

熱伝導センサーによる非平衡 MHD 発電プラズマの温度測定

宮田 昌彦*

**Measurement of the stagnation temperature of the MHD generation
plasma by a thermal sensor.**

by Masahiko Miyata

(Abstract)

We have conducted experimental works of the non-equilibrium MHD power generation with using a shock tunnel. This report shows the results of measurement of the stagnation temperature of the shock tunnel by a thermal sensor and a spectroscope. The stagnation temperature of the MHD generator is an important factor for the prediction of its performance. A simple calculation of the performance shows that the stagnation temperature should be as high as possible if we mind to get the highly effective generator. However, there are limitations from the thermal quality of the generator wall, electrical performance of the insulators or durability of the combustor or the heat exchanger. Because, in our experiments, pure argon without seed is used as a working gas, the stagnation temperature is from 6000 K to 2000 K. We have made the measurements about a relation between the stagnation temperature and the performance of the generator. The stagnation temperature was measured by a thermal sensor and a spectroscope. The thermal sensor consists of a thin metal film and a substrate. The surface temperature of the sensor is measured by a voltage drop in the metal film. A comparison was made between the data of the thermal sensor and the spectroscope. The thermal sensor is very effective for the measurement of the stagnation temperature of the MHD generator.

要 旨

我々は、省エネルギー技術の一つである MHD 発電の研究を行っている。MHD 発電は、その作動流体の種類により、いくつかの種類があるが、ここで述べるのは、作動流体に不活性気体を用いるもので、一般には、閉サイクル型、または、非平衡型 MHD 発

* 理工学部機械工学科教授 流体工学

電と呼ばれている種類である。この形式は、作動気体の澱み点の温度が比較的低くても、効率のよい発電が出来る点で、普通の燃焼ガスを用いる MHD 発電に対して優れている。しかし、今のところ、作動の安定性や信頼性に於いて、基礎的な研究の段階にある。我々は、この形式の発電機の模擬的な基礎研究を、衝撃波風洞によって作られた作動プラズマを用いて行っている。この研究において、作動プラズマから高い電力が取出された時の発電機の挙動⁽¹⁾、発電機内のプラズマの予備電離の方法⁽²⁾等について、研究成果が得られている。また、発電機の澱み点温度を出来るだけ低くして、効率のよい発電を行うために、どのような工夫が必要かについて、研究を行っている。そのため、発電機澱み点の温度測定をおこない、温度と発電機の効率の間の関係を研究している。本報告は、その結果の一つの報告であり、衝撃波風洞の澱み点温度を熱伝導センサーを用いて測定した結果である。報告には、熱伝導センサーの構造、作製方法、作動原理、および測定結果が述べられている。また、同時に、分光法により、温度測定を行っているのでも、結果の比較についても述べてある。熱伝導センサーは、比較的製作が簡単で、とくに短い持続時間の作動流体の熱測定に適した、センサーである。本センサーは、単に MHD 発電のみでなく、他の色々な用途に使用可能なものである。

1. 緒 言

MHD 発電は、省エネルギー、熱公害の減少等の社会的貢献度の高い発電方式で、多くの国々で研究が成されてきた。最近のエネルギー事情の変化により、開発の進歩が遅れているが、これは一時のことであると考えられる。特に、化石燃焼の燃焼により発生する種々の公害が、いまだに解決されていない現状では、効率のよい、クリーンな発電方式は社会的必要性が益々高まってくると考えられる。

我々の研究している方式の MHD 発電は、化石燃料への依存度を少なくして、出来るだけ効率のよい発電を行うことを目的とした方式であり、一般的には、閉サイクル型または非平衡型とよばれているものである。作動気体として、不活性気体（アルゴンやヘリウム）を使い、プラズマ源として、カリウムまたはナトリウムのシード剤をそれに添加する。この作動気体を何らかの方法で、摂氏 1500 度に加熱し、外部磁界間の発電流路に高速で流せば、発電を行うことが出来る。この方式においては、熱的な作動気体の状態を電気的な状態からある程度切離すことが可能であり、作動気体の温度が低くても、発電機の電気的な効率を高く維持できるという特徴がある。しかし、本来、このような状態は、熱力学の原理に反するので、現象は不安定であり、信頼性という点でまだ確立されたものであるとは断言できない。したがって、まだ基礎研究の積重ねが必要とされることが考えられる。

