

# ハイブリッドパッファ<sup>TM</sup>形ガス遮断器消弧室内の熱ガス流解析

## Hot Gas Flow Simulation in Hybrid-Puffer Type Gas Circuit Breakers

岩本 勝治

森 正

古田 宏

■ IWAMOTO Katsuharu

■ MORI Tadashi

■ FURUTA Hiroshi

遮断器は電流を遮断し、電力系統の制御並びに保護の役目を果たすものであり、六フッ化硫黄 (SF<sub>6</sub>) ガスの優れた消弧性能、絶縁性能、及び簡素な構造を持つパッファ形 SF<sub>6</sub> ガス遮断器が広く使用されている。東芝は、小形で低エネルギー駆動が可能なハイブリッドパッファ<sup>TM</sup>方式を採用している。この方式をいっそう高性能化するためには、アークを含んだ熱ガス流解析を活用して、遮断性能を詳細に把握する必要がある。

当社は、差分法を用いた解析プログラムをガス遮断器用に開発し、改良してきた。この解析手法をハイブリッドパッファ<sup>TM</sup>形ガス遮断器に適用し、有用なシミュレーション結果を得ることができた。

A gas circuit breaker (GCB) is an apparatus that interrupts electric currents to control or protect a power system. Puffer type sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) GCBs are the most widely used type due to the excellent insulating and arc-quenching properties of SF<sub>6</sub> gas and the simple structure of the puffer unit. The hybrid-puffer type GCB is an improved and downsized type of ordinary GCB requiring less driving energy.

Toshiba is developing a higher performance, more reliable, and more compact hybrid-puffer type GCB that will be realized through investigations of arcing phenomena based on hot gas flow simulation technologies. For this purpose, we have developed and are further improving a simulation program to analyze hot gas flows in GCBs. We have applied this program to the analysis of hot gas flow behavior in hybrid-puffer type GCBs and obtained a large amount of useful simulation results.

## 1 まえがき

遮断器は、電力系統の制御並びに保護のために、電流を遮断する役目を果たしている。SF<sub>6</sub>ガスの優れた消弧性能、絶縁性能、及びパッファ形の簡素な構造のため、信頼性が高いパッファ形SF<sub>6</sub>ガス遮断器が高電圧ガス遮断器として広く使用されている。

東芝は、FLIC (FLuid In Cell) 法を用いたプログラムをガス遮断器用に適用し、改良してきた。遮断性能を正確に把握し、高性能で小形なガス遮断器を開発するためには、アークを含んだ熱ガス流解析が必要である。この解析においては、アークをジュール加熱とし、熱放射や実在気体効果を考慮している。更に、接触子材料の銅及びノズル材料のPTFE (PolyTetraFluoroEthylene) がアーク熱で蒸発し昇華することによりアークが冷却されるアブレーション冷却<sup>(1),(2)</sup>効果も考慮している。ここでは、ハイブリッドパッファ<sup>TM</sup>形ガス遮断器を例に、消弧室内の熱ガス流解析について述べる。

## 2 FLIC 法による解析

### 2.1 基礎方程式

熱ガス流解析では、三角形要素の非構造格子を使用する変形FLIC法を用いた。圧縮非粘性流れの非定常2次元軸

対称流れに対する基礎方程式である連続の式、軸方向運動量方程式、半径方向運動量方程式、及びエネルギー方程式は、次式で与えられる。

(1) 連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (1)$$

(2) PTFEの連続の式

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_p u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_p v) = 0 \quad (2)$$

(3) 銅の連続の式

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_c u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_c v) = 0 \quad (3)$$

(4) 軸方向運動量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

(5) 半径方向運動量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (5)$$

(6) エネルギー方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho E u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho E v) \\ & = -\frac{\partial}{\partial r}(\rho u) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r p v) - \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{aligned}$$

$$+ q_{arc} - q_{rad} - \rho_P \dot{E}_{pab} - \rho_C \dot{E}_{cab} \quad (6)$$

$$E = \frac{P}{(\gamma-1)\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \quad (7)$$

