

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手法について—

小口伯郎・佐藤俊逸・鈴木新一

Study on Swirling Flow of Gas Mixtures with Special
Regard to Experimental Methods Relevant to Low
Density Flow

By

Hakuro OGUCHI, Shunitsu SATO and Shinichi SUZUKI

Abstract: The swirling flow of N_2 -He gas mixtures is experimentally studied in relatively lower density especially in focusing our attention onto experimental methods relevant to low density flows. The swirling flow was produced by a vortex tube with six nozzles tangential to the tube wall. The tube length and the stagnation pressure were varied. The measurement of flow variables was carried out just at the tube exit by the method utilizing the electron beam. The velocity components were measured by TOF method using a pulsed electron beam after detection of the location of the plasma sheet flowing down from the electron beam. The species concentrations were measured by the fluorescence method with an improved light detection technique. Moreover, the rotational temperature of N_2 was estimated by the well established method utilizing the relative intensity of rotational lines. The results show that there exists a sort of similarity for the swirling flow of gas mixtures through a tube and the governing parameter is $(L/D) Re^{-1/2}$ where L is the tube length, D the diameter, and Re the Reynolds number referred to the sonic speed at the nozzle throat and the tube diameter. The swirling ratio near the axis and the number density ratio on the axis depend only on the single parameter above defined, so far as the present experimental data are concerned.

1. は し が き

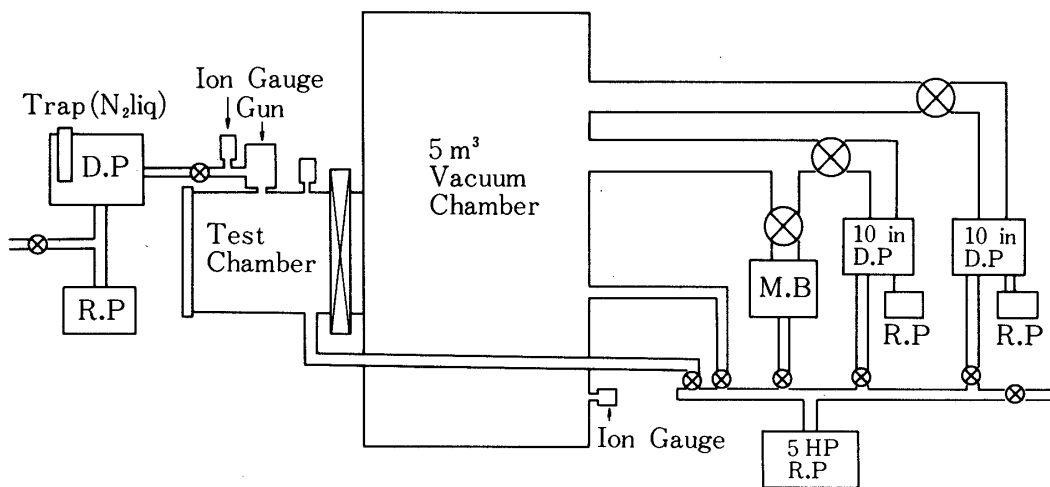
低密度混合気体の流れは最近多くの研究者によって取りあげられてきた。例えば、衝撃波の構造 [1], 自由噴流 [1, 2], 衝突噴流 [3], 曲面ノズル内流れ [4, 5] などに関する

る研究がある。これらの研究における主要な興味の一つは成分分離，同位体分離の機構を解明することにある[6, 7, 8]。同位体分離に関していえば，曲面ノズルを用いる方法がすでに実用に供されているが，他のものについてはまだ十分な理解が得られていない状況といえる。

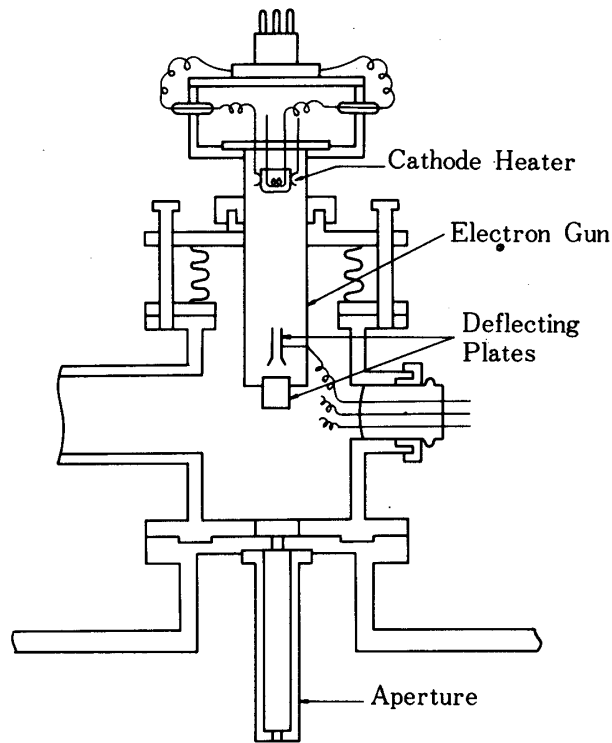
本報告では低密度混合気体の管内旋回流をとりあげ，成分分離の機構解明のための実験的研究を行う。たとえ実用的見地を離れても，旋回流それ自身気体力学における基本的現象の一つで，その特徴を明らかにすることは解析手法開拓のためにも重要である。事実，低密度混合気体の流れの解析手段は単一成分気体の流れの場合に比べて不十分なもので，幾何学的に簡単な場合たとえば衝撃波の構造，点湧源からの膨張流[9]などが取りあつかわれているにすぎない。他方実験的手法についても，気体が低密度であることの制約によって，その方法は限られている。ここでは，流れのふるまいを十分理解するために必要な物理量，すなわち速度，成分気体密度，温度また圧力などの測定をすでに確立されている手法ならびにその改良によって行うことに重点をおいて，得られた結果を報告する。

2. 実験装置

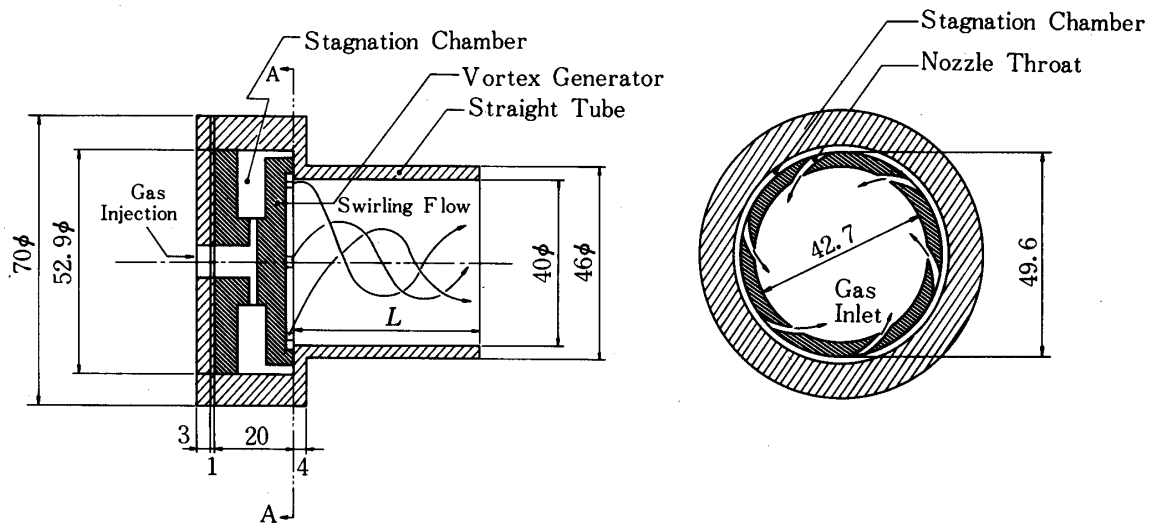
既設の真空槽（ 5 m^3 ）は2コの油拡散ポンプとメカニカルブースタによって，約 10^{-4} Torrに排気される（第1図）。旋回流発生装置としてボルテックス・チューブが用いられ，真空槽に連結する試験槽内に取り付けられる。混合気体は N_2 とHeの混合気体を用いられ，真空槽外に置かれた貯気槽に貯えられ，ボルテックス・チューブに給気され真空槽に噴出する。排気容量の制約によって気体の噴出は約1.6秒に限られた。実験の範囲ではこの時間は真空槽圧力上昇を十分小さくおさえ，定常的な流れの観測を保証する。対象とする密度範囲での観測手段としては電子線を利用する方法[12]が最も有効なものである。電子線発生電子銃は試験槽上部に取りつけられ，小孔をもつアパーチャによって試験槽と連結している（第2図）。銃の排気は別に設けられた小型油拡散ポンプによって 10^{-5} Torr程度に排気される。電子銃の使用は標準的には， -16 K V ， $500\mu\text{ A}$ である。電子銃は2対の偏向電極を持ち，



