CFDの自動化

The Automation of CFD

小野　謙二*
*東京大学 インテリジェント モデリング ラボラトリ

Kenji Ono
*University of Tokyo, Intelligent Modeling Laboratory

E-mail:keno@iml.u-tokyo.ac.jp

1　はじめに

CFDは，今や自動車の設計に必要不可欠な研究・設計ツールとなっている．最近では，切迫している環境・エネルギー問題に対応するため，低燃費低公害エンジンや燃料電池などの新技術の研究開発に活用されている．企業収益への影響の点から見ると，新技術を反映した製品をいち早く市場に投入し，ユーザーの購入機会を捉えることは企業戦略の上で重要である．また，近年の車両開発は多品種少量生産でも採算を確保することが望ましい．したがって，製品の製造サイクルを効率化および短縮し，開発コストを削減することが必須である．このような要請から，世界の自動車設計製造のトレンドとして製品開発プロセスはデジタル化が進み，フルシミュレーションによる設計へと移行しつつある[1]．

デジタルプロセスの一端を担う流体シミュレーションにおいて，CFD を実際の設計で活用するためにクリアしなければならない問題点は，格子生成であることが早くから指摘されている．この問題点は，計算機の演算速度が向上し計算時間が短縮されるに従い，相対的に顕在化してきている．本稿では，この計算格子作成の観点から CFD の自動化について考えてみたい．まず，格子生成法について概観し，問題点と現状における改善方法の取り組み，代替方法の可能性として直交格子法についてその特徴を述べる．

2　計算格子の作成における問題点

2.1　格子生成法

格子生成法に関しての詳細な記述に関しては，文献[2]などを参照されたい．ここでは簡単にその特徴をまとめよう．

構造格子

図 1 のように格子を表す線が規則的に並び，各軸方向の交点（格子点）が連続的である．このとき，メモリ空間には連続的に格子点の値が並ぶのでメモリアクセスが連続的になり，計算を実行する上で効率がよい．図 2 のような車体形状の格子は，BFC 格子を用いてマルチブロック変換により単一の構造格子が生成可能である．より複雑になると，図 3 のような重合格子法や接合格子法などのテクニックが必要になる．これらの方法は，計算空間内の異な

©日本数値流体力学会

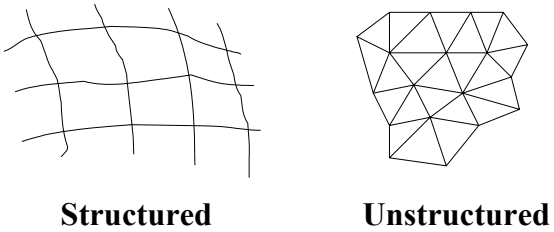


Fig. 1　Grid System.

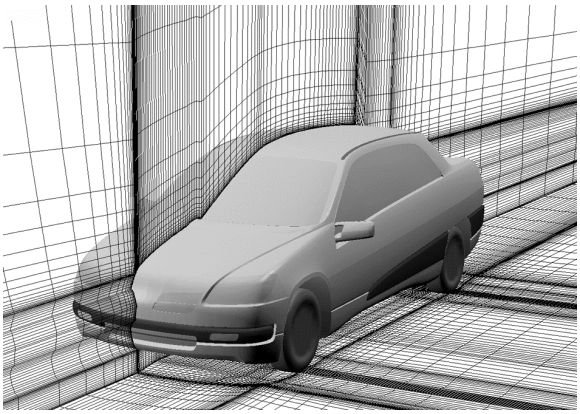


Fig. 2　Structured Grid Using Multi-Block Transformation.

