

応用力学研究所低圧プラズマ風洞について

村岡, 克紀
九州大学応用力学研究所 : 助教授

平城, 直治
九州大学応用力学研究所 : 助手

<https://doi.org/10.15017/4743475>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 36, pp.13-24, 1972-02. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



応用力学研究所低圧プラズマ風洞について

村 岡 克 紀*
平 城 直 治**

概 要

核融合装置, MHD 発電機等, プラズマ状態にある流体を作動媒体とする機械の実現が問題になるにつれ, プラズマの流動状態に関する知識が要求されて来た. このプラズマを「高エネルギー流体の発生と制御」という面から見直し, 研究を行なうため, 今度応用力学研究所に設置された低圧プラズマ風洞について, その概要と二, 三の予備実験結果を記した.

1. ま え が き

核融合装置, MHD 発電機, 宇宙推進機等, 高エネルギー状態にある流体を作動媒体とする諸機械の実現が現実の問題になるにつれ, プラズマの流動状態に関する広い知識への要求が切実な問題となって来ている. また, 材料の溶切断, 溶解再結晶などの作業にプラズマ処理を行ない高温化学反応をプラズマを用いて起させる際などには, プラズマの安定な発生・制御の問題, プラズマと材料との相互作用の機構の解明が迫られる.

ところで, プラズマは通常の流体とは違って, 密度, 温度等の諸パラメーターにより, その振舞が大きく変化するので, 上記のいろいろな問題に依じて, その支配的な機構が異なるため, それぞれに応じた取扱いをせねばならぬ部面も多いが, 我々はこれらを「高エネルギー流体の発生と制御」という面から改めて見直し, 力学的な立場から種々の研究に着手している¹⁾²⁾. この研究を行なうための一環として, 今度応用力学研究所に低圧可変密度プラズマ風洞装置が設置されたので, その装置の概要と, 二, 三の予備の結果を示し, 本装置が行なう予定の研究分野について言及する.

本風洞で実現できる流れは比較的密度が高く, 電離度の低いプラズマ流である. プラズマが通常の流体と著しく異なった挙動を示すのは, 密度が低く, 電離度が高い, いわゆる無衝突プラズマといわれるパラメータの領域であり, 核融合プラズマその他に広い応用を持っている. これとは異なり, ここで述べるプラズマは流れの機構的には通常の連続流体ないし, 稀薄気体力学的な立場から理解し得るものではあるが, 上記プラズマ加工, 高温化学反応等の基礎研究としてのプラズマと流体との相互作用の解明, プラズマの適確な制御, 稀薄気体力学の荷電粒子気体への発展という学問的興味のある問題の研究に有用な設備である. さらに可変圧力の下で連続運転可能ということから運転操作が単純であり, 測定が容易になるという利点を有する. なお, 電離度は高いが粒子間衝突は十分大きい場合の諸現象については別途研究を進めつつあり, 更に無衝突プラズマについても新たに研究を行なう予定で計画を進めている.

* 九州大学助教授, 応用力学研究所

** 九州大学助手, 応用力学研究所

2. 装 置

プラズマ風洞、および付属設備の配置を図1に示す。トーチ部には、ポンプより作動気体が供給され、プラズマ状態になって、ノズル・テストセクションを通して、真空ポンプにより外気へ排出される。

