

# 電離衝撃波および MHD 発電プラズマ流とくさびとの相互作用

宮田 昌彦\*

## Interaction of Ionizing Shock Wave and MHD Plasma Flow with a Wedge

*by Masahiko Miyata*

### Abstract

We have made experimental works of pre-ionization of the MHD generation plasma by a wedge with using a shock tunnel. A wedge with the apex angle of 30 degrees was set at the stagnant of the shock tunnel. High speed photographs of the plasma flow around the wedge were taken and the intensity of the plasma radiation was analyzed. Interaction of the ionization shock wave with the wedge is revealed as the transitional Mach reflection. The plasma flow with a bow shock wave in front of the wedge was re-heated in the thermal boundary layer at the surface of the wedge. This would contribute to heating up the electrode surface just behind the wedge and also reduce the electrode voltage drops in the MHD generator.

### 1. 序言

我々の研究室では、貴ガス（アルゴン）を作動気体とする、無シードの閉サイクル MHD 発電の実験的研究を、衝撃波風洞を用いて行っている。閉サイクル MHD 発電は、作動気体中に、電子温度と気体温度が相異なる熱力学的非平衡状態を、誘導された電場により発生させて、発電を行う方法である。発電機の電気的特性は、主に電子温度に依存し、一方、作動気体の熱特性は、気体温度に支配されるから、電子温度を気体温度より高く保つことによって、発電作動流体を保持する流路壁の耐熱性の制限を軽減しながら、有効な発電ができることとなる。しかし、例えば、作動気体として高価な貴ガスをを用いることによる経済的な問題や、熱力学的非平衡状態を保持することから発生するプラズマ内の乱流状態が、発電機の電気特性を低下させることなどの問題を持っており、研究開発は、基礎的段階にある。我々は、この閉サイクル MHD 発電機（この名称は、貴ガスを作動気体とすることから、サイクル内で貴ガスを循環して使用することを意味する）の発電特性に大きな影響を与える、発電機プラズマの緩和効果を防止する手段としての、予備電離の方法について、研究を行っている。

緩和効果とは、発電機内でプラズマの電離度が徐々に上昇することを言い、MHD 発電によって誘導された電場が、プラズマを加熱して、電気特性が上昇するまでに有限の時間が必要なことを意味している。この時間は、プラズマの発電機入り口での熱平衡温度が低いほど長くなり、閉サイクル型では、特に発電機の特性を低下させる原因となる。

---

\* 理工学部機械工学科教授 流体工学

また、閉サイクル型では、超音速の作動気体流を用いる可能性があり、発電機内では緩和が終了せず、電気特性が低いまま、発電が行われる可能性もある。このため、発電機入り口で、プラズマの温度を、外部から作用を加えて、高めておくことが考えられる。これは、予備電離と言われており、色々な方法があるが、我々の研究室では、気体力学的に、入り口衝撃波を用いて、プラズマを加熱する方法を研究している。この入り口衝撃波は、発電機入り口に設けたくさびによって、発生させている。この予備電離法により、実際、予備電離を用いない場合に比べて高い誘導ホール電流が得られており、この方法は、有効であることを確認している。(文献1)<sup>1)</sup>

最近、高空を超音速(速度と音速との比を表すマッハ数で、5から10)で飛行する大型の航空機の研究開発が試みられている。これらの航空機での最大の問題は、機体表面の温度の検討である。空気との摩擦によって発生する熱により、機体温度が高くなり、材料の耐熱性の問題が発生する。この方面の問題の解決に対しても、これから述べる衝撃波とくさびの干渉の研究は、重要な参考資料を提供し得るものと考えられる。

本研究では、新たに導入された高速度カメラを用いて、

- (1) 衝撃波管によって発生した電離衝撃波と、くさびの相互作用、
- (2) 電離衝撃波背後のプラズマ流と、くさびの相互作用、

の状況を写真撮影して、解析し、理論と比較検討を行った。また、プラズマ流の発光強度を、光センサーと分光器および画像処理装置により分析し、プラズマの温度を推定した。くさび周りのよどみ点温度は、熱伝導センサーと分光器により、測定した。

