

ガス遮断器消弧室の流体解析

南 和彦*
広瀬 英雄*

内容梗概

SF₆ガス遮断器消弧室でのガス流, アーク挙動を把握することができれば, 機器設計指針に大いに寄与することは言うまでもない。「試験および数値計算」はこれを把握するための両輪であるが, ここでは後者について最近の成果を報告する。

今回は, 特に無負荷遮断時のガス流 (圧力, 温度を含む) を数値的に把握 (理論的に把握) するために, 汎用流体解析プログラム PHOENICS を用いて, 一方, 解析結果を正しく評価するために圧縮性粘性流体解析プログラムを自社製作して数値計算を行った。その結果, 両目的は十分に達成されさらに実測値との良好な一致を確認した。

流体解析は数値計算の分野でも相当困難な分野で, 発展途上にある。圧縮性粘性流体に対しては, 今だに有限要素法のような任意形状境界に対する有効な方法がなく, 差分法が一般的である。しかしながら, 正体不明のナビエ・ストークスの方程式の解も, 最近の数値計算アルゴリズムおよびコンピュータの高速化に伴い, 少しずつではあるがその姿が見えてきている。

Computational Fluid Analysis of the Extinguishing Chamber of SF₆ Gas Circuit Breaker

Kazuhiko Minami*
Hideo Hirose*

Synopsis

It is needless to mention that we will greatly contribute to the guide of the circuit breaker designing if we can grasp the phenomena of fluid flow and arc behavior in the extinguishing chamber of a SF₆ gas circuit breaker. Test and calculation are like the two wheels of a cart to grasp these phenomena. We would like to address the recent results, in this report, especially about the latter.

We used the two methods to make the view of the SF₆ gas flow (containing not only velocity but also pressure and temperature) numerically i. e. theoretically, in the case of breaker opening without current. One is to use the general purpose flow analysis program PHOENICS, and the other is to use the self-made program. The reason why we used the two methods is to get the correct evaluation on the computed results. As the results, we achieved to understand the phenomena theoretically and obtained a good consistence between the test and the calculation.

Calculation of compressive flow is regarded to be considerably difficult, and it is not reached to the goal of easy computing. There are little calculating methods with efficiency to the arbitrary curved boundary like Finite Element Method. Finite Difference Method is therefore generally used now. However, the solutions of the Navier-Stokes equation which have not been known is gradually revealing the nature, accompanied with the aids of recent numerical algorithms and high speed computers.

1. ま え が き

John von Neumann (1903-1957)。数学, 物理学, 計算機科学方面での20世紀の巨人である。数学では有名な

作用素環論の基礎を作り, 計算機設計では, 現在では常識の“ノイマン型コンピュータ”の概念を創りあげた人である。その彼は, また, 自分で設計したコンピュータを用いて“計算流体力学”の基礎を作りあげた。1949年

*技術本部 数値情報センター

のことである⁽¹⁾。彼の論文中には、偏微分方程式を差分近似する際の数値安定性が論じられているが、この安定性の問題は、ナビエ・ストークスの方程式を解く際には、まず第一に重要となる問題であり、数値流体解析の困難さを象徴しているといえる。差分を用いて流体解析を行うおうとするにはこのことを覚悟する必要がある。

本稿後半で用いる圧縮性流体に適用される離散化の方法、MFLIC法(後述)は、Gentryら⁽²⁾が提案した方法(矩形直交メッシュ差分)を任意の境界形状が表現できるように拡張したものであり、足立⁽³⁾の考え方(三角形メッシュ)を採り入れたものである。したがって、圧縮性の強い(非線形性の強い)場合に適用される。

そこで、数値安定性を十分に考慮した上で、MFLIC法を用いると、亜音速から超音速領域でのSF₆ガス遮断器ノズルスロート部の流速、圧力分布等が計算できると考えられる。

