

円柱のまわりの稀薄な気体の流れ

小林 康徳*・大島 耕一

Rarefied Gas Flow Around a Cylinder

By

Yasunori KOBAYASHI and Koichi OSHIMA

Abstract: A weakly ionized, rarefied gas flow of Argon was produced, which has about several tens of Raynolds number, Knudsen number close to 1 and 1.5 of Mach number, and the potential and the density distributions of the charged particles were measured by single Langmuir probe in the flow field around a cylindrical model which was set perpendicularly to the gas flow. A constant electric potential and/or a uniform magnetic field were applied in the flow field.

The results show that the detached bow shock wave, which is characteristic to the continuum flow, is not observed, and that the density difference between the up- and the down-stream of the model is detected. Both of the potential and the density distributions near the shoulder of the model decrease from the free stream values. The effects of the externally applied electric and/or magnetic fields on the charged particles are qualitatively consistent to the prediction by the particle theory of ionized gas.

概要

アルゴンガスを用いて、レイノルズ数が数 10 程度、クヌーセン数が 1 前後、マッハ数が 1.5 程度の稀薄な弱く電離した気体の流れを作り、その中におかれた円柱のまわりの電位分布、荷電粒子の密度分布を単静電探針を用いて測定した。

また、円柱に一定の電位を与えた場合および流れの場に一様な磁場を与えたときのこれらの分布の変化も測定された。

この結果、連続流体としての特徴である衝撃波は表われず、円柱の上流と下流での密度差が観測された。また円柱の肩付近では、密度、電位共に低くなった。電場や磁場が荷電粒子に与える効果は電離気体の粒子理論の与える推測に近い結果を示した。

1. まえがき

弱く電離した稀薄気体についての研究は放電物理学や天体物理学の分野でかなり昔から続けられてきたが、最近は核融合や、電磁流体発電、宇宙開発などの現実的目的が現われて、いわゆるプラズマ物理学が脚光を浴び始めた。しかし、今日、この方面の研究が発展しつつあるとはいえ、理論的にも実験的にも未知の部分が多く残されている [1]。

* 東京大学 大学院学生

たとえば、宇宙空間を運動する物体のまわりの媒体にひき起される現象、およびこの現象が飛しょう物体に与える流体力学的、電磁気的、あるいは熱的効果は、学問的に興味深い研究対象であるばかりでなく実際面でも人工衛星の減速や、それからの通信などに関連を持つ非常に重要な問題であるが[2]、この方面的研究は理論的にもまだ確立されておらず、実験的研究は実際の人工衛星について各種の測定が進められている段階である。しかし、人工衛星に搭載した計器で人工衛星の外部の流場を測定する際に避けられない測定技術上の困難は依然として残されている。我々の行なった実験は、デバイ長などのパラメータについてちょうど、人工衛星が電離層領域を飛しょうする条件にあたる。

この研究では稀薄気体の流れの中に置かれた物体まわりの流れの様子を知る一つの手段として、流れの中の荷電粒子に着目し、その分布状態を調べることにより流れの様子を推察しようとするものである。その最も基礎的な試みとして、弱く電離した稀薄気体の流れを作り、この中におかれた円柱のまわりの電位分布、荷電粒子の密度分布などを静電探針を用いて測定し、さらに流れの場に電場、磁場などを加えたときの分布の定性的変化を調べた。

