

# 低密度気流計測におけるマス・フィルタ・ プローブの特性とその応用

平岡克己\*・佐藤俊逸・小口伯郎

On Applications of Mass-Filter Probe to Rarefied Gasdynamical Problems

By

Katsumi HIRAOKA, Shunitsu SATO and Hakuro OGUCHI

**Abstract:** Two kinds of mass-filter probe are applied to measurements of the pressure and velocity ratios in rarefied flows of gases mixture. One is a type of static pressure probe and the other a type of total pressure probe. The free molecule flow theory provides the component pressure and velocity ratios in terms of the signals detected by the two types of probe. Comparison of the results with those by the previous electron-beam technique is made for both swirling flow of He/N<sub>2</sub> mixture and free jet of He/N<sub>2</sub> (or He/Ar) mixture. The agreement is fairly good in a moderate pressure region except comparatively lower pressure region.

## 1 はしがき

低密度気流における計測に従来電子線法が多く用いられてきた。電子線法は電子線による気体励起によって得られる発光を利用しそれによって成分密度、温度あるいはスペクトル線のドップラー変位から気体分子の速度など測ることを可能にする。流れに擾乱を与えない点ですぐれているが、発光強度が気体密度に比例するため、低密度になるときその精度が問題となるとともに、あまり低い密度に対しては観測することができなくなる難点をもつ。質量分析器（マス・フィルタ型）は分子線実験には比較的以前から用いられてきた測定手段であるが、近年その性能が著しく改良され取扱いも容易になり分子線実験のみならず希薄な気流の観測にも次第に多くその利用が報告されてきている[1] [2]。しかし、電子線法と異なり気流中になんらかのサンプリング・プローブを挿入することにより気流とプローブとの干渉については注意深い処理を要する。従ってマス・フィルタ・プローブの出力と気流の諸量との関係はプローブ形状、流れとの相対位置、サンプリング孔の位置などを含め多くの検討を必要とする。

---

\* 東京大学大学院生

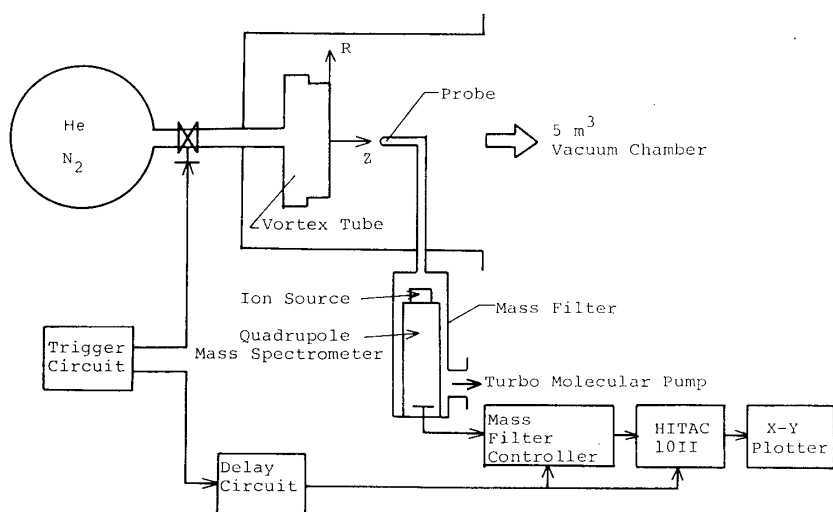


図1 測定部概略

本論文では、すでに電子線法などである程度明らかにされている希薄な混合気流（旋回流、自由噴流）などにプローブ計測を応用しその校正、成分圧力比、速度の比などの検知について、プローブの特性を含め2、3の実験結果とともに報告する。

## 2 実験装置

測定部の概略ならびに概観を図1、2に示す。給気槽からのガスは真空槽内のノズル貯気槽に導かれ、ノズル（2種類のノズル：旋回流発生用（図3）と自由噴流発生用（図4））