当社では遮断現象を解析するために、次の二つの方法により、流体解析を行うことを試みている。一つは、英国CHAM社により提供されているPHOENICS(後述)を用いること。もう一つは、自社でMFLIC法のプログラム開発を行い計算することである。この理由は、PHOENICSを適正に利用するにあたり、また、解析結果を正しく評価するためには、自社でプログラム開発できる技術力を備えることが最適であるという思想に基づいているからである。今回は、第一段階として、無負荷遮断現象のシミュレーションをターゲットとした。

そもそも、遮断現象をコンピュータシミュレーションするという発想は、実機試験回数を低減させるという効果の他に、機器設計者に遮断現象を理論的に理解してもらい、より信頼性の高い機器を設計してもらうという効果が期待できるという点にある。この意味で、当社では、数値情報センターで得られた成果を的確に機器設計者に反映させ、合理的で高信頼性の遮断器設計を行っている。

2. PHOENICSによる数値計算

2.1 PHOENICSの概要^{(4),(5)}

PHOENICSは、英国Imperial CollegeのD.B.Spalding教授により開発された、1,2,3次元、定常、過度、单相、多相、非圧縮性、圧縮性等の流体を扱うことのできる汎用熱流体解析プログラムである。

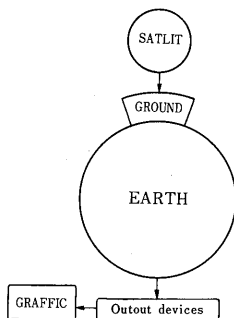


図1 PHOENICSのモジュール構成

その解析手法は、有限差分法(Finite Domain Method)を用い、完全陰解法により計算の安定性を図っている。

また、プログラムは、図1に示すように入力プログラム(SATLIT)、ユーザモジュール(GROUND)、解析プログラム(EARTH)、図化処理プログラム(GRAFFIC)の四つのモジュールから成り立っている。

2.2 計算モデル

計算モデルを図2に示す。

ここでは遮断開始とともに、可動部が右方に移動すること、すなわち境界が時間的に変化することを前提とする。つまり非定常計算である。PHOENICSには、BFC(Body-Fitted Coordinate)と呼ばれる、不規則的境界を表現する方法もあるが、これを使用すると前述の境界移動が困難となるため、直交格子で分割を行った。

また、座標系は軸対称2次元で計算するため、遮断器断面の2分の1をモデル化してある。

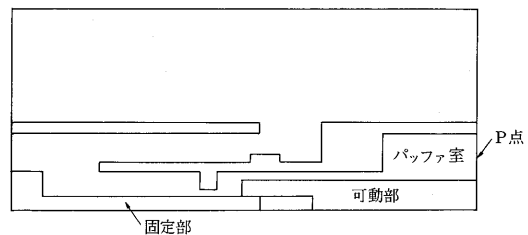


図2 PHOENICSでの計算モデル

2.3 計算条件

本解析では、無負荷状態においてSF₆ガスの流れのみの解析を行った。

流体は圧縮性粘性流体として扱い、乱流粘性は、k-εモデルにより計算している。

圧力の初期値は、全計算領域に対して5kgf/cm²とした。また、壁はすべりのない面として扱っている。

2.4 計算結果

図3(1)、(2)、(3)、(4)にそれぞれ15ms、20ms、25ms、30ms後の流速ベクトル図を示す。

図3(1)(15ms後)では、パuffers室内のSF₆ガスが圧縮されることにより、ガスが左方へ流れはじめるのがわかる。しかしながら、可動部はまだ固定部から離れていないため、可動部下側の領域では、膨張により圧力が低下している。

図3(2)(20ms後)では、可動部が固定部から離れることにより流路が分岐され、SF₆ガスは可動部下側の領域に流れ込んでいるのがわかる。このため、左方へ向かう流れは一度減速され、可動部下側の領域の圧力を高める働きをした後、再び左方へ加速されている。

図3(3)(25ms後)では、可動部と固定部の間の最も狭い部分で流速が139m/sに達している。SF₆ガスの音速は298kで138m/sであるから、ここでほぼ音速(マッハ数1)となる。この後、流速はしだいに減り、1ストロークの最終状態である図3(4)(30ms)に至る。