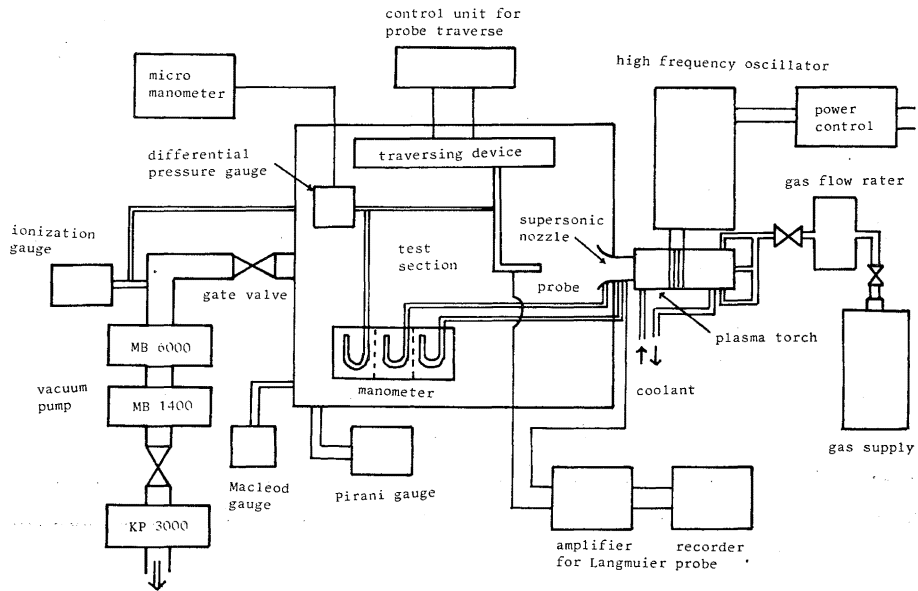


図 1 風洞装置概略図

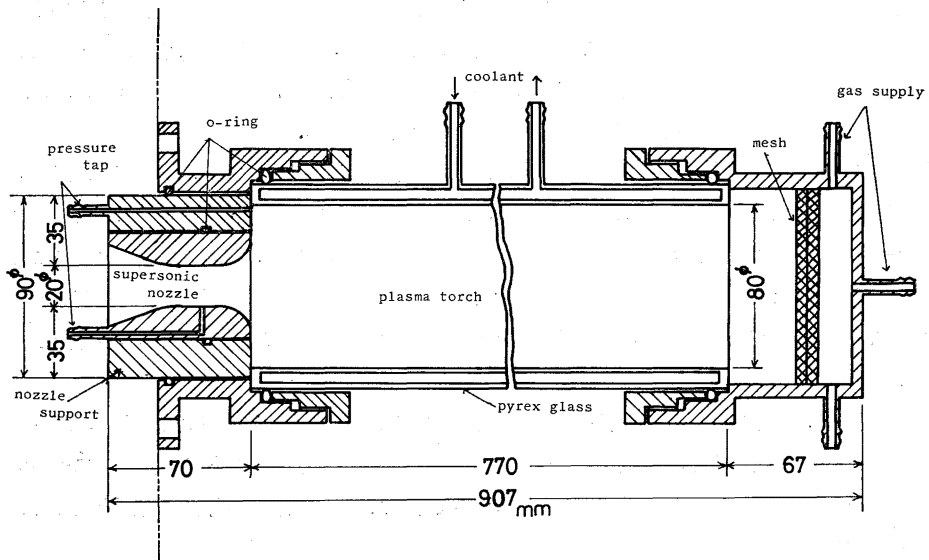


図 2 プラズマトーチ・超音速ノズル

以下、個々の部分について詳述する。

2. 1. プラズマトーチ

高周波誘導方式によるプラズマの発生を行なっているが、発振器本体については文献 (1) に述べた。

トーチヘッド部の詳細を超音速ノズル部とともに、図 2 に示す。同図からわかるように、プラズマ発生部は超音速風洞のプレナム室としての役割も兼ねており、プラズマの安定化のために、ガス供給口側にメッシュを入れた。図 2 には、パイレックス二重管による水冷トーチを示したが、低出力・短時間運

