

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

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

- **ポスト「京」重点課題⑧の実施目的と実施体制**
- **コ・デザインによるアプリケーションの開発**
- **アプリケーションの産業利用上の効果の検証成果**



ポスト「京」重点課題⑧の実施目的と実施体制

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

目的

【背景】近未来における我が国の競争力強化には、今後の社会ニーズを反映した高付加価値を有するものづくりが重要。

【目的】企画-設計段階で、製品の最適化・実働特性・成形性を統合して評価できる超高速高精度シミュレーション技術を開発し、上記に貢献する。

達成目標

- 【中間目標(H29年度)】解析手法の基本的アルゴリズムを創生して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、プロトタイプを作成し機能を検証する。
- 【最終目標(H31年度)】全体目標を達成するために必要なキラーアプリケーションに関し、周辺部分も含めたキラーアプリケーションのシステムを完成。さらに、これを実規模の事例に適用することにより機能の実証を行い、課題解決効果の見極めを実施する。

取組内容

【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の基盤を中心とし、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

- 次世代自動車の開発期間の大幅短縮と、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の向上を図る。

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: 航空機的设计・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性CFRP成形シミュレータの研究開発

- 広範な産業に普及が進む熱可塑性CFRPを対象として、マイクロ-マクロスケール解析技術を活用した、熱可塑性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。

ポスト「京」でなければならないこと

- 超高速計算技術による多数ケースの短時間解析を可能とし、現実的設計期間内での大規模多目的最適化を実現。
- 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・快適性等の多数の製品指標の空力面からの影響を高精度で評価。
- 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評価が可能。さらに、1個体10億グリッド規模の高精度RANS解析をベースとした1万個体(100個体×100世代)の多目的最適計算を実現。
- 実機スケール($Re=10^7$ の実機モデル)の詳細解析を実現。
- 「京」より2桁大きな規模の複雑な非線形連成現象の動解析が可能。
- 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性成形シミュレーションと構造解析まで実施可能。

海外や他プロジェクトとの違い・優位性

- 超高速計算技術や大規模多目的最適化技術を搭載したスパコンベースの設計プラットフォームは存在せず、世界をリード。
- 階層直交格子と超並列環境の活用で、多用されている非構造格子のボトルネックである計算モデル作成時間を飛躍的に加速。
- ターボ機械、車体、船舶に対し、数十億～数百億グリッド規模の準直接計算を可能とし、世界に先駆けて実製品で有用性実証。
- アセンブリ／接触問題の大規模解析を可能とする並列反復法。
- 熱可塑性材料成形解析を非線形大変形と熱伝導の強連成問題として解析。

期待される波及効果

- 新製品の実現性・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が可能となる。
- 本成果は大規模インフラから個別の民生製品まで広範への適用が可能であり、ものづくり産業全体の国際競争力強化への貢献は極めて大きい。
- 開発するキラーアプリ群(十数本)は、今後のものづくりに必須のツールとして実用性・有用性を兼ね備えるとともに、計算科学の学術的進歩性への寄与も大きい。

重点課題⑧全体の取り組み概要

目的・意義

【背景・着眼点】 ◆近未来における我が国の競争力強化には、社会ニーズの正確な把握による高付加価値を有するものづくりが重要。◆上流設計プロセスでの新製品・技術コンセプト構築・実現力の抜本的強化と、その具現化のための低コスト・高信頼製造技術の2本柱が必須。

【目的・意義】 ◆設計段階で、製品の最適化から実働時の特性、成形性までを統合して解析できる超高速高精度シミュレーション技術の実現が鍵。◆ポスト「京」で、ものづくりにパラダイムチェンジ(解析規模・時間の障壁除去)が起こる。

研究開発概要

【キラーアプリケーション群の研究開発】 ◆「京」・HPCI等での実績が豊富なアプリをベースとして、ものづくりに不可欠な実用的キラーアプリケーション群を重点開発。

【サブ課題の設定方針】 ◆共通基盤となる上流設計プラットフォーム、その実証のための代表的製品設計システム(3サブ課題)、今後の製造プロセスの核となる製造基盤技術(2サブ課題)の合計6サブ課題を厳選して設定。

【効率的な研究推進体制の構築】 ◆キラーアプリケーション群の一部が共通する重点課題⑥と⑧は一体的なアプリ開発体制を構築することにより、研究開発の効率化を図る。

ポスト「京」の戦略的活用

【ポスト「京」活用の重要度・投資効果等】 ◆「京」利用時の100倍程度のケーススタディーによる最適設計(自動車)、1兆グリッドレベルの解析による実験の置き換え(ターボ機械)、実機スケール簡略化なし詳細解析(航空機)等、ポスト「京」で初めて達成可能な問題を扱う。

◆費用対効果が高い上流工程で、製品ライフサイクルにわたる主要な課題の多くを解決できることによって、多大な投資効果が期待できる。

実施体制について

推進体制

代表機関 東京大学
生産技術研究所
課題責任者 加藤千幸



革新的シミュレーション研究センター
課題推進事務局

重点課題評価委員会

重点課題連携事務局会議

重点課題全体推進会議

アプリケーション連携開発会議

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 大山聖 (JAXA)

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 坪倉誠 (神戸大)

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 加藤千幸 (東大生研)

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 高木亮治 (JAXA)

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 奥田洋司 (東大)

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 吉川暢宏 (東大生研)

連携プロジェクト・ 成果検証・実践

サブ課題A
SIPプロジェクト、
最適化企業コンソーシアム

サブ課題B
自動車OEM、サプライヤーコンソーシ
アム

サブ課題C
ターボ機械メーカーコンソーシアム
日本造船技術センター

サブ課題D
航空機製造メーカー、空港会社、航空
会社

サブ課題E
素材メーカー、加工メーカー、重工メー
カー、プレス成形・溶接メーカーコン
ソーシアム

サブ課題F
素材メーカー
自動車メーカー
重工メーカー、他
→ 複合材料地域
クラスター

報告 助言・提言

連携

諮問委員会

重点課題⑥

コデザイン (FFB、ADVENTURE)

理化学研究所
計算科学研究センター

産業界へのニーズの提供・実用化

スーパーコンピューティング技術産業応用協議会/
計算科学振興財団

■ ポスト「京」重点課題⑧の推進目的

■ 多目的設計最適化アルゴリズムの研究開発

- ロバストで高速なアルゴリズム開発

■ 解析計算の大幅な短縮

- 格子生成の完全自動化
- ソルバーの高速化

■ 必要な計算機リソース量の削減

- 新たな乱流モデルの研究開発

■ 新たなものづくり分野へのHPCの展開

- 航空機分野
- 溶接シミュレータ
- 熱可塑性CFRP成形シミュレータ

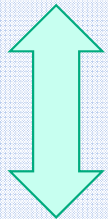


コ・デザインによるアプリケーションの開発

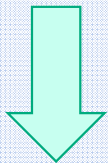
重点課題⑧におけるアプリケーション開発方法

■ コ・デザインによるアプリケーションの高速化

理研R-CCS



東大生研



神戸大・JAXA・
東大新領域

① 「富岳」の主要なパラメータ等の決定

- ・CPUアーキテクチャ, コア数, 動作周波数, etc
- ・メモリーアーキテクチャ, レーン数, 動作周波数, etc

② ターゲットアプリケーションFFBの高速化

- ・アルゴリズム改良による演算数の削減とFlops/Biteの向上
- ・メモリスループットの限界化(「京」46.0 GB/s)

③ 課題内の主要なアプリケーションへの展開

- ・CUBE(非圧縮性/圧縮性流体解析)
- ・FFVHC-ACE(遷音速流体解析)
- ・FrontISTR(非線形構造解析)

■ 他の主要な計算機プラットフォームへの展開

- Intel Skylake・Cascade Lake, NEC SX-Aurora TSUBASA
- 協力: 日本電気株式会社、ビジュアルテクノロジー株式会社、他

コ・デザインの進捗状況

コ・デザインによるアプリケーションの高速化

アプリケーション	サブ課題	機能・特長	スパコン「京」の ノード実効性能 (GFLOPS)	スパコン「富岳」 のノード実効性能 (GFLOPS)	対「京」性能 向上比
FFB (ターゲットアプリ)	8-C、6-C	FEMによる非圧縮性/圧縮性LES 解析・超大規模な高精度解析	4.0 (実測値)	95.5 (共用前評価環境)	47.8倍
CUBE	8-B	FVMによる非圧縮性/圧縮流体解 析・直交格子による完全自動格 子生成とオイラー系連成解析	18.3 (実測値)	234.6 (理研シミュレー タ)	25.6倍
FFVHC-ACE	8-D	FVMによる遷音速流体解析・レイ ヤー格子と直交格子のハイブリッ ド計算・高精度な壁面モデル	6.2 (実測値)	130.0 (理研シミュレー タ)	42.0倍
FrontISTR	8-E、8-F	非線形構造解析・ 高収束性前処理型マトリックスソ ルバ	9.2 (実測値)	106.4 (理研シミュレー タ)	23.2倍

注1) 「京」のノード実効性能は本格実施フェーズ開始当初の値

注2) 「京」と「富岳」のノードのピーク性能比は約21倍

注3) 「富岳」のノード性能は1CMG(12コア)の性能の4倍

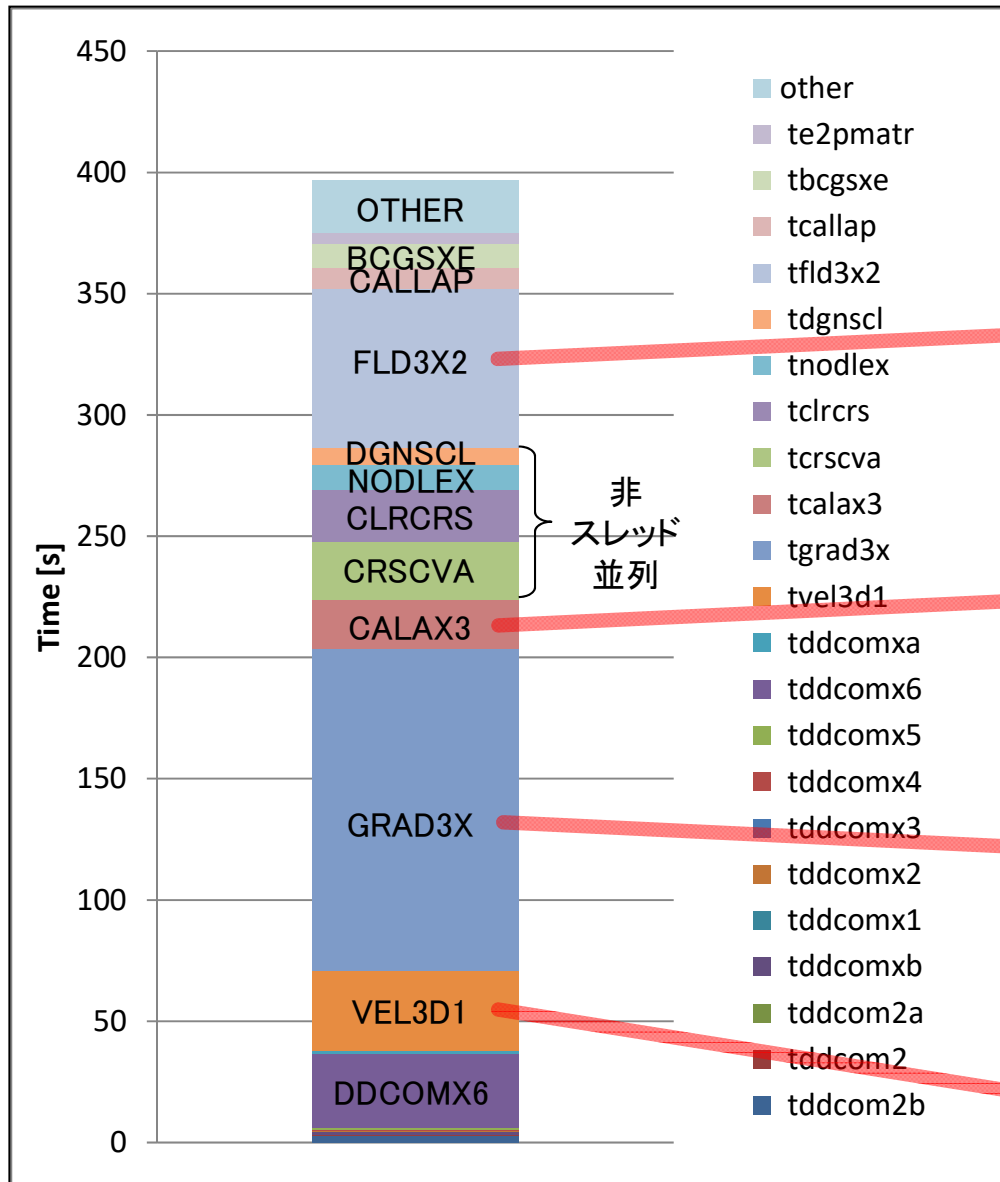
注4) コンパイラはFujitsu Fortran 4.0.0(オプションは通常-Kfast,parallel,ocl,optmsg=2)を利用

