

フォーミュラカー周りの流れ解析のための格子生成

Grid Generation for Flow Simulation of Formula Car

景 井 高 男*・谷 口 伸 行*

Takao KAGEI and Nobuyuki TANIGUCHI

1. は じ め に

流れ場解析を工学的問題に適用する際に格子生成は重要なプロセスであり、解析格子の適合性がときには解の精度を左右する最大の要因ともなりうる。格子生成手法に関しては各種の補間法や適合手法が提案されているが、具体的な解析にあたってはどの手法を選択しどのように適用するかという戦略的課題が重要と思われる。複雑形状の流れ場に対する解析格子は、①正規座標系による階段格子 ②単一の一般座標系による境界適合格子 ③複数の座標系による境界適合格子 ④非構造型格子 に大別される。このうち、②のタイプの格子生成法については従来より多くの研究がなされており、流れ解析の計算手法も完成されつつある。現在のところ最も広く利用されている手法といえる。しかし、実際の作業にあたっては作成者の経験にたよるところが多く、その際の課題についてはいわゆる know-how であるとして議論されにくかった。本報では、格子生成の具体的な作業プロセスを例示して課題を明らかにする。解析対象には、オープンホイールやウィングをもつフォーミュラカー周りの流れを取り上げる。流れ場解析法としては $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた非圧縮性流れの定常解析を想定し、一般座標系による FVM の適用を考えて格子生成を行った。またグラフィックスを用いた格子適合性の表示についても述べる。

2. 格子生成の作業プロセス

解析領域の形状は、周囲や内部の物体形状と境界条件によって定められる。工学的問題においては、物体形状の情報は製作図や CAD データといった設計・製作に適した方法で与えられており、これを解析に適した情報に変換することが格子生成の具体的な作業である。図 1 はフォーミュラカー周りの格子生成において今回行った作業のフローチャートである。以下では各 step における

キーポイントと課題について述べる。

〔データの前処理：Step 1〕3次元一般座標系による格子生成では、流れ場や形状の特徴に従った断面を考えることにより格子生成に適した形状データを得ることができる。物体周りの流れや管路流れの解析では、主流方向に沿った座標をパラメータとした幾つかの断面形状という形式のデータが多くの場合有用である。図 2 にフォーミュラカー形状に対する表示例を示す。このような断面を想定しにくい領域に対しては、単一座標系格子は必ずしも適当ではない。

〔領域のブロック分割：Step 2, 4〕単一座標系で格子を生成する場合には、解析領域が仮想的な立方体（2次元では正方形）空間に変換される。物体周りの格子生成では、その対応のしかたにより、C型、O型、H型、Box型に分類される(図3)。C型、O型格子は、なめらかな表面をもった物体の表現に適するが3次元形状に適用した場合には領域内に重合による特異線を生じる点に問題がある。H型、Box型では物体表面に角が必要で、なめらかな物体では仮想的な角点の特異点となる。Box型格子は、立方体領域からの変形が比較的小さいため格子形状を直感的に把握しやすく、複雑な形状を格子分割す

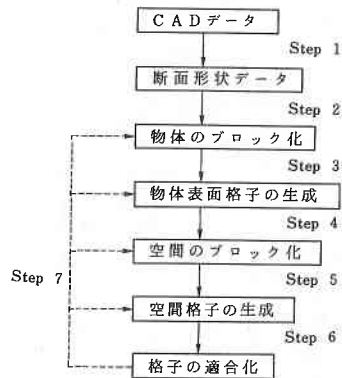


図 1 格子生成作業のフローチャート

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

研究速報

るのに適している。また、領域をブロックに分けて扱いやすいことも利点となる。

図4はBox型格子を適用した際の物体のブロック分割例を示している。ここでは、車体右半分が10このブロックに分割され、それぞれが仮想空間で小6面体に変換される。6面体の稜線の位置、形状は解析結果に大きな影響を与えるため、①実際の物体の稜線と一致、②表面流線と一致、③はく離域内等の流速の遅い領域に特異点をおく3条件の1つをできる限り満たすことが必要となる。上の条件が充分満足されない場合は、解析において格子の影響を常に考慮すべきである。