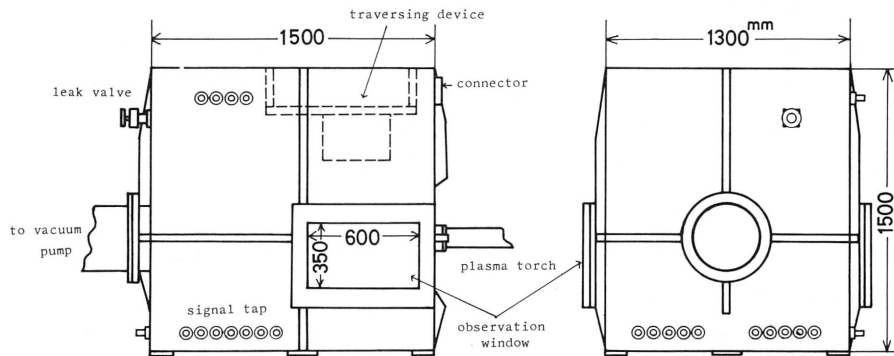


図 3 風 洞 本 体 概 略 図

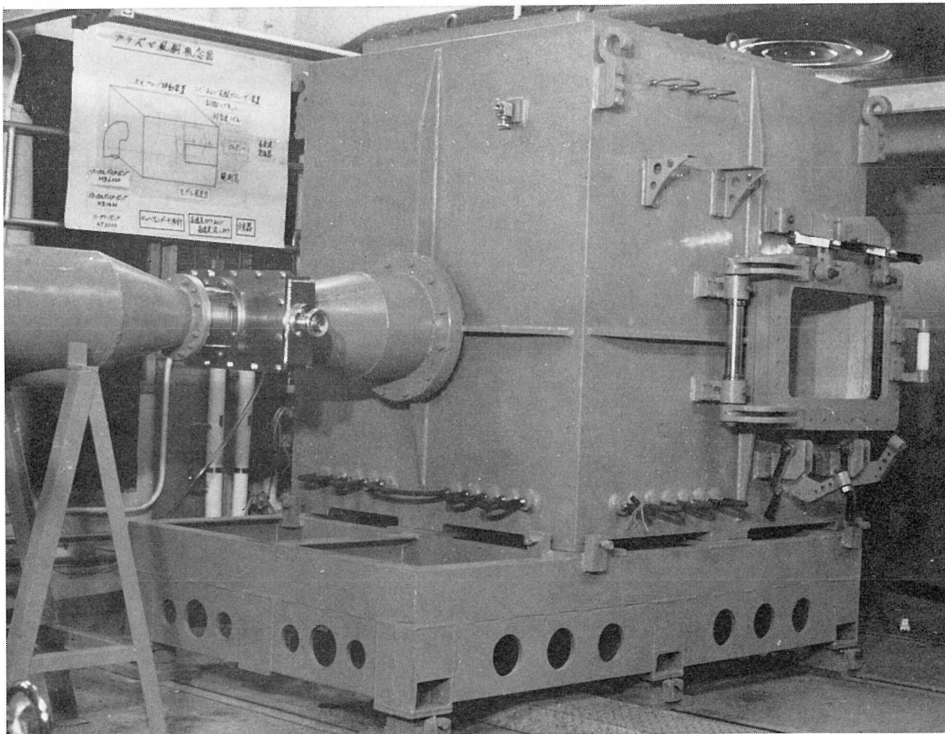


写真 1 風 洞 本 体 外 観 写 真

転 ($V_p \sim 3\text{kV}$, 運転時間 10 分以下) には空冷一重管でも十分であるが, 高出力 ($V_p > 6\text{kV}$) の運転操作には, 石英管での水冷が必要である. その中間の出力運転では, 工作の容易なパイレックス二重管を用いている.

なお, 超音速に加速しない場合の運転に際しては, 超音速ノズルを除去し, また直流アークによるプラズマ源も, トーチヘッドの簡単な改造で, とりつけ得るようにした.

2. 2. 風 胴 本 体

図 3 に風胴本体図を, また写真 1 にその外観写真を示す.

風胴本体はこの種のものとしては, かなり大きい, これは, (i) 風胴内部での諸種の計測の容易さ, および気流を制御するためのマグネットの設置のため, (ii) 三次元回転トラバース装置の内蔵のため, および (iii) 圧力脈動を抑えるためのダンブタンクの役割を持たせるため, である.

両面の観測窓は, 現在強化ガラスを用いているが, 光学観測を行なう際には, 光学ガラスと交換できるようにした.

風胴本体には, 圧力その他諸種の信号をとり出すための測定孔, 電気信号とり出しのためのハーメチックシール, および, リークバルブ等を設けた.

2. 3. 真 空 排 気 系

真空排気系は, 油回転ポンプ KP-3000; にメカニカルブースターポンプ MB-1400, MB-6000 を直列に配置したもので, ポンプ引口での排気速度は最大 9600 l/min (0.1 tor 付近) である. その到達真空度は 10^{-4}tor のオーダーに入っている.

写真 2 に真空ポンプの外観写真を示す.

