

四面体格子による超音速インテーク内粘性流計算

Viscous Flow Simulation in Supersonic Intake by Tetrahedral Grid

別所優, 東北大・院, 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01, E-mail: bessho@ad.mech.tohoku.ac.jp
 村山光宏, 東北大・院, 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01, E-mail: murayama@ad.mech.tohoku.ac.jp
 加藤琢真, 東北大・工, 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01, E-mail: kato@ad.mech.tohoku.ac.jp
 中橋和博, 東北大・工, 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01, E-mail: naka@ad.mech.tohoku.ac.jp
 Masaru BESSHO, Tohoku Univ., Aramaki-Aza-Aoba 01, Sendai, 980-8579, JAPAN
 Mitsuhiro MURAYAMA, Tohoku Univ., Aramaki-Aza-Aoba 01, Sendai, 980-8579, JAPAN
 Takuma KATO, Tohoku Univ., Aramaki-Aza-Aoba 01, Sendai, 980-8579, JAPAN
 Kazuhiro NAKAHASHI, Tohoku Univ., Aramaki-Aza-Aoba 01, Sendai, 980-8579, JAPAN

Flow in a supersonic intake is characterized by interaction of shock waves and boundary layers. In the computations of this kind of viscous flows by unstructured grid, a hybrid approach using prismatic grid in the boundary layer and tetrahedral grid in the remaining area is often employed mainly because of the solution accuracy. However, fully unstructured tetrahedral grid is better if possible for the parallelization and adaptive mesh refinement. In this paper, the effect of the choices of control volume in the highly-stretched tetrahedral grid on the solution accuracy and efficiency is discussed.

1. 緒言

インテーク内部の3次元衝撃波・境界層干渉流れ場を非構造格子で計算するには、壁近傍領域にプリズム状のセルを用いて境界層の計算精度を確保するハイブリッド格子法が多く用いられる⁽¹⁾。しかしながら、領域分割による並列計算を行う際、複数のセル形状が混じったハイブリッド格子では領域間のロードバランスを均一にすることが難しくなる。また、非構造格子法の大きな利点の1つである解適合細分化も、ハイブリッド格子では細分化に制約が生じる。従って並列化および格子細分化の観点からは、全領域単一格子、つまり四面体格子であることが望ましい。

一方、境界層領域に等方的四面体格子を用いると格子点数が非常に膨大となるため、壁に沿った方向には引き伸ばした四面体を使わざるを得ない。しかし、このようなアスペクト比の大きな四面体を境界層内で用いると計算精度が落ちることが知られている。

本論文では、壁に沿った方向に引き伸ばした四面体格子上でも高精度に高レイノルズ数流れを計算するための計算アルゴリズムについて調べ、その計算精度への影響について述べる。

2. 計算方法

支配方程式には3次元 Navier-Stokes 方程式を用い、セル節点有限体積法によって離散化する。対流項における流束の計算には HLLW 流束差分法を用いる。時間積分には非構造格子法用に拡張された LU-SGS(Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel)陰解法を適用する⁽²⁾。格子生成には Sharov らの方法を用いたハイブリッド格子生成コードを用いる⁽³⁾。今、簡単のため2次元における検査体積について考える。Fig.1において節点1まわりを考えると、図中 A~F で示される要素ごとの重心と辺の中点を結ぶことで構成される Median dual の検査体積を用いている。本計算では A~F を各要素の外心を選ぶこととし、それらと辺の中点を結ぶことで構成される Containment dual⁽⁴⁾へ検査体積の取り方を改良する。図に示すようなストレッチしていない要素においては要素の重心と外心の位置はさほど変わらないので検査体積は Median と Containment でほぼ等しくなる。次にストレッチした格子上で

の検査体積を考える(Fig.2)。この場合、外心の位置は要素の最長辺の付近となる。もし外心が要素から出る場合は、出た方向の辺の中点でその代用とする。これにより図に示す通り、両者における検査体積は大きく異なり、Containment の検査体積は4つの四辺形要素からなる構造格子の検査体積と等価となる。このことから、ストレッチした要素でも高精度に粘性計算を行うことが期待できる。

