

入口衝撃波予備電離をともしう非平衡 ホール型 MHD 発電

宮 田 昌 彦*

Non-equilibrium Hall MHD Generation Experiments with an Inlet Shock Wave Pre-ionization

Masahiko MIYATA

(Abstract)

we have conducted experimental works with the non-equilibrium Hall MHD generator using pure argon as a working gas. The working plasma produced making use of a shock tunnel is stagnated and expanded in a Hall generator duct. The Hall generator duct has the ringlike copper electrodes to short out the Faraday fields along the generator wall in order to get high Hall voltages. The performance of these ringlike electrodes was shown to be higher than that of the Faraday type electrodes with shorted circuits. In spite of very high stagnation temperature (6000 K), which is necessary to ionize the pure argon gas, the inlet gas temperature becomes low (3000 K) after expansion along the long distance between the stagnant and the duct inlet. To prevent these losses, we made preionization of the plasma by a shock wave at the duct inlet. An oblique shock wave was observed at the shock wave holder and higher Hall current and Hall field than the case without the shock wave were obtained. The choking effects with this shock wave were small, which was revealed by the small reduction of the Faraday field in the generator.

(要 約)

本研究は、純アルゴンガスを作動気体として行なわれた非平衡 MHD 発電の研究である。衝撃風洞によって作られた作動プラズマをホール型 MHD 発電機内に膨脹させる。ホール発電機流路は、壁面でフェラデー起電力を短絡し高いホール電圧をえられるように、円環状の銅電極をもつ。純アルゴンガスを電離するために高いよどみ点温度(6000K)を用いているが、よどみ点と発電流路の磁場作用領域入口までかなり距離があるため、気体温度は膨脹によって低下する。(3000K 位となる。)この損失を減少するため、プラズマを発電流路入口で衝撃波により予備電離した。衝撃波保持部に斜め衝撃波が発生しているのが観測され、高いホール電圧と電流がえられた。流れの閉塞は、フェラデー電圧の流路内分布の測定より、あまり強くおこってはいないことがわかった。

* 機械工学科助教授, 流体工学(本研究は、理工学研究科修士課程学生, 坪井秀夫との共同研究である.)

1. 緒 言

本研究は、純アルゴンガスを用いた非平衡 MHD 発電の実験的研究の一環として行なわれたものである。衝撃風洞によって、純アルゴンガスを圧縮してえられたプラズマを、よどみ点から MHD 発電流路内に膨脹させる。MHD 発電流路はホール型であって、円環状の銅電極をもち、壁面でファラデー電場を短絡してホール電圧を増大させる。この円環状電極は、短絡外部回路をもつファラデー型電極にくらべてよい性能をもつことがわかった⁽¹⁾。

純アルゴンガスを、MHD 発電可能なプラズマとして電離させるために、衝撃風洞のよどみ点で、ガス温度は 6000 K 以上という高温になるが、よどみ点と発電ダクトの磁場作用域入口までの間にかかなりの距離があるため、膨脹によってガス温度はかなり下ってしまう。(3000 K 位になると見込まれる)。図 1 は、一つの計算結果を示している。この場合、

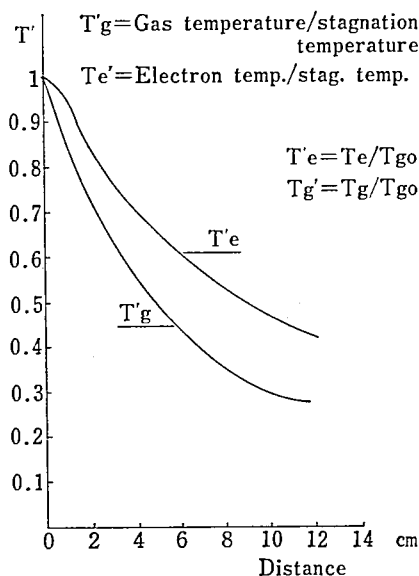


Fig.1. Gas temperature and electron temperature variation along the nozzle. $T_{go}=10350$ K
 $P_{go}=5$ atm.

