

1. 現状認識

自動車の設計開発において、CFD(Computational Fluid Dynamics), 特に定常流れ場を仮定したシミュレーションは、日常的に設計現場に近いところで使われていると言って過言ではない。また、空力、エンジン、空調などの従来からの適用領域だけでなく、電子機器分野にも拡大している。また近年では、地球環境問題から省燃費化が一層必要であり、また開発期間の短縮という要請に基づき、CFD活用の高度化、多様化が進展している。

しかし、流体現象そのものが非線形・非定常であり、また、実際には、流れのみならず、熱、燃焼、反応など複合した現象を扱う必要があるため、他のCAE（構造解析など）に比べて多くの計算コストを要する、あるいは計算精度が不十分である、という側面がある。

これに対して、近年の計算機性能向上に伴い計算時間は短縮されてきたが、その前段階で必要なCADデータの修正や、メッシュ生成等の準備に、多くの人的工数を要しているようである。これらについては、格子ボルツマン法や渦法など、メッシュ生成の労力や制約を格段に軽減する技術も提案され、それらに基づく商用ソフトウェアも注目されている。

また、一方で、公開ソフトウェア(オープンCAE)が各企業内で導入される動きも出始めている。これは、商用ソフトウェアによる多並列計算大規模モデル解析が、ライセンスコスト低減策として、また固有技術の内製化に有効な手段として、脚光を浴びている。

将来の車づくりを考えた場合、現状以上にCFD技術を活用し、それにより試作回数を減らす、あるいは開発期間を短縮することが進んでいくと考えられる。そのためには、(1)CFDに関する計算性能（計算ソフトだけでなく、計算機システム、ならびにプリ・ポスト処理のソフトや環境）、(2)空力性能予測技術の向上、(3)燃費性能予測（エンジン筒内、エンジンルーム内の流れからエンジン周辺部品までの燃費に寄与する部分）、(4)空調性能予測、について、現状分析から、一層の高度化、多機能化する必要がある。

2. 現状分析

2. 1 計算性能

非定常乱流場の計算法としてLES (Large Eddy Simulation) の実用化研究が盛んである。一方、マルチフィジックスの問題は、レベルセット法⁽¹⁾, Immersed Boundary 法, 渦法, 粒子法など、界面や粒子の形成に関する具体的なメカニズムを知るには、従来のVOF法から、ミクロな観点で分子動力学シミュレーションまた、Phase Field 法などが研究中である。

商用ソフトウェアに多くの機能が追加され、これらのニーズに応えようとする動きが見られる一方で、オープン CAE⁽²⁾と呼ばれるソフトウェアに対する期待が高まっている。

近年のハードウェアの進展として特筆すべき点としては、汎用 CPU のメニーコア化と GPU, FPGA などの専用演算器による高性能化が挙げられる。クラスター型の超並列計算機がスパコン開発の主流となっている。国内では、ペタフロップス級の TSUBAME-2.0 や目標計算速度毎秒 1 京回の K-Computer が次世代のスパコンとして稼働予定である。

2. 2 空力性能予測

従来は車両の空力特性は定常解析が中心であった。近年、車両運動性能の高度化要求に伴って空力特性の非定常性が議論され始めた。車両背後のウエーク流れは本質的に非定常現象であり、非定常な横風や突風などを受けた場合、車両には非定常空気が作用する。また、変動自然風下における抗力係数の非定常性も空力特性の非定常性の範疇に入る。これらの解析に対して近年、非定常乱流モデルである LES が注目されている。車両運動性能への影響に関する研究も進められている⁽³⁾。

自動車の快適性を向上させる上で空力騒音の低減は必要不可欠な技術である。しかし空力騒音による車室内騒音のCAEによる実用的なレベルにまだ至っていない。そのため空力騒音の CAEによる予測技術の確立が強く望まれている。

対象とした簡易ドアミラー形状は、乱流モデルとして LESを用いている。音圧スペクトルの比較を見ると、ピークが顕著に出ない広帯域騒音の場であり、この傾向は捉えているが、全般的にみて音圧値は 5-10dB程度過大評価する傾向にあった。

また、ピーク音の予測は分離解法では困難であり、直接解法が必要となるが、音速と比較して低速である自動車周りから発生する音の直接計算には未だ多くの課題が残されている。今後のさらなる自動車の快適性向上に資する空力騒音解析技術とその基盤となるCFD技術、音響解析技術、計算機技術の益々の向上に期待したい。

