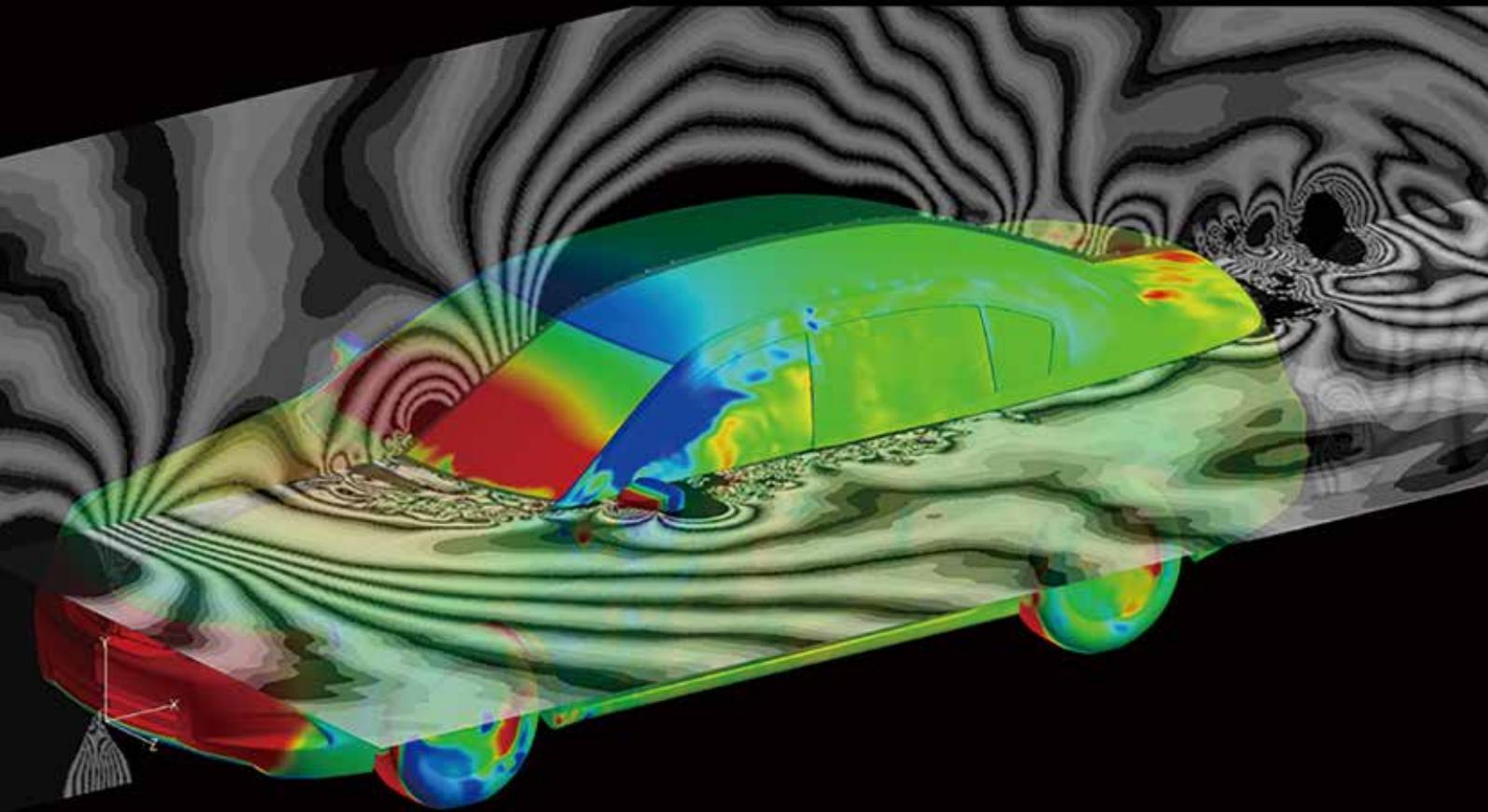


# 計 算 互 学 ナ ビ

計算工学ナビ・ニュースレター2023年春号



## 「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

<インタビュー> 3年間のプロジェクトを振り返る

「富岳」による大規模流体シミュレーションの産業上の効果を実証 ..... 東京大学生産技術研究所 加藤 千幸

<特集>

実証研究テーマ1~5 研究開発成果の概要 ..... 日本造船技術センター 西川 達雄、荏原製作所 渡邊 啓悦、九州大学 古川 雅人、神戸大学/理化学研究所 坪倉 誠、豊橋技術科学大学 飯田 明由

3年間のプロジェクトを振り返る

「富岳」による大規模流体シミュレーションの産業上の効果を実証

文部科学省が実施する「『富岳』成果創出加速プログラム」は、スパコン「富岳」を用いて成果を早期に創出することを目的に、2020年4月から3年間にわたり実施されました。研究開発も終盤を迎えるなか、「『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』流体予測革新プロジェクト）」の課題責任者である加藤千幸教授に3年間の振り返りいただき、研究開発とその成果についてお話しいただきました。



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 教授・センター長



すべてのテーマで目標をほぼ達成

プロジェクトも、残りわずかとなりましたが、当初の目標は達成できましたか。

加藤 このプロジェクトは、「富岳」を利用した大規模数値計算による流れの予測技術が、流体機械の性能試験や自動車の風洞試験を完全に代替し得ることを実証することなどを目的として始まりました。課題推進にあたっては、Large Eddy Simulation (LES) に基づく流体解析システム FFB (FrontFlow/blue)、格子ボルツマン法 (LBM) ベースの流体解析システム FFX (FrontFlow/x)、複雑現象統一シミュレーションフレームワーク CUBE、そして九州大学が開発したターボ機械用 DES (Detached Eddy Simulation) 圧縮性流れ解析ソフトウェアという4本の主要なアプリケーション・ソフトウェアを活用しています。実証研究テーマは、ターボ機械関係が3つ、自動車関係が2つ、合わせて5つあります(図1)が、5つの課題はほぼ順調に進捗し、現時点で目標を達成できる、あるいは目標以上の成果を挙げるができることと実感しています。個別のテーマについてはレポート