ここで、 $E$ は単位質量当たりのエネルギー、 $\dot{E}_{cab}$ は単位質量単位時間当たりの銅アブレーション冷却エネルギー、 $\dot{E}_{pab}$ は単位質量単位時間当たりのPTFEアブレーション冷却エネルギー、 $p$ は圧力、 $q_{arc}$ は単位体積当たりのアーク熱入力、 $q_{rad}$ は単位体積当たりのアークからの熱放射、 $r$ は半径方向座標、 $T$ は温度、 $t$ は時間、 $u$ は軸方向速度、 $v$ は半径方向速度、 $x$ は軸方向座標、 $\gamma$ は比熱比、 $\lambda$ は熱伝導率、 $\rho$ はSF<sub>6</sub>ガス、PTFE、及び銅の混合ガス密度、 $\rho_C$ は銅の密度、 $\rho_P$ はPTFEの密度を表す。

変形FLIC法では、計算領域を多数の三角形要素に分割し、各要素内において $p$ 、 $\rho$ 、 $u$ 、 $v$ 、 $E$ の値は一定と仮定して要素重心の値とみなし、計算を行う。

## 2.2 アークエネルギー入力

アーク接触子間に発生するアークエネルギーはジュール加熱として扱うことができる<sup>(1)</sup>。したがって、式(6)の外部熱項 $q_{arc}$ として入力することができる。

SF<sub>6</sub>ガスの物性値である電気伝導度と、実測のアーク電流よりアーク熱入力を計算している。SF<sub>6</sub>ガスの電気伝導度は、温度範囲が300 Kから30,000 Kまで、圧力が5, 10, 20, 50, 100 atmの5条件での計算結果が得られている<sup>(3)</sup>。

アーク抵抗は、次式で与えられる。

$$R_{arc} = \rho_{arc} \frac{l}{S} \quad (8)$$

ここで、 $l$ はアーク長さ、 $R_{arc}$ はアーク抵抗、 $S$ はアーク断面積、 $\rho_{arc}$ は比抵抗である。 $\rho_{arc}$ は電気伝導度 $\sigma$ の逆数であるから、式(8)は次式のようになる。

$$R_{arc} = \frac{l}{\sigma S} \quad (9)$$

そこで単位体積当たりのアーク熱入力は、アーク電流を $I$ とすると、次式のように求まる。

$$q_{arc} = \frac{I^2 R_{arc}}{Sl} = \frac{I^2}{\sigma S^2} \quad (10)$$

電気伝導度は、温度3,500 K以下では非常に小さく、アーク抵抗が大きくなりすぎるので、3,500 K以下では3,500 Kでの電気伝導度の値で計算している。

## 2.3 アークからの熱放射

アークからの熱放射は、アークの外周部からアークエネルギーの半分以上を熱として放出すると言われている。アークを灰色体<sup>(4)</sup>とみなすと、熱放射 $Q_{rad}$ は、次式で与えられる。

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma_S (T_{arc}^4 - T_{amb}^4) F A_S \quad (11)$$

ここで、 $F$ は形態係数、 $T_{arc}$ はアーク温度、 $T_{amb}$ は周囲温度、 $A_S$ は表面積、 $\varepsilon$ は放射率、 $\sigma_S$ はステファン・ボルツマン定数

である。アークがノズル内部で発生するので、 $T_{amb}$ はノズル壁面温度としている。

## 2.4 アブレーション冷却

アーク熱により、接触子材料の銅及びノズル材料PTFEが蒸発して昇華し、その際にアークからエネルギーを奪うアブレーション冷却の効果を式(6)に入れている。更に、ノズル材料PTFEは解離の際にもアークからエネルギーを奪う。アブレーションエネルギー<sup>(5)</sup>を表1に示す。

PTFEは、温度600 K以上でノズル壁面から蒸発してSF<sub>6</sub>ガス中に流れ込み、3,400 K以上で分子が解離を起こしてアークの冷却に寄与する。

