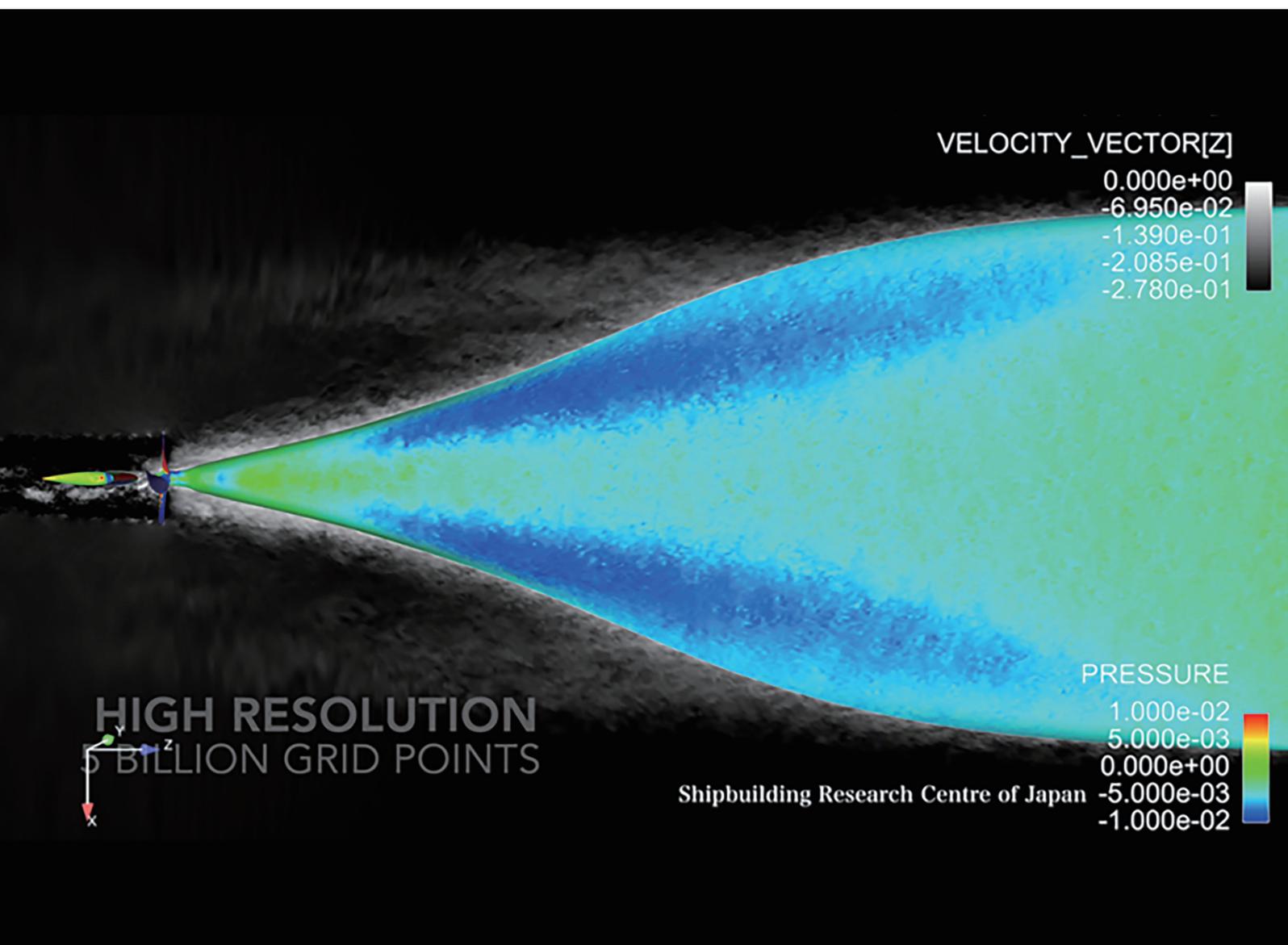


計 算 互 学 ナ ビ

計算工学ナビ・ニュースレター2021年春号



特集 「富岳」成果創出加速プログラム

「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発

ターボ機械の性能予測の革新を目指して 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 加藤 千幸

「富岳」で目指す革新的自動車空力性能予測技術の研究開発 神戸大学大学院システム情報学研究所/理化学研究所計算科学研究センター 坪倉 誠

スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用

石炭ガス化炉のスーパーシミュレーション 東京大学大学院工学系研究科 吉村 忍

洋上ウインドファームのスーパーシミュレーション 東京大学大学院工学系研究科 吉村 忍

航空機フライト試験を代替する近未来型設計技術の先導的実証研究

最新の圧縮性LES研究と「富岳」で航空機開発に第二のイノベーションを 東北大学大学院工学研究科 河合 宗司

産業界における「富岳」の利用促進

「富岳」を産業界で活用するための株式会社ヴァイナスの取り組み 株式会社ヴァイナス 藤川 泰彦

「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発 ターボ機械の性能予測の革新を目指して

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

加藤 千幸
教授・センター長



3つのサブ課題を実施

スーパーコンピュータ「富岳」(以下、「富岳」)の共用開始が本年4月に迫っています。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では文部科学省のプロジェクト「『富岳』成果創出加速プログラム」の1課題である、「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発を2020年(令和2年)4月から実施しています。この課題の主たる応用分野は自動車、およびターボ機械です。ターボ機械分野においては、「ポスト『京』重点課題」で抜本的な高速化を進めてきた、有限要素法によるLES (Large Eddy Simulation) 解析ソルバーである「FrontFlow/blue (以下、FFB)」, および九州大学で開発・高速化を進めてきた圧縮性流れ解析ソルバーを利用して、以下に紹介する3つのテーマ(サブ課題)を実施しています。

数値曳航水槽の実現と省エネデバイス による推進効率の向上

「富岳」を利用して、船体まわりの流れを完全に再現するシミュレーションを実現し、水槽試験を代替できることを実証するとともに、推進効率の向上を図るために船尾に付加するデバイスのメカニズムを解明し、船体の推進効率の向上に資することを目的としています。このテーマは一般財団法人日本造船技術センターが中心となり、ジャパン マリンユナイテッド株式会社、日本シップヤード株式会社、株式会社名村造船所、および株式会社三井造船昭島研究所などの協力を得て実施しています。