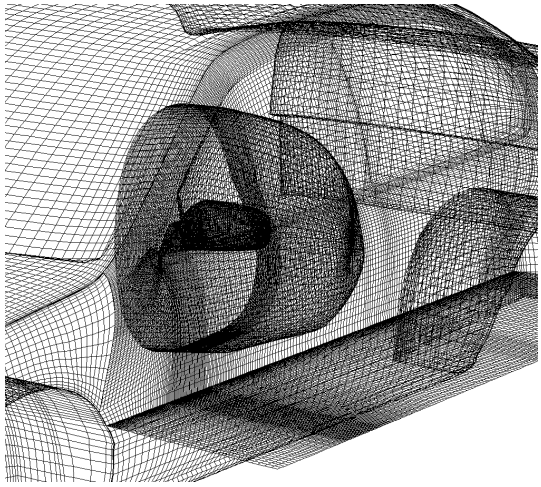
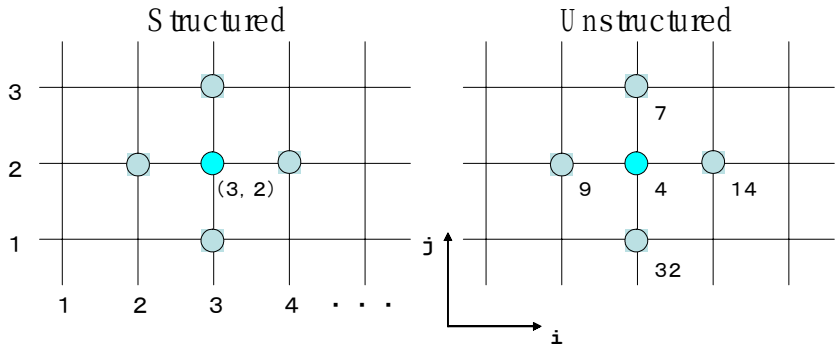


Fig. 3　Overset Grid System.




```
do j=1,jx
do i=1,ix
   u(i,j)=(u(i+1,j)+u(i-1,j)
           +u(i,j+1)+u(i,j-1))
           *0.25
end do
end do
```

```
do m=1,mx
   ir=list(4,1)
   il=list(4,2)
   it=list(4,3)
   ib=list(4,4)
   u(m)=(u(ir)+u(il)
        +u(it)+u(ib))*0.25
end do
```

Fig. 4 Implementation on Code for each Grid System.

©日本数値流体力学会

る領域毎に最適な計算格子を作成し，それらを重ね合わせる方法である．計算する時にお互いの境界部分で情報のやりとりをしながら計算する必要があり，多くの場合内挿計算を行う．BFC構造格子の優れた点は物体に沿った格子を作成できるため，境界層を精度よく解像することができる点である．

非構造格子

非構造格子は図1のように格子点の配置に規則性がなく，各格子点は任意の順序で順番付けされ，どの点が参照点であるかという情報をテーブルとして記憶しておく必要がある．このためメモリアクセスは不連続になり，高速演算に有効なパイプラインやキャッシュ等のCPUハードウェアを有効に利用できない場合もある．図4に二次元のラプラス方程式を解く場合のソースリストを，構造格子と非構造格子の場合とで比較して示しておく．非構造格子は格子情報の管理に通常ポインタを用いる．このため，プログラム上容易に格子点の追加，移動，削除等ができ，解適合格子を導入しやすい．この解適合格子は計算空間の中で物理量が大きく変化する部分に自動で計算格子密度を高める方法で，衝撃波の捕獲などに用いられる．境界層の解像に関しては，物体付近にプリズム状の格子を発生させ，物体から離れる方向に積層する手法が提案されている[3]．非構造格子に期待する点は格子生成の自動化で，現在でも一つの研究テーマとなっている．

設計側からみたCFDへの要求事項は，解析期間，予測精度，必要工数，導入・運用コストなどがある．車のように複雑な形状をした物体周りの流れを解析する場合は，格子生成の労力と時間が特に問題となる．コストの点からも人的資源の配分を最小にでき，短時間にセットアップ可能なシミュレーションシステムが望まれる．商用の流体解析システムでは有限体積法と非構造多面体格子を用いるものが主流であり，境界層解像のためのプリズム格子や重合格子なども利用できる．しかし実際には，非常に複雑な形状に対し自動で格子が生成できず，格子の手修正を行うことが多い．また，格子生成自体にもかなりの時間が必要な点が解決すべき問題である．

