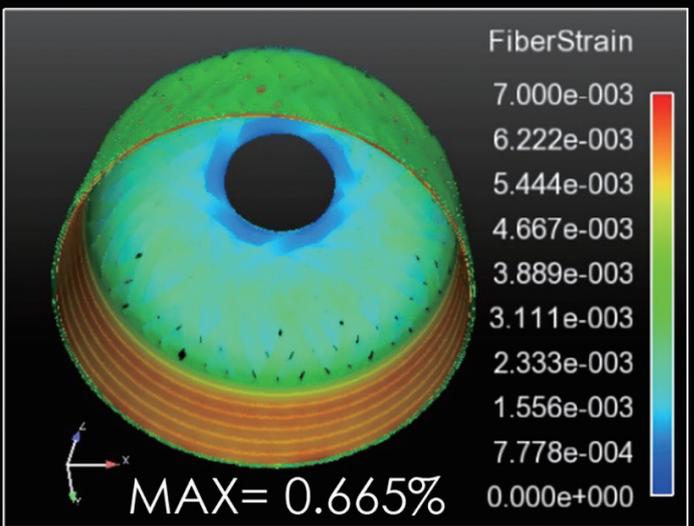
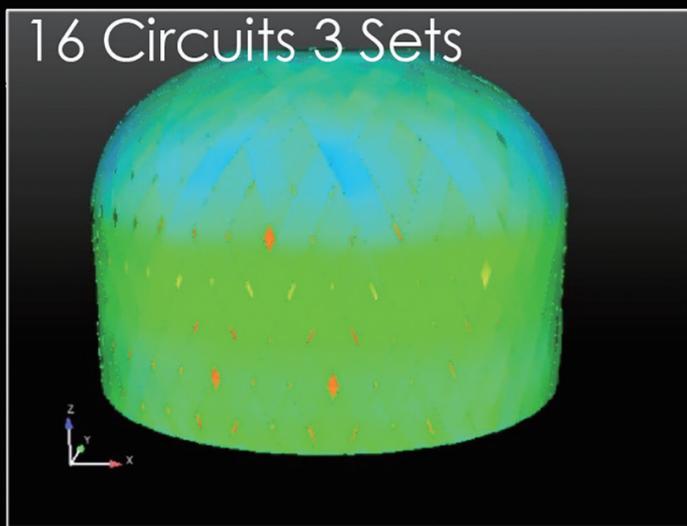
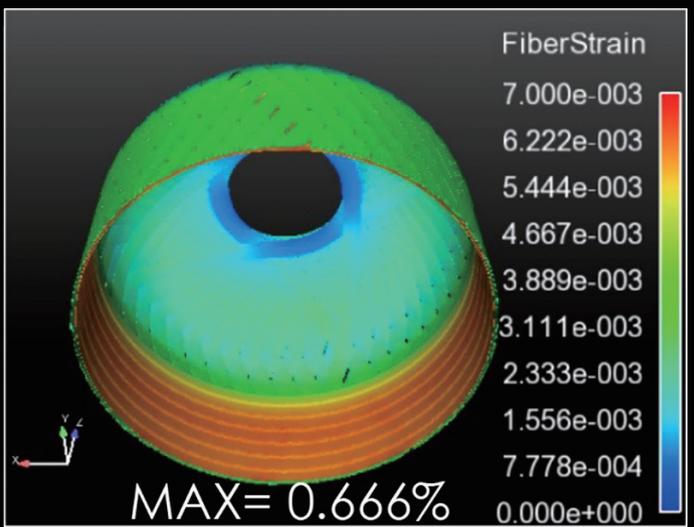
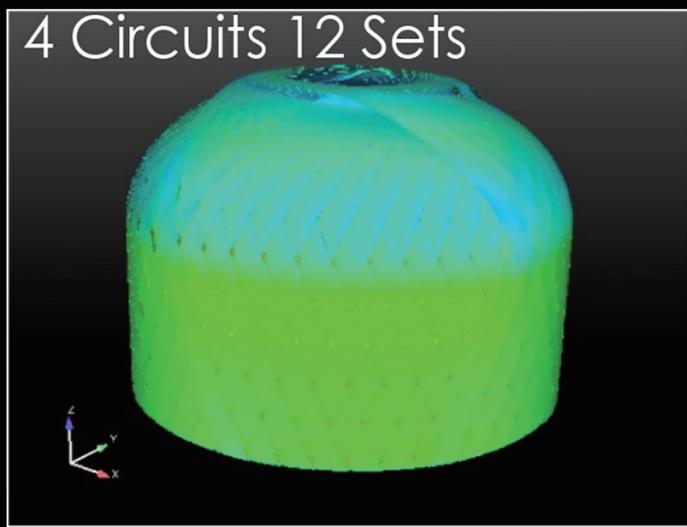


計 算 工 学 ナ ビ

計算工学ナビ・ニュースレター2022年春号



■計算工学ナビ・特別インタビュー

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業

CFRP製高圧水素タンクのメソスケール解析を推進し、水素貯蔵技術の高度化をめざす

東京大学生産技術研究所 吉川 暢宏 トヨタ自動車株式会社 大神 敦幸

「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」

「富岳」の計算性能を最大限に引き出し、ものづくり分野の複雑な流体現象を解明

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 株式会社本田技術研究所 宮澤 真史

■計算工学ナビ・レポート

「富岳」を利用した圧縮機サージの直接解析

九州大学 古川 雅人

スーパーコンピュータ「富岳」上での実用アプリケーションの動作検証

富士通株式会社 稲垣 和久・戸田 皓陽

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業

CFRP 製高圧水素タンクのメゾスケール解析を推進し、水素貯蔵技術の高度化をめざす

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、経済産業省の水素・燃料電池戦略協議会が策定した「水素・燃料電池技術開発戦略」に基づいて産業界の共通課題を解決し、2030年以降燃料電池を飛躍的に普及拡大させるため、2020年度から燃料電池システムに関する大規模な研究開発事業「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」を実施しています。その課題の1つとして、燃料電池自動車(FCV)に搭載される革新的水素貯蔵システムの実現をめざし、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)製水素タンクの設計・評価解析技術、低コストと高性能を両立した製造技術、高圧水素適合性高分子材料評価技術などの研究開発が進められています。今回は、東京大学生産技術研究所の吉川暢宏教授と、燃料電池技術の研究開発と普及促進に向けた活動を推進する燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)に参画するトヨタ自動車の大神敦幸主幹に、高圧水素タンクに関する研究開発の取り組みや進捗状況などについてお話をいただきました。



