モデル SF₆ ガス遮断器のガス流観測

正員 鈴木 克己 (東芝)

Observation of Gas Flow in the Nozzle of Model SF₆ Gas Circuit Breaker

Katsumi Suzuki, Member (Toshiba Corporation)

Flow velocity and pressure distribution were measured in the downstream region without arc by using laser fluid flow velocimeter system and pressure transducer system, respectively. Flow pattern was also observed by using Schlieren optical system. By these experiments, the flow characteristic was clarified in detail. Flow characteristic was calculated by using the compressible fluid analytical program of FLIC method. Pressure distribution obtained in the experiment was compared with the calculated one. Two data show good agreement in general.

Based on the calculated pressure distribution, the breakdown voltage was estimated from E/p where E is electric field strength and p is pressure. It was found that estimated breakdown voltage is very close to the breakdown voltage measured during contact opening operation.

キーワード：SF₆ ガス遮断器，衝撃波，消弧室，絶縁回復特性，レーザ流速計，シュリーレン法

1. ま え が き

パッファ形 SF₆ ガス遮断器 (GCB) は、SF₆ ガスの優れた消弧性能、絶縁性能およびパッファ形の簡素な構造のために信頼性が高く、高電圧 GCB として広く適用されている。GCB の大容量化とともに、GCB の一遮断点あたりの遮断容量も増加の一途をたっており、従来にも増して高い電圧および大きな遮断電流を遮断しなければならない。そのため、消弧室の性能向上を図ることが重要である。

高気圧ガスをアークに吹き付けて遮断する場合、開極途中でパッファ室の圧力が急激に上昇することによりノズル下流側の流れが超音速条件となり、ガス流空間の急激な圧力の低下や圧力変動が起こることが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。消弧室内のガス流状態は遮断性能に大きな影響を与えていると考えられており、ガス流の特性を正しく把握することが重要である。しかし、ノズル下流側の一部の状態は、シュリーレン法などの可視化技術によって測定されているものの、ノズル内のガスの流れの状態を可視化する方法が難しいため、流体諸量の測定⁽¹⁾や二次元、三次元モデルを用いた流体解析が数多く行われ間接的に推定されている⁽³⁾。ま

た、遮断性能面ではノズル下流側のガス流が超音速条件になっているにもかかわらず、大きく影響する場合としない場合があり、ガス流の特徴と接触子間の絶縁回復について関連付けことが難しかった。

本論文では、ノズル下流側のガス流について流速と圧力分布の測定、シュリーレン法を用いた流れの可視化および流体解析によって詳細に検討し、ガス流の特徴と絶縁破壊の関連を明らかにした。

2. モデル消弧室によるノズル下流側のガス流

GCB の開極過程においてパッファシリングが圧縮され、圧力が上昇するに従って SF₆ ガスが絶縁ノズルを通して下流側へ流れる。パッファ室の圧力とノズル下流側の圧力の比が超音速条件になったとき、ノズル下流側の領域において急激な圧力変動が起こる。

本章では、パッファ動作がある場合、消弧室内で起る現象が複雑となることから、現象を単純にして理解しやすくするために、SF₆ ガスの代わりに空気を作動媒体として、パッファ動作をさせずにノズルと固定接触子の相対位置を固定した状態 (固定モデル) で、モデル消弧室の絶縁ノズル下流側のガス流速測定、圧力測定、シュリーレン法による測定を行った。更に、

実際のパuffa動作を行うパuffaモデルの圧力測定を行った。

〈2・1〉 流速の測定 可動部を固定した状態でパuffa室から高気圧の空気を流し、ノズル下流側の一定位置における流速を測定した。

実験装置の概略を図1に示す⁽⁴⁾。空気をマイクロミストセパレータを通して、50 lタンクにためる。実験の際には、溜めた空気を配管を通し、モデル消弧室のノズルから大気へ放出する。空気の放出は、タンクの出口のボールバルブを開にすることによって行った。

計測器は、図1に示すようにレーザ流速計を dual scatter mode 前方散乱方式で校正し、アルゴンイオンレーザを波長 5,145 Å, 出力 100 mW で動作させた。アルゴンレーザから発した波長 5,145 Å のレーザ

