## 令和元年度

# 「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2年5月29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 実施した令和元年度「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.	令和元年度(報告年度)の実施内容	. 1
4	4-1. 実施計画	. 1
4	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 メニーコアアーキテクチャの計算機のための大規模液状化解析手法	. 5
	1.2 <b>OpenACC</b> を用いた地震動解析ソルバの GPU 計算機へのポーティング	19
	1.2.1 はじめに	19
	1.2.2 CPUを対象としたソルバの概要	19
	1.2.3 OpenACC による GPU 計算の導入	26
	1.2.4 性能計測	32
	1.2.5 おわりに	36
	1.3 交差点の改良モデルによる混合モード大規模避難シミュレーション	37
	1.3.1 はじめに	37
	1.3.2 交差点における軌道と自由流速の近似	38
	1.3.3 信号のない交差点での車と車間の相互作用	41
	1.3.4 実証的シミュレーション	43
	1.3.5 討議とまとめ	51
	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	53
	2.1 はじめに	53
	2.2 対象問題	54
	2.3 開発手法	55
	2.4 性能計測	55
	2.5 おわりに	55
	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	60
	3.1 全体概要	60
	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	60
	3.2.1 概要	60
	3.2.2 企業間取引データを用いた F2F の推定	62
	3.2.3 人の流れを用いた F2C の推定	62
	3.2.4 人流ビッグデータを用いた C2F の推定	64
	3.2.5 応用事例	68
	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	70

	3.3.1	概要
	3.3.2	利用データ
	3.3.3	手法
	3.3.4	結果
3	.4 ③A	B 連携の推進
	3.4.1	概要
	3.4.2	手法
3	.5 ④海	5外展開:タイのバンコクにおける精緻な人口データ開発
	3.5.1	概要
	3.5.2	対象地域
	3.5.3	利用データ
	3. 5. 4	手法
	3. 5. 5	結果
3	.6 I-	-ジェントベースによる経済モデルの HPC 拡張
	3. 6. 1	はじめに
	3.6.2	エージェントベースの経済モデル: HPC の観点
	3.6.3	シリアルおよびパラレルパフォーマンスの強化85
	3.6.4	計算性能
	3.6.5	実証的な数値シミュレーション
	3.6.6	まとめ
(4)‡	也震・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
厚	<b></b> 聚法人	海洋研究開発機構)(サブ課題A)96
4	.1 南海	Fトラフ域の一部を模擬した地震サイクル計算
4	. 2 GAI	MERA での弾性グリーン関数ライブラリの公開準備106
4	.3 社会	ミ実装のための準備:有限要素法を用いた千島海溝の海溝型地震に対する津波想定
4	.4 防災	え
	4.4.1	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116
4	.5 個別	」要素法(DEM)についての検証と妥当性確認(V&V)128
	4.5.1	DEM と SPH の連成による液状化シミュレーション 132
4	.6 粒子	- 法動的負荷分散手法の改良134
(5)\$	也震・津浦	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
汕	学)(サフ	<sup>*</sup> 課題A)
5	.1 サロ	ロゲートモデルによる確率論的津波被害リスク評価138
	5.1.0	背景138
	5.1.1	主成分分析サロゲートモデル138
	5.1.2	適用例
5	.2 陽的	JISPH 法(EISPH 法)の GPGPU への実装155

	5.2.0	背景	155
	5.2.1	近傍粒子探索	155
	5.2.2	圧力評価の陽解法化	156
	5.2.3	並列化領域の分割方法	157
	5.2.4	GPGPU による EISPH 法による計算例	158
5	.3 ASI-	-Gauss 法による都市全体の木造家屋の倒壊解析	161
	5.3.0	背景	161
	5.3.1	ASI-Gauss 法の高速化	161
	5.3.2	木造家屋のモデル化指針	162
	5.3.3	都市全域モデルの自動化処理	163
	5.3.4	都市全域モデルによる木造家屋倒壊解析例	164
	5.3.5	ASI-Gauss 法による都市全域モデルによる木造家屋倒壊解析の現状	165
⑥坿	也震・津道	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:国立大学派	去人
祁	申戸大学)	) (サブ課題 B)	166
6	.1 既存	の数値解析手法の整理	166
	6.1.1	時間変化するリンク旅行時間データの圧縮手法に関するレビュー	166
	6.1.2	動的交通需要モデルのレビュー	167
6	.2 交通	「流シミュレータの開発	167
	6.2.1	交通流シミュレータの基本検証に向けたベンチマークの作成	167
	6.2.2	主要コンポーネントの高速化	168
	6.2.3	道路ネットワークデータの調整	169
	6.2.4	スケーラビリティ	170
6	.3 交通	9需要シミュレータの開発	171
	6.3.1	動的需要モデルの基本フレーム	171
	6.3.2	被災需要モデルのモデル構成	171
	6.3.3	被災需要モデルの動作検証	172
	6.3.4	日常活動需要モデルのモデル構成	173
	6.3.5	日常活動需要モデルの動作検証	175
	6.3.6	被災需要・日常活動需要モデルの妥当性検証	176
	6.3.7	救援物流モデルのモデル構成	179
	6.3.8	救援物流モデルの妥当性検証	180
6	.4 関西	「圏シミュレーションの実施(サブ課題A連成)	180
	6.4.1	サブ課題Aから受領したデータの概要	180
	6.4.2	道路啓開ネットワークの構築	180
	6.4.3	交通需要シミュレータの計算結果	182
	6.4.4	交通流シミュレータの計算結果	183
⑦坿	也震・津浦	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:国立プ	大学
注	5人京都:	大学)(サブ課題 B)	186

7.1 令和元年度の結果の概要	186
7.2 モデルの概要	186
7.3 アルゴリズムの概要	193
7.4 並列化と計算時間	193
7.5 計算結果の概要	195
7.6 政策分析	197
7.7 まとめ	198
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)	199
8.1 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デュールの改良	199
8.1.1 概要	199
8.1.2 橋梁ネットワークを対象とした橋梁モデル自動構築手順	199
8.1.3 コード化	201
8.1.4 おわりに	201
8.2 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	204
8.2.1 概要	204
8.2.2 前処理(データ変換)	204
8.2.3 潜在的有用性の検討	204
8.2.4 おわりに	212
⑨統合的予測システムの実用化	214
⑩プロジェクトの総合的推進	215
4-3. 活動(研究会等)	217
4-4. 実施体制	218
別添1 学会等発表実績	
別添2 実施計画	

#### 4. 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)

	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 19	61年12月11日(58歳)	
		氏 名	堀 宗朗	月日	₩2020 4	年4月1日現在	
代		所属部署名	地震研究所 役職 外来研究員				
表		連絡先	Tel. 03-5841-XXXX Fax. 03-5689-4467				
機			E-mail hori@eri.u-tokyo.ac.jp				
関		ふりがな	わたなべ まさあき				
	事務	氏 名	渡辺 正昭				
	連絡	所属部署名	地震研究所	役職	副事務長		
	担当者	演	Tel. 03-5841-1772	Fa	x. 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. 令和元年度(報告年度)の実施内容

4-1. 実施計画

令和元年度は、前年度に引き続き、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。また、前年度に引き続き、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、昨年度までの改良を踏まえてソルバの前処理等の改 良を行い、ポスト京実機上で良好な性能を発揮するように最終段階の開発を行う。なお、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継続して進める。 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

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。なお、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である。本年度は、全球モデルの一部となる列島付近の地殻モデルを構築し、構築手法の妥当性を検討するとともに、構築したモデルを用いて GAMERA により解析を行う。

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いて、昨年度、支社・事業所単 位に分解・高精細化した企業・事業所間取引データを、企業・事業所レベル、メッシュレベル、県全域 等のマルチスケールで活用できるように整備を行う。これにより、様々な規模に応じた地震被害シナリ オに対応した企業間取引への被害予測を迅速に行う事ができる。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。昨年度、時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ってきたが、年齢・性別に ついてメッシュレベルでの精度担保にとどまらず、建物レベルでの信頼性確保を目指して、詳細化手法 を開発する。なお、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は、昨年 度、地震シミュレーションに統合し、予測結果が得られて終了したため今年度は実施しない。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)

非線形有限要素法 GAMERA を組み込んだ地震サイクルシミュレーションコードを、現実的な弾性構 造を考慮した南海トラフ地震シナリオ計算に適用する。そのために、これまで開発したシミュレーショ ンコードに、GAMERA の更新版である最新の高速有限要素計算手法を取り込む等の大規模・高速化を 行う。また、昨年度開発した水塊付近の境界条件を考慮する動的境界条件挿入モデュールの改良を行 い、実用的な津波遡上計算における並列化効率の改善をはかる。また⑤と連携して、簡易的な山体崩壊 計算を伴う津波シミュレーションを実行する。津波による洗堀問題を扱う SPH-DEM 混相流コードと、 それに資する動的負荷分散技術開発を引き続き進める。昨年度開発した低 B/F 環境で有効な SPH 法の実 装を DEM 法にも拡張して実装し、その効果を調査する。さらに近年性能向上の目覚ましい単精度もし くは半精度演算器を活用した SPH 法の実装方法を検討し、同程度の計算コストを用いた場合の粒子数と 演算精度のトレードオフ関係を、最新の計算機環境において、定量的に明らかにする。

### 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反映させた3次元津波計算を実施する。具体的には、GAMERAによる高詳細地 殻変動計算結果を津波の初期水位変動とし、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、さらには3次元津波解析コンポーネント MScPHy により陸地への津波遡上現 象を解析する。最終年度である今年度には、具体的な事例として南海トラフ地震時の高知市への津波遡 上問題を上記シミュレータで解析し、その結果を3次元動画として描画する。

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)

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ーラビリティ向上 のためのコード改良を完成させる。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とした 交通障害シミュレーションを構築する。これらを実施するために必要な、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う。

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。複数の災害シ ナリオの下で、大阪府と、全国の各地方を対象に、16業種以上の価格が変動して業種間の相互作用が生 じる市場経済を考慮する。状態空間を分割することにより各企業の動的計画問題を並列計算によって解 き、業種間の災害復旧の速さやインフラ整備政策の評価を行うコードを開発する。

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)

統合地震シミュレーションの都市モデルの拡張を図るため、橋梁モデルの構築手法の開発を継続す る。併せて建物モデルの高度化にも着手する。拡張・高度化された統合地震シミュレーションを利用し て、大阪を対象とした広域の被害シナリオ解析を行う。その結果を基に、統合的災害・被害・対応予測 の潜在的有用性を検討する。

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の試用を継続し、実用化に向けた連携の強化 も継続する。

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 の性能や利用法等の共有を継続する。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継続して利用する。

3

#### 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完成した。昨年度以来、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試行をおこなって きたが、解析手法の高度化・モデル構築の高度化が完成し、連成を実施することに成功した。一昨年度 の首都直下地震の対象地域に比べ、ワンオーダ大きい規模となった近畿圏での、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が実施できたことは、開発された統合予測シス テムの高い性能を証明するものである。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。昨年度同様、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 たー連の実行作業を継続し、実務として統合的予測システムが利用可能なレベルに達していることを示 した。

#### 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、昨年度までの改良を踏まえて以下2点の開発を行った。ま ず、GAMERA に液状化構成則を組み込み、新たに液状化構成則の特徴に合わせた前処理手法を開発する ことで、メニーコア計算機システム上で大規模液状化解析を高速に実施できるようにした[1]。次に、従 来まで行ってきた超並列環境向けの有限要素法ソルバを多様な計算機アーキテクチャ上で実行できるよ うにすることで、これまで開発してきた各種ソルバを企業や政府・自治体等において有効活用できるよう にすることを目指し、OpenACC を用いてポータビリティ・保守性を保った上で GPU において低コストでコ ード開発ができる仕組みを開発し、昨年度開発した SC18 ゴードンベルファイナリストソルバとの性能比 較を実施した[2]。以下、上記二点についてそれぞれ説明する。

[1] Ryota Kusakabe, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Wijerathne, A Fast 3D Finite-element Solver for Large-scale Seismic Soil Liquefaction Analysis, Computational Science - ICCS 2019, Lecture Notes in Computer Science, vol 11537, 2019.

[2] Takuma Yamaguchi, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Akira Naruse, Maddegedara Lalith, Muneo Hori, GPU Implementation of a Sophisticated Implicit Low-Order Finite Element Solver with FP21-32-64 Computation Using OpenACC, Proceedings of Sixth Workshop on Accelerator Programming Using Directives (WACCPD), 2019.

## 1.1 メニーコアアーキテクチャの計算機のための大規模液状化解析手法

#### 背景

地震に伴う地盤の液状化によって、様々な被害が引き起こされてきた。液状化の被害形態としては、 地盤沈下、側方流動、これらの地盤変形に伴う構造物の傾き、地上地下構造物の破壊などがあげられる。 2011 年に発生した東日本大震災では関東地方から東北地方にかけての広範囲で地盤の液状化が発生し、 それに伴う噴砂や、地下構造物の浮き上がりなどが多数観測されている(Towhata et al. 2014; Yamaguchi et al. 2012)。地盤液状化による被害を減らすために、液状化を分析するための様々な手法 が開発されてきている。近年では、空間データの蓄積や、計算機環境・計算手法の開発により、より大 規模な物理シミュレーションが可能になってきており、地盤液状化解析の分野においても、高詳細な3 次元地盤構造物モデルを用いた大規模な解析の実現への期待が高まっている。大規模な3次元液状化解 析が可能になれば、地震時の液状化による被害や液状化発生そのものの軽減に大きく寄与すると考えら れる。しかし、大規模な3次元のモデルを対象とした解析では、大きな計算コストを必要とするため、 多くの液状化解析では、鉛直2次元平面での解析や、小規模な3次元解析にとどまっているのが現状で ある。そこで、本研究では、近年のエクサスケールスパコンに向けた開発の一つのアプローチであり, 富岳でも採用が予定されている SIMD 幅の広いメニーコア CPU のアーキテクチャ上で、大規模な3次 元液状化解析の高速化を目指した。

液状化解析に限らない都市のローカルな地盤震動の解析に目を移すと、近年の超並列コンピュータに 適した並列3次元有限要素法ソルバが開発されてきており、実際の被害の分析に使われ始めている。例 えばSC14ゴードンベルファイナリストである Ichimura et al. (2014)では求解対象の大規模連立方程 式の求解において方程式の特性を考慮したマルチグリッド法・混合精度演算を利用した低計算コストの

5

アルゴリズムを構築することで大規模・高速解析を実現してきた。このような手法は液状化解析においても有効であると考えられ、実際、先行研究(Kusakabe et al. 2019a)では上記のソルバ(Ichimura et al. 2014)のアルゴリズムに液状化の構成則を組み込むことで大規模な3次元液状化解析が可能となっている。しかし、液状化解析は地盤の層構造と地下水位に応じてモデル内で異なる種類の物理方程式(構成則)を解く非均質性のある問題である一方で、ソルバ(Ichimura et al. 2014)は比較的均質な物理問題を想定した手法である。そのため、ソルバ(Ichimura et al. 2014)なそのまま使用した先行研究(Kusakabe et al. 2019a)では、本来の性能が発揮できず、SIMD 幅の広いメニーコア CPU のアーキテクチャ上で実行した際に要素ごとに計算方法・計算量に差が生じ、SIMD のレーン間・スレッド間・プロセス間といった並列計算機の各層において計算効率の低下を招いてしまっていた。本研究では、この課題を克服するために、各層における計算負荷分散の改善手法を開発した。これにより、液状化解析を高速化し、より大規模な問題が求解できるようになることを目指す。

我々の研究グループでは Ichimura et al. (2014)で取り上げたような求解対象の大規模連立方程式の 特性に応じたアルゴリズム開発と並行して、大規模連立方程式のもととなる離散化前の物理問題の特徴 に合わせて適切に計算コストを抑えるアルゴリズムを設計することで計算を効率化する方法を提案し てきている(例えば, SC18 ゴードンベルファイナリストである(Ichimura et al. 2018))。本研究では物 理問題の特性に応じてソルバ内の計算コストを抑える考え方を液状化問題に応用し、ソルバの前処理に おいて、複雑な物理方程式を解くために相対的に計算コストが高くなる液状化層(非線形層)の計算を、 線形層と同等の計算方法で近似することで、計算コストを下げ高速化を図った。これにより、解析コス トを削減し、解析時間の短縮を目指す。

ロードバランスの改善と物理問題の特性に基づいた改良を施した前処理を実装したソルバと先行研 究(Kusakabe et al. 2019a)の性能を比較した上で、SIMD 幅の広いメニーコア CPU である Intel Xeon Phi (Knights Landing)を搭載したスーパーコンピュータシステム Oakforest-PACS (最先端共同 HPC 基盤施設; OFP)上で,最大 35 億自由度の大規模な 3 次元液状化解析を実行することで本手法の有効性 を示した。

#### 問題設定

液状化解析において、非排水条件を仮定した場合、以下のような連立一次方程式が得られる。ただし、 この式は、空間方向には有限要素法で、時間方向には Newmark-β法で離散化されている。

$$A\delta \boldsymbol{u}^{(n)} = \boldsymbol{b}, \qquad (1.1)$$

ただし,

$$A = \frac{4}{dt^2} M + \frac{2}{dt} C^{(n-1)} + K^{(n-1)},$$
  

$$b = f^{(n)} - q^{(n-1)} + C^{(n-1)} v^{(n-1)} + M \left( a^{(n-1)} + \frac{4}{dt} v^{(n-1)} \right)$$

ここで、*M*, *C*, *K*はそれぞれ、質量行列、レイリー減衰行列、剛性行列、*f*, *q*, *δu*, *v*, *a*はそれぞれ、 外力ベクトル、内力ベクトル、変位増分ベクトル、速度ベクトル、加速度ベクトル、*dt*は時間ステップ 幅である。 また、\*<sup>(n)</sup>は変数\*が第n時間ステップの変数であることを示す。 液状化解析では、以下の ステップを各時間ステップで行う。

1. 外力fを読み込み、係数行列Aと右辺ベクトルbを計算する。

- 2. 連立一次方程式(<u>1</u>)を解く。
- 3. 変位**u**、速度**v**, 加速度**a**を更新する。(Newmark-β法)
- 4. 以下の式で剛性K,内力qを更新する。

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{(n)} &= \sum_{e} \int_{V_{e}} \mathbf{B}^{\mathrm{T}} \left( \mathbf{D}_{\mathrm{s}}^{(n)} + \mathbf{D}_{\mathrm{f}} \right) \mathbf{B} \, \mathrm{d}V, \\ \mathbf{q}^{(n)} &= \sum_{e} \int_{V_{e}} \mathbf{B}^{\mathrm{T}} \left( \boldsymbol{\sigma}^{\prime(n)} - p^{(n)} \boldsymbol{m} \right) \mathrm{d}V, \end{aligned}$$

ただし、 **B**は変位ひずみ変換行列、**D**<sub>s</sub>, **D**<sub>f</sub>はそれぞれ地盤と水の弾塑性行列、 $\sigma$ 'は平均有効応力、pは水 圧、 $m = \{1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\}^{T}$ である。 また、 $\int_{e} * dV$ は\*を第e要素内で体積積分することを示す。平均有効応力  $\sigma$ 'と地盤の弾塑性行列**D**<sub>s</sub>は構成則(Iai 1993)によって定義される。詳細は、(Iai 1993)とこの構成則のもと になった 2 次元の構成則(Iai, Matsunaga, and Kameoka 1992)を参照されたい。

#### 既往手法

液状化解析の中の計算時間のほとんどは、連立一次方程式(1)の求解と剛性K,内力qの更新に使われる。 特に、大規模な 3D 液状化解析において連立一次方程式(1)を解くのは解析コストが高く、大規模な 3 次 元液状化解析を行う際の障壁となっていた。先行研究(Kusakabe et al. 2019a)では,大規模な地震応答解 析の手法(Ichimura et al. 2014)を液状化構成則(Iai 1993)に適用することで、その計算コストを克服し、 大規模な液状化解析を可能にした。この章では、まず、Ichimura et al. (2014)によって開発された有限要 素ソルバの手法を説明したのち、先行研究(Kusakabe et al. 2019)で液状化解析の実装とその問題点を説 明する。

#### 有限要素ソルバ

Ichimura et al. (2014)は、通常の液状化を伴わない動的地震解析の支配方程式求解のための非構造 2 次要素の有限要素法に基づく,高速でスケーラブルな手法である。MPI 並列と OpenMP 並列を組み合わせたハイブリッド並列により大規模化・高速化を実現している。

通常の共役勾配(CG)法では、係数行列Aに似た行列である、前処理行列Mを用いて $z = M^{-1}r$ という処理 を行うことで、収束特性の改善を図ろうとしている。可変的前処理付き共役勾配法(Golub and Ye 1999) では、 $z = M^{-1}r$ の代わりに、Ax = rを「粗く」解くことで、収束特性の改善を図る。この手法の前処理 行列は $M \approx A$ とみなすことができ、高い前処理能力が期待される。また、前処理としてAx = rを解く際に は、3×3のブロックヤコビの前処理付 CG(PCG)法を用いており、高い並列効率を達成することができる。

ただし、前処理として「 $Ax = rce 3 \times 3$ のブロックヤコビの前処理付 CG 法で粗く解く」だけでは、計算時間の削減は限定的であるため、計算精度が比較的粗くても問題のない前処理の計算を適切に近似することで高速化を図る。具体的には、対象とする問題の 2 次要素のモデルに対応する 1 次要素のモデル をマルチグリッド的に作成することで計算コストの削減を図っている。まず、1 次要素もモデル上で、  $\overline{A_c}\overline{z_c} = \overline{r_c}e$ 解き、その解を初期値として、2 次要素のモデル上で $\overline{Ax} = \overline{r}e$ 解く。これにより、計算量・ 通信量を大幅に削減することができる。この手法では前処理の中で、1 次要素のモデル上と 2 次要素のモ デル上の計 2 回、PCG 法を使っている。以降、前者を inner coarse CG,後者を inner fine CG と呼ぶ。 また、この 2 つの inner CG を前処理として使用しているメインの CG を outer CG と呼ぶ。また、前処 理の計算は高い計算精度が必要ないので、前処理の計算は単精度実数で計算を行い、計算コストを削減している。(それ以外の処理は倍精度実数で計算している。)

Ichimura et al. (2014)では、CG 法の主要な処理の一つである行列ベクトル積を効率的に計算する手法 として element-by-element(EBE)法(Winget and Hughes 1985)を使用している。通常、行列ベクトル積 を計算する際には、グローバルな係数行列 $A = \sum_e A_e$ を計算して それとベクトルxとの積を取ることで、 行列ベクトル積Axを計算する。EBE 法では、グローバルな係数行列Aは計算せず、 要素ごとの係数行列  $A_e$ とベクトル $x_e$ の積 $A_e x_e$ をに計算し、その要素ごとの行列ベクトル積の和として、全体の行列ベクトル 積を計算する $Ax = \sum_e (A_e x_e)$ 。ただし  $x_e$ はx から第e要素に関係する成分を抜き出したものである。こ の手法を用いることで、グローバルな係数行列を保存するコストと保存に必要なメモリを節約できる。ま た、グローバルな係数行列を計算する必要がないこともあって、従来の行列ベクトル積と比較してメモリ アクセス回数・データ通信量が少なく、計算時間の短縮が見込める。

#### 既往研究の実装とその問題点

先行研究(Kusakabe et al. 2019)では、連立一次方程式求解に前節で説明した Ichimura et al. (2014)の 手法を用いることで、支配方程式求解における計算コストを克服し、大規模な液状化解析を可能にした。 しかし、液状化解析の非均質性により、(Ichimura et al. 2014)が対象とする比較的均質な通常の地震応 答解析では起きえなかったロードインバランスが発生し、並列効率が低下し、計算速度が期待されるほど 上がらなかった。ロードインバランスは主に、EBE 法による行列ベクトル積と構成則による応力・弾塑 性行列の更新の計算の 2 か所で生じる。この 2 つの計算は、液状化解析の中で最も計算コストが高く、 この 2 か所で発生するロードインバランスは解析時間を大幅に悪化させると考えられる。

要素による積分点の数の違いが行列ベクトル積におけるロードインバランスの原因である。EBE 法に よる行列ベクトル積計算の際に、要素ごとの係数行列 $A_e = \left(\frac{4}{dt^2}M_e + \frac{2}{dt}C_e^{(n-1)} + K_e^{(n-1)}\right)$ が計算される。 このときに、 $K_e = \int_{V_e} B_e^T (D_s + D_f) B dV$  も計算される。線形要素では弾塑性行列が constant であるので 被積分量が座標の 2 次関数であり、積分点が 4 つで十分である。一方、非線形要素では弾塑性行列も空 間的に変化する。液状化は局所的に発生するため、要素内で弾塑性行列が一定として計算すると十分な精 度で解析できなくなる可能性がある。そのため、非積分量の次数は 3 次以上であり積分点 4 つでは足り ない。(本研究の実装では 3 次の項まで考慮できる積分点 5 つの実装とした。)

有効応力 $\sigma'$ と地盤の弾塑性行列 $D_s$ を評価する際に生じるロードインバランスは、要素によって構成則 が異なることが原因である。線形要素では、弾塑性行列 $D_s$ は一定であり、各時間ステップで更新する必 要がない。一方、非線形要素では、5つの積分点で有効応力および、地盤の断層性行列を毎時間ステップ で更新する必要がある。本研究の実装では1積分点につき 300本の1次元ばねを使うため計算量が大き い。

Ichimura et al. (2014)では、要素ごとの計算量が等しいことを前提として、各 CPU コアに同数の要素を割り当てることで、ロードバランスを保とうとしていた。しかし、本研究の対象とする問題設定では要素ごとに計算量が異なるため、Ichimura et al. (2014)の手法を単純に実装した先行研究(Kusakabe et al. 2019a)ではプロセス間・スレッド間の計算量のインバランスが生じていた。また、本研究で対象としている SIMD 幅の広い CPU 上での高速化を行う上では、非均質な計算をする際に広い SIMD 幅

を有効に利用できないことも問題点として挙げられる。

#### 開発手法

本研究では、先行研究(Kusakabe et al. 2019a)の課題であったロードインバランスを解消することを目 的として、SIMD レーン間、OpenMP スレッド間、MPI プロセス間の並列計算の各層で、ロードバラン スを改善する手法を開発した。 また、対象問題の物理的な特性を考慮に入れたアルゴリズムを方程式 (1.1)求解に取り入れることで、更なる高速化が見込まれるソルバを提案する。

#### ロードバランスの改善

まず、要素のリオーダリングを行うことで、OpenMP スレッド間のロードバランスの改善と、広い SIMD 幅の有効利用を図った。要素の情報を保存している配列において、従来の実装では線形要素と非 線形要素が混在していたものを、配列の前半部分を線形要素、後半部分を非線形要素となるように、要素 の順番の並び替えを行い、これにより、線形要素の処理と非線形要素の処理を別々に行う実装にした。こ れにより、線形要素の処理と非線形要素の処理をそれぞれ OpenMP で並列実行することができ、スレッ ド間インバランスが解消されると期待される。また、線形要素の処理と非線形要素の処理のそれぞれで、 コンパイラによる自動 SIMD ベクトル化がされやすい構造となり、特に本研究が対象とする SIMD 幅 の広いメニーコア CPU のアーキテクチャ上での高速化が見込まれる。

さらに、領域分割手法を改良することでプロセス間のロードバランスの改善を図った。従来の方法で は、各プロセスが担当する要素数が均一になるように分割していため、MPI プロセスごとに担当する非 線形要素と線形要素の割合が異なり、プロセス間ロードインバランスの原因となっていた。本研究では、 領域を分割する際に線形層と非線形層を別々に分割することで、プロセス間のロードバランスを改善す ることを試みる。線形層、非線形層のそれぞれを MPI プロセスの個数分に分割し、各 MPI プロセスは、 線形層の1分割と線形層の1分割を合体させた領域を担当する(図 1.1)。



図1.1. 領域分割手法。

この方法によれば、各プロセスに割り当てられる線形要素・非線形要素の割合はほぼ一定となり、ロードインバランスが解消できると期待される。

#### 前処理の改良

本研究では、Ichimura et al. (2014)の前処理をもとに、地盤液状化の物理的特性を考慮した前処理を 開発し、さらなる高速化を図った。Ichimura et al. (2014)をもとに開発された別のソルバ(Ichimura et al. 2018)でも同様に、対象とする問題の物理現象を考えた前処理を行っている。ソルバ(Ichimura et al. 2018)が対象とする問題は、コンクリート構造物のような地盤に比べて硬い物性の領域があるような問 題であり、構造物付近で、CG 法の収束性が極端に悪化する。Ichimura et al. (2018)では、前処理の inner coarse CG と inner fine CG の間に、さらに別の inner CG を追加し、その inner CG では、収束性の悪 い箇所のみを解くことで、効率的に収束特性を改善した。本研究でも同様の発想で前処理に inner CG (inner middle CG と呼ぶ)を追加した前処理を導入する。ただし、本研究の inner middle CG は、液状 化現象の局所性を利用したものであり、Ichimura et al. (2018)で追加された inner CG とは異なる。

Ichimura et al. (2014)では、物性の空間的な変化は緩やかな問題を対象としており、Kの計算をする際に、地盤の弾塑性行列 $D_s$ は要素内で一定であると仮定した実装となっていた。一方、今回実装した液状化解析では、液状化により局所的に物性が変化しうるため、非線形層では地盤の弾塑性行列 $D_s$ を1要素につき5積分点で評価している。そのため、行列ベクトル積の計算時のデータ量の増加により、メモリアクセスコストが増加し、計算速度が低下することが予測される。そこで、inner middle CG を inner coarse CG と inner fine CG の間に追加し、行列ベクトル積の計算時のデータ量を減らすことで計算

速度の向上を図る。Inner middle CG では、inner fine CG と基本的には同じ処理を行う。ただし、係 数行列 $\overline{A}$ の代わりに行列 $\overline{A}_{m}$ を用いる。 ただし、 $\overline{A}_{m} = \frac{4}{dt^{2}}\overline{M} + \frac{2}{dt}\overline{C}_{m} + \overline{K}_{m}, \overline{K}_{m} = \sum_{e} \int_{V_{e}} \overline{B}^{T} \overline{D}_{m} \overline{B} \, \mathrm{d}V$ であ る。ここで、 $\overline{D}_{m}$ は要素内一定である

$$\boldsymbol{D}_{\rm m} = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_2 & & \\ d_2 & d_1 & d_2 & & 0 & \\ d_2 & d_2 & d_1 & & \\ & & & d_3 & \\ & 0 & & & d_4 & \\ & & & & & d_7 \end{bmatrix}$$

である。ただし、 $d_i$  (i = 1, ..., 5) は 5 積分点での弾塑性行列 $D = D_s + D_f$ を平均して計算する:1 。すなわち、

$$d_{1} = \frac{1}{15} \sum_{j=1}^{5} \left( D_{11}^{j} + D_{22}^{j} + D_{33}^{j} \right), \quad d_{2} = \frac{1}{15} \sum_{j=1}^{5} \left( D_{12}^{j} + D_{23}^{j} + D_{31}^{j} \right)$$
$$d_{3} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^{5} D_{44}^{j}, \quad d_{4} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^{5} D_{55}^{j}, \quad d_{5} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^{5} D_{66}^{j},$$

ただし、j番目の積分点での弾塑性行列を $D^{j}$ とする。これにより、計算に必要なメモリアクセスが削減 できる。また、 $\overline{D}_{m}$ は要素内一定であるので、 $K_{m}$ の計算時の積分点は4点で十分であり、5点積分が必 要な inner fine CG よりも少ない計算量で行列ベクトル積が計算できる。

液状化は局所的に発生するので、液状化の進行によって要素内で物性が大きく変化する要素はごく一部であり、それ以外の要素では、おおむね $\overline{D}^{j} \approx \overline{D}_{m}$  ( $j = 1, \dots, 5$ )であると考えられるので、計算コストの高い inner fine CG を使用していた計算の一部を、計算コストの低い inner middle CG で代替することができ、線形連立方程式を解く時間を短縮することができると期待される。

以上をまとめたアルゴリズムの概略を Algorithm A に示す。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> **D**を平均する方法は複数考えられるが、問題によって最適な方法は異なると予想される。 液状化解析 では、弾塑性行列の右上 **3**×**3** 成分には、地盤の剛性に比べて 1 桁程度大きな水の体積弾性係数に相当す る値が足される。 そのため、右上 **3**×**3** 成分については地盤の異方性がそれほど支配的にならないと予 測されるので、 $\overline{d_1}, \overline{d_2}$ の **2** つのパラメータのみで近似できると考えられる。 一方、地震応答解析のよう なせん断波が支配的な問題では、加振方向のせん断剛性のみが低下するような異方性がみられると予想 されるため、せん断剛性に相当する右下対角 **3** 成分は別々の値とした。 また、 $\overline{D}_m$ でゼロとなっている 成分は $\overline{D}$ では非ゼロである可能性もあるが、 $d_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ )と比較して、十分小さいので、 $\overline{D}_m$ ではゼロ とし、データ量を減らした。

1	[Model partitioning]					
2	[Element reordering]					
3	Calculate the initial values of $u$ , $q$ , $K$ by self-weight analysis.					
4	$\boldsymbol{v}, \boldsymbol{a} \leftarrow 0$					
<b>5</b>	do $it = 1, nt$					
6	Read the external force $f$ .					
7	$\boldsymbol{b} \leftarrow \boldsymbol{f} - \boldsymbol{q} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{v} + \boldsymbol{M}\left(\boldsymbol{a} + \frac{4}{dt}\boldsymbol{v}\right)$					
8	$\boldsymbol{A} \leftarrow \frac{4}{dt^2}\boldsymbol{M} + \frac{2}{dt}\boldsymbol{C} + \boldsymbol{K}$					
9	Set the initial values of $\delta \boldsymbol{u}$ and other variables for the CG method.					
10	$r \leftarrow b - A \delta u$					
11	(Outer CG starts: solve $A\delta u = b$ )					
12	while not converged do					
13	(Preconditioning starts)					
14	$\overline{r} \Leftarrow r$					
15	$\overline{r}_{c} \leftarrow \overline{P}^{T}\overline{r}$					
16	solve $\overline{A}_{c}\overline{z}_{c} = \overline{r}_{c}$ by PCG method (inner coarse CG)					
	on first-order-element mesh.					
17	$\overline{z}_0 \leftarrow \overline{P}\overline{z}_c$					
18	solve $\overline{A}_{m}\overline{z} = \overline{r}$ by PCG method (inner middle CG) with initial solution					
	$\overline{z}_0$ , on second-order-element mesh.					
19	$\overline{z}_0 \leftarrow \overline{z}$					
20	solve $\overline{A}\overline{z} = \overline{r}$ by PCG method (inner fine CG) with initial solution $\overline{z}_0$ ,					
	on second-order-element mesh.					
21	$\mathbf{z} \leftarrow \overline{\mathbf{z}}$					
22	(Preconditioning ends)					
23	Update $\delta u$ and $r(=b - A \delta u)$ , using z					
24	end while					
25	(Outer CG ends: displacement increment $\delta \boldsymbol{u}$ is obtained.)					
26	Update $\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v}$ and $\boldsymbol{a}$ by Newmark- $\boldsymbol{\beta}$ Method, using $\delta \boldsymbol{u}$ .					
27	Update $ \pmb{\sigma}' $ and $ p $ by constitutive law, using $ \pmb{u} $ and $ \delta \pmb{u} $					
28	$\boldsymbol{Q} \Leftarrow \sum_{e} \int_{V_{e}} \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \left( \boldsymbol{\sigma}^{\prime(n)} - p \boldsymbol{m} \right) \mathrm{d} V$					
29	Update $m{D}_{ m s}$ by constitutive law, using $m{u}$ and $\deltam{u}$					

<sup>30</sup> 
$$\boldsymbol{K} \leftarrow \sum_{e} \int_{V_e} \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{D}_{\mathrm{s}} + \boldsymbol{D}_{\mathrm{f}}) \boldsymbol{B} \, \mathrm{d} \boldsymbol{V}$$

#### 31 end do

#### 数值解析

提案手法の有効性を示すために実地盤を模した地盤モデルを用いて大規模な液状化解析を実施した。 図 1.2 に示されるような地盤モデルを x, y方向に並べたモデルを対象領域とする。各層の物性は表 1.1 に 示す。液状化のパラメータは先行研究(Kusakabe et al. 2019a)と同じものを使用した。地下水位は地表面 から 2m とした。入力波は 1995 年の兵庫県南部地震のときに兵庫県神戸市内で観測された地震波(JMA observatory, Japan Meteorological Agency)を使用した。この地震は、沿岸の埋め立て地を含む広範囲に わたって地盤液状化を誘発し、構造物などに重大な被害を引き起こした(Akai 1995; Okimura, Takada, and Koid 1996) 。モデルの分解能は Kusakabe et al. (2019a)を参考に、非線形層は最大要素サイズ 2m, 線形層は最大要素サイズ 20m, bedrock は最大要素サイズ 40m となるように設定した。また、時間ステ ップ幅は*dt*=0.001s とした。

	$ ho[kg/m^3]$	$V_{\rm p}[{\rm m/s}]$	$V_{\rm s}[{\rm m/s}]$	h	constitutive law	
Layer1	1500	_	_	5%	nonlinear	
Layer2	1800	1380	255	5%	linear	
Bedrock	1900	1770	490	0.5%	linear	

エニル曲州



図 1.2. モデル概観。

性能計測はすべて、SIMD 幅の広いメニーコア CPU を搭載したスーパーコンピュータである Oakforest-PACS (OFP)を使用して行った。OFP は最先端共同 HPC 基盤施設によって運用されている スーパーコンピュータで、8208 計算ノードを搭載している。各計算ノードは、68 コアの Intel Xeon Phi processor 7250 (Knights Landing) CPU と 16GB の MCDRAM メモリ、96GB の DDR4-2400 メモリ で構成されており、Intel Omni-Path によってインターコネクトされている。また、各 CPU コアは 512 bit のベクトル演算器を 2 つ搭載しており、AVX-512 SIMD 命令をサポートしている。

#### 解析時間

まず、解析時間を先行研究(Kusakabe et al. 2019)と比較して、本研究の提案手法の効果を示す。今回 比較するケースを表 1.2 に示す。

	asis	asisOMP	case1	case2	case3
OpenMP 並列(構成則計算)	-	+	+	+	+
OpenMP スレッド間ロードバランス	-	-	+	+	+
/SIMD 有効利用					
MPI プロセス間ロードバランス	-	-	-	+	+
前処理の改良	-	-	-	-	+

表 1.2. 解析ケース。

Asis は先行研究(Kusakabe et al. 2019a)の実装である。ただし、asis の実装は構成則計算部分の OpenMP 並列が未実装の不完全なものであったので、今回は asis に構成則部分の OpenMP 並列を実 装した asisOMP を性能計測時の参照値として用いる。Case1 は本研究の手法のうち、要素のリオーダ リングによるプロセス内のスレッド間のロードバランスの改善と SIMD の有効利用を実装したもので ある。Case2は case1に加えて、領域分割の方法を改良して、プロセス間のロードバランスの均一化を 行ったものである。Case3は case2 加えて、前処理の改良による連立一次方程式(1.1)求解部分の高速化 も含めた実装である。図 1.2 に示すモデルを x, y 方向にそれぞれ 4 個分(計 16 個)並べたモデルを使用 した 7,500 時間ステップ分の解析を 512 MPI 並列×8 OpenMP 並列=4096 並列(64 OFP nodes)で行っ た。図 1.3 に計算時間の比較を示す。AsisOMP と case1 を比較すると、プロセス内ロードバランスの 均一化と SIMD の有効利用により、連立一次方程式(1.1)求解部分では 2.03 倍、構成則計算部分では 6.78 倍の高速化が実現している。OFP の CPU の SIMD 幅が 8 であることを考えると、特に構成則の 計算部分で wide SIMD を有効に利用して高速化が実現できていることがわかる。Case1 と case2 を比 較すると、連立一次方程式(1.1)求解部分では 1.12 倍, 構成則計算部分で 1.89 倍高速化しており、プロ セス間ロードバランスを改善した効果が見える。構成則計算部分での性能改善幅が大きいが、これは線 形要素と非線形要素での計算量の違いが大きいことが理由である。また、case2と case3を比較すると、 連立一次方程式(1.1)求解部分で 13%の高速化が達成されている。図 1.4 は case2 と case3 で解析した 際の outer CG と inner CG の反復回数と解析時間を示している。Case2 での inner fine CG の反復回 数と case3 での inner middle と inner fine CG の合計反復回数はほぼ同じであるが、case3 では計算コ ストの軽い inner middle CG を使っている分計算時間が短縮されている。Asis と case3 を比較すると 26 倍の高速化、asisOMP と case3 を比較しても 4.85 倍の高速化が達成されており、提案手法の有効 性が実証されている。



#### Scalability

次に、case3 と asisOMP のウィーク・スケーラビリティを計測した。図 1.2 に示されるような地盤 モデルを *x*, *y*方向に並べたモデルを使用した。表 3 に使用したモデルの構成を示す。

# of OFP nodes	# of MPI procs.	DOF	DOF per process	# of elements
64	512	109,425,213	213,721	26,810,034
128	1,024	218,798,889	213,671	53,620,068
256	2,048	437,546,541	213,646	107,240,212
512	4,096	874,990,053	213,621	214,480,424
1,024	8,192	1,749,877,677	213,608	428,961,000
2,046	16,368	3,499,549,341	213,804	857,922,000

表 1.3. ウィーク・スケーラビリティ計測時のモデル構成。

1 MPI プロセス当たりの問題規模を一定にして、512 MPI 並列から 16368 MPI 並列まで増やして解 析を行った。1 MPI 並列当たりの OpenMP 並列数はすべて 8 で、100 時間ステップ分の解析を行った。 図 1.5 に解析結果を示す。



図 1.5. ウィーク・スケーラビリティ。

すべての問題規模を通じて asisOMP と比較して、case3 が約5倍程度高速化されている。最も大き な問題規模の解析では、OFP 8208 計算ノード中 2046 計算ノードを使用しており、OFP 全系の 1/4 までは十分な性能で計算できていることが確認できる。512 MPI 並列から 16368 MPI 並列へのウィ ーク・スケーラビリティは 75%である。この値自体は必ずしも高い数字には見えないかもしれないが、 対象としている問題は、そもそも複雑でスケールしづらい非構造要素を用いた有限要素解析であること、 さらに、液状化解析特有の非均一性に由来するロードインバランスを回避するための複雑性が加わって いること、構成則の計算で大量にメモリを必要とするため、1 MPI 領域当たりの計算規模が小さく相対 的に通信の割合が多いことを考慮すると、十分な性能である。

#### まとめ

本研究では、先行研究(Kusakabe et al. 2019a)をもとに、液状化解析に適したアルゴリズムを開発した。 さらに、液状化の物理特性を考慮して、演算量・メモリアクセスコストを削減したソルバを提案した。本 研究の提案手法では先行研究(Kusakabe et al. 2019a)と比較して、26 倍の高速化を達成した。また、先 行研究(Kusakabe et al. 2019a)で解析した地盤モデルは 340 万自由度であったが、本研究では最大 35 億自由度のモデルを使った大規模な 3 次元液状化解析を実施し、本研究の提案した手法が、高速かつス ケーラブルであることを示した。

本研究で提案した負荷分散手法は、液状化解析に限らず、他のマルチフィジックスの連成解析などの 非均質な問題にも応用しうるものである。また、本研究で開発した物理的特徴を考慮した前処理は液状化 現象の局所性を利用して、計算量・メモリアクセスを削減した手法であり、数理問題を解くソルバを開発 する際に、対象とする物理現象の特徴を加味することで、より効果的なアルゴリズムを構築しうることが 示された。

#### 参考文献

## Akai Koichi, Geotechnical Reconnaissance of the Effects of the January 17, 1995, Hyogoken-Nanbu Earthquake, Japan. Earthquake Engineering Research Center, University of

California at Berkeley, 1995.

- [2] Golub Gene H, and Qiang Ye., Inexact Preconditioned Conjugate Gradient Method with Inner-Outer Iteration, SIAM Journal on Scientific Computing, Vol.21 (4), pp.1305–20, 1999.
- [3] Iai Susumu, Three Dimensional Formulation and Objectivity of a Strain Splace Multiple Mechanism Model for Sand, *Soils and Foundations*, Vol.33 (1), pp.192–199, 1993.
- [4] Iai Susumu, Yasuo Matsunaga, and Tomohiro Kameoka, Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32 (2), pp.1–15, 1992.
- [5] Ichimura T., K. Fujita, S. Tanaka, M. Hori, M. Lalith, Y. Shizawa, and H. Kobayashi, "Physics-Based Urban Earthquake Simulation Enhanced by 10.7 Blndof × 30 K Time-Step Unstructured Fe Non-Linear Seismic Wave Simulation." In SC '14: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, pp.15–26, 2014.
- [6] Ichimura Tsuyoshi, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Akira Naruse, Jack C. Wells, Thomas C. Schulthess, Tjerk P. Straatsma, et al., A Fast Scalable Implicit Solver for Nonlinear Time-Evolution Earthquake City Problem on Low-Ordered Unstructured Finite Elements with Artificial Intelligence and Transprecision Computing, In *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis*, pp.49:1–49:11, SC '18. Dallas, Texas, 2018.
- [7] JMA observatory, Japan Meteorological Agency. n.d., Strong Ground Motion of the Southern Hyogo Prefecture Earthquake in 1995 Observed at Kobe,

http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo\_nanbu/dat/H1171931.csv.

- [8] Joint Center for Advanced High Performance Computing. n.d., Basic Specification of Oakforest-Pacs, http://jcahpc.jp/files/OFP-basic.pdf.
- [9] Kusakabe Ryota, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, and Lalith Wijerathne, A Finite Element Analysis Method for Simulating Seismic Soil Liquefaction Based on a Large-Scale 3D Soil Structure Model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.123, pp. 64–74, 2019.
- [10] Kusakabe R., Fujita K., Ichimura T., Hori M., & Wijerathne L, A Fast 3D Finite-Element Solver for Large-Scale Seismic Soil Liquefaction Analysis, In *International Conference on Computational Science, Lecture Notes in Computer Science*, Vol.11537, pp.349– 362, 2019.
- [11] Okimura Takashi, Shiro Takada, and Teng Hye Koid, Outline of the Great Hanshin Earthquake, Japan 1995, *Natural Hazards*, Vol.14 (1), pp.39–71, 1996.
- [12] Towhata Ikuo, Shogo Maruyama, Kinnichi Kasuda, Junichi Koseki, Kazue Wakamatsu, Hiroyoshi Kiku, Takashi Kiyota, et al., Liquefaction in the Kanto Region During the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.54 (4), pp.859–873, 2014.
- [12] Winget James M, and Thomas J R Hughes, Solution Algorithms for Nonlinear Transient

Heat Conduction Analysis Employing Element-by-Element Iterative Strategies, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.52 (1-3), pp.711–815, 1985.

[13] Yamaguchi A, T Mori, M Kazama, and N Yoshida, Liquefaction in Tohoku District During the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Soils and Foundations, Vol.* 52 (5), pp.811–829, 2012.

#### 1.2 OpenACC を用いた地震動解析ソルバの GPU 計算機へのポーティング

1.2.1 はじめに

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、地震の各段階を対象として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。これまでは京コンピュータ・富岳をターゲットとした CPU ベース の超並列環境向けの開発を行ってきたが、近年、計算機アーキテクチャは heterogeneous なものを代表に 多様化されており、毎年新しいアーキテクチャが発表されている。当該シミュレーション手法は、企業 や政府・自治体等との共同研究によって、次世代の地震シミュレーションとしての利用検討も進められ ているため、他の計算機環境への展開によって、その利用を促進することが重要であると考えられる。 ハードウェアが急速に発展する中では、ソフトウェア開発もそれに追随しなければならないが、計算機 に対応するコードを逐一構築することは開発コストの高さにつながる。また、開発者のコードの維持管 理も難しくなる。特に複雑なコードに関してはこれらの2点がより顕著となるため、ポータビリティ・ 保守性を保った上でより性能の高いコードを開発することは重要な課題であるといえる。

これを踏まえて、本検討では OpenACC を使用する。これは指示行を挿入することによって GPU やマ ルチコア CPU への計算のオフロードを実現できる並列化プラットフォームの一つである。元のコードを ベースに容易に OpenACC が導入でき、GPU による高速化の恩恵を受けることが可能となっている。超 複雑なアルゴリズムにもとづくプログラムでも、ディレクティブベースの手法により複数の計算機環境 における性能・ポータビリティ・保守性が両立できることを示すことができれば、開発手法の実用性を高 められると期待される。

これまでに開発されてきた地震シミュレーション手法は非構造低次要素有限要素ソルバがその中核で あり、陰解法が使われるためコードが複雑化しがちである上にランダムアクセスが卓越するために性能 が出しにくいものの、ものづくりや固体地球分野にて標準的に使われる重要な手法である。我々は WACCPD2016,2017において、CPU計算機を対象に開発された標準的な有限要素法コードの OpenACC に よる移植を行い、妥当な高速化が得られることを示してきた。一方で、昨年度においては性能面において 極限までの超高性能を実現した有限要素法のコードが Supercomputing Conference (SC) 18 のゴードンベル 賞ファイナリストにノミネートされた。以下ではこのソルバを SC18GBF とする。このソルバは AI や独 自のデータ型を含む精度変動演算が導入されており、WACCPD2016,2017 が対象としたソルバと比較し て非常に複雑なアルゴリズムとなっている。高い性能を実現するために対象とする NVIDIA Tesla V100 GPU が有する倍幅半精度演算などの特定のハードウェアを活用したチューニングを徹底的に施している ため、コードの保守性とポータビリティは低くなっている。

以上を踏まえて、SC18GBF ソルバへ OpenACC を適用することで、コードのポータビリティ・保守性・ 性能の両立を目指す。ディレクティブベースの単純な実装によって、対象とするアプリケーションがより 少ない開発コストで十分に高速化されることを示す。我々が開発した OpenACC 上における低精度変数演 算は他のアルゴリズムにおいても利用可能であるため、この FP21 テンプレートライブラリを公開するこ とで、他アプリケーションへの貢献を目指す。

1.2.2 CPUを対象としたソルバの概要

本検討では、地震学・地震工学などにおける複雑な形状を有する問題の求解に使われる、陰解法・低次

の非構造要素を用いた三次元有限要素解析を対象としている。この問題では、一般に複雑な前処理を使っ た反復ソルバが使われるために非常に複雑なコードとなる上に、非構造格子を扱うためにランダムアク セスが卓越するために性能を出すことが難しい。本検討でポーティングの対象とする SC18GBF ソルバ は、人工知能(AI)と精度混合演算を前処理に用いるため、一般の反復ソルバに比べてさらにコードが複雑 となっている。このコードを高い性能でポーティングできれば、他の複雑アプリケーションのポーティン グの参考になると期待される。以下、対象とする問題を定義したのち、具体的な求解アルゴリズムと CPU における実装を示す。

·対象問題

地震シミュレーションは局所的に複雑な構造を含んだ、大規模領域を対象とする非線形問題となる。そのため、複雑な形状を考慮することのできる、四面体二次要素による三次元有限要素法を用いる。時間積分に Newmark- $\beta$ 法( $\beta$ =1/4,  $\delta$ =1/2)を用いることで、対象とする方程式は以下に帰着される:

$$A_n \delta u_n = b_n$$

ただし、

$$\boldsymbol{A}_n = \frac{4}{dt^2}\boldsymbol{M} + \frac{2}{dt}\boldsymbol{C}_n + \boldsymbol{K}_n,$$

$$\boldsymbol{b}_n = \boldsymbol{f}_n - \boldsymbol{q}_{n-1} + \boldsymbol{C}_n \boldsymbol{v}_{n-1} + \boldsymbol{M} \left( \boldsymbol{a}_{n-1} + \frac{4}{dt} \boldsymbol{v}_{n-1} \right)_{\boldsymbol{\sigma}}$$

ここで、*δu*,*u*,*v*,*a*,*q*,*f*はそれぞれ変位増分、変位、速度、加速度、内力、外力を表すベクトルである。また*M*,*C*,*K*は質量、減衰、剛性マトリクスである。*dt*は時間増分であり、*n*は時間ステップ数を示す。減衰マトリクスに関してはレイリー減衰を用いる。上記の連立一次方程式を解いた後、各ベクトル*q*,*u*,*v*,*a*はそれぞれ以下のように更新される。

$$\boldsymbol{q}_{n} = \boldsymbol{q}_{n-1} + \boldsymbol{K}_{n} \delta \boldsymbol{u}_{n},$$
$$\boldsymbol{u}_{n} = \boldsymbol{u}_{n-1} + \delta \boldsymbol{u}_{n},$$
$$\boldsymbol{v}_{n} = \boldsymbol{v}_{n-1} + \frac{2}{dt} \delta \boldsymbol{u}_{n},$$
$$\boldsymbol{u}_{n} = \boldsymbol{a}_{n-1} - \frac{4}{dt} \boldsymbol{v}_{n-1} + \frac{4}{dt^{2}} \delta \boldsymbol{u}_{n}$$

以上の工程の中で最も計算コストが大きくなる箇所が、 $\delta u_n$ を求めるための連立一次方程式の求解部分となる。この求解を行うソルバ部分について、以下に詳細を記す。

・ソルバアルゴリズム

上記問題では、正定値対称行列*A<sub>n</sub>*は疎ではあるものの超大規模な行列となる。そのため、*A<sub>n</sub>*を直接高 速なメモリ領域に格納することはできず、行列ベクトル積において行列をメモリに格納せずに計算を行 う手法による反復解法による求解が使われることが多い。例えば、ブロック対角行列による前処理を使っ た共役勾配法に matrix-free 行列ベクトル積を組み合わせた PCGE 法は標準的に使われている。この方法 は、全領域を均一に倍精度で解くことで、様々な問題においてロバストな求解が可能だが、収束性は一般 的に悪く、演算コストは高い。そこで、SC18GBF ソルバにおいては、超並列計算機におけるロードバラ ンスを保ちつつ、対象問題の数理特性に合わせて計算密度を変化させ、さらに収束特性を踏まえた AI を 活用することで共役勾配法ソルバの効率化を図っている。以下、Algorithm 1 に沿ってソルバアルゴリズ ムを説明する。 Algorithm 1 SC18GBF solver algorithm for solving  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  on FEMmodel. The matrix vector product  $\mathbf{Ay} = (\frac{4}{dt^2}\mathbf{M} + \frac{2}{dt}\mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{y}$  is computed using matrixfree matrix-vector products (i.e., element-by-element method):  $\sum_{i}^{N} (\frac{4}{dt^2}\mathbf{M}_i + \frac{2}{dt}\mathbf{C}_i + \mathbf{K}_i)\mathbf{y}_i$ , where dt is the time increment,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ , and  $\mathbf{K}$  are the consistent mass, damping, and stiffness matrices, respectively, and subscript i indicates the i-th element.  $diag[\ ]$ , (<sup>-</sup>), and  $\epsilon$  indicate the  $3\times 3$  block Jacobi of [\ ], singleprecision variable, and tolerance for relative error, respectively. ( $)_c$  and ( $)_{cp}$ indicates the calculation related to FEMmodel<sub>c</sub> and FEMmodel<sub>cp</sub>, respectively, while the other is the related calculation of the FEMmodel.  $\mathbf{P}$  is a mapping matrix, from FEMmodel<sub>c</sub> to FEMmodel, which is defined by interpolating the displacement in each element of FEMmodel<sub>c</sub>.  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{q}$ ,  $\mathbf{r}$ , and  $\mathbf{z}$  are temporal vectors and  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\rho$  are scalars in conjugate gradient method and i denotes the number of iteration.

