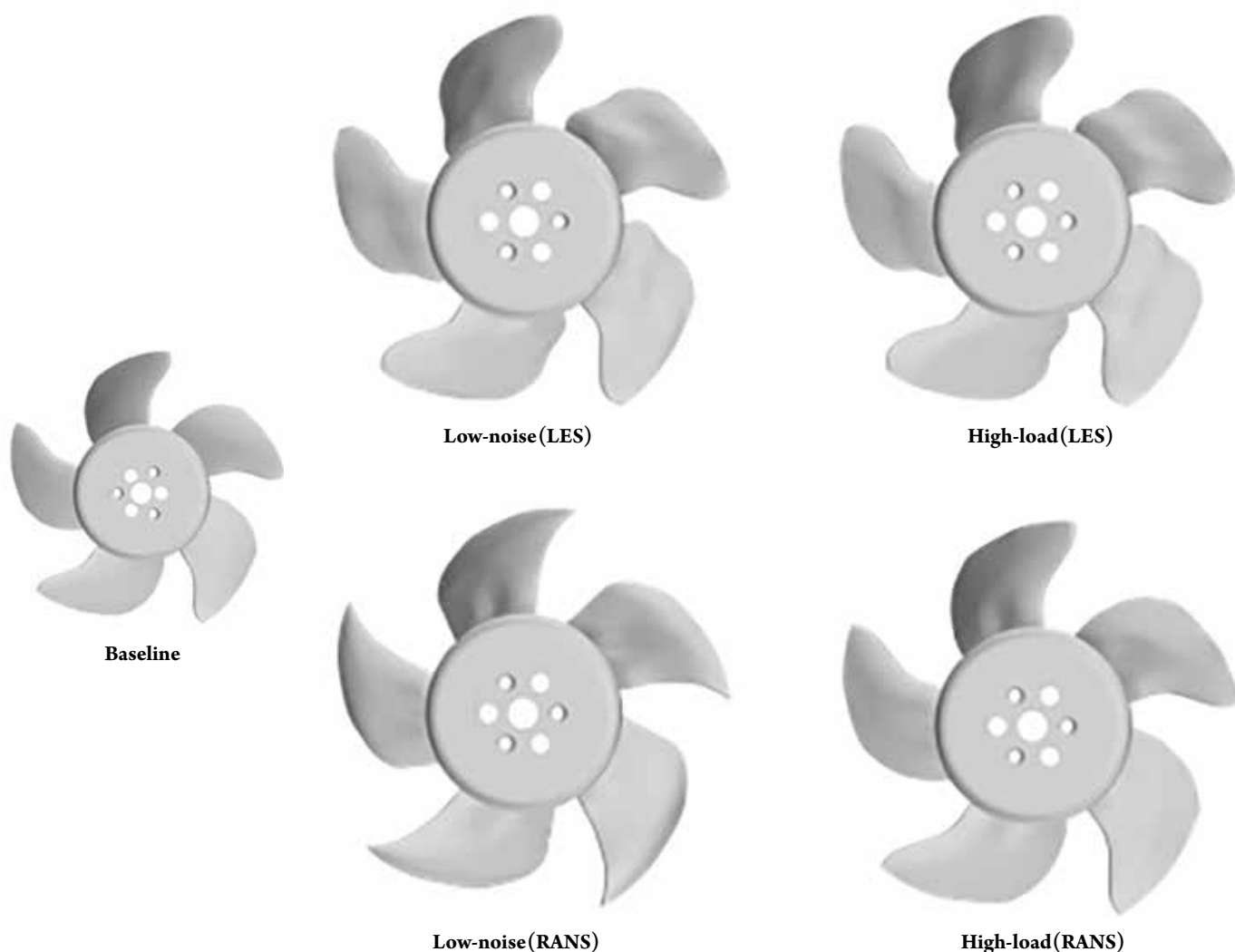


計算工学ナビ

計算工学ナビ・ニュースレター2024年春号



■計算工学ナビ・特別対談

「富岳」に続くHPCのハードウェアとものづくり分野のアプリケーションはどこへ向かうのか

ポスト「富岳」時代の次世代計算基盤とその利活用を展望する

筑波大学計算科学研究センター 朴 泰祐・東京大学生産技術研究所 加藤 千幸・理化学研究所計算科学研究センター 大西 順也(司会)

■計算工学ナビ・レポート

燃料電池自動車用高圧水素タンクの最適設計

ファンから発生する空力音源の解明・制御と設計最適化WGの活動について

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 吉川 暢宏
株式会社電業社機械製作所生産本部技術研究所研究課 富松 重行

「富岳」に続くHPCのハードウェアとものづくり分野のアプリケーションはどこへ向かうのか ポスト「富岳」時代の次世代計算基盤と その利活用を展望する

対談

朴 泰祐 センター長
筑波大学計算科学研究センター

加藤 千幸 教授
東京大学生産技術研究所

司会

大西 順也 研究員
理化学研究所計算科学研究センター

2021年3月に共用を開始したスーパーコンピュータ「富岳」は、「HPCG (HighPerformance Conjugate Gradient)」、「Graph500」で8期連続の第1位、「TOP500」で第4位、AI計算の能力も加味した計算性能を評価する「HPL-MxP (旧名称 HPL-AI)」でも第3位を獲得したことが、2023年11月のHPCに関する国際会議「SC23」にあわせて発表されるなど、「富岳」は今も国際的に高い評価を受け続けています。こうしたなか、文部科学省は2022年夏から「次世代計算基盤に係る調査研究」事業をスタートさせました。ポスト「富岳」時代の次世代計算基盤の具体的な性能・機能などに

