亜音速非平衡ディスク形 MHD 発電機における シード率変動時の応答特性

学生員 高 奈 秀 匡 (東京工業大学)

学生員 名 原 啓 博 (東京工業大学)

正 員 奥 野 喜 裕 (東京工業大学)

正 員 山 岬 裕 之 (東京工業大学)

Response of a Nonequilibrium Subsonic Disk MHD Generator to the Fluctuation of Seed Fraction

Hidemasa Takana, Student Member, Yoshihiro Nabara, Student Member, Yoshihiro Okuno, Member,
Hiroyuki Yamasaki, Member (Tokyo Institute of Technology)

The response of a nonequilibrium subsonic disk MHD generator to the fluctuation of seed fraction was examined with time dependent quasi-one-dimensional numerical simulations. When the seed fraction changes to a higher value step-likely, a temporary rise of the enthalpy extraction ratio is caused, and vice versa. For the pulse-like variation, the enthalpy extraction ratio settles after several hundreds of micro seconds, which can be determined by the response time of the MHD flow with reflected waves. For the sinusoidal fluctuation with the period of over $\sim 500\mu\text{sec}$, the flow can follow the change of the seed fraction, and the enthalpy extraction ratio fluctuates largely. With the period shorter than $\sim 500\mu\text{sec}$, the fluctuation of the enthalpy extraction ratio is reduced since the flow cannot respond. If the seed fraction fluctuates randomly, the time averaged enthalpy extraction ratio remains almost the ideal value, although the peak to peak value can increase.

キーワード：非平衡 MHD 発電，ディスク形発電機，亜音速準一次元流れ，シード率変動，応答特性

1. ま え が き

非平衡 MHD 発電に関する研究の中で，亜音速流を用いる発電機では，ディフューザ部において低い全圧損失で圧力回復が可能であるという大きな特長があることから，これまでいくつか数値シミュレーションが行なわれ，その実現可能性および性能が検討されてきた。まず，非定常準一次元計算により，電流-電圧特性⁽¹⁾や部分負荷運転⁽²⁾など基本的な動作特性が調べられた。続いて，非定常 $r-z$ 二次元計算が行われ，境界層の発達，はく離などの現象が発電性能へ与える影響が調べられた⁽³⁾。さらに，非平衡プラズマの振る舞いと流体の流れ構造が非定常三次元計算により検討され⁽⁴⁾，低負荷抵抗における流れのチョーク現象や，高シード率における電離不安定現象などが明らかにされた。

このように，亜音速発電機の準定常的な動作特性は調べられているが，その過渡的な動作特性に着目した検討は十分にはなされていない。亜音速流れにおいては，超音速流れの場合とは異なり，発電機内で生じた流体力学的変動が，

下流のみならず上流にも伝搬する。したがって，このような現象が発電性能に及ぼす影響を調べることは重要である。最近，その一つとして，負荷抵抗値を瞬時に切替えた場合の発電機内のプラズマおよび流れの過渡現象が非定常準一次元計算により調べられた⁽⁵⁾。その結果，負荷抵抗の急激な変化に伴い，アノードおよびカソード付近において流体力学的変動が誘発され，変動は発電機内を伝搬，反射するが，定常な放電が維持される場合には減衰し，発電機は安定に動作することが確認された。

実際の運転を考えた場合，このような急激な負荷変化の他に，シード率の変化もしくは変動が起こり得る。事実，超音速発電機でのこれまでの実験においてもシード率が時間的に変動することが示唆されており⁽⁶⁾，このようなシード率の揺らぎが亜音速発電機の性能に与える影響を調べておく必要があると考えられる。

そこで本研究では，非定常準一次元計算により，シード率が急激に変化する場合の亜音速非平衡ディスク形 MHD 発電機の過渡応答と発電機入口での連続的なシード率変動が発電機の性能に与える影響を明らかにすることを目的と

する。後に述べるように、流体変動の発電流路入口、出口での透過・反射を考慮して、本研究では、ノズル入口からディフューザ出口までを含めた発電機全体を対象として流体力学方程式を解いた。

