クローズドサイクルディスク形MHD発電機の性能に与える背圧の影響

正員 末包 哲也 (東工大) 非会員 萩田 貴幸 (東工大)
 学生員 前田 哲彦 (東工大) 正員 奥野 喜裕 (東工大)
 正員 梶島 成治 (東工大)

Effects of Back Pressure on the Performance of a Disk MHD Generator

Tetsuya Suekane, Member, Takayuki Hagita, Non-member, Tetsuhiko Maeda, Student member,
 Yoshihiro Okuno, Member, and Sigeharu Kabashima, Member (Tokyo Institute of Technology)

Properties of flow field with and without the MHD interaction in a disk closed cycle MHD generator and the effect of back pressure on the performance of the generator are discussed by performing two-dimensional numerical simulations. Without the MHD interaction, for sufficiently low back pressures, an isentropic flow is realized throughout the channel except for the boundary layers. For high back pressures as observed in experiments, pseudo shock waves arise in the channel. The shock system is attached to one wall, and on the other wall a large separation region is observed. The MHD interaction makes the flow field tend to be symmetric. Higher back pressures result in the low Hall parameter and low gas velocity, as a result, the generator performance tends to be low due to the low electro-motive force.

キーワード: ディスク形CCMHD発電機、擬似衝撃波、コアンダ効果、背圧

1. はじめに

ディスク形CCMHD発電機において、作動流体は発電機前後の圧力差によって駆動力を受けて流れている。このようなディスク形CCMHD発電機においては発電チャンネル背後の圧力(背圧)が上昇することにより、発電機内の静圧が上昇し発電性能に影響を及ぼす。ブローダウン装置Fuji-1を用いた実験において、MHDチャンネル出口のやや下流部で発電機高さ方向の全圧分布が計測されている⁽¹⁾。MHD相互作用の存在しない非発電時にはチャンネル高さ方向の全圧分布が大きく偏り、発電時にはそのような偏りがMHD相互作用により小さくなることが観測されている。また、非発電時のディスク形流路内の流れ場に対して、3次元計算による考察がなされている⁽²⁾。

高エンタルピー抽出実験が衝撃波管装置を用いて行われ、高断熱効率の実証が、次なる研究課題として注目を集めるようになってきている。断熱効率を数値的に予測するためには、超音速ノズル、MHDチャンネル、ディスク形ディフューザを含み、背圧の影響を考慮した数値計算手法を開発する必要がある。

本論文では、これらの数値計算手法の開発の第一段階として、ディフューザは計算領域に含めずに、MHDチャ

ネルに対して、 r - z 次元数値シミュレーションを行い、クローズドサイクルディスク形MHD発電機の発電時と非発電時の流れの特性と発電性能に与える背圧の影響について検討を行う。

図1 計算領域と座標系

Fig. 1. Calculation region and coordinate system.

2. 基礎方程式と解析手法

実験との比較を行うために、計算の対象としてFuji-1装置に用いられているDisk-F4チャンネルを用いる⁽³⁾。2

温度モデルを用いて MHD プラズマを記述する。図 1 に示すように、座標系を設定し、円周方向の均一性を仮定する。ディフューザは含めずに、スロットからカソードの後流端までを計算領域とした。

(2.1) 基礎方程式

(1) 重粒子形方程式 重粒子の連続の式、運動量の式、エネルギーの式は以下のように表される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{\rho} - \frac{1}{\rho} (\nabla \cdot \Pi) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \rho (c_v T + \frac{1}{2} |\mathbf{u}|^2)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \left(c_v T + \frac{1}{2} |\mathbf{u}|^2 \right) \mathbf{u} \right] = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} - \nabla \cdot \mathbf{q} + \nabla \cdot (\Pi \cdot \mathbf{u}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ρ は密度、 $\mathbf{u}$ はガス流速ベクトル、 T はガス温度、 c_v は定積比熱、 $\mathbf{j}$ は電流密度ベクトル、 Π は応力テンソルを表す。

(2) 電子系方程式 粒子保存の式、一般化された Ohm の式、エネルギーの式は以下のように表される。

$$\frac{\partial n_i^+}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i^+ \mathbf{u}) = \dot{n}_i^+ \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\mathbf{j} + \frac{\beta}{B} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{|\mathbf{j}|^2}{\sigma} = \frac{3}{2} \delta n_e m_e k (T_e - T) \sum_j \frac{\nu_j}{m_j} + \sum_i \dot{n}_i^+ \left(\frac{3}{2} k T_e + \epsilon_i \right) \quad (6)$$

