

# 稀薄な非平衡電離気体のノズル流れの 実験に関する一、二の問題

本 間 弘 樹\*

## Experiments on the Nozzle Flow of Rarefied, Nonequilibrium Ionized Gases

By

Hiroki HONMA

**Abstract:** Two problems are considered in connection with the experiments on the nozzle flow of slightly ionized gases in which the electron temperature is much higher than the gas temperature. First, the electron temperature along the nozzle axis is measured by the electrostatic probes, whose configurations are a disk, a cylinder and a cone and whose diameters are 0.5 mm, when the flow Mach number is about 1.7 at the exit of the nozzle, the mean free path of gas atoms is  $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$  cm and the mean free path for electron-atom collisions is 0.5~1 cm. The measured values of the electron temperature by these probes indicate no appreciable differences within the present experimental accuracy. It may be concluded that the electron temperature which is measured by these probes is identified with the electron temperature in the flow which is not disturbed by these probes. Secondly, it is shown that the flow Mach number can be estimated from observation of the luminous region ahead of a sphere located in the flow at the exit of the nozzle.

### 1. は し が き

外部電磁界のない電離した気体の流れにおいて、気体密度が比較的低いとき、電子温度が気体分子またはイオンの温度と異なる場合がある。このような例は、気体の状態が急激に変化する場合（衝撃波、ノズル流など）や電子温度と気体温度とが異なる気体が流れ出す場合（プラズマ・ジェット流）などに見出される。このような流れの中における荷電粒子のふるまいは流れの状態とともに粒子間相互の衝突の機構やひん度に依存する。

文献[1],[2]において、とくに電子密度が低い場合の流れにおける電子温度のふるまいに着目した実験が行なわれた。すなわち、電子密度が低く、気体温度に比べて非常に高い電子温度の電離気体をノズルを通して噴出させたときのノズル内における電子温度分布がしらべられた。とくに電離度が非常に小さく、電子が主として気体分子とのみ衝突するような場合について実験が行なわれた。そして、電子の平均自由行程がある程度大きくなった場合にお

\* 千葉大学工学部、宇宙研協同研究員

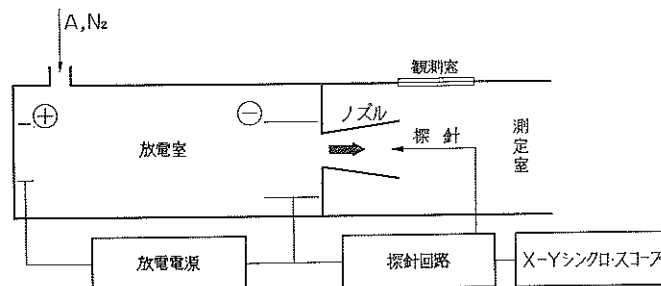
ける電子の流れの中におけるエネルギー平衡がしらべられた。この問題に関しては、さらにくわしい実験を行なっており、別の機会に報告をする予定でいる。

ここでは、上記の実験に関連した二つの問題について考察する。まず、ノズル軸にそって電子温度を測定するのに気体分子の平均自由行程よりも直径が大きいような静電探針が用いられたが、ここではその探針の形状をかえたときに電子温度の測定に及ぼす影響がしらべられている。また、ノズル出口に球模型をおくとき、球前方に発光層が観測されたが、この発光層の幅から流れのマッハ数を推定しようとする試みがなされている。

## 2. 気流中の電子温度測定における探針形状の影響

ここで行なわれた実験では、探針の直径が電子の平均自由行程よりも小さいが、気体分子の平均自由行程よりは大きくとられている。探針の直径をすべての粒子の平均自由行程よりも小さくせずに、このような寸法をえらんだ理由は、探針の製作、取り扱いが容易なことと、比較的大きな探針電流が得られるためである。このように、探針の直径が気体分子の平均自由行程よりも大きいときには、とくに高速の流れにおいては探針が流れにいちじるしい擾乱を与え、その結果探針の電流-電圧特性から求められた電子温度が必ずしももとの擾乱のない流れの電子温度に対応しなくなるおそれがある。したがって、探針による擾乱の影響がどの程度電子温度測定に及ぼされるかしらべて見る必要がある。そのために、探針の形状と寸法を変えて電子温度の測定を試みた。

