

並列 CFD 計算プラットフォーム UPACS の重合格子対応化

山崎裕之*、高木亮治*、岩宮敏幸*

Overset Grid Support of Parallel CFD Platform UPACS

by

Hiroyuki YAMAZAKI, Ryoji TAKAKI, Toshiyuki IWAMIYA

ABSTRACT

An overset grid support code is developed based on UPACS (Unified Platform for Aerospace Computational Simulation). UPACS is the parallel CFD platform for multi-block grids which NAL (National Aerospace Laboratory) is developing for the purpose of the efficient CFD programming and the aggregation of the CFD technology of NAL. In this research overset grids are classified as a major grid which is covering the entire area of the given problem, and minor grids which are supposed to be put around objects in the major grid. The communication of the values due to the overset grids are performed between the major and minor grids. The current program does not support moving or transforming grids. The index creation program developed in the research creates the information about the interpolations between overset grids. Additional routines, which read the information of overset grid communication and perform the communication, are added to the solver. A simple CFD problem is set up and the influence of the spatial relations between overset grids on the computational results is evaluated.

1. はじめに

CFD 技術の発展に伴い、CFD の航空宇宙分野での応用では、複雑な形状を対象とするようになってきた。複雑な形状に対しては、単一格子を用いることが困難なため、マルチブロックや重合格子が用いられている。特に重合格子は、格子が生成し易く、詳しく調べたい部分の格子解像度を上げたり、形状を変更したりすることが容易であるため、今後の研究開発には不可欠であると考えられる。

本研究では、ロケットエンジン付宇宙機や風洞内模型周り流れのシミュレーション等実績を持つ手法を利用して、マルチブロックを対象とした並列 CFD 計算プラットフォーム UPACS (Unified Platform for Aerospace Computational Simulation) をベースに、重合格子に対応させ汎用化した。UPACS は、CFD 分野のシミュレーションプログラムの構造の共通性に着目し、CFD コード開発の効率化、CFD 計算技術の集約等を目的として航技研が開発を進めているプラットフォームである。ベースとした UPACS のバージョンは UPACS-T 1.0 である。これは支配方程式の離散化に有限体積法を用い、cell-center 型計算格子を使う。慣性項の計算に Roe スキームと AUSMDV スキームを用い、数値流速の評価に MUSCL 法を用いている。本報告では、重合格子に対応させる手法の説明を行うとともに、格子の重合格子の仕方により計算結果にどの程度の影響が出るかを評価する。

2. 重合格子対応化

2. 1. システムの構成

本システムは、インデックス作成プログラムと重合格子対応化ソルバから構成される (図 1)。インデックス作成プログラムは、重合格子の重合部分における補間値設定に必要なセルのインデックス及びその補間係数を求め、ソルバが読む形式でファイルを出力する。ソルバはその情報を元

*航空宇宙技術研究所計算科学研究部

に、重合格子間での値の通信と補間値の計算、設定を行う。

2. 2. 格子

重合格子をバックグラウンドとなるメジャーグリッド、物体の周りに置くことを想定したマイナーグリッドの 2 種類に分け、メジャーグリッドとマイナーグリッドの間で重合格子としての値の受け渡しを行う。データ交換が複雑になることを避けるため、ここではマイナーグリッド同士が重合することは認めないことにした。グリッドはそれぞれマルチブロックにすることができる。現在のプログラムでは、移動または変形する重合格子は扱わないが、計算結果を元に格子を移動変形させて、重合格子のインデックス作成プログラムでインデックスファイルを作り、再計算するようにシステムを構築すれば、そのような問題にも対応可能である。

