

計算流体力学 —企業で設計に使われる実用ツール—

姫野 龍太郎

理化学研究所

himeno@postman.riken.go.jp

計算流体力学は合う合わないの議論を乗り越え、企業における設計の場で使われる実用ツールとして普及してきている。しかしながら、必ずしもどの分野にも広く使われているわけではなく、普及するためには解決しなければならない問題点も残っている。このような現状と打開のためのアプローチを紹介し、今後のさらなる発展の契機としたい。

計算流体力学の発展

流体の基礎方程式を数値計算で解くシミュレーションは計算流体力学 (Computational Fluid Dynamics: 以下CFD) と呼ばれ、航空宇宙の分野から設計に使われ始めた。その後、コンピュータの発達とともに自動車の設計にも応用されるようになってきた。この発展・普及には2つの大きな要因がある。1つはコンピュータの高速化・低価格化であり、もう1つは計算方法の進歩である。私は1979年から1996年末まで日産自動車(株)に在籍し、この間CFDの自動車への応用研究を担当、これらの変化を見てきた。ここでは、私が経験したことを中心に話をまとめてみたい。

まずは自動車でCFDが必要になった背景から紹介しよう。

自動車の空力開発の必要性

自動車も流体力学的な観点から考えると、航空機のように流線型で、細長い方がいい。しかし、現実には操作性や居住性、後方視界などのさまざまな制約から、車体の後部では曲率を大きくせざるを得ない。このため、流れは表面に沿って流れられなくなり、表面から離れてゆく(専門用語では剥離するという)。場合によっては車体の後部に大きな渦が発生し、大きな抵抗を生んだり、高速で車体が持ち上げられることも起こる。風の強い日に

高速道路を走ると、トンネルの出口や橋の上など、横からの強い風で風下側に車が振られ、はつとした経験はないだろうか。これらはいずれも周りの空気の流れによって起こる。流れによる抵抗は空気抵抗と呼ばれ、高速走行時の燃料消費率(燃費)を悪くするし、車を持ち上げたり、風下に車を振った力は揚力、横力などと呼ばれ、車の操縦安定性を悪化させる。これらの力(空気力)を小さくし、所定の性能を実現するのが車の空力開発である。

自動車の形は一方でファッション性が非常に重視され、デザインの初期段階では、形に対するいろいろな制約を離れた、自由な発想が尊重される。ところが、車に働く空気力はその形と深く結びついているために、いったん形が決まると、細部の修正だけでは所定の性能が実現できないことが多い。このため、デザインの初期段階から流体力学的な検討を行う必要がある。一方で、車のデザインにコンピュータ・グラフィクス(CG)が使われるようになり、デザイン検討に模型が使われなくなった。それまでデザイン検討用の模型を風洞に持ち込み、実験中心に行っていた空力開発は、コンピュータだけで流体力学的な検討の行えるCFDに移らざるを得ない状況に追い込まれてきた。