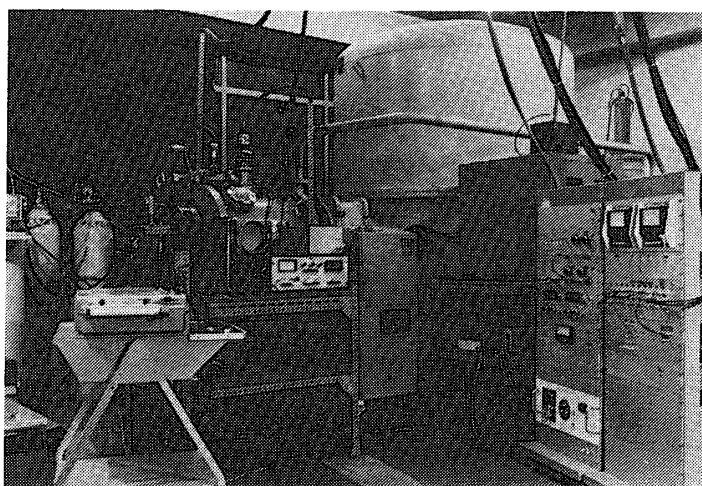
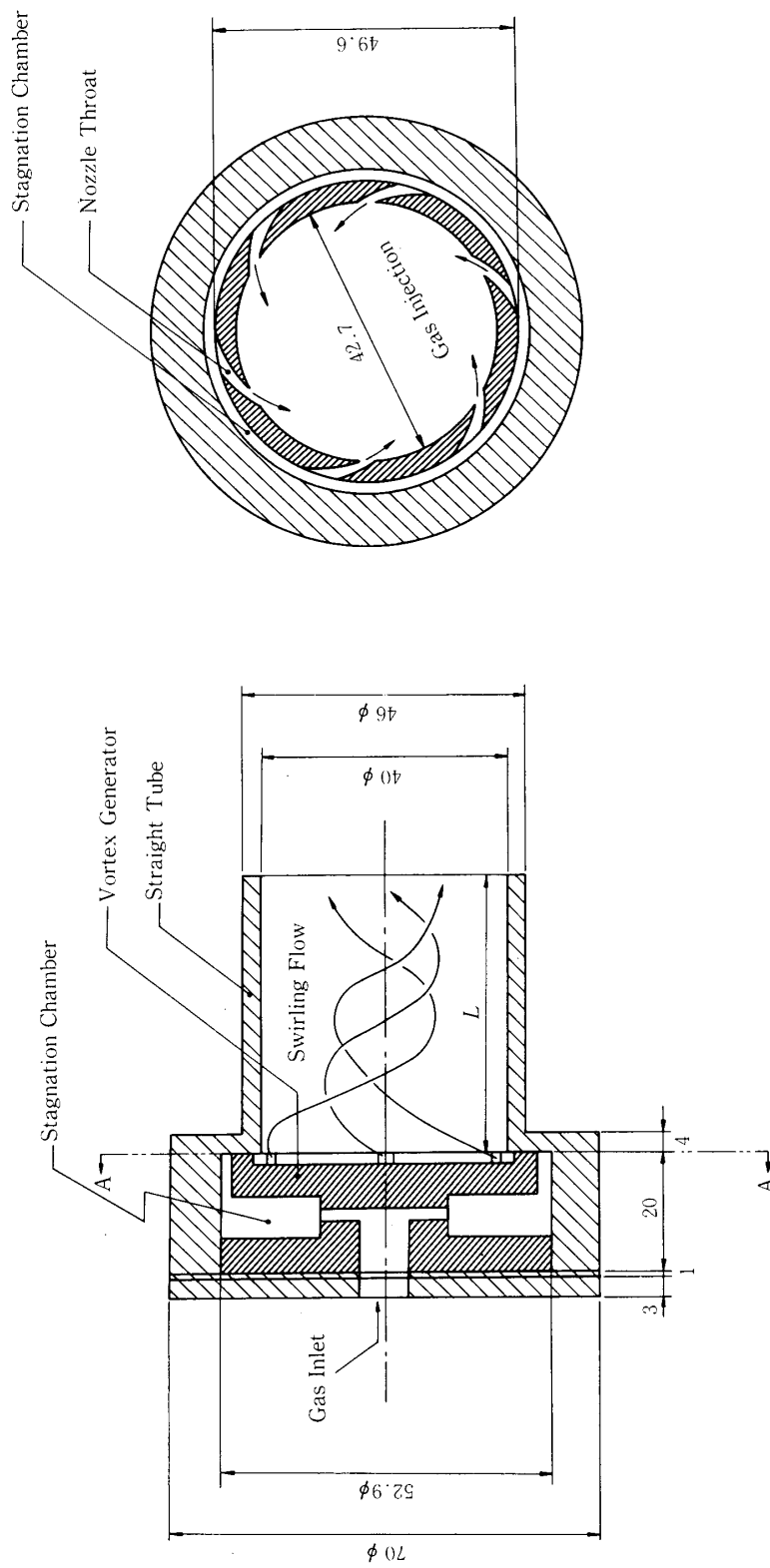