1:  $\mathbf{r} \leftarrow \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}$ , where  $\mathbf{x}$  is initial solution

2:  $\beta \Leftarrow 0, i \Leftarrow 1$ 3: (\* outer loop start \*) 4: while  $\|\mathbf{r}\|_2 / \|\mathbf{b}\|_2 \ge \epsilon$  do (\* inner loop start \*) 5:6:  $\bar{\mathbf{r}} \Leftarrow \mathbf{r}$  $\bar{\mathbf{z}} \Leftarrow diag[\mathbf{A}]^{-1}\mathbf{r}$ 7:  $\bar{\mathbf{r}}_c \Leftarrow \bar{\mathbf{P}}^T \bar{\mathbf{r}}$ 8:  $\bar{\mathbf{z}}_c \Leftarrow \bar{\mathbf{P}}^T \bar{\mathbf{z}}$ 9: Solve  $\bar{\mathbf{r}}_c = \bar{\mathbf{A}}_c \bar{\mathbf{z}}_c$  (\* *PreCG<sub>c</sub>*: solved on FEMmodel<sub>c</sub> by PCGE with  $\epsilon_c^{in}$  and 10:initial solution  $\bar{z}_c$  \*) 11:Extract  $\bar{\mathbf{z}}_{cp}$  from  $\bar{\mathbf{z}}_c$  and  $\bar{\mathbf{r}}_{cp}$  from  $\bar{\mathbf{r}}_c$ Solve  $\bar{\mathbf{r}}_{cp} = \bar{\mathbf{A}}_{cp} \bar{\mathbf{z}}_{cp}$  (\*  $PreCG_{cp}$ : solved on FEMmodel<sub>cp</sub> by PCGE with  $\epsilon_{cp}^{in}$  and 12:initial solution  $\bar{\mathbf{z}}_{cp}$  with Dirichlet boundary condition of  $\bar{\mathbf{z}}_c$  at boundary \*) 13:Update  $\bar{\mathbf{z}}_c$  with  $\bar{\mathbf{z}}_{cp}$ 14: $\bar{\mathbf{z}} \Leftarrow \mathbf{P} \bar{\mathbf{z}}_c$ Solve  $\bar{\mathbf{r}} = \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{z}}$  (\* *PreCG*: solved on FEMmodel by PCGE with  $\epsilon^{in}$  and initial 15:solution  $\bar{z}^{*}$ 16: $\mathbf{z} \Leftarrow \bar{\mathbf{z}}$ (\* inner loop end \*) 17:18:if i > 1 then 19: $\beta \Leftarrow (\mathbf{z}, \mathbf{q}) / \rho$ 20:end if 21: $\mathbf{p} \Leftarrow \mathbf{z} + \beta \mathbf{p}$  $\mathbf{q} \leftarrow \mathbf{A}\mathbf{p}$  (\* computed by matrix-free matrix-vector multiplication \*) 22:23: $\rho \Leftarrow (\mathbf{z}, \mathbf{r})$ 24: $\alpha \Leftarrow \rho/(\mathbf{p},\mathbf{q})$ 25: $\mathbf{q} \Leftarrow -\alpha \mathbf{q}$ 26: $\mathbf{r} \Leftarrow \mathbf{r} + \mathbf{q}$ 27: $\mathbf{x} \Leftarrow \mathbf{x} + \alpha \mathbf{p}$ 28: $i \Leftarrow i + 1$ 29: end while

30: (\* outer loop end \*)

#### 1.2.2.1 可変前処理の導入

ここではまず、各共役勾配法の反復の前処理において、 $A^{-1}$ を近似した固定行列を使う代わりに、前処 理方程式z = Arを共役勾配法ソルバによって解く可変的前処理を使う。前処理方程式の求解部を inner iteration (Algorithm 1, lines 5-17)、 もとの CG 法の求解部分を outer iteration (Algorithm 1, lines 18-28)と呼 ぶ。前処理ソルバの閾値を適切に設定することで、計算コストのほとんどを inner iteration に移動するこ とができる。前処理方程式はラフに解けばよいので、近似精度と計算コストの異なる様々な前処理アルゴ リズムを組み合わせることができることとなる。

#### 1.2.2.2 前処理部における AI の利用

AI などの data analytics は一般に、Equation-based method と比べて、推論速度は速いものの精度は低く、 equation-based method で直接使うと解が不正確になることや、発散することが欠点となる。そのため、陰 解法ソルバにおいて AI を使うためには、ロバスト性を考慮したアルゴリズムが必要となる。ここでは、 求解対象であるAにおける領域間での収束性の偏りに着目し、収束性の優良に応じて前処理の求解に疎密 をつけるアルゴリズムを構築し、収束性の優良の判定に AI を使うことを考える。これにより、収束性の 判定が若干ずれたとしても、前処理にしか使われないため、多少性能が悪化するだけで解の精度は担保さ れたロバストなアルゴリズムとなる。以下、詳細を説明する。



🗵 1.6. Extraction of part of the problem having bad convergence using AI.

まず下準備として、AIの学習に適した形となるように、対象となる四面体二次要素からなる有限要素 モデル FEMmodel(図 1.6a)を幾何的マルチグリッドで疎化した四面体一次メッシュFEMmodel<sub>c</sub>を作成する (図 1.6b)。次に、対象の問題と似ているが小さい規模の問題に対して、PCGE 法の誤差履歴を可視化し、 節点の接続情報・物性・要素サイズを入力に、節点誤差を出力する AI を構築する。この AI を使って対 象となる大規模問題において、接続情報・物性・要素サイズを入力に、収束性が悪いと予測される節点を 抽出し、それをFEMmodel<sub>cp</sub>と設定する(図 1.6c)。前処理に使われるソルバのうち、問題を均一に一段階 荒くしたFEMmodel<sub>c</sub>において荒く求解した結果(Algorithm 1, line 10)の誤差を軽減するためにFEMmodel<sub>cp</sub>における求解を行う(Algorithm 1, lines 11-13)。最後に、これを四面体二次要素にマッピングして求解対象となる FEMmodel にて求解を行うことで、前処理の精度を向上させる(Algorithm 1, line 15)。

各段階のソルバの閾値を適切に設定することで、問題全体を均一に解くソルバに比べて、収束性が悪い 対象問題のごく一部を重点的に解き、逆に収束性が悪い問題の大部分の領域を緩めに解くことができる ようになり、全体のコストが削減される。AI によるFEMmodel<sub>cp</sub>の選択が若干ずれたとしても、前処理の 他のソルバ(*PreCG*<sub>c</sub>及び*PreCG*)に吸収されるため、ロバストなアルゴリズムとなる。なお、AI による FEMmodel<sub>c</sub>からFEMmodel<sub>cp</sub>の抽出はオフラインで行われ、抽出したFEMmodel<sub>cp</sub>はソルバ内では不変となる ため、今回は OpenACC によるポーティングの対象としない。

#### 1.2.2.3 前処理部における精度変動演算の導入

前処理部では高い演算精度は求められないため、inner loop 内のFEMmodel<sub>c</sub>, FEMmodel<sub>cp</sub>, FEMmodel の 各ソルバにおいて低精度変数を使うことで計算コストを削減する。ここでは、FP32 のみならず、後ほど 説明する FP21 といった半精度(FP16)と単精度(FP32)の中間的な精度とレンジを持つ変数を使うことも可 能である。CPU 版においては実装上簡単な FP32 を inner loop 部の計算・通信に使う。

#### 1.2.2.4 時間並列積分の導入

上記の AI と精度変動演算を用いたソルバは一見複雑であるものの、それらはすべて共役勾配法ベース のソルバによってできており、その計算コストの大部分は行列ベクトル積となる。ところが、この行列ベ クトル積計算においてはランダムアクセスが卓越するため、CPU・GPU に限らず現状の計算機アーキテ クチャにおいて高性能で実行することが難しい。そこで SC18GBF ソルバにおいては、非構造格子有限要 素法においても時間方向にはメッシュの接続情報は不変であることに着目し、時間方向に並列に求解を 進めるアルゴリズムを活用することで計算効率を高めている。Algorithm 2 に示すように標準的な時間積 分では一時間ステップ毎に計算を逐次的に進めるが、Algorithm 3 に示すように並列時間積分において、 現在求解対象としている時間ステップに加えて将来のタイムステップを複数本まとめて計算をする。一 度に解く時間ステップ数をmとすると、反復ソルバにおける一反復あたりの計算量は通常の時間積分に 対しm倍に増えるものの、得られた解は将来の時間ステップにおける高精度な初期解として使えるため、 総反復数は約1/mに減る。結果として総演算量は同程度となる。この方法の良いところは、節点の値を時 間方向に連続して配置することでランダムアクセスを通常の時間積分と比べて1/mに低減させることが できるところにあり、これにより SIMD 演算器など CPU 計算における実行効率の向上と実行時間の削減が 見込める。mが大きくなると解の予測性能が低下して演算数が増加する傾向にあるため、実用ではm=4 が使われることが多い。上記アルゴリズムは複雑であるものの、近似解法は前処理の中で完結しているた め、ソルバの解である $\delta u$ はソルバ閾値 $\epsilon$ の範囲内で、倍精度 PCGE ソルバと同一となる。

Algorithm 2 Standard time-integration algorithm for solving  $\mathbf{A}_i \mathbf{x}_i = \mathbf{b}_i (i = 0, ..., n-1)$ . Values with over bars (<sup>-</sup>) indicate approximate values, while values without over bars indicate exact values.

1: Set 
$$\mathbf{x}_{-1} \Leftarrow 0$$

- 2: for i = 0; i < n; i = i + 1 do
- 3: Guess  $\bar{\mathbf{x}}_i$  using standard predictor
- 4: Set  $A_i$  and  $b_i$  using  $x_{i-1}$
- 5: Solve  $\mathbf{A}_i \mathbf{x}_i = \mathbf{b}_i$  with error tolerance  $\frac{|\mathbf{A}_i \mathbf{x}_i \mathbf{b}_i|}{|\mathbf{b}_i|} \leq \epsilon$  using initial solution  $\bar{\mathbf{x}}_i$ : Computed using iterative solver with matrix-free matrix-vector multiplication kernel (1 vector)
- 6: end for

Algorithm 3 Time-parallel time-integration algorithm for solving  $A_i x_i = b_i (i = 0, ..., n-1)$ . Values with over bars (<sup>-</sup>) indicate approximate values, while values without over bars indicate exact values. Algorithm 1 is used to solve m sets of linear systems of equations in line 9 in parallel.

1: Set  $\mathbf{x}_{-1} \Leftarrow 0$  and  $\bar{\mathbf{x}}_i \Leftarrow 0 (i = 0, ..., m - 2)$ 2: for i = 0; i < n; i = i + 1 do 3: Guess  $\bar{\mathbf{x}}_{i+m-1}$  using standard predictor Set  $A_i$  and  $b_i$  using  $x_{i-1}$ 4: 5: $\bar{\mathbf{A}}_i \Leftarrow \mathbf{A}_i$ 6:  $\mathbf{b}_i \Leftarrow \mathbf{b}_i$  $\mathbf{while} \;\; rac{|\mathbf{A}_i ar{\mathbf{x}}_i - \mathbf{b}_i|}{|\mathbf{b}_i|} > \epsilon \;\; \mathbf{do}$ 7: 8: Guess  $\bar{\mathbf{A}}_j$  and  $\bar{\mathbf{b}}_j$  using  $\bar{\mathbf{x}}_{j-1}$  (j = i + 1, ..., i + m - 1)Refine solution  $\{\bar{\mathbf{A}}_i \bar{\mathbf{x}}_j = \bar{\mathbf{b}}_j\}$  with initial solution  $\bar{\mathbf{x}}_j (j = i, ..., i + m - 1)$ : 9: Computed using iterative solver with matrix-free matrix-vector multiplication kernel (m vectors)10:end while  $\mathbf{x}_i \Leftarrow \bar{\mathbf{x}}_i$ 11:12: end for

1.2.2.5 CPU を対象とした性能の最適化

本アルゴリズムでは最内ループがm = 4の連続アクセスとなるため、幅4での SIMD 演算やデータアク セスが可能となっている。行列ベクトル積においてはマルチコア計算におけるコア間データ競合が問題 となるが、本アルゴリズムにおいてはコアごとにテンポラリ配列を確保する方法によってデータ競合を 回避している。これにより、SIMD 命令が大部分を占めるコードがマルチコア上で実行されるような CPU 版実装となっている。なお、コンクリート構造物が地盤に埋まっているような領域における地震波動解析 において、標準的な PCGE 法と比べて上記アルゴリズムは FLOP カウントで 1/5.56 に削減することがで きている。精度混合演算および高効率な SIMD 演算を使うことができるようになるため、実際には演算 数の減少倍率以上の高速化が期待され、実際、CPU ベースの京コンピュータにおいて 9.09 倍の高速化が 得られている。 1.2.3 OpenACC による GPU 計算の導入

1.2.3.1 標準的な実装

前章で述べた CPU ベースのソルバはアルゴリズム構成が GPU にも適したものとなっている。例えば、 時間並列積分の導入は疎行列ベクトル積計算におけるメモリアクセスの不規則性を大幅に改善させるた め、GPU で計算を行う上では有利なアルゴリズムと考えられる。また、AI の導入は計算量と同時に必要 なデータ転送量を削減することが出来るため、演算に対してデータの転送が低速な GPU に適していると 考えられる。そのため、CPU 向けに開発されたコードにそのまま指示行を追加するだけでも一定の高速 化が実現するものと推測される。我々は、まず以下に示すような一般的な手順に従い、CPU-based コード へ OpenACC を導入する。

本手法においてはいずれの計算も要素ごとあるいは節点ごとの計算が主であり、容易に GPU 計算の導入が可能である。そこで、ソルバ全体を対象として OpenACC を導入する。GPU ヘオフロードしたいルー プに対して図 1.7 のように指示行を加えることで GPU 上での計算を行う。OpenACC では並列化に 3 つの 階層が存在し、上から gang, worker, vector と名付けられている。NVIDIA GPU 上では vector が CUDA で の thread に相当する並列化粒度となるので、コンパイル時のメッセージを確認しながら、想定している 並列化粒度となるように各ループを GPU 化する。図 1.7 は疎行列ベクトル積カーネルの実装例を示して いる。1 スレッドが 1 要素を順に担当する形でスレッドの割り当てを行っている。最終的には各スレッド が計算した要素ごとの計算結果を全体ベクトルへと足しこむ操作が必要で、これはデータ競合が発生し うる箇所である。既往の研究から atomic 演算を使用した足しこみが coloring 等の明示的なデータ競合の 回避よりも高速であるということが分かっているため、atomic 演算を使用する。OpenACC 上では対応す る指示行を追加することによって atomic 演算を有効化できる。

```
1 #pragma acc parallel loop collapse(2)
2 for(i_ele = 0; i_ele < (*n_element); i_ele++){</pre>
З
     for(i_vec = 0; i_vec < (*n_vector); i_vec++){</pre>
4
        cny0 = connect[i_ele][0];
       cny1 = connect[i_ele][1];
5
6
7
       cny9 = connect[i_ele][9];
8
9
       u0x = u[cny0][0][i_vec];
       u0y = u[cny0][1][i_vec];
10
       u0z = u[cny0][2][i_vec];
11
12
13
       u9z = u[cny9][2][i_vec];
14
       Au0x = ...
15
16
       Au9z = ...
17
18
19
       #pragma acc atomic
       r[cny0][0][cny0] += Au0x;
20
21
22
       #pragma acc atomic
23
       r[cny9][2][cny9] += Au9z;
24
     }
25 }
```

🗵 1.7. Porting example of the matrix-vector multiplication kernel on a tetrahedral second order mesh.

OpenACC では特にデータ移動に指示を加えない場合、期待する計算結果が得られるようにループ計算 前に CPU から GPU へ、ループ計算後に GPU から CPU へとデータの転送を自動的に行う。GPU 計算に おいては GPU と CPU とのデータ転送は大きなボトルネックとなり、これを頻繁に行うと全体の性能が 大幅に低下する。データ転送コストを最小限に抑えるため、図 1.8 のように明示的にデータ転送を指定す る指示行を追加する。これらによって、GPU 上でソルバ全体の計算を行うことが可能となる。

```
1 #pragma acc data present_or_copy(u, r, connect, err,...){
2 while(err < tolerance){
3
4   /* CG computation in GPU */
5
6   #pragma acc update host(err)
   }
7 }</pre>
```

 $\boxtimes$  1.8. Example code for data transfer in a conjugate gradient loop.

今回開発するコードは MPI 並列化がされているため、複数 GPU を用いる実装を想定している。GPU 計算時には、1MPI プロセスに 1GPU を割り当てる形で計算を行う。袖通信においては GPU 間でデータの送受信が必要となるが、ここでは GPUDirect を使用したデータ転送を行う。図 1.9 のように、指示行を追加することによって、送受信の対象として GPU 上のメモリを直接指定して MPI\_Isend/Irecv を発行することができる。上に述べた実装を baseline OpenACC 版として、さらに性能を高めるために低精度変数によ

図 1.9. Example code for point-to-point communication.

1.2.3.2 低精度変数の導入

提案するソルバは可変的前処理における共役勾配法において低精度演算を導入することが可能となっ ている。共役勾配法にはメモリバンド幅律速となる演算が多く含まれている。そのため単純に各変数の bit 数を削り、footprint を削減することによって各計算のコスト削減が期待できる。SC18GBF ソルバの CPU 実装では前処理部分にあたる*PreCG<sub>c</sub>*, *PreCG*において FP32 を使用している。FP32 をは じめとする浮動小数点数は IEEE 754 の規格によって式  $x = (-1)^{sign} \times (1 + fraction) \times 2^{exponent-bias}$ (正規化数の場合)となる定義が標準化されており、符号部の lbit が対象となる数の正負を決定する。同 様に指数部がダイナミックレンジを、仮数部が精度に大きな影響を持つ。近年では FP32 よりも低精度と なる浮動小数点数が広く計算機ハードウェア上でサポートされるようになっている。代表的なものとし ては FP16 があげられる。これは FP32 変数の指数部、仮数部の bit をいずれも短縮したものに相当する。 深層学習をはじめとする、精度のそれほど必要とされない演算に対して FP16 の導入は容易であるが、ダ イナミックレンジの狭さから一般的な科学技術計算への利用は困難であり、反復法ソルバにおいては特 に指数部の bit 数が多い変数の使用が必要となる。これに対して、bfloat16 と呼ばれるデータ型が提案さ れている。これは FP32 と同等の指数部の bit 数を持ち、仮数部を 7bit にまで削除したものにあたる。こ れによって overflow/underflow の発生を抑えられるが、精度としてはマシンイプシロンが1/2<sup>7</sup> = 1/128相 当であるため、前処理部分について反復法の収束性が担保されない可能性がある。



 $\boxtimes$  1.10. Bit alignments of the sign, exponent, and fraction parts in each data type. Each cell describes one bit.

以上を踏まえて、本ソルバでは図 1.10 に示される 21bit からなる変数を前処理部分で使用する。以降 ではこのデータ型を FP21 と呼ぶ。bit 管理を容易にするため、64bit 配列の各要素に FP21 変数が3つ格納 し、1bit の空白を設ける構成をとる。この変数は FP32 および bfloat16 と同等のダイナミックレンジを持 っている。仮数部 bit が 12bit あるため、FP16 や bfloat16 よりも精度の点で有利と考えられる。またこの 変数は符号部と指数部、指数部と仮数部の境界が FP32 変数と一致しているため、データ型の変換に伴う 複雑な操作を伴わないことも利点の一つである。このデータ型はハードウェア上ではサポートされてい ないため、データ格納にのみ使用する。すなわち、この変数は FP21 としてメモリに格納されており、変 数を使用する計算に際しては FP21 から FP32 への変換を行ったのち演算に用いる。演算後は、FP32 で得 られる結果を FP21 に変換してからメモリに格納する。図 1.11 には実装の例として FP21 から FP32 への 変換が示されており、加減算及びビット演算のみによる関数として OpenACC で実装が可能となってい る。この関数を呼び出す際にスタックフレームの使用が発生すると大幅に性能が低下するため、関連する 操作はすべてインライン展開する必要がある。FP32から FP21 への変換においては、FP32の仮数部下位 bit を切り捨てることによっても FP21 を得ることが可能であるが、丸め誤差を半減させるために IEEE シ ステムで標準とされる最も近い浮動小数点数への丸めを模した形で数値の丸めを行う。もともと FP32 で 表現された値をa、この数の仮数部を切り捨てることで FP21 とした値を $\bar{a}$ として、 $a + (a - \bar{a})$ を対象とし て仮数部の切り捨てを行い、得られた数を変換結果とする。対象とする有限要素ソルバは 3 次元の問題 を対象としているため、x, y, zの3成分が1つの節点に対して存在する。そのため、64bit 配列の1要素 ごとに1節点の値である FP21の3要素を対応付けすることができ、これらの要素へのメモリアクセスを 容易に取り扱うことができる。

```
1 static inline float conv_fp21_to_fp32(unsigned int fp21tmp)
 2 {
 З
     fp21tmp <<= 11;
     float *b = reinterpret_cast<float*>(&fp21tmp);
 4
 5
     return b[0];
 6 }
 7
 8 static inline float conv fp21x3 to fp32 x(unsigned long fp21x3tmp)
 9
   {
10
     return conv fp21 to fp32(
             ((unsigned int)((fp21x3tmp >> 0) & 0x1fffff)));
11
   }
12
13 static inline float conv_fp21x3_to_fp32_y(unsigned long fp21x3tmp)
14 {
15
     return conv_fp21_to_fp32(
             ((unsigned int)((fp21x3tmp >> 21) & 0x1fffff)));
16
   }
17
18 static inline float conv fp21x3 to fp32 z(unsigned long fp21x3tmp)
19 {
     return conv_fp21_to_fp32(
20
             ((unsigned int)((fp21x3tmp >> 42) & 0x1fffff)));
21 }
```

# ☑ 1.11. Mock code for the FP21 implementation. These functions convert FP21 numbers into FP32 numbers and are in-lined for all computations requiring FP21 computations.

なお、行列ベクトル積カーネルの計算にあたっては atomic 演算が使用されているが、これは実数では FP16/32/64 にしかハードウェア上のサポートがないため、カーネルの出力ベクトルとしては FP21 でなく FP32 を用いる必要がある。よって共役勾配法の可変的前処理内では、FP21 によるベクトルと FP32 によ るベクトルが混在する形となる。

1.2.3.3 その他の性能改善のための各種の実装

前節によって、ソルバに低精度変数 FP21 を導入することができ、baseline 版の OpenACC コードと比較すると計算時間が短縮されると期待される。ただし、提案手法のソルバ構成においては OpenACC を使用する際に CUDA 等の低レベル記述と比較して性能を低下させるような操作が含まれているため、以下のような方法によって、性能低下を最低限に抑えることが望ましい。

・複数ベクトルの内積計算

内積計算では本来 loop 指示行に reduction オプションを加えるのみで容易に計算が可能である。ただ し複数ベクトル時の計算については注意が必要となる。現状では OpenACC の制約上、reduction が作用す るのはスカラー変数のみで、配列を対象とした縮約が指示できない。これは、OpenACC の現在の仕様で は内側のループを並列化することは不可能であることを意味している。そこで OpenACC での計算に当た ってはスカラー変数をベクトル本数分だけ用意し、節点数だけループを回す。コードは図 1.12 のように 表される。これによって GPU 上での計算は可能であるが、GPU の各スレッドがそれぞれ離れた位置を参
照するストライドメモリアクセスとなるため、性能が低下することになることが考えられる。そこで、内 積計算については CUDA のカーネルを一時的に使用する。図 1.13 のように、対応する指示行を挿入し、 wrapper を経由することで、OpenACCベースのコードから CUDA カーネルを呼び出すことが可能である。 これによって、内積部分の性能低下を防ぐことが出来る。

☑ 1. 12. Example code for computing dot products for multiple vectors in OpenACC.

```
1 __global__
2 void dotproduct(int *n, float *x, float *y, float *z, float *xy){
3  /* CUDA computation */
4 }
1 void dotproduct_wrapper(int *n, float *x, float *y, float *z, float *xy){
2  dotproduct<<<960,128>>>(n, x, y, z, xy);
3 }
1 #pragma acc host_data use_device(n, x, y, z, xy){
2  dotproduct_wrapper(n, x, y, z, xy);
3 }
```



・カーネル起動コストの削減

OpenACCはCUDAと比較するとループの起動に必要なオーバーヘッドが大きくなる。我々がSC18で 開発したソルバについてはマルチグリッド法やAIによる一部領域の集中的な計算が含まれているため、 自由度の小さい問題を解く操作が含まれる。このようなループ長の短くなる計算に関しては、カーネル起 動のオーバーヘッドが相対的に増加する。このオーバーヘッドが性能を大幅に低下させうるため、実装に あたっては一部のコードに修正を加えた。具体的には、非同期実行しても結果に支障が出ないループ群に ついて、OpenACCのオプション#pragma acc async(1)および#pragma acc wait(1)を追加させることによって、 カーネル起動コストの隠蔽を行った。また、OpenACC内のループにローカル変数として配列が使用され ている場合、それらは register ではなく local memory に格納されるように解釈される場合があり、このと き local memory の確保のために一定のサイクル数が必要となる。これもループ長の短い演算にとっては 計算時間のうちの大きな割合を占めることになるため、scalar 変数にすべて書き下す形でコードの修正を 行った。

1.2.4 性能計測

この章では、産業総合技術研究所のスパコンである AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI)の1計算ノー ドを使用して、開発手法の性能評価を行う。ABCI は、各計算ノードに GPU として NVIDIA Tesla V100 SXM2 を4台、CPU として Intel Xeon Gold 6148 を2 台搭載している。GPU は合計で倍精度理論ピーク性 能 7.8 TFLOPS×4 GPU=31.2 TFLOPS、 メモリバンド幅は 900 GB/s×4GPU=3600 GB/s である。ノード内 の GPU は NVLink によって相互に接続されており、その帯域はそれぞれ双方向に 100 GB/s である。ま た、CPU に関しては倍精度理論ピーク性能が 1.53TFLOPS×2=3.07 TFLOPS、メモリバンド幅は 256GB/s となっている。その他の測定環境として、コンパイラは PGI compiler version 19.3、 CUDA は version 10.0 となっている。

今回は小規模な都市を対象とする問題としてモデルを作成した。対象領域は 2 層の地盤とコンクリートを模した層を含んだ領域で、その自由度は四面体二次要素で 39,191,319 である。側面及び底面には半無限吸収境界条件を適用する。なお、開発したソルバで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。このモデルに神戸波を入力する。時間刻みは 0.01 秒で、タイムステップ数は 25 とする。各ソルバに関して、収束判定は残差ノルムの閾値 ε = 1×10<sup>-8</sup>との比較によって行う。また、ソルバの各前処理PreCG<sub>c</sub>, PreCG<sub>cp</sub>, PreCGの各閾値は SC18GBF ソルバにならってそれぞれ 0.7, 0.05, 0.25 と設定する。各前処理ソルバで計算すべき問題の自由度はそれぞれ (PreCG<sub>c</sub>, PreCG<sub>cp</sub>, PreCG)=(5,118,339, 65,544, 39,191,319)となっている。計算には 4MPI プロセスを使用しており、すべての計測時間は解析結果のファイル出力を含んでいる。

# 1.2.4.1 FP21の性能確認

前処理ソルバPreCGに含まれる各演算を取り出して性能の比較を行う。計算時間は MPI\_Wtime によっ て測定する。比較対象としては FP32 による CPU 版、FP32 による OpenACC 版、提案手法である FP32/FP21 版を取り上げる。

まず、単純なベクトル演算(AXPY)カーネルの計算時間を比較する。ここでは、式 $x(i) = x(i) + \alpha y(i)$ のような計算を行っている。配列 $x \ge y$ は FP21 または FP32 で、係数aは FP32 固定とする。それぞれの実装における計算時間は表 1.4 に示される。この計算はメモリバンド幅律速と考えられる。CPU のメモリバンド幅は 63.9GB/s、GPU のメモリバンド幅は 900GB/s であるため、想定されるカーネルの性能比は(CPU): (baseline OpenACC): (proposed) = 1/(32/63.9) : 1/(32/900) : 1/(21/900) = 1 : 14.1 : 21.5 である が、これを踏まえると我々の GPU 実装は妥当な高速化倍率を得ていると評価することができる。過去の ベンチマークによれば、V100 GPU における実測値メモリバンド幅として 750GB/s という値が出ており、今回の計測で得られたバンド幅は十分高い値であると評価できる。また FP21 を導入することで性能が 1.5 倍となっており、使用メモリ量の比率と一致することから、FP32、FP21 間の精度変換コストについて は無視できる形で計算が行われていることが確認できる。

次に、内積カーネルの計算時間を比較する。ここでは、式 $\alpha = \sum \left( \left( x(1, i) * y(1, i) + x(2, i) * x(2, i) \right) \right) \right)$ 

y(2, i) + x(3, i) \* y(3, i) \* z(i)のような計算を行っている。配列 $x \ge y$ は FP21 または FP32 で、配列

zは FP32 で固定とする。それぞれの実装における計算時間は表 1.4 に示される。内積の計算に関しても 理想的には性能はメモリバンド幅に律速となる。想定される各カーネルの性能比としては(CPU): (baseline OpenACC): (proposed) = 1/((32×7)/63.9) : 1/((32×7)/900) : 1/((21×6+32)/900) = 1 : 14.1 : 20.0 となる。この数値を実測値と比較すると、シンプルな OpenACC によるカーネルのメモリ バンド幅が低下していることが分かる。現状の OpenACC の複数ベクトル内積計算を行う際にはストラ イドのあるメモリアクセスが発生する形でしか書けないため、これが性能に悪影響を及ぼしていること が確認できる。一方で、CUDA 版の実装では上述の AXPY カーネルと同程度のバンド幅となっており、 十分な性能が得られていることが確認できる。

最後に、行列ベクトル積カーネルの計算時間は表 1.4 下段に示される。行列ベクトル積カーネルに関 しては単純な OpenACC の導入によって 15.0 倍、FP21 も含めた実装によって 14.8 倍の高速化となって おり、GPU 上で 4TFLOPS 程度の性能が出ている。このカーネルはベクトルの read ではなく write や計算 がボトルネックとなっているので、シンプルな実装と FP21 を含んだカーネルの間で有意な性能差は確認 されなかった。

		CPU-based	baseline OpenACC	proposed
Precision		FP32	FP32	FP32/21
	Elapsed time	$9.61\mathrm{ms}$	$0.605\mathrm{ms}$	$0.401\mathrm{ms}$
AXPY	Measured bandwidth	$50.2\mathrm{GB/s}$	$797.1\mathrm{GB/s}$	$802.2\mathrm{GB/s}$
	Speeding up ratio	1	15.8	24.0
	Elapsed time	$6.20\mathrm{ms}$	$0.456\mathrm{ms}$	$0.277\mathrm{ms}$
Dot product	Measured bandwidth	$54.0\mathrm{GB/s}$	$735.1\mathrm{GB/s}$	$822.9\mathrm{GB/s}$
	Speeding up ratio	1	13.6	22.4
	Elapsed time	$54.61\mathrm{ms}$	$3.65\mathrm{ms}$	$3.69\mathrm{ms}$
Matrix-vector product	Measured FLOPS per MPI process	0.27 TFLOPS	4.11 TFLOPS	4.07 TFLOPS
	Speeding up ratio	1	15.0	14.8

# 1.2.4.2 ソルバ全体の性能評価

この節では、ソルバ全体の計算時間の評価を行う。使用するソルバは、CPU-based ソルバとこれをその まま OpenACC あるいは CUDA で GPU 化したもの、提案手法である OpenACC に FP21 演算を加え、各 種のチューニングを施したもの、そして SC18GBFsolver となる。SC18GBFsolver に関してはポータビリ ティと引き換えにコードを書き替えることで Volta GPU における性能を高めている。具体的には行列ベ クトル積カーネルにおいて倍幅半精度演算を導入し、要素ごと計算結果を Shared memory 上で縮約する ことで全体ベクトルへのアクセス回数を削減しているほかに、疎行列ベクトル積と袖通信の計算の順番 を組み替えることによって計算と通信のオーバーラップを実現している。なお、SC18GBFsolver において は、大規模計算機環境、特にラック間の通信帯域に起因する隣接通信コストを低減させるために時間並列 計算の4ステップベクトルを2本×2組に分割し、それぞれの袖通信を別の組のベクトル演算とのオーバ ーラップを行うが、一方で今回の対象は小規模問題としており、特に同一計算ノード内であれば V100 GPU は NVLink によって高速に接続されるため、袖通信コストはボトルネックとならなくなる。これを踏まえて、今回のソルバについてはベクトルの組を分割せず、4 本のベクトルをすべて同時に計算する。

	CPU-based	baseline OpenACC	CUDA	proposed	SC18GBF
Precision in $PreCG_c$ , $PreCG_{cp}$ , and $PreCG$	FP32	FP32	FP32	FP32/21	FP32/21/16
PreCC	$161.4\mathrm{s}$	$14.89\mathrm{s}$	$14.21\mathrm{s}$	$9.79\mathrm{s}$	$7.47\mathrm{s}$
I TEOGe	(6199)	(6300)	(6210)	(4751)	(4308)
$D_{mo}CC$	$69.9\mathrm{s}$	$15.94\mathrm{s}$	$12.20\mathrm{s}$	$13.22\mathrm{s}$	8.98s
F TeO G <sub>cp</sub>	(28830)	(28272)	(28491)	(28861)	(26887)
$D_{mc}CC$	$372.0\mathrm{s}$	$22.90\mathrm{s}$	$22.30\mathrm{s}$	$18.27\mathrm{s}$	$16.98\mathrm{s}$
Freug	(2674)	(2729)	(2735)	(2575)	(2797)
CC	$83.9\mathrm{s}$	$5.77\mathrm{s}$	$4.57\mathrm{s}$	$5.89\mathrm{s}$	8.32  s
CG	(91)	(89)	(89)	(122)	(129)
Other	$94.8\mathrm{s}$	$7.21\mathrm{s}$	$7.73\mathrm{s}$	$8.66\mathrm{s}$	$5.99\mathrm{s}$
Total	$781.8\mathrm{s}$	$66.71\mathrm{s}$	$61.02\mathrm{s}$	$55.84\mathrm{s}$	$47.75\mathrm{s}$
Speeding up ratio	1	11.7	12.8	14.0	16.4

ソルバの計算時間は表 1.5 のように表される。なお、GPU の計算結果に関しては、行列ベクトル積カ ーネルの要素ごとの計算結果の全体ベクトルへの足しこみにおいて atomic 演算を使用しているため、計 算順序の乱れによる数値誤差が発生する。最終的に得られる解析結果は共役勾配法の収束判定値の範囲 内で一致することを確認しているが、ソルバの反復回数については一定ではなく、解析ごとに異なる回数 をとる。そのため、性能については 10 回同様の計測を行ったものの平均値を評価対象としている。

ABCI 計算ノード上の CPU を使用した場合の計算時間は 781.8s であり、これに対して単純に指示行を 挿入して GPU 計算を導入したソルバ(baseline OpenACC solver)では計算時間は 66.71s となっているため、 11.7 倍の高速化が実現している。また比較のために、CPU-based ソルバをそのまま CUDA に置き換える 形でもソルバを作成した。この場合の計算時間は 61.02s となっている。OpenACC よりも 10%程度高速と なっているが、この計算時間の差は以下の 3 点が主な要因となっている。1 つは、内積部分の性能差であ る。またもう 1 つは、地盤構成則や倍精度の一部計算のような、変数を多く使用するようなコードに関し ては CUDA よりもレジスタ使用量が大きくなる傾向にあり、レジスタのスピルが発生することで性能が 低下していることが要因である。最後に、OpenACC のループ起動オーバーヘッドが CUDA よりも大きい ことがあげられる。これはPreCG<sub>cp</sub>部において特に CUDA と OpenACC の計算時間の差異が大きくなって いることからも確認することができる。なお、同じ精度の計算を行っているにも関わらず反復回数に若干 の差異がみられるが、これは各カーネルにおける計算順序がそれぞれ異なることによる数値誤差が影響 したものである。一方で、提案手法は OpenACC をベースとしたソルバに FP21 を変数として使用し、オ ーバーヘッドを削減するための手法を導入したものに相当するが、この計算時間は 55.84s と、オリジナ ルの OpenACC よりも 20%高速に計算されている。これによって、オリジナルの CPU コードをそのまま CUDA 化したものよりも計算時間が短縮されている結果となった。このことから、FP21 の導入による各 カーネルの計算時間の短縮がソルバ全体の高速化につながっていることが確認できる。

また、開発手法を用いて、図 1.14 に示される地上/地下構造物を含んだ地盤を対象とした地盤振動解 析を行った。モデルの自由度は 16,291,917,564 である。計算機としては GPU をベースとした大型計算 機環境である Summit を用い、時間刻み dt = 0.001s での 2500 時間ステップ分の解析を計算ノード 384 台によって計算した。解析結果としては図 1.14c に示されるように、構造物の geometry を反映した複雑 な応答が得られている。このことから、対象領域は解析結果に大きな影響をもたらすことが確認でき、提 案手法による解析の重要性が示された。



 $\boxtimes$  1.14. Application example on Summit. a) 1024 x 1024 m city are with underground and building structures surrounded by two-layered ground model; b) underground structures in the domain; c) displacement distribution at t = 2.50 s.

なお、前処理で使用する変数の精度低下によってソルバ内の反復回数がいずれも増減していることが 確認できる。比較のために FP21 での計算をそのまま bfloat16 へと差し替えたところ、*PreCG*が収束しな くなる結果となったため、今回対象とした単純に精度を下げるという問題設定においては bfloat16 よりも 仮数部に bit 数が必要であることが確認された。このような精度の検証、適用範囲の検証に関しては今後 の研究・検討が必要であると考えられる。

提案手法のソルバ性能は V100 GPU に向けて徹底したチューニングを行った SC18GBFsolver の 65%程 度の性能であるが、CPU 版との性能を踏まえると十分な高速化であり、ポータビリティの観点を踏まえ ると実用に耐えうるものである。開発コストに関しても、元のコード群の行数が 33,527 で、これに CUDA を導入する際には 18,324 行の修正・追加が必要であったが、今回 OpenACC を導入するにあたっては 9,300 行の修正・追加となったため、コードの保守管理の点で、ディレクティブを中心とした実装が優位である と評価できる。 1.2.5 おわりに

開発された地震シミュレーション手法の利用を促進するうえでは、ポータビリティ・保守性を保ってコ ードの性能を高めることが重要な課題の一つである。シミュレーションの中核をなす陰解法・低次要素非 構造格子による三次元有限要素解析に対して、この計算時間を削減するために高速なソルバが開発され てきた。一方でこのソルバは AI や独自のデータ型を含む精度変動演算が導入された非常に複雑なアルゴ リズムとなっている。また高い性能を実現するために対象とするハードウェアを活用したチューニング を徹底的に施しているため、コードの保守性とポータビリティは低くなっている。そこで本検討では OpenACC の適用可能性を評価した。ソルバ全体では、CPU上での計算時間と比較すると OpenACC の導 入により 14.0 倍の性能が実現していることから、十分な高速化が達成されていると評価出来た。この性 能は徹底的な性能のチューニングを行った SC18GBF ソルバと比較しても 80%程度の性能となっており、 ディレクティブベースの単純な実装によって、対象とするアプリケーションがより少ない開発コストで 十分に高速化されることが示された。

## 1.3 交差点の改良モデルによる混合モード大規模避難シミュレーション

1.3.1 はじめに

日本では、津波で引き起こされた大量避難中に自動車の使用を許可すべきかどうかという質問がよく 出される。一般的な助言は徒歩で避難することであるが、東日本大震災での地震と津波からの避難の場面 では多くの自動車が使用された。狭い道路に満ちた日本の都市では、車の速度は緊急避難中の歩行者の速 度に非常に近いと予想された。そのことが徒歩で避難するという一般的な助言の主な理由かもしれない。 ただし、母親、高齢者、病人など、車を必要とする人々には使用を許可する必要がある。重要な質問は、 許可される車の台数と、これらの少数の車の使用者が安全な目的地に到達できる時間枠(つまり、津波警 報後の期間)があるかどうかである。都市の各部分から何台の自動車を許可するか、これらの自動車ユー ザがいつ避難を開始すべきか、どの目的地が彼らにとってより効果的であるかなどを決定するために、定 量的調査を実施する必要がある。これらを研究するには、歩く人々で満たされた狭い道路、広い道路で歩 行者用通路の外を歩く人々、地震による信号機の破損、交通信号を無視して交差点を渡る人々など、車が 遭遇する可能性のある全ての現実の障害が含まれる必要がある。緊急避難において歩行者が優先される ため、道路を歩き回る人や、信号機を再確認せずに交差点を渡る人のような状態が起こることは、車の使 用者が予想するはずである。主な問題は、これらの現実の条件が含まれる場合、避難の進捗状況を定量的 に評価する方法である。

ほとんどの避難研究では、使いやすさ、開発のしやすさ、利用可能な計算リソースの制限などのため、 MATSim のような高度な交通シミュレータを使用している。これらの高度な交通シミュレータは、道路 を 1 次元のリンクとしてモデル化し、壊れた信号機、狭い道路上の多くの歩行者などの条件を考慮でき ない。そのため、道路の 2 次元モデルを含むことが出来て、地震災害時に遭遇する実世界の状態をシミュ レートすることができる高度なモデルは、緊急避難中において車の使用を許可することによって生じる 影響を研究するために不可欠である。地震と津波によって引き起こされた緊急避難中に、交差点で遭遇す るこのような現実の条件のいくつかを処理するために、我々は先に開発した HPC 拡張避難シミュレータ を改良した。具体的には、シミュレータを改善して、信号が故障している交差点における、車と車の相互 作用及び車と歩行者の相互作用を含める。これらの 2 つの新機能を実証するために、いくつかのシミュ レーションを実施した。

信号機が破損している交差点において、車と車および車と歩行者の相互作用に対して改良されたモデ ルを実装するために、最初に避難シミュレータを更新して、交差点での車両の軌道と速度プロファイルを 正確に再現する。この結果、2018 年度に実装された交差点のプロトタイプモデルがさらに改善され、異 なる方向に走行する自動車の衝突点を正確に計算できるようになった。さらに、車と歩行者の相互作用が 更新され、スムーズなエージェントの応答が生成される。この改善された車と歩行者の相互作用モデル は、古いモデルと比較して、スムーズで安定したエージェントの応答を生成する。

このレポートの残りの部分は次のように構成されている。完全を期すために、1.3.2 では、ジャンクションでの近似車両軌跡と自由流速度プロファイルの詳細を示す。車と歩行者の相互作用の改善については、1.3.3 で説明する。1.3.4 では、改善された交差点モデルを使用した大規模シミュレーションを実証 するためのいくつかの数値例を示す。 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

Alhajyaseen らによる車両軌道観測[1]を分析して、2018 年度において車両の軌跡は B スプラインで簡 単に近似できることが判った。U ターンを除いて、ほとんどの交差点ジオメトリの軌跡は、ノットベクト ル[0,0,0,1,1,1]の B スプライン曲線と、交差点への入り口の車線中心を使用して近似できる。

入ってくる車線と出て行く車線の中心線の交点、および出口点の車線中心(図1.15参照)を制御点と して使用する。必要な3つの制御点はわかっていますが、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するため、車両の軌道と、軌道上の単純な評価点を簡単に作ることができる。 Alhajyaseen らにより提案された近似[1]と比較すると、我々のB-スプライン近似は数センチメートルし か逸脱していないことが判った。この差はこの特定のアプリケーションでは無視でき、車両の寸法と比較 しても無視できる。また、NURBSを使用すると非常に正確な近似を作成できることが判ったが、これに は観測と線形方程式の解が必要である。エージェントの更新における計算量を削減するために、Bスプラ イン曲線上の少数のポイント(5~10 ポイントなど)を使用して車両エージェントの軌道を定義し、図 1.16に示すように、複数の軌跡の交点が事前に計算される。正確な交点を計算してBスプライン曲線を 計算するのは複雑なので、近似方法を使用して交点を計算する。まず、Bスプライン曲線上のN 個のポ イントを見つけ、それらの12 個のポイントを接続する N-1 個の線分を使用して、それらのN 個のポイン トを接続することにより、各 B スプライン曲線の線形近似を取得する。2 つの B スプライン曲線のおよ その交点は、対応する線形近似の交点を計算して判る。関連するステップを図1.17 に示す。N=12 で十 分に正確な結果が得られる(図1.17 (e) を参照)。



図 1.15. 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 1.16. 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

交差点における車両と歩行者の相互作用のモデリングでは、自動車のエージェントが現実的な自由流 動速度プロファイルを持つことが不可欠である。車両速度は歩行者の速度よりも1桁大きくなる可能性 があるため、車両速度の非現実的または突然の変化は歩行者の異常な行動を引き起こす可能性がある。 Charitha らによると [6]、車両の速度プロファイルは高次の多項式曲線で近似できる。近似にはフィール ド観測が必要であるが、3つの既知のパラメータと1つの制約で定義できる次の3次多項式近似を使用す る。

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

 $V_{depart}\left(\frac{x}{L}\right) + V_{approach}$ 

(1.2)

ここで *L*は軌跡の長さで、 $x \in [0, L]$ である。  $x = \frac{L}{2}$  で加速度はゼロ(つまり、 $x = \frac{L}{2}$  で dv/dx = 0) であり、車両は  $V_{min}$ の最小速度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 速度と見なすことができる。車両の質量が与えられた場合、ジャンクションへの車両の接近速度(すなわ ちv(0)) および $V_{depart}$ は、望ましい出発速度v(L)である。

上記の速度プロファイルは、軌道に沿った長さ xで、特定の自動車エージェントの速度の上限のみを 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 (1.2)で定義される対応する上限を $v_i(x)$ とする。 $u_i(x) \ge v_i(x)$ の場合、i番目の自動車エージェントは、式 (1.2)の速度に従うように減速する。 その他の場合は $u_i(x)$ または $v_i(x)$ 未満の任意の速度で続行する。減速と加速の詳細については、次のセク ションで説明する。



1.3.3 信号のない交差点での車と車間の相互作用

津波により大量避難が引き起こされた場合、先に起きた地震が交差点の信号を機能不全にする可能性 が非常に高いため、信号機が機能していない交差点での相互作用をシミュレートする必要がある。このモ デルでは、運転者が合理的に行動すると仮定する。特に、運転者はパニックに陥らず、運転を道路車線と 交差点での標準軌道に制限すると仮定する。さらに、下記を想定している。

- 1. 交差点に近づくと、車は速度を適切な範囲まで下げる。
- 2. 各車は、隣の車の位置、方向指示器を観察し、相対速度を推定する。
- 3. 車が潜在的な衝突を識別した場合、適切な減速を適用してその間の安全な距離を維持すること により、衝突を回避する。

交差点での車と車の相互作用を次の3つのグループに分類する。

- 1. 交差する軌跡(たとえば、図 1.19の V1 と V3)
- 2. 分岐する軌跡
- 3. 1つに統合される軌跡(たとえば、図 1.19の V2 と V4)



図 1.19. 考慮される 3 つの異なるタイプの衝突の例: V1-V3 は交差する軌道上にある。V2~V4 は 軌跡のマージ。V5-V3 は同じ軌道上にある。

交差点での衝突を解決するために実装されたアルゴリズムはやや複雑である。ただし、衝突地点に到 達するまでに時間がかかる車は、他の車が途切れることなく移動できるという単純なルールに基づいて いる。軌道をマージする場合、V2 と V4 の両方の車がマージされた道路に進入すると、それらの間の安 全なギャップを維持して走行する。同じ車線上の2 台の車両間の安全な間隔は、減速する時間と追加の 安全な距離を考慮して計算される。追加の安全距離は、車の長さに設定される。この安全な距離は、道 路上の車の数に応じて制御する必要があり、観測に応じて設定する必要がある。図 1.20 は、交差点での多くの車のスナップショットを示す。信号機が機能していないと想定しているため、各交差点で各車の速度が低下し、渋滞につながる。



図 1.20. 交差点でのシミュレートされた車と車の相互作用のスナップショット。

# 1.3.3.1 車と歩行者間の相互作用

車と歩行者の相互作用の場合、車は歩行者を優先するように設定される。2018 年度のプロトタイプモ ードでは、車は周囲のすべての歩行者を考慮し、ORCA アルゴリズムを使用して運転速度と方向を見つ け、周囲のすべての歩行者との衝突を回避した。これにより、自動車エージェントの反応が滑らかでな く、やや不安定になった。本年度は、衝突しやすいエージェントのみを ORCA アルゴリズムに送信する ことによって、自動車エージェントの応答安定性が向上した。まず、車のエージェントは、適切な減速 で停止する前に移動しなければならない距離 dを推定する。次に、長さ dの投影経路の前方に、赤色で 示されている歩行者エージェントを特定する。また、車のエージェントは、どの歩行者エージェント

(緑色で表示)が長さ*d*の投影経路に入ることができるかを計算し、これらの歩行者エージェントのどれが車と衝突できるかを識別する。歩行者エージェントのこれら2つのグループのみが ORCA アルゴリズムに送信され、自動車エージェントは安定したスムーズな応答を生成する。図1.22は、ジャンクションで、歩行者と歩行者がいることで減速した車のスナップショットを示す。



図 1.21. 車はまず減速を停止するために必要な距離 dを計算し、どの歩行者が長さ dの予測経路に あるかを計算し、減速して衝突を防ぐ。赤色で示されたエージェントは車の進路を進むが、緑色で 示されたエージェントは投影された長さ dの進路に入ることができる。



図1.22. 交差点でのシミュレートされた車と歩行者の相互作用。

## 1.3.4 実証的シミュレーション

このセクションでは、開発したシミュレータの機能を実証するために、2セットのシミュレーション を紹介する。最初の例は、改良した交差点モデルを使用した、車と歩行者の混合モードの避難を示す。 2番目の例は、広いエリアにおける歩行者のみの避難を示す。シミュレーションが仮想的な問題設定を 使用すると共に、これらのシミュレーション結果がシミュレートされたエリアにおける実際の避難につ いて結論を導くことに使用されるべきではないことを強調されるべきである。

## 1.3.4.1 改良した交差点モードの大規模エリアでの避難

改良した交差点モデルの適用を実証するために、高知市環境を使用して仮想避難シナリオをシミュレ ートした(図 1.23 参照)。人々は、標高 10m 以上に避難する必要があると想定している。この仮想的な 設定は、高知市役所のホームページに記載されている津波の高さの約 30 倍に当たる。



(a) Grid environment

(b) Locations of people at 11 p.m.