CFDにおけるコンピュータ性能

いかにCFDが必要でもコンピュータの性能が悪く、実用的な範囲内で計算が行えなければ、使われない。実際

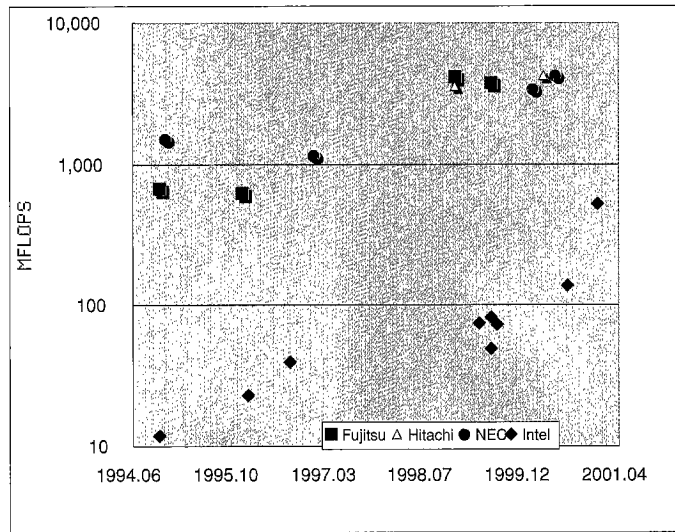


図-1 himenoBMTによる性能測定値の変遷

にはどの程度の計算時間がかかっているのでしょうか。それを紹介する前に、コンピュータの性能はどんな計算をやらせるかで変わることはよく知られている。そこでまず、自動車空力のCFDの特性を考えてみる。流体の計算では、空気の圧縮性を考えなければならないほど高速な流体であるか、そうでないかによって、支配方程式が異なり、プログラムの特性も大きく違う。一口にCFDといっても航空宇宙分野と自動車分野では相当な違いがある。この境目は速度が音速との比で定義されるマッハ数で、0.5あたりだろう。常温常圧なら秒速170m、時速で600km程度までは空気の圧縮性の影響は無視しても差し支えない。自動車が走っているときの風の流れは、せいぜいマッハ数では0.1から0.2程度であるから、空気の圧縮性の影響は無視できる。このときは空気は非圧縮性の流体として取り扱う。非圧縮性とは、計算している場の中で何か起こると、その影響が瞬時に全領域に伝わることを意味している。このため、計算する場全体を各瞬間ごとに解く必要がある。圧縮性流体では、影響が音速で伝わり、場所により時間的な遅れが生じる。この物理現象の違いによって計算する手法にも違いが出てくるわけである。

さて、非圧縮性のCFDでは各瞬間瞬間の場全体の影響を考慮するために、ポアソン方程式が最も単純化した特性を表す方程式となる。実際によく使われる非圧縮性の流体のコードにも、圧力の方程式としてポアソン方程式のソルバーが組み込まれている。私が作成した流体ソルバーで計測すると、全体の計算時間の50%が圧力のポアソン方程式の解法に費やされており、流速の計算部分は40%、境界条件などの処理に10%という比率になってい

る。この圧力ポアソン方程式部分はソースコードでみると数10行しかなく、いろいろなコンピュータで特性を調べるのに手軽に使える。私のWebサイト¹⁾ではそのFORTRANとCのソースコードを公開すると同時に、スーパーコンピュータからサーバ、ワークステーション、パソコンに至るまでの多彩なコンピュータの性能を一覧表として示している。このコードは今ではhimenobenchmark (以下、himenobMT) と呼ばれるようになった。特徴として

- 1) 非圧縮性流体コードの性能指標
- 2) 相対指標でなく実際の演算速度が測定できる
- 3) ベクトル化・並列化が可能 (MPI版もある)
- 4) ソースコードが短く、理解や改変が容易

というものである。世の中にはいろいろなベンチマークテストがあるが、多くのテストが相対的な比較しかできないのに対して、このベンチマークテストでは演算量と経過時間から実効速度を測定し、MFLOPS (1秒間に可能な浮動小数点演算量) で表示する。これにより、測定したコンピュータの理論性能に対して、実際にどの程度の速度が出ているかを知ることできる。

自動車分野でのCFDは1980年代終わりから90年代にかけて普及してきた。そのとき使われたコンピュータはCRAYをはじめとするスーパーコンピュータであった。しかし、その後急速にパソコンの性能が向上してきている。図-1はhimenobMTで測定した国産各社のスーパーコンピュータの1プロセッサの速度とインテル社のパソコンの速度を横軸に年代をとって表示したものである。1994年には100倍ほどもあったパソコンとスーパーコンピュー

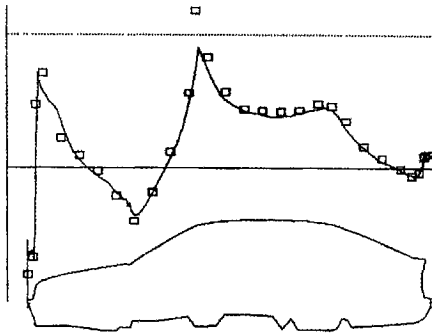


図-2 圧力分布の実験との比較
(日産の先代プリメーラ P10)

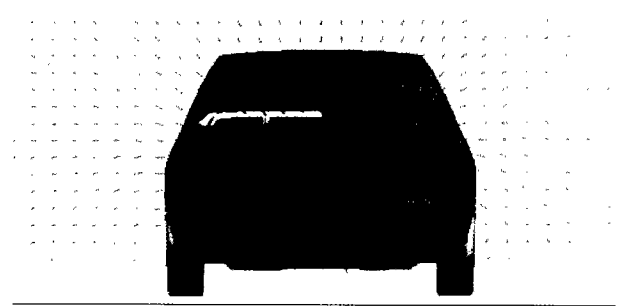


図-3 リアスポイラにより車体後部の渦が弱められる様子
(右:スポイラなし, 左:スポイラ付き, 車種:日産の先代プリメーラ P10)