2. 3 燃費性能予測

燃費に寄与する主な流れとして、エンジン筒内流れとエンジンルーム内流れに着目する。エンジン筒内流れの現状 CFDは筒内現象の定量的予測には未だ不十分であるにも関わらず、設計・開発・研究いずれの段階でも必須のツールになっている。CFD への要求は、①実用的な計算時間、②より複雑な現象解明が可能な予測精度、である。具体的に、①はメッシュ作成時間と計算時間の両方の短縮であるが、1Dコード+最適化ソフトの組合せでしか実際の設計では使えない場合が多い。②はエンジン特有のサイクル毎の変動予測、多相流+反応などの複雑な連成計算による高精度化が期待されている。

車両全体の熱管理を考えると、エンジン及び周辺機器の冷却性能、および周辺部材や床面の熱害検討のため CFDが不可欠となっている。また、排気系周辺の熱害予測は、特に排気マニホールド部や内部発熱を伴う触媒周辺の Heat Protector の設計に大きく貢献する。

エンジン冷却で計算上考慮しなくてはならない要素は、エンジンルーム内の熱流れ、冷却ファンの送風性能、冷却系の熱収支、そして、コンデンサーの放熱に絡み、空調用冷凍系の熱平衡である⁽⁴⁾。冷却性能の評価には冷却水温度が指標となる。冷却水温度を正確に予測するためには、熱交換器の特性を正確に把握するとともに、ファン性能の予測精度の確保が決め手となる。エンジン冷却性能の予測計算では、車両周りおよび冷却ファンやエンジンルーム内部の複雑な境界条件を厳密に模擬すると、膨大な格子数が必要となる。こ

のため、計算効率を考え、比較的粗い格子でも結果が得られる定常 RANS 計算を用いることが多い。ファンブレード周りに形成される渦構造を分析した例では、定常 RANS 計算の場合には、ファンの回転効果を模擬するために MRF (Multiple Reference Frame) 法が用いられるが必ずしも実用精度が得られない。条件に応じた計算方法の工夫が必要となる⁽⁵⁾。

2. 4 空調性能予測

車室内空調性能の代表的な項目として、暖房の定常、立ち上がり、最大性能などがあり、冷房性能についても同様である。その他、換気性能、デフロスター性能、デミスト性能なども欠くことができない要素である。実車に近い特性を得るため、自然対流の影響を考慮した温度場との連成計算が主流となっている。定常状態における空調快適性は、車室内の熱・流れの特性と密接なつながりがある。快適性指標は、皮膚温度との相関評価が一般的であるが、最近では、PMV や SET*のような快適性指標に換算して評価することもある。これらに加え、人体と環境間の伝熱形態の寄与が環境条件により変化するため人体の体温調節機構を模擬した人体熱平衡モデルも連立する必要がある⁽⁶⁾。最近では、車両開発時にこうした複数の系を連立して解析する検討も行われている⁽⁷⁾。

空調機器全体の性能予測に CFD 技術の設計活用が常識となっている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。複雑形状のため、計算安定化から定常 RANS、またブロワファンは MRF、熱交換器モデルは通風抵抗をポーラスメディア、熱量に等価伝熱係数を用いる場合が多い。温度計算精度向上のために、乱流プラントル数を補正する方法、応力方程式モデル及び熱流束モデル⁽¹⁰⁾や LES を用いる方法などが提案されている。また機器形状を効率的に改良するため、CFD 技術へのパラメトリック、ノンパラメトリックな最適化手法の適用が始まっている。こうした空調関連機器の場合、流体挙動が性能を決める要因となるが、一方で騒音の原因にもなるため、狭帯域騒音である流体異音の発生予測技術が研究⁽¹¹⁾されている。

3. ビジョン

上述した計算機環境と計算技術がさらに高度化すれば、複雑で大規模な問題も日常的に計算できるようになり、熱流体を対象とする限りにおいては、(a) より実際に近い状況を再現して自動車の設計をする、(b) 試作無しでより短期間に自動車の開発をする、といった将来のニーズにほとんど応えることができるようになると考えられる。

その先には、CFD以外(運動,熱,音,構造)との連成により、例えば車両運動との相互作用を考慮した実走行状態の空力のシミュレーション、外部のあらゆる気象状況を考慮した朝から晩までの空調シミュレーション、外部流れの影響まで考慮した車両要素の冷却系のシミュレーション、エンジン吸排気から大気環境までのシミュレーション、といったような現実世界の広範囲でのバーチャルな再現が期待される。その実現は、これまでCFD技術が自動車の設計開発に浸透してきた経緯を見れば、個々の革新的技術は基本技術確立から自動車開発応用までの期間は、投資対効果を考慮して、より短縮されるであろう。

