

細分割電極発電流路による強い $J \times B$ 力の 作用下での非平衡ホール型 MHD 発電*

宮田 昌彦**

**Non-equilibrium MHD Power Generation Experiments with Finely Segmented
Electrode Hall Generator Operating with Strong $J \times B$ Interaction**

by Masahiko MIYATA

Abstract: Non-equilibrium MHD power generation experiments have been made making use of a Hall generator with finely segmented ringlike electrodes under the condition of strong $J \times B$ interactions. The Argon gas without seed was compressed in the shock tunnel to obtain the plasma with the stagnation temperature 3,600-5,000K and the stagnation pressure 34-22 KPa. The generator has 154 finely segmented ringlike Hall electrodes of 2 mm width and 5 mm pitch. The segmentation ratio is varied from 0.16 to 0.09 in the interaction region of the generator. The measured Hall voltage varies linearly against the magnetic field and along the distance of the generator. The measured residual Faraday voltage distribution along the generator shows the effects of the strong $J \times B$ interaction. The effective Hall parameter is 0.6 and decreases with increasing magnetic field, which indicates the strong $J \times B$ interaction effects.

The Hall voltage becomes 600 V/m at the maximum in spite of the reduced stagnation electron density as compared to the former experiments.

(要約)

強い $J \times B$ 力の作用の下で、細分割円環状電極を用いた非平衡ホール型 MHD 発電の実験を行った。作動ガスとして、シードをとまわらないアルゴンガスを、衝撃風洞によって圧縮し、よどみ点温度 3600~5000K、よどみ点圧力 34~22 KPa のプラズマをえた。発電機は、154コの細分割円環状ホール電極をもち、その幅は、2 mm、ピッチは 5 mm である。電極分割比は、磁場の作用域内で、0.16から0.09に変化する。測定されたホール電圧は、磁場および流れ方向の流路の距離に対して、ほぼ線形に増加する。一方、測定された残留フェラデー電圧の発電機内の分布は、強い $J \times B$ 力の影響を示している。また、ホールパラメータは 0.6 で、磁場が増加すると減少し、やはり $J \times B$ 力の効果を示している。ホール電圧は、以前の実験に比べてよどみ点の電子密度が減少したにもかかわらず最大で 600 V/m に達した。

* 本論文は、1981年6月15日、アメリカ合衆国テネシー大学宇宙研究所で開催された、第19回「MHDの工学的側面シンポジウム」で発表したものである。

** 理工学部機械工学科助教 流体工学

1. 緒言

本論文は、強い $J \times B$ 力の作用下での非平衡型 MHD 発電機の特長について研究している一連の実験の結果を示している。

これらの実験は、シードを用いないアルゴンガスを衝撃風洞によって圧縮したプラズマを、MHD 発電機の作動流体として用いている。ファラデー型およびホール型 MHD 発電流路を用いた実験結果ならびにその解釈については、論文 1¹⁾ および 2²⁾ にそれぞれ記載されている。

主な結果は次の通りである。

強い $J \times B$ 力の作用の結果、ファラデー発電機では、MHD 発電流路内の超音速のプラズマ流に、二次的な衝撃波が発生し、流速がその後流で減少することにより、流路内の電流が減少し、発電機内の圧力が増加し、プラズマのホールパラメータが減少する。

一方、ホール発電機では、外部回路によってファラデー電極を短絡した発電機と、円環状の電極を用いてプラズマ内部でファラデー電場を短絡した発電機を用いて実験した結果、後者の発電機の方が性能がよかった。これは、壁面の熱境界層による電流々路の歪みが円環状電極によっておさえられるためであると考えられる。