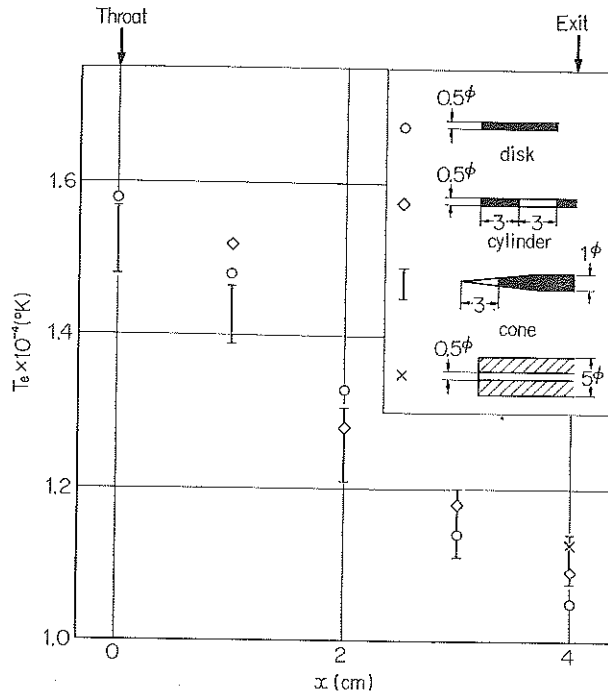
第1図に実験装置の概略を示す。試料気体は高圧ポンプから放電室内に導入され、ノズル(錐状ノズル、スロート径 20mm, 出口径 30mm, 全長 40mm, ベークライト製)を通し



第1図 実験装置概略図

て測定室内に噴出される。測定室は真空槽につながれ、一定圧力に保たれるようたえず排気されている。気体は放電室内におかれた環状電極間の直流グロー放電によって電離される([1],[2]参照)。

探針はトラバース装置にとりつけられ、ノズル軸にそって動かすことができる。電子温度は探針特性の減速電界領域において電子に対して Maxwell 分布を仮定することによって電流-電圧特性から求められた。電子密度は片対数にプロットされた電流-電圧特性において二直線の交点から求めるよく知られた方法によって求められた(たとえば、文献[3],[4],[5]などを参照のこと)。



第2図 ノズル軸にそう電子温度分布 (気体: アルゴン, 放電室圧力: 1 Torr)

第2図に気体がアルゴンで、放電室圧力が1 Torrの場合のノズル軸にそう電子温度分布の測定結果を示す。このとき、放電室気体温度 $\sim 300^{\circ}\text{K}$ 、放電電圧 $\sim 460\text{ V}$ 、放電電流 $\sim 75\text{ mA}$ で、ノズル出口における気流マッハ数約1.7、電子密度約 $10^9/\text{cm}^3$ である。この実験条件において、気体分子、イオン、電子について平均自由行程を見積ると、分子-分子衝突に対しては $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}\text{ cm}$ 、分子-イオン $\sim 10^{-3}\text{ cm}$ 、電子-分子 $0.5 \sim 1\text{ cm}$ 、電子-電子および電子-イオン $\sim 10^3\text{ cm}$ である。また、Debye長さ $\sim 10^{-2}\text{ cm}$ である。

