

平成30年度

「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」

成果報告書

令和元年5月31日  
国立大学法人東京大学  
堀 宗朗

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京大学地震研究所が実施した平成30年度「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」の成果を取りまとめたものです。

## 目次

1. 委託業務の題目 .....	1
2. 実施機関（代表機関） .....	1
3. 委託業務の目的 .....	1
4. 平成30年度（報告年度）の実施内容.....	1
4-1. 実施計画 .....	1
4-2. 実施内容（成果） .....	4
①統合的予測システムの開発 .....	5
1.1 人工知能を活用したソルバの開発.....	5
1.2 非線形有限要素法の機能拡張.....	18
1.2.1 はじめに .....	18
1.2.2 弾塑性地盤増幅解析.....	18
1.2.3 数値実験 .....	21
1.2.4 まとめ .....	27
1.3 交差点の詳細モデルを用いた避難シミュレータの機能強化.....	29
1.3.1 はじめに .....	29
1.3.2 交差点における軌道と自由流速の近似.....	29
1.3.3 車と車間の相互作用.....	31
1.3.4 信号の無い交差点における車と歩行者間の相互作用.....	34
1.3.5 自由流速プロファイルの検証と実証例.....	36
1.3.6 討議とまとめ .....	41
1.4 橋梁ネットワークを対象とした都市モデルの自動構築モジュールの改良.....	43
1.4.1 概要 .....	43
1.4.2 橋梁ネットワークを対象とした変換アルゴリズム.....	43
1.4.3 data と information の設計.....	44
1.4.4 橋梁モデル生成アルゴリズムの内容.....	44
②全球モデルを視野に入れた超大規模解析モデル構築手法の開発.....	48
2.1 はじめに .....	48
2.2 手法 .....	49
2.2.1 Octree-based なメッシュ生成手法の概要 .....	49
2.2.2 メッシュ最適化 .....	51
2.3 性能計測 .....	54
2.4 適用例 .....	56
2.5 おわりに .....	57
③先端都市情報の社会科学シミュレーションの利活用方法と実装の検討.....	59
3.1 全体概要 .....	59

3.2 ①本社間取引のビックデータを用いた事業所間取引の推定データの開発・整備.....	59
3.2.1 概要 .....	59
3.2.2 使用データ .....	60
3.2.3 分析手法 .....	61
3.2.4 事業所間取引額の推定.....	62
3.3 ②携帯電話の移動履歴のビックデータを用いた人の流れの推定データの整備開発....	66
3.3.1 概要 .....	66
3.3.2 利用データ .....	66
3.3.3 手法 .....	66
3.3.4 結果 .....	67
3.4 ③AB 連携の推進.....	68
3.4.1 概要 .....	68
3.4.2 手法 .....	68
3.4.3 結果 .....	69
3.5 エージェントベース経済モデルの分散メモリ実装.....	72
3.5.1 はじめに .....	72
3.5.2 エージェントベースの経済モデル：HPC の観点.....	73
3.5.3 スケーラブル並列計算拡張の実装.....	75
3.5.4 計算性能 .....	79
3.5.5 おわりに .....	84
④地震・津波の災害シナリオ多様性の数値解析コンポーネントの高度化（再委託先：国立研究開発法人海洋研究開発機構）（サブ課題A） .....	86
4.1 GAMERA での地震サイクル計算.....	86
4.2 GAMERA での静弾性グリーン関数ライブラリの作成.....	95
4.3 津波粒子シミュレーションの高度化.....	107
4.3.1 低コストな大規模粒子シミュレーションの実施に向けて.....	107
4.3.2 大規模 SPH シミュレーションの精度検証 .....	114
4.3.3 粒子法動的負荷分散手法の改良.....	123
⑤地震・津波の被害に関する数値解析コンポーネントの高度化（再委託先：国立大学法人九州大学）（サブ課題A） .....	127
5.1 地震シナリオ解析・FEM による地殻変動解析を反映した津波解析 .....	127
5.1.1 背景 .....	127
5.1.2 本研究の提案手法.....	129
5.1.3 津波解析モデルの作成方法.....	131
5.1.4 FEM による地殻変動量解析結果 .....	131
5.1.5 津波解析結果 .....	132
5.2 新たな3次元粒子法(Expanding Slice Grid 法)による津波遡上解析 .....	139
5.2.1 背景 .....	139

5.2.2	近傍粒子探索	139
5.2.3	圧力評価の陽解法化	140
5.2.4	並列化領域の分割方法	141
5.2.5	計算領域・壁データの拡張機能 (Expanding 機能)	142
5.2.6	並列化効率の計測(Weak Scaling)	143
5.2.7	高知市津波遡上解析への適用例	150
⑥	地震・津波災害時の交通に関する数値解析コンポーネントの開発 (再委託先: 国立大学法人神戸大学) (サブ課題 B)	155
6.1	既存の数値解析手法の整理	155
6.1.1	交通流モデルのレビュー	155
6.1.2	交通需要モデルのレビュー	156
6.2	交通流シミュレータの開発	157
6.2.1	渋滞の後方伝播計算の収束性の改善	157
6.2.2	主要コンポーネントの高速化	159
6.2.3	スケラビリティ	160
6.2.4	混雑下のグリッドネットワークにおける再現性の検証	161
6.2.5	旅行時間データの圧縮	163
6.2.6	確率的経路選択モデルの実装	165
6.3	交通需要シミュレータの開発	167
6.3.1	動的需要モデルの基本フレーム	167
6.3.2	動的需要モデルの動作検証	168
6.4	関西圏シミュレーションの実施 (サブ課題A連成)	169
6.4.1	地震によるインフラ被害の評価	169
6.4.2	交通需要シミュレータの計算結果	170
6.4.3	交通流シミュレータの入力データと計算結果	172
⑦	地震・津波災害時の経済活動に関する数値解析コンポーネントの開発 (再委託先: 国立大学法人京都大学) (サブ課題 B)	176
7.1	平成 30 年度の結果の概要	176
7.2	モデルの概要	176
7.3	アルゴリズムの概要	178
7.4	対象地域とハザード	181
7.5	計算結果の概要	181
7.6	計算規模と計算時間	183
7.7	計算に関する考察	184
7.8	今後の課題	187
⑧	地震災害に対する地盤～構造物応答シミュレーションの高度化とその利活用方法の検討 (再委託先: 国立大学法人東京工業大学) (サブ課題 A)	188
8.1	概要	188

8.2	利活用方法論①表層地盤増幅解析に着目した予備的検討.....	188
8.2.1	はじめに .....	189
8.2.2	解析対象および条件.....	189
8.2.3	応答の統計的性質の評価と考察.....	191
8.2.4	まとめ .....	193
8.3	利活用方法論②表層地盤増幅解析に着目した確率論的応答評価.....	194
8.3.1	応答推定法の提案.....	194
8.3.2	問題設定 .....	196
8.3.3	結果検証 .....	197
8.3.4	まとめ .....	198
8.4	利活用方法論③社会科学系シミュレーションとの連成.....	200
8.4.1	検討対象領域および主な解析条件.....	200
8.4.2	数値解析結果の統合・連成のための方法論.....	201
8.4.3	異粒度・異種データの統合における課題の抽出.....	202
8.4.4	おわりに .....	203
	⑨統合的予測システムの実用化 .....	204
	⑩プロジェクトの総合的推進 .....	205
4-3	活動（研究会等） .....	207
4-4	実施体制 .....	208
別添1	学会等発表実績	
別添2	実施計画	

### 1. 委託業務の題目

「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」

### 2. 実施機関（代表機関）

代 表 機 関	機関名		国立大学法人東京大学			
	所在地		〒113-8654 東京都文京区本郷七丁目3番1号			
	課題 責任者	ふりがな	ほり むねお	生年	西暦 1961年12月11日 (57歳)	
		氏名	堀 宗朗	月日	※2019年4月1日現在	
		所属部署名	地震研究所		役職	外来研究員
		連絡先	Tel. 03-5841-1776 Fax. 03-5689-4467 E-mail hori@eri.u-tokyo.ac.jp			
	事務 連絡 担当者	ふりがな	わたなべ まさあき			
		氏名	渡辺 正昭			
		所属部署名	地震研究所	役職	副事務長	
		連絡先	Tel. 03-5841-1772 Fax. 03-5689-4464 E-mail k-kenkyu@eri.u-tokyo.ac.jp			

### 3. 委託業務の目的

本研究は、地震・津波の災害被害に対し、さまざまな数値解析コンポーネントを連成させるシミュレーションの結果に基づいた科学的な合理性の高い予測を行うことを実現するため、大規模数値計算を用いた地震・津波の災害被害の数値解析コンポーネント群を統合的予測システムに昇華することを目的とする。

このため、国立大学法人東京大学を中核機関として、分担機関である国立研究開発法人海洋研究開発機構、国立大学法人九州大学、国立大学法人神戸大学、国立大学法人京都大学、国立大学法人東京工業大学と密接に連携し、再委託により研究開発を実施する。

### 4. 平成30年度（報告年度）の実施内容

#### 4-1. 実施計画

平成30年度は、ポスト「京」の性能を引き出すように、統合的予測システムの各種数値解析コンポーネントを改良することを成果の目標とする。数値解析コンポーネントの開発とともに、統合的予測システムの実用化に向けて、利用者との更なる連携強化を進めることも目的とする。具体的な研究とその方法は下記の通りである。

##### ①統合的予測システムの開発

統合的予測システムの災害被害シミュレーションの基幹数値解析コンポーネントである、地震・地震動計算を行う非線形有限要素法 GAMERA に対し、ソルバの前処理等の改良を継続して進める。

GAMERA はコデザインの対象であり、コデザインも重視した改良を進める。社会基盤施設の内、橋梁ネットワークを対象とした都市モデルの自動構築モジュールのプログラムの改良も継続する。

## ②全球モデルを視野に入れた超大規模解析モデル構築手法の開発

列島規模の数値解析のボトルネックは境界条件の設定であり、これを解決するために地球全体を対象とした全球モデルの数値解析が必要である。GAMERA を使って解析する全球モデルに対し、その構築手法を継続して開発する。全球モデルは、構想していたテラモデル自由度を超える超大規模解析モデルとなる。

## ③先端都市情報の社会科学シミュレーションの利活用方法と実装の検討

社会科学シミュレーションに利用できる先端都市情報の開発を昨年度に引き続き実施する。分担機関と連携し、分担機関に先端都市情報を提供することで、具体的な利活用方法の検討を実施する。具体的な内容として、まず地震・津波災害時の経済活動に関する数値解析における企業間取引データの活用方法を検討する。これにより大規模地震災害後の企業間取引への影響とその回復過程をシミュレーションすることで任意の地震被害シナリオに対応した企業間取引への被害予測を可能にする。また群衆避難シミュレーションにおける人流データの活用方法について検討する。これにより時間的・空間的に高粒度な人流データに対して年齢・性別などの個別属性を推定することで群衆避難シミュレーションの高度化を行い、より信頼性の高い結果を得ることを目指す。さらに高精細な建物データを活用した地震シミュレーションの高度化についても検討を行う。これにより建物の位置、形状だけでなく、構造や築年代などの建物属性も推定し、地震シミュレーション結果と統合することで、これまでよりも信頼性の高い地震被害予測を可能にする。なお、避難シミュレーションは中核機関、経済活動シミュレーションは分担機関が実施する。

また、分担機関と連携し、再委託によって以下の④～⑧の研究に取り組む。

## ④地震・津波の災害シナリオ多様性の数値解析コンポーネントの高度化（再委託先：国立研究開発法人海洋研究開発機構）（サブ課題A）

日本列島下に沈み込むプレートの挙動を対象とした地震サイクルシミュレーションを非線形有限要素法 GAMERA で行えるようにしたコードの改良を進めるとともに、このコードを用いた南海トラフ地震シナリオ計算の準備に着手する。実用的な 3 次元津波遡上解析を SPH 法を用いた大規模計算により実現するため、建物等の境界要素のうち水塊付近のみを動的に考慮する負荷分散技術開発を行う。津波による洗掘問題及び懸濁流を扱うため、SPH と DEM の混相流コード開発と SPH と DEM の異なる計算負荷を考慮に入れた動的負荷分散技術開発を引き続き進める。ポスト京を含む次世代の大型計算機でのメモリバンド幅問題に対応するため、低 B/F 値環境においても有効な粒子法アルゴリズムを SPH 法において検討し、その有効性を最新の計算機環境において検証する。さらに、地震サイクル・破壊伝播・地震波動伝播・3次元津波計算等の災害シナリオ多様性検討のための各数値解析コンポーネントの大規模・高速化を進める。

## ⑤地震・津波の被害に関する数値解析コンポーネントの高度化（再委託先：国立大学法人九州大学）（サブ課題A）

④地震・津波の災害シナリオ多様性の数値解析コンポーネントの高度化にて実施する南海トラフ地震シナリオの計算結果を受けた 3 次元津波計算を実施する準備を進める。具体的には、GAMERA による高詳細地殻変動計算結果を受けた 2 次元津波伝搬解析コンポーネント JAGRUS による大域的な津波伝搬解析を実施し、さらに陸地への津波遡上現象を解析するため、SPH 法による 3 次元津波解析コンポー

ネット MScPHY にシームレスに接続することで、統合予測システムへと発展させる準備を引き続き進める。また流体力を受けた構造物被害のシミュレーション機能を MScPHY に追加する。実用的な 3次元津波遡上解析を SPH 法を用いた大規模計算により実現するための動的負荷分散技術開発は、④と連携して実施する。

⑥地震・津波災害時の交通に関する数値解析コンポーネントの開発（再委託先：国立大学法人神戸大学）（サブ課題 B）

交通流モデルと交通需要モデルの数値解析手法の調査を継続する。ポスト「京」での capacity computing を想定し、大規模都市モデル 100 万ケースの並列計算を目標とした各モデルの数値解析コンポーネントのコード化およびシミュレーション計算のスケラビリティ向上のためのコード改良を継続する。南海トラフ地震を想定し、大阪市とその周辺のエリアを対象に、交通障害シミュレーションを実施する。

⑦地震・津波災害時の経済活動に関する数値解析コンポーネントの開発（再委託先：国立大学法人京都大学）（サブ課題 B）

災害後の企業の最適な設備復旧投資・生産過程に関するシミュレーションを継続する。16 業種の価格が変動する市場均衡問題の上で、災害によるサプライチェーンの途絶の影響を考慮する。状態空間を分割して各企業の動的計画問題を構成することによって均衡問題を並列計算によって解き、業種や事業所間の災害被害や復旧の速さの分布を算出するコードを開発する。

⑧地震災害に対する地盤～構造物応答シミュレーションの高度化とその利活用方法の検討（再委託先：国立大学法人東京工業大学）（サブ課題 A）

統合シミュレータ(IES)の構造物モデルの充足を図るため、現在の建物モデルに加え、新たに橋梁モデル生成アルゴリズムを開発する。生成されたモデルの信頼性評価を行った上で、IES にインフラモデルとして導入する。併せて建物モデルの高度化にも着手する。改良した IES を利用して広域の被害シナリオ解析を行い、capacity computing による統合的被害予測の活用・評価方法を検討する。

成果の実用化とプロジェクトの運営のため、分担機関・協力機関と連携し、以下の⑨と⑩の研究に取り組む。

⑨統合的予測システムの実用化

統合的予測システムの実用化に向けて、行政・防災研究機関・防災コンサルティング企業と意見交換を継続する。さらに、開発された数値解析コンポーネントを実際に試用してもらうことで、実用化に向けた連携を強化する。

⑩プロジェクトの総合的推進

ポスト「京」で実現する統合的予測システムに関して、開発と実用化の研究グループの間で、システムの性能や利用法等が共有できるようにする。プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、進捗管理等のための会合の開催や、外部有識者を招聘した諮問委員会から、本プロジェクトの進捗状況の把握・評価・改善提言・指導等を受ける。プロジェクトで得られた成果については、広報や研究活動を通じて積極的に公表し、今後の展開に資する。

また、計算結果の可視化は、研究成果の整理はもとより、広報に重要である。計算科学研究機構に設置した可視化サーバー式をこの可視化に利用する。

#### 4-2. 実施内容（成果）

当該年度は、昨年度に実行された試行を基に、統合的予測システムの本実行に向けて解析手法の高度化・モデル構築の高度化等を進めた。昨年度の試行は首都直下地震を想定としたものであるが、本実行は南海トラフ大地震を想定し、大阪・兵庫や近畿圏を対象として、理工学のシミュレーションと社会科学のシミュレーションを連成するものである。解析手法・モデル構築を高度化の目的は、対象とする都市・都市域が拡大したため、地震・地盤震動・構造物応答・避難・交通障害・経済活動を連成した数値解析を、より高速・大規模に実行できるようにすることである。昨年度に引き続き、システム開発とともに、統合的予測システムの実用化に向けて利用者との連携強化を継続した。特に、民間企業から派遣された技術者は、適切な計算環境下において、都市モデルの構築、統合的予測システムの操作、予測結果の整理、といった一連の実行作業を行い、実務として統合的予測システムが利用可能であることを示しつつある。

## ①統合的予測システムの開発

統合的予測システムの災害被害シミュレーションの基幹数値解析コンポーネントである、地震・地震動計算を行う非線形有限要素法 GAMERA に対し、ソルバの前処理等の改良を継続して進めた。GAMERA はコデザインの対象であり、コデザインも重視した改良を進めた。具体的には、ポスト京のアーキテクチャ開発の動向を踏まえつつ、また、人工知能の活用を模索しつつ、ソルバの前処理等の改良を行い、その成果は SC18 のゴードンベル賞のファイナリストに選ばれた。この内容を「人工知能を活用したソルバの開発」として、詳細を 1.1 にまとめる。また、軟弱地盤における地震被害想定のための大規模三次元弾塑性地盤増幅解析手法の開発として非線形有限要素法の機能拡張も行った。この内容を「非線形有限要素法の機能拡張」として詳細を 1.2 にまとめる。

### 1.1 人工知能を活用したソルバの開発

#### 概要

当該課題の対象とする統合的予測システムにおける地盤震動解析・地震動解析・地殻変動解析等では、既往の経験的手法からの信頼性向上を目指し、地震の各段階を物理モデルに基づくシミュレーション手法を開発してきた。その中で、高密度・高効率な集積が進む都市部の機能損傷評価・耐障害性評価にはより精緻な評価、すなわち地盤と都市構造物群の完全カップリング解析が望ましいと考えられるため、本検討ではこの問題を取り上げる。対象とする系の挙動解析は、局所的に超詳細・複雑な構造がある広い領域での媒体の非線形時間発展問題を扱うこととなる。具体的には、解析対象領域は  $10^3 \times 10^3 \times 10^{1-2} \text{m}$  の範囲であり、かつ、構造物が  $10^{-2-1} \text{m}$  程度の非常に複雑な幾何形状をもつ。そのため、応力フリーの境界条件を解析的に満足し、計算コストを抑えつつこのような複雑な形状のモデル化に優れた非構造四面体二次要素を用いた非線形動的 3 次元有限要素法により連続体の非線形時間発展問題を倍精度で解くこととなる。複雑な自由度が  $10^{10}$  の有限要素モデルを対象とするとき、 $10^{3-4}$  時間ステップの非線形応答解析コストが膨大となることが大きな課題となる。この解析をアルゴリズムの改良によって高速に行うことが本検討における目的である。

上記の問題を高速に解くため、我々は従来から開発されてきた大規模有限要素解析ソルバである GAMERA をさらに発展させ、ポスト京のアーキテクチャ開発の動向を取り入れた改良を行った。具体的には、FP64、FP32 による演算に加えて FP16 による演算をハードウェア上でサポートするようになるため、低精度データ型を活用しても最終的な演算結果に影響を与えず、計算コストを削減することのできるアルゴリズムの構築を行った。また、近年の計算科学上の重要な課題である AI と HPC との融合を念頭に置いて、一般的な科学技術計算の中で AI を活用することで、解析に必要とされる演算量を軽減させる手法を導入した。開発手法は、ポスト京と同様に半精度演算をサポートする NVIDIA Tesla P100 GPU、V100 GPU をそれぞれ搭載した大型計算機環境である Piz Daint と Summit を用いて性能計測を行い、既往研究である標準的なソルバおよび SC14 ゴードンベル賞ファイナリストのソルバと比較して大幅な計算時間の短縮が実現することを確認した。これによって、地盤と都市構造物群の地震時被害推定の高度化が期待される。なお、これらの研究成果は SC18 におけるゴードンベル賞ファイナリストにノミネートされた。

#### はじめに

対象とする問題は、超複雑な幾何形状を忠実にソリッド要素によりモデル化している。そのため局所的に小さな要素が生成され、陽的な時間積分では安定性を確保するには非常に小さな時間刻みを使わなければならない、計算量が膨大となる。そこで、Newmark-β法(β= 1/4、δ= 1/2)を時間積分として用い、以下の非線形時間発展問題を対象とする。

$$\left(\frac{4}{dt^2}\mathbf{M} + \frac{2}{dt}\mathbf{C}^{(n)} + \mathbf{K}^{(n)}\right)\delta\mathbf{u}^{(n)} = \mathbf{F}^{(n)} - \mathbf{Q}^{(n-1)} + \mathbf{C}^{(n)}\mathbf{v}^{(n-1)} + \mathbf{M}\left(\mathbf{a}^{(n-1)} + \frac{4}{dt}\mathbf{v}^{(n-1)}\right)$$

ここで、 $\delta\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{F}$ は変位増分、速度、加速度、内力ベクトル、外力ベクトルである。 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ は、整合質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクスであり、 $dt$ と $n$ は時間刻みと時間ステップである。以下では、行列 $\mathbf{A}$ を用いることによって $\mathbf{A} = \frac{4}{dt^2}\mathbf{M} + \frac{2}{dt}\mathbf{C}^{(n)} + \mathbf{K}^{(n)}$ と置く。

この問題は自由度が  $10^{10}$ となるほど巨大で、 $\mathbf{A}$ は密行列ではなく $\delta\mathbf{u}^{(n)}$ へのアクセスはほぼランダムとなる。 $\mathbf{M}$ の要素が対角近傍に集中し  $dt$  が小さいことから $\mathbf{A}$ の収束性は如何に複雑な都市モデルであっても収束しないほどは悪くない。自由度がメモリ量に比べて巨大すぎるので、 $\mathbf{A}$ を Compressed Row Storage (CRS)形式等であってもメモリ上に確保することは現実的な解法ではない。以上の特徴を踏まえて考えられる、この問題に適した一般的な従来法は $\mathbf{A}$ の  $3 \times 3$  ブロック対角行列を前処理とした前処理付き共役勾配法と $\mathbf{A}$ をメモリ上に確保せずにオンフライで処理する Element-by-Element 法を組み合わせた PCGE ソルバを倍精度で実行する方法である。このソルバのアルゴリズムは図 1.1 に記されている。

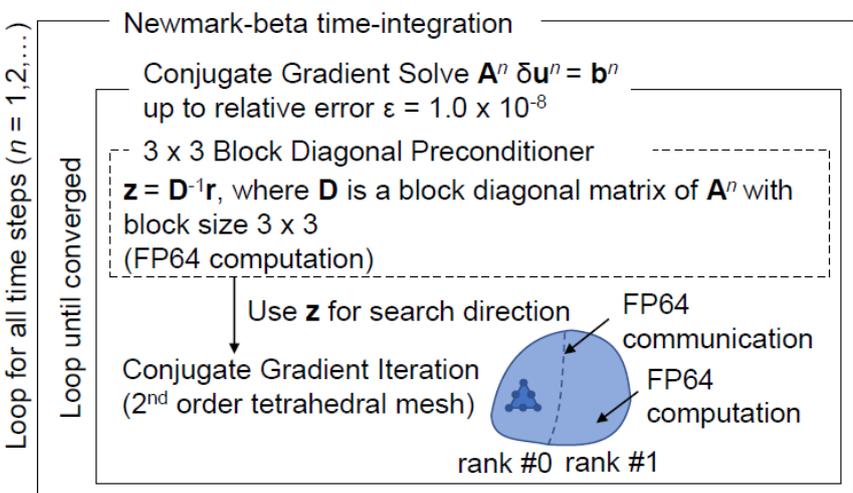


図 1.1. PCGE ソルバのアルゴリズム。共役勾配法の 1 反復ごとに倍精度変数による疎行列ベクトル積演算と袖通信が行われる。前処理は  $3 \times 3$  ブロックヤコビ行列を用いている。図の青い領域が計算対象となる箇所、破線部は MPI による袖通信が必要となる領域を示している。

しかし、ネットワーク性能に比べ計算速度が超高速で B/F も小さい昨今のスーパーコンピュータでは PCGE において高い性能を出すことは難しい。また、収束しないことはないものの収束性は悪いので、より高度な前処理を導入することで time-to-solution を著しく改善する余地が残っている。そこで、前処理付き CG 系の情報量の移動を抑制する局所化・均質化の観点から Artificial Intelligence (AI)と精度変

動演算により高度化した新しいアルゴリズムを構築する。

## Artificial Intelligence の導入

方程式求解における収束性向上に AI を用いる。収束性の悪化は、対象行列のグラフ連結の強さの偏在による。この強さの偏在と収束性の悪化の関係を深層学習にて人工知能に学習させ、強さの偏在から収束性を悪化させる部分を発見可能な人工知能を構築する。人工知能により発見された偏在を局所的な操作により均質化しその度合いを軽減することで、収束性の改善を図るのが本手法の概要である。具体的には、対象とする大規模系と同様のグラフ連結の強さの偏在をもつ小規模系において、グラフ連結の強さの偏在と収束性の悪化を人工知能に学習させ、対象とする大規模系の強さの偏在から収束性を悪化させる部分を人工知能に発見させ、局所的な操作によりその収束性を改善することとする。なお、効率的に収束性を悪化させる箇所の探索に人工知能は活用されるだけであり、**supercomputing** で人工知能を活用する際に懸念される解の品質低下は、もちろん一切起きずに、**supercomputing** の性能向上のみが達成される。また、小規模系の対象行列のグラフ連結データは、**supercomputing** では小規模ではあるが人工知能生成の観点からは高品質の大規模データである。**supercomputing** で見過ごされがちな小規模行列による高品質の大規模データを人工知能生成に活用することで、**supercomputing** の威力をより高めることができる。上記の原理は明快かつ汎用性も高いが、収束性が悪化する部分を適切に抽出する AI 構築には格段の工夫を要する。以下に具体的な実装を説明する。前処理付き CG 系では、 $\mathbf{z}=\mathbf{B}^{-1}\mathbf{r}$  のように前処理行列  $\mathbf{B}$  を用いて収束性の改善を図るが、本論文では  $\mathbf{r}=\mathbf{A}\mathbf{z}$  を CG で緩い閾値で解くという可変的前処理を導入することでより積極的に収束性を改善するようにする。しかし、グラフ連結の強さの偏在と収束性の悪化の関係を学習するためには、この形式のままでは汎化性能が乏しい AI しか構築できないため、 $\mathbf{A}$  の性質を考え、適切な問題設定を考える必要がある。まず、四面体二次要素は中間節点とそれ以外の二種類の節点を持っており、グラフ連結の性質が全く異なるため、その均質化を図る。すなわち、四面体二次要素の代わりに四面体一次要素を用いた、 $\mathbf{r}=\mathbf{A}\mathbf{z}$  と等価な  $\mathbf{r}_c=\mathbf{A}_c\mathbf{z}_c$  を設定し、節点の性質が均質化された  $\mathbf{A}_c$  を対象とする。なお、前処理として、 $\mathbf{r}=\mathbf{A}\mathbf{z}$  を CG で解くことを PreCG、 $\mathbf{r}_c=\mathbf{A}_c\mathbf{z}_c$  を CG で解くことを PreCGc と以下呼ぶこととする。次に、今回の系がもっている性質、すなわち、その解  $\mathbf{u}$  が、微分方程式とモデルの性質を反映したグリーン関数  $\mathbf{G}$  と分布力  $\mathbf{b}$  により  $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \int \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y})\mathbf{b}(\mathbf{y})dV$  となることを利用する。 $\mathbf{A}_c$  のグラフ節点  $i$  周りのグラフ連結の強さは、 $\mathbf{G}$  を支配している  $dt$  と  $\mathbf{x}$  近傍のせん断波速度  $\omega$  とグラフ節点  $i$  と  $i$  に最接する節点  $j$  間の距離  $d_{ij}$  を考えれば、 $d_{ij}c/dt$  の頻度によって特徴づけられると予想される。この特徴量と小規模問題を解いた際の誤差の残量との関係を深層学習で学習することで AI を構築した。不均質な系において汎化性能の高い AI を構築することは非常に難しいが、系を局所化・均質化し系の持つ特徴を活かすことで汎化性能の高い AI が構築されている。AI によって収束性が悪いと推定された  $\mathbf{A}_c$  の一部の  $\mathbf{A}_{cp}$  を対象に  $\mathbf{r}_{cp}=\mathbf{A}_{cp}\mathbf{z}_{cp}$  を CG で解くことを PreCGcpart と呼ぶ。以上を踏まえ、PreCGc、PreCGcpart、PreCG の順に解くことで、PreCG のみで解くのに比べ収束性の改善が期待されることになる。

我々は性能計測用問題の一部を取り出して訓練用データを作成し、深層学習によって AI を構築した。モデル W-1 において  $\mathbf{A}_{cp}$  は節点数が 17,162,689 であり、これは元の行列である  $\mathbf{A}_c$  の 10.9% に相当することから、解くべき問題の自由度を大幅に削減できていることが確認できる。この問題に提案手法の AI を用いた際の収束性が表 1.1 に示されている。CG を 8 反復、PreCGc を 5803 反復、PreCGcpart を 26826 反復、PreCG を 3103 反復することで収束に至っていることがわかる。一方で、PCGE ソルバを

用いた場合は CG 反復を 132,665 回必要とした。この比較から、AI の導入によってソルバの収束性が大幅に改善されていると評価することが出来る。また、PreCGc および PreCGcpart で扱う問題の自由度は元の問題よりも小さいため、反復当たりの計算量も少なくなる。ソルバ全体の演算量は AI を導入することによって  $33.2 \text{ PFLOP} / 184.7 \text{ PFLOP} = 1/5.56$  となっており、この演算量の削減が性能の向上に大きく寄与することとなる。大規模な問題においても同様の高速化が実現することに関しては、以降の性能評価において示す。

表 1.1. 性能計測におけるモデル W-1 使用時の Summit における共役勾配法反復回数と演算量の比較。非線形解析の 25 時間ステップを対象としている。

	Without AI	With AI
CG iterations	132,665	88
PreCG <sup>c</sup> iterations	-	5,803
PreCG <sub>part</sub> <sup>c</sup> iterations	-	26,826
PreCG iterations	-	3,103
FLOP count	184.7 PFLOP	33.2 PFLOP

### 精度変動演算の導入

前処理として、 $\mathbf{r}=\mathbf{A}\mathbf{z}$  を解く精度は高くなくて良いので、PreCGc、PreCGcpart、PreCG は FP32 で計算することとするが、さらなる演算空間の活用により解析の高効率化を目指す。より演算空間の柔軟な活用を目指し従来の FP32/FP64 に加え FP16 演算器が実装されるようになるなど、複数の演算精度をサポートしたハードウェアによりマシン性能を引き出すことが計算科学界におけるトレンドとなっている。また、演算速度に対してメモリ転送及びノード間通信におけるデータ移動が遅い傾向が続いており、低精度データ形式を用いた移動データ量の削減が計算の高速化に重要となっている。その一方で FP16 のレンジ・精度は限られているため、一般の科学技術計算で使うことは容易ではない。陰解法ソルバの前処理に使うというアイデアがあるが、一般的なマトリクス方程式の成分のレンジは広く、全体行列をそのまま FP16 で格納・計算して得られる解に意味のある問題は限定される。実際、今回対象とする都市問題では行列成分の値にはかなりのばらつきがあり、FP16 を直接適用することは前処理といえども困難である。一方で、有限要素法の定式化の観点からすると演算空間は要素毎に定義されたローカルな基底関数で展開されており、各要素の基底関数で展開される値のレンジは狭く、性質の異なる要素が多数集まることでレンジの広い全体行列が生まれていると解釈できる。

そこで有限要素法の局所展開に着目し、要素毎の計算において FP16 を使うことを考える。ここでは、行列ベクトル積においてオンザフライで要素行列を求め右辺ベクトルを掛け合わせる Element-by-Element 法(以下では EBE 法と表す)におけるローカルな行列ベクトル積において FP16 を使う。以下、精度変動演算による EBE カーネルの詳細を示す。

EBE では、行列ベクトル積  $\mathbf{y} \leftarrow \mathbf{A}\mathbf{x}$  を

$$\mathbf{y} \leftarrow \sum_e (\mathbf{Q}^{eT} (\mathbf{A}^e (\mathbf{Q}^e \mathbf{x})))$$

として計算する。ここで、 $\mathbf{A} = \sum \mathbf{Q}^e \mathbf{A}^e \mathbf{Q}^e$  であり、 $\mathbf{Q}^e$  は要素  $e$  におけるローカル節点番号とグローバル節点番号のマッピングマトリクスである。上記の式をそのまま FP16 で実装すると変数のダイナミックレンジ内で計算を行うことができないため、 $\mathbf{x}_h^e \leftarrow \mathbf{f}(\mathbf{Q}^e \mathbf{x}_s)$ 、 $\alpha_s^e \leftarrow g(\mathbf{A}_s^e)$ 、 $\beta_s^e \leftarrow h(\mathbf{Q}^e \mathbf{x}_s)$  として、 $\mathbf{y}_s \leftarrow \sum_e \mathbf{Q}^{eT} \alpha_s^e \beta_s^e \mathbf{B}_h^e(\mathbf{x}_h^e)$  と計算する。

ここで、添え字  $s$ 、 $h$  はそれぞれ FP32、FP16 の変数・関数を示す。 $\mathbf{f}$ 、 $g$  はベクトル  $\mathbf{x}_h^e$  の成分、及び、関数  $\mathbf{B}_h^e$  内の計算で使われる変数の成分が 1 に近いように調整する関数であり、精度が無限であれば  $\mathbf{A}^e \mathbf{x}^e = g(\mathbf{A}^e) h(\mathbf{x}^e) \mathbf{B}^e(\mathbf{f}(\mathbf{x}^e))$  を満たす。 $\mathbf{y}_s$  への足しこみとスカラー値  $\alpha_s^e$ 、 $\beta_s^e$  の計算は FP32 で行う必要があるが、主要計算部は FP16 で行うことができるようになるため、FP32 に比べて FP16 の演算性能が高いシステムにおいては高速化が期待できる。なお、行列  $\mathbf{A}$  の性質に合わせて適切な  $\mathbf{f}$ 、 $g$ 、 $\mathbf{B}$  を選択することで精度の向上が可能である。例えば、剛性マトリクス  $\mathbf{K}$  に関する行列ベクトル積においては掛け合わせるベクトルの成分の相対差のみが結果に影響するため、ベクトルの成分の差の最大値に基づいて正規化を行うことで精度を確保している。

このように高速化した EBE カーネルにおいては、 $\mathbf{x}_s$  へのランダムアクセスと、 $\mathbf{y}_s$  へのランダム足しこみが実行時間の大部分を占めるようになる。これらのランダムデータアクセスを減らす方法として、時間並列アルゴリズムを導入する。この方法では、有限要素法メッシュの接続情報は時間方向に変わらないことに着目し、複数時間ステップを並列で計算することでランダムデータアクセスを減らす。同時に解く時間ステップ数を  $m$  とした場合、反復法ソルバー反復あたりの演算数は通常の方法の  $m$  倍になるが、求めた将来時間ステップの解は反復ソルバの高精度な初期解として使うことができるため、反復数を  $1/m$  程度まで減らすことができる。結果として、逐次時間積分アルゴリズムを使う場合と演算数を同程度に保ったまま、ランダムアクセス数の削減が可能となり、近年の計算機においては time-to-solution の短縮が可能になると期待される。本提案手法では  $m$  組の時間ステップを 2 グループに分けて求解することによって、独立に共役勾配法の計算が可能となる。これによって疎行列ベクトル積に伴う袖領域の通信に関して、別時間ステップのベクトルを用いた演算とのオーバーラップが実現し、大規模問題におけるスケラビリティの向上が期待される。併せて GPU の shared memory を有効利用することで L2 への atomic add を削減する方法を実装している。表 1.2 にはカーネルの性能比較が示されている。

表 1.2. EBE 法による疎行列ベクトル積カーネル性能。ベクトル 1 本あたりの性能値が記されている。

System	Elapsed time	FLOPS efficiency to FP64 peak
One K computer node		
FP64 (one vector)	56.71 ms	10.9%
FP32 (one vector)	46.43 ms	13.2%
FP32 (two vectors)	18.53 ms	25.7%
One P100 GPU on Piz Daint		
FP64 (one vector)	785.3 us	19.1%
FP32 (one vector)	623.4 us	24.0%
FP16-32 (two vectors)	392.7 us	50.3%
One V100 GPU on Summit		
FP64 (one vector)	413.5 us	21.9%
FP32 (one vector)	400.3 us	22.8%
FP16-32 (two vectors)	178.2 us	71.4%

FP64 (one vector)、FP32 (one vector)は EBE カーネルをそのまま FP64/FP32 で計算したものであり、一般的なソルバである PCGE および state-of-the-art である SC14 ソルバで使われる。FP16-32 (two vectors)は開発した精度変動演算 EBE カーネルであり、時間並列アルゴリズムにおいて並列計算時間ステップ数  $m=4$  とし、ベクトルを 2 組に分割した場合に使われるカーネルである。ここでは、ベクトル一本あたりの時間に elapsed time を換算している。

FP16 演算器を搭載する Piz Daint と Summit では FP16-32 (two vectors)とすることで FP64 比においてそれぞれ FLOPS 性能が 2.63 倍、3.26 倍に向上している。京に関しては FP16 演算器が搭載されていないため全計算を FP32 で実行しているものの、FP64 から FP32 に変更することによるデータ移動の削減と時間並列アルゴリズムによるランダムアクセスの削減により 2.35 倍の高速化が達成されている。精度変動演算により EBE カーネルの実行時間が短縮されたため、従来は EBE の計算時間にオーバーラップされていた隣接通信が隠蔽できなくなる可能性がある。特に Summit ではノード当たり演算性能に対してノード間通信帯域が限られており、隣接通信を削減することがノード間における scalability の確保において不可欠である。そこで本研究においては EBE 計算結果の袖通信においても精度変動演算を適用する。二つのプロセス間で通信されるベクトルデータを  $\mathbf{y}_s$  とするとき、 $\mathbf{y}_h \leftarrow \mathbf{y}_s/|\mathbf{y}_s|$  とし、ベクトル  $\mathbf{y}_h$  とスカラー値  $|\mathbf{y}_s|$  を通信し、受信側は  $\mathbf{y}'_s \leftarrow |\mathbf{y}_s|\mathbf{y}_h$  として復元する ( $|\cdot|$  には L1 ノルムを使っている)。 $\mathbf{y}_s$  と  $\mathbf{y}'_s$  は等価とならないが、誤差は MPI パーティションの境界部に局所化されるため、多くの問題で収束特性は変化せず、倍精度の最終結果に影響しない。これにより、FP64 の標準的なソルバに比べて隣接通信量を 1/4 に減らしている。

また、共役勾配法の多くの演算は単純なベクトルの加減算および内積の計算であり、これらはいずれもメモリバンド幅律速の性能となる。これらの演算の性能を向上させるため、データ型として 21 ビットの変数を作成し、メモリへの格納を行う。この 21 ビットは符号部が 1 ビット、指数部が 8 ビット、仮数部が 12 ビットとなっており、単精度変数と同等のダイナミックレンジを持つことから、overflow や underflow を起こすことなく対象の計算を行うことが可能となる。この変数は 21 ビット 3 変数分である 63 ビットを一組として、倍精度変数配列に格納される。各節点は  $x$ 、 $y$ 、 $z$  成分の 3 要素を有するため、各倍精度配列の 1 要素がそのまま節点に対応付けされる。このデータ型は独自に作成したものであるため、ハードウェア上ではサポートされていない。このデータ型を用いた計算の前後では、いずれも単精度変数へ値を変換するビット操作を行う必要があるが、対象としている演算がメモリバンド幅律速であるため、これらのビット操作が性能には影響しない。このデータ型も FP16 と同様に前処理部分でのみ使用される。そのため、最終的に倍精度で得られる演算結果が低精度変数の影響を受けない。

図 1.2 に提案手法をまとめる。

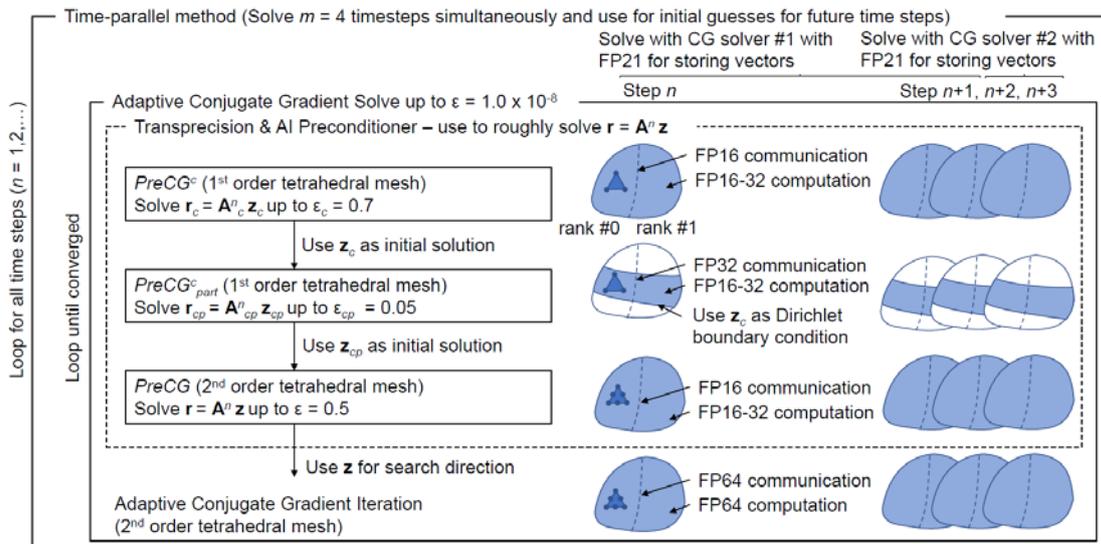


図 1.2. 提案手法のソルバ構成。ソルバは可変的前処理付き共役勾配法をベースとしており、前処理方程式  $\mathbf{z}=\mathbf{A}^{-1}\mathbf{r}$  を AI と精度変動演算を使って高速に解いている。

なお、GAMERA は提案手法と同様に可変前処理により前処理の高度化を図ったソルバであり、両者とも複雑なアルゴリズムとなっているので、その差を明瞭にすることは難しい。しかし、提案手法のソルバから AI を活用した前処理 PreCGpart、FP21 演算、FP16 演算・通信、時間並列アルゴリズムを除いたものと理解すると以下の性能計測は理解しやすい。

## 性能計測

提案手法のアルゴリズムは、主要カーネルの高速化率が高いほど高速となる。また、通信性能がボトルネックになりやすい大規模システムにおいてスケーラビリティの改善が期待される。そこでカーネル比較表で使った Pascal 世代の GPU を搭載する Piz Daint と Volta 世代の GPU を搭載する Summit を対象とする。併せて、GAMERA との特性差を見るために京においても性能を測る。

地下街を含む都市の問題は対象領域が広く必要な分解能が高い上に、地震時に地盤は非線形化するため収束性が悪く、都市の地震問題のなかでも特に高コストな部分である。この問題を高速に解くことができれば、都市の地震問題全般の高速求解も可能になると考えられる。そこで地下街を模して固い層を地盤内に埋め込んだ問題を性能計測の対象とする（図 1.3 参照）。地下街は鉄筋コンクリートを模した線形物性、地盤の一層目は歪に応じて剛性テンソルが変化する非線形物性とし、地盤の二層目は基盤層を模擬した線形物性とする。

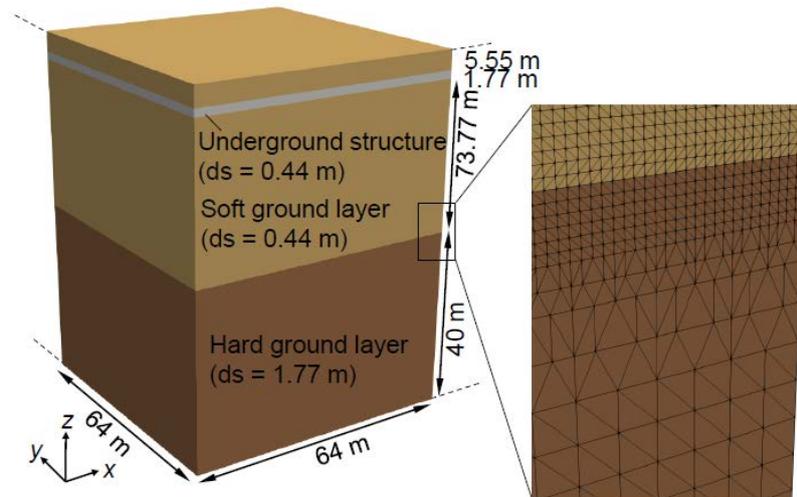


図 1.3. 性能計測用に作成した有限要素モデル。このモデルを  $x$  方向、 $y$  方向に関して周期的に複製することによって弱スケーリングの測定に適した問題設定とする。

弱スケーリングを測る際には、この領域を  $x$ 、 $y$  方向に複製した周期的な問題設定を使う。周期的な問題ではあるものの、実際の都市の問題と似たロードバランス特性となるようにグラフ分割手法である METIS を利用してモデルを並列計算用に分割している。このモデルの底面に入力波として  $dt=0.01$  秒の地震波（1995 年日本の兵庫県南部地震で観測された地震動）を入力し、25 時間ステップの求解にかかった時間を測る。なお、解が  $dt$  及び空間離散化に依存するため、本論文では収束性を確認しながら問題設定及び離散化設定を決めている。本論文中では、以下全てで、側面及び底面には半無限吸収境界条件を適用する。ソルバには任意の構成則を利用できるが、本論文では、地盤の非線形構成則として修正 RO モデルと Masing 則を用いている。

この問題において、提案手法と一般的な解析手法である PCGE、state-of-the-art である GAMERA を比較する。ソルバの閾値は全問題で残差ノルム  $\epsilon=1.0 \times 10^{-8}$  としている。なお、提案手法のマルチグリッド前処理の閾値は PreCGc が 0.7、PreCGpart が 0.05、PreCG が 0.25 としており、GAMERA のマルチグリッド前処理の閾値は既往研究で設定された値の通りとなっている。Summit と Piz Daint においては 1 MPI プロセスあたり 1 GPU を使い、京においては 1 MP プロセスあたり 8 OpenMP スレッドで計算する。京では MPI\_Wtime および、演算数に関するハードウェアカウンタを使って計測を行い、Summit 及び Piz Daint では MPI\_Wtime を使って計測を行った上で、京での結果から FLOP カウントを換算する。PCGE はすべて FP64、GAMERA は FP32 と FP64 の精度混合演算となる。以下では、図 1.2 の通りの精度変動演算を実装した提案手法のバージョンを MOTHRA と呼び、通信性能の差を分析するため図 1.2 の FP16 comm と記載された部分をすべて FP32 で実行したバージョンを MOTHRA-a と呼ぶ。京においては FP16 演算器を搭載していないため、図 2 の計算や通信において FP16 あるいは FP21 と記載された部分をすべて FP32 で実行する(これを MOTHRA-b と呼ぶ)。すべての計測時間には解析結果のファイル出力を含んでいる。

ここで対象としている都市のシミュレーションにおいては自由度が  $10^{10}$  におよぶ問題をスーパーコンピュータによって時間程度で求解する必要がある。メモリ容量が演算能力に対して小さいため、大規模解

析を行う際にはメモリを最大限使用することが望ましい。そこで、表 1.3 にあるように、各 GPU は 1230 万自由度程度となるように領域分割を行っている。この問題サイズは京コンピュータの 1 ノード内のメモリには乗り切らないため、2 ノードで同サイズの問題を計算している。表 1.3 に記載のように PCGE の反復数は各モデル間ではほぼ一定であり、weak scaling の測定に適した問題セットとなっていることがわかる。

表 1.3. Piz Daint と Summit(括弧外)、京コンピュータ(括弧内)におけるモデルセット。GPU 計算機環境である Piz Daint と Summit では 1MPI プロセスに対して 1GPU を割り当てる。京コンピュータに関しては、MPI プロセス当たり 8 OpenMP スレッドを立て、2 ノードに 1GPU を対応させる形で領域を分割する。

Model	# of MPI processes	Degrees-Of-Freedom	DOF per process	# of elements	PCGE iterations
W-1	288 (576)	3,545,198,451	12,309,716 (6,154,858)	883,104,768	132,665
W-2	576 (1,152)	7,088,615,271	12,306,623 (6,153,311)	1,766,209,536	131,320
W-3	1,152 (2,304)	14,174,736,543	12,304,458 (6,152,229)	3,532,419,072	129,765
W-4	2,304 (4,608)	28,345,910,535	12,302,912 (6,151,456)	7,064,838,144	128,165
W-5	4,608 (9,216)	56,687,546,151	12,301,984 (6,150,992)	9,419,784,192	126,475
W-6	6,144 (12,288)	75,580,545,159	12,301,521 (6,150,760)	18,839,568,384	125,636
W-7	12,288 (24,576)	151,152,541,191	12,300,825 (6,150,412)	37,679,136,768	123,910
W-8	24,576 (49,152)	302,293,683,783	12,300,361 (6,150,180)	75,358,273,536	-

### 提案手法アルゴリズムの性能評価

まず表 1.3 におけるモデル W-1 を用いて、各ソルバ PCGE、GAMERA、MOTHRA の性能比較を行う。図 1.4、1.5、1.6 に示されているように、提案手法である MOTHRA はそれぞれ京コンピュータ、Piz Daint、Summit における PCGE ソルバの 18.6 倍、24.9 倍、25.3 倍の高速化を実現している。これはソルバ内の演算量が削減されたことと、実行性能が向上したことが要因としてあげられる。Summit における PCGE、MOTHRA のソルバ内演算量はそれぞれ 184.7 PFLOP、33.2 PFLOP である。GAMERA に関してはマルチグリッド法を伴う可変的前処理によって一般的なソルバと比較すると必要な演算量は削減されているが、依然として 44.0 PFLOP を必要としており、提案手法の優位性が確認できる。さらに、計算コストの多くを占める EBE カーネルに関して提案手法は高速化が実現されている。理論ピーク性能比で評価すると Summit 上では PCGE ソルバにおいては 4.27%であったものが MOTHRA では 19.5% を達成している。Piz Daint と Summit における計算時間の比率は  $110.7:75.8=1.46:1$  で、この比率は P100 GPU と V100 GPU の理論ピーク性能比である 1.66 に近い値となっている。この比較から、提案するソルバはハードウェアの性能を十分引き出して計算が可能となっていると評価することができる。

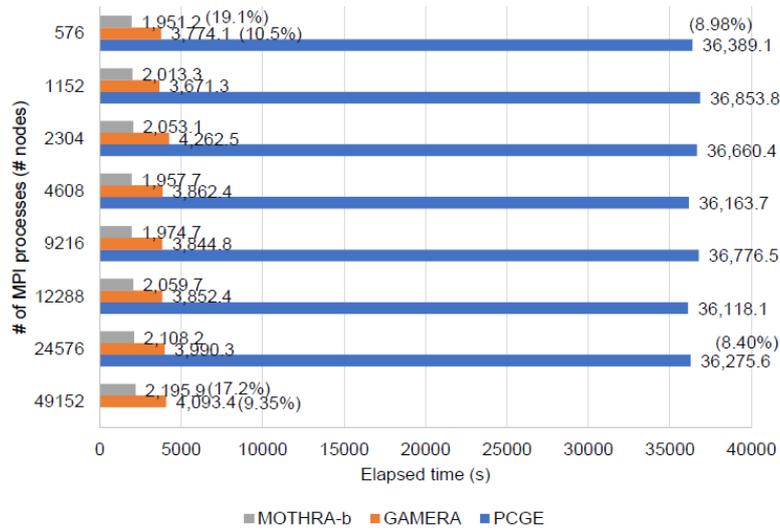


図 1.4. 京コンピュータにおける弱スケーリング測定結果。Elapsed time と倍精度演算ピーク性能比が示されている。

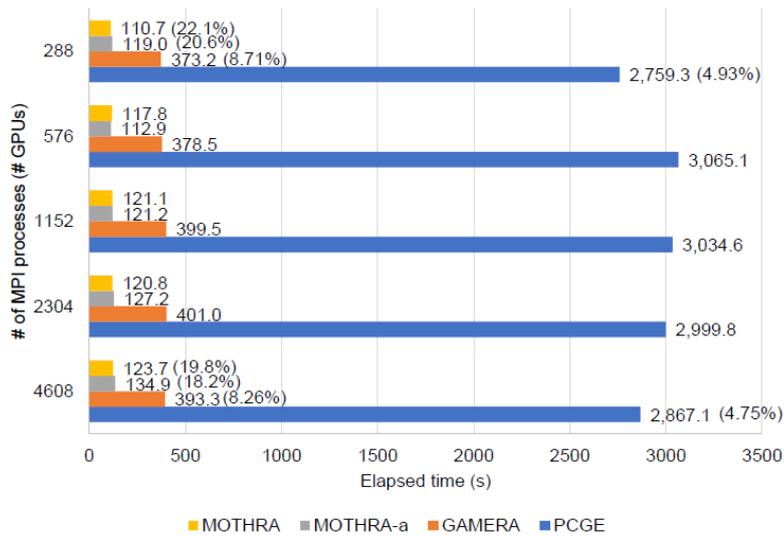


図 1.5. Piz Daint における弱スケーリング測定結果。Elapsed time と倍精度演算ピーク性能比が示されている。

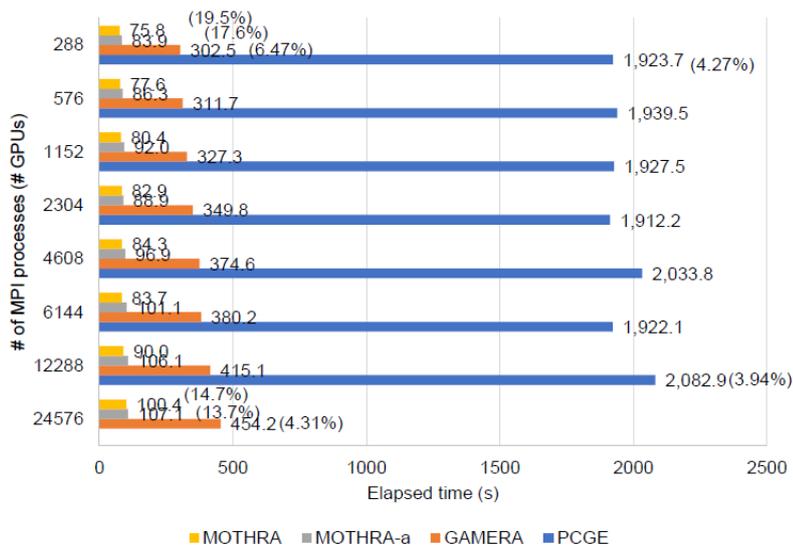


図 1.6. Summit における弱スケーリング測定結果。Elapsed time と倍精度演算ピーク性能比が示されている。

### 大規模問題におけるスケーラビリティの評価

まず、京における性能を見る。FP16 演算・通信が無効であるにも関わらず、W-1 (576 ノード) から W-8 (49152 ノード) までの weak scaling efficiency は 88.8% となっており、アルゴリズムが高いスケーラビリティを持っていることがわかる。単体性能の高さと、高いスケーラビリティにより最大の問題である W-8 における実行効率は 17.2% となっている。

次に Piz Daint における性能を見る。Piz Daint の理論ピーク性能とノード間通信帯域の比は 4.7 TFLOPS : 10.2 GB/s となっており、京コンピュータが 128 GFLOPS : 5 GB/s であることを踏まえると演算能力に対してノード間通信性能がボトルネックとなりやすいことがわかる。このような計算機環境において FP16 を使用することによってスケーラビリティの改善が期待できる。性能計測問題において、FP16 のような低精度変数を使用しても、ソルバの収束性が大幅に変化しないことを確認している。MOTHRA と MOTHRA-a を比較すると、この差は袖通信のデータ型のみである。それぞれのソルバを使用した際のソルバ内反復回数は [CG, PreCGc, PreCGcpart, PreCG] = [119, 4516, 26593, 2448] および [117, 4453, 26553, 2422] となり、反復回数の増加は 5% 程度にとどまった。通信の精度を落とすことによってデータ転送サイズは 1/2 となり、これによってモデル W-1 におけるソルバ全体の計算時間にして 1.07 倍の高速化につながっている。また W-1 から W-5 までのスケーラビリティに関しては MOTHRA-a が 88.2% であるのに対して MOTHRA が 89.5% となっており、性能の改善が確認された。Piz Daint 全系使用時(モデル W-5)において、提案手法である MOTHRA は PCGE、GAMERA のそれぞれ 23.2 倍、3.18 倍の高速化を実現している。

最後に Summit での性能を見る。理論ピーク性能とノード間通信帯域の比は 46.8 TFLOPS : 25 GB/s となっており、Piz Daint よりもノード間通信帯域が狭いことが課題となる。そのため、MOTHRA による通信コスト削減手法がより高い効果を示すことが期待される。モデル W-1 において、FP16 通信を導入した提案手法 MOTHRA は FP32 による通信を行う MOTHRA-a と比較して 1.10 倍の高速化となっ

た。スケーラビリティも MOTHRA-a および GAMERA と比較して改善がみられており、最大サイズのモデルである W-8 において提案手法は GAMERA の 4.52 倍の高速化が確認できた。Summit 全系使用時(モデル W-8)における実行性能は 28.2 PFLOPS で、これは倍精度演算の理論ピーク性能比で 14.7%に相当する。この値は GPU 計算機環境上における低次非構造格子有限要素法としては非常に高い数値となっている。

なお、開発手法は MPI プロセスあたりの問題規模が大きくなるような問題設定を対象としているため、weak scaling で高い性能を示すことを重要視して設計されたソルバである。しかしながら提案手法 MOTHRA は図 1.7 に示すように strong scaling においても良好なスケーラビリティを実現していることが確認できる。

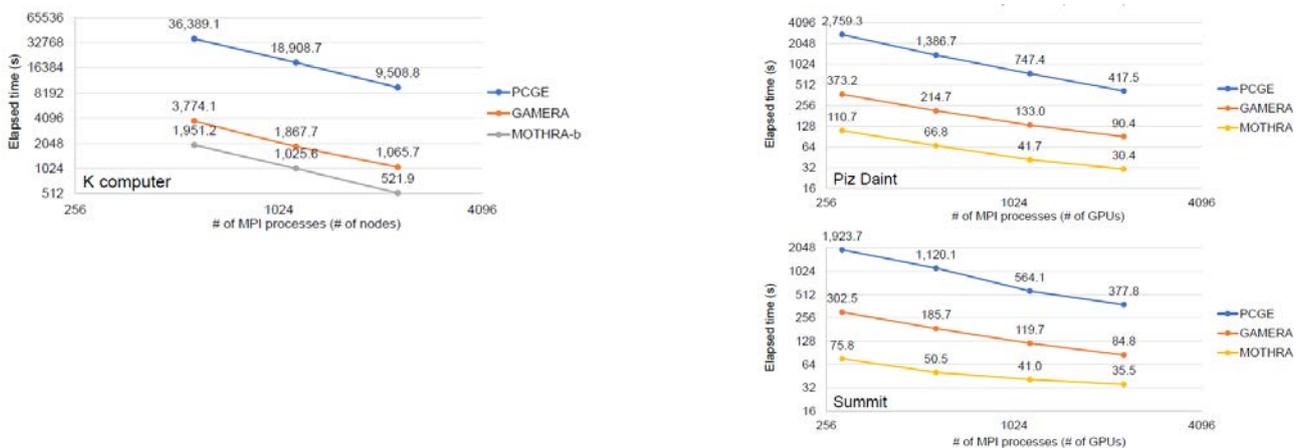


図 1.7. 京コンピュータ、Piz Daint、Summit 上における強スケーリング測定結果。

## まとめ

HPC において AI やそれに付随して実装が進んだ FP16 演算器の活用が探索される中、提案手法は対象問題における計算の局所化と適切な基底の選び方によって AI/精度変動演算による計算が反復法ソルバの性能向上に役立つことを示した。具体的には、AI により対象問題の収束特性の悪い箇所を学習・予測することで計算を局所化し、有限要素法の要素レベルの局所化により精度変動演算を活用した演算性能の向上を実現した。上記を実装した提案手法ソルバは、ランダムアクセス主体の疎行列演算による低次有限要素のコア・カーネルが Summit 内 V100 GPU 上において倍精度演算理論ピーク性能比で 71.4%、ソルバ全体では Summit 全系使用時で 14.7%のピーク性能比を得た。これは従来手法である PCGE と比べて time-to-solution では 25.3 倍、state-of-the-art である GAMERA と比べて time-to-solution では 3.99 倍の性能改善である。

このように AI や精度変動演算が反復法ソルバに使えること、また、最新のスーパーコンピュータにおいて性能が出ることが実証されたことは、同様のアプリへの大きな示唆を与えると考えられる。

ポスト京コンピュータに採用される SVE をサポートした ARMv8-A では ARMv8.2 で半精度を採用するため、本研究で示したアプローチの適用可能性は非常に高いと考えられる。今回は FP16 通信にて Summit の通信ボトルネックの回避を図ったが、これ以上の通信性能の低下はアルゴリズムレベルで隠すことが難しくなると考えられ、適切な演算性能・メモリ転送性能・インターコネク性能のバランスが

重要になると考えられる。ハードウェアの構成が複雑化するにつれ、計算機科学と計算科学の専門家が協力し、超洗練されたコードによりハードの性能をより引き出す、コデザインの意義は増すと考えられる。本研究で開発したソルバは既に社会的波及効果の特に大きい複雑・高密度な都市問題の地盤・地下構造物・地上構造部物の連成非線形地震応答問題の求解に役立っている(図 1.8 参照、Summit 384 ノードを用いて計算)。これは提案手法により高速化した計算と最新のスーパーコンピュータがあつて始めて実現できた高付加価値の計算である。都市の問題では情報の不確かさらしさが大きくかつ多種多様なステークホルダーの意思決定に評価結果を供するため、不確かさらしさを考慮した **High Quality Computing (HQC)**が必須となる。一方で、都市挙動の非線形は非常に強いため、曖昧さを考慮するためにはモンテカルロシミュレーションのような解析負荷が大きなものが必要となる。即ち、都市解析では、巨大な解析を超多数回行う必要があるため、さらに超高速なソルバと計算機システムの導入が必須となると考えられる。

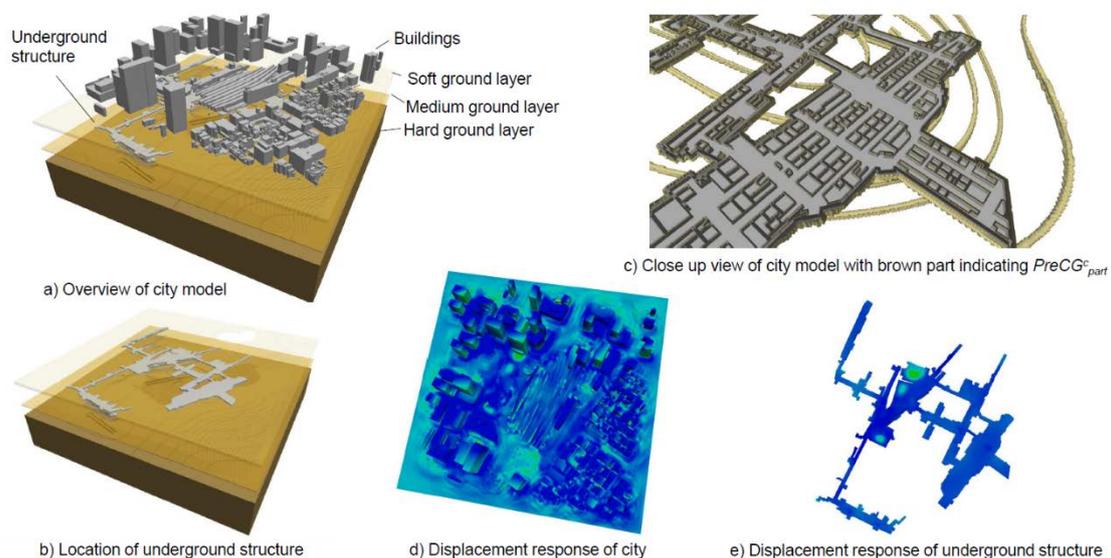


図 1.8. 開発手法を Summit 384 ノードによって計算して得られる適用例計算結果。対象領域は  $1024\text{m} \times 1024\text{m} \times 370\text{m}$  で、地下構造物、地上構造物、3層の地盤構造から構成されている。この問題の自由度は  $16,291,917,564$  に達する。

#### 参考文献

- [1] Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Akira Naruse, Jack C. Wells, Thomas C. Schulthess, Tjerk P. Straatsma, Christopher J. Zimmer, Maxime Martinasso, Kengo Nakajima, Muneo Hori, Lalith Maddeggedara, A fast scalable implicit solver for nonlinear time-evolution earthquake city problem on low-ordered unstructured finite elements with artificial intelligence and transprecision computing, SC '18 Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis, Article No. 49, 2018.

## 1.2 非線形有限要素法の機能拡張

### 概要

地震は様々な被害を引き起こすが、軟弱地盤では滑動崩落や地盤沈下等の地盤の大きな変形を伴う被害が生じることがある。このような大きな地盤変形を伴う地震応答を解析で表現するためには、地盤の構成則として弾塑性構成則を適用する必要があるが、弾塑性構成則を適用して大規模なモデルを解析対象にすることのできる地盤増幅解析手法は例を見ない。そこで本研究では、三次元非線形有限要素法 GAMERA に弾塑性地盤構成則を組み込むことで、大規模な弾塑性地盤増幅解析手法を開発した。開発手法の数値検証を行ったうえで、実際の軟弱地盤を対象に地盤増幅解析を行った。本研究は[1]において論文発表されている。

### 1.2.1 はじめに

日本では、宅地開発のために造られた盛土造成地が数多くみられる。盛土造成地とは、丘陵地を削ることのできる谷や斜面等に柔らかい土が盛られた場所のことである。このような地盤では、大地震の際、地盤の物性のコントラストにより地震動が局所的に増幅され大きな被害が生じやすいと言われている。このような被害を軽減するためには、盛土造成地等の複雑な地盤構造をもつ地盤における地盤増幅を適切に評価することが重要となる。そして、そのような地盤増幅を適切に評価するためには、地表・地層境の幾何形状を高詳細にモデル化し、土の非線形を適切に考慮した三次元的な地盤増幅解析が有効とされる。このような解析には、複雑な幾何形状のモデル化に有効である非線形有限要素法が有効であるが、大規模解析を行うとなると膨大な解析コストが必要となる。

この膨大な解析コストという課題を解決するためには、高性能計算(HPC)が必要となる。Ichimura et al. [2]は三次元非線形有限要素法による大規模地盤増幅解析手法を開発した。ここでは、反復法の高速度等の様々な高速化手法が組み込まれており、京コンピュータ等のスーパーコンピュータを用いた大規模解析を可能としている。しかし、盛土造成地等の非常に軟弱な地盤を対象に信頼性の高い三次元地盤増幅解析を実施するためには、地盤の構成則として三次元弾塑性構成則の適用が必要となる。既往のこの手法は、地盤の構成則として RO モデル[3]・MASING 則[4]が適用されており、滑動崩落等の永久変位が生じる地盤変形を表現するには不十分であると言われている。

そこで本研究では、三次元弾塑性構成則の 1 つである上下負荷面関口・太田 EC モデルを地盤の構成則として導入した大規模三次元弾塑性地盤増幅解析プログラムを開発し大規模な盛土造成地を対象に解析を行った。非線形有限要素法を用いた弾塑性地盤増幅解析プログラムはこれまでも存在していたが、大規模な三次元地盤モデルに適用できるものは例を見ない。

### 1.2.2 弾塑性地盤増幅解析

非線形有限要素法ソルバ GAMERA は、組み込まれている構成則を入れ替えることで様々な非線形問題を解くことが可能である。本研究では、上下負荷面関口・太田 EC モデルを地盤の構成則として組み込み、大規模三次元弾塑性地盤増幅解析を可能とした。本章では、高速非線形有限要素法ソルバ GAMERA、GAMERA を用いた弾塑性地盤増幅解析手法、及び、上下負荷面関口・太田 EC モデルについて概説する。

### 1.2.2.1 高速非線形有限要素法ソルバ GAMERA

GAMERA は、連立一次方程式  $Ax = b$  を高速に解くことで大規模非線形有限要素法の計算を可能としている高速非線形有限要素法ソルバである。連立一次方程式の解法としては前処理付き共役勾配法を利用している。反復法はメモリ使用量が直接法に比べて少ないため、必要メモリ量の大きくなる大規模問題にも適用できる。共役勾配法では、解が一定の誤差に収まるまで同じアルゴリズムを繰り返し計算する。マトリクス  $A$  の性質が悪い場合、共役勾配法の収束性能は前処理の性能に大きく影響する。そこで、GAMERA では前処理の高度化がなされており共役勾配法の収束性の改善が図られている。ここでは、共役勾配法ソルバをマルチグリッド的に使った可変的前処理を使っている。さらに、前処理においては高い精度での演算を必要としないことから、前処理計算は全て単精度で行っている。外部反復の計算は全て倍精度である。この手法は精度混合演算と呼ばれる。詳しい計算手法の詳細は文献[1]に記載されている。

### 1.2.2.2 GAMERA を用いた弾塑性地盤増幅解析手法

一般的に弾塑性地盤増幅解析では、まず初期応力解析を行い重力の影響を考慮した応力状態を求め、その後地震波を入力とした地盤増幅解析を行う。そのため、静的解析と動的解析を連続的に行う必要がある。そこで、既往の GAMERA を利用した三次元地盤増幅解析手法をもとに、連続的に初期応力解析と地盤増幅解析を行えるようにした。以下、動的有限要素法による三次元弾塑性地盤増幅解析手法、初期応力解析手法、そして初期応力解析後の地盤増幅解析手法について概説する。

#### (1) 動的有限要素法による三次元弾塑性地盤増幅解析手法

本研究で用いた動的有限要素法による三次元弾塑性地盤増幅解析手法の詳細を以下に示す。動的弾性体を、空間領域に対して有限要素法、時間領域を Newmark- $\beta$  法でそれぞれ離散化して得られた以下の式を用いる。

$$\left(\frac{4}{dt^2}M + \frac{2}{dt}C^n + K^n\right)\delta u^n = F^n - Q^{n-1} + C^n v^{n-1} + M(a^{n-1} + \frac{4}{dt}v^{n-1}) \quad (1.1)$$

ここで、 $\delta u$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $a$ ,  $F$  はそれぞれ、変位増分、変位、速度、加速度、外力ベクトルである。また、 $M$ ,  $C$ ,  $K$  はそれぞれ、質量、減衰、剛性マトリクスである。 $dt$ ,  $n$  は時間刻み、タイムステップ数を表している。 $Q$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $a$  はそれぞれ以下の式で時間方向に更新する。

$$\begin{aligned} Q^n &= Q^{n-1} + K^n \delta u^n, \\ u^n &= u^{n-1} + \delta u^n, \\ v^n &= -v^{n-1} + \frac{2}{dt} \delta u^n, \\ a^n &= -a^{n-1} - \frac{4}{dt} v^{n-1} + \frac{4}{dt^2} \delta u^n. \end{aligned} \quad (1.2)$$

なお本研究のような非線形解析においては、 $C$ ,  $K$  がタイムステップにより変化する。 $C$  として

Rayleigh 減衰マトリクスを用い、要素減衰マトリクス $C_e^n$ は要素質量マトリクス $M_e$  及び要素剛性マトリクス $K_e^n$ を用いて、 $C_e^n = \alpha M_e + \beta K_e^n$ とする。なお、 $\alpha$ と $\beta$ は以下の最小二乗問題を解き、決定する。

$$\text{minimize} \left[ \int_{f_{min}}^{f_{max}} \left( h^n - \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{2\pi f} + 2\pi f \beta \right) \right)^2 df \right].$$

ここで、 $f_{max}$ ,  $f_{min}$ ,  $h^n$ は解析対象最大周波数、最小周波数、タイムステップ  $n$ における減衰定数である。複雑な幾何形状を忠実にソリッド要素によりモデル化すると、局所的に小さな要素が生成される。そのため、陽的な時間積分(e.g., 中心差分法)を用いると Courant 条件より定まる小さな時間刻みを使わなければならないため、計算量が膨大となる。そこで、本研究では、Newmark- $\beta$ 法( $\beta=1/4$ ,  $\delta=1/2$ )を時間積分として用いる。側面及び底面には、半無限吸収境界条件を適用し、逸散性と半無限性を考慮している。

## (2) 初期応力解析手法

本研究では、初期応力解析として自重解析を適用した。具体的には、式(1.1)中の外力ベクトル $F^n$ を

$$F^n = F^n + \int \rho g N dv, \quad (1.3)$$

と計算し、重力の影響を考慮した。ここで、 $\rho$ ,  $g$ ,  $N$ はそれぞれ、密度、重力加速度、要素の形状関数である。また、Dirichlet 境界条件として、モデル底面の節点の  $z$  方向の変位を 0 に固定した。

## (3) 初期応力解析後の地盤増幅解析手法

初期応力解析後の地盤増幅解析においては、モデル底面の節点の変位固定を取り除きその分の反力をモデル底面の各節点に加えることで、自重解析直後における力の釣り合いをとった。モデル底面の節点以外の節点では、自重解析直後において式(1.1)中の $F^n$ と $Q^{n-1}$ がほぼ等しくなっており力が釣り合っているため、反力を加えるなどの工夫は不必要である。具体的には、モデル底面に位置する節点に関して、式(1.1)中の右辺に

$$-F^{n_0} + Q^{n_0-1}, \quad (1.4)$$

を加えて計算した。 $n_0$ は初期応力解析の最終タイムステップである。外力ベクトル $F^n$ に関しては、式(1.3)と同様に計算した。

## (4) 上下負荷面関口・太田 EC モデル

本研究では、地盤の構成則として三次元弾塑性構成モデルの一つである上下負荷面関口・太田 EC モデルを適用した。下負荷面とは、現応力点を通り正規降伏曲面の内側に定義される相似形の負荷面のことである(図 1.9 参照)。下負荷面を導入することにより、正規降伏曲面内での塑性変形が考慮できるようになり弾性から塑性への滑らかな変化が表現可能となる。また通常の弾塑性構成モデルでは、応力状

態が正規降伏曲面から飛び出した際にリターンマッピング法等の降伏面上に戻す工夫が必要である。しかし、下負荷面モデルでは降伏面から飛び出す応力状態を降伏面に引き戻す自動制御機能が考慮されているため、このような工夫は不必要である。また、上負荷面は正規降伏曲面の外側に定義される相似形の負荷面である(図 1.9 参照)。物体の塑性変形に伴って上負荷面が相対的に収縮(正規降伏面が膨張)することにより、通常の弾塑性構成モデルでは表現できない構造の破壊・劣化による体積圧縮を表現することができる。以上の理論拡張を踏まえた応力-ひずみ関係導出のための支配方程式を、図 1.10 にまとめる。なお、構成則の詳細は[5-7]に示されている。

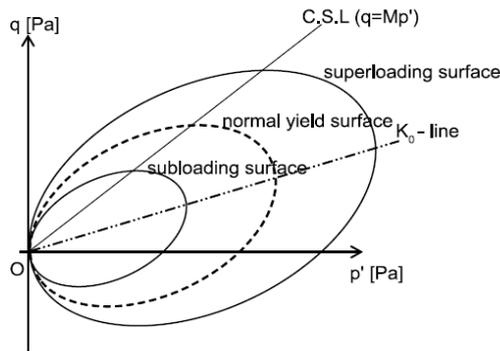


図 1.9. Relation of yield surface.

・下負荷面式	$f(\sigma', \epsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{p_0'} + \frac{MD}{n_E} \left( \frac{\eta^*}{M} \right)^{n_E} - \epsilon_v^p - MD \ln R + MD \ln R^* = 0$ <p>ただし、<math>\eta^* \equiv \sqrt{\frac{3}{2}} \left\  \frac{s}{p'} - \frac{s_0}{p_0'} \right\ </math>, <math>p' \equiv \frac{1}{3} \sigma' : 1</math>, <math>s \equiv \sigma' - p' 1</math></p>
・関連流れ則	$\epsilon^p = \gamma \frac{\partial f}{\partial \sigma'}$
・ひずみの弾塑性分解	$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p$
・非線形弾性構成式	$\sigma' = C^e : \epsilon^e$
・コンシステンシー条件	$f = \frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \dot{\sigma}' + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} \dot{\epsilon}_v^p + \frac{\partial f}{\partial R} \dot{R} + \frac{\partial f}{\partial R^*} \dot{R}^* = 0$
・下負荷面の発展則	$\dot{R} = -\frac{m}{D} (\ln R) \ \dot{\epsilon}^p\ $
・上負荷面の発展則	$\dot{R}^* = a (R^*)^b (1 - R^*)^c \ \dot{\epsilon}^p\ $

図 1.10. Governing equation of stress-strain relation.

### 1.2.3 数値実験

#### 1.2.3.1 大規模三次元弾塑性地盤増幅解析プログラムの数値検証

GAMERA を用いた本三次元解析プログラムは、同じ条件での一次元解析の結果(応力と速度)を三次

元モデルの底面、側面に境界条件として入力することで三次元解析を行っている。そこで、開発した大規模三次元弾塑性地盤増幅解析プログラムの検証として、非線形モデルを対象に、一次元モデルに対する弾塑性地盤増幅解析の結果と三次元モデルに対する弾塑性解析の結果を比較し、解の収束性を確認した。検証の対象としたモデルは、厚さ 40 m の基盤層の上に厚さ 10 m の堆積層が載っている二層の水平成層構造のモデルである。三次元 FEM モデルは、 $0 \leq x \leq 16 \text{ m}$ 、 $0 \leq y \leq 16 \text{ m}$ 、 $0 \leq z \leq 50 \text{ m}$  にわたるモデルとした(図 1.11 参照)。図 1.11 に、各層の物性値、堆積層の弾塑性パラメータ値も示す。ここで、 $K_i$ 、 $K_0$  はそれぞれ初期の土圧係数、先行時の土圧係数である。要素サイズに関しては、既往の研究[8]において示されている以下の条件を満たすように定めた。最大要素サイズ  $ds$  は、

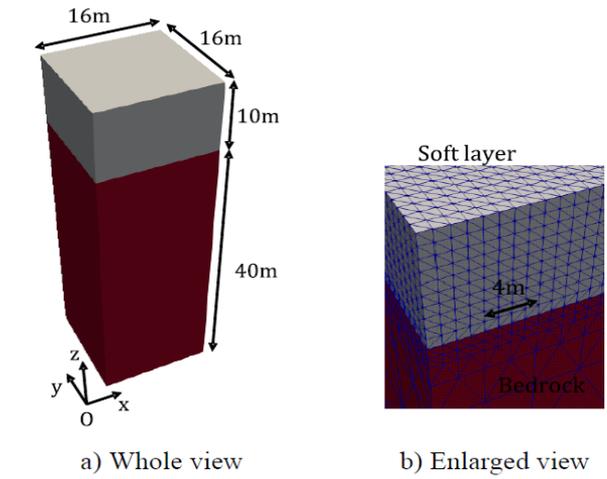
$$ds \leq \frac{V_s}{\chi f_{max}}, \quad (1.5)$$

を満たす必要がある。ただし、 $V_s$ 、 $f_{max}$ 、 $\chi$  はそれぞれ S 波速度、最大周波数、一波長あたりの要素数である。一波長あたりの要素数に関しては、解の精度を保証するために、非線形層において  $\chi > 10$ 、線形層において、 $\chi > 5$  と設定する。以上の条件を加味して、本解析においては、一次元モデル、三次元モデルともに最小要素サイズを 1 m または 2 m、最大要素サイズを 8 m に設定した。

初期応力解析後に入力する地震動としては、1995 年の阪神淡路大震災の際に神戸市中央区中山手の海洋気象台で観測された地表面の地震波(以後、神戸波と呼ぶ)の加速度データを用いた。この入力地震動を図 1.12 に示す。既往の研究[8]より、主に 0.1 Hz から 2.5 Hz にかけての周波数の地震動によって地盤に歪が生じるということが分かっているため、地震波の加速度データにバンドパスフィルターをかけ、0.1 Hz から 2.5 Hz までの範囲以外の周波数の波は取り除いた。

本解析では、三次元非線形有限要素法を用いて、0.001 秒刻みで 700000 タイムステップの初期応力解析を行った後、上記の地震動を入力して 40000 タイムステップの地盤増幅解析を行った。自重は  $\times 0.000002$  倍の大きさずつ 1 タイムステップごとに増やしていき、最初の 500000 タイムステップかけて全ての自重を考慮した。三次元解析に関しては、東京大学の Oakleaf-FX を使い、OpenMP と MPI を組み合わせたハイブリッド並列化を行って計算させた。上記の最小要素サイズが 1 m の水平成層モデルは自由度が 85839 であり、1 ノードあたり 2 MPI プロセスの計算ノードを 36 ノード、8 OpenMP 用いて計算を行ったところ、計算時間は 5 時間 43 分 39 秒であった。一方、最小要素サイズが 2 m の水平成層モデルは自由度が 14427 であり、1 ノードあたり 2 MPI プロセスの計算ノードを 4 ノード、8 OpenMP 用いて計算を行ったところ、計算時間は 3 時間 24 分 38 秒であった。出力に関しては、0.01 秒刻みで地表面変位を出力した。図 1.13 は、一次元解析と三次元解析の結果の比較として、各解析による地表面節点の変位の時刻歴波形を重ねた図である。三次元解析の結果としては、 $(x, y, z) = (8 \text{ m}, 8 \text{ m}, 50 \text{ m})$  の節点における結果を取り出した。図 1.13 を見ると、最小要素サイズを 2 m に設定した際の一次元解析の結果が他のものと比べて  $z$  方向の変位挙動に若干の差異があるものの、概ね全ての結果が一致していることが見て取れる。一方、図 1.14 は、三次元解析の各タイムステップにおける地表面変位分布である。図 1.14 より、最小要素サイズが 1 m のモデルでは、地表面の各場所における変位応答差が最大約 0.75% の誤差に収まっており解の収束性が確認できる。一方、最小要素サイズが 2 m のモデルではこの誤差が最大約 2% となる。この結果より、要素サイズを細かくすることで解が収束することを確認できた。以上よ

り、本研究で開発し大規模三次元弾塑性地盤増幅解析プログラムを用いて弾塑性解析を行う際は、収束した解を得るために要素サイズを 1 m 程度に設定する必要があることが分かった。



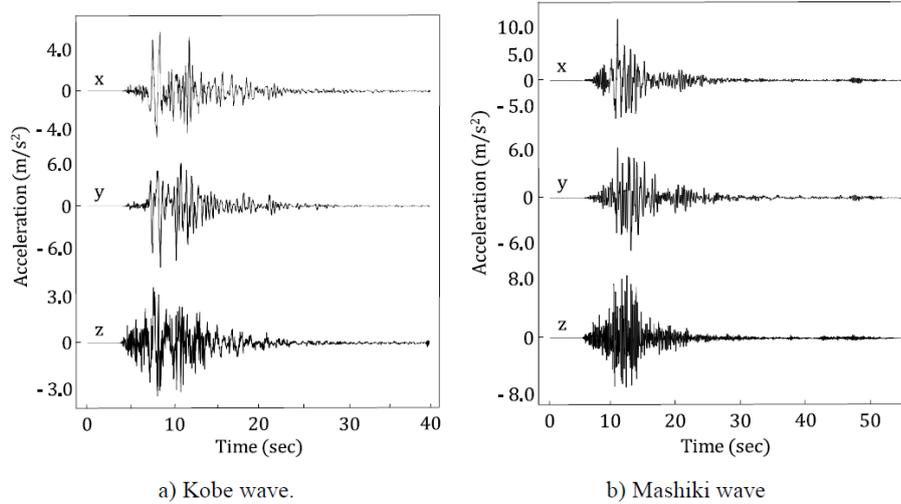
c) Ground property

Layer	$V_p[m/s]$	$V_s[m/s]$	$\rho[kg/m^3]$	$h_{max}$
Soft layer	220	100	1500	0.23
Bedrock	2000	500	2000	0.01

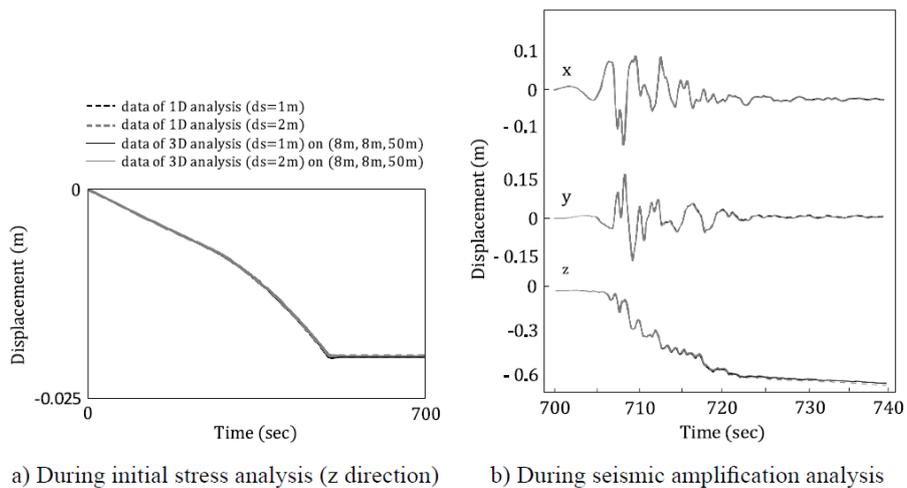
d) Elasto-plastic property of soft layer

$M$	$D$	$A$	$\nu$	$n_E$	$m$	$\sigma_{v_i}[kPa]$	$\sigma_{v_0}[kPa]$	$K_i$	$K_0$	$R^*$	$a$	$b$	$c$
1.2	0.021	0.95	0.37	1.2	10.0	73.5	195.0	0.92	0.58	1.0	1.0	1.0	1.0

図 1.11. Horizontally-layered model & Ground property.



☒ 1. 12. Input wave.



☒ 1. 13. Time history of displacement on ground surface(Horizontally-layered model).

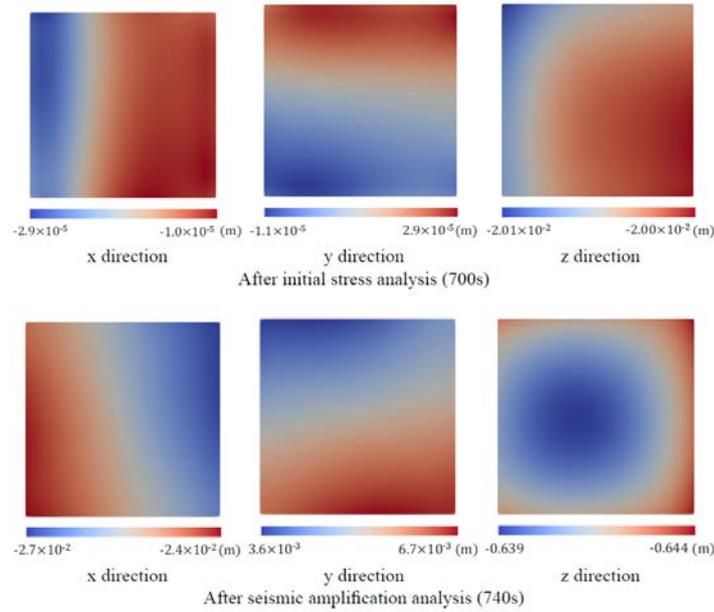


図 1.14. Displacement on ground surface of horizontally layered model(ds=1m).

### 1.2.3.2 適用例

2016年9月14日、16日と熊本県熊本地方で相次いで発生した熊本地震では、斜面崩壊や家屋倒壊等の甚大な被害が生じた。特に、大規模な盛土造成地である南阿蘇村の住宅地では、滑動崩落が発生し溪谷近傍の宅地は崩落したり、東西方向の亀裂が発生したりした。また、溪谷から少し離れた宅地においては、大きな鉛直変位を伴う段差が生じた。このような大きな地盤変形を伴う現象を解析で再現するためには、地盤の構成則として弾塑性構成則を適用する必要がある。そこで、上記の被害が生じた南阿蘇村の住宅地を対象に、本研究で開発した大規模三次元弾塑性地盤増幅解析プログラムを用いて、地盤増幅解析を行った。

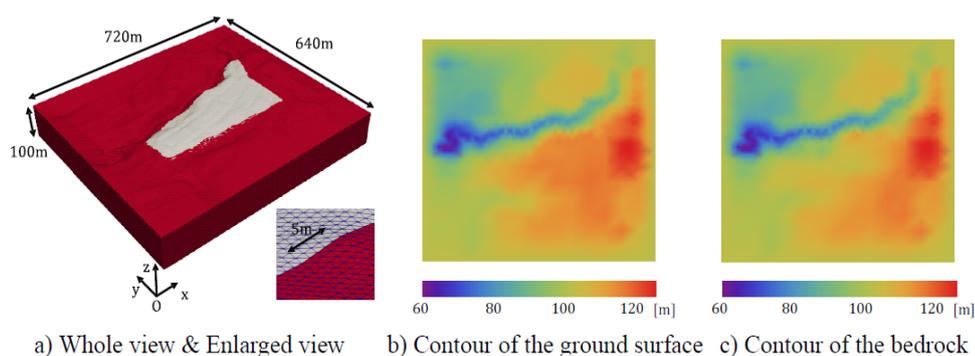
上記の領域の標高データは、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデルのデータから得た。また、堆積層の厚さに関しては、対象地盤周辺のボーリングデータを参考に推定した。以上のデータをもとに生成した三次元 FEM モデルを図 1.15 に示す(以後、阿蘇モデルと呼ぶ)。モデルの範囲は、 $0 \leq x \leq 720$  m、 $0 \leq y \leq 640$  m、 $0 \leq z \leq$  約 100 m である。この地盤モデルは堆積層と基盤層の二層から成り立つものと仮定し、各層の物性値として図 1.15 に示した値を使った。要素サイズに関しては、1.2.3.1 での結果を考慮して、最小要素サイズ 1 m、最大要素サイズ 16 m となるように設定した。その結果、三次元 FEM モデルの自由度は 47813250、節点数は 15937750、四面体要素数は 11204117 となった。

初期応力解析後に入力する地震動としては、2016年4月16日に発生した熊本地震の際に KiK-net 益城(KMMH16)で観測された地表面の地震波(以後、益城波と呼ぶ)の加速度データを用いた。この入力地震動を図 1.12 に示す。1.2.3.1 同様、0.1 Hz から 2.5 Hz 以外の周波数の波を取り除いた。

本解析では、三次元非線形有限要素法を用いて、0.001 秒刻みで 350000 タイムステップの初期応力解析を行った後上記の地震動を入力して 55000 タイムステップの地盤増幅解析を行った。自重は×

0.000004 倍の大きさずつ 1 タイムステップごとに増やしていき、最初の 250000 タイムステップかけて全ての自重を考慮した。三次元解析に関しては、東京大学の Oakleaf-FX を使い、OpenMP と MPI を組み合わせたハイブリッド並列化を行って計算させた。1 ノードあたり 2 MPI プロセスの計算ノードを 240 ノード、8 OpenMP 用いて計算を行ったところ、計算時間は 31 時間 13 分 8 秒であった。出力に関しては、0.01 秒刻みで地表面変位を出力した。なお、本解析プログラムの計算性能は Oakleaf-FX 120 MPI プロセスを用いて 2.34 TFLOPS (16.5% of peak) の性能であった。

阿蘇モデルの三次元解析の結果を図 1.16 に示す。図 1.16 は、各タイムステップにおける地表面の  $x$ ,  $y$  方向の変位量とそのベクトル(図中の黒い矢印が各地点における  $x$ ,  $y$  方向の変位方向である)、また  $z$  方向の変位分布を表す。これらの図を見ると、地盤増幅解析後に堆積層の北側にある小溪谷部分に堆積層の一部がはらみ出している様子が見て取れる。また、堆積層の中央部分では大きな沈下が生じていることも分かる。地盤のはらみ出し具合、沈下具合が過剰ではあるが、これは堆積層の物性、弾塑性パラメータを粘土のような柔らかめの値に設定したためと考えられる。堆積層の物性、弾塑性パラメータをもう少し固めの土の値に設定すれば、地盤のはらみ出し、沈下具合が抑えられ実際に起きた現象に近づくと考えられる。



Layer	$V_p$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$h_{max}$
Soft layer	90	48	1330	0.23
Bedrock	2000	500	2000	0.01

e) Ground property

$M$	$D$	$A$	$\nu$	$n_E$	$m$	$\sigma_{v_i}$ [kPa]	$\sigma_{v_0}$ [kPa]	$K_i$	$K_0$	$R^*$	$a$	$b$	$c$
0.98	0.064	0.873	0.3	1.2	10.0	65.0	195.0	0.92	0.58	1.0	1.0	1.0	1.0

f) Elasto-plastic property of soft layer

図 1.15. Aso model & Ground property.

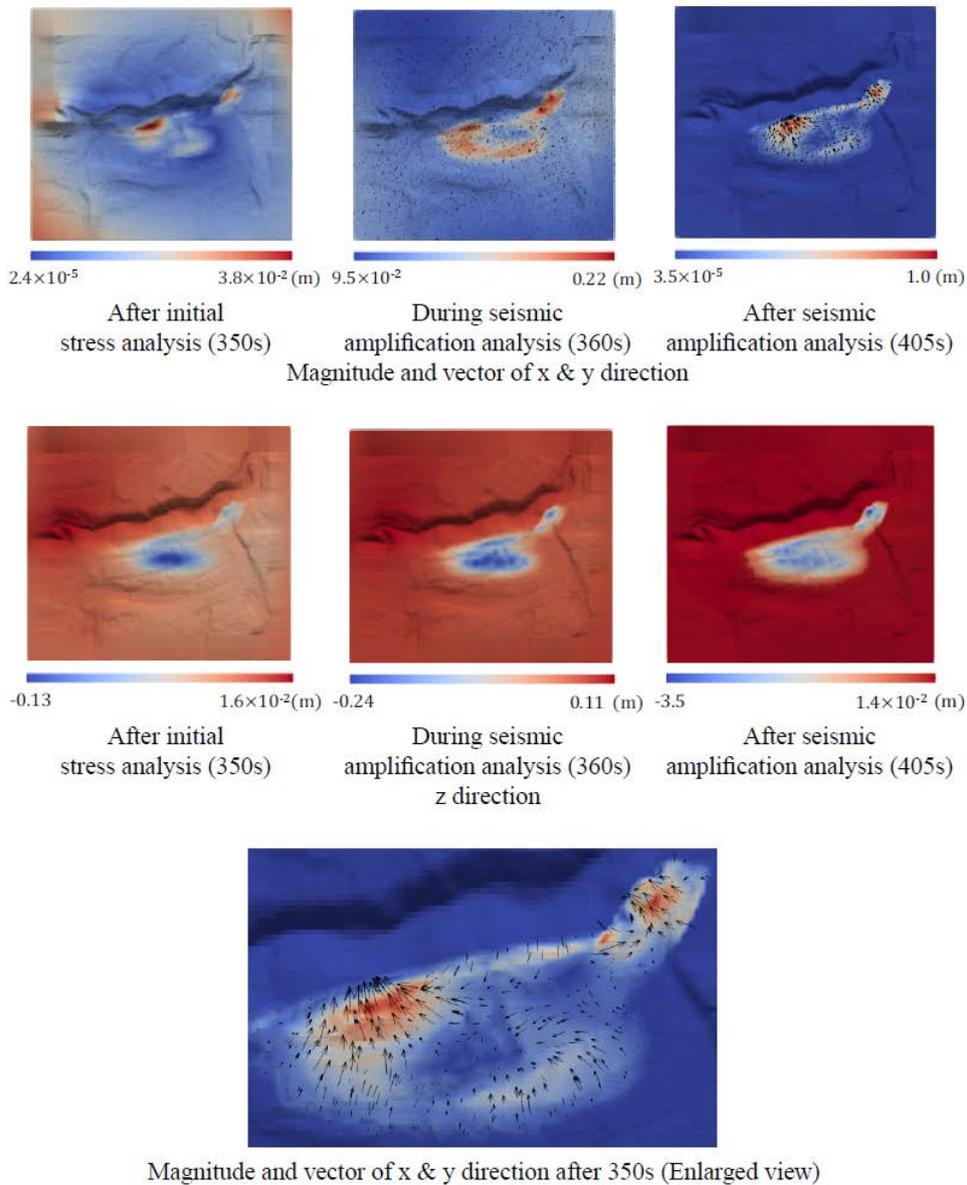


図 1. 16. Displacement on ground surface of Aso model.

