

MHD 発電研究における超高速現象の解析

宮田 昌彦*

Ultra-high Speed Analysis in the MHD Power Generation Research

1 序 言

我々の研究室では、この10年間に渡り、MHD発電の研究を行ってきた。最近、地球環境が、人間の活動に起因する排出物により次第に汚染されていく状況は、もはや危機的段階にあると言われている。そのなかでも、特に、化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素により、地球上に太陽熱の蓄積がおこるいわゆる温室化現象は、熱帯雨林の消失とともに、加速されつつあり、21世紀の半ばには、気温が平均して数度上昇するといわれている。このことによって、人類の被る損害は、(1) 気温上昇によって、海面が数m程度上昇し、低高度の陸地では、堤防のかさあげや護岸工事に大量の投資が必要となり、(2) 気温上昇による海水の蒸発の促進によって、北半球の高緯度地域では、降水量が増加し、農作物の病虫害が多発し、一方、低緯度地帯では、乾燥による砂漠化がすすみ、いずれにしろ、人類の食糧の確保に重大な危機が訪れる。また、二酸化炭素とともに燃焼によって発生する窒素酸化物は、一部、酸性雨となって、地球上の森林の破壊を、現在も促進していると言われている。エネルギーの使用量は、国民のGNPに比例して増加すると言われており、現在発展途上にある国々もやがては大量にエネルギーを消費する国となっていくと考えられる。したがって、今のうちに、化石燃料の使用を押える対策を立てなければならぬのは、自明の理である。

現在の高水準の文明生活を維持しながら、エネルギー消費を減少させるには、多くの新しい技術開発と我々の精神的な思考の転換も必要であり、なかなか簡単にできるとは思われないが、このままの状態をいずれは放棄しなければならないことは、明らかなのである。思考の転換について、我々自然科学の研究者に述べるすじあいはないので、ここでは、エネルギー消費を減少させる技術開発の数例をあげることにしよう。

エネルギー消費を減少させるのには、現在、使用されている種々の熱機関の熱効率を上昇させることが必要である。現在の新鋭火力発電所の熱効率は、42%であるといわれており、これを上昇させることは、極めて困難であると考えられている。これは、発電所から電力のみを抽出する現在のシステムでは、かなりの排熱を捨ててしまっているからであり、これを熱として利用し、発電所の近くの地域での暖房等に用いれば、総合的に、エネルギー消費を減らすことができる。これらのシステムは、コジェネレーション(熱併給発電)と呼ばれている。また、火力発電所は、燃料のもつ比較的低い温度の熱を用いているので、

*理工学部機械工学科教授 流体工学

熱的なサイクルの温度の高い部分を利用して発電するトッパを備えた、複合発電システムも色々考えられている。これには、ガスタービンや我々の研究しているMHD発電が開発されている。ガスタービン複合サイクルは、比較的小容量の発電に適し、MHD発電は、大容量のそれに適するといわれている。

火力発電に頼らずに電力を賄うには、現在実用として用いられている原子力発電がある。これは、危険性や技術の未熟性を指摘されながら、特に我が国では、電力の40%を担うものとして、位置づけられている。MHD発電の一形式に非平衡型MHD発電というものが、これは、元来、高温ガス冷却原子炉と結合して使用する目的で開発が行われてきた。我々の研究しているMHD発電は、この形式である。

現在、開発途上にあり、今後も精力的に開発研究がなされるべき物として、太陽熱や風力、波力等のいわゆる自然エネルギー源をもちいた発電がある。これらは、その不安定さやコストの面から、必ずしも開発がスムーズではないが、地球環境の破壊を防ぐ意味から極めて重要であると考えられる。MHD発電は、これらの比較的小容量のエネルギー源から効率よく電力を抽出する方法として、用いられると思われる。このように、MHD発電の研究は、エネルギー消費を減少させ、地球環境の保護に対して、多くの貢献をなすうる研究であると考えられる。

この報告は、最近、明星大学に設備された、超高速現象の解析装置を用いたMHD発電の研究について述べ、その意義を明らかにしたい。

2 MHD発電研究における超高速現象の分類

MHD発電の原理は、磁界の中を高速の電離気体を流して、ファラデーの電磁誘導の法則により、発電を行うもので、この電離気体を保持する流路と流れから電流を取出すための金属または合金の電極が必要である。電離気体としては、MHD発電の形式により、様々な種類の物が用いられているが、最も普通の気体は、燃焼によって、化石燃料から作られる。これは、もちろん、火力発電との複合サイクルを組む目的で用いられている。また、我々の行っているMHD発電では、アルゴンまたは、ヘリウムといった貴ガスを用いている。これは、すでに述べたが、高温ガス原子炉との組み合わせを目指していたからである。いずれも、気体は、数1,000度に、何らかの方法で加熱されてから、発電機内に導入される。しかし、この温度では、気体はそれ自身では、導電性を持たないので、シードといわれるアルカリ金属またはその化合物を少量添加する。この、シードの存在は、かなり、難しい電極の材質面の問題をもたらす。

発電流路は、一般的に言って、電極と交互に配置された絶縁体とで出来ている。この配置によって、発電の状態が変化するが、その点は詳しくは述べない。絶縁体の材質も高温に接することから、多くの問題を抱えている。MHD発電機内の気体の温度は、2,500Kから1,500Kに達し、その結果、これを保持する流路の耐久性に難しい問題が多く存在する。