## 2. 実験装置

実験装置は、その概略を、図1に示すように、内断面積  $100 \times 80 \text{ mm}^2$  の矩形断面の衝撃波管(風洞)と測定系からなる。本報告の研究では、MHD 発電機内のくさびの周りの流れを観測するために、同形状の独立したくさびを、アクリル樹脂で作製し、衝撃波管のよどみ点に、図1に示すように設置した。この図は、くさびを上から見た図であり、くさびは、衝撃波管の軸に平行に設置されている。くさびの形状の詳細は、図2に示す。くさびの先端の角度(頂角)は30度である。これは、くさびを横から見たもので、写真撮影用の窓から、図2のように見える。図2の点線の四角形の内側が、カメラの視野である。

くさびの周りの流れは、一部発光しており、これを写真撮影するために、超高速度イメージコンバーターカメラ(イメコン792, ハドランドーホトニクス社製)を、衝撃波管軸と垂直に置いてある。(図1) イメージコンバーターカメラには、現象に合わせて電子シャッターを開けるためのトリガーパルスが必要で、これは、半導体圧力センサー(PHS-10, 豊田工機)と増幅器(AA6010, 同上)より得ている。半導体圧力センサーは、衝撃波管の破膜によって発生する衝撃波の圧力上昇をとらえて、増幅する。この圧力上昇の出力は、3チャンネルパルスディレイジェネレーター(3CPDG, ハドランドーホトニクス社製)に送られ、任意の時間(約  $600 \mu\text{s}$  から  $1 \text{ ms}$ ) 遅延されてから、イメージコンバーターカメラに送られる。このパルスに合わせて、カメラのシャッターが開けられ、その写真は、ポラロイドフィルムに記録され、解析される。