2. 基礎方程式と計算条件

〈2・1〉 基礎方程式と計算手法 本研究では非平衡プラズマを記述する方程式として流体近似による2温度モデルのMHD方程式⁽⁷⁾を用い、これにMaxwell方程式と状態方程式を併せて解いた。以下に、ここで用いた電子系及び重粒子系の方程式を示す。なお、変数などの記号は一般に使用されているものを用いた⁽⁷⁾。

(1) 電子系方程式

(i) 電離式

$$\frac{\partial(n_i^+ A)}{\partial t} + u_r \frac{\partial(n_i^+ A)}{\partial r} = n_i^+ - n_i^+ A \frac{\partial u_r}{\partial r} \dots\dots (1)$$

$$n_e = \sum_i n_i^+, \quad (i = \text{Seed}, \text{Noble Gas})$$

(ii) 一般化されたオームの式

$$\left. \begin{aligned} j_r &= \frac{\sigma}{1 + \beta^2} (E_r + \beta u_r B + u_\theta B) \\ j_\theta &= \frac{\sigma}{1 + \beta^2} (\beta E_r - u_r B + \beta u_\theta B) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

(iii) エネルギーの式

$$\frac{j_r^2 + j_\theta^2}{\sigma} = 3n_e k(T_e - T_g) \sum_h \frac{m_e}{m_h} \nu_{eh} + \sum_i n_i^+ \left(\frac{3}{2} k T_e + \epsilon_i \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$(h = \text{Seed}, \text{Noble Gas}, \text{Ion})$$

(2) 重粒子系方程式

(i) 連続の式

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + u_r \frac{\partial(\rho A)}{\partial r} = -\rho A \frac{\partial u_r}{\partial r} \dots\dots\dots (4)$$

(ii) 運動量の式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} &= \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial r} + j_\theta B + \frac{\rho u_\theta^2}{r} - \dot{P}_L \right) \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} &= -\frac{1}{\rho} \left(j_r B + \frac{\rho u_r u_\theta}{r} \right) \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

(iii) エネルギーの式

$$\frac{\partial(E_s A)}{\partial t} + \frac{\partial[(E_s + p)u_r A]}{\partial r} = A(j_r E_r - \dot{Q}_L) \quad (6)$$

$$E_s = \rho \left(e + \frac{1}{2} |\vec{u}|^2 \right)$$

式(1)の電離生成項(n_i^+)に関しては、電子の衝突による電離と、三体再結合のみを考慮している。電子のエネルギー

表1 亜音速ディスク形発電機の運転条件

Table 1. Working conditions of subsonic disk generator.

作動気体	He - Cs
熱入力	20.00 [MW]
シード率	$1.4 \sim 2.6 \times 10^{-5}$
負荷抵抗	12.0 [Ω]
磁束密度	10.0 [T]
入口全温	2000 [K]
入口出口全圧比	4.0
入口質量流量	1.92 [kg/s]

式(3)においては、放射によるエネルギー損失は衝突損失に比べて2～3桁程小さいことから、本解析では無視している。式(5)、(6)の $\dot{P}_L$ 、 $\dot{Q}_L$ はそれぞれ壁面摩擦による圧力損失項、作動気体から壁面への熱損失項である。本解析においては、壁面摩擦損失項は、電磁流体中における局所壁面摩擦係数を用いてモデル化されており、またエネルギー損失項に関しては、運動量と熱との輸送形態の間に類似性が成立するものと仮定し、作動流体から壁面への熱損失を考慮している。式(1)、(4)～(6)の双曲型方程式を有限差分法の一つであるCIP法⁽⁸⁾を用いて解いた。発電機内の電子温度は非線形代数方程式である(3)式に対して、二分法を用いて求めた。ホール電流値は、(2)式中の電界強度 E_r を発電流路入口から出口まで積分して求めた電圧と外部負荷抵抗との整合条件から求めた。

