ガス遮断器ノズルによる超音速流に関する研究*

岩 本 勝 治^{*1}Study of Supersonic Flow Fields through Nozzles
Used in Gas Circuit Breakers

Katsuharu IWAMOTO

It is important to understand the aerodynamic characteristics of circuit breaker nozzles. Therefore, experimental apparatus was fabricated with air instead of SF_6 as the working fluid. The nozzle wall pressure and the flow velocity of the nozzle free jet were measured. This paper describes the study of the supersonic flow fields through the circuit breaker model nozzle with an electrode, using the laser velocimeter. The flow fields involving shock waves between the nozzle exit and the electrode are investigated. The results of measurement using the laser velocimeter are compared with the flow visualization results by the schlieren method.

Key Words: Supersonic Flow, Shock Waves, Nozzle, Jet, LDV, Flow Visualization, Schlieren Method

1. ま え が き

遮断器は、使用される電気系統における正常、および異常にかかわらず、起こり得るあらゆる状態において、電流を遮断し、系統の制御、ならびに保護の役目を果たすものである。代表的なものとして、パuffa形 SF_6 ガス遮断器があげられる。これは、 SF_6 ガスの優れた消弧性能、絶縁性能およびパuffa形の簡素な構造のために信頼性が高く、高電圧ガス遮断器として広く適用されている。近年の電力事情に伴って遮断器には、いっそうの高電圧および大電流を遮断することが要求されてきた。そこで、遮断器消弧室の性能向上を計ることが必要とされるが、消弧室ノズルの形状が遮断性能に及ぼす影響が大きいため、種々の研究が行われている^{(1)~(5)}。

遮断器ノズルの流体力学的性能把握のため、 SF_6 ガスの代わりに空気を作動流体⁽¹⁾とした実験装置を製作し、ノズル壁面の圧力測定⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾およびノズル噴流の流速測定⁽²⁾⁽³⁾を行ってきた。本研究では、ノズル噴流中に固定電極がある場合の超音速流について、レー

ザ流速計を差動形、前方散乱方式⁽³⁾で構成し、流速を測定した結果とシュリーレン法による可視化結果との比較を行った。

2. 実験装置および測定方法

2・1 実験装置 本研究に使用した実験装置およびシュリーレン光学系の構成を図1に示す⁽³⁾。ごみやオイルミストを除去するためのマイクロミストセパレータを通して、圧縮空気を50 Lタンクにためる。実験の際には、ためた高圧空気は2 in 配管を通り、1 in 配管4本に分岐してプレナム室に入り、モデルノズルを

図1 実験装置およびシュリーレン光学システム

* 原稿受付 平成6年1月20日。

^{*1} 正員、(株)東芝重電技術研究所 (〒230 横浜市鶴見区寛政町20-1)。

図 2 モデルノズル圧力測定位置

通して大気中に放出される。この高圧空気の放出は、50 L タンクの出口に設けている 2 in ボールバルブを、一気に全開にすることによって行う。光源として 5 mW の He-Ne レーザを使用したシュリーレン法により実験装置の側壁に設けている直径 10 cm の光学ガラス BK 7 の観測窓を通してノズル噴流を観測する。設定タンク圧力でモータドライブカメラに駆動信号を出す制御器により、望みのプレナム室圧でのノズル噴流のシュリーレン写真を撮れるようになっている。

実験に使用したモデルノズルと固定電極との位置関係を図 2 に示す。プレナム室に入った高圧空気はノズル環状部を通り中心部で、矢印で示すように左右に分岐して、大気中に流出する。図 2 中の番号は、圧力測定位置を示し、スキャニバルブ社製ひずみゲージ式圧力変換器を切換えて測定している。50 L タンク圧測定用のひずみゲージ式圧力変換器とスキャニバルブ圧力変換器は、ピストン基準重すい形圧力計による校正を行い 1.5 kPa の精度で測定できることを確認している。

