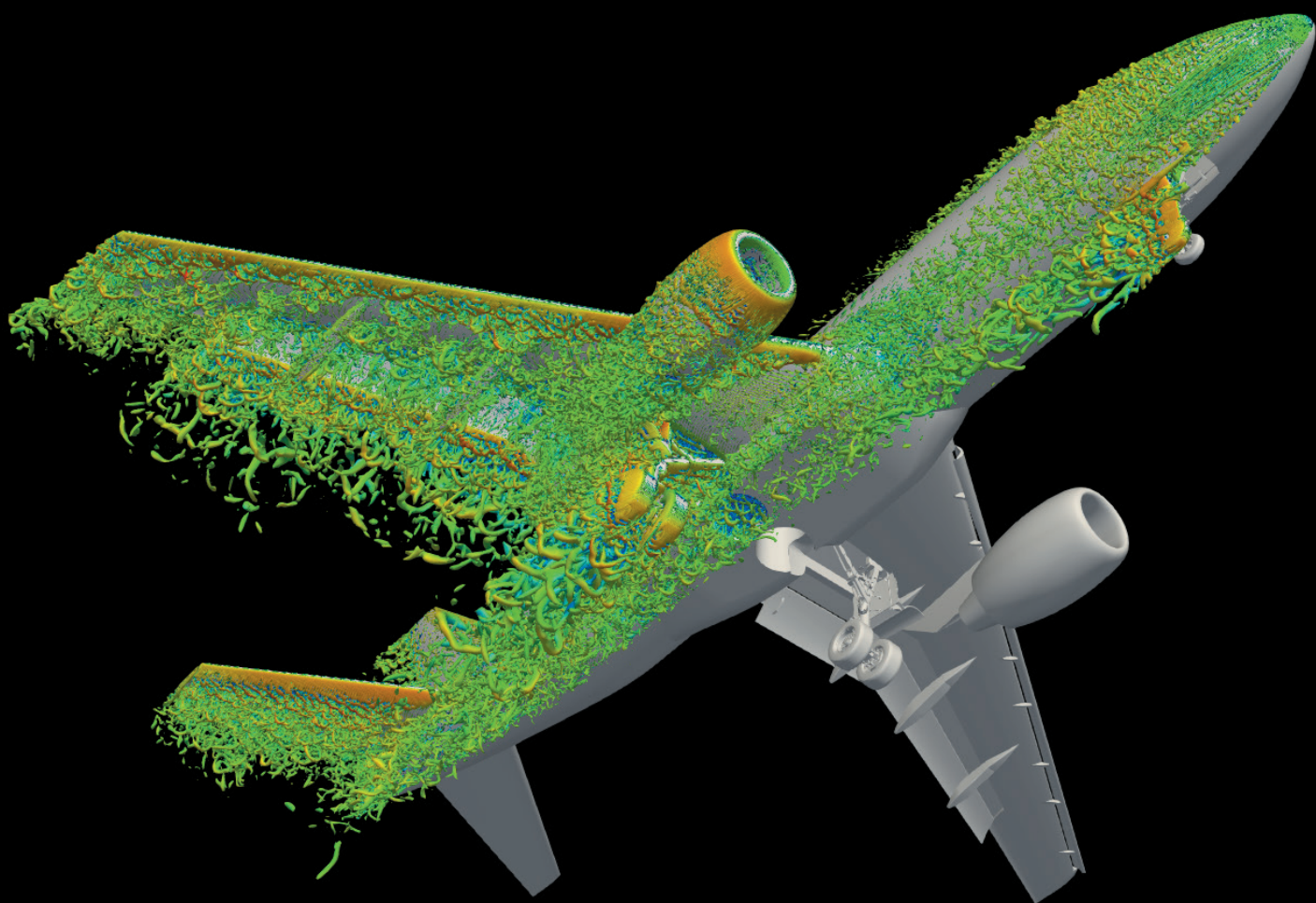


# 計 算 互 学 ナ ビ

計算工学ナビ・ニュースレター2019年春号



## 特集 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

今年度までの開発成果と残り1年の展望について ..... 課題責任者 加藤千幸

各サブ課題の研究開発状況と今後の展望 ..... 各サブ課題責任者



今年度までの開発成果と残り1年の展望について

# プロジェクト本格実施フェーズの 完遂に向けて着実に研究開発を推進

文部科学省が推進するフラッグシップシステム、ポスト「京」で重点的に取り組むべき課題の1つとなっているのが、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」です。これは製品コンセプトを初期段階で定量的に評価し、最適化する革新的設計手法、コストを最小化しつつ信頼性を向上させることが可能な革新的製造プロセス、さらにそれらの核となる超高速統合シミュレーションにより、付加価値の高いものづくりを実現し、日本の国際的な産業競争力強化に資するアプリケーションの研究開発を進めるものです。プロジェクトは、2年間の調査研究・準備研究フェーズを経て、2016年度より本格的な研究開発フェーズに入り、開発するアプリケーションの実用化を視野に入れた高度化が進められています。そこで今回は、残り1年となるプロジェクトの実施状況および展望について、重点課題⑧課題責任者である加藤千幸教授にお話をいただきました。



