

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-729

圧縮性NSコードFIVADの
機体伝熱問題に対する応用について

高崎 浩一・大竹 邦彦・小川 哲

1998年7月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目次

1 . はじめに	1
2 . 基礎方程式, 数値計算理論	2
2.1 基礎方程式	2
2.2 基礎方程式の離散化	2
2.3 AUSMDV スキームについて	3
3 FIVAD の構造及び実行手順	4
3.1 FIVAD の構造	4
3.2 実行手順	5
3.3 使用における制約及び注意点	5
4 FIVAD を使用した例題	5
4.1 biconic 形状物体	5
4.2 2次元円柱の非定常空力加熱シミュレーション	6
4.3 再突入物体前胴部	7
5 まとめ	8
6 参考文献	9
7 付 録	9
7.2 連成解析シェルリスト	9
7.3 FIVAD 表面熱流束出力ファイルから	10
7.4 ANSYS 節点温度出力ファイルから	10

圧縮性 NS コード FIVAD の 機体伝熱問題に対する応用について

高崎 浩一^{*1}, 大竹 邦彦^{*1}

小川 哲^{*2}

Application of Navier-Stokes CFD code FIVAD to Structural Heat Conduction Problems

Kouichi TAKASAKI, Kunihiko OHTAKE, Satoru OGAWA

ABSTRACT

A Compressive Navier-Stokes CFD code FIVAD is currently utilized for numerical simulation of heat conduction problems under aerodynamic heating. In this paper we will describe the governing equations and its characteristics of AUSMDV scheme which is used in FIVAD, then show the structures of the code and finally present some computational results of test problems.

Key words: computational fluid dynamics, aerodynamic heating, structural analysis

概 要

圧縮性ナビエ・ストークス CFD コード FIVAD が空力加熱と連成した機体伝熱問題のシミュレーションに利用されている。FIVAD の用いる AUSMDV スキーム等の基礎理論式、実際のコードの特徴と構造、及び機体伝熱問題との連成計算への応用例を示す。

1. はじめに

現在、空力加熱による機体構造の伝熱及び熱応力問題の評価に対して、空力加熱と機体熱伝導の連成数値シミュレーション¹⁾が有用なツールとなっている。また、飛行試験結果または実機そのものが存在しない場合、空力加熱に対応した構造加熱試験を行うためにも、空力加熱の数値シミュレーションにより、空力加熱率または温度の分布及び履歴を設定するためのデータを得ることは必要である。

FIVAD は、航技研の小川、和田らによって開発された CFD コード²⁾である。対象は粘性を持つ圧縮性流体 (FIVAD は実在気体に対応するが、現在筆者らが使用しているコードは完全気体を対象としている) であり、流体運動の基礎方程式である (連続条件、運動量方程式、エネルギー方程式) を一括したベクトル形式とし、セル中心有限体積法の形式で空間的に離散化したものを後述する AUSMDV スキームを用いて解く。

この AUSMDV スキームは、
・衝撃波の捕捉性がよい。

* 受付け 平成 10 年 2 月 4 日受付 (received 4 February 1998)

* 1 構造力学部 (Structural Mechanics Division)

* 2 数理解析部 (Computational Sciences Division)

- ・物体表面での境界層における粘性を過大評価しないため、表面での熱流束を正しく求められる。
 - ・一様流でのエンタルピー保存状態がよい。
 - ・シンプルで計算効率がよい。
 - ・実在気体効果に対応できる。
- といった特徴を有する。

以下、FIVADの用いる基礎方程式、理論、実際の構造、そして応用例について述べる。

2．基礎方程式，数値計算理論

2.1 基礎方程式

圧縮性、粘性を持つ完全気体は、3次元では以下の偏微分方程式に支配される³⁾。

連続条件

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho V = 0$$

運動量保存

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \rho V^T V = -\nabla p + \nabla \cdot P$$

エネルギー保存

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + (e + p)V = \nabla p V + \nabla \cdot k T$$

ここに

- ρ : 気体密度
- P : 気体圧力
- V : 速度ベクトル = (u, v, w)
- e : 内部エネルギー
- h : エンタルピー

$$h = e + p = \left(C_p T + \frac{1}{2} |V|^2 \right)$$

粘性応力テンソル

$$P_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla \cdot V \right)$$

- δ_{ij} : クロネッカーのデルタ
- μ : 粘性係数
- κ : 熱伝導係数
- T : 絶対温度

～ 式を数値計算で一般的なベクトル形式で記述すると次式となる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (E + E_v)}{\partial x} + \frac{\partial (F + F_v)}{\partial y} + \frac{\partial (G + G_v)}{\partial z} = 0$$

ここで、
オイラー方程式に対応する項として：

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (e + p)u \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ p + \rho v^2 \\ \rho vw \\ (e + p)v \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ p + \rho w^2 \\ (e + p)w \end{bmatrix}$$

ナビエーストックス方程式のための付加粘性項、および熱伝導項として：

$$E_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xx} \\ -\tau_{xy} \\ -\tau_{xz} \\ -\tau_{xx}u - \tau_{xy}v - \tau_{xz}w - kT_x \end{bmatrix},$$

$$F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{yx} \\ -\tau_{yy} \\ -\tau_{yz} \\ -\tau_{yx}u - \tau_{yy}v - \tau_{yz}w - kT_y \end{bmatrix},$$

$$G_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{zx} \\ -\tau_{zy} \\ -\tau_{zz} \\ -\tau_{zx}u - \tau_{zy}v - \tau_{zz}w - kT_z \end{bmatrix},$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu(u_y + v_x)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu(w_y + v_z)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu(w_x + u_z)$$

