

平成 30 年度 文部科学省
ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関する
アプリケーション開発・研究開発

平成 30 年度
「近未来型ものづくりを先導する革新的設計・
製造プロセスの開発」
成果報告書

令和元年 5 月 31 日
国立大学法人東京大学
加藤千幸

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が実施した平成 30 年度「近未来型ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発」の成果を取りまとめたものです。

目次

| | |
|--|-----|
| 1. 委託業務の題目 | 1 |
| 2. 実施機関(代表機関) | 1 |
| 3. 委託業務の目的 | 1 |
| 4. 平成 30 年度(報告年度)の実施内容 | 1 |
| 4-1. 実施計画 | 1 |
| 4-2. 実施内容(成果) | 5 |
| 4-2-1. (サブ課題 A) 上流設計プラットフォームの開発整備と産業利用実証によるものづくり革新 | 5 |
| 4-2-2. (サブ課題 B) リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発 | 29 |
| 4-2-3. (サブ課題 C) 準直接計算技術を活用したターボ機械設計システムの研究開発 | 39 |
| 4-2-4. (サブ課題 D) 航空機の設計・運用革新を実現するコア技術の研究開発 | 63 |
| 4-2-5. (サブ課題 E) 新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発 | 83 |
| 4-2-6. (サブ課題 F) マルチスケール熱可塑 CFRP 成形シミュレータの研究開発 | 99 |
| 4-2-7. プロジェクトの総合的推進 | 109 |
| 4-2-8. 成果の外部への発表 | 110 |
| 4-3. 活動内容 | 110 |
| 4-4. 実施体制 | 116 |
| 別添 1 学会等発表実績 | |
| 別添 2 実施計画 | |

※本文に記載の性能推定ツール、理研シミュレータ[1]、シミュレータの結果は推定値であり、ポスト「京」共用開始時の性能を保証するものではない。また、試作機の結果はポスト「京」共用開始時の性能を保証するものではない。

[1] 児玉他、“理研ポスト京プロセッサシミュレータの評価”、情報処理学会、研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC)、2019-HPC-168(5)、pp. 1-7(2019-02-26)。

1. 委託業務の題目

近未来型ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発

2. 実施機関（代表機関）

| | | | | | | |
|------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|----------|
| 代 表 機 関 | 機関名 | 国立大学法人東京大学 | | | | |
| | 所在地 | 〒113-8654 東京都文京区本郷七丁目3番1号 | | | | |
| | 課題 責任者 | ふりがな | かとう ちさち | 生年 | 西暦 1959年 3月 1日 (59歳) | |
| | | 氏名 | 加藤 千幸 | 月日 | ※2018年 4月 1日現在 | |
| | | 所属部署名 | 生産技術研究所 | | 役職 | センター長・教授 |
| | | 連絡先 | Tel. 03-5452-6190 | | Fax. 03-5452-6191 | |
| | | E-mail ckato@iis.u-tokyo.ac.jp | | | | |
| | 事務 連絡 担当者 | ふりがな | すえなが ゆか | | | |
| | | 氏名 | 末永 幸加 | | | |
| | | 所属部署名 | 生産技術研究所 経理課 企画チーム | 役職 | 一般職員 | |
| 連絡先 | | Tel. 03-5452-6016 | | Fax. 03-5452-6080 | | |
| | E-mail rk@iis.u-tokyo.ac.jp | | | | | |

3. 委託業務の目的

近未来社会における多様なニーズをとらえた付加価値の高いものづくりは、我が国の持続的成長を支える産業の発展に必要な不可欠な重要政策である。これに対応するためには、特にものづくりの上流における製品・技術コンセプト創出力とそれを具現化する完成度の高い設計力の抜本的強化が重要であるとともに、信頼性、経済性に優れるものづくりを可能にする革新的製造プロセスの開発が必須要件となる。本委託業務では、これらの近未来型ものづくりの核心をなす手段である、最先端スパコンの能力を最大限に引き出せるアプリケーションソフトウェア群ならびにそれらを統合して設計・製造支援を行うための超高速シミュレーションシステムの開発・戦力化を目的とする。

このため、中核機関の国立大学法人東京大学は、分担機関の国立大学法人東北大学、学校法人東京理科大学、国立大学法人神戸大学、国立大学法人山梨大学、国立大学法人九州大学、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、及び国立研究開発法人理化学研究所と密接に連携し、研究開発を実施する。

国立大学法人東京大学は、上記の目的を達成するため、以下の6つのサブ課題（A、B、C、D、E、F）に関する研究開発とそのとりまとめを行うとともに、プロジェクトの総合的推進を実施する。

4. 平成30年度（報告年度）の実施内容

4-1. 実施計画

平成30年度は、平成29年度までの成果を踏まえ、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラアプリケーションの「京」レベルの計算機による機能予備確認を実施する。また、ポスト「京」を開発する理化学研究所計算科学研究センターと連携してコデザインを実施する。具体的には、サブ課題C

の主要アプリである FrontFlow/blue を中心に、アプリの最適化を進め、その成果を他のサブ課題の主要なアプリにも展開する。

以下に各サブ課題の業務内容について記す。

(1) (サブ課題 A) 設計を革新する多目的設計探査・高速計算技術の研究開発

本サブ課題では、多目的設計最適化問題のトレードオフを可視化する多目的設計探査技術と高速計算技術を開発する。これらの技術を共通基盤となる設計プラットフォームとして整備し、メーカーや宇宙航空研究開発機構、他のサブ課題が抱える実設計問題に適用して有効性を実証する。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施する。

a) 多目的設計探査技術

a)-1 多目的設計探査技術の「京」レベルの計算機などによる検証解析およびキラーアプリケーションのさらなる性能向上

<再委託機関：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、
学校法人東京理科大学、国立大学法人東北大学>

b) 高速計算技術

b)-1 時間領域並列化法のキラーアプリへの実装と性能評価

<再委託機関：国立大学法人九州大学>

b)-2 低 B/F アルゴリズムのキラーアプリへの実装と性能評価

<再委託機関：国立大学法人九州大学>

c) 上流設計技術

c)-1 上流設計プラットフォームのキラーアプリでの機能実証

<再委託機関：国立研究開発法人理化学研究所、国立大学法人九州大学>

(2) (サブ課題 B) リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発

本サブ課題では、「京」で実現した自動車空力連成解析を基盤技術として、設計上流側でデザイナーと技術者が協調して実施するコンセプトデザインを支援する（リアルタイム）と共に、時々刻々と変化する運転条件を考慮した（リアルワールド）シミュレーションを実現する。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施する。

a) 流体・構造統一連成解析手法を用いた設計システムによる車両空力の産業応用解析

<再委託機関：国立大学法人神戸大学>

b) ポスト京システムを対象とした基盤アプリの高速化と大規模化

<再委託機関：国立研究開発法人理化学研究所>

c) オイラー構造解析手法を用いた設計システムによる実車モデル構造の検証解析

<再委託機関：国立大学法人山梨大学>

(3) (サブ課題 C) 準直接計算技術を活用したターボ機械設計・評価システムの研究開発

本サブ課題では、最大 1 兆グリッドの大規模解析技術およびこれをリファレンスデータとする多目的最適化技術を研究開発し、性能・信頼性を大幅に向上することができるターボ機械設計システムを実現する。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラアアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施する。

a) エクサスケール計算機で高速動作する流れソルバーの開発

a)-1 ループ構造組み換えによるコアカーネル高速化技術の開発

a)-2 複数ベクトル利用による高速化技術のシステム実装

b) 大規模流体解析における収束性改善のための乱流解析手法の研究開発

b)-1 ターボ機械への適用のための圧縮性ソルバーによる実証解析

c) 格子ボルツマン法 (LBM) による直接計算手法の研究開発

c)-1 複雑形状まわり流れに関する実証解析

<再委託機関：国立大学法人九州大学>

d) LES (Large Eddy Simulation) 解析用の壁面モデルの研究開発

d)-1 壁法則併用型 LES 壁面モデルのプロトタイプコードの開発と検証

d)-2 乱流構造に基づく LES 壁面モデルのプロトタイプコードの開発と検証

(4) (サブ課題 D) 航空機的设计・運用革新を実現するコア技術の研究開発

本サブ課題では、設計から運用までがものづくりである、という観点に立ち、航空機的设计・開発および運用・運航プロセスに革新をもたらすコア技術として、新たな設計評価技術、飛行安全性向上技術、効率的運航制御技術を実現する。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラアアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施する。

a) 高速・高精度乱流解析技術の研究開発

a)-1 直交格子ベース基盤ソルバーのレイヤー格子への対応

<再委託機関：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構>

a)-2 直交格子ソルバーにおける LES (Large Eddy Simulation) 壁面モデルの研究開発

<再委託機関：国立大学法人東北大学>

b) 設計評価技術の研究開発

b)-1 高速バフエット/低速失速解析における LES 壁面モデルの基礎検証

<再委託機関：国立大学法人東北大学>

c) 飛行安全性向上技術の研究開発

c)-1 非線形飛行力学モデルデータベースに基づく機体運動シミュレータの構築

<再委託機関：学校法人東京理科大学>

(5) (サブ課題 E) 新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発

本サブ課題では、「京」コンピュータで実績のある並列構造解析ソフトウェア「FrontISTR」を基盤とし、高強度・超高張力鋼板など新材料に対応した高度なプレス成形・溶接シミュレーション技術を研究開発する。それにより、成形機・車両全体規模での数 μm 精度の予測を可能とする技術を実現する。

平成30年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施する。

- a) アセンブリ／接触問題の大規模解析が可能な反復法の並列性能の最適化
- b) アセンブリ問題に対する並列領域分割法の性能評価
- c) 部品モデルの溶接シミュレーションに対する精度検証
- d) プリポストの動作検証・機能改善

(6) (サブ課題 F) マルチスケール熱可塑 CFRP 成形シミュレータの研究開発

航空機や自動車の軽量化を目的として成形性の高い熱可塑 CFRP の適用に期待が集まっている。本サブ課題では、熱可塑 CFRP に対して加熱成形後の繊維配置と欠陥を正確に予測して、強度評価に裏打ちされた最適設計を可能とするためマルチスケール熱可塑シミュレーションを研究開発する。

平成30年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施する。

- a) ジェットエンジンファンブレードの開発段階で試作する試験体の熱可塑成形シミュレーションを「京」クラスコンピュータで実施
 - a)-1 ミクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションの実施
 - a)-2 マクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションの実施
- b) 実成形品との照合によるシミュレーション結果の検証
 - b)-1 積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とミクロスケールシミュレーション結果との照合によるミクロスケールシミュレータの検証
 - b)-2 積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とマクロスケールシミュレーション結果との照合によるマクロスケールシミュレータの検証
 - b)-3 積層プリプレグシートのミクロスケールシミュレーション結果とマクロスケールシミュレーション結果との比較を通した直交異方性マクロスケールモデルの検証

(7) プロジェクトの総合的推進

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、諮問委員会、評価委員会、全体推進会議、アプリケーション連携開発会議（重点課題⑥との連携）等を適宜開催し、参画各機関の連携・調整にあたる。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査等を行うなど、プロジェクトの効果的・効率的推進に資する施策を実施する。また、プロジェクトで得られた成果については、可能な限り積極的に公開して今後の展開に資するとともに、ものづくり産業での早期戦力化を支援する。

平成 30 年度は、引き続き、上記の各施策を順次開催しながら、重点課題間、サブ課題間の有効な連携研究活動のための支援を実施し、研究開発全体を円滑に実施するための調整を行う。

4-2. 実施内容（成果）

4-2-1. （サブ課題 A）上流設計プラットフォームの開発整備と産業利用実証によるものづくり革新

(1) 研究成果の要旨

多目的設計最適化問題のトレードオフを可視化する多目的設計探査技術を多数の制約条件を持つ多目的設計最適化問題のトレードオフを可視化する多目的設計探査技術を多数の制約条件を持つ問題に適用するための技術、多目的設計探査に必要な多目的設計最適化のターンアラウンドタイムを削減するための技術、数値シミュレーションを高速化するための高速計算技術を開発することを目的とする。また、これらの技術を上流設計プラットフォームとして整備し、メーカや JAXA、他のサブ課題が抱える実設計問題に適用して有効性を実証する。開発した設計プラットフォームはポスト「京」マシン以外でも使えるように整備して産業界に展開し、産業競争力強化に貢献する。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施した。

a) 多目的設計探査技術

a)-1 多目的設計探査技術の「京」レベルの計算機などによる検証解析およびキラーアプリケーションのさらなる性能向上

多目的設計最適化の性能向上に関する研究開発を実施した。この結果、MOEA/D などの手法で用いられる、大規模多目的最適化問題を複数の小規模多目的最適化問題に分解する Decomposition 戦略を多目的進化アルゴリズムの 1 つである CHEETAH に導入すること、また ε インディケータに改良を加えることで、より効率的な多目的進化アルゴリズムが開発された。また、車両構造の最適化問題などの実問題において、多目的設計最適化に必要な計算時間を大幅に短縮できることを確認した。また、サブ課題 B と連携し、京コンピュータを用いて車体の空力設計最適化を実施した。これにより、多目的設計探査技術の有効性を検証した。

b) 高速計算技術

b)-1 時間領域並列化法のキラーアプリへの実装と性能評価

キラーアプリである双曲型方程式への時間領域並列化法の適用のため、1 次元の線形移流方程式に対して性能評価を行った。その結果、収束性改善の効果の大きい 3 つの手法は、効果の大きい順番に、物理量分布のグリッドベースの波数の低減、Parareal 法の更新計算における緩和係数の導入、高精度位相な移流項計算法であることがわかった。

b)-2 低 B/F アルゴリズムのキラーアプリへの実装と性能評価

課題間連携の点から重点課題⑥で開発されている風況予測シミュレータ RIAM-COMPACT をキラーアプリとして選定し、低 B/F アルゴリズムを実装した。シミュレータの特性を考慮したデータ構造、直接法と反復法のハイブリッド解法、直接法（LU 分解）における再内側ループの並列アルゴリズムの導入による SIMD 化などを実施した。Skylake-SP での実装評価と A64FX の諸元に基づくルーフラインモデルの予測値から CPU 単体ピーク性能 20%程度の実

行推定値を得た。

c) 上流設計技術

c)-1 上流設計プラットフォームのキラーアプリでの機能実証

ウェブブラウザ上で処理手続きの構築と実行管理が可能なワークフローシステム **WHEEL** の開発を実施した。キラーアプリでの機能実証として、サブ課題 C でのボックスファンの多目的最適化設計の解析ワークフロープラットフォームとして、**CHEETAH** と組み合わせた解析ワークフローの実証を行った。また、萌芽的課題②の交通流シミュレーションのワークフローでも機能実証を行い、想定した機能を確認した。

Objective of this project is to develop multiobjective design exploration technologies that can handle real-world design problems with strong design constraints with shorter turnaround time and to develop high-speed computing technology for speeding up numerical simulations. These technologies are implemented in “upstream design platform (UDP)” and applied to real-world problems in industries. UDP runs on post-K computer and personal computers as well so that it contributes to strengthening industrial competitiveness immediately.

In this fiscal year, we conducted the following research and development topics. Details are described below.

a) Multiobjective design exploration technology

a)-1 Evaluation of multiobjective design exploration technology on K computer class environment and further performance improvement of multiobjective design exploration technology

We conducted research and development on performance improvement of multi-objective design optimization. In this fiscal year, a more efficient multi-objective evolutionary algorithm was developed by introducing the decomposition strategy used in MOEA/D into **CHEETAH** and improving a new ε indicator. In addition, we confirmed that the computational time required for multi-objective design optimization can be significantly reduced in real problems such as the optimization problem of car structure. In cooperation with sub-task B, aerodynamic design optimization of a car body was carried out using K computer. The obtained result verified effectiveness of multi-objective design optimization technology.

a)-2 Trial development of constraint handling techniques for multiobjective design optimization and evaluation of the produced technique based on real-world design optimization problem

We conducted benchmark tests of some constraint handling techniques on the benchmark problem based on a real-world design optimization problem. We revealed advantages and disadvantages of the different constraint handling techniques.

b) High-speed computing technology

b)-1 Investigation of fundamental technology of parallel-in-time method and design of a PinT platform

A The performance evaluation for the advection problem was conducted on the one-dimensional linear advection equation before incorporating the PinT method into the hyperbolic equation, which is a killer application of the parallel in time method. As a result, it was found that the three approaches with the greatest improvement in convergence were, in order of effectiveness, the reduction of the grid-based wave-numbers of the physical quantity distribution, the introduction of relaxation coefficients in the update calculation of the Parareal method, and the highly accurate phase advection calculation method.

b)-2 Performance evaluation of a low B/F implementation of stencil computation

Under developing low B/F algorithm was applied to the wind condition forecasting simulator RIAM-COMPACT, which is developed under Key Issue 6 from the point of view of collaboration between issues, as a killer application. We implemented a suitable data structure considering the characteristics of the simulator, a hybrid solution of direct method and iterative method, and SIMDization by introducing parallel algorithm of inner loop in direct method (LU decomposition). From the evaluation results of Skylake-SP and the predicted performance value of the roofline model based on the specifications of A64FX, the estimated value of about 20% peak performance of a CPU was obtained.

c) Technology development for upstream design process

c)-1 Design of a platform for upstream design process

The workflow system WHEEL was applied to the killer application Cheetah, which also developed in our sub-theme A, as a functional demonstration. In this demonstration, WHEEL plays a role of an analysis workflow for multi-objective optimization design of a box fan in sub-theme C of this project. We also exhibited other applications for the traffic flow simulation in R&D category for post K computer (Exploratory Challenges 2) and found that the WHEEL behaved as it was expected.

(2) 本研究の内容

a) 多目的設計探査技術

a)-1 多目的設計探査技術の「京」レベルの計算機などによる検証解析およびキラーアプリケーションのさらなる性能向上

本研究では、既存の多目的進化計算アルゴリズムである CHEETAH と MOEA/D をベースとした新しい多目的進化計算アルゴリズム(CHEETAH/R)を提案し、CHEETAH/R のさらなる効率化を目指して CHEETAH/R フレームワーク及びそのコンポーネントの改良を行っている。

Fig. 4.2.1-1 に MOEA/D の基本的なアイデアを示す。この図に示すように、目的関数空間上に定義された方向ベクトルを用いて多目的最適化問題をいくつかのサブ問題の集合として再定義し、個々のサブ問題を別々のサブ集団を用いて解くことにより、解の多様性を高く保ちながら多目的最

適化問題を解く手法である。収束性と多様性とは一般的に相反する性質を持つが、多目的設計探索技術には短いターンアラウンドタイムで多様な優れた解を得る必要があり、すなわち収束性と多様性の両立が不可欠となる。

本研究では、収束性に優れる CHEETAH に、多様性の保持に優れている MOEA/D のフレームワークを組み込むことで収束性と多様性の両立を図っている。ここで、CHEETAH に組み込むために、特に MOEA/D の派生である MOEA/D-M2M を採用している。昨年度は収束性と多様性の両立において CHEETAH と MOEA/D-M2M との組み合わせが有用であること、また収束性のさらなる向上において親選択においてエリート戦略（評価値の高い解を高い確率で選ぶこと）を取り入れた提案手法が特に大集団サイズにおいて有用であることを確認した。今年度は、多様性のさらなる向上のため i) 新たな方向ベクトルの定義方法の開発と ii) 解の選好性の指標の改良を行い、それらの有用性を確認した。

i) 新たな方向ベクトルの定義方法の開発

Fig. 4.2.1-2 に提案した方向ベクトルの新たな定義を示す。既存手法では、Fig. 4.2.1-2(a)に示すように、得られた解集合から推定された **ideal point**(理想点)を方向ベクトルの原点と定義し、進化が **ideal point** に収束するような形でサブ問題を定義する。一方、提案手法では Fig. 4.2.1-2(b)に示すように、得られた解集合から推定された **nadir point**(最悪点)よりさらに最適方向から離れた点：**dystopian point** を方向ベクトルの原点として定義することによって、その点から押し出される方向に進化が進むような形でサブ問題を定義する。それにより得られるパレート解集合は既存手法では Fig. 4.2.1-2(a)中の青線のパレート解集合の狭い領域となる一方、提案手法では Fig. 4.2.1-2(b)の青線で示すようにより広い領域にわたるパレート解集合となることが期待できる。

単に **nadir point** あるいは **dystopian point** を方向ベクトルの原点と設定する手法は他研究でも提案されているが、その場合、解集合が存在する領域すべてを方向ベクトルでカバーできないため(Fig. 4.2.1-2 灰色の領域)、解集合の分布によっては方向ベクトルでカバーされる領域に存在する解が極端に少ない場合も起こりうる。そのため、提案手法では(a) **ideal point** 原点の方向ベクトルと(b) **dystopian point** の方向ベクトルとを同時に使用することを提案している。提案した CHEETAH/R のフレームワークを以下にまとめる。

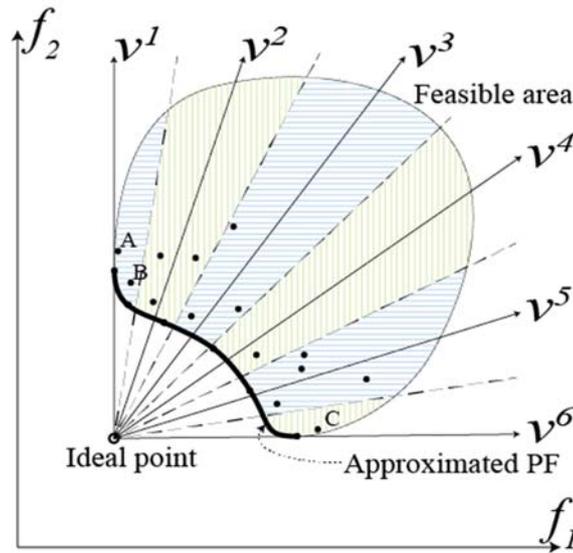
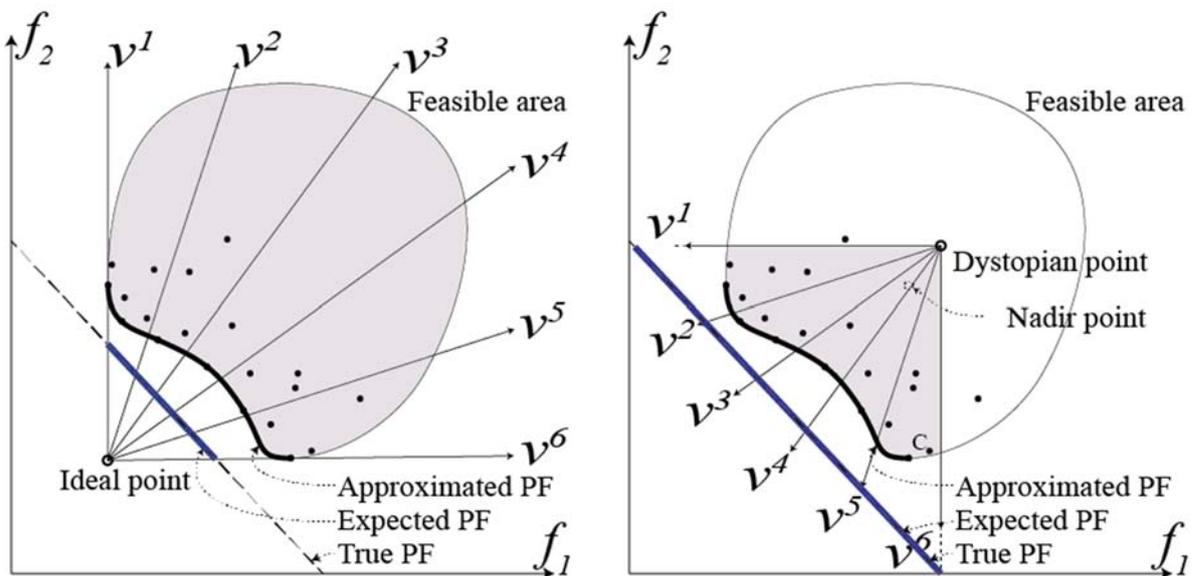


Fig. 4.2.1-1 Idea of MOEA/D.



(a) Ideal-origin

(b) Dystopia-origin

Fig. 4.2.1-2 Use of dystopian point as the origin of the direction vectors.

- Step 1. 初期化： N 個の解をランダムに生成、あるいは既存の解集団を用意する。その初期集団について、目的関数値を計算し、ideal point, nadir point, dystopian point を計算する。目的関数空間上に均一に K 個の方向ベクトルを生成し、ideal-point 起点の方向ベクトルで目的関数空間を分割し、それに基づき集団をサブ集団に分割する。サブ集団ごとに、 ϵ^+ インディケータ(後述)を用いて選好度を計算する。世代数=0 とし、初期集団を母集団とする。
- Step 2. 複製：分割されたサブ集団ごとに、昨年度提案した手法であるエリート親選択手法を用いて親のペアを選択し、そこから交叉と突然変異により子個体集団を生成する。生成された子個体集団の目的関数値を計算し、ideal point, nadir point, dystopian point を更新

する。

Step 3. 環境選択 1 : dystopian point を優越する解のみについて、dystopian point 起点の K 個の方向ベクトルにより解の集団をサブ集団に分割する。分割されたサブ集団ごとに ϵ +インディケータを用いて選好度を計算し、サブ集団内の個体数が N/K と同じかそれ以下となるように ϵ +インディケータの値を用いて選択を行う。**Step 3** 終了時における選択された解の数を N' とする。

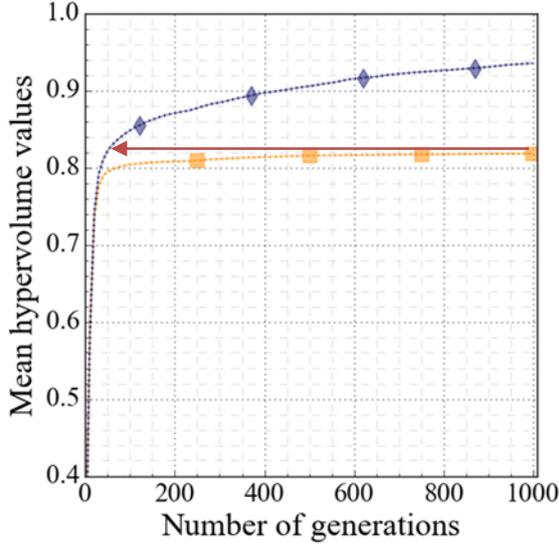
Step 4. 環境選択 2 : **Step 3** において選択されなかったすべての解について、ideal point 起点の K 個の方向ベクトルにより解の集団をサブ集団に分割する。分割されたサブ集団ごとに ϵ +インディケータを用いて選好度を計算し、サブ集団内の個体数が $(N-N')/K$ と同じかそれ以下となるように ϵ +インディケータの値を用いて選択を行う。**Step 4** 終了時における選択された解の数を N'' とする。

Step 5. 環境選択 3 : **Step 3, 4** において選択されなかったすべての解を集団として ϵ +インディケータを用いて選好度を計算し、上位 $(N-N'')$ 個の解を選択する。

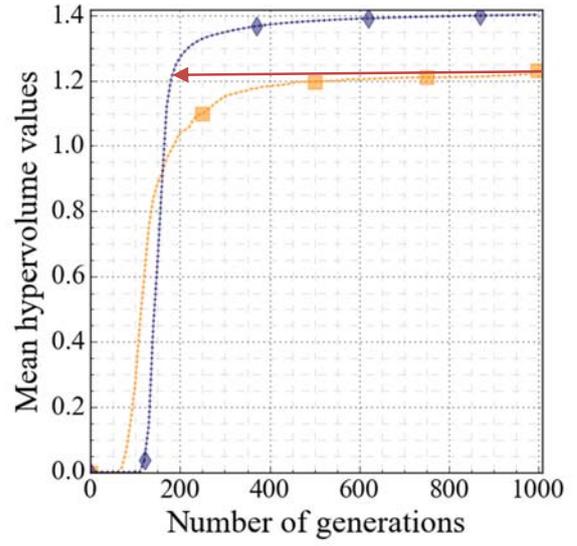
Step 6. 終了判定 : 世代数もしくは解の総評価回数などで定義される終了条件を判定する。終了条件を満たさない場合、世代数を 1 増加し、環境選択 1~3 において選択された解を母集団として **Step 2** に戻る。

上記のアルゴリズムは、既存手法である MOEA/D-M2M と比較し、i)dystopian point を優越する目的関数空間上の領域を region of interest (RoI) とし、RoI 内の解を ϵ +インディケータを用いて優先的に選択する CHEETAH の手法の利用と、ii)dystopian point 起点の方向ベクトルの利用、及び iii)エリート親選択手法の利用の 3 点で改善を行っている。なお、 ϵ +インディケータの計算量は $O(N^2)$ のオーダーであるのに対し、上記アルゴリズムでは計算量を $O(N^2/K)$ のオーダーに削減することができるため大集団サイズでの利用にも適している。

WOSGZ, DTLZ と呼ばれる一般的な多目的最適化テスト問題を用いて、それらの改良を織り込んだ提案手法の性能評価を行った結果を Fig. 4.2.1-3 に示す。横軸が進化計算の世代数 (ターンアラウンドタイムに相当)、縦軸がハイパーボリュームを示し、大きいほど優れたパレート最適解集合が得られていることを表す。ターンアラウンドタイムの観点から、Fig. 4.2.1-3(b) DTLZ3 での一部の世代を除き提案手法は従来手法に比べ同程度の質のパレート最適解を得るために必要な計算時間が大幅に短縮できている様子が分かるさらに、Fig. 4.2.1-3(b) 5 目的 DTLZ3 問題の結果に示すように、提案手法は多数目的問題にも適用可能である。



(a) WOSGZ12 problem
(number of objectives = 3)



(b) DTLZ3 problem
(number of objectives = 5)

Fig. 4.2.1-3 Performance evaluation of CHEETAH and CHEETAH/R using artificial benchmark problems. Legends: Yellow: CHEETAH, Blue: CHEETAH/R.

ii) 解の選好度の指標の改良

昨年度までの検討で CHEETAH や IBEA と呼ばれる多目的進化計算アルゴリズムが優れた収束性を持つことを明らかにした。これら 2 つのアルゴリズムはともに ϵ^+ インディケータと呼ばれる解の選好度を定義する指標を採用しており、この ϵ^+ インディケータをベースにインディケータを開発することでさらなる収束性または多様性が期待できる。 ϵ^+ インディケータについて、 ϵ^+ インディケータを用いる多目的進化計算アルゴリズムでは目的関数空間の特定の領域のパレート最適解集合しか得られないという多様性上の欠点が指摘されており、今年度はこの欠点の修正を行い、その有用性を確認した。

ϵ^+ インディケータは 2 つの解 \mathbf{x}, \mathbf{y} の良し悪しを比較する指標であり、次式で示される。

$$I_{\epsilon^+}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max_{i \in \{1, \dots, M\}} \{f'_i(\mathbf{y}) - f'_i(\mathbf{x})\}$$

ここで、 $f'_i(\mathbf{x})$ は $[0, 1]$ に正規化された解 \mathbf{x} の目的関数値である。また、解集合 P における解 \mathbf{x} の選好度は次式で計算される (α はスケールングファクター)。

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{y} \in P \setminus \{\mathbf{x}\}} e^{-\frac{I_{\epsilon^+}(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{k}}$$

ϵ^+ インディケータなどの binary インディケータは 2 つの解 \mathbf{x}, \mathbf{y} における優劣を示す指標であり、言い換えると同評価の解に対しては同じ値を返すべきである。これに対し、本研究では、 ϵ^+ インディケータの定式化では Fig. 4.2.1-4 に例示したように本来同程度と評価すべき 2 つの解に対しても異なる

る選好度を与えるという性質を指摘し、またその性質によって ϵ^+ インディケータを用いる多目的進化計算アルゴリズムにおいて上述の多様性上の欠点が生じることを指摘した。本研究ではこの性質を改善するために次式に示す ϵ^{++} インディケータを提案した。

$$I_{\epsilon^{++}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} \max_{i \in \{1, \dots, M\}} \{f'_i(\mathbf{y}) - f'_i(\mathbf{x})\} & , \text{if } \mathbf{x} < \mathbf{y} \text{ or } \mathbf{x} > \mathbf{y} \\ \max_{i \in \{1, \dots, M\}} \{|f'_i(\mathbf{y}) - f'_i(\mathbf{x})|\} & , \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、 $<$ および $>$ は解の優越関係を表す。提案した ϵ^{++} インディケータでは同評価の解に対しては同じ値を返す性質を持つため、 ϵ^+ インディケータの代わりに用いることで前述の欠点を解消することができる。

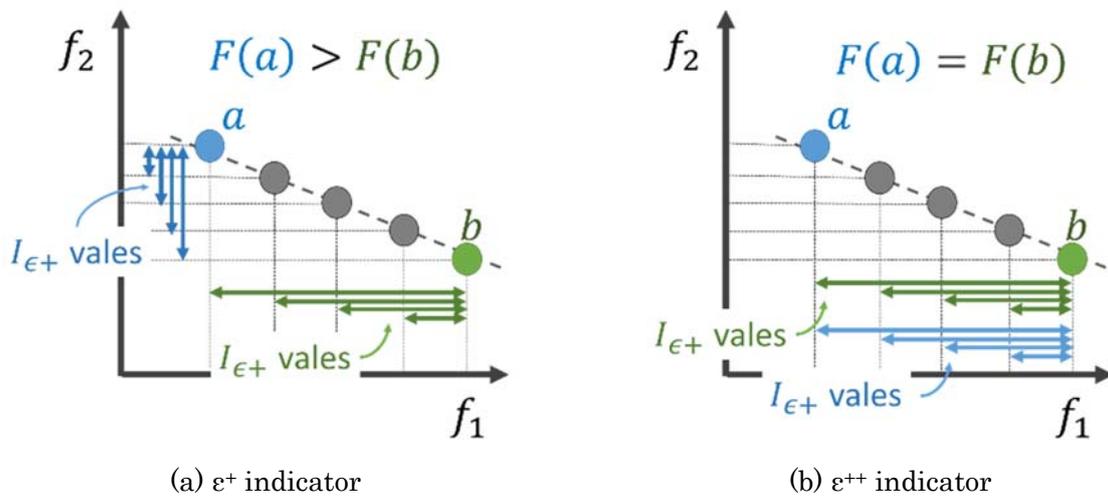
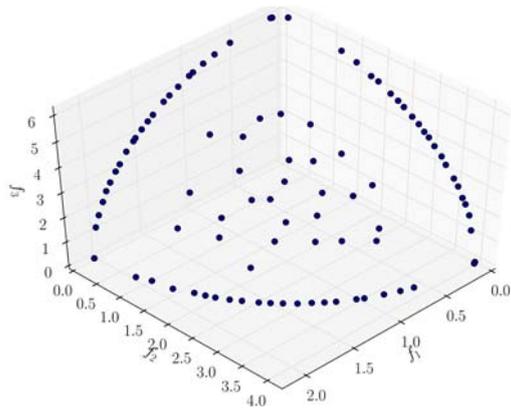
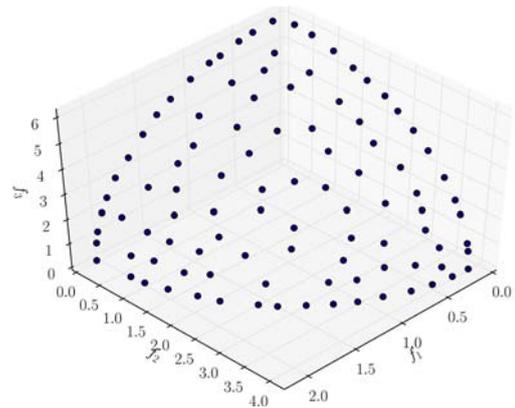


Fig. 4.2.1-4 Examples of indicator calculation.

WFG5 と呼ばれる簡単なテスト問題を用いて ϵ^{++} インディケータの性能評価を行った結果を Fig. 4.2.1-5 に示す。Fig. 4.2.1-5 の各軸は最小化すべき各目的関数の値である。Fig. 4.2.1-5 に示すように ϵ^+ インディケータでは特定領域のパレート最適解が得られていないことがわかる。一方、 ϵ^{++} インディケータでは多様な解を獲得することに成功している。



(a) ε^+ indicator



(b) ε^{++} indicator

Fig. 4.2.1-5 Distribution of Pareto optimal solution set obtained by ε^+ indicator and ε^{++} indicator.

以上提案した CHEETAH/R のフレームワークとその改良コンポーネントについて、実問題を用いて性能評価を行った結果を示す。ここでは実問題の例としてマツダベンチマーク問題を用いている。Fig. 4.2.1-6 では横軸に進化計算の世代数、縦軸がハイパーボリュームを示している。提案手法は従来手法に比べ高いハイパーボリューム値を示しており、更に集団サイズの増加に対する性能向上幅も大きい。集団サイズの設定は計算機の CPU 数に依存することから、この結果は提案手法がより多数の CPU を持つポスト「京」に適合したアルゴリズムであることを示している。ターンアラウンドタイムの観点からは、同程度の質のパレート最適解を得るために必要な計算時間を 1/3 程度に短縮できることがわかる。Fig. 4.2.1-7 に示した目的関数空間上での解の分布では、提案手法によって得られた非劣解集合が従来手法によって得られたパレート解集合 (図中赤点) よりも最適化方向に位置し、さらに広い範囲に分布している様子が見られる。これらはそれぞれ提案手法が高い収束性と多様性を持つことに対応し、提案手法が強い制約条件付き最適化問題に対しても短いターンアラウンドタイムで優れたパレート解集合を得ることができる結果を示している。

なお、サブ課題 B と連携して「京」コンピュータを用いた車体の空力設計最適化を実施し、大規模計算における多目的設計探査技術の有効性を検証したが、その結果についてはサブ課題 B の項目で記載している。

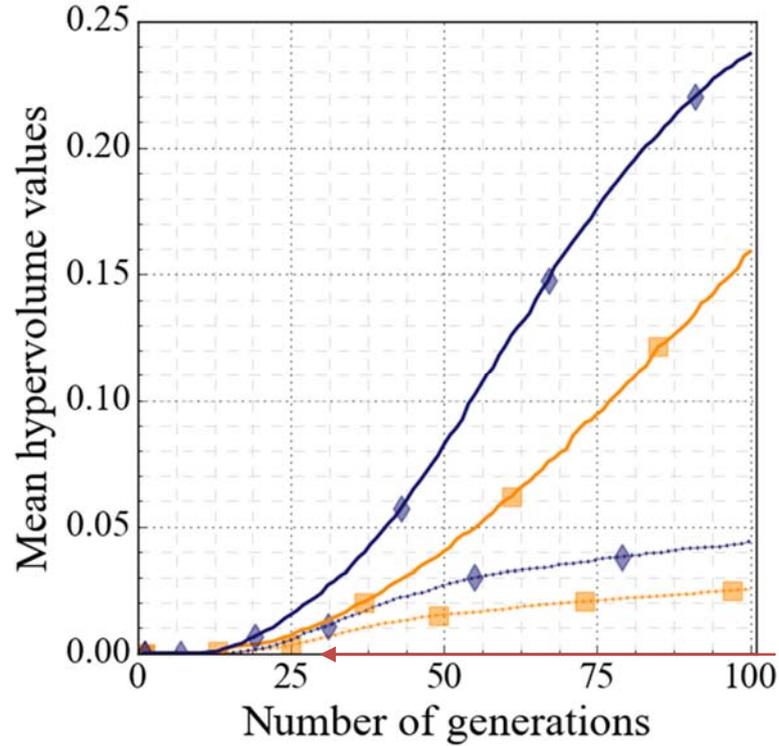


Fig. 4.2.1-6 Performance evaluation of CHEETAH and CHEETAH/R using Mazda benchmark problem. Red arrow indicates that the turnaround time is reduced to approx. 1/3, from CHEETAH with population size of 64 to CHEETAH/R with population size of 1000. Legends: Yellow: CHEETAH, Blue: CHEETAH/R. Dashed line: population size = 64, Solid line: population size = 1000.

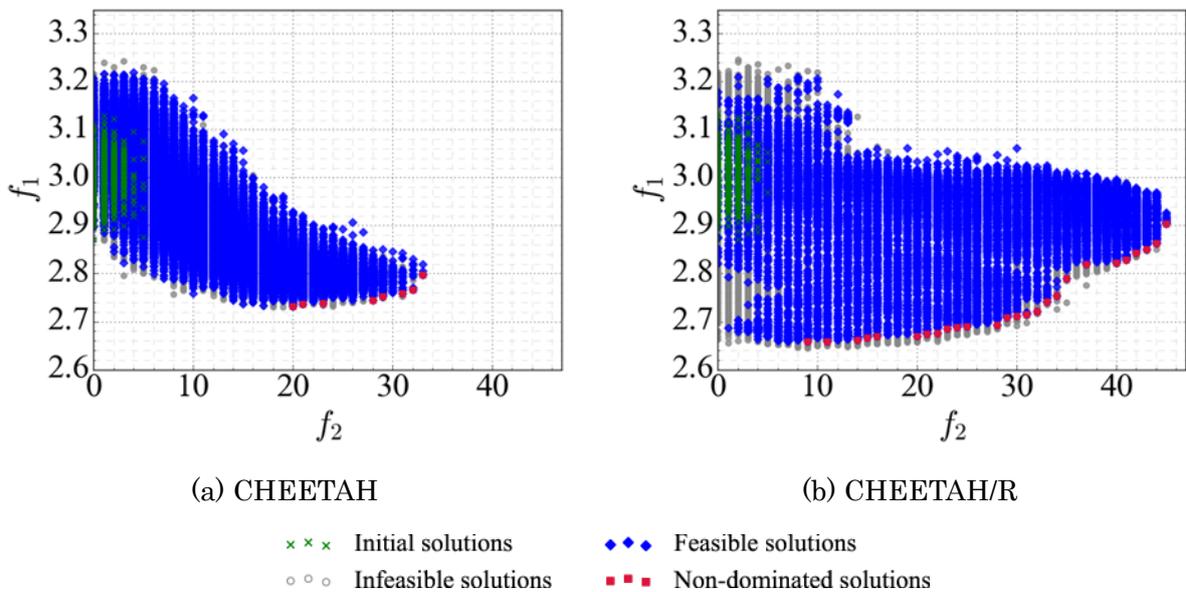


Fig. 4.2.1-7 Distribution of obtained solutions by CHEETAH and CHEETAH/R on Mazda benchmark problem with population size of 1000, at the number of generations of 100. Optimization direction is bottom-right.

b) 高速計算技術

b)-1 時間領域並列化法のキラアプリへの実装と性能評価

昨年度は、時間領域並列化法のプロトタイプアプリへの実装と性能評価を行い、(i)基本性能特性を把握し、放物型では目標の7倍以上の加速性を確認し、双曲型では性能改善の方向を把握した。(ii)また、改善点を抽出し、放物型では非線形性の強い問題の加速法を、双曲型ではCIP法と他手法の組み合わせ等の開発方針を得た。

今年度は、時間領域並列化法のキラアプリ（サブ課題Cの流体コードの1つの時間積分法）へ組み込む前にそのキラアプリの核心である移流問題に対する性能評価を1次元の線形移流方程式に対して行い、Parareal法の収束改善手法の検討に焦点を当て研究開発を実施した。具体的には、これまでに提案されている双曲型偏微分方程式に対するParareal法の収束性改善法を総合的に評価した。その結果、収束性改善の効果の大きい3つの手法は、効果の大きい順番で、(i)物理量分布のグリッドベースの波数の低減、(ii)Parareal法の更新計算における緩和係数の導入、(iii)高精度位相な移流項計算法であった。Parareal法の双曲型方程式への応用に課題はあるものの、多くの改善案の提案が続いており、その効果も完全ではないが示されつつある状況である。今後さらに多くの案が出され評価・改善が加えられと考えられる。本研究では、今後、研究開発のまとめへ向けさらに検討を進める予定である。以下に研究開発の詳細を述べる。

本研究では、広範囲な応用性やコード開発の効率性そして基本問題に対する性能の評価から、Parareal法を要素技術としている。Parareal法は2001年にLionsらにより提案されたもので、本来は逐次計算である時間積分をその計算が実行される時間領域をtime sliceという N_{ts} (並列数)個の時間領域に分割し、それらtime sliceの始端・終端値を並列反復解法ですり合わせて解く手法である。その計算法はNewton-Raphson法を基に考えると次の式(4.2.1-1)と書ける[1]。ここで $\mathbf{U}_n^{k^{par}}$ は K^{par} 回目の反復でのtime slice n の終端値、F、GはFine solver、Coarse solverと呼ばれるものであり、それぞれNewton-Raphson法の残差計算（並列）、修正計算（逐次）を行う。 T_n, T_{n-1} はtime slice n の始端値から終端値までの時間発展計算を行うことを意味する。

$$\mathbf{U}_n^{k^{par}} = F(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{k^{par}-1}) + G(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{k^{par}}) - G(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{k^{par}-1}) \quad (4.2.1-1)$$

この時、Coarse solverでは、積分時間ステップ幅 $\delta T \gg \delta t$ を用いて時間を粗視化するかその時間積分法を粗視化する等により、その計算時間 T_G を削減する。Fine solverのステップ幅 δt による計算時間 T_F を使って時間粗視化率 $R_{tc} = T_F / T_G$ を定義する。これはParareal法の逐次計算部分の負荷を表すパラメータとなっている。時間並列計算法での加速率 a は時間方向を逐次計算した処理時間を時間並列計算の処理時間で割ったものである。ここで、Fine solverとCoarse solverのtime slice当たりの計算時間比 $R_{tc} = T_F / T_G = 1/Q R_{tc}^f$ を時間粗視化率、 $R_{tc}^f = \delta T / \delta t$ を時間刻み幅粗視化率、 Q はFine solverとCoarse solverの1ステップ当たりの計算時間の比である。

評価対象は式(4.2.1-2)の1次元の移流方程式で、スカラー量 ϕ の一定速度 c での移流を表す。

$$\partial_t \phi + c \partial_x \phi = 0 \quad (4.2.1-2)$$

この方程式に対する時間逐次計算法は既によく開発されている。空間離散化では発散防止に重点を置いた上流法さらに振動抑制にも重点を置いた TVD 法等がある。時間離散化では多段法（アダムス・バッシュフォース、アダムス・ボルトン、後退差分法）、単段法（ルンゲ・クッタ法）等が応用されている。Parareal 法の応用においてよりおおきな加速性を得るためには、非並列計算量の減少と収束性の悪化のバランスを取りつつ時間粗視化率 R_{fc}^t を大きくすることが必要である。時間粗視化率 R_{fc}^t を大きくするためには、Coarse solver の計算モデルまたは計算精度を Fine solver のものに比べ簡易なものとし、1 ステップ当たりの Coarse / Fine solver の処理時間比 $Q=T_{Co}/T_{Fo}$ の増加を抑えながら、時間刻み幅比 $R_{fc}^t=\delta T/\delta t$ を上げることが必要となる。最も単純な方法として、同じ空間・時間離散化法を用いた同じコードを Fine / Coarse solver に使い、 $R_{fc}^t=1/Q$ $R_{fc}^t=\delta T/\delta t$ ($Q=1$) を上げるように調整する方法がある。今回はこの方法を用いる。

これまでに以下のような収束性改善の方法が提案されてきている ((A)(ii)、(B)、(C)はわれわれの提案[2、3]で、他は PinT2016、2017、2018 時間並列計算国際会議、論文の調査で判明した提案である)。それら手法を 3つのグループに分けて羅列すると以下となる。

(A) Time slice 端点での Fine/Coarse solver 間での位相差の削減：(i) グリッドベースの波数の低減（格子密度の動的制御技術が必要）、(ii) 高精度位相計算法（*）勾配という位相情報を利用して位相計算精度を上げている CIP3rd、（*）さらに曲率という位相情報を利用する CIP5th、（*）CIP 法の位相情報の劣化をふせぐ振幅保存法(STRS 法) の利用の試み、(iii) 時間領域 T の縮小化、(iv) $\delta T=\delta t$ と位相誤差の原因となる時間刻み幅の差を無くしその代わりに Coarse solver のモデル・計算法の工夫により時間粗視化率 R_{fc}^t を低減する（適用が大変、効果限定的）、(v) 随伴方程式法による時間方向対称化による位相誤差縮小（計算量の爆発が課題）。

(B) 更新計算で発生する端点での非物理的振動の抑制：(i) 準 Newton Raphson 法である Parareal 法の改善（緩和係数の導入）、(ii) エイトケン加速法（準 Newton Raphson 法に有効）の導入ベクトル版（e 変換の e 算法）。

(C) 端点で発生した非物理的振動の除去：(i) RCIP 法、MMT、WENO の応用による発生振動除去、(ii) Coarse solver にのみ粘性を加えて非物理的振動除去。

しかし、これまでこれらを総合的に評価した研究は見当たらなかったため、本研究ではこれらを総合的に評価した研究を進めた[4]。Fine / Coarse solver の時間積分法はセミラグランジェ法を用いる。その理由は時間刻み幅粗視化率を $R_{fc}^t=\delta T/\delta t \gg 1$ とするためでありそのため CFL $\gg 1.0$ にも対応できるようにしている。高精度位相計算法の影響を見るための Parareal 法の収束性を見る基準での移流計算法として河村・桑原法(KK 法)を用いた。また効果が大きかった収束性改善法の具体的な内容は以下のようなものである。

- グリッドベースの波数の低減：その波数を系統的に変化させてその影響を見るために、初期条件として階段状分布および曲線状分布を設定し、空間時間領域を $x = [0 ; 3]$; $t = [0 ; 2]$ とした。そして移流速度 $c=1.0$ に固定した 1 次元の移流問題 (Fig. 4.2.1-8) を計算した。

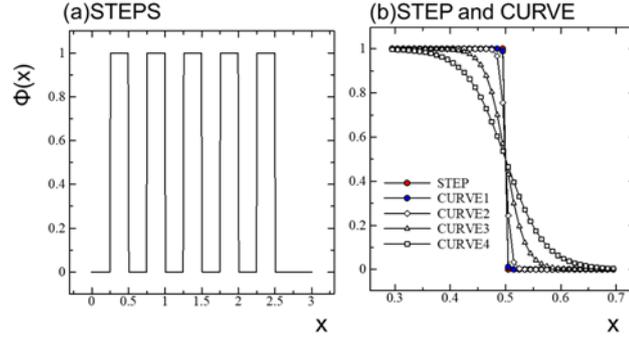


Fig. 4.2.1-8 Grid based wave number control by initial ϕ distribution. (a) STEPS: high grid based wavenumber case, (b) STEP and CURVE: reduced grid based wavenumber cases.

- 準 Newton Raphson 法である Parareal 法の改善 (緩和係数の導入) : Parareal 法は、time slice の端点の値を未知数とした非線形方程式の解法を Newton-Raphson 法で定式化し、修正値を求める線形方程式の左辺の正確な計算が不可能なことからその計算に大胆な近似を使っている。そのため準 Newton-Raphson 法に基づく計算法と言ってもよい。そこで Coarse solver で計算される修正項に加速・減速処理を行えば収束性が改善する可能性がある。そこで今回、式 (4.2.1-1)を、Coarse solver からくる修正量に減速係数 γ を使いまた Newton-Raphson 法の修正量に減速係数 β を使うことにより、式 (4.2.1-3) のように変更しその修正の効果を調べた。

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_n^{K^{par}} &= (1 - \beta)\mathbf{U}_n^{K^{par-1}} + \beta F(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{K^{par-1}}) \\ &+ \gamma(G(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{K^{par}}) - G(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{K^{par-1}})) \end{aligned} \quad (4.2.1-3)$$

- 高精度位相計算法 : 位相高精度計算の手法として CIP-3 次 (位相計算精度が高い、勾配情報[位相情報]も移流させる方法) 及び CIP-5 次 (さらに曲率情報も移流させる方法として開発) を利用したものを用いた。CIP-5 次の場合は式(4.2.1-4)の式を使う。

$$\begin{aligned} \partial_t \phi + c \partial_x \phi &= 0 \\ \partial_t g + c \partial_x g &= 0, \quad \partial_t \chi + c \partial_x \chi = 0 \\ g &= \partial_x \phi, \quad \chi = \partial_x g \end{aligned} \quad (4.2.1-4)$$

評価のための計算条件は、空間 $L=3.0$ 、 $\Delta x=0.01$ 、時間 $T=2.0$ 、 $\delta t=0.001$ 、 $CFL=0.1$ 、2,000steps の解析条件と time slice 数 $N_{ts}=20$ 、時間刻み幅粗視化率 $R_{fc}^t=25$ の時間並列パラメータとした。その評価結果を Fig.4.2.1-9 にまとめて示す。

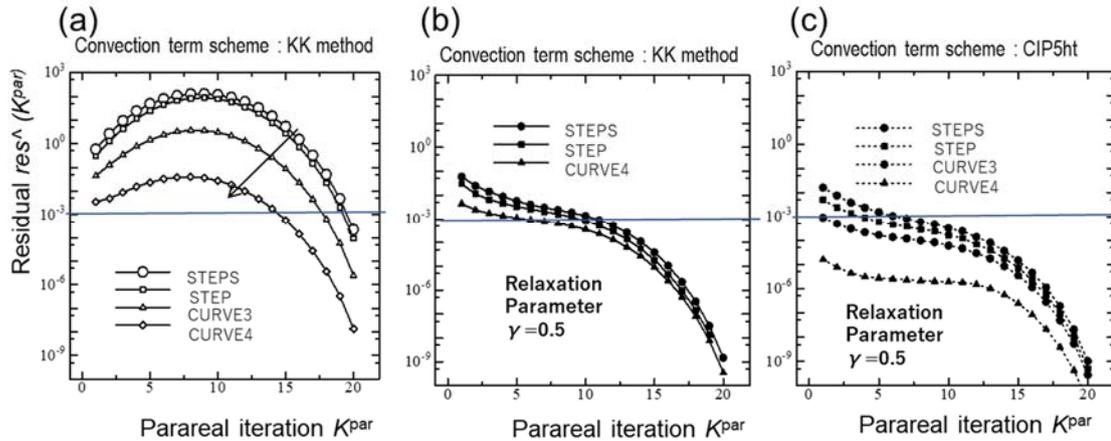


Fig. 4.2.1-9 Convergence history of Parareal method with the methods to improve the convergence. (a) Method reducing grid base wave number, (b) Method relaxing the update of Parareal method, (c) Method improving the phase accuracy calculated by the coarse solver such as use of high order time integrator.

最も効果が大きかったのはグリッドベースの波数の低減であった (Fig. 4.2.1-9(a))。物理量の勾配の大きい部分のグリッド密度制御技術を適用すれば可能な手法である。次に効果が大きかったのは Parareal 法の修正計算に緩和係数を導入する手法であった (Fig. 4.2.1-9(b))。Newton-Raphson 法の修正量の減速係数 β だけでも残差の増加を抑える効果はあるが急速に効果が飽和してしまう。Coarse solver からくる修正量の減速係数 γ は収束を改善し残差を減少傾向にする効果があるもののまだ不十分である。3 番目に効果があったのは、高精度位相計算法の導入である (Fig. 4.2.1-9(c))。これらの結果よりも Parareal 法の判定基準が 10^{-3} 程度であれば、パイプライン化された Parareal 法を想定すると、加速率が $\alpha = N_{ts} / (K^{par} + QN_{ts}/R_{fc})$ ($N_{ts}=20$, $R_{fc}=25$, $Q=1$ (Coares/Fine solver の 1 ステップの計算時間比)) と推定可能なので、

(i) STEPS の場合: $\alpha = 20 / (6 + 20/25) = 20/7 = 2.9$ 倍

(ii) CURVE4 の場合: $\alpha = 20 / (1 + 20/25) = 20/2 = 10$ 倍

程度の加速性が期待される。一般の応用では STEPS のような高いグリッドベース波数を含む領域が存在することが多いと推定されるため、さらに急速に収束が進む工夫が必要である。

以上のように今年度は、キラーアプリ (サブ課題 C の流体コードの 1 つの時間積分法として) に組み込む前にその核心である移流問題に対する性能評価を 1 次元の線形移流方程式に対して行い、Parareal 法の収束改善手法の効果を評価した。その結果、効果はあるもののさらに改善が必要であることが分かった。そこで次年度は実際にナビエストーク方程式へ適用し問題の所在の絞り込み、改善、実証を目指すことにした。

また Parareal 法は放物型偏微分方程式に対しては有効であり、さらに応用範囲は広い (地下の資源・環境問題、多相流、形状最適化等) ため成果を広めることが重要である。一方、成果を広めるためのフレームワークは汎用化が困難であるためチュートリアル形式 (書籍と例題プログラム) で成果を広める方針のもとその準備を進めた。Parareal 法を中心にした詳細な理論説明、線形拡散方程式・フェーズフィールド法を例とした解析手法説明、具体的な時間並列コードの構築法、そして詳細な説

明のついたプログラムを整備し提供するものを出版提供する予定である。

b)-2 低 B/F アルゴリズムのキラーアプリへの実装と性能評価

キラーアプリとして、課題間連携の点を考慮して、重点課題⑥サブ課題 C で開発を進めている風況予測シミュレータ RIAM-COMPACT を選定し、これに低 B/F アルゴリズムを実装し、Skylake-SP での性能測定と A64FX の諸元に基づくループラインモデルを適用して実行性能を推定した。

適用対象の RIAM-COMPACT を大規模並列化する上で、効率的な領域分割の観点から、水平方向について領域分割を行い、分割しない鉛直方向を三次元配列の最内側ループとして SIMD 長を確保するデータ構造とした。非圧縮流を対象とする RIAM-COMPACT は分離解法を用いており、圧力の Poisson 方程式を反復法で解くが、事前プロファイルでは圧力反復法部分が約 40%を占めており、この部分の実行時間を短縮することが性能向上に寄与する。反復法として前処理付きの双共役勾配法 (Preconditioned BICGSTAB 法, PBICGSTAB) は反復回数が少なく最良の候補の一つであるが、その内部処理に AXPY (STREAM)や Dot (内積)など高 B/F の演算処理を含むため、高速化のボトルネックとなる。そこで、前処理で固有値分布を改善することにより、BICGSTAB 自体の反復を削減し、高 B/F の演算処理時間を減らす方針をとる。このとき、前処理としては、従来、定常反復である SOR 法系統が比較的よい性質を示したが、SpMV (疎行列ベクトル積) としては B/F が高い点、キャッシュの再利用性が低い点が問題であった。そこで、SpMV の解法として、直接法と反復法のハイブリッドである SLOR 法 (Line SOR 法) を導入し、さらに効率的な並列化を導入した。

■計算パラメータの選定

まず、ターゲットとなる問題設定のパラメータを、A64FX の諸元から見積もった。A64FX は 1CPU 内に 4 つの CMG をもち、ccNUMA 構造のメモリ構成で、各 CMG には 8GiB のメモリが接続されている。また、各 CMG は 12 演算コアと 1 アシスタントコアを持つ。これらの点から、1CPU 内に 4MPI ランクを配し、各ランク内は 12 スレッド並列とする並列化の方針をとる。RIAM-COMPACT の要求メモリ量は格子点あたり 140Byte (単精度) なので、1 プロセスは 8GiB のメモリ空間を利用できることを考慮し、プロセスあたり 5M~10M 点 (700MB~1.4GB) を考える。この場合、配列として A(100, 100, 500~1000)となる配列形状とする。8GiB のメモリ空間から考えるとまだ余裕があるが、想定する問題規模 1.8G 点を計算するためには 300 プロセス、75CPU 程度の計算資源となる。風況予測では、この程度の規模の計算を多数実行し、確度の高い発電量予測を行うシナリオである。また、In situ 可視化も導入予定であり、そのためのワークバッファも確保する観点からも、上記のような問題規模とした。

■低 B/F 実装による A64FX 上での性能向上推定

次に、Poisson 方程式の求解部分であるが、基礎方程式には微少な圧縮性を考慮した Poisson 方程式 (4.2.2-1) を用いる。

$$M^2 \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.2.2-1)$$

M はマッハ数、バーは格子スケールの物理量を意味する。RIAM-COMPACT では直交不等間隔格子を採用するため、座標変換のメトリクス計算が必要になる。物理空間と計算空間の計量関係を示すヤコビアン (4.2.2-2) と計算空間に変換後の式 (4.4.4-3) は下記のようになる。

$$J = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(\xi, \eta, \zeta)} = \begin{pmatrix} x_\xi & 0 & 0 \\ 0 & y_\eta & 0 \\ 0 & 0 & z_\zeta \end{pmatrix} = x_\xi y_\eta z_\zeta \quad (4.2.2-2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \right)^{n+1} = \frac{1}{J \Delta t} \frac{\partial (J \bar{U}^i)^*}{\partial \xi_i} + \left(\frac{M}{\Delta t} \right)^2 \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \quad (4.2.2-3)$$

U は反変速度、*は部分段階での予測値を表す。ラプラシアン表現は式 (4.2.2-4) となる。

$$\begin{aligned} \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \\ &= \underbrace{\frac{1}{x_\xi^2}}_{c_1} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \underbrace{\frac{1}{y_\eta^2}}_{c_2} \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + \underbrace{\frac{1}{z_\zeta^2}}_{c_3} \frac{\partial^2}{\partial \zeta^2} - \underbrace{\frac{x_{\xi\xi}}{x_\xi^3}}_{c_7} \frac{\partial}{\partial \xi} - \underbrace{\frac{y_{\eta\eta}}{y_\eta^3}}_{c_8} \frac{\partial}{\partial \eta} - \underbrace{\frac{z_{\zeta\zeta}}{z_\zeta^3}}_{c_9} \frac{\partial}{\partial \zeta} \end{aligned} \quad (4.2.2-4)$$

ここから、反復式は式(4.2.2-5)となり、

$$\begin{aligned} &\left(C_1 + \frac{C_7}{2} \right) p_{i+1} + \left(C_1 - \frac{C_7}{2} \right) p_{i-1} \\ &\left(C_2 + \frac{C_8}{2} \right) p_{j+1} + \left(C_2 - \frac{C_8}{2} \right) p_{j-1} \\ &\left(C_3 + \frac{C_9}{2} \right) p_{k+1} + \left(C_3 - \frac{C_9}{2} \right) p_{k-1} \\ &- \left\{ 2(C_1 + C_2 + C_3) + \left(\frac{M}{\Delta t} \right)^2 \right\} p_{ijk} = \frac{1}{J \Delta t} \frac{\partial (J \bar{U}^i)^*}{\partial \xi_i} - \left(\frac{M}{\Delta t} \right)^2 p_{ijk}^n \end{aligned} \quad (4.2.2-5)$$

左辺の係数を a~g、右辺を h で表すと、

$$a p_{k-1} + b p_{j-1} + c p_{i-1} + d p_{ijk} + e p_{i+1} + f p_{j+1} + g p_{k+1} = h_{ijk} \quad (4.2.2-6)$$

式 (4.2.2-6) に対して、SOR 反復のナイーブな実装をすると、疑似コードは List 4.2.1-1 のようになる。

List 4.2.1-1 Naïve implementation of the SOR method.

```
do j = jst, jed
do i = ist, ied
do k = kst, ked
  bb = RHS(k, i, j)
  pp = P(k, i, j)
```

```

C1 = coef(k,i,j,1)
C2 = coef(k,i,j,2)
C3 = coef(k,i,j,3)
C7 = coef(k,i,j,4)
C8 = coef(k,i,j,5)
C9 = coef(k,i,j,6)
dd = C1 + C2 + C3
rp = 0.5 * ((C1 * (P(k , i+1, j ) + P(k , i-1, j ))      &
+          C2 * (P(k , i , j+1) + P(k , i , j-1))      &
+          C3 * (P(k+1, i , j ) + P(k-1, i , j ))      &
+          C7 * (P(k , i+1, j ) - P(k , i-1, j )) * 0.5 &
+          C8 * (P(k , i , j+1) - P(k , i , j-1)) * 0.5 &
+          C9 * (P(k+1, i , j ) - P(k-1, i , j )) * 0.5) &
+ bb)
dp = ( rp / dd - pp ) * omg
pn = pp + dp
P(k,i,j) = pn
de = -(rp - pn * dd)
res = res + de * de
enddo
enddo
enddo

```

これは、座標変換の係数はあらかじめ計算しておき、演算量を減らす実装である。k 方向は L1 キャッシュ内、i 方向と j 方向へのアクセスは MMU と仮定すると、ロード 13、ストア 1、浮動小数点演算数は 32 であることから $B/F=1.75(\text{float})$ となる。これは **Operational Intensity** で表現すると、 $O.I.=1/(B/F)=0.57$ である。Fig. 4.2.1-10 は A64FX の諸元から算出した 1CMG あたりのルーフライン分析の結果である。メモリバンド幅は実測の推定値（公表されている STREAM の測定結果）を用いた。O.I.=0.57 の場合、SIMD 演算器がすべて動作している理想的な状態でも 117GFLOPS（ピーク性能の 8.6%）となる。そこで、メトリクス計算を展開し、ロードする変数を一次元の座標値のみにする。変更後の擬似コードは List 4.2.1-2 のようになる。座標値の配列は一次元なので、Z は L1、XY は L2 に収まることが期待される。MMU からのロードとストアの数は 7 に減少し、 $B/F=0.4375$ 、 $O.I.=2.2857$ となる。これから推定される性能値は 468GFLOPS であり、ピーク性能の 34.6%となる。しかし、この推定値は演算器がすべて動いている状態を想定しており、実際には、コア間のロードバランスや命令発行、データ待ちなどが発生するためこの値より小さくなるが、ナイーブな実装に比べて 4 倍の性能向上は見込める。ただし、この推定では、SOR 法には再帰性がなく SIMD 適用可能であると仮定している。実際には Red-Black SOR などにより SIMD 化可能な実装にする必要があるが、近年のキャッシュベースのアーキテクチャでは依存性を排除するための、Red-Black オーダリングにおける 2 回のスワイプは B/F を大きくすることにつながるため、別の効率的な手法が必要になる。

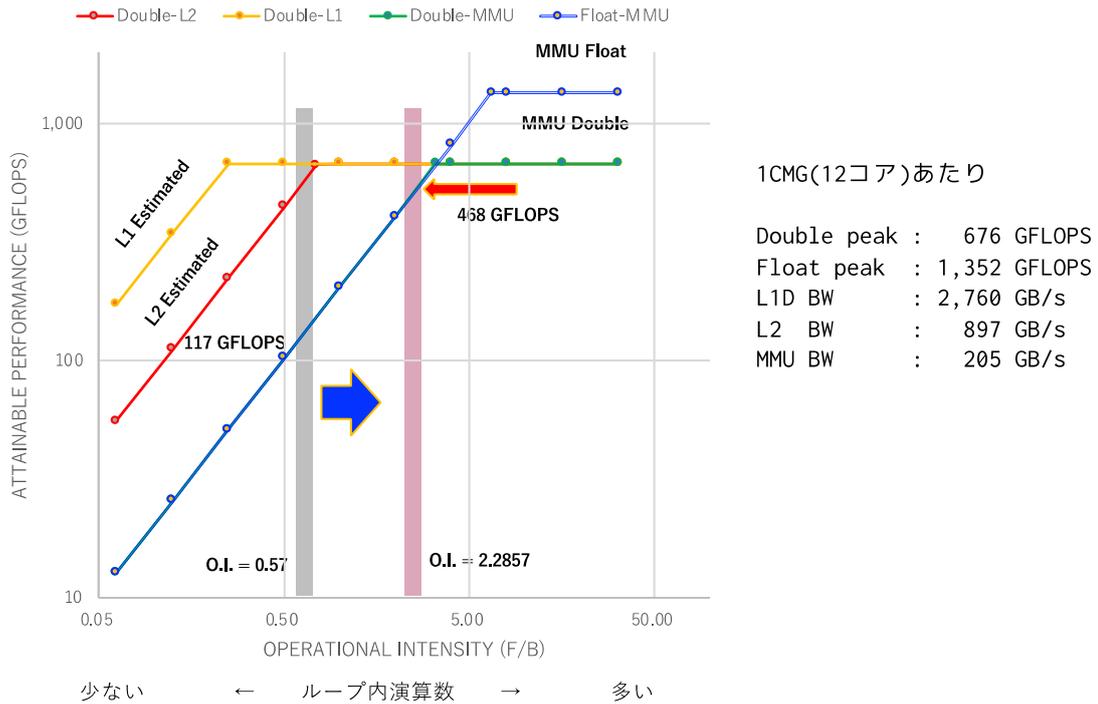


Fig. 4.2.1-10 Performance estimation based on Roofline analysis for Poisson kernel on A64FX.

