

# 対角線電極型MHD発電機における 熱伝達と流れの測定

宮田 昌彦\*

## 1. 序言

我々は、衝撃波管を用い、シードなしのアルゴンプラズマを作動気体とする、閉サイクルMHD発電の実験的基礎研究を行っている。シードなしのアルゴンプラズマを用いているため、そのよどみ点温度は、3000 Kから6000 Kとなり、実用的なMHD発電機のよどみ点温度にくらべてかなり高くなる。しかし、シードをしていないため、非平衡状態のプラズマが容易に得られ、プラズマの物理的特性の測定が容易であり、かつ、衝撃波管の操作が容易になるなどの利点も多い。

ここで報告する研究結果は、対角線電極を用いて、MHD発電特性を向上させることを目的とした実験結果である。以前我々は、ホール型の電極を持つMHD発電機の特性を測定してきた。この発電機では、電極は、四角形で、発電機の壁を囲んだ形で作られていた。今回、電極は、対角線状とされ、その流れに対する角度は、測定されたホール係数に一致するように設定された。開放出力電圧は、その結果、2倍に向上した。

さらに、我々は、発電機の絶縁壁へのプラズマからの熱伝達量と発電機内のプラズマの流れの様子を測定した。熱伝達量は、磁場と平行に設置された白金薄膜熱伝導センサーにより測定した。得られた熱伝達量は、発電機の壁面の境界層が、熱平衡状態にあると仮定した理論結果とよく一致していることが分かった。熱伝導センサーの校正は、衝撃波管のよどみ点で行われた。

発電機内のプラズマの流れは、高速度カメラ（イメコン792）とそれに付属した画像処理装置により測定された。写真画像からのプラズマの発光の強度分布の測定から、対角線電極の近傍に強い電流の集中が見られることが分かった。

## 2. 実験装置と測定装置

実験装置は、図1に示すように、普通の形の衝撃波管とアクリル樹脂で作られたMHD発電機からなる。

衝撃波管は、内断面積が $70 \times 100 \text{ mm}^2$ で、MHD発電機の直前に、発生したホール電場を短絡しないようにエポキシガラス樹脂で作られた部分を持つ。

高速度カメラのトリガーとして用いられる圧力センサーが衝撃波管のよどみ点の前方600 mmに設置されている。よどみ点の前方250 mmに、よどみ点の温度と熱伝達量を測定する二つの窓が置かれている。一つは、分光測定用の窓で、もう一つは、白金薄膜熱伝導センサーの測定孔である。分光測定は、ホトダイオードと増幅器により行われた。ホトダイオード

---

\*機械工学科教授 流体工学

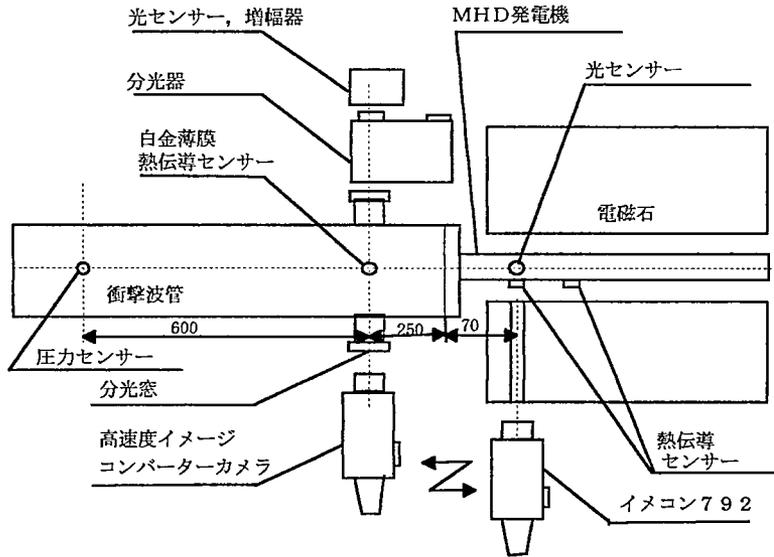


図1 実験装置の概略図

と分光窓の間には、単色分光器が置かれている。

よどみ点のプラズマの発光の状態は、高速度カメラを用いて分析された。発光強度を測定するために、測定された画像は、カメラに付属した画像処理装置（ハドランドーホトニクス SS553DR）で処理された。