東京大学生産技術研究所
吉川暢宏 教授



燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)
要素・基盤技術WG
(トヨタ自動車株式会社トヨタZEVファクトリー
FC事業領域商用ZEV製品開発部
水素貯蔵システム開発室 主幹)
大神 敦幸

CFRP 製高圧水素タンクのモデル開発

CFRP 製高圧水素タンクのモデル開発について、その取り組みの全体像をご説明ください。

大神 カーボンニュートラルの実現に向けて、燃料電池自動車(FCV)の開発推進が求められています。燃料電池は、水素など燃料の化学的エネルギーを直接電気エネルギーに変換する発電装置であり、回転などの運動エネルギーを介する従来型の発電装置より本質的に高いエネルギー効率を発揮するとともに、発電時に二酸化炭素を発生しないことから、環境負荷を減らす上でもFCVの普及が必要不可欠といわれています。そのためには発電効率や耐久性の向上、低コスト化など、燃料電池そのものの技術開発はもちろん、燃料電池システムを構成する水素貯蔵タンクなどの開発も重要な課題となっています。そこで、自動車業界は燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)と、2030年以降のFCV普及拡大に向けた高圧水素タンクに関する研究開発戦略(図1)を策定し、貯蔵密度を高めたり、

軽量・コンパクト化、低コスト化を達成したりするための研究開発に取り組んでいます。

吉川 ちなみに、FCVの高圧水素タンクは4種類に分けられます。タイプ1は、CFRPで補強しない一般の金属製容器、タイプ2は、金属容器(一般には鋼製)の直胴部に周方向に炭素繊維を数万本単位で束ねた炭素繊維束を巻きつけて補強したもの、タイプ3は、金属製容器(一般にはアルミ合金)全体に炭素繊維束を巻きつけて補強したもの、タイプ4は、樹脂製容器と金属製の口金を組み合わせた容器全体に炭素繊維束を巻きつけて補強したものです。

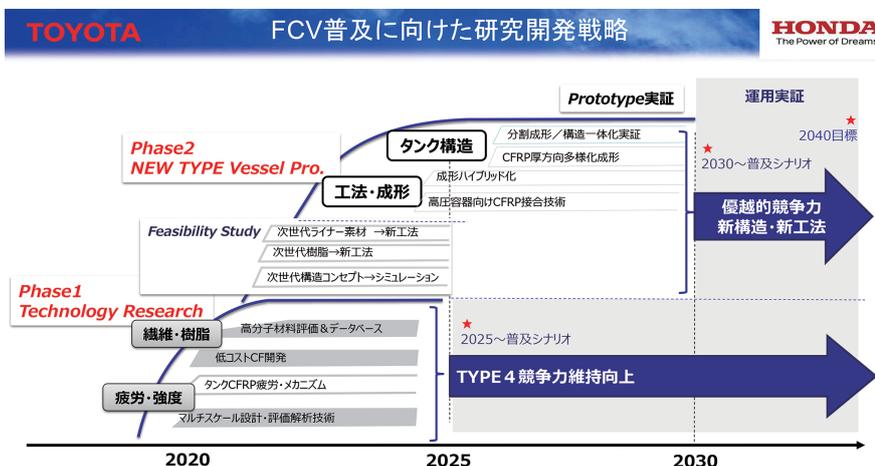
大神 私たちが取り組んでいるタイプ4の高圧水素タンクは、ガスバリアとなる樹脂ライナー、耐圧力を保持するためのCFRP、キズ防止のためのガラス繊維強化プラスチック(GFRP)、そしてバルブを組み付けるための口金で構成されています(図2)。タンクの質量や価格の大部分をCFRPが占めているため、CFRPの使用量を減らすことが大きな課題になっており、そのために、シミュレーション解析に精通する吉川先生にご協力いただいているわけです。この高

圧タンクは、強度を最大限に引き出すためフィラメントワインディング法(樹脂を含浸させた炭素繊維を型に巻き付ける成形法)によってつくられています。巻き付ける際に繊維束が重なり合ったりずれてしまうなどのばらつきが生じたり、加熱して硬化させるときに隙間ができるなど均一にすることが難しく、モデル化は非常にハードルが高いのですが、高精度なシミュレーション解析によって、最適なタンク構造やCFRPの使用量が明らかになると期待しています。

メゾスケールモデルによる強度解析

吉川 シミュレーション解析に最も期待されていることは、要するにタンクが破壊するときの様子やそのメカニズムをより正確に表してほしいということです。それが分かれば、信頼性の高い設計が精度よくできるからです。しかしながら、タンクの破壊を高精度に予測することは簡単ではありません。CFRPは、硬くて丈夫な炭素繊維束を軟らかくて弱い樹脂で固めてつくられています。普通なら「丈夫な炭素繊維束が強度を支配しているはずだから、炭素繊維束が壊れる様子を評価しておけばよい」と考えたくりますが、実は樹脂の果たす役割も大きいことが分かっています。炭素繊維束が切れる前の段階で、まわりの樹脂が徐々に壊れていくのですが、そのプロセスをしっかりと追っていかないと正確な破壊の予測はできません。そのため、炭素繊維と樹脂をきちんと分けてモデル化することが求められます。私たちは、これまで開発してきた複合材料強度信頼性評価シミュレータ「FrontCOMP」により、炭素繊維束と樹脂の強度モデルを直接的に導入できるメゾスケールモデルに基づく強度解析を実施し、より正確な強度の評価、破裂圧力の評価を実現させようとしています。

さらに問題になるのは、タンク製造時に生じる欠陥です。先ほど大神さんが話されたとおり、タイプ4の高圧水素タンクは、フィラメントワイ



▲図1 FCV普及に向けた高圧タンクに関する研究開発戦略

出典/漆山雄太, 高見昌宣: 第2回FC-Cubicオープンシンポジウム資料(一般公開), 技術研究組合 FC-Cubic, 2020.11.10.
URL: <https://fc-cubic-event.jp/wp-content/uploads/2020/11/>【公開版】ホンダ・トヨタ_移動体高圧水素貯蔵.pdf

