

対角線状くさびによる非平衡 MHD

発電プラズマの予備電離

宮 田 昌 彦*

Pre-ionization of the non-equilibrium MHD generation plasma by diagonally arranged wedges

by Masahiko MIYATA

(Abstract)

We have conducted non-equilibrium MHD power generation experiments with using a shock tunnel. Pure argon plasma made by a shock wave compression is expanded in a Hall generator which has ringlike (octagonal shape) copper electrodes. Pre-ionization of the plasma is made by diagonally arranged 15 degree wedges at the position of 28 cm behind the stagnant. These wedges produce weak shock waves to heat up the plasma and to sustain the conductivity which is sufficient to get non-equilibrium ionization. The pressure rise by the shock wave would affect the velocity of the plasma, however, reduction of the velocity would be small by appropriate design of the wedges and gain due to the pre-ionization would exceed the performance reduction with the pressure rise. MHD generator performance of this diagonal wedge duct was measured and compared with those of a duct with 15 degree wedges. The Faraday voltage in the duct with the diagonal wedges is larger than that in the duct with 15 degree wedges, however, the Hall voltage is smaller in the diagonal wedge duct. The Faraday voltage distribution in the diagonal wedge duct becomes smooth as compared to that in the 15 degree wedge duct. The Hall current shows nearly constant value of about 8A when the stagnation temperature of the generator is reduced even to 2900 K, which indicates the effective pre-ionization of the plasma by the wedges. We have concluded that the effective pre-ionization was made by the diagonally arranged wedges at the entrance of the generator.

1. 緒 言

本研究は、純アルゴンガスを用いた非平衡 MHD 発電の作動プラズマの予備電離法について行ったものである。非平衡 MHD 発電は、基礎的な研究から応用的な開発研究までいろいろ行われているが、現在の段階では、いまだに実用規模のものは作られてはいな

* 理工学部機械工学科教授 流体工学

い。これは、非平衡 MHD 発電の作動流体の挙動が大変複雑なので、その効率のよさは明らかではあるが、安定した作動が保証されていないためである。しかし、非平衡 MHD 発電の作動流体を燃焼から得られる熱により、熱交換器を通して、加熱する方法による中規模の発電実験装置が作られ¹⁹⁾稼働している。これらは、それぞれ数十秒の持続時間で発電をおこない、発電後流体は外部に排出されてしまう構造であり、完全な閉サイクル型とはなっていない。いずれの装置においても、実験結果は、このような方式での MHD 発電がまだ多くの基礎的研究の積み重ねを必要としていることを明らかに示している。

本研究でも、そのような基礎的な研究の一つとして、作動プラズマの予備電離の方法について研究したものである。一般的に MHD 発電の作動プラズマは、発電流路の入り口で発電に必要な電離度をえるように加熱される。しかし、発電に適した温度範囲では、電離度は極めて敏感に温度変化に対して変化するので、発電機にはいった後の少しの温度低下に対しても、電離度は実用に耐えないまでに低下してしまう。これを回復するには、予備電離を発電機入り口で行い、プラズマを再加熱する方法が取られている。この方法は、普通は、外部から放電によりジュール熱を加えて再加熱するものである。しかし、この方法では、新しい放電による電場の乱れを付け加えることになり、非平衡 MHD 発電のようになかなか敏感な系では、作動状態の不安定を招くこともあり得る。また、放電に用いる電力は発電機の出力損失となるので効率低下の原因ともなる。