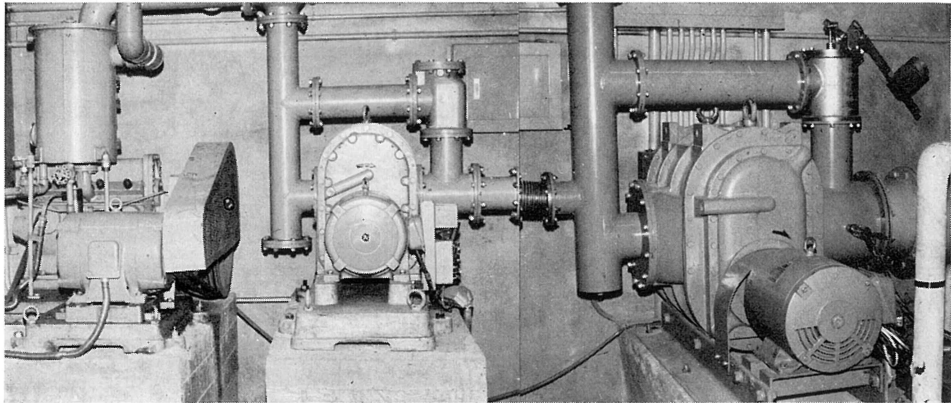


写真 2 真 空 ポンプ 系 外 観 写 真

なお図 1 に示すように, 風胴本体と真空ポンプの途中の配管にゲートバルブを設け, 両者を遮断することができるようにした.

2. 4. プローブおよびモデルトラバース装置

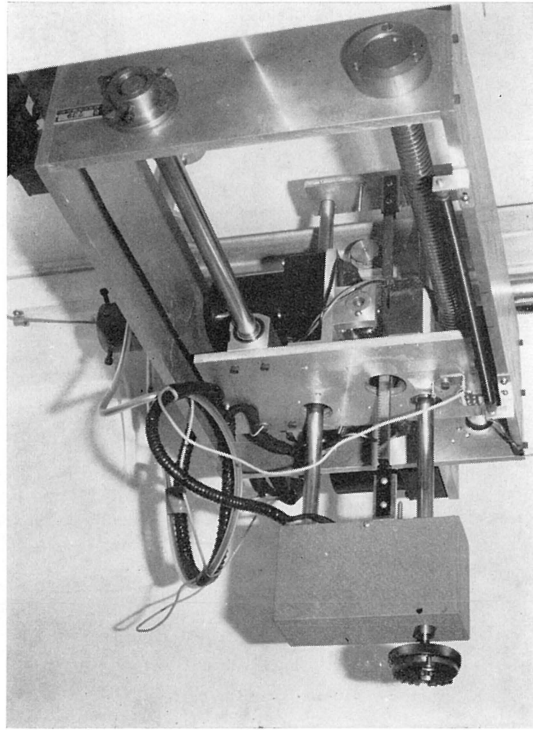
気流中に置かれたプローブおよびモデルを回転トラバースするために, 本風胴中に三次元回転トラバース装置を設置した. 写真 3 に 3 次元回転トラバース装置の外観を示す. トラバース範囲は高さ 260

mm, 幅 310mm, 流れ方向 520mm, 回転 360 度であり, その動きは風洞外部から制御し, その位置はサーボシンクロ系により誤差 1mm 以内の精度でダイヤル上に示される. また電気信号としてとり出すことも可能である.

2. 5. 測 定 装 置

(i) 圧力計

風洞壁圧の測定には, 回転式マクラウド真空計およびピラニゲージを用い, 真空ポンプ引口の到達真空度測定には電離真空計を用いた. またプレナム室圧, 超音速ノズルスロート圧, およびピトー圧の測定には真空用に使い易くしたマノメーターを用いた. マノメーターの液体には飽和蒸気圧の低い, ジブチルフタレイト (比重 1.05) を用いた.



写 真 3 三次元回転トラバース装置

(ii) ピトー管 微圧計

プラズマ流の流速測定に全圧ピトー管を用いたが, この外観を写真 4 に示す. 低密度流になると粘性効果がきいて, 通常のピトー管方式は通用できなくなるが, それを系統的に調べるために, 先端の寸法・形状の異なるピトー管を準備した.