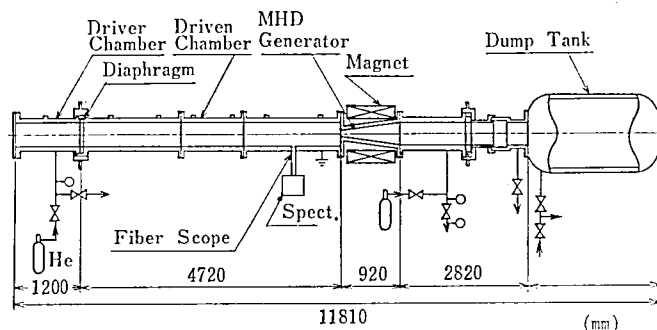
この論文では、ホール型発電流路の電極の分割比（ピッチ/ダクト幅）を減少させて、細い円環状電極を多数配置した発電流路を用いて、同様な実験を行い、ホール発電機の性能向上を旨とした研究結果について報告する³⁾。

2. 実験装置

実験装置は、衝撃風洞、MHD 発電機と電磁石よりなる。装置の概略図を図 1 に、全体の写真を図 2 に示す。装置の詳細については、論文 2 にのべてある。

衝撃風洞の駆動ガスは、実験の都合上、従来の水素ガスにかえて、ヘリウムガスを用いた。

発電流路は、図 3 に示すように改良された。発電機の大きさは、従来と同一であるが、電極の構造は、この図に示すように変更された。円環状の電極は、すでに用いられた流路に比べて、もっと細分割されている。電極のピッチは 5 mm で、従来の電極のそれに比べて 1/4 となっている。したがって、電極分割比（=ピッチ/ダクト幅）は、磁場作用域



Shock Tunnel MHD Generator

Fig. 1 Schema of the shock tunnel MHD generator.

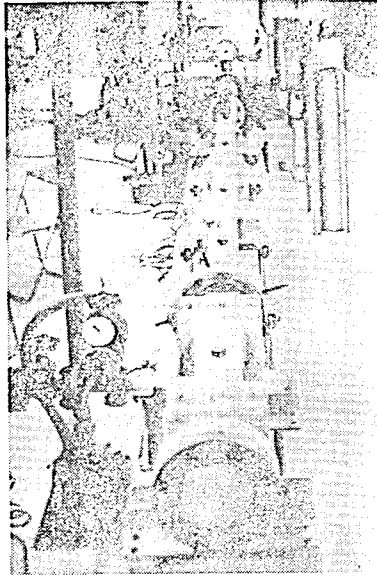
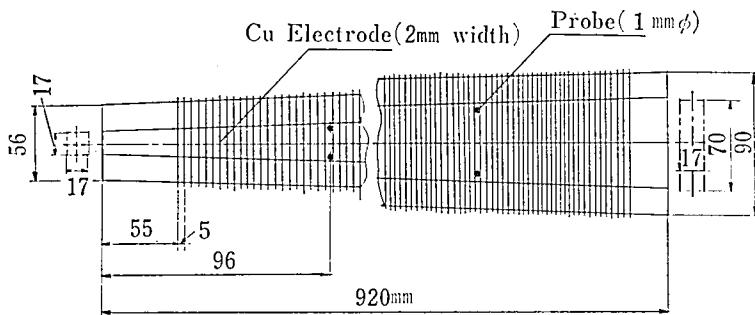


Fig. 2 Photo of the experimental apparatus.



Type C generator duct with finely segmented electrodes

Fig. 3 The generator duct with finely segmented ringlike Hall electrodes.

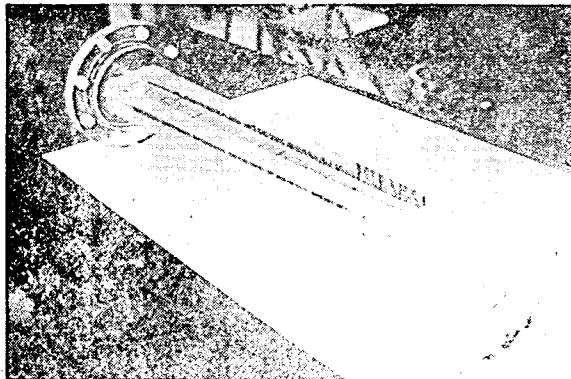


Fig. 4 Photo of the generator duct.