#### 1.2.4 まとめ

本研究では大規模なモデルを対象に三次元弾塑性地盤増幅解析を行うことのできる手法を開発した。プログラムの数値検証と南阿蘇の盛土造成地の適用例を通して、本手法が大変形を伴う大規模な地盤増幅解析に有効であることを示した。以前より非線形有限要素法を用いた弾塑性地盤増幅解析は行われてきたが、その多くが二次元解析であり、たとえ三次元解析であったとしても約 5000 万自由度のモデルを対象に行ったものは見られない。また、高速非線形有限要素法ソルバ GAMERA を組み込んだ既往の地盤増幅解析プログラムでは 1 億自由度以上のモデルを対象に三次元解析が可能だが、大きな変形を伴う現象は解析できなかった。本研究で開発したプログラムを用いることで、はらみ出しや地盤沈下等の大きな変形を引き起こす地盤増幅解析が可能であり、被害が予想される地域を対象に適用することで被害予

測の高度化が期待できる。

#### 参考文献

- [1] Yoshiyuki A., Fujita K., Ichimura T., Hori M., Wijerathne L., Development of Scalable Three-Dimensional Elasto-Plastic Nonlinear Wave Propagation Analysis Method for Earthquake Damage Estimation of Soft Grounds, Computational Science – ICCS 2018, Lecture Notes in Computer Science, vol.10861. Springer, Cham, 2018.
- [2] Ichimura, T., Fujita, K., Tanaka, S., Hori, M., Lalith, M., Shizawa, Y. and Kobayashi, H., Physics-based Urban Earthquake Simulation Enhanced by 10.7 BlnDOF x 30 K Time-step Unstructured FE Non-linear Seismic Wave Simulation, SC14: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, pp.15–26, DOI: 10.1109/SC.2014.7
- [3] Idriss, I.M., Singh, R.D. and Dobry, R., Nonlinear Behavior of Soft Clays during Cyclic Loading, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 104, pp.1427–1447, 1978.
- [4] Masing, G., Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing, Proceedings of the 2nd International Congress of Applied Mechanics, pp. 332–335 (in German), 1926.
- [5] Ohno, S., Iizuka, A., Ohta, H., Two categories of new constitutive model derived from non-linear description of soil contractancy, Journal of applied mechanics, Vol.9, pp. 407–414, August 2006.
- [6] Ohno, S., Takeyama, T., Pipatpongsa, T., Ohta, H., Iizuka, A., 2007, Analysis of Embankment by Nonlinear Contractancy Description, 13th Asian Regional Conference Kolkata, 2007.
- [7] Akira, A., Nakano, M., Noda, T., Kaneda, K., Delayed compression/consolidation of natural clay due to degradation of soil structure, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.40, No.3, pp.75–85, June 2000.
- [8] Ichimura, T., Fujita, K., Hori, M., Sakanoue, T. and Hamanaka, R., Three dimensional Nonlinear Seismic Ground Response Analysis of Local Site Effects for Estimating Seismic Behavior of Buried Pipelines, J. Pressure Vessel Technol., Vol.136, No. 4, 2014. DOI: 10.1115/1.4026208.

## 1.3 交差点の詳細モデルを用いた避難シミュレータの機能強化

### 1.3.1 はじめに

日本のように、ほとんどの道路が狭く、歩いて避難することが推奨されている国では、津波によって引き起こされる避難は、特に交差点で車と異常な数の歩行者の間で激しい相互作用を引き起こす可能性がある。何台の車両を許可できるか、という事や、車を使用する際に許容される時間はどれくらいか、等、の問題に対処する時に、信号の無い交差点における異常な数の歩行者と車両の相互作用を正確にモデル化することが不可欠である。これは、災害時において、信号灯が機能していないか、あるいは、信号灯が考慮されていない可能性があるためである。特に、自動車は歩行者に比べて20倍以上速く動く可能性があるため、自動車エージェントは、交差点内で現実的な軌跡と速度プロファイルを再現できなければならない。信号の無い交差点における車両と歩行者の相互作用モデルを見出すことは稀だが、車両間の既存の相互作用モデルでさえ、現実的な軌跡や速度プロファイルを再現していない。これらのモデルは、衝突回避アルゴリズム[3,4,7-9]、スケジューリング手法[5]、ゲーム理論[12]等に基づいている。

避難シミュレータは、交差点での車両の軌道と速度プロファイルを正確に再現し、信号の無い交差点における車両間および車両と歩行者間の相互作用を合理的に再現するように更新される。交差点における車両軌跡はBスプライン曲線で容易に近似できるのに対し、自由流速プロファイルは3次多項式で近似できることが実証された。車両と車両間の相互作用は、単純な物理ベースの近似、および接近時における衝突の不確かさと可能性に基づいてモデル化される。さらに、車両と歩行者間の相互作用をモデル化する際に歩行者が優先される。いくつかの数値例を用いて、合理的な相互作用の振る舞いを再現できることを実証した。

この節の残りの部分は次のように構成される。1.3.2では、車両の軌跡と接合部の自由流速プロファイルの近似値を示す。信号機の無い交差点における車両と車両間の相互作用および車両と歩行者間の相互作用について、それぞれ1.3.3および1.3.4で示す。1.3.5では近似の精度を実証するためにいくつかの数値例を提示し、相互作用を合理的に再現できることを示す。

### 1.3.2 交差点における軌道と自由流速の近似

#### 1.3.2.1 交差点での車両の軌跡

我々は、あらゆる交差幾何学に対して使用できるパラメトリック近似を高速で評価し定義するのが容易であることを見つけた。交通工学の要件[1]を満たすオイラー螺旋と円を組み合わせた近似があるが、それらを定義して評価するのは複雑である。Alhajyaseenらによる車両軌道観測の分析[1]によって、我々は車両の軌道をBスプライン曲線で簡単に近似できることを発見した。Uターンを除く、ほとんどの交差点幾何学での軌跡は、ノットベクトル $[0, 0, 0, 1, 1, 1]$ を備えたBスプライン曲線、及び交差点への入り口での車線の中心、及び出て行く車線と入ってくる車線の間にある交差する点、および制御点として出口点の車線中心（図1.17参照）を使用して近似できる。必要とされる3つの制御点が知られているが、上記のBスプラインノットベクトルは単純な3次ベジエ基底関数を定義し、それによって車両の軌道および軌道上の単純な評価点を定義することが容易になる。Alhajyaseenらによって提案された近似[1]と比較すると、Bスプライン曲線近似では僅か数センチメートルだけの逸脱であることが判った。この誤差は、この特定のアプリケーションに対して無視できるものであり、車の寸法との比較にもならない。また、NURBSを使用して非常に正確な近似を作成できることが判った。しかし、これには観測と線形方程式を

解く必要がある。

エージェントを更新する際の計算量を減らすために、Bスプライン曲線上の少数の点(例えば5~10点)を使用して車両エージェントの軌跡を定義し、そして図 1.18 に示すように複数の軌跡の交点が予め計算される。異なる軌跡上にある車両が潜在的に衝突する区域は、これらの交差点に基づいて定義される。

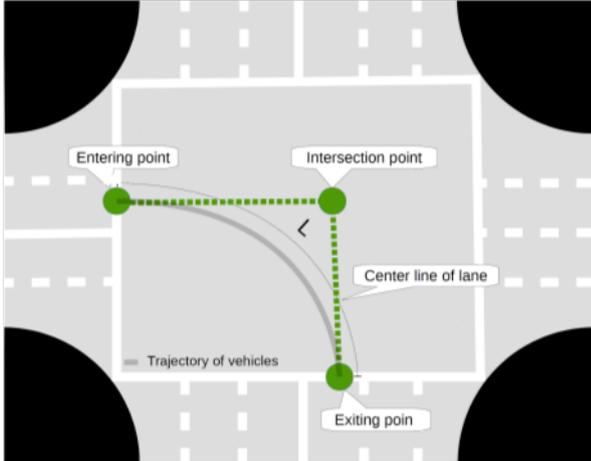


図 1.17. 交差点での車両軌跡は、3 次Bスプライン曲線で近似される。

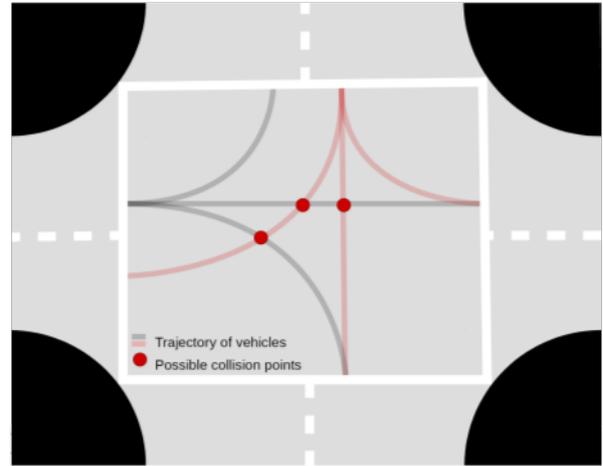


図 1.18. 複数の軌跡の交点。

### 1.3.2.2 交差点での車両の速度プロファイル

交差点での車両と歩行者の相互作用のモデリングでは、自動車エージェントが現実的な自由流速プロファイルを持つことが不可欠である。車速は歩行者よりも一桁大きいので、車速の非現実的または突然の変化は歩行者の異常な行動を誘発する可能性がある。Charitha らによると[6]、車両の速度プロファイルは高次多項式曲線で近似できる。それらの近似はフィールド観測を必要とするが、我々は3つの既知のパラメータと1つの制約で定義できる3次多項式近似を使用する。次に示す。

$$v(x) = (-4V_{approach} + 4V_{depart})\left(\frac{x}{L}\right)^3 + (8V_{approach} - 4V_{min} - 4V_{depart})\left(\frac{x}{L}\right)^2 + (-5V_{approach} + 4V_{min} + V_{depart})\left(\frac{x}{L}\right) + V_{approach}, \quad (1.6)$$

ここで、 $L$  は軌跡の長さ、 $x \in [0, L]$  である。我々は、 $x = \frac{L}{2}$  において加速度がゼロであり (すなわち、 $x = L/2$  において  $dv/dx = 0$ )、そして車両が最低速度  $V_{min}$  に達すると仮定した。 $V_{min}$  は、求心力による事故を防ぐための最大許容速度と見なせる。従って、車両の質量、軌跡の最大曲率、路面状態などを考慮して、 $V_{min}$  を定義できる。 $V_{approach}$  は車両が交差点に接近する速度 ( $v(0)$ ) であり、 $V_{depart}$  は所望の出発速度  $v(L)$  である。

上記の速度プロファイルは、その軌跡に沿った長さ  $x$  であり、特定の自動車エージェントにおける速度の上限のみを定義する。 $i$  番目の自動車エージェントの速度を  $u_i(x)$  とし、式(1.6)で定義される上限は  $v_i(x)$  とする。 $u_i(x) \geq v_i(x)$  の場合、 $i$  番目の自動車エージェントは自分自身を減速して式(1.6)の速度に従う。

そうでなければ、 $u_i(x)$ または $v_i(x)$ より下の任意の所望の速度で継続する。減速と加速の詳細は 1.3.3 で説明する。

### 1.3.3 車と車間の相互作用

津波が大量避難を引き起こした時、先立って発生した地震が交差点の信号を機能不全にする可能性が高いため、信号の無い交差点で相互作用をシミュレートする必要がある。自由流動交通のモデル化を行うために 1.3.2 において軌跡と速度プロファイルを使用しているが、ここでは単純で軽量の車両間相互作用モデルを使って衝突及び接近遭遇時の衝突の可能性を示す。

#### 1.3.3.1 仮定と観察

単純ではあるが現実的な車両と車両間の相互作用モデルを考察するために、以下の 2 つを仮定する。

仮定 1 交差点を走行している間、車両は車線を変更しない。

仮定 2 衝突の可能性のある領域に最初に入ることができる車両には、より高い優先順位が与えられる。

これら両方の仮定は現実からさほど遠くない。交差点ではほとんどすべての運転手が標準的な軌道を守るのが日常経験であり、実際に、交差点で車線を変更することが事故の主な原因の 1 つである[11]。また、多くの観察が 2 番目の仮定を支持している[10]。さらに、対話アルゴリズムを実装する際には、以下に示す観察された合理的ドライバの動作を使用する。

1. 交差点に近づく時は、速度を快適な範囲に下げる。
2. 隣接車両の位置と方向指示を観察し、それらの相対速度を推定する。
3. いくつかの安全係数を使って、自分の車が他の車と衝突するかどうかを推定する。
4. 衝突の可能性がある場合は、快適な減速を行い安全な距離を保ち、衝突を回避する。

車が互いに数秒の時間間隔で速く動いている交差点において、接近遭遇における単純なミスまたは誤判断は、致命的な事故につながる可能性がある。このような接近した場所での衝突を恐れて、運転手は、通常、不完全な精神的判断や運転手の反応時間、また周囲の運転手の予期しない行動、および周囲の運転手による間違いなどに対処するために、安全要因を決定に含める。最も一般的な安全要因は、数学的に完全な推定値ではなく、距離または時間の観点から、精神的推定値に対する追加のバッファを含めることである。我々は、隣の車や歩行者との間のギャップを維持するようにし、数学的に必要とされるよりも約 1.5 秒早くブレーキをかけることによって、このような恐怖感を自動車エージェントの意思決定に含めた。

#### 1.3.3.2 潜在的に危険な領域

車と車の相互作用について、3 タイプの潜在的に危険なゾーンを検討する。それぞれが後述する 3 つの衝突の可能性のあるポイントの周囲に存在する (図 1.19)。

1. 同じ軌跡上にある速く移動する後方車両と遅く移動する前方車両の衝突点。
2. 2つの独立した軌跡の交点。
3. 合流する軌跡上にある2台の車両に対して現在の移動方向を線形外挿した交点。

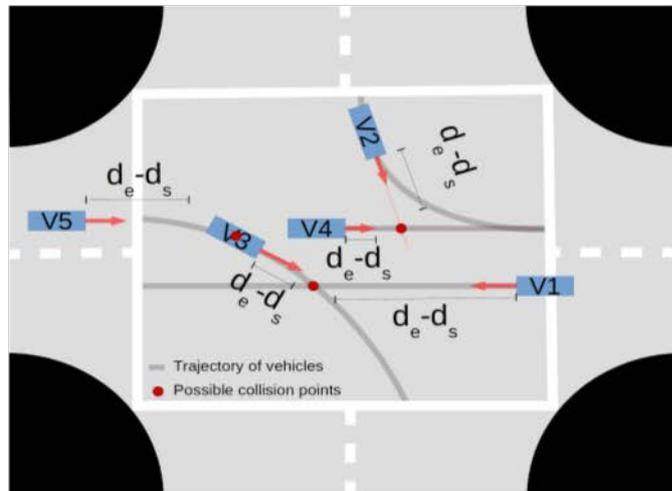


図 1.19. 考慮した 3 種類の衝突の例。V5-V3 の速い後方車両と遅い前方車両。異なる軌跡の V1-V3 の交点。合流する軌跡上の V2-V4 について現在の移動方向を外挿する。

現在の移動方向の推定を考慮した第 3 のタイプの衝突点は、軌跡が合流する際に起きる運転者の誤りを考慮に入れるために含む。第 2 のタイプに該当する交点は、計算オーバーヘッドを減らすために 1.3.2.1 の後半で説明したように事前計算される。第 3 の項目に該当する軌跡のリストもまた、コンピュータ実装における条件付き分岐を減らすために事前に識別される。

### 1.3.3.3 交差点内での車と車の衝突の回避

本節の冒頭で説明したように、交差点内では、衝突を回避するために車両エージェントは車線や方向を変えないと仮定する。代わりに、車両エージェントは衝突を避けるためにスピードを落とす。各車両エージェントは、上記の 3 つのタイプの衝突のうちいずれかをもたらす全ての隣接車両を識別し、それ自体の車両とそれらの車両のうちいずれかが安全距離  $A$  よりも接近するかどうかを推定する。そして衝突までの最短時間でエージェントまでの距離  $d_s$  に達する前に、距離を維持または停止するために減速する。エージェントが行う減速プロセスの詳細は、本節の残りの部分で説明されているが、車両と車両の衝突回避に関連する基本的なステップはアルゴリズム 1 で説明されている。

隣接車両エージェント  $a_j$  との潜在的衝突点に到達する時間を推定する際に、車両エージェント  $a_i$  は、隣接者  $a_j$  が潜在的衝突点まで現在の観測速度で運転を続けると仮定する。しかしながら、エージェント  $a_i$  は、その予想される将来の速度変化に基づいて衝突点までのそれ自身の移動時間の正確な推定をする。一例として、 $a_i$  が曲線の軌跡上にある場合、それは式(1.6)によって制限されるその予想速度プロファイルに基づいて移動時間を推定する。 $a_i$  の正確な時間の見積もりは、ドライバーが過去の経験に基づいて近距離の

旅行時間をかなり正確に見積もることができるので非現実的ではない。しかしながら、近隣の運転手が何をするかについては不確実であり、彼らの移動時間の正確な推定は不可能である。

---

**Algorithm 1:** Pseudo code for vehicle-vehicle collision avoidance at intersections.

---

```

input : One considered vehicle (cveh), Neighbor vehicle information
output: Collision free speed of considered vehicle

1 initialize list OVList ;                /* the observed vehicle list */
2 initialize float OptimalSpeed = FreeFlowSpeed ;    /* the collision free
   speed */
3 initialize vector2d collpoint ;        /* the possible collision point */
4 Observing neighbor vehicles and keep them in OVList
5 while OVList is not empty do
6     sveh = OVLIST.pop() ;                /* selected vehicle */
7     if sveh is possible to collide with the considered vehicles then
8         Determine collpoint between cveh and sveh;
9         if cveh will not reach the collpoint before sveh then
10            Calculate the collision free speed (collfreespeed) for cveh
11            if collfreespeed < OptimalSpeed then
12                | OptimalSpeed = collfreespeed
13            end
14        end
15    end
16 end
17 return OptimalSpeed

```

---

#### 1.3.3.4 衝突を避けるための減速

誤判断および不確実性に対する安全要因として車両エージェント  $a_i$  が好む安全距離  $d_s$  は、 $d_s = \tau_i v_i$  であると仮定する。ここで、 $\tau_i$  と  $v_i$  はそれぞれ  $a_i$  の反応時間および現在の速度である。考慮されるエージェント  $a_i$  とその隣接エージェント  $a_j$  との間の有効距離  $d_e$  は、次のように定義される。

$$d_e = d - r_i - r_j, \quad (1.7)$$

ここで、 $d$  は 2 つのエージェントの中心間の距離を表し、 $r_i$  と  $r_j$  はそれらの半径を表す。計算を簡単にするために、車両エージェントを半径  $r$  の円で表す。

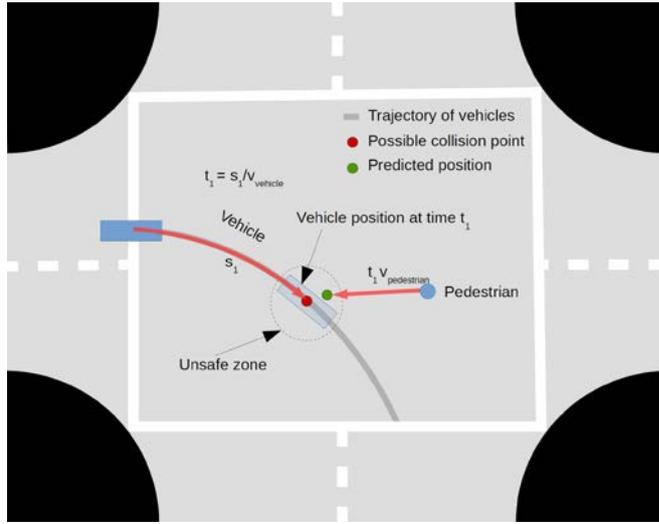


図 1.20. 車両エージェントと歩行者エージェントの相互作用。

速度  $v_i(t)$  の車両エージェント  $a_i$  と速度  $v_{front}(t)$  のエージェント  $a_{front}$  が同じ軌跡上で  $a_i$  の前を移動しているとする。  $v_i > v_{front}$  の場合、低速移動する前方側エージェント  $a_{front}$  との衝突を回避するために、高速移動する後方側エージェント  $a_i$  は、  $a_{front}$  までの安全距離  $d_s$  に達する前に、それらの速度に一致するように減速する（すなわち、  $v_i - v_{front} = 0$ ）（図 1.19 参照）。単純な物理学に基づいて、  $\Delta t$  時間間隔で  $a_i$  速度を更新するための式を次のように定義できる。

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + \frac{(v_{front}(t) - v_i(t))^2}{2(d_e - d_s)} \Delta t. \quad (1.8)$$

上記以外の衝突の可能性のある他の全ての状況において、衝突の可能性のある地点に後で到達した全ての車両は完全に停止するように減速し、エージェントが衝突の地点に最初に到達しても妨害されずに継続できる。潜在的な衝突点まで安全距離  $d_s$  に到達する前に完全に停止するために、後で衝突点に到達した車両  $a_i$  は、次式に従って速度を更新する。

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + \frac{v_i(t)^2 \Delta t}{2(d_e - d_s)}. \quad (1.9)$$

#### 1.3.4 信号の無い交差点における車と歩行者間の相互作用

序文で述べたように、日本のような国では、津波から避難する場合、歩行が主な方法であり、そして道は狭い。このような状況下では、歩行者が狭い道路を占拠して、多数の歩行者と少数の車両との間で異常な相互作用を引き起こす可能性がある。この研究の 1 つの目的は、信号が無い交差点でのそのような車両と歩行者の相互作用をモデル化することである。車両と車両の相互作用に関連する 2 つの主な仮定（1.3.3.1 を参照）に加えて、我々は車両が歩行者を優先すると考える。

歩行者が安全な高所に到達するために歩く距離が長いという事実を考えると、これは不合理な仮定ではない。歩行者と相互作用する場合、自動車エージェント  $a_i$  は、目に見える全ての歩行者エージェントを識別し、どの歩行者がその決まった軌跡を横切って歩こうとしているかを見つけ、各歩行者が現在の方向に歩き続けると仮定して  $a_i$  の軌跡に達する時間を推定する (図 1.20)。車と車間の相互作用の場合と同様に、車エージェント  $a_i$  は予想速度プロファイルに従って、衝突までの時間を正確に推定し (1.3.3 参照)、衝突する最初の歩行者エージェントを識別する。車両エージェントが安全距離  $d_s$  よりも近くに到達できる場合、それは式(1.6)に従って減速する。その結果、衝突の可能性のある点の周りの安全でない区域 (図 1.20 参照) に入る前に停止する。

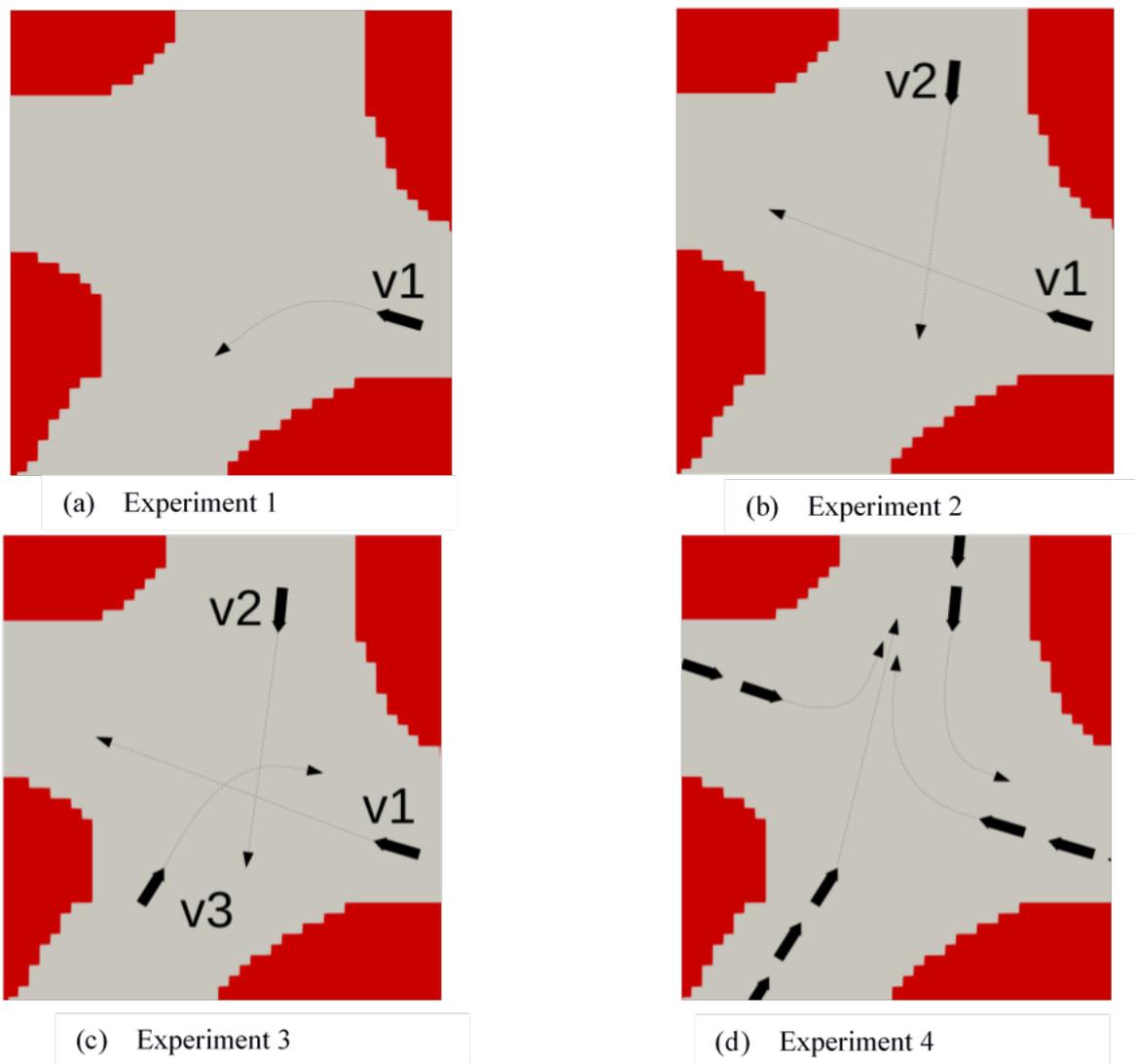


図 1.21. 4つの数値実験に対する問題設定。

これとは対照的に、歩行者エージェントは、直交相互衝突回避 (ORCA) アルゴリズムをわずかに修正したバージョンに基づき、速度と方向の両方を調整して衝突を回避する [13, 3]。実際の歩行者と同じように、歩行者エージェントは、可能であれば衝突の可能性を回避するために歩行方向をわずかに変更して、希望する歩行速度を維持しようとする。歩行者のスピードは遅いので、歩行者エージェントは、突然、

方向を止めたり方向を変えたりすることが許される。

### 1.3.5 自由流速プロファイルの検証と実証例

ここでは、車両速度プロファイルに対する3次多項式近似の検証、および信号が無い交差点での車両と車両間、及び車両と歩行者間の相互作用をシミュレートするために実装されたエージェントシステムを定性的に実証するための数値実験を示す。

全ての数値例において、全ての車エージェントの反応時間および好ましい速度は、それぞれ0.67秒[14]および45km/hに設定されている。計算を減らすために、反復ステップ毎にBスプライン曲線を評価する代わりに、対応するBスプライン曲線上にある6つの等間隔の点を通過させることによって、車両を軌道に拘束した。単一車両エージェントによるシミュレーションを除いて、すべての実験において、 $V_{approach} = 30 \text{ km/h}$ 、 $V_{min} = 20 \text{ km/h}$ 、 $V_{depart} = 30 \text{ km/h}$ に設定する。

#### 1.3.5.1 車両間の相互作用

1.3.3で提示した車両と車両間の相互作用モデルを実証するために、図1.21に示すように4つの数値実験を行った。最初のケースは自由流速プロファイルを検証することであり、残りは異なる数のビークルエージェント間の相互作用を実証することである。

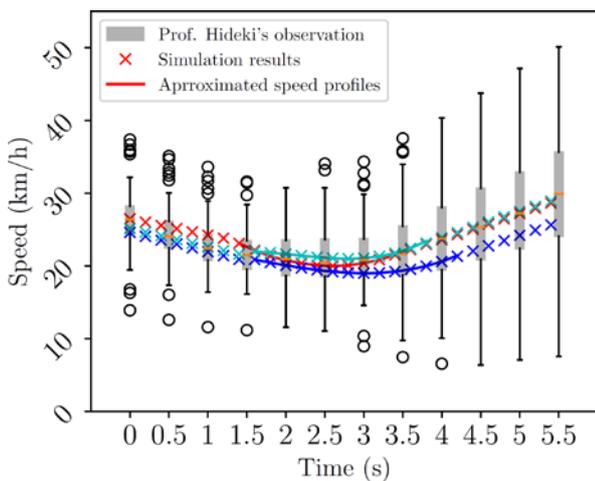


図 1.22. 実験 1 の速度プロファイルと、Hideki Nakamura 教授によるフィールド観察。

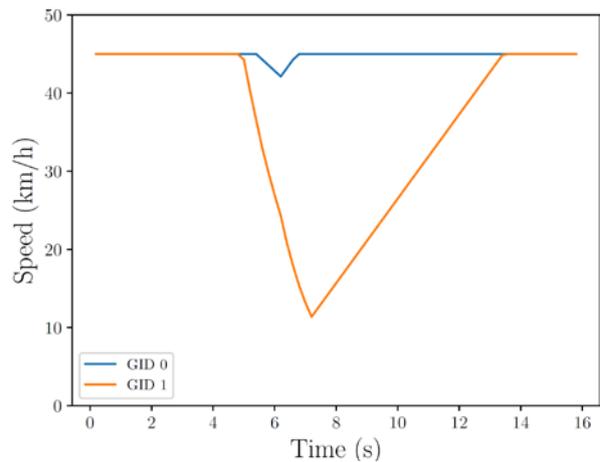


図 1.23. 実験 2 の速度プロファイル。

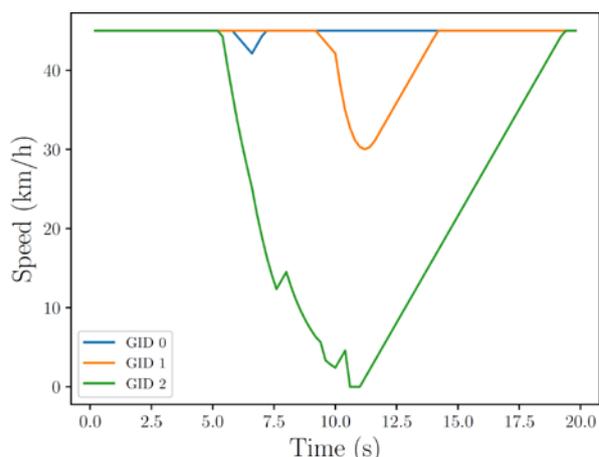


図 1.24. 実験 3 の速度プロファイル。

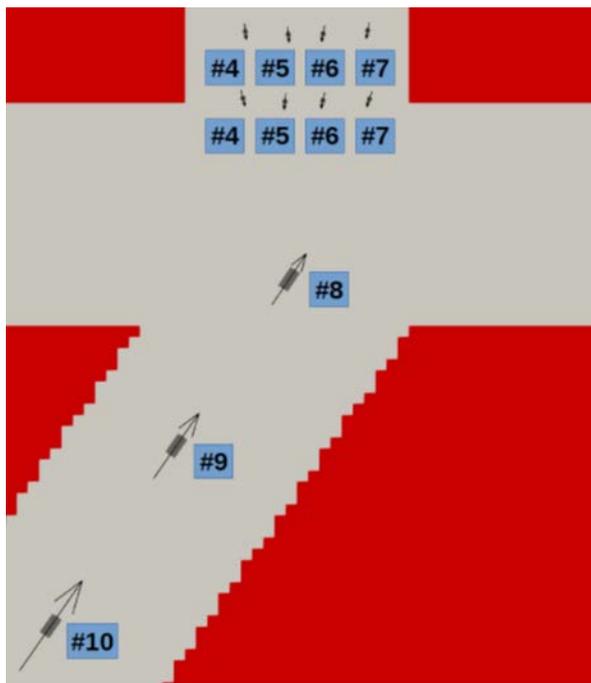


図 1.25. 複数の車両エージェントシミュレーションでのスクリーンショット。

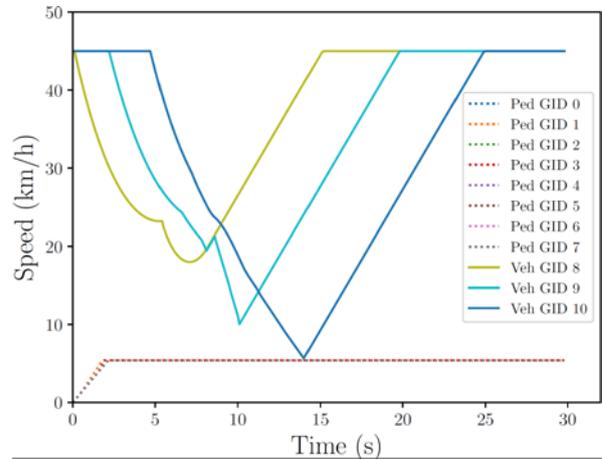
#### ・複数の自動車エージェントの相互作用

相互作用する車両が複数の場合について、我々は比較するための現地観察を見つけることができなかった。最も関連のある研究として[12]を見つけた。彼らの研究において、Mandiau らは、交差点で衝突する軌道上で 2 台と 3 台の車両についてゲーム理論を使用してシミュレートした。ほとんどの設定は、図 1.21 b 及び図 1.21 c に示す我々の問題設定と同様であるが、彼らは詳細な比較をするために必要な初期条件を提供していない。図 1.23 のように、2 つの車両エージェントは、ID 1 を有する最初に到着したエージェントを優先し、ID 0 を有するエージェントをわずかに減速させることによって衝突を解決する。定性的には、これらの速度プロファイルは Mandiau らのものとよく一致している。図 1.23 は、3 台の車両がある場合の速度プロファイルである。この場合、ID 0 のエージェントを優先してわずかな減速を行って衝突を解決する。車両 0 が衝突ゾーンから出るとすぐに、車両 1 は優先順位を受け取ることで加速する。車両 0 が移動するまでに、車両 1 の速度は車両 2 の速度よりもはるかに速い。このシミュレーションは、衝突点に到着した最初の人に優先順位を付けることで、分岐点での衝突を解決できることを示す。衝突点に複数の車両が同時に到着する可能性がある場合、それらはランダムプロセスに従って優先順位が割り当てられる。対応する Mandiau らの結果と比較すると、どちらのシミュレーションも似たようなパターンを持っていることが判った。しかし、彼らのゲーム理論ベースのモデルは、3 人のエージェントすべてを停止させ、3 台の車が交差点を通過するのに、より長い時間が掛かる。

図 1.21 d に示される多数の車両エージェントの事例は、多数の衝突を伴う、より現実的なシナリオをテストする。この場合、右の曲がる車両は実際の交差点と同じように途切れなく流れていたが、他の 3 台の列が次々に交差点を通過した。



(a) Problem setting



(b) Speed profiles of agents

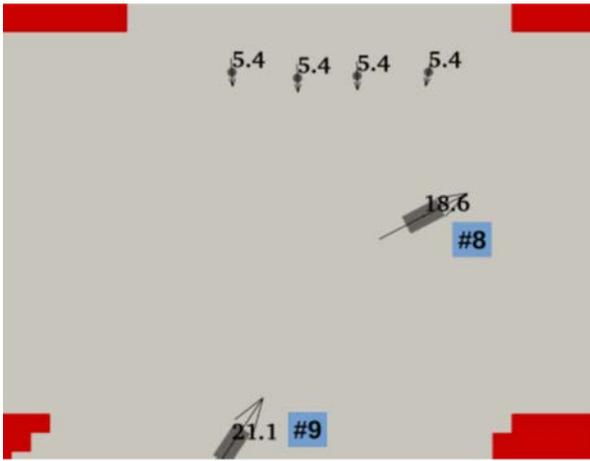
図 1.26. 歩行者と車の混合モデル相互作用実験のためのエージェントの問題設定とその結果の速度プロファイル。

### 1.3.5.2 車両と歩行者間の相互作用

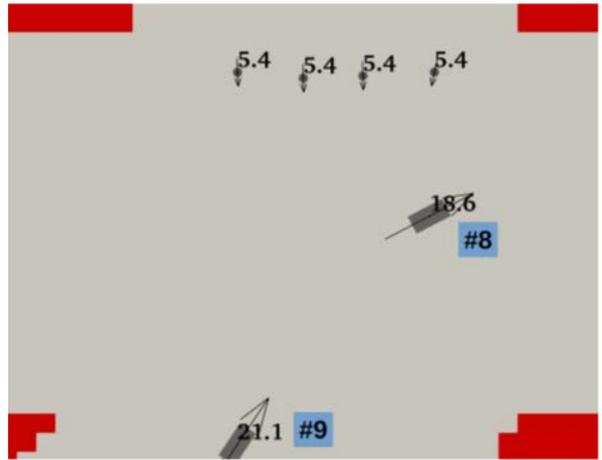
この数値実験の目的は、開発したエージェントベースのモデルが多数の歩行者の存在下で衝突を解決できることを実証することである。単純な幾何学的設定で配置された8人の歩行者のみを使用したため、自分の期待に基づいて得られた結果の質を簡単に評価できる。図 1.26 a に示すように、自由流速を生み出すために間隔を置いて配置された3台の車両が交差点の下側から入るように設定されている。緊急避難シナリオを模倣するために、歩行者エージェントが横断歩道を利用することを制限しなかった。8人の歩行者は、信号の無い交差点で3台の北に向かう右折車に出会うように、南向きにした。すべての歩行者エージェント (ID 0-7) は円で表され、すべての車両エージェント (ID 8-10) は長方形で表される。

得られたエージェントの速度プロファイルを図 1.26 b に示す。それらの軌道が多数の歩行者エージェントによって妨げられていても、車両エージェントは著しく滑らかな速度プロファイルを生成している。1.3.4 では、歩行者エージェントとの衝突が検出された時に、車両エージェントのルールとして減速して停止するように設定している。図 1.26 b に示すように、この規則は実際に各自動車エージェントをその速度がゼロになるまで減速させない。衝突の恐れがある状況で、車両エージェントは歩行者との衝突を検知する限り、式(1.9)に従ってブレーキを掛ける。その経路が明確になるとすぐに、それは自由流動条件下で再開する。これは式(1.9)があまりにも制限的ではないことを示す。図 1.27a から 1.27f は、各エージェントの場所と速度のスナップショットを示す。各エージェントに関連付けられている数字と矢印は、それぞれその速度と速度を示す。

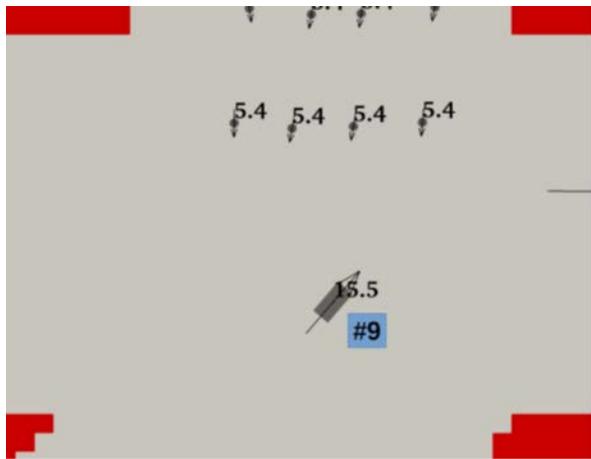
この簡単な例で実証されたように、開発したエージェントベースのモデルは、多くの歩行者と車両間の相互作用を伴う信号が無い交差点をシミュレートできる。今後の改善の可能性を明らかにするために、シミュレーションと実際の観察結果を比較する予定である。



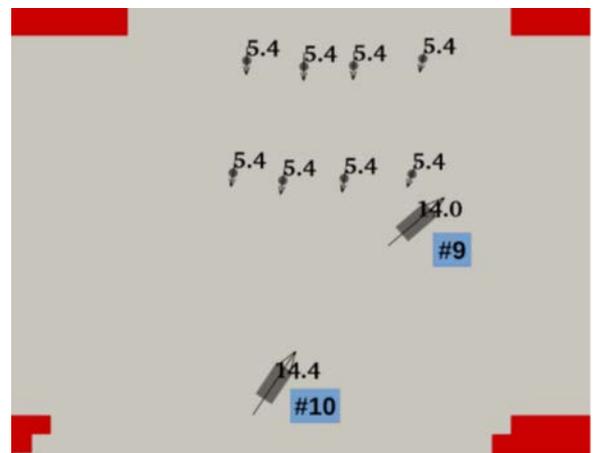
(a)  $t = 7.7$  s



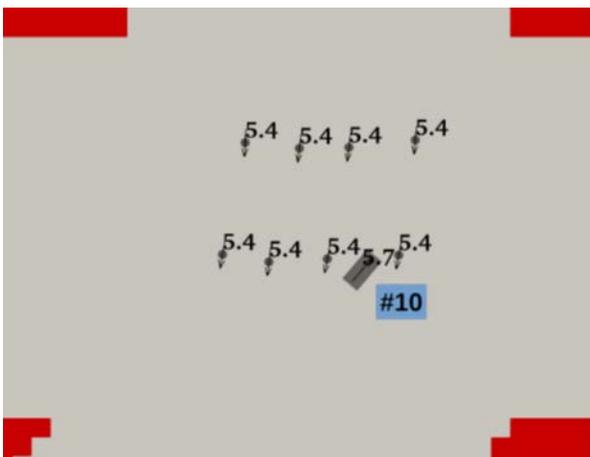
(b)  $t = 8.0$  s



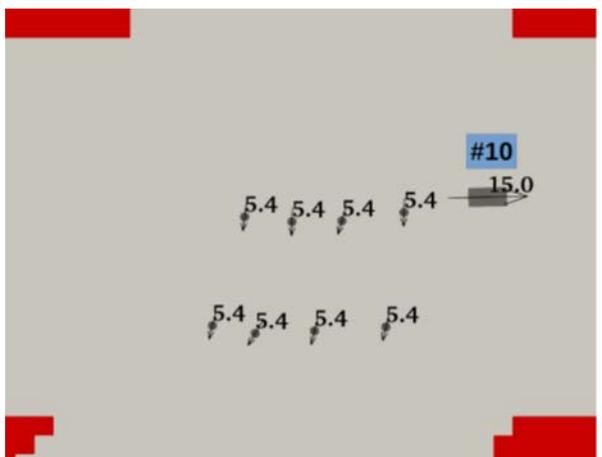
(c)  $t = 9.4$  s



(d)  $t = 11.2$  s



(e)  $t = 14.0$  s



(f)  $t = 16.6$  s

図 1.27. 車と歩行者の混合実験のスナップショット。各エージェントに関連付けられた数字と矢印は、それぞれ速度 (km/h) と速度を示す。

### 1.3.6 討議とまとめ

我々は、津波避難のような大量避難での応用をターゲットにして、信号が無い交差点における車両と車両間、及び車両と歩行者間の相互作用をシミュレートするために避難シミュレータを強化した。交差点での車両軌跡はBスプライン曲線で近似され、速度プロファイルは3次多項式を使用して近似される。軌道と速度プロファイルの両方を現地観測と比較検証している。衝突を簡単に解決するため、車両は軌道に制限され、そして最初に衝突点に到達する車両が優先される。さらに、歩行者がいる場合、車両は歩行者を優先する。車両は、衝突を判断する際に誤判断や不確実性を考慮に入れ、衝突を回避するために減速する。

いくつかの数値実験により、開発されたエージェントベースのモデルは、信号の無い交差点で車両と車両間、及び車両と歩行者間の相互作用を解決できることが実証している。文献に記載のあるゲーム理論モデルの定性的比較を行い、開発した自動車エージェントがより効率的に衝突を解決できることを示した。歩行者と車両の数値例は、このモデルがスムーズな車両応答と論理的な結果を生み出すことができることを示す。

### 参考文献

- [1] Alhajyaseen, W.K., Asano, M., Nakamura, H., Tan, D.M., Stochastic approach for modeling the effects of intersection geometry on turning vehicle paths, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.32, pp.179–192, 2013.
- [2] Alonso-Mora, J., Naegeli, T., Siegwart, R., Beardsley, P., Collision avoidance for aerial vehicles in multi-agent scenarios, *Autonomous Robots*, Vol.39(1), pp.101–121, June, 2015.
- [3] van den Berg, J., Guy, S.J., Lin, M., Manocha, D., Reciprocal n-body collision avoidance, Pradalier, C., Siegwart, R., Hirzinger, G. (eds.) *Robotics Research*, pp.3–19, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [4] de Campos, G.R., Falcone, P., Sjberg, J., Autonomous cooperative driving: A velocity based negotiation approach for intersection crossing, *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, pp. 1456–1461, Oct., 2013.
- [5] Colombo, A., Vecchio, D.D., Least restrictive supervisors for intersection collision avoidance: A scheduling approach, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.60(6), pp.1515–1527, June, 2015.
- [6] Dias, C., Iryo-Asano, M., Oguchi, T., Predicting optimal trajectory of left-turning vehicle at signalized intersection, *Transportation Research Procedia*, Vol.21, pp.240 – 250, 2017.
- [7] Doniec, A., Mandiau, R., Piechowiak, S., Espié, S., Anticipation based on constraint processing in a multi-agent context, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol.17(2), pp.339–361, Oct., 2008.
- [8] Doniec, A., Mandiau, R., Piechowiak, S., Espi, S., A behavioral multi-agent model for road traffic simulation, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21(8), pp.1443 – 1454, 2008.
- [9] Fu, Y., Li, C., Xia, B., Dong, W., Duan, Y., Xiong, L., A novel warning/avoidance algorithm for intersection collision based on dynamic bayesian networks, *2016 IEEE International Conference*

on Communications (ICC), pp. 1–6, May, 2016.

- [10] Hafner, M.R., Cunningham, D., Caminiti, L., Vecchio, D.D., Cooperative collision avoidance at intersections: Algorithms and experiments, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.14(3), pp.1162–1175, Sept., 2013.
- [11] Kim, D.G., Lee, Y., Washington, S., Choi, K., Modeling crash outcome probabilities at rural intersections, Application of hierarchical binomial logistic models, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.39(1), pp.125 – 134, 2007.
- [12] Mandiau, R., Champion, A., Auberlet, J.M., Espié, S., Kolski, C., Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation, *Applied Intelligence*, Vol.28(2), pp.121–138, Apr., 2008.
- [13] Melgar, L.E.A., Lalith, M., Hori, M., Ichimura, T., Tanaka, S., A scalable workbench for large urban area simulations, comprised of resources for behavioural models, interactions and dynamic environments, *PRIMA 2014( Principles and Practice of Multi-Agent Systems)*, pp.166–181, 2014.

## 1.4 橋梁ネットワークを対象とした都市モデルの自動構築モジュールの改良

### 1.4.1 概要

橋梁ネットワークはデジタル都市に欠かせない構成要素である。道路統計年報 2017 によれば、高速自動車国道から一般道までを合わせ全国には約 17 万、総延長 11,000km の橋梁が存在する。地震等災害による橋梁ネットワークの被害推定を行うためには、信頼性の高い数値モデルを自動構築できることが重要である。デジタル化された設計図を利用することで、信頼性の高いモデルを自動構築する技術が開発されつつあるが、比較的新しい橋梁以外はそもそもデジタル化された設計図が存在しないケース、あるいは実存するが入手困難なケースも多く、さらに古い橋梁に対しては設計図そのものがないものも多い。このため、データがないことを想定し何らかの仮定のもとで合理的に数値モデルを生成できることが求められる。

現在、統合地震シミュレータ (IES) には建築建物応答解析モジュールが導入されており、このモジュールでは GIS データと設計基準類を参考にしたアルゴリズムから、建物の数値モデルを自動構築する。橋梁モデルの自動構築では、この自動構築の流れをベースとしながらも新たな方法論を導入することで自動構築アルゴリズムを改良 (構築) し、モジュールを新たに作成する必要がある。そこで、当該モジュールのコード化に先立ち、まずは断片的なデータのみが利用できることを前提とした橋梁ネットワーク地震解析モデルの自動構築の方法論を考案した。

### 1.4.2 橋梁ネットワークを対象とした変換アルゴリズム

通常の方法論では、解析モデルを所与として断片的なデータからモデルパラメータを直接推測する。この方法では、データの質・量が増えた場合はより確実にモデルパラメータの推定精度が向上するものの、より先端的な解析モデルへの更新が困難という致命的な問題がある。考案した方法論では、データの質・量に合わせて適切な解析モデル選択も可能となる。勿論、断片的なデータの質・量が増えた場合、より適切な解析モデルに更新することも可能となる。これらを実現するため、断片的データから解析モデルを構築するのではなく、断片的データを「共通モデリングデータ」 (CMD、common modeling data) に変換するという IES の方法論を採用した。ここでは CMD を「橋梁 information」と称する。橋梁 information は橋梁の構造特性を推定あるいは表現するための普遍的な情報を指す。そこで、断片的データを information に、information から解析モデルに、という二段階の変換を行う (図 1.28)。

### 1.4.3 data と information の設計

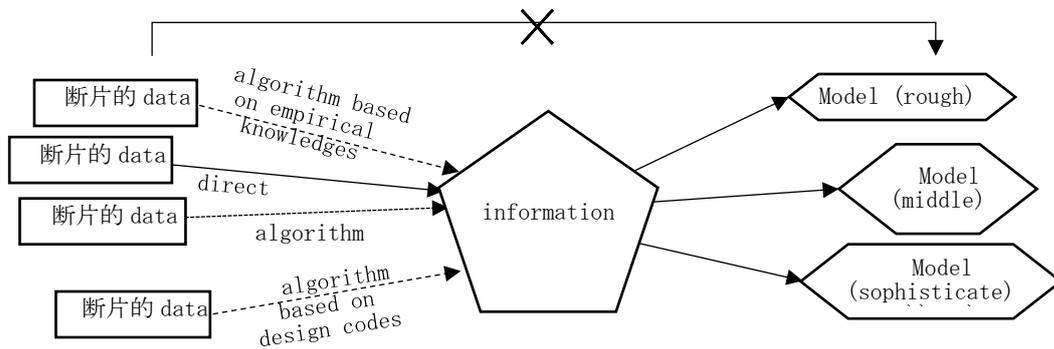


図 1. 28. 橋梁ネットワーク自動構築アルゴリズムの概要。

断片的データは多様である。主なデータには、対象橋梁に関する情報だけでなく、周辺地盤・地形情報や道路情報を含む。設計図は断片的データ群の中では質的に優れているが、これがない場合であっても他の多岐多様な情報を組み合わせ、これらを **information** に変換することで、モデリングは可能である。

ただし、質の高い断片的データが存在しない場合であっても、構築された解析モデルは、ある程度以上の品質を確保していることが要求される。この質を確保するためには、例えば耐力や固有周期といった応答への感度が高い構造特性に対して一定の精度を満足している必要がある。なお、このためには幾何形状、構造種別、竣工年がデータとして必須であり、これらの情報が得られていない場合には、何らかの信頼性評価指標をモデル情報として埋め込んでおくなどの配慮は欠かせない。

上記方法論では、当然ながら **information** の設計が重要である。断片的データと解析モデルは所与であり、多岐多様な断片的データと同様に多岐多様な解析モデルを繋ぐことが **information** の目的である。この目的を果たすための適切な設計が必要となる。橋梁モデリングにおいては「標準設計」が活用できるため、**information** はこれに準じて設計する。この「標準設計」は、道路区分（主要幹線道路・幹線道路・補助幹線道路・特例または暫定道路の別）、地域区分（都市部 A,B・地方部 C・D の別、積雪地か否か）、一般部（100m以下の橋梁）・橋梁部（100m以上の橋梁）の別によって一般的な幅員構成や上部構造断面を指定するものであるため、これらの断片的データに基づけば橋梁上部構造の適切な選択が可能となる。詳細なアルゴリズムは紙面の都合から割愛するが、上部構造が決定されたのち、種々の仮定のもと、支承や下部構造に関しては主に上部構造と支間長と建設年によって、また基礎構造に関しては主に地盤条件によっておおよその構造特性が決定される。**information** 決定のための各種アルゴリズムは、主に各年代の設計基準類やデザインデータ・デザインマニュアル類を適用する。

今後は同アルゴリズムに基づき、橋梁ネットワークの構築を試み、必要に応じ、あるいは断片的データに応じた改良を加える予定である。

### 1.4.4 橋梁モデル生成アルゴリズムの内容

上述の方法論に基づき構築した新たな橋梁モデル生成アルゴリズムについて、具体的な内容を概説する。まず、デジタル道路データ<sup>[7]</sup>の道路種別に基づき「橋・高架」属性に対応する箇所を抽出、橋長を決定する。デジタル道路データから道路標高を算出し、また地表面標高を DEM データ<sup>[8]</sup>から取得する

ことで橋脚高を設定する。これから、橋種および支間を仮定する。上部構造が決定されたのち、種々の仮定のもと、支承や下部構造に関しては主に上部構造と支間長と建設年によって、また基礎構造に関しては主に地盤条件によっておおよその構造特性が決定される。information 決定のための各種アルゴリズムは、主に各年代の設計基準類やデザインデータ・デザインマニュアル類(例えば91101)を適用することになる。

以上の流れの概要を、方法論の概念として抽象化した図 1.28 に即して示したものが図 1.29 であり、実際のコード化のためのフローとして示したものが図 1.30 である。コードにおいては図の矢印に対応する部分にそれぞれ関数や条件式が適用される。当然ながら、実データが存在する場合はこれを Information の入力値として直接利用できるものとする。

今年度は、上述のように橋梁モデルの自動構築のための方法論を構築し、橋梁ネットワークを対象とした都市モデルの自動構築モジュールのプログラム化を進めた。プログラム化については IES への導入までには至っていないが、1) 考案した上述の自動構築アルゴリズムの具体的なコード化を進めながら(未完成で継続中)、2) IES に導入するための3次元動的応答解析コード(サブプログラム)の作成を別途行った。

今後は1)を完了し、IESに導入した上で橋梁ネットワークの構築を実施し、必要に応じ、あるいは断片的データに応じた改良を加える予定である。

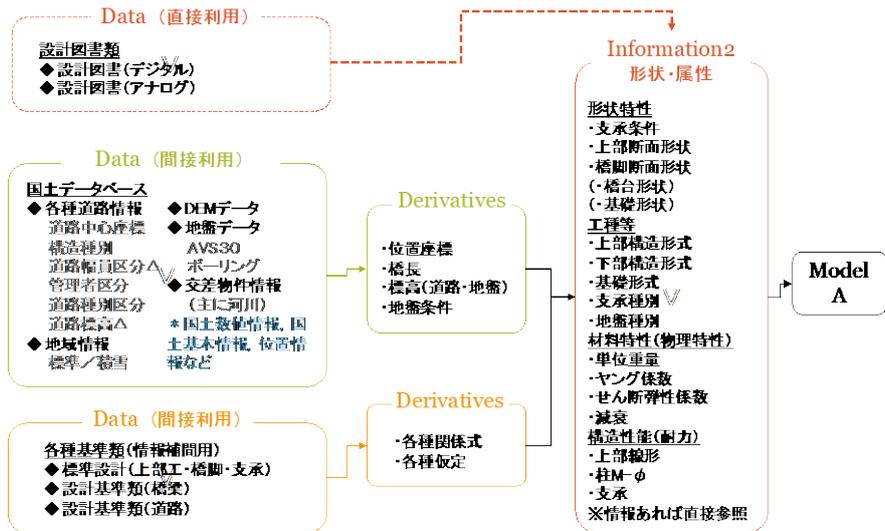


図 1.29. 橋梁ネットワーク自動構築アルゴリズム (図 1.30) の具体内容。

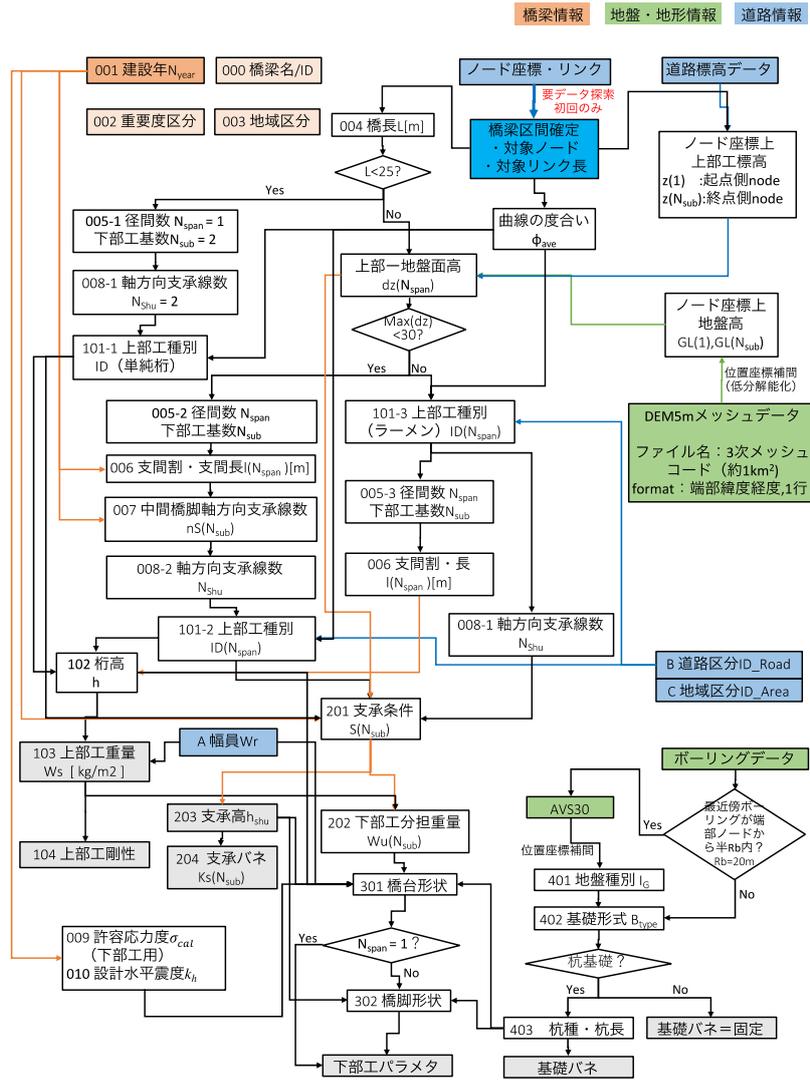


図 1.30. 橋梁ネットワーク自動構築の主な流れ。

参考文献

[1] 国土交通省, 道路統計年報 2017, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2017tokei-nen.html> (参照 2019年4月10日)

[2] (社)全日本建設技術協会, 建設省制定土木構造物標準設計第6~12巻(橋台・橋脚)の手引き, 1985.

[3] (社)全日本建設技術協会, 建設省制定土木構造物標準設計第20巻解説書(プレテンション方式PC単純Tげた橋), 1991.

[4] (社)全日本建設技術協会, 建設省制定土木構造物標準設計第23~27巻(単純プレートガーダー橋)の手引き, 1994.

[5] (社)全日本建設技術協会, 建設省制定土木構造物標準設計第23~27巻数値表その1~その3(単純プレートガーダー橋), 1994.

[6] (社)日本道路協会, 道路構造令の解説と運用, 2015.

[7] (財)日本デジタル道路地図協会, デジタル道路地図データベース (Digital Road Map)

- [8] 国土交通省国土地理院, 基盤地図情報 (5m メッシュ),  
<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem> (参照 2018年9月1日)
- [9] (社)日本橋梁建設協会, デザインデータブック, 2016.
- [10] (社)日本道路協会, 道路橋支承標準設計 (ゴム支承・ころがり支承編), 1993.

## ②全球モデルを視野に入れた超大規模解析モデル構築手法の開発

列島規模の数値解析のボトルネックは境界条件の設定であり、これを解決するために地球全体を対象とした全球モデルの数値解析が必要である。GAMERA を使って解析する全球モデルに対し、その構築手法を継続して開発している（全球モデルは、構想していたテラモデル自由度を超える超大規模解析モデルとなる）。具体的には、大規模かつ複雑なモデルを構築できるように、手法を改良するとともに、複雑なモデルを構築することで、その有効性を示した。この内容を「大規模・複雑な有限要素モデル構築手法の開発」としてまとめる。

### 概要

全球モデルを視野に入れた数値解析を高精度で実現するためには、地球の複雑形状と非均質物性を反映した超大規模有限要素モデルの作成が必要となる。そこで本研究では、大規模かつ複雑な有限要素モデルを構築できるよう、昨年度までに開発したメッシュ生成手法を改良し、数値解析例を通してその有効性を示した。本研究は[1]において論文発表されている。

### 2.1 はじめに

全球モデルの地震学・固体地球分野の解析において信頼性の高い有限要素シミュレーションを実現するために解決すべき課題の一つとして、幾何形状を忠実に再現した大規模メッシュの生成が挙げられる。複雑形状・複数物性からなる大規模かつ高品質なメッシュをロバストに作成することはいまだ困難であり、手法の開発が各分野で進められている。例えば筆者らは、複雑形状・複数物性からなるメッシュのロバストな生成手法のプロトタイプとして、octree 構造を用いて設置した各構造格子を要素分割することで大域的なメッシュ生成を高速に行うことができる手法[2][3]を開発してきた。しかしながら、この手法で生成したメッシュはわずかな形状誤差を含み、ひずみや応力など解析結果における特徴量が局所的に集中し、これらの数値解がメッシュ分割に対して収束しなくなる可能性がある。そこで、高い精度が求められるシミュレーションへの適用のためには、幾何的形狀近似の修正が課題として残されている。

幾何修正は数値解析上で低品質となる要素が生成されないことを担保しながら行う必要がある。そのため、境界節点のスージングのみの単純な幾何形状修正を行うと、スージングの反復を繰り返すうちに低品質な要素が生じ、要素品質保証の制約から境界節点が動かさなくなることが多い。その際はトポロジーの変更が効果的であり、トポロジー最適化とスージングの両者を組み合わせるとより品質の高いメッシュが生成されるという報告がされている[4][5]。

本研究では従来手法に含まれる幾何形状近似を修正するメッシュ最適化手法を開発することで、複数物性を有する入力幾何形状に忠実なメッシュのロバストな生成手法を開発した。メッシュ最適化手法は既往研究にならいスージングとトポロジー最適化を組み合わせで開発した。スージングによりメッシュの幾何的表面形状を修正しながら、低品質要素により節点が動かなくなるという状況をトポロジー変更により解決した。スージングとトポロジー最適化を様々な小領域で繰り返し行う局所的なものとするすることで、要素品質を保証しながらの着実な形状修正を図った。開発手法は局所的な操作を組み合わせで構築されており、将来的には並列化可能な設計となっている。そのため、今後の拡張により大規模なモデルへの適用も可能となると期待される。

## 2.2 手法

本研究で開発したメッシュモデル生成手法の概要を図 2.1 に示す。前半の初期メッシュは octree-based なメッシュ生成手法[2][3]を用いて生成する。ここでは octree によりモデル化領域をマルチスケールな立方体領域に分割し、各立方体を四面体に分割することでメッシュを生成する。わずかな幾何形状近似を許すことで、複数物性の境界面をロバストに分割し、さらに生成される四面体の面及び節点の整合性及び品質を保証している。続くメッシュ最適化ではスムージングとトポロジー最適化を繰り返すことで、この幾何形状近似を減らす。内部節点のスムージングとトポロジー変更により要素品質が悪くなることを防ぎつつ、境界節点のスムージングによりメッシュの幾何的形狀を修正する。スムージング・トポロジー最適化ともに local な操作を小領域ごとに繰り返す設計とすることで、予め指定された閾値を超えないよう要素品質を保証しながらの着実な幾何形状修正を可能としている。以下、octree-based なメッシュ生成手法の概要、及び、メッシュ最適化手法の順にアルゴリズムを説明する。

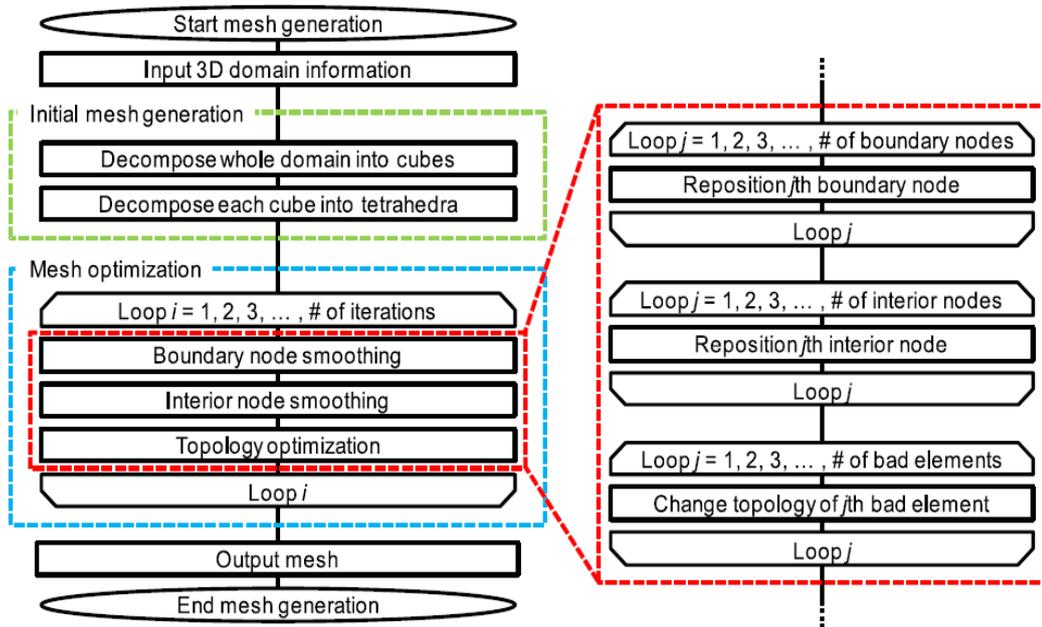


図 2.1. Flowchart of developed meshing method.

### 2.2.1 Octree-based なメッシュ生成手法の概要

各物性閉領域の表面情報を離散化した有向三角形パッチ群を入力として、整合した四面体一次メッシュを全自動・並列かつロバストに生成する。ここでは、1) 直交する Octree 構造を用いてモデル化領域をマルチスケールな立方体領域に分割し、2) 各立方体領域を四面体に分割する。前者を「立方体生成」、後者を「立方体分割」と名づけ、これら 2 ステップを分けて説明する。立方体生成においては各物性閉領域を定義している有向三角形パッチ群を入力として、直交 Octree 構造を用いてモデル化領域(図 2.2a)をマルチスケールな立方体領域に再帰分割する(図 2.2b)。領域境界面の詳細形状を詳細に捉えるため、領域境界部には細かい立方体を設置する一方、生成メッシュの自由度を必要最低限とするため領域内部には粗い立方体を設置する。最短となる、内部に領域境界面を有する境界立方体の一辺長を以下では分解能(ds)と呼ぶ。また隣接する立方体間の急激な階層の開きは最終的に生成される四面体品質の低下、解析

精度悪化に直結するので、面または辺を共有する立方体同士の階層差を 1 以下に制限する。各領域内には解析に要求される四面体サイズに合わせたサイズの立方体を設置する。また各節点には、自身がどの入力物性領域に属しているかという物性情報を割り当てる。

立方体分割設置した各立方体を、節点の物性情報を入力として探索表を用いて四面体に分割する(図 2. 3a, 2. 3b)。立方体分割探索表を、構造格子内に複数物性の境界面を定義できる **multiple material marching cubes** 法[6]を用いて構築することで、複数物性境界を解像したメッシュ生成を可能としている。さらに、隣接立方体間の面と節点が必ず整合するような立方体分割を探索表に格納することで、各立方体の独立した分割を実現している。

以上の手順を踏むことで、複雑形状・複数物性を有する整合した四面体一次要素メッシュがロバストに生成される。立方体生成と立方体分割に関わる全ての操作を一意なものとすることでロバスト性を確保している。本節で説明したメッシュ生成手法は最終的に生成されるメッシュは最大で分解能の半分の大きさの幾何的形狀近似を含む。これは、内部に物性領域境界を有する境界立方体を分割し領域境界面を定義する際、新規に生成する境界節点を空間格子点に限定していることに由来する(図 2. 4)。この近似は、生成されるメッシュの面及び節点の整合性を確保し四面体要素の品質を保証しているものの、有限要素解析における非収束や特徴量の局所集中につながるため望ましいものではない。

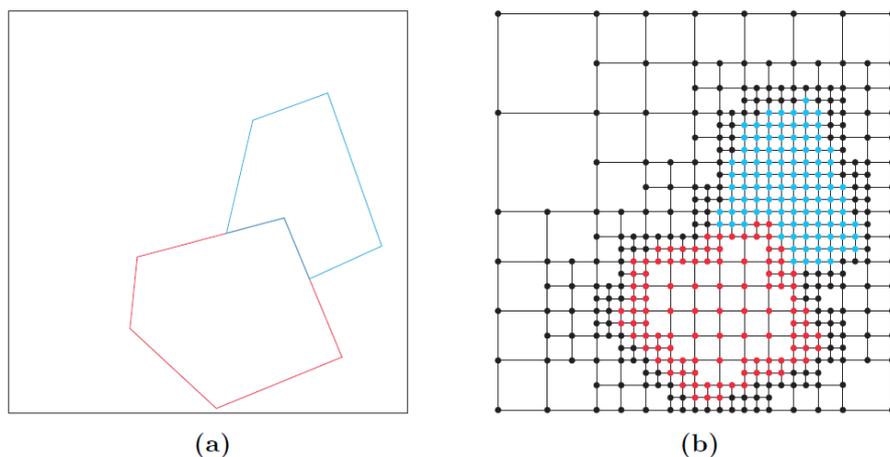


図 2. 2. 立方体生成。



図 2. 3. 境界立方体分割。

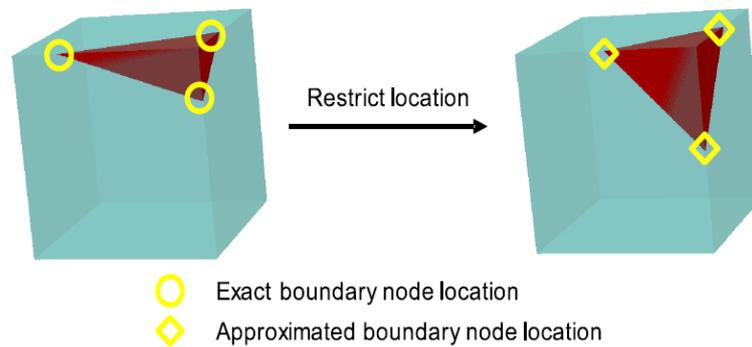


図 2. 4. Geometrical approximation.

## 2.2.2 メッシュ最適化

メッシュ最適化はメッシュ情報の修正内容により、「トポロジー最適化」と「スムージング」に大別できる。トポロジー最適化は節点の位置を移動せずメッシュのトポロジー(節点-要素の接続情報)のみを変更するものであり、スムージングはメッシュの節点の位置のみを変更するものである。幾何形状近似の修正には、節点の位置を変更するスムージングを適用できるが、スムージングの反復を繰り返すうちに低品質な要素が原因で節点がそれ以上動かなくなるという状況に陥ることがある。特に境界節点を有する要素が低品質となる傾向にあり、その中でも四面体の四つの節点が全て境界節点からなる要素はスムージングによる品質改善が不可能となる場合が多い。その際はトポロジーの変更が効果的であり、一般的にトポロジー最適化とスムージングの両者を組み合わせるとより品質の高いメッシュが生成されるという報告がされている[4][5]。

今回のメッシュ最適化手法は、スムージングにトポロジー最適化を組み合わせで開発した。節点の位置および領域内部の四面体のトポロジーを変更する一方、領域境界面のトポロジーは一切変更しないため、領域境界部のメッシュの細かさを保存するのが特長である。スムージングによりメッシュの幾何的表面形状を修正しながら、低品質要素により節点が動かなくなるという状況をトポロジー変更により解決している。スムージングとトポロジー最適化はどちらも局所的なものとなっており、各小領域で繰り返す設計となっている。計算量の少ない局所的な操作とすることで、予め指定した要素品質閾値を侵害しないことを確認しながらの着実な形状改善を可能としている。さらに、局所的な操作は並列化に適しており、将来、大規模メッシュモデルにも適用できるよう将来的な高速化の可能性を残している。以下、メッシュ最適化に必要な準備を説明したのち、メッシュ最適化の繰り返し単位を構成する境界節点のスムージング、内部節点のスムージング、低品質要素のトポロジー変更の3ステップを順に説明する。

### 2.2.2.1 境界節点のスムージング

この操作においては、境界節点に対してラプラシアンスムージングをした後、境界節点を境界面に移動させる。

まず境界節点のラプラシアンスムージングについて説明する。境界節点の移動による要素のゆがみを緩和すべく境界節点の位置を改善する。この操作は最適化の繰り返しの中で境界節点同士が近くに寄っ

てきてしまった際、境界節点がそれ以上動けなくなることを防ぐために必要な操作となる。新位置の決定方法として、実装及び計算量の観点からラプラシアンスムージングを採用した。ただし、新位置を単純に境界節点が接続する全ての節点の算術平均位置としてしまうと、接続する内部節点に引きずられて境界面から離れる方向に移動してしまう可能性がある。この現象は特に空隙部との境界節点で顕著となる(図 2.5)。そこで、新位置は接続する境界節点全ての算術平均位置とした。なお、ラプラシアンスムージングの短所である裏返った四面体や低品質な四面体の生成可能性は、逐一生成されるかを確認することで防止した。このような四面体が生成される場合は、新位置への移動幅を半分にして再度移動を試みるようにした。なお、この境界節点ラプラシアンスムージングは必ずしも境界節点を境界面方向に働くとは限らないため、メッシュ最適化の繰り返しの前半部分のみで行うこととなる。

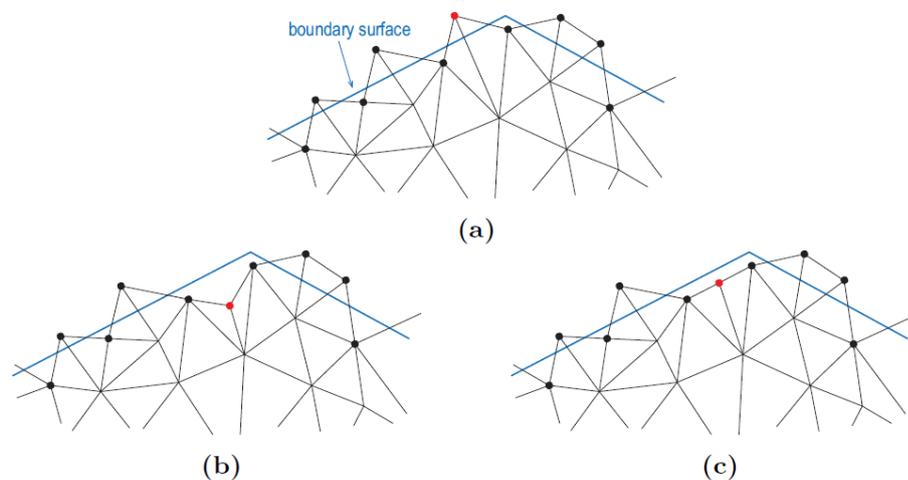


図 2.5. 空隙境界部のメッシュ例。小丸が境界接点を表す。(a)の赤い小丸で表されている境界節点をラプラシアンスムージングすることを考える。単純なラプラシアンスムージングだと内部節点に引っ張られ(b)となるが、本手法では(c)と境界面に近い位置で留まる。

次に、ラプラシアンスムージングした境界節点を境界面方向に移動させる。新しい節点の位置は、現在の位置から乗るべき境界面に下ろした垂線の足とした(図 2.6)。しかしながら上記では周囲の四面体に裏返りが生じる場合や要素形状が極端に扁平になる場合がある。この原因として、近傍の境界節点と乗るべき境界面が同一であるため、移動方向に他の境界節点が存在し要素品質の制約が働くことが考えられる。そこで移動ベクトルに摂動を加え、移動方向に存在する他の境界節点を避けて境界面方向に移動できるようにした。摂動ベクトルは乱数により決定し、移動ベクトルの半分の長さをもつように調整した。移動ベクトルと摂動ベクトルの長さの比は常に 2:1 のため、新位置は現在の位置よりも必ず境界面に近くなるようになっている。

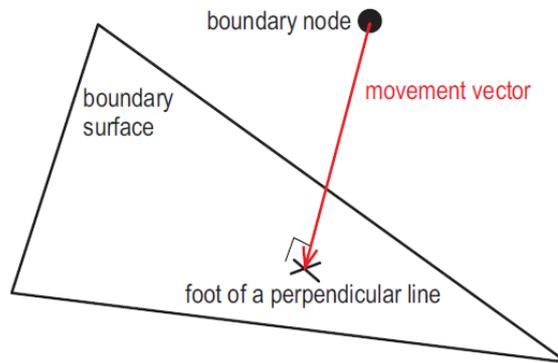


図 2.6. 移動ベクトル。

### 2.2.2.2 内部節点のスムージング

このステップでは内部節点の位置を改善する。この操作は最適化の繰り返しの中で境界節点が境界面に移動していくことにより生じた境界近傍要素のゆがみを領域全体に緩和することを目的としている。内部節点の位置を改善し境界近傍要素のゆがみを和らげることで、境界節点のさらなる境界面への移動を可能とすることを意図している。実装及び計算量の観点から内部節点のスムージングにはラプラシアンスムージングを採用した。新位置は接続する節点全ての算術平均位置とし、新位置に移動した際に裏返った要素や低品質な要素が生成される場合は移動幅を半分として再度移動を試みる。

### 2.2.2.3 低品質要素のトポロジー変更

最適化の繰り返しの中で、要素品質が閾値程度まで低下してしまい、接続する節点がそれ以上境界面に向かって移動できなくなるという現象が起こる。これは境界節点を境界面に寄せている境界近傍で特に顕著に生じるため、境界節点の境界面への移動ができず幾何的形狀近似の妨げとなる。この場合スムージングを試みても要素品質の制限から節点はほぼ移動できないため、トポロジーの変更を行うことが効果的である。トポロジーの変更は、より多くの要素に関して同時に行う方が変更方法の自由度が高くなりよい結果をもたらす傾向にある。そこでいくらかの要素のトポロジーをまとめて変更するようアルゴリズムを設計した。まず、低品質要素の四つの節点のうち、境界面にのっていない内部節点に着目する。境界節点に着目しないのは、物性領域境界面のトポロジーを保存するためである。続いて、その内部節点が接続する四面体をすべて取り出し多面体を作り、表面三角形を抽出する(図 2.7)。この操作により、着目していた内部節点、及び、それにつながる四面体は全て消失することとなる。最後に、表面三角形を維持したまま拘束 Delaunay 四面体分割により多面体を四面体に分割する。ここで新節点が生産される場合は多面体内部に限られる。ただし、新しく生成された四面体の中に 4 境界節点からなる要素や低品質要素が存在する場合はトポロジーの変更は行わない。これらの手順の長所は、物性領域間の境界面を保存すること、及び複数の四面体のトポロジーを同時に変更しているため四面体の品質が改善されやすいということである。

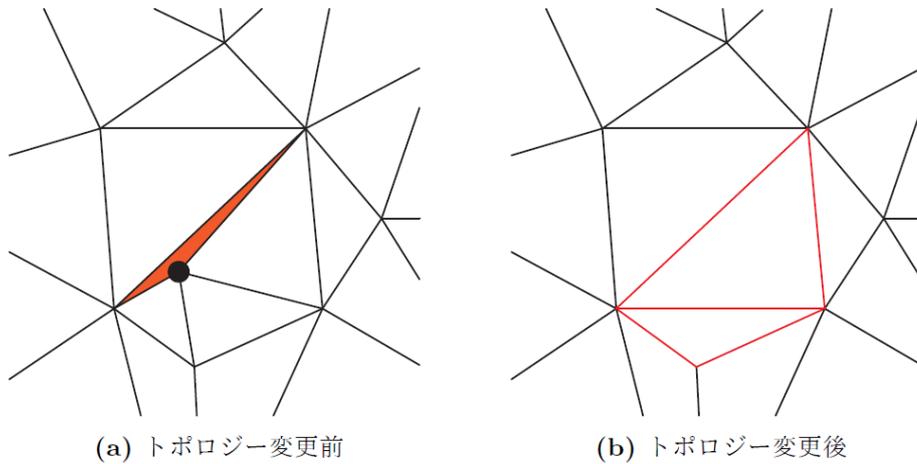
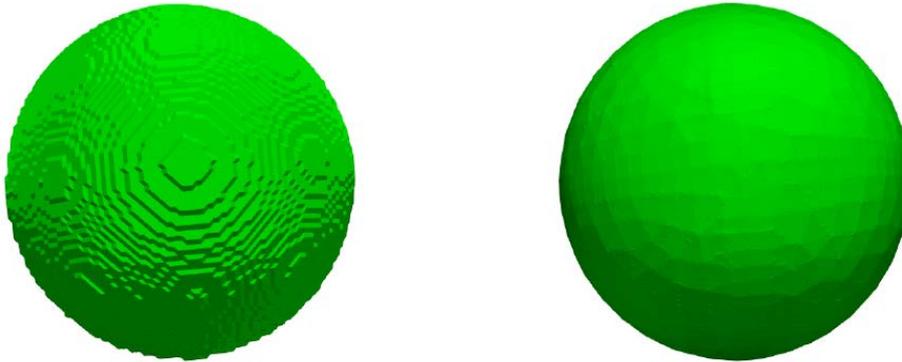


図 2.7. 低品質要素トポロジー変更。黒丸で示された内部節点まわりでトポロジーを変更する。

### 2.3 性能計測

前節で説明したメッシュ最適化手法の性能測定を行った。初期メッシュモデル生成手法では曲面において幾何形状近似が顕著となることを考慮し、測定には球を対象とした。ここでは直径 8 の球を分解能 0.1 で分割した初期メッシュモデルを図 2.8a に示す。このモデルの四面体一次要素節点数 90,813 要素数 452,280 自由度 272,439 であり境界節点数は 30,070 である。幾何形状近似が顕著に現れていることが見て取れる。一方、メッシュ最適化後のモデルは図 2.8b であり、表面の凹凸が緩和され滑らかな表面に近づいていることがわかる。なおこの最適化では許容される四面体アスペクト比の最大値を 30 と設定し、節点スムージングと低品質要素トポロジー変更からなるループを 50 回繰り返した。境界節点のラプラシアンスムージングは反復回数 25 回まで実施しそれ以降は行わなかった。図 2.9 は境界節点と境界面の距離の最大値及び平均値を反復回数に対してプロットした図である。反復回数 0 で表されるメッシュ最適化前は、距離の最大値が  $4.96 \times 10^{-2}$  とおおよそ分解能 0.1 の半分の大きさとなっており、平均値は  $1.67 \times 10^{-2}$  である。反復回数 25 回までは境界節点と境界面の距離が増加しているところもあるが、境界節点のラプラシアンスムージングを行わない反復回数 26 回以降は境界節点と境界面の距離は単調に減少しており、反復 50 回終了後は距離の最大値及び平均値共に十分小さくなっている。反復回数 38 回以降は最大値  $4.25 \times 10^{-15}$ 、平均値  $1.9 \times 10^{-16}$  でほぼ一定となっており収束していることも確認できる。メッシュモデル内の要素のアスペクト比の累積相対度数分布をプロットしたものが図 2.10 である。最適化前メッシュモデルのアスペクト比最大値は 4.87 であった一方、最適化後メッシュモデルのアスペクト比最大値は 30 であった。アスペクト比の許容値 30 の範囲内で節点が移動したことがうかがえる。



(a) メッシュ最適化前

(b) メッシュ最適化後

図 2.8. 球モデルメッシュ最適化 (分解能 0.1)。

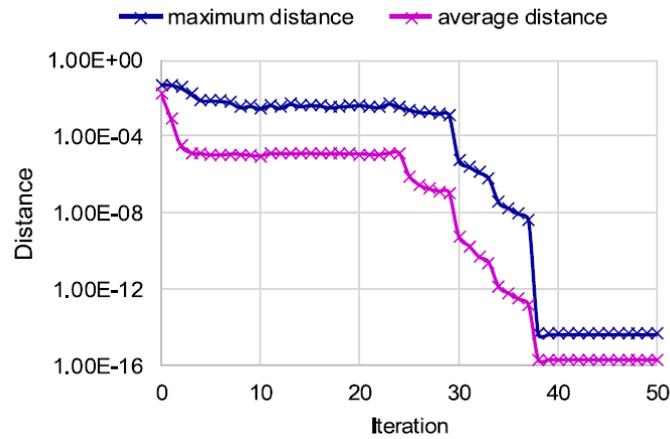


図 2.9. 反復回数に対する境界節点と境界面の距離の最大値及び平均値。

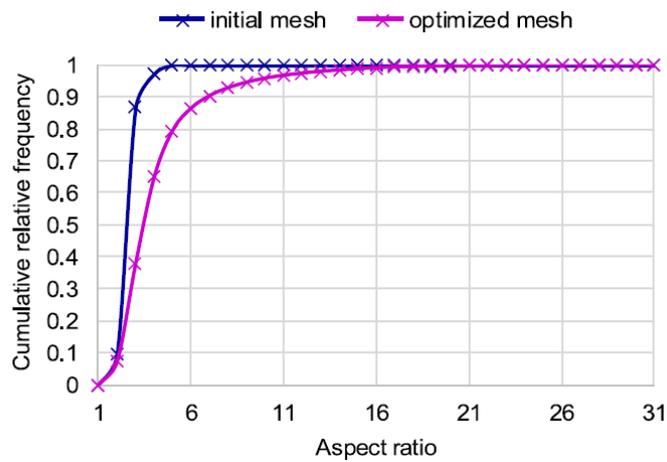


図 2.10. メッシュ最適化によるアスペクト比分布の変化。

## 2.4 適用例

本研究で開発したメッシュ生成は全球モデルといった地震学・固体地球の分野だけでなく、ものづくりなどの工学用途、さらには生体シミュレーションを通じた医用生体工学分野への適用も可能であると期待される。ここではメッシュ生成例として、生体シミュレーションの一種である高位脛骨骨切り術(HTO手術)の数値モデルを生成した。HTO手術とはO脚変形のために大腿内側に偏った過度な荷重を大腿外側にも分散させるための手術であり、脛骨の上部を楔状に切り抜きそこに人口骨を挿入し金属で固定するという術式をとる。侵襲の少ないHTO手術の実現のためは、応力集中の有無など骨に加わる応力分布の定量的評価を行うことが有効であると考えられている。そこで今回はメッシュ最適化前後のHTO術後脛骨メッシュを作成し静的線形弾性解析を行い、応力分布比較により開発したメッシュ生成手法の妥当性を検証した。

成人男性の右脚の脛骨形状モデル[7][8]を、分解能0.05cmでモデル生成したところ、初期メッシュモデル生成に157秒、メッシュ最適化に7,947秒を要し、四面体一次要素節点数1,073,949要素数5,459,851自由度3,221,847のモデルが生成された(図2.11)。用いた計算機環境は、初期メッシュモデル生成にSGI UV300 64コア、メッシュ最適化に同計算機1コアである。生成されたメッシュの表面が滑らかとなっていることが見て取れる。

続いて、初期メッシュと最適化後のメッシュを用いて静的線形弾性構造解析を行った。ここでは脛骨下半分節点を固定した状態で、脛骨上面に下方向圧力を加えた。メッシュ最適化前後の最小主応力分布を比較したものが図2.12である。メッシュ最適化前は応力分布に凹凸がみられる一方、最適化後のメッシュでは滑らかな応力分布となっていることが確認できた。本研究で開発したメッシュ最適化手法は応力の局所集中を解消し、メッシュ細分化による数値解析の品質保証を可能とすることが示唆された。なお、今回は簡単のため脛骨内部の物性値を一様として解析を行ったが、開発したメッシュ生成手法では複数物性のモデル作成が可能であり、骨内部の物性分布の不均一性を考慮した解析や、大腿骨や尺骨をまとめた解析も可能であると考えられる。

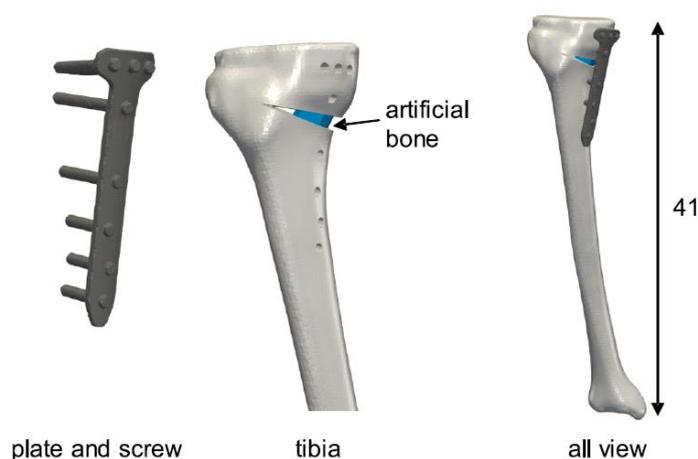


図2.11. 最適化後HTO手術後脛骨メッシュモデル(cm)。

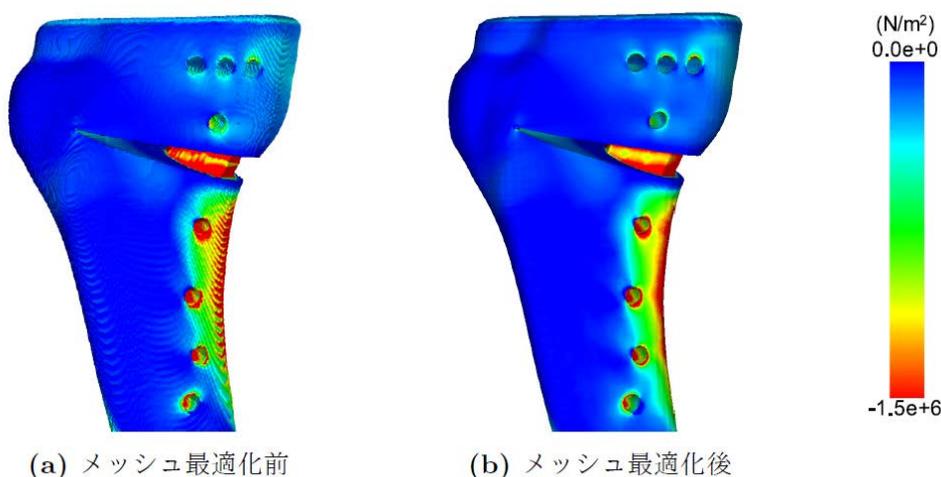


図 2.12. メッシュ最適化前後の脛骨構造解析最小主応力分布比較。

## 2.5 おわりに

本研究では従来手法の課題であった幾何的形狀近似を修正するメッシュ最適化手法の開発により、複雑形状・複数物性を有する高品質メッシュのロバストな生成手法を構築した。局所的なスムージングとトポロジー最適化を繰り返すことで、要素品質を保証しながらの着実な幾何形状修正を実現した。球モデルを用いて性能を測定したところ、確かに形状近似が修正されていることが確かめられた。さらにメッシュ最適化前後の脛骨モデルを用いた構造解析結果を比較し、メッシュ最適化により数値解析結果の品質が改善されることを確認した。

現状のメッシュ最適化手法は、要素数  $O(10^7)$  の最適化に日単位の時間がかかる速度となっている。数時間で数十億自由度の初期メッシュが生成可能となっていることを踏まえると、今後メッシュ最適化を高速化することで大規模な全球モデルシミュレーション用のメッシュ生成が可能になると期待される。

## 参考文献

- [1] K. Katsushima, K. Fujita, T. Ichimura, M. Hori and L. Maddeggedara, Development of Octree-Based High-Quality Mesh Generation Method for Biomedical Simulation, Computational Science – ICCS 2018. Lecture Notes in Computer Science.
- [2] K. Fujita, K. Katsushima, T. Ichimura, M. Hori, and M. Lalith, Octree-based Multiple-material Parallel Unstructured Mesh Generation Method for Seismic Response Analysis of Soil-Structure Systems. Procedia Computer Science, vol.80, pp.1624-1634, 2016.
- [3] K. Fujita, K. Katsushima, T. Ichimura, M. Horikoshi, K. Nakajima, M. Hori, and Lalith Maddeggedara, Wave Propagation Simulation of Complex Multi-Material Problems with Fast Low-Order Unstructured Finite-Element Meshing and Analysis, Proceedings of International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region, 2017.
- [4] L. A. Freitag and C. Ollivier-Gooch, Tetrahedral mesh improvement using swapping and smoothing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.40(21), pp.3979-4002,

1997.

- [5] B. M. Klingner and J. B. Shewchuk, Aggressive tetrahedral mesh improvement, Proceedings of the 16th international meshing roundtable, pp. 3-23, 2007.
- [6] Z. Wu and J. M. Sullivan, Multiple material marching cubes algorithm, International Journal of Numerical Methods of Engineering, vol.58(2), pp.189-207, 2003.
- [7] GrabCAD, Tibia TOMOFIX Plate for HTO, <https://grabcad.com/>.
- [8] GrabCAD, Design of integrated Implant for tibial bone, <https://grabcad.com/>.