本研究では、シード原子のみの電離を仮定しているので、 n_i^+ はセシウムイオン数密度であり、 $\dot{n}_i^+$ はセシウムイオンの生成率を表す。

(2.2) 解析手法 重粒子形方程式及び電離の式は CIP 法⁽⁴⁾を用い、一般化されたオームの式はマクスウェル方程式と組み合わせて有限要素法を用いて離散化した。なお、計算手法の詳細については参考文献⁽⁵⁾を参照されたい。乱流モデルには、剥離した流れにも適用できる Baldwin - Lomax モデルを用いた⁽⁶⁾。メッシュへの依存性が小さくなるように、半径方向に、60 メッシュ、高さ方向に 103 メッシュをとり計算を行った。時間ステップはクーラン数を 0.1 として計算した。多くの場合、時間刻みは $0.01 \mu\text{s}$ オーダーの値となった。

また、本研究では発電機出口の流出境界条件に Kentzer によって提案された特性曲線法を用いた⁽⁷⁾。計算領域出口における背圧を指定し、他の物理量は特性方程式から決定される。

3. 発電時と非発電時の流れの特性

(3.1) これまでの研究のまとめ MHD 相互作用がない場合に対する 3 次元数値計算により、図 2 に示すような流れの構造が推測されている⁽²⁾。また、ブローダウン

装置を用いた実験により、非発電時の発電機出口での全圧分布は発電回路高さ方向に大きく偏り、全圧のピークがある側の壁面（偏流側）では、壁面静圧が半径方向に上昇下降を繰り返すことが指摘されている⁽¹⁾。

ディスク形発電機のような内部流れにおいては、壁面上に発達する境界層と衝撃波の干渉により擬似衝撃波が発生する。この干渉によって境界層近くで衝撃波が分岐し斜め衝撃波が形成される。この干渉が激しい場合、斜め衝撃波により境界層が剥離し、流体は再び加速され、第 1 の衝撃波の下流にさらに第 2、第 3 の衝撃波が表れる。このため、偏流側では、静圧の半径方向への増加と減少の繰り返しが観測される。また、大きな剥離領域が形成されると、発電機の高さ方向に圧力勾配が生じ、コアンダ効果により、このような流れ場が維持されると推察されている。

非発電時に対して、MHD 相互作用の存在する場合（発電時）の全圧分布は発電回路高さ方向の全圧分布の偏りが小さくなることが実験的に観測されている⁽¹⁾。このような発電時と非発電時の流れについて r-z2 次元数値シミュレーションを用いて考察を行う。

図 2 ディスク形 MHD 発電機内の擬似衝撃波の構造
Fig. 2. Structure of pseudo-shock waves in a disk MHD channel.

(3.2) 計算条件 計算は図 1 で表されるような r-z 平面内のスロットからカソード下流端まで、上壁から下壁までの領域について行った。表 1 に計算条件を示す。それぞれの条件に対して、発電時、非発電時の計算を行った。ただし、背圧が $9.5 \times 10^{-4} \text{MPa}$ の場合の発電時の計算は行っていない。

(3.3) 計算結果と考察

(1) MHD 相互作用のない場合（非発電時） はじめに、非発電時の流れに与える背圧の影響について検討を行う。初期条件として、チャンネル内の流体諸量が全て発電機内で一定であるとし、流速が 0 で、静圧は背圧と等しいとした。非発電時に Disk-F4 チャネル形状で十分低い背圧の $9.5 \times 10^{-4} \text{MPa}$ を与えた場合のマッハ数分布と静圧分布を図 3、4 に示す。なお、静圧 p は対数スケールで表している。境界層を除いて発電機内全域で等エントロピー流れに近い流れが維持でき、マッハ数は発電機出口において約 6 に達している。得られた結果は時間的に定常な流れである。このように十分に低い背圧に対して、

表 1 計算条件

Table 1. Calculation conditions

チャネル形状	Disk F-4 channel
作動流体	Ar + Cs
シード率 $S.F.$	2.0×10^{-4}
壁面温度 T_w [K]	500
負荷抵抗 R_L [Ω]	1.0
入口境界条件	
激み点圧力 P_0 [MPa]	0.45
激み点温度 T_0 [K]	2000
電子温度 T_e [K]	3000
出口境界条件	
背圧 p_{exit} [MPa]	2.0×10^{-2} 9.5×10^{-4}

図 3 十分に背圧が低い場合の非発電時のマッハ数分布 ($p_{exit} = 9.5 \times 10^{-4}$ MPa)

Fig. 3. Mach number distribution without MHD interaction for the lower back pressure of 9.5×10^{-4} MPa.

