

自動車産業におけるシミュレーション技術

～ 自動車の空気力学シミュレーションと衝突事故人体損傷シミュレーションを中心に ～

小林 敏雄

一般財団法人 日本自動車研究所 代表理事 所長

1. まえがき

わが国には地球シミュレータの性能を大幅に上回るスーパーコンピュータ「京」が出現した。この世界最高の高性能大容量スーパーコンピュータがサイエンス、テクノロジーの進展にどのようなブレークスルーを与えるか、イノベーションを創出するか、あるいは産業界が利活用できるのかが論議されている。

筆者は2003年東京大学生産技術研究所における最終講義において、「コンピュータ・シミュレーションが人工物設計に不可欠な時代になってくるという認識は一般的であるが、世界最高クラスのスーパーコンピュータを産業界が使いこなすにはまだ時間がかかる、このツールを持たなくては競争に勝てないと認識するにはまだ時間がかかることであろう」と述べたことを思い出す。その状況は、地球シミュレータや京の導入が実現している2012年の現時点においても、以前に比してアプリケーション・ソフトウェアの進展はみられるものの、画期的に改善された状態にはなっていないように思われる。

わが国におけるものづくりの代表とされる自動車産業においてもコンピュータ・シミュレーションは、物理的あるいは化学的現象を再現する手法として開発段階で既に利用されているし、さらに進んで目標とする性能を達成するためのCAEツールとして設計段階においても存在感を増している。当然、既に数年にわたって地球シミュレータ活用のプロジェクトが立ち上がり、また、京を活用する計画も存在しており、高性能大規模コンピュータの活用を自動車技術のブレークスルーに繋げる期待は大きい。本稿では自動車関連業界でのHPC（High Performance Computing）の中から自動車空気力学と自動車衝突事故における人体損傷の予測について研究の現状と課題を概説する。

2. 戦略プロジェクトとアドバンスソフト

前述のようにハードウェアは少なくとも現在まで確実に急速に進化している。問題はそれを有効に使うことができるかどうかということである。産業に資するアプリケーション・ソフトウェアという面ではわが国は欧米等に比較して圧倒的に劣っている。産業に資するアプリケーション・ソフトウェアといっても、開発研究に効果的な大規模高精度シミュレーション（ここではHigh Performance Computing HPCと呼ぶことにする）のソフトウェアと設計手順に入り込む、いわゆるCAEシミュレーションソフトウェアがある。両者を画一的に分離することはできないし、融合しての利用もなされているが、特に国産のCAEソフトウェアの市場占有率は低い。このギャップを埋めるべく、また、高性能化されるコンピュータにマッチしたアプリケーション・ソフトウェアを開発すべく、2002年に筆者は現アドバンスソフトの小池秀耀社長らとともに文部科学省ITプログラム「戦略的基盤ソフトウェア開発プロジェクト」を発足させた[1]。プロジェクトに対応して東京大学生産技術研究所内に計算科学技術連携研究センターを設置し、外部ベンチャー企業アドバンスソフトを立ち上げた。このプロジェクトはその後、革新的戦略ソフトウェアの研究開発プロジェクト、イノベーション基盤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（いずれも東京大学生産技術研究所加藤千幸教授代表）として発展したが、その目標は、高精度高機能のソフトウェアの開発、大規模ソフトウェアを設計する人材の育成、計算科学の拠点形成および実用ソフトウェアを開発・維持するベンチャーの育成であった。これらのプロジェクトが開発した実用・大規模ソフトウェアは、流体解析

ソルバー、構造解析ソルバーから始まって、大規模アセンブリ構造対応熱流体解析ソルバー、同じく構造解析ソルバー、複合材料強度信頼性評価シミュレータ、バイオ・ナノ分子特性シミュレータ、バイオ分子相互作用シミュレータ、ナノデバイスシミュレータまで多岐、多数に上る。3つのプロジェクトは現在では京活用の戦略分野のひとつである「ものづくり分野」の中核となっている。開発したアプリケーション・ソフトウェアを実際のものづくりの現場で使えるような状況にブラッシュアップする作業を効率的に行うことが求められている。