2.2　格子生成の手順と問題点

格子生成を作成するにあたり，まず車体の形状データが必要となる．自動車会社では，従来自前のCADシステムを持っていたが，現在ではCATIA, Pro/E, I-DEAS, UNIGRAPHICSといった標準的な三次元CADシステムに置き換わりつつある．CFDの格子生成ソフトの多くは，これらのCADシステムのネイティブフォーマットの幾何データを直接扱えるものも少なくない．そうでない場合は，IGES, STLなどの標準的な中間ファイルを介して，幾何データのやりとりを行う.CADシステムのネイティブフォーマットデータを直接読み込むことの利点は，データ変換の手間と精度低下の防止である．米国においては，大学と企業が連携して，上記のCADシステムのネイティブデータの互換性を検討し，今後の標準フォーマットとする活動が進行中であることが，8th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulationsの会議（2002, June, Hawaii）で報告された．この成果はエンドユーザーに恩恵をもたらすであろう．

形状データを格子生成ソフトに取り込んだ後は，前処理として，流体計算に不要なデータ

©日本数値流体力学会

（例えばネジやワイヤー類などのデータ）の除去が必要である．この処理には作業者の判断が必要なため，現状では自動化できず，労力と時間がかかることが問題点である．他にも，点の同一性のチェック，重複データの削除，法線ベクトルの一致などの処理が必要な場合もある．

次に物体表面の格子を作成する（面生成，面張り）作業であるが，この作業が最も自動化が難しい．この表面格子の出来具合は，後の空間格子の品質に大きく影響する．このため，品質の高い面の作成を支援するツールが提供され，その機能も年々自動化されてきている．最後に空間格子の生成である．物体近傍には境界層を解像するためのプリズム型の格子を張るオプションがあり，空間側はアドバンシングフロント法やデローニー法などで格子を作る．

市販の格子生成ソフトの能力は年々高くなってきているが，完全な自動化には未だ及ばないのが現状と思われる．形状を厳密に再現するため，格子生成ソフトは完全なデータを要求する．つまり，形状を表す面データは完全な閉曲面であり，隙間などがないこと(Water-tight)が要求されている．このような完全な幾何データを準備することが，逆に，解析モデル作成の足枷になっていると言えるだろう．

2.3　代替案

これに対し，不完全な形状データでも許容する格子生成システムがあれば，格子生成時のエラーがなくなり自動化が可能なため，格子生成時間は非常に短くなると期待できる．この視点に立った方法が直交格子を用いた解析方法である．直交格子にはいくつかの近似レベルがあるが[1]，最も簡単な形状のブロック近似では前述の格子生成の不安定性を完全に排除できる．近似レベル0では物体を0流体1とするフラグで表し，物体形状をステップ状に近似する（図5）．各格子点あるいは検査体積が物体に含まれるか含まれないかの情報のみを形状の情報として持つ．このためには，物体を表す表面データが格子を横切るかどうかを判断すれば良く，単純なアルゴリズムで物体の形状を直交格子上に写像できる．したがって，自動処理が可能なため，誰でも同じ品質の格子を失敗無く短時間で作成できる大きな利点がある．この点は設計解析の運用面からは高く評価できる．実際の工学的な問題では大まかな流れの構造が判れば十分で，階段状の形状近似でも実用上は問題ない場合も少なくない．

形状の再現性の点から見ると，複雑な形状を近似して表すことはできても形状を厳密に再現することはできない．この点の改善方法としては，図6のような局所細分化[4]や部分的に欠けたカットセルなどを使う必要があるが，プログラムへの負担は大きい．一部の商用ソフトでは，壁面近傍のみ多面体格子を用いて計算格子を元の幾何形状に適合させる手法が用いられているが，完全な自動化には至っておらず手作業による修正を必要としている．自動化という観点から見ると，前処理で安定に計算できる幾何情報を用いてソルバー側で境界の処理を工夫する方法が有望と思われる．具体的には，壁面近傍で部分的にカットされる格子に対して，開口率や体積率または壁面までの距離を幾何形状データから計算する．これらの値の計算は自動化できるため，前処理段階では修正は不要である．ソルバー側では，これらの幾何情報を用いて流体の計算を行う．計算時に問題となるのはカットされたセル部分で生じる数値積分の不安定性である．これに対しては，近隣のセルと融合させて安定化する方法や不安定性を排除するスキームが考案されている[5]．

