

複合格子による数値計算

小川 哲* 和田 安弘*
石黒 登美子* 高倉 葉子**

Numerical Computations Using Multi-Domain Technique

by

Satoru OGAWA, Yasuhiro WADA and Tomiko ISHIGURO
National Aerospace Laboratory
Yoko TAKAKURA
Fujitsu Ltd.

ABSTRACT

The multi-domain technique is used to solve the whole flowfields around the combined configuration of space vehicles. Several computational grids are overlapped with each other in the computational domain, and the solutions are combined by the interpolation scheme at the boundary of each grid. The TVD scheme of finite volume and post-processing type is used to solve the Navier-Stokes equations for hypersonic flow. The numerical computations are performed for two problems, i.e., NASA space shuttle/external tank roket booster and NANDA HOPE/H2 roket/roket boosters, and it is shown the results of numerical simulation using the present methods are reasonable.

1. はじめに

近年、計算機能力の著しい向上とともに航空機全機モデルの計算がある程度可能になり、さらには複雑な複合体に対する計算も試みられるようになってきている。複雑形状物体全体まわりの流れ場を解析する場合流れ解析の基本的部分のほとんどは既に解決しており、計算格子を物体まわりにどう張り巡らすかということが主要な問題となる。計算を行う場合、単一格子で場全体を覆うのが解析の上からは最も理想的であるが、多重連結領域を単一格子で覆うことは格子生成上極めて困難である。ここでは、計算領域に対し幾つかの計算格子を用意し解を互いに補間し合うことにより全領

域の解を求める方法（複合格子法）を用いて行った幾つかの計算について報告する。計算はNASAスペースシャトル、外部タンク及び固体ロケットの組み合わせ形状、及び宇宙開発事業団によるHOPE/H2組み合わせ形状に対するNavier-Stokes方程式による超音速流の数値解析を行っており、いずれの場合にも形状の複雑さに比べ比較的簡単に数値解が求められることがわかる。

2. 数値解析法

複合格子を用いた数値解析法は格子の境界を別の格子の境界に合わせる必要はなく比較的簡単な手続きでかなり複雑な物体まわりの流れ場を解析することができる。複合格子を用いた数値解析法としてはNASA エームズにおけるChimera¹⁾が良く知られている。方法は極めて単純で、空間を互

* 航空宇宙技術研究所・数理解析部

** 富士通㈱・科学システム部

いに重なり合う幾つかの計算格子で覆い、時間の進行とともにある計算格子の境界の物理量を別の計算格子の物理量を使って置き換えるものである。この置き換えを可能とするためにはあらかじめ重なり合う計算格子間の位置関係を計算しておく必要がある。数値計算法は以下の要素から基本的に構成される。

2-1 差分法

圧縮性流体に対する差分スキームは近年 TVD スキームの出現により急速な進歩をみせ、広範囲のマッハ数に対し安定な解を簡単に求めることができるようになってきている。複雑な形状まわりの流れ場を複合格子法で解く場合互いに重なり合う格子間の物理量のやり取りを各時間ごとに行う。その場合風上差分法にもとづいた TVD スキームを用いると流れと境界の関係を考えることなく単なる置き換えにより境界において十分滑らかな解を得ることができる。又計算格子がかなりゆがみ幾何学的量が極端な値を持つ場合においても TVD スキームは相当頑強であり安心して計算することができる利点がある。ここでは、和田²⁾による TVD コードにより計算をおこなっている。使われている差分スキームは Chakravarthy³⁾ の TVD スキームを改良したもので、有限体積法的取り扱い、境界条件の設定法⁴⁾、ADI オペレータの改良等により計算コードの頑強さを高めている。

