

ブラフボディを有する高速流れ場の数値解析

佐藤幸徳* 藤秀実*
安藤安則* 河合理文*

Numerical Analysis of High Velocity Flow Field Around the Bluff Body

by

Yukinori SATO, Hidemi TOH,
Yasunori ANDO and Masafumi KAWAI
Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

A finite-volume numerical analysis method for the solution of three-dimensional incompressible steady Navier-Stokes equation in general curvilinear coordinate system is presented. The main solution algorithm of the method is an extension of SIMPLE algorithm to present general curvilinear coordinate formulation. The standard k- ϵ two equations turbulence model is used for the closure of the Reynold equation. Numerical analysis are compared with the experimental results for the flow field around the U-shaped gutter in a diffuser, with fairly good consistence. This method is applied to the calculation of turbulent three-dimensional flows around the bluff body to obtain the velocity and temperature flow field. A feature of the velocity and temperature field around the bluff body was clarified.

1. 緒 言

ジェットエンジンのアフタバーナや将来の高速輸送機用推進機関として考えられているターボラムジェットやATRの燃焼器の高速流れ場では保炎を行うのにガッタ(ブラフボディ)を置きその後流にできる低速の再循環領域を利用することが行われる。この流れの把握は燃焼の安定性や燃焼効率の観点から重要である。

ガッタ周りの数値解析はこれまで周方向にガッタ形状が変化しない2次元あるいは軸対称モデルで、しかもガッタを三角形などに置きかえた単純なモデ

ルでの解析が行われている^{1,2)}。

ところで現在実用化されているガッタでは周方向に一樣な環状ガッタに半径方向に伸びる半径方向ガッタを組み合わせた複雑な3次元形状になっているものもある。

従来3次元解析は直交座標系に基づく手法³⁾が行われてきたが、この手法で複雑な形状を解析するには形状を正確に表わすため計算格子が膨大となり、計算機容量および計算時間の点で限界があった。

ここでは3次元ガッタ周りの流れおよび熱移動解析を行うため、従来の直交座標系3次元解析に複雑な形状の解析に適した一般曲線座標系を導入して行った。

* 石川島播磨重工業(株)

2. 数値解析手法

2.1 支配方程式

図1に示す流れ場を3次元定常非圧縮性粘性流で標準の $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いれば、流れ場の支配方程式は式(1)ようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho U \Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W \Phi) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial z}) + S_\phi \end{aligned} \quad (1)$$

ここで x, y, z は直交座標、および U, V, W はそれぞれの方向の時間平均流速成分に対応している。また ρ は密度、 Φ は解くべき変数を表し、 Γ_ϕ は各変数の有効拡散係数、 S_ϕ は各変数に関する対流項と拡散項以外のソース項である。表1に Γ_ϕ と S_ϕ についてまとめる。

式(1)を一般曲線座標 (ξ, η, ζ) に変換すると、式(2)ようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi}(\rho G_1 \Phi) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho G_2 \Phi) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\rho G_3 \Phi) \right\} \\ &= \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi}(\Gamma_\phi \frac{A}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\Gamma_\phi \frac{B}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta}) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\Gamma_\phi \frac{C}{J} \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta}) \right\} + S_\phi(\xi, \eta, \zeta) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで J はヤコビアンであり、 S_ϕ はソース項を座標変換したものおよび一般曲線座標の非直交性から生じる項である。また G_1, G_2, G_3 は反共変ベクトルに類するもので式(3)となる。

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= a_1 U + a_2 V + a_3 W \\ G_2 &= b_1 U + b_2 V + b_3 W \\ G_3 &= c_1 U + c_2 V + c_3 W \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

