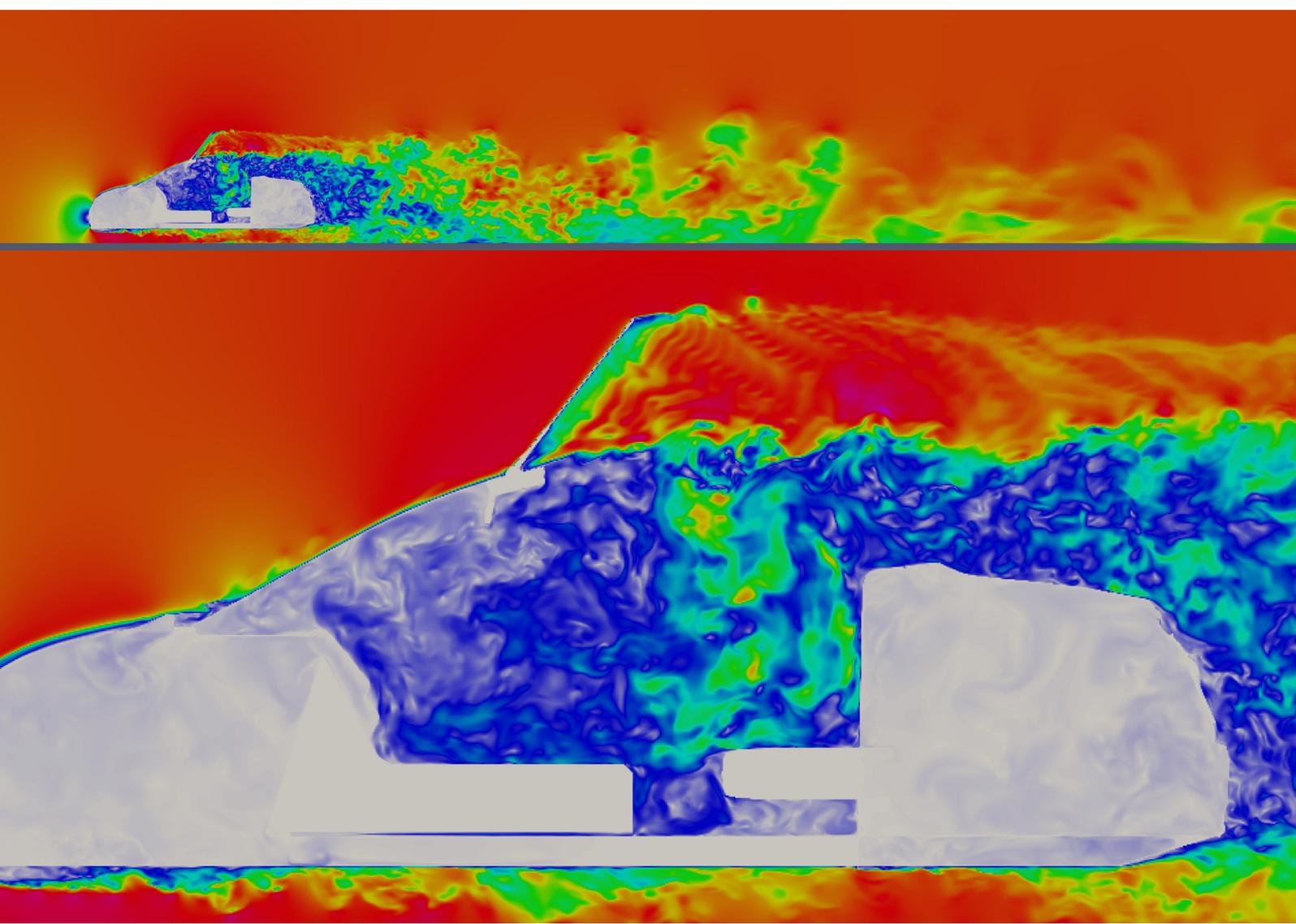


ものづくりにHPCを活用するためのツールとケーススタディー

# 計 算 互 学 ナ ビ

QUARTERLY NEWSLETTER / SPRING 2016



『次世代ものづくり』プロジェクトの成果

東京大学 加藤千幸

FrontFlow/violet Cartesian

東京大学 鶴沢 憲

新しい流体制御技術の開発とその可能性

東京理科大学 青野 光

VOL. **10**

# 『次世代ものづくり』プロジェクト終了 その成果とHPCのさらなる可能性



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

東京大学生産技術研究所、日本原子力研究開発機構、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の3機関が中心となって進められてきた、文部科学省HPCI戦略プログラム分野4『次世代ものづくり』がこの3月末に完了します。スパコンの威力をものづくりのイノベーションに活かす革新的な取り組みはどのような成果をあげ、また、その成果はどう発展していくのでしょうか。プロジェクトの統括責任者、加藤千幸教授に聞きました。

## 長期に渡ったこのプロジェクトは、どのような取り組みだったのでしょうか？

本格的にプロジェクトがスタートしたのは2011年度で、準備研究期間を入れるとトータル6年間のプロジェクトでした。京コンピュータの運用開始が2012年の9月末ですから、12年度の後半からが本格的に京を使った取り組みの期間です。

5つの研究開発課題を設定して、ものづくり分野において革新的な成果を創出するとともに、その成果を広く普及させるために計算科学推進体制の構築を推進してきたというのがプロジェクトの全体像です【図1】。単なる大規模計算のプロジェクトではなく、産業界におけるプロジェクト終了5年後の実用化を目指して実証研究を進めてきました。

## 5つの研究開発課題の内容と成果については、後ほど個別に詳しくうかがいたと思います。先に「計算科学技術推進体制の構築」について概要と成果を教えてください。

その目的は、研究開発の成果を産業界に展開して、より使いやすいHPC環境を提供することにあります。

研究開発課題で使ったキーアプリケー

ションだけではなく、それ以外のABINIT-MP<sup>[1]</sup>、FrontISTR<sup>[2]</sup>、FrontCOMP<sup>[3]</sup>といったHPC向けのアプリケーションを整備して、ユーザーにとって使いやすい環境を整備してきました。使いやすさを形にするソフトウェア開発の取り組みとしてはHPCプラットフォーム【図2】を挙げることができると思います。

さらに、解析のナビゲーションや解析事例のインデクスによる参照といった機能を備えたプラットフォーム<sup>[4]</sup>を開発して、アプリケーションソフトウェアの提供だけでなく、実際に行った計算の事例を蓄積してきました。

## アウトリーチ活動や人材育成事業にも注力してきましたね。

代表的な活動は計6回開催した「次世代ものづくりシンポジウム」です。そのほかにも、ユーザーが実際にアプリケーションを動かしながら学べるハンズオンセミナーやワークショップを定期的に行いました。参加者は延べ3000人以上になります。