注5) 「富岳」のノード性能の値は、共用前評価環境および理研シミュレータ[1]による推定値

[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ズコンピューティング(HPC)、2019-HPC-168(5), pp. 1-7(2019-02-26)

■ コ・デザイン: ①チューニング (1/2)

■ 高速化開始時のプロファイリング(「京」)



高速化の基本方針

- ・4カーネルのスループットの限界値化 (46 GB/s)
- ・最大限のSIMDロード化/SWP化
- ・配列初期化の高速化

FLD3X2

発散の計算を行う

具体的にはGRAD3Xで求めた節点での圧力勾配ベクトル ∇P の発散を求め、要素での ΔP を求めるための処理

CALAX3

疎行列とベクトルとの積

GRAD3X

勾配の計算を行う

具体的には要素中心定義の圧力から、節点での圧力勾配ベクトルを求めるための処理

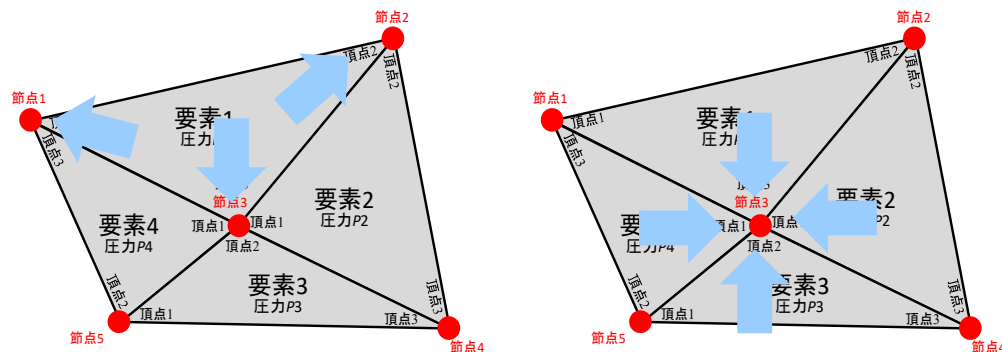
VEL3D1

運動方程式を解き、中間速度を求める処理

コ・デザイン: ①チューニング (2/2)

チューニング例1: 連続の式AX計算1 (GRAD3X)

要素定義の圧力から節点定義の圧力勾配を計算



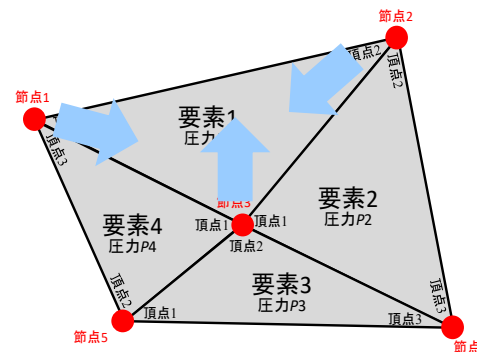
修正前: 要素ループ
(ストアがリストアクセス) 修正後: 節点ループ
(ストアが連続アクセス)

GRAD3Xの性能測定結果

	変更前	変更後
実行時間	135	44.2
性能 GFLOPS	5.2	15.9
ピーク性能比	4.1	12.4
メモリスループット GB/s	23.2	47.2

チューニング例2: 連続の式AX計算2 (FLD3DX)

節点定義の速度から要素定義の速度発散を計算



改良1: 配列のサイズをコンパイラに教える
改良2: SIMDロードを適応するため, アンロール実装をループに戻す

改良3: 配列U, V, WをUVWにまとめてストリーム削減
改良4: 配列を「京」の機能であるセクタキャッシュに載せる

FLD3DXの性能測定結果

	変更前	変更後
実行時間	57.4	47.5
性能 GFLOPS	10.3	13.0
ピーク性能比	8.0	10.2
メモリスループット GB/s	36.8	42.5