気流中の電子温度測定に及ぼす探針形状の影響をしらべた例としては、低密度プラズマ風洞におけるClayden [6]の測定がある。実験条件は今の場合とは異なり、気体の圧力がもっと低く(静圧 $35\ \mu\text{Hg}$ )、電子密度は高く( $10^{13}/\text{cm}^3$ )、電子温度は低い( $2 \sim 3,000^{\circ}\text{K}$ )。気流マッハ数は2.5である。平均自由行程は分子-分子 $2.5\text{ mm}$ 、荷電粒子間 $0.03\text{ mm}$ 、電子-分子間 $\sim 100\text{ mm}$ で、電子については荷電粒子との衝突が重要となる。探針としては直径 $0.46\text{ mm}$ および $0.28\text{ mm}$ の球と直径 $6\text{ mm}$ の円板が用いられている。したがって、Knudsen数(平均自由行程/探針直径)にすると、分子に対しては55, 90, 0.4, 荷電粒子に対しては0.065, 0.1, 0.005である。得られた電子温度の測定値は多いときには20~30%のちらばりがあるが、平均すると、どの探針を用いてもほぼ一致した値を示すとしている。すなわち、この実験では探針直径が荷電粒子の平均自由行程よりも大きい場合に、電子温度の測定値が探針の形状・寸法によってあまり変わらないことを示している。また、French [7]

は、やはり電子と荷電粒子との衝突が重要となる場合(平均自由行程, 原子-原子 1mm, イオン-イオン 0.3mm, 電子-電子 0.15mm, 気流マッハ数 1.4) に, 円柱探針(直径 0.1mm)を流れに垂直においた場合と平行においた場合を比べて, 電子温度に関してはほぼ一致するような測定値を得ている. 今の場合に近い弱電離の実験条件において気流中の探針特性をしらべたものに土手・一宮・玉木[8], Wilber[9]などの実験があるが, とくに電子温度の測定値におよぼす探針形状の影響についてはしらべられていない.

この実験においては, まず試みに先端のみを円板形に露出させ, 周辺を絶縁した直径 0.5mm の銅線が用いられた(第2図参照). この探針の直径は上記の実験条件において, 電子-分子衝突に対する平均自由行程よりは小さいが, 気体分子に対する Knudsen 数は 0.1~0.2 である. この形状は空間的な分解能の点では有利であるが, よどみ点流れの影響をうける点で不利である. このよどみ点流れの影響をさけるため, 第2図の右上に示されるような円柱形および円錐形の探針による電子温度の測定が試みられた. 円柱は直径 0.5mm で, 先端から 3~6mm の部分の金属が露出し, 残りの部分は絶縁されている. 円錐は先端から 3mm までが露出している. また, 直径 5mm のバーク棒の中心に直径 0.5mm の銅線をうめこんだものも探針として用いられた.

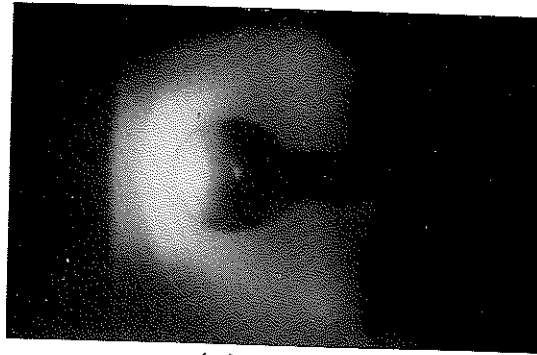
第2図において, 円錐探針の場合に示してある電子温度測定値の幅は, 電流-電圧特性から電子温度をよみとる際の精度を示している. 他の場合もほぼ同程度の精度である. 第2図からわかるように, 各形状の探針によって測定された電子温度は, この精度の範囲内ではほぼ一致している. すなわち, ここで用いられた形状の探針による気流の擾乱の電子温度測定に及ぼす影響が, 上記の実験条件の範囲ではほぼ測定精度の範囲内であることを示している. このことから, ここで得られた電子温度の測定値がほぼ擾乱をうけないものの流れにおける値であると推測される.