3. CFD と自動車空気力学

自動車開発における車両空力技術の歴史そのものは古く、系統的な研究は1940年代に遡る。研究の手法は風洞試験、実車走行試験とコンピュータ・シミュレーションである。部品点数が数万に及ぶ巨大組立産業であり、基幹産業の1つとして国際競争力強化が求められてきた自動車業界では、設計・生産過程の高精度化・高効率化は必須課題であり、コンピュータ援用工学（CAE）の導入が積極的に進められてきた。数値流体力学（CFD）の導入はその一例であり、現在、全ての自動車メーカーは程度の差こそあれ、市販ソフトウェアを導入し、自動車空力設計に活用している。

CFDによる車両空力評価は市販ソフトウェアがまだ存在していなかった1982年に、空力設計プロセスへのCFDの活用を目的として、ドイツ・フォルクスワーゲン社において自動車空力性能の数値予測に関する欧州シンポジウムが開催されている。当時の解析として、航空工学分野で成功したパネル法を自動車空力に適用した例が紹介されたが、ブラフボディ解析における限界が指摘されている[2]。また、当時、台頭し始めたPHOENICSによる3次元解析の結果も報告されているが、直交格子によるせいぜい数千点の離散点による解析では自動車形状を再現できる状況でなく、その精度については評価されるものではなかった。筆者らも、3次元

自動車車体まわりの流れに対して、一般座標系による有限体積法によるレイノルズ平均型乱流モデルによる解析およびLarge Eddy Simulation (LES)解析を試みた[3]。

市販ソフトウェアが実用化し始めた1990年代に入っても、形状が複雑な自動車に対してはその成功は限定的であり、形状を簡略化した車体に対して一般座標系有限体積法や有限要素法による試験的な解析がなされた。このような時代にあって、一般座標系による非定常3次元ナビエストークス解析は大きなインパクトを与えるものであった[4]。当時のスーパーコンピュータCray X-MPを用いて50万節点規模の一般座標系高次風上差分を用いた疑似DNS解析が発表され、車体表面の詳細な圧力分布の予測とともに、風洞実験では把握が困難な車体周りの3次元渦構造の抽出が可能となり、CFDの有用性を強く印象付けた。ただしCray X-MPのピークパフォーマンスは1ギガフロップス程度であり、実際の空力設計環境で詳細なフルビークル解析を実施するには21世紀を待たねばならなかった。

21世紀にはいると、10テラフロップス級のコンピュータが現れ、大手自動車メーカーには数百ギガフロップス級のコンピュータが導入された。筆者らも地球シミュレータによる億要素規模のフォーミュラカーまわり流れのLES解析を試行した[5]。図1にその結果を示す。図形の解像度もさることながら解像する渦の細かさが注目される。

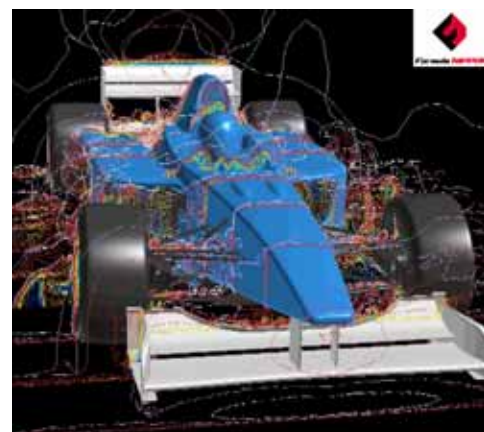


図1 億要素規模 LES 解析[5]

