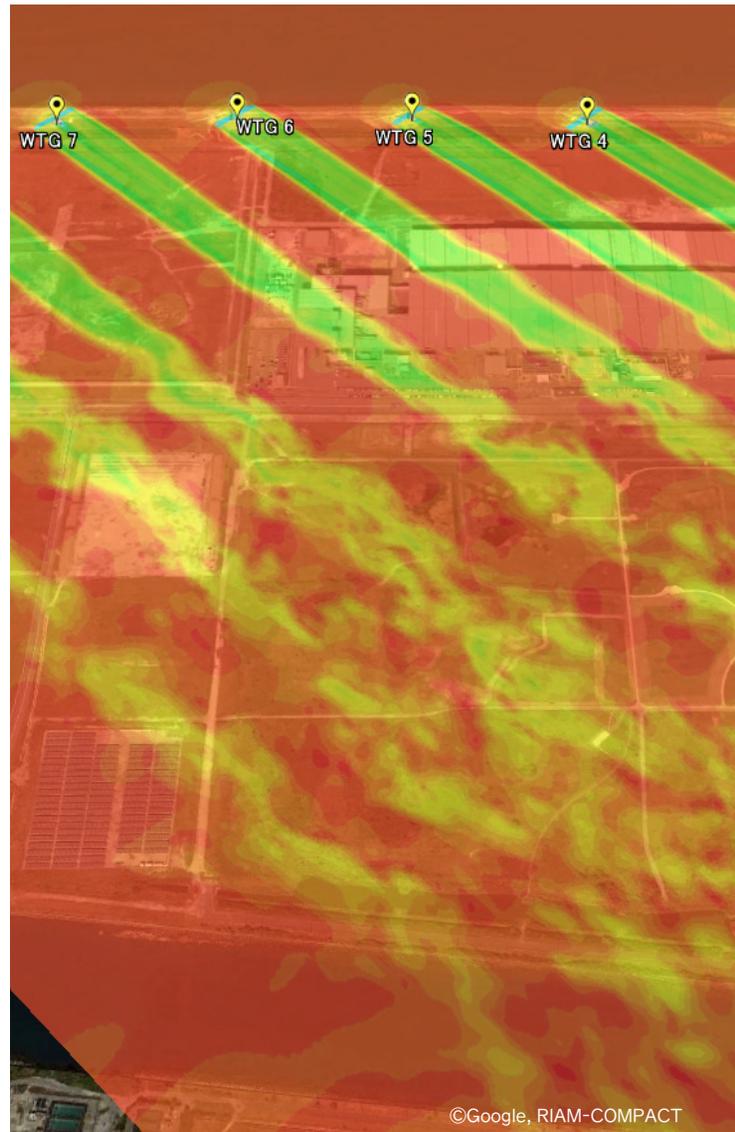
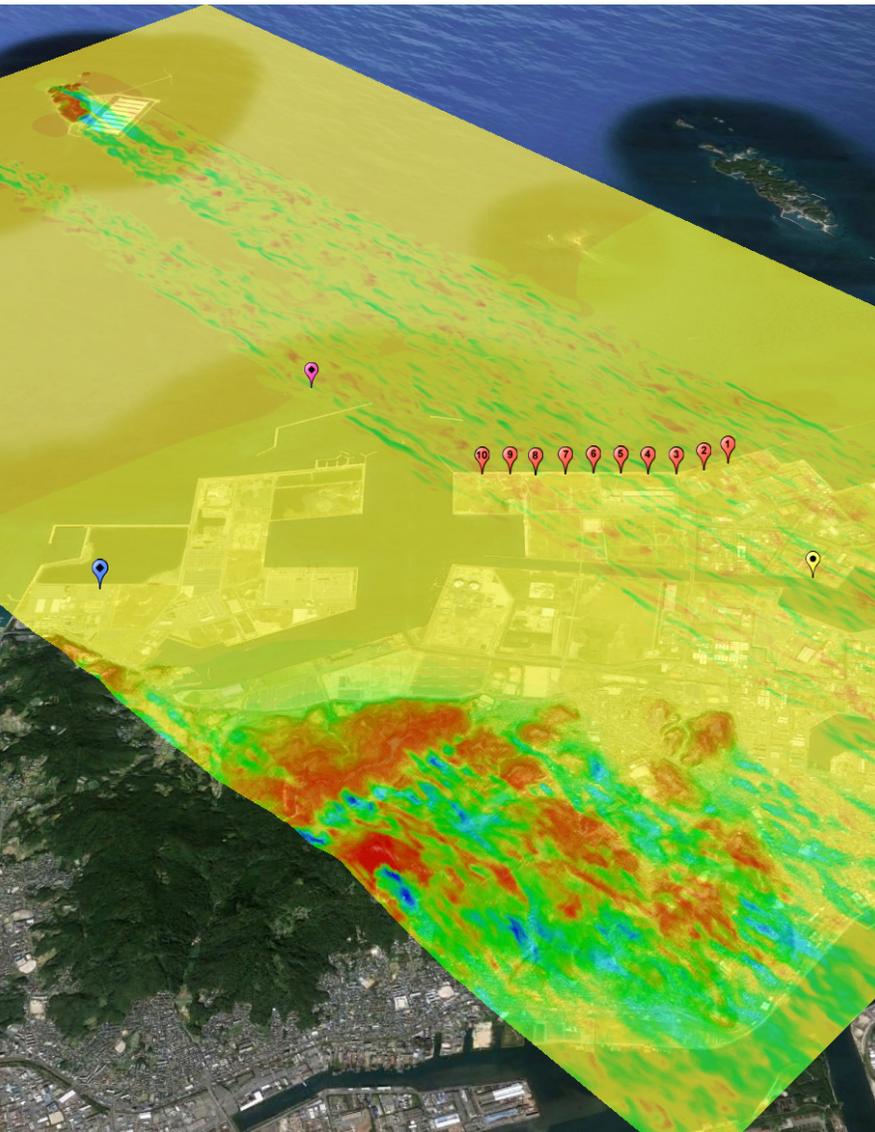