スーパーコンピュータ「京」(以下、「京」)の時代にすでに320億要素を用いて船体表面近傍の直径700 μ m程度の小さな渦まで解像するLES計算を実施し、摩擦抵抗、形状抵抗、造波抵抗などの船体抵抗やプロペラと船体まわりの干渉効果を表す、自航要素とよばれるパラメータを水槽試験の誤差の範囲内で予測できることを確認していました。しかし、「京」の時代は計算に2日以上かかったため、このような計算を実用化するには至りませんでした。そこで、「FFB」の徹底した高速化を実施し、「京」に対してノード性能で35倍の高速化を実現しました。この成果を用いて、数値シミュレーションによって水槽試験を代替できることを実証します。表紙画像に計算結果の一例を示します。

細隙部を含めた多段遠心ポンプの内部 流れのWall-Resolved LES

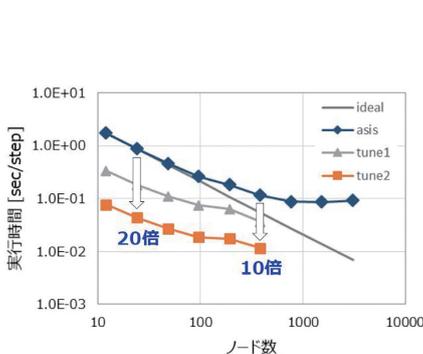
「富岳」を利用して多段遠心ポンプの内部流れの高精度なシミュレーションを実現し、試験を代替できることを実証するとともに、これまで解明されていなかった複雑な流動現象を解明することを目的としています。このテーマは九州大学、株式会社荏原製作所、株式会社日立インダストリアルプロダクツが中心となって実施しています。図1に計算結果の一例を示しますが、羽根車の直径は30cm程度ですが、ポンプにはライナー部とよばれる100 μ m程度の狭い隙間内の流れや羽根車や案内羽根内の流れと複雑な干渉をする、羽根車の側室内の流れがあります。ポンプを設計点の近くで運転する場合はこれらの流れはあまり重要ではありませんが、流量が小さい状態で運転する場合はこれらの流れによる損失や羽根車に作用する流体力の変動などが問題となります。本テーマでは細隙部内の流れも含めた高精度な計算を実現します。現在、計算メッシュの調整などを実施しており、4月に「富岳」の共用が開始されたらすぐに本計算を実施すべく、準備を進めています。

圧縮機サージの直接解析

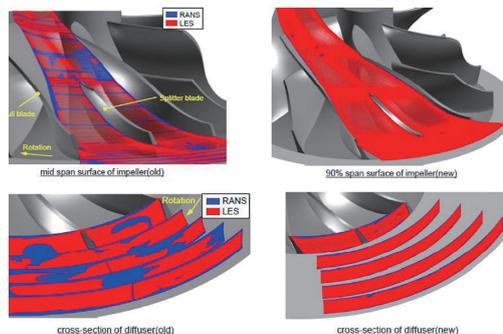
圧縮機は化学プラントや自動車などで用いられる重要な機械です。圧縮機に流れる空気の流れを小さくしていくと、サージといって逆流を伴う大きな変動が発生し、圧縮機の運転ができなくなります。したがって、サージの発生を避けることは必須ですが、これまでサージの発生は実験的にしか確認することができず、数値シミュレーションによりサージの発生を予測できた例はありません。このテーマでは圧縮機サージの直接解析を実現し、サージのメカニズムを解明するために、九州大学を中核機関として株式会社IHI、三菱重工コンプレッサ株式会社などの協力を得て実施しています。羽根車の回転数は2 kHz程度であるのに対して、サージの周波数は5 Hzから20 Hz程度です。したがって、サージの直接計算を実現するためには非常に長時間にわたり非定常計算を続ける必要があり、いわゆるストロングスケールによる並列化効率の向上が本テーマの成否の鍵を握っています。現在、一般財団法人高度情報科学技術研究機構の高度化支援を受けて、アプリケーションの速度向上を図ったり(図2)、計算格子を調整したり(図3)しています。間もなく、本計算を開始する予定です。以上のように、4月からの「富岳」の共用開始に向けて、当グループでは着々と計算の準備を進めてきました。計算結果はまたの機会にご紹介いたします。



▶ 図1
多段遠心ポンプ内部流れのLES計算結果



▲ 図2
圧縮機サージ計算に用いるアプリケーションの計算速度の向上



▲ 図3
DES (Detached Eddy Simulation) 計算に用いる計算格子の調整

「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発

「富岳」で目指す革新的自動車空力性能予測技術の研究開発



神戸大学大学院
システム情報工学研究科
理化学研究所計算科学研究センター

坪倉 誠
教授・チームリーダー



われわれのグループでは、「富岳」の有する高い計算性能を有効に引き出すアプリケーションソフトウェアを駆使して、電気自動車や自動走行車などの次世代自動車の設計・開発に貢献するためのHPCシミュレーション技術の構築と実証に関する研究開発をしています。具体的には、(1)リアルワールド自動車空力性能の予測と、(2)リアルワールド自動車空力音予測の2つのテーマを掲げ、理研産学連携「HPCを活用した自動車用次世代CAEコンソーシアム」にて活動を行っています。

アプリケーションとしては、格子ボルツマン法に基づく「FFX」、階層直交格子に基づく複雑現象統一解法「CUBE」を用います。「CUBE」は、解析領域をサイズの異なる立方体(cube)で領域分割(八分木)し、全てのcubeに対して三次元方向に同数の等間隔メッシュを配置することで、格子作成を行います。アプリ開発においては、このcubeを基準としてコーディングすることで、データ構造が著しく簡略化できます。並列計算の際は各ノードに割り当てるcubeの数をできるだけ同じにすることで、ノード間の演算負荷を均等にすることができ、超並列環境下でも高い並列性能を達成することができます。「CUBE」の「富岳」への実装とチューニング状況については、現在、1ノード単体性能(4コアメモリグループ)については、圧縮性ナビエストークス解析において、ピーク性能比6.38%、1コアメモリグループ比3.59倍の性能向上を達成しています。アプリのカーネル性能としては、大きく対流項計算と粘性項計算にわたることができ、前者についてはメモリスループに、後者についてはキャッシュミスについて、まだまだ改善の余地があると見ており、さらなるチューニングを進める予定です。