低密度流でのピトー管の出力は 1 tor 以下であり, それを精度よく測定するために差動トランス法を用いた微圧計を用いた. 写真 5 にその外観写真を示す.

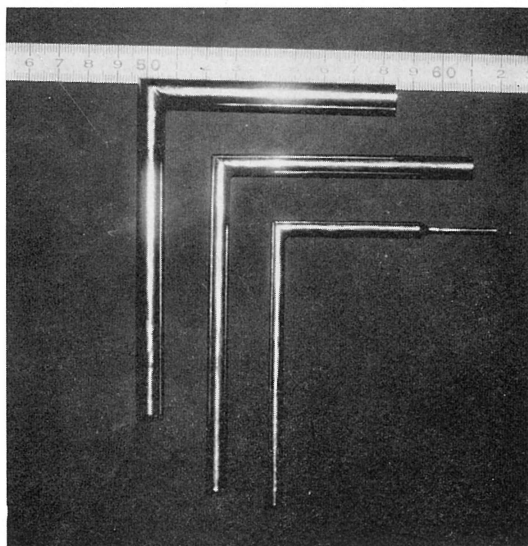


写真4 ピトー管外観写真



写真5 微圧計及び検出器

(iii) ラングミュアプローブ

プラズマ中の荷電粒子密度、温度等を測定するために用いたラングミュアプローブの回路を図4に、またプローブおよび検出器の外観を写真6に示す。

プローブの寸法、形状は適宜実験に応じて選んだ。

(iv) 分光光学系

プラズマから放射される光を分光計測するための装置については、すでに文献(1)に詳述した。

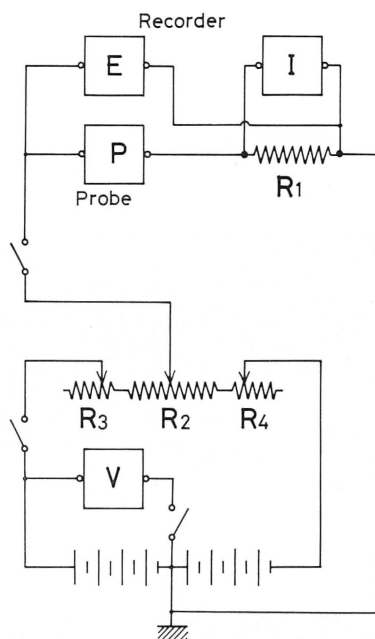


図 4 ラングミュアプローブ回路図

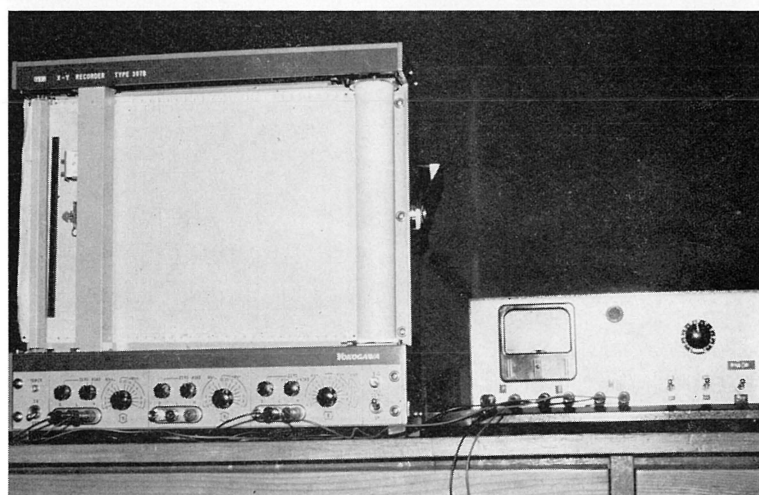
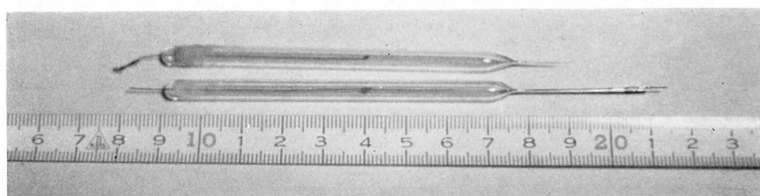


写真 6 ラングミュアプローブ及び検出・記録装置

3. 二, 三の予備的結果

ここでは, 風胴の予備運転の状況およびその際得られた初期的なデータを示す.