内で0.16~0.09となる。円環状電極の幅は2mmである。この結果、電極の総数は154コとなった。

流路は、920mmの長さで、入口断面積は、 $17 \times 17 \text{ mm}^2$ 、出口断面積は、 $17 \times 70 \text{ mm}^2$ である。直径1mmのホールプローブが2本1対づつ6カ所に流れ方向に設置されている。このプローブは、ホール電圧と残留ファラデー電圧を測定する。図4に発電ダクトの全景を示す。

3. 衝撃風洞の特性

実験の都合上、高圧部の駆動ガスを水素ガスからヘリウムガスに変更したので、衝撃風洞の気体力学的特性を測定しなおした。

測定は、主に、衝撃風洞内に発生する衝撃波の速度について、電離ゲージ、圧力計を用いて行った。圧力計は、コパル社製の半導体圧力素子P-1800であり、この素子からの出力を手製の増幅器によって増幅して、オシロスコープ上にかかせて測定した。素子の特性から、衝撃波速度の早い場合のデータは誤差が大きいが、衝撃波管内の初期圧力が高い場合は、データの信頼性が向上している。

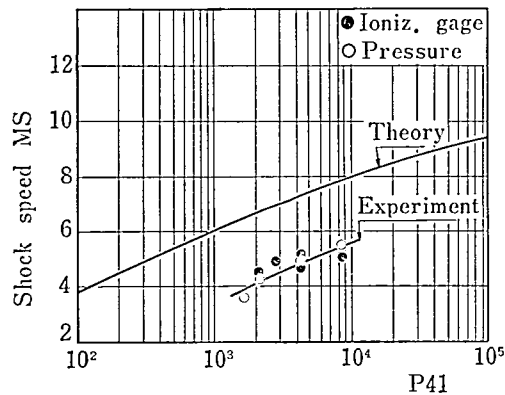


Fig. 5 Shock speed vs. initial pressure ratio of the shock tunnel. The ideal performance is indicated as theory.

Table Gas dynamic performance of the shock tunnel. Stagnation temperature, stagnation degree of ionization and stagnation electron density are calculated from the measured data.

Driver pressure (He)	1.089	MPa
Initial pressure (A)	0.13~0.39	KPa
Shock speed	5.4~4.8	M
Stagnation pressure	22~34	KPa
Stagnation temperature	6,000~3,600	K
Stagnation degree of ionization	7.0×10^{-5}	
Stagnation electron density	5.6×10^{19}	$1/\text{m}^3$
Magnetic field	0.86~0.49	T

図5に、衝撃波速度の実測値を、高圧部低圧部の初期圧力比に対して記入した結果を示す。ヘリウムを駆動ガスとすると、比較的衝撃波速度の減衰が大きくなり、理論値に対して、25%位の減少がおこる。

この実測値から計算して求めた衝撃風洞の性能について、表に示す。

初期圧力を 0.13~0.39 KPa との間で変化させると、衝撃波速度は、5.4~4.8 M に変化し、よどみ点圧力は、22~10 KPa、よどみ点温度は、5000~3000 K と変化する。よどみ点温度は、水素を駆動ガスとしたときの場合に比して、同条件で約 1/2 となっている²⁾。この結果、よどみ点の電離度は、約 2 桁減少した。

4. 発電実験の結果

4.1 ホール電圧と磁場の関係

図6は、測定されたホール電圧（ただし、電圧勾配の単位となっている。以下同様）の、印加磁場に対する変化を示している。作動ガスのよどみ点圧力は、22 KPa である。ホール電圧は、0.6~0.86 T の磁場の変化の範囲で 350 V/m から 600 V/m まで、ほとんど磁場強度に比例して変化している。