タの性能差が、今では10倍もないことが分かる。最新の Pentium4の1.5GHzでは524MFLOPSの性能を出し、CRAY YMPの2プロセッサ、あるいは富士通のVPP500の1PE (Processor Element) 並みの性能に匹敵する。このPentium4でクラスタを組めば、安くスーパーコンピュータの性能が手に入ることとなり、今後のCFDの普及と発展に一段の拍車がかかるだろう。

自動車空力解析にみる精度の現状

自動車はさまざまな制約から、車体の後部で曲率が大きいので、流れは表面に沿って流れられなくなり、表面から離れてゆく。流れが表面に沿わず、離れて流れている領域では流れは細かく渦を巻き、乱れ、圧力がほとんど一定になる。自動車空力のCFDの課題は、突き詰めれば、この流れが表面から離れてゆく点(剥離点)と、その後のほぼ一定になる圧力を正確に予測することである。

乱れた流れの場合、非常に細かい渦が発生する。細かい渦は数値計算上、不安定性を増し、普通に計算してゆくと発散してしまう。この解決策として、本来細かい渦をすべて計算しなければならないのに、有限な計算点で行うために計算できない渦ができたのであるから、計算できない渦の効果を、計算できる大きさの渦から求めるモデルを作ればよいと考えられていた。このモデルは乱流モデルと呼ばれ、一般に広く使われている。しかし、単に計算上の不安定性を招いているだけだから、ローパスフィルタを使ってカットする方法も考えられる。私が計算を始めた当初はそんなことは無意味であり、実験値とも合うわけではないと多くの専門家に諭された。今でもそう考えている専門家は多い。しかし、そんな予想を覆

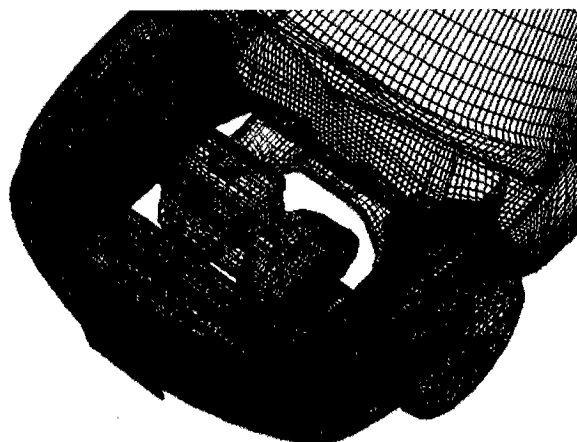
す出来事が起こるから世の中はおもしろい。図-2は車体中心線上の圧力分布を時速100km時の実験と計算で比較したものである²⁾。ほぼ完璧に一致している。この場合、空気抵抗係数でも誤差は1%しかない。計算点数は135万点程度、自由度数ではその4倍となる。計算では時間的に変化する流れの様子を求め、その時間変化をとってグラフを作成している。時間方向には4万ステップの計算を行い、後半の2万ステップを使って平均をとっている。計算時間はNECのSX4の2CPUで約5時間である。図-3にはリアスポイラを取り付けた場合の流れの変化の様子を表示した。車体後部にできる渦が、リアスポイラによって弱められているのが分かる。これにより空気抵抗を減少させているわけだ。

このようなCFDによるシミュレーションを、風洞実験の前に行い、実験での無駄な試行錯誤を省いている。また、車のデザインでは日本だけでなく、海外のデザインスタジオも使われる。海外の拠点で風洞が自由に使えない場合も、CFDによるシミュレーションが有効である。

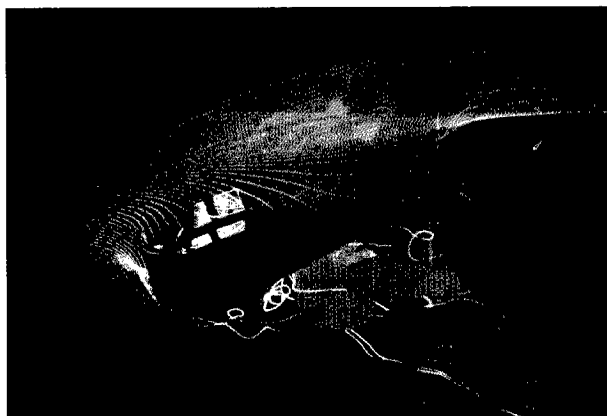
エンジンルーム内の流れのシミュレーション

車体の外側の流れは、デザインと密接に関係するために、脚光を浴びやすい。しかし、重要さでいえばエンジンルームの中の流れの方も引けをとらない。エンジンルーム内の流れがまずいと、オーバーヒートや部品の熱による不具合を招く恐れがある。このため、部品点数が多く、形状も複雑であり、シミュレーションのための手間も非常に大きい。熱心に取り組まれている。