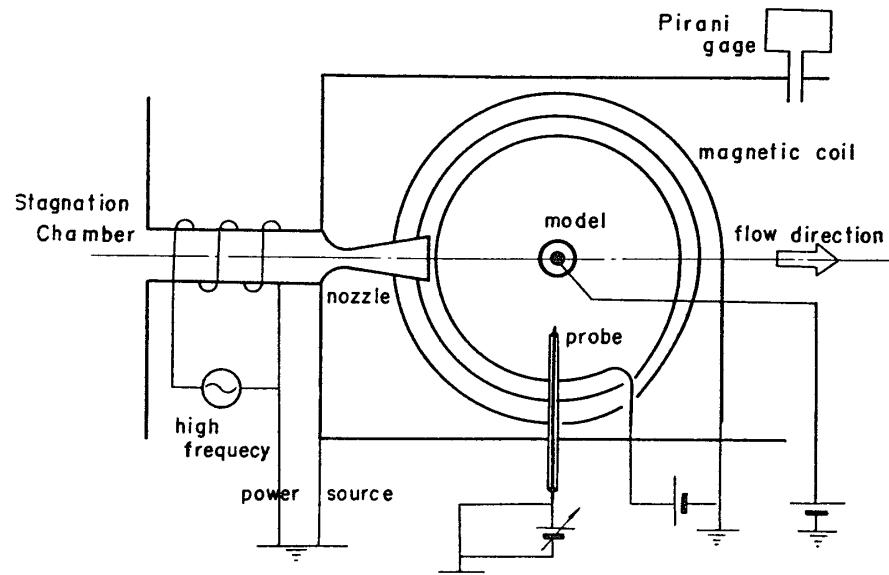
本実験は上に述べたごとく、ごく基礎的な段階のものであり、条件も限られているが、さらに条件を広げて実験を行なえば宇宙空間でおこる現象を理解するための有力な方法となるであろう。

理論的研究としては、連続流に対する理論、自由分子流に対する計算、およびマッハ数の低いときの遷移流領域の計算などが報告されている[3][4]。

2. 実験

a. 装置

実験装置の略図を第1図に示す。左方の貯氣槽からアルゴンガスを流し、高周波誘導加熱器(40.68 Mc/s、出力2kW)により高周波放電させる。ガスは弱電離気体となってノズル部



第1図 実験装置

に流入し、超音速流となってテスト室内に流れ込む。テスト室中央部に、流れを横切って垂直に円筒形模型が保持されており、その内部に内包された銅線に電圧を加えることにより模型に電位を与えることができるようになっている。測定部には直径 6 mm の空心銅パイプを巻いて作った一対の水冷コイルで、模型の軸に平行に一様な磁場を作ることができる。探針は、直径 0.2 mm、長さ 2 mm の円筒形の単探針で、探針電圧の基準点は風洞壁にとった。この探針は流れに垂直および平行の方向(図で上下、左右)に移動できる。テスト室の圧力はピラニゲージで測定した。最終到達真空度は 4×10^{-3} Torr であった。

b. 条件

実験条件は、第1表に示すとく。

気体の流量 3 種

ノズルの径 2 種

模型の材質 3 種

を変化させ、計 18 通りの組合せで

A) 流れの場に電場も磁場も与えない場合

第1表 実験条件

model	glass, Teflon, brass
nozzle exit (mm)	40
nozzle diameter (mm)	6, 3
stagnation pressure (μHg)	20, 200, 960; 80, 800, 3800
flow rate (mg/s)	1, 10, 50
chamber pressure (μHg)	8, 17, 50
magnetic field (gauss)	800
applied electric potential (volt)	40

第2表 流れの種々のパラメータ

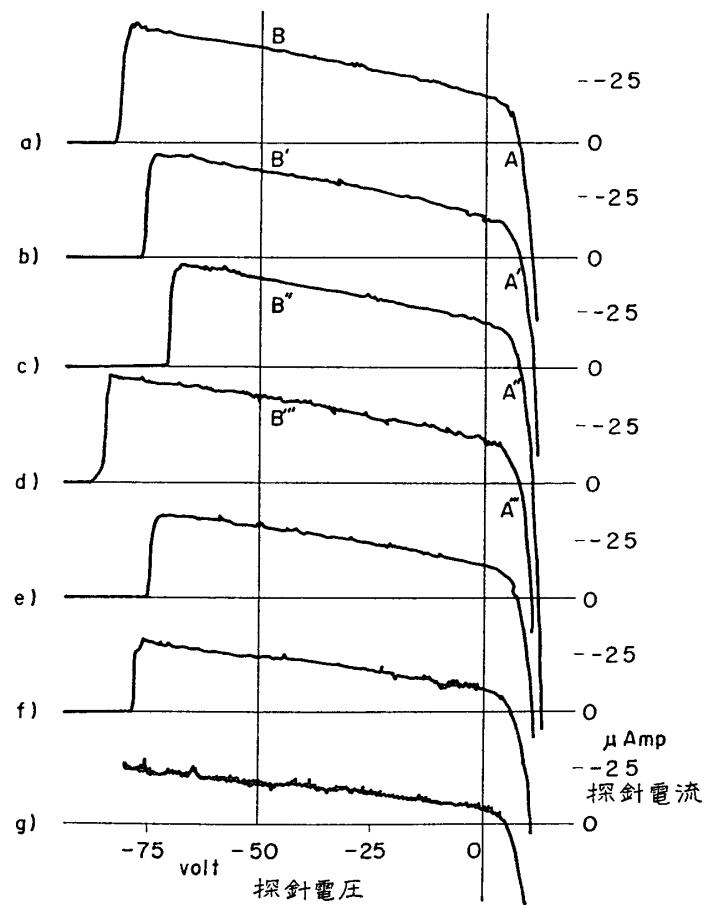
nozzle diameter (mm)	6			3		
	8	17	50	8	17	50
chamber pressure (μHg)	8	17	50	8	17	50
Mach number	1.1	1.6	1.7	1.6	1.8	1.9
Reynolds number	2	5	15	2	6	16
speed ratio	1.00	1.46	1.55	1.48	1.64	1.73
gyration radius (mm)	2.1			2.1		
Knudsen number	1.1	0.5	0.2	1.1	0.5	0.2
Debye length (mm)	2.4	1.9	1.5	1.3	0.9	0.7
ion number density ($\times 10^9 \text{ cm}^{-3}$)	8.5	9.2	9.1	10	18	22