ついて、サイエンス・産業・社会のニーズを明確化し、それを実現可能とするシステムなどの選択肢を提案することをめざしています。ポスト「富岳」がどのようなものになるかはまだ明らかではありませんが、今号では、次世代計算基盤に必要な機能や技術的課題、求められる性能などを考えながら、筑波大学計算科学研究センターの朴泰祐センター長にはポスト「富岳」時代のハードウェアの今後の進展について、東京大学生産技術研究所の加藤千幸教授にはアプリケーション(ものづくり分野)に関する展望についてお話をいただきました。

ポスト「富岳」へ向けた 調査・研究の進展

大西 本日はお忙しいなかお時間をいただき、ありがとうございます。スーパーコンピュータ「富岳」が本格稼働してから約3年が過ぎました。「富岳」は多様なアプリケーションを高性能かつ低電力で実行可能とするコデザインの方考え方を重視して開発され、ものづくり分野をはじめさまざまな分野で優れた成果を創出し、社会や産業、サイエンスに大きな貢献を果たしています。その一方で、文部科学省は「次世代計算基盤に係る調査研究」事業をスタートさせました。ポスト「富岳」時代に日本が独自に開発・維持すべき技術を特定しつつ、システム(アーキテクチャ、システムソフトウェア・ライブラリ、アプリケーション)、新計算原理、運用技術を対象とした調査研究及び要素技術の研究開発等を実施するとのこと。朴センター長は、この「次世代計算基盤に係る調査研究」事業のプログラムディレクターも務めておられますね。

朴 この事業では、システム調査研究チームとして、理化学研究所計算科学研究センター(事業代表者:近藤正章氏)を代表とするチームと神戸大学(事業代表者:牧野淳一郎氏)を代表とするチームの2つが採択されています。また、新計算原理調査研究チームに慶應義塾大学(事業代表者:天野英晴氏)を代表とするチー

ム、運用技術調査研究チームに東京大学(事業代表者:堀敏博氏)を代表とするチームが採択されました(P.4図1)。理化学研究所計算科学研究センターは、本事業について「システム設計の基本理念として演算精度も考慮しながら必要な計算性能を確保し、電力制約の下でデータ移動を高度化・効率化するFLOPS to Byte指向のシステム構築を、アーキテクチャ開発からアルゴリズム設計、アプリケーション技術に至るまで実践することをめざし、オールジャパン体制のもとで、実効的な性能を向上させる次世代計算基盤のシステム構成や要素技術の調査検討、要素技術の開発などを実施する」と述べています。一方の神戸大学チームは、「世界最高の電力当たり性能を実現している国産アクセラレータ技術、AI応用技術を活用し、従来分野の計算性能とAI利用の両方において高い実行効率を実現できる汎用HPC向けのシステム構築を検討していく」ことを掲げています。

加藤 今日は、「これからのHPCはどこに向かうのか?」ということについての展望的な記事にしたいといわれていますが、私は、今、かなり厳しい状況にあると思っています。明確なビジョンが見えておらず、一体どこへ行くのだろうという印象です。朴先生からお話が合ったように、次世代計算基盤のフィジビリティスタディ(FS)は進められていますが、めざすところがはっきりしないというか、見えてこないのです。3次元積層技術とかチップ間直接光通信技術など、景気のいい話も聞かえてくるのですが、性能がどこまで向上するのか、本当に実現するのかということになると、なかなか難しいということに。朴 まあ、それがFSですからね。それでもいろいろ新しいプランが出ていますよ。

加藤 いろいろあるのですか。私は、選択肢がそれほどないと思っていました。例えば、高い汎用性をもち、高速で大容量の情報を処理できるCPUとか。

朴 加速器でない部分はそうかもしれません。それでも、システム調査研究チームに入っている海外ベンダーなどは、当然ながらCPUと



朴 泰祐 センター長
筑波大学
計算科学研究センター



GPUの一体型を提案するでしょうし、加速器をもたない国内ベンダーはCPUと加速器をどうつなぐかを提案するでしょう。私の口からは、はっきりとは答えられませんがね。

加藤 そうですね。

朴 先程、加藤先生がFSについて「めざすところがはっきりしない」といわれましたが、私も、今回のFSの問題点は、目標がないことだと思っています。目標として「何PFLOPS出す」ということが決まっていらないのです。というか、それを決めることさえもFSの役割になっています。「京」のときは「LINPACKベンチマークで10 PFLOPSを出す」という明確な目標があり、「富岳」ではアプリケーションで「京」の100倍を達成するというのが目標になっていました。

加藤 主要アプリケーションのすべてでというわけにはいきませんでしたけれどね。流体解析のFFB (FlontFlow/blue) では40数倍でした。

朴 それでもいい方です。話を戻しますが、私も今回のポスト「富岳」のFSにおいて最も重要なのは、「まず目標を決めることではないか」と話しました。ところがですね、そもそもポスト「富岳」が稼働する想定2030年にLINPACKベンチマークがどれだけの意味をもつのかという議論があるわけです。また、AIをどう評価するかも問題です。もちろんLINPACKは測るでしょうけど、それが開発の目標になるのか、それより2030年にLINPACKによる「TOP500」が誰にどのように運営されているのかも不明です。しかも、今やDP (double



大西 順也 研究員
理化学研究所
計算科学研究センター



precision：倍精度）よりむしろメモリ使用量が少なくて済むHP（half precision：半精度）というように、AI向けのプレジジョン性能をどれだけ出せるかが重要だともいわれています。加藤 令和5年度『富岳』成果創出加速プログラム」の採択課題にもAIの活用が明確に求められていました。