人材育成事業としては、スーパーコンピューティング技術産業応用協議会と共同で行った「HPC産業利用スクール」が柱

となっています。そこではHPCの産業利用に関する戦略等を議論する講座も開催され、延べ300人の参加がありました。

こうした活動によってHPC利用者の拡大とレベルアップに貢献することができたと考えています。

## それでは、ここからは5つの研究開発課題について、順番にお話を聞かせてください。まず課題1は「輸送機器・流体機器の流体制御による革新的な効率化・低騒音化に関する研究開発」というテーマです。

これはJAXAが中心となって進めてきた課題で、プラズマアクチュエータ<sup>[5]</sup>を使ったマイクロデバイスを実用化するのが最終的な目的です。

流体機械にはストール(失速)という現象が付きもので、過度な条件になると翼が翼として機能しなくなります。当初狙ったのは、プラズマアクチュエータを使って、ストールの問題を抜本的に解決することだったのですが、実はそれだけでなく、ストールしていない状況や単純な形状の翼であっても、流体制御によって性能を上げられるということを見出したのが本プロジェクトの大きな成果と言えるでしょう。

【図1】プロジェクトの2本の柱



- [1] 本誌Vol.5に関連記事
- [2] 本紙Vol.4, Vol.9に関連記事
- [3] 本紙Vol.1, Vol.8に関連記事
- [4] 計算工学ナビ・解析事例データベース <http://www.cenav.org/kdb/>
- [5] 本紙Vol.6, Vol.10に関連記事

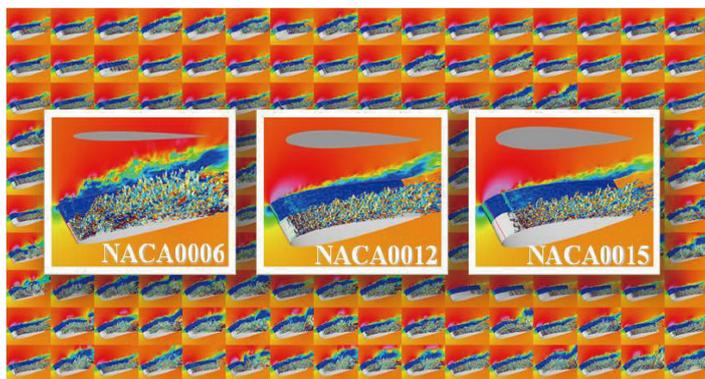
かなり大規模なケーススタディーを、例えば何千万格子という規模のモデルに対して何百ケースも繰り返し、限られたケーススタディーでは見だせなかった主要なメカニズムを含め、マイクロデバイスによる流体制御に実は複数のメカニズムが存在することを明らかにしました【図3】。

さらに、メカニズム解明の知見に基づいたデバイスの利用やデザインガイダンスを示すことで、実用問題への利用を促進し、いくつかの企業と共同研究を進めてきました。東芝の例をあげると、小型風車の気流を制御するシミュレーションや風洞試験を行った結果、トルクが20%向上できるといった顕著な効果が得られることがわかりました。

この課題を通じて、概念・初期設計段階における高度な数値シミュレーションの有効性を実証できたと考えています。

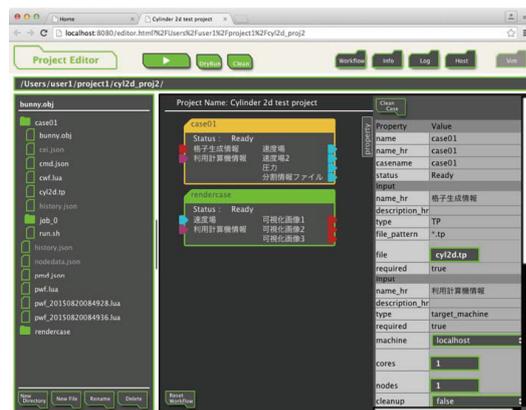
**課題2の「次世代半導体集積素子におけるカーボン系ナノ構造プロセスシミュレーションに関する研究開発」は物質・材料研究機構（NIMS）によって進められてきました。**

これはミクروسコーピックなシミュレーションによる材料設計によって、材料の飛躍的な高機能化、高性能化を図ることが目的で、課題1と同じくプロダクトイノベーションを目指す取り組みです。



**【図3】 200ケースを超える大規模パラメトリックスタディー**  
JAXAの流体解析ソフトウェアLANS3Dと京を用いて大規模なパラメトリックスタディーを行い、プラズマアクチュエータによる流体制御の現象理解と知識基盤の構築を行った。

**【図2】 HPCプラットフォーム**  
ポータルGUIの表示例。国プロアプリを利用した解析ワークフローをWebブラウザ上で簡単に実行することができる。



実はプロジェクト開始当初のターゲットはグラフィックでした。ところが、グラフィックはまだすぐに実用化されることはないという産業界の意見があったので、それを重視してもう少し近い将来を見据えたターゲットに変更したといういきさつがあります。

これからはパワーエレクトロニクスが非常に重要です。自動車も電気で動くようになってきました。従来の半導体は情報の制御に使われてきましたが、今後は電力制御のための半導体がさらに重要となるでしょう。そこで問題になるのが電子の移動度なんですね。情報制御が目的の半導体ではスイッチング速度が重視されるのに対し、パワーエレでは移動度が重要で、現在、高移動度のデバイスを作る材料として期待されているのがシリコンカーバイド（SiC）です。ただ、このSiC半導体のゲート絶縁膜（SiO<sub>2</sub>）の酸化プロセスがまだよく分からない。よくわかっていないので、どうしてもその界面の構造に欠陥ができてしまうのです。界面の欠陥は移動度に直接的に影響するため、この欠陥の発生を最小化したいと

というのが研究開発のモチベーションです。

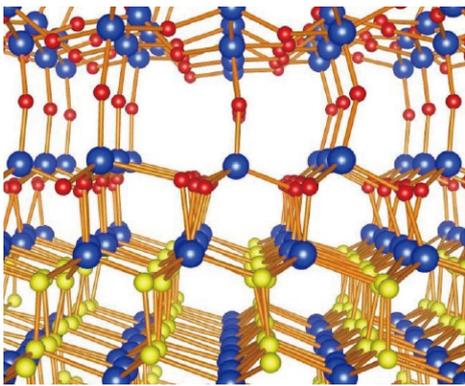
NIMSの大野隆央先生を中心とするチームは、東芝との共同研究において、この問題に対して第一原理分子動力学計算を実施し、界面に特異なカーボンクラスタ（CC結合）が現れることを見出しました【図4】。これは世界で初めてと言っていいと思いますが、これまで可能性は指摘されていたのですが、シミュレーションによって確かにそういう構造が現れることを確認したのは今回が初めてで、特に実際のプロセスで用いられる摂氏800度から1000度という、分子の動きが大きい温度でシミュレーションを実現した点が、革新的な成果であると考えています。本件については東芝と一緒に特許出願も終えている状況です。

**課題3は「乱流の直接計算に基づく次世代流体設計システムの研究開発」。多様な機器が対象です。**

この課題の対象は、自動車、燃焼器、ターボ機械、船などの設計システムで、プロセスイノベーションがテーマです。製品設計の手段として大規模計算を利用する方法を、シミュレータだけでなくプリポスト処理を含めたシステムとして確立することを目標としました。

まず、自動車については神戸大学の坪倉誠先生を中心にコンソーシアムを組織して、風洞実験をシミュレーションで代替する技術の開発を進めてきました。従来の技術では空気抵抗の予測精度が7%くらいだったのに対し、本プロジェクトでは実用的な予測精度である2%程度を実現するという世界初の成果があがっています【図5】。その他にも、自動車の実際の運動状態におけるシミュレーションや車内騒音の予測が可能

