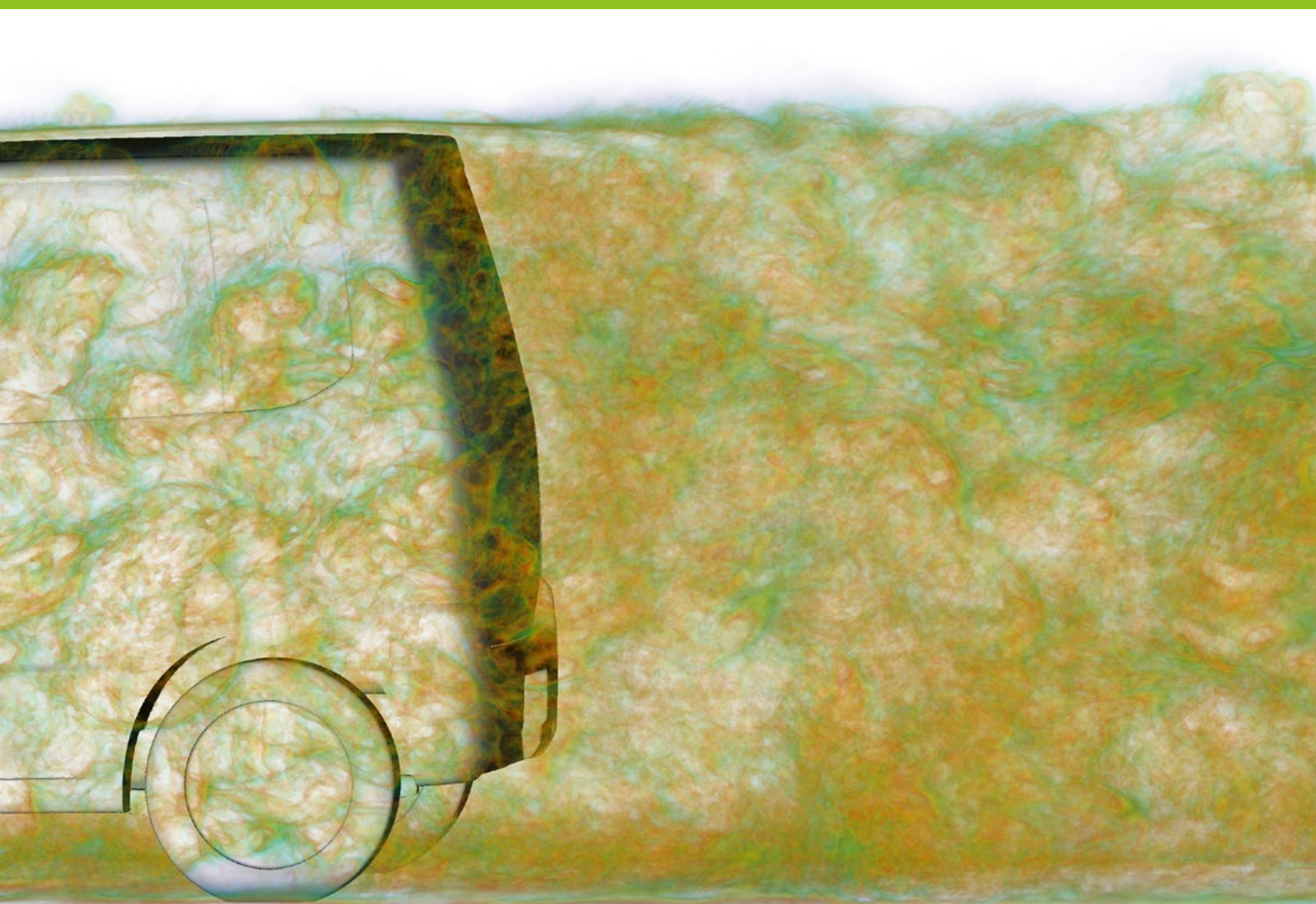


ものづくりにHPCを活用するためのツールとケーススタディー

計 算 互 学 ナ ビ

QUARTERLY NEWS LETTER / SUMMER 2014



提供：北海道大学，スズキ（株），理研AICS

産学連携で実現するプロセス統合

自動車のプロセスイノベーション

北海道大学 坪倉 誠

産業界にHPCクラウド環境を提供する

計算科学振興財団 FOCUS

ソフトウェアライブラリ

FrontISTR

VOL.