ものづくりにHPCを活用するためのツールとケーススタディー

# 計 算 互 学 ナ ビ

QUARTERLY NEWSLETTER / FALL 2015



**洋上・陸上wind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** 九州大学 内田孝紀

**高圧水素容器の合理的設計法を求めて** 東京大学 針谷耕太

**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** 東京大学 川鍋友宏

VOL. **8**

# 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



九州大学応用力学研究所  
新エネルギー力学部門 風工学分野  
内田孝紀 准教授

ポスト京に向けた研究開発が進められています。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』(本誌Vol.6参照)のサブ課題のひとつとして設定されたのが、『高効率風力発電システム構築のための大規模数値解析』というテーマで、風力発電所の設計と運用に革新的なコンピュータシミュレーションの成果を導入する試みです。このプロジェクトで数値風況シミュレーションソフトウェアの研究開発を担当している九州大学応用力学研究所の内田孝紀准教授に話を聞きました。

風力発電にとってコンピュータシミュレーションはどのように役立つのでしょうか？台風が来ても壊れない風車を作るといった目的なのでしょうか？

掴み所の無い自然の風を相手にするのは難しいことですが、台風や爆弾低気圧が相手なら、気象庁の予報を見て事前に風車を止めることもできますし、強い風で壊れることを避ける設計も当然されています。それよりもやっかいなのは、日々の風によって地形や植生から生じる乱流なんですね。そうした日常的な乱流が風車に悪さをし、ボディーブローのようにダメージを与えることがあるんです。

風力発電所を新設するには数百億円の前算が必要で、メガワット級の風車は1基1億円以上します。それを15年くらい運用しないとイケない。しかし、その運用期間中に風車が壊れる事故がすでに発生しています<sup>[1]</sup>。事業を成り立たせるには、風車

を設置する前に、15年間壊さずに運用できる場所を見つける必要があります、そのためには日常的な乱流も含めて風が及ぼす影響を精度良く予測できるシミュレーションの技術が不可欠です。

また、事業者によっては採算性の評価を行うために発電量を正確に予測したいというニーズを持っています。実際の地形や気候のデータに基づいて、発電量が最大になる風車の配置を見つける技術が求められています。

内田先生は20年間に渡る数値風況シミュ

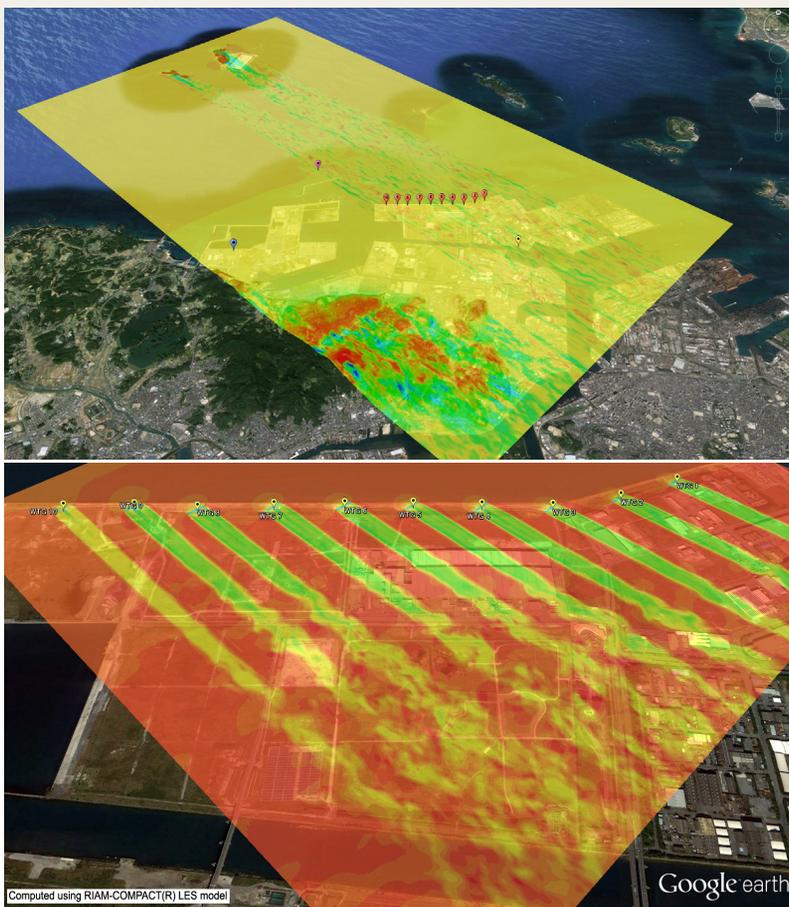
レータRIAM-COMPACT<sup>[2]</sup>シリーズの開発を通じて、そうした課題に取り組んできました。