最近、オランダと日本の東京工業大学に、閉サイクル型 MHD 発電の基礎研究をめざす中規模の発電装置が作られた。これらは、完全な閉サイクル型ではなく、吹出し風洞型の装置であるが、共に、数十秒の流れの持続時間が得られるものである。オランダの装置では、作動気体のシード量を多くして、エンタルピーの変換効率を大きくする実験が行われており、多くの成果が得られている。また、日本の装置では、逆に、シード量が小さい時にプラズマの挙動が安定になる効果を利用して、円環状の発電機により、発電するもので、超電導電磁石を設置している。これらは、作動気体の加熱に、ペブルベ

ッド型の熱交換器をもちい、燃焼気体の熱により加熱している。もともとは、閉サイクル型の MHD 発電機は、原子炉特に高温ガス炉を熱源として、構想されたものである⁽³⁾。しかし、高温ガス炉の出口のガス温度が MHD 発電の最適作動温度よりかなり低いため、直接的な組合わせの構想は断念された。その代案として、上記のような燃焼熱源との組合わせが考えられたのである。閉サイクル型 MHD 発電の利点は、熱源についての制限が少なく、色々な熱源を用いることが出来るところであり、今後技術の発達により、太陽熱、核融合炉等も熱源として考えられる。

一方、閉サイクル型または非平衡型の MHD 発電の基礎研究においては、あまり大規模な装置は必要はなく、我々の研究は、中形の衝撃波風洞を用いて行われている。衝撃波風洞は、普通の衝撃波管の低压室内の一部にノズルを設けた物で、ノズル前面の激み点で気体の流れをせきとめてたかい温度と圧力を得る装置である。我々は、作動気体として、アルゴンをシードせずに用いている。シードが無いために、プラズマ状態の作動気体を得るために普通の MHD 発電機に比べて高い激み点温度が必要である。

ここで報告する研究は、この激み点温度を熱伝導センサーにより測定した研究である。熱伝導センサーは、ガラスの表面に薄くコーティングをした金属の薄膜への熱伝導により、温度測定を行うもので、衝撃波風洞のような作動気体の持続時間が限られた装置で用いるのに適している。このセンサーは、もちろん MHD 発電のみでなく、様々な熱測定に用いることが出来るもので、センサーの大きさが小さいため、局所的な熱分布の測定が出来るという特徴がある。

2. 熱伝導センサーの測定原理

この節では、熱伝導センサーの測定原理について、簡単に述べる。また、衝撃波風洞内のセンサーの作動状態を説明する。

熱伝導センサーは、普通、白金または金の薄い膜を蒸着により、ガラス等の基板上に形成したものである。これを解析するために、モデルとして、半無限の広さを持つ薄膜と基板が重なった状態を考える。図 1。この場合、熱の伝導は、センサーに垂直な方向のみに起こる。その方向に x 軸を取る。

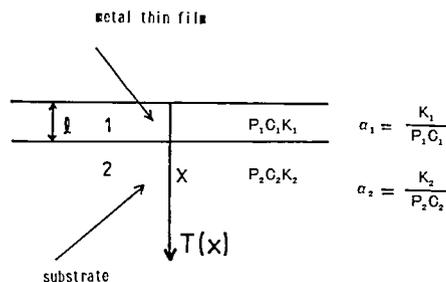


Fig.1 Heat Transfer in a Thermal Sensor.

図 1 において、金属薄膜を 1 とし、基板を 2 とする。 α を熱拡散係数とし、 k を熱伝導率、 c を比熱、 ρ を材料の密度とすれば、熱拡散の方程式は、

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

とあらわされる。ここで、 T は温度である。また、 t は時間を示す。

この方程式を解くと、もし金属薄膜が基板にくらべて非常に薄く、材質的に熱伝導がよい場合は、 1 は、熱伝導に無関係となり、薄膜の表面温度 $T(t)$ と熱流束 q との間に次のような関係式が成立つ。

$$q = \frac{\sqrt{\rho_2 c_2 k_2}}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{dT/dt}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (2)$$

ここで、熱流束と温度との間には、熱伝導の式

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

が成立っている。

したがって、表面温度の時間的変化が測定されれば、これから式 (2) により、積分によって、熱流束がわかることになる。表面温度の変化は、金属薄膜の電気抵抗の温度変化により、電気的方法により測定できる。