アプリケーションの産業利用上の効果の検証成果

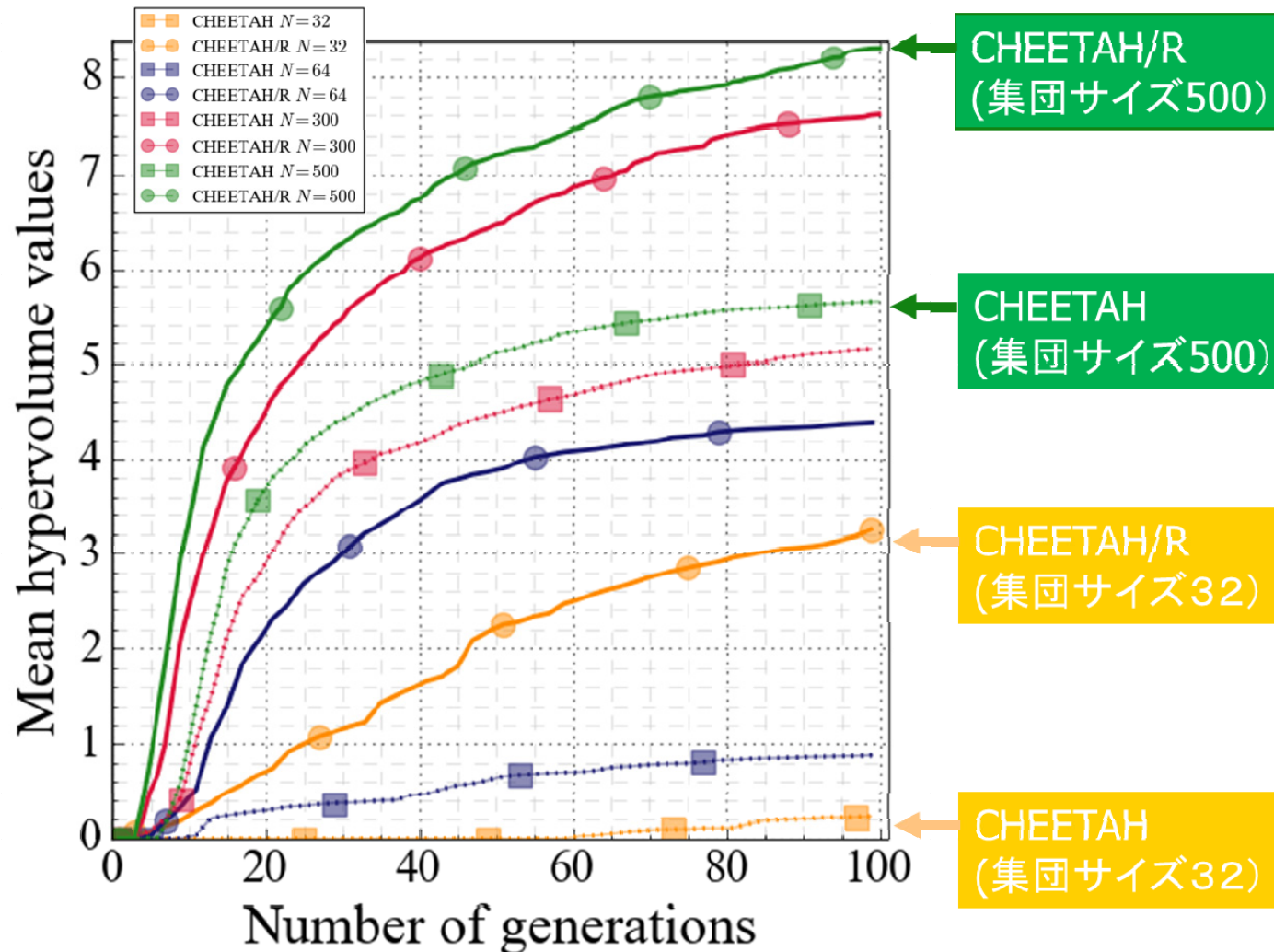
サブ課題A: 多目的設計探査・高速計算技術

開発アルゴリズム等:
CHEETAH/R、低B/F直接-反復ハイブリッド反復法、
時間並列化アルゴリズム、ワークフローWHEEL

実施機関: 宇宙航空研究開発機構、九州大学、東北大学、東京理科大学、理化学研究所

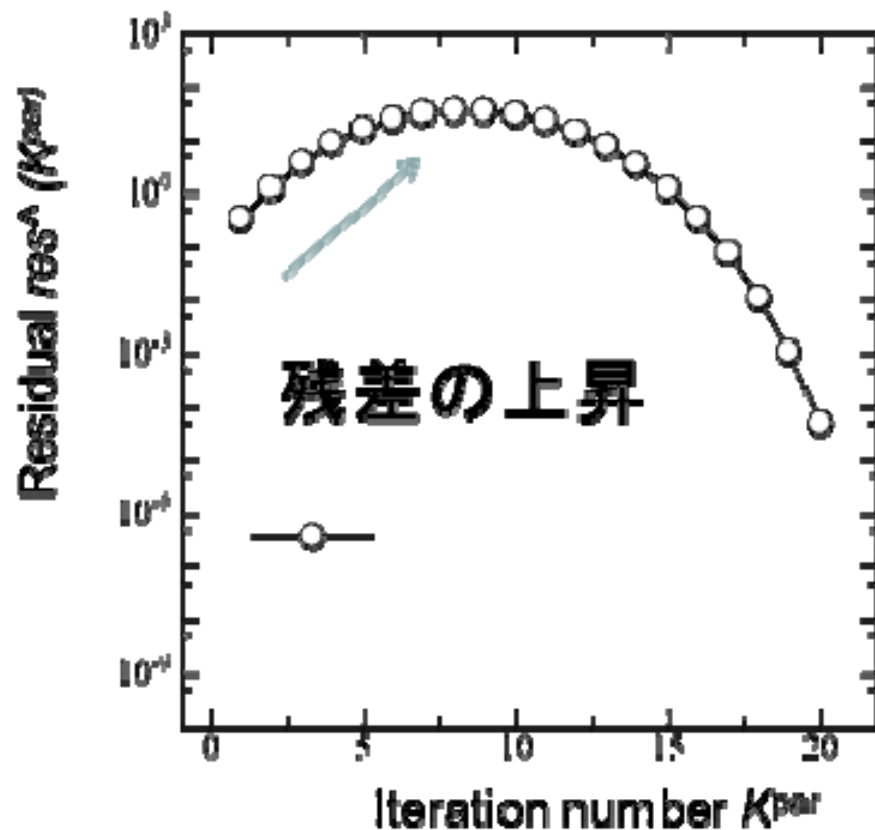
多目的設計探査

■ 戦略プログラムで開発したCHEETAHと比較しても大幅な性能向上を実現

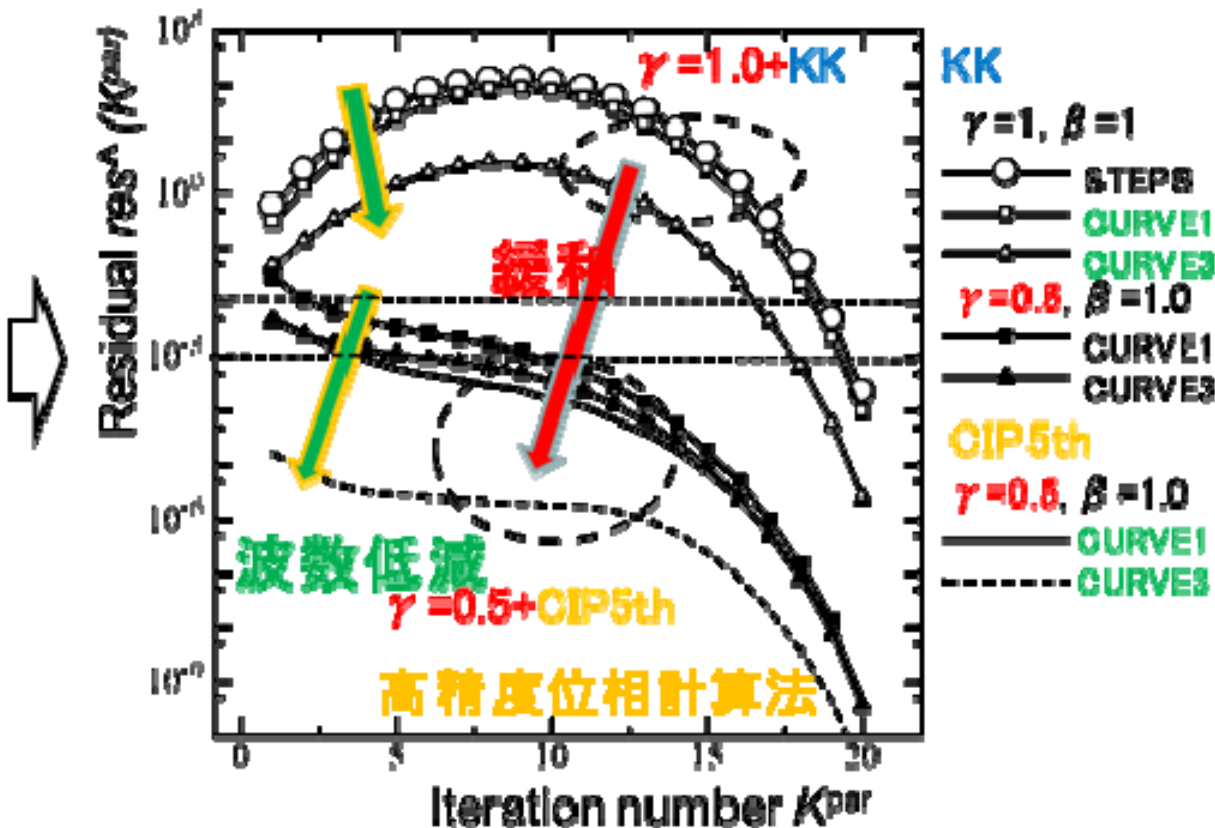


発電用風車設計最適化問題を用いた性能評価

- 放物型PDE: 実用性と改良案の提示
- 双曲型PDE: 課題とその解決手法の有効性の程度の把握



オリジナルParareal法

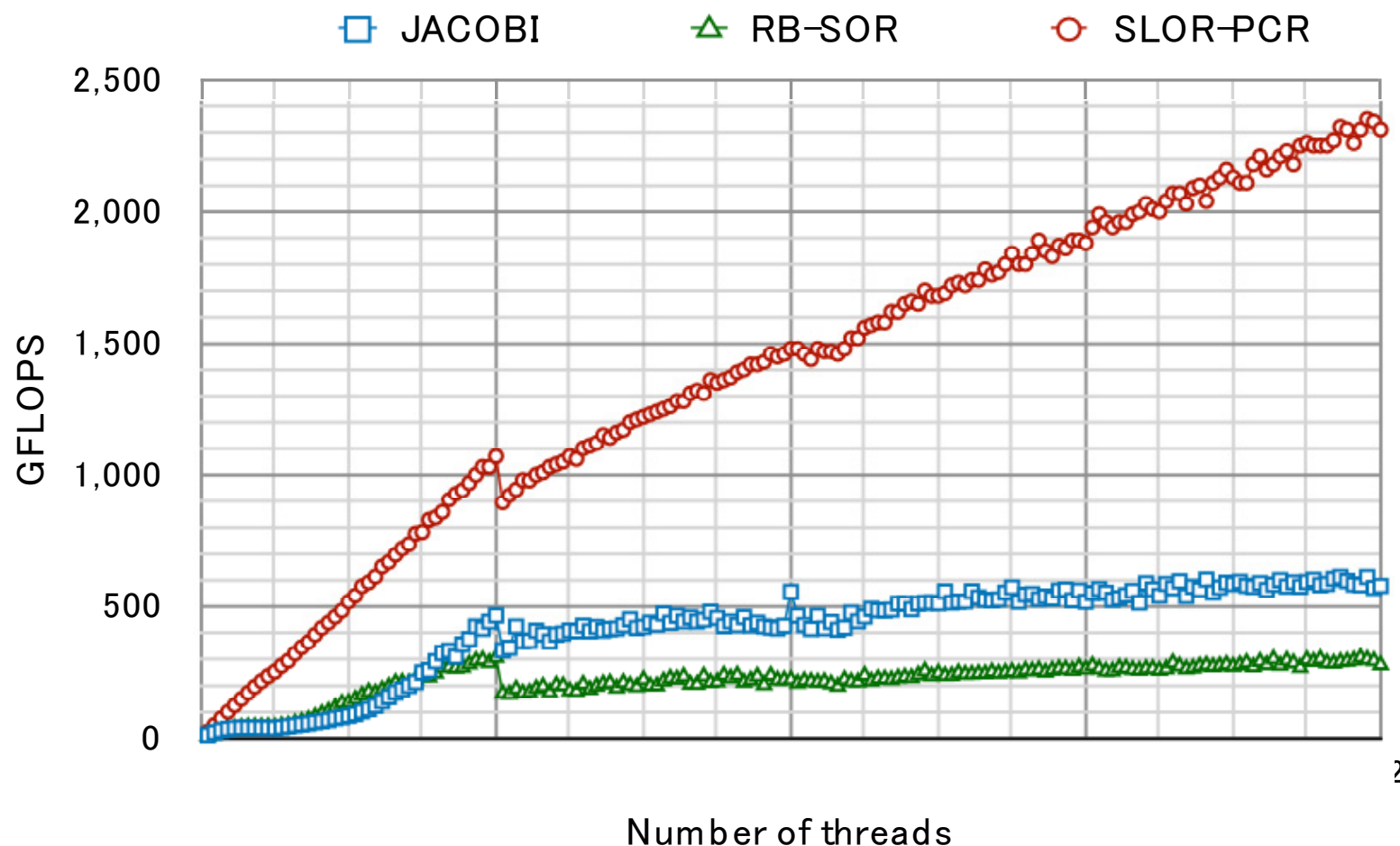


残差の上昇防止は可

さらに急峻な収束が必要

高速計算技術・低B/Fアルゴリズム

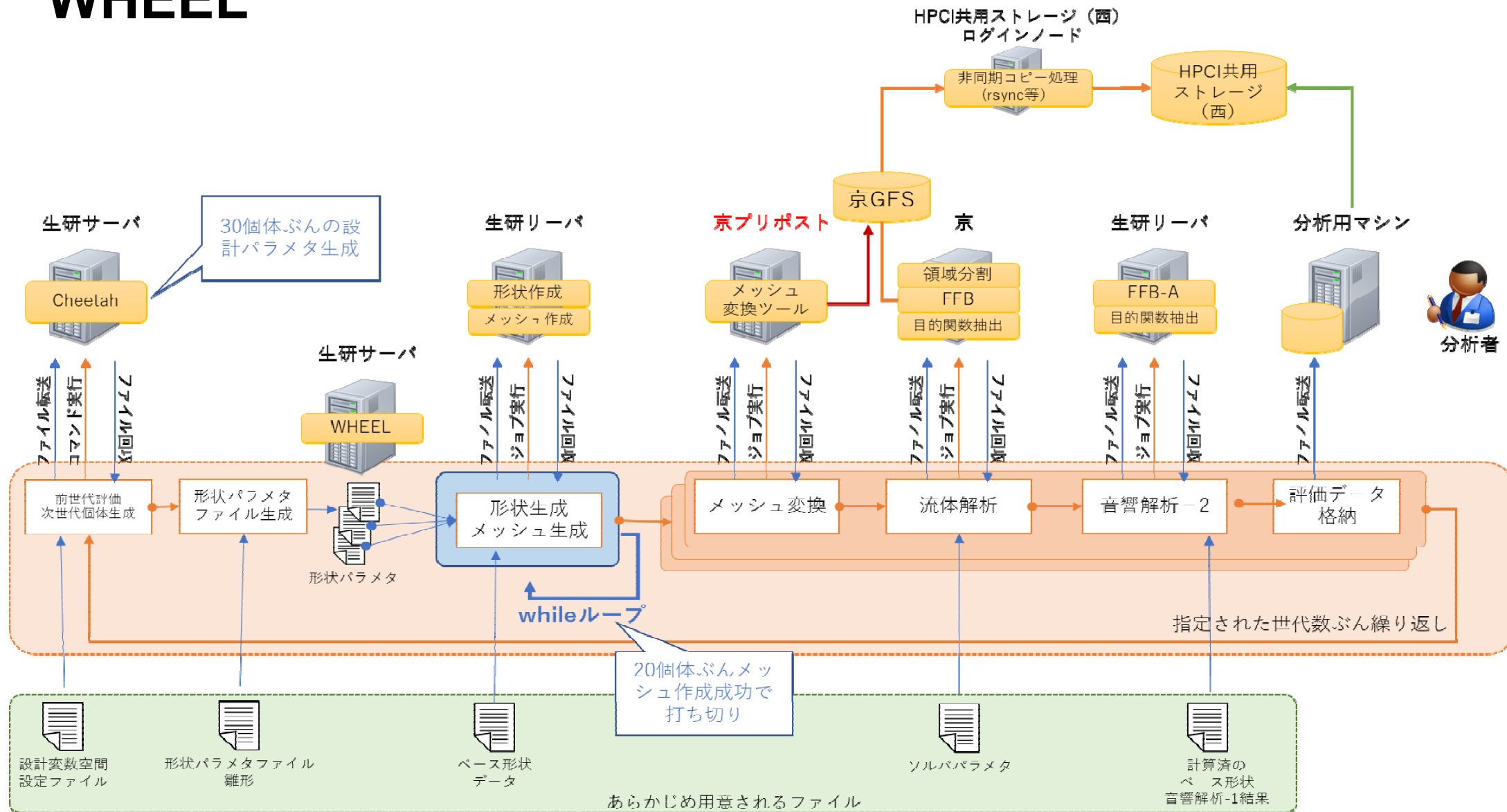
- 直接法を組み込んだSLOR-PCR法を開発。
- キャッシュの再利用効率を大幅に改善し、性能向上5倍を達成。
- メトリクスを展開で4倍の性能向上を達成できる見込み



