

# 稀薄気流における密度分布測定のための 走査電子線密度計

小 口 伯 郎  
本 間 弘 樹\*  
別 所 順 吉\*\*  
小 楠 千 早\*\*

## Scanning-Electron-Beam Densitometer for Measurements of Density Distributions in a Rarefied Gas Flow

By

Hakuro OGUCHI, Hiroki HONMA, Junkichi BESSHO and Chihaya OGUSU

**Abstract:** The scanning-electron-beam densitometer has been developed in order to measure density distributions in a rarefied gas flow during a short period of time. The decay of electron-beam intensity depends on the gas density along the beam path. In the ordinary use of electron-beam densitometer the beam is employed to hold a fixed position, so that the beam-intensity measurement provides the density only along the fixed path. In the present device, the electron beam can be scanned across the gas flow in parallel with the original beam axis by use of the electron lens and collimator. The density distribution along the path in the scan direction is obtained by the beam-intensity measurement. In actual this device has been applied to obtain the density distribution along the shock layer ahead of a sphere in a low-density gun tunnel stream.

### 概 要

低密度気流中の密度分布を短時間内に測定することを目的として、電子レンズによって平行に走査される電子線を利用した密度計を試作した。その機構、性能と、低密度ガン・タンネル気流におかれた球の前方の衝撃波層内の密度分布測定に応用した結果が報告されている。

### 1. 序

低密度気流において気流密度を測定しようとする場合、密度の比較的高い気流の測定に用いられているマッハツェンダー干渉計などの光学的方法によると、感度の低下により直接測定を行なうことができないので、それに代わる有力な方法として電子線を用いた密度測定法がしばしば用いられる[1]~[4]。

\* 協同研究員，千葉大工学部 機械工学科

\*\* NHK 技術研究所 電子管研究部

密度測定に電子線を用いる場合、気体中を通過する電子線の減衰の程度を測るか、または高エネルギー電子線によって気体を発光させ、その強さから気体原子または分子密度を求めようとする方法に大別される。ここでは、電子線の減衰を利用する密度測定法によって短時間内にある領域内の密度分布を測定可能にする装置の試作とその応用例についてのべる。

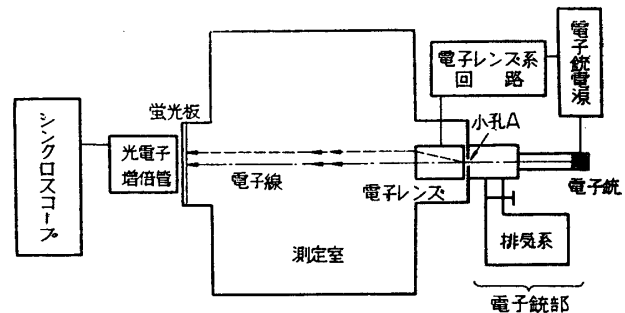
電子線が気体中を通過するとき、気体分子による散乱のため電子線強度は減衰する。その単位長さあたりの減衰量は気体の種類と密度による。したがって、気体を選ばれるとき、電子線強度の減衰量から気体密度を測定することができる。これまで行なわれているように電子線が固定されている場合には、電子線経路にその平均密度が得られるにすぎない。したがって、異なる場所の密度は電子線の射出部と検出部を機械的に移動することによって測定された[2]。連続風洞におけるように長時間一定の気流状態が実現される場合、あるいは衝撃波管内の実験のように一点における密度の時間変化を問題にする場合にはこのことはあまり問題にならないが、現在われわれがこの装置を応用した低密度ガン・タンネル、あるいは衝撃風洞などにおけるような短かい持続時間の気流中の実験においては、ある範囲の密度分布を知るためにこれまでの様式のまま適用することは事実上非常な労力をともなうばかりでなく、流れの再現性を考慮するとき、一回の気流持続時間中に分布そのものが求められることがきわめて望ましい。この目的にそって、われわれは電子線が短時間内に電子レンズによって平行に走査され得るような装置を試作し、低密度ガン・タンネル気流中におかれた球の前方の衝撃波層内の密度分布測定に応用した。