List 4.2.1-2 Metric array free implementation for the SOR method.

```

do j = jst, jed
do i = ist, ied
do k = kst, ked
  bb = RHS(k,i,j)
  pp = P(k,i,j)
  XG = 0.5 * (X(i+1) - X(i-1))
  YE = 0.5 * (Y(j+1) - Y(j-1))
  ZT = 0.5 * (Z(k+1) - Z(k-1)) ! 6
  XGG= X(i+1) - 2.0*X(i) + X(i-1)
  YEE= Y(j+1) - 2.0*Y(j) + Y(j-1)
  ZTT= Z(k+1) - 2.0*Z(k) + Z(k-1) ! 9
  YJA = XG * YE * ZT
  YJAI = 1.0 / YJA ! 3
  GX = YE * ZT * YJAI
  EY = XG * ZT * YJAI
  TZ = XG * YE * YJAI ! 6
  C1 = GX * GX
  C2 = EY * EY
  C3 = TZ * TZ
  C7 = -XGG * C1 * GX
  C8 = -YEE * C2 * EY
  C9 = -ZTT * C3 * TZ ! 9
  dd = C1 + C2 + C3 ! 3
  rp = 0.5 * ((C1 * (P(k , i+1, j ) + P(k , i-1, j )) &
+ C2 * (P(k , i , j+1) + P(k , i , j-1)) &
+ C3 * (P(k+1, i , j ) + P(k-1, i , j )) &
+ C7 * (P(k , i+1, j ) - P(k , i-1, j )) * 0.5 &
+ C8 * (P(k , i , j+1) - P(k , i , j-1)) * 0.5 &

```

```

+          C9 * ( P(k+1, i , j ) - P(k-1, i , j ) ) * 0.5) &
+ bb) ! 22
dp = ( rp / dd - pp ) * omg
pn = pp + dp
P(k,i,j) = pn
de = -(rp - pn * dd)
res = res + de * de ! 8
enddo
enddo
enddo

```

■SLOR-PCR 法

上記のメトリクスを展開する Metrics Array Free (MAF) 実装は、B/F 低減に効果的であることがわかった。次に、BICGSTAB の前処理に利用する反復法について説明する。アイデアは 1980 年代に提案された Line-SOR 法であるが、この方法は SOR 反復の 1 座標軸方向に直接法を導入し、収束性を改善する手法である。直接法には最も演算量の観点から最も効率がよい LU 分解を用いている。しかしながら、この LU 分解は逐次アルゴリズムであり並列化ができない問題点がある。この問題点については、Cyclic Reduction やその並列アルゴリズムである Parallel Cyclic Reduction (PCR) が提案されており、近年、PCR の GPU 実装などが報告されている。ここでは SIMD 実装を導入した。Poisson 方程式 $\nabla^2 \phi = \Psi$ を差分法により離散化し、k 方向のスweepを陰的に扱い、式(4.2.2-9)の三重対角行列の連立一次方程式を得る。

$$-\frac{1}{6}\bar{\phi}_{k-1}^m + \bar{\phi}_k^m - \frac{1}{6}\bar{\phi}_{k+1}^m = \frac{1}{6}(\phi_{i-1}^{m-1} + \phi_{i+1}^{m-1} + \phi_{j-1}^{m-1} + \phi_{j+1}^{m-1}) + h^2 \psi \quad (4.2.2-9)$$

これを LU 分解などで解き、式(4.2.2-10)に示す緩和過程を実行する。

$$\Delta\phi = (\bar{\phi}^m - \phi^{m-1})\omega \quad (4.2.2-10)$$

$$\phi^m = \phi^{m-1} + \Delta\phi$$

PCR 法は LU 分解を並列処理する方法で、Fig. 4.2.1-11 に示すように、解くべき連立方程式を、依存関係のない複数の連立方程式の組へと縮約する操作により変形していく。1 回の縮約操作で 1 組の N 元連立一次方程式が 2 組の N/2 元連立一次方程式へと変わる。異なる組の連立一次方程式は独立に解ける。この縮約を繰り返していき、N 個の組になったときに解が得られる。図では、縮約ごとの方程式の一组のみを示している。例えば L3 では 4 組の方程式群がある。

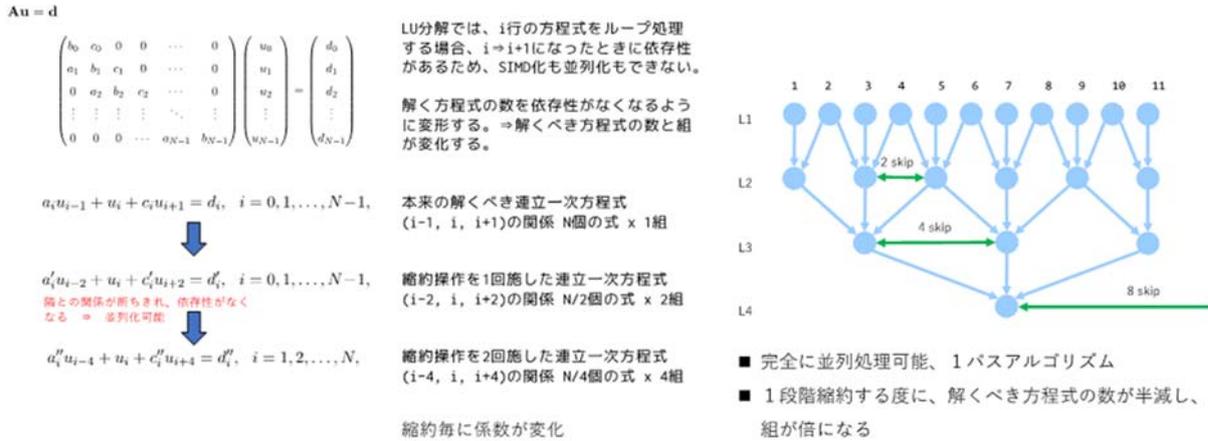


Fig. 4.2.1-11 An algorithm of Parallel Cyclic Reduction.

List 4.2.1-12 に PCR 法の擬似コードを示す。カーネル部分は直交等間隔格子を想定しており、MAF実装ではない。LU分解と比較すると1回あたりの演算量は増加するが、B/Fの点からは有利になる。また、ステージが進むとメモリアクセス幅は広がり (s=1,2,4,...)、B/F=1.7~3.4と変化するが、メモリアクセスは連続である。

List 4.2.1-3 Pseudo code of PCR.

```

void CZ::pcr(const int nx, const int pn,
             REAL_TYPE* d, REAL_TYPE* a,
             REAL_TYPE* c, REAL_TYPE* dl,
             REAL_TYPE* al, REAL_TYPE* cl, double& flop)
{
    int s=0;
    for (int p=1; p<=pn; p++)
    {
        s = 0x1 << (p-1); // s=2^{p-1}

        pcr_kernel(nx, s, d, a, c, dl, al, cl, flop);

        REAL_TYPE* tmp;
        tmp = a; a = al; al = tmp;
        tmp = c; c = cl; cl = tmp;
        tmp = d; d = dl; dl = tmp;
    }
}

void CZ::pcr_kernel(const int nx, const int s,
                   REAL_TYPE* d, REAL_TYPE* a, REAL_TYPE* c,
                   REAL_TYPE* dn, REAL_TYPE* an, REAL_TYPE* cn,
                   double& flop)
{
    REAL_TYPE r, ap, cp;
    int iL, iR;
}

```

```

flop += (double)(nx)*14.0;
#pragma omp parallel for private(iL, iR, ap, cp, r)
for (int i=1; i<=nx; i++)
{
    iL = std::max(i-s,0);
    iR = std::min(i+s,nx+1);
    ap = a[i];
    cp = c[i];
    r = 1.0 / ( 1.0 - ap * c[iL] - cp * a[iR] );
    an[i] = - r * ap * a[iL];
    cn[i] = - r * cp * c[iR];
    dn[i] = r * ( d[i] - ap * d[iL] - cp * d[iR] );
}
}

```

既に指摘されているように、ステージが進むと対角要素と非対角要素の係数の比が大きくなり、精度低下が懸念される。そこで、Fig. 4.2.1-12 に示すように、最終段の手前で縮約を終了し、最終段で得られる方程式を 2×2 あるいは 3×3 の小行列にとどめ、これらの小行列を直接反転する。小行列反転部のコードは低 B/F なので、高速化が期待できる。ルーフラインモデルによる推定では、小行列の反転部分は A64FX の 1CMG のピーク性能に対して約 30%程度の性能が見込める。なお、本アルゴリズムは対角優位な係数行列を対象とするため、ピボットリングは不要である。

開発した反復カーネルを Skylake-SP (Intel Xeon Gold 6140 2.3GHz)を用いて性能評価を実施した。Fig. 4.2.1-13 に測定結果を示す。まず、Red-Black SOR 法との比較を示す。図中の PCR(lsor_p1) と Red-Black SOR(sor2sma)を見ると、スレッド数が増えた場合に性能差が現れている。これは、最外側ループをスレッド並列化しているが (本アルゴリズムでは collapse(2)は使えない)、コア間のロードインバランスが現れている。R-B SOR の場合にはループを 2 回スイープするが、有効ベクトル長は半分になり、SIMD に使うデータはアクセスした半分は無駄になる。メモリ連続になるようにコードを修正することもできるが、メモリバンド幅が狭い場合には有効な策とはならない。これに対し、PCR ではループのスイープ順に並列化可能であるため実効性能はよいことが確認できる。次に、小行列を直接反転する実装の効果を見ると、わずかであるが性能向上が見られる。現在のところ、このカーネルはメトリック計算を含んでおらず B/F は大きな傾向であるので、実際のコードではさらに計算性能が向上する。

$$pn = \min 2^{pn} > NK$$

```

for (int p=1; p<=pn-1; p++)
{
  int s = 0x1 << (p-1); // s=2^{p-1}

  pcr_kernel(nx, s, d, a, c, d1, a1, c1, flop);

  REAL_TYPE* tmp;
  tmp = a; a = a1; a1 = tmp;
  tmp = c; c = c1; c1 = tmp;
  tmp = d; d = d1; d1 = tmp;
}

```

=== 最終段の実装はf90

```

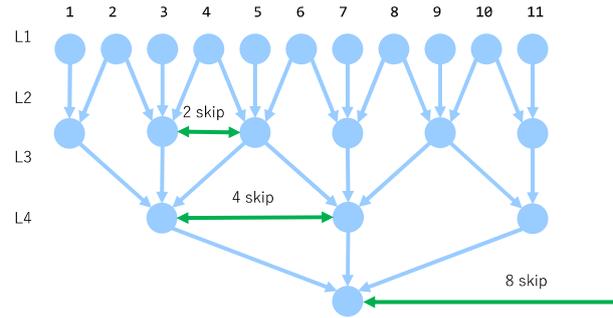
s = 2**(pn-1)

do k = kst, kst+s-1
  solve_mat2x2(); ! 4段unroll B/F= 0.67 => 307 GFLOPS
end do

do k = kst+s, ked-s
  solve_mat3x3(); ! 4段unroll B/F= 0.41 => 492 GFLOPS
end do

do k = ked-s+1, ked
  solve_mat2x2(); ! 4段unroll B/F= 0.67 = 307 GFLOPS
end do

```



- ステージが進むと、対角と非対角要素の比が大きくなり、精度的に不利
- 最終段の手前で縮約を終了し、最終段で得られる方程式 (2x2 or 3x3の小行列) を直接反転



A64FX 1CMGで達成してほしい性能 30%@peak

Fig. 4.2.1-12 Improvement of PCR algorithm introducing direct inversion of 2x2 and 3x3 matrices.

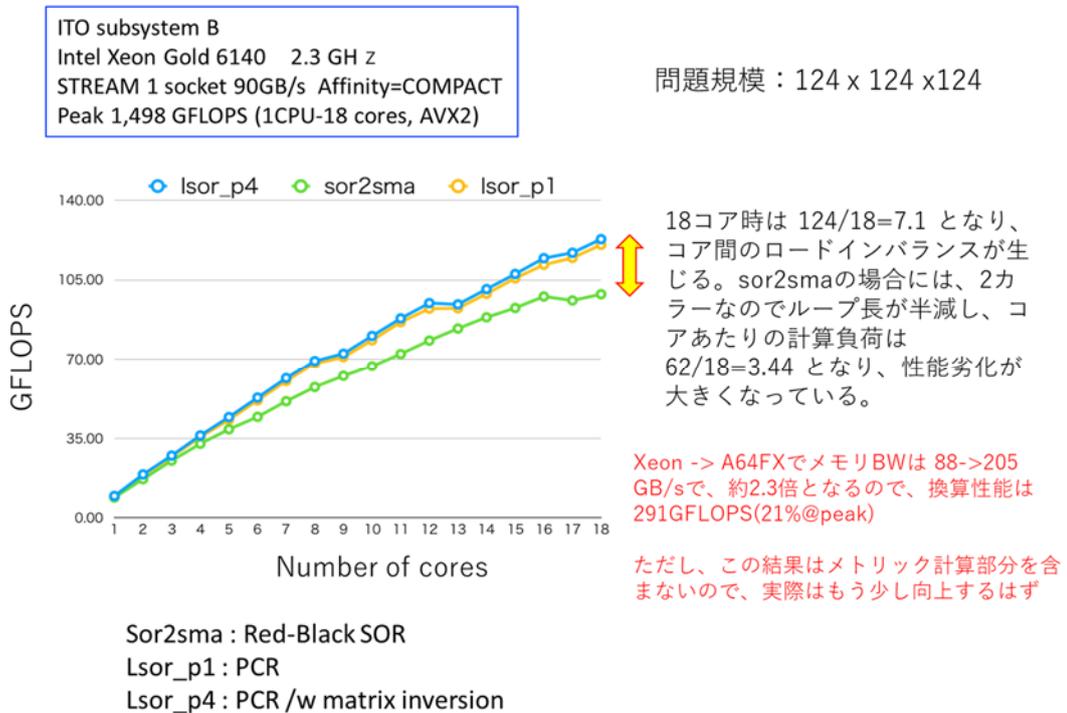


Fig. 4.2.1-13 Performance measurement of the developed SLOR-PCR algorithm kernel on ITO system at Kyushu University.

以上のように、本年度は RIAM-COMPACT への低 B/F アルゴリズムの実装と高効率な SLOR-PCR 法の開発と性能評価を実施した。また、ポスト「京」への適用を想定したパラメータとループラインモデルから実効性能を推定した。

c) 上流設計技術

c)-1 上流設計プラットフォームのキラアプリでの機能実証

上流設計プラットフォーム（製品の機能、性能、品質を開発の上流で正確に作り込み無駄な手戻りを削減するための製品開発基盤）として解析ワークフロー実行環境 WHEEL を開発してきた。昨年度までに Capacity Computing（パラメータ空間を探索する膨大な数の計算を効率的に実行する技術）に資する機能の開発を完了し、その機能を重点課題⑥との課題間連携として重点課題⑥キラアプリ ABINIT-MP による「京」micro キューを用いた 6000 ジョブを自動実行するワークフローで動作の正当性と実行完了性を検証した。昨年度は、本サブ課題で開発する多目的設計探索アルゴリズム CHEETAH と WHEEL を連携させた多目的設計探索ワークフローが動作することを、自動車会社により作成された実問題のベンチマーク問題を用いて確認した。

今年度は、サブ課題 C におけるボックスファンの性能・騒音最適化設計ワークフロー構築と実行に WHEEL を適用した。本ワークフローの概要を Fig. 4.2.1-14 に示す。このワークフローの特徴として、多目的設計探索アルゴリズム CHEETAH を用いた進化計算により、ファンの性能向上と、騒音低減を目的関数とした 2 目的最適化を行うこと、流体計算と音響計算のために必要な前処理として、ファンブレード形状生成ツールや、格子生成ツールに汎用アプリを利用すること、また、各アプリが動作する計算資源がそれぞれ異なること、といった実務上の運用を考慮した点が挙げられる。WHEEL は各処理単位をコマンドラインから実行可能なスクリプトで記述することや、各処理単位のデータインターフェイスをファイル単位とすることなどのルールにより、疎結合かつ汎用的なワークフローが構築可能である。これに加え、昨年度実証したように、パラメトリックスタディ機能による複数ジョブの同時投入や、CHEETAH との連携が可能であるため、本事例のような複雑な解析ワークフローも比較的簡単に実現できる。本年度はワークフロー全体構成の設計と、各処理間のデータインターフェイスを確認した。

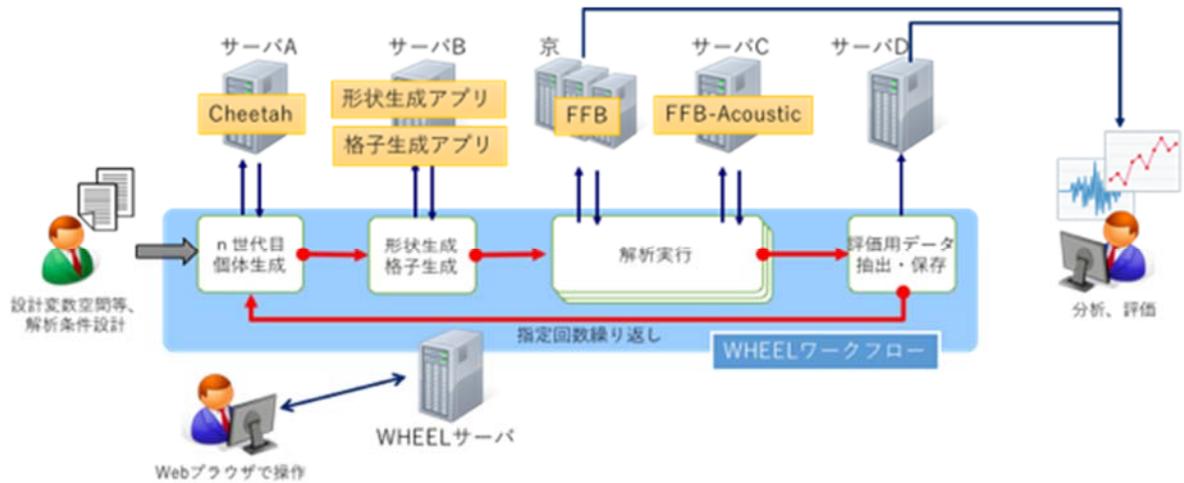


Fig.4.2.1-14 Diagram of a workflow for multi-objective design exploration using WHEEL.

また、これまで WHEEL はワークフロー構築時に入力データなどを指定する使い方を前提として開発してきており、同一のワークフローについて入力データを頻繁に変更して実行するような使い方において自由度が低かった。この点を改善するため本年度は WHEEL フロントエンド機能を新たに開発した。これは複数のワークフロープロジェクトの相互関係（「ひな形ワークフロー」と「（ひな形を元にした）派生ワークフロー」のような従属関係や、同じワークフロー構造で入力ファイルのみが違うといった関係）を管理する機能であり、本機能を従来の WHEEL に組み合わせることにより、解析パラメータやワークフロー構造を試行錯誤しながら変更・実行を繰り返すような使い方をサポートする。（Fig.4.2.1-15）

さらに、この本年度開発した新機能を含めた WHEEL 利用事例として萌芽的課題②「堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現」の Capacity Computing ワークフローの実装と評価を実施した。この課題では航空機の着陸間隔最適化のシミュレーションを行っており、予め決められた複数のシナリオをもとに大量の着陸間隔のモンテカルロシミュレーションを行う。つまり複数のシナリオ（入力データセット）に対して、同じワークフロー構造を複数回実行するような事例であり、今年度 WHEEL に対して追加開発した機能の実証に適している。本事例においては今年度ワークフローの実装を行い、複数シナリオでの実行が可能であることを確認した。実行するシナリオおよびワークフロー構造は今後も増えるため、継続的なサポートや重点課題以外への普及展開も検討している。

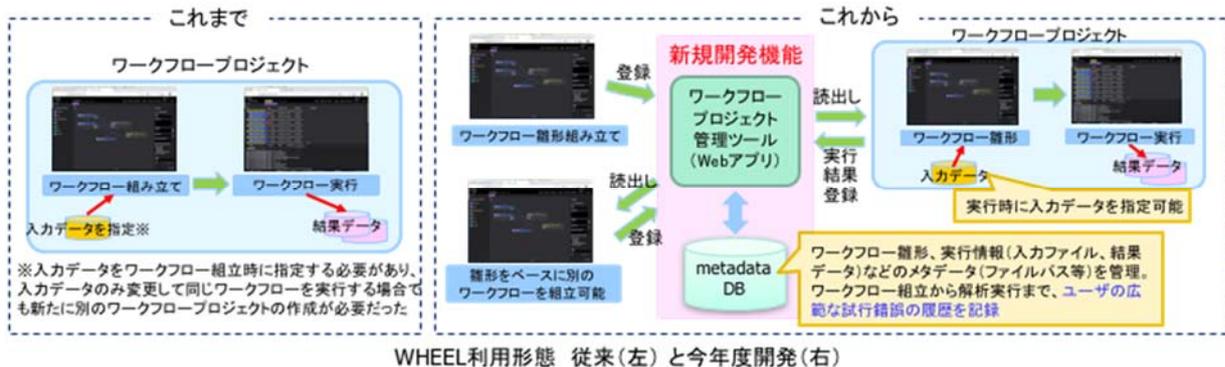


Fig.4.2.1-15 Comparison of the previous version of WHEEL (left) and the current version with the new function (right).

(3) 参考文献

- [1] J.-L. LIONS, Y. MADAY, AND G. TURINICI, A parareal in time discretization of PDEs, C.R. Acad. Sci. Paris, Serie I, 332, 2001, pp.661-668.
- [2] Mikio Iizuka, Kenji Ono, Investigation of Convergence Characteristics of Parareal Method for Advection Equation using Accurate Phase Calculation Method, 6th Workshop on Parallel-in-Time methods, October, 2018.
- [3] Mikio Iizuka, Kenji Ono, Convergence Acceleration of the PinT Integration of Advection Equation using Accurate Phase Calculation Method, SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, March, 2018.
- [4] 飯塚幹夫、小野謙二、移流問題に対する Parareal 法による時間並列計算の収束挙動, 第 32 回数値流体力学シンポジウム予稿集、B07-2、2018。

4-2-2. (サブ課題 B) リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発

(1) 研究成果の要旨

新素材や新たな動力を用いた次世代自動車を早急にかつ高い品質で実現するためには、既存の実験代替を目的とした CAE を活用した設計手法に対して、より高次元で CAE を利用した設計プロセスの革新が必要である。本サブ課題では、「京」で実現した自動車空力連成解析を基盤技術として HPC 環境を活用することで、設計上流側でデザイナーと技術者が協調したコンセプトデザインを支援する (リアルタイム) と共に、時々刻々と変化する運転条件変化を考慮した (リアルワールド) シミュレーションを実現することで予測精度・信頼性向上を実現する。リアルタイムシミュレーションでは、格子作成を含む解析ターンアラウンドタイムを、ストロングスケール計算技術とポスト「京」アーキテクチャとのコデザインにより抜本的に短縮し、実験・実測に匹敵する速度を実現する。リアルワールドシミュレーションでは、ウィークスケール技術による解像度向上と共に、企業の有する膨大な実験・実走行データを活用し、既存のシステムに対して、操縦安定性や乗り心地、快適性まで含めたより高次元の製品性能評価を可能とするシステムの実現を目指す。このシステムが実現すれば、開発期間のさらなる短縮化と製品の性能向上の支援が可能となり、日本の自動車産業の国際競争

力強化に貢献することができる。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施した。

a) 流体・構造統一連成解析手法を用いた設計システムによる車両空力の産業応用解析

昨年度に引き続き WLTP 認証取得に向けた実車実証空力解析とボンネット周り狭帯域空力音、さらに新たな課題として空力多目的形状最適化解析を、国立大学法人神戸大学が実施した。この結果、WLTP 実証解析で求められているタイヤ・ホイール回転の条件下で認証に要求されると想定される精度での空気抵抗予測が可能であることを実証した。狭帯域音予測では、フード領域周辺からの音の発生を再現すると共に、そのポスト「京」での定量的予測に向けた解像度の見積もりを行った。空力多目的形状最適化では、サブ課題 A と連携して多目的設計探索のフレームワークを構築し、その有用性を検討した。具体的には、セダン形状風洞モデルを対象に 8 つの設計変数と 4 つの目的関数を設定し、10 世代程度の進化計算を実際に行うことで、フレームワークが実設計環境での利用に耐え得ることを示すと共に、得られた最適化形状が実開発現場での経験と合致することを確認した。

b) ポスト「京」システムを対象とした基盤アプリの高速化と大規模化

AMR (Adaptive Mesh Refinement) の実装と、ソルバーのプロファイル・チューニングを、国立研究開発法人理化学研究所が実施した。この結果、ポスト「京」では「京」に対してノード当たり十数倍の性能向上、並列性能を合わせれば 20 数倍の性能向上の見込みがあることが確認された。

c) オイラー構造解析手法を用いた設計システムによる実車モデル構造の検証解析

時間進行スキームの改良、PIC 法の実装とその薄板に対する精度検証、幾何学的境界条件の付与法の開発やその実証を、国立大学法人山梨大学が実施した。この結果、薄板構造ベンチマークでの妥当性確認すると共に、実車自動車ホワイトボディを対象に強度解析を行い、汎用ソフトウェア (LS-Dyna) の解析結果と比較して、格子作成が数十倍高速化できることを確認した。

So far CAE technologies in industry are mainly used as alternative or supplementary methods to experiments, expecting to reduce costs and shorten total development period. On the other hand, to realize next-generation vehicles with new material and power resources in a shorter period at higher quality, the development process itself should be innovated by utilizing the CAE technology at a higher dimension. In this research and development project, based on the coupling aerodynamics simulation systems realized by utilizing the K computer, we will try to realize real world/time simulation. In the real time simulation, by utilizing the strong-scaling technology, simulation turn-around time including the pre-processing is reduced dramatically comparable to the real wind-tunnel experiments, which makes it possible for engineers to collaborate with designers' concept designing. In the real world simulation, by utilizing the weak-scaling technology and big experimental data acquired by industry, accuracy of the coupling simulation method is fundamentally improved to assess drivability, ride-comfort, and passenger's comfortability. These real time/world systems enable to further shorten the total development

period and support performance improvement of products, and is expected to contribute to international competitiveness of Japanese automotive industry.

This year, we performed verification analysis using a “K-computer” on a killer application that implemented the core element technologies in this research, and developed the following items.

- a) Industrial application analysis of vehicle aerodynamics by design system using fluid-structure unified coupled analysis method

An actual vehicle aerodynamic analysis under tire rotation, a narrow-band vehicle aerodynamic noise analysis and a multi-objective shape optimization analysis on vehicle aerodynamics have been conducted. As a result, we have demonstrated that it is possible to predict aerodynamic drag with satisfactory accuracy that is expected to be required for certification under the conditions of tire-wheel rotation required in WLTP. A narrow band sound prediction reproduces the generation of sound from around the engine-hood area and estimates the resolution for quantitative prediction in post-K computer. In aerodynamic multi-objective shape optimization, design exploration in cooperation with sub-task A was performed on four objective functions, and their usefulness was demonstrated. These studies have been conducted by Kobe University.

- b) Speed-up and large-scale implementation of platform applications toward post-K system

The AMR (Adaptive Mesh Refinement) framework has been implemented and profiler tuning of the compressible core solver has been conducted. As a result, it has been confirmed that it is expected to have a performance improvement of more than a dozen times per node and the entire parallel performance should improve by 20 times on the post-K system with respect to the K-computer. These studies have been conducted by RIKEN.

- c) Verification analysis of real vehicle model structure by design system using Euler structural analysis method

The semi-implicit time integration scheme was implemented, coupled on the PIC based Eulerian structured analysis method, and the verification study for the thin plate has been conducted. And by the method for applying geometric boundary condition was implemented, the practical vehicle white-body stiffness analysis has been realized. The validity in the thin plate structure benchmark was been shown, and also confirmed its usefulness in the actual vehicle white-body problem. These studies have been conducted by Yamanashi University.

(2) 本研究の内容

- a) 流体・構造統一連成解析手法を用いた設計システムによる車両空力の産業応用解析
- i) ホンダとの連携による、WLTP 認証取得に向けたタイヤ回転を伴う実車空力解析

昨年度から引き続き、WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) による CFD を用いた空力抵抗の評価試験手法の認証取得に向けた取り組みとして、(株)本田技術研究所と連携して 6 仕様を含む実車フルモデル CAD データ群に対する空力解析を行った。WLTP では、測

定条件は実際の走行条件に近いタイヤ/ホイール回転を含む条件とすることが推奨されているが、一般的に CFD では移動境界によるタイヤ回転の計算は困難を伴う。例えば、非定常流れシミュレーションによる計算時間、移動に伴う格子変形による計算の不安定性などに問題を抱えており、市販のソフトウェアで実行するのは容易ではない。一方、本研究で開発された CUBE は移動境界問題の取り扱いを得意とし、タイヤ回転への適用も容易である。そこで本年度は、解析手法を移動境界問題へ拡張し、タイヤ回転を伴う自動車空力問題の実証解析を行った。なお、本研究では主に形状の違いによる空力抵抗差 $\Delta C_d A$ を評価している。

Fig. 4.2.2-1 は、セダンタイプの車両で、ホイール、スポイラー/デフレクター、その他の空力部品が異なる合計 6 つの構成による違いを示している。車両モデルはオープングリル条件で、計算格子は解像度約 6mm、約 1 億 2 千万セルであり、生成には約 10 分程度しか要しない。計算は、各ケースそれぞれ「京」コンピュータ 617 ノードを使用し、計算時間約 24 時間で物理時間 1.4 秒の結果が得られた。これはタイヤ回転無しの場合と比べて約 2.5 倍の計算時間に相当するが、この際 10 タイムステップ毎に移流する形状情報を初期化しており、これを 50 ステップ毎にすると約 1.6 倍程度高速化できることが判っている。

得られた典型的な流速分布を Fig. 4.2.2-2 に、抵抗係数 (Cd 値) の予測結果を Fig. 4.2.2-3 に示す。仕様違いによる Cd の差がよく捉えられていることがわかるが、従来手法の市販のソフトウェアによる解析では、同程度の結果精度を得ることは困難であったことを記しておく。Fig. 4.2.2-4 に示すように、 $\Delta C_d A$ は WLTP が要求する $\pm 0.015 \text{ m}^2$ の要求精度を十分満足している。また、従来予測が困難とされてきた揚力係数 (フロントリフト、リアリフト) についても評価しており、こちらも良好な結果が得られている。

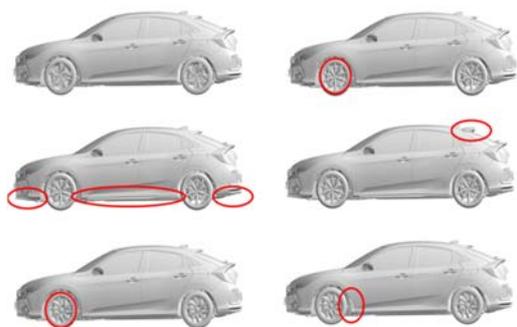


Fig. 4.2.2-1 Configurations of full vehicle model.

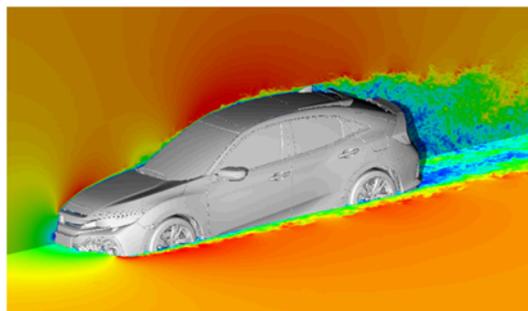


Fig. 4.2.2-2 Instantaneous velocity magnitude distribution of center section.

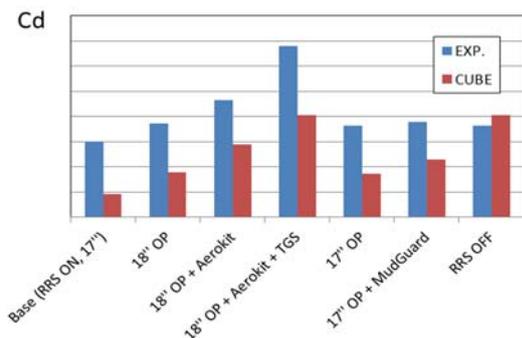


Fig. 4.2.2-3 Comparison of drag coefficient.

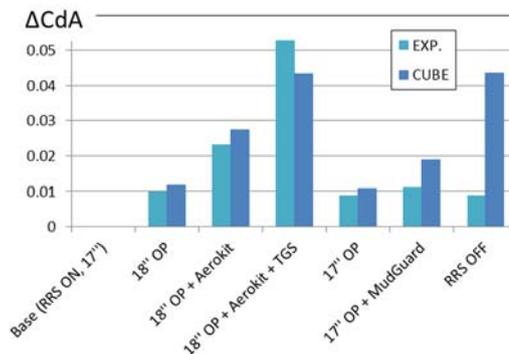


Fig. 4.2.2-4 ΔCdA of different configurations.

タイヤ回転を壁面の流速境界条件に置き換え計算する手法も試みている。この場合形状情報の初期化を必要とせず、計算時間は移動境界なしの場合と同等となる利点がある。Cd 値流れ場ともにタイヤ回転有りの場合とほぼ同等な結果を示しており、代替手法として有望であることが確認できた。

以上の結果は、理化学研究所が主催する「HPC を用いた次世代自動車用 CAE コンソーシアム」を通じて各自動車メーカーに訴求し、いくつかのメーカー担当者からすでに活発な質問が寄せられている。今後もこのコンソーシアム活動を通じて、従来手法と比較した CUBE の優位性を実証していく予定である。

ii) スズキとの連携による、ボンネット周り狭帯域空力音解析

自動車が発生する狭帯域騒音は、品質問題として設計現場では多大な労力を要して対策がなされている。市販コードを含めた従来手法では予測精度は不十分とみなされており、本研究では昨年度より、コスト削減と開発期間の短縮を目的とした CUBE による圧縮性統一解法の開発を進めてきた。昨年度の取り組みでコアとなる要素技術が整備されたが、計算精度の改善のために高解像度・大規模計算のリソースの配分を待つ状況にあった。そこで本年度は、与えられたリソースから可能な範囲で大規模解析を実行し、実車フルモデルによる狭帯域音の予測を試みた。

使用した計算格子は、エンジン・フード先端近傍で発生する音響フィードバックを捕捉できるように、Fig. 4.2.2-5 左図に示すように先端部のすき間 (約 5~6mm) に最小幅 0.2mm の格子を集中的に配し、計 20 億程度の計算セル数としている。フィードバック現象を十分解像するにはすき間に 100~数百点必要であることが既に解っているが、計算資源の制約から本年度の実施は断念した。計算には「京」コンピュータ 13,086 ノードを用い、約 50 時間使用している。Fig. 4.2.2-5 右図は流れに生ずる圧力変動成分を可視化した図であり、フード先端から円状に伝搬する音響振動が発生していることが見て取れる。これは車体まわりの流体渦に起因する他の騒音成分と比較すると全く異なる現象であることが解るが、音響フィードバックによる共鳴がなければ現れない波動である。フード近傍の 3 つの測定点における音圧スペクトルの解析結果を Fig. 4.2.2-6 に示す。約 2700Hz 近傍で特徴的なピークを示しており、倍長波成分とみられる小さなピークもいくつか観察される。実測におけるピークはこの半分程度の周波数であったことから、本計算結果はまだ十分な解像度を有していないと推察されるが、本計算によって初めて実車における音響フィードバック音を捉えることに成功し、本手

法が有望であることを示すことが出来た。



Fig. 4.2.2-5 The computational grid overview (left) and the propagation of the pressure fluctuation (right).

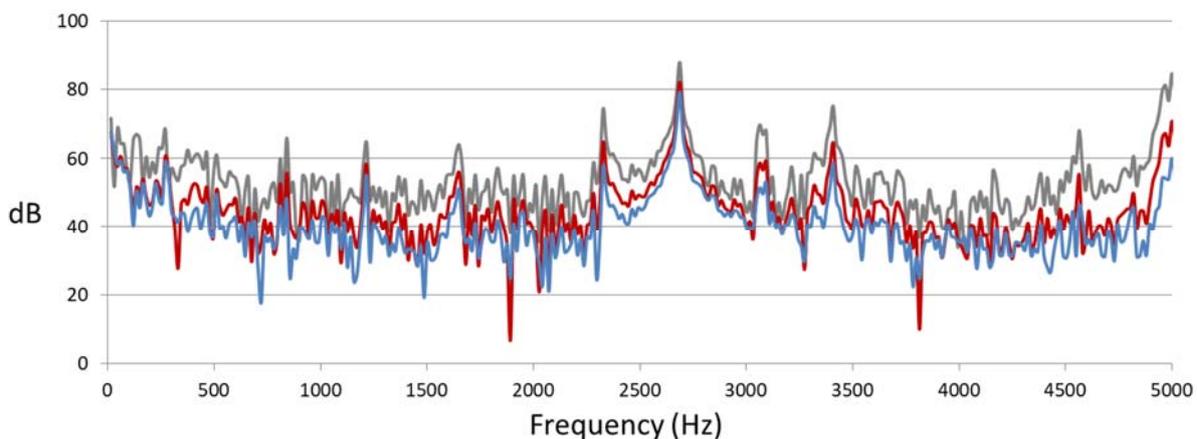


Fig. 4.2.2-6 Sound pressure spectrum at each measurement point.

計算精度の改善にはやはり計算格子解像度の向上が不可欠である。本年度見積もられた定量的予測のための要求解像度に合わせて、今後も引き続きポスト「京」に向けた計算手法の高速化、計算リソースの獲得へ取り組んでいく予定である。

iii) マツダおよびサブ課題 A との連携による、空力多目的形状最適化解析

設計の初期段階で空力性能を効率的に最適化することを目的として、CUBE による多目的最適化解析フレームワークを開発した。このフレームワークでは、宇宙航空研究開発機構との連携によりサブ課題 A で開発された多目的進化最適化ソフトウェア CHEETAH、および米国 Detroit Engineered Products 社による形状モーフィングソフトウェア MeshWorks を用いた。各ソフトウェアは、テキストベースの結果またはパラメータファイルを介して情報を交換することによって情報交換している。CUBE は階層直交格子に基づいているが、複数の変化する車両形状に対して単一の計算格子と共用することができるため、計算格子生成およびモーフィングに関する問題を回避することができる。

連携機関との協議により、以下の条件を採用するに至った。ターゲットは単純化されたセダン型自

動車モデルとし、目的関数は車両が直進しているときおよび接近する流れがヨー角（車両の前後軸と基準軸とのなす角度）を有するときの抗力と揚力とした。最適化の規模は 18 個体に対して約 5 世代としている。これはつまり、4 目的関数による多目的最適化であることを意味する。これら条件の元、開発したフレームワークで最適化計算を実行し、実際の設計と同様の傾向を示す目的関数の解を得ることができ、本フレームワークの妥当性を確認することができた。Fig. 4.2.2-7 に、この際得られたパレート解を示す。

今後は、本計算では世代数がまだ少なく十分に収束したとは言えないため、必要な計算資源を確保しながらさらに計算を続ける。また、形状変更幅を狭くしたり、R 変形を組み込んで変形の自由度を増すなど、より詳細な設計変更を含めることも合わせて検討している。

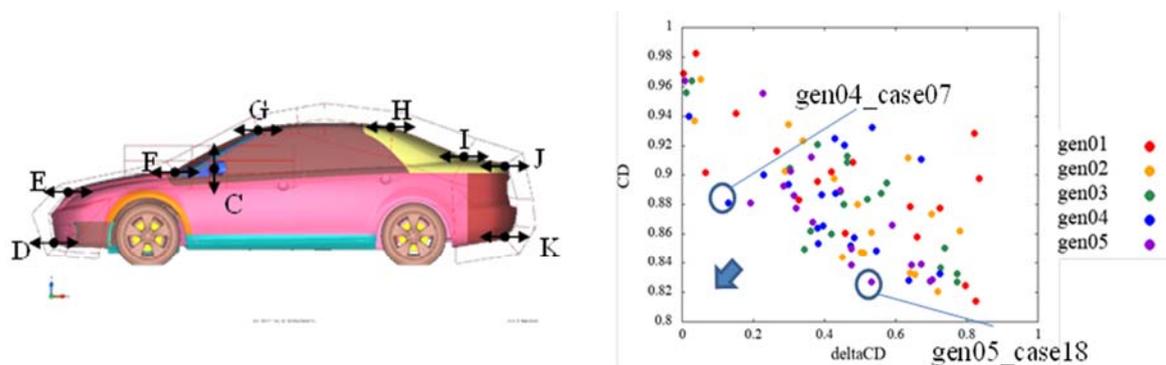


Fig. 4.2.2-7 The geometry deformation parameters (left) and optimized results of Pareto solution on 5th generation (right).

b) ポスト「京」システムを対象とした基盤アプリの高速化と大規模化

i) AMR (Adaptive Mesh Refinement) 機能の実装と MPI 並列化

解適合格子法 (Adaptive Mesh Refinement) は、乱流に代表されるような、局所的な解像度に敏感な物理現象を解く際に、必要な領域のみに計算格子を集中させ、あるいは解の進展に伴って動的に格子の解像度分布を変化させ、計算メモリ量と計算時間を節約することを企図した計算手法である。HPC 環境で効率的に計算を行うことが出来るため、Exa スケールに向けた要素技術として研究開発に取り組んでいる。昨年度にオクトツリー・ベースの基本的なデータ構造の構築を行ったが、BCM (Building-Cube Method) では局所的な解像度の変化率を 2 に抑えなければならない制約があり、その対応が課題であった。本年度はその制約条件への対応、ならびに標準の MPI 環境による並列化に取り組んだ。今後は、動的負荷分散、局所時間刻みによる計算高速化、実用的なエラー・エスティメータ、分割指針の検討を行っていく。

ii) 圧縮性統一解法ソルバーのプロファイルおよびチューニング

昨年度に引き続き、「京」コンピュータにおける圧縮性ソルバーの単体・並列性能向上ならびにポスト「京」性能推定ツールによる評価を試みた。対象とする問題は、単純キャビティ流れで、音響解析を想定したスキームを用いた。セル界面における流束の評価には MUSCL 法と Roe 法を用いており、時間進行には 3 次精度の Runge-Kutta 法、粘性流束の評価には 2 次精度中心差分を用いた。

まず、各ノードあたりの Cube 数は 64 で固定とし、各方向にセルを 16 分割し、「京」コンピュータ 32,768 ノードまでのウィークスケーリングによる並列性能の測定を行った。その結果、実効並列化率は 99.99954%、並列化効率は 89.142268%、「京」コンピュータ全ノード使用時の並列化効率は 75.324899%であった。数万ノード、数十万コアの大規模計算でも十分並列性能が確保できており、ポスト「京」でも十分な並列性能を発揮できる目処が立ったと言える。

また、昨年度までのチューニング作業を基に、課題であった浮動小数点演算待ち等のスケジューリングの問題、ループ分割等のアルゴリズム見直しを行い、さらなる高速化を実施した。対流項計算ループでループ分割して SWP 化を図った結果、約 8%の性能向上が得られた。またスレッド並列時の構造体配列コピーの最外ループを明示することで、当該ループが 8.61 秒から 0.86 秒へと高速化された。他に、SIMD 化阻害要因となるループ (minmax 関数を含む演算) を分離、対流流束計算ルーチンのメモリアクセス順序変更、コンパイラ指示行 (!OCL NOALIAS 等) の明示による SIMD 化促進、等を試行し、ポスト「京」性能評価ツールを用いた性能推定を行った結果、ポスト「京」では「京」に対してノード当たり 12.8 倍の性能向上、並列性能を合わせれば約 25 倍の性能向上の見込みがあることが確認された。Table 4.2.2-1 にその結果を記しておく。しかしながら、理研シミュレータを用いた性能推定では性能向上率が鈍化しており、今後は理研シミュレータを活用した原因推定ならびにそのチューニングを実施する。

Table 4.2.2-1 Results of performance evaluation and tuning of compressible solver.

| ソースコード +実行環境 | 性能 [GFLOPS] | ノード性能 [GFLOPS] | 効率 | 倍精度ピーク効率 | ノードメモリスルー プット [GB/s] | SIMD命令率 | ノード演算 数 [GFLOP] | 経過時間 [sec] |
|-------------------|----------------|-------------------|--------|----------|----------------------------|---------|-----------------------|---------------|
| ASIS+京 | 2.29 | 18.29 | 14.29% | 14.29% | 7.32 | 1.89% | 1405.05 | 76.81 |
| 180820版 +推定ツール | 4.89 | 234.59 | 8.49% | 8.49% | 199 | 45.08% | 5616.39 | 23.94 |

c) オイラー構造解析手法を用いた設計システムによる実車モデル構造の検証解析

i) 構造-流体統一 PIC スキームにおける動的半陰解法の開発

本課題では、従来手法では計算困難な詳細形状を再現した大規模構造解析問題に対応するため、オイラー型構造解析手法に粒子法の一つである PIC (Particle in Cell) 法を組み合わせた独自の流体-構造統一解法を開発しており、本年度はそのアルゴリズムの改良ならびに動的半陰解法の実装を行った。

昨年度に引き続き、PIC スキームにおいて時間進行にクランク・ニコルソン法を採用し、半陰解法としたスキームの開発を行った。これは実用問題において圧力による厳しい時間増分制約を回避するために、必要不可欠な技術である。結果、FSI (Fluid and Structural Interaction) のベンチマーク問題で数値解の定量的妥当性を確認し、陽解法と比べて実行時間を最大で 68.8%削減することに成功した (Fig. 4.2.2-8)。これにより、自動車をはじめとする産業応用問題へ本手法を適用できる目途が立った。

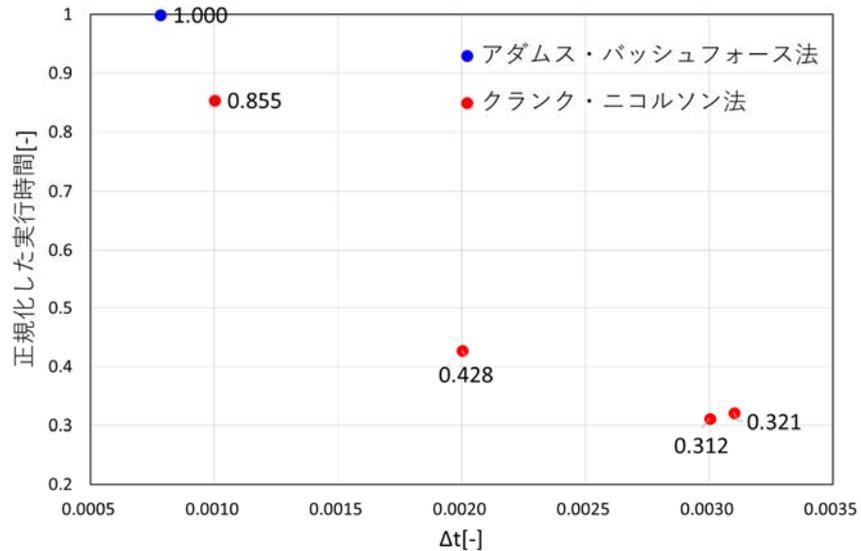


Fig. 4.2.2-8 Comparison of calculation time (explicit vs. implicit scheme).

また、本課題の最終ターゲットは自動車のような薄板構造物であり、従来のシェル要素に代わる手法として機能することを確認しておかなければならない。そこで、本手法を Ko[1]らによる薄板構造ベンチマーク問題へ適用し、その妥当性を確認した。Fig. 4.2.2-9 にその結果概要を示す。約 10mm の薄板構造物に対し鞍型荷重分布を適用し、 $y=0$ 平面を完全拘束した解析を行い、評価点における変位量の時刻歴を従来手法を用いた市販ソフト (LS-Dyna) による解と比較した。結果、格子解像度を向上するにつれて従来手法による解に漸近し、格子が十分細かい場合は同等な結果が得られることを確認できた。

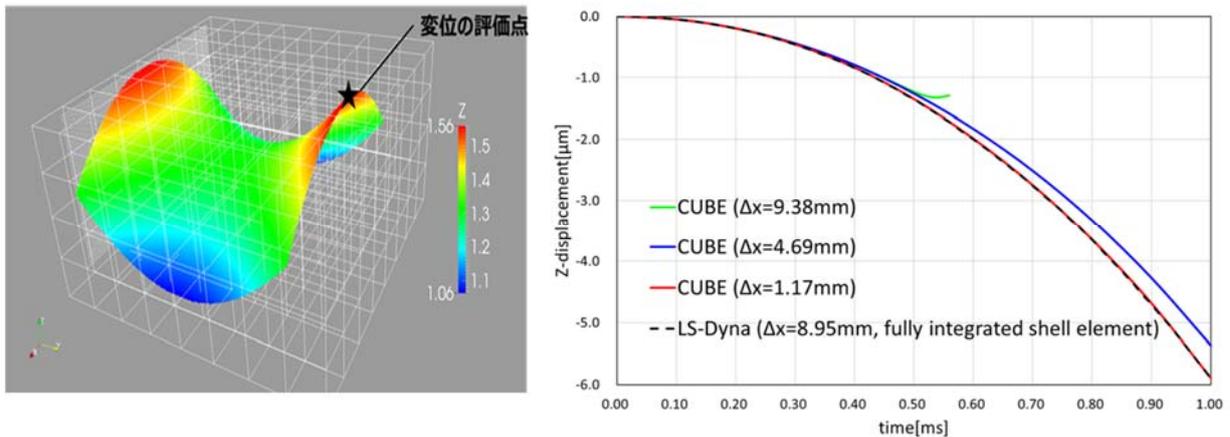


Fig. 4.2.2-9 Displacement time history (right) of the evaluation point (left) of thin plate structure.

ii) 幾何学的境界条件付与の手法開発、ならびにスズキとの連携による自動車ホワイトボディ実証剛性解析

オイラー型解法では、計算格子の節点と物体境界が一致しないため、境界条件の付与が困難とな

る。そのため本課題で開発した PIC 法に基づく流体-構造統一解析法を用いて自動車のような詳細複雑形状に対する解析を行うには、幾何学的境界条件の実用的な付与方法を考案する必要がある。そこで本研究では、埋め込み境界法により幾何学的境界条件を付与する手法を開発し、詳細複雑形状に対して適用可能とした。これは変位固定もしくは速度境界条件を付与することにより、剛体治具（工作物の固定等をする、剛体の装置）を再現する手法である。

本手法をスズキ株式会社提供による実車体 CAD データを元とした自動車ホワイトボディの剛性解析を行い、その妥当性を調べた。この例では、構造は鋼のヤング率と質量密度を持ち、流体領域は 20°C での空気の粘度と質量密度として設定されている。格子解像度は約 1.86mm とし、セルの総数は約 4 億 6,000 万、計算には「京」コンピュータ 14,000 ノードを使用した。Fig. 4.2.2-10 は、自動車業界で広く使用されている商用構造解析コードの 1 つである LS-Dyna と CUBE との間のミーゼス応力分布の比較を示しており、定性的に良好なミーゼス応力分布が得られていることが確認できる。また、Fig. 4.2.2-11 に示すように、本手法が自動車構造シミュレーションの所要時間を大幅に短縮できることを実証できた。これは、自動車の薄鋼板に基づく 3 次元モデルで直交格子に基づくオイラー構造解析法を使用した剛性解析の、おそらく世界初の成功例と思われる。

現在、格子解像度を 0.93mm（総セル数約 20 億）の解析を準備しており、計算リソースの割り当てを待つ状況にある。今後は引き続き、大規模解析による精度確認の他、解析精度を向上させるための開発・改良、スポット溶接のモデル化に取り組み、定量性の向上を図っていく予定である。

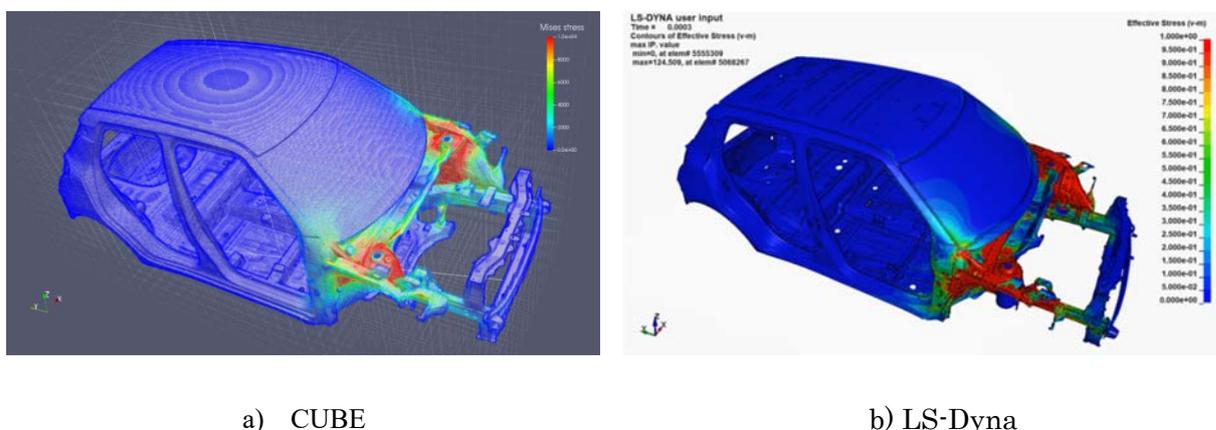


Fig. 4.2.2-10 Comparison of Mises stress distribution: a) CUBE and b) LS-Dyna.

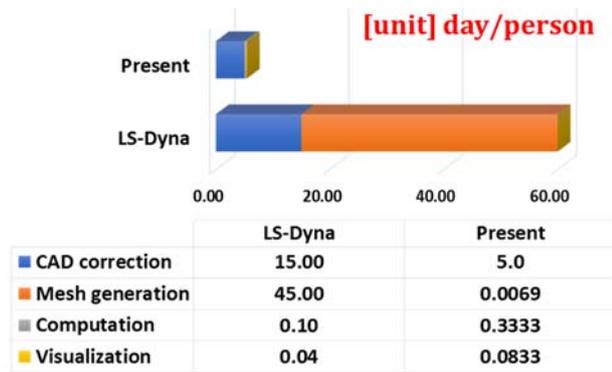


Fig. 4.2.2-11 Comparison of turnaround time of stiffness analysis of white body.

(3) 参考文献

- [1] Yeongbin Ko, Youngyu Lee, Phill-Seung Lee, Klaus-Jurgen Bathe, Performance of the MITC3+ and MITC4+ shell elements in widely-used benchmark problems, Computers & Structures, Volume 193, 2017, Pages 187-206.

4-2-3. (サブ課題 C) 準直接計算技術を活用したターボ機械設計システムの研究開発

(1) 研究成果の要旨

本サブ課題では、既存のターボ機械設計の高度化に資する設計システムを開発するとともに、これをターボ機械設計に適用しその有効性を実証する。具体的には、エクサスケールの計算機を活用し、最大 1 兆グリッドの計算により、ほぼ全てのターボ機械の製品性能を実験と同じ精度で予測する大規模流体解析技術を開発するとともに、大規模解析で取得した結果をリファレンスデータとして活用することにより既存の RANS ベースのターボ機械製品評価技術を高度化し、これを用いた多目的最適化計算をサポートするターボ機械設計システムを研究開発する。これまでの乱流の大規模解析に関する研究は、計算の大規模化・高速化を実現することにより、RANS 解析では予測が不可能な現象の予測に主眼が向けられてきたが、本サブ課題では、この乱流の大規模計算技術をベースとし、現在ターボ機械設計の主要解析ツールと位置づけられる RANS 解析自体を高精度化し、これを多目的最適化設計に適用する。これにより、開発する設計ツールが、単なる実験の代替ツールという枠を超え、ターボ機械設計にとって従来より飛躍的に有用な情報を提供することを目指す。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施した。

a) エクサスケール計算機で高速動作する流れソルバーの開発

a)-1 ループ構造組み換えによるコアカーネル高速化技術の開発

運動方程式ルーチンのループ組み換えによる高速化を実施した。この結果、組み換え部分で約 3 倍、ループ全体で約 2 倍の高速化を達成した。

a)-2 複数ベクトル利用による高速化技術のシステム実装

運動方程式における非線形項の取り扱いに関する基礎検討および実装を実施した。この結果、非線形項を含むシステムにおいても、マトリックスソルバー内で係数計算をする手法を実装する

ことにより複数ベクトル化できる目途を立てることができた。

b) 大規模流体解析における収束性改善のための乱流解析手法の研究開発

b)-1 ターボ機械への適用のための圧縮性ソルバーによる実証解析

ターボ機械への適用のための圧縮性ソルバーによる実証解析に関しては、精度向上のため、スキームを変更し、検証のため、NACA0012 翼周り流れの LES 解析を実施した。この結果、翼表面の圧力係数が計測データと良好に一致していること、および音場の構造を捉えることができることが確認され、スキームの変更により、乱流から発生する空力騒音の予測精度の向上を実現した。

c) 格子ボルツマン法 (LBM) による直接計算手法の研究開発

c)-1 複雑形状まわり流れに関する実証解析

単一の解像度を有するシングルキューブから、壁面近傍に高解像度を配置する階層的な解像度を有するマルチレベルキューブの作成機能の開発を実施した。この結果、テスト問題において、これまでのシングルキューブと同じ程度のグリッド数で、一桁小さな解像度の計算ができることを確認した。

d) LES (Large Eddy Simulation)解析用の壁面モデルの研究開発

d)-1 壁法則併用型 LES 壁面モデルのプロトタイプコードの開発と検証

サブ課題 D で開発する壁面モデルの実装し、2 次元翼 (DU25 A17) 周り流れに対し、Wall-Modeled LES 解析を実施した。この結果、翼表面の圧力分布を予測できること、および、解像度が不足する LES 解析では過小評価する傾向にあった摩擦速度を、壁面モデルの導入により適切に計算に取り込むことが可能であることを確認した。

d)-2 乱流構造に基づく LES 壁面モデルのプロトタイプコードの開発と検証

粗格子 LES の瞬時変動速度確率密度関数が解像格子 LES のそれと一致するように、主流方向瞬時変動速度にフィードバックを施す壁面モデルを開発し、平板乱流を対象にその妥当性の検証を実施した。この結果、格子幅および時間刻み幅を 4~8 倍した壁面モデル LES により、壁面近傍において解像格子 LES と同等の予測精度が得られることを示し、本手法の妥当性を確認した。

In this sub-subject, we will develop a design system for improving current turbomachinery design and validate its ability by applying the system to turbomachinery designs. By using this system, prediction of turbulent phenomena with an accuracy as experiments will be possible by performing fully resolved large eddy simulation (LES) with a large scale of computational mesh which has up to a trillion grids. This system also supports a multi-objective optimization with RANS method. The parameters of RANS will be tuned by using reference data obtained by fully resolved LES. RANS is widely used for current turbomachinery design, therefore improvement of RANS will contribute to it. In this sub-subject, the technology for predicting turbulent phenomena by a large scale computation will be used for improvement of RANS.

In this year, we validated software to which core technics were implemented on machine which is equivalent to the post-K, in terms of following items:

- a) Development of flow solver with high performance on Exa-scale computer
 - a)-1 Development of speed-up technic of core kernel by changing operation loop

The performance of the core kernel for momentum equations were improved by changing operation loop. Three times higher performance was obtained for this loop.
 - a)-2 Implementation of speed-up technic by multi-vectors function

Computational method with multi-vectors for momentum equations which have non-linear term was investigated. This method was implemented to the prototype core kernel.
- b) Investigation for computing turbulence with high rate of convergence in large scale computations
 - b)-1 Variation of compressible flow solver for computing internal flow of turbomachinery

Accurate predictions of aeroacoustics noise were realized by improvement of schemes implemented to the compressible flow solver.
- c) Investigation of direct simulation of turbulence by Lattice Boltzmann Method (LBM)
 - c)-1 Validation for computation of flow around a complex geometry

Software for making multi-level cubes were developed. Computational cost was significantly reduced by using multi-level cubes.
- d) Investigation of wall-model large eddy simulation (WM-LES)
 - d)-1 Development and Verification of wall model based on log-law

Wall model based on log-law was implemented to the flow solver. Usefulness of the wall model was confirmed by computing turbulent flow around two-dimensional blade.
 - d)-2 Development and Verification of wall model based on turbulent structure

Feedback term referring to probability density function (PDF) was implemented to the flow solver. Usefulness of the wall model was confirmed by computing turbulence boundary layer on flat plate.

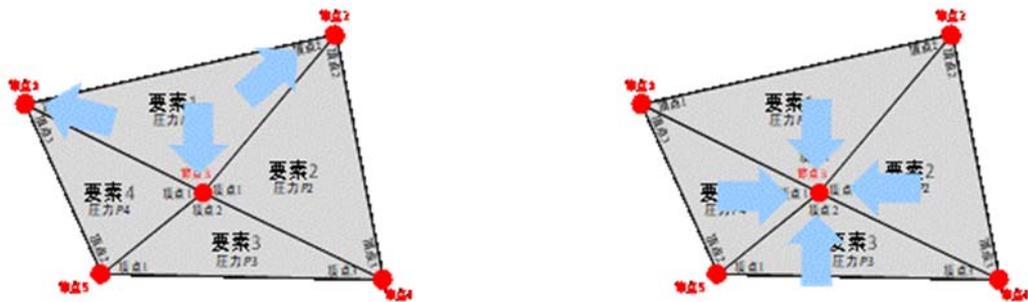
(2) 本研究の内容

- a) エクサスケール計算機で高速動作する流れソルバーの開発
 - a)-1 ループ構造組み換えによるコアカーネル高速化技術の開発

流体解析コード **FFB (FrontFlow/blue)** の流れソルバーはホットカーネルとして、①運動方程式のくみ上げ処理、②運動方程式行列ソルバーにおける行列ベクトル計算 (以下、**AX** 計算)、③連続の式の行列ソルバーにおける **AX** 計算その 1 (勾配計算)、④連続の式の行列ソルバーにおける **AX** 計算その 2 (発散計算) で構成される。連続の式の行列ソルバーにおける **AX** 計算では、右辺ベクトルのラプラシアンを計算するが、**FFB** ではラプラシアンに相当する行列係数を陽に保持せず、右辺ベクトルの勾配とその発散を計算することによりラプラシアンを計算しているため、**AX** 計算が 2 段階に分かれている。高速化前の段階 (コデザイン開始時) では、上記①～④の処理時間が全体に占める割合はそれぞれ 8.5%, 5.1%, 33.6%, 17.2% (その他は 35.6%) であった。昨年度まではホットカーネル③、④に対し高速化を行い、それぞれ 2.4 倍、1.4 倍の高速化を実現している。また、ホットカーネルの部分に関してもスレッド化の徹底、通信ルーチンのパック・アンパック処理の改良、ゼロクリ

ア処理の高速化等により 2.2 倍の高速化を実現している。①に関しては、全体に対する割合が小さかったため優先順位が低かったが、寄与率の高い他のホットカーネルの高速化により、寄与率が上がり、また①の処理はメモリからのロードあたりの演算が多いため高速化が望めるため、今年度はさらなる高速化を目指し①のチューニングを実施した。①では、運動方程式における各項（時間項、移流項、拡散項）を要素ごとに計算し、節点に足しこむ処理をしている。改良前の実装では要素でループが回っており、ランダムアクセスにより節点へのストア処理がされていた。改良後の実装では節点でループを回し連続アクセスにより節点へのストア処理がされるように変更した。改良前後の処理のイメージを Fig. 4.2.3-1 に示す。なお、各項の計算には形状関数やその導関数の要素積分値といった幾何情報が必要になる。幾何情報に関しては要素定義でメモリに格納されているので、このまま節点ループ化すると、幾何情報へのアクセスがランダムになるため、幾何情報を節点定義に組み替えてメモリに格納するよう変更することが重要であり、今回の改良でもこれを行っている。上記の節点ループ化は、ホットカーネル①および③で共通して有用であることを確認している。コデザイン的活動でこれまでに実施した高速化の効果を、「京」で測定した結果を Table 4.2.3-1 に示す。今年度実施した高速化によりホットカーネル①は 2.3 倍（改良したコードだけで評価した場合は 3 倍）になり、全体では 2.0 倍の高速化を実現した。

高速化したコードのポスト「京」における性能推定値の結果を Table 4.2.3-2 に示す。性能推定に関しては、各カーネルで推定方法に違いがあることに留意されたい。ポスト「京」の性能の推定値は Table 4.2.3-2 下の補足説明を示す。高速化したコードのポスト「京」（1-CMG）における性能は、高速化前の「京」における性能との比較し、カーネル毎の評価で 1.9 倍～9.1 倍（ポスト「京」1 ノード、4-CMG で 7.6 倍～36.4 倍）であった。



(a) Original code (element loop).

(b) Tuned codes (node loop).

Fig. 4.2.3-1 Speed-up method of kernel for computing momentum equation.

Table 4.2.3-1 Comparison of performance of FFB flow solver between original code and tuned code.

| 処理内容 | 処理時間 | | 高速化率 |
|-------------------------|-------|-------|------|
| | 高速化前 | 高速化後 | |
| 運動方程式くみ上げ (①) | 29.3 | 12.1 | 2.4 |
| 運動方程式 AX 計算 (②) | 19.1 | 19.1 | 1.0 |
| 連続の式 AX 計算その 1 勾配計算 (③) | 95.1 | 44.7 | 2.1 |
| 連続の式 AX 計算その 2 発散計算 (④) | 65.8 | 49.2 | 1.3 |
| その他 | 185.6 | 77.1 | 2.4 |
| 全体 | 394.9 | 202.2 | 2.0 |

Table 4.2.3-2 Comparison of performance of FFB flow solver between K and Post-K.

| 処理内容 | 処理時間 | | 高速化率 |
|-------------------------|-------|----------|------|
| | 「京」*1 | ポスト「京」*2 | |
| 運動方程式くみ上げ (①) | 29.3 | 7.7*3 | 3.8 |
| 運動方程式 AX 計算 (②) | 19.1 | 10.1*4 | 1.9 |
| 連続の式 AX 計算その 1 勾配計算 (③) | 95.1 | 10.4*5 | 9.1 |
| 連続の式 AX 計算その 2 発散計算 (④) | 65.8 | 19.3*6 | 3.4 |

*1: 「京」における性能計測値

*2: ポスト「京」(1-CMG)における性能推定値あるいは計測値

*3: シミュレータによる推定値

*4: 性能推定ツールによる推定値

*5: 試作機による値

*6: 理研シミュレータによる推定値

a)-2 複数ベクトル利用による高速化技術のシステム実装

演算機の性能向上のペースに対し、メモリ性能の向上は相対的に遅れる傾向にあるため、演算あたりのメモリからの転送速度比であるいわゆる B/F は小さくなる傾向になる。非構造格子を用いた流体解析では、演算あたりに必要なデータはおおよそ 1 ワード (単精度なら 4 Bytes, 倍精度なら 8 Bytes) であり、要求 B/F はおおよそ単精度で 4、倍精度で 8 である。計算機が提供する B/F は「京」で 0.5 であり、上述のとおり今後小さくなる傾向であるため、非構造格子を用いた流体解析コードが次世代の計算機で高いピーク性能比を維持することが困難となる。この課題を克服する方法のひとつとして、複数の流れ場を同時に計算することにより、演算あたりのデータ量を減らすアルゴリズム (以下、複数ベクトル計算) が期待されている。複数ベクトル計算の概念図を Fig. 4.2.3-2 に示す。複数ベクトル計算では、行列係数が共通であることを利用し、1 度の係数行列のロードで複数の AX 計算を実行することにより要求 B/F を下げることができる。これまで、FFB のホットカーネルを対象にベンチマークテストを実施し、複数ベクトル 8 本で約 4.9 倍の高速化を確認している (Fig. 4.2.3-3(a))。複数ベクトル計算による高速化では、係数行列は複数ベクトル間で共通であることが前提で

あるが、運動方程式は非線形であるためこれまでの実装では運動方程式の複数ベクトル化により高速化は期待できない。Fig. 4.2.3-3 (b)におけるケース 1 は、運動法方程式が複数ベクトル化により高速化できない場合の全体の高速化率であり、その効果は限定的である。本年度は、非線形項を含む複数ベクトル化の手法を検討しそのプロトタイプを作成したのでその具体的な方法を報告する。運動方程式を含め、高速化できる場合、Fig. 4.2.3-3 (b)におけるケース 2 に示すよう、複数ベクトル 16 本で、全体で 4.7 倍の高速化が期待できる。

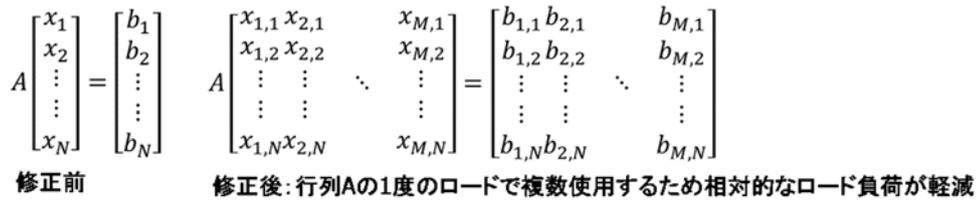
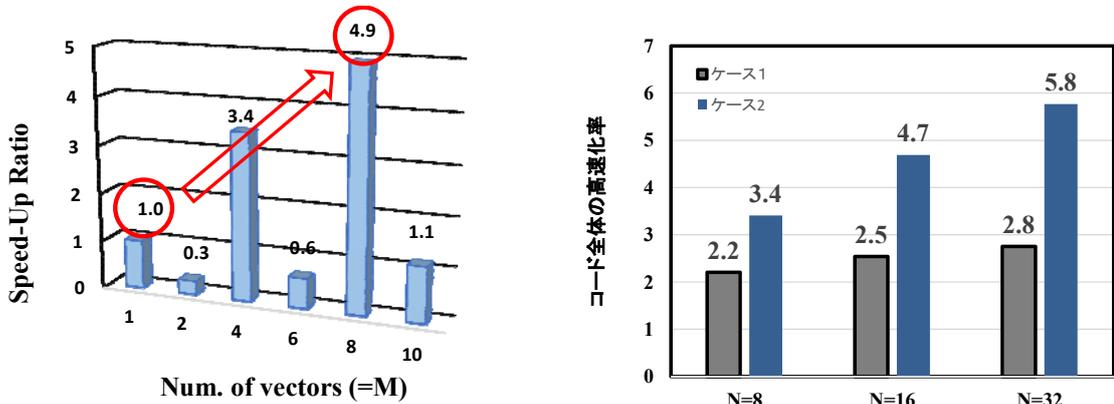


Fig. 4.2.3-2 Concept of multi vector algorithm.



(a) Performance of core kernel mesearred on FX-10. (b) Estimated overall performance of the flow solver.

Fig. 4.2.3-3 Effects of multi vectors algorithm.