この研究では、放電による予備電離のかわりに、プラズマを空気力学的に加熱することを考えた。つまり、発電流路入り口に作ったくさびにより、作動流体内に衝撃波を発生させそれによりプラズマを加熱するものである。これによると、加熱されるのは厳密には作動気体であり、放電による方法のように電子のみを選択的に加熱することは出来ない。そのぶん効率はよくないが、先程述べたように、新しい不安定の原因にならないことは利点の一つである。もう一つの欠点として、衝撃波により、作動気体の圧力が上昇することが考えられる。これは、流体の速度を低下させるので、発電出力を減らす原因となる。しかし、この効果と作動気体の温度上昇を比較して考えた場合、温度上昇の方が出力に大きい増大をもたらすと考えられる。また、くさびの形や配列を工夫することにより、作動気体の流速の減少を最小として、温度上昇を期待できる設計の発電流路を得ることができる。我々は、この方法がどのくらい有効かについて実験結果を積み重ねて来た。この報告は、そのシリーズの一つの結果の報告であり、発電流路内の四隅に、くさびを対角線的に配置した流路によるものである。この結果の一部はすでに、明星大学研究紀要 理工学部 第22号に発表してあるので、重複した部分は省いてある²⁰⁾。

本研究では、作動流体として、純アルゴンを用いている。普通の非平衡 MHD 発電では、作動気体は希ガスと少量のアルカリ金属の混合物である。その意味で、この実験は非平衡 MHD 発電のシミュレーション研究となっている。また、作動プラズマは、衝撃波圧縮によって得られている。衝撃波管による MHD 発電の研究は、基礎研究としては、かなり普及しているものである。この方法では、プラズマの持続時間が少ない（数ミリ秒以内）ことと定常性や再現性にやや劣ることなどの欠点はあるが、安価に実験が出来多くのデータが比較的簡単に得られることや、かなり自由に実験の条件を変化させることが出来かつ純粋な実験条件が得られることなどの利点が多いものである。我々は、既に述べたように純粋なアルゴンを作動気体として用いているため、これを MHD 発電可能な状態に電離するのに、かなり高い激み点温度を必要とする。これは、ほぼ 3000 K から 6000 K

になる。このような温度の作動気体はほとんど衝撃波圧縮によってのみ、簡単に得られうるものである。

2. 実験装置と MHD 発電回路

実験装置は、文献 (3) にも述べたように、全長 11.8 m、内断面積 $70 \times 100 \text{ mm}^2$ の圧力駆動型衝撃風洞と、0.86T の最大磁界強度をもつ電磁石により構成されている。

衝撃風洞は、アルゴンを作動ガスとし、ヘリウムを高圧駆動ガスとするもので、付属の真空装置により、0.01 Torr まで排気される。作動アルゴンガスの圧力は、0.13 kPa から 0.65 kPa で、これを、マッハ数 5.4 から 4.8 の衝撃波によって圧縮し、澱み点圧力 22 kPa から 60 kPa を得ている。アルゴンは電離されて、電離度約 10^{-5} のプラズマとなる。このプラズマを 3/100 の勾配をもつ末広型の発電回路に噴出し、後述するような澱み点より約 28 cm 後方の衝撃波保持部において、マッハ数約 3.3 のプラズマ流を得る。

MHD 発電回路の構造は、文献³⁾と同じであり、25対の円環状の銅電極を保持する保持板の先端を15度に切って、ここに衝撃波を発生させている。このくさびを、本実験では、発電回路の四隅に対角線状に配置した。これにより、発電回路の断面積は、すでに発表した15度のくさび2箇所をもつ発電回路⁴⁾に比べて、大きくなり、プラズマ流に対する妨害の効果は少なくなると考えられる。図1に、上記の二つの発電回路の断面の比較を示す。

発電回路内には、ホールおよびファラデー電圧を測定するためのプローブ5対が設置してある。また、ホール電圧は、負荷を無限大とした電極により測定することも出来る。その他、ホール電流、ファラデー電流も電極において、負荷を変えることにより測定された。

発電回路内の静圧分布は、キスラー社の水晶を用いたピエゾ圧力計 (603A) により測定された。

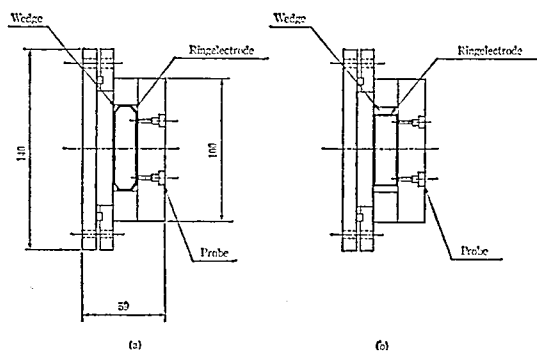


Fig. 1 Schematic diagrams of the duct with (a) diagonally arranged wedges and (b) 15 degree wedges.