特に、高速現象に関する問題として、次に示すような現象が研究されている。

- (1) 電極の表面に生ずる放電現象の解析：電極は、高温の気体の流れにさらされながら、大量の電流を気体から外部回路に取出す役目を負っている。そのため、特に、表面の温度の低い部分に、いわゆるアーク放電が生じ、局所的な加熱によって、表面が蒸発

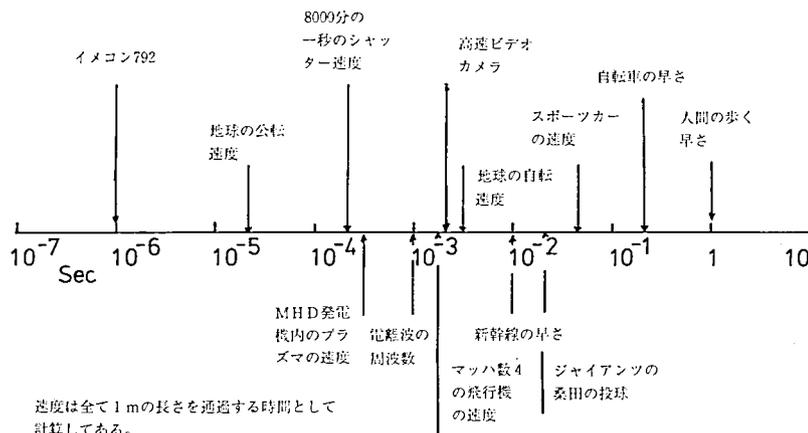


図1 高速現象の継続時間の比較

してしまい、長時間の使用に耐えないようなこともある。これには、電極の材料面の開発研究が必要であるが、同時に、表面のアーク放電の構造の研究も大事である。アーク放電は、電極の一部に生じ、時間とともに移動していくことが分っている。高温気体の流れとの複雑な関係を高速解析装置で研究する必要がある。

- (2) 発電機内の種々な乱流や波動現象の解析：発電機全体は、まず気体を加熱する装置、化石燃焼によるMHD発電では燃焼機、発電流路、電磁石、ディフューザー等より構成されているが、その各部で流れが乱流となったり、いろいろな波動現象が発生することが観測されている。とくに燃焼機内では、燃焼不安定性があり、また発電機内では、音波不安定性という現象が観測されている。また、貴ガスを用いるMHD発電では、電離不安定性という形の波動があり、いずれも、MHD発電の特性に悪い影響を与えると考えられている。これらは、後で述べるように、いずれも高周波数の波動で、高速現象の解析が必要である。
- (3) 発電機内の高速気体の流れと電磁場の相互作用の解析：これは、MHD発電の原理そのものによる現象で、高速気体が磁界と相互作用することにより、電力が発生するのであるが、それは気体の流れそのものを変化させる。これは、磁界との相互作用によって発生するローレンツ力の影響である。気体は普通超音速で流れているので、相互作用の解析には、高速の観測装置が必要となる。また、MHD発電機の安定な作動のために必要なプラズマの状態を維持する予備電離の研究においても、高速現象の測定が必要となる。

以上を、まとめて、図1に示してある。これは、現象の典型的な持続時間を示した図で、比較のために、MHD発電以外の日常的な現象の時間も示している。また、これから述べる高速現象解析装置の測定時間も同時に示した。