SGI UV300での性能測定結果

上流設計プラットフォーム

WHEEL





サブ課題B: 自動車統合設計システムの開発

開発アプリケーション:
CUBE

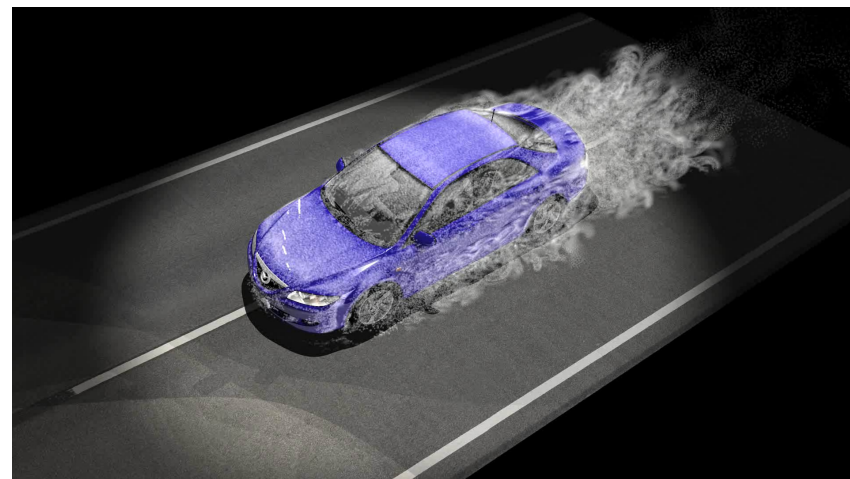
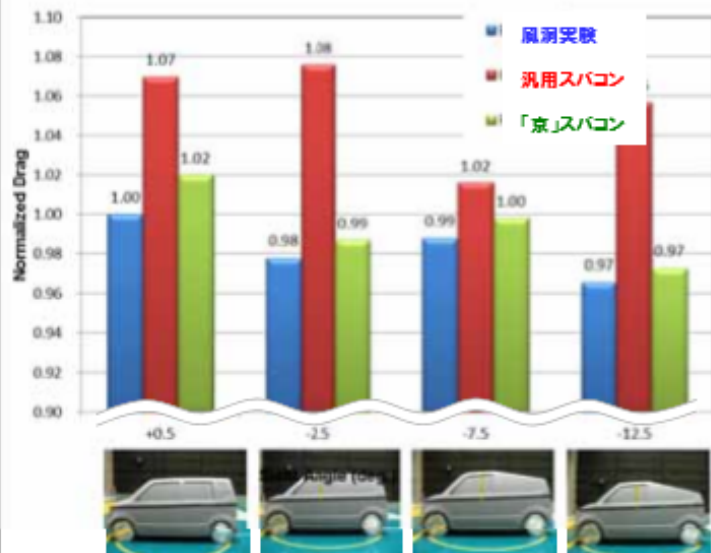
実施機関: 神戸大学、山梨大学、理化学研究所

直交格子を利用した新たな流体解析ソルバー(CUBE)の開発

京で実現した高精度空力連成シミュレーション(FFR-HPC)

高解像度LES解析により風洞実験に匹敵する精度の空力予測が可能に

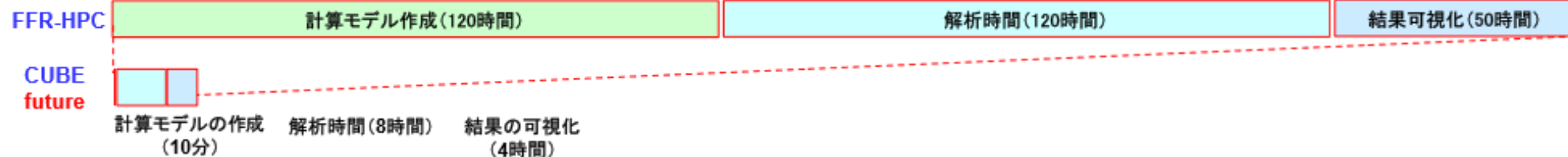
運動連成解析により風洞実験では難しい走行安定性・安全性評価が可能に



解析の高精度化・連成化に伴うターンアラウンドタイムの増加(現状、十数日)
製品のさらなる高性能化・高機能化・安全性強化に対応するための多目的最適化設計のニーズ

ポスト京で目指すリアルタイムリアルワールドシミュレーション(CUBE)

高精度空力連成解析の抜本的加速(ターンアラウンド時間を十数日から数時間へ！)

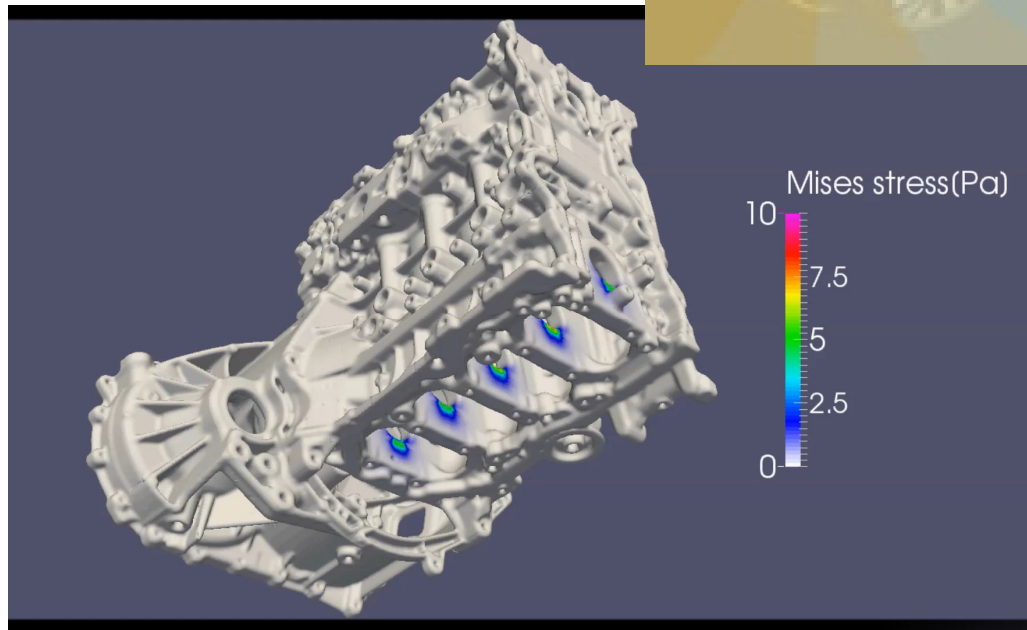


高精度風洞解析(20億セル規模、40ノード程度)であれば、**全ポスト京で4000ケースを同時解析可能に**
簡易空力解析(2億セル規模、4ノード程度)であれば、**全ポスト京で40000ケースを同時解析可能に**

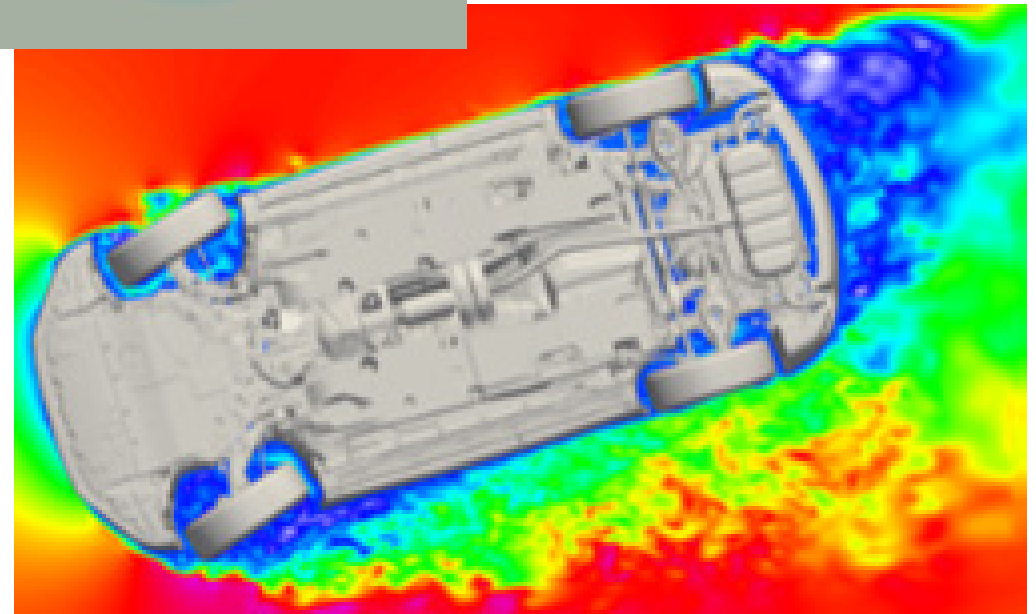
複合現象の連成解析の最新成果

■ オイラー構造解析・圧縮性解析・6自由度移動境界解析

統一圧縮性解析による流れ・
音場統一解析



エンジンブロック振動解析



操舵時の車両空力解析

多目的最適化フレームワークの構築およびその実証

■ 実設計と同様の傾向がみられ、フレームワークの妥当性を確認

車体空力最適化問題

- 4目的(すべて最小化)

