

7 自動車の大規模空力シミュレーション —非構造格子 vs. 構造格子—

坪倉 誠^{1, 2} 大西慶治²

1 北海道大学 2 理化学研究所計算科学研究機構

緒言

自動車の空力計算に CFD (Computational Fluid Dynamics)^{☆1} が試みられ始めたのは 1980 年代初頭である。その後、複雑形状への対応に優れる有限体積法の市販ソフトウェア化と汎用並列計算機の低価格化により、1990 年代末から 2000 年初めにかけて開発・製造プロセスへの導入がなされるようになった。この間、スーパーコンピュータ (以下、スパコン、HPC) の性能は十年に数百倍～一千倍という驚くべき速さで進化し、十数年前の導入時には夢のようであった大規模高精度解析が可能となっている。スパコンの進化は 3 つの点で自動車の空力解析 (以下、自動車空力) に寄与すると考えられる。1 つ目は空間・時間解像度の向上により、自動車周りの 3 次元非定常渦構造を直接解析できるようになる点である。この結果、乱流^{☆2} モデルに依存しない高精度の計算が可能となるとともに、車体形状変更による空力性能向上のメカニズム解明が可能となり、経験主義的な空力開発にブレークスルーをもたらすことが期待される。2 つ目は再現時間数十秒におよぶ長時間解析が可能となる点である。この結果、定常空力評価を主眼にした既存のシミュレーションに対し、突風や追い越し等の実際の自動車の走行やドライバの応答も含めた、実時間数十秒に及ぶリアルワールド

解析が可能となる^{1) ~ 3)}。3 つ目は現在行われている空力性能評価解析を数百ケース流すことによる最適化シミュレーションの導入である。以上、高性能スパコンによる HPC-CFD は、従来の風洞実験主体の定常空気力に基づく空力設計プロセスから、リアルワールドや最適化も考慮した新しい設計プロセスの実現に大きく貢献すると期待される。

一方、近い将来のエクサスケールの実現を見据えた場合、スパコンのアーキテクチャはますます複雑化すると考えられる。プロセッサに含まれるコア数はますます多くなるであろうし、キャッシュメモリの階層化も一段と進むであろう。この結果、プロセッサの演算性能あたりのメモリバンド幅 (B/F 値) は、「京」に対してより小さくなると想定される。これに対して現在産業界で一般的に用いられている非構造有限体積法は、要求 B/F 値が高く、次世代のスパコンでは高い性能を得ることは格段に難しくなる。本稿では、複雑形状に対する格子作成と超並列環境での効果的な CFD の高速化という観点から、「京」で実現した非構造格子と構造格子を用いた 2 種類の空力 CFD について議論する。

非構造格子と構造格子

自動車空力で有限体積法や要素法が多用される一番の理由は、空力性能評価の際に高い精度で実物製品形状の再現が求められるからである。図-1 上に、代表的な非構造格子であるプリズムメッシュを用いて、実際の自動車エンジン形状を再現した図を示す。非構造格子では 10mm 程度の解像度でもある程度の形状再現性が得られていることが分かる。この程

☆1 流体の運動を記述する方程式、すなわち一般的には流体の質量、運動量、エネルギーの保存を表す偏微分方程式を、コンピュータで解く手法。解析速度や精度がコンピュータの性能に大きく依存することから、スパコン性能の向上に伴ってその適用範囲が飛躍的に広がっている。

☆2 流れの状態の 1 つで、ある流体に対して特定の流速やスケール以上で発生する。流速や圧力が時空間的に大きく変動し、混じり合った状態となり、広いスペクトルを有する結果、シミュレーションする場合には高い計算機性能を必要とする。