©日本数値流体力学会

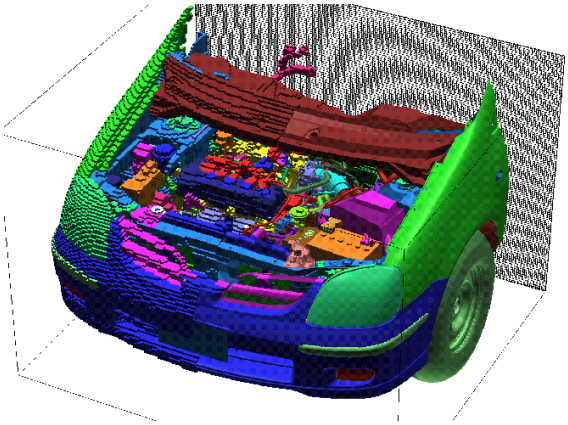


Fig. 5　Cartesian Mesh in Engine Bay.

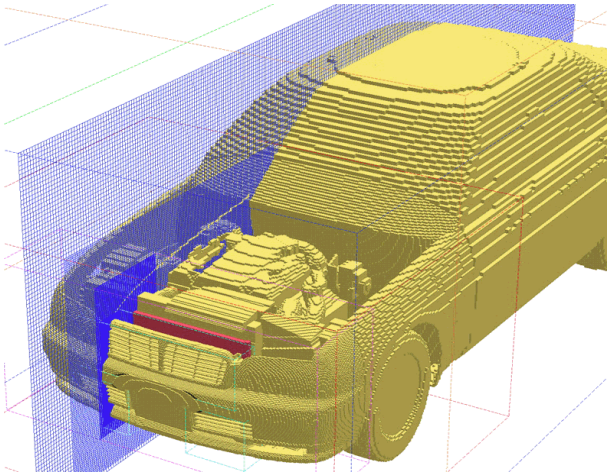


Fig. 6　Multi-Level Mesh around Grille.

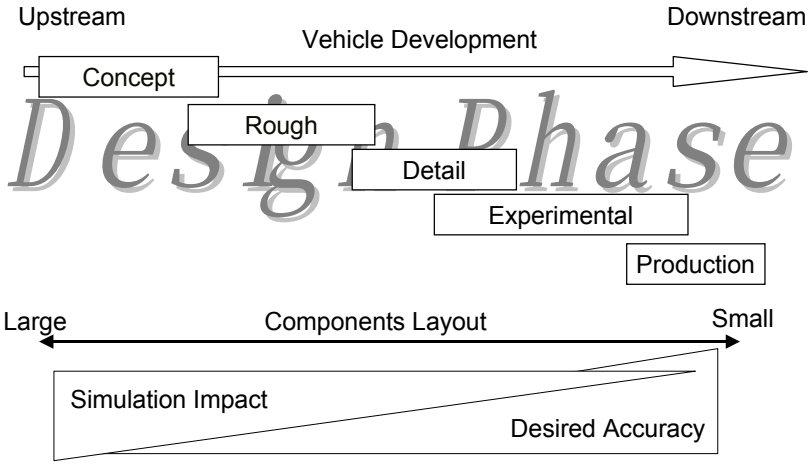


Fig. 7　Design Process of Vehicle Development.

境界層の解像については，非等方分割[6]などが考案されているが，現在のところ有効な方法は未だ提案されていないように見受けられる．

3　直交格子の活用

直交格子の大きな利点は，格子生成時間が圧倒的に短い点である．この特性を活かすと，車の設計プロセスの上流での活用が期待できる．

車の設計では，一般的に図7のようなプロセスを踏襲する．開発の上流で，まず製品コンセプトを決定し大まかな性能設計を行う．ここでは内外装のデザインが複数提案され，絞り込まれていく．下流では，性能を満たすための具体的な機構レイアウトやそれに伴う修正や案の絞り込みを経て，試作車が作成される．従来の設計プロセスでは実際に試作車を幾台か作成し，多くの実験評価を経て生産車の最終設計にフィードバックしていた．現在は実験をシミュレーションに置き換え，コストの削減と期間の短縮を図っている．