本論文ではこれら2手法による全領域四面体格子の計算と、ハイブリッド格子による計算とを比較し、計算精度への影響について調べる。

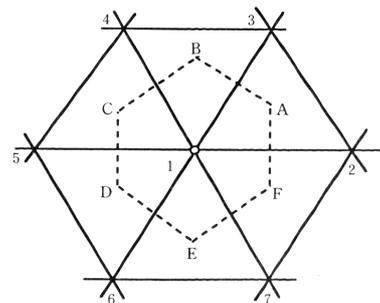
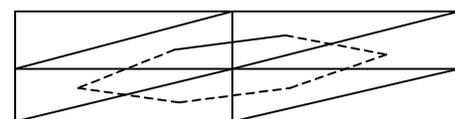
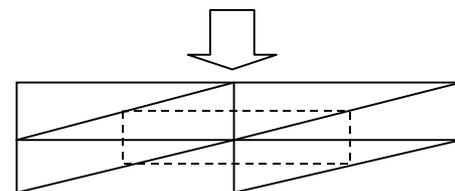


Fig.1 Control volume for triangular grid



Median dual control volume



Containment dual control volume

Fig.2 Control volume for stretched triangular grid

3. 計算結果

3.1 非粘性計算による計算コードの検証

まず Containment の検査体積による計算コードの検証をするため、非粘性計算を行い Median の場合と比較・検証する。計算対象は ONERAM6 翼、自由流マッハ数は 0.84、格子点数は 250114 点である。Fig.3,4 に計算格子を示す。非粘性計算において要求される最小格子幅はさほどシビアでないので、Fig.4 のように、ストレッチした要素はない。計算結果(等密度線図)をそれぞれ Fig.5,6 に、 C_p 分布を実験結果も併せて Fig.7,8 に示す。同図より Median, Containment 両計算とも良い一致を示しており、ストレッチしていない要素では Containment は Median と同等の精度で計算できることが確認できた。

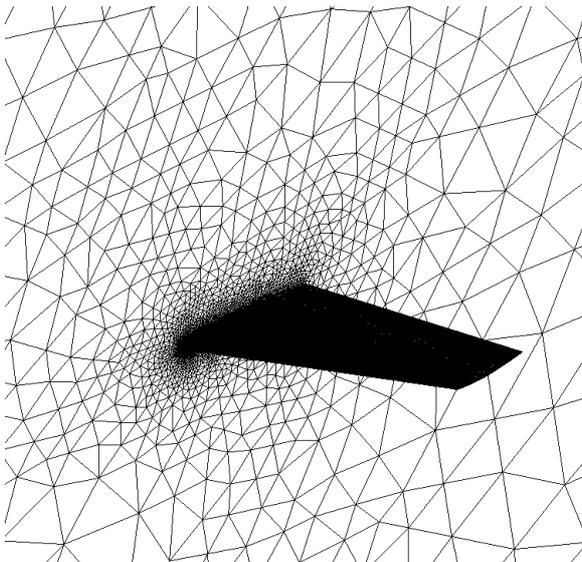


Fig.3 Unstructured grid around ONERAM6wing

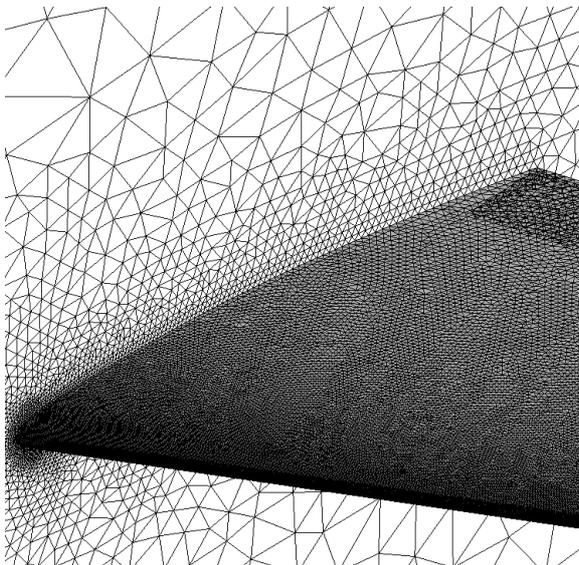


Fig.4 Unstructured grid around ONERAM6wing
(Scaling up on the wing surface)