### ③先端都市情報の社会科学シミュレーションの利活用方法と実装の検討

#### 3.1 全体概要

本研究ではポスト京における社会科学のシミュレーションの支援と発展、高度化を実現するために、位置情報を持つマイクロな都市空間情報（マイクロジオデータ）を収集するとともに、既存の統計や GIS データも収集し、それらを組み合わせることで「人」、「物」、「金」の分布と動きを把握出来るデータワールドの実現を目指している。今年度は様々なマイクロジオデータ、既存統計や各種 GIS データの収集を引き続き実施するとともに、それらを組み合わせ整備した新しいマイクロジオデータや、人や資金（企業間取引）の動きに関するデータを収集し、社会科学シミュレーションに利用可能なデータを整備した。

特に今年度大きく進んだ内容としては図 3.1 に示す 3 つの内容が挙げられる。①地震・津波災害時の経済活動に関する数値解析を行うための本社間取引ビッグデータを用いた事業所間取引の推定データの開発、②携帯電話の移動履歴のビッグデータを用いた人の流れの推定データの開発・整備（京阪神エリア）、③サブ課題 A・B 連携の推進（分担機関に建物データなどの先端都市情報を提供することで分担機関と連携し、具体的な利活用方法を実装する。以下、A B 連携の推進と記載する。）である。

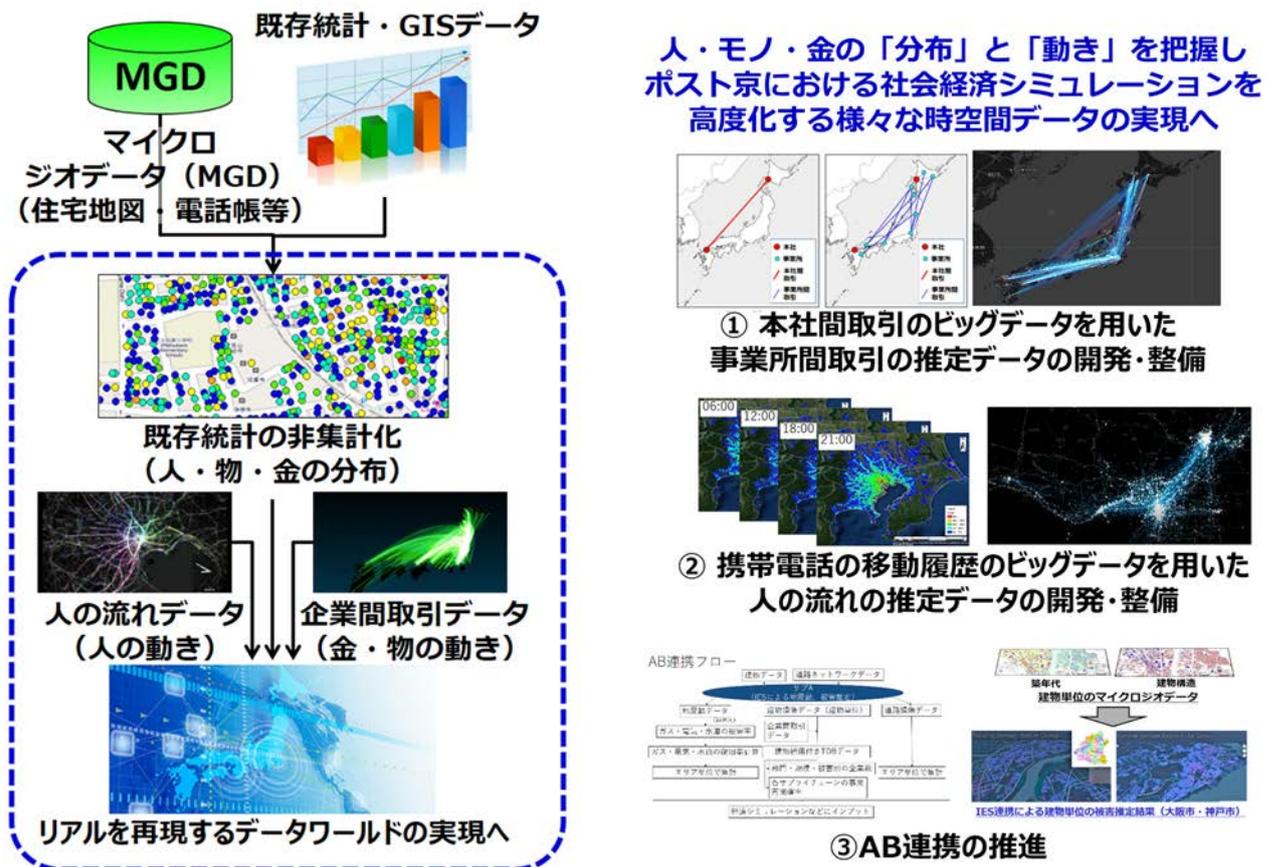


図 3.1. 今年度の実施内容の概要。

#### 3.2 ①本社間取引のビッグデータを用いた事業所間取引の推定データの開発・整備

##### 3.2.1 概要

これまで地震災害を対象とした経済的影響を評価する多くの研究において経済産業省が整備している

地域間産業連関表が用いられてきた。しかしながら、地域間産業連関表は全国を9地域に分割し、それら9地域間の統計表であるため、空間解像度がより高い、例えば市区町村間単位や企業間単位といったミクロスケールでの経済的な分析への活用が困難であるという課題がある。また産業連関表の作成には、物流センサスなどの12省庁に及ぶ統計データを用いて作成しているため、データ更新の作業コストという面でも調査してから公表されるまで5年の時間を有するという課題があり、2010年に2005年に実施された地域間産業連関表が公開されて以来、データの更新が行われていない。

一方近年では、全国の住宅地図や携帯電話の移動履歴データを代表とする様々なマイクロデータを活用した経済分析も可能になりつつあるため、時空間的によりミクロな単位で利用可能な地域間産業連関表が求められている。また近年では企業の信用調査目的で整備されている企業間取引データ（株式会社帝国データバンク）を用いることで企業間の取引情報を把握することができる。企業間取引データは企業間の資本移動を企業単位で高精細に把握することが出来る。しかし、同データに収録された取引は、あくまでも受注および発注企業による本社間取引に関する情報である。実際の金や物の流れは本社間だけでなく、支店・営業所や工場などの生産施設からも発生している。図3.2は企業間取引データから得られる本社間取引データ（2016年）と地域間産業連関表（2005年）でそれぞれ作成した産業間（産業A～L：本研究における産業（部門）は表3.1を参照）の相関係数行列である。この結果からも多くの産業間（A～L）において相関が0.5を下回っており本社間取引だけでは地域間の産業連関を十分に説明できない事が分かる。そこで本研究では、本社間に集計された企業間取引データを事業所データと産業連関表を用いて事業所間の取引を推定し、ミクロな取引を把握可能なデータ整備を目的とする。

### 3.2.2 使用データ

#### 3.2.2.1 本社データ

株式会社帝国データバンク提供の2015年の企業の本社情報データ（約165万件収録）を用いた。同データは日本の全法人企業の約4割をカバーしている日本で最も大規模な企業データの1つである。同データは企業ID、資本金、従業員数、売上高などが収録されており、毎年継続的に調査・更新が行われている。

#### 3.2.2.2 事業所データ

株式会社帝国データバンク提供の2016年3月時点の本社に属する事業所データを用いた。約58万件の事業所データであり、企業コードにより本社への紐付けが可能である。同データは本社の企業コード、事業所の住所、業種、売上高などが格納されている。

#### 3.2.2.3 企業間取引データ

株式会社帝国データバンク提供の2016年の企業間取引データを用いた（図3.3）。同データには取引の受注側と発注側の企業コード、取引品目、本社集計された推定金額などの情報が含まれている。

#### 3.2.2.4 地域間産業連関表

地域間産業連関表は、全国を9の地域（北海道地方、東北地方、関東地方、中部地方、近畿地方、中国地方、四国地方、九州地方、沖縄地方）に分割し各地域が投入する財・サービスの原材料がどの地域から

仕入れられたのか、またその商品をどの地域のどの産業に販売したのかを把握することができる。そこで本研究では、地域間産業連関表から部門ごとに特定の地域間が占める取引の割合（交易係数）を得るものとする。また事業所間取引推定手法の検証においても地域間産業連関表を利用する。

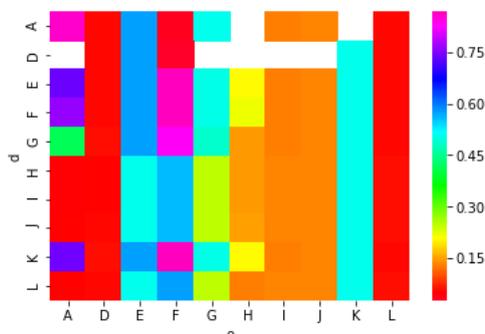


図 3.2. 企業間取引データ（本社集計）と地域間産業連関表の相関係数行列（空欄は取引無し）。

表 3.1. 本研究における部門区分。

部門コード	部門
A	農林水産業
D	鉱業
E	建設業
F	製造業
G	卸売・小売業, 飲食店
H	金融・保険業
I	不動産業
J	運輸・通信業
K	電気・ガス・水道・熱供給業
L	サービス業

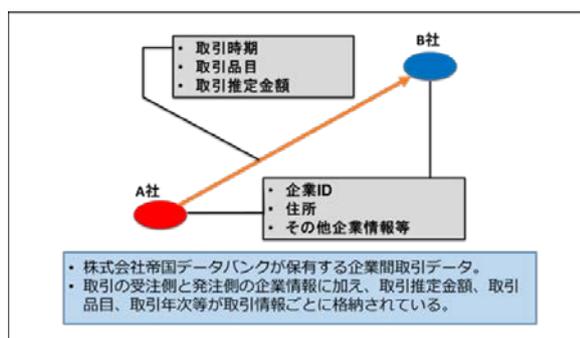


図 3.3. 企業間取引データの概要。

### 3.2.3 分析手法

ここでは、本社間取引データから事業所間取引の推定手法を述べる。本研究では 3 つのステップにより推定を行う。

ステップ 1. 各企業の全て事業所の従業員数の推定。

ステップ 2. 推定した全て事業所の従業員数から各事業所の従業員数の推定。

ステップ 3. 各本社・事業所の従業員数、本社・事業所間距離、地域間産業連関表を用いて重力モデルを作成し本社間取引を事業所間に配分。

また産業連関表との比較により推定結果の検証を行う。次に各ステップの詳細について説明する。

#### 3.2.3.1 各企業における事業所の総従業員数の推定

各事業所の従業員数を推定するために、まず各企業の従業員数の総数を推定した。約 6 割の本社データには従業員数が収録されているため、それらを教師データとしてモデルを構築した。事業所の従業員総

数は、売上金額、資本金、本社従業員との間に相関があるため、これらを変数として各部門で重回帰モデルを作成することで推定した。また変数間の相互作用を考慮した重回帰モデルも作成し、精度が良い方を採用した。最後に各部門で作成したモデルを用いて推定した値と真値を比較することで信頼性を検証した。その結果、図 3.4 のようにどの部門においても比較的高い相関が得られた。

### 3.2.3.2 各事業所における従業員数の推定

まず、従業員数が収録されているデータを用いて、各部門で事業所種別ごとの従業員数の確率分布を求めた。3.2.3.1 の従業員総数を確率分布に応じてどの事業所種別に属するかを推定した。もし同じ種別の事業所が複数存在する場合は、事業所面積で重み付けして配分した。続いて従業員数の記載があるデータから事業所種別ごとに各事業所の最大従業員数を制約条件として与えた。最後に推定結果を経済センサスから得られる 500m メッシュ (2 分の 1 地域メッシュ) ごとの就業者数と比較することで信頼性を検証した結果、相関係数 (R) が 0.9 以上との高い相関が得られた (図 3.5)。

### 3.2.4 事業所間取引額の推定

本研究では取引額を直接推定することに利用可能な教師データが存在しないため、重力モデルを用いてパラメータを推定し取引額の重みを求めた。重力モデルでは、取引額は、資本規模の大きい企業同士では大きくなる一方、企業間の距離が遠いと小さくなるを考える。これは、天体と天体の引力が天体の重量に比例し、天体間の距離に反比例する法則と同等であるとしてモデル化した。つまり、次のような関係が成り立つと考え、ある事業所  $i$  と  $j$  間の取引額の重み  $W_{ij}$  は式 (3.1) で与えた。

$$\ln W_{ij} = \alpha \ln Q_{ij} \times \beta \ln D_{ij} \times \gamma \ln P_{ij} \times \varepsilon_{ij} \quad (3.1)$$

$Q$  は地域間交易係数、 $D$  は事業所間距離、 $P$  は従業員数である。

次に取引額の重みを用いて本社間取引額を式 (3.2) で配分した。

$$S_{ij} = H * ( W_{ij} / \sum W_{ij} ) \quad (3.2)$$

$H$  は本社間取引額である。

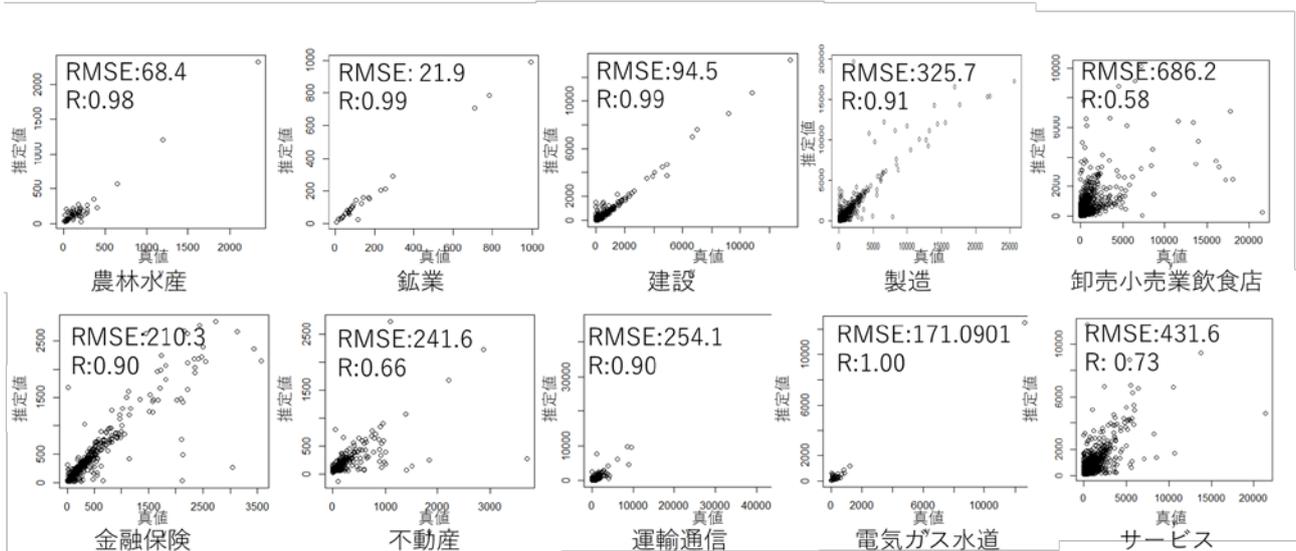


図 3.4. 各部門における従業員総数の推定値と真値の比較。

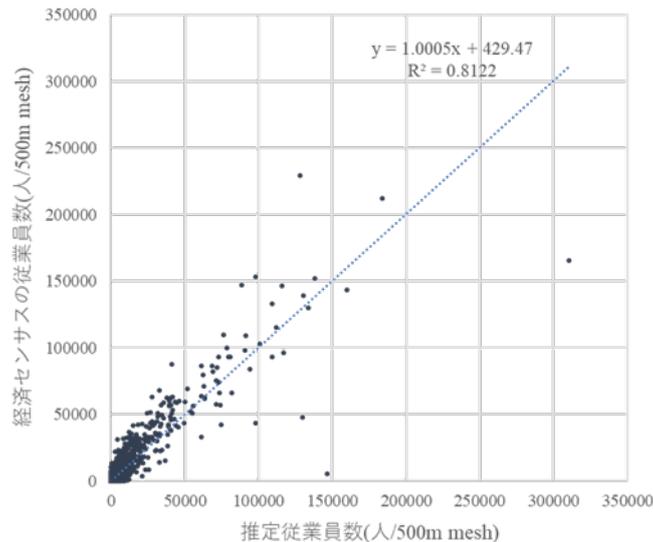


図 3.5. 推定従業員数と就業者数（経済センサス）との比較。

パラメータを推定するにはグリッドサーチにより全業種間（10\*10=100）のそれぞれで最適なパラメータを推定した。距離パラメータ、従業員数パラメータ、地域間交易パラメータをそれぞれ 0 から 3.0 まで 0.5 刻みで変化させることで合計 343 のモデルを作成し、取引推定結果を集計することで地域間産業連関表との相関を計算した。図 3.6 は農林水産業間におけるグリッドサーチ結果を示しており、距離パラメータと地域間交易パラメータが大きいほど相関係数が大きくなっていることがわかる。同様に各業種間においても最も相関係数が大きいモデルを用いた取引額を最終的な取引データとして採用した。図 3.7 はある東京本社間の取引の事業所間の取引を推定した例である。このように本社間取引では、東京都内間の取引のみしか把握できなかったが、事業所間取引の推定を行うことで本社間のみならず事業所間単位で取引を把握することが可能になった。

事業所間取引推定結果の検証は全部門間で推定結果を集計し、地域間産業連関表との比較をした。その

結果、どの部門間においても図 3.2 に示す本社間取引よりも高い相関を得ることができた（図 3.8）。また他のデータとの比較による信頼性確認として、首都圏物資流動調査（東京都市圏交通計画協議会）のマスターデータとの比較を市区町村単位で行った。この比較では本研究における推定事業所間取引データの単位は金額、物資流動調査の単位は重量として比較を行った。その結果、鉱業間や建設業間においてやや強い正の相関がみられたものの、小売業間や金属製造業間においては相関が見られなかった。これは、両データの単位の違いや、事業所として本社も含めて取り扱ったことで物資流動調査のモノの流れとの整合が取れなかったことが原因であると考えられる。

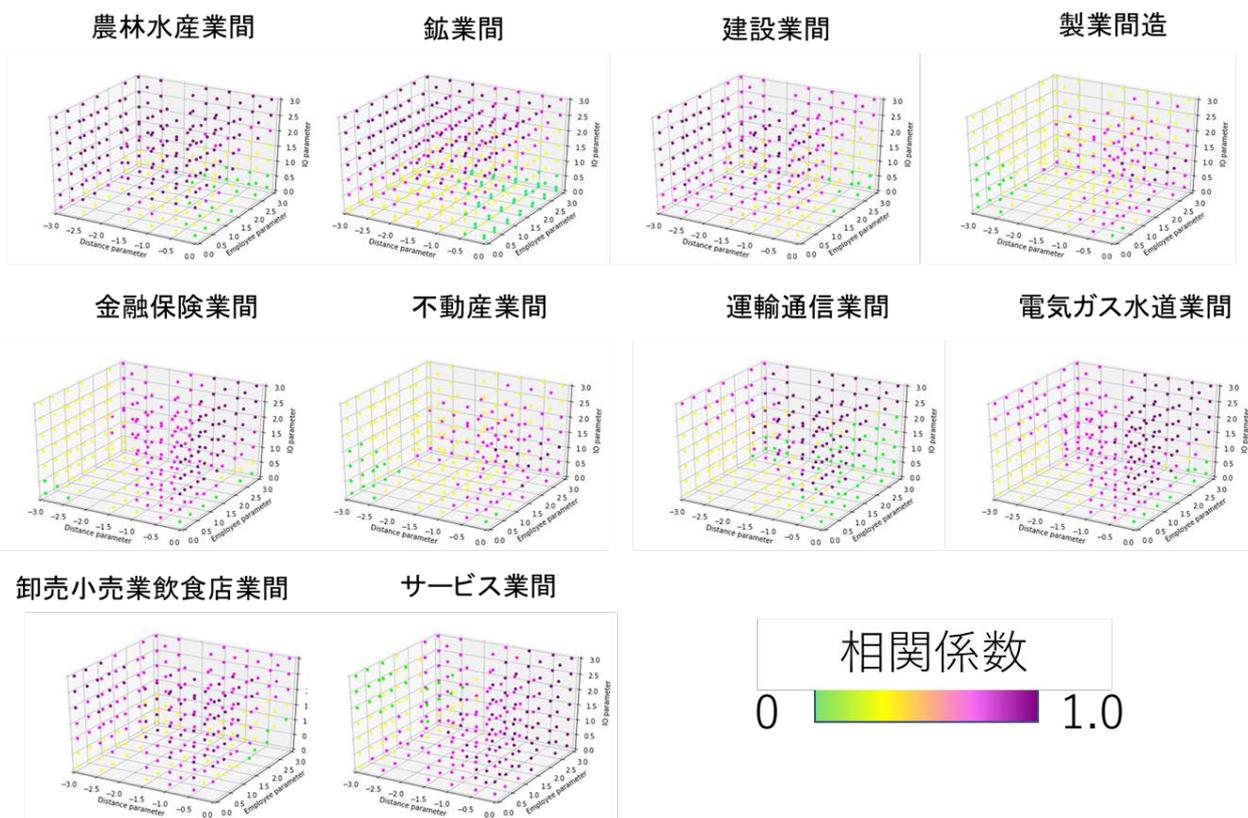


図 3.6. グリッドサーチにおける相関係数（農林水産業間の取引の例）。

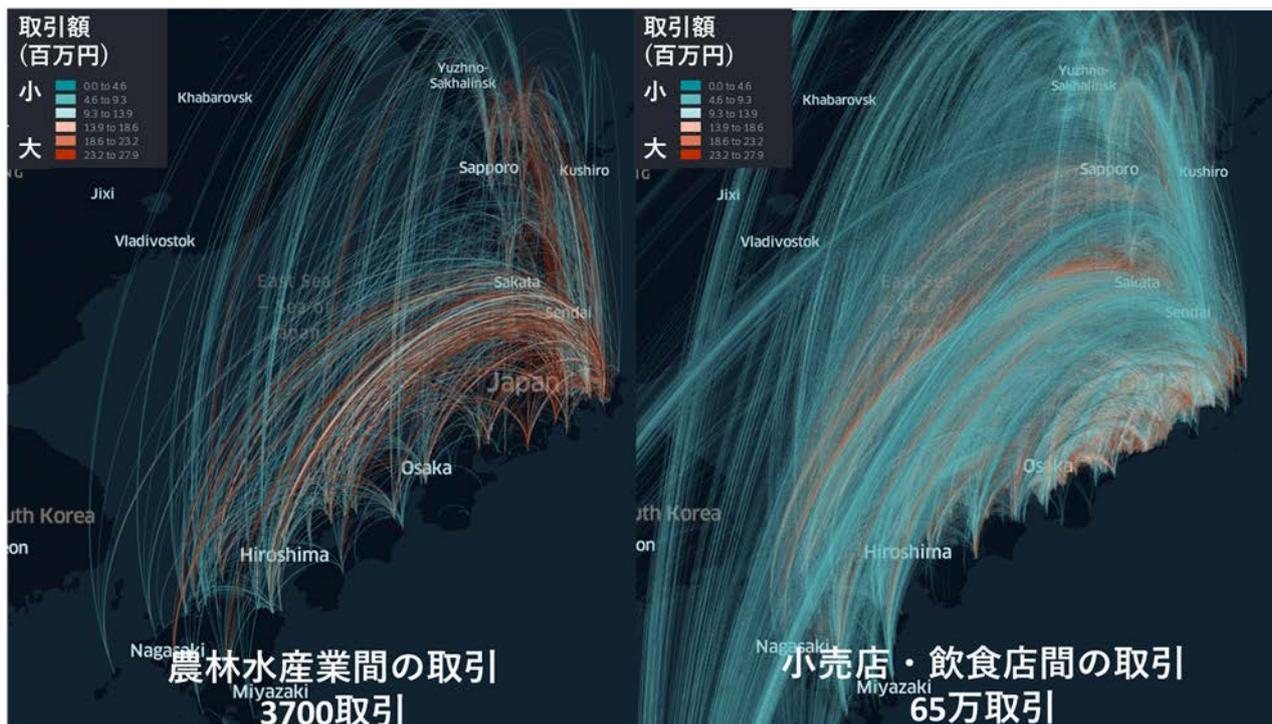


図 3.7. 事業所間取引推定結果の例。

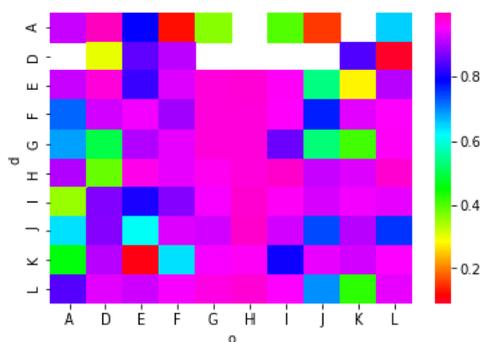


図 3.8. 事業所間取引推定結果と地域間産業連関表との相関係数行列（空欄は取引無し）。

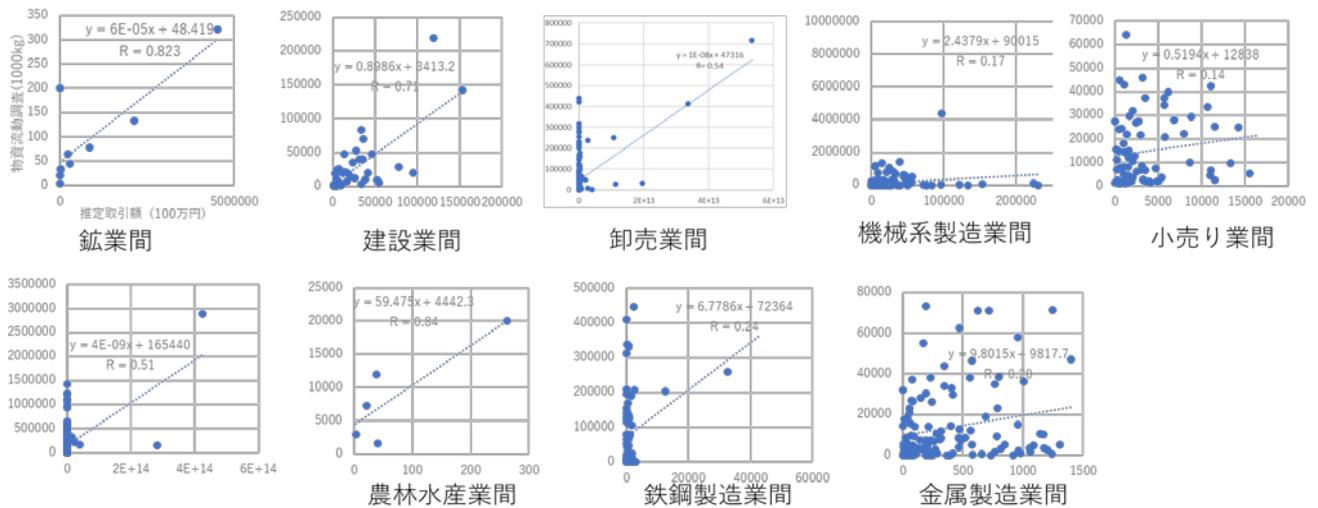


図 3.9. 推定事業所間取引データと物資流動調査データとの比較。

### 3.3 ②携帯電話の移動履歴のビックデータを用いた人の流れの推定データの整備開発

#### 3.3.1 概要

津波の群衆避難シミュレーションにおいては、エージェントの初期設定条件が結果に大きく影響を与える可能性がある。そのため、本研究では携帯電話の移動履歴データ（以下「GPS データ」）を用いて人の流れの推定手法を開発してきたが、今年度は同手法を用いて京阪神エリア地域における人の流れデータを整備した。

#### 3.3.2 利用データ

利用するデータは株式会社ゼンリンデータコムが株式会社 NTT ドコモのナビゲーションサービスである「ちずナビ」の利用者から、明確な同意を得てデータを取得したものの中から、2012年1年分のデータを用いた。提供された GPS データはユーザ ID や緯度経度等を総体的かつ統計的なデータに加工したものであり、匿名加工処理されているため逆推定による個人の特定は不可能である。同データの特徴は以下の通りである。

- (1) 原則 5 分間隔で各 ID の連続な位置情報が取得・記録されている。
- (2) 抽出期間に毎日データがあるとは限らない（利用者に依存）。
- (3) 緯度経度・観測時間以外の性別・年齢などの属性は一切含まれない。
- (4) 個人を特定することは不可能である。

#### 3.3.3 手法

京阪神エリアを対象とした携帯電話 GPS データの移動履歴のマップマッチングについては、昨年度と同様の手法を用いて様々なインフラデータを用いて行った（図 3.10）。

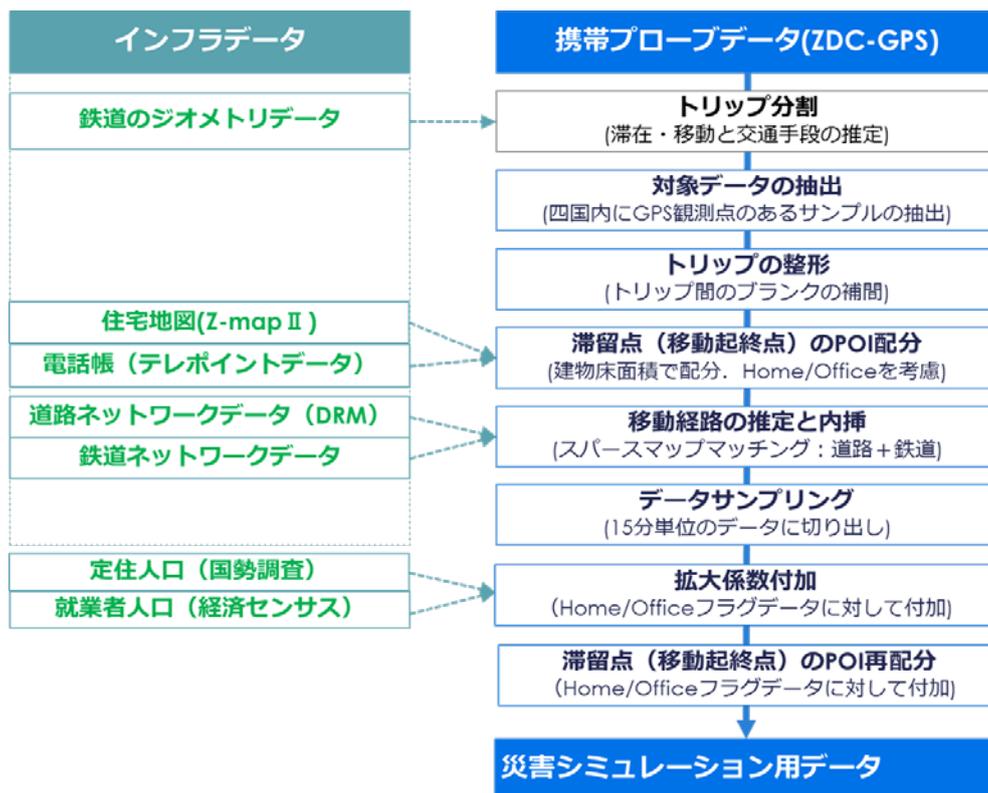


図 3.10. 人の流れデータへの属性の付加手法。

### 3.3.4 結果

図 3.11 に大阪府における 2012 年 8 月 27 日の人流データの例を示す。人々がどこをどの程度の数移動しているかを任意の時間で把握できるようになった。例えば、平日、休日やイベント開催日など、様々なシナリオが生成可能になる。なおこれは移動軌跡に基づいて各インフラデータを用いてマップマッチングを行うことで推定された擬似的な分布であり、実際の分布を示すものではない(個人特定は不可能)。このように携帯電話 GPS を用いることで日々の人々の流動を追うことが可能となった。これは従来の国勢調査やパーソントリップ調査等では成し得ないものである。このような観測データに基づいた人流データを用いて避難シミュレーションをすることで、地域ごとの脆弱性をよりの確に捉えることが可能になるものと期待される。

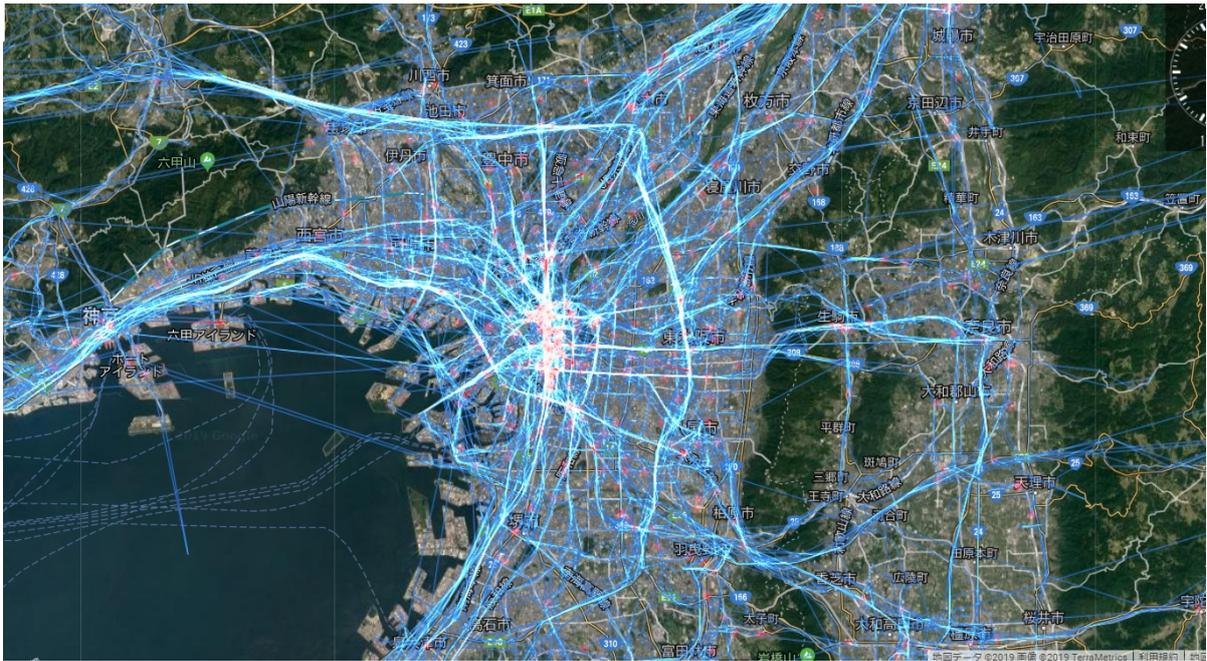


図 3.11. 2012 年 8 月 27 日における京阪神エリアにおける人の流れデータ  
(14 時頃における可視化の例、青線：移動軌跡、赤点：人)。

### 3.4 ③AB 連携の推進

#### 3.4.1 概要

今年度は、社会科学シミュレーションチーム（サブ課題 B）と統合的地震予測システム（サブ課題 A）との連携強化を進めることで、高精細な建物データや①の企業間取引データを活用したシミュレーションの高度化についても検討を行った。これにより建物の位置、形状だけでなく、構造や築年代などの建物属性も推定し、地震シミュレーション結果と統合することで、これまでよりも信頼性の高い地震被害予測が可能になった。なお、地震被害シミュレーションは中核機関、経済活動シミュレーションは分担機関が実施した。分担機関との連携により開発した先端都市情報を用いた構造物応答シミュレーションと経済活動に関する数値解析の連携支援を実現した。

#### 3.4.2 手法

AB 連携フローは図 3.12 に示す手順で実施した。先端都市情報チームは、建物データをサブ課題 A の IES に投入し、IES の建物被害推定結果を受け取り、さらにそれらのデータを経済シミュレーション用に企業取引データと統合してデータ整備を行う。経済シミュレーションにおいては、サプライチェーン途絶の影響を考慮する必要があったため、各被災企業がどのサプライチェーンに属して、どれだけの期間生産活動に影響があるのかも推定した。またライフライン被害（電気、ガス、上水道、港湾、道路）についても神戸大（交通チーム）を通して被害推定データを受け取り、ライフラインの復旧推定を既往モデルより 500m メッシュで推定し、分担機関が要望する集計単位で集計した。最終的に、経済シミュレーションチーム（京大）がシミュレーションで用いるためにフォーマット変換を行い、企業被害データ、ライフライン被害・復旧データ、サプライチェーン被害・復旧データを提供した。

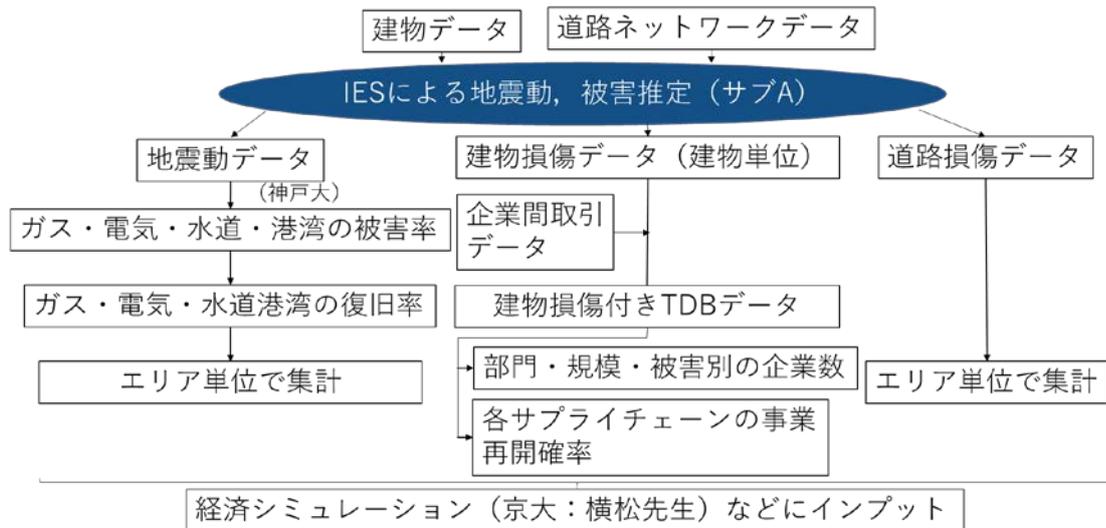


図 3.12. AB 連携フロー。

### 3.4.3 結果

AB 連携により実現した先端都市情報チームのデータ整備の結果を示す。まず図 3.13 に各ライフラインの被害推定結果を示す。また図 3.14 に各ライフラインの発災 2 ヶ月後の復旧率を示す。さらに図 3.15 に建物被害とサプライチェーンデータを統合した結果を示す。これらのデータをサブ課題 B の分担機関へ提供することで、各分担機関は経済シミュレーション、交通シミュレーション、群衆避難シミュレーションを実施した。AB 連携により各分担機関のシミュレーションに先端都市情報を導入することで、より現実に即したシミュレーションが可能になった。シミュレーション結果の詳細については各分担機関の報告内容を参照されたい。

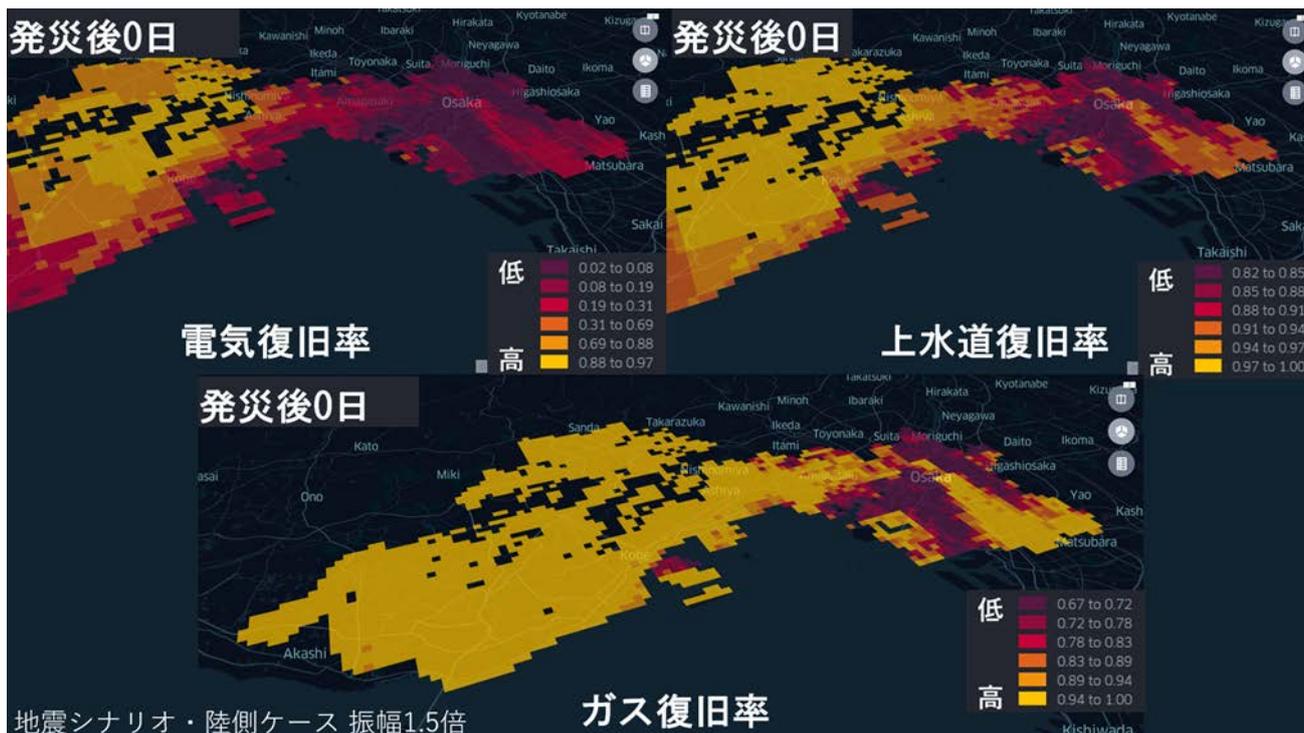


図 3.13. 各インフラデータの被害推定結果(発災直後(0日)、500m メッシュ)。

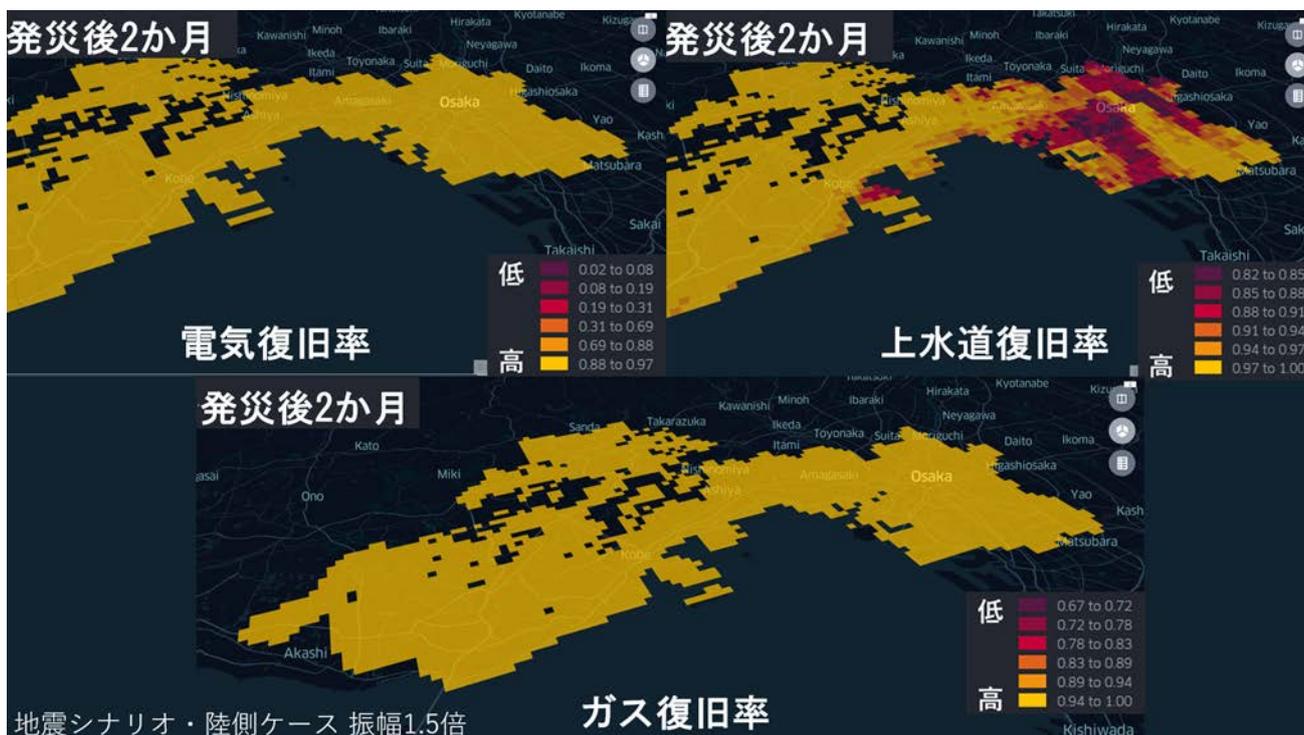


図 3.14. 各インフラデータの復旧推定結果(発災後 2 か月の例、500m メッシュ、京阪神地方)。

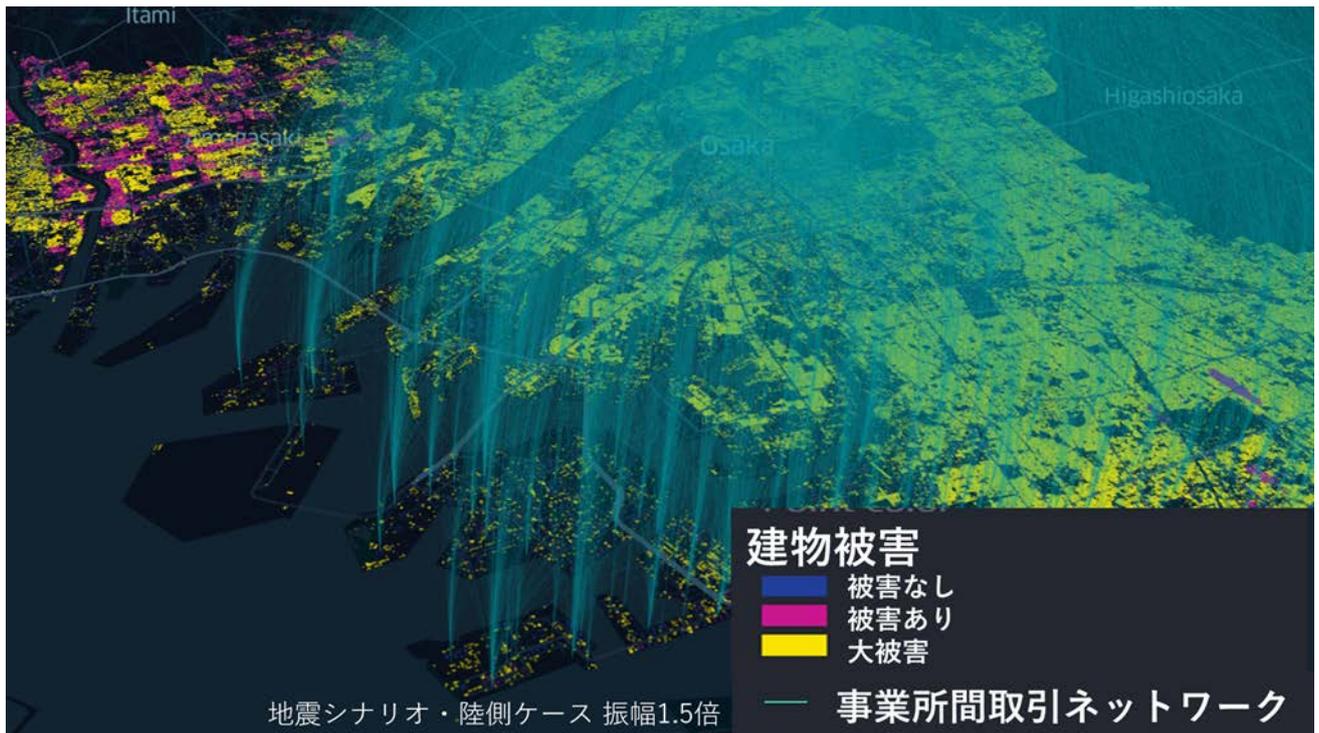


図 3.15. 建物データを用いた IES（サブ課題 A）による計算結果と、事業所間取引データ（サプライチェーンデータ）統合による経済シミュレーション支援の結果（大阪市とその周辺の例）。

## 3.5 エージェントベース経済モデルの分散メモリ実装

### 3.5.1 はじめに

経済学における最近の傾向は、エージェントベースモデル (ABM) を使用することである。このモデルにおいては、個々の経済実体は、それぞれの実世界の対応物を模倣するために、適切なルールで構成される自律エージェントでモデル化される。そして、関心のある経済現象は、エージェント間の複雑な相互作用を考慮してモデル化される。この方法は、従来の新古典派経済学に基づく計算可能な一般均衡モデルとは異なるアプローチである。クレジットネットワークから、全国規模または地域規模の経済の 1 対 1 スケールのシミュレーションまで、幅広いアプリケーションを対象とした多数の ABM が存在する [1-4]。そのうち、EURACE モデル [3] は欧州連合全体をシミュレートすることをターゲットにしているが、Poledna らは [4]、1 対 1 のスケールでオーストリアの経済をシミュレートしている (つまり、各世帯、各会社などをモデル化する)。

1 対 1 スケールのエージェントを用いた国家または地域のシミュレーションは、現実世界の対応物を模倣するために、エージェントのルールを定義すること、および数億のエージェントをシミュレートするという計算上の要求を満たすためにコンピュータクラスタを効率的に利用すること、の両方において困難をもたらす。EURACE モデル [3]、および Poledna らの研究 [4] では、すでに 1 つ目の困難に取り組んできたが、スケーラブルな HPC (High Performance Computing) 実装に関する文献が不足している。スケーラブルな HPC 拡張を実装する際の主な困難は、いくつかのトポロジカルグラフ上で発生するエージェント間の複雑な相互作用である。共有メモリを実装する際、これらの相互作用は競合状態につながるが、MPI (Message Passing Interface) による分散メモリ並列 (DMP) を実装すると、各相互作用が MPI プロセス (CPU コアなど) 間で 1 つ以上のメッセージを生成する。スケーラブルな DMP 実装における重要なステップは、すべての対話グラフを最小の通信コストで利用可能にしながら、MPI プロセス間でエージェントをバランスよく分散させることである。EURACE モデル [3] は、MPI プロセスにほとんど接続されていないエージェントサブセットを割り当てることによって、複雑な相互作用による問題を回避する。

HPC 拡張エージェントベースの経済モデルの必要性に触発されて、我々は MPI に基づく DMP コードを開発した。Poledna らのモデル [4] は以下の理由から、基本の ABM として選択される。その理由は、クレジットベースの市場、エージェントによる決定に基づいた予測、前期に購入した商品に基づく生産、などの特徴が、より高い並列スケーラビリティを達成するためである。バランスの取れた作業負荷を分散するために、代表的な雇用主と従業員の相互作用グラフに基づいてエージェントを分割し、他のすべての相互作用はごくわずかな量の通信で利用可能になる。市場の相互作用の連続的なパフォーマンスを改善し、それによって負荷の不均衡を減らすいくつかの方法が提示されている。現在の実装では、オーストリアの 1 対 1 モデル (1000 万人までのエージェント) の単一の反復を完了するのに約 20 秒かかる。これは、国全体をシミュレートすることが現実になっていることを示す。現在のスケーラビリティは数十の MPI プロセスに制限されているが、各エージェントに関連する計算量の正確な推定値を使用することによって、さらにプロセス数を増加させることができる。

この節の残りの部分は次のように構成されている。3.5.2 では、エージェントベースの経済モデルを DMP の観点から説明し、スケーラブルな実装における課題を提示する。3.5.3 では提案された DMP 実装方式の詳細を説明する。この説明では、ドメイン分解の詳細、3.5.2 で説明した課題の解決方法、およ

び広く使用されているいくつかのシリアルアルゴリズムの改良を示す。3.5.4 では、3.5.3 で導入されたソリューションの有効性と並列スケーラビリティを実証するための実行時統計を示す。

簡潔にするために、この文書の残りの部分では、ランクまたは MPI ランクという用語は MPI プロセス (CPU コアなど) を表し、並列という用語は MPI による分散並列実装を意味する。メッセージまたは通信とは、ポイント間または集合 MPI 通信 (例えば MPI\_Send () および MPI\_Recv ()、MPI\_Bcast () など) を意味する。

### 3.5.2 エージェントベースの経済モデル：HPC の観点

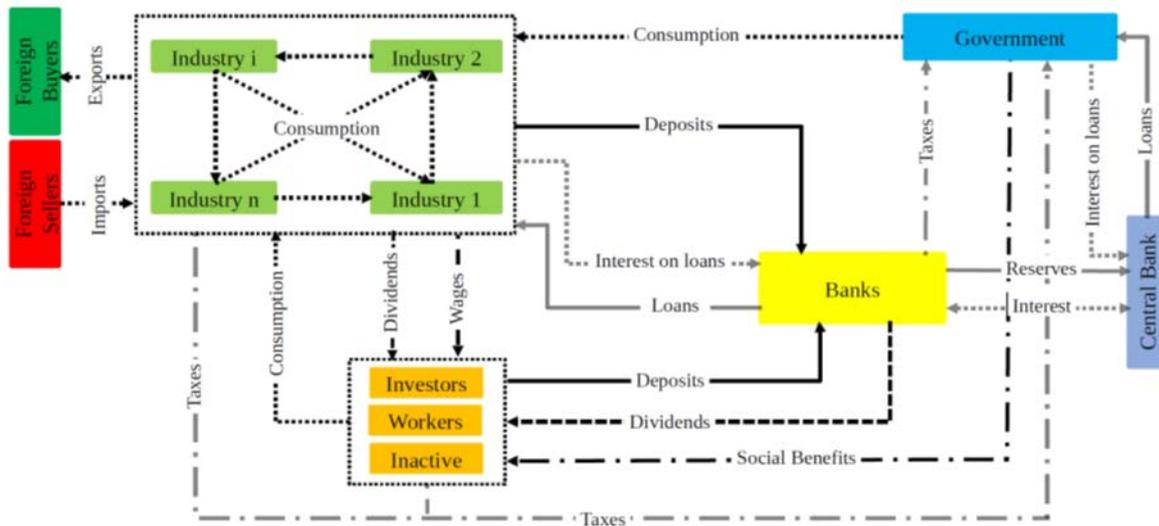


図 3.16. 典型的なエージェントベースの経済モデルの概略図。各産業は多数の企業で構成される。

エージェントの行動を定義するルールは様々であるが、ほとんどの一般的な経済 ABM には共通のエージェントタイプとそれらの間の相互作用がある。図 3.16 は、一般的な ABM の概略図を示す。シミュレートされた経済圏に応じて、それぞれが多数の会社からなる数十から数百の産業がある。地域経済は、外国の買い手と売り手を介して世界の他の地域と繋がる。最も多いのは、労働者、活動していない世帯、および投資家から構成される世帯エージェントである。企業の総数は労働者のおよそ 10% である。

一見したところでは、各 MPI プロセスに同じサイズのエージェントのサブセットを割り当てることによって何百万ものエージェントをシミュレートすることは、理想的な DMP アプリケーションのようである。ただし、エージェント間の複雑な対話のため、スケーラブルな DMP の実装は困難な作業である。相互作用のほとんどは、集中型グラフ、またはランダムな連結を含む密集したグラフのいずれかで行われる。DMP の実装では、各リンクは、リンクを定義している 2 つのエージェントを所有するランク間の 1 つ、ないし 2 つの通信を表す。相互作用がエージェントのランダムペア間でない限り、ランクペア間のすべてのメッセージを 1 つのメッセージにまとめて配信できる。一方、ランダムグラフ上の各対話には、リンクごとに独立したメッセージが必要であり、対話が双方向の場合は独立した返信メッセージが必要である。この項の残りの部分では、エージェント間のさまざまな対話の詳細について説明し、スケーラブルな HPC 拡張機能を実装する上での問題点について説明する。

### 3.5.2.1 集中型グラフ上の相互作用

政府と銀行が関わる相互作用は集中型グラフで行われる（図 3.17a を参照）。これらのうち、単方向相互作用は並列化がより簡単であるが、一方で双方向相互作用は、政府または銀行の関連する意思決定の逐次化による負荷の不均衡をもたらす。

### 世帯、企業、銀行と政府との相互作用

すべての労働者、投資家、企業、銀行は政府にさまざまな税金を支払い、政府は世帯にさまざまな社会的利益を支払う。納税は一方方向の対話であり、各ランクに税金を徴収させ、政府機関を保持しているランクに送信することで簡単に並列化できる。

一方、社会的給付の支払いは双方向であり、3段階がある。まず、世帯の所得状態が MPI\_Gatherv () を使用して収集される。各世帯に支払われる社会福祉厚生は、政府機関によって逐次計算される。そして最後に、社会的利益は MPI\_Scatterv () を使用してそれぞれの世帯に分散される。

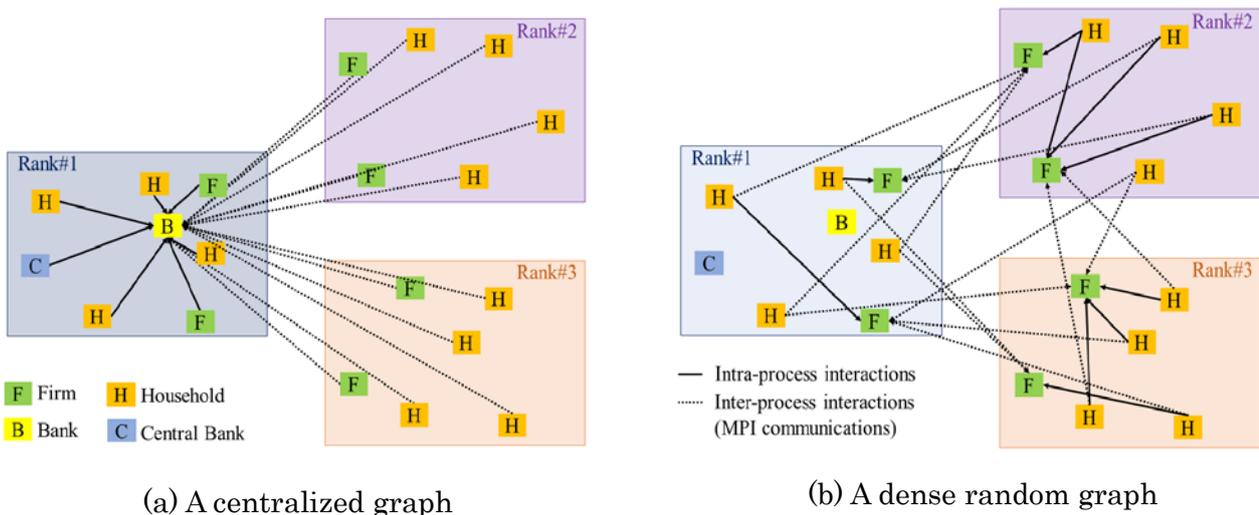


図 3.17. 共有または分散メモリ並列実装における主な問題の原因。(a) 集中型相互作用グラフにおける銀行や政府のようなホットスポット、(b) 商品や雇用市場のような密集したランダム相互作用グラフ。

### 世帯および企業と銀行との相互作用

入金是一方向であるが、引き出しとローン要求は双方向である。政府による社会的利益の支払いと同様に、双方向の対話には3段階がある。各 MPI ランクは、世帯または企業の要求を MPI\_Gatherv () を使用して撤回または借入する。銀行は各要求を順次処理する。そして応答は MPI\_Scatterv () を使用して送信される。

### 3.5.2.2 密ランダムグラフ上の相互作用

一元化されたグラフ上の相互作用とは異なり、商品と雇用市場の相互作用は密集したランダムグラフのセット上で発生する。グラフの接続性は各期間でランダムに変化し、商品と雇用市場のランダム性を模倣する。これらのランダムグラフは、スケーラブルな DMP 拡張を実装するのを非常に困難にする。

### 3.5.2.3 商品市場における相互作用

各期間において、消費者（すなわち、企業、世帯、外国の買い手および政府部門）は、各産業からランダムな売り手のセット（すなわち、企業および外国の販売会社）を訪れ、必要な消費財および資本財を購入する。消費者エージェントが訪れる会社の数は予測不可能であり、そのエージェントの現在の予算及びそのエージェントが売り手を訪れる時間までに各売り手で利用可能な金額に依存する。その結果、各売買の相互作用は、買主と売主を所有するランク間の独立したメッセージを含む。双方向であるため、売り手を訪問するたびに3段階がある。それらは、対応する売り手を所有するランクへのメッセージ、売り手による意思決定、および買い手への返信メッセージ、である。何百万ものエージェントの間で、このようなランダムな相互作用を容易にするためのスケーラブルな共有または分散メモリ並列コンピューティングコードを開発することは、間違いなく困難である。

単純な解決策は、各売り手にキューを導入することであり、そこに各消費者は MPI ポイント間通信を使って要求を送信でき、要求が処理されると売り手は応答メッセージを送信する。この方法は論理的には正しいが、明らかに計算性能はシリアルバージョンと比較しても遥かに悪い。

### 3.5.3 スケーラブル並列計算拡張の実装

この項では、MPI ベースの DMP 拡張を実装する際の主な3つの手順について説明する。

1. 各ランクにバランスの取れたワークロードを割り当てるためにエージェントを分割すること。
2. 前の項で説明した問題に対するスケーラブルなソリューション。
3. 非常に多く使用されるシリアルアルゴリズムの実行時間を減らすためのいくつかのテクニック。

以下の文章ではブロッキング MPI 機能を使用するが、ユーザ定義の MPI データ型を持つ対応する非ブロッキング機能を使用して、より高い通信効率を達成する必要がある。

#### 3.5.3.1 ドメイン分割

ランク間でバランスのとれた計算ワークロードを分散するために、エージェントは相互に排他的なサブセットに分割される。エージェントを区分する際に、雇用市場を表すグラフ（すなわち、雇用主-従業員のグラフ）を使用しながら、他のすべての位相グラフの可用性を保証するために異なる戦略を取る。以下において、買い手-売り手、銀行-顧客、雇用者-従業員、政府納税者、外国の売り手-地元の買い手などの残りのグラフがどのように利用可能になるかを説明する。各交差リンクがランク間の通信を生じさせるので、パーティション重みによって分割されるグラフエッジの数を最小にしながら、ノード重みの合計がほぼ等しいパーティション（すなわちエージェントに関連する計算作業負荷）が望ましい。

分割されるグラフは、各企業  $f_i$  を最も近い  $n_i$  個の労働者エージェントに接続することによって作成される。ここで、 $n_i$  は、最初の期間における  $f_i$  の所要労働量の概数である。現実を捉えるために、各エージェントはそれぞれの物理的な場所に配置され、最も近い労働者エージェントは k-d ツリーを使用して識別される。グラフが雇用主と従業員の関係を十分に反映し、活動していない世帯、外国の売り手および外

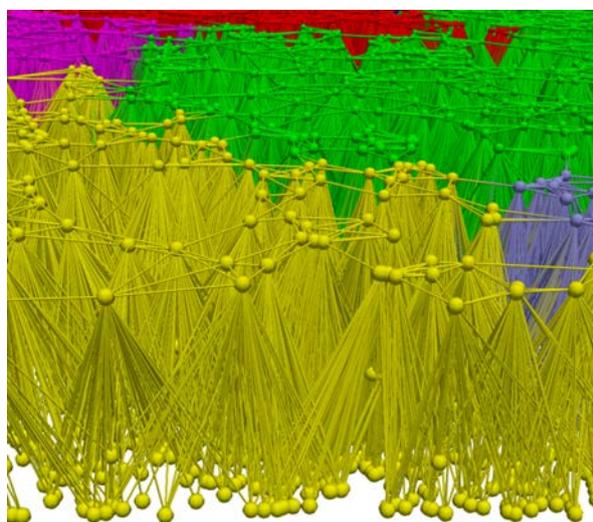
国の買い手の存在によるわずかな影響を確実にするために、これら3種類のエージェントは低いリンクウェイトを持つ1つまたは2つの最も近い企業に接続される。さらに、企業自体は、リンクの重みが小さいいくつかの近隣企業と接続されているため、切断グラフが作成される可能性が低くなる。グラフのノード(すなわちエージェント)には、各エージェントタイプに関連する計算量に従って重みが割り当てられる。このグラフを METIS [5]を使って分割した。図 3.18a および 3.18b は、入力グラフの例と8つの生成された区画を示す。

### 3.5.3.2 集中グラフ上の相互作用のためのスケーラブルな解決策

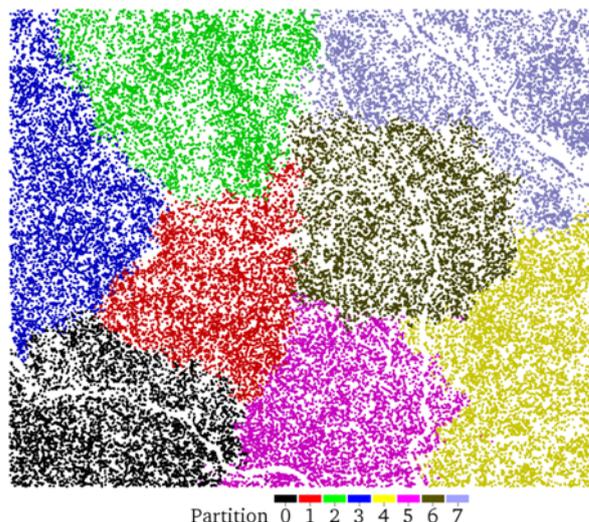
各ランクの政府と銀行の代表エージェントを導入することで、関連するコミュニケーションをほとんど排除し、関連する計算作業負荷を均等に分散させ、政府を含む集中型のやり取りをほぼ完全にスケーラブルにすることが可能である。

#### 集中グラフに関する政府との相互作用

単一のランクでは何百万もの世帯に支払われるべき社会的便益を計算しなければならず、そして大量のメッセージを伴うので、3.5.2.1 で与えられた簡単な解決法はかなりスケーラビリティが悪い。よりスケーラブルな解決策は、各ランクに地方自治体エージェントを導入することである。このエージェントは、税金を徴収し、社会的利益を計算して支払い、そして徴収された総税金と社会的利益を、政府機関を保持するマスターランクに最終的に伝達する。この単純な解決策は、計算作業負荷が十分に分散され、すべての双方向通信が排除され、通信されるメッセージ数およびデータ量が大幅に削減されるので、非常にスケーラブルである。



(a) Input graph to METIS



(b) 50,000 agents in 8 partitions

図 3.18. 入力グラフの例、および METIS で得られた 8 つのパーティション。明確にするために、異なる種類のエージェントを 3 つの異なる標高で描いている。

#### 集中型グラフ上の銀行との相互作用

銀行のためのスケーラブルな解決策 (3.5.2.1 を参照) は各ランクに地元の銀行支店を導入することである。銀行支店はすべての顧客のアカウントを対応するランクに保持し、すべての入出金要求をローカルで処理することで、メッセージを完全に排除し、関係する計算をランク間で分配する。各期間の終わりに、地元の支店は、単一の `MPI_Gather ()` を使用して、マスターランクにあるメインバンクに貯蓄、ローンなどの合計を送信する。メッセージ数の大幅な削減と計算ワークロードの分散のバランスは、支店の導入をスケーラブルにする。

### 3.5.3.3 密ランダムグラフ上の相互作用に対するスケーラブルな解

一見したところでは、スケーラブルな並列拡張 (3.5.2.2 を参照) を実装することは不可能なように見えるが、商品および労働市場に対する単純な現実世界の解決策がある。我々は生産者から直接購入するのではなく、スーパーマーケットのような販売店を訪れる。これらの実社会のソリューションを模倣することで、労働および商品市場向けのスケーラブルで妥協の少ないソリューションを実装できる。

#### 商品マーケット

我々は販売店を導入した。各販売店は、単一の販売者 (つまり、会社または外国の販売者) の商品を販売する。各売り手は各ランクに1つの販売店を持っている。売り手は、集合的なコミュニケーションを使用して、販売する合計金額をすべての販売店に伝える。ランク  $r$  の売り手  $i$  の販売店は、比率  $\frac{s_i^r(t-1)}{\sum_{r=0}^M s_i^r(t-1)}$  に基づいて販売する金額を設定する。ここで  $s_i^r(t-1)$  は前の期間に売った金額、 $M$  はランクの総数である。これには、各販売店に集める  $\sum_r s_i^r(t-1)$  ための追加のコミュニケーションが必要である。販売が完了すると、`MPI_Reduce ()` を使用して、その販売店の対応するデータをマスターランクに合計することで、総販売額と各販売者の需要が判る。最後に、売り上げと需要の合計は、マスターランクから対応する親売り手に拡散される。この簡単な解決策は、買い手-売り手の対話を妥協することなく、MPI 通信の数を劇的に減らし、ランダム通信を完全に排除する (すなわち、買い手はそれぞれのランク内で任意のランダムプロセスを使用することができる)。

販売店の導入は複雑なコミュニケーション問題を解決するが、販売者と各ランクにある販売店の間でデータを効率的に交換するには、さらなる計画が必要である。図 3.19 は、売り手と販売店のデータの望ましいレイアウトを示す。一般的な MPI 集合関数を使用することは、少なくとも  $2I$  メッセージを含むため最も効率的ではない。ここで、 $I$  は産業部門の数である。これは、108 個の産業部門を持つ日本のような国をシミュレートする際に大きなオーバーヘッドとなる [6]。 `MPI_Alltoallw ()` を使用して、すべて組み合わせる [6] ことで、独立した集合メッセージに関連する通信オーバーヘッドの一部を排除できる。送信端と受信端で MPI データ型と変位を適切に定義すると、 `MPI_Alltoallw ()` を使用して `Allgatherw ()` および `Scatterw ()` の操作を模倣し、図 3.19 に示す目的の形式でデータを取得して配信できる。本稿の残りの部分では、この商品市場の実装は `buy ()` と呼び、特定の消費者を指すときは消費者の名前で呼ぶ (例えば、世帯の `buy ()`) 。

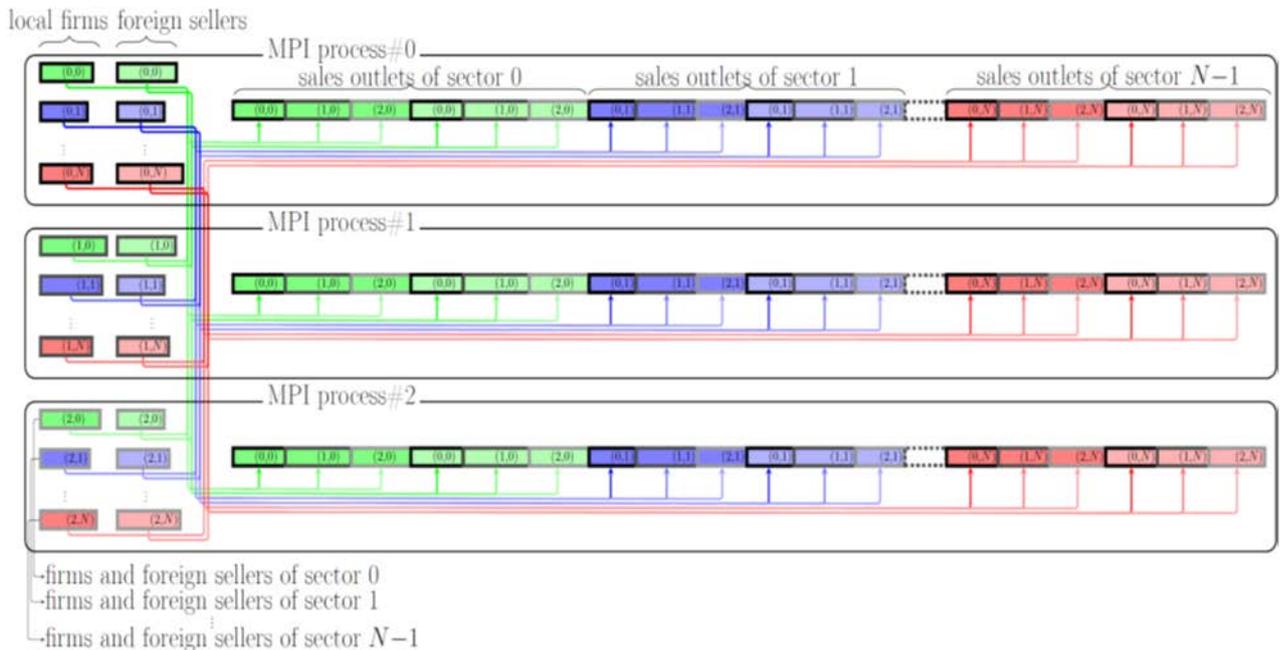


図 3.19. N セクターの販売店の望ましいデータレイアウト、および 3 つのランク間の必要な通信パターン。色付きの四角形はそれぞれ、多数の販売者または販売店を示す。

### 3.5.3.4 通信の隠蔽

より高い並列スケーラビリティを実現するために、ほとんどすべての通信が計算とオーバーラップする。ブロッキング MPI 関数が上記の説明で言及されているとしても、我々是对應する非ブロッキング MPI 関数（例えば `MPI_ibcast()`、`MPI_lalltoallw()` など）を使用する。可能な限り、我々は必要なデータが利用可能になったら、すぐにノンブロッキングメッセージを投稿し、受信ランクでデータが必要になる直前に受信を確定するように努める。明示的に測定された訳ではないが、このような通信の隠蔽は、スケーラビリティに大きく貢献しているはずである。

### 3.5.3.5 シリアル性能の向上

非常に多く使用される関数の実行時間を短縮し、それによってランク間の負荷の不均衡を減らすためにいくつかの試みを行った。3.5.4 に示すように、`buy()` 関数は総実行時間の 95% 以上を消費する。`buy()` の実行時間は、分布から無作為サンプルを抽出するために、より高性能な関数を実装し、データ指向のアプローチを使用することによって大幅に削減される。

### ランダム分布からの抽出

ほとんどのエージェントベースのモデルでは、消費者エージェントは最良の値引き交渉を探す。消費者は、購入したい業界の販売店の分布から無作為にサンプルを抽出する。分布は、より低い価格を請求し、かつ/または、より多くの量を生産する企業の店舗に顧客が訪れる可能性がより高くなるように計算される。

訪問する店舗をランダムに選択するために、エージェントは、 $0 < r \leq \sum_1^n p_j$  の範囲の一様乱数  $r$  を生成し、 $\sum_1^{i-1} p_j < r \leq \sum_1^i p_j$  である分布から対応する店舗  $O_j$  を選択する。ここで、 $n$  は営業中の店舗の総

数、 $p_j$  は営業中の店舗 $O_j$ から購入する可能性である。売り切れの店を販売店に含めると、消費者エージェントはそれらが無意味に訪問することになり、それによって多数の CPU サイクルを浪費する。この大量の CPU サイクルの浪費をなくすために、販売店を売り切れと同時に分布から削除する。この分布から抽出する実装を基本的な `draw_dist ()` 関数と呼ぶ。

基本的な `draw_dist ()` は、分布を保持している大きな配列から要素を削除するのに時間がかかり、非効率的である。`draw_dist ()` の効率は、削除するのではなく、売り切れの店舗を無効にすることで改善できる。売り切れ  $O_k$  は、 $k \leq j < N_s$  に対して  $P_j = P_j - p_k$  になるように分布を更新することによって、効率的に無効にできる。ここで、 $N_s$  は産業部門の販売店の総数  $s$ 、 $P_j = \sum_1^j p_l$  である。この売り切れ  $O_k$  をスキップするために、この新しい分布からランダムな販売店を引き出す際に、所与の乱数  $r$  に対して、 $r \leq P_j$  を満たす最小の  $j$  が選択される。この改良された `draw_dist ()` は大規模な配列からの削除を排除するだけでなく、多数の条件付き分岐（すなわち `if` 条件）も排除する。3.5.4 に示すように、この改良された `draw_dist ()` は計算時間を大幅に短縮する。

## データ指向設計

`buy ()` では、何百万の消費者エージェントが、一度に数十の産業に由来する何十万もの販売者を訪問する。明らかに、これは非常にメモリに制限されており、消費者オブジェクトのサイズとメモリアクセスパターンは計算性能に大きく影響する。我々が行う C++ 実装では、世帯エージェントのオブジェクトは  $12 + 2 \times I$  倍精度変数で構成される。ここで  $I$  は産業数である。これらの肥大化したオブジェクトは世帯の `buy ()` を過度にメモリに制限された計算にする。さらに、公正な購買の機会を提供するために、消費者エージェントはランダムな順序で店舗を訪問するようにされる。肥大化したオブジェクトを含む大規模アレイへのランダムアクセスは明らかにキャッシュパフォーマンスが非常に悪く、さらにパフォーマンスの低下に繋がる。

`buy ()` のメモリとキャッシュのパフォーマンスを削減するために、世帯の配列からコピーされる `buy ()` に関連する 6 つの変数のみが配列  $V$  を通して繰り返すことによって、`buy ()` に含まれるメモリ量が大幅に削減される。さらに、`buy ()` 内の要素にランダムにアクセスするのではなく、 $V$  をランダム化することでキャッシュのパフォーマンスが大幅に向上する。 $V$  を軽量で要素単位にランダム化することはメモリを集中的に使用するタスクであるので、我々はブロック単位のシャッフリングを選択する。 $V$  のサイズは非常に大きいため、ブロック単位のシャッフリングは `buy ()` で公平な機会を生み出すのに十分である。Fisher-Yates アルゴリズム [7] をわずかに修正したバージョンを使って、効率的なブロック単位のシャッフリングを行う。

### 3.5.4 計算性能

Sebastian らによるエージェントベースの経済モデル [4] に基づいて、我々は C++ 11 と MPI-3.2 を使用して分散並列コードを開発した。このコードは、前項で示したドメイン分解およびその他の技法に従って設計されている。ここでは、3.5.3.5 で説明した改善の効果と強力なスケーラビリティを扱う。

#### 3.5.4.1 問題設定

すべてのシミュレーションは、オーストリア経済に関する 1000 万人のエージェントを含むデータセットを使用して行った。データセットは、62 の産業、634,019 の企業、98,270 の外国の売り手、98,270 の外国の買い手、4,130,385 の非勤務世帯、そして中央銀行である。人口は期間あたり 0.25% の割合で増加するように設定されている。

各シミュレーションは、東京大学の ReedBush スーパーコンピュータにおいて、4、8、16、32 および 64 の MPI プロセスを用いて、20 期間にわたって行われる。各コンピューティングノードは、Intel Xeon E5-2695 v4 (2.1 GHz、18 コア) x2 ソケット、および 256 GB のメモリ (153.6 GB/秒の帯域幅) で構成される。

#### 3.5.4.2 シリアルパフォーマンスの向上の意義

3.5.3.5 で示したシリアルパフォーマンスの向上による寄与を定量的に見積もるために、3 組のシミュレーションを実行した。それらは、基本的な `draw_dist ()`、改良された `draw_dist ()` およびデータ指向した `buy ()` である。コードのメインループは、エージェントベースのモデルの基本的なイベント、およびノンブロッキングメッセージの投稿とファイナライズを含む 32 個のイベントで構成される。

#### 3.5.4.3 負荷バランスと計算時間

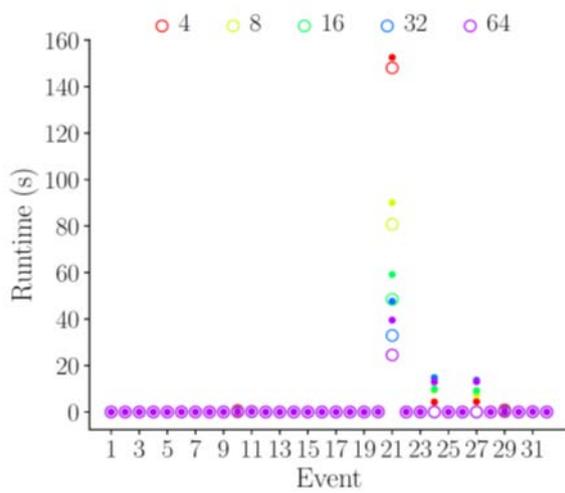
図 3.20 は、13 回の期間における、メインループの 32 個の事象それぞれにかかる時間を示す。円と点は、各事象を完了するためにそれぞれのランクが要した最短および最長の時間を示す。対応する円と点の違いは、各事象のランク間の負荷の不均衡の程度を示す。

図 3.20a と図 3.20b の事象 21 を比較すると、基本的な `dist_draw ()` が重大な負荷の不均衡を引き起こすこと、そしてその悪影響が事象 24 と 27 で明確に判り、これが `buy ()` に関するノンブロッキングメッセージを完結させる。図 3.20b は、分布から削除するのではなく、売り切れの販売店を無効にすることで (3.5.3.5 を参照)、かなりの量の負荷の不均衡が解消されただけでなく、`buy ()` の実行時間が約 25% 削減されたことを示す。さらに、それは事象 24 および 27 の不均衡を劇的に減少させる。図 3.20b と 3.20c を比較すると、データ指向の改善 (3.5.3.5 を参照) によってもたらされた軽量のデータ構造とキャッシュフレンドリなデータアクセスによって、実行時間が約 50% 短縮されている。図 3.20 b および図 3.20 c に示す図 3.21 の拡大図は、データ指向した `buy ()` の改善によって、事象 10、24、27、および 29 の不均衡がさらに減少したことを示している。これは、ノンブロッキングメッセージの終了に対応する。

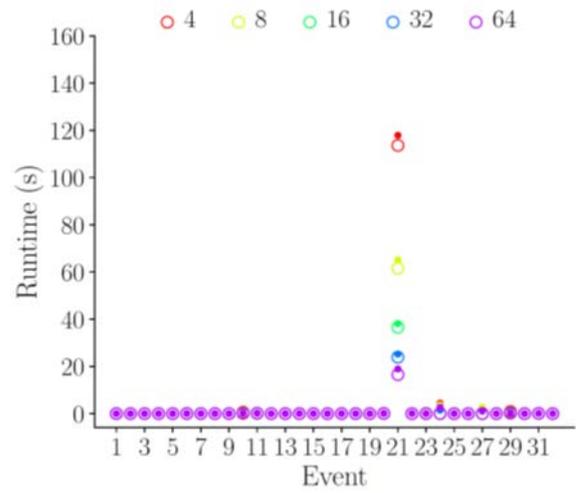
#### 3.5.4.4 スケーラビリティ

表 3.2 は、3 つの異なる設定の下で、改善された `dist_draw ()` とデータ指向した `buy ()` を備えたバージョンの実行時間と強力なスケーラビリティを示す (図 3.22c)。強力なスケーラビリティは、計算リソースがどれほど効率的に利用されているかの尺度であり、 $(T_m/T_n)/(n/m)$  として定義される。ここで、 $T_k$  はランク数  $k$  の実行時間、 $n \geq 2m$  である。一般に、各設定は最大 16 MPI ランクまでの妥当なスケーラビリティを生み出す。上記のように、スケーラビリティが低い主な理由は、`buy ()` の負荷の不均衡である。検討した 3 つの設定により、実行時間とスケーラビリティに影響を与える他の考えられる要因を調べる。2 列目と 3 列目を、4 列目と 5 列目で比較すると、エージェント数を徐々に増やしても、実行時間とスケーラビリティにはほとんど影響がないことが判る。一方、4 列目と 5 列目、6 列目と 7 列目を比較

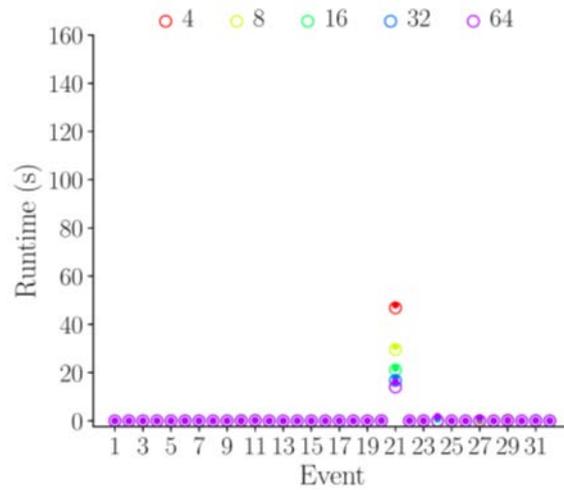
すると、累積確率分布を更新して売り切れ店舗を無効にするのにかかる時間はかなり長く、MPI ランク間で不均一である。確率分布の更新頻度を減らすと、合計実行時間は約 20%短縮されるが、スケーラビリティの向上は MPI プロセスの数が少ない場合に限定される。



(a) Primitive `dist_draw()`

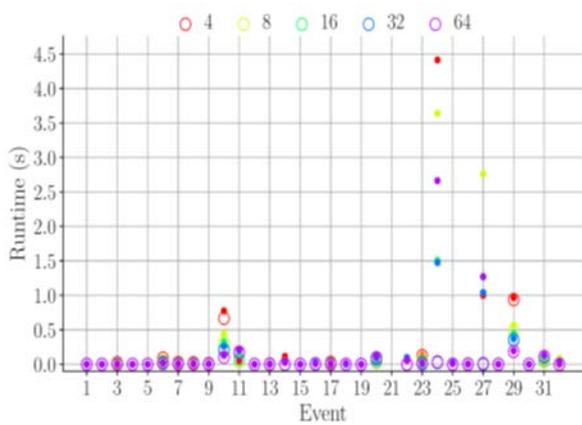


(b) Improved `dist_draw()`

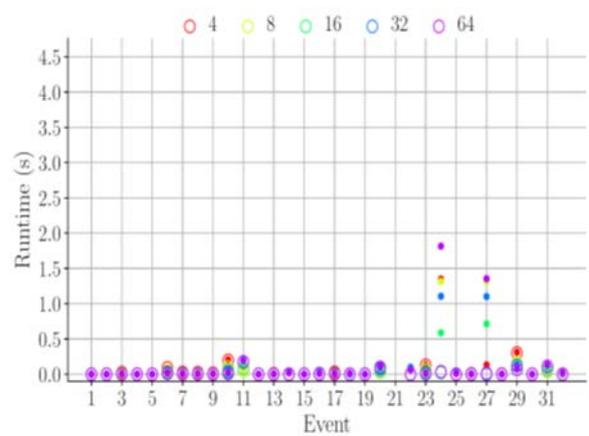


(c) Data-oriented `buy()`

図 3.20. 13 回の期間における、メインループの 32 個の事象それぞれにかかる時間。



(a) Improved `draw_from_dist()`



(b) Data-oriented `buy()`

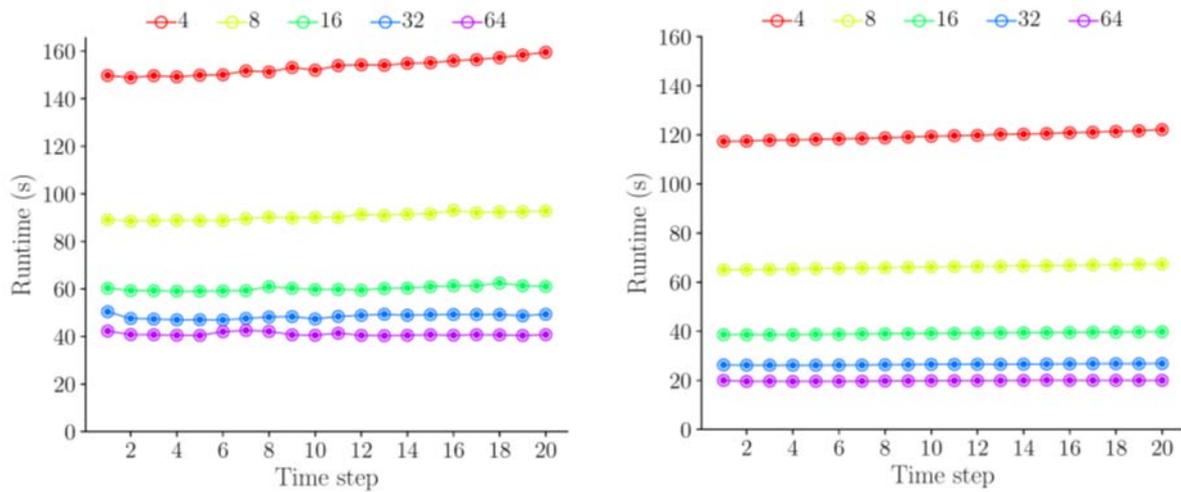
図 3.21. 図 3.20 b と 3.20 c の拡大図。

図 3.22 は、シミュレートされた 20 の時間ステップすべてについて、上記の 3 つのケースの実行時間を比較したものである。図 3.22a は、顕著な突然の変動があるだけでなく、時間ステップによる実行時間が顕著に増加する場合もあることを示す。これら両方の悪影響は、buy () の負荷の不均衡によって引き起こされる。これら両方の効果は減少するが、上述した buy () の負荷不均衡の転送のために、依然として反復回数に伴う実行時間の増加が図 3.22b および 3.22c に見られる。

表 3.2. dist\_draw () の改善と buy () のデータ指向設計による実行時間と強力なスケーラビリティ。  
 “Dist. updated at #”は、#販売店が完売している場合にのみ、完売販売店が無効であることを示す。”#% growth rate”は、期間ごとの人口増加を示す。

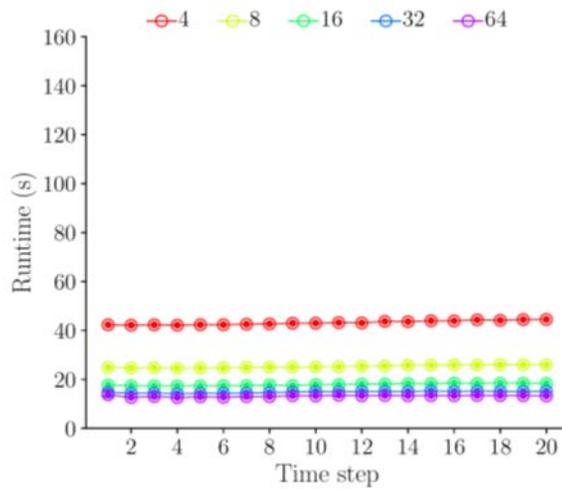
MPI ranks	Dist. Updated at 1+ 0.25% growth rate		Dist. Updated at 1+ 0.0% growth rate		Dist. Updated at 50+ 0.25% growth rate	
	Runtime (s)	Strong Scalability	Runtime (s)	Strong Scalability	Runtime (s)	Strong Scalability
4	50.10		50.00		44.52	
8	31.97	78.4%	34.16	73.2%	25.97	85.7%
16	22.79	70.1%	22.87	74.7%	18.35	70.7%
32	19.12	59.6%	19.19	59.6%	15.23	60.2%
64	16.79	56.9%	16.74	57.3%	13.26	57.4%

buy () によって引き起こされる残りの負荷不均衡（図 3.21b 参照）を排除することによって、スケーラビリティをさらに向上させることが可能である。分割する時、各タイプのエージェントの規則における浮動小数点演算の数に従って、ノードの重みをほぼ設定する。この概算見積もりでは、生産規模、作業員数などの詳細は考慮に含まない。buy () の負荷の不均衡は、各エージェントの測定された実行時間によってノードの重みを設定することによって削減でき、それによって並列スケーラビリティが向上する。



(a) Primitive dist draw().

(b) Improved dist draw().



(c) Data-oriented buv().

図 3.22. シミュレートされた 20 の時間ステップの実行時間履歴。

### 3.5.5 おわりに

エージェントベースの経済モデルの DMP 実装が、中規模経済をシミュレートできることを示した。MPI プロセス間でエージェントをバランスよく分散させ、すべてのエージェントの対話を最小の通信コストで容易にする際に起きる主な障害は、代表的な従業員と従業員の対話グラフを分割し、実際の解決策を模倣することによって対処される。データ指向設計およびメモリをあまり必要としないキャッシュに配慮したアルゴリズムを使用することにより、実行時間の性能を大幅に向上できることを実証している。現在の実装では何千万ものエージェントをシミュレートすることが出来るが、MPI プロセス間のワークロードの分散を改善することで、より大きなシミュレーションが可能である。

### 参考文献

- [1] Caiani, A., Godin, A., Caverzasi, E., Gallegati, M., Kinsella, S., Stiglitz, J.E., Agent based-stock flow consistent macroeconomics: Towards a benchmark model, J. of Economics Dynamics and

Control, Vol.69, pp.375-408, 2016.

- [2] Assenza, T., Delli Gatti, D., Grazzini, J., Emergent dynamics of a macroeconomic agent-based model with capital and credit, *J. of Economic Dynamics and Control*, Vol.50, pp.2-5, 2015.
- [3] Deissenberg, C., van der Hoog, S., Dawid, H., EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy, *Applied Mathematics and Computation*, Vol.204, pp.541-552, 2008.
- [4] Poledna, S., Hochrainer-Stigler, S., Miess, M.G., Klimek, P., Schmelzer, S., Sorger, J., Shchekinova, E., Rovenskaya, E., Linnerooth-Bayer, J., Dieckmann, Ulf, Thurner, S., When does a disaster become a systematic event? Estimating indirect economic losses from natural disasters. arXiv:1801.09740.
- [5] George Karypis and Vipin Kumar, A fast and highly quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs. *J. on Scientific Computing*, Vol.20(1), pp.359-392, 1999.
- [6] Balaji P., Chan A., Gropp W., Thakur R., Lusk E., Non-data-communication overheads in MPI, *Analysis on Blue Gene/P. LNCS*, Vol.5205, 2008.
- [7] Durstenfeld, R.. Algorithm 235, Random permutation. *Communications of the ACM*, Vol.7(7), pp.420-421, July, 1964. doi:10.1145/364520.364540.