前節 2 に述べた測定法を用いての詳しい系統的な計測は, 諸々の圧力レベル, プラズマ入力に対して行なわれる予定であるが, それについて本節で簡単に言及する.

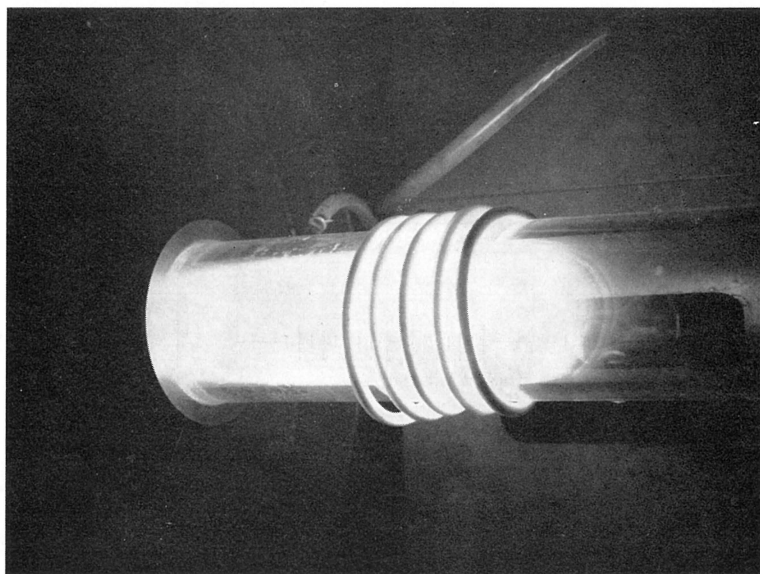


写真 7 プラズマトーチ運転状態

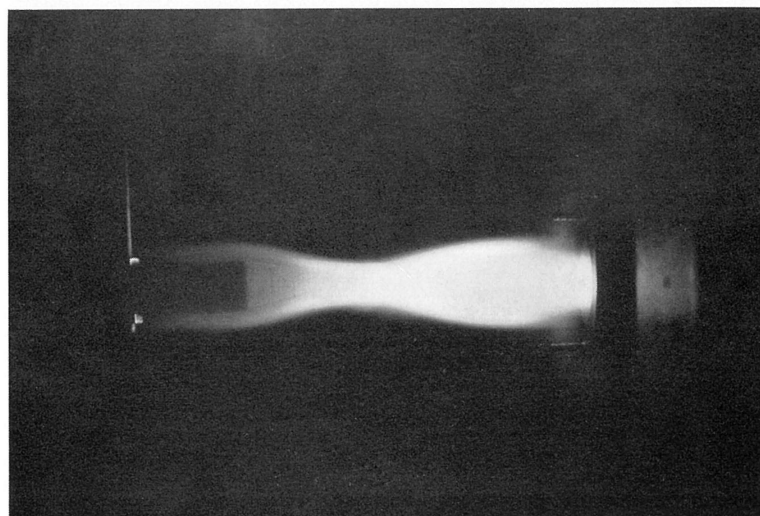


写真 8 円錐挿入時の流れ写真

3. 1. プラズマ外観

アルゴンガスを作動気体とし、ガス流量 $Q=20\text{ l/min}$ 、発振器条件、 $T=1$ 、 $C_p=1.5$ 、 $V_p=3.5$ （記号は文献(1)参照）の下でのプラズマトーチの運転状況を写真7に示す。また同じ条件下で、テストセクションでの流れに、開き角30度の円錐を挿入した場合の流れを写真8に示す。これにより不足膨脹のパターンが認められる。

3. 2. 微圧計検定曲線

低密度流中の小さなピトー圧を精度よく読むために、前節に示した微圧計を用いた。これはダイヤフラムにかかる差圧による変化を、差動トランスにより検出するもので、検定は差圧の代りに分銅によるダイヤフラムの変位検出により行なった。結果を図5に示す。同図より、本実験で目的とする 0.5 tor 以下の領域でも精度よく測定できることがわかる。