4

産学連携で実現する 自動車のプロセスイノベーション ～プロセス統合へ向けて～

ハイパフォーマンス・コンピューティング (HPC) がもたらす自動車の設計手法の変革について、北海道大学の坪倉誠准教授にその現状と展望を伺いました。産学連携のコンソーシアムによる研究開発が京コンピュータを使った大規模な空力シミュレーションを実現し、さらには設計プロセスの変革につながろうとしています。

はじめに坪倉さんの専門分野と現在の研究テーマを教えてください

空気や水等の流れと、流れに関わる複雑・複合現象（例えば個体構造、熱、化学反応、音等）に対して、数値シミュレーション手法を構築すると共に、この手法を用いた現象解明を行っています。

流れのシミュレーション手法としては、ラージ・エディ・シミュレーション (LES) と呼ばれる、乱流場の主要な渦構造を非定常三次元的に直接解析する方法を用いています。

LESを用いる利点は、渦同士がどのように影響を及ぼしあっているか、また渦と構造・熱・化学反応等がどのようにに関わりあっているかを直接見ることができるので、現象の物理的メカニズムの解明に大きく役

立つ点です。

一方、欠点は時空間的に大規模な解析が必要となり、スパコン等のハイエンド計算機が必要になる点です。この結果、シミュレーション手法に対しても、最先端のスパコンでのチューニングや、大規模計算を実現するための様々な工夫が必要となります。

最近ではこの手法を自動車の空力設計問題に適用し、次世代のものづくりのありかたについて、産業界と連携して研究を進めています。

自動車の設計にシミュレーションはどのように生かされているのでしょうか？

自動車の空力設計では、走行中の車に作用する空気抵抗や前後輪での揚力のバランスが重要な指標となります。これに加えて、



北海道大学 大学院工学研究科
機械宇宙工学専攻 宇宙システム工学講座
坪倉 誠准教授

エンジンや排気系に対する空気による冷却性能や、車室内での空気の流れによる騒音、さらには泥はね等も重要な課題です。

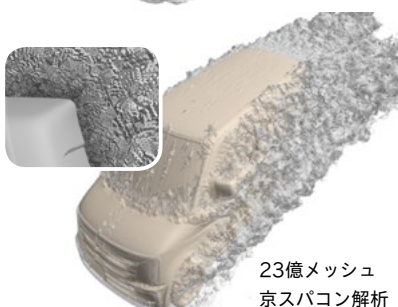
開発段階でのこれらの性能評価には、一般に風洞を用いての計測が行われてきました。ところが特にここ20年の間に、開発期間の短縮とコスト削減を目的として、風洞に加えて数値シミュレーションが導入され、日本の自動車会社の国際競争力の強化に大きく貢献しました。実際、空力設計のみならず自動車開発全体にコンピュータ支援設計 (Computer aided engineering, CAE) を積極的に導入することで、日本の自動車会社は欧米と比較すると、ほぼ1年程度、開発期間を短縮できていると言われています。

一方、空力設計における現在のシミュレーションの使い方は、風洞実験の一部を

京コンピュータで実現したシミュレーションの例

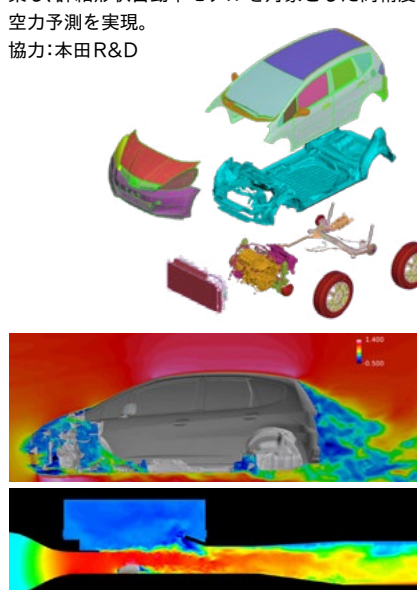
1. 超高精度空気抵抗予測

風洞実験値に対する誤差を7%から2%に向上。
協力:スズキ(株)



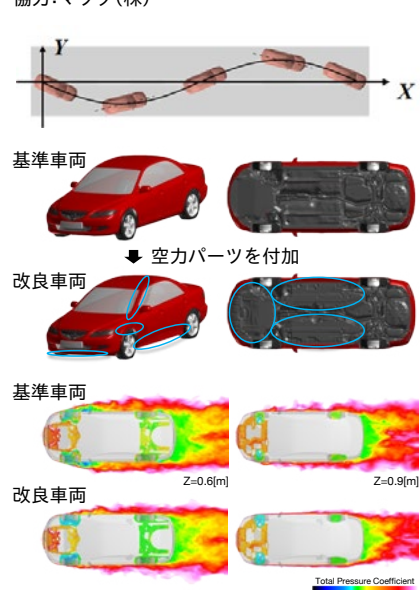
2. 超高精度空気抵抗予測

自動車会社の実在実車風洞を京コンピュータに構築し、詳細形状自動車モデルを対象とした高精度空力予測を実現。
協力:本田R&D



3. 蛇行運動する自動車の空力走行安定性メカニズムの解明

協力:マツダ(株)

