一定断面積 MHD 発電流路における衝撃波と境界層の干渉*

青木 俊之^{*1}, 右近 哲哉^{*2}
益田 光治^{*1}, 松尾 一泰^{*1}Shock Wave-Boundary Layer Interaction in Constant Area
MHD Generator ChannelTosiyuki AOKI, Tetuya UKON,
Mitsuharu MASUDA and Kazuyasu MATSUO

The purpose of present paper is to report the experimental studies of the gas dynamic characteristics, especially those such as shock wave-boundary layer interaction, in a supersonic MHD generator with constant area channel. The plasma for MHD generator is produced by a shock tube. In order to obtain a clear and sharp image of shock wave-boundary layer interaction in MHD generator channel, the color schlieren method has been employed. The experimental results show that a pressure rise occurs through the shock wave. The schlieren photographs show the bifurcation of shock wave and the separation bubble due to the shock wave-boundary layer interaction in MHD channel. As a result of this interaction, the passing of the shock wave reduces the output current over an axial distance of several duct diameters downstream.

Key Words: MHD Generator, Constant Area Channel, Shock Wave, Boundary Layer, Magnetohydrodynamics, Supersonic Flow, Compressible Flow, Plasma Flow

1. 緒 言

化石エネルギーの有効利用のために多くの新しい発電形式が提案されている。その中の一つに MHD 発電がある。この MHD 発電の発電特性は発電流路内を流れるプラズマの流動特性に大きく依存し、そのため発電流路内の流れに対する詳細な研究が必要である。MHD 発電流路内の流動特性に関して従来より多くの研究がなされている。例えば、MHD 発電流路内の定常流についての流体力学的特性⁽¹⁾、衝撃波が定在する場合の発電流路内圧力分布⁽²⁾⁽³⁾、非平衡プラズマ MHD 発電⁽⁴⁾⁽⁵⁾、発電流路形状の影響⁽⁶⁾などの実験的研究や、MHD 発電流路内の二次流れ⁽⁷⁾、負荷の短絡時の流動特性⁽⁸⁾、発電機の起動時における過渡流れ⁽⁹⁾などの理論的研究がある。しかしそれらの研究はおもに発電特性との関連におけるものが多く、発電流路内に発生する衝撃波の特性、とくに衝撃波と壁面境界層との干渉現象に関する研究は少なく、不明な点が依然として多く残されている。

本研究の目的は MHD 発電流路内の流れの流体力学的特性の解明と、流路内の衝撃波と境界層との干渉現象が流れや発電特性に与える影響を究明することである。本報では一定断面積超音速 MHD 発電流路において下流から上流へ伝ばする衝撃波をカラーシュリーレン法により可視化するとともに、発電流路において伝ばする衝撃波のふるまいや、衝撃波と境界層の干渉現象が発電特性に与える影響などを実験的に調べた。

2. 実験装置および方法

実験装置は図 1 に示すように衝撃波管の末端によども室、発電流路、ダンブタンクを順に設けたものである。高圧室は長さ 1 500 mm、内径 97 mm である。低圧室は長さ 3 500 mm、内径 81 mm であり、その後方に長さ 440 mm のよども室を設けている。高圧室と低圧室とは二重膜で区切られており、この二つの間の圧力を瞬間的に下げることで破膜させ、高速流れを発生させる。よども室には二つの圧力センサ [11A21, PCB エレクトロニクス(株)] が設けてあり、衝撃波がこの間を通過する時間よりよども室を伝ばする衝撃波の伝ば速度を算出した。圧力センサや電極からの出力信号はすべてウェーブメモリーに取り込み、その後計算処理する。

* 原稿受付 平成 4 年 10 月 20 日。

^{*1} 正員, 九州大学総合理工学研究科 (〒816 春日市春日公園 6-1)。^{*2} 正員, 九州大学大学院。

図 1 実験装置および測定部の概略

図 2 発電流路の詳細

図 3 シュリーレン光学系の配置図

図 2 に発電流路の詳細を示す。図 2 に示すように、発電流路は幅が 20 mm、高さ 40 mm の一定断面積形で、流路入口の下流 155 mm（以下、この位置を $X=0$ とする）より長さ 200 mm の発電測定部が設けられている。発電測定部の電極ピッチは 10 mm、幅は 5 mm で上下に 19 対取付けてあり、負荷抵抗の結線はファラデー形である。流路内のプラズマ流れは流路入口の縮流⁽¹⁰⁾により超音速にまで加速される。また、測定部の両側壁は光学観察のためにガラス窓となっており、場合に応じて $X=65, 135$ mm の位置に圧力センサ (4045A5, Kistler 社) が取付け可能になっている。本実験においては、MHD 発電機の起動時や非定常時において、流路内に発生する衝撃波をシミュレートするために、発電測定部を下流から上流へ伝ばする衝撃波を $X=200$ mm の位置に流路断面積 32×20 mm の絞りを取付けることにより発生させた。すなわち、破膜により生じた衝撃波が測定部下流の絞り部を通過後約 0.2 ms で測定部を上流へ伝ばする衝撃波が形成され