FFB 流れソルバーでは、以下の式(4.2.3-1)で表される運動方程式を解いている。

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} - (v + v_{SGS}) \Delta \right\} u_i = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (4.2.3-1)$$

なお、拡散項に現れるシェアストレスに関しては、渦粘性係数の空間勾配が小さいとし省略している。複数ベクトル計算では左辺の速度ベクトル u_i および右辺の圧力 p を複数組用意し、これらを同時に計算する。すなわち、

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} - (v + v_{SGS}) \Delta \right\} \begin{pmatrix} u_i^{(1)} \\ u_i^{(2)} \\ \vdots \\ u_i^{(N)} \end{pmatrix} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \begin{pmatrix} p^{(1)} \\ p^{(1)} \\ \vdots \\ p^{(N)} \end{pmatrix}. \quad (4.2.3-2)$$

左辺オペレータに第 2 項の u_j および第 3 項の v_{SGS} は、流れ場ごとに異なるため、使いまわすことができない。ここでは行列ソルバーに左辺オペレータを計算するための幾何情報をわたし、AX 処理時に係数の計算を同時に実行する。

対流項を例に具体的な処理内容を以下に説明する。FEM では、方程式に重み関数 ϕ^* をかけて解析領域全体 Ω で積分するが、これを要素ごとの積分領域 Ω_e に対する積分に分割する。対流速度を要素一定とし、重み関数および速度は形状関数 N の線形和で表す。これらの操作により対流項および主に関数の積の積分は以下のようにあらわることができる。

$$\begin{aligned} \int_{d\Omega} \phi^* u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} d\Omega &= \sum_e \left[\int_{\Omega_e} \phi^* u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} d\Omega_e \right] \\ &= \sum_e u_j^e \left[\int_{\Omega_e} N_\alpha \frac{\partial N_\beta}{\partial x_j} d\Omega_e \right] u_{i,\beta} \phi_\alpha^* \end{aligned} \quad (4.2.3-3)$$

対流項の左辺オペレータは、以下の式で表すことができる。

$$\sum_e u_j^e S_{\alpha\beta}^e, \quad S_{\alpha\beta}^e = \int_{\Omega_e} N_\alpha \frac{\partial N_\beta}{\partial x_j} d\Omega_e \quad (4.2.3-4)$$

ここで Σe は要素の重ね合わせ処理である。これまでの実装では行列ソルバーを実行する前処理として要素一定の速度ベクトル u_j^e および幾何情報 $S_{\alpha\beta}^e$ を用いて行列係数を計算し行列ベクトルに渡していた。複数ベクトル計算では、行列ベクトルに幾何情報 $S_{\alpha\beta}^e$ を渡して、行列ソルバー内で更新された速度ベクトル u_j^e を用いて計算を実装とする。ここでは、対流項についてのみ説明したが、実際の左辺オペレータはこれに加え、時間項、拡散項を加えた実装になる。

上記の方針をもとに、既存の運動方程式ルーチンに複数ベクトル計算機能のプロトタイプルーチンを実装しその動作を確認している。今後、性能を測定し複数ベクトル計算機能の有用性を検証する。

b) 大規模流体解析における収束性改善のための乱流解析手法の研究開発

b)-1 ターボ機械への適用のための圧縮性ソルバーによる実証解析

開発した圧縮性流れソルバーの検証のため、NACA0012 翼周り流れの LES 解析を実施した。主流 U およびコード長 C をベースとするレイノルズ数は 10^5 、迎角は 9 度である。マッハ数は 0.3 と、計測時のマッハ数 (0.08) より大きな値とした。この理由は、計測時相当の低マッハ数の計算では、音圧パワーが相対的に小さくなるため、計算される音場に対する数値振動の強さが相対的に大きくなり、空力音の高精度計算が困難になることを事前の計算で確認しているためである。マッハ数を上げても流れに大きな差異がないことを確認している。

計算モデルは主流方向を X 、翼高さ方向を Z 、残る方向を Y とした。計算領域の大きさは X 、 Y 方向に $8C$ 、 Z 方向に $0.05C$ とした。計算格子解像度は乱流境界層が発達する翼近傍において、壁座標で、 $dx^+=45$ 、 $dy^+_{\min}=2$ 、 $dz^+=25$ とした。翼近傍の計算格子を Fig. 4.2.3-4 に示す。計算格子のグリッド数は約 3500 万である。サブグリッドモデルには、ダイナミックスマゴリンスキーモデル [1, 2] を適用した。

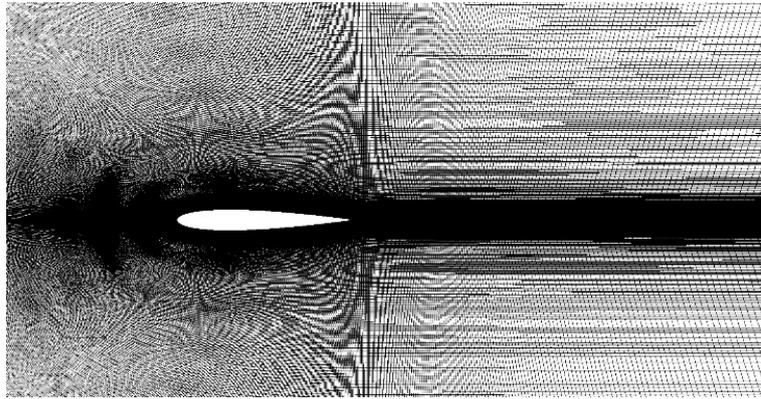


Fig. 4.2.3-4 Mesh near the NACA0012 airfoil.

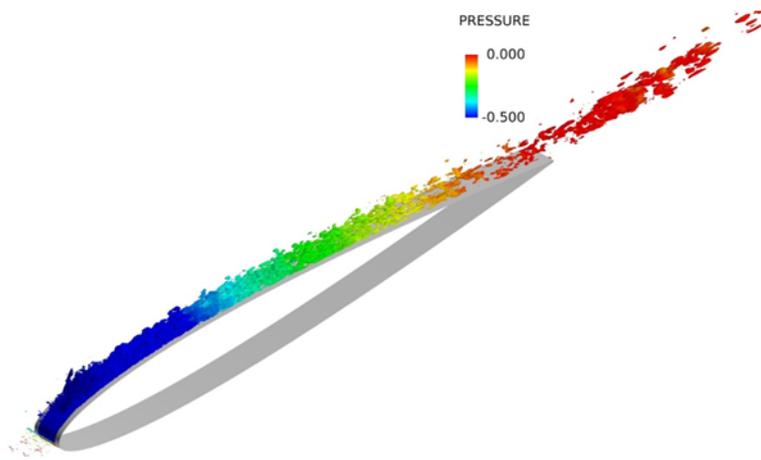


Fig. 4.2.3-5 Instantaneous iso-surface of Laplacian of computed normalized pressure (Color represents normalized pressure).

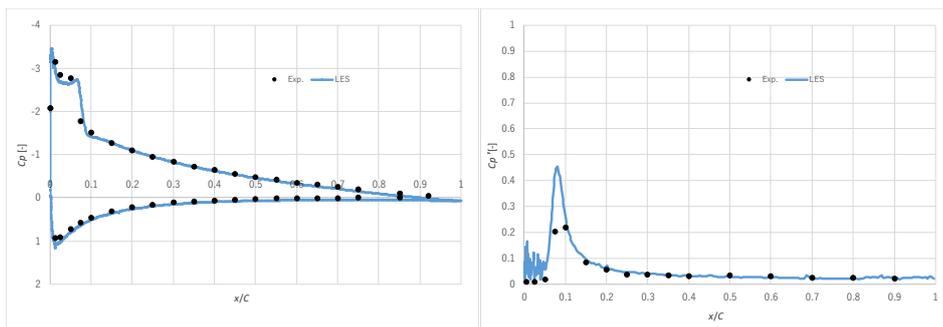
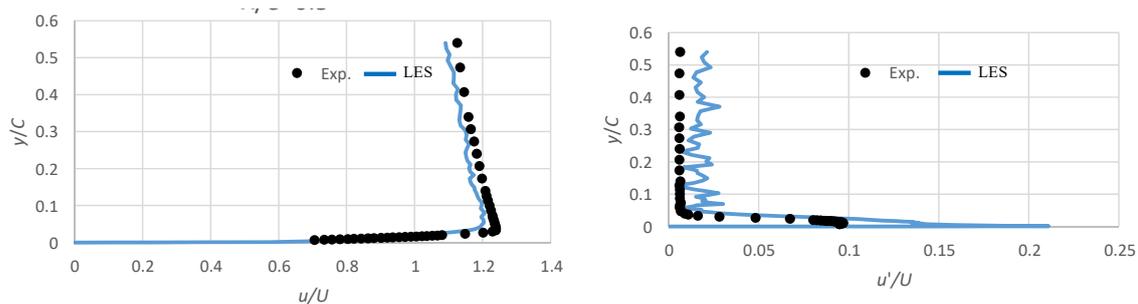
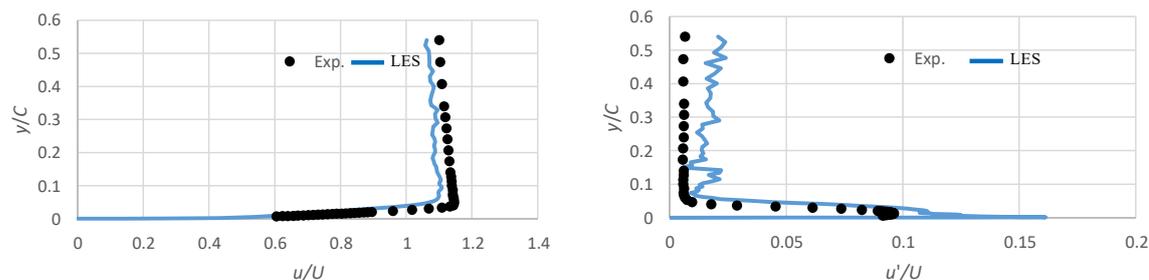


Fig. 4.2.3-6 Mean pressure coefficient (left) and r.m.s. pressure coefficient (right) on the airfoil surface.



(a) X/C=0.5.



(b) X/C=0.7.

Fig. 4.2.3-7 Mean velocity profile (left) and r.m.s. velocity profile (right) at $x/C=0.5, 0.7$ on the suction side of airfoil surface.

本 LES により計算された縦構造を、瞬時圧力のラプラシアン等の等値面により可視化した結果を Fig. 4.2.3-5 に示す。負圧面、LE から 3%コードあたりで層流剥離しその直後に乱流遷移しており、遷移完了後、主流方向に伸ばされた渦構造が確認できる。

翼表面の圧力係数の計測データ [3] との比較を Fig. 4.2.3-6 に示す。LE 近傍の変動値 (RMS) の計算結果に振動がみられ、計測データに対し過大になっているが、それ以外の部分に関しては、平均値、変動値 (RMS) とともに計算結果を計測データと良好に一致している。

乱流境界層 (負圧面、 $x/C=0.5, 0.7$) における速度分布の比較を Fig. 4.2.3-7 に示す。計算結果は、平均分布、変動分布ともに、計測データとおおよそ一致するが、変動分布を過大評価している。この理由は計算格子の解像度不足により、本来存在するサイズの渦が表現できていないためと考えられる。

音場に対応する瞬時速度の発散場の可視化結果を Fig. 4.2.3-8 に示す。計算格子の品質が悪い領域には、数値振動が生じているものの、全体的には音場の構造を捉えており、主要な音源が LE および TE 近傍にあることが確認できる。

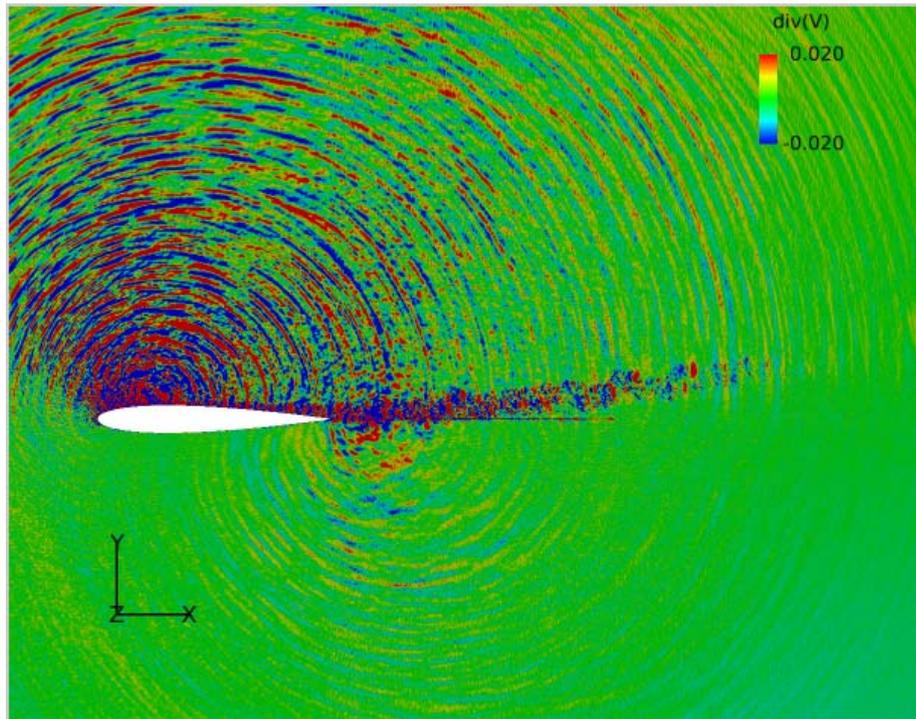


Fig. 4.2.3-8 Computed instantaneous velocity divergence at mid-span plane.

c) 格子ボルツマン法 (LBM) による直接計算手法の研究開発

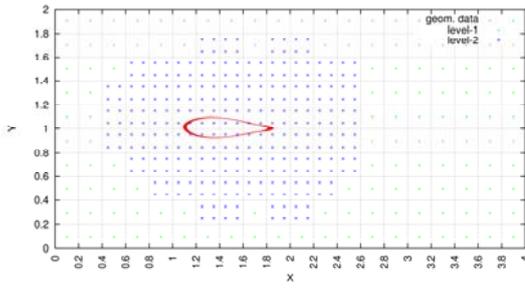
c)-1 複雑形状まわり流れに関する実証解析

壁面の近傍に高解像度格子を配置するため、階層的解像度をもつマルチキューブを作成するためのツールを開発しその有用性を確認した。マルチキューブ作成ツールは、単一の解像度を有するシングルキューブの GF-CUBE ファイルを入力し、壁面近傍に高解像度を配置する階層的な解像度を有するマルチキューブの GF-CUBE ファイルを出力する。キューブの解像度は、別途入力する GF-GEOM (壁面に配置された点列データ) からの距離により制御する。制御パラメータとしては、最大レベル数 (LVMAX)、各レベルにおける層の数 (NLAYER) である。ツールは、シングル GF-CUBE を入力し、別途入力した GF-GEOM データを参照し、壁面から一定以下の距離にあるキューブを refine (レベルをひとつあげ、キューブを 8 分割) する。Refine 処理の処理流れを以下に示す。

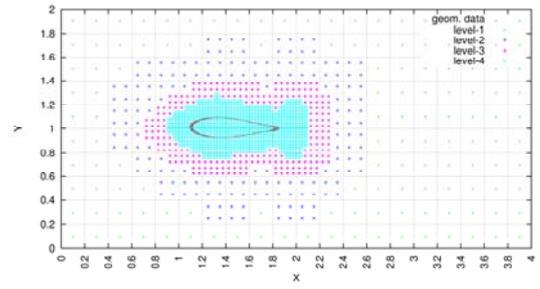
- (1) **Refine** 対象の選別：各キューブより壁面点列までの最短距離を計算し、これが指定の距離より短い場合、そのキューブを **Refine** の対象とする。
- (2) 位置情報の更新：キューブの位置情報は、最大レベルのサイズの規格化している。**Refine** 処理では、最大レベルがひとつ増えるので、まず、位置情報を全て 2 倍する。その後、**refine** するキューブを 8 分割して、各キューブの位置情報を登録する。
- (3) 隣接キューブ情報の更新：キューブは隣接キューブの情報として以下を保持している。キューブの **refine** に応じて、これらのデータを更新する。
 - ① 隣接キューブの境界 ID (1~26)
 - ② 隣接キューブの領域番号 (現状シリアル動作なので、全て 1)

- ③ 隣接キューブのキューブ番号
 - ④ 隣接キューブの相対解像度 (-1: Coarse, 0: Same, 1: Fine)
 - ⑤ 隣接キューブの相対位置 (隣接キューブのレベルが異なる場合のみ)
- (4) キューブのリオーダー : Refine 対象となるキューブは抜け版となるため、キューブ番号をつけなおす。

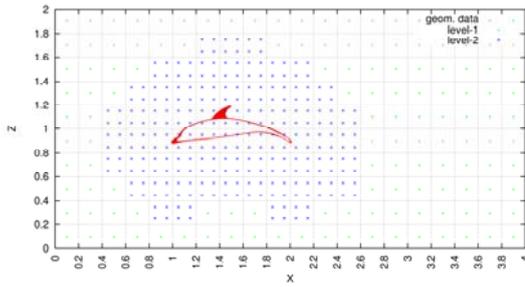
開発したツールを用いてイルカモデルまわりにマルチキューブを作成した。イルカ長さ規格化して主流方向に 4、垂直方向に 2×2 の直方体領域の中にイルカモデルを配置する。イルカ長さの 0.2 のサイズのベースキューブを 20×10×10 (合計 2000) 個、配置し、これをもとにマルチキューブを作成した。キューブの解像度は 7 段階 (最大 6 回の refine 処理) とした。Fig. 4.2.3-9 および Fig. 4.2.3-10 にイルカモデル周辺に配置されたマルチレベルのキューブの分布を示す。Refine 回数をあげたマルチキューブほど、イルカまわりに細かいキューブが効果的に配置されていることが確認できる。シングルキューブおよびマルチキューブを用いて、イルカ周りの計算格子を作成し、解像度と計算格子の関係を Fig. 4.2.3-11 に示した。シングルキューブの場合、500 億グリッドを費やしても解像度はイルカ長さのおよそ 10^{-3} 程度しかとれず、解像度を 10^{-4} とする場合、計算格子数は数兆グリッドになってしまうが、マルチレベルキューブであれば、解像度を 10^{-4} の計算格子を 500 億グリッドで作成でき、同じ程度のグリッド数で各方向に一桁小さな計算格子を用いることができることがわかった。小さな渦が壁面近傍に局在する乱流計算では、局所的に解像度をあげる必要があるため、マルチレベルキューブが必須であることを確認した。



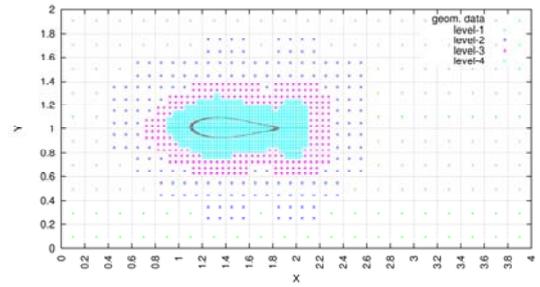
Z/D=1.0 (one time refinement).



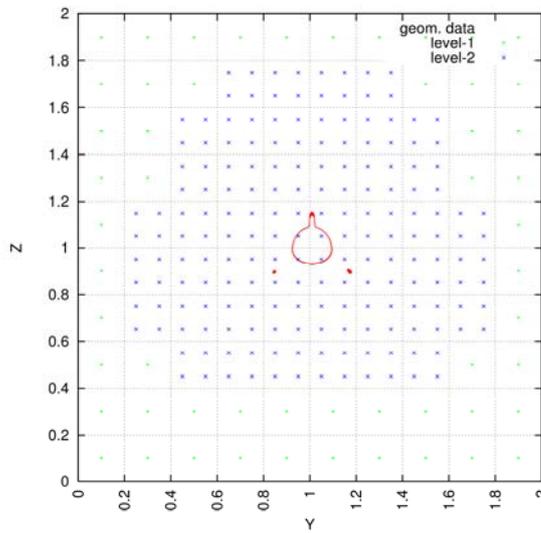
Z/D=1.0 (three times refinement).



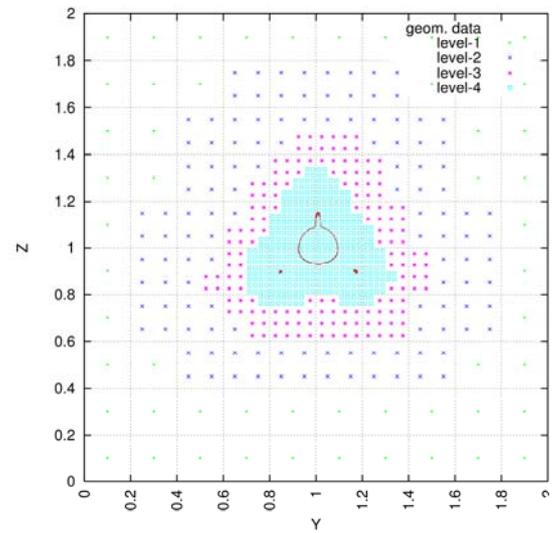
Y/D=1.0 (one time refinement).



Y/D=1.0 (three times refinement).

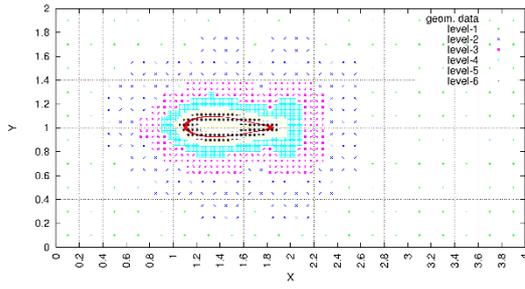


X/D=1.4 (one time refinement).

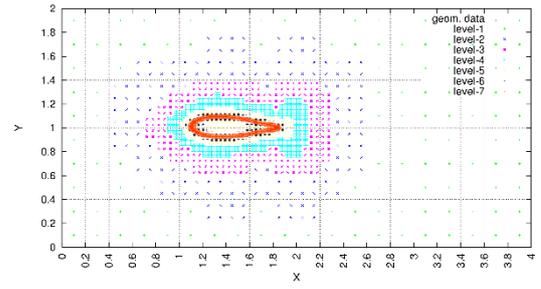


X/D=1.4 (three times refinement).

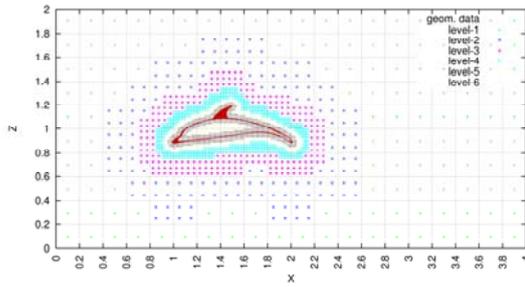
Fig. 4.2.3-9 Distributions of multi level cubes around dolphin model with one time (left) and three times (right) refinement.



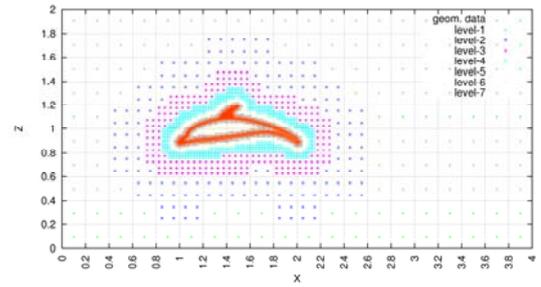
Z/D=1.0 (five times refinement).



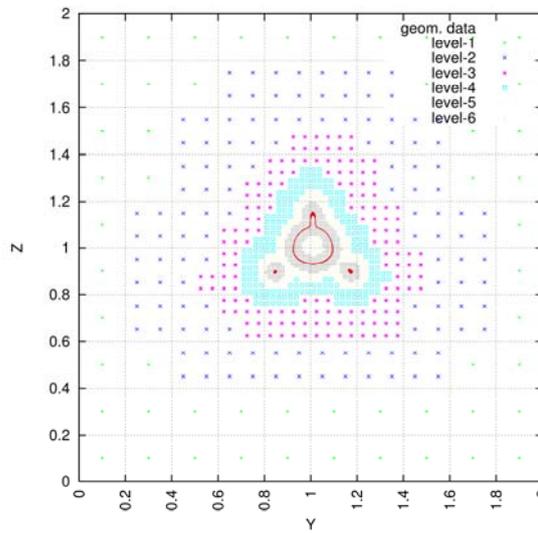
Z/D=1.0 (six times refinement).



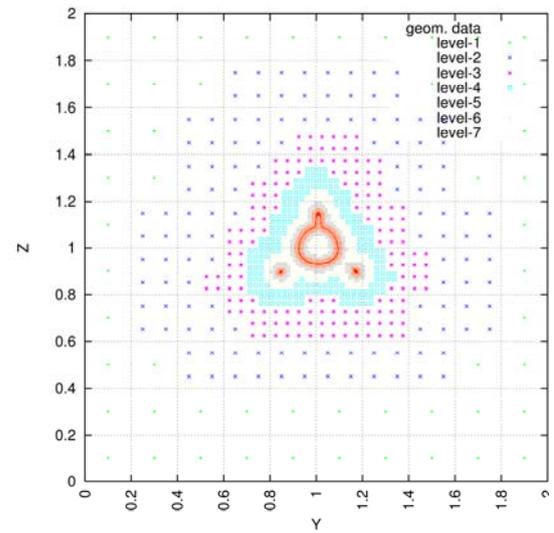
Y/D=1.0 (five times refinement).



Y/D=1.0 (six times refinement).



X/D=1.4 (five times refinement).



X/D=1.4 (six times refinement).

Fig. 4.2.3-10 Distributions of multi level cubes around dolphin model with five (left) and six times (right) refinement.

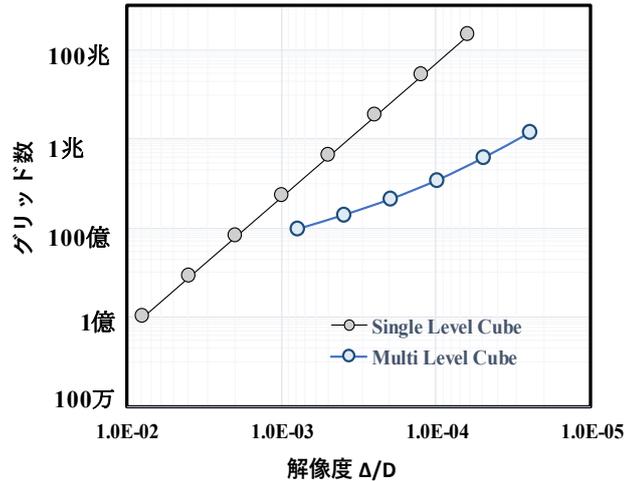


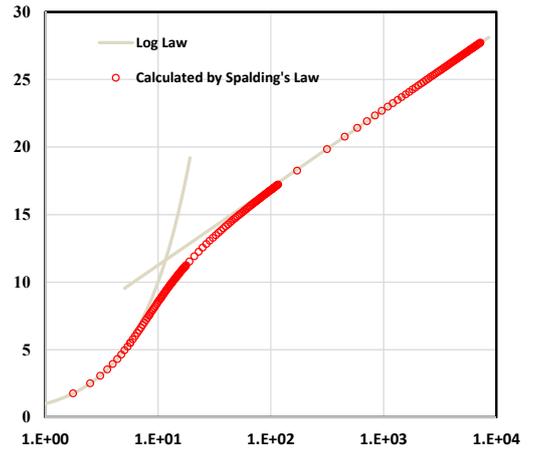
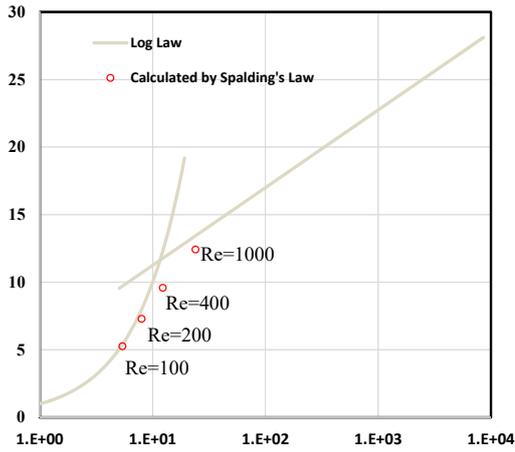
Fig. 4.2.3-11 Number of computational grids around dolphin model with single and multi level cubes.

d) LES (Large Eddy Simulation)解析用の壁面モデルの研究開発

d)-1 壁法則併用型 LES 壁面モデルのプロトタイプコードの開発と検証

重点課題⑧サブ課題 D で開発した壁面モデル[4]をベースコードに統合する。実装する壁面モデルは壁面から数メッシュ離れた点における速度を参照し、壁法則より壁面に作用する壁面応力を算出する。FFB は非構造格子を用いていることより、壁面からのメッシュ数というカウントができないため、ユーザが指定した距離に相当する要素を検索し、その要素の速度より壁面応力を計算する方法をとる。FFB の流れソルバーによって計算された摩擦速度 U_τ を用いて、イメージポイントにおける Y^+ および U^+ を計算した結果を Fig. 4.2.3-12 (a)に示す。Re 数を変えた 4 ケースにおいて計算された Y^+ および U^+ が、Log-Law に概ね乗っていることより、FFB の流れソルバーが計算した摩擦速度 U_τ が妥当であることを確認した。また、摩擦速度を計算するサブルーチン TAUWML にデバッグ分を挿入し、イメージポイントにおける速度にダミーの値を入力し、そこから計算される摩擦速度を用いて Y^+ および U^+ を出力しこれをプロットした結果を Fig. 4.2.3-12 (b)に示す。この結果からも、摩擦速度の計算機能が妥当であることが確認できる。

実装した壁面モデルの検証のため 2 次元翼 (DU25 A17) まわり流れ (迎角 4 度) に対し、壁面モデルを用いた Wall-Modeled LES を実施した。主流方向、壁面垂直方向およびスパン方向の計算格子解像度は、壁座標でそれぞれ、1000, 200, 2000 である。Fig. 4.2.3-13 に計算に用いる翼の型を示す。Fig. 4.2.3-14 に翼表面の圧力係数分布の比較を示す。点線は実験値で、線は計算結果である。計算結果は複数あるが、これは摩擦速度を計算するための速度の参照点の壁面からの距離を変更したものである。圧力分布に関しては、参照点までの距離にかかわらず、表面圧力分布を精度よく計算できることがわかる。Fig. 4.2.3-15 に抵抗係数の時刻歴を示す。壁面モデルを用いない計算に対し、壁面モデルを適用することにより抵抗係数が増加しているため、壁面モデルとしては定性的には正常の動作をしていると考えられるが、実験結果とは差異が生じたため、今後、ほかの検証データでも壁面モデルの妥当性を確認していくことになった。



(a) Test case (Re=100~1000).

(b) Calculated data by flow solver.

Fig. 4.2.3-12 Y^+ and U^+ at the image point ($Y^*=0.3$).

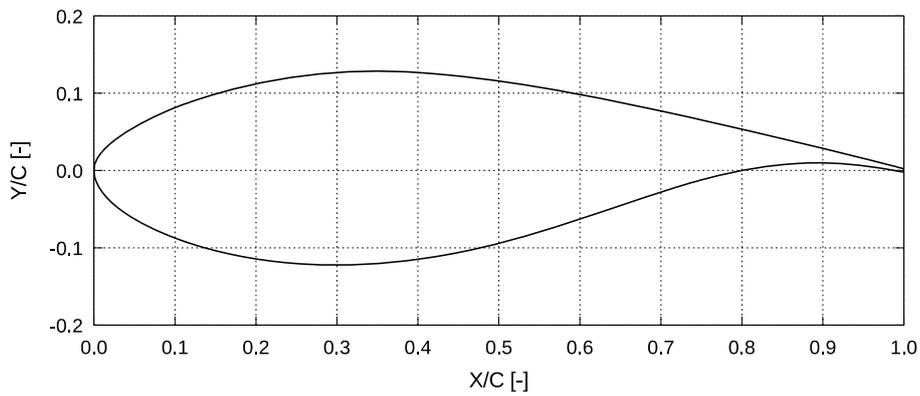


Fig. 4.2.3-13 Wing shape profile of DU25 17.

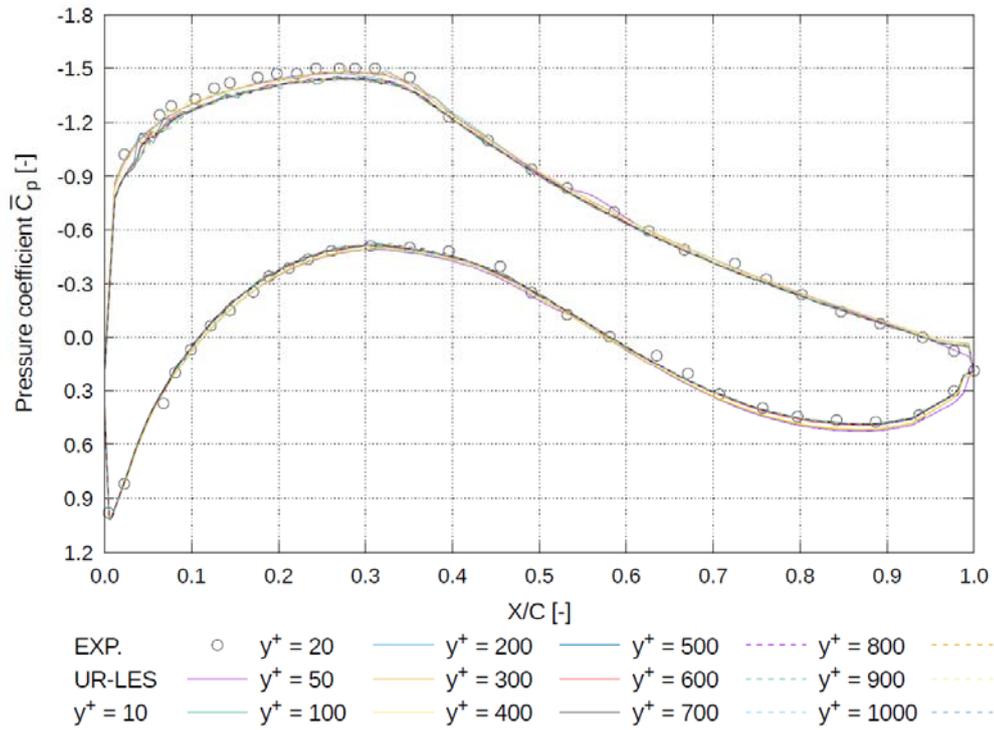


Fig. 4.2.3-14 Comparison of pressure coefficients on the blade surface.

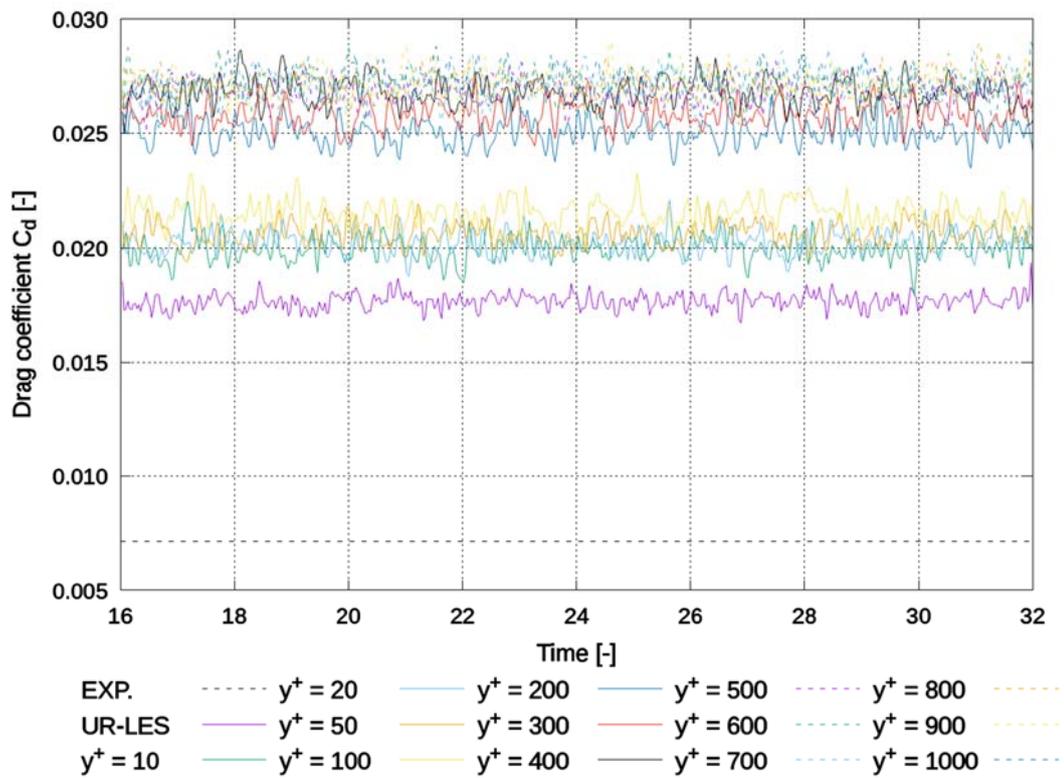


Fig. 4.2.3-15 Comparison of drag coefficients.

d)-2 乱流構造に基づく LES 壁面モデルのプロトタイプコードの開発と検証

前年度までの平板乱流境界層を対象とした LES 結果により、解像度が不足する LES では渦構造が大きくなる（乱流変動強度、特に主流方向成分が過大評価される）ことが分かったので、本年度ではその修正方法を検討した。Fig. 4.2.3-16 は、粘性底層から対数領域までの主流方向瞬時変動速度の確率密度関数（probability density function, PDF）を表す。解像格子 LES の格子幅は粘性スケールで 2（コロケート座標を用いているので壁面第一格子点は $y+=1$ ）であり、カラーの実線で示している。粗格子 LES の格子幅は粘性スケールで 8（壁面第一格子点は $y+=4$ ）であり、黒色の実線で示している。粗格子 LES の PDF と解像格子 LES の PDF を比較すると、粘性低層や緩和層では前者の裾野が広がっている一方で、対数領域では両者がほぼ一致することが分かる。そこで、解像度不足の影響が顕著な緩和層以下において、粗格子 LES の瞬時変動速度 PDF が解像格子 LES のそれと一致するように主流方向瞬時変動速度にフィードバックを施す壁面モデルを検討した。緩和層までの解像格子 LES の PDF に対し有意水準が 1% に対応する閾値を求め、壁面モデル LES の際に閾値以上の瞬時変動速度に対して正規乱数分布に従うランダムな変動速度に置換した。なお、正規乱数分布は中心極限定理を応用して 12 個の一樣乱数の和から 6 を減じることで与えた。壁面鉛直方向の瞬時変動速度は主流方向および壁面鉛直方向の変動エネルギー保存から与えたが、スパン方向瞬時変動速度に関しては特に修正を施さずに連続の式から従属的に与えた。対数領域での本壁面モデルの効果は限定的と考えられるが、工学的には壁面近傍の流れ場の予測がより重要と考えられるため、特に問題はないと考えた。平板乱流を対象に本壁面モデルの妥当性を検証した。計算条件については[5]、もしくは前年度までの報告書を参照されたい。はじめに、主流方向瞬時変動速度に対するフィードバックが正しく機能しているかどうかを確認した。Fig. 4.2.3-17 は $Re_x=5.0 \times 10^5$ における、異なる壁面鉛直座標での主流方向瞬時変動速度の PDF である。青色実線が解像格子 LES 結果、緑色実線が粗格子 LES 結果、赤色実線が粗格子と同じ格子解像度の壁面モデル LES 結果を示す。粘性底層から緩和層にかけて壁面モデル LES による PDF が解像格子 LES による PDF と良好に一致しており、本フィードバックが正しく機能していることが分かる。

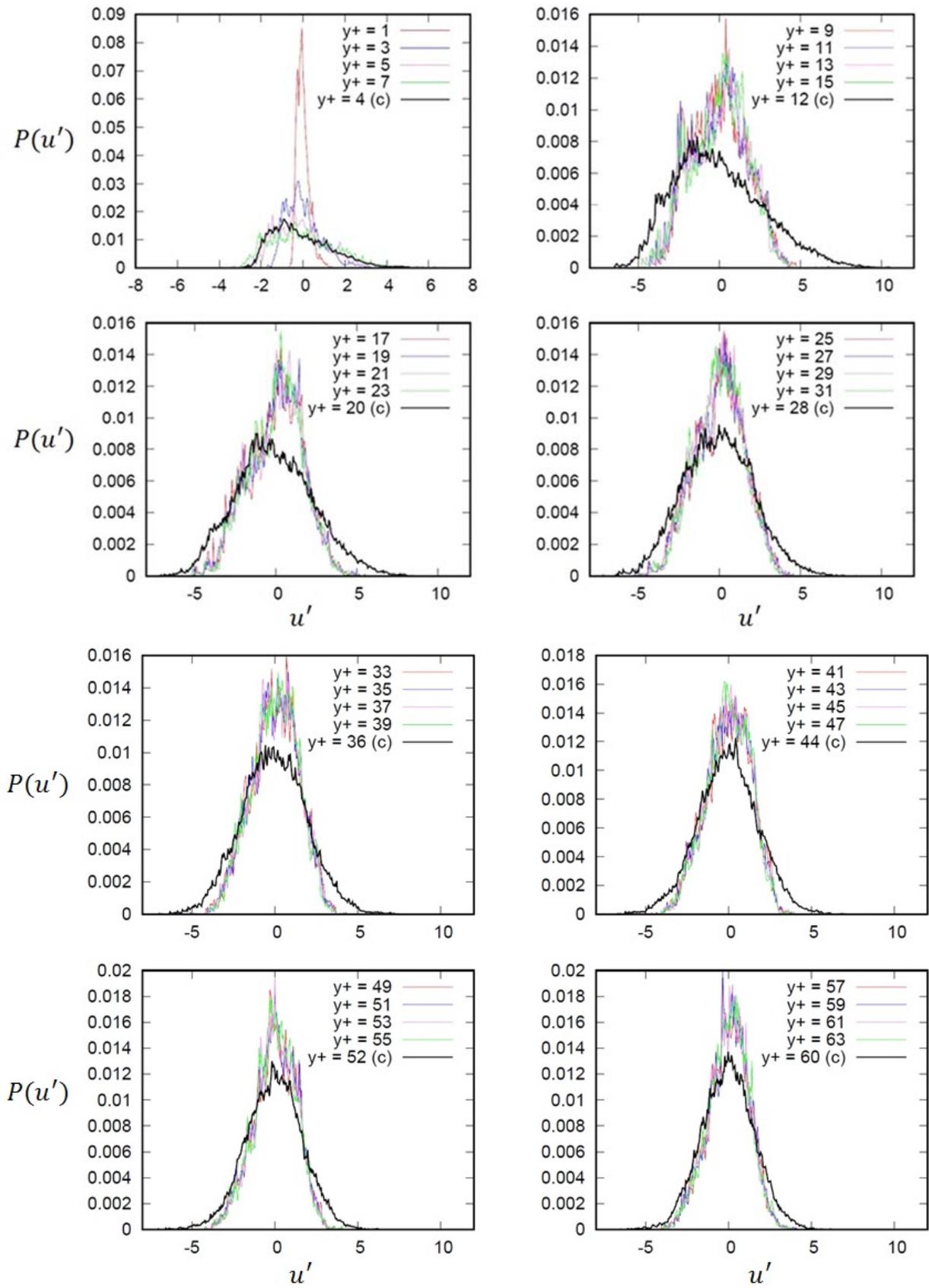


Fig. 4.2.3-16 PDF of stream wise velocity between viscos sublayer and log-region. Colored lines are by resolved LES and black lines are by unresolved LES.

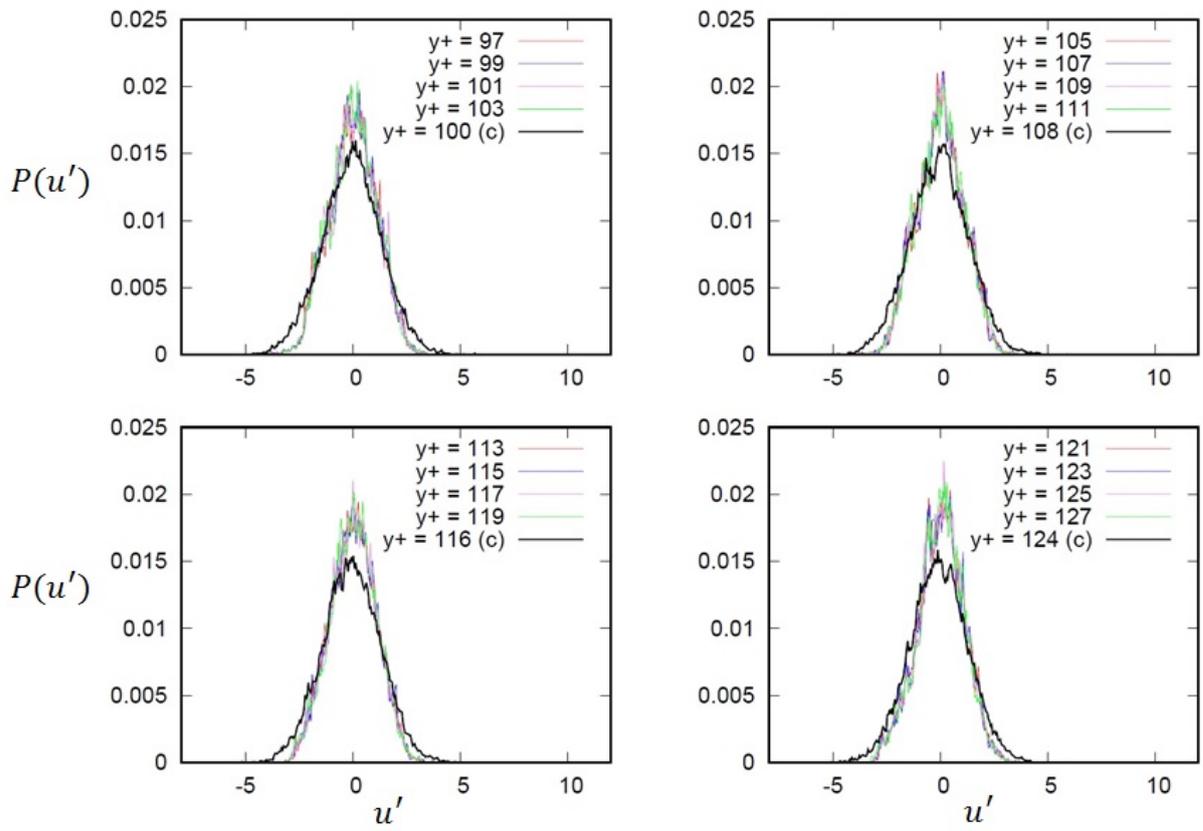


Fig. 4.2.3-16 (Continued.)

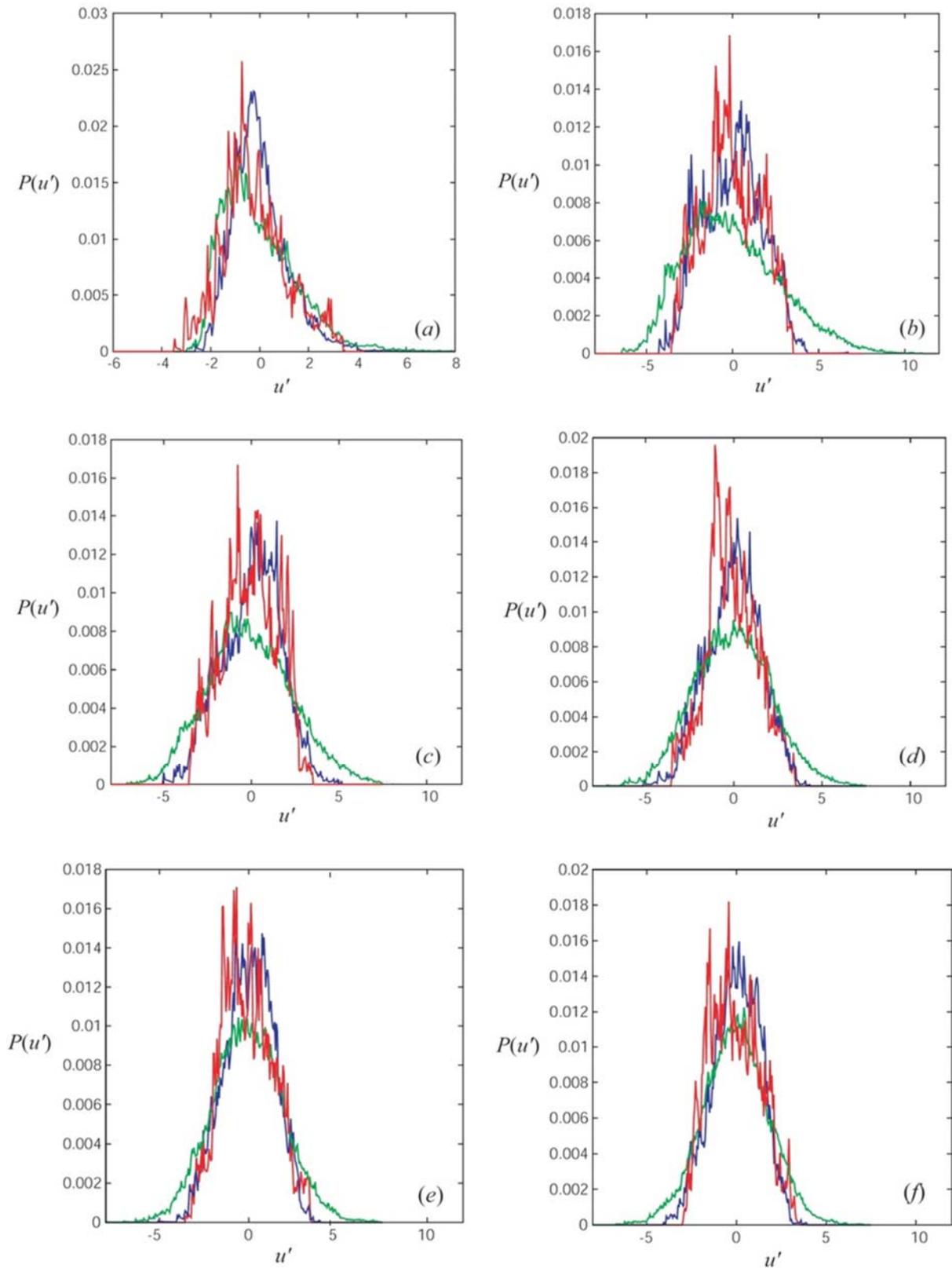


Fig. 4.2.3-17 PDF of streamwise velocity at $y^+ = 4$ (a), 12 (b), 20 (c), 28 (d), 36 (e) and 44 (f). Colored lines are by resolved LES and black lines are by unresolved LES.

Fig. 4.2.3-18 は $Re_x=5.0 \times 10^5$ における (a) 主流方向平均速度と (b) 主流方向乱流変動強度、(c) 壁

面鉛直方向乱流変動強度、(d) スパン方向乱流変動強度を表す。青色実線が解像格子 LES 結果、緑色実線が粗格子 LES 結果、赤色丸印が壁面モデル LES 結果である。本壁面モデルを導入することにより、予測精度が大幅に向上していることが分かる。特に、壁面近傍において、主流方向平均速度および主流方向と壁面鉛直方向乱流強度が解像格子 LES の結果と極めて良好に一致していることが確認できる。Fig. 4.2.3-19 は異なる地点 ($Re_x=7.0\times 10^5$) での同様の結果であるが、こちらも壁面モデル LES 結果が解像格子 LES の結果と極めて良好に一致している。

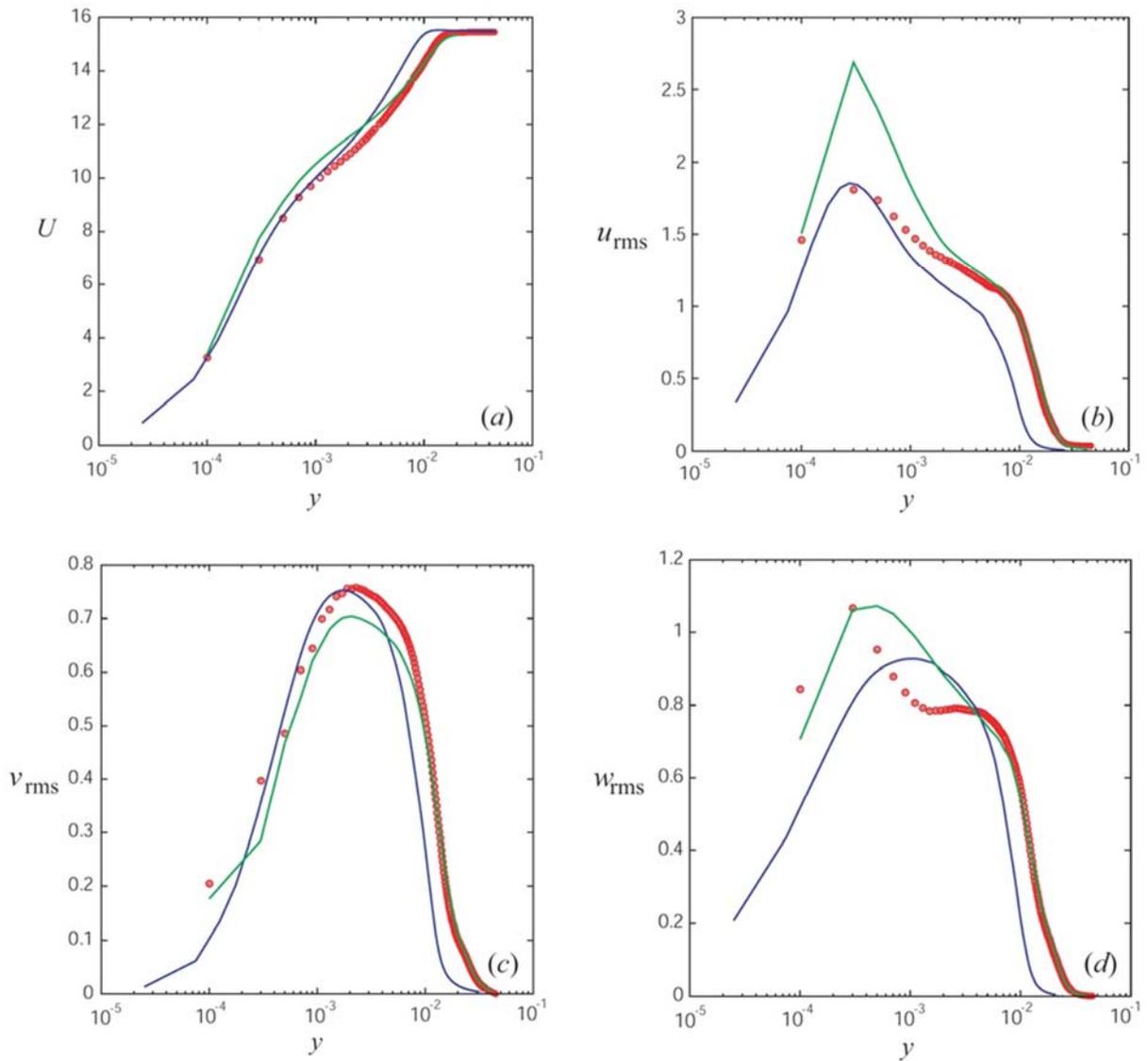


Fig. 4.2.3-18 Time averaged streamwise velocity (a), turbulence intensity in stream wise direction (b), turbulence intensity in wall-normal direction (c) and turbulent intensity in spanwise direction (d) at $Re_x=5.0\times 10^5$. Blue lines are by resolved LES and red points are by wall-modeled LES.

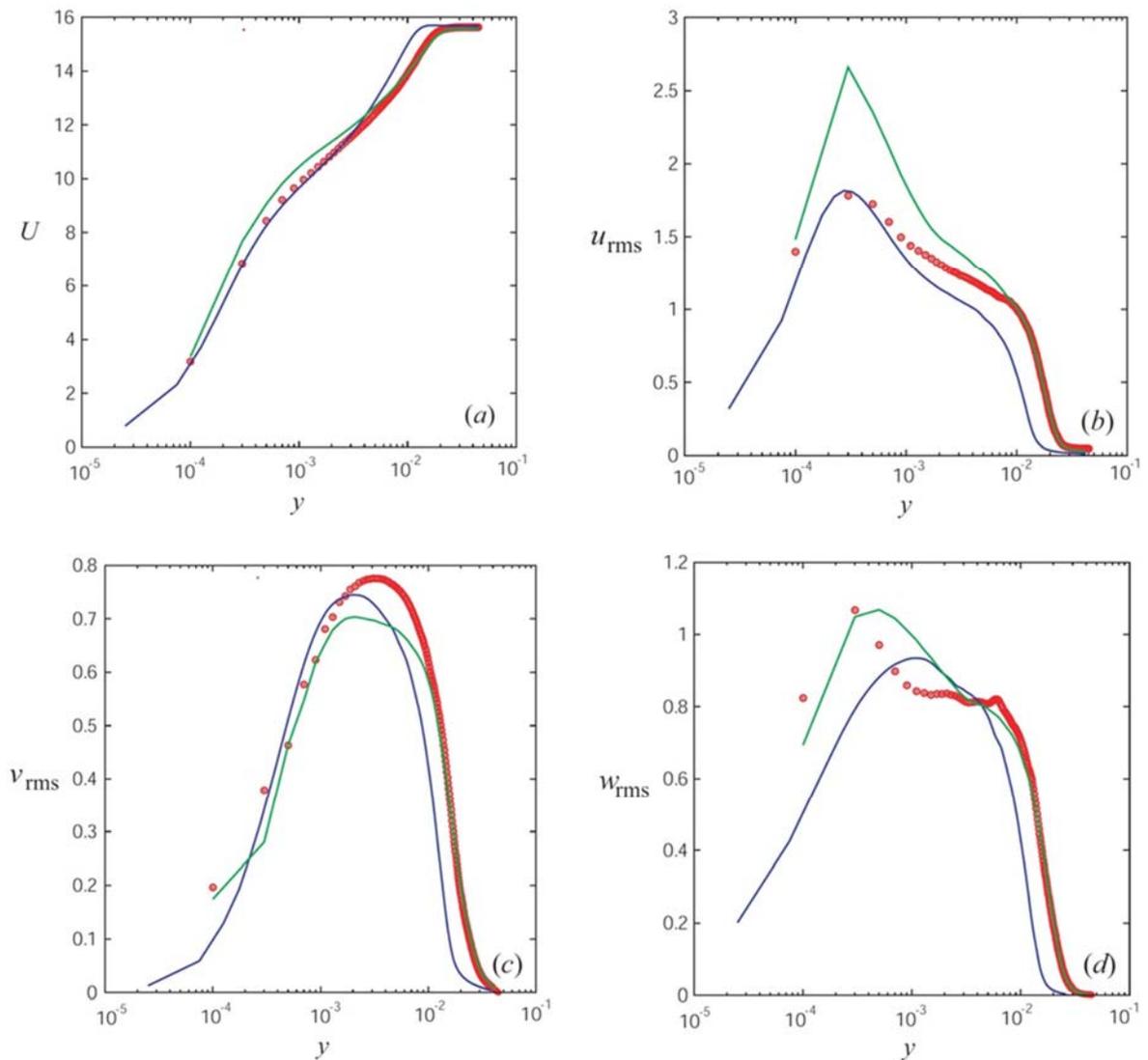


Fig. 4.2.3-19 Time averaged streamwise velocity (a), turbulence intensity in stream wise direction (b), turbulence intensity in wall-normal direction (c) and turbulent intensity in spanwise direction (d) at $Re_x=5.0 \times 10^5$. Blue lines are by resolved LES and red points are by wall-modeled LES.

Fig. 4.2.3-20 は $Re_x=5.0 \times 10^5$ における(a)主流方向平均速度と(b)主流方向乱流変動強度、(c)壁面鉛直方向乱流変動強度、(d)スパン方向乱流変動強度に対する格子幅依存性を示す。青色実線は解像格子 LES 結果であり、それ以外の実線は粗格子 LES 結果、丸印は同色の粗格子 LES と同じ解像度の壁面モデル LES 結果を示す。赤色、黒色、緑色の格子幅はそれぞれ粘性スケールで (60, 8, 24)、(90, 12, 36)、(120, 16, 48) であり、解像格子の格子幅と比較するとそれぞれ 4, 6, 8 倍である。粗格子では過大評価している主流方向平均速度、および主流方向と壁面縁力方向乱流変動強度の予測精度が、壁面近傍において向上していることが分かる。Fig. 4.2.3-21 は異なる地点 ($Re_x=7.0 \times 10^5$) での同様の結果であるが、こちらも Fig. 4.2.3-20 と同様に本壁面モデルの有効性が確認できる。

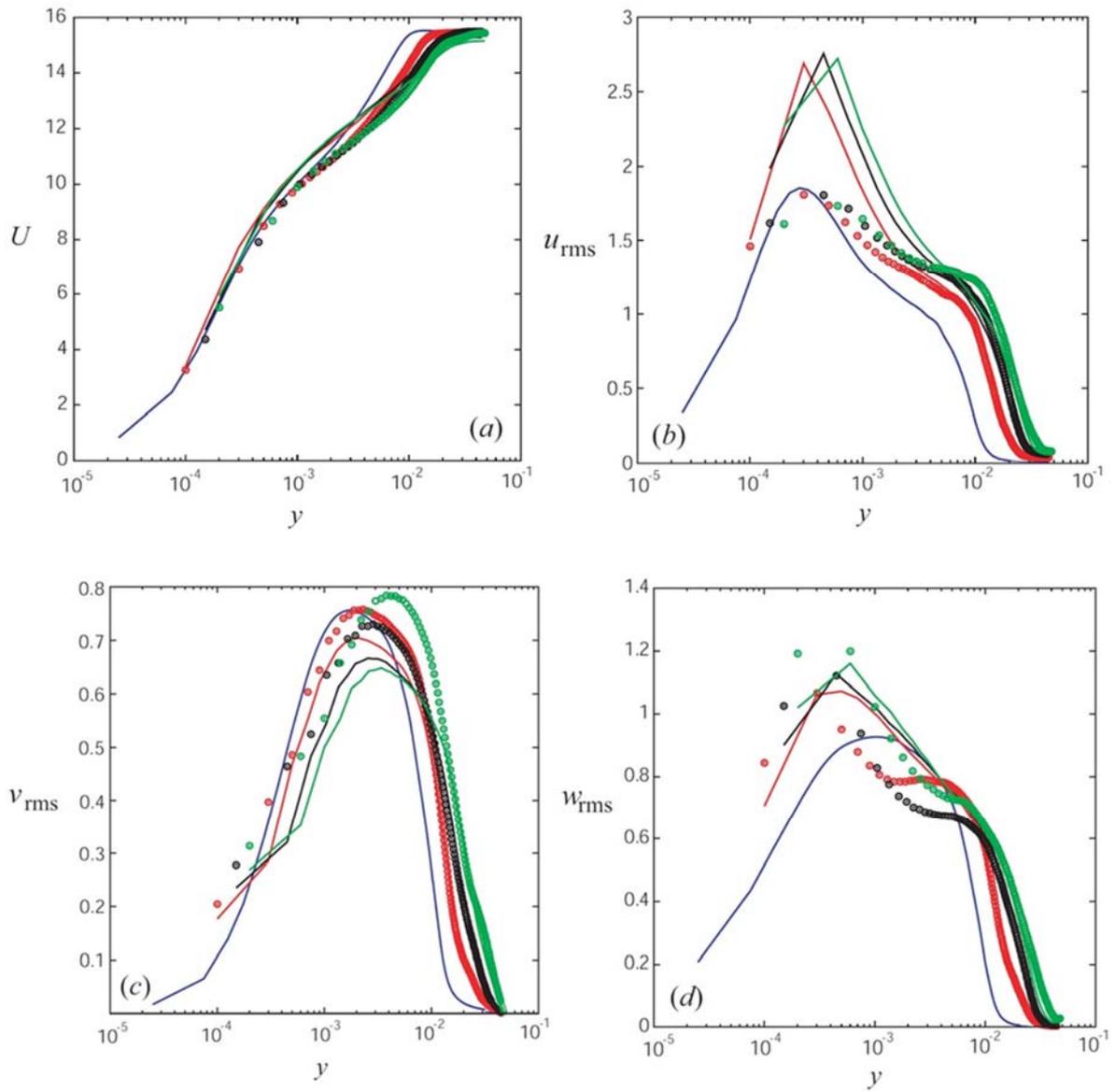


Fig. 4.2.3-20 Time averaged streamwise velocity (a), turbulence intensity in stream wise direction (b), turbulence intensity in wall-normal direction (c) and turbulent intensity in spanwise direction (d) at $Re_x=5.0 \times 10^5$. Blue solid lines are by resolved LES, the other solid lines are by unresolved LES and points are by wall-modeled LES. Grid resolutions are same for the same colored lines and points.

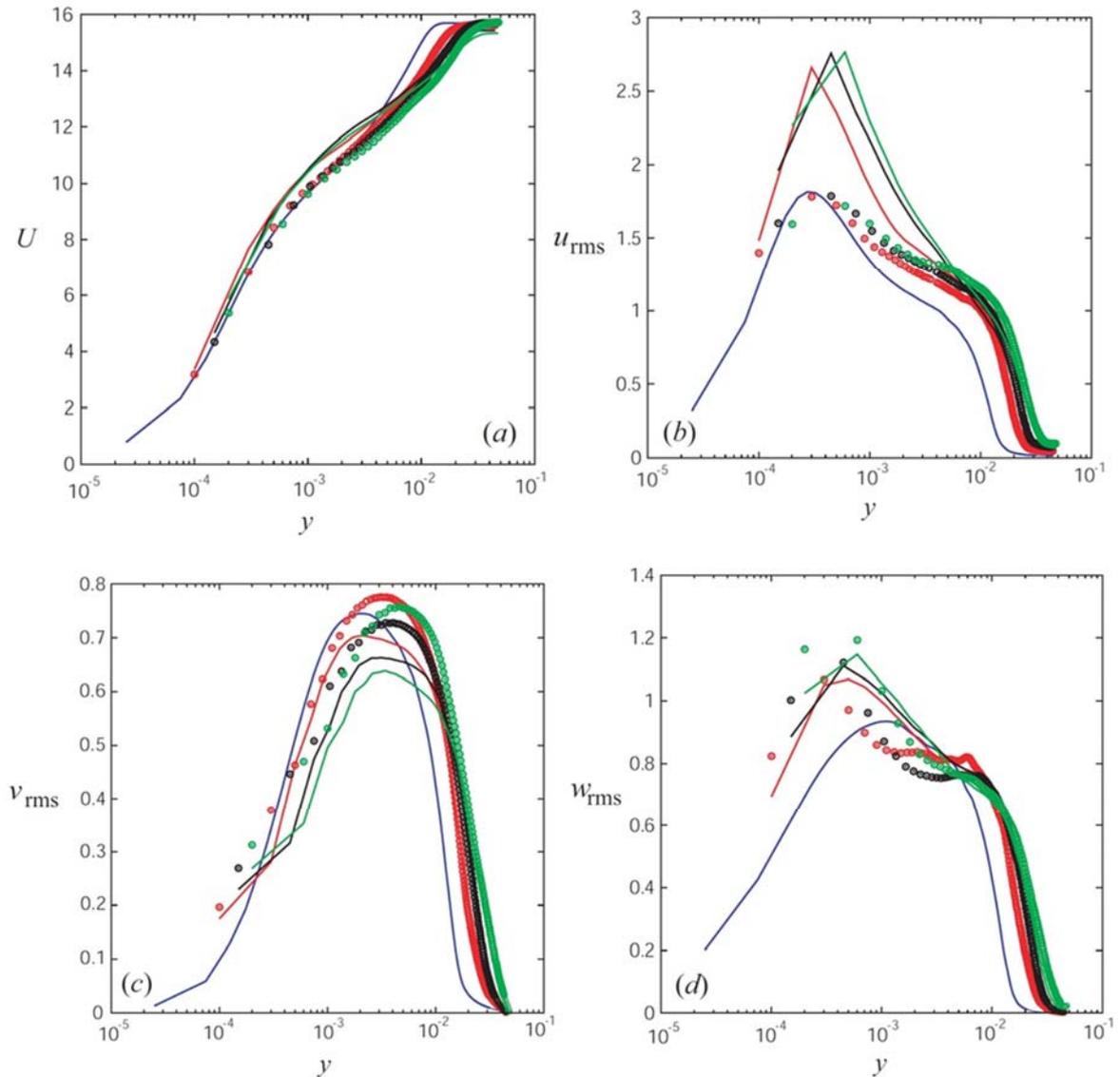


Fig. 4.2.3-21 Time averaged streamwise velocity (a), turbulence intensity in stream wise direction (b), turbulence intensity in wall-normal direction (c) and turbulent intensity in spanwise direction (d) at $Re_x=7.0 \times 10^5$. Blue solid lines are by resolved LES, the other solid lines are by unresolved LES and points are by wall-modeled LES. Grid resolutions are same for the same colored lines and points.

以上の結果は、各方向の格子幅および時間刻み幅を 4~8 倍（したがって全体の計算規模は 1/256 ~ 1/4096 倍）した壁面モデル LES により、壁面近傍において解像格子 LES と同等の予測精度が得られることを示している。

これまでに報告されてきたほとんどの壁面モデルでは時間的・空間的な平均則（統計則）を併用しているが、その数学的・物理的な妥当性は必ずしも自明ではない。我々の事前検討でも、一般的な壁面モデルにおいて第一格子点が位置する対数領域での瞬時速度と、粘性底層や緩和層での統計則に基づく瞬時速度の相関がほとんど 0 であることを確認している。したがって本提案の壁面モデルでは、第一格子点を対数領域に確保することは想定していない。むしろ格子解像度不足の影響が顕著に

表れる緩和層以下に格子点を積極的に確保する、一般的な壁面モデルに共通する”内層をバイパスする”という思想に逆行する壁面モデルである。そのため、極めて高いレイノルズ数の流れに適用する場合には、統計則を併用する既存モデルと比較して相対的に計算コストが高くなる。また、本来ならば瞬時変動速度間には厳密な相関があるが、壁面近傍の渦構造をあるべき姿へ強制的に修正する過程においてはそれを部分的には無視している、ある意味で”乱暴な”壁面モデルである。しかし、変動エネルギー保存と、(工学的な流れでは方向が定義されることが多い) 主流方向の瞬時速度変動を修正するという簡便な手法により、壁面近傍において解像格子 LES と同程度の予測精度を担保したまま計算規模を3~4桁削減できるという事実は、工学的な見地からは歓迎すべきものであると考える。

(3) 参考文献

- [1] Germano, M., et al., "A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model," *Phys. Fluids A*, Vol. 3, No. 7 (1991), pp. 1760-1765.
- [2] Lilly, D. K., "A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method," *Phys. Fluids A*, Vol. 4, No. 3 (1992), pp. 633-635.
- [3] Miyazawa, M., Kato, C., Suzuki, Y., Takaishi, T., "Aeroacoustic Simulation of a Flow around a 2-D Aerofoil: 1st Report, Validation of a Large Eddy Simulation of Separated and Transitional Flow around an Aerofoil," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B* (in Japanese), Vol. 72, No. 721 (2006), pp. 2140-2147.
- [4] S. Kawai and J. Larsson, Wall-modeling in large eddy simulation: Length scales, grid resolution, and accuracy, *Physics of Fluids*, 24, 015105 (2012)
- [5] 鶴沢憲, 加藤千幸, "渦構造に基づく壁面モデルの開発", *生研研究*(70-1), p.37-41 (2018).