〈2・2〉 対象とする発電機と計算条件

本研究で対象とする亜音速ディスク形発電機の運転条件および形状をそれぞれ表1及び図1に示す。本研究で対象とする亜音速ディスク形発電機の形状は、まず、電子温度が発電機内の全域で5000K、エンタルピー抽出率が約30%となるように定常準一次元MHD方程式を解くことにより決定した⁽⁹⁾。さらに、発電機入口には設計条件においてノズル入口マッハ数0.5、ノズル出口マッハ数(発電流路入口マッハ数)0.9とする亜音速ノズルを設け、また発電流路出口には、ディフューザを設けた。ディフューザの形状は、発電機の両側に電磁石を配置すること、および出口マッハ数を0.5以下まで減速させることを考え、ディフューザ入口($r=351.8\text{mm}$)から半径位置 $r=389.8\text{mm}$ までは直線的に高さが増加し、それより下流では等高さとなる形状を採用した。

計算に用いた格子点数は半径方向に182点で、格子幅は $\Delta r = 2\text{mm}$ として計算を行った。なお、CFL条件から、時間ステップは $\Delta t = 0.1\mu\text{sec}$ とした。計算領域は、重粒子系諸量に関してはノズル入口からディフューザ出口まで、電子系諸量に関してはアノードからカソードまでとした。発電流路出口1メッシュ分は擬似的にカソードとし、ホール電界 E_r をゼロとした。本来は適当な長さを有する電極領域を含めて解析することが望ましいが、準一次元モデルでは電極への流れ込み現象などをとらえることができないので、本研究では上記の仮定を用いた。なお、ノズル内($r=109.8\text{mm} \sim 147.8\text{mm}$)及びディフューザ

図1 発電機形状

Fig. 1. Shape of generator.

図2 シード率に対するエンタルピー抽出率 (E.E.) および断熱効率 (I.E.)

Fig. 2. Enthalpy extraction ratio and isentropic efficiency against seed fraction.

内 ($r=353.8\text{mm}\sim 471.8\text{mm}$) ではローレンツ力は作用しないものとした。

〈2・3〉境界条件 双曲型方程式の境界条件は、特性曲線法によって与えた。具体的な関係式は文献(3)、(10)を参照されたい。本研究では、重粒子系諸量に対する境界条件は、実際の運転を考えた上でより現実的である条件として、入口境界で質量流量 $\dot{m}$ と全温 T_{0in} を、さらに入口出口全圧比 p_{0in}/p_{0out} を設計値に固定した。それ以外の物理量は、入口境界においては、特性速度 $u_r - a$ (u_r は半径方向流速、 a は音速) に関する式から外挿した値を用いた。また、円周方向流速はゼロとした。出口境界においては、特性速度 u_r 、 $u_r + a$ に関する式から外挿した値を用いた。電子系諸量の入口境界条件は、電子温度を 5000K 一定とし、荷電粒子数密度は入口電子温度でのサハ平衡値で与え、荷電粒子数密度に関する出口境界条件は特性速度 u_r に関する式から外挿した値を用いた。

3. 結果と考察

〈3・1〉ディスク形亜音速発電機の定常動作特性 まず本節では、本発電機の定常動作特性を示す。シード率に対するエンタルピー抽出率と断熱効率を図2に示す。ただし、図2において△、▲印は、発電路で一部超音速となっている

 図3 シード率 2.0×10^{-5} におけるマッハ数、静圧および電子温度の半径方向分布

 Fig. 3. Radial distribution of Mach number, static pressure and electron temperature at the seed fraction of 2.0×10^{-5} .