●シリコン(Si) ●酸素(O) ●炭素(C)



【図4】 シリコンカーバイド(SiC)デバイスに関する新知見

従来予想と異なる新たな界面構造と酸化過程を見出し、欠陥の少ない酸化膜界面を作製する指針を提供することができるようになった。

であることを実証するなど、多くの目標が達成されました。

燃焼器に関しては、実機や小型実験炉を対象に、目標とした予測精度である温度10%、窒素酸化物濃度30%を実現しました【図6】。これは京都大学の黒瀬良一先生を中心に達成された成果で、重工メーカー各社、電力中央研究所などと共同研究を進めてきました。今後、この技術を燃焼器の設計や運転条件の割り出しに適用していきます。

ターボ機械と船は我々のグループが担当しました。まず、ターボ機械についてですが、これは一般社団法人ターボ機械協会に民間14社からなる「ターボ機械HPCプロジェクト」を発足させて進めたプロジェクト内のプロジェクトです。ファン騒音の定量的予測、水車のドラフトチューブ内の非定常運動の予測といった6つのサブテーマについて、高い予測精度とこの技術の有用性を実証しました。

船については造船技術センターと一緒に進めてきました【図7】。曳航水槽試験を完全にシミュレーションで代替することが目

標で、すでに目処は立っています。あとは計算コストの低減ですね。おそらく今後3年くらいで実用化できるのではないかと考えています。

**課題4の「多目的設計探査による設計手法の革新に関する研究開発」もプロセスイノベーションを目指す取り組みですね。**

JAXAの大山聖先生を中心に進めた課題で、大規模な設計最適化問題の解決に利用できる多目的設計探査手法を開発し、JAXAだけでなく分野4の他課題や企業が抱える問題に適用してその有効性を実証することが目的です<sup>[6]</sup>。

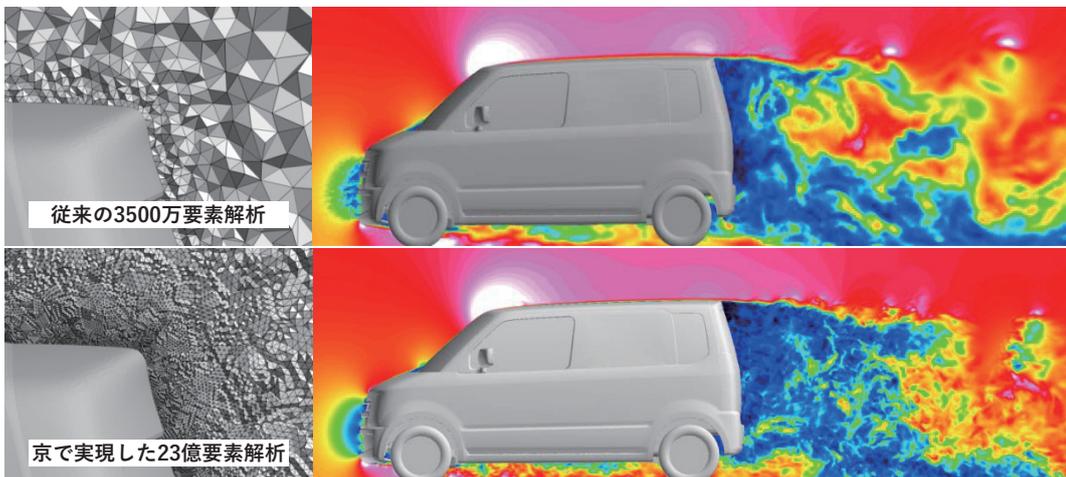
幅広い分野のものづくりに適用するため多くの企業と共同研究を進めました。たとえば、マツダ、富士通、日本自動車工業会とは車両の重量最小化と共通部品点数最大化のトレードオフ探査、JR東海とは高速鉄道車両の車内騒音と空気抵抗の低減、横浜ゴムとはタイヤの空力設計の最適化といったテーマを設定して、いくつかの画期的な成果が得られています。

横浜ゴムの例をもう少し詳しく説明しましょう。タイヤ側面の突起形状とその位置の最適化によってクルマの空力性能を向上させることが目的です。普通、クルマの揚力と抗力は相反する関係にあって、両方を同時に小さくすることはできませんでした。しかし、この設計探査手法を京を用いて実行することで、揚力と抗力を同時に低減できる革新的な知見を得ることに成功したのです。この知見を利用した試作品は2015年の東京モーターショーに展示されました【図8】。

**最後となる5つ目の課題は「原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発」です。**

安全安心社会の実現に貢献するという大きな枠組みのなかで、建屋および機械構造物の耐震設計を抜本的に高度化するという取り組みです。日本原子力研究開発機構(JAEA)の中島憲宏氏を中心に進められたこの実証研究では、JAEAが開発してきたFIESTA<sup>[7]</sup>というコードが使われました。

FIESTAの大きな特徴は、部品点数が非常に多い場合でも組み合わせ解析ができる点にあります。大型プラントの構造解析、特に耐震シミュレーションをやろうとすると、その部品点数は数十万というオーダーになるのですが、そのモデル化を行うと膨大な計算量が必要となってしまいます。そこで従来は計算資源削減のためモデルを簡略化していたわけですが、それでは局所的には十分な予測精度が得られませんでした。



【図5】 対風洞実験誤差2%を実現した大規模解析

従来の3500万要素解析では誤差7%だったのに対して、京を使って実現した23億要素の解析では、誤差2%と風洞実験の代替が可能なレベルまで精度が向上した。協力:スズキ

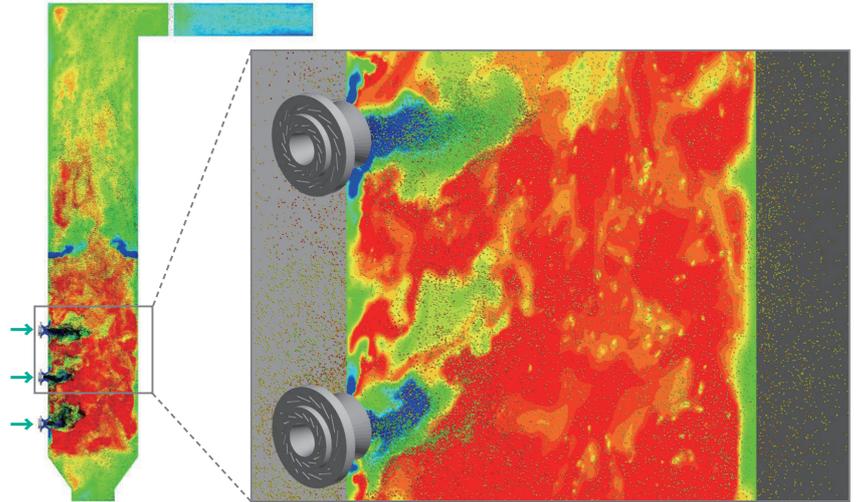
この問題に対して、今回は部品ひとつひとつを直接そのままシミュレーションしています。キーとなったのは、非常に多くの部品点数に対して統合解析できる技術ですね。JAEAの高温工学試験研究炉（HTTR）を対象に解析を行いました。過去の地震波に対して建屋と機器がどう揺れたかというデータがありますから、それと比較することで解析の精度を評価しました。その結果、きちんとシミュレーションできていることがわかったことが成果です。