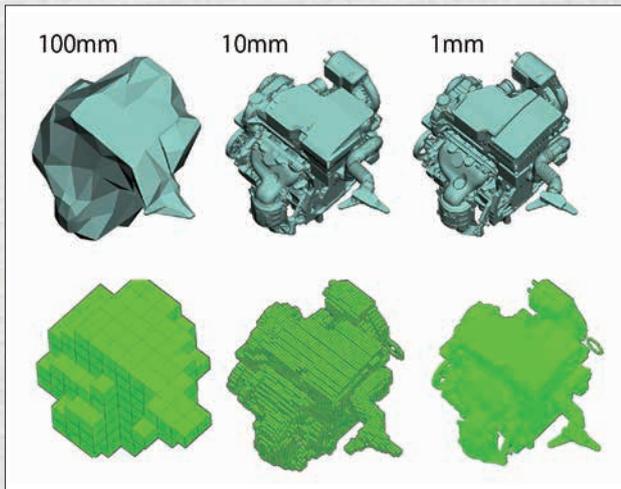


図-1 自動車エンジンの格子トポロジの違い (上:非構造, 下:構造) による形状再現性 協力:スズキ(株)

度の解像度でフルスケールの自動車の空力解析を行った場合、総要素数は数千万 (10^7) ~ 1億 (10^8) 程度であり、テラフlops級の計算機での実行が可能である。現在我々が「京」で実施しているのは、非構造格子による1mm以下の解像度であり、総要素数は数十億 (10^9) に達する。

これに対して図-1下に、構造格子としてボクセルメッシュで再現したエンジンを示す。

非構造格子と比較すると、解像度が1mm程度でも表面の不自然な凹凸が確認できる。加えて車体表面に発生する乱流境界層の厚さがセンチメートルオーダーであることを考慮すると、曲率を持った表面における境界層の剥離等の予測に十分な形状再現性であるとは言えず、乱流現象の再現性の観点からもより高い解像度が要求される。一方で構造格子は非構造格子と比較してアプリケーションが要求するB/F値は比較的小さく、プロセッサの性能をより引き出しやすいため、数百億 (10^{10}) ~ 一千億 (10^{11}) 格子による解析が「京」で実現できる。さらにはメモリへのデータアクセスが規則的であり、プロセッサの階層キャッシュの活用・コントロールが非構造格子と比較して容易でもあり、エクサスケールまで見据えた次世代のCFDとしての活躍が期待される。

表-1に、自動車空力における構造格子(直交)と非構造格子の比較をまとめておく。

	Structured grid (Cartesian)	Unstructured grid
Reproducibility of complicated surface	×	◎
Easiness of surface (CAD) repairing	○	×
Flexibility of grid allocation	△	◎
Easiness of mesh generation	○	×
Calculation load	○	×
Tuning for HPC	○	×
Accuracy of results	△	○

表-1 自動車空力解析における構造格子(直交)と非構造格子の比較

産業界での空力解析の現状

自動車の開発初期では、デザイナーにより提案された多数の形状に対して、空力的には抵抗値に主眼を置いて絞り込みが行われる。この段階ではパワートレイン等の詳細な設計はまだ決まっておらず、かつては20~30%スケールの簡略化したスケールモデルによる風洞実験が行われていた。現在この段階は、多くのメーカーが風洞実験をCFDに置き換えている。形状が比較的簡単な上、数多くのケースを並行して解析し、その相対評価をするというニーズにCFDがマッチした典型例であろう。中後期では、数ケースに絞られたデザインに対して、エンジンルーム・床下形状も詳細に再現し、抵抗値を主眼として揚力バランス、さらには熱害といった項目についても検討が始められる。この段階では実スケールのクレイモデルによる風洞実験が行われていたが、現在、この部分へのCFDの導入がめざましく、車体形状を数ミリ~数センチで詳細に再現したシミュレーションが日常業務で行われている。この後、デザイン固定されプロトタイプ(試作車)が製造されるが、試作車以前のプロセスをすべてCFDに置き換えているメーカーもある。試作車完成後は、エンジンルーム・排管系の熱害や騒音、泥はねといった評価に主眼を置いた開発に移っていくが、この開発段階へのCFDの積極導入が現在の課題といえる。