地形に起因する風の非定常な挙動を数値的に捉えるためには、どうしてもLES<sup>[3]</sup>モデルが必要でした。それがRIAM-COMPACTを開発した動機です。

我々は「流れを見る」ということを重視しています。風車が壊れる原因となる見落としがちな乱流を見つけるには、日常の感覚で見るのが一番いいのです。また、計測をするにしても、その前に流れを見なければ



【図1】北九州市響灘地区の響灘風力発電所  
RIAM-COMPACTを用いて響灘風力発電所(写真上)における風の流れを可視化し、Google EarthのGUIに投影した事例。右上は沖合の白島(男島、女島)を含む9×16×1.2kmの領域(1500万点)の風況を評価したもの。右下は発電所をカバーする4.6×3.5×0.2kmの領域(1億点)における風車後流(ウエイク)の相互干渉を調査したもの。



[1] 内田 孝紀, 太鼓山風力発電所のナセル落下事故に対する数値流体力学的アプローチによる一考察 [http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/img/aboutus\\_detail\\_image/JWEA\\_Taikoyama\\_2015.pdf](http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/img/aboutus_detail_image/JWEA_Taikoyama_2015.pdf)  
[2] Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain  
[3] Large-Eddy Simulation

ばどこに計測機器をつければいいのかわかりません。時々刻々と大小の渦が入り交じりながら流れていく様を見ることが大事です。

また、事業者の方と話して思うのは、誰でも理解できるように可視化することの重要性です。我々はGoogle Earthを使って3次元の地図の上に計算結果を投影するシステムを開発しました。これを使うと見慣れた地図の上で色んな角度から自由に計算結果を眺めることができます。[図1]

**RIAM-COMPACTは様々なプラットフォームで動作していますが、ハイエンドの領域では京コンピュータに対するチューニングが進行中ですね。さらに、ポスト京プロジェクトの「重点課題6 高効率風力発電システム構築のための大規模数値解析」に採択されました。**

現在、風力業界は洋上という分野で日本の新しい技術的独自性を出そうと力を入れています。我々もポスト京に向けて、まず洋上の風力発電の事業性評価をターゲットにします。その一方で、陸上の風車が今抱えている問題も同時に解決しないといけない。洋上風力発電所を成功させるためにも、陸上と洋上の課題を同時に解決したいと考えています。

**陸地には凹凸があるのに対し、海面は平らです。素人目には洋上のほうが簡単そうに思えますが、洋上固有の難しさはあるのでしょうか？**

洋上ではたくさんの風車を並べようとしています。当然、ある風車の後ろにはまた別の風車があって、前の風車が回っていることによる影響を受けます。これをウェークロスと言うのですが、そうした風車の相互作用をきちんと反映する技術を作る必要があります。

この技術を基に、洋上ウインドファーム全体の日々の発電量を数パーセントくらいの誤差で予測したいという要望が事業者にはあって、実現するとインパクトは大きいのですが一番難しい究極の課題と言えます。

それよりも「ここに風車を建てて大丈夫なのか、本当に壊れないのか」という疑問に答えることのほうが重要だとする事業者も少なくありません。この課題には現在の技術でも十分対応できると考えています。

たとえば、あるエリアに10基の風車を設置するとしたら、その10基を相対的に比較します。ある方向から風が吹いてきたときに、どの風車のリスクが高いかを調べる。この方法であれば、実際の気象条件を与えなくても、風洞実験をやっているようなイメージで計算して構いません。

数値的な風洞実験を大規模に精度よくできることこそが事業を進めるかどうかの判断に必要です。5年後に予定されているポスト京の完成を待たずに、スピード感を持って、京の段階から風力発電所の建設を計画している事業者に使ってほしいと思っています。

**計算の規模について教えてください。どのくらいの大きさのエリアを対象に計算するのですか？**

大規模な計算をしてほしいというニーズが増えてきました。20km四方くらいは平気でやります。メッシュ数は我々の計算機を使う場合1億くらいが多いですね。京では10億メッシュの計算が可能です。事業性の判断には十分な規模でしょう。