図2 測定部概観



(b) Cross Section A-A

図3 ボルテックス・チューブ

(a) Cross section of Vortex Tube

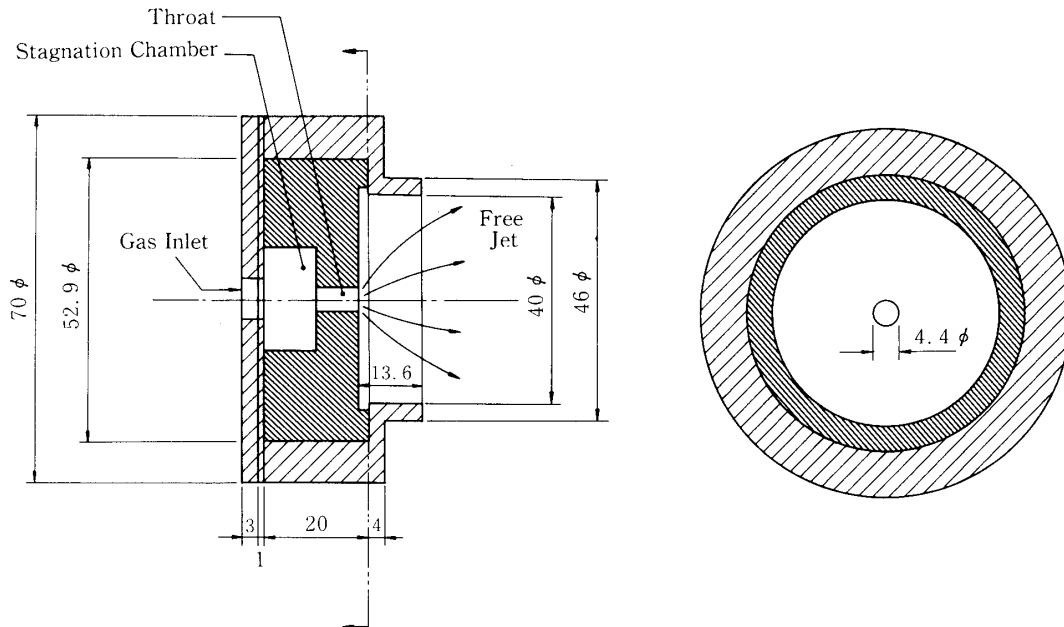


図4 ノズル

を通して噴出される。ガスとして  $H_2$  と  $N_2$  の混合気体を用いられた。ノズルは2次元移動を可能にする台に取り付けられその位置は外部より制御され検知できるようにしてある。真空槽は R.P. , M.B. , D.P. よりなる排気系によって  $10^{-5}$  Torr 程度に排気される。排気容量が制限されているためガスの噴出は約2秒に限られその間に計測が完了するようにされた。

成分圧力、速度を検知するためにここでは四重極マス・フィルタ・プローブが用いられた。プローブは真空槽の側壁より槽内に取り付けられている。マス・フィルタおよびその検知部、ターボポンプは槽外におかれた。マス・フィルタは3つの部分からなる。イオン源部では、熱陰極から熱電子を放出し、これを加速して気体分子をイオン化する。分析電極部は四重極電界をつくっており、イオン源より中心軸に入射したイオンは質量数に依存する振動をし、ある特定の振動のみを通過せしめることによって特定の質量数の分子の数を検知できるようになっている。検出部では通過してきたイオンの電流を2次電子増倍管で増巾し検出する。分析管内はターボ・ポンプで排気し、測定中の管内圧力をつねに  $10^{-5}$  Torr 以下に保つようにしてある。

噴流は2次元微動装置上に取り付けられたノズルを通してつくられる。これによって、ノズルとマス・フィルタ・プローブの相対的位置を任意に変えられるようにできた。プローブとして2種類のもので用いられた。すなわちプローブ1は尖った先端から適当な位置に相対する2つの小孔をもつものでその形状は図5に示されている。プローブ2は先端に小孔をも

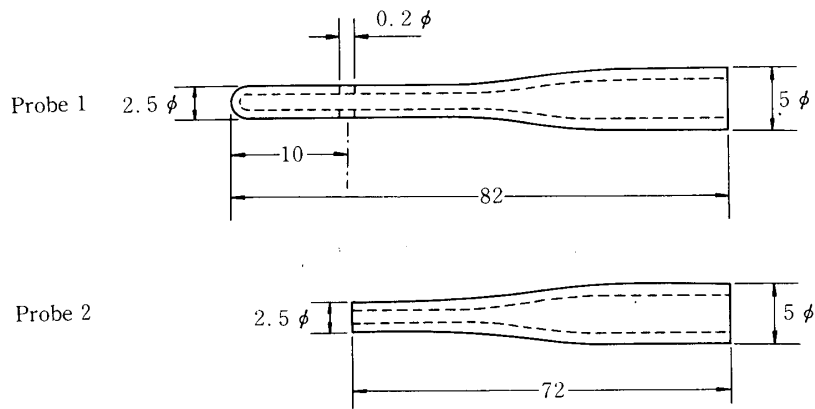


図5 プローブ

つ総圧管型のもので同図に示されるような形状のものである。

マス・フィルタ・プローブによって得られた記録の例を図6および7に示す。図6はガスを供給しない状態すなわちバックグラウンドの信号で最も大きなものは質量数18の $\text{H}_2\text{O}^+$ によるものであることが分る。図7は $\text{H}_e$ と $\text{N}_2$ の混合気体を槽内に充たした場合のもので質量数4の $\text{H}_e^+$ 、14の $\text{N}_2^{++}$ 、28の $\text{N}_2^+$ に対応する信号をみる事ができる。

4重極マス・フィルタでは、質量数を時間的に掃引するため信号取り込み開始から任意の質量数にいたる時間の対応を求めておけば測定されるイオン電流に対する質量数を求めることができる。本実験では質量数1から52までを1秒間で掃引している。先に述べたように、排気容量の制限のため気体噴出時間は約2秒間に限られたから、マス・フィルタの掃引は噴出開始から1秒後に始まるように設定された。