特に開発中期以降の詳細形状CFDでは、開発初期の車体形状差に対する定性的評価に加えて、実車風洞データに対して抵抗値で3~5%程度の定量的誤差が要求される。この予測精度に対してターンアラウンドタイムは、シミュレーション自体は1日で

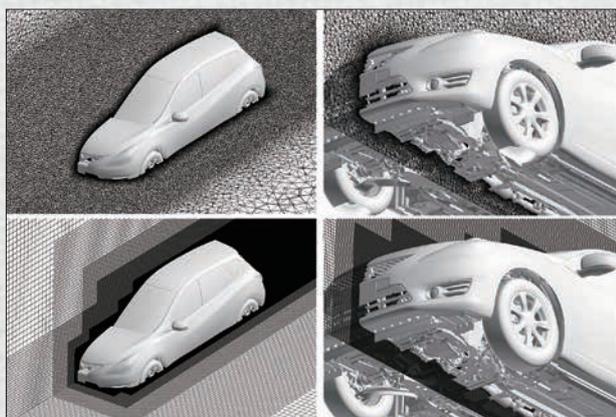


図-2 非構造格子（上）と階層型構造格子（下）
協力：日産自動車（株）

結果が出るというのが理想である。対費用効果の観点から、ハードウェアは数～数十テラフリップス（数百～数千コア）のクラスタ計算機が主流であり、この結果、数千万～一億要素数規模の乱流モデルを用いた解析が一般的である。ただしターンアラウンドタイムの実情は、むしろ格子作成を含むプリプロセスに数日～10日程度かかっており、CFDに適したCAD（Computer Aided Design）データクリーニングがネックになっている点に注意すべきである。すなわち産業界での実用化では、ソフトウェアの予測性能や速度だけでなく、この前処理の時間短縮が大きな課題であることが分かる。

図-2に、同一車種に対して数千万～数億要素の非構造、階層型構造格子を作成した例を示す。非構造格子は、まず車体表面を希望の解像度による非構造面で再現し、ボトムアップ的に空間格子を作成する。一方、階層型構造格子は、空間領域からトップダウン的に求める解像度まで車体近傍をボクセル形状で細分化する。自動車業界の現在の主流は非構造格子であるが、格子作成の簡便さから車体周辺は構造格子で作成し、車体近傍のみ非構造に扱う方法が増えている。

非構造解析の有用性と限界⁴⁾

非構造解析の有用性を調べるために、デザイン初期～中期に相当する自動車車体形状を用いた精度検証解析例を紹介する。対象とした車体形状を図-3

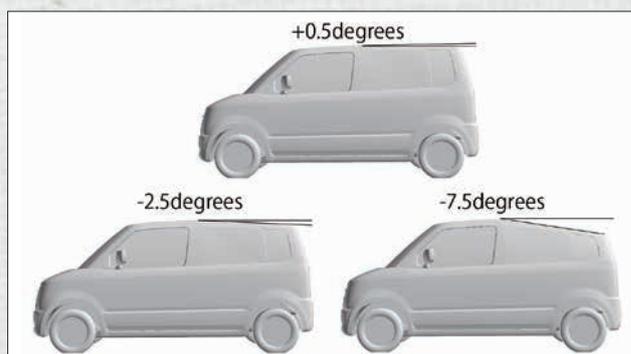


図-3 後部スラント角を変化させたモデル 提供：スズキ（株）

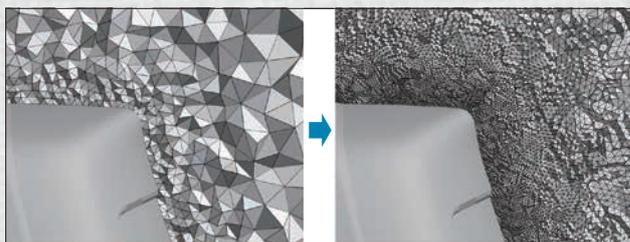


図-4 テトラ非構造格子. 左, 3,500万; 右, 23億要素数

に示す。モデルは、空気抵抗の車体後部スラント角依存性を調べるためにスズキ（株）で開発された33%スケール風洞モデルで、エンジンルームや床下形状はある程度簡略化して再現されている。