©日本数値流体力学会

車両開発の下流における適用は，試作車を用いた実験の代替と考えられる．これは実験のコスト削減や期間短縮などが主目的である．この時期に供給される形状データは詳細でシミュレーションの予測精度は実験と同程度であることが求められる．

一方，設計上流は多くの試行を重ねる時期であるため，データは流動的で不備なものが多くなる傾向である．こうした状況でのシミュレーションは，直交格子のもつ特性と一致する．つまり，不備な幾何データに対するロバスト性と短時間でのアウトプットによる意志決定支援である．開発プロセスの上流でCFDを活用し，性能とデザインを両立させる設計を行うことにより，設計プロセス下流では無駄が減少し効率的な設計が行える．また，製品の品質向上にも効果がある．このように設計プロセス上流でのCFD適用は，その効果が下流行程に与える影響は非常に大きく，シミュレーションの活用効果を最大限引き出せる．

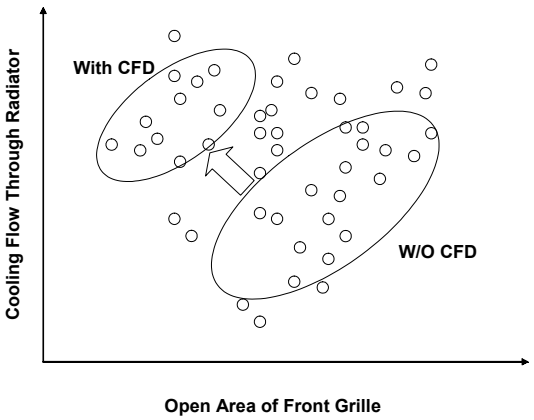


Fig. 8　Optimization of Open Area of Front Grille.

一つの例を図8に示す．これは，車のフロントグリルの形状を変え，様々な開口面積にした場合に冷却性の重要な指標であるラジエータ通過風速がどのように変化したかを示すグラフである．CFDを適用することによって，開口面積が小さく性能の良いグリル形状となっている．つまり，性能を確保した上でデザインの自由度を向上させている．

4　おわりに

本稿では，CFDの自動化について計算格子作成の観点から私見を申し上げた．現在日本の自動車会社のほとんどに導入されている市販のCFDツールは，その性能や機能，ユーザーインターフェースなどが年を追うごとに改善されており，使える設計ツールになってきていると思われる．しかしながら，使いこなすには多くのテクニックを必要とするのが現状である．現在のCFDは，適切な解析モデルと計算格子それに計算方法の組み合わせで信頼できる結果が得られるが，そのノウハウは技術者の経験知として存在している．この経験知を誰にでも判るような形式知へと変換することがCFDの自動化の上で最も重要と思われる．この点を考慮すると，直交格子による解法は最も可能性のある手法の一つと考えている．今後は，簡単に使えるツールとしてパッケージ化できる方法を考え，得られた結果を基に何かを考えるという部分にこそ，技術者の知識を使えるようにしていきたい．

参考文献

[1] 小野謙二，”設計における直交格子法の利用”，日本流体力学会誌 ながれ 21，(2002)，16-25.

[2] 数値流体力学編集委員会，”格子形成法とコンピュータグラフィックス”，東大出版会，(1995).

©日本数値流体力学会

[3] Nakahashi, K., et al., Applications of Unstructured Hybrid Grid Method to High-Reynolds Number Viscous Flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, John Wiley & Sons, Num 31,(1999)97-111.
[4] ONO, K., et.al., “Prediction of Cooling Airflow Rate through the Front Grille Using Flow Analysis with a Multi-Level Mesh System,” Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress (2000)H201.
[5] 市川治，藤井孝藏，直交格子を使用した３次元の任意形状物体まわりの流体シミュレーション，日本機械学会論文集(B編)，68巻669号(2002)13-20.
[6] Lahur, P.R. and Nakamura, Y., “A Cartesian Grid Generation Method Considering a Complicated Cell Geometry at the Body Surface,” Trans. Jap. Soc. Aeronautical and Space Sciences, Vol.43, No.139(2000)8-15.

©日本数値流体力学会