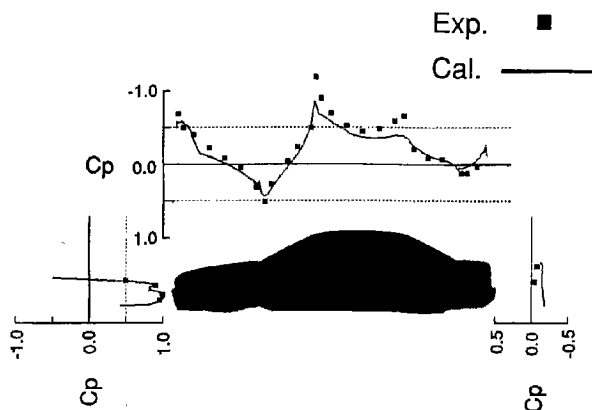
1990年代初頭に取り組みされたシミュレーションは図-4に示すように、主要な部品だけがモデル化されたもので



(1) 計算のためのメッシュ (総数約200万点)



(2) エンジンルームへ入る冷却風の様子



(3) 車体外表面の圧力分布を実験と比較

図-4 車の外部流とエンジンルームへ流入する冷却風、エンジンルーム内の流れを同時に計算した例 (車種: 日産・プレセア, 1992)

あった³⁾。それでも、車体外部の流れとエンジン冷却風を同時に解き、冷却風量などがそれなりの精度で計算できたことは、自動車の設計にとって大きな進歩であった。しかし、同時に問題点も明らかになった。それは計算のためのメッシュ生成に必要な手間が非常にかかるということである。外部流の計算では1週間程度でできたものが、外部と同時に内部も解こうとすると、4倍の約1カ月もかかってしまった。また、計算点数も空力シミュレーションの倍近い200万点という計算点数を必要とし、計算時間もそれ相応必要となった。

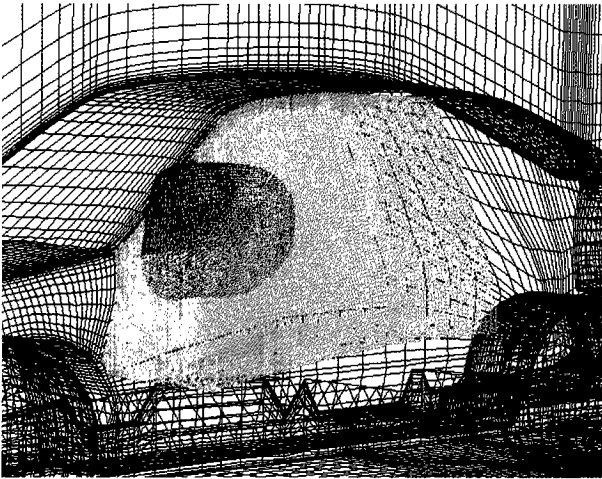
その後、メッシュ生成の期間を短縮するためのさまざまな試みがこの分野で行われている。1つはエンジンルーム内部では部品の曲面に沿うメッシュの生成を諦め、曲面でも階段状の物体として取り扱うような方法、もう1つは有限要素法などを用い、自動メッシュ生成を試みる方法である。当初有望と考えられていた自動メッシュ生成も、自動車のエンジンルームのように部品点数が多く、かつ密集し、ワイヤーやケーブルなどの細長いものがある場合は、なかなかうまくいかないようである。この問題は改めて後ほど取り上げる。