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3}\mu(2u_x - v_y - w_z)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2}{3}\mu(2v_y - w_z - u_x)$$

$$\tau_{zz} = \frac{2}{3}\mu(2w_z - u_x - v_y)$$

である。

式右辺と 式での下付き文字は微分を表し、

$$u_x = \frac{\partial u}{\partial x}, u_{xy} = \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \text{ である。}$$

2.2 基礎方程式の離散化

FIVADは基礎となる偏微分方程式の離散化にセル中心有限体積法⁴⁾を使用している。粘性項を含まない2次元問題の場合を例にとると、先のベクトル方程式は次の形になる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = 0$$

ここで、図1の物理空間における各格子点座標(x, y)と計算空間における各格子点座標(ξ, η) (ξ, η : 物理空間において格子点が序列を持って配置されるように取られる整数)との写像関係は、

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_x & x_h \\ y_x & y_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\xi \\ d\eta \end{bmatrix}$$

逆変換を行うと、

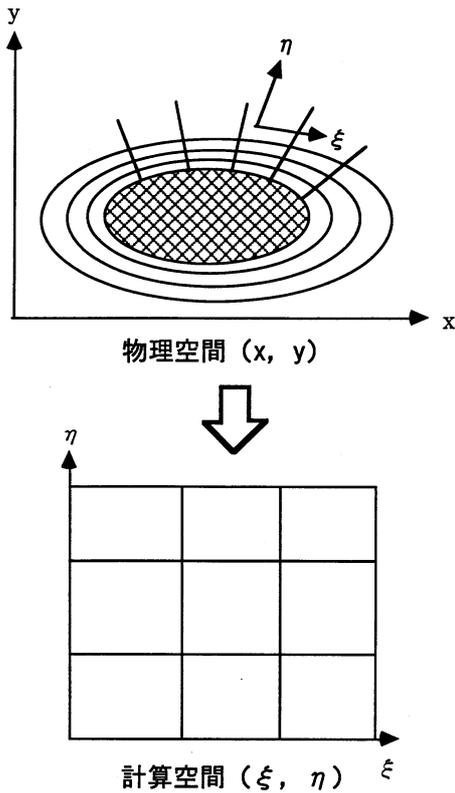


図1 物理空間から計算空間への写像

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} dx \\ dh \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_x & x_y \\ h_x & h_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}, \\ x_x &= J, \quad y_h, \quad x_y = -J, \quad x_h \\ h_x &= -J, \quad y_x, \quad h_y = -J, \quad x_x \\ 1/J &= (x_x y_h - x_h y_x) \end{aligned}$$

(x_x, y_x, x_y, y_h : メトリックス, J : ヤコビアン)

これらを用いて 式を変形すると,

$$\begin{aligned} \frac{1}{J} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{dx} (x_x E + x_y F) + \frac{1}{dh} (h_x E + h_y F) &= 0 \\ \frac{1}{J} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{dx} (y_h E - x_h F) + \frac{1}{dh} (-y_x E + x_x F) &= 0 \end{aligned}$$

よって,

$$\begin{aligned} \frac{1}{J} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{dx} (u_1 F) + \frac{1}{dh} (u_2 F) &= 0 \\ \begin{pmatrix} u_1 = y_h i - x_h j \\ u_2 = -y_x i - x_x j \\ F = E i + F j \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ただし 式中の E, F, F に対する内積は E, F, F の各流束に対応する成分に対して行うものとする。

式から, 先のベクトル式 \sim は, 格子点で構成されるセルにおいて,

$$\begin{aligned} &(\text{セルの物理量の変化率}) / \text{セル体積} \\ &= (\text{各セル境界面を通過しての数値流束の流出入}) \\ &\text{のコントロールボリューム形式で離散化されることが} \\ &\text{わかる。 (図2)} \end{aligned}$$

またこの方法を用いれば, セルの形状が厳密に直交性

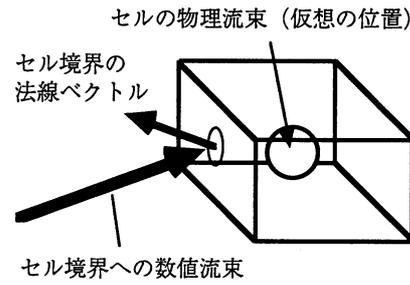


図2 各セルにおける数値流束と物理流束

を保たなくても流束を正しく評価することができる。しかしこの数値流束はセル自体が持つ物理流束とは異なり, 計算スキームが陽に持っているわけではなく, 境界をはさんで隣り合うセルの物理流束から何らかの内挿を行なう必要がある。この内挿の形式がスキームを特徴づけ, これが FIVAD の使用する AUSMDV スキームにも言える。

2.3 AUSMDV スキームについて

圧縮性流体力学の計算法では, リーマン問題 (状態量が空間不連続値を持つ初期値問題) を各部分で解く FDS (Flux Difference Splitting, 流束差分離法) と, 流束ベクトルのヤコビアン行列 ($E, F, G / Q$) の符号によって差分の方向を使い分ける FVS (Flux Vector Splitting, 流束ベクトル分離法) の 2 種の上流差分法が代表的である。