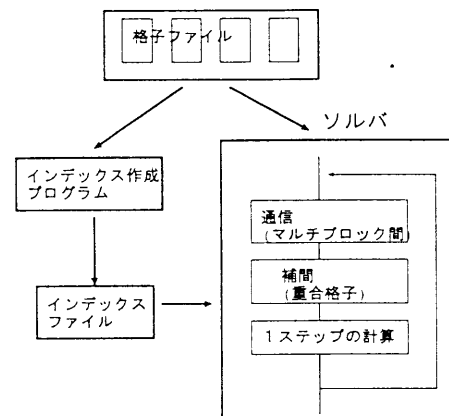


図 1 重合格子対応ソルバ

2. 3. 補間値の設定

重合している相手グリッドの計算値を元に値を設定され

るセルを、補間セルと呼ぶ。マイナーグリッドにおける補間セルは、外側から指定した層分のセルであるが、ソルバが2次精度であるため、2層分と指定する必要がある。メジャーグリッドにおける補間セルは、マイナーグリッドの補間点探索領域にセル中心が含まれるメジャーグリッドのセルである。補間点探索領域とは、マイナーグリッドの補間セルの内側から、1層空けてその内側の、指定された層数のセルである。マイナーグリッド補間セルに、2層分を指定した場合、補間点探索領域は外側から4層目から指定した層数のセル領域となる。

ある点の座標がセルに含まれているかの判定法は以下の通りである。対象となるセルを5つの四面体に分割し、各四面体に対する内外判定を行う。分割の仕方は2種類とし、隣接するセルで不整合が起こらないように互い違いに並ぶようにする(図2)。

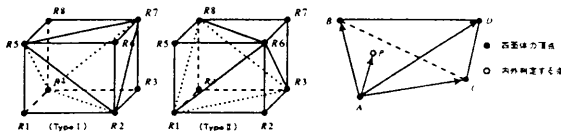


図 2 セルの分割と内外判定

$$\vec{AP} = s \cdot \vec{AB} + t \cdot \vec{AC} + u \cdot \vec{AD}$$

図2(右)のような四面体について、上記式で $0 \leq s, t, u$ かつ $0 \leq s+t+u \leq 1$ が成り立つとき、点Pは四面体の内部にあると判定する。

補間セルに設定する値を補間するときを使う、重合している相手のセルは、以下のように決定される。補間セルの中心から、重合している相手のグリッドで最も近い格子点(最短格子点)を探し、それを囲む8つのセル(ドナーセルと呼ぶ)の値が補間に用いられる。この8つのドナーセルの中心を結んでできるセルを包含セルと呼ぶ。最短格子点がグリッドの境界にある場合、内側の格子点の包含セルが参照され、補間は外挿となる。図3に2次元の場合で示す(3次元も同様)。

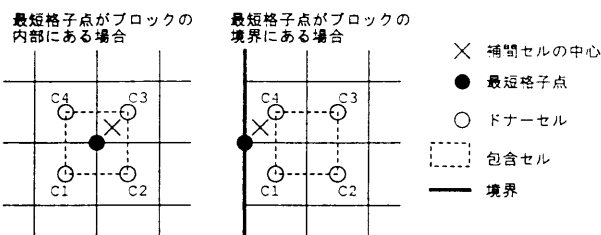


図 3 補間に必要なセルとその計算

補間係数は以下のように求められる。包含セルの頂点をC1,C2,C3,C4とし、補間セルの中心の座標をPとする。次の値を計算する。

- S12: ベクトル C1P の、ベクトル C1C2 への射影成分
- S43: ベクトル C4P の、ベクトル C4C3 への射影成分
- T14: ベクトル C1P の、ベクトル C1C4 への射影成分
- T23: ベクトル C2P の、ベクトル C2C3 への射影成分

補間係数 s,t を次の式で求める。

$$s=(S12+S43)/2, \quad t=(T14+T23)/2$$

重合格子間で値を補間するために、送信側 PE は一次元配列の送信用バッファに送るべき値をセットし、受信側 PE は同様な一次元配列の受信用バッファから値を取り出して補間値を計算し、その値を設定する。通信には MPI または PVM メッセージパッシングライブラリを用いる。送信、受信 PE が同一の場合(重合格子が同一 PE 上に存在する場合)、受信用バッファのポインタが送信用バッファを指すようにして、バッファを介して補間処理を行う。補間のために送受信する値は全ての保存変数である。バッファに値をセットするときに、5変数については計算部が扱う $\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E$ の形式から、 ρ, u, v, w, p に変換し、受信側で計算部が扱う形式に戻している。