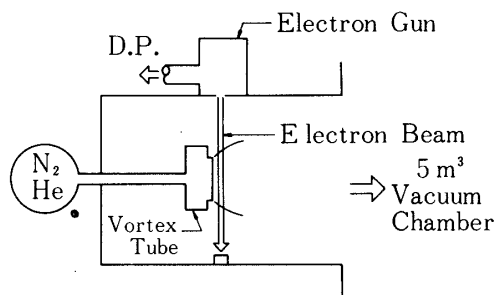
第 1 図 試験槽と排気系



第2図 電子銃



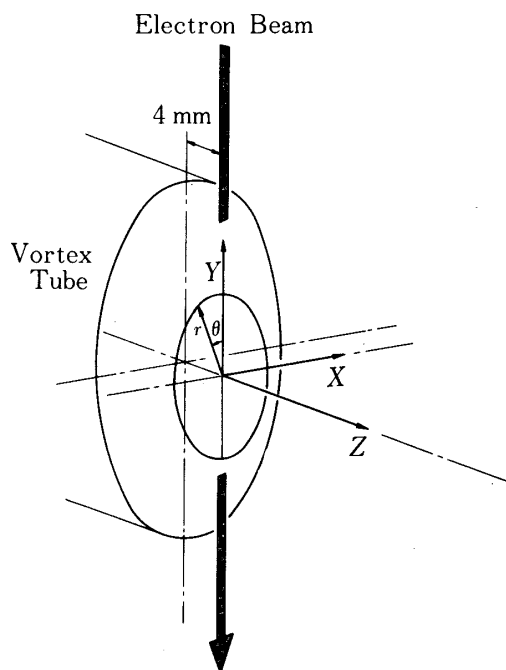
第3図 ボルテックス・チューブ



第4図 試験槽内の概略図

それに負荷する電圧によって電子線は小孔を通過し試験槽をよぎるように制御される。

使用されたボルテックス・チューブは第3図に示すように6コのノズルを持つ。貯気槽からの給気はこれらノズルを通り管壁に接する方向に噴出し、続く管内に旋回流を形成する。管内旋回流を観測するためには、電子線は管壁を通し流れをよぎるようにされなければならない。しかし、実際には電子線による気体の発光を観測する場合、曲った管壁による屈折が測定障害になりそのようにすることはできない。そこで、いくつかの違った長さの管を用意しその出口近傍を電子線が通過するように設定し(第4図)、そこでの測定が一つの管の長さに対応する場所での測定に近似的に等しいものとみなすことにした。実際には管長11.5



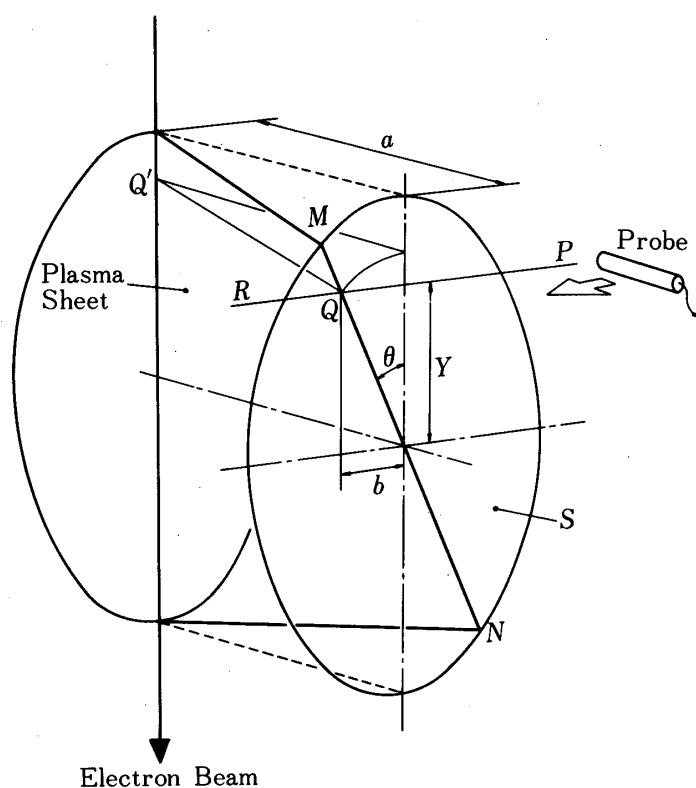
第5図 座標系

mm, 40 mm, 69 mm, 138 mm のものを用意し, それぞれに出口から下流 4 mm の付近を電子線がよぎるように設置された (第 5 図).

3. 速度測定

一般に速度は 3 方向成分をもつ. 第 5 図に示す座標系 (X, Y, Z) または (r, θ, Z) をとるとき, 速度成分は v_r, v_θ, v_z である. ここで Y 軸は電子線に沿って定義され, $X-Y$ 面は電子線を含み管軸 Z に垂直な面とする. 管内旋回流の特徴として径方向速度 v_r は v_θ, v_z に比べて十分小さく, 旋回率 v_θ/v_z と流速 v とが主要な量と考えられる. そこで, ここでは v_r が十分小さいという仮定のもとに旋回率 v_θ/v_z と流速 v の計測法を述べる.

まず, 旋回率の測定についてであるが, 電子線が所定の位置に定常的に射出されているとする. 電子線によってイオン化された気流は下流に向かって一枚のプラズマシートを形成する. 第 6 図に示されるように, 流れが旋回しているため, 形成されるプラズマシートは a だけ下流に位置した平面 S 内において $M-N$ のようによじられることになる. 平面 S 内で Y なる位置をラングミュアー・プローブが X 軸に平行に移動するとき, プローブは $|X|=b$ においてシートを横切る. そのときのプローブの出力から平面 S 内のプラズマシートの位置を検知することができる. 径方向速度 v_r を無視する仮定によって, 気体粒子は Z 軸を軸とする円筒



第 6 図 旋回率測定と流速測定の概略図

面上を飛行するものと考えてよい(第6図). したがって, 旋回率 $\zeta (=v_{\theta}/v_z)$ は近似的に
つぎのように与えられる.

$$\zeta = \frac{v_{\theta} \Delta t}{v_z \Delta t} = \frac{r\theta}{a} \quad (1)$$

ここで

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{Y}\right), \quad r = \sqrt{b^2 + Y^2},$$

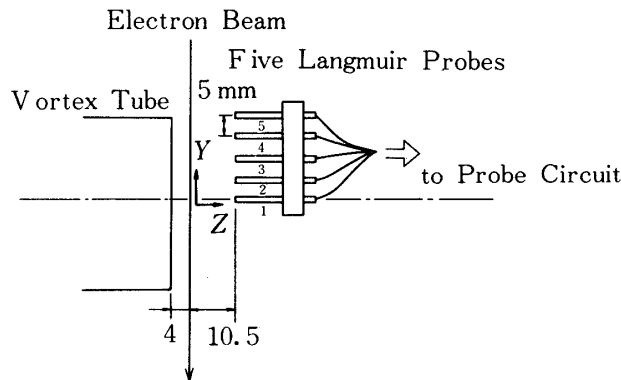
Δt は飛行時間である. すなわち一定の a , Y に対し b を検知するとき, 旋回率 ζ は式(1)
によって求められることになる. なお, 旋回率が小さいときには

$$\zeta \approx \frac{b}{a} \quad (2)$$

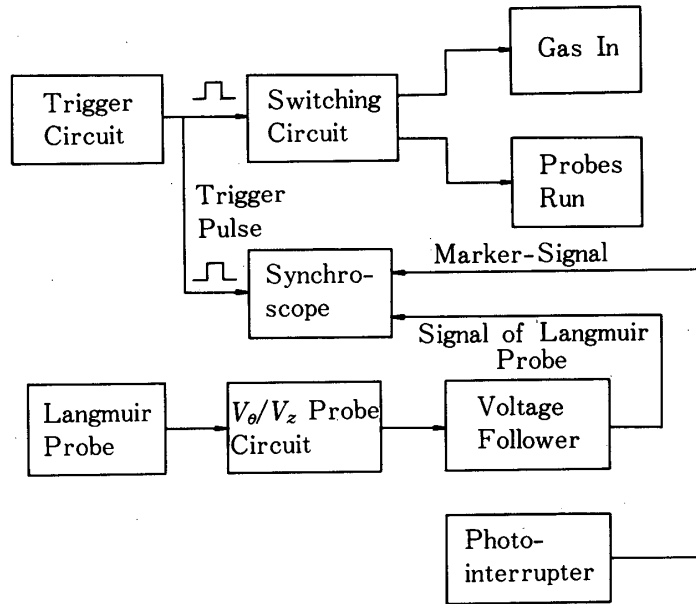
すなわち一定の a に対し, 旋回率は b に比例することになる. 以上のことから, $Z = a$ の断
面でのプラズマシートの位置を求めることによって旋回率の断面分布が与えられる.