ることを表している。図2からわかるように、発電路全域において亜音速が保たれている運転条件では、 2.0×10^{-5} のとき断熱効率は74.6%，エンタルピー抽出率は31.8%となっている。なお、本計算では、発電機形状が完全には最適化されていないため、一部超音速となる運転条件で最高の発電性能が得られているが、形状を最適化することにより、全域亜音速に保たれる運転条件において最高の発電性能が得られるような発電機も実現可能であると考えられる。ここでは亜音速発電機を対象としているので、全域亜音速に保たれるシード率条件の中で、最高の発電性能が得られたシード率 2.0×10^{-5} の場合を基準とする。図3に最適シード率 2.0×10^{-5} におけるマッハ数、静圧および電子温度の半径方向分布を示す。この図より、作動流体は、亜音速ノズルによりマッハ数0.9程度まで加速され、デフューザ部において圧力回復し、マッハ数0.4程度まで減速することがわかる。また、発電路内の電子温度は約 $5000\text{K} \sim 6000\text{K}$ ではば一定となっていることがわかる。

以下、最適シード率である 2.0×10^{-5} を基準とし、発電機入口におけるシード率がステップ状およびパルス状に変化する場合の発電機の応答特性と、シード率が連続的に変動する場合の発電性能について議論する。

〈3・2〉発電機入口においてシード率がステップ状に変化する場合の過渡応答 シード率が急激に変化する場合の基本的な物理現象を明らかにすることを目的として、シード率をステップ状に変化させた場合の発電機の過渡応答を調べた。図4は時刻 $t = 0\mu\text{sec}$ においてノズル入口でシード率を 2.0×10^{-5} から 2.2×10^{-5} 、もしくは 1.8×10^{-5} にステップ状に変化させた場合のエンタルピー抽出率および平均マッハ数の経時変化を示したものである。なお、図4中(1)ではシード率は発電機上流部から 2.2 (または 1.8) $\times 10^{-5}$ へと変わり、図4中状態(2)において、シード率は発電路全域において 2.2 (または 1.8) $\times 10^{-5}$ となっている。これらの図より、シード率が高シード率側に変化する場合、エ

図4 ステップ状にシード率が変化する際のエンタルピー抽出率と平均マッハ数の経時変化

Fig.4. Time traces of enthalpy extraction ratio and averaged Mach number at step-like seed fraction change.

図5 ステップ状にシード率が変化する際のマッハ数の経時変化

Fig.5. Time traces of Mach number change (seed fraction: $2.0 \times 10^{-5} \rightarrow 2.2 \times 10^{-5}$).

エンタルピー抽出率は一旦上昇した後、より低い値の定常値に漸近することがわかる。一方、シード率が低シード率側に変わる場合には逆の現象が生じる。なお、後者では図2に示したように、本発電機は一部超音速となる運転条件(シード率 1.8×10^{-5})において最高の発電性能が得られるため、エンタルピー抽出率はより高い値の定常値に漸近する。これらの現象は、電子系に比べ、流体系の時定数が十分に大きいために生じると考えられ、次のように説明することができる。例えば、高シード率側にステップ状に変化させた場合には、発電機上流部より高い電気伝導度を持った流体が流入し、発電機内の電気伝導度は高くなるが、このとき発電流路内の流速は、シード率が 2.2×10^{-5} の場合の定常状態における流速よりも十分に高い値を維持しているため、エンタルピー抽出率は上昇する(図4中状態(1))。しかしながら、ローレンツ力により徐々に流体は減速され、それに起因してエンタルピー抽出率もまた緩やかに減少し、

図6 パルス状にシード率が変化する際のエンタルピー抽出率と平均マッハ数の経時変化(パルス幅 $62.5 \mu\text{sec}$)

Fig.6. Time traces of enthalpy extraction ratio and averaged Mach number at pulse-like seed fraction change(pulse width = $62.5 \mu\text{sec}$).