(1)では、変動風下での車体六自由度運動と空力をカップリングさせたリアルワールドシミュレーションを実現させ、空気抵抗や操安性に与える変動風や車体運動の影響やそのメカニズム解明を目指します。ここでは車両運動解析には、マルチボディダイナミクス解析のオープンソースソフトウェアである「Chrono」を用いています。「Chrono」を用いることで、自動車のタイヤ特性やサスペンション、ステアリング機構を合

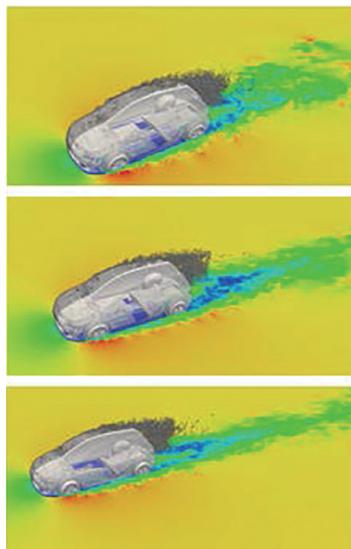
む詳細な車両運動の再現が可能であり、空力解析を担当する「CUBE」と双方向連成させることで、実走行時の非定常空力特性を考慮した高い空力操安性評価が可能となります。また、ソースレベルでの連成が可能なので、プラットフォームを問わず実装が可能です。図1はこの機能を活用してレーンチェンジする自動車の空力・運動解析を行った例です。実開発に用いたCADデータにより車体形状を詳細に再現したほか、ホイールの回転はもちろんのこと、ハンドル操作に伴う前輪舵角変化も再現しています。また、ドライバーモデルによる自律走行により、車体に作用する空気力や車両運動挙動の時間変化のみならず、ドライバーのハンドル入力まで再現されています。これにより、操安評価における空力の影響解明が一步進むと期待されます。

(2)では、実走行中に発生する自動車空力音を大きく狭帯域音、広帯域音、車内騒音に分類し、対象に応じて「FFX」と「CUBE」を活用して空力音発生メカニズム解明を目指します。テーマ主査は豊橋技術科学大学の飯田明由先生が担当します。今年度実施した解析一例として、「CUBE」による狭帯域音予測の結果を図2に示します。ここではボンネットと車体の隙間から発生する空力音を対象としています。このテーマは、「京」でもフィジビリティスタディとして実施していたもので、狭帯域音の発生については予測できていましたが、解像度の不足からか、ピーク音圧の大きさに実験との差異が確認されていた問題です。現在は解像度を0.1mmまで高

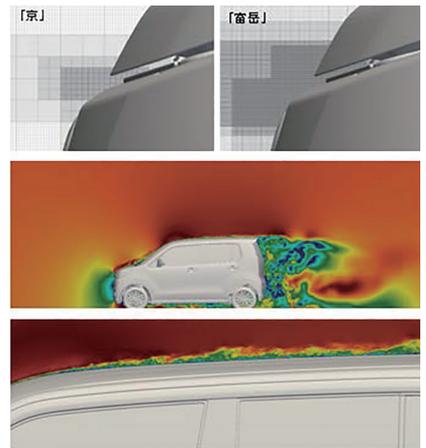
め(総格子数110億セル)、解析を進めています。広帯域音については、空力音予測では定評のある「FrontFlow/blue」も活用して、ベンチマーク問題による「FFX」の性能評価と改良が進められています。



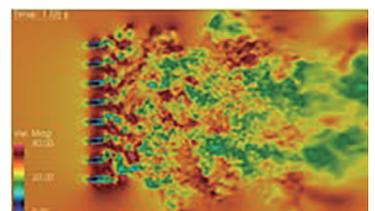
(1)と(2)に共通する開発項目として、自然風の再現が挙げられます。空気抵抗に与える変動風の影響や突風時の操安評価、さらには間欠的なバサバサ音の発生など、実走行時の車両空力評価において、大気変動風の影響は避けて通れないものであり、現在、風洞実験などでも大気変動風の再現が試みられています。ここでは大気変動風の特性として、乱流強度やスペクトル、積分長さなどに着目してシミュレーションによる変動風の生成、特に変動特性を自由にコントロールできる変動風ジェネレータの開発を進めています。自動車空力を対象とした変動風風洞では、ピッチ運動する翼を用いた乱流生成が一般的であり、今年度は、シミュレーションの特性を生かした、より自由度の高い加振運動による乱流の生成や(図3参照)、乱数を活用した乱流生成装置の有用性の検討を進めています。このような研究開発を産学連携コンソーシアムで進めることで、システムの開発に不可欠な実車両を用いた信頼性の高い実走行テストデータの提供を受けたり、HPCシミュレーション技術を産業界に普及展開できるなど、双方にとってメリットの高い活動となっています。



▲図1
レーンチェンジする自動車の空力・車両運動連成シミュレーションの例
(協力:トヨタ自動車)



▲図2
ボンネットと車体の隙間から発生する狭帯域音予測に向けた格子(上)と「富岳」による解析結果(下)
(協力:スズキ)



▶図3
加振翼を用いた変動風の生成
(協力:本田技術研究所)

スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用 石炭ガス化炉のスーパーシミュレーション



東京大学大学院
工学系研究科
吉村 忍 教授



デジタル革命が急速に進み、知識集約型社会へのパラダイムシフトが起きつつあるなかで、わが国では、世界に先駆けて、サイバー（仮想）空間とフィジカル（現実）空間を高度に融合させたシステムによって経済発展と社会課題の解決を両立し、ヒューマンセントリックな豊かな社会 Society5.0の実現を目指しています。同時に、Society5.0を支えるエネルギーシステム、特に電力システムに目を転じると、エネルギー資源小国であるわが国にとって、エネルギー問題はエネルギーセキュリティの観点からも地球温暖化問題対応に向けた国際的責務の観点からも喫緊の重要課題です。2018年に決定された第5次エネルギー基本計画においては、「安全性」、「安定供給」、「経済効率性の向上」、「環境への適合」というエネルギー政策の基本方針にのっとり、電源構成については、あらゆる面（安定供給、コスト、環境負荷、安全性）で優れるエネルギー源はないとの前提のもとに、エネルギー源ごとの特性を踏まえ、エネルギーミックスの確実な実現に向けた取り組みを強化することとなっています。さらに、2020年にはカーボンニュートラルへの取り組みが一気に加速し、2019年12月の欧州グリーンディールの発表を皮切りに、中国、米国などの発表に続き、わが国においても昨年12月にグリーン成長戦略が発表されました。

私たちは、2020年4月にスタートした文部科学省『「富岳」成果創出加速プログラム』において、Society5.0を支える電力システムの主要クリーンエネルギー源として期待されるCCS（Carbon dioxide Capture and Storage）技術の適用に適した次世代火力発電システムの主要構成機器である石炭ガス化炉と超臨界圧CO₂ガスタービン、および洋上ウィンドファームについて、それぞれの高精度かつ高速なデジタルツインを構築し、実機エネルギーシステムの開発、設計、運用の最適化に活用できるようにして、それらの実用化を大幅に加速することを目的とした研究開発を進めています。

具体的には、本プロジェクトに先立ち2014年12月から2020年3月まで進めてきた文部科学省ポスト「京」重点課題⑥「革新的クリーンエネルギーシステムの実用化」プロジェクトにおいて、「富

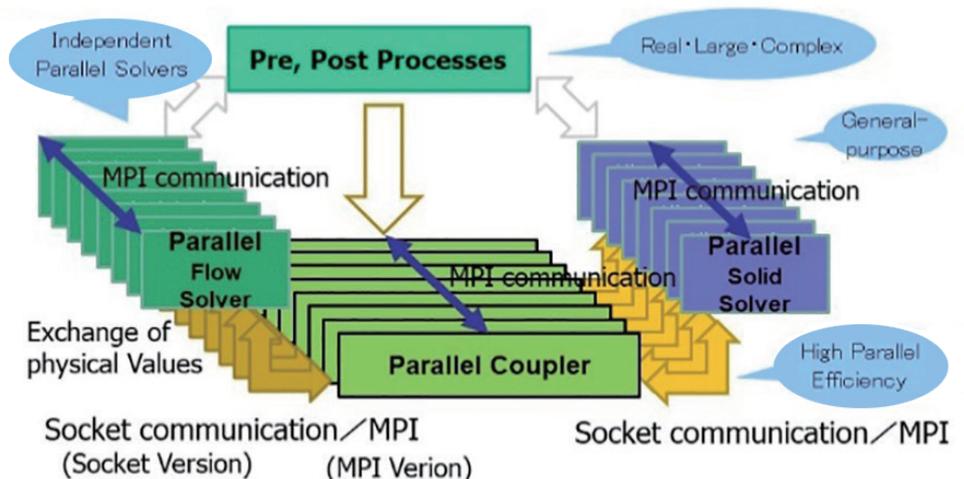
岳」での活用を念頭に開発を進めてきたアプリケーション群（「ADVENTURE」、「FFB」、「FFR-Comb」、「REVOCAP_Coupler」、「RC（RIAM COMPACT）HPC版」）に基づくマルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーション（スーパーシミュレーションと称する）とAI（機械学習）を連携活用し、各クリーンエネルギーシステムの高精度かつ高速なデジタルツインを構築します。

ここでは、石炭ガス化炉のスーパーシミュレーションの現状について述べます。FVM（有限体積法）に基づく並列LES燃焼流解析コード「FFR-Comb」はガス化炉の燃焼部やスラグ流の固気液三相燃焼解析を担い、FEM（有限要素法）に基づく並列熱伝導解析コード「ADVENTURE_Thermal」は、炉容器内の熱伝導解析を担います。炉容器内表面には燃焼部より高熱負荷が加えられますが、同時に炉容器内に埋め込まれた複数の冷却管を流れる冷却水によって強制冷却されます。このため、「ADVENTURE_Thermal」には、冷却管内の1次元の移流拡散解析を担当する解析機能が追加実装されています。燃焼部の外表面、すなわち炉容器の内表面が連成界面となり、この部分で熱の授受が行われます。「FFR-Comb」から「ADVENTURE_Thermal」への熱流束Qの送受信と、「ADVENTURE_Thermal」から「FFR-Comb」への壁面温度Twの送受信を通して、両ソルバー間の双方向連成解析を実現します。並列計算実行中の熱流束と炉容器壁面温度のオンライン送受信は、並列カプラー「REVOCAP_Coupler」によって実現します。図に並列連成解析時の各ソルバーとカプラーの通信のイメージを模式的に示

します。さらに、一連の双方向連成解析が終了後は、炉容器内の温度分布の時刻歴解析結果を、並列非線形固体力学解析コード「ADVENTURE_Solid」に入力して、炉容器の非線形熱応力挙動を評価することができます。

現在、本スーパーシミュレーションのV&V（Verification and Validation）を目的として、（財）電力中央研究所のラボスケール石炭ガス化炉の解析を進めています。燃焼部のFVMモデル規模は1.19億要素、炉容器部のFEMモデル規模は1.56億要素、連成面モデル規模は流体部が63万節点、固体部が24万節点です。また、本非定常解析では、準定常状態の解を求めることが目的であることから、燃焼部と炉容器熱伝導部の特性に合わせて、1時間ステップを流体部は10-6秒、炉容器部は10-2秒に設定しました。本解析により、燃焼部の温度分布やCO分布、炉容器部の温度分布、スラグ流の様子を定量的に評価できます。「京」を用いた解析では、流体部のLES燃焼解析に9,216領域分割、9,216コア（1,152ノード）、炉容器部の熱伝導解析に2,048領域、2,048コア（256ノード）を用いました。1時間ステップあたりの燃焼部の解析にかかった時間は2.68秒、炉容器の熱伝導解析は0.66秒、連成計算や通信などの処理時間は0.13秒でした。

