

次世代超音速旅客機周りの非粘性圧縮流体解析における LU-SGS 法の検証 Simulation of inviscid, compressible flow around SST model with LU-SGS method.

畑中 圭太 (名大・院), 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 E-mail: keita@fluid.nuae.nagoya-u.ac.jp

中村 佳朗 (名大・工), 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 E-mail: nakamura@fluid.nuae.nagoya-u.ac.jp

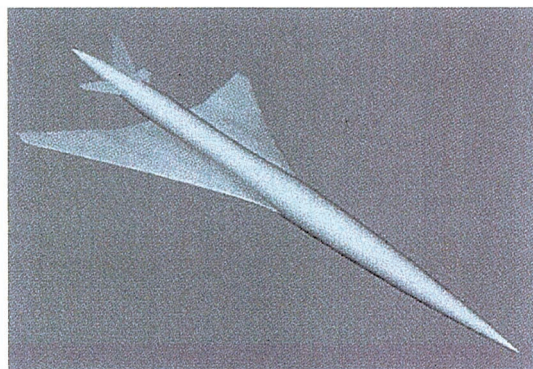
Recently CFD is commonly used in design, where high efficiency is required. The cartesian grid has an advantage over other grids because it is easy to generate grid. However, many grid cells are necessary to correctly capture various flow phenomena, which spoils the merit of the cartesian grid. In the present study, an LU-SGS method is employed for time integration to overcome this problem.

1. はじめに

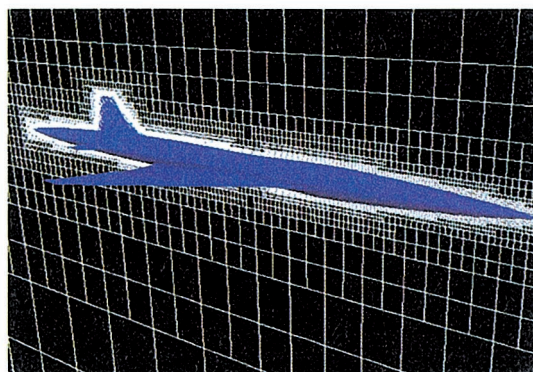
近年高効率化を求めて設計分野においても CFD が使われるようになってきているが、決められた時間内においていかに速く結果を出すかが重要な鍵となる。その中で直交格子は格子の自動生成が行えることで優位性を持っているが、より正確に現象を捉えるためには格子の解適合が必要で、その結果、格子数が増大する。また、物体からの距離に応じた細分割を行っているので物体付近にはセルサイズが減少し、その結果、時間刻み幅が制限される。そのため、陰解法が重要となる。本研究では I. Men' shov^[1]らによる非構造格子 LU-SGS 法をオイラー方程式に適用し、NAL の SST (図 1) 周りの 3 次元流体解析を行い、その性能を評価する。

に格子を生成するのは容易ではない。一方、物体非適合座標格子の場合、計算格子が物体に沿って配置されていないため粘性計算を行うことが困難であるが、3 次元複雑形状においても格子の自動生成が可能である。

そこで本研究では、これら 2 種類の格子の利点を活かして物体付近は粘性計算が行えるように物体に沿ってプリズム格子を、物体表面から離れた所ではデカルト格子をそれぞれ自動で生成するプログラムを作成する。しかし格子数の増加に伴い計算時間が増大してしまう。そこで LU-SGS 陰解法を用いて、計算時間の短縮化を図る。