さらに、他の研究開発課題と同様に、JAEAの他部門のプロジェクトに加えて、千代田化工建設、荏原製作所といった企業の一部署との共同研究も進めていただきました。その成果として、従来は不可能だった詳細な耐震裕度の俯瞰的な評価が可能となる技術が開発されています。

**各課題から多くの成果が上がっていることがわかりました。今後、これらの成果をどのように展開していくのでしょうか？**

もっとも重要なのはこれらの成果を実用化するという事です。このプロジェクトの目的は実証研究ですから、直接的には実用化とは関係しないという見方も可能かもしれませんが、次世代のものづくりに取り組んでいる我々としては、産業界が使えるよう実用段階に持って行くことがとても重要だと考えています。

実用化のために、私は2つの柱が必要になると考えています。ひとつはさらに強力



**【図6】 マルチバーナ試験炉内の石炭の燃焼**  
 京(1万並列)を用いて行った石炭燃焼の解析によって当初目標の精度(温度10%、窒素酸化物濃度30%)を実現した。 協力:電力中央研究所

な企業との連携による実用化の推進。もうひとつは計算コストの抜本的な削減です。

コストの問題について、少し説明しましょう。先ほどあげた課題3の船のケースを例にとると、京の3万ノードを使って、300億格子の計算を行えば、水槽実験と同等の精度を得られることがわかりました。でも精度だけでなく、コストの問題も解決しないと製品開発にはなかなか使えません。現実問題として数千とか数万ノードの計算機がそんな簡単に使えるかということ、まだそれは難しいからです。このため抜本的に計算コストを下げる必要があります。

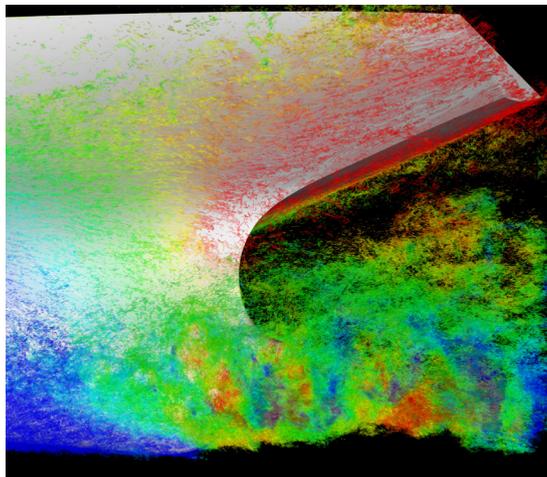
**抜本的というと、どのくらい下げていることを考えているのでしょうか？**

我々は最近、トータルのコストを1万分の1にしようと言っています。そのためにハードウェアの進歩は必須ですが、そ

れだけではダメなんです。さらにソフトウェア的な知恵を使って、高速化を実現することが必要です。ハードウェアと計算手法による高速化で100倍、モデリング手法で100倍、あわせて1万倍と考えています。

1万倍が実現できれば、現在1万ノードを使っている計算が1ノードでできてしまうことになります。もちろん、一朝一夕には行かないのですが、100倍の高速化に対してはもうある程度目処が立っていて、あと数年でできると考えています。100倍でも、現在3万ノードを使っている計算が300ノードでできるようになります。ラック数でいうと3ラックか4ラックくらいです。実用化に向けての大きな前進となるでしょう。

1万倍の目標は「ポスト京」のプロジェクト<sup>[8]</sup>が終わる2019年度末までには実現したいですね。本当にできるかどうかはわからないのですが、なんとかやり遂げたいと思っています。



**【図7】 船体まわりの渦構造の可視化**  
 320億格子による準直接計算により、水槽試験に対し誤差1%以下で推進抵抗の予測をすることができた。 協力:日本造船技術センター

**【図8】 東京モーターショー2015で展示された試作品**

横浜ゴムとの共同研究により、タイヤ側面の突起形状とその位置の設計探査を実施。研究開発課題3で開発されたFrontFlow/redを利用し、抵抗と同時に揚力も低減できる形状に関する革新的な知見を得ることに成功した。



# 目指すは全自動高速シミュレーション FrontFlow/violet Cartesian



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  
特任研究員  
鵜沢 憲

FrontFlow/violet Cartesian(FFV-C)はHPCI戦略プログラム分野4で整備されてきた三次元非定常熱流体ソルバーです。京コンピュータの全ノードを使いきる90%の並列実行効率、自動格子生成、オープンソースライセンスに基づく公開といった特長を備えています。この記事では、開発に携わってきた東京大学生産技術研究所の鵜沢憲さんに、FFV-Cの特徴と今後の開発の方向性について聞きました。

## 鵜沢さんとFFV-Cの関わりはどのように始まったのでしょうか。

私がFFV-Cの開発に関わったのは、京の運用開始後1年くらい経ってからで、おもに乱流モデルの実装とその基礎的な検証に携わってきました。

当時のFFV-Cは乱流モデルが実装されていなかったのです。そこでまず、京の規模の計算にふさわしい乱流モデルとはどういふものかをリサーチするところから始めました。既にFFV-Cは京向けのチューニングが進んでいて、90%くらいのウイークスケーリング性能を実現していましたから、それを低下させないように乱流モデルを組み立てなくては行けませんでした。

## 採用した乱流モデルについて教えてください。

当時のFFV-Cは直接数値計算(DNS)とよばれる乱流解析手法を採用していました。乱流の中には大きな渦から小さな渦まで

いろいろな大きさの渦があります。DNSでは一番小さな渦を解像できるほど格子を細かく切ってしまうのです。その結果、非常に高い計算精度が得られますが、弊害として計算規模が大きくなるため、現状では計算精度と計算コストのトレードオフでLES<sup>[1]</sup>と呼ばれる手法が主流です。

乱流の渦は、小さくなっていくと等方的な性質を持ってきます。そういう統計的性質を使って、十分小さい渦はモデル化して大きな渦だけ解くのがLESの考え方です。計算精度をDNSとほぼ同程度に保ちつつ格子数を削減できるので、合理的な方法ですね。

ただ、LESモデルの中には並列性能を劣化させる要因であるノード間の通信を必要とするモデルがあるため、京を使い倒すためには、大域的な通信を必要としないモデルが好ましいと言えます【図1】。とは言っても、計算速度に気をとられて、必要以上に渦のモデルを簡素化し過ぎてもいけません。そうして行き着いたのが局所SGS<sup>[2]</sup>モデルといって、ノード内の格子だけを使っ