2002年、地球シミュレータが稼働を開始し、

当時、世界最速の 40 テラフロップスを誇ったが、ほぼ 10 年経過した現時点では、自動車大手メカには 10 テラフロップス級のグリッドコンピュータの導入が実現している。ハードウェアの急速な発展とともに、自動車業界のニーズに応えるべく、非構造格子系有限体積法をベースとする市販ソフトウェアの使い勝手が格段に進歩し、実空力設計環境への CFD の活用は一気に加速する。当初はエンジンルームを省略し、床下構造もフラットな簡略化モデルによる定性的評価が主流であったが、エンジンルームを含む車体全体の空力シミュレーションもこの 10 年でかなり一般化してきている。ただし、実設計環境を想定した場合、CAD データのクリーニングと格子作成から、解析、結果の評価までを 5 日間程度で実施する必要があり、現状は、数百万～数千万格子規模のレイノルズ平均型乱流モデル（RANS）による解析が主流である。その結果、空力設計プロセスにおいてかつては風洞実験で実施されていた部分の多くを CFD が取って代わっているが、本質的には風洞実験の補完的役割からの脱却にはなっていない[6]。

今後、CFD が既存の自動車空力設計にイノベーションをもたらすことが可能な自動車用次世代空力評価システムとしての地位を確立するためには、次のような要求が浮かび上がる。

- a 風洞実験に匹敵する定常空力予測精度（2～3%以下）を確保すること、
- b 風洞実験では実現困難な自動車姿勢や風向風速等の動的変化時に作用する非定常空気力の予測が可能であること、
- c 計測結果取得に要する時間が風洞実験のターンアラウンドと同程度であること、

自動車空気力学におけるシミュレーションの歴史は乱流現象の解析技術の歴史である。

RANS による CFD は、経済性と精度の兼ね合いから広く設計・開発現場で利用されつつあるが、幾つかの欠点が指摘されている。まず、乱流変動場を、全て乱流モデルを用いてモデル化するため、解析結果は適用したモデルに依存す

ることになる。自動車周りの流れ場は、境界層の剥離、再付着を伴い、かつ大規模な組織的渦構造が発生する乱流場であり、RANS による乱流モデルの予測精度はまだ十分であるとは言えない。従って、詳細な風洞実験データの利用による流れ場に応じた最適化が必要であるのが現状である。また、乱流場を平均場と変動場に分離して解析を行うため、風洞実験と同様、非定常空力特性の予測への適用は困難である。さらに同じ理由から、車室内環境の観点から重要なピラーやドアミラー等から発生する空力音の予測ができない。

このような対象には、LES に基づく非定常乱流解析の適用が有効となる。LES は一般に、乱流場の格子スケール以上の運動に関しては非定常 3 次元的に直接解析し、格子スケール以下の運動についてのみ乱流モデルを用いてモデル化するため、流れ場の非定常特性の把握ができ、かつ格子を細かくするに従って予測精度が向上し、数値解が物理的解に漸近するという特徴を持っている。この特徴は新たなブレイクスルーを求める次世代空力評価システムとして有効であり、CFD における RANS から LES への転換が大きな鍵になると思われる。

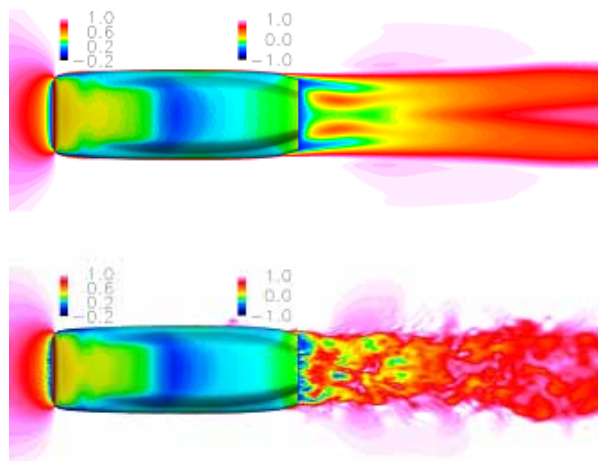


図 2 RANS（上）と LES（下）の比較例[7]

