Development of Highly Accurate Analysis Method for Compressible Fluid Considering Radiation and Ablation

Makoto Koizumi Member (Hitachi, Ltd. Power & Industrial Systems R&D Labs.)

Hajime Urai Member (Hitachi, Ltd. Power & Industrial Systems R&D Labs.)

Youichi Osita Member (Hitachi, Ltd. Power & Industrial Systems R&D Labs.)

Naoki Osawa Member (Hitachi, Ltd. Power & Industrial Systems R&D Labs.)

Masanori Tukushi Member (Japan AE Power Systems Corporation)

Noriyuki Yaginuma Member (Japan AE Power Systems Corporation)

Keywords: gas circuit breaker, arc, radiation, ablation, compressible fluid dynamics

To understand physical phenomena in gas circuit breaker, we developed a highly accurate analysis method for compressible fluid considering arc behavior. The analysis method is based on CIP (Constrain of Interpolation Profile) method. To calculate arc behavior, we improved the method as follows;

(1) A large change of density and energy in arc causes numerical oscillation in case of conventional CIP method. To suppress this problem, the product of density and internal energy is treated as unknown valuable of transport energy equation solved by CIP method.

(2) To consider the effect of ablation of nozzle wall the rate of evaporation is assumed to be proportion to the difference between the power emission rate from wall and the intensity of radiation in the space.

(3) To solve linear equation systems appeared in pressure, electric and radiation fields, we have improved PCG (Preconditioned Conjugate Gradient) method by reduction of unknowns. In order to reduce number of unknowns, one step Gaussian elimination is applied to the coefficient matrices.

We have applied the method to an ablation measurement test stand and an interrupter model of gas circuit breaker, and confirmed the calculation results agree with the experimental ones. Comparison of measurements and calculation results of puffer pressures of the interrupter model of gas circuit breaker are illustrated in Fig. 1. And arc voltages are also shown in Fig. 2. The calculation results of puffer pressure agreed the lower envelope of measured ones as shown in Fig. 1. And calculation results of arc voltage are also coincide with experimental ones exclude near current zero point.

Fig. 1. Change of pressure in puffer room

Fig. 2. Change of arc voltage

輻射とアブレーションを考慮した高精度気流解析技術の開発

正員 小泉 眞* 正員 浦井 一*
 正員 大下 陽一* 正員 大澤 直樹*
 正員 筑紫 正範** 正員 柳沼 宣幸**

Development of Highly Accurate Analysis Method for Compressible Fluid Considering Radiation and Ablation

Makoto Koizumi*, Member, Hajime Urai*, Member, Youichi Osita*, Member, Naoki Osawa*, Member,
 Masanori Tukushi**, Member, Noriyuki Yaginuma**, Member

To understand physical phenomena in gas circuit breaker, we developed a highly accurate analysis method for compressible fluid considering arc behavior. The feature of the method is as follows, (1) To suppress numerical oscillation, the product of density and internal energy is treated as unknown valuable of transport energy equation solved by CIP (Constrain of Interpolation Profile) method. (2) To consider the effect of ablation of nozzle wall the rate of evaporation is assumed to be proportion to the difference between the power emission rate of wall and the intensity of radiation in the space. (3) To solve linear equation systems appeared in pressure, electric and radiation fields, we have improved PCG (Preconditioned Conjugate Gradient) method by reduction of unknowns. We have applied the method to an ablation measurement test stand and an interrupter model of gas circuit breaker, and confirmed the calculation results agree with the experimental ones.

キーワード：ガス遮断器，アーク，輻射，アブレーション，気流解析

Keywords: gas circuit breaker, arc, radiation, ablation, compressible fluid dynamics

1. 前書き

遮断器内の気流解析技術としては FLIC (FLuid In Cell) 法⁽¹⁾、TVD (Total Variation Diminishing) 法⁽²⁾ 及び CIP (Constrain of Interpolation Profile) 法⁽³⁾ による解析等幾つかの方法が提案されている。また、近年では市販プログラムがかなり充実しており、それを用いた方法なども提案⁽⁴⁾ されている。これらの方法のうち、FLIC 法や TVD 法では、コントロールボリュームを用いた保存型で記述されており、メッシュ分割が適切であれば高精度で解析できる。しかし、構造物に適合したメッシュ分割では、メッシュ形状が正三角形から大きくずれることがあり、この場合解析精度が悪化する。また、時間方向については陽的に解くため、時間ステップが音速によって制限され、計算時間が掛かる