正対風 C_D 値

正対風 C_L 値

$|\text{正対風}C_D\text{値}-\text{-3度}C_D\text{値}| (= \Delta C_D)$ ※

$|\text{正対風}C_L\text{値}-\text{-3度}C_L\text{値}| (= \Delta C_L)$ ※

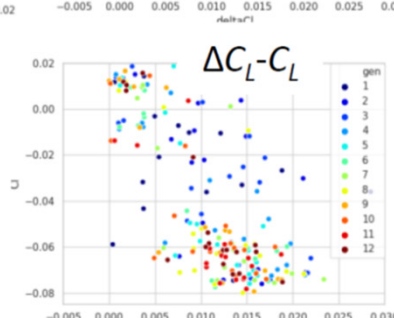
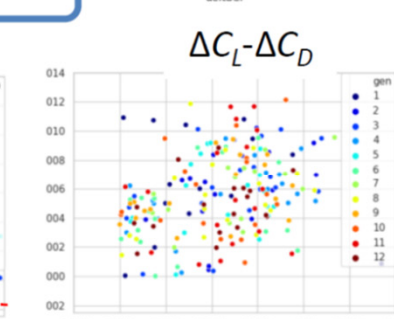
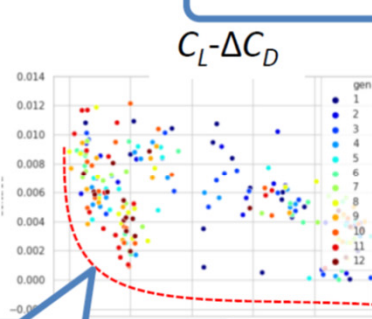
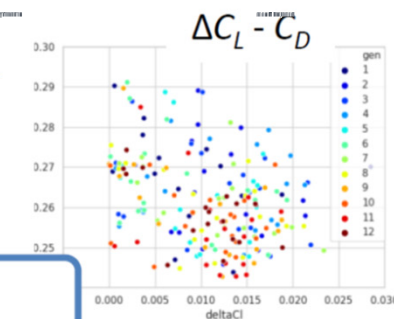
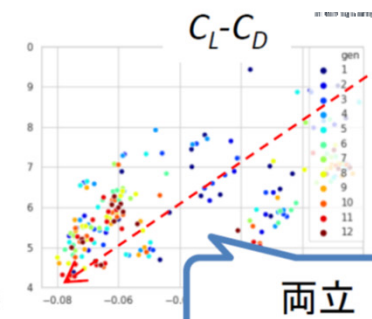
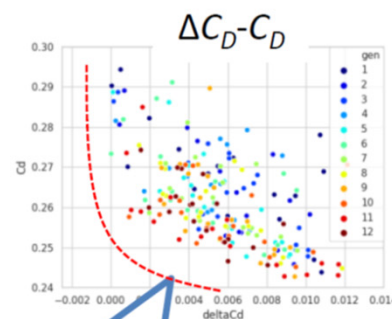
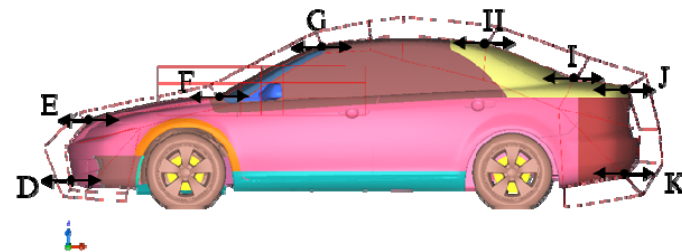
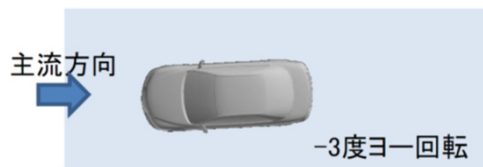
※風向変化に対するロバスト性の指標

- 8設計変数

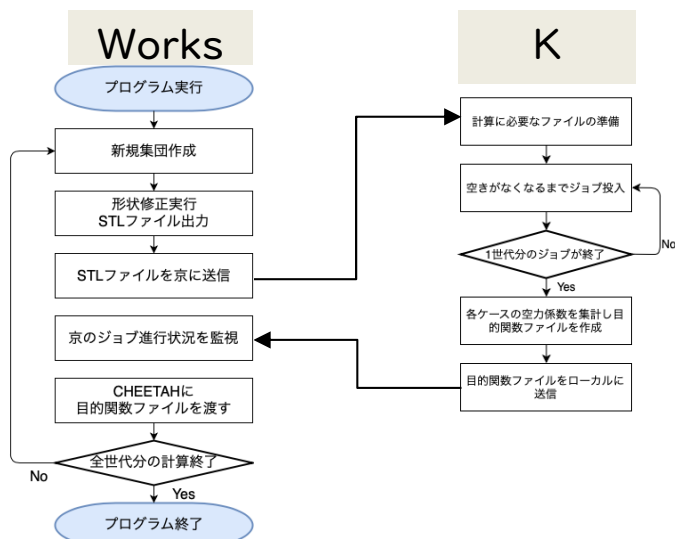
- 集団サイズ: 18

- 12世代

- 形状修正の刻み幅: 2mm



多目的最適化フレームワークの構築



4変数ともに最小化が目的なので、
左下が最適化の方向



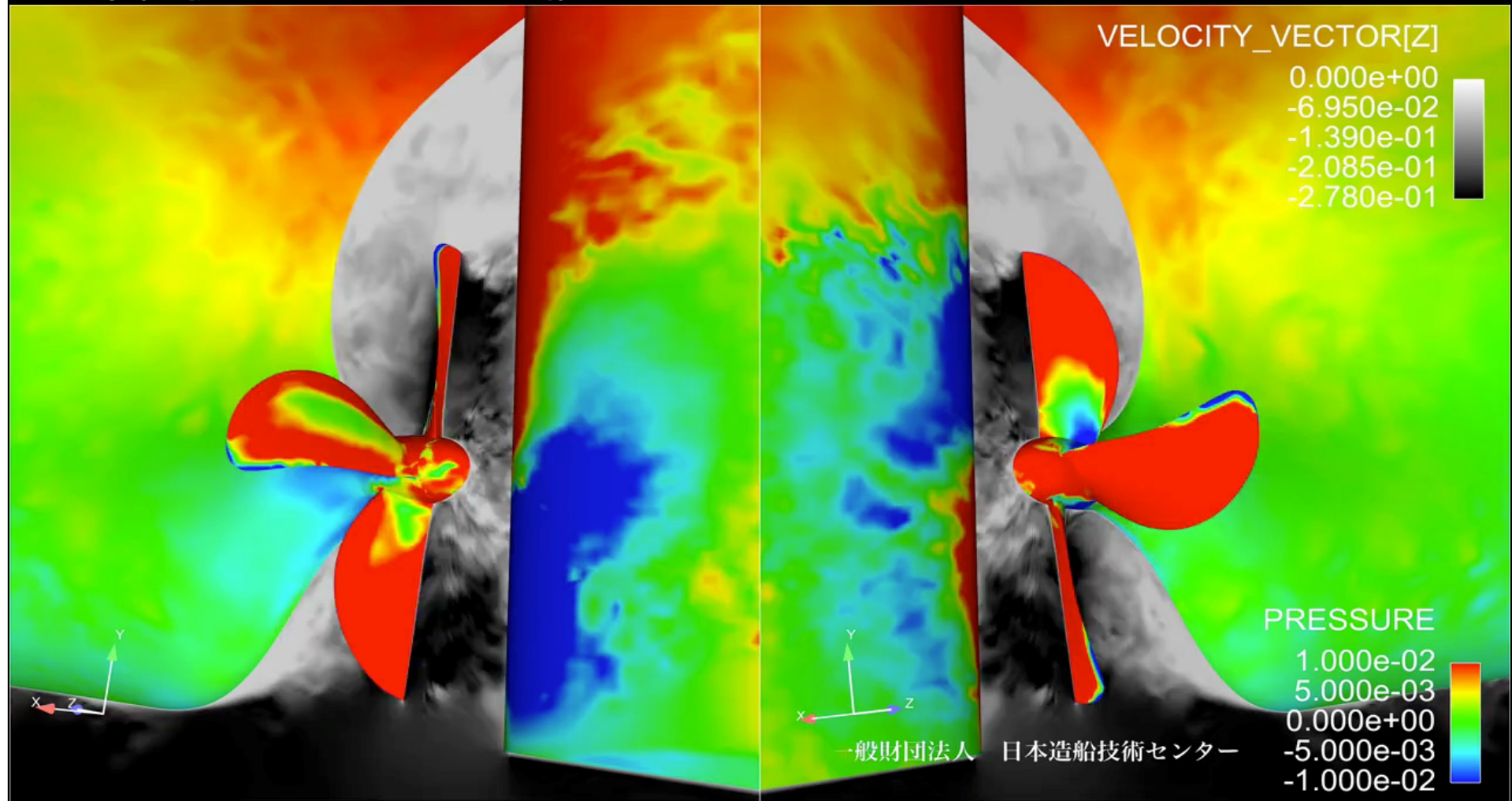
サブ課題C: ターボ機械設計・評価システムの開発

開発アプリケーション:
FFB(ターゲットアプリケーション)

実施機関: 東京大学、九州大学

自航試験のベンチマーク計算(KVLCC2船型)

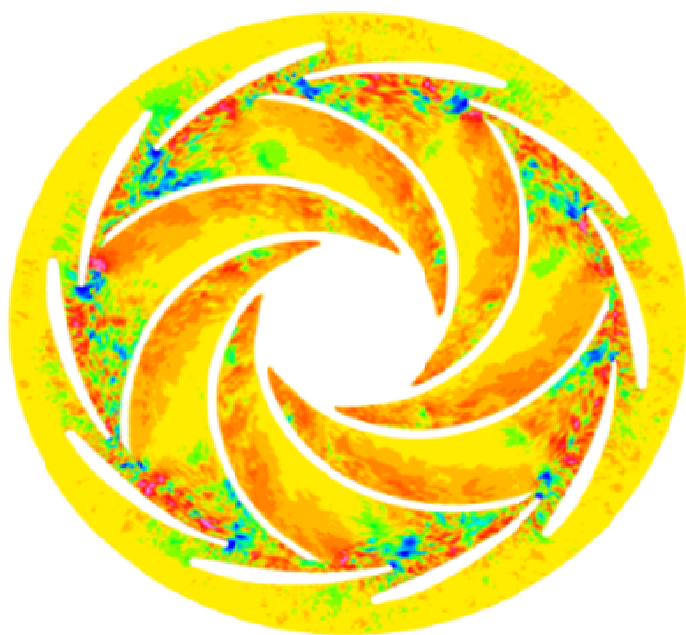
自航計算
(自航試験の波がない状態に相当)



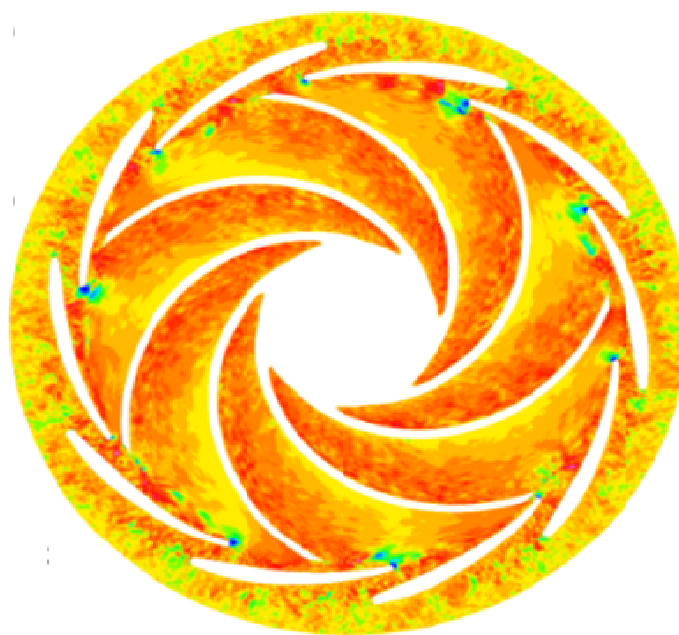
船体表面圧力分布(カラー)と船体中心断面の流速分布(白黒)
(提供:一般財団法人日本造船技術センター)

高速化したコードを用いた実証解析：遠心ポンプ (1/2)