各図とも、粘性のために流れ後方に渦が生じているの

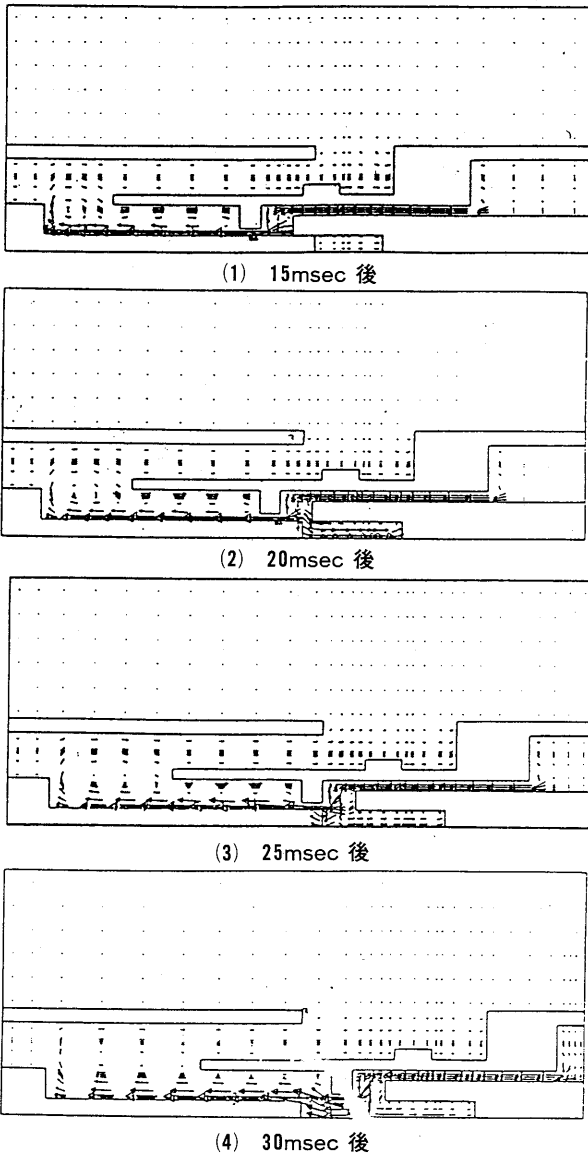


図3 流速ベクトル図

がわかる。また、図3(3)、(4)において、固定部壁付近で、粘性流にもかかわらず壁側の流れが内側の流れより速いのは、流速が大きいために、境界層が非常に薄くなり、壁での速度勾配が大きいためと考えられる。

図4にパuffa圧力(図2のP点)の計算値と実験値との比較を示す。この図より、計算値が実験値によく一致しているのがわかる。

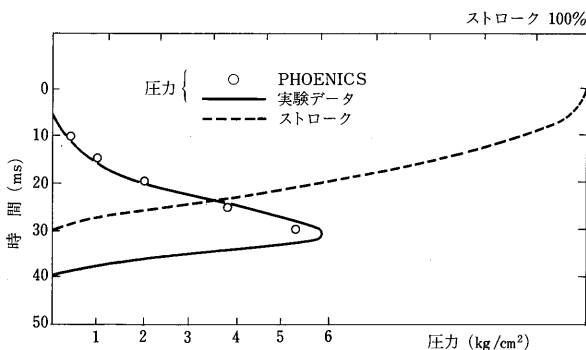


図4 パuffa圧力の計算値と実験値の比較

2.5 まとめ

汎用熱流体解析プログラム PHOENICS で、GCB 消弧室内気流解析を行うことで、1 ストローク間のガスの流れのようすを知ることができた。また、パuffa 圧力の計算値が実験結果とよく一致したことで、PHOENICS がガス遮断器消弧室の流体解析に有効であることがわかった。

3. 自社製プログラムによる数値計算

ここでは、先の計算と異なり定常計算を行っている。つまりガスの入口、出口での圧力を境界条件とし、その圧力差を時刻0でインパルス的に与えることにより、過渡現象計算を行い安定状態での結果を定常値とみなしている。