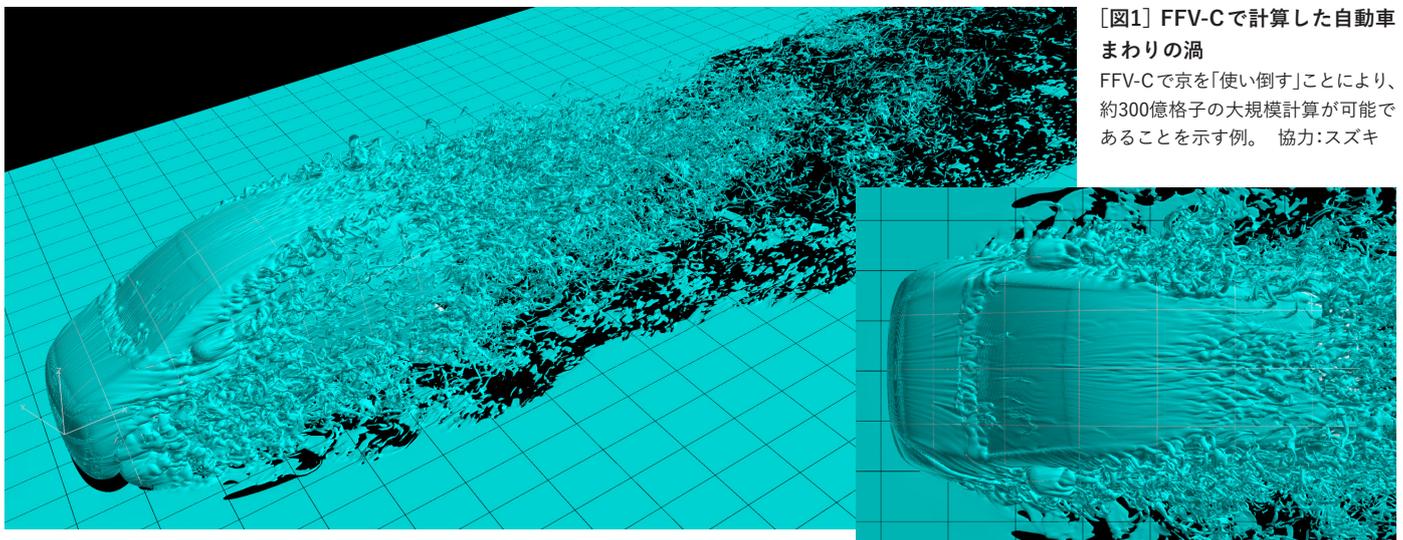
てLESで必要となる量を全部計算できる乱流モデルです。

これまでに、簡単な検証例題として矩形の空間の中の流れや、一様等方性乱流という開いた空間での乱流を対象にモデルの正しさを検証しました。

"Cartesian"はデカルト座標系あるいは直交座標系のことですよ。この言葉がFFV-Cの特長を表していると想像するのですが、ユーザーからみたときのFFV-Cの最大の特長はなんでしょうか。

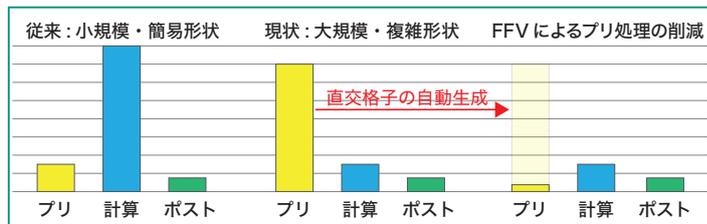
FFV-Cの計算格子は3辺が直交するサイコロ型です。これを直交格子とよびます。FFV-Cは必要な直交格子を計算の始まりの1ステップ目で、形状データから非常に短時間に並列自動生成してしまうんですね。これが他の市販ソフトウェアやオープンソースソフトウェアにない大きな特長です。

近年の流体解析では、コンピュータの性能向上に伴ってますます複雑な形状を扱え



【図1】FFV-Cで計算した自動車まわりの渦  
FFV-Cで京を「使い倒す」ことにより、約300億格子の大規模計算が可能であることを示す例。 協力:スズキ

- [1] Large Eddy Simulation
- [2] Subgrid scale
- [3] Immersed Boundary Method
- [4] FFVは修正BSDライセンスで公開されている。



【図2】 流体解析の処理時間の比率  
 プリ処理(格子生成)、計算、ポスト処理(可視化)の比率を模式的に示したグラフ。

ようになってきましたが、その一方で、計算やポスト処理に比べてプリ処理にかかる時間が圧倒的に長くなってしまっているという現状があります。今後、この傾向はどんどん顕著になってくるはずで、いかにしてプリ処理の工数を削減するかが、産業界で実用化する上で重要でしょう。

プリ処理の工数が増える原因のひとつが格子生成の大変さです。複雑形状に対する格子生成のどういう所が大変かと言うと、例えば自動車の格子を生成する時に、複雑な形状を忠実に再現する非構造格子を自動生成しようとする、計算が上手くいかない格子ができてしまう場合があるのです。そういう時は、結局、職人が手で編集することになります。人の手に頼る部分は、形状が複雑になればなるほど工数が多くなるので、ボトルネックになってしまうのです。この問題をFFV-Cによる直交格子の自動生成によって解決しようと考えています【図2】。

**格子生成のためのプリ処理が必要ないというFFV-Cの大きな利点がよくわかりました。一方で課題もあるのでしょうか。**

たとえば自動車の空力性能を評価する上で必要な渦の大きさは、1mmより遙かに小さくなります。FFV-Cの格子は3辺の長さが全部同じなので、ボディから遠く離れた物理的に意味の無い所まで全部最小の渦サイズの格子で切ることになってしまい、

その結果、計算量が膨大になります。そこで、FFV-Cから派生したFFV-HC(囲み記事参照)では、必要な所だけサイコロを小さくする階層型格子を用いることでこの問題に対処しています。

一方で、私が担当するFFV-Cでは、サイコロの各辺の幅を変えたり、幅は同じでも大きなサイコロのまま渦の性質をうまく捉えられる理論モデルを入れることで、精度を維持しながら計算コストの削減を進めています。なお、後者については、LESで必要な格子数を数桁減らすことができることから、工学的に極めて重要な課題です。現在、既存の理論モデルの洗い直しを含めてモデルの検討を開始したところですが、なんとか頑張ってポスト京のプロジェクトの間に形にしたいと考えています。

また、直交格子は非構造格子と比較して形状再現性が劣ります。このため、従来のIBM<sup>[3]</sup>を改良し、さらなる計算精度の向上に努力したいと考えています。

**綿沢さんが描くFFV-Cのこれからはどんなものでしょうか。**

FFVはものづくりの設計上流での使用を念頭に置いて開発・改良されている、世界的にも類を見ないコードです。これまでに製造機械や生産技術分野を中心に展開されてきた実績がありますので、今後さらにユーザの裾野を広げていければと思っています。

私がFFV-Cを通じて実現したいのは、精度は超高精度と言えなくとも、ある程度十分な精度を確保した上で、誰でも、ものすごく手軽に計算できる環境です。究極的な理想はシミュレーションしたいと思ったら全自動で数秒の内に全解析プロセスが終わるようなシステムですね。まだまだ先は長いですが、もしそれが実現したら、日本のものづくりプロセスを劇的に効率化できるのではないかと思います。

**綿沢さんはこれまでもオープンソースソフトウェアに携わってきましたね。**

前職の日本原子力研究開発機構では"OpenFOAM"を使っていました。個別の原子力課題に特化したコードを開発するのではなく、オープンな技術を活用して、広く原子力課題全般に適用可能な計算技術を提供しようという試みに、取り組んでいました。