物体のブロック分割に対応して空間領域もブロック化することで格子生成が可能となる。各ブロックは仮想領域の小6面体に対応し、ブロック単位で格子生成を行う。格子の直交性を必要とする場合は、ブロック境界面にも直交性が課される。ブロック化の手順は領域形状により異なるため一般的手法を示すことは難しく、格子生成の自動化における大きな障害といえる。適切な格子を得るためには、多数ブロックと低次補間、少数ブロックと高次補間の2つの戦略が考えられ、グラフィックスの対話的使用を前提とすれば、汎用性では前者に利点がある。

〔格子の補間：Step 3, 5〕 Step 3では物体表面格子を、Step 5では3次元空間格子をブロック化されたパーツごとに生成する。単一座標系格子では、境界の接合について境界点の一致が必要である。さらに解の精度向上のためには、格子線傾きの連続性が求められることが多い。格子の生成方法として偏微分方程式法、代数法などが挙げられる。前者は偏微分方程式を数値的に解くことにより座標点格子を求めるもので、解析領域の全境界上で格子点の座標値（あるいは格子線の勾配）が与えられる場合には楕円型偏微分方程式が、また境界の一部で格子条件が設定される場合（たとえば航空機翼まわりの外部流れなど）には双曲型あるいは放物型偏微分方程式が

使用されている。この方法はほかの方法と比べて2次元および3次元幾何形状に対する適合性に富み、格子直交性がよい。格子間隔や形状の制御もパラメータ制御により可能である。特にThompsonによって楕円型偏微分方程式の一種であるポアソン方程式を用いた方法が提唱された後、急速に実用化が進められている。後者は代数的な内挿関数を用いて空間を離散化していくもので、格子の適合性に関して先の方程式法ほど普遍性がないものの計算時間の負担が小さいという利点がある。また格子形状の局所的な制御が容易であるため、複雑な形状に対しても、いくつかの代数法を組み合わせるにより、比較的簡単に格子を作ることができる。内挿関数の例としては、双1次のTransfinite法が簡便である。また、代数的手法は境界直交化やスムージングなどの格子適合手法と併用される。本稿で扱ったモデルではタイヤ部分に偏微分方程式法を、その他の部分に代数法を用いた、3次元格子の表示例を図5に示す。

〔格子の適合性：Step 6, 7〕 実際の格子生成作業においては、格子の適合性を高めるためのフィードバックに最も労力を必要とする。格子の適合性を計算結果より判定し、格子を修正する解適合格子法も研究されつつある。しかし、幾何学的な条件を先験的に課すだけでも格子の適合性の向上は期待できる。その場合、格子の適合性を調べるStep 6にはグラフィックスなどによる視覚によるチェックが有効である。格子形状をグラフィックスで表示し、マウスなどによりインタラクティブに修正できればフィードバック作業を効率的に行うことができる。格子の適合性のチェックに関しては次節で詳しく述べる。