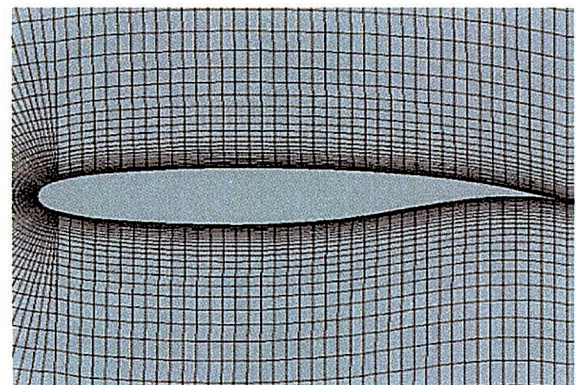


(a) SST 模型

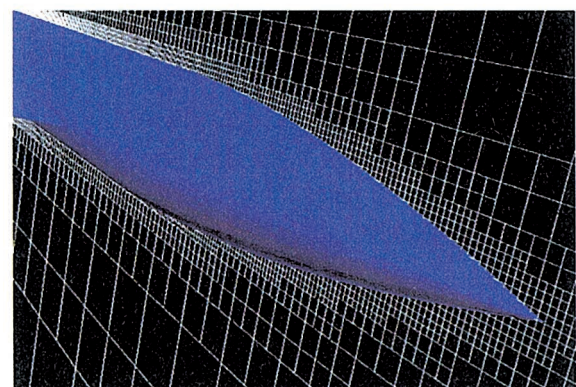


(b) SST 模型周りの計算格子

図 1 NAL の SST 模型と計算格子



(a) 物体適合座標格子



(b) 物体非適合座標格子

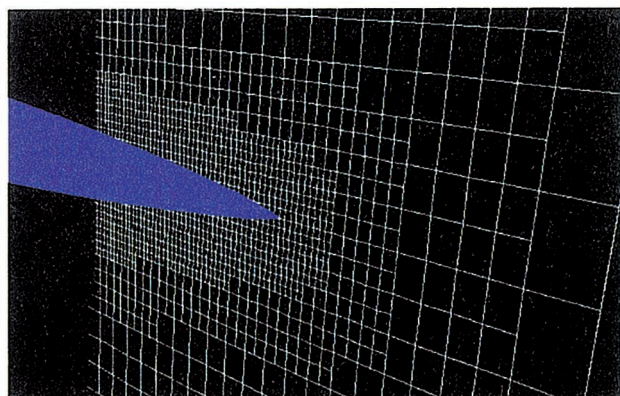
図 2 物体適合座標格子と物体非適合座標格子

2. 背景

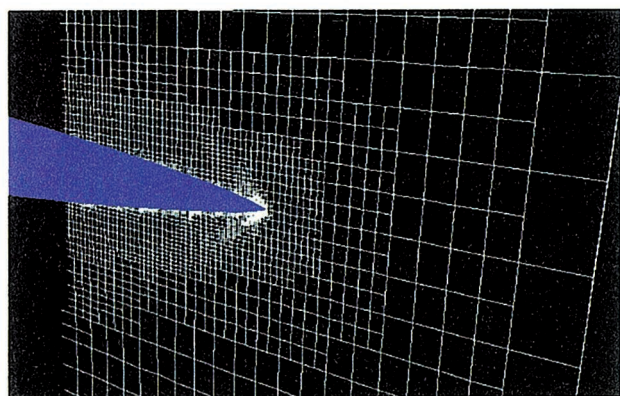
CFD で使用する計算格子には図 2 (a) のような物体適合座標格子や図 2 (b) のような物体非適合座標格子が存在する。それぞれの特徴は、まず、物体適合座標格子の場合は格子を物体表面に沿って配置しているため、粘性計算を行うことが可能であるが、格子の生成が手動であるため三次元的な複雑形状

3. 計算格子

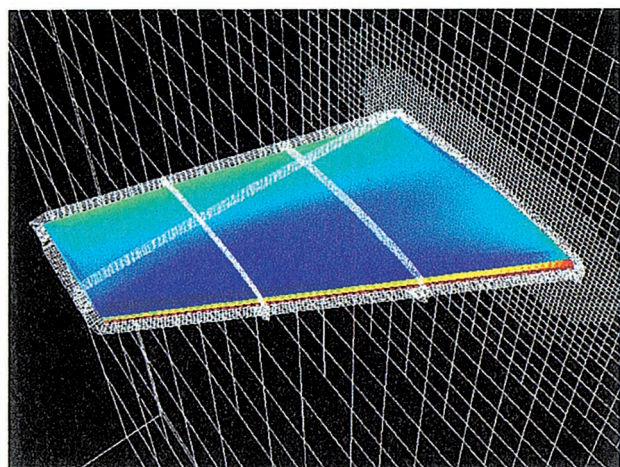
本研究で使用した計算格子は物体から外側への距離に応じて分割数を調節するマルチレベルデカルト格子^[2]である。また現象をより正確に捉えるために図 3(b)に示すように物理量の変化の大きい部分で格子の細分割を行う解適合格子^[1]も使用している。さらに今後は図 3 (c) のような粘性計算を行うために物体表面付近において物体適合格子であるプリズム格子を用いる HYBRID 格子も使用していく。