更に A, \dots, C や a_1, \dots, c_3 は座標変換に

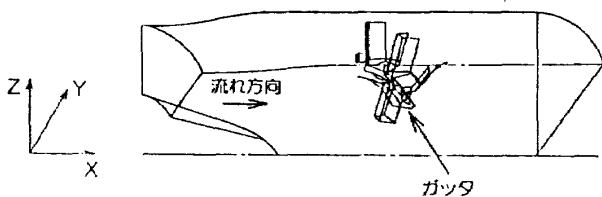


図1 解くべき場

伴う係数である。

支配方程式群(3)を適当な境界条件のもとで数値解析するため、有限体積法を用いて差分方程式を導く。差分格子としては、スタガード格子(流速成分格子をスカラー量格子間に配置したもの)を採用した。図2に示す計算格子まわりのコントロール・ボリューム内にて支配方程式を積分することにより、次の代数方程式が得られる。

$$\begin{aligned} A_p \Phi_p &= A_E \Phi_E + A_W \Phi_W + A_N \Phi_N + A_T \Phi_T + A_B \Phi_B \\ &+ S_\phi(\Phi_E, \dots, \Phi_N, \dots) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで A_p, A_E, \dots, A_B は各差分格子点における差分係数であり、各係数に含まれる対流項と拡散項の寄与はハイブリッド・スキームにより評価した。

差分方程式の解法はSIMPLEアルゴリズム⁴⁾を3次元一般座標系に拡張したものである。代数方程式はVP計算機に適したChecker-Board法⁵⁾に基づく反復法により解いた。

表1 Γ_ϕ と S_ϕ のまとめ

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
1	0	0
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x})$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y})$
w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z})$
k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \epsilon$
ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$G_k C_1 \epsilon / k - C_2 \rho \epsilon^2 / k$

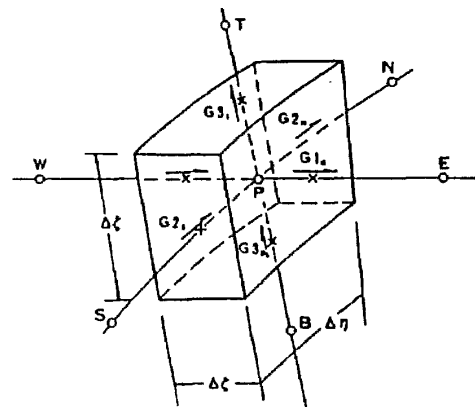


図2 計算格子とコントロール・ボリューム

3. 数値解析結果

本解析手法の有効性確認のためまずディフューザを有するダクト中に軸対称Uガッタを置いた場合の流れの検証をした。次に環状ガッタに半径方向ガッタを組合せた3次元形状ガッタと燃料噴射弁マニホールドを有する流れ場での流れ、熱移動解析に適用した。

3.1 検証

検証は図3に示すディフューザを有するダクト中にUガッタがある場に行った。流れの特徴の検証のため、①全体フローパターン、②Uガッタ後方の再循環領域長さ、③ディフューザ出口速度分布について調べた。実験は速度分布とフローパターンを共に得るため水流可視化試験装置⁶⁾にて行い、可視化は水の電気分解にて得られる水素気泡による。ファン流およびコア流は同じ流速であり、Uガッタ幅代表で Re 数は 2×10^4 である。図4にフローパターンの解析結果を示す。ディフューザテールコーンのハクリや、Uガッタ後方の燃焼の安定性などに重

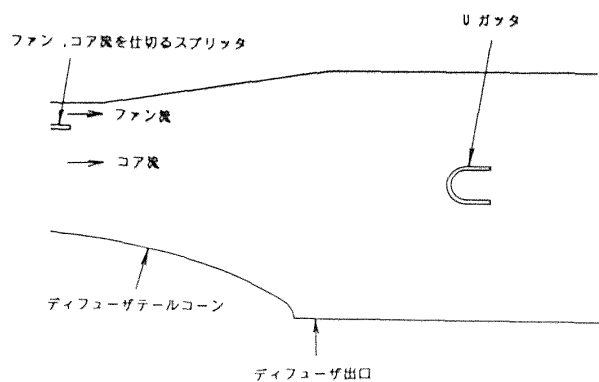


図3 検証解析モデル

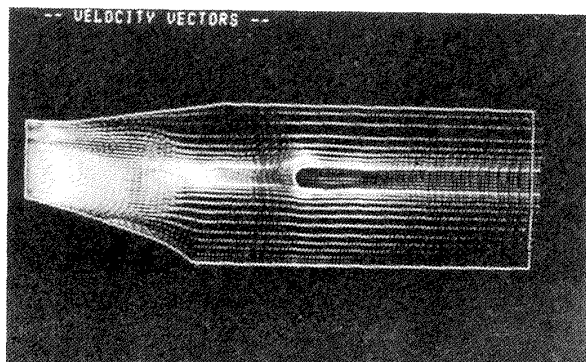


図4 フローパターン(解析)