3. 格子の適性のチェック

境界形状などが複雑な場合は、格子形状を画面表示し、確認しながら対話的に格子生成を行うことにより、流体解析の前作業が大幅に効率化できる。しかし、格子数が

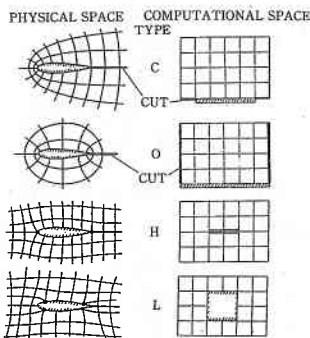


図3 格子の種類

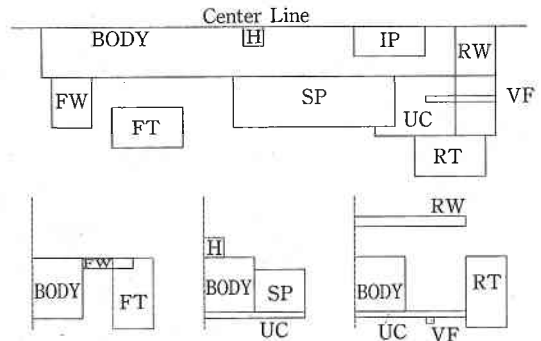


図4 ブロック分割例

大きく、3次元になると格子の適合性を確認することは必ずしも容易ではなく、そのような情報を取り出すためのチェックプログラムは非常に有効である。格子に課せられる幾何学的条件は多数考えられるため、格子形状に応じてライブラリーより選択できるようにし、表示方法についても任意面を選択する等の工夫により作業の効率化を図れる。本報ではフォーミュラーカーのタイヤ付近の格子生成をモデルに、格子の交差、集中、直交性、間隔や傾きの均一性、最小格子幅などをチェックするルーチンの開発を試み、その結果をグラフィックコンピュータ上に表示させることによって、格子生成の効率化を図った。

一般座標系格子生成において今回取り上げたチェックポイントは、

- ① 格子の交差 ② 格子の集中
- ③ 格子の直交性 ④ 格子間隔の均一性
- ⑤ 格子傾きの均一性 ⑥ 最小格子幅

である。

チェックポイント①、③、⑤に関しては5つのプログラムを作成した。基本的に2つのベクトルから内積をとり角度を検出する方法をとっており、一定の角度以上のときその点や面をマークする。ベクトルのとり方を図6に示す。なお、面のベクトル積は図7のようにベクトルをとって、それらを平均したベクトル積を採用している。たとえば、面 w については次式で定義する。

$$A_w = \frac{1}{2} \sum A_x \quad (x = 1, 2, 3, 4)$$

A : 面のベクトル積

下添字の w は面 w を、 x は4つの3角形を示す。

チェック5はジグザクな格子を検出するためのもので、 $n, n+1, n+2, n+3$ の格子点から $n, n+3$, $n+1, n+2$ のベクトルを作り、それらの内積をとって角度を求めた。

チェックポイント②、④、⑥に関しては以下の2つのプログラムを作成した。

CHECK 6 : セルの同一座標方向の4辺を平均して格子幅を求めるもの

CHECK 7 : セルのボリュームを求めるもの

ハードウェアとしてクボタコンピュータのTITAN 1500を、また、グラフィック・ツールとしてDoréを使用した。

13500点の3次元格子に対する出力例を図8に、計算速度の比較表を図9に示す。図8では不適合な格子点がマークされている。チェック1はオブジェクトの表面の格子の滑らかさをチェックするとき、チェック2は3次元格子をチェックするとき特に意味を持つ。チェック3、

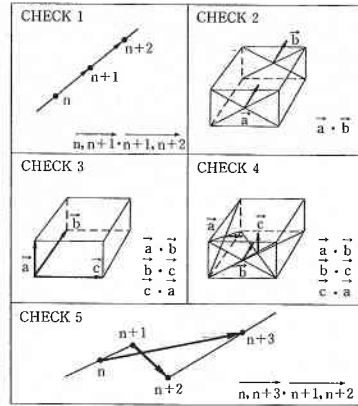


図 6 ベクトルの取り方

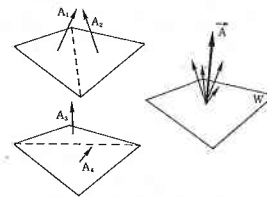


図 7 面のベクトルの積

	CHECK 1	CHECK 2	CHKCK 3	CHECK 4
LEVEL (deg)	88	60	20	15
INADAPTABLE POINT	123	119	361	355
CPUTIME (sec)	2.09	1.91	1.80	2.99

図 9 計算時間

4の意味はいずれも格子の直交性を示すが、角度などのパラメータの基準値が異なっているため、設定した角度によってチェックされるポイントの数が変わってくる。さらに、オブジェクト表面の直交性をチェックするためには面と線の直交性のチェックが必要であり、オブジェクト表面を指定して使えるようにすべきであろう。チェック5は物体表面のジグザクな格子の検出に有効であることが確認された。チェック6、7は数値のみの出力にした。今回はチェックされた格子点の表示例を示したが、チェックしたベクトルなど、より多くの情報を引き出せる効果的な表示方法については検討中である。