つぎに, 流速 v の測定であるが, 電子線による速度測定としてはスペクトル線のドップラ
ー広がり測定する方法[15], パルス電子線によってイオン化された気体の飛行時間をラン
グミュアー・プローブで検知する方法[10, 11]が知られている. ドップラー広がりによ
る方法は後者に比べて正確で空間分解能も高く, He, Arなどの単原子気体について実
際に測定されている[2, 15]. しかし, N_2 など2原子分子ではスペクトル線はドップラ
ー広がり以外の原因による広がりを持ち, 速度分布関数の決定が困難である. また, 対象が
微弱光のゆえに技術的にもかなりやっかいなものである. それに比較してパルス電子線によ
る方法は精度, 空間分解能は劣るが手法としては簡単で流れの広い範囲にわたって計測す
るのに便利である.

前に述べたように, 定常的に射出する電子線を用い $Z = a$ におけるプラズマシートの位
置を求めておけば, その位置にプローブを固定しパルス電子線を射出し飛行時間 τ を測定す
るとき流速 v はつぎのように求まる. すなわち, 飛行距離 l は



第7図 くし形ラングミュアー・プローブ

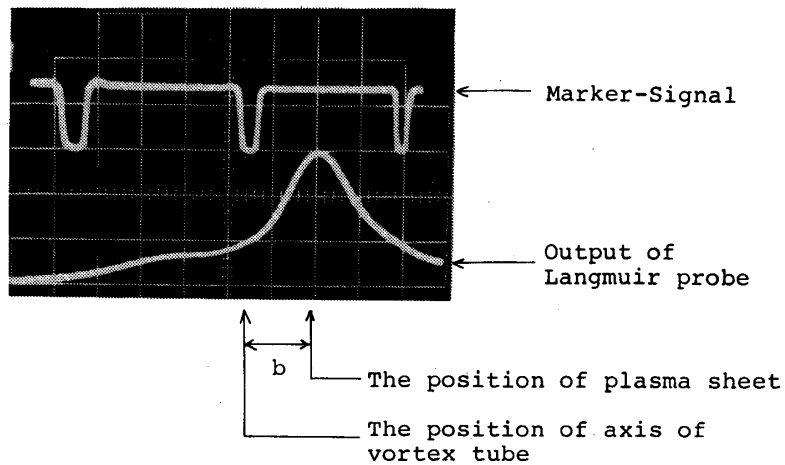


第8図 旋回率測定のプロック図

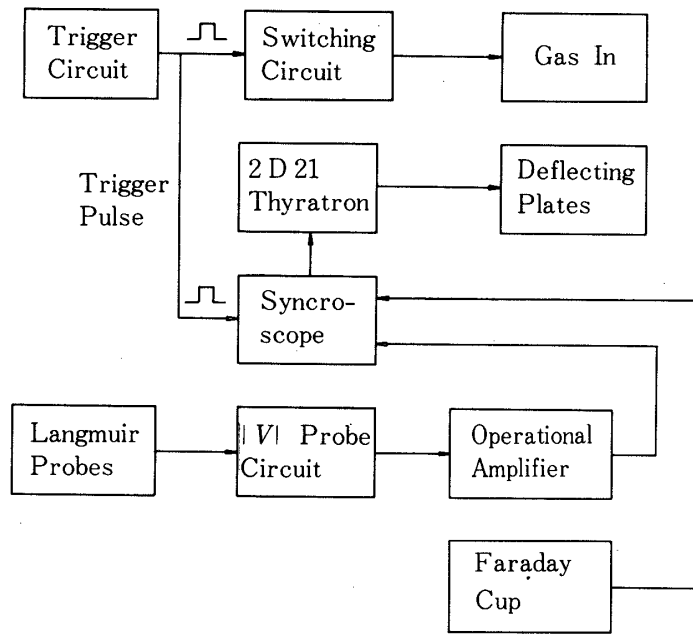
$$l = \int_0^a \sqrt{1 + (rd\theta/dz)^2} dz \tag{3}$$

式-(1)より

$$l = \int_0^a \sqrt{1 + \zeta^2(r)} dz = a \sqrt{1 + \zeta^2(r)}$$



第9図 旋回率測定における信号

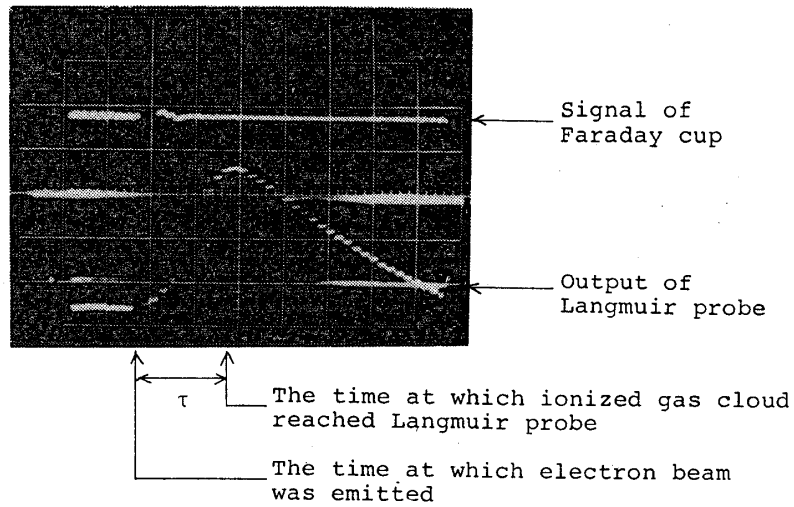


第10図 流速測定ブロック図

したがって

$$v = \frac{l}{\tau} = \frac{a}{\tau} \sqrt{1 + \zeta^2(r)} \quad (4)$$

旋回率 $\zeta(r)$ はすでに求めてあるから、一定の a に対する τ の測定から流れの速さ v が求め



第11図 飛行時間測定における信号

られる。

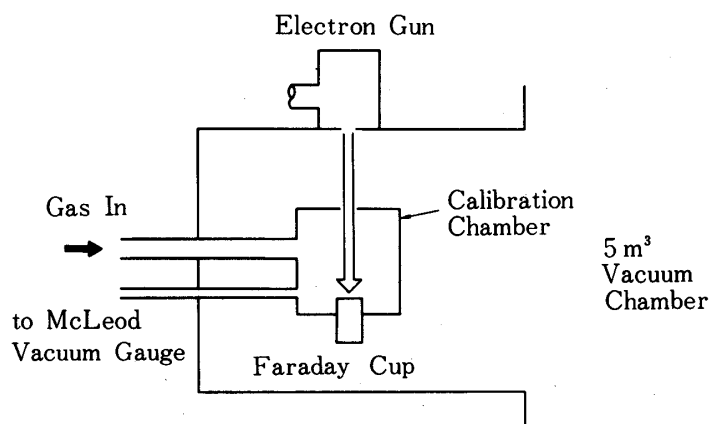
実際の測定には5本のプローブをくし形に取り付けたものが用いられ、トラバース架台によって移動が行われた。プローブ先端は電子線より下流10.5 mmに設置された。すなわち、 $a = 10.5 \text{ mm}$ であった(第7図)。旋回率測定のための回路が第8図に示されている。測定はトリガ・パルスによって開始される。トリガ・パルスによって、用意された気体はボルテックス・チューブに流れ込んで旋回流を形成し、同時にプローブが掃引を始める。プローブのX軸方向の位置はフォトインタラプタの出力によって検知される。この位置を示すマーカー信号とプローブ出力が同時にシンクロスコープ上に記録される。第9図に記録例を示す。プローブ出力が最大値を示す位置がプラズマシートの位置で、マーカー信号との対応から求めることができる。

流速 v の測定に関する回路を第10図に示す。この場合もトリガパルスで流れが開始する。電子線がアパーチャを通らないように偏向電極にはあらかじめ電圧が負荷されており、偏向電圧を瞬間的に変化させることによって電子線は一瞬(約 $3 \mu \text{ sec}$)アパーチャを通過する。電子線は下に設けてあるファラディカップによって検知される。ファラディカップの信号とプローブ出力の最大値の間の時間がイオン化された気体の飛行時間 τ を与える。記録の一例を第11図に示す。以上のようにして、旋回率 $\zeta (=v_{\theta}/v_z)$ および流れの速さ v を求めることができる。