MHD発電機は、入り口断面積 $19 \times 19 \text{mm}^2$ 、出口断面積 $19 \times 60 \text{mm}^2$ の末広型の構造で、図2に概略を示す。電極は、対角線状に設置され、巾5mm、ピッチ10mmであり、図2に示すように、流れに対して60度の角度を持っている。

白金薄膜センサーは、流れと磁場に垂直方向に発電機の絶縁壁に挿入されている。センサーの表面は、壁と面一となっている。センサーは、長さ1cm、直径5.5mmで、パイレックスガラス上に白金を蒸着により形成した構造である。白金薄膜の固有抵抗は、100オームとなっている。センサーの出力は、アナログ回路と増幅器により熱伝達量に変換される。センサーの校正は、衝撃波管のよどみ点で行われた。

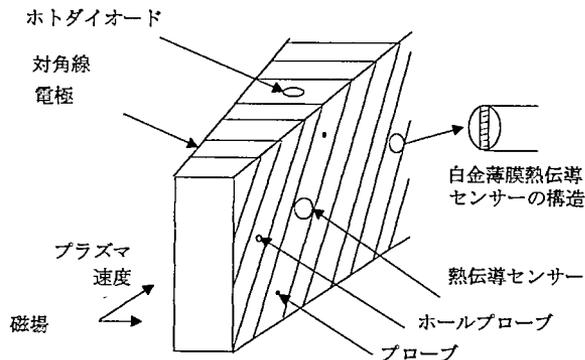


図2 MHD発電機の構造の概略図

MHD発電機の上流側に、ホットダイオードと増幅器が設置され、通過するプラズマの温度が測定された。プラズマ光の分光のために、分光フィルターが用いられている。

高速度カメラを衝撃波管のよどみ点より発電機の位置に移動し、プラズマの発光強度分布を測定した。プラズマの光の分布は、画像処理装置により分析され、対角線電極付近の

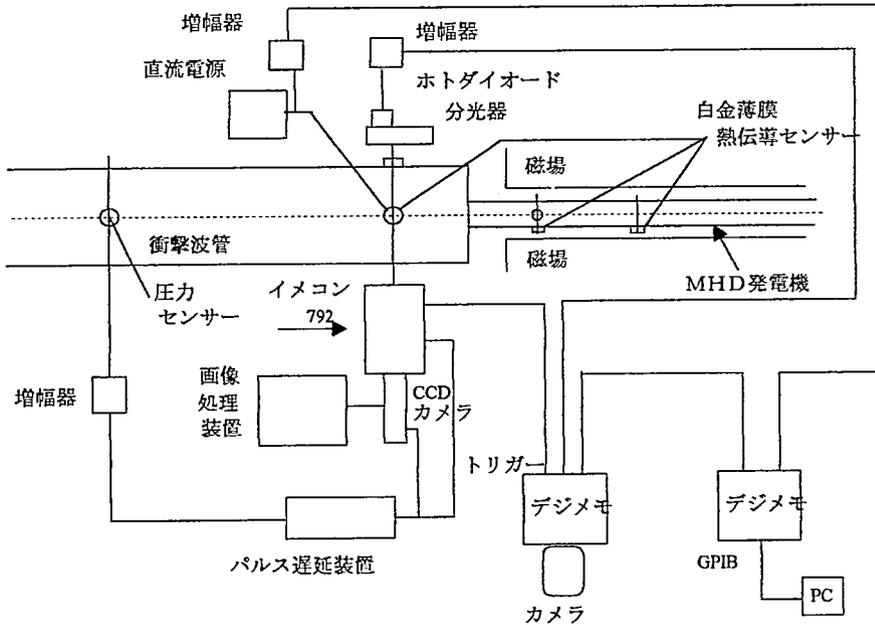


図3 測定回路の概略図

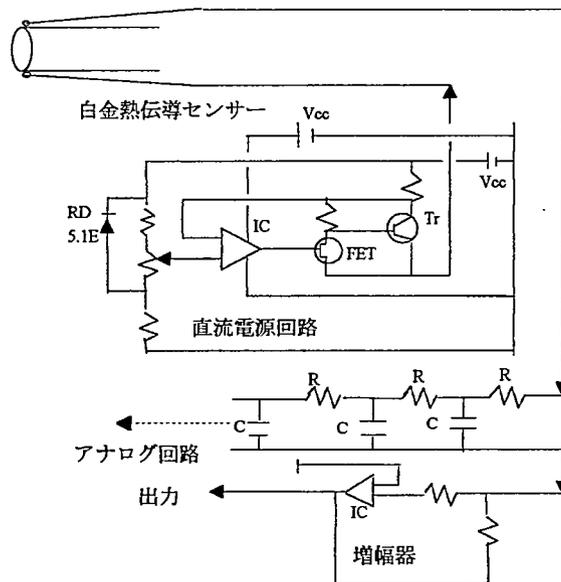


図4 熱伝導センサーの定電流回路、アナログ回路および増幅回路の概略図

分布を三次元表示した。

電圧電流特性は、一対の電極に接続された負荷と発電機内のプローブにより測定された。また、磁場の強度に対する電圧の変化が測定された。図3は、測定回路の概略を示す。また、図4に、熱伝導センサーに付属する定電流回路、アナログ回路、増幅器回路の概略を示す。