ここでは、澱み点温度を測定したいのであるから、この熱流束より、もう一度、式 (3) を、今度は、澱み点の気体と壁との間に適用すれば、澱み点の温度が求められる。ただし、気体の熱伝導率が必要となるが、これは、すでに測定されているので、それを用いる。

センサーは、衝撃波風洞の澱み点、つまり発電機への流れの入口に、図 2 のように、設置されている。この澱み点では、気体の流れは静止しているので、単純な熱伝導による測定が可能である。しかし、厳密には、気体の流れの乱れにより、誤差が生じると考えられる。澱み点の温度については、理論的な計算も可能であり、実験結果と比較することが出来る。

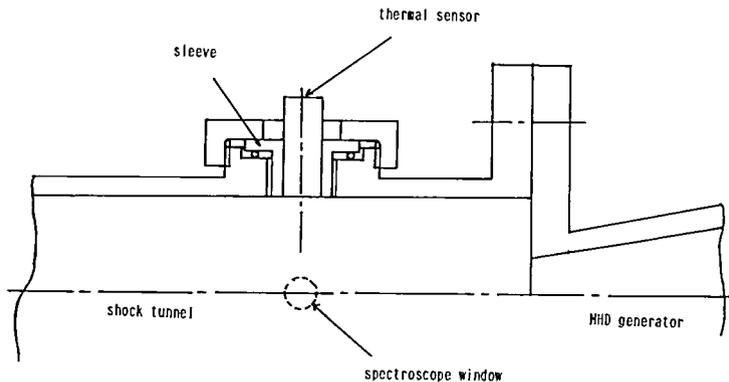


Fig.2 Schematic Diagram of the Thermal Sensor at the Stagnation of the Shock Tunnel.

澱み点の温度は、MHD 発電の効率を支配する重要な要素である。この温度は、単純な効率計算では、高ければ、高いほどよいが、MHD 発電機の流路の壁材料の耐久性などから制限を受ける。ここで、報告する研究では、無シードアルゴンを作動流体として使用

しているため、澱み点の温度は 6000—2000K の範囲となるが、もちろんこれは、低いほど材料面での制限が少なくなるので、有利である。発電の効率が確保できる限界の最も低い温度を求める必要があり、そのためにセンサーにより温度測定を行うわけである。

温度測定の方法は色々あり、この研究でも、分光法による測定を行い、結果を比較してある。分光法については、改めて述べる。

3. 熱伝導センサーの作製法

この節では、熱伝導センサーの作製法について述べる。

熱伝導センサーは、金属の薄い膜とそれを支える熱の不良導体とから成る。金属の薄膜としては、金または白金が考えられる。しかし、金は電気抵抗の温度係数が白金に比べて小さいので、感度が悪い。ここでは、センサーの金属として、白金を用いた。金属薄膜の基板としては、パイレックスガラスの直径 8mm の円形の棒を、適当な長さに切断し、その切口をエメリーペーパーでよく磨いたのち、バフ仕上げを施したものをを用いた。

このガラス棒の断面に、白金を蒸着により、約 $0.5\mu\text{m}$ の厚さに形成した。実際の厚さを測定することは困難なので、金属膜の固有抵抗を約 100Ω に保つようにし、その幅は約 2mm にした。図 3 に、センサーの構造の概略を示す。

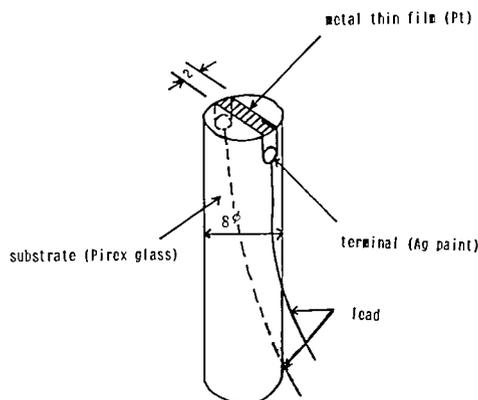


Fig.3 The Thermal Sensor.