- B) 流れの場に電場のみを与えた場合
 - C) 流れの場に磁場のみを与えた場合
 - D) 流れの場に電場と磁場の両方を同時に与えた場合
- の四つの場合について測定した。

測定は流れの軸に平行、あるいは垂直に探針を移動させて模型の付近のいろいろの位置で探針電圧対探針電流の曲線を測定した。探針の向きは、流れに平行と垂直の二通り行なった。なお、電場についてははん雑を避けるため、模型に代表として +40 ボルトの電圧を加えた場合についてのみ測定を行なった。また、磁場は常に一定の 800 ガウスを加えた。これは流れの中央の測定部では、模型の軸に平行で十分に一様とみなせる。この一様な領域は、幅 180 mm 程度あり模型の径に比べて十分に長いから、流れは二次元的とみなしてよい。

次に実験の行なわれた流れの場における各種のパラメータを第 2 表に示す。これらの値は、イオン数密度、貯気槽圧力、および流量の測定値から計算したものである。この表より流れはほぼ遷移流の範囲に入ることがわかる。

探針特性の解析にあたっては、A. A. SONIN の論文を参考にした [5]。



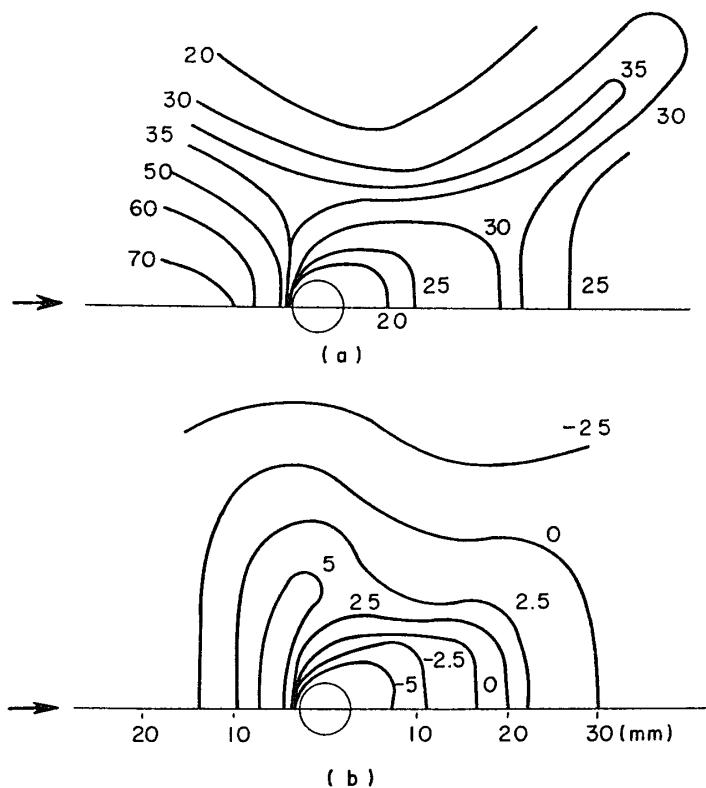
第 2 図 探針の電圧-電流の曲線

a) が流れ軸上での曲線で、b), c) ……の順に流れに垂直に探針を移動して、縦軸の原点をずらして測定を行なった

測定例を第2図に示す。電位分布はプラズマの浮動電位（図中 A, A', A'' ……点の電位）より定められ、密度分布は探針電圧 -50 ボルトでのイオン電流値（図中 B, B', B'' ……の値）から計算された。