4. 密度測定

気体密度の測定については電子線発光法とよばれるすでに確立した手法がある[12,13]。電子線との衝突によって励起された気体分子(又は原子)は気体に固有なスペクトルをもつ光を放出する。特定の波長の光の強さは気体密度に関係する。混合気体において成分 g についての発光強度 I_g は

$$I_g = \frac{A_g n_g}{1 + \sum_s (B_{gs}(T) n_s)} \quad (5)$$



第12図 密度測定に関する校正の概略図

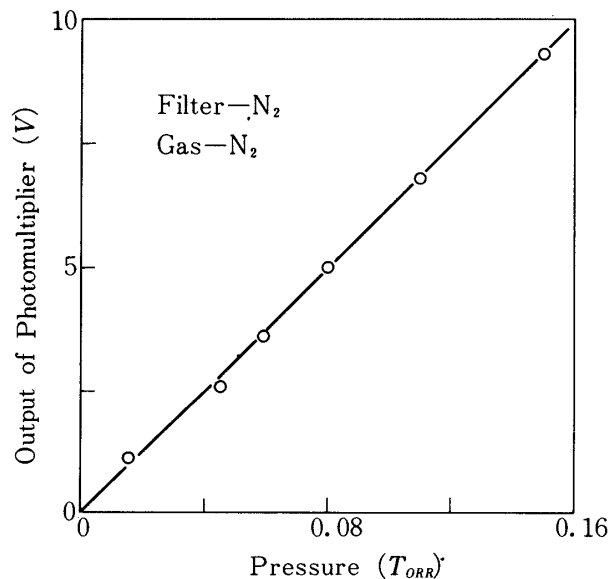
と書くことができる [13]. ここで, n_g, n_s はそれぞれ成分 g, s の数密度, A_g は流れに関係しない定数, $B_{gs}(T)$ は温度 T の関数で和はすべての成分 s についてとられる. 気体密度が低いとき, (5) 式分母の第 2 項は無視してよい. したがって光強度 I_g は数密度 n_g に比例する.

実際に選択された波長は He に対し 5016 \AA 線スペクトル, N_2 に対しては 4278 \AA の N_2^+ ($0-1$) バンドで, 用いた光学フィルタの透過半値幅は, He 用光学フィルタでは 20 \AA , N_2 用光学フィルタでは 40 \AA のものであった. N_2 と He から放出された光はその 2 枚の光学フィルタによって完全に分離されるものではなくお互いに多少重複されるから, N_2 用光学フィルタを通過してくる光強度 I_N と, He 用光学フィルタを通過してくる光強度 I_H は, それぞれ

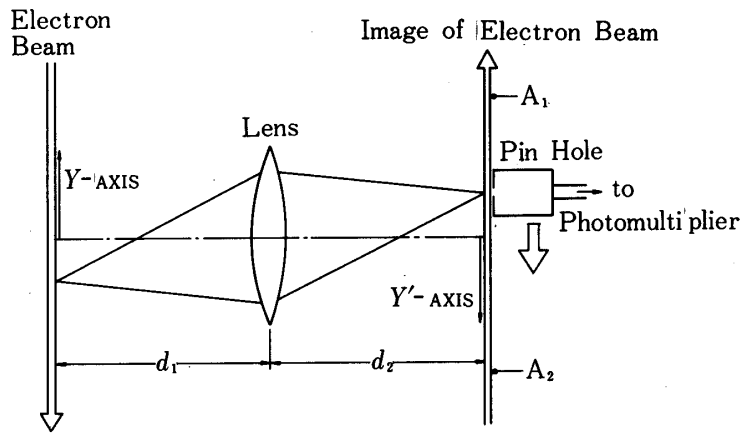
$$\left. \begin{aligned} I_N &= A_{NN}n_N + A_{NH}n_H \\ I_H &= A_{HN}n_N + A_{HH}n_H \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

と書くことができる. 4 コの係数は静的に較正から求めることができる. すなわち, 第12図に示すように試験槽に較正箱を置き N_2 または He の単一気体を注入し, 箱内の圧力を真空計で測定し, 光電管出力から I_N, I_H を求めれば, 式 (4) 係数 $A_{NN}, A_{NH}, A_{HN}, A_{HH}$ を決定することができる. 較正曲線の一例を第13図に示す.

この実験で実際に用いた密度測定について以下に述べる. ここで用いた電子線の直径は大よそ 2 mm 程度である. 前にも述べたように, 電子線上のある位置の光強度はその位置での



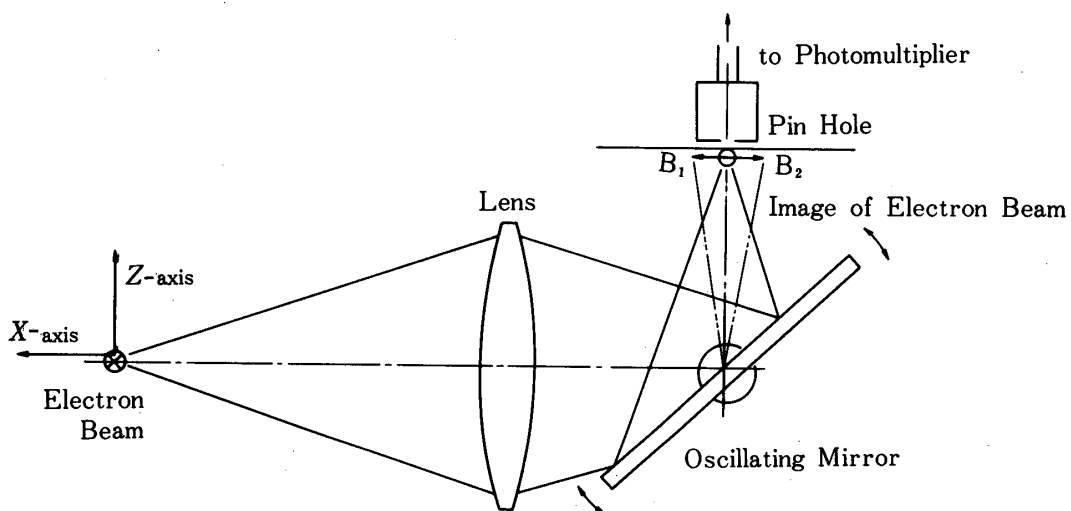
第13図 較正曲線の一例



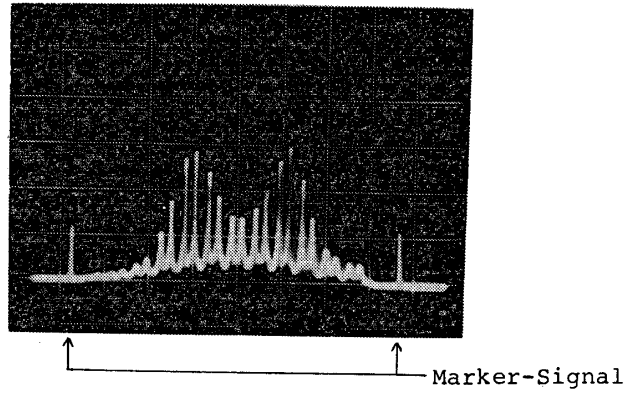
第14図 密度測定の概略図

気体密度に関連している。短い時間内で電子線にその光強度の分布を測定するために、第14図に示すように、電子線の実像に沿って光を取り込むためのピンホールを走らせる。取り込まれた光はファイバーによって光電子増倍管に導かれる。しかし、このままでは電子線の細い実像上を正しくピンホールが追従することは難しい。そこで、回転振動をする鏡を導入し、この困難を克服することができた。すなわち、第15図に示すように電子線の実像がピンホールの移動する面内で $B_1 - B_2$ の範囲を周期的に振動するように鏡を回転振動させる。ピンホールは紙面に対して垂直に移動する。このようにすると、電子線の実像はピンホールをくり返し横切ることになり、ピンホールは電子線を中心軸からの光を確実に取り込むことができる。

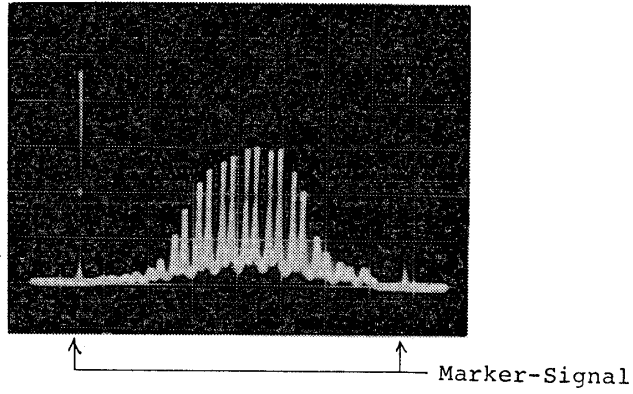
光電子増倍管の出力の記録例を第16, 17図に示す。両端のマーカースignalはピンホールの位