図 1.23. 最初のシミュレーションで使用した高知市の環境。標高が 10m を超える緑で示されたエ リアは、安全な避難エリアと見なされる。

緊急避難は午後11時に通知され、合計61218人が10m以上の標高まで避難すると予想される。午後11時の人々の場所は、携帯電話のGPSデータに従って設定される(図1.23(b)を参照)。車での避難を許可することによる効果を定量的に評価するために、各車に3人が乗車していると仮定して、特定のpパーセントの人が車を使用できるようにした。最も近い避難場所から少なくとも1km離れたところに住んでいる最も遅い人々は、車に置き換える。このレポートでは、4つのシナリオを示す。

- (1) すべての人が歩く
- (2) 人々の6%が車の使用を許可される。 合計 1224 台
- (3) 人々の9%が車の使用を許可される。 合計 1836 台
- (4) 人々の15%が車の使用を許可される。 合計 3060 台

エージェントの速度特性と避難開始時間を図 1.25 に示す。これは夜間の避難であるため、4m 以上の道路を歩くことを事前に想定している。4m 未満の狭い道路の使用は妨げられないことに注意する。 歩行者 エージェントは任意の幅の道路を使用できるが、利用可能な場合は4m 以上の道路を使用することを優先 するようにプログラムしている。図 1.26 は、シナリオ 3 で予想される歩行者と車の数を示す。

さらに、津波を発生させた地震が停電を引き起こし、信号機が機能していないと仮定する。車の使用 者は合理的に行動し、道路上で良好な秩序を維持して運転すると仮定する。車は歩行者エージェントを 優先すると想定されている。また、最も早く交差点を離れることができる車は、交差点を通過するのを 待っている他の車によって優先順位が与えられると想定する。

図 1.27 は、各シナリオの避難の進捗を比較する。図 1.27 (c) によると、車が許可されていない場合、人口のごく一部が避難エリアに到達できない。この小さな割合は、最も近くの安全なエリアから1 km 以上離れた、動きの遅い人々である。一方、人口の6%が車を使用できるようにすると、人口の100%が目的地に到達できる。さらに、自動車の6%の使用が避難の進行をわずかに加速させた。9%と

15%の車を使用すると、最初の40分間で避難の進行が加速するが、その後、道路上の多くの歩行者が 車の動きを遅くし始める。特に交差点では、歩行者が車に大きな影響を与える。

図 1.26 (a) および (b) は、歩行者と車が通る経路を示す。このように、車が使用する主要なルート は歩行者によって共有されており、これが交通渋滞の原因になる可能性がある。実際、図 1.26 (c) に見 られるように、主要な交通渋滞は車と歩行者が共有する主要なルートで発生する。車と歩行者が使用する 主要なルートを分離する政策を作成することにより、車のユーザ数をさらに増やすことが可能である。



図 1.24. 各シナリオの歩行者と車の速度特性。左側のグラフに濃い緑色で表示されている部分は 車に変換され、各車に 3 人が配置される。



図 1.25. 各シナリオでの歩行者と自動車のエージェントの避難開始時間。各シナリオの歩行者の 分布は、シナリオ1の分布に非常に近いことに注意。



図1.26. 検討した4つのシナリオの避難時間履歴の比較。



図1.27. 検討した4つのシナリオの避難時間履歴の比較。



図 1.28. 大阪の環境モデル。

# 1.3.4.2 大規模な歩行者モード避難

開発した避難シミュレータの計算能力を実証するために、図 1.28 に示す 12×26 km<sup>2</sup>の大阪市域を使用 して仮想の津波避難条件をシミュレートする。避難の進行が時刻によってどのように影響されるかを理 解するために、24 個のケースを考慮する。人々の場所は、携帯電話の GPS データを使用して、時刻に従 って割り当てられる。シミュレートされたエージェントの最小数は約 50 万人であるが、午前 9 時以降 のエージェント数は 70 万人から約 100 万人の間で変化する。



図 1.29. 12 時に津波が発生した際の避難の進展。

図 1.29 は、12 時に避難が発生した際に 500 秒間隔で観察された平均速度を示す。津波警報の約 1000 秒後、避難場所に近い交差点と急カーブで渋滞が発生し始める。これらの混雑は、避難が終わるまでほ ぼ続き、避難の進行に大きく影響する。図 1.30 に見られるように、これらの混雑のために考慮された 24 個のケースすべてにおいて、人口の 100%が避難できなかった。この研究をさらに拡張して、人口を ざまな避難場所に割り当てることでこれらの混雑を軽減する方法や、道路の形状を変更してこれらの混雑を軽減する方法などを検討できる。



図 1.30.1日の1時間ごとの避難時間履歴の比較。上図は0時から13時までを示す。下図は14時から23時までを示す。

1.3.5 討議とまとめ

改良した交差点モデルを用いて避難シミュレータを強化し、信号化されていない交差点における車 両間および車両と歩行者の相互作用をシミュレートした。車と歩行者の混合モードの避難を含む仮想避 難シナリオをシミュレートし、特定の割合の車を使用することが有益であることを実証した。さらなる 研究によって、避難プロセスを加速するために歩行者と車に異なる目的地を割り当てる方法を見つける ことを可能にする。さらに、1×1m<sup>2</sup>解像度モデルを使い、12×26 km<sup>2</sup>の領域において、約 100 万人のエ ージェントをシミュレートすることにより、開発したシミュレータの計算能力を実証する。将来的に は、改良した交差点モデルをさらに改善して、非常に混雑した状況や車線変更を処理し、さまざまな緊 急避難シナリオの研究に適用することを計画している。

## 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

## 概要

富岳コンピュータ本格稼働時における日本列島付近の沈み込み帯での巨大地震のシミュレーションへ 向け、大規模モデル構築及びそれを用いた解析を行い、課題の抽出とその解決策の検討を行った。なお、 SC19 へ向けて米国オークリッジ国立研究所の Summit を使用することが可能となったため、米国内で 対象を選定することとなり、その結果日本列島付近の沈み込み帯と同様の構造を持つ米国のカスケディ ア沈み込み帯を対象として検討を行うこととした。ここでは、equation-based modeling のアルゴリズム を AI 構築時のアルゴリズムに近いものへ変換し、Summit の V100 GPU に搭載されている Tensor Core を用いることを可能とすることで equation-based modeling を高速化した。低次の非構造要素を用いた 有限要素法であるにもかかわらず Summit 全系まで良好にスケールし、カーネルレベルで 1.10-ExaFLOPS, implicit solver 全体で 416-PFLOPS という、state of art を上回る性能のコードを開発し た。このような、アルゴリズム的に equation-based modeling と AI を融合させる新しい HPC の方向性 は他のアプリケーションへも活用可能であると考えられ、今後の発展が期待される。

# 本研究の成果は以下において発表した。

Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Akira Naruse, Jack C. Wells, Christopher J. Zimmer, Tjerk P. Straatsma, Takane Hori, Simone Puel, Thorsten W. Becker, Muneo Hori, Naonori Ueda, 416-PFLOPS Fast Scalable Implicit Solver on Low-Ordered Unstructured Finite Elements Accelerated by 1.10-ExaFLOPS Kernel with Reformulated AI-Like Algorithm: For Equation-Based Earthquake Modeling, Research Poster for SC19: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis

# 2.1 はじめに

地球表面を覆っているプレートの動きにより、プレート間・プレート内において地震が発生し、海洋近 くで地震が生じれば津波が生じる。これらは超長時間・超広域の事象であり、2011年の東北地方太平洋 沖地震と津波のように時として社会・都市に甚大な被害を与える。顕著な例は世界の他の場所でも起こっ ており、例えば図1に示すように、アメリカ北西部の北米プレートの下に海側のプレートが潜り込んでい るカスカディア沈み込み帯では、断層が1000 km以上にわたって20 m以上もずれるマグニチュード9 級の地震による強震動と巨大津波[1]が1700年に起きている。また、カスカディア沈み込み帯の南に位 置し、カスカディア沈み込み帯と周辺プレートの動きから複雑な影響を受けるサンアンドレアス断層系 では、マグニチュード8級の地震の発生が危惧されている。図2.1に示すように、3000人が亡くなった 1906年のサンフランシスコ地震をはじめとして1989年のロマ・プリータ地震など1900年以降に被害 が生じうる大きさの地震が複数回発生しており、2019年には1994年ノースリッジ地震から25年ぶりに 大きな地震が発生しているなど、今後の推移が注目されている。

被害軽減の方法のうち、地震の時期や規模の予測は効果が絶大と期待されているが、実現にはまだ距離 があるとされている。特に短期的な地震予測はまだかなり難しいとされているが、長期的な地震活動予測 であれば、サイバー空間上に詳細なディジタルツインを構築しその支配方程式を解くという、equationbased earthquake modeling により、観測データを同化することで、確率的な予測が出来ると期待され ている。実際、例えば、日本では地震調査研究推進本部において、米国であれば Modeling Collaboratory for Subduction of the SZ4D Initiative [2]などで、このような検討がなされている。しかし、この physics-based earthquake modeling に基づいた長期的な地震動予測を実現するには膨大な計算量がボトルネックとなっているのが現状である。

そこで本研究では、近年開発が進んできた AI 用のアクセラレータを念頭に、equation-based modeling のアルゴリズムを、AI 構築時のアルゴリズムに近いものへ変換することで、physics-based earthquake modeling の高速化を実現した。ここでは 2019 年 11 月の Top 500 リストで一番に位置する Summit を 用いて高速計算することを念頭に、Summit の V100 GPU に搭載されている Tensor Core を用いること を検討した。V100 GPU の Tensor Core においては、FP16 演算を通常の FP64 演算比で 16 倍高速に計 算できるため、これを有効活用することで大幅な高速化が可能となると期待される。このような、アルゴ リズム的に equation-based modeling と AI を融合させる新しい HPC の方向性を示す。

#### 2.2 対象問題

物理ベースの支配方程式を解く equation-based earthquake modeling では、地殻・プレートの構造や 断層の形状などを高詳細にモデル化し、プレートの動きによる地殻内の力の伝播を解析し、観測データと 比較しつつモデルを改善し、長期的な地震活動を推定することとなる。数理的には、複雑な三次元の不均 質構造の粘弾塑性時刻歴応答を解析することとなり、このような解析に適した低次要素による非構造有 限要素法により解析を行う。例えば、図 2.1 のようなカスカディア沈み込み帯とサンアンドレアス断層系 を全て考慮したディジタルツイン的な長期的な地震活動予測において信頼性と品質を確保するためには、 少なくともキロメートルスケールで 1000 km×1000 km の範囲を数百年以上にわたった解析を、データ 同化・構造の曖昧さの考慮のため 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup> 回繰り返すこととなる。粘弾塑性時刻歴応答解析は弾性解析 のアルゴリズムに帰着することが可能なので、この解析コストを弾性解析に換算すると、10<sup>10</sup>~10<sup>12</sup>自由 度の問題を 10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> 回解くことを 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup> 回繰り返す解析コストとなる。なお、このような解析は固体 地球科学の主要な計算の一つであり従来から多数の方法が開発されてきているが[3],[4]、上記の規模感は これら従来研究の 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup> 倍に相当する。大規模計算を要する、災害軽減につながる社会的要請の高い テーマであるため、高性能計算分野からの貢献が求められる。

このような問題への the state-of the-art solver として、SC14 のゴードンベルファイナリストソルバ [5]をこのような問題用に再開発し SC16 の WACCPD の Best Paper Award となった[6]がある。図 2.1 内の 1944 km×2646 km×480 km の領域の複雑な地設構造から構築した  $1.49 \times 10^{10}$  自由度の非構造要 素に基づく有限要素モデルの弾性応答を例にこの state-of-the-art solver の性能を評価したところ、最低 でも 50 倍程度の高速化が必要であり、全く性能が足りていないことが分かった。本研究では、深層学習 のような解析では従来から有効であるとされていたが、支配方程式を解く equation-based modeling で は、データ転送量・演算量・精度の観点から性能を有効に活用することが難しいとされていた Tensor Core を高性能で使えるように、equation-based modeling のアルゴリズムを、深層学習のアルゴリズムに近い ものへ変換することで、Summit 全系まで良好にスケールする超高速低次非構造有限要素の陰解法ソル バを開発した。なお、低次非構造有限要素解析は小規模マトリクス演算が主体となるため、equationbased modeling の中でも Tensor Core の性能を引き出すことが特に難しいとされているが、新たなアル ゴリズムを構築し実装に工夫を凝らすことで、その演算主要部の kernel で 1.10 ExaFLOPS を、solver 全体でも 416 PFLOPS の超高性能を実現した。また、提案手法@Summit 全系は、state-of-the-art@Piz Daint 全系に比べて 75.6 倍高速となる。Piz Daint と Summit の FP64 ピーク性能比は 215/25 = 8.6 倍 であることを考慮すると、Summit に採用されている最新アーキテクチャの特性を考慮して開発した本 手法の 75.6 倍の高速化率は非常に高いことがわかる。この高速化率は、長期的な地震活動予測における データ同化・構造の曖昧さの考慮に必要となる粘弾性解析を実行するのに必要な要件を上回る高速化を 十分に成し遂げるレベルである。

## 2.3 開発手法

通常の非構造格子有限要素法においては各四面体要素の形状と節点の接続状況に応じた非均一な基底 関数が使われるため、ランダムアクセスなどの複雑な計算が生じ、結果として AI の学習において用いら れる計算パターンで頻繁に用いられる行列・行列積に特化した Tensor Core の高い性能を発揮すること が難しい。そこで本研究では、AI の学習において用いられる計算パターンと類似の計算が生じるよう、 ソルバ内で局所的・規則的な基底関数展開を使うことを考える。ここでは、四面体二次要素メッシュを対 象とした陰解法ソルバにおいて adaptive conjugate gradient method を使い、前処理部に構造格子から なる共役勾配法ソルバを使う (図 2.3)。このようにすることで、ソルバ内の大部分の計算を構造格子に おける演算に移すことができ、その内部の主要演算カーネルとなる行列ベクトル積において、小規模な行 列・行列積を用いることが可能となる。また、前処理でしか使わないため、低精度演算を用いても十分な 精度の解を得ることができ、Tensor Core の FP16 演算を使うことができるようになる。さらに、Tensor Core において十分な性能が発揮できるよう、マッピング性能の高いボクセル要素を開発し、さらに、レ ジスタ上でデータを使いまわす工夫をすることで、四面体二次要素の前処理として高いマッピング性能 と、高い性能による大幅な高速化を実現した。

## 2.4 性能計測

まず、構造格子前処理において使われる、行列ベクトル積演算カーネルの性能を計測した。ここでは、 NVIDIA V100 GPU 1 枚を使ってボクセル要素 2,457,600 からなるメッシュにおける行列ベクトル積の 実行時間を計測したところ、Tensor Core を用いた場合で FP32 計算を用いた場合の 17.4 倍速に相当す る 49 TFLOPS の性能が得られた (図 2.4)。また、Summit のほぼ全系にあたる 4544 ノード(V100 GPU 27,264 枚)を使って 1.67×10<sup>12</sup> 自由度の問題を解いたところ、よく使われる 3×3 ブロックヤコビ前処理 による共役勾配法ソルバ比で 17.6 倍速、V100 GPU 用にチューニングを施した SC14 ゴードンベルソル バに比べて 3.89 倍の高速化を達成した (図 2.5)。開発ソルバは 8 ノードから 4544 ノードまでで 90.5% のウィークスケーリングとなり (図 2.6)、結果として 4544 ノードにおいてソルバ全体で 416 PFLOPS、 行列ベクトル積部分で 1.10 Exa FLOPS となった。

# 2.5 おわりに

HPC による equation-based modeling と人工知能の更なる融合により、解けなかった問題を解くこと が可能になると期待され、様々な検討が行われている。本論文では、equation-based modeling のアルゴ リズムを、AI 構築時のアルゴリズムに近いものへ変換し Tensor Core を用いることを可能とし Exa 級カ ーネルを実現することにより equation-based modeling を高速化するという、アルゴリズム的に equation-based modeling と AI を融合させる新しい HPC の方向性を示した。この融合により、小規模 マトリクスベクトル積主体となる低次の非構造要素を用いた有限要素法であるにもかかわらず Summit 全系まで良好にスケールし、カーネルレベルで 1.10-ExaFLOPS, 陰解法ソルバ全体で 416-PFLOPS と いう、state-of-the-art を凌駕する性能のコードを開発した。データ転送コストに敏感でかつ計算密度が 高いことが必須となり、equation-based modeling で高性能を実現することに向いていないとされる計算 機アーキテクチャであっても、データ移動コストを抑え込み局所的な基底で展開するアルゴリム形式に 持ち込めれば、本研究のように高効率での演算を達成可能である。このような問題の再構築は、関数の局 所展開と酷似しており、汎用性の高い考え方であり他の問題にも拡張可能と考えられ、また、計算機アー キテクチャにあわせて取捨選択も可能であり、広がりがある考え方であると考えられる。

地震は科学的に未知な部分があるとともに、社会・都市へ壊滅的な被害を与えることからその被害軽減 への社会的要請は極めて高い。本研究では、計算科学・計算機科学的に手が届かないとされていた地震長 期予報のために、HPC と AI の新たな融合により高速な equation-based earthquake modeling 手法を開 発し、また、現実的なモデルを用いて開発手法の capability を確認した。今後は、この成果を用いて地震 長期予報へ向けた検討を行っていく計画である。



図 2.1. 北米大陸北西部のカスカディア沈み込み帯とサンアンドレアス断層系の位置関係。コンターは 1700年に起きたカスカディア沈み込み帯地震で生じた断層すべりの分布[1]であり、円は 1900-2019 に 起きた、被害が生じうるマグニチュード6以上の地震の分布である[7]。プレート境界は緑及び赤色の線 で表示されている。



図 2.2. Summit にて計算されたカスカディア沈み込み帯における断層に対する弾性地殻応。ここでは、 解析領域 1944 km×2646 km×480 km を精緻にモデル化する 1.49×10<sup>10</sup> 自由度の大規模有限要素モデル が使われている。左図は断層における入力滑り分布、および、変位の流れ線を示しており、右図は地殻内 での最大主応力分布、および、地表面での最大主応力の方向を示している。



図 2.3. 開発したソルバアルゴリズム。四面体二次要素のソルバ内において adaptive conjugate gradient method を使い、その前処理部において構造格子からなる共役勾配法ソルバを使う。構造格子共役勾配法 ソルバ内の行列ベクトル積は小規模なマトリクス・マトリクス積として実行できるため、Tensor Core に よる加速が可能となる。



図 2.4. 開発した行列ベクトル積カーネルの性能。通常の FP32 による行列ベクトル積に比べ、Tensor Core を用いることで 17.4 倍の高速化を達成した。



図 2.5. 開発したソルバの性能。一般に用いられる 3×3 ブロックヤコビ前処理による共役勾配法ソルバ (PCGE)や、SC14 ソルバに比べて総演算数は増えるものの、Tensor Core を用いることで行列ベクトル 積の大幅な高速化が可能となり、結果として、全体で PCGE 比で 17.6 倍、SC14 ソルバ比で 3.89 倍の 高速化を達成した。



図 2.6. 開発したソルバのウィークスケーラビリティ。8 ノードから Summit のほぼ全系に相当する 4544 ノードまで 90.5%のウィークスケーリングが達成された。

参考文献

- K. Satake, K. Shimazaki, Y. Tsuji, and K. Ueda, Time and size of a giant earthquake in Cascadia inferred from Japanese tsunami records of January 1700, Nature, vol. 379, pp. 246–249, 1996.
- [2] Modeling Collaboratory for Subduction Research Collaboration Network, [Online]. http://sz4dmcs.org
- [3] B. T. Aagaard, M. G. Knepley, and C. 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, vol. 118(6), pp. 3059–3079, 2013.
- [4] H. N. Gharti, L. Langer, and J. Tromp, Spectral-infinite-element simulations of coseismic and postearthquake deformation, Geophysical Journal International, vol. 216, pp. 1364–1393, 2018.
- [5] T. Ichimura, K. Fujita, S. Tanaka, M. Hori, M. Lalith, Y. Shizawa, and H. Kobayashi, "Physicsbased urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF x 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation," in Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC'14), IEEE Press, pp. 15–26, 2014.
- [6] K. Fujita, T. Yamaguchi, T. Ichimura, M. Hori, and L. Maddegedara, Acceleration of Element-by-Element Kernel in Unstructured Implicit Low-order Finite-element Earthquake Simulation using OpenACC on Pascal GPUs, in Proceedings of Third Workshop on Accelerator Programming Using Directives (WACCPD), IEEE Press, pp. 1–12, 2016.
- [7] From USGS Earthquake Catalogue, [Online]. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/.

## 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 置情報を持つミ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 を実現した。今年度は、昨年度まで実施した、様々なマイクロジオデータ、既存統計や各種GISデータの 収集結果を組み合わせてデータの高精細化と高精度化を達成するとともに海外における建物と人口に関 するデータ整備も実施した。これら整備したデータを分担機関と連携することで、地震・津波災害時の経 済活動に関する数値解析及び、群衆避難シミュレーションにおける人流データを用いた多数シナリオ生 成に関する開発支援を行った。

地震・津波災害時の経済活動に関する数値解析と連携では、「お金の流れ」に関して支社・事業所単位 に分解・高精細化した企業・事業所間取引データを、企業・事業所レベル、メッシュレベル、県全域等の マルチスケールで活用できるように整備を行った。これにより、マルチスケールに分担機関との連携が可 能になり様々な規模に応じた地震被害シナリオに対応した企業属性を考慮した経済への被害シミュレー ションを迅速に行う事が可能になった。なお具体的な経済シミュレーションの内容に関しては連携機関 を参照されたい。

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の開発支援においては、時空間的に高粒度 な人流データに対して年齢・性別について個人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 化を行ってきたが、年齢・性別について集計値での精度保証にとどまらず、個人レベルでの信頼性確保を 目指して、詳細化手法を開発した。

特に今年度大きく進んだ内容としては次の4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に用いるための本社間取引ビックデータを用いた事 業所間取引(BtoB)及び事業所と消費者間取引(BtoC)の推定データの開発・整備(全国)。

②携帯電話移動履歴のビックデータを用いた属性付きの人の流れの推定データの開発・整備(京阪神エ リア)。

③AB 連携の推進(分担機関と連携することで、分担機関に建物データなどの先端都市情報を提供し、 具体的な利活用方法と実装)

④海外展開:タイのバンコクにおける詳細な人口データの開発である。

以上の4つの内容についてそれぞれ詳しく説明する。

#### 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

#### 3.2.1 概要

本研究では、地域経済の把握において重要である、実体経済における地域間の資本流動を可能な限り精 緻に推定する手法を開発した。具体的には、企業間取引ビッグデータと人流ビッグデータを活用して、企 業間の資本の流れである企業間取引(Inter-firm transaction: F2F)と、企業から消費者への賃金とし ての資本流動(Firm-to-consumer flow: F2C)、またその賃金の消費による消費者から企業への資本流動 (Consumer-to-firm flow: C2F)という資本流動を空間的に推定する手法を開発した。まず、企業間の資

本流動(F2F)は、企業間取引ビッグデータを用いて把握できる。次に携帯電話の GPS 通信記録に基づく

人流ビッグデータを活用し、消費者の滞留点を推定した。そして滞留点と企業の立地に基づいて消費者に 賃金を与えることで、企業から消費者への資本流動(F2C)を推定した。最後に滞留点に基づいて消費地 を推定することで労働者から企業への資本流動(C2F)を推定した。これにより企業から企業(F2F)、企 業から消費者(F2C)、そして消費者から企業(C2F)という資本の流動をミクロかつ総体的に把握できる データセットが実現した。

地域間資本流動という大規模ネットワークで構築されている今日の地域経済の現状を精緻に把握・分 析するためには、地域間資本流動を可能な限りミクロにモニタリングできるデータを構築する必要があ る。企業間の資本の流れ(Inter-firm capital flow 以下「F2F」)、企業から消費者への資本の流れ(Firmto-consumer capital flow 以下「F2C」)、そして消費者から企業への資本の流れ(Consumer-to-firm capital flow 以下「C2F」)という資本流動の循環を把握できる資本流動ネットワークデータを実現する ことで、国単位などのマクロな経済分析だけでなく、特定地域の地域経済の現状把握にも役立つものと 期待される。例えば F2F 場合、企業がネットワーク構造上のノードであり、企業間取引はノード同士を繋 ぐリンクと見なすことができる。そして各企業は地理的な空間分布を持っているため、企業間取引が地域 を越えて相互に影響しあうことになる。

そこで本研究では上述の課題を解決するために、地域間の資本流動を可能な限りミクロに把握するた めの資本流動データを開発することを目的とする。本研究は図 3.1 の流れで構成される。具体的には近 年我が国で利用可能になりつつある企業やその事業所の立地と企業間の取引関係に関するデータ(以下 「企業間取引ビッグデータ」)と、携帯電話の移動履歴に基づく膨大な人々の分布と動きに関するデータ (以下「人流ビッグデータ」)に、既存の統計データを組み合わせることで実現する(図 3.2)。





図 3.1. 本研究における F2F、F2C および C2F の実体 経済における位置づけ。



#### 3.2.2 企業間取引データを用いた F2F の推定

ここでは企業間取引ビッグデータを用いて F2F の推定を行う手法を紹介する。

#### 3.2.2.1 企業間取引ビッグデータ

企業間取引ビッグデータとは株式会社帝国データバンクにより整備されている、本社の様々な属性 (資本金、従業員数、住所、後継者有無など)と、本社間の取引情報(取引時期・取引品目・推定取引 金額など)で構成されるデータである。単年度分で約145万社間の約550万取引の情報が格納されてい る.これは日本において最大規模の企業間取引に関するビッグデータである。なお同データは企業信用 調査を目的に日本全国を対象に実施され、全ての情報が基本的には膨大な数の調査員による企業への聞 き取り調査により収集されている。また同データは企業間取引だけでなく、その取引に関わる企業・事 業所の分布情報(本社・事業所データ)も格納している。本社・事業所データが収録する2014年の本 社情報と、2014年の経済センサスが収録する企業情報を比較した結果、会社企業のほぼ全数を収録して おり、またその企業規模の割合も統計とほぼ一致する。ただし同データの収録範囲は日本国内の企業間 取引のみであるため、海外企業を含んだ輸出入の取引金額を捕捉したデータでないことに留意する必 要がある。

## 3.2.2.2 取引金額の推定

企業間取引ビッグデータは全ての取引間の取引金額が明らかになっているわけでない。そのため取引 金額が明らかとなっている一部の取引の情報を用いて、取引金額が不明な取引の取引金額を推定する必 要がある。この課題に対し、Tamura et al. (2012)は企業間取引の金額を、取引を行う2社の企業規 模や取引高に着目した重力モデルを用いて推定した。Tamura et al. は取引額と企業売上の間に重力則 が働いていることを明らかにし、取引先同士の企業売上から全取引の取引推定金額を算出している。そ こで本研究でも田村ほかの手法により、全ての取引額の推定を行った。

#### 3.2.3 人の流れを用いた F2C の推定

ここでは人流ビッグデータを用いて F2C の推定を行う手法を紹介する。本研究では人流ビッグデータ を用いて消費者の自宅、勤務地、消費地を推定する。続いて推定した勤務地の情報に基づき、消費者の 賃金を推定する。

以上の計算を行うためにはまず人流ビッグデータを用いて消費者の勤務地や消費地を推定する必要が ある。また各企業が消費者に支払う賃金の推定も行う必要がある。そこで本章ではまず本研究で用いる 人流ビッグデータを紹介し、続いて消費者の自宅、勤務地、消費地の推定を行い、最後に各企業および 消費者の賃金推定を行う。

# 3.2.3.1 人流データ

本研究では、膨大な人々の勤務地、居住地および消費地を推定するために株式会社ゼンリンデータコムが作成した「混雑統計®」を用いた。「混雑統計®」データは、 NTT ドコモが提供する「ドコモ地図ナビ」サービスのオート GPS 機能利用者より、許諾を得た上で送信される携帯電話の位置情報を、NTT ドコモが総体的かつ統計的に加工を行ったデータである。位置情報は最短5分毎に測位される GPS データ

(緯度経度情報)であり、性別・年齢等の個人を特定する情報は確認できない処理が施されている。本研究において用いる 2012 年の1年 365 日分の混雑統計®は、ユーザ数が約 100 万人、データのレコード数にして約 90 億レコードのビッグデータである。なお本研究における混雑統計®に対する総体的処理は、個人情報保護の観点から株式会社ゼンリンデータコム内で実施した。

#### 3.2.3.2 各企業の賃金推定

まず賃金構造基本統計調査を用いて、2012年の都道府県別、業種別、雇用形態別の平均賃金の情報を 収集した。なお賃金構造基本統計調査は厚生労働省が毎年作成、公表している基幹統計であり、日本の賃 金構造の実態を調査し把握することを目的として実施されている。主要産業を営む企業に勤める勤労者 の賃金が、雇用形態、就業形態、職種、性別、年齢、学歴、勤続年数、経験年数、地域や業種ごとに集計 されている.収録情報を元に正規雇用者は、47都道府県×55業種の組み合わせ、計2,585パターンの、 非正規労働者に関しては47都道府県×22業種の組み合わせ、計1,034パターンの平均賃金データを作成 した。なお正規労働者と非正規労働者で業種の数が異なる理由は、賃金構造基本統計調査の非正規雇用者 の統計の産業分類が正規雇用者よりも粗いためである。また公務員は地方公務員給与実態調査を用いて、 都道府県別の平均給与を算出した。

続いて賃金データを企業・事業所データに付与する。賃金構造基本統計調査と企業・事業所データの産業 分類は必ずしも一致はしないため、日本標準産業分類に基づいた業種の整合を行った。そして企業・事業 所データには各企業に正規雇用者と非正規雇用者の人数が格納されているため、式(3.1)により各企業の 平均賃金を推定した。

$$S_{pi} = \frac{\Pr_i sB_p + Pn_i sb_p}{\Pr_i + Pn_i}$$
(3.1)

Pri は企業 *i*の正規雇用者数、Pni は企業 *i*の非正規雇用者数、sBp は都道府県 p における企業 *i*の正 規雇用者に対応する業種 B の平均賃金、sbp は都道府県 p における企業 *i*の非正規雇用者に対応する業種 b の平均賃金、Sp*i* は都道府県 p の企業 *i*の平均賃金である。

以上の計算を全ての企業・事業所において実施することで、全ての企業・事業所の平均賃金を推定する ことが出来た。

## 3.2.3.3 各従業員の賃金の推定

最後に消費者の賃金を推定する。消費者は既に勤務地の推定が完了している。一方、企業・事業所デー タはそれぞれの立地情報と平均賃金の推定値を持っている。そこでそれぞれの情報を 1km メッシュに集 計し、式(3.2)により消費者の賃金を推定した。

$$u_{j} = \frac{\sum_{k=1}^{m} (Sj_{k} (Pr_{k} + Pn_{k}))}{\sum_{k=1}^{m} (Pr_{k} + Pn_{k})}$$
(3.2)

sjk はメッシュ j 内の企業 k の平均賃金、m はメッシュ j 内の企業数、uj はメッシュ j 内を勤務地とする消費者の推定賃金である。

以上により日本全国における消費者ごとの賃金推定、すなわち F2C の推定が可能となった。図 3.3 は 2012 年の日本全国における 1km メッシュごとの居住地における平均年間賃金、すなわち F2C を示してい る。人単位の非集計データを用いることで、図 3.8 のようにミクロな F2C の推定も可能になった。



© " Congestion Census® (混雑統計®)" Copyright© ZENRIN DataCom CO.,LTD

図 3.3. 1km メッシュごとの居住地における F2C (平均年間賃金) (2012 年)。

3.2.4 人流ビッグデータを用いた C2F の推定

ここでは人流ビッグデータを用いて、消費地の分布に基づき C2F を推定する。消費者には既に賃金が 与えられているため、賃金をどこでどの程度消費するかということを明らかにすることができれば、C2F の分布を推定することが出来る。

ただし消費者にとって賃金は個人消費のもとになる資本であるが、賃金のすべてを消費に回すわけで はなく、貯蓄行動も取る。また近年では消費行動にインターネットを利用した E-Commerce が含まれてお り、本研究においても、その影響を考慮した形で資本流動の推定を実施する必要がある。そこで実態に即 した資本流動を推定するためには、推定された賃金のうち、どの程度が消費に回され、そのうちどの程度 が店舗や飲食店など実空間での消費地で消費されるのかを把握する必要がある。 3.2.4.1 各人の収入に応じた消費額と E-Commerce での消費額の推定

まず家計調査を用いて、収入に応じた消費額とE-Commerce での消費額を把握する。これらの値を用い て実空間での消費地における年間を通した消費額を推定する。家計調査とは、総務省統計局が作成してい る統計であり、家計における消費動向を把握するために行われている。日本全国の世帯を対象としたサ ンプル調査を年 4 回実施している。そのため我が国において消費に大きな影響を与える季節性も把握す ることが出来る。表 3.1 は家計調査より得られる 2012 年の 1 年間の年収別の消費額と E-commerce の消 費額を示す。表 3.1を用いた消費者 i の実世界における年間を通した推定消費額は式(3.3)で与えられ る。

$$CR_i = S_g - E_g \tag{3.3}$$

Sg は年収区分gの年間平均消費額、Eg は年収区分gの E-Commerce 年間平均消費額、CRi は消費者 i の実 世界における年間を通した推定消費額である。

以上の計算を人流ビッグデータに収録されている約100万ユーザ(消費者)に適用することで、全ての 消費者のCriを推定した。

Annual	Average consumption [Von]					Annual
income	Average consumption [Yen]					Consumption
[Million Yen]	lan $\sim$ Mar	Anr~lun	]ul∼Sen	Oct~Dec	Annual	in e-commece
	San Tiai			000 000	/	[Yen]
$\sim$ 2.0	409,458	354,321	364,740	436,935	1,565,454	23,016
2.0~2.5	570,015	665,598	606,234	554,751	2,396,598	42 336
2.5~3.0	657,009	591,084	606,021	727,221	2,581,335	42,550
3.0~3.5	656,067	698,697	614,211	641,217	2,610,192	62 040
3.5~4.0	688,026	724,572	694,476	732,339	2,839,413	02,040
4.0~4.5	737,862	749,322	770,439	737,364	2,994,987	81 788
4.5~5.0	858,777	769,338	734,691	748,509	3,111,315	01,200
5.0~5.5	806,307	765,567	767,265	814,089	3,153,228	83 880
5.5~6.0	912,744	821,301	830,988	833,721	3,398,754	05,000
6.0~6.5	855,897	846,027	811,194	918,984	3,432,102	01.836
6.5~7.0	983,004	967,491	937,320	948,279	3,836,094	91,050
7.0~7.5	1,025,508	951,573	893,826	981,261	3,852,168	101 700
7.5~8.0	1,039,863	1,036,104	1,072,029	1,097,739	4,245,735	101,700
8.0~9.0	1,071,879	1,060,296	1,097,904	1,110,882	4,340,961	125,856
9.0~10.0	1,164,939	1,173,891	1,126,020	1,147,632	4,612,482	134,184
10.0~12.5	1,320,018	1,260,588	1,260,933	1,443,297	5,284,836	158,400
12.5~15.0	1,453,701	1,390,278	1,560,750	1,424,283	5,829,012	169,296
$15.0\sim$	1,834,560	1,654,746	1,502,607	1,882,245	6,874,158	265,236

表 3.1. 家計調査による1年間の年収別平均消費額と E-commerce 平均消費額(2012年)。

3.2.4.2 賃金の消費地及びその消費額の推定

以上により各人の賃金のうち、実空間において年間に消費される賃金を明らかにすることができた。続

いて実空間で消費される賃金がどこでどの程度消費されるのかを明らかにする必要がある。人流ビッグ データから各消費者の消費地は既に明らかになっている。そこで本研究では各人の消費地の滞在時間を 重みにして、実空間で消費される賃金を按分する。ある消費者 i の消費地 j における消費額は式 4 で与 えられる。

$$cr_{ij} = CR_i \frac{t_j}{\sum_{k=1}^n t_k}$$
(3.4)

tjは消費地jにおける滞留時間、nは消費者iの年間の滞留点の数、crijは消費者iの消費地jにおける推定消費額である。

なお人の滞留と消費には強い相関があることが複数の先行研究において指摘されている。数多くの先 行研究の結果によると、人の滞留行動と消費行動の間には相互依存性があることは明らかである。すなわ ち式(3.5)による各消費者の消費地での消費額の推定方法も妥当性があるものと期待される。

3.2.4.3 任意の集計単位における消費者による実空間における消費額

最後に市町村やメッシュなど、任意の集計単位における消費者による実空間における消費額の合計を 計算する。すなわちこの値は任意の集計単位における実空間の C2F といえる。ある集計単位 i の任意の 期間における C2Fi は式 (3.5) で与えられる。

$$C2F_i = \sum_{k=1}^n M_k cr_k \tag{3.5}$$

nは集計単位 i 内の任意の期間の消費地の数、Mk は消費地 k の消費者の拡大係数、crk は集計単位 i 内の 任意の期間の消費地の推定消費額である。

以上で消費者が F2C で企業より得た賃金が実空間において C2F となって企業に還元される流れを消費 者および企業単位で推定することが可能になった。図 3.4 は 2012 年 1 月 1 日~12 月 31 日の日本全国に おける 1km メッシュごとの実空間における C2F を示している。人単位の非集計データを用いることで、 図 3.4 のようにミクロな C2F の推定も可能になった。


図 3.4. 1km メッシュごとの C2F。

# 3.2.4.4 C2Fの信頼性

C2F の信頼性を既存統計との比較により検証した。検証に用いた統計は 1km メッシュ単位集計の 2014 年の商業統計である。商業統計を用いることで 1km メッシュごとの小売販売額を把握することが出来る。 一方、C2F は小売店における消費以外の消費も含まれているが、日本には本研究で推定した C2F の分布を 空間的に把握出来る統計は存在しない。しかし C2F が大きい地域では、消費者による消費活動が活発で あることが推定され、小売業による消費も旺盛であると考えられる。そのため本研究では商業統計から得 られる小売販売額と C2F を比較した。図 3.5 は日本全国における 1km メッシュごとの C2F と小売販売額 を比較したものである。



図 3.5. 1km メッシュごとの C2F と商業統計の年間小売販売額の比較(日本全国)。

年間小売商販売額と C2F の間には正の相関が見られ、年間小売商販売額が大きい地域ほど、C2F も大き くなる傾向が有ることが明らかになった。すなわち消費者による消費活動が活発な地域で C2F が大きく なっており、本研究で得られた C2F の空間的分布がある程度の信頼性を持っていることが明らかになっ た。なお C2F が過剰に評価される地域(図 3.5 中の A)の多くは、都市地域に分布する大規模な鉄道駅を 含むメッシュであった。大規模な鉄道駅では実際には滞留時間の長さに比べて消費する機会が少ないこ とや、高額な商品の購入機会が少ないこと、また飲食による消費額が大きいと考えられるため、このよう な結果になっていると考えられる。一方、C2F が過小に評価される地域(図 3.5 中 B)の多くは、業務地 区や住商混合地域であった。これらの地域では消費行動に伴う滞留点が自宅や勤務地滞在と判定されて いる可能性があるため、人流ビッグデータの分析方法の改良を検討することで改善する可能性が期待さ れる。ただし商業統計で知ることが出来るのは小売販売額のみであり、今後飲食業や各種サービス業等の 販売額を知ることが出来る統計やデータを用いた検証も進める必要があることが分かった。

3.2.5 応用事例

最後に本研究で開発した資本流動データの活用事例を紹介する。

3.2.5.1 C2F と来訪者の年収の比較

図 3.4 で示したように C2F のデータを用いることで、地域別の年間の C2F を推定することが可能になった。C2F が大きい地域は数多くの人々が訪問している、あるいは高所得者の訪問が多い地域であることが期待される。図 3.6 は 2012 年における 1 年間の 1km メッシュごとの C2F と、2012 年に各メッシュに来訪した消費者の年収の合計との関係を示している。



図 3.6. 2012 年の1年間における1kmメッシュ毎のC2Fと来訪者の年収合計の比較。

両者の値は正の強い相関を示した。ただし C2F が回帰直線に対して過小、あるいは過大に評価された 地域も見られた。過小に評価された地域の代表的な例としては、東京駅や大阪駅、また羽田空港などの交 通結節点であった。また大手町や霞ヶ関などの業務地区や官公庁街も該当した。これらの地域は通勤や出 張で利用する場合が多く、 滞留人口は多いものの、消費のための滞留時間が短いことが原因である。ま た高額な商品を消費するための商業施設が少ない地域であることも、滞留時間が短くなることに影響し ているものと考えられる。

一方、過大に評価された地域の代表的な例は、新宿歌舞伎町やすすきのといった大規模な繁華街、また 東京ディズニーリゾートや東京ドームシティ、お台場といった観光地が該当した。これらの地域では1人 あたりの滞在時間が長く、その結果1人あたりの消費額も大きくなっているものと考えられる。

#### 3.2.5.2 C2Fの時系列分析

これまで特定の地域に商業施設や交通機関が設置されることによる経済効果の分析、すなわち事前の 経済分析は数多くの例がある。しかし、そうした施設が設置された後の経済効果を時系列的に分析した例 は数少ない。しかし本研究で開発したデータを用いることで、特定の地域における資本流動の時系列的な 変遷を把握し、事後の経済効果を分析することも可能である。

図 3.7 に 2011 年 1 月から 2013 年 6 月までの 4 半期ごとにおける C2F が大きい代表的な地域 (1km メッ シュ集計)を示す。まず全体的な傾向として 2012 年 1<sup>~3</sup> 月期に多くの地域で C2F のピークが見られる。 一方で 2012 年 10~12 月期に多くの地域で C2F が落ち込んでいる。内閣府経済社会総合研究所では、景 気循環の局面判断や各循環における経済活動の比較などのため, Bry and Boschan (1971)の手法[24]によ り、主要経済指標の中心的な転換点である景気基準日付 (山・谷)を設定している[25]。それによると我 が国の第 15 循環の山が 2012 年 3 月、谷が 2012 年 11 月となっている。これは図 12 の C2F のピークと落 ち込みの時期と一致している。すなわち本研究で得た C2F は景気基準日付によるマクロ経済の影響も反 映されていることが分かる。

続いて特徴的な時系列変化となった地域に注目してみる。まず1つ目の例は東京スカイツリーである。 東京スカイツリーは 2012 年 5 月 22 日に開業した電波塔であり、日本一高い展望台と大規模商業施設、 水族館などの複合施設である。2012 年 4~6 月期の前後で C2F の大きな伸びを確認出来る。開業前の4 半 期の C2F が約 70 億円、開業後は約 200 億円であり、4 半期で C2F が約 130 億円増加している。つまり開 業後を含む 2012 年 4~6 月から 2013 年 1~3 月で C2F が約 520 億円増加したと言える。なお東京スカイ ツリーの経済効果は開業前の 2006 年に第一生命経済研究所による予測では 473 億円とされており[27]、 当初予測よりも 10%ほど大きい値となったものの、事前の予測値とかなり近い値となることが分かった。 2 つ目の例は東京ディズニーリゾートである。東京ディズニーリゾートでは 2011 年 10~12 月に他の地域 には見られない顕著なピークが見られた。2011 年は東京ディズニーシー開業 10 週年であり、この年の 9 月からアニバーサリーイベントが数多く開催されたことが、大きく影響しているものと考えられる。

このように本研究の手法を用いて C2F の時系列変化を追うことで、経済のマクロ的な変化を追うだけ でなく、特定の地域における新しい施設やインフラの開業、またイベントの開催による経済効果も把握・ 分析することが可能になった。将来的にはある地域や施設を対象に C2F をもたらす消費者の属性分析を 行い、来訪する消費者が域内に住む人なのか、あるいは域外から来た人なのかを分析することで、地域経 済における重要度を評価する方法を開発していきたいと考えている。



図 3.7. 2011 年 1 月から 2013 年 6 月までの 4 半期ごとにおける C2F が大きい代表的な地域。

## 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 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、今年度は京阪神エリア地域における人の流れデータを年齢・性別といった属性と共に整備した。

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 NTTdocomo 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。本データの特徴は次 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(時空間内挿)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 3.8)。属性推定方法の流 れを図 3.9 に示す。まず、トレーニングデータとしてパーソントリップデータ(以下 PT データ、47,000 サンプル)を使用して機械学習の1つのランダムフォレストによるアンサンブル学習モデルを構築した。 次に、構築したモデルを GPS データに適用した。 PT はアンケートデータであり、GPS は観測データであ るため、両方のデータ傾向は異なる。したがって、モデルを GPS データに適用すると、一部のデータが一 致しない。その対策として、国勢調査データを使用して、グループ間の属性を比較検討し、グループ間の 重み付けを行った。モデル構築に使用される特徴量は、総滞在時間、帰宅時間、帰宅時間、総滞在時間、 総移動距離、および自宅から職場までの距離を計算し利用した。また性別と年齢の両方に同じ特徴量を使 用し、学習モデルを作成した。 精度評価はクロスバリデーションを用いて評価し,n数は5とした。



図3.8. 地理空間情報と機械学習を用いた人の流れデータへの属性の付加手法。



図 3.9. アンサンブル学習による GPS データの属性推定手法。

3.3.4 結果

図 3.10 に大阪府における 2012 年 10 月 17 日の人流データの例を示す。時間別にどんな人がどこにど の程度移動しているかが任意の時間で把握可能なデータである。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だけでなく、年齢性別に応じて避難速度の設定を変えるなどの 避難シミュレーションモデルの構築も可能になる。なおこれはデータに基づく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)。GPS データを用いることで任意の時間での日々の人 の流動を追うことが可能になってきており、これは従来の国勢調査やPT では把握できないものであ る。本研究による PT で構築したアンサンブル学習モデルの信頼性は、クロスバリデーションによる評 価を行った。その結果、各属性の推定精度は年齢について 82.0%、性別について 76.7%を達成するこ とが出来た。このような実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 で日時別に地域ごとの脆弱性をより的確に捉えることが可能になると考えられる。

以上のように時間的・空間的に高粒度な人流データに対して年齢・性別の個別属性を推定した上で群 衆避難シミュレーションの高度化支援を行った。



図 3.10. 2012 年 8 月 12 日の京阪神エリアにおける人の流れデータ(17時における可視化の例)。

#### 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 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、先端都市情報チームは、各機関と連携し①の事業所間取引などの経済データを 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。それら経済データを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 3.11 に示すようなデータと手順による実施する。先端都市情報チームは、建物

データをサブAのIESに投入し、計算結果を受け取り、経済シミュレーション用に企業取引データと 緯度経度から空間結合しデータ整備をして連携機関に渡す役割を担っている。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を推定した。また表 3.2 に示す経済シミュ レーションに必要な各種パラメータについても推定した。今年度は、大阪市エリアだけでなく関西圏、 全国へと連携するデータを拡張した。これはシミュレーションを実施する分担機関の技術発展に合わ せたもので、全国へとデータ連携を拡張することにより日本全体の企業・サプライチェーンなどの経済 を取り扱うことが可能になった。また、今年度はエージェントモデルによる経済シミュレーションモデ ルとの連携も新たに実施することができた。



図 3.12. AB 連携フロー。

パラメータ種類	パラメータ	パラメータ 説明		
	$\Delta l_h^{ROK}$ , $\Delta l_h^{ROJ}$	部門ごとの労働被害率		
止プニノイ		業種別、規模別、地域別被災の企業数及び被		
リノノイノエーン	企耒攸吉	害の大きさ		
()()百	サプライチェーン被害	業種別、規模別、地域別サプライチェーンの		
	率及び生産再開確率	被害率及び災害後時系列の生産再開確率		
資本ストック被害	$\Delta k_h^{ROK+}$ , $\Delta k_h^{ROJ+}$	資本被害率		
各インフラの被害	$\Delta B_b^{ROK}, \Delta B_b^{ROJ},$	インフラの被害率		
ライフライン対害	インフラ被害率及び供	災害によるインフラ停止確率及び災害後時系		
ノイノノイン板音	給再開確率	列の供給再開確率		
	$Y_{h'h}^{ROK}$ , $Y_{h'h}^{ROJ}$	部門 h が部門 h'から調達する中間投入水準		
	$\kappa_{h'h}^{ROK}$ , $\kappa_{h'h}^{ROJ}$	部門 h が部門 h'から調達する中間投入係数		
	$C_h^{ROK}$ , $C_h^{ROJ}$	部門 h の家計外消費支出		
	$Y_{Ch'h}^{ROJ}$ , $\kappa_{Ch'h}^{ROJ}$	ROJ の部門 h がサプライチェーンで調達する		
		部門 h'の中間投入水準と中間投入係数		
		部門 h にする部門 h'からの供給に占める関西		
	$\mu_{Kh'h}$	市場の割合		
産業連関表関連	$\mu_{Ch'h}$	部門 h がサプライチェーンで調達する部門 h'		
		の割合		
	$\mu_{ROJh'h}$	部門 h にする部門 h'からの供給に占める ROJ		
		市場の割合		
	φ	部門hにする部門h'からの供給に占める関西		
	Ψdh'h	市場の割合		
	<i>ф</i> .	ROJの部門hの産出物の、関西市場に供給す		
	$\psi_{sh}$	る割合		

表 3.2. 変数一覧表。

#### 3.4.2.1 地震動データ

地震動データについて、大阪エリアに関しては分担機関のシミュレーション結果(5 ケース)を用いた。 また ROK と ROJ に関しては内閣府の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南海トラ フの巨大地震の想定震度分布・浸水域等に係るデータを使用した。5 ケースの想定震度のデータが格納さ れており、強振波形 4 ケース(基本ケース、東側ケース、西側ケース、陸側ケース)及び経験的手法のケ ースでそれぞれ計算されている。

3.4.2.2 経済シミュレーションに関する市場の変数

本研究では、図 3.13 の通り、大阪以外の関西市場(兵庫県、京都府、滋賀県、奈良県、和歌山県)を

ROK (Rest of Kansai)、関西以外全ての地域を ROJ (Rest of Japan)とする。ROK 市場の変数に関しては対象の各都道府県の数値の合計を使用し、ROJ 市場の変数に関しては全国の数値から関西市場を差し引いた数値を使用する。また、各変数の算出に用いたデータは表 3.1 の通りである。





表 3.3. 各変数のデータソース。

変数	データソース		
就業者数	平成 27 国勢調查 就業状態等基本集計		
民間企業資本ストック	内閣府 社会資本ストック推計(2009年)		
生産性社会資本ストック	内閣府 社会資本ストック推計(2014年)		
ROK、ROJ 產業連関表	各都道府県の産業連関表(2011年)		
地域間産業連関表	地域間産業連関表(2005年)		
サプライチェーン	帝国データバンク 大規模企業概要データ		
	(2015 年)		

3.4.2.3 サプライチェーンと市場(サプライチェーンではない)調達の比率

企業の中間投入財はサプライチェーン(本研究では代替可能不可能である仕入先)と市場(サプライチ ェーンではない)から調達されているとする。業種間の代替可否の比率に関しては、帝国データバンク株 式会社の大規模企業間取引データを用いて、2011年の東日本大震災の前後の企業の仕入先の変化率より 推定する。ただし、データより推定が難しい業種に関しては一律中小企業庁(2015)が調査した企業の 代替調達についての検討状況の調査結果を参考とする。表 3.4 は企業が既存の取引先の製品やサービス の代替可能率である。代替可能の割合をサプライチェーンからの調達率とし、それ以外の割合を市場から の調達率とする。

	代替可能	ー部代替可能、全て代替不可 能、わからないなど	
製造業	22.7%	77.3%	
非製造業	28.8%	71.2%	

表 3.4. 既存の取引先の製品・サービスの代替可否の調査結果。

3.4.2.4 インフラ被害

19 部門(道路、港湾、航空、公共賃貸住宅、下水道、廃棄物処理、水道、都市公園、学校施設、社会 教育、治水、治山、海岸、農業、林業、漁業、国有林、工業用水道、庁舎)のうち、湾岸及び下水道部門 の被害に関して ROK、ROJ 地域の想定計測震度より算出し、その他の部門に関しては大阪地域の数値を 使用する。

(1) 湾岸被害率

赤倉・小野(2015)が提案された湾岸被害関数を用いて湾岸の被害率を算出した。なお、岸壁の種類は 不明であるため、通常の岸壁を対象とした脆弱性評価を行う。具体的には式(3.6)を用いて、各地域の 計測震度 I\_JMA より各地の湾岸被害率 P\_Rank2 を算出し、地域別の平均をその地域の湾岸被害率とす る。

$$P_{Rank2} = \Phi \left[ \ln \left( \frac{I_{JMA}}{6.06} \right) / 0.0546 \right]$$
(3.6)

(2)下水道被害率

庄司ほか(2014)によって提案された下水道埋設管路の地震被害率曲線を用いて算出した。式(3.7)の被害率曲線関数を用いて、各地域の想定計測震度 IJ より標準被害率 R(x)を算出し、地域別の平均値を その地域の下水道被害率とする。

$$R(x) = 0.134 \cdot \Phi\left[\frac{x - 5.000}{0.0546}\right] \quad (x: IJ). \tag{3.7}$$

(3) 電気、ガス、上水道

電気、ガス、上水道の3部門のライフンラインについて、災害による被害率及び災害後時系列の再開 確率を算出する。計算手法は能島・加藤(2013)によって提案された供給系ライフラインの地震時機能 評価モデルを用いる。本研究では地震直後のライフライン機能停止確率を被害率とし、式(3.8)の通り 機能停止確率 P(I)はパラメータ b\_0、b\_1と想定計測震度 I より算出する。各ライフラインのパラメー

$$P(I) = \frac{\exp[b_0 + b_1 \cdot I]}{1 + \exp[b_0 + b_1 \cdot I]}.$$
(3.8)

	電気	上水道	ガス
$b_0$	-19.72	-26.98	-61.45
$b_1$	3.75	4.72	10.42

表 3.5. 機能停止確率関数のパラメータ。

3.4.2.5 サプライチェーンの再開確率

災害によるサプライチェーンの被害率及び災害後時系列の再開確率を算出する。まず、各企業の被害率 は企業所在地の建物被害とする。次に、各企業の被害率より、災害による被害率及び災害後の時系列の再 開確率を求める。再開確率曲線は図 3.14 の通りである。ただし、本研究の分析単位は1ヶ月単位とする。



図 3.14. 企業の再開確率曲線。

## 3.5 ④海外展開:タイのバンコクにおける精緻な人口データ開発

## 3.5.1 概要

近年、全世界の開発途上国において急速な人口増加と都市化が進みつつある。特に開発途上国の都市で は、農村から都市への人口移動が急速に進むとともに、急激な人口増加に都市の各種インフラ整備が追い つかず、都市の内部やその外縁部にスラムが形成される状況にある。都市の持続的な発展と管理を行う ためには、適切な都市計画や交通計画を策定・実施する必要があるが、都市計画や交通計画を策定して行 く上で必要不可欠な情報が、都市の物理的な広がり(建物等の分布)と人口の分布状況である。これらの 情報を把握する上で利用可能な情報として地図や各種統計が挙げられるが、特に開発途上国では建物や 人口の分布を把握するための地図や統計の継続的な整備が成されていない,あるいは継続的に整備され ていたとしても一般に公開されているものは空間的粒度が荒いため、きめ細やかな都市・交通計画の策定 と実施への利用には充分の耐えられる品質ではないと言える。そのため可能な限り空間的粒度の高い人 口統計(理想的には建物単位の人口分布が推定できるレベル)の登場が望まれている。

以上の課題を克服するためには、空間的粒度が高いデータ(衛星画像やディジタル地図)を用いて、迅 速に高精細な人口の空間分布を把握する手法を実現するべきである。以上の成果が実現することにより、 先進国のみならず開発途上国も含めた世界のありとあらゆる都市の都市計画・交通計画を支援する、居住 者の空間分布をピンポイントに推定できるマイクロデータが世界で初めて実現する。これにより世界中 の都市、特に今後これまで以上に適切かつ継続的な都市計画・交通計画が必要となる開発途上国の都市に おける都市計画・交通計画を、よりスマートに策定・実施することが可能になるものと期待される。

そこで我々はバンコク都を対象に、建物単位の詳細なディジタル地図と、町丁目単位の比較的低粒度な 人口統計を用いて、建物ごとの居住者数を推定する手法の開発を検討する。また同手法を用いてバンコク 都全域のマイクロ人口データの整備を試みる。

本研究では町丁目単位の人口統計を後述する方法で非集計化することでマイクロ人口データを開発す る。なおバンコクは、町丁目単位の人口統計しか公開されていない。

### 3.5.2 対象地域

対象地域はバンコク都全域とする。図 3.15 に本研究の対象地域と人口統計の町丁目単位の分布を示す。 バンコク都は中央を南北にチャオプラヤー川が流れており、東岸と西岸で様相が異なる。かつては首都機 能が置かれていたトンブリー地区は現在では中間層が多く居住する住宅地となっている。一方、現在の中 心市街地はクルンテープ地区に分布しており、中心市街地周辺には高級住宅街が分布する。また何れの地 区も外縁部に向かって郊外住宅地がスプロールを続けている、今なお成長著しい都市である。



図 3.15. 対象エリア。

3.5.3 利用データ

本研究では世帯や人口の分布を把握するためにバンコクの人口統計を用いる。日本の人口統計は 2015

年に実施されたものが最新である。また町丁目単位よりも高精細な集計単位、すなわちメッシュ (1km,500,250m四方)で集計されたデータも利用可能である。一方、バンコクは2018年に実施された人 ロ統計が利用可能である。公開されている人口統計の集計単位は町丁目となっている。

また人口統計を非集計化して、建物ごとに配分処理を行うためには、配分先となる建物の位置情報が必要になる。そこで本研究ではバンコクの建物ポリゴンデータを利用した(図3.16)。バンコクはインクリメントP株式会社の Map Fan DB data (2018年)を用いた。同データにはタイ全域の都市部を中心に約589万棟の建物ポリゴンデータが含まれている。本研究の対象地域であるバンコクの場合、約216万棟の建物が存在する。またぞれぞれのポリゴンデータには建物の位置や形状(面積)だけでなく、建物の階数・高さ(容積)、建物の用途を把握することが出来る点が特徴である。