定常状態に落ち着く(図4中状態(2))。

図5(a)は $0 \mu\text{sec}$ から $600 \mu\text{sec}$ におけるマッハ数変化 $\Delta M_{i,t}$ を示したものである。ここで $\Delta M_{i,t}$ とは、時刻 t 、半径位置 i におけるマッハ数 $M_{i,t}$ と、1つ前の時間ステップのマッハ数 $M_{i,t-1}$ との差を $M_{i,t}$ で割った値 $\Delta M_{i,t} = (M_{i,t} - M_{i,t-1})/M_{i,t}$ である。この操作により、任意の半径位置において、時間的変化が急な部分のみを強調することができる。なお、同図(b)は、任意の位置に仮想粒子をおき、 U_r または $U_r \pm a$ の速度で移動するものとして、追跡計算した結果を示している。なお、シード率の境界は図5(b)において実線で示した u_r の軌跡と一致している。同図より、発電流路入口において急激にシード率が変化することにより($t = 31 \mu\text{sec}$)、局所的なローレンツ力が変動し、それにより流体力学的変動が誘発され、その変動は、 $u_r + a$ の速度で下流へ、 $u_r - a$ の速度で上流へ伝搬する。カソードに達した変動は、一部はそこを透過してディフューザ内に伝搬するが、発電流路内は全域超音速に保たれているため、一部はカソードで反射し発電流路内を上流へ伝搬する。下流に伝搬する変動は、出口境界にて反射波を発生させ、それは $u_r - a$ の速度で上流へ伝搬する。上流へ伝搬する変動はいずれも発電流路内で減衰していることから、シード率が急激に変化する場合にも、発電機は安定に動作することが本計算により確かめられた。ただし、図4に示されているようにエンタルピー抽出率は、 $100 \mu\text{sec}$ 及び $400 \mu\text{sec}$ 付近においてわずかに変動する。これは図5から判断すると、 $100 \mu\text{sec}$ 付近に見られる変動は、カソードにおいて反射する波との干渉によるものであり、 $400 \mu\text{sec}$ 付近に見られる変動は、下流より反射してくる波との干渉によるものであることがわかる。

〈3・3〉 発電機入口におけるシード率がパルス状に変化する場合の過渡応答 図6は、時刻 $t = 0 \mu\text{sec}$ におい

図7 シード率が正弦関数的に変動する場合の時間平均エンタルピー抽出率の周期依存性

Fig. 7. Time averaged enthalpy extraction ratio as a function of period of sinusoidal fluctuation in seed fraction.

図8 シード率がランダムに変動する場合の時間平均エンタルピー抽出率の時間間隔依存性

Fig. 8. Time averaged enthalpy extraction ratio as a function of time interval of random fluctuation in seed fraction.

て 2.2×10^{-5} (+10%), もしくは 1.8×10^{-5} (-10%) のシード率をパルス状に与えた場合のエンタルピー抽出率および平均マッハ数の経時変化を示したものである。ここでパルス幅は、流体の発電流路内滞在時間 ($125 \mu\text{sec}$) に比べて短い $62.5 \mu\text{sec}$ とした。シード率のパルス波は発電機上流より移流し、発電機内を通過する。これらの図より、一時的に高い (低い) シード率が発電機内に流入し (図6中状態(1)(2)(3)), その後、発電機内のシード率は全域において再び 2.0×10^{-5} に戻っているにもかかわらず (図6中状態(4)), エンタルピー抽出率はすぐには回復せず、数百 μsec 要して、多少変動しながらもとの定常状態に戻ることがわかる。図6における平均マッハ数の経時変化に示されているように、例えば発電機内に高いシード率の領域が存在する場合は、発電機内の電子数密度は一時増加するため、作動気体に働くローレンツ力が増大し、作動気体は徐々に減速される。しかし、シード率が 2.0×10^{-5} に戻り、ローレンツ力が減少すると、流体は再び徐々に加速され、多少変動しながら初期値に戻る。ここで、エンタルピー抽出率と平均マッハ数の $400 \mu\text{sec}$ 以降の変動は下流より反射してくる波との干渉によるものである。すなわち、エンタルピー抽出率の回復時間は、流体の反射波も含めた応答時間で決まると言うことができる。超音速発電機の場合、発電機としての応答時間は、流体の発電流路内滞在時間とほぼ同程度であるとされているが、亜音速発電機の場合には、カソードや下流から反射される変動の影響も受けるため、実際の応答時間は、流体の発電流路内滞在時間よりもかなり長くなり、それは変動の大きさにも依存する。