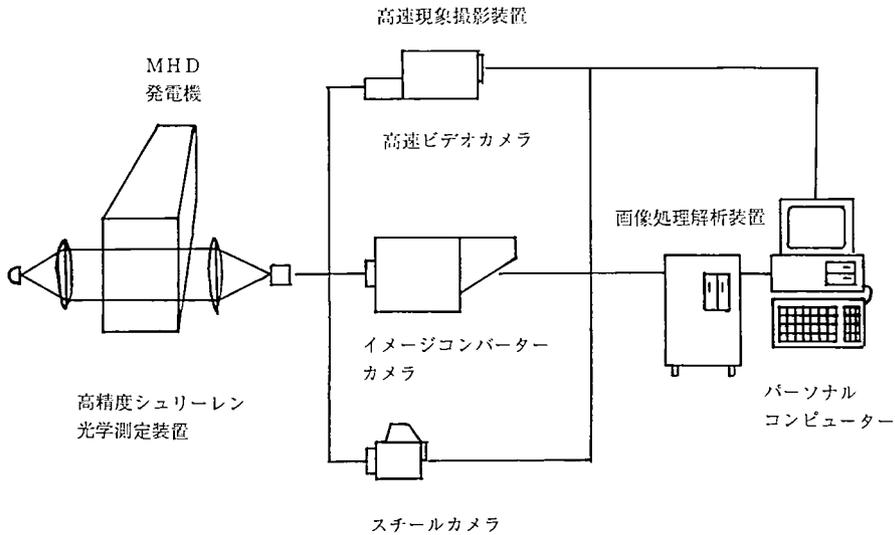


図2 超高速現象解析装置の概略

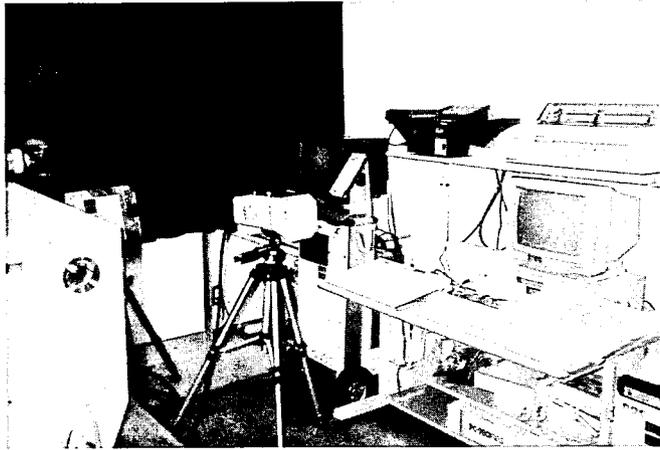


図3 超高速現象撮影解析装置

3 超高速現象解析装置の概要

明星大学に導入された超高速現象解析装置の概要を以下に述べる。図2は、装置の概略を示すものである。また、図3に、全体の写真を掲げる。

装置は、基本的に、現象の光を取込む系、それを撮影するカメラの系、撮影された画像の後処理を行う系に別れている。MHD発電のような気体の高速流れでは、その速度によって、気体そのものが発光している場合とそうでない場合があり、いずれかによって、光の取込む系が変わってくる。発光している場合は、そのまま、カメラに光を導入すればよく、光の強度増大のための簡単なレンズの組み合わせがあればよい。しかし、気体の速度が遅く、気体が発光していない場合、現象を補えるには、シュリーレン法という特別な方法

が用いられている。これは、強い光を現象の背後から当てて、影を作り、それを撮影する方法である。影の濃さは、気体の密度に関係があり、密度は温度と密接に関係しているので、気体中の温度の分布が測定される。導入されたシュリーレン装置は、極めて性能の高いもので、例えば、人間の吐く息の温度分布などのような微少の温度変化も測定できる。

光の撮影は、カメラで行われるが、導入された装置では、現象の速度により、3種類の測定ができるようになっている。一秒間に100万駒の撮影が行なえる、イメージコンバーターカメラシステム、一秒間に200駒の連続撮影が可能な、ハイスピードビデオカメラシステム、8,000分の一秒のシャッター速度のスチールカメラ、である。イメージコンバーターカメラは、光を蓄像管に蓄積して、フィルムに記録する装置で、種々のトリガー装置を備えており、瞬間的に発生して、消えてしまうような現象の記録に適している。

撮影された現象は、付属のコンピューターによって、後処理される。例えば、イメージコンバーターカメラによって記録された画像は、モノクロ画像であるが、これを、カラー画像に処理したり、明るさによって、画像の各部分を強調したり、分類したりすることが可能である。ハイスピードビデオカメラの画像から、像の運動の様子をコンピューターで解析することもできる。以上の装置を、現象の持続時間に合せて適宜に用いることにより、MHD発電機内の高速現象の解析が可能となった。

4 MHD発電機の電極におけるアーク放電の挙動の研究

既に述べたように、MHD発電機において、電極は極めて重要な役目をはたしている。それは、発電機内のプラズマ流体から電流を外部負荷回路に取出し、エネルギーを取出す役目をはたしている。しかし、電極は、高温高速のプラズマと接して高い電流を取るため、色々な難しい条件のもとに作動している。特に、電極の耐久性が、発電機の信頼性に繋がっており、電極の材料面での研究開発が必要となっている。

電極は、高温高速の流体に接しながら、陽極と陰極の間で放電を行っている。放電現象に関しては、既に多くの研究がされているが、いまだに完全とはいいがたく、特に、MHD発電機内のような複雑な流れ場におけるそれはこれからの研究の進展が期待されている部分といえる。ここでは、貴ガスの作動流体を用いる非平衡MHD発電の場合について主に述べるが、化石燃料を用いる開放形MHD発電においても多くの問題が存在している。

放電には、よく知られているように、グロー放電とアーク放電がある。これらの間の厳密な境界はないが、放電を維持する電流密度が 1 A/cm^2 を越えると、グロー放電からアーク放電になるといわれており、したがって、大概のMHD発電機では、アーク放電状態の放電を電極が維持していることになる。放電管の中のように、静止していて外部の磁場が無い環境ならば、比較的簡単な放電現象として解析ができるが、MHD発電機の場合はそうでなく、複雑な流れの場や電磁場と相互作用を行っている。図4は、単一の電極からの放電が、MHD発電機内の場と相互作用している様子を模式的に書いたものである。

発電機の中には、超音速の流れの場、電極の近くの温度と速度の境界層、放電を維持する流れに垂直なファラデー電界、流れに平行に生ずるホール電界等がある。これら全体を全て取入れて解析することは、難しいので、ある程度の省略をした上で、数値計算を行うことが成されている。(例えば、文献1) 図5は、いくつかの電極の組合わせについて、電流の流れ方を計算した結果を示している。この計算では、現象は二次元であるとし、電極近くでの熱伝導は無視している。放電による電流は、陽極と陰極の端に集中して流れることが