また、光センサーと分光器および熱伝導センサーが、くさび周りのプラズマの温度測定のために、設置されている。光センサーの出力は、増幅器により増幅されて、メモリー

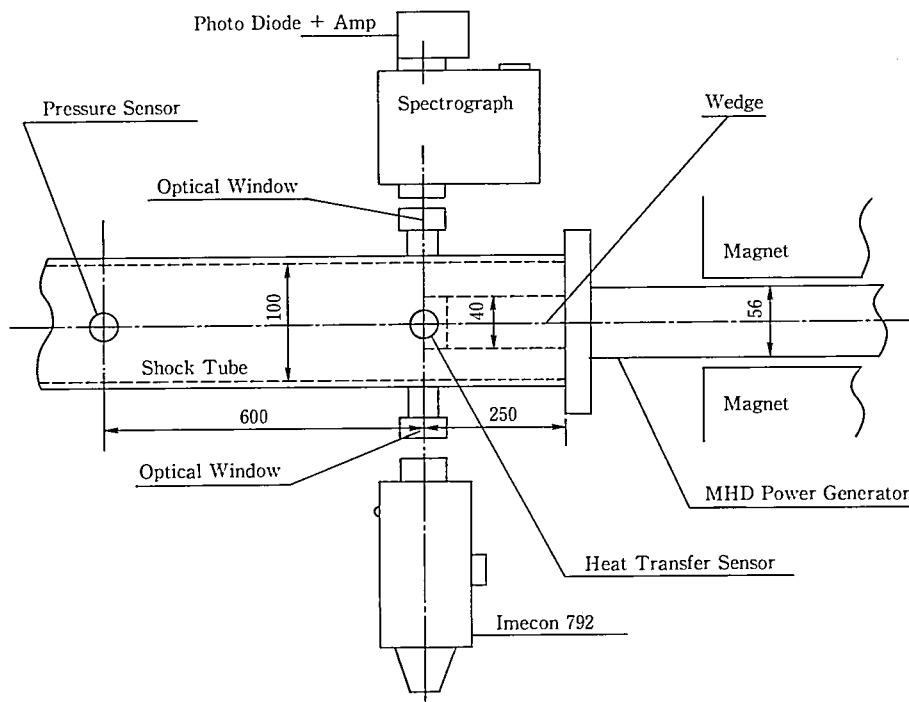


Figure 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

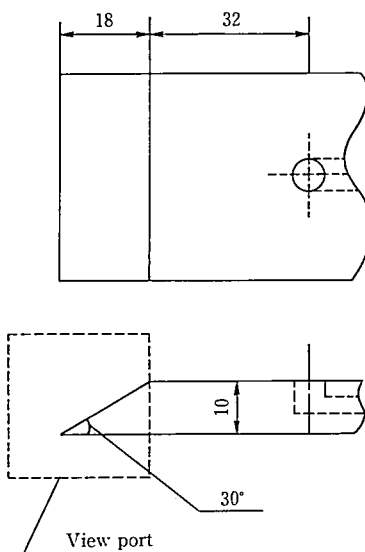


Figure 2 The wedge with the 30 degrees apex angle.  
View port indicates the camera visual field.

スコープに記録される。熱伝導センサーは、直流電流源が必要で、やはり、出力は、増幅器を通してメモリースコープに記録される。光センサーと分光器、および熱伝導セン

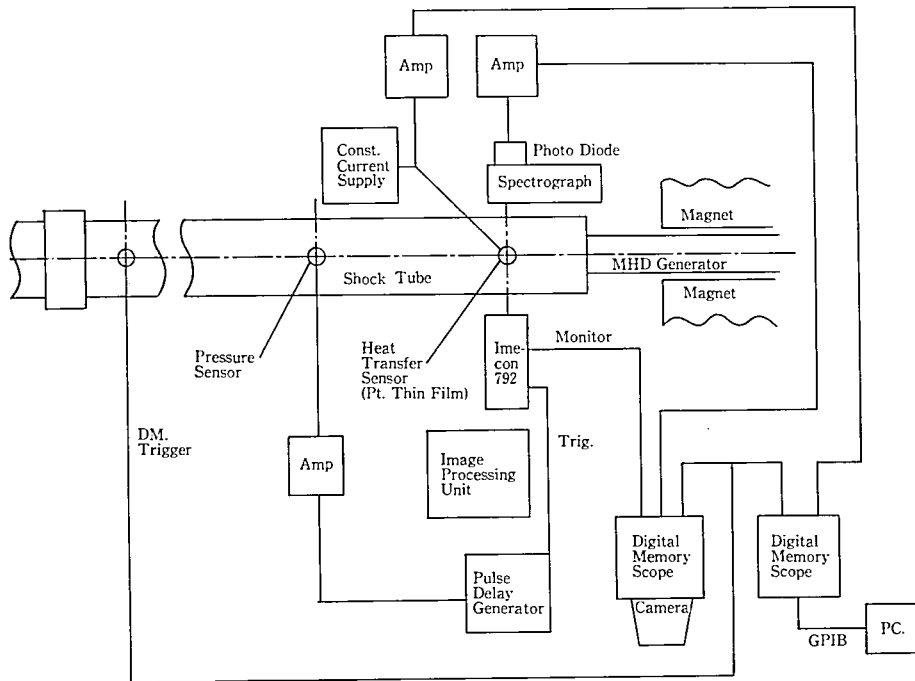


Figure 3 Schematic diagram of the measurement circuit.

サーの詳細については、文献(2)<sup>2)</sup>に述べた。以上の測定系の回路図を、図3に示す。

実験上の最も重要な点は、イメージコンバーターカメラへ送られるパルスの遅延時間の設定で、何回かの試行錯誤の結果、時間を決定した。

### 3. 実験結果とその検討

図4は、イメージコンバーターカメラによって撮影された、くさび周りの電離衝撃波とプラズマ流の運動を示す、コマ撮り写真の一例である。コマの順序は、図4の上下に付けた数値で示されている。最も左下のコマが、カメラのシャッターが開けられてから、 $100\mu\text{s}$ 後に撮られた、1コマ目で、2コマ目はその列の上側にあり、次いで、第2列の下側に、3コマ目、以下、数値の順に、シャッターが切られていることになる。各コマは、 $100\mu\text{s}$ の時間間隔で撮られており、1コマの露光時間は、 $20\mu\text{s}$ である。この写真の衝撃波の速度は、約 $1800\text{m/s}$ であり、くさびのある撮影窓の部分を通過する時間は、約 $20\mu\text{s}$ であるから、1コマ内に衝撃波を撮影することが可能である。