朴 HPCでDPの限界がきているところで、AIの助けを借りてどのようにこれを打破していくか。それが大きなテーマになっているということです。

新規要素技術は どこまで取り入れられるのか

大西 ユーザビリティ向上を考えても、ポスト「富岳」には、AIや機械学習の大規模データ解析などをより大規模かつ高速に行えることが求められますね。そうした状況もあって、アクセラレータの一種であるマトリクス（Matrix）も重要になっているということでしょうか。

加藤 マトリクスは、中国が先にやりましたね。独自開発のアクセラレータ、マトリクス2000とか。別にマトリクスに反対するわけではありませんが、私たちが使おうとしたとき、スケジューリングを誰がやってくれるのかなど、見えない部分が多くて、“アプリ屋”としては何ともやりにくいところがあります。

朴 “釈迦に説法”ですが、アーキテクチャ的というと、単位時間あたりどれだけのデータをメモリから読み出せるかというメモリーバンド幅が厳しいわけですね。それを上回って闇雲に演算コアだけを積んでも意味がありませんが、マトリクスなら積み込めます。NVIDIAが4x4のマトリクスの積和算ユニットTensorコアをつくったのもそういうことです。テンソル計算は小さなマトリクスがたくさんできればいいだろうと

いうことです。で、そこを活かす部分と、普通に演算器を回してメモリやキャッシュに頼って計算性能を引き出す部分では、出せる性能が1桁違ってくるわけです。

加藤 おそらく1桁以上の違いが出てしまうでしょうね。

朴 海外ベンダーなどは、「演算は精々50 TFLOPSですが、マトリクスだったら何百TFLOPSも出せますよ」と盛んにいってくる、しかもB/F値（Byte per FLOPS）がすごく低いわけです。ただ、マトリクスで全部やるということではなくて、性能が発揮できるピーキーな計算はマトリクスのコアでやり、メモリーバンド幅律速なものはそこそこの性能のこっちの演算器でやるといったストラテジーがいろいろなところで進められています。

加藤 演算器の「そこそこの性能」ってどれくらいですかね。

朴 結局はメモリーバンド幅律速ですからね。

加藤 まあ見えていますね。

朴 ですからメモリーの技術で、ポスト「富岳」が稼働する想定2030年ごろに実用として安定して動くものという、高速なデータアクセスを可能にするHBM（High Bandwidth Memory）4とかになるでしょうか。それ以上のものを入れてもDP演算を行う部分では電力の無駄になってしまう。

加藤 電力といえば、CPUとメモリー間で大容量データを低電力で伝送する技術の開発も進んでいますか。

朴 それは、3次元積層のいわゆる3次元実装メモリーの技術ということですか。

加藤 そうですね。大量のデータ伝送をしても、従来の2次元的な配置では配線数を増やすにも限界があります。また、伝送距離とデータ伝送速度に比例した消費電力の増大も課題ですが、3次元積層なら消費電力を抑えることも可能になりますね。そうすると、残る大きな課題

加藤 千幸 教授
東京大学生産技術研究所



はネットワーク（インターコネクト）でしょうか。

朴 正直な話、ネットワークは「京」も「富岳」も相対的に低いです。CPU性能とネットワークの乖離は甚だしいといわざるを得ません。現状では、ネットワークのボトルネックを、むしろアルゴリズムやソフトウェアでどう回避するかという方向に向かっています。

加藤 現在のTofuインターコネクトは、設計はいいと思いますが、うまく使おうとすると相当工夫しなければいけません。

朴 結局のところ、ノード性能とノード数によって、ネットワークが高次元接続でなければならないかが決まります。小さければ高次元接続にする必要はなくて、普通のInfiniBandで問題ありません。「富岳」は約15万ノードもあるから「Tofuインターコネクトしかない」といっているわけです。ですからポスト「富岳」では、CPU、メモリーバンド幅、ネットワークのバンド幅の割合、ノード数などによって選択肢は変わる可能性があります。

加藤 おっしゃる通り、変わるでしょうね。あとは、光をどこまで入れるかも重要です。

朴 ネットワークは、1 Tbit/s以上を出そうと思ったらやるしかないと思います。InfiniBandは、もう基本的に光です。電気を出しているのを光にコンバートしているわけです。ところが、



写真左から、加藤 千幸 教授、朴 泰祐 センター長、大西 順也 研究員

そのコンパートの電力が馬鹿にならないのです。ですから、今後はよりCPUに近く、チップの外は光というようにつくらないとだめです。技術的にも可能ですし、電気と光を組み合わせるのはもはや限界だと感じています。というより、それをやらなければいけない時代だと思っています。「富岳」だって、ネットワーク・インターフェイサー体型でつくられているので、光にしようと思えばできたはずなんですけどね。

加藤 そうすると、ポスト「富岳」は、光インターコネクション技術が取り入れられるということですね。しかも、1 Tbit/sも当たり前になっているかもしれない。

朴 ええ、そう思っています。できれば数テラ程度にはなしてほしいですね。

加藤 10テラくらいだと嬉しいですね。

ムーアの法則が終焉を迎えた今、演算性能はどこまで向上するのか

大西 近年では「TOP500」上位のマシンのなかでCPUオンリーというのは「富岳」だけです。ポスト「富岳」では、大規模シミュレーションとAI・データサイエンスを高いレベルで両立させていくことが求められ、当然GPUをはじめ、加速機構が取り入れられます。その一方で、そうではない“普通の演算器”の方では、ムーアの法則の終焉により演算性能は頭打ちです。何か画期的な進展は望めるのでしょうか。