よどみ点の気体温度は 10350 K で圧力は 5.0 気圧の場合である。計算は一次元流を仮定し、中性ガスは断熱膨脹過程にしたがい、プラズマ内の電子は、有限反応速度の化学反応を行うとして計算してある。この計算結果より、よどみ点より 10cm 位のところで、気体温度はよどみ点温度の 0.3 倍、電子温度は 0.5 倍位に低下している。電子温度が比較的低下しないのは、電子から中性ガスへのエネルギー減少がお互のエネルギー交換断面積が小さいことによっておこりにくいことを示すが、いずれにしてもかなり温度が低下して、MHD 発電機入口での電子密度が減少することがわかる。これを防止するために、種々の予備電離法が提案されている⁽²⁾が、いずれも電気的方法にもとづくもので、予備電離によ

って、作動プラズマの電位が乱れ、新しい不安定性が生ずることが多い。そのため我々は、発電機入口に衝撃波保持部をもうけ、入口衝撃波による予備電離を試みた。この衝撃波によってプラズマの速度は低下するが、一方プラズマの温度は増加し、電離が促進される。衝撃波による流体速度の低下があまり顕著でなければダクト内の圧力を低下させることによって、プラズマの温度上昇を有効に利用して発電機の効率を向上せしめることができる。発電機内の気体圧力を比較的高くして、亜音速流を用いる開放型 MHD 発電に対して、非平衡（閉サイクル）型 MHD 発電では、ダクト内圧力をかなり低下せしめることができるので、入口衝撃波による予備電離もかなり有効であると考えられる。

実験の結果、斜め衝撃波が発電機流路入口にみられ、衝撃波がない場合に比して、高いホール電圧、ホール電流がえられた。ファラデー電圧の流路内分布の測定から、流路内で入口衝撃波が存在する場合でも、流速の低下が比較的少ないことがわかった。

2. 実験装置と衝撃風洞の性能

実験装置は、図 2 に示すように、普通の衝撃風洞、電磁石と発電流路よりなる。発電流

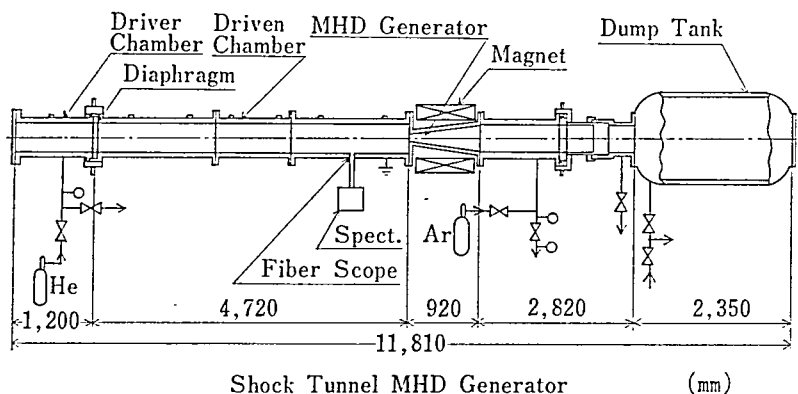


Fig. 2. Schematic of the shock tunnel MHD power generator.

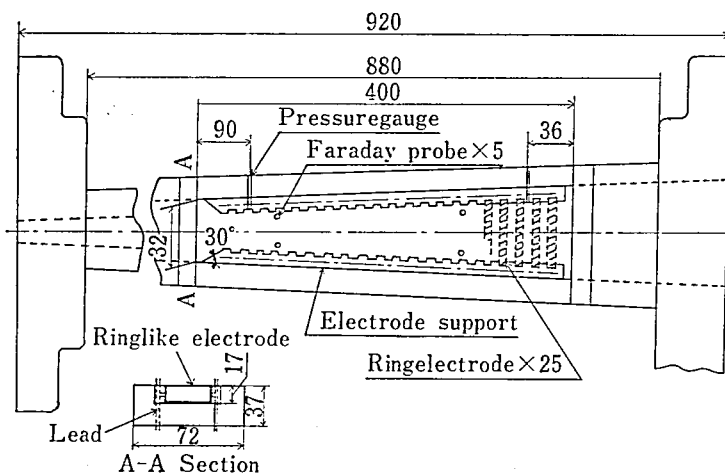


Fig. 3. Schematic of the MHD power generator duct with an inlet shock wave pre-ionizer.

Driver Pressure (He)	1.089	MPa
Initial Pressure A	0.13 -0.39	KPa
Shock Speed	5.4 -4.8	M
Stag. Pressure	34 -22	KPa
Stag. Temperature	6000 -3600	K
Stag. Deg. of Ion.	7.0×10^{-5}	
Stag. Electron Den.	5.6×10^{19}	$1/\text{m}^3$
Magnetic Field	0.85 -0.49	T

Table. Gas dynamic performance of the shock tunnel.