4-2-4. (サブ課題 D) 航空機の設計・運用革新を実現するコア技術の研究開発

(1) 研究成果の要旨

本サブ課題では、「設計・開発段階のみならず開発対象の運用・運航段階も含めて考えるのが「ものづくり」である」、という観点に立ち、航空機の設計・開発および運用・運航における重大な課題を解決し、格段の効率化、高性能化、安全性向上、さらには利用者サービスとしての質の向上を実現するコア技術を確立する。

設計・開発における課題である設計の手戻りをなくすためのコア技術の開発に取り組む。手戻りの原因は、現状では実機試験など開発の下流段階でしか評価できない設計課題のためであり、これらの設計評価を設計初期段階で評価可能とするコア技術を開発する。そのため、実機飛行環境を高忠実に再現でき、また、高速に解析可能な革新的解析プログラムを、「京」での成果をベースとして研究開発する。

運用・運航における課題である、落ちにくい飛行機の実現、増大する物流要求への対応について取り組む。危険な状況下での航空機の安定性・安全性の向上を可能とするため、失速特性の高精度予測技術を研究開発し、非線形飛行力学モデルの構築および非線形制御の導入など航空機の飛行制御技術の抜本的な改善を目指す。また、横風、ダウンバーストなど急激な気象変動時の飛行特性の把握や大型機の翼端渦によるダウンウォッシュの高精度予測による離発着制限の緩和、更には空港近傍の

航空航路の最適化など、新しい運用・運航制御手法を開発することで、安全性向上のみならず混雑する空港の離発着枠の増大や輸送能力の向上を目指す。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施した。

a) 高速・高精度乱流解析技術の研究開発

a)-1 直交格子ベース基盤ソルバーのレイヤー格子への対応

背景格子とレイヤー格子間でのデータ通信機能の研究開発を実施した。この結果、背景格子とレイヤー格子を用いた解析基盤が実装できた。

a)-2 直交格子ソルバーにおける LES (Large Eddy Simulation) 壁面モデルの研究開発

昨年度提案した、LES 壁面モデルを用いた直交格子ソルバーに適した安定かつ非散逸な計算スキーム (KEEP スキーム) の検証を実施した。この結果、提案する LES 壁面モデルと KEEP スキームを組み合わせることで従来手法に対する優位性が確認された。

b) 設計評価技術の研究開発

b)-1 高速バフエット/低速失速解析における LES 壁面モデルの基礎検証

既存構造格子ソルバーを用いた精度検証を実施した。この結果、高速バフエットに関しては平衡 LES 壁モデルを用いることでバフエット現象を再現できることが確認できた。同時に、LES 壁面モデルを使わない解析との比較により、平衡 LES 壁面モデルと非平衡 LES 壁面モデルに関して特性の違いを確認できた。失速付近での、LES 壁面モデルを使わない解析および使った解析が完了した。

c) 飛行安全性向上技術の研究開発

c)-1 非線形飛行力学モデルデータベースに基づく機体運動シミュレータの構築

空力データベースの構築に向けたパラメトリック計算を実施した。この結果、現時点までの計算で非線形な空力係数の変化が確認でき、これにより従来の線形モデルとは異なった挙動を再現可能である事がわかった。

In this sub subject, we will establish key technologies to solve critical issues in design development and operation of aircrafts and offer technical advantages, enhanced safety and quality enhancement as a user service.

Regarding design development, we develop an innovative design analysis program based on an achievement of Strategic Programs for Innovative Research (K-computer project). It is able to treat real flight environments faithfully and conduct quick analysis in order to realize design evaluations in early phase of the design, which can't be evaluated until a later phase of development such as actual equipment tests currently.

Regarding operation of aircraft, we aim to realize drastic improvement of a flight control technology by research on a highly accurate stall prediction method and a non-linear control technology which are key technologies for flight stability and safety under dangerous conditions. We study on innovative operation technologies such as optimization of flight course and limitation easing of takeoff and landing by precise prediction of aerodynamic characteristics during rapid

weather change like cross wind and down burst generated by wing-tip vortices. We aim to increase the number of service and the transport capacity as well as improve flight safety.

This year, following functional verification analyses were proceeded using the K-computer level supercomputers for a killer application program in which core elemental technology is implemented.

a) Research and development of high-speed, high-precision turbulence analysis technology

a)-1 Development of the function to support layer grid

Research and development of data interpolation function between background cartesian grid and layer grid was carried out. As a result, an analysis base using a background cartesian grid and layer grid could be implemented.

a)-2 Study on LES wall-model for the base solver

The LES wall model for non-body-fitted grid was implemented and verified using the existing proven structural grid solver. As a result, it is confirmed that the proposed LES wall model is also effective in the non-body-fitted grid.

b) Design assessment technology

b)-1 Basic verification of LES wall model in high speed buffet / low speed stall analysis

Accuracy verification using an existing structural grid solver was performed. As a result, the effectiveness of the equilibrium LES wall model for high-speed buffeting was confirmed. Also, the characteristics of the equilibrium / non-equilibrium LES wall model was confirmed by comparison between the analysis with the LES wall mode and the analysis without the LES wall model. The analysis of the assumed case has been completed for low-speed stalls.

c) Enhancement of flight safety

c)-1 Development of basic non-linear flight dynamic model

Parametric calculations for the construction of the aerodynamic database was carried out. As a result, the change of the nonlinear aerodynamic coefficient has been confirmed by the calculation up to the present time.

(2) 本研究の内容

a) 高速・高精度乱流解析技術の研究開発

a)-1 直交格子ベース基盤ソルバーのレイヤー格子への対応

レイヤー格子への対応

直交格子ベース基盤ソルバーに対してレイヤー格子への対応機能を追加した。昨年度までに開発したレイヤー格子のデータ構造およびレイヤー格子内でのデータ通信機能をベースに、今年度はレイヤー格子のプロトタイプソルバーおよびレイヤー格子と背景格子(階層型直交格子)間のデータ通信機能を開発した。Fig. 4.2.4-1 に背景格子とレイヤー格子のイメージを示す。今後は機能検証、レイヤー格子ソルバーへの LES 壁モデルの実装を実施する予定である。

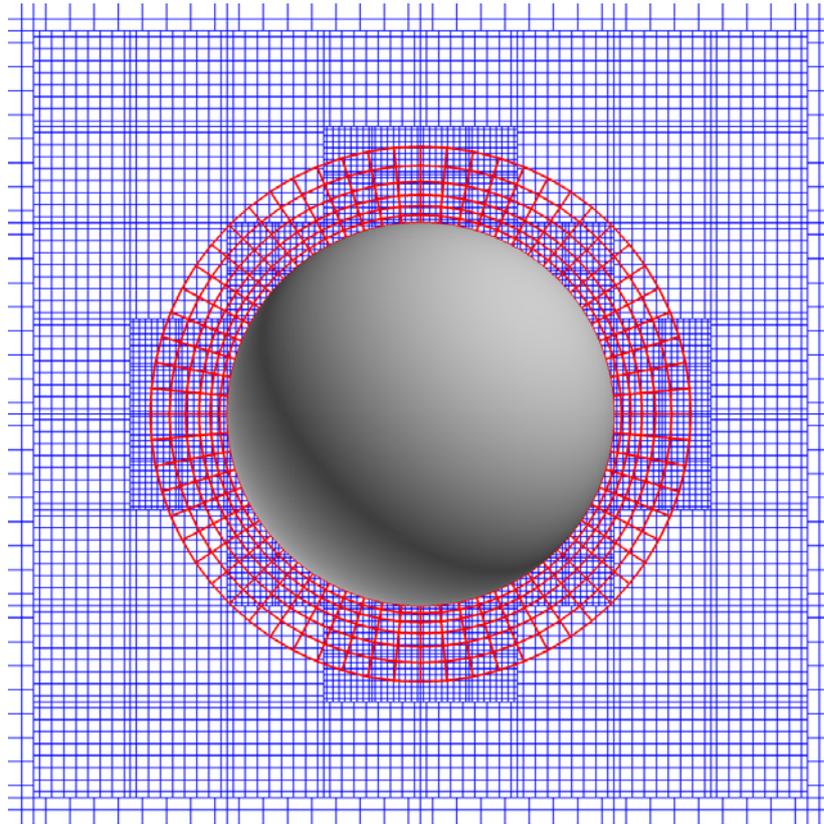


Fig. 4.2.4-1 Background grid (blue lines) and layer grid (red lines) around a sphere.

表面積分機能の開発

物体に働く力を計算するためには表面積分を行う必要がある。直交格子法では物体形状をアルゴリズムで表現するために表面積分にも工夫が必要となる。ここでは、流束を物体表面で定義しているため、計算で用いる流束をそのまま積分することが可能である。しかしながらそこでの面積要素をどう計算するかが問題になる。物体形状を階段近似で表現し、それに基づいて計算する方法が一番簡単ではあるが、これには大きな問題がある。2次元での45度平板を例に説明する。この場合直角二等辺三角形の斜辺が物体の表面積($\sqrt{2}$)に相当し、残り二辺がそれを階段状に近似する(1+1=2)事になる。この比率はフラクタル性を有するため、格子サイズ(直角二等辺三角形)をいくら細かくしても不変であり、正しい表面積には収束しない。そのためここでは、法線ベクトルを活用して、面が傾いている効果を取り入れた手法を適用する。具体的には面積要素 S は

$$S = \frac{\Delta y \Delta z}{\max(n_x, n_y, n_z)} \times \frac{1}{N_w} \quad (4.2.4-1)$$

で計算する。これを図示すると Fig. 4.2.4-2 のようになる。式(4.2.4-1)の第1項は Fig. 4.2.4-2 中で青線の部分となる。この部分は、 x 軸方向に投影した面積が $\Delta y \Delta z$ になるような面積要素であり、面が傾いている効果を反映している。

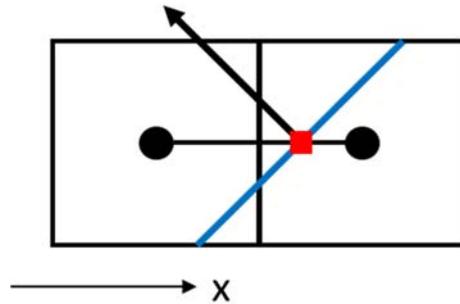


Fig. 4.2.4-2 Computational model of a surface element

また、式(4.2.4-1)における N_w は当該セルの周りにある壁の個数である。Fig. 4.2.4-3 の様な状況を想定した場合、そのまま計算すると、重複した箇所が発生する。そのため重複を避けるために各々 $1/N_w$ 分の寄与として計算することとした。

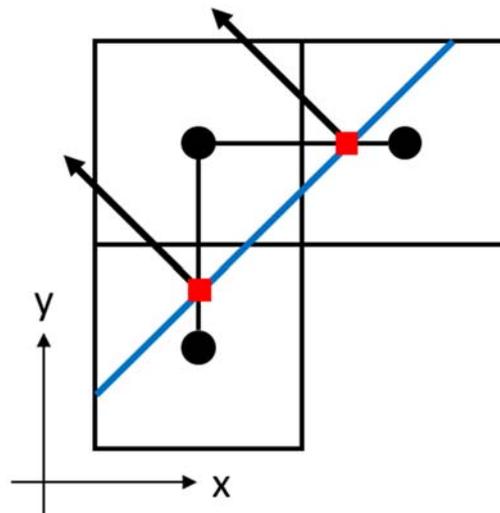


Fig. 4.2.4-3 Case with multiple walls

式(4.2.4-1)で示された面積要素に対して、式(4.2.4-2)で示すように面積要素に法線ベクトルをかけて各軸方向の面積要素とする。

$$S_x = S \times n_x, S_y = S \times n_y, S_z = S \times n_z \quad (4.2.4-2)$$

本手法を用いて実際に表面積を計算した結果を Fig. 4.2.4-4 に示す。これらの図では、球および2次元翼型 (NACA6712) の表面積の計算において、階段状近似を用いた手法と提案手法との比較を示している。横軸は格子サイズ、縦軸は表面積の誤差を示す。階段状近似では、格子を細かくしても正しい表面積には収束しないことがわかる。一方提案手法では1次精度で正しい値に収束していく様子がわかる。

表面積分においては表面積が正しく計算できると同時に、閉じた物体の場合は、面ベクトルも最終的に閉じる (総和が0になる) 必要がある。階段状近似の場合は必ず0になるが、提案手法では誤

差の範囲で 0 にはならない。球では形状の対称性により、提案手法でも総和は 0 になるが、非対称形状では Fig. 4.2.4-5 で示す様に誤差が発生する。しかしながらこちらも 1 次精度で誤差は小さくなることが確認できる。

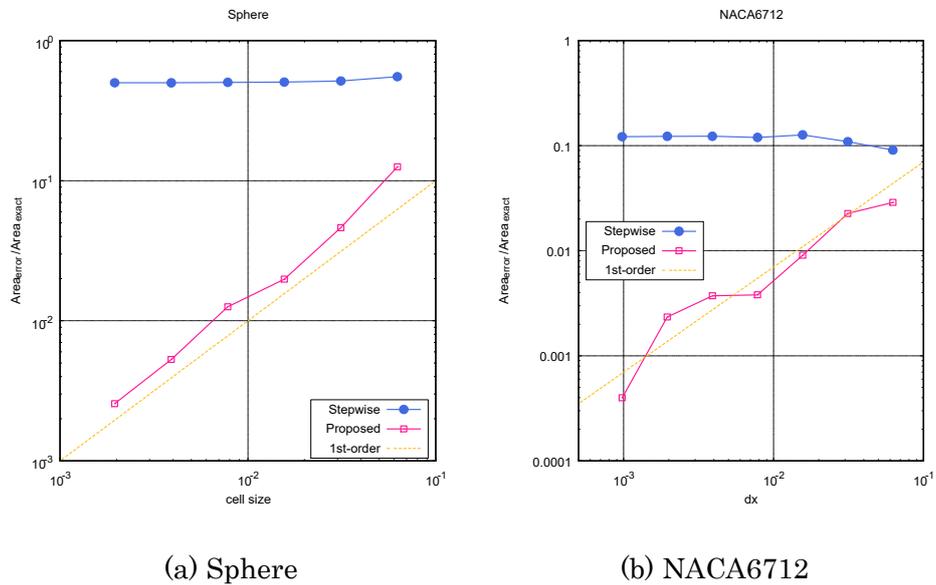


Fig. 4.2.4-4 Error of surface integration

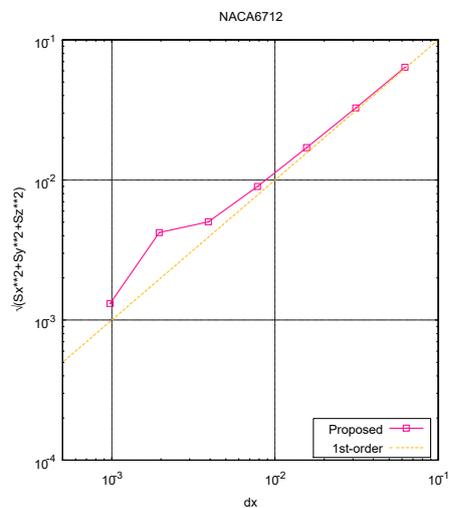


Fig. 4.2.4-5 Summation error of surface normal vector

実機詳細形状の試解析

階層型等間隔直交格子法と IB (Immersed Boundary) 法の組み合わせで実機詳細形状を対象とした格子の自動生成と試計算を実施した。Fig. 4.2.4-6 に実機複雑形状まわりの大規模格子作成例を示す。ここでは、JAXA 高揚力形態モデル (主翼、水平/垂直尾翼、胴体、ナセル、パイロン、降着装置、高揚力装置) の周りに数億点規模の格子を自動生成している。格子の生成には JSS2 (富

士通 PRIMEHPC FX100) の 256 ノードを使って約 10 分程度で作成できた。

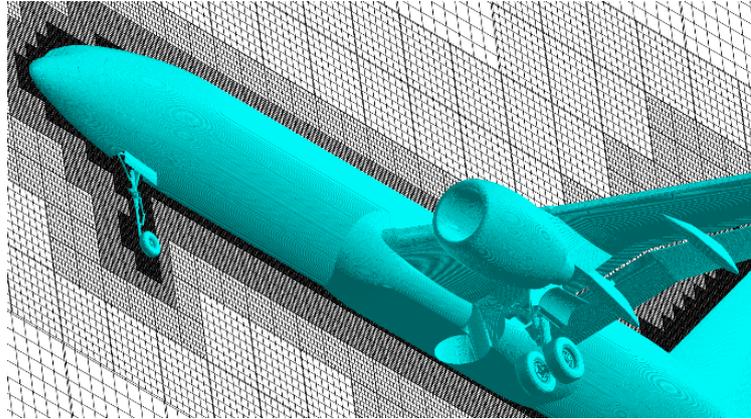
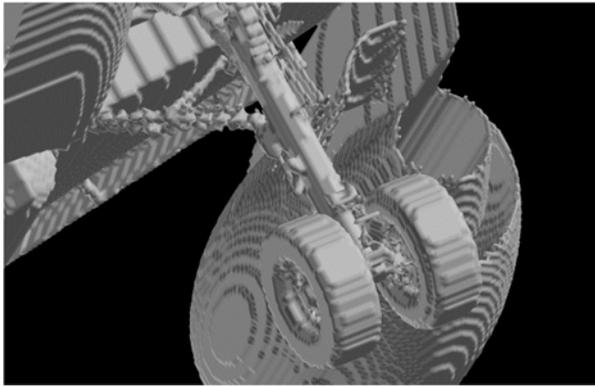
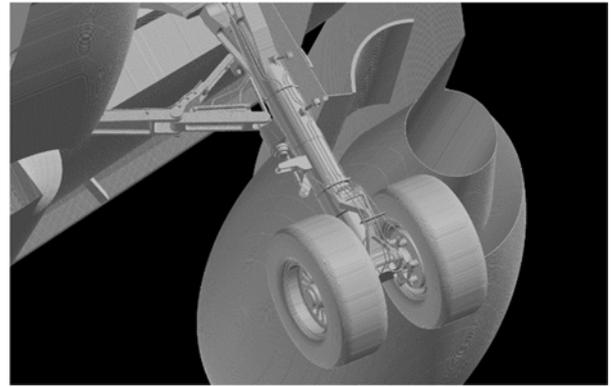


Fig. 4.2.4-6 Hierarchical cartesian grid around the JAXA high-lift configuration model

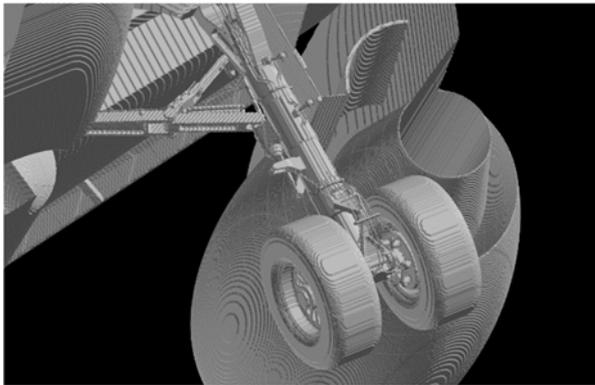
Fig. 4.2.4-7 は IB 法で設定した物体表面を用いて、降着装置の形状を可視化したものである。Fig. 4.2.4-7 (d) がもとの CAD 形状で、STL ファイルとして読み込んでいる。パイプなど非常に細かな部品が形状として再現されている。格子点数が少ない場合は、それらの細かな形状を再現できていないが、格子点を増やす（階層格子の階層を増やす）と形状再現性が向上し、細かな部品も再現できるようになることがわかる。後述する試計算では、6 階層 6.7 億点規模の計算格子を使っており、その場合の形状再現性はこの図で示す程度となっている。物体適合格子ほど自由に格子密度を制御することはできないため、相対的に多くの格子点が必要になるが、格子作成時間は圧倒的に短時間かつ自動的に生成できることは大きなメリットである。



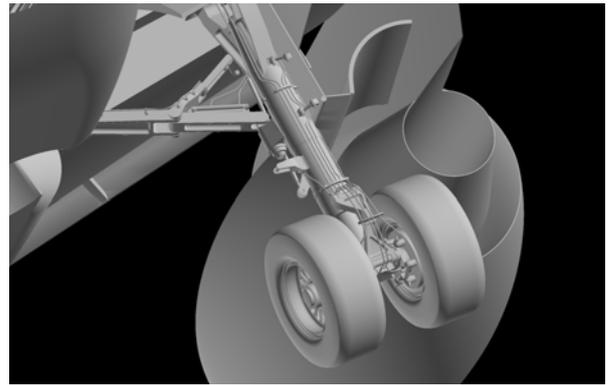
(a) Level 4 (64 million points)



(c) Level 8 (15 billion points)



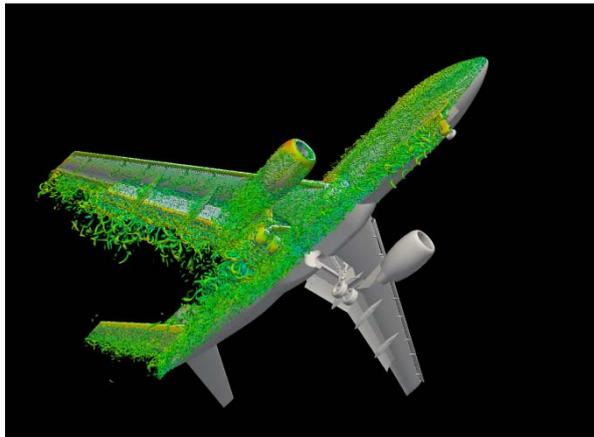
(b) Level 6 (670 million points)



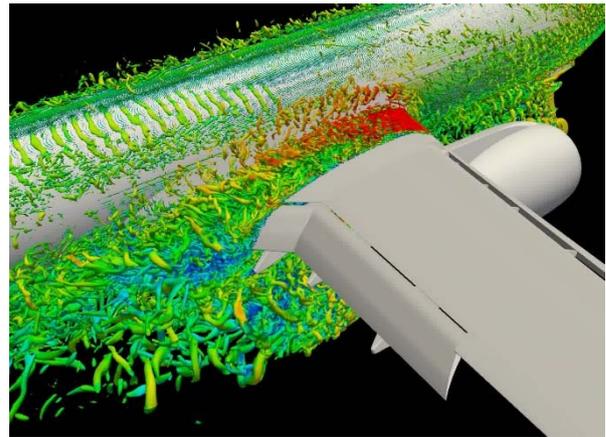
(d) CAD geometry

Fig. 4.2.4-7 Reproducibility of surface shape of landing gear by IB method.

Fig. 4.2.4-8 は試計算の結果を示す。計算条件はレイノルズ数 10^6 、マッハ数 0.2、迎角 7 度、LES 壁モデルは用いていない。格子点数は全体で約 8.4 億点（流体セルが約 6.7 億点、機体内部に存在する固体セルが約 1.7 億点）である。JSS2 の 256 ノード（512 プロセス×16 スレッド）、2.2 TB のメモリを用いた計算である。この試計算により格子の自動生成および大規模解析が実施できていることがわかる。



(a) Bottom view



(b) Wing-to-body connection

Fig. 4.2.4-8 Test analysis of JAXA high-lift configuration model (isosurfaces of Q criterion colored by streamwise velocity).

コデザインによるポスト「京」での性能予測

性能推定ツールを用いてポスト「京」上での性能推定を行った。700万点(963×8)の計算規模を対象とした。「京」のノード性能の実測値は6.2 [GFLOPS]であった。富士通 FX100 および性能推定ツールを用いてポスト「京」での性能予測を行ったところ、ノード性能で130 [GFLOPS]、実行効率は4.7 [%]となった。理研シミュレータでの性能予測も進めている。

a)-2 直交格子ソルバーにおける LES (Large Eddy Simulation) 壁面モデルの研究開発

直交格子ソルバーに適した安定かつ非散逸な計算スキームの壁面モデル LES (WMLES) における評価

本研究では、昨年度提案した運動エネルギー・エントロピー保存(KEEP)スキーム [1]を用いて実際に乱流境界層の WMLES を実施し、その安定性や格子解像度に対する感度について調査を行った [2]。既存の圧縮性直交格子ソルバーでは、数値安定性の観点から数値散逸が卓越する風上スキームが用いられており、本プロジェクトで開発を進めている FFVHC-ACE も例外ではない。しかし、数値散逸(散逸エラー)が卓越してしまうと LES として乱流を正確に解像するのが困難となるため、理想的には、誤差少なく乱流を解像するため、数値散逸の無い計算手法が望まれる。KEEP スキームは、物理的な運動エネルギーおよびエントロピー保存を離散的に満足することにより数値散逸を含まないにも関わらず、従来の中心差分スキームと比較して、物理的な制約条件を満足することで数値安定性を飛躍的に高める計算手法である。また本 KEEP スキームで使用するステンシルは隣接格子点のみであるため、FFVHC-ACE への実装においては壁面近傍のステンシルの処理等を変更することなしに実装が可能である利点も持つ。

KEEP スキームの評価・検証のために、2次精度 KEEP スキームおよび既存の3次精度風上スキームを用いた平板乱流境界層の WMLES を実施し、参照結果(6次精度コンパクト差分スキーム [4]・Fine 格子)との比較を行った。流れ条件は、一様流マッハ数 $M_\infty=0.3$ 、境界層厚みベースのレイノルズ 4.4×10^4 である。またサブグリッドスケールの乱流渦粘性の計算には Selective-mixed-scale

モデル[3]を用いた。

格子には等方直交格子を用い、境界層厚み当たりの各方向の格子点数を 25 (Coarse)、35 (Medium)、50 (Fine)とした時の平板乱流境界層の流れ方向平均速度分布を Fig. 4.2.4-9 に示す。3次精度風上スキームを用いた計算結果 (Fig. 4.2.4-9 (a))では外層の無次元速度が参照結果 (6次精度コンパクト差分スキーム[4]・Fine 格子)よりも小さくなるのに対し、KEEP スキームを用いた計算結果 (Fig. 4.2.4-9 (b))では、外層の速度分布が参照結果に近い傾向を示している。この時、KEEP スキーム・Coarse 格子の結果における壁面摩擦係数 C_f は 0.00300 であり、参照結果 ($C_f = 0.00291$)に対して 3%の誤差となっている。一方で、風上スキームは Fine 格子でも壁面摩擦係数を 11%過大評価した ($C_f = 0.00322$)。また、Fine 格子における境界層厚みの 20%高さでの主流方向速度のspan方向スペクトルを Fig. 4.2.4-10 に示す。KEEP スキームでは風上スキームと比較して低周波側 ($k < 5$)で参照結果と良い一致がみられることから、境界層内の主要な渦構造が精度良く捉えられていることが分かる。一方で、3次精度風上スキームは低周波側のエネルギーを過剰に予測していることが分かる。このことが、上記の平均速度分布の差異につながっていると考えられる。

以上より、乱流境界層の WMLES において、KEEP スキームを用いることで既存の風上スキームを用いる際よりも大幅に少ない格子点数で正確な LES 解析が可能であること、数値粘性を付加せずとも安定した計算が可能であることを確認した。来年度はこの成果をベースに、FFVHC-ACE への KEEP スキーム実装を行い、格子が物体表面に沿わない場合の平板乱流境界層 WMLES 解析を行ってその精度を検証する。

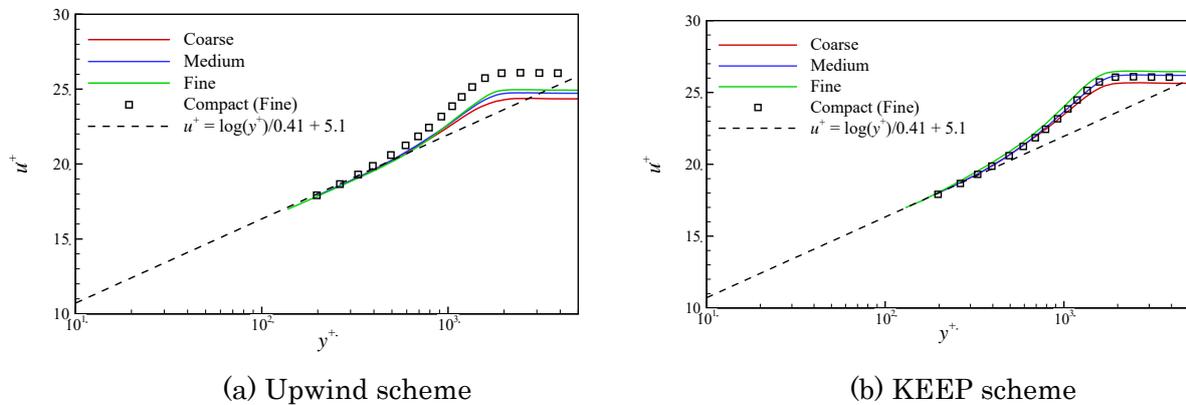


Fig. 4.2.4-9 Mean streamwise velocity profiles.

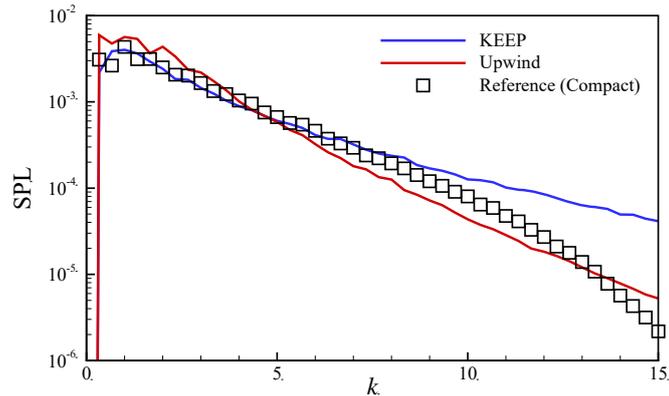


Fig. 4.2.4-10 Comparisons of spanwise spectra of streamwise velocity at 20% boundary layer height.

b) 設計評価技術の研究開発

b)-1 高速バフエット/低速失速解析における LES 壁面モデルの基礎検証

高速バフエットの LES 壁面モデルの基礎検証

本研究では、前年度に引き続き物体適合構造格子ベースのLES壁面モデルを実装した東北大WMLESソルバーを用いて遷音速バフエット解析を実施した。本年度は平衡壁面モデル[5]での解析[6]に加えて非平衡壁面モデル[7]による解析を行い、モデルごとの予測精度の特性を調査した。非平衡WMLESの解析は平衡WMLESの解から解析を始めて、 $\Delta t u_{\infty} / c \doteq 30$ のデータ(衝撃波振動の約2周期分)を用いて統計量を解析し、前年度行った平衡WMLESの結果($\Delta t u_{\infty} / c \doteq 30$ のデータを時間平均)、および実験データ[8]と比較・検証した。平衡・非平衡WMLES共に、衝撃波上流での乱流境界層の速度分布、運動量厚さに大きな違いはなく、また、Figs. 4.2.4-11、4.2.4-12に示した翼面上の時間平均Cp分布および瞬時のQ等値面を見ると、衝撃波の振動範囲($0.4 \leq x/c \leq 0.6$)や後縁付近のCp分布(Fig. 4.2.4-11)、瞬時の流れ場の様相(Fig. 4.2.4-12)に大きな違いはない結果となった。従って、遷音速バフエット現象に対しては平衡・非平衡モデルの予測精度に大きな違いはなく、同程度に十分な予測精度を持っていることが確認できた。次年度は取得した平衡・非平衡WMLESのデータを、乱流境界層内層域まで解像する通常のLES解析結果とより詳細に比較・検証することで、それぞれの壁面モデルの特性を解明し、遷音速バフエット解析に対するLES壁面モデルの有効性や予測精度の検証を実施する。

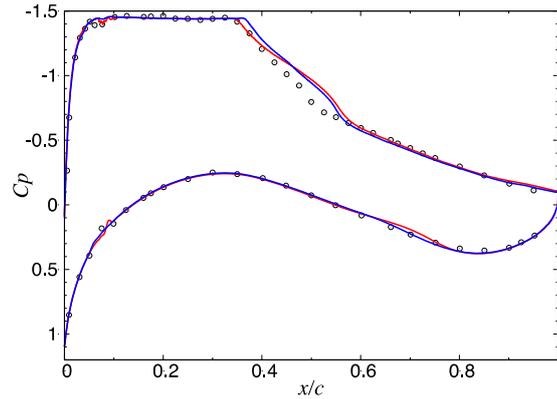


Fig. 4.2.4-11 Pressure coefficient along airfoil surface at $Re_c=3.0\times 10^6$, $M_\infty=0.73$ and $AoA=3.5deg$ obtained by the Equilibrium [6] (red) and non-equilibrium (blue) WMLES compared with the experimental data (black circles) [8].

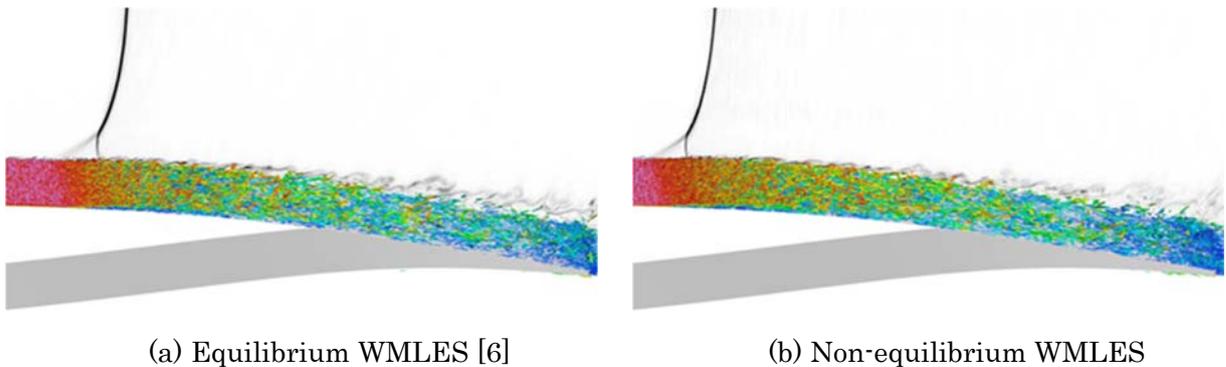


Fig. 4.2.4-12 Isosurfaces of Q criterion colored by streamwise velocity and density gradient distributions in spanwise cross section obtained by the Equilibrium and non-equilibrium WMLES.

また本年度は、LES 壁面モデルのより詳細な予測精度検証や適切な LES 壁面モデルの構築を可能とするため、OAT15A supercritical 翼型に対して、乱流境界層内層域まで解像する通常の LES (wall-resolved LES、WRLES) 計算を行い、詳細な参照データベースの構築に着手した。解析条件は先行研究において実験が行われている流れ場条件 (レイノルズ数 $Re_c=3.0\times 10^6$ 、一様流マッハ数が $M_\infty=0.73$ 、バフエット現象が発生するケースとしないケースとして、迎角 $AoA=3.5deg$ 、 $3.0deg$) を対象とした。先行研究から 2 つの迎角条件の間にバフエット境界が存在することが分かっている。本 WRLES 解析は WMLES 解析と同様に 6 次精度コンパクト差分スキーム [4]、および衝撃波捕獲法として localized artificial diffusivity 法 [9] を用いた東北大構造格子ソルバーを用いて実施した。WMLES の結果と比較するためにサブグリッドスケールモデルとして同じ Selective-mixed-scale モデル [3] を用いる。現在、 $\Delta t u_\infty / c \doteq 15$ まで計算が進んでおり、WMLES と比較するために更に $\Delta t u_\infty / c \doteq 15$ (合計で $\Delta t u_\infty / c \doteq 30$) の計算を行う予定である。次年度は、得られた WRLES データにおける運動量のバランスなど詳細な流れ場の解析を行うことで壁面モデルの妥当性を検証すると共に、平衡・非平衡 WMLES のデータと比較することで平衡・非平衡モデルの特性を理解する。

以上で記載してきた WMLES 解析は、WMLES の有効性検証のため、全て比較データ（風洞試験データや WRLES データ）が取得可能なレイノルズ数条件 ($Rec=3.0 \times 10^6$) に対しての解析結果である。しかし一方で、航空機飛行条件ではレイノルズ数がこれよりも一桁大きくなる。そこで、実機飛行条件における WMLES の有効性を検証するため、実験条件のレイノルズ数 ($Rec=3.0 \times 10^6$) に対して、レイノルズ数を 10 倍大きくした実機レベルのレイノルズ数 ($Rec=3.0 \times 10^7$) での平衡 WMLES を実施した。実機レベルのレイノルズ数条件では、比較参照データが存在しないため、あくまで定性的な有効性の議論になるが、WMLES がレイノルズ数効果を適切に再現できるかの検証となる。その他の流れ場条件は、バフエットが発生しない条件である、一様流マッハ数 $M_\infty=0.73$ 、迎角はバフエット境界前後の $AoA=3.0 \text{deg}$ である。 $Rec=3.0 \times 10^6$ ではバフエットが発生する $AoA=3.5 \text{deg}$ の WMLES 解析は次年度実施予定である。Fig. 4.2.4-13 は、風洞試験レベルのレイノルズ数条件 ($Rec=3.0 \times 10^6$) および実機飛行レベルのレイノルズ数条件 ($Rec=3.0 \times 10^7$) の平衡 WMLES 解析結果である。

風洞試験レベルのレイノルズ数条件 ($Rec=3.0 \times 10^6$) に対して、実機飛行レベルのレイノルズ数条件 ($Rec=3.0 \times 10^7$) では、衝撃波が下流側に移動し、衝撃波根元のラムダ衝撃波も小さくなっている様子が見られる。また、Fig. 4.2.4-14 に示す時間平均の C_p 分布を見ると、 C_p の不連続位置が $x/c \doteq 0.5$ から下流側 ($x/c \doteq 0.6$) に移動し、後縁付近 ($x/c \doteq 1.0$) では剥離が小さくなることで C_p がやや増加している様子が見られる。これは、高レイノルズ数条件では前縁から発達する境界層が薄くなり剥離が小さくなっている影響であり、WMLES はこれらのレイノルズ数効果を定性的に正しく捉えていることが示唆される。また本結果は、先行研究（論文[10]）で調べられたレイノルズ数効果の傾向と一致しており、壁面モデルを用いた LES 解析でもレイノルズ数効果が少なくとも定性的には再現できることが確認できた。次年度はバフエット条件 ($AoA=3.5 \text{deg}$) においても解析を進める予定である。

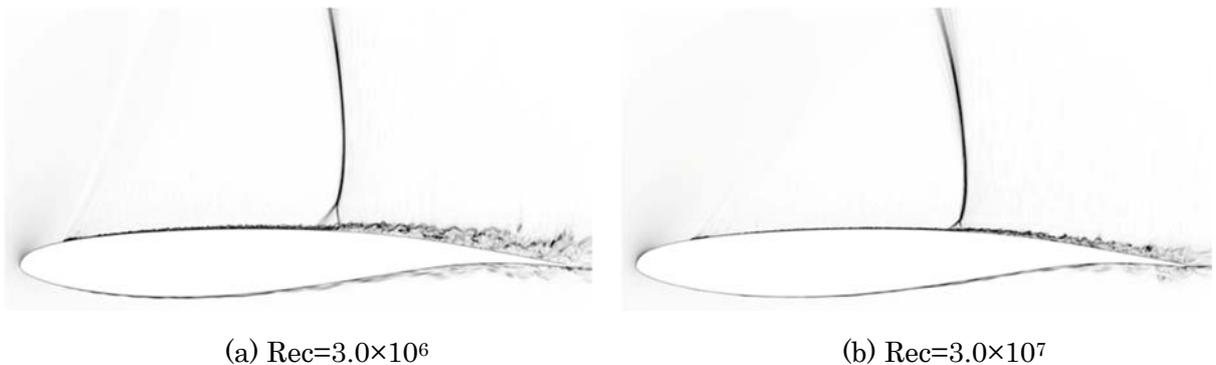


Fig. 4.2.4-13 Density gradient magnitude of spanwise cross section at $M_\infty=0.73$ and $AoA=3.5 \text{deg}$ obtained by the EQBL WMLES.

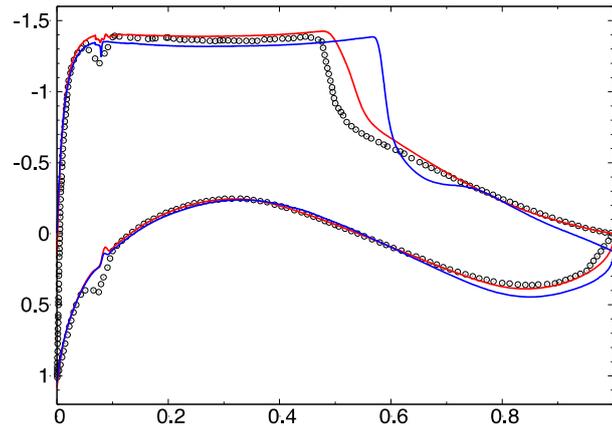


Fig. 4.2.4-14 Pressure coefficient along airfoil surface obtained by the equilibrium WMLES at $Rec=3.0 \times 10^6$ (red) and $Rec=3.0 \times 10^7$ (blue) at $AoA=3.0 \text{ deg}$ compared with the experimental data [8] at $Rec=3.0 \times 10^6$, $AoA=3.0 \text{ deg}$ (black circles).

低速失速の LES 壁面モデルの基礎検証

A-Airfoil の迎角 $AoA=13, 14, 16 \text{ deg}$ の流れ場について平衡・非平衡 WMLES を実施し、後縁失速流れにおける WMLES による流れ場の予測精度を検証した。本解析では境界層の非平衡性（非定常項・圧力勾配項・対流項による寄与）を無視して境界層の平衡状態を仮定する平衡壁面モデル (EQBL) [5] と、非平衡性を考慮する非平衡壁面モデル (NonEQBL) [7] を比較した。また、参照結果としては Gleyzes & Capbern [11] による風洞試験、Asada & Kawai [12] による $AoA=13 \text{ deg}$ における WRLES が既に存在するが、さらに高迎角での参照データとして、新たに $AoA=14, 16 \text{ deg}$ における WRLES も本研究の枠内で実施した。格子点数は WMLES が $3784 \times 297 \times 225$ 、WRLES が $5382 \times 705 \times 283$ である。本年度は、 $AoA=16 \text{ deg}$ における非平衡壁面モデルを用いた WMLES を除いた全ての計算結果を取得した。

それぞれの結果における揚力-迎角曲線を Fig. 4.2.4-15 に示す。実験で $AoA=13 \text{ deg}$ 付近で C_l が最大値を取るのに対し、WRLES ではさらに高迎角まで C_l が増大している。これは、Fig. 4.2.4-16 に示したように WRLES では流れ場が 2 次元性であるのに対し、風洞試験では Fig. 4.2.4-17 のように風洞側壁の干渉によって流れ場の 2 次元性が崩れているためであると考えられる。また、WRLES は有限スパン長 (5% コード長) でスパン方向の両端に周期境界条件を課しており、大剥離領域においてはスパン方向の相関が残っていることも影響している。ただし、WMLES と WRLES は同じスパン方向領域サイズ・境界条件を採用しているため、高迎角については風洞側壁の干渉が発生している実験データとの比較ではなく、WRLES と WMLES を直接比較することで、壁面モデルの評価が可能であると考えている。得られた $C_l-\alpha$ 曲線を見ると、WMLES は参照データである WRLES と概ね近い傾向が見られており、非平衡壁面モデルを用いた解析 (図中 NonEQBL) の方が平衡壁面モデルを用いた解析 (図中 EQBL) よりも C_l の予測精度が良いことが分かる。なお、高迎角条件における両壁面モデルの差異や流れ場の予測精度については、今後より詳細に調査を行う予定である。

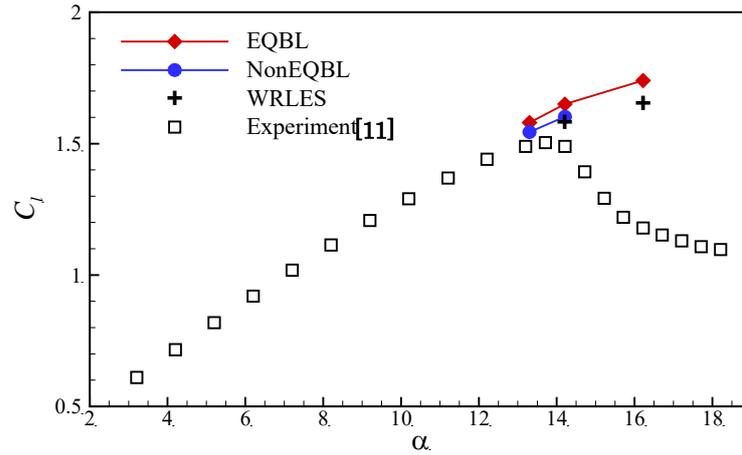


Fig. 4.2.4-15 $C_l - \alpha$ curve.

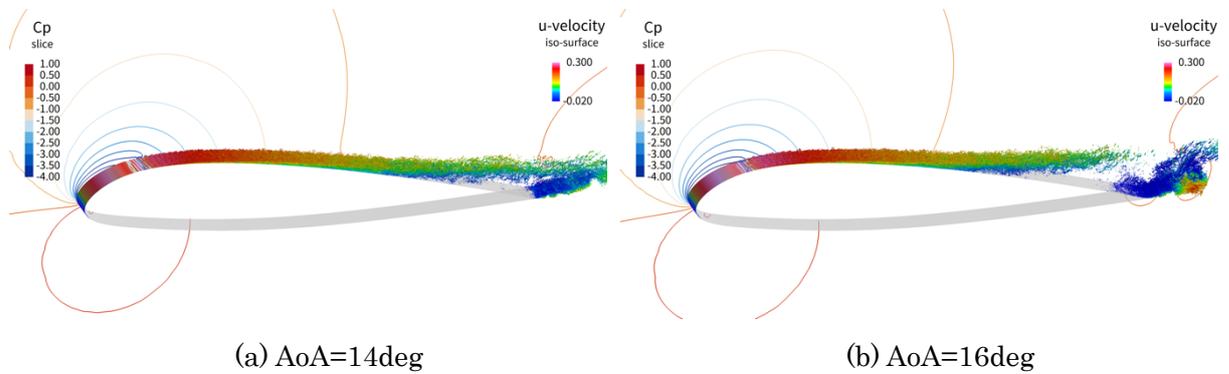


Fig. 4.2.4-16 Isosurfaces of the Q criterion in WRLES colored by streamwise velocity.

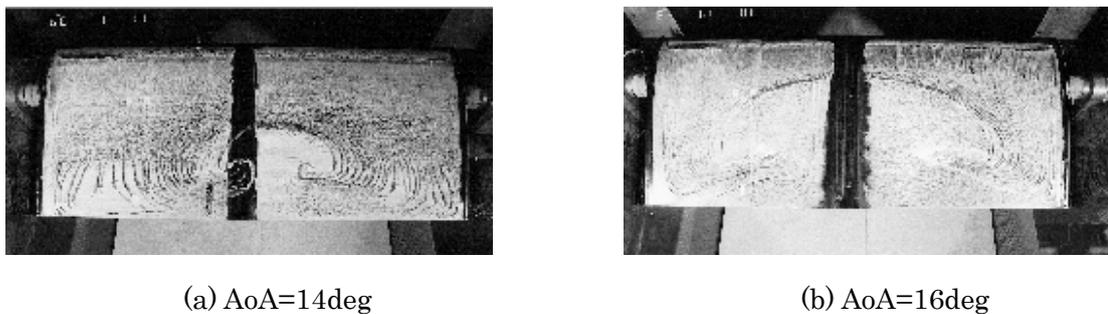


Fig. 4.2.4-17 Oil-flow visualizations of surface streamlines in the wind-tunnel experiment [11].

AoA=13deg の流れ場については、平衡・非平衡壁面モデルによる後縁失速予測精度に関する検証を行った[13]。Fig. 4.2.4-18に翼面上圧力係数の時間平均値を示す。WMLESの結果はWRLES、風洞試験結果と概ね良い一致が見られるが、平衡壁面モデルを用いた時は前縁付近の負圧ピークがやや強く現れている。この負圧ピークの差異が揚力の差を生み出している。なお、時間平均の揚力係数 C_l は平衡・非平衡壁面モデルを用いた場合でそれぞれ1.58、1.54であり、非平衡壁面モデルを用いた時の方がWRLES ($C_l = 1.50$) とより近い値となる。また、Fig. 4.2.4-19に壁面接線方向平均速度分布を示す。非平衡壁面モデルを用いた結果はWRLESの結果と良い一致が見られるのに対し、平衡

壁面モデルを用いた結果は全体的に境界層内の速度分布が大きめに予測されている。

平衡・非平衡壁面モデル間で境界層厚みや揚力に差が生じた原因の一つとして、Fig. 4.2.4-20に示す前縁付近（乱流遷移よりも上流側）の壁面摩擦係数の違いが挙げられる。非平衡壁面モデルを用いた際は WRLES の結果と同様の順圧力勾配に伴う強い壁面摩擦のピークが再現されるのに対し、平衡壁面モデルを用いた際はそのピークが再現されない。これは、平衡壁面モデルには圧力勾配項が含まれていないためである。この壁面摩擦係数のピークの欠損により、境界層の発達が遅れ、結果として後縁付近での境界層剥離が起りにくくなっていると推察される。

前縁付近、乱流遷移よりも上流側の壁面摩擦の差が後縁剥離に与える影響を明確にするため、乱流遷移位置($x/c = 0.14$)よりも上流側では非平衡壁面モデルで得られた壁面摩擦の時間平均値を与え、乱流遷移位置下流でのみ平衡壁面モデルを解く WMLES 解析を実施した。その結果、Fig. 4.2.4-21に示すように乱流境界層内速度分布や境界層厚みが WRLES や非平衡壁面モデルを用いた WMLES の結果に近づいた。このことから、前縁付近の壁面摩擦を正確に捉えることが後縁剥離の予測に重要であること、非平衡壁面モデルはこの点で後縁剥離の予測精度が高いことが示された。

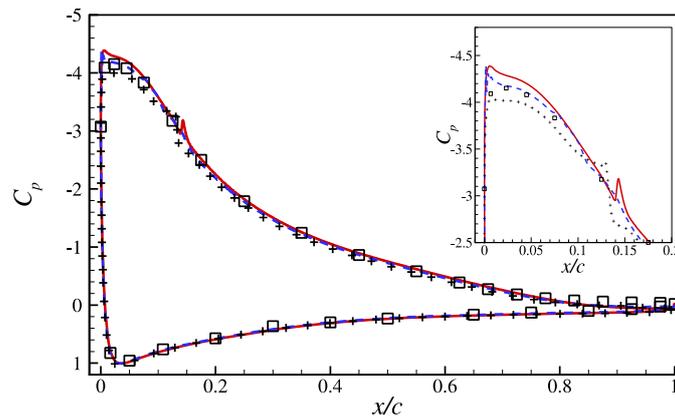


Fig. 4.2.4-18 Distributions of surface pressure coefficient (red solid line: EQBL WMLES, blue dashed line: NonEQBL WMLES, cross symbols: WRLES [12], square symbols: wind tunnel experiment [11]).

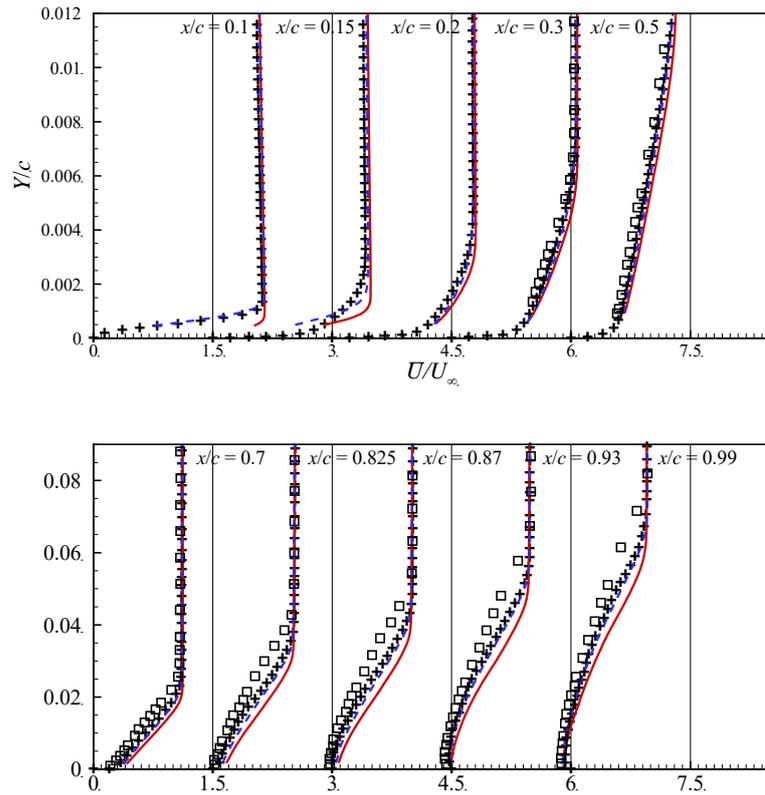


Fig. 4.2.4-19 Mean streamwise velocity profiles. Lines and symbols as in Fig. 4.2.4-18.

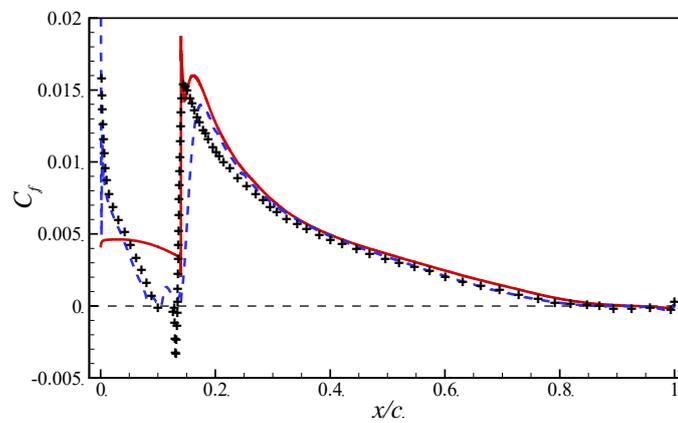


Fig. 4.2.4-20 Distributions of the skin-friction coefficient on the airfoil upper surface. Lines and symbols as in Fig. 4.2.4-18.

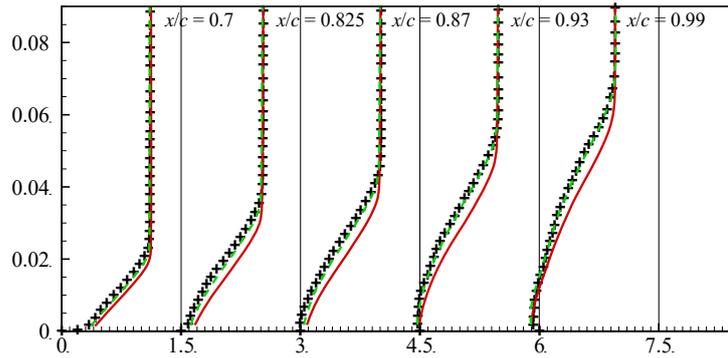


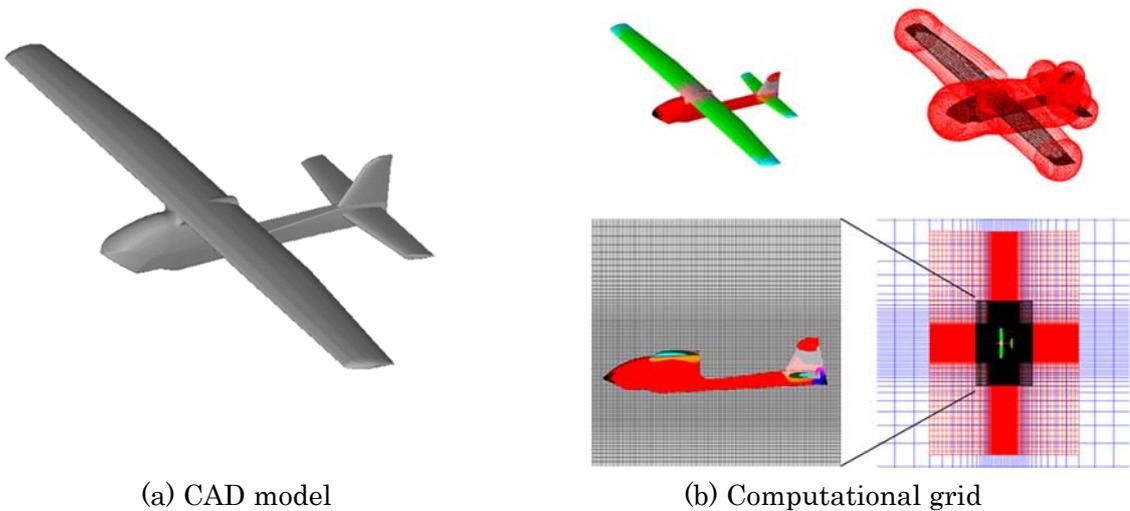
Fig. 4.2.4-21 Effects of differences in the skin-friction near the leading edge on the velocity profiles near the trailing edge (red solid line: original EQBL WMLES, green dashed line: EQBL WMLES with the skin friction near the leading edge from NonEQBL WMLES result, cross symbols: WRLES).

c) 飛行安全性向上技術の研究開発

c)-1 非線形飛行力学モデルデータベースに基づく機体運動シミュレータの構築

前年度の成果を踏まえ、今年度は「非線形飛行力学データベースの構築」と「機体運動シミュレータの開発」の2点を実施した。

データベース構築の対象として、既存の小型航空機をモデルとした簡易形状を選定し、そのCADデータを元に計算用の格子を作成した(Fig. 4.2.4-22)。総格子点数は約2,000万点である。ここで作成したモデル形状及び計算格子は実形状における微細な流れ構造を解像するには粗いものであるが、本テーマは「非線形飛行力学フレームワーク構築」を目的としており、その中で利用するデータベースということで飛行姿勢を変化させる中で非線形性が現れる程度で十分と考え、本計算格子を採用した。



(a) CAD model

(b) Computational grid

Fig. 4.2.4-22 CAD model and computational grid of airplane model.

機体の飛行状態をレイノルズ数(機速)、迎角、滑り角の3つのパラメータで規定し、それぞれを変更しながら全330状態を選定した。レイノルズ数は31,500から189,000までの全6水準、迎角は20度から30度までの約20水準を選定し、滑り角は機体の左右対称性を考慮して片側のみ0度から5度で3水準を選定した。各条件について計算を実施、各条件について空力時系列データを取得した(Fig.4.2.4-23)。

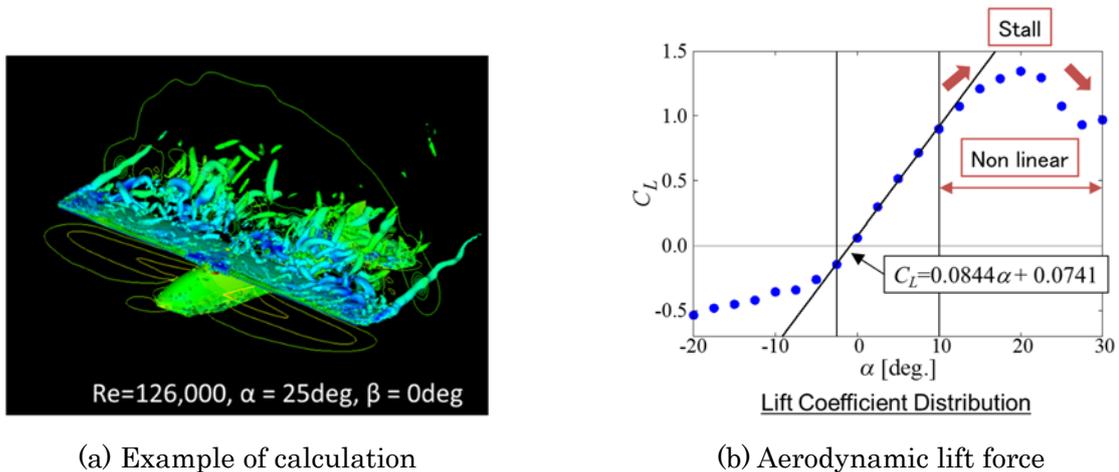


Fig. 4.2.4-23 Example of calculation for nonlinear aerodynamic database.

機体運動シミュレータの開発では、力学的な釣り合い点周りでグローバルに線形化した従来の安定微係数による運動方程式は、非線形空力による運動挙動の記述には不向きであるため、剛体の運動方程式について陰解法化を施し、特に回転運動の記述では局所線形化及びを採用した。また上記で構築したデータベースの空力値を直接入力として扱えるような機体運動シミュレータを構築した。現時点では構築したデータベースとのカップリングは未実施であるが、対象とした機体モデルについて DATCOM を適用し得られた安定微係数から擬似的な空力データベースを構築、開発した機体運動シミュレータに適用した結果、良好に機体挙動を模擬することを確認した (Fig.4.2.4-24)。

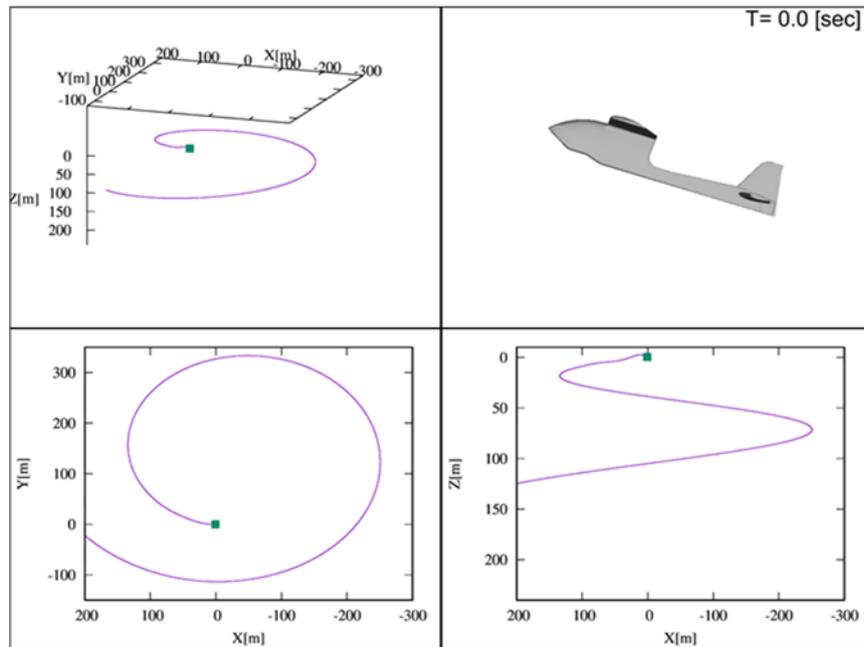


Fig. 4.2.4-24 Example of flight behavior calculated with developed flight simulator.

(3) 参考文献

- [1] Y. Kuya, K. Totani, and S. Kawai, Kinetic energy and entropy preserving schemes for compressible flows by split convective forms, *Journal of Computational Physics*, Vol. 375, pp. 823-853, (2018).
- [2] 玉置義治、久谷雄一、河合宗司、直交格子・圧縮性流体ソルバーにおける wall-modeled LES の有限体積法的計算スキームに対する考察、第 32 回数値流体シンポジウム、C08-4, (2018)。
- [3] E. Lenormand., P. Sagaut, L. T. Phuoc, and P. Comte, Subgrid-scale models for large-eddy simulations of compressible wall bounded flows, *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 8, pp. 1340-1350, (2000).
- [4] S. K. Lele, Compact finite difference schemes with spectral-like resolution, *Journal of Computational Physics*, Vol. 103 No. 1, pp. 16-42, (1992).
- [5] S. Kawai, and J. Larsson, Wall-modeling in large eddy simulation: Length scales, grid resolution, and accuracy, *Physics of Fluids*, Vol. 24, Issue 1, pp. 015105-1 – 015105-10, (2012).
- [6] Y. Fukushima and S. Kawai, Wall-modeled large-eddy simulation of transonic airfoil buffet at high reynolds number, *AIAA Journal*, Vol. 56, No. 6, pp. 2372-2388, (2018).
- [7] S. Kawai, and J. Larsson, Dynamic non-equilibrium wall-modeling for large eddy simulation at high Reynolds numbers, *Physics of Fluids*, Vol. 25, Issue 1, pp. 015105-1 – 015105-22, (2013).
- [8] L. Jacquin, P. Molton, S. Deck, B. Maury, and D. Soulevant, Experimental study of shock oscillation over a transonic supercritical profile, *AIAA Journal*, Vol.47, No. 9, pp. 1985-1994, (2009).
- [9] S. Kawai, S. K. Shankar, and S. K. Lele, Assessment of localized artificial diffusivity scheme for large-eddy simulation of compressible turbulent flows, *Journal of Computational Physics*,

Vol.229, Issue 5, pp. 1739-1762, (2010).

- [10] D. L. Loving, Wind-tunnel-flight correlation of shock-induced separated flow, NASA Technical note D-3580, (1966).
- [11] C. Gleyzes and P. Capbern, Experimental study of two AIRBUS/ONERA airfoils in near stall conditions, Aerospace Science and Technology, Vol. 7, No. 6, pp. 439-449, (2003).
- [12] K. Asada and S. Kawai, Large-eddy simulation of airfoil flow near stall condition at Reynolds number 2.1×10^6 , Physics of Fluids, Vol. 30, Issue. 8, pp. 085103-1 – 085103-22, (2018).
- [13] Y. Tamaki, Y. Fukushima, Y. Kuya and S. Kawai, Large-eddy simulation of airfoil flows at near-stall conditions using equilibrium/non-equilibrium wall models, AIAA Scitech 2019 Forum, AIAA paper No. 2019-1646, (2019).

4-2-5. (サブ課題 E) 新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発

(1) 研究成果の要旨

自動車をはじめ、圧力容器、タービンなどの製造には、様々な鋼板のプレス成形や溶接が行われている。近年は、環境負荷低減や燃費向上への要請から、超高張力鋼などの新材料に対応した高度なプレス成形・溶接シミュレーションに基づく「ものづくり基盤工程の高度化」が必須となっている。本サブ課題では、「京」コンピュータで実績のある並列構造解析ソフトウェア FrontISTR を基盤とし、新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータを開発する。

ポスト「京」コンピュータを用いれば、従来は不可能であった、寸法精度評価に十分な解析メッシュを使用でき、熱伝導（接触熱伝達を含む）・焼入れ効果（熱による材料特性の変化）との連成解析手法を構築することも可能となる。溶接では、熱・相変態・塑性流動の連成解析、ハイテン溶接部の水素脆化、m スケールの製品（自動車、圧力容器など）に対する数 μm スケールの溶融条件の制御、摩擦攪拌溶接やハイブリッド溶接に代表される次世代溶接法、の評価を可能とする。

当該分野の協力企業による評価のもと、本シミュレータを、強度と成形性を両立させた新材料の開発に必須のキラーアプリに育てる。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施した。

a) アセンブリ／接触問題の大規模解析が可能な反復法の並列性能の最適化

接触を含む数億自由度規模の実問題への適用を実施した。この結果、本プロジェクトで開発した陽的自由度消去を利用した反復解法が直接法では解けない規模の問題に対しても安定的に求解可能であることを確認した。

b) アセンブリ問題に対する並列領域分割法の性能評価

実証例題で必要となる規模のメッシュ作成においてリファイナを利用することから、接触ペアの面グループ化を進め、またそれに伴うパーティショナ対応を実施した。この結果、数十億自由度規模の接触を含む実証例題のメッシュが作成・領域分割できる機能を確認した。

c) 部品モデルの溶接シミュレーションに対する精度検証

実証例題への適用に向け、実際の複雑な形状に沿った複数の溶接パスや、それらに対し実際の溶接工程に沿った入熱をあたえるための機能追加を行った。具体的には、溶接材肉盛り部に当たる

メッシュの ON/OFF 設定や溶接材メッシュへの入熱設定の汎用化である。また、実証例題として掲げる「大規模望遠鏡の架台部のアーク溶接工程」と「ジブクライミングクレーンマストのアーク溶接工程」の 2 つの溶接工程をシミュレーションするための解析データセットの作成を実施した。この結果、アーク溶接工程を模擬する熱伝導解析および熱変形解析の実施から、開発機能が定性的に問題ないことを確認した。

d) プリポストの動作検証・機能改善

複雑かつ複数の溶接線部の抽出機能や要素タイプの拡充を実施した。この結果、大規模望遠鏡の架台部のアーク溶接工程のような複雑な形状モデルも対応可能となった。

Press-forming and welding of various steel sheets are done in manufacturing processes of pressure vessel, turbine and automobile. In recent years, it is necessary to improve manufacturing process using numerical simulation of press-forming and welding corresponding to new material such as UHSS (Ultra High Strength Steel) to reduce environmental pollutant load or increase fuel efficiency. In this study, an advanced press-forming/welding simulator for new material is developed based on a parallel structural analysis program “FrontISTR” which has been used successfully on K computer.