3.1 方程式⁽⁶⁾

流れ場を解くために必要な方程式は、連続の式(質量保存則)、運動方式(運動量保存則)、エネルギー方程式(エネルギー保存則)である。

これらを、圧縮性粘性流体、軸対称2次元座標(r, x)で定式化し、これらをベクトル表示すると以下のようになる。

$$\frac{D}{Dt} \int_V U dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V U dV + \int_S (ul + vm) U dS = R + Q \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{bmatrix}, \quad R = \int_V g dV = \int_V \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\sigma_\theta}{r} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} \end{bmatrix} dV$$

$$Q = \int_V f dV = \int_S \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma_x l + \tau_{rx} m \\ \tau_{xr} l + \sigma_r m \\ (u\sigma_x + v\tau_{xr} + k \frac{\partial T}{\partial x}) l \\ + (u\tau_{rx} + v\sigma_r + k \frac{\partial T}{\partial r}) m \end{bmatrix} dS$$

ここで、

- ρ : 密度
- u, v : x, r 方向の流速
- e : エネルギー $C_v T + (u^2 + v^2) / 2$
- C_v : 定積比熱
- $\frac{D}{Dt}$: 物質導関数 $\frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial r} + u \frac{\partial}{\partial x}$
- l, m : 要素辺上の外向き法線ベクトルの方向余弦
- σ_x, σ_r, σ_θ : 垂直応力, τ_{rx}, τ_{xr} : せん断応力

$$\sigma_x = -P + \lambda \operatorname{div} V + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

$$\sigma_r = -P + \lambda \operatorname{div} V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial r} \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta} = -P + \lambda \operatorname{div} V + 2\mu \frac{v}{r} \quad (4)$$

P: 圧力

μ : 粘性係数 (剪断粘性係数)

λ : 第2粘性係数 (体積粘性係数)

$$\operatorname{div} V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv)$$

• k: 熱伝導率

• T: 温度

である。

3.2 離散化⁽⁷⁾

解析手法としては、MFLIC法 (Modified FLuid in Cell method) を使用する。MFLIC法は Lagrange Step と Euler step の2段階法である。

時間を Δt 幅に分割し、第1ステップ (Lagrange step) では、流れを、流れと共に移動する座標系でとらえて、 Δt 時間後の物理量 (例えば、圧力、温度、流速など) を計算する。第2ステップ (Euler step) では、その値を空間に固定された絶対座標系に変換する。

i) Lagrange step

Lagrange step 後の値を記号 “~” を付して表わし、これを中間値と呼ぶことにし、(1)式を離散化すると以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \int_{A_k} r \rho dA &= \frac{1}{\Delta t} (\tilde{m} - m_k^{(n)}) \\ &= \frac{1}{\Delta t} [\tilde{\rho}_k \tilde{V}_k - \rho_k^{(n)} V_k^{(n)}] = 0 \end{aligned}$$

これより

$$\tilde{m}_k = m_k^{(n)} \quad (5)$$

$$\tilde{\rho}_k = \rho_k^{(n)} V_k^{(n)} / \tilde{V}_k \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \int_{A_k} r \rho u dA &= \frac{1}{\Delta t} (\tilde{m}_k \tilde{u}_k - m_k^{(n)} u_k^{(n)}) \\ &= \frac{m_k^{(n)}}{\Delta t} (\tilde{u}_k - u_k^{(n)}) \end{aligned}$$

したがって

$$x \text{ 方向速度 } \tilde{u}_k = u_k^{(n)} + \frac{\Delta t}{m_k^{(n)}} \{ \mathbf{Q}_1^{(n)} + \mathbf{R}_2^{(n)} \} \quad (7)$$

同様に

$$r \text{ 方向速度 } \tilde{v}_k = v_k^{(n)} + \frac{\Delta t}{m_k^{(n)}} \{ \mathbf{Q}_3^{(n)} + \mathbf{R}_3^{(n)} \} \quad (8)$$

$$\frac{D}{Dt} \int_{A_k} r \rho e dA = \frac{m_k^{(n)}}{\Delta t} (\tilde{e}_k - e_k^{(n)})$$