図4から、2コマ目に、くさびに電離衝撃波が衝突し、くさび上面で、後述のような反射過程が行われているのが、観測された。図4の、3コマ目から4コマ、5コマ目の間は、くさびと電離衝撃波の気体流の間の相互作用の結果、くさび表面の熱境界層内に発生する新しいプラズマを示している。6コマ目では、電離衝撃波は、くさびを通り過ぎて、接触面以後の冷たい気体が通過し、プラズマが消滅していることを示す。7コマ目、8コマ目では、衝撃波管のよどみ点で、衝撃波が反射して、その背後の高温度の気体流が、くさびを逆向きに通っていることを示す。

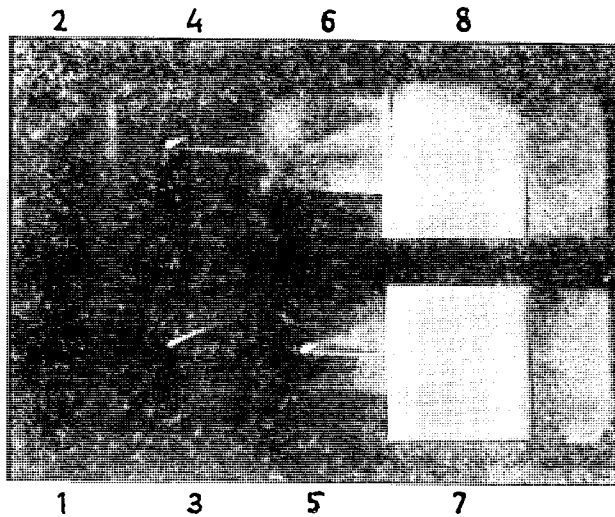


Figure 4 Time sequence of the high speed photo in the case of Mach number 4.0. Numeric figures indicate the time sequence. Exposure time of the each frame is  $20\mu$  sec and time interval of the frames is  $100\mu$  sec.

電離衝撃波の背後のプラズマの発光は、あまり強くない（温度約 1800K）ので、写真の鮮明度があまり良くないが、画像処理装置により、光強度を増幅して、解析を行った。

### 3. 1 電離衝撃波とくさびとの相互作用

図5は、くさびに入射してくる電離衝撃波とくさびとの相互作用を、時間を追って、模式的に書いたものである。衝撃波は、衝撃波管の破膜によって作られ、くさびに衝突すると、くさびの上側と下側に分割される。下側の衝撃波は、そのまま、変形せずにくさびを通り過ぎるが、上側の衝撃波は、反射過程を行う。図5(b)に示す形の反射を、マッハ反射と呼んでおり、撮影された写真を、図6に示す。原写真は、露光が弱いため、画像処理装置によって、修正してある。波は図5(b)に示すように、三つの衝撃波で構成されている。三つの衝撃波の交点を、三重点と言う。三重点後方の、くさびの壁と反射衝撃波の間の温度が、上昇しているのが、写真撮影の結果、確かめられた。

くさび上面の衝撃波の反射過程は、多くの文献で研究されており、理論解析も行われている。(文献3)<sup>13)</sup> 図7は、アルゴンガス中の、種々な反射過程を分類した理論解析の結果であり、縦軸は、くさび頂角、横軸は、入射衝撃波マッハ数であり、RRは、正常反射、TMRは、遷移マッハ反射、DMRは、二重マッハ反射を示している。図上の○印は、本報告の実験点であり、これから、測定された反射過程は、TMRであることが分かる。図6のデータでは、反射過程の詳細を判別するのは困難であるが、TMRであれば、三重点の後方の速度は、三重点に対して、超音速となっている。

反射過程は、入射衝撃波の脚部が、くさびの終端、つまり、水平部分に移行する肩の部分にきた時、終了し、反射波は消滅して、次の、プラズマ流との相互作用に移行すると考えられる。