問題があった。これらを陰的に解く方法もあるが、クーラン数が 1 を超えるような時間ステップで解くと数値粘性のため、やはり精度が悪化する問題がある。これに対し、CIP 法は直交メッシュと組み合わせて解くため、比較的高精度が維持でき、また、解法も準陰解法であるため、流速のクーラン数による時間ステップの制限をうけるが、音速による制限は受けない。このため、時間ステップがむやみには細かくならないことが期待される。そこで、本報告では CIP 法を取り上げる。

従来の CIP 法⁽⁵⁾ では、非保存形で方程式が記述されており、アーク解析のように高温でのガス分子の解離・結合に伴うガス定数の変動を伴う場合、精度が保てない問題があった。また、アークを解く場合、流体を解くときに必要な圧力方程式を解く以外にも、輻射場、及び、電場を解くために連立方程式を解く必要がある。連立方程式を解く方法としては PCG (Preconditioned Conjugated Gradient) 法⁽⁶⁾ を用いるがやはりできるだけ収束が早い方が繰り返し計算には都合が良い。本報告では、これについても改良を行ったので報告する。

ところで、高温ガスを取り扱う場合、熱輻射を考慮する必要があるが、その取り扱い方は著者らが先に報告した方

* (株) 日立製作所 電力・電機開発研究所
 〒319-1221 日立市大みか町 7-2-1
 Hitachi, Ltd. Power & Industrial Systems R&D Labs.
 7-2-1, Omika-cho, Hitachi 319-1221

** (株) 日本 AE パワーシステムズ
 〒316-8501 日立市国分町 1-1-1
 Japan AE Power Systems Corporation
 1-1-1, Kokubu-cho, Hitachi 316-8501

法⁽²⁾を含めて、幾つか報告されている。しかし、アブレーションを考慮する方法については幾つか報告⁽⁷⁾はあるが、空間の輻射強度と壁面からの射出能を結びつけたものは著者らが先に報告⁽⁸⁾したもの以外にはあまりない。そこで、本報告ではこれらの内容もまとめて報告する。

2. 解析モデル

(2・1) 基礎式 基礎方程式は圧縮性のナビアストークス方程式と、輻射場の方程式、及び電流場の方程式である。電磁力については、影響が小さいのでここでは考慮しない。状態方程式は高温でのSF₆の分解再結合を考慮して温度・圧力を独立変数として求めテーブル化した。導電率・比熱などの物性値についても電子状態を考慮して温度・圧力の関数として予め求めておき同様にテーブル化した。(1)～(3)式に圧縮性のナビアストークス方程式を示す。

連続の式：

$$\rho_{,t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})\rho = -\rho \cdot \text{div} \mathbf{u} + s \dots \dots \dots (1)$$

運動方程式：

$$\mathbf{u}_{,t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})\mathbf{u} = -\text{grad} p / \rho + \mathbf{F} / \rho \dots \dots \dots (2)$$

エネルギー方程式：

$$E_{,t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})E = (Q - p \cdot \text{div} \mathbf{u}) / \rho \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 ρ は密度、 $\mathbf{u}$ は速度ベクトル、 p は圧力、 s は蒸発などの湧き出し、 $\mathbf{F}$ は粘性摩擦をも含めた体積力、 E は単位質量当りの内部エネルギー、 Q は粘性発熱を含めた発熱密度を現す。添え字のコンマは微分を表し、 t は時間を表す。

アークからの輻射は次のように取り扱う。輻射吸収性のガス内での輻射強度 U は次のヘルムホルツ方程式を満たす⁽²⁾。

$$\text{div}\{\text{grad} U / (3k_r)\} = k_p U - E_c \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 E_c はガスの輻射エネルギー射出率、 k_p 、 k_r はそれぞれ Plank 平均と Rossland 平均による吸収係数である⁽²⁾。また、 E_c はステファンボルツマン定数 σ_s を用いて次のように表せる。

$$E_c = 4k_p \sigma_s T^4 \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 T はガスの温度である。