c. 結 果

得られた結果の一例を第3図に示す。左側の矢印が流れの方向を示し、電場も磁場もない場合 ($E=0, M=0$) の分布である。図中、直線、および円は、それぞれ流れの中心軸、円筒形模型の断面を表わしている。密度分布曲線群中の数字は密度の大小の測度であって、量的な意味はない。電位分布曲線群中の数字は電位（ボルト）を表わしている。また、流れ軸にそっての数字は模型中心からの距離（mm）を表わしている。



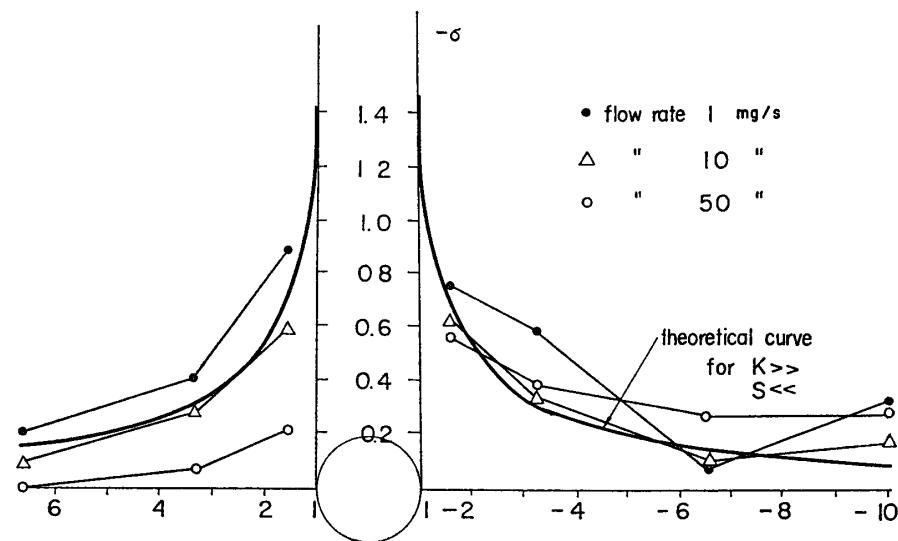
第3図 流量 50 mg/s のときの電場も磁場もない場合の (a) 密度分布と (b) 電位分布
矢印は流れの方向。中央部の円は模型の断面を示す。

第4図は、速度比の十分小さい自由分子流の円柱の上流と下流方向の軸上における密度に関する量のパラメータ σ の理論値を実験値と比較したものである。ここで

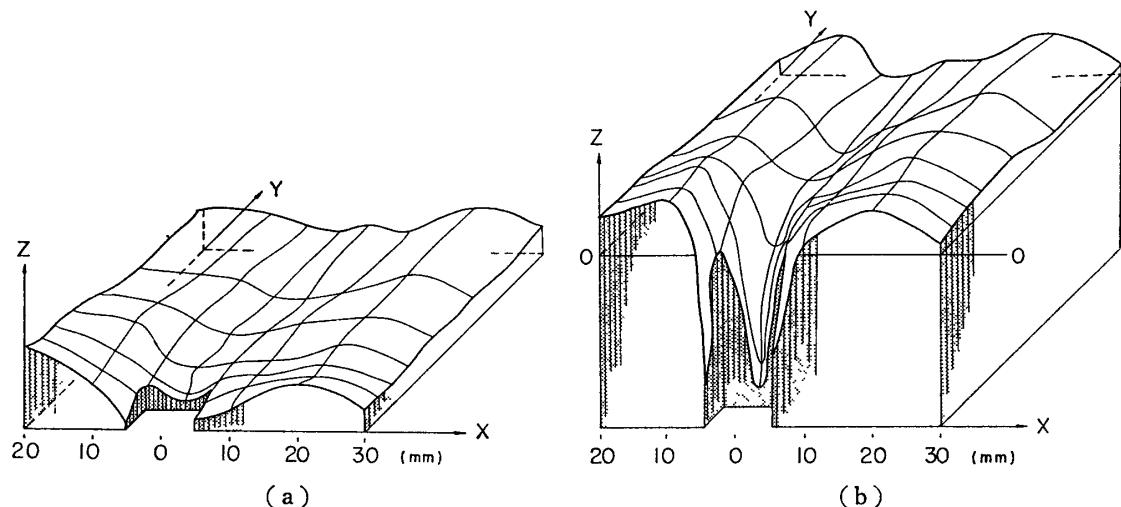
$$\sigma = \frac{1}{S} \left(\frac{n}{n_\infty} - 1 \right)$$