ポスト京では100億メッシュの計算を考えていますが、メッシュの刻み幅は10mのまま領域を広げる方法と、領域は変えずに刻み幅を数十cm程度にしてより

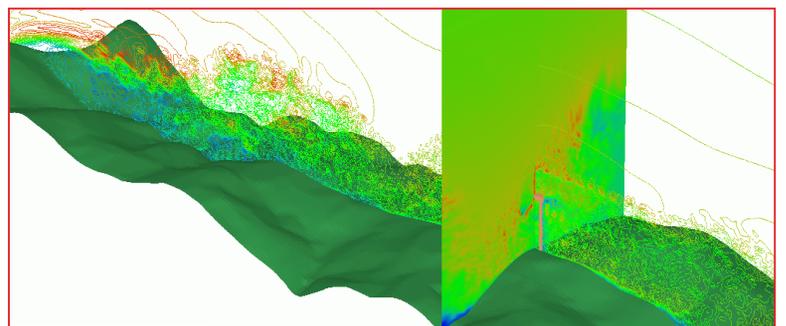
細かいスケールで見る計算があり得ます。

ただし、風車のブレードの大きさから20kmのウインドファームの規模に至る空間スケールは100億メッシュでも同時には解像しきれないので、個別の要素をRIAM-COMPACT以外のソフトウェアで解析した上で粗過程を明らかにし、最終的にRIAM-COMPACTが風車の最適な配置案を支援する形にしたいと考えています。

ユーザーには大規模なHPCを意識しないで使ってもらいたい。そのためにはソルバだけでなくプリとポストが重要になるだろうと感じています。ただし、これはCFDの知識がまったくない人を対象にするという話ではなく、ターゲットユーザーはあくまで専門家です。業務で忙しい専門家の皆さんに、凄いを簡単にやってもらいたいという意味です。

**RIAM-COMPACTを京、そしてポスト京で活用するアイデアに触れた事業者の反応はいかがですか？**

皆さんすごく関心が高いです。自分たちの計画にすぐ使いたいとおっしゃっている。我々が研究開発を成功させるためにも、産業界の声を聞くことは重要なんですね。「この機能を充実させてほしい」とか「この精度を上げてほしい」といった要望は実際に使ってからでないとは出てこないの、できるだけ早く使ってもらおうほうがいいと思います。そして、コンピュータシミュレーションを使って様々な事業性の判断をする意義について理解を深めて欲しいです。



**【図2】複雑地形上の風車ウェイクの可視化（動画より）**

RIAM-COMPACTによる、様々な流れの可視化映像が下記のページで公開されている。  
[http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/aboutus\\_detail03.html](http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/aboutus_detail03.html)

# 燃料電池自動車の普及に欠かせない 高圧水素容器の合理的設計法を求めて



東京大学 生産技術研究所  
基礎系部門 技術職員  
針谷耕太

東大生研・吉川研究室は複合材料強度信頼性評価シミュレータ FrontCOMP の開発を進めています (本誌 Vol. 1)。その主な用途は燃料電池自動車に不可欠な高圧水素容器の強度評価。特に炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の層を合理的に設計するための知見を得ることが求められています。FrontCOMP の中心的開発者として同研究室に所属する針谷耕太氏に開発の状況と今後の展望を聞きました。

針谷さんが燃料電池自動車に使われる水素容器の強度評価というテーマに携わってどのくらいになりますか？

今年は自分にとって10年の節目でした。水素燃料を貯蔵するCFRP容器の強度評価という研究の対象は変わっていないのですが、前半の5年と後半の5年では解析の手法が大きく変化しました。

前半の5年はどういうことをやっていたかということ、きし麺のように平たい帯状の繊維束をちゃんとモデル化するのではなく、層ごとに平均化して強度評価するという方法でやっていました。そのメリットは解析規模が小さいこと。普通のノートパソコンでも計算できる解析規模でした。

しかし、この方法では詳細な強度評価はできなかつたんですね。CFRP容器を作るには、繊維束にエポキシ樹脂を含浸させながら巻いていくのですが、この2つの材料特性は全然違うので、平均化してしまうと定性的には合っているけれど定量的には違うということが分かっていました。

一方で、自動車の容器は700気圧、水

素ステーションの蓄圧器は1000気圧と非常に圧が高いため、もっと詳細に評価したいという要望が企業側にはありました。

この課題を解決するため、平均化するのではなく、繊維束を1本1本明確にモデル化する技術をFrontCOMP[図1]をベースに開発することが後半の5年の研究テーマとなりました。

モデルが精密になると計算量は増大しますね。

4千万~5千万要素の解析規模となるのでノートパソコンでできるかというの難しいでしょう。FX-10や京のようなスパコンが使えるようになったからできるようになった解析です。

1本1本モデル化するという事は、繊維束を適当な多角形とか多面体で分割してから解くということです。このメッシュ分割の処理だけでスパコンを使っても300時間かかります。その次の領域分割の処理に1日。解析は比較的短くて3.5時間くらいです(弾性解析の場合)。