路の構造は、図3に示すようである。発電流路は、二つの電極保持板を有し、この電極保持板は先端が 30° のくさび型をなして、衝撃波保持の役割を行う。また、保持板は対をなして、ここに25コの円環状（ロの字型）の銅電極を保持する。

衝撃風洞の気体力学的特性は、表に示すようであるが、これはすでに発表したものと同じである⁽³⁾。

作動アルゴンガスは、初期圧力が 0.13 KPa ないし 0.39 KPa である。このアルゴンガスを衝撃風洞のよどみ点で圧縮して 34 KPa から 10 KPa のアルゴンプラズマをえて、発電機流路内へ膨脹させる。初期圧力が 0.13 KPa のときの発電機の磁場作用域の入口でのマッハ数は、1.3 である。

よどみ点の気体温度は、6000 K から 3600 K までアルゴンの初期圧力によって変化する。

3. 実験結果とその検討

3.1 ホール電圧

図4は、よどみ点圧力が 34 KPa の場合の磁場に対するホール電圧の変化を示す。ま

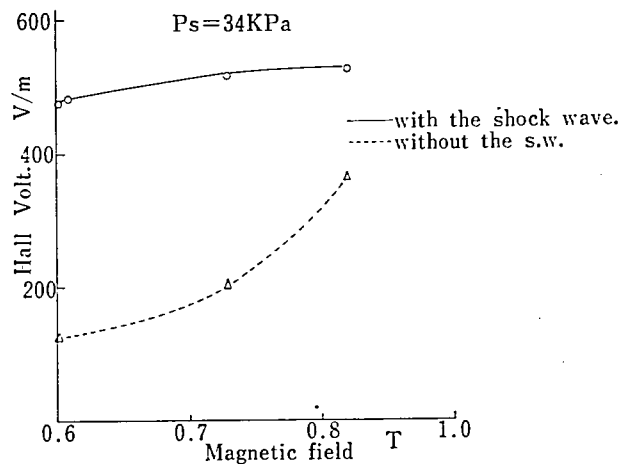


Fig. 4. Hall voltage variation against the magnetic field. The upper curve indicates the values with the inlet shock wave and the lower curve shows that of without the shock wave.

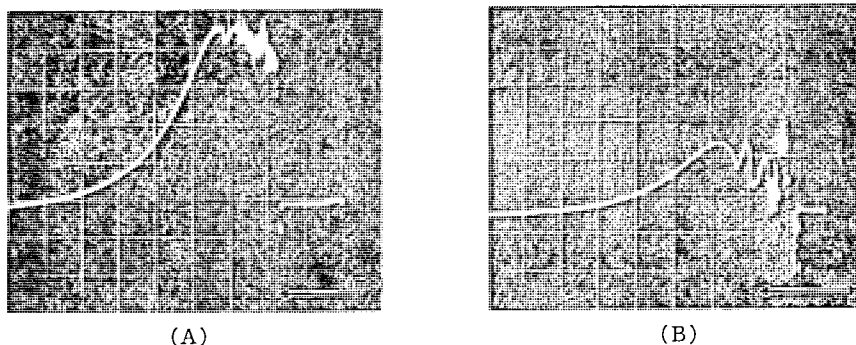


Fig. 5. Hall voltage data with and without the inlet shock wave. (A) indicates the datum with the shock wave and (B) indicates that of without the shock wave. Sweep velocity is 1 ms/div.. Voltage is 2 V/ div.. Stagnation pressure is 34 KPa.

た、図5はホール電圧の典型的なデータを示す。図4の上側の曲線は、電極保持板の先端に斜め衝撃波が発生したときのホール電圧の値で、図5 (A) のデータに相当する。図4の下側の曲線は、斜め衝撃波が存在しない場合の値で、図5 (B) のデータに相当する。上の曲線は、ホール電圧が下の値に比べて倍以上大きいだけでなく磁場に対する変化も少ないことを示している。図5のデータを比較して顕著な差は、ホール電圧の細かい振動の振幅が相対的に、斜め衝撃波が存在する場合は、減少しているという事実である。この場合、ホール電圧は、発電機の流れ方向に平行におかれた一対のプロブにより測定されており、図4に示すのは最大のホール電圧である。