要な意味をもつ再循環領域を捕えている。図5に可視化実験結果を示すが、ディフューザテールコーン部のハクリ領域は実験結果の方が大きい。Uガッタ後方の再循環領域の長さは解析、実験共にUガッタ幅の約2.5倍となり一致している。図6にディフューザ出口部の速度分布を示す(位置を図3に示す)。

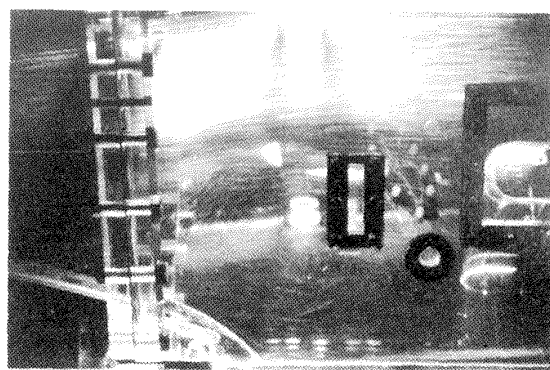


図5-1 ディフューザ部フローパターン (実験結果)

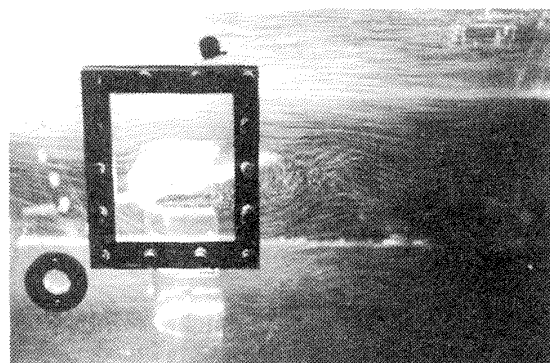


図5-2 ガッタ後流のフローパターン (実験結果)