(3・4) 発電機入口におけるシード率が連続的に変動する場合の過渡現象 前節では、シードが急激に変化するときの基本的物理現象を明らかにしたが、実際には、発電機入口におけるシード率は連続的に変動する考えられる。ここでは、そのモデルとして、まず、発電機入口において、10%のシード率変動を異なる周期の正弦関数により連続的に与えた。図7は、その周期に対する時間平均されたエンタルピー抽出率を示したものである。なお、図中のエラーバーは、エンタルピー抽出率の時間変化が定常となったときの変動 (最大値と最小値) を示している。この図より、 $500 \mu\text{sec}$ 以上の周期では、図2に示した静的なエンタルピー抽出率 - シード率特性から予測されるような大きなエンタルピー抽出率の変動が生じることがわかる。これは、上述の議論より、流体の応答時間が数百 μsec であることから、流体がシード率の変動にตอบสนองすることによるものと考えられる。一方、短い周期の変動に対しては、流体がตอบสนองしないことから、エンタルピー抽出率の変動は小さくなるが、 $50 \mu\text{sec}$ 付近の周期では、エンタルピー抽出率の平均は大きく下がり、またその変動も大きくなる。この現象は、その周期付近において放電が非定常となることに起因する。

次に、より実際のモデルとして、発電機入口においてシード率を異なる時間間隔毎に、平均値 2.0×10^{-5} 、標準偏差 10% の正規乱数で与えた。図8は異なる時間間隔に対する時間平均されたエンタルピー抽出率を示したものである。なお、図中実線のエラーバーは標準偏差を示しており、点線で示したエラーバーは実際の変動幅を表している。同図より、いずれの時間間隔においても、エンタルピー抽出率の平均値の大きな低下は見られない。また、その標準偏差もいずれの場合においてもほぼ等しい。またこの図より、乱数でシード率に変動を与えた場合には、正弦関数でシードに変動を与えた場合に見られた周期 $50 \mu\text{sec}$ 付近における性能の劣化が緩和されているように見える。一方で、時間間隔を大きくすると、エンタルピー抽出率の最大値と最小値の差は大きくなる。これは、(3.2) で述べたシード率がステップ状に変化する場合に見られる過渡現象がより顕著に現れることによるものである。

本研究では超音速非平衡 MHD 発電機におけるシード率変化時の応答特性等を明らかにした。超音速発電機に対しては、シード率の揺らぎが発電性能に及ぼす影響が調べられているが⁽¹¹⁾、本研究のような過渡応答も含めた議論はなされておらず、超音速発電機との厳密な比較はできない。

しかしながら、亜音速発電機では流体の発電路内滞在時間そのものが長いだけでなく、反射波も存在するので発電機全体としての応答時間は超音速発電機に比べて長くなることは容易に予測できる。

4. む す び

亜音速非平衡ディスク形 MHD 発電機に対し、非定常準一次元数値シミュレーションを行い、シード率が急激に変化する場合の発電機の応答特性と連続的なシード率変動が発電性能に与える影響について調べた。その結果、次のことが明らかになった。

(1) シード率が高シード率側にステップ状に変化する場合、エンタルピー抽出率は一旦上昇した後、徐々に減少し、より低い値の定常値に落ち着く。これは、シード率が高くなると、電気伝導度は高くなるが、流体系の時定数は大きいため、一時的に高い流速が維持されることによる。一方、低シード率側に変化する場合逆の現象が生じる。

(2) シード率がパルス状に変化する場合、発電機内のシード率が元の値に戻っているにもかかわらず、エンタルピー抽出率が定常状態に落ち着くまでに数百 μsec を要する。これは反射波も含めた流体の応答時間によって決まる。