(P.3~P.7) に譲りますが、例えば、長時間の計算が必要で、しかも非常に大きな変動を伴うため計算の安定性・精度・速度のすべてが達成されないと成果が出せないテーマ3の「圧縮機サージの直接解析」は、当初は十分な成果が出せるか未知数でした。しかし、かなり早い段階から性能調整に取り組み、アプリケーション・ソフトウェアの高速化を進め、2021年下期にはマイルドサージを定量的に再現できる目途が立ち、現在ではディープサージも再現できて、メカニズムの解明を進めているなど、目標を上回る大きな成果を達成しています。サージの直接予測は、これまで誰も成し遂げていなかった世界初の成果です。こうしたスムーズに進展したテーマもあれば、曳航水槽試験を完全に数値シミュレーションに代替できることを実証しようとしたテーマ1は、途中いろいろと苦戦が続きましたが、苦労したおかげで新たなことがわかるなど、大きな結果に結びつきました。LES 解析による細隙部を含めたポンプの水力性能を予測するテーマ2も非常に難しいテーマでしたが、何とかゴールにたどり着こうとしています。自動車関係の2テーマも途中の苦労はありましたが、

良い方向に向かって進んできました。今回のプロジェクトは、あくまで実証研究というフェーズですが、その意味ではどのテーマも目標どりに進んだと思っています。ただし、HPCの効果が実証されただけで、実際に使われなければ何の意味もありません。得られた成果をどうやって普及させていくかが、これからの大きな課題といえます。

産学連携体制で研究開発を推進

今回のプロジェクトでは、学術界と産業界の連携を重視した実施体制の構築も大きな特長でした。

加藤 ターボ機械関連のターボ機械協会「流体性能の高精度予測と革新的流体設計分科会」と自動車関連の「HPCを活用した自動車次世代CAEコンソーシアム」が並走するかたちでプロジェクトを実施できたことは、産業的な課題を直接研究開発に反映するという点で非常に大きな意味がありました。今回のプロジェクトでは、産業界のニーズを吸い上げ、実用化につなげやすいということだけでなく、産業界のユーザーが直接「富岳」による計算にも携わり、実験検証でも多大な貢献を果たしてくれたおかげで、限られた研究費のなかで想定を大きく上回る成果を挙げる事ができました。

今回のプロジェクトに続く、今後の展望についてお聞かせください。

加藤 今後については、これまでの成果をどのように実用化につなげていくかということに加えて、将来の計算機の発展を考慮してどのように展開していくべきかを考えることが必要です。これまでは計算機は計算が速くなりながら大きくなるという右肩上がりの性能向上を続けてきましたが、今日のハードウェアの発達状況をみると、より早い計算とより大きな計算を同時に達成することが難しくなっています。そのなかでコストパフォーマンスも考えながら、いかにして実用化を進めていくかが大きな課題です。そのためには、HPCを産業界に展開するといった実用化にフォーカスした新たな研究開発の実施体制について議論していかなければならないと考えています。その上で、われわれ研究者には、高度なアプリケーション開発だけでなく、コストパフォーマンスを高めていくハードウェア寄りの研究も必要になるでしょうし、シミュレーション解析全体を俯瞰できるような新しいプラットフォームの構築も求められるでしょう。

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

テーマ1	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 実施機関：日本造船技術センター、東京大学	
テーマ2	細隙部を含めた多段遠心ポンプの内部流れの Wall-Resolved LES 実施機関：荏原製作所、九州大学、東京大学	
テーマ3	圧縮機サージの直接解析 実施機関：九州大学、岩手大学	
テーマ4	リアルワールド自動車空力性能の予測 実施機関：神戸大学、理化学研究所、山梨大学	
テーマ5	リアルワールド自動車空力音予測 実施機関：豊橋技術科学大学、神戸大学、理化学研究所、東京大学	

「ターボ機械協会 流体性能の高精度予測と革新的流体設計分科会」

HPCを活用した自動車次世代CAEコンソーシアム

▲ 図1 「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発

画像提供/日本造船技術センター(テーマ1)、飯田・宮澤他 2018年数値流体力学シンポジウム(テーマ5)

# 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



一般財団法人日本造船技術センター  
技術開発部技術企画課  
**西川 達雄 課長**



われわれのグループでは10年以上前から数値シミュレーションによる曳航水槽試験の代替技術に関する研究開発を行っており、その技術はほぼ完成しました。コスト的には、まだ数値シミュレーションの方が高くなるため、代替はされていませんが、現在はターボ機械協会や国内造船所、CFD (Computational Fluid Dynamics) ベンダと共同でシミュレーションの利点を活かした本技術の活用を進めています。

実験(曳航水槽試験)は、基本的には抵抗力などの力を求めることが主な目的です。流れの可視化を目的とした実験には非常に大きな追加コストがかかる一方で、シミュレーションは追加コストなしで全ての流場の情報が手に入ります。この利点を有効活用するため、われわれは、最初のステップとしてはかなりチャレンジングなテーマを選びました。

近年、省エネ付加物はほとんどの船に装備されつつありますが、実験的なアプローチでは、プロペラ後方の複雑な流れのなかにある省エネ付加物の効果と、その流体力学的メカニズムを理解することは現実的には不可能です。われわれは別途実施している船型研究会において実験的にわかっていた、以下のプロペラ後方の付加物をテーマとして選びました。舵にバルブを装着したものとフィンを装着したものを比べると、バルブを装着したものは何も装着しないものと比べて若干性能が向上し、フィンを装着したものは何も装着しないものより性能が悪化しました。フィンの設計が間違っていたという結論を得ることができるのですが、どのように設計すれば良かったのか、何が問題だったのかがよくわかりません。もちろん、フィンはそれなりに正当な方法で設計されたものでした。