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  
加藤 千幸 センター長・教授

## 目指すのは “スパコンを使ったものづくり変革”

### 残り1年となったプロジェクト全体の推進 状況についてお話しください。

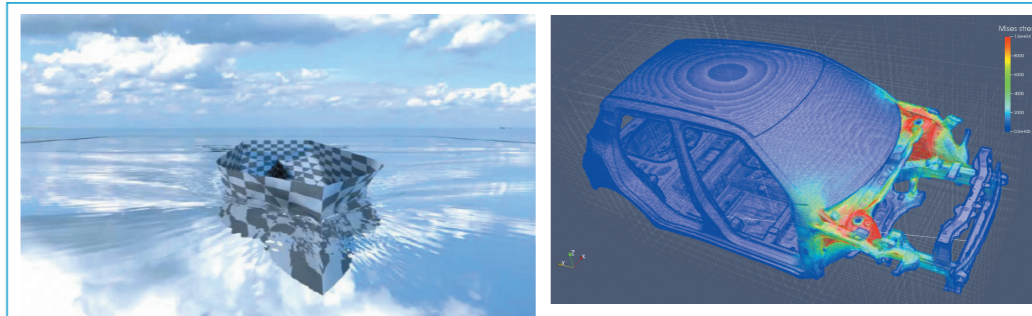
まず初めに、重点課題⑧の全体像についてお話ししておきましょう。私たちがやろうとしているのは何かということです。目指しているのは、一言で言えば「スパコンを使ったものづくり変革」です。近未来における日本の産業競争力強化には、今後

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欠かせません。そのためには、企画・設計段階から製品の最適化・実働特性・成形性など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の開発が必要であり、私たちはこれを実現するための研究開発に取り組んでいます。つまり、ポスト「京」を活用して、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）を起こそうとしているわけです。スパコン「京」が運用され、様々な可能性が現実のものとして見えてきましたが、課題も明らかになってきました。たとえ

ば、最適化の難しさであったり、解析に要する時間の長大化、膨大な計算機リソースの必要性、適応される分野が限定されたりするといったことが分かってきました。今回のプロジェクトでは、こうした課題を解決して、スパコンの利用をこれまで以上にものづくり分野に広げていくことを狙っています。具体的な推進目的は次のとおりです。まずは多目的設計最適化アルゴリズムの研究開発です。ロバストで高速なアルゴリズム開発を推進しています。さらに格子生成の完全自動化やソルバーの高速化による解析計算の大幅な短縮も図っています。



▲重点課題⑧ 実施体制



▲サブ課題C 自由表面の影響も考慮した抵抗試験 (KCS船型)  
提供:一般財団法人日本造船技術センター

▲サブ課題B 複合現象の連成解析に向けた取り組み(自動車ボディ剛性解析)  
形状データ提供:スズキ株式会社

や機能強化を推進していますが、高速化だけでなく性能評価でも定量的に問題のないことを確認していますし、航空機設計のサブ課題D、自動車設計のサブ課題Bなどにおいても産業上の効果が確認されつつあるなど、現在のところ、効果の面でも全6サブ課題のうち4つで目的達成の目途が立ったといつてよいと思います。

また、新たな乱流モデルの研究開発も進められており、これが実現できれば、必要な計算リソース量の1/100以下に削減することが可能になります。さらに、これまで展開できていなかった航空機分野をはじめ、溶接シミュレータ、熱可塑性CFRP成形シミュレータなど、新たなものづくり分野へのスパコンの展開も目的に挙げています。

## キラアアプリケーション を開発

これらを実現するために、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し、それぞれでキラアアプリケーションを開発しています。具体的にいうと、後に紹介するCo・デザインのターゲットアプリケーションになっている、ターボ機械設計・評価システムの流体解析システム「FFB (FrontFlow/blue)」をはじめ、自動車統合設計システムである非圧縮性・圧縮性流体解析プログラム「CUBE」、航空機の次世代空力解析ソルバーである圧縮性流体解析プログラム「FFV-HC-ACE」、溶接シミュレータの非線形構造解析プログラム「FrontISTR」等です。今回のプロジェクトでは、ハードウェアとソフトウェアを協働して開発することが大きな特長の1つになっています。それがCo・デザインであり、それによって、CPUアーキテクチャ、コア数、動作周波数などのパラメータを最適化するとともに、最低化されたCPUに対して、アプリケーションの性能を高めています。重点課題⑧

では、「FFB」をCo・デザインのターゲットアプリケーションに設定し、アプリケーションの高速化を図っています。さらに、Co・デザインの成果をその他のアプリケーションに展開することも重要です。各サブ課題の中核となるアプリケーションで高い性能が達成できなければ、研究開発そのものが先へ進みません。いかにして各アプリケーションの性能を高めていくかが、本格的な研究開発フェーズに入った現在の大きな課題です。そのために各研究者たちがさまざまな工夫を凝らしています。