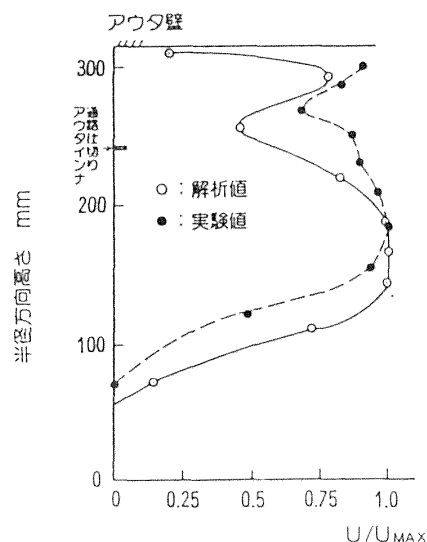


図6 ディフューザ出口速度分布検証

速度は最大流速で無次元化しているが、定性的には解析と実験値は一致している。ファン流とコア流を仕切るスプリッタの影響が下流まで現われている。

本解析法は、定性的には流れの性格を捕えており、有効であると判断した。

3.2 3次元形状ガッタ囲り数値解析例

図7に示すモデル例について解析を試みた。3次元ガッタの上流側に燃料を噴射するマニホールドを配置している。

図8に解析メッシュを示すが80×49×66の約26万点である。特に形状が複雑なガッタ部の計算面格子を図9に示すが、ガッタを多数のボックスの組合

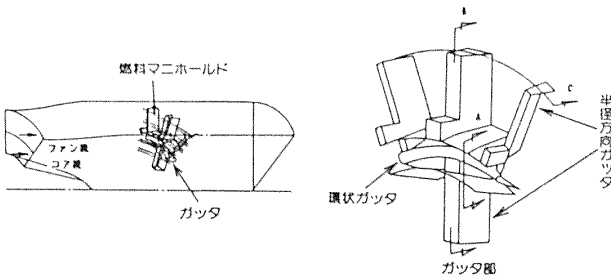


図7 数値解析モデル

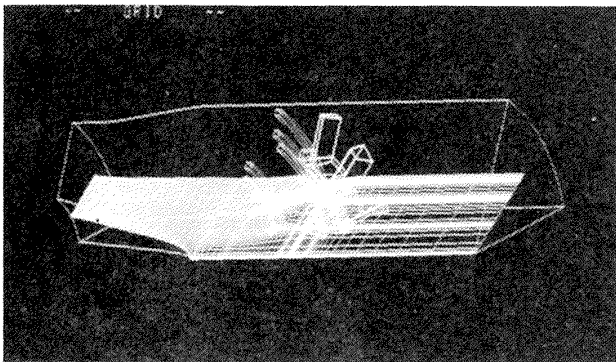


図8 解析メッシュ (80×49×66 のメッシュの一部表示)

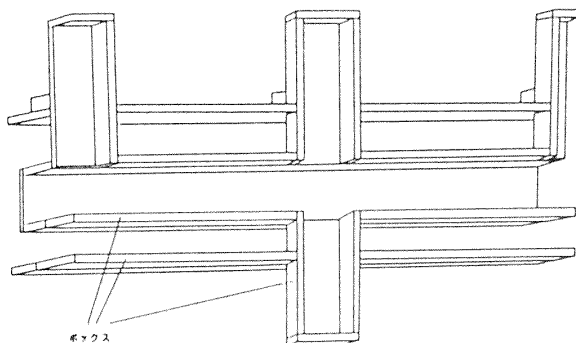


図9 ガッタ部の計算面格子

わせて表わしている。このようにしてできた解析格子にて流れ解析を行うが、その計算の初期状態量はファン側とコア側の流速比を1.5:1 温度比(単位: K)で2:1の条件で計算した。計算はVP-200を使用し、計算時間は約2Hr CPUであった。

3.2.1 速度分布

図10に全体フローパターンを示す。ディフューザ部のハクリは見られず、燃料噴射弁マニホールド後方およびガッタ後方に再循環領域が見られる。図11に燃料噴射弁マニホールド部およびガッタ部の流れの拡大図を示すが、燃料噴射弁マニホールド後方の再循環領域の長さはマニホールドの位置で異なっているが、概ねマニホールド径Dの1倍~2倍程度である。ガッタ前方のマニホールドの再循環領域により速度分布がつくが、その影響がガッタ部内に流れ込む流速にまで残っている。ガッタ後方の再循環領域の長さはVガッタ幅の約2倍となっている。図12には半径方向ガッタを含む断面のフローパターンを示すが、半径方向ガッタを含まない断面同様、ガッタ後流に大きな再循環領域が存在し、その長さは、

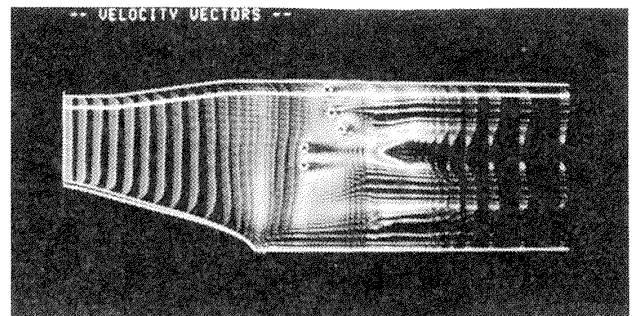


図10 半径方向ガッタを含まない断面のフローパターン(解析) (図7のA断面)

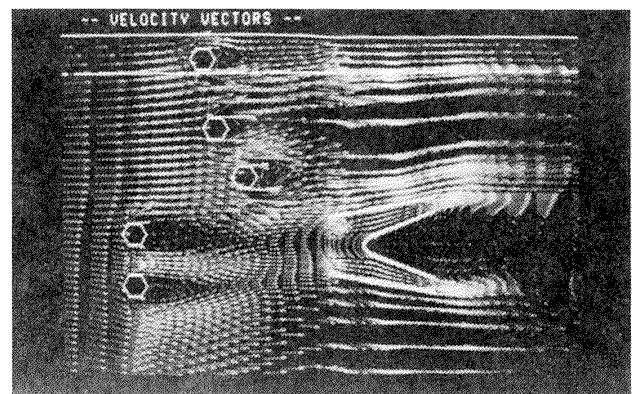


図11 燃料噴射弁マニホールド, Vガッタ部のフローパターン(解析)