結果的にスパコン「富岳」を使ったLES (Large Eddy Simulation) で分かったことは、ハブ渦が左舷側のフィンの性能、特に翼根部の性能を落としていることでした。これは、結構意外な結果で、フィンの設計では一般的に翼根部は軽視されがちです。図1に示すように、ハブ渦(灰色で示す筒状に伸びているもの)が舵の左舷、フィンの下方(圧力面)にきて、これが悪影響を及ぼしていることがわかりました。改良案としてはフィンの取り付け角度や捻じりを加えるなどの形状改良が考えられます。また、ハブ渦を消す

ために新たにハブに省エネ付加物を装着することも考えられます。しかしながら、われわれは、このシミュレーション結果を見て、なぜ、ハブ渦は左舷下方にきてしまったのかを考えさせられざるを得ませんでした。上述した改良は、やろうと思えば実験的に試行錯誤しながらやれないこともないのですが、シミュレーションで得られた全ての流場情報を使って、全体を俯瞰することによる本質的な改良案が得られるはずだと考えたのでした。ここでは誌面の都合上、詳しく書けませんが、結果的に、ハブと舵の距離を調節することによって、フィンの取り付け角や形状を変更することなく、また、新たな付加物を取り付けることなく、改良することができることがわかりました。

今回は、「富岳」を使ったシミュレーションによる可視化が、設計を行う上で非常に強力な武器となることを実証できましたが、全ての設計において「富岳」を利用することはハードルが高いという造船所もあります。そこで、われわれは、このテーマを使って、設計現場で気軽に使えるRANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)法が再現できる現象と「富岳」を使ったLESでなければわからない現象を切り分けることも行っています。これによって、設計者は効率的にRANSとLESの使い分けができるようになるものと期待しています。

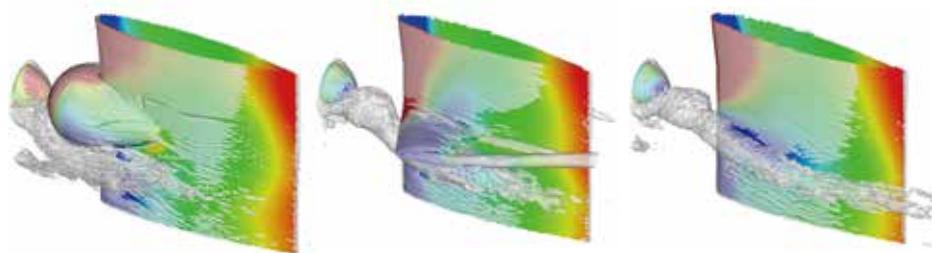
もう一つのテーマとして、船舶性能の尺度影響に関する調査を行っています。全長が4.4 mと8.1 mの2つの相似模型船を、国内の造船所の2つの曳航水槽で実験しました。これまでは船体抵抗係数  $C_{T1} = (1+K)C_{F1} + C_{W1}$  で表すことができると考えられており、形状影響係数  $K$  と造波抵抗係数  $C_{W1}$  は相似模型の場合、同じ値で、尺度影響は摩擦抵抗係数  $C_{F1}$  に現れるとされてきました。しかしながら、今回はこの方法では説明がつかない結果が得られました。われわれは尺度影響に関する新しい知見が得られるのではないかと期待しましたが、LESを使ったシミュレーションによると、乱流遷移の様子が違うのではないかとということがわかってきました。今回は抵抗予測には4.4 m模型を使うことは推奨

されないという結論が得られ、この結果は今後、ゼロエミッション船の開発に関連する低速運航船の開発時に活用されるものと思われます。現在は自航要素(プロペラと船体の干渉係数)についても尺度影響を調べているところで、これについては更なる新しい知見が得られることを期待しています。また、将来的にはここで得られた知見をもとに、何らかの縮小モデルや壁関数などを使った船舶用シミュレーション技術の構築を行い、実船の直接シミュレーションにつなげていけることができると考えています。



かなり簡略化した結果のみを示してきましたが、プロジェクト全体ではさまざまな結果が得られており、その経験から多くの副産物、すなわち、シミュレーションのノウハウが得られました。例えば、省エネ付加物の繊細な挙動を再現するためには、オーバーセット計算法についてこれまで考えられていた以上に厳しい条件を課さなければならないことがわかりました。また、船型やレイノルズ数によっては、船首船底剥離渦の影響が顕著になるといった物理的な発見、またその再現にはこれまで曖昧にしてきた境界層外層の計算格子の設計法に関するノウハウを得ることができました。さらには、上述の乱流遷移を正確に再現するためには、これまで考えていた計算格子の設計法をアップデートする必要があることもわかりました。

われわれはこれらの経験を通じてバーチャル水槽が物理水槽を越える瞬間を見てきました。これらの経験から得られた知見は、デジタルツインを社会実装する上で有益なものになると思われれます。気象・海象や船舶の状態(リアル空間における物理現象)をコンピュータ(サイバー空間)上で精緻に再現するだけでなく、収集および再現されたデータにもとづき、サイバー空間上で船舶の設計・建造から運航、保守管理、解撤に至るまでの状態把握や仮想条件下での高精度な試計算を可能とする技術が望まれています。このような壮大な構想の実現のためには、われわれの地道な研究成果や開発したツールが重要になると感じています。



▲図1 ハブ渦の様子(左:舵バルブ、中:舵フィン、右:付加物なし)

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



在原製作所  
建築・産業カンパニー開発統括部  
技術開発部/技術・研究開発・知的  
財産統括部 技術・研究開発部  
**渡邊 啓悦 部長**



## ● 研究の目的

多段遠心ポンプは、プラント発電設備のボイラー給水や石油化学・生成、二酸化炭素回収・貯留プロセスなどの各プラントの主要機器であり、高性能であることはもとより常に安定した運転を保證する、高い信頼性が要求されます。高圧多段ポンプはその構造から軸方向に大きなスラスト力が発生するため、このスラスト力の予測はバランス機構の設計や適切な軸受選定のために重要です。