2・2 レーザ流速計⁽³⁾ ノズル噴流の流速測定には、図 3 に示すように、レーザ流速計を差動形前方散乱方式で構成し、アルゴンイオンレーザを波長 514.5 nm, 出力 200 mW で作動させた。アルゴンイオンレーザよりのレーザ光線は、ミラーにより 90° 方向を曲げられ、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噴流の中心に焦点を結び、干渉じまを有するレーザ流速計測定領域が得られる。この明暗の干渉じまをノズル噴流中に自然に含まれている数 μm の粒子が通過すると、レーザ光線を散乱することになり、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増倍管で電気信号に変える。レーザ流速計測定領域の長さ、幅、干渉じま間隔は、それぞれ 5.5 mm, 0.16 mm, 8.6 μm であるが 0.5 mm のピンホールと信号処理にドップラー信号の 8 パルスを用いることにより、有効測定領域の長さは 2.3 mm となる。

信号処理器のブロックダイアグラムを、図 4 に示

図 3 レーザ流速計光学システム

図 4 レーザ流速計信号処理器

す。個々の処理による出力信号波形は、処理ブロックの右上方に示している。光電子増倍管よりのドップラー信号は、ハイパスフィルタで信号の直流成分を除去され、シュミットトリガで方形波に直される。方形波の時間間隔 t が、粒子が干渉じま間隔を通過するのに要する時間である。プリセットカウンタで、方形波中の 8 パルスと 5 パルスを取り出す。この 8 パルスの方形波と 5 パルスの方形波をパルス幅・パルス高コンバータで電圧 V_8 , V_5 に変換する。この電圧 V_8 と V_5 をコンパレータで比較することにより、ドップラー信号の重なりなどによる波形のひずみを検査する。電圧 V_8 が V_5 の 1.6 倍の 2% 以内であれば、電圧 V_8 をサンプルアンドホールド回路に回す。これ以外の場合には、ドップラー信号の電圧 V_8 をリセットする。サンプルアンドホールド回路はドップラー信号 V_8 がリセットされた場合は、前回の信号電圧を保持する。この信号処理器の処理時間は、30 μs であり、高速粒子の通過の場合ドップラー信号の時間間隔 t が短いので電圧 V_8 は低くなるが、低速粒子通過の場合ドップラー信号の時間間隔 t が長いので電圧 V_8 は高くなる。信号処理器は、正弦波による校正で周波数 100 MHz まで良好に作動することを確認した。

3. 測定結果および考察

3・1 圧力測定結果 図2の圧力測定位置2, 3の圧力測定結果を, 図5に示す。横軸の距離はモデルノズルと固定電極との距離 x を, 全移動距離 L で割って無次元化したものであり, 縦軸の圧力比は圧力測定位置2, 3の圧力を, プレナム室圧1で割って無次元化したものである。また, SF_6 ガスを使用し実際の遮断器と同様な油圧駆動機構をもったガス遮断器(GCB)モデルによる圧力測定位置2, 3と同じ位置での圧力測定結果も示している。ノズル壁面の圧力2は, 固定電極がノズル内にある距離0.6で圧力比0.85まで急上昇し, 固定電極がノズルより出る距離0.7において圧力比0.4まで下降する。固定電極先端の圧力3は, 固定電極がノズル内部にある間は圧力比が1近くにあるが, 固定電極がノズルより出る距離0.7以後は圧力比0.8まで低下する。空気を使用した本実験装置と SF_6 を使用した実際の遮断器に近い GCB モデルとの圧力測定結果は, ほぼ一致しており本実験装置の有用性がわかった⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3・2 シュリーレン法による可視化 固定電極がノズルより出た図5の距離0.9の状態のシュリーレン写真を, 図6に示す。これは, 図1の制御器よりのトリガ信号によりモータドライブカメラが作動するまで数msの遅延が発生するために, 制御器に設定圧より高いタンク圧で作動するように設定を行い, モータドライブカメラが作動した際にプレナム室圧1が設定圧となるように制御して, ノズル噴流の写真を撮ったものである。写真の左側がノズル出口部であり, 右側が固定電極の先端である。ノズル出口に, かなり強い垂直