### 3. 実験結果とその検討

#### 3.1 白金薄膜センサーによる熱伝達量の測定

白金薄膜熱伝導センサーの表面温度と熱伝達量は同時にアナログ回路と増幅器を用いて測定された。センサーの校正は、衝撃波管のよどみ点で行われた。はじめに、恒温室内で、温度変化とセンサーからの出力の関係を測定した。白金薄膜センサーの表面温度の変化の範囲で、温度と出力の間に比例関係が保証されていることを確認した。

このセンサーを衝撃波管のよどみ点に挿入し、実験を行い、センサーの表面温度より計算したよどみ点温度とランキン-ユゴニオの理論値を比較すると、図5が得られる。この計算において、アルゴンの熱伝達率の値には、参考文献(1)の数値を用いた。図5において、横軸は、衝撃波のマッハ数で、高いマッハ数においては、よどみ点の測定温度は、ランキン-ユゴニオの理論値よりも低くなっている。

図6の■印で、無次元の熱伝達量を表す $Nu/\sqrt{Re}$ の値と衝撃波のよどみ点エンタルピの関係を示す。よどみ点エンタルピの値は、図の下の横軸に示されている。ここで、 $Nu$ は、ヌッセルト数であり、 $Re$ は、レイノルズ数である。この熱伝達パラメータは、よどみ点エンタルピの増加とともに上昇し、Parkの理論値(2)に近づく。Parkの理論は、このパラメータの値をアルゴンの電離が現れるよどみ点エンタルピ以上で計算している。よどみ点エンタルピが低い領域では、アルゴンのプラントル数を0.6とすれば、 $Nu/\sqrt{Re}=0.395$ である。実験値は、この領域にある。

つぎに、センサーは、MHD発電機の絶縁壁に挿入された。センサーは、磁場と流れに垂直になっている。

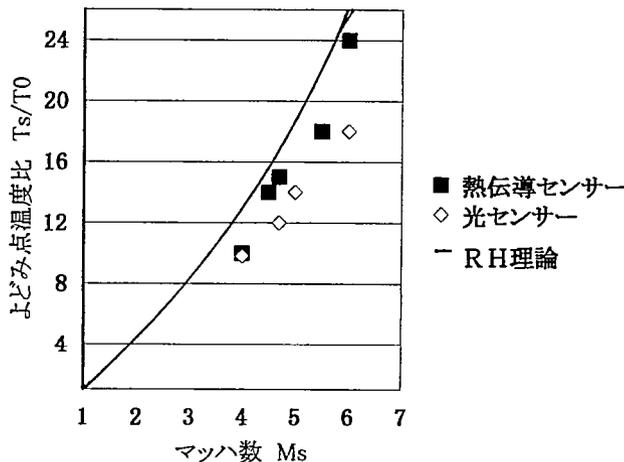


図5 よどみ点温度の測定値とランキン-ユゴニオ(RH)理論値の比較

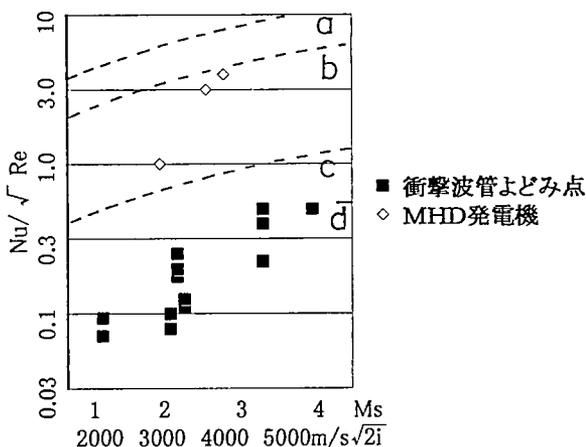


図6 衝撃波管よどみ点およびMHD発電機内の熱伝達パラメータの測定値  
 点線 (a, b, c) は、文献 (3) の理論値、実線 (d) は、文献 (2) の論理値。  
 a ; 非平衡境界層、 b ; 平衡境界層、 c ; 凍結境界層