そこで

$$\text{エネルギー } e_k = e_k^{(n)} - \frac{\Delta t}{m_k^{(n)}} \{ \mathbf{Q}_4^{(n)} + \mathbf{R}_4^{(n)} \}$$

ここで

m_k : 質量
 k : k番目の要素を示す添字
 \mathbf{Q}, \mathbf{R} の右下の添字に(1)式における, \mathbf{Q}, \mathbf{R} の行数を示す。

また、

$$\text{体積 } \tilde{V}_k = V_k^{(n)} + \Delta t \sum_{i=1}^4 r_i (\tilde{u}_i l_i + \tilde{v}_i m_i) \Delta S_i \quad (9)$$

ただし、 ΔS_i : 面積

$$\text{温度 } \tilde{T}_k = \frac{1}{C_v} \left(\tilde{e}_k - \frac{\tilde{u}_k^2 + \tilde{v}_k^2}{2} \right) \quad (10)$$

$$\text{圧力 } \tilde{P}_k = \tilde{\rho}_k R \tilde{T}_k \quad (11)$$

(6)~(7)より $\tilde{\rho}_k, \tilde{u}_k, \tilde{V}_k, \tilde{T}_k, \tilde{P}_k$ が求まる。

ii) Euler step

(1)式を風上差分で離散化し、中間値と、(n+1)ステップ目の物理量との関係式を求めると、

$$\begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v \\ e \end{bmatrix}_k^{(n+1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v \\ e \end{bmatrix}_k \tilde{m}_k - \Delta t \left\{ \delta_i \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v \\ e \end{bmatrix}_{ki} \tilde{\rho}_{ki} + (1 - \delta_i) \right.$$

$$\left. \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v \\ e \end{bmatrix}_k \tilde{\rho}_k \right\} \times \{ \tilde{u}_i l_i + \tilde{v}_i m_i \} \Delta S_i \quad (12)$$

ただし

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & (\tilde{u}_i l_i + \tilde{v}_i m_i \leq 0) \\ 0 & (\tilde{u}_i l_i + \tilde{v}_i m_i > 0) \end{cases}$$

