

吊下げ法による高速希薄気流中の物体の抵抗測定

雛田元紀・寺田守男

Measurement of the Drag of the Body Immersed in a High Speed Rarefied Gas Flow by the Suspension Method

By

Motoki HINADA and Morio TERADA

Abstract: An attempt has been made of the determination of dynamic pressure in the low density wind tunnel by measuring the drag force exerted on a sphere with the wire suspension system and using the drag coefficient of sphere given by the empirical formula. The flow conditions of the present tests are in the Mach number range of 2.0~3.5 and in the Reynolds number range of 50~250 for the length of 1 cm. With the same system, the drag forces experienced by ultralightweight models of foamed plastics with circular and square-flat noses have been measured. The effects of the Reynolds number and the shape of model on the drag coefficient have been examined.

概 要

低密度風洞で、吊下げ法による球の抵抗測定から、抵抗係数を既知として、気流の動圧決定を試みた。実験条件は気流マッハ数 2.0~3.5、長さ 1 cm に対するレイノルズ数 50~250 である。同じ吊下げ法で、頭部が円形および正方形の非常に軽い発泡スチロール製模型の抵抗係数を求め、レイノルズ数による変化ならびに形状による相異を示した。

1. ま え が き

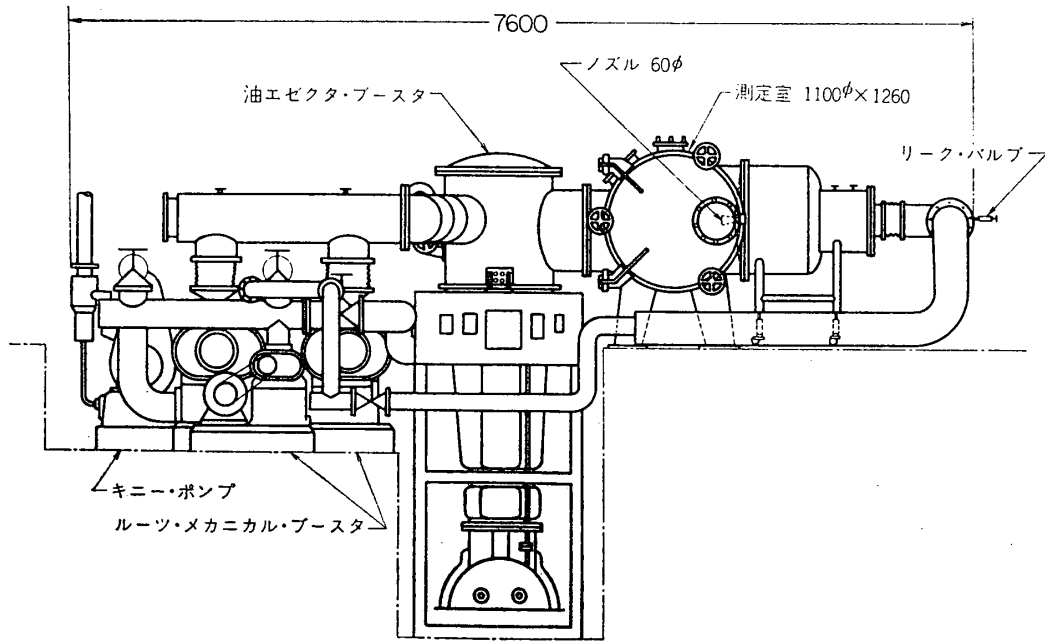
高速希薄気流における球の抵抗係数についてはすでに多くの実験がなされ、一様流マッハ数 M_∞ 、レイノルズ数 Re_∞ 、クヌッセン数 $K_{n\infty}$ 、よどみ点温度 T_0 および物体表面温度 T_b などをパラメータとした連続流から自由分子流の広範囲にわたる精密な実験結果が多数報告されている。まずこれらのうち代表的なものについて、測定方法の観点から述べてみよう。抵抗を求める最も手軽なものに気流中に細い糸で模型を吊るし、糸の傾き角から抵抗を測定する方法(吊下げ法、第5図参照)がある。これは通常の低密度風洞のように長時間測定が可能な場合には簡便なものとしてよく用いられ、連続流から中間流領域の一部 ($M_\infty/\sqrt{Re_\infty} < 1$) にかけて精度の高い測定がなされている。しかし、この方法では吊下げ糸の太さに制約され(現在使用できる最も細い糸で直径 0.02 mm 程度)、自由分子流に近い領域 ($K_{n\infty} \approx M_\infty/Re_\infty$