図 4 十分に背圧が低い場合の非発電時の静圧分布 ($p_{exit} = 9.5 \times 10^{-4}$ MPa)

Fig. 4. Static pressure distribution without MHD interaction for the lower back pressure of 9.5×10^{-4} MPa.

流れは発電機内で発電回路高さ方向に偏りを起こさない。またこの条件よりも背圧を低くすると出口で過膨張を起こすような結果が得られる。このような過膨張は実際の流れ場では起きず、実際の発電機出口ではここで用いた値よりも背圧が低下することはない。

次にFuji-1のDisk F-4チャネルの発電機出口で実際に測定される程度の値である 2.0×10^{-2} MPaの背圧に対して計算を行った。マッハ数分布と静圧分布を図5、6に示す。ここに示した結果は時間的に定常な流れ場である。発電機中流において、擬似衝撃波が発生し、その擬似衝

図 5 背圧が高い場合の非発電時のマッハ数分布 ($p_{exit} = 2.0 \times 10^{-2}$ MPa)

Fig. 5. Mach number distribution without MHD interaction for the higher back pressure of 2.0×10^{-2} MPa.

図 6 背圧が高い場合の非発電時の静圧分布 ($p_{exit} = 2.0 \times 10^{-2}$ MPa)

Fig. 6. Static pressure distribution without MHD interaction for the higher back pressure of 2.0×10^{-2} MPa.

撃波背後で、偏流が発生している。偏流側領域では擬似衝撃波により半径方向に静圧が上昇下降を繰り返して、剥離側領域ではほぼ一定の静圧になっている。また、擬似衝撃波背後で剥離側の静圧に対して、マッハ数が高い偏流側の静圧が低く、この圧力勾配により、偏流が維持されていることが分かる。このときの半径方向壁面静圧を図7に偏流側と剥離側について実験値とともに示す。偏流側では、衝撃波により静圧の上昇、下降を繰り返して、剥離側では静圧がほぼ一定に保たれていて、計算結果は実験と定性的に一致している。

Fuji-1装置で用いられている発電機はスロートの前にあるコーン部、導入管などが非対称であり、これが流れの非対称性を引き起こす原因になりうる。一方、ここでの計算は完全に対称な条件で行っているにもかかわらず非対称な流れ場が誘起されている。比較的高い背圧で運転した場合、どちらかの壁に偏流した流れは安定であり、実験でも完全に対象に設計を行っても偏流現象が発生する可能性がある。なお、Carrollらによって等断面矩形ダクト内流れに対して、同様な現象が観察されている⁽⁸⁾。

(2) MHD相互作用のある場合(発電時) 前述の、MHD相互作用のない場合(非発電時)において、 2.0×10^{-2} MPaに対して得られた偏流の存在する計算結果を流体の初期条件として発電時の計算を行った。発電開始から1msec後のマッハ数及び静圧分布を図8、9に示す。非発電時に現れていた偏流が解消されている。半径方向速度 u_r が速い領域では、誘起されるファラデー電流密度 j_θ が大きくなり、流体に作用するローレンツ力 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ が増加する。このように、流速の早い部分ほど大きなローレ

(a) 偏流側

(b) 剥離側

図 7 非発電時の半径方向静圧分布 ($p_{exit} = 2.0 \times 10^{-2}$ MPa)

Fig. 7. Static pressure distribution along r-direction without MHD interaction for the higher back pressure of 2.0×10^{-2} MPa.

図 8 発電時のマッハ数分布 ($p_{exit} = 2.0 \times 10^{-2}$ MPa)

Fig. 8. Mach number distribution with MHD interaction for the back pressure of 2.0×10^{-2} MPa.