「富岳」を用いた次なるターゲット問題として、燃焼部の容量が電中研炉の約30倍となる、ベンチスケール炉（三菱重工炉）のスーパーシミュレーションの準備を進めています。



▲並列連成解析時の各ソルバーとカプラーの通信のイメージ

スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用 洋上ウィンドファームのスーパーシミュレーション



東京大学大学院
工学系研究科
吉村 忍 教授



エネルギー資源小国であるわが国にとって、エネルギー問題はエネルギーセキュリティの観点からも地球温暖化問題対応に向けた国際的責務の観点からも喫緊の重要課題です。2018年に決定された第5次エネルギー基本計画においては、「安全性」、「安定供給」、「経済効率性の向上」、「環境への適合」というエネルギー政策の基本方針にのっとり、電源構成については、あらゆる面（安定供給、コスト、環境負荷、安全性）で優れるエネルギー源はないとの前提のもとに、エネルギー源ごとの特性を踏まえ、エネルギーミックスの実現に向けた取り組みを強化することとなっています。さらに、2020年にはカーボンニュートラルへの取り組みが一気に加速し、2019年12月の欧州グリーンディールの発表を皮切りに、中国、米国などの発表に続き、わが国においても昨年12月にグリーン成長戦略が発表されました。

私たちは、2020年4月にスタートした文部科学省「『富岳』成果創出加速プログラム」において、Society5.0を支える電力システムの主要クリーン

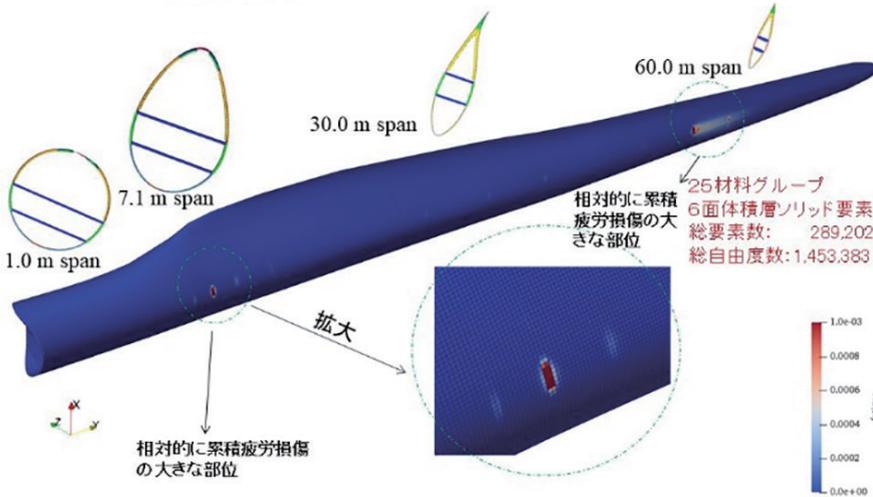
エネルギー源として次世代火力発電システム及び洋上ウィンドファームについて、それぞれの高精度かつ高速なデジタルツインを構築し、実機エネルギーシステムの開発、設計、運用の最適化に活用できるようにして、実用化を大幅に加速することを目的とした研究開発を進めています。

具体的には、2014年12月から2020年3月まで進めてきた文部科学省ポスト「京」重点課題⑥「革新的クリーンエネルギーシステムの実用化」プロジェクトにおいて、「富岳」での活用を念頭に開発を進めてきたアプリケーション群（「ADVENTURE」、「FFB」、「FFR-Comb」、「REVOCAP_Coupler」、「RC (RIAM COMPACT) HPC版」）に基づくマルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーション（スーパーシミュレーションと称する）とAI（機械学習）を連携活用し、各クリーンエネルギーシステムの高精度かつ高速なデジタルツインを構築します。

ここでは、洋上ウィンドファームのスーパーシミュレーションの現状について述べます。わが国では、2030年に400万kWの洋上ウィンドファーム開発が計画されています。1基あたりの発電設備容量が5MW～20MWに及ぶ大型発電用風車は高さ243mの東京都庁並みの大きさがあり、洋上ウィンドファームでは、それらが数百m～1km間隔で数十機が並ぶ規模となります。この

ような実機大規模風車を対象とした解析では、ブレードまわりに生じる数ミクロンの渦から、風車後流（wake）の数m～数十mの渦、大気境界層内の数百m～1kmに及ぶ巨大な乱れを同時に解析する必要があり、高精度のマルチスケール解析が発電性能や疲労寿命を高精度に予測する上で本質的に重要となります。サイトごとの風況（年間の風速分布や風向分布）を考慮しつつ、大型風車間の相互干渉、すなわち上流側配置風車の後流による下流側配置の風車の発電性能低下を高精度に予測し、同時に後流に晒される後方配置風車の流体構造連成振動に基づく累積疲労損傷評価を高精度化し、その情報に基づき適切に保守運用していくことが必須となります。