風音

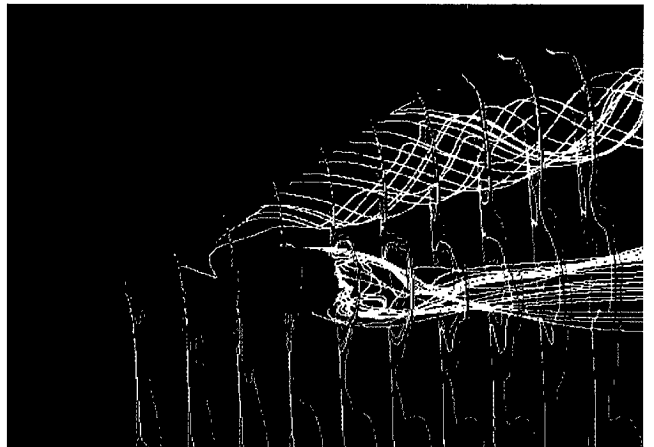
車室の快適性を高めるために、騒音の低減は重要な課題である。これまでの取り組みから走行音やエンジン音などの低騒音化が進み、相対的に騒音の中に占める風による音(風音)の割合が増えてきている。自動車の走行に伴う風音は、今では時速100km以上で走行しているときの主要な騒音源となっている。自動車の場合、風音は流れの中の渦の時間変化から発生し、その騒音レベルは車速の6~7乗に比例するので、車速を上げると急激に増大する。

発生した風音は車体表面や窓ガラスを通して車室内の乗員の耳に達する。風洞実験によって、どの部分から出た風音がどの程度関与しているかを調べてみると、特定の部分が大きな影響を及ぼしているわけではなく、いろいろなところから音が出ていることが分かった。しかし、1kHz近辺の音に限ると、ドアミラーの寄与が大きかった。そこでがドアミラー周りの流れのシミュレーションを行ったのが図-5である⁴⁾。

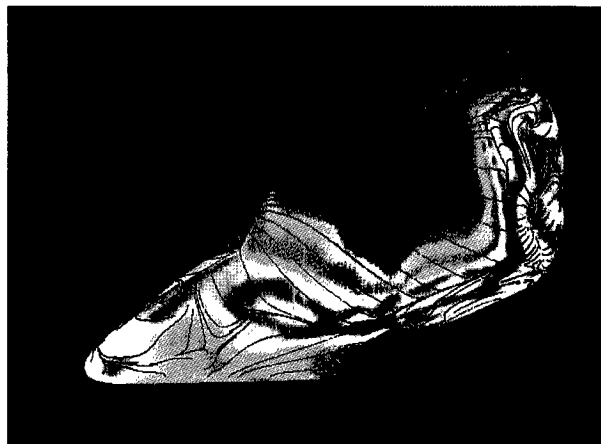
1kHzあたりの帯域の音を計算しようとする、1cm以下の渦の動きを捉えなければならず、ドアミラーを数mm以下のメッシュに分割することが必要である。しかし、その細かさで長さ5mほどもある車全体をメッシ



(1) 3種類のメッシュを重ねて使った計算用メッシュ
(総計算点数約300万点)



(2) 流線と渦の様子 (白い線は流線, 色つきの等高線は渦による運動量の損失を表す. ピンク: 損失少, 赤: ややあり, 緑: 中程度, 青: 大)



(3) 圧力変動の強さと流れの関係 (黒い線は表面の流線, ミラー部分の色は圧力変動の強さを表す. 青: 弱い, 緑: 中間, 赤: 強い, 白: 最大)

図-5 ドアミラーからの風音のシミュレーション (車種: 日産・先々代プリメーラP10, 1992)

ユに切ると、計算点数が膨大になって、とても計算できなくなってしまう。かといって、ドアミラーだけを取り出した計算では、周りの流れの様子がまったく異なる。そこで、空力計算用に作った車体全体の計算メッシュに、サイドウィンドウの強い渦を再現するためのメッシュを重ね、さらにその上に細かいドアミラーのメッシュを重ねて、解像度を上げている。これによって初めて実験と比較して十分な精度の結果を得られるようになった。図-5 (3) からドアミラー表面に沿ってきた流れが、端に近い表面の曲率が大きくなったところで、沿って流れることができなくなり、急に向きを変えていることがお分かりいただけるだろう。そこでは何本もの流線が集まり、

束になっている。ここで流れが剥離していることが分かる。同時に、その近辺は圧力の時間変動が大きいことが図から見てとれる。そこで表面の曲率を小さくし、流れがなるべく表面に沿って流れるように形を変えてやると、騒音レベルを下げる事ができた。