2-2 計算格子

複合格子を用いる計算法の最大の利点は物体をいくつか分割し各部分を覆う計算格子を別々に用意すればよいことであり、複雑な物体形状を覆う計算格子生成といった厄介な問題に悩まされることがないということである。計算対象を計算格子が作りやすい単純な形に分割し、それぞれにたいして計算格子を作れば良い。計算格子の配置は任意でよいが計算のしやすさから考えると計算格子の重なりは 2 重であるように配慮したほうがよい。重なりがより多重になると値の置き換えがより複雑となるからである。又、重なり合う領域において格子の間隔は同程度であることが望まし

い。片方の格子間隔がもう一つの格子のそれとくらべ著しく異なると継ぎ目で数値解が著しく鈍ってしまい、解の収束も悪くなる傾向がある。

2-3 複合格子法

互いに重なり合う複数の計算格子を使って計算を進める際、計算格子の境界における物理量を別の計算格子の値によって置き換えなければならない場合が生じる。置き換えを行うためには、計算格子間の位置関係がわかっているなければならない。位置関係をきめるアルゴリズムは、A 座標系の点 P の B 座標における値の決めかたを例にとり示すと、

- 1) P 点との距離が最短となる B 座標系の格子点 R を求める。
- 2) ベクトル RP と R における基底 e_i ($i=1, 2, 3$) との内積から P 点が B 座標系のどのセル内にあるかを求める。
- 3) P 点の 2) で求めたセル内の無次元化座標 (s, t, u), [$0 \leq s, t, u \leq 1$], 即ち内挿公式

$$X_p = (1-u)[(1-t)\{(1-s)X_{000} + sX_{100}\} + t\{(1-s)X_{010} + sX_{110}\}] + u[(1-t)\{(1-s)X_{001} + sX_{101}\}] + t\{(1-s)X_{011} + sX_{111}\}].$$

を満足する s, t, u を求める。

境界の格子点に対し 1), 2) 及び 3) の手続きにより、対応する座標系の最短点のインデックス、セルを規定するインデックス、及び (s, t, u) をあらかじめ計算しておき、時間ステップが進むたびに物理量に対して上式を使って値の置き換えを行う。

3. 計算結果

ここでは NASA のスペースシャトル / 外部タンク / 固体ロケットの組み合わせ形状、及び宇宙開発事業団が計画している大型 HOPE 及び、H2 ロケットの組み合わせ形状に対し超音速領域での数値計算を行った。解析は薄層近似の Navier-Stokes 方程式を使い、いずれも対称面の片側のみについて行われた。計算時間は VP2600 を使った場合クーラン数 2 の局所時間刻みを使った場合で約 1 ~ 3 時間であった。ただし、単一格子での計算に比

べ残差の減少はかなり悪い。

3-1 NASA シャトル

この計算は既にNASA エームズの研究グループにより解析されている⁵⁾。複合格子法の有効性を検証する意味ではほぼ同じ問題を解析した。シャトル等の形状データは公表されておらず、シャトルについては以前 Rizk らの文献⁶⁾ から作成した計算格子⁷⁾を用い、外部タンク等及びその配置については Buning らの文献⁵⁾ から読み取ったものである。したがって形状データは実物と比べかなりずれていると考えられる。計算領域を外部燃料タンク、スペースシャトル、固体ロケットまわりの3領域に分け計算を行った。計算格子を図1に示す。格子点数は、外部タンクまわりに対し $81 \times 68 \times 61$ 、シャトルに対し $68 \times 65 \times 31$ 、ブースターに対し $71 \times 41 \times 21$ とした。超音速流の数例について計算を行ったがいずれの場合においてもほとんど問題なくある程度の収束解を得た。図2はマッハ数1.55、 $\alpha = -6^\circ$ における圧力分布を示したものである。図2-1は物体表面の圧力分布、図2-2は対称面の圧力分布をカラーグラフィックディスプレイで表示したものである。図3はマッハ数1.05、 $\alpha = -3^\circ$ における外部タンク表面の圧力係数を実験、及びNASA エームズの計算と比較したもので