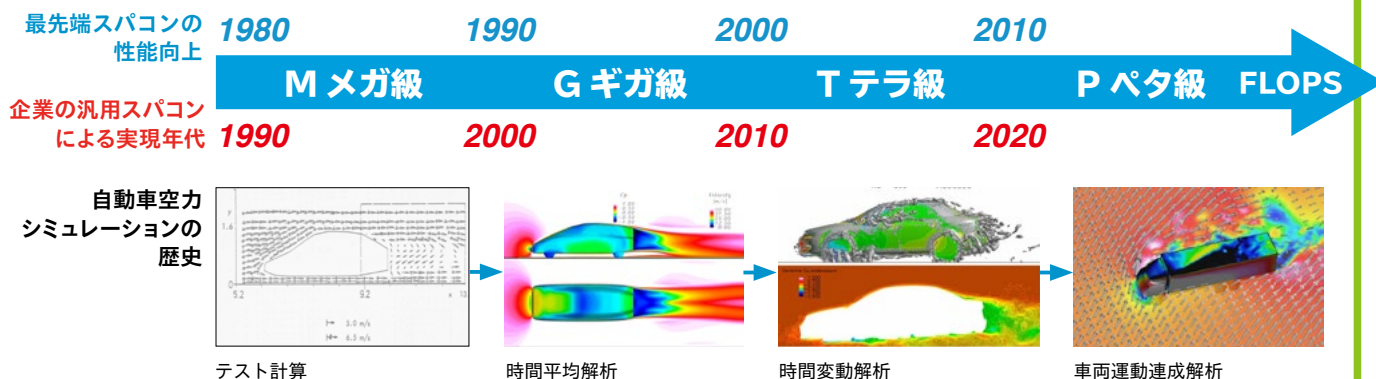


今までとこれからの自動車空カシミュレーション

GFLOPS級スパコンの登場により実用化した自動車空カシミュレーション。TFLOPS級スパコンを活用した現在の設計開発現場では、エンジンルームや床下等の複雑形状を数ミリの解像度で再現したシミュレーションが活用されている。また計算機の急速な発達とソフトウェアの高速化により、時間平均解析(RANS)から実際の非定常渦流れを再現した時間変動解析(LES)

も使われるようになってきている。

PFLOPS級スパコン(京コンピュータ)を活用したシミュレーションでは、自動車の運動や構造振動等を空カシミュレーションと連成させ、実験では本質的に再現が難しい、実走行状態に近いシミュレーションが可能となっている。これらの解析は2020年頃を目途に設計開発現場で実用化と思われる。



シミュレーションに置き換えるというやり方であり、風洞実験を主体とした空力設計のプロセスそのものが大きく変わっているわけではありません。

世界の自動車市場を見た場合、空力設計では経験的に一日の長がある欧州の自動車会社が空力性能に優れた高級車で勝負する一方、韓国等の新興国では日本以上に積極的にCAE技術を導入することでコストパフォーマンスに優れた大衆車で勝負をかけてきている現在、日本の自動車産業も設計・開発プロセスにおけるCAEの活用について、他国に先んじた新たな活用手法を模索する時期に来ているのではないのでしょうか？

「新たな活用方法」を拓く手段のひとつとしてスーパーコンピュータの応用が期待されています

京コンピュータが開発されたのを契機に、北海道大学が中心になって「HPCによる自動車用次世代空力・熱設計システムの研究開発」という産学連携コンソーシアム(2014年7月現在、13の企業と5の大学研究機関が参画)を立ち上げ、京コンピュータに代表される最先端のスパコンを使うことでどのような新しい空力設計シミュレーションが可能か、議論しています。

現在、自動車会社が使っているスパコンの性能はおおよそ数十～数百テラフロップスと考えられます。これに対して京は十ペタフロップスですから、現在のおおよそ数

百倍～千倍高速の京スパコンを使って、近い将来産業界で実用化すると考えられるシミュレーションをいわば先取りして考えておこうというわけです。

コンソーシアムでは、自動車の運動を考慮した高速走行時の空力安定性・安全性、車室内騒音、エンジンルーム排気系熱害という三つの空力連成問題にターゲットを絞り、産業界から現在の設計開発において問題となっているトピックスを提供いただき、研究者委員がHPCI戦略プログラム分野4等で開発している京にチューニングしたシミュレーションソフトウェアを駆使して、京クラスのスパコンを活用することでどの程度の精度と速度で、どのような解析が可能か検討しています。あわせてこれらの問題を産業界で実用化するために、シミュレーションのプリ・ポスト処理を含めたシステム化も行っています。

現在までに、空力設計で最も大切な空気抵抗予測を風洞実験に匹敵する2%程度の精度で予測することに成功した他、自動車のレーンチェンジ時や蛇行走行時の空気力学的な安定性メカニズムの解明や、横風安定性を評価するためのシステムの開発、さらには車室内騒音予測のための空力・構造振動、音響の連成解析フレームワークの開発を行ってきました。

産学協同で成果を蓄積しつつあるわけですね。最後に今後の展望教えてください

コンソーシアム活動を通して、京コン

ピュータクラスのペタスケールスパコンでどのようなことができるのかが見えてきたと共に、こういった大規模解析特有の問題である、シミュレーションモデルの作成にかかる工数、大規模解析データのハンドリングと可視化、大規模シミュレーションそのものにかかる時間と精度のトレードオフ等も浮き彫りになってきました。