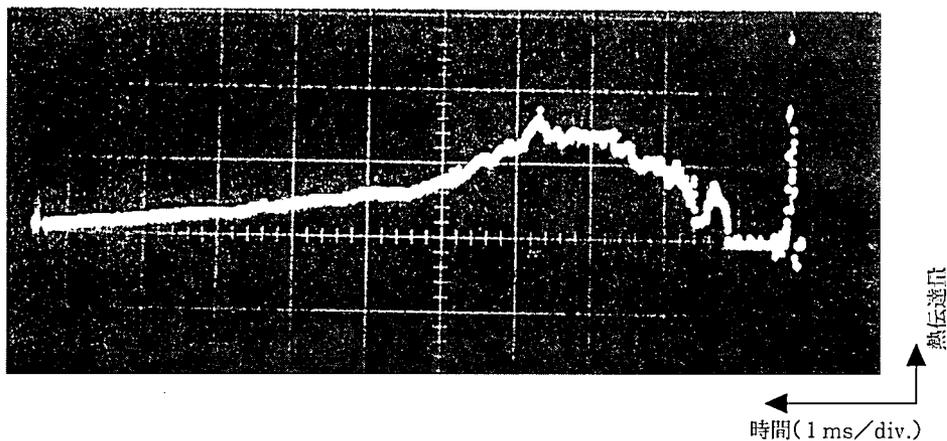


図7 熱伝達量の測定データの一例

熱伝達量のデータの一例を、図7に示す。

図6の、菱形の印のデータは、発電機内の熱伝達パラメータの値である。同じ図の中に、Kerrebroom et.al. (3) による理論値を点線で示す。実験値は、上記の理論値において、発電機内の境界層が熱平衡状態であると仮定した場合の値と一致している。この図で、熱伝達パラメータの値は、プラズマの流れのマッハ数に対して示されている。発電機内のプラズマの速度は、二つの薄膜センサーの出力の立ち上がりの時間差より計算してある。

同時に、衝撃波管のよどみ点と発電機内のプラズマの温度は、分光法によって測定された。図5に、分光法によって測定されたよどみ点の温度を示す。この図の一つのデータは、ホトダイオードよりの出力を、アルゴンのスペクトル線の波長を分光器によって変化させて測定し、その値をスペクトル線のエネルギーの値に対してプロットすることにより得られている。

ホトダイオードからのよどみ点温度の測定値は、ランキン-ユゴニオの理論値より低い。これは、光が分光窓のガラスに吸収され、また、プラズマ中の光路において、光強度が小さくなるためである。発電機内の測定においては、アルゴンの分光にはフィルターを用い、二本のスペクトル線の強度を比較して温度を測定した。