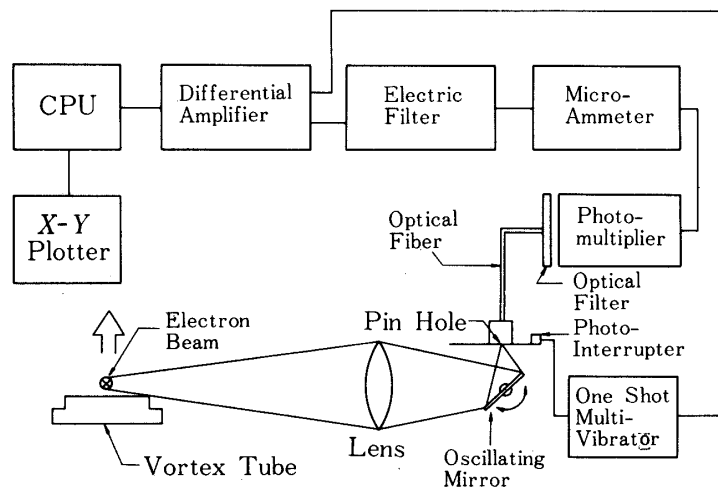
第15図 密度測定用光学系の概略図



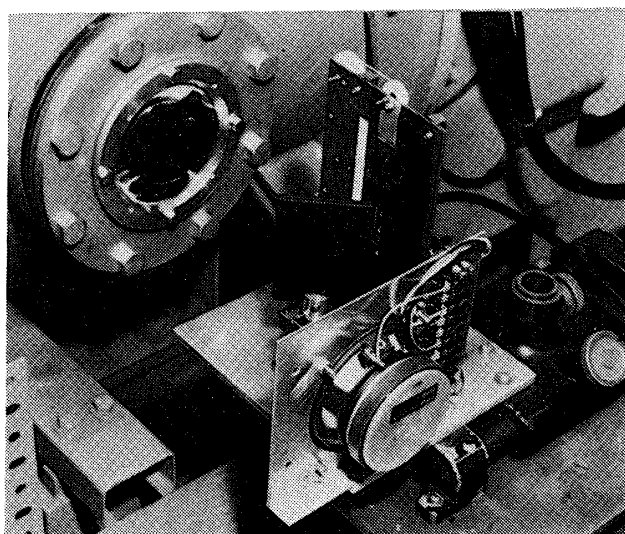
第16図 N₂用光学フィルターを用いた時の光電子増倍管の出力



第17図 He用光学フィルターを用いた時の光電子増倍管の出力



第18図 密度測定のプロック図



第19図 密度測定用光学系

置を判定するためのもので、フォトインターラプターの出力である。この二つのマーカー信号は、ピンホールが A_1 , A_2 の2点(第14図)を通過した時に発せられたものである。実際には第18図に示すブロック図のように、これらの出力信号は電氣的フィルタ、差動増幅回路を通り、HITAC-10 II の磁気ディスクに記憶され、式(6)を用いて数密度を求めた後 $X-Y$ プロッターなどに出力される。なお、鏡の回転振動はスピーカーを用いて行われた。密度測定における光学系を含む装置の写真を第19図に示しておく。

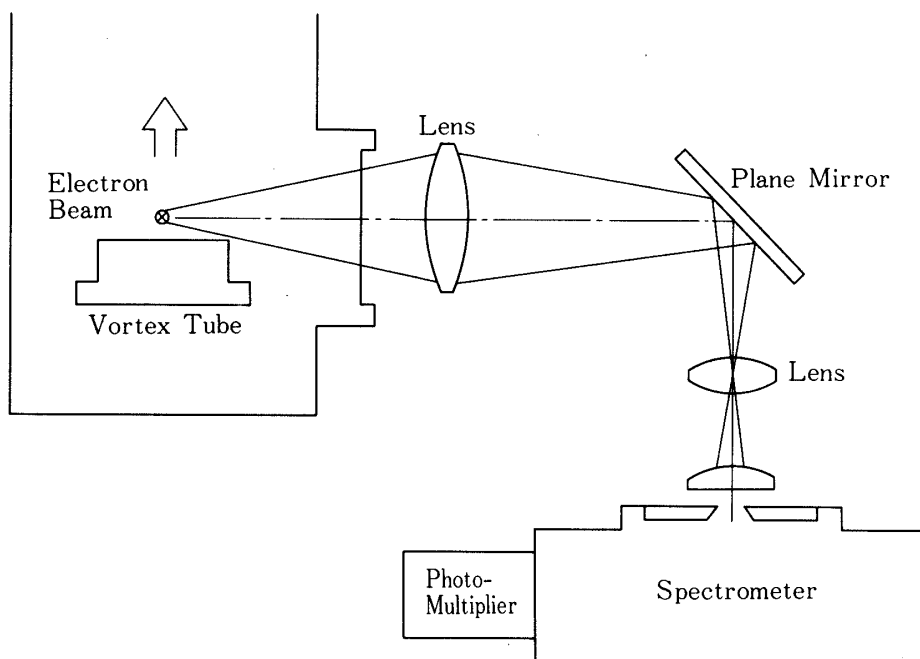
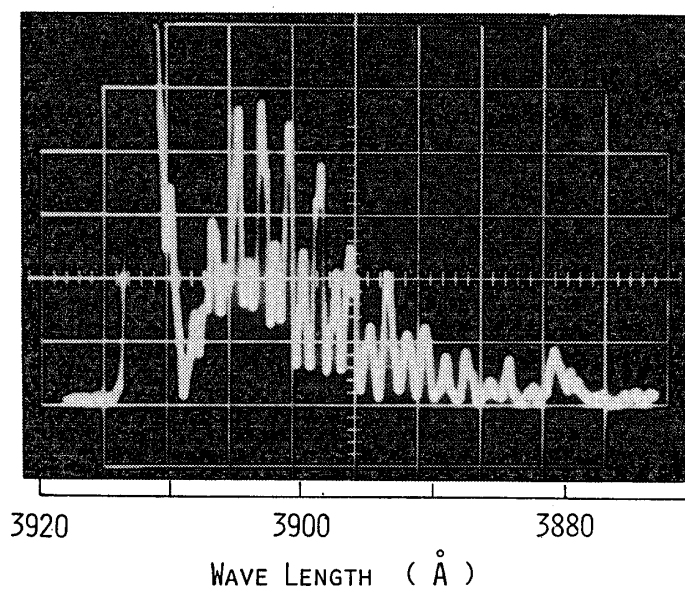
5. 回転温度の測定

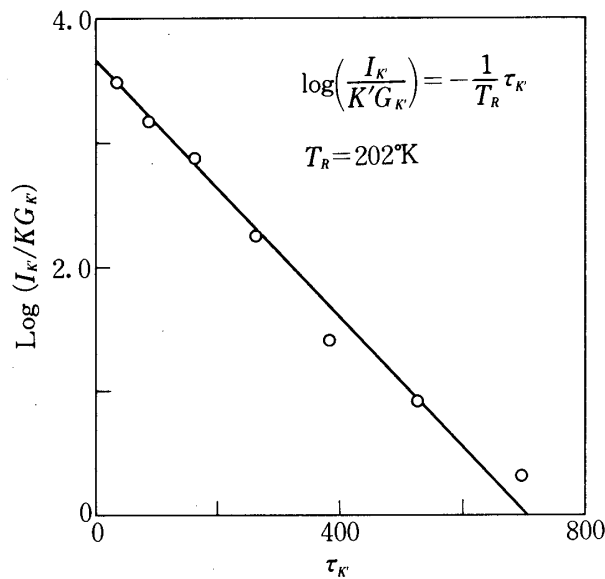
電子線の発光スペクトルより回転温度を測定する方法は Muntz [12, 14] によって提案されて以来、すでに多くの研究者によって行われてきた。特に N_2 の回転温度に着目して、 $N_2^+(0-0)$ バンドあるいは $N_2^+(0-1)$ バンドのスペクトルを利用するものが多い。この手法は回転スペクトル線の強度比によって回転温度を推定するもので、回転スペクトル線が分別できる R -枝についてなされる。気体が局所的に熱平衡に近いとき、回転温度は並進温度に等しいとみなすことができるから、このような場合には回転温度の測定から並進温度を知ることができる。回転量子数を k' とすると k' に対応するスペクトル線の相対光強度 I'_k はつぎのように与えられる。

$$I'_k = K' G'_k (T_R) \exp(-\tau'_k / T_R) \quad (7)$$

ここで T_R は回転温度、 G'_k , τ'_k はそれぞれ

$$G'_k = \frac{1}{2K'+1} \{ K' \exp(2K'\theta_R/T_R) + (K'+1) \exp[-2(K'+1)\theta_R/T_R] \} \quad (8)$$