FFV-Cも同じオープンソース<sup>[4]</sup>ですが、OpenFOAMのような汎用のソフトウェアとは方向性に違いがありますね。国プロのアプリは良い意味で尖っています。この点については他のソフトに負けない、という作り方がされている。国プロに携わる者が受ける最大の恩恵の一つは、このようなハイリスク・ハイリターンズのチャレンジングな研究を進めることができる点なのではないかと思っています。

(参考文献リストを10ページに掲載しました)

**FrontFlow/violetの派生版と関連ソフトウェア**

FFVは理化学研究所 計算科学研究機構の小野謙二博士が1990年代半ばに開発を始めたコードが基になっている(本誌Vol.5に関連記事)。設計上流での活用を想定し、短時間で解析プロセスを実行するための様々なアプローチが採用されている次世代のものづくりを見据えたソフトウェアである。

現在、データ構造の異なるいくつかの派生版が存在し、並行して開発が進められている。

ひとつは本稿で紹介した"FFV-Cartesian"。もうひとつは階層的な直交格子を用いる"FFV-Hierarchical Cartesian"(本誌Vol.7に関連記事)である。

FFV-HCは空間解像度を局所的に密にする制御ができ、FFV-Cよりも少ない格子点数で計算が可能となっている。

さらに、現在、実験段階にある派生バージョンとして"FFV-OCT"(Octree、八分木版)がある。

また、FFVは「HPCプラットフォーム」(HPC/PF)の機能を十分活用できるように、連携して開発が行われている。HPC/PFは各種ものづくり系解析ソフトウェアをスパコン上で簡単に使えるようにする基盤ソフトウェアである(本誌Vol.5に関連記事)。

# 大きな翼から小さな羽まで 新しい流体制御技術の開発とその可能性



東京理科大学  
工学部第一部機械工学科 助教  
青野 光

HPCI戦略プログラム分野4の研究開発課題1『輸送機器・流体機器の流体制御による革新的高効率化・低騒音化に関する研究開発』では、大規模流体制御解析ソフトウェアの整備とプラズマアクチュエータを用いた流体制御技術の有効性を実証する研究が進められてきました。この課題に初期から参加している青野光さんに、開発の経緯と現在の状況、そして青野さんご自身の専門分野である「羽ばたき」について聞きました。

青野さんは昨年度までJAXAに所属していましたが、そこで分野4のプロジェクトに参加することになったいきさつから話を聞かせてください。

ミシガン大学でポスドクをしていたとき、学会でお会いしたJAXAの大山先生からこのプロジェクトが始まることをうかがいました。「メンバーを探しているの、どう?」とお誘いを頂いて「ぜひ」と応えたのが始まりです。京を使って新しいことができるという「魅力的な話」と感じました。

## 米国でのポスドク時代はどんな研究を?

羽ばたき飛行の研究です。流体構造連成のシミュレーションと実験をやっていました。博士課程は今の分野とまったく違う昆虫飛行のシミュレーションがテーマです。

## 「羽ばたき」については後ほど改めてうかがいたいと思います。京を使い始めた頃の仕事はどんな内容でしたか?

JAXAの宇宙研に赴任したのは京が正式に動き始める前の2011年で、まず取り組んだのはLANS3D<sup>[1]</sup>を京に対応させるためのスカラーチューニングです。富士通の方々とは2週間に1回くらい綿密なミーティングをして、どこまでプログラムの性能を出せるかを調べていきました。それを京の正式運用が始まる前の半年間くらいやりましたね。

今はおそらく違うのですが、当時は京でプロダクトランをするには厳しい条件がありました。ノード内の実行効率と、ノード間の並列化効率がどちらもその条件を満た

していないと実行できなかったのです。最初は数千ノードから始まり、約半年ごとに1万ノード、2万ノードと増えていったのですが、その段階ごとにテストを繰り返して、京の上でLANS3Dのプロダクトランができる状態まで持って行くことが私の仕事でした。

## 京の正式運用開始後に本格的なパラメトリックスタディが始まりましたね。

約25,000ノードの並列テストを行った後、翼まわりの計算を本格的に始めました。最初はレイノルズ数が10の4乗の計算を300ケース弱くらい。それを稼働後1年くらいやって、その後、レイノルズ数を1桁上げた10の5乗の計算を数十ケースについて実行しました。

京を使うことで、このようにたくさんのケースを調べて良い解を見つけることができるわけですが、パラメータの設定を人間がやったのでは、全部の組み合わせを見ることはできません。今回はグリッドサーチ

とJAXAの多目的設計探索のフレームワーク<sup>[2]</sup>によって可能になった成果で、とても効果的なツールです。

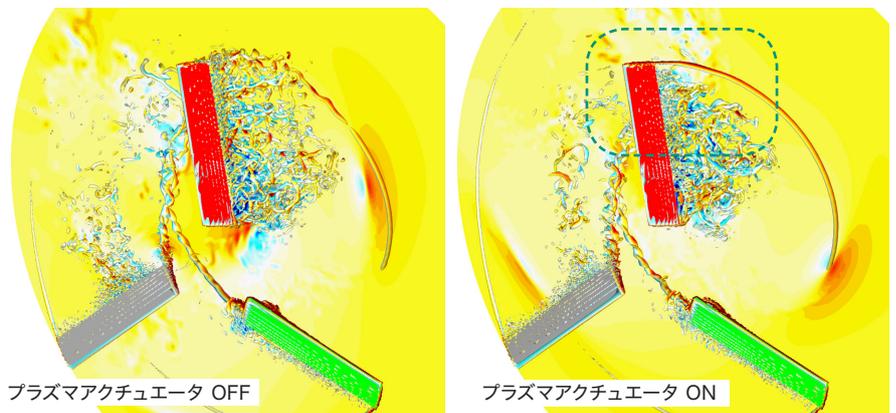
## このプロジェクトを通じて、プラズマアクチュエータをどう評価するようになりましたか?

原理は、以前、藤井先生がおっしゃったとおりです<sup>[3]</sup>。他のメリットとしては、簡単に作れる、という点をあげたいですね。触ってみると柔らかくて、身近に感じられるデバイスです。

材料を変えると性能も変わるので、材料分野の人も興味を持っています。今は流体制御という使い方に絞っていますが、発生するオゾンを使ってウイルスを殺すといった使い方も考えられています。

## 企業との共同研究も進められています。

東芝との実証研究が最初に始まりました。詳細については東芝の論文(10ページ参考文献C)をぜひ読んでいただきたいのですが、



〔図1〕 小型風車に適用したプラズマアクチュエータの効果 1

前縁に取り付けた間欠的駆動中のプラズマアクチュエータが剥離せん断層に影響を及ぼし、翼端部分では剥離を抑制し、翼端渦の崩壊なども抑制する。ブレード中心部から翼端側での制御効果が確認できる。

- [1] JAXA 藤井研究室で開発された流体解析プログラム
- [2] 本誌 Vol.3 に関連記事
- [3] 本誌 Vol.6 に関連記事
- [4] 本誌 Vol.8 に関連記事