アーク中の電流分布は次のように取り扱う。アーク中及び周囲のガス中の電圧を ϕ とすると、ガスを含めた導電率 σ を用いて、電場を支配する方程式は次のようになる。

$$\text{div}\{\sigma \cdot \text{grad} \phi\} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

ここで、導電率は温度の関数である。低温のガスの導電率は非常に小さいものであるが、マトリックスの収束性を考えて $\sigma = 10^{-7} \text{ S/m}$ 程度とする。また、誘電体の導電率も

同様に小さいものであるが、導電率が小さい場合、電場分布は遮断現象のように速い現象では誘電率によって決まる。そこで、ここでは、誘電体については実際の導電率は無視して、誘電率の比に従って導電率があると仮定する。こうすることによりノズルなどの誘電体を含めた電場解析が模擬できる。(6)式を解くことにより電流によるジュール発熱を計算できる。輻射損失とジュール発熱をあわせたものを(3)式の発熱密度として下式により計算する。

$$Q = \sigma(\text{grad} \phi)^2 + k_p U - E_c + Q_\tau \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 Q_τ は粘性発熱を示す。

(2・2) 離散化 離散化には移流項での物理量の分布形状を保つために、物理量の勾配の移流も考慮した、CIP法を用いる。特に、圧力を陰的に求めるCCUP法で離散化する。CIP法による離散化方法の詳細は文献(5)を参照されたし。従来のCCUP法では移流項を取り扱う際、(1)～(3)式の物理量をそのまま取り扱っていた。しかし、この形式で風上差分により離散化すると次のような不都合が生じる。セル内において、内部エネルギー E の分布に大きな差があると、内挿時に誤差を生じる。この誤差は、時間積分に伴う繰返し計算を重ねると蓄積することが予想される。そこで、(3)式の代わりに、密度を内部エネルギーに乗じた値、即ち、単位体積当りの内部エネルギー e を用いる。この場合、エネルギーの輸送方程式は次のように変換される。

$$e_{,t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})e = Q - (p + e) \text{div} \mathbf{u} \dots \dots \dots (8)$$

こうすると、次のような利点がある。理想気体では、密度 ρ は絶対温度に逆比例するのに対し、 E は絶対温度に比例する。実在気体では厳密にはこのような関係は成り立たないが、近似的にはこのような相関関係がある。そのため、 e は温度変化の影響を受けにくくなる。これにより、セル内の e の変化が小さくなり、風上差分による内挿誤差を減少できるものと期待できる。

(8)式の左辺および Q を用いて、風上差分を実施した後の値を e^* とする。残りの補正は次のようになる。

$$\frac{e^{n+1} - e^*}{\delta t} = -(p + e^*) \text{div} \mathbf{u}^{n+1} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 δt は時間増分である。上付き添え字 $n+1$ は次の時刻での値である。オリジナルのCIP法では、(9)式の右辺には、 e^* の項が無いが、未知数の変換に伴い、付加されたものである。上式において、 $\text{div} \mathbf{u}^{n+1}$ はまだ、未知のままであるが、これは、従来の方法で解くことができる。即ち、風上差分実行後の、密度を ρ^* 、流速を $\mathbf{u}^*$ として、密度、流速に対する補正式は、次のように表せる。

$$\rho^{n+1} = \rho^* - \rho^* \delta t \text{div} \mathbf{u}^{n+1} \dots \dots \dots (10)$$

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* - \frac{\delta t}{\rho^*} \text{grad} p^{n+1} \dots \dots \dots (11)$$