第20図 N_2 回転温度測定用光学系の概略図第21図 $N_2^+(0-0)$ バンドの回転構造

第22図 $Y_{K'} - \tau_{K'}$ の一例

$$\tau_{K'} = \theta_R K' (K' + 1) \quad (9)$$

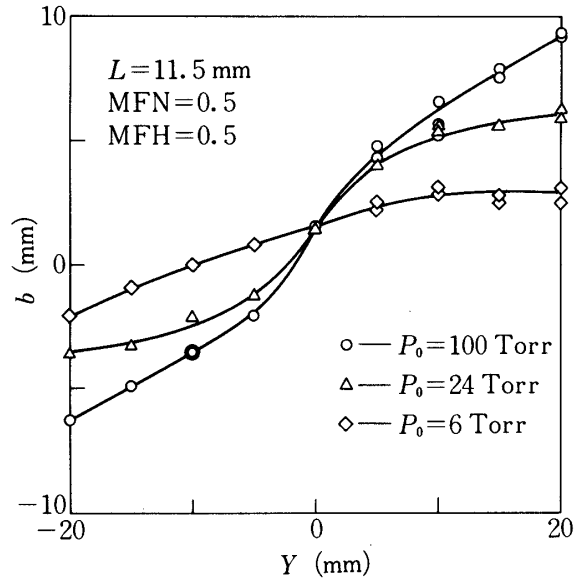
なお、 θ_R は回転特性温度である。上式の導出についての詳細は例えば文献 [14] を参照されるとよい。ここで、式(7)の適用について窒素の振動温度が 800°K より低いことが条件で、それ以上の高温では変更を要する。この実験においては式(7)が十分成り立つ範囲であった。

式(7)の対数をとると、

$$Y_{K'} \equiv \ln \frac{I_{K'}}{K'G_{K'}(T_R)} = -\frac{\tau_{K'}}{T_R} \quad (10)$$

を得る。この式より、 $Y_{K'}$ は $\tau_{K'}$ に比例しその勾配の逆数の符号を変えたものが回転温度 T_R になることがわかる。実際には $Y_{K'}$ は T_R を含むからくり返し計算によって T_R を求めることになる。

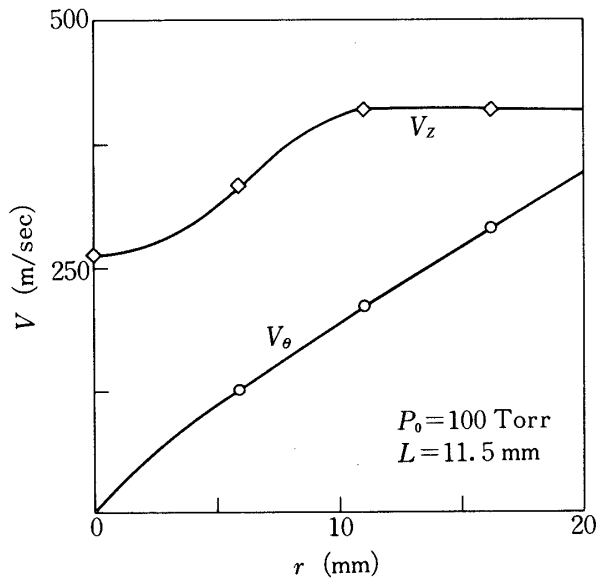
用いた分光器は Shimazu GE-100、グレーティングは 1200 本/mm 分散度 $8.3 \text{ \AA} / \text{mm}$ 。グレーティングをパルスモータによって回転し、その波長送り速度は $25 \text{ \AA} / \text{sec}$ である。また、スリット幅は 0.1 mm 、 0.075 mm で光の強さによって選択された。光学系は中間結像法によるものでそのブロック図を第20図に示す。得られたスペクトルの一例を第21図に示す。このようなスペクトルより求められる $Y_{K'} - \tau_{K'}$ の図を第22図に示す。この場合、勾配より求められる T_R は 202°K であった。