半径方向ガッタを含まない断面よりも長い。

図13にはガッタを含む軸方向位置での周方向フローパターンを示す。ガッタ内とガッタ外の流れ特徴がはっきりとでている。即ちガッタ内では半径方向ガッタがある位置に向かう流れが存在する。この流れは半径方向ガッタの中心部で衝突し、外側半径方向ガッタ内では外側に、内側半径方向ガッタ内では内側に向かう流れとなる。このガッタ内での2次流れは半径方向ガッタを含む断面と含まない断面とで静圧が異なるために生じるものと考えられる。ガッタの外側の流れは半径方向ガッタから内側に向かう流れが存在し、環状ガッタより外側は外側に向かい、内側は内側に向かう流れとなっている。

3.2.2 温度分布

図14には半径方向ガッタを含まない断面の温度の拡散を示す。温度せん断層は徐々に広がっているが、ガッタ部はほとんど、コア側温度領域にはいつている。図15には半径方向ガッタを含む断面の温

度の拡散を示す。半径方向ガッタを含まない断面と比較し、温度の拡散が小さいのが特徴である。図16にはガッタを含む軸方向位置での周方向温度分布を示す。ガッタ内では半径方向ガッタ部が温度が高くなっている。ガッタ外では環状ガッタより内側および外部では半径方向ガッタの付け根部が高温になり、設計上厳しい。

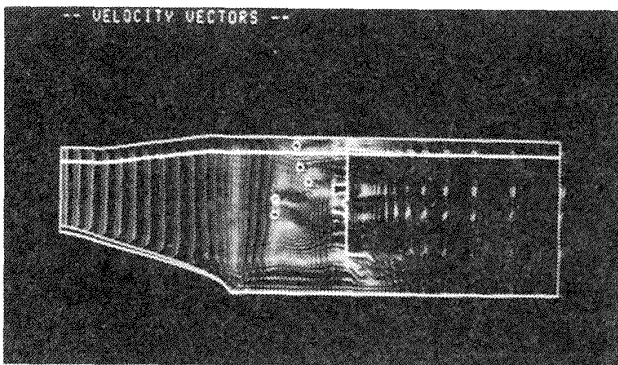


図12 半径方向ガッタを含む断面のフローパターン(解析)
(図7のB断面)

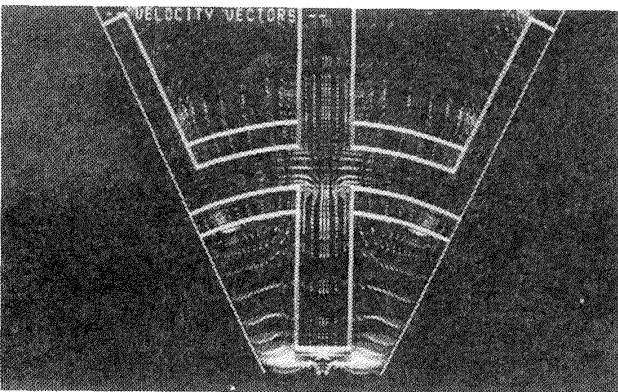


図13 ガッタを含む軸方向位置での周方向フローパターン(解析)
(図7のC断面)

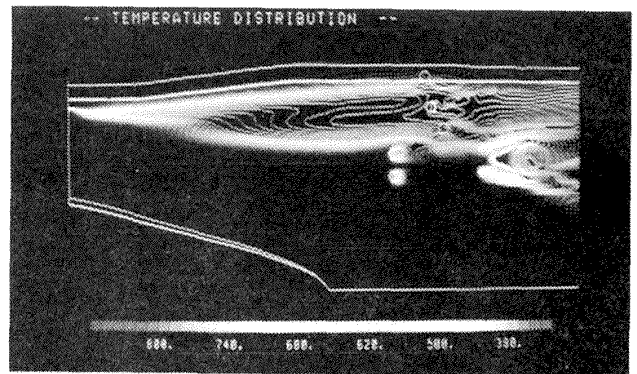


図14 半径方向ガッタを含まない断面の温度分布(解析)(図7のA断面)