3.2 ファラデー電圧の流路内分布

入口衝撃波の影響は、電極保持板のくさびの後流で、ガスの速度が減少することになってあらわれると思われる。図6は、発電流路内のファラデー電圧の変化を示してい

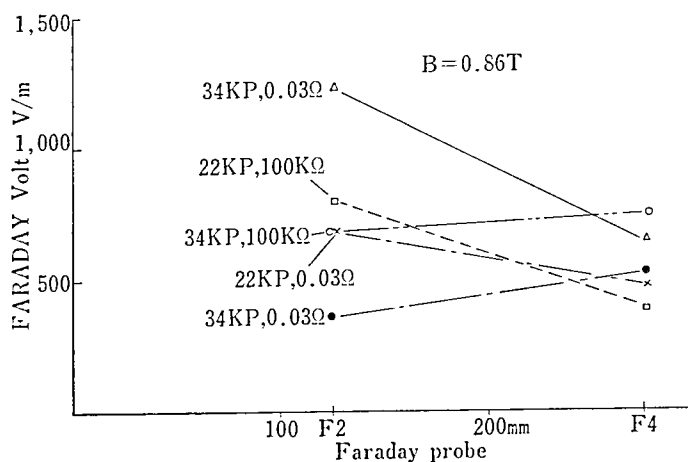


Fig. 6. Faraday voltage variation along the generator. The values of the Faraday field are not strongly reduced in spite of the presence of the shock wave.

る。この図よりみるとファラデー電圧の減少は流れにそってあまり大きくはなく、ある場合にはファラデー電圧は流路内で増大していることがわかる。したがって、我々は、入口衝撃波が存在するにもかかわらず、流れの閉塞は発電流路の作動部分ではおこらないという結論に達する。

3.3 ホール電圧の流路内分布

図7と図8は、それぞれよどみ点圧力が 22 KPa と 34 KPa の場合の ホール電圧の流

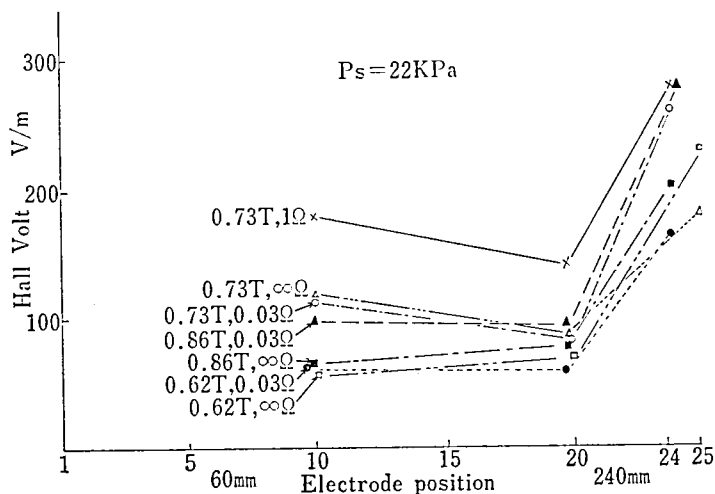


Fig. 7. Hall voltage variation along the generator. The values of the Hall voltage are increased in the portion downstream of the generator

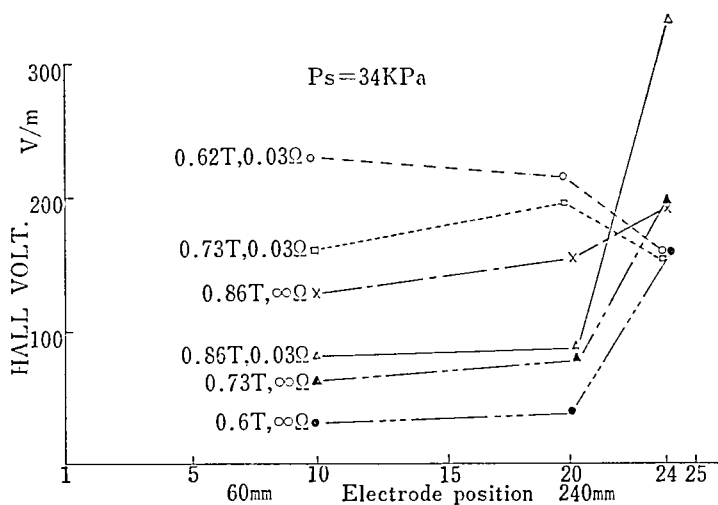


Fig. 8. Hall voltage variation along the generator for the stagnation pressure of 34 KPa. The values of the Hall voltage are increased in the downstream portion of the generator when the applied magnetic field and the load are high.