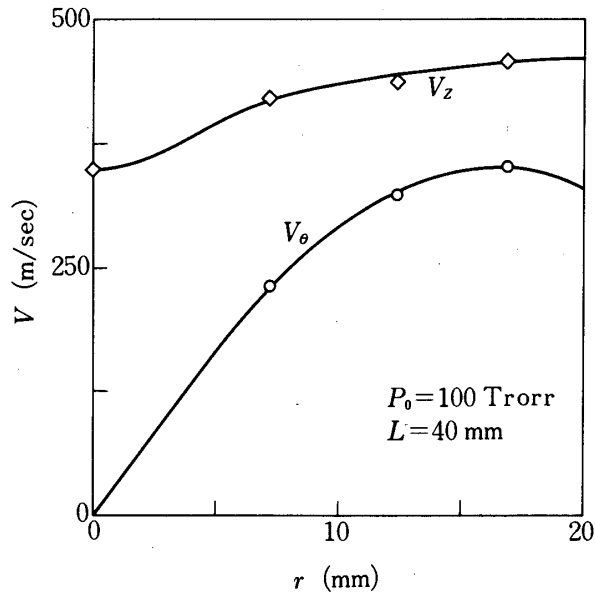
MFN - N₂ のモル分率

MFH - He のモル分率

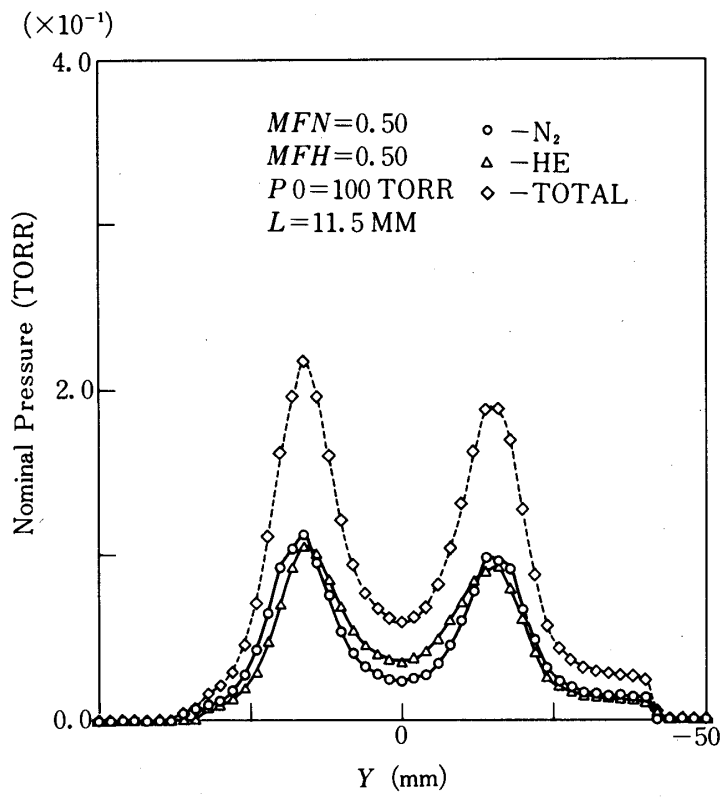
第23図 旋回率の圧力依存性



第24図 速度成分 v_θ, v_z の分布



第25図 速度成分 v_θ と v_z の分布



第26図 成分数密度分布と全数密度分布

6. 測定結果と考察

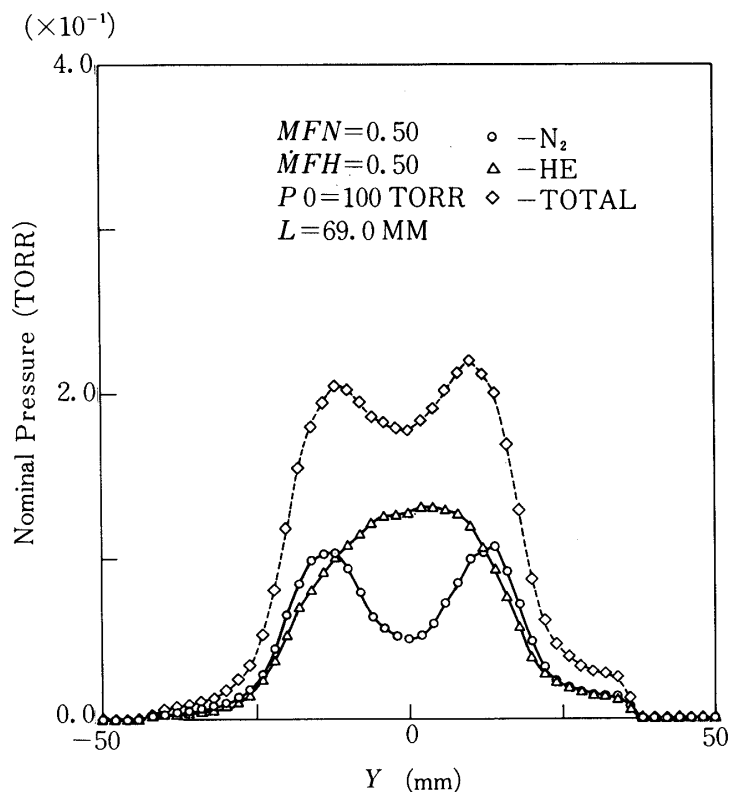
旋回率と流速の測定

前に述べたように、旋回率 $\zeta (=v_{\theta}/v_z)$ は b を求めることによって得られる。 $b \sim Y$ の関係を最短管長 ($L = 11.5 \text{ mm}$) の場合について第23図に示す。貯気圧 $P_0 = 100, 24, 6 \text{ Torr}$ の場合である。 ζ は大よそ b に比例するとみてよいから、この図より貯気圧が低くなる時旋回率は小さくなるのがわかる。特に 24 Torr から 6 Torr において急速に小さくなっている。後に述べるように、この付近に希薄性の影響が著しくなる境界があることが予想される。旋回率 $\zeta (=v_{\theta}/v_z)$ と流れの速さ v が求められると、 $v_r \approx 0$ の仮定より、 v_{θ}, v_z を知ることができる。 v_{θ}, v_z の分布の一例を第24図に示す。短い管においては周方向速度 v_{θ} の分布は径 r にはほぼ比例して管壁まで増大している。すなわち、大よそ剛体回転とみなしうる状態になっている。特にここに示した圧力の高い場合においてこのようにいえる。管長が長くなると、壁の影響によって剛体回転の部分は中心部に縮少してくる(第25図)。

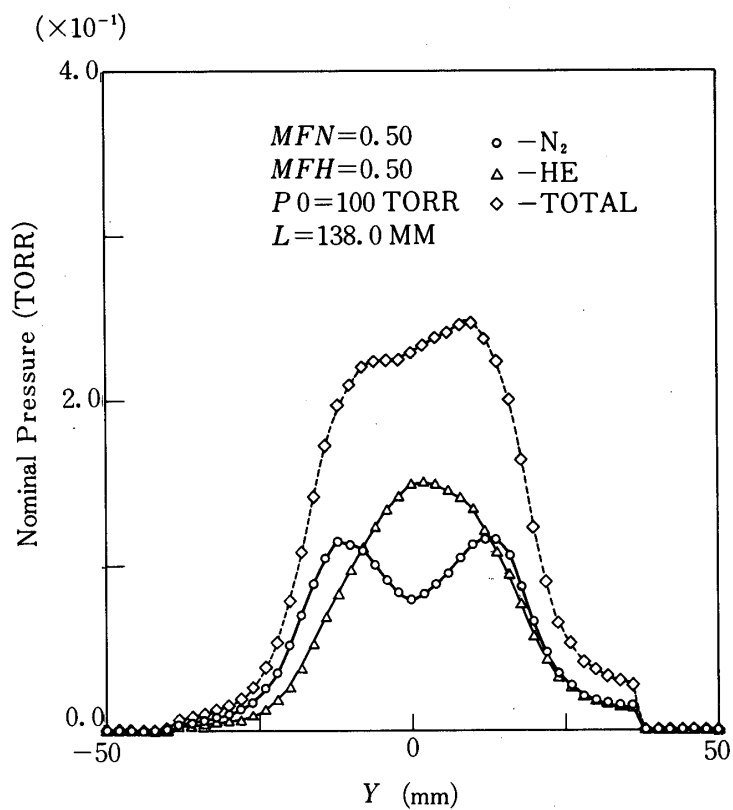
流速の測定(パルス電子線法)は、低密度の場合($P_0 = 6 \text{ Torr}$)において実行できなかった。理由は明確でないが、電子線とプローブ間の放電によるノイズと思われる出力によって飛行時間を計測することができなかった。この点は今後の問題として残されている。

密度測定

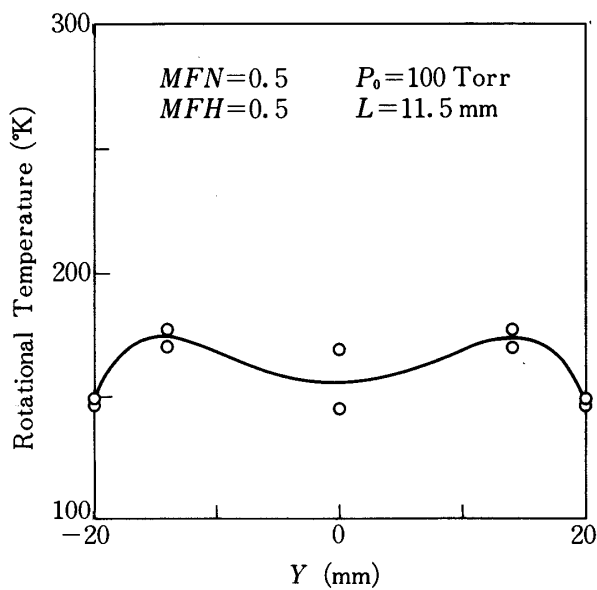
成分密度、全密度とも nominal pressure P_{nom} で示される。すなわち