図 9 発電時の静圧分布 ($p_{exit} = 2.0 \times 10^{-2}$ MPa)

ンツ力が作用することにより、発電機内の流速の発電機の高さ方向の差が少なくなり、流れの発電機高さ方向の分布は偏りが小さくなる。

(a) 非発電時

(b) 発電時

図 10 発電機高さ方向の全圧分布

Fig. 10. Total pressure distributions along z-direction

発電流路出口における発電機高さ方向の全圧分布の様子を非発電時及び発電時に対して図 10 に実験結果とともに示す。非発電時の場合、偏流に伴う全圧の非対称な分布が計算結果でも現れていて、実験結果と定性的に一致している。また、MHD 相互作用に伴い偏った全圧分布が一様になる点も再現できている。

4. 発電出力に与える背圧の影響

MHD 発電機は上流側と下流側の圧力差によって駆動されている。下流側の圧力である背圧が高いと発電機内部に静圧上昇が起き、半径方向流速の低下を招き、発電機性能に影響を与えると考えられる。この節では、背圧が発電機性能に与える影響を数値シミュレーションを用いて検討した。

〈4.1〉 計算条件と境界条件 前節において、MHD 相互作用により発電時には発電機高さ方向の偏りが少ないことが示されたので計算負荷の軽減のために発電機高さ方向については全ての物理量が対称であると仮定して上面のみを計算領域とした。計算条件を表 2 に記す。

〈4.2〉 計算結果と考察 さまざまな負荷抵抗、シード率に対して得られた、エンタルピー抽出率に与える背圧の影響を図 11 に示す。同じシード率、同じ負荷の場合、

表 2 計算条件
Table 2. Calculation conditions

チャネル形状	Disk F-4 channel
作動流体	Ar + Cs
シード率 $S.F.$	$2.0, 3.0 \times 10^{-4}$
壁面温度 T_w [K]	500
負荷抵抗 R_L [Ω]	0.5, 1.0
入口境界条件	
激み点圧力 P_0 [MPa]	0.45
激み点温度 T_0 [K]	2000
電子温度 T_e [K]	3000
出口境界条件	
背圧 p_{exit} [MPa]	$0.5 \sim 4.0 \times 10^{-2}$

背圧の上昇に伴って、エンタルピー抽出率が低下する傾向が示されている。

図 11 さまざまな負荷抵抗及びシード率に対して得られたエンタルピー抽出率に与える背圧の影響

Fig. 11. Effects of back pressure on enthalpy extrusion ratio for various load resistances and seed fractions.

次に、シード率 2.0×10^{-4} 、負荷抵抗 0.5Ω の場合に対して得られた、半径方向の静圧、ホールパラメータ、流速分布に与える背圧の影響を図 12～図 14 に示す。

背圧が 4.0×10^{-2} MPa と比較的高い場合、発電路入り口に顕著な静圧上昇と流速の低下が見られる。この静圧の上昇に伴って、ホールパラメータも減少している。このように、ホールパラメータ β と流速 u_r のが低下するために、起電力 $\beta u_r B$ が低下し、エンタルピー抽出率が低下する。

背圧が 2.0×10^{-2} MPa 以下の場合、発電路入り口における顕著な静圧の上昇は見られず、発電機内諸量の違いは発電機下流部でしか見られない。そのためエンタルピー抽出率は大きな差異がない。

また、背圧を 5.0×10^{-3} MPa より下げた計算も行ったが、出口で過膨張になる非物理的な解になった。つまり、

図 12 半径方向のホールパラメータ分布に与える背圧の影響 ($S.F. = 2.0 \times 10^{-4}$, $R_L = 0.5\Omega$)

Fig. 12. Radial distributions of Hall parameter ($S.F. = 2.0 \times 10^{-4}$, $R_L = 0.5\Omega$).

図 13 半径方向流速分布に与える背圧の影響 ($S.F. = 2.0 \times 10^{-4}$, $R_L = 0.5\Omega$)

Fig. 13. Radial velocity distributions ($S.F. = 2.0 \times 10^{-4}$, $R_L = 0.5\Omega$).

図 14 半径方向の静圧分布に与える背圧の影響 ($S.F. = 2.0 \times 10^{-4}$, $R_L = 0.5\Omega$)

Fig. 14. Static pressure distributions ($S.F. = 2.0 \times 10^{-4}$, $R_L = 0.5\Omega$)

シード率 2.0×10^{-4} で負荷抵抗 0.5Ω のときは発電機出口での背圧は 5.0×10^{-3} MPa より低い値をとることができず、このときに発電機内の作動流体は最大の圧力差を受けていることになる。

以上のように、本論文ではディフューザ部を含めずに背圧の発電性能に与える影響について検討を行った。今後、ディフューザ部を含めた検討が必要である。また、ディスク形ディフューザの設計指針を得ることも、今後の重要な課題である。