路内分布を示している。よどみ点圧力が 22 KPa の場合では、印加磁場や負荷の値に無関係に発電機の後流部でホール電圧が増大することがわかる。また、よどみ点圧力が 34 KPa の場合では、印加磁場や負荷の値が大きいときは、ホール電圧が増大する傾向にある。

3.4 ホール電流の流路内分布

図 9 は、発電機流路内のホール電流の分布を示している。よどみ点圧力が 22KPa で負

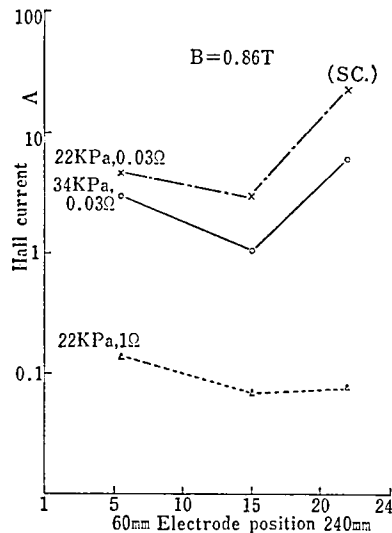


Fig. 9. Hall current distribution in the generator. The Hall current is increased in the portion downstream of the generator.

荷が小さいときは、ホール電流は発電機の後流で増大して 23A となる。この場合のホール電流は、電極の対を適当にえらんで測定してある。たとえば、第一番目の電極と第十番目の電極をホール方向に結線してその間に適当な負荷をおき、その負荷を流れる電流を測定している。

3.5 気体圧力の流路内分布

図 10 は、発電機流路内の静圧力の分布を示している。電極保持板の先端に斜め衝撃波が発生しており、磁場が印加された場合、静圧力が発電機の作用域内で増大するのがわかる。

3.6 静圧力の測定値

図 11 は、入口衝撃波保持板のくさびの直後におかれた圧力計（キスラーモデル 603 A）によって測定された静圧力の時間的变化を示すデータである。このデータには、強い斜め衝撃波が存在することが示されている。圧力の値は、ほとんど衝撃風洞のよどみ点圧力に等しく、またこの衝撃波は、停留衝撃波である。衝撃風洞内のアルゴンの初期圧力が小さい場合は、 $J \times B$ 力によって強い停留衝撃波が発生し、またこの衝撃波内の温度上昇によって誘起された強いジュール加熱の結果、気体流の再膨脹が起こり、気体はさらに加速さ

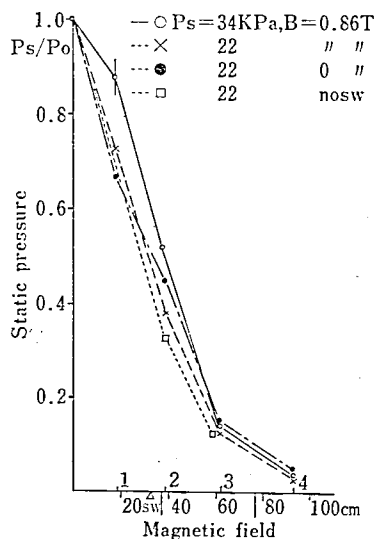


Fig. 10. Static pressure distribution in the generator. The values of the static pressure are increased when the inlet shock wave is produced in the duct.

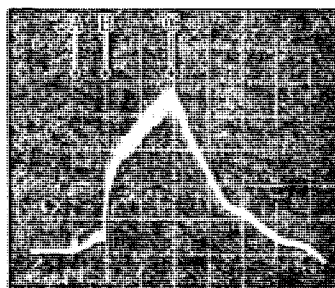


Fig. 11. A typical static pressure datum obtained by the first pressure gauge which was set just behind the shock wave holder.

A: Shock wave with expansion process of the shock tunnel.

B: Bow shock wave at the shock wave holder.

C: Expansion wave downstream of the shock wave holder.

Sweep velocity: 1 msec/ div..

Voltage: 0.5 V/ div. (=0.136 atm/ div..).

Stag. pressure: 22 KPa.

れて、衝撃波および $J \times B$ 力による速度減少をおぎなうものと思われる。

4. 結 論

入口衝撃波予備電離をとまなう 非平衡ホール型 MHD 発電の実験を、衝撃風洞によっ

て純アルゴンガスを圧縮電離したプラズマを用いて行なった。入口衝撃波の存在によって、発電機の磁場作用領域内で静圧力が増大するが、しかしフェラデー電圧の流路内分布の測定からプラズマの流速は流路内であまり強く減少しないことがわかった。ホール電圧とホール電流は、この入口衝撃波予備電離の効果によって、発電機内の後流部分で増大することがわかった。

参考文献

- (1) Miyata, M.: Non-equilibrium MHD power generation experiments with finely segmented electrodes Hall generator with strong J cross B interaction, 19th Symposium on EA-MHD, University of Tennessee Space Institute, USA. (1981)
- (2) Rosa, R. J.: Magnetohydrodynamic Energy Conversion, McGraw-Hill, (1968)
- (3) 宮田昌彦:「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」明星大学研究紀要第18号 (昭和57年)