物体表面における熱流束を正しく再現するために CFD コードが持つべき特性としては, 物体表面近く境界層における温度勾配を正しく再現するために数値粘性が少ない必要があり, また同時に急激な物理量変化を伴う衝撃波も安定に捕捉しなければならない。AUSMDV スキーム²⁾ は数値流束の評価には Roe の FDS や Steger-Warming の FVS のような代表的なスキーム⁴⁾ とは別の, 衝撃波前後の質量流束をより直接的に評価し, 同時に接触不連続面での数値粘性を取り除いた新しい 2 種のスキーム: (FDS 的な手法の AUSMD スキーム, FVS 的な手法の AUSMV スキーム) を用いている。AUSMD スキームは数値計算の安定性の面で, AUSMV スキームは衝撃波の捕捉性において優れており, AUSMDV スキームは両者を各点においてその圧力勾配に応じて配分したものである。

図3のようにある方向でセルとその境界を例にとると, セル間境界における, 式の E, F, G に対応する数値流

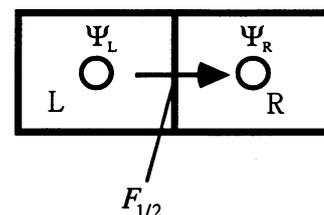


図3 セル境界面における数値流束

束 $F_{1/2}$ は

$$F_{1/2} = \frac{1}{2} \left[(\tau u)_{1/2} (Y_L + Y_R) - \left| (\tau u)_{1/2} \left[(Y_R - Y_L) \right] \right| \right] + P_{1/2}$$

$$Y = (1, u, v, w, H)^T \quad (H \text{ " } puh)$$

と表現され, AUSMD, AUSMV 各スキームは共に

$$(\tau u)_{1/2} = u_L^+ \tau_L + u_R^- \tau_R,$$

$$u_{L/R}^- = \begin{cases} \bar{a}_{L/R} \left\{ \frac{(u_{L/R}^+ + c_m)^2}{4c_m} - \frac{u_{L/R}^- |u_{L/R}^-|}{2} \right\} + \frac{u_{L/R}^- |u_{L/R}^-|}{2} : \text{if } \frac{|u_{L/R}^-|}{c_m} \leq 1 \\ \frac{u_{L/R}^- |u_{L/R}^-|}{2} : \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\bar{a}_{L/R} = \frac{2(p/\tau)_{L/R}}{(p/\tau)_L + (p/\tau)_R},$$

$$c_m = \max(c_L, c_R)$$

$$p_{1/2} = p_L^+ + p_R^-,$$

$$p_{L/R}^- = \begin{cases} p_{L/R} \left(\frac{u_{L/R}^-}{c_m} - 1 \right)^2 \cdot \left(2 - \frac{u_{L/R}^-}{c_m} \right) / 4 : \text{if } \frac{|u_{L/R}^-|}{c_m} \leq 1 \\ \frac{u_{L/R}^- |u_{L/R}^-|}{2u_{L/R}^-} : \text{otherwise} \end{cases}$$

を使用している。

(C_L, C_R : 各セルの音速)

両者の違いは, 運動量保存の部分(ここでは u^2)を評価する時であり, AUSMD では, 式と同様に

$$(\tau u^2)_{AUSMD} = \frac{1}{2} \left[(\tau u)_{1/2} (u_L + u_R) - \left| (\tau u)_{1/2} \left[(u_R - u_L) \right] \right| \right]$$

だが, AUSMV は,

$$(\tau u^2)_{AUSMV} = u_L^+ (\tau u)_L + u_R^- (\tau u)_R$$

と評価する。

AUSMDVスキームは両スキームを 式のように配分したものである。

$$(\tau u^2)_{AUSMDV} = \left(\frac{1}{2} - s \right) (\tau u^2)_{AUSMD} + \left(\frac{1}{2} + s \right) (\tau u^2)_{AUSMV}$$

$$s = \frac{1}{2} \min \left(1, K \frac{|p_R - p_L|}{\min(p_L, p_R)} \right)$$

s は両スキームの割合を決め, セル間の圧力差によって 0 ~ 0.5 の範囲(圧力差が 0 であれば AUSMD : AUSMV = 0.5 : 0.5, 圧力差が低圧側の 1/K 以内であれば 0.5 - s : 0.5 + s , それ以上であれば 0 : 1) となる。現在使用されている FIVAD ではこの圧力差の影響を調整する定数 $K = 10$ と

している。

3 FIVAD の構造及び実行手順

3.1 FIVAD の構造

FIVAD 内部の計算手順の概略図を図 4 に示す。FIVAD 自体はコンパクトであり, 各計算ケースごとに入力ファイルと FIVAD とを共通のディレクトリ中で実行させる事ができる。各計算ケースで境界条件ルーチン BOUNDT も変更する。

3 次元物体の場合, 主な入出力ファイルを以下に示す。

cmach, t2, rho2, dt, dt2, itlfin, aoa

外部流マッハ数, 温度, 密度, 1 次および 2 次時間幅, イタレーション数, 迎角 (subroutine init1 で入力)

n1, n2, n3

i, j, k 方向格子数

x(1:n1, 1:n2, 1:n3),

y(1:n1, 1:n2, 1:n3),

z(1:n1, 1:n2, 1:n3)

格子座標

(subroutine grid2 で入力)

twall(1:n1-1, 1:n3-1)

物体初期表面温度

(subroutine dtwall で入力)

等温条件, また輻射平衡条件ならばファイル入力の必要はなく, プログラム中で作製してもよい。

hwall(1:n1-1, 1:n3-1)

機体表面の熱流束分布 (subroutine output1 で出力)

また, 参考のために, 他の使用変数を以下に示す。

e1, e2, e3(1:n1, 1:n2, 1:n3, 1:3)

メトリックス

voli(1:n1, 1:n2, 1:n3)