On post-K computer, it is possible to use large-scale analysis meshes with sufficient resolution for evaluating dimensional accuracy and execute coupled analyses of structural deformation, heat conduction/contact heat transfer and hardening effect including thermal change of material properties. In welding simulations, we tackle coupled phenomena of heat-conduction/phase-transformation/plastic-flow, hydrogen embrittlement and control of welding condition (dozens of micrometer scale) for meter-scale parts of automobile, pressure vessel, etc. In addition, next-generation welding method is evaluated such as FSW (Friction Stir Welding) and hybrid welding.

Through cooperation with various companies in this field, we make our simulator a killer application software needed in development of new material which has sufficient strength and formability.

In FY2018, we proceeded verification analysis of the killer application that implemented the core element technologies that has been researched and developed, listed in the following:

a) Program code optimization improving parallel performance of iterative solution method for large-scale assembly/contact problems

Applying our method to the real problems of hundreds of millions of degrees of freedom including contact, it was confirmed that the iterative solution method using explicit freedom elimination, developed in this project, can stably reach the convergence while the direct method fails to solve.

b) Performance evaluation of parallel domain decomposition method for assembly problems

Mesh refinement is required to obtain FE mesh with the required fineness for targeting problems and the process is supposed to be performed after domain decomposition in parallel. Assuming contact problems, both the contact pairs need to be handled as surface

groups in the mesh refiner but also in the partitioning tools which was originally handled by surface group to node group. By using modified partitioning tool, the FE mesh with billions of degrees of freedom including contact problems was partitioned and created.

c) Accuracy verification for welding simulation of part model

Several enhancements have been developed to accommodate general heat input and complex welding material mesh settings. Then the input data sets were prepared for the two targeting problems, one is the arc welding process of the jib crane must and the other is of the mount part of large-scale telescope. Applying the enhanced program to these two targeting problems, qualitatively correct solutions were obtained in each step of the heat conduction analysis and the thermal deformation analysis that simulates though the arc welding process.

d) Operation verification of pre/post program

Two functions were enhanced. One is to extract complex shaped and multiple weld lines interactively through GUI. The other is the enhancement of the supported element types. Using new functionality, welding lines can be extracted in the realistic analysis models such as arc welding process of a large-scale telescope.

(2) 本研究の内容

a) アセンブリ／接触問題の大規模解析が可能な反復法の並列性能の最適化

これまで接触問題で帰着する悪条件問題に対しても安定的に解を得るべく直接法 (MUMPS) を用いることが多かったが、大規模な問題では Fill-in 成分を格納する配列のメモリ確保エラーが生じたり、数百プロセス以上で並列効率が悪化したりする傾向が頻発する。そこで、数億・数十億規模のアセンブリ／接触問題でも、既存の直接解法と同等の安定性でかつ、並列化効率の面でも有効な反復解法の開発に取り組んできた。本研究で開発した手法はすでに前年度までの報告書で述べた通り、自由度消去法を用いた多点拘束条件処理によって反復法の適用を行う方法である。

今年度は、実証例題への適用として、車輪とレールの接触モデル (Fig.4.2.5-1) を用いた動的接触解析を「京」コンピュータにて実施し、その性能評価を行った。接触摩擦が生じることから、反復法としては GMRES をマルチグリッド前処理と合わせて適用する。

本モデルの要素数は 808,396、節点数は 927,314、自由度数は 2,781,942 である。リファイン 1 回で約 2 千万自由度、リファイン 2 回で約 1 億 8 千万自由度となる。計算は「京」コンピュータにおいてリファインなし、リファイン 1 回、リファイン 2 回まで計算を実施した。その結果、1.8 億自由度まで本研究で提案する手法で安定的に解けることを確認した。その際の実行時プロファイルや経過時間を Table 4.2.5-1 に示す。MPI プロセス数は 1,024 に固定したが、リファインを一回するたびに自由度が約 8 倍になることから使用するノード数は増加させており、ノードあたりのメモリ容量も増加した。一方、ソルバーを MUMPS に変更して、リファイン 1 回、リファイン 2 回の計算を実施したところ、リファイン 1 回の時点で MUMPS は反復法の約二倍の計算時間を要した。リファイン 2 回では Fill-in 成分を格納する配列のメモリ確保エラーが生じ求解に失敗した。

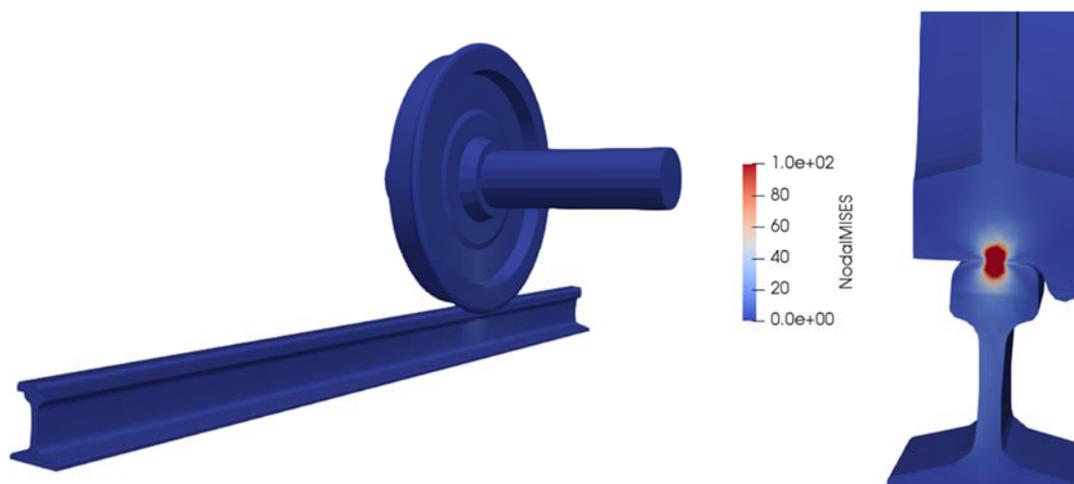


Fig.4.2.5-1 Wheel/rail dynamic contact analysis model.

Table 4.2.5-1 Execution profiles of successful solved cases by iterative method up to 1.8 billion DOFs.

| | No refinement | Refinement 1x | Refinement 2x |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| MPI process | 1,024 | | |
| Nodes (cores) | 128 (1,024) | 512 (4,096) | 1,024 (8,192) |
| Memory usage/node [MiB] | 10716.2 | 9207.1 | 12185.6 |
| Elapsed time for 100 steps [s] | 5,686 | 9,520 | 11 [hrs] |

また、コデザインワークの一環として、FrontISTRによる構造解析のホットスポット部である反復解法中のSpMVに対して、性能推定ツールを用いたノード性能評価を行った。実形状モデルの弾性静解析としてFrontISTRのtutorial/01_elastic_hingeに含まれるhingeモデル（約8万節点、4面体二次要素）の解析で得られる線形方程式を対象に評価を実施した。「京」コンピュータおよびRIKEN FX100にて単一ノードを使用した場合に得られた実測性能はそれぞれ6.96 GFLOPS、12.6 GFLOPSとなったのに対し、性能推定ツールを用いたポスト「京」1CMGあたりの予測性能として、スレッド割当サイズを工夫することで59.7 GFLOPS、さらに節点リオーダーリングの実施により68.0 GFLOPSが得られた。「京」での実測値を基準とすると約9.6倍となった。

b) アセンブリ問題に対する並列領域分割法の性能評価

FrontISTRによる接触解析では、接触する可能性のある面のペアをメッシュファイルにて定義しておく必要があるが、その際、マスター面は面グループ、スレーブ面は節点グループとして定義することとなっていた。面グループはメッシュのリファインに応じて細分化された要素面から構成されるようになるが、節点グループはメッシュのリファインを行っても新たに生成される節点を含むようにはならない。実証例題などでターゲットとしている数億自由度～数百億自由度規模の問題においては、領域分割されたメッシュを各分散ノードでリファインし、さらに細分化可能にすることが望ましい。そこで、これまでは接触面ペアの定義として「面グループ」対「節点グループ」を前

提としていた FrontISTR ならびにパーティショナの両者において、スレーブ面も「面グループ」として定義可能にする変更をおこなった。

接触解析を分散並列化する際、接触面ペアのうちマスター面はメッシュ分割ツールで分割されるが、スレーブ面側の節点情報はマスター面を含む領域にはその全てが含まれるように領域分割が行われる。今回の修正で、スレーブ面を面グループに変更した場合、スレーブ節点が属する要素も全ての関連する領域に含めなければならないが、実際に必要なのは表面のコネクティビティだけであって、深さ方向には情報を必要としていない。そこで新たに、表面のコネクティビティのみを表現する特殊な要素タイプとして、パッチ要素を定義した。スレーブ面を面グループとして入力した場合、その面グループを構成する要素面からパッチ要素を内部的に生成し、元の面グループと等価な、パッチ要素のみからなる面グループを追加する。これによって、スレーブ面のリファイン対応を可能とした。なお、リファインを実施した場合、領域内に内部要素としてマスター面が存在しない場合であっても、オーバーラップ要素（袖領域の要素）となっている要素が存在する場合、新たに内部要素となるマスター面が発生する可能性がある。そのような場合も想定し、従来の分割方法をやや拡張した形で実装を行った。

動作検証として、(a)で示した車輪・レール間動的接触解析モデルのプリ処理として本機能を利用した。機能拡張後の FrontISTR およびパーティショナを「京」コンピュータにインストールし、同解析モデルの領域分割を行い、リファイン回数を 0、1、2 と増やした場合も計算結果が一致することを確認した。

c) 部品モデルの溶接シミュレーションに対する精度検証

今年度は実証例題への適用に向け、①DUMMY 要素の導入と機能拡張、②2 つの実証例題（大規模望遠鏡の架台部のアーク溶接とジブクライミングクレーンマストのアーク溶接）の解析データセットの作成、③実証例題のデータセットを用いた①で開発した機能の動作検証、について実施した。以下では、①の内容を報告し、つづいて②、③で実施した 2 つの実証例題に対する動作検証について報告する。

<DUMMY 要素の導入と機能拡張>

熱伝導解析および変形応力解析において、溶接材の肉盛り部にあたる部分など指定した要素の計算を無効化している。データ上要素は消去せず、可視化ファイルにも出力される。無効化は、

- ・ 熱伝導解析では要素が完全に無効化
- ・ 変形応力解析では、要素への荷重境界条件および温度発熱は無効化。要素重心と各節点を結び、一般に微小な無効化係数をバネ剛性とする要素に置き換えることで無効化する。応力ひずみは 0 とする。

前年度までにメッシュを計算の途中で無効化・有効化する機能や、溶接材のメッシュグループに段階的に入熱する機能は備えていたものの、その適用範囲は単純形状の場合に限られていた。実証例題においては、溶接材の形状もそれに与える入熱方法も複雑となる。入熱は溶接の方法や現場の状況によっても異なるため、サブルーチン化には実験やシミュレーションによる知見の蓄積が必須であることから、現段階では体積発熱量データをファイル入力であたえるようにした。複雑な形状

に沿ったきめ細やかな指定をおこなうため、「!DUMMY」を導入し、肉盛り部など無効化する要素グループの指定を行う。AMP オプションを指定した場合、「!AMPLITUDE」のテーブルで値が 1 以上の時間帯に要素を無効にする。また、「!DUMMY」により要素が消されている間、実際に要素を消して可視化できると直感的でわかりやすい。例えば要素変数として DUMMY (0=ダミーなし、1=無効化) を出力し、この値を用い ParaView での可視化時の threshold フィルタ機能で要素の表示・非表示を制御することができるようにした。

無効化の具体的な実装方法については、剛性行列および節点力に係数を乗じる方法では非線形の応力ひずみが発散するなどして収束解が得られない場合があった。その単純な対応策として係数を更に小さくする方法も考えられたが、Newton 法や線形方程式の反復解法が発散するケースが見られ、汎用的な対策にならなかった。更なる対応策として、ダミー要素内部で応力ひずみを 0 で上書きする処理を追加する方法、材料関数をダミー要素用の低剛性弾性材料に差し替える方法などが考えられたが、これらは要素種類ごとにコード修正が必要かつ、要素の無効/有効と要素関数計算の独立性も失われるため、実装の観点からは好ましくない。これらの検討の末、実装の簡便性・安定性から、汎用的かつ単純なダミー要素を新規作成することとした。具体的には、無効化係数をバネ剛性にもち、各節点には要素重心との変位差に比例するばね力を与える要素である。この要素は任意の節点数の要素と置き換え可能であり、並進運動する限り一切の力を生じさせない。剛体回転運動時や圧縮/引っ張り/曲げ変形時にはバネ力が生じるが、変位に対して線形の荷重しか生じないので、無効化係数を十分小さくとればその影響は無視できる。具体的には、要素節点数 N 、節点変位 $u_{i\alpha}$ (i : 自由度、 α : 節点番号)、要素重心の節点変位 $u_i^{(m)} = (1/N) \cdot \sum^\alpha u_{i\alpha}$ 、無効化係数 ε 、代表要素長さ L とした場合、下記のように与える。

- ・要素ポテンシャルエネルギー: $P = (\varepsilon/2L) \cdot \sum^{i,\alpha} (u_{i\alpha} - u_i^{(m)})^2$

- ・節点力: $f_{i\alpha} = \partial P / \partial u_{i\alpha} = (\varepsilon/L)(u_{i\alpha} - u_i^{(m)})$

- ・要素剛性: $K_{i\alpha j\beta} = \partial^2 P / \partial u_{i\alpha} \partial u_{j\beta} = (\varepsilon/L)\delta_{ij}(\delta_{\alpha\beta} - 1/N)$

- ・代表要素長さ $L = (1/DOF) \cdot \sum^i d_i$ (ここで d_i は要素 bounding box の自由度 i 方向の幅

動作確認のため、Fig. 4.2.5-2 で示す簡易解析モデル (節点数: 1,218、要素数: 840) を用いて溶接を模擬した簡易シミュレーションを実施した。

解析ステップは、熱伝導解析と熱応力解析に分かれ、それぞれ以下のような条件を与えた。

① 熱伝導解析

- ・底面の 3 コーナー節点に 25°C 温度固定

- ・前半: 時刻 $0 \leq t < 20$

溶接線 2 を !DUMMY で無効化 (!AMP で時間指定)

溶接線 1 に !DFLUX、AMP で移動熱源を模擬した入熱を指定 (時刻依存のデータを解析制御ファイルに定義)

- ・後半: 時刻 $t \geq 20$

溶接線 2 を有効化 (!AMP の値を 0 未満に)

溶接線 2 に !DFLUX、AMP で移動熱源を模擬した入熱を指定 (時刻依存のデータを解析制御ファイルに定義)

② 熱応力解析

- ・底面の3コーナー節点を変位固定

- ・前半：時刻 $0 \leq t < 20$

溶接線2を!DUMMYで無効化(!AMPで時間指定)

熱伝導解析の結果温度による温度荷重(!TEMPERATURE、READRESULT)

- ・後半：時刻 $t \geq 20$

溶接線2を有効化(!AMPの値を0未満に)

熱伝導解析の結果温度による温度荷重(!TEMPERATURE、READRESULT)

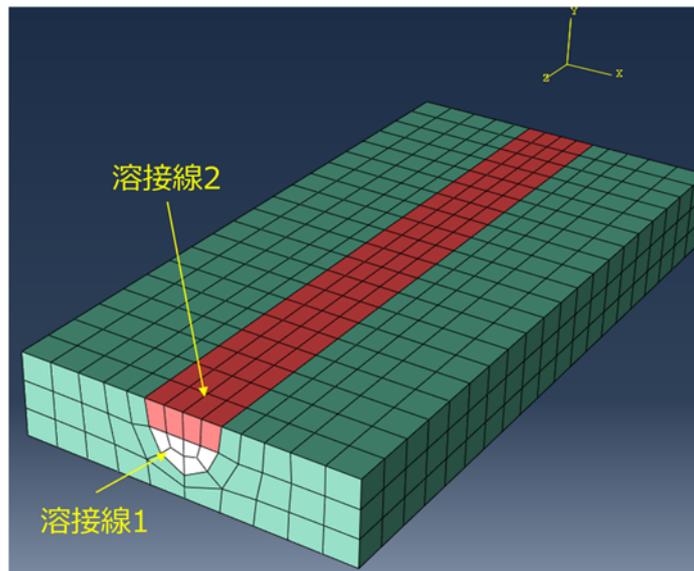


Fig. 4.2.5-2 Test model for dummy elements.

前半の溶接線1への移動熱源による入熱結果を Fig. 4.2.5-3 に示す。溶接線2のみに所属する節点については温度が変化しておらず（同図左上）、溶接線2の要素が無効化されていることが確認できる。ParaViewで要素変数 DUMMY に対して threshold フィルタをかけ、溶接線1のみ表示させると移動熱源付近で温度上昇している様子が確認できる（同図右上）。後半、溶接線2への入熱結果は Fig. 4.2.5-4 に示す。溶接線2が有効化され、入熱によって移動熱源付近で温度上昇している様子が確認できる。

次に、熱伝導解析の結果温度をもとにした応力解析結果を Fig. 4.2.5-5 に示す。前半の溶接線2のみに所属する節点については応力が発生しておらず（同図左）、溶接線2の要素が無効化されていることが確認できる。ParaViewで要素変数 DUMMY に対して threshold フィルタをかけ、溶接線1のみ表示させると移動熱源付近で高い mises 応力が発生している様子を确认できる（同図右）。後半、溶接線2による応力解析結果は Fig. 4.2.5-6 に示す。溶接線2が有効化され、移動熱源付近で高い応力が発生している様子が確認できる。

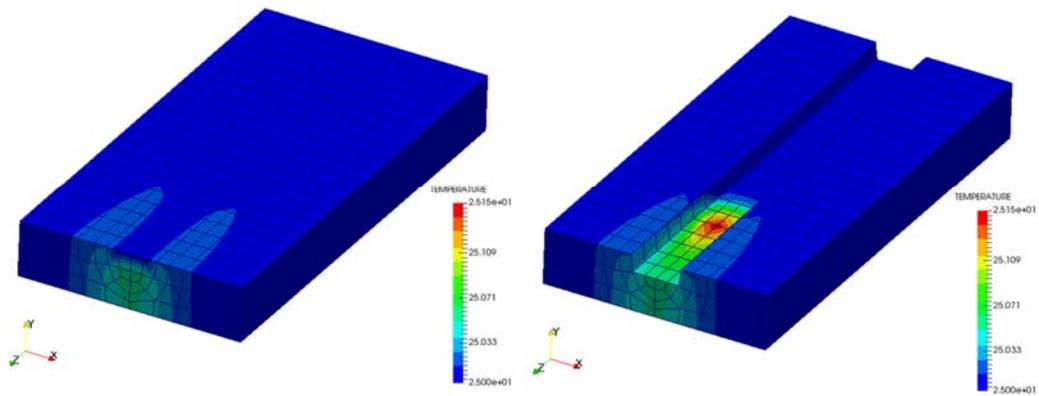


Fig. 4.2.5-3 Temperature distribution resulted from bead line 1, left: shown w/ Dummy elements, right: shown w/o Dummy elements.

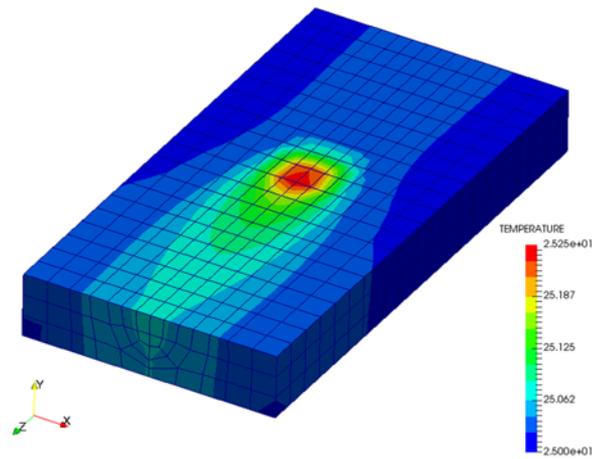


Fig. 4.2.5-4 Temperature distribution resulted from bead line 2.

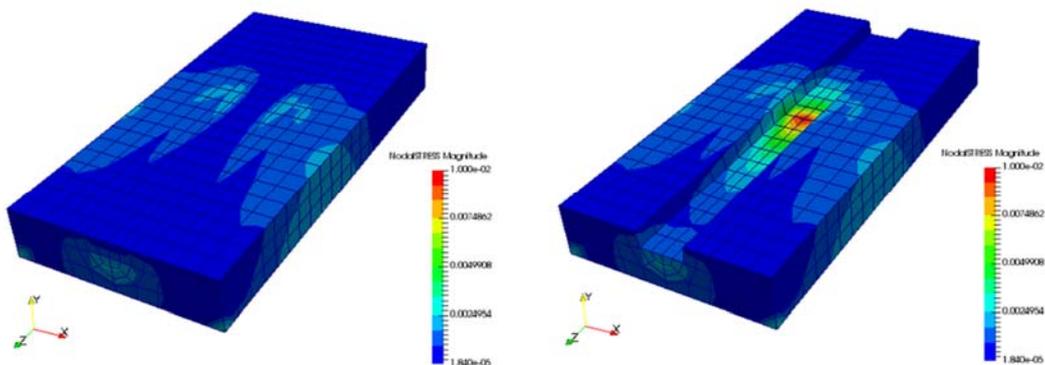


Fig. 4.2.5-5 Stress distribution (von Mises stress) resulted from bead line 1, left: shown w/ Dummy elements, right: shown w/o Dummy elements.

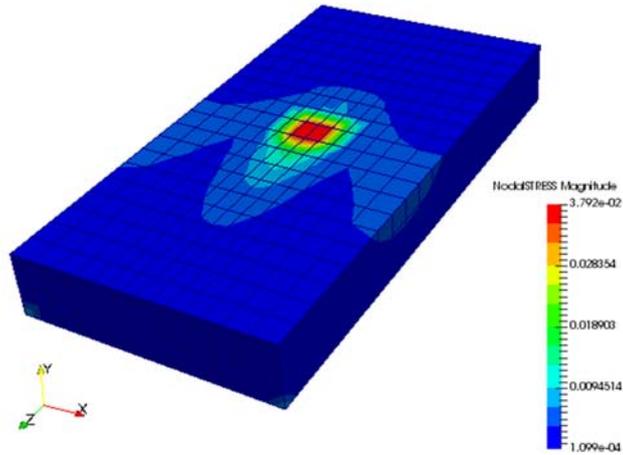


Fig. 4.2.5-6 Stress distribution (von Mises stress) resulted from bead line 2.

<実証例題 1：大型望遠鏡架台部のアーク溶接問題>

ポスト「京」上での超大規模溶接シミュレーションに向けて、これまでに開発してきた「FrontISTR」の拡張機能を、実証例題である大規模天体望遠鏡架台部のアーク溶接問題に適用し、その動作検証を実施した。解析モデルとなる 16 管モデルの外観を Fig. 4.2.5-7 に示す。

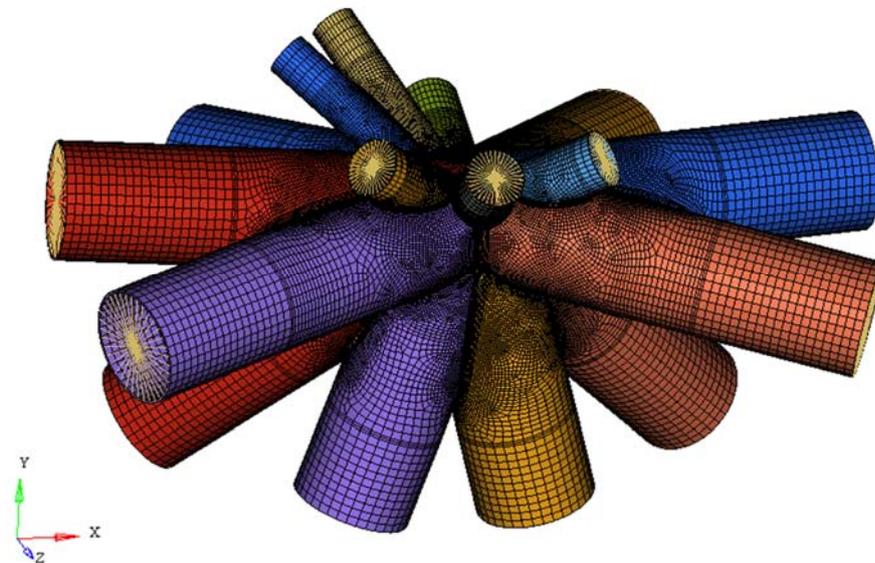


Fig. 4.2.5-7 FE mesh of mount part of large-scale telescope consisting from 16 pipes.

メッシュは六面体一次要素と五面体一次要素で構成され、要素グループは、pipe_1 から pipe_16 までのパイプ部分と、pipe_2 を溶接する 1 パス目の溶接金属 bead_2_1 から、最後の pipe_16 を溶接する 4 パス目の溶接金属 bead_16_4 の 90 パス分の溶接金属部分で構成される。溶接解析の場合、一般的な拘束条件はなく、無拘束な状態を解くため、剛体移動を防ぐために 3 次元剛体運動の 6 自由度の拘束条件を与えている。溶接部で発熱された熱は、構造物の表面から大気中に熱伝達さ

れる。この熱伝達面は、パイプが増えるごとに面が増え、さらに溶接ビードが増えるごとに面が増える。この熱伝達面を定義するための要素面のグループを、溶接金属の要素グループと同様に **FACE_(溶接するパイプ番号)_(溶接パス番号)** と表した。溶接金属部分とパイプ部分にはそれぞれ適切な材料物性を割り当てている。溶接 1 パスごとに、10000 秒ずつ増加するようし、ダミー要素に含まれる節点の温度を溶接が開始されるまでは室温に設定する。ダミー要素の無効化から有効化の時間指定や、それと同時に熱伝達面を有効化する時間指定など時間に沿った設定は **Amplitude** を用いて指定した。溶接 90 パス分の溶接解析ではパスごとに最大 10000 秒であり、室温まで冷却すれば、自動的に次の溶接パスに進む。

解析インプットデータに、エラーがないことを確認の上、パイプ 1 とパイプ 2 の溶接パスで、熱伝導解析のテスト計算を実施した。Fig. 4.2.5-8、Fig. 4.2.5-9 に 1 パス目の移動熱源による入熱結果を示す。ただし、Fig. 4.2.5-8 は全体像が把握しやすいようにパイプ 16 までのダミー要素をすべて含む形で可視化したもので、Fig. 4.2.5-9 は ParaView で要素変数 DUMMY に対して **threshold** フィルタをかけ、1 パス目のみ表示させたものである。移動熱源付近で温度上昇している様子が確認できる。

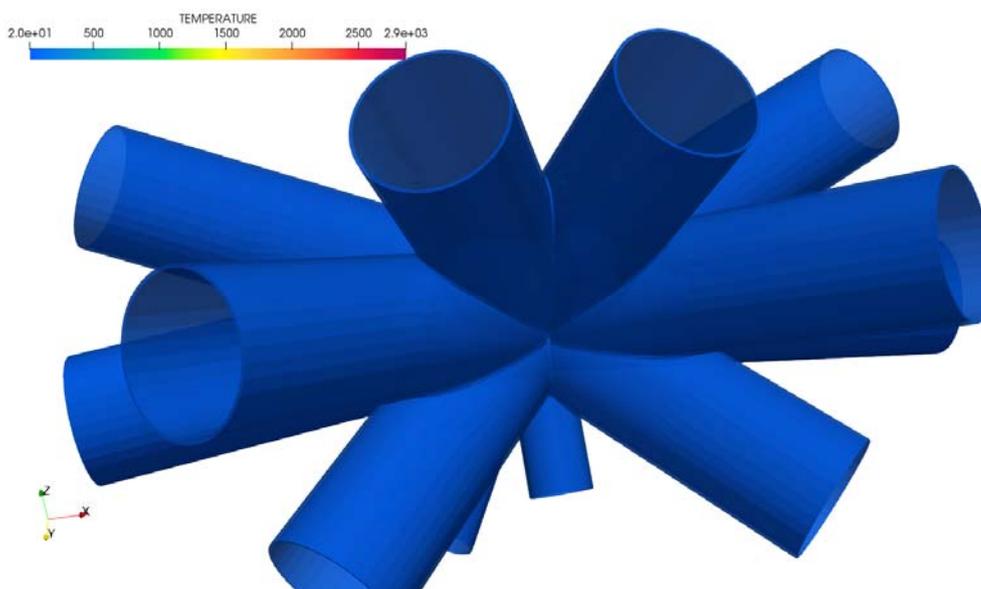


Fig. 4.2.5-8 Temperature distribution resulted from bead line 1 on pipe_1 and pipe_2 w/ dummy elements.

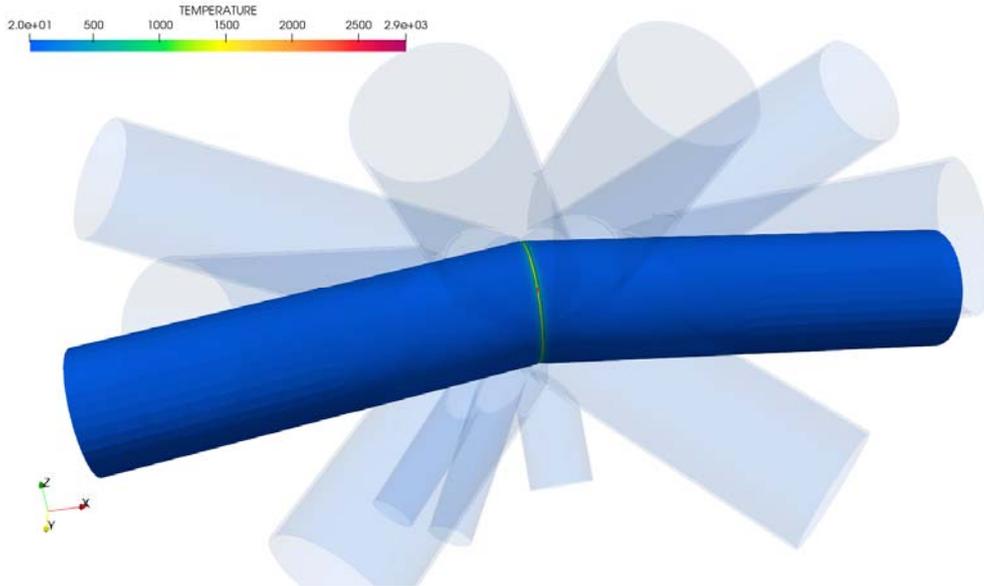


Fig. 4.2.5-9 Temperature distribution resulted from bead line 1 on pipe_1 and pipe_2 w/o dummy elements.

<実証例題 2：ジブクライミングクレーンマストのアーク溶接問題>

ジブクレーンマストのアーク溶接を模擬した解析を実施した。Fig. 4.2.5-10 にジブクレーンのマストとそれを構成する平面パネルを示す。同図中の平面パネルにて点線で囲んだ部分をより詳しく示したものが左に示す図で、この部分だけでも溶接箇所は 8 つある。数百メートル規模の一パネルにおいて溶融部では mm の解像度が必要であり数百万要素となる。マスト全体の解析モデルは平面モデルを数枚重ねるため、数千万要素・数億自由度に達する。

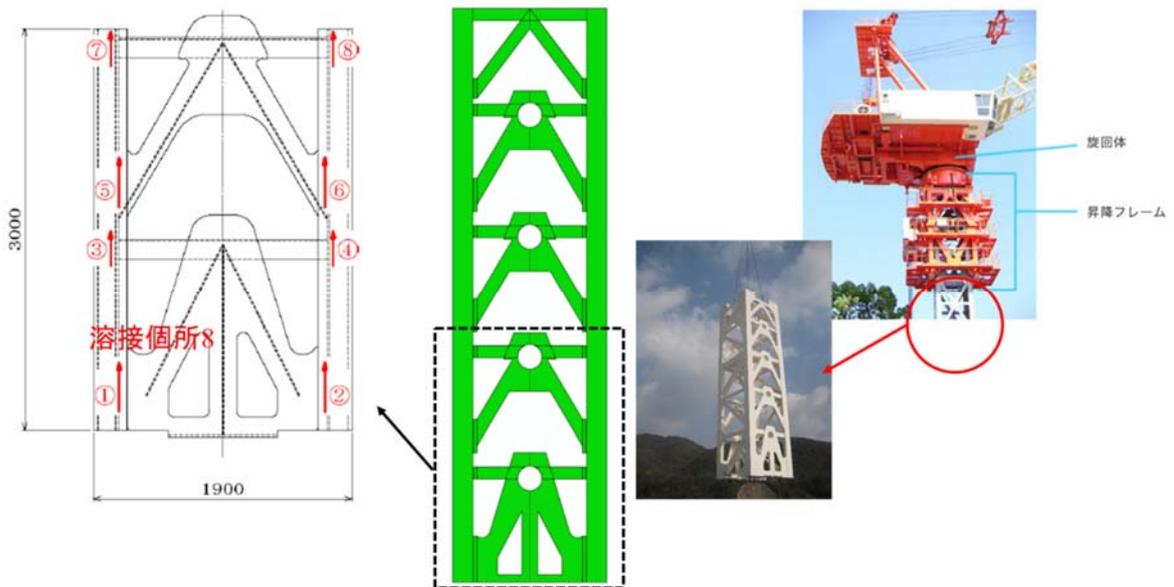


Fig. 4.2.5-10 Arc welding process focusing on the jib crane mast.

解析ステップは、以下に分けられる。

① 溶接工程における過渡的な温度分布を評価するための熱伝導解析

② 溶接工程で生じる永久ひずみの影響を考慮した変形を得るための、熱弾塑性解析

前節で導入した!DUMMY 機能を①の解析ステップに適用し、機能検証した結果を報告する。

解析にもちいたメッシュを Fig. 4.2.5-11 に全景、Fig. 4.2.5-12 に溶接個所を含むベース部分の拡大を示す。節点数は 511,467、要素数は 437,376 である。すべて 3 次元ソリッド要素でモデリングしている。機能検証が目的であるため、ここでは質量密度、比熱、熱伝導率には共通の係数を用いた。また、初期および雰囲気温度を 20℃、対流熱伝達定義として熱伝達係数を 10、溶接位置から遠い上端、下端は 20℃に温度固定する。溶接箇所は全部で 52 パスあり Fig. 4.2.5-12 に示すように、一個所に注目しただけでも複数の溶接パスで構成される。

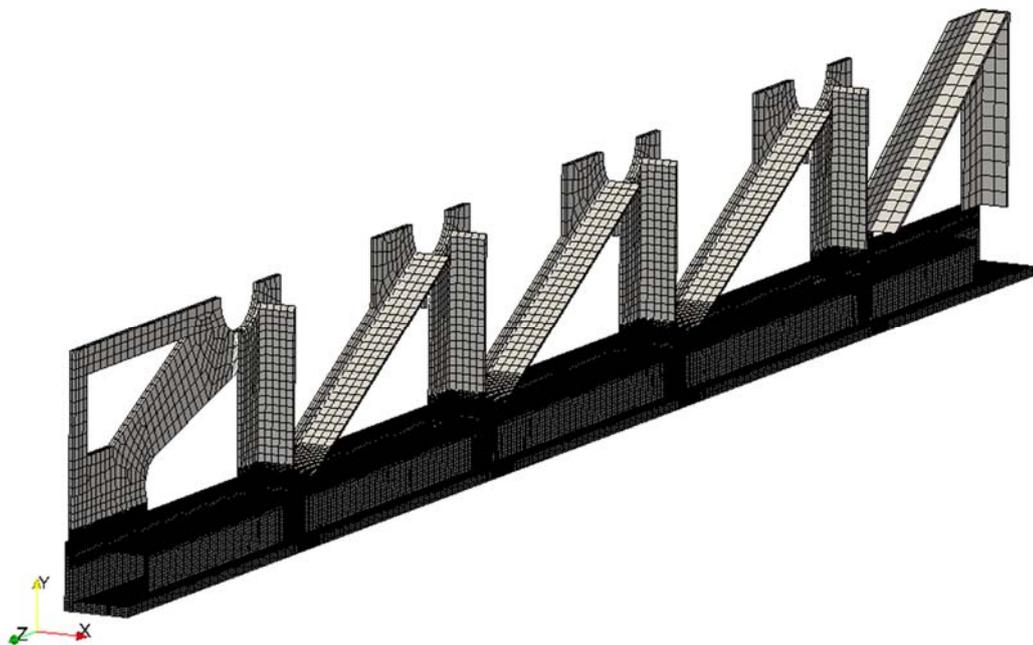


Fig. 4.2.5-11 FE mesh model of a half panel of the jib crane must.

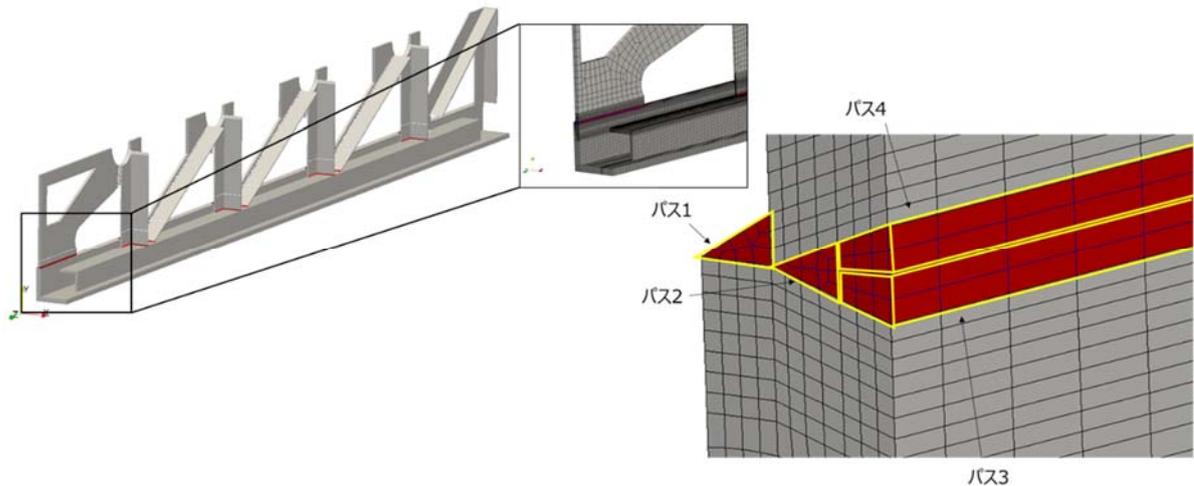


Fig. 4.2.5-12 Enlarged mesh view near the base part to be welded by the multiple welding paths.

移動熱源による入熱を模擬するため、要素グループごとに時間差で発熱する体積発熱を指定した。これは、各溶接パスにおいて、ベースとなる熱量に対して時間変化する係数(amplitude)をかけることで、移動する熱源を表現している。たとえばパス3に注目すると、Fig. 4.2.5-13に示すように熱源移動方向にそって時間差で与えられる。入熱は5秒間にわたって行われるようにし、各パスの入熱後は3600秒の放熱時間を設けた。ダミー要素の設定も、入熱の指定方法と同様に、溶接材が入熱時点で出現するよう、要素グループごとに時間差で要素無効化が解除される条件を与えた。

最初の溶接パス1~4について、時刻10816[s]および10817[s]の温度分布をFig. 4.2.5-14およびFig. 4.2.5-15に示す。今回機能追加した無効化要素判別フラグの出力と、可視化ツールのフィルタ機能を組み合わせることにより、溶接材を模擬した要素が出現しながら発熱をしている様子を確認できる。

つぎに、パス1~5に渡る最大温度の履歴をFig. 4.2.5-16に示す。想定よりも高く出ているため、入熱値の与え方については今後調整が必要と考えられる。

可視化結果においては熱源を中心に長い尾を引く形の温度分布が得られていることから、本モデルの条件設定によって溶接の移動熱源を模擬した熱伝導解析が実施できているものと判断できる。また、無効化機能も有効に働いていることが確認され、溶接材を時間経過とともに出現させるような溶接工程を模擬した解析が実証例題のメッシュに対しても実施可能であることを確認した。

多パス溶接はステップ数が膨大であるため、計算時間が非常に長い。高速化に向けて、収束閾値と反復回数の自動調整によって不要な反復を削減するなどの工夫による線形ソルバーを高速化すること、また、ファイル出力時間も無視できない量発生していることから出力と計算の非同期実行によって出力時間を隠蔽することで結果出力を高速化することなどが必要と考えられる。

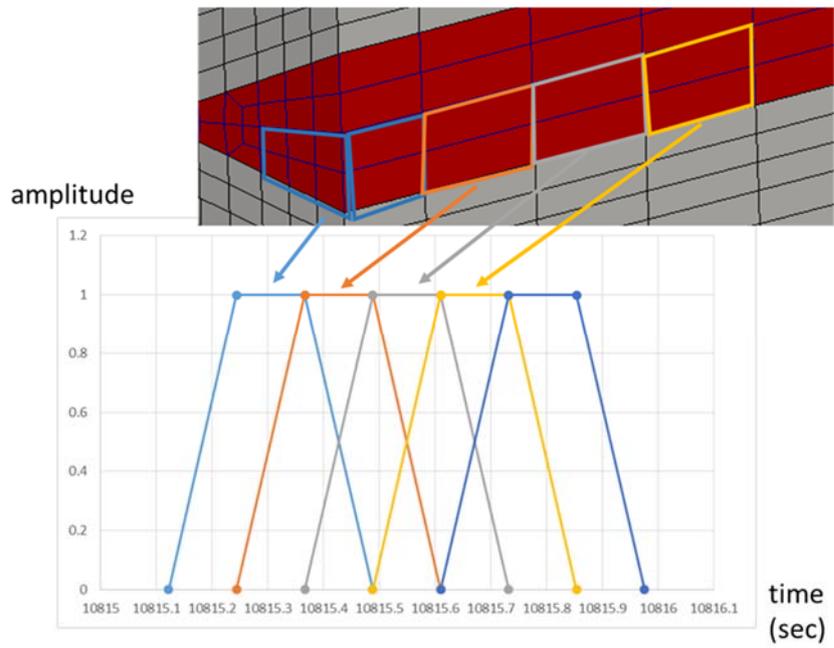


Fig. 4.2.5-13 Heat input conditions given in time series along the “path 3”.

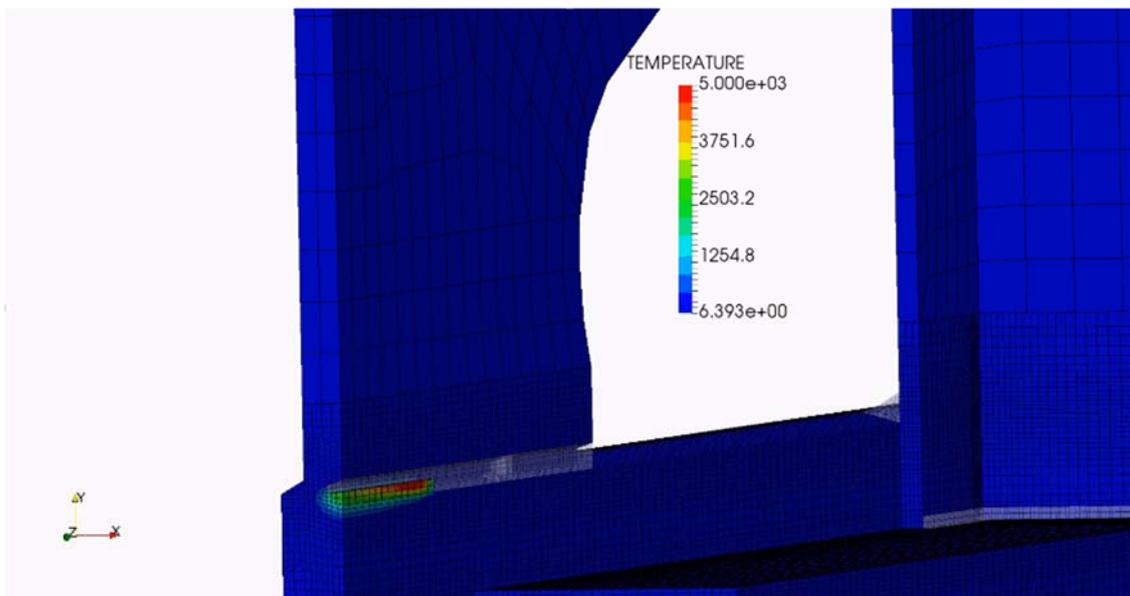


Fig. 4.2.5-14 Temperature distribution obtained at 10816s.

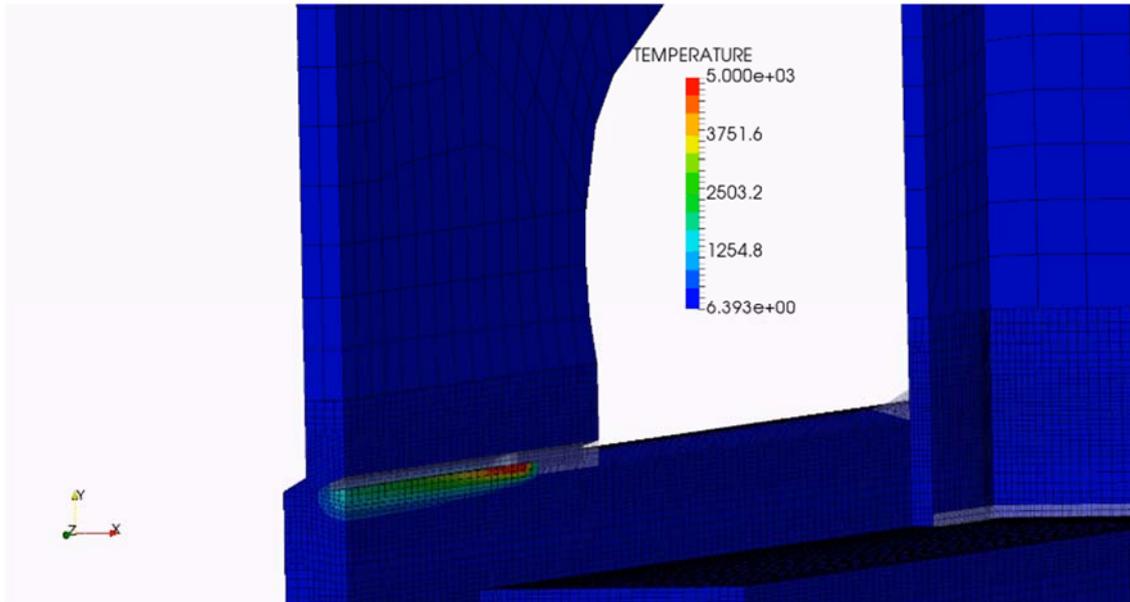


Fig. 4.2.5-15 Temperature distribution obtained at 10817s.

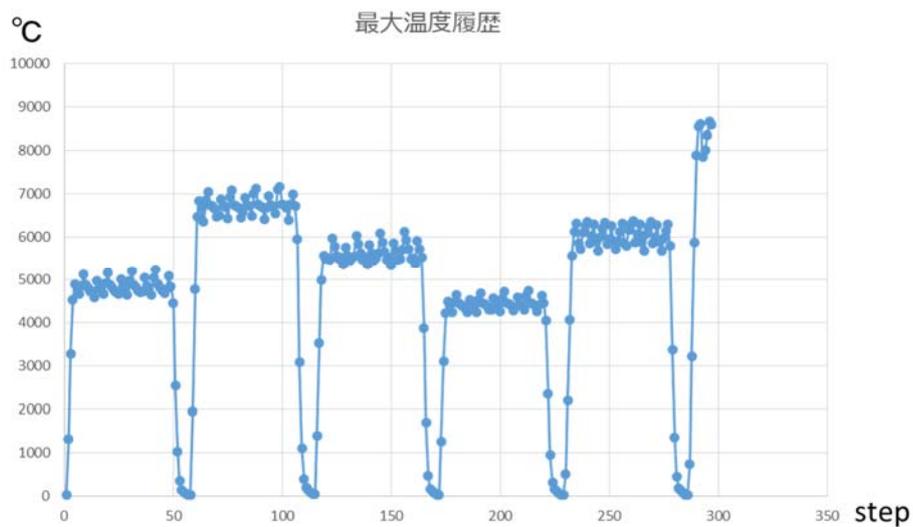


Fig. 4.2.5-16 Step history of the max temperature through the simulation for five welding paths.

d) プリポストの動作検証・機能改善

前年度までに、FrontISTR を基盤とした溶接シミュレータに対応したプリポストソフトウェアとして開発された。このプリポストソフトウェアは、ソフトウェアフレームワーク Electron で開発されている。このフレームワークは、Chromium(Web ブラウザ)、Node.js で構成されており、各 OS への対応は、フレームワークにおいて行うため、プラットフォームの OS を意識する必要がない。また、このプリポストソフトウェアは、HTML、CSS、JavaScript などの普及した Web 技術を用いて機能開発ができるため、以降のオープンソース・ソフトウェアとしての発展も期待できることから選定したものである。

本年度では、読み込むことのできる要素タイプの拡張及び溶接線部等の指定のインターフェース

を拡張した。プリポストにおいて、読み込むことのできる要素タイプとして、3 節点三角形シェル要素、6 節点三角形シェル要素、4 節点四角形シェル要素、8 節点四角形シェル要素、6 節点五面体要素、15 節点五面体要素の追加を行った。これにより、実証例題に含まれる要素タイプについて全て対応したため、読み込みができることとなった。一般に用いられる要素について対応しているため、十分な汎用性を備えたと考えられる。

さらに、溶接線部等の指定することができるように、要素のグループ、面のグループ及び節点のグループをグラフィカルインターフェースによる操作で選択できる拡張を行った(Fig. 4.2.5-17)。これは、マウス操作により矩形選択することでその範囲に含まれる要素、面、節点等を指定できる機能である。これにより、溶接線上の要素などの選択が行いやすくなったため、大規模望遠鏡の架台部のアーケ溶接工程のような複雑な形状モデルも取扱が行いやすくなったと考えられる。この機能は、溶接に限らずとも有用であり、プリポストソフトウェアの汎用性を大いに高めることができたと考えられる。

これらのソフトウェアの改良・開発と並行して、機能拡張方法のマニュアルを作成した。今後本プリポストは、オープンソース・ソフトウェアとする予定であり、ドキュメントが充実していることから、将来的には様々なプリポスト処理の場面で活用が図られると期待される。

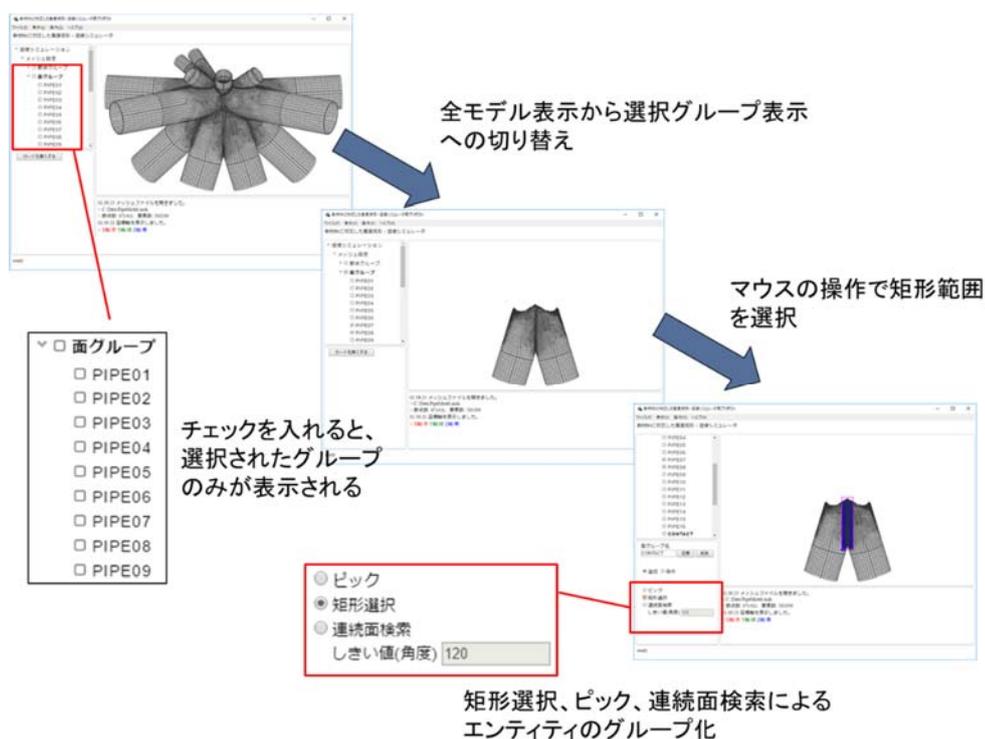


Fig. 4.2.5-17 Enhanced function supporting the users for the easily selection of specific part from irregular shaped meshes, such as the element groups on the weld lines, through the software GUI.

(3) 参考文献

- [1] 後藤和哉、橋本学、奥田洋司、陰的および陽的自由度消去法を用いた多点拘束条件処理における

- 並列反復法線形ソルバーの収束性、日本シミュレーション学会論文誌、Vol.7、No.1、pp.1-9、2015。
- [2] 生野達大、橋本学、奥田洋司、正弦波荷重下での内部摩擦発熱を考慮した一体型熱構造連成解析、土木学会論文集 A2、Vol.71、No.2（応用力学論文集 Vol.18）、pp.181-192、2015。

4-2-6. (サブ課題 F) マルチスケール熱可塑 CFRP 成形シミュレータの研究開発

(1) 研究成果の要旨

本サブ課題では、ジェットエンジンファンブレードや自動車ボディの CFRP（炭素繊維強化プラスチック）化において実用が期待されている、熱可塑プリプレグシートを積層し加熱成形する製造手法を合理化するシミュレータの開発を行う。実用化に際しての最重要課題が合理的強度評価手法の確立であるが、そのためには、成形後の繊維配置が不明であるという根本的な問題の解決が必要である。加熱成形後の繊維配置を正確に予測し合理的な強度評価に基づく高度な最適設計を実施可能とするため、プリプレグシート 1 枚ずつを正確に有限要素モデル化し、加熱成形プロセスを精密に辿る成形シミュレータを開発する。開発項目の中核を占めるのは 1) 炭素繊維と樹脂を区分したミクロスケールでの成形シミュレータと、2) ミクロスケールシミュレーションの結果を直交異方性連続体へマルチスケール展開する方法論、3) 熱と接触大変形の強連成解析シミュレータである。

平成 30 年度は、以下の項目について、研究開発されたコアとなる要素技術等を実装したキラーアプリケーションの「京」レベルの計算機による検証解析を実施した。

a) ジェットエンジンファンブレードの開発段階で試作する試験体の熱可塑成形シミュレーションを「京」クラスコンピュータで実施

a)-1 ミクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションの実施

繊維と樹脂を区分したモデルを使用したミクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションとして、1 層プリプレグシートの反り解析を実施した。この結果、「京」レベル計算機が必要な 2000 万節点規模モデルに対しても、温度分布、変形状態、ひずみ、応力分布は妥当に算出されており、ミクロスケールシミュレータは正常に機能していることが検証された。

a)-1 マクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションの実施

繊維と樹脂を均質化したモデルを使用したマクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションとして、8 層プリプレグシートの反り解析を実施した。この結果、「京」レベル計算機が必要な 400 万節点規模モデルに対しても、温度分布、変形状態、ひずみ、応力分布は妥当に算出されており、マクロスケールシミュレータは正常に機能していることが検証された。

b) 実成形品との照合によるシミュレーション結果の検証

b)-1 積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とミクロスケールシミュレーション結果との照合によるミクロスケールシミュレータの検証

積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とミクロスケールシミュレーション結果との照合によるミクロスケールシミュレータの検証として、1 層プリプレグシートの反り量の照合を実施

した。この結果、シミュレーション結果は試験結果の約 1/10 と差がみられたため、物性値の影響、繊維の不均一性等について検討が必要であることが確認された。

b)-2 積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とマクロスケールシミュレーション結果との照合によるマクロスケールシミュレータの検証

積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とマクロスケールシミュレーション結果との照合によるマクロスケールシミュレータの検証として、8層プリプレグシートの反り量の照合を実施した。この結果、シミュレーション結果は試験結果の約 1/4 であり、試験体寸法のオーダーから見て、適切な予測が可能であることが確認された。

b)-3 積層プリプレグシートのミクロスケールシミュレーション結果とマクロスケールシミュレーション結果との比較を通じた直交異方性マクロスケールモデルの検証

積層プリプレグシートのミクロスケールシミュレーション結果とマクロスケールシミュレーション結果との比較を通じた直交異方性マクロスケールモデルの検証として、1層プリプレグシートの反り量の比較を実施した。この結果、変形状態並びにそり発生の要因と推定される断面内の応力分布に関してはミクロスケールシミュレーションとマクロスケールシミュレーションの結果は一致しているものの、反り量の結果は大きく乖離した。誤差発生のメカニズムについて、さらなる検討が必要である。

This sub task aims at developing simulation software to rationalize manufacturing process of thermoplastic CFRP members. An accurate prediction of fiber direction after thermal press manufacturing process is required, and will be realized by the developed simulation software based of thin sheets lay-up modeling of finite elements. Development items are (1) micro-scale based simulator where carbon fiber/resin system is explicitly handled, (2) a multi-scale modeling methodology to constitute anisotropic continuum based model from micro-scale model and (3) strong-coupling simulation technology of thermal and large deformation problems with contacting.

We set two subjects to research in this FY2018. The results are summarized as follows;

a) Execution of forming process simulation of CFRTP of test piece for developing fan blade of jet engine by hyper parallel computer of K computer class

a)-1 Execution of press forming simulation of a prepreg sheet by micro-scale based simulator
Press forming simulation of one ply prepreg sheet was successfully executed by micro-scale based simulator using large scale model of 20 million nodes.

a)-2 Execution of press forming simulation of layered prepreg sheets by macro-scale based simulator

Press forming simulation of eight ply prepreg sheets was successfully executed by macro-scale based simulator using large scale model of 4 million nodes.

b) Verification of simulation results of mold members by comparison with the experiment results

b)-1 Verification of micro-scale based simulator by comparison between the micro-scale based simulation result and press forming experiment result of a prepreg sheet

Comparison of warp deflection between the micro-scale based simulation result and press forming experiment result of one ply prepreg sheet was executed. Simulated warp deflection was one tenth of experimental one. So that, further investigation is necessary.

b)-2 Verification of macro-scale based simulator by comparison between the macro-scale based simulation result and press forming experiment result of layered prepreg sheet

Comparison of warp deflection between the macro-scale based simulation result and press forming experiment result of eight ply prepreg sheets was executed. Simulated deflection was one fourth of experimental one. The result verifies the performance of simulation.

b)-3 Verification of the anisotropic continuum based model by the comparison between micro-scale based simulation result and macro-scale based simulation result of layered prepreg sheet

Comparison of warp deflection of one ply prepreg sheet between the micro-scale based simulation result and the macro-scale based simulation result was executed. Warp deflection of micro-scale based simulation is much smaller than that of macro-scale simulation. Further investigation to reduce the difference is necessary.

(2) 本研究の内容

a) ジェットエンジンファンブレードの開発段階で試作する試験体の熱可塑性成形シミュレーションを「京」クラスコンピュータで実施

a)-1 ミクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションの実施

ミクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションとして、1層プリプレグシートのたわみ解析を実施した。Fig. 4.2.6-1 に示す解析モデルは、b)-1 項に示す x_1 方向に炭素繊維を配した試験体に対して、 x_1 方向に一要素分だけ取り出し平面ひずみの拘束を与えたモデルであり、2000 万節点規模モデルである。熱伝導解析では、モデル上下面に熱間プレス試験で測定された温度履歴を直接付与した。応力解析では平面ひずみ条件とし、圧力負荷を模擬するため下面法線方向変位を拘束した。たわみ量は、熱伝導／応力連成解析終了後、圧力解放を模擬するためモデル下面法線方向変位拘束を解除した条件下で応力解析を実施して求めた。解析は「京」を使用し、並列数を 2048 とした。熱伝導解析／応力連成解析に要した計算時間は 13 h であった。この結果、2000 万節点規模モデルに対してもミクロスケールシミュレータは正常に動作していることが検証された。

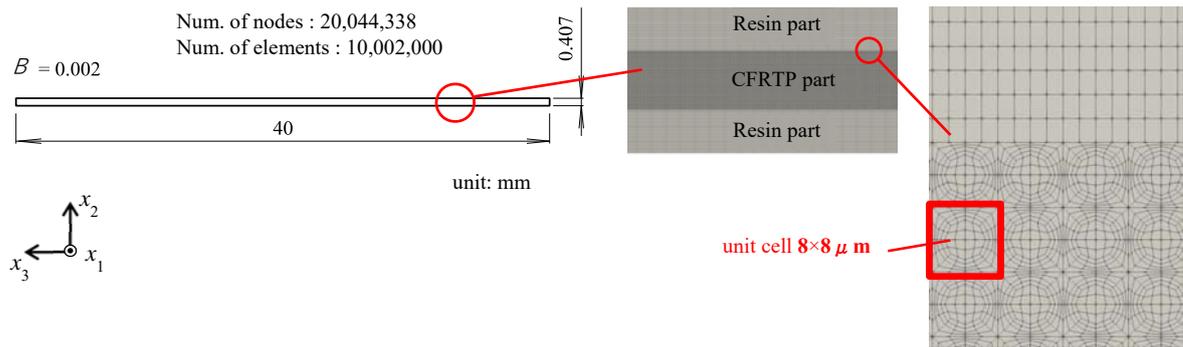


Fig. 4.2.6-1 Finite element model of one ply prepreg sheet: micro-scale simulation.

a)-2 マクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションの実施

マクロスケールシミュレータによる積層プリプレグシートの熱間プレスシミュレーションとして、8層プリプレグシートのたわみ解析を実施した。Fig. 4.2.6-2 に示す解析モデルは、b)-2 項に示す x_1 方向に炭素繊維を配した試験体に対して、 x_1-x_3 面内の対称性を考慮した 1/4 対称モデルであり、400 万節点規模モデルである。熱伝導解析では、モデル上下面に熱間プレス試験で測定された温度履歴を直接付与した。応力解析では、圧力負荷を模擬するため下面法線方向変位を拘束した。たわみ量は、熱伝導／応力連成解析終了後、圧力解放を模擬するためモデル下面法線方向変位拘束を解除した条件下で応力解析を実施して求めた。解析は「京」レベル計算機を使用し、並列数を 576 とした。計算時間は、熱伝導解析に 19h、応力解析に 43h、計 62h を要した。この結果、400 万節点規模モデルに対してもマクロスケールシミュレータは正常に動作していることが検証された。

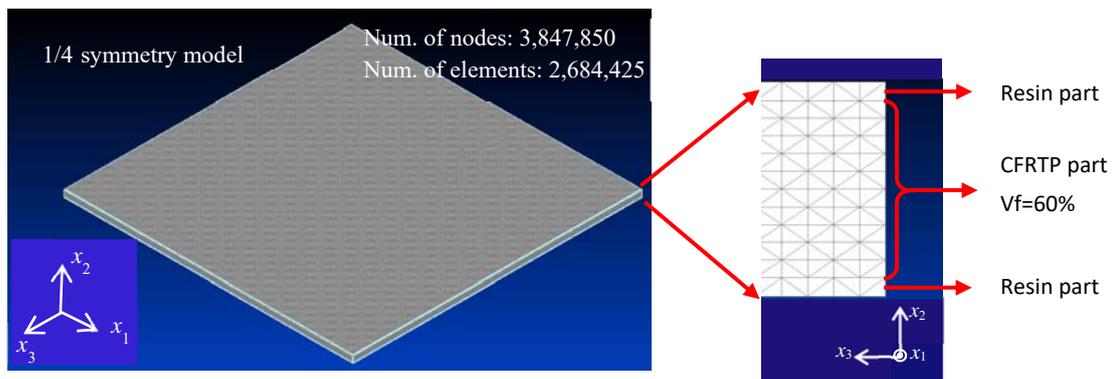


Fig. 4.2.6-2 Finite element model of eight ply prepreg sheets: macro-scale simulation.

b) 設計評価技術の研究開発

b)-1 積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とミクロスケールシミュレーション結果との照合によるミクロスケールシミュレータの検証

積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とミクロスケールシミュレーション結果との照合によるミクロスケールシミュレータの検証として、1層プリプレグシートのたわみ量の照合を実施した。Fig. 4.2.6-3 に1層プリプレグシートの熱間プレス試験の概要を示す。試験体は板厚 0.41 mm、

長さ 40 mm、幅 20 mm の寸法を有する 1 層プリプレグシートであり、炭素繊維の主軸が x_1 方向に配置された一方向材である。断面写真を見ると板厚方向中央部に CFRTP 層、その上下に樹脂層という構造である。実験は試験片全体を炉内で約 240°C まで加熱した後、冷却開始後ほどなく低温アルミ板にて試験体をプレスした。室温になるまで十分時間が経過した後にアルミ板を取り外し、試験体のたわみを測定した。a)-1 項でも記載したとおり、シミュレーションでは試験体上下面の温度履歴を熱伝導解析の境界条件として直接付与した。温度履歴を見ればわかるように、冷却時に板厚方向の温度勾配が発生しており、室温到達後に圧力を解放することで試験体にたわみが発生し、最終的なたわみ量は約 0.07 mm であった。たわみ量は基本的に Fig. 4.2.6-3 に示す測定点における x_2 方向の試験後変位と試験前の初期たわみとの差を取り、図中対角線上の相対する端点での試験前後の変位差を減じることで算出した。試験後の形状から、繊維の不均一配置、初期残留応力等により、非対称変形を生じる等の課題は残った。a)-1 項に示したミクروسケールシミュレーションの結果を Fig. 4.2.6-4 に示す。Fig. 4.2.6-4 は変位の絶対値の分布を示したものであり、たわみ量は 0.007 mm であった。この結果、ミクروسケールシミュレーション結果は試験結果の約 1/10 と差がみられたため、今回は平面ひずみ条件とした境界条件について検討が必要であることが確認された。

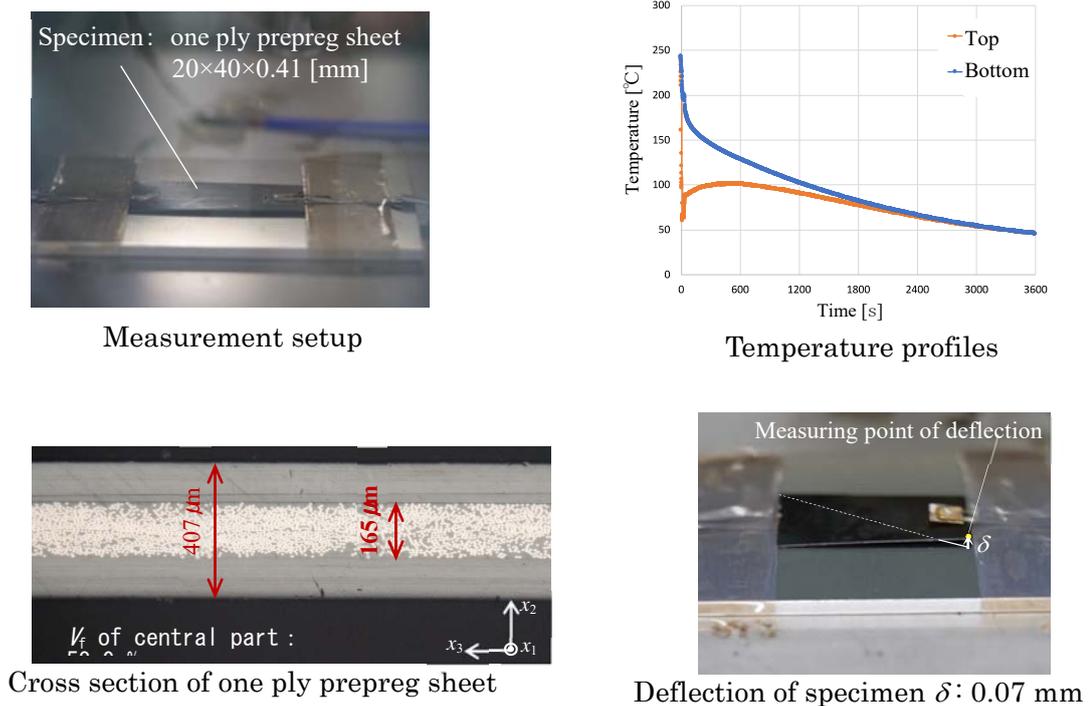


Fig. 4.2.6-3 Press forming experiment of one ply prepreg sheet.