衝撃波が発生しているのがわかる。また, ノズル噴流は固定電極先端に衝突して, 電極を包むように流れるのがわかる。

3・3 レーザ流速計による測定結果⁽³⁾ シュリーレン写真を撮ったモデルノズルと固定電極間の距離が0.9の状態のノズル出口から固定電極間の中心軸上のノズル噴流速の測定を, レーザ流速計によって測定した。

測定に使用したウェーブフォームレコーダは, 電圧が10 bit 1 024 に分解され, 最大16 384 ワードの時間メモリがある。ウェーブフォームレコーダのメモリーを8 192 ワードの2チャンネルで使用し, ノズル噴流の中央部での測定時における信号処理器出力を, 図7に示す。これはデジタルオシロスコープを介して, プロッタに出力したウェーブフォームレコーダの出力をトレースしたものである。図7の上チャンネルが50 L タンク圧であり, 図7中のひし形がウェーブフォームレコーダのトリガとして使用した圧力0.315 MPaの位置を示す。下チャンネルがレーザ流速計信号処理器の出力であり, 図4の電圧 V_8 の立上りと立下りを除いた定電圧部のみトレースしている。定電圧部の長さは, 前述のホールド回路の保持機能による。

ノズル出口より固定電極までの距離は, 固定電極直径 d と同じであり, ノズル出口を基準として, 測定位

図5 圧力測定結果

図6 ノズル噴流シュリーレン写真

図7 信号処理器出力

図 8 レーザ流速計による流速分布

置までの距離を l とすれば、測定点は $l/d = 0.15, 0.25, 0.35, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ の 8 点である。ノズル出口近傍と固定電極近傍では、2 本のレーザ光線の一方がノズルや固定電極に当たり、レーザ流速計が構成できなかった。それで、図 6 に見られる垂直衝撃波の内部測定はできなかった。図 8 に代表的な $l/d = 0.15, 0.35, 0.6, 0.9$ の流速分布を示す。これらは横軸に流速を取り、流速のデータ数をヒストグラムで表したものである。それぞれの測定位置でのデータの個数は、200 個程度である。垂直衝撃波の後流にあたる図 8 (a) は、かなり流速にばらつきがある。ノズル噴流の中間的図 8 (c) においては、速度が正規分布に近づき、固定電極の近傍図 8 (d) では、速度のピークが 2 個所現れており、固定電極に噴流が衝突した影響が出たと思われる。垂直衝撃波と固定電極間のノズル噴流の速度は、一様で中心速度が 130 m/s である。

大電流遮断時にはノズル内にアークが発生し、アークと SF_6 ガスとの干渉の問題が起こり、本実験装置では取扱えない⁽¹⁾。小電流遮断時には電流は瞬時に切れ、流体力学的な取り扱いでノズル特性が把握できる。ノズル特性として、衝撃波位置の特定が重要である。

4. 結 論

ノズル噴流中に固定電極がある場合の超音速流について、圧力測定、シュリーレン法による流れの可視化およびレーザ流速計による流速測定を行い、次の結果を得た。

(1) 空気を使用した本実験装置と SF_6 を使用した実際の遮断器に近いガス遮断器モデルとの圧力測定結果の比較によれば、圧力比はほぼ一致しており、本実験装置の有用性が証明できた。

(2) ノズル出口に発生した垂直衝撃波後の流速は、ほぼ一様となっている。

文 献

- (1) EPRI, Fundamental Investigation of Arc Interruption in Gas Flows, *EPRI EL-284*(1977), 6-12.
- (2) 佐藤・ほか 4 名, 電気学会開閉保護装置研資, SPD-88-15(1988).
- (3) 岩本・池田, 機論, 55-515, B(1989), 1802.
- (4) 河野・ほか 5 名, 電気学会開閉保護装置研資, SPD-90-30(1990).
- (5) 鈴木, 電学論, 113-2(1993), 152.