(3) シード率が正弦関数的に変動する場合、長い周期 (500 μsec 以上) では、流体がシード率の変動に対して応答するので、静的なエンタルピー抽出率-シード率特性から予想されるような大きなエンタルピー抽出率の変動が生じる。逆に短い周期の変動では流体は応答しないので、エンタルピー抽出率の変動は小さくなるが、50 μsec 付近の周期では、放電の非定常性が強く現れ、エンタルピー抽出率の平均値は大きく低下し、また大きく変動する。

(4) シード率がランダムに変動する場合、エンタルピー抽出率の平均値は、いずれの時間間隔においてもシード率が一定の場合の値と大きく変わらない。しかし、時間間隔が大きい場合、(1) で述べた過渡現象に起因して、エンタルピー抽出率の最大値と最小値の差は大きくなる。

(平成 12 年 10 月 26 日受付, 同 13 年 1 月 24 日再受付)

文 献

- (1) 小林宏充・他: 「亜音速ディスク形 CCMHD 発電機の電圧-電流特性」, 電学論 B, **118**, 302~307 (平 10-3)
- (2) 名原啓博・他: 「亜音速ディスク形 CCMHD 発電機の部分負荷運転特性」, 電学論 B, **118**, 1041~1046 (平 10-9)
- (3) 名原啓博・他: 「亜音速非平衡 MHD 発電機内の流れと発電性能」, 電学論 B, **119**, 931~936 (平 11-8/9)
- (4) Y.Nabara et al.: "Numerical Simulation on Performance of a Nonequilibrium Disk MHD Generator with Subsonic Flow", *Proc. of Int. Conf. on MHD&HTT '99*, 319~324 (1999)
- (5) 高奈秀匡・他: 「亜音速非平衡ディスク形 MHD 発電機における負荷切替え時の過渡現象」, 電学論 B, **121**, 123~128 (平 13-1)
- (6) K.Ohgaki et al.: "Measurement of Seed Fluctuation in Cesium Seeded Argon", *Proc. of Int. Conf. on MHD&HTT '99*, 331~337 (1999)

- (7) M.Mitchner and C.H.Kruger: "Partially Ionized Gases", 192, John Wiley and Sons, New York (1973)
- (8) T.Yabe and T.Aoki: "A Universal Solver for Hyperbolic Equations by Cubic-Polynomial Interpolation I. One-Dimensional Solver", *Comput. Phys. Commun.*, **66**, 219~232 (1991)
- (9) Y.Okuno, et al.: "Comparative Studies of the Performance of Closed Cycle Disk MHD Generator Using Argon, Helium and Argon-helium Mixture", *Energy Convers. Mgmt*, **24**, 3, 345~353 (1985)
- (10) C.Hirsch: "Numerical Computation of Internal and External Flows", **2**, Chap.19, John Wiley and Sons, New York (1988)
- (11) Y.Okuno, et al.: "Effect of External Fluctuations on the Performance of a Closed Cycle Disk MHD Generator.", *TransIEE of Japan*, Vol.108, No.1/2, 6~14 (1988)

高 奈 秀 匡 (学生員) 昭和 51 年 6 月 18 日生。平成 11 年 3 月芝浦工業大学工学部機械工学科卒業。同年 4 月より東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻修士課程入学、現在に至る。

名 原 啓 博 (学生員) 昭和 50 年 7 月 5 日生。平成 10 年 3 月東京工業大学機械宇宙学科卒業。平成 11 年 3 月同大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻修士課程修了、同年 4 月より同大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻博士後期課程進学、現在に至る。

奥 野 喜 裕 (正員) 昭和 34 年 5 月 4 日生。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、64 年 4 月東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授、12 年 4 月同教授、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。

山 崎 裕 之 (正員) 昭和 19 年 4 月 2 日生。昭和 42 年 3 月新潟大学工学部工学科卒業。昭和 44 年 3 月東京工業大学大学院総合理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。工学博士。平成 2 年同大学原子炉工学研究所教授。平成 8 年同大学院総合理工学研究科エネルギー科学専攻教授、現在に至る。MHD 発電、高速気体力学、エネルギーシステムに関する研究に従事。