図 2 に FrontFlow/red（戦略プロジェクトで開発した汎用流体解析ソフトウェア）を用いて実施した RANS および LES による ASMO 形状車体周り流れ場の可視化図を示す 7)。両解析に

は全く同じ計算格子を用いているが、RANS と比較して LES ではより細かい渦構造が現れているのが分かる。特に、車両後流での流れの非定常 3 次元性に関する差は顕著であり、車体後端（ルーフ部や床下部）から剥離した流れが互いに干渉しあい、複雑な乱流場を形成している。RANS においてこの後流域の平均速度、圧力を予測するには、この複雑な乱流挙動により発生する乱流レイノルズ応力を高精度に再現する必要がある、過去、車両空力予測において車体後端の圧力（ベース圧）分布予測の予測精度の向上は最重要課題の 1 つとされてきた。産業界での空力設計開発現場における計算機環境を考えた場合、車体全体の空力解析に用いられる計算格子は数百万程度であり、この解像度における両者の差異、特に車体ベース圧予測の問題が格子解像度の不足に依存するのか、乱流モデルの精度の問題であるのか、説明が必要である。ASMO 程度の簡易形状でも LES は数千万要素規模の解像度を必要とするようで、現在、自動車設計開発段階で最も普及していると考えられる数十～百数十テラフロップスのグリッド計算機環境を想定した場合に、数日の解析時間が必要で、残念ながら前項の要求(c)を満たすに至っていない。しかしながら、これはコンピュータハードウェアの進歩が直ぐに解決する問題であり、次世代空力評価システムとして LES は最も有望な CFD 技術であると考えられる。複雑形状、高レイノルズ数、車体の動的姿勢変化への対応等、次世代空力システムとして設計開発現場で活用されるためには、自動車空力評価に特化した LES 手法の構築が望まれる。

自動車空力設計における CFD と風洞実験のコストを比較した場合、メーカーにより差異はあるが、導入コストと年間減価償却、維持費用、モデル作成費用の観点からは、風洞実験費用に対して CFD の費用は数分の 1 から十分の 1 程度であろう。上述したように CFD の現状は、かつて風洞実験が担っていた部分の多くを CFD が担っているとはいっても、現状での役割はあくまで風洞実験の補助的な役割に過ぎない。

しかしながら、一方で物理メカニズムの解明や新たな空力設計プロセスの創出による革新的な空力設計の実現等、CFD に期待する声は大きい。すなわち現状は、対費用効果としては役割を果たしているが、風洞を超える CFD の持つポテンシャルが実現されているとは言えないということであろう。さらに、解析モデルの複雑化による並列解析規模の大規模化により、ソフトウェア維持費が増加傾向にあり、現状の CFD の役割では対費用効果が得られなくなりつつあるという問題に直面している。そのため、各メーカーは維持費用が安価なオープンソース CFD ソフトに着目するという傾向にある。

これとは対照的に、空力設計における CFD の可能性を高めるべく、RANS による定常解析から LES による非定常解析へ移行する動きもある。この場合、非定常解析に伴う解析時間増を補うために、ハードウェアを増強するとともに、プリ・ポスト処理を迅速に進める必要がある。いずれにしてもこの場合は風洞実験に匹敵する段階まで CFD のコストを高めることになり、対費用効果が取れるか、CFD の真価が問われることとなる。既存の設計プロセスに対して CFD をあてはめるという考えではなく、設計プロセスそのものを大きく変革できるか、製品のイノベーションに結び付く設計プロセスを提案できるか、CFD の真価が問われる時代である。