他の応用分野

製品の設計時に必要な流体シミュレーションで最も期待されているのは、機器の冷却問題ではないだろうか。いろいろな製品が軽量化・小型化・高密度化されてい



図-6 平板上に置かれた立方体の発熱体の周りの流れ

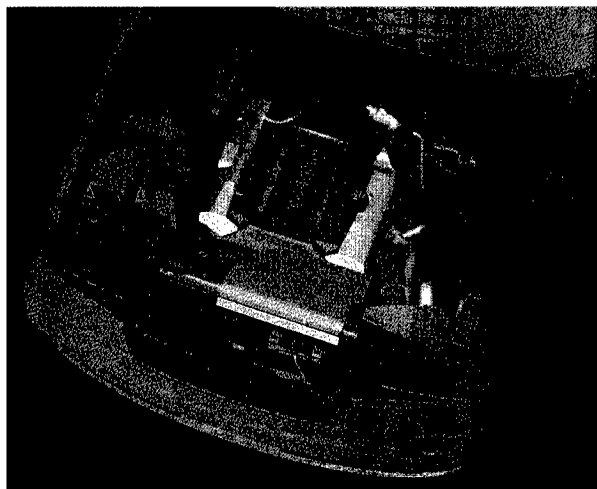


図-7 CADデータ

るため、熱設計の重要性が増してきている。いろいろな機器で発生した熱量は最終的には空気に放熱させている。一般に放熱性能を上げるには、

- (1) 放熱器の表面積を増やす
- (2) 熱伝達率を上げる
- (3) 冷却風量を増やす

が行われている。(3)は比較的容易な方法であるが、冷却ファンで風量を増やすために、風音が大きくなる。この場合も自動車の風音と同じで、風速の6~7乗で騒音が増えると覚悟しなければならない。自然対流だけで放熱できれば、たとえばアップル社のiMacやPower MAC G4 Cubeのように商品力の向上につながる。これらの製品の開発に、実際にシミュレーションが使われたかどうかは知らないが、実験的な試行錯誤では短期間の商品開発は望めない。熱流体のシミュレーションが必須だといえる。

図-6はボード上に発熱する立方体が置かれた場合の流れの様子をシミュレーションしたものである。図は、左下から右上に流れる冷却風を受けている状況を、ボリュームレンダリングによって可視化した一連の動画の1コマである。立方体の前方に、立方体を取り囲むようにU字形の渦ができ、立方体の後ろにできる時間的に変化の大きな渦と干渉して、複雑な流れを作っていることが分かる。このようにして放熱器の形状や冷却風のダクト、風向、風量などを検討することができる。筆者の経験では流路を設計し直すことで、放熱性能を維持しつつ、騒

音レベルを半分に落とすことができた。

この場合、熱のシミュレーションを含まなくても、放熱器単体の実験と流体のシミュレーションを組み合わせると、ある程度の熱性能を予想することもできる。特に冷却ファンを使う場合は、放熱器からの放熱が支配的になるので、実用的な精度を持つ。

実用的な発展を阻む問題点と解決策

ここで紹介してきたように、各種の応用分野ですでにCFDは十分な精度を持ち、計算時間も実用的な範囲に収まっている。設計の実務の面から考えると、問題点は以下の2つに凝縮される。

- (1) メッシュ生成に要する期間と手間が大きい
- (2) CFDの専門的知識を要する

メッシュ生成に要する期間が全体の解析に占める割合は空力の解析では約70%、エンジンルームや風音の解析では80から90%となっている。これは有限要素法で計算する場合でも同じ程度かかっている。結果的に計算時間や計算にかかるコストは小さな割合でしかない。

実際のメッシュ生成では、精度のよい結果を得るために、流れがどの部分でどのくらい変化するかを、あらかじめ予想し、変化の大きいところではメッシュを細かくし、変化が少ないところでは粗いメッシュを作らねばならない。でき上がったメッシュも一度で計算可能な品質