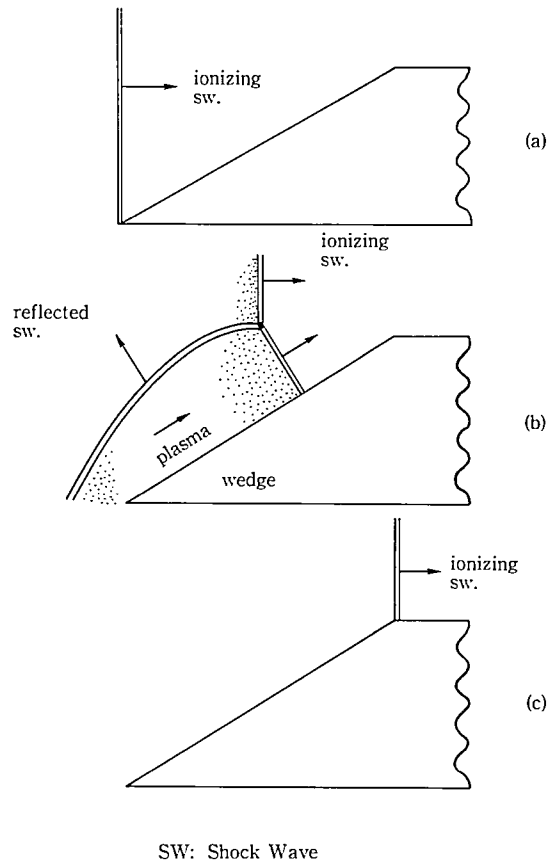


Figure 5 Schematic diagram of the interaction of ionizing shock wave with a wedge. Time sequence is from (a) to (c).

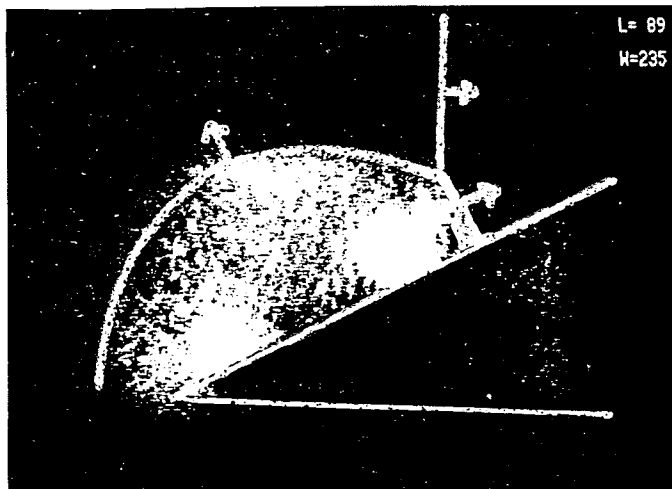


Figure 6 Photo of the reflection of the ionizing shock wave.

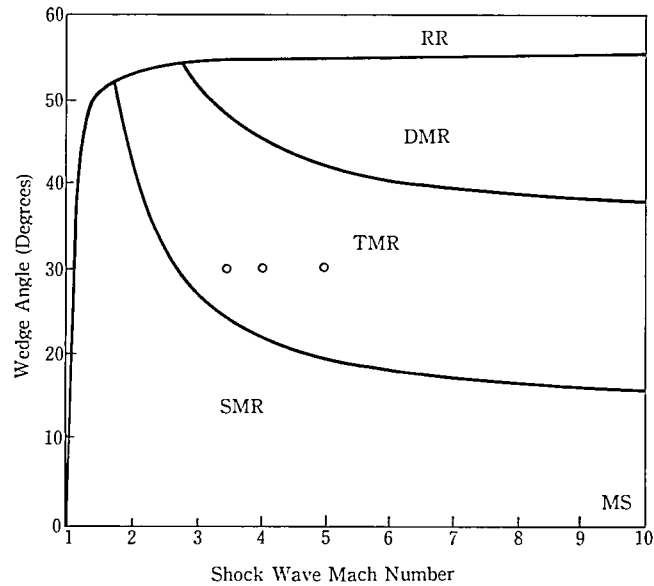


Figure 7 Domain of the reflection processes in the perfect Argon (Ref. 3). Circles indicate experimental data. RR : regular reflection. DMR :double Mach reflection. TMR: transitional Mach reflection. SMR :single Mach reflection.