4.2 ファラデー電圧と磁場の関係

一方、ファラデー電圧は、図7に示すように、磁場が大となると、比例関係よりも少し増大する傾向を示している。この場合のファラデー電圧は、プラズマ内の流れに垂直におかれた2本のプローブより測定されたもので、残留ファラデー電圧 $(UB - jy/\sigma - \Delta E) \cdot D$ である。ここで、 U は流速 (m/s)、 B は磁束密度 (T)、 jy はファラデー電流 (A/m^2)、 σ はプラズマの電気伝導度 (S/m)、 ΔE は電極電圧降下 (V/m)、 D はダクト幅 (m) である。ファラデー電圧が磁場の増大に従って増大するのは、上述の事実から、 jy/σ が減少することを示している。すなわち、 $J \times B$ 力の影響によって、ファラデー電流の流路がひずんでくることによるものと考えられる。これによって、図13に示すように、磁束密度が増大しても、ホール係数 ωr が減少する結果となる。

4.3 ホール電圧 - 電流特性

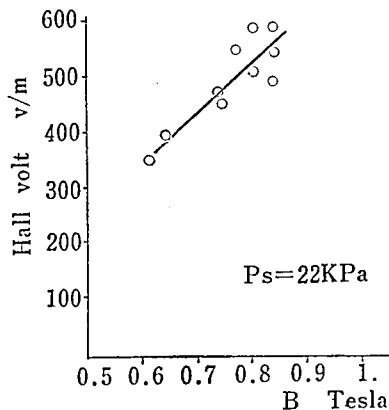


Fig. 6 Hall voltage vs. magnetic field. Hall voltage varies linearly against the magnetic field.

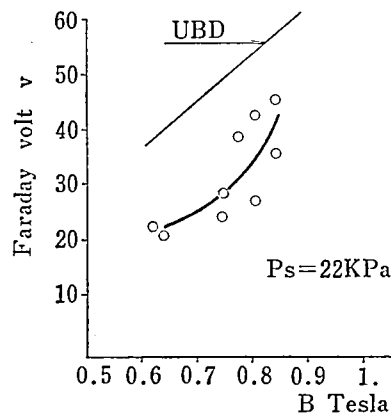


Fig. 7 Faraday voltage vs. magnetic field. Open voltage is indicated with a solid line.

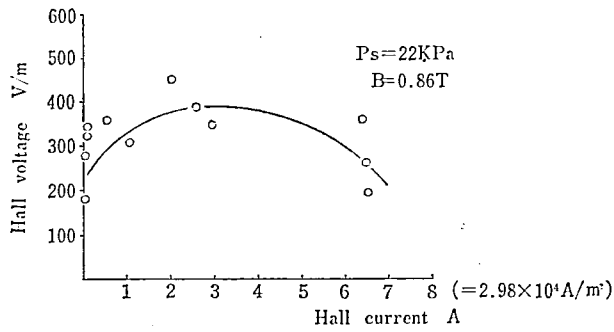


Fig. 8 Hall voltage-current characteristics.

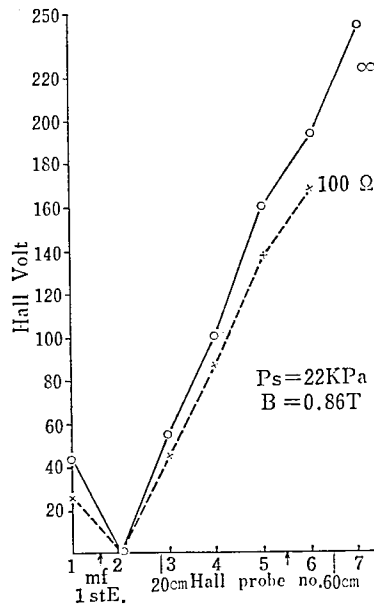


Fig. 9 Open Hall voltage distributions along the generator with the open Hall load and 100Ω load.