ポンプには、ライナー部とよばれる100 $\mu$ m程度の狭い隙間内の流れや、羽根車や羽根車下流のディフューザベン流路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、特に低流量運転時のスラスト力の予測には、これらの複雑な流れを適切に予測する必要があります。Large Eddy Simulation (LES) は、計算格子の空間解像度により決定する解像可能なスケールより大きな渦の非定常な挙動を直接計算するため、非定常の流れ場をより高精度に予測可能であり、非定常流れ場に起因する羽根車へ作用する非定常流体力の予測精度向上に対して、その発生メカニズムの解明も合わせて大きな力を発揮すると期待されます。

本実証研究テーマでは、理化学研究所に設置されているスパコン「富岳」を利用して、30~100 $\mu$ mの最小渦スケールまで計算格子により直接解析するWall-Resolved LESを実施し、内部流れやその結果として決まる水力性能(全揚程・水力トルク・水力効率)の完全な予測を実現するとともに、細隙部内部流れの挙動や、それが性能や信頼性に与える影響を明らかにして、ポンプ設計の高度化に貢献することを目的としています。

## ● 解析対象および解析コード、格子規模

解析対象は、ターボ機械協会内に設置された研究分科会において活動を進めてきました多段遠心ポンプの流体性能の高精度予測に関するワーキンググループで使用した供試ポンプです。本ワーキンググループでは多段ポンプの最終段を取り上げ、実験結果との比較により解析精度の検証を実施しています。

解析は、LES (Large Eddy Simulation) 解析ソルバーである東京大学生産技術研究所で開発されているFrontFlow/blue (FFB) を利用します。FFBは計算実行時に計算格子を自動細分化するリファイン機能を具備しており、この機能によりリファインの実行毎に格子数を8倍(2回なら64倍、3回なら512倍)にすることができます。解析は羽根車やディフューザベンといったポンプの主流部分に加えライナー部隙間や羽根側室部も含めた解析モデルを用い、約8,600万格子規模の初期格子から解析を始め、前述のリファイン機能により格子解像度を高めていき、3回リファイン時には約440億格子のWall-Resolved LESとする計画としました。現在は「富岳」の4,096ノードを使用し、2回リファインの55億格子規模の解析まで完了しています。

## ● 解析結果について

2回リファイン時のポンプ性能の予測値と試験結果と比較したところ、設計流量における解析結果は実験値よりもポンプ揚程を5%程度過大に評価していることがわかりました。また軸動力も4%程度過大に評価していました。

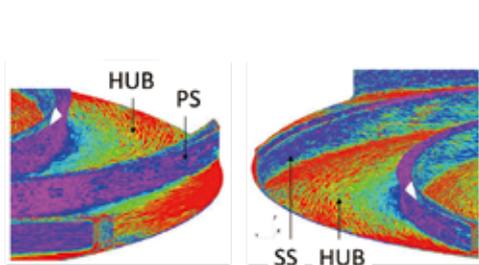
図1には2回リファイン時の設計流量における羽根車内の壁面近傍の渦構造を示しています。ここで、HUBは羽根車のハブ面、PSとSSはそれぞれ羽根の圧力面と負圧面を表します。羽根車が作用する仕事を精度良く予測するためには、各羽根面上の乱流境界層を適切に解像する必要があります。図1が示す壁面近傍の渦構造を見ますと、負圧面および圧力面近傍を除くハブ面の境界層には縦渦が発達していることが捉えられ、乱流に遷移していることがわかりますが、圧力面にはそのような縦渦は確認できず、乱流に遷移していない様相を示しています。上記の分析結果より、2

回りファインの格子解像度で軸動力・揚程を過大評価する理由として、ブロッカーの過小評価による軸動力の過大評価(流路断面積が大きく出口速度が小さくなるため)、損失の過小評価による揚程の過大評価の可能性として推察されます。この点については、今後、格子解像度の影響度に加え、羽根車に流入する乱れおよび偏流の影響を調査していくことにしています。

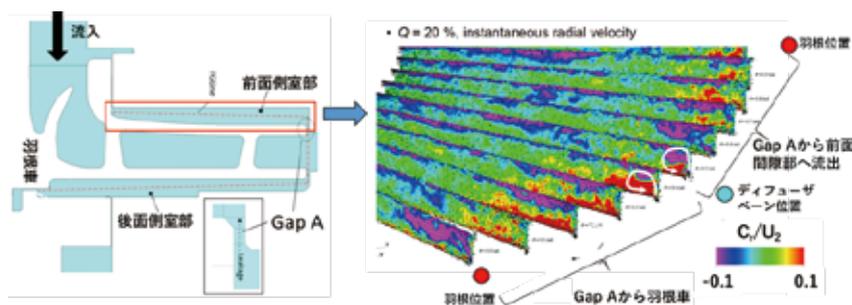
次に低流量運転時の流れ状態を調査しました。図2は20%設計流量における前面側室部の瞬時流動状態を示しています。図中左側には、ポンプ羽根車周りの断面を示しています。羽根車と前面のケーシングとの間には赤枠で囲まれた前面側室部があり、この部分の圧力分布が羽根車に作用する軸方向のスラスト力を決定します。図中右側には、前面側室内の周方向に羽根車1ピッチ分(1流路分)の領域における流れを半径方向速度 $C_r$ と羽根車外周の周速度 $U_2$ の比 $C_r/U_2$ のコンターで示しています。コンターの色は、紫色は半径方向内向きの流れ、赤色が半径方向外向きの流れです。

この図が示すように、20%設計流量では羽根側室内の流れは非軸対称的となり、特に羽根車の外周部に近い領域では周方向に大きく乱れた流れ構造になっていることがわかります。青丸で示したディフューザベンの位置では、ディフューザからの逆流の影響により羽根車外周部とケーシング間の隙間であるGap Aからの強い漏れ流れが発生し、羽根側室内に渦を発生させていることが認められます。このような流れ状態において、羽根車の回転とともに羽根側室内の流れも変動するため、羽根車に作用するスラスト力の変動が設計流量運転時よりも大きくなります。今後、流れ解析結果をもとに、非定常的な流動状態の調査とスラスト力変動の定量的な評価を進めていきます。