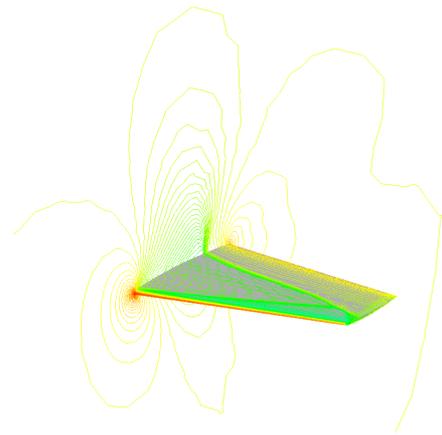


Fig.5 Density Contours(Median)

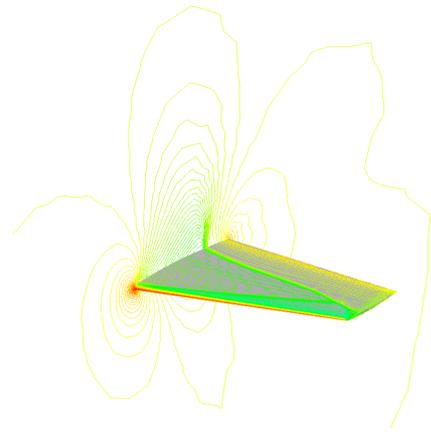


Fig.6 Density Contours(Containment)