解析ソフトには「京」コンピュータにチューニングされたFrontFlow/red-HPC^{☆3}を用いた。格子形状としてここでは空間の自動分割が容易なテトラ格子を採用する。自動分割は元の格子の辺を等分しながら均一に分割していくアルゴリズムを採用しており、テトラ格子は1段の分割で8つに細分される。産業界でのテラフリップス級で一般的な3,500万要素数（ 3.5×10^7 、表面解像度2～10mm）の粗格子解析と、この格子から自動格子分割機能を用いて2段階細分化した、23億要素数（ 2.3×10^9 、同0.5～2.5mm）による密格子解析の結果を比較する（図-4）。密格子解析は「京」コンピュータ4,096ノードを用いて100時間程度で結果を得た。その際、粗格子で得られた十分発達した結果を密格子にマッピングして初期値として利用した。

☆3 前身のFrontFlow/redは、文科省プロジェクト「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」等により東京大学生産技術研究所で開発された、非構造有限体積法に基づく汎用流体シミュレーションソフトウェア。本HPC版はHPCI戦略プログラム「分野4次世代ものづくり」の委託を受けて北海道大学で開発されている。

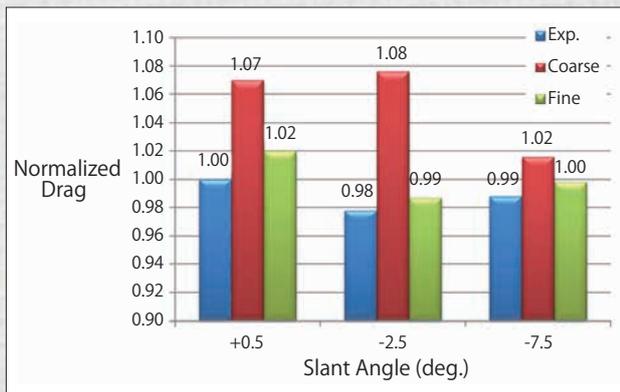


図-5 空気抵抗値の比較. 青, 風洞実験; 赤, 3,500万格子 (Coarse); 緑, 23億密格子 (Fine). +0.5度の実験値で正規化

図-5に得られた空気抵抗値を, 風洞実験値とともに示す. ここではスラント角 +0.5度の値を基準として正規化してある. 風洞実験値から, 空気抵抗はスラント角を +0.5度から減少させた場合, -2.5度で一度下がった後, -7.5度で再び増加することが分かる. 粗格子では, すべてのケースで実験値に対して最大7%程度の過大評価を示しているほか, 抵抗のスラント角変化依存性を定性的に捉えられていない. 一方, 密格子では, すべてのケースで1~2%の過大評価におさまるほか, スラント角変化と抵抗変化の関係を的確に捉えている.

この抵抗値予測改善の原因を調べるために, 図-6に車体周りの瞬時流れ, 図-7に最も顕著な差の表れた, 車体中央後端屋根角部の拡大図を示す. 表面解像度を0.5mmまであげた密格子では, 車体表面の境界層が再現されており, 後端角の曲率を持った部分で流れが剥離しているが, 解像度が2mmの粗格子では境界層の解像が不十分で, 曲率部分の終点で流れが剥離している. この結果, 曲率部分で流れの回り込みが発生し, コアンダ効果により圧力低下が起こり, 空気抵抗の増大につながったものと考えられる.