3. MHD 発電実験結果

文献 (3) に述べた以外の MHD 発電実験結果をのべる。それらは、電極で測定されたホール電圧の発電回路内の分布、ホール電流の流路内分布、ファラデー電流の流路内分布、高い澱み点圧力でのホール電圧電流特性、流路内の静圧力分布およびホール電流と澱

み点温度の関係である。

3.1 ホール電圧の発電流路内分布

図2に、電極で測定された、ホール電圧の発電流路内分布を示す。横軸は、ホール電極の位置を示している。この図には、実際の流路の大きさは書かれていないが、それについては、図3に記述されている。図中の点線で示すデータは、図1(b)に示した、15度のくさび2箇所を持つ発電流路でのホール電圧分布である。また、三角形の印は、澱み点圧力が34 kPaの場合のデータであり、丸印はそれが22 kPaのデータである。

ホール電圧の発電流路内の分布は、15度くさびの流路のそれに比べて滑らかであり、10番目の電極付近に見られる大きな減少は現われない。流路最終端での電圧の値は、ほぼ同じ位の600 V/mとなっている。澱み点圧力によるホール電圧の値の差は、あまり大きくないが、幾分澱み点圧力が小さい場合の方が、大きな値を示す。これは、プラズマの電離度の影響と考えられる。このような滑らかな分布は、対角線状に配したくさびでは、発生する衝撃波が弱く、それによる流体の速度への影響が小さいために生じたと考えられる。

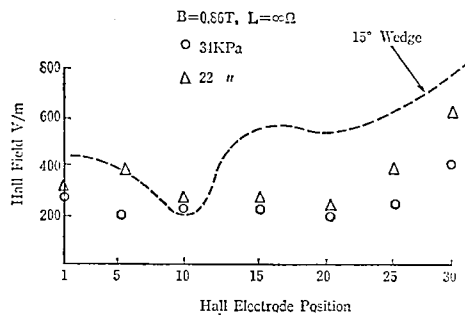


Fig. 2 Distribution of the Hall voltage measured by electrodes in the generator.

3.2 ホール電流の流路内分布

図3に、ホール電流の発電流路内分布を示す。図中の実線と点線は、電極での負荷を 0.03Ω とした場合、また負荷が $1k\Omega$ の場合は、三角形の印で示すデータが得られた。負荷が小さい場合は、当然電流の値は大きくなり、しかも発電流路の後方で大きくなる傾向を示す。一方、負荷が大き場合は、発電流路内で漸減していく傾向を示している。ホール電流の大きさは、澱み点圧力が22 kPaの場合に得られた、発電流路後方での値である約18 Aが最大である。

3.3 ファラデー電流の発電流路内分布

図4に、発電流路内のファラデー電流の分布を示す。この電流は、円環状の銅電極に、外部回路として 0.03Ω の負荷を並列に接続して、得られたものである。この方法で測定された電流は、絶対値を示すものでなく、分布の形に注目することになる。黒丸印は澱み点圧力が34 kPaの場合、白丸印は、それが22 kPaの場合である。また、半黒丸印で、15度くさび2箇所を持つ発電流路での分布を示す。

分布の形は、二つの流路ではほぼ逆の形をしている。つまり、対角線くさびをもつ流路で

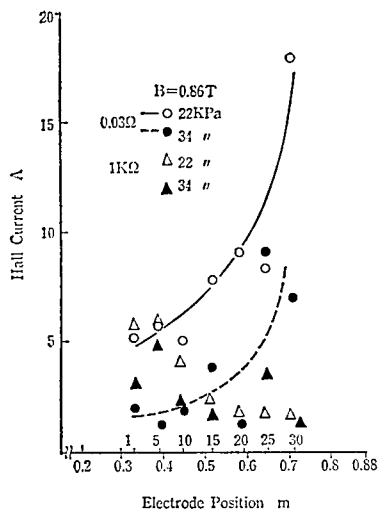


Fig. 3 Distribution of the Hall current in the generator.