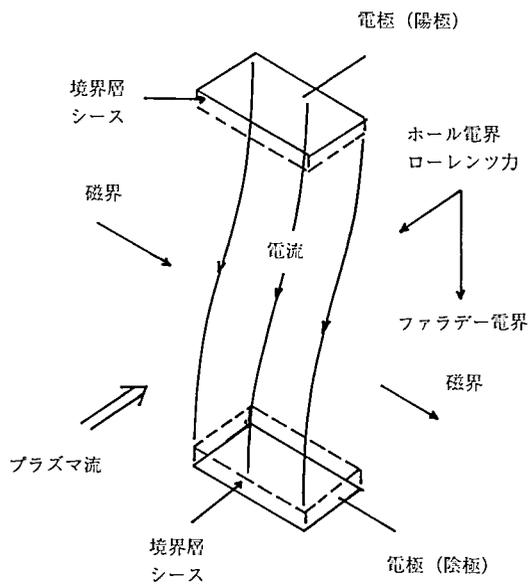


図4 電極と放電の場との相互作用の概念図

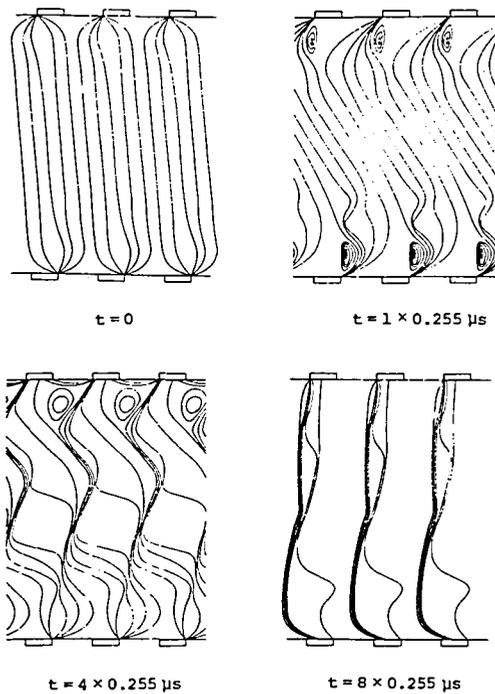


図5 MHD発電機電極の間の放電の時間的変化の数値計算。tは時間（文献1）



図6 ストリーマーの写真。イメージコンバーターカメラによって撮影された。澱み点温度3501K、圧力7.7atm、磁界3.0T。撮影時間は、1 μ sec。二つの写真は、同じ放電を別の角度より見たもの（文献2）

わかる。これは、流れに平行に発生するホール電界の効果によるところが大きい。電流が集中することによって、プラズマ流れの一部が加熱されその部分の温度が上昇しさらに電気伝導率が増し電流の集中が促進されるので、ストリーマーと呼ばれる電流のフィラメントが流れの中に沢山発生する。これは、電極表面が局所的に加熱されることを示し、いわゆるアークスポットという温度の極めて高い部分が出来て、これが流れに押流されることにより、電極表面を高速で移動する。長い時間の間、この現象が続くと電極表面の溶解が起り、電極の寿命が短くなる。このような挙動の解析には、高速の写真撮影が用いられている。図6は、ストリーマーの発光を高速カメラで撮影した例である。（文献2）放電の構造は、計算結果に比べて広がりが見える。

アークスポットの様な局所的な加熱は、電極に悪い影響を与えるし、流れの平均的な電気伝導率が低下し、プラズマの特性を悪くするので、なるべく平均的な加熱が出来るように、種々な工夫をしなければならぬ。これは、MHD発電機の効率向上のために、重要な研究の一部となっている。

5 非平衡MHD発電機における電離不安定の研究

貴ガスを作動気体とする非平衡MHD発電では、プラズマ内にある電子の集団の温度とイオンおよび中性気体の温度との間に温度差が出来る。この現象は、一般の放電管の中では普通に起こっているもので、温度差の源は電界によって供給されるエネルギーである。このエネルギーは、電子の質量が小さいために、電子に選択的に吸収されて、電子の温度が他の粒子のそれに比べて高くなる。放電管のなかのように、気体の圧力が小さいとこの現象はすぐ実現されるが、MHD発電機の中のように圧力の高い気体では、実現が難しく、また、実現されても、熱力学の法則により、すぐ、電子の温度とイオンや中性気体の温度が同じになろうとする。この復元の過程で、プラズマ中に複雑な波動が発生し、プラズマの特性を悪くする現象がある。これを、電離不安定性と言っている。また、この不安定を安定化する研究が盛んになされている。

放電管中の電離不安定性は、かなり昔から研究されてきた。これらは、電離波ともよばれている。図7は、二つの電極の間に出来る電離波の様子を流し写真によって撮影したもので、時間の経過が縦軸に示されている。（文献3）電離波は、規則正しい電子密度の大小の



図7 電離波の写真。右側が、陰極。左側は、陽極。時間は、上から下へと経過している。水銀とアルゴンの放電管内で、電流は100mA (文献3)

振動で、その周波数は、プラズマの平均的な密度や気体の電離電圧、気体の質量、電極の間隔等によってきまる。その大きさは、数100Hzから数10KHzの広い範囲にわたっている。これは、放電管が静かな流れで、磁界が無いためである。しかし、MHD発電機内では、だいぶ様子が異なる。