以上のとおり、ライナーリングや羽根車の側室といった漏れ流れ流路部を含めポンプのLES解析を実施することにより、部分流量運転時の非定常の流体力の発生に関わる非定常流れの詳細がわかってきました。本結果は、ポンプの非定常流体力の計算に役立てることができると考えています。今後さらに研究を進め、ポンプ設計の高度化に貢献したいと考えています。



▲ 図1 設計流量における羽根車内の渦構造



▲ 図2 20%設計流量における前面側室部の瞬時流動状態

## 圧縮機サージの直接解析



九州大学大学院  
工学研究院機械工学部門  
古川 雅人 教授

### ● 研究の目的について

圧縮機は産業用および発電用ガスタービン、航空機エンジン用ガスタービンの主要構成要素であり、また石油精製プラント、化学プラント、天然ガスプラント、製鉄プラントなどの各種プラントの心臓部としての役割を果たすとともに、空気源やターボ過給機などにも用いられており、圧縮機は工業上極めて重要なターボ機械のひとつであります。一般に、圧縮機を含むシステム(管路系)では、流量が減少すると流れの不安定現象としてのサージが発生します。サージが発生すると、流速や圧力が管路系全体にわたって大きく変動する結果、圧縮機の運転が不可能になるだけでなく、管路系を構成する機器に損傷を与えることもあり、サージは回避することが不可欠な現象です。特に、発電用ガスタービン、航空機エンジン用ガスタービン、および各種プラントでは、それらシステムの安全性・信頼性が高いレベルで要求されることから、圧縮機サージの予測は極めて重要な技術と位置づけられています。さらにプラントでは、サージを回避するために、必要以上の容量の抽気用バルブを設置せざるを得ないことがあり、圧縮機サージの予測は信頼性向上の観点のみならず、コスト低減の観点からも重要となっています。

圧縮機サージの予測は工学的に極めて重要な問題ですが、圧縮機サージは圧縮機羽根車での失速現象と配管系まで含めたシステム全体にわたる流体振動現象がカップリングして発生する現象であり、両現象を支配する特性時間のスケールが大きく異なる(時間スケール比が3桁以上異なる)マルチスケール問題であることから、非定常三次元数値解析により圧縮機サージを予測することは未だに実現できていませんでした。

以上の観点から、本研究テーマでは、圧縮機本体だけでなく、それが設置される配管系まで含めたシステム全体を計算領域とし、圧縮機羽根車での失速現象を再現できるほど短い時間刻みを設定するとともに、システム全体にわたる長周期の流体振動現象を捉え得るほど膨大な時間ステップ数にわたってDES(Detached Eddy Simulation)による非定常三次元流動解析をスパコン「富岳」上で実施することにより、圧縮機サージの初生(マイルドサージ)から、逆流を伴うディープサージに至る非定常流動現象を解明し、圧縮機サージの予測技術を確立することを目的としました。

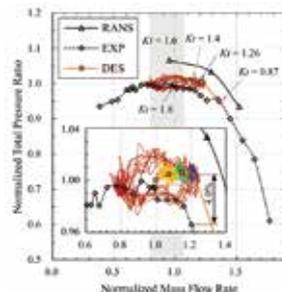
### ● 圧縮性DES流れ解析コードおよび解析対象について

圧縮機サージはマルチスケール問題であることから、稠密な計算格子を用いたLES(Large Eddy Simulation)解析を実施することは現実的ではありません。そこで本研究テーマでは、限られた計算格子数ではく離を伴う複雑な渦流れ場を正確に捉えるために、LES解析とRANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)解析の利点を取り入れたDES解析を実施しました。具体的には、 $k-\omega$ 二方程式乱流モデルに基づいた圧縮性DES流れ解析コードを利用しました。当該コードは、「『京』を中核とするHPCIシステム利用研究課題」において九州大学を中心として既に整備されたものでありますが、「富岳」で利用するにあたって、高度情報科学技術研究機構(RIST)による高度化支援を受け、コードのチューニングを行い、オリジナルコードと比較して「富岳」上で約90倍の高速化を達成しています。

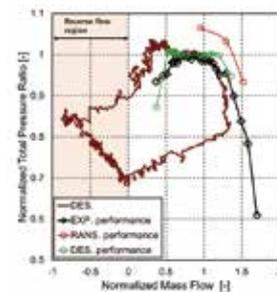
ターボ機械協会内に設置された研究分科会において、圧縮機内のサージに関する非定常計測を約10年にわたって行ってきましたが、本研究テーマではその分科会で使用した供試圧縮機と同じ遷音速遠心圧縮機を解析対象としました。当該圧縮機と配管系まで含めたシステム全体を対象とし、配管入口が大気開放であることから、配管入口上流の大気開放領域まで含めて計算領域を設定しました。一方、圧縮機下流側の配管系は流量調整弁までを計算領域とするとともに、流出境界では弁損失モデルを導入し、弁の損失係数(Kt)を調節することにより流量を制御してサージ初生を再現しました。計算格子は全てH型の構造格子で構成し、計算領域全体の総計算セル数は約9億に設定し、時間刻み幅はDES解析であることを考慮して、羽根車の1回転当たり1,200ステップとなるように設定しました。

### ● 世界で初めてマイルドおよびディープサージの直接計算に成功

図1は、サージの初生(マイルドサージ)を再現した結果を示します。図中において、横軸は質量流量を、縦軸は全圧比を表しており、黄色の四角シンボル付きの実線がDES結果、黒い破線が実験結果です。図中の横軸と縦軸はそれぞれマイルドサージ初生点の流量と全圧比で無次元化されています。本DES解析では流量調整弁



