

設計における数値解析の活用について（その11）

－マルチグリッド法のマルチブロック法への適用の試み－

半田 智宏*、嶋 英志*

Role of Computational Fluid Dynamics
in Aeronautical Engineering (11)

－ Trial to apply Multi-Grid Scheme to Multi-Block Method －

by

Tomohiro Handa and Eiji Sima

Gifu Technical Institute

Kawasaki Heavy Industries, LTD

ABSTRACT

Multi-grid scheme was applied to multi-block method which calculate inviscid or viscous flow. We got 3 times faster convergence with same accuracy than no multi-grid scheme for both inviscid and viscous flow in simple test cases. More complicated problems, which are inviscid and viscous supersonic flow around SST, were solved using Multi-Blocks & Multi-Grid method, and we got 2 or 3 times faster convergence again.

1. 序論

川崎重工業の3次元圧縮性粘性流解析コード（通称ENMA: Euler Navier-Stokes Multidimensional Analysis）はマルチブロック法¹⁾を採用している。マルチブロック法は複雑形状を比較的容易に取り扱うことができるという利点がある反面、格子点数が多くなり、計算時間が長くなるという問題点が存在する。その問題点を解消するためには計算効率の改善が望ましい。そのためにはいくつかの手法がある。1つ目はより性能の高い計算機の導入である。これについてはENMAが並列計算に向いているという特徴があるため航空宇宙技術研究所の並列計算機用に改造中である。その他の方法としてアルゴ

リズムを変更することによっても改善可能である。本研究では収束性加速法の一つであるマルチグリッド法²⁾を導入することにより計算効率の改善を試みた。

2. ENMA

ENMAはKHI・NAL共同研究により構築されたものである。基礎式として3次元レイノルズ平均N-S方程式、 $q-\omega$ 2方程式乱流モデル、理想気体を扱っており、数値解法としてセルセンター型有限体積法、マルチブロック法、Roeの近似リーマン解法、TV D法、Symmetric Planer Gauss-Seidel法を採用している。

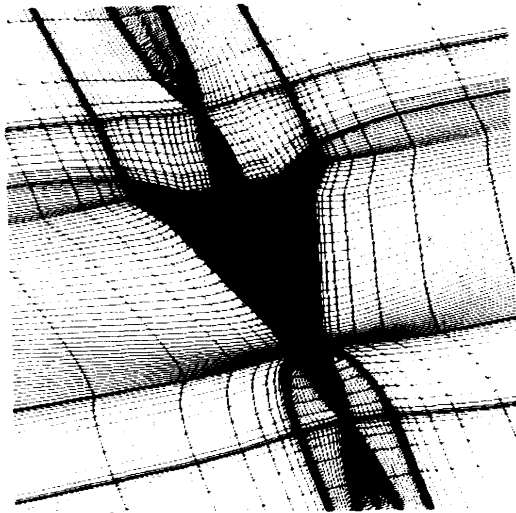
3. マルチグリッド法

マルチグリッド法はJameson等によってその実績が既に報告されており、導入が比較的容易である事も確認されている。マルチグリッド法とは予め数種

* 川崎重工業（株）・岐阜技術研究所

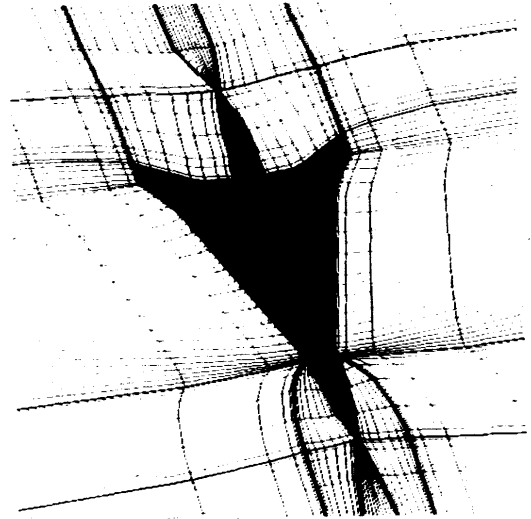
類の計算格子（本研究では3段階法を考えているため3種（最も細かい格子から順に *fine*、*middle*、*coarse grid* と呼ぶ事にする。図1～3参照））を用意し、それぞれの特性に応じた波長成分をそれぞれの格子上で急速に減衰させる事により全体としての計算時間を短縮させるものである。つまり細かい格子では小さな波長を、粗い格子では大きな波長を減衰させている。マルチグリッド法では細かい格子での収束状況が鈍ると保存則を満足するように結果を粗い格子に