## 2. 走査電子線密度計

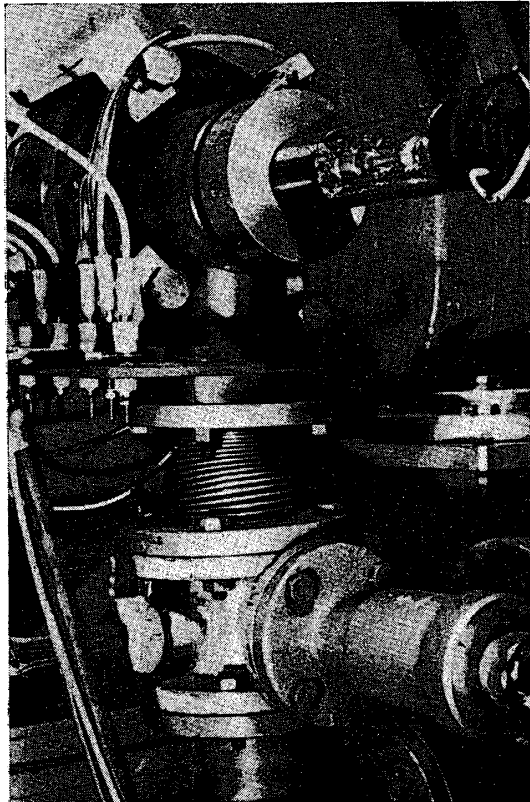
走査電子線密度計の概略を第1図に示す。電子銃から出た電子は電子銃部と測定室との隔壁にけられた小孔Aを通過してのち、電子レンズ部で偏向をうけ、測定室内を横切って測定室の反対側の壁に設けられた蛍光板に達する。電子線ははじめ電子レンズ軸上にあるが、電子レンズの偏向電極に電圧が加えられると電子線はレンズ軸からはずれて軸に平行のまま移動する。電子線による蛍光板の発光を光電子増倍管で受け、シンクロスコープでその出力を観測する。装置の詳細は以下の小節2-a~2-cでのべる。気流中の密度分布の測定法は第4章の応用例においてのべる。

### 2-a 電子銃部

電子銃には、酸化陰極をタングステン・フィラメント（直径0.15 mmφ、ヒータ電圧2 V、ヒータ電流3.5~3.7 A）におきかえたテレビジョン用の電子銃を用いた（CES 14 RP 4 A）。電子銃部内を使用時には油拡散ポンプによって $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$  Torrに常に排気したが、使用していないときには大気圧にもどした。このようにして用いて、フィラメントは数十時間の使用に耐えた。