実際にどのような状況かという、たとえば「FFB」では、次世代CPUを使用した場合に「京」と比較して100倍の高速化が達成できる見込みです(ほかのアプリケーションの開発状況については、本誌4~7ページをご覧ください)。これらはほぼ期待通りの成果であり、アプリケーションの高速化に関しては、目途が立ったといつてよいと思います。

### アプリケーション開発の先に求められるものは何でしょうか。

各アプリケーションで何をやるのが重要です。私たちはアプリケーションを2つの側面から評価しています。1つは高速化。つまり高い計算性能が達成できているかということです。もう1つはアプリが狙っている産業上の効果が本当に出せるかということです。本格的な実証研究はポスト「京」でなければ実現しませんが、確かな効果が出るのかを「京」による小規模な問題で検証する取り組みが各サブ課題で進められています。たとえばサブ課題Cではターボ機械分野でHPC技術を普及・拡大させるため、「FFB」の計算速度の向上

### いよいよ4月から最後の1年に入るわけですが、その展望についてお話しください。

1つには、この1年で開発を行っているアプリケーションを最終的にまとめ上げる必要があります。2つ目が先ほどお話しした産業上の効果の確認です。6つのサブ課題中、4つのサブ課題で上記の目途が立っているといいましたが、まだすべてが終わったわけではありません。今取り組んでいる課題を完遂させることが何よりも重要です。そして3つ目はアプリケーション計算性能の確認です。簡易的性能評価から、シミュレータを利用した性能評価、さらに、ポスト「京」の実ノードを使用した性能評価とフェーズがシフトするなかで、性能の向上を確認することが必要です。さらにその先に向けて備えていくことも求められます。ただ、今後の進め方で難しいのは、「京」が年度の半ばほどで使えなくなるため、それまでに産業上の効果が得られることを小規模な問題で確認しておかなければならないという点です。「京」が使えなくなっても、代替手段は用意されるでしょうし、そうした代替機のCPU性能は「京」より優れているはずですが、しかし、大規模な実証計算をするには「京」のように多数のCPUをまとめて使える環境が欠かせません。そのことを考えると、「京」が動いている間に大規模計算をすべてやってしまい、効果の確認を完遂させることが必要だと考えています。研究開発は残り1年ですが、各サブ課題とも産業界の今後の競争力強化に貢献できる高い成果が期待されています。ぜひ今後の成果に注目していただき、ものづくりの現場で実際に活用していただける日が来ることを願っています。



ポスト「京」重点課題⑧ 各サブ課題の研究開発状況と今後の展望



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) 大規模計算環境において高効率な多目的設計最適化アルゴリズムを開発し、実設計問題に適用してその有効性を実証する。  
(b) 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。  
(c) 次世代ワークフローシステム「WHEEL」による多目的設計探査ワークフロー自動化をサブ課題間連携に適用する。

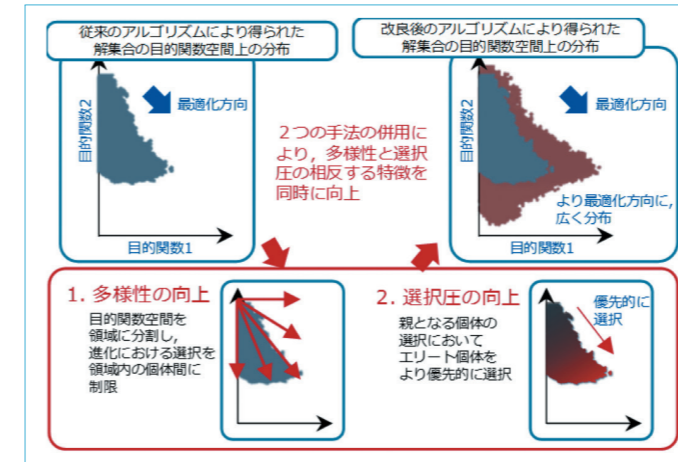
製品のライフサイクルにわたるコスト低減や高品質化に貢献できる意思決定の質的・時間的ブレークスルーを実現する新設計基盤を整備し、産業競争力強化に貢献できることを実証することを目的として研究開発を進めています。また、具体的な最終達成目標として、以下の3つを定義しています。

多目的設計最適化に関しては、ポスト「京」で利用可能となる大規模並列計算環境を活用し多目的設計最適化に必要な計算時間の削減を図ることを大きな目標の1つとして、(1)大規模集団サイズを利用した多目的進化アルゴリズムの採用、(2)選択圧を大きく向上させる新規手法の採用、(3)その弊害となる解集合の多様性の低

下を緩和する手法の採用、により大規模並列計算環境において優れた性能をもつ新しい大規模設計最適化アルゴリズムを開発しています(図)。また、サブ課題Bやサブ課題Cと連携して、多目的設計最適化の実問題での実証計算を進めています。

高速計算技術に関しては、時間領域並列化法、低B/Fアルゴリズムの開発の2つを進めています。時間領域並列化法については双曲型方程式の移流方程式への適用を実施し、性能評価を行っている段階です(時間領域並列化法はまだあまり知られていない技術なので、サンプルコード付きの書籍の出版を予定しています)。低B/Fアルゴリズムについては、重点課題⑥サブ課題Cで開発している「RIAM-COMPACT」への組み