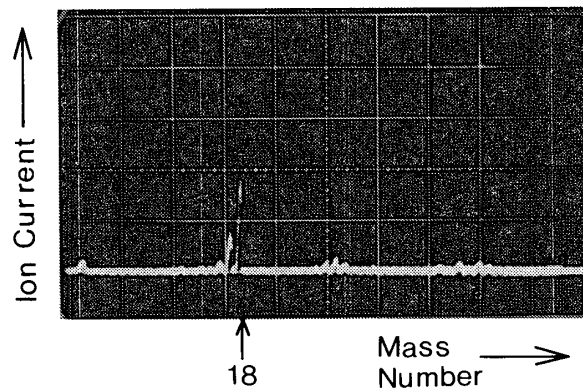


図6 バック・グラウンド・シグナル例

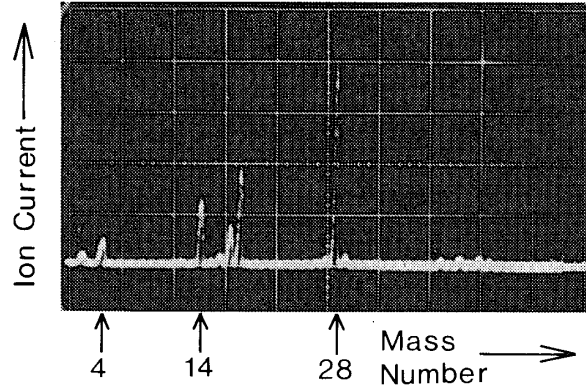


図7 He-N<sub>2</sub> 混合気体シグナル例

実際には、マス・フィルタの出力はAD変換器を通しHITAC10 IIに導かれ、予め記憶されている較正特性によって分圧、混合比率、速度比などの値に換算されて出力される。後に示される図にはこのようにしてX-Yプロッタに出力されたものが示されている。

### 3 マス・フィルタ・プローブの較正と出力検知

2章で述べたように、本実験では静圧型、総圧型の2種類のプローブを用いた。図1に示されるように検知部はターボ・ポンプによって十分低圧に排気されている。実験中は $10^{-5}$  Torr以下に常に保たれるようにしてある。小孔を通過して検知部に流入する分子を考えると、プローブ内側より外方に流出する分子はほとんどない。したがって、小孔から流入する分子だけを考えよう。小孔の代表長例えば径に比べて雰囲気中の平均自由行程は大きいとし、自由分子流の取り扱いができるものとする。ふん囲気が静止しているとする、単位時間、単位面積あたりの流入分子数 $N_i$ は雰囲気中の圧力 $P$ 、温度 $T$ とすると、

$$N_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi m}} \frac{P}{\sqrt{RT}} \quad (1)$$

と与えられる。ここで $m$ は分子の質量、 $R$ は気体常数。小孔の有効面積を $A$ とすると単位時間あたりの流入分子数は $N_i A$ で、マス・フィルタの出力電流 $I$ は $N_i A$ に比例する。すなわち、

$$I \propto N_i A = \frac{A}{\sqrt{2\pi m}} \frac{P}{\sqrt{RT}} \quad (2)$$

さて、プローブの雰囲気中を特定の気体とし、所定の圧力 $P_c$ で充たしその出力 $I_c$ を検知することによってその気体について $I_c$ と $A P_c / \sqrt{T_c}$ の関係を求めることができる。通常、 $T_c$ は室温であるから、定まった面積 $A$ をもつプローブについて $I_c$ より $P_c$  (nominal pres-

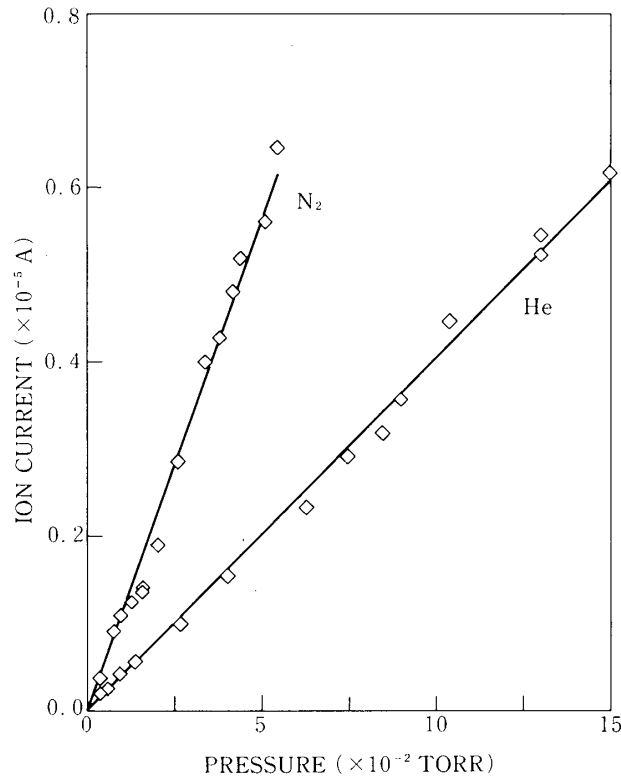


図8 較正曲線の例

sure)を知ることができる。このような較正は各プローブについて対象とする気体について行う。He, N<sub>2</sub>に対するプローブの較正曲線の例を図8に示す。マス・フィルタの感度は経時変化をもつから較正は必要に応じその都度行わなければならない。

つぎに気流中におかれたプローブの出力について考える。この場合にも、プローブおよび検知部は十分排気されていて小孔から外部に流出する分子は考えなくてよいとする。図9に示されるように流れの向きと小孔の面の法線が角 $\psi$ をなすとし、雰囲気圧力、温度がそれぞれ $P_\infty$ ,  $T_\infty$ であるとする。自由分子流理論によれば、この場合単位時間、単位面積あたり小孔に流入する分子数 $N_i$ は

$$N_i = \frac{p_\infty}{\sqrt{2\pi m} \sqrt{RT_\infty}} \left[ e^{-(S \cos \psi)^2} + \sqrt{\pi} S \cos \psi \{1 + \text{erf}(S \cos \psi)\} \right] \quad (3)$$