MHD発電機内では、磁界によって誘導される電界が、放電管内の電界に代わって、電子温度と中性気体温度との差を発生させている。電界には、流れに垂直なファラデー電界と流れに平行なホール電界があることは、すでに述べたが、電子温度と中性気体温度との差は、特に、ホール電界の大きさに強く依存している。また、ホール電界によって、陽極と陰極の間を流れる電流は、その方向が、平均のファラデー電流の方向とある角度をなす。これらの効果によって、発電機内のできる電離波は、ホール電界の大きさを表すパラメータであるホール係数という数値によって成長したり減衰したりする。これらは、多くの理論計算により、その振舞いが解明されてきている。とくに、電離波の発生によって、MHD発電機内の平均的な電気伝導率が低下することが分かっている。図8には、MHD発電機を模擬した磁界を伴う放電管中での電離不安定性の写真を示す。(文献4) ホール係数の値によって、放電がしだいに不規則となり、細かく分裂しているのが分かる。図9には、この放電の細胞がずっと細かくなった時に、プラズマの電気伝導率に与える影響を計算した理論解析の結果を示す。(文献5) 電気伝導率が大きく低下することが示されている。実際の発電機内では、流れの存在や冷たい流路の壁の存在等の為、現象はもっと複雑となり、放電の観測も困難である。しかし、電離不安定性は、直接発電機の性能に影響を与えるため、重要な研究対象となっている。電離不安定性をうまく制御すれば発電機の信頼性を増すことができることから、例えば、シードを完全に電離させるような方法、予備電離を行ってプラズマの温度や密度の平均化を計る方法、外部回路で制御する方法など色々考えられているが完全な方法はまだ無く、今後の研究に待つところが大きい。このような現象も高速現象の一つで、解析装置の時間的解像力が要求される。

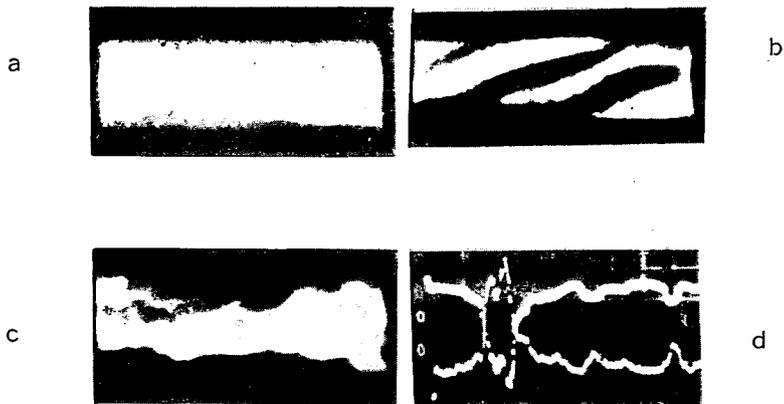


図8 磁界の作用下の弱電離放電管内の放電の写真と電圧の変動。(a) $\omega\tau = 0$ (b) $\omega\tau = 3$ (c) $\omega\tau = 9$ (d)は、(c)の場合の電圧の変動波形。左側が陽極、右側が陰極。(文献4) $\omega\tau$ は、ホール係数

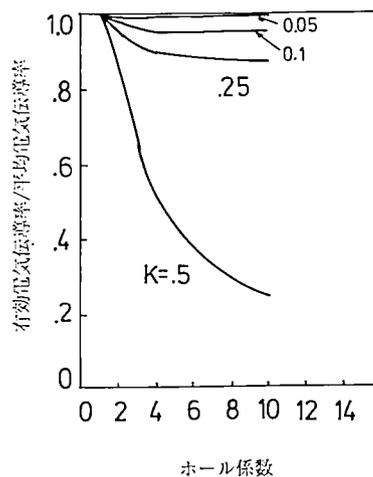


図9 MHD発電機内の電離不安定性による有効電気伝導率の低下。パラメーターKは不安定性による変動の程度を表す (文献5)

6 MHD発電機内のプラズマ流と磁界の相互作用の研究

MHD発電の原理は、発電機内を流れる高速、高温の気体から、磁界の相互作用により、電気エネルギーを外部回路に取出すものであるが、このエネルギーはもともと気体の流れに含まれていたもので、そのため、気体の流れはエネルギーを失って、その速度や温度が

低下する。この低下の程度があまり大きくなると、結局発電に回されるエネルギーが低くなることになり、発電効率が低下することになる。取出すエネルギーとプラズマ流れに含まれているエネルギーの釣合いが、発電効率に影響を与える訳である。現在のMHD発電の開発研究では、発電所としての総合効率に関しては理論研究の段階であり、上記の効率（いわゆるタービン効率）は、パラメーターとして仮定されて計算されている状態であるが、実際の発電所として稼働する場合は、重要な効率の一つとして研究されなければならない。