図 3.16. バンコクにおける建物ポリゴン。

## 3.5.4 手法

基本的に政府系のビル、学校、病院のような公共性の高い建物や、企業のオフィス、工場、商業施設な どには国勢調査で調査対象とされる定住人口は居住していない。そこで建物用途が住宅と共同住宅の建 物に配分先を絞り込んだあとに按分を実施した。ただし住宅と共同ビルの建物が存在しないにもかかわ らず居住者が存在する町丁目の場合は、例外的に全ての建物を配分先とした。また世帯数や居住者数の配 分方法に現実的な揺らぎを与えた。揺らぎを与えることで複数の世帯が分布する共同ビルのような建物 の場合、同じ建物に入居する世帯が持つ居住者数が全て同じ値となるのを防ぐためである。そこで本手法 ではまず世帯の配分先候補となった建物全てに最低1世帯は配分する。余った世帯が存在する場合、町 丁目 iの建物 j に式 (3.9) で選択確率 rwhij を与える。

$$\mathbf{rwh}_{ij} = \mathbf{v}_{ij} / \Sigma \mathbf{v}_{im} \tag{3.9}$$

そして全ての建物の rwhij を用いてルーレット選択を行う。選択された世帯に対して、1 世帯ずつ配分し、 余りが 0 になるまで続ける。同様にして以上の方法で生成された世帯に最低 1 人は居住者を配分する。 もし居住者が余った場合、町丁目 iの建物 j に分布する世帯に式(3.10) で選択確率 rwr2ij を与える。

$$rwr2_{ij} = hs_{ij} / \Sigma hs_{im}$$
(3.10)

最後に世帯の場合と同様に、ルーレット選択を行うことで居住者数を決定する。

### 3.5.5 結果

図 3.17 にバンコクの中心市街地、高級住宅街、および中流所得層の住宅街における MPD を示す。バン コク全域の結果から、バンコクでは中心市街地から郊外に移動するにつれて、世帯人員の大きい世帯が増 える傾向にあることが分かった。特に中心市街地では単身世帯の数が他の地域よりも顕著に多いことが 分かった。中心街の Asok station 周辺は殆どが単身世帯となっており、また世帯が配置されない建物も 数多く分布している。これは中心街には政府系ビルや商業施設など世帯の配置先とならない建物が数多 く分布しているためである。次に高級住宅街である Thong Lo と住宅街である Thonburi を比較してみる。 全体的に Thong Lo よりも Thonburi の方が世帯が高密度に分布していた。また町丁目によって偏りがあ るものの、Thonburi の方が全体的に世帯人員も大きくなる傾向が見られた。中心街で見られるこの特徴 や、住宅地の富裕度による以上の違いは、多くの既存研究でも一般的に言われている現象である。バンコ クの人口分布を MPD で広域的かつ高精細に観察した場合でも、これらの特徴が明らかに見られたことは 興味深い結果と言えよう。



図 3.17. バンコクの中心市街地、高級住宅街、および中流所得層の住宅街における MPD。

### 3.6 エージェントベースによる経済モデルの HPC 拡張

3.6.1 はじめに

災害に対する回復力を高め、経済と経済基盤を迅速に回復する効率的な回復計画を見つけるには、経済 と経済基盤について、相互依存関係をすべて含め一緒にシミュレートする必要がある。これを行うには、 経済における数百万の異なる経済主体(生産者(企業)、消費者等)の複雑な経済的な相互作用すべてに 対応できる、きめ細かい経済モデルが必要である。しかし、DSGE などの標準的な経済モデルは、この作 業には適していない。これは、標準モデルが非常に粗い経済モデルを対象にするためである。一方、エー ジェントベースの経済モデル(ABEM)には、国または経済圏の数百万の経済主体を含む経済の1:1ス ケールモデルをシミュレートする機能があり、サプライチェーン、ライフラインネットワークなどの重要 な要素を含む。ABM は、異種エージェント間における相互作用の時間ステップ駆動システムとして経済 をシミュレートするので、災害後の経済などの経済状況を研究するための最良の候補である。成長率に対 するクレジットネットワークの影響[2]、消費財生産企業に利用可能な資本とクレジットの影響[1]など、 さまざまな経済現象を研究するために多くの ABEM が開発された。国民経済のすべての経済的実体をシ ミュレートする最も完全な ABEM は、Diessenberg ら [6]および Poledna ら[7]によって開発された EURACE である。これらのモデルのエージェントは似た動作ルールに従う。われわれの ABEM として、 Poledna ら [7] のものを選んだ。この理由は、この ABEM に利点がいくつかあるためである。エージェ ントの初期データは、経済の国民経済計算システム (SNA) に従って利用可能な経済データから導出され、 エージェントは SNA やクレジットベースの商品市場で定められたのと同じ会計手順に従う。そしてモデ ルは過去の出来事を再現することが最も重要である[12]。

Polednaら[7]は、必要な全ての経済主体とその動作ルールを提供するが、数億人のエージェントを持つ 経済の1:1スケールモデルをシミュレートする計算上の需要を満たすことは、きめ細かい経済シミュレー ションを実行するために主要な障害となる。Deissenbergら[5]は、並列コンピュータを使用して数億人の エージェントが存在するユーロ圏経済のシミュレートを試みている。ただし、それらの実装は小さな仮想 の労働市場についてのみ説明しており、完全な実装を評価するための文献はない。

きめ細かな経済シミュレーションを行う高性能コンピューティング(High-Performance Computing、HPC) 拡張ABEMの必要性を動機として、われわれはメッセージパッシングインターフェース(Message Passing Interface、MPI)に基づいたABEM用の分散メモリ並列拡張を開発した。前年度(2018年度)における研究 報告では、ABEMのHPC拡張実装の詳細を示した。本年度(2019年度)は、シリアルおよびパラレルのパフ オーマンスをさらに大幅に改善するとともに実行時間を短縮し、またパラレルスケーラビリティを改善 することで、問題サイズを30倍に増やした。われわれの知見では、3億3000万人のエージェントをシミュ レートするのは今回が初めてであり、文献で報告されている最大のエージェントベースの経済シミュレ ーションに比べて33倍大きい。

この報告書では、本年度に行った改善の詳細と、改善の有効性を示す数値結果を示す。計算性能を実証 するために、1つが1,000万人のエージェントを持ち、もう1つが3億3000万人のエージェントを持つ2つの 経済をシミュレートする。2つの例は、エージェント間のランダムな相互作用に関係なく、実装が70%を 超える強力なスケーラビリティを実現できることを示す。さらに、開発されたシステムの潜在的なアプリ ケーションの早期実証として、1億2500万人のエージェントで構成される日本経済のモデルを使用して、 仮想災害のシミュレーションを提示する。 簡潔にするために、以降、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)を意味する。またパラレルという用語は MPI による分散並列実装を意味し、メッセージまたは通信はポイン トツーポイントまたは集合的な MPI 通信を示す(例: MPI\_Send()および MPI\_Recv()、MPI\_Bcast()など)。



図 3.18. 典型的なエージェントベースの経済モデルの概略図。

3.6.2 エージェントベースの経済モデル: HPC の観点

典型的な ABEM は、相互作用するエージェントの動的システムとして経済をシミュレートする。エー ジェントは、本質的に自律的で不均質であり、さまざまな市場で他のエージェントと対話する。 エージェントは、一度に複数の市場でアクティブになり、そのニーズと要望を満たすためにさまざまな決 定を行う。エージェントの動作を定義するルールは ABEM によって異なるが、ほとんどの ABEM では、 エージェントの動作は単純な事前定義されたルールによって定義される。エージェントの行動/決定は、 現在の状態と経験によって管理される。市場内の2つのエージェント間のすべてのやり取りは、2つのエ ージェント間でデータの交換をもたらす。市場のほとんどは、エージェントの現在の対応相手に対する満 足度または不満度に応じて、時間とともに進化する。

図 3.18 は、われわれが採用した ABEM の概略図を示す。このモデルは、さまざまなエージェントで構成されている:産業の一部としての企業、外国企業、投資家、労働者および非アクティブな世帯からなる 世帯、銀行、中央政府、中央銀行である。すべてのエージェントには、動作する物理的な場所があり、さ まざまなネットワークによって接続されている。企業は、労働市場の労働者や商品市場の消費者、また信 用市場の銀行、そして税金/補助金の支払い/受け取りを目的として政府と対話する。労働者は、労働市場 と商品市場で企業と相互作用し、また信用市場で銀行と相互作用し、そして政府と相互作用し税金を支払 うか、あるいは社会的利益を受け取る。



図 3.19. 集中グラフ上の顧客と銀行 の相互作用。

さまざまな市場のエージェントの相互作用グラフは、信用市場などの集中グラフ、または労働市場や商 品市場などのスケールのないグラフとして分類できる。並列実装では、2つの異なるプロセスに存在する 2つのエージェント間の各相互作用により、2つのプロセス間の通信が行われる。

この報告を自己完結型にするために、相互作用グラフの詳細と、スケーラブルな HPC 実装における課題をこのセクションで説明する。前年度の報告において、労働市場を除く、複雑なエージェントの相互作用がもたらす困難に対処するための戦略の詳細を示している。このセクションの後半では、本年度に完了した労働市場の並行実施の詳細を示す。

### 3.6.2.1 集中型グラフ上の相互作用

銀行や政府と他のエージェントとの相互作用は、集中型グラフを介して行われる。 相互作用のいくつかは、政府に税金を支払うように単方向であり、他の相互作用には銀行への融資を申 請するような双方向がある。単方向の相互作用には、元のエージェントから目的とするエージェントへ のデータ転送が含まれる。プロセスから発生するこのような相互作用はすべて、1つの通信のみを必要 とする1つの相互作用にまとめることができるので、並列化が容易である。一方、双方向の相互作用 は、元のエージェントから目的のエージェントへのデータ転送、受信したデータに基づいた目的のエー ジェントによる意思決定、および元のエージェントへの応答という3段階で構成される。従って、これ らの相互作用には2つ以上の通信が必要であり、シリアル化された意思決定のために大きな負荷の不均 衡が発生する。図3.19は、銀行とその顧客の典型的な相互作用の仕組みを示す。

#### 家計、企業、銀行と政府との相互作用

すべての地元企業、外国企業、労働者、投資家、働いていない世帯、そして銀行は、中央政府にさまざ まな種類の税金を支払う。政府は世帯に社会的便益と補助金を支払い、一部の産業部門には補助金を支払

図 3.20. スケールが無いグラフでの 購入者と販売者の相互作用。

う。納税は一方向であり、すべてのランクを作成してすべてのエージェントから税金を収集し、この収集 した税金を、政府エージェントを含むランクに送信することにより、簡単に並列化できる。

政府による社会的利益の支払いは、世帯に支払われる社会的利益の額が経済的地位に依存するため、双 方向である。

### 家計や企業と銀行の相互作用

すべての企業および世帯は、銀行と対話して、余剰金の預け入れ、預け入れた金の引き出し、または財務状況に応じてローンを取る。預け入れは単方向であるが、貸出の引き出しと受け取りは双方向である。 政府による社会給付の移転と同様に、融資の撤回と取得には3つの手順が必要である。最初に *MPI\_Gatherv()*を使用して融資申請を収集し、それから、アプリケーシションをひとつずつ処理し、最後 に*MPI\_Scatter()*を使用して、申請者に返信を分散する。これにより、銀行を含むランクに高い計算負荷が かかり、スケーラブルな並列拡張の実装が困難になる。

3.6.2.2 スケールの無いグラフ上の相互作用

スケールの無いグラフ上で、商品市場と労働市場の相互作用が発生する。これらのグラフのすべての 相互作用は、本質的に双方向、ランダム、および動的である。典型的な購入者と販売者の相互作用の仕 組みを図 3.20 に示す。ランダム性のため、すべての相互作用を予測し、それらの並列化を計画するこ とは不可能である。

3.6.2.3 商品市場における消費者と販売者との相互作用

各期間において、すべての消費者は、各業界のランダムな販売者の組を訪れて、資本財と消費財を購入 する。すべての購入者は、経済のすべての販売者にアクセスできる。購入者によって販売者が選ばれる確 率は、そのサイズ(つまり、生産される商品の量)とその商品の価格に基づく。生産量が多く、価格が低 い販売者は、購入者の訪問する可能性が高くなる。すべての販売者に公平なチャンスを与えるために、彼 らが買い物に行く順番を各期間でランダム化する。相互作用の双方向性のため、購入者が別のランクにあ る販売者に訪問するたびに2つの MPI 通信が必要である。購入者が訪問した販売者の数は、購入者の予 算と、特定の購入者の訪問時に販売者と販売できる金額に依存するため、予測できない。従って、ランク 間のランダム、1対1、および双方向の通信が多数発生する。このようなシナリオのスケーラブルな実装 を実装することは非常に困難である。

### 3.6.2.4 労働市場における従業員と雇用主との相互作用

各期間において、企業は労働需要に応じて労働者を雇用し、余分な労働者を解雇する。失業者は雇用 されるまで仕事を探す。利用可能な仕事よりも労働者の多いランクには、労働力不足のランクで仕事を 探す多くの失業者が存在する。ランクが労働力不足であるか、労働力過剰であるかは、各期間の労働市 場の初めにのみ判る。労働者による別のランクの企業への求職には、2 つのポイントツーポイント通信 が含まれる。1 つは労働者による応募用であり、もう1 つは企業の労働者への返信用である。労働者が そのような仕事を確保できる場合、会社は賃金を支払う必要があり、これには会社から労働者へのもう 1 つのコミュニケーションが含まれる。労働者は解雇される可能性があり、解雇された労働者は別の会 社で仕事を得る可能性があるため、労働市場におけるすべての相互作用は動的である。商品市場と同様 に、仕事を探すために労働者が訪れる企業の数は予測不可能であり、企業の空席数に依存する。明らか に、このようなシナリオにスケーラブルなソリューションを実装することは非常に困難である。

### 労働市場の並行実施

エージェントは、プロセス間リンクの数を最小限に抑えることにより、労働市場の代表的な相互作 用グラフに基づいて分割されましたが、労働者は物理的な場所が固定されているため、企業の労働需要 に正確に応じて分配できないため、多数のプロセス間リンクがやはり存在する。さらに、このようなリ ンクの数は、相互作用グラフが時間とともに進化するにつれて増加する可能性がある。労働者と企業の 間のこれらの多数のランダムなプロセス間相互作用を取り除くために、中間エージェント-募集代理店-が各ランクに導入され、企業の労働供給者および求職者の求人提供者として機能する。

すべての企業は、各期間の労働需要をその階級にいる人材紹介会社に送り、失業者は人材紹介会社を 訪問して仕事を見つける。仕事と失業者の利用可能性に応じて、人材派遣会社は余剰仕事または余剰労 働力を持っているかもしれない。マスターランクの求人機関は、各自のランクのローカルジョブマーケ ットを終了した後、MPI\_Gather()を使用して、すべての採用機関の余剰ジョブ/労働者の数を収集する。 マスターランクの人材紹介会社は、すべての人材紹介会社が労働需要を満たすことができるように、ど のランクで仕事/労働者を送るべきかを決定する。この決定は、MPI\_Scatter()を使用して募集代理店に分 散される。マスター募集代理店から受け取った指示に応じて、募集代理店はポイントツーポイント通信 を使用して相互に通信する。したがって、人材派遣会社の導入により、労働市場でのランダムな相互作 用が排除された。さらに、それらの機能はグラフの動的な性質の影響を受けない。これらすべての要因 により、これはスケーラブルなソリューションになる。

### 3.6.3 シリアルおよびパラレルパフォーマンスの強化

本年度の研究において、より高いシリアルパフォーマンスを実現し、それによってより高いスケーラビ リティを実現するために、最も時間のかかる、広く呼ばれる関数のアルゴリズムが、キャッシュフレンド リーにすることで改善された。モデルに存在するすべての関数のうち、商品市場を表す buy()は、総実行 時間の約 90%を占め、エージェント間における最大量のデータ処理を伴う。利用可能な販売者の分布を 更新し、そこからランダムな販売者を引き出して購入するアルゴリズムを改善し、軽量のデータ構造を使 用することにより、buy()の実行時間が大幅に短縮された。このセクションでは、本年度に行ったアルゴリ ズムの改善について簡単に説明する。次のセクションでは、これらの改善による有効性を示す数値結果を 述べる。

#### 3.6.3.1 販売者の分布の更新

前のセクションで述べたように、購入者が販売者 *i* に訪問される可能性は、購入者 *pi* が選択される確率に依存する。この確率は販売者のサイズと価格に依存する。従って、市場の開始前に、販売者の累積確率分布が生成される。分布から販売者を選択するために、購入者は、 $0 < x \le P_n$ となるような一様乱数 *x* を 作る。ここで、 $P_n = \sum p_i$ は利用可能な販売者の総数である。分布から、販売者 *j* がバイナリ検索アルゴリズムを使用して  $P_{(j-1)} < x \le P_0$ を見い出して、購入者はこの販売者を訪問する。このように選択された販売者

がアクティブである (つまり、売れ残りの数量がある)場合、購入者の訪問は成功する。そうでなければ、 購入者は何も買わずに戻る。*buy()*が進行するにつれて、売り切れの販売者 (非アクティブな販売者)がま すます多くなる。そのような失敗した訪問の数が増え、多くの実行時間が無駄になる。従って、売り切れ た販売者は、すべてを販売したらすぐに分布から削除する必要があり、分布が再生成される。大きな配列 のランダムな要素の削除には時間がかかるため、売り切れた販売者の削除は非常に非効率的である。この ため、昨年度 (2018 年度) において、販売者を無効にするアルゴリズムを実装した。これを、 *improved\_update\_distr()*として言及する。

enhanced\_update\_distr()は、中規模の経済で良好に機能する(セクターの販売者の最大数は 50 万人未満 である)。ただし、販売者の数が数百万を超える場合、im-proved\_update\_distr()で分布を更新すると、い くつかの販売者を無効にするには、かなりの時間を要する。販売者の数が多い場合、販売者のデータはキ ャッシュメモリに収まらない。その結果、分布の更新は非常にメモリを集中的に使用するタスクになり、 実行時間が大幅に増加する。このメモリアクセス時間の大幅な増加をなくすために、分布を分割し、各分 割部分がキャッシュメモリに収まるようにする。また、関連するアルゴリズムは、分布全体を処理するの ではなく、分布が関連する分割部分のみを処理するように変更する。例として、販売者 j を無効にする必 要があり、分布が2 つの部分に分割されていると仮定する。j > n/2の場合、 $j \leq i \leq n$  に対して  $P_{(i)} = P_{(i)} - p_{j}$ に従って分布が更新される。一方、 $j \leq n/2$ の場合、分布は  $0 \leq i \leq (j-1)$ に対して  $P_{(i)} = P_{(i)} + p_{j}$ に従って更新さ れる。どちらの場合も、分布が分割されていない場合と比較して、分布が分割されている場合、更新され るコンポーネントの数ははるかに少ない。次のセクションで示すように、この方法により、何百万人もの 販売者がいる場合に実行時間が大幅に短縮される。

注意を要する別の問題は、与えられたランダムな確率xに対して、 $P_{(j-1)} < x \le P_{(j)}$ を満たす分布配列Dで販売者jを見つけることである。販売者jを見つけるための検索時間は、配列Dのサイズに依存する。数百万の購入者がそれぞれ少なくとも1人の販売者を選択しているため、数百万の販売者がいるセクターでは、検索時間が非常に重要である。検索時間を短縮するために、確率範囲と対応する販売者のインデックス範囲を含む中間配列*range-index*を使用する。ランダムな確率xの場合、最初のステップで、範囲インデックス配列を検索して、対応する販売者の範囲を見つける。

2番目のステップでは、前のステップで取得した範囲に対してのみ、配列 D で検索が実行される。明らかに、現在の分布からの販売者の引き出しは非常に高速である。この実装を、advanced\_update\_distr()と呼ぶ。

3.6.3.2 データ指向設計

*buy()*では、数百万の顧客エージェントが数十の業界の数千の販売者を訪問し、大量のデータを交換す る。これはメモリ領域操作であり、顧客オブジェクトのサイズとメモリアクセスパターンは実行時間に顕 著な影響を及ぼす。実装において、世帯顧客オブジェクトには少なくとも15個の double 変数、2個の float 変数、4個の int 変数がある。 ただし、購入するために必要なのは6つのダブル変数のみである。また、 購入者全員に公平な機会を提供するために、顧客はランダムな順序で買い物に行く。肥大化したオブジェ クトで構成される大きな配列へのランダムアクセスは、キャッシュのパフォーマンスを低下させ、コード の全体的なパフォーマンスに重大な影響を与える。 この問題を克服するために、顧客の *buy()*関連の6変数のみで構成される新しい軽量エージェントが、 家庭用のプロキシとして使用される。配列 C は、これらすべての軽量の購入者を格納するために使用さ れる。この軽量の配列 C を反復処理すると、メモリのパフォーマンスが向上する。キャッシュに優しい 設計では、*buy()*の開始前に配列 C がランダム化される。要素単位のランダム化は依然としてメモリを集 中的に使用するタスクであるため、数千ブロック単位のブロック単位のシャッフルが採用される。配列 C は数百万の要素で構成されているため、ブロック単位のシャッフルは購入者に公平な機会を提供するの に十分である。効率的にブロック単位でシャッフルするために、Fisher-Yates アルゴリズムを使用する。 この実装を、*data-oriented buy()*と呼ぶ。

## 3.6.3.3 ビッグバイヤーbuy()

エージェントが不均一であるため、一部のエージェントは、他のエージェントと比較して経済的に遥 かにサイズが大きい。例えば、ある産業において、労働者が1人しかいない企業もあるが、数千人の労 働者がいる企業もある。従って、小規模企業と大企業の間では、総生産、生産の資本と中間財の要件に 大きな違いがある。同様に、家計の一部は大企業の投資家であるため、家計の間には大きな所得格差が ある。世帯の消費予算は収入に依存するため、世帯の消費予算には大きな差がある。エージェントが購 入に要する合計時間は、消費予算に正比例する。エージェントには物理的な場所が関連付けられてお り、その場所に応じてプロセス内に配置される。その結果、一部のプロセスは他のプロセスと比較して 多数の大規模な購入者を抱えている可能性があり、これが大きな負荷の不均衡を引き起こす。buy()の仕 事量のバランスをとるために、大規模な購入者:100人以上の労働者を持つ企業、投資家:大企業の投 資家(つまり、100人以上の労働者を持つ企業)、および銀行投資家は、すべてのプロセスから平等に 購入するように作られる。その結果、総需要はすべてのプロセスに均等に分配され、負荷の不均衡は大 幅に減少する。この実装を、dstr\_big\_buy()と呼ぶ。

### 3.6.3.4 大企業向けの分散販売

購入者は、業界のすべての販売者からランダムに選択された販売者を訪問する。これらの多数のラン ダムアクセスは、業界の販売者を含む配列のサイズが利用可能なキャッシュよりも大きい場合、非常にキ ャッシュ効率が悪くなる。シミュレートされる経済圏に応じて、一部の業界には数百万の企業(販売店) が存在する場合がある。例えば、ユーロ圏では、62の産業のうち6つが100万を超える企業を抱えてい る。明らかに、それぞれが6つの2重変数を含む数百万の販売店を含む配列は、キャッシュに適合しな い。従って、キャッシュを適切に利用するために、大企業の販売者は2つ以上のサブセットにグループ化 され、売り手の最大のサブセットが利用可能なキャッシュに収まるようにする。現在の実装では、販売店 のサブセットの最大サイズとして100,000を採用している。ここで、買い手は、アクティブな販売者のサ ブセットの1つから販売者を選択する。一度にアクティブになるのは販売者の1つのサブセットのみで、 現在のサブセットが販売を終了するとすぐに別のサブセットがアクティブ化される。この実装を、 salesoutlets subsets buy()と呼ぶ。 3.6.4 計算性能

性能改善を説明するために、合計 980 万人のエージェント(ここでは小経済と呼ぶ)を持つ小規模経済 向けと、合計 3 億 3100 万人のエージェント(以下参照)を持つ大規模経済向けの 2 つのシミュレーショ ンを示す。これは、いくつかの問題は小さなサイズの問題では目立たないが、大きなサイズの問題では深 刻になるからである。小経済と大経済は、それぞれオーストリア経済とユーロ圏経済を表す。

3.6.4.1 シリアル性能の強化の重要性

最初に、セクション3.6.3.1で示したアルゴリズムの改善による性能改善を示す。

enhanced\_update\_distr()、data-oriented\_buy()、およびad-vanced\_update\_distr()に対応する4つの異なるシ ミュレーションを実行して、性能向上を確認した。これらの要因は小さな問題の場合にも重要であるた め、これらのシミュレーションには小経済データを使用する。図3.21は、4回のシミュレーションすべ てで各イベントを完了するために行われた、13回の反復での平均された最大時間と最小時間を示す。合 計32のイベントは、さまざまな経済プロセス、およびノンブロッキング通信のポスティングとファイナ ライジングを表す。これらのシミュレーションに含まれていない唯一の経済プロセスは、非現地労働市場 である。イベント21は buy()を表し、これらすべての改善は、このイベントの性能を改善することを目的 としている。

図 3.21 に示すように、これらのアルゴリズムの改善により、最も時間のかかるイベント 21 の実行時間と負荷の不均衡が大幅に減少した。これらすべての改善を含むコードを、stage-1 code と呼ぶ。

大規模経済のシミュレーションで *stage-1\_code* の性能を確認するために、大規模経済シミュレーション を実行した。1024 プロセスを使用した場合、コードの1回の反復による合計シミュレーション時間は 7000 秒であった。図 3.22 (a) は、各セクターの *buy()*を完了するために、かかった最大および最小の計算時間 を示す。わかるように、さまざまなセクターの *buy()*に大きな負荷の不均衡がある。この大きな負荷の不 均衡を軽減するために、セクション 3.6.3.3 および 3.6.3.4 で説明した手法を採用した。



図.3.21. 32 イベントの平均実行時間(13 回の反復)。ズームビューに標準偏差を表わす。 イベントに対応するドットの中心と円の差は、負荷の不均衡を示す。



図 3. 22. 各セクターの *buy()*の標準偏差(13回のモンテカルロシミュレーション)を伴う平均 実行時間。

図 3.22 (b) および (c) は、それぞれ (*stage-l code + dstr\_big\_buy(*)) および (*stage-l\_code + dstr\_big\_buy(*)+ *salesoutlets\_subsets\_buy(*)) によって取得される実行時間を示す。これらの改善により、負荷の不均衡が大幅に削減されただけでなく、総実行時間も大幅に削減されたことが明らかに判る。



図 3.23. 各イベントの平均実行時間(13回の反復)。イベントに対応する点の中心と円の 差は負荷の不均衡を示す。

 $(stage-l code+dstr_big_buy()+ salesoutlets_subsets_buy())$ を、final\_stage\_code と呼ぶ。final\_stage\_code には、この白書で紹介したすべての技術を含み、57 のイベントがある。これらのイベントには、ローカルでない雇用/解雇、および非ブロッキング通信のさまざまな初期化と最終化を含むすべての経済プロセスを含む。buy()は、企業のbuy()と他の消費者のbuy()に分けられ、通信を隠す。

### 3.6.4.2 負荷バランスと計算時間

前のセクションで説明したように、さまざまな手法により、buy()の負荷の不均衡が大幅に減少した。このセクションでは、負荷の不均衡に対するコード全体の性能を調べる。この目的のために、小経済と大経済それぞれに1つずつ、2つのシミュレーションを実施し、その結果を図3.23に示す。図3.23の円と点は、最も遅い MPI ランクと最速の MPI ランクにかかった時間を表し、円と点の間のギャップは、各業界の購入プロセスにおける負荷の不均衡を表す。判るように、上記の改善により負荷の不均衡が大幅に減少した。

3.6.4.3 スケーラビリティ

表 3.6 と表 3.7 は、それぞれ、小経済シミュレーションと大経済シミュレーションの final\_stage\_code の 実行時間と強力なスケーラビリティを示す。実行時間は、それぞれの場合にコードの 13 回の反復にかか る平均ランタイムであり、強力なスケーラビリティは( $T_n/T_m$ )/(m/n)として定義される。Ti は、i 個のプロセ スがとる平均実行時間であり、m≥2n である。

エージェントの相互作用のランダムな性質に起因する課題を考慮すると、70%を超えるスケーラビリ ティが大きな成果である。1000万人のエージェントをシミュレートする3秒の実行時間は、文献で報告 されている実装よりも数桁高速であるが、著者の知識によれば、130秒で3億3100万人のエージェント をシミュレートすることは記録である。この非常に少ない実行時間により、小さな計算リソースにアク セスできる人なら誰でも、大きな経済の確率論的研究を行うことができる。 表 3.6. 小経済に対する実行時間とスケーラ ビリティ。

Number of	Runtime(s)	Scalability	
MPI processes		(%)	
4	21.98		
8	11.85	92.74	
16	7.09	83.57	
32	5.02	70.62	
64	3.41	73.61	

表 3.7. 大経済に対する実行時間とスケーラ ビリティ。

Number of	Runtime	Scalability	
MPI processes	(s)	(%)	
16	492.00		
32	294.13	83.64	
64	187.04	78.63	
128	129.00 72.50		
256	107.32	60.10	



c) 名目資本形成

d)経済の実質総付加価値

図 3.24.3 つの災害条件下でのさまざまな経済指標の比較。

3.6.5 実証的な数値シミュレーション

開発したツールの適用を実証するために、3つのシナリオの下での日本経済のシミュレーション結果 を示す。最初のシナリオは通常の経済状況(以下、通常シナリオと呼ぶ)を表し、他の2つは仮想災害 シナリオに起因する災害後の経済状況に対応する。一つは資本の1%の損失を引き起こす災害(災害シ ナリオ1と呼ぶ)であり、もう一つは資本の10%の損失を引き起こす災害(災害シナリオ2と呼ぶ)で ある。災害は、シミュレーションの最初の期間の終わりに発生すると想定する。各期間は、1年の4分の 1を表す。

3.6.5.1 モデルパラメータとエージェントの行動ルール

モデルパラメータは、2012 年第4四半期の日本の経済データから導出する。データソースは、入出力 テーブル1、国民経済計算2、およびOECD四半期国民経済計算である。経済には51の産業セクターに またがる約1億2,000万の世帯と約150万の地元企業がある。経済は、約75万あると想定される外国企 業を通じて、世界の他の地域と相互作用する。モデルの1シミュレーション期間は1財務四半期を表し、 経済シミュレーションを12四半期にわたって実施した。

通常の経済状況下でのエージェントの行動ルールを、Poldena ら [7]が提供する。災害シナリオでは、エージェントの動作を次のように想定する。

- a)国民経済計算の手順に従って、企業は利益から損害を受けた資本を差し引く。
- b) 企業は、災害後の次の期間から失われた資本を購入しようとする。 ただし、銀行からのローンの利用可能性と商品市場における資本財の利用可能性は、彼ら

が失われた資本を購入するのにかかる時間を決定する。

c)世帯も、災害後の次の期間から失われた資本の購入を開始する。

これは多くの先進国で標準的な慣行であるため、失われた資本を購入するための政府支援 の形で家計が全額補償を受けると想定した。市場での資本財の入手可能性は、世帯の唯一の 制約である。

#### 結果と考察

3つのケースすべてのシミュレーション結果を一緒にプロットし、図3.24に示す。名目資本形成、企 業の営業黒字、労働者に支払われる賃金、名目総付加価値などのさまざまな経済的パラメーターを示 す。結果は、短期的には、両方の災害シナリオが経済に悪影響を与えることを示す。経済は完全に回復 し、災害シナリオ1の場合は通常のレベルに近づくが、災害シナリオ2では、約1.5%の損失(総付加価 値)で落ち着く。

災害直後、資本の損失により企業の営業黒字が急落する。資本損失により企業の生産量が減少し、企業 は労働者を解雇しなければならない。これは、図3.24(b)で労働者に支払われる総賃金の減少として表 される。後期には、企業と家計は失われた資本を購入しようとするが、これは経済に短期的な需要をもた らす。そのため、企業はより多くの労働者を雇用して、需要を満たすためにより多くの労働者を生み出 す。その結果、すべての経済指標は中期的にプラスの兆候を示す。経済は通常のシナリオよりも高いレベ ルに達することさえできる。しかし、成長は短命であり、すべてのエージェントの失われた資本が回復す ると、経済は安定しようとし、均衡に達する。図3.24に示すように、災害シナリオ1の場合、経済の四 半期ごとの総付加価値は通常のシナリオレベルで安定するが、災害シナリオ 2 の場合、通常のシナリオ 状態よりも 1.5%低い状態に設定される。

3.6.6 まとめ

災害の経済的余波のきめ細かいシミュレーションは、災害に対する回復力を向上させる上で大きな役 割を果たすことができる。災害後の経済回復への適用を目的として、数億の国家経済の不均一な経済主体 の複雑な経済的相互作用をすべてシミュレートできる、きめの細かい ABEM を開発した。

ABEM は、分散メモリ並列実装により計算的に強化され、大国または経済圏の1:1スケールモデルを シミュレートできるようになった。特に、本年度に導入した性能強化によって、スケーラビリティが大幅 に向上し、数分で数億のエージェントの問題をシミュレートできるようになった。災害後の経済をシミュ レートする際のモデルの例示的なアプリケーションも提示される。モデルは、日本経済の10%の資本を 破壊する大災害が、経済の四半期の総付加価値の約1.5%の永久損失を引き起こすことを示す。経済主体 のより現実的な災害後の行動ルールを使用することにより、シミュレーション結果をさらに改善できる。 開発されたシステムは、回復計画の経済的パフォーマンスを定量的に評価するための潜在的な候補とな るか、あるいは迅速な経済回復を達成するための最適な回復計画を見つけるシステムのコンポーネント としても使用できる。さらに、差し迫った地震災害の経済的影響を定量的に推定できるように、開発した システムを物理ベースの地震災害シミュレータと緊密に統合するよう取り組んでいる。

参考文献

- [1] Assenza T, Gatti DD, Grazzini J, Emergent dynamics of a macroeconomic agent-based model with capital and credit, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.50, pp.5-28, 2015.
- [2] Gatti DD, Gallegati M, Greenwald B, Russo A Stiglitz J, The financial accelerator in an evolving credit network. *Journal of Economics Dynamics and Control*, Vol.34, pp.1627-1650, 2010.
- [3] Caiani A, Godin A, Caverzasi E, Gallegati M, Kinsella S, Stiglitz JE, Agent based-stock flow consistent macroeconomics, Towards a benchmark model. *Journal of Economics Dynamics and Control*, Vol.69, pp.375-408, 2016.
- [4] Haldane, AG, Turrell AE, An interdisciplinary model for macroeconomics, *Oxford Review of Economic Policy*, Vol.34(1-2), pp.219-251, 2018.
- [5] Holcombe M, Chin S, Cincotti S, Teglio A, Deissenberg C, van der Hoog S, David H, Gemkow S, Harting P, Neugart M, Large-scale Modelling of Economics Systems. *Complex Systems*, Vol.22(2), pp.175-191, 2013.
- [6] 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.
- [7] Poledna S, Hochrainer-Stigler S, Miess MG, Klimek P, Schmelzer S, Sorger J, Shchekinova E, Rovenskaya E, Linnerooth-Bayer J, Dieckmann U, Thurner S, When does a disaster become a systematic event? Estimating indirect economic losses from natural disasters, arXiv:1801.09740, 2018.
- [8] Caiani A, Russo A, Palestrini A, Gallegati M, Economics with Heterogeneous Interacting Agents, Springer. Print, 2016.

- [9] Karypis G, Kumar V, A fast and highly quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs, *Journal on Scientific Computing*, Vol.20(1), pp.359–392, 2019.
- [10] Lalith M, Gill A, Poledna S, Hori M, Hikaru I, Tomoyuki N, Koyo T, Ichimura T, Distributed Memory Parallel Implementation of Agent-Based Economic Models. *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 419-433, Portugal: Springer. DOI:10.1007/978-3-030-22741-8\_30, 2019.
- [11] Poledna S, Miess Michael G, Hommes Cars H, Economic Forecasting with an Agent-Based Model, http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3484768, 2019.

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 南海トラフ域の一部を模擬した地震サイクル計算

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 [1])。一方、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 [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 おいて実施することで、その結果から地震発生シナリオを抽出できる。このような方法で、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が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において一般的なのは、媒質中の既存の弱面を仮定し、そこに摩擦構成 則を仮定するというアプローチである。摩擦面上で発生するすべりを地震とみたて、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・進展を計算するものである。従来多く用いられてきたの は、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である(例えば Rice [1])。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 造不均質性やマント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。昨年度は、メッシュ生成方法の改良などにより、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に成功した。本年度は、通常の地震の サイクルシミュレーションを試みる。通常の地震の発生計算は、長期的スロースリップのための計算と比 べ、数値的に安定し計算のためにより高い時間分解が要求される分、計算の難易度が高くなる。具体的に 対象とするのは、南海トラフ域の紀伊半島沖の弾性波速度構造不均質を模擬した計算モデル設定下での 地震サイクルの計算である。

地殻やマント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

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{e} + \varepsilon_{ij}^{i}$$
$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}^{e}$$
$$\varepsilon_{ij}^{i} = \frac{1}{2n}\sigma_{ij}'$$

と書く。ここで $\varepsilon_{ij}^{e}$ 、 $\varepsilon_{ijkl}^{i}$ 、 $C_{ijkl}$ 、 $\eta$ 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。 $\sigma_{ij}^{\prime}$ 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

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

という線形方程式に帰着する。ここでK、u、f、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Vを Split node technique [7] 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 $\dot{\mathbf{f}} = \dot{\mathbf{f}}(\mathbf{V})$ 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[8]。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(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<sup>7</sup>-10<sup>9</sup>)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。昨年度開発した計算の効率化 を図るメッシュ修正方法も合わせて用いる。これは、必要領域においてのみ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するものである。

すべり速度・状態依存摩擦則[10][11]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 $\tau_{s*}$ 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係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係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(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[12]による時間積分を行う。

南海トラフ域では、マグニチュード8以上の巨大地震は100~200年程度の間隔で発生することが知ら れている[13]。南海トラフ域における地震は、発生領域で大きく分けて、東海・東南海・南海地震が知 られている。過去の地震記録・津波体積物・歴史書等の分析から、3つの地震は連動して同時発生する可 能性もあるものの、多くの場合は時間的なずれを伴って発生すると知られている。例えば、東南海・南海 地震は、1944・1946年に約2年のタイムラグを伴って発生している。この2つの地震発生域のセグメン ト境界には、地震の破壊を止める物理的な要因が存在するものと思われる。過去に行われた半無限均質弾 性体に基づいた南海トラフ域地震サイクルシミュレーションでは、セグメント境界の断層面上に摩擦特 性の不均質が存在すると仮定したパラメータ設定に基づき、東南海・南海地震が連動せずに発生する場合 が再現されている[4][14]。しかしセグメント境界に実際に摩擦特性の不均質が存在するかを実際に確か めることは現在の知識では難しく、これらの研究は可観測量によって拘束できる情報について議論でき ていないという側面がある。一方で、過去の地震探査の結果より、両地震のセグメント境界付近で、断層 の上板側に地震波速度の大きな部分(high-velocity body)があることが示唆されている[14]。すべり速度・ 状態依存摩擦則の枠組みに基づいたすべりの安定性解析によると、*A、B、L*等の摩擦パラメータだけでな く、断層周囲の媒質の弾性パラメータもすべりの安定性(つまり地震発生のしやすさ)に影響を与える。 つまり摩擦則の分析は、断層面上の摩擦則の空間的変化が小さかったとしても、断層周囲での地震波速度 構造に大きな空間的変化があれば、その場所で摩擦特性は大きく変わることを示唆している。弾性不均質 構造を取り入れた地震サイクルシミュレーションが難しかったためか、このようなアイデアはこれまで あまり重要視されず、その妥当性をシミュレーションによって確かめることもされていない。そこで、本 プロジェクトで開発した手法を用い、Kodaira et al.[14]から示唆される東南海・南海地震のセグメント境 界における high-velocity body の存在を弾性不均質構造により模擬した地震サイクルシミュレーションを 行う。これにより、南海トラフ域のプレート境界地震の最も特徴的な発生様式の1つが、可観測である弾 性不均質構造の存在により説明可能であるかどうかを検討する。

紀伊半島沖の high-velocity body とその周囲の地下構造を単純化してモデル化した有限要素モデルを図 4.1 に示す。図 4.1 中の青色、橙色、赤色であらわされる層はそれぞれ付加体+大陸地殻、マントルウェ ッジ、海洋地殻、海洋マントルを簡便に表現している。各層の物性値は全国一次地下構造モデル(暫定 版)[15]の性質の近い層に基づき設定する(表 4.1)。付加体+大陸地殻の層は、実質的には付加体を想定 した低い剛性率を持つように設定した。白色であらわされる層はプレート境界に面した high-velocity body である。Kodaira et al.[14]に基づき、周囲の付加体に比べ6倍程度の剛性率を持つように設定する。なお、 今回の計算では粘弾性は考えない。有限要素モデルの自由度は 25,641,012、二次四面体要素数は 6,295,618 である。

摩擦パラメータには、破壊伝播方向として想定する海溝軸方向には変化を与えない。これにより、地震 のセグメンテーションに対して摩擦パラメータ単体では影響が発生しないという状況を考える。比較の ため、期待される摩擦特性の違いによって特徴づけられる3ケースを設定する。ケース1は、high-velocity body の物性値を Continental crust と同じとし、摩擦パラメータは図 4.2(a)のような設定とする。ケース 2 においては、high-velocity body は表1の設定のままで、摩擦パラメータは図 4.2(a)のような設定とする。 ケース 3 は、high-velocity body の物性値を Continental crust と同じとし、摩擦パラメータは図 2(b)のよう な設定とする。これはすべり弱化距離 L を 3 倍にしたもので、よりすべりが安定化する傾向となる設定 である。

設定した摩擦パラメータと媒質から、震源核形成の臨界サイズというものが計算できる。これは、地震 に相当する不安定なすべりが発生するために必要な地震発生領域のサイズを表しており、

$$h^* = \gamma \frac{\mu L}{B - A}$$

と計算される。ここでµは剛性率、γは断層ジオメトリに関連する係数である。h\*が小さければ小さい断

層領域でも不安定すべりが発生しやすくなり、大きければその逆となるということである。各ケースでの h\*の値を図4.3に示す。h\*のもともとの定義では均質な媒質が想定されているためこの値は参考のための ものであるが、ケース1では h\*に海溝軸方向の空間変化はないが、ケース2では high-velocity body の剛 性率の高さにより、h\*が周囲より大きい。つまり high-velocity body 直下の断層面では周囲よりすべりが不 安定化しづらい=地震が発生しづらいということになる。ケース3でも同様であるが、Lが全体に大きい 分 high-velocity body 直下での h\*もさらに大きい。

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 4.4 にケース 1 の結果を示す。 設定した断層領域全体での断層破壊が繰り返し発生していることがわかる。紀伊半島沖と想定している 断層面中央部においてセグメンテーションは観察できなかった。h\*からわかる摩擦特性が、破壊伝播方向 であるトラフ軸方向に空間変化していないため、このような結果が得られるのは自然といえる。図4.5に ケース2の結果を示す。計算開始直後数回は、ケース1と同様に設定した断層領域全体での断層破壊が 繰り返し発生していることがわかる。しかし、4回目の地震において high-velocity body の直下から地震が 発生した(計算時間の不足によりこの地震の発生中までで計算が終了した)。セグメンテーションは明瞭 には観察できなかったが、high-velocity bodyの導入による弾性不均質性が、摩擦パラメータの空間変化が 小さい状況においても多様なすべりパターンを生む可能性が示唆される。図 4.6 にケース 3 の結果を示 す。この場合は、断層の端部で発生した地震が断層の逆側に伝播していくが、破壊先端部が high-velocity body に達すると破壊が止まり、数年後にその逆側で地震が発生する、というパターンが1回目、2回目 の地震とも明瞭に観察できる。これより、摩擦パラメータの空間変化が小さい状況においても、highvelocity body のような弾性不均質性が断層周囲に存在することにより、地震のセグメンテーションの再現 シミュレーションが可能であることが示された。これまでの多くの既往研究は、断層面上の摩擦特性の不 均質性にのみ基づいて地震の発生パターンの多様化を議論しようとしていたが、本研究はこれに対し「弾 性不均質性」という新たな観点を提案するものとなる。実際のプレート境界においては、異なる弾性的性 質を持った岩石どうしでは摩擦特性も異なる可能性を否定できないため、断層面上の摩擦特性と断層周 囲の弾性的性質の双方が関与して複雑な地震発生パターンが生まれると考えられる。なお、本結果の計算 には3ケースとも京コンピュータの385計算ノード×60時間程度の計算資源を要した。高い時間分解が 要求される通常の地震のサイクルであっても、数回のサイクルが現実的な計算資源量で計算できるよう になったことがわかる。



図 4.1. 計算に用いた有限要素モデル。(a)全体像。赤枠内が(b)で示す領域に対応する。(b)震源域付近の拡大図。

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<sub>p</sub>:P 波速度(m/s), V<sub>s</sub>:S 波速度 (m/s), ρ: 密度 (kg/m<sup>3</sup>), η: 粘性率 (Pa s) 。

	$V_p (m/s)$	$V_s (m/s)$	$\rho \; (kg/m^3)$	$\mu$ (GPa)	ν
Continental crust	3000	1486	2224	4.911	0.3374
High-velocity body	5900	3450	2650	31.54	0.2402
Mantle wedge	7500	4500	3200	34.80	0.2188
Oceanic crust	5900	2450	2650	31.54	0.2402
Oceanic mantle	8100	4600	3400	71.94	0.2620



図 4.2. 図 1 (b) の白線内の領域で設定される断層摩擦パラメータ分布。(a) ケース 1・ 2 での分布。(b) ケース 3 での分布。(a) に比べ *L* が全体的に 3 倍になっている。



図 4.3. 摩擦パラメータ分布と弾性不均質構造に基づいて計算された *l*\*の分布。
 (a) (b) (c) がそれぞれケース 1、2、3 に対応する。青矢印や赤点線部分が high velocity body の直下にあたる部分。


図 4.4. ケース1の結果。(a)3番目に発生した地震時の、震源域でのすべり速度分 布のスナップショット.赤が高速すべり(地震)を表す。左から右へと破壊が伝播し ている。(b)(a)の赤・青・緑点でのすべり速度。右は3番目の地震時の拡大図。最高 速度となっている時刻が3点で十分近いことから、同一の地震で各点を破壊が伝播 していることがわかる。



図 4.5. ケース 2 の結果。(a) 4 番目に発生した地震時の、震源域でのすべり速度分 布のスナップショット。High velocity body の下部である中央部から地震が発生する パターンである。(b)(a)の赤・青・緑点でのすべり速度。



図 4.6. ケース 3 の結果。(a)2 番目に発生した地震時の、震源域でのすべり速度分 布のスナップショット。赤が高速すべり(地震)を表す。右から左へと破壊が伝播し ていくが、high velocity body の下部である中央部でいったん破壊が止まり、その後 左の方でもう一度破壊が始まる。(b)(a)の赤・青・緑点でのすべり速度。右は1 番目 の地震時の拡大図。最高速度となっている時刻が赤点と緑点で離れており、青点では 十分な速度に達していないことから、中央部で破壊が一旦停止していることがわか る。

### 4.2 GAMERA での弾性グリーン関数ライブラリの公開準備

断層すべりに対する弾性グリーン関数は、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の用途があり、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と位置付けられる。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。Okada[3]などによる計算コードの整備により、半無限弾性体での弾性グ リーン関数計算が広く行われ、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[16])。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、海底地殻変動観測や干渉合成開ロレーダー (InSAR) による地殻変動解析がより多くの 地域で可能となってきた。これらの観測から得られるデータがカバーする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ている。これらの影響を考慮したグリ ーン関数の計算、および断層すべり逆解析、津波計算などが広まりつつある。

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[17]で行われている。しかし、ハードウェアとソフトウェアの整備が進んでいる昨 今においても、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いことは否定できない。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ればよい、と考え ることもできる。

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。南海トラフと日本海溝をはじめのターゲット として計算を行う。日本列島においては、統一的な地震波速度構造モデルとして「全国一次地下構造モデ ル(暫定版)」[15]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、デカルト座標に変換 してメッシュを生成する。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新たに導入して計算を行う。

地震波速度構造モデルから有限要素モデルを生成する部分については、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。

次にグリーン関数の計算方法について述べる。ここでいうグリーン関数は、対象とするプレート境界を 離散化する小断層に対する弾性応答である。小断層として、3次のBi-cubic スプライン形状を持った単位 すべりをプレート境界面上に配置した構造格子上の各点に入力する[16]。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、そこのすべり量は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:

#### $\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f}$

ここで K、u、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、 小断層におけるすべり量を節点分割法により 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。本式の求解のため、 ポスト京プロジェクトで開発されたより高性能なソルバを新たに導入した。ベースとなるアルゴリズム はこれまでと共役勾配法である。共役勾配法による反復求解の収束性を、幾何的マルチグリッド法によっ てのみ改善していたのが以前のバージョンであったが、今回導入したものはこれに加え代数的マルチグ リッド法も併せて用いることで、収束性のさらなる改善をはかっている[18]。

全国一次地下構造モデル[15]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。浅層地盤から大陸・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。メッシュ生成の入力となる地下構造の DEM データの準備 は昨年度の報告書に記載したため割愛する。昨年度は日本海溝域でのグリーン関数ライブラリのプロト タイプ計算について述べたが、本年度は新たに

- 浅部の14層を同じ物性の一層にまとめていたものを、堆積層より浅い層とそれ以外の2層構造 とし、再計算
- 南海トラフ域についても同様の計算

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 Mw9 クラス地震 に対する測地観測点での数値解の評価結果[19]に基づき設定する。これにより、層境界の要素サイズを1 km、震源域を中心として領域を 2500 km×2500 km×1100 km としてメッシュを生成するのを基本設定とす る。メッシュサイズ ds を変えて行った事前解析から、上板側の堆積層より浅い層のメッシュサイズのみ 再分割により 0.5 km とした。

西南日本の南海トラフ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 を室戸沖 80 km 付近に定める(表 4.2、図 4.7(a))。生成された有限要素メッシュを図 4.8(a)に示す。室戸沖を中 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。この有限要素モデルに おいて、(表 4.2)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 461 個となり、沈み込み方向とその垂直方向とを合わせて 922 個のグリーン関数を 計算することとなった(図 4.7(a))。ここでは、小断層に 50 km の深さ制限を設けている。計算結果の一 例を図 4.9 (a)に示す。3 次 Bi-cubicB スプライン型の小断層に対する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。

同じ段取りで、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

107

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4.2、図4.7(b))。生成された有限要素メッシュを図4.8(b)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。この有限要素モデルにおいて、(表4.2)に示す領域に、3次BicubicB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405個となり、沈み 込み方向とその垂直方向とを合わせて810個のグリーン関数を計算することとなった(図4.7(b))。ここ では、小断層に100kmの深さ制限を設けている。計算結果の一例を図4.9(b)に示す。

計算したグリーン関数ライブラリの公開に向けた準備を整えている。公開するツール群は主に

- グリーン関数本体(1km×1km グリッドの地表面変位・傾斜・体積ひずみ)
- グリッド上のデータから任意の観測点でのデータに補間するプログラム

 グリーン関数を重ね合わせて任意の断層すべり分布に対する地表面応答を計算するプログラム
 等により構成されている。本ライブラリは無料ホームページサービスにより作成された WEB サイトを経 由して海洋研究開発機構のファイルサーバより提供する形で、最初は共同研究者に対象を絞って運用を 開始する予定(図 4.10)であるが、ゆくゆくは海洋研究開発機構が提供する予定のデータプラットフォ ーム「4次元仮想地球」のコンポーネントとして提供することも計画している。

表 4.2. 日本海溝域のモデルにおける中心点 Pc の位置とグリーン関数の計算領域を表 す地理座標。

	$P_{\rm c}$ Region for GFs	
	(Long.(°), Lat.(°), ellipsoidal height(m))	Southwest-Northeast edge (Long.(°), Lat.(°))
Nankai Trough	(135, 33.5, 0)	(131, 31)- $(139, 35.5)$
Japan Trench	(142.369, 38.322, 0)	(140.5, 36)- $(145, 41)$



図 4.7. グリーン関数を計算する対象領域の概観。(a)は南海トラフ域、(b)は日本海溝 域を表す。灰色の点は各小断層の中心点を表す。三角形と逆三角形はそれぞれ GEONET の観測点と海底地殻変動観測点のうち代表的なものを示す。



図 4.8. 有限要素モデルの概観。(a)は南海トラフ域、(b)は日本海溝域を表す。(c)(d) はそれぞれ(a)(b)中の赤線上における地下構造(P 波速度)のプロファイル。下図は上 図の赤枠の中を拡大したものである。



図 4.9. (a) 南海トラフ域と(b) 日本海溝域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。色コンターはすべり分 布。黒矢印は地表面の応答変位。白矢印はすべり方向。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。

4.3 社会実装のための準備:有限要素法を用いた千島海溝の海溝型地震に対する津波想定

津波被害想定は沿岸地域の津波防災計画を策定する上で重要である。津波被害想定は一般的に、(1)過 去の地震をもとに断層破壊モデルを設定、(2)半無限弾性体による、断層破壊に対する地殻変動の計算、 (3)計算した地殻変動を入力とした、2次元浅水長波近似による津波計算、というプロセスに基づいて行 われる。

本プロジェクトでは、これらの想定に必要な各要素を、高性能計算に基づく計算手法により高度化する ことを目指している。(1)断層破壊モデル設定では、対象とする断層破壊領域での地震発生の物理シミュ レーションから、断層破壊モデルを抽出する。このような物理シミュレーションは計算手法の開発により 大きな津波を引き起こすような大規模な地震に適用可能となっている(たとえば Hyodo et al. [4])。(2) 地殻変動計算においては、有限要素法を用い、より現実的な 3 次元不均質な弾性構造に基づいた地殻変 動計算を導入する。Ichimura et al. [6]が開発した弾性有限要素計算手法により、津波波源となる地殻変動 計算に必要な高分解能な計算が可能となっている。(3)津波計算では、津波研究者と連携し、都市部の浸 水深など詳細な計算が必要なところでは3次元粒子法に基づいた計算を導入することを検討している。

本プロジェクトでは(1)(2)(3)の各コンポーネントについて研究が進められてきた。一方で、国の被害 想定で用いられているのと同じ、従来の(1)(2)(3)のアプローチに基づいた千島海溝の海溝型地震に対す る津波想定に関し、(2)の部分に弾性有限要素計算手法を導入するという取り組みも、2017年度から 2019 年度にかけて社会実装の準備のため行ってきた。2019年度は合計 10ケース程度の異なる震源モデルに対 して地殻変動の計算を行った。本資料では、2018年度に計算を行った結果を中心に検討内容を述べる。

地震調査委員会から、千島海溝の海溝型巨大地震の切迫性が高いとの見解が2017年に発表されている [20]。想定される千島海溝最大クラスの震源モデルの一つ(ここには掲載しないが、地震調査委員会の資 料において想定されているものに近い)に対して、すべり面がこのすべり量まで一斉に滑る場合を 2018 年度に検討した。設定された震源モデルに対する地殻変動応答は従来、半無限弾性体における地表面応答 の解析的表現[3]を用いて計算されてきた。これに対し、本プロジェクトでは有限要素法により地殻変動 計算を行った。今回の検討の目的は従来法と有限要素法での結果の比較検討であるため、同じ問題設定に おける地殻変動量の一致度を調べる。図 4.10(a)に、海溝軸を横切るある測線上での変動量を示す。半無 限弾性解と有限要素解が長波長において一致していることがわかる。短波長成分における細かな違いは 断層を表現する分解能の違いに起因すると考えられる。津波計算の入力とする前に空間的なローパスフ ィルタがかけられるために、これらの違いの津波計算結果への影響は比較的小さいと期待される。実際 に、図 4.10(b)に計算された地殻変動を入力として計算された沿岸部の津波高を示す。等価な問題設定で あれば、計算結果が従来法とよく一致することが示された。これより、解析的表現による扱いが可能な問 題設定において、有限要素法は解析的な解と比較しても十分な精度で計算ができることが可能であるこ とが分かった。なお、2019年度にはこれを発展させ、10秒ごとの時刻歴すべり量を入力として時刻歴海 底地殻変動を計算することで、時間をかけて破壊が伝播していくような設定での検討を行い、ここでも両 手法の良い一致を確認した。

ここに示した有限要素法による津波想定のための地殻変動計算手法に基づき、今後は内閣府防災が進める日本海溝・千島海溝の津波の検討に海底地殻変動計算結果を提供していく予定である。また、従来法の扱えない設定(海溝軸周辺の3次元不均質構造の考慮など)での津波想定への有限要素法の適用が期待される。

112



図 4.10. (a)本研究の手法と既往手法で、千島海溝最大クラスの震源モデルの1つに対して計算した海底地殻変動量の比較。(b)本研究の手法と既往手法で計算した海底地殻 変動量を入力として計算された沿岸部での津波高の比較。いずれも赤線が従来法で、黒 線が有限要素法によるもの。

参考文献

- Rice, J. R, Spatio-temporal complexity of slip on a fault, Journal of Geophysical Research, Vol.98, pp.9885-9907, 1993.
- [2] Hori, M., Introduction to Computational Earthquake Engineering, Imperial College Press, 2011.
- [3] Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.82(2), pp.1018–1040, 1992.
- [4] Hyodo M., and Hori T., Re-examination of possible great interplate earthquake scenarios in the Nankai Trough, southwest Japan, based on recent findings and numerical simulations, Tectonophysics, 2013.
- [5] Ichimura, T., Fujita, K., Tanaka, S., Hori, M., Maddegedara, L., Shizawa, Y., Kobayashi, H., 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] Ichimura, T., Agata, R., Hori, T., Hirahara, K., Hashimoto, C., Hori, M., Fukahata, Y., An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3-d island-scale high-fidelity model, Geophysical Journal International, Vol.206(1), pp.114–129, 2016.
- [7] Melosh, H. J., and Raefsky, A., A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.71(5), pp.1391–1400, 1981.
- [8] Aagaard, B. T., Knepley, M. G., Williams, C. A., A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasi-static and dynamic crustal deformation, Journal of Geophysical Research, Vol.118.6, pp.3059-3079, 2013.
- [9] Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J., A hybrid multiresolution meshing technique for finite element three-dimensional earthquake ground motion modelling in basins including topography, Geophysical Journal International, Vol.177.3, pp.1221-1232, 2009.
- [10] Dieterich, J. H., Modeling of rock friction: 1. experimental results and constitutive equations, Journal of Geophysical Research, Vol.84, pp.2161-2168, 1979.
- [11] Ruina, A., Slip instability and state variable friction laws. Journal of Geophysical Research, Vol.88, pp.10359-10370, 1983.
- [12] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., Numerical Recipes in C (2nd Ed.): The Art of Scientic Computing, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 1992.
- [13] Ando M., Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan. Tectonophysics, Vol. 27(2), pp.119–140, 1975.
- [14] Kodaira, S., Hori, T., Ito, A., Miura, S., Fujie, G., Park, J.O., Baba, T., Sakaguchi, H., Kaneda, Y., A cause of rupture segmentation and synchronization in the Nankai Trough revealed by seismic imaging and numerical simulation. Journal of Geophysical Research, Vol.111, B09301-17. http://dx.doi.org/10.1029/2005JB004030, 2006.
- [15] 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 \$10-038, 2008.