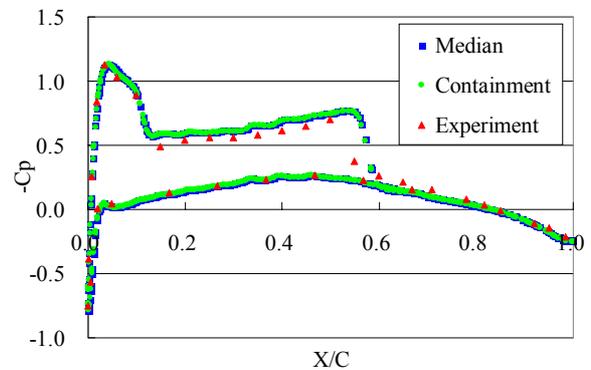


Fig.7 Pressure coefficient distributions for wing section at 44 % semispan

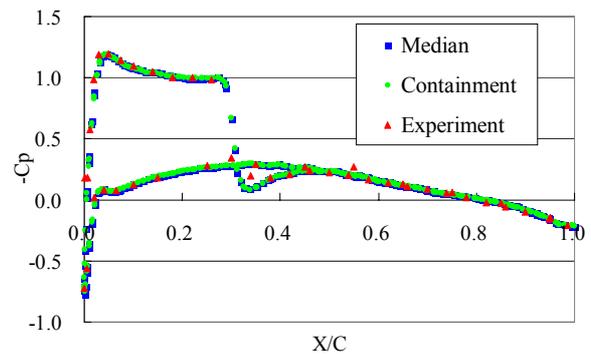


Fig.8 Pressure coefficient distributions for wing section at 90 % semispan

3.2 粘性計算その1

前節により計算コードの信頼性が確かめられたので、本手法を粘性計算に適用する。計算対象は同じく ONERAM6 翼とする。ハイブリッド格子、そのプリズム格子を分割した全領域四面体格子の2種類を用意し、四面体格子の計算では Median, Containment の両計算を行い、比較・検証する。レイノルズ数は 1.46×10^7 、自由流マッハ数は 0.84、格子点数は 830467 点である。Fig.9,10 に全領域四面体の計算格子を示す。前節と違って粘性計算においては、境界層に十分な格子を配さなければならないので、Fig.10 のように翼表面付近は非常にストレッチした要素となる。ハイブリッド格子による計算結果を Fig.11 に、Median, Containment の検査体積による全領域四面体格子での計算結果をそれぞれ Fig.12,13 に示す。また C_p 分布を実験結果も併せて Figs.14-17 に示す。Fig.11 を見て分かる通り、ハイブリッド格子による計算では翼表面上における衝撃波がよく捕らえられているのに対し、四面体格子の場合、Median の検査体積では衝撃波を捕らえられない。一方 Containment による計算ではハイブリッド格子同様、衝撃波の存在が確認できる。Figs.14-17 の C_p 分布からも、Median では衝撃波による2段階の圧力上昇が捕らえていない様子が見て取れる。一方、ハイブリッド格子と Containment では圧力上昇を良く捕えることができている、また実験結果とも非常に良く一致している。

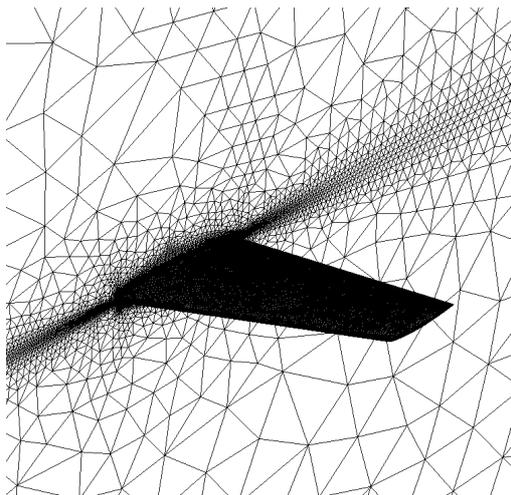


Fig.9 Unstructured grid around ONERAM6wing

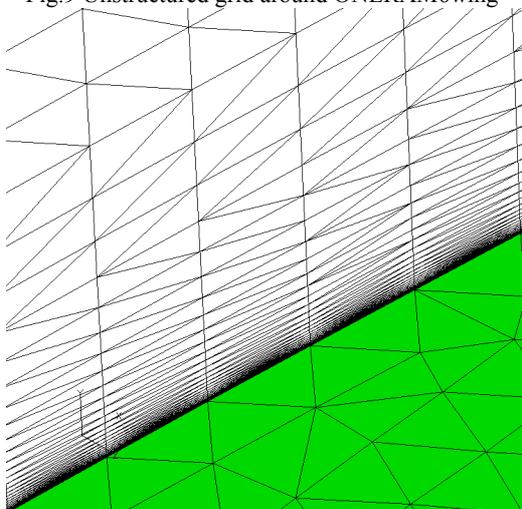


Fig.10 Unstructured grid around ONERAM6wing
(Scaling up on the wing surface)

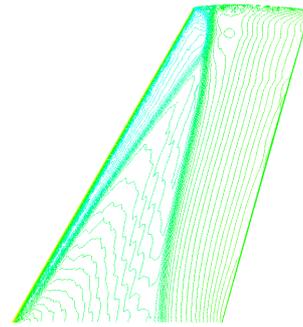


Fig.11 Density contours on the surface of M6wing
(On hybrid grid)

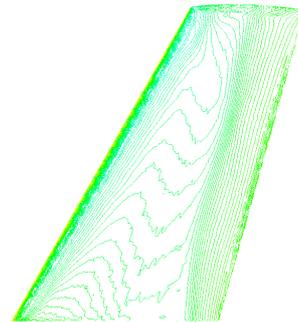


Fig.12 Density contours on the surface of M6wing
(By median dual control volume on tetrahedral grid)