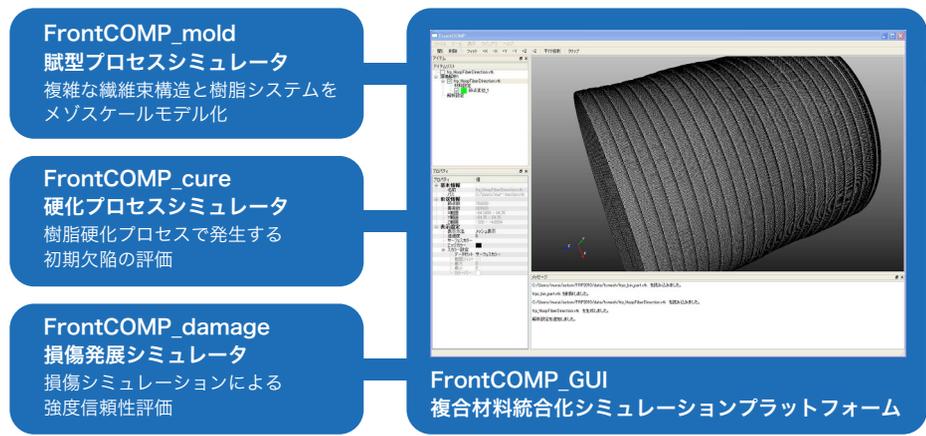
1回の試行につきこれだけの時間がかかるので、2回、3回と試そうとすると果てしない……。当然、開発の過程ではバグも出ます。そのバグフィクスにも300時間かかってしまう。苦労したのはこういうところですね。

試行とは、色んな巻き方を試すということでしょうか？

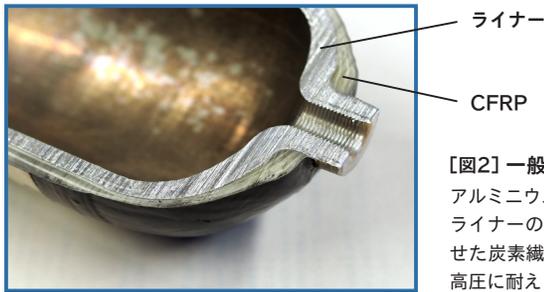
はい。この2つの画像[図3]は、どちらも繊維束を48回巻いて繊維方向の歪みの分布を示したものです。違うのは交差のパターンで、それにより歪みの状況はかなり違います。この例の場合、実際には6パターン計算して比較しました。

300時間×6回ということはメッシュ分割に1800時間……。気の遠くなるような時間です。そうした労力を投入する理由は何でしょう？ 製品をどう良くしようとしているのですか？

炭素繊維は非常に高価なので、強度を下



【図1】FrontCOMPのシステム構成  
3つのシミュレータとGUIによって構成され、複合材料を使った様々な製品の強度信頼性評価に活用できる。記事ではおもにFrontCOMP\_moldをCFRP容器に適用するケースについて解説しているが、FrontCOMP\_cureを用いてCFRPの樹脂硬化プロセスを評価することも行われている。



【図2】一般的なCFRP容器の断面  
アルミニウムやステンレス鋼などの金属製ライナーの外側に、エポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維束を巻きつけ固めることで、高圧に耐える構造を実現している。

げずに使用量を極力減らしたいのです。現在の蓄圧器は500kgと重く、クレーンで吊り上げています。もっと軽い容器が必要です。企業にとっては材料コストの低減が一番のメリットですね。

それから、無駄のない設計を実現することで製造時間を短縮することも求められています。現在、水素ステーション用の蓄圧器は1個作るのに3~4週間かかっています。ステーションを1000カ所作るとして、1カ所につき蓄圧器を10本置くとしたら1万本が必要になりますね。1本に3~4週間かかっていたら、いつできあがるのかわからない。ではどうしてそんなに時間がかかっているかという、CFRP容器のことがまだよくわかっていないんです。わからないから限界を狙っていない。設計者の勘と経験で作っている。

わかるには実際に作って壊すのが簡単なのですが、それには時間がかかるので、試作レスあるいは試験を加速させるソフトを作ることができれば、ものづくりに貢献できると考えています。

もちろん、そのためにはもっと計算を速

くしないとけません。まずメッシュ分割に必要な時間を100分の1にするのが目標です。

**「100分の1」としたのは、京の100倍と言われるポスト京の計算能力を当てにしていることですか？**

今後ポスト京は関係してくるはずですが、100分の1と言ったのはメソドロジーの話です。アルゴリズムの開発によって実現したい。もちろん計算機の速さも必要ですが、新しいアルゴリズムを考えていかないとダメだと思っています。

**最初の5年、そして次の5年についてお話を伺いました。では、これからの5年はどんな研究になるでしょう？**

まずは強度評価をやり遂げる必要があります。小さいタンクから始めて、最終的にはクルマ用のタンクや蓄圧器のレベルで実験して、その結果が計算と合っていることを確認します。