センサーには、銀ペイントによりリード線を取付けるためのターミナル部分を作り、ここに銀入りハンダにより、リード線を取付けた。センサーを衝撃波風洞の澱み点部分に設置するために、テフロン製のスリーブに挿入し、エポキシ樹脂で接着した。リード線は、静的校正のためと測定のために、切替えることが出来る。静的校正は、センサー本体を、電気炉に入れ、温度を上昇させながら、センサーに接続したホワイトストンプリッジからの電圧を、デジタルマルチメーターで測定した。

4. 熱伝導センサーの測定回路

熱伝導センサーからの電氣的出力を測定し、記録するために必要な測定回路について

述べる。

熱伝導センサーは、その表面の白金薄膜の温度変化を、白金の抵抗の温度変化により検出する。この変化はかなり微小であるので、それを増幅するために、図4に示すような、ホイートストンブリッジを用いる。ブリッジの電源には、45Vの乾電池をもちい、ブリッジの固定抵抗を4K Ω にした。これは、センサーの電圧降下を約1Vとするためである。ブリッジの出力は、静的校正においては、デジタルマルチメーターに、測定においては、デジタルシンクロスコープにおいて記録した。実験のたびに、ブリッジの釣合わせを行う必要があり、マルチメータを用いた。シンクロスコープのデータは、GPIBにより、パーソナルコンピューターに転送し、数值的に線形化および積分をした後、記録した。

5. 熱伝導センサーの測定結果とその検討

1) センサーの静的校正

センサーを電気炉に入れ、温度を上昇させ、電気抵抗の変化と出力の関係を調べる。

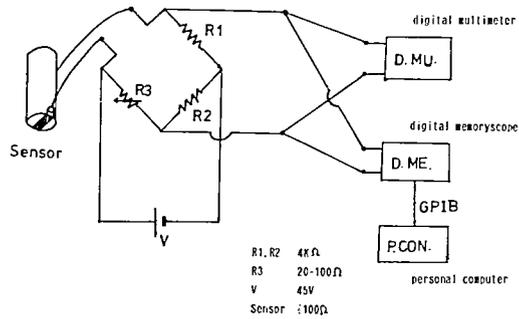


Fig.4 Schematic Diagram of the Measurement Circuit.

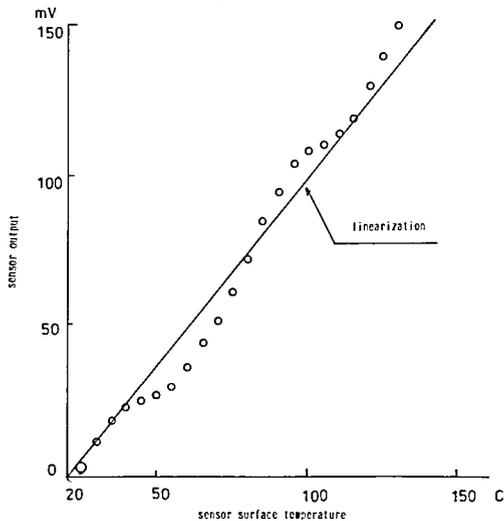


Fig.5 Sensor Output VS. Surface Temperature (Static Calibration).

温度上昇の範囲は、測定に用いる温度範囲で、約 150°C までである。図5にその結果を示す。おおまかには、線形の温度と出力の変化が得られるが、少しそれから離れているところがある。したがって、これを線形化する必要があり、図5に示すように、最少2乗法により、線形化を行った。前節で述べたように、リアルタイムで線形化を行うために、コンピューターに転送されたデータを、ソフト的に処理した。

2) 衝撃波風洞激み点における測定結果

図6に、測定データの一例を示す。これは、ブリッジからの出力そのものの記録である。高温の気体がセンサーに接触すると、出力は緩やかに上昇したのちある一定値に達する。出力が上昇している間は、センサーに熱の入力があると考えられる。出力の上昇の勾配が変化すると、熱量の流束が変化する。図7は、このデータを積分して得た熱量の時間的变化である。出力が下降すると、熱流束が急激に減少することがわかる。

このデータから、図8に示す、アルゴンの熱伝導率⁽⁴⁾の値を用いて計算した激み点の温度は、最大値が 4320K であった。ただし、壁の温度として、室温を選んでいる。

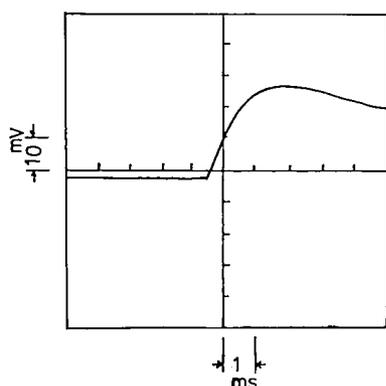


Fig.6 Surface Temperature Data of the Thermal Sensor.