- [16] Yabuki, T., and Matsu'ura. M., Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip, Geophysical Journal International, Vol.109.2, pp.363-375, 1992.
- [17] Komatitsch, D., and Tromp, J., Spectral-element simulations of global seismic wave propagation—I. Validation, Geophysical Journal International, Vol.149.2, pp.390-412, 2002.
- [18] Fujita, K., Ichimura, T., Koyama, K., Inoue, H., Hori, M., Maddegedara, L., Fast and scalable low-order implicit unstructured finite-element solver for earth's crust deformation problem, In Proceedings of the Platform for Advanced Scientific Computing Conference, pp.11. ACM, 2017.
- [19] Agata, R., Ichimura, T., Hirahara, K., Hyodo, M., Hori, T., Hashimoto, C., Hori, M., Numerical Verification Criteria for Coseismic and Postseismic Crustal Deformation Analysis with Large-scale High-fidelity Model, Procedia Computer Science, Vol.51, pp.1534-1544, 2015.
- [20] 地震調査委員会:千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第三版)、 www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou\_pdf/chishima3.pdf (2020年2月5日閲覧)

### 4.4 防災減災に資する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 計算機向けの高速化アルゴリズム開発、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。

### 4.4.1 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

Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH; Lucy, 1977; Gingold & Monaghan, 1977)法とは、粒子的流体数値計 算手法である。SPH 法には、メッシュ法に比べて大きな変形を伴う流体などを計算するのが得意という 利点があり、現在では防災や産業などの分野において広く使われている。一方で、SPH 法にはメッシュ法 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ため、SPH 法を用いて多くの粒子を用いた数値 計算を行う場合は、計算機の性能を十分に引き出す工夫を適用する事が求められる。

近年の計算機は、通常の CPU の他に加速器と呼ばれる外部演算装置を用いる事が一般的になっている。 この加速器は、CPU に比べて多数の演算コアを備えた「メニーコア・アーキテクチャ」である事が多い。 また、一般的にはホスト CPU はこの加速器に対し計算に必要なデータを送信し、加速器に計算を行わせ、 その結果を加速器から回収する、という形で加速器を用いる事が多い。SPH 法の場合は、流体にかかる 圧力勾配などを加速器に行わせる事が多く、従ってこの圧力勾配の計算をどのようにして効率的に加速 器に行わせるかが近年の計算機の性能を十分に引き出す事につながると言える。

ところで、近年の計算機の進歩を牽引しているものは人工知能である。例えば、2020 年 1 月現在、 NVIDIA 社の最新の GPU である Tesla V100 や、Google の Tensor Processing Unit などはどれも「人工知能 向けプロセッサ」を標榜しており、他にも今後 Intel や AMD、あるいは国内のベンチャー企業である Preferred Network 社なども「人工知能向けプロセッサ」を開発していく事を謳っている。この「人工知能 向けプロセッサ」という言葉の定義はベンダーに依存しており、明確に定まった物は存在していないが、 半精度浮動小数点演算をサポートした、メニーコア・アーキテクチャである事が多い。半精度浮動小数点 とは全体の bit 長が 16bit の浮動小数点数の事である。半精度浮動小数点はもともとストレージ容量の圧 縮をするか、あるいはグラフィック用に導入されたものであり、精度の低さから計算用途で使われる事は 想定されてきていなかった。しかしながら、人工知能分野ではストレージ容量やメモリ容量の削減という メリットの他、精度の高い計算を必要としないという事から近年広く用いられてきている。人工知能向け プロセッサの積極的な開発は今後も続くと予想され、従って半精度浮動小数点が得意なメニーコア・アー キテクチャに関する技術はこれからも進歩していくと考えられる。

一方で、人工知能に限らずとも、SPH 法にとっても半精度浮動小数点技術の発展は意義のある事であると予想される。近年のアーキテクチャでは、その性能がデータ転送速度によって律速される事が多い。 例えば、前述した V100 などは、演算速度が 7 TFlops/s なのに対しチップ内のデータ通信速度が 900 GB/s しかない。更に、ホスト CPU から V100 へのデータの転送は PCIe を通して行われるが、このデータ通信 速度に至っては 32 GB/s しかない。精度浮動小数点は数値計算で一般的に使われる倍精度浮動小数点に対 してそのバイトサイズが 1/4 であり、故にデータ転送にかかる時間も 1/4 になる。従って、半精度浮動 小数点数を用いた事によるデータ転送時間の削減は、計算時間の短縮に有用であると予想される。また、 もし SIMD 型アーキテクチャを用いていれば、演算時間もやはり 1/4 になるため、データ転送時間も含 めれば全体の計算時を 1/4 に削減する事が可能になる。

一方で、半精度浮動小数点は倍精度浮動小数点に対して精度が低いため、これを用いると数値計算結果 の精度は低下してしまう事が予想される。これは、精度が重要な数値計算には深刻な問題である。例え ば、半精度浮動小数点を用いた事により計算時間が理想通りに 1/4 になったとしよう。この時、数値計算 の精度が大きく悪化してしまい、倍精度の計算と同じ精度の計算結果を得るために逆に多数の粒子を用 いる必要が出てくるという事もありうる。こうなった場合、逆に計算時間は肥大してしまい、半精度では なく倍精度での計算の方が早く結果を得られるという可能性も出てくる。従って、倍精度浮動小数点に対 して半精度が有効かどうかは、「データ転送削減及び演算性能が向上する事による計算時間の削減」と、 「精度が悪化し、それを回復するための粒子数の増加に伴う計算時間の肥大」のバランスによって決ま る。しかしながら、これまでの所 SPH 法において半精度浮動小数点を用いた際に計算結果の精度がどの 様に変化するかはあまり詳しく調べられていない(e.g., Nakasato et al., 2007; Zhang et al., 2008)。

そこで、本研究では SPH 法において半精度浮動小数点を効果的に用いる事ができるかどうかを調べた。 まずは、数値計算の結果を得るまでに必要だと予測される計算時間と、数値計算の精度の関係に関して、 簡単な見積もりを出すことで、半精度浮動小数点が有効であるために必要な条件を導出しておく。次に、 半精度浮動小数点を用いた SPH コードを作成し、実際に半精度での浮動小数点演算をサポートしている アーキテクチャの上で動作させる。そして簡単なテスト計算を行い、数値計算の精度及び計算時間が倍精 度、単精度、半精度でどの様に違うかを調べる。これらの結果から、半精度浮動小数点が SPH 法の計算時 間を削減するために有効かどうか、結論づける事を目的とした。

4.4.1.1 SPH 法の概略

まず、SPH 法に関して簡単に紹介する。SPH 法は粒子的流体数値計算手法であり、流体はSPH 粒子 と呼ばれる仮想の粒子の集合として表現される。そして、連続の式及び運動方程式を粒子間の相互作用 の足し合わせとして表現する。図 4.11 はこの SPH 法の概略図である。



図 4.11. SPH 法のイメージ図。青い粒子は SPH 粒子であり、青い矢印は相互作用を意味する。 オレンジの円は相互作用半径であり、オレンジの円の中心の粒子はその中に存在する粒子とのみ 相互作用する。

以下は実際に SPH 法を用いて圧力勾配及び粘性項を計算する際の数式である。

$$\frac{\Delta \vec{v}_{i}}{\Delta t} = \sum_{j} m_{j} \left[ -\left(\frac{p_{i}}{\rho_{i}^{2}} + \frac{p_{j}}{\rho_{j}^{2}}\right) \nabla W(|\vec{r}_{i} - \vec{r}_{j}|; h) + \frac{4\nu(\vec{r}_{i} - \vec{r}_{j}) \cdot \nabla W(|\vec{r}_{i} - \vec{r}_{j}|; h)}{(\rho_{i} + \rho_{j})|\vec{r}_{i} - \vec{r}_{j}|^{2}} (\vec{v}_{i} - \vec{v}_{j}) \right] \cdots (4.2)$$

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、vは粘性率である。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り、典型的には粒子の配置間隔と同じ程 度の値になる。物理量の右下に付いている添字iはそれがi番目の粒子の物理量であることを意味してお り、 $\Sigma_j$ は自分以外の粒子との相互作用の和を取る事を意味している。ここで、Wはカーネル関数と呼ば れる関数であり、粒子間相互作用の重みに相当する物である。Wはカットオフ距離Hを持っており、粒 子間距離がHhよりも遠い粒子は相互作用しない。このWは、一般的に以下の様な表式を取る。

$$W(r,h) = \frac{C_d}{(Hh)^d} w(s), s = \frac{r}{Hh} \cdots (4.3)$$

dは数値計算の次元の数で、 $C_d$ は規格化定数である。w(s)は窓関数と呼ばれる関数である。Hの具体的な値はこの窓関数の具体的な形に依存するが、一般的に2 < H < 3程度の値にする事が多い。関数形の具体的な候補としてはいくつか存在するが、今回はその中でも最も広く用いられている Cubic Spline 関数と呼ばれる物を用いる(Dehnen & Aly, 2012)。

式(4.2)を時間発展させるにあたって、タイムステップΔtが必要になる。これは、流体の音速cと、粘 性率vを用いて以下の様に与えられる。

$$\Delta t = C \min\left(\frac{h}{c}, \frac{h^2}{2\nu}\right)$$

Cは0 < C < 1の定数であり、今回はC = 0.3を用いた。ここで、hは粒子間隔程度の値を取るので、粒子数が増えるほど値が小さくなる事に注意する。従って、粒子数を増やすと $\Delta t$ もまた小さくなり、計算を終了させるために必要な計算ステップ数は増大する。以下では、 $\Delta t = h^2/2v$ のケースを考えていく事にする。

4.4.1.2 本研究で用いた計算環境及びアルゴリズム

以上の式を、半精度浮動小数点の演算をサポートしているアーキテクチャの上で計算させる。今回 は、そのアーキテクチャとして、現在広く用いられている NVIDIA Tesla V100 を用いた。実際に、2019 年11月時点での大型計算機の演算性能をランキング化した TOP500 (https://www.top500.org/lists/2019/11/) では、V100を導入した計算機が1位と2位を獲得している。ここで、V100上で実装されている半精度 浮動小数点は IEEE 754 に準拠するもので、指数部 5bit、仮数部が 10bit の物である事に注意する。人工 知能で用いられている半精度浮動小数点には、bfloat16 と呼ばれる指数部が 8bit で仮数部が 7bit のもの が存在するが、本報告書ではそちらは扱わない。また、ホスト CPU としては Intel の Xeon Gold 6148 を 用いた。

SPH 粒子はHh以内の粒子としか相互作用しないため、式(4.2)のΣ<sub>i</sub>は実際には全粒子の相互作用の和 を取る必要は無く、i粒子から見て近傍の粒子との間の相互作用の和だけを考えればよい。そこで、SPH 法を実際に実装するにあたっては、式(4.2)の計算を行う前に各粒子に対する近傍粒子のリストを作成 しておく事が一般的である。本研究では、この近傍粒子リストの作成を素早く行うため、Framework for Developing Particle Simulator (FDPS; Iwasawa et al., 2015) と呼ばれる粒子法の自動並列化フレームワークを 用いた。FDPS は C++で書かれたライブラリであり、既に GPU といった加速器の利用をサポートしてい る。具体的には、FDPS はまずホスト CPU 上でいくつかのi粒子の群に対応する近傍粒子のリストを生成 する。次に、その複数のi粒子群及びそれらの近傍粒子のデータをまとめて GPU に送り、式(4.2)に従っ て圧力勾配および粘性項を計算した後、その結果をホストに転送する。この力の値を用いて、粒子の位 置や速度などをホスト CPU 上で時間発展させる。この手法は Multiwalk 法(Hamada et al., 2009)と呼ば れ、元々は重力計算の分野で主に開発されたが、SPH 法に関してもその有用性が確かめられてきている 手法である(Hosono and Furuichi, 2019)。図 4.12 は本研究で用いたコードにおいて、力の計算一回に必 要な操作を描いた概略図である。青いボックスはホスト CPU 上で行われる操作であり、緑のボックス は GPU 上で行われる操作である。また、本報告書で用いた実装では、ホスト CPU では全ての変数を倍 精度浮動小数点でもって定義する。式(4.2)の計算をするのに必要なデータをホストから GPU に送る直 前、倍精度浮動小数点の値を単精度あるいは半精度浮動小数点に切り詰める。その後、式(4.2)の計算 結果をホストに書き戻し、その値を倍精度浮動小数点に戻す。

ただし、実際に式(4.2)を半精度浮動小数点で計算するにあたって、粒子データに対して「変換」を 作用させる。まず、式(4.2)の右辺を計算するには2つの粒子の間の相対距離 $|\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ が必要になる。こ れは近い数の引き算を含み、半精度で行うと無視できない桁落ち誤差を生じる可能性がある。そこで、 ホスト側から GPU にデータを転送する前に、各*j*粒子の座標を全て*i*粒子の座標からの差分にする。これ を倍精度の状態で行い、その差分の結果を半精度に切り詰める事で、桁落ち誤差の影響を軽減する。

119

また、半精度浮動小数点を用いて表現する事ができる浮動小数点の幅は単精度及び倍精度のそれに対 して非常に小さい。故に、単精度または倍精度浮動小数点であれば表現できる微少な勾配を表現する事 ができず、勾配が損失する事がある。そこで、粒子データを倍精度から半精度に切り詰める前に、物理 量を全て計算する系の典型的な値でもって規格化し、概ね1前後の値にしてから半精度に切り詰める (Narang et al., 2018)。これら2つの操作に対応するのが図4.12の(a)である。

また、式(4.2)を GPU 上で半精度を用いて計算する前に、ホスト CPU 上で計算コストの上昇を引き 起こさず倍精度のままで計算可能な部分がある場合は、ホスト側で倍精度で計算する事を考える。例え ば、式(4.2)の圧力勾配に式(4.3)を代入すると、

$$\frac{\Delta \vec{v}_i}{\Delta t} = -\frac{C_d}{(Hh)^d} \sum_j m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2}\right) \nabla w(s) \cdots (4.4)$$

となる。  $C_d/(Hh)^d$ は定数なので、ホスト CPU 側で倍精度で計算し、 $\Sigma_j$ の後ろに存在する項の計算のみ を GPU 上で半精度で実行する。同様の事を粘性項にも適用する。また、式(4.4)に存在する  $p/\rho^2$ に関し ても、 $p \ge \rho$ をそのまま加速器に送るのではなく、ホスト CPU 上で $p/\rho^2$ をを予め倍精度の状態で計算し ておき、その結果を規格化し半精度に切り詰めて GPU に送信する。

4.4.1.3 計算時間と精度の見積もり

数値計算の精度と計算時間について、簡単な見積もりをだして、半精度浮動小数点が有効であるという事の定義に関して導出しておこう。まず、図 4.12 に描いた処理を完了するのにかかる 1 粒子あたりの計算時間を  $\Delta T_{(p)}$ と書こう。ここで、右下の (p)はこの量が浮動小数点精度に依存する量である事を意味する。従って、粒子数Nを用いた場合、1 ステップにかかる計算時間  $T_{step}$ は、

$$T_{\rm step} = N\Delta T_{\rm (p)}$$

となる。また、SPH 法では、計算誤差E とNの間に、次のような関係がある事が解析的に求まっている (Monaghan, 2005; Price, 2012; Dehnen and Aly, 2012)。

$$E \propto N^{-\frac{\alpha}{d}} \cdots (4.5)$$

ここで、αはカーネル関数によって定まる正の定数である。ただし、この関係式はあくまでも理想的 な状況での物であり、実際に数値計算した際にこの関係式が成り立っているかは調べる必要がある事に 注意する(Zhu et al., 2015)。

この2つを組み合わせると、

$$T_{\rm step} \propto E_{\rm (p)}^{-d/lpha} \Delta T_{\rm (p)}$$

となる。ここで計算誤差Eもまた浮動小数点精度に依存すると予想されるため、(p)をつけた。従って、数値計算を開始してから結果が得られるまでにかかるステップ数を  $N_{step}$ とすると、かかる計算時間Tは、

$$T = N_{\rm step} T_{\rm step} \propto N_{\rm step} E_{\rm (p)}^{-d/\alpha} \Delta T_{\rm (p)}$$

となる。さて、ここで $N_{\text{step}} \propto 1/\Delta t$ である。 $h \propto 1/N^{1/d}$ である事に注意すれば、

$$\Delta t \propto \frac{1}{2\nu N^{2/d}}$$

なので、

$$T \propto 2\nu N^{\frac{2}{d}} E_{(p)}^{-d/\alpha} \Delta T_{(p)} \propto E_{(p)}^{-(d+2)/\alpha} \Delta T_{(p)}$$

となる。この計算時間Tが精度を落とした際に小さくなればよいので、「SPH 法において半精度浮動小数 点精度を用いる事は効果的である」ための条件は、

$$E_{(16)}^{-(d+2)/\alpha} \Delta T_{(16)} < E_{(32)}^{-(d+2)/\alpha} \Delta T_{(32)} < E_{(64)}^{-(d+2)/\alpha} \Delta T_{(64)} \cdots (4.6)$$

という関係式が成り立っている事である。

4.4.1.4 テスト計算のセットアップ

本研究では、テスト計算として解析解がわかっている問題を解き、それと SPH 計算から得られた数値 解との間の誤差を定量化する事で浮動小数点精度と誤差の間の関係性を調べる。本報告書では、実際に 解く問題として、粘性流体のテスト計算として広く用いられている 2 次元 Couette flow と呼ばれる物を 用いた。この問題では、初期に 2 枚の距離 L だけ離れた並行平板の間に密度 *p*<sub>0</sub>、粘性*v*の流体が静止し て存在している物とする(図 4.13)。この並行平板のうち、片方の平板だけをある速度 *V*<sub>0</sub>で動かす。静止 している流体はこの壁から摩擦力を受け、運動し始める。この時、座標系として、並行平板の運動に並 行な方向に*x*軸を、垂直な方向に*y*軸を取ると、ある時刻*t*及び場所*y*での流体の*x*方向の速度の解析解 は、以下のように与えられる。

$$v_x(t, y) = \frac{V_0}{L}y + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2V_0}{n\pi} (-1)^n \sin\left(\frac{n\pi}{L}y\right) \exp\left(-\nu \frac{n^2 \pi^2}{L^2}t\right)$$

この時、解析解と数値的に得られた値の誤差として、L2誤差と呼ばれる次の様な量が定義される。

$$L_{2} = \sqrt{\frac{\sum_{i} (v_{x,i} - v_{x}(t, y_{i}))^{2}}{\sum_{i} (v_{x}(t, y_{i}))^{2}}}$$

以降は、このL2誤差を前節における誤差 Eとして採用していく事にする。

また、この問題を SPH 法で解くにあたって、初期条件として粒子を等間隔格子状に置いた。また、x方向には周期境界を適用する。本報告書で用いた具体的なパラメータの値は、L = 0.02 m、 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、 $V_0 = 6.25 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、 $v = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ を用いた。

4.4.1.5 結果

まず、計算結果から得られたL2誤差に関して調べていく。図4.14は実際に得られたL2誤差の時間発展 を表示したものである。横軸の時間はL/V0で規格化してある。パネルの違いは粒子数の違いであり、上の パネルから順番に、16<sup>2</sup>,32<sup>2</sup>,64<sup>2</sup>,128<sup>2</sup>粒子を用いたものである。個々の線は、赤が半精度の結果、青が単 精度の結果で緑が倍精度の結果である。この図から、いずれの場合も計算直後は誤差が「小さい」状態に あるが、計算が進むとある時点で誤差が急激に成長し、その後誤差の時間発展が収まる事が見て取れる。

この誤差の原因に関して調べるため、粒子分布を見る。図 4.15 は128<sup>2</sup>粒子を用いたかつ倍精度の場合の粒子の分布である。左のパネルは *t* = 30、右のパネルは *t* = 300での SPH 粒子の分布である。これから、初期の誤差が「小さい」状態では、粒子は比較的奇麗に分布しているが、その後の誤差成長後の状態では、粒子の分布にノイズが入っている事がわかる。従って、この誤差の成長は粒子分布にノイズが乗ったためと考えられる。

また、図 4.14 から、誤差が急激に成長するまでの計算時間は浮動小数点精度が低いほど早くなるが、 最終的な誤差の大きさそのものは浮動小数点精度の影響を受けず、粒子数にのみ依存するという事がわ かる。従って精度の上では、もし十分に長い時間の計算を行うのであれば、倍精度浮動小数点ではなく半 精度浮動小数点を用いても問題ないと言える。

また、図 4.16 は、図 4.14 と同じであるが、粒子の座標データの変換を行わずに GPU 上で計算を行っ たものである。この場合、単精度及び倍精度浮動小数点の場合は座標データの変換を行った場合と誤差の 様子は変わらないが、半精度浮動小数点を用いた場合は誤差が成長していく事が見て取れる。これから、 半精度浮動小数点を用いて SPH 法の計算を行う場合は、近い座標の引き算から来る桁落ち誤差を回避す る事が重要である事がわかる。

式(4.5)が成立しているか調べるため、計算終了時点での誤差と粒子数の関係について調べる。図4.17 は、粒子数と誤差の関係をプロットした物であり、これから粒子数と誤差の間には式(4.5)が成り立って いる事がわかる。

以上の結果から、式(4.6)は結局

$$\Delta T_{(16)} < \Delta T_{(32)} < \Delta T_{(64)}$$

となり、半精度浮動小数点の有効性を示すには一粒子にかかる力を計算するのに必要な時間のみを比較 すればよいという事に帰着する。 次に、一粒子にかかる力を計算するのに必要な計算時間に関して見る事にしよう。以下では、それを3 つに分割する。まず、粒子データを変換する時間であり、これは倍精度から単精度または半精度に変換す る時間や前処理などの時間を含む。これは図4.12の(a)に相当する。次に、データをホストから GPU に 転送するのにかかる時間であり、図4.12の(b)に相当する。最後に、力の計算にかかる時間であり、図 4.12の(c)に相当する。これらは、理想的にはデータの変換以外の時間は浮動小数点精度を落とすに従っ て半分になっていく。

図 4.18 はこれらの時間を描いたものであり、横軸は粒子数である。これから、データの転送にかかる 時間と力の計算時間は倍精度、単精度、半精度と精度を落とすに従って概ね半分程度になっており、理想 的に動作していると言える。一方で、データの変換時間に着目すると、倍精度と単精度を用いた時の値に はほぼ差が無いにも関わらず、半精度の場合のみ時間がかかる事がわかる。これは、現在この倍精度から 半精度への変換をホスト CPU (Intel Xeon)で行っているためであると考えられる。例えば A64FX の様な、 半精度への変換が遅くならない事が期待されるプロセッサを用いれば、この問題は解決するだろう。もし そうなれば、式(4.6)が成立するため、半精度浮動小数点は SPH 法の計算時間の削減に有効であると言え る。

4.4.1.6 まとめ

本研究では、近年の人工知能向けプロセッサにおいて積極的に実装されている、半精度浮動小数点を用 いて SPH 計算を行い、その時の数値計算誤差と計算時間に関して調べた。結果、誤差に関してはその成 長の様子こそ浮動小数点精度に依存して変わるものの、絶対値そのものは変わらなかった。計算速度に関 しては半精度をサポートしていない Intel Xeon 上では倍精度から半精度への変換というオーバーヘッド が発生したが、それ以外の部分、すなわちデータの転送や計算速度に関しては理想的な速度向上が得られ た。従って今後精度の変換に伴うオーバーヘッドが軽減されたプロセッサが開発されれば、半精度浮動小 数点は SPH 法の計算コストを削減するのに有効であると言える。今後人工知能向けプロセッサにて、半 精度に関する技術が進歩すれば、本結果はより重要になっていくだろう。



図 4.12. 本研究において実装した SPH 法の概略図。青いボックスは CPU が実行を担当するところであ り、緑のボックスは GPU が担当する部分である。近傍粒子探査は FDPS が自動的に行ってくれるため、 本研究において実装したのは灰色の背景のパートである。赤い矢印は CPU と GPU のコミュニケーショ ンである。



図 4.13. Couette flow の模式図。距離Lだけ離れた 2 つの平板の間に、密度 $\rho_0$ の流体を満たし、上端の平板を速度 $V_0$ で動かす。



図 4.14. Couette flow における、誤差の時間発展の仕方。各パネルの違いは粒子数の違いであり、 上から下に16<sup>2</sup>,32<sup>2</sup>,64<sup>2</sup>,128<sup>2</sup>粒子のものである。赤の線は半精度、青の線は単精度、緑の線は倍精 度での計算結果。



図 4.15. Couette flow の SPH 粒子の分布。個々の丸が SPH 粒子を表している。左のパネルはt = 30、右のパネルはt = 300のものである。



図 4.16. 図 4.12 の最後のパネルと同じであるが、粒子座標の値をそのまま 16bit の値にして GPU に送信した物。



図 4.17. 粒子数と誤差の関係。



図 4.18. 横軸は粒子数であり、縦軸は計算時間であり、両方とも対数軸になっている。赤い丸は半精度 での結果、青い四角は単精度での結果、緑の三角は倍精度での結果である。各パネルは、左上がデータの 変換時間、右上がホストから GPU へのデータ転送時間、そして左下が力の計算時間である。

## 4.5 個別要素法 (DEM) についての検証と妥当性確認 (V&V)

個別要素法(DEM)の V&V を行うために、日本地盤工学会が企画した DEM のベンチマークテスト (http://geotech.civil.yamaguchi-u.ac.jp/tc105/) に参加した。ベンチマークテストは、図 4.19 に示すような 粒子を用いて、その安息角を実験と比較するものである。粒子は正四面体の4項点に球形粒子を配置して 結合したような構造になっており、実験では3Dプリンタで作成している。



図 4.19. ベンチマークテストに用いた粒子。

安息角を作る実験装置として図 4.20 と図 4.21 に示す 2 種類(Device I、Device II)を用意した。Device Iでは 2150 個の粒子を重力落下により容器に詰め、一方の側壁を上げて粒子を流し出すことによって安息角を作成する。なお側壁を上げる速度は 43mm/sec である。一方、Device IIでは、2468 個の粒子を重力落下により円筒容器に充填し、円筒容器の壁を下げて粒子を落下させる方法によって安息角を形成する。この時、壁を下げる速度は 40mm/min である。ここで、粒子の物性は力学試験により表 4.3 のように与えられている。DEM では表 4.3 に示す物性を用いて、DeviceIと DeviceIIのそれぞれについて実験と同条件で 1MPI プロセス 24OpenMP スレッドを用いて安息角のシミュレーションを行った。

Experimental Device I (Plane strain type)

A board installed between the upper and lower boxes



(a) Overview of Device I



(b) Device I test procedure

図 4.20. 安息角を作成する実験装置(Device I)。



(a) Overall of Device II



(b) Device II test procedure 図 4.21. 安息角を作成する実験装置(Device II)。

表 4.3. 粒子と壁の物性。

Young's modulus of sphere element (MPa):	1640
Poisson ratio of sphere element (-):	0.37
Friction coefficient of sphere element:	0.713
Normal and tangential restitution coefficients of sphere element:	0.809
Poisson ratio of wall element (-):	0.37
Friction coefficient of wall element:	0.52
Normal and tangential restitution coefficients of wall element:	0.79
Principal moment of inertia of tetrahedral particle (10 <sup>-9</sup> kg/m <sup>2</sup> ):	2.96, 3.04, 3.04
Mass of tetrahedral particle (kg):	0.00038

まず、Device Iでのシミュレーション結果を示す。安息角のシミュレーションは3回行い、安息角が完成するまでにかかった実時間、計算ステップ数、計算時間の平均値を表4.4に示した。この時の安息角ができるまでのスナップショットを図4.22に示した。

Results	Sign	Value	Unit
Mean elapsed time at repose from starting	$t_{ m r}$	3.4333333	s
to elevate of the front vertical face			
Mean number of steps from starting to	N	$3.43\! imes\!10^5$	-
elevate of the front vertical face			
Mean CPU time (total time expended on	Т	0.11634	h
calculation of computer for one case)			

表 4.4. Device Iにおける計算時間



図 4.22 Device I における安息角形成シミュレーションのスナップショット。

つぎに Device IIでのシミュレーション結果を示す。Device IIについても安息角のシミュレーションは3 回行い、安息角が完成するまでにかかった実時間、計算ステップ数、計算時間の平均値を表 4.5 に示した。さらに、安息角ができるまでのスナップショットを図 4.23 に示した。

Results	Sign	Value	Unit
Mean elapsed time at repose from starting to	$t_{ m r}$	107.13	8
descent the movable cylindrical side wall			
Mean number of steps from starting to	N	$1.07\! imes\!10^7$	-
descent the movable cylindrical side wall			
Mean CPU time (total time expended on	Т	2.6149	hours
calculation of computer for one case)			

表 4.5. Device IIにおける計算時間。



(d) *t*=110s



いずれの Device においても安定に安息角が形成されることが分かった。実際の安息角の角度は、日本 地盤工学会によってシミュレーションによって得られた粒子座標データを解析して求め、実験値との比 較が行われる。そして、検証結果が2020年6月にわかる予定となっている。

## 4.5.1 DEM と SPH の連成による液状化シミュレーション

海域で巨大地震が発生した際に地震速報を出したり電車などの交通インフラを緊急停止させるために、 東南海域の海底には地震計が多く設置されている。しかし、地震により海底地盤が液状化した場合には、 海底地震計が地震波を正確に捕らえられない可能性が出てきている。そこで、地震発生時の海底地震計と

海底地盤の相互作用をシミュレーションにより解析し、液状化に強い海底地震計の設置方法を開発する ことが試みられている。

本シミュレーションでは SPH と DEM を連成することによって、地盤の液状化を解析可能にした。シ ミュレーションは予め行った実験と同様の図 4.16 に示す容器を用いて行った。外容器の中には海底地震 計を模した内容器が設置されており、その周りは目地砂 (珪砂 5 号)を高さ 45 c mの層厚で詰めている。 そこに外容器内を満たすように水が充填されている。実際の砂の粒子径は 0.3~0.8mm程度であるが、シ ミュレーションでは計算負荷を考慮して、1.8~2.0mmとした。シミュレーションに使用した MPI プロセ ス数は 256 で、粒子数は SPH と DEM 合わせて約 4000 万粒子、計算実時間は 5.0 s であり、それに要し た計算時間は約 4 日程度である。振動条件は図 4.24(a)に示すように X 方向に振動加速度が 0.5G のサイ ン波条件で加振した。



(a) 外容器



(b)外容器の中

H: 30 cm 30 cm

(c)内容器

図 4.24. 実験とシミュレーションで用いる容器。

図 4.25 にシミュレーションによって得られたスナップショットを示す。緑色の粒子が砂を表しており、 中央の赤色の箱が内容器である。なお、ここでは SPH 粒子は可視化していない。加振によって砂地盤が 液状化し、内容器が浮力によって浮き上がる様子が捕らえられている。今後、実験結果との比較検証を行 い、振動加速度を変えながら液状化による地震計の応答性能について詳しく解析する予定である。





## 4.6 粒子法動的負荷分散手法の改良

前年度に、スライスグリッド型のフレキシブルな直行領域分割の欠点であるアスペクト比の問題解決 のために、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4.26(a))を改良し、列毎に異な る領域分割数を許すように変更する(図4.26(b))技術を開発した。本年度はこのテクニックが実際の問 題においてどれほどインパクトを持つのかをスランプフロー試験において確かめた。スランプフロー試 験とは、コンクリートの流動性を評価するために用いられる試験の一種であり、図4.27のようにコーン 状の枠に入れられた粒子群に対して、コーンを抜き取りその時間発展を観察するものである。粒子法が得 意とするフレキシブルな形状変形問題であるが、直行格子をベースとした負荷分散方法が不得意とする (楕)円形の粒子分布を取り扱わなくてはいけない。



**図 4.26.** (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。



図 4.27. 数値スランプフロー実験のシミュレーション結果、コーン内に詰められた粒子群がコーンを 取り除いた後に広がっていく様子。

この試験の初期配置において従来と新しい領域分割の条件において、パフォーマンス測定実験を実施 した。図4.28は同じ64MPIプロセスを用いた場合に動的負荷分散が達成された時のX-Z平面のMPI領 域分割の結果である。これまでの分割法(図4.28(a))では8列がそれぞれ8行に分割されるが、端に 近づくに従い円弧の影響でアスペクト比が大きくなり最大3.9になる。一方で新しい方法(図4.28(b)) では9列で列毎に(4,7,8,8,9,9,8,7,4)で分割されている。この場合アスペクト比は2.1まで 削減することが出来ている。このことにより、13M(12,976,258)粒子を計算した場合に、4.1%のパフォ ーマンス向上が得られることが検証により分かった。



図 4.28. スランプテストの初期粒子配置(図\*右)に対する MPI 領域分割。

図 4.29 には、本テストにおける強弱スケーリングを示した。計算に用いたマシンは地球シミュレータ に搭載されている SX-ACE (ES:4 cores) と Oak forest 等で使用される Intel Xeon Phi 7210(Phi: 64 cores)で ある。この図において異なる粒子数の問題が同じ直線にのることは、弱スケーリング、異なるコア数にお いて直線に乗ることは強スケーリングを示している。この図から開発したコードが、スランプ試験のよう な実用的な問題において、よい並列化・スケーリング性能をさまざまなメニーコアを含むアーキテクチャ において示せることが分かった。

ここで示した技術は円形のみならず任意の形状において適応が可能であり、複雑な地形における津波 問題を扱う際にも有効である。



図 4.29. 数値スランプ試験における強弱スケーリング。

参考文献

- [1] Dehen, W., Aly, H., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.425, pp.1068, 2012.
- [2] Lucy, L.B., The Astronomical Journal, Vol.82, pp.1013, 1977.
- [3] Gingold, R.A., Monaghan, J.J., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.181, pp.375–389, 1977.
- [4] Hamada, T., et al., Proceedings of the Conference on High Performance Computing Networking, Storage and Analysis, Vol.62, pp.12, 2009.
- [5] Hosono, N., Furuichi, M., ICCS 2019: Computational Science ICCS 2019, Vol.11540, pp.476, 2019.
- [6] Iwasawa, M., et al., WOLFHPC '15: Proceedings of the 5th International Workshop on Domain-Specific Languages and High-Level Frameworks for High Performance Computing, Vol.1, pp.1, 2015.
- [7] Narang, S., et al., 6th International Conference on Learning Representations, 2018.
- [8] Monaghan, J. J., Reports on Progress in Physics, Vol.68, pp.1703, 2005.
- [9] Nakasato, N., Hamada, T., Fukushige T., European Astronomical Society Publications Series, Vol.24, pp.291, 2007.
- [10] Price, D. J., Journal of Computational Physics, Vol.231, pp.759, 2012.
- [11] Zhang, Y., Solenthaler, B., Pajarola, R, SPBG'08: Proceedings of the Fifth Eurographics / IEEE VGTC conference on Point-Based Graphics, pp.137, 2008.
- [12] Zhu, Q., Hernquist, L., Li., Y., The Astrophysical Journal, Vol.800, pp.13, 2015.

# 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 サロゲートモデルによる確率論的津波被害リスク評価

5.1.0 背景

2011年東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード9.0を記録し我が国の観測史上最大の地震となった。 同時に、同地震により引き起こされた巨大津波は、30mを超える遡上高や数十 km 単位での河川の遡上を 見せるなど、三陸海岸を中心に広域的かつ壊滅的な被害をもたらした。この巨大地震、及び津波被害を受 け、自然災害の脅威と我が国の災害対策の不十分さ、さらに将来に向けた大規模災害の被害想定や災害対 策の見直しの必要性が改めて指摘されるようになった。

さらに近年では、南海トラフ巨大地震の発生とそれに伴う巨大津波の被害が危惧されている。将来発生 しうる災害の予測は防災対策を講じる上でも必須とされる重要な課題であるが、地震や津波に代表され る自然災害は多くの不確実性を有しており、被害予測を正確に行うことは困難を極める。そのため、自然 災害の被害予測においては不確実性を定量化(パラメータ化)し、各パラメータに変動を与えながら多量 の計算を行うことで確率論的な評価を得ることが有効な手段とされる。しかしながら、確率論的な議論を 行うためには数万単位での試行回数が必要とされ、一回当たりの計算コストが高い解析を繰り返して行 うのは、時間的制約などコスト面での問題から現実的ではない。

これは、例えば次世代の富岳計算機を使えば解決する問題ではなく、少数のサンプルの高詳細な計算から確率論的なリスク評価が可能な方法論の開発が必要である。そこで本研究では、少数の解析結果から得られたデータを主成分分析することでまずは次元圧縮し、さらに応答曲面法を組み合わせたサロゲート モデルを取り上げ、南海トラフ巨大地震を想定し、四国地方、及び淡路島沿岸部での最大波高予測を題材 としその有効性を検証した。

5.1.1 主成分分析サロゲートモデル

本研究は、高精度かつ高コストな解析をより低次元な空間で代理表現するサロゲートモデルを導入す ることで、この問題の解消に取り組む。津波解析は従来の2次元浅水長波方程式を差分法で解く津波解 析コード JAGRUS を使用したため、その詳細は割愛し、本節では、提案する次元圧縮、モデル化及びリス ク評価に至るまでの一連のスキームを提示する。図5.1には、その大まかな流れを示す。


図 5.1. 主成分分析サロゲートモデルのフローチャート。

5.1.1.1 データの取得とデータ行列の定義

まずは、対象となる実現象・実災害を特定し、目的変数が決定される必要がある。例えば、それは地震 発生時の最大津波高や洪水時の最大浸水高などの物理量である。次に、目的変数の応答を決定付ける、基 本変数が定義されなければならないが、前章にも述べた通り自然災害の被害予測が困難であることの主 な理由は、その本質とも言うべき不確かさにある。文字通りすべての不確実性を定量化することは、目的 変数の挙動を支配する基本変数を膨大に定義することに等しく、不可能である。そのため、ここでは研究 者の工学的判断、あるいは過去の事例から得られる考察、数ケースのシミュレーションから為される推察 などにより、対象事象に強い関連性を示し、説明力のある数個の変数が定められる。後述の回帰分析のた め、このとき選択される変数は一般に 2~3 個程度が望ましい。

次に、基本変数の不確実性を考慮する。これは自然現象の不確かさを定量化し、数値的なパラメータとして取得するプロセスである。具体的には、基本変数に対して±10%などのばらつきを与え、解析が保証するパラメータ、及び目的変数の変動範囲を設定することで完了する。

最後に、定義した変動範囲の内部で数ケースから数十ケースの高精度解析を行い、その結果を要素とす る行列を得る。これをデータ行列と呼ぶこととする。ここで得られる解析結果を基に、確率論的評価を含 めた以降の議論がすべて為されるため、解析における初期条件・境界条件の設定などは慎重に行われるべ きである。尚、後述するが、このときデータセットは特定の規則に則って定義されるのが望ましい(例えば、*i*行目には、特定のパラメータによって得られる解析結果が要素として並べられるなど)。行列内には目的変数の解析結果のみが入っていれば良く、それは任意の型を持つことができる。

# 5.1.1.2 モード分解と次元の圧縮

ここではデータ行列の分解、及び圧縮に係る手法を述べる。本研究では、行列の分解手法として特異値 分解(Singular value decomposition, SVD)を採用した。特異値分解とはある行列を3つの異なる行列の積 で表現する分解手法であり、特徴としては、行列分解にしばしば用いられる固有値分解 (Eigendecomposition/Spectral decomposition)が対称な正方行列にのみ定義されるのに対し、特異値分解は 任意の型の行列に対応していることが挙げられる。また、データ行列が為す部分空間の分散の度合いを数 値として見て取ることができるため、各空間が有する重要度を簡単に比較することも可能である。以上の ような特徴から、特異値分解は任意の型を持つ行列の分解、及び元の行列の部分空間が持つ分散の大きさ (重要度の高さ)に基づいた分解に適している。

数値として得られる波高データを要素とした行列に対して特異値分解を応用することで、データ行列 が張る各部分空間の基底、及びそれらの分散を得る、各空間の分散の大きさを比較し、分散が小さい集合 は全体に与える影響が小さいとして次元圧縮を行う。

多くの場合、前節で設定される目的変数は実数値として得られる。事実、津波の波高データは実数であ る。そのため、以降では、データ行列は実数の要素によって構成されるとして議論を進める。複素数空間 での議論は省略され、従ってユニタリ行列と直交行列、及びエルミート行列と転置行列は、実数空間中で それぞれ等価なものとして扱う。

 $A \delta m \times n$ 型、階数rの行列とし( $m, n \ge r$ )、その要素はすべて実数であるとする。このとき、Aは3つの異なる行列の積として、以下のように書き換えられる。これをAの特異値分解と呼ぶ。

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^T \tag{5.1}$$

ここで、**U**は左特異ベクトルと呼ばれ、r次元列空間を為す正規直交基底 $u_i$  (i = 1, 2, ..., r)からなる。 同様に、**V**は右特異ベクトルと言い、r次元行空間の正規直交基底 $v_i$  (i = 1, 2, ..., r)からなる。また、**S** は**A**の特異値 $\sigma_i$  (i = 1, 2, ..., r)を要素とする対角行列であり、**S**中で特異値は降順に並べられる ( $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge ... \ge \sigma_r$ )。特異値分解に関する詳しい説明は省略するが、詳細については付録を参照されたい。

特異値分解には、完全形(Complete form)と呼ばれる形と省略形(Compact/incomplete form)とされる 形式がある。完全形とは、Aが $m \times n$ 型であることに着目し、Aの行空間の基底 $v_i$ ・列空間の基底 $u_i$ に加え て、A及びA<sup>T</sup>の零空間を考慮した形で書かれる、以下のような分解である。

$$\boldsymbol{A}_{m \times n} = \boldsymbol{U}_{m \times m} \boldsymbol{\Sigma}_{m \times n} \boldsymbol{V}^{T}_{n \times n}$$
$$= [\boldsymbol{u}_{1} \ \boldsymbol{u}_{2} \ \cdots \ \boldsymbol{u}_{m}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{1} & \boldsymbol{o} \\ \boldsymbol{\sigma}_{2} & \boldsymbol{o} \\ & \ddots & \\ & \boldsymbol{\sigma}_{r} & \boldsymbol{o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{1}^{T} \\ \boldsymbol{v}_{2}^{T} \\ \vdots \\ \boldsymbol{v}_{n}^{T} \end{bmatrix}$$
(5.2)

ここで、 $u_i$ ,  $v_i$ はそれぞれU, Vの列成分を為すベクトル、 $\sigma_i$ はi番目に大きいAの特異値である。またこのとき、 $\Sigma$ は $m \times n$ のサイズを得るようにゼロパディングされる。尚、ここでの下付き文字はそれぞれの行列のサイズを表している。式(5.2)の右辺を計算するといくつかの項は $\Sigma$ 内のゼロとの積となり、左辺と

一致させる上では計算に影響しない。そこで省略形式では、*A*,及びΣの階数が共に*r*であることに着目し、 零空間にある基底との計算を無視することで各行列をより簡略に書き表す。

$$\boldsymbol{A}_{m \times n} = \boldsymbol{U}_{m \times r} \boldsymbol{\Sigma}_{r \times r} \boldsymbol{V}^{T}_{r \times n}$$
  
=  $[\boldsymbol{u}_{1} \, \boldsymbol{u}_{2} \, \cdots \, \boldsymbol{u}_{r}] \begin{bmatrix} \sigma_{1} & \\ \sigma_{2} & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{1}^{T} \\ \boldsymbol{v}_{2}^{T} \\ \vdots \\ \boldsymbol{v}_{r}^{T} \end{bmatrix}$  (5.3)

式(5.2)と式(5.3)とを比較すると、等号は両者で成立しているものの、式(5.3)ではその計算量が少量で ある。そのため、以下では特異値分解( $A = U\Sigma V^T$ )は式(5.3)の省略形により与えられることとする。 以上に示した特異値分解により、各要素の積の線形結合として書くことができる。

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{T}$$
$$= \sum_{i=1}^{r} \sigma_{i}\boldsymbol{u}_{i}\boldsymbol{v}_{i}^{T}$$
(5.4)

以降、i番目の各要素の積 ( $\sigma_i u_i v_i^T$ )を第i次モードと呼ぶこととする。式(5.4)から理解されるように、 Aは第i次モードのr個の重ね合わせとして表現することも可能である。ここで、Eckart-Young-Mirsky theorem<sup>3)4)</sup>により、行列Bが階数kを持つとき、行列A ( $m \times n$ 型、階数r)に対する最も良い近似は式(5.5) のように与えられることが知られている。 $\|\cdot\|$ は行列のノルム ( $l^2$ ノルム,フロベニウスノルム、あるいは 核型ノルムに対応している)を表す。

$$\|\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\| \ge \|\boldsymbol{A} - \boldsymbol{A}_{k}\|$$
$$\boldsymbol{A}_{k} = \sum_{i=1}^{k} \sigma_{i} \boldsymbol{u}_{i} \boldsymbol{v}_{i}^{T} \approx \boldsymbol{A}$$
(5.5)

このとき $k \leq r$ 。これより、元の行列Aに対する近似行列 $A_k$ が得られ、その階数をkまで減少させることができる。

以上の手順に従えば、前節での解析により得られたデータセットAを分解、及び圧縮し、低ランク近似 データ $A_k$ を得ることができる。さて、ここで問題となるのは近似行列のランク数(あるいは式(5.4)にお けるモード数)kをどのように決定するかである。特異値分解は信号処理やパターン認識などの幅広い分 野で応用されており、それらの研究領域では、しばしば式(5.6)に定義される累積寄与率(Cumulative contribution rate,  $c_k$ )が $A_k$ のランク数決定に係る指標とされる。

$$c_k \coloneqq \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i}{\sum_{i=1}^n \sigma_i} \tag{5.6}$$

累積寄与率は、特異値の、全総和に対するk個目までの累積値の比であり、すなわちデータ行列が持つ空間的な分散の度合いを数値として表す。本研究においては、A<sub>k</sub>をAに接近させることが重要な問題である

ため、累積寄与率に加えて式(5.7)に定義する平均精度(Mean accuracy,  $a_k$ )を考慮し、両者が高い値を示すときに $A_k$ がAに十分接近していることとする。



図 5.2. 2 行列間の距離の概念。

# 5.1.1.3 サロゲートモデルの生成手順

前節までで得られた近似行列A<sub>k</sub>を用い、回帰分析によりサロゲートモデルを得る手段について提案する。

データ行列は 5.1.1.2 節での説明に従って定義されているとする。例えば津波波高のデータセットが 得られているとすると、行列Aの列方向には特定の地点でのパラメータの変動に対応する解析結果が要素 として代入され、行方向には特定の解析ケースでの地点別の解析結果が並べられている形である。ここで は、以降のモンテカルロシミュレーションで乱数計算を可能にするため、連続な関数を得ることが主な目 的である。従って以上の条件を満たすAに対して回帰分析を行い、解析結果と各パラメータとの間に存在 する応答の関係を、少々の誤差を認めながらも精度よく近似・定式化することが重要な課題となる。

式(5.4)において、Aの列方向に特定の条件を満たす要素が並べられているとき、列方向の挙動を支配 しているのは、 $u_i$  (i = 1, 2, ..., r) であり、同様に行方向の要素の関連性は $v_i$  (i = 1, 2, ..., r) が司る。 上記の例に関して述べれば、行列Aの列方向にパラメータの変動に対応する解析結果並べられているため、 その挙動は $u_i$  (i = 1, 2, ..., r) により表現されている。そのため、圧縮後の行列 $A_k$ を対象にばらつきを 与えた基本変数を説明変数、各ベクトル $u_i$  (i = 1, 2, ..., r) を被説明変数として回帰分析を行う。これに より $u_i$ の応答曲面(高次では何らかの応答関数)を得ることができ、 $u_i$ の応答関数から $A_k$ を代理表現する サロゲートモデル(以下, $A_M$ で表す)が得られる。 $A_M$ は以下のように定式化することができる。

$$A_{M} = \begin{bmatrix} f_{1}(X) & f_{2}(X) & \cdots & f_{k}(X) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{1} & & \\ & \sigma_{2} & \\ & & \ddots & \\ & & \sigma_{k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{1}^{T} \\ & \boldsymbol{v}_{2}^{T} \\ \vdots \\ & \boldsymbol{v}_{k}^{T} \end{bmatrix}$$

$$= \sum_{i=1}^{k} \sigma_{i} f_{i}(X) \boldsymbol{v}_{i}^{T}$$

$$= \begin{bmatrix} A_{M,1} & A_{M,2} & \cdots & A_{M,n} \end{bmatrix}$$
(5.8)

ここで、 $f_i(X)$  (i = 1, 2, ..., r) はそれぞれのモードに対応する回帰式であり、Xは初めの大規模解析に当たって定義された単数、あるいは複数の基本変数である。回帰式 $f_i$ がベクトル $u_i$ の有する列方向へのばらつきの情報を集約しているため、 $A_M$ の次元は $1 \times n$ となっており、地点別の解析結果のみが表現されていることに注意されたい。これは、サロゲートモデルが特定のパラメータでの解析結果を予測するものであり、予測が必要なパラメータが選ばれてしまえば、各行に対応する解析結果は必要なくなるためである。このとき、回帰式 $f_i$ をどのような関数とするかは被説明関数 $u_i$ の挙動を十分によく観察した上で決定されるべきであるが、過学習を避けるため、計算結果に特に非線形的な動きが見られない限り高次項は不要であると考えられる。

式(5.8)に得られるサロゲートモデル $A_M$ は、Eckart-Young-Misky theorem から得られる近似行列 $A_k$ を被 説明関数とする形で行った回帰分析によるもので、初めに得られたデータ行列Aとの間にはより大きい誤 差が生じている。そのため、 $A \ge A_M$  との間の距離を計算し、構築されたサロゲートモデル $A_M$ が十分な精 度を保持していることが確認されなければならない。指標としては、式(5.8)での回帰分析に当たりサン プルとなった解析解を $A_M$ が概ね近似できていれば十分である。以下の図-1.3には各行列の間に存在する 距離の概念図を示す。最終的には、 $A \ge A_M$ の間の距離 $|A - A_M|$ を縮めることがモデルの精度を上昇させる 上での重要な課題となるが、そのためにはAから $A_k$ までの距離や、 $A_k \ge A_M$ との間の差を縮めることが有 効な手段となる。従って、モデル $A_M$ の予測値と実際のデータセットAとの間に大きな差が見られる場合に は、式(5.5)でのモード数を増加させる、あるいは式(5.8)での回帰式の構造を見直す等、十分な精度が支 持されるまでモデルを検討・更新する必要がある。