各セルの体積の逆数

q(0:n1, 0:n2, 0:n3, 1:5)

各セルの物理量

q(i, j, k, 1) : 密度

q(i, j, k, 2:4) : 運動量

q(i, j, k, 5) : エネルギー項

u(0:n1, 0:n2, 0:n3)

各セル内の速度

c(0:n1, 0:n2, 0:n3)

各セル内の音速

p(0:n1, 0:n2, 0:n3)

各セル内の圧力

t(0:n1, 0:n2, 0:n3)

各セル内の温度

fff(1:n1, 1:n2, 1:n3, 1:5)

各セル物理量の増分

ishock(0:n1, 0:n2, 0:n3, 1:3)

衝撃波捕捉記録

ts(0:n1, 0:n2, 0:n3)

各セルの積分間隔

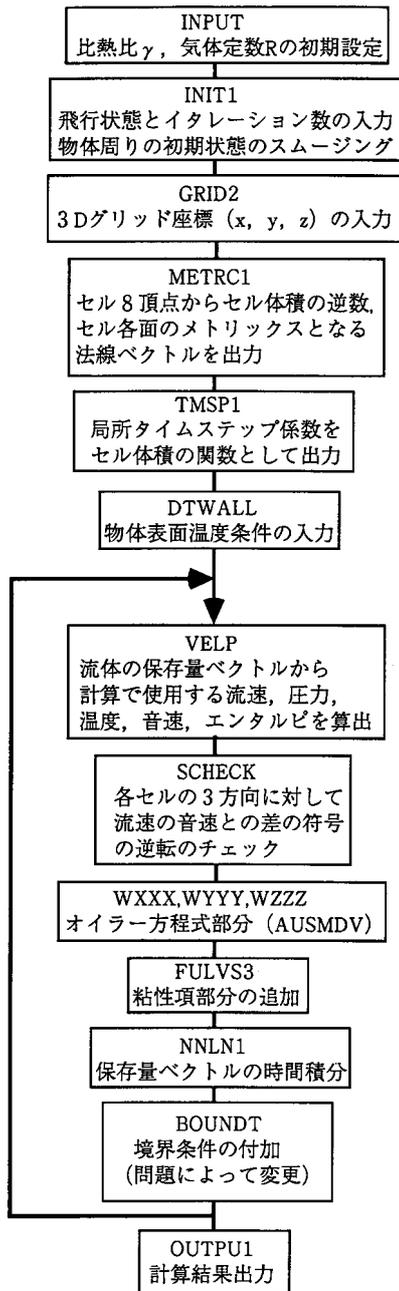


図4 FIVAD 計算手順の概略図

3.2 実行手順

入出力ファイルおよび伝熱解析FEMとの典型的な連成計算手順を図5に示す。FIVADはセル中心有限体積法を使用しているため、伝熱解析FEMへのインターフェイスはセル境界面そのものを熱流束境界条件の対象とする必要がある。また同時に各セルの物理量はセルの頂点ではなくセル自体が持つため、可視化の際にも注意を要する。

伝熱解析FEMとの連成計算の場合、現時点では考慮する時間領域を有限数のステップに分割して各計算ステップ初期における表面熱流束をステップ間で一定とした方式で解析している。伝熱解析FEM^{5), 6)}が非定常解析に

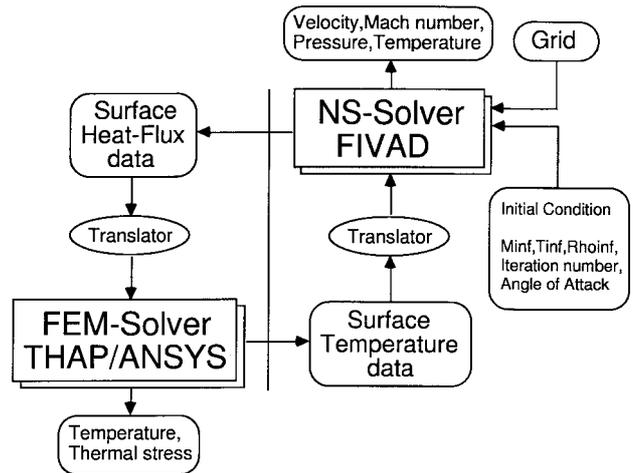


図5 FIVAD の FEM ソルバとの連成計算手順

対応しているのに対し、現在使用しているFIVADは定常解を出力することを目的に作成されているが、少なくとも現在行っているような非定常連成解析方法については、空力解析は各ステップ開始点の瞬間の機体表面温度に対応する表面熱流束をFEMソルバに与えることが目的となるため、定常解で対応が可能である。実際には、3次元解析の場合は計算時間との兼ね合いから5ステップ、2次元解析の場合は10~20のステップ数を用いている。与えられた飛行条件でのステップ幅の解析精度への影響は今後の課題である。

3.3 使用における制約及び注意点

FIVADは実在気体に対応できるCFDコードだが、現時点では著者らは第1段階として完全気体に設定したものをを用いている。しかし、後に応用例で示すように、文献[3]のような風洞試験や解離の生じない超音速域の機体前部のシミュレーションには、剥離流までは十分適用できるであろう。

また、境界の外にダミーセルを配置しているため、物体表面における境界条件は特別な外挿の必要なく得られるのもFIVADの利点である。

4 FIVAD を使用した例題

4.1 biconic 形状物体

実際の試験結果との熱流束値の整合性を調べるため、文献[7]における風洞試験結果を軸対称FIVADコードで模擬したものである。

グリッド数	: 49 × 32
マッハ数	: 9.86
一様流温度	: 48.9 K
一様流密度	: 4.27 × 10 ⁻³ kg/m ³
機体表面温度	: 試験データから補間
イタレーション数	: 10000