各社がペタ級スパコンを導入すると思われる10年以内にこのような問題を解決しておくことが、HPCシミュレーションの産業界での実用化にむけて必要となります。

また、京コンピュータでは空力設計上の空気力予測や空力安定性、空力騒音といった個別の性能評価に対して、その有用性を示すことができました。しかし実際の自動車開発では、空力性能のみでなく、衝突安全性性能や動力性能等、多岐に渡る設計プロセスで性能評価が必要であり、これらの性能の中にはお互いにトレードオフ関係になるものも少なくありません。

実際の設計では、こういった設計プロセス間で折衝が行われて最適なバランスの性能が決まっていますが、これには多大な労力と時間が費やされます。複数の設計プロセスで共通のデータ構造を持つシミュレーションが実現すれば、設計の工数短縮と自動車の性能向上に大きく貢献することができます。このような各設計を統合するシミュレーション、すなわちプロセス統合シミュレーションが、産業界では重要になってくると考えられます。

産業界にHPCクラウド環境を提供する 計算科学振興財団 "FOCUS"

計算科学振興財団(略称 FOCUS)は兵庫県、神戸市、神戸商工会議所の出資によって設立された公的機関。京コンピュータの産業利用の促進、コンピュータシミュレーション技術の普及による産業活性化、そして同技術の普及啓発活動を行っています。スパコン活用を目指すものづくり企業等を対象にした公的HPCクラウド・スパコンセンターとして、産業界における広い利用実績を有しています。



2014年6月にTOP500中450位を獲得した FOCUSスパコン EシステムはXeon Phiを採用し全48ノードで構成されている。

公益財団法人計算科学振興財団（以下 FOCUS）は産業界に向けて公的なスーパーコンピューティング環境を提供することを第一のミッションに掲げる組織。企業が持つ小規模なPCクラスタから「京」に代表される先端のスーパーコンピュータへの橋渡しをすべく、独自のスパコン環境を運営し、一般企業に広く提供している。

ユーザーは FOCUS スパコンによって最小限のコストで高度なHPC環境を導入することができ、また、FOCUSの教育機能を活用して並列化の技術を磨くことで、究極的には京クラスの超並列環境にステップアップできる能力を身につけられる。

ここではまず FOCUS スパコンの計算機資源とその利用方法について概要を示し、次いで FOCUS が提供する技術サポートと普及啓発活動について解説する。

総理論演算性能272TFLOPS

2014年1月の時点で FOCUS は用途別に5台のスーパーコンピュータと大規模な高速ストレージを提供している。ユーザーは自社のニーズに合うシステムを選択し、必要なノード数を必要な時間だけ利用することができる。

下の図は FOCUS スパコンのシステム構成を簡略化して示したもの。ユーザーはインターネットを通じてアクセスする。神戸のセンタービルではユーザーが来所して利用する端末も提供しているが、基本的に FOCUS スパコンはクラウドサービスとしての利用が想定されている。HPC分野においてもオンプレミスとクラウドの併用が一般化しつつあり、FOCUSの資源を自社資源と相補的に使う企業が増えている。

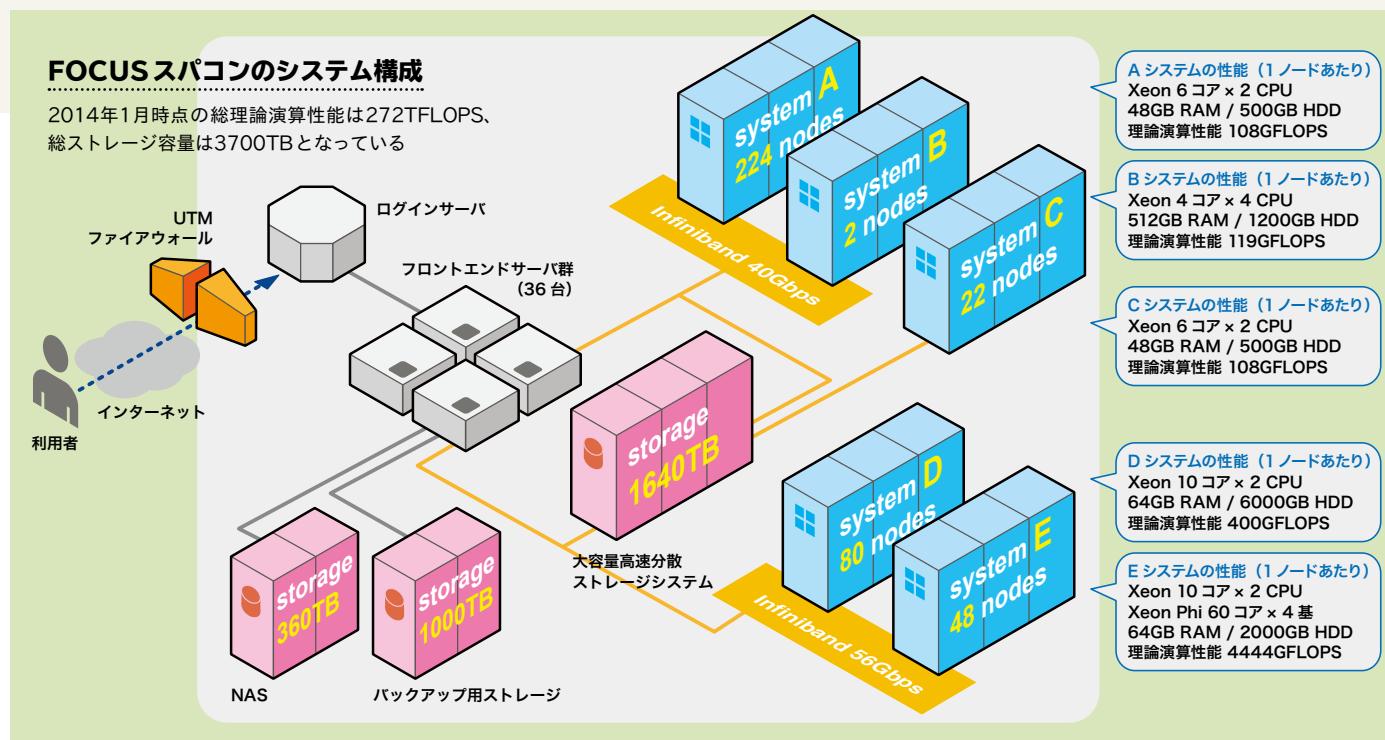
2011年に導入されたAからCの3システムを利用する企業は、HPC需要の高まりによって急増し、2013年度には129社に達した。こうした状況に対応するため、新たにより性能の優れたDとEの2システムが導入され、とくにEシステムはメニーコア・プロセッサ "Xeon Phi" を搭載し、2014年6月のTOP500で450位にランキングされた高性能機となっている。