表1. PTFEと銅のアブレーションエネルギー

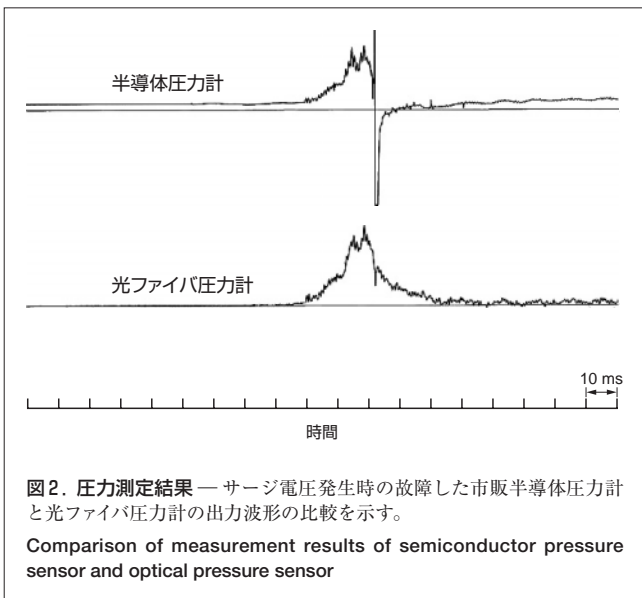
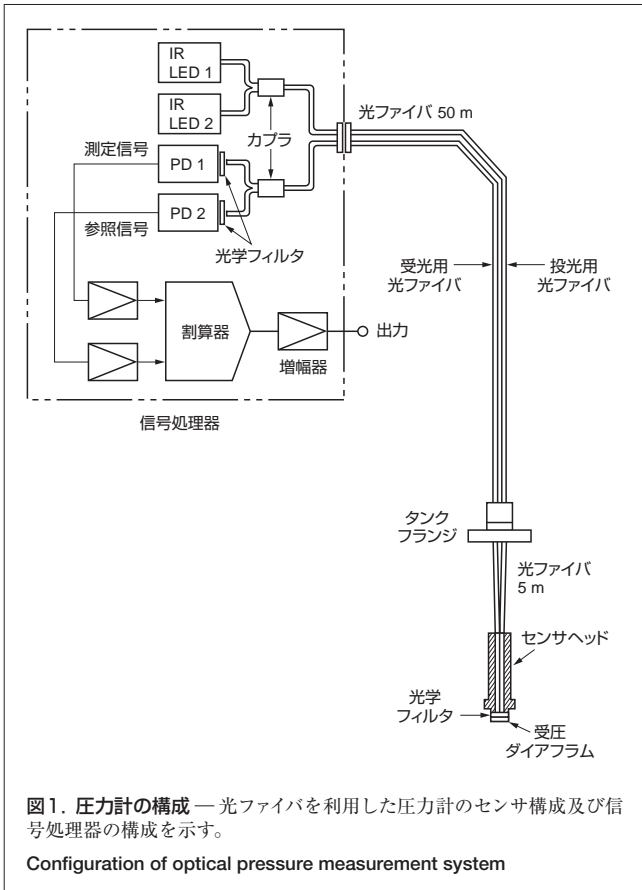
Energy loss by ablation of polytetrafluoroethylene (PTFE) and copper

項目	蒸発温度 (K)	蒸発エネルギー (J/kg)	解離温度 (K)	解離エネルギー (J/kg)
PTFE	600	$5.73 \times 10^4$	3,400	$1.19 \times 10^7$
銅	1,360	$4.80 \times 10^6$	—	—

## 3 光ファイバ圧力計

ガス遮断器内部では、高電圧及び大電流に伴う電磁誘導雑音により、市販の圧力計はノイズの影響を受けるため、光ファイバ圧力計の開発を行った<sup>(6)</sup>。光ファイバ圧力計の構成を図1に示す。測定原理は、圧力による受圧ダイヤフラムのたわみが反射光量の変化に比例することを利用して圧力測定を行うものである。測定用赤外発光ダイオードIR (InfraRed) LED1と参照用赤外発光ダイオードIR LED2の光を光ファイバに入れ、カプラで2本の光ファイバを1本にすることにより、測定光と参照光を投光用光ファイバに入れる。この光ファイバを入れた2心コードケーブル50 mを通して、測定光と参照光を遮断器タンクに伝送する。遮断器タンク内部にはコネクタ付きフランジで導入される。遮断器タンク内部の光ファイバの長さは、測定位置を考慮して5 mとしている。センサヘッド内において、測定光は光学フィルタを通過して受圧ダイヤフラムに投光され、そこで反射される。参照光は光学フィルタで反射される。測定光と参照光の反射光は、受光用光ファイバにより信号処理器に伝送される。それぞれの反射光は光学フィルタにより分離され、フォトダイオードPD1、PD2によって、測定信号と参照信号に変換される。反射信号を参照信号で割算することで、光ファイバに対する振動や温度変化の影響なしに、圧力測定が可能となる。

光ファイバ圧力計と半導体圧力計をパツファ室の接近した位置に設置した。遮断器開発試験において、サージ電圧が発生した際の両センサの出力を図2に示す。半導体圧力計は出力が負側に大きく振れて出力が出なくなったが、光ファ