図 5.3. 各行列間の距離の概念。

5.1.2 適用例

5.1.2.1 解析モデル・解析条件

津波解析コード JAGURS では多階層でのネスティングにより、計算量域内の特定の領域について格子 解像度を上げた計算を可能にしている。今回は、解析対象地域である四国地方・淡路島沿岸部での解像度 を上昇させるようにネスティングを行った。本研究では、図 5.4 (a)に示すように 3 つの領域を設定して おり、解像度はそれぞれ 18arc-sec (450m)、6arc-sec (150m)、2arc-sec (50m)とした。解像度 18arc-sec、 6arc-sec の解析モデルの作成には、NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)が提供する陸 地・海底地形データセット ETOPOI Global Relief Model を使用し、また 2arc-sec のモデル作成には、国土 地理院の基盤地図情報 10m メッシュの数値標高モデルデータ (DEM データ)を使用した。この DEM デ ータは、航空測量により得られた地形の標高情報を一定の格子上に保存したものであり、建物や樹木等を 除外した地表面の標高を与えるものである。

本研究では、その発生が危惧されている南海トラフ巨大地震を対象とし、内閣府の検討シナリオ「断層 パラメータ\_ケース 03」を採用した解析を実施した。大きな被害が予想される沿岸部に 25 の観測点を設 置し、地震による津波波高の観測を行った。図 5.4 (b)に今回設けた観測点の位置を赤点で示す。四国沿 岸部においては室戸岬から鳴門海峡を通り瀬戸内海へ向かう方向に Location\_1~18 を、淡路島においては 鳴門海峡南部から北部に向けて Location\_19~23 を、さらに淡路島南東部及び東部に Location\_24, 25 を設 定した。波の回析やエネルギーの集中などの効果が予想される場所に関しては、同一地域近傍でも湾内と 湾外に観測点を設置するなどして、地形的な影響を詳細に調べられるようにした。本研究では、各観測点 を Location\_(番号)という形で定義したが、スペースの都合から適宜 L\_(番号)などと呼ぶこととする。





図 5.4. (a) 解析モデルのネスティング。

図 5.4. (b) 波高観測点。

ちなみに内閣府の検討シナリオは過去の経験や統計に基づいた予測であり、どれ程の信頼性があるかは 定かではない。そこで、自然現象に対する確率論的なリスク評価を可能にするため、不確かさのパラメー タ化、及びパラメータにばらつきを与えることで複数の津波解析ケースを設定した。

前述の通り、地震挙動は主に9つの断層パラメータに支配されると考えられる。しかし、中でも断層の 長さとその幅を推定するのは非常に難しい。そこで今回は、図 5.5 に示される 4 つのパラメータ(走向 方向、傾斜角、すべり角、すべり量)の中からばらつきを与えるパラメータを選定することとした。



図 5.5. 各種断層パラメータ。

走向方向とは断層面と水平面の交わる直線の方向であり、傾斜角は断層面の水平面からの傾きを示す。すべり量は文字通り断層の変位量を意味しており、すべり角は断層面の上盤の下盤に対する相対的なすべり方向を表す。

ここで、断層運動が解放するエネルギーの大きさを示す地震モーメントM<sub>0</sub>は、以下によって与えられる。

$$M_0 = \mu As \tag{5.9}$$

µは圧力と同次元を持つ断層面の剛性、Aは断層の面積、sは断層全体でのすべり量平均値を示す。式(5.9) から地震モーメントとすべり量は非常に強い相関を持つことが分かる。そのため、今回のリスク評価にお ける基本変数の1つとしてすべり量を選択した。他の断層パラメータと地震が放つエネルギーとの関連 性を考慮すると、まず、走向方向の変化が津波波高に与える影響は、物理的に非常に小さいと考えられ る。傾斜角とすべり角については、物理的考察の結果、すべり角の方が波高や地震のエネルギーとより強 い関連性を持つと考えられたため、2つ目の基本変数としてすべり角が選ばれた。

設定された基本変数にはそれぞれ複数パターンの変動量が与えられた。具体的には、各断層のすべり量 (slip) に対して 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 を乗じた 5 ケース、及びすべり角 (rake) に対して-10°, -5°, ±0°, +5°, +10°を加えた 5 ケース、合計 25 の解析ケースが設定された。解析ケースの詳細と各ケース 名は表 5.1 に示す通り。

Case		Rake Variation					
		-10°	-5°	$\pm 0^{\circ}$	$+5^{\circ}$	+10°	
on	60%	A1B1	A1B2	A1B3	A1B4	A1B5	
iati	80%	A2B1	A2B2	A2B3	A2B4	A2B5	
Vaı	100%	A3B1	A3B2	A3B3	A3B4	A3B5	
dil	120%	A4B1	A4B2	A4B3	A4B4	A4B5	
$\mathbf{x}$	140%	A5B1	A5B2	A5B3	A5B4	A5B5	

表 5.1. 解析ケース一覧。

ここで、表 5.1 に記される通り解析ケース「A3B3」(バラつきを考慮しない標準ケース)における各パ ラメータのばらつきはゼロであり、すなわち、「A3B3」においては「断層パラメータ ケース 03」に明示 されるパラメータを与えて計算を実行している。その他、本研究で設定した解析条件は表 5.2 に示す通 りである。

項目	内容				
支配方程式	非線形長波方程式				
計算手法	Staggered格子, Leap-Frog法に基づく差分法				
	第1領域:450m				
格子解像度	第2領域:150m				
	第3領域:50m				
解析対象地震	南海トラフ巨大地震				
解析対象地域	四国地方沿岸部,及び淡路島沿岸部				
断層モデル	断層パラメータ_ケース03				
初期水位	Okadaの式 (1985) に従う				
	海域:0.025				
粗度係数	陸域:0.025				
	*どちらもManning則に従う				
分散効果	なし				
コリオリカの効果	なし				
海水密度効果	なし				
培思冬州	沖側境界:ルードドメイン境界で吸収				
現外未什	越流境界:本間越流公式に従う				
時間ステップ幅	0.05秒				
計算再現時間	地震発生から3時間				

表 5.2. 解析条件一覧。

5.1.2.2 津波解析結果の要約

特に、解析ケース A3B3 における解析結果に注目して津波被害の考察を行う。例えば、Location\_3 と Location 4の情報に着目してみる。それぞれの点での波高時系列歴変化を図 5.6 (a)に示す。



図 5.6. (a) L\_3, L\_4 での時系列データ。 図 5.6. (b) L\_3 及び L\_4 観測点。



これら2点は直線距離にしておおよそ2kmしか離れていないのにも関わらず、それぞれのピーク波高、 及び波高の時刻歴変化は全く異なる特徴を有する。L\_3では約4.81mの最大波高を記録し、その到達時間 は地震発生後約37分である。図5.6(a)からも、短時間の内に4m級の波が繰り返して押し寄せている様 子が分かる。一方、L\_4でのピーク波は約7.04mであり、地震発生から75分程度で到達する。L\_4での 時系列データはL\_3のそれとは大きく異なり、巨大な波が低い周期でL\_4沿岸部を襲うことが予測され る。

また非常に特徴的な現象として、L\_4 では波の回析と湾形状の影響によるエネルギーの集中が見られる。特にL\_4 では、時刻 75 分周辺でピーク波高が観測されており、その 10 分程度前にはL\_3 で 4m に 及ぶ波が観測されている。これは、時刻 65 分周辺にL\_3 に到達した波が 10 分程度の時間をかけて湾内 に向けて回析、V 字形の湾に沿ってエネルギーを集中させ、L\_4 で 7m の津波を与えたためであると予想 される。床摩擦を無視した線形理論に基づく Green の法則によっても同様の議論を与えることができる。 尚、地震発生後 15 分から 23 分にかけて、90 分から 100 分にかけても同観測点で類似の現象が見られる。 以下、図 5.7 にはケース A3B3 での、時刻 67 分から 75 分までの津波の伝播の様子を示す。



図 5.7. 解析対象地域での津波時系列に関するスナップショット。

5.1.2.3 津波最大波高のサロゲートモデルの構築

今回は 25 の解析ケースと 25 の地点で津波の観測を行った。本研究では計算再現時間を 3 時間とした が、ここでは、その中で最も重要と考えられる最大波高を要素としてデータ行列Aを定義する。すなわち、 今回の目的変数は解析中のピーク波高である。前章で説明したように、本研究では 25 の解析ケースを設 定し、さらに 25 観測点での最大波高データ(すべて正の実数)を得ている。従って、5.1.1 節で為され た行列の要素がすべて実数であるという仮定は満たされている。

行列中のデータの並べ方は次の通りとする。行方向にはある解析ケースのデータを、列方向にはある観 測点でのデータを並べる。すなわち、以下のようになる。



図 5.8. データ行列の要素の並べ方。

ここで、A<sub>i,j</sub>はi番目の解析ケースの場合にj番目の地点で観測される最大波高を示す。

今回のデータ行列Aは25×25のサイズと25の階数を持つ。ここでは特異値分解とEckart-Young-Mirsky theorem に基づき、Aを十分に近似しながら表現するのに必要なモード数を定める。今回、Aの分解に当たって得られた特異値と各モードの関係を図5.9(a)に、各特異値の大きさを比較したものを図5.9(b)に示す。

Mode	Singular Values	Mode	Singular Values	Mode	Singular Values			1
1	110.938	11	0.236	21	0.029	I	.00 -	
2	5.931	12	0.151	22	0.025			
3	4.975	13	0.130	23	0.019		80 -	
4	1.083	14	0.109	24	0.016	alues		
5	1.044	15	0.081	25	0.003	lar V.	60 -	
6	0.627	16	0.078			ngui	10	
7	0.421	17	0.070			- CA	40	
8	0.371	18	0.047				20 -	
9	0.322	19	0.042					
10	0.288	20	0.037				0 -	and and
							5	

図 5.9.(a) 各モードと得られた特異値。



提案手法では、モード数の設定に当たり平均精度(Mean accuracy,  $a_k$ )と累積寄与率(Cumulative contribution rate,  $c_k$ )がその基準とされる。今回の津波データに対し、上記の指標は以下のように与えられる。

$$a_k \coloneqq 1 - \frac{1}{25 \times 25} \sum_{i=1}^{25} \sum_{j=1}^{25} \frac{\left|A_{k_{i,j}} - A_{i,j}\right|}{A_{i,j}}$$
(5.10)

$$c_k \coloneqq \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i}{\sum_{i=1}^{25} \sigma_i} \tag{5.11}$$

ここで $A_{k_{ij}}$ は、データ行列Aのi行j列成分 $A_{i,j}$ に対する近似値であり、 $\sigma_i$ はAから得られる特異値の内、i番目に大きい値を持つものである。図 5.10 (a)には、モード数の増加に伴い平均精度、寄与率がそれぞれ上昇していく様子が示される。



また、以下の式(5.12)で定義される誤差率(error ratio,  $e_k$ )を用いれば、図 5.10 (b)に示される誤差率の曲面を描くことができる。同図からもモード数と精度の関係が見て取れる。

$$e_{i} \coloneqq \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \frac{\left|A_{k_{i,j}} - A_{i,j}\right|}{A_{i,j}} \quad (i = 1, \cdots, m)$$
(5.12)

平均精度 $a_k$ が近似行列 $A_k$ と元のデータセットAとの間の距離を全体に渡って平均した値であるのに対し、誤差率 $e_k$ は特定のパラメータが与えられたときに $A_k$ とAの間に存在する誤差を各地点間に渡って平均することで求められる。この図からも、モード数が上昇すれば誤差が減少していく様子が確認できる。

今回は、平均精度 $a_k$ =0.987、累積寄与率 $c_k$ =0.959を得たことから、第3次モードまでの線形結合によりAを近似することとした。すなわち、

$$A_{k} \coloneqq \sum_{i=1}^{3} \sigma_{i} \boldsymbol{u}_{i} \boldsymbol{v}_{i}^{T}$$

$$\approx \sum_{i=1}^{25} \sigma_{i} \boldsymbol{u}_{i} \boldsymbol{v}_{i}^{T} = \boldsymbol{A}$$
(5.13)

このとき、Aの階数が25であるのに対しA<sub>k</sub>の階数は3である。空間的には、支配的なモードが持つデータの分散が元のデータの広がり方を十分に良く表現しているとし、25次元空間に存在するAを3次元空間中にあるA<sub>k</sub>で表すことを意味する。

実際に JAGURS を用いた計算を行っていないパラメータに対しても波高の予測を可能にする(サロゲートモデルを構築する)ため、式(4.4)で得られた近似式 $A_k$ から、列ベクトル $u_i$  (i = 1, 2, 3)を被説明変数とする形で誤差最小二乗法による重回帰分析を行った。これは、データ行列Aの列方向に基本変数(すべり量 slip、すべり角 rake)のばらつきに対応した目的変数(ピーク波高)の応答が並べられており、その変動を特徴付けているのが列ベクトル $u_i$ であることによる。

回帰分析には、式(5.14)に示す双一次の関数を基本形とした。下付き文字Mはモデル化された関数であることを示す。

$$u_{M,i} = a_i s + b_i r + c_i s r + d_i \tag{5.14}$$

ここで、 $u_{M,i}$ は第i次モードを為す成分 $u_i$ を近似する関数 (i = 1, 2, 3) であり、s, rはそれぞれすべり量、 すべり角を示す変数、 $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ は未定係数である。尚、目的変数が線形性を有することは厳密には 確認されていないが、高次項を含めれば次数の決定が非常に困難となることや、オーバーフィッティング による不安定な挙動を示す可能性がある。また、以降に議論されるが、双一次の基本形が非常に良い近似 を与えていることが確認されているため、今回、回帰式の基本形は式(5.14)に示される形で十分であると した。

今回用いる回帰式の基本形は、4 つの異なる項からなる。そこで切片を除く 3 項の組み合わせから 8 (=  $2^3$ ) 種類の関数が考えられるが、切片のみによりなされる関数は物理的な意味を与えないため、7 (=  $2^3$  – 1) 種類の応答関数の中から最適な関数を調べる必要がある。多数の説明変数を有する重回帰分析で最適な回帰式を得る際には、しばしばステップワイズ法などが用いられるが、本研究では高々7 種類の回帰式 を $u_{M,1}$ ,  $u_{M,2}$ ,  $u_{M,3}$ に関して調べればよいため総当たり法を用い、その中で AIC (Akaike's Information Criterion)を最小にする関数を最適な回帰式として選択した。表 5.3 に、7 種類の回帰式とそれぞれの AIC 及び自由度調整済み決定係数(表中では $adj.R^2$ と表記)を示す。各回帰式における最小の AIC を黄色で ハイライトしている。

150

同過学	$u_{M,1}$		$u_{M,2}$		$u_{M,3}$	
凹怖式	AIC	adj. R <sup>2</sup>	AIC	adj. R <sup>2</sup>	AIC	adj. R <sup>2</sup>
$u_{M,i} = a_i s + b_i r + c_i s r + d_i$	-233.3	0.998	-105.0	0.982	-88.41	0.963
$u_{M,i} = a_i s + b_i r \qquad + d_i$	-230.6	0.997	-69.64	0.922	-89.25	0.963
$u_{M,i} = a_i s \qquad + c_i s r + d_i$	-234.9	0.998	-106.1	0.982	-80.45	0.948
$u_{M,i} = b_i r + c_i s r + d_i$	-199.4	0.991	-67.02	0.913	-84.33	0.955
$u_{M,i} = a_i s \qquad \qquad + d_i$	-195.2	0.989	-7.739	0.039	-56.01	0.856
$u_{M,i} = b_i r + d_i$	-81.61	-0.035	-53.10	0.843	-9.257	0.065
$u_{M,i} = c_i sr + d_i$	-140.6	0.902	-5.818	-0.038	-78.13	0.941

表 5.3 重回帰分析の結果と回帰式の選定。

これより、各モードに対応する*u<sub>M,i</sub>*(*i* = 1,2,3)の関数が求められた。すべてのモードにおいて、回帰 式の当てはまりの良さを示す自由度調整済み決定係数は非常に高いことが分かる。そのためオーバーフ ィッティングの可能性が示唆されるが、式(5.14)の基本形に見られる通りその次数は高々2であることか ら、関数は安定した挙動の下で良い近似を与えていると考えることができる。各関数が持つ係数などの詳 細な情報は表 5.4 に示される。

回帰式	$a_i$ t値	$b_i$ t値	$c_i$ t值	$d_i$ t値
	p値	p値	p値	p值
	-0.2194	-	0.0652	-0.0410
$u_{M,1} = a_1 s \qquad + c_1 s r + d_1$	-32.010	-	9.744	-26.954
	0	-	0	0
	3.2674	-	-3.0734	-0.2100
$u_{M,2} = a_2 s \qquad + c_2 s r + d_2$	36.362	-	-35.011	-10.533
	0	-	0	0
	0.6448	1.0476	-	-1.7317
$u_{M,3} = a_3 s + b_3 r \qquad \qquad + d_3$	23.616	8.067	-	-13.028
	0	0	-	0

表 5.4. 各回帰式の詳細。

ここでは、特に各係数とそれらのt値, p値を示した。表 5.4 から、いずれの係数のt値も2以上の絶対値 を有することが確認できるが、今回の回帰分析の自由度が不十分であるため、t分布は標準正規分布に十 分に接近していない。そこで、今回はp値に着目することで自由度の低さを考慮しながら検定を行うこと とする。p値に関してはいずれの係数に対してもそのp値が 0.05 未満と求められていることから、各ケー スで「説明変数の被説明変数への真の効果がゼロである」という帰無仮説H<sub>0</sub>が有意水準 5%の下で棄却さ れている。これより、十分な信頼率の下ですべての説明変数が被説明関数に対して非ゼロの影響を与える と考えることができる。

以上により得られた*u<sub>M,i</sub>を*用いれば、(今回の解析ケースの範囲内の)任意の断層パラメータに対し、 式(5.15)に示す各観測点でのピーク波高を予測するサロゲートモデルを得ることができる。

$$A_{M} = \sum_{i=1}^{3} \sigma_{i} u_{M,i} \boldsymbol{v}_{i}^{T}$$

$$= \sigma_{1} u_{M,1} \boldsymbol{v}_{1}^{T} + \sigma_{2} u_{M,2} \boldsymbol{v}_{2}^{T} + \sigma_{3} u_{M,3} \boldsymbol{v}_{3}^{T}$$
(5.15)

このとき、 $u_{M,i}$ (i = 1, 2, 3)は式(5.14)を基本形とする回帰式であるが、各モードに対応する関数は表 5.3、 表 5.4 に示されるものである。

式(5.15)に定義したサロゲートモデル $A_M$ を用い、図 5.11 (a)に示すような、各地点での最大波高に関する応答曲面を得た。これは、各観測点でのピーク波高を表現する応答曲面を、すべり量、すべり角、最大波高の3軸空間で表現したものである。図 5.11 (a)中に描画されている曲面は式(5.15)に得られる応答曲面であり、プロットされている点は JAGURS の数値解析により得られた計算値を表している。比較してみても、特に顕著な外れ値は見当たらない。尚、本研究では、25 の観測点それぞれに対応する応答曲面を得ているが、ここではその中の5 つのみを示す。



図 5.11. (a) 最大波高に関する応答曲面。

図 5.11. (b) 対応する観測点。

ここでは、前節で定義したサロゲートモデルの精度を検証する。式(5.15)に定義されるサロゲートモデルA<sub>M</sub>は、近似行列A<sub>k</sub>に対する回帰分析から得られており、実際のデータ行列Aとの間にはより大きい誤差が存在していると考えられるためである。具体的には、いくつかの断層パラメータ(解析ケース)を用いて各観測点での波高をサロゲートモデル、JAGURSの両方で計算した差を比較し、以下の式(5.16)を用いることとした。

$$1 - \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \frac{\left|A_{m_{i,j}} - A_{i,j}\right|}{A_{i,j}}$$
(5.16)

今回、モデルA<sub>M</sub>の精度検証に当たり、回帰分析のサンプルとなった解析ケース中の5パターンに加え、 新たに8つの解析ケースを定めてモデルの精度を評価した。各ケースの断層パラメータと、それぞれ のケースで確認されたモデル精度を以下の表に示す。



表 5.5. 精度確認に用いた断層パラメータと得られた精度。

緑色で示される解析ケースは回帰分析のサンプルとしたものであり、黄色で示されるものは新たに解析 を行ったケースである。全体としておおよそ 2%程度の誤差が確認されたが、今回得られたサロゲートモ

デルA<sub>M</sub>は高精度津波シミュレーションコード JAGURS の計算を十分に良く表現していると考えられる。

5.1.2.4 サロゲートモデルによる津波最大波高の確率評価

以上に説明したサロゲートモデルと定量化した変数のばらつきに基づきモンテカルロシミュレーショ ンを行うことで、各観測点での最大津波波高に関する確率密度分布を得た。具体的には、すべり量、すべ り角のばらつきが、今回の解析ケースの中で正規分布に従うと仮定して乱数を生成し(表 5.6)、式(5.15) に代入計算することで最大波高を推定する計算を繰り返した。各基本変数の標準偏差においては、正規分 布が平均µの周りに片側3σの幅をとるとその中に確率変数を 99.7%以上有する特性から、基本変数変動域 の端点を定義する値と3σが一致するとして標準偏差が選ばれた。今回、サンプル数は 100,000 とした。 本研究では、25 の観測点それぞれに対応する確率密度分布を得ているが、ここではその中の5 つを図 5.12 (a)に示す。また、表 5.6 にはそれぞれの変数が従う確率分布を示している。

表 5.6. 各変量の平均・標準偏差・確率密度関数。

Variables	Mean, $\mu$	Standard Deviation, $\sigma$	Probability Density Distribution
slip, s	1.0	0.133	N (1.0, 0.0178)
rake, r	1.0	0.028	N (1.0, 0.0008)



図 5.12 より、いくつかの観測点では確率変数の分散の小ささのために非常に集中した確率密度分布が 得られた一方、分散が大きいためなだらかに広がった分布を得た地域もある。例えば、Location\_1 につい ては、JAGURS が計算した最大波高はケース A5B1 での 10.459m であったが、今回行ったモンテカルロ シミュレーションは最大で 11.482m の津波が観測されることを示唆しており、10%程度の差が生じている。 また、ケース A3B3 での波高 7.558m を超過する確率が 42.7%程度と得られるなど、モンテカルロシミュ レーションを通して定量的な評価が可能となった。また、L\_16 と L\_21 の密度分布を比較すると、その形 状は酷似している。これは、2 点がどちらも鳴門海峡に置かれた観測点であることとお互いが近傍に存在 していることに起因すると考えられる。

図 5.12 にはすべての観測点での確率密度分布を描画していないが、特に入り組んだ地域にある観測点 では確立分布が横方向に広がる傾向があり、対称的に、あまり入り組んでいない湾形の地域に設置された 観測点では分散が非常に小さい背の高い確率密度分布が得られた。これらの分布形状の広がり方は、サロ ゲートモデルが与える応答曲面の形状に強く依存していると考えられ、湾形と波高の変動の相関関係に ついてはさらに深い研究が必要である。

# 5.2 陽的 ISPH 法(EISPH 法)の GPGPU への実装

# 5.2.0 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<sup>1),2),3),4),5),6)</sup>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、 スパコン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。半陰解法である ISPH 法を当初は選択してきたが、連立一次方程式を解く必要が あり、上記の大規模計算においてはメモリ量の増大がボトルネックとなったため、完全陽解法化した EISPH 法を開発した。今年は、EISPH 法の利点である省メモリ化の恩恵を受け、同技術を GPGPU に展開 した。

## 5.2.1 近傍粒子探索

本研究で用いる手法は SPH 法の一種であり、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 5.13 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 5.13. セルの概略図。

5.2.2 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<sup>2)</sup>を陽解法 化した陽的 ISPH 法<sup>7)</sup>を用いる。安定化 ISPH 法は圧力を陰的に評価する ISPH 法の一種であり、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(5.17)を用いて圧力の評価を行う。

$$p_{i}^{n+l} = \frac{B_{i} + \sum_{j} A_{ij} p_{j}^{n+l}}{\sum_{i} A_{ii}}$$
(5.17)

ここで表記の簡便化のため、Aii, Bi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。

$$A_{ij} = m_j \frac{2}{\rho^0} \frac{r_{ij} \,\nabla W(r_{ij,h})}{r_{ij}^2 + \eta^2} \tag{5.18}$$

$$B_{i} = \frac{\rho^{0}}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \boldsymbol{u}_{i}^{*} \rangle + \alpha \frac{\rho_{i}^{0} - \rho_{i}^{n}}{\Delta t^{2}}$$
(5.19)

式(5.17)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。

$$p_i^{n+1} = \frac{B_i + \sum_j A_{ij} p_j^n}{\sum_j A_{ij}}$$
(5.20)

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。

$$\overline{P}_{l} = \frac{\sum_{j=1}^{N} (m_{j}/\rho_{j}) P_{j} W(|x-x'|,h)}{\sum_{j=1}^{N} (m_{j}/\rho_{j}) W(|x-x'|,h)}$$
(5.21)

ここで、安定化 ISPH 法の圧力ポアソン方程式における a 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、a 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。

## 5.2.3 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 5.14 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<sup>71</sup>や古市,西浦<sup>80</sup>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 2-3 に示す。本手法では直交系において x 方向に(I=1,2,3,...Nx)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,...Ny)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<sup>80</sup>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。



5.2.4 GPGPUによる EISPH 法による計算例

5.2.4.1 水柱崩壊現象における性能評価

以上の EISPH 法を GPGPU へと実装することで、1GPU あたり 4000 万粒子程度の計算までを可能とした。現時点では MPI の実装はしていないため、GPU4 枚までの計算に留まっているが、億粒子以上の計算が高速に実施できるようになった。この性能評価のため、単純な水柱崩壊を例題に取り上げて性能評価を実施した。



図 5.16 には粒子の解像度を上げながら、問題規模を大きくした場合の粒子数と計算時間の関係図であ る。また同図には、粒子法のカーネル関数を 3 次スプラインと 5 次スプライン関数の両者の比較を示し ている。計算時間は必要となる近傍粒子数に強く依存するため、約倍の数の近傍粒子を必要とする 5 次 スプライン関数の場合が計算時間を要していることが確認できる。またいずれのケースも、全粒子数の増 加に伴い計算時間が線形的に増加している。これはスキームが完全に陽解法化されたため、粒子数に対し て線形的に増加するのは当然の結果である。また GPU の枚数を 1,2,4 と変化させた場合の計算時間をプ ロットしているが、複数 GPU を使うことでほぼ理想通り計算時間が短縮できている。この複数 GPU 計 算の効率をより明確に表わすため、1 枚の計算時間に対するスピードアップ効率(計算時間の逆数)を図 2-5 にプロットした。2 枚まではほぼ理想通りの結果であり、4 枚使った場合も約 3.5 倍まで高速化できて おり、開発コードのパフォーマンスの高さを示すことができた。

5.2.4.2 GPGPUによる福島原発津波遡上現象の再現

最後に 50 cmの粒子径、約 5000 万粒子を使い福島原発の津波遡上現象を解析した例を図 5.18 に示す。 類似の計算をこれまでにもスパコンで実施してきたが、4GPU で数十台の CPU 相当の計算時間で同解析 が実施でき、GPGPU の性能の高さを実感した。



図 5.18. 複数 GPU の性能評価。

参考文献

- 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),I\_397-I\_404,2017.
- [7] J. Makino, A fast parallel treecode with GRAPE, *Publastorn 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.

## 5.3 ASI-Gauss 法による都市全体の木造家屋の倒壊解析

## 5.3.0 背景

2011年東北地方太平洋沖地震で生じた大規模な津波により、沿岸域の木造家屋の多くは瓦礫となった。 津波と瓦礫が混在して遡上することで、人的・経済的損失が拡大した。瓦礫の総量は約2000万トンにも 及び、災害復旧時にはその膨大な瓦礫の処理に時間を有し、復旧・復興に遅れが生じた。今後、南海トラ フなど、同規模の地震・津波被害が生じる危険性が高いことが指摘されている。この規模の津波からの構 造物等の被害をゼロにすることは非現実的であることから、人的被害をゼロにするために津波遡上現象 の予測精度を向上させると同時に、瓦礫の総量とその拡散状況を事前評価することで災害後の復旧活動 に備えておく必要がある。

以上の背景から地震および津波に対する木造家屋倒壊解析を都市全体規模で実施するためのツールの 開発を行った。この解析のためには、GIS データ等から都市全域の建物のモデル化を自動化し、また広域 な領域に含まれる多数の家屋の非線形解析をロバストに実施できるツールが望まれる。そこで本研究で は建物の倒壊解析に実績のある ASI-Gauss 法を解析手法として選択し、大規模解析を実施するための改 良を行った。また木造家屋のモデル化には建築分野の設計基準に準拠した強度を付与することで建築年 代に整合した倒壊解析を実施し、地震動による都市全体に存在する木造家屋の崩壊予測を可能とした。

## 5.3.1 ASI-Gauss 法の高速化

本研究では構造解析手法として ASI-Gauss 法を採用した。ASI-Gauss 法は筑波大学磯部らによって開発 された FEM 解析手法である。1部材を2つの線形チモシェンコはり要素だけで分割し、数値積分点をシ フトすることで、はりの崩壊現象を適切に表現する手法であり、Updated Lagrangian の定式化により大変 形までを解析可能な有限変形弾塑性解析方法である。また破断後は、要素の断面力を解放することで表現 している。降伏関数として次式を採用した。本研究では Mx, My, N はそれぞれ x, y 軸回りの曲げモー メント、軸力とし、次式に示す降伏関数を用いた。ここで、右下添え字の"0"は全断面塑性値であること を示す。

$$f_{y} = \left(\frac{M_{x}}{M_{x0}}\right)^{2} + \left(\frac{M_{y}}{M_{y0}}\right)^{2} + \left(\frac{N}{N_{0}}\right)^{2} = 1$$
(5.22)

従来の ASI-Gauss 法は、並列計算に対応しておらず、また要素数が数千万オーダーのモデル解析を想定していないため、計算効率の低いアルゴリズムが存在していた。都市全域の大規模地震応答解析をするにあたって、ASI-Gauss 法の並列化およびアルゴリズムの改良が必要となった。

ASI-Gauss 法を計算並列化するため、ソースコードのスレッド並列化(以下、OpenMP と記述)を段階 的に行った。計算コストが高く非効率な場所を計測し、連立一次方程式ソルバと接触探査アルゴリズム、 全体剛性行列構築アルゴリズムの改良を行った。ソルバについては剛性行列の格納法として CRS 法

(Compressed Row Storage)を採用し、スレッド並列効率の高い共役勾配法ライブリーを移植した。また 接触探査には、特に粒子系の解析における近傍粒子探索法で用いられているバックグラウンドセルを使 ったセル検索方法を応用することで、触探索すべき要素を限定することで大幅な高速化を実現した。

前述のソルバ OpenMP 化と、接触探査アルゴリズムを改良した結果、十分な高速化を達成した。性能 評価に使用したモデルは、図 5.19 に示す要素数:43934、節点数:30370 のモデルである。このモデルを 用いて、1000 ステップの計算に要する時間を測定した。OpenMP 化コードの解析環境は、京都大学 「Camphor 2」、1 ノード、64 スレッドである(京コンピュータ停止後、別途自身で計算機環境は調達し た)。その結果、従来のコードでは 33 時間 32 分要した計算時間が、OpenMP 化により 13 時間 37 分にな り、約2.5 倍の高速化を達成した。特にソルバのサブルーチン単体に着目すると、35 倍高速化(並列化効率: 57%)した。この結果から、ソルバは大幅に高速化したものの、他の計算効率が低いサブルーチンが、 解析時間の多くを占めていることが2.5 倍の高速化に留まっている要因であった。

次に接触探査アルゴリズムの改良を実施した。従来のコードでは、一要素が、その他すべての要素に対 し、接触探査のための計算を行っていた。無駄な計算を削減するために、解析領域をセル単位で分割し、 接触探査の候補を自身のセルと近傍のセルのみに限定することで接触探査の高速化を実現した。その結 果、図 5.19 と同様のモデル・解析条件において、接触探査アルゴリズム改良後のコードでは、解析時間 が 13 時間 37 分から 2 時間 11 分になり、さらに 6 倍近く高速化することができた(ソルバと併せると約 15 倍の高速化を実現した)。

以上の高速化は、非線形解析までに留まっており、ASI-Gauss 法一番の特徴である崩壊後の解析まで実施すると、急激に解析速度の低下を招いていた。図 5.19 と同様のモデルでは、全体剛性行列構築に 7 秒要したのに対し、図 5.20 に示す要素数:217 万、節点数 155 万オーダーのモデルでは約 5 時間要していた。接触計算では、ギャップ要素を追加し、その要素を介して接触要素間の力を伝えている。そして全体剛性行列を再び構築している。そのため接触判定・接触解除判定されるたびに、ギャップ要素が増減し、約 5 時間かけて全体剛性行列を一から作り直していることが問題であった。そこで上記アルゴリズムの見直しを行い、約 9 秒で計算できるように改良した(約 1830 倍の高速化)。

以上、ソースコードの OpenMP 化、接触探査・全体剛性行列構築アルゴリズムの改良を行い、ASI-Gauss 法は大規模崩壊解析が実施可能となった。



図 5.19. モデル小 (要素数:43934,節点数:30370)。



図 5.20. モデル大 (要素数: 217 万,節点数:155 万)。

# 5.3.2 木造家屋のモデル化指針

本研究で対象とする木造家屋の軒数は非常に多く、建物ごとの詳細なモデル化は不可能である。そのた め一軒一軒の詳細なモデル化はせず、簡易的にモデル化し、建築年代ごとに適用された建築基準法に基づ いた耐力を保有させる方針とした。図5.21に示すように、木造家屋をはり要素によりモデル化を行った。 厳密なモデル化はせず、層せん断力と層間変形角の関係から、構造物全体としての耐力を設定した。木造 家屋を柱、梁、壁、屋根(床)の4つの要素に分類し、壁と屋根(床)要素はブレースに置換、屋根(床) は剛体床と仮定した。モデルの重量は、「2012年改訂版木造住宅の耐震診断と補強方法」より代表的な 建築年代ごとの床面積当たりの重量を参照することで決定した。屋根(床)の重量を梁と屋根要素に、外 壁、内壁の重量を柱と壁要素に分配した。部材の降伏は、層間変形角がある閾値に達したとき、降伏と判 断した。例えば、1959年基準に準拠する図5.22の場合、壁を構成する要素は層間変形角が1/120 rad、 柱を構成する要素は1/30 rad に達した時に降伏させ、要素端部に塑性ヒンジを形成させた。スギの材料 特性を用い、降伏後は完全弾塑性体と仮定した。以上のように、木造家屋をはり要素にてモデル化し、建 築基準法に準拠した耐力をもたせる方針とした。



図 5.21. 木造家屋モデル。

図 5.22. 層せん断力と層間変形角の関係(1959 年基準)

# 5.3.3 都市全域モデルの自動化処理

都市全域のモデル化には、地理情報システム(GIS)を用いた。GISより得られる建物の立体位置情報 と数値標高データから、都市全域の建物モデルを構築できる。また同データから、津波遡上解析に必要な 地表面モデルの作成も可能である。本研究で対象とする都市は、高知県高知市とした。ASI-Gauss 法を用 いた都市全域のモデル化及び地震応答解析を達成後は、SPH 法と連成解析することで、地震・津波に対 する都市全域の木造家屋倒壊解析を実施する方針である。

高知市モデルの概要を次に示す。領域:7 km×10 km、建物数:82,916、要素数:43,411,162、節点数: 30,295,639、データサイズ:9.5 GB(図 5.23)。単一の計算機でも解析できないことはないが、数日の間 に解析を終了させるためには、複数の計算機による同時処理を行うことにした。このため、複数の計算機 に計算負荷が一致するように領域分割を行った。その例として、高知市全域モデルを20 区画に分割した 例を示す(図 5.24)。このモデルの平均要素数は2,170,558(絶対偏差:0.3%)、平均節点数は1,514,782

(絶対偏差:1.1%)であった。領域分割の結果、各領域の平均解析時間は28時間28分(Camphor 2:20 ノード、68スレッド、1000ステップ)に抑えることができ、都市全体の弾塑性地震応答解析(変位入力) が数日の内に完了できるようになった。図5.25に2区画を可視化した結果を示す。カラーコンターは水 平変位を意味する。背の高い建物ほど大きく揺れていることがわかる。なお、解析では要素の破断、接触 はなく、都市全域モデルには、個々のモデル耐力が未設定、壁ブレースの未設定であること留意してお く。





図 5.23. 高知市の都市モデル。

図 5.24. 高知市モデルの領域分割。



図 5.25. 地震応答解析結果 (2 区画)。

# 5.3.4 都市全域モデルによる木造家屋倒壊解析例

都市全域の木造家屋倒壊解析の実現可能性を確認するため、1 区画のモデルを用いて、1000 ステップ、 実時間 20 秒の計算を実施した。木造家屋相当の節点数 1000 未満のモデルに対して、弱い強度を設定し、 地震動は変位入力した。要素の破断、接触、接触解除、地面との接地を考慮した。その結果、56.6 時間で 計算を終えることを確認した(結果出力を除けば 42.2 時間)。図 5.26 に 1 区画モデルを拡大した結果を 示す(0 秒,7 秒)。カラーコンターは鉛直変位を意味する。要素の破断が 210809 回、要素間の接触が 5524 回発生しており、破断後に接地したと判定された回数は 29311 回あり、全体剛性行列の形状が 37854 回 変わる計算であった。全体剛性行列構築アルゴリズムの改良により、現実的な時間内で計算でき都市規模 の崩壊解析が可能になった。

以上、都市全域の木造家屋倒壊解析の実現可能性検討を行った。各種アルゴリズムの改良により、大規 模崩壊解析が数日のうちに終了することを確認できた。今後、壁ブレースを追加した都市モデルに木造家 屋の物性値・断面形状を適用し、年代ごとの倒壊過程の評価へと発展させる予定である。



図 5.26. 木造家屋倒壊解析(初期モデルと地震動流力後 7 秒後)。

5.3.5 ASI-Gauss 法による都市全域モデルによる木造家屋倒壊解析の現状

まずは地震動による都市全域の木造家屋倒壊解析を実施するために、ASI-Gauss 法を高速化させ、また 建築基準に整合した木造家屋のモデル化方法を整備した。都市全体の木造家屋を効率よくモデル化する ため、GIS で登録された情報から建物モデルを自動生成した。また構造解析手法の OpenMP 化、アルゴリ ズム改良をすることで、上記の解析を現実的な時間内で実施可能にした。今後は、まず過去の地震被災事 例との比較による木造家屋倒壊解析の妥当性を確認し、さらには ASI-Gauss 法による家屋の解析と津波 遡上解析法を連成することで、地震だけでなく津波に対する都市全域の木造家屋倒壊予測技術への発展 が望まれる。

# 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)

⑥においては、交通需要モデルの数値解析手法およびデータ圧縮手法の調査を行い、時間依存の旅行時間データの圧縮手法と、動的な交通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およびシミュレーション計算のスケーラビリティ向上のためのコード改良を完了した。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。交通流シミュレータにおける繰り返し計算の収束性を改善するために、ネットワークの簡略化手法を開発し実装した。需要シミュレータにおいては、昨年度構築した被災者の交通行動を再現する動的なシミュレータの改良を行なった。また、救援物資輸送による大型車の交通需要モデルを開発した。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 時間変化するリンク旅行時間データの圧縮手法に関するレビュー

動的交通流シミュレータ FastDUE(Fast Dynamic User-Equilibrium Calculator)における反復計算 プロセスの高速化に向けた、時間依存のリンク旅行時間(Time-Dependent Travel Time(以下、TDTT)) データの圧縮手法について整理する。旅行時間は(時間に対して)厳密に単調な単一変数の関数であるた め、その圧縮手法は TDTT データの区分線形近似問題として定義することができる。

交通流シミュレータに対して適用しうる、絶対誤差を用いた区分線形関数の近似手法に関する論文を 紹介する。例えば Tomek<sup>1</sup>)は単一変数の関数に対して2つの単純なヒューリスティックアルゴリズムを 提案した。一方のアルゴリズムは高速で十分に滑らかな関数において満足できる結果が得られたのに対 し、もう一方のアルゴリズムは低速ではあるものの、病的な関数においても良い近似を得ることができ た。Imai and Iri<sup>2</sup>)は Suri<sup>3</sup>のアイデアを用いて、厳密に単調な1変数の区分線形関数の最適解を与える エッジ可視性問題 <sup>4</sup>に対するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムの主な利点は、*O(N)*のオーダ ーで計算可能なことである。ここで*N*は区分的線形曲線を表す点の数を示す。

Neubauer<sup>5)</sup>は Imai and Iri のアルゴリズムを実際の TDTT データに適用した。しかしながら TDTT デ ータの圧縮に Imai and Iri のアルゴリズムを適用するには、主に3つの大きな懸念がある。第一に、Imai and Iri のアルゴリズムは単純で絶対誤差値の観点で考えれば最適であるが、旅行時間の下限に関しては 自由流旅行時間よりも小さい値、または負の値を生成する可能性があるため、確認して調整する必要があ る。Neubauer<sup>5)</sup>は相対的な上限にのみこのアルゴリズムを使用することで対処した。また下限値にも適 用する場合、First In First Out(以下、FIFO)条件が満たされないことを確認した。第二に、TDTT の 近似値を生成するために必要な線分の距離、交点、および角度の計算には、依然としてかなりの計算量お よびメモリが必要である。さらに、アルゴリズムの効率性は入力データの複雑さ、特にサンプルデータの 形状に依存する。第三に、アルゴリズムに必要不可欠な要素として、区分的線形曲線の上限下限を一定の 値だけ差し引くことによってポリゴンを生成する。これは、近似プロセス中に区分的線形曲線上にある*N* 点の2 つのコピー(上限下限)もメモリに保存する必要があることを意味しており、分散メモリ構造を 備えた並列コンピュータなど、メモリ容量が制限された大規模な動的交通流シミュレーションで使用す る場合には困難となる。

6.1.2 動的交通需要モデルのレビュー

動的需要モデルの構築にあたり、活動パターンに基づき動的な交通需要分析を行う activity-based model のレビューを行う。

Miller and Roorda<sup>6)7)</sup>は大規模交通調査で得た活動分布を用いて個人の一日のスケジュールを作成す る TASHA (Toronto Area Scheduling model for Household Agents)を提案した。TASHA は、世帯レ ベルでの意思決定を考慮した個人のアクティビティスケジュールとトリップパターンを、平日の 24 時間 について生成することができる。TASHA ではまず、PT 調査に代表される大規模交通調査データから個 人属性や活動情報の分布を作成する。次に活動目的ごとに、作成した分布から活動(活動数・開始時刻・ 活動時間)を生成する。それぞれの活動目的にはエントロピーモデルにより目的地(活動場所)を付与す る。生成された活動をひとつずつプロジェクトアジェンダに挿入する。分布から生成した活動開始時刻と 活動時間のままでは活動の重複が生じてしまう場合があるため、以下のルールに従い重複を処理する。

- ・ 既存のエピソード、もしくは新しく挿入するエピソードを空白方向にシフトする。
- エピソードの活動時間をもとの 50%まで短縮する。
- ・ 上記が失敗した場合は、新しいエピソードが棄却され、新しい時刻と活動時間を10回まで再サン プリングする。

次に、作成されたプロジェクトアジェンダから、個人のスケジュールにアクティビティエピソードを挿入 する。活動重複時のルールはプロジェクトアジェンダの作成時と同様であるが、アクティビティ間の旅行 時間も考慮して挿入する。挿入は仕事や学校などの優先度の高い活動から順番に行う。以上の計算により 個人の活動スケジュールを作成する。

TASHA の特徴として以下の点が挙げられる。

- 交通調査データから得られる活動分布をもとにしているため、パラメータが少数である。
- 移動時間を含めたスケジュール重複の確認プロセスにより、移動時間長期化によるトリップ取り やめを評価できる。この特徴は旅行時間の増加により活動量が変化する災害復旧期に適している。

一方で TASHA は、活動のシフトや短縮に理論的な根拠がなく理論基盤が欠如している。また、サンプリ ング試行に上限を付与することで元の活動分布をゆがめる可能性や、最初にサンプリングされた活動数 に対して活動を棄却する操作のみなので過小評価になりやすいといった算術結果の問題も挙げられる。

## 6.2 交通流シミュレータの開発

6.2.1 交通流シミュレータの基本検証に向けたベンチマークの作成

動的なネットワークフローモデル (Continuous Flow Network Models(以下、CFNMs)) は、理論的か つ実践的に、動的利用者均衡 (実世界におけるドライバーの行動規範であると認知されている) や、動的 なネットワークローディングを算出する際に広く用いられる。これらのモデルにおいて、一般に用いられ ている行動仮説は、巨視的モデルの解法に必要不可欠と見なされている FIFO 原則である。しかしなが ら従来の研究では、CFNMs が FIFO 原則を完全に保証するものではないことが報告されており、経時的 に蓄積する微小な FIFO violations を許容している。こうした FIFO violations は、実際に観察されない か物理的に不可能な運転挙動である。CFNMs は研究者や計画者の間で広く採用されているため、FIFO violations が交通シミュレーションの結果にどの程度影響するかを知ることが重要である。

FIFO violations の影響を分析するために、Cell Transmission Model (CTM) において FIFO 原則を 満たす計算アルゴリズム Exact FIFO を開発した。CTM は、kinematic wave 理論を解くための一般的 な数値的解法であり、各タイムステップにおいて分割したセル上の交通量と密度を算出することにより、 巨視的な交通状態を予測する。特に CTM に対して焦点を当てているが、その理論的な枠組みは link transmission model や point-queue model、spatial-queue model、および本プロジェクトで実装中の交 通流シミュレータ FastDUE が属するような派生モデルにおいても適用可能である。これらのモデルで は共通して、全ての交通機関またはそれぞれの交通機関ごとのいずれかにおいて、FIFO 原則に従う交通 |挙動を保証しようとしている。 注意すべき重要な点として、 これらモデルにおける FIFO の仮定は、 交通 挙動が FIFO に従っているからではなく、FIFO が無視され、別の明示的な原則に置き換えられない場 合、実際には観察されないまたは物理的に不可能な挙動が生じうる可能性があるためである。これにより 非現実的または信頼することのできない結果が生じる可能性がある。より具体的には、交通シミュレーシ ョンの結果には、i)物理的に不可能な、または理論やモデルによって裏付けられていない交通挙動が含 まれ、ii)実際には、車両が入ったのと同じ順序でリンクや経路から出る傾向が見られる。加えて、FIFO violations は意思決定者が交差点において前進する前に下流リンクの渋滞が解消されるのを待とうとす る非現実的な交通挙動を含んでいる。FIFO に代わる方法も存在するが、そのような非 FIFO モデルで は、単純さ、簡便さ、理論上および計算上の扱いやすさにおいて幾分の特性が失われる。

開発した計算アルゴリズムを CTM と FastDUE の両方の交通シミュレータの基本検証に用いる。 CFNMs において FIFO 原則を完全に順守する手法は、筆者の知る限りない。Exact FIFO の結果をベン チマークとして、FastDUE の分析・改善を行う。FastDUE は大規模な交通ネットワークに適用できる が、CTM の FIFO 原則を保証する手法は計算量が膨大になるため、現在では中小規模のネットワークに 適用可能となっている。従ってこの方法は、他の計算アルゴリズムの FIFO 性能または FIFO violations の影響を評価できるベンチマークを提示する点で有用である。

将来を見据えると、FastDUEのフレームワークを使用して FIFO を完全に保証するアルゴリズムを開 発することは、交通分野に大きな影響を与える非常に興味深い研究課題である。FastDUEのフレームワ ークは非常に効率的であり、並列化により非常に大きな問題にも容易に適用できるため、大規模ネットワ ークにおいて FIFO 原則に遵守した結果を生み出すことができる可能性がある。

# 6.2.2 主要コンポーネントの高速化

交通流シミュレータ FastDUE を構成するコンポーネントのうち、もっとも計算時間を要し、シミュレー タ全体を律速しているものは、ネットワークを構成する各リンクから下流側へのリンクへ流出する交通 流のリンク内での遅れ時間を計算するものである。このコンポーネントには Diverge (分流) という名前 をつけてあるが、FastDUE の中でも主要なコンポーネントの1つである。Diverge の高速化は、FastDUE 全体の高速化のために必要不可欠である。

Diverge では、計算対象リンクの下流側リンクが持つ流入容量制約と、計算対象リンクへ流入する交通 量を所与とし、計算対象リンクでの遅れ時間を計算する。この計算に用いるモデルはボトルネックモデル と呼ばれる。過年度までの Diverge では、このボトルネックモデルの厳密解を計算するようになってい た。しかし、この実装では、リンクの混雑状況によって計算の実行時間に非常に大きいばらつきが生じる ことがわかった。計算時間のばらつきは並列計算のスケーラビリティに甚大な影響を与える。FastDUE ではリンクを空間的に分割することにより並列計算を実施している。プロセス間通信にはあまり時間を 要していないため、並列計算のスケーラビリティは、数 10 万本はあるリンクを各 CPU にいかに割り当 てていくかに依存して決定する。計算時間がばらついていると、最も計算時間が長いリンクにより律速さ れ、並列数を上げても計算速度が上がらなくなる。

このDivergeの計算時間のばらつきを解消するために計算アルゴリズムの改良を行った。具体的には、 これまで渋滞の発生および解消時刻を 0.1 秒のタイムステップで都度厳密に計算していたものを、1 秒~ 10 秒程度のタイムステップで計算するようにしている。これにより、渋滞の発生および解消時刻を特定 しなくてはならない回数が減り、計算時間が短縮される。この改良された Diverge については、OpenMP によるハイブリット並列化の実装も行っている。

# 6.2.3 道路ネットワークデータの調整

DRM (Degital Road Map) は、上下方向が分離された幹線道路同士の交差点を表現する際に、図6.1 のような短いリンクを組み合わせた構造を用いている。交通流シミュレーションにおいて、このような構 造が存在するネットワークに一定程度の交通量を流すと、容易にグリッドロックが発生し、交差点の容量 がゼロになってしまう。実際の交差点では、信号制御や内回りによる右折、交差点内での滞留の禁止によ り、グリッドロックは起こりえない。このような現実には発生し得ないグリッドロックの発生を抑止する ために、交差点内のグリッド構造を抽出し、シミュレーション内で除去して計算を行った。抽出方法を下 記に示す。なお、同様の処理は、四角形だけではなく、三角形のグリッド構造に対しても行っている。 Step1: 交差リンクの抽出

始点・終点共に、3 つ以上のノード*i*と接続するノード*j*で構成されるリンク $l_{ij}$ を抽出する。 Step2: ループ検出

Step1で抽出したリンク $l_{ij}$ に対し、jを起点、iを終点としてdijkstra法による最短経路探索を実行する。得られた経路のうち、3リンク以内の経路を持ち、経路距離がリンク数×50(m)未満のリンク集合 $L_{ij}$ とノード集合 $N_{ij}$ を交差点内ループ候補として検出する。

# Step3: 交差点内ループの判断

Step1とStep2を繰り返し、同じリンク・ノードで構成される集合が複数回検出されたときに交差点 内ループとしてみなす。



図 6.1. 交差点内のグリッド構造。

交通流シミュレーションの計算負荷の削減のため、道路ネットワークデータの簡略化も行った。経路の 中間に他の道路と接続する交差点を持たない一続きのリンクのうち、交通容量と道路料金が一致するも のを1リンクとしてまとめ、リンクパラメータの更新を行った。距離と自由流旅行時間はまとめたリン クパラメータの和を用いて更新し、自由流旅行速度はそれらの調和平均で設定した。ジャム密度に関して も、更新した自由流旅行速度を用いて更新した。これにより、総リンク数は465,896 本から352,714 本 に、総ノード数も214,377 個から148,990 個に減少した。

6.2.4 スケーラビリティ

主に 6.1.2 の改良によってスケーラビリティが昨年度よりどれだけ向上したかを確認した。図 6.2 に、 改良前と改良後の Diverge によるプロセス数と計算速度の関係を示す。改良により、特にプロセス数が 多いときの実行時間が改善していることがわかる。



図 6.2. 改良前の Diverge と改良後の Diverge (Diverge2) による実行プロセス数と速度の関係。

# 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

動的交通需要シミュレータ DeSuTA(Demand Simulators for Dynamic Traffic Assignment)は、物 資調達などの復旧期特有の被災交通需要を再現する SPACE (travel demand Simulator for Procurement Activities Caused by Earthquake)と非被災者の日常活動需要を再現する ASTRO(Activity Scheduler To Reproduce Observed behavioral data with trip-chain condition)と救援物資輸送を目的とする輸送 車両の交通需要を再現する HuLAND(rule-based simulator for Humanitarian Logistics Activity after a Natural Disaster)の3つのシミュレータで構成される。交通需要の算出にあたっては、被災交通需要、 日常活動需要、救援物流需要の3種類を計算し、合算して、動的交通需要とする。以下の節では、各シミ ュレータのモデル構成とその動作検証について説明する。

# 6.3.2 被災需要モデルのモデル構成

被災需要シミュレータ SPACE は、これまで検討してきた逐次型の意思決定フレームを用いて、タイムス テップごとに、(i)施設への供給、(ii)避難所からの出発、(iii)移動、(iv)物資の受け取り、(v)帰宅、(vi)物資 の消費の6つのフレームを計算対象時間が経過するまで繰り返すことで、被災需要交通量を算出する。

救援施設は、給水所、炊き出し、スーパー、銭湯の4つを扱う。(i)銭湯を除いた3つの救援施設へ一 定間隔で物資(水、食料)を補給し、物資保持量が0になった施設はサービスを停止する。これら救援 施設で得られる物資を水(給水所)、食料(炊き出し、スーパーマーケット)、清潔度(銭湯)と定義し、 各避難者が持つ状態量として時間の経過とともに減少する。避難所もしくは自宅に滞在している避難者 は、この状態量や施設の魅力やアクセス性に起因して、(ii)施設があるゾーンへの出発・目的地選択を行 う。物資xに関する出発・滞在の確定効用V<sup>x</sup><sub>depature</sub>, V<sup>x</sup><sub>stay</sub>と、滞在ゾーンiから目的地ゾーンjへ移動する確 定効用V<sub>ij</sub>を次で定義する。

$$V_{stay}^{x} = V_{depature}^{x}(S^{x} - a^{x}) + v_{shelter}^{x}$$
(6.1)

$$V_{ij} = \beta_t c_{ij} + \beta_g G_j \tag{6.2}$$

ここで、 $S^x \ge a^x$ は物資xの保有量基準と保有量、 $v_{shelter}^x$ は滞在避難所の相関、 $c_{ij}$ はゾーンij間の旅行時間、  $G_j$ は目的地ゾーンjの魅力度を示す ( $\beta_t \ge \beta_g$ は係数)。魅力度 $G_j$ はゾーンj内の施設数に基づき算出される。 目的地の効用には確率効用項 $\eta_{ij} = v_{ij}\log c_{ij}$ を加える。これは旅行時間の非観測誤差を表している。また、 交通手段選択は旅行時間を効用とする多項ロジットモデルまたは PT データから集計した距離帯・時間 帯別選択割合を使用して確率的に行う。(iii)避難所から出発した被災者は一括でネットワークに乗せ、旅 行時間が経過するまでネットワーク上に滞在する。旅行時間分のタイムステップが経過すると避難者は 救援施設の存在するゾーンへと移動する。その後、被災者は施設選択を行い、施設の待ち行列に到着順で 並ぶ。施設選択では、以下の条件を満たす施設から等確率で一つの施設を選ぶ。