計算時間 : 約 5 分
(MIPS R10000, 190 Mhz)

次元のFIVADコードを文献[8]に対応するステンレス製円柱への非定常熱伝導計算に適用した結果である。詳細については付録に示す。

図 6 にグリッド形状, 図 7 に表面熱流束の試験結果と計算結果との比較を示す。低レイノルズ数 (2.318×10^5) である事と主流のエンタルピが低いために, 非解離かつ層流解でも試験結果と非常によく一致を見せている。

グリッド数 : 45 × 40
マッハ数 : 6.47
一様流温度 : 241.7 K
一様流密度 : 0.01032 kg/m³
機体表面温度 : 伝熱解析 FEM の出力を使用
イタレーション数 : 10000 × 10 回

4.2 2次元円柱の非定常空力加熱シミュレーション
空力加熱と構造熱伝達との連成計算の 1 例として, 2

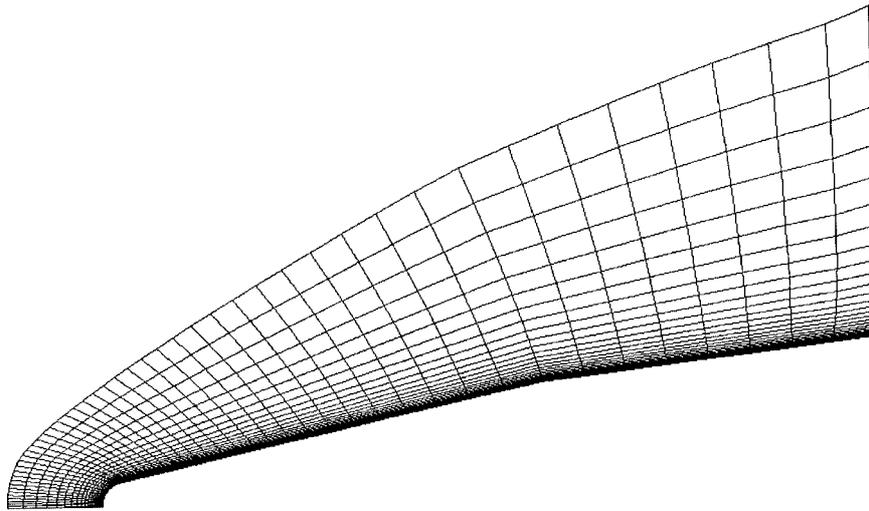


図 6 biconic 形状物体に対する CFD グリッド

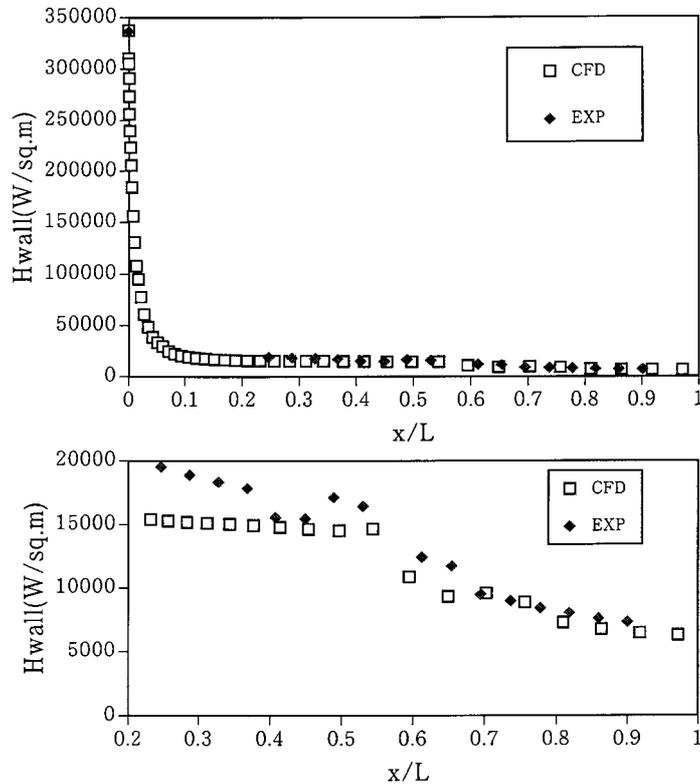


図 7 表面熱流束の CFD と実験結果 (文献 3) との比較

計算時間 : 約 60 分
(PA8000, 180 Mhz)

迎角 : 40 度
マッハ数 : 10.8
一様流温度 : 264.6 K
一様流密度 : $1.92 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
機体表面温度 : 300 K (一定)
イタレーション数 : 5000
計算時間 : 約 250 分
(MIPS R10000, 190 Mhz)

図 8 に空力加熱解析 CFD, 図 9 に構造伝熱解析 FEM のグリッドを, 図 10 に円柱断面の温度分布を, 図 11 に温度分布に対応する熱応力 (ミーゼス応力) を示す。