3. 試行解析

本研究において、格子の重合の仕方により計算結果にどのような影響が出るかを調べるため、以下に示す簡単な問題を設定して解析を行った。構造物のない直方体の領域で斜め衝撃波が発生するように条件を与え、斜め衝撃波上にマイナーグリッドを置く(図4)。メジャーグリッドは4つのブロックからなる複合格子で、領域全体を覆う。流入境界の流速は x,z 方向にのみ与える。マイナーグリッドの位置、角度、解像度を変えて、計算結果に及ぼす影響を調べる。このような設定にしたのは、理論値が簡単に計算でき、容易に計算条件が設定できる上、衝撃波前後で物理量が不連続に変化するため物理量の分布が際立った特徴を持つ、という理由による。

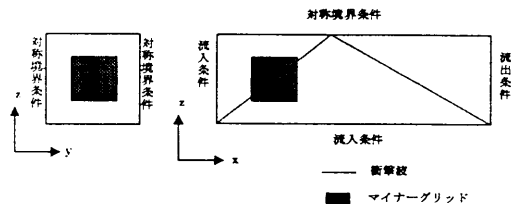


図 4 問題の条件とグリッドの配置

メジャーグリッドは矩形の等間隔格子で、全ケース共通である。メジャーグリッドの格子諸元を以下に示す。

- ・グリッドの大きさ: 4.0×1.6×1.0[m]
- ・格子点数: 101×17×26
- ・セルの大きさ: 0.04×0.1×0.04[m]

上記メジャーグリッドを4つのブロックからなる複合格子として計算している。

マイナーグリッドの設定は以下の通りである。

- ・メジャーグリッドのみ … 基準値とする。
- ・平行移動 … (x, z)方向に1格子間隔の (5, 2.5)%(小), (50, 25)%(大) 平行移動。
- ・回転 … 形状を保ったまま 10, 20, 30度回転。
- ・細分化 … x, z 方向共に格子密度を 2, 4, 5, 10 倍。
- ・アスペクト比 … (x, z)方向に格子密度を(2,1), (1,2),

(4,1), (5,1)倍にする。

図 5 に、上記の設定におけるメジャーグリッドとマイナーグリッドとの関係を模式的に示す。

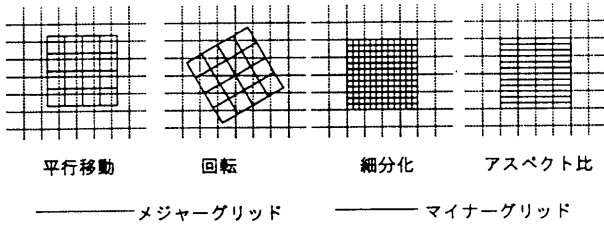


図 5 マイナーグリッドの設定(重合格子)

表 1 境界条件

境界	条件	密度 [kg/m ³]	圧力 [10 ⁵ Pa]	マッハ数
1	流入	1.283	1.016	2.9
2	対称	-	-	-
3	流入	2.279	2.323	2.28
4	流出	(3.722)	(4.681)	(1.86)

境界	u[m/s]	v[m/s]	w[m/s]
1	965.59	0.0	0.0
2	-	-	-
3	860.11	0.0	182.71
4	(778.68)	(0.0)	(0.0)

境界条件を表 1 に示す。境界 1,2,3,4 は、図 4 (右)のように領域を +y 方向に見たとき、それぞれ左側、上部、下部、右側の境界を表す。手前と奥の xz 境界面は、対称境界条件を与える。カッコ付きの物理量は、理論式による予想値である。u,v,w はそれぞれ x,y,z 方向の流速である。境界条件の数値は、ランキン-ウゴニオの関係から、衝撃波が xy 平面に対して 30 度の角度を持つように設定されている。また、上部対称面で反射した衝撃波は 24 度になり、右下隅を通過する。