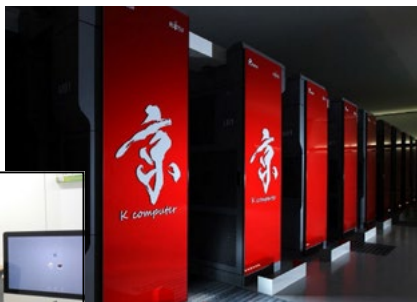
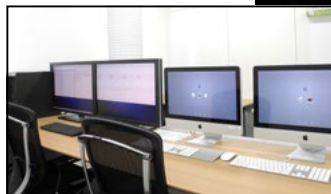
FOCUS がサービス提供者としてシステム性能の維持と同様に重視しているのは「利用しやすさ」。ユーザーは申し込みから3営業日程度でアカウントを受け取ることができ、演算サーバに空きがあれば随時利用可能となる。

利用料はノード時間単位で課金され、利用しやすい水準に設定されている^[表1]。ジョブ実行時間は最長96時間（D、Eシス

FOCUS スパコンのシステム構成

2014年1月時点の総理論演算性能は272TFLOPS、
総ストレージ容量は3700TBとなっている





HPCIアクセスポイント神戸

FOCUSには隣接施設内の京コンピュータと広帯域回線(10Gbps)で結ばれたアクセスポイントがあり、ユーザーはそこからセキュリティの確保された環境で京を使うことができる。2室の作業用個室にはジョブ管理用端末のほかにも大容量メモリを搭載したワークステーション(16コア256GBまたは512GB)が置かれており、大規模データの出入力やプリポスト処理も快適に行える。

テムは72時間)。予約制によって、あらかじめ計算資源の確保を行うことができる。日単位、月単位あるいは年度一括の利用契約にも対応している。

初年度の利用開始から1万円分までが無料となるトライアルユース制度や、アプリケーションの導入・検証を行うソフトウェアベンダー用アカウントの無償提供といった優遇措置も用意されている。

FOCUSスパコンを利用して得られた成果の公開は任意(企業名は公開)、知的財産権はすべて利用者に帰属することが明記されている点も製品開発等に活用するユーザーにとっては重要だろう。

企業のスパコン活用を促進するためには、まず柔軟かつ低コストなサービス構成が必要という認識がFOCUSには浸透している。

ソフト面の利用しやすさも重視

FOCUSスパコンはすべてプロセッサに

インテルXeonを採用しており、企業向けPCクラスタともソフトウェアの互換性が高い。ユーザーは自前のアプリケーションをインストールして使うことになるが、多くのソフトウェアについてベンダーとFOCUSが事前に動作確認を行っているため、そのリストにあるソフトウェアは最低限の準備で使い始めることができる。

また、目下の取り組みとして、市販ソフトウェアのサイトライセンスをFOCUSが取得し、それをユーザーに対して計算機と同様に従量制課金で提供する試みも進められている^[表2]。

もうひとつソフトウェア関連の取り組みとして力点がおかれているのが、HPCI戦略プログラム分野4によって開発されたオープンソースソフトウェアの提供である。ユーザーは極めて強力な並列性能を持つ、ものづくり分野のシミュレーションソフトウェアを無料で使うことができ、その利用技術については東大生産技術研究所が主体