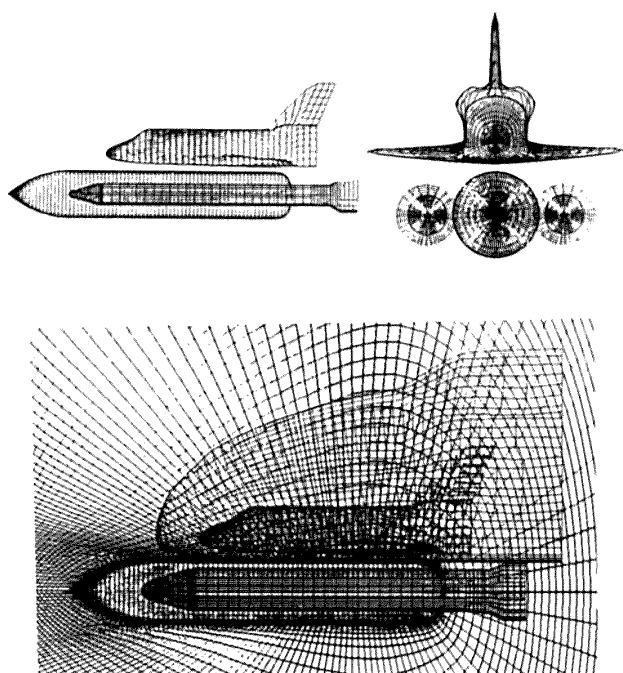


図1 シャトル組合せ形状に対する計算格子

ある。図3-1はタンクの側面、すなわち固体ロケットと接触する部分、図3-2は固体ロケットブースター上面における圧力係数を示したものである。実線が我々の計算結果であり形状および配置のあいまいさを考えると比較的満足できる結果を与えていると考えられよう。

3-2 宇宙開発事業団 Hope/H2/SRBs

次ぎの計算例は宇宙開発事業団が開発、計画しているHOPE/H2ロケット組み合わせ形状に対する数値計算である。計算領域を6つに分割し(HOPEまわり、H2ロケットまわり、ブースター4本のまわり)、それぞれに対し計算格子を生成した。最初に生成した計算格子を図4に示す。格子点数は、HOPEに対し $68 \times 68 \times 41$ 、H2本体に対し $65 \times 65 \times 41$ 、ブースター周りに対し $68 \times 41 \times 21$ 、および対称面上にあるブースターに対しては $68 \times 23 \times 21$ としている。