また、単一格子でマイナーグリッドに相当する部分の格子を平行移動、細分化したもの、アスペクト比をつけたものを用いて、比較した。重合格子アスペクト比ケースを模した単一格子を図 6 に示す。

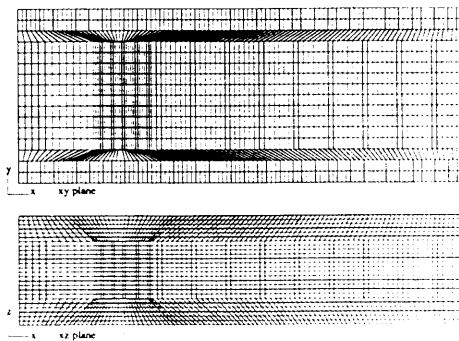


図 6 単一格子(アスペクト比 2×1)

3.結果

図 7 は、メジャーグリッドのみのケースで、密度コンターを图示したものである。

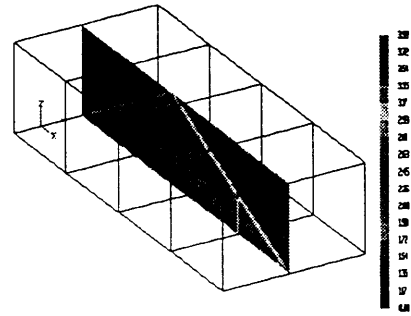


図 7 密度コンター(メジャーグリッドのみのケース)

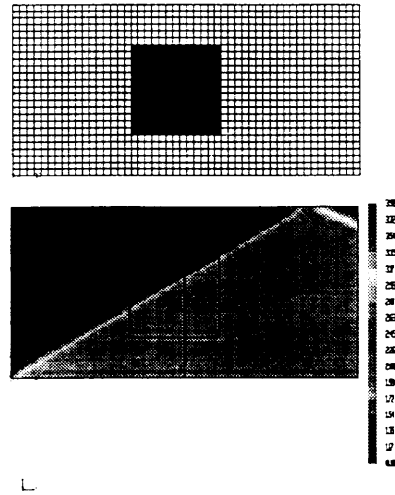


図 8 細分化 5 倍のケース(格子と密度コンター)

図 8 は、細分化 5 倍ケースで重合格子による計算結果を表したものである。領域全体の左半分について、密度コンターを表示している。中央の矩形はマイナーグリッドを表す。マイナーグリッド部分はマイナーグリッドでの値を表示している。衝撃波の厚みを、その 10%,90%点の幅で評価すると、メジャーグリッドのみの結果については上下方向に 5 点分で捕らえられていた。回転ケースを除く他のケースでは、マイナーグリッドにおいて 5 点あるいは 6 点で捕らえられており、格子解像度にはあまり関係なく、同程度の格子点数で衝撃波が捕らえられている。これは細分化のように格子が細かくなると、圧力変化の幅が狭くなり、メジャーグリッドとの補間部分で圧力分布に差が生じることを意味する。回転ケースでは 30 度の場合、最も幅が細くなる部分で 3 点であり、格子が衝撃波に沿っているため、短くなっていると考えられる。

本ソフトウェアでの重合格子を用いた計算が、結果にどのような影響を与えるかを評価するために、各ケースでの

流速を、基準値であるメジャーグリッドのみを用いた計算結果と比較する。図 9 から図 13 は、いくつかのケースで、x 方向の流速の基準値との差を、等値面で表したものである。各等値面図では、無次元化量で速度差 0.01 あるいは -0.01 の面を作図している。これは実際の速度で $\pm 2.81[\text{m/s}]$ であり、流入境界における速度の $\pm 0.29\%$ にあたる。(なお、等値面の図は $0.8 < y < 1.6[\text{m}]$ 、すなわち図で奥側半分を作図している。) 約 $2.0 < x < 4.0[\text{m}]$ の部分において、衝撃波にそって帯状に等値面が存在するのは、衝撃波面上では値の変化が大きいため、基準とする結果と衝撃波面がわずかにずれたりしても大きな差となって現れてしまうため、重合格子により発生するものではないと考えられる。