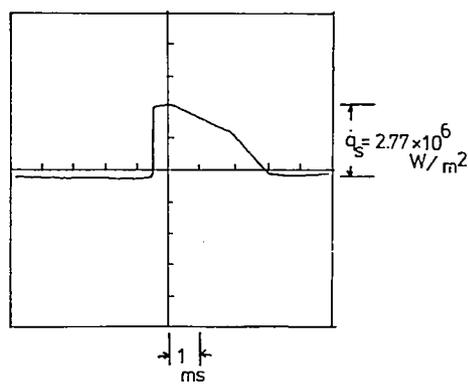


Fig.7 Heat Input to the Thermal Sensor.
(Maximum $\dot{q}_s = 2.77 \times 10^6 \text{W/m}^2$)

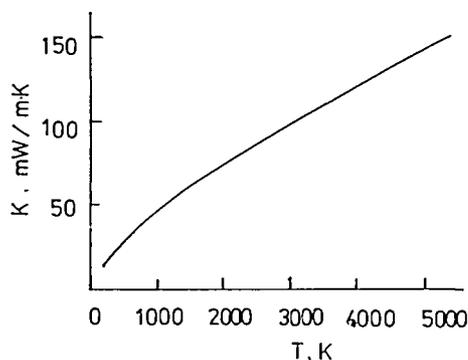


Fig.8 Thermal Conductivity of Argon. (Ref.4)

6. 分光法による測定との比較

激み点の温度は、分光法によっても測定できる。この節では、分光法による測定の原理、方法、測定結果について、述べる。

分光法は、激み点のプラズマから放射される光の強さの測定により、温度を計る方法であり、ここでは、線スペクトルの発光強度とそのエネルギー準位との間の関係から、温度を測定する方法を取った。

もし、プラズマが温度 T で熱平衡にあるならば、このプラズマが光学的に薄い場合、各線スペクトルの光の強度と温度との間に、

$$\frac{I}{L\phi A\nu} = \exp\left(\frac{-\Gamma}{KT}\right) \quad (4)$$

のような関係が成立つ。ここで、

I は光の強度、 ν は光子波の振動数、 A は遷移確率、 ϕ は統計的重さ、 K はボルツマン定数、 T は温度、 Γ は励起エネルギー、 L は比例定数である。

光学的に薄いというのは、プラズマ内で光の自己吸収が無いということであり、今のような比較的圧力の低い場合は、近似的に正しい。

式(4)の両辺の対数を取ると、光の強度と温度の間に、簡単な関係式(5)が成立つので、これを用いて、温度を測定する。

$$\log\left(\frac{I}{L\phi A\nu}\right) = -(\Gamma/KT)\log e \quad (5)$$

図9に、測定装置の概略を示す。

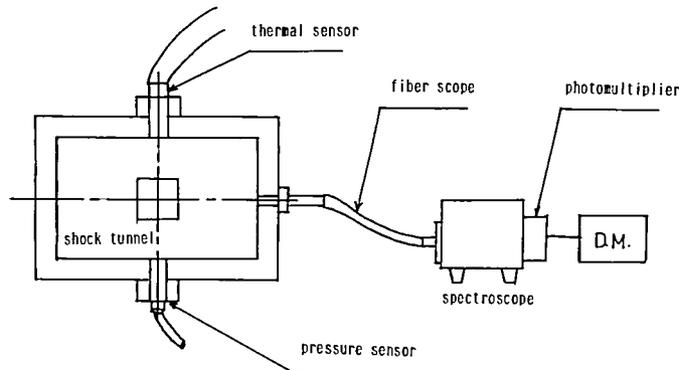


Fig.9 Schematic Diagram of the Sensors and the Spectroscopy.