羽根車およびディフューザにおける軸流速度の瞬時分布



10%流量

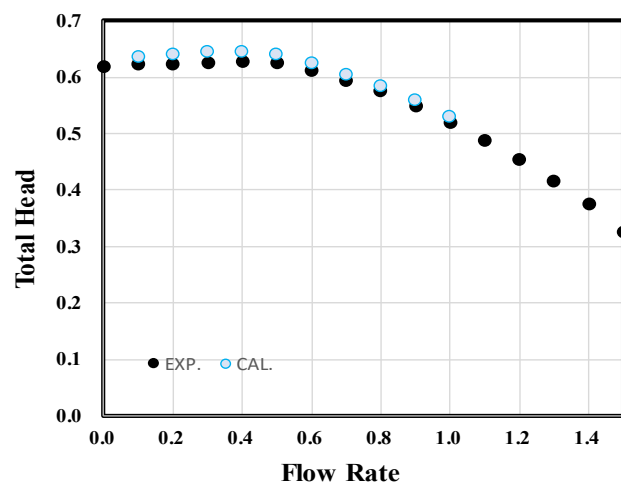


50%流量

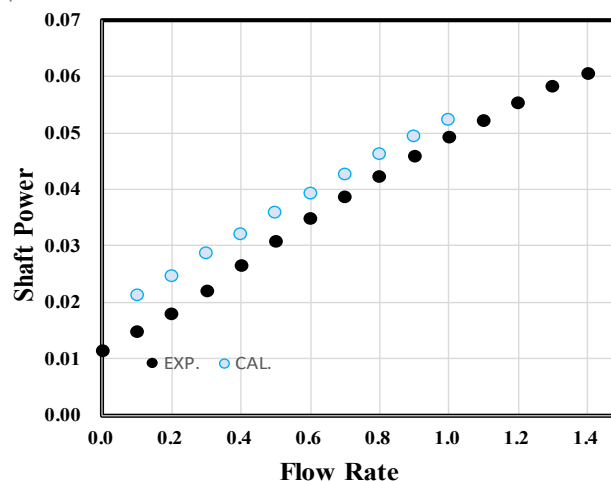


100%流量

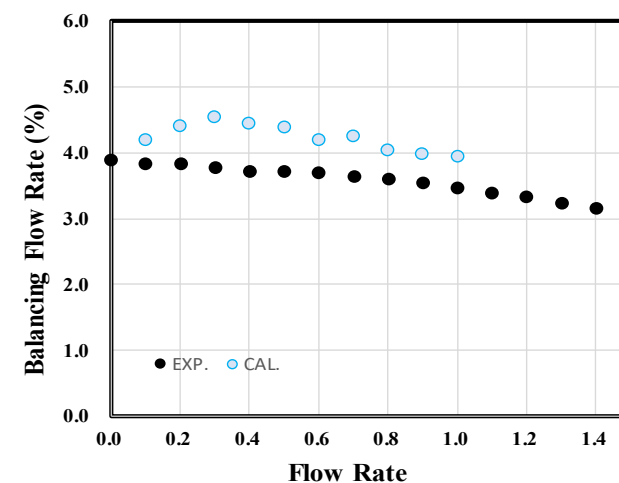
高速化したコードを用いた実証解析:遠心ポンプ (2/2)



全揚程

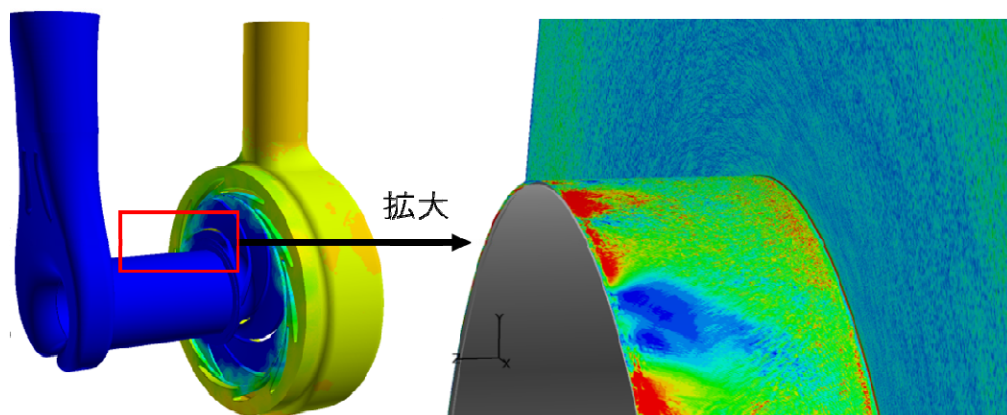


軸動力



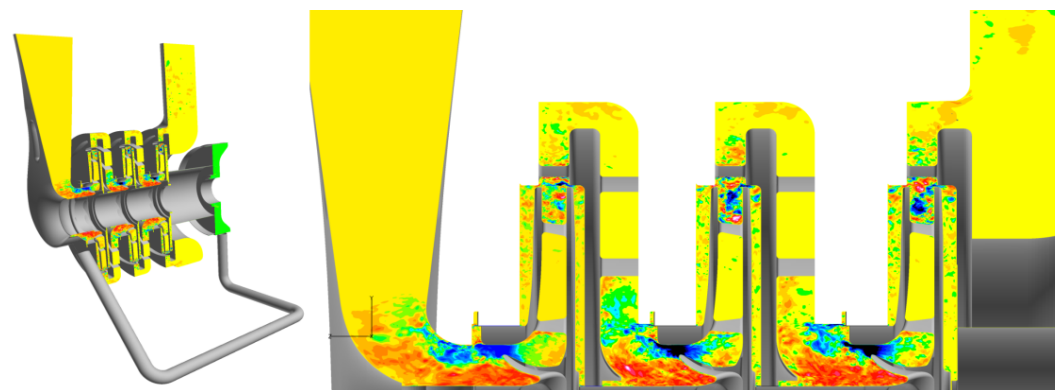
戻り流量

Unresolved-LES(3億グリッド)によりポンプの性能を予測



渦負度絶対値の瞬時分布

細隙部のWall-Resolved LES(40億グリッド)