### 3.2 MHD発電機の性能の測定

MHD発電機の電極は、以前のホール型から、対角線型に変更された。ここでは、今回得られた実験結果を、ホール型電極の発電機の性能と比較して述べる。

我々は、プラズマの流れに平行な電流を、入り口電極と出口電極に負荷を接続して測定した。負荷に現れる電圧降下を測定し、その値を、負荷抵抗値でわることにより、電流を

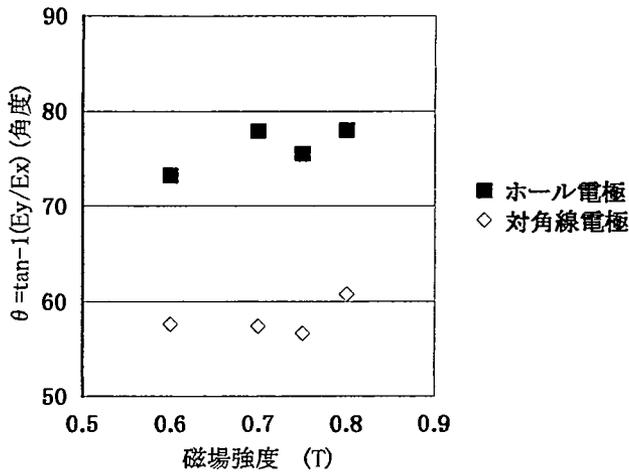


図8 対角線電極の流れに対する角度と磁場強度の関係

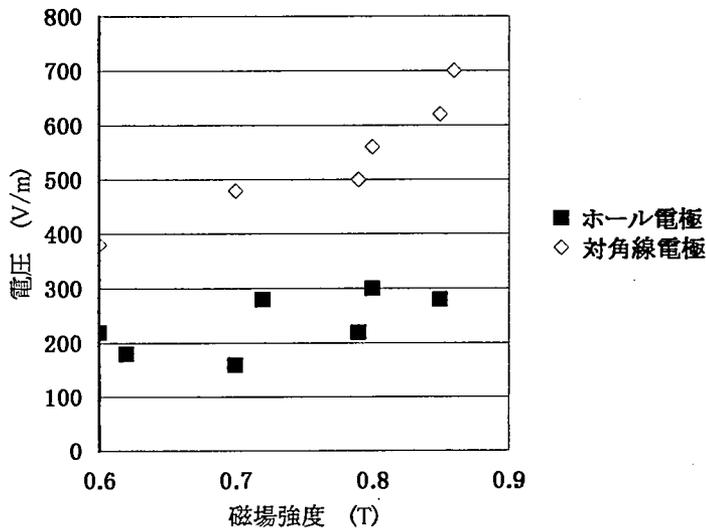


図9 流れに平行な電圧と磁場の関係

求めた。MHD発電機内の電圧は、上流と下流にそれぞれ設置されたプローブにより測定された。また、流れに垂直方向の電圧もプローブを用いて測定した。

はじめに、電極と流れの方向との間の角度を決定するために、流れに垂直な方向と平行な方向の電圧をプローブによりそれぞれ測定し、その比を求め、磁場の大きさに対してプロットし、図8を得た。この角度 $\theta$ は、ホール発電機の値より小さくなり、60度に近づく。我々は、発電機の電極の流れに対する角度を60度とした。

図9に、流れに平行な電圧と磁場の間の関係を示す。

対角線電極の発電機の電圧は、ホール発電機の値の2倍となる。さらに、この値は、磁場に対して比例的に変化し、大きな非線形性は見られない。

図10に、流れに平行な電圧と電流の関係を示す。電流値は、横軸に対数表示で示されている。特に、対角線電極の発電機の開放電圧は、ホール発電機のそれに比べて2倍大きい値である。また、高い電流値の領域においても、大きな電圧が得られている。この事実は、発電機の特性が、対角線電極によって向上したことを示す。

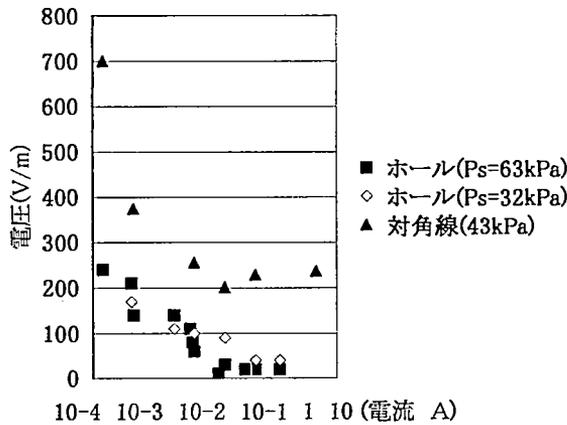


図10 MHD発電機の電圧-電流特性

### 3.3 MHD発電機内のプラズマ流れの挙動の測定

MHD発電機の中のプラズマ流れの測定は高速度カメラを用いて行われた。高速度カメラは、イメージコンバータ型（ハドランドーホトニクス イメコン792）のもので、そのシャッター速度は、1/10000秒である。ここで使用されたカメラのプラグインは、一コマの写真撮影時間が、20マイクロ秒で、コマ間の時間は、100マイクロ秒のものである。撮影された写真は、CCDカメラを通して画像処理装置（ハドランドーホトニクス SS553 DR）に送られ解析された。高速度カメラのトリガーとして、衝撃波管のよどみ点前方850 mmの位置に置かれた圧力センサーの出力を用いている。この信号は、パルス遅延装置（ハドランドーホトニクス 3CPDG）により遅延され、カメラは、衝撃波のよどみ点への到着後約640 マイクロ秒たってからトリガーされる。遅延時間は、実験条件により変化するため、時間の決定は、試行錯誤法により行われた。