風上差分計算後の補正は等エントロピー的に行われると考えると、圧力変化は次のようになる。ここでは、精度を

上げるため、2次のオーダーまで取る。

$$\Delta p = \left[\frac{\partial p}{\partial \rho} \right]_s \delta \rho + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right]_s \delta \rho^2 \\ = Cs^2 \left(1 + \frac{1}{2\gamma} (\gamma - 1) \delta \rho \right) \delta \rho \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 γ は比熱比で、 Cs は音速を表す。上式の圧力差 Δp は次の時刻 $n+1$ と風上差分計算後の値との差を考えると次のようになる。また、上式の添え字の s は等エントロピー変化を示す。

$$\Delta p = p^{n+1} - p^* \dots\dots\dots (13)$$

(12) 式に (13) 式を代入して、 $\delta p = p^{n+1} - p^*$ を考慮して (10) 式を代入すると最終的に次の圧力に関する波動方程式を得る。

$$\frac{p^{n+1} - p^*}{Cs^2 \rho^* \left(1 - \frac{1}{2} (\gamma - 1) \delta t \operatorname{div} \mathbf{u}^* \right)} \\ = -\delta t \operatorname{div} \mathbf{u}^* + \operatorname{div} \frac{\delta t^2}{\rho^*} \operatorname{grad} p^{n+1} \dots\dots\dots (14)$$

(14) 式を解くことにより次のステップの圧力分布 p^{n+1} が得られる。次に、得られた圧力分布より、 $\delta t \operatorname{div} \mathbf{u}^{n+1}$ を計算する。

$$\delta t \operatorname{div} \mathbf{u}^{n+1} = - \frac{p^{n+1} - p^*}{Cs^2 \rho^* \left(1 - \frac{1}{2} (\gamma - 1) \delta t \cdot \operatorname{div} \mathbf{u}^* \right)} \\ \dots\dots\dots (15)$$

これを、(9)、(10) 式に代入し、次のステップの内部エネルギー及び密度を計算する。また、次のステップの流速は (11) 式に圧力 p^{n+1} を直接代入して計算する。従来、(9)、(10) 式の $\operatorname{div} \mathbf{u}^{n+1}$ の計算は (11) 式より流速を求めてから計算していたが、従来法だと、一旦流速を求めるため、計算誤差が混入する可能性がある。そこで、 $\operatorname{div} \mathbf{u}^{n+1}$ を流速から求めずに (15) 式の圧力から計算する方法とした。

(4) 式及び (6) 式は通常の直交差分法で離散化した。この場合境界形状が問題になるが、差分格子を作る際、セル内の物体と気体の占有率を考慮して、そのセルの物性値を決める方法とした。流速及び体積占有率の定義点はセルの頂点、圧力、熱エネルギー、密度、電圧及び温度はセル中心においた。

CIP 法では風上差分を計算する際、三次の内挿関数を用いて計算する。一般的に風上差分を計算する際、1 次の内挿関数を用いるとオーバーシュートやアンダーシュートが起きず、安定に計算できることが知られている。しかし、1 次関数では内挿の繰り返しによる数値拡散が大きいことから、最近の流体計算では、あまり用いられなくなった。代わりに、高次（特に 3 次）内挿関数を用いて計算する手法がとられている。この場合、数値拡散は小さくなるが、変化の大きい問題を取り扱う場合、オーバーシュートやアン

ダーシュートがおき、計算が安定しない。そこで、圧縮性の気流解析では数値的な制限を課して計算する方法（TVD 法）や、人工的な数値粘性を入れる方法が開発されている。これに対し、CIP 法では、有理関数を用いて、上記現象を緩和する方法が提案されている⁹⁾。この方法は有効と考えられるが、やはり十分には上記現象を抑制せず振動が残る。そこで、ここでは、比較的単純な制限値関数を導入する。それは、セル内の内挿値はセルの各端点の値を越えないとする方法である。風上差分を実行する際、密度、熱エネルギー、運動量について、発生や消滅が無いとして計算するため、セル内では最大値原理が成り立つと仮定する。しかし、エネルギー及び、密度がそれぞれ別々に上記条件を満たすように計算すると、数値的なずれが生じる。そこで、密度、熱エネルギーのどちらかが、最大値を超えた場合、次のように計算する。