加藤 マジックのような特別な方法はないような気がします。

朴 メモリバンド幅は抑えられてしまいますから。まあ、3次元積層メモリが実装できるようになれば、電力的にもスループットのにもよくなります。といっても多少よくなるという程度で、とても10倍になるという話ではありません。

加藤 それでも5倍くらいまでいきますかね。

朴 それは、どのメモリを使うかによるでしょう。

加藤 先程も話が出ましたが、「富岳」開発のときは「目標演算性能は『京』の100倍、1 EFLOPS級」をめざしていましたが、途中から「アプリで100倍」となり、結局、ハードウェア的には約40倍でした。ただ、ポスト「富岳」では、「富岳」の40倍というのは難しいでしょうね。

朴 そうですね。ただ、普通の演算器なのかマトリクスなのかによっても違うと思います。

加藤 うーん。アプリ屋としては、「普通の演算器がどれくらいまでいくのか」をできるだけ早く知りたい。その上で、マトリクスやGPUがどうなるのかわかるといいですね。実は、次世代計算基盤に関する「計算ロードマップ」をつくってほしいといわれているんです。ただ、今の状況では「10倍になれば何ができる、100倍になれば何が可能になる」と書くのが、まさに“絵に描いた餅”で、とても虚しい気持ちなのです。

大西 私からも加藤先生にお願いしているのですが、「今、ロードマップを書いても仕方がな



加藤 千幸 教授
東京大学生産技術研究所

いでしょう」と加藤先生からいらわれています。

朴 いや、おっしゃる通りです。20年前とは考え方も状況も違いますからね。かつては「ハードウェアがここまでいけるなら、われわれはこれができます」と比較的具体的なことがいええました。ロードマップの重要性というのは、性能がどこまで達成できるか、どこまで欲しいかを示すことではなく、



▲図1 「次世代計算基盤に係る調査研究」実施体制

出典／文部科学省



朴 泰祐 センター長
筑波大学計算科学研究センター

今いわれたように、ここまで出るなら何ができるかを示すことなのです。ロードマップによって、できることが見えてくるのが大事です。

加藤 ところが、今回は、そもそも目標が見えていません。せっかくFSを進めているのですから、すべてを昔の延長線のようにやるのではなくて、アーキテクチャを決める前に、ハードウェア、システムソフトウェア担当者のみならず、アプリケーション開発者とも、早い段階から膝を詰めて話し合うべきではないかと思えますね。今はお互いの距離が遠い印象です。

朴 アプリケーション開発側とのコードデザイン（協調設計）が重要ということです。今の時期からアーキテクチャの性能だけでなく開発側との協調によるアルゴリズム上の工夫などができていれば、より高い実効性能に結びつくはずで。特に今後は加速機構への対応も求められるので、アプリケーション開発側の協力は欠かせません。

加藤 今の段階で「100倍になったら何ができます」といっても仕方がない。むしろ「5倍しか上がらないが、アプリ屋は何ができるか」といわれた方がこちらもやる気になります。今回の『富岳』成果創出加速プログラムでも、「アプリケーションで何とかしよう」という方向に全面的に舵を切りましたから。

朴 さすがにたった5倍なんていうのはないでしょう。

加藤 HBM（High Bandwidth Memory）4あたりで決まりでしょうから、そのあたりかなと。

朴 メモリソリューションは、ほかにもいくつかあるのではないですか。そのあたりも近いうちに見えてくるでしょう。当初、FSの実施期間は令和4～5年度でしたが、令和6年度まで続く見込みで、令和6年の初夏ころまでにはアーキテクチャが固まってくるはずで。予算のなかでどこまでできるか、メモリバンド幅はどれくらいか、メモリキャパシティは、加速機構は、そしてDPだったらどれくらいでマトリクスだったらどれくらいかなど、全部出揃うはずですから、そこでもう一度ロードマップを書くことになる

のではありませんか。FSが答えを出したところで、まとめていただくのが自然です。

加藤 そうですね。ですから、今ロードマップを書くのは気が重いです。

朴 答えがないことを書けといわれているようなものですからね。

大西 先程、朴先生がいわれた“ピーキー”な方についてですが、こちらはマトリクスでいくのですか、それともGPUの延長線上にあるものなのでしょうか。

朴 AIやデータサイエンスが重視されているので、何かしらの形でマトリクスを取り入れなければいけないわけです。AIはマトリクスエンジンがないとどうにもなりません。ただ、GPUというのは、そのなかにすべてマトリクスを持っているわけです。NVIDIAにしてもAMDにしても、何かしら持っています。GPUの強みは、1パッケージに両方入っていることなのです。LLM（Large Language Models：大規模言語モデル）にしても、CNN（Convolutional Neural Network：畳み込みニューラルネットワーク）にしても、マトリクスは必須であり、FSでもいつも「マトリクスをどうするか」が粗上に載っています。マトリクスがなくなることはあり得ないでしょう。神戸大学が代表機関となっているシステム調査研究チームには、AI技術の開発に取り組むPFN社（Preferred Networks）が参画していますが、彼らはマトリクスができる環境で、どのように工夫してDP計算をやるかという話をしています。

加藤 FFBも完全に最適化してプログラミングできるといいのですが。でも、私はそれほど簡単ではないと思っています。

朴 従来のコードを扱っている人たちは、当然ながら「どう料理すれば、ちゃんとお皿の上に乗ってくれるのか、そのレシピを示してほしい」と考えますよね。普通に流体計算をしてきた人たちは、当然、マトリクスエンジンで使えるコードが知りたいはずで。アプリケーションをちゃんと載せられるかは、これからの大きな課題と思っています。

加藤 すでに、私たちはAIと流体計算を同時に走らせることも計画していますが、マトリクスの部分が流体計算のエンジンとしても使えることが明らかになれば、とてもありがたいです。