となって開催される講習会等を通じて学習することが可能だ^[表3]。

技術力向上を目指す企業のニーズに応えるため、FOCUSでは毎月10回程度のセミナーが開催されている。なかでも毎月2回開催される「FOCUSスパコン利用講習会(基本コース/応用コース)」は新規ユーザーを対象にしたもので、1日の集中講義を通じてFOCUSスパコンの利用に必要な基礎知識を習得することができる。また、同様に定期開催されている「京を中核とするHPCI活用を見据えた講習会」は、大規模並列化に不可欠なプログラムのチューニング技術を専門家から直接学ぶ貴重な機会となっている。

FOCUSスパコンを経験したユーザー企業の43%は、その後なんらかの形で京コンピュータを活用している。企業のスパコン利用をサポートするFOCUSの取り組みは、着実に日本のコンピュータシミュレーション技術の裾野拡大に貢献している。

システム	1ノード時間
Aシステム ^{※1}	100円
Bシステム	100円
Cシステム	80円
Dシステム	300円
Eシステム ^{※2}	2,700円

並列ノード数	割引料金
2~4	95円
5~8	90円
9~16	85円
17~32	80円
33~48	75円
49~64	70円
65~80	65円
81~96	60円
97~112	55円
113以上	50円

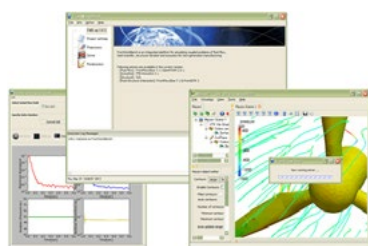
【表1】ノード時間あたりの利用料金
平成26年度のおもな料金。ユーザーの負担を抑えた価格設定である。このほかに追加ストレージや専用フロントエンドサーバ等の料金が設定されている。最新の情報については下記ページを参照。
<http://www.j-focus.or.jp/focus/fee.html>

※1 Aシステムには並列ノード数に応じて変化する割引料金が設定されている。ノード時間あたりの料金は右の表のとおり。ノード日あたり、ノード月あたりの割引料金については上記ページを参照。

※2 賛助会員のEシステム利用は700円/ノード時間。

対応ソフトウェア	料金
Gaussian 09	120 円
MIZUHO/BioStation	80 円
Parallel CONFLEX	80 円

【表2】従量制ソフトウェアの料金(1ノード時間あたり)



講習会タイトル	内容
FrontFlow/blue の設計実務セミナー	FOCUSスパコンと会場内PCをリモート接続し、メッシュ生成から計算実行、ポスト処理まで、研究開発・設計現場でのCFD設計実務の一連の作業を体験する
PHASE/0利用講習会 基礎編	FOCUSスパコンを利用した計算実行が含まれる実用的な電子状態解析
神戸ハンズオン ABINIT-MP 講習会	BioStation Viewer を用いての相互作用エネルギーの解析
ProteinDF 利用講習会	ProteinDF を使って大規模力ノニカル分子軌道計算に取り組む

【表3】HPCI戦略プログラム分野4関連ソフトウェアの講習会(2014年)
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はFOCUSと協力して、ものづくり分野で活用可能な解析ソフトウェアの利用技術を定期的な講習会等を通じて提供している。FOCUSスパコンを実際に用いて解析の実務を手ほどきするハンズオン形式の講習会は現場の技術者に好評。左の写真はFrontFlow/blueとその設計実務セミナーの様子。

オープンソース構造解析システム

FrontISTR

〔フロントアイスター〕

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科
人間環境学専攻
奥田洋司 教授

FrontISTRの先進性と実用性

FrontISTR（フロントアイスター）は、京などの超並列スーパーコンピュータ、PC クラスタからパソコンまで、さまざまな環境で稼働するオープンソースの構造解析システムです。アピールポイントは、シンプルな手続きで優れた並列計算性能を発揮できる先進性、および、商用コード並の豊富な非線形解析機能（プリ・ポストを含む）を有する実用性です^{〔表1〕}。

図1にプリント配線基板の熱反りシミュレーションの例を示します。微細な配線パターンと非線形材料特性を考慮した高精細な予測により、リフロー工程で加熱された際の基板反りに起因する半田未着やショートなどの実装不良を防ぐことが解析の目的です。リファイナ利用によるモデルの詳細化によって解の収束傾向が明らかとなる、などの成果が得られています。

商用コードとの差異

構造解析機能の豊富さという面において、FrontISTRが長年バージョンアップを重ねてきている商用の構造解析コードを

一気に凌ぐのは困難と言えます。しかしながら、FrontISTRのソフト設計においては、サポートする構造解析機能をすべて並列FEM計算のための共通基盤ライブラリ上に実装しています。今後の利用が進むにつれて、前記の並列性能が担保されつつ、機能と信頼性がさらに向上することが期待されます。

一方、商用コードの並列計算機への対応も進められていますが、プログラムに手を入れない限り、エンドユーザーの利用レベルでは数十並列を超えてなお効率的な性能を発揮することは困難なようです。

商用コードと比較した位置づけを図2に示します。やがては両者の解析性能は同様のものに収斂するのかも知れません。こうした意味で、現段階では商用コードとは相補的な関係にあります。