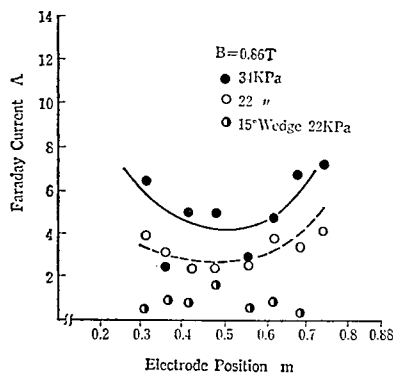


Fig. 4 Distribution of the Faraday current in the generator.

は、上流と下流で大きくなり流路中央部で小さくなっている。一方、15度くさびの流路では、上流と下流では小さく中央部で大きくなる。ファラデー電流の分布に関する要素としては、(1) 発電流路内の電気伝導度の値と分布、(2) ファラデー電圧の分布、(3) ホール電流の分布等が考えられる。(2) と (3) については、測定値が得られているが、(1) については、測定されておらず確定的な考察はできない。しかし、二つの形の流路での分布の相違は、主に電気伝導度の分布により、とくに電極近傍での電気伝導度の分布により生ずるものと思われる。

3.4 ホール電圧-電流特性

図5は、澱み点圧力が高い場合 (60 kPa) のホール電圧と電流の関係を示している。これはまた、澱み点温度が低い場合のそれとなり、この図は、澱み点圧力によるホール電圧電流特性の変化を比較している。前報で述べたように³⁾、対角線状くさびの流路では、ホール電圧の値は、小さくなり、電圧電流特性が図の左下のほうにかたよっており、したがって、非平衡特性も弱くなっている。

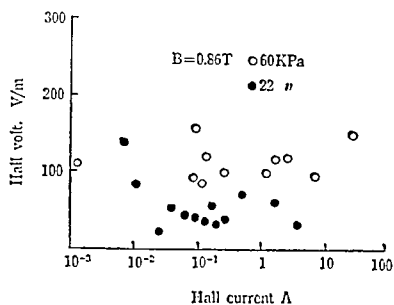


Fig. 5 Hall voltage-current characteristics for the high stagnation pressure.

また澱み点の圧力による変化では(図5), あまり特性に顕著な差は見られず, むしろ澱み点圧力が高いほうがホール電流は大きくなっている。データが多くないので確定的な結論は得にくい, 澱み点圧力が大きくても(澱み点温度が小さくても), 特性の変化はあまり無いということが言えると思われる。

3.5 発電回路内の静圧力の分布

図6には, 発電回路内の静圧力の分布を示す。静圧力は, 既に述べたようにキスラー社製の水晶ピエゾ圧力計により測定された。白丸, 黒丸と三角形の印はそれぞれ, 澱み点圧力が 22 kPa, 34 kPa と 60 kPa のデータを示している。静圧力の値は, 澱み点圧力により無次元化されている。データのばらつきはかなりのあるが, 一応の傾向として, 澱み点圧力が 22 kPa と 34 kPa の場合は, 発電回路内で静圧力は上昇し, 60 kPa の場合は, 減少している。これは, 澱み点圧力が低いときは, 充分発電による流速の減少が起こっていることを示し, 60 kPa では相互作用が少なくなったことを表す。くさびの存在による静圧力の変化は, あまり顕著ではない。このことは, くさびにより発生する衝撃波の強さが弱いことを示す。

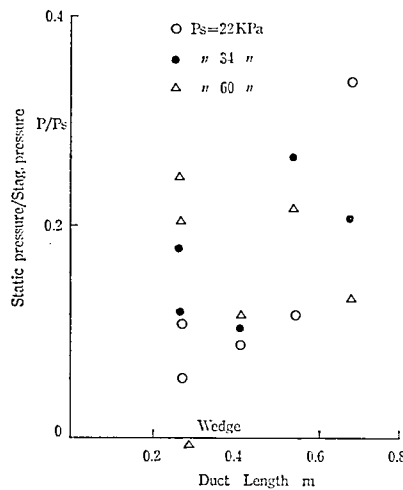


Fig. 6 Distribution of the static pressure in the generator.