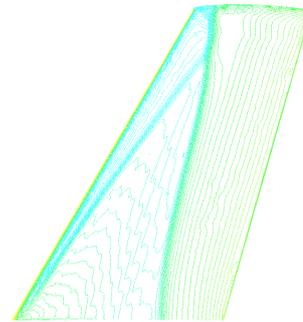


Fig.13 Density contours on the surface of M6wing
(By containment dual control volume on tetrahedral grid)

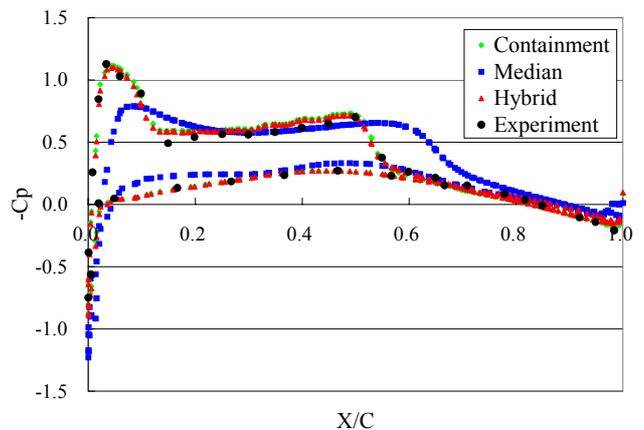


Fig.14 Pressure coefficient distributions for wing section at 44 % semispan

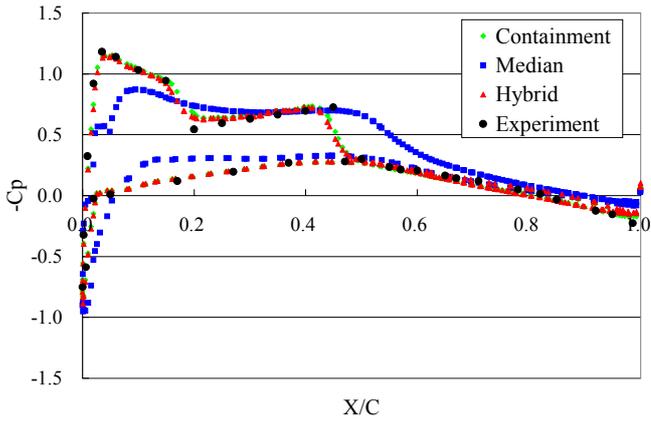


Fig.15 Pressure coefficient distributions for wing section at 65 % semispan

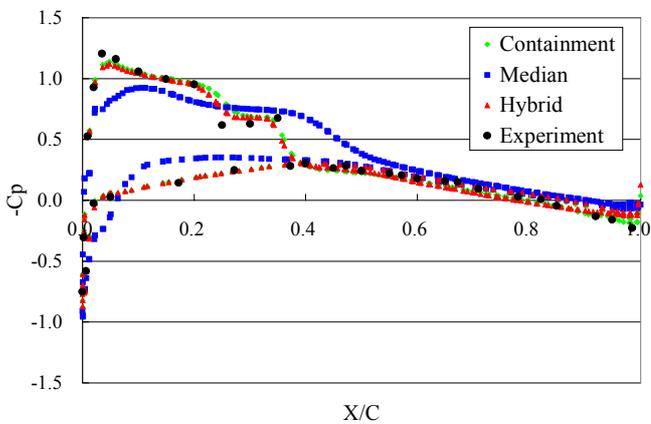


Fig.16 Pressure coefficient distributions for wing section at 80 % semispan

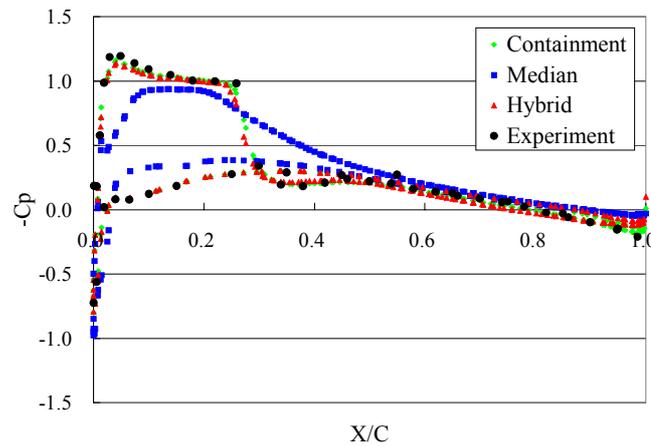


Fig.17 Pressure coefficient distributions for wing section at 90 % semispan

3.3 粘性計算その2