と与えられる。ここで、 $S$ は速度比とよばれ気流速度を $U_\infty$ とすると

$$S = \frac{U_\infty}{\sqrt{2RT_\infty}} \quad (4)$$

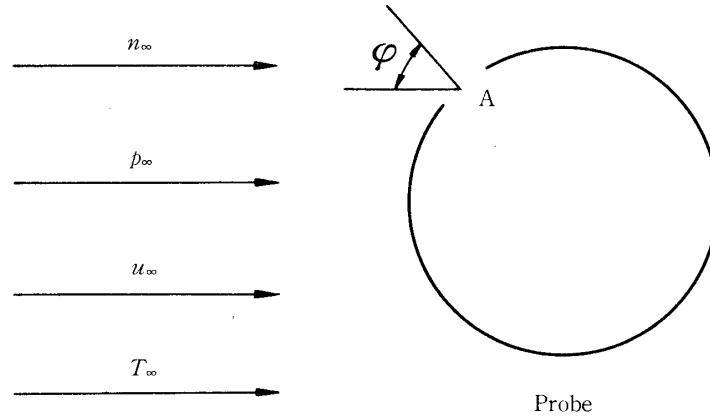


図9 自由分子流内のプローブ

気流マッハ数  $M_\infty$  とは  $S = \sqrt{\gamma/2} M_\infty$  の関係がある (ここで  $\gamma$  は気体の比熱比).

先に述べたように較正は室温の状態で行なわれるから, これを基準状態 (nominal state) とみなす. Probe 1 を流れの向きに設定するとき小孔面は流れの向きに沿うから  $\psi = \pi/2$  である. したがって Probe 1 をこのような設定で用いるとき, マス・フィルタの出力  $I_\infty$  は(3)より

$$I_\infty \propto p_\infty / \sqrt{T_\infty} \quad (5)$$

となり, 較正曲線より  $p_\infty / \sqrt{T_\infty}$  に相当する基準状態の  $P_{n\infty} / \sqrt{T_{n\infty}}$ , あるいは  $p_{n\infty}$  を求めることができる. これよりプローブの雰囲気気体の静圧  $p_\infty$  は

$$p_\infty = p_{n\infty} \left( \frac{T_\infty}{T_{n\infty}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

となり, 気流温度  $T_\infty$  を別の方法で知ることによって求められる. いうまでもなく, マス・フィルタで求められる圧力は成分気体の圧力, 本実験の場合には  $H_2$  または  $N_2$  についてのそれぞれの分圧を知ることになる. したがって気流温度  $T_\infty$  と関係なく分圧比は上述の測定によって求められる. つぎに流れに対向する小孔をもつ Probe 2 の出力については, この場合,  $\psi = 0$  であるから出力  $I_o$  は(3)より

$$I_o \propto \frac{p_\infty}{\sqrt{T_\infty}} \{ e^{-S^2} + \sqrt{\pi} S (1 + \operatorname{erf} S) \} \quad (7)$$

となり, 較正曲線より相当する基準状態の  $p_{no} / \sqrt{T_{no}}$  が求められる.  $T_{n\infty} = T_{no}$  を考慮すると

$$p_{no} / p_{n\infty} = e^{-S^2} + \sqrt{\pi} S (1 + \operatorname{erf} S) \quad (8)$$



より速度比  $S$  を求めることができる。

以上述べたように、基準状態（室温）での各成分について校正曲線を知るときプローブ1、プローブ2による出力測定から分圧比、速度比が得られる。その精度は校正曲線の精度に依存することはいうまでもないが、小孔まわりの気体の流れが自由分子流理論の適用に十分な程希薄であること、また流れに対向する角度が予め正確に知られていることなどによる。流れに対向する角度による誤差は(3)における関数

$$F(S, \psi) = e^{-(S \cos \psi)^2} + \sqrt{\pi} S \cos \psi [1 + \operatorname{erf}(S \cos \psi)] \quad (9)$$

と  $\psi$  の関係からみられるように、 $\psi = 0$  付近では  $\Delta F / \Delta \psi$  が小さいことにより角  $\psi$  の設定はプローブ2についてプローブ1より相対的に厳しくなくてよい(図10)。事実、 $\psi = 0$  において  $\partial F / \partial \psi = 0$  であることは容易に示される。

#### 4 測定結果と考察

低密度気流に関する計測手段として従来電子線法が最も有力なものとしてすでにそれを用いた多くの研究がある。電子線法は電子線励起による気体の発光を利用する点で気体密度があまり低いところではその計測が困難であるばかりでなく、精度においても適用が疑わしく