(a) 初期計算格子



(b) 解適合格子



(c) HYBRID 格子 (直交格子+プリズム格子)

図3 計算格子

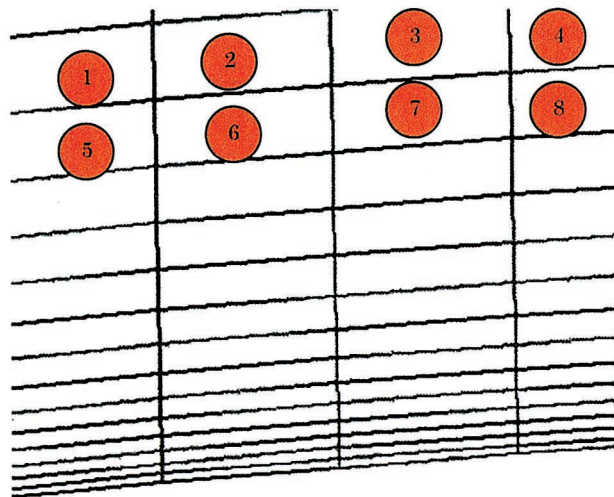
4. 計算手法

流体解析の手法として、本研究では圧縮性オイラー方程式を解いている。また、本研究で用いられた直方体セルを用いた非構造格子は、一般の格子とは違い、物体表面ではカットセルとして検査体積が多面体となるので、差分法的な取り扱いでの空間の離散化は困難で、有限体積法の適用が必要となる。

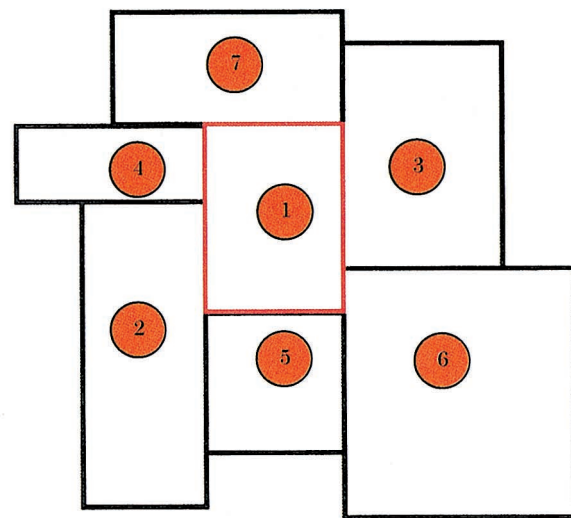
有限体積法では格子が細分割される境界部分の取り扱いをも容易になる。時間積分については陰解法である LU-SGS 法と陽解法である 3 段階 Runge-Kutta 法を使用している。

5. 非構造ソルバーへの適用

LU-SGS は、流体計算において以前の格子の情報も参照して計算を行う。そのため、図 4 (a) のように格子の配置が連続的であれば比較の実装は容易であるが、今回は図 4 (b) のように格子の配置が連続的でない非構造格子を用いているので実装には多少の工夫が必要である。



(a) 格子の配置が連続的な構造格子



(b) 格子の配置が不連続的な非構造格子

図4 構造格子と非構造格子における格子の配置の違い

流体解析に必要なデータの保存にはいくつかの方法がある。今回用いた非構造格子は、格子の配置が不連続であるため、ある格子に隣接する格子の番号を即座に得ることができない。その結果、LU-SGS 法の適用が困難となる。

これに対して一番最初に考えられるデータ構造は、各計算格子に対してその格子に隣接する計算格子の番号をストアすることである。このデータ構造を利用すると隣接する計算格子がすぐに引けるため、LU-SGS を適用する場合には問題がない。しかし、今回用いた非構造格子は、構造格子の場合と