加速器を使わないアプリケーションは生き残れない

大西 お二人に次世代の計算資源についてお話をいただきましたが、一方で、ポスト「富岳」に向けてアプリケーション開発側はどのように進んでいかなければならないのでしょうか。

加藤 朴先生のお話をうかがって、だいぶイメージが湧いてきました。これまで考えていたより夢があるなという印象です。

朴 ポスト「富岳」がどこへ向かうのかについて、1つだけはっきりしているのは、とにかく

加速器を使わないアプリケーションは生き残れないということです。私は講義や講演などで話すときに、「今から加速器で扱えるプログラムをつくらないと、この先は生き残れませんよ」と話しています。GPU化だけは先行してやらないとだめです。目の前のGPU化できないアプリケーションは、ほかの加速器にも対応できるはずがありませんから。GPUへの書き換えは、それほどハードルが高くないと考えている人もいられるかもしれません。ただ、本当のGPU化とは、OpenACCのディレクティブを入れても速くならない、それはなぜなのか、そこを解析することなのです。

大西 今後に向けて、AIやデータサイエンスの活用が重要といわれていますが。

加藤 すでに私たちは、AIを活用した取り組みを始めています。たとえば、乱流の計算では、壁面近くの予測が非常に大変なのですが、そこにAIを活用しようとしています。私たちの一番の強みは、データを持っていることです。AIについては、何でも予測できる便利な方法と勘違いしている人もいますが、実はデータがなければ何もできません。生成AIでリアルな絵が描けたり、作曲できたり、文章が書けたりするのは、世の中にデータが山ほどあるからです。では、ものづくりの設計に使えるデータは世の中にどれだけあるかというと、十分に存在するわけではありません。実験やシミュレーションをしている各社が、大切なデータを無闇に世の中に出すわけがないからです。その点、私たちはものづくりに必要な良質な大量のデータを保有しています。HPCが計算する膨大なデータをAIに学習させて、何が導き出せるか、さらに学習と実行をいかに効率よく進めていくかに取り組んでいるところです。乱流の計算では、ラテン語のア・プリオリ（a priori）、ア・ポステリオリ（a posteriori）という言葉をよく使います。ア・プリオリはあるモデルを学習させたときに合うかどうか、ア・ポステリオリはそれを組み込んだときに本当にうまくいくかです。実際のところ、ア・プリオリはうまくいくけれど、ア・ポステリオリは大抵の場合うまくいかないのです。そこが一番のボトルネックになっています。そこで、私たちはAIを効果的に活用して、この課題を克服したいと考えています。そうしたなかで、次世代計算基盤のFSで、CPU、GPU、マトリクスの3つのエンジンが入ったものができる、マトリクスが流体計算でも使えるというのは、心強いですね。

朴 いや、今の段階では、「3つのエンジン」と断定することはできませんけれどね。重要なのは、HPCとAIとがうまくコントロールできなければいけないということです。そのためには、先程からいっているように、すべてのアプリケーションが加速器に対応することが大切だと考えています。

大西 本日は、どうもありがとうございました。

燃料電池自動車用高圧水素タンクの最適設計



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
吉川 暢宏 センター長・教授



ブの重なりと変形に伴う修正を加えることを試みております。そのために、単純化したメゾモデルと軸対称モデルの照合を通じて、位置によって異なるCFRPテープのメゾ構造の特徴を取り込んだ材料特性設定方法を検討しています。

●最適設計の探索

設計に用いるモデルの改良ができたとしても、最適設計の探索は容易ではありません。口金の寸法、口金近傍のライナーの形状、巻きつけるCFRPのパターンを同時に最適化しなくてはならないからです。実際のタンクは巻きつけるパターンを変えて20層以上の積層を行います。それぞれの層の厚さや炭素繊維の方向を変数とするだけで、40以上の設計変数をハンドリングする必要があります。口金の寸法とライナー形状を固定して最適なCFRP巻き付けパターンを探索するだけでも無数の局所解が存在する最適設計問題を構成します。それに加えて、口金の寸法と形状の変更も想定すれば、最適設計の探索が容易には行えないことが想像できるかと思います。

解決策として採用したのが、機械学習により設計パラメータの変更によるタンクに発生する応力・ひずみ分布の変化を予測し、遺伝的アルゴリズムを用いて最適解を探索する方法です。現状では前述の口金近傍ドーム部の誤差修正が十分に実施できていないので、便宜的に炭素繊維破断ひずみの閾値を場所ごとに設定して最適解を探索しました。遺伝子の更新を45世代繰り返すことで図2に示すように炭素繊維に発生する最大ひずみとタンクの内容積あたりの重量に関するトレードオフを示すパレートフロントが推移し、グラフ中の右隅に存在するであろう最適解を探索できることがわかります。45世代を経て見つけた最適設計の概略も図中に示しています。図中えんじ色で示す口金をやや大きめに設定し、それにうまく引っかかるようにCFRP層を形成して効率よく口金付近を補強する構造になっていることがわかります。口金の形状も半球ではなく扁平な形状のほうが補強効果は高いようです。

現在開発途上の最適設計まで含めた一連のソフトウェアを完成させて、2024年9月までには公開し、タンク開発メーカーに活用いただきさらなるブラッシュアップを図る予定です。