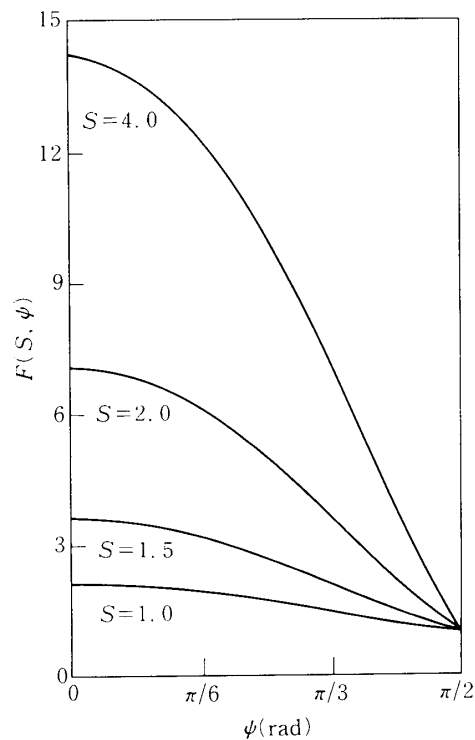


図10 関数  $F(S, \psi)$

なる。マス・フィルタによる計測はむしろ気体密度が小さいときに精度の点で有利になるばかりでなく、従来の電子線法によって測定不能な領域をカバーすることができる。また速度の測定に関しては、電子線法ではスペクトル線のドップラー変位により測ることになり、実際にそれを適用することは容易でない。それに比べ3章でみたように、マス・フィルタでは、速度比を各成分について容易に計測することができる。他方マス・フィルタ・プローブの欠点としては、流れのなかにプローブを挿入することによる擾乱の影響は多かれ少なかれまぬがれない点にある。また、気流温度を計測する手段は別に求めなければならない。しかし、比較的簡便に気体成分圧力、速度比を比較的精度よく計測できることを最大の特徴とする。

ここでは旋回流、自由噴流について実際に測定を行った2, 3の例を示してマス・フィルタ・プローブの有用性にふれておくことにする。

#### a) 旋回流

管内旋回流については電子線法を用いた詳細な計測が行われ、その結果についてはすでに報告されている[3]。ここではそれとの比較および電子線法では十分明らかにされなかったより低密度における流れのふるまいについて実験を行った。

前に行った実験では、旋回流は図3に示すような渦発生器（ボルテックス・チューブ）より直管を通して真空槽に噴出されている。管内旋回流に着目して、管の長さを種々変えて出口4 mmの点で電子線法によって計測された。その結果と比較のため、同じ位置（ $R = 0$ ,  $Z = 4$  mm）にプローブ小孔が位置するようにしてマス・フィルタによる計測を行った。ボルテックス・チューブに入る流れのよどみ点圧  $p_0$  を変え  $H_2$  50%,  $N_2$  50% の混合気体について各成分圧力（基準状態；nominal pressure）のふるまいが図11に示されている。比較のため同条件における電子線法による結果が示されている。予測されるように電子線法の結果は  $p_0 \sim 20$  Torr 以下ではマス・フィルタ・プローブのものと著しく差があった

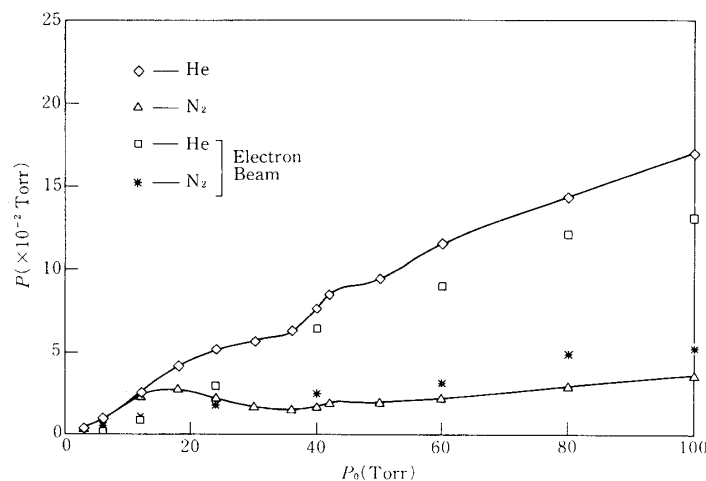


図11 成分圧力 ( $R = 0$  mm,  $Z = 4$  mm,  $L = 69$  mm)

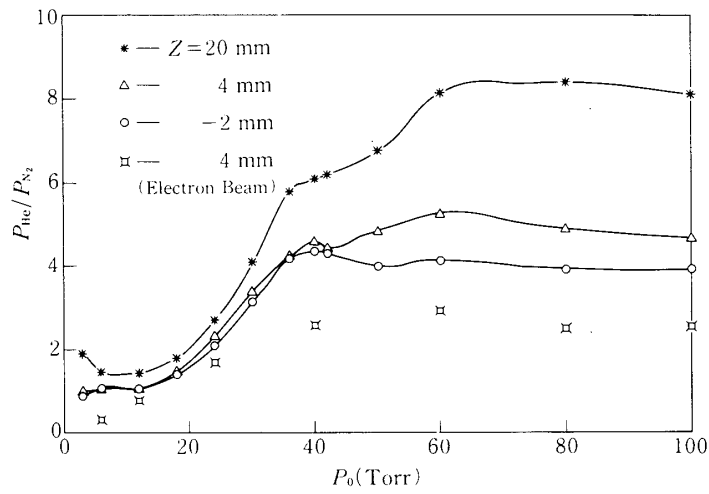


図12 圧力比 ( $R = 0 \text{ mm}$ ,  $L = 69 \text{ mm}$ )

く信頼できない値を示している。全体の傾向はほぼ一致をみるがマス・フィルタ・プローブによる成分分離の度合いがずっと大きいことが分った(図12)。なお、特徴的なことは  $p_0$  がある程度大きい場合  $p_0 \geq 40 \text{ Torr}$  では成分圧力比  $p_{He} / p_{N_2}$  はほぼ一定であるが  $p_0$  がそれより小さくなるときの比は小さくなり  $p_0 \sim 10 \text{ Torr}$  以下では殆んどその値は1となり成分分離はみられない。成分圧力比の減少は  $p_0$  が減少するとき旋回流が弱くなりつい