- 1. その施設が提供する物資を求めている(出発選択で出発が選ばれている)
- 2. 一回のトリップ内でまだ訪れていない施設である
- 3. 施設が営業している
- 4. 施設が供給可能である(物資が枯渇していない)

(iv)給水所、炊き出し、スーパーの3施設は、サービス率が十分でない場合に待ち行列が延伸し、施設での滞在時間が伸びる。提供できる物資が枯渇した場合は営業終了となり、被災者はサービスが受けられず強制的に再目的地選択を行う。銭湯は物資の提供を行わないため、サービス提供可能人数を設定することで混雑を再現する。(v)物資を十分に受け取った被災者は避難所もしくは自宅へ帰る。満足に受けられなかった被災者は、サービスが満足に受けられるまで、再度施設選択もしくは目的地選択を行う。タイムステップの最後には、(vi)全被災者が一定量の物資を消費する。物資の消費が完了すると出発選択に戻り、計算対象時間が経過するまで繰り返し計算を行う。

6.3.3 被災需要モデルの動作検証

ランダムパラメータの分散のの感度分析を行う。まず、滞在避難所の相関を表すランダムパラメータの 分散のによる出発選択の影響を検証する。計算の対象地域として、図 6.3 左の 5×5 の格子状のゾーン群 (計 25 ゾーン)を用いて、1,000 人分の被災者を仮定したシミュレーション結果を示す。図 6.4 は、 各避難所からの出発数の時間変化を示す。分散のを大きくするほど避難所ごとに相関が生まれ、グラフに 尖ったピークが生まれるようになっており、出発のタイミングが同時になる。このように、滞在避難所の 相関を表すランダムパラメータを変更することで、滞在避難所での情報共有とそれに伴う行動の同調を 再現できる。



図 6.3. 動作検証用のネットワーク。



図 6.4. 各避難所からの出発数。

次に、旅行時間の非観測誤差を表すランダムパラメータの分散による目的地選択の影響を検証する。図 6.3 右の 5×5 の格子状のゾーン群(計 25 ゾーン)を用いて、計算した結果を図 6.5 に示す。図 6.5(a) を見ると、旅行時間の非観測誤差がない場合には中心の避難所に隣接した 4 ゾーンが目的地として集中 的に選択されていることが分かる。σが大きくなるほどに、隣接した目的地だけでなく遠い施設にも分散 して目的地選択が行われていることが確認できた。このように、旅行時間の非観測誤差を表すランダムパ ラメータを変更することで、実際の現象に応じた目的地選択のばらつきを再現することができる。



## 6.3.4 日常活動需要モデルのモデル構成

日常需要活動シミュレータ ASTRO は、活動分布の作成、活動の生成、活動順序の調整、目的地・交通 手段選択、再サンプリング、追加サンプリングの6つのフレームワークで構成される。

まず、インプットデータとしてパーソントリップ調査データ(PT データ)に類する大規模交通調査デ ータを読み込み、個人の基本情報と活動に関する分布を作成する。個人の基本情報として個人属性分類・ 居住地・勤務地の分布、活動に関しては活動数、開始時刻、活動時間の分布を作成する。作成した分布に 基づき、確率的に個人ごとの属性と活動を生成する。ここで、活動目的分類は業務(勤務地以外での活動)、仕事・学校(勤務地での活動)、私事、途中帰宅、最終帰宅の5つを用いる。

活動を生成し並び変えただけでは活動の順序が不自然になる場合(例えば、最終帰宅より後ろに他の活動が存在)があるため、活動順序の調整を行う。調整対象のスケジュールの矛盾条件を以下に示す。

1. 最終帰宅より後ろに他の活動が存在する。

2. 会社・学校が連続、または途中帰宅が連続する。

3. 先頭に途中帰宅が存在する。

4. 最終帰宅の直前に途中帰宅が存在する。

活動順序の調整実施確率Psoneを次で定義する。

$$P_{done}^{s} = \frac{M^{h}(F_{b} \cap \{k_{a} + t_{sa}\})}{M^{h}(\{k_{a} + t_{sa}\})}$$
(6.3)

ここで、 $M^h(Z)$ は元データにおける個人属性 h の活動集合 Z を満たす人数、 $k_z \ge t_{sz}$ は活動 z の目的 活動開始時間、 $F_b$ は活動 b と同じ目的・開始時刻の活動が存在する活動集合である。 $P^s_{done}$ に従って調整 実施の採択/棄却を行い、採択/棄却に応じて活動順序の矛盾を解消する処理を行う。

次に、活動ごとに目的地・手段選択を行い、出発地・到着地・交通手段を踏まえて旅行時間を算出する。 目的地選択を行うのは私事、業務目的のみとし、SPACE と同様に、旅行時間と目的地魅力度を効用とす るロジットモデルで記述する。交通手段選択も SPACE と同様に行い、交通手段選択を行った後、トリッ プチェインを考慮するように交通手段を調整する。チェイン内は公共交通もしくは徒歩、車、自転車の3 つの交通手段グループのいずれかで統一する。どのグループに統一するかは、チェイン内の選択回数が多 いグループとチェイン内の平均トリップ距離、もしくは平均旅行時間を用いた手段選択により決定する。 単独のチェインであれば、上記の方法により簡易にトリップチェインを考慮した交通手段選択を行うこ とができるが、複数のチェインが入り混じっている場合は、さらなるルールに基づいてトリップチェイン を考慮する必要がある。二つのチェインが包含関係にある場合は、内部にあるチェインの交通手段グルー プを単独で決定し、残りの交通手段のグループを独立して決定する。

目的地・交通手段の決定により、活動・移動時間に重複が生じた場合、その重複を解消するため、活動 場所または活動開始時刻、活動時間の再サンプリングを行う。活動場所の再サンプリングを行うのは、目 的地選択によって活動場所を決定する活動目的「私事、業務」の二つである。再サンプリング実施確率 *P<sup>d</sup><sub>done</sub>を*次で定義する。

$$P_{done}^{d} = \frac{N^{h}(\hat{X} \cap \{k + o + d + t_{s}\})}{N^{h}(X \cap \{k + o + d + t_{s}\})}, \hat{X} = X \cap Y$$
(6.4)

ここで、kは活動目的、oは前の活動場所、dは次の活動場所、 $t_s$ は開始時刻、 $N^h(Z)$ は元データにおける 個人属性hの活動集合Zを満たす活動数、Xは元データにおける活動場所集合、Yは時間枠内で到達可能な 活動場所集合である。再サンプリングが採択された場合は、 $N^h(\hat{X} \cap \{k + o + d + t_s\})$ から活動場所を選択 する。活動場所の再サンプリング後も活動の重複が残る場合には、開始時刻・活動時間を再サンプリング
し、時間枠内に収まるスケジュールへの変更を検討する。再サンプリング実施確率Ptoneを次で定義する。

$$P_{done}^{d} = \frac{N^{h} (\hat{T}_{s} \cap \hat{T}_{d} \cap \{k + x\})}{N^{h} (T_{s} \cap T_{d} \cap \{k + x\})}$$

$$t'_{s} + t'_{d} + t_{t} \leq \hat{T}_{s}, \hat{T}_{s} + \hat{T}_{d} \leq t''_{s} - t''_{t}, t'_{s} + t'_{d} \leq T_{s}, T_{s} + T_{d} \leq t''_{s}$$
(6.5)

ここで、xは活動場所、t<sub>d</sub>は活動時間、t<sub>t</sub>は旅行時間、t'は前の活動、t"は次の活動、T<sub>s</sub>は元データにおける開始時刻集合、T<sub>d</sub>は元データにおける活動時間集合である。再サンプリングが採択された場合は、移動時間を考慮した時間枠内で行われた元データの活動から開始時刻、活動時間を選択する。ただし、この作業により、交通手段や活動場所が変更する場合があるので、最後にトリップチェインを考慮する作業を再び行う。

最後に、活動数の過小評価を防ぐため、活動・移動間の空き時間を踏まえ、活動を追加するサンプリングを実行する。追加サンプリング実施確率*Padd*を次で定義する。

$$P_{add}(C_f, t_v) = \frac{\sum_{k \in K} M^h(C_f + a^k)}{M^h(C_f) + \sum_{k \in K} M^h(C_f + a^k)}$$

$$T_d(a^k) \le t_v$$
(6.6)

ここで、 $C_f$ は活動数の組み合わせ、 $t_v$ は最大空き時間、 $a^k$ は活動目的kの追加アクティビティ候補、Kは活動目的集合、 $T_d$ は活動時間である。追加サンプリングが採択された場合は $M^h(C_f + a^k)$ の比率に合わせ て、追加する活動目的を選択する。ただし、スケジュールの矛盾を生じる活動目的が選択された場合は、 追加サンプリングを棄却する。目的地選択・交通手段選択を行い活動場所と旅行時間を決定し、旅行時間 を考慮した空き時間枠内に収まる開始時刻・活動時間をサンプリングする。時間枠内に収まる開始時刻と 活動時間の選択確率は、元データから作成した同時確率を用いる。時間枠内に収まるような元データが存 在しない場合は、追加サンプリングを棄却する。最大空き時間に対する追加の試行が棄却されるまで、追 加サンプリングを繰り返し行う。以上により、インプットデータの分布に従う個人ごとのスケジュールを 生成する。

6.3.5 日常活動需要モデルの動作検証

まず、インプットデータとシミュレーション結果を比較し、本シミュレータの精度を検証する。計算の 対象地域として、5×5の格子状のゾーン群(計 25 ゾーン)を用いる。1,000人分のサンプルデータを 入力として、シミュレーションを 1,000回行った結果を表 6.1に示す。追加サンプリングを行った場合 の総トリップ数は、相対誤差-3.05%と精度よく再現できている。対して、追加サンプリングを行わなか った場合は相対誤差-19.1%と過小評価である。ここから追加サンプリングを行ったことによりトリッ プ過少が改善したことが確認できる。しかし、追加サンプリングを行った場合でも総活動時間と総旅行時 間は過小評価となっており、それぞれの改善が望まれる。総活動時間の減少は、活動が重複した際の再サ ンプリングにおいて活動時間が短い活動が選ばれやすいことが原因と考えられる。アクティビティを延 長する操作を加えることで、活動時間の改善を行うことができるだろう。総旅行時間は総活動時間ほどで はないが、過小評価となっている。目的地の再サンプリングによって、旅行時間の短い近くのゾーンが選 ばれやすくなっているためと考えられる。

	入力	追加サンプリングあり		追加サンプリングなし	
		平均 (標準偏差)	相対誤差 %	平均 (標準偏差)	相対誤差 %
人数	1000	1000		1000	
総トリップ数	2984.0	$2893.1 \ (\pm 39.5)$	-3.05	$2413.5 (\pm 29.6)$	-19.1
総活動時間 (hours)	5055.0	$4440.1 \ (\pm 100.9)$	-12.16	$3753.6~(\pm 93.4)$	-25.7
総旅行時間 (hours)	1649.5	$1528.9 \ (\pm 29.6)$	-7.31	$1307.9 \ (\pm 24.8)$	-20.7
計算時間 (付録表 1)			$82 \mathrm{s}$		$30 \mathrm{s}$

表 6.1. 基本数値の比較。

次に、旅行時間に対するトリップ数の感度を検証する。車のみ旅行時間を変更する場合と、全交通手段の 旅行時間を変更する場合の二通りの計算を行う。また交通手段選択に関して、多項ロジットで手段選択す る場合と距離帯別交通手段分担率を用いて手段選択を行う場合の2通りを計算する。以上の4通りに おけるトリップ数の変動を図6.6に示す。車のみ旅行時間を変更した場合は、トリップ数の変動がほぼ 無い。これは、旅行時間が増えた自動車を交通手段として選択せず、トリップ減少への影響が抑えられた ためと考える。対して、車のみ旅行時間を変更した場合でも、交通手段選択が距離帯別であればトリップ 数は減少している。全ての交通手段の旅行時間を変更した場合は、交通手段選択の方法に関わらずトリッ プ数は減少する。以上より、構築したシミュレータは旅行時間の増加に感度をもつことを確認できた。



図 6.6. 旅行時間に対するトリップ数の変化。

6.3.6 被災需要・日常活動需要モデルの妥当性検証

2016 年に発生した熊本地震でのデータとシミュレータの出力結果を比較することにより、SPACE と ASTRO の妥当性を検証する。避難所や避難者数等の災害関連データは、熊本県災害対策本部会議資料等 に記載されている値を使用する。またパラメータは、ゾーン別滞在人口データを用いてキャリブレーショ ンを行った結果を与える。滞在人口の真値には、株式会社ゼンリンデータコムが販売している「混雑統計 ®」データを用いる。「混雑統計®」データは、NTT ドコモが提供するアプリケーション(ドコモ地図ナ ビサービス 地図アプリ・ご当地ガイド等の一部のアプリ)の利用者より、許諾を得た上で送信される携 帯電話の位置情報を、NTT ドコモが総体的かつ統計的に加工を行ったデータである。位置情報は最短 5 分毎に測位される GPS データ(緯度経度情報)であり、性別・年齢等の個人を特定する情報は含まれな い。

はじめに、日常活動需要シミュレータ ASTRO の妥当性を検証する。パラメータのキャリブレーショ ンには、熊本地震前の8日間(2016年4月1日~12日の平日)の滞在人口データを学習データ、2016 年4月13日のデータをテストデータとして使用した。熊本 PT データ(input)とシミュレーションで 計算した結果(output)の時間帯・目的別トリップ数の比較を表 6.2 に示す。総トリップ数は+0.5%であ り、非常に高い精度で再現できている。目的別では、業務、仕事・学校、私事を目的とするトリップ数の 誤差は3%以下であり、非常に再現性が高い。しかし、途中帰宅と最終帰宅に関しては、それぞれ過小評 価と過大評価になっており、双方を帰宅トリップでまとめると良い精度の結果を得られるが、それぞれの 再現性には改善の余地がある。時間帯で見ると、mid 帯のトリップ数が過小評価、night 帯に関しては過 大評価となっている。これは途中帰宅・最終帰宅トリップの再現性により生じた問題であると考えられ る。また、時間帯不明のトリップが21,592トリップ存在しており、時間帯別の推定を難しくする一因と なっている。

活動目的		am	mid	$_{\rm pm}$	night	不明	Total
		6:00am-	9:00am-	3:00pm-	7:00pm-		
業務	output trips	3553.3	6788.5	1993.6	2791.2	0.0	15126.6
	input trips	3350.0	8521.0	2193.0	478.0	520.0	15062.0
	output $\pm$ trips	203.3	-1732.5	-199.4	2313.2	-520.0	64.6
	output ± $\%$	6.1	-20.3	-9.1	483.9	-100.0	0.4
仕事・学校	output trips	39100.6	8896.2	3011.2	4754.1	0.0	55762.1
	input trips	42334.0	9069.0	3111.0	1667.0	1307.0	57488.0
	output $\pm$ trips	-3233.4	-172.8	-99.8	3087.1	-1307.0	-1725.9
	output ± $\%$	-7.6	-1.9	-3.2	185.2	-100.0	-3.0
私事	output trips	18198.3	31796.0	16292.9	14845.5	0.0	81132.6
	input trips	8406.0	41503.0	22662.0	5527.0	1727.0	79825.0
	output $\pm$ trips	9792.3	-9707.0	-6369.1	9318.5	-1727.0	1307.6
	output ± $\%$	116.5	-23.4	-28.1	168.6	-100.0	1.6
途中帰宅	output trips	1966.4	5756.5	3643.4	885.9	0.0	12252.2
	input trips	1788.0	8595.0	5634.0	742.0	2635.0	19394.0
	output $\pm$ trips	178.4	-2838.5	-1990.6	143.9	-2635.0	-7141.8
	output ± $\%$	10.0	-33.0	-35.3	19.4	-100.0	-36.8
最終帰宅	output trips	472.5	13930.3	47341.9	35065.7	0.0	96810.4
	input trips	349.0	11802.0	38512.0	18899.0	14815.0	84377.0
	output $\pm$ trips	123.5	2128.3	8829.9	16166.7	-14815.0	12433.4
	input ± $\%$	35.4	18.0	22.9	85.5	-100.0	14.7
不明	output trips	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	input trips	533.0	1706.0	742.0	161.0	588.0	3730.0
	output $\pm$ trips	0.0	0.0	0.0	0.0	-588.0	-3730.0
	input ± $\%$	0.0	0.0	0.0	0.0	-100.0	-100.0
Total	output trips	63291.2	67167.5	72283.0	58342.3	0.0	261084.0
	input trips	56760.0	81196.0	72854.0	27474.0	21592.0	259876.0
	output $\pm$ trips	6531.2	-14028.5	-571.0	30868.3	-21592.0	1208.0
	output ± $\%$	11.5	-17.3	-0.8	112.4	-100.0	0.5

表 6.2. 時間帯・目的別トリップ数の比較。

次に、SPACE とASTRO によるシミュレーション結果の合算値と、熊本地震後の滞在人口データを比較する。キャリブレーションには、熊本地震後の4日間(2016年4月18日~21日)の滞在人口データ を学習データ、2016年4月22日のデータをテストデータとして使用する。図 6.7 は、このキャリブレ ーションによって得られたパラメータを入力してシミュレーションした結果(SPACE + ASTRO)と、 ASTRO 単体でシミュレーションした結果を復旧期の滞在人口データと比較したものである。斜めの直線 はy = x の 45 度線である。誤差指標である RMSE は SPACE + ASTRO が ASTRO のみに対して小さく なっており、SPACE を追加することで再現性が高まっていることが確認できる。散布図の形を見ても、 SPACE を導入したことで、より真値に近づいていることが分かる。次に、熊本地震で被害の大きかった 益城・健軍を中心とする 4km×7km の地域における滞在人口の真値とシミュレーション結果を図 6.8 に 示す。総数は異なるが時間分布は再現されている。総数が異なるのは、携帯 GPS から取得された滞在人 口特有の原因であると考えられる。滞在人口は観測された人数に対して一律に拡大係数をかけるため、ゾ ーンごとの値を正確に取得することはできない。実際に、対象地域のシミュレーション人口は滞在人口真 値の総人口よりも大きく、図 6.8 のように総数が合わなかったと考えられる。



## 6.3.7 救援物流モデルのモデル構成

救援物流モデル HuLAND のモデル構成を説明する。救援物資輸送を目的とする大型車交通需要の算 出にあたって、被災者に提供する救援物資の輸送に必要なトラック台数を計算する。本シミュレーション は、必要な救援物資量の算出、救援物資流量の算出、大型車交通量への変換という 3 つのフレームワー クで構成される。

必要な救援物資量は、各救援施設が支援を担う避難所を指定し、該当する避難所に滞在する人数の合算 値に基づき物資需要量を計算する。具体的には、避難所に最も近い救援施設が滞在する避難者の物資需要 をカバーする。地方自治体が災害計画で発表している必要量算出基準(例えば、飲料水は1人1日3L必 要)を用いて、物資支援を担う避難者数より必要な救援物資量を算出する。

救援物資流量の算出にあたっては、日本の救援物資輸送システムに基づき、段階的な輸送を行う。救援 施設に最も近い一次ないしは二次集積所から救援施設へ、必要な救援物資量を輸送し、二次集積所へは最 も近い一次集積所が物資輸送を行う。集積所の位置情報は、地方自治体の災害計画指定の集積所や民間物 流事業者のロジスティクスセンターを与える。各施設間の輸送時間は、施設が含まれるゾーン間の最短経 路旅行時間とする。加えて、各施設での荷卸し・荷積みにかかる時間を考慮し、時間帯別の救援物資流量 を算出する。

大型車交通量の算出にあたっては、トラックの最大積載量まで救援物資を荷詰めすると仮定し、時間帯 別の救援物資流量を大型車交通量に変換する。トラックの種類は、災害計画に従う規格のトラックで輸送 を行うとする。また、各施設で荷卸し時間や施設間の旅行時間を考慮した上で、出発した集積所に戻るト リップの計算も行う。

#### 6.3.8 救援物流モデルの妥当性検証

四国ブロック協議会が過去に実施している救援物資物流の定量的評価結果<sup>8)</sup>と、関西圏を対象に本シュ ミュレーションを実行した結果を比較し妥当性評価を行う。救援施設は避難場所に基づきランダムに設 定し、震度の計算範囲である関西ネットワーク内の民間集積所および一部都市(大阪市、神戸市、西宮市、 芦屋市、尼崎市、大阪府、兵庫県)の災害計画指定の集積所をインプットとする。物資の種類は必要量の 大きい水(必要量:3L/日・人)と食料(必要量:3食/日・人、従量:60kg/7食)を設定し、4トントラ ックで物資支援を行う。

四国ブロック協議会は支援対象とする 558,704 人避難者数に対して、水と食料を含む 6 種類の物資を 輸送するのに必要な 4 トントラックの台数を 707 台/日と算出している。この結果を元に、関西の 4,795,224 人の避難者に対する必要なトラック台数を計算すると 6,068 台/日である。一方で、上記のデ ータをインプットとし本シュミュレーションを実行した場合、一日あたり 4,208 台の 4 トントラックが 必要であると算出された。四国ブロック協議会の算出結果に基づいた交通量よりも 30%ほど過小推定さ れているが、本シミュレーションでは水と食料のみしか対象としていないため、交通量が低く算出される 結果は妥当であると考える。

#### 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 サブ課題Aから受領したデータの概要

ここでは、サブ課題 A より受領した関西圏を対象とするケーススタディの地震動に関するデータを説 明する。本ケーススタディは、南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループの南海トラフ巨大地震対 策について(最終報告)<sup>90</sup>をベースに,基本ケース、東ケース、陸側ケース、陸側ケースの地震動振幅を 1.5 倍に増幅させたケース、陸側ケースの表層地盤せん断波速度を 1.3 倍にしたケース、そして平時の 6 つシナリオに対して検討を行う。シミュレーションのインプットとする地震動に関するデータは道路閉 塞データと震度データである。道路閉塞データは、昨年度に引き続き、各リンクの幅員に対する閉塞の割 合として与え、半分以上閉塞したリンクを通行不可とみなし、交通流シミュレーションを実行する。震度 データは昨年度開発したインフラ被害評価モデルのインプットとする。インフラ被害結果は、計算対象地 域の被害判定として交通需要シミュレーションに用いられる。

#### 6.4.2 道路啓開ネットワークの構築

ここでは、全ての起終点ペアに関して接続性のある道路啓開ネットワークの構築手法を説明する。起終 点の間に経路が存在していない場合、それを起点とする交通需要はネットワーク上を走行しない。被害の 大きい地域に存在する被災者交通需要が欠落しており、被害を過小評価する可能性がある。構築する道路 啓開ネットワークは、交通流シミュレータのインプットとなり、全ての起終点間の交通需要をネットワー ク上に配分することができる。

道路啓開ネットワークの構築には、被災によって非接続となった起終点を含む木構造を構築し、木に含まれる閉塞リンクを復旧すればよい。このように、ネットワークの一部のノードを含む木構造をシュタイナー木という。特に、復旧にかかる費用の総和が最も小さいシュタイナー木を求めるが好ましい。しかし、有向グラフに対して現実的な計算時間で最小シュタイナー木を求めるアルゴリズムは存在しない。そのため以下のアドホックな手順で、ノード集合V、リンク集合E、非閉塞リンク集合F、閉塞リンク集合Fで構成される有向グラフ $G(V, E = F \cup \overline{F})$ より、全ての起終点ペアに関して接続性のある道路啓開ネットワークを構築する。

- 1. 根ノード $r \in V$ に関して、復旧リンクコスト $c'_{i}, l \in E$ の総和が最小となる全域木(全ノードを含む木構造)を求める。復旧リンクコスト $c'_{i}$ は、閉塞リンクならば自由流旅行時間、非閉塞リンクならば0で与える。また根ノードrは、非接続な起終点ペア $w \in W_{G(V,F)}$ の最短経路が最も通る(媒介中心性の最も高い)ノードとする。 $W_{G}$ はネットワークGにおいて非接続な起終点ペアの集合を示す。最小全域有向木に含まれる閉塞リンク(v,w)  $\in \overline{F}, v, w \in V$ 及び逆向きリンク(w, v)  $\in \overline{F}, v, w \in V$ を啓開候補リンクとする。
- 2. 非接続な起終点ペア $w \in W_{G(V,F\cup Fspen)}$ の起点から根ノードrまで経路の内、復旧リンクコスト $c'_{l}$ が最小となる経路を探索し、その経路上にある閉塞リンクを啓開候補リンク集合 $F_{open}$ に加える
- 3. 啓開候補ネットワーク $G(V, F \cup F_{open}^{cand})$ 上にある、非接続な起終点ペア $w \in W_{G(V,F)}$ の最短経路を探索し、 最短経路に含まれる啓開候補リンクを啓開リンクとする。

提案手法の妥当性を検証するために、次の二つのナイーブな手法と比較する。(a)最短経路探索を行い、 最短経路に含まれる閉塞リンクを啓開リンクとする。(b)復旧リンクコストciが最小となる経路を探索し、 対象経路に含まれる閉塞リンクを啓開リンクとする。図 6.9 は、各アルゴリズムを被災した関西圏ネット ワークに適用し、啓開後のネットワークにおける一部の起終点間の旅行時間を示す。また表 6.3 は、各ア ルゴリズムによる啓開リンク数と啓開したリンクのコストの総和を示す。図 6.9 および表 6.3 より、アル ゴリズム(a)は最も経路旅行時間が小さく効率的なネットワークが構築されているが、啓開するリンクの 数が大きい。一方、アルゴリズム(b)は最小のリンク数で道路啓開ネットワークを構築しているが、非効 率的なネットワークである。提案アルゴリズムは、比較的効率的なネットワークを構築しながら、啓開リ ンク数も閉塞リンクの約 7%以下であり、限られた資源と時間で啓開を行うには現実的な値と考えられる。 本検証結果より、提案アルゴリズムのロジックを被災 5 ケースの関西圏ネットワークに適用したものを 交通流シミュレータのインプットとする。



表 6.3.	啓開リンク数と総コストの比	上較。
方法	啓開リンク数	総コスト(0.1s)
アルゴリズム(a)	6,798	1,558,360
アルゴリズム(b)	1,208	253,140
提案アルゴリズム	1,677	305,030
	閉塞リンク数:24,647	閉塞リンク総コスト: 5,291,510

6.4.3 交通需要シミュレータの計算結果

交通需要シミュレータ DeSuTA の計算は、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)を対象として、朝夕ピークを含む4時から20時の時間帯のシミュレーションを実行す る。ASTROのインプットデータには、平成22年度近畿圏 PT データを用いる。SPACEと HuLANDで 使用する避難所等の被害情報は、行政が公開するオープンデータ等を用いる。交通流シミュレーションへ の交通需要の受け渡しにあたっては、交通需要が発生/集中する500mメッシュのセントロイドをダミー ノードとして関西圏ネットワークに加える。需要シミュレータの計算対象は5市内で31,217 ゾーンとな っている。追加したダミーノードはネットワーク上の最も近いノードに紐付けられる。

図 6.10 に各ケース(被災 5 ケース+平時 1 ケース)のゾーン別発生交通量の集計値を示す。どの被災 ケースも基本的な傾向として、平時と比較して、発生量の多いゾーンが減少し、トリップのないゾーンか ら交通需要が新たに発生している。これは被災により通勤等の日常活動需要が減少し、物資調達等の復旧 期特有の交通需要が発生していることを意味する。一方で、各被災ケースの発生量の空間分布には差異が あり、被害の空間分布を反映した結果であることが確認できる。





6.4.4 交通流シミュレータの計算結果

交通需要シミュレータで計算した交通需要データとサブ課題 A より受領した道路閉塞データ、ディジ タル道路地図に基づき作成した道路ネットワークデータをインプットとし、シミュレーションを実行す る。なお、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朝夕のピークを含む 4 時 ~20 時としている。

混雑状況の計算結果を図 6.11 に示す。青色は閉塞リンクを示し、暖色は自由流速度との相対速度の時 間平均を示す。平時のケースでは目立った混雑は見られない。一方、5つの被災ケースについては、いず れについても全体的に激しく混雑している。激しく混雑している領域は概ね、今回のケーススタディで大 きな地震動があるとした場所に相当する。これはケースごとの交通需要パターンの変動に拠る影響もあ り得るものの、特に大阪中心部を中心とする大規模な道路閉塞による交通容量の不足が大規模な渋滞を 発生させ、最終的にグリッドロックを引き起こしたことが原因であると考える。なお、昨年度までこのよ うな結果はあまり見られなかったが、これは今回、交通容量を過去のケースより低めに設定した他、計算 対象時間を16時間と長時間に設定したため、閉塞リンクの周辺で発生した交通渋滞が延伸し続け、グリ ッドロックを引き起こしたことが原因であると考えられる。



参考文献

- [1] Tomek I., Two algorithms for piecewise-linear continuous approximation of functions of one variable, IEEE Transactions on Computers, Vol.C-23(4), pp.445-448, 1974.
- [2] Imai H., Iri M., An optimal algorithm for approximating a piecewise linear function, Journal of information processing, Vol.9(3), pp.159-162, 1987.
- [3] Suri S., A linear time algorithm with minimum link paths inside a simple polygon, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol.35(1), pp.99-110, 1986.

- [4] Guibas L., Hershberger J., Leven D., Sharir M., Tarjan R., Linear time algorithms for visibility and shortest path problems inside simple polygons, In SCG '86: Proceedings of the second annual symposium on Computational geometry, pp. 1-13, New York, NY, USA, 1986.
- [5] Neubauer S., Space Efficient Approximation of Piecewise Linear Functions, Student research project (Studienarbeit), Universitat Karlsruhe (TH), 2009.
- [6] Miller E. J. and Roorda M. J., Prototype model of household activity-travel scheduling, Transportation Research Record, Vol.1831, No.1, pp.114-121, 2003.
- [7] Roorda M. J., Miller E. J., and Habib K. M., Validation of tasha: A 24-h activity scheduling microsimulation model, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol.42, No.2, pp.360-375, 2008.
- [8] 南海トラフ巨大地震等に対応した支援物資物流システムの構築に関する四国ブロック協議会, http://wwwtb.mlit.go.jp/shikoku/soshiki/seisaku/block.html, accessed 2018-06-08.
- [9] 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ: 南海トラフ巨大地震対策について, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku\_wg/pdf/20130528\_houkoku\_s1.pdf, accessed 2020-03-06.

# 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 令和元年度の結果の概要

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。令和元年度は南海トラフ地震のハザードと、「大阪府」と「大阪府以 外の関西1府4県(京都府・兵庫県・滋賀県・奈良県・和歌山県)」「関西2府4県以外の日本」の3地域 と36業種で構成された経済を対象とした。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4320タイプ の主体の動的計画問題を扱い、関西市場の36業種全ての価格が変動する動的プロセスを計算した。また、 モデルに瓦礫を導入し、瓦礫が企業の復旧作業の妨げになる影響や、瓦礫撤去の過程を考慮した。さらに は、インフラ復旧政策を評価する関数を導入した。対象とした災害シナリオは、5つの直接被害ケース と、各直接被害ケースの下で10<sup>100</sup>を超える組み合わせ数となるライフラインとサプライチェーンの再開 過程により構成した。

数値解析の改良に関しては、1)ノード間のロードバランスの調整コードを導入した。また、2)モン テカルロシミュレーションの並列化を行った。さらには、3)乱数の生成処理について、これまでは一つ の特定のノードが乱数の生成を担当していたが、各ノードへの分散化を行った。それによって、大阪府の みを対象としたある規模のモデルの計算時間は2時間38分から0時間25分へと短縮した。また、ある 計算規模を対象とした並列化による計算時間短縮効果は概ね1を示した。

#### 7.2 モデルの概要

#### ・地域と市場の構成

「大阪府」と「大阪府以外の関西1府4県(京都府・兵庫県・滋賀県・奈良県・和歌山県)」、「関西2 府4県以外の日本」の3地域で構成された経済を考える。それぞれを地域OSK(Osaka)、地域ROK(Rest of Kansai)、地域ROJ(Rest of Japan)と表記する。また、市場の空間は2つに分割されるとし、関西市場とROJ・ 海外市場とする。いずれの地域でも市場は36部門(業種)に分類されるものとする。

災害発生後、地域 OSK と地域 ROK の企業は動的最適化問題を解くことによって、損壊した生産設備 (資本)を復旧する。それに対して、地域 ROJ については最適化問題を扱わず、資本と労働、インフラ の復旧過程はシナリオによって外生的に与えた上で、各部門のセクターGRP(Gross Regional Product)の変 化過程を算出する。

#### ・ライフラインとサプライチェーンの再開確率、企業タイプの分岐

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,…,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。ま た、同一部門hに依存した変数であっても地域ごとに値が異なるが、地域を越えて変数を集計したりする 箇所でないところでは、表記の簡便化のため、地域を表すインデックスの表記は省略することとする。

各ライフラインやサプライチェーンをインデックスルにより表す。例えば、1=1は電気、1=2はガス、

 $\iota = 3$ は上水道、 $\iota = 4$ は企業にとっての一つ目のサプライチェーン、 $\iota = 5$ は二つ目のサプライチェーン… と考える。ライフライン/サプライチェーン $\iota$ が求期までに機能を再開している確率(分布関数)を $\Phi_{lh}^{1}(t)$ によって表す。 $\Phi_{lh}^{1}(t)$ は企業iが属する地域の部門h毎に与えられ、データにより同定されるものとする。 それぞれの $\iota$ の機能の再開確率を独立と仮定し、さらに、全てのライフラインとサプライチェーンの機能 が生産において完全に非代替的だと仮定すると、ある地域の部門hの企業の生産再開の分布関数は次式の ように与えられる。

$$\Phi_h^1(t) = \prod_{\iota} \Phi_{\iota h}^1(t) \tag{7.1}$$

したがってt期までに生産を再開していない確率 $\Phi_h^0(t)$ と、t-1期までに生産停止でありt期に生産を再開する確率 $P_{01}^{\theta h}(t)$ はそれぞれ以下のように与えられる。

$$\Phi_h^0(t) = 1 - \Phi_h^1(t) \tag{7.2}$$

$$P_{01}^{\theta h}(t) = \frac{\Phi_h^1(t) - \Phi_h^1(t-1)}{\Phi_h^0(t-1)}$$
(7.3)

生産状態の変化Δθ<sub>i</sub>に関するマルコフ推移確率行列を以下のように表現する。

$$P^{\theta h}(t) = \begin{bmatrix} P_{00}^{\theta h}(t) & P_{01}^{\theta h}(t) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(7.4)

推移行列 $P^{\theta h}(t)$ の1行目と1列目は状態 $\theta_i = 0$ に、2行目と2列目は状態 $\theta_i = 1$ に対応する。 $P_{00}^{\theta h}(t) = 1 - P_{01}^{\theta h}(t)$ である。また、生産可能状態から停止状態への推移確率は0と仮定する。

各部門内の企業のタイプは、(災害前の資本規模×被災状態×生産を再開する期)によって分類される。 (災害前の資本規模×被災状態)で与えられるタイプを「(復興過程の)事前タイプ」と呼び、インデッ クスを*j*としよう。部門*h*内の事前タイプ*j*のシェアを $\pi_{jh}^{0}$ と表すと $\sum_{j}\pi_{jh}^{0} = 1$ が成立する。また事前タイ プ*j*の企業のシェアを、生産停止中の企業のシェア $\pi_{jh0}(t)$ と生産稼働中の企業のシェア $\pi_{jh1}(t)$ のベクトル として以下のように表現する。

$$\pi_{jh}(t) := \left(\pi_{jh0}(t), \pi_{jh1}(t)\right) = \left(\pi_{jh0}(t-1), \pi_{jh1}(t-1)\right) \begin{bmatrix} P_{00}^{\theta h}(t) & P_{01}^{\theta h}(t) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(7.5)

したがって、それぞれの企業数は以下のようになる。

$$\pi_{jh}(t) \cdot N_{nh} = \left(\pi_{jh0}(t) \cdot N_{nh}, \pi_{jh1}(t) \cdot N_{nh}\right)$$
(7.6)

ただし $N_{nh}$ は部門hの企業数を表す。 $t_s$ 期に生産を再開する企業の数 $N(j, t_s, h)$ は以下のように決まる。

$$N(j, t_s, h) := \pi_{jh0}(t_s - 1) \cdot P_{01}^{\theta h}(t) \cdot N_{nh}$$
(7.7)

#### ・地域 OSK と地域 ROK の企業の復旧投資問題

企業*i*の問題における*t*期の状態変数ベクトルを*s<sub>i</sub>*(*t*) = (*k<sub>i</sub>*(*t*), *l<sub>i</sub>*(*t*), *B<sub>h</sub>*(*t*), *p*(*t*), *θ<sub>i</sub>*(*t*), *t*)により表現する。 *k<sub>i</sub>*(*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<sub>i</sub>*(*t*)は企業*i*の労働、*B<sub>h</sub>*(*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<sub>i</sub>*(*t*), *B<sub>h</sub>*(*t*)の変化過程は外生的に与えられるものとする。*p*(*t*) = (*p*<sub>1</sub>(*t*), ..., *p<sub>H</sub>*(*t*))は関西市場に おける部門 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。*θ<sub>i</sub>*(*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。*θ<sub>i</sub>*(*t*) = 1のとき企業*i*は*t*期に生産が可能であり、*θ<sub>i</sub>*(*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<sup>i</sup>(·)と中間投入財m<sub>hri</sub>(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。

$$y_{i}(t) = \min\left[F^{i}(\cdot), \frac{m_{1i}(t)}{\kappa_{1h}}, \cdots, \frac{m_{h'i}(t)}{\kappa_{h'h}}, \cdots, \frac{m_{Hi}(t)}{\kappa_{Hh}}\right]$$
(7.8)  
$$F^{i}(l_{i}, k_{i}^{+}, \tilde{B}_{h}, \varepsilon_{i}, \theta_{i}, \xi_{di})$$
$$\coloneqq \theta_{i}\{1 + \gamma_{i}\varepsilon_{i}\}\tilde{B}_{h}\beta_{0}\{1 + \gamma_{\xi d1} \cdot (\xi_{di})^{\alpha_{\xi d1}}\}^{-1}\{\beta_{h}^{l}l_{i}^{\alpha_{h}} + \beta_{h}^{k}k_{i}^{+\alpha_{h}}\}^{\frac{1}{\alpha_{h}}}$$
(7.9)

ただし、 $\xi_{di}$ は企業iの瓦礫ストックを表す状態変数であり、上式では瓦礫が生産性を落とす影響が考慮されている。 $l_i, k_i^+, \tilde{B}_h, \varepsilon_i, \theta_i, \xi_{di}$ 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。 $\gamma_i, \beta_0, \gamma_{\xi d1}, \alpha_{\xi d1}, \beta_h^l, \beta_h^k, \alpha_h$ 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。

$$\tilde{B}_h(t) \coloneqq \sum_b \beta_{bh} B_b(t) \tag{7.10}$$

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。

$$B_b(t) = B_b(t-1) + \zeta_b(t-1) \cdot G_R(t-1) \cdot \{1 + \gamma_b \varepsilon_{Bb}(t)\}$$
(7.11)

 $G_R(t)$ 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<sub>i</sub>(t)の変化過程は以下のように表される。

$$k_{i}(t+1) = (1-\delta) \left\{ k_{i}(t) + \left\{ 1 + \gamma_{\xi d2} \cdot \left( \xi_{di}(t) \right)^{\alpha_{\xi d2}} \right\}^{-1} \eta_{i}(t) \right\}$$
  
=  $(1-\delta)k_{i}^{+}(t)$  (7.12)

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。上式で は瓦礫ストック $\xi_{di}(t)$ が投資効率を落とす影響が考慮されている。

瓦礫ストック $\xi_{di}(t)$ は次式に従って減少する。

$$\xi_{di}(t+1) = \xi_{di}(t) - \eta_{di}(t) \tag{7.13}$$

ただし*η<sub>di</sub>(t)*は*t*期の撤去量を表す。本研究では簡単化のため、撤去スケジュールを外生的に与える。 企業*i*の*t*期の利潤は以下のように構成される。

$$\Pi^{i}(l_{i},k_{i},\tilde{B}_{h},\mathbf{p},\eta_{i},\varepsilon_{i},\theta_{i}) \coloneqq \tilde{p}_{Sh}y_{i} - \sum_{h'}\tilde{p}_{Dh'}m_{h'i} - wl_{i} - p_{\eta}\eta_{i} - p_{\eta d}\eta_{di}$$
(7.14)

ただし上記の全ての変数で「(t)」の表記を省略している。 $\tilde{p}_{sh}(t)$ はt期における関西市場の部門hの財の事後実効売却価格、 $\tilde{p}_{Dh'}(t)$ は事後実効購入価格を表す。それらは内生的に決定する。w(t)は賃金率、 $p_{\eta}(t)$ と $p_{\eta d}(t)$ はそれぞれ単位当たり資本の調達費用と瓦礫撤去費用であり、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、第5項は瓦礫撤去費用を表す。

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 $\Lambda_i(s_i(t))$ 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。

$$\Lambda_{i}(\boldsymbol{s}_{i}(t)) = \max_{\boldsymbol{d}_{i}(t)} \left[ E_{\varepsilon}[\Pi^{i}(\cdot)] + \psi \sum_{\{q, \Delta\theta_{i}\}} \phi_{i}(q, \Delta\theta_{i}) \cdot \Lambda_{i}(\boldsymbol{s}_{i}^{t+1}(\boldsymbol{s}_{i}(t), \boldsymbol{d}_{i}(t))) \right]$$
(7.15)

ただし $d_i(t) \coloneqq (\eta_i(t), \{m_{hi}(t)\})$ は企業iの制御変数ベクトルである。 $E_{\varepsilon}[\Pi^i(\cdot)]$ は式(7.14)で与えられる利潤 のホワイトノイズ・ベクトル $\varepsilon(t)$ に関する期待値を表す。 $\psi$ は割引因子( $0 < \psi < 1$ )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。 $\Delta \theta_i \coloneqq \theta_i(t+1) - \theta_i(t)$ は、1となるときに企 業の生産状態が停止から再開に転じることを、0の場合は状態が変わらないこと(すなわち生産停止のま ま、あるいは生産可能のままであること)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、生産状態の変化 $\Delta \theta_i$ に関する確率の積を表す。 $\sum \phi_i(q, \Delta \theta_i) = 1$ が満たされる。 $s_i^{t+1}(s_i(t), d_i(t))$ は今期の状態 $s_i(t)$ と制御 $d_i(t)$ によって決まる次期の状態ベクトルを表す。  $\Lambda_i(s_i(t))$ は動的計画問題の最適値関数であり、全ての状態 $s_i(t)$ 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 $\Lambda_i(s_i(t))$ を決める関数方程式である。

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**p**(*t*) (インデックス*q*) が決まる。
- 2) 状態s<sub>i</sub>(t)が決まり、t期の Bellman 方程式(7.15)が決まる。
- 3) Bellman 方程式(7.15)の右辺を最大化するように企業は制御変数ベクトルd<sub>i</sub>(t)を決定する。
- 4) ホワイトノイズ・ベクトルをが決まる。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。価格の決定のルールに ついては後述する。



図 7.1. 各期 t の変数の決定順序。

#### ・地域 ROJ の各部門の生産水準

地域 ROJ については他の2地域とは異なったモデル化を行う。南海トラフ地震の被害を直接には受け ない地域の割合が大きく、企業にとって施設の復旧問題が中心にはならないからである。また、地域 ROJ に対しては部門内の企業の異質性は考慮せずに、部門ごとの集計的変数を扱うこととする。そして資本と 労働、インフラの復旧過程は外生的に与えられ、ROJ 市場の価格は一定と仮定する。

災害によって地域 ROJ の部門別・地域内総生産(GRP)が受ける変化は、1) 資本と労働、インフラの損

壊と復旧、2) 関西からのサプライチェーンとオープン市場調達による中間投入財の供給の途絶、3) 関西 市場での価格の上昇に集約されるものとする。GRP の変化分は次式のようにあらわされる。

$$\Delta \text{GRP}_h^{\text{ROJ}} = \Delta p_h^{\nu \text{ROJ}} \cdot Y_h^{\text{ROJ}} + p_h^{\nu \text{ROJ}} \cdot \Delta Y_h^{\text{ROJ}}$$
(7.16)

Δは災害前の水準からの変化分を表すものとする。(前の期からの変化分ではない。)また、 $\Delta p_h^{\nu ROJ}$ は付加価値価格の変化分であり、 $\Delta Y_h^{ROJ}$ は生産水準の変化を表す。紙面の制約上、それらの決定構造の記述については省略する。



図 7.2. 市場の構成。

## ・市場と価格の変化過程

市場の構成を図 7.2 に示す。前述のように、全ての部門hについて ROJ・海外市場は関西市場に較べて 大きいため価格は一定と仮定する。さらに、地域 OSK と地域 ROK の企業は、災害によって輸送手段が 被害を受けるなどの影響が及ぶため、ROJ・海外市場で売買をする際には通常よりの大きな輸送費用を要 するものと仮定する。それによって関西市場での取引を優先させるものとする。関西市場の各部門hの価 格の更新過程を以下のように仮定する。

$$p_h(t+1) = \{1 + v \cdot \text{RExD}_h\} p_h(t)$$
(7.17)

RExD<sub>h</sub>は超過需要率を表し、vは正のパラメータである。RExD<sub>h</sub>は次式のように与えられる。

$$\operatorname{RExD}_{h} = \frac{\operatorname{DM}_{\operatorname{in}h} - \operatorname{SP}_{\operatorname{in}h}}{\operatorname{DM}_{\operatorname{in}h}}$$
(7.18)

DM<sub>inh</sub>は地域 OSK と ROK、ROJ の企業による中間財需要、それらの企業や政府による投資財需要、関西の家計による最終需要の和によって与えられる。一方、SP<sub>inh</sub>は地域 OSK と ROK、ROJ の企業による供

給の和である。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 足は海外の企業や家計の需給によって調整されるものとする。

#### ・政策評価関数

政策の評価は災害シナリオ毎に次式によって行われるものとする。すなわち地域 OSK と ROK の全て の企業の期待利潤の現在価値(右辺第1項、第2項)と、地域 ROJの GRP の変化分の現在価値の加重和 (右辺第3項)から、復旧投資費用の重み付き現在価値(右辺第4項)を差し引いた、利益の純増分によ り評価する。

$$W_{\nu} = \sum_{i} \Lambda_{i}^{\text{OSK}} \left( S_{i}(0) \right) + \sum_{i} \Lambda_{i}^{\text{ROK}} \left( S_{i}(0) \right) + w_{1} \cdot \text{Ave} \left[ \sum_{t} \psi^{t} \left\{ \sum_{h} \Delta GRP_{h}^{\text{ROJ}}(t) \right\} \right]$$

$$-w_{2} \left[ \sum_{t} \psi^{t} \left\{ G_{R}^{\text{OSK}}(t) + G_{R}^{\text{ROK}}(t) + G_{R}^{\text{ROJ}}(t) \right\} \right]$$

$$(7.19)$$

vは災害シナリオを表すインデックスである。 $w_1 \ge w_2$ はウェイトであり、Ave[·]はモンテカルロシミュレ ーションの平均値を計算する操作を意味する。 $G_R^{OSK}(t), G_R^{ROK}(t), G_R^{ROJ}(t)$ はそれぞれ地域 OSK、ROK、ROJ に対するt期のインフラ復旧投資総額を表す。



図 7.3. 計算フローの概要。

#### 7.3 アルゴリズムの概要

図 7.3 に計算の順序を示す。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**d**<sup>i</sup>(*s*<sub>i</sub>)と最適値関数の値*A*<sub>i</sub>(*s*<sub>i</sub>)のリストを作成する。図 7.3 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。

#### 7.4 並列化と計算時間

本コードでは随所に並列化処理を施している。図 7.3 に示す第1段階(Step 1)では、昨年度までに、各主体の問題の内部で状態空間を分割して並列計算を行うコードを実装していた。今年度はそれに加えて、各主体の問題の間でイタレーションが収束する時間に差異が生じるので、早く収束したノードに次の仕事を割り振るというコードを導入した。

第2段階(Step 2)は、並列化の視点からは以下の4つの部分で構成される。Step 2-1 では、必要なすべての乱数を発生させる。今年度は、このサブステップを並列化し、全ノードと全スレッドを使って乱数を発生させることとした。次いでStep 2-2 では、Step 1 の結果から、予め各主体の乱数の実現値のパスに依存した最適制御の系列を取得する。ここではStep 1 と同様のロードバランス調整アルゴリズムによる並列化を施した。またStep 2-3 では、各主体の供給・需要行動を集計して価格調整を行う。調整された価格に基づいて、各主体の制御変数を決定する。ここでは主体をグループにまとめて、グループ間で並列化を行った。最後にStep 2-4 では結果の集計と出力を行う。このサブステップは並列化していない。第2段階(Step 2)において、今年度は上記の3通りの並列化を実装した。



(a)「Step 1: Bellman 方程式を解く」部分の並列化の効果



(b)「Step 2: モンテカルロシミュレーション」の並列化の効果



(c) 2段階合わせた合計の計算時間と並列化の効果

図 7.4. 並列化の効果。

図 7.4 は地域 OSK のみを取り出し、状態空間をある規模に限定して、計測した並列化の効果を示す。 (ただし上図の横軸に示すノード数について、ロードバランスの管理と計算結果の出力のために設けた 1つのノードはカウントから除いている。)3 地域モデルにおいても並列化の構造は変わらないため、並 列化の効果も同様のものが得られるものと考えられる。一方、第1段階(Step 1)と第2段階(Step 2)は計算 のプロセスが分離可能で、かつ全く異なる計算を行うため、個別に計算時間と並列化の効果を計測した。 その結果、両段階ともに、強スケーラビリティはほぼ1となった。両段階に導入した、ロードバランス調 整アルゴリズム (早く収束したノードに次の仕事を割り振るというコード)の影響が大きかったものと思 われる。

また、Step 2-1 の乱数発生の分散化の効果は、その導入によってある規模のモデルの計算時間が2時間

38 分から 0 時間 25 分へと短縮したことによって確認された。一方、Step 2-3 における並列化効果は、今回は通信時間に要する時間の増加によってほとんど相殺された可能性がある。効果や原因の精査については今後の課題とする。

### 7.5 計算結果の概要

対象とする災害シナリオは、南海トラフ地震の直接被害ケースと、ライフラインとサプライチェーンの 再開過程の組み合わせによって構成される。前者は5ケースであり、後者は地域OSKとROKにて、そ れぞれ3つのライフライン(電気、ガス、上水道)が稼働を再開する期と、36個の各部門の小規模企業・ 大中規模企業がサプライチェーンの復旧によって生産を再開する期の組み合わせで与えられる。組み合 わせの総数は10<sup>100</sup>を超える。それらのシナリオを確率的に生成するためのデータは、平成30年度と同様 に、IESが推計する建物被害率や、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、フラ ジリティカーブと復旧曲線を利用して生成したデータ、帝国データバンクの企業データ等で構成される。 ここでの詳細な記載は省略する。

図 7.5 から図 7.9 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 7.5 はパー センタイル値によって部門毎の集計量に関する部門間のバラつきを、図 7.6 は同様にして特定の部門内で 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。ま た、図 7.8 以外は、地震の直接被害シナリオは基本ケースを対象とした結果である。



(a) 地域OSKの36部門(業種)の復旧過程と格差



図 7.5. 地域 OSK と ROK の 36 部門(業種)の生産設備と生産水準の復旧過程と格差。







図 7.7. 地域 ROJ の生産水準の復旧過程。



今回のモデルでは、全ての地域・部門において、ライフラインのサービスやサプライチェーンで調達す る中間投入財が他の投入財と完全に非代替的であるという仮定を採用している。それによって、生産再開 の遅れが過剰に現れている可能性がある。今後はそれが他の投入財と部分的な代替性をもつことを考慮 したモデルの拡張について検討する必要がある。

## 7.6 政策分析



インフラ復旧の早期化政策の政策評価関数の値

部門の生産水準の復旧率の増分

図 7.9. インフラ復旧整備の早期化の効果。

政策分析の妥当性は今後の実用化の可能性に直結している。本モデルは多様な政策の評価を行うこと が可能な構造をもっている。ただし現状においては、利用可能なデータの制約によって、多くのパラメー タの値を仮定によって与えている。よって、結果がそのような仮定の値に直接的に依存するような類の政 策分析の結果は、定量的に妥当なものにはならない。今後、より広範なデータの取得とパラメータ値の同 定によって、多様な政策分析を展開することが課題である。

図 7.9 は、インフラ復旧整備の早期化の効果を示す。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、そこから復旧を3期間、6期間、9期間早期化した際の効果を分析してい る。上の表より、6期間早期化が最も効果的であることが示される。9期間早期化は費用の現在価値が大 きくなり過ぎるため、6期間早期化に劣る。そして、下の図によって、6期間早期化の便益の大きな割合 が、主として復旧の前半期に、相対的に被害が小さい部門の生産の向上に帰着することがわかる。よって 被害の格差縮小の観点からは補完的な政策が必要であることが示唆される。

他の政策分析を行うための変数(パラメータ)には、例えば、3地域×19 種類のインフラへの投資を 配分するパラメータや、どの市場からどれだけの投資財を調達するかを決めるパラメータ、また、復旧期 間内のどの期にどのインフラを重点的に復旧させるかの決定、瓦礫撤去スケジュールの決定などがある。 既述のように、それらの分析によって定量的に意義のある結果を得るために、今後より多様なデータを収 集する必要がある。

#### 7.7 まとめ

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、計算した。前年度までに、多数ストックに起因した「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が得られていた。

令和元年度は、モデルを、日本全国を含む3地域モデルへと拡張した。また、災害復興政策を評価する 関数を導入して、実用的な政策分析への基礎を築いた。数値解析については、主として並列化に関連した 改良を行った。それらは、1)ノード間のロードバランスの調整コードの導入、2)モンテカルロシミュ レーションの並列化、3) 乱数の生成処理のノード間の分散化を含む。それによって、ある規模のモデル を対象に計測した計算時間は2時間38分から0時間25分へと短縮した。また並列化による計算時間短 縮効果は概ね1を示した。

本モデルは、経済分析分野ではエージェントベースモデルに分類されるモデルである。そのカテゴリー において、4000 を超える Bellman 方程式を基礎とした動的計画問題を扱い、超多数の災害シナリオを計 算する研究は、課題担当者の知る限りこれまでに存在しない。

一方、本研究は今後に重要な課題を残している。Bellman 方程式を解くための効率的なアルゴリズムの 実装は最重要の課題である。また、実証的な面でモデルのバリデーションを高める必要がある。

# 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)

#### 8.1 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デュールの改良

8.1.1 概要

橋梁ネットワークはディ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<sup>[1]</sup>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。ディ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ディ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い。さらに、古い橋梁に対しては設計図そのものが存在しないものも多 い。データがない場合は信頼性の高いモデルを構築することはできないが、限られた情報と設計基準や経 験知に基づけば、構造パラメータを推定することは不可能ではない。また、推定されたモデル情報は、こ れを管理し情報を更新していくことで構造物の維持管理に継続的に利用できるなど潜在的有用性がある。 ただし、数値モデルを自然災害の被害評価等に利用する場合は、構築されたモデルに何らかの信頼性指標 を与えることで、モデル精度に応じた被害推定の信頼性評価が求められる。

現在、統合地震シミュレータ(IES)には建築建物応答解析モデュールが導入されており、このモデュ 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、モデュールを新たに作成する必要がある。そこで、昨年度検討 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参照しながら、断片的なデータのみが利用 できることを前提とした合理的な数値モデルを自動構築するためのアルゴリズムを具体的に考案し、コ ード化した。

#### 8.1.2 橋梁ネットワークを対象とした橋梁モデル自動構築手順

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が、 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。採用する方法論では、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 modelling data)に変換するという IES の方法論を採用している。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している。この方法は、断片的データを橋梁 information に変換し、橋梁 information から解析モデルを生成する、という二段階の変換を行うもので ある(図 8.1)。

上記の方法を採用する場合、断片的データから橋梁 information への変換手順・方法は多岐にわたる。 ここでは、パラメータ設定に関しては(たとえ入手可能な情報が少なくとも)可能な限りその方法に合理 性を有するよう配慮した。合理性とは経験知を利用することである。その例が、標準設計データ<sup>例えば[2]-[5]</sup> に基づく入出力関係の適用となる。標準設計の歴史は古いものの、実際の設計計算に基づく膨大な種類の



図8.1. 橋梁ネットワーク自動構築アルゴリズムの概念。(昨年度報告書より)

設計断面データベースとなっており、情報が少ない場合におおよその断面規模を推定するにあたっては 有用な情報となる。

上部構造標準設計は古く、また適用対象橋梁種別は5種程度に限られているものの、道路種別(主要幹 線道路・幹線道路・補助幹線道路等)や地域区分、寒冷地区分、橋梁長区分から、橋種(以下、これらを 上部工入力情報という)ごとに幅員・断面構成が15~25種設定されているため、各種区分等を入力、こ れらに応じた断面を出力とすることで、合理的に幅員構成を選択できる。(上部工入力情報がない場合は 仮定となるため、モデルの信頼性をモデル出力情報として加えることが重要である。)

ただし、標準設計断面の数は膨大であり(例えばプレートガーダー橋では組合せ2376橋が存在)、それらの全てを関数化するのは非現実的であるため、ここでは各橋種に対し、最小桁高・最大桁高を抽出、 これらの断面パラメータ(面内・面外剛度、ねじり定数、断面積)を用いて中間桁高の断面パラメータを 算出し、これらを補間する近似関数、すなわち上部工入力情報を入力、断面パラメータを出力とした関数 を求め、適用した。

下部構造の標準設計は矩形断面(陸上用)および小判型断面(水中用)の鉄筋コンクリート橋脚が対象 であるが、橋脚高さごとの上部構造形式、死荷重・活荷重反力区分、梁幅区分、梁厚区分、地盤種別区分、 地耐力区分(以下、これらを下部工入力情報という)に応じた膨大な量の梁・柱・フーチング断面が示さ れている。また、上部構造形式ごとの支間一反力関係、支間一梁幅関係等、実際の計算に即した各種関係 も示されているため、これらを関数化することで、下部工入力情報に応じた規模の下部構造断面を設定す ることが可能となる。

ただし、上部構造と同様、標準設計断面の数は膨大であり(例えば矩形断面では377種類の柱・梁・フ ーチングが存在)、全断面に対して数値モデルに必要となる断面パラメータ(面内・面外剛度、ねじり定 数、断面積、ひび割れ・降伏・終局モーメント、ひび割れ・降伏・終局曲率)を計算するのは非合理的で ある。そこで、代表40断面に対する各断面パラメータを算定し、重回帰分析に基づき下部工入力情報— 断面パラメータの関係を関数化し、適用した。

支承については、情報がない場合は竣工年代に応じて固定・可動支承および弾性支承から選択できるようにした。支承の配置については、固定・可動の場合は橋脚高が低い側を固定条件とする等、現実的な配置となるよう配慮した。

#### 8.1.3 コード化

コードに関してはモデル構築方法の改良・追加が容易なものとすることを条件とした。具体例として は、各種パラメータおよび各種関数の意味を明確化するための命名規則への配慮や、関数の入出力関係が 明確となるような引数構成などが挙げられる。本コードによる5径間連続PCポステンT桁橋のモデル生 成例を図 8.2 に示す。必要とする入出力と関数を表したコード概要は、図 8.3 のフローに示すとおりで ある。同図中、記号<sup>()</sup>で示す番号は各関数からの生成データ(中間生成データあるいは共通モデリングデ ータ)を表しており、これと同じ番号を有する記号<sup>()</sup>の部分にその生成データが読み込まれる。本コード の IES への導入は現在継続中である。



### 8.1.4 おわりに

本方法は、断片的なデータのみが利用できることを前提としたものであり、大規模橋梁や複雑な構造形式の橋梁は対象としていない。一方、対象とする中小規模の桁橋であっても、モデル化に必要となる構造 情報の不足から、橋梁 information の生成には多くの仮定を必要とする。紙ベースの資料の読み込み、あ るいは河川・道路等の交差条件や写真データ等の利用により、多くの不足情報を補える可能性は十分に残 されており、データ変換技術の開発を、今後継続して行う予定である。

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/2017tokeinen.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.