ンディング法で炭素繊維を数万本程度まとめたテープをグルグル巻き付け、高温で加熱して樹脂を固めてつくります。そのため、巻き付ける過程ですれが生じたり、加熱の際に隙間ができたり、そういうことが比較的容易に起きてしまうのです。そうした欠陥を含めて評価するためにも、メソスケール解析は重要です。強度モデルとして正確であることに加えて、設計および製造の局面において炭素繊維束のメソスケール構造に関わるパラメータが強度に与える影響を定量的に解析することが可能であり、設計およびフィラメントワインディング・プロセスにおける欠陥の制御のための方策も数理的に議論することができるからです。すでにメソスケールモデルによる破壊圧力予測シミュレーションを実施し、複雑な構造を均質化せざるを得なかった従来モデルでは評価できなかった現象をとらえることが可能になったり、実際の試験結果との比較でも、よく再現されていることが示されています。

欠陥をモデル化し、設計・製造に活かす

CFRP製高圧水素タンクのモデル開発は、ほぼ完了したといってよいのでしょうか。

吉川 まだ多くの課題が残されています。モデル化の最大の課題は、欠陥のモデル化です。巻き方のずれや加熱の際に生じる隙間は、均一ではなくところどころに出てきます。それをどのようにモデル化すれば最も適切なものかということです。例えば、CFRP容器に予め小さな空隙を入れ込んで破壊シミュレーションを行うことは可能です。ただ、それでは十分とはいえません。欠陥を設定して確定的に解析するのではなく、ものづくりの現場で統計的に出てくる「このあたりの場所にこれくらいの確率で欠陥が発生する」といった情報が的確に反映される新たなシミュレーション手法が必要なのです。不確定性を含みながら発生する欠陥をモデル化し、設計や製造方法にフィードバックすることができ、欠陥を生じにくい設計・製造に貢献する情報を得ることが大切だと考えています。

大神 それは、まさにめざすべき一つのゴールではありますが、まずは炭素繊維のずれやばらつきが生じるメカニズム、空隙が発生するメカニズムなどをシミュレーションによって明らかにし

ていきたい考えです。それにより、生じた欠陥が重大なものなのか無視できるものなのか判断できれば、それは大きな成果です。実際にCFRPの積層のなかにあるずれや空隙の影響を試験的に一つひとつ調べることは困難であり、そこはシミュレーションに活躍していただきたいですね。

吉川 そのためにも、欠陥をモデル化して、シミュレーション解析においてどのように扱っていくかは大きな課題です。非常に難しいですが、やりがいもあり、とても魅力的な課題だと思います。そうした課題も含めて、FCCJとともに研究開発を進めているところです。より正確な解析を実現するためには、バリデーション（検証）も重要です。正しく評価するためにも、FCCJに参画する自動車メーカーにご協力いただいています。

軽量・コンパクト化、低コスト化をめざして

CFRP製高圧水素タンクには、安全性に優れた構造とともに、軽量・コンパクトで低コストであることが求められていますね。

吉川 FCVに搭載される水素タンクは700気圧という超高压に耐えるものでなければなりません。まずは高い信頼性が要求され、安全性を確保した上で、軽量化やコンパクト化を求めることとなります。したがって、シミュレーションでも安全性をしっかりと評価できる手法が必要です。それがなければ、重量やコンパクト性を追求することはできません。現状では、ぎりぎりのところまで突き詰めるまでは到らず、安全性に余裕を持たせた構造で進めています。

大神 FCCJとしてFCVを普及拡大していくことを考えれば、安全性を確保しつつ、どこまで軽量化できるか、どこまでコストを下げるができるかが重要になってきます。現在は、安全規格上のセーフティを多めにとっていますが、今後は、破壊のメカニズムを明確にしながら、どこまで削ることができるかを検討していくこととなります。また、自動車業界からは、「必要なところに部分的な補強構造を取り入れることはできないか」という声も出ています。現在のタンクは、CFRPを一筆書きのように連続して均一に巻き付けていますから、ある場所を補強しようとすると全体が補強されてしまいます。必要な部分だけ補強することができれば、軽量・コン

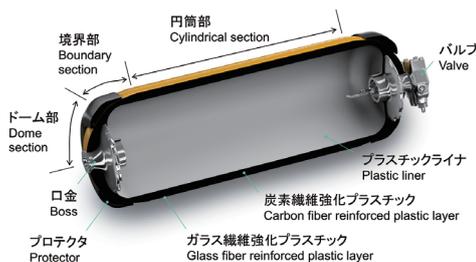
パクト化にも役立ちます。そうしたことを検討していくためにも、破壊メカニズムをしっかりと押さえたシミュレーション技術が重要と考えています。

吉川 確かに部分的な補強ができれば、効率的にタンクをつくることができますが、現状では、高圧タンクの製造においてCFRPパーツを張り合わせるような接合構造はしない方針が進められています。当然ながら、貼り合わせた接合部は強度が低下しますから、十分な強度を保持できるかが問題です。部分的な補強を検討するためには、貼り合わせても大丈夫かをシミュレーションベースで評価するとともに、試験的な評価も必要です。

大神 簡単ではありませんが、革新的な技術開発を達成するためには、多方面のフレッシュな発想や意見にも期待したいと考えています。最初にご紹介した高圧水素タンクに関する研究開発戦略を見ていただくと、フェーズ1とフェーズ2という二段構造になっていることにお気づきと思います。まずは材料の検討や低コスト化、シミュレーション技術による疲労やメカニズムの解明といった従来技術を発展させながら基盤となる研究開発を推進し、その上で、新たな製品開発に結び付く新構造や新工法を生み出していこうとしています。