与え、そこで一度計算を収束させた後その変化量を細かい格子に与え、再び細かい格子で計算を進めていく。しかしこの収束判定は難しく本研究では予め各格子での繰り返し計算数を設定している。例えば3段階のマルチグリッド法では図4のように先ず *coarse grid* でLステップ、次に *middle grid* に移りMステップ、さらに *fine grid* に移りNステップ計算を進めた後再び *middle grid*、*coarse grid* と内挿しつつ移っていく。



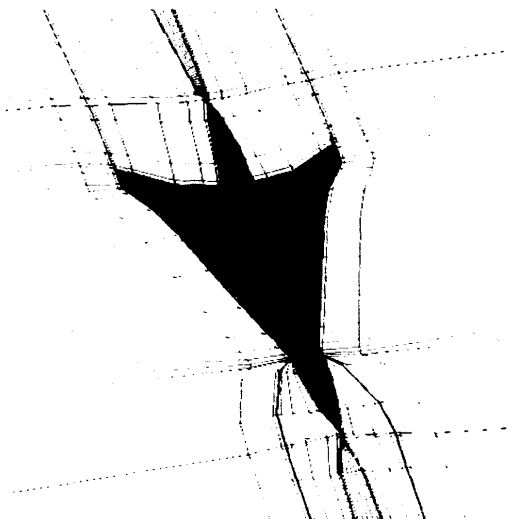
113 × 65 × 77

図1 *fine grid*



57 × 33 × 39

図2 *middle grid*



29 × 17 × 20

図3 *coarse grid*

○ 3段階

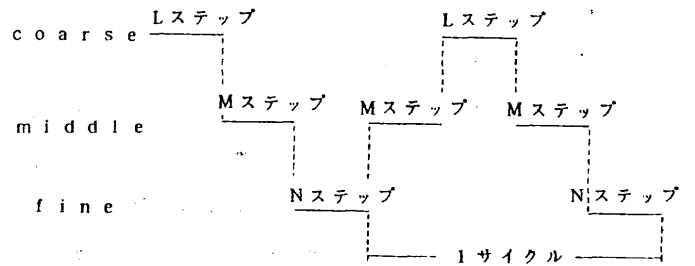


図4 マルチグリッド法計算手順

精度で計算を続行している。そのため、マルチグリッド法無しでは計算時間がやや少な目となっているが、それでも2段階、3段階マルチグリッド法（各格子でのstep数は前回と同じ）共に2倍程度の収束加速を得ている。しかし、今まで同様図17に見られるようにマルチグリッド法では残差履歴が大きめにでている。

5. 結論

今回、マルチブロック法に収束加速法の1つであるマルチグリッド法を適用し、比較的容易な変更（新規にコードを作成する事と比較して）により3倍程度の計算効率の改善を得ることができた。しかしながら、マルチグリッド法適用による残差の収束性、各格子での繰り返し計算数の設定に経験的なものが必要であり、適度な回数以上でないと発散してしまう、等問題がまだ残っている。今後はこの様な問題に取り組んでいきたい。

6. 参考文献

1) K. Sawada, S. Takanashi
 "A Numerical Investigation on Wing/Nacelle Interferences of USB Configuration"
 AIAA-87-0455

2) L. Martinelli, A. Jameson
 "Validation of a Multigrid Method for the Reynolds Averaged Equations"
 AIAA-88-0414