現在大型風車としては、風車ブレード構造などについて詳細な情報が公開されている米国再生可能エネルギー研究所（NREL）の5MWモデルを対象としました。大型風車まわりの大規模マルチスケールLES流体解析には、並列LES乱流解析コード「FFB」を用い、単基の解析や2基を直列にタンデム配置したモデルの解析を実施し、風車の発電性能および後流の影響を受ける後方配置風車の発電性能低下を高精度に評価します。さらに、「FFB」から得られる風車ブレードに作用する流体力分布の時刻歴データを、複合材料構造を詳細にモデル化した風車ブレードの構造解析モデルに入力し、並列構造解析コード「ADVENTURE_Solid」を用いて動的応答解析を実施します。そこから得られた詳細な応力の時刻歴データを元に「ADVENTURE_Fatigue」を用いてブレード内に生じる累積疲労損傷分布を定量的に評価します。この連成解析を通して、流入風速、そこに重畳する乱流成分、大気境界層のシェア、後流などの流体の複雑な特性が、累積疲労損傷に与える影響を詳細に分析することも可能となります。「FFB」から「ADVENTURE_Solid」へのデータのオフライン受け渡しは、石炭ガス化炉のスーパーシミュレーションの項で述べた「REVOCAP_Coupler」の並列データ変換機能を活用します。さらに、大型風車が数十基並ぶ洋上ウィンドファーム全体を対象とした多風向（16～24方位）のLES乱流解析には、「RC HPC版」を活用します。「RC HPC版」では、ラインアクチュエータモデルと呼ばれる工学近似モデルによって風車をモデル化しています。このため、先に述べたタンデム配置モデルの解析を「FFB」と「RC HPC版」を用いて独立に行い、両結果を比較検討することによって、「RC HPC版」の風車モデルの高度化を計画しています。図に、定格風速を与えた際の風車ブレードの累積疲労損傷解析事例を示します。



▲ NREL5MW 風車ブレードの累積疲労損傷解析事例

航空機フライト試験を代替する近未来型設計技術の先導的実証研究

最新の圧縮性LES研究と「富岳」で航空機開発に第二のイノベーションを



東北大学大学院工学研究科
航空宇宙工学専攻

河合 宗司 教授



航空機は空気の力を使って飛ぶことが基本原理であることから、空力性能の予測・評価は航空機開発における一丁目一番地といわれることもあり、非常に重要な要素になります。この航空機空力設計に革新をもたらしたのは、1970年代後半からの時間平均流れ場を対象とする圧縮性CFD（数値流体力学）技術（RANS < Reynolds-Averaged Navier-Stokes > 解析）の発展とスパコンの登場でした。これにより、従来の莫大なコストと時間を要する風洞試験への依存度は激減し、CFD技術は今や航空機開発に欠かすことのできない技術となっています。これは圧縮性CFDに関する基礎学術研究成果とスパコンの登場が実を結んだ、航空機空力設計における（第一の）大きなイノベーションといえるでしょう。

しかし一方で、航空機空力設計で用いられているRANS解析は、ひとたび巡航条件から外れ、流れの非定常現象が支配的になったり、離着陸時の高揚力装置など複雑な形状になると、途端に空力予測精度が悪化し、設計に使うことが困難となります。離着陸性能を決める最大揚力や失速予測、高速飛行域の飛行限界や安全性に関わる遷音速バフェット境界予測などが、その代表例です。このため現状では、開発下流段階の実機フライト試験など試験機製造後でないと評価できない空力上の重要課題が残っており、開発下流段階での重大な設計の手戻りや開発リスクとなっています。『「富岳」成果創出加速プロ

グラム』の「航空機フライト試験を代替する近未来型設計技術の先導的実証研究」課題では、非定常な圧縮性流体現象を高忠実に再現するLES（Large-Eddy Simulation）解析に関する近年の基盤学術研究成果と「富岳」により、この課題を解決に導き、さらには本技術が現状の実機フライト試験への依存度を激減させる、航空機空力設計における第二のイノベーションとなり得ることを先導的に実証していくことを目指しています。



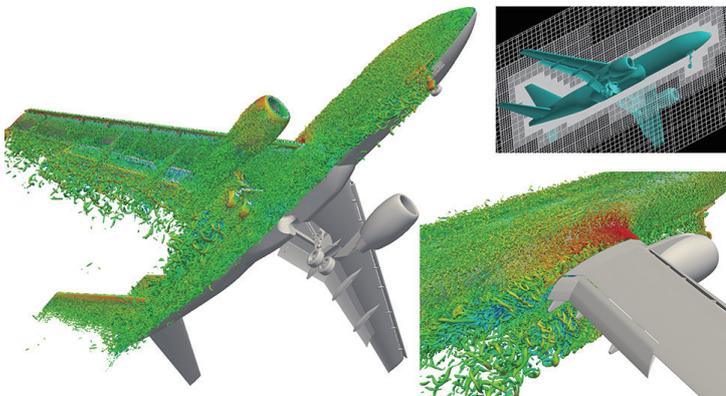
本課題で開発している基盤アプリケーション「FFVHC-ACE」は、航空機実機複雑形状・実飛行レイノルズ数 $Re_c \sim 10^7$ での圧縮性LES解析を実現させ、ものができる前の設計初期段階で上記空力設計上の重要課題に対する予測評価精度を抜本的に向上させることを目指したアプリとなっています。また格子生成を含め、設計プロセスに使える解析速度で航空機実機複雑形状の解析を実現するため、階層型等間隔直交格子法と埋め込み境界法ベースの壁面モデルLESを用いた複雑形状への自動格子生成技術を基盤とし、より形状再現性の高いレイヤー格子を壁面近傍に配置するオプションも持たせる形で開発を進めています。いずれの場合も、LESが可能なレイノルズ数を飛躍的に上げる必要があり、壁面近傍内層乱流をモデル化する独自の学術成果・壁面モデルLESが実装されていることが特徴の1つです。

本課題における「FFVHC-ACE」のターゲットは、航空機の離着陸性能を決める重要な空力特性である最大揚力の予測評価に設定しています。図1はそのテスト解析結果ですが、世界初となる航空機実機複雑形状・実飛行レイノルズ数での圧縮性LESによる空力予測評価を実証し、本手法が実機フライト試験を代替する次世代の航空機設計開発技術と成り得ることを先導的に示していきたいと考えています。また本課題では、高