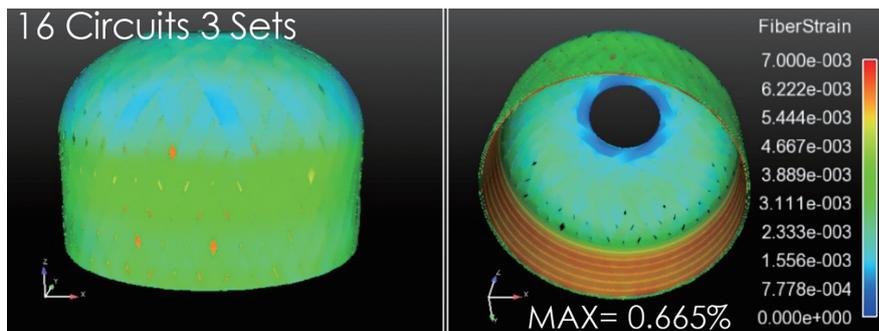
吉川 研究開発戦略において求められているのは、まさに課題解決のためのシミュレーションの高度化ですが、大学の研究者という立場からすると、開発したシミュレーション手法を一般化することも視野に入れておきたいと考えています。高圧水素タンクの製品開発に役立つだけでなく、ほかの分野にも適応できるシミュレーション手法の開発が重要です。そのためには、目の前で起きている現象の本質を明らかにしていかなければなりません。まだ見えていないこと、分かっていることがたくさんあります。それを一つひとつ明らかにしながら本質を解き明かしていく、そうした研究開発を続けていきたい考えです。

大神 今回のNEDOプロジェクトでは、その事業名に「産学官連携による研究開発」とありますように、それぞれがその強みを生かして研究開発に取り組んでいくことが求められています。産業界の強みは、実際のものづくりに基づくノウハウを持っていることです。製品開発から得られる情報を提供しつつ、官・学と連携してよりよいものをつくり出していきたいと考えています。



▲図2 高圧水素タンク(タイプ4)の構造

出典/金子智徳, 西原真史, 山本拓矢, 吉川暢宏, 青野昌弘: CFRP繊維束交差形状を考慮した高圧水素タンク強度モデル開発, M&M2019 材料力学カンファレンス講演論文集 (2019.11.2-4 (福岡))



▲図3 炭素繊維束に発生する繊維方向垂直ひずみ分布の一例

メソスケール解析により、繊維方向ひずみを正確に評価し破裂圧力を予測することができる。ひずみの最大値(赤色)はフープ巻き(直胴部を周方向に補強する巻き方)炭素繊維束で発生することが示された。

出典/吉川暢宏, 針谷耕太: CFRP容器のメソスケール解析, 2021年3月, 圧力技術, 第59巻, 第2号, pp.70-76.

「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」

「富岳」の計算性能を最大限に引き出し、ものづくり分野の複雑な流体现象を解明

～自動車空力音予測の実証研究～



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



株式会社本田技術研究所
先進技術研究所

宮澤 真史
アシスタントチーフエンジニア



「『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、ターボ機械および自動車分野を対象として、「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」、「細隙部を含めた多段遠心ポンプの内部流れのWall-Resolved LES」、「圧縮機サージの直接解析」、「リアルワールド自動車空力性能の予測」、および、「リアルワールド自動車空力音予測」の5つのテーマを設定し、大学などの研究者とともに産業界の技術者・研究者らが連携して研究開発を推進しています。今回は、プロジェクトの代表機関である東京大学生産技術研究所の加藤千幸教授と、「リアルワールド自動車空力音予測」に参画する本田技術研究所の宮澤真史アシスタントチーフエンジニア(HPCを活用した自動車次世代CAEコンソーシアム*)に、プロジェクトの取り組みや進捗状況などについてお話しいただきました。

自動車分野のテーマは 空力性能と空力音の予測

ターボ機械・自動車を対象としたプロジェクトの5つの実証研究テーマのなかで、本日は「リアルワールド自動車空力音予測」を中心にお話をうかがいます。その前に、プロジェクトの全体像についてご説明ください。

加藤 ポスト「京」重点課題⑧の成果を引き継ぐかたちで、2020年4月から「富岳」成果創出加速プログラムの領域③「産業競争力の強化」の課題の1つとして「『富岳』を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発」を推進しています。このプロジェクトでは、ポスト「京」重点課題⑧で実施したテーマのうち、ターボ機械および自動車の分野を対象として、Large Eddy Simulation(LES)に基づいた流体解析システム「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(FrontFlowX)」、複雑現象統合シミュレーションフレームワーク「CUBE」、さらに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った、「富岳」の高い計算性能を十二分に引き出すことができるアプリケーション・ソフトウェアを活用して、製品開発において重要でありながら、これまで経験的に扱われることが多かった複雑な流体现象の解明への貢献をめざしています。

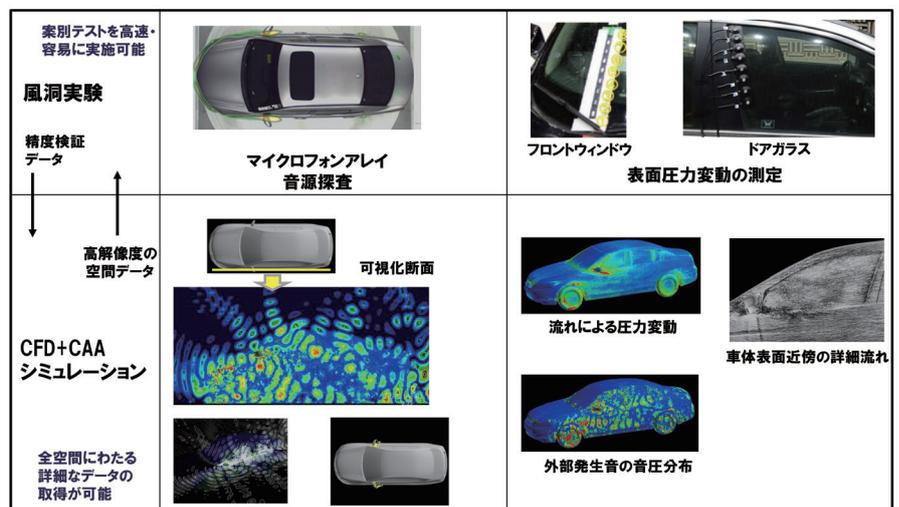
自動車については、空力性能の予測と空力音の予測という2つのテーマを設定しています。空力性能については「CUBE」を使った解析を行っています。最大の特長は、実走行状態の自動車の運動も考慮された空力と運動の連成解析であるという点です。ドライバーがどんなステアリングをするか、前を走る自動車によって生じる空気の流れの影響なども含めて空気抵抗、操縦安定性、横風安全性など自動車の空力性能を再現します。自動車に関するもう一つのテーマが空力音の予測ですが、これに関しては、実際に解析を実施している宮澤さんに説明してもらいます。