実験での研究では、現在の段階では、数10分の気体流れの持続時間を持つ吹出し型の風洞、(文献6)や、数ミリ秒の持続時間の衝撃波風洞、(文献7)によって行われている。プラズマ流れに対抗する力は、ローレンツ力または $J \times B$ 力と呼ばれている。また、この力と流れの相互作用の強さを表す係数として、相互作用係数

$$S = JBL / \rho u^2$$

を定義している。ここで、 J は、電流密度、 B は、磁界の強さ、 L は、発電流路の幅、 ρ は、プラズマ流れの密度、 u は、流れの速度である。この値の上限がいくら位になるかということが、重要な研究対象となっている。図10は、 S が5.0となった時に、MHD発電機内に発生した二次的な反射衝撃波の挙動を圧力センサーによって測定したデータを示している。(文献7)また、この衝撃波によって発電流路内でのファラデー電流が低下する様子を電流分布の測定によって示したデータを、図11に掲げる。このように、大きい相互作用では、プラズマ流れは大きな影響を受けて、発電効率も低下することが分かる。一般的には、 S の値は1.0を越えることはないと考えられているが、エネルギーの取出し量を多くすれば、この限界を越えることもあり得る。発電機の形式や種類によって、相互作用係数の値をどの大きさにすればよいかの研究が大切になっている。図12は、数値計算によって、

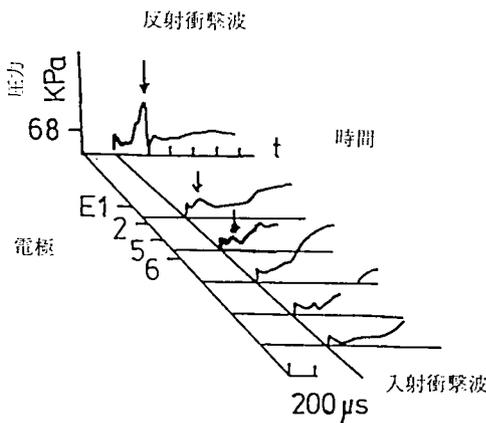


図10 MHD発電機内の圧力分布の測定結果。横軸は、時間。Eは、電極の位置。縦軸は、圧力の値。(文献7)

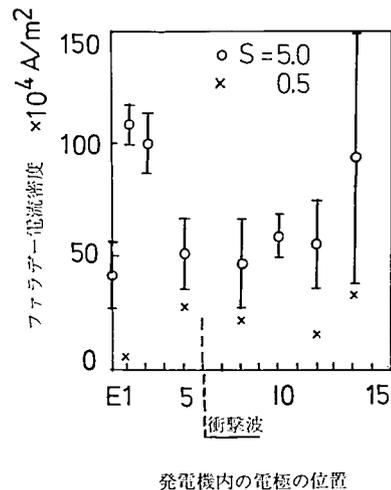


図11 MHD発電機内のファラデー電流密度の分布。二次的衝撃波の後ろで電流が減少する。(文献7) 縦の線は、実験値の範囲を示す。

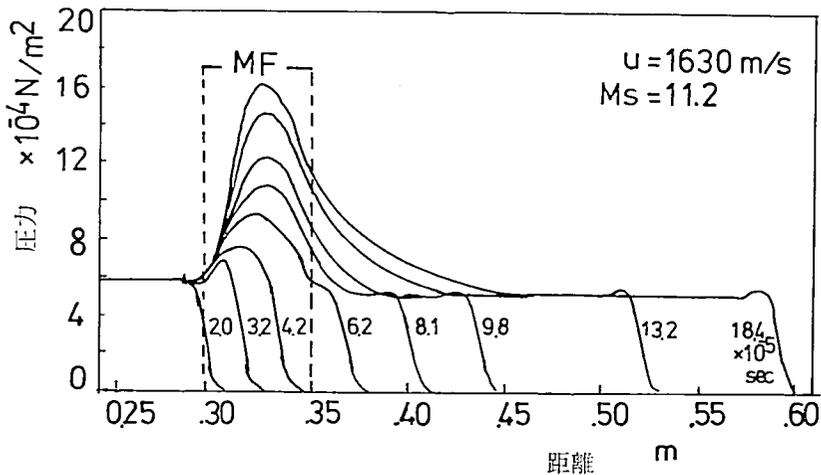


図12 MHD発電機内のプラズマ流と磁場の相互作用により発生する圧力の変化の数値計算。MFは、磁場の範囲。右下の数値は、現象の変化する時間を示す。(文献8) プラズマ流の速度は、マッハ11.2

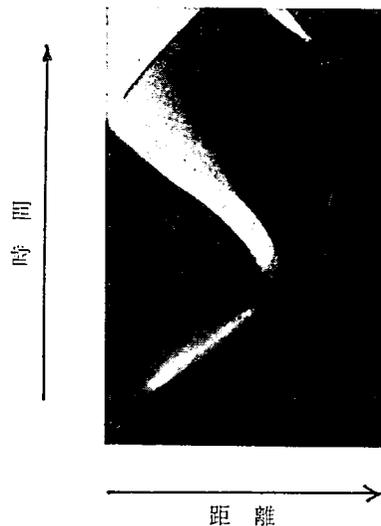


図13 電磁駆動衝撃波管によって作られたプラズマ流と磁界との相互作用。時間は縦軸で、下から上へ経過している。横軸は、距離で、磁界の作用により、途中で流れが反射され、上流へ逆行している。上方の明るい部分は、管の壁によって出来た反射プラズマの光 (文献9)

発電機内に出来る二次的な衝撃波の圧力変動を求めた例である。(文献8)