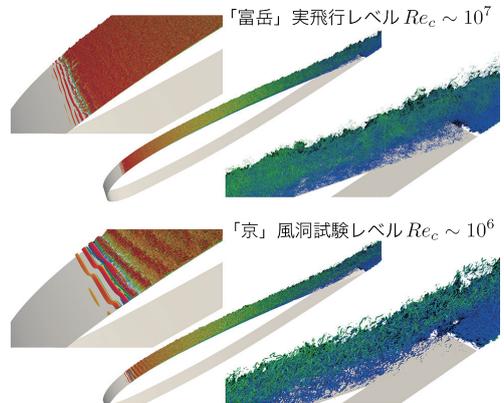
次精度（6次精度コンパクト差分法）構造格子ソルバーと「富岳」を用いることで初めて可能となる、実飛行レイノルズ数レベル $Re_c \sim 10^7$ の主翼基本形状を対象とした380億点規模の大規模LES解析も実施しています。図2は「富岳」を用いた最新の解析結果で、「京」で実施可能であった風洞試験レベルのレイノルズ数 $Re_c \sim 10^6$ と比べると、翼前縁での乱流遷移が早まり（遷移形態も変わっています）、失速を引き起こす翼後縁での乱流剥離が抑えられる傾向にあることが分かり、航空機空力性能におけるレイノルズ数依存性の強さが改めて見て取れます。実飛行レイノルズ数レベル $Re_c \sim 10^7$ の翼型LES解析は世界初の成果であり、今後モデル開発や検証のためのデータとすることはもちろんのこと、高精度な高レイノルズ数乱流データベースとして広く公開し、成果を学術界・産業界が広く享受できるようにしていく予定です。

以上のように本課題で実施する解析は、どれも数百から数千億点規模の大規模非定常流解析となります。本課題では、これら次世代の大規模複雑流体現象データからキーとなる流体現象をどのように抽出し、解析するか、さらにはCapability ComputingからどうCapacity Computingにつなげていくか、についてもある一定の方向性を示していきたいと考え研究を進めています。

最後にありますが、本課題では、1970年代後半からの圧縮性RANS研究やスパコンの登場が風洞試験への依存度を激減させ、航空機開発に第一のイノベーションを起こしたように、われわれが進める最新の圧縮性LES研究と「富岳」の登場が、次世代の航空機空力設計技術として航空機実機フライト試験への依存度を激減させ、航空機開発に第二のイノベーションをもたらすよう、研究開発を進めていきたいと考えています。



▲図1 「FFVHC-ACE」による航空機全機離着陸形態複雑形状の解析例



▲図2 「富岳」を用いた実飛行レイノルズ数レベルの主翼基本形状大規模LES解析

上図：「富岳」で実施した実飛行レイノルズ数 $Re_c \sim 10^7$ のLES解析
下図：「京」で実施した風洞試験レベル $Re_c \sim 10^6$ のLES解析

「富岳」を産業界で活用するための株式会社ヴァイナスの取り組み



株式会社ヴァイナス

藤川 泰彦
代表取締役社長



株式会社ヴァイナスは、CAEやCFDに関連したソリューションやサービスを通して、自動車、航空、重工業、創薬など、さまざまな分野の大規模・高速・最適設計を支援しています。特にHPCの利用につきましては、数値計算の高速化・高機能化や設計者を想定したシステム構築サービスなどを推進してきました。これらの実践を踏まえ、「富岳」を産業界で活用するためのさまざまな取り組みについて紹介します。

「富岳」クラウドと利用支援サービス

理化学研究所による“「富岳」のクラウド的利用にむけたプロジェクト”として、理化学研究所、計算科学振興財団(FOCUS)と「APSサービス」、「商用アプリケーションの利用環境提供サービス」、「準最適手法スケジューリングサービス」の共同研究に取り組み、サービスの実現可能性と効果を検証しています。本プロジェクトでは、流体解析ソフトウェア「HELYX」を対象に「富岳」のクラウド的利用を想定して、プログラムの移植や性能評価を実施しています。商用ライセンスの課金方式やユーザーサポート提供方法なども含め、クラウドサービスによる事業収益モデルについても検討しています。

「富岳」を活用する商用アプリケーション

「HELYX」はOpenFOAMを強化した汎用流体数値計算ソフトウェアです。チューニングによりロバスト性が向上したソルバーに各種アドオンモジュールを追加することで、より高速、高精度な計算へ対応可能です。流体解析データは年々大規模化しており、前述の共同研究プロジェクトにより「富岳」に移植された「HELYX」は、大規模・高精度・高速計算を可能にするアプリケーションとして産業界から期待されています。

「富岳」のコンピューティングパワーを必要とするアプリケーションに、超臨界流体・超音速・化学反応対応の流体ソルバー「CRUNCH CFD」があります。日本政府による“2050年までに二酸化炭素の排出量を実質ゼロにする「カーボンニュートラル」宣言”により、製造業ではこれを実現する技術力と製品開発力が課題となることが予想されます。「CRUNCH CFD」はこのような課題解決の鍵となる超臨界CO₂によるガスタービン機関やそのなかでの水素燃焼などのシミュレーションに適用でき、駆動装置や発電装置などの飛躍的

な性能向上と高効率化が可能になります。さらにCO₂の分離回収も容易にするシステム開発に不可欠なツールとして、強力な計算能力を利用できる「富岳」での機能提供を検討しています。

また「富岳」により大規模多目的最適化設計技術の製品開発への適用が可能となると考えています。宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発した多目的設計探索アルゴリズム「CHEETAH」を最適化エンジンに備え、製造業の形状最適化設計に必要な機能とGUI(Graphical User Interface)を備えたパッケージシステムの開発を産業界に向けて進めてきました。「CHEETAH」は4目的以上の目的関数、加えて多くの制約条件からなる設計パラメータ問題でも安定的かつ高速に探索計算をすることが出来ます。これらの解析実行システムを「富岳」で活用することで、大規模多目的最適化設計を迅速に行うための技術を製品開発に適用できるようになります。

「富岳」時代の新たなポストプロセッシング

産業界で「富岳」などのスーパーコンピュータを利用する際の課題のひとつは、生成される計算結果が膨大な量になり、設計業務での計算結果の評価が困難になるということです。特にさまざまな研究・設計に用いられるCFD(数値流体計算)解析は、HPCの進化とともに年々データサイズが大規模化し続けています。計算結果が膨大になると、設計者の判断に役立つよう可視化する工程(ポストプロセッシング)に時間がかかり、結果的に設計業務で利用されなくなります。これらの課題に対し「新たなポストプロセッシング」と題して、「性能・関数評価グラフ」、「可視化並列処理とデータサイズの縮小化」、「モード分解と低次元化」の3つソリューションを提供しています。