で、 S は速度比、 n は数密度で、添字 ∞ は一様流の値を示す。図の横軸は、流れの方向に測った（上流側が +）円柱中心からの距離を円柱半径で無次元化した量である。

第5図は密度分布、電位分布を直観的に表わしたものである。図中、 X 軸は流れの方向、



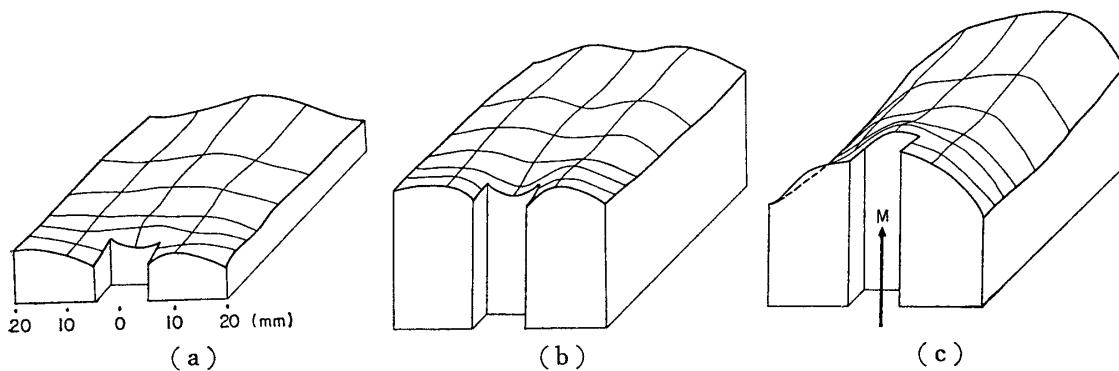
第4図 流れの方向の軸上における密度分布



第5図 流量 1 mg/s で電場磁場のない場合の (a) 密度分布と (b) 電位分布
 X 軸は流れの方向, Y 軸は流れに垂直の方向を示し, Z 軸は測定値を示す. (b) で $0-0$ の面は電位零ボルトでそれより上が正, 下が負電位になる.

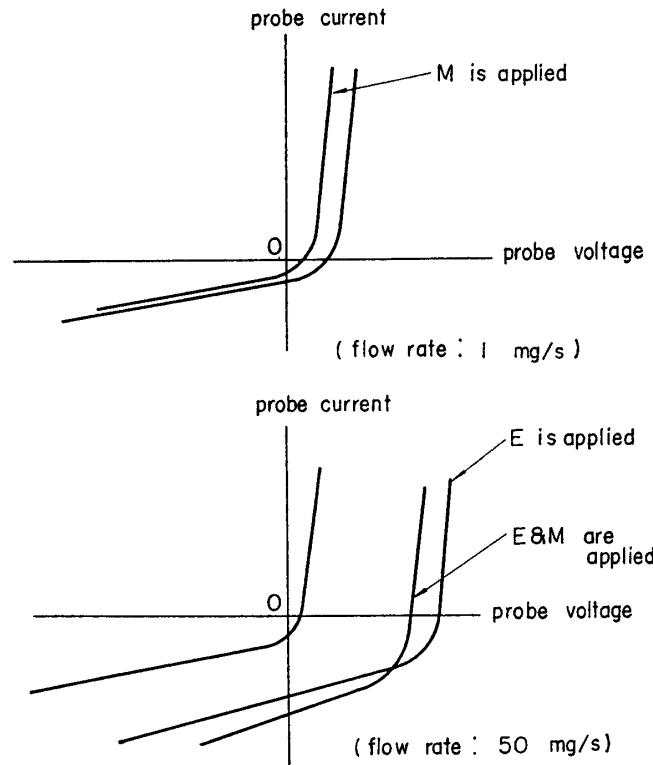
Y 軸は流れに垂直な方向, Z 軸は各点での測定値の大きさを示す. したがって $X-Y$ 面に平行な面でこの分布を切ると, その切口は第4図のごとき曲線を描く. また, 中央付近, 分布が凹んでいるところに Z 軸に平行に模型がある. X 軸下方の数字は模型断面中心からの距離 (mm) を示す.