4. ロードマップ

CFD技術部門委員会

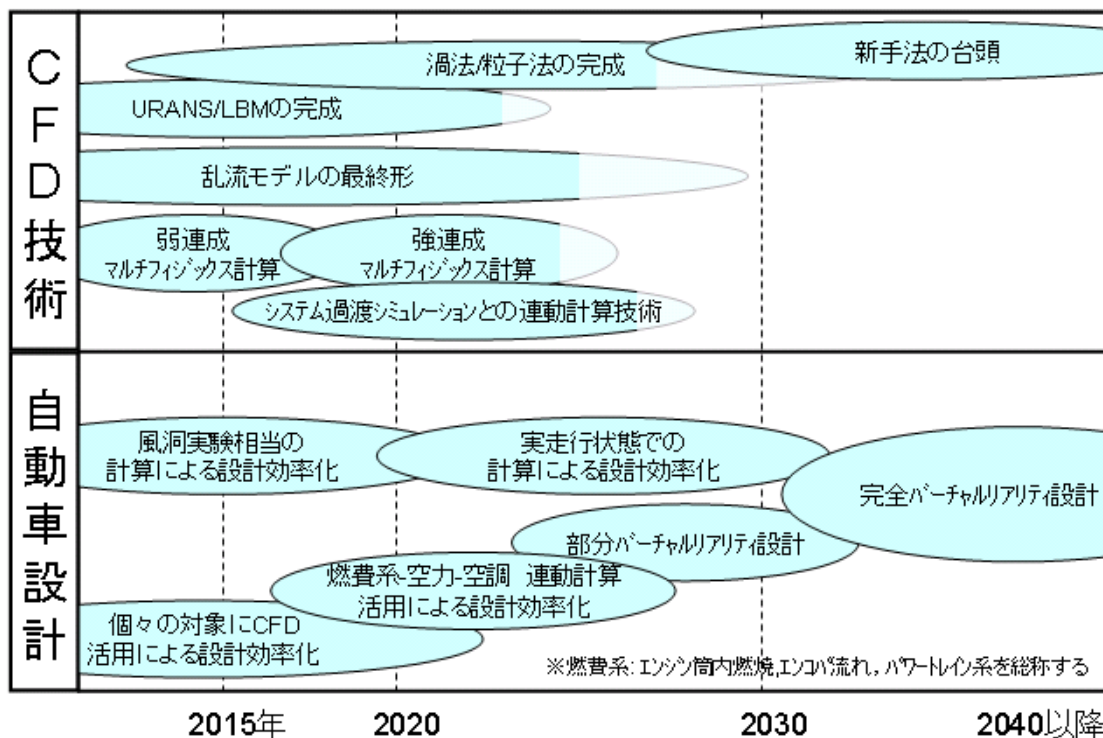


図1. CFD技術と活用の発展シナリオ

参考文献

- (1) 大島伸行:社会ニーズにこたえるマルチフィジックス流体シミュレーション, 日本機械学会論文集 B編, Vol. 76, No. 765, p. 729-732, (2010)
- (2) <http://www.openfoam.com/>
- (3) M. Tsubokura, et al.:Development of an unsteady aerodynamic simulator using large-eddy simulation based on high-performance computing technique, SAE paper 2009-01-0007 (2009)
- (4) I. Kohri, et. al.:Computational design of commercial vehicle for reconciling aerodynamics and engine cooling performance, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, No. F2000H248, (2000)
- (5) 小林裕児ほか:冷却ファンの実用的な性能予測法に関する研究, 自技会学術講演会前刷集 No. 81-10, p. 19-22, (2010)
- (6) 郡逸平,:温熱環境評価のための人体熱平衡計算理論, 自技会車室内環境フォーラム/2003, テキスト No. 20034208, p. 15-23, (2003)
- (7) Taeyong Han, et. al., :Assessment of various environmental thermal loads on passenger thermal comfort, SAE Paper 2010-01-1205, (2010)
- (8) 浅野秀夫ほか:仮想設計:カーエアコン基本性能シミュレータの開発, DENSO Technical Review vol. 4, No. 2, p86, (1999)
- (9) 王偉民ほか:カーエアコン温調特性シミュレーション, CALSONIC KANSEI TECHNICAL REVIEW vol. 5, p18, (2008)
- (10) 杉山均ほか:自動車用 HVAC ユニット内の乱流熱流動数値解析, 自技会学術講演会前刷集 No. 138-08, p17, (2008)
- (11) 小野寺淳ほか HVAC システム内流体騒音シミュレーション:, 自技会学術講演会前刷集 No. 64-10, p1, (2010)

【CFD 技術部門委員会】