光線はミラーにより 90 度方向へ曲げられ、ビームスプリッタに入射する。ビームスプリッタにより 2 光線に分岐したレーザ光線は、焦点レンズによりノズル出口に焦点を結ぶ。この焦点をノズル噴流に含まれている数 μm の粒子⁽⁹⁾ が通過すると、レーザ光線を散乱する。この散乱光を集光レンズでピンホール面上に集め、ピンホールを通過した光を光電子倍增管で電気信号に変え、粒子が幅 8.58 μm の干渉縞を通過するに要した時間を測定することによって粒子速度を算出した。測定領域は長さ 2.3 mm, 幅 0.164 mm である。接触子の開極方向に対して、垂直方向からレーザ光を入射しているの、開極方向が幅に、半径方向が長さにそれぞれ一致する。

30 μs ごとに繰返して約 5 ms の間続けて信号処理を行う。これを繰返して約 200 個のデータを得、流速分布として示したものが図2である。実線は、ノズル先端よりやや下流側 (図1の A 点) であり、破線は、これより更に固定接触子側へ移動した (図1の B 点) ものである。いずれも中心軸近傍で測定した。レーザ流速計では、粒子の速度を測定してこれを運ぶ流体の速度としている。粒子と流体の速度のずれが生じると正確な測定ができないので、標準の流速であらかじめ測定し、ずれがないことを確認した⁽¹⁰⁾。

図に示すように消弧室内の流速は、一定ではなく、200 m/s をやや超える速度を中心に広がっている。これは、一般的なノズル噴流中の流速が比較的一定しているのに比べると特殊であることを意味しており、消弧室内のガス流が固定接触子の存在によって発生する衝撃波の影響により一般的なノズル噴流より乱れていると考えられる。また、この傾向は下流側へ行くほど強くなり、流速は広い範囲にわたってなだらかな分布を示した。

図1 流速測定実験装置

Fig.1. Experimental apparatus for gas velocity measurement.

図2 流速分布

Fig.2. Gas velocity distribution.

図3 圧力測定実験装置

Fig.3. Experimental apparatus for gas pressure measurement.

〈2・2〉 圧力の測定 図3に示した実験装置を用いて消弧室内部の圧力測定を行った。消弧室モデルの断面および圧力測定点を図4に示す。測定点は、タンク圧①、パuffa圧②、ノズル4箇所③～⑥、固定接触子2箇所⑦～⑧で、各点での圧力は、ひずみゲージ式圧力変換器とストレインアンプを使用して測定し、アンプからの出力はフォトコーダおよびディジタイジングオシロスコープにより記録した⁽¹⁾。相対位置を変えて測定できるように、固定接触子の位置を可変にしてある。以下、各相対位置においてノズルスロートから固定接触子先端までの距離を、ノズルスロート径で割ったものを相対位置を表す値とした。すなわち、ノズルスロートと固定接触子先端が一致したところで相対位置0とした。

相対位置0.1～2.8の圧力測定結果を図5に示す。

図4 消弧室モデルと圧力測定点
Fig. 4. Interrupting chamber model and pressure measurement points.

図5 固定モデルのノズル中の圧力分布
Fig. 5. Pressure distributions in the nozzle of two pressure level flow system.

ノズルスロート③は相対位置1.0で最低圧力となり、その後上昇している。理論的に知られているLavalノズル内の流れを参考にすると、ノズルスロートでの圧力は、超音速条件になるまではパuffa圧が高くなるに従って低下し、超音速条件になった後はパuffa圧と一定の圧力比を示すように変化する。空気の超音速条件は、等エントロピー流れを仮定すると、圧力比が0.528 (20°C, 比熱比 $\gamma=1.4$) 以上となるときであり、パuffa圧②とノズルスロート③の比が相対位置1.0より大きくなると超音速条件を超える。従って、本実験結果では相対位置が1.0より大きくなると超音速条件になり、衝撃波が発生していると考えられる。ノズルスロート③のマッハ数は、同図に示すとおり、相対位置1.0以後ほぼ1以上の一定のマッハ数になっている。

〈2・3〉 パuffa動作のある場合の圧力測定結果との比較 図6(a)～(d)は、パuffa動作させた場合(以下、パuffaモデルと呼ぶ)と固定モデルで得られた圧力測定結果の比較を示す。パuffaモデルでは、作動媒体としてSF₆ガスを用いた。パuffaモデルでの測定方法は、半導体圧力変換器の抵抗変化を

図6 ノズル中の圧力分布の比較
Fig. 6. Comparison of pressure distributions in the nozzle.