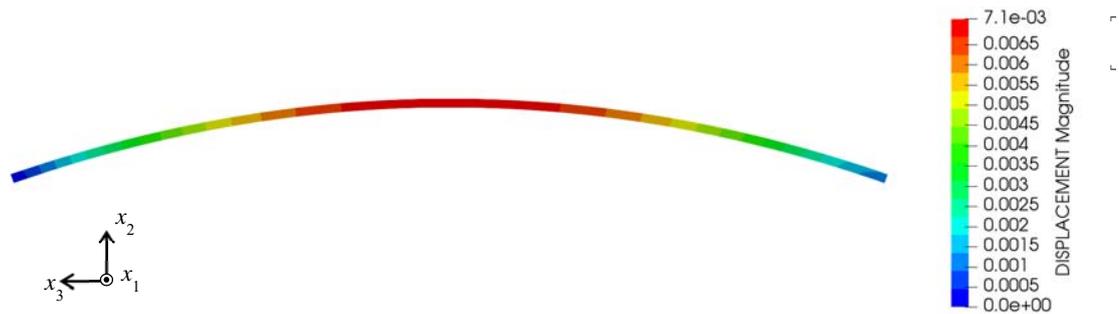
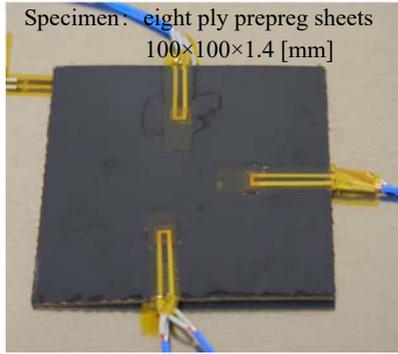


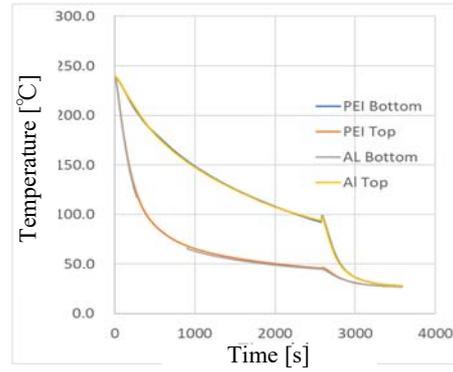
Fig. 4.2.6-4 Distribution of absolute value of displacement at 3600 s, deformation magnification 500.0.

b)-2 積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とマクロスケールシミュレーション結果との照合によるマクロスケールシミュレータの検証

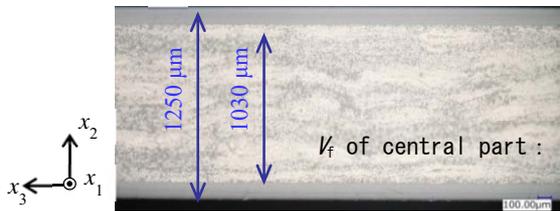
積層プリプレグシートの熱間プレス試験結果とマクロスケールシミュレーション結果との照合によるマクロスケールシミュレータの検証として、8層プリプレグシートのたわみ量の照合を実施した。Fig. 4.2.6-5 に8層プリプレグシートの熱間プレス試験の概要を示す。試験体は板厚 1.4 mm、長さ 100 mm、幅 100 mm の寸法を有する 8層積層プリプレグシートであり、炭素繊維の主軸が x_1 方向に配置された一方向材である。前項に示した 1層プリプレグシートと同様に、断面写真を見ると板厚方向中央部に CF RTP 層、その上下に樹脂層という構造である。実験は試験片全体をプレス機内でプレスしながら約 240°Cまで加熱した後、冷却時に試験体上部に設置されたアルミ板を水流冷却した。室温になるまで十分時間が経過した後にアルミ板を取り外し、試験体のたわみを測定した。a)-2 項でも記載したとおり、シミュレーションでは試験体上下面の温度履歴を熱伝導解析の境界条件として直接付与した。温度履歴を見ればわかるように、冷却時に板厚方向の温度勾配が発生しており、室温到達後に圧力を解放することで、試験体にたわみが発生し、最終的なたわみ量は約 1.77 mm であった。たわみ量は Fig. 4.2.6-5 に示す測定点において、 x_2 方向の試験後変位と試験前の初期たわみとの差から算出した。a)-2 項に示したマクロスケールシミュレーションの結果を Fig. 4.2.6-6 および Fig. 4.2.6-7 に示す。Fig. 4.2.6-6 の x_2 方向変位分布から、たわみ量は 0.58 mm であった。Fig. 4.2.6-7 は冷却終了時の応力分布を示したものである。 σ_{33} は板厚方向である x_2 方向に分布があり、 x_3 軸に沿ってたわみが発生する要因になっていると考えられる。以上の結果から、たわみ量のマクロスケールシミュレーション結果は試験結果の約 1/4 であり、適切な予測が可能であることが確認された。



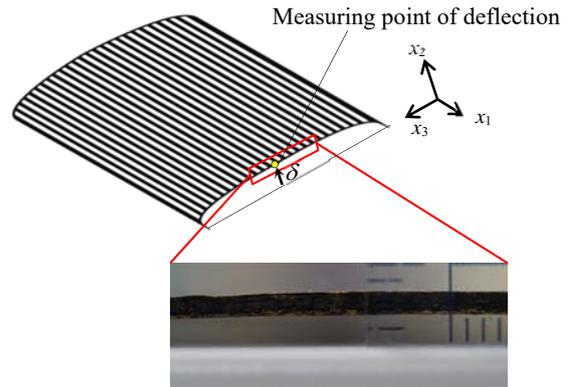
Measurement setup



Temperature profiles

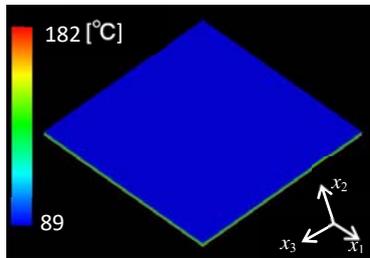


Cross section of eight ply prepreg sheets

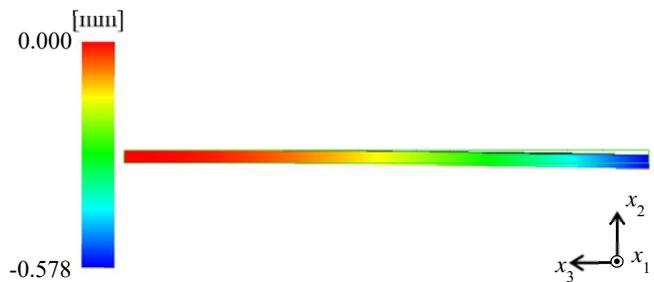


Deflection of specimen δ : 1.77 mm

Fig. 4.2.6-5 Press forming experiment of eight ply prepreg sheets.



Temperature ($t = 358$ s)



Displacement x_2 ($t = 3580$ s)

Fig. 4.2.6-6 Distributions of temperature and displacement.

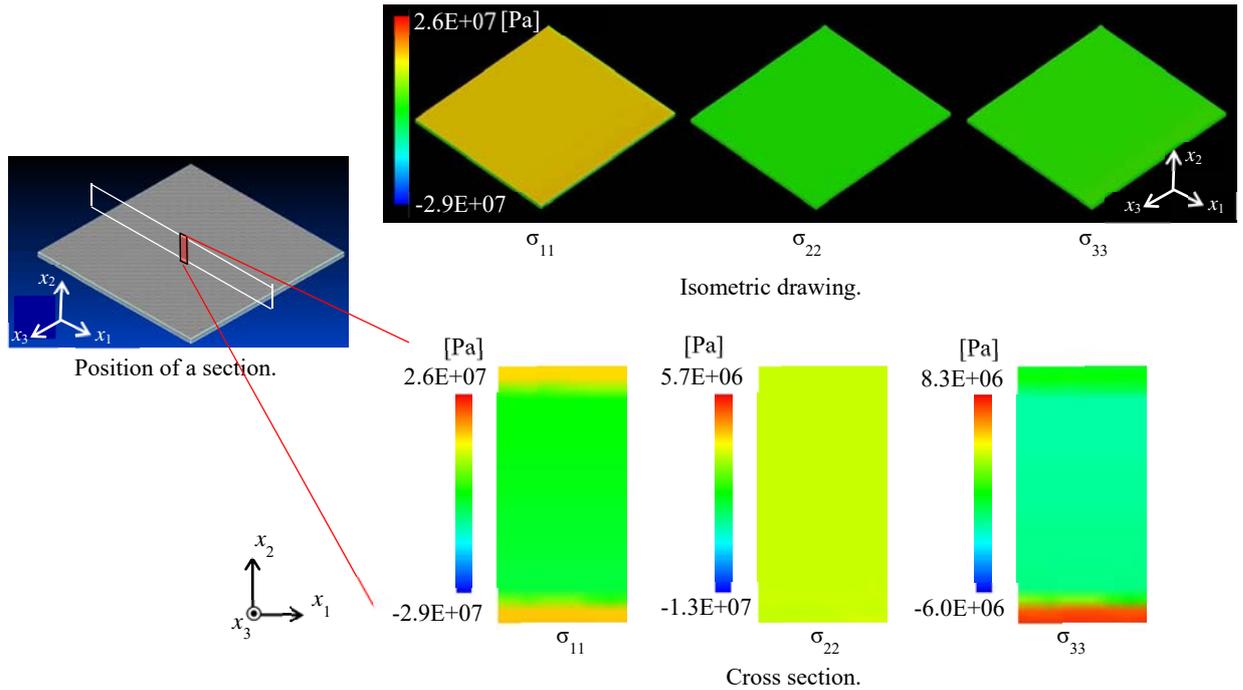


Fig. 4.2.6-7 Distribution of stress at 3580 s.

b)-3 積層プリプレグシートのミクロスケールシミュレーション結果とマクロスケールシミュレーション結果との比較を通じた直交異方性マクロスケールモデルの検証

マクロモデル材料パラメータの決定において粘弾性特性の材料モデル化が最重要課題であった。マクロモデルの直交異方性粘弾性体構成則に関しては、寺田らにより一般化 Maxwell モデルに対して導出法が提案されている[1]。本研究では寺田らの導出法を参考にして、一般化 Voigt モデルに対してマクロモデルの直交異方性粘弾性体構成則を導出した。一般化 Voigt モデルに対して、マクロモデル直交異方性粘弾性体構成則(4.2.6-1) 中の、マクロクリープコンプライアンスマトリックス $[C(t)]$ を式(4.2.6-2)により定義する。

$$\{\varepsilon(t)\} = [C(t)]\{\sigma(t)\} \quad (4.2.6-1)$$

$$\begin{aligned} [C(t)] &= [C_g] \left(1 + \frac{t}{T_g} \right) + \sum_{i=1}^n [C_i] \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_i}\right) \right) \\ &= \sum_{i=0}^n [C_i] g_i(t) \end{aligned} \quad (4.2.6-2)$$

ここで、ひずみを $\{\varepsilon\}$ 、応力を $\{\sigma\}$ 、Maxwell 要素のクリープコンプライアンスマトリックスを $[C_g]$ 、Voigt 要素 i のクリープコンプライアンスマトリックスを $[C_i]$ 、緩和時間を T_g 、遅延時間を T_i 、時刻を t とした。

マクロクリープコンプライアンスマトリックス同定の手順として、最初に、Fig. 4.2.6-8 に示す樹脂と繊維からなるユニットセルマイクロモデルに対してクリープ解析を実施し、クリープコンプライアンスマトリックスのマクロ時刻歴応答 $[\bar{C}(t)]$ を求めた (Fig. 4.2.6-9)。次に、得られたクリープコン

プライアンスマトリクス各成分のマクロ時刻歴応答 \bar{c}_{ij} に一致するように、マクロクリープコンプライアンスマトリクスの各成分 $c_{ij}(t)$ を次式に示す二乗誤差関数の停留条件等を適用し同定した。

$$m_{ij} = \frac{1}{2} \int (c_{ij}(t) - \bar{c}_{ij})^2 dt \quad (4.2.6-3)$$

続いて、積層プリプレグシートのマクロスケールシミュレーション結果とマクロスケールシミュレーション結果との比較を通じた直交異方性マクロスケールモデルの検証として、1層プリプレグシートのたわみ量の比較を実施した。ミクロスケールシミュレーションの概要は a)-1 項に示すとおりである。ここでは、マクロスケールシミュレーションの概要を示す。Fig. 4.2.6-10 に示す解析モデルは、b)-1 項に示す x_1 方向に炭素繊維を配した試験体に対して、 x_1-x_3 面内の対称性を考慮した 1/4 対称モデルであり、100 万節点規模モデルである。熱伝導解析では、モデル上下面に熱間プレス試験で測定された温度履歴を直接付与した。応力解析では、圧力負荷を模擬するため下面法線方向変位を拘束した。たわみ量は、熱伝導／応力連成解析終了後、圧力解放を模擬するためモデル下面法線方向変位拘束を解除した条件下で応力解析を実施して求めた。解析は「京」レベル計算機を使用し、並列数を 576 とした。計算時間は、熱伝導解析に 3h、応力解析に 7h、計 10h を要した。マクロスケールシミュレーションの結果を Fig. 4.2.6-11 に示す。 x_2 方向変位分布から、たわみ量は 1.3 mm であり、b)-1 項に示したミクロスケールシミュレーションのたわみ量 0.007 mm との間に大きな乖離がある。Fig. 4.2.6-12 および Fig. 4.2.6-13 はミクロスケールシミュレーションおよびマクロスケールシミュレーションについて、冷却終了時のモデル中央付近の断面応力分布を示したものである。Fig. 4.2.6-13 のマクロスケールシミュレーションについては、等角図も同時に示した。Fig. 4.2.6-12 に示すミクロスケールシミュレーションの断面分布は x_2-x_3 面内を、Fig. 4.2.6-13 に示すマクロスケールシミュレーションの断面分布は x_1-x_2 面内を示したものであるが、Fig. 4.2.6-13 の等角図を見れば明らかなように、モデル中央付近では、 x_1-x_2 面内も x_2-x_3 面と同様の分布を示すものと考えられる。Fig. 4.2.6-12 と Fig. 4.2.6-13 の断面応力分布を比較すると、ミクロスケールシミュレーションおよびマクロスケールシミュレーションともに、 x_3 軸に沿って発生するたわみの要因である σ_{33} の板厚方向 (x_2 方向) 分布は同様の傾向を示していることがわかる。以上の結果から、たわみ発生の要因と推定される断面内の応力分布に関してはミクロスケールシミュレーションとマクロスケールシミュレーションの結果は一致しているものの、たわみ量の結果は大きく乖離した。誤差発生のメカニズムについて、さらなる検討が必要である。

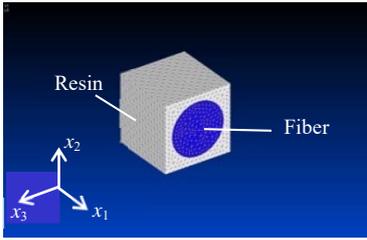


Fig. 4.2.6-8 Unit cell micro model.

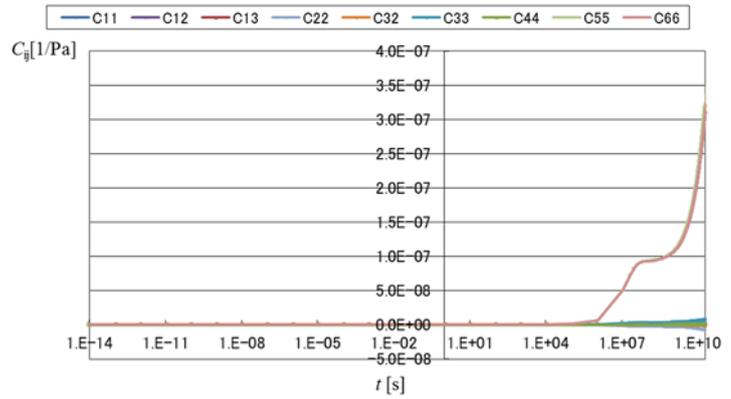


Fig. 4.2.6-9 Time history of macro creep compliance matrix.

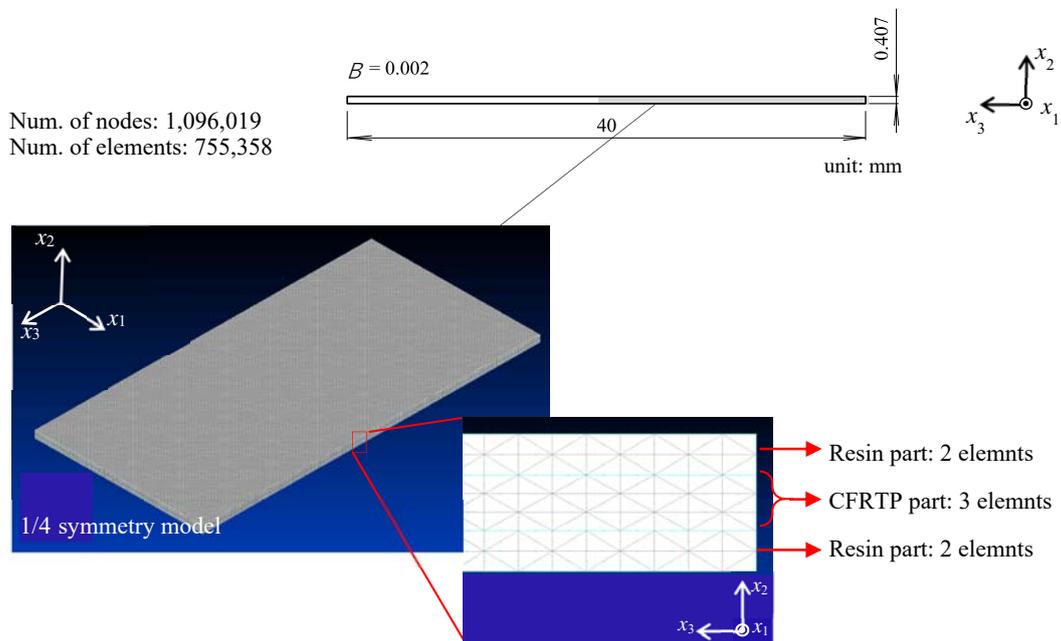


Fig. 4.2.6-10 Finite element model of one ply prepreg sheet: macro-scale simulation.

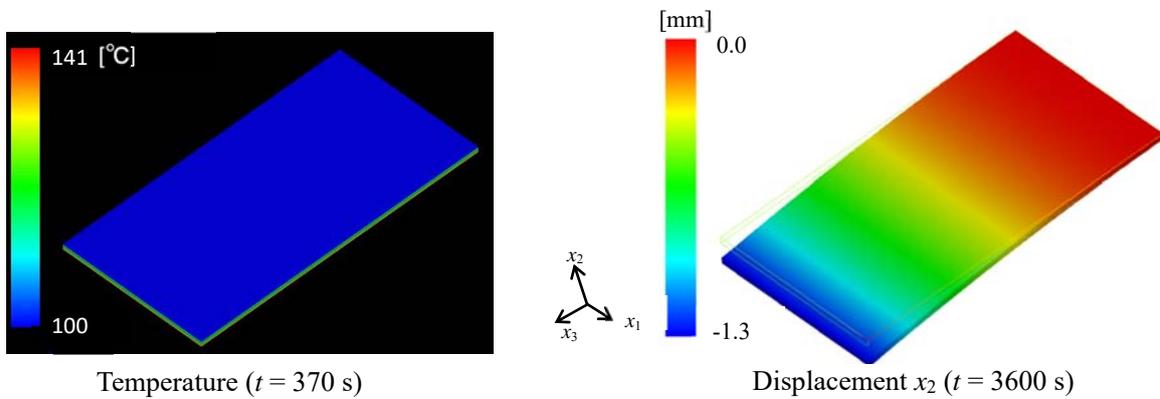


Fig. 4.2.6-11 Distributions of temperature and displacement: macro-scale simulation.

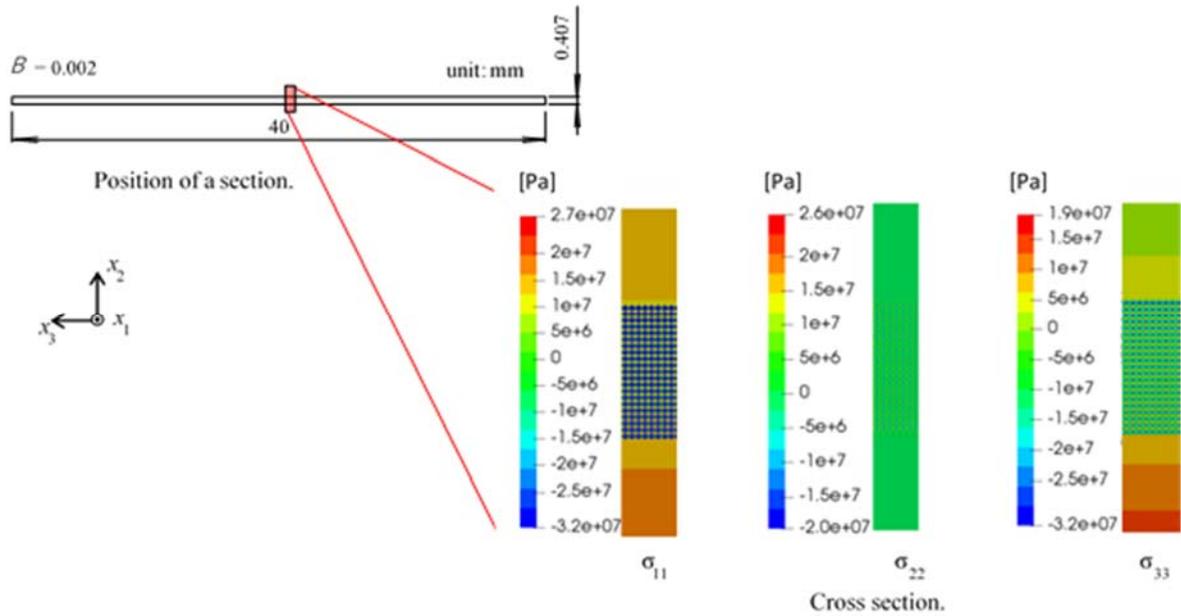


Fig. 4.2.6-12 Distribution of stress at 3600 s: micro-scale simulation.

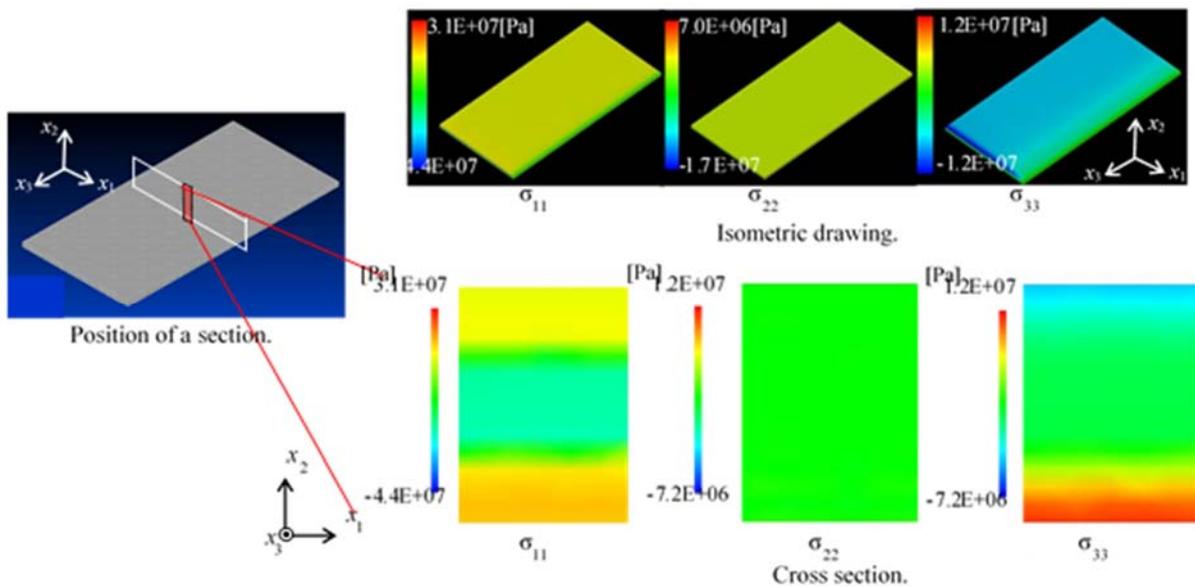


Fig. 4.2.6-13 Distribution of stress at 3600 s: macro-scale simulation.

(3) 参考文献

- [1] 寺田賢二郎、濱名康彰、平山紀夫：繊維強化プラスチックの粘弾性マルチスケール解析手法、日本機械学会論文集（A編）、75、No. 760（2009）、1674-1683。

4-2-7. プロジェクトの総合的推進

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、諮問委員会、評価委員会、全体推進会議、アプリケーション連携開発会議（重点課題⑥との連携）等を適宜開催し、参画各機関の連携・

調整にあたる。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査等を行うなど、プロジェクトの効果的・効率的推進に資する施策を実施する。また、プロジェクトで得られた成果については、可能な限り積極的に公開して今後の展開に資するとともに、ものづくり産業での早期戦力化を支援する。

平成 30 年度は、引き続き、上記の各施策を順次開催しながら、重点課題間、サブ課題間の有効な連携研究活動のための支援を実施し、研究開発全体を円滑に実施するための調整を行った。なお、成果の外部への発表は、次節に記載する。

4-2-8. 成果の外部への発表

平成 30 年度は、各サブ課題の学術活動のほか、計算工学ナビの作成や 4-3 に示すアウトリーチ活動を実施した。以下に代表的な活動を示す

(1) 2018 年度 キャンパス公開

日時：平成 29 年 6 月 2 日～平成 29 年 6 月 3 日
 場所：東京大学生産技術研究所 笠岡ラウンジ
 展示物：各サブ課題紹介を含むポスター 7 スライド
 来場者：359 名

(2) 重点課題⑧・重点課題⑥ 第 2 回 HPC ものづくり統合ワークショップ

日時：平成 30 年 9 月 26 日
 場所：東京大学生産技術研究所セミナー室
 配布物：重点課題⑧パンフレット、計算工学ナビ
 来場者：53 名

(3) 第 4 回ポスト「京」重点課題⑧「近未来型ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発」シンポジウム

日時：平成 31 年 3 月 13 日
 場所：東京大学生産技術研究所コンベンションホール
 展示物：重点課題紹介ポスター 9 スライド
 配布物：重点課題⑧パンフレット、計算工学ナビ
 来場者：269 名

4-3. 活動内容

(1) アウトリーチ活動

| 年 月 日 | 行 事 |
|-----------|--------------------|
| H30.6.8~9 | 東京大学生産技術研究所キャンパス公開 |
| H30.9.6~7 | 国際フロンティア産業メッセ 2018 |

| | |
|--------------|-------------------------------------|
| H30.9.26 | 重点課題⑧・重点課題⑥ 第2回 HPCものづくり統合ワークショップ |
| H30.11.2 | RIST 成果報告会 |
| H30.11.12~15 | SC18 |
| H30.11.23 | R-CCS 一般公開 |
| H30.12.15 | 第13回 スパコンを知る集い in 水戸 ～「京」からポスト「京」へ～ |
| H31.3.13 | 第4回 重点課題⑧ シンポジウム |

(2) 全体推進会議兼諮問委員会

| 年月日 | 行事 |
|-----------|----------------------|
| H30.6.21 | 第10回全体推進会議兼第9回諮問委員会 |
| H30.9.5 | 第11回全体推進会議兼第10回諮問委員会 |
| H30.12.26 | 第12回全体推進会議兼第11回諮問委員会 |
| H31.2.27 | 第13回全体推進会議兼第12回諮問委員会 |

(3) 連携事務局会議(幹事会)

| 年月日 | 行事 |
|-----------|------------------|
| H30.4.5 | 第13回連携事務局会議(幹事会) |
| H30.8.6 | 第14回連携事務局会議(幹事会) |
| H30.11.28 | 第15回連携事務局会議(幹事会) |
| H31.3.22 | 第16回連携事務局会議(幹事会) |

(4) アプリケーション連携開発会議

| 年月日 | 行事 |
|-----------|--------------------------|
| H30.5.30 | 平成30年度 第1回アプリケーション連携開発会議 |
| H30.11.27 | 平成30年度 第2回アプリケーション連携開発会議 |

(5) サブ課題間連携開発会議

| 年 月 日 | 行 事 |
|---|---------------------------|
| H30.5.22 H30.5.29 H30.7.3 H30.11.13 H30.12.5 H31.3.4 H31.3.26 | 車両空力設計最適化会議(サブ課題 A&B) |
| H31.2.15 H31.3.7 H31.3.28 | ファン性能・騒音最適設計検討会(サブ課題 A&C) |
| H30.6.14 H30.8.23 H30.12.21 H31.2.5 | 材料・構造ソルバー開発会議(サブ課題 E&F) |

(6) コデサイン

| 年 月 日 | 行 事 |
|--|-------------|
| H30.4.26 H30.6.26 H30.9.3 H30.10.10 H30.11.8 H30.12.6 H31.1.10 H31.2.14 H31.3.19 | 重点課題⑧ サブ WG |

(7) サブ課題推進会議

| サブ課題名 | 年 月 日 | 行 事 |
|---|--------------|------------------|
| (1) (サブ課題 A) 上流設計プラットフォームの開発整備と産業利用実証によるものづくり革新 | H30.4.13 | 時間並列計算法に関する打ち合わせ |
| | H30.6.4 | |
| | H30.6.11,12 | |
| | H30.6.21 | |
| | H30.7.10 | |
| | H30.9.14 | |
| | H30.11.28 | |
| | H31.2.20 | |
| | H30.6.12 | 最適化に関する打ち合わせ |
| | H30.8.27 | 最適化に関する打ち合わせ |
| H30.12.20 | 最適化に関する打ち合わせ | |
| H31.2.19 | 最適化に関する打ち合わせ | |
| H30.4.11 | H30.4.27 | 上流設計 PF 開発検討会議 |
| | H30.5.8 | |
| | H30.7.13 | |
| | H30.8.1 | |
| | H30.8.8 | |
| | H30.8.20 | |
| | H30.9.19 | |
| | H30.10.4 | |
| | H30.10.16 | |
| | H30.11.16 | |
| | H30.11.27 | |
| H31.1.29 | | |
| H31.2.19 | | |
| (2) (サブ課題 B) リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発 | H30.4.19 | 開発検討会議 |
| | H30.4.26 | 開発検討会議 |
| | H30.5.9 | 開発検討会議 |
| | H30.5.17 | 開発検討会議 |
| | H30.5.25 | 開発検討会議 |
| | H30.6.5 | 開発検討会議 |
| | H30.6.19 | 開発検討会議 |
| | H30.6.29 | 開発検討会議 |
| | H30.7.5 | 開発検討会議 |
| | H30.7.17 | 開発検討会議 |

| | | |
|---|--|--|
| | H30.8.1 H30.8.7 H30.8.24 H30.8.30 H30.9.4 H30.10.12 H30.11.5 H30.11.22 H30.12.5 H30.12.28 H31.1.25 H31.2.1 H31.2.14 H31.2.22 H31.3.5 H31.3.14 H31.3.25 | 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 開発検討会議 |
| | H30.4.20 H30.5.15 H30.6.19 H30.8.7 H30.9.12 H30.10.23 H30.10.26 H31.1.15 H31.3.15 | 構造 WG 開発会議 構造 WG 開発会議 構造 WG 開発会議 構造 WG 開発会議 構造 WG 開発会議 構造 WG 開発会議 構造 WG 開発会議 (スズキ株式会社にて) 構造 WG 開発会議 構造 WG 開発会議 |
| (3) (サブ課題 C) 準直接計算 技術を活用したターボ機 械設計システムの研究開 発 | H30.4.26 H30.6.22 H30.9.13 H30.11.22 H31.1.23 H31.3.14 | サブ課題 8-C 開発検討会議 |
| | H30.4.10 H30.8.6 H30.11.7 H30.2.13 | 第 7 回ターボ機械 HPC 実用化分科会 第 8 回ターボ機械 HPC 実用化分科会 第 9 回ターボ機械 HPC 実用化分科会 第 10 回ターボ機械 HPC 実用化分科会 |

| | | |
|--|---|--|
| (4) (サブ課題 D) 航空機の設計・運用革新を実現するコア技術の研究開発 | H30.6.19 H30.7.9,30 H30.8.20 H30.9.7 H30.10.9 H30.11.20 H30.12.18 H31.1.23 H31.2.21 H31.3.27 | コアソルバー開発会議 |
| | H30.5.28 H30.9.5 | サブ課題 D 開発検討会議 |
| (5) (サブ課題 E) 新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発 | H30.9.29 H30.9.30 H30.10.1 | 平成 30 年度第 1 回 FrontISTR 開発会議 平成 30 年度第 2 回 FrontISTR 開発会議 平成 30 年度第 3 回 FrontISTR 開発会議 |
| | H30.4.26 H30.5.31 H30.8.9 H30.9.29 H30.11.2 H30.12.17 H31.1.22 H31.2.7 H31.2.19 | 平成 30 年度第 1 回サブ課題 E 進捗会議 平成 30 年度第 2 回サブ課題 E 進捗会議 平成 30 年度第 3 回サブ課題 E 進捗会議 平成 30 年度第 4 回サブ課題 E 進捗会議 平成 30 年度第 5 回サブ課題 E 進捗会議 平成 30 年度第 6 回サブ課題 E 進捗会議 平成 30 年度第 7 回サブ課題 E 進捗会議 平成 30 年度第 8 回サブ課題 E 進捗会議 平成 30 年度第 9 回サブ課題 E 進捗会議 |
| (6) (サブ課題 F) マルチスケール熱可塑 CFRP 成形シミュレータの研究開発 | H30.5.10 H30.6.20 H30.7.12 H30.9.27 H30.11.27 H31.1.10 H31.2.21 | サブ課題 F 推進会議 サブ課題 F 推進会議 サブ課題 F 推進会議 サブ課題 F 推進会議 サブ課題 F 推進会議 サブ課題 F 推進会議 サブ課題 F 推進会議 |
| (7) サブ課題 E・F 連携 | H30.4.24 H30.5.24 H30.6.26 H30.7.31 | 平成 30 年度第 1 回サブ課題 E&F 連携会議 平成 30 年度第 2 回サブ課題 E&F 連携会議 平成 30 年度第 3 回サブ課題 E&F 連携会議 平成 30 年度第 4 回サブ課題 E&F 連携会議 |

4-4. 実施体制

| 業務項目 | 担当機関 | 担当責任者 |
|--|---|--|
| (1) (サブ課題A) 設計を革新する多目的設計探査・高速計算技術の研究開発 | 宇宙航空研究開発機構 | 宇宙科学研究所 准教授 大山聖 |
| a) 多目的設計探査技術 | 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 東北大学流体科学研究所 東京理科大学工学部 | 准教授 大山聖 准教授 下山幸治 情報工学科 講師 立川智章 |
| b) 高速計算技術 | | |
| b)-1 時間領域並列化法のプロトタイプアプリへの実装と性能評価 | 九州大学情報基盤研究開発センター | 情報基盤研究開発センター長 ／教授 小野謙二 |
| b)-2 低 B/F アルゴリズムのキラアプリへの実装と性能評価 | 九州大学情報基盤研究開発センター | 情報基盤研究開発センター長 ／教授 小野謙二 |
| c) 上流設計技術 | | |
| c)-1 上流設計プラットフォームのキラアプリでの機能実証 | 理化学研究所計算科学研究センター 九州大学情報基盤研究開発センター | テクニカルスタッフ 川鍋友宏 情報基盤研究開発センター長 ／教授 小野謙二 |
| (2) (サブ課題B) リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発 | 神戸大学大学院システム情報学研究科 | 教授 坪倉誠 |
| a) 流体・構造統一連成解析手法を用いた設計システムによる車両空力の産業応用解析 | 神戸大学大学院システム情報学研究科 | 教授 坪倉誠 |
| b) ポスト京システムを対象とした基盤アプリの高速化と大規模化 | 理化学研究所計算科学研究センター | 研究員 大西慶治 |
| c) オイラー構造解析手法を用いた設計システムによる実車モデル構造の検証解析 | 山梨大学総合研究部 | 教授 岡澤重信 |

| | | |
|---|-------------------|------------------------------------|
| (3) (サブ課題C) 準直接計算技術を活用したターボ機械設計・評価システムの研究開発 | 東京大学生産技術研究所 | 革新的シミュレーション研究センター センター長/教授 加藤千幸 |
| a) エクサスケール計算機で高速動作する流れソルバーの開発 | 東京大学生産技術研究所 | 革新的シミュレーション研究センター センター長/教授 加藤千幸 |
| b) 大規模流体解析における収束性改善のための乱流解析手法の研究開発 | 東京大学生産技術研究所 | 革新的シミュレーション研究センター センター長/教授 加藤千幸 |
| c) 格子ボルツマン法(LBM)による直接計算手法の研究開発 | 九州大学大学院工学研究院 | 教授 古川雅人 |
| d) LES 解析用の壁面モデルの研究開発 | 東京大学生産技術研究所 | 革新的シミュレーション研究センター センター長/教授 加藤千幸 |
| (4) (サブ課題D) 航空機的设计・運用革新を実現するコア技術の研究開発 | 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 | 准教授 高木亮治 |
| a) 高速・高精度乱流解析技術の研究開発 | 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 | 准教授 高木亮治 |
| a)-1 直交格子ベース基盤ソルバーのレイヤー格子への対応 | 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 | 准教授 高木亮治 |
| a)-2 直交格子ソルバーにおける LES 壁面モデルの研究開発 | 東北大学大学院工学研究科 | 准教授 河合宗司 |
| b) 設計評価技術の研究開発 | 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 | 准教授 高木亮治 |
| b)-1 高速バフケット/低速失速解析における LES 壁面モデルの基礎検証 | 東北大学大学院工学研究科 | 准教授 河合宗司 |
| c) 飛行安全性向上技術の研究開発 | 東京理科大学工学部 | 機械工学科 教授 山本誠 |
| c)-1 非線形飛行力学モデルデータベースに基づく機体運動シミュレータの構築 | 東京理科大学工学部 | 機械工学科 教授 山本誠 |

| | | |
|---|-------------------|------------------------------------|
| (5) (サブ課題E) 新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科 | 教授 奥田洋司 |
| (6) (サブ課題F) マルチスケール熱可塑CFRP成形シミュレータの研究開発 | 東京大学生産技術研究所 | 革新的シミュレーション研究センター 教授 吉川暢宏 |
| (7) プロジェクトの総合的推進 | 東京大学生産技術研究所 | 革新的シミュレーション研究センター センター長・教授 加藤千幸 |

様式第21

学会等発表実績

委託業務題目「近未来ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発」

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 |
|---|---|---|---------|--------|
| Preliminary Spacecraft Design Optimization Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm(口頭発表) | Hiroaki Fukumoto, Mitsuhsa Baba, Masatsugu Otsuki, Yasuhiro Kawakatsu and Akira Oyama | 10th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization | 2019年3月 | 国外 |
| 航空機実機実飛行環境における空力特性評価技術の実現に向けて（口頭発表） | 高木亮治 | 第4回ポスト「京」重点課題⑧シンポジウム | 2019年3月 | 国内 |
| Memory First: performance tuning strategy focusing on memory access patterns（口頭発表） | Hiroyuki Takizawa, Naoki Ebata, Mulya Agung, Muhammad Alfian Amrizal, Ryusuke Egawa, Yoko Isobe, and Ryoji Takaki | Workshop on Sustained Simulation Performance | 2019年3月 | 国内 |
| High-Performance Parallel Simulation of Airflow for Complex Terrain Surface (Journal) | Kenji Ono and Takanori Uchida | Modelling and Simulation in Engineering | 2019年2月 | 国外 |
| 産業競争力に貢献する次世代スーパーコンピューティング技術の動向2（口頭発表） | 加藤千幸 | 日本学術会議総合工学委員会公開シンポジウム「AI時代のもの・コトづくりに向けた新たな計算科学活用における課題と期待」, 2019.2.14, 日本学術会議講堂 | 2019年2月 | 国内 |

| | | | | |
|--|--|---|----------|----|
| Industrial applications of fully-resolved LES in the post-K era (口頭発表) | Chisachi Kato | International Symposium on Hydro & Marine Renewable Energy, 2019.2.21, Asti Hotel Busan Korea | 2019年2月 | 国外 |
| 並列 FEM 構造解析プログラム FrontISTR および FrontISTR Commons について・FrontISTR の社会実装(口頭発表) | 奥田洋司 | FOCUS 第二回産業用クラウドスパコン利用推進協力会 | 2019年2月 | 国内 |
| APPLICATIONS OF VERY LARGE SCALE FLUID-FLOW COMPUTATIONS TO INDUSTRIAL PROBLEMS (口頭発表) | Chisachi KATO | 2019 Japan-China-Korea Hydraulic Machinery Workshop, 2019.1.10-11, 早稲田大学 | 2019年1月 | 国外 |
| Large-eddy simulation of airfoil flows at near-stall conditions using equilibrium/non-equilibrium wall models (Technical Paper Session Oral) | Yoshiharu Tamaki, Yuma Fukushima, Yuichi Kuya, Soshi Kawai | AIAA SciTech Forum and Exposition 2019 | 2019年1月 | 国外 |
| Self-sustained shock-wave oscillation mechanisms of transonic airfoil buffet (Technical Paper Session Oral) | Yuma Fukushima, Soshi Kawai | AIAA SciTech Forum and Exposition 2019 | 2019年1月 | 国外 |
| 大規模並列計算環境下において効率的な探索を実現する多目的進化計算アルゴリズムについて (口頭発表) | 福本浩章、大山聖 | 進化計算シンポジウム 2018 | 2018年12月 | 国内 |
| 移流問題に対する Parareal 法による時間並列計算の収束挙動 (口頭発表) | 飯塚幹夫, 小野謙二 | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018年12月 | 国内 |

| | | | | |
|--|---|---|-------------|----|
| 「京」の経験を踏まえた今後のHPC ソフトウェアの展望（招待講演） | 小野謙二 | 第 11 回スーパーコンピュータティング技術産業応用シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |
| スレッド性能測定機能を備えた性能モニタライブラリ Pmlib（口頭発表） | 小野謙二、三上和徳 | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 回転速度が異なるゴルフボールの空力特性に関する LES 解析（口頭発表） | 池田隼，金炯哲，大貫正秀，坪倉誠 | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 京コンピュータにおけるオープンソースを用いた In-situ 可視化（口頭発表） | 大西慶治，ヤンソン・ニクラス，坪倉誠 | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 空間音源を用いた自動車空力騒音の予測（口頭発表） | 飯田明由，宮沢真史，横山博史，加藤千幸 | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |
| Benchmark Test of a finite Element Solver for Compressible Flows（口頭発表） | Yang Guo, Chisachi Kato, Yoshinobu Yamade | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 流体音響解析を実施する上での留意点（口頭発表） | 加藤千幸 | FrontFlow/blue の設計実務ハンズオントレーニング， 2018.12.14., 高度計算科学研究支援センター | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 直交格子・圧縮性流体ソルバにおける wall-modeled LES の有限体積的計算スキームに関する考察（一般講演） | 玉置義治、久谷雄一、河合宗司 | 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 高レイノルズ数翼型後縁失速流れの wallmodeled/wall-resolved LES（一般講演） | 玉置義治、福島裕馬、久谷雄一、河合宗司 | 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |

| | | | | |
|--|------------------------------|---|-------------|----|
| スパコンで航空宇宙機をつくる!?!-ものづくりにおけるスパコンの役割- (口頭発表) | 高木亮治 | 第 13 回スパコンを知る集い in 水戸 ~「京」からポスト「京」へ~ | 2018 年 12 月 | 国内 |
| DBD プラズマアクチュエータを用いたフィードバック翼流れ剥離制御の LES・渦移流に伴う翼面圧力変動を利用した制御則の検討- (口頭発表) | 小川拓人, 浅田健吾, 関本論志, 立川智章, 藤井孝藏 | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |
| デジタル価値付加型シミュレーション (口頭発表) | 奥田洋司 | 第 8 回計算力学シンポジウム, パネル討論 「Society5.0を支える人と人工物システム・サービスの計算情報科学基盤創成」 | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 大規模 CFRP モデルの界面損傷解析におけるメッシュサイズの影響評価 (口頭発表) | 山口太一, 橋本学, 奥田洋司 | 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 1 台車モデルを用いた大規模並列有限要素法による曲線走行時の動的転がり接触挙動の再現 (口頭発表) | 坂井宏隆, 高垣昌和, 唐津卓哉, 林雅江 | 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム講演集 | 2018 年 12 月 | 国内 |
| オープンソース流体解析ソルバーを活用した固有直交分解法の配管系流れ解析への適用 (口頭発表) | 矢敷達朗, 橋本学, 奥田洋司 | オープン CAE シンポジウム 2018 | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 並列 FEM オープンプログラム FrontISTR の社会実装 (基調講演) | 奥田洋司 | オープン CAE シンポジウム 2018 | 2018 年 12 月 | 国内 |
| オープン CAE の普及と持続可能な発展のために (口頭発表) | 奥田洋司, 林雅江 | オープン CAE シンポジウム 2018、パネルディスカッション | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 摩擦攪拌接合における熱/材料流動のための大規模過渡解析手法の開発 (口頭発表) | 宮川悠咲, 橋本学, 奥田洋司 | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |
| 固有直交分解法の配管系流れ解析への適用 (口頭発表) | 矢敷達朗, 橋本学, 奥田洋司 | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018 年 12 月 | 国内 |

| | | | | |
|---|---|--|----------|----|
| Study on Improving Efficiency of Multi-Objective Evolutionary Algorithm with Large Population by M2M Decomposition and Elitist Mate Selection Scheme (口頭発表) | Hiroaki Fukumoto and Akira Oyama | IEEE-SSCI 2018 | 2018年11月 | 国外 |
| 大規模集団サイズでの制約条件付き多目的最適化問題における多目的進化アルゴリズム親選択手法の影響について(口頭発表) | 福本浩章、大山聖 | 日本機械学会 第28回設計工学・システム部門講演会 | 2018年11月 | 国内 |
| 指標が多目的進化アルゴリズムの探索性能に与える影響(口頭発表) | 石川達将, 大山聖 | 日本機械学会 第28回設計工学・システム部門講演会 | 2018年11月 | 国内 |
| 設計問題の定式化に関する実践(招待講演) | 大山聖 | HPCを活用した自動車用次世代CAEコンソーシアム 第3回総会・WG | 2018年11月 | 国内 |
| タイルドディスプレイシステム ChOWDERを利用したオンラインコラボレーション(口頭発表) | 川鍋友宏、小野謙二 | AXIES 2018 | 2018年11月 | 国内 |
| Performance evaluation and visualization of scientific applications using PMLib (口頭発表) | Kazunri Mikami and Kenji Ono | Proceedings - 2018 6th International Symposium on Computing and Networking Workshops, CANDARW 2018 | 2018年11月 | 国外 |
| Numerical Investigation of the Effect of Rotational Speed on the Flow past a Golf Ball (口頭発表) | Jun Ikeda, HyoungChol Kim, Masahide Onuki, Makoto Tsubokura | 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Atlanta | 2018年11月 | 国外 |
| ポスト「京」時代の大規模数値流体解析(口頭発表) | 加藤千幸 | 流体工学シンポジウム | 2018年11月 | 国内 |

| | | | | |
|---|----------------------------------|---|----------|----|
| Wall modeling in large-eddy simulation: A path to predicting high Reynolds number flows (口頭発表) | Soshi Kawai | The 15th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018) | 2018年11月 | 国内 |
| ポスト「京」を使った航空機の新しい作り方 (口頭発表) | 高木亮治 | 理化学研究所 計算科学研究センター 一般公開 | 2018年11月 | 国内 |
| 大規模並列有限要素法による車輪／レール／制輪子間の熱・構造連成解析 (口頭発表) | 坂井宏隆, 高垣昌和, 唐津卓哉, 奥田洋司, 林雅江, 殷峻 | 日本機械学会第31回 計算力学講演会 | 2018年11月 | 国内 |
| 車輪フラットに対するモデル化の影響に関する考察(口頭発表) | 唐津卓哉, 坂井宏隆, 高垣昌和, 林雅江 | 日本機械学会第31回 計算力学講演会 | 2018年11月 | 国内 |
| Study on Reducing Turn-Around Time of Multi-Objective Evolutionary Algorithm on an Industrial Problem (口頭発表) | Hiroaki Fukumoto and Akira Oyama | High-Performance Optimization in Industry (HPOI 2018) | 2018年10月 | 国外 |
| Toward Data-Driven Equations (招待講演) | 小野謙二 | 理研シンポジウム | 2018年10月 | 国内 |
| High-Throughput Parallel Simulation of Airflow for Detailed Land Configuration (口頭発表) | Kenji Ono and Takanori Uchida | the 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (ACFD) | 2018年10月 | 国外 |
| Two-Stage in Situ Parallel Meshing for Large-Scale Atmospheric Fluid Simulation Over Complex Topography (口頭発表) | Kenji Ono and Takanori Uchida | The 27th International Meshing Roundtable | 2018年10月 | 国外 |
| Unified simulation framework for continuum mechanics based on HPC technique and its application to industrial problems (口頭発表) | Makoto Tsubokura | The 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (ACFD 2018), Yilan, Taiwan | 2018年10月 | 国内 |

| | | | | |
|---|--|---|----------|----|
| CFD simulation of RCM combustion by building cube method (口頭発表) | Wei-Hsiang Wang, Chung-Gang Li, Rahul Bale, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura | The 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (ACFD 2018), Yilan, Taiwan | 2018年10月 | 国外 |
| Numerical study of the unsteady aerodynamics on running stability and drivability of road vehicles (口頭発表) | Jun Ikeda, Makoto Tsubokura | The 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (ACFD 2018), Yilan, Taiwan | 2018年10月 | 国外 |
| A unified time stepping scheme for flow and aeroacoustic computations (口頭発表) | Chung-Gang Li, Makoto Tsubokura | The 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (ACFD 2018), Yilan, Taiwan | 2018年10月 | 国外 |
| Moving-least-squares immersed boundary method for thin rigid structures (口頭発表) | Rahul Bale, Niclas Jansson, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura Rahul Bale, Niclas Jansson, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura, Amneet Pal Singh Bhalla | The 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (ACFD 2018), Yilan, Taiwan | 2018年10月 | 国外 |
| ポスト「京」時代の大規模流体解析 (口頭発表) | 加藤千幸 | VINAS Users Conference 2018, 2018.10.9., 東京コンファレンスセンター・品川 | 2018年10月 | 国内 |

| | | | | |
|--|--|--|----------|----|
| COMPUTATIONAL STUDY OF WING TIP EFFECT FOR DBD PLASMA ACTUATOR -FROM LES FOR THE SEPARATION OVER THREE-DIMENSIONAL WING (口頭発表) | Takumi Abe, Kengo Asada, Satoshi Sekimoto, Koji Fukudome, Yuya Mamori, Tomoaki Tatsukawa, Kozo Fujii, Makoto Yamamoto | ICM2018 | 2018年10月 | 国外 |
| ターンアラウンドタイム低減に向けた実数値 GA における設計変数の適応的離散化(口頭発表) | 立川智章 | ポスト「京」重点課題⑧・重点課題⑥ 第2回 HPC ものづくり統合ワークショップ | 2018年9月 | 国内 |
| 大規模並列計算環境下において効率的な探索を実現する多目的進化計算アルゴリズムについて (口頭発表) | 福本浩章 | ポスト「京」重点課題⑧・重点課題⑥ 第2回 HPC ものづくり統合ワークショップ | 2018年9月 | 国内 |
| Analysis of blade-passage flow of a mixed-flow pump at performance-curve instability (口頭発表) | I Hagiya, C Kato, Y Yamade, M Fukaya, T Nagahara | 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2018.9.17-21, 同志社大学 (京都) | 2018年9月 | 国外 |
| Wall-modeled large-eddy simulation of the transonic airfoil buffet at realistic high Reynolds number (口頭発表) | Yuma Fukushima, Soshi Kawai | The 7th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods | 2018年9月 | 国外 |
| DBD プラズマアクチュエータを用いた剥離制御における翼端の影響：翼端付き3次元翼流れの LES (口頭発表) | 阿部巧、浅田健吾、関本諭志、福留功二、守裕也、立川智章、藤井孝藏、山本誠 | 日本流体力学会年会 2018 | 2018年9月 | 国内 |
| 並列有限要素法による 繊維/樹脂の界面特性評価 (口頭発表) | 山口太一、橋本学、奥田洋司 | 第43回複合材料シンポジウム | 2018年9月 | 国内 |

| | | | | |
|--|--|--|------------|----|
| FPGA 加速ボードによるデスクトップ PC の FrontISTR 専用機化に向けての試み(口頭発表) | 奥田洋司, 井原遊 | 日本機械学会 2018 年度 年次大会 (関西大学) 先端技術フォーラム | 2018 年 9 月 | 国内 |
| CAE データ活用のためのクラウドプラットフォーム -FrontISTR を用いたクラウド CAE システム- (ポスター発表) | 奥田洋司, 橋本学, 井原遊 | 第一回データ利活用研究コミュニティワークショップ | 2018 年 9 月 | 国内 |
| Benchmarking Multiobjective Evolutionary Algorithms and Constraint Handling Techniques on a Real-World Car Structure Design Optimization Benchmark Problem (ポスター発表) | Hiroaki Fukumoto and Akira Oyama | GECCO 2018 | 2018 年 7 月 | 国外 |
| Proposal of Benchmark Problem Based on Real-World Car Structure Design Optimization (口頭発表) | Takehisa Kohira, Hiromasa Kemmotsu, Akira Oyama, Tomoaki Tatsukawa | GECCO 2018 | 2018 年 7 月 | 国外 |
| Scientific Workflow tailored for Capacity Computing of Product Design (口頭発表) | Kenji Ono and Tomohiro Kawanabe | WCCM 2018 | 2018 年 7 月 | 国外 |
| Scientific Workflow tailored for Capacity Computing of Product Design (口頭発表) | Kenji Ono and Tomohiro Kawanabe | The 13th World Congress in Computational Mechanics | 2018 年 7 月 | 国外 |
| Implicit particle-in-cell formulation for fluid-structure interaction simulations with hard solid (口頭発表) | Koji Nishiguchi, Rahul Bale, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura | 13th World congress in computational mechanics (WCCM 13), New York | 2018 年 7 月 | 国外 |

| | | | | |
|---|---|---|---------|----|
| Moving-least-squares immersed boundary method for thin rigid structures (口頭発表) | Rahul Bale, Keiji Onishi, Niclas Jansson, Amneet Pal Singh Bhalla, Makoto Tsubokura | 13th World congress in computational mechanics (WCCM 13), New York | 2018年7月 | 国外 |
| 遷音速翼型バフエットの衝撃波自励振動メカニズムとモデリング (口頭発表) | 福島裕馬、沼田大祐、河合宗司 | 第50回流体力学講演会/第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム | 2018年7月 | 国内 |
| Unified Programming Framework for Parallel FEM Multi-physics Analysis (口頭発表) | Tatsuhiro Shono, Gaku Hashimoto and Hiroshi Okuda | WCCM 2018 | 2018年7月 | 国外 |
| 高性能・変動精度・高信頼性数値解析手法とその応用(ポスター発表) | 中島研吾, 横田理央, 奥田洋司, 他24名 | 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第10回シンポジウム | 2018年7月 | 国内 |
| 時間並列計算法の最新研究成果と将来展望 (口頭発表) | 飯塚幹夫, 小野謙二 | 第23回計算工学講演会論文集 | 2018年6月 | 国内 |
| 計算効率とメモリ量を考慮した AMR データ構造の設計 (口頭発表) | 小野謙二 | 第23回計算工学講演会論文集 | 2018年6月 | 国内 |
| High Performance Parallel Computing of Full Vehicle Aerodynamics Simulation Including Pre- and Post-Proces (口頭発表) | Keiji Onishi, Niclas Jansson, Makoto Tsubokura | 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD 7), Glasgow | 2018年6月 | 国外 |
| The IC Engine Combustion Simulation Using Hierarchical Cartesian Mesh Framework (口頭発表) | Wei-Hsiang Wang, Chung-Gung Li, Rahul Bale, Keiji Onishi and Makoto Tsubokura | 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD 7), Glasgow | 2018年6月 | 国外 |

| | | | | |
|--|--|---|---------|----|
| Strong coupling scheme for thin-shell structure and fluid with implicit particle-in-cell method, (口頭発表) | Koji Nishiguchi, Rahul Bale, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura | 6th European conference on computational mechanics (ECCM 6) and 7th European conference on computational fluid dynamics (ECFD 7), Glasgow | 2018年6月 | 国外 |
| 移動最小二乗近似を用いた拘束型埋め込み境界法の開発(口頭発表) | バレ・ラフル, ヤンソン・ニクラス, 大西慶治, 坪倉誠, バッラ・アムイト・バル・シング | 第23回計算工学講演会, ウィンクあいち, 名古屋 | 2018年6月 | 国内 |
| 埋め込み境界法によるタイヤ回転を伴う自動車空力解析(口頭発表) | 大西慶治, バレ・ラフル, 坪倉誠 | 第23回計算工学講演会, ウィンクあいち, 名古屋 | 2018年6月 | 国内 |
| Particle-in-cell法を用いた薄板構造-流体の統一解法(口頭発表) | 西口浩司, バレ・ラフル, 岡澤重信, 坪倉誠 | 第23回計算工学講演会, ウィンクあいち, 名古屋 | 2018年6月 | 国内 |
| BCM圧縮性ソルバの性能評価と自然対流解析を用いた検証(口頭発表) | 池田隼, 李崇綱, 坪倉誠, 南一生, 熊畑清 | 第23回計算工学講演会, ウィンクあいち, 名古屋 | 2018年6月 | 国内 |
| 非線形構造解析ソフトウェアとのプログラムフレームワークの共用に基づく並列流体構造連成解析(口頭発表) | 生野達大, 橋本学, 奥田洋司 | 計算工学講演会, 第23回計算工学講演会講演論文集, Vol. 23, E-05-04 | 2018年6月 | 国内 |
| 反復法による線形方程式求解の計算時間を推定できる深層学習モデルの構築(口頭発表) | 森田直樹, 橋本学, 奥田洋司 | 計算工学講演会, 第23回計算工学講演会講演論文集, Vol. 23, G-04-04 | 2018年6月 | 国内 |
| Neural-net Prediction of Stress Concentration at Fillets Using Stress Distribution Data Sets of Models without Defects(口頭発表) | Taichi Ymaguchi, Gaku Hashimoto, and Hiroshi Okuda | ECCM-ECFD2018 | 2018年6月 | 国外 |

| | | | | |
|--|--|--|---------|----|
| Investigation of the stress evolution of polyetherimide during its forming process (口頭発表) | Qi Wu, Tomotaka Ogasawara, and Nobuhiro Yoshikawa | Long Beach, USA (2018 Society for the Advancement of Material and Process Engineering) | 2018年5月 | 国外 |
| Convergence Acceleration of the PinT Integration of Advection Equation using Accurate Phase Calculation Method (Invited) | Mikio Iizuka, Kenji Ono | 7th Workshop on Parallel-in-Time methods | 2018年5月 | 国外 |
| An Investigation of Implicit Turbulence Modeling for Laminar-Turbulent Transition in Natural Convection (口頭発表) | Chung-Gang Li, Makoto Tsubokura | XI-th International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2018), Cracow, Poland | 2018年5月 | 国外 |
| 車輪とレール間の接触面におけるメッシュサイズ評価(口頭発表) | 唐津卓哉, 坂井宏隆, 林雅江, 高垣昌和, 相川明, 奥田洋司, 殷峻 | 第21回理論応用シンポジウム | 2018年5月 | 国内 |
| Design Optimization and Design Exploration in Space Engineering (セミナー講演) | Akira Oyama | Department of Intelligent Systems, Jozef Stefan Institute | 2018年4月 | 国外 |
| Evaluation of an Open-grill Vehicle Aerodynamics Simulation Method Considering Dirty CAD Geometries (口頭発表) | Keiji Onishi, Yasunori Ando, Kosuke Nakasato, Makoto Tsubokura | SAE World Congress Experience (WCX18), Detroit, MI | 2018年4月 | 国外 |
| Applications of large-scale computation to industrial problems (口頭発表) | Chisachi Kato | IEA Wind Task31 シンポジウム | 2018年4月 | 国外 |

| | | | | |
|--|----------------------------------|---|---------|----|
| A Generic Framework for Incorporating Constraint Handling Techniques into Multi-Objective Evolutionary Algorithms (セミナー講演) | Hiroaki Fukumoto and Akira Oyama | Department of Intelligent Systems, Jozef Stefan Institute | 2018年4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 |
|--|--|---|---------|--------|
| Assessment of Rotating Wheel Vehicle Aerodynamics Simulation using Cartesian Grid Method and Open-grill Full Vehicle Models | Keiji Onishi, Rahul Bale, Makoto Tsubokura | SAE Technical Paper 2019-01-0660 | 2019年4月 | 国外 |
| Effects of Moving Ground and Rotating Wheels on Aerodynamic Drag of a Two-Box Vehicle | Chisachi Kato, Ryo Takayama, Tsutomu Takayama, Yoshinobu Yamade, Taro Yamashita, Takafumi Makihara, Yuta Saito | WCX18 Best Papers Special Issue, Volume11, 2018, doi:10.4271/2018-01-0730 | 2019年2月 | 国外 |
| Investigation on optimization of the thermal performance for compressible laminar natural convection flow in open-ended vertical channel | Deboprasad Talukdar, Chung-Gang Li, Makoto Tsubokura | International Journal of heat and Mass Transfer | 2019年1月 | 国外 |

| | | | | |
|--|--|--|----------|----|
| Full Eulerian deformable solid - fluid interaction scheme based on building - cube method for large - scale parallel computing | Nishiguchi K, Bale R, Okazawa S, Tsubokura M | International Journal for Numerical Methods in Engineering | 2019年1月 | 国外 |
| 移流問題に対する Parareal 法による時間並列計算の収束挙動 | 飯塚幹夫, 小野謙二 | 第 32 回数値流体力学シンポジウム | 2018年12月 | 国内 |
| 非圧縮性固体-流体連成解析のための陰的 Particle-in-cell 法 | 西口浩司, バレラフル, 岡澤重信, 坪倉誠 | 土木学会論文集 A2(応用力学)(2018) | 2018年12月 | 国内 |
| CUBE: A scalable framework for large-scale industrial simulations | Niclas Jansson, Rahul Bale, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura | International Journal of High Performance Computing Applications | 2018年12月 | 国外 |
| Kinetic energy and entropy preserving schemes for compressible flows by split convective forms | Y. Kuya, K. Totani, and S. Kawai | Journal of Computational Physics | 2018年12月 | 国外 |
| Wall-modeled large-eddy simulation of transonic airfoil buffet at high Reynolds number | Yuma Fukushima, Soshi Kawai | AIAA Journal, 56(6), 2372-2388 | 2018年12月 | 国外 |
| Performance evaluation and visualization of scientific applications using Pmlib | Kazunori Mikami, Kenji Ono, and Jorji Nonaka | CANDAR 2018 | 2018年11月 | 国外 |

| | | | | |
|--|---|---|----------|----|
| ChOWDER: An Adaptive Tiled Display Wall Driver for Dynamic Remote Collaboration | Kawanabe, Tomohiro and Nonaka, Jorji and Ono, Kenj | 15th International Conference, CDVE 2018, LNCS11151, pp.11-15. | 2018年10月 | 国外 |
| 2-Stage Automatic Parallel Mesh Generation for Large-Scale Atmospheric Fluid Simulation Over Complex Terrain Geometry | Kenji Ono, Jorji Nonaka, Takanori Uchida, and Tomohiro Kawanabe | International Meshing Roundtable 2018 | 2018年10月 | 国外 |
| 圧縮性流体の Large-eddy simulation と航空宇宙分野への展望 | 河合宗司 | ながれ (日本流体力学会) | 2018年10月 | 国内 |
| Stochastic Analysis of the Kamishiro Earthquake Considering a Dynamic Fault Rupture | Yuta Mitsuhashi, Gaku Hashimoto, Hiroshi Okuda and Fujio Uchiyama | Journal of Earthquake and Tsunami, Vol. 12, No. 04, 1841009 | 2018年10月 | 国外 |
| ウォームスタート付き内点法に基づく大変形接触解析手法 | 生野達大, 稲垣和久, 橋本学, 奥田洋司 | 日本計算工学会論文集, 論文番号 20180009, pp. 1-15 | 2018年8月 | 国内 |
| ChOWDER: Dynamic Contents Sharing Through Remote Tiled Display System | Kawanabe, Tomohiro and Nonaka, Jorji and Ono, Kenj | Proceedings of the 11th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction | 2018年7月 | 国外 |
| Influence of the phase accuracy of the coarse solver calculation on the convergence of the parareal method iteration for hyperbolic PDEs | Mikio Iizuka, Kenji Ono | Computing and Visualization in Science - Springer | 2018年6月 | 国外 |

| | | | | |
|---|--|--|------------|----|
| 時間並列計算法の最新研究成果と将来展望 | 飯塚幹夫, 小野謙二 | 第 23 回計算工学講演会論文集 | 2018 年 6 月 | 国内 |
| Unsteady Flow Effects on Steam Turbine Last Stage Blades at Very Low Load Operating Condition | Tadashi Tanuma, Michio Ogawa, Hiroshi Okuda, Gaku Hashimoto, Naoki Shibukawa, Kenichi Okuno and Tomohiko Tsukuda | Proc. ASME Turbo Expo 2018, Paper No. GT2018-76498 | 2018 年 6 月 | 国外 |
| Investigation of boundary layer thickness and turbulence intensity on film cooling with a fan-shaped hole by numerical simulation | Wu-Shung Fu, Wei-Siang Chao, Makoto Tsubokura, Cung-Gang Li, Wei-Hsiang Wang | International Communications in Heat and Mass Transfer | 2018 年 5 月 | 国外 |
| 航空機実高レイノルズ数流れに対する CFD の挑戦 | 今村太郎, 河合宗司 | 日本航空宇宙学会誌 (掲載決定済) | 掲載決定済 | 国内 |
| High-Performance Parallel Simulation of Airflow for Complex Terrain Surface | Kenji Ono and Takanori Uchida | Modelling and Simulation in Engineering | Accepted | 国外 |

「近未来型ものづくりを先導する革新的設計・
製造プロセスの開発」
実施計画

平成31年2月5日
国立大学法人東京大学
加藤 千幸

改版履歴

| 変更時期 | ページ | 変更内容 | 変更理由 |
|--------------|-------|--|----------------------------|
| 平成 29 年 5 月 | 8 | サブ課題 D の分担機関・責任者の変更 | 基礎検討の加速を図るための実施体制変更による |
| | 31 | 「空港近傍の航路モデルの開発」に係る記載の削除 | |
| | 33 | 実施体制図の変更 | |
| | 42 | 実施体制の変更 | 人事異動による |
| 平成 29 年 12 月 | 1~3 | 「1. 実施概要」(1) ~ (3) の記載の変更 | 記述の修正による |
| | 4~11 | 「1. 実施概要」(5) の目標の記載の変更 | 目標の明確化による |
| | 13 | 「1. 実施概要」(6) の記載の変更 | サブ課題間の連携体制の明確化のため |
| | 13~15 | 「1. 実施概要」(7) の記載の変更 | 目標の明確化およびサブ課題間の連携体制の明確化のため |
| | 16~43 | 「2. 研究開発内容詳細」(3) および (5) の記載の変更 | 目標の明確化および記述の修正による |
| | 29~33 | サブ課題 D における「飛行安全性向上に必要な非線形飛行力学モデルによる飛行制御」に係る記載の修正と「高度運航制御モデルの開発」に係る記載の削除 | 関連した課題の統合による |
| | 43~45 | 「3. 採択時の留意事項への対応状況」の記載の変更 | 具体的対応の追記のため |
| | 45~47 | 「4. 中間評価における指摘事項への対応状況」の追加 | 対応の追記のため |
| 平成 31 年 2 月 | 42 | 実施体制の変更 | 人事異動による |

内容

| | |
|--|----|
| 1. 実施概要 | 1 |
| (1) 目的・意義 | 1 |
| (2) 研究開発内容 | 1 |
| (3) 目標・期待される成果 | 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け | 3 |
| (5) 年次計画 | 4 |
| (6) 実施体制 | 12 |
| (7) 必要計算資源 | 13 |
| 2. 研究開発内容詳細 | 16 |
| 2-1. サブ課題 A. 設計を革新する多目的設計探査・高速計算技術の研究開発 | 16 |
| (1) 目的・意義 | 16 |
| (2) 実施内容 | 17 |
| (3) 目標・期待される成果 | 18 |
| (4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと | 19 |
| (5) 実施体制 | 20 |
| 2-2. サブ課題 B. リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発 | 21 |
| (1) 目的・意義 | 21 |
| (2) 実施内容 | 22 |
| (3) 目標・期待される成果 | 22 |
| (4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと | 23 |
| (5) 実施体制 | 24 |
| 2-3. サブ課題 C. 準直接計算技術を活用したターボ機械設計・評価システムの研究開発 | 25 |
| (1) 目的・意義 | 25 |
| (2) 実施内容 | 26 |
| (3) 目標・期待される成果 | 27 |
| (4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと | 28 |
| (5) 実施体制 | 29 |
| 2-4. サブ課題 D. 航空機的设计・運用革新を実現するコア技術の研究開発 | 29 |
| (1) 目的・意義 | 29 |
| (2) 実施内容 | 30 |
| (3) 目標・期待される成果 | 31 |
| (4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと | 32 |
| (5) 実施体制 | 32 |
| 2-5. サブ課題 E. 新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発 | 33 |
| (1) 目的・意義 | 33 |

| | |
|--|----|
| (2) 実施内容 | 35 |
| (3) 目標・期待される成果..... | 37 |
| (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..... | 38 |
| (5) 実施体制 | 38 |
| 2-6. サブ課題 F. マルチスケール熱可塑CFRP成形シミュレータの研究開発 | 39 |
| (1) 目的・意義 | 39 |
| (2) 実施内容 | 40 |
| (3) 目標・期待される成果..... | 41 |
| (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..... | 42 |
| (5) 実施体制 | 42 |
| 3. 採択時の留意事項への対応状況 | 43 |
| 4. 中間評価における指摘事項への対応状況 | 45 |

1. 実施概要

(1) 目的・意義

欧米ではドイツを中心として、生産工程のデジタル化・自動化による抜本的なコスト低減を狙ったインダストリー4.0 が推進されているが、ものづくりの低コスト化施策の費用対効果は上流に行くほど大きいという実態（2012年版ものづくり白書等参照）や早い段階で、社会の期待に沿う製品を企画することの重要性が益々大きくなりつつある状況に鑑み、本重点課題では、製品企画段階から設計・製造に至るまでのプロセスの、高度なデジタル技術を活用した革新（HPC デジタルエンジニアリング）に取り組む。これにより、多様なニーズに対応した、付加価値の高いものづくりを低コスト・迅速に実現し、我が国産業の国際競争力強化に貢献する。企画段階から製品コンセプト創出を重視した手法は、「コンセプトドリブン型ものづくり」として知られているが、その要は性能や信頼性の定量的な評価を通じた実現性の正確な見極めと、そのことによる高い製品完成度の担保である。すなわち、構造・形状最適化はもとより、製品の実働状態における特性の多角的評価を早い段階で実施するという設計手法の革新と、今後有望な新材料等に関する高信頼・高精度加工技術の開発を中心とする製造プロセスの革新が必須になる。本重点課題では、そのための中核的な手段となる、最先端スパコンを駆使した超高速統合シミュレーションを実現するために鍵となるアプリケーション・ソフトウェアを開発する。本研究開発は世界をリードする近未来型のものづくりを牽引する先導的施策として極めて意義深い。