#### ④地震・津波の災害シナリオ多様性の数値解析コンポーネントの高度化（再委託先：国立研究開発法人海洋研究開発機構）（サブ課題A）

##### 4.1 GAMERA での地震サイクル計算

断層破壊から都市応答までの物理シミュレーションに基づいた地震被害推定への期待が、様々な観測データと計算機環境の整備を背景として高まってきている[1]。固体地球分野では、地震発生準備から発生までの過程の研究のためのツールとして、地震サイクルシミュレーションの手法が研究されてきた

（例えば Rice[2]）。数百年以上の時間に対する地震サイクルシミュレーションを現実的な設定下において実施し、その結果から地震発生シナリオを抽出することで、物理シミュレーションに基づいた地震被害推定への入力により適切に設定できると期待される。

地震サイクルシミュレーションでは、媒質中の既存の弱面を仮定し、そこに摩擦構成則を仮定する。摩擦面上で発生するすべりを地震とみため、プレートの沈み込みなどの駆動力に対するすべりの自発的な発生・進展を計算する。従来、媒質として半無限均質弾性体を仮定し、すべりに対する媒質応答の解析的表現（例えば Okada[3]）をベースとした境界要素法により地震サイクルを計算する手法が多く用いられてきた（例えば Rice[2]）。一方で筆者らは、沈み込み帯（一つのプレートがもう一つの下に沈み込むことにより巨大地震を発生させる領域）の構造不均質性やマンテル流動を表現する粘弾性的を取り込んだより現実的な設定を取り込むため、ポスト京プロジェクトで開発された高速有限要素ソルバ GAMERA[5][6]を導入した地震サイクルシミュレーション手法を開発してきた。2011年東北地方太平洋沖地震に対し、地震サイクルの一部分とみなせる地震後 2.8 年間の地殻変動の再現計算への適用を行い、地表面での変位観測データをよく説明することに成功した[7]。

本年度は、Agata et al. [7]の手法をメッシュ生成方法の改良などにより拡張し、より長期の地震サイクルの計算を試みる。具体的な適用例として、豊後水道で観測された地震波を伴わないスロー地震の一つである長期的スロースリップの計算結果を示す。

地殻やマンテルを構成する岩石を粘弾性体とみなし、媒質の変形を計算する。粘弾性体の構成式を

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^i \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^i &= \frac{1}{2\eta} \sigma'_{ij}\end{aligned}$$

と書く。ここで  $\varepsilon_{ij}^e$ 、 $\varepsilon_{ij}^i$ 、 $C_{ijkl}$ 、 $\eta$  は弾性ひずみテンソル、非弾性ひずみテンソル、弾性定数テンソル、粘性率である。 $\sigma'_{ij}$  は偏差応力を表す。加速度項を無視した平衡方程式の時間微分と微小ひずみを考え、有限要素法により離散化することで、問題は

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} + \mathbf{h}(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^i) \quad (4.1)$$

という線形方程式に帰着する。ここで  $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{f}$ 、 $\mathbf{h}$  は全体剛性マトリクス、変位ベクトル、外力ベクトル、粘弾性による応力緩和を表すベクトルである。粘弾性変形のソースは有限要素モデル内に設定した断

層面上でのすべり速度である。与えられたすべり速度ベクトル $\mathbf{V}$ を Split node technique[8]により有限要素方程式の外力ベクトルに変換する。節点分割法では断層面上の節点を仮想的に上下に分割し、節点の上下に逆向きの仮想変位に相当する節点力をそれぞれ与えることにより、食い違い変位を簡便に表現する。これを $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{V})$ とあらわす。モデルの側面と底面には Dirichlet 条件を与える。具体的には、面上の節点の法線方向の動きを固定し、それ以外の方向には拘束を与えない[9]。すべり速度の発展は後述の摩擦則により計算される。

本シミュレーション手法の計算コストの大半が線形方程式(4.1)の求解に費やされる。共役勾配法とマルチグリッド法を組み合わせた並列ソルバを用い、線形方程式の求解を行うことにより、京コンピュータなどのスーパーコンピュータを用い多自由度 ( $10^7 \sim 10^9$ ) の問題を高速に解くことが可能となる[5][6]。

有限要素モデルの生成は、Ichimura et al.[6][9]の手法をベースとして行う。具体的には、複雑な地表面・境界面形状を持った成層構造の入力データ (DEM による標高データと物性値) に対し、バックグラウンド構造格子を用いて、四面体要素とボクセル要素からなるハイブリッドメッシュを生成する。本研究ではボクセル要素を更に6つの四面体要素に分割し、四面体要素をすべて二次要素とする(図 4.1(a)(b))。Ichimura et al.[6][9]のメッシュ生成手法では、メッシュ生成対象領域の全域について、層境界に高分解能なメッシュが生成される。一方本論文で対象とする数値シミュレーションでは、高分解能の計算が必要な領域が、震源域の位置するモデル領域中央の一部分に集中しており、それ以外の部分では分解能を低くしても必要計算精度上問題がない場合がある。そこで、いったん分解能の低いメッシュを生成してから、必要領域において四面体要素の再分割を行うことで、震源域周辺のみ必要な分解能のメッシュを生成し、計算の効率化をはかることとした。手順としては、まず全体のメッシュを粗く生成し、四面体要素のうち細かく分割したい辺を指定する(図 4.1(c))。指定した辺の組み合わせから、再分割パターンは一意にきまる(図 4.2)。分割した後メッシュの節点を要素性能が悪くならない範囲で移動させることで、入力データに対して忠実なメッシュを生成するというオリジナルの手法の特長は保たれる(図 4.1(d))。なお、一度の再分割で分解能は2倍になるが、これを再帰的に繰り返すことにより、メッシュ中の任意の領域を任意の分解能に変更することができる。

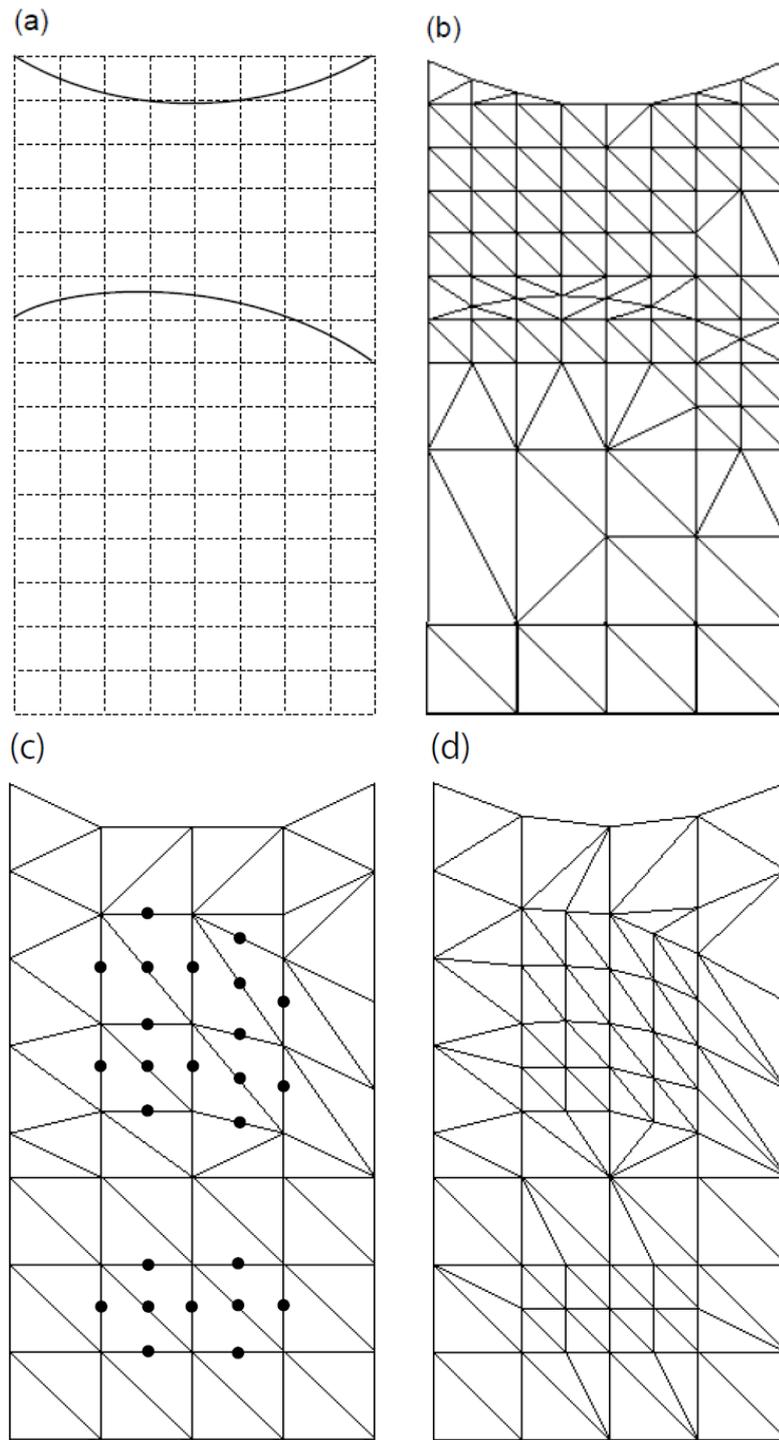


図 4.1. メッシュ生成手法の概要。(a) 入力の上層の DEM データ (実線) と、メッシュ生成のための背景格子。格子間隔を  $ds$  とする。(b) Ichimura et al.[5][10] の手法で生成されたメッシュ。(c) 本研究の手法で生成されたメッシュ。まず全体のメッシュを粗く生成する。この例では格子間隔が  $2ds$  である。黒点で示される辺を再分割する。(d) 再分割した後のメッシュ。(b) と比べ、全体の自由度は小さくなりながらも、1・2 層目の層境では同じ分解能でメッシュが生成されている。層の内部のメッシュも細かくすることができる。

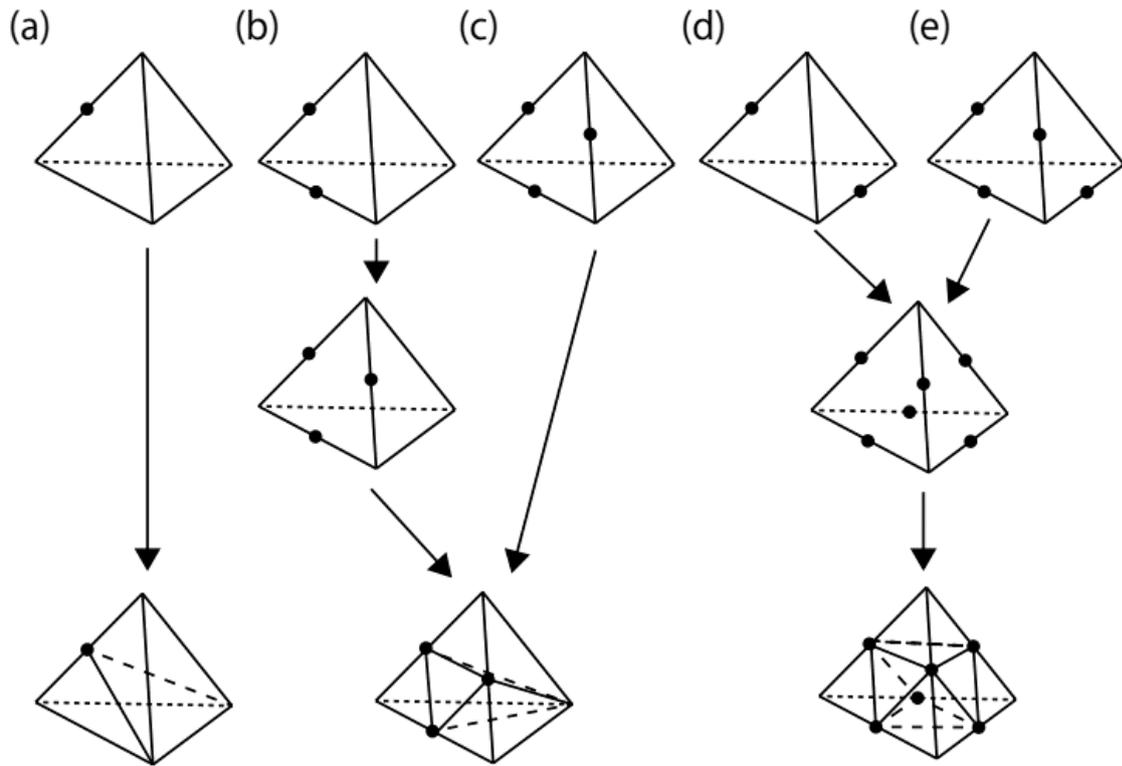


図 4.2. 再分割を指定する辺の組み合わせによる、5 種類の四面体再分割パターン。それぞれ (a) 一辺、(b) 同じ平面上にある二辺、(c) 同じ平面上にある三辺、(d) 異なる平面上にある二辺以上、(e) 四辺以上、を再分割する辺として指定した場合を示す。

すべり速度・状態依存摩擦則[11][12]においては、断層面上の各点において、すべり速度 $V$ 、せん断応力 $\tau$ 、摩擦強度を表す状態変数 $\Delta\tau_s$ が以下の構成関係を持つと仮定される（すべりの方向は決まっていると仮定し、これらの値はすべてスカラー量とする）。

$$V_i = V_* \exp\left(\frac{\tau_i - (\tau_{s*i} + \Delta\tau_{si})}{A_i}\right),$$

ここで $\tau_{s*i}$ は定常状態における状態変数である。 $V_*$ の値としては沈み込み速度がよく用いられる。沈み込み速度は多くの場合、各沈み込み帯で定数として扱われ、数 cm/year 程度である。 $A$ はすべり発生中に失われる破壊エネルギーに関するパラメータである。 $\Delta\tau_s$ の時間発展則として用いる Aging 則は、

$$\frac{d\Delta\tau_{si}}{dt} = \frac{B_i}{L_i/V_*} \exp\left(-\frac{\Delta\tau_{si}}{B_i}\right) - \frac{B_i V_i}{L_i},$$

と記述される。 $B$ と $L$ はそれぞれ、強度回復とすべり弱化距離に関する摩擦パラメータである。これら

の構成式、せん断応力のつり合い式と式(4.1)を合わせて解くことで、従来法では難しかった非線形粘弾性媒質中の断層すべり発展を計算することができる。A、B、Lの摩擦パラメータにより、摩擦特性が決定される。計算されるすべり速度の桁が計算中に10桁以上も変わることにより、時間積分に必要なとなる時間刻み幅も大きく変わるため、ステップ幅可変のルンゲクッタ法[13]による時間積分を行う。

南海地方の豊後水道においては、1997年・2003年・2010年のほぼ等しい時間間隔で、Mw6.7-6.9程度の長期的スロースリップの発生が観測されている。長期的スロースリップにおいては、断層が高速(1m/s程度)ですべる通常の地震とは異なり、数か月から数年かけたゆっくりとした断層すべりが観察される。半無限均質弾性体を仮定した手法により豊後水道でのスロースリップサイクルの再現計算が実施されている。本研究ではMatsuzawa et al.[14]の摩擦パラメータ設定を弾性不均質構造に取り込み、豊後スロースリップの計算を試みる。

図4.3に断層摩擦パラメータの分布を示す。Matsuzawa et al.[14]を基にした設定であり、赤枠の豊後水道付近で長期的スロースリップが繰り返し発生する設定となっている。なおここでは、すべり速度が大きくなると摩擦特性がすべり速度弱体化からすべり速度強化に転じるように、カットオフ速度[15][16]を導入したすべり速度・状態依存摩擦則を用いた。摩擦パラメータの分布する震源域を囲むように生成した有限要素モデルを図4.4に示す。震源域の存在するプレート形状データも、Matsuzawa et al.[14]に基づく。図4.4中の青、白、赤色であらわされる層はそれぞれ大陸地殻、海洋地殻(フィリピン海プレート)、マントルを簡便に表現している。各層の物性値をSato et al.[17]に基づき設定(表4.1)し、計算に弾性不均質構造を取り込んだことになる。図4.4(c)(d)は先に述べた四面体再分割による改良前と後のメッシュの比較である。(c)では震源域の内外でメッシュ分解能が変わらないが、(d)では震源域内部のみ高分解能なメッシュが生成されている。試験的に生成したメッシュにおいては、改良後のモデルは自由度が1/10以下となった。弾性変形計算を一回実施するのに必要な計算資源(計算ノード数と計算時間の積)は、設定にも依存するが、京コンピュータを用いた場合に1/11程度になった(表4.2)。再分割後のメッシュではアスペクト比が10以下となっており、要素性能もそれほど悪化しておらず、計算精度は同程度となることも確認している。実際に計算に用いたモデルの自由度は76,177,959、二次四面体要素数は18,799,606である。

シミュレーション結果として、計算された断層すべり速度を示す。図4.5には震源域でのすべり速度分布のスナップショットを示した。豊後水道付近で、 $10^{-6}$ m/s程度のすべり速度が計算されており、地震よりはるかに遅いすべり=スロースリップが繰り返し発生していることがわかる。

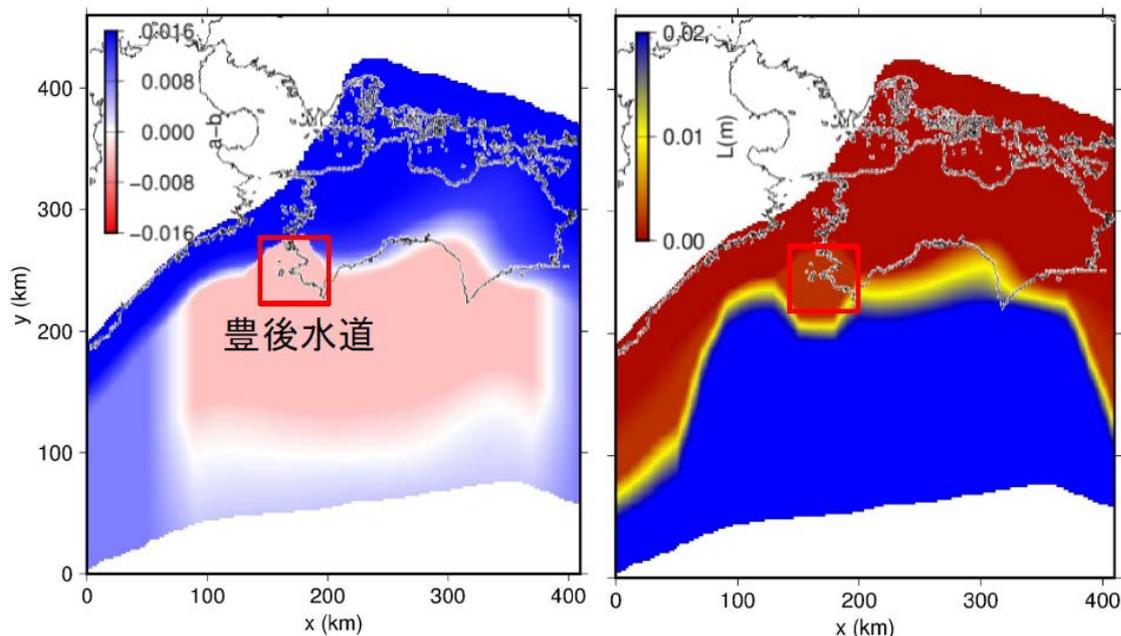


図 4.3. Matsuzawa et al.[14]を基にした断層摩擦パラメータ設定。赤枠の豊後水道付近で長期的スロースリップが繰り返し発生する設定となっている。

図 4.6 には左上の縮小図に示される赤青 2 点におけるすべり速度時間変化を示す。赤点においては、6-7 年ごとにスロースリップが発生しており、観測事実と調和する計算ができていることがわかる。設定により、計算結果には弾性不均質や粘弾性の影響が反映されており、それらの結果への影響については現在考察を進めている。本結果の計算には京コンピュータの 385 計算ノード×48 時間程度の計算資源を要した。

表 4.1. 有限要素モデルを構成する各層の名称と物性値。 $V_p$ : P 波速度 (m/s),  $V_s$ : S 波速度 (m/s),  $\rho$ : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\eta$ : 粘性率 (Pa s)。

	$V_p$	$V_s$	$\rho$	$\eta$
Continental Plate	5664	3300	2670	$\infty$
Philippine Sea Plate	6700	3941	2884	$\infty$
Mantle	6686	3818	2600	$1.000 \times 10^{19}$

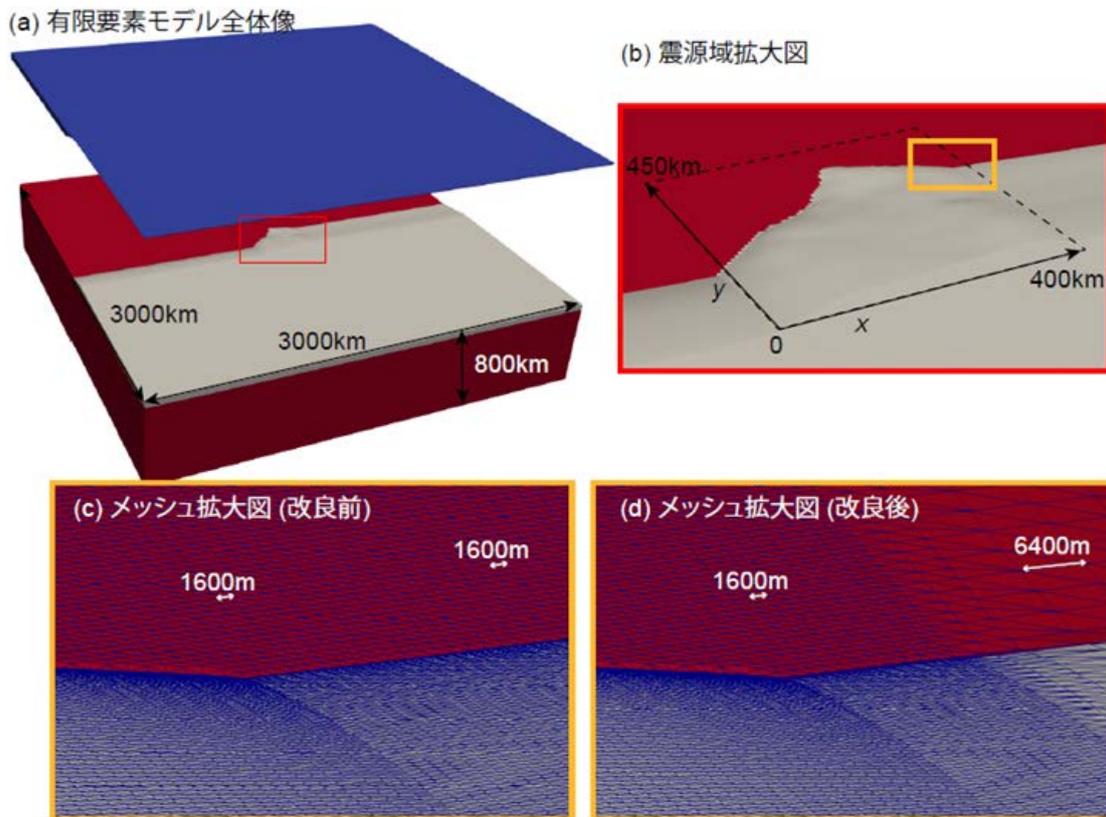


図 4. 4. 計算に用いた有限要素モデル。(a)に示される全体像のうち、(b)の領域を震源域として扱い、摩擦則によるすべり発展の計算を行う。(c)では震源域の内外でメッシュ分解能が 1600m と変わらないが、(d)では領域全体を 1600m の分解能でメッシュ生成したうえで、震源域内部のみ 2 段階再分割することで、全体の自由度を抑えながらも震源域には 1600m 高分解能なメッシュが生成されている。

表 4. 2. オリジナルのメッシュ生成手法 (Original) と再分割を導入して震源域のみ Original と同じ分解能でメッシュ生成した場合 (Refined) の自由度数、弾性変形計算一回に必要な計算資源、全要素中の最悪アスペクト比。

	Original	Refined
DOF	1,360,669,047	114,754,590
Time to solution (s) / # nodes	12.4 / 1152	3.4 / 384
Worst aspect ratio	5.99	9.00

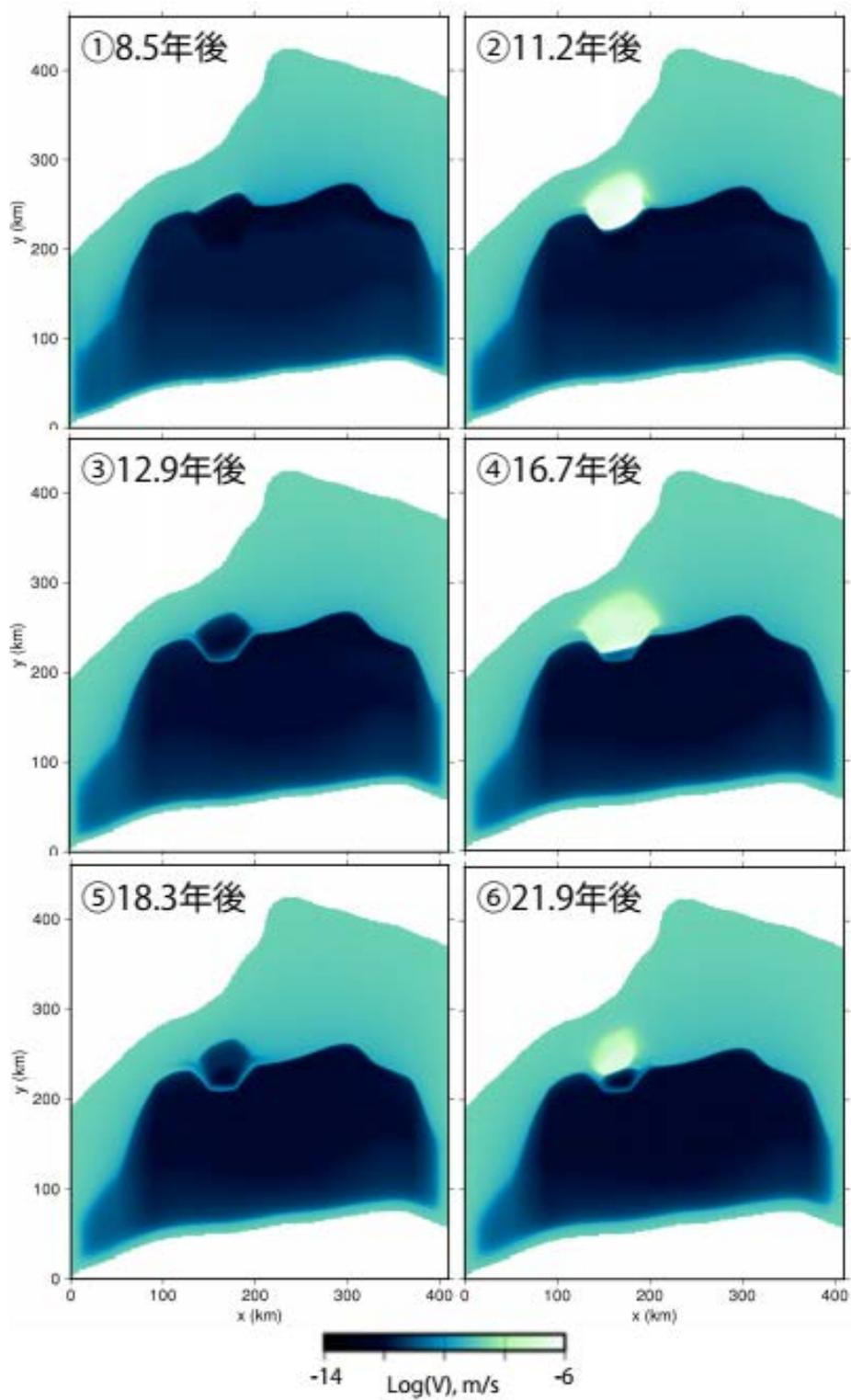


図 4. 5. 震源域でのすべり速度分布のスナップショット。豊後水道付近で、地震 (1m/s 程度) よりはるかに遅いすべり=スロースリップが繰り返し発生している。

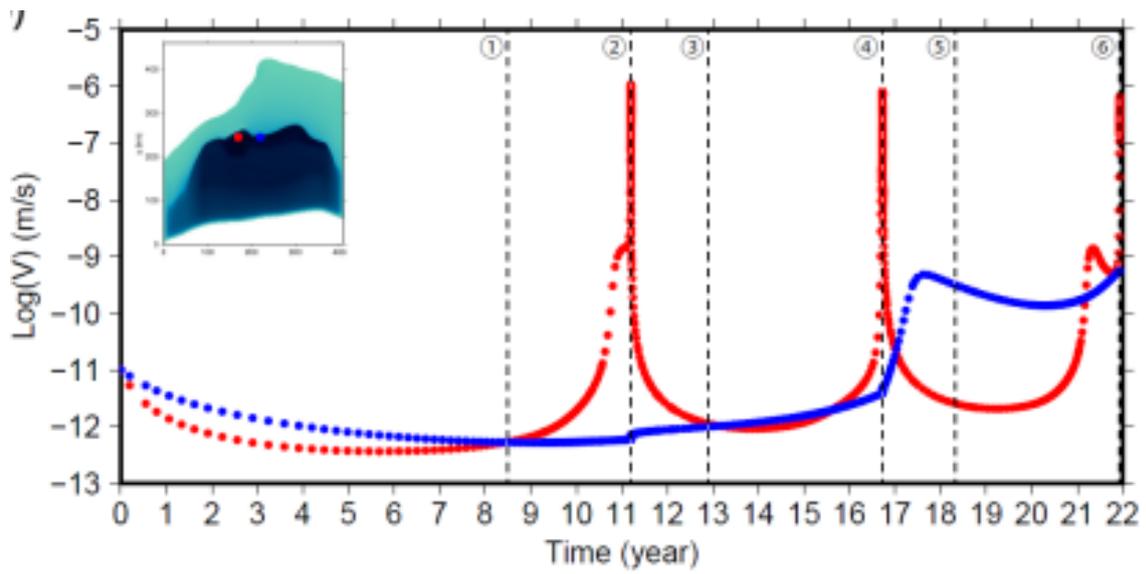


図 4.6. 豊後水道付近における赤青二点でのすべり速度時間変化。赤点においては、6-7年ごとにスロースリップが発生しており、観測事実と調和する。青点は比較のため、スロースリップが発生していない領域でのすべり速度変化を示す。

## 4.2 GAMERA での静弾性グリーン関数ライブラリの作成

断層すべりに対する弾性グリーン関数は、沈み込み帯地震に関する地震学・地震工学研究における重要なコンポーネントである。用途は地震時の断層すべり推定や地震間の断層固着度推定に加え、津波シナリオ計算など防災に関しても様々である。その線形性により、一度計算しておけば重ね合わせによりいろいろな現象に適用できるという特徴がある。Okada[3]などによる計算コードの整備により、半無限弾性体での計算が広く行われ、測地観測と組み合わせた断層すべり逆解析などの分野で成果を挙げてきた（例えば[18]）。一方で、地表面形状はもとより、地下の弾性構造についても、トモグラフィなどの発達により情報が蓄積されるようになってきた。また地上の GNSS 地殻変動観測が常時行われるようになったことに加え、干渉合成開口レーダー（InSAR）や、海底の地殻変動観測も急速に広まりつつある。これらの背景から、広い範囲での地殻変動データを整合的に扱おうとする場合、弾性変形計算において半無限弾性体を用いると、地形、弾性パラメータ、地球の楕円度を無視することによる影響が大きい場合が指摘されるようになってきた。これらを考慮したグリーン関数の計算、およびすべり逆解析、津波計算などが急速に広まりつつある。

これらの多くの計算は任意形状の取り扱いにたける有限要素法、もしくはその亜種であるスペクトル要素法で行われている。ハードウェアとソフトウェアの整備が進んでいるとは言え、それを扱うための技術的訓練の必要性や計算コストの大きさは半無限弾性体を扱う場合に比べて格段に大きく、だれもが扱えるという状況ではない。グリーン関数の使用に関しては、一度計算をしておけば後はユーザが簡便な計算で活用できるという特徴を考えれば、計算は各研究者が各々で行う必要はなく、多くの人に使われるために十分な要求を備えたグリーン関数のライブラリが公開されていけばよいということになる。

そこで、本研究は日本の主要な沈み込み帯に対し、3次元弾性不均質性と楕円度を考慮した弾性グリーン関数の有限要素計算を行い、ライブラリとして公開することを目的とする。初めのターゲットとして、南海トラフと日本海溝に対する計算を行う。多くの人に使われるため我々が想定する十分な要求とは、モデル構築の透明性と数値解の収束性である。日本列島においては、統一的な速度構造モデルとして「全国一次地下構造モデル（暫定版）」[20]が構築されている。地理座標系で定義されるこれらのデータを、測地学的な知見に忠実に、デカルト座標に変換してメッシュを生成し、地表面観測点での *ENU* 変位を計算するまでの手続きを明確にする。メッシュ生成には数値解の収束を確認したパラメータと高分解能なメッシュでの計算を可能にする高性能ソルバを導入して計算を行う。

入力となる地下速度構造の DEM データから有限要素モデルを生成する手順について述べる。必要となる座標変換の手続きは測地学的な定義に基づいて行っているものにすぎないが、手続きを明確にするために詳細を述べる。全国一次地下構造モデルの使用を想定しているが、CRUST1.0[21]など地理座標系で定義されているデータであれば適用可能である。グリーン関数計算のための入力構造データとして、

- ・地理座標系、つまり緯度、経度、標高からなる複数層の Digital elevation model (DEM) データ
- ・各層の弾性パラメータ

を想定する。有限要素法による計算はデカルト座標系において行うため、入力データを座標変換する必要がある。この際、斜めメルカトル法などの投影方法を用いると地球の楕円体性が失われるため、投影などは行わず直接座標変換する。入力 DEM データの地理座標系は世界測地系において定義され、GRS80 を

準拋楕円体とする (WGS84 楕円体との違いは無視できるものとする)。ここから、興味のある領域の代表点 (中心点)  $P_c$  に対して、北向きが  $y$  軸、鉛直上向きが  $z$  軸 ( $x$  軸は自動的に決まる) となるようなデカルト座標系への変換を行う。以下では単位の長さは断りがない限り  $m$  とする。手順としては、まず DEM データ上の点  $P$  の座標値の地理座標系から地心直交座標系への変換を行う (図 4.7 (a))。すなわち

$$\begin{aligned} X &= (N + h)\cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= (N + h)\cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= \{N(1 - e^2) + h\}\sin \varphi \end{aligned}$$

ここで  $\varphi, \lambda, h$  は経度・緯度・楕円体高、 $X, Y, Z$  は地心座標系における座標値である。卯酉線曲率半径  $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$ 、 $a$  は赤道半径、 $e$  は第一離心率である。GRS80 では、 $a=6378137$  m、 $e=0.081819191042815791$

と定められている。楕円体高  $h$  は標高とジオイド高の和とする。ジオイド高には EGM2008[22]を用いる。次に地心直交座標系から、興味のある領域への平行移動・回転を行う (図 4.7 (b))。すなわち

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \varphi_c & \cos \varphi_c & 0 \\ -\sin \lambda_c \cos \varphi_c & -\sin \lambda_c \sin \varphi_c & \cos \lambda_c \\ \cos \lambda_c \cos \varphi_c & \cos \lambda_c \sin \varphi_c & \sin \lambda_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{pmatrix}$$

ここで  $\varphi_c, \lambda_c, h_c, X_c, Y_c, Z_c$  は  $P_c$  の緯度経度楕円体高、地心直交座標系出の座標値、 $x, y, z$  は局所的な直交座標系での座標値である。通常  $h_c=0$  とする。これは  $P_c$  を原点とし、北向きが  $y$  軸、鉛直上向きが  $z$  軸 ( $x$  軸は自動的に決まる) となるような座標系であり、式中の回転行列は  $Z$  軸中心の  $\varphi_c$  度回転行列、 $Y$  軸中心の  $\lambda_c$  度回転行列、座標を入れ替える行列の積である。次項で述べるように、有限要素モデル生成にはデカルト座標系の  $xy$  平面において格子状に整列した DEM データが必要になる。変換した座標値は格子状に並んではないため、適切に補間を行うことにより格子状のデータを生成する (図 4.7 (c))。

有限要素モデルの生成は、Ichimura et al.[6][9]の手法をベースとして行う。具体的には、複雑な地表面・境界面形状を持った成層構造の入力データ (DEM による標高データと物性値) に対し、バックグラウンド構造格子を用いて、四面体要素とボクセル要素からなるハイブリッドメッシュを生成する。本研究ではボクセル要素を更に 5 つの四面体要素に分割し、四面体要素をすべて二次要素とする。4.1 で述べた改良済みのメッシュ生成手法のグリーン関数計算への適用は今後の課題である。

次に、ここまでの手法で生成した有限要素メッシュを用いてグリーン関数を計算する方法と、必要なポスト処理に関して述べる。小断層は 3 次の Bi-cubic スプライン形状とする [15]。プレート境界面上に配置した構造格子上の各点に Bi-cubic スプライン形状のすべり量を入力する。小断層のすべり分布の中で、海溝軸を超える部分があれば、そのすべり量は 0 とする。すべり方向は 2 方向を計算する。1 方向は格子点におけるプレート境界面への接面に沈み込み方向を投影した方向とし、もう一方向は格子点におけるプレート境界面に対する法線ベクトルと沈み込みベクトルの双方に直行する方向とする。

これらの小断層に対する応答変位を計算する数値解析手法として、地殻構造のような形状の複雑な連

続体の解析に適した有限要素法を用いる。地殻変動を静弾性変形としてモデル化する。境界条件を考慮して整理すると、問題は以下の一次連立方程式に帰着する：

$$\mathbf{Ku} = \mathbf{f}$$

ここで  $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{f}$  はそれぞれ全体剛性マトリクス、変位ベクトル、外力ベクトルである。式(4.1)と同様に計算に、小断層におけるすべり量を節点分割法により  $\mathbf{f}$  に変換する。速度ではなく変位について解くという違いがあるが、線形方程式の求解自体も式(4.1)と同様の手法を用い行うことができる。

計算結果から、地表面の任意の点での変位を取り出すことができるが、変位の  $xyz$  成分は前章で定めた局所的なデカルト座標系におけるものである。そのため、GNSS や InSAR などの測地観測で得られる  $ENU$  変位と直接比較することはできない。そこで、下記の式により局所的なデカルト座標系における  $xyz$  方向の変位を点  $P$  における  $ENU$  系の変位へと変換する：

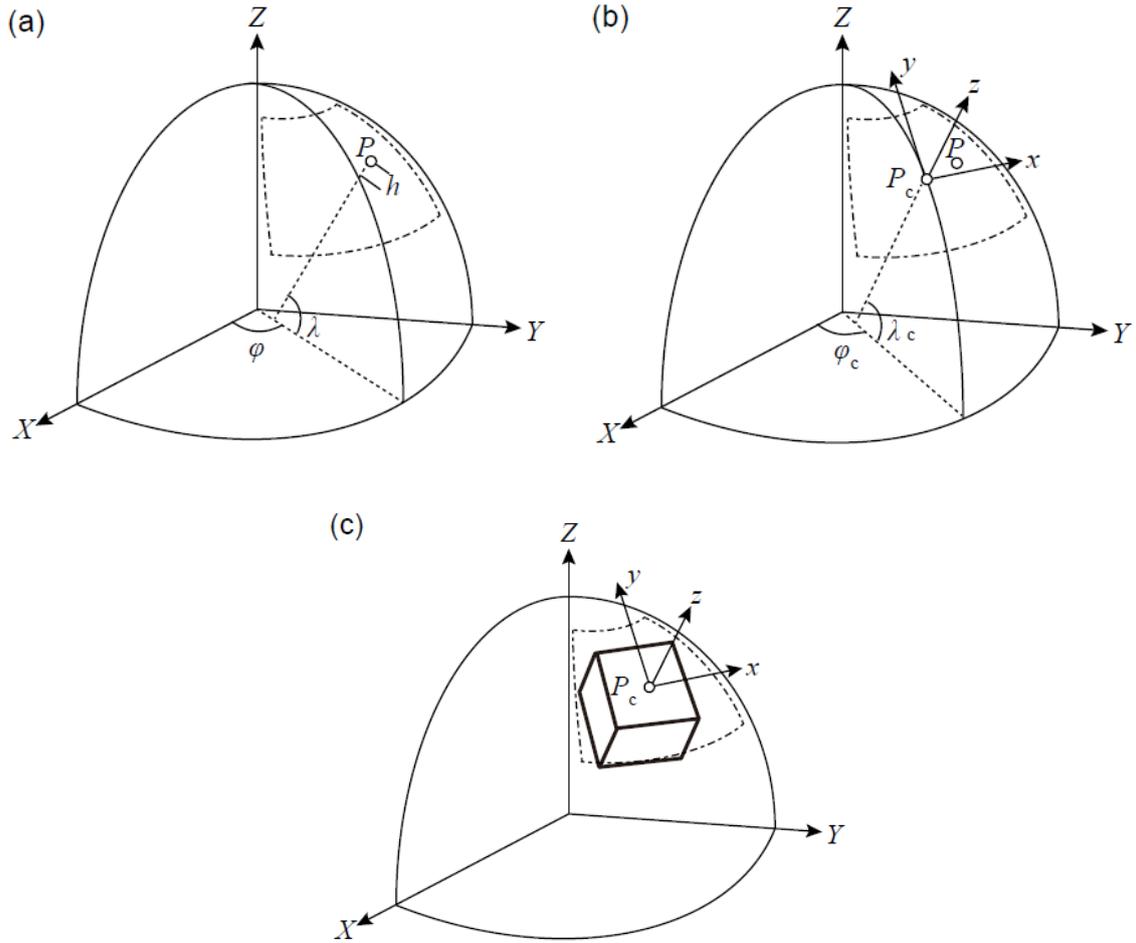


図 4. 7. 座標変換の模式図。簡単のため、GRS80 準拋楕円体の 1/8 を取り出している。(a) $P$  の座標値の地理座標系から地心直交座標系への変換。 $P$  は楕円体面から楕円体高  $h$  の場所にあることに注意。入力データ範囲が、一次地下構造モデルのように地理座標系において長方形の範囲で指定されたとすると、直交座標系上では一点鎖線で囲まれた領域のようにゆがんだ形状となる。(b) $P$  の座標値の地心直交座標系から  $P_c$  を原点とする局所的なデカルト座標系への変換。 $h_c=0$  を仮定すれば、 $P_c$  は楕円体面上に存在する。(c)局所的なデカルト座標系における格子状に整理した DEM データの切り出し。黒太線の立方体が新しい DEM の領域である。

$$\begin{pmatrix} u_E \\ u_N \\ u_U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sin \lambda \cos \varphi & -\sin \varphi & \cos \lambda \cos \varphi \\ -\sin \lambda \sin \varphi & \cos \varphi & \cos \lambda \sin \varphi \\ \cos \lambda & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\sin \lambda_c \cos \varphi_c & -\sin \varphi_c & \cos \lambda_c \cos \varphi_c \\ -\sin \lambda_c \sin \varphi_c & \cos \varphi_c & \cos \lambda_c \sin \varphi_c \\ \cos \lambda_c & 0 & \sin \varphi_c \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}$$

ここで $u_E, u_N, u_U, u_x, u_y, u_z$ はそれぞれ点 $P$ の $ENU$ 、 $xyz$ 方向の変位である。この操作により、変位を一度地心直交座標系での成分表示に戻した後、点 $P$ における $ENU$ 変位へと再変換することが可能となる。

全国一次地下構造モデル[20]を用いて日本海溝域と南海トラフ域の数値計算用モデルを作成する。全国一次地下構造モデルは長周期地震動の予測のために作成された、日本列島の大半の領域をカバーする地震は速度構造モデルである。浅層地盤から海洋マントルまでを23層構造でモデル化しており、各層のジオメトリと物性値が与えられている。モデル化の方針としては、地質情報や各種構造探査のデータを用いた0次モデル、面的に存在する探査データを用い層境界面の形状の高精度化による0.5次モデル、地震観測記録の波形やスペクトル比などを用いた1次モデル、という順番に改善が重ねられ構築されている[26]。全国一次地下構造モデルは日本測地系をベースとしているため、世界測地系に変換してから、先述のデカルト座標系での座標値への変換を行う。

有限要素モデル作成時は、変位固定境界条件の影響を小さくするため、興味のある解析領域よりメッシュ作成領域をかなり広くとる必要がある。プレート境界型の巨大地震における断層すべり面は、深部においては海洋および大陸プレートの境界であると考えられる。一方、津波が発生するような、破壊が浅部に及ぶ地震の場合、破壊面が地表（海底）に現れるのは海溝軸・トラフ軸であると考えられる。地震の発生場所が深い場所では構造境界に従い、浅いところでは必ずしもそうとは限らないことは、微小地震の解析からもわかっている。本研究ではこのような考えに基づき、すべり面を深部では海洋プレート上面に設定し、これが海底で海溝軸・トラフ軸に到達するよう設定する。浅部すべり面は付加体堆積物と海洋プレート上面の堆積物の間を通して海底に到達すると思われるが、全国一次地下構造モデルにおいて両堆積物は一つの層として与えられているため、すべり面については新たに設定する必要がある。そこで、拘束点を用いた曲面の生成を行っている他の研究（例えば[23]）にならい、フィリピン海プレートのデータとトラフ軸の間を **an adjustable-tension continuous curvature surface gridding algorithm**[24])により補間することで、標高データの補正を行った。

メッシュ生成のための領域サイズ、分解能などの各パラメータは、日本海溝における $M_w9$ クラス地震に対する測地観測点での数値解の評価結果[25]に基づき設定する。これにより、層境界の要素サイズを1km、震源域を中心として領域を $2500\text{km} \times 2500\text{km} \times 1100\text{km}$ としてメッシュを生成するのを基本設定とする。全国一次地下構造モデルを構成する23層のうち、浅部の14層は地表面付近の小さい空間スケールの不均質性を表現しており、今回注目する空間スケールには影響しないと考え、同じ物性の一層にまとめて計算を行うこととする。物性値の詳細な情報については全国一次地下構造モデルに関する資料[26]を参照されたい。

東北日本の日本海溝域においてグリーン関数を計算する。座標変化の中心点である点 $P_c$ を2011年東北地方太平洋沖地震の震源付近に定める(表4.3)。生成された有限要素メッシュを図4.8に示す。東北地方太平洋沖地震の震源域を中心に、地球の楕円体性を考慮した有限要素モデルが生成されていることがわかる。今回の計算例では、簡単のため、日本水準原点のジオイド高をすべての場所のジオイド高として使用することとした。この有限要素モデルにおいて、表4.3に示す領域に、3次Bi-cubicBスプライン形状の小断層を導入するための格子点を配置すると、その個数は514個となり、沈み込み方向とその

垂直方向とを合わせて 1028 個のグリーン関数を計算することとなった。計算結果の一例を図 4.9 に示す。3 次 B スプライン型の小断層に対すると表面応答が計算されていることがわかる。海溝軸付近の格子点においては、海溝軸を超える部分の断層すべりは不連続的に 0 となっていることがわかる。

新学術領域研究「地殻ダイナミクス」との連携により、このグリーン関数を用いて 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり推定を行った[27]。国土地理院による GNSS 観測ネットワーク GEONET と海底水圧計から得られる地殻変動のデータから、地震前後の数十分のデータの解析により、余効すべりや余震などの影響を含まない純粋な地殻変動だけを抽出し、この変位データを再現するグリーン関数の重ね合わせを最小二乗法により求めることで、地震時の断層すべり分布を推定した。図 4.10 に推定結果を示す。(a)より、地表面変位観測データをよく説明するような断層すべり分布を得られていることがわかる。(b)は観測データと変位計算値の残差をプロットしたものであり、東北地方の陸域を除いて、解析領域全体で同じ残差の空間分布がみられることがわかる。グリーン関数計算に半無限弾性体を用いた既往研究[28]においては、残差の空間分布に系統的な偏りがみられた。これは 3 次元の弾性構造不均質性を考慮したグリーン関数の使用により、データの説明能力が改善されたことを示す良い一例である。東北地方の陸域で残差が大きくなっていることは、陸域のより局所的な構造不均質性[29]が考慮されていないことによると推測される。これは地表面付近の小さなスケールの構造不均質性が重要となる可能性を示しており、これらをどこまで取り入れてグリーン関数計算を進めていくかは、今後の検討課題である。

今後は、南海トラフ域に対しても同様の計算を行い、作成したグリーン関数をライブラリとして公開するための準備を進めていく予定である。新たに計算中のグリーン関数においては、EGM2008 によるジオイドモデルを導入し、またより小さいスケールの構想不均質性を取り入れるなど、設定の高度化を進めている。

表 4. 3. 日本海溝域のモデルにおける中心点  $P_c$  の位置とグリーン関数の計算領域を表す地理座標。

	$P_c$ (経度 (°), 緯度 (°), 楕円体高 (m))	グリーン関数計算領域 西南端-東北端 (経度 (°), 緯度 (°))
Tohoku	(142.369, 38.322, 0)	(140.5, 36)-(145, 36)

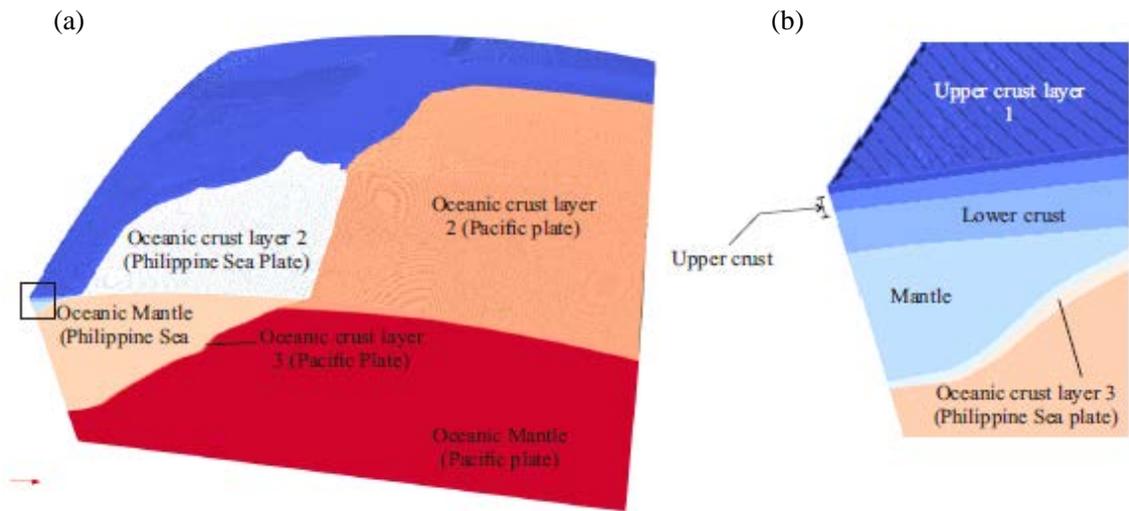


図 4. 8. 日本海溝域を中心とした有限要素モデル。異なる物性値の層ごとに違う色を付けている。(a)全体像。(b) (a)での黒い長方形部分を拡大した図。

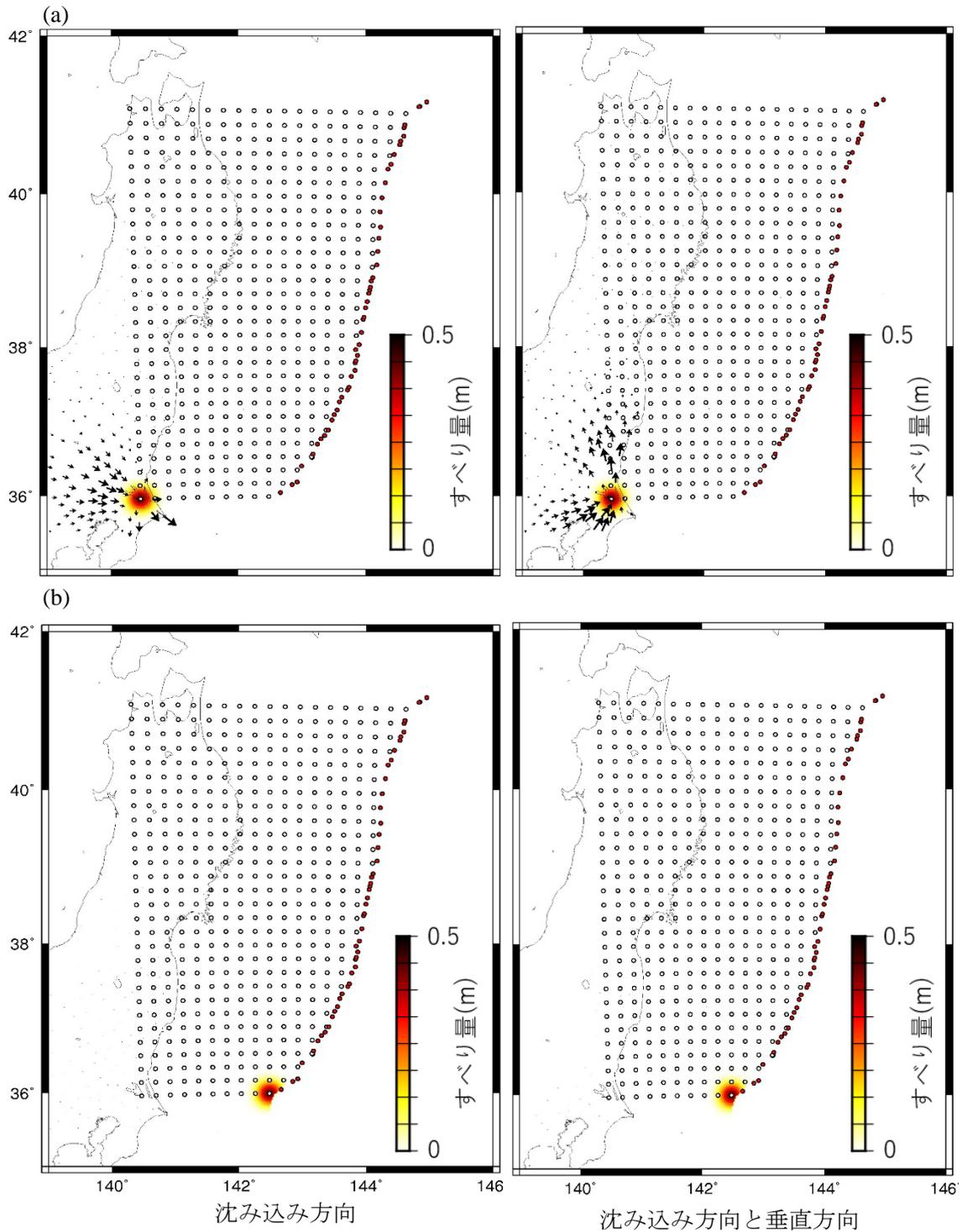


図4. 9. 東北地方において計算されたグリーン関数の例。格子点は入力する断層すべりの3次 Bi-cubicB スプライン形状分布の中心点。矢印は地表面の応答変位を表す。(a)断層の深い部分におけるグリーン関数の一例。(b)海溝軸間際のグリーン関数の一例。海溝軸を超える部分の断層すべりは不連続的に0となっている。周囲に観測点がないため地表面変位は可視化されていない。

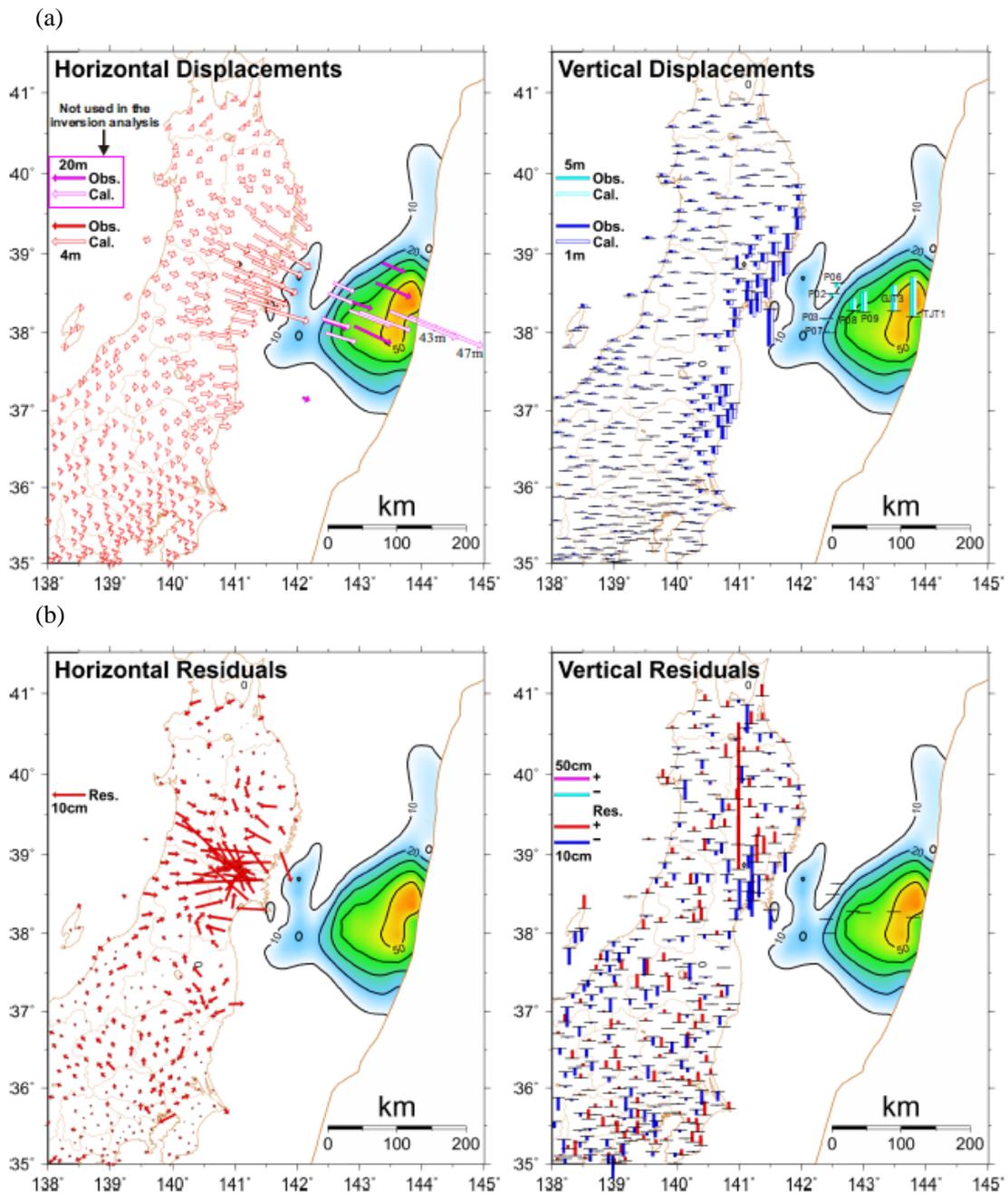


図 4.10. 推定された断層すべりの結果。すべり分布の色コンターはすべりの絶対値を表し、すべり方向は本図上では示されていない。(a) 地表面変位観測データとの比較。観測データを説明するようなすべり分布を得られていることがわかる。(b) 観測データと変位計算値の残差のプロット。東北地方の陸域を除いて、解析領域全体で同じ残差の空間分布がみられることがわかる。(JAMSTEC 飯沼卓史研究員よりご提供)

## 参考文献

- [1] Muneo Hori, Introduction to Computational Earthquake Engineering, Imperial College Press, 2011.
- [2] Rice, J. R., Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 98, pp.9885-9907, 1993.
- [3] Yoshimitsu Okada, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2), pp.1018–1040, 1992.
- [4] Mamoru Hyodo and Takane Hori, Re-examination of possible great interplate earthquake scenarios in the Nankai Trough, southwest Japan, based on recent findings and numerical simulations, *Tectonophysics*, 2013.
- [5] Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Seizo Tanaka, Muneo Hori, Maddegedara Lalith, Yoshihisa Shizawa and Hiroshi Kobayashi, Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF× 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation, *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, IEEE Press, 2014.
- [6] Tsuyoshi Ichimura, Ryoichiro Agata, Takane Hori, Kazuro Hirahara, Chihiro Hashimoto, Muneo Hori, and Yukitoshi Fukahata, An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3-d island-scale high-fidelity model, *Geophysical Journal International*, 206(1), pp.114–129, 2016.
- [7] Ryoichiro Agata, Sylvain D. Barbot, Kohei Fujita, Mamoru Hyodo, Takeshi Iinuma, Ryoko Nakata, Tsuyoshi Ichimura, and Takane Hori, Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake, *Nature Communications*, 10(1), 1385.
- [8] HJ Melosh and A Raefsky, A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(5), pp.1391–1400, 1981.
- [9] Aagaard, Brad T., Matthew G. Knepley, and Charles A. Williams, A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite - element models of quasi - static and dynamic crustal deformation, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 118.6, pp.3059-3079, 2013.
- [10] Ichimura, Tsuyoshi, Muneo Hori, and Jacobo Bielak, A hybrid multiresolution meshing technique for finite element three-dimensional earthquake ground motion modelling in basins including topography, *Geophysical Journal International*, 177.3, pp.1221-1232, 2009.
- [11] Dieterich, J. H., Modeling of rock friction, 1. experimental results and constitutive equations, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 84, pp.2161-2168, 1979.
- [12] Ruina, A. Slip instability and state variable friction laws, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 88, pp.10359-10370, 1983.
- [13] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. & Flannery, B. P., *Numerical Recipes in C (2nd Ed.)*, The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 1992.
- [14] Matsuzawa, Takanori, et al, Comprehensive model of short - and long - term slow slip events

- in the Shikoku region of Japan, incorporating a realistic plate configuration, *Geophysical Research Letters*, 40.19, pp.5125-5130, 2013.
- [15] Paul G Okubo, Dynamic rupture modeling with laboratory-derived constitutive relations, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 94(B9), 12321–12335, 1989.
- [16] Bunichiro Shibazaki and Toshihiko Shimamoto, Modelling of short-interval silent slip events in deeper subduction interfaces considering the frictional properties at the unstable-stable transition regime, *Geophysical Journal International*, 171(1), pp.191–205, 2007.
- [17] Kachishige Sato, Naoya Minagawa, Mamoru Hyodo, and Toshitaka Baba. Effect of elastic inhomogeneity on the surface displacements in the northeastern Japan, Based on three-dimensional numerical modeling, pp.1083–1093, 2007.
- [18] Yabuki, T., and M. Matsu'ura, Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip, *Geophysical Journal International*, 109.2, pp.363-375, 1992.
- [19] Komatitsch, Dimitri, and Jeroen Tromp, Spectral-element simulations of global seismic wave propagation—I. Validation, *Geophysical Journal International*, 149.2, pp.390-412, 2002.
- [20] Koketsu, K., Miyake, H., Fujiwara, H. & Hashimoto, T., Progress towards a japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, *Proceedings of the 14th World conference on earthquake engineering S10-038*, 2008.
- [21] Gabi Laske, Guy Masters, Zhitu Ma, and Mike Pasyanos, Update on CRUST1. 0—A 1-degree global model of Earth's crust, *Geophys. Res. Abstr.*, Vol. 15, Vienna, Austria: EGU General Assembly, 2013.
- [22] Nikolaos K. Pavlis, Simon A. Holmes, Steve C. Kenyon, John K. Factor, The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of geophysical research ,solid earth* 117.B4 (2012).
- [23] Ide, S., Shiomi, K., Mochizuki, K., Tonegawa, T., Kimura, Split Philippine Sea plate beneath Japan. *Geophysical Research Letters*, 37(21), doi:10.1029/2010GL044585, 2010
- [24] Smith, W. H. F. and Wessel, P., Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, Vol.55(3), pp.293–305, 1990.
- [25] R. Agata, T. Ichimura, K. Hirahara, M. Hyodo, T. Hori, C. Hashimoto and M. Hori, Numerical Verification Criteria for Coseismic and Postseismic Crustal Deformation Analysis with Large-scale High-fidelity Model, *Procedia Computer Science*, 51, 1534-1544, 2015.
- [26] 地震調査研究推進本部 地震調査委員：地下構造モデル作成の考え方, 2017,  
[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17apr\\_chikakozo/model\\_concept.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17apr_chikakozo/model_concept.pdf) (最終閲覧日：2019年4月11日)
- [27] T Iinuma, R Agata, Y Ohta, R Hino, T Hori, Modelling of the Early Postseismic Deformation Associated with the 2011 Tohoku-Oki Earthquake with Considering Non-linear Rheology, *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2018.
- [28] T Iinuma, R Hino, M Kido, D Inazu, Y Osada, Y Ito, M Ohzono, H Tsushima, S Suzuki, H Fujimoto, S Miura, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.

0) refined by means of seafloor geodetic data, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 117.B7, 2012.

- [29] J Muto, B Shibasaki, T Iinuma, Y Ito, Y Ohta, S Miura, Y Naka, Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku - Oki earthquake, *Geophysical Research Letters* 43.10, pp.4971-4978, 2016.

### 4.3 津波粒子シミュレーションの高度化

粒子法シミュレーションは防災・減災を目的とした諸問題において有効な手法であるが、アルゴリズムの特徴によりスーパーコンピュータを活用することが難しい。よって、従来の粒子法シミュレーションコードでは大規模計算によって計算領域の拡張や精度改善を行う事が困難である。そこで本課題では、粒子法の大規模シミュレーションを実現するためのコード開発に取り組んでいる。ここで扱う粒子法とは、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics Method) や DEM (Discrete Element Method) に代表される近接粒子相互作用を指す。本年度は SPH における低 B/F 計算機向けの高速度アルゴリズム開発、並びに津波遡上問題に資する SPH コードの精度検証、さらに動的負荷分散手法の領域分割の改良にそれぞれ進捗があったため、下記にまとめた。

#### 4.3.1 低コストな大規模粒子シミュレーションの実施に向けて

粒子法は現在、防災や産業などの分野において広く使われている手法であるが、一方でメッシュ法等に比べて計算コストが高いという問題点も存在している。特に近年は、古典的な CPU を用いて粒子法の大規模かつ高解像度な数値計算を行おうとすると、電気代効率という観点から大きな困難を伴う。そこで、近年は加速器と呼ばれる、外部演算装置を用いるのが一般的になりつつある。

加速器とは、通常の CPU に比べて演算性能は落ちるが、多数のプロセッサを備えた外部演算装置の事である。近年よく使われている加速器としては、NVIDIA 社の GPGPU、Intel の Xeon Phi などがあげられる。これら加速器の特徴は、その電気代に対する演算効率の良さである。実際、スーパーコンピュータの電力に対する演算能力の高さをランク付けした GREEN 500 というランキングでは、ほとんどが NVIDIA の GPU である(2018年11月)。したがって、今後粒子法を用いて大規模かつ高解像度な数値計算を行っていくにあたって、この様な加速器の利用は避けては通れない。

一方で、粒子法を加速器の上で効率よく動作させる事には、課題も存在する。近年の加速器は、単位時間あたりの演算数( $F$ )に対して、メモリの転送速度( $B$ )が不足している物がほとんどである。この様なアーキテクチャを、低 $B/F$ アーキテクチャと呼ぶ。一方で、SPH 法は、演算数に対してメモリの転送の量が多いため、アーキテクチャは高 $B/F$ である方が望ましい。これは、既存の CPU と同じ SPH 法の実装をそのまま加速器上に持ってきて、メモリ転送がボトルネックとなってしまう、効率的な計算ができないという事態になる事を意味している。

この問題を解決するために、Multiwalk 法と呼ばれる、低 $B/F$ な加速器上で効率よく粒子法を動作させるためのアルゴリズムが開発された[1]。Multiwalk 法の鍵は、粒子のグルーピングである。例えば、単純な SPH 法の実装では、加速度を計算したい粒子( $i$ 粒子)のデータと、その粒子に相互作用する粒子( $j$ 粒子)のデータを、個々加速器に送る事になる。この時、加速器上のプロセッサは $i$ 粒子数 $\times j$ 粒子数だけ、加速器上のメインメモリにアクセスし、データを読む事になる。一方で、Multiwalk 法では、まずは、CPU の側で、空間的に近い位置に存在する幾つかの $i$ 粒子をグルーピングする。次に、この $i$ 粒子群内に所属する粒子に対応する $j$ 粒子全てを含む、 $j$ 粒子群を生成する。そして、この $i$ 粒子群と $j$ 粒子群を加速器に転送する。加速器は粒子にかかる加速度の計算をする際に、キャッシュに載っている $i$ 粒子と $j$ 粒子のデータを用いて相互作用計算を行えるため、メインメモリへのアクセス回数が減少する。この時、プロセッサとメインメモリとの間の通信回数は、 $i$ 粒子数 $+j$ 粒子数に減少する。これにより、メモリ転送がボトルネックになりがちな加速器上で、粒子法を効率よく動作させる事ができるようになった。

ただし、ここで注意することは、何個の*i*粒子をまとめるかは、**free parameter** であるということである。**SPH** 法で計算する圧力勾配は短距離力であるため、*i*粒子の数を不必要に大きくすると、一つの*i*粒子群の中に、全く違う*j*粒子を持つ2つの粒子が含まれてしまうという事もありうる。これにより、演算コストが上昇してしまい、逆に計算コストが大きくなってしまう可能性がある。そのため、「最適な*i*粒子数」が存在するはずであるが、それは今の所自明ではない。

そこで、本研究では、加速器を用いた効果的な数値計算を行う上で、最適な*i*粒子数を予言する評価式の導出を行い、その上で実際に実装した **SPH** 法のプログラムが、その予想値と調和的な結果を出すかについて、調査した。まず、**SPH** 法を用いて圧力勾配を計算する際に、加速器に転送されるデータのバイトサイズと、加速器上で計算する数式の演算数を導出する。以下は **SPH** 法を用いて圧力勾配を評価する際に加速器上で計算する数式である。

$$\frac{\Delta \vec{v}_i}{\Delta t} = - \sum_j m_j \left( \frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W(|\vec{r}_i - \vec{r}_j|; h)$$

ここで、 $\vec{v}$ は速度、 $t$ は時間、 $m$ は質量、 $p$ は圧力、 $\rho$ は密度、 $\vec{r}$ は座標、 $h$ は **smoothing length** と呼ばれる、粒子の相互作用半径を決める量である。物理量の右下の*i*は、それが*i*番目の粒子の物理量であることを意味する。 $W$ はカーネル関数と呼ばれる関数で、今回は以下のような関数を用いている。

$$W(r; h) = \frac{21}{2\pi} \left(1 - \frac{r}{Hh}\right)_+^4 \left(1 + 4 \frac{r}{Hh}\right)$$

ここで、 $H$ はカットオフ長であり、粒子間の距離が $Hh$ 以上の粒子は相互作用をしない。これから、相互作用の計算に必要な*i*粒子の物理量は、 $p, \rho, \vec{r}, h$ であり、*j*粒子のそれは $m, p, \rho, \vec{r}, h$ である事がわかる。従って、*i*粒子のバイトサイズ $S_i$ は、倍精度を仮定すると、 $6 \times 8 = 48$ バイト、*j*粒子のバイトサイズ $S_j$ は $7 \times 8 = 56$ バイトである事がわかる。また、この加速度を計算するのに必要な式の浮動小数点演算数は、**70**である事がわかる。ただし、倍精度の除算及び平方根演算は加算などに比べて重い為、ここでは除算と平方根の実行的な演算数は加算の8倍であると仮定した。

**Multiwalk** 法では、複数個の*i*粒子と、それらに対応する*j*粒子を加速器に送る。そこで、今この*i*粒子の個数を $N_i$ 、*j*粒子の個数を $N_j$ と置く。加速器上で消費される計算時間 $C$ は、この $N_i$ 個の*i*粒子をメモリからキャッシュに持ってくるのにかかる時間( $C_{\text{store}}$ )、 $N_j$ 個の*j*粒子をメモリからキャッシュに持ってくるのにかかる時間( $C_{\text{load}}$ )、演算にかかる時間( $C_{\text{arith}}$ )から構成される。

$$C = C_{\text{store}} + C_{\text{load}} + C_{\text{arith}}$$

ここで、加速器のメモリ転送速度 $B$ 、単位時間あたりの演算数 $F$ を用いれば、

$$C_{\text{store}} = \frac{N_i S_i}{B}, C_{\text{load}} = \frac{N_j S_j}{B}, C_{\text{arith}} = \frac{N_j N_i N_{\text{arith}}}{F}$$

となる。従って、 $i$ 粒子一個の加速度を計算するのに必要なコストの、 $N_j = 0$ の場合との差分は、

$$\frac{C}{N_i} - \frac{S_i}{B} = \frac{1}{B} \left( \frac{N_j}{N_i} S_j + \frac{B}{F} N_j N_{arith} \right)$$

となる。以降、加速器上で消費される計算コストとして、このコストを考えていくことにする。ここで注意することは、 $N_j$ は $N_i$ の関数になっているということである。表 4.4 に、代表的な $H$ の値に対する、 $N_j$ の値を $N_i$ の関数として書いた。 $H$ は、一般的に2から3程度の値にする事が多いため、今回は $H = 2.1$ および3.1の場合を考える。また、比較のために大きい値である、6.1もテーブルに載せた。したがって、計算コストは $N_i$ のみに依存する形に書ける。また、この計算コストの $N_i$ に対する関数形は、加速器の $B/F$ に依存しているという事が見て取れる。一方で、計算コストの絶対値は $1/B$ に依存する。

表 4.4.  $N_i$ を変化させた際の、 $N_j$ の値。

$N_i$	$H = 2.1$	$H = 3.1$	$H = 6.1$
1	32	122	948
8	87	231	1351
27	178	388	1838
64	311	599	2415
125	492	870	3088
216	727	1207	3863
343	1022	1616	4746

本研究では、検証のために、実際に SPH 法をいくつかの加速器の上で実装した。具体的には、NVIDIA 社の GPU を 2 種類(K40, P100)用いた。表 4.5 に、これらの加速器の $B$ と $F$ 、および $B/F$ を記載した。GPU での実装には CUDA を用いた。

表 4.5. 本課題で用いた加速器の一覧。

Name	$B$ GB/sec	$F$ TFlops	$B/F$
P100	732	5.3	0.14
K40	288	1.43	0.20
京	64	128	0.50

なお、実際に Multiwalk 法を実装するにあたって、汎用粒子法並列化ソフトウェアである、Framework for Developing Particle Simulator (FDPS) [2,3]を用いた。FDPS は、任意の粒子法に対して自動的に並列化を適用するソフトウェアであり、version 2 以上では Multiwalk 法をサポートしている。近傍粒子の探索に関する部分は FDPS が行うため、ユーザーが書くべき部分は以下の 3 つである。

- (1) ホスト CPU から加速器へのデータの転送
- (2) 加速器上で実行させる加速度の計算
- (3) 加速器からホスト CPU への加速度の回収

図 4.11 は以上の 3 つの処理を表した絵である。この図において、青い部分はホスト CPU の実行する部分であり、緑の部分は加速器上で実行される部分である。本研究で計算コストと称しているものは、この緑で表される処理にかかる時間の事である。

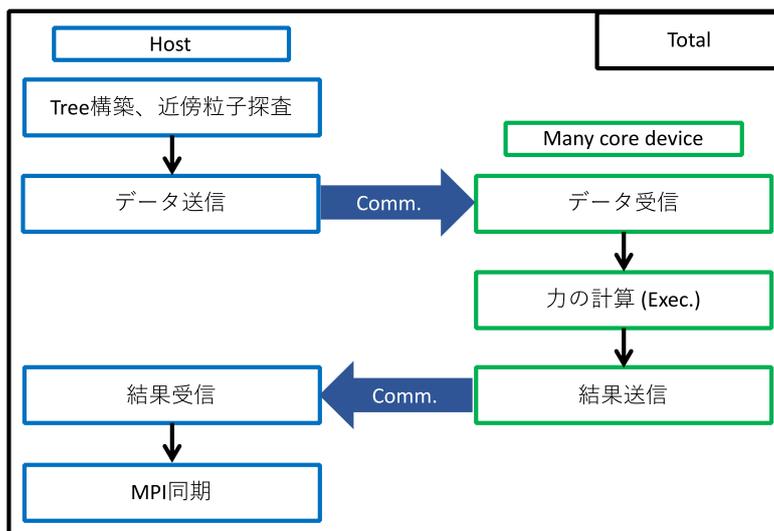


図 4.11. FDPS から Multiwalk 法を用いて SPH の加速度の計算を行う際の概念図。青のボックスで囲まれている処理はホストで行われ、緑のボックスで囲まれている処理は加速器で行われる。

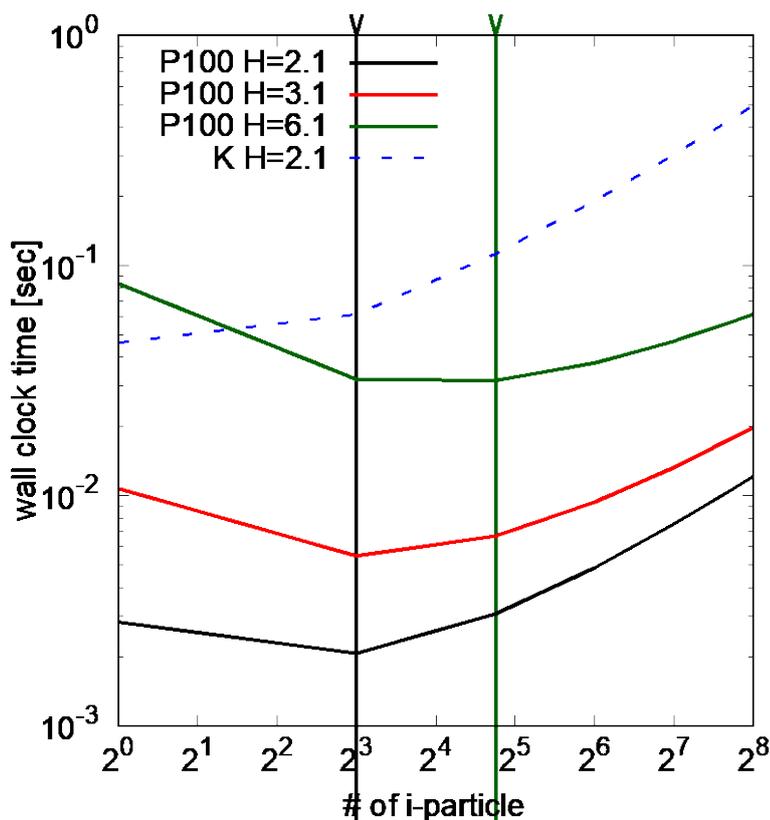
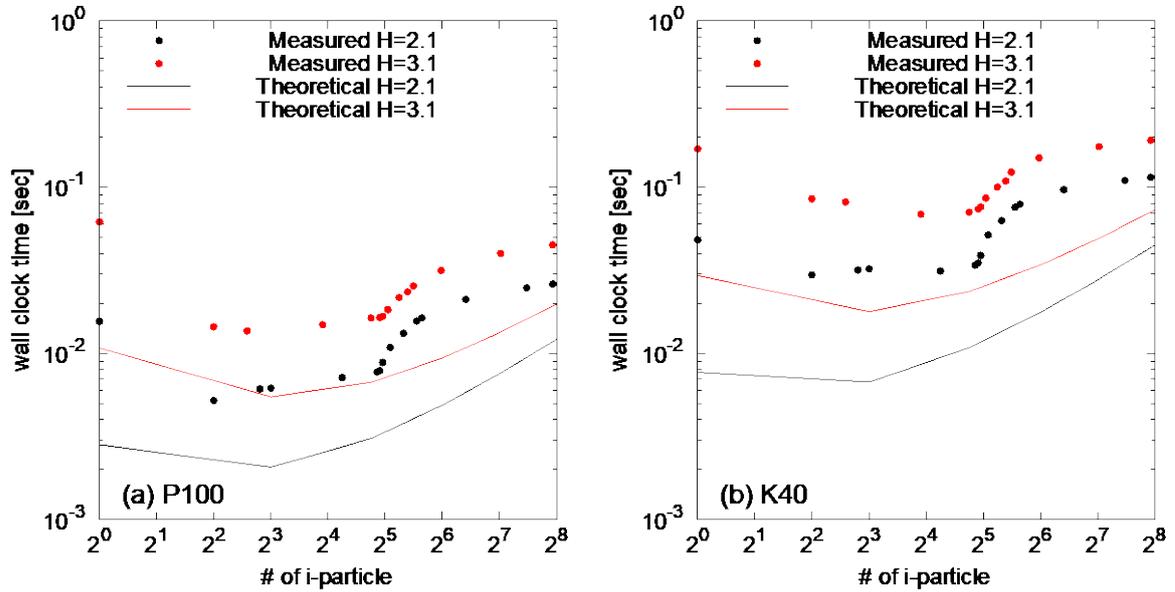


図 4. 12. 本課題で導出された、コストの予測式を $N_i$ の関数として描いたもの。実線は P100 のもので、黒が $H = 2.1$ 、赤が $H = 3.1$ 、緑が $H = 6.1$ のものである。破線は京コンピュータの値である。上部の矢印は、コストを最小化する  $N_i$  の値を指している。

図 4. 12 は、我々のコスト評価モデルを実際に $N_i$ の関数として描いたものである。今回は、 $B/F$ の影響を見るために、用いた加速器の中から最も $B/F$ の低い、P100 のコストを描いた。また、比較のために、 $B/F$ の高いアーキテクチャである、京コンピュータ ( $B/F = 0.5$ )の結果を載せた。図の黒( $H = 2.1$ )及び赤( $H = 3.1$ )の実線からわかるように、計算コストは $N_i = 2^3$ までは減少していく。したがって、Multiwalk 法によるメモリ通信の削減の効果が見えていると言える。一方で、 $N_i > 2^3$ の領域では、計算コストは逆に増加してしまう。これは、多数の粒子をまとめすぎたため、不要な演算コストが増加してしまい、逆に計算コストが増えてしまったためである。

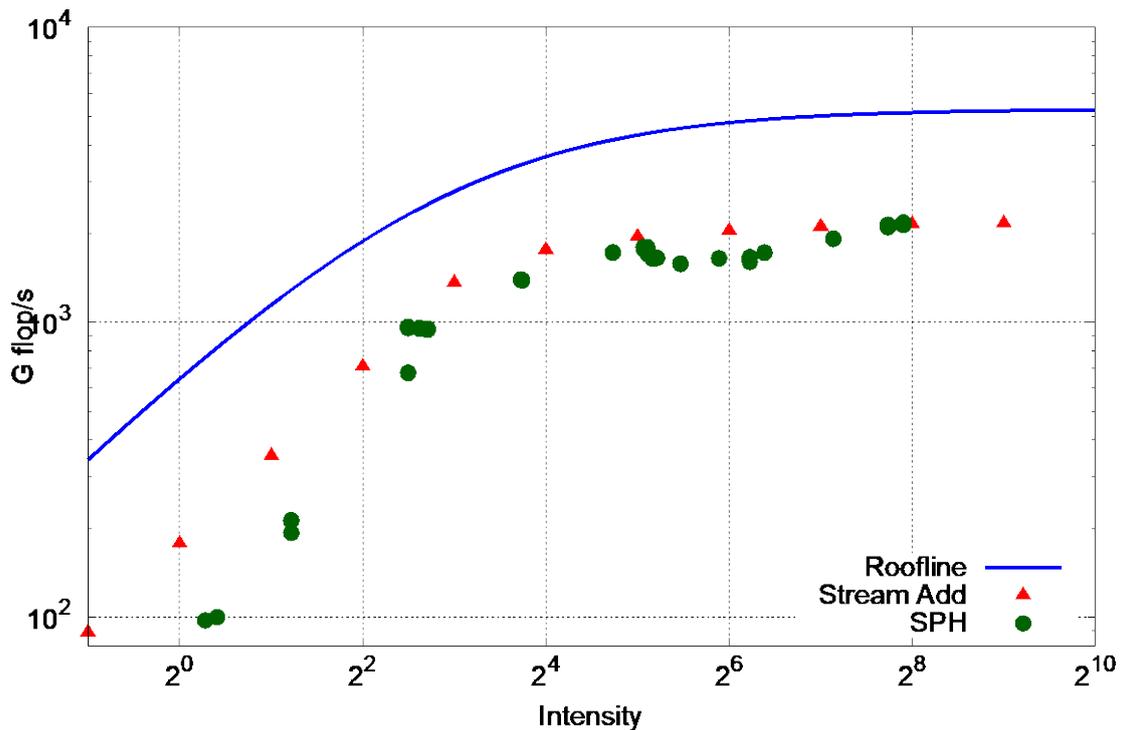
これから、Multiwalk 法を用いて SPH 法を計算した際には、グルーピングする $i$ 粒子の個数 $N_i$ に、計算コストを最小化するような最適値が存在することが確かめられる。この最適値の値は、加速器の $B/F$ のみならず、粒子の相互作用半径、すなわちカットオフ長にも依存する。図 4. 12 の緑の実線は、 $H = 6.1$ の結果であり、一般的な $H$ の値からやや多めに取った場合の結果である。この時、 $N_i = 2^5$ が最適な値となる。 $N_i$ が最適値よりも小さいところでは、計算コストはメモリ通信により律速され、一方、大きいところでは演算コストによって律速される。したがって、 $H$ が大きくなるほど最適な $N_i$ は大きくなるため、Multiwalk 法を用いて SPH 法の計算をする際には、どの程度のカットオフ長を用いるかにも注意する必要がある。

一方で、Multiwalk 法は、常に計算コストを減少させるとは限らない。図 4.12 の破線は、京コンピュータのものであり、P100 に比べると大きい  $B/F = 0.5$  の物であるが、この場合、計算コストは  $N_i$  が大きくなるに従い、単調に上昇する。この場合、Multiwalk 法は効果的であるとは言えない。



・ 図 4.13. 本課題で導出されたコストの予測式と、加速器上で実際に加速度の計算を動作させた際に測定された計算コスト。パネル(a)は P100 のもの、(b)は K40 のものである。黒が  $H = 2.1$ 、赤が  $H = 3.1$  であり、実線が予測式、丸が実測値。

図 4.13 は、実際に加速器上で SPH 法を実装し、加速度の計算を行った際の計算コストを、本研究で導出した予測式とともに表示したものである。まず、P100 での結果(a)に着目すると、本研究での予測式から求められる最適な  $N_i$  の値 ( $N_i = 2^3$ ) が、実際の計算でもよく再現できている事がわかる。また、 $H = 2.1$  の結果に着目しよう。我々の予測式は、 $N_i = 2^3$  は  $N_i = 1$  に対して 60% 程度のコスト削減があると予測する。これは実測値では 75% の削減になっており、概ね予想値を再現できているといえる。この結果は K40 でも同じである。我々のコスト予測式は、加速器の  $B/F$  に対して精度良く最適なグループ数を予測できると言える。



・ 図 4. 14. 演算強度と、加速器の単位時間あたりの演算数のグラフ。青はカタログスペックから得られたルーフラインモデルで、三角は Stream Add テストの結果、丸は SPH 法の結果である。

一方で、予測式と実測値の間には、ほぼ一定の 2 倍程度のズレが存在している事がわかる。このズレは、カタログスペックと実際の動作スペックの違いである。図 4. 14 の実線は、P100 に対して、演算強度と実行的な単位時間あたりの演算数を示したルーフラインモデルと呼ばれるグラフである[4]。ここで、演算強度とは、加速器上で実行する計算が必要とする、計算量とメモリサイズの比である。例えば、Multiwalk 法を用いた SPH の場合、演算強度  $I$  は、

$$I = \frac{N_i N_j N_{arith}}{N_i S_i + N_j S_j}$$

である。これは、加速器は  $I$  が小さい計算を実行する場合、即ち演算量に対して必要メモリサイズが大きい計算を行う場合、到達可能な演算速度はカタログスペックの物よりも小さくなる事を意味している。ただし、この実線は、カタログスペックから描いた予測値である。これと同じ物を、Stream Add と呼ばれる簡単なテストを用いて実測値に対して描いたのが、図 4. 14 の三角である。これから、三角は実線よりも常に低いため、カタログスペック通りの演算速度が出ていない事がわかる。また、同じくこれを SPH 法に関して描いたのが、図 4. 14 の丸である。三角と丸は概ね一致しているため、本研究で加速器上のコストを計るのに用いたコードは、P100 の出しうる演算速度のほぼ限界まで出せている事がわかる。

本研究では、FDPS と Multiwalk 法を用いた SPH 法に関して、その性能予測となる理論式を確立し他、実際の実装がその理論式に対してどの程度調和的かを調べた。結果、我々の実装は理論式をよく再現する事が確かめられた。ただし、我々の理論式は、粒子分布が一様である場合を仮定しているため、粒子分布が空間により大きく違い、疎密が激しい系などに関しては必ずしも有効では無い事に注意する。また、本課題では基本的に SPH 法に焦点を当てたが、 $i$ 粒子と $j$ 粒子のバイトサイズ及び演算数さえわかれば、SPH 法に限らずどのような様な短距離力にも適用できる手法である。故に、本課題で導出された計算コストの予測式は、今後より低 $B/F$ 加速器が一般的になると予測される状況において、汎用的に有用性の高い手法となる。

#### 4.3.2 大規模 SPH シミュレーションの精度検証

社会インフラ構造物の安全設計には、大規模津波水槽実験と数値シミュレーションのハイブリッドアプローチに基づく物理現象の包括的な理解が重要となる。しかし、大規模な津波現象の場合、数値シミュレーションモデルの信頼性は十分に検証されていない。そこで、ここではシミュレーションデータ（高効率並列計算技術に基づく粒子法シミュレーションを用いて得られたもの）を、Dry bed と Wet bed の両方の条件についての大規模実験データと比較することによって、粒子法による津波シミュレーションモデルの精度を検証する。ここで得られた情報は、津波の様な流れをより良く理解するために用いられる数値シミュレーションコードの開発を支援すると考えられる。

津波やダムブレイクおよび洪水が発生するのは稀ではあるが、一度発生すると甚大な人的被害をもたらす、社会インフラに壊滅的な損害を与える。現時点では、波が構造物に与える力の観測や推定は基礎となるプロセスが複雑なため、数多くの研究が行われているにもかかわらず依然として困難である。津波に対してより信頼性の高い垂直シュルターを含む安全な社会インフラの設計には、津波波力のより正確な推定が必要であり、関連する物理現象を包括的に理解するための実験と数値シミュレーションを用いたハイブリッドアプローチによる研究の重要性が増している。

今日までに津波の様な波について行われてきた研究の多くは実験的なアプローチに基づいている ([20]、[13])。例えば、ダムブレイクによって発生する波の流体力学的性質は、洪水の様な流体力学的現象において観察された流れの性質と類似していることが示された。すなわち、内陸を伝搬する津波の様な波を再現するために、これらの非定常流れの実験を用いることが可能である [9]。スイスの Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) にある Laboratory of Hydraulic Construction (LCH) で行われた過去の実験的研究では、水を上部貯水池から下部貯水池へ垂直放出することによって津波のような波を発生させる技術を提案している ([16]、[17]、[18])。この技術は、津波のような流れをシミュレートするためのダムブレイク実験と比較され、波の流体力学的性質をよく再現できていることが示されている。また実験装置のセッティングの柔軟性が高いため、Dry bed と Wet bed の両方の条件で波を生成させることが可能であり、海域における津波の伝播とその後の陸域への波の伝播をシミュレートすることが可能である。図 4.15 に示す様に、7つの超音波式距離センサ (US) と1つの超音波式速度プロファイラ (UVP) を使用して波高と速度プロファイルを測定し、津波のような流れの流体力学的特性が詳細に調べられている。

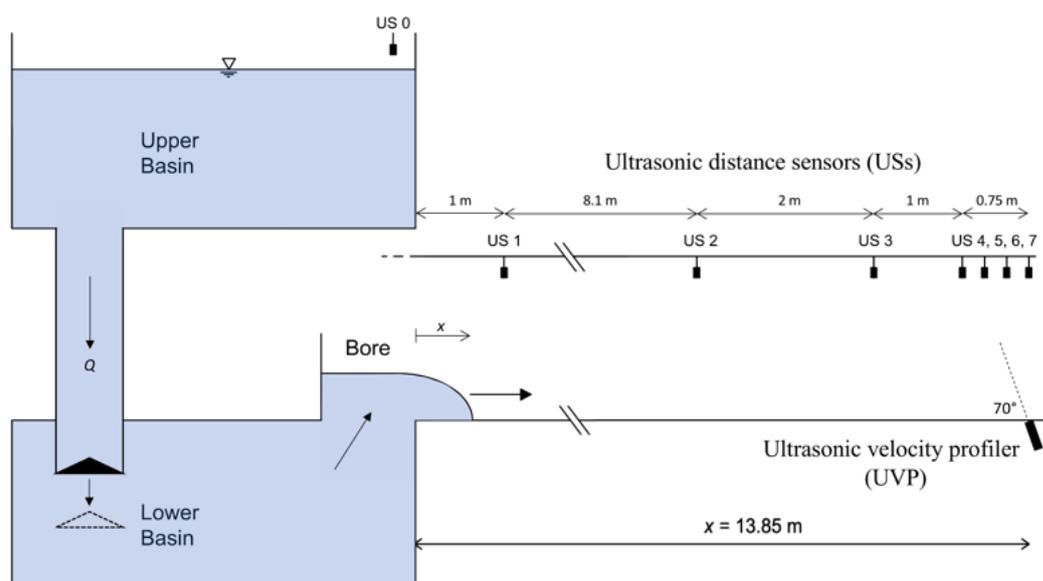
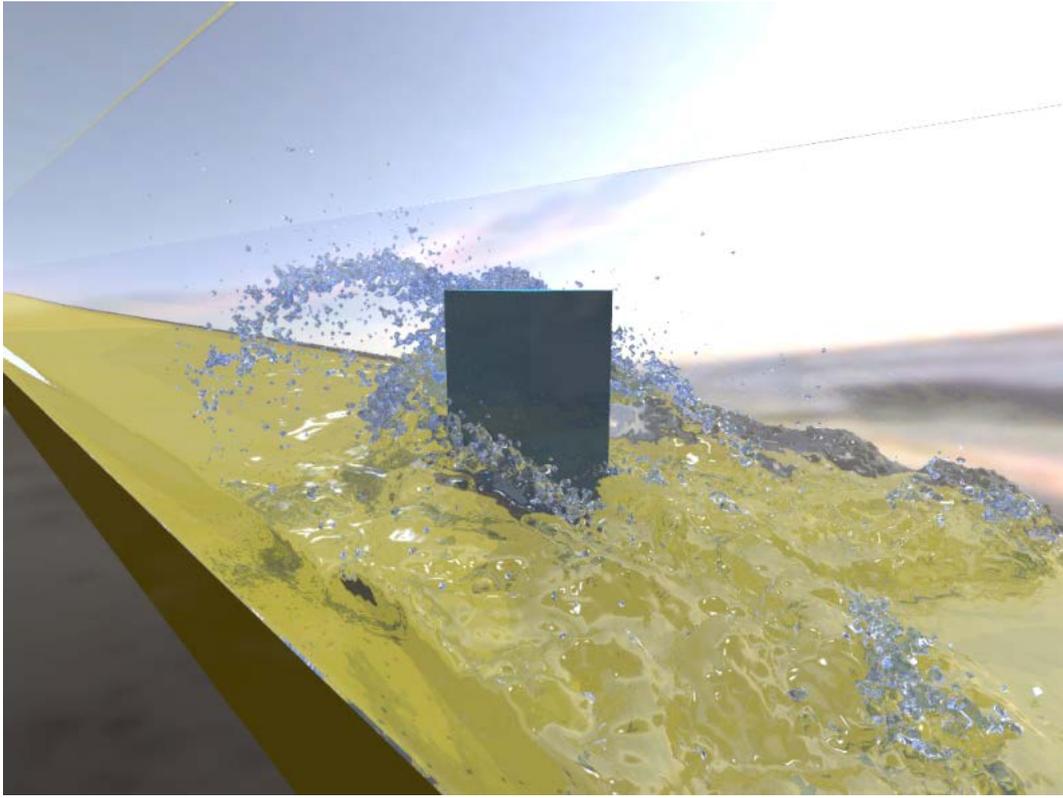


図 4. 15. LCH-EPFL で用いられている津波水槽の実験装置概要図。

一方、実際の津波現象を高い精度で再現することが可能な数値シミュレーションモデルの開発は、より安全な社会インフラおよび対津波構造物の設計に潜在的に有用となり得る。しかし、数値シミュレーションを津波研究に活用するためには、モデルの精度や信頼性の検証がなされるべきである。現在、津波のような流れを調べるために、数値流体力学に基づくいくつかの数値モデル開発がなされている ([11]、[21]、[14])。一般的にはモデルの開発過程において、実験結果や理論解との比較を通してモデルの検証がなされる。しかしながら、これらの検証の大部分は、小規模で単純な波の流れについてのみ行われており、すなわち、大規模な津波の様な波については数値シミュレーションモデルの信頼性が十分に検証されていないのが実態である。

以上のことから、本研究では LCH-EPFL で行われた実験結果と、JAMSTEC で開発された大規模数値シミュレーションモデルによる結果を比較し検証を行う。上記の数値モデルには Dry bed と Wet bed の大規模津波をシミュレートするために SPH を採用し [19]、動的負荷分散技術を用いた並列計算アルゴリズムと陽解法による時間積分法 ([8]、[5]) を用いた。メッシュベースの方法とは対照的に、SPH は津波などの自由表面流を容易に処理できる粒子ベースのシミュレーション方法である (図 4. 17)。しかし、メッシュベースの手法に比べると計算精度が低いため、実験で得られる津波のような流れを再現するために必要な SPH シミュレーションモデルの精度や制約を知ることが重要である。



・ 図 4. 16. LCH-EPFL の津波水槽実験に対応した大規模 SPH シミュレーションによる津波と構造物のグラフィックス結果。

これまでのところ、大規模数値シミュレーションと大規模実験との予備的な比較においては、これら二つのアプローチが一見したところ非常に類似した結果を与えることを確認している。ここでは、津波のような流れをよりよく理解するためのツールとして数値シミュレーションの再現性についての有用な情報を得るために、Dry bed と Wet bed の条件において主な流体力学的特徴（例えば、波面プロファイル）を比較し検討する。

#### 4.3.2.1 検証例題の条件

津波のような波を発生させるために SPH シミュレーションで使用するパラメータを表 4. 6 に示す。このシミュレーションでは、津波のような波を生成するためにダムブレイクシステムを採用した。初期水塊の大きさは、長さ 50 m、高さ  $d_0$  に設定した。計算の空間解像度として SPH 粒子サイズは 0.005 m に設定し、SPH の Smoothing length は十分な精度で波動伝播を解くために粒子サイズより 2.1 倍大きい値に設定した。この設定では、水深によっては、水塊中の SPH 粒子の数が 200 万粒子に達することがあり、計算コストが非常に高くなる。そこで、非常に高効率な並列計算技術[5]を用いて 64 m の長い水路長に対して 40 秒の長時間スケールで波の伝播をシミュレートした。その結果、京コンピュータ（理化学研究所）の 96 ノードを使用することにより、計算時間を約 12 時間に短縮することができた。

表 4. 6. シミュレーション条件

Parameter	Value
Density $\rho_0$	1000 kg/m <sup>3</sup>
Kinematic viscosity $\nu^k$	1 $\mu\text{m}^2/\text{s}$
Speed of sound $c_0$	125 m/s
Smoothing length $l$	0.0105 m
Impoundment depth $d_0$	0.4 m, 0.63 m, 0.82 m
Initial water depth $h_0$	0 m (dry bed), 0.05 m (wet bed)
Channel length	14 m (length of water mass is 50 m)

#### 4.3.2.2 Dry bed における検証結果

Dry bed における波の伝播は、視覚的には初め薄い水の層として現れ、続いて最大値に達するまで水深が連続的に上昇し、その後、波高は減少し始めた。図 4. 18 (b) に示すように、波は一様に伝播し、波の先端領域にはエアレーションは見られなかった。そして、シミュレーションによる伝搬波形（図 4. 18 (a)）と実験による伝搬波形（図 4. 18 (b)）の特性はよく一致した。

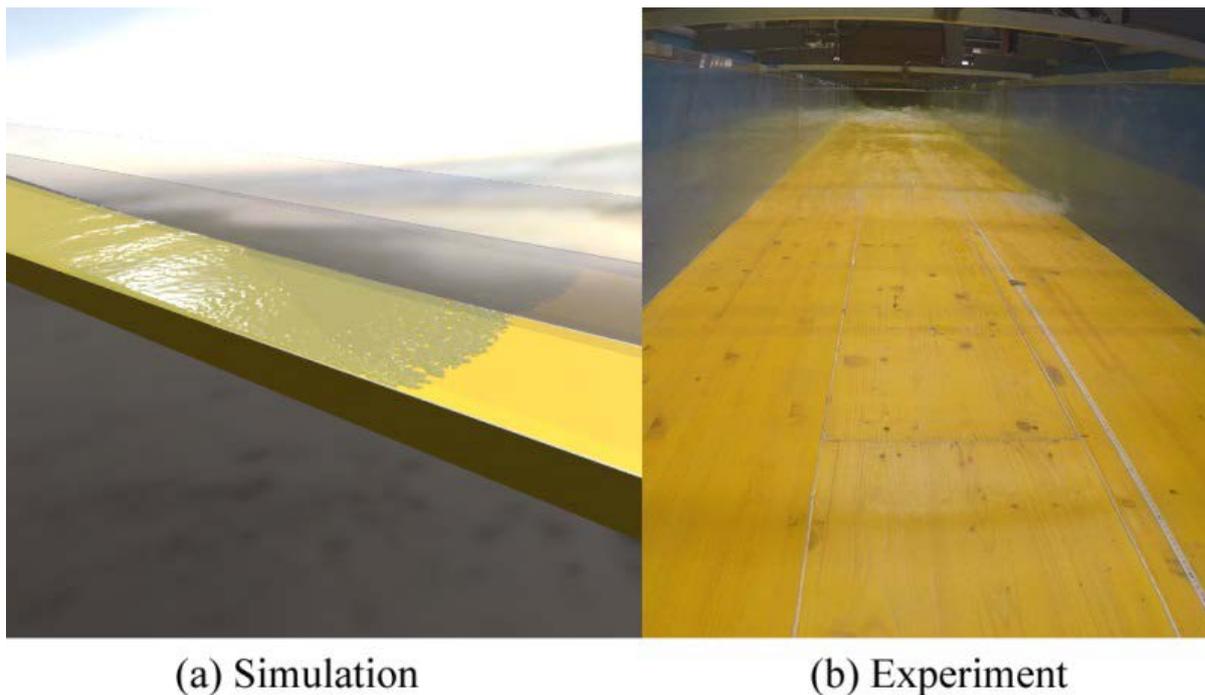


図 4. 17. Dry bed の条件においてシミュレーションと実験で得られた波の先端形状

実験では、波の先端が  $x = 13.85$  m (US7) の位置に達したときの水路方向の水面プロファイルを、同一の条件下で複数回測定が行われた。これらのプロファイルを、数値シミュレーション結果および以下に示す Ritter (1892) の理論解と比較した。

$$\frac{h}{d_0} = \frac{1}{9} \left( 2 - \frac{x}{t\sqrt{gd_0}} \right)^2,$$

ここで、 $h$  は位置  $x$  と時間  $t$  における波高を表す。

図 4. 19 は各水塊高さ  $d_0$  について得られた結果を示しており、実験では波高は特に  $d_0 = 0.82$  m の場合に水面の変動によってわずかにバラつきが生じることがわかった。それにもかかわらず、すべての実験結果は理論解を良く再現することができている。一方、数値シミュレーションでは、すべてのテストケースで定性的に実験データを再現しているが、波の先端部分には多少の違いが見られた。特にシミュレーション結果は、図 4. 19. (b) に示すように  $d_0 = 0.63$  m の場合において実験結果や理論解と良く一致した。しかし、 $d_0 = 0.40$  m の場合は、波高プロファイルはやや高く、波の先端形状は実験および理論 (Ritter) 結果と比較して急勾配であった。Dry bed の条件下では波が伝播するにつれて波の先端形状は急速に薄くなるため、波中に存在する SPH 粒子の数は減少する。すなわち計算の空間分解能が不十分になる。したがって、シミュレーションの誤差は空間分解能の低下による影響によって引き起こされていると考えられる。これに対して、 $d_0 = 0.82$  m の場合、実験よりもシミュレーションの波高はやや低く、波の先端形状の勾配は緩やかであった。ここで、実験的に観測された波先端の形状と速度には水路床の僅かな粗さによって影響される可能性が有るが[17]、シミュレーションの境界条件は完全に滑らかな水路床と滑り無し条件を仮定している。したがって、床の粗さの影響をシミュレーションに考慮することによって、実験とシミュレーションの結果の一致性が向上する可能性がある。しかし、粗さを表現するために SPH 粒子サイズを小さくすることは、実験で観察される現象を解くには計算コストが高すぎるため、床の粗さを直接解くことは困難である。したがって、表面粗さの影響を再現するための新しい境界モデルを現在開発中である。