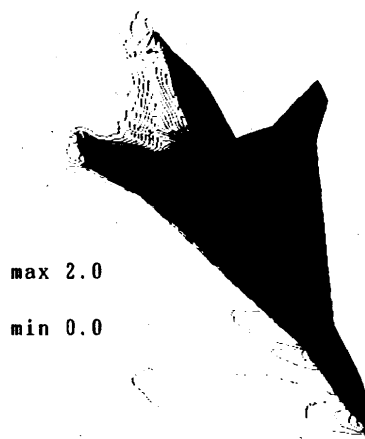


図 1 6 等マッハ線図

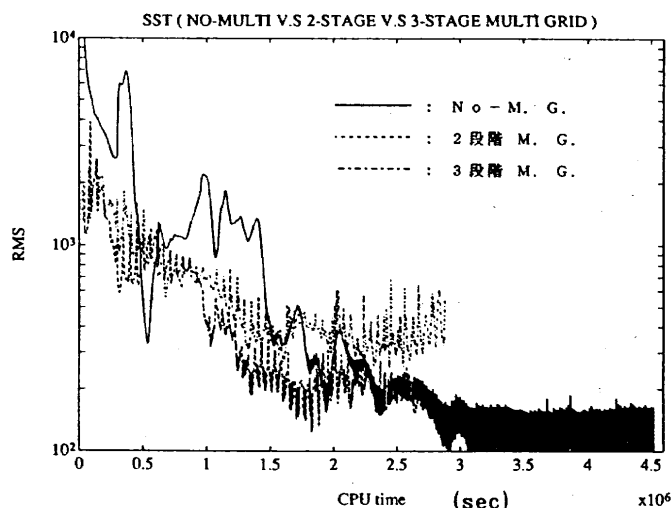


図 1 7 残差時間履歴

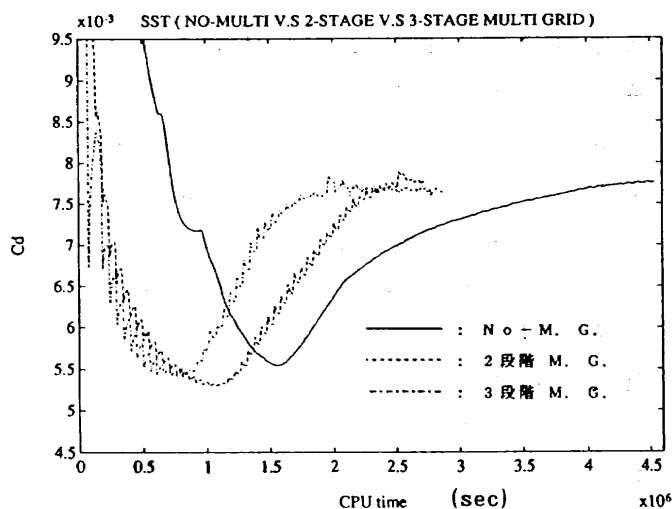


図 1 8 C d 時間履歴

(3) 4%円弧 粘性流

非粘性流については(1)、(2)でマルチグリッド法の有効性が確認されたので今度は粘性流に適用してみる。(1)と同様先ず4%円弧(主流マッハ数1.4、全域乱流)について行った。流れ場の様子を図13(等マッハ線図)に示す。

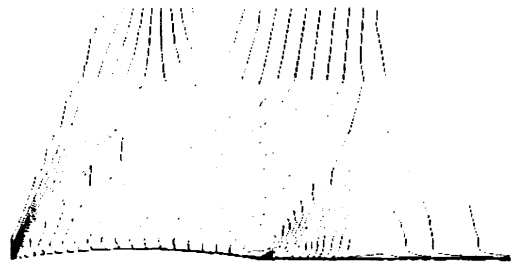
計算効率の状況を見るために残差の時間履歴を図14に、抵抗係数Cdの時間履歴を図15に示す。これらの図より2段階法(fine: 30 step, middle: 30 step)、3段階法(fine: 30 step, middle: 15 step, coarse: 20 step)共に3倍程度の収束加速を得る事ができた。

また、図14を見てみると、(2)の時以上に3段階法では残差履歴が大きめとなっており、2段階法でもマルチグリッド法無しの場合と同程度になっている。おそらく同じ様な原因によるものと思われる。

(4) SST 粘性流

粘性流においても4%円弧に適用する事によりマルチグリッド法の有効性が確認されたので再びSSTに適用してみる。解析条件は主流マッハ数1.4、迎え角5度、全域乱流である。流れ場の様子を図16(等マッハ線図)に示す。