(2) 研究開発内容

a) 全体方針

本重点課題の目的を達成するため、「京」の高度利用で培われたシミュレーション技術成果を基に各サブ課題の解決に必須の革新的要素技術を創出し、これを実装したアプリケーション・ソフトウェアを研究開発する。特に、サブ課題を【設計プロセスの革新】と【製造プロセスの革新】の2つのカテゴリーに分類して取り組む。前者については、上流設計プロセス革新のための、多目的最適設計プラットフォームや高速シミュレーション技術（サブ課題 A）とそれらをベースとする代表的実証システム（サブ課題 B～サブ課題 D）を開発し、後者については、広範囲のものづくりの核となる高信頼・高精度加工プロセスの実現に必要なシミュレータを開発する（サブ課題 E、サブ課題 F）。本重点課題では、開発するアプリケーション・ソフトウェアをポスト「京」時代の近未来ものづくりを牽引するキラーアプリケーションとして位置付ける。これらのアプリケーション・ソフトウェアは、「京」において実績のあるソフトウェアを基にしながら、各サブ課題の解決に必要な革新的機能を新しく研究開発し、実装することにより、効率的に開発する。

b) 実施内容

本重点課題では、上記の目標を達成するために、以下に記載する6つのサブ課題を設ける。

【設計プロセスの革新】

サブ課題 A：設計を革新する多目的設計探査・高速計算技術の研究開発

大規模多目的最適化技術と高速計算技術を研究開発することにより、製品の機能・品質等に関する意思決定の質的・時間的ブレークスルーを実現するための新しい設計基盤を整備する。

サブ課題 B：リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発

超短時間空力解析により、次世代自動車の開発期間の大幅に短縮するとともに、運転条件変化等を考慮したリアルワールドシミュレーションにより、次世代自動車の信頼性と完成度を向上させる。

サブ課題 C：準直接計算技術を活用したターボ機械設計・評価システムの研究開発

設計上流における性能や信頼性の評価精度の大幅な向上と大規模な多目的最適化技術の応用により、ターボ機械の性能・信頼性等の抜本的向上を図る。

サブ課題 D：航空機の設計・運用革新を実現するコア技術の研究開発

実機詳細形状を考慮したシミュレーションの活用により、航空機開発期間の大幅な短縮と開発コストの大幅な削減を図る。

【製造プロセスの革新】

サブ課題 E：新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発

溶接プロセスの超高精度解析技術の開発により、製造プロセスの高信頼化・短時間化を実現する。

サブ課題 F：マルチスケール熱可塑 CFRP 成形シミュレータの研究開発

広範の産業に普及が進む熱可塑性 CFRP を対象とした、マイクロ・マクロスケール解析技術を活用した、熱可塑成形シミュレータを開発し、合理的設計と製造管理に資する。

(3) 目標・期待される成果

ニーズに沿った価値創造と費用対効果の大きいものづくりを実現するため、設計の上流段階から製造に至るまでのプロセスにおいて、構造最適化、実働時の特性把握、高信頼・低コスト製造などを抜本的に加速するキラーアプリケーション（以下、「キラーアプリ」という）を研究開発し、代表的産業分野（自動車、ターボ機械、航空機等）を対象に、ポスト「京」クラスのスパコンを駆使すれば現実的な期間内に極めて完成度の高い設計が可能であることを実証する。

a) アウトプット成果

① 平成 29 年度終了時

各サブ課題で計画している主要機能の研究開発ならびにそれらを実装したキラーアプリプロトタイプの開発・機能の検証。

② 本格実施フェーズ終了時

各サブ課題で開発したキラーアプリ（設計プラットフォームを含む）の「京」レベル計算機による機能の予備的確認とポスト「京」を利用した場合の効果の推定。

③ ポスト「京」運用開始 5 年後

開発したキラーアプリ・統合システムのポスト「京」による機能の確認・強化と代表的な産業界実問題での効果の実証・実用化。

b) アウトカム成果

① ポスト「京」運用開始 5 年後

産業界によるポスト「京」利用効果の認知と先導メーカーによる、開発システムを活用した製品設計の実施。

② ポスト「京」運用 10 年後

開発システムの産業界での利用拡大。ポスト「京」レベルのスパコンが産業界でも広く利用可能になり、産業利用効果が飛躍的に増大。

(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

ものづくりにおいては、製造プロセスへの IoT 等の利用が急速に進展しつつあり、ポスト「京」時代には製造面での生産性の大幅な向上が実現されている可能性が高い。したがって、ものづくりに対する大きな課題は徐々に上流に移ることが予測される。一方、今後のものづくりの課題の特徴は単一の課題ではなく、従来にも増して複雑多岐にわたるものになることが推定される。

本研究開発は、そのようなものづくりのトレンドを踏まえた場合に特に重要となる、新しい製品コンセプトの創出、さらにはその実現性・生産性・信頼性の評価を、最先端のシミュレーション技術を用いて上流工程で高速・高精度に実施することを可能にするものである。この成果は、大規模インフラから個別の民生製品まで広範に適用可能であり、その波及効果は極めて大きい。本研究開発において開発されるアプリケーション・ソフトウェア群は、ポスト「京」の能力を最大限に引き出す最先端の機能を有するとともに、ものづくりに必須のキラーアプリケーションとしての実用性・有用性を兼ね備える。したがって、計算科学の学術的進歩性への寄与はもとより、既存アプリケーションでは達成困難な、近未来型ものづくりを牽引するシミュレーション技術としての位置づけも大きい。

(5) 年次計画

| | | |
|------|---------------|--|
| 課題全体 | 中間目標 (平成29年度) | 各サブ課題が有する技術課題の詳細な掘り下げを行うとともに、その課題解決に資する解析手法の基本的アルゴリズムを開発し、検証する。次いで、キラーアプリケーション開発のための要素技術を研究開発し、それを実装したプロトタイプを作成する。さらに、比較的簡便な事例を対象として、開発したプロトタイプの機能を検証する。 |
| | 最終目標 (平成31年度) | データの入出力も含めてキラーアプリケーションを完成させる。ポスト「京」の単一ノードあるいは複数のノードを用いた計算、またはシミュレータによるノード性能の予測、およびネットワーク性能・通信量により、ポスト「京」を使用した場合に実施できる解析規模や計算時間などを推定する。「京」の数分の1から最大1/2程度のノードを数日から10日間程度占有利用するか、もしくはそれに相当する計算機資源を占有利用して、実際に対象とする問題のスケールダウンした問題や主要な設計プロセスに対してキラーアプリケーションを適用することにより、各サブ課題における課題解決の効果を見極める。 |

| サブ課題名 (分担機関・責任者) | 調査研究・準備研究フェーズ | | 本格実施フェーズ | | | |
|--|---|--|--|--|--|--|
| | 平成26年度 | 平成27年度 | 平成28年度 | 平成29年度 | 平成30年度 | 平成31年度 |
| サブ課題A 設計を革新する多目的設計探査・高速計算技術の研究開発 (JAXA宇宙研・大山聖、九大・小野謙二、東北大・大林茂、下山幸治) | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アウトプットとアウトカムを考慮した全体の計画策定、およびポスト「京」計算機環境で効果的な計算技術の調査を実施する。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アウトプットとアウトカムを考慮した全体の計画策定、およびポスト「京」計算機環境で効果的な計算技術の調査 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計探査と高速計算技術の調査を進めるとともに、一部の主要技術について性能評価する。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計最適化についてはアルゴリズム検討を行う。 ・高速計算技術については実現可能性のテストコード開発を実施し、性能評価を | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計探査と高速計算技術の開発に一定の目途をつける。 ・上流設計プラットフォームの再設計が終わる。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計探査および高速計算技術の研究開発を進める。 ・上流設計プラットフォームの再設計を行う。 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計探査については、ターンアラウンドタイム短縮技術および制約条件取り扱い技術に目途をつけ、テスト問題で有効性を示す。 ・高速計算技術については、基本技術開発に目処をつけ、アプリケーションへの適用・評価を行い、その後のミドルウェア設計の指針を得 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計探査についてはサブ課題⑧-Bまたは⑧-Cと連携し、自動車の空力最適化またはファンの性能・騒音最適化を開始する。 ・高速計算技術については、フレームワークを開発・整備し、応用アプリに組み込む。 ・上流設計PFについては、WHEELを用いた多目的設計探査ワーク | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計探査については、開発した多目的設計最適化アルゴリズムを実設計問題に適用しその有効性を実証する。 ・高速計算技術については、高速計算技術を多くの分野で利用可能なフレームワークとして整備し、公開する。 ・上流設計PFについては、ワークフ |

| | | | | | | |
|--|---|---|--|--|--|---|
| | を実施する。 | 施する。 | | <p>る。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上流設計PFについては、ワークフローを用い Capacity Computing 実証事例の検証、および多目的最適化アルゴリズム Cheetah の組み込みを行う。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計探査、高速計算技術の研究開発を進める。 ・上流設計プラットフォームの整備を行う。 ・小規模な系での適用事例について検討し、システム開発にフィードバックする。 | <p>フローの自動化を実証する。</p> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計探査と高速計算技術の研究開発を進める。 ・上流設計プラットフォームに開発された多目的設計探査を実装しテストする。 | <p>ロー WHEEL をサブ課題間および重点課題間の連携に適用し、生産性の向上につなげる。</p> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多目的設計探査と高速計算技術の研究開発を進める。 ・上流設計プラットフォームの有効性を実問題で実証する。 ・具体的な事例について開発システムを適用し、有効性の実証を行う。 |
| <p>サブ課題B</p> <p>リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発（神戸大・坪倉誠、理研・大西慶治、山梨大・岡澤重信）</p> | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・研究開発計画の策定と推進体制の構築 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・基盤アプリ開発項目調査 ・システムの必要 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・研究開発計画の策定と推進体制の構築 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・システムの基本設計 ・実証課題の選定 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アプリ高速化目標：定常空力を20時間程度 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・基盤アプリ高速化 ・流体・構造連成解 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実車空力解析については、ホンダとの連携による WLTP 認証取得に向けた取り組みを開始し、1~2車種の車両認証用データを提供 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実車空力解析については、WLTP の認可要求を満たすスペックを実現する。 ・圧縮性解析・6自由度移動境界解析については、自 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・定常空力予測を数時間で完了することや空力数百ケースの多目的最適化を実現することでシステム有用性を実証する。 |

| | | | | | | |
|--|--|--|---|--|---|--|
| | <p>機能調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 産業界ニーズ調査 | | <p>法の実装と検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 界面処理モデルの開発 | <p>する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 6自由度移動境界解析については、レーンチェンジ動作における渦挙動の解析を実施する。圧縮性解析については、ボンネット周り狭帯域音の直接解析を実施する。 ・ 構造解析については、陰解法化による時間増分制約の緩和、およびPIC法によるシェル構造のモデル化を可能にする。また、エンジンブロックモデルの振動解析の定量的検証、ホワイトボディの剛性解析を実施する。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 基盤アプリ高速化と大規模化 ・ 流体・構造連成解法の実証解析 ・ システムプロトタイプ構築と検証解析 | <p>動車メーカーとの連携により実車による検証解析を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 構造解析については、部分構造同士の場合に関してフィジビリティ・スタディを行い、その基礎モデルを確立する。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 基盤アプリ高速化と大規模化 ・ システムプロトタイプの実証解析 ・ ポスト「京」での実証に向けた準備研究 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 実車空力解析についてはターンアラウンドタイム(TAT)12時間で解析を実行可能とする。 ・ オイラー構造解析・圧縮性解析・6自由度移動境界解析については、実車自動車モデルを用いた多目的最適化を可能とするシステムを実現する。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本格システム稼働と産業界実用化評価 ・ ポスト「京」での実証に向けた準備研究 |
|--|--|--|---|--|---|--|

| | | | | | | |
|--|---|---|--|--|--|--|
| <p>サブ課題C 準直接計算技術を活用したターボ機械設計・評価システムの研究開発 (東大・加藤千幸、九大・古川雅人)</p> | <p>(目標) ・基本設計 ・ニーズ調査</p> <p>(実施内容) ・アプリ基本設計 ・体制構築(ターボ機械および船舶)</p> | <p>(目標) ・コアカーネル高速化達成 ・基本設計</p> <p>(実施内容) ・アプリ基本設計 ・体制構築(ターボ機械および船舶)</p> | <p>(目標) ・詳細設計、実装、検証</p> <p>(実施内容) ・アプリ開発(FFB、LBMコード、多目的最適化) ・開発中アプリの検証および試計算(2ケース)</p> | <p>(目標) ・FFBについては、ソフトウェアで現状の10倍の高速化(チューニングで2倍、高速化で5倍)の目途をつける。 ・LBMについては数兆規模の解析を可能とするプロトタイプを完成させ、乱流の予測精度を検証する。</p> <p>(実施内容) ・アプリ開発(FFB、LBMコード、多目的最適化) ・開発中アプリの検証および試計算(2ケース)</p> | <p>(目標) ・FFBについては開発した高速化技術をシステム実装し、ソフトウェアで10倍の高速化を確認するとともに、実装した壁面モデルおよび圧縮性コードの有用性を確認する。 ・LBMについてはターボ機械内部流れに対応するための移動メッシュ機能を実装する。</p> <p>(実施内容) ・開発したアプリを設計システムとして統合 ・設計システムの機能検証(2ケース)</p> | <p>(目標) ・ターボ機械設計システム(FFB高速化技術、圧縮性コード、壁面モデル、LBMコードを含む)を完成させ、一般公開するとともに、壁面モデルを用いた多目的最適について、小規模なテスト問題で検証する。 ・FFBについては高速化した設計システムをターボ機械内部流れに適用しその効果を実証する。 ・LBMについてはターボ機械内部流れ解析に適用する。数千億規模の解析によりシステムの有用性を確認する。</p> <p>(実施内容) ・小規模な問題による、設計システムの実証計算(2ケース)</p> |
|--|---|---|--|--|--|--|

| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|---|---|
| <p>サブ課題D 航空機的设计・運用革新を実現するコア技術の研究開発 (JAXA・高木亮治、東北大・河合宗司、東京理科大・藤井孝蔵(～平成28年7月)、東大・西成活裕(～平成28年7月))、東京理科大・山本誠(平成28年7月～)</p> | <p>(目標)</p> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発計画の検討 実施体制の構築準備 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発計画の策定、実施体制の構築 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発計画の詳細検討 実施体制の構築 要素技術の検討(ベースコード、壁モデル) | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> 基盤コードの要素技術の研究開発 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 基盤コードの研究開発 既存プログラムを用いた要素技術(LES壁面モデル、壁面形状モデル)の研究開発 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> IP (Image Point)法を実装し、境界非適合格子に対するLES壁モデルの基盤コードへの実装を行う。 設計評価技術として、低速失速解析、降着装置騒音解析に着手する。 非線形飛行力学/空気力学連成プロトタイププログラムを開発する。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 基盤コードの研究開発 要素技術(LES壁面モデルなど)の検証・高度化 壁面形状モデル(レイヤー格子)の研究開発 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> 基盤コードのレイヤー格子への対応を行う。 境界非適合格子に対するLES壁モデルの乱流境界層での有効性検証を行う。 非線形飛行力学/空気力学連成プロトタイププログラムの検証を行う。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 基盤コードの単純形状・簡易モデルでの検証・高度化 壁面形状モデル(レイヤー格子)の高度化 | <p>(目標)</p> <ul style="list-style-type: none"> 航空機実機詳細形状に対して、離着陸時の最大揚力予測、遷音速バフエット予測等が可能なアプリケーションプログラムを開発する。 開発したアプリケーションプログラムに関して、非線形運動におけるシミュレーションの信頼性を検証する。 <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> ポスト「京」で実施する解析規模である約8,000億の格子が自動的に生成できることの確認 実機レイノルズ数から1～2桁落とした条件で、単独2次元翼を対象とした「後縁失速」「遷音速バフエット」の解析により、解析精度などの検証 |
|--|--|--|--|--|---|---|

| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|---|
| <p>サブ課題E 新材料に対応した 高度成形・溶接シ ミュレータの研究 開発 (東大・奥田洋司)</p> | <p>【調査】 (目標) ・多階層並列直接 法に関する調査 ・接触変形・熱弾塑 性・相変態の相互 作用を忠実に再現するアルゴリ ズムに関する調査 ・並列領域分割アル ゴリズムに関する調査</p> <p>(実施内容) ・既存並列直接法 ライブラリに関する調査 ・接触変形・接触を 伴う弾塑性体の 変位場と温度場 を連成解析でき るアルゴリズム、 弾塑性体におけ る相の体積分率 の変化を解析で きるアルゴリ ズムに関する調査 ・既存の逐次パー ティショナの高 速化、実行時間の 計測</p> | <p>【開発】 (目標) ・Code Verification (ア プリのコアとな る基本アルゴリ ズム、基本コー ドの作成) ・プリプロセッサ・ ポストプロセッ サ作成 (詳細設 計)</p> <p>(実施内容) ・アセンブリ/接 触問題の大規模 解析が可能な並 列反復法の開発 ・並列領域分割法 の基本アルゴリ ズムの開発 ・熱弾塑性・相変態 の強連成解析の ための基本アル ゴリズム開発 ・プリ・ポストの仕 様作成、詳細設計</p> | <p>【開発】 (目標) ・Code Verification (ア プリのコアとな る基本コード作 成) ・プリプロセッサ・ ポストプロセッ サ作成 (基本コ ード開発)</p> <p>(実施内容) ・アセンブリ/接 触問題の大規模 解析が可能な並 列反復法のコー ド検証 ・並列領域分割法 のコード検証 ・並列領域分割法 ・材料構成則の基 本アルゴリズム の開発 ・プリ・ポストの実 装、仕様の見直し</p> | <p>【精度検証&パフ ォーマンス評価】 (目標) ・超大規模・高精度 強連成解析ソル バーについては、 数千万節点規模 の問題に対する 並列性能評価を 行う。また、ベン チマーク問題 (10万節点規模モ デル) に対する 精度をJWRIAN 熱弾塑性コード (阪大接合研) と 比較する。 ・プリ・ポストプロ セッサについて は、溶接解析の機 能(溶接線、溶接 条件の設定機能 など)を拡張し、 動作検証を実施 する。</p> <p>(実施内容) ・協力機関から提 供されたベンチ マーク問題の解 析を実施 ・開発コードによ って、必要な計算 精度が得られる</p> | <p>【部品規模での妥 当性検討&パフ ォーマンス評価】 (目標) ・超大規模・高精度 強連成解析ソル バーについては、 数億～数十億節 点規模の問題に 対する並列性能 の最適化を行う。 また、実測値を用 いて、部品モデル (数百万～数億節 点) に対する精 度をJWRIAN 固 有ひずみ法コー ド(阪大接合研) と比較する。 ・プリ・ポストプロ セッサについて は、溶接解析の機 能(複数パスの 設定機能など) を拡張し、動作検 証を実施する。プ レス成形解析機 能(補助的なツ ール)からのデ ータ渡しについ ても検討する。</p> <p>(実施内容) ・協力機関から提</p> | <p>【全体規模での実 証解析&パフ ォーマンス評価】 (目標) ・溶接工程におけ る高精度な溶接 順序探索および 高速な逆ひずみ 量推定を可能と する高度成形・溶 接シミュレータ を開発する。 ・超大規模・高精度 強連成解析ソル バーについては、 数百億～数千億 節点規模の問題 に対する並列性 能の最適化を行 う。自動車全体モ デルや重機械フ レーム全体モデ ル(数千万～数 十億節点) 対 する実証解析を 実施する。 ・プリ・ポストプロ セッサについて は、プレス成形の スプリングバッ クによる残留応 力を溶接の初期 条件として渡す 機能を実装し、動</p> |
|--|--|--|--|--|--|---|

| | | | | | | |
|---|--|---|--|---|--|---|
| | | | | かを検証 ・開発コードの並列計算性能を測定、大規模計算能力を検証 ・プリ・ポストを使用し、CADデータ、解析メッシュの作成、計算、可視化を実施 | 供された部品規模の溶接解析を実施 ・開発コードと固有ひずみ法による従来コードの解析結果を比較、計算精度を検証 ・協力機関の解析グループで高度溶接シミュレータおよびプリ・ポストを利用 ・ユーザの視点から、高度溶接シミュレータおよびプリ・ポストの機能の追加・改善 | 作検証を行う。 (実施内容) ・熱反りによって生じる溶接隙間量が最小となるような、最適な溶接順序を計算、開発アプリを溶接現場で利用、その効果を検討 ・これまで40日を必要とした逆ひずみ量の決定にどの程度の時間短縮が可能かを検討（逆ひずみ量の決定を10分～20分にするのが目標） |
| サブ課題F マルチスケール熱可塑CFRP成形シミュレータの研究開発（東大・吉川暢宏） | (目標) ・研究計画の策定 (実施内容) ・熱可塑樹脂成形シミュレーションに関する調査 ・熱可塑CFRPのマルチスケールモデル化に関する調査 ・熱可塑CFRP成形後の欠陥生成に関する調査 | (目標) ・熱可塑樹脂モデルの開発 (実施内容) ・熱可塑樹脂単体の成形シミュレーションアルゴリズムを開発 ・「京」を用いた計算結果と樹脂単体の熱可塑成形試験の照合による検証 | (目標) ・マルチスケール熱可塑CFRP成形シミュレータの開発とマクロモデルの構築 (実施内容) ・樹脂と繊維を区分したマクロモデル設定による熱可塑成形シミュレータの開発 ・試験片レベルの | (目標) ・マルチスケール熱可塑成形シミュレータの開発を完了するため初期プリプレグシート積層構成を正確に有限要素モデル化するメッシュャーの開発および接触大変形問題と熱伝導問題を強連成問題として解く | (目標) ・自動車ボディあるいはジェットエンジンファンブレードの開発段階で試作する試験体の熱可塑成形シミュレーションを実施し、実成形品との照合を行いシミュレータの実効性の確認 | (目標) ・実効性を確認したシミュレータを活用し自動ボディあるいはジェットエンジンファンブレードの実部品レベルの熱可塑成形シミュレーションを実施し、繊維配向の乱れなどの製造誤差を低減する成形プロセ |

| | | | | | | |
|--------------|---|---|--|---|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> 研究計画の策定 | | <p>計算を「京」上で実施し試験結果との照合による検証</p> <ul style="list-style-type: none"> 一方向強化プリプレグの熱可塑性成形マクロモデルの材料パラメータ決定 | <p>アルゴリズムの開発・実装。</p> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 初期プリプレグシート積層構成を正確に有限要素モデル化するメッシュの開発 接触大変形問題と熱伝導問題を強連成問題として解くアルゴリズムの開発とマクロスケール熱可塑性成形シミュレータへの実装 | <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 自動車ボディあるいはジェットエンジンファンブレードの開発段階で試作する試験体の熱可塑性成形シミュレーションを「京」クラスコンピュータで実施 実成形品との照合によるシミュレーション結果の検証 | <p>スの策定と設計において勘案すべき製造誤差の見積もり</p> <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 自動車ボディあるいはジェットエンジンファンブレードの熱可塑性成形シミュレーションを「京」クラスコンピュータで実施 実成形品との照合によるシミュレーション結果の検証 |
| プロジェクトの総合的推進 | <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 各種会議・委員会と実施体制案の策定 アプリ連携開発会議と体制案の策定(コデザイン含む) 広報・普及実施方法案の策定 | <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 各種会議・委員会と実施体制の決定 アプリ連携開発会議と体制の決定(コデザイン含む) 広報・普及実施方法決定 | <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 各種会議・委員会の推進 アプリ連携開発会議の推進(コデザイン含む) 広報・普及の推進 | <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 各種会議・委員会の推進 アプリ連携開発会議の推進(コデザイン含む) 広報・普及の推進 | <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 各種会議・委員会の推進 アプリ連携開発会議の推進(コデザイン含む) 広報・普及の推進 | <p>(実施内容)</p> <ul style="list-style-type: none"> 各種会議・委員会の推進と取り纏め アプリ連携開発会議の推進(コデザイン含む)と取り纏め 広報・普及の推進と取り纏め 全体成果の取り纏め |

(6) 実施体制

本重点課題の全体推進体制を下図に示す。課題全体の運営方針決定機関として、課題責任者・推進管理者等および重点課題⑥の課題責任者・推進管理者等を構成メンバーとする「重点課題連携事務局会議」を設ける。その下に、サブ課題推進主要メンバーから構成される「重点課題全体推進会議」を設け、重点課題連携事務局会議で決定された方針の共有並びにサブ課題間の連携促進等を議論する。さらに、第三者の視点で本プロジェクトの進捗状況の把握・評価・改善提言・指導等を行う「諮問委員会」を設置する。また、「アプリケーション連携開発会議」を設け、本重点課題で開発するキラーアプリケーションの効率的・効果的の開発を進める。以上の重点課題全体の推進をサポートする組織として、東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター内に課題推進事務局を設置する。

アプリケーションの開発は以下の通り進める。ターゲットアプリケーションの開発は、国立研究開発法人理化学研究所計算科学研究センター（R-CCS）との密接な連携による、ハードウェア開発との協調設計により実施し、コデザイン会議において、他のサブ課題（サブ課題 B、サブ課題 D、サブ課題 E）も含めて、協調設計の成果であるカーネル情報を共有する。各サブ課題の研究開発の推進にあたっては、サブ課題 B～D による CFD ソルバー開発会議およびサブ課題 E、F による材料・構造ソルバー開発会議を開催し、サブ課題間の連携強化を図ることにより、開発効率の向上に努める。さらに、サブ課題 A では、その成果の検証において、多目的設計探査に関してはサブ課題 B およびサブ課題 C と、高速計算技術に関してはサブ課題 C と連携する。

本重点課題の推進では、スーパーコンピューティング技術産業応用協議会や公益財団法人計算科学振興財団との連携を重視する。また、本重点課題⑧において活用するアプリケーションの技術要素の多くは、重点課題⑥のものと共通していることから（たとえば、Frontflow/blue、Frontflow/red、Frontflow/violet、ADVENTURE、REVOCAP など）、前記の「アプリケーション連携開発会議」において、両者で連携をとり、情報交換を密に行い、効率的なアプリケーション開発を実施する。



重点課題⑧実施体制

(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 |
|-----------|------------|------------|------------|-----------|
| 1,806,531 | 18,000,000 | 23,400,000 | 25,740,000 | 9,317,968 |

「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 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 605,000 | 4,205,000 | 5,305,000 | 5,505,000 | 5,505,000 |

※ 「京」 計算資源量

サブ課題 A: 必要な「京」の計算資源量は約 300 万ノード時間/年である。

- ・自動車車両構造の多目的設計最適化の例

1 つの車両設計の性能評価に 4,000 ノード時間が必要であり、300 ケースの設計評価を実施するとして約 120 万ノード時間が 1 つの最適化計算に必要である。

サブ課題 B: 必要な「京」の計算資源量は約 500 万ノード時間/年である。

- ・リアルタイムシミュレーション

数億要素の最適化計算 50 ケース：200 万ノード時間/年

- ・リアルワールドシミュレーション

200 億要素の準直接計算：300 万ノード時間/年（50 万ノード時間×6/年）

サブ課題 C: 必要な「京」の計算資源量は約 2000 万ノード時間/年である。

300 億グリッドの準直接計算 5 ケース、1 億グリッドの最適化計算 150 ケース

サブ課題 D: 必要な「京」の計算資源量は航空機空力解析のアプリケーション開発進捗にあわせて 1,800 万ノード時間/年である。

- ・航空機のバフエット解析（風洞 Re 数）：1,400 万ノード時間/年（70 万ノード時間×20 ケース/年）
- ・モデル飛行機（Re=10⁶）の非線形制御空力 DB の作成：400 万ノード時間/年（1.6 万ノード時間×250 ケース/年）

サブ課題 E: 必要な「京」の計算資源量は約 150 万ノード時間/年である。

約 10 億自由度モデルでの計算（8,192 ノード×20 時間/ケース×10 ケース/年 =184 万ノード時間/年）

サブ課題 F: 必要な「京」の計算資源量は約 100 万ノード時間/年である。

ファンブレード 1 ケースあたり約 63 万ノード時間（熱伝導解析 36,864 ノード×3.2 時間、応力解析 36,864 ノード×14.0 時間）を要すると想定。5 ケースの試行を行ったとして、約 316 万ノード時間/年

◆ 海外に対する優位性—

欧米における「ものづくり」への IoT（Internet of Things）の活用目的は、上流工程（企画・設計段階）での柔軟でスピーディな対応（意思決定や正確な評価）の実現が大前提になる、主としてマスカスタマイゼーションの実現やサービスの拡大化で、その核心は生産システムの変革に対してである。これに対して、本事業では、超高速・高精度シミュレーション技術を駆使し多様な（ニーズに合った）製品の企画・設計を高速に実現することを重視して、これを包含した実施内容になっている。これにより今後の「ものづくり」に重要な視点である製品ライフサイクル（企画・設計～製造）最適化に大きく貢献することが期待でき、海外に対して優位性のあるものとなっている

さらに、上記計画を実現するための核となるアプリケーションの開発については、必要不可欠なものを「キラーアプリケーション」と位置付けて海外に比較して優位な機能の開発・実装を企画しており、世界を先導する研究開発を推進する。各サブ課題の具体的取り組み内容については、次節「2. 研究開発内容詳細」の中で記述する。

◆ サブ課題間の連携と相乗効果—

本重点課題では、「設計プロセスの革新」に関する 4 サブ課題と「製造プロセスの革新」に関する 2 サブ課題を設ける。

サブ課題 C で実施する、ターゲットアプリケーションのハードウェア開発との協調設計の成果であるカーネル情報は、他のサブ課題（サブ課題 B、サブ課題 D、サブ課題 E）に、コデザイン会議において共有される。各サブ課題の研究開発の推進にあたっては、サブ課題 B～D による CFD ソルバー開発会議、および、サブ課題 E、F による材料・構造ソルバー開発会議を開催し、サブ課題間の連

携強化を図る。これらにより開発の効率化が期待できる。

また、広範にわたるものづくりへの応用展開を可能とするために、サブ課題 A においては「コア技術プラットフォーム」を整備し、各サブ課題成果の基盤部分を統合整備する役割をもたせる。これによりサブ課題 A を中心とした情報共有化や成果のフォーマットの共通化が促進されるとともに、成果利用面における便宜性の向上という相乗効果が期待できる。なお、後述の通り、サブ課題 A で得られた成果を、多目的設計探査に関してはサブ課題 B およびサブ課題 C の研究開発に、また、高速計算技術に関してはサブ課題 C に展開する。

さらに、本重点課題⑧と重点課題⑥の各サブ課題で共通に利用するアプリケーションについては、技術分野等で括った「アプリケーション連携開発会議」を設けて推進することで、成果の質・量的な面と研究開発の効率面での相乗効果が得られる。

◆ 人材育成一

重点課題の枠組みで行う人材育成は OJT を基本とする。具体的には、PD を中心とした人材育成を、ポスト「京」レベルの計算機環境を駆使できるソフトの開発研究と今後のものづくりに有用な機能の実証研究をサブ課題ごとにリーダーの指導のもとに実践し、先端的かつ実用的ソフトの開発能力を身に着けさせる。

一方、HPCI 戦略プログラム事業での人材育成施策の継続性の観点から、「HPC 産業利用スクール」（スーパーコンピューティング技術産業応用協議会主催事業）や「先端ソフト開発者教育」（東京大学大学院工学系研究科の演習）については、必要に応じて講師派遣等のサポートを実施する。

2. 研究開発内容詳細

実証された HPC (High Performance Computing) 技術を広く普及させることを目的とした HPCI 戦略プログラム分野 4「次世代ものづくり」の成果として、「京」を駆使することにより、たとえば、船体の直接シミュレーションによる曳航水槽試験の代替ができることや車室内騒音の事前評価が実現できることといった、従来は不可能であったさまざまなことが実現できることを実証した。一方で、最適設計解を得るまでのターンアラウンドタイムが長大化することや制約条件が強い場合は最適設計解が得られないといった多目的設計最適化に関する問題、計算格子の作成に 1 週間、最悪の場合は格子の作成不能となることや解析ソルバーの実行が 1 週間となるといった解析に要する時間が長大化する問題、300 億要素の流体解析に 3 万ノード必要になるといった膨大な計算機リソースが必要となるといった問題、そして、HPC を利用する分野が、流体解析の場合は自動車、ターボ機械のみに限定されているという問題が顕在化してきた。

そのことを踏まえて、本重点課題では、ロバストで高速な多目的設計最適化アルゴリズムの研究開発 (サブ課題 A)、格子生成の完全自動化 (サブ課題 B、サブ課題 C、サブ課題 D) やソルバーの高速化 (サブ課題 C、サブ課題 D、サブ課題 E) により解析計算の大幅な短縮、新たな乱流モデルの研究開発 (サブ課題 C、サブ課題 D) により必要な計算機リソース量の削減、航空機分野 (サブ課題 D)、溶接 (サブ課題 E) や熱可塑性 CFRP 成形 (サブ課題 F) といった新たなものづくり分野への HPC の展開に資する、アルゴリズムの研究開発およびアプリケーションの開発に取り組むこととした。

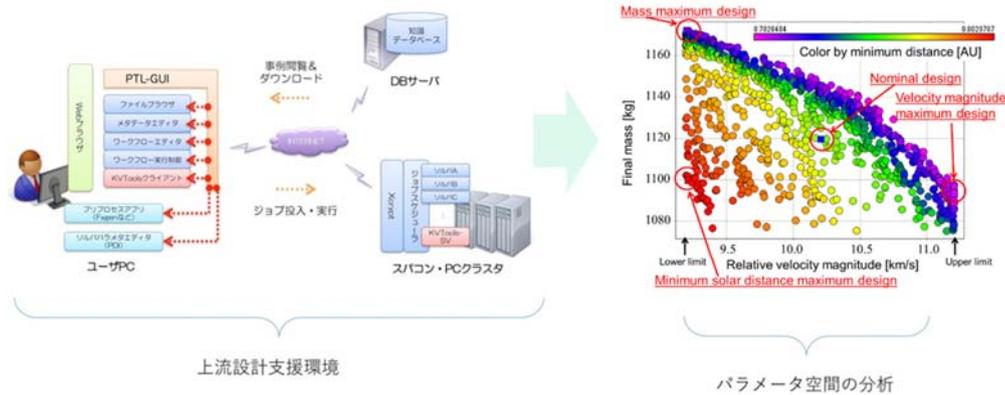
各サブ課題の取り組みの詳細は以下の通りである。

2-1. サブ課題 A. 設計を革新する多目的設計探査・高速計算技術の研究開発

(1) 目的・意義

設計は製品開発の上流工程に位置し、製品の性能やコストなどに大きく影響する重要な開発過程である。産業界における実設計問題は改善すべき性能指標が多数ある多目的設計最適化問題であり、性能指標間のトレードオフを設計の上流で明らかにする多目的設計最適化が必要とされているが、その適用先は限定されている。また、上流設計段階では、目的の製品を実現する多数の選択肢の中から最適なパラメータを迅速に選び、機能の実現・高品質化・コスト最小化による効率的な開発を進めていくことが要求される。

本計画では、前述の問題を解決するため、多目的設計探査技術および高速計算技術の研究開発を行う。また、これらを実装する上流設計プラットフォームを開発する。これらにより製品コスト低減や高品質化に貢献できる新設計基盤を整備し、産業競争力強化に貢献できることを実証する。



パラメータ空間における多数のシミュレーションを迅速に行い、
得られた結果から最適なパラメータを選択するアプローチ

計算機の新しい利用方法によるものづくりを支える技術であり、設計の革新的な方向転換を促す技術

サブ課題 A の社会的意義

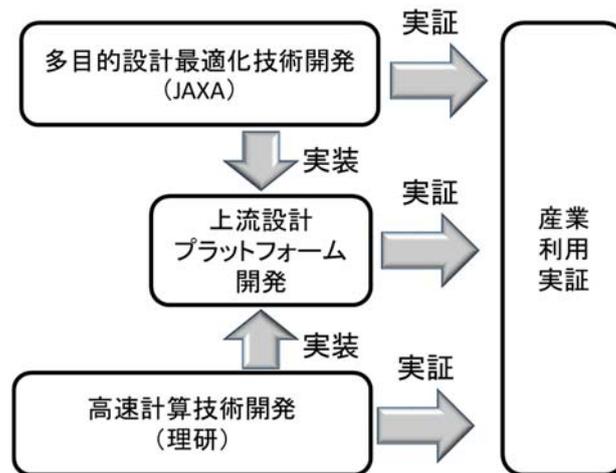
(2) 実施内容

宇宙航空研究開発機構（JAXA）で多目的設計最適化問題のトレードオフを可視化する多目的設計最適化技術、理化学研究所（理研）で多数の計算を短時間で実施する高速計算技術、九州大学で大規模計算の高速反復解法を開発する。また、Capacity Computing の設計活用を促進する上流設計プラットフォームについては、理化学研究所と九州大学が共同で開発する。多目的設計最適化技術および高速計算技術を上流設計プラットフォームと連携させ、メーカーや JAXA、他のサブ課題が抱える実設計問題に適用して有効性を実証する。また、開発した上流設計プラットフォームはポスト「京」以外でも使えるように整備して産業界に展開し、産業競争力強化に貢献する。

多目的設計最適化技術に関しては、HPCI 戦略プログラム分野 4「次世代ものづくり」で開発した世界初の大規模並列計算対応多目的設計最適化アプリ Cheetahなどをベースとし、制約条件が厳しい設計問題でも効率的にパレート最適解を探索可能な多目的設計最適化アルゴリズムやパレート最適解を得るために必要な計算時間を 1/2～1/10 に短縮する多目的設計最適化アルゴリズムを開発する。

高速計算技術では、(a) 世界で初めてとなる数値流体ソルバーの時間方向の並列化技術の開発を行う。ターゲットアプリとしては FrontFlow/blue, FrontFlow/violet を考えており、「京」レベルの 50 倍程度の高速化を目指す。(b) 行列・多重ベクトル積を使うアルゴリズム開発を行う。これにより、ポスト「京」の能力を活用できる基盤技術を開発し、技術の水平展開も行い、他のアプリの高度化に貢献する。

上流設計プラットフォーム開発では、HPCI 戦略プログラム分野 4「次世代ものづくり」で開発してきた HPC/PF をベースに、上記の要素技術を統合化し、アプリケーションの設計適用を支援するしくみとして整備を進める。また、内閣府の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）／革新的設計生産技術にて採択された「全体俯瞰設計と製品設計の着想を支援するワークスペースの研究開発」（研究代表者：小野謙二（九州大学情報基盤研究開発センター））と連携し、SIP プロジェクトで開発した技術を上流設計プラットフォームに導入することにより、研究開発を加速する。



サブ課題 A 実施内容

(3) 目標・期待される成果

a) アウトプット成果

多目的設計探索に関しては、「京」を用いることにより、たとえば、自動車部品の共通化と軽量化に対して従来は見出すことが不可能であった設計解を見出したり、従来不可能とされていたタイヤの空気抵抗と揚力を同時に低減できる設計解を見出したりすることに成功し、その有効性を証明できた。一方、最適設計解を見出すまでに要する時間が 40 日以上掛かったり、制約条件が強い場合は最適設計解（パレート最適解）を見出せなかったりする場合があることが判明した。そこで本サブ課題では、多目的最適設計探索技術の実用化を加速するために、設計解を見出すまでの時間を飛躍的に短縮するとともに、制約条件が強い場合においても設計解を見出すことができるアルゴリズムの研究開発を行い、設計者が使いやすい形でプラットフォーム上に実装して提供する。また、重点課題⑧で開発する全てのアプリケーションに共通する課題として解析に要する時間の短縮がある。本サブ課題では、上記の多目的設計探索技術の研究開発に加えて、時間短縮のための共通基盤技術として、高速計算技術の研究開発し、主要なアプリケーションに実装し、その効果を検証する。

①平成 29 年度終了時

- 1) 従来手法の 1/2～1/10 程度の少ない世代数でパレート最適解を得ることが可能な、また、制約条件が厳しい設計問題でも効率的にパレート最適解を探索可能な多目的設計最適化アルゴリズムを研究開発し、テスト問題で検証を行う。
- 2) 高速計算のための基本技術を開発し、重点課題⑥のサブ課題 B のフェーズフィールド法や重点課題⑧のサブ課題 C の流体シミュレーションへ適用する。それにより、基本性能を把握し、改善点を抽出し、その後の開発方針を決定する。
- 3) 上流設計プラットフォームの基本機能を整備する。
- 4) 多目的設計探索および高速計算技術の実証計算に用いるアプリケーションを決定し、当該アプリケーションとのインターフェースを決定する。

②本格実施フェーズ終了時

- 1) 従来手法の 1/2～1/10 程度の少ない世代数でパレート最適解を得ることが可能な多目的設計最

適化アルゴリズムや制約条件が厳しい設計問題でも効率的にパレート最適解を探索可能な多目的設計最適化アルゴリズムを研究開発し、実際の設計問題に適用して効果を実証する。

- 2) 高速計算技術を多くの分野で利用可能なフレームワークとして整備し、公開する。
- 3) 設計者が上流設計プラットフォームを利用することにより多目的設計探索や高速計算を容易に実現できることを証明する。

なお、多目的設計探索に関しては、重点課題⑧のサブ課題 B またはサブ課題 C と連携することにより、それぞれ自動車の空力最適化、または、ファンの性能・騒音の最適化に適用し、その効果を見極める。また、高速計算技術に関しては、上記の中間目標に記載のとおり、サブ課題⑥-B のフェーズフィールド法や重点課題⑧のサブ課題 C の流体シミュレーションに適用し、高速化の効果を検証する。

③ポスト「京」運用開始 5 年後

- 1) 多目的設計最適化技術、設計検討を開始して数時間後に計算結果が得られる高速計算技術、上流設計プラットフォーム技術が実設計に活用され、有効性が実証される。

b) アウトカム成果

①ポスト「京」運用開始 5 年後

- 1) 本サブ課題で開発した高速計算技術および上流設計プラットフォームが企業でカスタマイズ・活用され、実設計で効果を上げ始める。
- 2) ポスト「京」クラスのコンピュータを用いた多目的設計最適化が製品の設計開発に有効であることが産業界に認識される。

②ポスト「京」運用開始 10 年後

- 1) 多目的設計探索技術および高速計算技術が企業において活用され、製品開発期間の短縮・コスト削減、および製品品質向上に貢献する。
- 2) 上流設計プラットフォームは大規模計算のデータハンドリング、ワークフローシステムの基盤としてデファクトになり、コミュニティが形成され、それをサポートするソフトウェアベンダーが育っている。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

「京」においては、数百億規模の大規模シミュレーション技術の確立、および現実的な規模の計算を多数実施することにより多目的設計最適化技術の実証を行ってきた。その結果、空力音響設計最適化問題や衝突強度計算を含めた車両構造設計問題に対して、従来は見出すことが不可能であった設計解を見出すことに成功し、その有効性を証明できた。しかしながら、計算機資源の制約から、最適設計解を見出すまでに要する時間が 40 日以上掛かったり、また、多目的設計最適化を実施する際に十分な数の設計候補を評価することができなかつたため、制約条件が強い場合は最適設計解（パレート最適解）を見出せなかつたりする可能性があることが判明した。

ポスト「京」においては理論的な計算能力が増大する一方、解析に要する時間の短縮の技術が必要となる。このため、高速計算技術を開発し、多数のケースを短時間で計算することにより、「京」では実現できなかった新しいシミュレーションの活用方法を実現する。

高速計算技術では、形状データの入手後数時間で高い信頼性をもつ性能予測を実施し、設計プロセ

スの短時間化に貢献する。多目的設計最適化では、アルゴリズムの改良により必要な計算時間を従来の 1/2~1/10 に短縮し適用範囲と結果の信頼性を向上させる。また、制約条件が厳しい設計問題でも効率的にパレート最適解を探索可能な多目的設計最適化アルゴリズムを開発する。

本サブ課題では自動車車両やターボ機械の多目的設計探索を考えているが、たとえば、自動車車両の多目的設計最適化を例に挙げると、「京」コンピュータで実施する場合は約 5 万ノードを使って 100 時間の計算時間がかかってしまう。待ち時間を考慮すると計算時間が 1 週間以上かかってしまうが、ポスト「京」を用いることでこれを一晚（10 時間程度）で実施可能になる。

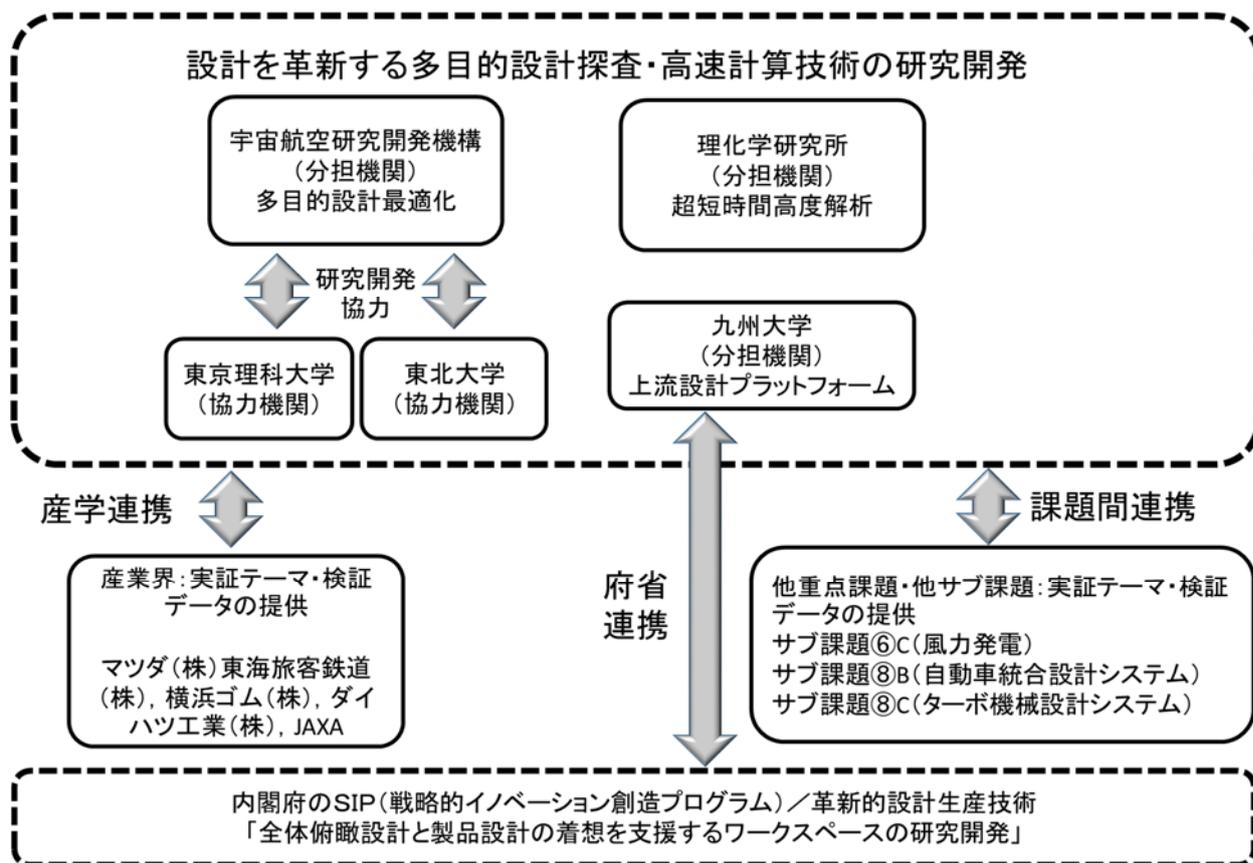
(5) 実施体制

多目的設計最適化の技術開発および実証は宇宙航空研究開発機構（JAXA）、超短時間高度解析技術の開発は理化学研究所、上流設計プラットフォームの整備は理化学研究所と九州大学が中心となって実施する。プロジェクト管理はサブ課題代表者の大山聖（JAXA）が務める。アプリの研究開発や実証計算を行うため、3 名（多目的設計最適化の開発に 1 名、上流設計プラットフォーム 1 名、高速計算技術 1 名）のポストドクを採用する。東北大学、東京理科大学などの学术界とも連携を深め、最新の技術・研究成果を反映させる。また、構想段階から産業界のメンバーと積極的に議論をかさね、産業界のニーズと合致した上流設計プラットフォームを整備する。現時点でマツダ（株）、東海旅客鉄道（株）、横浜ゴム（株）、ダイハツ工業（株）から協力機関となっていただけの実績を得ている。

JAXA、東北大学、理研、東京理科大は、HPCI 戦略プログラムで分野 4「次世代ものづくり」の研究開発課題を担当し、多目的設計最適化技術やポスト「京」にも適用可能な高速計算技術、ポスト処理技術で協調して成果を挙げてきた実績がある。

開発された個別設計技術および設計プラットフォームについては、JAXA や企業が抱える実際の設計開発問題に適用し、その有効性を実証する。また、重点課題⑧のサブ課題 B「自動車統合設計システム」、サブ課題 C「ターボ機械設計システム」および重点課題⑥サブ課題 C「風力発電」と連携し、自動車、ターボ機械、風車の設計プラットフォームを開発し実証する。

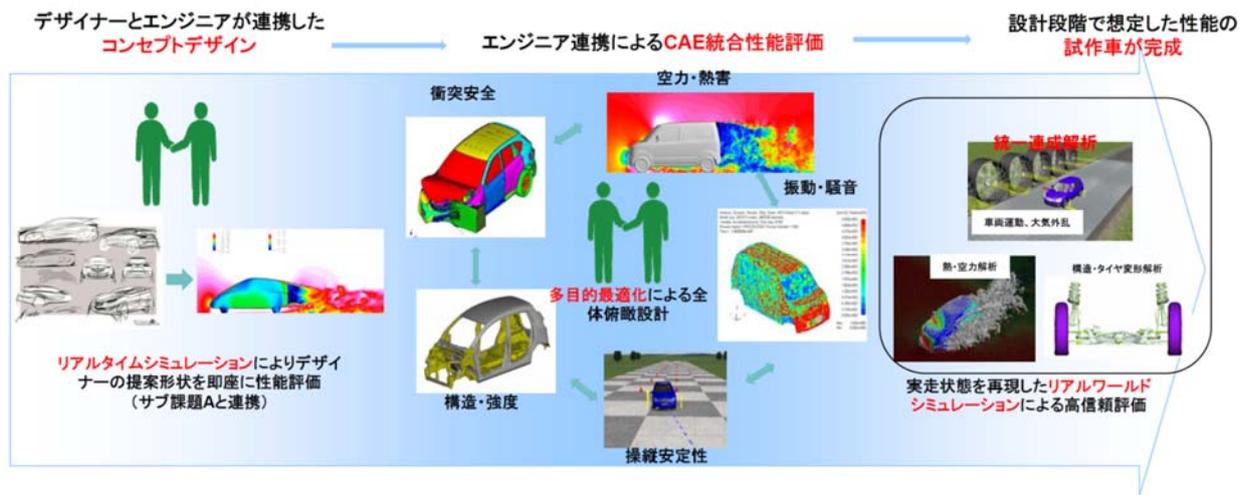
また、上流設計プラットフォームについては、内閣府の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）／革新的設計生産技術にて採択された「全体俯瞰設計と製品設計の着想を支援するワークスペースの研究開発」（研究代表者：小野（理研））と連携し、SIP プロジェクトで開発した技術を上流設計プラットフォームに移植することにより、研究開発を加速する。



2-2. サブ課題 B. リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システムの研究開発

(1) 目的・意義

新素材や新たな動力を用いた次世代自動車を早急にかつ高い品質で実現するためには、実験代替を目的とした既存の CAE を活用した設計手法に対して、より高次元で CAE を利用した設計プロセスの革新が必要である。HPC 環境を活用することで、設計上流側でデザイナーと技術者が協調したコンセプトデザインを支援する（リアルタイム）と共に、時々刻々と変化する運転条件を考慮した（リアルワールド）シミュレーションを実現することで予測精度・信頼性向上を実現する。このシステムが実現すれば、開発期間のさらなる短縮化と製品の性能向上の支援が可能となり、日本の自動車産業の国際競争力強化に貢献することができる。



サブ課題 B の社会的意義

(2) 実施内容

「京」で開発した熱流体 (FrontFlow、CUBE) や構造 (ADVENTURE) の連成解析技術 (REVOCAP) を基盤として、以下の開発を行う。

a) リアルタイムシミュレーション技術とプロセス間統合システムの開発

CAD データからの計算モデル作成時間がボトルネックとなる空力解析について、実験・実測に匹敵する速度で解析が可能なリアルタイムシミュレーション技術を開発する。理研 R-CCS で開発した階層直交格子と埋め込み境界に基づく格子作成手法 (CUBE)、ポスト「京」アーキテクチャとのコデザインによるストロングスケール計算技術を活用して、ターンアラウンドタイムの抜本的短縮を図る (理研担当)。解析の高精度化には壁面近傍のボクセル境界面に対する壁面境界層モデルの構築が鍵となる。これはサブ課題 D と連携して開発を行う (神戸大担当)。これらを実現することでサブ課題 A と連携して、自動車用上流概念設計プラットフォームを構築する (神戸大担当)。本サブ課題で実現する実証解析として、車体形状変化に対する空力・構造強度を統合した解析や、樹脂等材質変化に対する構造強度・空力熱害最適化を統合した解析などを実施する (流体解析は神戸大、構造解析は山梨大担当)。なお、具体的な実証課題については、産学連携のコンソーシアムで議論して決定する。

b) リアルワールドシミュレーション技術とプロセス内統合システムの開発

既存のシミュレーションに対して格段に高精度で、かつ、実際の走行状態を考慮したリアルワールドシミュレーション技術を開発する。ここでは、「京」で開発した流体解析をポスト「京」アーキテクチャに最適化することでさらに空間解像度 (現行に対して 1 オーダー、空力解析で 0.1mm 程度) を高めると共に、理研 R-CCS で開発した統一データ構造に基づく流体・構造連成解析手法 (CUBE) を適用することで、システムの高精度化と信頼性の向上をはかる。本課題で実現する実証解析として、空力高速操安・乗り心地評価や車室内総合環境・快適性評価などを実施する。なお、具体的な実証課題については、産学連携のコンソーシアムで議論して決定する。

(3) 目標・期待される成果

新素材や新たな動力を用いた次世代自動車を早急にかつ高い品質で実現するためには、単なる実験の一部の代替を目的とした CAE を活用する既存の設計手法から脱却し、より高次元で CAE を利用した設計プロセスに革新することが必須である。本サブ課題では、「京」で実現した自動車空力連成解析

を基盤技術として、設計上流側でデザイナーと技術者が協調してコンセプトデザインを実施することを可能とするために、従来の 1/10 以下の時間で定常空力予測（リアルタイムシミュレーション）が可能なアプリケーションを開発する。また、設計初期段階において、空力・強度・音・熱・振動などの複数の物理現象が関連した設計問題に対する多目的最適設計解を見出すことを可能するために、時々刻々と変化する運転条件変化を考慮した（リアルワールドシミュレーション）、構造解析機能、圧縮性熱流体解析機能、移動境界解析機能を具備したアプリケーションを開発する。

a) アウトプット成果

①平成 29 年度終了時

- 1) 実車空力解析に対して、プリ処理・コアカーネルの高速化により 1 ケースのターンアラウンドタイム(TAT)24 時間以内を達成する。
- 2) 構造解析・圧縮性流れ解析・6 自由度移動境界解析のための基本プログラム開発し、基本動作や予測精度を検証する。

②本格実施フェーズ終了時

- 1) TAT12 時間で実車空力解析が可能なアプリケーションプログラムを開発する。
- 2) 実走行状態における多目的設計最適化が可能な、構造解析機能、圧縮性熱流体解析機能、移動境界解析機能を具備したアプリケーションプログラムを開発する。

なお、最終目標の達成に関しては、「京」の 1/2 程度のノードを 10 日間占有利用するか、もしくはそれに相当する計算機資源を使用し、最終目標である解像度 1mm、約 20 億格子による多目的設計最適化のための解析を実施することにより、アプリケーションの効果を評価する。また、ポスト「京」の単一ノードあるいは複数ノードを用いた計算、またはシミュレータによるノード性能の予測、およびネットワーク性能・通信量から、ポスト「京」を用いた場合の計算速度や実施可能な計算規模を推定することにより、総合的に判断する。

③ポスト「京」運用開始 5 年後

ポスト「京」を活用した実証解析を完了する。開発システムの産業界普及のために、コンソーシアムを通してシステム利用の人材教育を実施する。

b) アウトカム成果

①ポスト「京」運用開始 5 年後

開発システムの自動車産業界普及、実用化を進める。具体的には、ポスト「京」を活用して各企業（OEM）でのシステム実証試験を進めることで、OEM 固有の開発体制を支援する。あわせて各 OEM が導入予定の「京」クラススパコンでの実用化を加速する。さらに重点課題で対象とならなかった産業界への普及・利用推進を、ポスト「京」を活用して進める。

②ポスト「京」運用開始 10 年後

自動車産業界に対して開発システムの実用化が定着し、各 OEM 固有の自動車ものづくりの革新を実現する。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

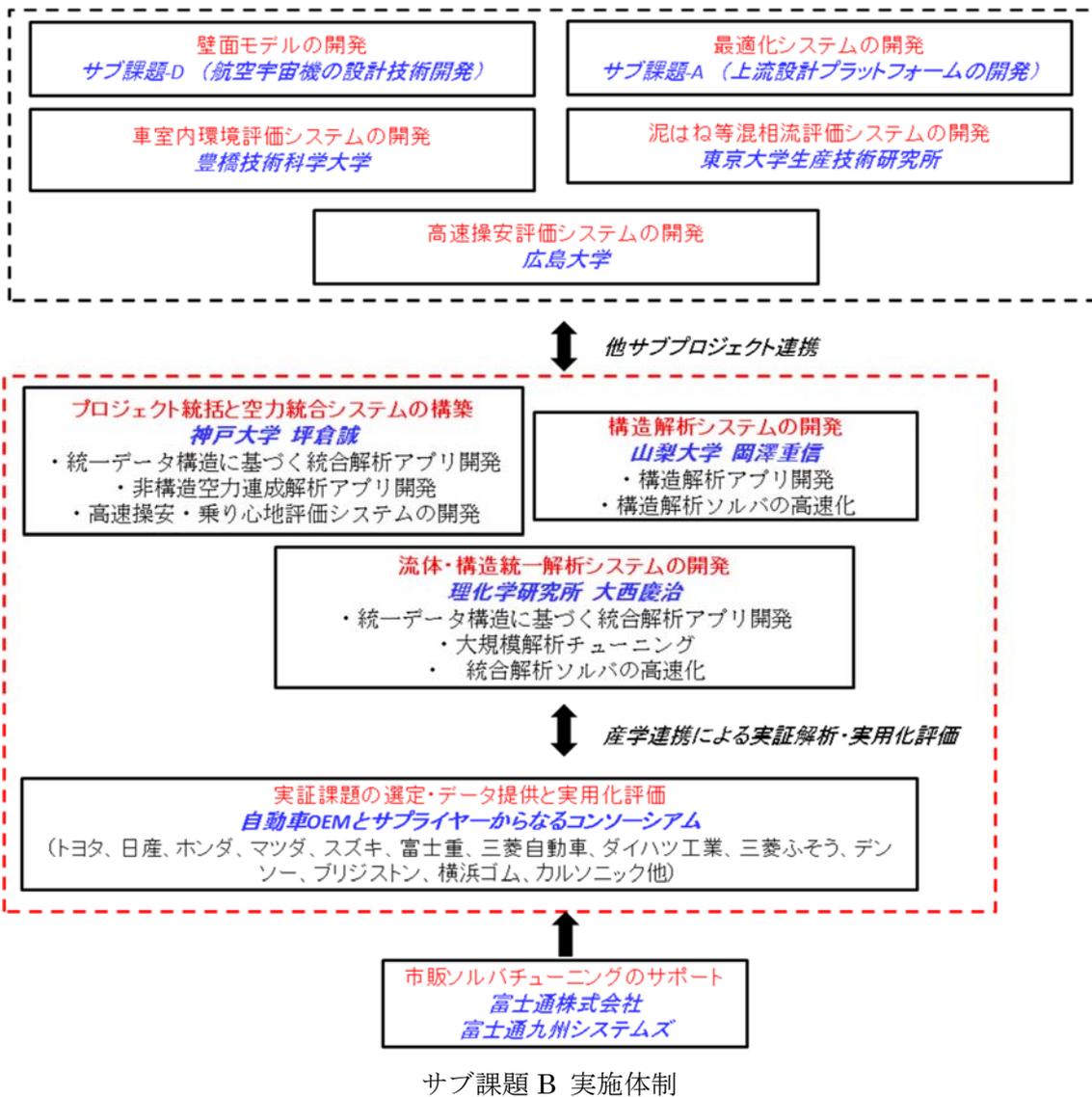
「京」では、風洞実験の代替として、風洞実験値に対して空気抵抗を 1~2%の精度で予測することに成功した。また、流体解析アプリケーションのチューニングや連成解析手法の開発により、空力と車両運動の双方向連成解析による高速走行安定性評価や、空力・構造・音響連成解析による車室内騒音評

価に世界で初めて成功した。これにより手法の有用性については「京」で実証された。しかしながら、格子作成を含むトータルターンアラウンド時間の問題で、本格実用化には至っていない。これに加えて CAE に期待されている形状最適化、さらには空力・構造等の多目的最適化に対応するためには、ポスト「京」の資源を想定してソルバー単体の抜本的なターンアラウンド時間の短縮（「京」の数十倍）と、乗り心地・操作性・快適性といったより高精度で信頼性の高いシステムの構築が不可欠である

（５）実施体制

統括と熱・流体解析ソルバーの開発、システムの全体設計は神戸大学が担当する。山梨大学は構造解析ソルバーの開発を担当する。流体と構造を統一的に扱う連成ソルバーは神戸大学が理化学研究所計算科学研究センター（以下、理研）と連携して開発し、特にシステム全体の高速化・大規模化チューニングは、理研が担当する。キラーアプリケーションの実証と実用化評価は自動車 OEM とサプライヤー（協力機関として参画）からなるコンソーシアムが担当する。具体的には、ソルバーの実証課題を産業界ニーズに合わせて選定し、プリ・ポスト処理も含めて、実際の設計開発現場での活用を想定して産業界が実用性の評価を行う。特に実車を対象とした場合、シミュレーション結果の検証・実証に必要となる実験・実測データの取得が大きな経済負担となるが、この費用は産業界がデータ提供することで負担する。活動成果の知的財産権の扱いについては、活動後の産業界実用化を促進するために、「京」で実施したコンソーシアム「HPC による自動車用次世代空力・熱設計システムの共同研究開発」の覚書を踏襲する。

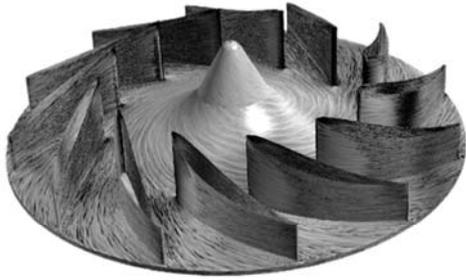
その他、車室内環境評価、車両運動連成操縦安定性評価、泥はね等混相流評価については、それぞれ各課題に対して実績のある豊橋技術科学大学、広島大学、東京大学生産技術研究所を協力機関として迎え、体制を強化する。また、ソルバーの高速化、システムの高精度化、プラットフォーム開発、個別実証課題等では、コデザイン設計成果を本システムの各種アルゴリズムにも反映させると共に、各サブ課題（A と D）や他機関を協力機関として迎え、連携を行う。



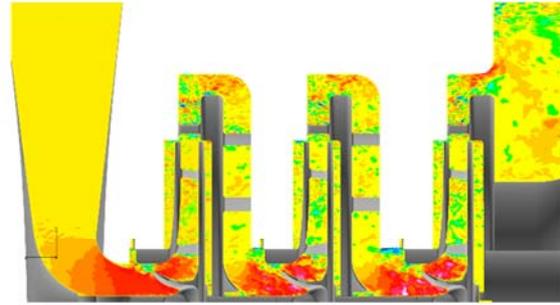
2-3. サブ課題 C. 準直接計算技術を活用したターボ機械設計・評価システムの研究開発

(1) 目的・意義

本サブ課題の目的は既存のターボ機械設計の高度化に資する設計システムを開発するとともに、これをターボ機械設計に適用しその有効性を実証することにある。本研究グループは数百億グリッドを用いた準直接計算技術の工学応用を世界に先駆けて実施し、その効果を実証した。本サブ課題では、この準直接計算技術をさらに発展させ、多目的最適化計算にも適用可能とすることを目的とする。これにより、開発する設計ツールは、単なる実験の代替ツールという枠を超え、ターボ機械設計にとって真に有用な情報を提供することを目指す。



遠心送風機内部流れ解析



多段遠心ポンプ内部流れ解析

ターボ機械の性能・信頼性向上により産業競争力強化に貢献

- ・ 最大1兆格子を用いた乱流の準直接計算により設計段階でターボ機械性能を高精度に予測
- ・ 広範囲な設計パラメータを短時間に探索する多目的設計

サブ課題 C の社会的意義

(2) 実施内容

エクサスケールの計算機を活用し、最大1兆グリッドの計算により、ほぼ全てのターボ機械の製品性能を、実験と同じ精度で予測する大規模流体解析技術を開発するとともに、全く新たな発想に基づく壁面モデルの開発により、計算資源量の抜本的な削減を図り多目的最適化計算にも適用可能とする。また、開発した設計システムをポンプ、ファン、船舶のプロペラ等のターボ機械設計に適用し、その有用性を実証するとともに各適用分野に特化したインターフェースを開発し実用化への準備をする。本研究開発でキーとなる準直接計算の実用技術は本研究グループが世界を先導する技術であるため、本研究開発は他の研究グループでは容易に追従することはできない。

a) ターボ機械設計システムの開発

- 1兆グリッド大規模準直接計算技術の開発（実施機関：東大）：「京」において300億グリッド（世界最大規模）の実用計算の実績のある既存の流体解析コード（FrontFlow/blue）をベースに、複数解ベクトルの同時計算や時間並列化手法等の実行効率・収束性向上のための新計算手法を導入するとともに、エクサスケールのマシンで高速で動作するようチューニングすることにより、最大1兆グリッド規模の準直接計算を実現する。
- 格子ボルツマン法コードの開発（実施機関：九大）：格子ボルツマン法（LBM）と Building Cube 法（BCM）を用いることにより、乱流場と音場の同時直接計算を可能とするアプリケーションを開発する。
- 準直接計算用壁面モデルの開発（実施機関：東大）：実験と同程度の精度を有する準直接計算に必要な計算資源量を抜本的に削減できる壁面モデルを開発し、FrontFlow/blue に実装する。サブ課題 A(1)と連携し、1万個体（100個体×100世代）の多目的最適化設計を数日で完了できることを示す。

b) ターボ機械設計システムの実証（実施機関：東大）

ポンプ、ファン、プロペラ等のターボ機械設計より、1兆規模の大規模解析が必要である実証ケースと多目的最適化計算を必要とする実証ケースをそれぞれ選定し、開発したシステムの有用性を実証する。また、分野ごとに必要なインターフェース（ステンシルベースの計算格子作成プログラム、分析ツール等）を拡充し、開発したシステムの実用化の準備をする。選定候補となる実証ケースを以下に示す。

- (i) ポンプ：小型のポンプを対象に最大 1 兆グリッド規模の準直接計算を実行し、設計の上流段階で、水力性能および製品の非定常特性（振動、騒音、スラスト等）をループ試験と同じ精度で予測する技術を確認し製品信頼性向上に貢献する。
- (ii) ファン：従来は実験主体で評価されていたファンの騒音を直接予測しながら、性能・効率・騒音等を含む多目的最適設計技術を開発する。
本実証計算はサブ課題 A と連携する。
- (iii) 船舶：プロペラによる自航条件や造波抵抗も含めて、船体の推進抵抗予測技術を高度化し船体設計の高度化に貢献する。具体的には、実海域における波浪中推進性能の把握、設計システムを活用した船体およびプロペラの形状最適化の技術を開発し、その実証を行う。

(3) 目標・期待される成果

HPCI 戦略プログラム分野 4 の一つの研究開発課題の成果として、数億から数 100 億規模の計算格子を利用した大規模な LES (Large Eddy Simulation) を適用することにより、ファンの性能や騒音、船の推進抵抗などを実験にとって代わり得る精度で予測したり、旋回失速など従来十分には解明されていなかった複雑な非定常流動現象を解明したりすることが可能であることを実証した。しかし、これらの計算には「京」の数千ノードから数万ノードの計算資源が必要であるため、直ちに企業における実用化には至らなかった。また、多段ポンプや水車の LES 解析には少なく見積もっても 5,000 億以上の格子が必要であり、「京」を用いても解析を実施することができなかった。さらに、「京」で実証した現有のアプリケーションでは、流体騒音の直接的な予測ができなかったり、計算格子の生成が困難である場合があったりするという問題点も顕在化した。そこで、本サブ課題では、ターボ機械分野において HPC 技術を普及拡大させるために、既存のアプリケーション (FFB) の計算速度の大幅な向上と計算規模や計算機能の拡大、計算資源量の大幅な削減を目指した LES 解析用の新たな壁面モデルの開発と実装、および、計算格子の完全自動生成と流体騒音の直接計算が可能な、Lattice Boltzmann 法 (LBM) に基づく新規アプリケーション (FFX) の開発を行う。

a) アウトプット成果

①平成 29 年度終了時

最終目標を達成するためのマイルストーンとして、平成 29 年度中に以下の要素技術ならびにプロトタイプアプリケーションを開発する。

- 1) 本重点課題の本格実施開始時点（平成 28 年 4 月時点）の FFB に対して、アプリケーションのみで 10 倍の高速化を達成するとともに、CPU の性能向上と合わせて、ポスト「京」において「京」と比較して 100 倍高速化できる目途を立てる (FFB)。
- 2) FFB の機能拡張の一環として空力騒音の直接計算精度を検証する (FFB)。
- 3) 最大 20 兆規模の大規模計算に対応可能なファイルシステムを開発する (FFB・FFX)。
- 4) LBM によるプロトタイプアプリケーションを開発し、空力騒音の予測精度を検証する (FFX)。
- 5) 大規模な LES 計算により、壁面近傍の渦の挙動の解明し、その結果に基づき、壁面モデルの定式化に関する基本方針を決定する (FFB・FFX・他の流体解析アプリケーション)。