(i) 密度の内挿値が各セルの頂点の最大値を超える場合、密度は最大値とする。このとき、熱エネルギーは密度が最大となるセル頂点の値とする。

(ii) 密度の内挿値が最小値を下回る場合、密度は最小値とする。このとき、熱エネルギーは密度が最小となるセル頂点の値とする。

(iii) 熱エネルギーの内挿値が各セルの頂点の最大値を超える場合、熱エネルギーは最大値とする。このとき、密度は熱エネルギーが最大となるセル頂点の値とする。

(iv) 熱エネルギーの内挿値が各セルの頂点の最小値を下回る場合、熱エネルギーは最小値とする。このとき、密度は熱エネルギーが最小となるセル頂点の値とする。

こうすることにより、密度と熱エネルギーの同時性が保たれる。

〈2・3〉 アブレーションの取り扱い アーク近傍のノズル材料は輻射を吸収して蒸発すると考えられる。(4) 式の右辺はガスが吸収する輻射エネルギーである。そこで、蒸発量を見積もる場合についてもこの考え方を踏襲する。(4) 及び (5) 式では輻射吸収係数の一つである k_p が含まれている。これは、ガス固有の輻射吸収係数 k_n の関数となっている¹⁰⁾。

そこで、ノズル材の輻射吸収係数がガスの場合の θ 倍とすると、輻射場からノズル材が受け取るエネルギー Q_{ev} は壁面の輻射エネルギー射出率と空間での輻射強度の差に比例するとして次式のように表せる。

$$Q_{ev} = \theta k_p (U - 4\sigma T_w^4) \dots\dots\dots (16)$$

T_w は壁面の蒸発開始温度（昇華温度）である。これに伴い、蒸発量 δW は蒸発潜熱 L_w を用いて

$$\delta W = Q_{ev} / L_w \dots\dots\dots (17)$$

となる。(16) 式は単位体積当たりの熱吸収量を表すので (17) 式もやはり単位体積当たりの質量変化を示す。即ち、単位時間当たりのガス密度増加分を示す。また、このとき、内部エネルギーもガスに持ち込まれる。その大きさは T_w の

温度でのガス状になった壁面材料の内部エネルギーである。(蒸発潜熱はガス状態での内部エネルギーと固体状態での内部エネルギーの差であり、蒸発の際の体積膨張仕事に相当する。)この、内部エネルギーは温度 T_w での SF_6 の内部エネルギーで代用する。その結果、密度、内部エネルギーの変化は次のようになる。

$$\rho^{**} = \rho^* + \delta W \delta t \dots\dots\dots (18)$$

$$e^{**} = e^* + E(T_w, p_w) \delta W \delta t \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 $E(T_w, p_w)$ は壁温 T_w 及び壁面での圧力 p_w のときの単位質量当りの内部エネルギーである。また、アスタリスク*は変更前の値、2重のアスタリスク**は変更後の値である。

〈2・4〉 行列解法の改良 行列解法には、後氏の発案した反復法 PCGPME (Preconditioned multiply Conjugated Gradient Polynomial Minimized method for finite Element method) ⁶⁾ に改良を加えて用いている。PCGPME は従来法のなかで、収束が最も早い方法の一つである。時間ステップを更新する毎に解く連立方程式は、電界、輻射、及び圧力方程式の三つである。このうち、アーク解析において、電界と輻射を解くのに多くの反復時間を割いている。そこで、反復時間を減らす方法を検討した。通常反復回数が増える要因としては主に、解くべき未知数の数が増えること、及び行列の条件数(最大固有値と最小固有値の比)が悪くなることによる。後者については、不完全 LU 分解による前処理法がすでに PCGPME には組み込まれていて解決済みである。そこで、前者の未知数を減らす方法を考える。基本的なアイデアは未知数のうち幾つかについて予め消去して、方程式から取り除き、方程式を解いた後、取り除いた未知数を基の方程式から求めるという、比較的古典的な方法である。以下にその手順を示す。

電場、輻射場、及び圧力場の方程式は連立方程式となっている。これらの方程式を ϕ_n を未知数として次のように書く。

$$\sum_m A_{nm} \phi_m + D_n \phi_n = B_n \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 A は行列の非対角項、 D は対角項を表し、 B は右辺のベクトルを表す。(20) 式はゼロの多い行列となっている。そのため、上式の一部を消去すると未知数が減少するため、反復解法で解く場合、早く収束するようになる。行列の一部を消去する分解操作をガウスの掃出し法と同じように行う。ただし、分解操作は一段階のみとし、また、分解の中心となる軸(消去対象となる未知数が対角に来る方程式)は図 1 に示す様に分解操作が互いに干渉しないように選ぶ。

まず、(20) 式を対角成分で割って規格化する。

$$\sum_m A'_{nm} \phi_m + \phi_n = B'_n \dots\dots\dots (21)$$

今、 n 番目の未知数を消去することを考える。未知数 ϕ_n を

図 1 分解の軸の選択方法(実線は非 0 要素)

Fig. 1. Selection of pivots for decomposition of matrix.