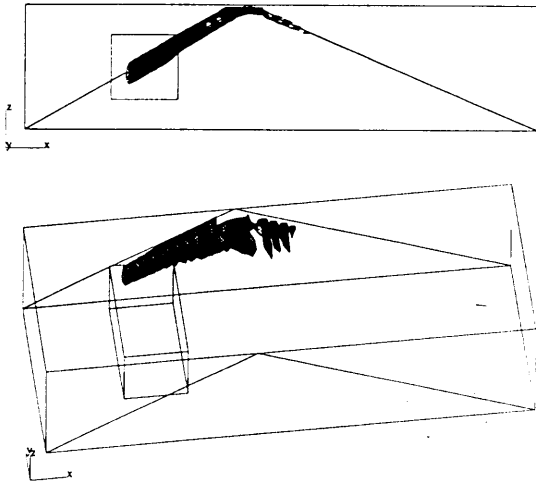


図 9 平行移動(大)の x 方向流速の差(+0.01)

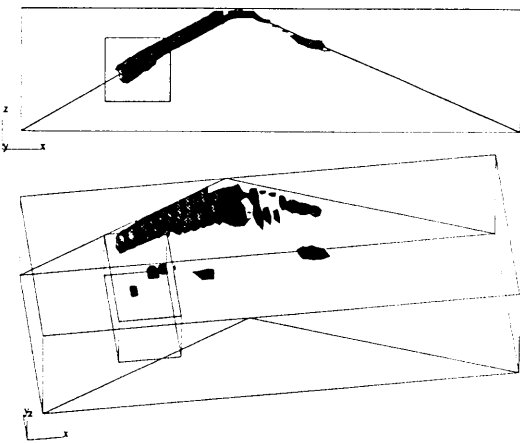


図 10 30 度回転の x 方向流速の差(+0.01)

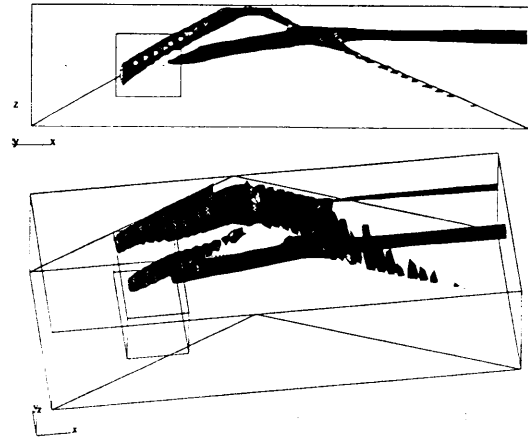


図 11 細分化 5 倍の x 方向流速の差(+0.01)

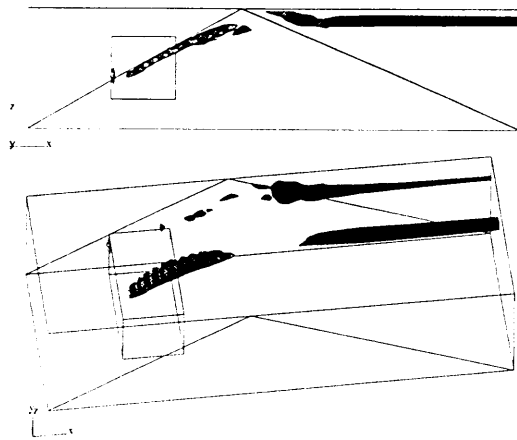


図 12 細分化 5 倍の x 方向流速の差(-0.01)

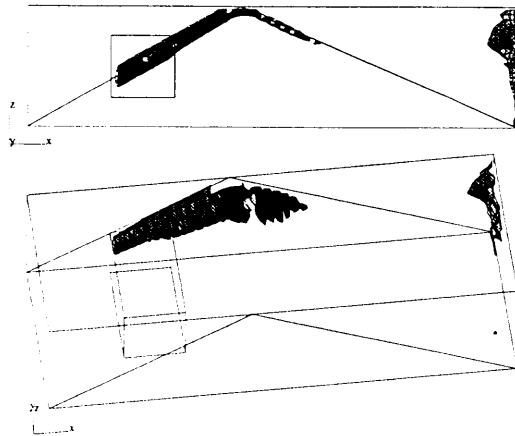


図 13 アスペクト比 5x1 の x 方向流速の差(+0.01)