▲図1  
マイルドサージ発生時のリサージュ曲線



▲図2  
ディープサージ発生時のリサージュ曲線

の損失係数Ktを徐々に増加させながらサージ初生を再現しますが、そのKtの値を図1中に示しています。Kt = 1.8において、逆流を伴わずに流量や圧力の長周期変動が発生するマイルドサージの初生が現れました。実験で得られたマイルドサージ初生の発生範囲を図中にグレーの網掛けで示していますが、DES解析の初生点とよく一致していることがわかります。また、図中に赤い実線でマイルドサージ発生中における流量と圧力の変動を表すリサージュ曲線を示していますが(図中の下部に拡大図を表示)、流量および圧力の変動周期と振幅が実験結果と一致していることを別途確認できました。同拡大図中には、Kt = 1.26, 1.4, 1.6におけるリサージュ曲線をそれぞれ青線、緑線および黄線で示しています。さらに、マイルドサージの発生時における非定常現象は圧縮機羽根車先端部での逆流領域の周期的変動に支配されていることが明らかになりました。

マイルドサージ初生点から流量調整弁の損失係数Ktをさらに増加させると、Kt = 7.5において逆流を伴うディープサージの発生が現れました。その際の流量と圧力の変動に対応したリサージュ曲線を、図2中の赤い実線で示します。図中の黒および緑のシンボルは、それぞれ実験およびDES解析から得られた時間平均の全体性能を表しています。流量および圧力の変動周期と振幅が実験結果とほぼ一致しており、ディープサージ現象を正しく捉えていることが確認されました。ディープサージサイクル中における非定常流動現象を詳細に調べた結果、羽根車先端部の逆流領域は周期的に極めて大きく変動し、配管入口まで到達すること、竜巻状の大規模なく離渦が羽根車の負圧面上から形成され、流量の減少とともに羽根車出口側に移動した後に、逆流発生直前にハブ面上に到達し、逆流発生時には複数の翼間において形成されること、サージサイクル中においてもディフューザでの巡回失速の発生が認められること、すなわちサージと巡回失速が共存していることが明らかになりました。

以上のとおり、圧縮機を含む配管系全体に対してDES解析を実施することにより、マイルドおよびディープサージを再現することができました。これは「富岳」を利用することによって世界で初めて得られた成果であり、本成果は圧縮機の空力設計技術の向上に大きく貢献できることが期待されます。



## 複雑現象統一的解法フレームワークCUBEによる自動車空力性能・空力音予測

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 教授/チームリーダー



われわれのグループでは、リアルワールド自動車空力シミュレーションと空力音シミュレーションの一部を担当し、研究開発を進めてきました。本課題は理化学研究所および産学連携「HPCを活用した自動車次世代CAEコンソーシアム」の活動の一環として行われました。

ソフトウェアとしては、理化学研究所計算科学研究センターで2012年より開発を進めている複雑現象統一的解法フレームワークCUBEを用いています。CUBEは階層直交格子をデータ構造として採用し、物体壁面を埋め込み境界条件でモデル化することで、超高速な格子生成を可能とするとともに、スパコン「富岳」での性能チューニングを容易にしています。ここではこのCUBEと、マルチボディダイナミクスシミュレーションソフトProject Chronoをカップリングすることで、サスペンションやステアリング機構、タイヤ特性を含む自動車の複雑な運動を車体周りの空気の流れと連成させて解析することを可能としました。また、支配方程式として流体の圧縮性を直接解析する運動方程式を採用することで空力音を直接解析し、これにより気流と音が連成するような問題への対応を可能としました。さらに、リアルワールド評価を実現するために、大気の変動風の乱流特性（例えば積分長さや強度）を再現するモジュールを開発しました。変動風については、車体上流に翼列を配置し、翼のピッチ運動を制御することで乱流特性の制御を行っています。

このフレームワークを用いて、乱流変動風を直進走行する自動車に作用する空力抵抗の予測や、レーンチェンジ時における大気変動風の影響を明らかにしました。このようなリアルワールド評価では、車体の六軸自由運動に加えて、ホイールの回転や前輪舵角の変化、さらには仮想的なドライバーを実際に操舵させることで、直進走行時の修正操舵やレーンチェンジ時のアクセル・ブレーキ操作も再現しています。対象とした車両は、開発時に用いられる形状データを用いることで、エンジンルームや車体床下等の複雑形状を再現しています。

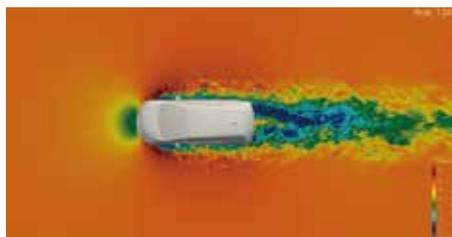
図1はその一例として、リアルワールド燃費評価を示しています。ここでは直進走行する自動車に周囲気流に対して大気乱流を模擬した場合

に、一様流（風洞を想定）に対して空気抵抗にどの程度の影響があるかを評価しました。これにより、ドライバーの修正操舵や変動風を考慮することで、空気抵抗が数%大きくなることを明らかにするとともに、その差異が車体表面のどこに起因するのか、さらには流れとの関係についても調査を行いました。変動風モジュールの問題点として、車体設置場所で主流方向に対して圧力勾配が発生することから、その補正方法についても検討し、さらに精度の高い予測が可能となっています。このようなフレームワークを実際の設計開発現場に適用することで、将来的には変動風に対してもロバスタな低燃費車の実現につながればと思います。

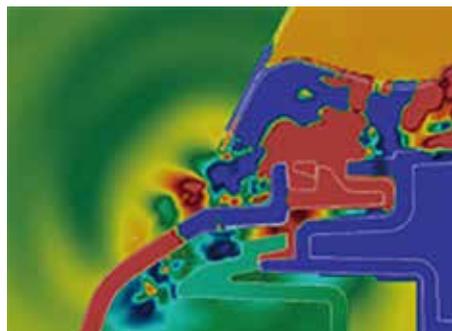
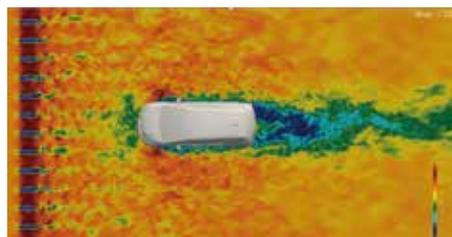
リアルワールド空力音予測では、ボンネットと車体間の微小な隙間から発生する狭帯域音に着目し、その予測にチャレンジしました。図2にその結果を示します。狭帯域音の発生は、自動車の品質問題の1つとして重要ですが、現状は試作車が完成する設計開発の最終段階で確認されることが多く、場当たりの対策による開発計画の遅れを引き起こすことから大きな問題となっています。従ってこの課題は「京」の時代