第1図 装置概略

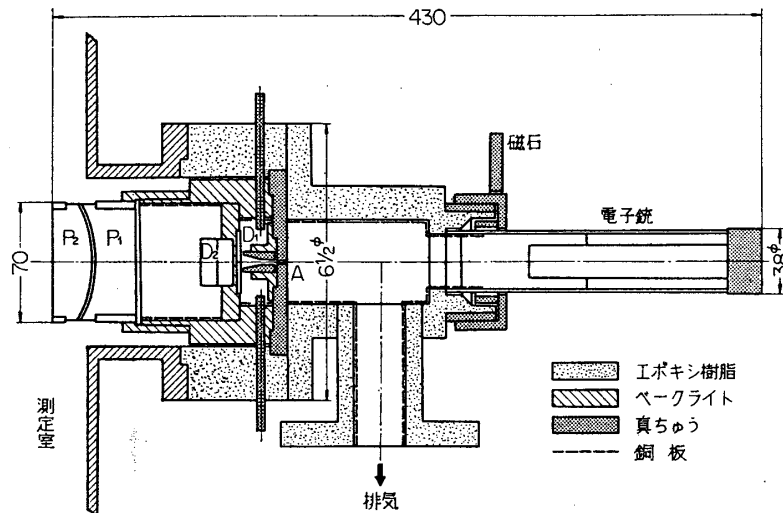


第 2 図 電子銃部および排気系

電子銃部の外形が第 2 図に、電子銃部および電子レンズ部の断面図が第 3 図にそれぞれ示されている。電子銃を取付ける真空室は、絶縁、周辺の電磁界の影響の排除、加工の容易性などの考慮にもとづいてエポキシ樹脂で作られた。電子銃から出た電子線が小孔 A (0.3 mm 径) を通るようになるための調節は、第 3 図に示すような位置におかれた磁石によって行なわれた。

2-b 電子レンズ部

電子レンズ電極および電位が第 4 図に示されている。ここで説明の便宜のため、レンズの軸を  $z$  軸とし、電子線の走査面内のそれと垂直な軸を  $x$  軸とする直交座標を導入する。小孔 A から出た電子は、偏向板  $D_1$  に加えられた電圧によって  $x$  方向への偏向を受け、集束電極  $P_1, P_2$  によって  $z$  軸に平行となる。偏向板  $D_2$  は電子線の  $y$  方向の偏位の調整に、電極  $S$  は電子線断面形状の調整にそれぞれ用いられる。この電子レンズは、NHK 技研において「垂直信号軸に比べて水平時間軸の振幅を大



第 3 図 電子銃部および電子レンズ部断面

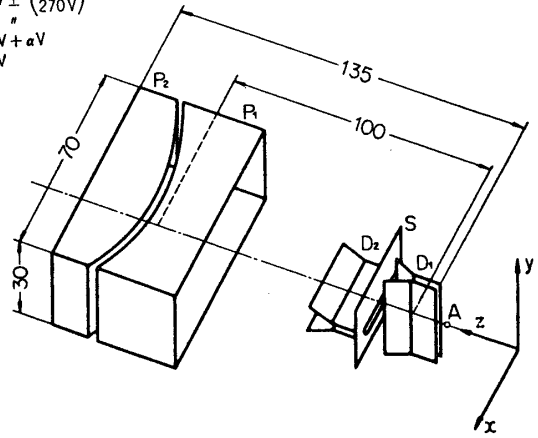
きくすることを必要とする場合に適した矩形観測面を有する波形観測用陰極線管\*」として開発された電極の一部を採用したものである。

電子レンズ電極への電圧供給回路が第 5 図に示されている。スイッチ  $Sw_2, Sw_3$  を  $S$  側に倒し、偏向電極  $D_1$  にかかる電圧をポリウム  $V_0$  によって変え、電子線を電子レンズ軸か

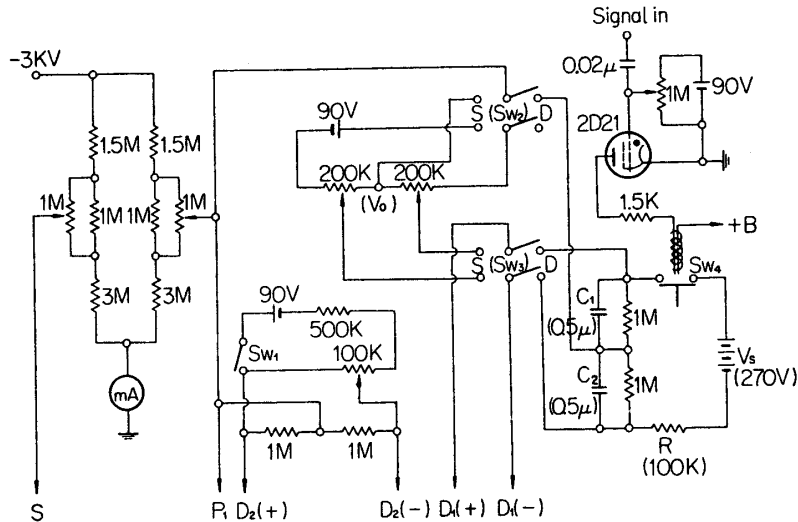
\* 参照 特許庁実用新案公報 出願公告 昭 36-18128.