以上の図から、主としてマイナーグリッド側面から基準値に対する x 方向流速の差が発生し、流れの方向に沿って存在していることがわかる。細分化 5 倍のケースについては、マイナーグリッドの前端と後端の中央部分からも流速の差が発生している。また、このケースでは基準値よりも小さくなるような流速差が発生しているため、図 12 に示した。図 14 は細分化 5 倍のケースで、中央部分での基準値に対する圧力差と x 方向流速差を図示したものである。斜めの点線は衝撃波の位置を示す。衝撃波が通過している部分

で圧力差が発生し、それに伴って流速の差も生じていると考えられる。

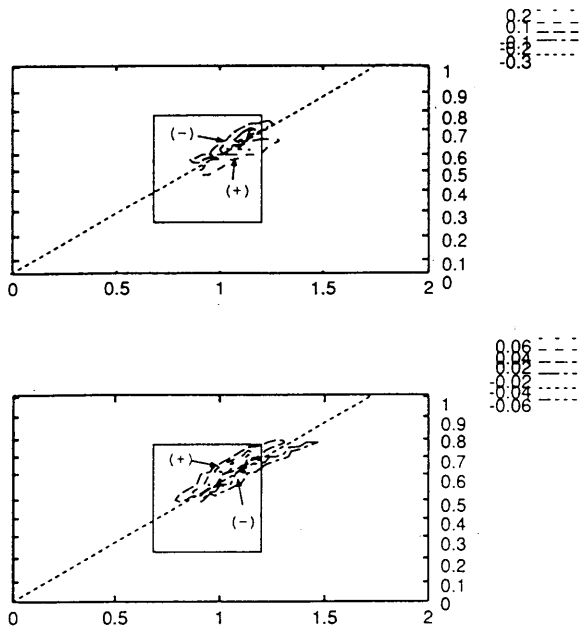


図 14 メジャーグリッドでの基準値に対する圧力の差と速度差：細分化5倍

この問題は xz 面の二次元問題であるが、重合格子細分化のケースで主流に対して最大 1.7%程度の y 方向の流速が計算結果に発生した(表 2)。細分化ケースでは、格子密度の違いが大きいものは大きな流速が出ている。これは、マイナーグリッドが領域全体を覆っていないため、重合しているグリッド間の解像度が異なり、衝撃波位置の圧力変化の幅が、本来同様であるべき方向に差を生じているためと考えられる。回転のケースでも、30 度では流速が大きくなっているが、マイナーグリッドで衝撃波が細かく捕らえられているため、メジャーグリッドとマイナーグリッドとの間に大きな圧力差が発生しているためと考えられる。アスペクト比ケースでは、圧力変化の幅があまり変わらないので大きなアスペクト比が大きくなってもそれほど発生する流速に変化がない。図 15 から図 18 に、いくつかのケースでの y 方向流速の等値面を示す。

表 2 y 方向流速の最大値の主流に対する比 (上：重合格子、下：単一格子)

平行移動(小)	8.28×10^{-3}	細分化 5 倍	1.71×10^{-2}
平行移動(大)	7.35×10^{-3}	細分化 10 倍	1.71×10^{-2}
回転(10度)	8.01×10^{-3}	アスペクト比 2×1	8.60×10^{-3}
回転(20度)	8.99×10^{-3}	アスペクト比 1×2	9.55×10^{-3}
回転(30度)	1.16×10^{-2}	アスペクト比 4×1	9.11×10^{-3}
細分化 2 倍	1.09×10^{-2}	アスペクト比 5×1	9.08×10^{-3}
細分化 4 倍	1.59×10^{-2}		
平行移動(小)	2.14×10^{-4}	細分化 2 倍	3.10×10^{-2}
平行移動(大)	1.11×10^{-3}	アスペクト比 2×1	4.04×10^{-2}