(12)式より (n+1)ステップ目の値が求まる。

ここで

i: 四角要素の辺の番号を示す添字

3.3 格子モデル

格子については、本解析法の性格から以下の i)~iv) の条件を満たすことが重要である。

i) 直交に近い格子であること。

ii) 流れの状態変化の急なところで密であること。

iii) 格子の大きさがなめらかに変化すること。

例えば、面積の極端に違う要素が隣接することは好ましくない。

iv) 格子が途中で急に折れ曲ったりすることなく、なめらかに変化すること。

ただし、境界線は忠実に表現しなくてはならない。

本解析に使用する格子モデルを図5に示す。

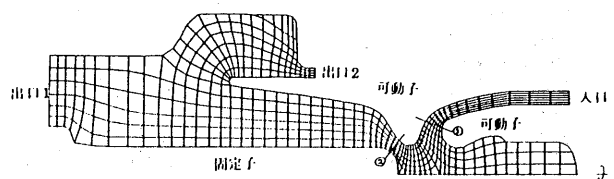
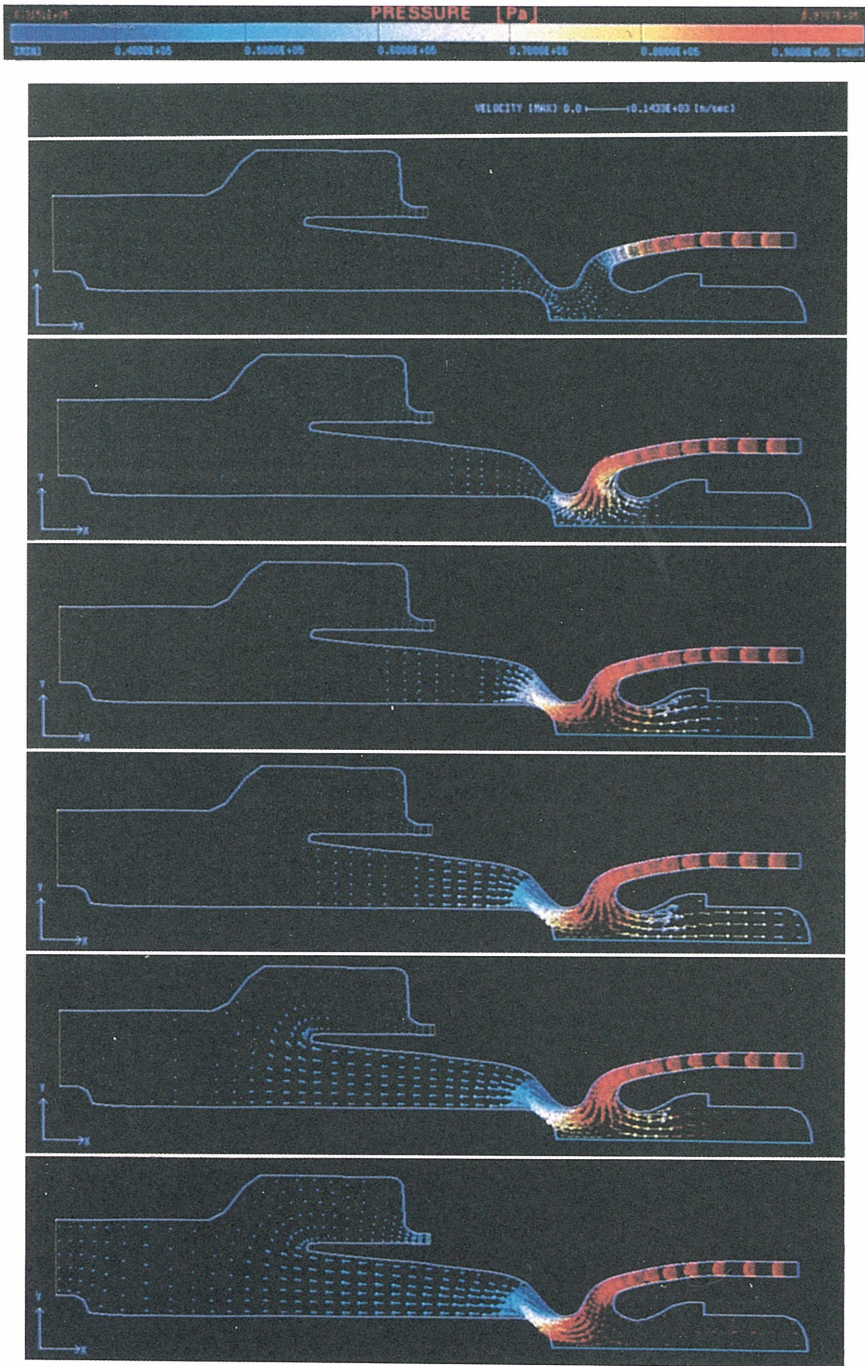