違って、一つの面に対し複数の計算格子が割り当てられる場合がある(図4(b))。このような場合、隣接する計算格子のみを保存しておくデータ構造では、隣接する計算格子を参照後、流束の計算を行うために、その隣接格子とのインターフェイス面の面積、法線ベクトルを計算する必要がある。

このような計算時間のロスとなる要素をできる限り減らしていく必要がある。そこで以下のようなデータ構造を採用した。

[点データ]

```
1  x 座標   ,   y 座標   ,   z 座標
:   :       ,   :       ,   :
:   :       ,   :       ,   :
n   :       ,   :       ,   :
```

(a) 点のデータ構造

[面データ]

```
1  左のセル, 右のセル, 面積  境界条件
   (面を構成する点番号)
   p1      p2      p3      p4
   nx      ny      nz      (法線)
   t1x      t1y      t1z      (接線 1)
   t2x      t2y      t2z      (接線 2)
:   :       :       :
:   :       :       :
```

(b) 面のデータ構造

[セルデータ]

```
1  体積
   (セルを構成する面番号)
   s1  s2  s3  s4  s5  s6
   (重心の座標)
   cx      cy      cz
:   :       :
:   :       :
```

(c) セルのデータ構造

図5 各データの構造

図5(a)は計算格子を構成する点群データの構造を、また図5(b)は計算格子を構成する面群データの構造を、さらに図5(c)は計算格子データの構造をそれぞれ示している。

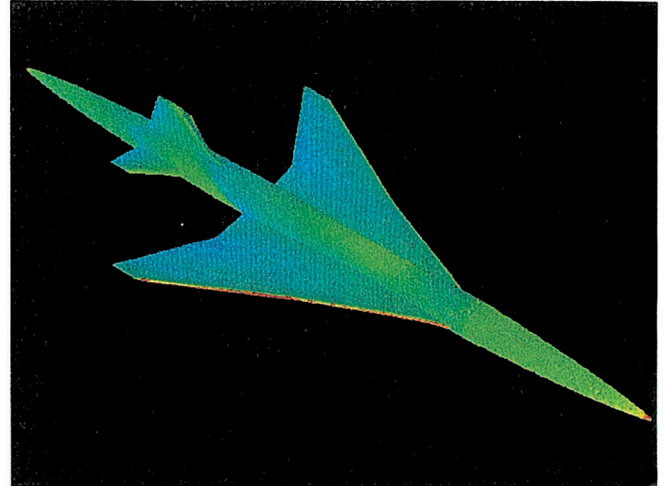
このようなデータ構造を使うメリットは、例えばある計算格子の計算を行う場合に図5(c)のデータからその計算格子を構成する面の番号が分かり、この面の数だけ流束の計算を行えばよい。また、流束の計算の際に必要なインターフェイスの面積、法線ベクトルは面の番号からそれらのデータに直接アクセスすることができる。その結果、直接隣接する計算格子を保存する場合よりも大幅な計算時間の短縮が可能となる。