4. お わ り に

従来議論されにくかった格子生成プロセスにおける課題について、具体的な例題をもとに概観した。また、格子適合性検査のためのグラフィックツールを試作し格子生成に適用した。本報に取り上げたフォーミュラーカー



図 2 断面データ

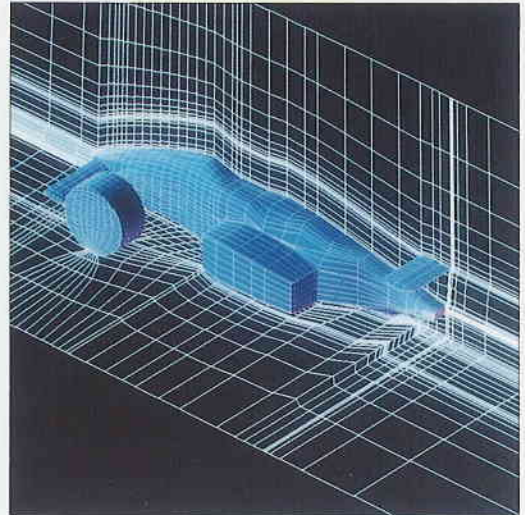


図 5 三次元格子の表示例

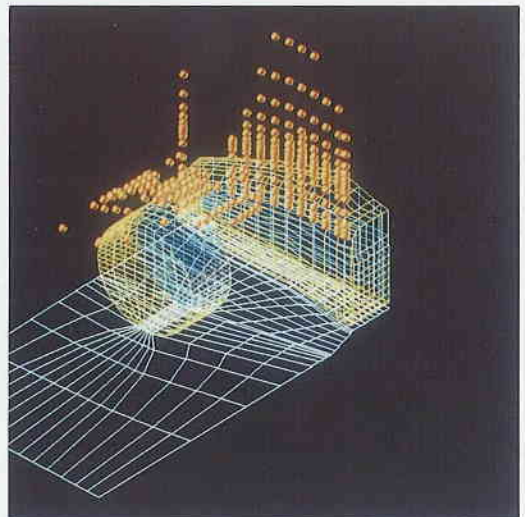
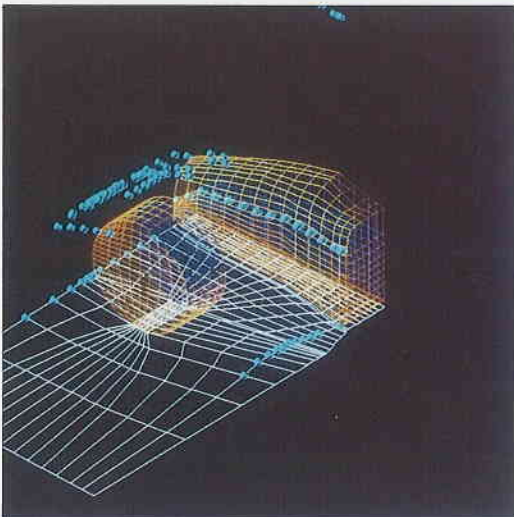


図 8 不適合点の表示例

モデルの形状データに関して、(株)セルモの佐々木氏、三菱総合研究所の丸山、吉田氏に御協力いただいた。

(1990年10月23日受理)

参 考 文 献

- 1) 谷口伸行：「自動車車体周りの流れ場数値解析に関する研究」，東京大学工学部学位論文，1989年
- 2) 中橋和博：「計算流体力学における格子生成」，情報処

理vol. 30, no. 7

- 3) 児玉：「格子生成における直接的数値制御法」，第3回航空気計算空力学シンポジウム，1985年
- 4) J.F. Thompson, Z.U.A. Warsi and C.W. Mastin：「Numerical Grid Generation Foundations and Application」，North-Holland, 1985年
- 5) 三木一克：「Boundary-Fit曲線座標変換法による流体・電磁解析」，情報処理vol. 30, no. 7, 1989年