宮澤 自動車まわりの空力騒音については3つ

の課題があります。1つは、自動車業界でパサパサ音とよばれる主流乱れによる変動空力音の予測。2つ目は、狭帯域騒音とよばれる音響共鳴や空力自励音の予測です。狭帯域騒音については、低マッハ数・高レイノルズ数・複雑形状の圧縮性流れ解析の高精度化と高速化を進めています。3つ目は、私たちが取り組んでいる流れに起因する車内騒音の予測です。車内騒音については、車のまわりの流れから発生する音(空力音)を予測するだけでは十分でなく、それがどのように車体を振動させて車内音として伝わるかを予測・解明しなければなりません。近年、自動車の電動化に伴い車両の静粛性が向上しており、相対的に車内騒音に占める空力騒音の割合が増加しており、空力騒音の低減はますます重要になっています。

加藤 車内騒音を求めるには、まずは車外でどんな音が出ているかを予測することが重要です。それが車体の振動を介してどのように車内に入り、車内でどんな音場となり、その結果、ドライバーの耳元の音圧レベルがどうなるかを予測しなければなりません。そのためには、流体・音響解析だけでなく振動解析もやらなければいけません。プロジェクトでは、実験データベースをもとに機械学習を活用した車内騒音予測シ

ステム(機械学習強化SEA法)を構築し、より簡便かつ高精度な車両の振動と車内の音場の予測を実現させようとしています。ただし、車両の振動と車内の音場がある程度簡易的に予測できたとしても、音源となっている車外の音をきちんと求める必要があるということで、流れと音の直接解析ソフトウェア「FFX」という新たなコードを開発しており、現在、実証計算を実施しています。車のまわりの流れから発生する音の予測は、LES解析と音響解析を組み合わせることによってすでにできています。「FFB」と「FFB-Acoustics」というアプリケーションを使用していますが、いずれもFEM(Finite Element Method:有限要素法)コードです。しかし、非常に複雑な形状の解析を行うとすると、メッシュの作成に時間がかかる、あるいはメッシュが作成できないという課題があるため、今回、複雑な形状でもほぼ自動でメッシュ生成ができるように、新たに階層型の直交格子を使ったLBMソルバー「FFX」を開発したわけです。「FFB」と「FFX」を比較すると1時間ステップの計算時間におよそ100倍の差があり、「FFX」によって高速な計算もできます。ただ、「FFB」と比べると「FFX」は開発の歴史がまだ浅いのです。「FFB」は1985年ころから開発



▲実験とCFDを活用した空力騒音減の解析イメージ

* HPCを活用した自動車次世代CAEコンソーシアム:「富岳」などの次世代HPCを用いて、既存のCAE技術とは抜本的に異なる新たなシミュレーションフレームワークを産学官連携によって構築し、次世代の自動車ものづくりに役立てることをめざしている。

し続けてきて、使い勝手や精度、計算速度を向上させてきました。一方の「FFX」は、本格的な開発を開始してからまだ5年ほどですから、実用的に使うには、さらに手を加えていく必要があります。それを早急に一定レベルまでもっていかうとしていて、今年度中に最小格子幅100ミクロンくらい、格子の数で2兆点くらいの計算を実施する予定です。この計算が問題なくできるようになれば、実際の風洞実験の誤差と同程度の精度の予測が実現できるものと考えています。すでに計算そのものはできるのですが、さらなる改良や精度の検証を行っているところです。

実験とシミュレーションの相互補完により解析能力が向上

自動車メーカーにおける車両開発では、これまで風洞テストや実走テストといった実験ベースで進められることが多かったと思いますが、シミュレーションの有効性についてはどのように認識されていますか。

宮澤 もともと自動車の開発ツールの一つとして衝突や空力などさまざまな分野でシミュレーションが活用されてきました。空力騒音については、風洞を使った測定や実走によっていろいろなことが明らかにされてきて、実験の重要性は今も変わりませんが、空力騒音はいろいろな条件が複合的に重なり合う複雑な現象です。どこで音が発生しているのか、何が問題なのかを特定するのがとても難しく、それを把握することはとても重要で、エンジニアの経験に依存している領域です。そうしたなか、CFD（数値流体解析）やシミュレーションの実用化により、実走や風洞でつかみきれなかった騒音の発生箇所の特特定や騒音発生メカニズムの理解が進むのではないかと期待されています。

加藤 この自動車メーカーも、当然ながらCFDをやります。ただ、空力騒音については、従来の解析技術では直接的に予測することはできず、経験的なモデルで「まあ、こんなものかな」くらいの予測しかできませんでした。何が問題なのか、どこを直せばよいのかはわからなかったわけです。そうした従来の解析とは違う、答えを的確に示してくれるシミュレーションに期待していると同時に、各社とも将来技術としてどのくらい有望なのかをベンチマークしている状況だと思っています。

宮澤さんたちは、現在「富岳」を活用してどのような研究開発を行っているのですか。

宮澤 「FFB」を用いたこれまでの計算もだいぶ進化していて、自動でメッシュを切ったりすることもできるのですが、メッシュを切る前にモデルに手を入れたり、ラッピングという処理を行うことも必要です。そこで重要な形状が削られてしまうこともあり、どんどん計算できるという状況ではありませんでした。高精度化や

高効率化も重要ですが、使う側にとっては、モデルの前準備なしで高精度なCFDができるところに「FFX」の大きなメリットを感じています。細かい問題はまだ残されていますが、これから実用性を高めていければと考えています。

加藤 実は、すでに「FFB」でかなり大規模な計算をやっている、車内の音圧レベルを予測したり、結果を実験と比較したりすることもできるようになっています。さらに「FFB」を使った車外音の予測でもよい結果を出しています。ただ、宮澤さんがいうように、シミュレーションの使い勝手という意味で、モデル作成の容易さは重要で、今回、そこを大幅に改良する取り組みとして、新たなコード開発を進めています。宮澤 空力騒音については、実際に形状の対策を考える場合、加える変化量が1mm以下というケースもあるなど、すごく細かい変更で音が消えることがあります。でも、なかなかその精度でメッシュが切れるように想定されていないため、メッシュが切れるように手作業の修正が必要でした。これが結構たいへんで、それをやらずに済むというのは大きなメリットです。