多段遠心ポンプのUnresolved-LES(200億グリッド):京では計算リソースが不足

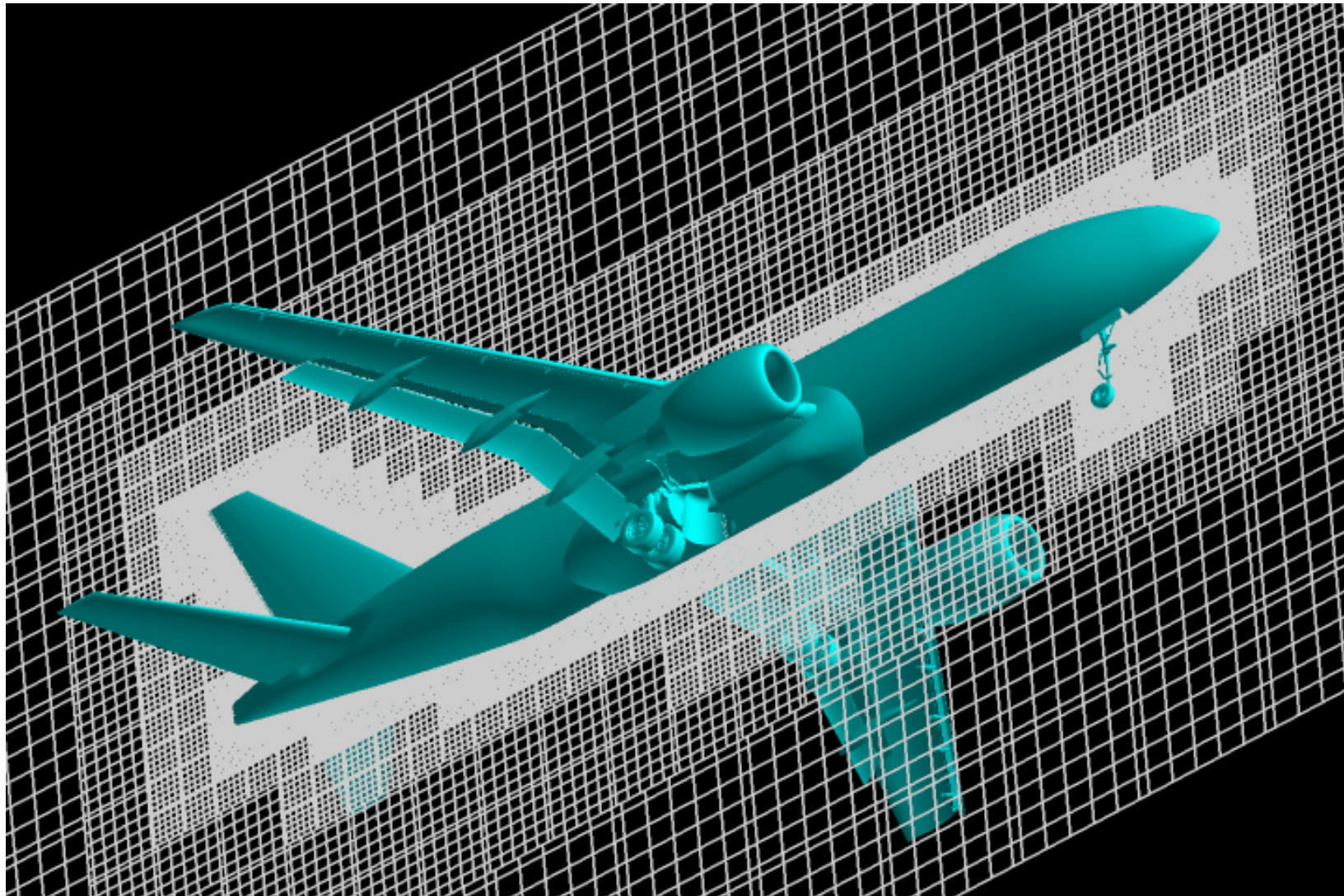


サブ課題D: 航空機の次世代空力解析ソルバー

開発アプリケーション:
FFVHC-ACE

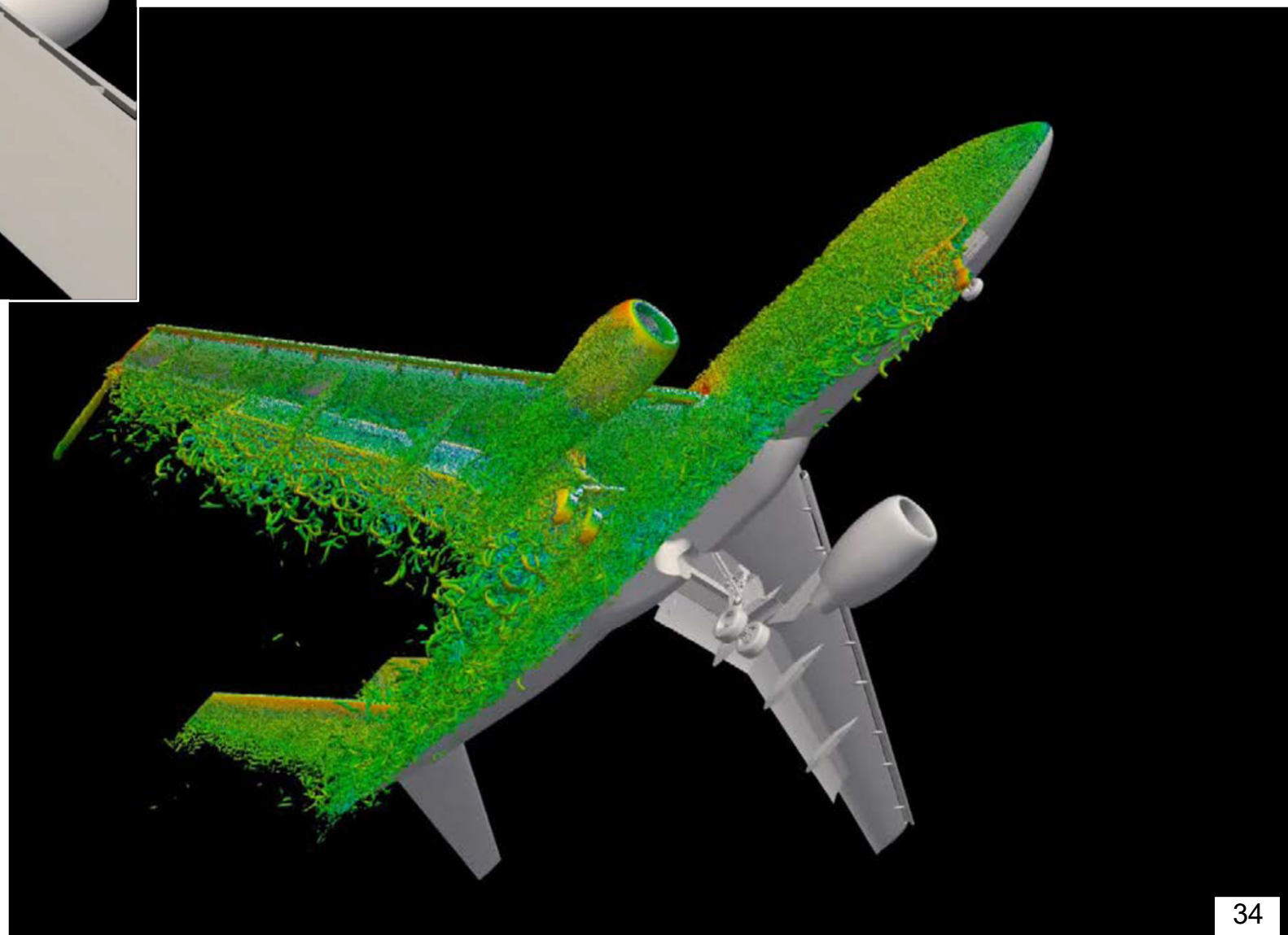
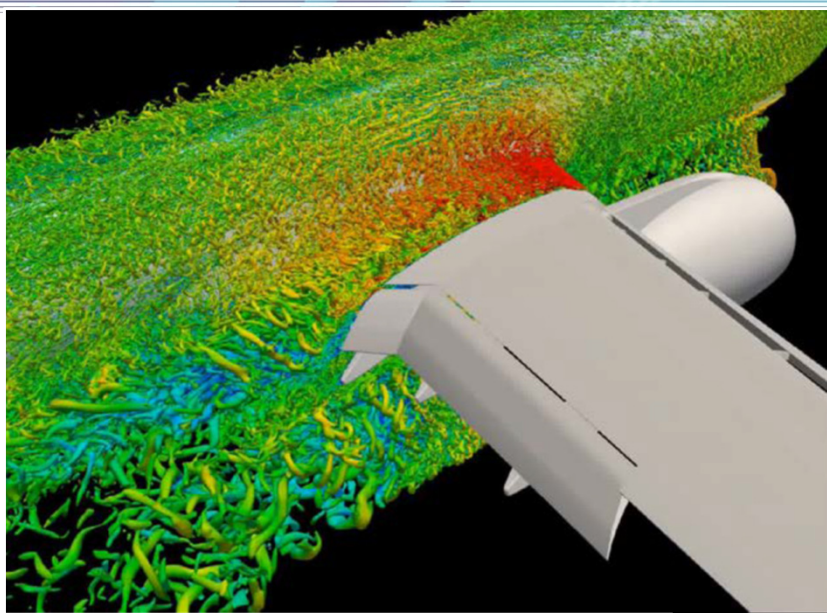
実施機関: 宇宙航空研究開発機構、東北大学、東京理科大学

■ 階層型直交格子を自動生成



JSM_CRM_LEG (レイヤー格子・LES壁モデルなし)

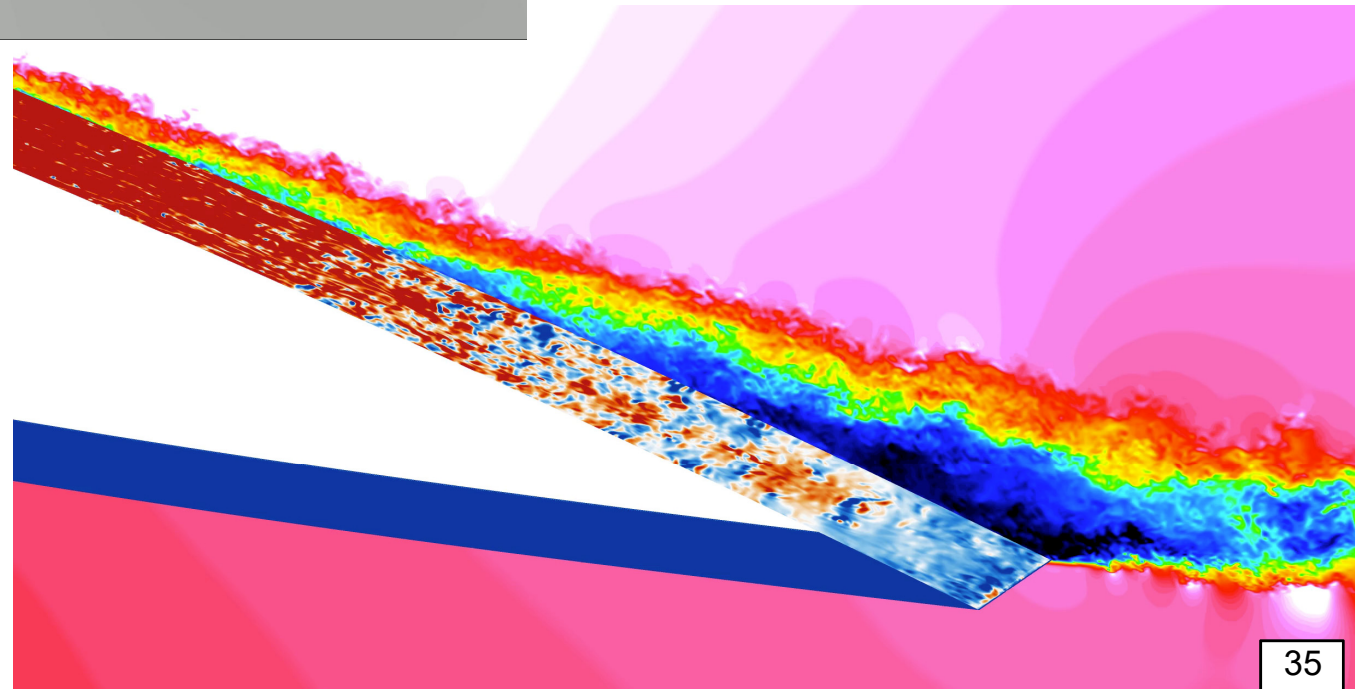
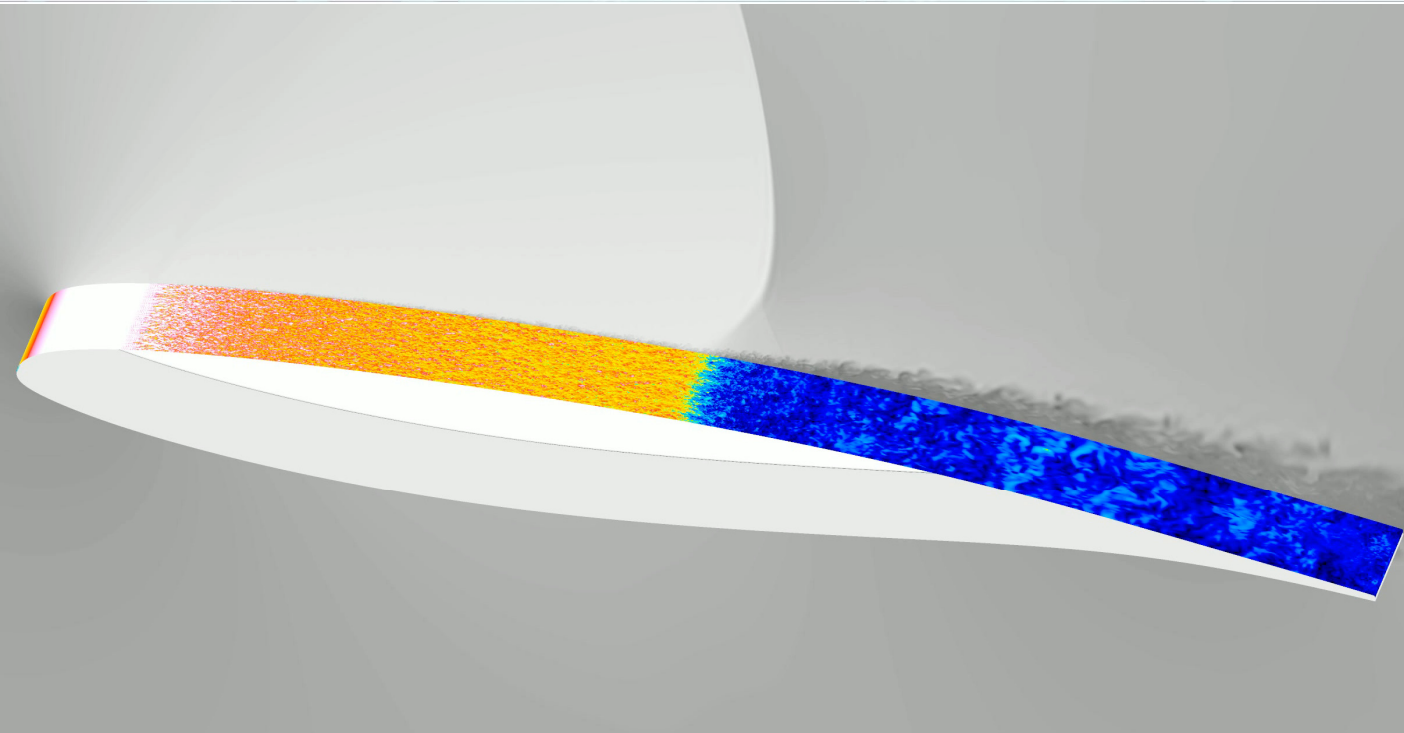
JSM_CRM_LEGによる全機解析(続き)



JAXA High-Lift Model
(レイヤー格子・
LES壁モデルなし)
・流体: 31億点
(全体: 45億点)