含む n' 番目の方程式は次のように書ける。

$$\sum_{m \neq n} A'_{n'm} \phi_m + A'_{n'n} \phi_n + \phi_{n'} = B'_{n'} \dots\dots\dots (22)$$

上式から ϕ_n を消去すると次のようになる。

$$\sum_{m \neq n} A'_{n'm} \phi_m - A'_{n'n} \sum_m A'_{nm} \phi_m + \phi_{n'} = B'_{n'} - A'_{n'n} B'_n \dots\dots\dots (23)$$

上式から $\phi_{n'}$ を取り出して纏めて書くと次のようになる。

$$\sum_{m \neq n} (A'_{n'm} - A'_{n'n} A'_{nm}) \phi_m + (1 - A'_{n'n} A'_{nn}) \phi_{n'} = B'_{n'} - A'_{n'n} B'_n \dots\dots\dots (24)$$

同様に未知数 ϕ_n を含む n' 番目以外の方程式についても ϕ_n を消去する。 n 番目についてはこの操作を行わない。こうすると、分解操作を行う方程式と行わない方程式の二組に分けられる。ただし、ディリクレ境界条件を与える方程式はこの操作を行わない。全未知数の数を N 、分解操作を行った方程式の数を N' とすると、未知数の数は N から N' に減少する。この N' 個の方程式を反復法で解く事により解が求まる。残りの未知数は求めた解とこの操作を行わなかった下記の $(N-N')$ 個の方程式より求めることが出来る。

$$\phi_n = B'_n - \sum_m A'_{nm} \phi_m \dots\dots\dots (25)$$

この方法によると、上記の処理はほぼ一つ置きの方程式について実行されるので、未知数の数はほぼ半減する。ただし、バンド幅は逆に 2 倍程度増える。従ってメモリー的にはあまり効果はないが、未知数が減る分だけ反復回数が減少し計算が速くなる。

本行列解法の有効性を見るため試算を行った。対象にした方程式は下記のポアソン方程式を直交差分で離散化したものである。

$$\{\phi_{i-1j} + \phi_{i+1j} - 2\phi_{ij}\} / \Delta x^2 + \{\phi_{ij-1} + \phi_{ij+1} - 2\phi_{ij}\} / \Delta y^2 = Q_{ij}$$

境界条件はディリクレ条件として正方形領域の周囲を $\phi = 0$ に固定した。また、 Δx 及び Δy は 0.1 とし、分割数はそれぞれの方向に 300 とした。 Q_{ij} は 1.0 と領域内を一定とした。誤差評価には反復毎に各連立方程式の残差の二乗和を右辺の二乗和で規格化して平方根を取ったノルムを用いた。図 2 に収束状況を示す。改良版ではオリジナルの PCGPME より約 2 倍早く解が収束している。

図2 PCGPME法の収束状況
Fig. 2. Convergence of PCGPME method.

3. 解析結果

〈3・1〉 アブレーション測定試験との比較 上述した解析をノズル材アブレーション測定試験について実施し、実測結果と比較した。図3に試験装置のノズル材試験部の形状を示す。試験部には2つのアーク電極を15mmの間隔で対抗して設置し、その周りを取り囲むようにノズル材試験片を配置した。圧力センサは試験片中央部に取付けた。この試験部を、SF₆ガス0.3MPaを封入した試験容器内に配置し、ピーク値15kAの電流を通电した。使用したノズル材料は四フッ化エチレンである。

図4は通电開始から6ms後の圧力分布の解析結果であり、(a)はアブレーションを考慮しない場合、(b)はアブレーションを考慮した場合である。(16)式の比例定数 θ は壁面での輻射の吸収率を示しており、実測に合うように調整したところSF₆の約160倍となった。図4(a)に示すように、アブレーションの無い場合には通电開始直後にはアーク内部にあるガスを加熱することによる圧力上昇はあるが、この期間を過ぎるとベース圧力(0.3MPa)とほとんど変わらない。これに対し、アブレーションを考慮すると、ノズル材料蒸発によりアーク近傍にガスが供給されるため、図4(b)に示すように最大1.54MPa程度まで上昇する。

図5および図6は、試験片表面における圧力変化およびアーク電圧の、解析と実測との比較である。このときの測

図3 アブレーション測定試験装置
Fig. 3. Ablation measurement test part.