3.6 ホール電流と澱み点温度の関係

図7には, 澱み点温度の変化によるホール電流の変化を示す。測定は, 衝撃風洞の初期圧力を変化させて, 衝撃波速度を変えることにより, 澱み点温度を変え, 発電回路内のホール電流を測定した。ホール電流は, 発電回路内で変化するので, ここでは, 始めの1番目から10番目までの電極を使って, 測定を行った。図7の中に, β として, 純粋のアルゴンガスの電離度が計算され表示されている。本衝撃風洞では, 澱み点温度は圧力と独立には変えられないので, 電離度は温度のみの関数ではない。

この図より, 澱み点温度が 2900 K 以下で, 急激にホール電流が低下するが, その温度までは, 約 8 A の一定のホール電流が得られることがわかった。図より明らかなように, 2900 K の澱み点温度では, 電離度は 10^{-11} 程度であり, このような低電離度でかなりの

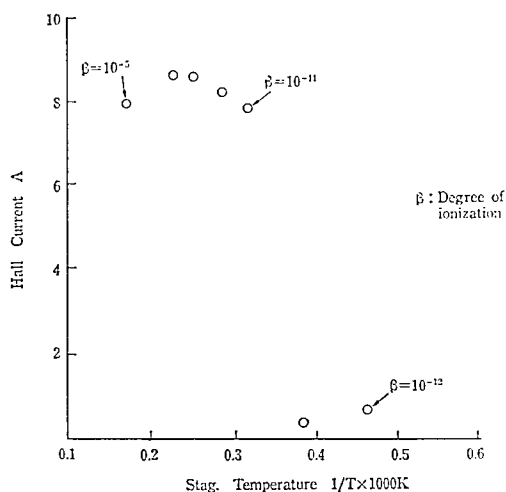


Fig. 7 Hall current variation as a function of the stagnation temperature. The Hall current remains nearly constant above the stagnation temperature of 2900 K.

ホール電流が得られるのは、くさびによる予備電離の効果であると考えられる。

4. 結 論

発電流路内に対角線状に配した15度のくさびにより、純粋なアルゴンプラズマを予備電離して、これを作動流体として、MHD 発電の実験を行った。その結果として、大きなホール電流の値を、比較的低い澱み点温度で得ることができた。これは、くさびによる予備電離の有効性を示している。

5. 謝 辞

本研究の過程において、明星大学特別研究助成費の援助を受けた。ここに謝意を表す。この研究の一部は、1986年11月に筑波で開催された第9回 MHD 発電国際会議において発表されたものである。

参考文献

- 1) Balemans and Rietjens, High Enthalpy Extraction Experiments with Eindhoven Blow-down Facility, Proc. 9th Int. Conf. on MHD Electrical Power Generation, Tsukuba, Japan, Vol. 2, p. 330 (1986).
- 2) Yamasaki, Shioda et al., Experimental Studies of Closed Cycle Disk Generator in the Fuji-1 Facility, Proc. 9th Int. Conf. on MHD Electrical Power Generation, Tsukuba, Japan, Vol. 2, p. 341 (1986).
- 3) 宮田, くさびによる非平衡 MHD 発電プラズマの予備電離, 明星大学研究紀要理工学部 第22号, p. 29 (1986).
- 4) Miyata and Tamaki, Pre-ionization of the Non-equilibrium MHD Generation Plasma by Diagonally Arranged Wedges, Proc. 9th Int. Conf. on MHD Electrical Power Generation, Tsukuba, Japan, Vol. 3, p. 1343 (1986).