#### 4.3.2.3 Wet bed における検証結果

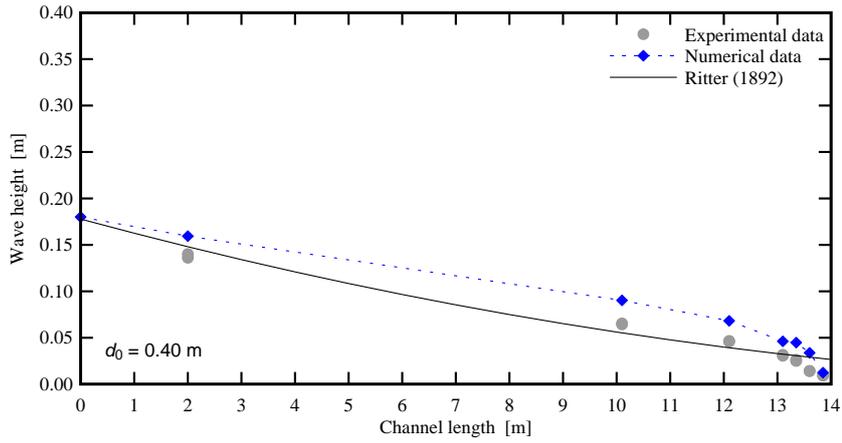
シミュレーションと実験によって得られた Wet bed の条件における水面波伝播のスナップショットをそれぞれ図 4. 20 (a) と (b) に示す。Wet bed における初期水位は 0.05 m である。Dry bed と Wet bed の波動伝播パターンの違いは、図 4. 18 と図 4. 20 を比較することにより明確にわかる。波の先端の後ろ側では、著しい水中への空気の巻き込みが観察された。さらに後方では、これとは対照的に、Leng and Chanson [10]のこれまでの発見と同様に澄んだ水の移動が観測された。

一方、シミュレーションで得られた波の先端形状 (図 4. 21 (a)) は、実験および過去の文献と同様に Dry bed の条件で観察されたものよりも急勾配であった。視覚的には、波の形状が実験と非常によく一致していることが確認できた。しかし、SPH シミュレーションでは空気の流れが計算されていないため、波面内の空気の巻き込みは観察できなかった。

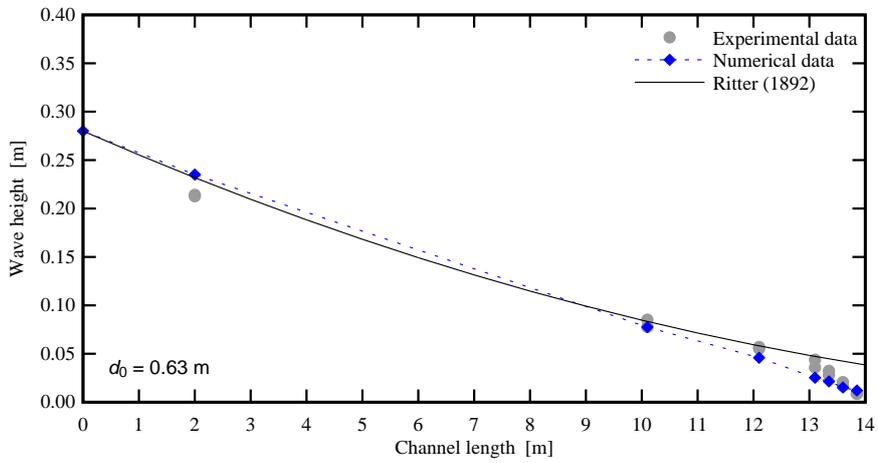
Stoker[15]によると、Wet bed を伝播するダムブレイク波の水路方向の波高プロファイルについては、波の時間発展は下流から上流に向けて4つの主な領域、すなわち (1) 波先端の乱流領域、(2) 過渡域すなわちほぼ一定の水位を有する領域 (図 4. 21 の水平方向の破線)、(3) Ritter[12]の理論を適用することができるはるか後方の領域、(4) 上流の水塊領域に分けることができる。図 4. 21 は、波先端が  $x = 13.85$  m の位置に到達したときに捕捉された各水塊高さ  $d_0$  についての実験およびシミュレーションにおける水路方向の波高プロファイルを示す。ここで、波先端の到達時間は、波高  $h$  の閾値が  $h_0 +$

0.01 m になった時間として定義した。また、これらのプロファイルは、最も背後の領域（3）では Ritter[12]の理論解と、そしてほぼ一定の水の高さになる領域（2）では Stoker[15]の理論解と比較した。実験によって得られたプロファイルは全てのテストケースにおいて理論解とよく一致した。このことから、LCH-EPFL で開発された波の生成技術は古典的なダムブレイクシステムで生成されたものと同等の波を生成できることが確認できた。

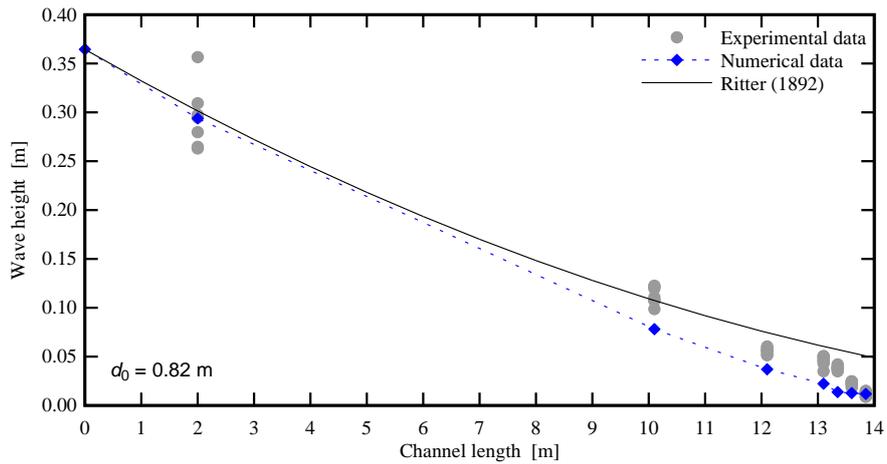
一方、シミュレーションは実験のプロファイルと理論解を比較的よく再現できたが、シミュレーションによって得られた波高は、特に  $d_0 = 0.82$  の場合、波先端領域近くの過渡領域（2）において実験値や理論値よりわずかに低かった。水塊の高さが増すにつれて乱流が顕著になり、波先端部に空気の巻き込みが大きく生じる。したがって、我々の SPH シミュレーションでは気流を考慮していないため、波高に対するエアレーションによる乱流の影響を過小評価している可能性がある。エアレーションがシミュレーションで考慮されるならば、その結果は改善される可能性が有る。しかし、SPH による水と空気の多相流シミュレーションは、空気と水の密度差が大きすぎるため、安定に流体流計算を行うことは非常に困難である。それでも、今回の検証に用いた水塊の高さにおいては、本シミュレーションによって下流から上流に渡って波高と Wet bed の上を伝播する波の形状を許容できる精度で再現できることが示された。



(a) Test 1

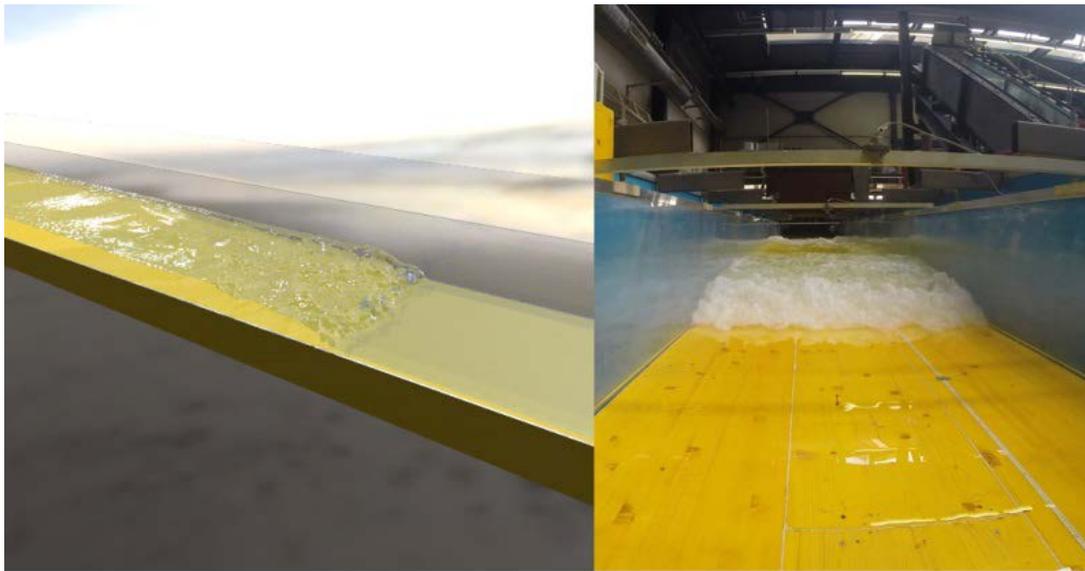


(b) Test 2



(c) Test 3

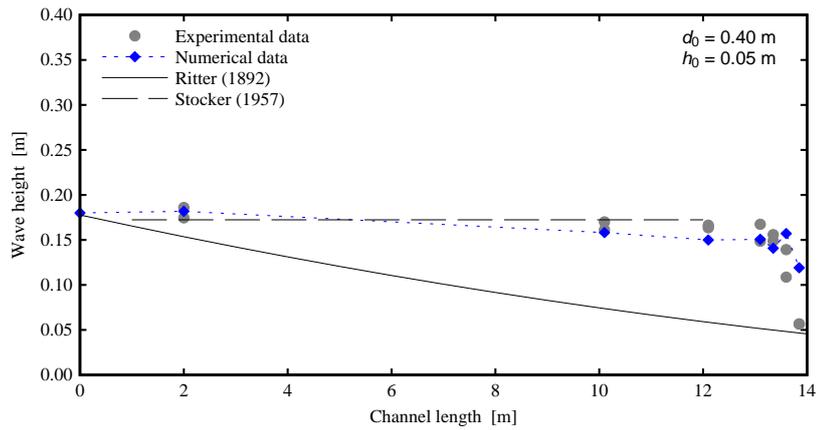
- 図 4. 18. Dry bed 条件において、 $x = 13.85$  m に波の先端が到達したときの実験とシミュレーションによって得られた水路方向水面プロファイル。 $d_0 =$  (a) 0.40 m、(b) 0.63 m、(c) 0.82 m で得られた水面形状と Ritter[12]の理論解との比較。



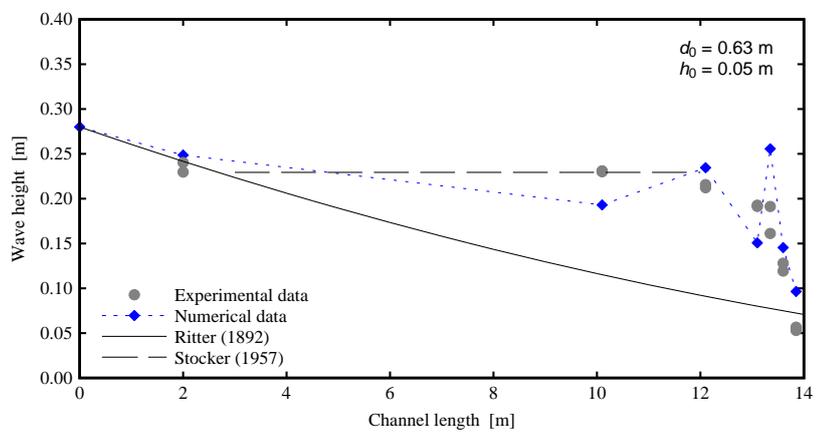
(a) Simulation

(b) Experiment

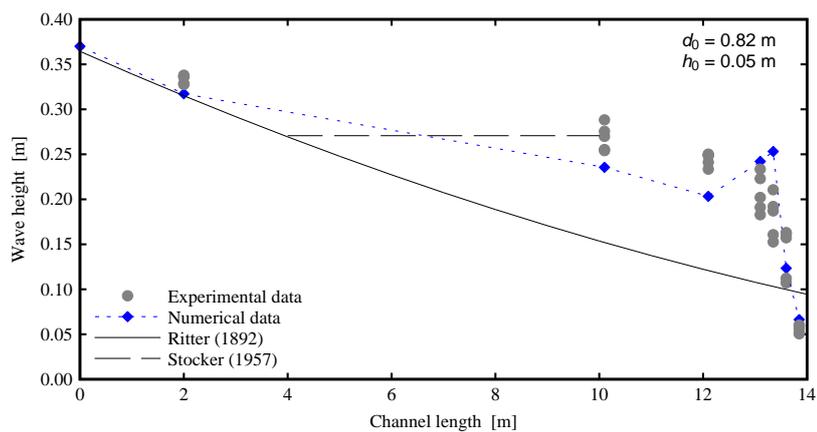
- ・ 図 4. 19. Wet bed の条件においてシミュレーションと実験で得られた波の先端形状



(a) Test 4



(b) Test 5

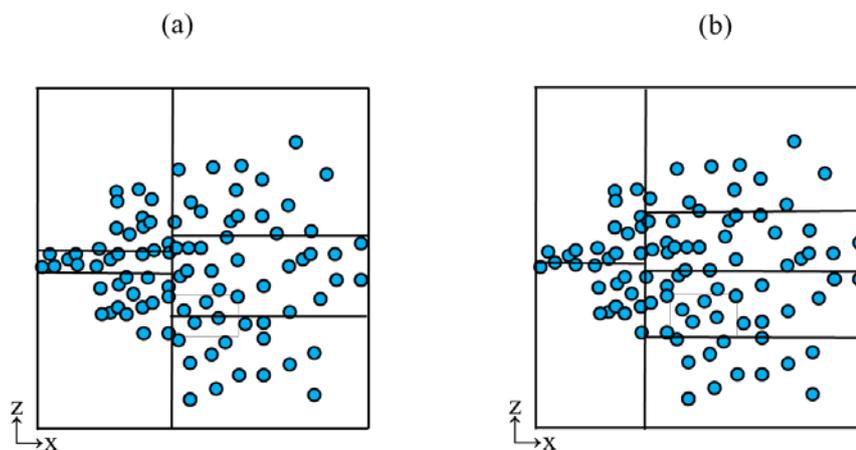


(c) Test 6

- ・ 図 4. 20. Wet bed 条件において、 $x = 13.85 \text{ m}$  に波の先端が到達したときの実験とシミュレーションによって得られた水路方向水面プロファイル。 $d_0 =$  (a)  $0.40 \text{ m}$ 、(b)  $0.63 \text{ m}$ 、(c)  $0.82 \text{ m}$  で得られた水面形状と Ritter (1892) および Stoker (1957) の理論解との比較。

### 4.3.3 粒子法動的負荷分散手法の改良

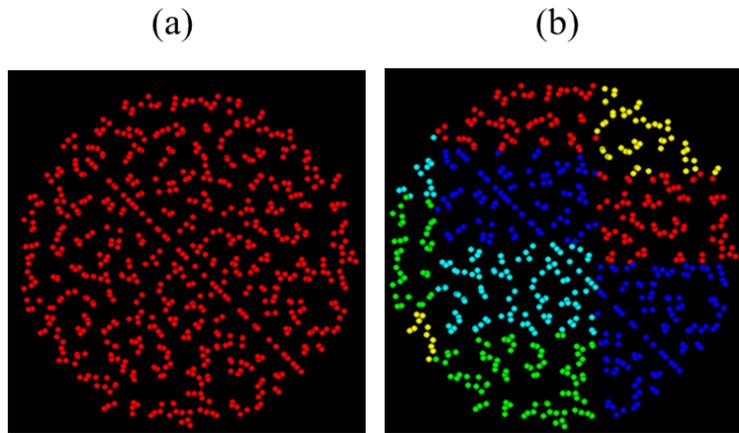
本プロジェクトにおける粒子法開発の大目標として、実際の地形を取り入れた大規模津波遡上計算の実施が挙げられる。そこで、我々は、スライスグリッド型のフレキシブルな直交領域分割を用いた、粒子法の動的負荷分散手法を開発し [5]、大規模粒子法計算を実現してきた[6]、[7]、[22]。しかしながらこれまでの領域分割法では、複雑な地形に沿って水塊分布の短波長成分の振幅が大きい場合が往々にしてあり、縁周辺において分割領域のアスペクト比が過大に大きくなり計算効率の低下や使用するメモリの偏在化を招く問題があった。そこでこの問題を緩和するために、これまで列毎に同数だけ領域分割していたアルゴリズム (図 4.22(a)) を改良し、列毎に異なる領域分割数を許すように変更した (図 4.22(b))。これにより、粒子局在化に伴う領域分割のアスペクト比を下げる事ができた。



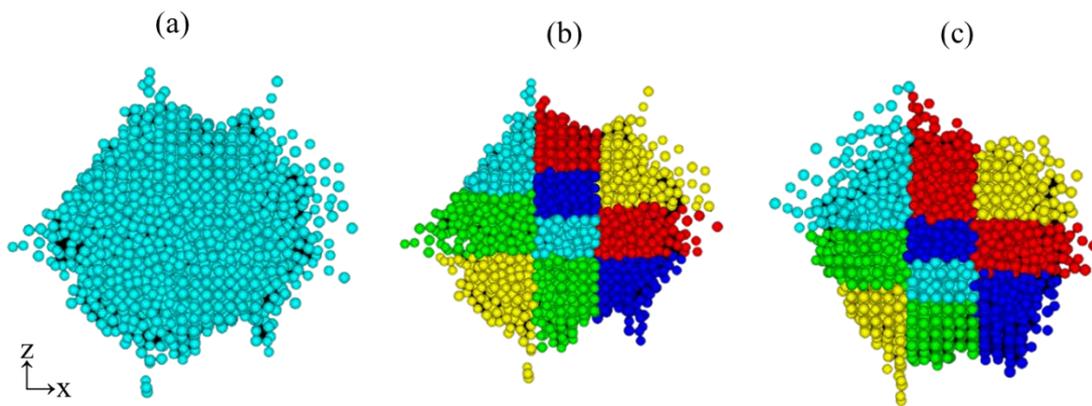
・ 図 4.21. (a) 各列に 3 領域分割した例と (b) 本年度新しく実装した列毎に異なる分割数 (左が 2 分割で右が 4 分割) の例。

この改良に伴い、SPH コードと DEM コードの大幅な書き換えが必要であったため、その Verification を慎重に行う必要があった。そこでまず並列化の容易な SPH において円柱形の初期配置から散らばる様子を計算し、シングル MPI プロセスと 10MPI プロセスでの計算結果を比較した結果を図 4.23 に示す。検証の結果、シングルプロセスの計算結果 (図 4.23 (a)) を、10 プロセスを用いた計算結果 (図 4.23 (b)) が各粒子において正確に再現していることが分かった。次に接線方向の接触相互作用のため、並列化が難しい DEM においてどのように粒子が散らばるかの計算においてコード実装の検証を行った。図 4.24.において、シングル MPI プロセスと 10MPI プロセスでの計算結果を比較した結果を示す。検証の結果、シングルプロセスの計算結果 (図 4.24 (a)) を、10 プロセスを用いた計算結果 (図 4.24 (b)) が再現できている事を確認した。本テストは非常に精度の高い検証問題であり、粒子間相互作用の粒子への足しこみ計算順序を変更するだけで丸め誤差の蓄積により (図 4.24 (c)) のように結果が大きく異なる分布となる。つまり足しこみ順序の整合性を含めて、我々の実装は DEM を正しく並列化できていることを示している。

次年度には、このようにして開発した新しい動的領域分割による並列化率の改善を実際の地形を用いた津波遡上問題において実証し、成果としたいと考えている。



- 図 4. 22. 新しく実装した動的領域分割の SPH における実装妥当性の検証結果。初期状態は円柱形に粒子を配置し、底からの崩壊を (a) シングル MPI プロセス計算 (b) 10MPI プロセス (左から 3 ランク・4 ランク・3 ランクで列毎に分割) で計算した結果である。粒子の色は MPI プロセスのランクを表す。



- 図 4. 23. 新しく実装した動的領域分割の DEM における実装妥当性の検証結果。初期状態は円柱形に粒子を配置し、底からの崩壊を (a) シングル MPI プロセス計算 (b) 10MPI プロセス (左から 3 ランク・4 ランク・3 ランクで列毎に分割) で計算した結果である。粒子の色は MPI プロセスのランクを表す。(c) は参考までに粒子計算の足しこみ順序を変えた場合を示す。

#### 参考文献

- [1] T. Hamada, T. Narumi, R. Yokota, K. Yasuoka, K. Nitadori, and M. Taiji, 42 tflops hierarchical n-body simulations on gpus with applications in both astrophysics and turbulence, In Proceedings of the Conference on High Performance Computing Networking, Storage and Analysis, pages 1-12, Nov 2009.
- [2] D. Kushner. The wizardry of id [video games]. IEEE Spectrum, 39(8), pp.42-47, Aug 2002.
- [3] M. Iwasawa, A. Tanikawa, N. Hosono, K. Nitadori, T. Muranushi, and J. Makino. FDPS, A novel framework for developing high-performance particle simulation codes for distributed-memory systems, In Proceedings of the

- 5th International Workshop on Domain-Specific Languages and High-Level Frameworks for High Performance Computing, WOLFHPC '15, pp. 1:1-1:10, New York, NY, USA, 2015.
- [4] S. Williams, A. Waterman, and D. Patterson. Rooine, An insightful visual performance model for multicore architectures. *Commun, ACM*, 52(4), pp.65-76, April 2009.
- [5] M. Furuichi, D. Nishiura, Iterative load-balancing method with multigrid level relaxation for particle simulation with short-range interactions, *Computer Physics Communications*, Vol. 219, pp.135-148, 2017.
- [6] Furuichi, M., Nishiura, D., Asai, M., & Hori, T., The first real-scale DEM simulation of a sand-box experiment using 2.4 billion particles, *The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Denver, CO.  
[http://sc17.supercomputing.org/SC17%20Archive/tech\\_poster/tech\\_poster\\_pages/post113.html](http://sc17.supercomputing.org/SC17%20Archive/tech_poster/tech_poster_pages/post113.html) (2017).
- [7] Furuichi, M., Nishiura, D., Asai, M., & Hori, T. Massively parallel stress chain characterization for billion particle DEM simulation of accretionary prism formation. *The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Denver, CO.  
[https://sc18.supercomputing.org/proceedings/tech\\_poster/poster\\_files/post136s2-file3.pdf](https://sc18.supercomputing.org/proceedings/tech_poster/poster_files/post136s2-file3.pdf) (2018).
- [8] Nishiura, D., Furuichi M., & Sakaguchi H., Computational performance of a smoothed particle hydrodynamics simulation for shared-memory parallel computing, *Computer Physics Communications*, 194, pp.18–32, 2015.
- [9] H. Chanson, Tsunami surges on dry coastal plains, *Application of dam break wave equations*, *Coastal Eng. J.*, 48(4), pp.355–370, 2006.
- [10] X. Leng and H. Chanson, Breaking bore, Physical observations of roller characteristics, *Mech. Res. Commun.*, 65, pp.24–29, 2015.
- [11] P. St-Germain, I. Nistor, R. Townsend and T. Shibayama, Smoothed-Particle Hydrodynamics Numerical Modeling of Structures Impacted by Tsunami Bores, *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 140(1), pp.66–81, 2014.
- [12] A. Ritter, Die Fortpflanzung der Wasserwellen, *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 36, pp.947–954, 1892.
- [13] J.D. Ramsden, Tsunami: Forces on a Vertical Wall Caused by Long Waves, Bores, and Surges on a Dry Bed, Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA (1993).
- [14] H.G. Guler, C. Baykal, T. Arikawa and A.C. Yalciner, Numerical assessment of tsunami attack on a rubble mound breakwater using OpenFOAM (R), *Appl. Ocean Res.*, 72, pp.76–91, 2018.
- [15] J.J. Stoker, *Water waves: The mathematical theory with applications*, John Wiley & Sons, 1957.
- [16] D. Wüthrich, M. Pfister, P. Manso, G. Constantinescu and A.J. Schleiss, Surface Turbulence on Bores and Surges propagating on smooth and rough beds, *Proc. of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab16)*, May 10-13, Ottawa, Canada (2016).
- [17] D. Wüthrich, M. Pfister, I. Nistor and A.J. Schleiss, Experimental Study of Tsunami-Like Waves Generated with a Vertical Release Technique on Dry and Wet Beds, *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 144(4), 04018006, 2018.
- [18] D. Wüthrich, Extreme Hydrodynamic impact onto buildings, EPFL PhD Thesis (N. 8116), Lausanne, Switzerland, pp.264, 2018.

- [19] J.J Monaghan, Smoothed Particle Hydrodynamics, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 30, pp.543–574, 1992.
- [20] G. Lauber and W.H. Hager, Experiments to Dambreak Wave: Horizontal Channel, *J. Hydraul. Res.*, 36(3),pp. 291–307,1998.
- [21] A.J. Crespo, J.M. Dominguez, B.D. Rogers, M. Gomez-Gesteira, S. Longshaw, R. Canelas, R. Vacondio, A. Barreiro and O. Garcia-Feal, DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), *Comput. Phys. Comm.*, 187, pp.204–216, 2015.
- [22] M. Furuichi, D. Nishiura, O. Kuwano, A. Bauville, T. Hori, H. Sakaguchi, Arcuate stress state in accretionary prisms from real-scale numerical sandbox experiments, *Scientific Reports* (2018), 8, 8685, DOI:10.1038/s41598-018-26534-x.

## ⑤地震・津波の被害に関する数値解析コンポーネントの高度化(再委託先：国立大学法人九州大学) (サブ課題A)

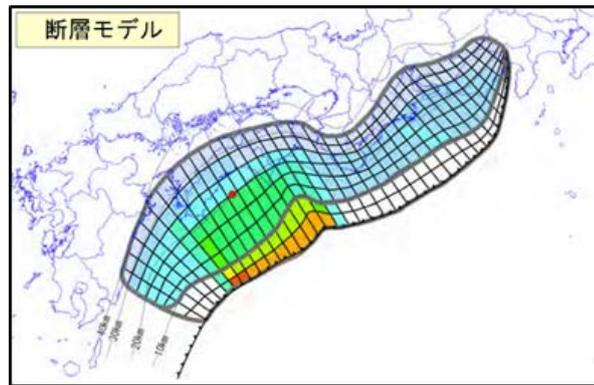
### 5.1 地震シナリオ解析・FEMによる地殻変動解析を反映した津波解析

#### 5.1.1 背景

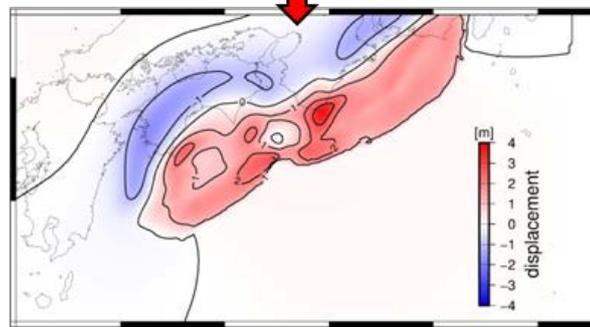
一般的に実施されている津波解析のフローを図 5.1 に示す。津波解析を実施するには、一般的には初期水位の入力が必要となり、事前に地震シナリオを設定し、それに対応した地殻変動量をなにがしかの方法で算定する必要がある。

地震津波解析の実務では、地震シナリオとして内閣府想定シナリオを用いることが多い。この内閣府想定シナリオは、過去の経験や統計に基づき、最大級の地震・津波となり得るすべり域・大すべり域を設定するものであるが、その領域・時間発展を推定することは困難を極め、また設定されたシナリオの発生確率を議論できるものではない。

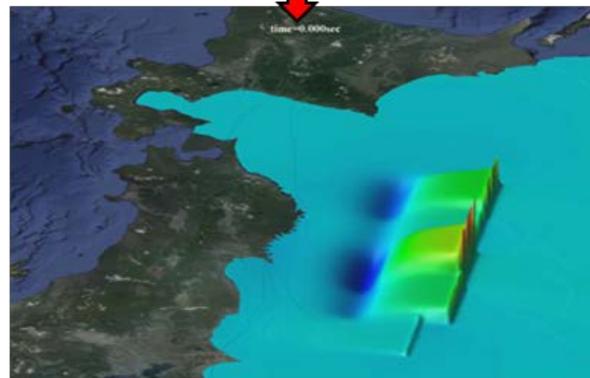
地震シナリオの推定の次に実施する地殻変動解析は、食い違い弾性理論の一つである Okada 式が用いられることが多い。Okada 式は、図 5.2 に示すように地表面は水平とし、地盤は均質で連続的な地質構造であり、また等方・半無限弾性体を仮定することで導出された解析解である<sup>[1]</sup>。近年では、地盤は不均質性や不連続性、非一様性等を考慮するため、東京大学の市村らは大規模 FEM による地殻変動量の推定し、地盤の不均質性・非一様性が津波予測値にも無視できない可能性を示した。つまり、内閣府想定シナリオを入力とした地殻変動量の予測に Okada 式を適用した最終変動量が「想定し得る最大規模の浸水」となる保証はない。また地殻変動は津波伝搬に比べると短時間での現象であるため、最終変動量から津波解析用の初期水位を推定することも簡便的に行われるが、地殻変動の時間発展が津波に与える影響度の調査はまだ不十分である。



地震シナリオの決定（内閣府想定シナリオ）



地殻変動量の計算（食違い弾性理論）



津波伝搬・遡上解析（2D・3D）

図 5.1. 実務における一般的な津波解析フロー。

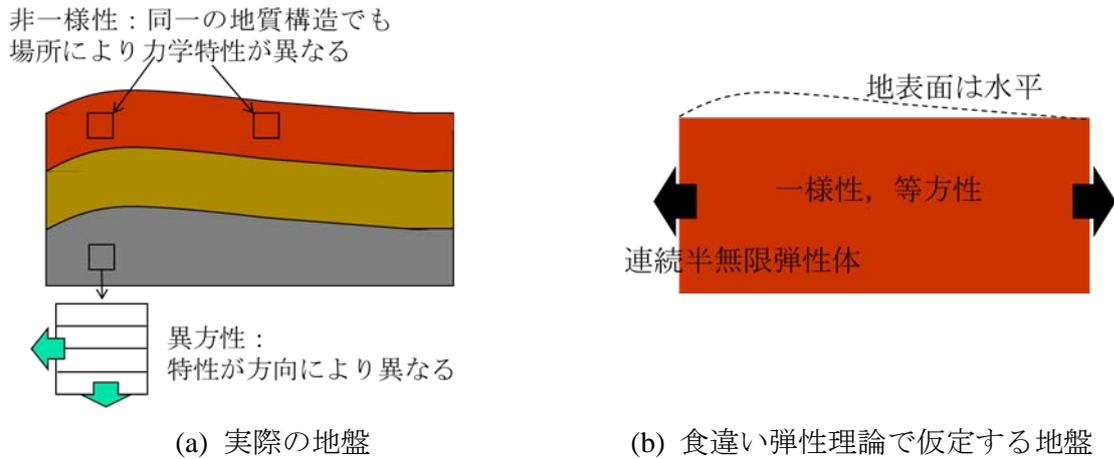


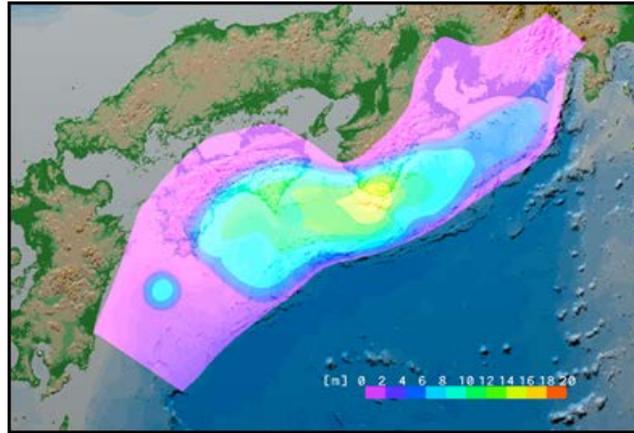
図 5.2. 食違い弾性理論。

### 5.1.2 本研究の提案手法

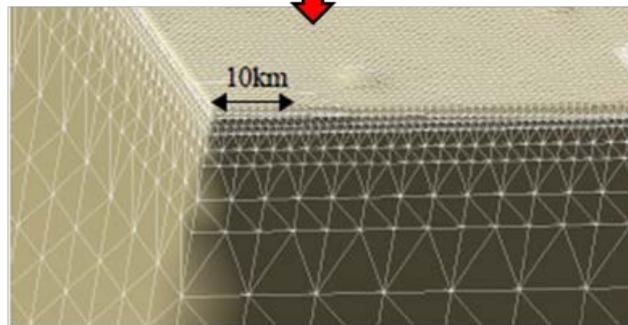
実務レベルの津波解析における矛盾点を解消するため、本研究では地震シナリオ～地殻変動～津波伝搬までの一連の災害を物理シミュレーションにて実施することで、物理的にも起こり得る最大級のシナリオを使い、特に地殻変動の時間発展の入力が与える影響度を調査することにした。本研究で実施する津波解析のフローを図 5.3 に示す。

具体的には、まず、海洋研究開発機構（JAMSTEC）堀らが中心に開発している巨大地震発生サイクルプログラム（RSGDX）にて最大級の地震シナリオを設定した。RSGDX では境界要素法によりプレートの運動を解くことで物理的に断層すべりシナリオを求めている。その断層すべり量を入力とし、高詳細な海底地盤モデルを用いた FEM による地殻変動解析を東京大学の市村・JAMSTEC の縣らが開発している 3 次元有限要素法（GAMERA）にて実施した。なお、この高詳細海底地盤モデルは、Citak *et al.*<sup>[2]</sup>によるフィリピン海プレート構造データを用いており、5 層の地層構造から成っている。地殻とマンツルの物性値は Sato *et al.*<sup>[3]</sup>の値を用い、堆積層と海洋地殻の値は Nakanishi *et al.*<sup>[4],[5]</sup>を参考に設定した。

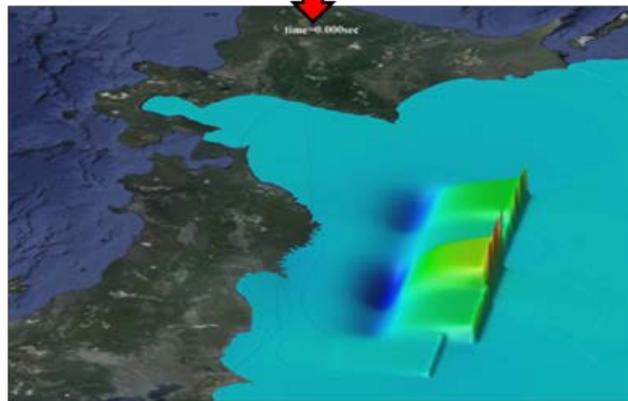
その後、地殻変動解析から得られた海底面での隆起・沈降の時系列データをそのまま津波伝搬解析の入力値とする解析を実施した。この際の 2 次元津波解析には、JAMSTEC が開発した JAGURS<sup>[6]</sup>を用いた。



地震シナリオの決定 (RSGDX)



地殻変動量の計算 (3次元FEM)



津波伝搬・遡上解析 (2D・3D)

図 5. 3. 津波解析フロー (提案手法)。

JAGURS は、Navier-Stokes 方程式を長波として近似した式を有限差分法により解くことで、津波の波源からの伝搬、陸地や河川への遡上を計算することができる。JAGURS では、より精度を高めるために、海底面の摩擦、波の流れ込みによる波速の変化といった非線形計算や、波が複数に分裂する津波の分散性についても考慮することができる。今回は計算コストの観点から津波の分散性については考慮しないこととした。

以上の解析結果により断層破壊伝搬の考慮の必要性を検討するため、有限要素法により与えられた最終的な地殻変動量を使用し、断層破壊終了時まで線形的に時間発展する場合（従来法と同じく破壊伝搬考慮なし）の結果と比較検討することにした。この際の地震シナリオについては、いくつかあるシナリオの中から和歌山県沖から破壊が開始するもので Mw9.00 及び Mw8.62 となる 2 つのシナリオ、高知県沖から破壊が開始するシナリオの合計 3 つのシナリオを抽出し採用した。

### 5.1.3 津波解析モデルの作成方法

図 5.4 に数値実験モデルを示す。本研究では、計算コストを削減するため、対象としている高知県高知市周辺のみ解像度を上げるようにネスティングを行った。本研究では、図 5.4 に示すように 6 つの領域を設定しており、解像度はそれぞれ、18 s、6 s、2 s、2/3 s、2/9 s、2/27 s とした。18 s、6 s の解析モデルの作成には、陸地・海底地形データセット ETOPO1 を使用し、2 s、2/3 s の解析モデルには国土地理院の基盤地図情報 10 m メッシュの数値標高モデルデータ（DEM データ）を、また 2/9 s、2/27 s の解析モデルは 5 m メッシュの DEM データを用いることで陸域部分の標高を設定した。また、海域の数値実験モデルの作成には、日本水路協会の海底地形データ M7000 シリーズを用いた。ここで DEM データは、航空測量により計測した地表の標高情報を一定の間隔の格子上で保存したデータであり、建物や樹木等の除外した地表面の標高を与えるものである。

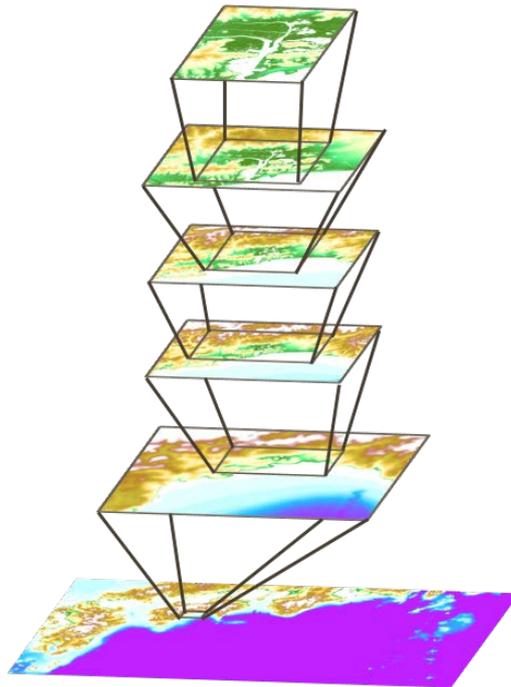


図 5.4. 数値実験モデル。

### 5.1.4 FEM による地殻変動量解析結果

図 5.5 に Mw9.00 のケースでの最終変動量の分布、図 5.6 に任意に設定した 3 点での地殻変動の推移を示す。同様に、図 5.7 および図 5.8 に Mw8.62 のケースでの最終変動量の分布、地殻変動の推移を示す。これらの地殻変動を時系列にそのまま初期条件として入力する場合と最終的な変動量まで線形的に発展

させる場合の二つについて津波伝搬解析を実施した。この際、地殻変動による上下変動分に加え、次式によりより求まる水平方向の地殻変動によって生じる鉛直方向の水位変動の両者を考慮している。

$$U_h = -U_x \frac{\partial H}{\partial x} - U_y \frac{\partial H}{\partial y} \quad (5.1)$$

ここに、 $U_h$  は水平移動に伴う鉛直方向の地殻変動量、 $U_x$ 、 $U_y$  はそれぞれ  $x$ 、 $y$  方向の地殻変動量である。なお、水位変動推定のための地殻変動量の算定に用いた FEM 解析の詳細については、参考文献[8]を参照されたい。タイムステップは 0.05 秒とし、18000s 秒の計算を行った。

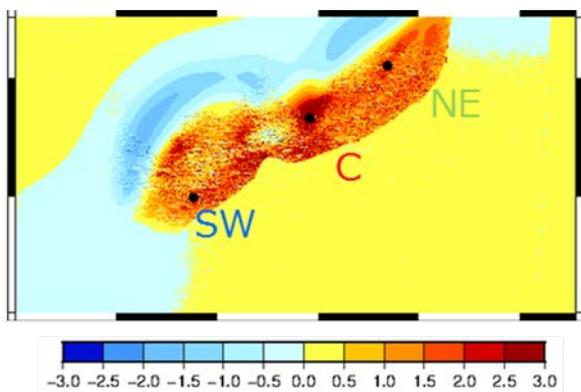


図 5.5. 地殻変動量の分布 (Mw9.00)。

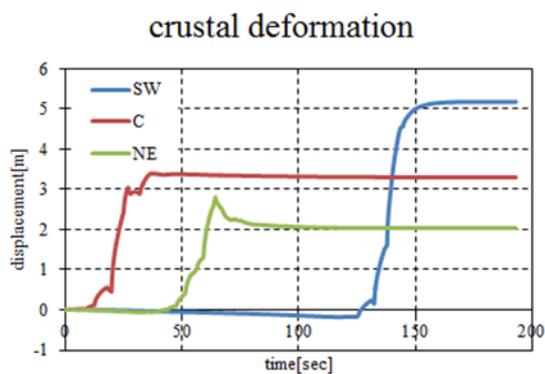


図 5.6. 地殻変動の推移 (Mw9.00)。

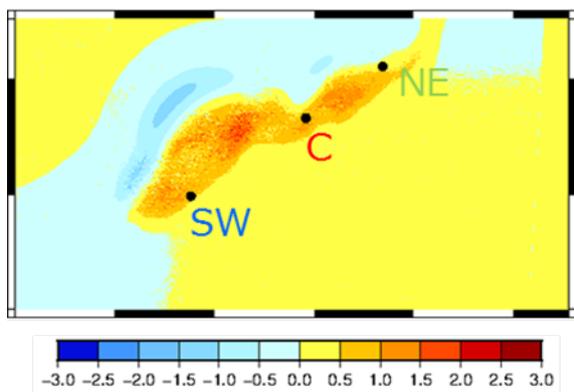


図 5.7. 地殻変動量の分布 (Mw8.62)。

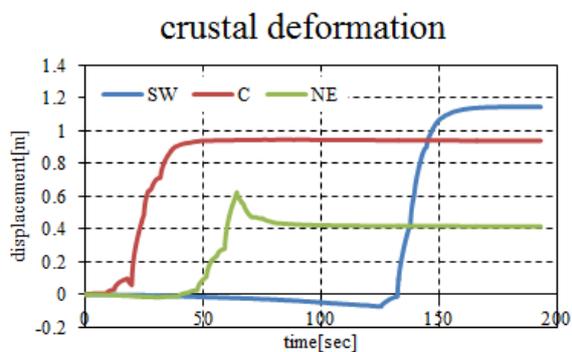


図 5.8. 地殻変動の推移 (Mw8.62)。

### 5.1.5 津波解析結果

図 5.9 に和歌山県沖から破壊が開始する Mw9.00 のケースでの地殻変動を線形的に与えた場合の津波伝搬の様子、図 5.10 には時系列に与えた場合での津波伝搬の様子を示す。図 5.9 は、初めに生じた水位変動の領域で水位が時間と共に線形的に水位が上昇している。これに比較し、図 5.10 は、水位変動領域も時間と共に変化し、その変動も不連続である。たとえば、図 5.10 は、波が発生地点から北東方向に進

展し、その後、南西方向に進展するという傾向が確認できるが、図 5.9 の線形的に与えるモデルでは、このような現象を再現することができておらず、最終変動量に向かって滑らかに変動していることが確認できる。

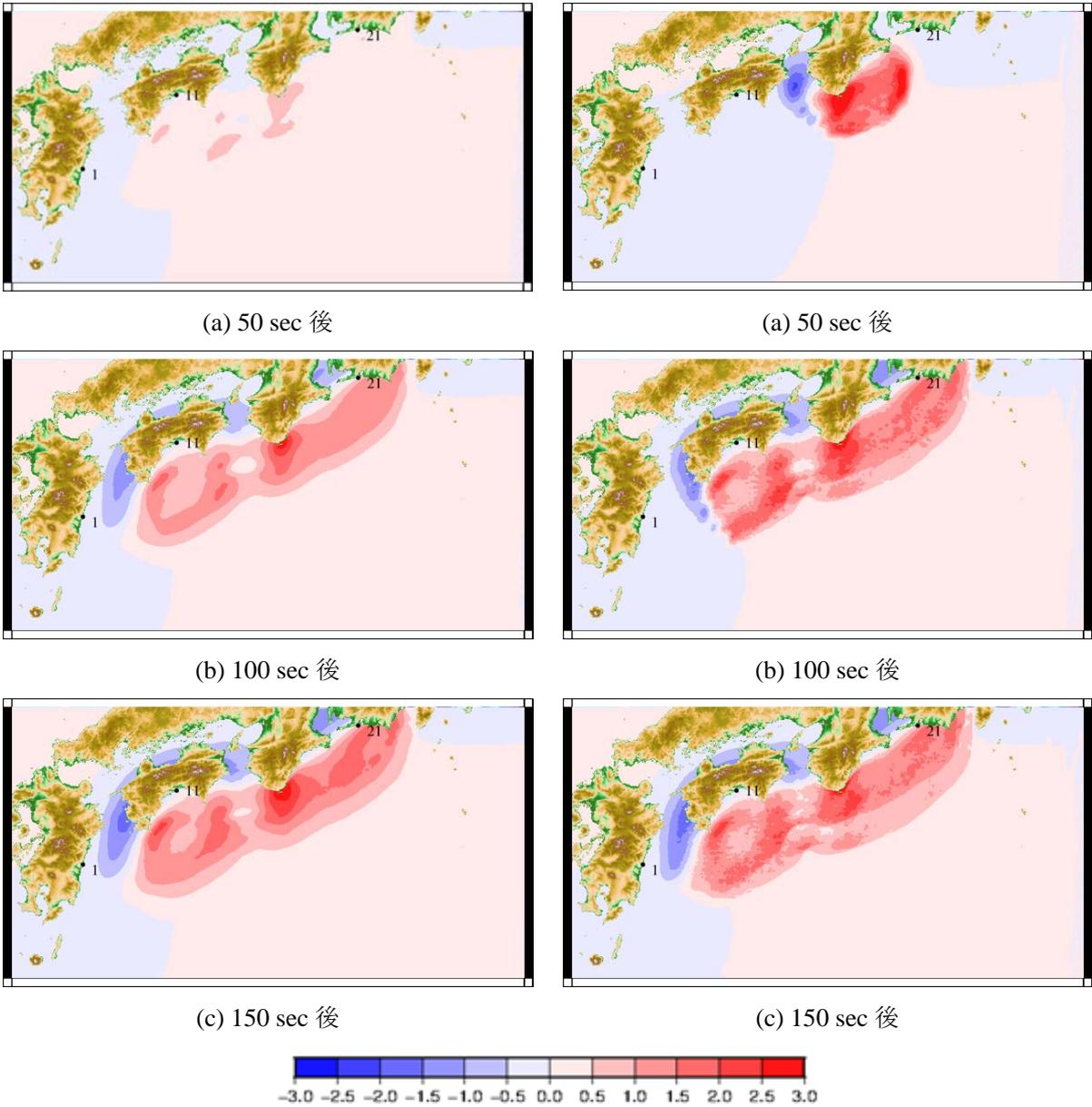


図 5.9. 線形的に与えた津波伝搬  
(和歌山県沖から破壊 Mw9.00)。

図 5.10. 時系列に与えた津波伝搬  
(和歌山県沖から破壊 Mw9.00)。

図 5.11 には和歌山県沖から破壊が開始する Mw8.62 のケースでの地殻変動を線形的に与えた場合の津波伝搬の様子、図 5.12 には時系列に与えた場合での津波伝搬の様子を示す。Mw9.00 のケースと同様に、図 5.12 では波が発生地点から北東方向に進展し、その後、南西方向に進展する傾向が確認できるが、図 5.11 の線形的に与える場合ではこのような現象を再現することができない。すなわち、FEM による地殻変動解析結果は場所・時間と共に線形的に広がるものではなく、それに伴って津波伝搬にも大きな影響を

与えていることが確認できる。

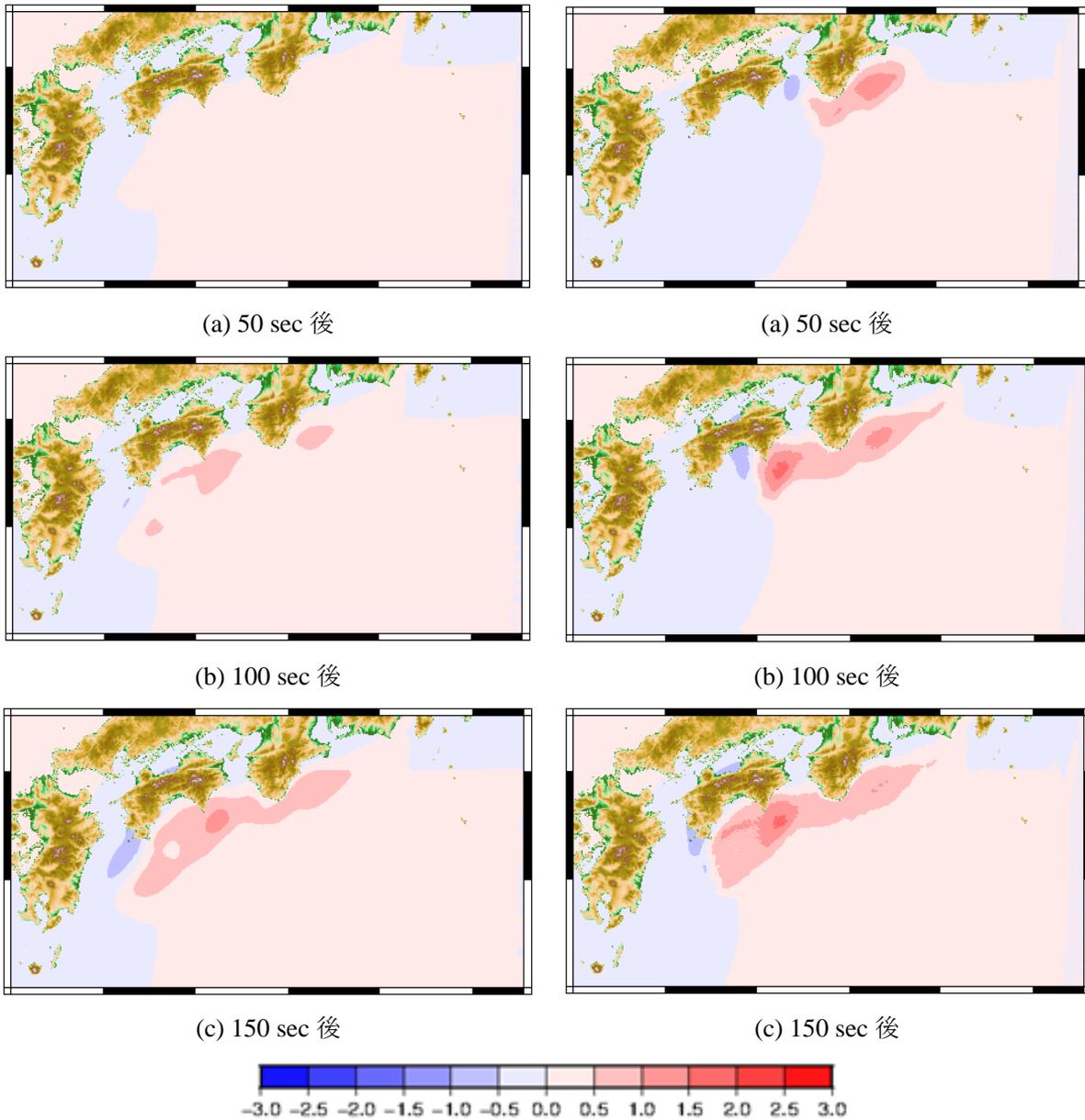


図 5.11. 線形的に与えた津波伝搬  
(和歌山県沖から破壊 Mw8.62)。

図 5.12. 時系列に与えた津波伝搬  
(和歌山県沖から破壊 Mw8.62)。

図 5.13 には高知県沖から破壊が開始するシナリオでの地殻変動を線形的に与えた場合の津波伝搬の様子、図 5.14 には時系列に与えた場合での津波伝搬の様子を示す。図 5.14 の時系列に与える場合では和歌山県沖から波が発生し、東に向かって進展する様子が確認できるが、図 5.13 の線形的に与える場合ではこのような現象を再現することができない。

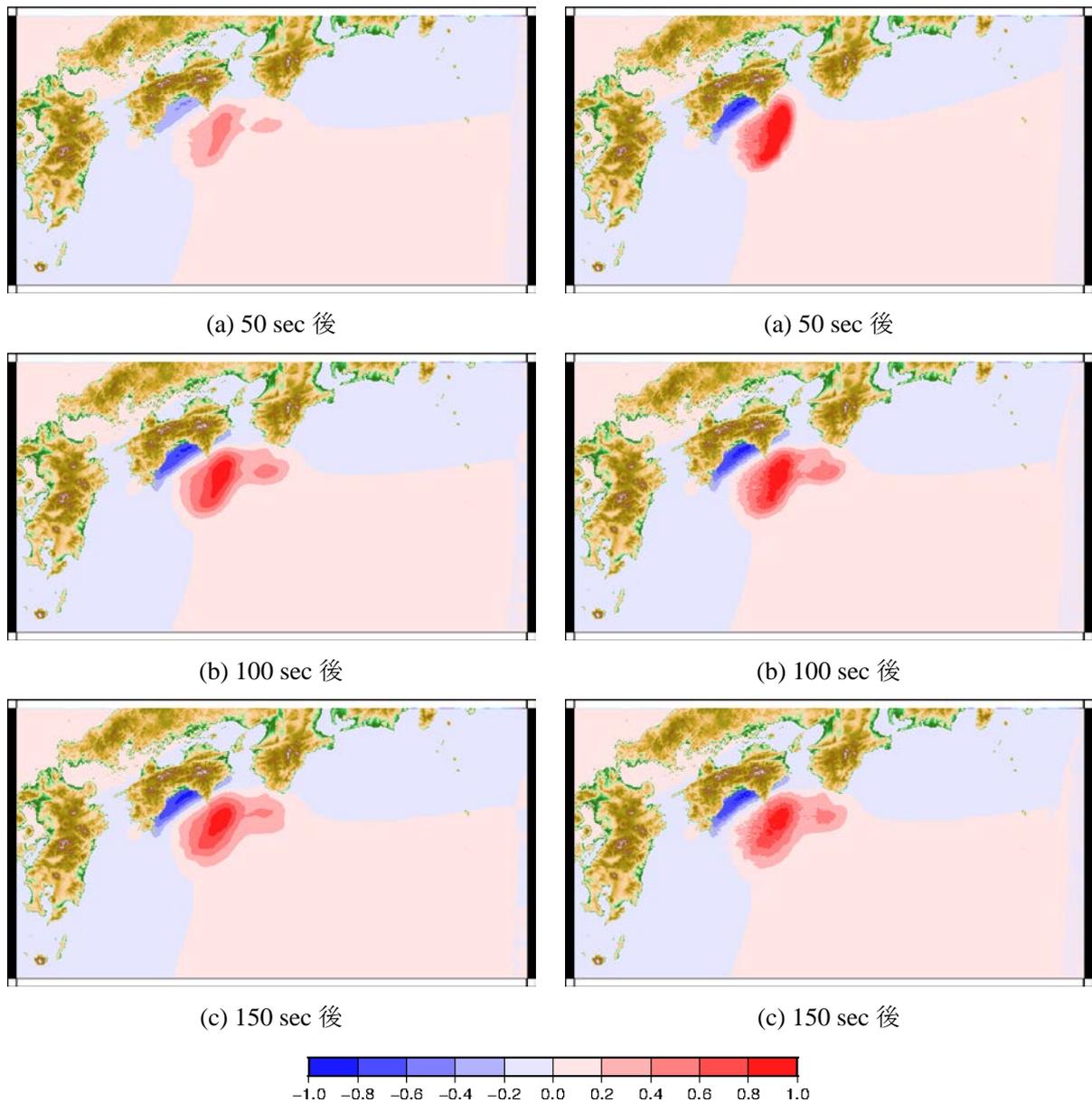


図 5.13. 線形的に与えた津波伝搬  
(高知県沖から破壊)。

図 5.14. 時系列に与えた津波伝搬  
(高知県沖から破壊)。

次に、大きな被害が予想される沿岸部に観測点を設け、波高の計測を行った結果について説明する。図 5.15 に今回設置した観測点の位置を、また、表 5.1 に観測点の一覧を示す。

和歌山県沖から破壊が開始する Mw.9.0 のシナリオにおいて波高の計測を行った結果を図 5.16 に示す。線形と時系列の差は地点によっては優位な差がない箇所もあるものの、いずれの地点にでも時系列に地殻変動を与える場合において最大津波高が高くなっていることが確認できる。また、1 (高鍋) や 21 (白須賀) での差は 1.5~2m と無視できない値である。高知県沖から破壊が開始するシナリオにおいて波高の計測を行った結果を図 5.17 に示す。線形的に与える場合の方が大きくなっている地点も確認できるが、多くの地点では時系列に地殻変動を与える場合において最大津波高が大きくなっている。

今回の検討では、二つのシナリオでの計測しか行っていないため、今後ほかのシナリオによる検討も継続して実施していく必要がある。しかし、今回の検討により、地震の規模に関わらず多くの地点で、FEMによる地殻変動解析を用いて時系列に地殻変動量を与える場合の波高の方が大きくなっていることから、「想定し得る最大規模の浸水」の想定の見直しの必要性を示唆した結果となった。

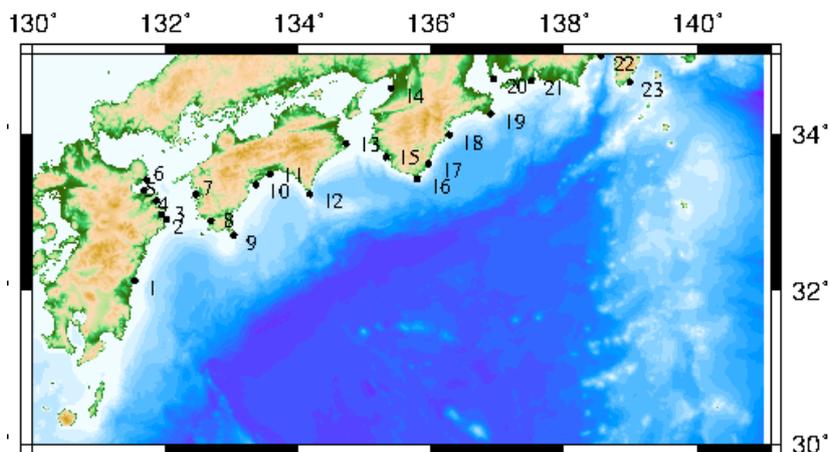


図 5.15. 観測点。

表 5.1. 観測地点名。

1	高鍋	9	土佐清水	17	勝浦
2	浦代浦	10	須崎	18	尾鷲
3	佐伯	11	高知	19	志摩
4	白杵	12	室戸	20	長嶋
5	大分	13	阿南	21	白須賀
6	杵築	14	堺	22	清水
7	宇和島	15	田辺	23	下田
8	宿毛	16	串本		

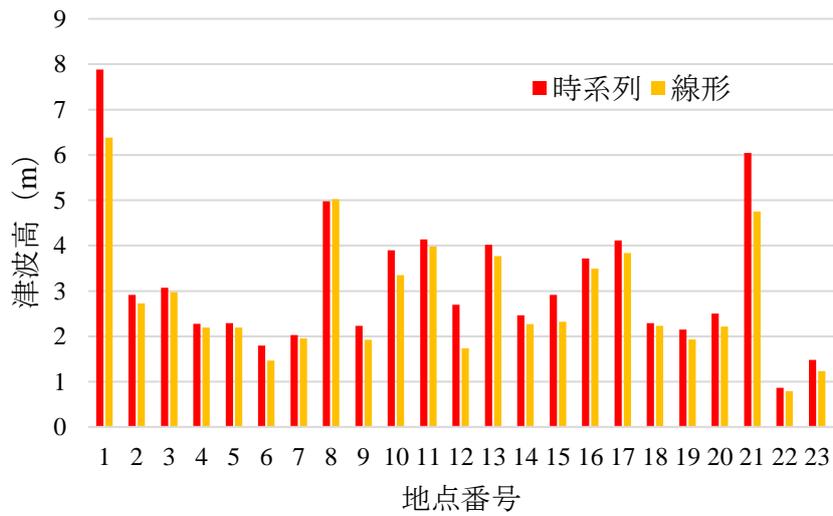


図 5.16. 最高津波高。

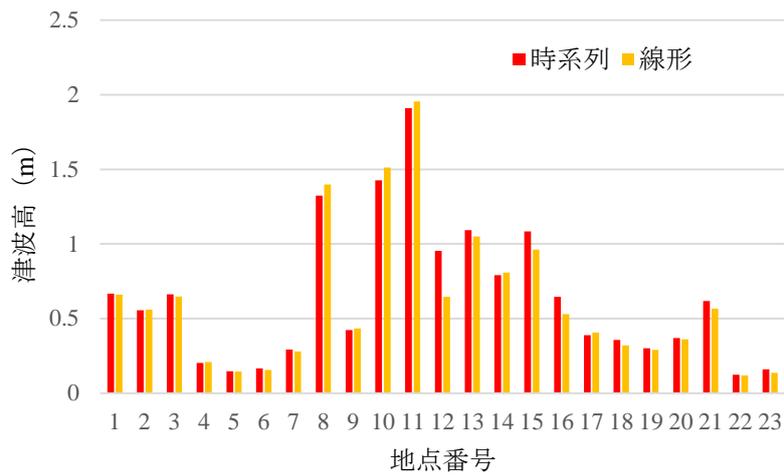


図 5.17. 最高津波高。

参考文献

- [1] Okada, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992.
- [2] Citak, S.O., T., Nakanishi, A., Yamamoto, Y., Ohori, M., Baba, T., Kaneda, Y., An Updated Model of Three-dimensional Seismic Structure in the Source Area of the Tokaitonakai-nankai Earthquake, AOGS-AGU(WPGM) Joint Assembly, Singapore, 2012.
- [3] Sato, K., Minagawa, N., Hyodo, M., Baba, T., Hori, T. and Kaneda, Y., Effect of elastic inhomogeneity on the surface displacements in the northeastern Japan: Based on three-dimensional numerical modeling, Earth Planets Space, Vol.59, pp.1083-1093, 2007.

- [4] Nakanishi, A., Shiobara, H., Hino, R., Kodaira, S., Kanazawa, T., and Shimamura, H., Detailed subduction structure across the eastern Nankai Trough obtained from ocean bottom seismographic profiles, *J. Geophys. Res.*, Vol.103(B11), pp.27151-27168, 1998.
- [5] Nakanishi, A., Takahashi, N., Park, J-O., Miura, S., Kodaira, S., Kaneda, Y., Hirata, N., Iwasaki, T., and Nakamura, M., Crustal structure across the coseismic rupture zone of the 1944 Tonankai earthquake, the central Nankai Trough seismogenic zone, *J. Geophys Res.*, Vol.107(B1), doi: 10.1029/2001JB000424, 2002.
- [6] Baba et al., Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, 172, pp.3455-3472, 2015.
- [7] 高知県：高知県沿岸における津波浸水想定説明資料,  
[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/shaseishin/kasenbunkakai/bunkakai/dai49kai/dai49kai\\_siryou2-5.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/bunkakai/dai49kai/dai49kai_siryou2-5.pdf) (2017年1月5日参照) .
- [8] Ichimurra et al., Tsunami analysis method with high-fidelity crustal structure and geometry model, *Journal of earthquake and tsunami*, Vol.11, No.5, 18pages, 2017.

## 5.2 新たな3次元粒子法(Expanding Slice Grid法)による津波遡上解析

### 5.2.1 背景

前節では2次元解析による津波の伝搬解析までを対象としていた。しかし、この際、津波先端部分、建物角部を周る流れなど3次元問題として取り扱うべき問題に対する誤差が無視できない。そこで、その誤差を推計するためにも粒子法による3次元津波遡上解析[1]~[6]を推進してきた。

これまでの事前検討より、精度の高い津波遡上解析を行うための粒子解析モデルの空間解像度としては、街区の道路を解像できる2m程度が最低限必要であり、さらに収束解を得るには50cm程度まで解像度を上げる必要があることを示してきた。しかしながら、そのような高分解能の粒子モデルのまま津波遡上解析の対象を都市全体として設定すると、解析モデルの大規模化は避けられない。例えば、本研究では高知市を解析対象地の一つとしているが、同地域を2mでモデリングした場合でも粒子数は1億を超え、スーパーコンピュータの使用を前提としても、解析時間の制約と使用するメモリ量の制約の両面からこれ以上の大規模化には限界が生じた。

そこで本節では、高速化と省メモリ化などの計算効率と解析精度の両面を配慮した新たな手法(Expanding Slice Grid法)の開発を行い、その効率について検証例題を通して測定した。

### 5.2.2 近傍粒子探索

本研究で用いる手法はSPH法の一つであり、SPH法の基本概念は、連続体を有限個の粒子に離散化し、対象とする粒子の物理量を、影響半径内に存在する近傍粒子の物理量の重み付平均によって近似するという考え方である。そのため、各粒子は影響半径内の粒子との相互作用を計算する必要がある。着目粒子の影響半径内にある粒子を探索する場合、相手粒子との距離を計算して、影響半径よりも小さければ、相手粒子は影響半径内にあると判定する。この時、各粒子が解析領域内すべての粒子との距離を計算すると、粒子数×粒子数の粒子間距離の比較が必要となり、計算時間が莫大になってしまう。SPH法において、計算時間の大部分はこの近傍粒子探索と圧力ポアソン方程式の求解が占める。そのため、計算コストを削減するためには近傍粒子探索の手法の選択も重要な要素になる。本研究ではlinked-list探索アルゴリズムを用いることにしている。この手法は空間的に一定の影響半径を用いる場合に有効なものである。このアルゴリズムでは、図5.18に示すような格子状のセルを用い、全ての粒子を各セルに割り当てる。そして着目する粒子を起点とした影響半径をカバーするセルを特定し、関係のある粒子を検出する。この操作により、近傍粒子探索の過程である特定の粒子グループの探索のみで済むため、計算時間を大幅に削減することが可能になる。

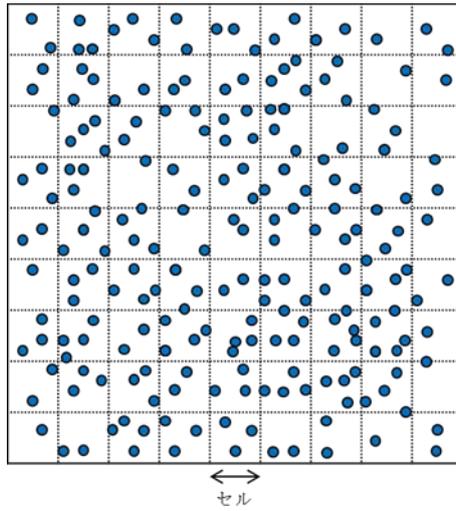


図 5.18. セルの概略図。

### 5.2.3 圧力評価の陽解法化

本研究では、解析手法として安定化 ISPH(Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics)法[2]を陽解法化した陽的 ISPH 法[7]を用いる。安定化 ISPH 法は圧力を陰的に評価する ISPH 法の一つであり、圧力ポアソン方程式の求解が必要になるため、一般的には共役勾配法などの連立一次方程式の求解が必要となる。このため、係数行列をメモリに保存する必要があるため使用メモリが増え、また連立一次方程式求解のコストも粒子数に対して 1.5 乗程度で増加するため、大規模問題の解析が困難となる。陽的 ISPH 法では、陰的な圧力評価スキームを陽的に発展させることにより、こうした計算コストの問題を解決する。以下では安定化 ISPH 法の定式化をもとに陽的 ISPH 法における圧力評価手法について概説する。安定化 ISPH 法では式(5.2)を用いて圧力の評価を行う。

$$p_i^{n+1} = \frac{B_i + \sum_j A_{ij} p_j^{n+1}}{\sum_j A_{ij}} \quad (5.2)$$

ここで表記の簡便化のため、 $A_{ij}$ 、 $B_i$  はそれぞれ、圧力ポアソン方程式の係数行列とソース項とした。

$$A_{ij} = m_j \frac{2}{\rho^0} \frac{r_{ij} \nabla W(r_{ij}, h)}{r_{ij}^2 + \eta^2} \quad (5.3)$$

$$B_i = \frac{\rho^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \rangle + \alpha \frac{\rho_i^0 - \rho_i^n}{\Delta t^2} \quad (5.4)$$

式(5.2)において、現在の  $n$  ステップからの次の時刻の  $n+1$  ステップまでの微小な時間間隔においては、本来は未知量である近傍粒子の圧力が現時刻での基地の圧力で近似できると仮定すれば、右辺は次式のように書き換えることができ、粒子  $i$  の圧力はその近傍粒子の圧力と相関がなくなり、陽的に圧力を評価

することができる。

$$P_i^{n+1} = \frac{B_i + \sum_j A_{ij} P_j^n}{\sum_j A_{ij}} \quad (5.5)$$

上記の定式化のみで計算を行うと、解析中に圧力の振動が発生したため、本研究では以下に示す圧力の平滑化処理を導入している。

$$\bar{P}_i = \frac{\sum_{j=1}^N (m_j / \rho_j) P_j W(|x - x'|, h)}{\sum_{j=1}^N (m_j / \rho_j) W(|x - x'|, h)} \quad (5.6)$$

ここで、安定化 ISPH 法の圧力ポアソン方程式における  $\alpha$  項は安定化のための項であり、物理的には虚偽の項である。上述の平滑化処理を実施した場合には、 $\alpha$  項までを含みながら平滑を行うことから、平滑された圧力は、理想状態の圧力に近づくと考えられる。しかしながら、同項による体積補正効果は実証済であり、安定した解析を実施するためには不可欠である。このことから、解析における状態の更新に関して、速度の更新については平滑化した圧力を、粒子位置の更新については平滑化前の圧力を使い分けることにしている。

以上により、計算精度にも配慮しつつ、計算コストの削減と使用メモリの省略化をしている。なお、本手法の妥当性についてはダムブレイクの例題による実験との比較、高知市を対象としての ISPH 法との遡上域の比較などにより検証済みである。

#### 5.2.4 並列化領域の分割方法

以上の陽解法化に加えて、並列化効率を向上させるためには領域分割方法とその通信方法も重要になる。一般的に用いられることの多い直交分割によるイメージを図 5.19 に示す。この手法では分割を容易に行うことができるが、各プロセスの負荷を均等にすることが難しい。そこで本研究では領域分割手法として、牧野[7]や古市、西浦[8]による 2 次元スライスグリッドによる分割を用いることにした。2 次元スライスグリッドのイメージを図 5.19 に示す。本手法では直交系において x 方向に ( $I=1,2,3,\dots,N_x$ ) の列要素に一次元領域分割を行い、y 方向には各列で各々異なる分割 ( $J=1,2,3,\dots,N_y$ ) を行う。各要素は袖領域を持ち、その領域の粒子群は MPI 通信により整合性を毎ステップ担保する。

粒子法による計算では、時間とともに粒子配置が大きく変動するため、適切な領域を更新する動的負荷分散が必要となる。本論文では古市、西浦[8]による負荷バランサーを適用した。粒子法の並列計算では、粒子数を均等化することで動的負荷分散を実現することが多い。しかし、粒子法の計算では自由表面近傍、壁粒子近傍、内部領域では計算コストが異なるため、粒子数の均等化だけでは適切な負荷分散が実現できないことがある。本論文で適用した偽ニュートン法による動的負荷分散は前ステップで生じた各計算ノードの計算時間・通信時間を参考にして、次ステップでの計算時間・通信時間の均等化を図る手法であり、粒子法のように点の数だけでは計算負荷の予測が困難な場合に有効な手段となる。

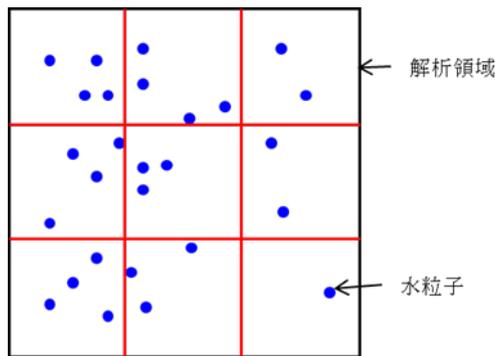


図 5.19. 直交分割イメージ。

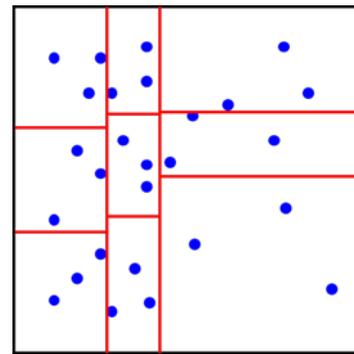


図 5.20. 2次元スライスグリッド。

### 5.2.5 計算領域・壁データの拡張機能 (Expanding 機能)

津波遡上のような時間とともに面内に解析領域が段階的に広がる問題を想定したとき、初めから全ての領域を対象に領域分割を実施すると、まだ水の達していない計算する必要のない壁粒子の箇所まで分割を行うことになり効率を落とす原因になる。そこで本研究では、領域分割方法として 2 次元スライスグリッドによる分割と動的負荷分散法を基礎技術とし、津波遡上に併せて解析領域 (壁粒子) を逐次拡張する拡張スライスグリッド法を開発した。

近傍粒子探索に用いていたセルの集合をタイルと呼ぶことにし、壁の粒子データはこのタイルにより管理している。例として  $7 \times 7$  セルで 1 タイルとする際のタイルのイメージを図 5.21 に示す。

具体的な領域の拡張の手順を図 5.22 および図 5.23 を用いて説明する。まずは、領域の拡張を行わない場合についての説明をする。図 5.22 の (a) に示す赤の粒子が着目する粒子であり、その粒子の存在するセルの周囲のセル (図の水色部分) を確認する。その時、今回の場合ではすべて読み込み済みのタイルのセルであることが分かる。このような場合では、新たな壁粒子の読み込みは起きず領域が拡張することなく次のステップに移ることになる。次に図 5.23 を用いて壁粒子の読み込みが発生する際の説明をする。図 5.23 の赤の粒子に着目し、その周囲のセルを確認すると、まだ読み込み済ではないタイルの領域にセルが入っていることが確認できる。この場合には、そのセルが含まれる領域のタイルの壁粒子を読み込み解析領域が拡張される。この動作の繰返しにより可能な限り無駄な粒子を保持することを避け、解析を実施することができる。

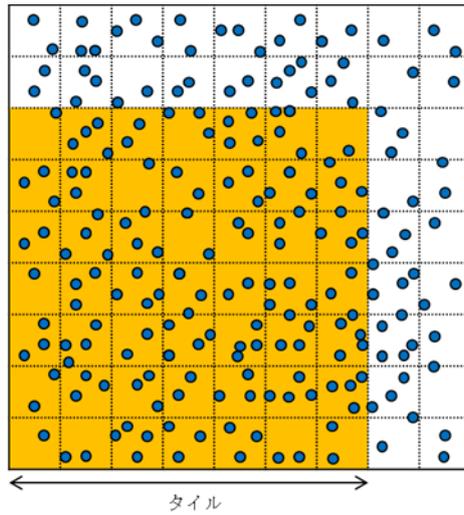
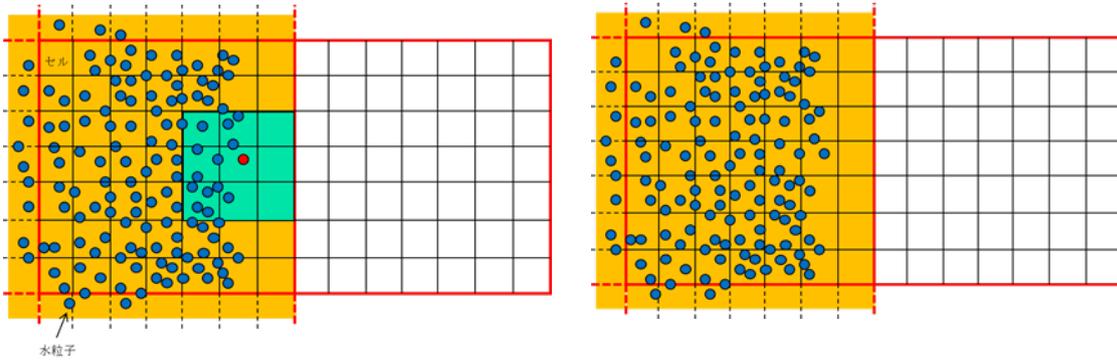


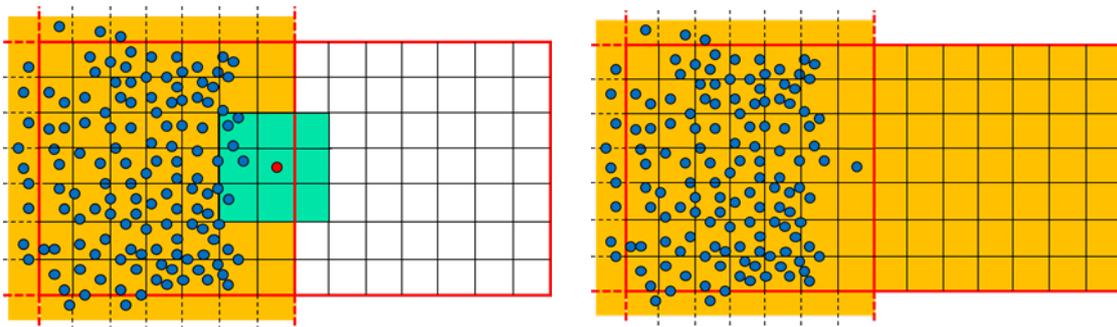
図 5.21. タイルの概略図。



(a) 拡張有無の判定

(b) 判定後の領域

図 5.22. 領域の拡張をしない場合の粒子位置。



(a) 拡張有無の判定

(b) 判定後の領域

図 5.23. 領域を拡張する場合の粒子位置。

### 5.2.6 並列化効率の計測(Weak Scaling)

前節で説明した手法を用いることで、計算コストの削減と使用メモリの省略化をしてきた。従来の安定化 ISPH 法および本手法のフローを図 5.24 にまとめた。(b)が本研究で開発した手法のフローであり、特

に大きく変更した点については赤字で示してある。圧力の更新を陽解法により行い、速度・粒子位置の更新し、新たに読み込むべき壁粒子があれば解析領域の拡張をする。最後に計測した計算・通信時間の実績をバランスさせるように並列化領域の再分割を行うことで効率的な計算を行う手法になっている。本節では開発した手法を用い、テストモデルを通してその効率の測定を行う。

並列化効率の計測を実施する検証例題を図 5.25 に示す。赤線で示す海底を想定した-40m の場所に 100m の水柱を設定している。その水柱が崩壊し、障害物（突起 A、B）にぶつかりながら広がり低いところから順に浸水していくような例題となっている。測定条件を表 5.2 に示す。case 1 と case 2 の二つのモデルを用意しており、case 2 は case 1 の縦横を 4 倍にした 16 倍のモデルである。16 倍の規模のモデルを用意したため、計算資源としては、case 1 が京コンピュータの 256 プロセスであるのに対し、case 2 では 16 倍の 4096 プロセスを用いている。

このようなモデル規模に比例して計算資源を増やしての計測を弱スケールによる計測といい、両者が同じ時間で同じステップまで計算できる状態が理想であり、その時の効率が 100% となる。

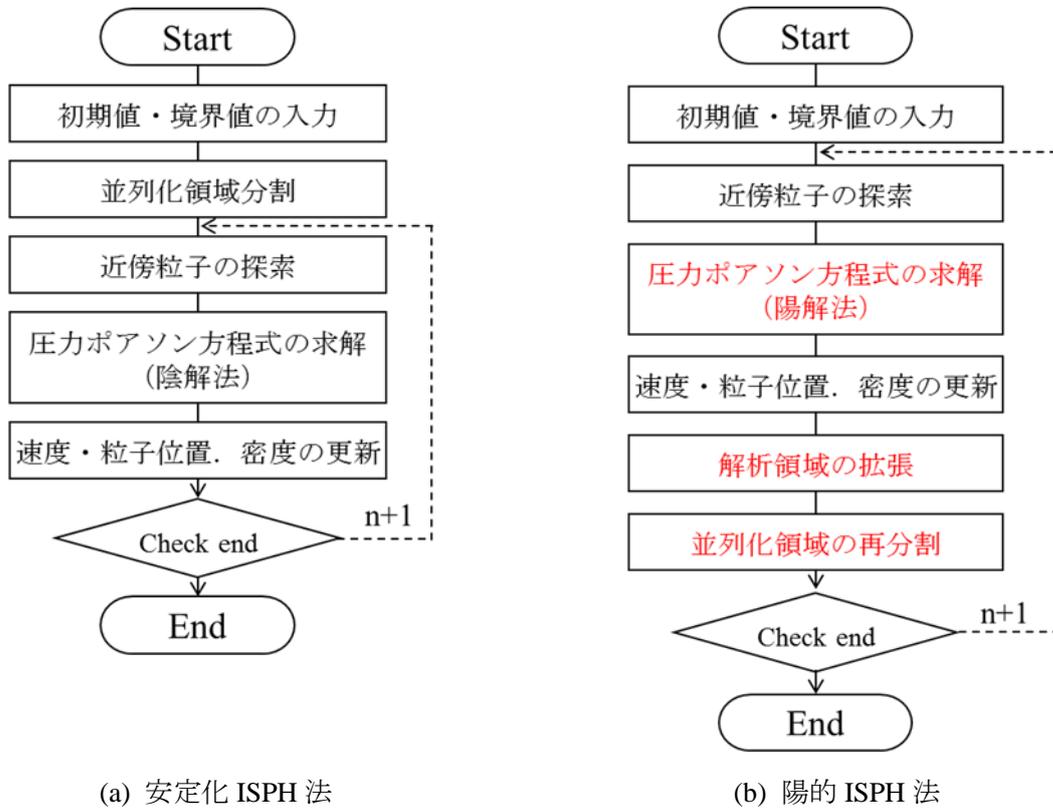


図 5.24. 計算フロー。

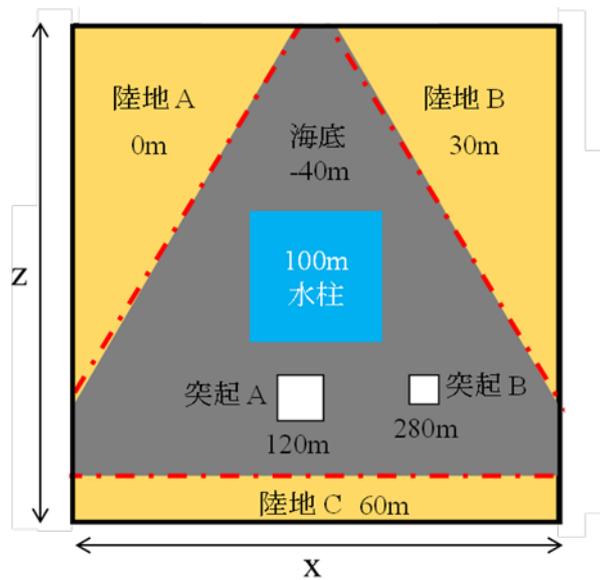
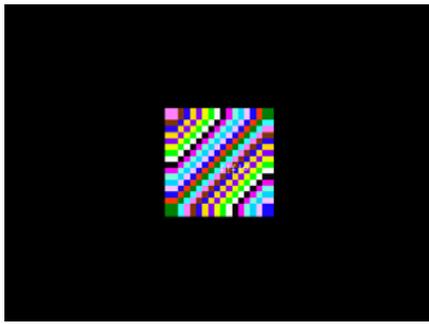


図 5. 25. Weak Scaling 計測モデル。

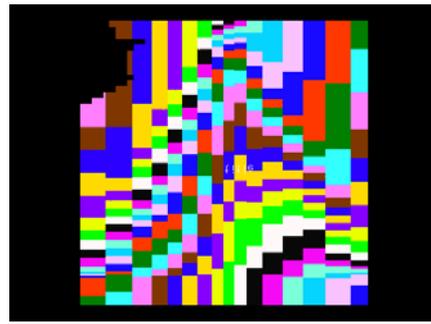
表 5. 2. 測定条件。

	case 1 (256)	case 2 (4096)
実行マシン	京コンピュータ	
粒子径	1 m	
粒子数	約 25,000,000	約 400,000,000
x,z の長さ	1080.5 m	4322 m
並列数	256 プロセス (8 スレッド)	4096 プロセス (8 スレッド)
計算ステップ	70000 step (dt=0.0005 s)	

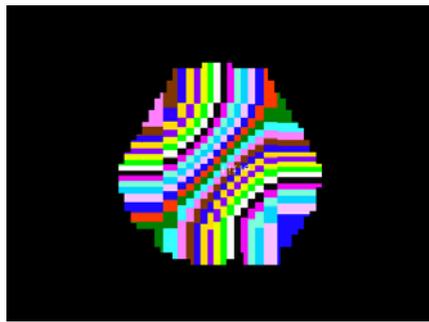
図 5. 26 に case 1 での 10000step ごとの結果、図 5. 27 に case 2 での結果を示す。図中の色は各プロセスが担当する領域を表している。動的な負荷分散と領域の拡張をしながら進展している様子が確認できる。case 1 では 50000step ほどで領域すべてが読み込まれており、一方で case 2 では 70000step 時点においてもまだ読み込み終わっていない領域も存在する。これは領域の縦横の幅は 4 倍にしているが、水柱の高さはどちらも 100m で実施しているため、完全に物理的に相似な問題設定になっていないためである。case 1、case 2 のどちらの場合でも領域の端の方が大きく担当領域を確保していることが確認できる。これは、中心に近づくほど粒子が密に存在し負荷が大きくなるためであり、負荷分散が正常に働いた結果であると考えられる。



(a) 0 step



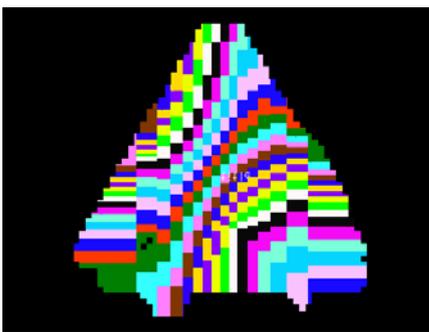
(e) 40000 step



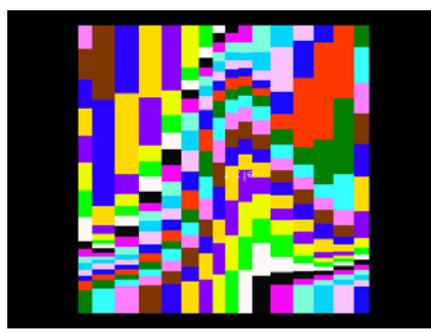
(b) 10000 step



(f) 50000 step



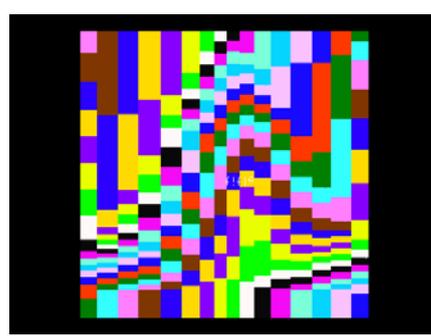
(c) 20000 step



(g) 60000 step

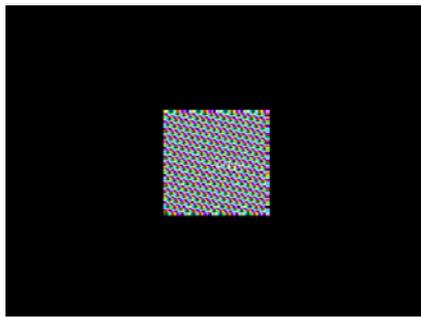


(d) 30000 step

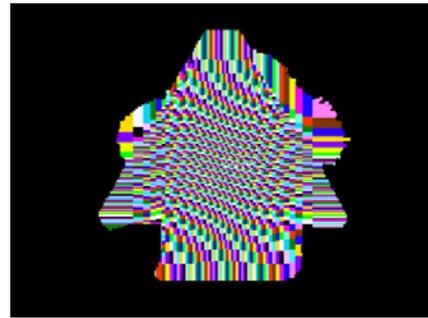


(h) 70000 step

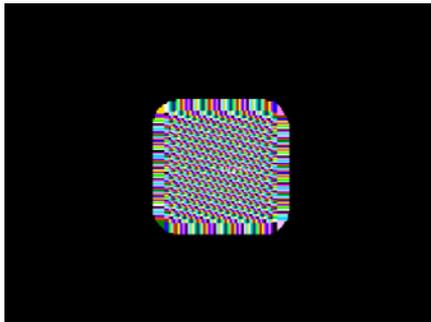
図 5.26. case 1 (256 プロセス) における壁領域の拡張の様子。



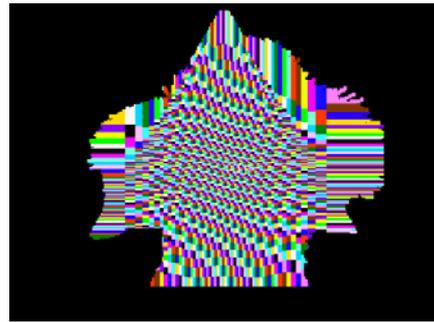
(a) 0 step



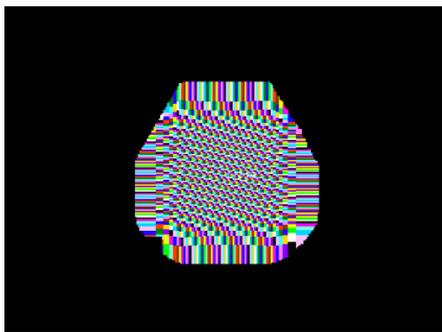
(e) 40000 step



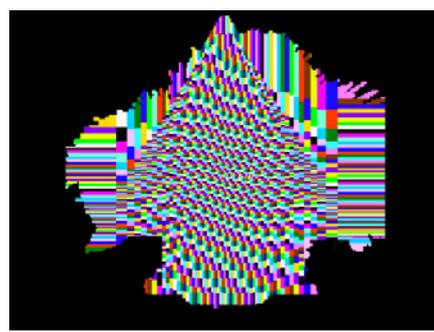
(b) 10000 step



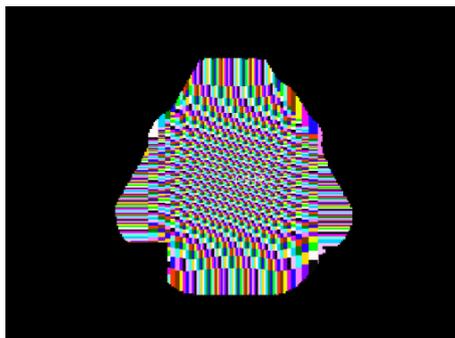
(f) 50000 step



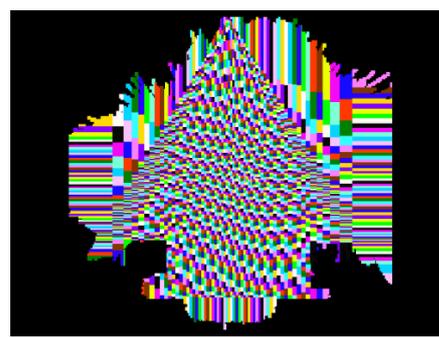
(c) 20000 step



(g) 60000 step



(d) 30000 step



(h) 70000 step

図 5.27. case 2 (4096 プロセス) における壁領域の拡張の様子。

表 5.3 に計算時間および計算効率を示す。10000step 時点で 86.0%という効率で計算できていることが確認でき、その後効率が低下するが 60000step 時点からはまた回復してくるという傾向が確認できる。100step、1000step の時点では初期の読み込みや output に要する時間による多少の差が、全体の計算時間

が短いため効率に大きく影響し 70～75%という効率に落ちていると考えられる。その後、10000step 時点で、その多少の計算時間の影響が小さくなる計算時間になると、86.0%という効率で解析できている。その後一旦効率が低下する原因として、今回用いている動的な負荷分散は一回の計算ステップでは x、z どちらかの方向に 1セル分領域を増減させるものであることが挙げられる。これによりある箇所の負荷を他の担当プロセスに分散させようとしたとき、case 1 ではその伝搬がすぐに伝わるが、case 2 では領域が広いために影響が伝搬するのが遅れているためと考えられる。60000step 時点からは領域の拡張が落ち着いてきており、負荷分散が全体に伝わってきたために計算効率が向上していると考えられる。そのため、70000step 時点では効率が 67.1%となっているが、先の計算ステップまで計算することでさらに効率が回復することが期待できる。

表 5. 3. 計算効率。

	Case 1	Case 2	
step	Time [s]		計算効率 [%]
100	62.236	87.121	71.4
1000	562.081	753.486	74.6
10000	6171.862	7178.734	86.0
20000	12737.482	16024.715	79.5
30000	20042.345	28573.518	70.1
40000	27554.101	42745.599	64.5
50000	35164.321	56260.546	62.5
60000	50572.888	66049.052	65.0
70000	58182.853	75410.71	67.1

図 5.28 に case 2 での各プロセスが SPH 主要計算部分に要した計算時間、およびその時の担当粒子数を示す。負荷分散によりすべてのプロセスで計算時間がほぼ一樣になっていることが確認できるが、その時の粒子数には 5 万～10 万粒子と大きなばらつきがあることが分かる。これより、粒子法を用いて負荷分散を行う際には、粒子数ではなく計算時間と通信時間の実績で負荷分散を行うべきであることが再確認できた。

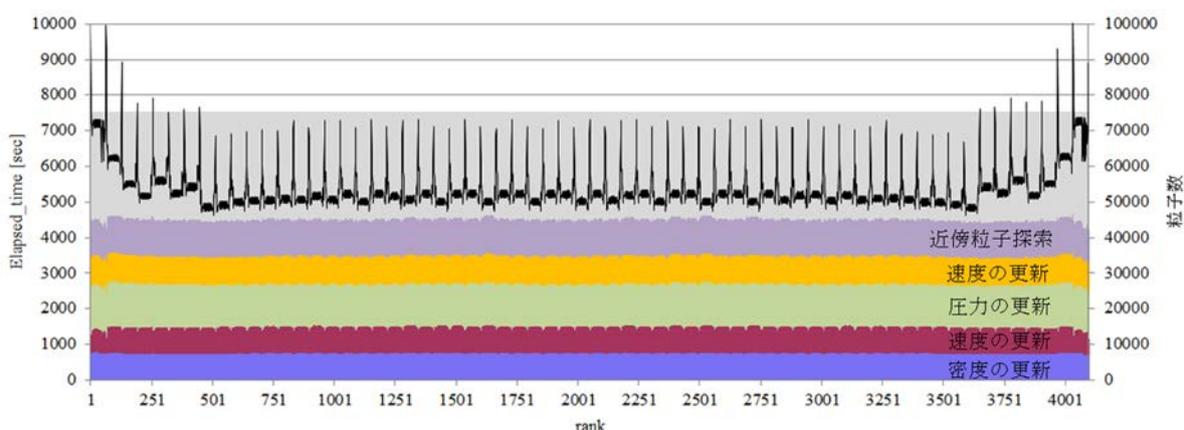


図 5.28. case 2 (プロセス) における各プロセスの計算時間と担当粒子数分布。

本手法を開発する以前の効率をまとめたグラフを図 5.29 に示す。このグラフから分かるように以前の手法では 1024 プロセスを用いた解析の時点で 78% という効率まで低下しており、このまま 4096 プロセスの計算を行うことは現実的ではなかった。