ら平行する任意の位置  $x$  に固定できる。一方,  $Sw_2, Sw_3$  を  $D$  側に倒し, 電磁開閉式水銀スイッチ  $Sw_4$  を作動させるとき, 偏向電極  $D_1$  にはコンデンサ  $C_1, C_2$  の充電電圧がかかる。電磁石はサイラトロンプレート回路に組み込まれ, 任意時刻のトリガー信号で作動するようにされたが, ここで用いられた水銀スイッチではおおよそ 5~6 msec の遅れは避けられなかった。この場合容易に分るように, コンデンサ  $C_1, C_2$  の充電が始まると電極  $D_1$  の電圧はそれぞれ正負極性

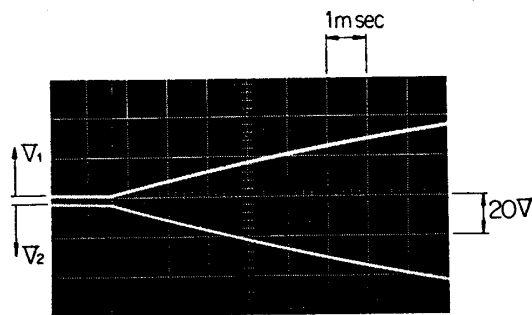
$D_1: -1.8kV \pm (0-270V)$   
 $D_2: "$   
 $S: -1.8kV + \alpha V$   
 $P_1: -1.8kV$   
 $P_2: Earth$



第 4 図 電子レンズ



第 5 図 電子レンズ系回路



第 6 図 偏向電極電圧特性

で線型に上昇し, レンズ軸と平行に定速度で  $x$  方向に走査される電子線が得られる。電子線の平行移動速度はコンデンサ  $C_1, C_2$  と抵抗  $R$  による充電時定数および電圧  $V_s$  によるが, ここで用いられた回路についての充電特性は第 6 図に示されている。

2-c 電子線強度の検出

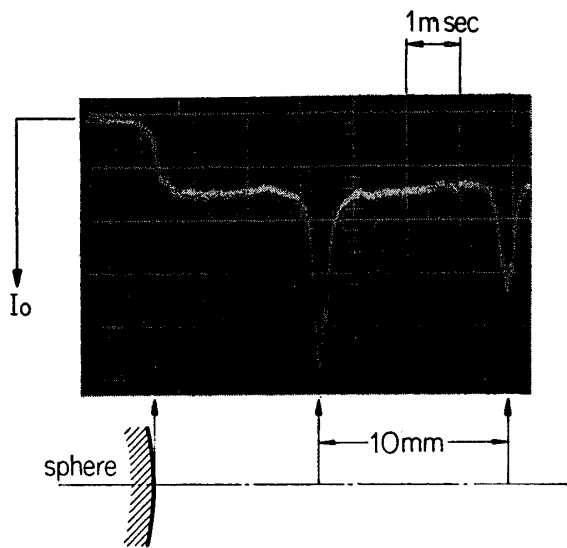
電子線の検出には蛍光板が用いられた。蛍光板としては, 気流のじょう乱による損傷に耐えるように, 水ガラスと硫酸カリウムの混合液に蛍光剤を加えガラス板の上に蛍光剤を沈着させ乾燥させたものを用いた。蛍光剤には, 残光時間の短いことと発光スペクトル特性が使用する光電子増倍管の最大感度に近いことから P-16 が選ばれた (残光; 1/10 になる

のに約  $0.1 \mu\text{sec}$ , 発光最大波長  $3.800 \text{ \AA}$ ).

電子線による蛍光発光を受光面の広い光電子増倍管 7696 (有効径 40 mm) で受け, シンクログラフでその出力を観測した.