ブリッジ回路で検出し、直流増幅器で増幅して測定した。(a)図はノズルスロート③、(b)、(c)図はそれぞれノズル沿面④、⑥、(d)図は固定接触子先端⑦での比較で、縦軸はパuffa室の圧力変化を基準とした圧力比で示している。相対位置0.7~1.3で違いが見られるものの圧力変化の傾向はどの位置においてもほぼ一致した。

〈2・4〉 シュリーレンによる測定 以上のようなガス流を更に調べるために、シュリーレン法を用いたガス流の可視化を行った。実験装置は、図3で示した固定モデルのシュリーレン測定系である⁽⁵⁾。光源は、5mWのHe-Neレーザを使用し、この光を対物レンズを通して25μmのピンホール径まで絞り、コリメータレンズによって光を平行光線にし、消弧室モデルに入射する。光は測定部を通った後、スリット部に焦点ができるように集光される。スリットを通過したレーザ光線はカメラあるいはスクリーンに入射する。ここでは、ノズル下流側のガス流を可視化するために、ノズル下流側の長さを短くしている。ガス流がない場合には、ガスの密度が変化しないので画面に変化がないが、ガス流が発生するとガス密度が変化するため、密度の変化したガスを通過した光線が屈折を起こし、スクリーンに到達し像ができる。シュリーレン法では密度の変化によって光線が屈折する現象を用いており、定性的には影の部分は密度の変化が急激であると考えられる。

図7はノズル下流側のガス流について測定した結果である。接触子間の圧力変動が最も大きく、ノズル下流側の圧力比が超音速条件に達した状態の一部を撮ったものである。ノズル先端と固定接触子との間に擬似衝撃波⁽⁸⁾と呼ばれる菱形の影が生じる。また、固定接触子の前部には剥離衝撃波⁽⁸⁾と呼ばれる弓状の影が見られる。このようにノズル下流側と固定接触子先端付近に衝撃波が発生していることがわかった。この衝撃波は、衝撃波前後で圧力こう配の大きい領域を作り、圧力変動の著しい空間が生じるものと考えられる。

図7 シュリーレン法によるガス流の観測
Fig.7. Schlieren photographs of gas flow.

パuffaモデルでは、パuffaシリンダ内の圧力およびノズルと固定接触子先端との間の距離が時間とともに変化するため、現れる像はそれに対応して変化しているため、種々の衝撃波の移動している様子が観測された。

3. ガス流の解析

実際の消弧室内のガス流は以上に示したような複雑な変化をしており、ノズルの形状ごとにガス流が異なっている。ノズル内のガス流は、直接的に測定することができないので、ノズル内のガス流を把握するために数値解析手法を用いた。

〈3・1〉 計算法 解析には、差分法の一つである変形FLIC法によるプログラムを用いた⁽⁶⁾。モデルのガス流路の断面を三角メッシュで近似して、各メッシュごとに以下の基礎方程式により逐次計算を行った。

質量保存則

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

半径方向運動保存則

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot u r)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho u \cdot v)}{\partial z} = - \frac{\partial P}{r \partial r} \quad \dots\dots\dots (2)$$

中心軸方向運動量保存則

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot v r)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho v \cdot v)}{\partial z} = - \frac{\partial P}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (3)$$

エネルギー保存則

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial(E u r)}{r \partial r} + \frac{\partial(E v)}{\partial z} \\ = - \frac{\partial(P u r)}{r \partial r} - \frac{\partial(P v)}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし、 ρ :密度、 u : r 方向速度、 v : z 方向速度、 E :単位体積当たりのエネルギー

図8 等圧力線図(相対位置2.0)
Fig.8. Figure of pressure distributions (relative position 2.0).

図 9 測定結果と解析結果の比較 (相対位置 1.9)
Fig. 9. Comparison between measured and calculated pressure distribution.