加藤 「FFX」のもう一つのメリットは計算時間です。例えば「FFB」で数十億から100億くらいの格子で計算を行うのは、結構たいへんな作業でした。しかし「FFX」を使えば、6000億とか7000億くらいの格子の計算は全く問題なくできます。あとは定量的に問題がない満足いく結果を出せるかどうかです。

残された課題は後処理

「富岳」を利用した研究開発で、今後の課題はどのようなことですか。

宮澤 7000億くらいの格子の計算は全く問題なくできるというお話がありましたが、データ解析が大規模化すると、後処理の高速化や大規模なデータの対応が課題となります。膨大なデータが取れてしまうので、それをどのように保存するか、どうやって後処理するのかということです。ストレージや転送、あとは可視化をどうするかが問題です。

加藤 つまりこういうことです。これまでやってきた「FFB」、「FFB-Acoustics」は計算部分に

ついては問題ありませんでした。「FFX」でも、高い精度が得られることは確認済みです。前処理部分の問題点もすでに分かっており、「FFX」のコード改良はほとんど完了しています。最後の課題は後処理で、これはほとんど手つかずの状況ですが、従来の考え方で後処理するのは現実的ではなく、どのようなデータを出すべきかは、目的に合わせて最後に考えればよいと思っています。いろいろな解析を進めていくと「重要なのはこれ」ということが分かってくるので、それに合わせて出してあげればよいのです。

宮澤 そうですね。計算によって実験データより細かいデータが取れてしまうので、それを効果的に後処理するための環境や方法を構築できるかが、今後の最大の課題です。

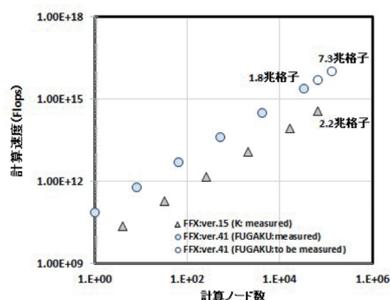
空力騒音に関しては計算もたいへんだし、シミュレーションによる理解は難しいという一般的なイメージがありましたが、だれがやってもできるし、実験では明らかにできなかったことが分かるかもしれないということを、今回のプロジェクトで示すことができればよいと思っています。

最後に、ものづくりにシミュレーションを活用することに関心を持っている読者にメッセージをお願いします。

宮澤 これまで大きな壁だったシミュレーションに関する敷居の高さみたいなものはかなり低くなっていて、シミュレーションの活用を積極的に考えられるようになったと思います。実験とシミュレーションを組み合わせることが、実際の開発現場の困りごとを解決するために効果的であることを多くの人たちに知ってほしいですね。

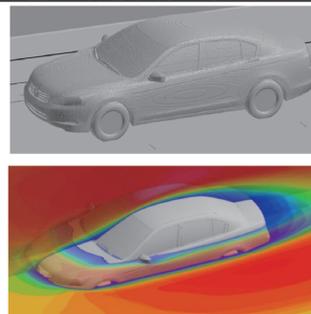
加藤 まずは「使ってみてください」といいですね。HPCの大きな課題は、一言でいうと広く普及していないということです。使えるか使えないか、みんなが見極めようとしている、つまりベンチマークの段階なのです。例えば、宮澤さんたちがわれわれとの共同研究で使えることを示すというように、誰かが先陣を切って成果を挙げてくれれば、利用者が増えます。使う人が増えればコストが下がり、より敷居が低くなります。HPCの利用者が増えてコストが安くなる、安くなれば利用者が増える——そうした循環を生むことが重要なのだと思います。

大規模並列性能のベンチマーク結果



「富岳」単体200.0GFLOPSを実現しています

実車の空力・音響解析に向けたテスト計算



計算格子(上図)と計算された車体まわりの主流方向速度分布(下図)

▲LBMベースの流体解析システム「FFX」の開発状況

「富岳」を利用した 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



圧縮機サージの予測について

文部科学省「富岳」成果創出加速プログラムにおける研究課題として2020年度から開始されている『富岳』を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発（課題代表者：東京大学・加藤千幸教授）で、実証研究テーマ③として「圧縮機サージの直接解析」が実施されています。本稿では、この研究テーマの概要について紹介いたします。

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1つです。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。この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。

上述のとおり、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「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ています。

ターボ機械用圧縮性DES 流れ解析コードのチューニング

前述のとおり、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な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解析を採用しました。DES解析においては、壁面近傍の乱流境界層領域付近でRANS解析を行うことにより現実的な計算格子数で壁面上の乱流境界層を正しく捉えるとともに、主流領域ではLES解析を実施することにより離に伴う複雑な渦流れ現象を正確に再現することができます。圧縮機の複雑な内部流れ場においてLES領域とRANS領域を適切に決定するために、 $k-\omega$ 二方程式乱流モデルに基づいたDES解析を実施しています。本研究テーマで用いるターボ機械用圧縮性DES流れ解析コードは『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、一般財団法人 高度情報科学技術研究機構 (RIST) による高度化支援を受けてコードのチューニングを行いました。具体的には、OpenMPスレッド並列化、SIMD化、ループ重化、インデックス入れ替え、Sliding mesh処理の高速化、並列性能の改善などを行うことにより、オリジナルコードと比較して「富岳」上で約60倍の高速化を達成しています。

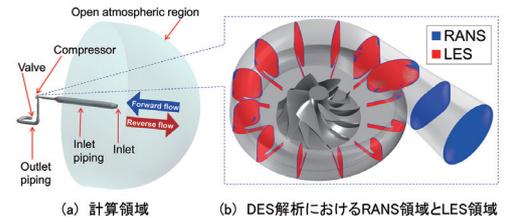
世界で初めてマイルドサージの 直接計算に成功

本研究テーマでは、ターボ機械協会内に設置された研究分科会でサージに関する非定常計測をこれまでに行ってきた遷音速遠心圧縮機を解析対象としました。図1 (a) に示すとおり、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

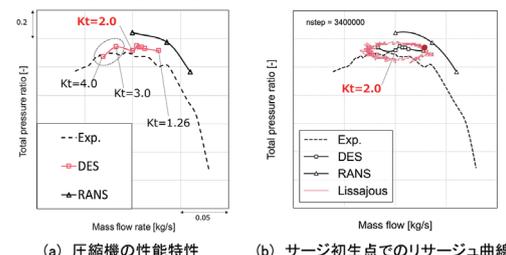
の総計算セル数は約9億に設定し、時間刻み幅は、DES解析であることを考慮して、羽根車の1回転あたり7,500ステップ（翼間あたり1,250ステップ）となるように設定しました。事前の予備計算により計算格子の調整を行った結果、LES領域とRANS領域は図1 (b) のようになり、圧縮機本体周辺において本DES解析の妥当性が確認できました。