### 3. 2 MHD 発電プラズマとくさびとの相互作用

電離衝撃波がくさびを通過した後、再び、衝撃波の背後に形成された超音速のプラズマ流とくさびの相互作用が行われる。図8から図10までは、高速度カメラで撮影されたデータを拡大した写真である。それぞれ、衝撃波管の初期圧力を変化して、入射衝撃波の速度を、マッハ数で、 $Ms=5.0$  (図8),  $Ms=4.0$  (図9),  $Ms=3.5$  (図10) としてある。プラズマは、くさびと干渉し、くさび表面で摩擦により、再加熱されている。発光して

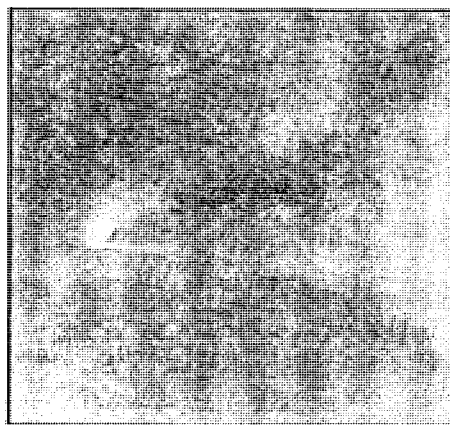


Figure 8 High speed photo of the plasma flow around the wedge.  
(Stagnation temperature=4400 K, Stagnation pressure=22 KPa, Mach number=5.0)



Figure 9 High speed photo of the plasma flow around the wedge.  
(Stagnation temperature=3500 K, Stagnation pressure=34 KPa, Mach number=4.0)

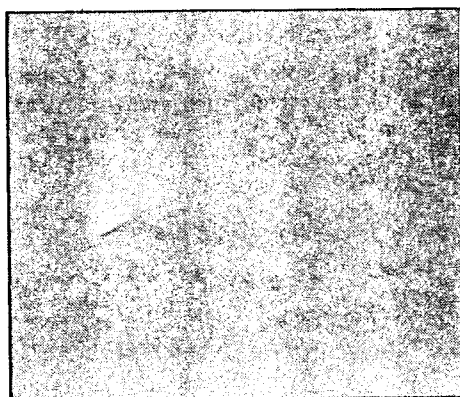


Figure 10 High speed photo of the plasma flow around the wedge.  
(Stagnation temperature=2900 K, Stagnation pressure=60 KPa, Mach number=3.5)

いるのは、アルゴンガスであり、その光強度の分布を、画像処理装置により測定したデータの一例を、図 11 に示す。これは、図 9 に対応している。この測定データと、光センサーによる分光測定の結果とを比較すると、くさび表面のプラズマの温度は、2900K と見積もられる。

再加熱の程度が最も大きいのは、 $Ms=4.0$  の場合で、それ以上でも以下でも、再加熱の程度は減少している。これは、衝撃波管での実験では、速度と作動気体の初期圧力をまったく独立には変えられないことによるもので、一般的に言えば、 $Ms$  が大となるほど、再加熱も大となると考えられる。再加熱は、くさびの先端から少し離れたところに行われる帽子状の衝撃波によって、促進されると考えられる。図 12 に、その状況を模式的に示す。図 9 の写真では、帽子状衝撃波の発光は、微弱で、その構造の判別は難しいが、その存在は確認される。