$[=\rho C_v T + \rho/2(u^2 + v^2)]$, C_v : 定積比熱,
 T : 温度

メッシュ図は、圧力こう配の大きい領域および流れのよどむと予想される領域はメッシュを細かく切った。

〈3・2〉 測定と計算の比較 解析結果の一例として、相対位置 2.0 の場合の等圧力線図を図 8 に示す。固定接触子先端付近で急激な圧力変動が見られ、衝撃波が発生していると考えられる。固定接触子と可動接触子の間での圧力の最も低い部分は、圧力比が 0.15 以下になっており、著しい圧力低下が起きている。

図 9 に相対位置 1.9 の場合の固定モデルおよびパッファモデルの測定結果と計算結果を圧力比で比較した。計算結果は、測定点に最も近い要素の重心での値である。測定結果と計算結果は、圧力こう配の大きいスロート付近③および④や衝撃波より下流の固定接触子先端⑦などでは差があるが、ほぼ似た値を示しており、ノズル下流側沿面における圧力比により、ノズル下流側のガス流を把握することが可能である。

4. 検 討

以上の実験により、固定モデル、パッファモデルの測定結果および解析結果がほぼ一致していることからノズル内部の圧力比が超音速条件となり、ガス流速が乱れ、衝撃波が発生することが明らかとなった。実際の GCB では、この衝撃波を伴った流れが生じ、小電流を遮断した際の絶縁回復特性に最も影響を及ぼすものと考えられる。本章では、開極動作途中の電界強度が同一の接触子構造としたモデルにおいて、3 種類の異なった流れを作り、ノズル下流側の圧力比分布と絶縁破壊との関係について検討した。

〈4・1〉 GCB 開極動作中の絶縁破壊 SF₆ ガス

図 10 ノズル下流側における E/p
(相対位置 1.9)

Fig. 10. E/p in the downstream region of the nozzle throat (relative position 1.9).

ャップ中の絶縁破壊は、ストリーマ理論がよく用いられ、ガスのイオン化係数 α と電子付着係数 η によって表される実効電離係数 $(\alpha - \eta)$ によって決定される。この係数は、 E/p に対して直線関係にある⁽⁷⁾。この破壊条件から、相対位置 1.9 に対する各部の電界強度と空間の圧力 p の比 E/p を求めると図 10 になる。この関係から E/p が最も高くなるのは、固定接触子近傍であり、絶縁破壊現象は、固定接触子先端で起こっているものと考えられる。また、絶縁破壊は、空間のガス密度に依存するが、等エントロピー流れを考慮すると圧力と密度は比例関係が成り立つため、ここでは圧力と絶縁破壊の関係について論じる。

〈4・2〉 GCB 開極動作中の圧力変化と絶縁破壊

ノズルの形状により 3 種類の流れ (a) ~ (c) を作り下流側の圧力比と絶縁破壊について検討した。パッファ圧力上昇特性は、図 5 で測定した圧力②と同等とした。また、ノズル形状以外の寸法 (パッファシリンダ容積など)、開離速度、ノズルスロート径、ノズル下

図 11 各相対位置におけるノズル下流側の圧力比分布と絶縁破壊電圧

Fig. 11. Pressure ratio distributions and dielectric breakdown voltages in the downstream region of the nozzle throat at various relative positions.

流側の傾き角度はすべて同一にした。ノズル(a)は、ノズルスロートの曲率を最小にした構造で、ノズルスロートから上流側の断面積は、ノズルスロートの断面積に比べて2倍程度である。ノズル(b)は、ノズル(a)とほぼ同一であるが、上流側断面積をノズルスロートの断面積とほぼ等しくした。ノズル(c)は、ノズル(a)の上流側断面積と同一であるが、ノズルスロートの曲率半径をノズル(a)の3倍にした構造である。ノズル測定位置は、消弧室モデルと同様パuffa室、ノズルスロート部、ノズル下流側の沿面部および固定接触子先端部である。図11に(a)~(c)のガス流に対する各相対位置とノズル下流側および固定接触子におけるパuffa室の圧力を基準としたノズル沿面部の圧力比と絶縁破壊電圧を示す。⊕印は、各相対位置における固定接触子先端の圧力比である。

(a)図のガス流は、相対位置1.8 puの前後で固定接触子先端の圧力比が超音速条件に達し、ノズル沿面の圧力比と近い値となる。ノズル沿面部は、ほとんど超音速条件である。絶縁破壊電圧は、固定接触子先端の圧力比が超音速条件に近付くか、達した領域で低下した。この状態の固定接触子先端は、衝撃波中にあるか、衝撃波直後にあるものと考えられる⁽⁵⁾。

(b)図のガス流は、相対位置1.2 puから2 puまでの間で固定接触子先端の圧力比が超音速条件に達し、

ノズル沿面における圧力比と近いのが特徴である。絶縁破壊電圧は、(a)図と同様、固定接触子先端が、超音速条件を超えた広い領域で低下した。この状態の固定接触子先端は、衝撃波直前の圧力の低い領域にあるものと考えられる⁽⁵⁾。