から、自動車コンソーシアムの重要な課題として取り上げられていました。シミュレーションとしてのこの問題の難しさは、車体表面の微小なギャップ等から発生することから、実車体に匹敵する各段に高い形状再現性が求められることと、気流と音波が連成することで発生することから、広帯域音の予測に汎用的に用いられている非圧縮性流体と音波の分離解法では予測が不可能であり、圧縮性解法に基づく気流と音波の直接解析が必要になることです。図2左に「京」を用いて空間解像度0.1 mmで解析した結果（変動圧力）を示します。図左下から中央に向けて進行する気流が車体表面から剥離し、エンジンルーム内の壁に衝突することでフィードバックがかかる様子が再現されており、狭帯域音の予測には成功しています。しかしながら風洞実験での対策等から、剥離したせん断層が右上のボンネットの先端に衝突することでフィードバックがかかることが想定されており、実際、発生する音の周波数は実験とやや異なる結果となっていました。図2右に示す通り、「富岳」を用いて解像度をさらに0.05 mmに高めることで、想定した流れ場が再現されていることがわかります。

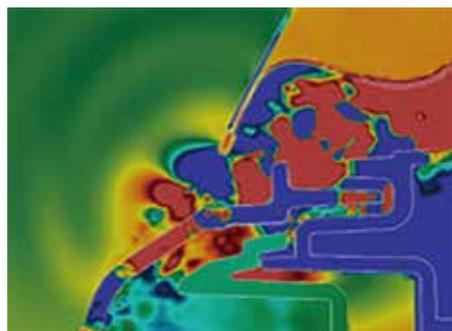
以上のようなリアルワールド評価がCADデータの段階で予測できるようになると、自動車の設計開発の上流段階で、燃費や操縦安定性、さらには空力音といったさまざまな性能に対する包括的な最適化が可能となり、開発期間の短縮とコスト削減に大きく寄与するのみならず、その物理メカニズムをシミュレーション結果により明らかにすることで、より性能の高い自動車の開発が可能になると期待されます。



▲図1 リアルワールド燃費評価の一例（車体周りの流速分布）。ここではドライバーの修正操舵や変動風による車体の運動やホイールの回転等を考慮している。（左：一様流中、右：変動風中） 協力：本田技術研究所



▲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の例（変動圧力の分布）（左：空間解像度0.1 mm、右：空間解像度0.05 mm） 協力：スズキ





### 格子ボルツマン法による空力音響解析ソフトウェア FFX による自動車空力音予測

豊橋技術科学大学 工学部機械工学系  
飯田 明由 教授



実証研究テーマ5では、自動車空力騒音の予測に関する研究開発を進めています。本課題は実証研究テーマ4と同様、産学連携「HPCを活用した自動車次世代CAEコンソーシアム」の活動の一環として行われました。



ソフトウェアとしては、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加藤千幸教授により開発された有限要素法乱流音場解析ソフトウェア FrotFlow/blue (FFB)、FrontFlow/blue-ACOUSTICS (FFB-A) 及び新たに開発された格子ボルツマン法による空力音響解析ソフトウェア FrontFlow/x (FFX) を使用しています。FFBは大規模乱流解析ソフトとして多くの実用問題に適用されており、本研究グループではスズキと共同で流れに起因する自動車車内騒音の予測を「京」コンピュータを用いて実施した実績があります。



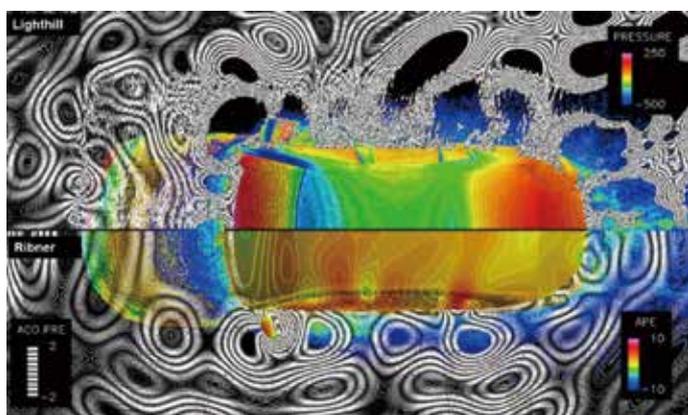
本課題では本田技術研究所と共同で、車両周りの流れにより発生した空力音も加振源とした車内騒音予測に取り組んでいます。車両近傍の圧力変動は、流れ場による圧力変動と流れによって発生した空力音によるものが混在しています。流れ場と音場に起因する車内騒音のそれぞれの伝達経路や寄与を分離できると振動騒音対策がしやすくなることから、両者を分離する方法が検討されてきています。従来のFFB-AではLighthillテンソルを音源とした空力音響解析

を行っていましたが、この方法の場合、音源近傍では流れ場と音場を分離することができないという問題がありました。本プロジェクトではLighthill方程式の圧力変動を流体成分と音響成分に分離したAcoustics Perturbation Equation (APE) を用いて車両近傍の音場のみを抽出し、構造振動解析の加振源とするシステムを開発しました。図1にAPEを用いた解析と従来のLighthill音源を用いた解析結果の比較を示します。Lighthill音源を用いた場合は車両近傍に乱流による変動成分があるのに対して、APEでは音場のみが抽出されていることがわかります。また、解析によって得られた流れ場、音場の波数・周波数スペクトル解析を行い、加振源である流れ場と音場の特徴を抽出するとともに、波数空間での振動、音響伝播特性から車内音になりやすい圧力変動やその部位を同定しました。