次に対称鋭角フィンが垂直に立てられた平板において生じる3次元の干渉場に対して計算を行う。ハイブリッド格子、そのプリズム格子を分割した全領域四面体格子の2種類を用意して計算を行い、比較・検証する。レイノルズ数は 2.5×10^5 、自由流マッハ数は 2.95、格子点数は 196063 点である。Fig.18 に形状および計算格子を示す。計算結果を Fig.19 に示す。同

図よりハイブリッド格子における計算と Containment による計算は良い一致を示している。また $y=13.34$ における平板上での壁圧分布を Fig.20 に示す。これより両計算は実験値とも良い一致を示していることがわかる。Fig.21 に計算の収束履歴を示す。Containment による計算はハイブリッド格子による計算には劣るものの、非常によく収束している。なお、Median による計算では収束解を得ることはできなかった。Table1. に計算時間の比較を示す。ハイブリッド格子は四面体格子と比べて境界要素数が約 1/2、総要素数で約 1/3、辺の数で約 2/3 となっているため計算時間はおよそ 1.5 倍早い結果となっている。しかし計算の並列化を行うことにより全領域四面体格子においても、より早く計算することは可能であり、大規模な数値シミュレーションを考えると、単一格子による計算の方が望ましいといえる。

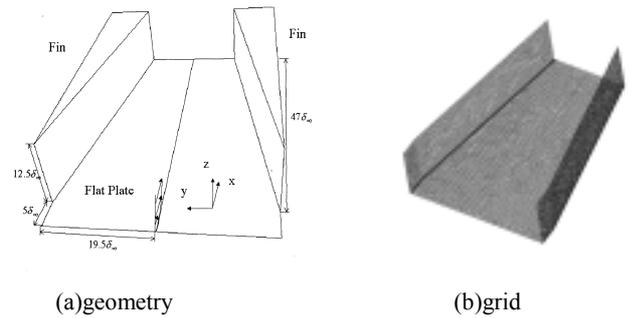
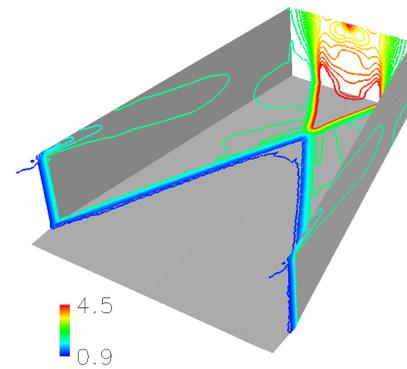
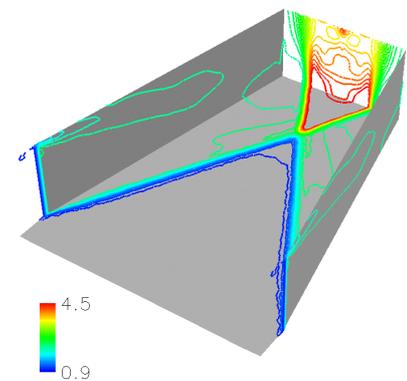


Fig.18 Double-fin



(a)Hybrid grid



(b)Tetrahedral grid (Containment)