5. まとめ

非発電時と発電時の流れの特性、および背圧が発電出力に与える影響を数値計算により検討した。

非発電時の場合、背圧が十分に低いと境界層を除いたほぼ全域で等エントロピーに近い流れを実現でき、偏流は発生しない。Fuji-1 実験程度まで背圧が上昇すると擬似衝撃波により流体は減速され、大きな剥離渦と偏流が発生する。また、このような偏流が安定であり、対称な流路においても発生する可能性があることが示唆された。

発電時の場合、流速の速いほど大きなローレンツ力が作用するために、流れは発電機高さ方向に均一になる。十分に背圧が低い場合、発電流路内に顕著な静圧上昇は発生せず、高いエンタルピー抽出率が得られるが、背圧が増加すると発電流路入口に顕著な静圧上昇が発生し、ホールパラメーターと流速の低下により、発電出力が減少し、発電機性能の低下につながる。

(平成9年11月12日受付、平成10年1月30日再受付)

文 献

- (1) Y. Seki, et al., "Asymmetrical Flow Behavior in Disk MHD Generator," Proc. of 12th International Conference on MHD Power Generation, IV.21 pp.729-735, 1996
- (2) 瀬谷典繁, ほか, "ディスク形発電機内の放射状超音速流れの挙動," 機械学会論文集 (B編), 61巻592号, pp.4312-4318, 1995
- (3) Y. Okuno, et al., "Closed Cycle MHD Power Generation Experiments with FUJI-1 Blow-Down Facility," Proc. of 12th International Conference on MHD Power Generation, OR1-3 pp.155-164, 1996
- (4) Takewaki, H. and Yabe, T., "The Cubic-Interpolated Pseudo Particle (CIP) Method: Application to Non-linear and Multi-dimensional Hyperbolic Equations," *J. Comput. Phys.* Vol.70, pp.355, 1987.
- (5) Suekane, T., et al., "The Effect of Boundary Layer Phenomena on the Performance of Disk CCMHD Generator," *IEEE Trans. Plasma Science*, Vol.23, No.1, pp.97-102, 1995
- (6) Baldwin, B. and Lomax, H., "Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," *AIAA Paper*, AIAA-78-257, 1978
- (7) Kentzer, C.P., "Discretization of Boundary Condition on Moving Discontinuities," Proceeding of 2nd International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, *Lecture Notes in Physics*, pp.108-113, 8, 1970

- (8) Carroll, B.F. and Dutton, J.C., "Characteristics of Multiple Shock Wave/Turbulent Boundary - Layer Interactions in Rectangular Ducts," *J. Propulsion*, Vol.6, No.2, pp.186-193, 1990

末包 哲也 (正員) 昭和43年1月8日生まれ。平成2年3月東京工業大学工学部機械物理工学科卒業。平成6年3月同大学大学院総合理工学研究科エネルギー科学専攻博士課程修了。同年4月より、同大学助手、現在に至る。工学博士。主として、クローズドサイクルMHD発電、プラズマ工学に関する研究に従事。E-mail: tsuekane@es.titech.ac.jp

萩田 貴幸 (非会員) 昭和48年2月3日生まれ。平成9年3月東京工業大学総合理工学研究科創造エネルギー専攻修士課程修了。平成9年4月、三菱重工業(株)入社、現在に至る。

前田 哲彦 (学生員) 昭和46年7月23日生まれ。平成6年3月東京工業大学理学部応用物理学科卒業。平成8年3月同大学大学院総合理工学研究科エネルギー科学専攻修士課程修了。同年4月同大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻博士課程に進学、現在に至る。CCMHD発電の研究に従事。

奥野 喜裕 (正員) 昭和34年5月4日生まれ。昭和57年3月九州工業大学電気工学科卒業。昭和62年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科エネルギー科学専攻博士課程修了。同年6月長崎大学助手、63年4月佐賀大学講師、平成元年4月同助教授、6年4月東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授、現在に至る。主として、電磁流体力学、プラズマ工学に関する研究に従事。

栴島 成治 (正員) 昭和14年7月30日生。昭和39年3月九州大学大学院修士課程修了。同年4月東京工業大学理学部助手、55年2月同大学院総合理工学研究科エネルギー科学専攻助教授、63年4月同教授、現在に至る。主として、非平衡MHD発電、プラズマ物理に関する研究に従事。