以上のように, 数千万要素数規模のテトラ格子による解析では, 空気抵抗値の予測として, 産業界で求められている数%の誤差を満足できないことが分かる. したがって実際の開発プロセスでは, 表面にプリズム層を挿入するなどして壁面近傍の解像度を壁面垂直方向にのみあげることで, 精度向上をは

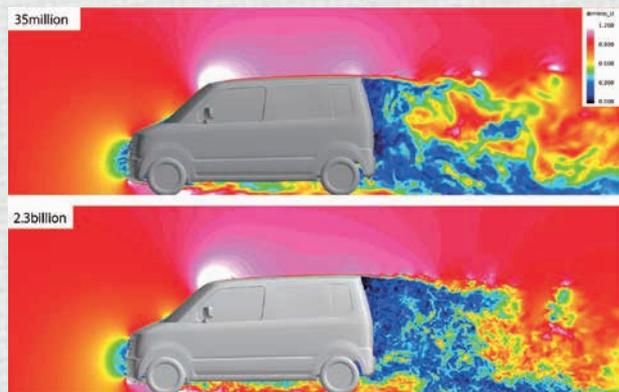


図-6 車体周りの瞬時流れの比較 (車体中央断面での瞬時速度分布). 上, 3,500万格子; 下, 23億格子

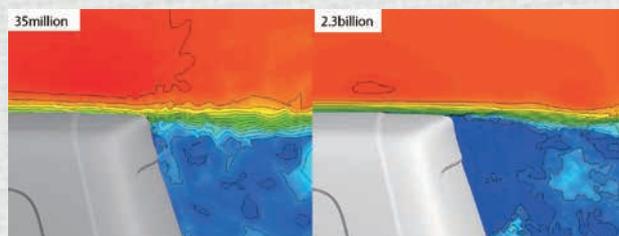


図-7 車体中央後端屋根角部の速度分布の比較. 左, 3,500万格子; 右, 23億格子

かっている. 一方こういったハイブリッド格子は, 格子作成プロセスにおける工数の増加や計算安定性の問題を引き起こすことが知られている. ここで示した結果より, 「京」コンピュータのパワーを活用し, 壁面近傍解像度を1mmより小さくしてやることで, テトラ格子のみでも開発プロセスの要求にマッチした予測精度の向上が可能であることが分かる.

一方このような非構造格子の作成において重要なのは, 形状データの準備である. 非構造格子の原則として, モデル形状を非構造面 (図-1であれば三角形) で再現し, 空間要素を作成するとすれば, もとになる車体形状は想定する解像度で再現されていなければならない. これに対して車体形状のもとなるCADデータには, 部品間のギャップや重なり等の欠陥が多数存在し, 非構造格子を作成する場合には表面データのクリーニングが必要となる. 現在は市販ソフトウェアの機能を用いて1cm弱程度の解像度までは数日でのクリーニングが可能であるが, 1mm以下の解像度では数十日に及ぶ膨大な工数が必要となる. これは産業界での実用化に向けて大きな障壁となろう.

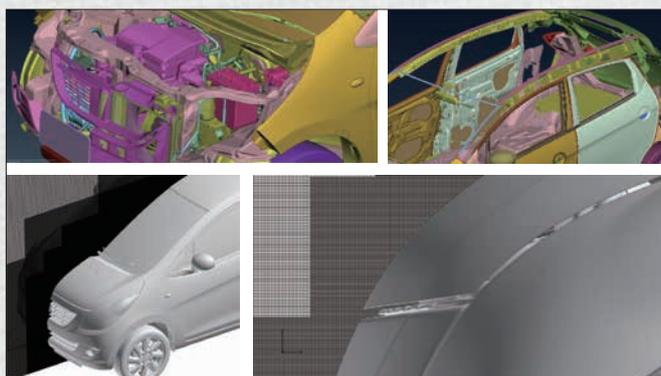


図-8 CAD (上) データと 192 億階層型構造格子 (下)