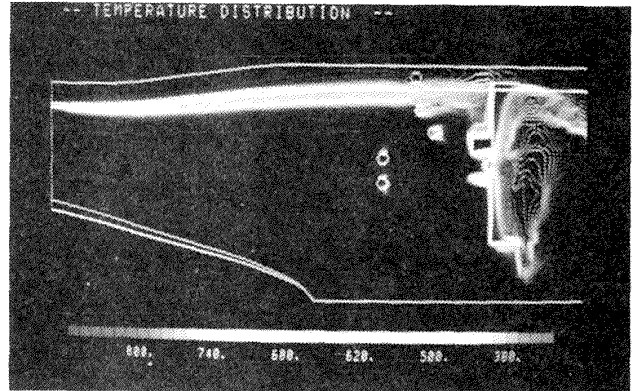


図15 半径方向ガッタを含む断面の温度分布(解析)(図7のB断面)

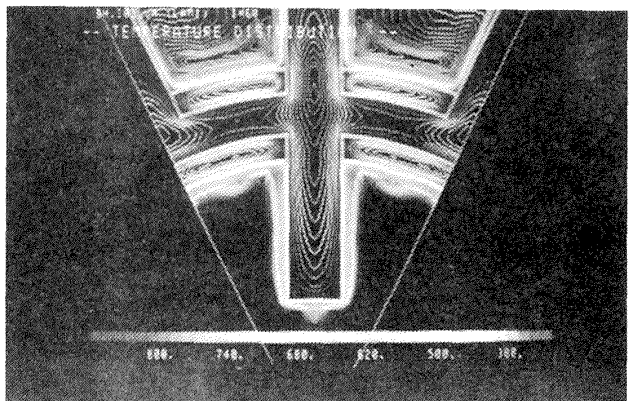


図16 ガッタを含む軸方向位置での周方向温度分布(解析)(図7のC断面)

4. 結 論

一般曲線座標を用いた複雑なガッタ形状囲りの3次元解析について述べた。また軸対称Uガッタを用いての検証についても述べた。結論として次のことがいえる。

1) 軸対称Uガッタでの検証で、Uガッタ後方の再循環領域の長さはUガッタ幅の約2.5倍で、実験結果と一致した。またディフューザ出口流速も定性的に実験結果と一致している。

2) 環状ガッタに半径方向ガッタを組合わせた3次元形状ガッタと燃料噴射弁マニホールドを有する流れ場での流れ熱移動計算を行い、流れ、温度の拡散についていくつかの知見を得た。

- ① ガッタ内には2次流れがあり、半径方向ガッタに向かって流れている。
- ② ガッタ外にも2次流れがあり、半径方向ガッタ側から、含まない断面に向かう流れがある。
- ③ 温度の拡散は半径方向ガッタを含む断面と含まない断面では異なり、含まない断面の方が拡散範囲は広い。

これらの解析結果は圧力損失や燃焼の安定性、燃焼効率に関連する燃料分布の予測などに利用している。

参 考 文 献

- 1) Zhang, S. & Chiu, H.H., 7th ISABE paper, 1985, p. 359.
- 2) Zhou, L., Lim, W. & Zhao, H., *ibid.*, p. 380.
- 3) 安藤, 河合, 藤本, 水本, 根岸, 草刈: 石川島播磨技報, 24-3(昭59), 171.
- 4) Patankar, S.V. & Spalding, D.B., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, 1972, p. 1787.
- 5) Ando, Y., Kawai, M., Sato, Y. & Toh, H., *AIAA Paper No. 88-0185*, 1988.
- 6) 佐藤, 藤, 中野, 仲田, 第12回ガスタービン定期講演論文集(昭59).