### 3. 調整と較正

電子線の空間的な分解能は電子線断面の形状と電子線の拡がりによる. その調整は次のようにして行なった. 測定室内を高真空状態にしておいて電子線スポットを蛍光面上に出し,



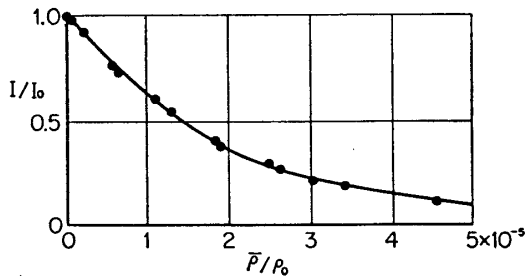
第 7 図 走査電子線強度記録 (高真空, 流れのない場合, 強度  $I_0$ ).

測定室内のトラバース装置に取付けられた球模型を動かして電子線が球先端のわずかうしろにかくれるようにする. このときに電子線を走査させると, 第 7 図に示されるような光電子増倍管の出力が得られる. 右手の二つのピークは距離を示すために蛍光面上に入れられたマーカーで, 2 ピーク間が 10 mm に対応する. 左端で急激に出力の大きくなるところが, 電子線が球のかげから出た位置に対応する. もしも電子線断面積が非常に小さければ, ここで鋭い階段状の出力波形が得られるはずであるが, 実際には電子線はある程度の幅をもつから出力波形はやや鈍い階段状になっている. 出力零からほぼ一定の出力になるまでの横軸の幅から電子線の拡がりを見積ることができる.

この拡がりになるべく小さくするように電子銃グリッドと電子レンズ電極  $S$  の電圧調整を行なった結果, 得られた電子線の有効幅は, 階段状出力部分の横幅から推定して約  $0.5 \text{ mm}$  であった.

電子線の平行度は, 測定室内の球の移動距離と電子線によって蛍光面上に投影された球のかげの移動距離とが一致するかどうかによって調べられた. この移動距離は, レンズ軸から  $25 \text{ mm}$  離れた位置まで,  $10 \text{ mm}$  の移動に対して  $\pm 0.5 \text{ mm}$  以内で一致した. 電圧  $P_1$  の調整によって平行度の調整を行なった.

電子線強度の減衰率は気体, 密度, 距離が等しい場合, 単に加速電圧による. 加速電圧  $3 \text{ kV}$  に対し気体が空気の場合, 測定室内の圧力と減衰比の関係が第 8 図に示されている. ただしこの場合の測定室内の電子線の通過距離は  $638 \text{ mm}$  である. この加速電圧は, 次章に示されるガン・トンネル実験で適当な減衰を示すデータを得るため選ばれたものである.

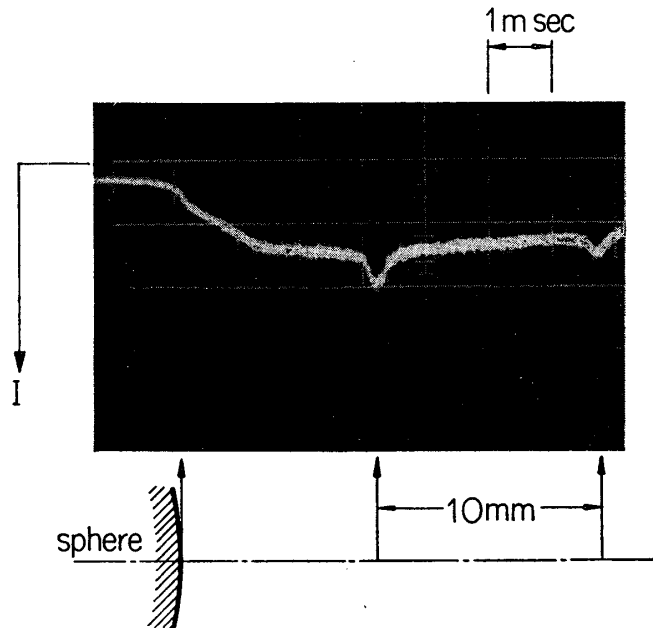


第 8 図 較正曲線 ( $\rho_0$ ; 標準大気密度)