計算効率の状況を見るために残差の時間履歴を図17に、Cdの時間履歴を図18に示す。尚、マルチグリッド法無しでもマルチグリッド法的な事を行っている。すなわちまず空間1次精度である程度計算を収束させ、それを初期解として空間2次



max 1.7

min 0.0

図13 等マッハ線図

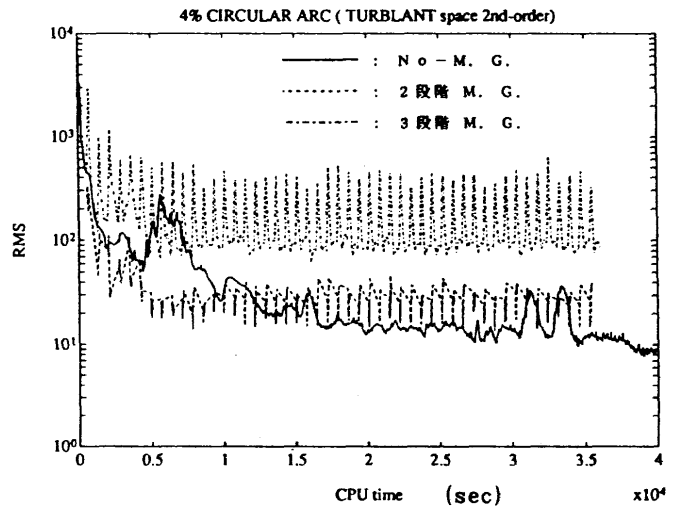


図14 残差時間履歴

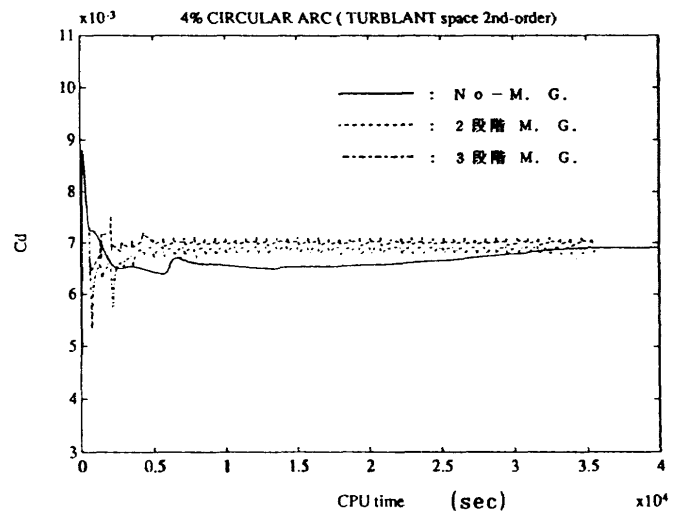


図15 Cd時間履歴

2 段階マルチグリッド法 (fine : 20 step、middle : 20 step) では3 倍程度、また3 段階マルチグリッド法 (fine : 20 step、middle : 10 step、coarse : 20 step) では4 倍程度の収束加速を得る事ができた。また図9 に下壁面での圧力係数分布を示すがマルチグリッド法の有無に関わらず同一の精度が得られた事が示されている。

尚、図8 において Cl が負値を示しているのは解析が超音速であり、且つ上面のみを積分しているためである。

(2) S S T 非粘性流

先の検証によりマルチグリッド法の有効性が確認されたのでより現実的 (複雑) な例として図1 ~ 3 に示される S S T について計算を行った。主流のマッハ数 1.4、迎え角 5 度である。流れ場は図10 (等マッハ線図) の様に胴体前後部、主翼前縁結合部、及び主翼翼端部から衝撃波が発生している。

計算効率の状況を見るために残差の時間履歴を図11 に、 Cl の時間履歴を図12 に示す。これらの図から2 段階、3 段階マルチグリッド法 (各格子での step 数は前回と同じ) 共に3 倍程度の収束加速を得た事が示されている。尚、図11 において3 段階法では残差履歴が大きめにでている。原因として、Jameson 等が提唱している W サイクル³⁾を行っていない、各格子での step 数が適当でない、coarse grid が粗すぎる、等が考えられるが確認はされていない。