図2で、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、四角シンボル付きの実線がDES結果、破線が実験結果です。本DES解析では流量調整弁の損失係数Ktを徐々に増加させながらサージに追い込んでいきますが、そのKtの値を図2 (a) 中に示しています。DESから得られた性能特性は実験結果と比較して3%程度高くなっていますが、性能特性の変化は実験結果と定性的に良く一致していることが分かります。Kt = 2.0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。この作動点近傍では、実験においてもマイルドサージの初生が確認されています。Kt = 2.0においてDES解析から得られた圧縮機の性能特性の時間変化を図2 (b) 中にリサージュ曲線（赤い実線）として示しています。この結果からも、Kt = 2.0においてマイルドサージが発生していることが明確に分かります。

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、マイルドサージの初生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す。今後計算を継続し、サージ周期、流量および圧力変動の振幅について、実験結果と比較することにより定量的な検証を行う予定です。また、Ktの値を増加させた計算を引き続き実施し、逆流を伴うディープサージの再現にもチャレンジする予定です。



▲図1 計算領域および計算格子の調整



▲図2 マイルドサージの初生

スーパーコンピュータ「富岳」上での 実用アプリケーションの動作検証 ～社会課題解決に向けて～



富士通株式会社
インフラストラクチャ
システム事業本部
福垣 和久



富士通株式会社
インフラストラクチャ
システム事業本部
戸田 皓陽

スーパーコンピュータ「富岳」には、高速・大規模な計算リソースを活かした精緻なシミュレーションにより、ものづくりにおける現象解明や実試作削減をより一層推進することが期待されています。今回、富士通はソフトベンダー・ユーザ企業と連携し、「富岳」上での実用アプリケーションの動作検証に取り組みました。その成果として、航空機や自動車など社会の運輸システムを支える製品及びその機械部品について、安全かつ高エネルギー効率な交通の実現といった社会課題の解決につながる解析事例が得られています。加えて、アプリケーション実行時の高い省電力性も確認しており、SDGs（持続可能な開発目標）^[1]達成にも貢献します。本稿にて、その電力性能と動作検証事例をご紹介します。

高い電力効率を実現した 「富岳」テクノロジー

スーパーコンピュータは複雑な現象の解明により高品質な製品の効率的開発に貢献することが期待されます。一方、大規模・高精細な計算を行うためには莫大な電力を必要とするため、省電力性を高めることは持続可能な社会の実現に向けた重要な課題の1つとなります。

「富岳」に搭載されたA64FXには、低消費電力のためにアーキテクチャレベルからデバイスレベルまで広い階層にわたって工夫が施されており、世界最高水準の電力性能を達成します。図1はA64FXを搭載したFX1000・FX700^[2]上で「地球科学」「材料・化学」「電磁界」「流体」「構造」の分野で主要なアプリケーションを実行したときの消費電力をx86サーバ（Xeon Platinum 8268）と比較した結果です^[3]。全てのアプリケーションでFX1000、FX700はx86サーバと比べて2倍以上の電力効率を発揮しました。

航空機の安全性向上

航空機は航行中に機体周辺の空気の流れによってバフェット（機体の振動現象）が起こること

があります。安定飛行に影響を及ぼすため、設計段階でバフェットを予測し機体安全性を十分に検証することは重要な課題ですが、バフェットを捉えるには大規模なシミュレーションが必要となります。

そこで「Cradle CFD | scFLOW」^[4]を活用し、大規模・高精細な航空機モデルを用いて航行中の流体解析を行いました。「Cradle CFD | scFLOW」は任意の多面体格子に対応した汎用熱流体解析システムで、多くの分野（航空宇宙、自動車、建設など）で利用されています。本解析では、航行中の機体周辺の空気の流れを解析するために、2億3700万要素の高精細なモデルと、解析手法としてLarge Eddy Simulationを用いて、現実時間における0.05秒間を解析しました。「富岳」の最大19万2000 CPUコアを活用することで、約10時間の計算でバフェットの予測につながる翼表面上の圧力振動や細かい渦の生成現象を観測できるようになりました。実際に安全性検証を行う際は、さらに長時間の解析が必要となり、産業界で通常用いられる規模の計算機では約1ヶ月程度の計算時間を要しますが、「富岳」を活用することで同様の計算を数日で完了できます。今後は約8億要素の大規模な航空機モデルを用いて、さらに高精細な検証を進めます。

電気自動車などの駆動用モーターの エネルギー損失低減

電気自動車などは、駆動用モーターのエネルギー損失を低減するべく日々改良が続けられており、エネルギー損失量を計算するアプリケーションとして「JMAG」^[5]が利用されています。「JMAG」は電気機器設計開発のためのシミュレーションソフトウェアであり、自動車の他、電化製品、デジタル機器、など各業界で採用されています。今回は、駆動用モーターのエネルギー損失を高精度で計算すべく、モーター内の電磁鋼板に発生する渦電流も考慮するため、電磁鋼板を一枚一枚積層してモデル化し、1500万要素を持つ大規

模モデルを利用しました。「富岳」の8192CPUコアを活用し、モーターの電力損失を計算したところ、1日で解析結果を得ることができました。同様の計算を産業界で通常用いられる規模の計算機で行うと、数週間の計算時間を要しますが、「富岳」であれば設計業務などの限られた時間内で解析できます。エネルギー効率の改善は、持続可能な社会づくりの実現に向けた重要な課題であり、本成果はさらなる高効率な電気自動車等の開発につながります。

摩擦伝動ベルト向け 短繊維配向ゴム材料の強度向上

摩擦伝動ベルトに用いられる短繊維配合ゴム材料の開発では、所望の機械的特性を得るために、さまざまな繊維配合を試行するコストがかかります。今回、機械的特性をシミュレーションによって予測する目的で、「FrontISTR」^[6]を用いた材料試験片の詳細解析モデルによる大規模構造解析を実施しました。「FrontISTR」はオープンソースの構造解析ソフトウェアであり、建築構造物、電子機器、各種機械部品、鉄道などさまざまな製品に活用されています。本解析では、ゴムに剛性の高い短繊維が埋め込まれた試験片の挙動を忠実に再現するため、個々の短繊維の形状まで一体メッシュでモデル化しています。精度上繊維長さに対して十分な領域が必要であり、今回は5mm×5mm×1mmの領域をモデル化するために、四面体2次要素で約7600万要素規模となりました。