合っていたら我々のソフトウェアの強度評価はちゃんとできているということです。これがまず大きなハードルですね。

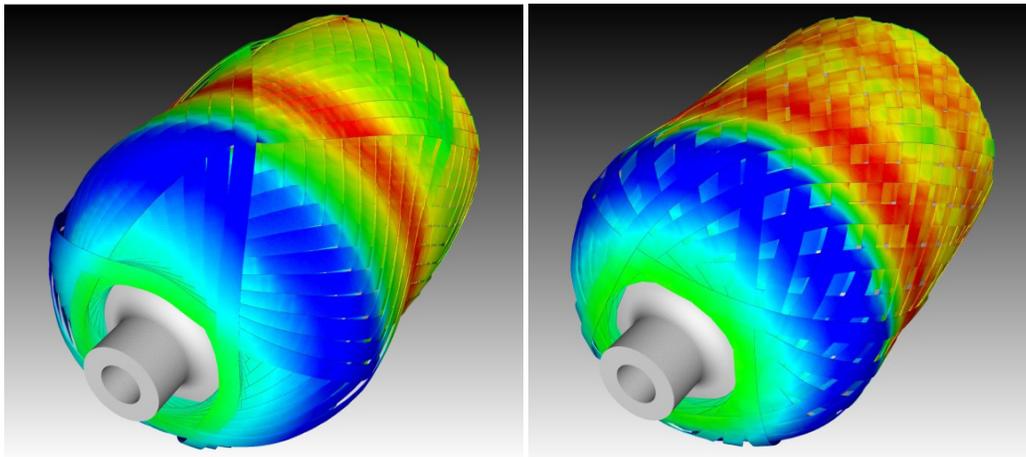
第2のハードルは最適設計の探索で、これはなかなか難しいのですが、自分のやることだと考えています。

こうした研究と並行して、ソフトをもっと多くの企業に使って頂けるよう、使いやすくしていきます。特に解析結果を検索しやすくするための、データベースの拡充が必要と思っています。

**世界的に見て、類似の研究は存在するのでしょうか？**

手前味噌になるかもしれませんが、繊維束1本1本をモデル化して解く手法を大学で研究しているのは吉川研だけだと思います。

ただし、今はまだV&V（検証と妥当性確認）が終わっていないので、我々の手法がいいのか悪いのかわかるのはこれからです。頂上があると信じて、登っていきます。



【図3】繊維束の巻き方を変えて強度を比較した例

巻き数は一定だが繊維束の交差のパターンが異なる複数のモデルを用意し、繊維方向歪みの分布を可視化している。この例では胴部の歪みの状態が大きく違っていることがわかる。

戦略的イノベーション創造プログラム

## SIP / 革新的設計生産技術

## 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

内閣府 総合科学技術・イノベーション会議が府省・分野の枠を超えて、基礎研究から出口（実用化・事業化）までを見据え、規制・制度改革を含めた取り組みとして、平成26年度にスタートした戦略的イノベーション創造プログラム（略称SIP）。理化学研究所、神戸大学が中心となり応募し採択されたテーマ「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」について、HPCI戦略分野4「次世代ものづくり」との関係を含め、その概要を紹介します。

## プロジェクトの概要

製品開発の超上流、つまり製品コンセプトを検討する段階においては、市場動向、実現可能な性能の予測、デザイナーの主張、製造コストなどの多様な情報を迅速かつ的確に把握し、加えて法令などの社会的制約条件も考慮して意思決定する必要があります。これら多種多様なデータは、コンセプト立案において有益な情報となり得るはずですが、その多様性や量に圧倒されると凡庸なコンセプトが創出されかねない、諸刃の剣です。

我々はこの問題を、「全体俯瞰設計」と

いうアプローチで解決することを試みています。つまり、多種多様なデータの中から必要十分なものを選択、理解しやすい形でユーザに提示し、ユーザの思考速度や深化に追従するよう、要求に応じてデータを速やかに提示、あるいは見せ方を変えていくことで、大量のデータの中から「気付き」を促し、新たな着想や意思決定を支援するシステムの開発です。

SIPの本テーマでは、上述のソフトウェアシステムを開発し、実際の製品開発現場での実証利用と技術展開を行い、その有効性を検証します。

## システムの特徴

本テーマで開発するシステムの概要を図1に示します。

超上流設計に必要な各種データ群を効率よく収集・格納するデータベースシステムを中核に、多様なデータ分析モジュールを用意し、データを加工します。それをタイルドディスプレイシステムが実現する広大なピクセル空間に表示します。このタイルドディスプレイシステムはPCだけでなく、タブレットなど様々なデバイスを表示対象とすることができ、かつアドホックにデバ