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



込み作業を実施しています。また、低B/FアルゴリズムのGPU対応として、オリジナルコードに対してソルバー全体での性能評価で約3倍、等価なCPUコードに対して性能評価で約6倍の性能を出すことを目標に開発を進

めています。現在はNVIDIAと連携して、多ベクトルカーネルのOpen ACCによるディレクティブ実装評価を実施中です。

設計ワークフローに関しては、HPCI戦略プログラムにおいて開発整備した大規模シミュレーション実施基盤「HPC/PF」の知見をベースに、多数のジョブ実行管理を司る「WHEEL」を開発しており、キャパシティ・コンピューティング(多種多様な小中規模計算の同時多数実行)用途として重点課題⑥サブ課題Bや萌芽的課題2のアプリケーションでの試験利用が始まっています。

諮問委員より

産業界におけるものづくりは、仕様(目的関数)を実現するための最適設計・製造要件(設計変数)を追及するという「最適化」の連続です。最適化する仕様は複数で高度、しかも多くの場合、それらは互いにトレードオフの関係にあります。サブ課題Aのゴールは、そうした「多目的な設計探査」を効率的に行う革新的設計技術の構築ですが、産業界の実問題での評価を重ねており、産業競争力強化へ直接貢献するポテンシャルを実感しています。



株式会社原製作所  
技監  
**後藤 彰**



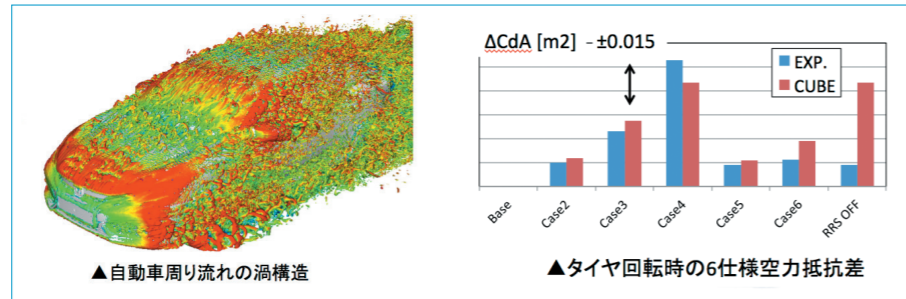
サブ課題 B リアルタイム・リアルワールド 自動車統合設計システムの研究開発

神戸大学大学院  
システム情報学研究所 教授  
**坪倉 誠**

すべく、「リアルタイム・リアルワールド自動車統合設計システム」と題して、その基盤アプリケーションとなる流体・構造統一シミュレーション「CUBE」の開発を進めています。「CUBE」では、流体運動と構造変形を統合的に扱える基

礎式を採用し、階層直交データ構造に基づいた離散化を採用することで、流体、構造、熱、音波等が連成し合う実走行状態を再現したリアルワールド問題に対応するとともに、ポスト「京」に代表される次世代ハードウェア・アーキテク

新素材や新たな動力を用いた次世代自動車をより少ない期間で、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による設計に対して、より高次元でCAEを活用した設計プロセスの革新が求められます。サブ課題Bでは、このような設計プロセスの革新を実現



チャに対して高い単体性能、並列性能を実現(現在までに、「京」において単体性能23.7%、ウィークスケーリングで並列化効率75.324899%を達成)。これに加えて、物体埋め込み境界法を独自改良することで、複雑な移動境界問題に対して高い対応が可能であるとともに、実際に産業界で用いられているような、部材間の重なりや隙間を含むCADデータから、人為的な表面修正をすることなしに直接メッシュ生成が可能となっています。

これにより、例えば空力解析では、1億セル規模のフルスケール自動車空力LES解析を、実際の開発車両CADデータからの格子作成も含めて十数時間で完了することを可能としています。さらに、自動車6自由度運動に加えてホイールの回転や舵角変化を考慮した実走行状態空力解析や、車体隙間から発生する狭帯空力音の直接解析等のリアルワールド解析を実現。一方構造解析では、実証解析として、エンジンブロックの振動解析や車体ホイットボディ強度解析を進めています。

特に今年度はこのシミュレーションを多目的最適化に適用すべく、サブ課題Aと連携して4目的、8設計変数の空力性能最適化を行いました。また、図に示すように、乗用車の国際燃費基準(WLTP)の認証取得に向けて、精度検証を行いました。この認証取得にむけては、空気抵抗精度に対して、

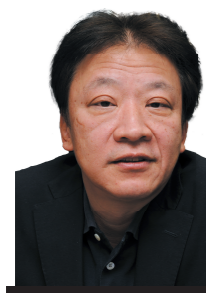
仕様違いの空気抵抗差を $\Delta C_d A$ (Aは車体投影面積)で $\pm 0.015[m^2]$ 以内で予測することが求められる見込みです。ここでは自動車会社から提供された実車CADデータ(1車種6仕様)に対して、「CUBE」による空力解析を行い、既存の非構造格子ベースのソフトウェアに対しておよそ1/7の時間で、要求される精度を実現していることがわかります。