今回の計測は海底を模した三角形の地形に障害物を設置したモデルにより実施しており、単純なモデルによる計測ではない。その結果 4096 プロセスを用いた解析においても 80% を超える効率が保持できることを示した。また、今回のモデルでは図 5.28 から確認できるように各プロセスの担当粒子数は 5 万～10 万程度と少ない。過去の経験より計算時間や通信時間のバランスを考えると、各プロセスの担当粒子数は 50 万～100 万程度で分割すると最も良い性能（理論的性能に対する比率）を得ることができていることが分かっており、まだ問題設定等は今後見直す必要がある。以上、本手法を用いれば今回の 10 倍程度の数十億粒子であれば解析を高い効率で実施可能なツールが構築できたものとする。

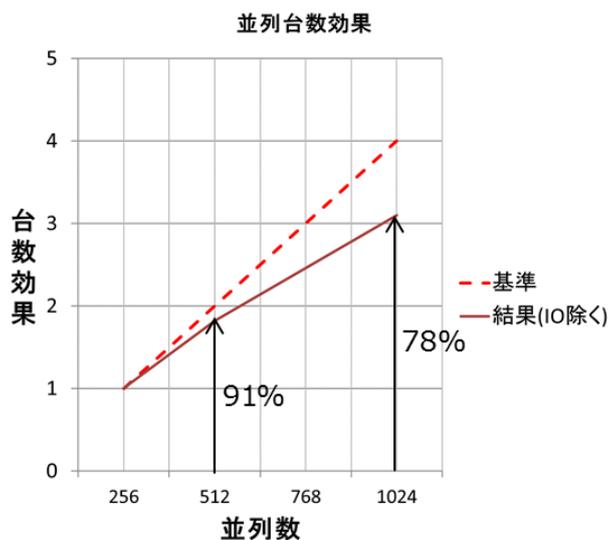


図 5.29. Expanding Slice Grid 法なしの場合の計測結果。

### 5.2.7 高知市津波遡上解析への適用例

図 5.30 に高知市周辺の地形データを示す。今回設定した領域は約  $6\text{km}\times 6\text{km}$  となっている。この領域を通常の粒子法で用いる Slice Grid 法では、潜在的な壁領域全体を対象として Slice Grid 法により領域分割するため、まだ水粒子が到達していない不必要な領域までを領域分割することになる。これに対して、今回開発した Expanding Slice Grid 法では、初期状態では壁粒子データを一旦、各計算ノードが均等に保管し、計算に必要な粒子データは計算負荷に応じて領域分割し、必要な粒子データのみを使い効率に計算できる。この両者の差のイメージを図 5.31 に示す。

具体的に約  $6\text{km}\times 6\text{km}$  の領域における  $1\text{m}$  の粒子間隔での粒子モデルを図 5.32、図 5.33 に示す。図 5.32 に示す通常の Slice Grid 法では担当する粒子に対して粒子法の解析に必要な変数をすべて保管することになるため、無駄にメモリを使うだけでなく、また壁粒子のみで計算する必要のない領域を確保してしまう。このため京コンピュータで計算するには、メモリの制約から、図 5.32 に示すモデルでは  $64\times 64$  分割の 4096 ノード（プロセス）を必要とした。これに対して本研究で開発した Expanding Slice Grid 法では、無駄な壁粒子は座標値のみを各ノードで均等分担しながら記憶させておき、計算に必要な粒子のみを Slice Grid 法で領域分割するため、省メモリ・高効率化が図れ、 $32\times 32$  の 1024 ノード（プロセス）のみで同じ解像度の粒子モデルの解析を可能とした。図 5.33 がその初期領域分割図となり、この後、津波遡上過程に応じて領域を拡大しながら、各計算ノードの計算時間と通信に要した実時間を均等に分散させるように動的負荷分散を実施した。

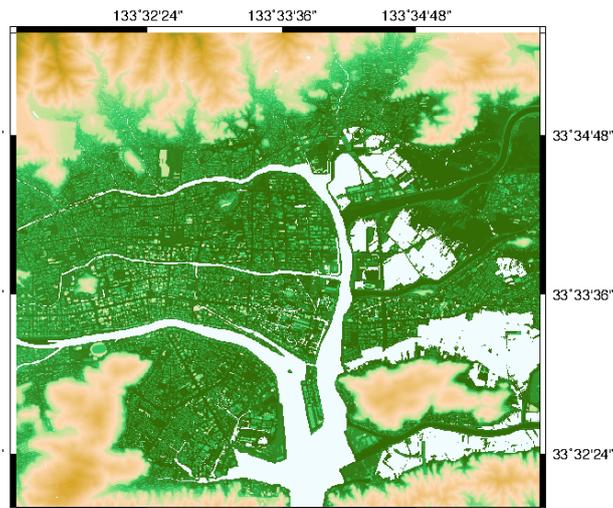


図 5.30. 高知市周辺の地形データ。

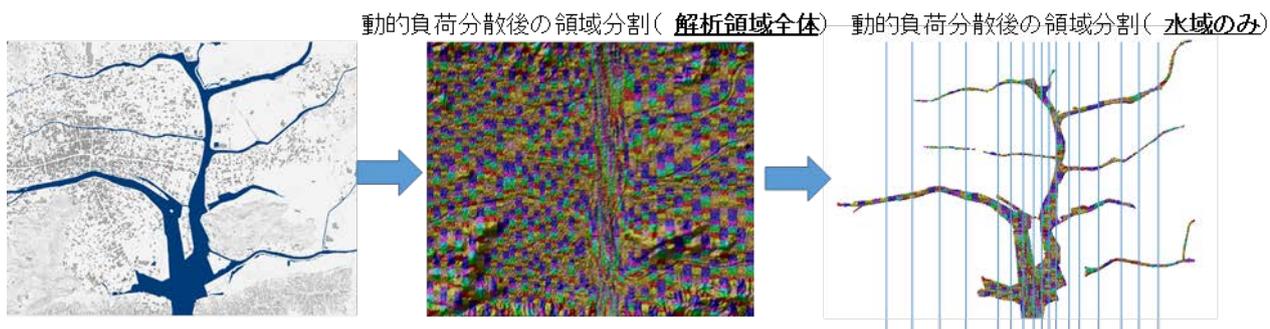


図 5.31. 通常の Slice Grid モデルと Expanding Slice Grid モデル。

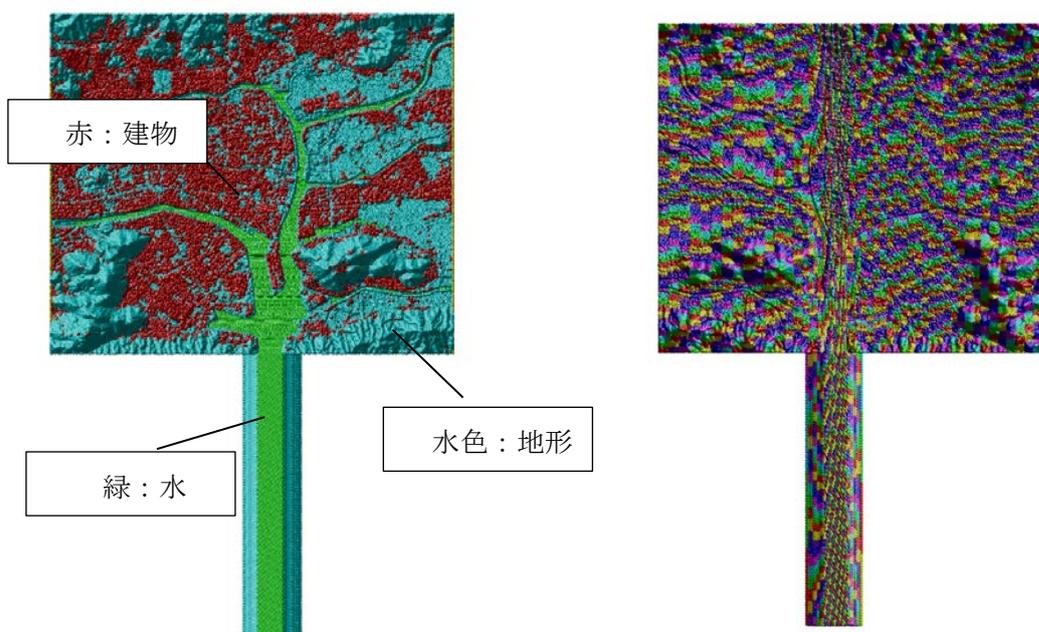


図 5.32. 通常の Slice Grid モデル (1m 解像度：4096 ノード (プロセス))。

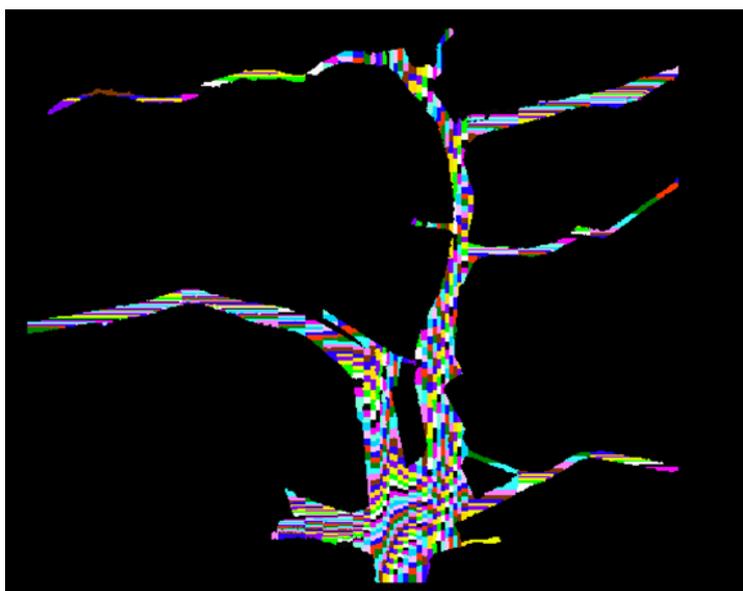


図 5.33. Expanding Slice Grid モデル (1m 解像度 : 1024 ノード (プロセス))。

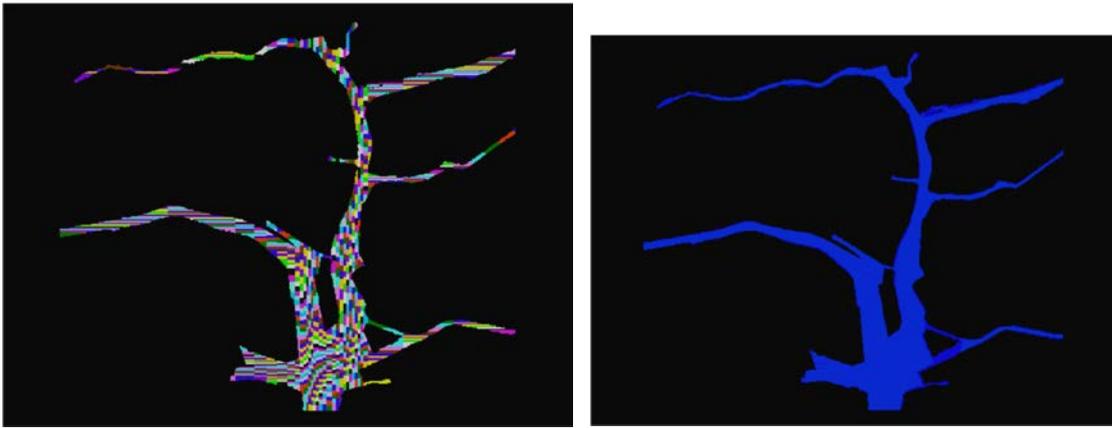
図 5.33 の初期モデルに対して、河口部より 10m の波を 10m/s を流入させた解析を実施した。実行条件をまとめて表 5.4 に示す。

表 5.4. 計算条件。

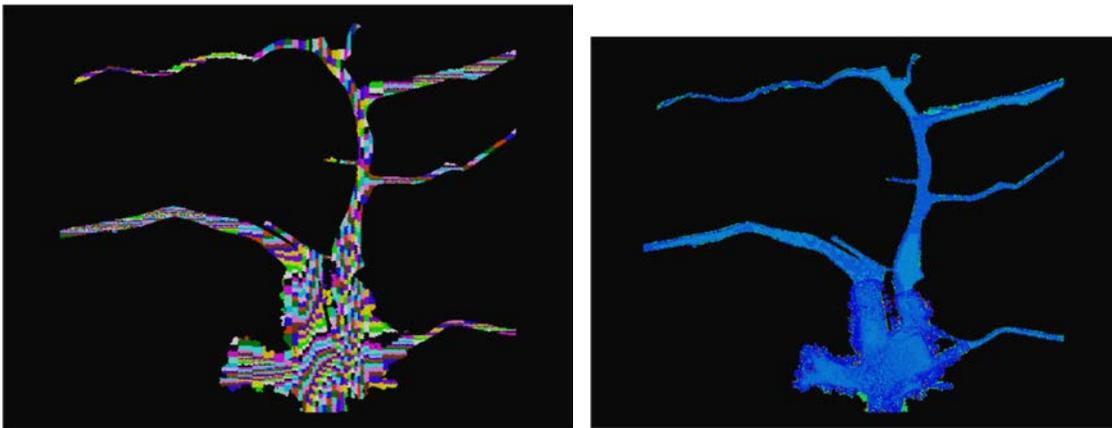
実行マシン	京コンピュータ
粒子径	1 m
粒子数	約 2 億
並列数	1024 プロセス
計算ステップ	500,000step (dt=0.0005 s)

図 5.34 に解析結果を示す。図左には計算プロセス分布図を示し、色はそれぞれの時点での各プロセス (ノード) の担当領域を表している。同図中(b)は 300,000step での結果であり、初期に比べると河口に設定した流入領域付近の各プロセスの担当領域が狭くなっていることが確認できる。これは、流入域では計算コストが大きくなるためであり、負荷分散が正常に働いた結果である。(c)は 500,000step で結果であり、水が平面的に広がるとともに壁粒子も拡張されている様子が確認できる。また図中右にはそれぞれの段階での圧力を示す。

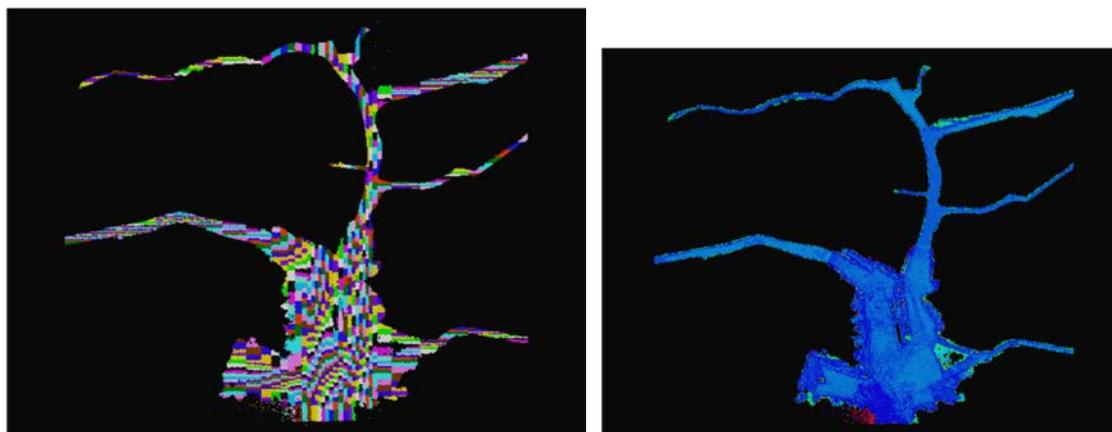
以上より、これまで 4096 ノードを使用しないと不可能であった粒子径 1m、総粒子数約 2 億という大規模計算を 1/4 の計算資源である 1024 ノードで、安定かつ高速に解析可能であることを示した。なお、本解析で使用した計算資源にはまだ余裕があり、目標としていた粒子径 0.5m 程度以下の高詳細な計算も可能な目途がたった。



(a) 0 step



(b) 300,000 step



(c) 500,000 step

図 5.34. 解析結果 (左: 各プロセス担当領域, 右: 圧力分布)。

## 参考文献

- [1] Asai et al, A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, Journal Of Applied Mathematics, Vol.2012, 139583,pp1-24,2012.
- [2] Asai et al, Coupled tsunami simulation based on a 2D shallow-water equation-based finite difference method and 3D incompressible smoothed particle hydrodynamics, Journal of Earthquake & Tsunami, 2016.6.
- [3] Isshiki et al, 3D tsunami run-up simulation and visualization using particle method with GIS-based geography model, Journal of Earthquake & Tsunami, 2016.6.
- [4] 江口史門, 浅井光輝, 大谷英之, 一色正晴, 建物群を含む地表面詳細モデルを用いた粒子法による三次元津波遡上解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. I\_367-I377, 2016.
- [5] 宮川欣也, 浅井光輝, Abdul Muhari, 今村文彦, 仮想造波板による平面 2 次元解析と 3 次元粒子法の連成型津波遡上解析, 土木学会論文集 A2 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. I\_473-I\_481, 2016.
- [6] 小笠原圭太, 浅井光輝, 古市幹人, 西浦泰介, 大規模津波遡上解析に向けた安定化 ISPH 法の陽的時間積分スキーム, 土木学会論文集 A2, Vol.73(2), pp. I\_397-I\_404, 2017.
- [7] J. Makino, A fast parallel treecode with GRAPE, Publ. Astron. Soc. Jpn. Nihon Tenmon Gakkai, Vol.56(3), pp.521-531, 2004.
- [8] M. Furuichi, D. Nishiura, Iterative load-balancing method with multigrid level relaxation for particle simulation with short-range interactions, Computer Physics Communications, 2017.

## ⑥地震・津波災害時の交通に関する数値解析コンポーネントの開発（再委託先：国立大学法人神戸大学）（サブ課題 B）

⑥においては、交通流モデルと交通需要モデルの数値解析手法の調査を行い、より効率的な車両の経路選択の更新アルゴリズムと、災害復旧期における動的な需要モデルに関する知見を得た。また、ポスト「京」での capacity computing を想定し、大規模都市モデル 100 万ケースの並列計算を目標とした各モデルの数値解析コンポーネントのコード化を継続した。具体的には、交通流シミュレータにおいては交通流コンポーネントの並列性および収束性を改善した。需要シミュレータにおいては、被災者の交通行動を再現する動的なシミュレータの構築と実装を行なった。また、最短経路探索アルゴリズムの消費メモリ節約のための、旅行時間データ圧縮技術を開発し実装した。さらに、確率的な経路選択のためのモデルを開発し実装した。昨年度から継続していた、大きな渋滞が生じる需要での市販シミュレータとの結果比較を、テストネットワークを用いて行った。サブ課題 A との連成のため、サブ A のシミュレーションで生成された、南海トラフ地震を想定し、大阪市とその周辺のエリアを対象とした震度データと道路閉塞データをインプットとする交通障害シミュレーションを実施した。

### 6.1 既存の数値解析手法の整理

#### 6.1.1 交通流モデルのレビュー

ここでは、本研究の交通流モデルに用いる確率的利用者均衡配分(SUE:Stochastic User Equilibrium)の解法である多項プロビットモデル(MNP: Multinomial Probit)について整理する。

MNP モデルにおいて、主体 $i$ が目的地までの経路集合 $\mathbf{K}$ からある経路 $k$ を選択する効用 $U_k^i$ とする。効用 $U_k^i$ は経路コスト $V_k^i$ 、認知誤差 $\varepsilon_k^i$ を用いて、

$$U_k^i = V_k^i + \varepsilon_k^i, \forall i \in I, \forall k \in \mathbf{K} \quad (6.1)$$

の式で表される。 $\varepsilon_k$ は平均 0、共分散行列 $\Sigma^i$ に従う多変量正規分布であり、 $\Sigma^i$ は、

$$\Sigma^i = [\text{cov}(\varepsilon_k^i, \varepsilon_j^i)], \forall j \neq k, (j, k) \in \mathbf{K} \times \mathbf{K} \quad (6.2)$$

で表される。MNP モデルの選択確率は閉形式では表現できないが、モンテカルロシミュレーションによって近似する方法が Sheffi and Powell<sup>[1]</sup>によって提案されている。MNP モデルは、同じく SUE の解法である多項ロジットモデル (MNL: Multinomial Logit) と比較して分析が難しくなるものの、IIA(Independence of Irrelevant Alternatives)特性による問題を解決できる利点がある。MNP モデルは、Sheffi and Powell<sup>[1]</sup>、Daganzo and Sheffi<sup>[2]</sup>、Sheffi and Powell<sup>[3]</sup>によって提案されたのち、McFadden<sup>[4]</sup>による simulated moments 法によって進展を遂げた。

Sheffi and Powell<sup>[3]</sup>による研究では、MNP モデルの共分散構造は、行列要素をネットワークトポロジーに関連付けることによって定式化されている。したがって、共分散行列は明示的に評価して維持する必要はない。リンク旅行時間 $T_l$ は、真のリンク旅行時間 $t_l$ と旅行者毎のランダムな認知誤差によって摂動し、

$$T_l \sim N(t_l, \theta t_l^0), \forall l \in \mathbf{L} \quad (6.3)$$

と定義される。ここで  $N(a,b)$  は、期待値  $a$ 、標準偏差  $b$  の正規分布である。平均は真の旅行時間  $t_l$  であり、分散は自由流旅行時間  $t_l^0$  及び定数  $\theta$  から構成されている。また、経路旅行時間ベクトル  $T_k$  は、モーメント

$$E[T_k] = t_k = \sum_l t_l \delta_{l,k}, \forall k \in K \quad (6.4)$$

$$\text{cov}[T_k, T_j] = \theta \sum_l t_l \delta_{l,k} \delta_{l,j}, \forall j, k \in K \quad (6.5)$$

をもつ多変量正規分布に従う。ここで、 $\delta_{a,b}$  はリンク  $l$  が経路  $k$  に属しているとき 1、属していないときに 0 になるリンク・経路接続行列の要素である。以上より、経路選択確率は、

$$P_k = \Pr \left[ T_k = \min_{j \in K} (T_j) \right], \forall j, k \in K \quad (6.6)$$

のように表される。

正規分布は負の無限大から正の無限大に伸びるので、MNP モデルを用いる場合に認知旅行時間が負の値となる問題があるが、Nielsen<sup>[5]</sup>、Ramming<sup>[6]</sup>、Bierlaire and Frejinger<sup>[7]</sup> 及び、Prato and Bekhor<sup>[8]</sup> による研究では、負の値を切り捨てるか、別の分布を使用して正規分布に近づけることでこの問題を解決している。

### 6.1.2 交通需要モデルのレビュー

災害復旧期の動的需要モデルの構築にあたり、災害復旧期の交通需要及び現象に関する研究のレビューを行った。

山口ら<sup>[9]</sup>では、携帯電話 GPS による滞在人口データを用いて熊本地震における復旧期の交通需要の特徴の分析を行っている。滞在人口分布データは、個人情報保護のための処理が加えられるため、得られる情報が制限されている。既存研究では、滞在人口分布について「どこに人がいるか」に焦点を絞って集計が行われていた。一方で、「どのような状態の人がいるか」はわからない。そこで「どのような状態の人がいるか」に注目し、分析を行っている。具体的には、熊本地震の際の GPS 情報を識別 ID ごとに「主拠点滞在、副拠点滞在、その他滞在、移動」の 4 種類の状態に分類し、その構成比を時間ごとに集計している。さらに、観測された構成比と、平常時変動から予想される構成比の乖離を分析することで行動パターンの被害・回復過程を明らかにしている。ここで得られた行動パターンの変化には、次の通りである。

- ・ 熊本地震の発生直後、熊本県では夜間に最大 22 万人が平常通り自宅に滞在することが出来なくなっており、7 万人以上の状態が 6 日間継続していた。この推移は災害対策本部発表の避難者数の推移とおおむね一致しており、GPS データから避難者数を概算することができたとと言える。
- ・ 昼間は最大 18 万人が通常通りの副拠点（勤務地）への外出行動をせず自宅に滞在し、それが 7 万人以上の異常状態が 10 日継続した。これは都市機能のダメージを示すものであり、生活行動への被害という観点で見ると自宅被害よりも長期間のダメージがあったことが分かる。

携帯 GPS の行動状態の時間変化の分析により、熊本県において発生した日常的な生活パターンからの乖離と、それが回復する過程が定量的に確認されている。以上より、動的交通需要モデルの構築にあたっては、自宅以外（避難所）を生活拠点とすることや災害後は平常の活動が発生しないことを再現する必要がある。

災害時の行動分析を携帯 GPS 以外のパッシブデータを用いて行った他の既存研究として、桑原ら<sup>[10]</sup>がある。この研究ではプローブカーを中心とする移動体データを用いて熊本地震の際の都市内交通と避難行動の実態について定量的な解析を行っている。具体的には、熊本地震前後の約 1 週間ずつの移動体データを用いて、平常時と災害後の主要経路の旅行時間変化、ボトルネック地点の変化、発生集中点の変化、避難需要の特性について分析している。分析結果は次の通りである。

- ・ 都市間交通について、九州自動車道の通行止めの影響で代替経路の日中の旅行時間は平常時に比べて大きく増加した。
- ・ 都市内交通について、日中は幹線道路において渋滞がかなり悪化し、平常時には見られないボトルネックが顕在化した。
- ・ 避難者が集中する避難所やスーパー、銭湯を中心に平常時とは異なる局所的な交通渋滞が発生した。

こうした分析結果から、災害時には平時とは大きく異なる交通状況が発生することが確認されている。特に交通需要の観点で見ると、避難所やスーパーが大きな需要の発終点としてできており、これは平常時との大きな違いであり、混雑を生む原因となる。動的交通需要モデルの構築にあたっては、こうした需要の再現が必要となる。

柿本ら<sup>[11]</sup>は避難所からの帰還行動に着目した研究を行っている。熊本地震では多くの人が長期にわたり避難所で生活をしたため、自治体は多くの人的資源を割かれてしまい、ほかの被災者支援が手薄になってしまったという問題意識のもと、住民の避難から帰宅に至るまでのプロセスに着眼し、モデルを用いた分析を行っている。この研究では、避難者の速やかな日常生活の再開を促す方策・要因を明らかにすることを目指し、避難者数の推移モデルを構築している。説明変数としては、時間推移、生活インフラの復旧・営業率、個人属性、自宅被害状況や避難所属性、余震回数などを用いている。

モデル分析では、単なる時間推移に加え、避難者減少要因（生活インフラ・近隣店舗の復旧・営業率）や自宅被害状況や避難所属性、余震回数が有意に影響することを明らかにしている。モデルパラメータの推定結果を用いたシミュレーションでは、避難所運営を改善することでかえって避難者数の減少は鈍化し、生活インフラの被害が小さければ避難者数の減少が促進されるという結果が示されている。前述した通り、動的交通需要のシミュレーションにあたっては避難者数及び避難拠点の記述が重要となるが、2 週間～1 か月程度の復旧期における交通需要シミュレーションにあたっては生活インフラの復旧率や避難所の質なども含めた計算が（より詳細な結果のためには）必要となるであろう。

## 6.2 交通流シミュレータの開発

### 6.2.1 渋滞の後方伝播計算の収束性の改善

構築中の交通流シミュレータ（今回、これを **FastDUE** (Fast Dynamic Useq-Equilibrium calculator) と名付けた）は、ネットワークに含まれる多数のリンクを各プロセスに割り当て、各プロセスが各リンクの交通量の状態を個別に更新し、その結果を隣接するリンクにプロセス間通信により伝達することを繰り返すことにより交通流の計算を行う（図 6.1）。この繰り返し計算は、リンク間の境界条件がすべて整

合した時点で収束したとみなされる。このうち、車両の進行方向に交通状況を伝達する部分（前方伝播）については、必ず有限に収束することが証明されている実装をすでに過年度の研究により実現している。一方、渋滞の延伸にともなう流入可能容量の低下を伝播する部分（後方伝播）については、有限の計算での収束は理論的に証明されておらず、数値的にも、過去の検証においては収束せずハンチング(振動)を起こすケースが多く見られた。このことを防ぐために、実際のシミュレーションの実装においては、上流への容量伝播に指数平滑的な手法を用いている。しかしこの方法は収束まで多数の繰り返し計算を強いる。計算時間の向上のためには、アルゴリズムの改善によって、少なくとも限定的な状況において少ない回数で収束するようにすることが望ましい。

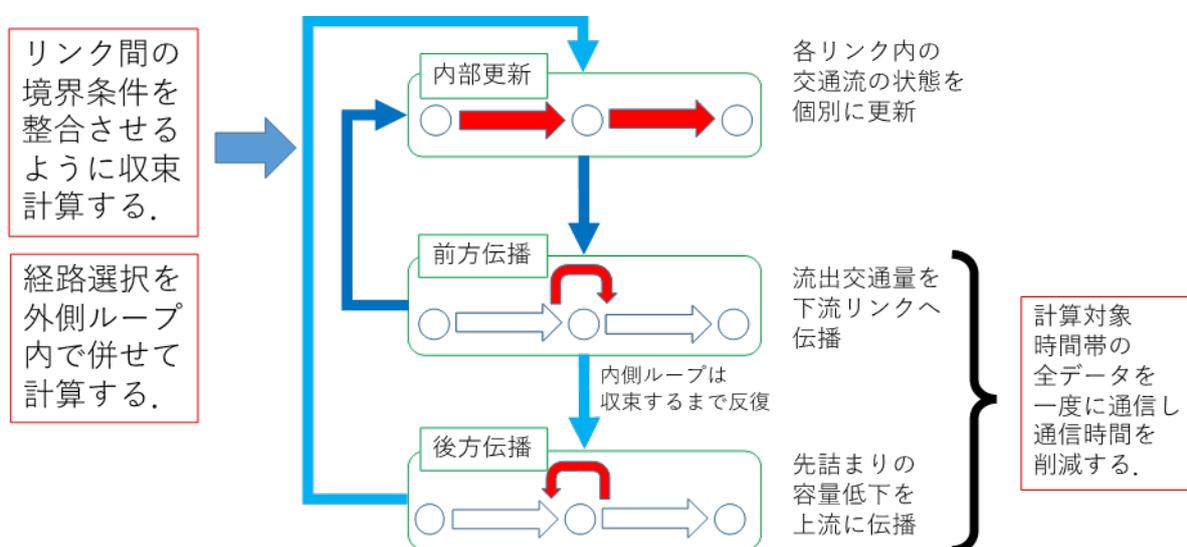


図 6.1. 交通流シミュレータにおける繰り返し計算の構造。

後方伝播においてハンチングが起こる原因を調査したところ、以下の 2 点が原因となっていることが推測された。

1. 当該リンクの渋滞列が最上流まで到達した状態で収束している時に、数値的な誤差が加わることで、渋滞列が達していないと見なされ、流入可能容量が拡大され、次の計算で渋滞列が溢れてしまう。
2. 当該リンクから複数のリンクが分流する時に、それらのリンクへの流出可能容量が安定して定まらない。

1.は、収束状態が微小誤差に対して不安定であることを原因として生じている。対策として、渋滞列が達しているか否かの判定にマージンを持たせ、ハンチングが起きてもそのマージンの範囲内に収まるようにした。

2.は、分流先のリンクに車両が交互に流出する際に、片方に車両が流出中にもう片方の容量が使用されず、結果として実効容量が低下することにより生ずる。車両が同時に流出する場合はこのことは生じないので、結果として、車両の走行パターンが少し変わっただけで、実効容量に大きな差が出てしまうことがある。この影響を緩和するために、使用されない容量を短時間だけ貯められるような処理を追加してい

る。これは、交通工学的には、流出口に付加車線をつけたことに対応する。ただ、この処理は実効容量の変動を完全に消すものではなく、より改良が必要である。

また、上流に 2 本以上のリンクがある場合は、流入可能容量を適切にこれらのリンクに割り振らなくてはならない。これまでは指定した比率で容量を割り振るだけであったが、これでは使いきれない余剰容量が出るため、全体として混雑を過大に評価する傾向があった。今回、余剰容量が他のリンクからの流入に再割り振りされるように改良を行い、この問題を解決した。

### 6.2.2 主要コンポーネントの高速化

ここでは、計算科学的アプローチによる高速化を説明する。交通流シミュレータの計算コードの構造を精査し、計算負荷が高い箇所を見つけコードを改善することで計算高速化を図る。計算が高コストである部分（全体コストの 1%以上となる関数）について着目したところ、`main` 関数ループに関しては、MPI 通信等のコストが 99.7%以上であり、演算のコストは僅かである。計算が高コストであったのは、メインループ全体の 9 割以上のコストを占める `update` 関数内の `getTraveltime` 関数、`Make_ToBe_RelayForward_list` 関数、`updateForward` 関数および `diverge` 関数であった。`diverge` 関数に関しては、昨年度に高速化を実施した。そこで、`getTraveltime` 関数、`Make_ToBe_RelayForward_list` 関数および `updateForward` 関数について高速化を図る。

まず、計算コードの中の `getTraveltime` 関数の高速化のために行った修正内容を説明する。当該処理に関しては、`updateForward` 関数内の多重ループ内から呼び出される関数であり、その回数は 2 千万回以上となる。そのため、呼び出しのためのオーバーヘッドが大きいと判断できるため、呼び出しコストの削減のために、`getTraveltime` 関数を `inline` 化する。

次に、`Make_ToBeRelayForward_list` 関数のコードの改善内容を説明する。当該処理に関しては、線形探索のため `for` ループで値が一致するまで繰り返しを行う処理となっている。しかし、線形探索よりも二分探索の方が、検索要素数の増加にしたがって、一般的には高速である。二分探索のためには、テーブルのソートが必要になるが、そのソート処理を追加したとしても高速化の効果は十分であると予測される。

最後に、`updateForward` 関数の高速化のために行った修正内容を説明する。`updateForward` 関数内の経過時間取得処理に関しては、実数値を `stringstream` 変数に代入し、さらに整数値に足し込む処理となっている。実数から `stringstream` 変数への代入処理が、当該処理全体の 55%程度のコストとなっているため、これらの処理を省くことにより高速化を図った。

`getTraveltime` 関数、`Make_ToBe_RelayForward_list` 関数および `updateForward` 関数の高速化による効果を計測した。その結果を以降に示す。なお計算実行時の条件については表 6.1 に示す通りである。

表 6.1. 実行時動作条件一覧。

ケース	内容	
実行条件	並列数 [フラット MPI]	3,840 プロセス並列
	性能評価対象ステップ	l:51~l:53
	実行時オプション	-R 0.1 -r 0.1:25:0.02:50:0.01 -s 2 -i 3 -z 0 -b 10 -q 1.0 -M 1.0 -B 0.5:25:0.2:50:0.1 -A 2 -Q 0 -H 0 -m 0.2 -d 1200 -x 1.4 -S -h 18 -k 10 -K 200 -j 100 -J 50 -F -c 0.5 -l 1 -T -E -p ./partition.txt

updateForward 関数内のタイマー計測結果では、getTraveltime 関数を inline 化により、対象ループの最大経過時間が 87 秒から 69 秒に短縮されており、ループ単体では約 20%の性能改善が図られた。updateForward 関数全体としては 4%の性能改善である。また、線形探索を二分探索に変更したことにより、updateForward 関数を含む interRelayForward 関数と intraUpdateForward 関数の最大経過時間が、前者は 386 秒から 20 秒に、後者は 1,234 秒から 1,160 秒に短縮した。interRelayForward 関数としては 94%の性能改善であり、その結果に伴い、ロードインバランスが目立たなくなった。さらに、実数から stringstream 変数への代入処理を省くことにより、高速化の対象となるループの最大経過時間が 172 秒から 61 秒となり、ループのコストとしては 65%、updateForward 関数全体としても 17%の性能改善となった。これらのチューニングの結果として、update 関数の経過時間が 1,699 秒から 991 秒に短縮され、メインループの経過時間は、1,677 秒から 1,000 秒に短縮され 1.68 倍の効果を得ることが出来た。

### 6.2.3 スケーラビリティ

交通流シミュレータの並列性を改善した。圏央道ネットワーク(リンク数:347,691)を 1,536 分割し、単位時間あたりに外側ループを何回計算できるかを測定した。改良した経路選択コンポーネントとして、昨年度から継続している最短経路探索アルゴリズムの高速化に加え、旅行時間データの圧縮アルゴリズムと確率的な経路選択の実装を行った。また、ホットスタート時にリバランスを行うコンポーネントも実装した。

図 6.2 に 96、192、384、768、1,536、3,072 台の CPU で計算した際の計算速度上昇率を示す。計算速度上昇率は、96 台の CPU での計算時間を基準としたときの比で表す。赤色の折れ線は今年度の結果、青色の折れ線は昨年度の結果を示す。

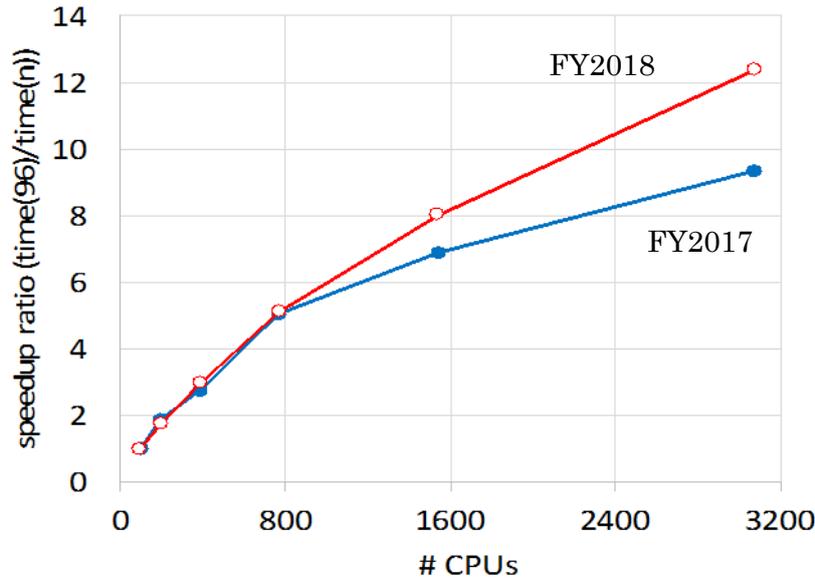


図 6.2. CPU 数と計算速度上昇率の関係。

昨年度に比べ、特に多数の CPU を使用したときの計算効率が向上しており、課題であった並列計算の効率性に改善がみられた。プロセス間通信にはほとんど時間はかかっておらず、ロードバランスの改良によってさらに改善できる可能性があると考えられる。これらはコンポーネントとして開発を完了し、交通流シミュレータ本体に統合している。

#### 6.2.4 混雑下のグリッドネットワークにおける再現性の検証

ここでは、FastDUEにおいて、グリッドロック現象の発生を正しく再現できるかを確認するため、株式会社アイ・トランスポート・ラボが販売する商用の交通流シミュレーションであるSOUNDでの結果と比較することによって検証する。

まず、比較方法について説明する。条件の異なる計算を FastDUE と SOUND を用いて行い、それらの差異を比較する。FastDUE と SOUND を用いて任意の車両発生間隔ごとに 100 回計算を行い、グリッドロックが発生した回数を比較する。計算には 10×10 グリッドネットワークを使用する。リンク容量と BW 速度は、すべてのケースのすべてのリンクにおいてそれぞれ一定の 1,600(vehs/h)、20(km/h)に設定する。OD (起終点) 交通量と自由流旅行時間はランダムに設定される。

次に、グリッドロックの判定手法について説明する。SOUND においてグリッドロックが生じた場合、グリッドロック発生箇所が存在する車両は停止し、複数台の車両が目的地に到達できない。この特性を用いてグリッドロックの発生有無を判定する。一方 FastDUE では、グリッドロックが発生した場合においてもリンク容量は 0 にはならず、微量のリンク容量が与えられるため、車両は少しずつ動き続けて最終的には全車両がトリップを終了する。したがって、SOUND と同じ判定手法を用いるのは困難である。そこで、FastDUE では長時間にわたって著しくリンク容量が低下した (混雑した) リンクを抽出し、その数が 4 つを超えた時にグリッドロックが発生したと判定する。以上の条件で計算を行い、グリッドロックの発生回数を比較した結果を図 6.3 に示す。

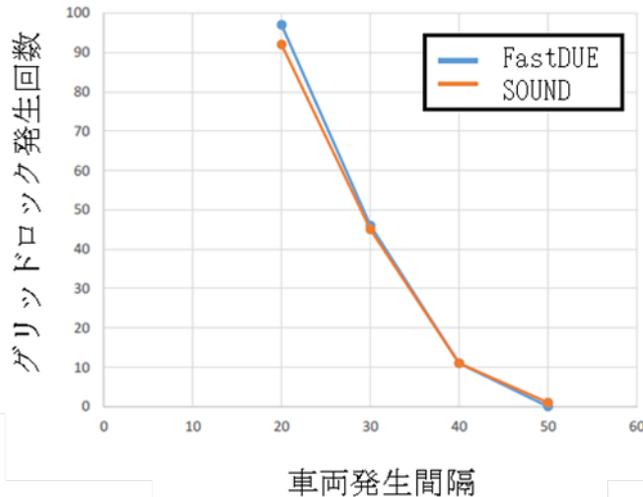


図 6.3. 比較結果。

どの発生時刻 $t$ においてもグリッドロックの発生回数は概ね一致している。しかし、微量な差が生じていることも同時にわかる。その理由として、次の二つの理由が挙げられる。一つ目は、FastDUE と SOUND でグリッドロックの判定手法が異なることである。特に FastDUE ではヒューリスティックな判定が行われているため、それが原因で差が生じた可能性が考えられる。二つ目は根本的に計算結果が異なっているということである。2 つ目の可能性を検証するために、車両の軌跡を出力して結果が異なっているかを確認する。発生間隔 40 秒のあるケースから一つの OD (起終点) ペアを抽出し、その OD ペアを走行する車両の軌跡を図 6.4 に示す。

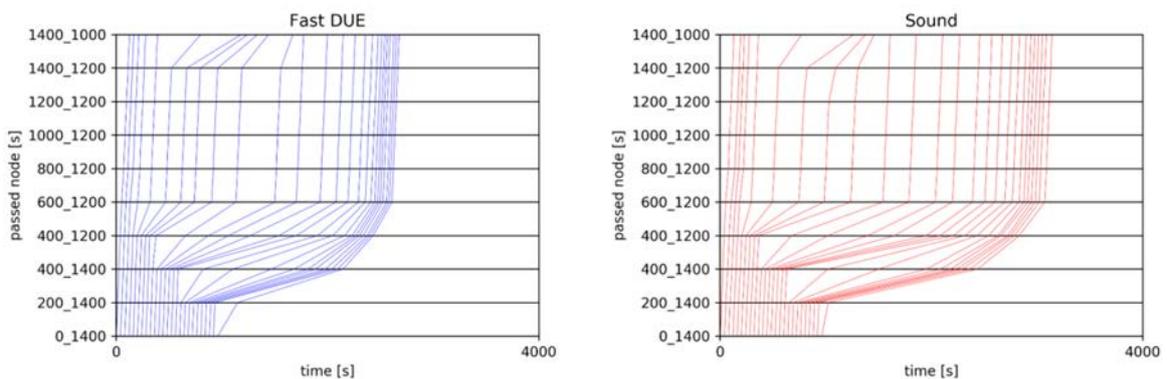


図 6.4. FastDUE と SOUND における車両軌跡の比較。

FastDUE と SOUND での車両軌跡は、概形が同じものの、完全には一致していないことが分かる。軌跡が完全に一致しない原因を追究するために、図 6.5 に示す簡単なネットワークを用いて FastDUE と SOUND で計算を行い、理論値と比較した結果を図 6.6 に示す。

FastDUE と SOUND とともに理論値と比べてショックウェーブ (SW) が遅く伝達していることがわかる。FastDUE では、リンクが先詰まった際、理論値よりもわずかに多くの車両を流入させている。SW が遅れて伝達したのはこの処理が原因であると考えられ、SOUND でも同様の処理が施されていると推察される。車両軌跡が異なっているのは、先詰まり時に、多めに流入させる計算手法が FastDUE と

SOUND でわずかに異なっていることが原因ではないかと考えられる。

以上のように、グリッドロックの発生回数に FastDUE と SOUND で微量な差が生じた理由として、グリッドロック判定が異なる問題と計算結果自体が異なる問題が確認できた。しかし、差は微量なものであり、ベリフィケーションとしては問題のない結果であるといえる。

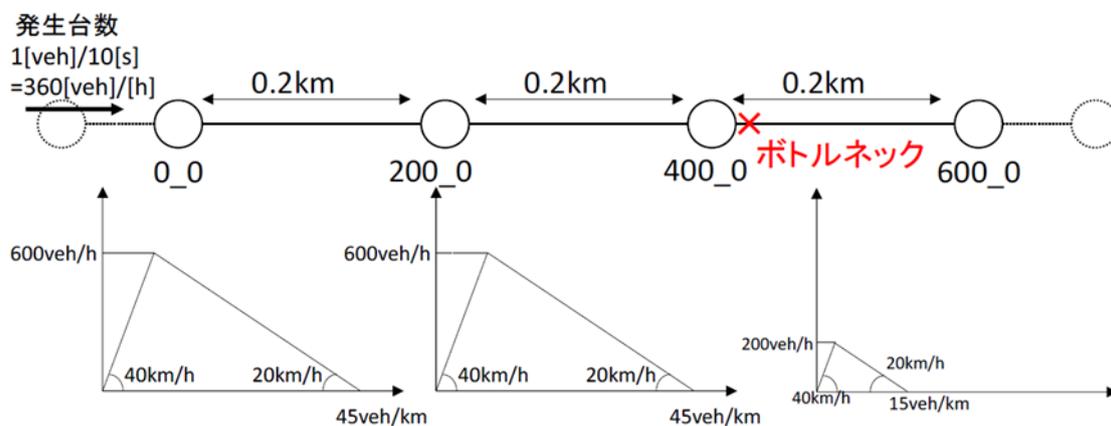


図 6.5. ネットワークと交通需要及び QK の設定。

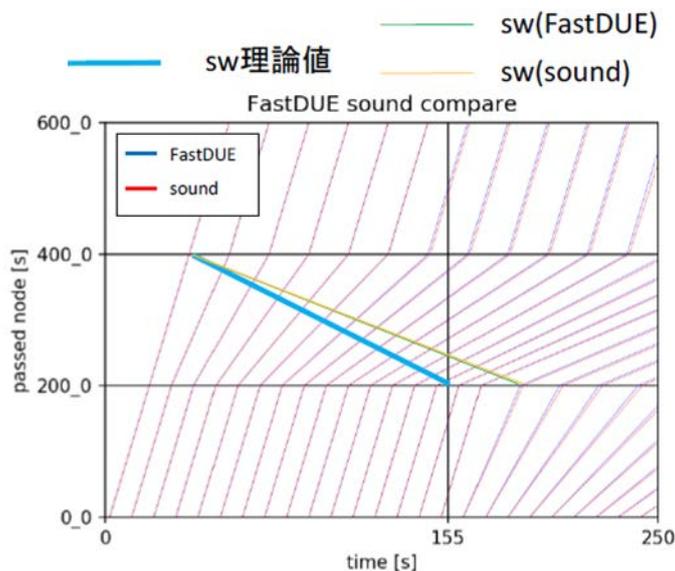


図 6.6 FastDUE と SOUND の理論値比較。

### 6.2.5 旅行時間データの圧縮

ここでは、旅行時間データの圧縮による高速化について説明する。本シミュレータ内の最短経路探索アルゴリズムは、各 CPU に各車両を割り当て、車両単位で並列計算を行っている。ただし、最短経路探索のためには、ネットワーク全体のリンクコストが必要となる。本シミュレータでは、交通流の計算直後に、全 CPU 間で各リンクの旅行時間データを通信し、ネットワーク全体のリンクコストを共有している。ここでネットワークの規模が大きくなると、リンク数は爆発的に増加し、MPI 通信等の通信コストが大

幅に増加する。各リンクの旅行時間データを圧縮してから各 CPU に旅行時間情報を通信することにより、最短経路探索時での旅行時間取得処理と通信コストを削減できる可能性があり、シミュレータの高速化が図られる。

最短経路探索は、全車両のリンクへの流入時刻とその旅行時間を示す二次元配列から求められるリンクコストを用いて行われる。データ圧縮では、この二次元配列の要素数を小さくすることを検討する。具体的には、配分結果の精度を保証しつつ保存する要素を選択し、要素間を線形補間することで、通信する旅行時間データを圧縮する。ただし、各リンクに最初と最後に流入する車両のデータは保存する必要がある。ここでは、圧縮による各要素の旅行時間の変化がある閾値 $\varepsilon$ を超えないようにしつつ、通信する二次元配列の要素数を最小にする。データ圧縮の計算アルゴリズムを図 6.7 に示す。 $\mathbf{P} \in \{p_1, \dots, p_N\}$ と $\mathbf{P}' \in \{p'_1, \dots, p'_M\}$  ( $N > M$ )は圧縮前後の二次元配列、 $err_{p_j}$ は要素 $p_j \in \mathbf{P} \setminus \mathbf{P}'$ を保存する場合と保存しない場合の要素 $p_j$ の旅行時間の差である。

圧縮アルゴリズムを本シミュレータに実装し、高速化の効果および配分結果の精度を検証する。10×10 のグリッドネットワークを対象にシミュレータを実行し、圧縮前後の計算コストと配分結果を比較した。

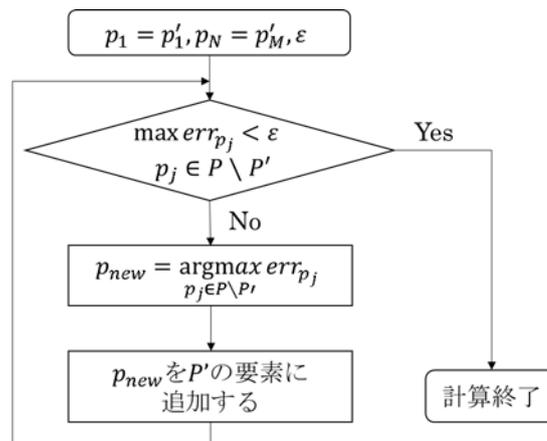


図 6.7. 旅行時間圧縮アルゴリズムのフロー図。

計算結果を図 6.8 と図 6.9 に示す。図 6.8 は縦軸が圧縮前のリンク交通量、横軸が圧縮後のリンク交通量を示し、同リンクの交通量を散布図により示している。散布図の回帰直線は、ほぼ 45 度の傾きとなっており、圧縮前後のリンク交通量はほぼ同じ結果を得られることが確認できた。図 6.9 は平均遅れ時間の推移を示す。図 6.9 から分かるように、圧縮後の平均遅れ時間も大きく振動・発散する現象はなく、均衡状態が確認できる。

次に圧縮前後の計算コストを比較する。異なるシードを 10 個設定し、シミュレータを実行した結果、圧縮前の計算時間の平均値は 496.4 秒、圧縮後の計算時間の平均値は 479.8 秒であった。また、t 検定を用いて、圧縮前後の計算時間に有意な差があることが確認できた。上記の 10 個の計算のうち 1 個の計算

における圧縮前後の旅行時間データ数は、圧縮前が 198,259,251 個、圧縮後が 9,301,912 個とデータが圧縮されており、約 95%の圧縮効果を得ることが出来た。従って、対象となるネットワークの規模が大きくなるほど、旅行時間データの圧縮による高速化が期待できる。

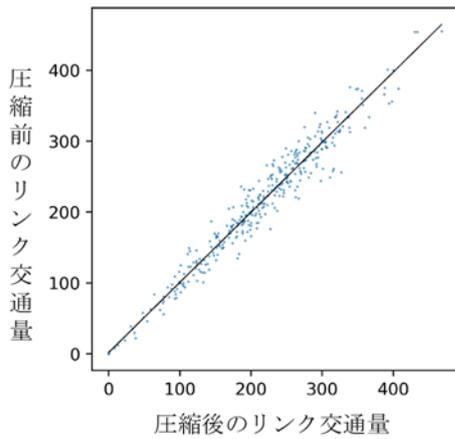


図 6.8. 圧縮前後のリンク交通量の比較。

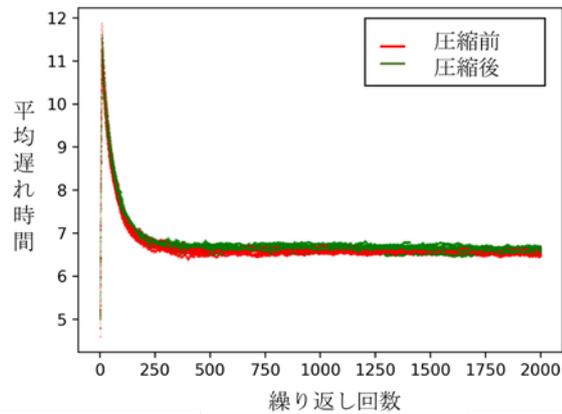


図 6.9. 圧縮前後の平均遅れ時間の推移。

### 6.2.6 確率的経路選択モデルの実装

関東ネットワークで計算を実施し、高速道路や幹線道路のリンク交通量が大きく妥当性のある結果を得たものの、0 台のリンクが散見される課題が残った。リンクコストが極端に大きい道路であっても 1 日に数台の交通量が存在することが現実的な事象である。これらの現象は、確定的な利用者均衡配分モデルに従ったことによる影響であると推測できる。ここでは FastDUE に確率的利用者均衡配分 (SUE) を組み込み、現実的なリンク交通量の再現を図る。

ここでは、Sheffi and Powell<sup>[1]</sup>による手法を援用し、モンテカルロシミュレーションによる近似的解法を用いて、SUE を FastDUE に実装する。FastDUE は動的モデルであることから、SUE を導入するためには、全時刻のリンク旅行時間に誤差項を組み込む必要がある。最初に、リンク  $(i, j)$  の認知コスト  $\hat{t}_{ij}$  を  $N(t_{ij}, \beta t_{ij})$  に従う正規乱数からサンプリングする。

$$\mathbf{S}^m = \text{sample} \left( \left( \hat{t}_{ij} \right) \middle| \forall (i, j) \in \mathbf{A} \right)^m \quad (6.7)$$

$i, j$  はノード、 $\mathbf{A}$  はノード集合を表し、 $\mathbf{S}^m$  は  $m$  回目のサンプリングで得られた  $\hat{t}_{ij}$  の集合を表す。 $\mathbf{S}^m$  から OD ペア  $rs$  間の最短経路を  $\text{shortestpath}_{rs}^m$  とする。この作業を  $m = M$  ( $M$  は十分大きい値) になるまで繰り返し、経路  $k$  が最短経路  $\text{shortestpath}_{rs}^m$  となった回数を  $n$  とする。この時、 $n/M$  は経路  $k$  に対する認知コスト  $\hat{C}_k^{rs}$  が OD ペア  $rs$  の経路選択肢集合  $\mathbf{K}_{rs}$  のうち最小になる確率の近似値である。これを  $M \rightarrow \infty$  とすると、 $n/M$  は  $\hat{C}_k^{rs}$  が最小になる確率となり、次式に示す経路  $k$  の選択確率を得る。

$$P_k^{rs} = \Pr \left[ \hat{C}_k^{rs} = \min_{j \in K_{rs}} (\hat{C}_j^{rs}) \right] \quad \forall j, k \in K_{rs} \quad (6.8)$$

式(6.7)を動的モデルに適用できるように、

$$\mathbf{s}^{day+1} = \text{sample} \left( (\hat{t}_{ij,time}) \mid \forall (i,j) \in A, \forall time \in \mathbf{TIME} \right)^{day} \quad (6.9)$$

と拡張する。最短経路探索は全リンクの認知コスト集合 $\mathbf{s}^{day+1}$ を用いて行われる。ここで $\hat{t}_{ij,time}$ は時刻 $time$ におけるリンク $(i,j)$ の認知コストを示す。 $\hat{t}_{ij,time}$ を以下で定義する。

$$\hat{t}_{ij,time} \sim N(t_{ij,time}, \frac{1}{\beta} t_{ij,time}) \quad (6.10)$$

$\hat{t}_{ij,time}$ のサンプリングを $day$ 日目の計算フローにおける交通流の計算直後に行い、生成された $\mathbf{s}^{day+1}$ を用いて最短経路探索を行う。

次に、数値計算を行った結果を示す。計算には $10 \times 10$ のグリッドネットワークを用い、任意のパラメータ $\beta$ に対する交通量0台のリンク数の感度分析を行う。ここで $\beta$ は分散の逆数を示す。

図 6.10 より、SUE を適用することで交通量 0 台のリンク数が減少することが確認できる。これにより、交通量 0 台のリンクが散見された課題が緩和されるものと考えられる。現実には、いかなる道路でも一日に車両が全く通らないという現象はほとんどないと考えられるため、現実の再現性が大きく向上したといえよう。

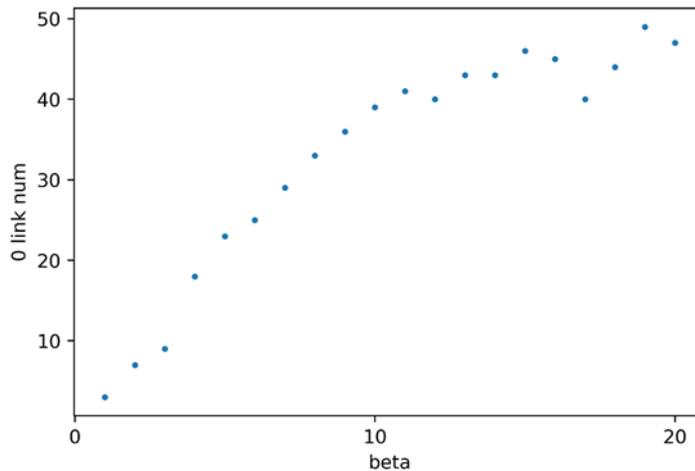


図 6.10. 交通量 0 台のリンク数。

## 6.3 交通需要シミュレータの開発

### 6.3.1 動的需要モデルの基本フレーム

動的交通シミュレーションの計算にあたって、全体のフレームワークは図 6.11 の通りである。交通需要の算出にあたっては、被災地を中心とした復旧関連の交通需要と非被災地を主とした通常目的の交通需要の 2 種類を計算し、合算して、動的交通需要とする。これは、復旧期において、被災者・被災地域における行動パターンと非被災者・非被災地域における行動パターンは異なり、同じモデルは使えないため、二つに分けた計算過程となっている。被災者・被災地域における行動パターンとして、生活インフラが使えず、自宅スペースにおける在庫機能も失われたため、避難生活のための（高頻度な）物資調達が行われると考える。一方で、非被災者・非被災地域における行動パターンは通常に近い勤務や日常交通が行われる。ただし、発地や着地が被災していれば、相応の交通需要の減少が生じると想定するのが妥当だろう。

被災者・被災地域における交通需要は昨年度検討した逐次型的意思決定フレームを用いる。物資調達の出發有無は物資の保有量、目的地は距離とゾーンごとの物資保有量により決定し、調達施設での待ち時間は待ち行列を用いて算出する。また、自宅被災した場合は、避難所を居住場所として計算する。調達施設や避難所は全てのゾーンにあるわけではなく、実計算においては、実際に地方自治体から公開しているデータなどから確認し、インプットとする必要がある。

非被災者・非被災地域における交通需要は簡易にゾーンごとの被災率を用いる。まず、他のシミュレータにより、震度計算をインプットとし、生活インフラの被害を算出している。そのゾーンごとの被害率を用いて、通常目的の交通需要を減じている。ゾーンの被害率及び OD ペア  $ij$  の減少後のトリップ数の定式化は次の通りである。

$$\begin{aligned} \text{ゾーン}i\text{の被害率 } D_i &= \sum_{m \in M_i} d_m / N_{M_i} \\ M_i: & \text{ゾーン}i\text{に含まれるメッシュの集合、} N_{M_i}: \text{ゾーン}i\text{に含まれる} \\ & \text{総メッシュ数} \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} \text{ペア}ij\text{間の減少後のトリップ数 } A'_{ij} &= A_{ij} * (1 - D_i) * (1 - D_j) \\ A_{ij}: & \text{ペア}ij\text{間の平常時のトリップ数} \end{aligned} \quad (6.12)$$

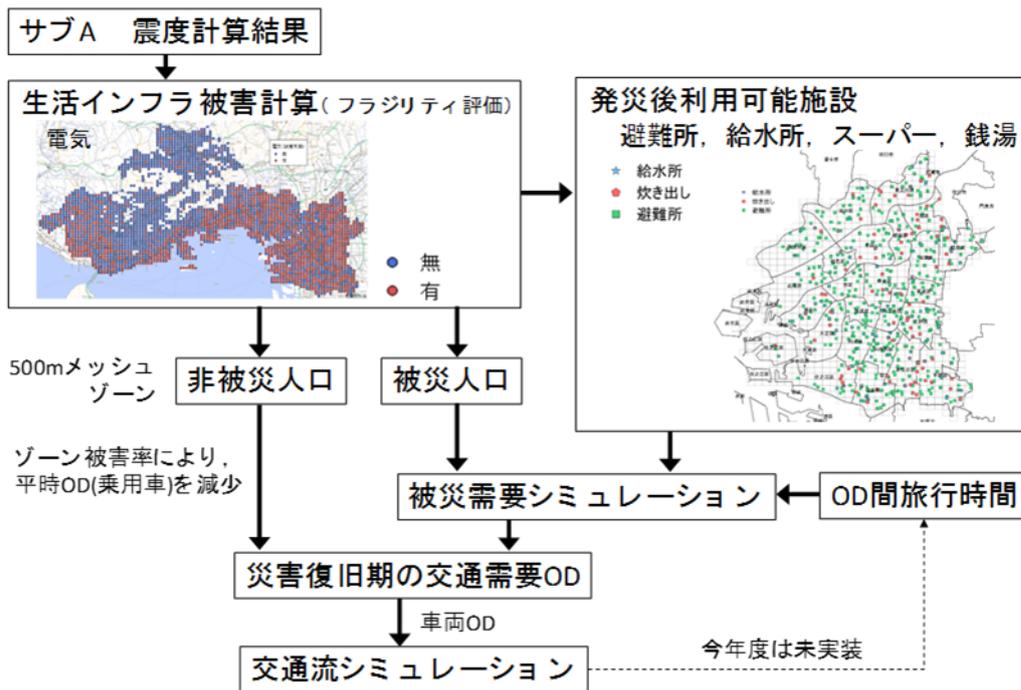


図 6.11. 動的交通需要シミュレーションの基本フレーム。

### 6.3.2 動的需要モデルの動作検証

動的需要シミュレーションモデルの動作検証にあたって、図 6.12 のネットワークと表 6.2 の避難者の設定をインプットとし、計算を行った。具体的設定としては、1 タイムステップ 10 分とし、避難者は 100 人、図の通りに 5×5 の格子ネットワークを使用する。リンク旅行時間は距離を基準に設定する。また、25 個のノードに 4 人ずつの居住を想定し、ネットワークの四隅に、物資調達施設を設定する。また、施設の物資は枯渇しないとする。

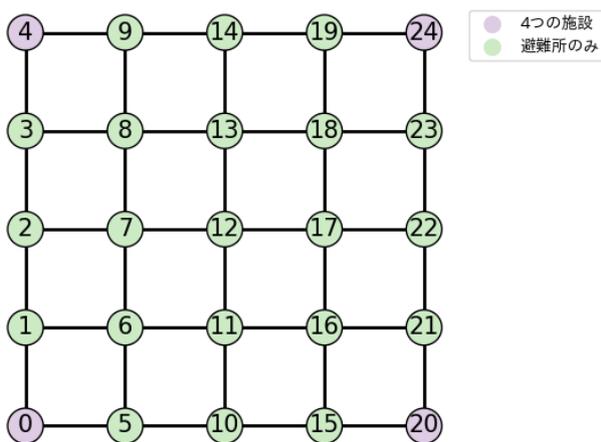


図 6.12. 動作検証用のネットワーク。

表 6.2. 避難者の設定。

	water	food	cleanliness
初期保有量	10	10	10
保有量基準	3	3	3
受け取り規定値	10	10	10
単位時間消費量	0.002	0.01	0.002

まず、旅行時間に応じた目的地の選択過程の動作検証のため、図 6.13 に目的地までの旅行時間の分布（横軸）と生成回数（縦軸）を示す。旅行時間の短い目的地が多く選ばれていることがわかり、想定通り

の計算ができていることがわかる。次に、避難者の物資の保有量パラメータに感度があるかを確認するため、図 6.14 に保有量パラメータ（横軸）とトリップ発生回数割合（縦軸）を示す。横軸は左から表 6.2 の設定通りの場合（全ての保有量パラメータは 3）、水のみ保有量パラメータを 1 にした場合、食料のみ 1 にした場合、銭湯のみ 1 にした場合はである。保有量パラメータが小さいほど、その活動目的が生成するときの保有量が小さくなる。図 6.14 では想定通り、基準ケースに比べて、全ての場合で想定通り、トリップの発生割合が少なくなっており、動作の妥当性が確認できた。

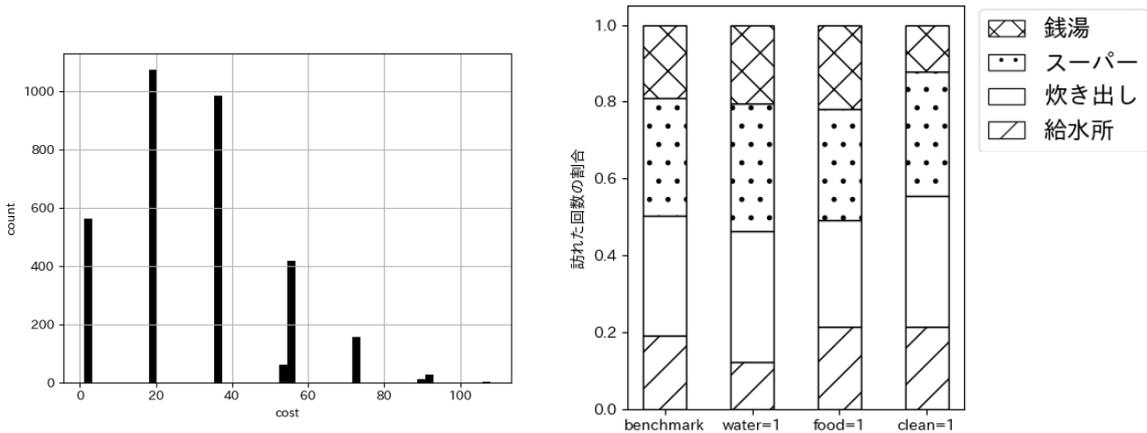


図 6.13. 目的地までの旅行時間の分布。

図 6.14. 目的別のトリップ発生回数。

## 6.4 関西圏シミュレーションの実施（サブ課題A連成）

### 6.4.1 地震によるインフラ被害の評価

ここでは、フラジリティカーブを用いたインフラ被害有無の計算方法を説明する。計算されたインフラ被害有無は、需要シミュレータのインプットとなる。フラジリティカーブとは、震度と被害率の関係を表す式である。フラジリティカーブの形状はインフラの種類によって異なる。下水道のフラジリティカーブに関しては庄司ら<sup>[12]</sup>、上水道・電気・都市ガスに関しては能島・加藤<sup>[13]</sup>、港湾に関しては赤倉・小野<sup>[14]</sup>が提案している。インフラ被害有無は、[0,1]の一様乱数を生成し、フラジリティカーブを用いて算出した被害率と比較することによって判断する。

IES の建物ごとの震度に関する 2 ケース（東ケースと基本ケース）の計算結果を用いて、4 次メッシュごとの平均震度を算出し、地震時のインフラ被害有無を計算する。東ケースは基本ケースより震度の小さい結果となっている。なお、震度の計算範囲は関西ネットワーク内の一部都市（大阪市、神戸市、西宮市、芦屋市、尼崎市）である。電気インフラの被害有無の計算結果を図 6.15 に示す。左右どちらの図も大阪市と尼崎市を中心に大きな被害が確認できる。また、東ケースより基本ケースのほうが被害のある箇所が多く、計算方法が妥当であるといえる。

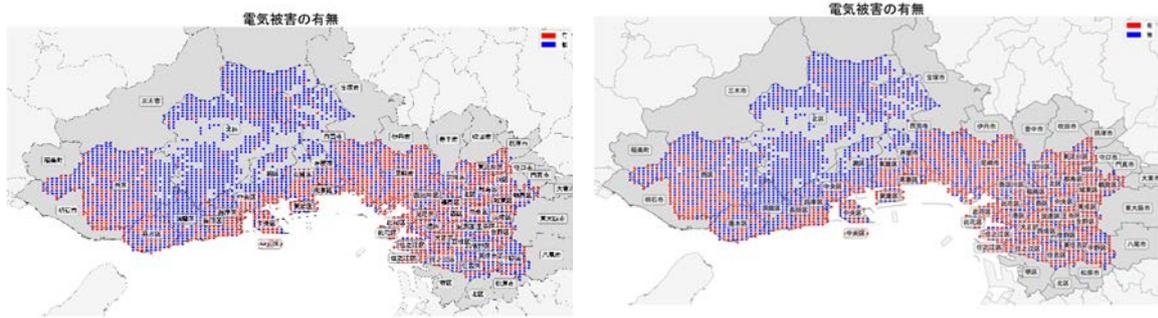


図 6.15. 電気インフラの被害有無（左：東ケース，右：基本ケース）。

#### 6.4.2 交通需要シミュレータの計算結果

交通需要シミュレーションの計算は、自身によるインフラ被害の範囲のうち、大阪市内を対象として行う。インプットデータには次を用いた。

- ✓ 避難所：マップナビおおさかオープンデータ（大阪市の指定避難所一覧）  
<http://www.city.osaka.lg.jp/toshikeikaku/page/0000250227.html#data>
- ✓ スーパー：平成 26 年商業統計メッシュデータ（500m メッシュの小売業事業者数）  
<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/syougyo/mesh/download.html>
  1. 今回用いたデータは飲食料品の事業者のみ
- ✓ 銭湯：大阪府公衆浴場組合（大阪市の区ごとに Google マイマップ形式）  
<http://www.osaka268.com/>
- ✓ 人口：地図で見る統計 500m メッシュデータ（平成 27 年）  
<https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?type=1>

また、大阪市内の被害のあったメッシュの住民全員を被災行動の交通需要シミュレーションの対象とし、大阪市の対象地域人口 2,809,984 人のうち被害にあったメッシュの住民は約半数であった。被災住民は最寄りの避難所を避難場所とすることとし、避難所は指定避難所を含むもの（「指定避難所」、「指定緊急避難場所・指定避難所」、「指定緊急避難場所、指定避難所」）を指定した。炊き出し・給水所のデータはないため、避難場所からランダムに抽出し、設定することとした。熊本地震の資料を参考に、避難場所のうち 1/5 程度を設定した。物資調達施設とするスーパーマーケット・銭湯は非被災地域のみとした。

計算にあたって、1 タイムステップは 10 分とし、合計 26 時間分の計算を行ったが、最初の 2 時間分は初期保有量による影響が大きいため、除外し、全部で 24 時間分をアウトプットとする。交通流シミュレーションへの OD 交通需要の受け渡しにあたっては、ゾーン集計が必要となる。これは、交通需要シミュレーションは、500m メッシュを単位としている一方で、交通流シミュレーションは、それよりも大きいゾーンを単位としているためである。なお、需要シミュレータ対象は大阪市内で 952 メッシュ、交通流シミュレータの対象は関西圏全体で 1,808 ゾーンとなっている。集計にあたっては最も近いゾーンにメッシュを紐づけることとした。それぞれのセントロイドの分布と対応関係を図 6.16 に示す。

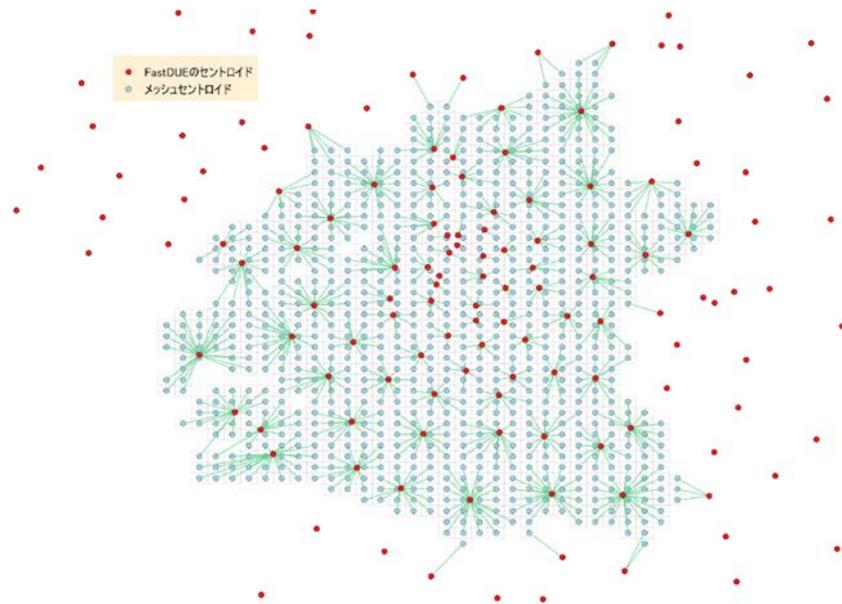


図 6.16. 交通流・交通需要シミュレーションのセントロイドの分布と対応関係。

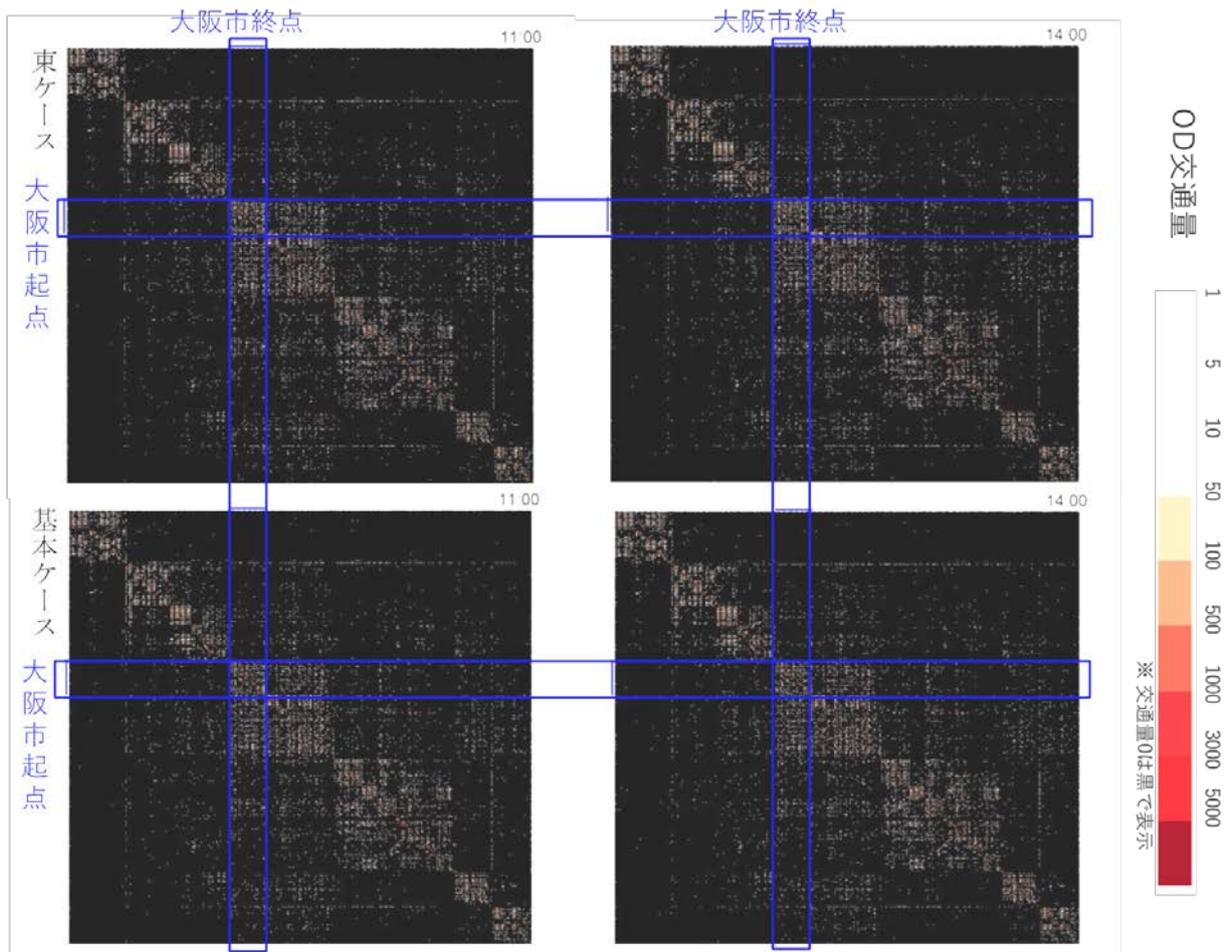


図 6.17. 交通需要シミュレーションで算出された時間帯別 OD 分布。

シミュレーション計算は2つのケース（東ケース、基本ケース）で行う。総トリップ数は、東ケースは

1,835,142、基本ケースは 2,174,532 である。なお、平時の総トリップ数は 14,713,595 である。図 6.17 に OD 分布の例を示す。黒は OD 間交通量が 0 を示している。青線は大阪市内に該当するゾーンを表している。どちらのケースも、基本的な傾向として、大阪市の流出入交通量は減少しており、かつ大阪市内の短距離トリップのピーク時の交通量は増加する傾向がみられた。

### 6.4.3 交通流シミュレータの入力データと計算結果

交通流シミュレータのインプットには、

1. 道路ネットワークデータ
2. 交通需要データ
3. 道路閉塞データ

を用いた。道路ネットワークデータは、デジタル道路地図より生成したものである。ネットワークデータには、ダミーリンクと呼ばれる、交通需要の発生（起点）および集中（終点）となるセントロイドとネットワーク内の各ノードを接続するリンクが含まれる。ネットワークの範囲は、近畿地方を中心に中部地方から中国地方の一部を含むものとなっている。なお、外縁部におけるネットワーク構造は簡略なものとなっている。ノード総数は 183,160 個、リンク総数は 434,678 本である。交通需要データはセントロイド間の時間帯別起終点交通量として与えられる。なお、ネットワーク、交通需要データとも、キャリブレーションは実施していないので、出力結果はシミュレーション開発そのものに関係しない実務上の意味はとくに持たないことに注意したい。計算対象の時間帯は午前中（4時～正午）としている。道路閉塞データは、各リンクの幅員に対する閉塞の割合として与えられる。今回は、半分以上閉塞されたリンクを通行不可とみなしてシミュレーションを実施している。

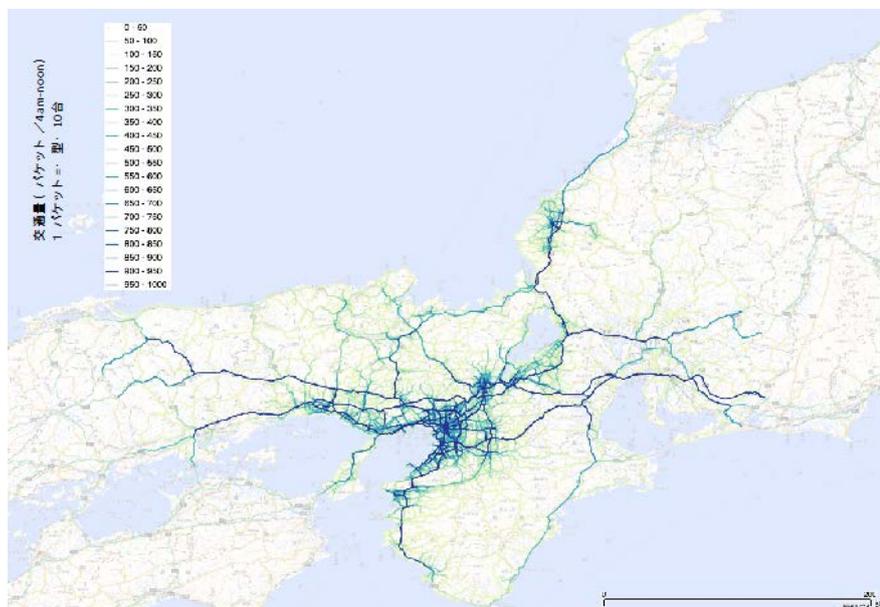


図 6.18. 交通流シミュレーションで算出されたリンク交通量（関西圏ネットワーク）。

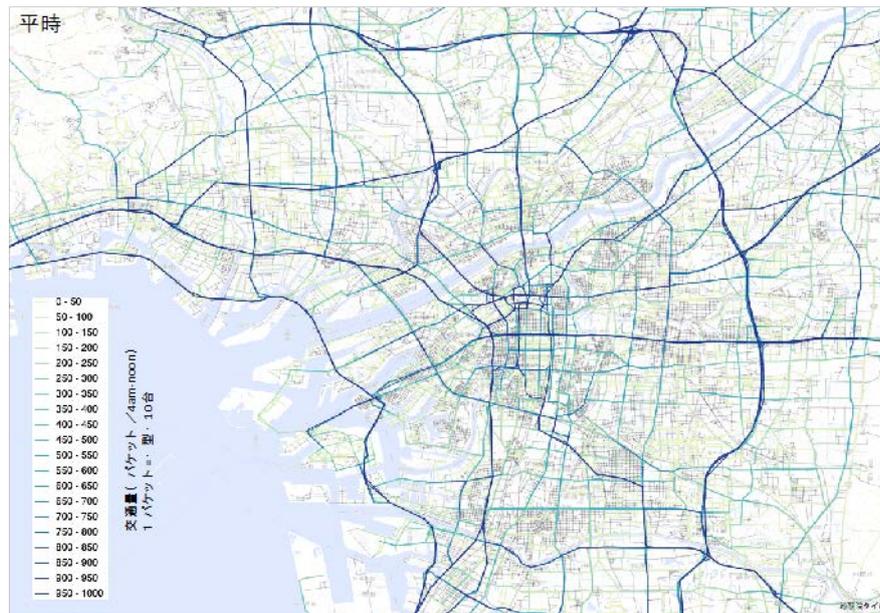


図 6.19. 交通流シミュレーションで算出されたリンク交通量（大阪市周辺，平時）。

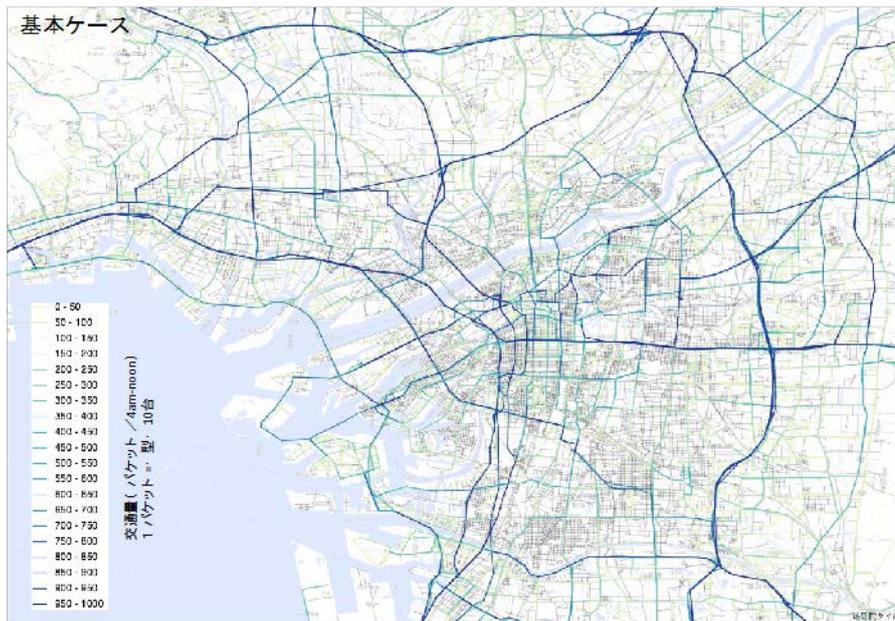


図 6.20. 交通流シミュレーションで算出されたリンク交通量（大阪市周辺<sup>24</sup>，基本ケース）。

交通量の計算結果を図 6.18～6.20 に示す。図 6.18 は対象ネットワーク全体の交通量の計算結果であり、計算範囲の明示も含め、参考までに示している。図 6.19, 6.20 は、大阪市周辺を拡大して交通量を出力したものである。これらの図を比較すると、交通量のパターンがかなり異なることがわかる。道路閉塞の影響を反映しているものと見られる。

混雑状況の計算結果を図 6.21～6.22 に示す。定量的な評価は行っていないが、特定の場所が激しく混雑する一方、全体的にはあまり混雑がないように見受けられる。激しく混雑するところを見ると、グリ

ッドロックが局所的に発生していると思われるところが複数見られた。全体的には混雑があまり見られないことを考えると、本来グリッドロックするべきではないところでしている可能性が高い。ダミーリンクによる交通需要のネットワークへの付加が、現実とは整合しない交通需要の空間的集中をまねている可能性がある。この点は次年度で改善すべき課題であると考えられる。

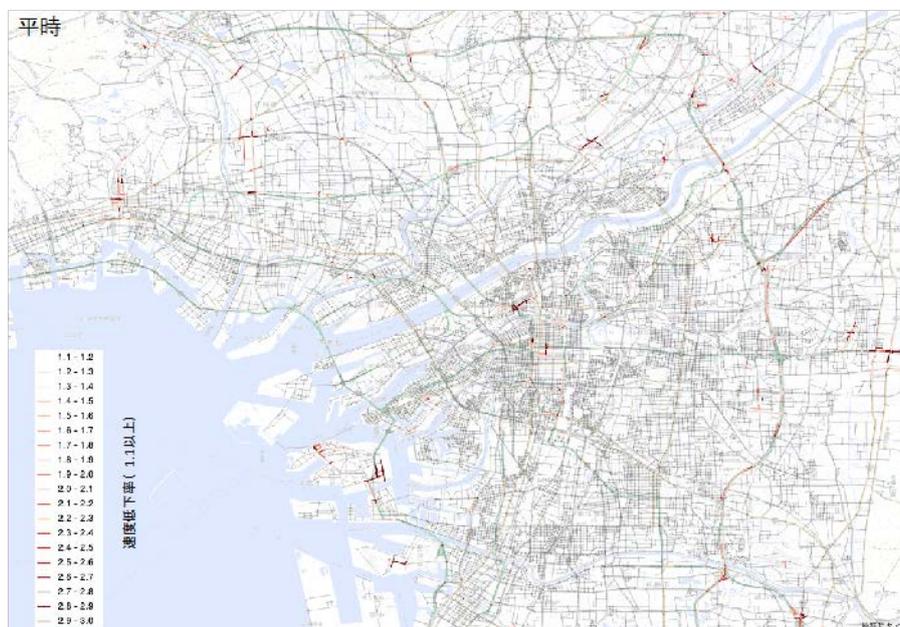


図 6.21. 交通流シミュレーションで算出された混雑状況（大阪市周辺，平時）。

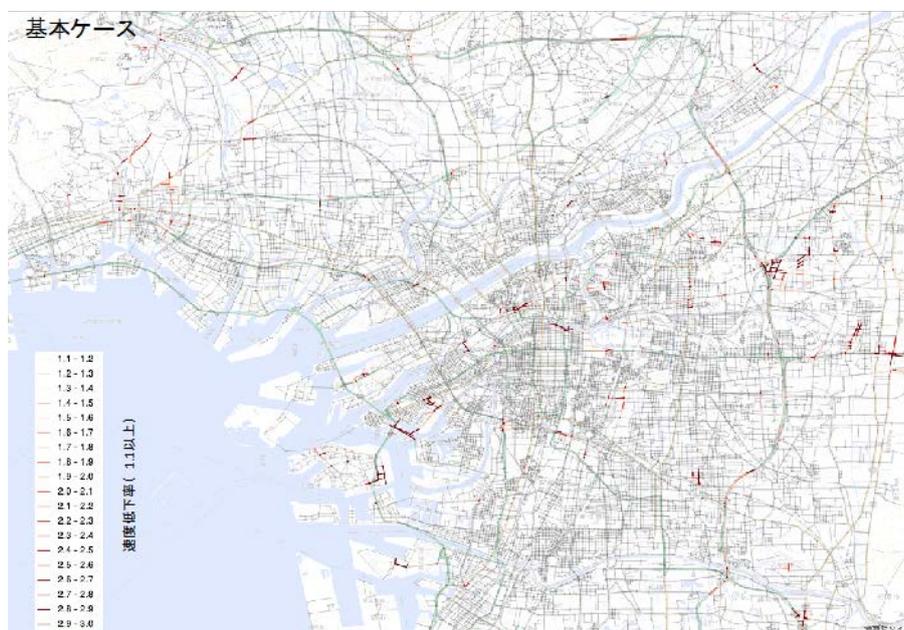


図 6.22. 交通流シミュレーションで算出された混雑状況（大阪市周辺，基本ケース）。

## 参考文献

- [1] Sheffi, Y. and Powell, W., A comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks, *Transportation Research*, Vol.15B, pp.52-64, 1981.
- [2] Daganzo, C. and Sheffi, Y., On stochastic models of traffic assignment, *Transportation Science*, Vol.11, pp.253-274, 1977.
- [3] Sheffi, Y. and Powell, W., An algorithm for the equilibrium assignment problem for random link times, *Networks*, Vol.12, NO.2, pp.191-207, 1982.
- [4] Nielsen, O., A stochastic transit assignment model considering differences in passengers utility functions, *Transportation Research Part B*, Vol.34, No.5, pp.377-402, 2000.
- [5] Ramming, S., Network knowledge and route choice, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2002.
- [6] McFadden, D., A method of simulated moments for estimation of discrete response models without numerical integration, *Econometrica*, Vol.57, pp.995-1026, 1989.
- [7] Bierlaire, M and Frejinger, E., Route choice models with subpath components, *Proceedings of the 5th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Switerland, 2005.
- [8] Prato, C. and Bekhor, S., Applying branch and bound technique to route choice set generation, *Transportation Research Record*, 1985, pp.19-28, 2006.
- [9] 山口裕通, 奥村誠, 金田穂高, 土生恭祐, 携帯電話 GPS 情報から分かる熊本地震による行動パターンの被災・回復過程, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.73, No.5, pp.I\_105-I\_117, 2017.
- [10] 桑原雅夫, 原祐輔, 三谷卓摩, 川崎洋輔, 竹之内篤, 井料隆雅, 浦田淳司, 熊本地震における都市内交通・避難の実態と課題, 第 54 回土木計画学研究発表会・講演集, No.179, 2016.
- [11] 柿本竜治, 黒肥地雄太, 吉田護, 2016 年熊本地震後の避難所からの帰還行動分析, 第 55 回土木計画学研究発表会・講演集, No.27-02, 2017.
- [12] 庄司学, 寺嶋黎, 永田茂, 下水道埋設管路の地震被害率曲線の構築, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, Vol.70, No.4, pp.I\_921-I\_946, 2014.
- [13] 能島暢呂, 加藤宏紀, 供給系ライフラインの地震時機能評価モデルの改良と再検証ー東日本大震災を対象とした都道府県別評価ー, 第 5 回相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム講演集, pp.94-104, 2013.
- [14] 赤倉康寛, 小野憲司, 港湾 BCP のための港湾施設の脆弱性評価手法, *京都大学防災研究所年報*, 第 58 号 B, pp.15-25, 2015.