②本格実施フェーズ終了時

HPC を駆使したターボ機械設計システムの構築のために鍵となる、以下の性能・機能を具備する

アプリケーションを開発すると共に、LES 解析に必要な計算資源を大幅に削減可能な壁面モデルを研究開発し、上記のアプリケーションに実装し、予測精度を検証する。

- 1) CPU の高速化と合わせて現状比 100 倍の高速計算、最大 7,000 億要素規模の LES 計算が実施可能で、非圧縮性流れ・圧縮性流れの双方に応用できるアプリケーション (FFB)。
- 2) ターボ機械の性能や騒音を、最大 20 兆格子を用いた直接計算により予測できる LBM に基づくアプリケーション (FFX)。
- 3) 従来の LES 計算に対して計算格子数を 1/100 以下に削減でき、ほぼ同等な精度で内部流れの予測が可能な LES 用壁面モデル。

なお、大規模化・高速化・機能強化した FFB に関しては、約 500 億規模の LES を単段の遠心ポンプの流れに適用し、連携するプロジェクトで取得する実験結果と比較することにより、性能、流体力、および内部流れの予測精度を検証する。一方、新規に開発する FFX に関しては、約 300 億規模の LES を小型のファンの流れや音の予測に適用し、連携するプロジェクトで取得する実験結果と比較することにより、性能・騒音の予測精度を検証する。これらの計算には「京」の数分の 1 のノードを用いるか、もしくはそれに相当する計算機資源を用いる。また、LES 用の壁面モデルの開発に関しては、上記の単段遠心ポンプの内部流れ解析に適用することにより、計算資源の削減量と予測精度を評価する。さらに、ポスト「京」を用いた場合の計算速度や実施可能な計算規模に関しては、ポスト「京」の単一ノードあるいは複数ノードを用いた解析またはシミュレータによるノード性能の予測から計算速度を推定するとともに、ネットワーク性能と通信量からアプリケーション全体の性能を評価する。

③ポスト「京」運用開始 5 年後

一般公開した設計システムをメンテナンスし定期的にアップデート版を一般公開する。

b) アウトカム成果

①ポスト「京」運用開始 5 年後

開発した設計システムが、ポンプの信頼性向上、ファンの性能・騒音の多目的設計、推進抵抗の予測技術としての実用化が進展する。

②ポスト「京」運用開始 10 年後

開発した設計システムをターボ機械・車体・船舶等のものづくり分野に普及させる。目標ユーザー企業数を 30 社とする。本サブ課題で開発する技術は、単に実験の代替を狙った乱流現象の高精度開発技術にとどまらず、多目的最適化計算機能をサポートしているため流体解析に関連するものづくり設計分野においても活用されることが期待される。

具体的な成果目標は産業界と協議中であるが、現時点で想定する目標を以下に示す。

- ・ ポンプ：設計段階で予測誤差を性能・効率 2 %、スラスト変動 5 %、騒音 5 dB とする。
- ・ ファン：騒音一定で効率 3 % 向上するか、もしくは効率一定で騒音 3 dB 低減する。
- ・ 船舶のプロペラ：プロペラスラスト係数一定でプロペラトルク係数を 5 % 低減する。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

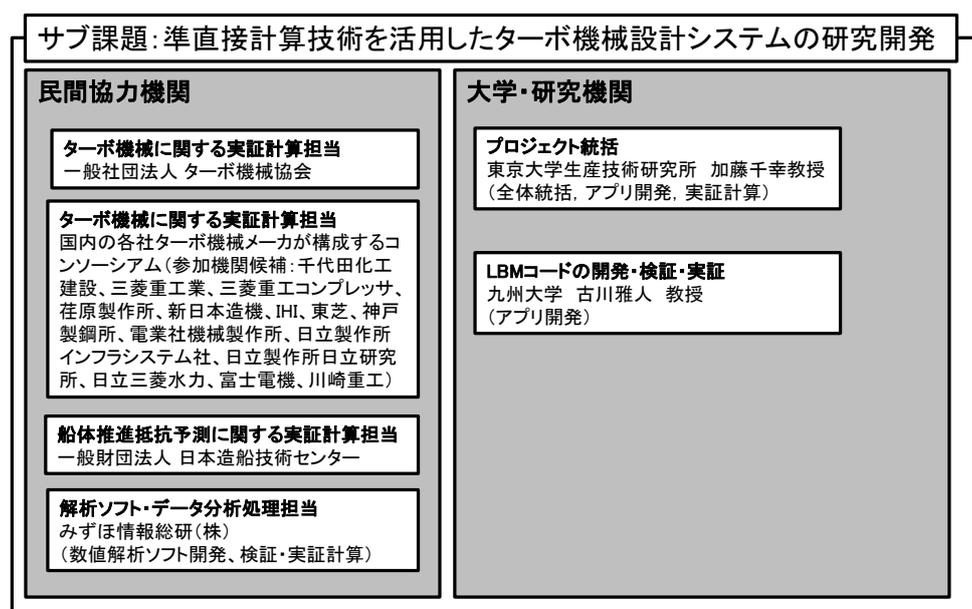
ペタスケールの計算機（「京」）を用いれば、数百億グリッドを用いて、ポンプやファン等に対し、実験を代替しうる性能の予測が可能であり、実際、本研究グループで 300 億グリッド規模の準直接計

算の実績を有している。今後、エクサスケールの計算機（ポスト「京」）を用いれば、最大1兆グリッドを用いた計算により、一部の機種（大型のポンプ）を除くターボ機械の大部分に対して、実験と同じ精度の製品の評価が数値計算により実現される。さらに、本サブ課題で開発する設計システムを活用すれば、1個体10億グリッド規模の、1万個体（100個体×100世代）の多目的最適化計算が可能となる。

(5) 実施体制

全体統括、流体解析コード(FrontFlow/blue)の開発およびこれらの実証は東京大学が担当する。設計システムのサブシステムであるLBMコードの開発および実証は東京大学と九州大学が担当する。ポンプ・ファンに関する実証に関しては、(一社)ターボ機械協会ターボ機械HPC実用化分科会(2016年10月1日設置)と連携して実施する。船舶の実証に関しては日本造船技術センターと連携して実施する。

本サブ課題で実施するコデザインの成果として、連続体(流体、構造、音響等)を対象とする解析コードのコアルーチンの高速化技術を他のサブ課題(A、B、D、E、F)に展開する。



サブ課題 C 実施体制

2-4. サブ課題 D. 航空機の設計・運用革新を実現するコア技術の研究開発

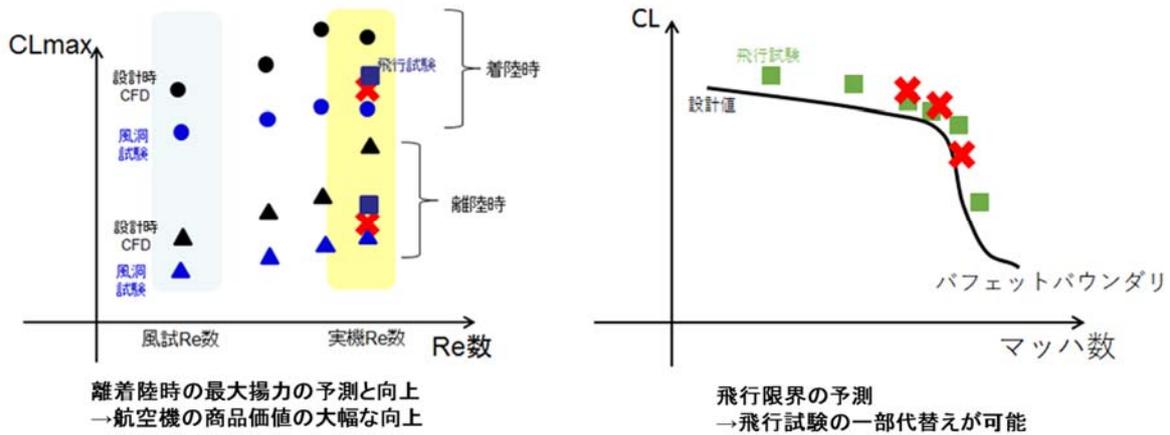
(1) 目的・意義

「設計・開発段階のみならず開発対象の運用・運航段階も含めて考えるのが『ものづくり』である」という観点に立ち、航空機の設計・開発および運用・運航における重大な課題を解決し、格段の効率化、高性能化、安全性向上、さらには利用者サービスとしての質の向上を実現するコア技術を確立する。これらの成果は航空分野に閉じるものではなく、広く産業界に展開する。

設計・開発における課題である設計の手戻りをなくすためのコア技術の開発に取り組む。手戻りの原因は、現状では実機試験など開発の下流段階でしか評価できない設計課題のためであり、これらの設計評価を設計初期段階で評価可能とするコア技術を開発する。そのため、実機飛行環境を忠実に再現で

き、また、高速に解析可能な革新的解析プログラムを、「京」での成果をベースとして研究開発する。これにより、設計の初期段階から、例えば巡航状態だけでなく離着陸状態などを含めた運用全体を俯瞰した新たな設計プロセスを提案できるようにする。

運用・運航における課題である、落ちにくい飛行機の実現について取り組む。危険な状況下での航空機の安定性・安全性の向上を可能とするため、横風、ダウンバーストなど急激な気象変動や大型機翼端渦によるダウンウォッシュ環境下における飛行特性の高精度予測技術を研究開発し、非線形飛行力学モデルの構築および非線形制御の導入など航空機の飛行制御技術の抜本的な改善を目指す。



サブ課題Dの社会的意義

(2) 実施内容

- a) 離着陸時および実機詳細形状対応の高速・高精度乱流解析技術の確立(JAXA、東北大、東京理科大)

飛行試験や実機試験など、実機がないと評価できない設計課題を、実機ができる前の設計初期段階で、限られた設計期間内に評価するために、流体现象の本質をとらえる準第一原理的手法、実機フライト環境を忠実に再現できる手法、これらの解析を高速に実施する技術を開発する。具体的には直交等間隔格子法をベースに高精度圧縮性ソルバー、壁面形状モデル、LES 壁面モデルを開発することで、フライトレイノルズ数流れの高精度乱流解析と複雑形状まわりの高速解析を実現する。ここで開発する技術は世界的にも研究開発途上である。特に LES 壁面モデルに関しては、我が国独自の取り組みを行っており、世界に先駆けて高速・高精度乱流解析技術の実現を目指している。開発した技術を、各種制約のためこれまで設計プロセスへの組み込みが困難だった設計課題(離着陸時の最大揚力の予測、遷音速バフェットの予測)に適用し検証を行う。具体的な実施内容は以下とする。

- ▶ 直交等間隔格子法をベースとした圧縮性流体プログラム基盤の研究開発：JAXA、東北大学
- ▶ 壁面形状モデルの研究開発：JAXA
- ▶ LES 壁面モデルの研究開発：東北大学
- ▶ 設計課題への適用：JAXA、東北大、東京理科大

- b) 飛行安全性の向上に必要な非線形飛行力学モデルによる飛行制御(JAXA、東京理科大、東北大)
 乱気流や横風、翼端渦によるダウンウォッシュなど外乱を受けた飛行状況、特に失速を伴う飛行特

性の高精度予測に必要な非線形飛行力学モデルの構築および高精度空力 DB の構築を行う。加えて、これらに必要な壁モデルの高度化を進める。これにより、非線形飛行モデルに基づく制御による航空機飛行制御基盤技術の研究開発を行う。

- ▶ 非線形飛行力学モデルの開発：東京理科大、JAXA
- ▶ 高精度空力 DB の構築と航空機飛行制御基盤技術の研究開発：東京理科大、JAXA
- ▶ 高度壁モデルの開発：東北大

(3) 目標・期待される成果

航空機産業の国内生産額は、過去 5 年間で 1.1 兆円から 1.8 兆円と、年率約 5%で急成長しており、2030 年には 3 兆円を超えると期待されている。本サブ課題では、ポスト「京」の計算能力をフルに活用することにより、航空機設計の要となる空力設計技術を飛躍的に高度化することを狙っている。具体的には、従来の解析では不可能であった、離着陸時の最大揚力係数の推算と飛行限界の評価が可能なアプリケーションを開発する。最大揚力係数の推算やその向上を図ることができれば、離着陸滑走距離を短くすることができ、滑走路長の短い空港にも離着陸が可能となる他、高地空港（空気密度が低い）での運航柔軟性、空港周辺への騒音低減（上昇・下降の勾配が大きく取れるので Noise Foot Print とよばれる、航空機の離着陸時に騒音の影響を受ける地域が狭くなる）などの、航空機の商品価値の大幅な向上が期待できる。また、シミュレーションによる飛行限界の評価が可能となれば飛行試験の一部をシミュレーションにより代替することが可能となり、航空機の開発期間の大幅な短縮と開発コストの大幅な削減に繋がる。さらに、上記の数値シミュレーションを用いて、航空機空力特性に関して、これまで取り扱いが困難だった非線形空力特性を含めた高精度な空力データベースを構築し、それを活用した飛行制御の高度化により航空機の安全性向上が期待できる。具体的に解釈すべき課題、および、開発するアプリケーションを以下に記す。

a) 離着陸時および実機詳細形状対応の高速・高精度乱流解析技術の確立

従来の数値解析では評価できなかった設計課題（離着陸時の最大揚力の予測、遷音速バフェットの予測など）を、精度、解析時間の両面から設計に使えるレベル評価可能なアプリケーションプログラムを開発する。

(i) アウトプット成果

①平成 29 年度終了時

下記の最終目標が達成できる基盤コードのプロトタイプを完成させ、簡易モデルにより要素技術を実証する。

②本格実施フェーズ終了時

航空機実機詳細形状に対する離着陸時の最大揚力の予測、遷音速バフェットの予測が可能となるアプリケーションプログラムを開発する。目標達成については、最終的にポスト「京」で実施する解析規模である約 8,000 億の格子が実機複雑形状に対して生成できることで確認する。また最大揚力の予測精度および遷音速バフェットの予測精度に関しては単独翼などを対象とした解析結果を既存の風洞実験値と比較することにより、解析精度を確認する。

③ポスト「京」運用開始 5 年後

約 8,000 億の計算格子を用いて、航空機実機詳細形状に対して数値シミュレーションを実施

し、フライト試験データと比較することにより、数値シミュレーションの解析精度を検証する。

(ii) アウトカム成果

①ポスト「京」運用開始 5 年後

上記の数値シミュレーションを利用した、新しい航空機設計プロセスを提案し、その実用化を進める。

②ポスト「京」運用開始 10 年後

上記の設計プロセスを実用化する。

b) 飛行安全性の向上に必要な非線形飛行力学モデルによる飛行制御

非線形飛行力学モデルを構築する。

(i) アウトプット成果

①平成 29 年度終了時

非線形飛行力学モデルのための基本検討を実施し、予備的な解析を実施する。

②本格実施フェーズ終了時

種々の条件下における航空機の空力特性を計算し、非線形飛行力学モデルのデータベースとして纏める。このデータベースを用いて、失速時等の飛行予測を行い、従来の線形飛行モデルによる予測に対する優位性を実証する。データベース作成に必要な計算ケース数は 250 ケースを想定。各ケースで数千万点規模の計算を行う。「京」を用いた場合、1,500 ノードを約 4 ヶ月占有する程度の資源量が必要となる。

③ポスト「京」運用開始 5 年後

企業との連携により非線形飛行モデルに基づく実機航空機の航空機飛行制御基盤技術を実証する。

(ii) アウトカム成果

①ポスト「京」運用開始 5 年後

非線形飛行モデルに基づく航空機飛行制御技術を提案する。

②ポスト「京」運用開始 10 年後

新たな航空機飛行制御技術を実用化する。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

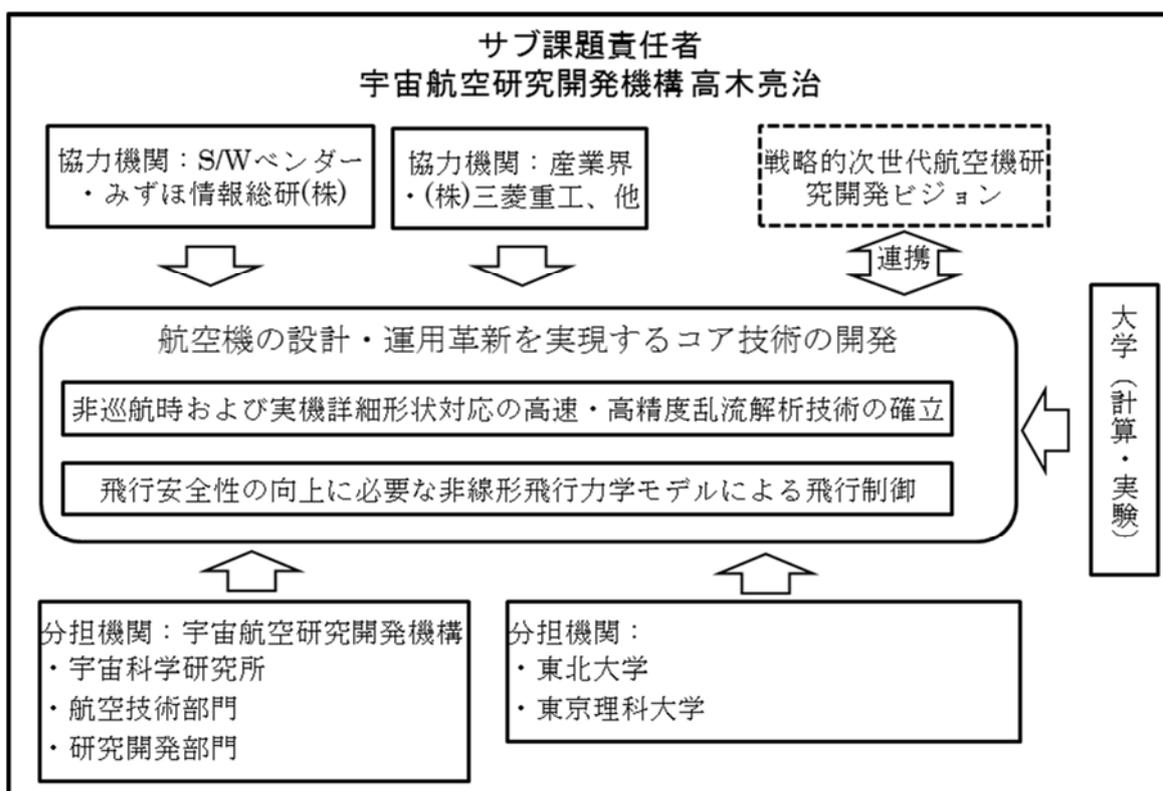
「京」では高解像度 LES 解析により、風洞試験に対応する、実機形状を簡略化したサブスケールモデルや $Re=10^6$ の 3 次元翼型モデルなどの要素モデル、および、設計点である巡航時の定常解析に対する詳細解析が可能であり、設計要求である全機空力抵抗予測精度 0.3%程度を実現した。しかし、実機スケール ($Re=10^7$ の実機モデル) の詳細解析は実現できず、特に、航空機の空力設計上重要度の高い、非巡航時 (離着陸时空力、バフエット、失速、離着陸時騒音など) の詳細解析にはポスト「京」が必要となる。「京」での実績より、実機スケールの詳細解析では 8,000 億点の計算格子を用いて 10,000PF 時間が必要と予測している。

(5) 実施体制

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は航空宇宙分野における大規模数値解析に関する、我が国における

中核機関であると同時に、「京」での研究開発実績（HPCI 戦略プログラム分野 4）も有する。JAXA 内部の関連部署（宇宙科学研究所、航空本部、研究開発部門）が連携すると同時に JAXA を中核として関連大学や民間協力機関、外部協力機関、特に文科省の「戦略的航空機研究開発ビジョン」との連携を積極的に進めながらポスト「京」を活用したコア技術の開発を進める。産業界との連携に関しては実際に航空機の開発を行っている三菱重工（株）と密接な連携を行う。具体的には単なる検証データの提供のみならず、実設計を革新するための各種要求要件の検討・整理、開発したツールの実設計での有効性検証などを協力して実施する。また、重点課題⑧内のサブ課題間では、基盤的な計算科学技術や共通で使えるプリポストツールの開発・利用などを連携して行う。

コデザインに関しては、重点課題⑧のターゲットアプリで得られた知見を基に、既存プログラムへの適用および評価を実施する。そこで得られる成果を本サブ課題で新たに開発するアプリケーションプログラムのデータおよびループ構造、各種アルゴリズムの設計に反映させる。



サブ課題 D 実施体制

2-5. サブ課題 E. 新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発

(1) 目的・意義

溶接工程は、工業製品の製造の根幹を支え、生産時間やコストに大きく影響を与える工程である。日本の基幹産業である自動車を始め、クレーン、圧力容器、タービン、配管、LNG タンクなどの製造では、様々な鋼板の溶接が行われている。

今日の工業製品の設計・製造において CAE の利用は不可欠である。しかし、複数部品の組み立てにおける計算規模の大きさや溶接部の現象の複雑さのため、現状では CAE を十分に適用できていない。

適切な溶接順序の探索における精度が低下したり、逆ひずみ量の決定に多くの時間を要したりする。そのため、溶接工程は依然として熟練工によるトライアル・アンド・エラーに頼っている。

一方、工業製品の製造では、環境負荷低減や燃費向上のために軽量化が強く望まれており、新材料の利用が広がっている。したがって、日本の産業競争力を国際的に強化するためには、新材料に対応した溶接法の開発などに、「ものづくり基盤」の高度化が重要である。

本研究は、上述の社会的な課題を踏まえ、溶接工程における溶接順序探索の高精度化、逆ひずみ量推定の高速化を目的とする。溶接工程における CAE 技術の高精度化・高速化によって、以下の三つが期待される。

- 生産時間の短縮やコストダウンに大きく貢献
- 熟練工によるトライアル・アンド・エラー依存からの脱却
- 溶接法の高度化につなげ、高張力鋼や超高張力鋼などの新材料利用を促進

本研究の目標は、ポスト「京」を用いて、自動車／重機械フレームの溶接工程で発生する全体規模での永久変形を予測することである。溶接工程では、数 m のスケールを有する自動車／重機械フレーム全体規模において、数 mm のスケールの溶接部が数千箇所存在する。また、溶接部で発生する溶融では数 μm スケールの現象を考える必要がある。自動車／重機械フレーム全体への残留応力の影響を高精度に予測したり、寸法精度を十分に評価したりするには、溶接シミュレーションにおいて数千億～数兆要素の解析メッシュが必要であり、かつ、熱弾塑性・相変態の大規模強連成解析の高速計算や大規模固有ひずみ解析の高精度計算が必須となる。ポスト「京」を用いれば、以下の特長を有する高度溶接シミュレーション技術を開発することが可能であり、従来の溶接シミュレーションの課題を解決できる。

- 溶接条件制御や溶融部の水素脆化の評価が可能な高精細メッシュを使用できる。
- 大規模強連成解析(熱弾塑性・相変態)、大規模固有ひずみ解析ができる。
- プレス成形シミュレーションも行うことができ、計算結果として得られた寸法精度を溶接シミュレーションの初期条件に使うことができる。
- 次世代溶接法(摩擦攪拌溶接など)に対応でき、溶接法の高度化に繋げる。

本研究では、「京」で実績があるオープンソース並列有限要素法ソフトウェア「FrontISTR」を基盤として、高度溶接シミュレータを開発する。以下に記述されるような点で、本研究で開発するソフトウェアは汎用ソフトとしての先進性と実用性の両方を兼ね備えており、市販コード(ADVENTURECluster、Abaqus、LS-DYNA、JSTAMP など)と差別化される。

- 拡張性の高い並列 FEM 共通基盤ライブラリ上での構造解析
- 機能の実装および先進的な並列計算機能
- 可搬性の高いソースプログラムであり、非線形解析(大変形・材料非線形・接触問題の静解析・動解析、固有値解析、熱伝導解析)を様々な計算環境で実行可能

また、「溶接シミュレータとしての先進性」として、

- アセンブリ／接触問題の大規模解析が可能な並列反復法

- 上記のソルバーと親和性の高い並列領域分割法
- 数 m 規模の解析領域に対して、数 μm の精度の予測が可能。このことにより、熟練工による多数回のトライアル・アンド・エラーがなくなり、試作レスの製造を実現、新材料を用いた溶接法の高度化を促進
- プレス成形時の寸法精度が溶接条件の適用範囲や継手の性能に影響するため、プレス成形と溶接の一連の工程を一つのプリ・ソルバー・ポストで解析可能

が挙げられる。

▶ 溶接におけるジブクライミングクレーンのマスト全体規模の永久変形予測
本溶接を行うときの「熱反りによって生じる溶接隙間量を小さくできる溶接順序」を高速かつ高精度に探し出す



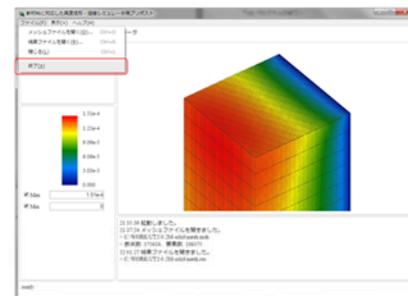
クレーンのマスト
(http://www.iuk.co.jp/howto/t_crane.html)

▶ 溶接におけるラダーフレーム／サスペンションメンバ全体規模の永久変形予測
「溶接解析ソフト(固有ひずみ法ソフト)を使用して逆ひずみ量を検討するのに要する時間(40日)を短縮化(10分~20分程度)する



自動車のラダーフレーム

超大規模・高精度強連成解析ソルバーを持つシミュレータの開発
→溶接工程における系全体規模での永久変形の予測を実現



一連の工程を解析可能なプリ・ポストプロセッサの開発
→プレス成形解析から溶接解析に至るワークフローをサポート

サブ課題 E の社会的意義

(2) 実施内容

a) 開発内容

「京」コンピュータで実績のある並列構造解析ソフトウェア「FrontISTR」を基盤として、新材料に対応した高度溶接シミュレータを開発する。開発内容は、

- FrontISTR ベースの超大規模・高精度強連成解析ソルバー
- 一連の工程を解析可能なプリ・ポストプロセッサ

である。

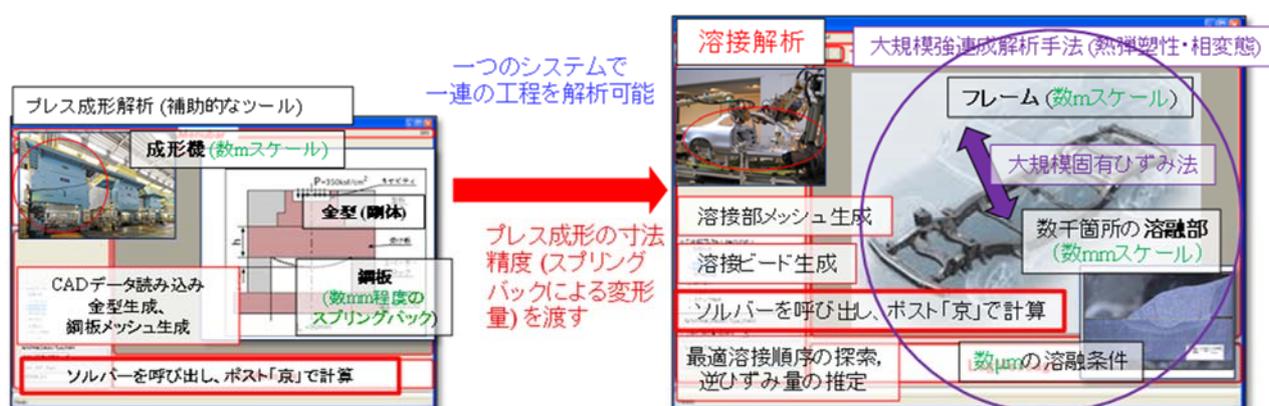
FrontISTR ベースの超大規模・高精度強連成解析ソルバーとして、

- (i) アセンブリ／接触問題の大規模解析が可能な並列反復法
- (ii) 大規模強連成解析手法(熱弾塑性・相変態)
- (iii) 大規模固有ひずみ法

を開発する。自動車／重機械フレームに存在する溶融部の解析には、数 m 規模の解析領域に対して、数 μm の要素を用いることが必要であり、全体の要素数は数千億～数兆(解析メッシュの粗密あり)となる。これまでの経験上、「京」では 1 日で 1,000 億要素程度の静解析が限界である。(ii) の解析手法では、自動車／重機械フレームの解析モデル全体と溶融部を一括して高精度に計算可能である。固有ひずみ法は、溶接近傍での計算結果から求めた固有ひずみを解析モデル全域に与えて、全域の変形を高速に

近似計算する解析手法である。(iii) の解析手法では、溶接近傍領域を広げることによって、従来の固有ひずみ法より高精度な高速計算を実現する。(ii) は解析者寄りの解析手法であり、(iii) は設計者寄りの解析手法であるが、目的に応じて使い分けることができる。(ii) と (iii) の解析手法の開発において、高張力鋼板（ハイテン）や超高張力鋼板（ウルトラハイテン）などの新材料に対応した材料構成則（Hill モデル、YLD モデル、Y-U モデルなど）も整備する。

一連の工程を解析可能なプリ・ポストプロセッサでは、プレス成形解析から溶接解析に至るワークフローをサポートする（下図参照）。このことを、既存のプリプロセッサ・ポストプロセッサへ溶接に特化した機能を追加することで実現する。実機の詳細形状から六面体 1 次要素や四面体 2 次要素を生成し、合金設計データベース「Thermo-Calc」と連動しながら物性値を設定し、ソルバーも呼ぶことができる。また、溶接線（ビード）部の複雑なメッシュ生成にも対応する。



b) 開発計画

各年度に対する実施内容は、アプリ開発計画を以下の (i) ~ (iv) に示す（※分担機関は、東京大学大学院のみである）。

(i) 2015 年度 - 2016 年度：【開発】

- ・ Code Verification (アプリのコアとなるコード作成)
 - アセンブリ／接触問題の大規模解析が可能な並列反復法
 - 並列領域分割法
 - 大規模強連成解析手法／大規模固有ひずみ法
- ・ プリプロセッサ・ポストプロセッサ (仕様、設計、開発)

(ii) 2017 年度：【精度検証とパフォーマンスの評価】

- ・ ベンチマーク問題での Calculation Verification
 - 小規模溶接モデル (市販コードとの比較)
- ・ ポスト「京」に対する最適化

(iii) 2018 年度：【部品規模での妥当性検討とパフォーマンスの評価】

- ・ 従来の溶接解析結果との比較
- ・ 実測値との比較

(iv) 2019 年度：【全体規模での実証解析とパフォーマンスの評価】

- ・ 車両全体モデル
- ・ 重機械フレーム全体モデル

・実測値との比較

(3) 目標・期待される成果

溶接は重要な製造工程の一つであるが、それを取り巻く一連の製作工程（単材加工、鉄構組立、仮付け溶接、本溶接）は従来、経験により管理されており、必ずしも最適な製作工程が実現されているわけではない。本サブ課題の目的は、ポスト「京」の計算能力を駆使する大規模な溶接シミュレータを開発し、溶接を中心とした一連の製作工程の総合的、かつ、高精度な予測を実現することにより、製作工程の抜本的な高効率化を実現することにある。具体的には、オープンソース並列有限要素解析ソフトウェア「FrontISTR（フロント・アイスター）」をベースとして、溶接工程における溶接順序の探索／逆ひずみ量の予測を高速、かつ、高精度に実施することが可能な高度成形・溶接シミュレータを開発する。本シミュレータができれば、プレス成形後の変形や残留応力を考慮し、数百パス必要な重機器の溶接の指針を高速に探し出すことができるようになる。たとえば、ラダーフレームの溶接では、従来の溶接解析ソフトウェアを使用して逆ひずみ量を検討するのに1ヶ月以上掛かっていたが、本シミュレータを利用すれば数十分以内に検討することが可能になる。また、溶融部での接触状態を数 μm の超高解像なメッシュによりシミュレーションできれば、従来の予測技術では数十%の誤差を有していた溶接における隙間量や応力解放・分配量を、数%の誤差で予測することが可能となり、熟練者でなくとも、溶接によって母材に何が起こるかを知ることが可能となり、製作工程の効率化と製品の信頼性の向上に対して大きく貢献できる。

開発するシミュレータは以下の特長を有する。すなわち、(1) 固有ひずみ法も開発を進めてはいるが、これまで利用されてきた固有ひずみ法ではなく、熱弾塑性解析によって解析領域全体を計算できること、(2) 自動車／重機械フレーム全体規模（数 m）の解析領域に対して、溶融部の接触状態が高解像度（数 μm ）に計算可能であること、(3) 温度場（熱伝導）と変位（弾塑性クリープ変形）の強連成解析が可能であることである。数 m 規模の解析領域に対して、数 μm の解像度を担保するには、数千億要素から数兆要素を用いた有限要素解析が必要となり、このようなシミュレーションはポスト「京」の計算能力により始めて実現されるものである。

a) アウトプット成果

①平成 29 年度終了時

高度成形・溶接シミュレータの基本アルゴリズムの開発とシミュレータへの実装を行い、入熱による熱弾塑性解析に関して、Abaqus（熱弾塑性解析を得意とする市販の構造解析ソルバー）や JWRIAN（大阪大学接合科学研究所が開発した溶接シミュレーションソフトウェア）などの計算結果と比較し、計算精度を検証する。また、シミュレータの並列計算性能を向上させ、その評価を基に、数 m の母材の溶融部を数 μm メッシュで解像する数千億要素から数兆要素を用いた熱弾塑性有限要素法解析が実現できる目途を立てる。

②本格実施フェーズ終了時

本サブ課題のターゲット問題である、(1) ジブクライミングクレーンのマスト全体規模の永久変形予測、(2) ラダーフレーム／サスペンションメンバ全体規模の永久変形予測に開発したシミュレータを適用し、部品規模の溶接解析の計算精度を従来手法による結果と比較し、開発したシミュレータの優位性を示す。全体規模（数 m）の溶接解析において、溶融部に数十 μm ～数百 μm オーダーの高解像

度のメッシュを使用し、実測値に対する固有力の誤差を従来ソフトの数十%から数%に減少できることを示す。また、数百パスでの隙間量や応力解放・分配量の計算に必要な時間を数日から数時間に短縮できることを示す。

③ポスト「京」運用開始 5 年後

高度溶接シミュレータを利用して、数 μm の溶接条件の制御が可能になる。計算結果を溶接線メッシュ生成へフィードバックすることによって、溶接順序だけでなく、最適な溶接範囲も予測できるようにする。継手の接合に対する詳細な評価、プレス成形時の寸法精度が溶接工程へ及ぼす影響を検討できるようになる。

b) アウトカム成果

①ポスト「京」運用開始 5 年後

参画している企業における高度溶接シミュレータの利用を拡大し、熟練工によるトライアル・アンド・エラーに依存していた溶接工程の見直しを実施し、生産時間の短縮やコストダウンにつなげる。高度溶接シミュレータを利用して造られた最初の製品を市場に出す。高度溶接シミュレータを摩擦攪拌溶接などの次世代溶接法へ適用し、製品の生産性を向上につなげる。

FrontISTR 研究会が中心となり、素材メーカ、加工メーカ、重工メーカ、学会の研究会などが協力し、溶接コンソーシアムを組織し、定期的な活動を行う。活動の目的は、高度溶接シミュレータの機能の追加・改善、メンテナンス、サポート、解析例題の蓄積などである。溶接コンソーシアムの立ち上げ準備は、本重点課題の本格実施フェーズ終了時までに行う予定である。

②ポスト「京」運用開始 10 年後

高度溶接シミュレーションを用いて、製品全体の疲労強度評価を実施する。シミュレーション結果を材料開発へフィードバックさせ、強度と成形性を両立させた材料開発に役立てる。また、溶融箇所の入熱、相変態、水素脆化などの微細な溶融現象の詳細なメカニズムの解明につなげ、溶接シミュレーションのさらなる高精度化を目指す。

(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

a) 「京」でできていること

「京」の 8,192 ノード (65,536 コア) を使用して、FrontISTR による 7,541,380,311 自由度の電子基板モデルの熱応力解析を実施した。有限要素解析の線形ソルバーとして、反復法 (前処理付き CG 法) を使用した。計算時間は、Hybrid 並列方式で 21.7 時間、Flat MPI 並列方式で 13.7 時間であった (対ピーク性能比 4.2%)。

b) ポスト「京」でなければできないこと

ポスト「京」を利用すれば、「京」より複雑な非線形連成現象の動解析が可能となり、2 桁大きな規模の問題を解くことが可能となる。

(5) 実施体制

並列構造解析ソフトウェア「FrontISTR」の開発を実施した東京大学を中核機関として高度溶接シミュレータを開発し、利用・評価フェーズにおいては民間協力機関の製造セクションと連携する (下図参照)。また、サブ課題 F の FrontCOMP とサブ課題間の連携も行う。サブ課題 F では、FrontCOMP の熱可塑性樹脂の解析に対して、本サブ課題 E で開発する大規模強連成解析手法 (熱弾塑性・相変態)

の成果の一部を利用する。開発されたアプリは、他分野、他プロジェクトとの連携にも展開する。



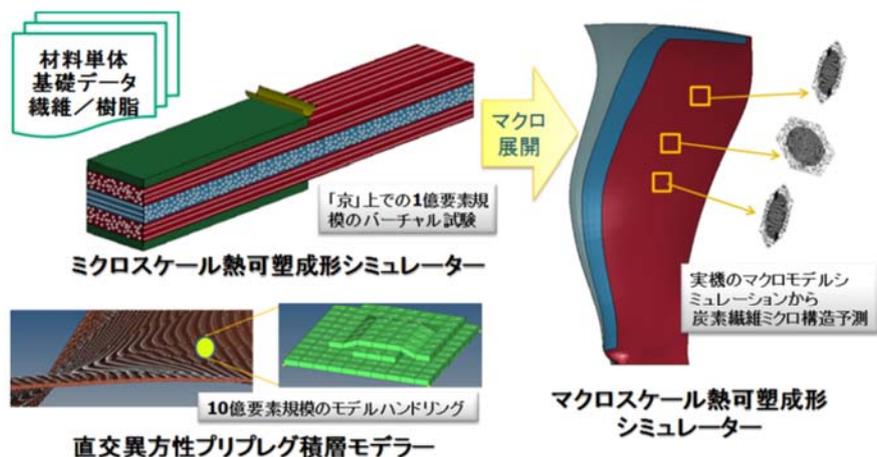
サブ課題 E 実施体制

2-6. サブ課題 F. マルチスケール熱可塑 CFRP 成形シミュレータの研究開発

(1) 目的・意義

ジェットエンジンファンブレードや自動車ボディの CFRP (炭素繊維強化プラスチック) 化において、成形性の高さから薄さ 0.1 mm 程度の熱可塑プリプレグシートを積層し加熱成形する手法が有望視されている。プリプレグシートの形状や積層構成を設計変数とする高度な最適設計に期待が寄せられているが、設計と製造が密に連動してしまうこのような状況が CFRP の強度部材への適用を遅らせており、正確な強度評価すら実施困難な状況である。エクサスケール規模の計算インフラ整備により、ようやくプリプレグシート 1 枚ずつを正確に有限要素モデル化した成形シミュレーションが可能となり、現状を打開する技術イノベーションが実現するとの期待が高まっている。本研究開発では、プリプレグシート 1 枚ずつを正確に有限要素モデル化し、熱可塑 CFRP 成形プロセスを精密に辿る成形シミュレータを開発し、成形後の繊維配置を正確に予測し、合理的な強度評価に基づく高度な最適設計を実施可能とすることを目標とする。

目標とするシミュレータの完成により、製造の誤差まで考慮したうえでの CFRP 製品の設計の合理化が飛躍的に進むと予想される。すなわち、製造と破壊試験を繰り返す試行錯誤により進めざるを得なかった CFRP 製品の開発に、合理的強度評価に基づく設計技術を導入することが可能になる。自動車ボディやジェットエンジンファンブレード等、低環境負荷の要請の下、軽量化を推進せざるを得ない輸送機器において、開発目標のシミュレータは高付加価値製品を生み出す原動力となると期待される。



熱可塑性成形シミュレーション技術を開発

→ CFRP製部品の製造技術に関して、設計および製造プロセスの最適化を可能にし、大型熱可塑性国内メーカーの優位性を確立する

サブ課題 F の社会的意義

(2) 実施内容

炭素繊維と樹脂を区分したミクروسケールでの成形シミュレーションを基礎とするマルチスケールシミュレーション手法の開発が中核となる。試験片レベルの実験と「京」を用いたシミュレーション結果を照合し開発した手法の予測精度を向上させる。さらに、試験体相当の部材に関する成形シミュレーションをエクサスケールコンピュータにより実施し、実機レベルでも正確な製造シミュレーションに基づく製造欠陥の予測まで可能であることを実証する。開発項目は次の通り。

a) ミクروسケール熱可塑性成形シミュレータの開発

炭素繊維と樹脂を区分したマイクロモデル設定を機軸とし、既に関済済みである熱硬化性樹脂 CFRP 成形シミュレータ **FrontCOMP_cure** をベースとするソフトウェア開発を行う。その改変の中心は温度解析コードおよび相変化による変形解析コードを熱硬化樹脂から熱可塑性樹脂対応へ変更することである。開発にあたってはサブ課題 E の接触変形・熱弾塑性・相変態の連成解析手法の開発と連携を図る。実験データとの照合により樹脂の温度依存材料パラメータを決定する手法も確立する。ソルバーの根幹部分はサブ課題 E 同様 **FrontISTR** にあり、**FrontISTR** に関するコデザインの成果を取り込んで開発の効率化を図る。

b) マルチスケール展開によるマクروسケール熱可塑性モデルの開発

開発したミクروسケール熱可塑性成形シミュレータを「京」上で運用し、1枚1枚のプリプレグシートに対して、樹脂の温度依存性を考慮した直交異方性連続体としてのマクロモデルの材料パラメータを決定する。試験片を用いた熱可塑性成形実験データとの照合によりモデルの精度を向上させる。

c) マクروسケール熱可塑性成形シミュレータの開発

開発したマルチスケール手法をソフトウェアとして完成させるため、① 初期プリプレグシート積層構成を正確に有限要素モデル化するメッシュャーを開発した上で、② 直交異方性連続体マクروسケールモデルによる接触大変形問題と熱伝導問題を強連成問題として解く成形シミュレータを開発する。開発したソフトウェアの実証のため、試験体の試作と検証計算をエクサスケールコンピューティ

ングにより実施する。

(3) 目標・期待される成果

熱可塑 CFRP は比強度が高く、また、熱硬化性 CFRP よりもはるかに生産性が高いため、航空機のファンブレードや自動車のボディなどの材料として、その実用化に大きな期待が寄せられている。しかし、現状では、形状精度と強度信頼性を確保するための、シミュレーションを基軸とする有効な方法論は確立されておらず、試作機を製作しては破壊試験を繰り返すという、試行錯誤により設計しているため、材料の実用化や普及を図る上での大きな課題になっている。CFRP をマクロ異方性材料として扱う、既往のシミュレーションソフトウェアを流用した問題解決も試みられているが、材料モデルの正確さを欠くため、このような設計手法は十分に有効なものとはなっていない。この現状を打開するため、本サブ課題では、成形後の形状誤差、CFRP 材料内部の繊維配置のずれ、および、ボイドなどの欠陥発生などを正確に予測可能なシミュレータを開発し、材料の実用化を加速する。具体的には、CFRP 材料を構成する基本単位である炭素繊維 1 本 1 本と樹脂を区分して取り扱う、ミクロスケールの正確な材料シミュレーションモデルを構築することで、CFRP 材料の熱可塑変形特性を正確に予測可能な熱可塑 CFRP 成形シミュレーションを可能にする。このことにより、シミュレーション結果を活用した設計および製造の高度化を推進するとともに、試作回数を激減させ、開発コスト削減に貢献する。本サブ課題はアプリケーションの主要な応用先として、前述のジェットエンジンファンブレードを想定しているが、ポスト「京」の計算能力をもってしても、炭素繊維と樹脂を区分するミクロモデルの枠組みのみで実機全体のシミュレーションをすることは不可能である。そこでまず、炭素繊維を一方向に配して熱可塑樹脂でシート状にしたプリプレグシートに対して前記のミクロモデル・シミュレーションを実施し、その結果を基にして、プリプレグシートに関して精緻な材料マクロモデルを構築する。このようにして得られた、プリプレグシートの精緻な材料マクロモデルを用いて実機全体をモデル化し、成形プロセスを解析する。なお、ミクロモデルによるシミュレーションはプリプレグシートの一部に対して実施すればマクロモデルの構築は可能であるが、ファンブレードは厚み 100 μm のプリプレグシートが 200 層程度積層された構造になっており、1 ケース当たりのファンブレードの成形シミュレーションは 4,000 万自由度規模の接触大変形・熱伝導有限要素法解析を実施する必要がある。設計に適用するためには、炭素繊維の配向・密度やプロセス条件などを変えた数 100 ケースのシミュレーションを実施する必要があるためポスト「京」を駆使して始めて解決される課題である。

a) アウトプット成果

①平成 29 年度終了時

熱可塑樹脂の機械的性質および伝熱特性の温度依存性とひずみ速度依存性、さらには強度の非線形性を正確にモデル化し、熱可塑樹脂／炭素繊維を区分するミクロスケールモデルを用いた、高精度の熱可塑 CFRP 成形シミュレータを開発する。さらに、熱可塑樹脂／炭素繊維を均質の材料として扱う、プリプレグシート単位に対応する、精緻なマクロスケールモデルを構築し、成形プロセスを解析するために必要な「接触大変形解析」と「接触熱伝導解析」の連成解析手法を確立し、ソフトウェアとして実装することにより、マルチスケール熱可塑 CFRP 成形シミュレータの開発を完了させる。

②本格実施フェーズ終了時

試験体レベルでの熱可塑成形実験とシミュレーション結果を照合し、開発したマルチスケール熱可塑 CFRP 成形シミュレータの精度を検証する。ジェットエンジンファンブレードあるいは自動車ボディに関して、実寸をスケールダウンしたモデルを用いて「京」レベルの計算機にて成形シミュレーションを実施し、ポスト「京」を活用することで得られる効果を推定し、アプリケーション開発の目標達成を判断する。また、本シミュレータの適用により、ジェットエンジンファンブレードの開発および自動車ボディ開発のために有効な知見を見出す。

③ポスト「京」運用開始 5 年後

ジェットエンジンファンブレードの熱可塑成形シミュレーションをポスト「京」により実施し、「高効率軽量ジェットエンジンファンブレード」や「超軽量車体」の開発へ貢献できることを実証する。

b) アウトカム成果

①ポスト「京」運用開始 5 年後

開発したシステムを活用し、ポスト「京」によるジェットエンジンファンブレードや「超軽量車体」の設計および製造プロセスの最適化を実施し始める。

②ポスト「京」運用開始 10 年後

大型熱可塑 CFRP 製部品の製造技術に関して、国内メーカーの優位性を確立する。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

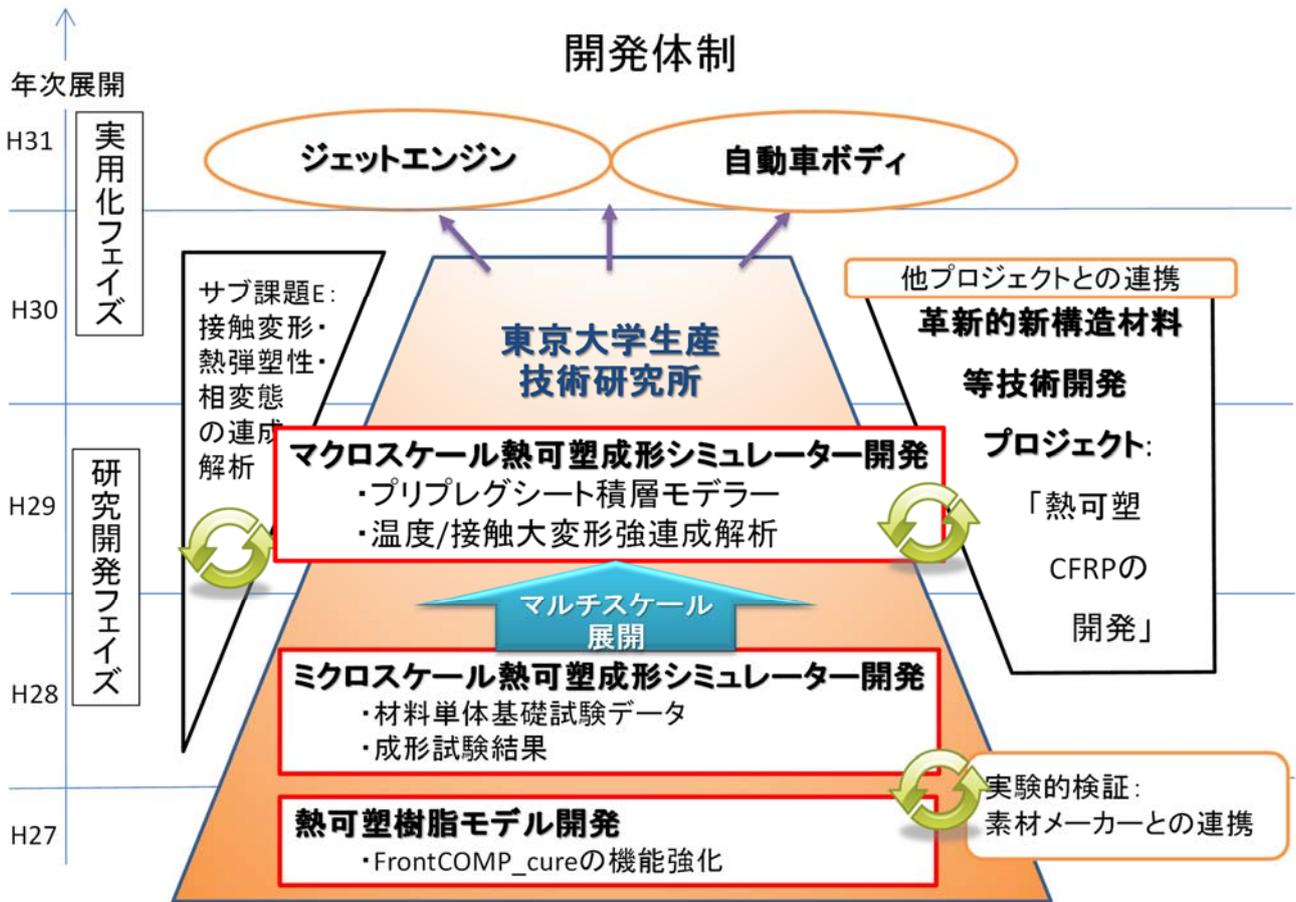
「京」では、ファンブレードを形成するプリプレグシートを数枚まとめて直交異方性体とするラフなマクロモデルによる構造解析が可能。ポスト「京」では、ファンブレードを形成するプリプレグシートを 1 枚ずつ正確にモデル化して行う熱可塑成形シミュレーションと構造解析まで実施可能となる。本研究開発では、熱可塑 CFRP の成形解析を非線形大変形と熱伝導の強連成問題として実行する手法を確立する。市販の海外製ソフトウェア (PAM-STAMP、PAM-FORM など) では、現状、大変形接触問題解析を流用した、材料モデルの合理性を欠くシミュレーションのみ可能となっており、ポスト「京」を用いた上記の解析により、それらに対する本研究の優位性を確かなものとする。

(5) 実施体制

東京大学生産技術研究所を中核として研究開発を進める。研究開発フェーズにおいては開発したアプリケーションの検証を、経済産業省：革新的新構造材料等技術開発プロジェクト「熱可塑 CFRP の開発」における実証的課題として位置付け、アプリケーションの展開を行う。開発後のアプリケーションを公開し、中部地区や北陸地区に形成された CFRP 材料研究開発クラスターでの活用に供し、オールジャパンでの技術力向上に貢献する。

東京大学生産技術研究所における実施体制は以下の通り。

| | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-----|------|
| 吉川 暢宏 | 教授 | 担当責任者 | 小笠原朋隆 | 研究員 | 実施担当 |
| 森田 直樹 | 助教 | 実施担当 | 呉奇 | 研究員 | 実施担当 |
| 針谷 耕太 | 技術専門職員 | 実施担当 | | | |



サブ課題 F 実施体制

3. 採択時の留意事項への対応状況

| 項 | 対応 (平成 29 年 12 月時点) |
|---|--|
| <p><指摘事項-1></p> <p>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、最終的には設計支援までつながるように計画を具体化すること。また、ポスト「京」より先まで見据えた上で、ポスト「京」で実現することを明確にすること。</p> | <p>->準備研究期間を含めたこれまでの 2 年余りに及ぶ研究開発において、合計 7 回の全体推進会議、ならびに、6 回の諮問委員会を開催するとともに、サブ課題毎、あるいは、サブ課題間の横断的な連携開発会議において、目標の定量化や達成時期の明確化に努めてきた。また、その過程において、常に産業界からの意見も反映し、設計支援に繋がるアプリケーションの開発に努めている。なお、本重点課題が終了する時点でポスト「京」の全系が稼働しないことが明確になったため、サブ課題毎に目標達成の確認方法を検討した。</p> <p>->重点課題⑧では、富士通、NEC、インテル、IBM、およびマイクロソフトなどハードウェアベンダとも密接に連携することにより、ポスト「京」以降の CPU や計</p> |

| | |
|---|--|
| | <p>算機の動向に注視しながらアプリケーションの開発を実施している。特に、ポスト「京」の時代以降、産業界で主流となると思われる計算機（特に、CPU）を想定しながら各サブ課題でアプリケーションの開発を進めている。</p> |
| <p><指摘事項-2> 相乗効果が期待される他プロジェクト等と効果的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。</p> | <p>->サブ課題 B に関して、2016 年 3 月末に、自動車会社 8 社、サプライヤー 3 社から構成される自動車次世代 CAE 技術開発に関するコンソーシアムを組織することが合意され、2017 年 11 月に設立され、産業界と連携してアプリケーションの開発を進めている。</p> <p>->サブ課題 C に関して、2016 年 10 月 1 日に一般社団法人ターボ機械協会内に、民間企業 32 社、大学等研究機関 15 機関 26 研究室からなる、「ターボ機械 HPC 実用化分科会」を組織し、アプリケーションの連携開発と開発したアプリケーションの実用化を推進している。</p> <p>->サブ課題 D に関して、2014 年 8 月 19 日に公表された文部科学省次世代航空科学技術タスクフォース「戦略的次世代航空機開発ビジョン」に協力するとともに、この結果を踏まえて、キラーアプリケーションの開発を進めている。</p> <p>->重点課題⑥と重点課題⑧のアプリケーション開発は共通技術要素が多いため、「アプリケーション連携開発会議」を設置し、常に最新情報を共有するとともに、ライブラリ等を共有化して開発を進めている。</p> |
| <p><指摘事項-3> 変化の早い産業界の状況を踏まえ、将来のニーズも見据えながら、適宜扱う課題の優先順位と構成を検討し、柔軟なプロジェクト推進を可能とする仕組みとすること。</p> | <p>->市販ソフトウェアでは実現不可能であり、かつ、産業界の将来的なニーズの大きいものを厳選して、各アプリケーションの開発を進めている。また、開発の進捗状況ならびに産業界からの期待大きさを反映し、研究費や「京」のリソースの配分を実施している。たとえば、本重点課題は合計 6 つのサブ課題から構成されているが、2017 年度にはサブ課題 C には全体の約 56% の「京」リソースを配分している。</p> |
| <p><指摘事項-4> アプリケーション開発体制については、共通基盤とそれ以外とを明確</p> | <p>->指摘事項-3 への対応に言及したとおり、研究リソースに関しては産業界からの期待の大きさや実現可能性を</p> |

| | |
|--|---|
| <p>にし、リソースを効果的に配分することのできる体制となっているか見直すこと。また、開発したアプリケーションを産業界に広く展開していくために、ユーザの利用環境や利用イメージを意識するとともに、市販アプリケーションとの差別化を明確にして開発に取り組む具体的な方針を明確にすること。</p> | <p>考慮し、かなりの傾斜配分を実施している。</p> <p>->市販アプリケーションとの差別化に関しても上記のとおり、基本的に市販のアプリケーションでは解析不可能であり、かつ、産業界からの将来ニーズの高い解析機能を具備したアプリケーションの開発を実施している。その際、産業界ではポスト「京」の全系を用いるような大規模解析はすぐには実現できないことを念頭に、入念な実用化計画を策定し、それに沿ったアプリケーションの開発を実施している。</p> <p>->サブ課題 A において、設計変数のパラメトリックスタディなど、ユーザの実利用イメージを想定した、設計プラットフォームを開発しており、重点課題⑧のほぼすべてのキラーアプリケーションはこのプラットフォーム上で利用することが可能になるように開発を進めている。</p> |
| <p><指摘事項-5></p> <p>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。</p> | <p>->各サブ課題において、若手人材のステップアップに留意し、たとえば、アルゴリズムの研究開発はポスドクが実施し、プログラムとしての実装やシステム整備は役務発注により対応している。特に、ポスドクにはアプリケーション開発と並行して、学会発表や査読付き論文の執筆も奨励して、本プロジェクト終了後にアカデミアや企業にステップアップできるように配慮している。</p> |

4. 中間評価における指摘事項への対応状況

| 項 | 対応 (平成 29 年 12 月時点) |
|--|--|
| <p><指摘事項-1></p> <p>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、サブ課題間の連携強化および、より優位性・独自性の高い課題を選択することを検討すること。</p> | <p>->中間評価時の自己点検において、また、その後の重点課題⑧全体推進会議および諮問委員会において、各サブ課題で達成目標の定量化、その科学的および産業上の意義の確認、目標達成判断方法について具体化した。例えば、サブ課題 B では、1 ケースのターンアラウンドタイム 12 時間で実車空力解析が可能なアプリケーションプログラムを開発し、「京」の 1/2 程度のノードを 10 日間占有利用するか、もしくはそれに相当する計算機資源を使用し、最終目標である解像度による多目的設計最適化のための解析を実施することにより、</p> |

| | |
|--|--|
| | <p>アプリケーションの効果を評価し、また、ポスト「京」の単一ノードあるいは複数ノードを用いた計算等から、ポスト「京」を用いた場合の計算速度や実施可能な計算規模を推定することにより、最終目標の達成について総合的に判断することとした。また、サブ課題 D では、これまで計算をすることができなかった、航空機実機詳細形状に対して、離着陸時の最大揚力および遷音速バフエットの予測が可能なアプリケーションを開発し、目標達成については、実機レイノルズ数から 1~2 桁落とした条件で、単独 2 次元翼を対象とした「後縁失速」「遷音速バフエット」の解析により、解析精度などを検証するとともに、最終的にポスト「京」で実施する解析規模である約 8,000 億の格子が自動的に生成できることを確認することとした。</p> <p>->サブ課題間の連携については、ターゲットアプリケーション開発に係るコデザインの成果を、コデザイン会議において、他のサブ課題（サブ課題 B、サブ課題 D、サブ課題 E）にカーネル情報を共有しており、各サブ課題の研究開発の推進には、サブ課題 B~D による CFD ソルバー開発会議、および、サブ課題 E、F による材料・構造ソルバー開発会議を開催し、サブ課題間の連携強化を図ることにより、開発効率の向上に努めている。また、サブ課題 A では、その成果の検証において、多目的設計探査に関してはサブ課題 B、および、サブ課題 C と、高速計算技術に関してはサブ課題 C と連携している。さらに、アプリケーションの技術要素が共通している重点課題⑥と連携を取り、効率的なアプリケーション開発を実施している。</p> <p>->より優位性・独自性の高い課題の選択については、採択時における指摘事項への対応状況にも記載したとおり、開発の進捗状況ならびに産業界からの期待大きさを反映し、研究費や「京」のリソースの配分を実施しており、今後もこれを実施する。なお、サブ課題 D では、上記の検討を踏まえて、「飛行安全性能向上技術の研究開発」について、次の変更を行った。当初計画していた「空港近傍の航空航路を対象とした運航シミュレーションと最適化」に係る研究開発を実施するよりも、空力に関連した要素技術の研究開発に注力する方</p> |
|--|--|

| | |
|--|---|
| | <p>が、ポスト「京」のアプリケーションの開発に当たっては有効であるため、横風やダウンバーストなど急激な気象変動時の飛行特性を表現可能な非線形飛行力学モデルなどの空力関連の要素技術を優先的に取り組むこととした。</p> |
| <p><指摘事項-2></p> <p>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。</p> | <p>->重点課題の目標の達成のため、現在アプリケーションの開発を行っているフェーズにあるが、このフェーズではアルゴリズムの研究開発および成果創出のフェーズと比較してアカデミックな成果を得ることが難しく、論文、学会発表を行うことが難しいと考えられる。今後、アプリケーションの開発が完了した段階で論文、学会発表の数は増加するものと考えられる。</p> <p>->一方、採択時における指摘事項への対応状況にも記載したとおり、本プロジェクトで雇用する研究者（ポストドク等）の将来のステップアップの観点から、ポストドクにはアプリケーション開発と並行して、学会発表や査読付き論文の執筆を奨励しており、ポストドク等（現在 12 名を雇用）を中心に、論文、学会発表による成果の公表を考えている。</p> <p>->このことを踏まえて、プロジェクトの実施期間（5 年間）で論文 80 件、学会発表 700 件を達成目標とし、今後ともより多くの機会でも成果の公表を行うことに努める。</p> |
| <p><指摘事項-3></p> <p>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。</p> | <p>->本研究開発は、ものづくりの新しい製品コンセプトを創出し、その実現性・生産性・信頼性の評価を、最先端のシミュレーション技術を用いて上流工程で高速・高精度に実施することを可能にするアルゴリズムの研究開発およびアプリケーションの開発を推進するものである。得られた成果が、産業界にとって真に有用なものとなり、産業界において遅滞なく実用的に利用されるものとするために、関連企業からなるコンソーシアムといった組織等やカウンターパートナーとなる産業界と密に連携して、産業界のニーズを反映させたアルゴリズムの研究開発およびアプリケーションの開発を実施し、そのアルゴリズムおよびアプリケーションの有用性を同時に検証しながら、プロジェクトを推進</p> |

| | |
|--|---|
| | <p>している。</p> <p>->各サブ課題では、研究開発の進捗や産業界との議論を踏まえ、ポスト「京」の利用によってはじめて実現される解析について常に議論しており、また、中間評価に際しては、代表的ユーザや当該分野の専門家を委員に迎えた諮問委員会での議論を踏まえて、定量的に目標の見直しや達成状況の確認方法を検討したが、今後さらに検討を進める。</p> |
|--|---|

(別紙1) 実施機関一覧

| | 実施機関 | 備考 |
|------------------|-----------------------------|-------------------|
| サブ課題A | 国立大学法人東京大学(加藤千幸) | 代表機関(課題責任者) |
| | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(大山雪) | 分担機関(サブ課題責任者) |
| | 国立研究開発法人理化学研究所 | 分担機関 |
| | 国立大学法人東北大学 | 分担機関(H28から) 協力機関 |
| | 学校法人東京理科大学 | 分担機関(H28から) |
| | 国立大学法人九州大学 | 分担機関(H28から) |
| | 国立大学法人東京大学 | 協力機関(H27) |
| | 国立大学法人和歌山大学 | 協力機関(H26,H27) |
| | マツダ株式会社 | 協力機関 |
| | 東海旅客鉄道株式会社 | 協力機関 |
| 横浜ゴム株式会社 | 協力機関 | |
| サブ課題B | 国立大学法人神戸大学(坪倉誠) | 分担機関(サブ課題責任者) |
| | 国立大学法人山梨大学 | 分担機関 |
| | 国立研究開発法人理化学研究所 | 分担機関 |
| | 国立大学法人豊橋技術科学大学 | 協力機関 |
| | 国立大学法人広島大学 | 協力機関 |
| | 国立大学法人北海道大学 | 協力機関(H29から) |
| | 日産自動車株式会社 | 協力機関 |
| | 株式会社本田技術研究所 | 協力機関 |
| | マツダ株式会社 | 協力機関 |
| | スズキ株式会社 | 協力機関 |
| | 三菱自動車株式会社 | 協力機関 |
| | 三菱ふそうトラック・バス株式会社 | 協力機関 |
| | 株式会社デンソー | 協力機関 |
| | 株式会社ブリヂストン | 協力機関 |
| | 横浜ゴム株式会社 | 協力機関 |
| | カルソニックカンセイ株式会社 | 協力機関 |
| | トヨタ自動車株式会社 | 協力機関 |
| | 富士通株式会社 | 協力機関(H26,H27,H28) |
| | 富士重工業株式会社 | 協力機関 |
| ダイハツ工業株式会社 | 協力機関 | |
| サブ課題C | 国立大学法人東京大学(加藤千幸) | 分担機関(サブ課題責任者) |
| | 国立大学法人九州大学 | 分担機関 |
| | 国立大学法人室蘭工業大学 | 協力機関(H28から) |
| | 国立大学法人東北大学 | 協力機関(H28から) |
| | 国立大学法人東京工業大学 | 協力機関(H28から) |
| | 国立大学法人横浜国立大学 | 協力機関(H28から) |
| | 国立大学法人豊橋技術科学大学 | 協力機関(H28から) |
| | 国立大学法人大阪大学 | 協力機関(H28から) |
| | 国立大学法人富山大学 | 協力機関(H29から) |
| | 国立大学法人岩手大学 | 協力機関(H30から) |
| | 学校法人早稲田大学 | 協力機関(H28から) |
| | 学校法人日本大学 | 協力機関(H29から) |
| | 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 | 協力機関(H28から) |
| | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 | 協力機関(H28から) |
| | 独立行政法人 国立高等専門学校機構長野工業高等専門学校 | 協力機関(H29から) |
| | 株式会社日立製作所 | 協力機関 |
| | 三菱重工業株式会社 | 協力機関 |
| | 川崎重工業株式会社 | 協力機関 |
| | 株式会社東芝 | 協力機関(H26~H29) |
| | 株式会社荏原製作所 | 協力機関(H28から) |
| | 株式会社IHI | 協力機関(H28から) |
| アルテアエンジニアリング株式会社 | 協力機関(H30) | |

| | | |
|-------|----------------------------------|-------------------|
| | 株式会社ヴァイナス | 協力機関(H29から) |
| | 株式会社神戸製鋼所 | 協力機関(H28から) |
| | 株式会社CD-adapco | 協力機関(H28) |
| | シーメンスPLMソフトウェア株式会社 | 協力機関(H29) |
| | シーメンス株式会社 | 協力機関(H30) |
| | 新日本造機株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 新菱工業株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 株式会社数値フローデザイン | 協力機関(H29から) |
| | ソニーグローバルマニュファクチャリング&オペレーションズ株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 株式会社ソフトウェアクレイドル | 協力機関(H28から) |
| | ダイキン工業株式会社 | 協力機関(H29から) |
| | 千代田化工建設株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | テラル株式会社 | 協力機関(H29から) |
| | 株式会社電業社機械製作所 | 協力機関(H28から) |
| | 株式会社デンソー | 協力機関(H28から) |
| | 東芝エネルギーシステムズ株式会社 | 協力機関(H30) |
| | NUMECAジャパン株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 日本電気株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 日本マイクロソフト株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | ビジュアルテクノロジー株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 日立三菱水力株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 富士通株式会社 | 協力機関(H29から) |
| | 富士電機株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 株式会社本田技術研究所 | 協力機関(H28から) |
| | みずほ情報総研株式会社 | 協力機関(H30) |
| | 株式会社三井造船昭島研究所 | 協力機関(H29から) |
| | 三菱重工コンプレッサ株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 三菱電機株式会社 | 協力機関(H28から) |
| | 株式会社ミツヤ送風機製作所 | 協力機関(H29から) |
| | 一般財団法人日本造船技術センター | 協力機関 |
| | 一般財団法人ターボ機械協会 | 協力機関(H28から) |
| サブ課題D | 国立研究開発法人宙航空研究開発機構(高木亮治) | 分担機関(サブ課題責任者) |
| | 学校法人東京理科大学 | 分担機関(H28から) |
| | 国立大学法人東北大学 | 分担機関(H27から) |
| | 国立大学法人東京大学 | 分担機関(H27から) |
| | 三菱重工業株式会社 | 協力機関 |
| | Imperial College London | 協力機関(H29) |
| サブ課題E | 国立大学法人東京大学(奥田洋司) | 分担機関(サブ課題責任者) |
| | 新日鐵住金株式会社 | 協力機関 |
| | 株式会社IHI | 協力機関 |
| | トヨタ自動車株式会社 | 協力機関(H26,H27,H28) |
| | 株式会社ツバメックス | 協力機関(H26,H27,H28) |
| | IHI運搬機械株式会社 | 協力機関(H29から) |
| | 大阪大学接合科学研究所 | 協力機関(H29から) |
| | 株式会社東芝 | 協力機関(H29から) |
| | 福井県工業技術センター | 協力機関(H29から) |
| サブ課題F | 国立大学法人東京大学(吉川暢宏) | 分担機関(サブ課題責任者) |
| | 株式会社IHI | 協力機関 |

公益財団法人計算科学振興財団 協力機関
 スーパーコンピューティング技術産業応用協議会 協力機関