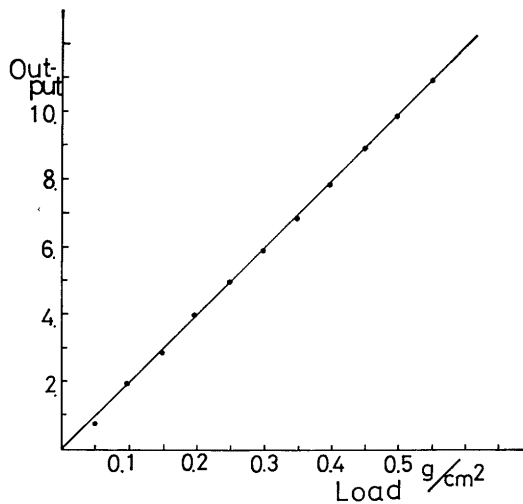


図 5 微 圧 計 検 定 結 果

なお、ピトー圧測定時の流れ写真を写真9に示す。前述の条件下での流れの測定時のものであり、ピトー管前方に衝撃波が形成されている様が、明白に認められる。

3. 3. ラングミュアプローブによる測定

アルゴンガスを作動気体とし、ガス流量 $Q=10\text{ l/min}$ 、発振器条件、 $T=1$ 、 $C_p=3.1$ 、 $V_p=4.0$ の下での流れの、ラングミュアプローブによる電子温度測定を行なった。プローブは写真6に示した円筒状のもので（ $50\mu\phi$ のものを使用）、その直径に対して粒子間の平均自由行程が十分大きいこと、電子温度の測定には流れの影響は入らないこと、などのチェックが必要であるが、ここではこれらの条件は満足されているとして測定を行なった。これらのチェックを含めて更に詳しい測定は今後行なう予定である。

プローブの電圧—電離特性をレコーダーに記録したものの一例を図6に示す。同図よりイオン電流分を差引き、プローブ電圧(E)に対して電子電流(I)を半対数方眼紙上にプロットして図7に示す。



