電子線を応用した空気密度測定法

和 田 勇 *

(昭和35年 3 月26日受理)

Electron-Beam Densitometry

Isamu WADA

(National Aeronautical Laboratory)

1. はしがき

人工衛星、月ロケットが打上げられるようになって、稀薄な空气中を高速で飛しょうする場合の問題が実地的見地から注目されるようになった。すでに知られているように標準状態における空気密度を ρ_{NTP} で示すと、高層における空気密度は高度 30km で $10^{-2}\rho_{NTP}$ 、50km では $10^{-3}\rho_{NTP}$ 、さらに 100km になると約 $10^{-6}\rho_{NTP}$ に変化する。現在流れの密度の定量的測定の方法として干渉計が使われているが、上の範囲のような低密度では感度が悪くなって使用することができない。稀薄な流れの測定に利用できる方法として、軟X線あるいは電子線を用いた測定方法があり、二、三の人によって報告されている。前者についてはわが国でも 玉木教授と金氏の研究¹⁾がある。

筆者は玉木教授の指導によって、電子線を用いた空気密度の測定法の開発を行いつつある。この方法はすでに低密度空気流の測定のために、一、二の人によって試みられている。しかしこの方法は試験的段階を脱していないが、現在発展の可能性をもつ方法の一つとして注目されている。ここでは電子線を用いた方法を簡単に紹介しておきたい。

2. 電子線の性質

電子線を応用した空気密度の測定法はすでに原理的に論じられている。^{2),3)}ここではその原理を簡単に紹介して、次章で実験例を紹介するつもりである。

空気分子による電子線の減衰を測定して、その密度が測定できる。標準状態における空気密度の 10^{-1} から 10^{-3}

第1図 空気密度による吸収状態変化 (空気層の厚みは10cmである)

の範囲 ($10^{-1}\rho_{NTP}$ から $10^{-3}\rho_{NTP}$ まで) の測定には約 50keV から 1 keV までのエネルギーをもつ電子線を使用するのが適当なようである。(第1図)

一般に粒子線が気体中を通過するときの減衰は個々の粒子のエネルギー ϵ の減少と単位面積、単位時間当りに通過する粒子の数 n の減少とから成立つ。密度 ρ の気体中を距離 l だけ通過するさいの粒子線のエネルギー E の減少 dE は次のようにあらわされる。

$$E = n \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{dE}{d(\rho l)} = n \frac{\partial \epsilon}{\partial(\rho l)} + \epsilon \frac{\partial n}{\partial(\rho l)} \quad (2)$$

この粒子線に対する一般式は電子線にも適用される。

α 線その他のイオンビームでは

$$n \frac{\partial \epsilon}{\partial(\rho l)} \gg \epsilon \frac{\partial n}{\partial(\rho l)}$$

であるが、電子線ではこれと反対に

$$n \frac{\partial \epsilon}{\partial(\rho l)} \ll \epsilon \frac{\partial n}{\partial(\rho l)}$$

* 航空技術研究所空気力学部

である。すなわち電子線では電子の数の減少と比較して個々の電子のエネルギーの減少は無視できる。

電子の数 n の変化は散乱によって行われるので、気体中を通過するに従って電子線の中は拡がる。そして一定距離で電子線は平衡状態となり、中心部から外側へ散乱される電子の数は逆に周囲から中心に散乱されてくる電子の数と等しくなる。その後は気体分子のための吸収によって電子線の強度は減少する。従ってその強度は指数関数であらわされる。

第2図 空気層1cm通過後の電子線強度分布の変化(x方向)

ある電子線強度 $J_{x_0}(l)$ は小さくなる。(xはl一方向に垂直な座標である。) $J_{x_0}(2)$, $l=2$ cmの位置における軸上の強度は、 $J_{x_0}(0)$ の約10%となる。この実験結果は空気圧力 30mmHg の場合の例である。