Fig.19 Pressure contours

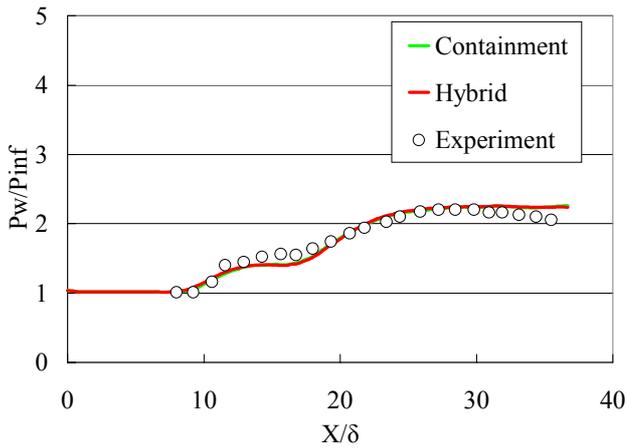


Fig.20 Pressure distributions on the side-wall($y/\delta = 13.34$)

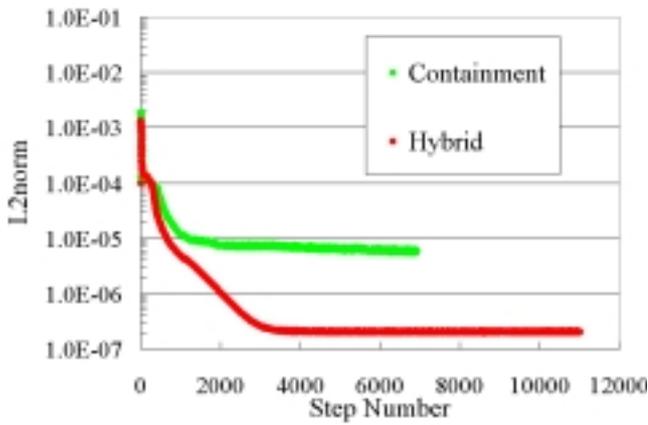


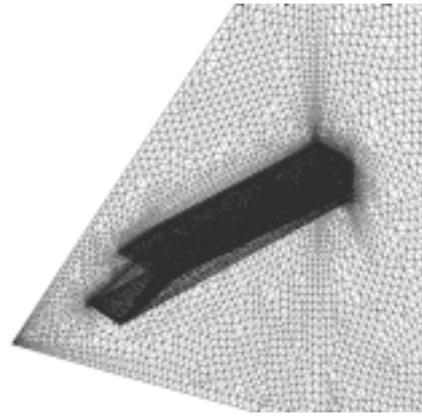
Fig.21 History of convergence

Table1. Comparison of CPU time (NEC SX-4)

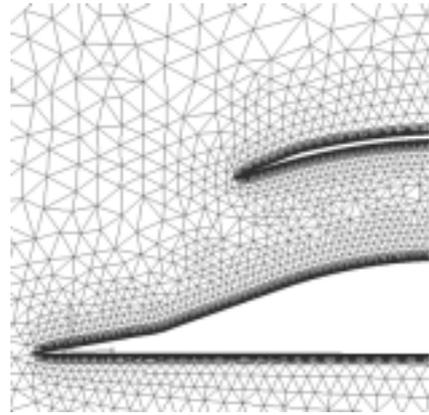
| | ハイブリッド格子 | 四面体格子 Containment |
|---------------------|----------|----------------------|
| 節点数 | 196063 | 196063 |
| 境界要素数 | 17682 | 34358 |
| 要素数 | 307184 | 1137108 |
| 辺数 | 915751 | 1334875 |
| 1 ステップあたりに要するCPU 時間 | 6.4(s) | 9.9(s) |

3.4 超音速インテークの粘性計算

3次元超音速インテーク内の粘性流について本手法により計算を行う。本計算に用いる超音速インテークの四面体の計算格子を Fig.22 に示す。カウル、ランプ、側壁に沿ってプリズム格子が配置されたハイブリッド格子と、そのプリズムを分割した四面体格子とで計算する。レイノルズ数は 3.0×10^6 、自由流マッハ数は 2.0、格子点数は 334291 点である。ランプ付近での等圧線図を Figs.23-25 に示す。同図からはさほど違いは見られないが、Fig.26 に示す側壁での壁圧分布を見るとハイブリッド格子による計算と Containment が近い結果になっているのに対し、Median における計算では結果がなまっていることが確認できる。