普通のMHD発電機では、プラズマの電気伝導率はあまり大きくなく、磁界の強さも比較的小さいので(最大でも4テスラ位)、磁界とプラズマ流れの相互作用は大きくないと考えられている。しかし、電気伝導率が高い場合は、この相互作用が極端に大きくなり、磁界とプラズマの凍結現象が起きることもある。そのような実験が、電磁的に駆動される

衝撃波管を用いて行われており、理論的な解析も多くなされている。図13は、電磁衝撃波管を用いて発生したプラズマの流れが、磁界の間をくぐりぬけることが出来ず、戻って行くことを、高速の流しどりカメラによって撮影したデータである。(文献9) 縦軸は、時間軸であり、光っている部分がプラズマの流れで衝撃波はその下側の境界にある。このような現象の解析には、相互作用係数とともに磁気レイノルズ数 R_m という係数が用いられることが多い。定義は、

$$\mu \sigma u L$$

であって、 μ は、流体の粘性係数、 σ は、電気伝導率である。現象の解析には、図13のように流しカメラによる撮影が用いられているが、ここでも高速現象の撮影装置が必要となる。

7 MHD発電機内のプラズマの予備電離の研究

MHD発電が安定に行われるためには、発電機の入口で、ある程度のプラズマの電気伝導率が確保される必要がある。発電機の構造によっては、プラズマの発生装置から発電機入口まである距離が出来てしまうこともある。この距離をプラズマが進行する時間は、数ミリ秒の大きさであるが、この間に壁への熱伝導によって、プラズマの温度が下がってしまうことがある。MHD発電のプラズマでは、電気伝導率は温度の敏感な関数であり、ほぼ200Kの温度低下によって、一桁の電気伝導率の低下がある。したがって、この温度低下は、発電機の性能に大きな影響を及ぼす。

この温度低下を防ぐ方法には、予備電離法というものがある。これは、発電機の入口近くで、放電や気体力学的な方法により、外部から強制的にプラズマの温度を高めるものである。放電による方法は、最も普通のやり方で、流れに平行または垂直に電極により外部より電流を流す方法である。この場合、電極の配置や構造を工夫して、放電が一様になるように配慮する必要がある。図14は、この放電の様子を写真撮影したものである。(文献10)

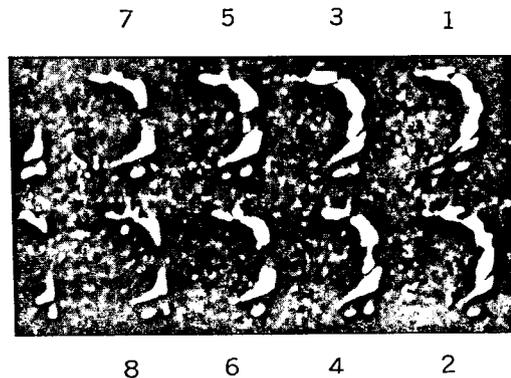


図14 予備放電のイメージコンバーターカメラによるこま撮り写真。時間経過は、右上から数値で示す。放電は、細いフィラメント状となり、予備電離の効果は大きくない(文献10)

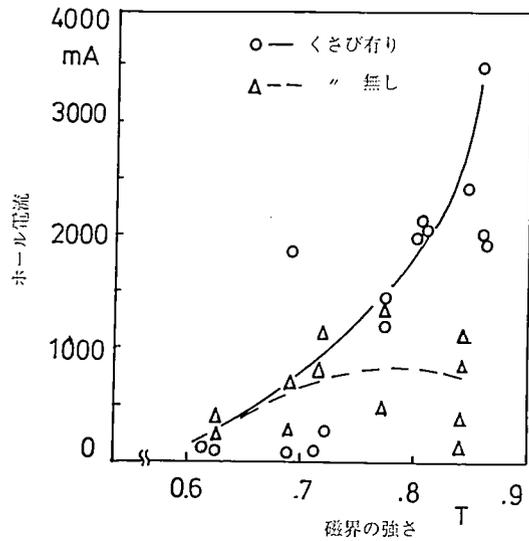


図15 くさびによる予備電離の効果。ホール電流と磁界の関係、予備電離をした場合としない場合で比較した (文献11)

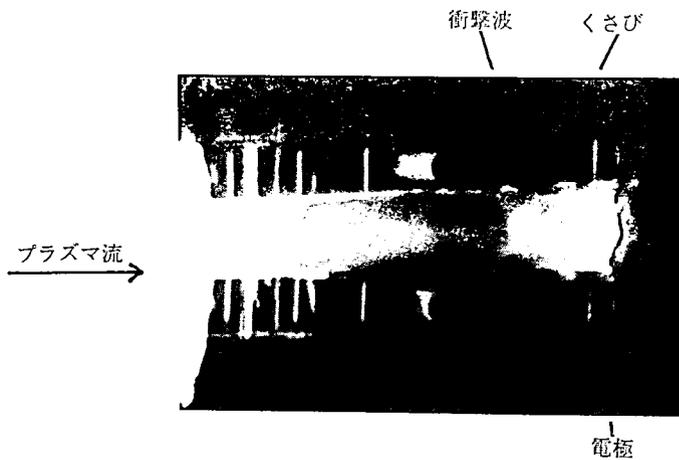


図16 くさびによって出来る衝撃波の写真。
15度のくさびの場合のデータ (文献12)