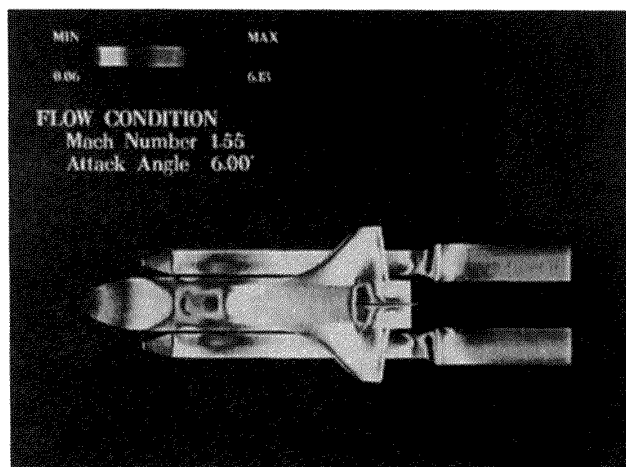


図2-1 表面の圧力分布

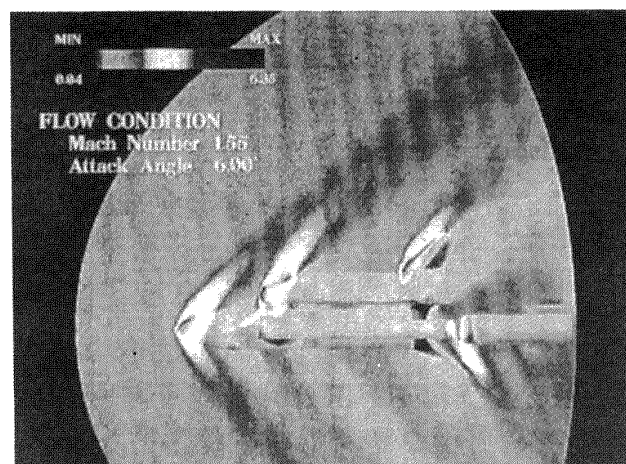


図2-2 対称面における圧力分布

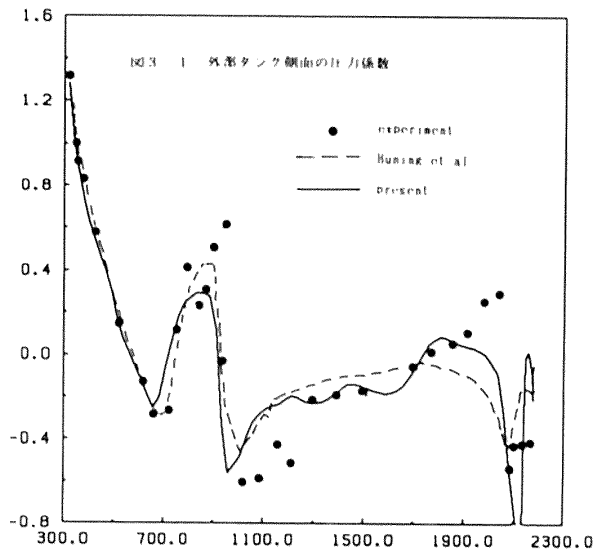


図 3-1 外部タンク側面の圧力係数

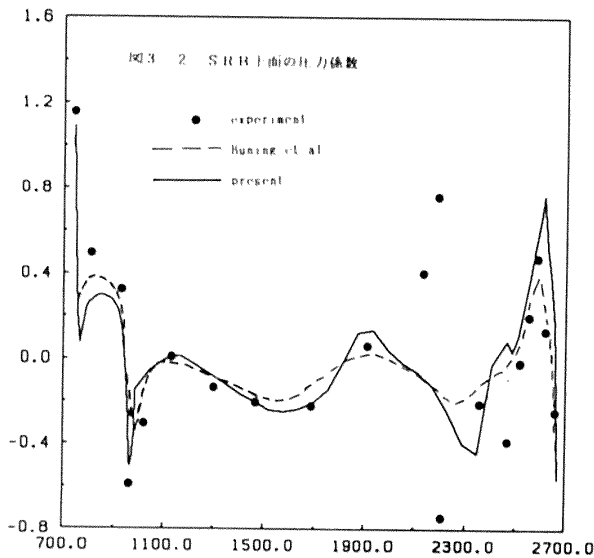


図 3-2 SRB 上面の圧力係数

図 5 にマッハ数 2.0, 迎角 3° における等密度線をカラーディスプレイにより図示したものを示す。対称面及び物体表面の密度分布を図示したもので、HOPE, H2, 及びブースターによる流れの干渉を的確に捕らえておりある程度の信頼性をもつ解であろうと推測される。しかしながら、流れが複雑になると図からもわかるように解の変化量が大きい所で格子間隔が大きいと解が急激に鈍る。又、格子の重複部分の格子間隔が同程度であることが望ましい。複雑形状になればなるほど流れ場も複雑になり、流れの変化が大きいところも複雑な形態をとる。流れ場の解像度は高々計算格子の幅程度しかなく流れをより鮮明にとらえる為解適合格

