

京からポスト京へ 大規模 CFD が拓く新たな応用空カシミュレーション

Applied Aerodynamics Simulation for the next generation based on the massively parallel CFD: From the K-computer to the post-K.

○ 坪倉 誠, 神戸大学大学院システム情報学研究科, 神戸市灘区六甲台, tsubo@tiger.kobe-u.ac.jp
理化学研究所計算科学研究機構, 神戸市中央区港島南町, mtsubo@riken.jp

Makoto Tsubokura, Kobe University, Nada-ku, Kobe-shi

RIKEN Advanced Institute for Computational Science, Chuo-ku, Kobe-shi

High-Performance Computing CFD recently developed and conducted on the K-computer for engineering applications was introduced. Two simulation frameworks based on the fully unstructured or hierarchically structured grid system were demonstrated and their strength and weakness were discussed in the context of their utilization in industrial development and manufacturing process. Based on these achievements on the K-computer, a new project just launched for the post K-computer for the purpose of developing unified CAE system for the road vehicle development was also introduced.

1. はじめに

「ものづくり」の世界、特に産業界における設計開発プロセスで CFD が活用され始めてから、既に 20 年近くが経とうとしている。当初は各社で試行錯誤的に、インハウスコードを用いて直交格子を用いて行われていた CFD も、複雑形状への対応に優れる非構造格子の導入と市販ソフトウェアの台頭により、90 年代末から 2000 年初めに開発・製造プロセスへの導入がなされるようになった。この間、ハイエンドスパコンの性能は十年に数百倍から一千倍という驚異的スピードで性能向上すると共に、産業界で導入されている市販スパコンの演算性能当たりのハードウェア価格も大きく下落し、今では 20 年前では夢のような大規模解析が可能となりつつある。

乱流シミュレーションという観点でいえば、時空間的解析解像度の向上は、かつてのレイノルズ平均シミュレーション (RANS) に対して、比較的大きなスケールの乱流渦を直接時空間的に解像するラージエディシミュレーション (LES) が可能となりつつある。このような高時空間解像度乱流解析は、解析精度の向上のみならず、流れ構造に基づく様々な流体现象の解明や流体連成問題への適用といった、実験計測では本質的にアプローチが難しい問題に対する可能性を秘めており、経験主義に基づくものづくりに大きなブレークスルーをもたらすと期待される。一方、ものづくりの世界で LES のような大規模非定常乱流解析を実現するためには、ターンアラウンドタイムと予測精度、実機形状再現性といった設計開発現場での要求を満たすことはもちろんのこと、最先端のスパコンで十分な性能が発揮できるソフトウェアが必要となり、ユーザーの大規模シミュレーション利用や膨大となるデータの扱いといったノウハウも含めて、市販ソフトで対応するには限界がある。

このような観点から我々のグループでは、大規模 CFD の産業応用を目指して、2012 年に運用が始まった京コンピュータを頂点とする HPCI (High-Performance Computing Infrastructure) に対して最適化を行ったソフトウェアを開発し、産学連携で様々な実証課題に取り組んできた。具体的には、産業応用において有利であると考えられる非構造格子と階層型構造格子という二つの代表的データ構造に着目した。そして前者に対しては、HPCI 戦略プログラム「分野 4 次世代ものづくり」の支援を受けて北海道大学が中心となって 2011 年より FrontFlow/red-HPC を開発、後者に対しては理化学研究所計算科学研究機構で 2012 年より CUBE を開発してきた。本講演ではこれらのプロジェクトで得られた最新の実証解析結果を紹介すると共に、それぞれの方法について、産業界で

の実用化を想定した場合のメリット・デメリットを比較検討する。さらにこれらの結果を受けて開発が始まった、「ポスト京」スパコンで実現を目指す HPC-CFD を活用した新たな「ものづくり」について、自動車 CAE という観点から紹介する。

2. FrontFlow/red-HPC の概要と成果

FrontFlow/red (FFR) は、2002 年に始まった文科省 IT プログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトで東大生研を中心として開発がスタートした。当初は LES、特に反応性乱流を対象として、産業応用を主目的に非構造有限体積法に基づいて開発が進められた。その後「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクト (東大生研) や、NEDO プロジェクト (燃料電池及び車両空力関連) を経て、現在は北海道大学を中心として開発が進められている。2011 年に本格始動した HPCI 戦略プログラム「分野 4 次世代ものづくり」では、自動車空力および燃焼器を対象として京コンピュータで大規模解析を実現すべく、チューニングが進められた。自動車空力を対象とした研究開発では、北海道大学を中心に、自動車 OEM10 社、自動車サプライヤー 4 社、及び 7 つの大学研究機関が参画した産学連携コンソーシアム「自動車用次世代空力熱設計システムの研究開発」を発足させ、この中で FFR は高精度定常空力予測や車両運動連成解析をターゲットとした開発が進められた。

現在までの成果として、数千万セルの非構造格子から百億セル規模の非構造格子を自動作成する格子自動細分化機能を開発し、解像度サブミリメートルの大規模非構造 LES 解析を実現することで、実車フルスケールモデルの対風洞実験値に対して 1~2% の誤差で空気抵抗の予測が可能であることを実証した⁽¹⁾。また、車両運動方程式と CFD の連成解析を実現することで、実車フルスケールモデルの高速走行操舵時に作用する非定常空力の高精度予測や、横風突風時の自動車の運動挙動予測を可能とした。本講演ではこういった超並列環境を利用した次世代自動車空カシミュレーションの実例を紹介する他、物体表面の境界層を解像した非構造有限体積法に基づく高精度 LES の有用性を示す例として、回転するゴルフボールに作用する空気力の予測についても紹介する。