●タンク開発の現状と課題

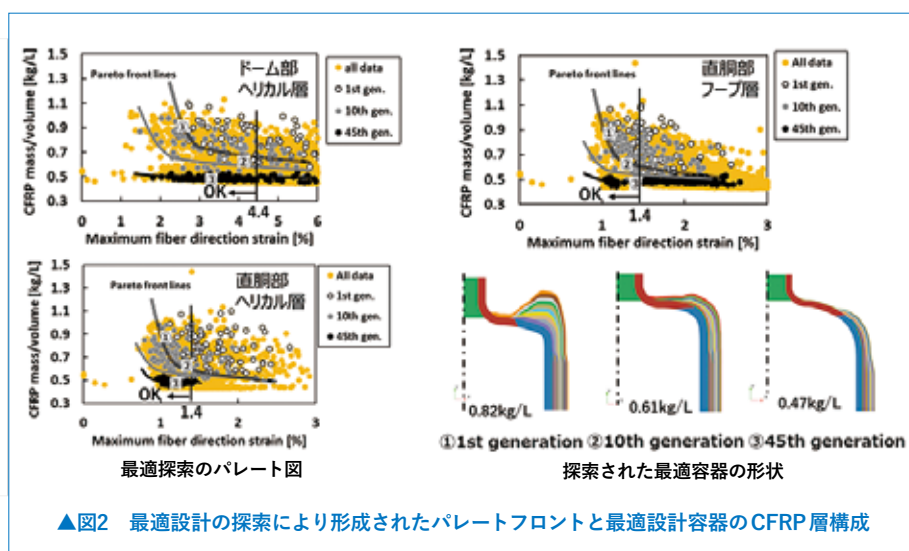
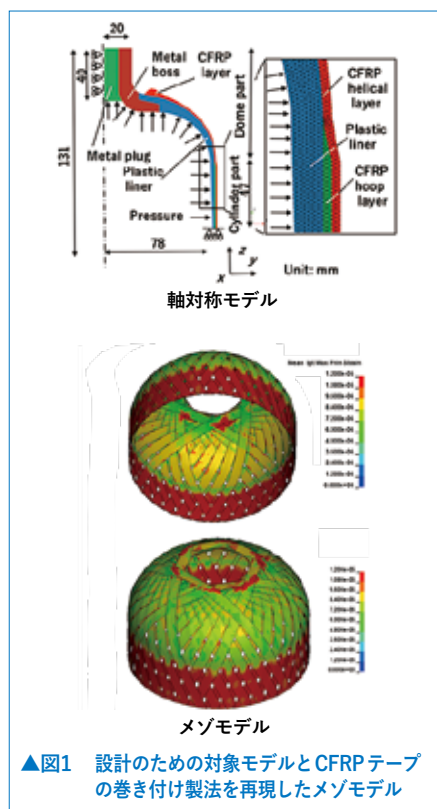
燃料電池自動車用高圧水素タンクは、高圧水素をシールするプラスチック製のライナーと呼ばれる内槽とガスを出し入れするバルブを装着するための金属ボスを嵌合（かんごう）させ、それらを一体化して補強し140 Mpaを超える超高圧水素に耐えてライナーと金属ボスの境界からの水素漏れを防ぐために、テープ状の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）をフィラメントウィンディングと呼ばれる製法で巻きつけて製造されています。巻きつけ製法は古くは蹴鞠にも用いられ、繊維を使って構造を補強するための常套手段であり、引張には強いが圧縮により容易に曲がってしまう繊維を効果的に用いる人間の英知が体现されている方法です。巻きつけ製法は、半球状になっているタンクの両端を補強するうえでも都合のよい製法ではありますが、同時にシミュレーションの難しさ、ひいては設計の困難さの根源となっています。そのため、現状においてもシミュレーションを用いた設計はまったく信用されておらず、最適設計という概念を持ち出すことすら憚られるような状況となっています。

それではどのような開発手法が執られるかというと、簡単にいえば「試行錯誤による経験則の蓄積」が基本的な方法論となっています。したがってタンクメーカーの経験の差が技術力の差となり、宇宙用の酸素タンクや圧縮天然ガス用

のタンクでの経験が豊富な欧米のタンクメーカーが先導しており、それに伍して日本のタンクメーカーが高圧水素タンク開発に乗り出すためには、膨大な投資と時間を要する“死の谷”を乗り越えなければなりません。その死の谷をなるべく浅く短くするのが高度シミュレーションの役割で、これまでのタンク開発の現状を打開し、日本のタンクメーカーの開発能力を向上させるため、（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）事業の支援を受けて、1）設計のためのシミュレーションモデルの高度化と2）そのシミュレーションモデルを用いた最適設計探索システムの開発を行っています。

●設計モデルの高度化

実機器の最適設計を実施するためには、計算負荷が高すぎず解析精度もある程度保証された有限要素モデルを用いる必要があります。その観点からは図1上に示すタンクの軸対称モデルが現実的であると思われます。実際の容器はCFRPテープを巻き付けるので、CFRPの経路は厳密に言えば軸対称ではなく、テープの重なり方によって非常に複雑な応力・ひずみ場が発生します。その状況を忠実に表そうとすると図1下に示すメゾモデルが必要ですが、「富岳」を用いても長時間にわたる計算が必要で設計問題として成立しません。軸対称モデルは誤差が大きく、特に金属ボス近傍の曲面上に巻きつけたCFRPに関して100%以上の誤差でひずみを過大に評価してしまうことがわかっています。軸対称モデルの解析精度を現実的なレベルにまで修正することが第一の課題です。誤差の要因はCFRPテープの重なりを無視して材料特性を平均化してしまうことにあります。誤差低減のために、軸対称モデルで設定する材料特性にテ