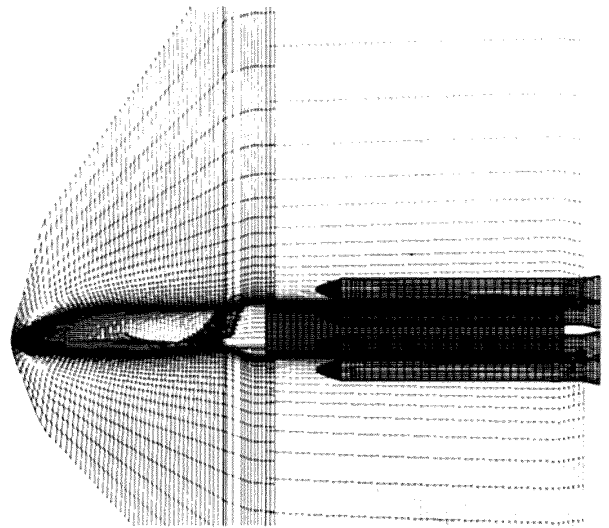


図 4 大形-Hope/H2 ロケット組合せ形状に対する計算格子

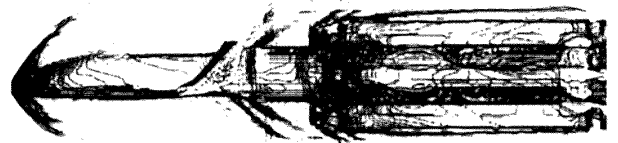


図 5 対称面及び物体表面の等密度線
 $M=2.0, \alpha=3^\circ$

子を使用することを試みた。ここで使う解適合格子生成法は極めて単純な方法で、計算格子における 2 点間の距離を通常の距離に物理量の変化量を加えて定義し、その新たな距離が与えられた点列を適当な間隔で切り直すものである。なお、距離をきめる物理量としては数値実験的に密度を使うと良いこと、更に密度勾配の場にスムージングを施しただらかにした値を使うと良いことがわかっている。一度収束した値を使い計算格子の切り直しを数回行って生成された計算格子を図 6 に示す。計算条件はマッハ数 3.0, 迎角 0° で、格子点数は HOPE に対し $74 \times 68 \times 58$, H2 本体に対し $75 \times 65 \times 87$, ブースター周りに対し前と同じ点数である。計算格子を動かすたびに格子間の補間に必要なイ

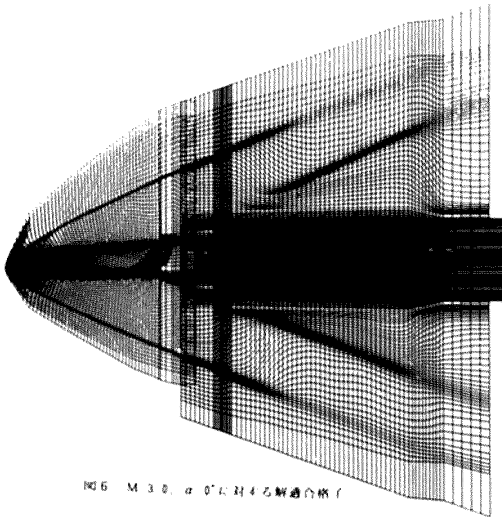


図6 M3.0, $\alpha=0^\circ$ に対する解適合格子

図6 $M=3.0, \alpha=0^\circ$ に対する解適合格子

ンデックスの計算をする必要があり計算の手間はかなりのものとなる。図7にマッハ数3.0, 迎角 0° の流れ条件における圧力分布を示す。図7-1は対称面及び物体表面の分布, 図7-2は各断面における分布を輪切りにして図示したものである。解適合格子により衝撃波等の解像度が著しく増し流れの構造がより理解しやすくなっていると考ええる。

4. まとめ

互に包含関係にある計算格子を用いかなり複雑な組み合わせ形状物体に対する Navier-Stokes 方程式による数値シミュレーションを実行してある程度妥当と思われる数値解を求めた。実験との比較等数値解の吟味を十分に行うことができず今後の問題として残されるが、殆どあらゆる複雑形状まわりの流れ場もこのような方法で解析することが可能であり、今後開発設計において極めて有用な方法となるであろう。この方法の最大の利点は設計等により形状の一部を変更した場合、例えばカナードを付けたような場合も全体の計算格子を作り直すことなくその部分のみの計算格子を変更すれば計算可能となり、複雑な形状をもつ物体の空力特性等を様々な場合に対し比較的簡単に求められることであろう。ただし複合格子による方法では、領域が分割されているため単一格子の場合と異なり主としてグラフィック表示、結果の表示がかなり難しくなる。又、計算コードが複雑化しデ