る⁽¹¹⁾。この伝ば衝撃波を用いて発電測定部における衝撃波と境界層の干渉現象を測定する。

本実験では MHD 発電流路において伝ばする衝撃波と境界層の干渉現象を光学観察するための流れの可視化方法として、2 台の Xe フラッシュランプ光源（発光時間 10 μ s、入力エネルギー 10 J）を用いたカラーシュリーレン法を用いた。その光学系の配置図を図 3 に示す。これにより 1 回の実験で測定時間の異なる 2 枚の光学写真の撮影や、カラーズリットを横置き、縦置きとした場合の同時撮影を行うことができる。Xe フラッシュランプの発光のタイミングは圧力センサによるトリガ信号をもとにデジタルリターダによって任意の時間に設定することができる。また発電流路の両側に設置されているマグネットは光学観察のために 50×200 mm の空心を持つコンデンサ放電形であり、

最大磁束密度は 1.3 T, 持続時間は 7 ms である。

実験条件は, 作動気体に金属カリウム蒸気によりシードしたアルゴンガス (シード率 0.1%), 駆動気体としてヘリウム 80%, 空気 20% の混合気体を使用した。高圧室の圧力を 505 kPa, 低圧室の圧力を 2.6 kPa とし破膜により衝撃波を発生させた。よどみ室において測定した入射衝撃波のマッハ数は 3.6 で, その結果作動気体の衝撃波圧縮加熱によって得られた MHD プラズマのよどみ点温度は 3 100 K, よどみ点圧力は 300 kPa である。本実験において負荷抵抗は $R=10, 100, 1\,000\ \Omega$ の 3 種類, 磁束密度は $B=0, 1.0\ \text{T}$ の 2 種類の範囲とした。

3. 実験結果および考察

3.1 発電流路内の流動特性 発電測定部下流に設けた絞りにより, 発電測定部内を下流から上流に伝ばする衝撃波を発生させた場合に, 側壁上 (電極を設けていない壁) で測定した圧力の時間的変化の一例を図 4 に示す。横軸は $X=65\ \text{mm}$ の位置を入射衝撃波が通過してからの時間 t であり, 縦軸は図 2 に示す $X=65, 135\ \text{mm}$ の位置の圧力センサで測定した発電測定部側壁上の圧力である。図 4 中の実線は磁場を印加しない場合, 破線は負荷抵抗を $R=1\,000\ \Omega$ とし, 磁束密度 $B=1.0\ \text{T}$ を印加した場合である。図 4 からわかるように, $X=135\ \text{mm}$ の測定では $t \leq 0.55\ \text{ms}$ で, $X=65\ \text{mm}$ では $t \leq 1.25\ \text{ms}$ で圧力は緩やかに上昇しており流れは超音速の定常状態であることを示している。しかし, $X=135\ \text{mm}$ では $t=0.55\ \text{ms}$, $X=65\ \text{mm}$ では $t=1.25\ \text{ms}$ 付近から圧力は急に上昇している。これらの急な圧力上昇が起こる時間は $X=135\ \text{mm}$ においては実験条件に対しほとんど変化がないが, $X=65\ \text{mm}$ においては磁場がない場合に比べ, 磁場がある場合が早くなっている。すなわち, この圧力の急な上昇は発電測定部を下流から上流にゆっくり伝ばする衝撃波があり, その結果として各測定点におけ

図 4 発電測定部内側壁の圧力変化

る圧力センサへの衝撃波あるいは圧縮波の到達を意味するものである。また図 4 中の細線は, 後述の光学計測より求めた $X=65\ \text{mm}$ における伝ば衝撃波速度を用いて境界層がない場合の垂直衝撃波が圧力センサ上を通過した場合の圧力波形の計算値である。理想的な垂直衝撃波において圧力は不連続的に上昇するが, 圧力センサの大きさがあるため, ある程度のこう配を持つ圧力波形となる。これよりわかるように垂直衝撃波の波形よりも実際の圧力波形は早く上昇を示している。さらに, 衝撃波通過後の圧力上昇の実験値は計算により求められた垂直衝撃波後方の値よりも小さく, 上昇の様子もなだらかであることがわかる。これらは伝ばする衝撃波と境界層の干渉による衝撃波分枝や境界層の巻上がりなどの影響である。