### 3. 球前方の発光層

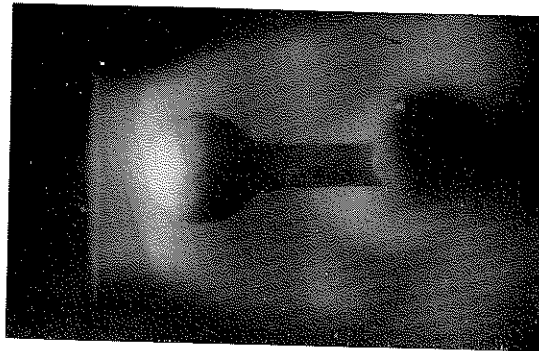
第3図はノズル出口に球模型をおいて観測窓から撮影した写真である. 一例として, 気体がアルゴンおよび窒素で, とともに放電室圧力が 2 Torr の場合が示してある. とともに球前方に発光する層が観測されている.

第4図は縦軸がよどみ線にそって発光層の幅  $l$  と球の半径  $R$  ( $=6.1$  cm) との比で, 横軸がノズル出口のマッハ数に対応する衝撃波を横切る密度比  $\epsilon$  ( $=\rho_w/\rho_s$ ) である. 流れのマッハ数は impact pressure の測定から求められた. プロットされたデータにおいてマッハ数にちがいがあるのは, 放電室圧力を変えるとノズル出口の一様流部分の径が変わり, 流れのマッハ数が変わることによる. 放電室圧力がアルゴンの場合には 1~5 Torr, 窒素の場合には 1~2 Torr の場合が示してある.

図の上段に比熱比  $\gamma=1.67$  (A) および  $\gamma=1.4$  ( $N_2$ ) に対して,  $\epsilon$  に対応する気流マッハ数が示してある. 図中の実線は球前方の衝撃波離脱距離  $l_s$  と  $\epsilon$  との関係を示したもので, Van Dyke の理論[10]によった. Van Dyke の理論は  $\gamma=1.4$  の場合について  $l_s/R$  をマッハ数に対して計算したものであるが, 図のように  $\epsilon$  の関数としてあらわすと, アルゴン, 窒素どちらの場合にも発光層の幅がこの実線とほぼ一致していることがわかる. 窒素の

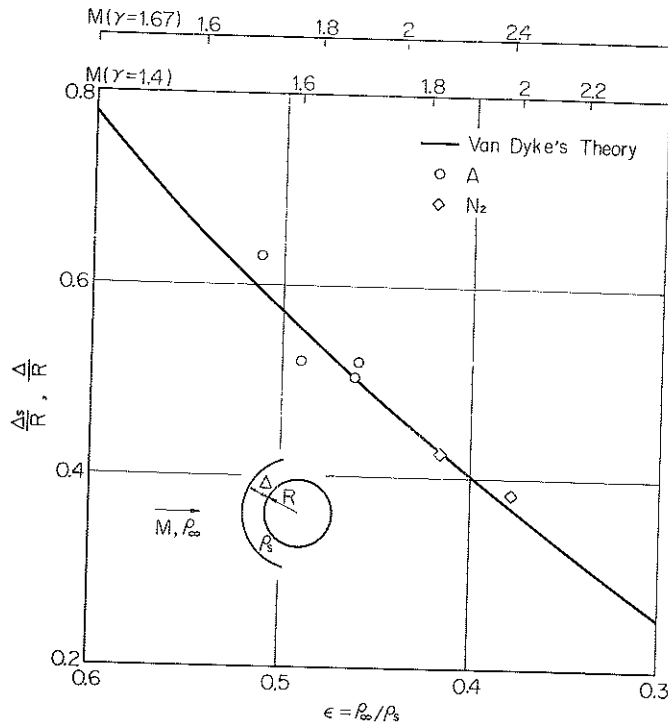


(a) アルゴン



(b) 窒素

第3図 ノズル出口に球模型をおいたときの写真 (放電室圧力: 2 Torr)



第4図 発光層の幅と衝撃波密度比の関係 ( $\Delta$ : 発光層の幅,  $r_s$ : 衝撃波離脱距離)