写真 9 ピトー圧測定時の流れ写真

ピトー管前方に形成された衝撃波の存在が、はっきりと認められる。

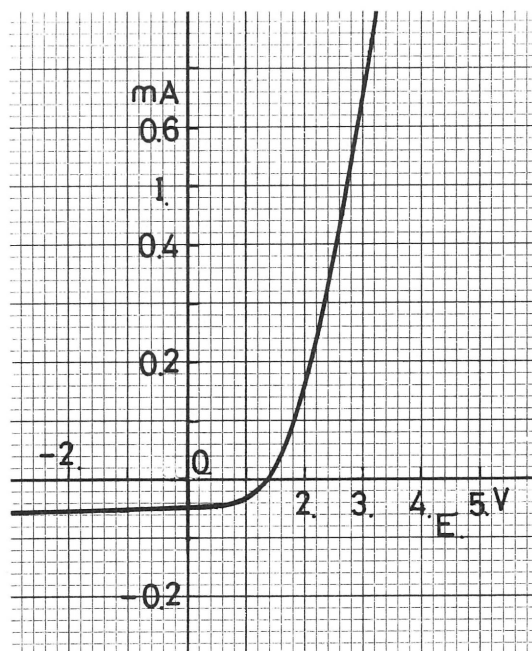


図 6 電子温度測定曲線

この例では電子温度は 0.34 eV である。

同様な測定をプラズマ流の対称軸上にわたって行なった結果を図 8 に示す。同図より電子温度は空間的にほぼ一定であることがわかる。

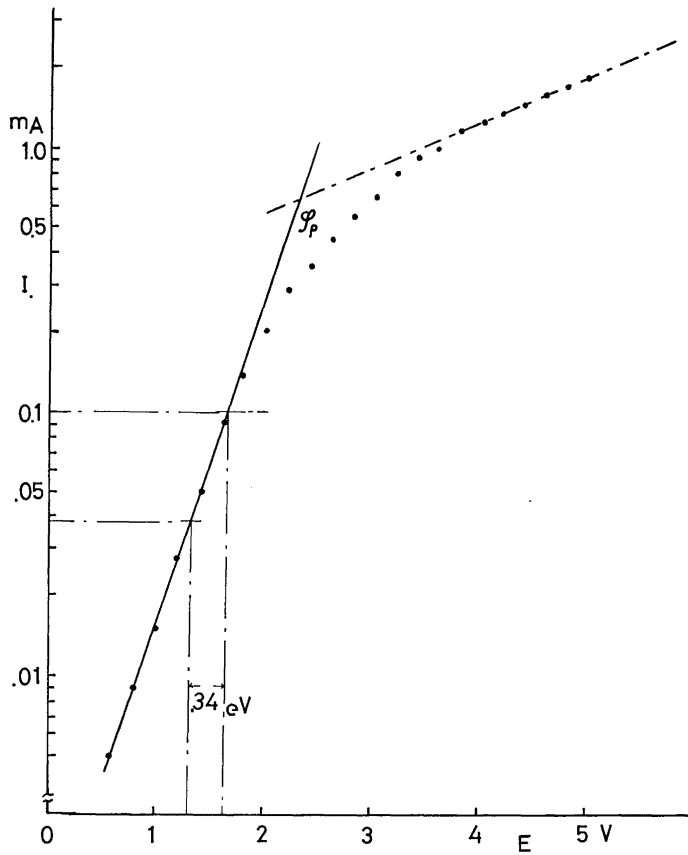


図 7 電子温度測定結果

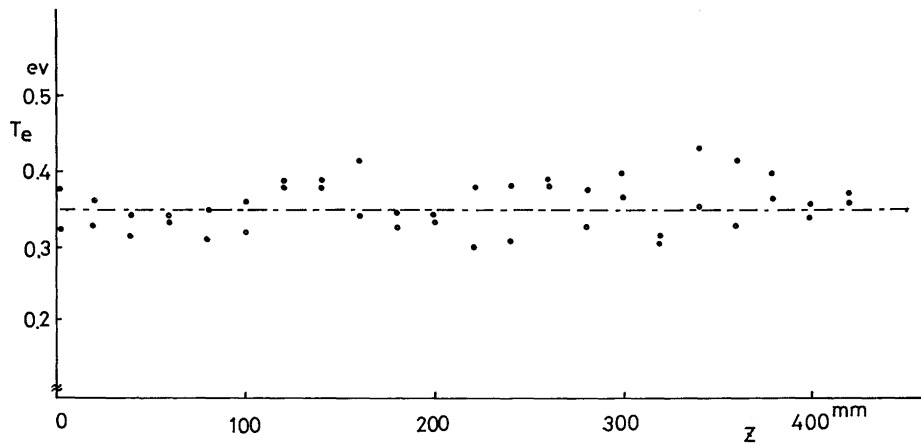


図 8 流れ方向電子温度分布図

以上、二、三の予備的な実験データーを示したが、本装置を用いて行なうことが予定されている研究計画を次に略記する。

(i) 稀薄気体力学の荷電粒子系への拡張

ピトー管の応答に対する粘性効果の修正.

流れを持つプラズマ中でのラングミュアプローブの応答特性を調べる.

ピトー管, ラングミュアプローブによる流れの場の測定.

流れ場に置かれた物体とプラズマ流との干渉 (例えば衝撃波, 熱伝達, 境界層等について) を調べる.

(ii) 可変圧力下での高周波トーチの運転特性

トーチの運転特性・安定性の調査

低圧プラズマの熱平衡からの外れと, その運転特性への影響の調査.

難溶解物質のプラズマによる溶解・再結晶の機構の解明.

(iii) プラズマ源として用いた場合の高周波誘導プラズマトーチと直流アークトーチとの比較

本風洞建設に当り、北島一徳教授には種々の配慮と助言を賜りました。また装置設置ならびに実験に当っては、本研究所高エネルギー工学研究部の方々をはじめ、所員の多くの方々の協力をいただきました。深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 村岡克紀, 高周波誘導プラズマトーチ, 応用力学研究所所報, 第34号, 昭和45年.
- 2) 村岡克紀・足立圭三・藤田順治・島村 信, プラズマ衝撃波に関する研究, 応用力学研究所所報, 第35号, 昭和46年.

(昭和 46 年 10 月 29 日 受理)