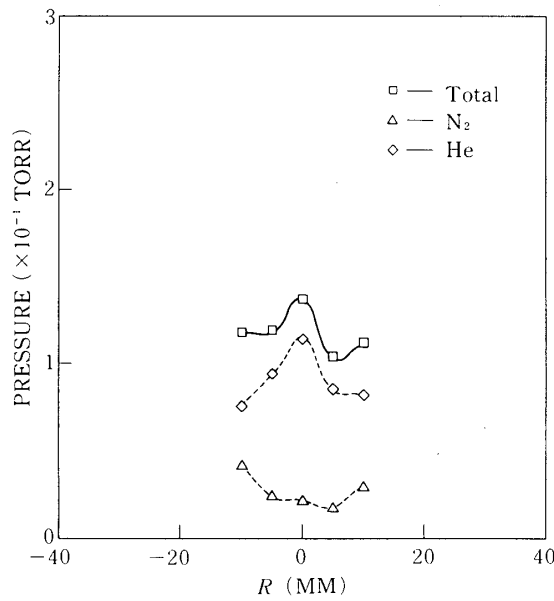


図13 圧力分布 ( $Z = 4 \text{ mm}$ ,  $L = 69 \text{ mm}$ ,  $p_0 = 60 \text{ Torr}$ )

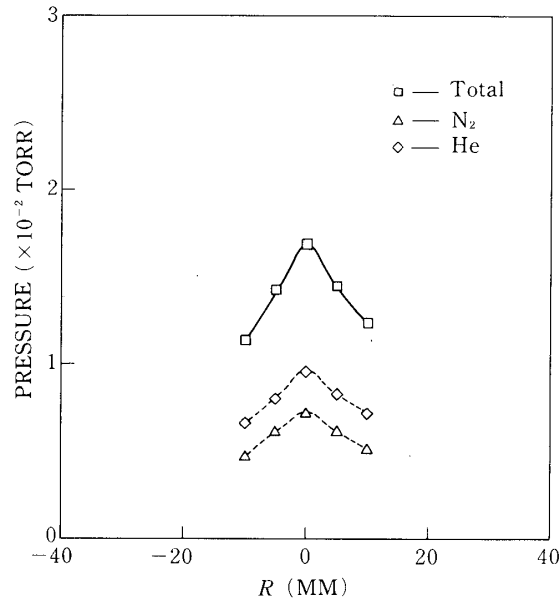


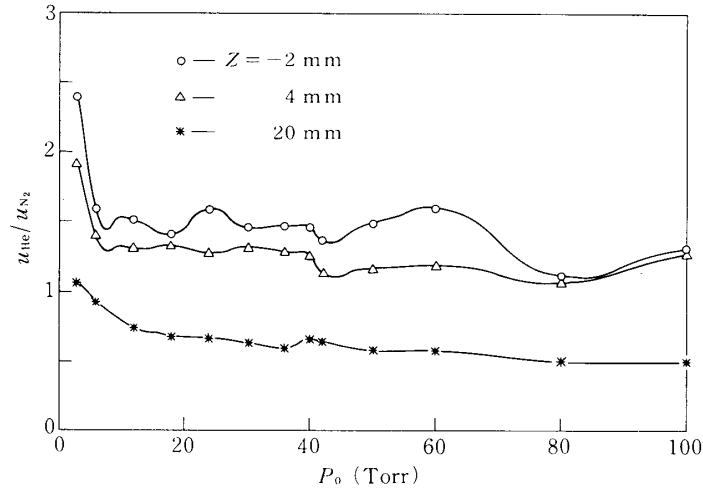
図14 圧力分布 ( $Z = 4$  mm,  $L = 69$  mm,  $p_0 = 6$  Torr)

には旋回流が消滅してしまうことによるものと考えられる。事実プローブによる  $Z = 4$  mm における成分圧力の径方向分布を示す図13, 14とを比べると明らかである。また図12の結果は軸に沿って  $Z = -2, 4, 20$  mm の3点における成分圧力比  $p_{He}/p_{N_2}$  を  $p_0$  に対してプロットしたものである。これからみられるように、旋回流による分離は管から噴出後さらに増大することがみられる。同じ位置での速度の比  $U_{He}/U_{N_2}$  を  $p_0$  に対してプロットした図を示しておく(図15)。速度の比は  $p_0 \geq 10$  Torr においてはあまり変わらずほぼ一定となっているが、 $p_0 < 10$  Torr においては  $p_0$  に依存して大きく変っている。その範囲では旋回流が殆んど消滅して自由噴流のようなふるまいをしているものと考えられる。このことは後に述べる自由噴流の結果との比較からもみることができる。以上の結果は管長が 69 mm の場合であることを付け加えておく。

#### b) 自由噴流

図4に示すような単純なストレート・ノズル(4.4 mm  $\phi$ )より真空槽中に噴出する自由噴流について成分圧力比、速度の比などについて測定した結果について述べる。He 90% / Ar 10% および He 50% / N<sub>2</sub> 50% の混合気体を用いた。自由噴流についてはすでに電子線法を用いた実験が多く行われている。たとえば最近の研究として Cattolica et al [4] のものをあげることができる。それらの実験条件と同様な範囲でプローブによる実験を行い、それらとの比較を行うこと、またさらには従来得られていない新たな条件下での現象の解明などを目的として進められた。

これらの詳細な結果については別の機会にゆずることにして、得られた主たる結果の2,

図15 速度比 ( $R = 0$  mm,  $L = 69$  mm)

3を記すことにする. Cattolica et al [4]との比較として貯気圧  $p_0 = 3, 6, 12$  Torr について速度の比  $U_{He} / U_{Ar}$  の  $R = 0$  mm,  $Z = 38$  mm での値を表に示す(表1).