この再加熱によって、MHD 発電プラズマは予備電離され、発電機内に流れ込むとき、



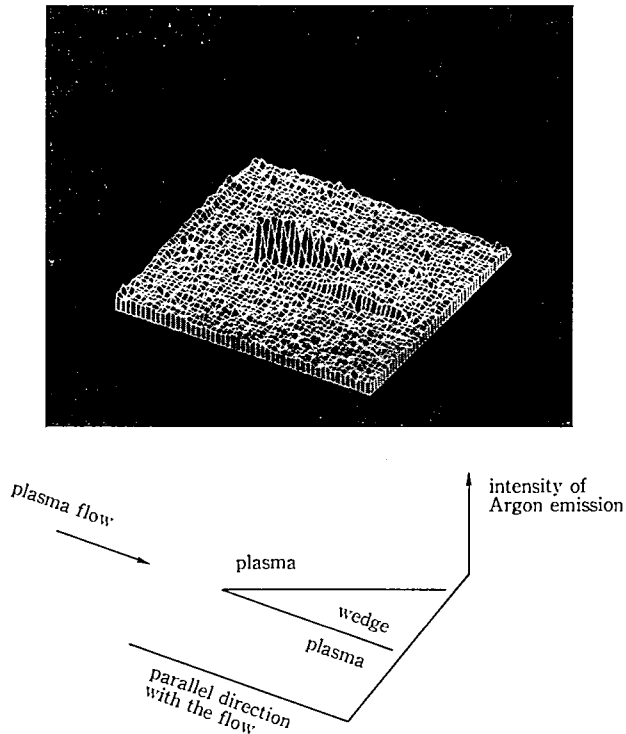


Figure 11 Argon plasma emission intensity distribution around the wedge in the case of Mach number 4.0.

壁面の熱境界層が加熱されるので、電極損失を減少させる効果が生ずると考えられる。3. 1 に述べた、初めの電離衝撃波の反射過程と、3. 2 で述べた、プラズマ流の再加熱の関係は、詳細に述べるには、もう少し研究の進展が必要であるが、電離衝撃波の反射過程により、アルゴンガスの電離が促進され、プラズマの再加熱が容易になる効果があると考えられる。

#### 4. 結論

MHD 発電機内のプラズマの予備電離を、気体力学的に行うために、衝撃波管内のよどみ点に、頂角 30 度のくさびを置き、くさびの周りの電離衝撃波の運動とプラズマの流れを、高速度カメラで写真撮影を行って、測定した。その結果、電離衝撃波は、くさび上面で、マッハ反射を行い、さらに、時間をおいて、プラズマ流がくさび上面で、再加熱されることが分かった。マッハ反射と再加熱は、相互に関係して、予備電離に貢献することが分かった。この再加熱により、気体力学的な予備電離は、特に、MHD 発電流路壁の電極損失の減少に効果的であると考えられる。

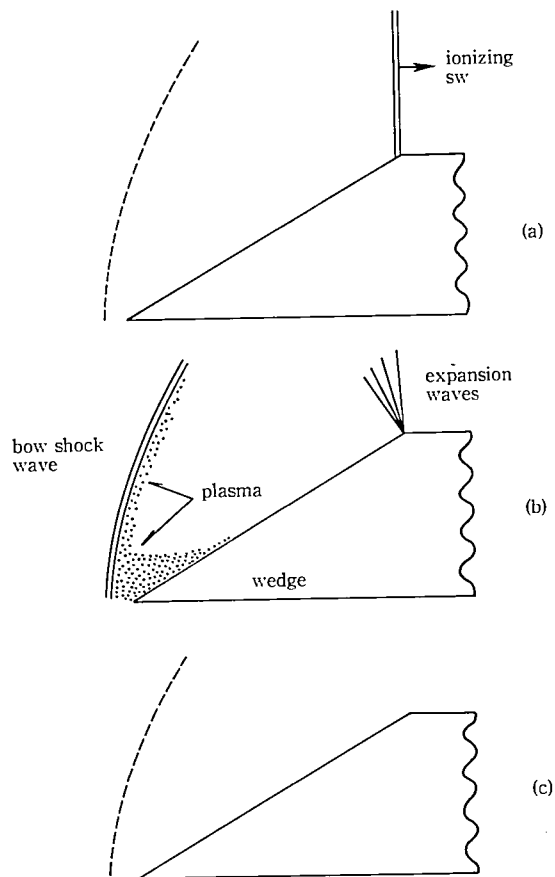


Figure 12 Schematic diagram of the interaction of a bow shock wave and plasma flows with the wedge. Time sequence is from (a) to (c).

## 5. 謝辞

本研究は、明星大学理工学研究科機械工学専攻 修士課程 隆 啓介 との協同研究である。

## 参考文献

- (1) 宮田昌彦 MHD 発電研究における超高速現象の解析 明星大学研究紀要 第 27 号 p31 平成 3 年
- (2) 宮田昌彦 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 明星大学研究紀要 第 25 号 p69 平成元年
- (3) Gabi Ben-Dor Shock Wave Reflection Phenomena Springer 1991