4. 自動車交通事故と人体損傷

車両の衝突安全対策、予防安全対策および飲酒運転対策などにより、日本では交通事故による死傷者数は減少傾向にある。しかし、2009 年では死者数は年間 4,914 人、負傷者数は約 91 万人となっており、依然として多くの方が被害にあっている。こうした中、2010 年に政府から「2018 年を目処に死者数を 2500 人以下とし、世界一安全な道路交通の実現を目指す」という新たな目標が設定された。死傷者数をさらに低減するためには、さらなる車両の総合的安全技術の向上が求められているが、その中でも、交通事故時における詳細な傷害発生メカニズムの

解明は重要な課題となっている。

人体損傷のシミュレーションを構成するためには、まず、図3に示すような生体の忠実度を検証した人体数値モデルを作ることになる[8]。これは、頸部、大腿部、腰部などの部位ごとの供試体実験を参照して比較検討を行い、次に全身供試体実験から外観挙動や人体に作用する負荷が再現されているかどうかを検討するというプロセスがとられる。例えば、膝靭帯に対して引張試験を想定し、供試体実験と数値シミュレーションとを比較し、供試体での膝靭帯引張特性をシミュレーションが再現できているかを確認し[9]、その後、膝に強制的な曲げを作用させ、靭帯が断裂する時刻や箇所を供試体実験と比較しながら検証を進めることになる。このように部位（要素）ごとに人体モデルの生体忠実度の検証が行われ、検証された部位のモデルを組み合わせて全身人体モデルが構築されている。最終的に、全身人体モデルにおいてもコンポーネントの場合と同様に、供試体実験との比較によって生体忠実度が検証されるというステップを踏んでいる。学術的には骨構造における局所性、臓器等柔構造の物性値や衝撃を受けた時の挙動、骨構造と柔構造のインターフェースなど未解決の問題、あるいは事故直前時の乗員の姿勢の処理方法など課題は多い[10]。



図3 人体のシミュレーションモデル[8]

また、傷害発生メカニズムの解明には事故を再現する必要があり、事故再現にコンピュータ・シミュレーションを活用する例も現れている[11]。実事故のデータをもとに事故再現実験および事故再現シミュレーションを実施し、実験とシミュレーションの比較、検証から事故再現シミュレーションの確立が進められている。

図4に事故再現シミュレーションによる胸部に作用する応力分布の例を示す[12]。人体モデルは実事故における乗員の体格と異なることや、エアバック等の保護装置のモデル化には一般的な特性を用いているところがあり、傷害メカニズムの全解明には至っていないが、傷害の発生箇所を予測することが可能な状態にまで進展している。

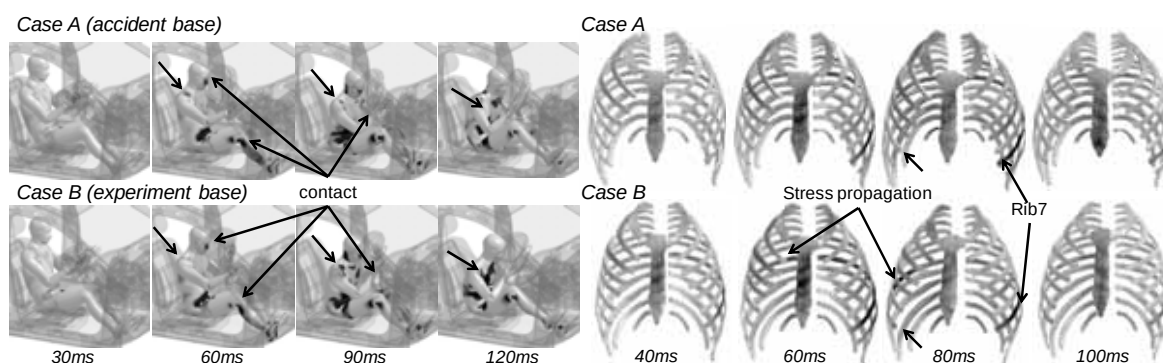


図4 事故再現シミュレーションでの胸部応力分布[12]