もう一点、商用コードとの大きな差はFrontISTRがオープンソースであることです。無償であることのメリットは言うま

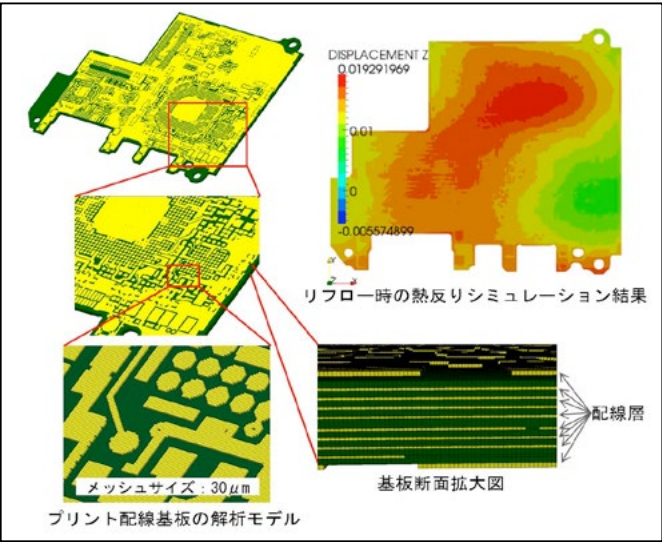
でもありませんが、定式化とプログラムが理解できれば、個別のニーズに応じたカスタマイズ化が可能となり、ひいては利用者（コード開発者）の競争力強化につながります。

短期的視野でブラックボックス的な利用のみが続けば、構造解析プログラムに関わる技術の空洞化を招きかねません。さらに、信頼性を保証する方法としてソース公開に勝るものはないとも言えます。

産業応用事例

産業応用は、FrontISTR開発に携わってきた大学・ソフトウェアベンダとユーザー企業がテーマに応じて共同研究を実施、もしくは、ソフトウェアベンダがユーザーに対して解析支援・カスタマイズ化サービス事業を実施、といった形態で進められています。

用いられている計算機は、研究室レベル



〔図1〕プリント配線基板の熱反り解析例

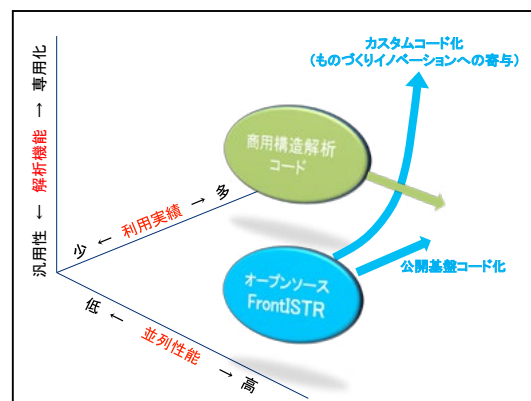
先進性: 並列計算機能
並列線形ソルバー……反復法・直接法、MPI-OpenMPハイブリッド並列対応、接触やアセンブリ構造解析に対応した前処理
リファイナ……解析モデル詳細化機能
実用性: 非線形解析機能
解析種別……大変形・材料非線形・接触問題の静解析・動解析、固有値解析、熱伝導解析、流体・構造連成解析インターフェイス
材料特性……線形弾性、超弾性、熱弾塑性、粘弾性、クリープ
要素ライブラリ……三角形・四角形平面要素(1次・2次)、四面体・五面体・六面体ソリッド(1次・2次、非適合、選択の次数低減、直交異方性、非圧縮)、三角形・四角形シェル(1次・2次、積層)、梁

〔表1〕FrontISTRの先進性と実用性

高速鉄道のレール・車輪間の動的接触挙動評価
船体ブロック溶接、キャスク、圧力容器など大規模構造物の残留応力評価
複合材料伝動ベルトの接触挙動評価
接触荷重・熱荷重下における電子機器の構造信頼性評価
発電用大型蒸気タービン動翼の流体・構造連成解析
微小構造を考慮した充填ゴムのひずみ評価
脳動脈瘤などの生体系非定常流体・構造連成解析
地震時における地盤・原子力建屋の動的挙動評価
広域地盤領域の周波数応答、断層破壊挙動評価
複雑構造押し出し成型の効率化

〔表2〕FrontISTRの産業応用テーマ

【図2】ユーザー視点から見た
商用構造解析コードと
オープンソースコード
(FrontISTR)の発展



のパソコンやPC クラスタ、大学・研究所・企業のスパコンなど様々で、京や地球シミュレータの支援を受ける場合もあります。

独自利用のユーザー研究者、ユーザー企業も多くありますが、筆者の知る範囲で産業応用テーマを〔表2〕に示します。

これら研究開発の成果は、可能な範囲でオープンソース版、いわゆる「公開版 FrontISTR」の機能拡充や精度・性能向上につながっています。

機能改良・サポート体制

2012年度末にFrontISTRの研究開発プロジェクトは終了しましたが、引き続きFrontISTRシステム(プリ・ポスト REVOCAP_PrePostを含む)の利用促進、産業応用、ソフトウェア資産や解析データの維持管理、機能改良等を目的に、一種のユーザー会である「FrontISTR研究会」が発足しました。これまで1~2ヶ月に1回の頻度で、以下のような種類のテーマが設定され開催されています。