諮問委員より

世界中で安全性能・環境性能の更なる高度化が求められる自動車業界では、より複雑な現象を、より短時間で予測可能なCAE技術を求めています。「CUBE」は、従来のCAE技術の課題であった「計算前処理の短縮(メッシュ構築)」、「計算時間の短縮」、「複雑運動(リアルワールド)の再現」の解決を目指しています。この技術は、従来の商品開発工程を短期化するのみならず、リアルワールドで最高の性能を発揮し、お客様に一層近づいた商品開発を可能にします。自動車業界としては、再現可能なシーンがより一層拡大できるため、さらなる短期化・高精度化に向けたCAE技術開発に期待しています。



マツダ株式会社  
ITソリューション本部  
エンジニアリングシステム部 部長  
**細川 大**



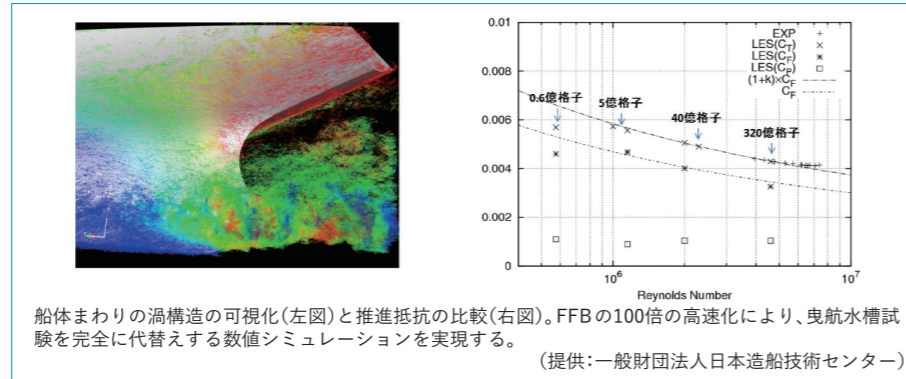
サブ課題 C 準直接計算技術を活用したターボ機械 設計・評価システムの研究開発

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**

(RANS)モデルによる解析と比較して、解析精度の大幅な向上や複雑な非定常流動現象の解明に大きな期待が寄せられています。しかし、ター

ボ機械の解析で重要となる、高レイノルズ数の境界層をLESにより解析するためには、膨大な数の計算格子が必要となることがこれまでポ

サブ課題Cでは、ターボ機械分野における、Large Eddy Simulation (LES) の実用化と適用範囲の拡大に向けたアプリケーションの研究開発を実施しています。LESは乱流中の支配的な渦を計算格子で直接計算する乱流の解析手法であり、従来のReynolds Averaged Navier-Stokes



ルネックとなっていて、産業界における本格的な実用化には至っていませんでした。そこで、本サブ課題では大規模なLES解析に関して多くの実績を有するアプリケーション・ソフトウェアである「FrontFlow/blue (FFB)」の計算速度を大幅に向上させ、LESの実用化を加速するとともに、圧縮性解析機能を実装し、LES解析の適用範囲を拡大することを目標として研究開発を進めています。さらに、計算資源量の大幅な削減を目指して、LES解析用の新たな壁面モデルの開発と実装を進めるとともに、計算格子の完全自動生成と流体騒音の直接計算が可能で、Lattice Boltzmann法(LBM)に基づく新規アプリケーション「FFX」の研究開発を進めています。

「FFB」の高速化に関しては、理化学研究所計算科学研究センター(R-CCS)と富士通株式会社の多大な協力を経てコアカーネルの徹底的な最適化を進めることにより、次世代のCPUにおいて「京」のCPUによる計算速度の約20倍の高速計算が実現できる見通しが得られています。さらに、計算アルゴリズムの工夫により5倍程度の高速化が達成できる見込みで、併せて100倍の高速化が達成できる見通しが得られています。これらの高速化の効果に関しては、一般社団法人ターボ機械協会内に設置した「ターボ機械HPC実用化分科会」のワーキンググループにおいて、ファンの性能・騒音の多

目的最適設計に適用し、その効果の予備的な検証を実施する予定です。その他、圧縮性解析機能の実装、LES解析用の新たな壁面モデルの開発、ならびに新規アプリケーション「FFX」の研究開発も順調に進んでいます。

諮問委員より

従来よりも高精度な解析が100倍の速さで可能になれば、AIで駆動する最適化設計を核とする自動設計、その先の自動生産までのターボ機械設計・生産一貫自動化が大きく進むのではないのでしょうか。また、この技術は設計者が計算機内に再現された複雑現象から、例えばエネルギーロスの起因となる流力的意味を読み取り、それを基に自由な発想でこれまでに無い高性能ターボ機械をデザインするといった、デザインエンジニアリングを推し進めるための核ともなり得ます。今後ターボ機械協会での連携などによる技術実用化を通じて、ターボ機械の設計・生産システム改革が加速すると確信しています。