ファンから発生する空力音源の解明・制御と設計最適化WGの活動について



株式会社電業社機械製作所
生産本部技術研究所研究課
富松 重行 課長



●活動の内容と目的について

「ファンから発生する空力音源の解明・制御と設計最適化ワーキンググループ (WG)」は(一社)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」の下で活動しているWGの1つです。大学・高専・研究機関から8機関、企業から10社、ソフトウェアベンダーから7社が参加しています。本WGではボックスファンとシロッコファンを対象に、解析分析SWG (サブワーキンググループ) と最適設計SWGに分かれて活動しています。また、これら4つのグループとは別に実験SWGを設けて、最適設計で得られたボックスファンの翼形状を実際に製作し、性能と騒音計測を行っています。

解析分析SWGでは、市販アプリケーション、オープンソースソフトウェア、国プロ開発アプリケーションなどを使用して「ファン騒音低減技術開発プロジェクト」(2001年11月～2004年3月)で開発された羽根車外径180 mm、動翼枚数5枚、回転数3,000 rpmの200 mm角のボックスファンの中からベースラインファンと高負荷ファンを対象にベンチマーク計算を進めています。また、シロッコファンは羽根車外径165 mmのHVAC用シロッコファンを対象としており、2次元と3次元スクロールケーシングを有するモデルについてベンチマークを進めています。

最適設計SWGでは、前述のボックスファンの翼形状とシロッコファンのスクロールケーシング形状を対象にして最適設計を進めています。ボックスファンの翼形状の最適設計のワークフローは翼設計と格子生成、流体計算のプリポスト、流体解析の実行、音響解析の実行、数値最適化から構成されており、多くの計算リソースを必要とするFrontFlow/blue (FFB) によるLES (Large Eddy Simulation) は「富岳」で実行しています。最適化計算には(国研)宇宙航空研究開発機構で開発されたCHEETAHが利用され、これらの一連の処理は(国研)理化学研究所で開発された実行プラットフォームWHEELで管理されています。流体解析でRANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) を用いた最適設計では、CHEETAH、WHEELを用いる部分はLESを用いたワークフローと同じですが、流体解析にはSTAR-CCM+を使用しています。なお、翼形状の設計にはともにAutoBladeを用いています。また、シロッコファンの最適設計にはメッシュモーフィングソフトSculptor、流体解析ソフトSTAR-CCM+、最適化計算ソフトHEEDSを用いたワークフローを構成し、RANSとU-RANS (Unsteady-RANS) をベースにそれぞれ最適化を進めています。

解析分析や最適設計を進める上で得られた乱流解析手法、音響解析手法、ファン前後の解析

領域の大きさや形状、格子分割方法、計算精度や計算時間、サロゲートモデルなどを用いた最適化手法について得られた情報や知見は参加機関の間で共有しており、これが本WGの活動の目的の一つとなっています。

●主な成果と今後の展開

Fluentを用いたRANSによるベースラインボックスファンの解析では、乱流モデルとしてSST (Shear Stress Transport) モデルを用いた場合よりもTransition k-kl- ω モデルを用いたほうが、性能予測が良好な結果となりました。Transition k-kl- ω モデルは乱流の運動エネルギー(k)、層流の運動エネルギー(kl)、散逸周波数(ω)の3つの輸送方程式を解くことによって乱流粘性を求めていますので、本WGで対象としているボックスファンの翼周りの流れ場を精度よく解析するには、翼表面上で起きる層流から乱流への遷移を考慮する必要があることが示唆されました。

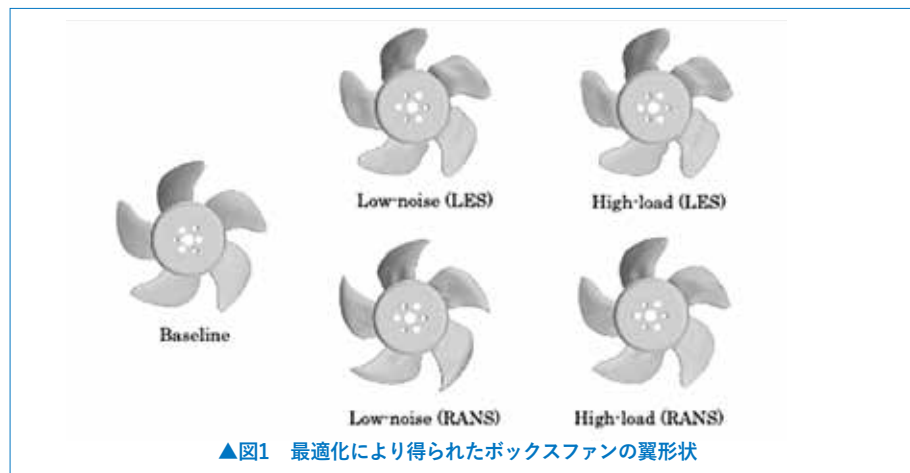
図1に最適化により得られた低騒音と高負荷ボックスファンの翼形状を示します。RANSによる最適化は20世代まで270条件の計算結果をもとにデータ分析を行って得られた結果であり、LES

による最適化は21世代434条件の計算結果をもとにデータ分析を行って得られた結果です。低騒音ファン、高負荷ファンともにRANSによって最適化された翼形状とLESによって最適化された翼形状は大きく異なっていることがわかります。LESとRANSで低騒音ファン、高負荷ファンの最適化された形状に違いが生まれる理由はまだわかっていませんが、今後解明していく予定です。