さらに流れの様子を具体的に調べるために, カラーシュリーレン法を用いて発電測定部内を伝わる衝撃波を撮影した。その代表的な写真を図 5 に示す。これらの写真はカラースリットは縦切りとし, 密度が均一な領域が緑, 流れ方向に密度の正の領域が赤, 負の領域が青で示されている原写真を白黒写真に焼付けたものである。実験条件は負荷抵抗 $R=100\ \Omega$, 印加磁束密度 $B=1.0\ \text{T}$ である。これらの写真は 1 回の実験において撮影したものであり, 図 5 中の各写真の時間は発電測定部に進入してきた入射衝撃波が下流の絞りに達してからの時間 t_r である。流れは左から右であり, 衝撃波は右から左に伝ばしている。衝撃波上流において流れは超音速であり電極などの微小な凹凸よりマッハ線が

(a) $t_r=0.3\ \text{ms}$, $B=1.0\ \text{T}$, $R=100\ \Omega$

(b) $t_r=0.6\ \text{ms}$, $B=1.0\ \text{T}$, $R=100\ \Omega$

図 5 MHD 発電流路内の代表的シュリーレン写真 (スリット縦切り)

発生しているのが観察される。このマッハ線と流れ方向のなす角度より求めたマッハ数の平均は流路全体にわたり約 1.4 であった。光学写真からわかるように、発電測定部内を伝ばする衝撃波は電極面上の境界層と干渉を起こし、衝撃波は分枝していることが明確にわかる。本実験の範囲では流体の運動エネルギーに対して電磁エネルギーが小さいため（干渉パラメータは 0.1 程度で比較的小さい）、発電の有無、負荷抵抗の値に対して衝撃波の形状はほとんど影響を受けていなかった。

次に衝撃波と電極面上の境界層の干渉を調べるためにカラスリットを横切りとした場合の写真の一例を図 6 に示す。実験条件は負荷抵抗 $R=100\ \Omega$ 、印加磁束密度 $B=1.0\ \text{T}$ である。写真よりわかるように作動気体が単原子分子のアルゴンであるために境界層は非常に薄く見にくい衝撃波下流においてかすかに膨れている。これは衝撃波との干渉のため境界層のはく離が起り下流ですぐ再付着するはく離泡⁽¹²⁾が形成されていると考えられる。

次に、光学観察より求めた発電測定部内を伝わる衝撃波の負荷抵抗に対する伝ば速度 U_s の変化を図 7 に示す。測定部内における衝撃波の伝ば速度は、図 5 に示すような 1 回の実験で得られる撮影時間の異なる 2 枚の写真より流路中心部における衝撃波の移動距離を求め計算した。図 7 の縦軸は測定した伝ば速度を磁場を印加していない場合、すなわち発電を行っていない場合の測定部における衝撃波の平均伝ば速度 $U_{s0}=100\ \text{m/s}$ で無次元化した U_s/U_{s0} である。図 7 中の丸印はそれぞれの場合の平値値である。図 7 より磁場を印加した場合の衝撃波の伝ば速度はいずれも磁場を印加していないときに比べて速度が増加している。本実験では $X=135\ \text{mm}$ での測定において、測定部下流の絞りより発生する衝撃波の強さは負荷抵抗に関係なく

一定であったことから、この衝撃波の伝ば速度の増加は衝撃波前後に作用するローレンツ力のためであると考えられる。すなわちローレンツ力は流れを減速させる方向に働くため主流が減速され、このため磁場を印加した場合の衝撃波の伝ば速度は磁場を印加しない場合に比べて約 5~10% 速くなっている。

3.2 衝撃波と境界層の干渉 まず発電測定部内を伝ばする衝撃波と測定部側壁面上に発達した境界層との干渉を調べる。一般に超音速流れにおける定在衝撃波と境界層の干渉現象において、圧力波形上の変曲点ははく離点を示すとも言われ、この圧力上昇が始まる点から変曲点までの距離は Separation length（以下、はく離距離）と呼ばれており⁽¹³⁾、このはく離距離は衝撃波と境界層の干渉の度合いを示すと考えられている。本実験の場合、測定部の衝撃波の伝ば速度は主流の流速に比べ十分に小さいので、衝撃波固定座標系において流れは定常流として取扱うことができることから、同様にこのはく離距離を測定できる。そこで図 4 に示したような側壁面上での圧力分布を利用し、図 8 の図中に示す圧力波形上の急な圧力上昇を示す点 a から変曲点 b（横軸は伝ばする衝撃波固定の座標系から見た無次元距離 $U_s t_s / D$ (t_s : 測定部を衝撃波が通過したときからの時間, D : 流路の等価直径 $26.7\ \text{mm}$), 縦軸は圧力) までの無次元距離 L を測定した。測定した無次元距離 L （すなわちのはく離距離）と磁場を印加しないとき ($B=0\ \text{T}$) の圧力上昇点から変曲点までの無次元距離 $L_0 (=0.34)$ との比 L/L_0 の負荷抵抗 R に対する変化を図 8 に示す。図よりわかるように無次元距離 L はいずれも磁場を印加していない場合、すなわち発電を行っていない場合より長くなっている。これは発電を行っている場合、流体中を流れる電流は側壁上の境界層、特に温度が低い温度境界層の中は電気伝導率が小さいため流れにくくなることから、ローレンツ力はおもに主流に作用し、主流を減速させる。その結果、境界層内の速度分布が変化し、無次元距離 L が