表1 速度比 ( $R = 0$  mm,  $Z = 38$  mm)

$p_0$ (Torr)	$U_{He} / U_{Ar}$	
	Present	Ref. 4
3	1.7	1.08
6	1.1	1.05
12	0.95	1.03

$p_0 = 3$  Torr の場合の差が大きい他はおおよそ両者は一致を示している.  $p_0 = 3$  Torr という低い密度の場合, 先に述べたように電子線法の結果がどの程度信頼できるか不明の点がありそこでのプローブ法と電子線法との差については今後さらに検討を要する点であろう.

最後に He, N<sub>2</sub> の等圧混合気体で  $p_0 = 6$  Torr の場合スロート出口から下流に向かって軸上に沿う成分圧力比  $p_{He} / p_{N_2}$ , 速度の比  $U_{He} / U_{N_2}$  の分布を図16, 17に示す. 図16から分るように噴流出口附近において大きな成分分離があり下流に向かって減少しつつは分離が消滅してしまう. 速度の比は逆に出口附近で小さく下流に向かって次第に1に近づいていく傾向をみることができる.

以上いずれにしても噴流, 旋回流とも軸上におけるプローブ測定においては流れに対向する角度の誤差は小さいからプローブ測定の結果は十分な精度をもつものといえる. 電子線法によって測定が十分でない特に低密度領域における測定法として簡便かつ信頼性のある計測

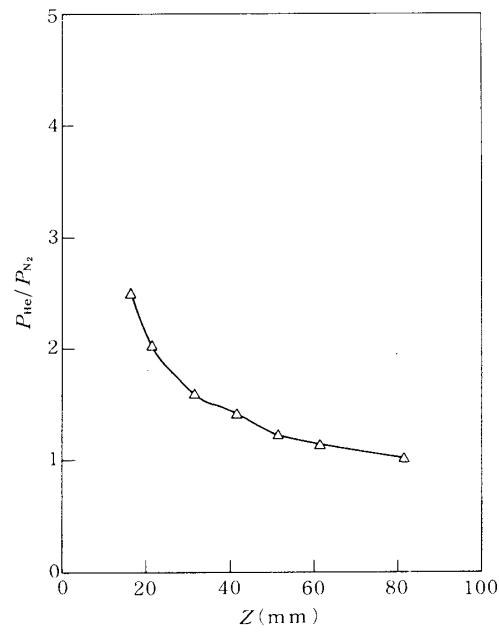


図16 圧力比 ( $R = 0$  mm,  $p_0 = 6$  Torr)

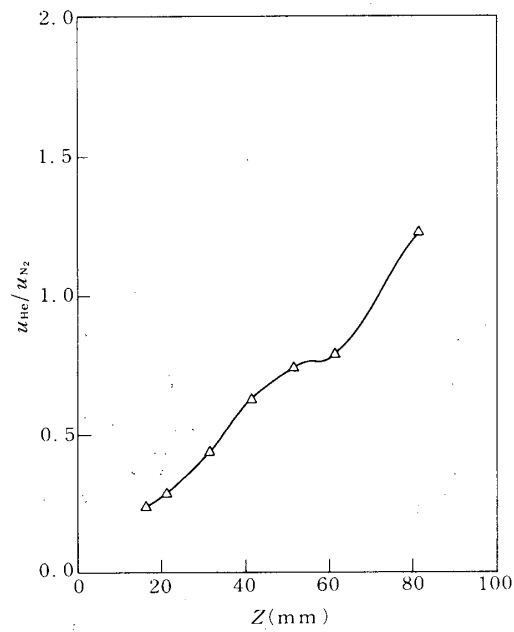


図17 速度比 ( $R = 0$  mm,  $p_0 = 6$  Torr)

手段として今後その応用が期待される。ここでは実験結果よりむしろマス・フィルタ・プローブの低密度気流計測への応用を主点にその特性と用法について報告した。

1980年12月10日 航空力学部

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] K. Bier and Th.K. Wurst, "Investigation of the Shock Zone of Freely Expanding Jets With Molecular Pressure Probes", *Rarefied Gas Dynamics*, ed.R. Campargue, vol. I, Commissariat A Lénergie Atomique, Paris, 343-354, 1979.
- [ 2 ] V. Ehrfeld, W. Ehrfeld, and E. Schmid, "Free Molecular Probe Measurements of Isotope Distribution in the Separation Nozzle", *Rarefied Gas Dynamics*, ed. R. Campargue, vol. I, Commissariat A Lénergie Atomique, Paris, 617-627, 1979.
- [ 3 ] 小口伯郎・佐藤俊逸・鈴木新一, "低密度混合気体の管内旋回流—特に低密度気流に関する実験方法について—" 東京大学宇宙航空研究所報告, 第16巻, 第1号(C) 523-546, March 1980.
- [ 4 ] R.J. Cattolica, R.J. Gallagher, J.B. Anderson, and L. Talbot, "Aerodynamic Separation of Gases by Velocity Slip in Freejet Expansions", *AIAA Journal*, vol. 17, No. 4, 344-355, 1979.