## ⑦地震・津波災害時の経済活動に関する数値解析コンポーネントの開発（再委託先：国立大学法人京都大学）（サブ課題 B）

### 7.1 平成 30 年度の結果の概要

動的計画法による経済シミュレーションでは、大規模災害後の企業の設備復旧投資と生産回復の過程のシミュレーションを行っている。平成 30 年度は南海トラフ地震シナリオと、36 業種に分類した大阪府の経済を対象とした。さらには各業種の内部における、資本規模や被災の大きさ、サプライチェーンやライフラインの途絶の影響による差異を考慮した。それによって合計で 2160 タイプの主体の動的計画問題を扱い、36 業種全ての価格が変動する動的プロセスを計算した。そこでは各企業間の問題を並列化するとともに、ひとつの企業の動的計画問題の内部でも状態空間を分割し、hybrid MPI/OpenMP による並列化を行った。これまで動的計画法の「次元の呪い」の問題は、具体的には、全ての状態のデータを保持する際にメモリがすぐに埋まってしまう制約として表れていたが、その問題に対して平成 30 年度は 1) 隣接する領域の値を取るためのメモリ効率性の高い通信方法を実装し、2) 多項式で表現される変数の配列を部分に分解することにより、メモリで保持すべきデータ量を削減することができた。例えば、平成 30 年度に扱った計算スケールを対象とすると、2) の改善によって、メモリ使用量は約 970M から約 3.22M に減少した。また、ベルマン方程式を解いて得られた最適制御配列を用いて、モンテカルロシミュレーションを行う方法を考案した。モンテカルロシミュレーションによって、36 業種間や、各業種内の事業所間の災害被害や復旧の速さの分布を導出した。またインフラ復旧を 12 か月から 8 か月に早期化する政策を例にとり、各業種の復旧に与える効果を計算した。

### 7.2 モデルの概要

災害発生時点を  $t = 0$  とした離散的な時間軸を考える。1 期間はひと月とする。各経済部門（業種） $h, h' (= 1, \dots, H)$  の内部では、企業は資本規模や被災レベル、ライフラインやサプライチェーンの再開時期によって複数のタイプに分類される。以下、企業をインデックス  $i$  によってあらわす。部門インデックス  $h$  は企業  $i$  が属する部門を表す。一方、 $h'$  は企業  $i$  が属さない部門も含めた任意の部門を表すこととする。

企業  $i$  の問題における  $t$  期の状態変数ベクトルを  $\mathbf{s}_i(t) = (k_i(t), l_i(t), \bar{B}_h(t), \mathbf{p}(t), \theta_i(t), t)$  により表現する。 $k_i(t)$  は企業  $i$  の資本ストックであり、企業  $i$  が直接コントロールする対象となる。 $l_i(t)$  は企業  $i$  の労働、 $\bar{B}_h(t)$  は部門  $h$  にとってのインフラ・コンポジットの期待値を表す。インフラ・コンポジットの詳細については後述する。 $l_i(t), \bar{B}_h(t)$  の変化過程は外生的に与えられるものとする。 $\mathbf{p}(t) = (p_1(t), \dots, p_H(t))$  は部門 1 から部門  $H$  までの価格ベクトルであり、その動学は市場における取引によって内生的に決まる。各企業にとっては外生的であるとする。 $\theta_i(t)$  は、ライフラインやサプライチェーンの状態に依存した企業の生産の有無を表す。 $\theta_i(t) = 1$  のとき企業  $i$  は  $t$  期に生産が可能であり、 $\theta_i(t) = 0$  のとき企業  $i$  は  $t$  期に生産が不可能であるとする。

生産技術は以下のように表される。付加価値  $F^i(\cdot)$  と中間投入財  $m_{h'i}(t)$  の間は完全非代替型を、付加価値関数に関しては CES(constant elasticity of substitution) 型を仮定する。

$$y_i(t) = \min \left[ F^i(\cdot), \frac{m_{1i}(t)}{\kappa_{1h}}, \dots, \frac{m_{h'i}(t)}{\kappa_{h'h}}, \dots, \frac{m_{Hi}(t)}{\kappa_{Hh}} \right] \quad (7.1)$$

$$F^i(l_i, k_i^+, \tilde{B}_h, \varepsilon_i, \theta_i) := \theta_i \{1 + \gamma_i \varepsilon_i\} \tilde{B}_h \beta_0 \{\beta_h^l l_i^{\alpha_h} + \beta_h^k k_i^{+\alpha_h}\}^{\frac{1}{\alpha_h}} \quad (7.2)$$

ただし、 $l_i, k_i^+, \tilde{B}_h, \varepsilon_i, \theta_i$ は期 $t$ に依存した変数であり、表記の煩雑さを避けるために上式では「 $(t)$ 」の記載を省略している。 $\gamma_i, \beta_0, \beta_h^l, \beta_h^k, \alpha_h$ は時間を通じて一定のパラメータである。 $\varepsilon_i(t)$ はホワイトノイズを表す。 $\tilde{B}_h(t)$ は部門 $h$ にとってのインフラ・コンポジットの水準であり、次式によって構成される。

$$\tilde{B}_h(t) := \sum_b \beta_{bh} B_b(t) \quad (7.3)$$

$b$ はインフラの種類に関するインデックスであり、 $B_b(t)$ はインフラ $b$ の $t$ 期における水準である。 $\beta_{bh}$ は部門 $h$ ごとに異なるインフラ $b$ へのウェイトである。各インフラ $B_b(t)$ の変化過程は次式のように表される。

$$B_b(t) = B_b(t-1) + \zeta_b(t-1) \cdot G_R(t-1) \cdot \{1 + \gamma_b \varepsilon_{Bb}(t)\} \quad (7.4)$$

$G_R(t)$ は $t$ 期のインフラ投資総額を、 $\zeta_b(t)$ はインフラ $b$ に対する投資シェアを表す。それらはいずれもインフラ復旧に関する政策変数であり、企業にとっては外生とする。 $\varepsilon_{Bb}(t)$ はホワイトノイズを表す。状態変数ベクトルの中の $\bar{B}_h(t)$ は、 $\tilde{B}_h(t)$ の期待値を表す。

資本（生産設備）ストック $k_i(t)$ の変化過程は以下のように表される。

$$k_i(t+1) = (1 - \delta)\{k_i(t) + \eta_i(t)\} = (1 - \delta)k_i^+(t) \quad (7.5)$$

ただし $\delta$ は資本の減耗率、 $\eta_i(t)$ は投資（生産施設整備）を表す。災害復旧投資も $\eta_i(t)$ に含まれる。

企業 $i$ の $t$ 期の利潤は以下のように構成される。

$$\Pi^i(l_i, k_i, \tilde{B}_h, \mathbf{p}, \eta_i, \varepsilon_i, \theta_i) := p_h y_i - \sum_{h'} p_{h'} m_{h'i} - w l_i - p_\eta \eta_i \quad (7.6)$$

ただし上記の全ての変数で「 $(t)$ 」の表記を省略している。 $p_h(t)$ は $t$ 期における部門 $h$ の財の価格、 $w(t)$ は賃金率、 $p_\eta(t)$ は単位当たり資本の調達費用であり、各企業にとっては与件である。右辺第1項は産出物の供給によって得られる収入を表す。第2項は中間投入財の購入費用を、第3項は賃金支払いを、第4項は設備投資費用を表す。

各企業は企業の市場価値を最大化することを目的とする。 $t$ 期の期初における企業 $i$ の価値を $\Lambda_i(\mathbf{s}_i(t))$ により表すと、企業の問題は以下の Bellman 方程式によって与えられる。

$$\Lambda_i(\mathbf{s}_i(t)) = \max_{\mathbf{d}_i(t)} \left[ E_\varepsilon[\Pi^i(\cdot)] + \psi \sum_{\{q, \Delta\theta_i\}} \phi_i(q, \Delta\theta_i) \cdot \Lambda_i(\mathbf{s}_i^{t+1}(\mathbf{s}_i(t), \mathbf{d}_i(t))) \right] \quad (7.7)$$

ただし $\mathbf{d}_i(t) := (\eta_i(t), \{m_{h'i}(t)\})$ は企業 $i$ の制御変数ベクトルである。 $E_\varepsilon[\Pi^i(\cdot)]$ は式(6)で与えられる利潤のホワイトノイズ・ベクトルに関する期待値を表す。 $\psi$ は割引因子を表す。また、 $q$ は価格ベクトル $\mathbf{p}$ の組み合わせに付されたインデックスを示す。 $\Delta\theta_i := \theta_i(t+1) - \theta_i(t)$ は、1となるときに企業の生産状態が再開に転じることを、0の場合は状態が変わらないことを意味する。 $\phi_i(q, \Delta\theta_i)$ は、次期にインデックス $q$ の価格ベクトルが実現することに対する主観的確率と、生産が再開する確率の積を表す。 $\sum \phi_i(q, \Delta\theta_i) = 1$ が満

たされる。 $\mathbf{s}_i^{t+1}(\mathbf{s}_i(t), \mathbf{d}_i(t))$ は今期の状態 $\mathbf{s}_i(t)$ と制御 $\mathbf{d}_i(t)$ によって決まる次期の状態ベクトルを表す。 $\Lambda_i(\mathbf{s}_i(t))$ は動的計画問題の最適値関数であり、全ての状態 $\mathbf{s}_i(t)$ の間の関係を満たすように決定する。Bellman 方程式(7)は最適値関数 $\Lambda_i(\mathbf{s}_i(t))$ を決める関数方程式である。

各企業の最適化問題が解かれて、価格ベクトル $\mathbf{p}(t)$  (インデックス $q$ ) の下での生産と中間財需要が決まると、各部門 $h$ の超過需要が得られる。総需要で除すことによって、超過需要率 $RExD_h(q)$ を得る。

$$RExD_h(q) = \frac{\sum_{h',i'} \kappa_{hh'} \hat{y}_i + c_h - \hat{y}_i}{\sum_{h',i'} \kappa_{hh'} \hat{y}_i + c_h} \quad (7.8)$$

ただし $c_h$ は部門 $h$ の財に対する消費者による最終需要であり、本モデルでは外生的に与える。また $\hat{y}_i$ はホワイトノイズの実現値を受けた、生産水準の実現値を表す。超過需要率に応じて、部門 $h$ の財の価格は次期に以下のように変化する。

$$p_h(t+1) = \{1 + v \cdot RExD_h(q)\} p_h(t) \quad (7.9)$$

$v$ は正のパラメータである。すなわち超過需要が正であれば価格が上昇し、負であれば下落する。なお、各期における財の過不足は最終需要で調整されるものとする。すなわち調整後の最終需要は $c_h$ とは異なった水準になると仮定する。

災害は0期末に起こるとする。各企業 $i$ の、1期以降の各 $t$ 期における状態の決定の順序を以下の1)-4)のように仮定する。

- 1) サプライチェーンやライフラインの再開 $\Delta\theta_i(t)$ と市場価格 $\mathbf{p}(t)$  (インデックス $q$ ) が決まる。
- 2) 状態 $\mathbf{s}_i(t)$ が決まり、 $t$ 期の Bellman 方程式(7.7)が決まる。
- 3) Bellman 方程式(7.7)の右辺を最大化するように企業は制御変数ベクトル $\mathbf{d}_i(t)$ を決定する。
- 4) ホワイトノイズ・ベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}$ が決まる。 $\boldsymbol{\varepsilon}$ を反映した各種インフラの水準、インフラ・コンポジット、生産水準、利潤が決定する。各市場の超過需要に応じて次期の価格が決まる。

### 7.3 アルゴリズムの概要

図 7.1 と図 7.2 に計算の順序を示す。図 7.2 は、図 7.1 の橙色と緑色の枠の内部のフローの構造を図示している。計算は二つの段階で構成される。第1段階(Step 1)では、部門と資本規模、被災レベルで分類される各企業タイプの Bellman 方程式を Non-Parametric Value Function Iteration によって数値的に求める。各企業タイプの、全ての状態 (価格空間は、抜粋された関連部門の価格の空間である) に関する最適な制御 $\mathbf{d}_i^*(\mathbf{s}_i)$ と最適値関数の値 $\Lambda_i(\mathbf{s}_i)$ のリストを作成する。図 7.1 に示すように、並列計算は各企業タイプの問題間に適用されると同時に、それぞれの問題内部の状態空間においても適用される。後者では、状態空間を分割して Non-Parametric Value Function Iteration を実行する。すなわち、(分割された部分状態空間を担当する) 各ノードで最適化の計算がなされた結果を集約して最適値関数値のリストを更新し、その情報を各ノードに送信し、各ノードは再度最適化計算を行うというイタレーションを、最適値関数値のリストが収束するまで繰り返す。第2段階(Step 2)では、初期状態から出発する一本の動的パスを導出する。初

期状態は災害シナリオによって特定される。初期状態に対応した各企業の最適行動を、第1段階で作成したリストからもってくる。そして、それらを集計して、市場における超過需要を計算する。各財の超過需要の大きさに応じて次期の価格ベクトルが決定する。それと各企業の資本水準などを合わせることによって、次期の経済全体の状態が決定する。期が更新され、各企業は次期の状態に対応した各自の最適行動をリストの中で特定する。以上のプロセスを復興過程の期間数だけ繰り返す。

復興過程においては、災害発生時までは同一タイプに属する企業であっても、生産再開のタイミングが異なることによって、異なるプロセスを辿ることになる。そうであっても、第1段階で作成した同一の最適値関数値のリストを参照することができる点に、本計算手法のメリットがある。またモンテカルロシミュレーションの際にも、第2段階のみの繰り返しを行えばよい点も本手法のメリットになる。

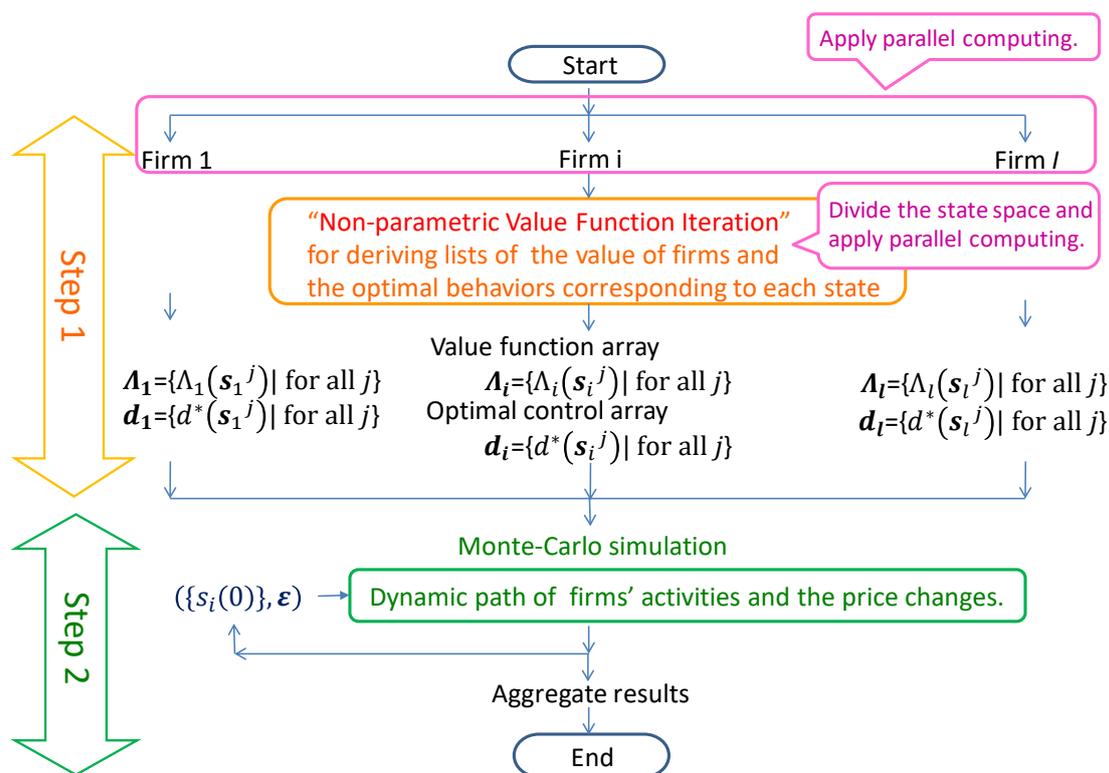
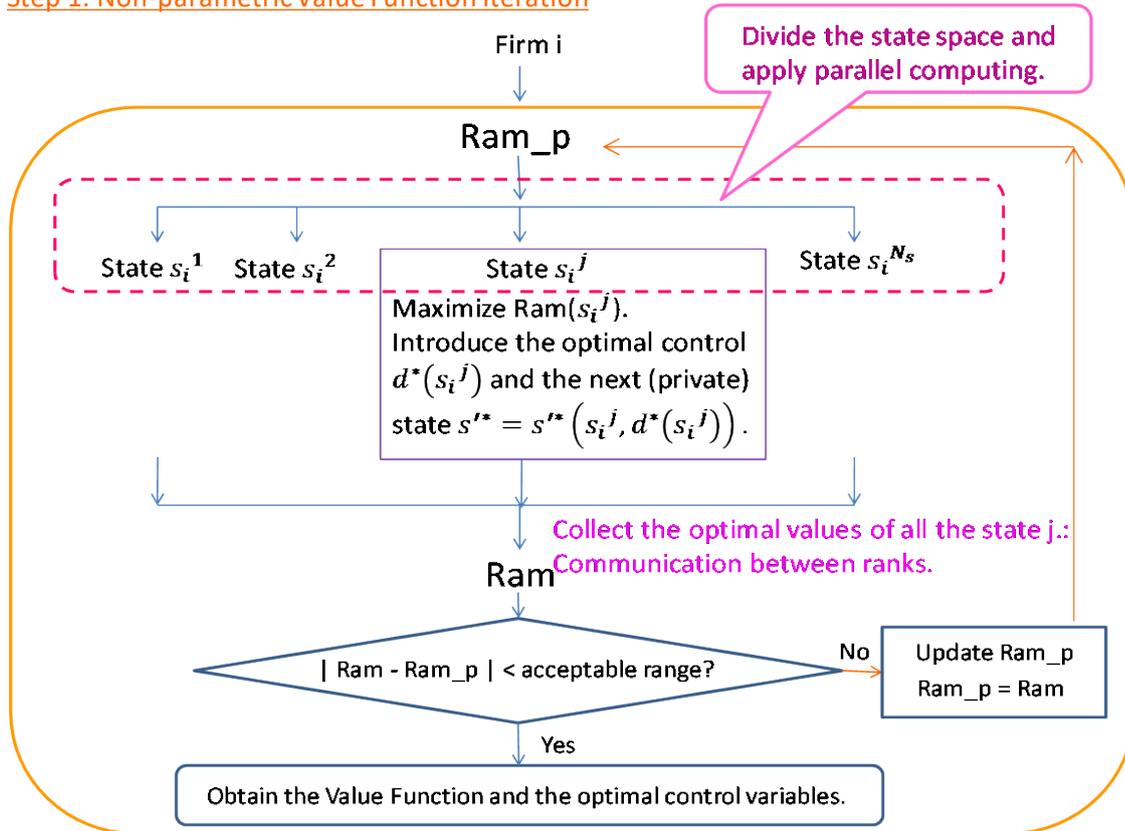
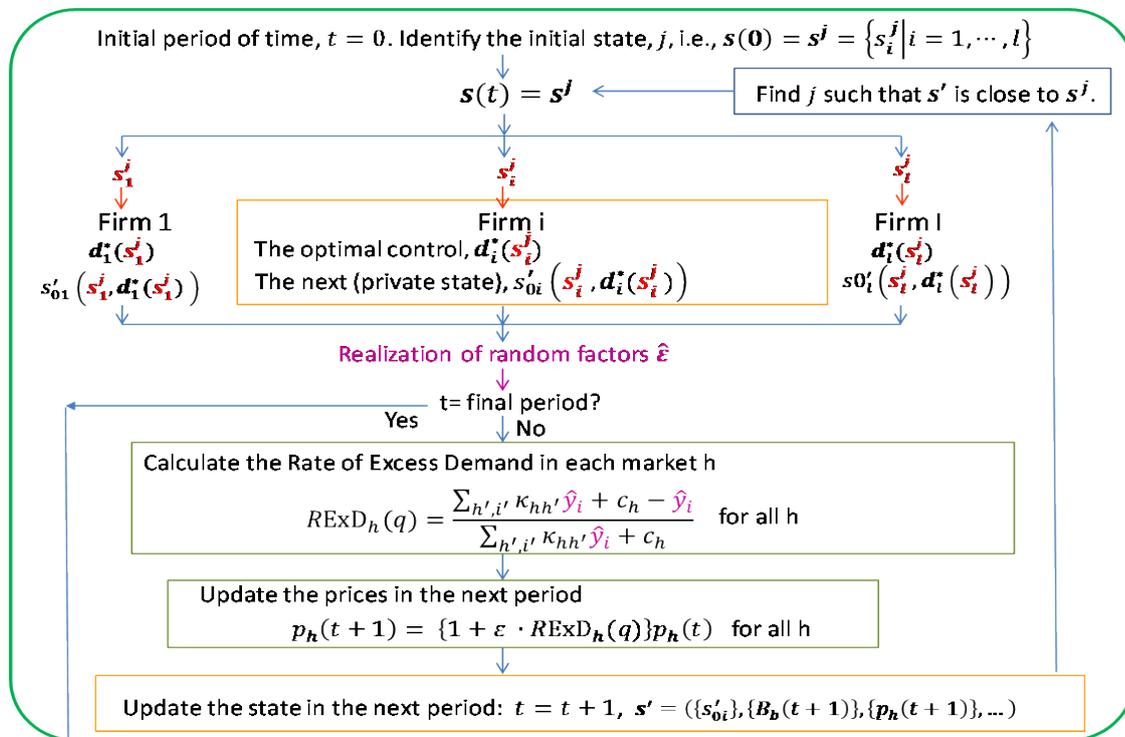


図 7.1. 計算フローの概要。

Step 1: Non-parametric Value Function Iteration



Step 2: Monte-Carlo simulation of dynamic paths of firms' activities and the price changes



Repeat M times, and aggregate results of M-runs of MC sim.

図 7.2. 第 1 段階と第 2 段階の計算のフロー。

## 7.4 対象地域とハザード

平成 29 年度までは、関東地方で起こり得る地震シナリオと、東京都の 26 部門に分類された経済を対象とした。平成 30 年度は、南海トラフ地震の 1 つの被害シナリオと、大阪府の 36 部門に分類された経済を対象とする。

当該地震による各種のストックの被害率の設定は以下のように行う。まず、IES が推計する建物被害率を用いて企業資本の被害率を同定する。インフラの分類は内閣府による社会資本ストックの 19 分類に従うが、それらのうち道路被害率は IES によって、下水道と港湾はフラジリティカーブによって推計する。他の社会資本ストックの被害率は内閣府の「東日本大震災による粗資本ストック毀損額」データを用いて、東日本大震災の際の被害率によって同定する。また、各ライフライン（電気、ガス、上水道）の被害率と各期の復旧率については、それぞれフラジリティカーブと復旧曲線を用いて推計する。また、サプライチェーンの途絶確率や各期の再開確率は、帝国データバンクの企業データ等を用いて推計する。

## 7.5 計算結果の概要

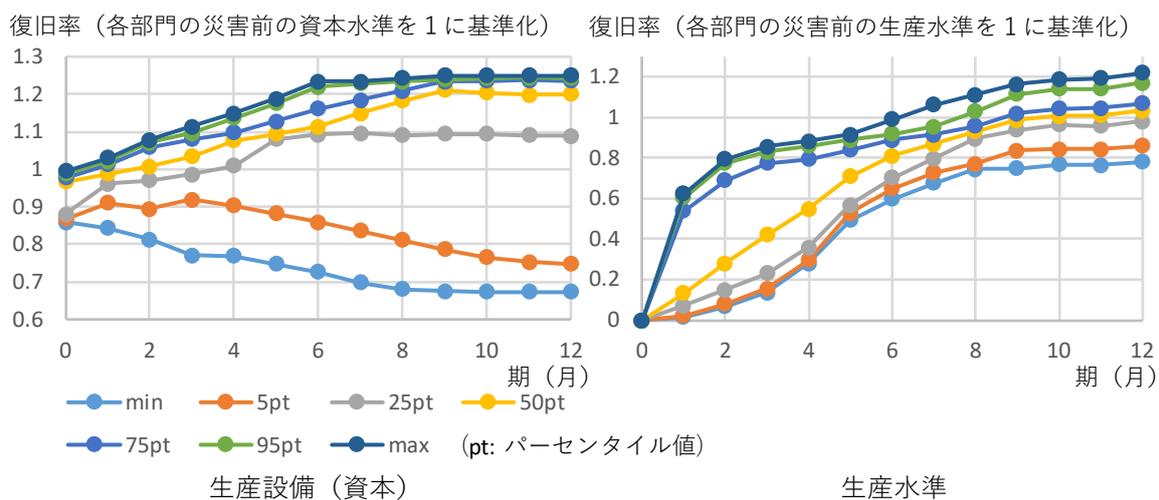


図 7.3. 36 部門（業種）の復旧過程と格差。

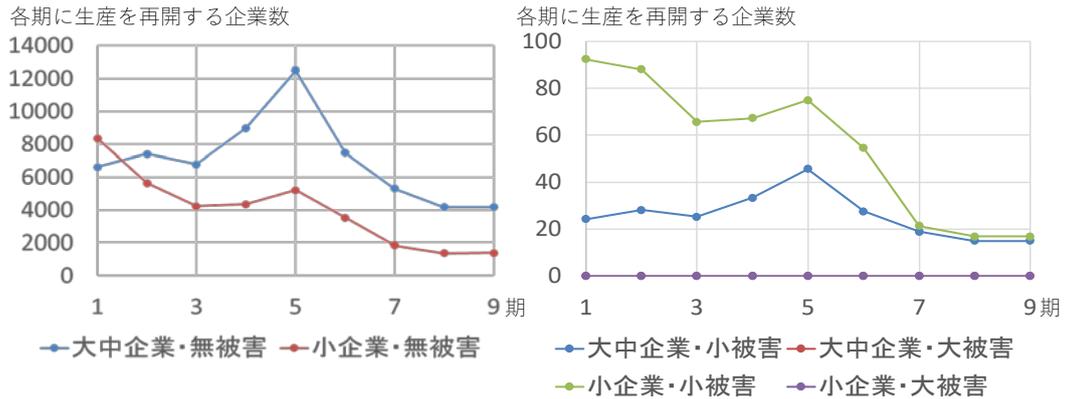
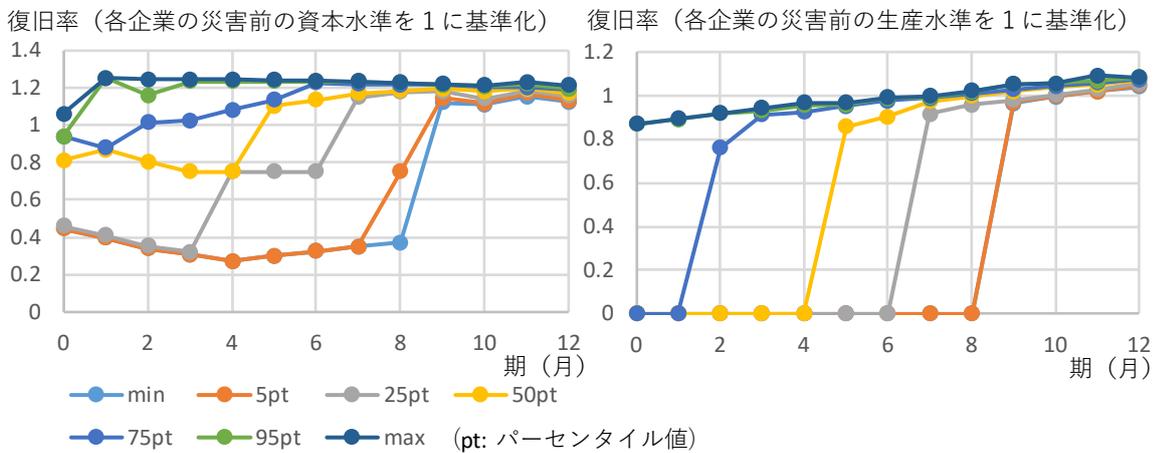


図 7.4. ライフライン（電気、ガス、上水道）とサプライチェーンの途絶の影響による生産再開時期のバラつき。



織維製品部門の生産設備（資本）水準

電気機械部門の生産水準

図 7.5. 各部門（業種）内の企業間の復旧の格差。

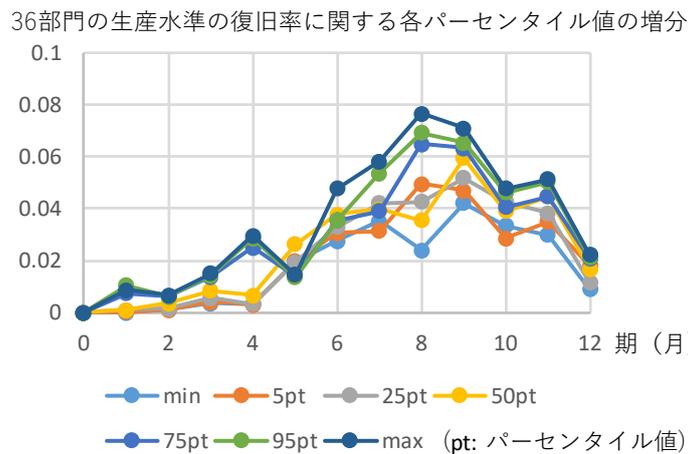


図 7.6. インフラ復旧整備の早期化の効果。

図 7.3 から図 7.6 に計算結果の例を示す。部門間や企業間で取引や資本の規模が異なるため、「復旧率」:

= 「各月の値」 / 「災害直前の月の値」を定義し、「復旧率」を用いた比較を行っている。図 7.3 は、部門毎の集計量に関する部門間でバラつきを、図 7.5 は、特定の部門内での企業間のバラつきを示す。他にも価格や付加価値など多数の内生変数の変化過程を出力している。

なお、図 7.4 では、ライフラインのサービスやサプライチェーンで調達する中間投入財が完全に非代替的であるというモデルの仮定に依存して、生産再開の遅れが若干過剰に現れている可能性がある。今後生産技術を再検討する必要がある。

また、今回は、被害を受けたインフラを 12 か月で復旧する政策シナリオを基本ケースとしている。それに対して、図 7.6 はインフラを 8 か月で復旧する場合の効果を、生産水準に関する復旧率の増分によって表している。他にも、ライフラインの再開の早期化など、多様な政策分析の効果を調べることができる。

### 7.6 計算規模と計算時間

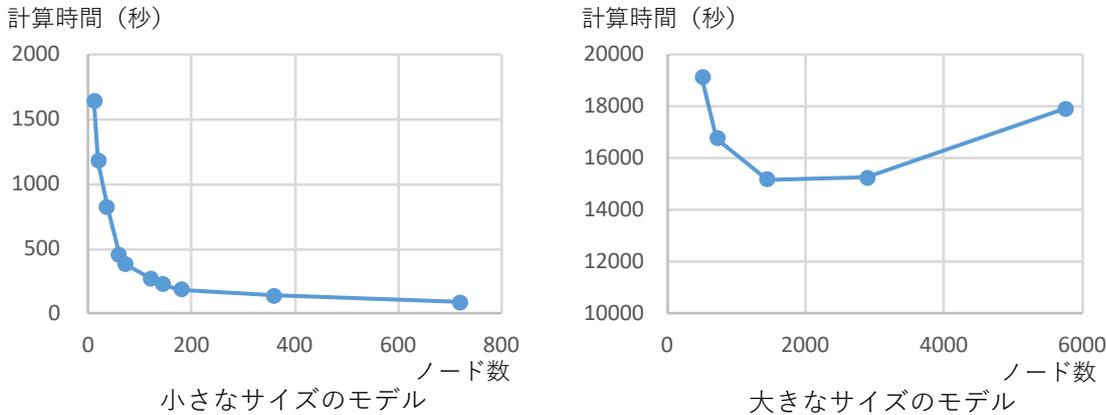


図 7.7. 計算時間。

図 7.7 に並列化による計算時間の変化を示す。本モデルでは、計算のサイズは状態空間の分割の数に依存する。今回は、マイクロジョブとして扱うことが可能な「小さなサイズのモデル」と、それを基準に、各価格のグリッド分割数を 1.5 倍に、各企業の資本ストックのグリッド分割数を 8 倍に、インフラのグリッド分割数を 7 倍に、モンテカルロシミュレーションの繰り返し回数を 150 倍にした「大きなサイズのモデル」を対象に計算した。その結果、図 7-7 に示すように、あるノード数までは計算時間が減少したが、それ以上になると計算時間が増加する傾向に転じた。全体として、良いスケーラビリティは示されなかった。

大きなサイズのモデルで並列化の効果が現れなかった原因は、上述の第 2 段階 (Step2) の処理に、第 1 段階 (Step1) と比較して長い時間がかかったことにあると推測される。第 1 段階が hybrid MPI/OpenMP の適用やファイル IO 処理を無くしたことによって速く処理できるようになったのに対して、第 2 段階の処理はほぼ逐次実行の状態になっている。大きなサイズの計算でモンテカルロシミュレーションの繰り返し回数を増やしたことによって、第 2 段階の処理時間がジョブ全体の処理時間において支配的になったものと考えられる。平成 31 年度は、モンテカルロシミュレーションを並列化させることが必須課題である。一方、並列数の増加によって計算時間が増加した原因については、まずは通信時間について調べる必

要がある。また、計算時間は、状態空間を構成するどの変数のグリッド分割数を大きくするかにも依存する。適切なグリッド分割数の組み合わせについても再検討する必要がある。

## 7.7 計算に関する考察

平成 30 年度に行った計算の高速化や効率化に関する取り組みは以下の通りである。

### i) 状態空間を分割し、隣接する領域の値を取るためのメモリ効率性の高い通信方法の実装

図 7.8 に示すように、以前の通信方式では、状態空間の各次元の分割境界の袖の部分について隣の分割領域と通信する動作を、次元毎に順番に繰り返していた。この動作を行うと、全ての次元について通信が完了しないと計算が始められないので、隣の分割領域の袖の値を保持しておく領域が必要になり、メモリ効率が悪くなる。ただし、通信回数は少なくすむ（格子毎の通信回数は最大で、 $4 * \text{「次元の数」}$ ）。

それに対して、本年度に導入した新しい通信方式では、次元毎ではなく、全次元について隣り合う格子の値を順番に通信で取得しつつ、足し込む計算を同時に行う。足し込んだ計算結果のみ保持するので、計算に必要な全ての値を保つ必要はなくなり、メモリ効率が良い。ただし、通信回数は多くなる（格子毎の通信回数は最大で  $2 * 3^{\text{「次元の数」} - 1}$ ）。

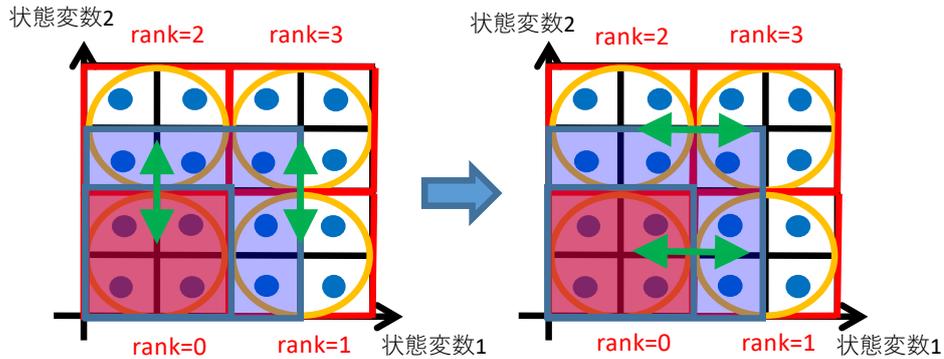
したがって、両方式の間の選択は、実行時間とメモリ効率のどちらを優先するかによることになる。これまで本課題ではメモリの問題が深刻であったため、新しい通信方式が奏功した。

Bellman方程式

$$\Lambda_i(\mathbf{s}_i(t)) = \max_{\mathbf{d}_i(t)} \left[ E_\varepsilon[\Pi(\mathbf{s}_i(t), \mathbf{d}_i(t))] + \psi \sum_{\{q', \Delta\theta_i\}}^Q \phi_i(q', \Delta\theta_i) \cdot \Lambda_i(\mathbf{s}_i'(t), \mathbf{d}_i(t)) \right]$$

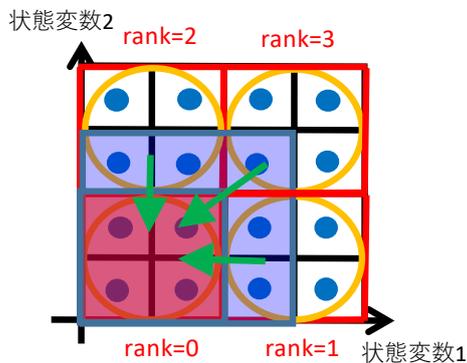
他のランクから  
データをもってくる。

以前の通信方式



rank=0に必要なデータを集めるために、(2次元の場合は)上記の2動作が必要。上記の2動作が完了するまで隣接領域の正しい値が取得できないので、rank=0は計算を開始出来ず、隣接領域のデータを保持しておく必要がある。  
上記の2動作をすれば、rank=1~3も必要なデータは揃い、通信回数は8回。

新しい通信方式



左図はrank=0に必要なデータを集める通信。  
集めたデータはその都度足しこんで結果のみ保持。

$$\sum_{\{q', \Delta\theta_i\}}^{Q'} \phi_i(q', \Delta\theta_i) \cdot \Lambda_i(\mathbf{s}_i'(t), \mathbf{d}_i(t))$$

通信を完了したQ'までの和のみを保持。

Rank=1~3も同様の動作をすると、通信回数は合計12回。

実行時間(通信回数)とメモリ効率のどちらを優先するかで通信方法を切り替える必要がある。

図 7.8. 以前の通信方式と本年度の通信方式。

ii) 多項式で表現される変数の配列を部分に分解することによる、メモリで保持するデータ量の削減

$E_\varepsilon[\Pi] =$  第1項 - {第2項 + 第3項}で構成される変数について、式全体で見ると9次元配列だが、第1項 $(b, t, k, \{q\})$ と「第2項&第3項」 $(t, k', k, x)$ に分解すると、それぞれは次元がより小さい。よって上記の2つの配列に分割して値を保持することにした。改善前のメモリ使用量は約970Mであったが、改善後には約3.22Mになった。本対策は、「次元の呪い」に対する、メモリ面からの改善策といえる。

iii) 統計処理(各ノードの計算結果の集計と指標の作成)および出力の仕事専門のノードの設置

これまでrank=0のノードにおいて、計算するためのメモリと、統計処理と出力のためにデータを保持

しておくためのメモリの両方が必要だった。このため、他のノードには十分なメモリの余裕があるにも関わらず、rank=0 のノードにおいてメモリが足りなくなり、それによって計算全体がエラーで終わってしまう問題があった。そこで、ノードを1つ追加して、そこでは計算は行わず、統計処理と出力だけを行うことにした。

iv) モンテカルロシミュレーションにおける最適値関数の配列の利用

本テーマでは、Bellman 方程式の数値解を求める上で Non-parametric Value Function Iteration 法を用いている。本方法では、状態空間の全ての状態ベクトルに対して最適値関数値と最適制御を求めて、そのリストを保持しておくことになる。その作業は本アルゴリズムの第1段階(Step 1)にあたる。しかし図 7.9 の上図に示すように、第2段階(Step 2)で一本の動的均衡パスを導出する際には、均衡として成立し得ない状態ベクトルがほとんどとなる。よって、それらの値がメモリを占めることが無駄と考えられてきた。しかしモンテカルロシミュレーションでは Step 2 で多数のパスを発生させ、それらはランダム変数の実現値に応じてさまざまな状態を経由する。よって図 7.9 の下図に示すように、1回の Step 1 の作業で求めた最適制御配列の多くの情報を使える。(Non-parametric Value Function Iteration 法ではない、他の)ラン毎に均衡解を計算する方法と比較して、モンテカルロシミュレーションでの効率性が向上する方法と考えられる。ただし既述のように、計算の高速化のためにはモンテカルロシミュレーションを並列化することが必要である。

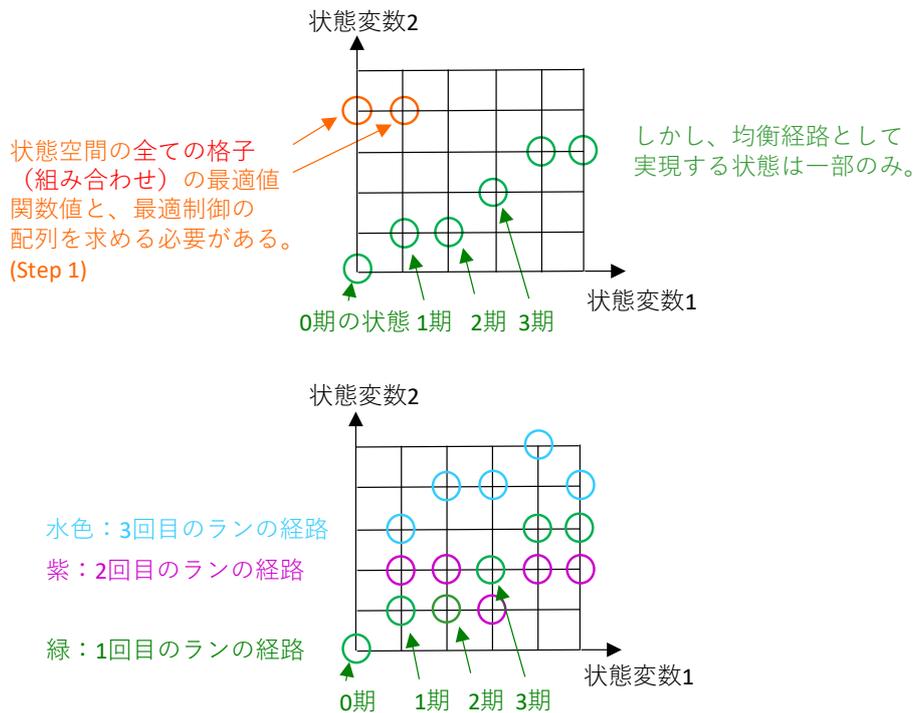


図 7.9. モンテカルロシミュレーションにおける最適制御配列の利用。

## 7.8 今後の課題

本テーマでは、災害後の生産活動の過程を、1) 多数のストックの変化過程を伴い、2) 企業が市場価格を通じて相互作用する動的計画問題として定式化し、計算している。平成30年度は、「次元の呪い」の問題をメモリ使用量の削減によって改善したこと、Bellman 方程式を解いて得られた最適制御配列を用いてモンテカルロシミュレーションを行う方法を考案したこと等の成果を得た。

平成31年度の主な課題は以下の通りである。第一に、さらなるメモリ使用量と実行時間を削減するためにアルゴリズムを改善する。現在は部門毎にノード分割して別個に Non-parametric Value Function Iteration の計算を行っているため、早く計算が終わった部門は他の部門の計算が終わるまで待たされている。これを改善すると実行時間が短縮できる。また Step2 のモンテカルロシミュレーションを並列化する必要がある。

第二に、分析対象を拡大する。平成30年度は大阪府のみが対象地域であったが、全国の各地方を加え、全国的な波及的影響も分析する。また瓦礫を組み込むなど、状態空間をさらに拡大する。

第三に、防災・復興のインフラ政策の議論に、本シミュレーションの結果を利用する方法を提案する。

### 参考文献

- [1] Bellman, R. E., and Dreyfus, S. E., Applied Dynamic Programming, Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 1962.
- [2] Cai, Y., and Judd, K.L., Advances in numerical dynamic programming and new applications, Handbook of computational economics, Vol. 3, Elsevier, pp.479-516, 2014.
- [3] Fernández-Villaverde, J., and Valencia, D. Z., A Practical Guide to Parallelization in Economics, No. w24561, National Bureau of Economic Research, 2018.
- [4] Ogawa, Y., Akiyama, Y., Yokomatsu, M., Sekimoto, Y., and Shibasaki, R., Estimation of Supply Chain Network Disruption of Companies Across the Country Affected by the Nankai Trough Earthquake Tsunami in Kochi City. Journal of Disaster Research, 14(3), pp.508-520, 2019.
- [5] Rust, J., Dynamic programming, The New Palgrave Dictionary of Economics, pp.1-26, 2016.
- [6] Stokey, N., Lucas, R., Prescott E., Recursive methods in economic dynamics, Harvard University Press, 1989.
- [7] Yokomatsu, M., Akiyama, Y., Ogawa, Y., and Shibasaki, R., Numerical Analysis of Dynamic Planning Problems on Corporate Recovery Capital Investment Considering Various Disaster Scenarios, Committee of Infrastructure Planning and Management Conf. Proc., CD-ROM, 2017.

⑧地震災害に対する地盤～構造物応答シミュレーションの高度化とその利活用方法の検討（再委託先：国立大学法人東京工業大学）（サブ課題A）

8.1 概要

検討課題では、統合シミュレータ(IES)を利用した大規模地震時における表層地盤応答および構造物応答シミュレーションの高度化を図るとともにその利活用方法を検討することを目的としている。IESでは現在、形状や構造種別等の属性データに基づく全国約6000万棟の建物モデルから構成される「デジタル都市」が利用可能である。ただしこれらは断片的な情報から自動構築されたものであり、モデルの精度は十分とは言えない。また、デジタル都市を構成する要素として、建築系建物のみならず物流に大きく影響する橋梁等インフラ関連のモデルの充足化を図る必要がある。シミュレーションの高度化を図るため、本年度より橋梁モデル自動作成アルゴリズムの開発に着手している。また、これと併行してIESを利用した統合的被害予測の利活用方法の検討を行っている。このうち前者の橋梁モデル作成については①統合的予測システムの開発で報告しているため本節では割愛するが、後者の事例として、データ不確定性の強い表層地盤応答に着目した予備的検討、および社会科学シミュレーションとの連成・統合のための具体的な方法論について報告する。図8.1にIESに関連する解析モジュール同士の関係を示す。対象は、IESの表層地盤増幅解析モジュール（図中SAA、Soil Amplification Analysis）・建築建物地震応答解析モジュール（同SRA、Structural Response Analysis）と、社会科学系シミュレーションに相当する交通流解析（同Traffic）・経済解析（同Economic）との連成である。

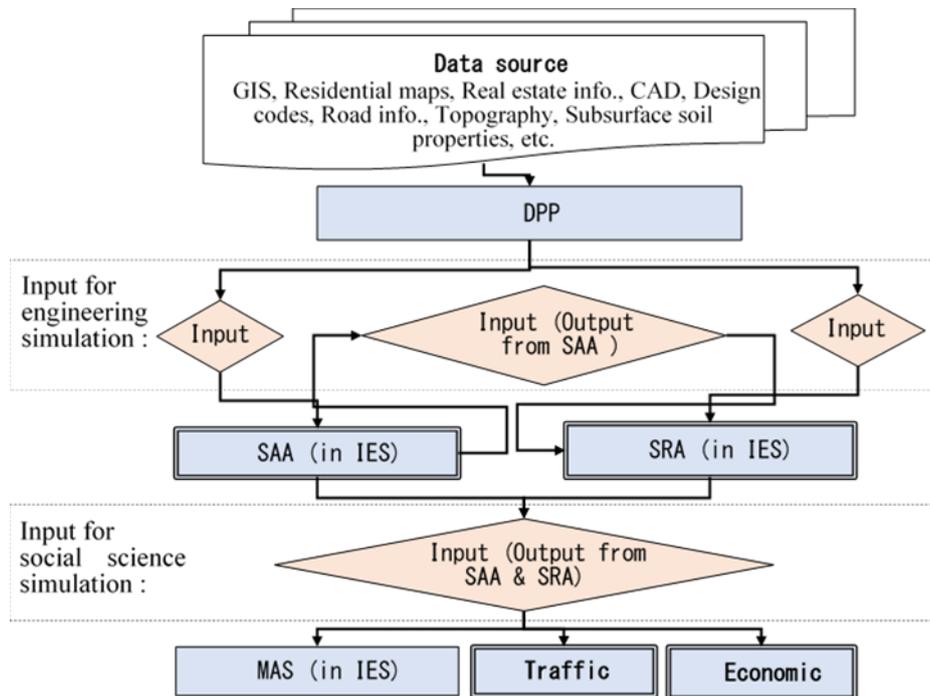


図 8.1. Outline of integrated system for engineering simulation and social science simulation.

8.2 利活用方法論①表層地盤増幅解析に着目した予備的検討

IESでは表層地盤から建物までを計算負荷の少ない数値モデルで表現することで、複数都市全体を包含するような広領域を対象に多数シナリオ解析を実現できる。地盤や建物をモデル化するにあたり種々の

属性情報が必要となるが、それらの組合せをシナリオと見立てた多数のシナリオ解析を行うことで、応答（すなわち被害の度合い）の幅を定量的に示すこと、あるいは属性である入力パラメータに対する感度が高い領域を把握することも可能である。こうした多数シナリオ解析は、被害推定の信頼性向上や、より詳しい推定を実現するための対策・各種調査等の優先順位づけにも活用できる。あるいは非線形回帰分析や機械学習から所謂入出力システムを事前構築することで、将来予想される入力に対する応答推定の効率化も期待できる。本節では、大規模領域を対象とした多数シナリオ解析の予備検討として、地盤物性情報が密な領域を対象とした解析の活用例を報告する。

### 8.2.1 はじめに

都市地震被害予測では、構造物の被害に寄与する表層地盤の増幅現象を精度良く推定出来ることが望ましいが、表層地盤は変位が大きいほど非線形性が強くなり応答が複雑化する。さらに、物理特性そのものに大きな不確定性を有することが課題となる。多くの場合、スパースなボーリングデータあるいは常時微動観測記録等に基づき設定した物理パラメータを周辺地盤にも適用することで数値モデルを構築するが、このモデルから推定される応答はゆらぎ（応答の幅）を持つことは明らかである。このゆらぎの度合いを把握できれば、推定結果を合理的に活用できる。このような観点から、パラメータ不確定性を考慮した地盤すべりや構造物の安全性評価法に関していくつかの研究が進められているが（例えば[1]～[5]）、これらは特定の地盤物性値を確率変数と捉えるものであり、多数の物性を考慮した事例は見られない。そこで、IESにより多数の物性を不確定なパラメータとしてモンテカルロシミュレーションを行い、そこから得られる情報の活用方法を検討した。

### 8.2.2 解析対象および条件

対象領域は全国電子地盤図<sup>[6]</sup>より標準地域メッシュの4分の1地域メッシュ（約250m間隔）ごとに1671本のボーリングデータが公開されている図8.2（図の軸は緯度経度）の概ね10km×10kmの範囲とした。ボーリング位置が解析地点である。

工学基盤に与える入力地震動（以下、工学基盤波）は、内閣府中央防災会議から提供されている南海トラフ陸側ケース<sup>[7]</sup>（EW方向）を適用した。これらは標準地域メッシュの第3次地域メッシュ番号（ただし約5km間隔）で提供されている。ここでは解析対象とする各ボーリングのメッシュ端部の座標に対し、提供された地震動メッシュ端部の座標が最も近いものを各ボーリング地点への入力とした。参考として、解析1671地点に適用した工学基盤波の最大加速度分布、および加速度応答スペクトルがピークを取る振動数を図8.2に示す。

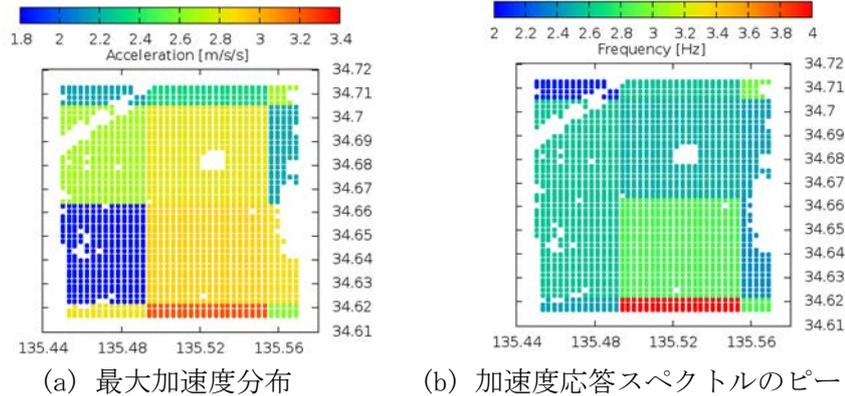


図 8.2. 入力地震動特性（横軸：経度，縦軸：緯度，以下同様）。

## (2) 地盤数値モデルの設定

検討では、各ボーリングの土層構造をある仮定のもと疑似的な3層構造（表層2層+工学基盤相当の層）に置き換えた。このような置き換えは実際の土層構造を大幅に均すものでもあり本来の各層パラメータを忠実に再現するものではないが、応答評価が不必要に煩雑となることを回避した。各ボーリングに対する3層構造への置き換えとRamberg Osgood(RO)モデルパラメータの設定は次の仮定に基づいて行った。

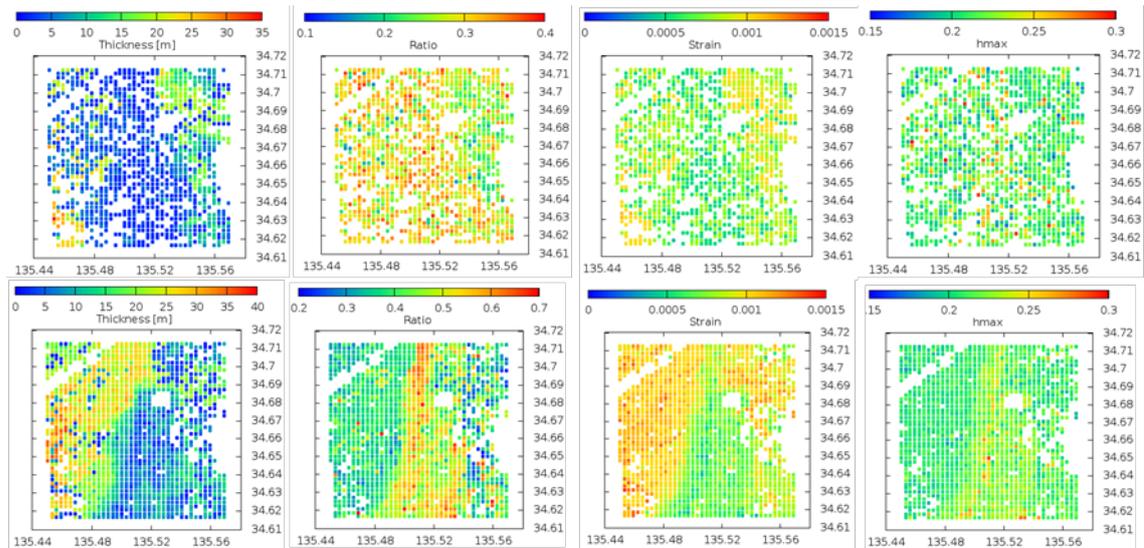
- ①工学的基盤の設定：N値50以上の層を工学的基盤とみなす。ただし、該当する層がボーリングデータに存在しない場合は、最下層に相当する位置を工学的基盤と仮定し、これを3層目の上面に設定する。
- ②N値による層分け：表層は、砂層なら $N \leq 10$ 、粘土層なら $N \leq 5$ を大よその目安とする。

上記仮定から各ボーリングに対して表層（1層目）の下面位置、および工学基盤（3層目）の上面位置を設定することで3層構造化し、それぞれの層に対する各種パラメータはその層の平均値を与えた。ただしボーリングによっては1または2層目の層が存在しない（層厚0の）地点もある。

## (3) 地盤パラメータ不確定性の設定

不確定性を持たせるパラメータは出来るだけ応答への感度が高いものが望ましい。ここではSH波の増幅率が各層の層厚および基盤層とのインピーダンス比で決定される<sup>[8]</sup>ことを参考に、1、2層目の層厚（幾何条件）とインピーダンス比（物性条件）を不確定パラメータとして選定した。また、ROモデルの非線形パラメータとして1、2層目の基準ひずみおよび最大減衰定数を採用した。以降、層厚を $H_{si}$ 、インピーダンス比を $\rho_s V_{si} / \rho_3 V_{s3}$ 、基準ひずみを $y_i$ 、最大減衰定数を $h_{maxi}$ と記す。ただし下付 $i$ は層番号を表す。

全地点（地点数 $N_{Site} = 1671$ ）における上記8種のパラメータを図8.3に示す。同図(a)に示す各層厚の分布から、対象地盤モデルは領域の中央付近からその南部にかけて基盤が浅いこと、領域西側で2層目が領域北東側で15m前後の表層あることなどが確認できる。これら8種の不確定パラメータに対して $\pm 30\%$ の一律変動を仮定してモンテカルロシミュレーション（パラメータ組合せ数 $N_{Mc} = 10000$ ）を行い、応答の統計的性質を考察する。



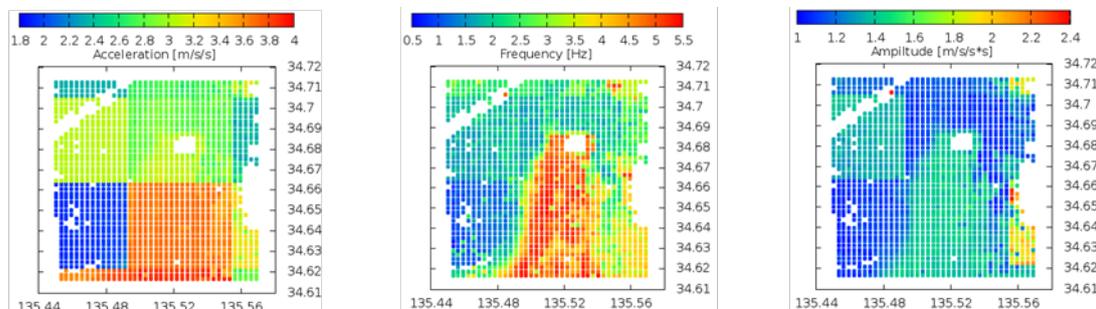
(a) 層厚 (b) インピーダンス比 (c) 基準ひずみ (d) 最大減衰定数

図 8.3. 設定した各層パラメータの空間分布 (上段: 表層、下段: 2 層目、一部空白部は層が存在しない箇所)。

### 8.2.3 応答の統計的性質の評価と考察

#### (1) 平均的な応答量

地点  $i$  における応答解析結果から、モンテカルロシミュレーションの  $j$  番目のパラメータ組合せ  $j$  ( $j = 1, \dots, N_{MC}$ ) の地表加速度フーリエスペクトルを入力加速度フーリエスペクトルで除すことで伝達関数を求め、5.5Hz以下の低周波数帯域における極大点をピーク振動数として探索する。この伝達関数のピーク振動数および対応する振幅をそれぞれ  $f_{pj}(i)$ ,  $TF_{pj}(i)$  ( $i=1, \dots, N_{Site}$ ) と表す。各地点の  $f_{pj}(i)$ ,  $TF_{pj}(i)$  の組合せ  $j$  に対する平均 ( $N_{MC}$  個平均) の空間分布を最大加速度の平均の空間分布と共に図 8.4 に示す。同図 (a) は図 8.2 (a) に類似しており、応答の最大加速度が入力の最大加速度に大きく依存することが定性的に読み取れる。 $f_{pj}(i)$  は表層厚が薄い箇所では振動数が高くなっているが、 $f_{pj}(i)$  に対応する  $TF_{pj}(i)$  は、最大加速度が大きなエリアでの増大は見られない。応答の非線形に伴い加速度が低減されるためと考えられる。



(a) 最大加速度の平均 (b)  $f_{pj}(i)$  の平均 (c)  $TF_{pj}(i)$  の平均

図 8.4. 地表応答平均の空間分布。

## (2)伝達関数ピークの変動

図8.3(b), (c)に示す伝達関数のピーク振動数 $f_{p,j}(i)$ と振幅 $TF_{p,j}(i)$ が、各パラメータの変動を受けてどのように変動するかを調べる。不確定パラメータの組合せ $j$  ( $j = 1, \dots, N_{MC}$ ) に対する各地点の線形時伝達関数の1次振動数と対応する振幅をそれぞれ $f_{p,j,ref}$ 、 $TF_{p,j,ref}$ と表す。これらと $f_{p,j}(i)$ 、 $TF_{p,j}(i)$ との差を $Df_{p,j}(i)$ 、 $DTF_{p,j}(i)$ としてベクトルで表す。

$$\mathbf{v}_{D,j} = \begin{Bmatrix} Df_{p,j} \\ DTF_{p,j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{p,j}(i) - f_{p,j,ref} \\ TF_{p,j}(i) - TF_{p,j,ref} \end{Bmatrix}. \quad (8.1)$$

この $\mathbf{v}_{D,j}$ の要素を昇順で並べ替えたベクトルを改めて $\hat{\mathbf{v}}_{D,j}$ と表す。代表的な統計値として、ベクトル平均 $\overline{\mathbf{v}}_{D,j}$ 、および値の下位5%を表す $\hat{\mathbf{v}}_{D,j=500}$ 、上位5%を表す $\hat{\mathbf{v}}_{D,j=9500}$ をそれぞれ図8.5に示す。同図では、式(8.1)のベクトル第1成分 $Df_{p,j}(i)$ 、第2成分 $DTF_{p,j}(i)$ をそれぞれ水平右正(→)、鉛直上正(↑)で記載しており、色はベクトル振幅を表す。同図から、伝達関数のピークの変動の様子が把握できる。

まず、平均的な変動 $\overline{\mathbf{v}}_{D,j}$  (同図(a))に着目すると、 $\overline{\mathbf{v}}_{D,j}$ の水平成分(第1成分)はいくつかの地点を除きほぼすべてのベクトルが左向きを示しており、全体として0~2 Hzの振動数低下が確認できる。鉛直成分(第2成分)は下向きあるいは横ばいを示しており、非線形化に伴う加速度の低下傾向が読み取れる。同図(b)は $f_{p,j}(i)$ 、 $TF_{p,j}(i)$ の下位5%に対応する変動量を示しており、8種の不確定パラメータの±30%の変動に対する $f_{p,j}(i)$ 、 $TF_{p,j}(i)$ が、特異的な場合を除きどの程度まで低下し得るかの指標となる。同図(c)は、逆に $f_{p,j}(i)$ 、 $TF_{p,j}(i)$ の上位5%に対応する変動量を示しており、各種パラメータの±30%の変動に対して $f_{p,j}(i)$ 、 $TF_{p,j}(i)$ が特異的な場合を除き最低限この程度は変動するという指標となる。

こうした多数パラメータによる予備解析の情報を活用することで、別の入力シナリオに対する再計算負荷の軽減が可能となる。

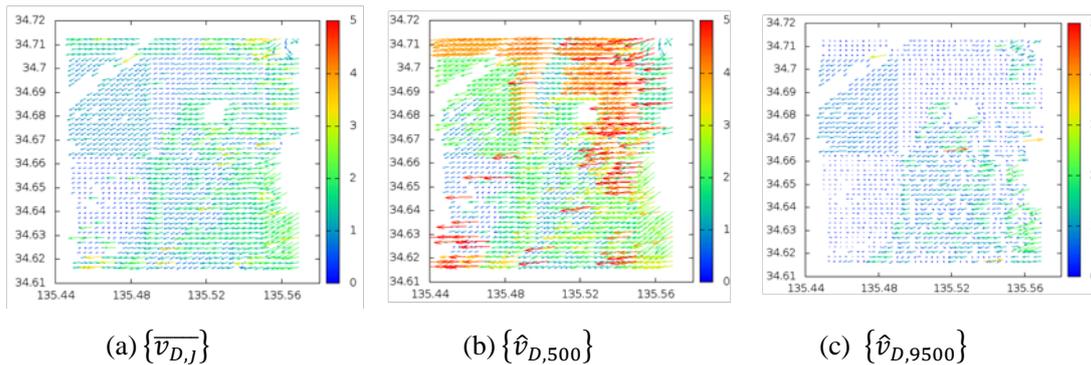


図 8.5. 伝達関数のピーク変動の空間分布。

## (3)各種パラメータと応答との関係

本検討は入力パラメータ群と応答が非線形関係にあるため、重回帰分析や正準相関分析、主成分分析といった線形データ解析に基づく手法の適用は適切でない。そこで、カーネル主成分分析<sup>[9]</sup>の適用を試みた。同手法は主成分分析をカーネル法の枠組みに拡張したものであり、空間軸を高次元の特徴ベクトル $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X})$ に変換してから通常の主成分分析を行うことで低次元の線形部分空間を求める方法である。特徴ベ

クトルの選び方によっては全く異なる結果を与えることから特徴ベクトルの設定には注意が必要であるが、複雑なパラメータ依存関係をより単純化できる可能性がある。手法の具体手順については割愛するが、8種の不確定パラメータの変動量と図 8.1 に示した 2 種の入力地震動パラメータ（最大加速度  $y_{gmax}$ 、加速度応答スペクトルのピーク振動数  $f_{sap}$ ）と目的関数  $z$  を変数とし、各パラメータの 1 次元変数とパラメータ同士の乗算（2 次元）の組合せを次式のように考慮し、特徴ベクトル  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X})$  の要素を  $x_i$ （1 次元）および  $x_i x_j$ （2 次元）の組合せで構成した。

$$\{x_1, x_2, \dots, x_{11}\} = \{H_{S1}, H_{S2}, I_1, I_2, \gamma_1, \gamma_2, h_{max1}, h_{max2}, y_{gmax}, f_{sap}, z\}. \quad (8.2)$$

要素の並び順についての記述は割愛するが、要素数  $M$  は  $x_9$  と  $x_{10}$  の 2 次元組合せを除くと 63 となる。サンプル数  $N_{MC}$  のデータ集合をベクトル  $\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}, \dots, \mathbf{X}^{(N_{MC})}$  とし、特徴ベクトル同士の内積であるカーネル関数  $k(x_i, x_j)$  を  $(i, j)$  要素とする  $N_{MC} \times N_{MC}$  のグラム行列  $\mathbf{K}$  を作成し、これを固有値分解する。得られた固有ベクトルを  $\mathbf{u}$ 、その要素を  $u_i$  とすると、各特徴ベクトルに対応する重みのベクトル  $\mathbf{w}$ （要素数  $M$ ）が次式で求められる。

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^{N_{MC}} u_i \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X}^{(i)}) \quad (8.3)$$

この重みは式(8.2)の各特徴ベクトルの重みを示すものでもあるが、各地点で  $M$  個ずつの重みが得られることから、その分析は容易でない。ここでは基本検討として、各地点で  $\mathbf{w}$  が最大となる要素を抽出することで、パラメータと応答との関係を考察する。

目的関数  $z$  を  $f_{p,j}$  とした場合の、全 1671 地点における  $\mathbf{w}$  が最大となる要素を図 8.6 左に示す。同図からわかるとおり、多くの地点で重みが最大を取る要素は主に 2 つに限られている。要素番号のヒストグラムを同図右に示す。頻度が際立つ要素番号は 17、9 であり、この要素はそれぞれ特徴ベクトル  $x_2 x_2$  および  $x_1 x_1$ 、すなわち  $H_{S2}^2$  および  $H_{S1}^2$  の重みに相当する。今回対象とした問題設定およびパラメータ設定においては、各層厚に対する割合の変動が伝達関数のピーク振動数の変動に最も寄与するものであることが示唆される。適用した特徴ベクトルの妥当性に関しては現段階では検討の余地があるが、比較的数の多いパラメータの影響を把握するための一つの手段として、手法の適用性が示唆される。

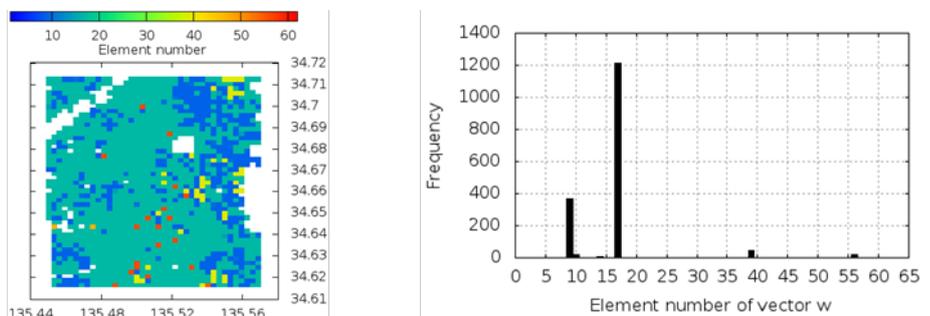


図 8.6. 各地点の重みベクトル  $\mathbf{w}$  が最大値をとる要素番号（左）とそのヒストグラム（右）。

#### 8.2.4 まとめ

一般に精度の高い応答推定が困難な表層地盤増幅解析に着目し、多数シナリオ解析としてモデル物性

値と幾何条件のゆらぎを表す8種の不確定パラメータを利用したモンテカルロシミュレーションからその応答の評価方法に関する基礎的な検討を行った。本検討結果から、多数の入力シナリオやモデルのパラメータ変数による膨大な数の予備解析を行うことで地盤の非線形応答特性の変動とその変動に寄与するパラメータの把握ができる可能性が示唆された。また、こうした予備解析から伝達関数の変動を把握し、これを利用することで新たな入力に対する応答をより少ない計算負荷から推定できる可能性がある。

### 8.3 利活用方法論②表層地盤増幅解析に着目した確率論的応答評価

前節の表層地盤物性の不確定性検討においては、表層地盤応答に対する層厚の感度が高いことが示唆された。既述のとおり、既往研究ではパラメータ不確定性を考慮した地盤すべりや構造物の安全性評価法に関していくつかの研究が進められているが、これらは特定の地盤物性値を確率変数と捉えるものであり、地盤の不整形性といった幾何条件を不確定とした大規模事例は見られない。地盤のFEM解析等において各要素の物性を確率変数とすることは可能である一方、要素境界を確率的に変動させ多数解析を行うことは容易でないことが、その一因と考えられる。ここでは、不整形性を確率変数とした場合の評価方法として、高分解能の3次元モデルに対する地盤応答解析に高速化計算と、限定された試行回数から応答を評価する点推定とを組み合わせた地盤応答の確率的評価について報告する。

#### 8.3.1 応答推定法の提案

表層地盤の応答解析はGAMERAを用いて行う。多数の地盤モデルに対する有限要素法メッシュを生成するため、バックグラウンド格子法ベースの有限要素モデル生成手法<sup>[10]</sup>を用いる。対象領域を囲むバックグラウンド格子を使って格子毎にローカルに要素分割を行うため、複雑形状を高速・ロバストに要素分割できる方法となっている。上記の高速な有限要素解析手法と組み合わせることで非線形物性・複雑地盤形状を反映した地盤震動解析を多数の地盤モデルに対し実行できる。

表層厚分布（あるいは基盤形状分布）という幾何条件を確率変数とした解析では、高分解能の3次元地盤非線形応答解析といった計算負荷の大きい問題に対してモンテカルロシミュレーションベースの方法を適用するのは不利である。そこで、演算回数の点で極めて優位性が高い点推定<sup>[11]</sup>の適用性を検討する。

##### (1) 従来の点推定法

1次元問題のM点推定 ( $M \geq 2$ , Mは自然数) では、1つの確率変数XのうちM個の評価点  $X_m$  ( $m=1, \dots, M$ ) とそれに対応する重み  $P_m$  から各評価点に対応する応答  $Y=g(X)$  の期待値を次式のように近似する<sup>[11]</sup>。

$$E[Y^k] \cong \sum_{m=1}^M P_m \cdot Y_m^k = \sum_{m=1}^M P_m \cdot g^k(X_m). \quad (8.4)$$

評価点  $X_m$  ( $m=1, \dots, M$ ) は、各  $X_m$  と対応する重み  $P_m$  から求まるXの期待値がXの確率密度関数  $p(X)$  (連続量) の期待値を満足するように決定する<sup>[11]</sup>。

$$E[X^k] = \int X^k p(X) dX = \sum_{m=1}^M P_m \cdot X_m^k. \quad (8.5)$$

特に  $p(X)$  が正規分布で近似出来るときは、2点推定で

$$X_1, X_2 = \mu_X \pm \sigma_X, \quad P_1 = P_2 = \frac{1}{2}. \quad (8.6)$$

ここに、 $\mu_X$ 、 $\sigma_X$  は  $X$  の平均と標準偏差を表す。

多次元問題への拡張については確率変数同士に相関がある場合や確率密度分布が非対称である場合を対象とした様々な手法が提案されているが(例えば[12]-[15])、計算効率の観点から殆どの研究が2点推定、多くても3点推定をベースとしている。最も単純な1次元2点推定の単純な拡張では  $N$  次元問題で  $2^N$  個の評価点が必要となり、最少の2点であっても  $N$  の増大に伴う計算回数の増大は無視できないものとなる。このため Rosenblueth は確率変数同士に相関がない場合を対象に、2点推定に基づく次式を提案している<sup>[11]</sup>。

$$\frac{\hat{Y}}{\overline{Y_{\mu_X}}} \cong \prod_{i=1}^N \frac{\overline{Y_i}}{\overline{Y_{\mu_X}}} \quad , \quad 1 + \hat{V}_Y^2 \cong \prod_{i=1}^N (1 + \hat{V}_{Y_i}^2) \quad (8.7)$$

ここに、 $\hat{Y}$ 、 $\hat{V}_Y$  は推定したい応答  $Y$  の平均と変動係数、 $\overline{Y_{\mu_X}}$  は全ての確率変数を平均値とした場合の応答、 $\overline{Y_i}$ 、 $\hat{V}_{Y_i}$  は  $N$  個の確率変数のうち  $i$  番目のみを確率変数(残りは平均値を設定)とした場合の応答  $Y$  の平均と変動係数であり、それぞれ次式で表せる。

$$\begin{aligned} \overline{Y_{\mu_X}} &= g(\mu_{X1}, \dots, \mu_{Xi}, \dots, \mu_{XN}) \\ \overline{Y_i}^{(2)} &= \sum_{m=1}^2 P_{i,m}^{(2)N} \cdot g(\mu_{X1}, \dots, X_{i,m}^{(2)N}, \dots, \mu_{XN}) \\ X_{i,1}^{(2)}, X_{i,2}^{(2)} &= \mu_{Xi} \pm \sigma_{Xi}, \quad P_{i,1} = P_{i,2} = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (8.8)$$

ただし括弧書きの上添字の括弧内数値は1つの確率変数に対する評価点の数 ( $M$ ) を表す。これらの式は確率変数同士が無相関の場合にのみ成り立つものである。この条件を満足する場合は、 $N$  次元確率変数に対する応答の平均と変動係数(標準偏差)を、 $2^N$  よりはるかに少ない ( $2N+1$ ) 個の評価点から推定できることになる。

## (2) 提案する点推定法

点推定の精度は式(8.7)の近似精度に依存するが、式(8.7)の近似精度を上げるには単純に評価点  $m$  の数を増やす必要があるため、計算負荷と精度はトレードオフの関係にある。ただし、2点推定から発展した式(8.7)は、 $y$  を各確率変数に重複利用することで評価点数( $2N+1$ )個を減らすことなく3点推定に置き換えられる点にここでは着目する。すなわち、確率変数  $X$  が正規分布に従うとき、次式で示すように3点推定 ( $M=3$ ) によって2点推定 ( $M=2$ ) の場合と同じ評価点数により期待値を推定することが可能となる。

$$\begin{aligned}\bar{Y}_i^{(3)} &= \sum_{m=1}^3 P_{i,m}^{(3)N} \cdot g(\mu_{X1}, \dots, X_{i,m}^{(3)N}, \dots, \mu_{XN}) \\ &= \sum_{m=1}^2 P_{i,m}^{(3)N} \cdot g(\mu_{X1}, \dots, X_{i,m}^{(3)N}, \dots, \mu_{XN}) + P_{i,m}^{(3)} \cdot \bar{Y}_{\mu_X}\end{aligned}\quad (8.9)$$

$$X_{i,1}^{(3)}, X_{i,2}^{(3)} = \mu_{Xi} \pm \sqrt{3} \sigma_{Xi} \quad , \quad X_{i,3}^{(3)} = \mu_{Xi} \quad , \quad P_{i,2}^{(3)} = P_{i,2}^{(3)} = \frac{1}{6} \quad , \quad P_{i,3}^{(3)} = \frac{2}{3}$$

なお、点推定からは期待値のみの推定となるため、確率分布を推定するには別途確率密度関数を適用する必要がある。

### 8.3.2 問題設定

方法の有効性を検証するために数値実験を行い、地表面の最大主ひずみを算出する。

#### (1) 地盤モデル

対象数値モデルは表層と基盤層の2層不整形地盤を模擬した(図8.7)。表層のみ地盤非線形を考慮し、基盤層は線形とした。当該モデルのメッシュサイズは4m~16m、自由度は704,699×3、四面体2次要素数は495,918である。各種地盤物性は表8.1のとおりとした。ここでhmaxは最大減衰定数、γtは基準ひずみである。

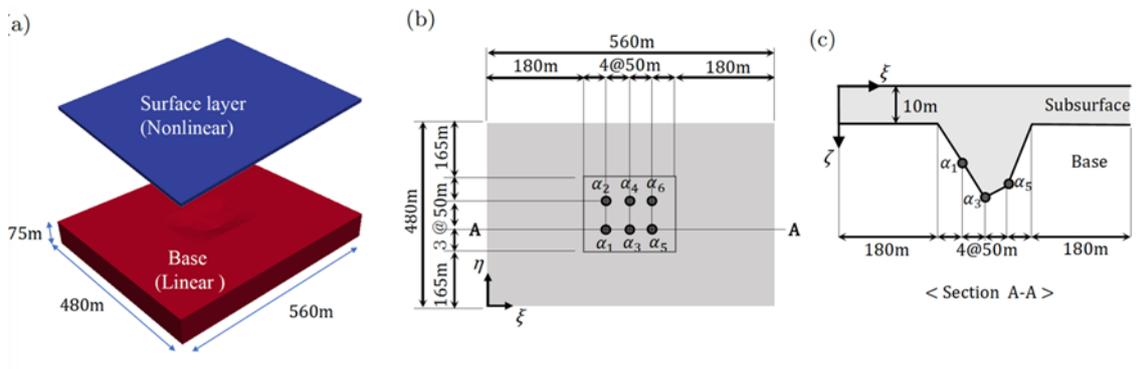


図 8.7. Numerical model of ground layers.

表8.1. Applied soil properties.

Layer	V p[m/s]	V s[m/s]	Density[kN/m <sup>3</sup> ]	h <sub>max</sub>	γ <sub>t</sub>
Subsurface (Soft sedimentary layer)	700	100	15.0	0.23	0.007
Base (Engineering bedrock layer)	2100	700	21.0	0.001	1

表 8.2. Settings of  $\alpha_i$  as stochastic variable.

		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
Plane position	$\xi$ [m]	230	230	280	280	330	330
	$\eta$ [m]	215	265	215	265	215	265
Statistical moments of $X_i$ (Component: $\zeta$ )	$\mu_{X_i}$ [m]	20	25	30	20	25	25
	$\sigma_{X_i}$ [m]	5	5	5	5	5	5

## (2) 入力地震動

入力特性の違いによる影響を考え、ここでは神戸海洋気象台 (Wave1)、宮城県桶谷町新町 (Wave2)、新潟県小千谷市城内 (Wave3) の 3 種の地震動を適用した。入力は水平 2 成分および上下の 3 方向、解析時間間隔は 0.005 s とした。ただし時間ステップ数は Wave1、2、3 でそれぞれ 20000、50000、20000 である。

## (3) 確率変数の設定

図 8.7 の点  $\alpha_i$  ( $i=1,\dots,6$ ) の 6 地点における表層厚を確率変数  $X_i$  とし、それぞれ表 2 に示す平均及び標準偏差を有する正規分布を仮定した。すなわち、この問題では  $N=6$  であり、点推定による演算は  $2N+1=13$  ケースとなる。2 点推定の場合の評価点  $X_i$  および重み  $P_i$  は式(8.8)および式(8.9)による。

## (4) 応答の確率密度変数の設定

各計算ケースから算出された地表面最大主ひずみ  $\epsilon_{max}$  は 0 以上であること ( $\epsilon_{max} \geq 0$ )、またその分布特性を考慮し、ここでは確率密度関数のうちガンマ分布を選定し、ガンマ分布の平均  $k\theta$ 、分散  $k\theta^2$  に点推定から得られた期待値を代入した。この累積分布からターゲットとする最大主ひずみの超過確率を算出した。

### 8.3.3 結果検証

点推定より求めた超過確率の精度検証用として、モンテカルロシミュレーションによる結果をリファレンスとした。モンテカルロシミュレーションの実行回数は、十分な収束を確保するため 500 回とした。以下ではモンテカルロシミュレーション法による推定を MCS、従来の点推定法による推定を convPEM、提案手法を modPEM と表記する。

図 8.8 に、各手法、各入力地震動シナリオにより推定した対象領域による最大主ひずみ  $\epsilon_{max}$  の平均値を示す。表層の基準ひずみ (初期剛性に対する剛性比率 0.5 に相当するひずみ) は 0.007 であるため、 $\epsilon_{max}$  は Wave1 に対してはこのレベルを超過する可能性があるが、従来の点推定法、提案した点推定法ともに MCS による推定結果と酷似していることが読み取れる。また、Wave3 に対しては従来の点推定では推定精度がやや劣るが、提案法では推定精度が改善されており、推定方法として頑健である。60 ノード使用時の IO を含めた全解析時間は、点推定 1.5 時間、モンテカルロシミュレーションで 75 時間であったことを踏まえれば、提案した点推定法は実用的な推定方法であるといえる。

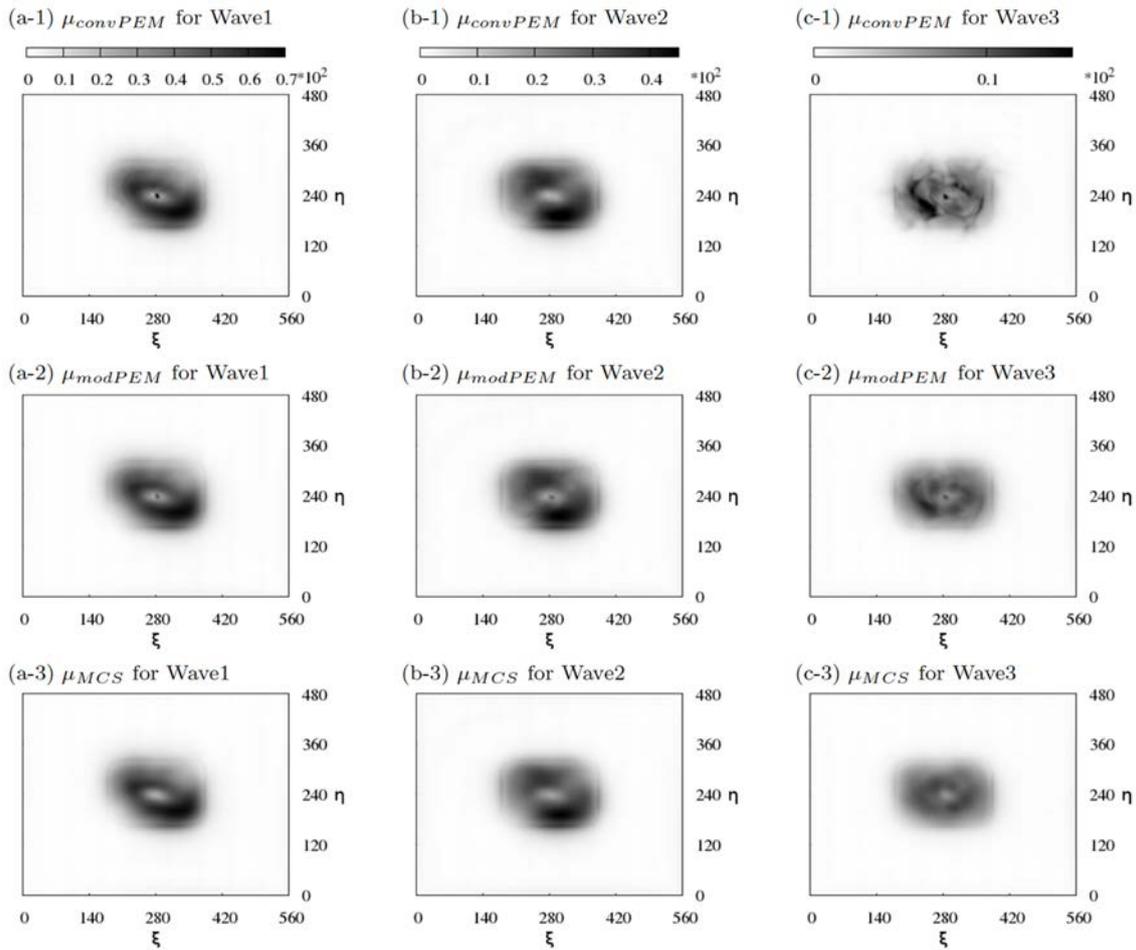


図 8.8. 推定された応答平均値  $\varepsilon_{max}$  の比較。

図 8.9 上側に、Wave1, Wave2 入力時の最大主ひずみ 0.1%, 0.3%, 0.5%, 0.7% (0.7%は基準ひずみに相当) 超過確率、下側に Wave 3 入力時の最大主ひずみ 0.05%, 0.1%, 0.15%に対する超過確率の空間分布を、MCS、modPEM を比較して示す。ただし Wave3 に対しては、応答ひずみレベルが小さいことが推定精度が低い要因の一つと考え、参考として Wave3 の振幅のみを 2 倍とした Wave3' 入力時の最大主ひずみ 0.3%, 0.5%, 0.7% 超過確率を追記した。同図より、振幅レベルが大きい入力に対しては、modPEM による最大ひずみの推定精度が非常に高いことが読み取れる。

### 8.3.4 まとめ

不整形地盤に起因する局所的な地盤増幅の影響を、地盤構造の曖昧さを考慮した上で評価することを目的として、高分解能の地盤応答解析と確率的評価を組み合わせた検討を行った。確率的評価手法として多次元 3 点推定を提案し、応答の推定精度と計算時間の観点からその実用性を検証した。

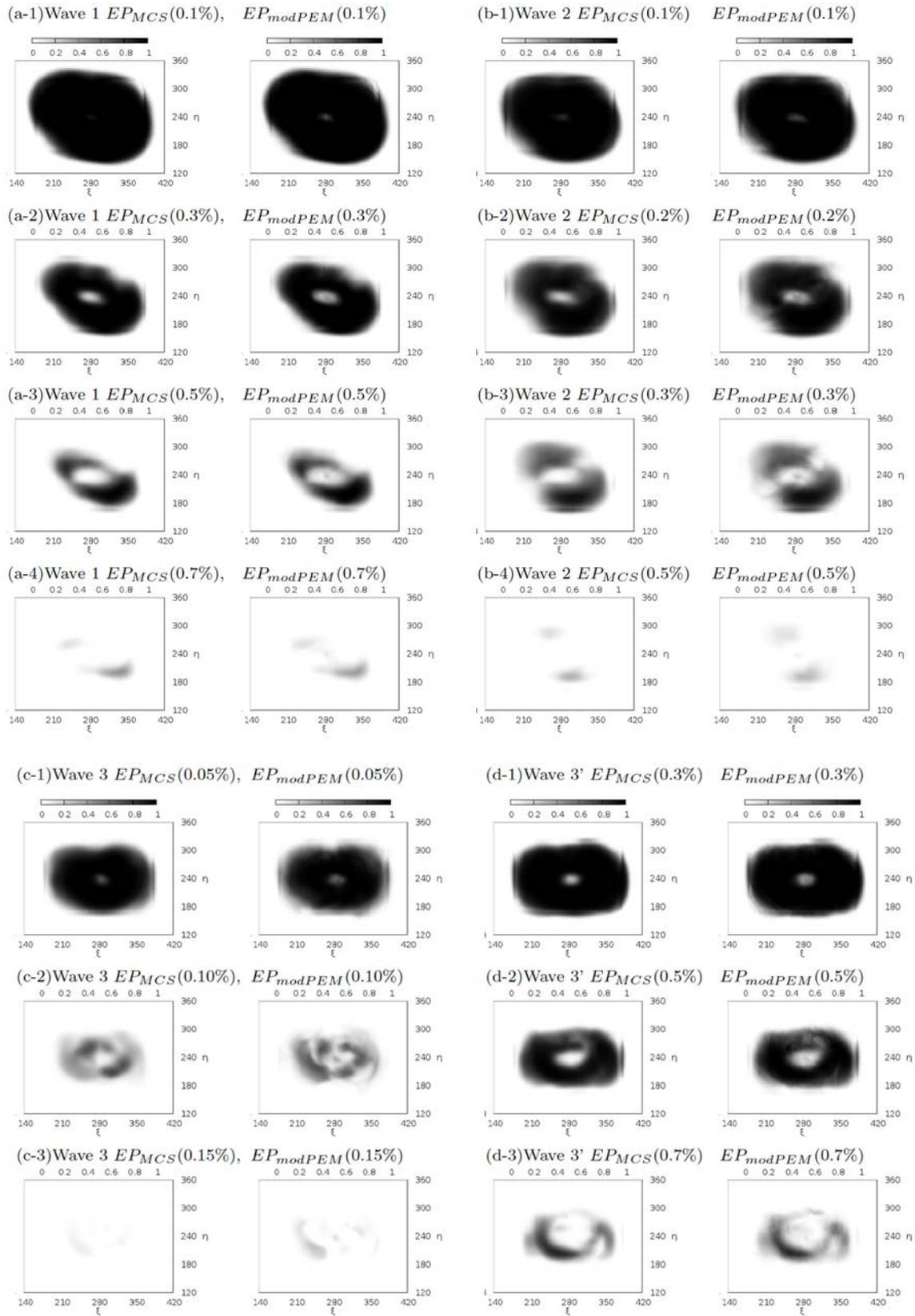


図 8.9. 推定された  $\varepsilon_{max}$  の超過確率の比較。

## 8.4 利活用方法論③社会科学系シミュレーションとの連成

大規模数値解析を利用した都市地震応答シミュレーションでは、地震動の理学系数値解析手法、構造物応答の工学系数値解析手法、そして被害対応の社会科学系数値解析手法を統合することが必要である。各数値解析は独自の時間・空間分解能や精度・信頼度を持つ。このことを「粒度が異なる」と称すれば、シミュレーションの統合に際しての最大の課題は各種数値解析の粒度が異なる点にあるといえる。IES の活用例として、空間分解能に限り粒度が異なる数値解析の統合を検討するための方法論として、建築建物地震応答解析-交通流シミュレーション間の統合、被災後経済活動シミュレーションとの連成について報告する。

### 8.4.1 検討対象領域および主な解析条件

災害発生後の都市の交通流や経済活動を評価するためにはある程度広範囲の領域を対象とする必要がある。このことを踏まえて阪神5市（西から神戸市、芦屋市、西宮市、尼崎市、大阪市）を検討対象とした。対象地震動シナリオは内閣府中央防災会議提供の南海トラフ陸側ケースとした。この工学基盤波は5km メッシュごとに提供されているため、各メッシュ内では同一の波形入力とした。領域内には約 127 万棟の建物が存在し、GIS 情報や住宅地図情報に基づきモデル化されたものである。地盤モデルは J-SHIS より全国 250 m メッシュで提供されている AVS30 を表層 30 m のせん断波速度に与えた表層-基盤の 2 層構造とした。なお、SAA モジュールの粒度を SRA モジュールのそれと統一するため、メッシュごとに与えられた物性は建物位置で補間した。図 8.10 に各建物位置における AVS30 と SAA モジュール解析例のうち各建物位置の地表最大加速度を示す。

道路データは、日本測地系座標に基づくデジタル道路地図情報（日本デジタル道路地図協会）に含まれているノード座標・リンク情報（ノード間の結合情報）、および道路幅区分を利用した。対象領域における解析モジュールごとのデータ解像度（粒度）および座標系を、表 8.3 に明記する。

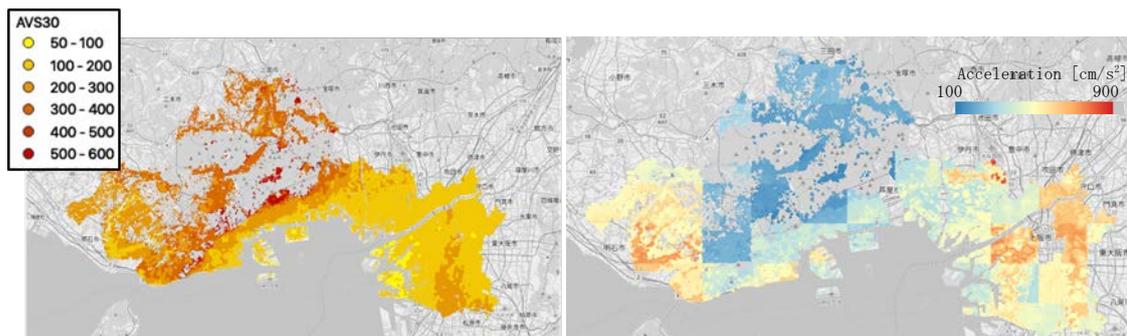


図 8.10. AVS30 (left) and maximum response acceleration on ground surface obtained through SAA module (right).

表 8.3. Example of data resolution for each analysis module.

Module	Object	Number of objects	Coordinate system
SRA	Building, houses	1,266,706	EPSG 4612 (2447, 2448)
Traffic simulation	Links (Nodes)	495,595 (264,212)	EPSG 4301

## 8.4.2 数値解析結果の統合・連成のための方法論

### (1) 経済活動シミュレーションとの連成

SAA モジュールによる解析結果からは建物位置ごとの地表震度が得られる。震度と被害については種々のフラジリティ曲線が提案されており、これらと併せて利用することで被害による経済への影響度合いを定量的に評価することが可能となる。また、SRA モジュールによる解析結果からは各建物の各層変位時刻歴、加速度時刻歴や層間変形角が得られる。このうち建物の被災度との相関が高い最大層間変形角を利用し、データ変換により被災度の指標に変換してから、建物位置情報と併せたフォーマットを作成することで、これらの情報を経済活動シミュレーションの入力情報として活用することが可能である。ただし、最大層間変形角から被災度への換算(データ変換)に関しては検討の余地がある。こうした関数は、将来的にも経験データの蓄積を反映出来るものとしておくことが望ましい。

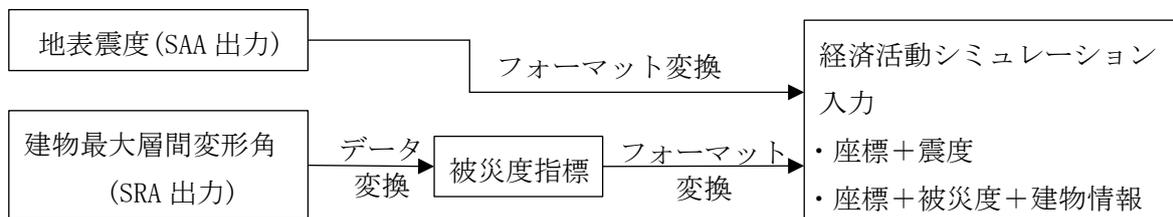
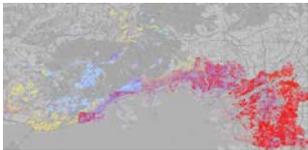
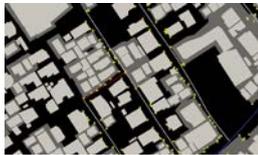
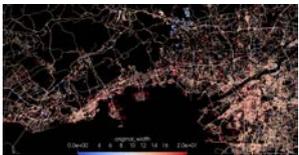


図 8. 11. 経済活動シミュレーションとの連成。

### (2) 交通流シミュレーションとの連成

建物地震応答解析-交通流解析間の統合にあたり、前者で構造物の損傷に伴う落下物や瓦礫流出による影響範囲を推定し、これに道路情報(ノード座標とそのリンク、および道路幅)を加味することで後者の解析で利用可能なリンクごとの道路閉塞幅を算出するまでの方法を開発した。具体的なプロセスを表 8.4 に整理する。これらを概説すると、まず SRA モジュールの入力データから建物ポリゴンを生成し(Step 1)、必要な道路情報(ノード・リンク、道路幅区分)を追加する(Step 2)。続いて SRA モジュールで建物の最大層間変形角  $\theta_{max}$  を算出し(Step 3)、建物損壊による影響幅  $W_a$  を算出する(Step 4)。データアクセスの効率化を考慮したベクトル演算により各建物ポリゴンを影響幅  $W_a$  の分だけ拡張した損壊影響範囲ポリゴンを生成(Step 5)、同ポリゴンの端部座標と道路中心との最短距離をリンクごとに算出し(Step 6)、道路幅情報から求めた最短距離を減じることで道路残存幅を計算する(Step 7)。最後に、全領域における各リンクの最小残存幅を、リンク ID、リンク座標、元道路幅とともに出力ファイルに保存・可視化する(Step 8)。

表 8.4. Integration process between output from SRA analysis and input of traffic simulation.

Step 1)	Step 2)	Step 3)	Step 4)
Generation of polygons based on residential maps 	Adding information of nodes, links and width of roads 	Calculation of maximum inter-story drift angle ( $\theta_{max}$ ) 	Calculation of average blockage width for corresponding $\theta_{max}$  $Wa = f(Hs, \theta_{max})$ where Wa : Average blockage width Hs : Building height
Transformation of blockage width into new polygon 	Calculation of min. distance (polygon-road) 	Conversion of min. distance to remaining road width 	Writing output 

### 8.4.3 異粒度・異種データの統合における課題の抽出

異粒度・異種データを利用する数値解析間の統合における主な課題を以下に挙げる。

#### a) 座標系の違いに起因する課題の例

建物形状データは通常、緯度経度座標で与えられているが、建物のモデル化およびその応答評価時に相対的な距離を扱う SRA モジュールでは計算の利便性から投影座標系として平面直角座標系を適用している。他方、広範囲の位置情報を取り扱う交通流解析では緯度経度座標系が主に利用される。このため、閉塞領域—道路間の距離計算(Step 6)においては、距離計算にかかる時間とデータ変換時間を考慮した座標系選択と、変換手順の工夫が必要となる。さらに、対象領域によっては平面直角座標系が複数混在することにも注意を要する。

#### b) 粒度（空間分解能）の違いに起因する課題の例

Step 6 および 7 は、約 127 万の建物ポリゴンデータから約 50 万のリンクデータへのデータ変換に相当する。このとき、上記①の座標系変換のみならず全建物に対する建物最近傍リンクの探索を行う必要がある。この計算量は対象領域の広さに比例して増大し、通常の方法では膨大な計算回数を要する。ここでは再近傍探索に kd-tree を適用して計算時間の低減を咨っている。

#### c) 異種データの変換に起因する課題の例

解析間の統合では、ある解析出力をある解析入力に翻訳するための関数が必要となり、この設定は統合結果の信頼性に直結する。例えば Step 4、5 における影響幅  $Wa$  の算出に関しては試験的に  $\theta_{max}$  と各建物高  $Hs$  から平均的な  $Wa$  を計算する単純な関数を仮定しているが、問題の複雑性あるいは統計データの不足等から明確な関数化が困難な場合は少なくない。統合結果の信頼性を担保するにあたり、必要に応じた関数の追加変更が容易であるような柔軟なコード設計が肝要である。

#### 8.4.4 おわりに

大規模数値解析を利用した都市地震応答シミュレーションにおいて粒度の異なる構造物応答の工学系数値解析と被害対応の社会科学系数値解析を統合するための具体的方法を提示し、その課題を明らかにした。得られた課題を解決するためのコード、膨大なデータ変換における人為的エラーの低減や検出を可能とするコードの設計を引き続き進める予定である。

#### 参考文献

- [1] Fei Kang, Shaoxuan Han, Rodrigo Salgado, Junjie Li, System probabilistic stability analysis of soil slopes using Gaussian process regression with Latin hypercube sampling, *Computers and Geotechnics*, Vol.63, pp.13–25, 2015.
- [2] Dian-Qing Li, Shui-Hua Jiang, Zi-Jun Cao, Wei Zhou, Chuang-Bing Zhou, Li-Min Zhang, A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties, *Engineering Geology*, Vol.187, pp. 60–72, 2015.
- [3] 大竹雄, 本城勇介, 地盤構造物設計の不確実性寄与度分析と設計の観点からみた地盤工学の課題, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.72, No.4, P.310-226, 2016
- [4] 小島紘太郎, 藤田皓平, 竹脇出, 地震動を受ける構造物—杭—地盤連成系の地盤特性の不確実性を考慮したロバスト性解析, 第 63 回理論応用力学講演会, 2014.
- [5] 畑明仁, 地盤物性の不確実性を考慮した地中構造物の損傷確率評価法に関する研究, 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻博士課程学位論文, 2015.
- [6] 地盤工学会 HP, 全国電子地盤図の作成と利用に関する研究報告書, 全国電子地盤図の作成と利用に関する研究委員会, 2015. (<https://www.geo-stn.bosai.go.jp>)
- [7] 内閣府 HP, 南海トラフ巨大地震モデル検討会, 南海トラフの巨大地震モデル検討会において検討された震度分布・浸水域に係るデータ提供について
- [8] 佐藤泰生, 弾性波動論, 1978.
- [9] 赤穂昭太郎, カーネル多変量解析 非線形データ解析の新しい展開, 岩波書店, 2015.
- [10] Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J., , “A Hybrid Multiresolution Meshing Technique for Finite Element Three-Dimensional Earthquake Ground Motion Modeling in Basins Including Topography,” *Geophysical Journal International*, 177, pp. 1221–1232, 2009.
- [11] Rosenblueth E., Point estimate for probability moments, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, Vol. 72, No. 10, pp.3812-3814, 1975.
- [12] Harr, M. E., Probability estimate for multivariate analysis, *Appl. Math. Model.*, Vol.13, No.5, pp.313-318, 1989.
- [13] Li, K. S., Point estimate method for calculating statistical moments, *J. Eng. Mech.*, Vol.118, No.7, pp.1506-1511, 1992.
- [14] Chang, C. H., Thung, Y. K., and Yang, J. C., Evaluation of probability point estimate methods, *Appl. Math. Model.*, Vol.19, No.2, pp.95-105, 1995.
- [15] Rosenblueth E., Point estimate for probability, *Appl. Math. Model.*, Vol.5, pp.329-335, 1981.