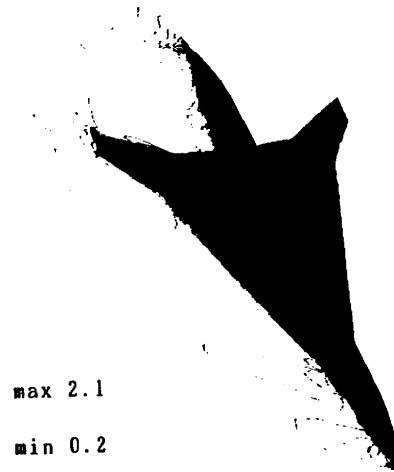


図 1 0 等マッハ線図

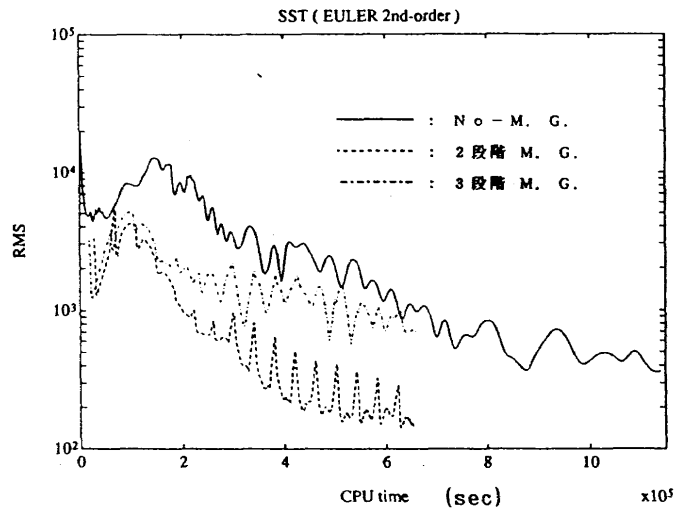


図 1 1 残差の時間履歴

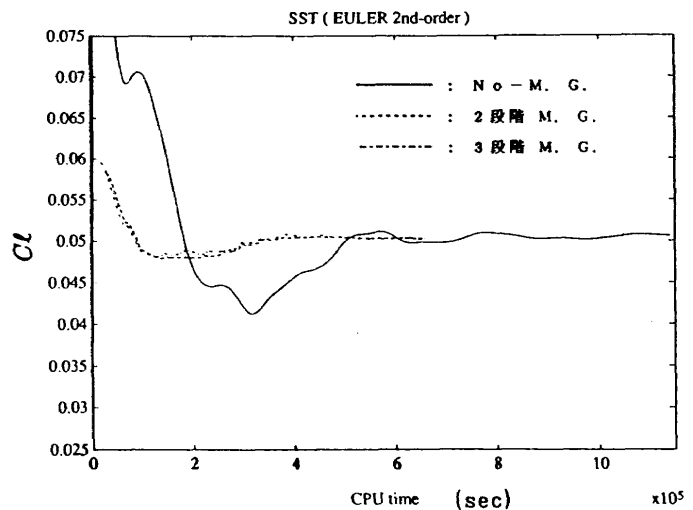


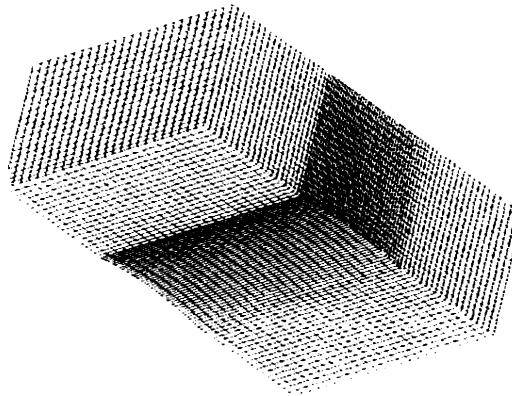
図 1 2 Cl の時間履歴

4. 結果

(1) 4%円弧 非粘性流

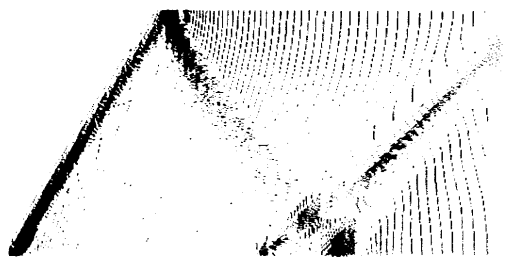
コードの検証を兼ねて2次元問題(衝撃波干渉)を3次元コードで解いた。主流のマッハ数は1.4である。図5に計算格子を、図6に流れ場の様子(等圧力係数分布)を示す。