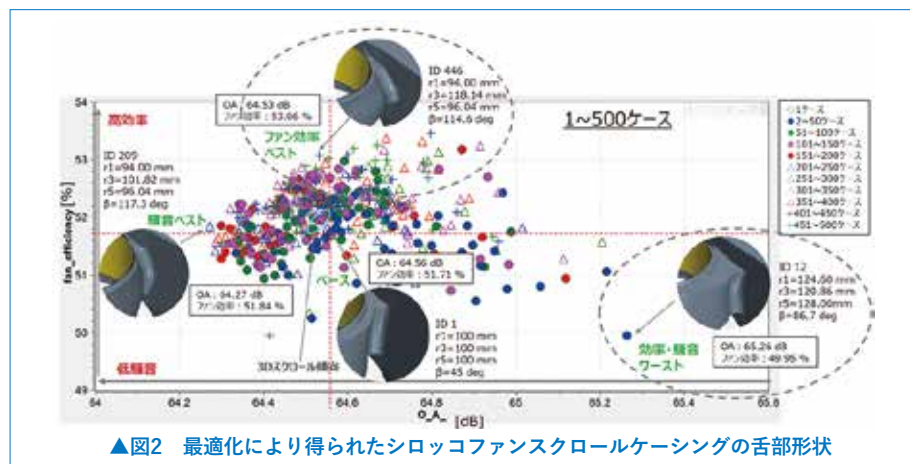
シロッコファンの解析分析は、流体解析は主にLESを用いた非圧縮・圧縮計算や、メッシュサイズの変更などによる予測精度の改善に取り組んでいます。また、音響解析では主にFW-H (FfowcsWilliams-Hawkins) 法やダイポール法を用いて解析を進めています。現状、高周波数の騒音予測が精度良く行えるところまで進んでいますが、低周波数の騒音の予測値が実測値と比べて過小評価になる、BPF (Blade Passing Frequency) が定量的にとらえられないなどの課題があり、引き続きこれらの検討を進める予定です。

図2にシロッコファンスクロールケーシングの舌部形状をRANSの解析結果に基づいて最適化した結果を示します。設計開発期間の短縮を考えるとであれば、U-RANSよりもRANSの結果に基づいて最適設計が行えることが望ましいのですが、現状両者の最適化結果が一致しない場合があるという課題があります。解析手法の検討を含め、これらの課題を解決すべく取り組みを継続していく予定です。

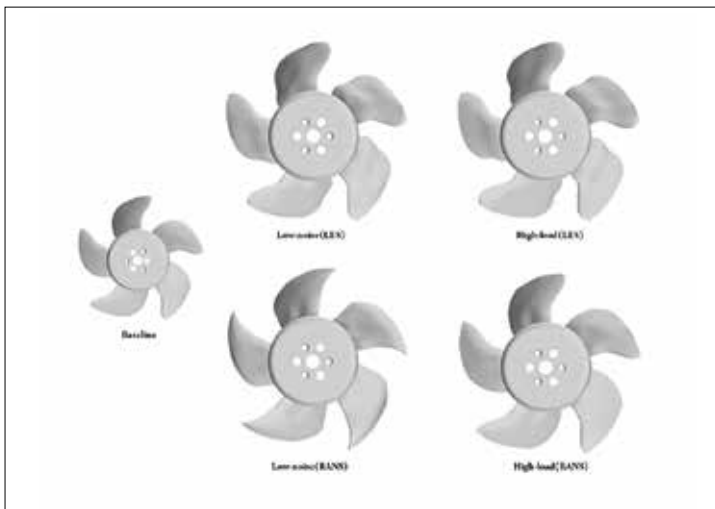
以上の通り、本WGではボックスファン、シロッコファンを対象に研究を進めていますが、得られた成果、知見がファンの空力設計に貢献することが期待されます。



▲図1 最適化により得られたボックスファンの翼形状



▲図2 最適化により得られたシロッコファンスクロールケーシングの舌部形状



今号の表紙

ファンから発生する空力音源の解明・制御と設計最適化をめざす

(一社) 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」の下で活動しているワーキンググループ (WG) の1つ「ファンから発生する空力音源の解明・制御と設計最適化WG」で進めている研究成果の1例。LES (Large Eddy Simulation) とRANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) で低騒音ファン、高負荷ファンの最適化により得られた翼形状です。RANSによる最適化は20世代まで270条件の計算結果をもとにデータ分析を行って得られた結果であり、LESによる最適化は21世代434条件の計算結果をもとにデータ分析を行って得られた結果になります。低騒音ファン、高負荷ファンともにRANSによって最適化された翼形状とLESによって最適化された翼形状は大きく異なっていることがわかります。今後は、LESとRANSで低騒音ファン、高負荷ファンの最適化された形状に違いが生まれる理由を解明していく予定です。

株式会社電業社機械製作所生産本部技術研究所研究課 課長 **富松 重行**

編集後記

近年では、AI技術によってシミュレーションを加速させたり、大規模シミュレーション結果を学習データとして活用したりするなど、大規模シミュレーションとデータサイエンスを融合させて、新たな成果の創出をめざす研究が盛んに行われており、次世代の、スーパーコンピュータ等の計算機にはそれを見据えた高度な機能・性能が求められています。しかしながら、ムーアの法則の終焉等、関連技術の転換期にあること、必要となる電力量が増大していることなどのため、さまざまな制約があるなかで、その機能・性能を実現するためには、課題が多いのが実情です。このようななか、文部科学省の事業である、スーパーコンピュータ「富岳」本格稼働の翌年(2022年)に開始された「次世代計算基盤に係る調査研究」において、ポスト「富岳」時代の計算機に係る要素技術や運用技術などの検討が進められているところです。そこで、今号でも、ポスト「富岳」時代の計算基盤に係るハードウェアとアプリケーションについて展望することを目的として、筑波大学計算科学研究センターの朴泰祐センター長と東京大学生産技術研究所の加藤千幸教授に対談いただきました。



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.26

発行日：2024年3月15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