## ⑨統合的予測システムの実用化

本年度の統合的予測システムの実用化に関する業務の目標は、1) 統合的予測システムの実用化に向けて、行政・防災研究機関・防災コンサルティング企業と意見交換を継続すること、2) 開発された数値解析コンポーネントを使った地震シミュレーションの利用を進めること、の二点である。具体的な行政・防災コンサルティング企業は、内閣府防災と内閣府防災から業務発注を受けている防災コンサルティング企業である。地震シミュレーションの利用を進める具体的な数値解析コンポーネントは、地震波動伝播の数値解析コンポーネントである。

1) に関しては、昨年度に引き続き、行政・防災コンサルティング企業と、統合的予測システムの実用化に向けて、意見交換を介して、現状の課題を分析してきた。昨年度、行政・防災研究機関・防災コンサルティング企業は統合的予測システムそのものの有用性は理解するものの、統合的予測システムのオペレーション（都市の解析モデル構築、統合的予測システムの実行、予測結果の整理）が決して容易でないことが指摘された。この種の問題の解決には、ユーザフレンドリーなインターフェイスを研究開発することが王道である。その第一歩として、本年度、防災コンサルティング企業の技術者2名を技術研究員として雇用し、統合的予測システムのオペレーションを実行させるとともに、オペレーションのボトルネックの抽出・分析を行ってもらった（勿論、オペレーションの実行結果は本課題の研究成果ともなる）。このようにして抽出・分析されたオペレーションのボトルネックは、インターフェイスの具体的な仕様を検討する際、十分な考慮が必要な事項となる。なお、新たな都市に対し、解析モデル構築の試行にも協力してもらい、都市情報を使った各種解析手法の解析モデルが（研究レベルのみならず）実務レベルで構築可能であることを示した。

2) に関しては、昨年度、実行した巨大地震の地震動の予測と再現のシミュレーションの分析を行った（相模トラフ地震の予測と熊本地震の再現）。これは、内閣府防災の発注で、防災コンサルティング企業が、一つの数値解析コンポーネントを使って実行したものである。一定の素養を持つ高級技術者であれば、高度な数値解析コンポーネントでもオペレーションが可能であることが確認され、本年度は、同種の数値解析コンポーネントのオペレーションを、昨年度とは別の防災コンサルティング企業の技術者に委ね、昨年同様、正しいオペレーション可能であることが確認された。

本年度、統合的予測システムの実用化に関して、大規模並列計算機を使う運用ではなく、大型計算サーバを使う運用に関して協議を継続した。大型計算サーバは、計算規模は小さくなるものの、その分、オペレーションは容易である。この利点を活かす統合的予測システムの利用の在り方が協議の焦点である。

## ⑩プロジェクトの総合的推進

プロジェクトの統合的推進では、1)ポスト「京」で実現する統合的予測システムに関して、開発と実用化の研究グループの間で、システムの性能や利用法等が共有できるようにすること、2)プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、進捗管理等のための会合を開催すること、3)外部有識者を招聘した諮問委員会から、本プロジェクトの進捗状況の把握・評価・改善提言・指導等を受けること、の3点を目的としている。また、プロジェクトで得られた成果については広報等を通じて積極的に公表し、今後の展開に資する、という広報活動も目的としている。

1)の開発と実用化の研究グループの間の情報共有に関しては、プロジェクト発足以来、実用化の研究者・技術者が開発の研究者と、必要に応じてフェイスツーフェイスでオペレーションを行うことで、十分な情報共有を行うことが継続された。

2)の進捗管理等のための会合に関しては、昨年と同様、効率性を重視した。プロジェクトに参加する研究者全体の連携を密にすることは必須であるが、運営に過度の労力を割くことは決して得策ではないからである。昨年度同様、研究者グループでの進捗管理等のための会合を定期的で開催する、という方針を堅持した。これは2月に一度の全体会議である（2018年5月10日、7月30日、9月14日、11月1日、2019年1月21日、3月4日）。昨年度に引き続き、サブ課題Aとサブ課題Bの連携のための定期的な会合を継続した。

3)諮問委員会に関しては、昨年同様、6か月に一度、開催した。本研究課題は防災関連の研究プロジェクトとしては比較的大規模なものであり、理学・工学・社会科学にまたがっている。このため、諮問委員会は下記の構成としている。

委員長	清野 純史	京都大学大学院工学研究科教授
委員	朝倉 康夫	東京工業大学環境・社会理工学院教授
	横田 崇	愛知工業大学工学部教授
	小林 広明	東北大学大学院情報科学研究科教授
	佐竹 健治	東京大学地震研究所教授

委員長・委員の専門は、固体地球科学・地震学・津波学、地震工学・交通工学・国土計画学、計算機科学・計算科学である。また、本課題で開発される統合的予測システムを社会実装する際、最大のユーザとなることが想定される国レベルの地震防災・減災の有識者でもある。

第1回の諮問委員会は2018年9月14日に開催された。本年度の研究計画を説明と約半期での進捗状況を説明した。主な指摘事項は、各種数値解析コンポーネントの性能の照査、交通障害シミュレーションと経済復旧シミュレーションの利用、計算機科学の観点からの成果、SC18での研究成果発表の内容、である。第2回の諮問委員会は2019年3月18日に開催された。本年度の研究成果を報告し、評価を受けた。5年連続でSCにおいて表彰された点は、計算科学の観点から高く評価された。3回目のGBファイナリストは特筆に値すると評価された。ポスト「京」計算機の開発も本格化したこともあり、本プロジェクト終了後の検討を具体化するよう、指摘・助言を受けた。

広報に関して、計算結果の可視化を重視し、計算科学研究機構に設置した可視化サーバー式をこの可視化に利用することを継続した。プロジェクトで得られた成果については、広報等を通じて積極的に公表し、今後の展開に資することを継続した。本プロジェクトのホームページと、昨年度から開始したSNSグループを介した公表である。この他、新たに和文・英文のパンフレットを作成した。これは本年度までの

成果の集大成である（2019年度は「京」の利用期間が限定される）。なお、計算結果の可視化は広報に重要であるものの、実都市を対象とするため、不特定多数が利用するホームページ・フェイスブックには公表できないことに配慮しなければならない。このため、一般を対象としたシンポジウムを含む会議等のみで可視化結果の動画を公表し、拡散を防ぐこととしている。

#### 4-3. 活動（研究会等）

##### ① 平成30年度成果発表会の開催（開催日：平成31年3月18日）

当研究についての平成30年度の研究成果発表会を開催した。本研究課題について、代表機関ならびに各分担機関の研究者から現在までの研究成果について、それぞれ発表され、参加者との質疑応答が行われた。ポスターセッションでは、本プロジェクトの研究者たちによる研究プレゼンテーションが実施された。

#### 4-4. 実施体制

業務項目	担当機関	担当責任者
統合的予測システムの開発	東京大学地震研究所 巨大地震津波災害予測研究センター	准教授 市村 強 准教授 マッデゲラト・ラリト
全球モデルを視野に入れた超 大規模解析モデル構築手法の 開発	東京大学地震研究所 巨大地震津波災害予測研究センター	准教授 市村 強 准教授 マッデゲラト・ラリト
先端都市情報の社会科学シミュレーションの利活用方法と実装の検討	東京大学生産技術研究所	准教授 関本 義秀
地震・津波の災害シナリオ多 様性の数値解析コンポーネン トの高度化(サブ課題A)	海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター	グループリーダー 堀 高峰
地震・津波の被害に関する数 値解析コンポーネントの高度 化(サブ課題A)	九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門	准教授 浅井 光輝
地震・津波災害時の交通に関 する数値解析コンポーネン トの開発(サブ課題B)	神戸大学大学院工学研究科	教授 井料 隆雅
地震・津波災害時の経済活動 に関する数値解析コンポーネ ントの開発(サブ課題B)	京都大学防災研究所 巨大災害研究センター	准教授 横松 宗太
地震災害に対する地盤～構造 物応答シミュレーションの高 度化とその利活用方法の検討 (サブ課題A)	東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系	助教 飯山 かほり
統合的予測システムの実用化	東京大学地震研究所 巨大地震津波災害予測研究センター	センター長・教授 堀 宗朗
プロジェクトの総合的推進	東京大学地震研究所 巨大地震津波災害予測研究センター	センター長・教授 堀 宗朗

## 様式第 2 1

## 学 会 等 発 表 実 績

(1) 委託業務題目：「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」

機関名：国立大学法人東京大学

## 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果 (発表題目、口頭・ポスター発表別)	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した 時期	国内・ 外の別
GPU を用いた地殻変動計算高速化手法と地殻構造の不確実性を考慮した逆解析への適用 (口頭)	山口拓真、藤田航平、市村強、堀高峰、堀宗朗、ラリス ウィジャラトネ	日本地球惑星科学連合	2018 年 5 月	国内
地下構造物の高詳細三次元地震応答解析のための、メッシュ生成手法及び高性能有限要素法の開発 (口頭)	藤田航平、勝島啓介、市村強、堀越将司、中島研吾、堀宗朗、マッデゲダラリス	地震工学シンポジウム	2018 年 12 月	国内
GPU による 3 次元有限要素解析の高速化と構造最適化問題への適用 (口頭)	山口拓真、藤田航平、市村 強、堀宗朗、ラリスウィジャラトネ	地震工学シンポジウム	2018 年 12 月	国内
大規模液状化解析のための超並列高速ソルバー開発に関する基礎研究」 (口頭)	日下部亮太、市村強、藤田航平、堀宗朗、Lalith Wijerathne	地震工学シンポジウム	2018 年 12 月	国内
Accelerating Low-Order Unstructured Finite Element Earthquake Simulation by Time-Parallel Computation on Recent HPC Architectures (口頭)	Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Takuma Yamaguchi, Muneo Hori, Lalith Maddegedara	Platform for Advanced Scientific Computing (PASC) Conference	2018 年 7 月	国外

Using Artificial Intelligence and Transprecision Computing for Accelerating Finite-Element Urban Earthquake Simulation (口頭)	Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Akira Naruse, Jack C. Wells, Thomas C. Schulthess, Tjerk P. Straatsma, Christopher J. Zimmer, Maxime Martinasso, Kengo Nakajima, Muneo Hori, Lalith Maddeggedara	The 1st R-CCS International Symposium	2019年 2月	国外
Developing a Model for Estimating the Home Return of Evacuees Based on the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami -Utilizing Mobile Phone GPS Big Data (口頭)	Ogawa, Y., Sato, T., Akiyama, Y., Shibasaki, R. and Sekimoto, Y.	EnviroInfo 2018	2018年 9月	国外
Estimation of the economic impact of large-scale flooding in the Tokyo metropolitan area (口頭)	Yang, S., Ogawa, Y., Akiyama, Y., Shibasaki, R. and Ikeuchi, K.	2018 IEEE International Conference on Big Data	2018年 12月	国外
Geospatial information and machine learning application in Japan (口頭)	Ogawa, Y., Sato, T., Akiyama, Y., Shibasaki, R. and Sekimoto, Y.	2018 International Conference on Geospatial Information Science	2018年 9月	国外
本社内取引データを用いた事業所間取引データの推定 (口頭)	小川芳樹, 秋山祐樹, 篠原豪太, 柴崎亮介, 関本義秀	第27回地理情報システム学会	2018年 9月	国内
荒川流域における大規模水害を対象とした経済的影響の推定 (口頭)	楊少鋒, 小川芳樹, 秋山祐樹, 柴崎亮介, 池内幸司	第28回地理情報システム学会	2018年 9月	国内
南海トラフ地震・津波を想定したサプライチェーンへの被害波及と復興シミュレーション (口頭)	小川芳樹, 秋山祐樹, 横松宗太, 関本義秀, 柴崎亮介	CSIS DAYS	2018年 11月	国内

荒川流域における大規模水害を対象とした経済的影響の推定（口頭）	楊少鋒, 小川芳樹, 秋山祐樹, 柴崎亮介, 池内幸司	CSIS DAYS	2018年 11月	国内
---------------------------------	-----------------------------	-----------	--------------	----

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した 時期	国内・ 外の別
A fast scalable implicit solver for nonlinear time-evolution earthquake city problem on low-order unstructured finite elements with artificial intelligence and transprecision computing	Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Akira Naruse, Jack C. Wells, Thomas C. Schulthess, Tjerk P. Straatsma, Christopher J. Zimmer, Maxime Martinasso, Kengo Nakajima, Muneo Hori, and Lalith Maddegedara	International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, pp. 627-637, 2018. (Gordon Bell Prize Finalist)	2018年 11月	国外
Development of Three-Dimensional Soil-Amplification Analysis Method for Screening for Seismic Damage to Buried Water-Distribution Pipeline Networks	Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Motoki Kazama, Susumu Ohno and Shingo Sato	Geosciences, vol. 8(5), pp. 170-183, 2018.	2018年 5月	国外
Development of Octree-Based High-Quality Mesh Generation Method for Biomedical Simulation	Keisuke Katsushima, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori and Lalith Maddegedara	Computational Science - ICCS 2018, ICCS 2018 Lecture Notes in Computer Science, vol. 10861, pp. 354-367, 2018.	2018年 6月	国外

Development of scalable three-dimensional elasto-plastic nonlinear wave propagation analysis method for earthquake damage estimation of soft grounds	Atsushi Yoshiyuki, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori and Lalith Wijerathne	Computational Science - ICCS 2018, ICCS 2018 Lecture Notes in Computer Science, vol. 10861, pp. 3- 16, 2018.	2018年 6月	国外
Viscoelastic Crustal Deformation Computation Method with Reduced Random Memory Accesses for GPU-based Computers	Takuma Yamaguchi, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Anne Glerum, Ylona van Dinther, Takane Hori, Olaf Schenk, Muneo Hori and Maddegedara Lalith	Computational Science - ICCS 2018, ICCS 2018 Lecture Notes in Computer Science, vol. 10861, pp. 31- 43, 2018.	2018年 6月	国外
A point-estimate based method for soil amplification estimation using high resolution model under uncertainty of stratum boundary geometry	Kahori Iiyama, Atsushi Yoshiyuki, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Hitoshi Morikawa, Muneo Hori	Soil Dynamics and Earthquake Engineering(in Press, <a href="https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.028">https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.028</a> ).	2019年 1月	国外
Estimation of Supply Chain Network Disruption of Companies Across the Country Affected by the Nankai Trough Earthquake Tsunami in Kochi City	Yoshiki Ogawa, Yuki Akiyama, Muneta Yokomatsu, Yoshihide Sekimoto, and Ryosuke Shibasaki	Journal of Disaster Research, vol.14(3), pp.508- 520, 2019.	2019年 3月	国外
ジオビッグデータを用いた多様なシナリオに基づく南海トラフ地震津波の人的被害推定—高知市周辺を対象として—	小川 芳樹, 秋山 祐 樹, 金杉 洋, 柴崎 亮 介	E-journal GEO, vol.13(1), pp.140- 155, 2018.	2018年 4月	国内

(2) 委託業務題目：「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」

(サブ課題A：地震・津波の災害シナリオ多様性の数値解析コンポーネントの高度化)

機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果 (発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した 時期	国内・ 外の別
Massively parallel stress chain characterization for billion particle DEM simulation of accretionary prism formation (ポスター)	M. Furuichi, D. Nishiura, T. Hori	SC18	2018年 11月	国外
Orientation of the SHmax in accretionary prisms from real-scale numerical sandbox experiments (口頭)	Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura, Arthur Bauville, Osamu Kuwano, Takane Hori, Hide Sakaguchi	日本地球惑星連合 大会 2018	2018年 5月	国内
Seamount induced stress state in accretionary prism from real-scale numerical sandbox experiments (ポスター)	Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura, Arthur Bauville and Takane Hori	AGU fall meeting 2018	2018年 12月	国外
Implementation of SPH and DEM for the PEZY-SC computer (口頭)	Hosono Natsuki, Furuichi Mikito	International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES 2019)	2019年 3月	国外
ヘテロジニアス・メニーコアデバイス 上で動作する粒子的流体数値計算手法 の実装と評価 (口頭)	細野七月,古市幹人	第23回計算工学講 演会	2018年 6月	国内
Efficient implementation and performance of SPH code on heterogeneous many-core processors towards energy efficient disaster simulation (口頭)	細野七月,古市幹人	日本地球惑星科学 連合 2018年大会	2018年 5月	国内

リアルスケール粉体シミュレーションによる地盤内部の応力鎖と断層の発達過程（口頭）	西浦泰介, 古市幹人 Arthur Bauville, 堀高峰, 桑野修, 阪口秀	粉体工学会 2018 年 度春期研究発表会	2018 年 5 月	国内
Application of a particle simulation for engineering problems（口頭）	Nishiura Daisuke	8th Japan-Korea Workshop on Computational Mechanics	2018 年 6 月	国内
Multibillion particle DEM to simulate centrifuge model tests of geomaterials（ポスター）	Nishiura Daisuke, Sakaguchi Hide, Yamamoto Shuichi	9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2018	2018 年 7 月	国外
ギガスケール個別要素法による数値地盤実験室の開発（口頭）	西浦泰介, 阪口秀, 山本修一, 樋口俊一	第 53 回地盤工学研 究発表会	2018 年 7 月	国内
大規模粒子法に基づく数値地盤実験室の開発（口頭）	山本修一, 樋口俊一, 西浦泰介, 阪口秀	土木学会平成 30 年 度全国大会	2018 年 8 月	国内
High performance computing of particle simulation method and its application for geophysical problems（口頭）	西浦泰介, 古市幹人	名古屋大学 地球惑 星物理学セミナー	2018 年 7 月	国内
粒子系シミュレーションの高速化と地盤力学問題への応用（口頭）	西浦 泰介	KOBE HPC サマ ースクール	2018 年 8 月	国内
世界最大の個別要素法を用いた砂箱シミュレーション～断層地盤内部の応力状態と円弧状地形の関係～（口頭）	西浦 泰介	日本学術会議第 8 回計算力学シンポ ジウム	2018 年 12 月	国内
QDEM-FEM によるバラスト軌道の振動特性と沈下挙動の解析（口頭）	西浦泰介, 相川明, 坂井宏隆, 阪口秀	土木学会平成 30 年 度全国大会	2018 年 8 月	国内
S P H-D E M 連成解析による防波堤の付加的な耐津波対策の評価に関する研究（口頭）	岩本哲也, 中瀬仁, 清野純史, 西浦泰介, 宮本順司	土木学会平成 30 年 度全国大会	2018 年 8 月	国内
QDEM-FEM 連成手法によるバラスト軌道の衝撃応答解析（口頭）	西浦泰介, 相川明, 坂井宏隆, 阪口秀	日本機械学会第 31 回計算力学講演会 (CMD2018)	2018 年 11 月	国内

粒子法による大規模津波遡上解析に向けた拡張スライスグリッド法（口頭）	仲矢直樹,浅井光輝, 小笠原圭太, 古市幹人,西浦 泰介	日本機械学会第 31 回計算力学講演会 (CMD2018)	2018 年 11 月	国内
Numerical simulation of crustal deformation after an M9-class earthquake based on nonlinear viscoelastic finite element modeling（口頭）	Ryoichiro Agata, Sylvain D. Barbot, Kohei Fujita, Mamoru Hyodo, Takeshi Iinuma, Ryoko Nakata, Tsuyoshi Ichimura, and Takane Hori	CoMFoS (Continuum Mechanics Focusing on Singularities) 2018	2018 年 6 月	国内
The role of the power-law viscoelastic flow and fault friction and in post-earthquake deformation after the 2011 Tohoku-Oki earthquake（口頭）	Ryoichiro Agata, Sylvain D. Barbot, Kohei Fujita, Mamoru Hyodo, Takeshi Iinuma, Ryoko Nakata, Tsuyoshi Ichimura, and Takane Hori	日本地球惑星科学 連合 2018 年大会	2018 年 5 月	国内
Toward tsunami damage prediction based on high performance computing（口頭）	Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura and Takane Hori	日本地球惑星科学 連合 2018 年大会	2018 年 5 月	国内
大規模非線形粘弾性有限要素計算に基づいた地震サイクルシミュレーション（口頭）	縣亮一郎,Sylvain Barbot,藤田航平,兵 藤守,中田令子,飯沼 卓史,市村強,堀高峰	第 23 回計算工学講 演会	2018 年 6 月	国内
有限要素計算を用いた豊後水道の長期的スロースリップサイクルシミュレーション（口頭）	縣亮一郎,堀高峰,藤 田航平,兵藤守,市村 強	地震学会 2018 年度 秋季大会	2018 年 10 月	国内
Quasi-static slow-slip cycle simulation based on finite element modeling（口頭）	Ryoichiro Agata, Takane Hori, Kohei Fujita, Hyodo Mamoru, Tsuyoshi Ichimura	American Geophysical Union Fall Meeting 2018	2018 年 12 月	国外

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した 時期	国内・ 外の別
Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake	Ryoichiro Agata, Sylvain D. Barbot, Kohei Fujita, Mamoru Hyodo, Takeshi Iinuma, Ryoko Nakata, Tsuyoshi Ichimura, and Takane Hori	Nature Communications, volume 10, Article number: 1385 (2019). DOI : <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-019-08984-7">https://doi.org/10.1038/s41467-019-08984-7</a>	2019年 3月	国外
Detectability analysis of interplate fault slips in the Nankai subduction thrust using seafloor observation instruments	Ryoichiro Agata, Takane Hori, Keisuke Ariyoshi and Tsuyoshi Ichimura	Marine Geophysical Research, 2019. DOI : <a href="https://doi.org/10.1007/s11001-019-09380-y">https://doi.org/10.1007/s11001-019-09380-y</a>	2019年 2月	国外
Arcuate stress state in accretionary prisms from real-scale numerical sandbox experiments	Furuichi Mikito, Daisuke Nishiura, Osamu Kuwano, Arthur Bauville, Takane Hori, Hide Sakaguchi	Scientific Reports, volume 8, Article number: 8685 (2018). DOI : <a href="https://doi.org/10.1038/s41598-018-26534-x">https://doi.org/10.1038/s41598-018-26534-x</a>	2018年 6月	国外
Multibillion particle DEM to simulate centrifuge model tests of geomaterials	Nishiura Daisuke, Sakaguchi Hide , Yamamoto Shuichi	Proceedings of the 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2018, volume 1, pp.227-232.	2018年 7月	国外

JAMSTEC 発の最先端離散要素法 (DEM) 技術に迫る!	阪口秀, 西浦泰介	精密工学会誌, 巻数 84, 号数 7, pp.589-592,2018.	2018 年 7 月	国内
粒子法またはメッシュフリー法	西浦泰介	機械工学年鑑 2018, pp.16-19	2018 年 8 月	国内
微粒子スラリーのケーキろ過シミュレーション	吉田友一, 村中絵美, 下坂厚子, 白川善幸, 日高重助, 西浦泰介, 阪口秀	化学工学論文集 44(3), pp.166-176, 2018.	2018 年 5 月	国内

(3) 委託業務題目：「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」

(サブ課題A：地震・津波の被害に関する数値解析コンポーネントの高度化)

機関名：国立大学法人九州大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果 (発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した 時期	国内・ 外の別
Tsunami Run-up Simulation Based on Crustal Deformation Simulation by FEM (口頭発表)	Naoki Nakaya, Mitsuteru Asai, Ryoichiro Agata, Takane Hori and Toshitaka Baba	7th International Conference on Protection of Structures against Hazards, Hanoi, Vietnam.	2018年 10月	国外
Improvements on Highly Viscous Fluid Simulation Using the SPH Method (口頭発表)	Daniel Shigueo Morikawa, Mitsuteru Asai	7th International Conference on Protection of Structures against Hazards, Hanoi, Vietnam.	2018年 10月	国外
Improvements on Highly Viscous Fluid Simulation using a Particle Method and Its Application to Landslide Problems (口頭発表)	Daniel Shigueo Morikawa, Mitsuteru Asai	13th World Congress on Computational Mechanics, New York, USA.	2018年 7月	国外
A physical simulation based earthquake scenario and a multi- scale Tsunami simulation (口頭発表)	Mitsuteru Asai, Naoki Nakaya, Ryoichiro Agata, Takane Hori, Toshitaka Baba	13th World Congress on Computational Mechanics, New York, USA.	2018年 7月	国外
Improvements on Highly Viscous Fluid Simulation using a Particle Method (口頭発表)	Daniel Sihgueo Morikawa, Mitsuteru Asai	4th Computational Design in Engineering, Changwon, Korea	2018年 4月	国外
Natural disaster simulation by as multi-physics particle simulation (セミプレナリー講演)	Mitsuteru Asai	4th Computational Design in Engineering, Changwon, Korea	2018年 4月	国外

粒子法による大規模津波遡上解析に向けた拡張スライスグリッド法 (口頭発表)	仲矢直樹, 浅井光輝, 小笠原圭太, 古市幹人, 西浦泰介	第31回計算力学講演会, 徳島.	2018年 11月	国内
BEMによる地殻変動解析に準ずる津波遡上解析(口頭発表)	仲矢直樹, 浅井光輝, 縣亮一郎, 堀高峰, 馬場俊孝	第23回計算工学講演会, 名古屋.	2018年 6月	国内
Improvements on Highly Viscous Fluid Simulation Using a Particle Method(口頭発表)	Daniel Shiguelo Morikawa, 浅井光輝, 一色正晴	第23回計算工学講演会, 名古屋.	2018年 6月	国内

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した 時期	国内・ 外の別
安定化 ISPH 法の理論的解釈 - エネルギー最小化問題からの安定化項の導出 -	井元佑介, 浅井光輝	土木学会論文集 A2(応用力学)特集号, Vol.74, No.2, I_159-I_166, 2019.	2019年 1月	国内
Improvements of highly viscous fluid simulation using a fully implicit SPH method	Daniel Morikawa, Mitsuteru Asai, Nur' Ain Idris, Yusuke Imoto, Masaharu Isshiki	Journal of Computational Particle Mechanics, <a href="https://doi.org/10.1007/s40571-019-00231-6">https://doi.org/10.1007/s40571-019-00231-6</a>	2019年 3月	国外

(4) 委託業務題目：「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」

(サブ課題B：地震・津波災害時の交通に関する数値解析コンポーネントの開発)

機関名：国立大学法人神戸大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果 (発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した 時期	国内・ 外の別
災害復旧期における情報と需要の不確 実性を考慮した最適在庫配送計画 (ポ スター発表)	河瀬理貴 井料隆雅 浦田淳司	第16回 ITS シンポ ジウム 2018, 同志 社大学	2018年 12月	国内
Spatio-Temporal Analysis for Understanding Traffic Demand after the 2016 Kumamoto Earthquake using Mobile Usage Data (口頭)	Junji Urata Yasushi Sasaki Takamasa Iryo	IEEE ITSC 2018, Maui, Hawaii	2018年 11月	国外
Development of a Traffic Demand Simulator under a Disaster Restoration Period (口頭)	Junji Urata Takamasa Iryo Riki Kawase	ISTS & IWTDCS 2018, 愛媛大学	2018年 8月	国内
Fast calculation of dynamic traffic assignment by parallelised network loading algorithm (口頭)	Takamasa Iryo Junji Urata Kazuki Fukuda Genaro Peque Jr. Lalith Wijerathne Wasuwat Petprakob	ISTS & IWTDCS 2018, 愛媛大学	2018年 8月	国内
On the implementation of high performance computing extension for day-to-day traffic assignment (口頭)	Wasuwat Petprakob Lalith Wijerathne Takamasa Iryo Junji Urata Kazuki Fukuda	ISTS & IWTDCS 2018, 愛媛大学	2018年 8月	国内

Simulating traffic congestions in a city after a major earthquake using a large number of demand patterns (口頭)	Takamasa Iryo Junji Urata Kazuki Fukuda Riki Kawase Lalith Wijerathne Wasuwat Petprakob	WCCM 2018, NewYork, USA	2018年 7月	国外
Preprocessing parallelization for the ALT-algorithm (口頭)	Genaro Peque Jr. Junji Urata Takamasa Iryo	ICCS 2018, Wuxi, China	2018年 6月	国外
災害復旧期における情報の不確実性を考慮した在庫配送計画モデルの提案 (ポスター発表)	河瀬理貴 井料隆雅 浦田淳司	第57回土木計画学 研究発表会, 東京 工業大学	2018年 6月	国内
大規模かつ動的な旅行時間データの効率的な圧縮 (ポスター発表)	原田日郎 Genaro Peque, Jr. 浦田淳司 井料隆雅	第57回土木計画学 研究発表会, 東京 工業大学	2018年 6月	国内
熊本地震復旧期における滞在人口分布の時空間分析 (口頭)	佐々木泰 浦田淳司 井料隆雅	第57回土木計画学 研究発表会, 東京 工業大学	2018年 6月	国内
社会的相互作用を考慮した行動モデルの数値シミュレーション手法の開発 (口頭)	浦田淳司 井料隆雅	第57回土木計画学 研究発表会, 東京 工業大学	2018年 6月	国内
A Link-Based Probit Model for Dynamic Traffic Assignment (口頭)	Genaro Peque Jr. Junji Urata Takamasa Iryo	DTA 2018, HongKong	2018年 6月	国外

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

無し。

### (5) 委託業務題目：「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」

(サブ課題B：地震・津波災害時の経済活動に関する数値解析コンポーネントの開発)

機関名：国立大学法人京都大学

## 1. 学会等における口頭・ポスター発表

無し。

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

無し。

(6) 委託業務題目：「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」

(サブ課題A：地震災害に対する地盤～構造物応答シミュレーションの高度化とその利活用方法の検討)

機関名：国立大学法人東京工業大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果 (発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した 時期	国内・ 外の別
伝達関数に着目した入力パラメタに依存するモデル応答の統計的性質に関する検討 (ポスター発表)	飯山かほり	第15回地震工学シンポジウム PS1-01-35, pp. 1-8, 2018.	2018年 12月	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した 時期	国内・ 外の別
A point-estimate based method for soil amplification estimation using high resolution model under uncertainty of stratum boundary geometry	Iiyama, K., Yoshiyuki, A., Fujita, K., Ichimura, T., Morikawa, H. and Hori, M.	Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (open access) <a href="https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.028">https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.028</a> , pp.1-11, 2019.1.	2019年 1月	国外

「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」  
実施計画

平成29年12月21日  
国立大学法人東京大学  
堀 宗朗

【改定履歴】

版	項目	ページ	主な改定内容(概要)
1.0 (2016.5.27)			制定
2.0 (2017.12.25)	-	-	中間評価指摘事項を受け、版数変更して対応。
	改定履歴	-	
	表紙	-	変更日付に対応したことによる。
	目次	i	第4章を追加したことによる。
	1.(2)	1	シミュレーション対象を変更したことによる。(中間評価に係わる報告書に関してご連絡済み(平成29年8月7日))
	1.(3)	2	中間評価の結果に対応したことによる。
	1.(3)	2	シミュレーション対象を変更したことによる。(中間評価に係わる報告書に関してご連絡済み(平成29年8月7日))
	1.(3)	2	中間評価の結果に対応したことによる。
	1.(5)	4	中間評価の結果に対応したことによる。
	1.(5)	4	中間評価の結果に対応したことによる。
	1.(5)	4	シミュレーション対象を変更したことによる。(中間評価に係わる報告書に関してご連絡済み(平成29年8月7日))
	1.(5)	4	中間評価の結果に対応したことによる。
	1.(5)	5	中間評価の結果に対応したことによる。
	1.(5)	5	シミュレーション対象を変更したことによる。(中間評価に係わる報告書に関してご連絡済み(平成29年8月7日))
	2-2.(2)	13	シミュレーション対象を変更したことによる。(中間評価に係わる報告書に関してご連絡済み(平成29年8月7日))
	2-2.(3)	13	中間評価の結果に対応したことによる。

	2-2.(3)	13	中間評価の結果に対応したことによる。
	2-2.(3)	14	シミュレーション対象を変更したことによる。(中間評価に係わる報告書に関してご連絡済み(平成29年8月7日))
	2-2.(3)	14	中間評価の結果に対応したことによる。
	2-2.(3)	14	シミュレーション対象を変更したことによる。(中間評価に係わる報告書に関してご連絡済み(平成29年8月7日))
	3.	18 ~21	中間評価の結果への対応を追記したことによる。
3.0 (2018.5.28)	1.(6)	6	再委託先機関に新たに東京工業大学を加えたことによる。
	2-3.	16	再委託先機関に新たに東京工業大学を加えたことによる。
	2-3.	17	再委託先機関に新たに東京工業大学を加えたことによる。



## 1. 実施概要

### (1) 目的・意義

2011年東日本大震災の教訓の一つは、地震・津波の想定に限界があったことである。このため、過去の経験を基とした従来の予測手法に代わる、新しい災害と被害の予測手法が必要とされている。HPCI 戦略プログラム分野3「防災・減災に資する地球変動予測」の地震・津波課題では、大規模数値計算を用いた予測手法の構築に取り組み、一定の成果を上げつつある。本研究は、更なる大規模化・高速化と機能の拡張を果たすことで、この予測手法を統合的予測システムに昇華することを目的とする。統合的予測システムは、災害・被害の全過程に対し、さまざまな数値解析コンポーネントを連成させた大規模数値計算シミュレーションを行うシステムである。科学的な合理性が高く、従来の手法では予測不可能な地震・津波の複合災害に対しても、この予測システムが有効であることが期待されている。

### (2) 研究開発内容

災害被害の過程は、1)地震・津波の災害発生過程、2)地震・津波が引き起こす被害発生過程、3)被害が引き起こす社会経済活動の低下回復過程、に大別できる。1)の災害発生過程では、数値解析コンポーネントの大規模化・高速化を進める。特に、capability computingとして、テラ自由度のモデルを解析する超大規模非線形有限要素法を開発する。詳細な災害被害予測に資する十分な時空間分解能を得るためには、現状のギガ自由度を超えたテラ自由度の地殻・地盤モデルの数値解析が必要である。2)の被害発生過程では、統合的予測システムの機能拡張のため、新たに交通ネットワーク・ライフライン等の社会基盤施設の数値解析コンポーネントを組み込む。建築建物と社会基盤施設のシミュレーションによって、より包括的な一次被害予測を可能とする。3)の社会経済活動の低下回復過程に関しては、群集避難の他、交通障害と経済活動の数値解析コンポーネントを統合的予測システムに加える。

地震・津波のそのものの不確定性は別として、構造物の特性や都市の社会経済活動には多岐多様の不確定要因がある。この不確定要因に対処するため、統合的予測システムはcapacity computingを実行する。具体的には、複数の地震シナリオを考える他、各々の地震シナリオにも不確定要因を様々に変えた多数の被害過程と対応過程のシミュレーションを行う。本研究では、首都直下地震と南海トラフの巨大地震を対象とする。

研究開発内容をcapability computingとcapacity computingの観点から整理すると、前者は大規模非線形有限要素法の開発と実行、後者は統合的予測の開発と実行である。大規模非線形有限要素法では500億自由度モデルを使った非線形解析、統合的予測では50程度の地震シナリオに対する理工学のシミュレーションと10,000程度の災害被害シナリオに対する社会科学のシミュレーションを実行する（同じ地震でも、都市モデルの不確定性や昼夜・季節の違いで被害が異なるため、地震シナリオと災害被害シナリオは区別する）。理学・工学・社会科学の数値解析コンポーネントは、計算速度・計算規模の点で高い性能が出るように、「京」上での十分なチューンアップを行う。その上で、首都直下地震と南海トラフ地震を対象とした、東京と大阪の地震・津波のシミュレーションを行う。大阪のシミュレーションでは交通・経済のシミュレーションも連成する。

本研究では統合的予測システムの実用化も進める。具体的には、内閣府・自治体等が持つ計算機環境を考慮し、統合的予測システムの数値解析コンポーネントの一部をその防災システムに実装することである。また、本研究で実行する多数シナリオのシミュレーションは、不確定性を考慮した災害被害情報とし

て内閣府・自治体等での有効利用が期待できるため、シミュレーション結果の実用も進める。

### (3) 目標・期待される成果

本研究は、ポスト「京」でのテラ自由度モデル（1兆億自由度モデル）の解析と10,000程度の被害シナリオの理工学・社会科学の統合シミュレーションを目標としている。本研究のアウトプット成果は統合的予測システムの理工学・社会科学の各数値計算コンポーネントとそれを使ったシミュレーション結果であり、アウトカム成果は開発された数値解析コンポーネント単体や統合的予測システム全体を国等が利用するという実用化を念頭に置く。以下、具体的な目標と成果を整理する。

#### アウトプット成果

・平成29年度終了時：首都直下地震を対象とした250億自由度モデルでの地震解析と災害被害シミュレーション、1,000災害被害シナリオでの群集避難・交通障害・経済活動シミュレーションを実施する。山手線内の都市モデルを使い、1,000のシナリオで被害の幅を考慮するシミュレーションである。

・本格実施フェーズ終了時：南海トラフ地震を対象とした500億自由度モデルでの地震解析と災害被害シミュレーション、10,000災害被害シナリオでの群集避難・交通障害・経済活動シミュレーションを実施する。大阪市とその周辺の都市モデルを使い、10,000のシナリオで被害の幅を考慮するシミュレーションである。

・ポスト「京」運用開始5年後：テラ自由度モデルが実現する地震解析と災害被害予測シミュレーションを実施する。特に、南海トラフ地震では、その連動性を考慮し、地震シナリオの数も1,000を目安に増やす。10,000災害被害シナリオに対し、群集避難・交通障害・経済活動シミュレーションを実施する。東海地方（静岡～名古屋）の都市モデルを使い、地震の不確定性を1,000のシナリオで、被害の幅を10,000のシナリオで考慮するシミュレーションである。

発表論文に対し、数値目標を設定する。「情報科学技術分野」の発表の目標は、期間内合計の本数とする。サブ課題Aの数値目標は、査読付き論文20本（狭義10本、広義10本）、原著となる査読付き学会発表数24本（狭義10本、広義14本）、サブ課題Bの数値目標は、査読付き論文4本（狭義1本、広義3本）、原著となる査読付き学会発表数4本（狭義3本、広義1本）の計8本を目標として設定する。なお、狭義とは情報科学分野の学術誌への投稿論文、広義とは情報科学分野以外の学術誌であるが、計算科学に関する投稿論文、であることを意味する。

#### アウトカム成果

・ポスト「京」運用開始5年後：統合的予測システムの一部である地震解析が国レベル（中央防災会議の被害想定や地震調査研究推進本部の長期評価等）で利用されること、群集避難・交通障害・経済活動の社会科学のシミュレーションに基づく統合的予測の結果が社会に発信されることがアウトカム成果である。対象は南海トラフ地震であり、我が国の生産活動の中核と物流の大動脈を襲うこの地震に対し、交通障害と経済活動のシミュレーションの予測が果たす役割は大きいと考えている。

・ポスト「京」運用開始10年後：統合的予測システム全体が国・自治体レベルで利用されること、多数シナリオのシミュレーション結果を関係省庁等への発信することをアウトカム成果と考えている。

#### (4) 周辺領域への波及効果、課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけ

本研究で開発する主要な数値解析コンポーネントである非線形有限要素法は、高精度かつ高分解能な解析が要求される重要構造物の地震応答解析の利用も可能である。大規模数値計算を使う数値解析は、我が国のみならず世界の耐震設計を高度化することが期待される。また、有限要素法の大規模化・高速化には、マトリクス演算の高度化が必須である。テラ自由度のマトリクス演算は計算科学のこの分野の発展に寄与することが考えられる。

本研究は、被害の対応過程として社会科学のシミュレーションを実施する。これは、多岐多様の不確定なパラメータが含まれるため、精緻な計算をすればするほど計算量が爆発的に増加することが主な原因（「次元の呪い」）で、大規模数値計算の適用が難しいとされてきた。ポスト「京」の計算性能を活かした多数シナリオのシミュレーションによって、社会科学のシミュレーションに新機軸を打ち出すことを考えている。

(5) 年次計画

課題全体	中間目標(平成29年度)	首都直下地震を対象とした250億自由度モデルの地震解析 1,000 災害被害シナリオの被害対応シミュレーション(東京23区2時間の全道路交通量に相当する10万徒歩・自動車の避難、総走行量400万台kmの交通、全26業種中16業種の価格変動のある経済)
	最終目標(平成31年度)	南海トラフ地震を対象とした500億自由度モデルの50地震シナリオの地震解析 10,000 災害被害シナリオの被害対応シミュレーション(大阪府8時間の全道路交通量に相当する40万徒歩・自動車の避難、総走行量2,000万台kmの交通、複数のシナリオ下での、全26業種中16業種の価格変動のある経済およびマルチエージェントシステムを使った経済)

サブ課題名 (分担機関・責任者)	調査研究・準備研究フェーズ		本格実施フェーズ			
	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度
サブ課題A 地震・津波の災害被害予測の実用化研究(海洋研究開発機構・堀高峰)	<p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○テラモデル解析準備</li> <li>○シナリオ計算の大規模化対応</li> <li>○3次元津波計算コード高速化</li> <li>○社会基盤施設評価</li> </ul> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○GAMERA拡張</li> <li>○RSGDX&amp;3D-DYNアルゴリズム改良</li> <li>○SPH2次元動的負荷分散の実装</li> <li>○IES拡張</li> </ul>	<p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○テラモデル解析準備</li> <li>○シナリオ計算の大規模化対応</li> <li>○3次元津波計算コード高速化</li> <li>○社会基盤施設評価</li> </ul> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○GAMERA拡張</li> <li>○津波・構造連成の拡張</li> <li>○RSGDX&amp;3D-DYNアルゴリズム改良</li> <li>○SPH負荷分散手法高度化</li> <li>○IES拡張</li> </ul>	<p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○テラモデル解析準備</li> <li>○シナリオ計算の弾性不均質着手</li> <li>○3次元津波計算コード高速化</li> <li>○統合的予測準備</li> </ul> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○津波・地震計算</li> <li>○GF用GAMERA改良</li> <li>○SPH実験検証</li> <li>○首都直下地震シミュレーション</li> </ul>	<p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○テラモデル解析準備</li> <li>○シナリオ計算の弾性不均質対応</li> <li>○3次元津波計算コード高速化</li> <li>○統合的予測準備</li> </ul> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○津波・地震計算</li> <li>○GF用GAMERA改良</li> <li>○SPH3次元負荷分散実装</li> <li>○首都直下地震シミュレーション</li> </ul>	<p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○テラモデル解析準備</li> <li>○シナリオ計算粘弾性不均質着手</li> <li>○3次元津波計算コード高速化</li> <li>○統合的予測実行</li> </ul> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○津波・地震計算</li> <li>○粘弾性RSGDXコード開発</li> <li>○SPH超並列動的負荷分散高度化</li> <li>○南海トラフ地震シミュレーション</li> </ul>	<p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○テラモデル解析準備</li> <li>○シナリオ計算粘弾性不均質対応</li> <li>○3次元津波計算の実施</li> <li>○統合的予測実行</li> </ul> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○津波・地震計算</li> <li>○粘弾性RSGDXコード開発</li> <li>○SPH津波計算への適用</li> <li>○南海トラフ地震シミュレーション</li> </ul>

<p>サブ課題B 統合的予測のための社会科学シミュレーションの開発 (神戸大学・井料隆雅)</p>	<p>(目標) ○既存技術の調査開発と拡張 ○問題定式化に着手</p> <p>(実施内容) ○避難：MASの拡張の調査分析 ○交通：既存シミュレータ調査 ○経済：負のストック最適制御問題定式化</p>	<p>(目標) ○避難：既存モデルの拡張 ○交通・経済：仕様の確定とコード開発</p> <p>(実施内容) ○避難：MASの拡張(状況適合型意思決定の考慮) ○交通障害：シミュレータ仕様検討 ○経済活動：負のストック最適制御問題コード開発</p>	<p>(目標) ○避難：高知市規模の予測(避難阻害要因抽出) ○交通・経済：実装とコード開発</p> <p>(実施内容) ○避難：MASの実施(高知) ○交通：シミュレータ実装と並列化 ○経済：住宅再建問題と、企業の生産施設被害を考慮した最適生産問題のコード開発</p>	<p>(目標) ○避難：高知市規模での予測(悪条件下) ○交通：スケラビリティ確保(東京都23区2時間分程度) ○経済：コード開発</p> <p>(実施内容) ○避難：MASの実施(高知) ○交通：実行速度チューニング ○被災者の労働制約やサプライチェーンを考慮した、企業の最適生産問題とインフラ価値評価のコード開発</p>	<p>(目標) ○避難・交通：南海トラフ時の予測(大阪市程度の規模) ○経済：コード開発</p> <p>(実施内容) ○避難：MASの実施(大阪市) ○交通：シミュレーション実施(大阪市) ○経済：地域経済の均衡導出のコード開発</p>	<p>(目標) ○南海トラフ地震の社会科学シミュレーション(大阪市程度の規模)</p> <p>(実施内容) ○避難：MASの実施(大阪市) ○交通：シミュレーション実施(大阪市) ○経済：市場均衡状態におけるインフラの価値評価(南海トラフ、大阪市)</p>
---	--	---	---	--	--	--

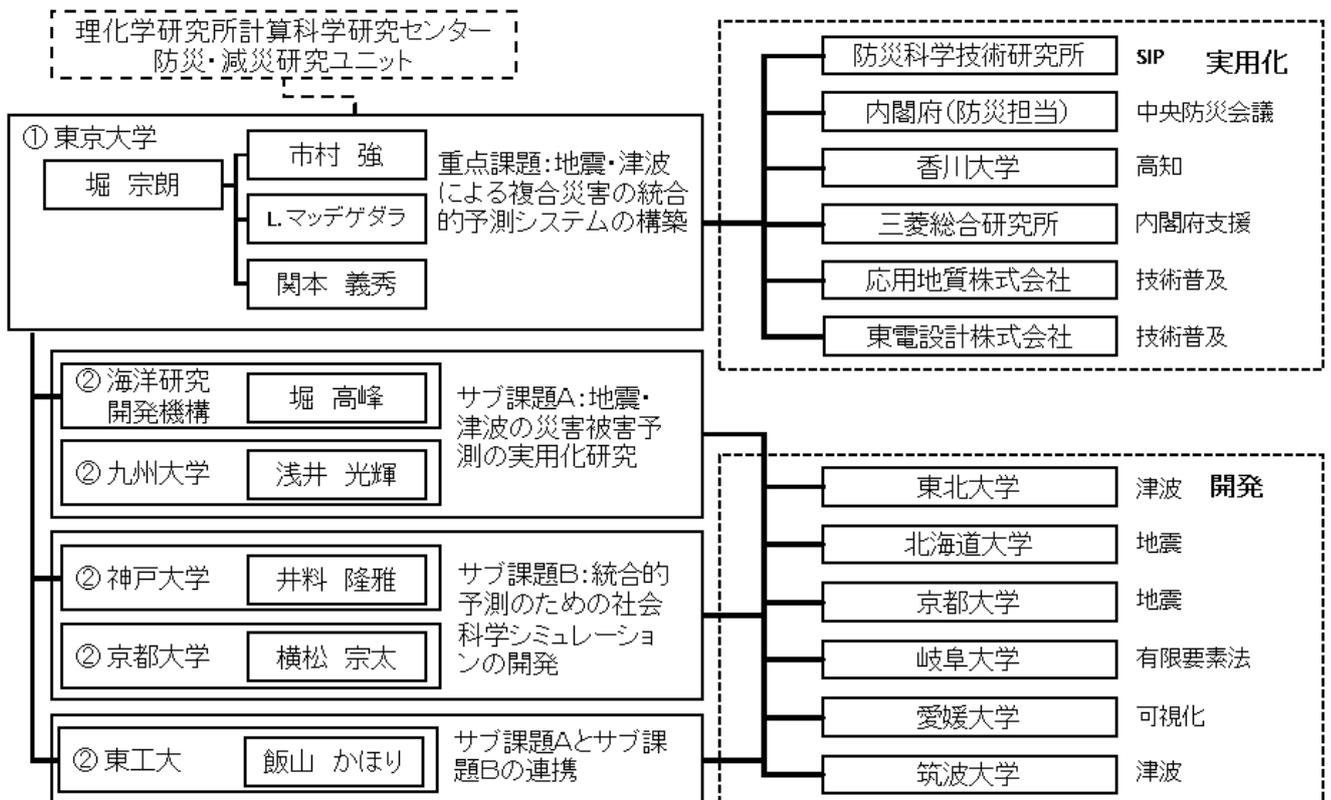
## (6) 実施体制

本研究の全体推進は研究代表機関である東京大学地震研究所が行う。運営体制として、研究代表者とサブ課題代表者から構成される全体会議と、サブ課題の分担機関と協力機関から構成されるサブ課題会議を設ける。また、外部有識者から構成される運営委員会を組織し、研究推進と成果発信に関して情報交換を行い、適宜、助言を受ける。代表機関は事務・研究支援を行うが、支援体制を充実するため、地震に関わる研究に精通した専属のスタッフを雇用する。特に、二つのサブ課題も含めた研究の業務管理の補助を行うことが重要である。

研究体制は開発と実用化のグループに大別される（下図を参照）。開発は、サブ課題の分担機関が推進し、具体的にはサブ課題Aは災害と一次被害の理工学シミュレーション、サブ課題Bは二次被害の社会科学シミュレーションの開発を行う。各々のサブ課題の協力機関は研究者が中心であり、数値解析コンポーネントの拡張や統合化等に貢献する。実用化は研究代表機関を中心に推進する。実用化の協力機関は、国の地震被害想定に関わる内閣府・企業体と SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」の研究機関である。上記の全体会議とサブ課題会議は主に開発に関わり、運営委員会は開発と実用化に関わる。

ポスト「京」の根幹の一つであるコデザインを推進するため、理化学研究所計算科学研究機構防災・減災研究ユニットとは特に密接な連携を図る。

地震・津波の防災減災にはさまざまなプロジェクトが平行して行われている。これは、1) コード開発、2) 環境整備、3) 実行、4) 行政展開に区分され、この区分が示すように特定の目標を持っている（次頁の図



研究体制は開発と実用化のグループに大別

- ・ 研究は分担機関が協力機関と推進. 実用化は研究代表組織が協力機関と連携
- ・ 研究と実用あとの連携は研究代表機関が担当

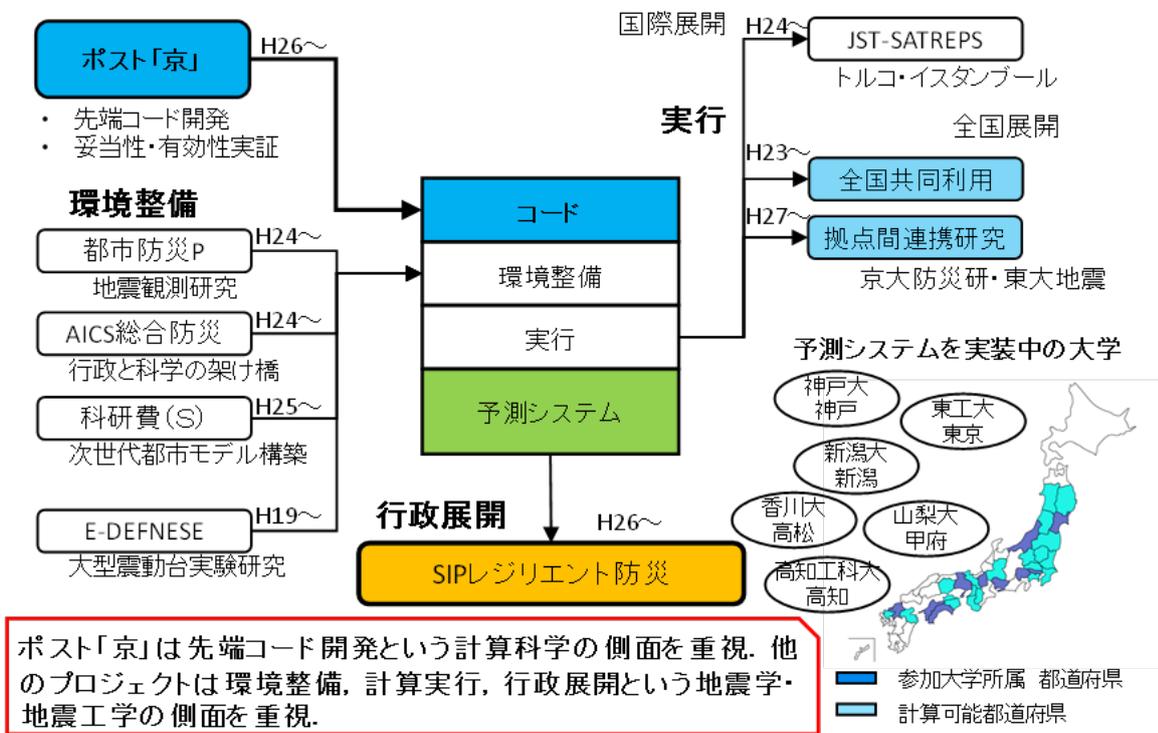
### 研究全体の実施体制

を参照)。ポスト「京」を見据えた本研究に特に密接に関わるプロジェクトは環境整備のプロジェクトである。このプロジェクトは、地震観測、都市モデル構築、大型震動台実験研究に関わるもので、観測・実験科学者のコミュニティと連携し、統合的予測システムの検証とモデル構築には不可欠である。本研究の参加者は直接、各種の環境整備のプロジェクトに関与しており、十分かつ継続的な連携が期待される。

実行は、実際に統合的予測システムを使って災害被害を計算するプロジェクトである。スパコンで実証されたプログラムを適当な計算機を使って各地域で実行することが主眼である。地域の研究者が開発した優良な数値解析コンポーネントを統合的予測システムに実装することも含まれており、統合的予測システムが、地震や地震防災・減災に関わる研究者との共通基盤となることを意図している。

本研究では特に行政展開を重視している。特に SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」という大型国家プロジェクトとの連携を進める。本研究で開発された数値解析コンポーネントがここで実用されることを計画している。分担機関・協力機関がこのプロジェクトに参加している他、国の防災に関わる行政・コンサルティング産業に協力機関として参加してもらい、行政展開を推進する計画である。

地球科学・地震工学・社会科学の研究分野で、ポスト「京」でのプログラム開発ができる人材に限られていることは事実である。この研究分野での若手研究者の育成とともに、計算科学の技術者の協力も必要となる。このため、サブ課題Aとサブ課題Bで十分な雇用枠・外注枠を取っている。具体的には、若手研究者のPDを雇用しアルゴリズム開発とコードの実装を担当させ、経験が必須のコードのチューニングは外注を計画している。なお、数値計算に強い研究者のニーズは防災コンサルティング産業にもある。楽観視をするものでは決していないが、統合的予測システムの開発・運用に長けた研究者は、この産業分野でも活躍できる可能性がある。防災コンサルティング産業では技術力の継続的向上は重要課題であり、本研究で育成する人材がこの課題に応えることは期待できる。



他のプロジェクトとの関連

## (7) 必要計算資源

「京」の計算資源量

(単位: ノード時間/年)

H27 年度	H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31 年度
1, 055, 315	19, 200, 000	19, 200, 000	19, 200, 000	19, 200, 000

「京」以外の計算資源量

(単位: ノード時間/年)

H27 年度	H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31 年度
1, 471, 680	1, 650, 000	1, 650, 000	1, 800, 000	1, 800, 000

注) 非線形有限要素法 GAMERA が最も多くの計算資源を利用する。現行のコードでは、1 億自由度モデル、10,000 回の時間ステップ数という 1 ケースの計算に、最低 10 万ノード時間が消費される。モデルの自由度と計算ステップ数は、防災に必要な 10 Hz と 10 m という分解能での精度保証をしたシミュレーションを数キロ四方の都市街区で行うためのものである。より大きい地震を想定すると地盤の非線形変形が進み、この度合いに応じて繰り返し計算数が増えるため、1 ケースに必要な計算資源は増加する。自由度を増やし対象領域を街区から 10 km 四方としても計算資源は増加する (自由度を  $N$  とすると、必要計算資源は  $N \log N$  で増加する)。コードの改良によって、計算速度を向上し、1 ケースに必要な計算資源を減らすことも計画しているが、防災に適した規模で解析を行う場合、必要計算資源の増加は避けては通れない。

GAMERA を実行するケースの数を基準に、必要計算資源を見積もっている。見積りには GAMERA 以外の計算も含まれており、その計算に必要な資源は、GAMERA の計算に必要な資源の概ね 30%としている。

サブ課題 B では H28~H31 年度で年度あたり概ね 1,000,000 の計算資源量を見積もっている。これを避難シミュレータ、交通関連シミュレータ、経済活動シミュレータそれぞれで概ね 3 分の 1 ずつ用いる。避難シミュレータでは 1 回あたり 500 ないし 3000 ノード時間の計算を 120~600 回程度/年度実施する。交通関連シミュレータでは 1 回あたり 30 ノード時間の計算を 10,000 回程度/年度実施する。経済活動シミュレータでは 50,000~200,000 ノード時間の計算を数回程度/年実施する。避難シミュレータは過去の実績により 1 回あたりの計算時間を見積もっている。交通関連、経済活動シミュレータについては既存の実績がないため、主要なコンポーネント (交通であれば最短経路探索) にかかる所要時間を推計して見積もりを行った。

## 2. 研究開発内容詳細

### 2-1. サブ課題A. 地震・津波の災害被害予測の実用化研究

#### (1) 目的・意義

HPCI 戦略プログラム分野3「防災・減災に資する地球変動予測」では、地震学・地震工学・津波工学の多数の数値解析コンポーネントを使った地震・津波の災害発生過程と都市の被害発生過程のシミュレーションに基づく災害被害の予測手法を研究開発中である。本研究は、数値解析コンポーネントの性能を上げるとともに、新たな数値解析コンポーネントを組み込み、より高い分解能で包括的な災害被害予測を行うことを目的とする。

統合的予測システムの根幹となる地震・津波の災害被害予測は、計算科学と地震学・地震工学・津波工学の融合という研究の他、社会実装も重要である。このため、本サブ課題では、サブ課題Bや他の研究プロジェクトとも連携し、数値解析コンポーネントを連成したシミュレーションに基づく災害被害予測を行政で利用できるようにすることに重点を置く。

#### (2) 実施内容

実施内容は、1)地震学・地震工学・津波工学の数値解析コンポーネントの高度化と増強と、2)主に行政を対象とした災害被害予測の利用の促進、という開発と実用化に大別される。

数値解析コンポーネントの高度化では、ポスト「京」の性能を引き出せる数値解析コンポーネントの大規模化・高速化を図る（東大、JAMSTEC、九大）。特に、「京」で大幅に高度化された大規模非線形有限要素法（東大：GAMERA）を重視する。これは、地震動解析の他、他の解析にも転用できるからである。数値解析コンポーネントの増強は、橋梁・ライフライン・地盤構造のような社会基盤施設の地震応答解析が対象である。現状の建築建物の被害予測に加え、社会基盤施設の被害予測ができることになり、シミュレーションに基づく包括的な被害予測が実現する。また、数値解析コンポーネントの統合化と、数値解析に必要な都市モデルの自動構築も行う（東大）。統合化は各解析数値コンポーネントの入出力の自動管理、都市モデルの自動構築は各種都市情報の解釈とモデル生成が主要な内容である。統合化では、一つの数値解析コンポーネントの出力を次の数値解析コンポーネントの入力とすることが重要であるが、やり取りされる中間データはテラバイトを超えるため、入出力の自動管理には特段の工夫が必要である。

地震・津波の災害シナリオ多様性を考慮するための数値解析コンポーネントの高度化では、地震シナリオのもとになる地震発生サイクルならびに破壊伝播の計算を行う境界積分方程式法（JAMSTEC：RSGDX、東大：3D-DYN）の大規模高速化を行うとともに、地表面形状・媒質3次元不均質・粘弾性を考慮できるようにするため、大規模非線形有限要素法（東大：GAMERA）を活用する。GAMERAを用いた断層面上の応力変化のグリーン関数計算を実現する。また、津波災害シナリオの計算のため、GAMERAによる高詳細な海底地殻変動を2次元津波解析コンポーネント（徳島大・JAMSTEC：JAGURS）の入力として安定かつ高速に計算するためのコード開発を行う。

津波被害予測については、RSGDX（JAMSTEC）により予測するシナリオ地震動に対する2次元津波伝搬解析結果を入力とし、陸地への津波遡上解析を3次元粒子法MScPhy（九大・JAMSTEC）により実施することを計画している。本年度中には、2次元津波伝搬解析と3次元津波遡上解析への受け渡し方法を確立するとともに、大規模高速化にむけて動的負荷分散を手法の高度化に着手する。さらに、被害予測を難しくする要因である漂流物や土砂移動についても、3次元流体計算（中央大・筑波大：VOF法）

による実施を計画している。

災害被害予測の利用では、SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」の災害情報共有システムに、複数の数値解析コンポーネントが適切な時期に実装されることを進める。具体的には、災害情報共有システムの開発研究機関（防災科学研究所等：協力機関）との連携である。また、南海トラフ地震の災害被害予測のシミュレーション結果が内閣府中央防災会議で利用されるよう、関係官庁・シンクタンク等（内閣府等：協力機関）との情報共有を図る。

### （3）目標・期待される成果

本サブ課題は capability computing と capacity computing に目標を設定する。capability computing の目標は、ポスト「京」でのテラ自由度モデル（1兆自由度モデル）の地震解析（地震波発生・地震波増幅過程の計算）である。地震発生シナリオでは粘弾性も考慮する。また、capacity computing の目標は多数地震シナリオに対する理学・工学シミュレーションによる被害予測（地震動と構造物被害）である。特に、想定された地震シナリオに応じた被害の幅を明示すること、さらに、南海トラフ地震の特徴である、東海・東南海・南海その他の連動を考慮した地震シナリオを計算すること、の二点が重要である。連動の結果、同一地域が二回の地震動を受ける場合も考えられ、この地震シナリオでの被害予測を行う。

研究開発とは別に、理学・工学の統合予測システムの実用化も本サブ課題の目標である。内閣府が進めている府省間の災害情報共有システムの開発（SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」、2014～2018）を当面の実用化のターゲットとする。災害情報共有システムでは主に経験式を使った災害・被害推定が計画されているが、シミュレーションを使った、より確度の高い災害・被害推定を行う。このシステムの実用化がアウトカム成果の主眼である。

#### アウトプット成果

・平成29年度終了時：首都直下地震を対象とした250億自由度モデルでの地震解析とその結果を用いた地震動と津波の被害予測を実施する。

・本格実施フェーズ終了時：テラ自由度モデルの準備となる500億自由度モデルを使う地震解析で南海トラフ地震を対象とした50地震シナリオ（震源・規模・破壊過程）解析とその結果を用いた地震動と津波の被害予測を実施する。災害情報共有システムに理学・工学の統合的予測システムの数値解析コンポーネントを実装する。

・ポスト「京」運用開始5年後：テラ自由度モデルが実現する地震解析と、その空間分解能向上に見合う、より精緻な都市モデルを使った災害被害予測を実施する。特に、南海トラフ地震では、その連動性を考慮し、地震シナリオの数も1,000を目安に増やす。

#### アウトカム成果

・ポスト「京」運用開始5年後：ソルバに対するアルゴリズムの改良による計算時間の短縮を図る。「京」での経験に基づき、数割程度、計算時間が短縮されることが期待される。また、統合的予測システムの一部である地震解析が国レベルで利用されること、すなわち中央防災会議の被害想定や地震調査研究推進本部の長期評価等に利用されることをアウトカム成果と考えている。

・ポスト「京」運用開始10年後：統合的予測システム全体が国・自治体レベルで利用されることをア

ウトカム成果と考えている。

#### (4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

「京」では、複数の数値解析コンポーネントをシームレスに連成し、大規模数値計算を使った都市の災害発生・被害発生過程のシミュレーションに成功している。時空間分解能には限界があり、また、被害発生過程も建築建物に限定されるが、シミュレーションに基づく統合的予測手法を確立しつつある。

「京」では、現状の観測データの時空間分解能を最大限に活かせるテラモデルを扱う場合、一つの地震シナリオを想定した災害発生・被害発生過程の解析が手一杯である。ポスト「京」では、複数の地震シナリオを想定し、時空間分解能を実用に供するレベルにまで向上する。さらに、社会基盤施設の数値解析コンポーネントを増強し、包括的な被害予測を実現する。複数の地震シナリオの下での、高分解能かつ包括的な災害被害予測は、ポスト「京」で初めてできることである。

津波被害予測においては、「京」により都市全体の津波遡上現象を3次元予測することは困難であり、一部の領域に限定した予測を行ってきた。ポスト「京」により都市全体の津波遡上現象を3次元で解析することが期待できる。

#### (5) 実施体制

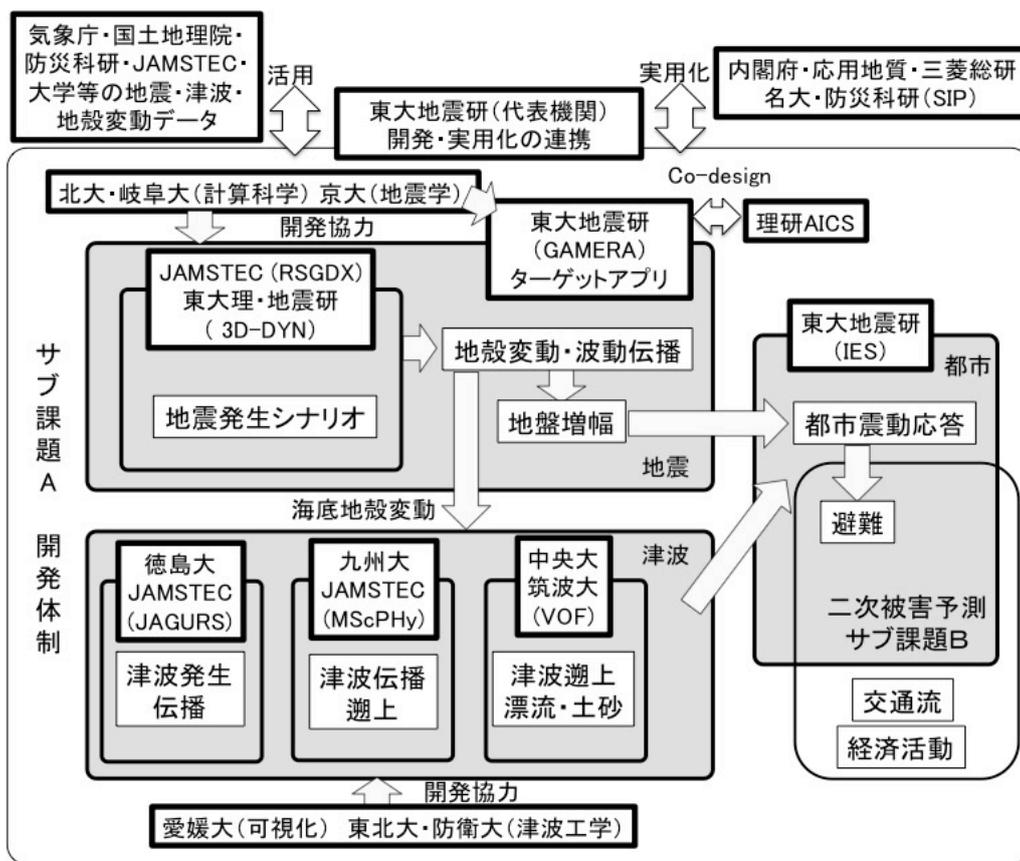
サブ課題Aは、JAMSTEC（分担機関、サブ課題責任、地震・津波の災害シナリオ多様性を考慮するための数値解析コンポーネントの高度化を担当）・東大地震研（代表機関、サブ課題実施、ターゲットアプリ開発ならびに統合的予測システム開発を担当）・九大（分担機関、サブ課題実施、地震・津波の被害に関する数値解析コンポーネントの高度化を担当）の3機関を中心に、各協力機関が下図に示したような役割を果たしながら、地震発生から地震動、津波、都市全体の揺れまでを扱う数値解析コンポーネントの開発を担う。そして、各コンポーネントの計算や結果検証に必要な観測データは、分担・協力機関自身が扱うデータはもとより、気象庁や国土地理院といった国の機関から入手・活用可能である。また、災害・被害の予測手法や計算結果の実用化については、代表機関である東大地震研が中心となり、協力機関である内閣府・応用地質・三菱総研（以上が国の被害想定を担う機関）、防災科研・名大（以上は、省庁横断のSIP防災プロジェクトを担う機関）と密に情報共有・意見交換し、確実に開発したものが活用される方向に軌道修正しつつ計画を進めていく体制ができつつある。

## 2-2. サブ課題B. 統合的予測のための社会科学シミュレーションの開発

### (1) 目的・意義

地震・津波の複合災害が起こす二次被害の予測は重要課題である。しかし、高分解能化が進む一次被害とは異なり、二次被害は地域単位という荒い分解能で予測される。社会・経済活動は確定論的モデルに馴染まないことは別としても、細かい分解能の予測に必要な人・組織という社会・経済活動の主体に不確定要因が多いことが主な原因である（「次元の呪い」）。

本研究では、ポスト「京」の計算性能を前提とした、二次被害予測のための社会科学シミュレーション



サブ課題 A の実施体制

の開発を目的とする。分解能を細かくする他、多数の不確定性要因を確率パラメータとして処理するモンテカルロシミュレーションを行う。分解能の荒い従来の解析とは全く異なる高分解能の解析は、二次災害の予測の新機軸となる。さらに、大規模数値計算を社会科学シミュレーションに適用する点は、社会科学と計算科学の境界という点でも意義が高い。

## (2) 実施内容

本研究で開発する社会科学シミュレーションは、二次災害の中でも重要な、緊急時の徒歩等による群集避難（東大）、地震被害がもたらす短期・長期の交通障害（神戸大）、復旧に伴う地域での経済活動の回復（京都大）、の3つである。開発された解析手法は統合的予測システムに統合される（東大）。

群集避難のシミュレーションはマルチエージェントシステムを使う。徒歩・自転車・自動車といった多様な交通手段を使った避難者が、地震・津波によって被災した都市内を避難する状況を解析するためには、先端的なマルチエージェントが必須である。昼間・夜間、夏季・冬季といったさまざまな事態を想定し、避難状況を把握することを目的とする。避難の円滑化を妨げる要因を抽出することも試みる。また、MPI+OpenMP ハイブリッド並列化による、特にポスト京を見据えた多コア CPU におけるスケーラビリティの向上にも取り組む。

交通障害のシミュレーションにおいては、道路交通と公共交通を多層化した交通関連シミュレータを開発する。交通関連シミュレータは需要解析と交通流解析から構成される。交通流解析には、複雑なダメ

ージを受けた都市内道路網の混雑を再現できるマイクロ交通流モデルをベースした、複数の都市間ネットワークの解析を可能にするマルチスケール型の交通シミュレーションを構築して用いる。需要解析は、地震・津波被害による交通需要の減少を考慮する新しい解析であるが、特に交通需要においては事前予測に不確実性があることが避けられない。このため多数の交通需要パターンに対する計算を実施しさまざまな問題の事前検討をする必要がある。また、交通混雑と交通需要の相互作用の計算には負荷の大きい反復計算が必要となる。交通関連シミュレーションの精度への影響が大きいのは需要解析である。この精度向上のために、交通需要発生メカニズムの精緻化、および、平時および発災後に取得されるビッグデータの存在を前提とした精度向上の方法論を開発する。後者においては、データとシミュレーション結果が整合するパラメータの推定に反復計算を要する。これらの実施にはこれまでの交通工学では経験のない計算能力が必要であり、これはHPCを使って初めて可能となる。

経済シミュレーションにおいてはインフラや生産資本の損壊が被災経済に与えるインパクトを計算することに主眼をおく。ここでは被災企業の生産の減少のみならず、市場を通じて波及する間接効果を計算する。高い空間分解能による生産施設被害や企業特性の入力値を与えることにより、(従来の経済計算が行ってきた) 平均値まわりの単峰性をもつ分布ではなく、被害の分布の偏り等を明らかにする。いずれの経済分析でも、多数の被害シナリオを対象に capacity computing を行う。災害後の直接・間接被害の把握に基づいて、防災・減災施設の経済価値を算出する。さらに、それぞれの被害シナリオの下で、災害発生後の物流のマネジメントやインフラ復旧作業の被害軽減効果を算出することにより、災害後の最適政策の決定に資することを目的とする。大阪市とその周辺を対象とすることにより、東京や名古屋など他の大都市でも生じる可能性が比較的大きな経済被害の計算結果を得る。

群集避難、交通障害、経済活動の3種のシミュレーションでは、避難や交通の行動様式や経済活動のモデルや初期状態として設定される都市の状況に関して、実態に即したデータが必要となる。さらにシミュレーション結果の妥当性確認に関しても都市の実態に即したデータが必要である。リアルタイムないし準リアルタイムで計測される位置情報を含む先端都市情報を使って、モデル構築と初期状態設定、およびシミュレーションの妥当性確認を試みる。また先端都市情報を使った、各種都市モデルのデータ同化の可能性も検討する。

### (3) 目標・期待される成果

サブ課題Bは群集避難、交通障害、経済活動の3種のシミュレーションからなる。群集避難については、HPCI 戦略プログラム分野3「防災・減災に資する地球変動予測」において研究開発されている群集避難のシミュレーションの拡張を行う。交通障害と経済活動のシミュレーションは、大規模数値計算に挑む解析手法の開発から開始する。

#### アウトプット成果

・平成29年度終了時：1,000 災害被害シナリオに対し、10万徒歩・自動車のエージェントを使った避難シミュレーション、総走行量400万台kmの交通障害マルチスケールシミュレーション(東京都23区2時間分の全道路交通流を予測することに相当)、全26業種中、16業種の価格が取引によって変動する問題のプログラムを開発する。交通障害を主な対象として、社会科学のシミュレーションの精度向上のために先端都市情報の利用技術を開発する。

・本格実施フェーズ終了時：10,000 災害被害シナリオに対し、40 万徒歩・自動車のエージェントを使った避難シミュレーション、総走行量 2,000 万台 km の交通障害マルチスケールシミュレーション（大阪府内 8 時間分程度の全道路交通流を再現することに相当）、同時に、複数のシナリオの下で、マルチエージェントシステムを使った経済活動シミュレーションを実施する。この計算規模は南海トラフ地震の大阪市とその周辺を想定している。交通障害を主な対象として、社会科学のシミュレーションに先端都市情報の利用技術を適用する。

・ポスト「京」運用開始 5 年後：10,000 災害被害シナリオに対し、100 万徒歩・自動車のエージェントを使った避難シミュレーション、総走行量 1 億台 km の交通障害マルチスケールシミュレーション、リスク対策を考慮した人口 800 万人・55 万事業所の被災地域経済活動シミュレーションを実施する。この計算規模は東海地方（静岡～名古屋）を想定している。

#### アウトカム成果

・ポスト「京」運用開始 5 年後：群集避難に加え、交通障害と経済活動の二つを含めた統合的予測を行うことをアウトカム成果と考えている。この地震は我が国の生産活動の中核と物流に関する大動脈を襲うが、現在の手法では被害や復旧を正確に予測することは困難である。交通障害と経済活動のシミュレーションの予測が果たす役割は大きい。先端都市情報の活用や多数ケース計算を含めることにより、より精度の高い予測結果を得られることが期待できる。

・ポスト「京」運用開始 10 年後：シミュレーション結果を関係省庁等への発信することをアウトカム成果と考えている。

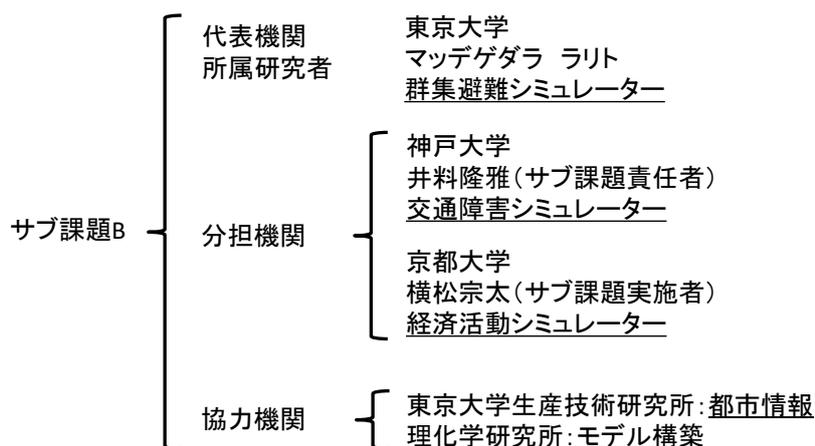
#### **(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと**

「京」で実行されている群集避難のシミュレーションは、さまざまな種類の避難者（歩行者・自動車）・事物（道路・構造物）を扱うため、プログラミング言語は C++ を使い、STL を最大限利用している。このため、「京」においては十分なチューニングはできていない。それにもかかわらず、この分野では最大規模の 10 万超の徒歩避難者を扱う群集避難を実現している。C++ の環境整備に依存するところもあるが、ポスト「京」では、複数の災害被害シナリオで 100 万超の徒歩・自動車等を使った群集避難を実行する予定である。

交通障害と経済活動のシミュレーションは「京」では実行されていない。防災分野の社会科学のシミュレーションとしてポスト「京」の計算能力を活かすことに挑戦するという段階であり、「京」でできることとポスト「京」でなければならないことを説明することは不可能である。一般的な説明に過ぎないが、従来にない細かい分解能で交通・経済活動の主体を扱い、さらに、不確定要因を確率的にとらえたモンテカルロシミュレーションを行うためには、ポスト「京」の計算能力が必要であると指摘することに留める。

#### **(5) 実施体制**

サブ課題 B では特にこれまで「京」での経験が少ない社会科学シミュレーションの開発を行うため、その開発のために特化した実施体制となっている。そのため、産業界や自治体等の関係者との連携について



### サブ課題 B の実施体制

はサブ課題そのものには組み込まず、研究全体での連携を考慮している。開発の実施体制としては、群集避難、交通障害、経済活動それぞれの要素におけるエキスパートを分担者として配置している。このうち群集避難については、「京」での経験が豊富なマツダゲダラ・ラリト（東京大学）を配置し、当該要素の開発に限らず、HPC 技術に関する経験を他の分担者に提供する役割を持たせる。交通障害および経済活動については、それぞれの分野での経験が豊富な井料隆雅（神戸大学）、横松宗太（京都大学）を配置する。協力機関には東京大学生産技術研究所と理化学研究所を配置する。特に前者は社会科学シミュレーションの入力として重要な都市情報に関するエキスパートであり、「G 空間」に関する研究開発での協力・連携も見込まれる。

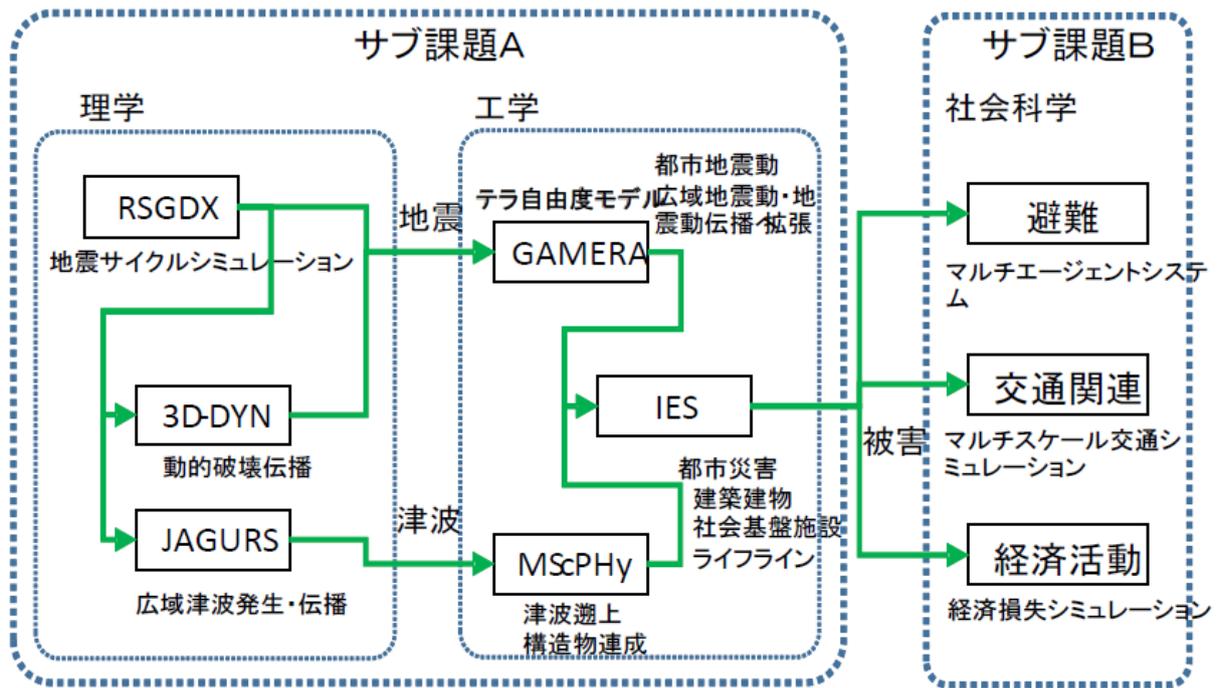
現時点で、地震に関わる社会科学の研究分野で、数値解析を中心とする研究者の割合は決して大きくなく、HPC に限定するとその割合はさらに減少する。一方、交通ミクロシミュレーションや「次元の呪い」の解消等、HPC を使うことで解決が期待できる重要問題があることも事実であり、この研究分野で HPC 利用の関心が低い訳ではない。交通と経済の分野で分担機関が窓口になり、より多くの社会科学の研究者がサブ課題 B に参加することが期待されている。

研究支援に関しては各機関とも十分な経験がある。神戸大学、京都大学においては事務担当者を指名し、必要に応じて事務補佐員を雇用し、研究代表機関の支援担当者と連携して支援を行う。

### 2-3. サブ課題Aとサブ課題Bの連関

統合的予測システムはサブ課題Aとサブ課題Bの複数のシミュレーションが連携し、災害・被害・対応の一連の過程を予測するものである。各シミュレーションの連携は下図のように整理される。理学と工学の間は地震・津波の災害に関する広域時系列データ、工学と社会科学の間は都市の被害の広域空間分布に関する高分解能データである。

サブ課題 A とサブ課題 B の連携は東工大が中心となって進める。なお、サブ課題 A とサブ課題 B そのものに比べて、連携は二つの課題で開発された数値解析手法を実都市に適用して実行するというオペレーションが中心となる。



サブ課題Aとサブ課題Bのシミュレーションの連携

上記のオペレーションは、サブ課題Aとサブ課題Bに比べて、事務支援の量は多くはない。この点を踏まえて、適切な事務担当者を指名し、研究代表機関の支援担当者と連携して支援を行う。

### 3. 採択時の留意事項への対応状況

(1) 課題全体として達成すべき成果を明確にするとともに、その成果実現に向けた定量的・定性的な目標（年間目標及び最終目標）を明確にすること。その際、科学的ブレークスルーや、多くの計算により新たに得られるものが何かを明確にすること。

1 及び 2.1 と 2.2 の「(3) 目標・期待される成果」に反映済み。

(2) 相乗効果が期待される他プロジェクト等と密に連携して取り組むとともに、役割分担を明確にすること。

1 の「(6) 実施体制」に反映済み。

(3) 取組を計画する社会科学の領域について土木計画学分野等、具体的に明記するとともに、それ以外の社会科学の領域の参加を検討し受け入れ可能な体制とすること。また、人や組織の災害時の行動（対応）をモデル化することにも力点を置いた計画を作成すること。

本研究の趣旨に鑑み、ポスト「京」でのプログラム開発ができることは課題参加の必須の条件である。この条件を満たす研究者の参加は常に受け入れ可能としている。サブ課題Bでは、土木計画学というより交通工学・経済学の研究者が参画しており、プログラム開発が可能な研究者の参加・協力は見込まれている。なお、ポスト「京」でのプログラム開発をしない社会科学系の研究者は、別のプロジェクトを介して、統合的予測システムが利用できる仕組みを考えている。利用の他、社会科学系の被害対応プログラムの統合的予測システムへの実装も可能である。

災害時の行動のモデル化は、ポスト「京」でのプログラム開発には不可欠であり、準備期間ではこの点を十分留意した計画を立案している。

(4) 必要な計算資源量について、成果実現のために科学的に妥当な目標値及びその根拠を明確にすること。

1 の「(3) 目標・期待される成果」と「(7) 必要計算資源」に反映済み。

(5) 各サブ課題の研究内容をより具体的に示すとともに、研究で利用することのできるデータ（観測データ等）を精査した計画とすること。

2.1 と 2.2 の「(5) 実施体制」に反映済み。

(6) 先端的な研究・開発によるチャレンジと、社会での実用化を視野に入れた計画とすること。その際、他省庁や自治体・企業への具体的な活用事例を示すとともに、内閣府や自治体等の防災システムへの部分実装については、その弊害（不完全情報の提供等）への対策について留意したものとする。また、リアルタイム被害推定が可能であるか調査すること。

本研究は「開発」と「実用化」に区分しており、「開発」では先端的な研究、「実用化」ではSIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」等を介して内閣府等への実装を考慮したものとなっている。ポスト「京」でのプログラム開発とのバランスを考え、上記の二点が、活用（実用化）に関する本プロジェクト

の最善の対応と考えている。

本研究で構想している総合的予測システムは研究開発段階であり、省庁や自治体・企業への具体的な活用事例はない（研究開発に集中した HPCI 戦略プログラム分野 3 の後継という意味で、本研究では、国レベルの活用を目指す「実用化」を、「開発」と並ぶ研究内容の一つとして位置付けている）。

シミュレーションによる被害推定は、現行の経験式に基づく被害推定より精度が高いことが期待されるものの、実際の調査に基づく被害情報とは一致しない。この意味で不完全情報である。その一方で、現行の被害推定でも一定の役割を果たしており、被害推定の精度向上は無駄ではない。また、本研究の数値解析コンポーネントを行政の防災システムに部分実装する場合、精度が異なる推定情報が混在することは確かに混乱の元となるが、低い精度に推定情報を揃えることも適切ではない。精度が異なる推定情報の混在をユーザに正しく理解されることを前提に、部分実装を進めることが現実的であると考えている。

常時稼働が見込まれるため、ポスト「京」を使うリアルタイム被害推定は現実的ではないと判断している。ポスト「京」以外の計算機を使う場合、観測データを自動かつ高速に入力することで、統合的予測システムを自動実行させるというリアルタイム被害推定は原理的には可能である（自動高速入力と自動実行を確実にを行う仕組みを作ることは決して些末なことではない）。なお、津波では、事前に多数のシミュレーションを行い、発災後に最適なシミュレーション結果を引用するというリアルタイム推定が行われている。災害のみならず被害まで推定する場合、季節・昼夜の差も考える必要がある他、沿岸という「線」ではなく都市という「面」を襲う地震では、蓄積すべきシミュレーションの結果が桁違いに多くなり、現実的ではないように思われる。このため、リアルタイム推定は本研究の課題には含めていない。

(7) 人件費の占める割合が大きいが、本プロジェクトで雇用する研究者（ポスドク等）の人員計画を明確にするとともに、将来のステップアップまで見据えた登用、人材育成の取組の計画を明確にすること。

1 の「(6) 実施体制」に反映済み。

#### 4. 中間評価における指摘事項への対応状況

(1) 課題全体として達成すべき成果を明確にするとともに、その成果実現に向けた定量的・定性的な目標（年間目標及び最終目標）を明確にすること。その際、各サブ課題の研究内容をより具体的に示すとともに、研究で利用することのできるデータ（観測データ等）を精査した計画とすること。

達成すべき成果と定量的目標は、各々、（ポスト「京」で実行できる）統合的予測システムの開発と、首都直下・南海地震の災害・被害推定の試行（領域・シナリオ数は指定）、としており、相応に明確になっていると考えている。

サブ課題の研究内容を下記に示す。

サブ課題Aは、地震・津波の災害と一次被害の予測のための理学・工学の数値解析コンポーネント（地震シナリオ・地震動・地盤増幅・津波伝播・遡上等）の性能向上と統合的予測システム開発を目的としている。定量目標として、コデザインではテラ（1兆）自由度モデルを扱える大規模非線形有限要素法を開発するとしており、地盤増幅計算で 1,000 億自由度、地殻変動計算で 2 兆自由度での計算を実現している。また、平成 29 年度終了時に「首都直下地震を対象とした 250 億自由度モデルでの地震解析と災害被害シミュレーション」を設定し、すでに目標に相当する計算を実施し、年内にサブ課題Bに結果を受け渡

す見込みである。本格実施フェーズ終了時の目標は「南海トラフ地震を対象とした 500 億自由度モデルを使う 50 地震シナリオの地震解析と災害被害シミュレーション」であり、この実現に向けて、地震シナリオを大規模非線形有限要素法で計算するための開発が計画通り進むとともに、有限要素法での地殻変動計算と津波伝播・遡上計算との連成も順調に進んでいる。

サブ課題Bは、ポスト「京」の計算性能を前提とした、二次被害予測のための社会科学シミュレーション（避難、交通障害、経済の3種類）の開発を目的としている。定量目標として、平成29年度終了時について「1,000 災害被害シナリオに対し、10 万徒歩・自動車のエージェントを使った避難シミュレーション、総走行量 400 万台 km の交通障害マルチスケールシミュレーション、人口 300 万人・15 万事業所の被災地域経済活動シミュレーションを実施する」を設定している。避難、交通は、詳細の変更はあるものの、目標に相当する計算を平成29年度内に実行する見込みである。経済については中間報告にあるとおり進捗に遅れがある。このため、経済のシミュレーションに関して下記の修正を行った。

中間目標（平成29年度終了時）：

現在：人口 300 万人・15 万事業所の被災地域経済活動シミュレーションを実施する。

修正：全 26 業種中、16 業種の価格が取引によって変動する問題のプログラムを開発する。

同様に平成31年度終了時の目標に対し、経済のシミュレーションに関して下記の修正を行った。

最終目標（平成31年度終了時）：

現在：リスク対策を考慮した人口 300 万人・15 万事業所の被災地域経済活動シミュレーションを実施する。

修正：複数のシナリオ下で、全 26 業種中、16 業種の価格が取引によって変動する問題のシミュレーションを実施する。同時に、複数のシナリオの下で、マルチエージェントシステムを使った経済活動シミュレーションを実施する。

「研究で利用できるデータ（観測データ等）を精査する」とあるが、誤解があるように思われる。本課題は、システム開発であり、決して首都直下・南海地震の被害・災害推定ではない。確かに、この被害・災害推定の精度・信頼度は、利用するデータの精査が不可欠であるが、この精査ができる研究者は他分野のデータ志向の研究者である。

(2) 予備計算などを通じて、サイエンス的な目標を明確にすること。その目標に対して、ポスト「京」でいつまでに何をどこまで明らかにすることを目指すのかを明確にすること。その時点でポスト「京」で初めてできる画期的な利活用について具体的に説明すること。

狭義の「サイエンス的な目標」は、残念ながら本課題では設定されていない。代わりに、技術的に重要な統合的予測システムの開発を目標としている。広義には、予測システムに組み込まれる数値解析コンポーネントは、従来の数値解析と質的に異なることが「サイエンス的」と考えられる。例えば、有限要素法では最大規模であり、質の差ももたらす。具体的には、線形モデルでのパラメータフィッティングしかできなかった地震後の粘弾性応答計算で、物質科学的に尤もらしい非線形粘弾性モデルを導入した

計算が可能になるといった質的な差である。MAS も同様である。交通障害シミュレータにおいても、提案手法は高並列実装を前提としたまったく新規の手法であり、Transportation Science として質的に既存研究と異なる結果をもたらすことが期待されている。

(3) 情報科学技術分野における研究開発の論文数、学会発表数は、事業の成果を議論する上で1つの指標となりうるため、分野の特性を考慮の上、論文数、学会発表数の達成目標値を設定すること。

狭義と広義の「情報科学技術分野」の発表論文の目標を設定した。

「情報科学技術分野」の発表の目標として、期間内合計の本数として、サブ課題Aでは、査読付き論文20本(狭義10本、広義10本)、原著となる査読付き学会発表数24本(狭義10本、広義14本)、サブ課題Bでは、査読付き論文4本(狭義1本、広義3本)、原著となる査読付き学会発表数4本(狭義3本、広義1本)の計8本を目標として設定する。

(4) 各サブ課題A、Bの進捗に加えて、両者の相互の連携がより強く実施される計画を検討すること。

サブ課題Aとサブ課題Bの連携をより強く実施できるよう、平成29年度より連携を主務とするPDを雇用した。中間審査の時点では、このPDの成果は出ていなかったが、平成29年度内には確実に出る予定である。

(5) 成果の利活用の観点で、現実的な課題への対応、実際の災害被害防止に活用されるまでの道程を明確にすること。その際、海外への具体的な成果展開についても考慮すること。

「実際の災害被害防止に活用されるまでの道程」は、国・自治体の防災対応機関やそれを支援する防災コンサルティングの構想に負う処が多く、研究者が構想することは、あまり意味があるとは思われない。そうではありながら、本課題では、予測システムの一部となる数値解析コンポーネントの利用を進め、その後、予測システムの利用を進めることを構想している。2016年度から内閣府防災が数値解析コンポーネントの利用に着手し、2017年度から大手防災コンサルが予測システムの利用の共同研究を開始した。この意味では、非常に幸運なことに、利用が進んでいる。サブ課題Bは新規開発のコンポーネントが多く、サブ課題Aのように実務活用は未だ実現していないものの、交通流シミュレータについては高速道路会社や交通系コンサルタント会社などの具体的なマーケットが存在し、将来的にそれらを通じた活用は十分に期待できる環境にある。

(6) 高精度計算可能なアルゴリズムを大規模化(特に群集避難や交通・経済システムに関して)することによりどのようなブレークスルーがあるのかを明確にすること。

前述(2)と関連するが、質的に違うシミュレーションを行っている。(大規模問題を解けるようなアルゴリズムの高度化、の意味と理解しているが)「アルゴリズムの大規模化」は、有限要素法、DEM、MASにおいて既に行われている。

有限要素法では(1)で書いたように地盤増幅で1,000億自由度、地殻変動で2兆自由度の計算を実現しており、DEMでは35億粒子までスケールすることを確認している。また、特に群衆避難や交通・経済システムに関しては以下の通り。

群衆避難：避難に許されたごく短い時間では、経路上の思わぬボトルネックが文字通り「致命的」とな

る。広大な分析対象エリアを、建物内の階段等の容量も含めた緻密な形で包括的に評価する能力があるMASは、都市における避難計画の現実性を向上するための重要な手段である。

交通：Capacity Computingと交通流計算の高並列実装による高速化により、膨大な数の需要パターンに対する交通混雑の評価が可能となる。観測データが揃わない災害復旧期の交通需要を災害前に確実に予測することは不可能である。提案手法は、災害復旧期を含め、不現実性の高い状況を対象とした交通ネットワーク評価を可能とする、これまでにはない全く新しいものである。

経済：大規模災害による経済損失の特徴は、被災エリアがごく一部であっても、その影響がサプライチェーンを通じて全国・全世界に広がってしまうところにある。また、被災規模が小さくても、それがボトルネックとなる特定の業種であれば、結果的に経済全体に影響が及んでしまう。全国各地の多様な業種を扱う大規模なシミュレーションを高並列実装で実現することにより、これらの評価を始めて正確に行えるようになる。

(7) 諮問委員会は、「第三者の視点でプロジェクトの進捗状況の把握・評価・改善提言・指導等を行う機関」として実施機関のもとに設けられているところ、諮問委員会からのクリティカルコメントが出ていることが明確になるようなマネジメント体制とすること。

諮問委員会からのクリティカルコメントが明確に出るマネジメント体制とする。なお、厳しいコメントはいくつか出ていたことは確かであるが、基本的には総じて好意的なコメントが多かったことも認識している。これは、防災・減災の分野で、高性能計算の研究は貴重であり、期待が大きい処によるものと判断している。なお、シニア研究者で構成される諮問委員は、若手・中堅の研究者が大半を占める本課題に好意的になる傾向があることも否めない。この点は正すようにする。

(別紙1) 実施機関一覧

	実施機関	備考
	東京大学	代表機関(課題責任者)
サブ課題A	海洋研究開発機構	分担機関(サブ課題責任者)
	九州大学	分担機関
	東京工業大学	分担機関
	東北大学	協力機関
	岐阜大学	協力機関
	愛媛大学	協力機関
	中央大学	協力機関
	理化学研究所	協力機関
	徳島大学	協力機関
	筑波大学	協力機関
	防衛大学校	協力機関
	京都大学	協力機関
	東京大学(理学系研究科)	協力機関
	東京大学(工学系研究科)	協力機関
	東京工業大学(理工学系研究科)	協力機関
	北海道大学	協力機関
	防災科学技術研究所	協力機関
	内閣府	協力機関
	名古屋大学	協力機関
	三菱総合研究所	協力機関
	応用地質株式会社	協力機関
サブ課題B	国立大学法人神戸大学	協力機関(サブ課題責任者)
	国立大学法人京都大学	分担機関
	東京大学(生産技術研究所)	分担機関