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  
川鍋友宏

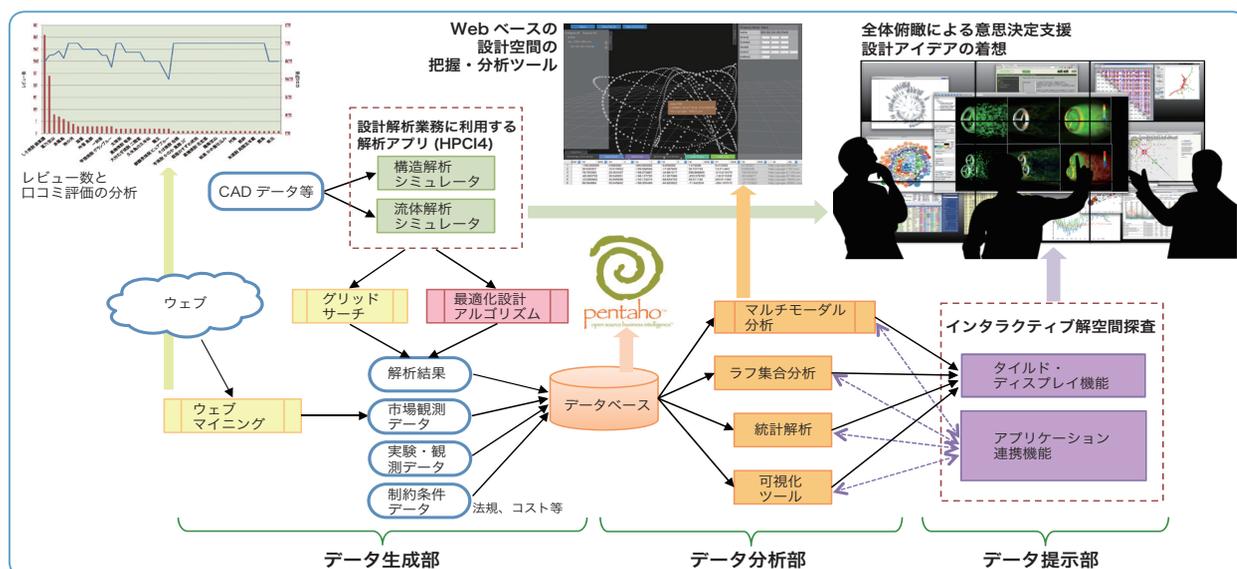
イスを追加できるため、必要に応じてピクセル空間の拡張が可能です。

表示空間のコントロールはネットワークを介して行われるので、全ディスプレイが一箇所に集まっている必要はありません。例えば遠隔地にある各ディスプレイ全体で1つの巨大ピクセル空間を構成することも可能ですし、各拠点で同じピクセル空間を共有することも可能な仕組みになっています。[図2,3,4]

このタイルドディスプレイシステム上で表示されるアプリケーションには、協調動作機能が実装されます。例えばシミュレーション結果の可視化アプリケーションが表示しているデータの物理量や、スライス断面位置、時間ステップなどをユーザが変更した場合、変更情報が協調動作する他のアプリケーションに通知され、関連情報が連動して変更されます。[図5,6]

このような仕組みで様々なデータを効率的に提示し、ユーザに新たな発想を促し、競争力の高いコンセプト立案を可能にすることを目的にシステムを開発しています。

【図1】  
開発システム概要

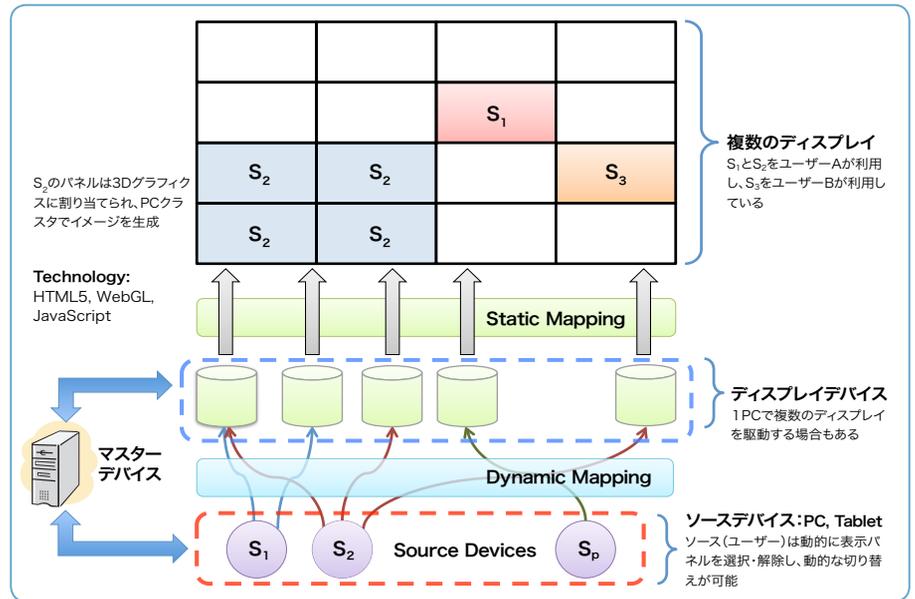




【図2】異なるデバイスを束ねたタイルドディスプレイの実現



【図3】複数PCによる同一タイルドディスプレイの制御



【図4】タイルドディスプレイシステム概念図

## HPCI戦略分野4との連携

HPCI戦略分野4「次世代ものづくり」で開発している解析シミュレータの実行環境であるHPC/PFやその他のアプリケーションを、全体俯瞰アプリケーションの1つとして本テーマで利用します。