4.3 再突入物体前胴部

大気圏再突入物体の前胴部を想定した 3 次元シミュレーションである。

グリッド数 : 49 × 40 × 26

図 12 に機体表面の熱流束分布を, 図 13 に表面熱流束の残差の最大値の収束状況を示す。

機体構造の伝熱解析との連成シミュレーションの結果

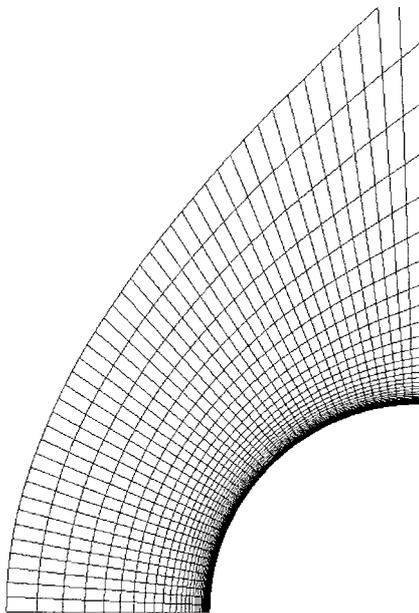


図 8 2次元円柱に対する CFD グリッド

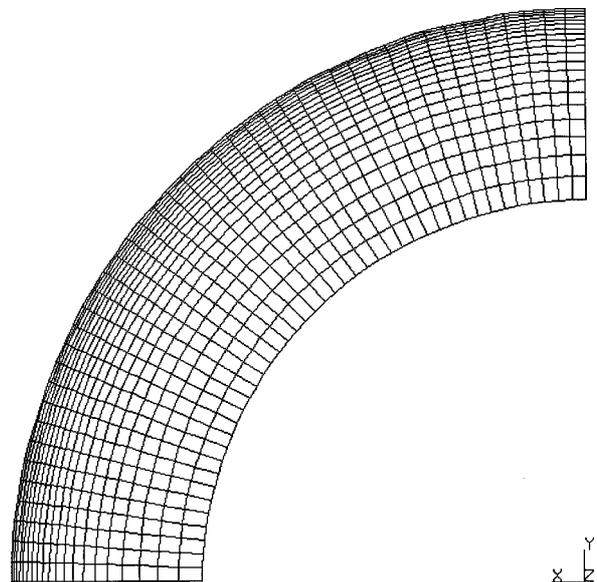


図 9 2次元中空円柱の FEM メッシュ

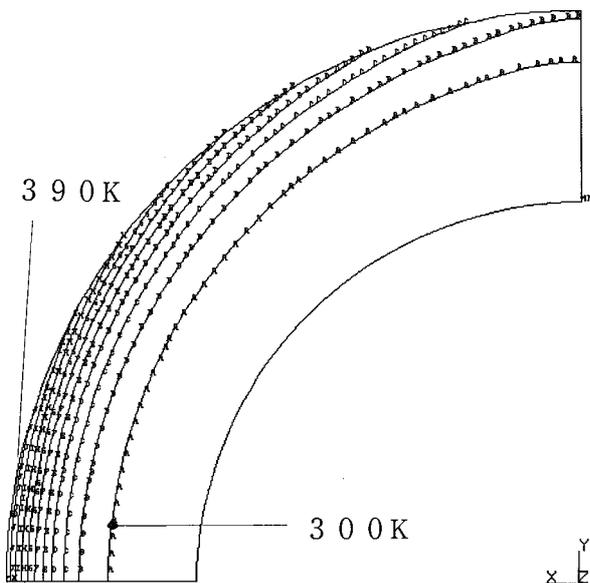


図 10 円柱断面温度分布

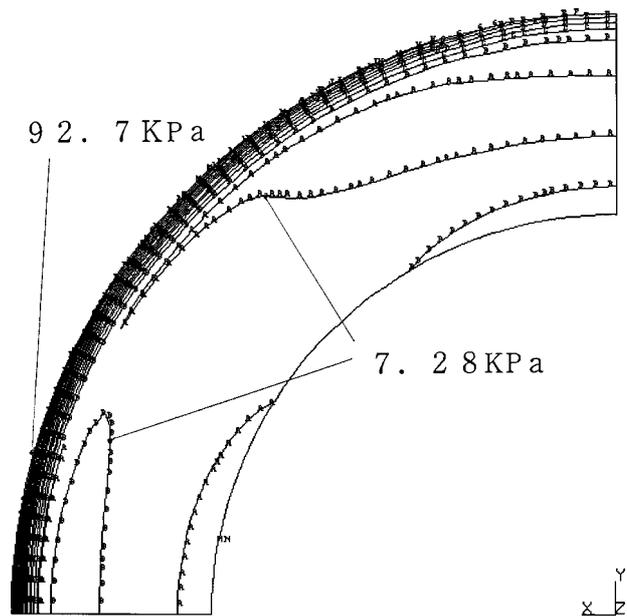


図 11 円柱断面応力分布

については、文献 [1] を参照されたい。

まとめ

現在機体伝熱問題のシミュレーションに使用されている圧縮性ナビエ・ストークスCFDコードFIVADについて、その基礎理論式、特徴、応用例が示された。FIVADは物体表面近くの少ない数値粘性と安定な衝撃波の捕捉性を兼ね備えたコードであり、超音速で飛行する物体の伝熱解析に要する表面熱流束を良好に得ることができる。基礎方程式の離散化にはセル中心有限体積法が使用され、物体表面及びグリッド外界の境界条件はダミーセルを利用

しているために外挿の必要なく得られる。現在使用されているものは気体の解離吸熱、及び乱流は考慮していないが、実際の解析の例から、解離の生じない低エンタルピ流または超音速域ならば空力加熱が特に問題となる構造前部には十分対応できる事が、また計算時間については、空間微分値であり長い収束時間を必要とする熱流束値に対しても現在のワークステーションの能力であれば実用的な範囲に収まることが示された。