図 8.3. 橋梁モデル構築手順概要(1)



図 8.3. 橋梁モデル構築手順概要(2)

#### 8.2 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

#### 8.2.1 概要

本検討課題では、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都市モデルの拡張を目指し、さらに広域の被害シナリオ解析に基づく災害・被 害・対応予測の潜在的有用性について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「ディジタル都市」が利用可能であ るが、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、 ディ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、昨年度、橋梁モデル自動 生成アルゴリズムの開発に着手した。モデル自動構築については 8.1 で報告しているとおりであり、断片 的なデータのみが利用できることを前提とした数値モデル生成の方法論を提示しこれをコード化した。 IES への導入は現在継続中である。以下、被害シナリオ解析を利用した総合的災害・被害・対応予測の有 用性の検討事例について報告する。

8.2.2 前処理 (データ変換)

IES を利用する際には、各種数値解析の入出力処理時に多様なデータ変換が必要となる。検討の前処理 に必要となる次のデータ変換に関するコードを準備した。

- 複数 VTK ファイル(Unstructured Grid format)の結合 対象領域が広い場合、対象領域の座標系(平面直角座標)が異なる。結果可視化に際しては全ファ イルを結合することが望ましく、座標系の統合が必要となる。
- ② 建物属性ファイル内の不確定パラメータ値の変更 確率解析や感度分析等を行う際には対象パラメータを定数でなく変数として扱う。解析コードの 再コンパイルを回避するためには、膨大な入力データから特定のパラメータのみを選択・変更する 処理が必要となる。
- パラメータ変更後の入力ファイル検証
   ②で変更した入力ファイルのチェック用。
- ④ バイナリ出力のテキスト化及び可視化
   各種入力データの確認および出力結果の細部確認のため、指定した領域や対象建物等に関する情報のテキストデータ化、可視化が必要となる。(変換対象例:表層地盤増幅解析時の入力波形、地表震度、地表加速度、建物応答解析の各種出力:応答変位、層間変形角、位置座標ほか)
- 8.2.3 潜在的有用性の検討
- 8.2.3.1 解析対象モデル概要

IES は表層地盤から建物までを対象とした多様な都市モデルを構築するが、計算負荷の少ない数値モデルを選択することで、一般的な計算環境の下であっても複数都市を包含するような広範囲領域を対象としたシナリオ解析が現実的な計算時間内で実行できる。IES を利用して地震被害推定等を行うためには災害シナリオとしての地震動と都市シナリオとなる地盤・建物モデルを組み合わせるが、入力地震動は不確定であり、また表層地盤や建物を精度よくモデル化するために必要な情報を入手することも通常難しい。

モデル化に際しては多くの仮定を導入する必要がある。この仮定は各種実験や経験則に基づくものであ るが、不確定な「幅」を有する。すなわち、構造特性や材料特性などの各属性データには取り得る「幅」 があり、その信頼性にはばらつきが付随している。各属性がある程度の「幅」を有することを考慮し、各 属性の違いの組合せをシナリオと見立て多数シナリオ解析を行うことで、災害時に起こり得る被害の度 合いを考察することができる。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。

本検討では、地震シナリオとして内閣府想定の南海トラフ地震1)のうち基本ケース・陸側ケース・東 側ケース(5km メッシュで提供)の3種を利用した。地震動はメッシュごとに同一の波形と仮定してお り、メッシュ内において波形の補間は行っていない。領域は阪神間5市(大阪・尼崎・西宮・芦屋・神戸) を含む範囲である。表層地盤30mのせん断波速度Vsは逆距離荷重法による建物位置におけるAVS302(平 均的なせん断波速度)の補間値を適用した。それ以深を工学基盤相当(Vs=700m/s)とした地盤をモデル とした。その他の仮定値は表1に示す。なお、土の非線形履歴モデルにはROモデルを適用したが、基準 ひずみを非常に大きく設定することで線形扱いとした。建物モデルは昨年度と同様にゼンリンAREAIIを 利用したが、層や建物種別(木造、RC造、S造など)の情報が欠落している建物が多く、これらを木造2 層・5層として仮定している。領域内で自動構築された建物モデルの数は126万棟超となったが、そのう ち2層以下が88.4%、3~5層が11.0%と、5層以下のモデルが全体の99.4%を占めている。

表層地盤 Vs 値は建物への入力となる地表応答に大きく影響するため、いくつかの地震・地盤シナリオ (組合せ計 22 ケース) について地盤応答解析を実行した。建物についても同様に、建物応答に大きく影 響するパラメータとして弾性固有周期を変えたいくつかのシナリオ(組合せ計 19 ケース) について構造 物応答解析を実行した。さらに、構造物損傷による道路への影響解析についても 12 ケースを実行し、こ れらの合計 53 シナリオの結果を検討に用いた。

以下の検討では、既述のとおり 5km メッシュ内で同一の地震動を入力としていること、表層地盤および建物のモデル化には多くの仮定を導入していることから、数値解析で得られる各応答値は実在の応答 を精度良く表すものではないことを、ここに述べておく。

	厚さ[m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	単重[kN/m <sup>3</sup> ]	基準ひずみ[-]	最大減衰定数[%]
表層	30	AVS30 補間	ポアソンと Vs	20	10	3.0
		(図)	から計算		(線形仮定用)	(線形仮定用)
基盤層	50	700	2100	20.5	10	0.5
					(線形仮定用)	(線形仮定用)

表 8.1. 表層地盤モデル用仮定パラメータ。



※表層ポアソン比=0.479と仮定図 8.4.表層 Vs(補間値)の空間分布。

8.2.3.2 表層地盤応答および建物応答の解析検討例と潜在的有用性

不確定性を有する入力パラメータを利用してより応答値を合理的に評価するには、そのパラメータの 合理的な確率分布を導入したモンテカルロシミュレーションの適用が望ましいが、実用性の観点からは 可能な限り少ない演算回数による評価、あるいは優先順位に基づく段階的評価を行えることが望ましい。 以下では簡便な検討例を示す。ある入力パラメータを変数 *i* としてそれぞれ n 個の変数 *xi* = (*xi1*, *xi2*,..., *xin*)を選定し、これらに対する応答を *yi* = (*yi1*, *yi2*,..., *yin*)と表す。

例として、入力パラメータとして地震動振幅、表層地盤 Vs の感度について段階的評価のための初期検討を行う。x1 を地震動強度の比率、すなわち振幅特性の単純な定数倍として xI = (1.0, 1.2, 1.5)、x2 を表層地盤 Vs の比率として  $x2 = (0.48, 1.00, 1.52)^{**}$ 、それぞれの応答を地表震度 yI、y2 とした場合の各評価 地点(各建物位置)における地表震度の差の絶対値:

## $\Gamma_a = |\max\left(\mathbf{y}_i\right) - \min\left(\mathbf{y}_i\right)|$

を図 8.5 に示す。ただし、max(yi)、min(yi)はそれぞれベクトル yiの要素の最大値、最小値を表す。

地震動振幅を単純に変化させた場合(図8.5(a))は、評価地点同士での震度変化の違いがほとんど見 られない。これは今回設定した地盤モデルが線形であることに起因するものと考えられ、非線形性を考慮 した場合は震度変化の空間分布により敏感な変化が現れると予想される。表層地盤Vsを変化させた場合 は評価地点ごとの震度変化の違いが明瞭となり、その分布は地震シナリオによっても大きく異なってい る(図8.5(b)-(d))。これは地表震度が入力地震動の周波数特性と表層地盤の周波数特性の組合せにより 大きく変化することを示すものである。このように、表層地盤Vsの違い(基準値からの変化)により地 表震度が大きく変化するエリアでは、表層地盤Vsをより精度良く推定できることが望ましいと判断でき る。あるいは、地盤改良等の対策を施すことによって震度を大幅に低減できる可能性があると判断でき る。少ない演算回数から地盤調査、あるいは地盤調査を優先的に行うエリア選定に活用できると考えられ る。

※注 J-SHIS で与えられた AVS30 値を対象建物位置で補間した値を当該位置における Vs の平均値とし、

基準値に対する倍率を変数のばらつきと見做し、点推定<sup>3)</sup>の理論を参考に標準偏差 $\sigma$ を考慮して平均 $\pm\sqrt{3\sigma}$ を3点推定と平均値の $\sigma$ =0.3とした場合の組合せ。



図8.5. 各地震シナリオ・各入力パラメータに対する地表震度が取り得る幅の算出例。

同様に、応答の非線形性を表す概略的な指標として、

$$\Gamma_b = sgn((y_{i2} - y_{i1}) \cdot (y_{i3} - y_{i2})) \cdot \{|y_{i2} - y_{i1}| + |y_{i3} - y_{i2}|\}$$

の空間分布と頻度分布を図 8.6 に示す。同指標は $\Gamma_a$ と同様 0 (濃紺) に近いエリアほど入力パラメータに 対する感度が低いことを、その絶対値が大きいほど非線形性が強いことを表す。特に $\Gamma_b < 0$ では評価点 *xi* (*i*=1,2)の増減に対して *yi* (*i*=1,2)の増減傾向が一致しない場合を示すものであり、これは選択した入力パ ラメータ (評価点 *xi*) の範囲内に対しては、入力パラメータの違いにより応答が複雑に変化することを示 している。

同図(a)では $\Gamma_b$  = +0.36付近で安定した値を示していることは、地震動振幅倍率評 *xl* =(1.0, 1.2, 1.5)に対 する震度 *yl* =(*yi1*, *yi2*, *yi3*)の比率が非常に安定していることを示唆している。これは上述のように地盤が 線形モデルであることに起因すると考えられ、逆に地盤が線形を保つ程度に小さい入力地震動レベルに 対しては、少ない演算回数のみから応答を精度よく推定できることを表している。

同図(b)~(d)より、地震動の違いにより震度の算定値が複雑に変化するが、特に陸側ケースの地震動に対して領域東側付近では $\Gamma_b$ が負値でかつ絶対値が大きい。この領域は低 $V_s$ の領域とも相関が高い。さらに陸側ケースは $\Gamma_b$ が負値の頻度が高い。これらの領域では特により精度の高い評価を行うためには多種の入力パラメータを利用した分析が必要となることが示唆される。



(d) 東側ケース y2

図 8.6. 地震シナリオ・各入力パラメータに対する地表震度の非線形性の評価例。

建物応答に対しては、代表計算結果例として各種地震シナリオに対する応答のうち最大層間変形角算 出結果を図 8.7 に示す。大半を占める木造建物モデルは、設計上の必要耐力を考慮したものであり、実被 害を非常に大きく見積もっていると考えられるが、地盤応答解析の場合と同様、パラメータ不確定性を加 味した数値解析の必要性が示唆される。

なお、検討では表層地盤 Vs および建物弾性固有周期をパラメータとした多数シナリオ解析も実行して いるが、建物弾性固有周期を基準値の 0.48 倍とした場合に応答が発散した。領域が広いため、地盤・建 物応答解析においては 1 領域内に約 5000 棟の建物を含むような領域分割を行っている。この領域を跨ぐ 建物に対しては、1 つの建物を分割したモデルを生成していたことが、一つの要因と考えられる。この場 合、1 建物の面積の過小見積もり、すなわち換算床質量の過小見積りをしていることと同義であるため、 結果的に実際よりも弾性固有周期を小さく評価したモデルが多数含まれていたと考えられる。現在は、モ デル生成方法の修正が完了している。

解析対象構造物の増大に伴い、限られた数の建物のみの検証だけではモデル検証が不十分となる場合

がある。このため、本来有するべき入出力関係が正しく設定されているかを全建物に対して統計的に評価 (例えば、建物高さと固有周期の関係式に対する誤差の評価)し、可視化するなどの配慮が不可欠と考え られる。



図 8.7. 地震シナリオによる建物最大層間変形角の可視化例。

なお、数値解析の精度を向上させるには対象領域における表層地盤特性や3次元的な基盤形状を事前 に把握することが欠かせない。地盤構造を調べる手段としてはボーリング調査が一般的ではあるが、金銭 的・時間的コストの面からこの調査方法のみで地盤構造を面的に把握することは困難である。他方、地盤 を掘削することなく地盤の速度構造を推定する方法としては地表面における微動探査や重力探査を利用 する多数の方法が開発されている<sup>(例えば 4-7)</sup>。さらに近年では不整形性の強い局所的な盆地構造等に対して 工学基盤形状を推定する手法の開発も行われている<sup>(例えば 8-10)</sup>。本検討では250mメッシュの AVS30 値に基 づく地盤モデルを適用したが、実地盤特性とは乖離がある。実際には既存ボーリング調査データこうした 観測記録を利用した高密度な地盤構造データの蓄積が、数値解析から得られる結果の信頼性を担保する ために必要である。地盤モデルの精度を向上することで、上述を例とした手順から合理的に被害推定や災 害対策を行うことが初めて現実的なものとなる。建物特性も同様、今後はセンサーの活用による構造特性 データの蓄積が急務であろう。常時微動や地震動記録を利用した建物特性の同定手法は多岐にわたる<sup>例え</sup> <sup>(ば 11-14)</sup>。今後は構造パラメータ同定から得られた情報を数値モデル更新に活用することで、不足情報を補 いモデル精度を高めることが考えられる。

8.2.3.3 社会科学との連成の解析検討例と潜在的有用性

本研究では、特に建築建物を対象とした構造物応答解析と交通流解析に絞って、空間分解能に着目した 粗粒度化の検討を行うこととした。構造物被害が交通流に及ぼす影響を評価することがシミュレーショ ン統合の目的である。構造物被害の解析結果を交通流の入力とすることが必要となるが、構造物被害の粗 度は建物単位となり連続的に敷設される道路の粗度を規定するためには工夫が必要である。交通流の数 値解析では、通常道路リンク(道路の始点と終点)を単位とするため、道路リンクが粗度となる。一般に 1つの道路リンクの近傍には複数の建物が存在することから、相対的な粒度は建物の方が密となる。

一般に、粒度の高い解析出力(空間分解能が密なアウトプット情報)を粒度の低い解析入力(空間分解 能が粗いインプット情報)に変換するという粗粒度化のための数理的処理は、空間平均の計算と代表値の 選択である。シミュレーションの結果利用という目的に応じて適切な数理的処理を選択する必要がある。 粗粒度化のための適切な数理的処理について検討するために、*i*番目の建物損傷*x<sup>i</sup>*と、道路の*i*番目の リンクの交通流の減少 $f^i$ を導入する。交通流解析と建物応答解析の粒度は $x^i$ と $f^i$ の総数*M*と*N*で表す。 つまり、粒度が同じ場合、交通流の総損傷は $F = \sum f^i(x^i)$ で表される。ただし、*M*が*N*よりも大きい場合、 *i*番目のリンクに隣接する建物のセットをリンクに関連付ける粗粒度化が必要となる。隣接する建物の損 傷変数のセットを $x^i$ とし、 $g^i(x^i)$ で*i*番目のリンクに与える影響を示すと、交通流低下は次式で近似的に 算出できる。

## $F \approx \sum f^i(g^i(\mathbf{x}^i)).$

ベクトル変数をスカラー値に入力する粗粒度化の関数 g<sup>i</sup>(x<sup>i</sup>)を定義するには、2 種の数理的処理が考えら れる。すなわち、g<sup>i</sup>をx<sup>i</sup>の平均値あるいは最大値を計算する処理である。 x<sup>i</sup>の各要素は建物の損傷であ るため、i 番目の道路リンクでの交通流を近傍の建物の平均的な損傷から評価することは数理的処理とし ては自然であるが、平均化に適用する粒子選択や加算・平均化の計算が別途必要になる。また、実際の交 通流の減少はリンク内の最も遅い部分によって決定することから、x<sup>i</sup>の最大値をg<sup>i</sup>として選択する方がよ り合理的と考えられるが、粗粒度化の方法論として最大値選択を採用すると、建物の損傷が交通流に与え る影響を過小評価することはなくなる。

これらの数理的処理を粗粒度化に適用した場合の違いを明らかにするために数値実験を行った。昨年 度の検討と同様に、前節と同じ対象領域において前節に示した地震シナリオ、地盤モデル、建物モデルを 適用した地震応答解析結果を利用する。領域内の自動構築された建物数 M=1,266,706、道路リンク数 N= 495,595 である(図 8.8)。道路閉塞幅 Wdも昨年度同様、建物高 h と最大層間変形角 $\theta_{max}$ から単純な関 数  $W_d = h(\theta_{max}, h)$ を仮定し計算している(図 8.9)。



🗵 8.8. Spatial distribution of buildings width road (left) and road width (right) in target area.


(1) Building before earthquake (2) Calculate W (3) Calculate d (3) Calculate d (3) Calculate d

各道路リンクに対して**x**<sup>i</sup>の平均値または最大値が 0.5 を超える場合(道路閉塞による残存道路幅が元 の道路幅の半分より小さくなる場合)をリンクが閉塞したと判断する。表 8.2 に、各種シナリオに対する 粗粒度化処理 g<sup>i</sup>(x<sup>i</sup>)の違いによる閉塞道路リンク数を示す。図 8.10 は陸側ケースを例とした全リンク残 存道路幅の空間分布である。表 8.2 に示すように、粗粒度化処理の違いによりリンク評価は大幅に異な り、最大値を適用した場合は、平均値を適用した場合に対し、定性的には 10 倍程度以上の閉塞道路リン ク数を見積もることとなる。

シナリオ例	平均值適用時	最大值適用時
基本ケース	3,489	45,022
東側ケース	2,290	32,223
陸側ケース	1,747	26,889
陸側ケース・地震動振幅1.5倍	3,252	47,023
陸側ケース・表層地盤Vs値1.5倍	3,440	46,805

表 8.2. Number of calculated unavailable links.



⊠8.10. Distribution of remaining road width for Rikugawa case and its close-up.

次に、最大値適用時の結果を利用して、交通ネットワークに対する建物損傷の影響を評価する。まず、 ネットワーク G に次の 2 つの指標 E<sup>15</sup>および I を導入する。

$$E(\boldsymbol{G}) = \frac{1}{|\boldsymbol{W}|} \sum_{\boldsymbol{W} \in \boldsymbol{W}} \frac{1}{f_{\boldsymbol{W}}}, \qquad I(\boldsymbol{X}) = \frac{E(\boldsymbol{G}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{E})) - E(\boldsymbol{G}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{E} \setminus \boldsymbol{X}))}{E(\boldsymbol{G}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{E}))},$$

ここに、V,Wおよびwはそれぞれノード全体の集合、起終点組合せの集合およびWの要素を表す。fwは、 wの最短経路の移動時間、Eはリンク集合、XはEの部分集合である。また、記号|\*|は\*の要素数を表す。 ネットワーク効率の相対的な低下はFを閉塞リンク集合として1(F)によって評価される。図8.11 左図は、 閉塞リンク数|F|ネットワークの非効率性1(F)との関係を表す。同図より、定性的には1(F)は|F|ととも に増加しており、この傾向は直線的である。ただし、1(F)は|F|に比例しておらず、これは閉塞リンクの 絶対数だけでなく、その空間分布も交通流低下に影響することを示唆している。リンクの各集合の重要度 は、Iにより評価できる。図8.11 右図は、陸側ケースを例に閉塞リンクの再開順序の違いによるネット ワーク効率性の変化の違いを表す。青線は再開順序をランダムとする場合、赤線は再開順序をリンクの重 要度の降順として行う場合の結果であり、同図から、後者の方が前者に比べ20%早くネットワークが回 復することがわかる。これらの結果は、地震災害後の復興計画においては閉塞リンクの絶対数のみならず 空間分布までを評価することの重要性を示唆するものであり、IES の利用により合理的な復興計画を実現 できることをも示唆するものである。



⊠8. 11. Relation between the number of links and network efficiency decrease (left), and difference in reopening effect for Rikugawa-case(right).

8.2.4 おわりに

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都市モデルの拡張を目指した。広域の多数被害シナリオ解析に基づく災害・被害・対応予測を行い、IESの潜在的有用性について示すとともに、モデル精度を向上させるための方策についても提示した。

#### 参考文献

- [1] G空間情報センター, https://www.geospatial.jp/gp\_front/
- [2] Wakamatsu, K. and Matsuoka, M., Nationwide 7.5-Arc-Second Japan Engineering Geomorphologic Classification Map and Vs30 Zoning, Journal of Disaster Research, Vol.8 No.5, pp.904-911, 2013.
- [3] Rosenblueth, E., Point estimate for probability, Appl. Math. Model., Vol.5, pp.329-335, 1981.

- [4] Capon, J., High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proceedings of the IEEE, Vol.57, No.8, pp.1408-1418, 1969.
- [5] Aki, K., Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol.35, No.3, pp.415-456, 1957.
- [6] Shiraishi, H., Matsuoka, T., and Asanuma, H., Direct estimation of the Rayleigh wave phase velocity in microtremors, Geophysical research letters, Vol.33, No.18, 2006.
- [7] Cho, I., Tada, T., and Shinozaki, Y., Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, Vol.111, B9, 2006.
- [9] Zhang, X., Morikawa, H., Discussion on Using Only One Linear Array to Estimate the Phase Velocity of Rayleigh Wave Based on Microtremor Survey. British Journal of Applied Science & Technology, Vol.6, No. 4, pp.350, 2015.
- [9] Dodt, M. B., Suzuki, Y., Iiyama, K., and Morikawa, H., A study on the modal properties of sediment on base rock, Seismological Society of Japan Fall Meeting on Sep., pp.16-18, 2019.
- [10] Suzuki, Y., Iiyama, K., Morikawa, H., Sakai, K., and Araki, G., A study to estimate shape of engineering basement on a basis of modal properties of sedimentary basin, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, No.C001704, 2019. (Submitted)
- [11] Hjelmstad, K. D., Banan, MO. R., Banan, MA. R., On building finite element models of structures from modal response, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.24, pp.53-67, 1995.
- [12] Fujita, K. and Takewaki, I., Stiffness Identification of High-Rise Buildings Based on Statistical Model-Updating Approach, frontiers in Built Environment, 2018.
- [13] Saito, T., System identification of a high-rise building applying multi-input-multi-output ARX model of modal analysis, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 508, pp.47-54, 1998.
- [14] Ping Yu Chen, P. Y., Iiyama, K., Morikawa, H., Sakai, K., and Kitamura, H., Modal Identification of Elevated Bridge through Microtremor and Impact Tests using Frequency Domain Decomposition, 土木学会年次学術 講演, 2019.
- [15] Latora and Marchiori, Efficient Behavior of Small-World Networks, Physical Review Letters, Vol.87, No. 19, 2001.

#### ⑨統合的予測システムの実用化

昨年度同様,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。昨年度以来,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を抽出・分析し、その分析に基づき、ボトルネックの解決案を考案すること を進めた(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が、実用上のボトルネックの抽出・ 分析とその解決を重視している)。本年度、防災コンサルティング企業の技術者が統合的予測システムに 十分、習熟しため、新たなボトルネックは見つからなかった。その一方で、対象領域が近畿圏になったた め、統合的予測システムの不具合が見つかり、プログラムの修正を行った。これは、都市情報を使う各種 解析手法の解析モデルを自動構築するプログラムの不具合であり、適切な修正によって、このプログラム の適用範囲は拡大した。より実用に適したシステムに改良されたと考えられる。結論として、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継続し、実務として統合的予測システムが利用可能なレベルに 達していることを示した。

2)に関しては、一昨年度、実行した相模トラフ地震の予測と熊本地震の再現に関するシミュレーション の分析を継続して行った。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、広域地震動シミ ュレーション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、高度な広域地震動シミュレーションの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 ることは、一昨年度と昨年度の取組で確認されている。本年度は、この確認を継続して行った。数値解析 コンポーネントのオペレーションが正しく実行できる、一定の素養を持つ高級技術者が防災コンサルテ ィング企業にいることがわかり、成果の早期創出に向けて、複数の防災コンサルティング企業と調整を し、高性能計算を利用する高度な広域地震動シミュレーションの利用を加速する準備ができた。

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も協議を継続した。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。 研究機関の有する大型計算サーバに対しても、その規模・性能に見合った問題設定をすれば、計算時間が 見積もれるというスケーラビリティの高さを活かし、統合的予測システムの実行が可能であることが認 識されつつある。

#### 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と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に開催する、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(2019年5月10日、7月19日、9月13日、11月15日、 2020月24日、3月13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。なお、本年度は、7月19日には1泊2日で研究集会を開催し、京の利用に関して総括を行う とともに、成果創出に向けての具体案を議論した。

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2019年9月27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。京の運用が終了したことを受け、本年度の計画と前期の成果の他、研究期間全体での成果に対する意見を受けた。主な指摘事項は、各種数値解析コンポーネントの性能の定量化、社会科学シミュレーションの更なる利用拡大、計算機科学の観点からの成果の定量化、SC19での研究成果発表の内容、である。第2回の諮問委員会は2020年3月18日に開催された。研究期間全体の研究成果を詳しく報告し、評価を受けた。計算科学の観点からは5年連続でSCにおいて表彰された点は、高く評価された。「富岳」の成果創出プロジェクトに本課題のサブグループAの課題が採択されたことも高く評価された。引き続き、地震・津波の防災分野で、理学・工学・社会科学を結び付ける研究開発を継続し、その成果を実用

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。本プロジェクトの和文・英文ホームページと、一昨年度から開 始した SNS グループを介した公表である。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、昨年と同様、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 令和元年度成果発表会の開催(開催日:令和2年3月18日)

当研究についての令和元年度の研究成果発表会を開催した。本研究課題について、代表機関および各サ ブグループのリーダーから5年間に亘る研究成果について、それぞれ発表された。パネルディスカッショ ンではパネリストから、当課題における研究成果、当分野における「富岳」に向けた期待、当課題が取り 組んだ統合的予測、等についてディスカッションが交わされた。また、各分担機関の研究者から、当課題 で取り組んできたテーマに対する今後の抱負が発表された。

## 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	准教授
	巨大地震津波災害予測研究センター	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	東京大学地震研究所	准教授
大規模解析モデル構築手法の	巨大地震津波災害予測研究センター	市村 強
開発		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	東京大学生産技術研究所	准教授
ュレーションの利活用方法と		関本 義秀
実装の検討		
地震・津波の災害シナリオ多	海洋研究開発機構	グループリーダー
様性の数値解析コンポーネン	地震津波海域観測研究開発センター	堀 高峰
トの高度化(サブ課題A)		
地震・津波の被害に関する数	九州大学大学院	准教授
値解析コンポーネントの高度	工学研究院社会基盤部門	浅井 光輝
化( <b>サブ課題A</b> )		
地震・津波災害時の交通に関	神戸大学大学院工学研究科	教授
する数値解析コンポーネント		井料 隆雅
の開発( <b>サブ課題 B</b> )		
地震・津波災害時の経済活動	京都大学防災研究所	准教授
に関する数値解析コンポーネ	巨大災害研究センター	横松 宗太
ントの開発( <b>サブ課題 B</b> )		
地震災害に対する地盤~構造	東京工業大学	助教
物応答シミュレーションの高	環境・社会理工学院	飯山 かほり
度化とその利活用方法の検討	土木・環境工学系	
(サブ課題A)		
統合的予測システムの実用化	東京大学地震研究所	センター長・教授
	巨大地震津波災害予測研究センター	堀 宗朗
プロジェクトの総合的推進	東京大学地震研究所	センター長・教授
	巨大地震津波災害予測研究センター	堀 宗朗

### 様式第21

## 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
Development of high-performance low order unstructured implicit finite-element solvers for solid earth science problems (口頭)	Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Takuma Yamaguchi	日本地球惑星科学連合	2019 年 5 月	国内
GPUによる三次元地盤増幅解析を用 いた三次元地盤構造推定手法の開発 (ロ頭)	山口拓真、市村強、 藤田航平、堀宗朗、 ラリス ウィジャラト ネ	第 24 回計算工学講 演会	2019 年 5 月	国内
有限要素法による大規模3次元地盤 液状化解析手法(口頭)	日下部亮太、藤田航 平、市村強、堀宗 朗、Lalith Wijerathne	第 24 回計算工学講 演会	2019 年 5 月	国内
高性能計算を活用したデータ同化に よる火山における地殻変動解析(ロ 頭)	村上颯太,山口拓 真,市村強,藤田航 平,Maddegedara Lalith,堀宗朗	第 65 回理論応用力 学講演会・第 22 回 土木学会応用力学シ ンポジウム	2019 年 6 月	国内
GPU クラスタ上での地盤震動解析を 用いた最適化による三次元地盤構造 推定手法の開発(ロ頭発表)	山口 拓真, 市村強, 藤田航平, 堀宗朗, Wijerathne Lalith	<ul> <li>第65回理論応用力</li> <li>学講演会・第22回</li> <li>土木学会応用力学シ</li> <li>ンポジウム</li> </ul>	2019 年 6 月	国内

時間並列積分による動的有限要素解 析の高速化と地盤地震動解析への適 用(ポスター)	藤田 航平, 市村 強	第65回理論応用力 学講演会・第22回 土木学会応用力学シ ンポジウム	2019 年 6月	国内
Using artificial intelligence and transprecision computing for accelerating earthquake simulation on Summit(口頭)	Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi	4th OpenPOWER Academia Discussion Group Workshop	2019 年 11 月	国外
大規模3次元地盤・構造物モデルに 対する有限要素法による地震時液状 化解析(ロ頭)	日下部亮太・市村 強・藤田航平・堀宗 朗・Lalith Wijerathne	第 39 回地震工学研 究発表会	2019 年 10 月	国内
Development of Micro Population Data for Each Building: Case Study in Tokyo and Bangkok (口頭)	Akiyama, Y., Miyazaki, H. and Sirikanjanaanan, S.	Proceedings of First International Conference on Smart Technology and Urban Development (STUD 2019)	2019 年 12 月	国外
Estimation of Transactional Network Data Between Branch Offices using Transactional Big Data Throughout Japan (口頭)	Ogawa, Y., Akiyama, Y., Sekimoto, Y., and Shibasaki, R.	2019 IEEE International Conference on Big Data	2019 年 12 月	国外
Firm-level behavior control after large-scale urban flooding using multi-agent deep reinforcement learning (口頭)	Yang, S., Ogawa, Y., Ikeuchi, K., Akiyama, Y., and Shibasaki, R.	2019 ACM SIGSPATIAL	2019 年 12 月	国外
Development of Building Micro Geodata for Earthquake Damage Estimation (口頭)	Akiyama, Y. and Ogawa, Y.	IGARSS 2019	2019 年 8 月	国外
Earthquake Damage Estimation by Soarse Modeing Using Geospatial Big Data (口頭)	Ogawa, Y., Akiyama, Y., Sekimoto, Y. and Shibasaki, R.	IGRASS 2019	2019 年 8月	国外

Development of People Flow Data with Individual Demographics based on Mobile Phone GPS Big Data (口頭)	Ogawa, Y., Akiyama, Y., Sekimoto, Y. and Shibasaki, R.	The 22nd AGILE Conference on Geo- information Science	2019 年 6 月	国外
Identification of the Homes, Offices, and Schools from Long- Interval Mobile Phone Big Data Using Mobility Pattern Clustering (口頭)	Kobayashi, R., Miyazawa, S., Akiyama, Y. and Shibasaki, R.	The 22nd AGILE Conference on Geo- information Science	2019 年 6月	国外
<ul><li>不動産ポイントデータと機械学習を</li><li>用いた建物の構造・築年代推定モデ</li><li>ル (口頭)</li></ul>	小川 芳樹, 沖 拓弥, 関本 義秀, 柴崎 亮介	地理情報システム学 会学術研究発表大会	2019 年 10 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
GPU Implementation of a Sophisticated Implicit Low-Order Finite Element Solver with FP21- 32-64 Computation Using OpenACC	Takuma Yamaguchi, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Akira Naruse, Maddegedara Lalith, Muneo Hori	Proceedings of Sixth Workshop on Accelerator Programming Using Directives (WACCPD)	2019 年 11 月	国外
Development of Element-by- Element Kernel Algorithms in Unstructured Implicit Low-Order Finite-Element Earthquake Simulation for Many-Core Wide- SIMD CPUs	Kohei Fujita, Masashi Horikoshi, Tsuyoshi Ichimura, Larry Meadows, Kengo Nakajima, Muneo Hori, Lalith Maddegedara	Computational Science - ICCS 2019, Lecture Notes in Computer Science	2019 年 6 月	国外
A Fast 3D Finite-element Solver for Large-scale Seismic Soil Liquefaction Analysis	Ryota Kusakabe, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Wijerathne	Computational Science - ICCS 2019, Lecture Notes in Computer Science	2019 年 6 月	国外

A finite element analysis method for simulating seismic soil liquefaction based on a large-scale 3D soil structure model	Ryota Kusakabe, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Lalith Wijerathne	Soil Dynamics and Earthquake Engineering	2019 年 8月	国外
416-PFLOPS Fast Scalable Implicit Solver on Low-Ordered Unstructured Finite Elements Accelerated by 1.10-ExaFLOPS Kernel with Reformulated AI-Like Algorithm: For Equation-Based Earthquake Modeling	Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Akira Naruse, Jack C. Wells, Christopher J. Zimmer, Tjerk P. Straatsma, Takane Hori, Simone Puel, Thorsten W. Becker, Muneo Hori, Naonori Ueda	Research Poster for SC19: The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis	2019 年 11 月	国外
A Detailed Method to Estimate Inter-regional Capital Flows Using Inter-firm Transaction and Person Flow Big Data, Asia- Pacific Journal of Regional Science	Akiyama, Y., Yamamoto, Y., Shibasaki, R. and Kaneda, H.	Asia-Pacific Journal of Regional Science, 1-21, 2019.	2019 年 10 月	国外
Estimation of the economic impact of urban flood through the use of big data on inter-branch office transactions	Yang, S., Ogawa, Y., Ikeuchi, K., Akiyama, Y., Shibasaki.R	自然災害科学, 38, 185-199, 2019	2019 年 9月	国内
Estimation of Supply Chain Network Disruption of Companies Across the Country Affected by the Nankai Trough Earthquake Tsunami in Kochi City	Ogawa, Y., Akiyama, Y., Yokomatsu, M., Sekimoto, Y. and Shibasaki, R.	J. Disaster Res., 14(3), 508-520, 2019.	2019 年 3 月	国外
企業間取引ビックデータを用いた 災害時の経済インパクト推計	小川芳樹	Estrela, (307), 11- 14.	2019 年 10 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
An adjoint-based simultaneous estimation method of the upper mantle viscosity and afterslip using finite element modeling (口頭)	Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Takane Hori, Kazuro Hirahara, Chihiro Hashimoto, and Muneo Hori	AOGS (Asia Oceania Geosciences Society) 16th Annual Meeting	2019 年 8 月	国外
弾性不均質構造・粘弾性の影響を考慮 した地震サイクルの数値シミュレーシ ョン(口頭)	縣亮一郎,堀高峰, 藤田航平,市村強	第 24 回 計算工学講演会	2019 年 5 月	国内
統合的な速度構造モデルに基づいた断 層すべり推定のためのグリーン関数ラ イブラリ生成(ポスター)	縣亮一郎,市村強, 藤田航平,山口拓真, 飯沼卓史, 堀高峰	日本地球惑星科学 連合 2019 年大会	2019 年 5 月	国内
Numerical Approach in the Study of Tsunami-like Waves and Comparison with Experimental Data (口頭)	Daisuke Nishiura, Davide Wüthrich, Mikito Furuichi, Shun Nomura, Michael Pfister, Giovanni De Cesare	The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE2019)	2019 年 6 月	国外
SPH-DEM Simulation on Stability of Composite Breakwater against Long- lasting Tsunami (口頭)	Tetsuya Iwamoto, Hitoshi Nakase, Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi, Junji Miyamoto, Kazuhiro Tsurugasaki, Junji Kiyono	The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE2019)	2019 年 6 月	国外

<ul> <li>大規模 SPH-DEM 連成シミュレーション手法の開発と地盤工学問題への応用</li> </ul>	西浦泰介	混相流シンポジウ ム 2019	2019年 8月	国内
津波防災に向けた大規模 SPH-DEM 連 成シミュレーションによる混相流解析 (ロ頭)	西浦泰介,古市幹 人,岩本哲也	第 33 回数値流体力 学シンポジウム	2019 年 11 月	国内
2.4 billion particles DEM simulation of accretionary prism formation using an iterative dynamic load balancer (口頭)	Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura	DEM8	2019 年 7月	国外
The real-scale numerical sandbox experiments for understanding stress state in accretionary prisms (口頭)	古市幹人,Arthur Bauville,西浦泰介, 堀高峰, 桑野修	日本地球惑星連合 大会 2019 年大会	2019年 5月	国内
実スケール数値砂箱実験による付加体 内部応力構造の解明(ロ頭)	古市幹人,西浦泰介, 桑野修,Arthur Bauville,堀高峰, 阪口秀	日本地質学会	2019 年 9月	国内
Experimental and Numerical Study on Wave-Impact on Buildings (口 頭)	Davide Wüthrich, Shun Nomura, Daisuke Nishiura, Mikito Furuichi, Michael Pfister, Giovanni De Cesare	38th IAHR World Congress	2019 年 9 月	国外
Large-scale Discrete Element Simulations of Soil Drilling Process (口頭)	Jian Chen, Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura	10th International Conference on Computational Methods	2019 年 7 月	国外
Large-scale discrete element simulations of a drilling process for deep sea (口頭)	Jian Chen, Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura	<ul><li>第13回深海底表層</li><li>地盤の研究ワーク</li><li>ショップ</li></ul>	2019 年 10 月	国内
The Smoothed Particle Hydrodynamics on modern architectures (口頭)	Natsuki Hosono, Mikito Furuichi	日本地球惑星連合 大会 2019 年大会	2019年 5月	国内
The Performance Prediction and Improvement of SPH with the Interaction-List-Sharing Method on PEZY-SCs	Natsuki Hosono, Mikito Furuichi	ICCS19	2019 年 6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
砂箱実験における断層発達過程のリア ルスケール粉体シミュレーション	西浦泰介,古市幹 人,阪口秀	粉体工学会誌 56 巻, 203-210, (2019)	2019 年 4 月	国内
Numerical Approach in the Study of Tsunami-like Waves and Comparison with Experimental Data	Daisuke Nishiura, Davide Wüthrich, Mikito Furuichi, Shun Nomura, Michael Pfister, Giovanni De Cesare	Proceedings of the 29th International Ocean and Polar Engine, volume 3, 3166-3173, (2019)	2019 年 6 月	国外
SPH-DEM Simulation on Stability of Composite Breakwater against Long- lasting Tsunami	Tetsuya Iwamoto, Hitoshi Nakase, Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi, Junji Miyamoto, Kazuhiro Tsurugasaki, Junji Kiyono	Proceedings of the 29th International Ocean and Polar Engine, volume 3, 3246-3252, (2019)	2019 年 6 月	国外
Application of SPH-DEM Coupled Method to Failure Simulation of a Caisson Type Composite Breakwater During a Tsunami	Tetsuya Iwamoto, Hitoshi Nakase, Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi, Junji Miyamoto, Kazuhiro Tsurugasaki, Junji Kiyono	Soil Dunamics and Earthquake Engineering, volume 127, 105806, (2019)	2019 年 8 月	国外

Convergence study and optimal weight functions of an explicit particle method for the incompressible Navier-Stokes equations	Yusuke Imoto, Satori Tsuzuki, Daisuke Nishiura	Computational Particle Mechanics, volume 6, 671-694, (2019)	2019 年 5 月	国外
Experimental and Numerical Study on Wave-Impact on Buildings	Davide Wüthrich, Daisuke Nishiura, Shun Nomura, Mikito Furuichi, Michael Pfister, Giovanni De Cesare	E-proceedings of the 38th IAHR World Congress, 6047-6056, (2019)	2019 年 10 月	国外
The Performance Prediction and Improvement of SPH with the Interaction-List-Sharing Method on PEZY-SCs	Natsuki Hosono, Mikito Furuichi	Computational Science – ICCS 2019	2019 年 6 月	国外
Implementation of SPH and DEM for a PEZY-SC Heterogeneous Many- Core System	Natsuki Hosono, Mikito Furuichi	Computational and Experimental Simulations in Engineering	2019 年 11 月	国外

(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
Fluid-solid multiphase flow simulator using a SPH-DEM coupled method in consideration of liquid bridge force related to water content (口頭発表)	Kunpei Tsuji, Mitsuteru Asai	VI International Conference on Particle-based Method - Fundamentals and Applications PARTICLES 2019	2019 年 10 月	国外
Dynamic Load Balanced Expanding Slice Grid Method for Large-scaled High Fidelity Tsunami Run-up Simulation suing an Explicit SPH (口頭発表)	Mitsuteru Asai, Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura	VI International Conference on Particle-based Method - Fundamentals and Applications PARTICLES 2019	2019 年 10 月	国外
Simulation of Free-surface Flow Interacting with Multiple Rigid Bodies using Coupled ISPH-DEM incorporated with Energy Tracking Impulse Contct (口頭発表)	Li Yi, Mitsuteru Asai, Bodhinanda Chandra	VI International Conference on Particle-based Method - Fundamentals and Applications PARTICLES 2019	2019 年 10 月	国外
Verification and Validation in Highly Viscous Fluid Simulation using a Fully Implicit SPH Method(口頭発 表)	Daniel Morikawa, Mitsuteru Asai, Masaharu Isshiki	VI International Conference on Particle-based Method - Fundamentals and Applications PARTICLES 2019	2019 年 10 月	国外

Fluid-Solid Multiphase Disaster Simulator using SPH-DEM coupled Method(口頭発表)	Kunpei Tsuji, Mitsuteru Asai	7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics	2019 年 12 月	国外
Application of ASI-Gauss code for	Kohei Hara,	7th Asian Pacific		
wooden houses collapse analysis of	Mitsuteru Asai,	Congress on	2019 年	国内
entire city by earthquake and	Daigoro Isobe,	Computational	12 月	国21
tsunami (口頭発表)	Seizo Tanaka	Mechanics		

## 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
Energy-tracking impulse method for particle-discretized rigid-body simulations with frictional contact	Li Yi, Mitsuteru Asai, Bodhinanda Chandra, Masaharu Isshiki	Journal of Computational Particle Mechanics	受理	国外
ASI-Gauss 法による骨組み崩壊解析に 基づく阿蘇大橋崩壊メカニズムの推定	浅井光輝,原倖 平,磯部大吾郎, 田中聖三	構造工学論文集	2020 年 3 月	国内
Improvements of highly viscous fuid simulation using a fully implicit SPH method	Daniel Morikawa, Mitsuteru Asai, Nur' Ain Idris, Yusuke Imoto, Masaharu Isshiki	Journal of Computational Particle Mechanics	2019 年 3 月	国外
洗掘解析に向けた鉛直噴流実験による ISPH-DEM 連成手法の妥当性確認	藤井 孟大, 浅井 光 輝, 牛島 省, 鳥生 大祐	土木学会論文集 A2(応用力学)特集 号, Vol.74, No.2, I_249-I_258	<b>2020</b> 年 1月	国内
含水に伴う見かけの粘着力を考慮した SPH-DEM 連成解析による地盤陥没現 象の再現	<ul> <li>辻 勲平, 浅井 光</li> <li>輝, 小西 康彦, 大</li> <li>峯 秀一</li> </ul>	土木学会論文集 A2(応用力学)特集 号, Vol.74, No.2, p.I_203- I_213	2020 年 1 月	国内
安定化 ISPH 法の理論的解釈 II -誤 差評価に基づく安定化係数の最適化-	井元 佑介, 浅井 光 輝, 藤井 孟大	土木学会論文集 A2(応用力学)特集 号, Vol.74, No.2, I_187_194	2020 年 1 月	国内

(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
Improving Post Disaster Humanitarian Logistics with Theoretical and Empirical Approaches (ポスター発表)	Riki Kawase Junji Urata Takamasa Iryo	The 24th HKSTS, Hong Kong	2019 年 12 月	国外
Time-dependent link travel time approximation for large-scale dynamic traffic simulations (口頭)	Genaro Peque Jr. Hiro Harada Takamasa Iryo	ICCS 2019, Faro, Algarve, Portuga	2019 年 6月	国外
災害復旧期における日常活動需要計算 のためのアクティビティシミュレータ の構築 (ロ頭)	佐々木泰 浦田淳司 井料隆雅	第 60 回土木計画学 研究発表会,富山 大学	2019 年 11 月	国内
動的利用者均衡配分による平成 30 年 7月豪雨後の広島都市圏における交通 混雑評価 (口頭)	松原大雅 浦田淳司 井料隆雅	第 60 回土木計画学 研究発表会,富山 大学	2019 年 11 月	国内

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

発表した成果	発表者氏名	発表した場所	発表した時期	国内·
(発表題目、口頭・ポスター発表の別)		(学会等名)		外の別
災害後の多部門経済市場の動的過程の数	横松宗太, 小	令和元年度京都大	2020年	国内
值解析 (口頭発表)	川芳樹,秋山	学防災研究所研究	2月	
	祐樹, 関本義	発表講演会		
	秀			

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
都市地震被害推定のための異分野間 数値解析技術の統合に関する基礎検 討	飯山かほり	土木学会全国大会 (香川大学)	2019 年 9 月	国内
A study on the modal properties of sediment on base rock	飯山かほり	日本地震学会秋季大 会(京都大学)	2019 年 9 月	国内
Fundamental study on numerical analysis integration for urban earthquake simulation focusing on difference in spatial resolution	Kahori Iiyama	COMPSAFE2020	2020 年 3月 (予定)	国内

\_\_\_\_\_ 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

無し。

# 「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			制定
(2016.5.27)			
2.0	-	_	中間評価指摘事項を受け、版数変更して対応。
(2017.12.25)	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))
	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))
	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))
	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))
	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))
	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))
	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	中間評価の結果への対応を追記したことによる。
		$\sim 21$	
3.0	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。
(2018.5.28)	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。

## 目次

1. 実施概要	.別称 2-1
(1)目的・意義	.別添 2-1
(2)研究開発内容	.別添 2-1
(3)目標・期待される成果	.別添 2-2
(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	がけ
	別添 2-3
(5)年次計画	.別添 2-4
(6)実施体制	.別添2-6
(7)必要計算資源	.別添 2-8
2. 研究開発内容詳細	.別添 2-9
2-1. サブ課題A. 地震・津波の災害被害予測の実用化研究	.別添 2-9
(1)目的・意義	.別添 2-9
(2)実施内容	. 別添 2-9
(3)目標・期待される成果	別添 2-10
(4)「京」でできていること、ポスト「京」でなければできないこと	別添 2-11
(5)実施体制	別添 2-11
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	別添 2-11
(1)目的・意義	別添 2-11
(2)実施内容	別添 2-12
(3)目標・期待される成果	別添 2-13
(4)「京」でできていること、ポスト「京」でなければできないこと	別添 2-14
(5)実施体制	別添 2-14
2-3. サブ課題 A とサブ課題 B の連関	別添 2-15
3. 採択時の留意事項への対応状況	別添 2-17
4. 中間評価における指摘事項への対応状況	別添 2-18

#### 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 ユレーション、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枢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。

年次計画
$\sim$
വ
~ /

	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)
課題全体	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)

別添 2-4

## 別添 2-4

(目標) 〇南海トッノ港 減の社会教学や ミュレーション (大阪市裾) 港()	(実施内容) ○避難:MASの 実施(大阪市) ○交通:シミュ マーション実活 (大阪市) の溶済:市場均衡 決読におけるイソ フラの価値評価 (南海トラフ,大 阪市)
(回禱) (面稿) ●瀬藩・公園 予御(大図)(大阪道: (大阪福: 一一、「 一」	<ul> <li>(実施内容)</li> <li>(実施内容)</li> <li>(一座離:MASの)</li> <li>(大阪市)</li> <li>(大阪市)</li> <li>(大阪市)</li> <li>(大阪市)</li> <li>(大阪市)</li> <li>(大阪市)</li> <li>(本岡市)</li> <li>(本陸裕靖田の二)</li> <li>(下開発</li> </ul>
(国標) (国標) (国標) (日本) (日本) (日本) (国本) (国本) (国本) (日本) (日本) (日本) (日本) (日本) (日本) (日本) (日	実〇の知つ速ン〇働うを企産了の施選実(交度グ被制イ考業問ラコ内難施 通チ 災約チ慮の題価一客:」 者やエし最と値ド(ま」 のサーた適イ評開行」 労プン,生ン価発
(目標) (画稿) (目標) (目録) (日) (日) (日) (日) (日) (日) (日) (日) (日) (日	(客方 海道() () を し し の () () () () () () () () () () () () ()
(標目) 「「」」」をの済定発し、「」」を、「」」を、「」」を、「」」」を、「」」」を、「」」」」で、「」」」での・様」」」がお経のドーでで、確開	実)の適定Oシ仕O負最コ施避拡合の交ミ様経の適一 5難選型考通ュ検済ス制ド(客:) 意慮障レ討活ト御開(安吉) 書」 動ッ問発現況決 :タ :ク題
(□櫺)(□==================================	(客」集) 「 「 (客」集) (客」 (客」) (客」) (客」) (客」) (客)) (客)) (客)) (客)) (客)) (客)) (客)) (客)
サブ澱麺B 統合的子渕のため の社会科道のため レーションの開発 (神戸大学・井料隆 麗)	

別添 2-5

#### (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が限られ 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。自由度数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、JAMSETC、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」でなければできないこと

「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・協力機関自体が 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ミ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。そ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枢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」でなければできないこと

「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」でなければでき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ッデゲダラ・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こと。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

## 別添 2-17

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、テクノロジ的 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確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、不確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 エーンを通じて全国・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