今回はLU-SGS法を適用するためにこのようなデータ構造を用いたが、Runge-Kuttaのような陽解法においても効率化をはかることができる。

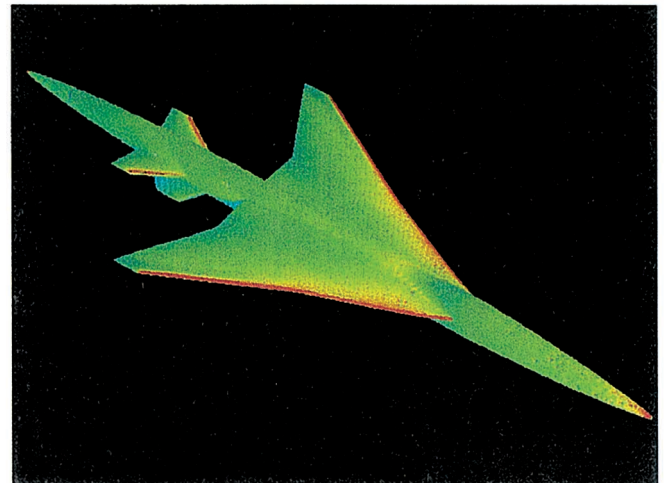
6. 計算結果

計算格子は上述の計算格子を用いている。

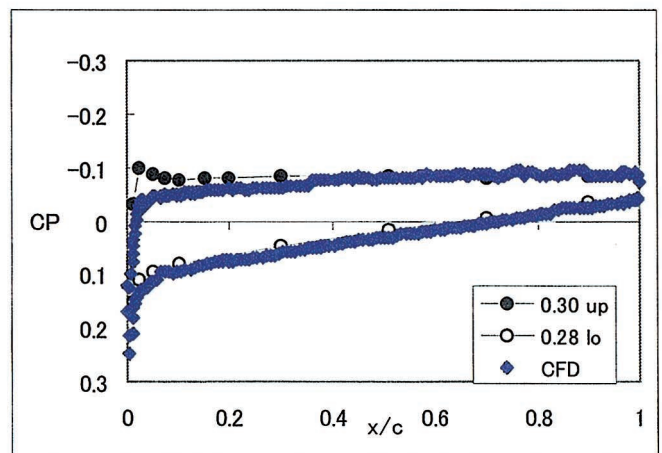
密度、マッハ数において解適合を3回適用した後の総計算格子数は571,006である。また計算条件としてはマッハ数を $M=2.0$ 、迎角を $\alpha=2.0$ とした。



(a) 上面



(b) 下面

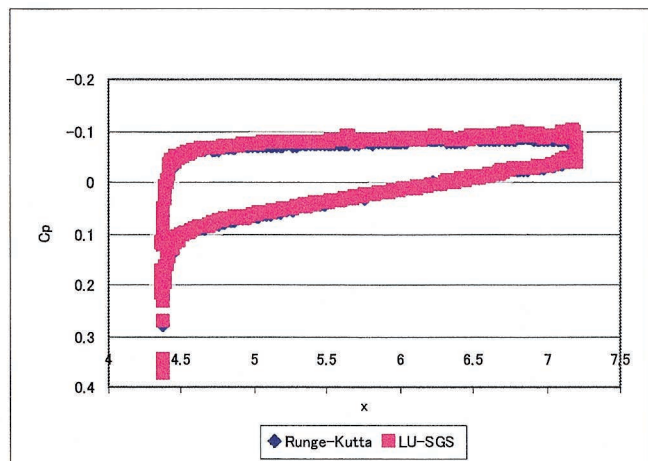


(c) 30%スパンにおける C_p 分布

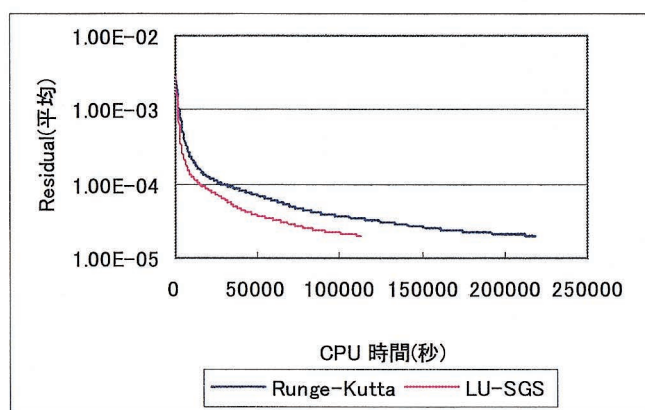
図6 SST模型表面の圧力分布

図 6 (a) および図 6 (b) は上記の計算条件で計算を行った場合の SST 模型上面および下面の圧力分布を、また図 6 (c) は主翼 30% スパンにおける C_p 分布を示している。

今回使用した非構造格子を用いると SST 模型のような 3 次元的複雑形状においても格子の自動生成が行え、また計算結果も翼前縁を除いて実験結果とよく一致している。