図 6 MHD 発電流路内の代表的シュリーレン写真
(スリット横切り)
($t_r=0.5\ \text{ms}$, $B=1.0\ \text{T}$, $R=100\ \Omega$)

図 7 発電流路内を伝ばする衝撃波の速度

長くなると考えられる。

次に MHD 発電機の発電特性に及ぼす発電流路に存在する衝撃波の影響について考察する。まず図 8 と同じく発電流路の流れを伝ば衝撃波から見て定常と仮定し、衝撃波ごく近傍の出力電流密度の変化の一例を図 9 に示す。測定位置 $X=65\text{ mm}$ 、負荷抵抗 $R=100\ \Omega$ 、印加磁束密度 $B=1.0\text{ T}$ で、図 9 の横軸は前述の無次元距離 U_{st}/D 、縦軸は電流密度 J である。また図 9 には参考のため同じ位置で測定した流路側壁での圧力分布と、図 9 の下に可視化写真より得た電極面上での流れ場の模式図を示している。図 9 よりわかるように、衝撃波上流の超音速 MHD 流れにおいて出力電流密度はほぼ一定の値をとるが、衝撃波の前枝の付近より減少し始め、主流の垂直衝撃波の通過にともないさらに急激な減少を示し、その後 $U_{st}/D > 1$ において緩やかに上昇を始めていることがわかる。これは圧力分布や図下の模式図からもわかるように、電極面上における衝撃波と境界層の影響と考えられる。すなわち、干渉による前枝衝撃波直後より ($U_{st}/D < -0.2$) 境界層が厚くなり、電極面上での見掛けの電気伝導率が減少

図 8 圧力上昇から変曲点までの距離の変化

図 9 衝撃波近傍における出力電流密度の変化

し電流密度が減少する。さらに $0 < U_{st}/D < 1.0$ の範囲においては離泡が形成されていることから、壁面近傍の冷たく電気伝導率の低い流れの厚い層が電極上を覆うため、見掛けの電気伝導率が大きく減少し、その結果、出力電流密度は大きく低下すると考えられる。さらにその後、境界層は再付着し主流の亜音速部において境界層はしだいに厚くなり、主流との混合の結果、電極面上付近の電気伝導率も上昇し出力電流が増加していくと考えられる。図 6 において撮影された境界層は速度境界層に相当し電気伝導率に直接関係する温度境界層はそれよりも大きく、磁場の印加により温度境界層が大きくなることから⁽¹⁴⁾ 衝撃波と境界層の干渉の発電特性に与える影響は衝撃波近傍において大きいと言える。

最後に、発電流路内に衝撃波が存在するときの衝撃波の上流域と下流域における発電特性を考察する。そこで、本実験では発電特性の測定位置を $X=130\text{ mm}$ の電極とし、衝撃波の上流域、すなわち超音速域と下流域（はく離泡より下流、 $U_{st}/D > 2.0$ であり、衝撃波と境界層の干渉の影響はなく、境界層は準定常と考えられる）における出力電流密度と電場を測定した。その結果を図 10 に示す。磁束密度は $B=1.0\text{ T}$ の一定であり、負荷抵抗は $R=10, 100, 1000\ \Omega$ の 3 種類である。図 10 中の白丸は衝撃波上流の、黒丸は下流の実験値を示す。図 10 より衝撃波上流（超音速域）での電流密度は負荷抵抗の増加とともに増加の傾向を示し、負荷抵抗が大きな場合はほぼ一定の傾向を示しているのに対し、衝撃波下流（亜音速域）では負荷抵抗が増加すると逆に減少を示している。また本実験範囲ではすべて衝撃波の上流域に比べ下流域の出力電流密度は減少している。