本資料をまとめるに当たって、航空宇宙技術研究所超高速空力学研究室長の山本行光氏には、空力加熱を受ける円柱問題についての資料をご提供くださった。また、

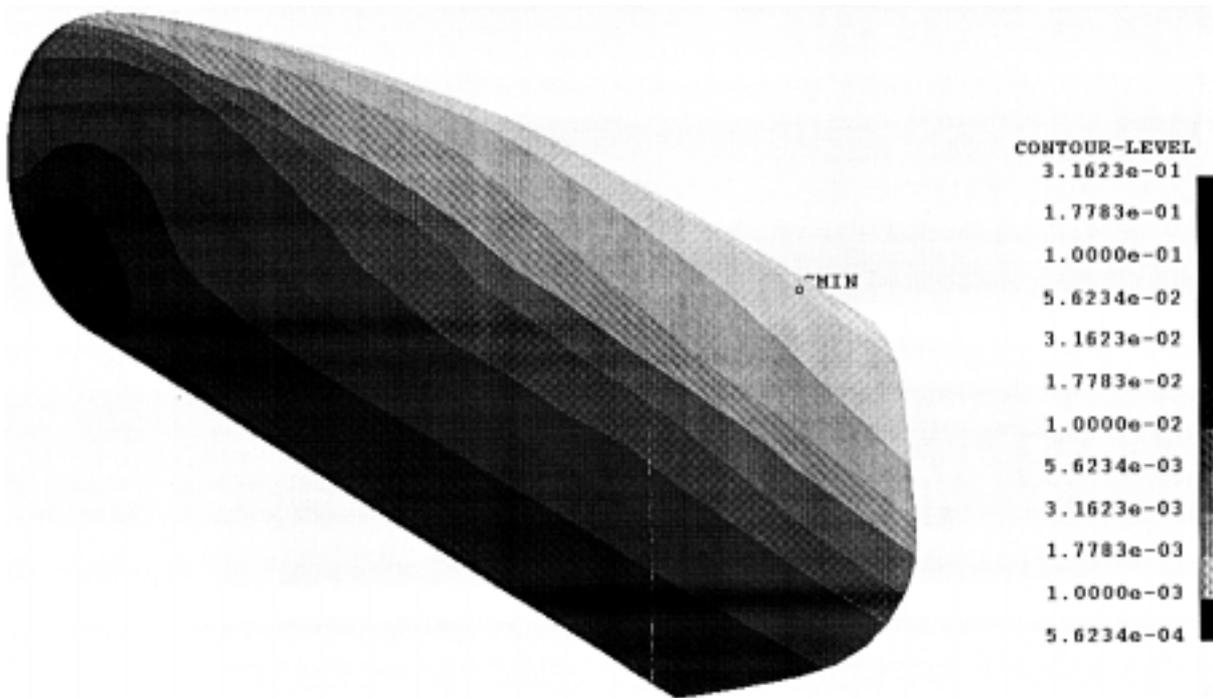


図 13 表面熱流束の残差履歴

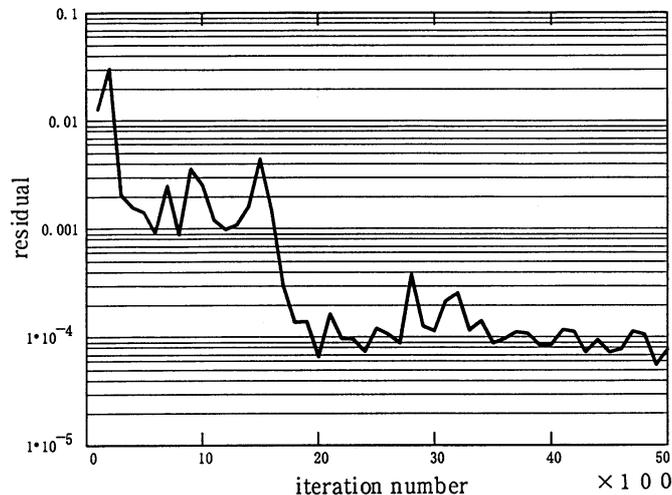


図 13 表面熱流束の残差履歴

長銀情報システムの羽地和彦氏にはFIVADの実際の運用方法についてのご指導を受けた。ここに感謝の意を表す。

6 参考文献

- 1) 大竹邦彦, 小川 哲, 甲斐高志, 羽地和彦; 空力加熱を受けるHYFLEX構造の非定常熱解析, 航技研特別資料(sp-32), 1996
- 2) Wada, Y. and Liou, M.; A flux splitting scheme with high-resolution and robustness for discontinuities, AIAA PAPER 94-0083
- 3) 保原 充, 大宮司久明 編; 数値流体力学, 東京大学出版会(1992)
- 4) 藤井考蔵; 流体力学の数値計算法, 東京大学出版会(1995)
- 5) 大竹邦彦, 蒲原美都子, 井上裕子; 組立構造物熱解析コードTHAP.V3, NAL J-94004, 1994
- 6) サイバネットシステム ; ANSYS 伝熱解析セミナーノート, サイバネットシステム, 1996
- 7) Miller, C.G.; Experimental and Predicted Heating Distributions for Biconics at Incidence in Air at Mach 10, NASA TP-2334, 1984
- 8) P.Dechaumphai, E.A.Thornton, and A.R.Wieting; Flow-Thermal-Structural Study of Aerodynamically Heated Leading Edges, J.spacecraft Vol.26, No.4 pp201-209, 1989