よどみ点圧力が 22 KPa で、磁束密度が 0.86 T の場合のホール電圧 - 電流特性は、図 3 に示すようにえられる。

ホール電流の小さい領域では、電圧 - 電流特性は、ホール電圧が電流によって、やや上昇する傾向を示している。これは、ファラデー方向の円環状電極において、常に短絡電流が流れており、その結果生ずる電極損失に対抗して、ホール電流を流すために、ホール電圧が増加することを示している。ホール電流の大きいところでは、ホール電圧 - 電流特性は、プラズマの非平衡電気伝導度を示している。ホール電流密度は、最大 $2.5 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ である。

4.4 発電機内のホール電圧分布

図9は、発電機内の開放ホール電圧の分布および、ホール回路の負荷抵抗を $100\ \Omega$ にしたときのホール電圧の分布を示している。図の横軸には、磁場の範囲を矢印によって示し、第一電極の位置およびホールプローブの位置を実線によって示してある。ホール方向のアースの位置は、ほぼ発電流路入口の位置であり、発電流路入口から磁場の印加されはじめる領域まで、約 $20\ \text{cm}$ の間、プラズマはジュール加熱されない。また、第1ホールプローブは、磁場の外側にある。

第1、第2ホールプローブの間で、ホール電位は、流れの方向に対して負の勾配を示しており、これは、プラズマの電離緩和により、ホール電圧がプラズマ内に供給されたことを示している。第2ホールプローブより下流の領域では、ホール電圧は、流れ方向にはほぼ距離に比例して増大し、電圧勾配が一定であることを示す。負荷抵抗が $100\ \Omega$ となっても、全般的な傾向はあまり変化していない。これは、電極を細分割したことによって、ホール電圧勾配の一定性がよく保たれていることを示すものと考えられる。

4.5 発電機内のホール電流分布

図10は、ホール電流の発電機内の分布を示す。横軸には、ホール電極の位置を示している。ホール電流の分布を測定するために、たとえば、第10番目と第20番目の電極をえらび、この間のホール負荷を $0.03\ \Omega$ にして、電流を測定した。また、作動ガスのよどみ点圧力を $22\ \text{KPa}$ と $34\ \text{KPa}$ に変えて測定を行っている。ホール電流は、発電流路の後方で増大し、第60番目の電極後方で大きく減少している。

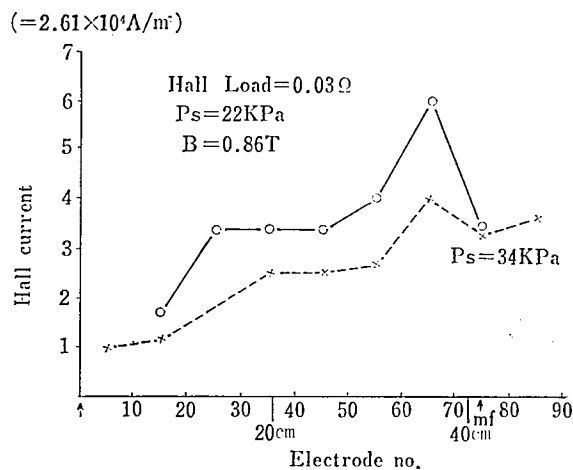
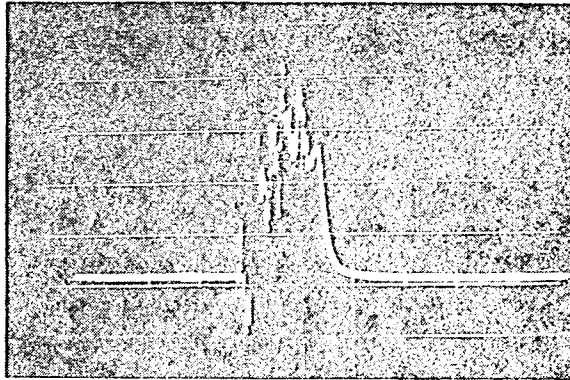


Fig. 10 Hall current distribution in the generator at the stagnation pressure $22\ \text{KPa}$ and $34\ \text{KPa}$.

よどみ点圧力が高い場合では、発電流路の後方の電極においても、あまりホール電流は減少していない。よどみ点圧力が高い場合、図11に示すように、プラズマの持続時間が増大する。したがって、ホール電圧は、ダクトの後流側までおよび、ホール電流の減少も少ないものと考えられる。これらは、本実験のような間欠的な装置ではやむをえず起きる現象である。



(a)



(b)

Fig. 11 The Hall current data.