図5 GCBモデル



(1) 0.4msec 後

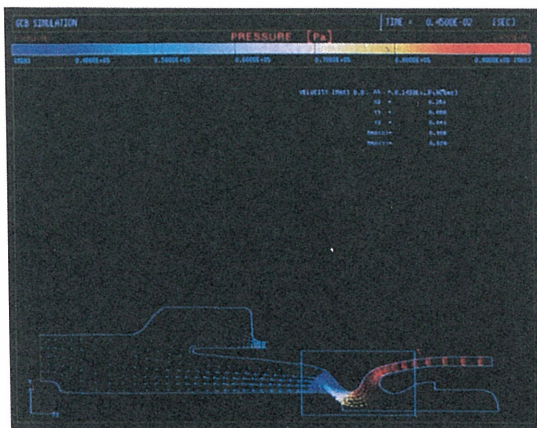
(2) 0.6msec 後

(3) 0.8msec 後

(4) 1.0msec 後

(5) 1.5msec 後

(6) 2.0msec 後



(7) 4.5msec 後



(8) (7)の青線領域内の拡大図

図6 流速ベクトル図

3.4 境界条件

- i) 入口境界条件
全圧 $P_0 = 1 \times 10^5$ Pa
全温 $T_0 = 293.15$ K
- ii) 出口境界条件
静圧 $P_s = 0.5 \times 10^5$ Pa
このときの圧力差はストロークが図7の状態のときの室測置を用いている。
- iii) 壁面境界条件
壁面はすべりのない面とする。
従って
 $u = v = 0$
また断熱境界として取り扱うから
 $\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0$
- iv) 中心軸上
中心軸上は鏡面条件を用いる。
すなわち

$$v = 0, \frac{\partial u}{\partial r} = 0$$

3.5 物性値

- 定圧比熱 C_p 640 J/kg.k
 - 定積比熱 C_v 580 J/kg.k
 - ガス定数 R 60 J/kg.k
 - 比熱比 κ 1
 - 熱伝導率 k 14×10^{-3} m.kg/s³.k
 - 粘性係数 μ 1.6×10^{-3} kg/m.s
- 粘性係数 μ は乱流域を扱うため、通常の粘性の100倍の値をもちいる。

3.6 計算結果

流速ベクトル図を図6に示す。

ここでは、流速の大きさを矢印の長さ、圧力の大きさを色で表わし、赤色は圧力が高く、青色が低いことを表わす。

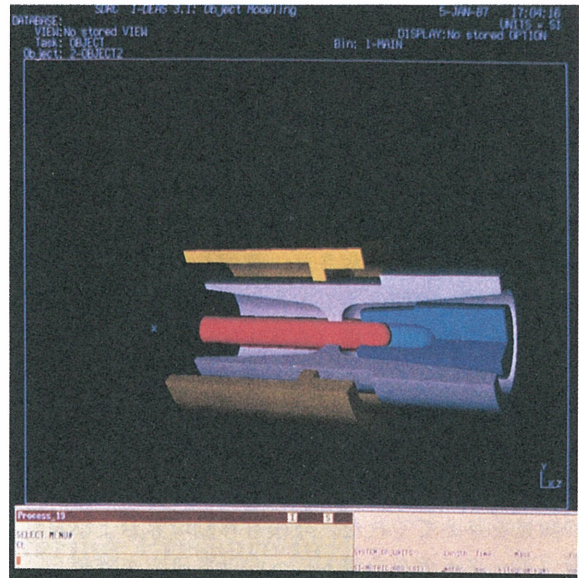
また、図7に GEOMOD で作成した遮断器のソリッドモデル図を示す。

図6(8)は図6(7)の青線で囲んだ領域を拡大したものである。また、この後処理プログラムは、圧力の他に温度、密度、全温、全圧、マッハ数等を色で表示することもできる。

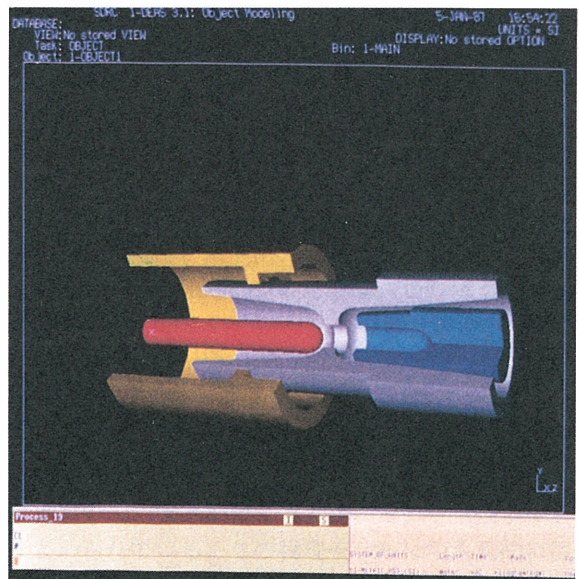
時刻歴的に、全体の流れのようすを見ると次のようになる。まず、パuffァ室入口から流れこんだSF₆ガスは、可動部内のノズルを通り、図5の分岐部(図で①部)に達する。次に流れは左方よりもむしろ右方に流れ込み、その領域内の圧力を高める。ある程度領域内の圧力が高まると今度はガスは左方に加速される。