図4 解析による通电開始後6ms後の圧力分布
Fig. 4. Calculated pressure distribution 6 ms after ignition of arc.

図5 圧力変化の解析と実測との比較
Fig. 5. Comparison of calculated pressure with measured.

図6 アーク電圧変化の解析と実測との比較
Fig. 6. Comparison of calculated arc voltage with measured.

図 7 小型モデル概形

Fig. 7. Outline of interrupter model.

図 8 遮断前 5 ms 近傍でのアークの温度分布

Fig. 8. Temperature distribution of arc 5 ms before current zero.

図 9 バッファ室圧力変化

Fig. 9. Change of pressure in puffer room.

定部近傍での圧力および電圧の解析値は、実測とほぼ一致している。以上のように、アブレーションの量はアークの輻射エネルギーと関連付けて見積もることができる。

〈3・2〉 小型モデル遮断実験との比較 図 7 は実器の小型モデル遮断器の遮断部を示したものである。これに、ピーク値 10 kA の電流を流した遮断試験についてテスト計算を実施した。通電時間は半波長の 10 ms である。可動子のストロークは別途動作解析を行って与えた。尚、解析に使用したメッシュ数は約 1000×160 で、また、メッシュ幅は計算の効率を考慮して 0.25 mm～1.0 mm を用いた。図 8 は遮断前 5 ms のときのアーク近傍の温度分布、図 9 はバッファ室圧力についての実測との比較、図 10 はアーク電圧の比較を示す。図 9 及び図 10 の横軸の時刻は遮断点で時刻 0 である。図 8 に示すように、ノズルカバーからの蒸発によりアークがノズルカバーに接触することなく離れている様子が計算されている。また、このときの最高温度は 27,000 K であった。バッファ室圧力は低めに予測しているが、計測

図 10 アーク電圧の変化

Fig. 10. Change of arc voltage.

時の圧力振動の下側の包絡線に一致しており、計算結果は妥当と考えられる。アーク電圧は消弧ピークを高めに予測しているが、全体的には概ね一致している。以上のように実機遮断器のようにパuffer室と可動アーク接触子から構成される場合にも本手法が有効であることが確認できた。

4. まとめ

遮断器内の物理現象を理解するため、アークを考慮した気流解析技術を開発した。本技術の特徴を下記に示す。

(1) アーク解析でのエネルギー及び密度変動に対し、数値的な安定化を図るため、内部エネルギーの輸送方程式の代わりに内部エネルギーと密度の積についての輸送方程式を用いた。

(3) アブレーションの効果を取り入れる方法として、アブレーション量は壁面の輻射エネルギー射出率と空間での輻射強度の差に比例するとした。

(3) 電場、圧力場、及び輻射場の連立方程式解法に用いている PCG 法に一段回のガウス掃きだし法を適用した未知数を削減する改良を行った。

本手法をアブレーション測定試験と、小型モデルによる電流遮断実験に適用し、実験結果と比較したところ、概ね実測値を再現でき、本手法が有効であることが分かった。

(平成 18 年 10 月 3 日受付, 平成 19 年 2 月 9 日再受付)