回転直径1.56メートルの小さい風車を使った風洞実験【図1、2】から2メガワット級の大型風車までを対象にしています。

小さい風車の実験では、回転しない状態でもプラズマアクチュエータのスイッチを入れると自分で回転し始めるので、ひと目で効果を確認できます。毎分40回転くらいのゆっくりした回転が、スイッチを入れると徐々に回転速度が上がり、最終的には約8倍の300回転になります。

レイノルズ数が大きくなると効果は見づらくなるのですが、屋外の大型風車の実験では、最も適した形状の場合で発電量が10%程度向上します。

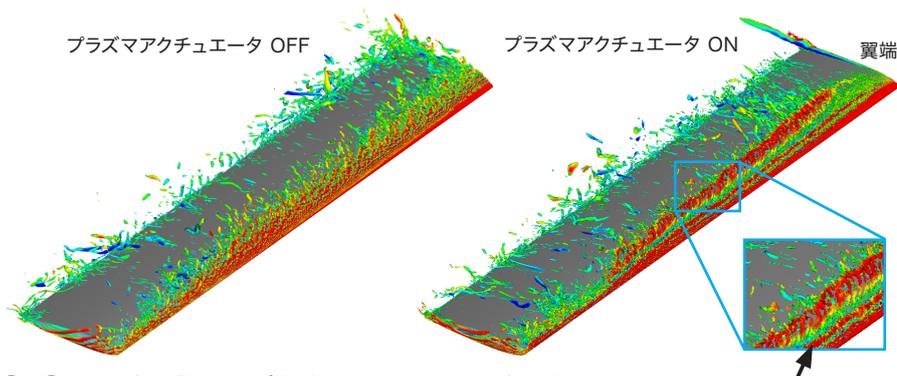
### 顕著な効果ですね。残している課題もあるのでしょうか？

止まっている翼に関しては、アクチュエータをどこに設置して、どう使えばいいかという指針が得られていて、これは既に実現したイノベーションであると思っています。しかし、風車などの設計に適用するには、動的な翼についての設計指針や運用の条件を知ることが必要でしょう。

### 静的な翼と動的な翼の違いはなんですか？

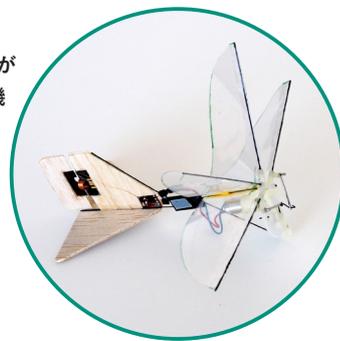
静的な翼の場合、剥離点が流れ場条件である程度決まるのですが、翼が動いていると剥離点も動いてしまいます。このデバイスは剥離を対象にしているので、剥離点の移動は難敵なんです。

風車を例にとると、流れがまっすぐ来て



【図2】小型風車に適用したプラズマアクチュエータの効果2  
間欠的駆動中のプラズマアクチュエータが剥離せん断層に影響を及ぼし、翼端部分では剥離を抑制し、スパン方向に軸を持つ渦構造(矢印)があることが確認できる。

【図3】青野さんらが試作した羽ばたき機



一番揚力抗力比が高いところをさらにアクチュエータを使って良くするという使い方を想定しています。

LANS3Dは高解像度で高精度なプログラムですから、ポスト京を使って、翼まわりの現象をきちんと捉えたシミュレーションをしたいと思っています。

### それでは羽ばたきの研究について聞かせてください。昆虫の羽とプラズマアクチュエータを装着した翼に共通点はあるのでしょうか？

昆虫は羽で前縁から流れを剥離させて渦を作ります。一方、今回の研究は剥離を抑制することが目的です。対照的ですが、流体制御という観点では同じ問題です。

飛行機や風車の翼は剥離しない設計になっています。その設計指針で昆虫のような羽ばたきものを説明しようとしてもできないんですね。大きな翼では抑制すべき剥離なのに、小さな昆虫ではそれを使わないと飛ぶことができない。大きさによって流体力学的なパラメータが異なる、あるいは、レイノルズ数によって使うべきメカニズムが変わってくると言えます。

### 最近の論文は「羽音」がテーマですね。

羽ばたきロボットを作って自然調査に使いたいのです【図3】。そのためには羽音の静かな羽ばたき機が必要です。アマゾンの森林へぼんと入れた時に、機械的な羽音を出していたらその生態は変わってしまいます。非常に数は少ないですが、これまでに作られた羽ばたき機はそこまで考慮されていません。羽音をうまく制御することで蝶に近い静音性を持たせかつ羽ばたきの本来の高い空力性能を維持したい。そうすればその自然に近い状態で生態調査ができると思っています。

(参考文献リストを10ページに掲載しました)

## ■参考文献(6~7ページ)

1. Kenji Ono, Shuichi Chiba, Shunsuke Inoue and Kazuo Minami, "Low byte/flop implementation of iterative solver for sparse matrices derived from stencil computations", High Performance Computing for Computational Science - VECPAR 2014, Vol. 8969 of Lecture Notes in Computer Science, pp.192-205, 2015.
2. Kenji Ono, Yasuhiro Kawashima and Tomohiro Kawanabe, "Data centric framework for large-scale high-performance parallel computation", Procedia Computer Science, Vol. 29, pp.2336-2350, 2014.
3. 磯部光基, 木村祐介, 木村真也, 世良俊博, 横田秀夫, 小野謙二, 田中学, "鼻腔内熱流動ボクセル解析における横断面医療画像二次元補間の有効性", 生体医工学, Vol. 53, No. 3, pp.160-167, 2015.
4. 水谷崇志, 磯部光基, 田中学, 世良俊博, 小野謙二, "医療画像に基づく鼻腔内熱流動のボクセルシミュレーション", 生体医工学, Vol. 52, No. 1, pp.33-41, 2014.
5. Ken Uzawa, Kenji Ono and Takanori Uchida, "Validation of local SGS models for high Reynolds number flow", 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona SPAIN, July 2014.
6. Ken UZAWA and Kenji ONO, "Validation of local SGS models implemented in high-performance CFD solver:FFV-C", ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, Seoul KOREA, July 2015.
7. 鶴沢憲, 小野謙二, "壁法則に基づく動的なLESモデルの検討", 第29回数値流体力学シンポジウム, 福岡, 2015年12月.

## ■参考文献(8~9ページ)

### A. 翼まわりのパラメトリック解析(抜粋)

1. M. Sato, H. Aono, A. Yakeno, T. Nonomura, K. Fujii, K. Okada, K. Asada  
Multifactorial Effects of Operating Conditions of DBD Plasma Actuator on Laminar-Separated-Flow Control,  
AIAA Journal, Vol. 53, No. 9, pp. 2544-2559 (2015).
2. M. Sato, T. Nonomura, K. Okada, K. Asada, H. Aono, A. Yakeno, Y. Abe, K. Fujii  
Mechanisms for Laminar Separated-Flow Control using DBD Plasma Actuator at Low Reynolds Number,  
Physics of Fluids, Vol. 27 117101 (2015).
3. H. Aono, K. Okada, T. Nonomura, S. Kawai, M. Sato, A. Yakeno, K. Fujii  
Effects of Burst Frequency and Momentum Coefficient of DBD actuator on Control of Deep-stall Flow around NACA0015 at  $Re_c=2.6 \times 10^5$   
AIAA SciTech 2014, National Harbor USA, January 2014, AIAA-2014-0776.
4. T. Watanabe, T. Tatsukawa, A.L. Jaimes, H. Aono, T. Nonomura, A. Oyama, K. Fujii  
Many-objective Evolutionary Computation for Optimization of Separated-flow Control using a DBD Plasma Actuator,  
IEEE WCCI 2014, Beijing CHANA, July 2014, E-14777.
5. T. Watanabe, H. Aono, T. Tatsukawa, T. Nonomura, A. Oyama, K. Fujii  
Design Exploration of a DBD Plasma Actuator for Massive Separation Control,  
53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2015-0307.