- A. 機能・例題・定式化・プログラム解説編
- B. 実践編(PCやPC クラスタを用いたハンズオン)
- C. ユーザー事例紹介編

D. 最新版の配布(2014年8月現在 Ver.4.3)

上記Aが、オープンソースならではのテーマ設定です。

FrontISTR研究会は大学・企業・研究機関の間で情報交換やサービス業務マッチングを行える場として機能することも目指しています。現時点では研究会への参加は無償で(登録は必要)、2014年1月6日時点で登録メンバー数113名、参加企業数65社です。

研究会で用いた資料や計算データ、2014年度の年間開催予定はすべてWEB上に掲載されています。

FrontISTR 研究会

<http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR>

問い合わせ先

fstr_seminar@multi.k.u-tokyo.ac.jp

なお、FrontISTR研究会は、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より、以下の業務を受託しています。

1. 非営利使用するユーザーに対するフリーソフトウェア公開業務
2. 営利目的での使用(ソフトウェアの販売、ソフトウェアを利用した解析サービス、その他、ソフトウェアを利用した一切の営利目的使用)を希望してきた企業との契約検討、選定及び締結業務
3. 企業に対する再許諾契約の締結
4. FrontISTR研究会のホームページへのソフトウェア公開情報等の掲載
5. 本受託業務遂行に係わる事務

上記契約のもと、FrontISTR研究会はソフトウェアをMITライセンスで配布しています。MITライセンスとは以下のようなものです。

- ・このソフトウェアを誰でも無償で無制限に扱って良い。ただし、著作権表示および本許諾表示をソフトウェアのすべての複製または重要な部分に記載しなければならない。
- ・作者または著作権者は、ソフトウェアに関してなんら責任を負わない。

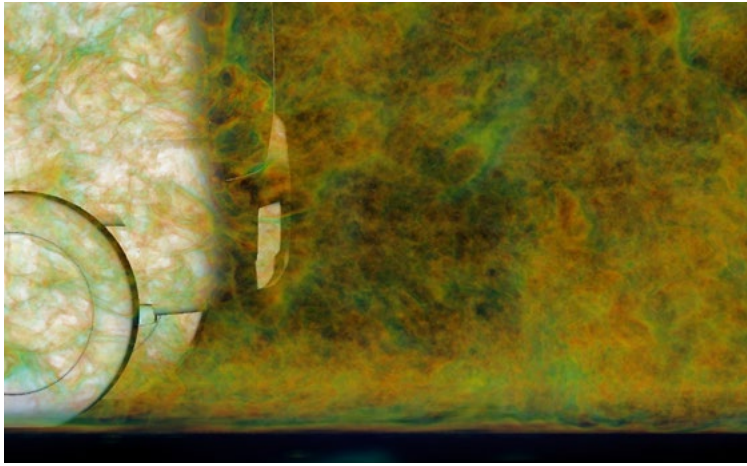
なぜ 構造解析の 並列コードが 必要か？

近年の計算機はハードウェアの並列化によって高速化と大容量化を実現しています。パソコンに搭載されたCPUでは、演算を複数のコアによって同時実行し、データはキャッシュなど階層的に配置されたメモリによって効率的に処理されます。PC クラスタは、こうしたCPUをさらに10~100個程度、ネットワークで結合して並列に実行させます。より高速なメモリやネットワークを用いてCPUを数千個かそれ以上

結合し、計算の規模と速度をスケールアップしたものがスパコンです。

こうした潮流は今後も続くと思われます。商用の構造解析コードの多くは単一CPUの時代に開発されました。計算機の本来の性能を発揮し、構造解析の能力を高度化してゆくためには、演算とデータ転送の並列化、階層化を考慮したソフトウェア設計の見直しが必要なのです。

(奥田洋司)



今号の表紙

京で実現した大規模自動車シミュレーション

FrontFlow/red-HPCを用いて、「京」コンピュータで実現した大規模自動車空力シミュレーションです。一般的な数ミリ〜数センチ程度の表面解像度を、0.5mmまで上げることで、対風洞実験誤差を空気抵抗に対して1〜2%程度まで向上することに成功しました。このような大規模シミュレーションでは、シミュレーションそのものの超並列計算機に対するチューニングのみならず、計算モデルの作成から結果の可視化まで、超大規模計算に対応したノウハウの構築が必要となります。ここでは空間格子分割が容易な四面体格子を採用し、京コンピュータで自動的に格子細分化をすることで、総格子数23億セルの格子を自動作成しました。図は渦度によるボリュームレンダリング法による可視化を表しています。

(北海道大学 坪倉誠)

編集後記

表紙にシミュレーションを可視化した画像を掲載するときは、高い解像度のものをご提供いただけるようお願いしています。今回は3000×3000ピクセルのイメージを新たに生成していただきました。小さな渦まで見て取ることができるはずです。ぜひオフィシャルサイトから高解像度版PDFをダウンロードし、何倍かに拡大してご覧ください。(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.4

発行日：2014年8月31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