この解析を「富岳」の9600から最大7万6800CPUコアで実行し、良好なスケール性能と共に最短約15分で計算可能であることを確認しました。これにより、長さ・うねり・配向ばらつきといった繊維配合状態の異なる複数の解析を実用的な時間内で実行できます。今後は繊維配合状態と機械的特性の関係解明を進め、実試作削減による材料ロス削減や駆動中のエネルギーロス低減につなげていきます。

まとめ

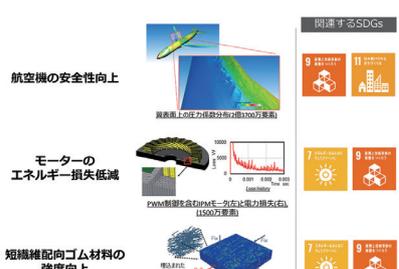
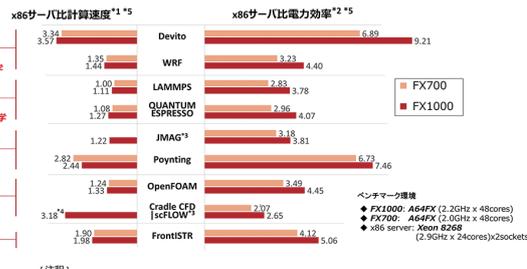
「富岳」上での実用アプリケーションの動作検証を通じ、公共交通機関の安全性向上や、エネルギー及び資源利用効率の向上につながるシミュレーションを実現しました。本稿で紹介したものを含め、富士通で移植を行ったさまざまな分野のアプリケーションは、ソフトベンダー各社やGitHub^[7]などから利用可能です。今後、アプリケーションの利用支援などを通じ、持続可能な社会の実現とイノベーション創出に貢献してまいります。

【謝辞】

本稿で紹介した航空機、電気自動車などの駆動用モーター、摩擦伝動ベルト向け短繊維配向ゴム材料の事例は、それぞれ株式会社ソフトウェアクレイドル、株式会社JSOL、三ツ星ベルト株式会社との協働で作成致しました。

【参考サイト】

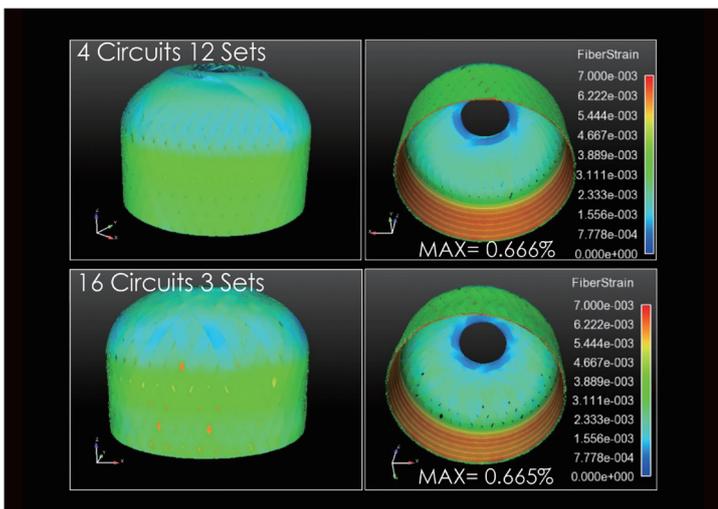
- [1] <https://sdgs.un.org/goals>
- [2] <https://www.fujitsu.com/jp/products/computing/servers/supercomputer>
- [3] <https://www.fujitsu.com/downloads/JP/jsuper/Applications-for-PRIMEHPC-ja.pdf>
- [4] <https://www.mscsoftware.com/ja/product/scflow>
- [5] <https://www.jmag-international.com/jp/>
- [6] <https://www.frontistr.com/>
- [7] <https://github.com/fujitsu/oss-patches-for-a64fx>



▲図2 「富岳」を活用したシミュレーション事例と関連するSDGs

▲図1 FX1000/700のx86サーバ比計算速度および電力性能

[注釈]
 *1 電力効率測定に用いた計算モデルと異なるモデルによる測定結果を含みます
 *2 測定環境の割合上、1ノード上で測定しています
 *3 x866環境は上記ベンチマーク環境と異なります JMAG: Xeon 8280 (2.7GHz)、Cradle CFD scFLOW: Xeon 8260 (2.4GHz)
 *4 scFLOWアルバのマルチスレーブ法の実行時間と比較しています
 *5 測定条件などの詳細については図1を参照してください



今号の表紙

CFRP製圧力容器のメゾスケール解析

炭繊維強化プラスチック（CFRP）製高圧水素容器の強度を正確に評価するため、炭素繊維束と樹脂の強度モデルをそれぞれ直接的に導入できるメゾスケール解析手法を用いて、フィラメントワインディング（FW）法により成形されたCFRP層の炭素繊維束ひずみの分布を明らかにしました。これにより、FWの巻きパターンの違いや炭素繊維束の断面サイズまで設計変数とする最適設計問題の設定が可能となり、FW経路のずれや硬化プロセスで発生する残留応力などの製造誤差が容器破裂強度に与える影響も評価可能となります。

東京大学生産技術研究所 教授 吉川暢宏

編集後記

「富岳」の本格稼働に伴い、2020年3月まで実施された「ポスト『京』重点課題」で進められてきた主要なアプリケーションソフト開発が実を結び、優れた成果が創出されようとしています。今号は、こうしたアプリケーションソフトを活用し、「富岳」をはじめ HPCを利用して産学連携によって推進されている、ものづくり分野の研究開発についてインタビュー記事にまとめました。さらに「富岳」における商用アプリケーションソフトの展開などについても紹介しています。「富岳」や「富岳」時代の HPCの高い計算性能を十二分に引き出すアプリケーションソフトを駆使することにより、ものづくりの分野に革新がもたらされることが期待されています。



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.22

発行日：2022年3月9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