文 献

- (1) T. Mori, K. Iwamoto, T. Nakamoto, and K. Suzuki: "Development of gas flow simulation method considering ablation for GCB chamber", SP-99-86 (1999) (in Japanese)
森 正・岩本勝治・中本哲哉・鈴木克己:「アブレーションを考慮した GCB 消弧室内ガス流解析手法の開発」, 電気学会開閉保護高電圧合同研資, SP-99-86 (1999)
- (2) M. Koizumi, R. Ando, H. Urai, N. Yaginuma, M. Tsukusi, and I. Harada: "Development of a numerical calculation method for arc behavior considering absorptive power of SF₆ gas in thermal radiation", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.12, pp.1652-1659 (2001-12) (in Japanese)
小泉 真・安藤竜弥・浦井 一・柳沼宜幸・筑紫正範・原田 巖:「ガスの輻射吸収性を考慮したアーク挙動解析手法の開発」, 電学論 B, **121**, 12, pp.1652-1659 (2001-12)
- (3) 堀之内克彦:「ガス遮断器におけるアークシミュレーション技術」, 三菱電機技報, Vol.80, No.7, pp.7-10 (2006)
- (4) A. Gleizes, J.J. Gonzalez, and P. Freton: "Thermal plasma modeling", *J.*

Phys. D: Appl. Phys., Vol.38, pp.R153–R183 (2005)

- (5) T. Yabe, F. Xiao, and T. Utsumi: “The Constrained Interpolation Profile Method for Multiphase Analysis”, *J. Comp. Phys.*, Vol.169, pp.556–593 (2001)
- (6) 小国 力・村田健郎・三好敏郎・J.J. ドラカン・長谷川秀彦：行列計算ソフトウェアWS，スーパーコン，並列計算機一，丸善 (1991-11)
- (7) M. Claessents, K. Moeller, and H.G. Thiel: “A computational fluid dynamics simulation of high- and low-current arcs in self-blast circuit breakers”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.30, pp.1899–1970 (1997)
- (8) M. Koizumi, H. Urai, Y. Ohsita, N. Osawa, J. Kida, and M. Hirose: “Gas flow analysis considering ablation of nozzle material”, 2005 National Convention Record IEE Japan, 6-209 (2005) (in Japanese)
小泉 眞・浦井 一・大下陽一・大澤直樹・木田順三・廣瀬 誠：「輻射吸収性によるノズル材蒸発を考慮した気流解析」，平成 17 年電気学会全国大会講演論文集，6-209 (2005)
- (9) F. Xiao, T. Yabe, G. Nizam, and T. Ito: “Constructing a multi-dimensional oscillation preventing scheme for the advection equation by a rational function”, *Comput. Phys. Commun.*, Vol.94, pp.103–118 (1996)

小 泉 眞 (正員) 1949 年 10 月 15 日生。1975 年 3 月大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (株) 日立製作所日立研究所入所。同エネルギー研究所，同電力・電機開発本部を経て，現在同電力・電機開発研究所に勤務。主として，電磁気及び熱流体に関する数値解析の研究に従事。工学博士。

浦 井 一 (正員) 1968 年 4 月 12 日生。1997 年 3 月東京工業大学理工学研究科博士課程修了。同年 4 月 (株) 日立製作所電力・電機開発本部入所。現在同電力・電機開発研究所に勤務。主としてガス遮断器の研究開発に従事。工学博士。IEEE 会員。

大 下 陽 一 (正員) 1951 年 3 月 6 日生。1975 年 3 月広島大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (株) 日立製作所日立研究所入所。同国分工場等を経て，現在同電力・電機開発研究所に勤務。主として，電力用ガス遮断器及び開閉器に関する開発に従事。

大 澤 直 樹 (正員) 1977 年 12 月 29 日生。2004 年 3 月金沢工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程修了。同年 4 月 (株) 日立製作所入社。現在，電力・電機開発研究所にて，電力用ガス遮断器に関する研究・開発に従事。博士 (工学)。IEEE 会員。

筑 紫 正 範 (正員) 1945 年 7 月 11 日生。1970 年 3 月横浜国立大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (株) 日立製作所入社日立研究所にてガス遮断器の遮断部，遮断現象の研究開発に従事。1997 年 2 月同社国分工場転属。現在，(株) 日本 AE パワーシステムズ研究開発本部勤務。工学博士。

柳 沼 宣 幸 (正員) 1967 年 1 月 19 日生。1992 年 3 月茨城大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月 (株) 日立製作所日立研究所入所。主に，ガス遮断器遮断部開発等に従事。1997 年 2 月同社国分工場転属。現在，(株) 日本 AE パワーシステムズ開閉装置事業部勤務。