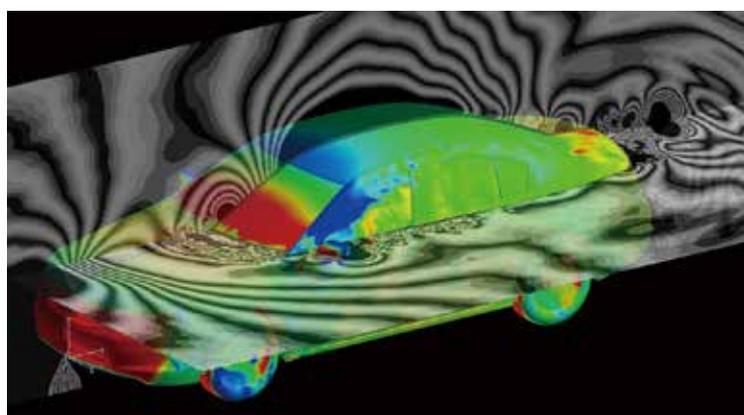


流れに起因する車内騒音の予測では、車両周りの流れ場、外部空力音、車体の構造振動、車室内音場を解析する必要があります。従来は、流れ場と外部音の解析はFFB、FFB-A、構造振動は東京大学・吉村 忍教授が開発したADVENTURE、車内騒音はFFB-Aを使用していました。FFB、ADVENTUREは時間領域の解析ですが、FFB-Aは周波数領域の解析です。将来、空力・構造振動・音響強連成解析を用いた車内騒音の完全な再現を実現するためには、すべての解析を時間領域で実施する必要があることから

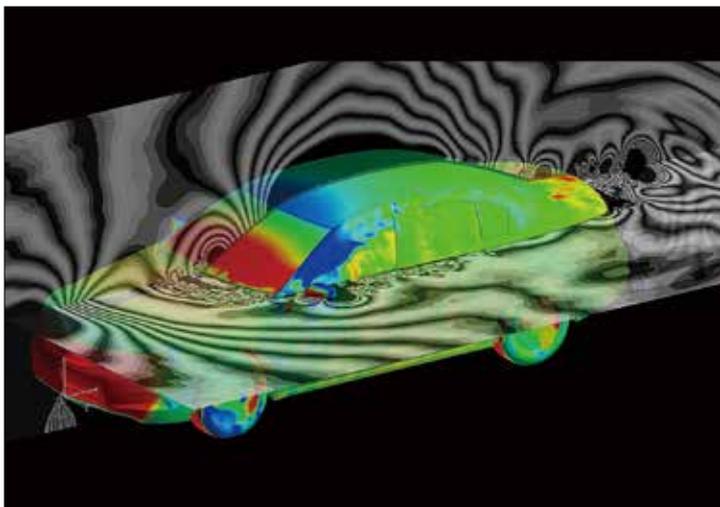
ら、本プロジェクトでは、FFXを用いた自動車周りの空力音響解析を実施しました。FFXは格子ボルツマン法に基づく流体解析アプリケーションであり、FFBとは異なり流れ場と音場を同時解析します。しかし、前述したように自動車の設計開発では流れ場と音場を分離したいという要望もあります。このため、波数・周波数スペクトルを用いた流れ場と音場の分離技術、FFB、FFB-Aの解析結果とFFXの比較が重要な意味を持ちます。格子ボルツマン法を自動車空力音響解析に活用するメリットは、直交系アプリケーションのため、格子生成が容易な点、解析アルゴリズムが単純であり、メモリアクセスに解析時間が律速される傾向の現在のHPCに適した手法である点です。格子生成が容易であることは自動車などの設計解析では非常に重要です。FFXでは、設計用のSTL (Standard Triangulated Language) があれば簡単なスクリプト処理で解析格子を生成することが可能です。流体解析用の車両モデルであれば1時間程度、エンジンなどの細かい部品を含む詳細STLでも5時間程度でメッシュを生成することが可能です。計算アルゴリズムが単純で解析速度の速いFFXでは、スパコン「富岳」を使うことにより1,500億格子程度の解析が簡単に実施できます。テスト計算では1兆2千億格子の解析が可能にも確認されました。図2にFFXによる自動車から放射される空力音の解析事例を示します。最小格子サイズは0.4 mm、格子点数は約1,500億です。FFXを使用することにより流れ場と音を同時に解析できることから分離解法でボトルネックとなっていたデータ処理部分が簡単になりました。格子生成も容易なことからさまざまな問題に適用することが可能なことが確認されています。FFXを活用することにより自動車などの複雑な製品の開発が従来よりも簡単に精度良く行えることから、多くの設計者に活用していただけないかと考えています。



▲図1 自動車から放射される空力音の解析結果 (上: Lighthill音源、下: Acoustic Perturbation Equation) 協力: 本田技術研究所



▲図2 格子ボルツマン法 (FFX) を用いた自動車空力音解析結果 (格子解像度0.78 mm、1,553億格子、プリ処理時間1時間25分) 協力: 本田技術研究所



## 今号の表紙

### 格子ボルツマン法を用いた自動車空力音解析結果

「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』では、格子ボルツマン法に基づく流体解析アプリケーションFFX (FrontFlow/x) を研究開発し、自動車空力騒音予測へ適用して、その有用性を実証しています。表紙の画像は、1,500億を超える大規模解析により得られた自動車から放射される空力音の解析事例です（協力：本田技術研究所）。FFXを活用することにより工業製品等の複雑形状周りの流れと音を短時間で予測することができるようになりました。

豊橋技術科学大学工学部機械工学系 教授 **飯田 明由**

## 編集後記

今号では、今年度が最終年度となる『『富岳』成果創出加速プログラム』の課題の1つである『『富岳』を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発』の、研究開発の成果を紹介しています。この課題では、スパコン「富岳」の高い計算性能をいち早く成果に結びつけることをめざし、エネルギー産業の心臓部となる「ターボ機械」および輸送産業の中核となる「自動車」を対象とした5つのテーマに対して実証研究を行ってきました。これまでの3年間の研究開発で得られた成果の展開により、ものづくりの在り方が抜本的に変革されることが期待されます。



## 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.24

発行日：2023年3月1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