3. 階層直交格子に基づく統一解法ソルバー-CUBE の概要と成果

産業界で多くみられるような、流体運動や構造変形、化学反応や空力音等が連成しあうような複雑現象を対象として、京コンピュータの超並列環境を有効に活用することで、こういった現象を高精度に予測するシミュレーションフレームワークを理研計算科

学機構の複雑現象統一的解法研究チームで開発している。これらの現象に対する統一的なデータ構造として、階層型直交格子、特に中橋ら⁹⁾により提案されたビルディングキューブ法 (BCM) を採用し、この特性を生かした高速なメッシュ生成、高い単ノード演算性能、並列性能が特徴である。現在までに、自動車会社の実車開発で用いられている CAD データから、車両周りでサブミリメートルの空間解像度で 1 時間以内に 270 億セル規模の格子を作成し、京 30,000 ノード程度を用いて 24 時間程度で LES の解を得ることができている。解析アルゴリズムとしては非圧縮性流体アルゴリズムの他、統一圧縮性アルゴリズムを採用し、解析対象に応じた適宜使い分けを行っている。また、構造解析に対しては、格子を変形させないオイラー型の解析を採用し、流体運動と構造変形を統一的に扱うことで、連成解析に対して高い演算性能が期待できる。

スパコンのみならず特に近年のコンピュータアーキテクチャは、プロセッサに含まれるコア数がますます増加すると共に、キャッシュメモリの階層化もますます進み、メモリバンド幅もより小さくなる傾向にある。この際、演算数に対してメモリアクセス過多 (低バイト/フロップス値問題) となる格子ベースの流体・構造解析は不利であり、単一プロセッサ性能に対しては、アーキテクチャに応じた適切なチューニングを施さない限りはますます演算性能が遅くなるという大きな問題が生じる。こういったハードウェア動向を鑑みると、階層直交格子のデータ構造を生かした HPC チューニングは、非構造格子に基づくデータ構造に対して、利があるように思われる。本講演ではこの手法により実施した自動車空力シミュレーションの他、東工大等と連携して実施している、東京都都市域 20km 四方の建物を再現した大規模風環境シミュレーションの例についても紹介する。

4. ポスト京重点課題「近未来型ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発」

ポスト京で重点的に取り組むべく社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発として、重点課題⑧「近未来型ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発」が文科省から選定され、実施機関として東大生研を責任機関とする全 7 機関が決定した (2015 年度は実施可能性調査、本格活動は 2016 年より 4 年間)。この中のサブプロジェクトとして、我々は「リアルタイムリアルワールド自動車統合設計システムの開発」をサブ課題として提案、採択されている。このサブ課題では、京で実現した連成空力解析 (リアルワールドシミュレーション) 技術を抜本的に加速することを一番の目標としている。2 節で高精度空力解析として紹介した数十億セル非構造有限体積法では、定常空力値を得るための解析時間として、京 4000 ノード (32,000 コア) 程度を利用した場合、120 時間程度を必要としている。これに加えて、部材間の重なりや隙間といったデータ欠陥を有する開発 CAD データから解像度 1mm で詳細な車体表面形状を作成するのに、少なく見積もっても 120 時間程度が必要であり、計算モデル作成も含めると 10 日以上の日数がかかっている。前者については並列数を増やせばある程度の加速は可能であるが、後者の計算モデル作成にかかる工数は、単純なハードウェア性能の向上が解決とはならないところが問題である。これではいくら精度がいいといっても、設計・開発プロセスでの活用は難しい。本プロジェクトは、3 節で紹介した CUBE をメインソルバーとして活用することで、数十億セルメッシュのモデル作成部分を数日から数十分にまで加速すると共に、階層直交型データ構造を有効活用してマルチグリッド法や動的計算負荷分散技術を採用することにより、CAD データから結果が得られるまでの時間を数時間 (実験と同程度) にまで加速することを目指す。この手法がポスト京で実現すれば、数十億セ

ル規模の高精度 LES 解析を数千ケース、数億セル規模の汎用 LES 解析を数万ケース並行して流して数時間で結果を得ることができ、実験ではまだ成しえていない、空力設計最適化システムが実現する。

5. おわりに

以上、本講演では、京で実現した自動車空力解析を中心とした応用空力解析を実例として紹介し、大規模流体連成解析の有用性と今後の課題、2020 年のポスト京で可能となる次世代ものづくり CAE のありかたについて議論する。

謝辞

本講演で示す結果の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです (課題番号: hp150284, hp150229, hp140226, hp140126, hp140084, hp130018, hp120295)。

参考文献

- (1) Makoto Tsubokura, Andrew Hamilton Kerr, Keiji Onishi, Yoshimitsu Hashizume: Vehicle Aerodynamics Simulation for the Next Generation on the K-computer: Part 1 Development of the framework for fully unstructured grids up to 10 billion numerical elements, SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems, 7(2): 2014-01-0621(2014)
- (2) Takashi Ishida, Shun Takahashi, Kazuhiro Nakahashi: Fast Cartesian Mesh Generation for Building-Cube Method Using Multi-Core PC, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit: AIAA 2008-919 (2008)
- (3) Keiji Onishi, Makoto Tsubokura: Vehicle Aerodynamics Simulation for the Next Generation on the K computer: Part 2 Use of Dirty CAD Data with Modified Cartesian Grid Approach, SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems, 7(2): 2014-01-0580(2014)