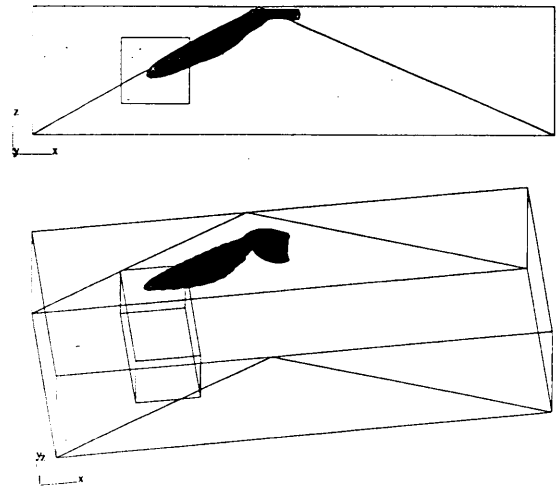


図 15 平行移動(大)の y 方向流速($v=+0.01$)

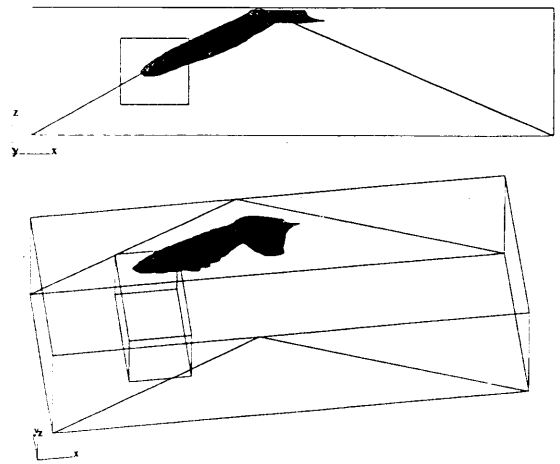


図 16 30度回転の y 方向流速($v=+0.01$)

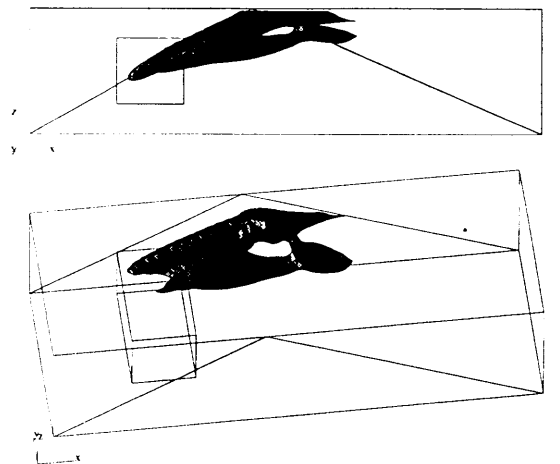


図 17 細分化 5 倍の y 方向流速($v=+0.01$)

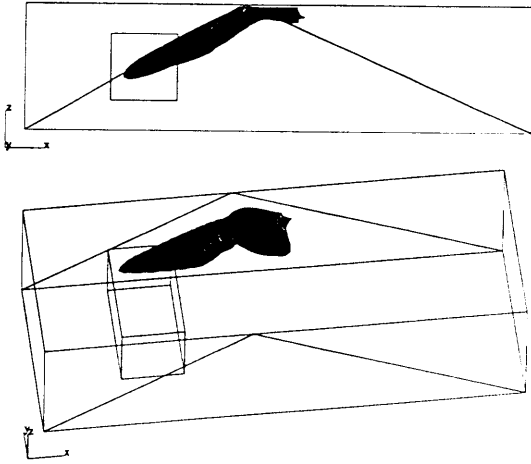


図 18 アスペクト比 5×1 の y 方向流速(v=+0.01)