4. 応用例：球前方の衝撃波層内の密度分布測定

低密度ガン・トンネル気流中におかれた球の前方の衝撃波層内の密度分布測定についてのべる。

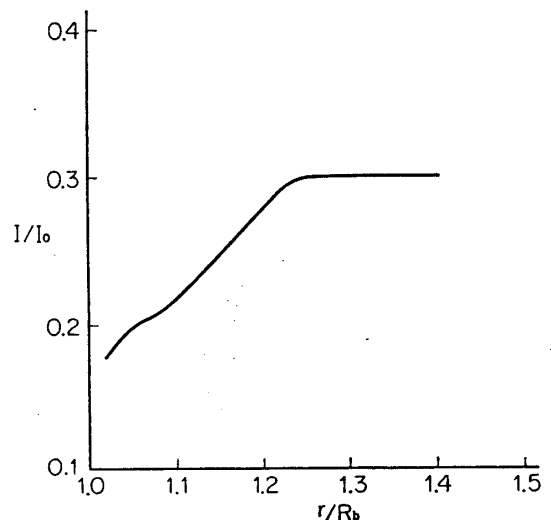
低密度ガン・トンネル装置および実験条件は付録 I に示されている。電子線は球のよどみ点から衝撃波層を横切って上流に走査されたが、流れの持続時間がおおよそ 20 msec 程度であるから、その時間内に電子線走査が行なわれるように、ガン・トンネル銃身部に取付けられた圧力計からの信号が遅延回路を通してトリガーとして用いられた。測定室内を十分に高



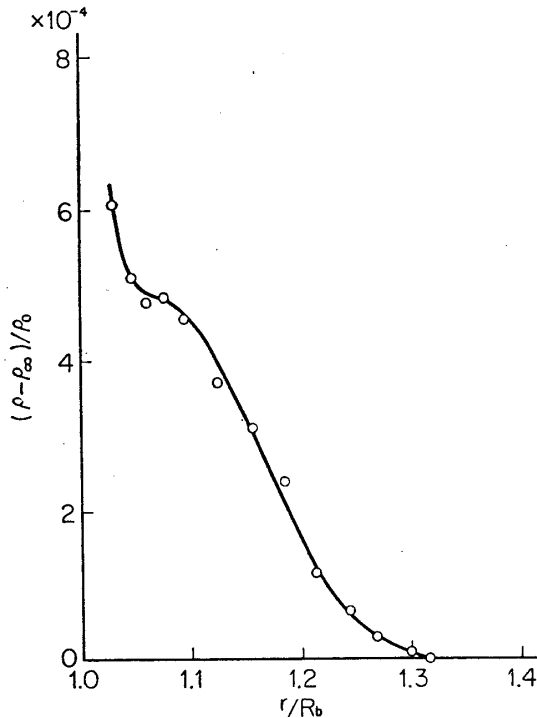
第 9 図 走査電子線強度記録 (電子線が球前方の衝撃波層を走査した場合, 強度  $I$ )

真空にした状態 ( $3 \times 10^{-5}$  Torr) で電子線を走査したときシンクロスコープ画面上で得られる波形は第 7 図に示してある。第 9 図に流れがある場合の波形を示す。球直径は 24.8 mm である。球のよどみ点直前で、衝撃波層により電子線の減衰が著るしいことが見られる。

第 7, 9 図から得られる発光強度比  $I/I_0$  が第 10 図に示される。強度比  $I/I_0$  から第 8 図の較正曲線を用いて、電子線経路にそう平均密度  $\bar{\rho}/\rho_0$  が求められる。平均密度  $\bar{\rho}/\rho_0$  から付録 II の解析によって得られた前方よどみ点を通る流線にそう密度分布