図6(7)では、流速は可動部と固定部に囲まれた流路の

最も狭いところ(図5の②)でマッハ数が1となり、その後方で超音速流となり、衝撃波を形成している。



(1) 投入状態



(2) 開極状態

図7 ガス遮断器のソリッドモデル

また今回、粘性を考慮した計算を行ったために、各流路断面で平坦でない流速分布が見られる。非粘性流体で計算すると、同部分に平坦な流速分布が見られ、今回のモデルはより現実の流れの様子に近づいたと考えられる。

3.7 まとめ

無負荷遮断時のSF₆ガスの流れのようすを知ることができた。移動境界問題はまだ取り入れていないが、今のままでも1ストローク間の各状態をモデル化して、その定常状態の計算を行うことにより、準非定常的に流れの変化をある程度とらえることが可能である。

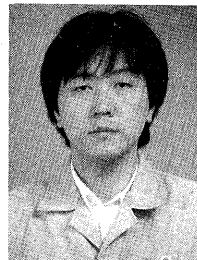
4. あとがき

流体力学は, Bernoulli, Euler の時代, 非圧縮性完全流体の流れ (ポテンシャル) を解く数学であった。そして, 非線形偏微分方程式であるナビエ・ストークス方程式は, 現在でも, 数学の対象である。一方, "ソリトン" の言葉に代表されるように, 浅水波の伝播の問題である K-dV 方程式は, 現代の数学の分野として著しい発展をとげている。あるいは, 乱流が偶然の現象の統計的平衡状態と考え, 統計数学に帰着させる方法 (Kolmogorov による統計流体力学) も提案され, 発展している。さらに, 流体がプラズマ状態にあるとき, 理想気体の前提が破れると, 粒子運動論的立場 (希薄流体) に立つ必要が生じるかもしれない。このようにプラズマ状態のガス流の解析には幾多の困難が想定され, 短期間に遮断現象を解明できる可能性は少ないと思われる。しかしながら可能な範囲でのアプローチは, 今まで述べたように我々に数多くの知見を与えてくれた。今後も移動境界および有負荷遮断 (アークモデルの導入) へ向けて研究を継続し, 合理的で高信頼度機器設計へ寄与する方針である。

最後に, 本研究をすすめるにあたり, 丁寧にご指導していただいた, 東京大学工学部航空学科, 高田浩之教授, に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) J. von Neumann, R.D. Richtmyer : A. Method for the Numerical Calculation of Hydrodynamic Shocks, Jour. App. Physics, Vol. 21, pp. 232-237, (1950)
- (2) R.A.Gentry, R.E.Martin, B.J.Paly : An Eulerian Differencing Method for Unsteadily Compressible Flow Problems, J. of Computational Physics, Vol. 1. pp. 87-118, (1966)
- (3) 足立 : 変形 FLIC 法による翼列の流れ解析, ターボ機械, 第 9 巻, 第 5 号, P. 38 (1981)
- (4) PHOENICS トレーニングマニュアル : (1987), センチュリリサーチセンタ(株)
- (5) スハス V.パタンカー : コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, (1985), 森北出版
- (6) 生井, 井上 : 粘性流体の力学, (1984) 理工学社
- (7) J.N. Scott: Numerical Simulation of Cold Flow in an Axisymmetric Centerbody Combustor, AIAA JOURNAL, VOL. 23, NO. 5 MAY, (1985)



南 和 彦
Kazuhiko Minami
昭和59年入社
数値計算業務に従事



広 瀬 英 雄
Hideo Hirose
昭和52年入社
数値計算業務に従事