上に述べたように、ある質的距離(電子線の通過した距離と気体の密度との積)以後の電子線強度分布 $J(l)$ は殆んど平らとなる。その距離 l_0 における電子線の中を x_0 とかくとすると、 $l \geq l_0$ の範囲では x の値は殆んど一定となって x_0 と等しくなる。すなわち、その範囲では散乱が平衡状態となって電子線の中が一定となる。本図の実験例では $l=4$ cm, $x_0=5$ mm となり、それ以後では指数的に減衰する。すなわち $l=l_0$ における電子線強さを J_{l_0} とするとき、

$$J(\rho, l) = J_{l_0} \exp \{-\alpha \rho (l - l_0)\} \quad (3)$$

全吸収係数 $\alpha \rho$ は電子エネルギー ϵ および気体の密度と原子量との函数となり、質量吸収係数 α_0 との関係は次のようにあらわされる。

$$\alpha \rho = \alpha_0 \cdot \rho \quad (4)$$

測定すべき気流巾を d とすると、 $l_0 \leq l \leq l_0 + d$ の範囲の平均密度変化(d で電子線を吸収する気体の密度変

ある気体中を通過して電子線の散乱する模様は第2図の実験結果によって説明することができる。図にはある距離 l (横軸) だけの空気層を通過したときの電子線強度分布が示されている。原点における電子線束の直径は 0.2mm であるが、距離 l が大きくなるに従って電子線の中はひろがり、中心にお

第1表 吸収率の変化(空気に対する値)

電子線エネルギー	$\alpha_0 = \alpha \rho / \rho$ (cm ² /g)	$\alpha \rho$ (cm ⁻¹) 100mmHg	10mmHg
1.6KeV	$1.4 \cdot 10^9$	240	24
5.8	$1.5 \cdot 10^5$	25	2.5
10.5	$3.6 \cdot 10^4$	6.2	0.62
16.7	$8.6 \cdot 10^3$	1.43	0.14
24.7	$2.9 \cdot 10^3$	0.5	0.05

化)を $\Delta \rho$ とすると位置 $l_0 + d$ において測定される電子線の強さの変化は次式であらわされる。

$$\ln(1 + \Delta J/J) = -\alpha \rho (1 + \Delta \rho / \rho) d \quad (5)$$

ρ の微小変化に対しては

$$\Delta J/J = -\alpha \rho \cdot \Delta \rho / \rho \cdot d \quad (6)$$

密度変化 $\Delta \rho / \rho$ と電子線強度変化 $\Delta J/J$ との関係が $d=10$ cm の例によって第1図にすでに示されている。広い範囲の加速電圧に対して空気の質量吸収係数 α_0 が第1表に与えられている。また空気圧力を与えて、それに対する全吸収係数 $\alpha \rho$ をも示してある。最後に気体密度と電

第3図 気体密度変化による電子線強度変化(アルゴン)

通過した電子線強度は微量な量であるので、その変化を検出するためには特別な技術を必要とする。いままで試みられた方法を装置とともに、次章で紹介するつもりである。

3. 装置および実験結果

前章でのべた方法によって行われた実験の装置とえられた結果を紹介すると、それぞれ目的によって装置の構

電子線の強さの変化の実験例を第3図に示す。この関係から逆に電子線の吸収量から気体密度を求めることができる。

しかし、測定される気流を

第4図 実験装置1

第5図 実験例、火焰の密度および温度分布
 J_0 , J_0 , 火焰のない状態の値

第6図(a) 陰写真、気体は窒素(ラバール管よりの噴流)、静圧 3mmHg。

造は異なるようであるが、ある点の密度の測定とある範囲の流れの場の密度分布を測定する場合とにわけられ

第6図(b) グロー写真、気体は窒素—アルゴン、静圧 2mmHg

る。いづれも装置の概略の構造が紹介されているので、それらによってえられた結果と平行してのべたい。

a) 定量的測定方法

密度の定量的測定に使用される装置がまづ E. Shopper と B. Schumacher によって試作された³⁾。フィラメントから発生した熱電子は電圧 20KV で加速され、中間の集束装置には 5KV が使用されている。この装置によって発生する電子線束は $120\mu\text{A}$ 、中心では電子流密度 $60\mu\text{A}/\text{mm}^2$ となる。電子線の強さの測定にはファラデー箱が使われている。また電子線発生装置の内部は高真空に保たなくてはならないため、測定部の気流の圧力が高い場合には高真空部との間に抵抗の大きな細い管を用いて発生装置内に流入する空気量を制御している。