第 10 図  $I/I_0 \sim r/R_0$  ( $R_0$ : 球半径)



第 11 図 よどみ線にそう密度分布 ( $\rho_0$ ; 標準大気密度,  $\rho_\infty$ ; 一様流密度,  $r$ ; 球中心からの距離,  $R_0$ ; 球半径)

なお、測定室の圧力が  $2 \times 10^{-2}$  Torr に達すると電子レンズの集束電極のわん曲スリットにおいて放電を生ずる。したがって、加速電圧 3 kV の場合に、電子レンズ部の気体圧力が  $2 \times 10^{-2}$  Torr 以上で本装置は使用できない。このことから、本装置の適用は密度がある程度低い現象を対象とする場合に限られる。

なお、本研究遂行について種々ご援助を頂いた NHK 技術研究所電子管研究部吉永義輝部長ならびに絶縁外被部のエポキシ樹脂による製作について本所河田幸三教授に厚くお礼を申し上げます。

1965 年 12 月 13 日 航空力学部

### 参 考 文 献

- [1] E. Shopper und B. Shumacher: Z. Naturforsch. 8 a, 700 (1951).
- [2] F.C. Hurlbut: J. Appl. Phys., 30, 273 (1959).
- [3] I. Wada: In "Proc. 5th Int. Symp. on Space Technology and Science", Tokyo, 251 (1963).
- [4] E.O. Gadamer: UTIA Rep. No. 83, (1962).
- [5] H. Oguchi, H. Honma and K. Funabiki: ISAS Rep. No. 394 (1965).

が第 11 図に示されている。

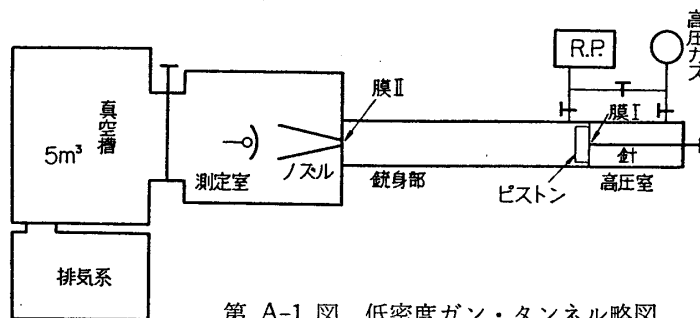
### 5. 検 討

以上、低密度気流中の密度分布を短時間内に測定することを目的として試作された走査電子線密度計、および低密度ガン・トンネル気流中におかれた球の前方の衝撃波層内の密度分布測定に対するその応用例をのべた。

応用された例においては、衝撃波層の厚みがおおよそ 3 mm 程度で、現在試作された密度計の分解能が前述のように 0.5 mm 程度であるから、0.5 mm 以内の範囲の変化については詳細なことは得られなかった。もしも、一段と精度（特に空間的分解能）が向上されるならば、衝撃波そのものの構造をより明確にすることも可能であろう。この点に関しては、電子線の走行距離や小孔 A の直径などをより小さくすることによって、ある程度改良される望みはあると言えよう。

## 付録 I. 低密度ガン・タンネル

低密度ガン・タンネルは、主として高圧室、銃身部、円錐状ノズル、測定室、真空槽から成り立っている。その概略図を第 A-1 図に示す。高圧室および銃身部の圧力を設定して後に針でセロハン膜 I を破ると、膜の直後におかれたピストンが高圧ガスによって銃身部の下流側へ駆動され、ピストン前方の気体は圧縮加熱される。そして、この圧縮された気体がセロハン膜 II を破り、ノズルを通して測定室内へ噴出する。測定室および真空槽は実験の前に約  $10^{-5}$  Torr の圧力に保ってある。



第 A-1 図 低密度ガン・タンネル略図

表 A-1 低密度ガン・タンネルの流れ  
(気体; 空気)