株式会社日立製作所  
水ビジネスユニット  
技術アドバイザー  
**都築 浩一**



ポスト「京」重点課題⑧ 各サブ課題の研究開発状況と今後の展望

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



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**

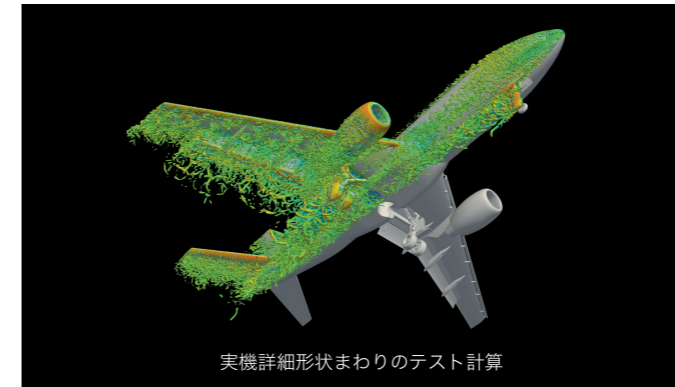
航空機の空力設計および運航プロセスに革新をもたらすコア技術として、従来解析で評価できなかった空力設計課題（航空機離陸時の騒音予測、パフェットオンセット・失速の予測、高揚力装置の最大揚力予測など）を、設計

に使えるレベル（精度、解析時間）で解析可能とすることを目指しています。そのため、実飛行条件での実機詳細形状全機周りの空力解析を高速・高精度で実現可能な圧縮性乱流解析プログラム「FFVHC-ACE」の開発を行っています。「FFVHC-ACE」はHPCI戦略プログラムにおいて「京」向けに開発された「FFV-HC」をベースに開発が進められ、「FFVHC-ACE」では階層型等間隔直交構造格子法と目的別壁面モデルを採用し、解析目的に応じて適切な壁モデル（形状壁面モデル、壁面モデルLES）を選択することになります。形状壁面モデルに関しては、複雑形状への高速自動格子生成を実現するIB（Immersed Boundary）法と、比較的単純形状向

けに高精度解析を実現するレイヤー格子法があります。壁面モデルLESに関しては、実飛行条件である高レイノルズ数流れの高精度乱流解析をポスト「京」クラスの計算機で実現するためには必須なものとなります。

現在、「FFVHC-ACE」は階層型等間隔直交構造格子法と形状壁面モデル（IB法）により、実機詳細形状周りの解析が可能となりました（図は実機詳細形状の解析例）。ここでは離陸形態を表現するため、機体、主翼、尾翼（水平、垂直）、エンジンナセルは勿論のこと、高揚力装置（フラップ、スラット、取付装置）、ランディングギアなども考慮した全機形状の解析を行っています。「FFVHC-ACE」では、機体形状データと

してSTLファイルを与えると、解析に必要な計算格子を自動作成して解析を実施。本解析では計算格子の作成時間は数十分と、従来と比較して劇的に短時間となり、計算のターンアラウンドの短縮に大きく貢献しています。



実機詳細形状まわりのテスト計算

諮問委員より

航空機開発の空力形状設計は、B767までは風洞試験に依存、莫大なコストと時間を要していました。80年代以降のCFD発展で、風洞試験時間は激減し、更には、実際の飛行条件（レイノルズ数）で設計するという技術革新までもたらし、平滑な形状と整齊とした流れの「巡航条件」でのCFDは、高い精度と優れた効率で、開発のコストと時間を大幅に削減しました。しかし、残る技術のフロンティアは、複雑な形状と多くの乱れを伴う「離陸条件」のCFD解析です。サブ課題Dで取り組み中の「実飛行条件、実機複雑形状」の流れ解析は、このフロンティアを切り拓き、航空機設計開発に再度大きな革命をもたらすものとして産業界は大いに期待しています。是非とも、日本発の航空機技術革命を起こして頂きたいと待ち望んでいます。



三菱重工業株式会社  
顧問  
**宮川 淳一**



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

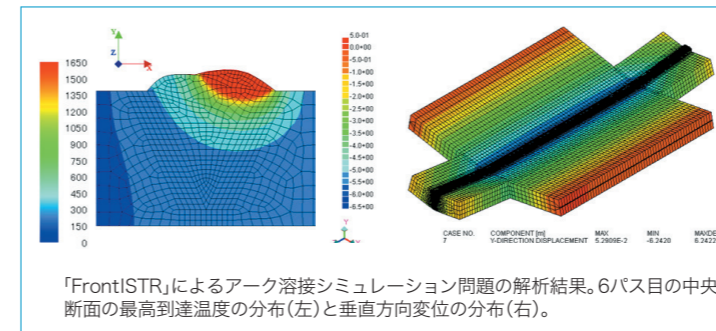
東京大学 新領域創成科学研究科 教授  
**奥田 洋司**

溶接工程は、自動車をはじめ、さまざまな工業製品の製造現場において、その根幹を支える重要な工程ですが、局所的な加熱・冷却によるひずみや溶接金属の収縮などによって、予測が難しい変形や残留応力による割れなどが生じることから、熟練工の経験に頼る部分が多い工程でもあります。高度な成形・溶接技術の深化