一つの抵抗管では充分でないので、この装置では中間槽を備えて二つの異った真空ポンプを使用している。(カスケード排気と呼ばれている。) 以上の装置を陽極内にくみこんでコンパクトに設計されたのが第4図である。第2図の実験結果は本装置を用いて得られたものであるが、実際の気流の測定に応用した結果を第5図に示す。これは燃焼中の火焰を測定した例で、電子線が通過して吸収される距離 S は下図の焰の形状より得て、吸収された電子線の量から平均密度分布を求めている。さらに定圧であるという条件で温度分布も求めている。

b) 電子線による陰およびグロー写真

電子線によって気流の陰およびグロー写真がえられるが、ここでは装置については省略して実際の観測例を紹介する⁴⁾。電子線が十分拡散したものを測定気流にあて、ある位置に感光板をおくと透過電子線の強さが空気密度によってかわるので、写真には流れの密度による濃淡があらわれる。第6図(a) はノズルからの噴流(使

第7図 実験装置II

第8図 改良型

用気体は窒素で静圧は3 mmHgである。また、気流に強い電子線をあてると、その後流に発生するグローは気体密度によって異なるので、グロー写真がえられる

第6図(b)は50

KeV の強い電子線によって励起された窒素とアルゴン混合気体の噴流の写真である。いずれも光学的観測の困難な30mmHgから 10^{-3} mmHgまでの稀薄な気体の観測が行える。

C) 衝撃波管への応用

最近、衝撃波管に応用した例が紹介されている。^{5), 6)} 管内を伝わる衝撃波による圧力変化(密度変化)を電子線の強さの変化によって測定する方法である。第7図に示したように衝撃波管の窓から電子線は投射され、反対側の壁の窓に検出部が取り付けられている。この窓は直径1 mmの白金膜に $10 \sim 15 \mu$ の穴があけられている。この2つの窓と電子源とは一直線になる必要がある。この"ball socket flange"を用いて調節できるように作られている。文献5), 6)の例では電子源として低真空でも破壊されないL-cathodeが選ばれている。検出器としてシンチレーション・プローブが使われている。その螢

第9図 実験結果

A、衝撃波到達点 B、不連続面到達点

光体はターフェニル・ポリスチレン螢光体で電荷の集積をさけるためにアルミ被膜で被われている。光電子増倍管にはNo. 5819が使用されている。検出された電子線強度変化は増巾してオシログラフへ導かれる。衝撃波を観測した例を第7図に示してある。衝撃波管内に発生した衝撃波が十分に平面衝撃波となっていないところで測定したために、長い rise time を示している。この装置は Los Alamos Scientific Laboratory, University of California で試作された。さらにこの装置を改良したのが第8図である。これは圧力の低い衝撃波の研究に利用されている。(初期圧力が数 mmHg 程度の場合) 螢光体として液体のものをを用い、光電子増倍管として、No. 6810, オシログラフとしてTektronix 545 が使われている。本例の電子線加速電圧は40KVである。螢光体がアルミ被覆されているので、比較的高いエネルギーの電子線を必要としている。参考のため測定されたオシログラフの追跡結果を第9図に示した。図中のA点は先頭衝撃波による立上りで、B点はエントロピー不連続面である。

なお、この種の低密度衝撃波管は最近の超高空における空気力学の研究のために使用される。この測定によってその性能がわかり、衝撃波後方の境界層による一次元非定常流理論からのずれが大きいことが明らかにされた。

4. むすび

電子線を応用した空気密度測定法 (Electron-Beam Densitometry) について紹介したが、いずれも初期の段階で空気力学的研究に充分に応用されていない。前述のように稀薄な気体の流れの密度の測定に利用される方法として、さらに研究されなくてはならない。現在筆者は航空技術研究所でこの種の装置を試作しつつある。これについては将来御紹介したいと考えている。

文 献

- (1) F. Tamaki & C. S. Kim: *J. Phys. Soc. Japan*, 14 664 (1959)
- (2) E. M. Winkler: Article 6, *Physical Measurements in Gas Dynamics and Combustion*, Princeton Univ. Press (1954)
- (3) E. Schopper & B. Schumacher: *Z. Naturforsch.*, 6a 700 (1951)
- (4) A. E. Grün, E. Schopper & B. Schumacher: *J. Appl. Phys.* 24 1527 (1953)
- (5) D. Venale & D. E. Kaplan: *J. Appl. Phys.* 26 639 (1955)
- (6) R. E. Duff: *Phys. Fluids*, 2 207 (1959)