階層型直交格子による解析⁵⁾

構造格子の場合、車体表面形状はボクセルで置き換えられるため、その過程で工夫をすればボクセルサイズより小さなギャップ等、CADデータの欠陥を自動的に修正することが可能である。すなわち非構造格子で要求されるCADデータの大きな修復は必要としない点が大きな利点である。ここでは構造格子の有用性を確かめるために、実際に自動車会社で活用されているCADデータを用いて実施した、階層型構造格子によるフルスケール空力解析の結果を紹介する。解析ソフトには、理化学研究所計算科学研究機構で我々が開発しているソルバーを用いた。なお、表面をボクセル近似した後、格子で捕えられない形状に対してはIBM (Immersed Boundary Method) 法を用いて表現している。

図-8に本研究で用いた形状データの一例と、格子配置を示す。ここでは、粗格子としてセル数1.1億 (1.1×10^8 , 最小解像度6.1mm)、密格子としてセル数192億 (1.92×10^{10} , 最小解像度0.76mm)の結果を比較する。密格子解析は「京」コンピュータ12,288ノードを用いて24時間程度で結果を得た。本解析で最も特筆すべきは、192億セルの場合でも、CADデータから格子作成にかかる時間は2時間程度である点である。

図-9と図-10に車体中央断面での瞬時速度分布を示す。最小格子解像度を6.1mmから0.76mmにすることで、各段に細かい渦構造が再現されているのが分かる。

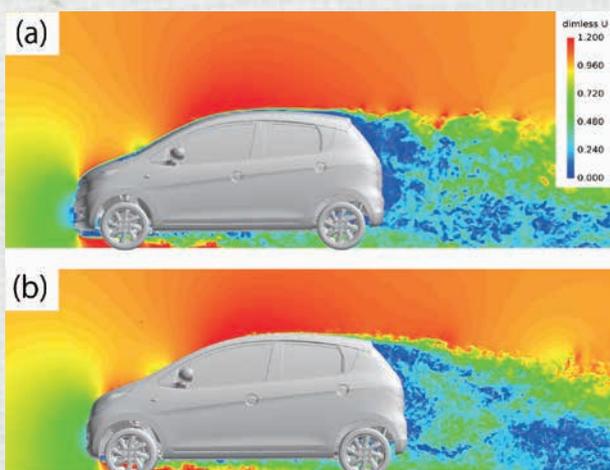


図-9 車体中央断面の瞬時速度分布の比較. 上, 1.1 億格子; 下, 192 億格子

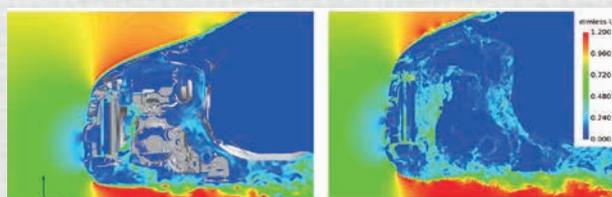


図-10 車体中央断面の瞬時速度分布の比較 (エンジンルーム内部). 左, 1.1 億格子; 右, 192 億格子

最後に表-2に、自動車空力を対象とした構造格子と非構造格子の計算時間と前・後処理にかかる時間の比較をまとめておく。ここでは非構造格子の例で述べた33%スケールモデルの結果を実スケールに換算している。

結言

「京」コンピュータを用いて、非構造格子23億要素、階層構造格子190億セルの自動車空力LES解析を実現した。非構造格子の利点は表面形状再現性に優れる点にあり、「京」の性能を活用して1mm以下の解像度を実現すれば、格子作成が容易なテトラ格子を用いても、風洞実験値に対して空気抵抗を1~2%の誤差で予測することが可能である。一方、この技術の実用化の観点からは、1mm以下の解像度の表面形状を精密に作成するのに要する前処理工数の削減が目下の課題である。またエクサスケールも見据えた場合、高B/Fアプリのチューニングは大きな問題となろう。これに対して構造格子の利点