計算効率の状況を見るために残差(密度)のRMSの時間履歴を図7に、揚力係数 C_l の時間履歴を図8に示す。これらの図からわかる様に



97 × 13 × 29

図5 計算格子



max 0.6

min -0.3

図6 等 C_p 線図

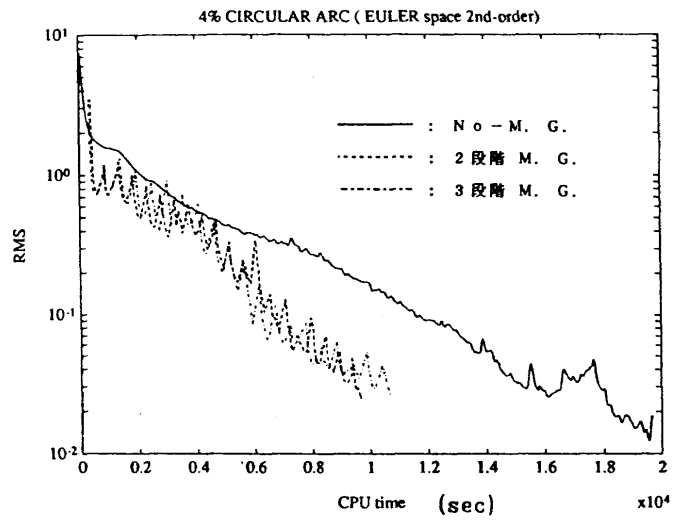


図7 残差の時間履歴

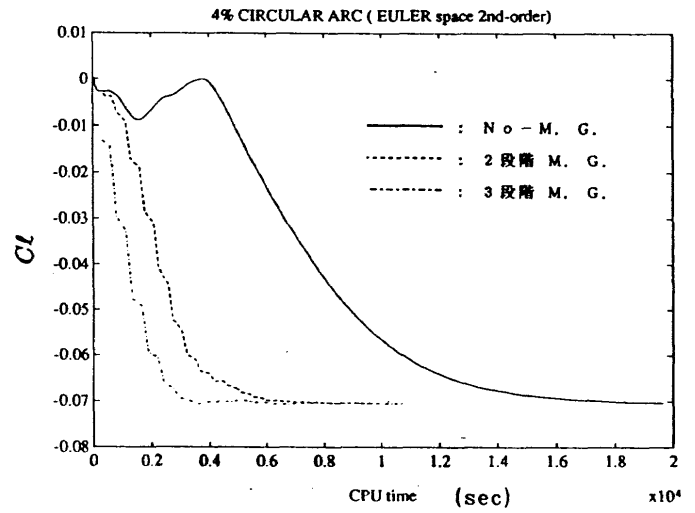


図8 C_l の時間履歴

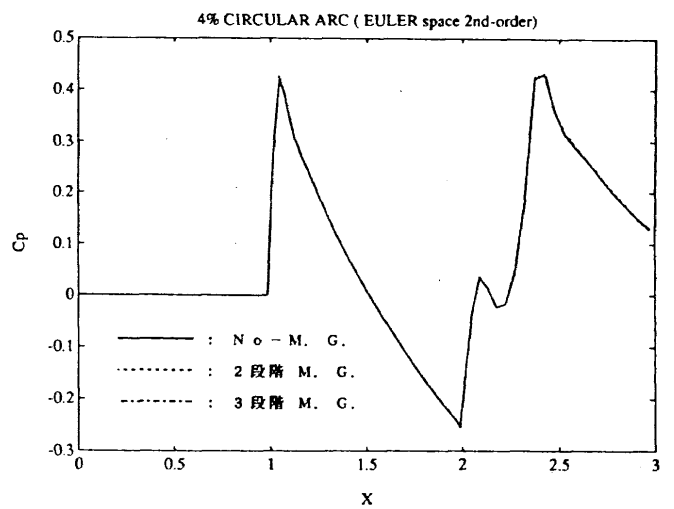


図9 下壁面の C_p 分布