y 方向の流速はマイナーグリッドの側面から発生した。アスペクト比のケースでは大きな流速は発生しなかったが、細分化は 2 倍のケースから大きな流速が発生した。メジャーグリッド、マイナーグリッドで格子の間隔が違うため、衝撃波部分で値の変化の仕方が異なり、グリッド間で圧力差ができて、流速が発生したものと考えられる(図 19)。図 19 左で、圧力は+x 方向に高くなっており、図 19 右で、右上と左下部分で+y 方向の流速が発生している。マイナーグリッドの外側 2 層はメジャーグリッドから値を補間しているため、衝撃波に相当する値の変化部分が広く、本来問題の設定から一様であるはずの y 方向密度分布が一様でなくなっている。そのため、y 方向に流速が発生している。比較のために単一格子で行った計算では、マイナーグリッドに相当する部分に格子を寄せたことによるスキューネスが存在する部分を衝撃波が通過したところで大きな y 方向の流速が発生していることがわかる(図 20)。スキューネスは領域の前端から後端まで存在するので、y 方向流速も前方から後方まで発生している。

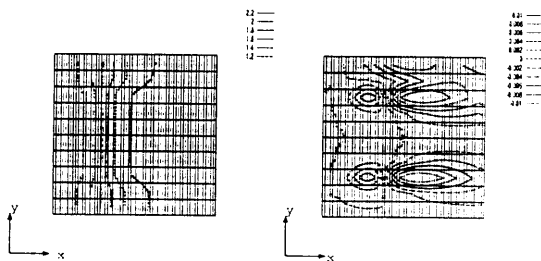


図 19 マイナーグリッド内の圧力(左)と y 方向流速(右) : 細分化 5 倍)

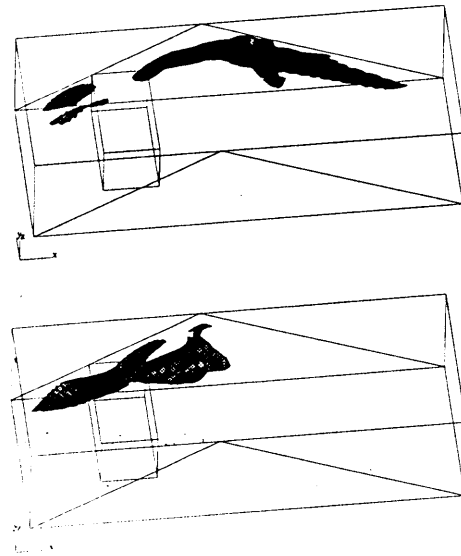


図 20 単一格子(アスペクト比 2×1)による結果 :y 方向流速 (上:v=0.01,下:v=-0.01)

4.まとめ

複合格子を対象とした並列計算プラットフォーム UPACS を重合格子に対応させた。衝撃波が発生する問題を設定し、重合格子を用いた計算で、計算結果に与える影響を評価した。重合格子のいくつかのケースについてマイナーグリッド相当部分が同じような格子解像度を持つような単一格子を作って比較したが、単一格子で一部分だけ格子解像度を上げるためには、格子を歪ませなければならず、歪みにより、計算に影響が出る。本報告で行ったような極端な形状では、重合格子と同程度かそれ以上の影響が現れた。重合格子では、格子を歪ませることなく、簡単に調べたい部分の格子解像度を上げられるが、重合している部分から、格子解像度の違いなどにより、重合格子間で圧力差が生じ本来の流れと異なる流速が発生した。本報告では、その計算への影響を見るために流れと不整合な格子を作ったが、重合格子を実際に計算に用いるには流れに合った格子を作る必要がある。

参考文献

- (1) 高木亮治「複雑形状まわりの流れの数値解析手法の開発」、航技研報告 TR-1375,1998 年
- (2) 高木亮治「複雑形状まわりの流れの数値解析手法の検証」、航技研報告 TR-1376,1998 年
- (3) 賈為、中村佳朗「領域分割法による 3 次元非圧縮性流の汎用計算プログラムの開発」、数値流体力学シンポジウム、1993 年 12 月