分光器に導く光は、熱伝導センサーの位置と90度離れた所から、石英ファイバーによりとりだされ、モノクロメーターのスリットに入射される。分光器の出口には、ホトマルチプライヤーが置かれており、各波長の光の強度を電圧に変えている。これは、デジタルメモリースコープに入力され、記録される。

測定は、波長を分光器により変化させながら、各線スペクトルの強度を測定し、それ

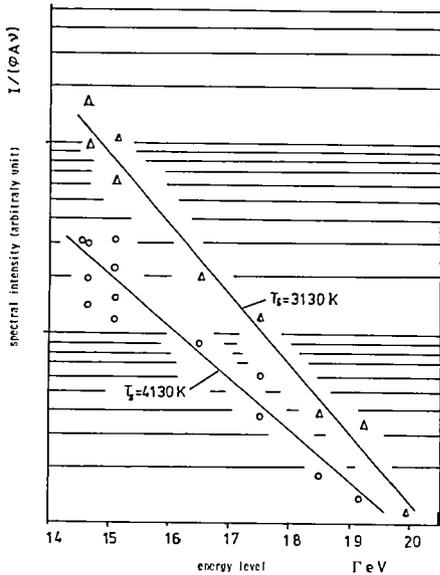


Fig.10 Stagnation Temperature Measured by a Spectroscope.

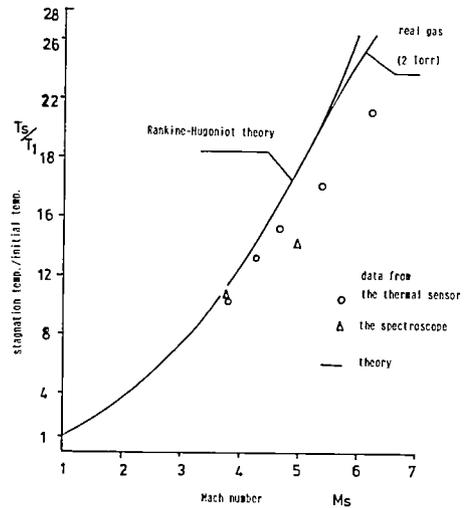


Fig.11 Stagnation Temperature as a Function of the Shock Wave Velocity.

を図10に示すような、光の強さに比例する量とスペクトルのエネルギー準位の関係にあらわす。このデータの示す勾配の逆数が、温度である。測定結果には、衝撃波風洞のアルゴンの圧力の初期値を変えて、2例の澱み点温度が示されている。

熱伝導センサーとの測定結果の比較は、図11に示す。これは、衝撃波の速度(マッハ数)と澱み点温度の関係で表されている。また、図11には、ランキン-ユゴニオの式による計算結果と、それに実在気体効果を考慮したものも併記してある。

分光法による温度測定では、特に高い衝撃波速度の場合には、理論値からの隔りが大きくなる。これは、衝撃波管壁での温度降下が積分されて、光の強さが少なくなるためであると考えられる。一方、熱伝導センサーによる測定結果は、理論値と分光法による測定値との中間にあり、高い衝撃波速度での温度の降下は、分光法のそれよりも小さいと言える。しかし、やはり、マッハ数が5.5のとき、600K程度の温度の低下が見られる。これは、衝撃波管壁での温度境界層の厚さの見積りにより生ずるもので、これを正確なものにするには、管壁に垂直な方向の温度分布の測定が必要となるが、かなりその測定は困難であろうと思われる。

7. 結 論

衝撃波風洞の澱み点でのMHD発電作動気体温度を、熱伝導センサーを用いて測定した。熱伝導センサーは、白金の薄膜の熱伝導による温度変化から、その表面温度を測定するものである。この研究では、表面温度より気体の澱み点の温度を計算する方法を用いた。結果として、理論値とかなりよく一致する澱み点温度が得られた。熱伝導センサーは、その作製が比較的簡単で小形に作ることが出来、しかも時間的応答性がよいため、

急激に温度が変化するような気体の局所的な温度分布の測定に適したセンサーである。

謝 辞

本研究の過程で、明星大学特別研究助成費の援助を受けた。ここに謝意を表す。なお、この研究は、明星大学大学院理工学研究科修士課程 荒木次郎 との共同研究である。

参考文献

- 1) 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 第 17号 p155 (1981)
- 2) 宮田, くさびによる非平衡 MHD 発電プラズマの予備電離, 明星大学研究紀要 第 22号 p29 (1986)
- 3) Rosa, R. J., Magnetohydrodynamic Energy Conversion, McGraw-Hill (1968)
- 4) Hoshino, Mito, Nagashima and Miyata, Determination of the Thermal Conductivity of Argon and Nitrogen Through Data Evaluation and Shock-Tube Experiments, International J. of Thermophysics, vol. 7, No. 3, p647 (1986)