イバ圧力計は正常であった。

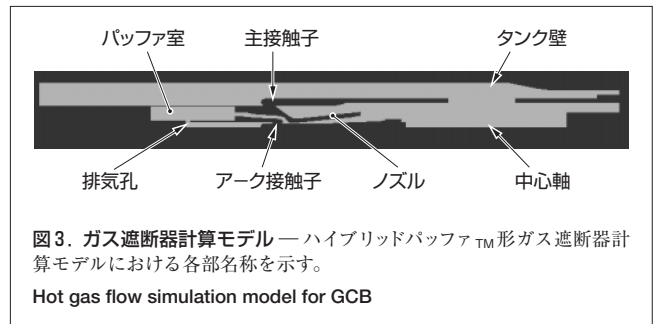
## 4 ハイブリッドパuffa™形ガス遮断器の解析結果

### 4.1 解析条件

ハイブリッドパuffa™形ガス遮断器は、アークエネル

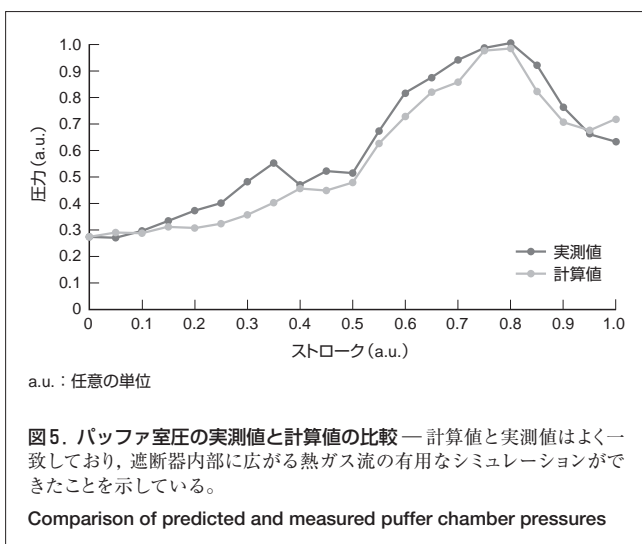
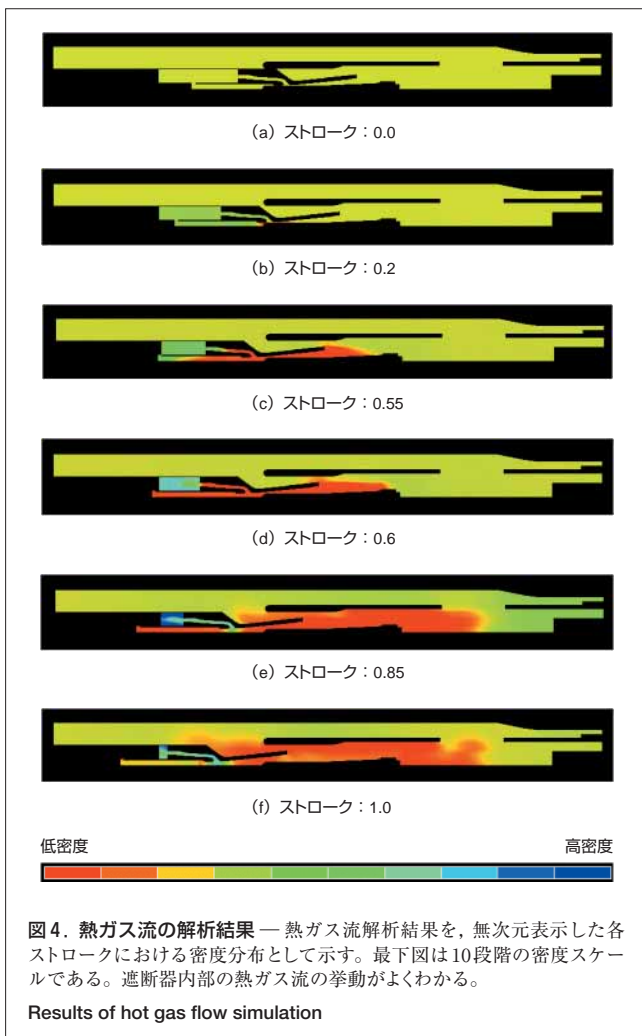
ギーの一部を有効利用した遮断器である。要素数約1,700のガス遮断器計算モデルを図3に示す。熱ガス流解析ソフトウェアは二次元軸対称流を扱うので、中心軸より上の部分を計算対象としている。ノズル部が左方向に移動し、パuffa室を圧縮する。