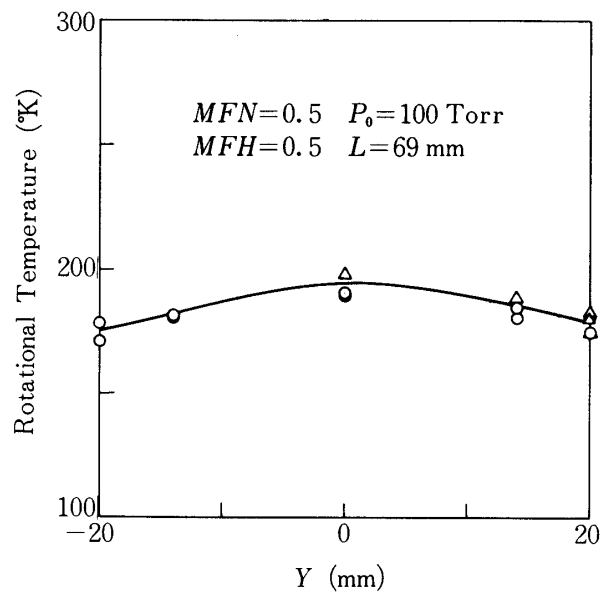
第27図 成分数密度分布と全数密度分布



第28図 成分数密度分布と全数密度分布

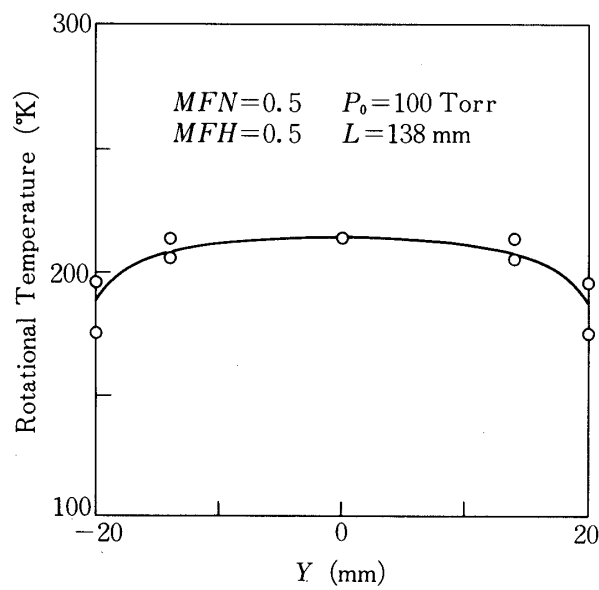


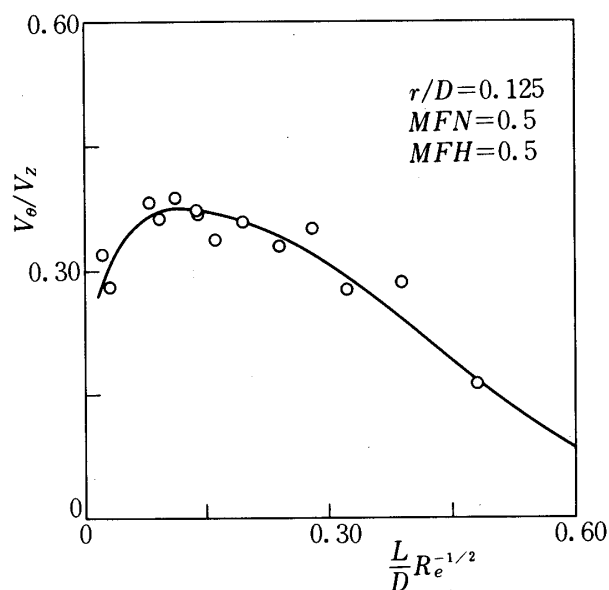
第29図 N₂ 回転温度分布

第30図 N₂ 回転温度分布

$$P_{\text{nom}} = knT_0$$

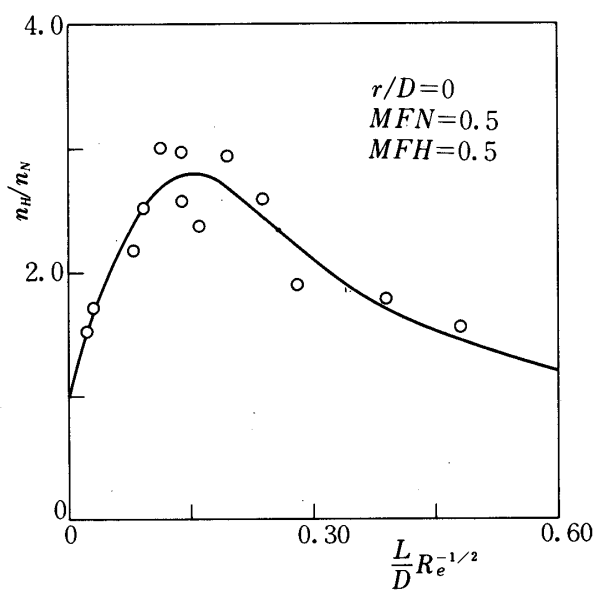
ここで k はボルツマン定数, T_0 は室温である. 貯気槽圧力 $P_0 = 100$ Torr の場合で, $L = 11.5, 69.0, 138.0$ mm の3種の管長に対する成分密度, 全密度をそれぞれ第26, 27,

第31図 N₂ 回転温度分布



第32図 相似パラメータに対する回転率

28図に示す. 短い管においては成分分離はほとんど現われていないが, 管長が長くなるとき大きな成分分離が現われ, さらに長くなるとき混合の影響によって分離度は再び小さくなる. 全体としてほぼ軸対象とみられるきれいな旋回流が形成されていることがわかる. このことは第23図においても同様に見ることができる.



第33図 相似パラメータに対する成分数密度比

回転温度測定

ここでも $P_0 = 100 \text{ Torr}$ について管長 $L = 11.5, 69.0, 138.0 \text{ mm}$ の場合の結果をそれぞれ第29, 30, 31図に示す. 短い管においては多少温度変化は強いが, 管が長くなるにつれてほぼ一様な温度分布に近づくことがみられる. 平均的な温度は管が長くなる時高くなる. 温度分布と速度分布は相関があり, 管長とともに減速していることを裏付けている. 全速度分布の結果は示していないが, それとの比較によってこのことは確められた. なお, ここでの実験では $N_2^+(0-1)$ バンド, $N_2^+(0-0)$ バンドの選択による差は実験誤差の範囲で認められなかった.

相似則

以上得られた結果を整理し, 回転率および成分数密度比 n_H/n_N について経験的相似則が存在することが見出された. いまレイノルズ数 Re を

$$Re = \frac{a^* D}{\nu}$$

と定義する. ここで ν は動粘性係数, a^* はノズルスロートでの音速, D は管径である.

ここで行った実験結果において特に管軸所傍 (v_θ/v_z に対し) または管軸上 (n_H/n_N に対し) の値を

$$\frac{L}{D} Re^{-1/2}$$

なるパラメータで整理すると第32, 33図に示される結果が得られた. それぞれ上記のパラメータについてほとんど一本の曲線にまとめられることが分る. 第33図より軸上における成分分離の最も高いパラメータの値は

$$\frac{L}{D} Re^{-1/2} \doteq 0.15$$

付近にあるといえる. Re は P_0, T_0 によって定まるから, もしも P_0, T_0, D, L の4コの中で3コを指定するとき最大の成分分離を与える残りの量を求めることができる. このことはあまり低くない圧力 P_0 に対して成り立つものと思われる. 密度がかなり低い場合 ($P_0 = 6 \text{ Torr}$) には希薄性の影響が大きくなり, 上記の相似パラメータは存在しない. また, 分離機構も圧力勾配による拡散ではなく成分間の速度すべりによるものが支配的になるものと予測しうる結果を得ているが, ここでは実験手法とその処理ということに焦点をおいて報告し, それらの結果については他の機会にゆずることとする.

1980年1月11日 航空力学部

参 考 文 献

- [1] D.I. Sebacher, "Diffusive Separation in Shock Waves and Freejets of Nitrogen-Helium Mixtures", *AIAA Journal*, 6, 51, 1968.
- [2] R.J. Cattolica, R.J. Gallagher, J.B. Anderson, and L. Talbot, "Aerodynamic Separation of Gases by Velocity Slip in Freejet Expansions", *AIAA Journal*, 17, 344, 1979.
- [3] F.C. Hurlbut and W. McDermott, "Flow Fields and Separation of Species in Opposed Gas Jets", *11th Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, vol. 1, ed. R. Campargue, CEA, Paris, 1979, p601.
- [4] E.W. Becker, P. Bley, U. Ehrfeld, W. Ehrfeld, U. Knapp, and G. Krieg, "Separation Nozzle Systems with Dynamic Flow Deflection", *11th Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, vol. 1, ed. R. Campargue, CEA, Paris, 1979, p587.
- [5] E.W. Becker, P. Bley, U. Ehrfeld, and W. Ehrfeld, "The Separation Nozzle-An Aerodynamic Device for Large-Scale Enrichment of Uranium - 235", *10th Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, vol. 1, ed. J.L. Potter, Progress in Astro. and Aeronau., AIAA, 1977, p3.
- [6] E.P. Muntz and B.B. Hamel, "Rarefaction Phenomena in Gas and Isotope Separations", *9th Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, vol. 1, ed. M. Becker and M. Fiebig, DFVLR Press, Porz-Wahn, 1974, B. 1.
- [7] E.P. Muntz and T.L. Deglow, "Rarefaction Phenomena in Gas and Isotope Separation with Emphasis on Jets and Beams", *11th Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, vol. 1, ed. R. Campargue, CEA, Paris, 1979, p573.
- [8] A.K. Rebrov, "Experimental Study of Relaxing Low-Density Flows", *10th Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, vol. 2, ed. J.L. Potter, Progress in Astro. and Aeronau., AIAA, 1977, p811.
- [9] T. Soga and H. Oguchi, "Source Flow Expansion of Gas Mixtures into a Vacuum", *9th Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, vol. 1, ed. M. Becker and M. Fiebig, DFVLR Press, Porz-Wahn, 1974, B. 3
- [10] K.A. Bütetfisch and D. Vennemann, "Absolute Velocity Measurements in a Rarefied Gas Flow by An Ion Time-of-Flight Technique", *8th Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, ed. K. Karamcheti, Academic Press, 1974, p245.
- [11] J. Allegre, M. Raffin, and D. Vennemann, "Flow Velocity Determination along a Wake Axis", *9th Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, vol. 1, DFVLR Press, Porz-Wahn, 1974, B. 9.
- [12] E.P. Muntz, "Measurement of Rotational Temperature, Vibrational Temperature, and Molecule Concentration in Non-Radiating Flows of Low Density Nitrogen", *UTIA Report No71*, 1961.
- [13] E.P. Muntz and D.J. Marsden, "Electron Excitation Applied to the Experimental

Investigation of Rarefied Gas Flows”, *3rd Symposium of Rarefied Gas Dynamics*, vol. 2, ed. J.A. Laurmann, Academic Press, 1963, p495.

- [14] E.P. Muntz, “Static Temperature Measurements in a Flowing Gas”, *The Physics of Fluids*, 5, 80, 1962.
- [15] E.P. Muntz, “Molecular Velocity Distribution-Function Measurements in a Flowing Gas”, *The Physics of Fluids*, 11, 64, 1968.