### B. 小型風車の計算(抜粋)

1. H. Aono, Y. Abe, M. Sato, A. Yakeno, K. Okada, T. Nonomura, K. Fujii  
Flow Control Using a DBD Plasma Actuator for Horizontal-axis Wind Turbine Blades of Simple Experimental Model,  
WCCM XI, ECCM V, ECFD VI, Barcelona SPAIN, July 2014.
2. H. Aono, Y. Abe, K. Okada, M. Sato, A. Yakeno, T. Nonomura, K. Fujii  
Large-eddy Simulations of a Two-meter, Three-bladed Simple Wind Turbine Model Controlled by a Plasma Actuator,  
Eleventh International Conference on Flow Dynamics, Sendai JAPAN, October 2014.

### C. 東芝のプラズマ気流制御(抜粋)

1. 松田, 田中, 雨森, 野村, 大迫, 風車性能に及ぼすプラズマ気流制御の影響, 日本機械学会2012年度年次大会, S056041.
2. 田中, 松田, 雨森, 志村, 安井, 大迫, 前田, 鎌田, プラズマ気流制御によるトルク増大効果のフィールド研究, 風力エネルギー利用シンポジウム2012予稿集.
3. 田中, 大迫, 松田, 山崎, 志村, 浅山, 近藤, 川上, 尾立, 吉田, プラズマ気流制御による大型風車の出力向上, 風力エネルギー利用シンポジウム2013予稿集.

# ニュースレター総目次

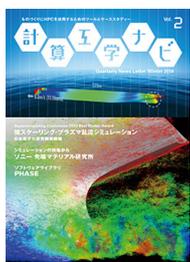
過去のニュースレターはすべてPDFフォーマットで下記のURLからダウンロードできます。  
<http://www.cenav.org/NLDL/>



**Vol. 1 (2013年10月発行)**  
 創刊に寄せて「ものづくりとシミュレーション」  
 住友ゴム工業株式会社  
 ソフトウェアライブラリ FrontCOMP



**Vol. 6 (2015年3月発行)**  
 非線形現象の理解からはじまるプロダクトイノベーション  
 ポスト「京」時代のものづくり  
 次世代並列可視化システム HIVE  
 Makerムーブメントとものづくりのコンピューティング



**Vol. 2 (2014年1月発行)**  
 核融合炉の閉じ込め性能を解明するプラズマ乱流シミュレーション  
 ソニー 先端マテリアル研究所  
 ソフトウェアライブラリ PHASE



**Vol. 7 (2015年6月発行)**  
 電極の超大規模解析による燃料電池設計プロセスの高度化  
 熱流体解析システム FrontFlow/violet-HC  
 オープンソース遠隔可視化ソフトウェア PBVR



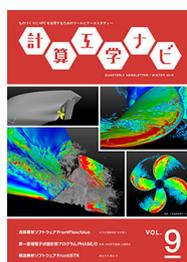
**Vol. 3 (2014年3月発行)**  
 多目的設計探索の新展開  
 電力中央研究所  
 ソフトウェアライブラリ FrontFlow/red



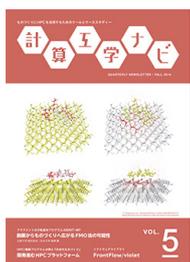
**Vol. 8 (2015年9月発行)**  
 洋上・陸上ウインドファームを最適化する大型風車の最適配置設計ツールの開発  
 高圧水素容器の合理的設計法を求めて  
 全体俯瞰設計と製品設計の着想を支援するワークスペースの研究開発



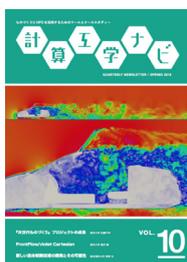
**Vol. 4 (2014年9月発行)**  
 自動車のプロセスイノベーション  
 計算科学振興財団 FOCUS  
 ソフトウェアライブラリ FrontISTR



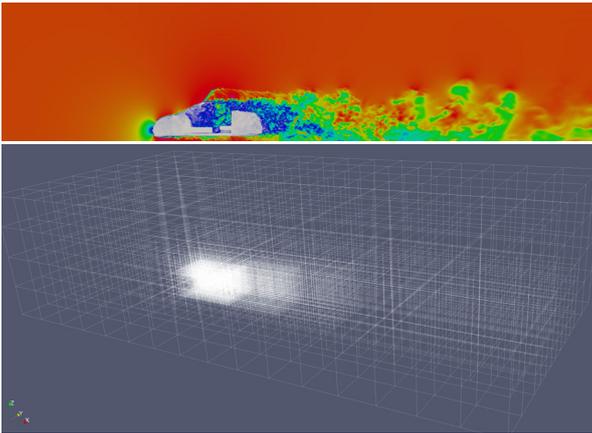
**Vol. 9 (2015年12月発行)**  
 流体解析ソフトウェア FrontFlow/blue  
 第一原理電子状態計算プログラム PHASE/O  
 構造解析ソフトウェア FrontISTR



**Vol. 5 (2014年11月発行)**  
 創業からものづくりへ広がる ABINIT-MP の可能性  
 HPCI 戦略プログラム分野4における 成果公開・普及促進活動の状況  
 ソフトウェアライブラリ FrontFlow/violet



**Vol.10 (2016年3月発行)**  
 『次世代ものづくり』プロジェクトの成果  
 FrontFlow/violet Cartesian  
 新しい流体制御技術の開発とその可能性



## 今号の表紙

### FrontFlow/violet-Hierarchical Cartesian(FFV-HC)による大規模流れ解析

京コンピュータ上でFFV-HCにより計算したオープンカーまわりの瞬時速度場(表紙)。FFVでは、計算開始時にロバストな計算格子を並列自動生成することで、格子生成に費やす時間を飛躍的に削減することが可能。32億の階層型直交格子(上図)を京コンピュータ上で約3.5分で生成することに成功した。

東京大学生産技術研究所 鵜沢 憲

## 編集後記

HPCI戦略プログラム分野4『次世代ものづくり』のアウトリーチ活動の一環として発行されてきた本誌も、このVol.10で一区切りです。締めくくりとなる本号では、加藤千幸教授へのインタビューを基に、プロジェクト全体の成果をまとめる記事(2~5ページ)を掲載しました。註として過去の関連記事へのリンクも用意しましたのでご活用ください。(F)



## 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.10

発行日：2016年3月23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