- a) Stagnation pressure 22 KPa.
Hall electrode No. 50-80.
Hall load 100 k Ω .
Sweep velocity 0.5 ms/div.
Voltage 5 V/div.
- b) Stagnation pressure 34 KPa.
Hall electrode No. 30-80.
Hall load 1 M Ω .
Sweep velocity 0.5 ms/div.
Voltage 20 V/div.

4.6 発電機内のフェラデー電圧の分布

図12は、残留フェラデー電圧の発電機内の分布を示す。点線は、プラズマのよどみ点圧力が 34 KPa の場合の値である。残留フェラデー電圧は、よどみ点圧力が低い場合 (22 KPa) では、第60番目のホール電極とほぼ同じ位置にある第4番目のフェラデープローブ後方で急激に減少している。よどみ点圧力が高い場合はそのような急激な減少は見られない。すでに述べたように、残留フェラデー電圧は、フェラデー開放電圧とジュール電圧降下の差であることから、強い $J \times B$ 力の作用のもとで、フェラデー開放電圧が減少したか、電気伝導度が急激に低下したかのいずれかの原因で、図12のようなフェラデー電圧分

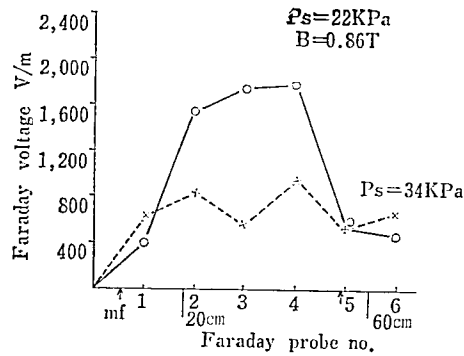


Fig. 12 The residual Faraday voltage distribution in the generator.

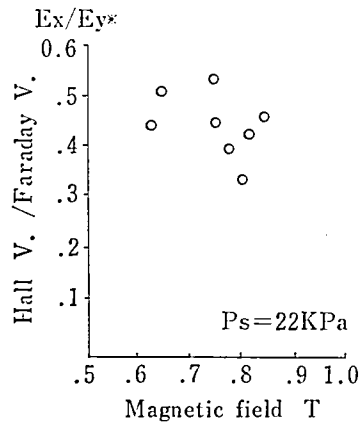


Fig. 13 E_x/E_{y^*} vs. magnetic field. The ratio E_x/E_{y^*} is equal to the effective Hall parameter.

布がえられたものと考えられる。

4.7 ホール係数

図13は、印加磁場に対するホール開放電圧 E_x とファラデー電圧 E_{y^*} の比の変化を示している。この比、 E_x/E_{y^*} は、有効ホールパラメータに比例している。この値の最大値は、0.6で磁場の増加に従って減少する傾向を示している。ホール係数は、普通、磁場に比例して増加する量である。したがってこのような特異な傾向は、 $J \times B$ 力によって生ずるファラデー電流路のひずみによって、ホール電圧が減少することを示し、磁場が強くなるほどこの傾向が増大することを示している。

5. 結 論

細分割の円環状の電極を設置したホール型流路を用いて、非平衡 MHD 発電の実験を行った。ホール電圧は、発電機内ではほぼ線形に増加し、印加磁場に対しても、ほぼ比例して増大する。ホール電圧は、よどみ点の電子密度が、過去の実験に比べて約 2 桁減少したにもかかわらず、最大で 600 V/m の値に達した。

参考文献

- 1) 宮田, 河村: 無シードアルゴンプラズマによる非平衡 MHD 発電, 日本機械学会論文集 41 巻352号, (1973) p. 3566
- 2) 宮田: ホール型非平衡 MHD 発電機における $J \times B$ 力の効果, 明星大学研究紀要—理工学部, 第17号 (1981) p. 155
- 3) Miyata, M.: Non-equilibrium MHD Power Generation Experiments with Finely Segmented Electrode Hall Generator Operating with Strong $J \times B$ interaction, 19th Symposium on EAMHD, University of Tennessee Space Institute, U.S.A. (1981)