次に衝撃波による出力電流密度の変化に対して考察する。そこで、衝撃波の前後において流れの境界層の

図 10 MHD 発電流路における衝撃波を伴う流れの電場と電流密度

影響を考えなければ、電流密度は近似的に、

$$\frac{J_d}{J_u} \approx \frac{\sigma_d u_d B (1 - K_d)}{\sigma_u u_u B (1 - K_u)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 σ は電気伝導率、 ρ は気体の密度、 K は負荷率⁽¹⁵⁾、添字の u, d はそれぞれ衝撃波の上流と下流の状態を示す。 u は流れの流速で、 u_u は光学観察より測定した流れのマッハ数と等エントロピーの関係を用いて計算し、さらに u_d はランキン・ユゴニオ関係より計算する。まず、衝撃波の通過により気体温度は上昇し、電子温度と気体温度が等しい平衡状態を仮定し、式(1)を用いて計算すると電流密度の比は $J_d/J_u \cong 125$ となり、図 10 の実験値とほとんど一致しない。そこで、衝撃波前後において流れは電子温度一定の凍結流れと仮定すると、電気伝導率 σ は密度に比例して上昇し、ランキン・ユゴニオ関係から $\rho_d/\rho_u = u_u/u_d$ であるから、式(1)は

$$\frac{J_d}{J_u} \approx \frac{(1 - K_d)}{(1 - K_u)} \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで、負荷率を衝撃波上流と下流の実験値を用いて計算すると、負荷抵抗によらず $J_d/J_u \cong 1.0$ で、この場合も図 10 の実験値と一致しない。いずれの場合も、境界層の影響を考えない場合にはうまく実験結果を説明できなかった。したがって、図 9 に示したような衝撃波と境界層の干渉現象から離れた流れ場においても衝撃波の下流の亜音速域における出力電流密度は境界層によって大きな影響があると考えられる。そのため、境界層内の温度分布などを考慮した解析を今後進めていく必要がある。

4. 結 論

一定断面積の超音速 MHD 発電流路内での衝撃波のふるまいや、衝撃波と境界層の干渉現象が発電特性に与える影響を実験的に調べた。得られた結果を要約

すると以下のとおりである。

(1) 発電流路内を伝ばする衝撃波をカラーシュリーレン法を用いて光学観察した結果、流路内の衝撃波が境界層との干渉により分枝し、さらに境界層のはく離が形成されていることが観察された。

(2) ローレンツ力により主流や境界層内の速度が減速することにより、発電流路内を伝ばする衝撃波の速度は増加し、壁面上の圧力分布も変化する。

(3) 出力電流密度は衝撃波の通過により衝撃波直後のごく近傍で大きく減少し、その後上昇する。これは衝撃波と境界層の干渉により生じたはく離泡により、電極面上を温度が低く電気伝導率の低い流れが覆うことにより、見掛けの電気伝導率が減少するためである。

(4) 衝撃波を伴う MHD 発電流路では衝撃波の通過により、衝撃波の上流域に対し下流域の出力電流はわずかに減少する。

文 献

- (1) Louis, J. F., ほか 2 名, *Phys. Fluid*, **7**-3(1964), 362.
- (2) Ikeda, S., ほか 4 名, *AIAA J.*, **14**-11(1976), 1655.
- (3) Roy, G. D. and Wu, Y. C. L., *AIAA J.*, **13**-9(1975), 1149.
- (4) 乾・ほか 3 名, 電気学会論文誌, **111**-6, B(1991), 675.
- (5) Merck, W. F. H. and Massee, P., *Proc. 22nd Symp. Eng. Aspects MHD*, (1984), 533.
- (6) 石川・卯本, 電気学会論文誌, **105**-3, B(1985), 296.
- (7) 角田・ほか 6 名, 機論, **58**-550, B(1992), 1769.
- (8) Hara, T. and Umoto, T., *AIAA J.*, **22**-5(1984), 595.
- (9) Wilson, D. R. and Lee, Y. M., *J. Energy*, **7**-6(1983), 644.
- (10) 平原・ほか 3 名, 機論, **55**-515, B(1989), 1785.
- (11) 青木・ほか 3 名, 可視化情報, **11**-Suppl. 2(1991), 227.
- (12) 生井・井上, 粘性流体の力学, (1978), 107, 理工学社.
- (13) Delery, J. M., *Prog. Aerosp. Sci.*, **22**(1985), 209.
- (14) 青木・ほか 9 名, 第 9 回エネルギー利用と直接発電シンポジウム講論集, (1987), 173.
- (15) 赤崎・ほか 3 名, プラズマ工学の基礎, (1984), 156, 産業図書.