図11に示す写真は、撮影された画像の一コマを拡大したものである。プラズマは、写真の左から右へ移動している。プラズマの速度は、約2000m/sと見積もられる。

図12は、この写真を画像処理装置にかけ、プラズマの発光強度分布を三次元表示したも



図11 高速度カメラによるプラズマ流れの写真 シャッター速度 1/10000秒

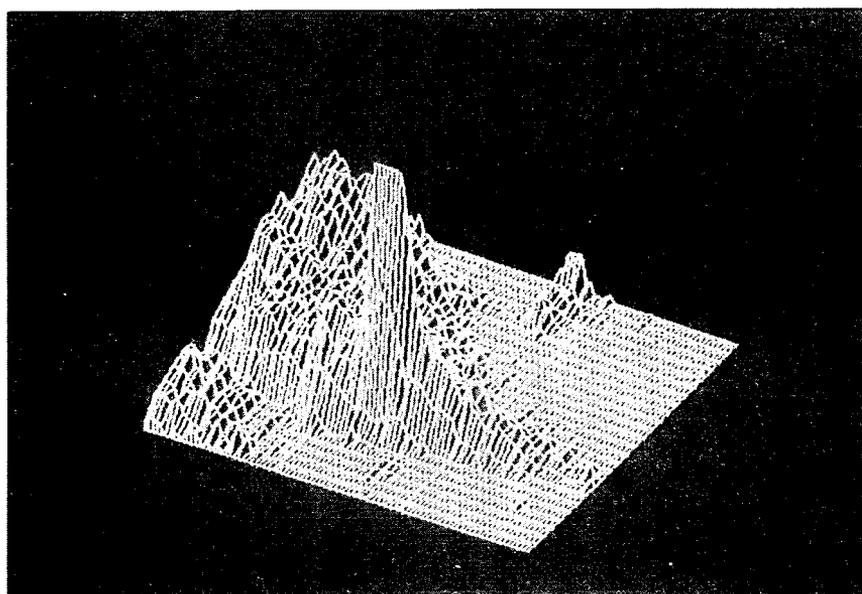
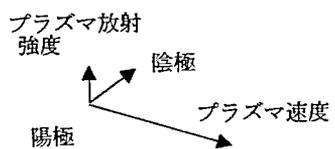


図12 MHD発電機電極近傍のプラズマの発光強度の分布

のである。プラズマは、図の左上から右下に流れており、図12の上を示すように、電極の陽極は下側に、陰極は上側にある。垂直軸は、プラズマからの発光強度を示している。

発光強度は、対角線電極の陽極近傍で大きい。発光の巾は、電極の巾とほぼ等しい。また、陽極よりも少ないが、陰極近傍にも発光が認められる。これは、かなり大きい電流が電極に流れ込んでいることを示す。図10の結果から、流れに平行な電流は、最大10Aで、電流密度は、 $2.5\text{A}/\text{cm}^2$ となる。したがって、電流の電極面への集中により、アーク電流が流れていると見なされる。

この実験では、加えられた磁場の強度は比較的小さい(0.86T)にもかかわらず、大きな電流値が得られており、対角線電極のよい効果が現れていると考えられる。

#### 4. 結論

シードなしのアルゴンプラズマを用いて、衝撃波管により駆動されるMHD発電機の実験を行った。発電機の電極は、流れに60度の角度を持つ対角線構造とした。熱伝達量と温度測定の結果、熱伝達量は、発電機の境界層が熱平衡状態であると仮定した理論値と一致した。発電機の性能としては、開放電圧は、ホール発電機の値の2倍となり、短絡電流も大きくなった。発電機内のプラズマ流の発光強度を高速カメラによる写真とその画像処理装置による分析により測定した結果、対角線電極の陽極端に強い発光が観測され、電流の集中が認められた。

対角線電極による電流の増加により、強い放電が起こるためと考えられる。

#### 参考文献

- (1) Hoshino, et.al. International J.of Thermophysics, 7,p647 (1986)
- (2) Park AIAA J., 2,p169 (1964)
- (3) Hale & Kerrebrock AIAA J., 2,p461 (1964)