>5) では糸の補正量が増し、精度のよい測定は期待できない。この方法で Ashkenas [2][3] は $M_\infty=1.8\sim 4.4$, $R_{e\infty}=3\sim 1000$, $K_{n\infty}=0.013\sim 1.0$, $T_0=300^\circ\text{K}$, $T_b=300\sim 1033^\circ\text{K}$ での球の抵抗係数を求め、近年 Koppenwallner [10] らも同じ方法で実験している ($M_\infty=10.3\sim 13$, $K_{n\infty}=0.002\sim 0.07$, $T_0=T_b=300^\circ\text{K}$)。つぎに模型の気体中での運動を解析し速度および加速度から抵抗係数を求める方法 (自由飛行法) もある。これはさらに風洞気流中に模型を放す方式と自由飛行体発射装置などで静止気体中に模型を飛行させる方式とに分けられる。この方法ではほかの方法のような模型支持系の補正が不要であり、連続流から自由分子流にわたる広範囲の測定がなされている。Masson ら [4] は熱衝撃風洞内に放された球の運動を高速カメラで撮影し、 $M_\infty=11\sim 60$, $R_{e\infty}=30\sim 15000$, $K_{n\infty}=0.002\sim 5$, $T_0=1600\sim 900^\circ\text{K}$ における抵抗係数を求め、また Bailey [6] は自由飛行体発射装置で広範囲 ($M_\infty=3\sim 25$, $K_{n\infty}=4.2\times 10^{-5}\sim 16$) の実験を行なっている。Hersh ら [9] は電場を使い直径 $0.5\sim 3\ \mu\text{m}$ という微小球状荷電金属粒子を希薄気体中で加速し、非常にクヌッセン数の大きい自由分子流領域 ($K_{n\infty}=12\sim 190$, $M_\infty=2\sim 12$) での抵抗係数を求めている。特殊な天秤を使った精密な実験としては、まず Aroesty [5] があげられる。彼は模型を細い糸で支える精密天秤で $M_\infty=1.7\sim 6$, $R_{e\infty}=10\sim 10000$, $K_{n\infty}=0.001\sim 0.3$, $T_0=300^\circ\text{K}$, $T_b=300^\circ\sim 80^\circ\text{K}$ での抵抗係数を測定している。Phillips ら [7] は磁気力模型を支持する電磁力3成分天秤を用いた実験 ($M_\infty=10\sim 12$, $K_{n\infty}=0.05\sim 5.5$) を、また Smoldern ら [8] は直径 1mm 程度の小さな模型に使用できる特殊天秤を用いた実験 ($M_\infty=10\sim 13$, $K_{n\infty}=0.2\sim 10$) をしている。さらに平衡天秤を利用した Koppenwallner ら [10] の実験 ($M_\infty=8.7\sim 10.4$, $K_{n\infty}=0.025\sim 20$) などもある。

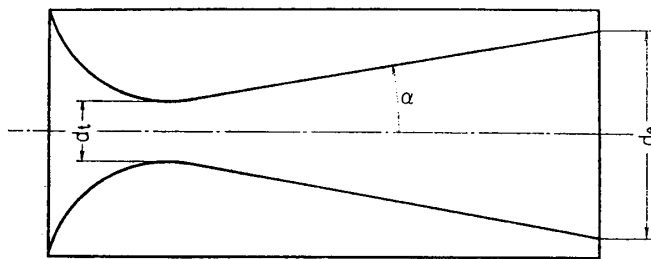
以上述べたように、高速希薄気流における球の抵抗係数は種々の $M_\infty, R_{e\infty}, K_{n\infty}, T_0, T_b$ などに対して正確な値が求められている。したがって、球の抵抗係数を既知のものとするればその抵抗測定から流れの動圧を求めることができる。われわれはこのような考えから球の抵抗を測定して流れの動圧を求めることを試みた。抵抗測定は最も簡単な吊下げ法で行なった。またわれわれは頭部が円形および正方形の物体の抵抗係数に興味をもち吊下げ法を用いて抵抗係数を求めた。これらの結果について以下に報告する。

2. 流れの特性

実験に用いた風洞についてはすでに玉木教授 [1] によって報告されているが、その後現在地 (東京大学宇宙航空研究所) への移転や排気速度を増すため新たに油エゼクタ・ブースタの付設が行なわれたので、ここで概略説明しておく。風洞の略図を第1図に示す。排気系としては、第1段にルーツ型ブースタ2台 (排気速度各 $5,000\text{m}^3/\text{h}$) およびこれと並列に油エゼクタ・ブースタ (排気速度 $43,000\text{m}^3/\text{h}$)、第2段にルーツ型ブースタ1台 (排気速度 $2,500\text{m}^3/\text{h}$)、そして最終段にキニー型回転ポンプ (排気速度 $6,500\text{l}/\text{min}$) を用いている。この風洞はブースタ・ポンプとキニー・ポンプを直列にした非回流型にも、キニー・ポンプで風洞内を低圧にしてからルーツ型ブースタで空気を回流させる方式 (回流型) にもできる。測定気流は集合筒の空気を軸対称ノズルを通して測定室内に膨張させて作られる。ノズルには出口直径約 60mm のものが使われ、気流の静圧は $10\sim 100\ \mu\text{Hg}$ 、マッハ数は5までで、よど



第 1 図 低密度風洞の略図



ノズル	公 マ マッハ数	称 スロート 直径 dt	出口直 径 de	拡り角 α
No. 1	2.0	46.0 ^{mm}	60.0 ^{mm}	4.5°
No. 2	2.5	37.0	60.0	8.5
No. 3	3.0	29.0	60.0	10.5
No. 4	3.5	23.0	60.0	12.5