(a) C_p 分布の比較



(b) 計算時間の比較

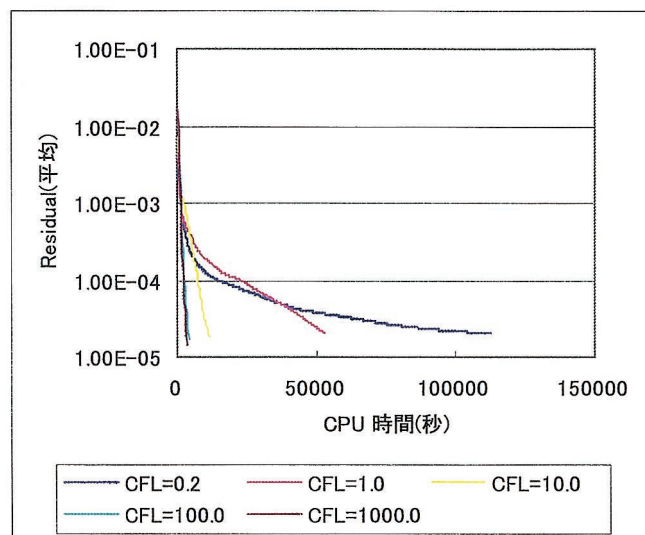
図 7 Runge-Kutta 法と LU-SGS 法の計算結果の比較

図 7 は Runge-Kutta 法と LU-SGS 法による計算結果の比較で、図 7 (a) は主翼 30% スパンにおける C_p 分布の比較であり、図 7 (b) はそれぞれの方法で CFL 値を同じにして計算を行い、残差の平均がある値にまで減少するまでの CPU 時間の比較である。

今回は以前から本研究室で使用されていた Runge-Kutta 法を用いていたソルバーを LU-SGS に変更した。図 7 (a) を見ると、 C_p 分布の比較では両方ともほぼ同等の結果が得られている。また図 7 (b) の CPU 時間の比較では同等の計算結果が得られるにもかかわらず必要な計算時間は Runge-Kutta 法で 218,000sec、LU-SGS 法で 113,000sec と、陰解法である LU-SGS 法を適用することによって計算時間を 48% 削減できた。

Runge-Kutta CFL=0.2	218,000 s	
LU-SGS CFL=0.2	113,000 s	48 % ↓
LU-SGS CFL=1.0	53,000 s	75 % ↓
LU-SGS CFL=10.0	11,300 s	94 % ↓
LU-SGS CFL=100.0	4,240 s	98.1 % ↓
LU-SGS CFL=1000.0	3,540 s	98.4 % ↓

(a) CPU 時間の比較 (表)



(b) CPU 時間の比較 (グラフ)

図 8 LU-SGS 法において様々な CFL 値を用いた際の計算時間の比較

図 8 には LU-SGS 法において CFL 値を変えた場合の計算時間の変化を示している。図 7 の場合の計算は CFL が 0.2 で、CPU 時間は 113,000sec、約 31 時間である。CFL 値を 1.0, 10.0, 100.0, 1000.0 と順に増加させていくと計算時間は、53,300sec 11,300sec 4240sec 3540sec と短縮されていく。一番 CPU 時間が短かった CFL 値 1000.0 での計算時間と Runge-Kutta 法による計算時間 218,000sec を比較すると、計算時間が約 98% 短縮化できた。

7. まとめ

解適合格子の使用や粘性計算で境界層を捕える計算では、計算格子はますます増加していくと考えられる。また今回使用した非構造格子では非常に小さな格子が存在し、その結果、時間刻みが制限されるという問題が生じる、このような問題に対して、本研究で行った LU-SGS 法を用いることにより、計算時間が大幅に短縮でき、設計での使用も可能となる。

8. 参考文献

- [1] : P. R. Lahur and Nakamura, Y., "Anisotropic Cartesian Grid Adaptation" AIAA 2000-2243, 2000.
- [2] : P. R. Lahur and Nakamura, Y., "A Cartesian Grid Generation Method Considering a Complicated Cell Geometry at the Body Surface" Trans. of Japan Soc. Aero. Space Sci., vol. 43, No. 139, 2000.
- [3] : I. Men'shov and Y. Nakamura, Implementation of the LU-SGS method for an arbitrary finite volume discretization, Proceed. of 9th Japan Conference on CFD, 123, (1995)