場合には、したがってこの発光層がほぼ衝撃波層に対応しているものと考えられる。アルゴンの場合には必ずしも発光層が衝撃波層に対応しているとは断言できないが、 $\epsilon$  に対してプロットされた  $\Delta_s/R$  に対する Van Dyke の理論曲線をこのマッハ数範囲でアルゴンに対しても適用するものとする、上記の実験条件においては、発光層の幅から逆に Van Dyke の理論を用いて大よその気流のマッハ数を推定することが可能と思われる。

#### 4. 結 び

電子温度が気体温度に比べて非常に高いような非平衡弱電離気体のノズル流れの実験[1], [2]における測定に関連した二つの問題が考察されている。

まず、ノズル軸にそって電子温度分布の測定が気体分子の平均自由行程よりも大きい直径をもつ静電探針により試みられた。気体分子の平均自由行程が  $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$  cm, 電子の気体分子との衝突に対する平均自由行程が 0.5~1 cm, ノズル出口の気流マッハ数 1.7 の場合に、直径 0.5 mm の円板, 円柱, 円錐の探針による電子温度の測定が示される。このとき Knudsen 数は分子の平均自由行程に対して 0.1~0.2, 電子に対して 10~20 である。またノズル出口で直径 5 mm の円板探針による測定も行なわれた。各形状の探針によって測定された電子温度は、実験精度の範囲内ではほぼ一致しており、このことから、得られた電子温度の測定値は探針形状のちがいによる気流擾乱の影響をほとんどうけず、ほぼ擾乱をうけないものとの流れにおける値であることが推測される。

つぎに、ノズル出口の流れの中におかれた球模型前方に発光層が観測されて、これがほぼ衝撃波層に対応することが示された。このことから、発光層の観測により、気流のマッハ数の推定が可能と思われる。

なお、ここでのべられた実験は文献[1], [2]の実験に関連して東大宇宙研において行なわれたものである。ご指導をいただいた東大宇宙研小口伯郎教授に心からお礼を申し上げます。

1966年10月24日

#### 参 考 文 献

- [1] 小口伯郎, 本間弘樹: 非平衡電離気体のノズル流れの実験, 第10回応数力学講演会予稿集, p. 34, 1965
- [2] 小口伯郎, 本間弘樹: 非平衡電離気体のノズル流れに関する実験, 第9回宇宙技術講演会講演集, p. 11, 1966
- [3] F.F. Chen: Electric Probes, "Plasma Diagnostic Techniques" (ed. R.H. Huddleston, S.L. Leonard), Academic Press, p. 113, 1965
- [4] J.H. de Leeuw: Electrostatic Plasma Probes, "Physico-Chemical Diagnostics of Plasmas", Proc. 5th Biennial Gas Dynamic Symp. (ed. T.P. Anderson, R.W. Springer, R.C. Warder, Jr.), Northwestern Univ. Press, p. 65, 1963
- [5] 電気学会放電専門委員会編, 放電ハンドブック, 第二編 気体, 1961
- [6] W.A. Clayden: Langmuir Probe Measurements in the R. A. R. D. E. Plasma Jet. "Rarefied

- Gas Dynamics" (ed. Laurmann) Vol. II, Academic Press, p. 435, 1963
- [7] J. B. French: Langmuir Probes in a Flowing Low Density Plasma, UTIA Rep. No. 79, AFOSR 2159, 1961
- [8] T. Dote, T. Ichimiya, F. Tamaki: Some Experiments on Probe Characteristics in Drifting Plasma, J. Phy. Soc. Japan Vol. 18, No. 2, p. 260, 1963
- [9] P. C. Wilber: Experimental Investigation of the Characteristics of a Langmuir Probe in Ionized Low-Density Flows, "Physico-Chemical Diagnostics of Plasmas", Proc. 5th Biennial Gas Dynamics Symp. (ed. T. P. Anderson, R. W. Springer, R. C. Warder, Jr), Northwestern Univ. Press, p. 97, 1963
- [10] M. D. Van Dyke: The Supersonic Blunt Body Problem-Review and Extensions, J. Aero/Space Sci, Vol. 25, p. 485, 1958