よどみ点圧力	$P_t$	650 Torr
よどみ点温度	$T_t$	1000°K
マッハ数	$M_\infty$	9.8
速度	$U_\infty$	1400 m/sec
密度	$\rho_\infty$	$1.4 \times 10^{-4} \rho_0$
一様流有効半径	$r_c$	38 mm
レイノルズ数	$R_{e_\infty} = \rho_\infty U_\infty R / \mu_\infty$	620 (/cm)
	$R_{e_s} = \rho_s U_\infty R / \mu_s$	52 (/cm)

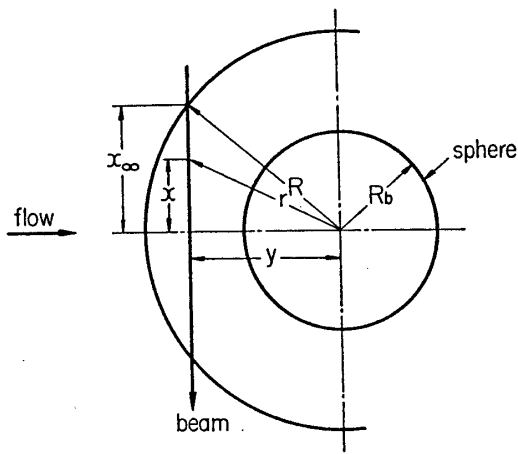
(注) 添字  $t, \infty, s$  はそれぞれよどみ点, 一様流, 衝撃波下流の値を示す。

気体として空気を用い、高圧室圧力  $1.7 \text{ kg/cm}^2$ 、銃身部初期圧力 15 Torr としたとき、測定室において表 A-1 に示すような流れが得られた。測定方法その他の詳細については文献 [5] を参照されたい。

## 付録 II. 衝撃波層内の密度分布を求める解析

球のよどみ点付近では流れは軸対称となるから、密度は球の中心からの距離  $r$  だけの関数となる。第 10 図からわかるように、強度比  $I/I_0$  はよどみ点から上流に進むにつれて一定値に近づく。このことから、球の前方に一様流が存在することがわかる。したがって、第 A-2 図に示すように、密度が一様流の値  $\rho_\infty$  をとるような半径  $R$  の球を選ぶことができる。





第 A-2 図 衝撃波層を通る電子線略図

衝撃波層を横切る電子線がよどみ点を通る流線と交わる点の密度  $\rho$  の平均密度  $\bar{\rho}$  との関係は、

$$\begin{aligned} (\bar{\rho} - \bar{\rho}_\infty)L &= 2 \int_0^{x_\infty} \rho(r) dx - 2\rho_\infty x_\infty \\ &= 2 \int_0^{x_\infty} \rho^*(r) dx \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、 $L$  は電子線の全経路 (=638 mm)、 $x$  はよどみ線から電子線にそって測った距離、 $x_\infty$  は電子線が半径  $R$  の球と交わる点の  $x$  である(第 A-2 図参照)。また、 $\rho^* = \rho - \rho_\infty$ 。球の中心からよどみ線にそって測った距離  $y$

を用いると、

$$\Gamma \equiv (\bar{\rho} - \bar{\rho}_\infty)L = 2 \int_y^R \frac{\rho^*(r) dy}{\sqrt{r^2 - y^2}} \quad (2)$$

と (1) 式を書き直せる。今ここで、

$$u^* = (y/R)^2, \quad v^* = (r/R)^2$$

なる変換を用いると、(2) 式は Abel 型の積分方程式に帰着され、 $\rho^*$  は

$$\rho^* = -\frac{1}{\pi R} \int_{v^*}^1 \frac{d\Gamma/du^*}{\sqrt{u^* - v^*}} du^*$$

となる。上式の右辺の積分は、強度比  $I/I_0$  から  $y/R$  すなわち  $u^*$  の関数として得られる  $\Gamma \equiv (\bar{\rho} - \bar{\rho}_\infty)L$  を用いて計算される。