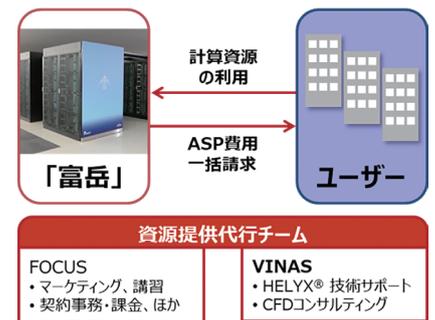
「性能・関数評価グラフ」は、解析を行った製品の性能をグラフによって直接評価できるようにすることで、設計者にとっては、画像や映像で可視化された解析結果よりも、数値とグラフで表されたデータの方が判断しやすい上、必要なデータ量は少なく済みます。グラフを出力するためのテンプレートを設計する機器や目的に合わせて多数用意し、これらを実償で提供しています。

「可視化並列処理とデータサイズの縮小化」は、

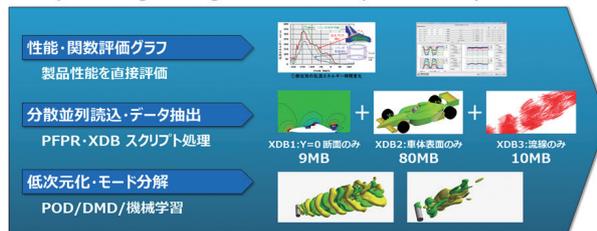
CFD可視化ポストプロセッサ「FieldView」を利用し、HPCで行った計算結果のなかから重要な現象が発生している時空間を切り出して可視化する手法です。例えば自動車の車体設計では「時速100kmで走行した場合の車体後部に起きる空気の流れがわかる真横からのアニメーション」というように、範囲を限定してHPC上で可視化データを生成します。この方法では、利用者は計算結果すべてをダウンロードする必要はありません。また可視化工程をHPC上で実行するため、作業を大幅に効率化できます。可視化したい範囲をいくつか指定してHPC上で並列処理させれば、個々のデータ量をおさえつつ、多くの結果をスピーディに取得することが可能です。

「モード分析と低次元化」は、HPCで出力した膨大な解析結果を自動でふるいにかけて、人間が理解しやすいように重要なものだけに絞り込んで可視化することを意味します。宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発したPOD(固有直交分解)およびDMD(動的モード分解)といった低次元化技術に機械学習を融合させたアルゴリズム「FBasis」をベースに、産業界で利用できるように機能を拡張した「VFBasis」を開発しました。既に自動車の走行時に起きる振動や、冷却ファンが発する騒音の原因となる空気渦の特定などで利用されています。

そのほか、計算科学振興財団(FOCUS)高度計算科学研究支援センターに「富岳/FOCUSスーパーコンピュータ利用支援センター(C-CAT)」を設置し、ユーザーの利用支援に向けた準備を行っています。今後も産業界の観点から「富岳」やHPCIの利用促進に尽力してまいります。

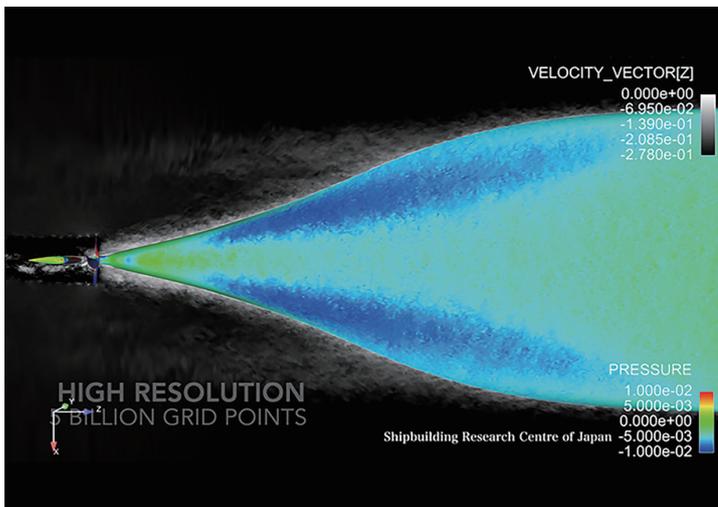


大規模・複雑化する解析データ 設計現場で使える工学ポスト評価方法 Post-processing for large-scale and complicated analysis result data



▲「富岳」のクラウド的利用に向けた共同研究プロジェクト

▲「富岳」時代の新たなポストプロセッシング



(画像提供：一般財団法人日本造船技術センター)

今号の表紙

船体とプロペラとの干渉効果を求めるLES計算

「Wall-Resolved Large Eddy Simulation(WR-LES)とよばれる高精度な乱流解析手法に基づいた大規模解析によって、船体表面に発達する乱流境界層中のサブミリスケールの渦と回転するプロペラとの相互作用を正確に計算しています。図は船尾近傍の流れの様子を示したものです。「富岳」のプロジェクトでは、このような大規模な数値計算によって水槽試験を数値シミュレーションで代替することを目的とした実証解析を実施しています。

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
日本造船技術センター技術開発部技術企画課
西川 達雄

編集後記

今号は、「富岳」を用いた成果を早期に創出することを目的として2020年度から進められている「『富岳』成果創出加速プログラム」を特集しました。このプログラムでは、①人類の普遍的課題への挑戦と未来開拓、②国民の生命・財産を守る取組の強化、③産業競争力の強化、④研究基盤の4領域19課題が選定され、選定された各課題は「富岳」の計算資源の優先的な使用により速やかな成果創出を目指しています。今回、このなかの領域③から3課題5つの研究テーマを紹介しました。

一方、「富岳」は、産業界が利用しやすい環境を提供する取り組みにも力を入れており、クラウドの利用サービスに向けた研究開発なども始まっています。そこで、今号では、産業界における「富岳」を利用した取り組みについても紹介いたしました。

いよいよ供用開始を迎える「富岳」に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.20

発行日：2021年3月10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