にCAEの活用が期待されていますが、複数の部品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などのため、十分に活用できていないのが実情です。そこで、大規模非線形構造解析ソフトウェア「FrontISTR」をベースとして「溶接工程における溶接順序探索及び逆ひずみ量推定の高精度化・高精度化」を目的とした、高度成形・溶接シミュレータの研究開発を進めています。

産業分野からのニーズを掘り起こすために行ったヒアリングからいくつかの最終的なターゲット問題を目標に据えてシミュレータの開発を進めています。これらの多くは数メートル級の領域を持つ一方で、評価しなければいけない溶接部は数mm程度で数μmの解像が必要となります。メッシュの粗密を考慮したとしても要素数

は数百億から数千億要素になります。また、溶接による収縮を高精度に予測するためには、溶接部ではない母材の接触状態と熱弾塑性の2つを同時に考慮する必要があります。これを達成するため、大きく3つのテーマに取り組んできました。1つ目は「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構築」です。アセンブリ／接触を考慮すると一般的に反復法の収束は不安定になるため、直接法を適用することが多いのですが、数千億要素を見据えた規模の超大規模並列計算では直接法の並列性能は頭打ちとなり、実用に供するツールとなりません。また解法と同時に、並列計算のためのプリ処理である領域分割も、既存ツールでは時間的・メモリの制約からターゲット規模の問題には適用できませんでしたが、今回これらの問題を解決すべ



「FrontISTR」によるアーク溶接シミュレーション問題の解析結果。6パス目の中央断面の最高到達温度の分布（左）と垂直方向変位の分布（右）。

く、アセンブリ／接触問題に適用可能な並列反復法の開発と分散並列領域分割ツールを開発しました。2つ目は「熱伝導・弾塑性変形の大規模双方向連成解析の構築」です。今までは熱の分布の計算と熱の分布が構造にひずみを生じさせる構造計算のプログラムを交互に計算していましたが、今回、相互作用を強連成させることで、より精度よく計算できるプログラム開発を行いました。3つ目は「プレス成形時のスプリングバックの影響を考慮した溶接解析の構築」です。従来の解析では、プレス成形時のスプリングバ

ックによる残留応力を無視していましたが、プレス成形・溶接の一連の工程を解析可能なプリ・ポストの機能を開発することにより、残留応力を溶接の初期条件として考慮できるようにしています。

溶接シミュレータに必要なプログラム部分の開発は順調に進んでいますが、今後は、これらを総合し、ターゲット問題に適用していく予定です。

諮問委員より

溶接のシミュレーションにおいては、実用化を重視して固有ひずみ法を採用したCAEソフトが主流ですが、適切な計算モデルの作成には経験とノウハウを要するとの印象があります。一方、熱伝導問題と弾塑性問題の、非線形とはいえシンプルな支配方程式を強連成型で解く「FrontISTR」は、高分解能な計算モデル作成が容易で、シミュレーション全体の高効率化が期待でき、溶接技術者が現場で調整するようなプロセスパラメータも設定し得ると想像します。溶接変形に加えて熱残留応力が計算できるため、溶接構造物の寿命予測等に有用で、将来は3D積層造形などへの発展性も秘めたアプリと考えています。



慶應義塾大学 教授  
**高野 直樹**



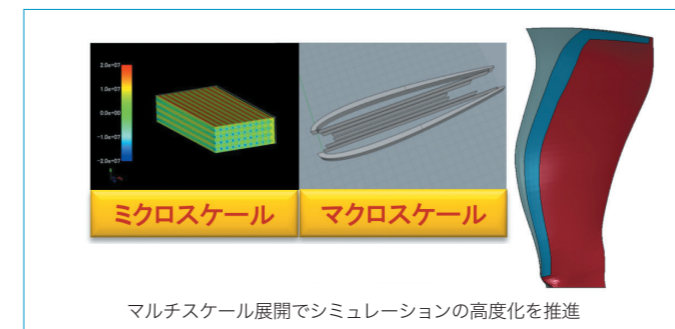
サブ課題 F マルチスケール熱可塑 CFRP 成形シミュレータの研究開発

東京大学生産技術研究所 教授  
**吉川 暢宏**

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP）は軽量化と強度を両立させる先進材料として期待されていますが、残念ながら鉄鋼材料を凌駕する域にまでは達していないのが現状です。航空機体の大胆なCFRP化が話題となりましたが、一般耐久財の

代表である自動車への適用は高級車に限定されている状況です。強度に関する懸念から熱硬化性CFRPが選択され、その成形に時間を要するため量産部品への展開が難しいことが主因です。その状況から脱却しようと、熱可塑性CFRPの活用が期待されています。鉄鋼材料においても成形プロセスが強度を左右しますが、熱可塑性CFRP材料の場合はその影響が顕著です。強度を保証する成形プロセスの決定方法に関して、試行錯誤以外の方法論がありません。有史以来営々と実用の経験を積んできた金属材料に比してCFRP利用の歴史は浅く、経験則を得るまでには至っていません。炭素繊維製造に関して、日本はトップランナーですが、その活用については欧米企業の後塵を拝しているのが現状