スーパーコンピュータ「京」の利用

	Cartesian with IBM		Unstructured	
	6.1mm	0.7mm	6.0mm	1.5mm
Grid resolution	6.1mm	0.7mm	6.0mm	1.5mm
Grid number	1.1x10 ⁸	1.9x10 ¹⁰	4.5x10 ⁷	2.3x10 ⁹
Pre/post processing	1hour	2hours	1week	2weeks
Turn-over time*	19hours	25hours	120hours	120hours

* The total node numbers of the fine case are determined so that the total simulation turn-over time is comparable to the corresponding coarse case.

表-2 自動車空力解析の構造格子と非構造格子の計算および前・後処理にかかる時間の比較（総計算時間は、粗格子と同じ程度のクロックタイムとなるように、密格子のノード数を決めている）

は、CADデータのクリーニングを極力排し、数時間で格子作成が可能である点にある。非構造では数十日かかるクリーニングが数時間となるのは、「ものづくり」の現場では計り知れない魅力がある。一方、曲面をボクセルで近似した場合の流体力学的な曲率再現性の悪化が懸念事項であるが、同じ要素数に対する計算負荷は、非構造格子の五分之一から十分の一程度であるから、同程度の計算資源で十倍程度多い計算格子での解析が可能である。

参考文献

- 1) Nakashima, T., et al. : Coupled Analysis of Unsteady Aerodynamics and Vehicle Motion of a Road Vehicle in Windy Conditions, *J. of Computers & Fluids*, Vol.80, No.10, pp.1-9 (2013).
- 2) Cheng, S., et al. : Numerical Quantification of Aerodynamic Damping on Pitching of Vehicle-Inspired Bluff Body, *J. of Fluids and Structures*, Vol.30, pp.188-204 (2012).
- 3) Tsubokura, M., et al. : Large Eddy Simulation on the Unsteady Aerodynamic Response of a Road Vehicle in Transient Crosswinds, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol.31, pp.1075-1086 (2010).
- 4) Tsubokura, M., et al. : Vehicle Aerodynamics Simulation for the Next Generation on the K Computer: Part 1 Development of the Framework for Fully Unstructured Grids using up to 10 billion Numerical Elements, SAE 2014 World Congress & Exhibition, Paper No. 2014-01-0621 (2014).
- 5) Onishi, K., et al. : Vehicle Aerodynamics Simulation for the Next Generation on the K Computer Part 2 Use of Dirty CAD Data with Modified Cartesian Grid Approach, SAE 2014 World Congress & Exhibition, Paper No. 2014-01-0580 (2014).

(2014年3月1日受付)

坪倉 誠 mtsubo@eng.hokudai.ac.jp

東京大学大学院博士課程修了後、東京工業大学講師、電気通信大学助教授を経て、2007年より北海道大学准教授。専門は乱流シミュレーションと車両空力。現在、理化学研究所 AICS の研究チームリーダーを兼任。

大西慶治 keiji.onishi@riken.jp

東北大学大学院博士課程修了。国内自動車メーカー勤務後、ソフトウェア企業で数値流体関連、特に自動車分野の計算コード開発・コンサルティング業務に10年以上従事。現在、理化学研究所 AICS にて特別研究員として勤務。

謝辞 本稿で示す結果は、科研費基盤研究 (C) No.23560179、文部科学省 HPCI 戦略プログラム「分野4次世代ものづくり」、NEDO 産業技術研究助成事業 (2007-2011)、文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「RSS21 革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」等の支援を受けて得られた。また本研究の数値計算は、理化学研究所スーパーコンピュータ「京」のほか、一部北海道大学情報基盤センター、東京大学情報基盤センターの計算機を利用した。ここに謝意を表す。