遷音速バフエットの再現と後縁失速の予測

遷音速バフエット



$y^+_{min} \approx 10$

$y^+ \approx 60$: Matching location

後縁失速

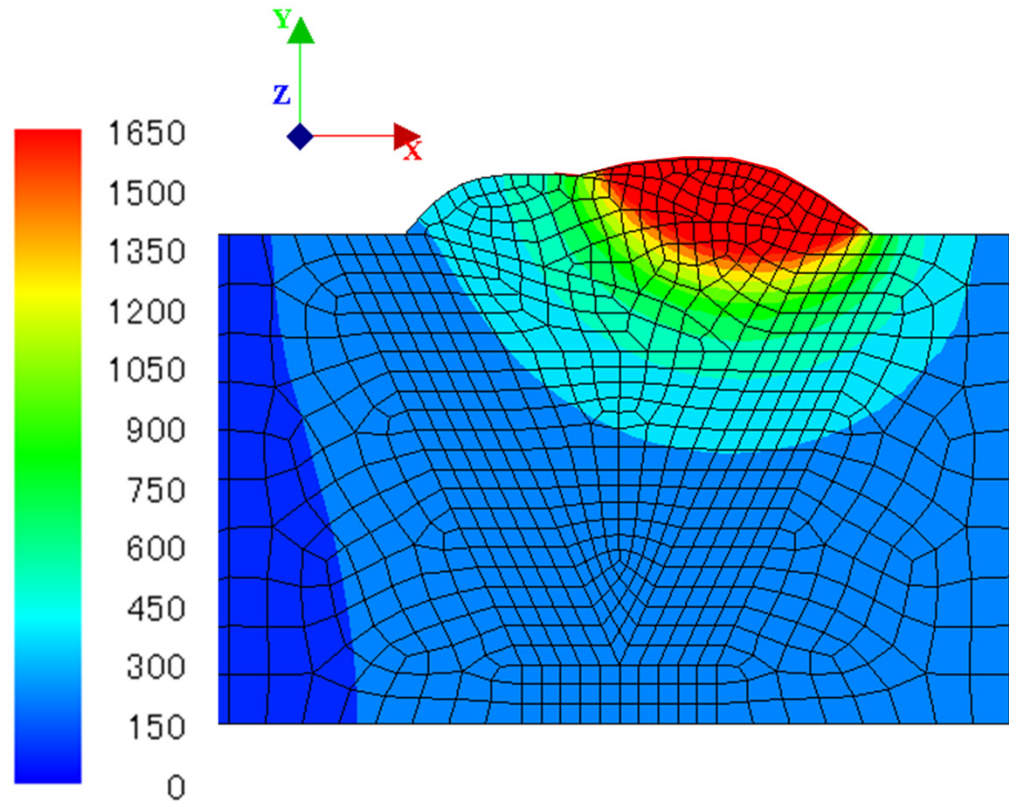


サブ課題E: 非線形構造解析ソルバー

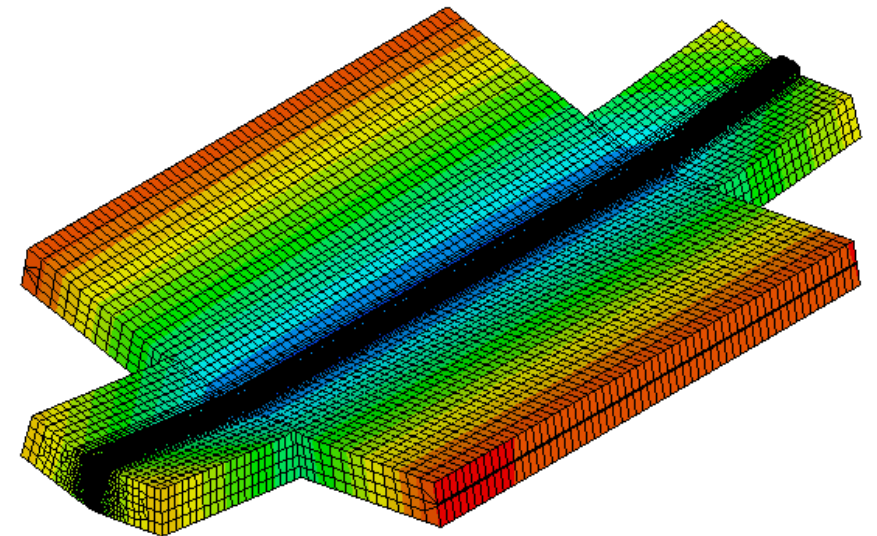
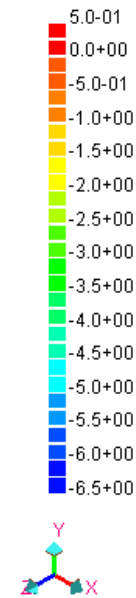
開発アプリケーション:
FrontISTR

実施機関: 東京大学

熱伝導・弾塑性クリープ変形の強連成解析手法の研究開発 および材料構成則の整備



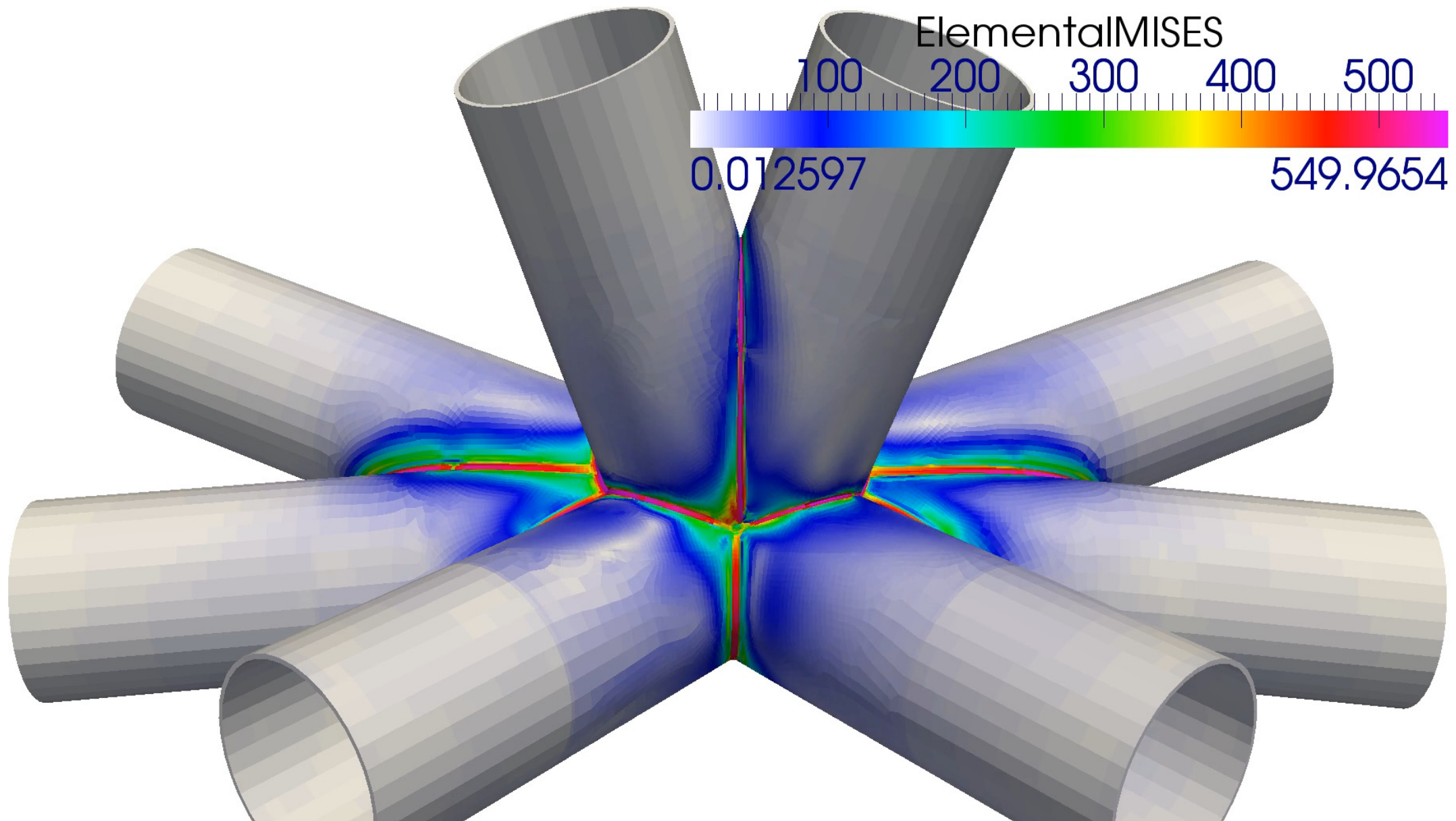
6パス目の中央断面の最高到達温度の分布



CASE NO.	COMPONENT [m]	MAX	MIN	MAXDEF
7	Y-DIRECTION DISPLACEMENT	5.2909E-2	-6.2420	6.2422
SEQ. 7				

6パス目の垂直方向変位の分布

大規模望遠鏡の架台部モデルへの適用



FrontISTRによる大型望遠鏡架台のアーチ溶接シミュレーション熱弾塑性解析結果
(表示は相当応力)



サブ課題F: 熱可塑性CFRPの整形シミュレータ

開発アプリケーション:
FrontCOMP

実施機関: 東京大学

マルチスケール熱可塑CFRP成形シミュレータの研究開発

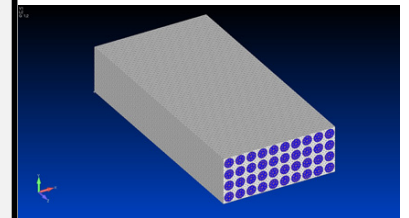
ベースとなるソフトウェア資産

熱硬化樹脂対応のFrontCOMP_cureをベース
に熱可塑樹脂対応の解析技術を導入

Updated Lagrange 法によるFrontISTR温度
連成接触大変形解析手法を参照

ミクロスケール熱可塑CFRP成形解析プログラム

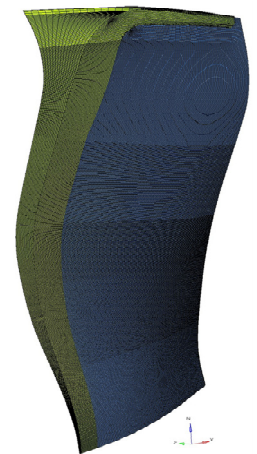
- 熱可塑樹脂と炭素繊維の温度／圧力依存材料モデル化
- 温度と接触大変形の連成解析
- 試験片成形の解析によるValidation



試験片から実部品への
マルチスケール展開

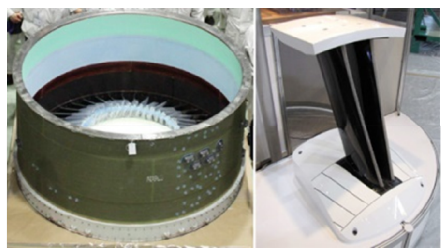
マクロスケール熱可塑CFRP成形解析プログラム

- プリプレグシート単位の直交異方性材料モデル化
- ミクロスケールモデルを用いたシミュレーションによるマクロ材料定数決定
- 欠陥発生予測, 欠陥発生メカニズム解明

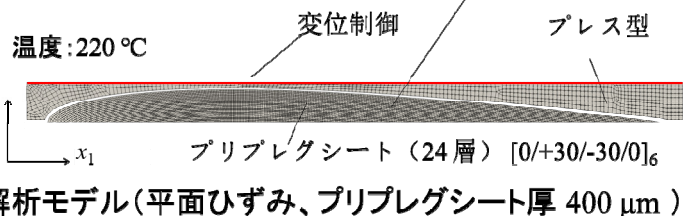
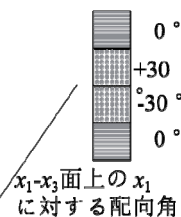


熱可塑CFRP部材成形後の誤差を含めた不整合および
欠陥の発生状況を高精度に予測

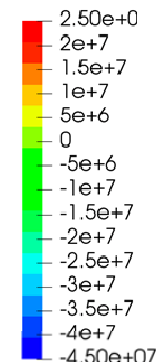
SGVのマクロスケール成形シミュレーション



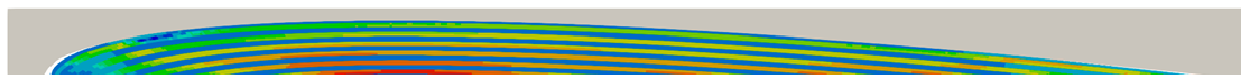
SGV(Structural Guide Vane)



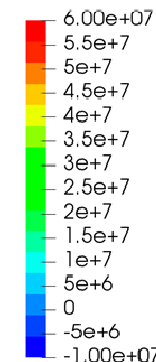
σ_{33} (プレス過程最終ステップ)



材料異方性のため、 $\pm 30^\circ$ 層の応力が高い



σ_{33} (冷却過程最終ステップ)



$\pm 30^\circ$ 層で正の応力、 0° 層で負の応力が発生

応力分布図