人体モデルを活用したシミュレーション技術はダミー実験では困難な衝突安全性能を評価するためのツールの1つとして自動車の衝突安全の分野で活用されると考えられる。また、将来

的には交通事故が発生すると同時に事故再現シミュレーションが行われ、救急隊や医師が現場に到着する前までに、あるいは負傷者が救急病院に到着する前までに、負傷者の傷害箇所を

把握できる環境が構築できれば、医師の状況判断が早くなり、治療の現場にも有効に活用できると期待される。しかしながら、人は千差万別であり、個人によって体格や骨の強度は異なっている。このような個体差を考慮することが傷害箇所を特定する上では大変重要になるが、負傷者の年齢や体格などを瞬時に把握するようなシステムは現在のところ構築されていない。シミュレーションを行う環境があっても、シミュレーションを行う上で重要な境界条件の抽出等、課題は多く残されている。

5. おわりに

コンピュータ・シミュレーションの現状と課題を自動車の空気力学と自動車衝突安全の分野を例にとって概観した。コンピュータが強力になった現在のシミュレーションの役割は従来の要素技術の開発、局所的な現象解析にとどまっている必要はない。マルチスケール、マルチフィジクス解析や実験結果との連携を含めてトータルデジタルエンジニアリングの実現、リアルタイム医療シミュレーションやテーラーメイド医療への展開等々工学、医工学の目標である現実社会への提案が時代の要求である。ここでは述べなかったが、例えば、生体系のシミュレーションは本質的に複雑であり、仮定や計算条件に十分な注意を払わねば重大な誤解を招く恐れがある。シミュレーションの普及と同時に、それを正しく使いこなせる人材を育成し、確保することが重要な課題となる。その上で、進歩する計測技術、画像処理技術との連携によりシミュレーション技術は産業に生活に有効なものに進化することになる。アドバンスソフトの存在がその橋渡しになることを希望している。

自動車を仮想空間上で運転し、その性能の限界を調査する、交通事故のメカニズムを認識する、自動車を取り巻く社会、環境全体を理解して自動車に新しい発想を与えることができる…等夢は膨らむが現実とのギャップはまだ大きい。次世代スーパーコンピュータという高い頂を持つ山の出現によって、すそ野も広くひろがり、

夢の実現に少しずつ近づいていくことを期待する。

最後に本稿執筆にあたり北海道大学坪倉誠准教授、日本自動車研究所高山晋一研究員の助力を得た。記して感謝する。

参考文献

- [1] 小林敏雄：生産研究, 55, 3, pp. 239-240, 2003
- [2] W. Schmidt and R. Buchheim： Vehicle Aerodynamics, International Symposium by Volkswagenwerk AG, 1982
- [3] T. Kobayashi： Proc. 2nd International Conference on Supercomputing in the Automotive Industry, Seville, 1988
- [4] T. Kobayashi： Proc. Science and Engineering on Cray Supercomputers, Minneapolis, 1987
- [5] M. Tsubokura et al.： SAE 2007, Trans J of Passenger Cars, Mech. Systems 6, 2007, 40-49
- [6] 小林, 伊藤, 鬼頭: 自動車技術, 51, 4, pp. 11-17, 1997
- [7] M. Tsubokura, T. Kobayashi et al.： Computers & Fluids, Vol. 38, pp. 981-990, 2009
- [8] Sugimoto T. et al.： First result from the JAMA Human Body Model Project, 19th ESV, 2005
- [9] 高山, 江島：可視化情報学会会誌, 2010, 7月号, pp165-170, 2010
- [10] T. Kobayashi, et al.： The 11th Asian Symposium on Visualization, Niigata, Japan, 2011
- [11] F. Sato, et al.： IRCOB Conference, pp41-58, 2010
- [12] 三上他：自動車技術会 2010 秋季学術講演会, No.127-10, pp17-22, 2010

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、【カラー版】がダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)