です。そのような状況を打開するため、CFRP材料の成形プロセスにまで立ち入ったシミュレーションソフトウェアの開発を行っています。「熱硬化CFRP」の成形に関しては「プロセスイノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」により実施済みで、ポスト「京」を睨んだ本研究プロジェクトでは、「熱解析」と「温度により変化する材料特性の導入」さらには「加工による大変形」の鼎立ちが必要な、より高度で計算負荷の高い「熱可塑性CFRP」の成形シミュレータの開発にチャレンジしています。愚直な方法論ではありませんが、「正確なシミュレーションの礎は正確な材料モデル」との原則に立ち、CFRP材料の構成単位である「樹脂」と「炭素繊維」



マルチスケール展開でシミュレーションの高度化を推進

を明確に分けるマイクロモデルを出発点として、ボトムアップ・アプローチにより開発を進めています。これまでの方法論は、CFRP材料を直交異方性連続体と捉え、現象論的にマクロな材料パラメータをフィッティングするとのトップダウン的アプローチを執っていました。本研究開発は、HPCIを活用してこの方法論の大転換を図るものであり、学術的にも意義の高いものです。正確な樹脂材料モデルを導入したマイクロスケール・シミュレー

ションを出発点として、マクロスケールへの展開を行い、試験片レベルではありますが、その有効性を検証しています。最終年度に向けて、熱可塑性CFRP製ジェットエンジン・ファンブレードの成形問題、あるいは自動車ボディの成形問題を通じて、開発したシミュレータの効果を実証していく予定です。

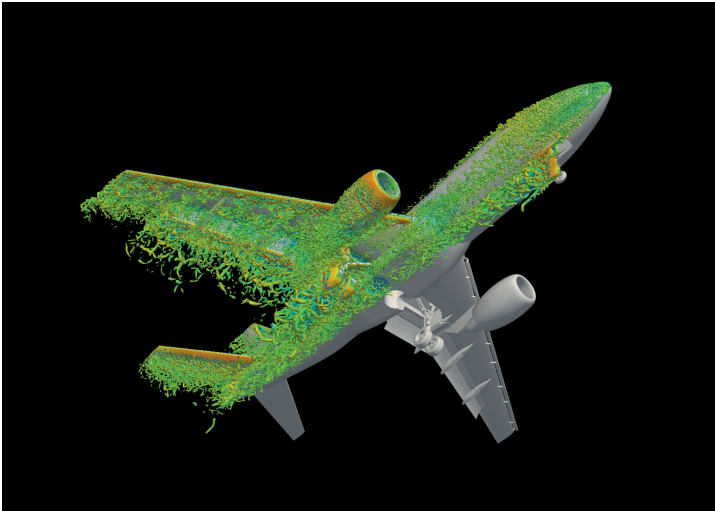
諮問委員より

熱可塑性CFRP材を使用する部品の製造（成形）プロセスを確立するにあたり、これまでは実用に足る適切なシミュレータが存在しないため、作ってはパラメータをいじるという“トライアルアンドエラー”を何度も繰り返す非常に効率の悪い開発を行ってきました。この状況からの脱却が、メーカーにとっては切実な課題です。学理（ミクロの振る舞い）に立ち返り、さらにミクロからマクロへつなぎ込んで、実際に起きる事象を説明するためには多分野にわたる基礎的な研究からの積み上げが必要であり、これはとても企業ではこなさきれない領域です。本課題の成果となるシミュレータに期待するところ大です。



株式会社IH  
航空・宇宙・防衛事業領域  
主席技監  
**金津 和徳**





## 今号の表紙

### ポスト「京」重点課題⑧ サブ課題D

サブ課題Dで開発する圧縮性乱流解析プログラム「FFVHC-ACE」による航空機の実機詳細形状まわりのテスト計算結果の可視化画像です。離着陸形態を表現するため、機体、主翼、尾翼、エンジンナセルは勿論のこと、高揚力装置（フラップ、スラット、取付装置）、ランディングギアなども考慮した全機形状の解析を行っています。「FFVHC-ACE」では、機体形状データとしてSTLファイルを与えると、解析に必要な計算格子を自動生成して解析を実施。本解析では計算格子生成時間は数十分と、従来と比較して劇的に短時間となり、計算のターンアラウンドの短縮に大きく貢献しています。

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 准教授  
高木 亮治

## 編集後記

今号は、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」を特集しました。このプロジェクトは2014年度に開始し、2016年度から本格的な研究が推進されています。研究開発も残り1年となり、6つのサブ課題担当者らはそれぞれの成果創出に向けて万全の取り組みを行っています。特集記事では、課題責任者の加藤千幸教授に全体の展望について語っていただくとともに、各サブ課題責任者らに進捗状況を記していただきました。今後のものづくりを支える革新的な技術の実用化に向けて、産業界からも大きな期待が寄せられています。



## 計算工学ナビ オフィシャルサイト

本誌のPDF版やソフトウェアライブラリ、ニュースなどのコンテンツを提供しているWebサイトは下記のURLからアクセスできます

<http://www.cenav.org/>



## 計算工学ナビ Vol.16

発行日：2019年3月13日

発行：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

〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

office@ciss.iis.u-tokyo.ac.jp