放電に要するエネルギーは、発電の電力を利用することになる。

また、気体力学的な方法としては、発電機入口に衝撃波を発生させ、その後流で温度が上昇することを利用する方法がある。我々の研究室では、この方法の利害得失について、多くの実験的研究を重ねてきた。その結果、図15に示すように、この方法は有効であることが示された。(文献11) この図は、予備電離をした場合としない場合のホール電流の値の比

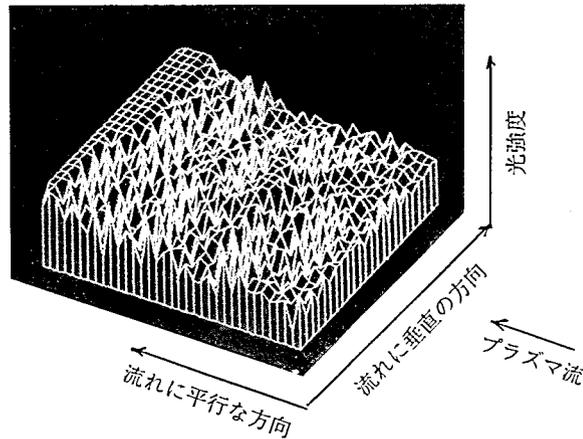


図17 図16に示すデータを画像処理装置によりプラズマの光強度分布を測定し、三次元のグラフに表示したもの

較を行ったもので、明らかに予備電離の効果があることが示されている。

入口の衝撃波の形の変化は、写真撮影によって観測された。図16は、15度のくさびによって発生する衝撃波の形を示す。くさびは、その先端の角度により、発生させる衝撃波の構造が異なり、したがって、予備電離の効果も違ってくる。色々な、形のくさびにより予備電離の有効性を調べた。(文献¹²) 図16のオリジナルの写真を、今回大学に導入された画像処理装置により、プラズマの光の強度分布を測定して三次元のグラフに表示すると、図17のようになる。この図では、水平軸は、それぞれ流れに平行な方向と垂直な方向を表し、縦軸は、光の強度を示す。プラズマの光の強度は、この実験では、アルゴンガスの光放射の強さ、つまり、アルゴンガス内の電子密度と電子温度の関数であり、強度分布の解析からプラズマの状態を明らかにすることができる。この解析には、やはり、高度現象の測定装置や画像処理装置が必要となり、導入された装置を多いに活用して、MHD発電機の高性能化の研究を進めたいと考えている。

謝 辞

高価な高速現象の解析装置を研究設備として導入してくださった大学の関係諸氏に謝意を表します。この装置は、文部省の補助を受け、平成元年度、私立大学研究設備として購入されたものである。本研究は、大学院理工学研究科機械工学専攻 隆啓介との協同研究である。

参考文献

- (1) Hara, Veeffkind and Rietjens : A Numerical Investigation of the Inhomogeneous Discharge Structure in Noble Gas MHD Channels, 19th Symp. EAMHD, The University of Tennessee Space Institute 1981

- (2) Veefkind, Sens and Wetzer : Shock Tube Investigations on MHD Conversion in Argon-Cesium, 19th Symp. EAMHD, The University of Tennessee Space Institute 1981
- (3) Gascadden : Ionization Waves in Glow Discharges, Gaseous Electronics, vol 1 p65 (eds.) Hirsh and Oskam, Academic Press 1978
- (4) Berousov, Eliseev and Sipuk: Ionization Instability and Turbulent Conductivity in the Non-equilibrium Plasma, Electricity from MHD, vol 2 p323, Proc. of Symposium, Salzburg 1966
- (5) Miyata, Iiyoshi and Kasahara: The Effects of Turbulence on the Performance of the Non-equilibrium MHD Power Generator, Proc. of the Faculty of Engineering of Keio University, vol 21 no 85 p30 1968
- (6) Yamasaki, Shioda et al. : Experimental Studies of Closed Cycle Disk Generator in the Fuji-1 Facility, 9th Int. Conf. on MHD Electrical Power Generation, vol 2 p341, Tukuba 1986
- (7) Miyata and Kawamura: Non-equilibrium MHD Power Generation using Non-seeded Argon Plasma, Bulletin of the JSME, vol 19 no 134 p965, 1976
- (8) Rosciszewski and Gallaher: Shock Tube Flow Interaction with an EM. Field, Proc. of 7th Int. Shock Tube Symposium, p475, Toronto University 1969
- (9) Mucha: Interaction of a Strong Shock Wave with Electromagnetic Field, Dynamics of Ionized Gases, (eds.) Lighthill, Imai and Sato, p131, University of Tokyo Press 1973
- (10) Borgi and Veefkind: Ionization Relaxation in a Closed Cycle MHD Generator, AIAA Journal vol 22 no 3 p348. 1984
- (11) 荒木次郎 明星大学大学院理工学研究科修士論文 1989
- (12) Miyata and Tsuboi: Non-equilibrium Hall MHD Generation Experiments with an Inlet Shock Wave Pre-ionization, 22th Symp. EAMHD, Mississippi State Univ, 1984