第6図は模型として真ちゅう管を用いたときの, 最初の分布 (a), 電場を与えた場合 (b), 電場, 磁場を同時に与えた場合 (c) の電位分布を示すものである. なお, 磁場だけを与えた場合の密度分布の変化は, わずかに密度が小さく現われるだけで分布の傾向にはほとんど変化がない. 電位分布も同様である.



第6図 流量 50 mg/s の場合の電位分布

- (a) 外部より電場も磁場も加えないとき
- (b) 電場だけを加えたとき
- (c) 両方を加えたとき



第7図 探針の電圧-電流特性に対する電場、磁場の影響

これらの電場、磁場の分布に対する影響は、実際の測定値に対して第7図のように表われる。

3. 結 論

次のような一般的な流れの性質が認められた。

- a) ノズルの径を変えても流れの模様は変わらない。
- b) 低密度のため連続流体としての特徴はほとんど見られず、離れた衝撃波も表われない。

c) 流れに対する探針の向きの違いによる差異はほとんど表われず、ただ濃いプラズマ（流量 50 mg/s）の場合に模型上流でわずかに流れに平行な探針電流値が小さく表われた。

また、おのののばいについての定性的な特徴をまとめると

A) 電圧も磁場も加えないとき

衝撃波は表われず、物体の上流と下流で密度差が表われる。物体のごく近くの密度、電位は低くなる。

物体まわりに生ずる低電位は、物体まわりに発生するシースのために、低密度が生ずるのは壁への吸着、そこで再結合などによる荷電粒子の減少に起因するものと考えられる。

B) 電圧を加え、磁場を加えないとき

真ちゅう管の模型に正電位を加えたときのみ顕著な効果を表わし、そのときプラズマ全域にわたって均等にプラズマの電位は上るが分布は変らない。

負電圧を与えても、探針電圧-電流曲線に変化は表われないが、これは模型に流入する飽和イオン流密度は 0.13 mA/cm^2 程度で小さい一方、真ちゅう管に +40 ボルトの電圧を加えると電子流密度は $4 \sim 10 \text{ mA/cm}^2$ 程度と大きくなるためであろう。

テフロンやガラスの模型では、正電圧を加えても変化しないが、これはその誘電率により管の肉厚部で電圧降下をきたし、プラズマ内に侵透してくる電場は小さいためとみられる。

C) 電圧を加えず、磁場を加えたとき

イオンが磁場の中心にある真ちゅう模型に沿う強い磁束に束縛され、模型壁まわりのシースを緩和するのでプラズマ電位は降下し、密度はほとんど変らない。

D) 電圧、磁場を共に加えたとき

電場、磁場を同時に与えると、電場、磁場それぞれ単独に与えたときの効果が重畠され、B) の場合より密度は増すが電位は降下する。

1967年12月2日 航空力学部

参考文献

- [1] JA. L. AL'PERT: On electromagnetic effects in the neighbourhood of a satellite or a vehicle moving in the ionosphere or interplanetary space. Space Science Reviews 4 (1965) 373-415.
- [2] G. P. WOOD & F. HOHL: Electric potentials, forces and torques on bodies moving through rarefied plasmas. AIAA PAPER No. 65-628.
- [3] G. Hays & H. Probstein: Hypersonic Flow Theory, Academic Press (1960)
- [4] 玉田玲・山本恭二: 円柱を過ぎるきわめて稀薄な気体のおそい流れ. 京都大学工学部航空工学教室流体力学空気力学研究室, 研究速報 第17, 19号.
- [5] A. A. SONIN: The free molecule Langmuir probe and its use in flow field studies. AIAA PAPER No. 66-5.