(c)図のガス流は、固定接触子先端の圧力比が相対位置の増加に従って低下するが、超音速条件に達しないのが特徴である。絶縁破壊電圧は、ほとんど低下せず、固定接触子先端の最大電界強度とその点の圧力により計算した50%破壊電圧曲線の近傍で発生した。この状態の固定接触子先端は、衝撃波の後方にあるものと考えられる⁽⁵⁾。

従って、衝撃波中の絶縁破壊電圧は、固定接触子の先端の圧力比が超音速条件を超えた場合に低下しやすく、固定接触子先端の圧力変化にほぼ比例して変化する。

5. ま と め

GCBのノズル内のガス流と絶縁破壊の関連を調べるために、モデル消弧室を用いて流速、圧力、シュリーレンの測定および二次元軸対称モデルを用いた流体解析によりガス流を詳細に検討し、衝撃波と絶縁破壊現象について明らかにした。その結果、以下のことがわかった。

(1) ノズル下流側の流速は、広い範囲に分布しており、流れが乱れている。この原因としては、シュリーレン法の測定で現れる擬似衝撃波が考えられる。

(2) 作動媒体として空気を用いたパuffa動作のない場合と SF_6 ガスを用いたパuffa動作のある場合の圧力測定結果はほぼ同じ傾向を示した。

(3) ノズルと固定接触子の相対位置 1.9 の場合の測定結果と解析結果を比較した場合には、圧力こう配の大きいノズルスロート付近や衝撃波下流の固定接触子先端などで、擬似衝撃波の影響が原因と考えられる違いがあるが全体としてよく一致し、解析でもノズル下流側の圧力変化を予測できることが明らかとなった。

(4) ガス流中の絶縁破壊は、固定接触子先端の圧力比が超音速条件に達した領域で起こりやすく、電界強度 E とノズル下流側の圧力 p の比 E/p からほぼ推定できる。そのため固定接触子先端の E/p を低下させることが絶縁回復特性改善に効果的である。

(5) 3種類のガス流に対して固定接触子先端が超音速状態になる場合に低い電圧で絶縁破壊が起こりやすく、ノズル下流側のガス流が超音速条件に達しても固定接触子先端が衝撃波より後方の位置となり、超音速条件を満たさない状態となれば固定接触子先端の圧力が低下せず絶縁回復特性の改善となる。

(平成4年1月8日受付, 同4年8月11日再受付)

文 献

- (1) 佐藤, 他:「パuffa形 SF_6 ガス遮断器消弧室内ガス流の調査」, 電気学会開閉保護装置研資, SPD-88-15 (昭63)
- (2) 鈴木, 他:「ノズル下流側の圧力変動の解析」, 昭62電気学会全大, p.1249
- (3) 河野, 他:「パuffa形ガス遮断器消弧室内のガス流調査」, 電気学会開閉保護装置研資, SPD-90-30 (平2)
- (4) 岩本:「レーザ流速計を用いた流れの測定」, 流れの動的計測シンポジウム, 2-2, p.147 (昭63)
- (5) H. W. Liepman & A. Roshko (玉田訳): Elements of Gas-dynamics (昭35) 吉岡書店
- (6) 池田, 他:「パuffa式 SF_6 ガス遮断器消弧室の絶縁的遮断性能の解析」, 電学論 B, 108, 125 (昭63-3)
- (7) T. H. Teich & W. S. Zaengl: The Dielectric Strength of an SF_6 Gas, p. 282 (1978) PLENUM PRESS
- (8) 永井:「超音速噴流中に発生する擬似衝撃波の構造について」, 機械学会論(B編), 48, No. 430 (昭57)
- (9) David Y. H. Pui & Benjamin Y. H. Liu: "Advances in Instrumentation for Atmospheric Aerosol Measurement", TSI J. Particle Instrumentation, 4, No. 2 (1989)
- (10) 岩本, 他:「レーザ流速計によるノズル噴流の流速測定」, 機械学論(B編), 55, No. 515 (平元)

鈴木 克 己 (正員)

昭和26年6月27日生。53年3月東京電機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)東芝入社。重電技術研究所において、ガス絶縁開閉装置の開発、アーク現象の研究に従事。