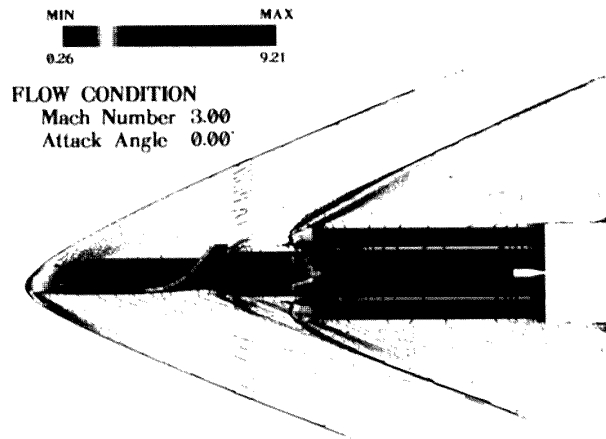


図7-1 対称面及び物体表面の圧力分布

図7-1 対称面及び物体表面の圧力分布

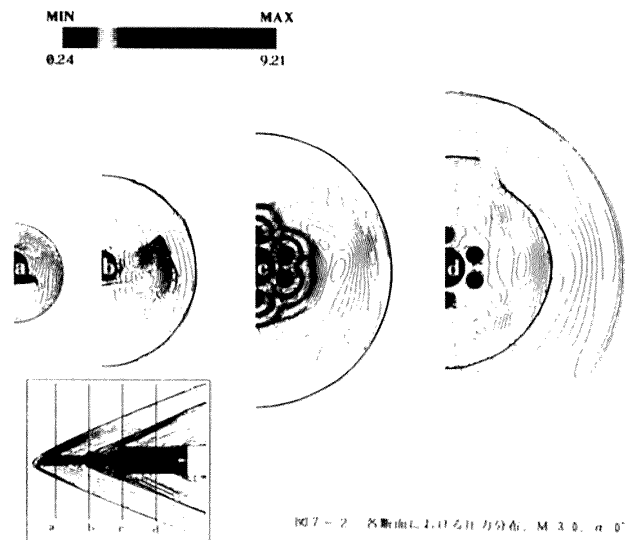


図7-2 各断面における圧力分布, $M=3.0, \alpha=0^\circ$

図7-2 各断面における圧力分布, $M=3.0, \alpha=0^\circ$

バッグ、ファイル管理等にかなり面倒になる。ちなみにHOPE/H2の計算において21個のファイル(格子のメトリック4個, 格子間インデックス5個, 計算結果の読み込みと書き込み 6×2 個)を使用しており、その管理だけでも大変になる。こうした複合格子による計算を効率良く行うためには系統だった解析コード、グラフィック用プログラム等の開発研究が更に要求されていると思う。

なお、本研究はNAL/NASDA 共同研究による成果を一部含んでいる。

参 考 文 献

- 1) Benek, J.A., Buning, P.G., & Steger, J.L., AIAA paper 85-1523.
- 2) Wada, Y., Kubota, H., Ishiguro, T. & Ogawa, S., AIAA paper 89-0202.
- 3) Chakravarthy, S.R., AIAA paper 86-0243.
- 4) 和田安弘, 熊谷清志: 第 6 回航空機計算空気力学シンポ, NAL SP-9, 1988.
- 5) Buning, P.G., Chiu, I.T., Obayashi, S., Rizk, Y.M. & Steger, J.L., AIAA paper 88-4359-CP.
- 6) Rizk, Y.M., Steger, J.L. & Chaussee, D.S., Proc. ISCFD-Tokyo, pp. 392-403, ISAS, 1986.
- 7) Ogawa, S., Ishiguro, T. & Takakura, Y., Proc. ICCTA-Sydney, pp. 577-587, North-Holland, 1988.