銅及びPTFEのアブレーション量は、遮断試験前後の電極及びノズルの重量測定を行って算出し、アーク電流に比例するとして熱ガス流解析ソフトウェアに取り入れている。



### 4.2 解析結果

熱ガス流解析の結果、得られたストロークに対するSF<sub>6</sub>ガス密度分布を図4に示す。表示したストロークは、各ストロークを最大ストロークで割り、無次元表示している。また、光ファイバ圧力計によるパuffa室圧の実測値と計算結果との比較を図5に示す。横軸のストロークは、図4と同様、最大ストロークで割り、無次元表示している。また、縦軸のパuffa室圧は、測定値の最大圧力値で割り、無次元表示している。図4の(a)ストローク0.0は、遮断前の状態である。ノズル部が左方向に移動しパuffa室を圧縮し、パuffa室圧が上昇する。(b)ストローク0.2でアーク接触子が開離し、アーク接触子間にアークが発生して高温高压低密度となる。開極初期から(c)ストローク0.55まで、アークによって高温高压化したガスを操作ロッドの排気孔からパuffa室内に取り込み、圧力上昇を効果的に行う。(d)ストローク0.6で、アークにより高压化したノズル内部のガスがパuffa室に流入する。この流入により高压になったパuffa室内のガスを圧縮動作で更に高压化する。図5に示したように、ストローク0.8でパuffa室圧は最大となり、(e)ストローク0.85で、パuffa室内の高压高密度のガスがアーク接触子間に流出し、アークを遮断する。(f)ストローク1.0は、遮断の完了した状態を示している。高温低密度のガスがノズルより下流に残留しているのがわかる。図5では、全体的に計算値は測定値よりもやや低い値を示しているが、おおむね一致している。特に、電流ゼロ点付近(ストローク0.85)や圧力の最大値(ストローク0.8)はよく一致しており、遮断の成否にかかわる接触子間や、遮断器タンク部に広がる熱ガス流のようすをシュミレーションするために必要な精度を確保できていると考えられる。



## 5 あとがき

高性能で小形なガス遮断器の研究開発を効率よく行うために実施している消弧室内の熱ガス流解析技術を、ハイブリッドパッファ<sup>TM</sup>形ガス遮断器を例に述べた。

最近のガス遮断器研究開発においては、アークエネルギーを利用してパッファ室を圧縮する駆動エネルギーを低減する傾向にあり、今後、熱ガス流解析技術のいっそうの精度向上を目指していく。

## 文献

- (1) Chévrier, P., et al. Industrial applications of high-, medium- and low-voltage arc modelling. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30**, 1977, p.1346 - 1355.
- (2) Chévrier, P., et al. Study of the arc-electrode interaction in a SF<sub>6</sub> self-blast circuit breaker. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32**, 1999, p.1494 - 1502.
- (3) Mori, T., et al. Gas-Flow Simulation With Contact Moving in GCB Considering High-Pressure and High-Temperature Transport Properties of SF<sub>6</sub> Gas. *IEEE Trans on Power Delivery.* **20**, 4, 2005, p.2466 - 2472.
- (4) Claessens, M., et al. A computational fluid dynamics simulation of high- and low-current arcs in self-blast circuit breakers. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30**, 1997, p.1899 - 1907.
- (5) Ruchti, C. B. and Niemeyer, L. Ablation Controlled Arcs. *IEEE Trans. on Plasma Science.* **PS-14**, 4, 1986, p.423 - 434.
- (6) Iwamoto, K., et al. Miniature Optical Pressure Sensor for Gas Circuit Breaker. *IEEJ Trans. FM.* **124**, 7, 2004, p.582 - 586.



岩本 勝治 IWAMOTO Katsuharu, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 送変電機器開発部参事, 工博。電力用ガス遮断器の研究開発に従事。日本機械学会, 応用物理学会, OSA 会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



森 正 MORI Tadashi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 送変電機器開発部主務。電力用ガス遮断器の研究開発に従事。電気学会, IEEE 会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



古田 宏 FURUTA Hiroshi

電力システム社 浜川崎工場 開閉装置部主務。電力用ガス遮断器の開発設計に従事。日本機械学会会員。

Hamakawasaki Operations