また、本テーマで開発するシステムの実証事例の1つとして、本テーマの研究開発成果をHPCI戦略分野4の研究課題3「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」へ適用します。具体的には、自動車のHVAC性能評価ワークフローの効率化や、エンジンルーム熱設計におけるキョーフ時熱害予測とそれに伴う部品配置の最適化に本システムを適用します。【図7】ブラックボックス的な最適化設計ツール

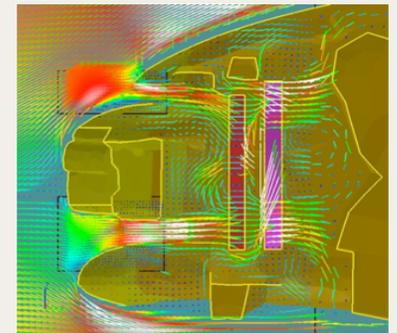
では成し得ない、設計者の閃きや直感を考慮した最適化ワークフローを本システム上で実行し、HPCI戦略分野4のさらなる成果創出を狙います。

## おわりに

ものづくりの現場においてCAEは無くしてはならない存在ですが、その積極的な利用はものづくりの中・下流工程に限られていました。我々はCAEの適用を一步進め、超上流の工程まで適用可能なCAEシステムを開発することで、イノベティブでスピード感のあるものづくりに貢献したいと考えています。

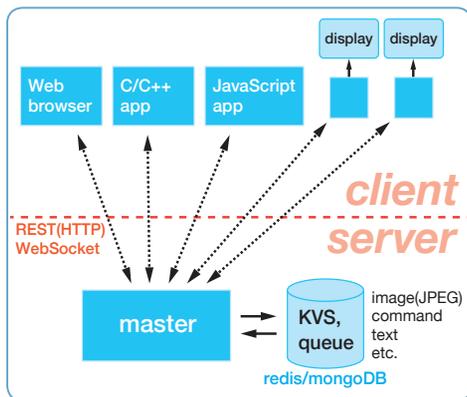
本テーマで開発するソフトウェアは広く産業界に使ってもらうことを目的にオー

プンソースとして公開します。開発状況は本テーマのWebサイト (<http://www.swov.info>) や、本誌のWebサイト (<http://www.cenav.org>) で随時ご覧ください。



【図7】自動車エンジンルームの熱害シミュレーションの例

数値シミュレーション実行環境  
スパコンを利用した数値解析を実行、多目的最適化設計機能などを有する。解空間表示機能が協調動作に対応。(文科省HPCIプロジェクト成果の応用)

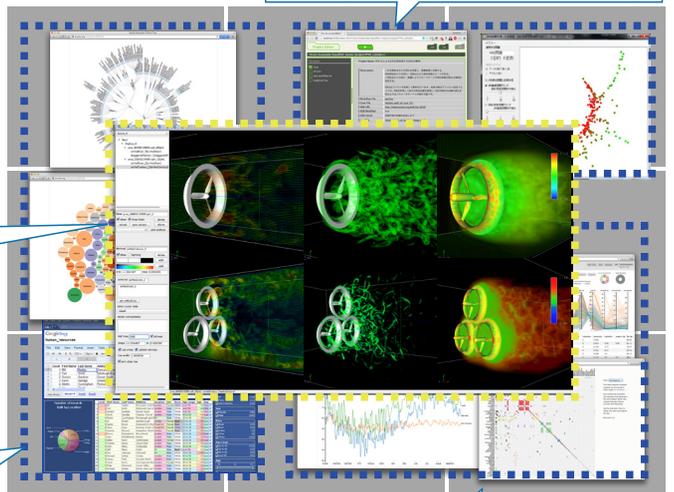


【図5】協調動作の概念図

【図6】タイルドディスプレイと各協調動作アプリケーションの例

数値シミュレーション結果の可視化ツール  
ユーザが視点や分析対象データを変更すると、連動して他ツールも協調動作する。

データ分析ツール  
ウェブマイニングやクラスタ分析、ラフ集合分析など、主に非数値的分析を行う。対象データ種別に応じて協調動作。



データ分析ツール  
数値シミュレーション結果などの数値的分析を行う。分析対象データ種別に応じて協調動作。



### 今号の表紙

#### RIAM-COMPACT®による響灘風力発電所の数値風況調査

北九州市響灘地区を対象に、数値風況シミュレータRIAM-COMPACTを用いて行われた一連の数値風況調査の結果を示しています。左の画像は沖合の島からの風を可視化したもの、右は風力発電所内の風況を可視化したもので、どちらもGoogle Earthへ解析結果を投影することで、わかりやすいプレゼンテーションを実現しています。(本誌2ページに関連記事)

### 編集後記

取材のため、九州大学・筑紫キャンパスを訪ねました。敷地の一角には様々な形状の風車が設置され、日々実験が行われています。特に印象的だったのは、透明な塔の根元に風車が水平に置かれている風力発電システムでした。煙突効果を利用しているのでしょうか？新しいアイデアが試されている現場を目撃することができて元気が出ました。(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.8

発行日：2015年9月25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