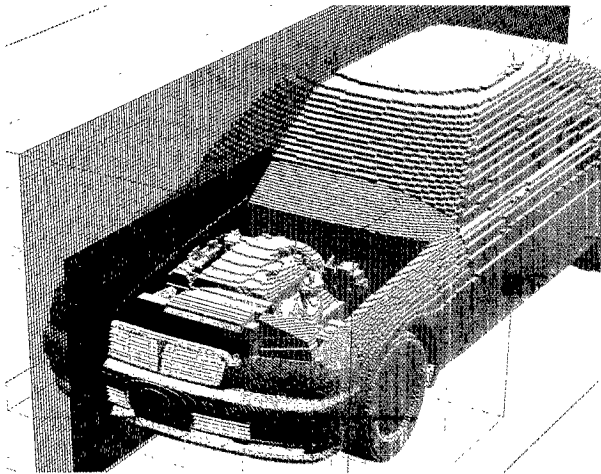


図-8 マルチレベル・ボクセル

を持っていることは希で、どこのメッシュが計算に不都合かを見定めたり、改良するための方法を考えたりするのに、CFDの十分な知識と経験が必要となる。

これらの解決策の1つとして、日産自動車が行っているマルチレベル・ボクセル法⁵⁾があるだろう。ボクセル法は直交等間隔のメッシュを使うもので、医療画像や構造解析に使われている。流体の解析にそのまま適用すると、流れの変化の激しいところに合わせてボクセルのサイズを決めることになり、自動車のような問題ではボクセル数が非常に多くなって、とても計算できない。そこで、段階的に細くなる解像度の異なるボクセルを組み合わせることで、この問題を解決したのが、このマルチレベル・ボクセル法である(図-8参照)。図-7のようなCADデータから1時間程度の作業で、図-8のような計算用ボクセルができる。図-9のエンジンルームの計算例以外に、室内空調ダクトなどの応用例が最近報告されている。

この計算方法では、部分領域の解像度を指定するだけなので、機械的な設定が可能である。後は自動的に計算可能なメッシュが必ずでき上がるので、CFDに関する専門知識が十分になくとも計算を進められる。

今後について

今後は、計算結果に合わせてメッシュの解像度が自動的に細分化されるなどの方法を取り入れ、完全に自動化

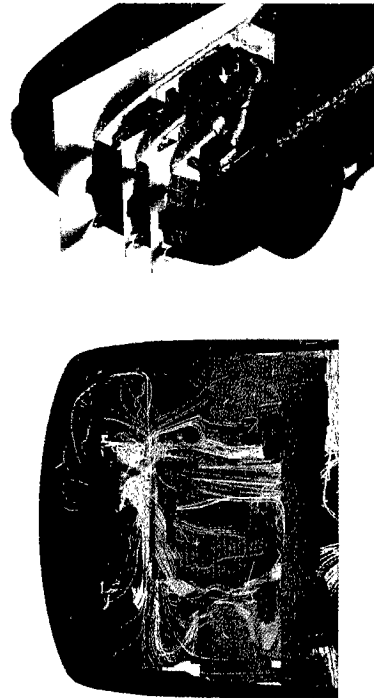


図-9 シミュレーション結果(流線と風圧の分布)

し、専門知識のない人でも十分な精度でシミュレーションが可能になることを目指すべきだろう。このとき必要なことは、CADデータから直接シミュレーションを行うことで、CADとシミュレーションが境目なく繋がらなければならない。理化学研究所ではこの目的のために、新たなCADシステムを作成するプログラムを、平成13年度から3年間の予定で開始した。この新たなCADはボリュームCADと名付けられ、従来、線や面しかデータを持たなかったCADに、シミュレーションで使うような体積データ(メッシュ)を初めから持たせようとする試みである。今後の発展が楽しみである。

参考文献

- 1) <http://w3cic.riken.go.jp>
- 2) 塩澤, 姫野, 藤谷, 田中: リア・スポイラを有する車体周りの流れの数値解析, 自動車技術会学術講演前集911, 911086, pp.347-350 (May 1991).
- 3) Ono, K., Himeno, R., Fujitani, K. and Uematsu, Y.: Simultaneous Computation of the External Flow around a Car Body and the Internal Flow Through its Engine Compartment, SAE, SAE Technical Paper Series, 920342 (1992).
- 4) Ono, K., Himeno, R. and Fukushima, T.: Prediction of Wind Noise Radiated from Passenger Cars and its Evaluation based on Auralization, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.81, pp.403-419 (1999).
- 5) Ono, K., Himeno, R., Tomita, N. and Fujitani, K.: An Application of Voxel Modeling Approach to Prediction of Engine Cooling Flow, Proceedings of the Society of Automotive Engineers of Japan, Inc. May 20-22, 1998 at Pacific Convention Plaza, Yokohama, Proceedings No.984, pp.165-168, #9832819.

(平成13年5月6日受付)