(a)External view



(b)Around ramp

Fig.22 Unstructured grid around supersonic intake

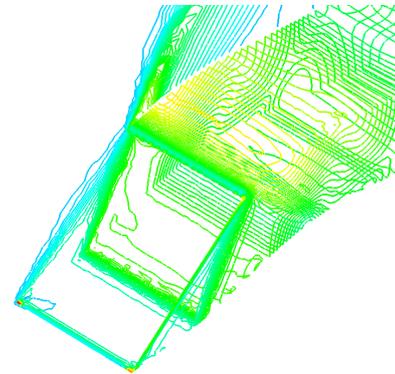


Fig.23 Pressure contours on hybrid grid

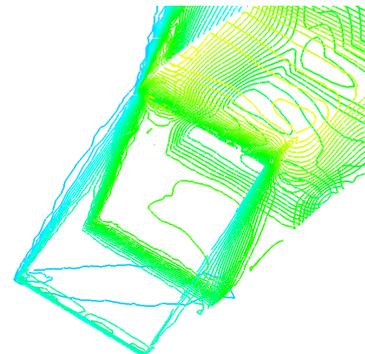


Fig.24 Pressure contours (median)

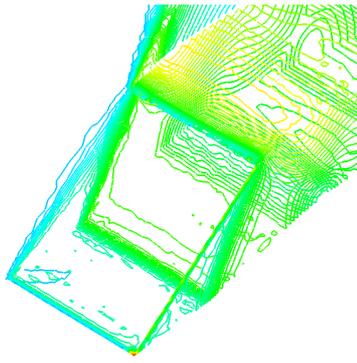


Fig.25 Pressure contours (containment)

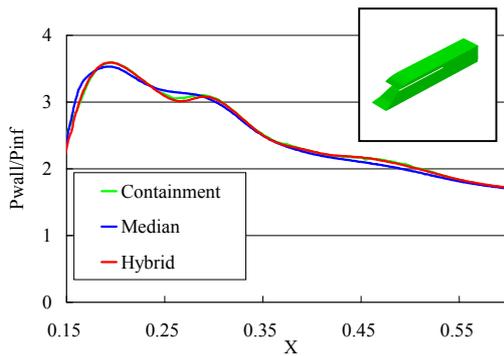


Fig.26 Pressure distributions the side-wall

4. 結言

検査体積の改良による全領域四面体格子の計算を、ハイブリッド格子の計算と比較・検証した。

Containment の検査体積による計算は、Median の場合に比べて高い精度、安定性を示し、それらはハイブリッド格子による計算のそれと同等であった。今後この手法は並列化や解適合法のための、全領域四面体格子の計算に大きく貢献できることが分かった。

参考文献

- (1) 小寺正敏, 中橋和博, 五十嵐康隆, 苅田丈士, 平岩徹夫, 三谷徹, “ハイブリッド非構造格子法を用いたスクラムジェット内部流の数値解析”, 日本機械学会論文集 (B 編) 65 巻 633 号, pp.1513-1519, (1999 年 5 月) .
- (2) D.Sharov, K. Nakahashi, “Reordering of Hybrid Unstructured Grids for Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel Computations”, AIAA J., Vol.36, No.3, pp.484-486, 1998.
- (3) D.Sharov, and K. Nakahashi, “Hybrid Prismatic/Tetrahedral Grid Generation for Viscous Flow Applications”, AIAA J., Vol.36, No2, pp.157-162, 1998.
- (4) Hong Luo, Dmitri Sharov, Joseph D.Baum, Rainald L hner, “On the Computation of Compressible Turbulent Flows on Unstructured Grids,” AIAA Paper 2000-0926,2000.