7 付 録

空力加熱を受ける2次元円筒問題の詳細

4章で触れた, 空力加熱を受ける2次元円筒の伝熱連成解析の詳細について以下に述べる。

対象は外径76.2 mm, 内径50, 8 mmのステンレス円柱であり, 2次元4分割モデルを使用した。物性値は以下の通りである。

密度 : 7.99×10^3 (Kg / m³)
 比熱 : 511 (J/Kg · K)
 熱伝導率 : 16.5 (W/m · K)
 ヤング率 : 1.98×10^{11} (Pa)
 ポアソン比 : 0.33

表面放射率が不明のために放射熱流束は考慮していないが, これはFIVAD中で容易につけ加えることができる。

全体的な連成解析の手順は図5の通りである。連成解析用のシェル及び伝熱解析コードとFIVAD間のデータ変換のプログラムリストを以下に示す。

7.2 連成解析シェルリスト

```
@ number = $1
@ count = 1
while($count <= $number)
    cp initcond.0$count initcond
    cp inittemp.0$count inittemp
    echo "execute FIVAD."
    cylcouple
# wait until FIVAD output file will exist.
@ endflg = 0
while($endflg == 0)
    if(-e hwall.fvd) then
        echo "FIVAD heatflux data exist."
        @ endflg = 1
        sleep 1
    else
        sleep 10
    endif
end
cp hwall.fvd hwall0$count
# check new analysis or restart.
if($count == 1) then
    cp new NeworRst
else
    cp rest NeworRst
endif
# copy last time for ANSYS load step.
cp lasttime.0$count lasttime
echo "make ANSYS logfile."
mkanslog
rm hwall.fvd
echo "execute ANSYS logfile."
ansys53 -p ANFL <heatflow.log> file.lst
# wait until ANSYS output file will exist.
@ endflg = 0
while($endflg == 0)
    if(-e nodetemp.ans) then
        echo "ANSYS temperature data exist."
        @ endflg = 1
        sleep 1
    else
        sleep 10
    endif
end
echo "translate ANSYS output file (nodetemp.ans)"
echo "      to FIVAD input file (celltemp.fvd)."
readanstemp
```

```

mv nodetemp.ans nodetemp.0$count
@ count++
echo "copy celltemp.fvd to inittemp.0*."
cp celltemp.fvd inittemp.0$count
end

```

7.3 FIVAD 表面熱流束出力ファイルから ANSYSログファイルへのデータ変換プログラムリスト

```

program make_ansyslogfile

parameter(pi = 3.14159265,area = 0.0381*pi*0.5/44)
dimension hwall(44),hflowout(45)

open(1,file='hwall.fvd')
do i=1,44
  read(1,*) hwall(i)
  hwall(i) = hwall(i) * area
enddo
close(1)

do i=1,45
  if (i .eq. 1) then
    hflowout(i) = 0.5 * hwall(i)
  elseif (i .eq. 45) then
    hflowout(i) = 0.5 * hwall(i-1)
  else
    hflowout(i) = 0.5 * (hwall(i-1)+hwall(i))
  endif
enddo

open(0,file='heatflow.log')
write(0,*) '/batch'
write(0,*) '/prep7'
write(0,*) 'resume,file,db'
write(0,*) 'finish'
write(0,*) '/solution'

open(1,file='NeworRst')
read(1,*) n
if (n .eq. 0) then
  write(0,*) 'antype,trans,new'
  write(0,*) 'toffst,0'
  write(0,*) 'ic,all,temp,294.4'
else
  write(0,*) 'antype,trans,rest'
endif
enddo

```

```

close(1)

write(0,*) 'kbc,1'
open(1,file='lasttime')
read(1,*) time
write(0,*) 'time,',time
write(0,*) 'deltim,0.01'
write(0,*) 'autots,on'
close(1)

do i=1,45
  if (i .eq. 1) then
    n = 1
  elseif (i .eq. 45) then
    n = 2
  else
    n = i+1
  endif
  write(0,*) 'f,',n,',heat,',hflowout(i)
enddo

write(0,*) 'solve'
write(0,*) 'finish'
write(0,*) '/post1'
write(0,*) '/output,nodetemp,ans'
write(0,*) 'prnsol,temp'
write(0,*) '/output,term'
write(0,*) 'finish'
write(0,*) 'exit'
end

```

7.4 ANSYS 節点温度出力ファイルから FIVAD入力ファイルへのデータ変換プログラムリスト

```

program readnodetemp
parameter(Nonode = 945)
real*8 nodetemp(Nonode),ntemp(45)

open(1,file = 'nodetemp.ans')

read(1,*)
read(1,*)

n = 0

do i=1,1000
  do ii=1,16

```

```
    read(1,*)
enddo

do ii=1,39
    n = n+1
    read(1,*) node,nodetemp(n)
    if ( n .eq. Nonode) then
        goto 10
    endif
enddo
enddo
10 continue

close(1)

do i=1,45
    if (i .eq. 1) then
        n = 1
    elseif (i .eq. 45) then
        n = 2
    else
        n = i+1
    endif
    ntemp(i) = nodetemp(n)
enddo

open(0,file = 'celltemp.fvd')

do i=1,44
    write(0,fmt = '(e12.5)') 0.5*(ntemp(i) + ntemp(i+1))
    write(*,fmt = '(e12.5)') 0.5*(ntemp(i) + ntemp(i+1))
enddo
close(0)

end
```

航空宇宙技術研究所資料 729号

平成10年7月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話(0422)47-5911 ㊦182-8522
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

禁無断複写転載

本書(誌)からの複写,転載を希望される場合は,管理部 研究
支援課係にご連絡ください。

Printed in Japan