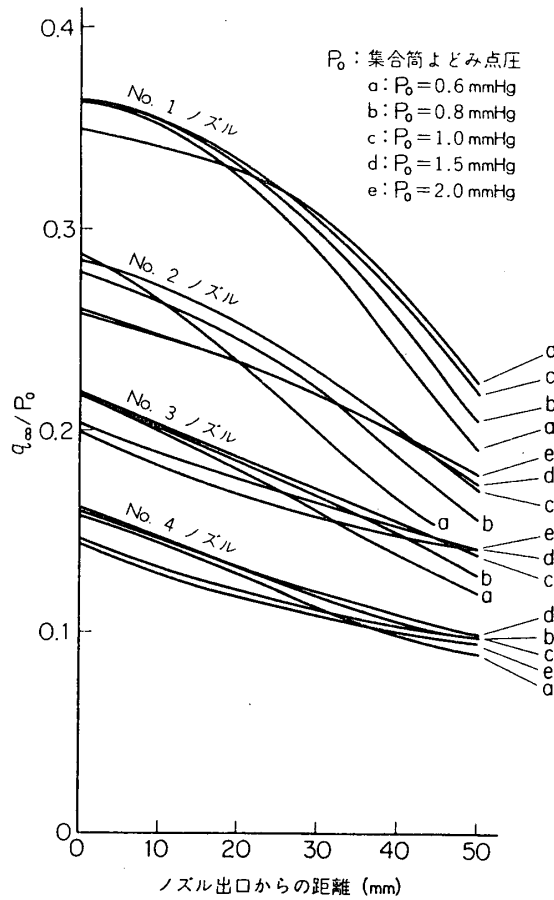
第 2 図 コニカルノズルノズルの寸法

み点温度は室温 (約 300°K) である。

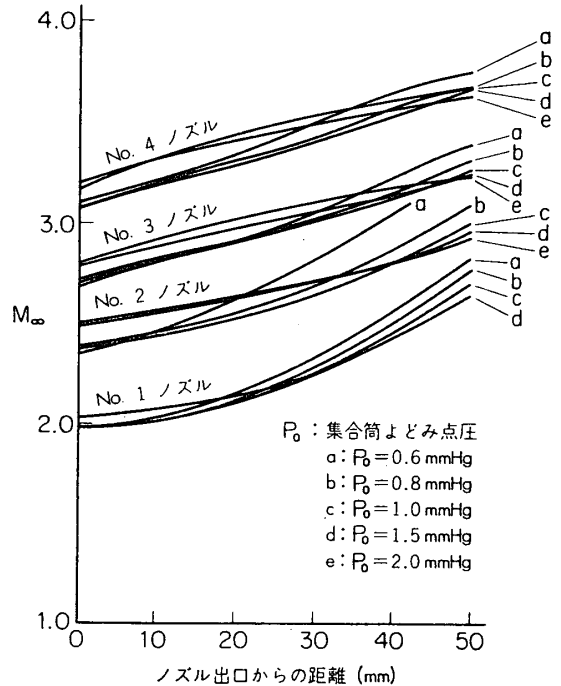
本実験は第 2 図に示す 4 個のコニカル・ノズルを用い、集合筒よどみ点圧 $p_0=0.6\sim 2$ mmHg として非回流方式で行なった。まず気流の特性を調べるため圧力測定をし (圧力計としてはピラニ・ゲージを使用)、その結果から求めた気流の動圧 q_∞ 、マッハ数 M_∞ のノズル軸方向の分布を第 3, 4 図に示す。よどみ点圧 p_0 によって流れに若干のちがいがみられる。ノズル出口から約 30mm までは一様流の幅が 30~40mm あり、動圧およびマッハ数の変化も比較的少なくないが、それより後流では流れの幅も狭く、変化もかなり急激である。測定気流として使用できる範囲で、長さ 1cm に対するレイノルズ数は 50~250 程度である。

3. 球の抵抗測定とその動圧測定への応用

まえがきにも述べたように、高速希薄気流における球抵抗係数については広範囲にわたり



第3図 ノズル軸方向の動圧 q_∞ 分布 (圧力測定から求めたもの)



第4図 ノズル軸方向のマッハ数 M_∞ 分布 (圧力測定から求めたもの)

$M_\infty, R_{e\infty}, K_{n\infty}, T_0, T_b$ などをパラメータとした精密な測定結果が得られている。したがってわれわれは球の抵抗係数を既知として、その抵抗測定から気流の動圧を求めることを試みた。本実験では抵抗測定に Ashkenas などと同じ吊下げ法を用いたので、ここでこれについて簡単に説明しておく。第 5 a) 図のように支点から気流中に細い糸で模型を吊るし、さらにその下に細い糸でおもりを吊るす。模型および糸にかかる抵抗 D_0 は糸の傾き角を θ 、模型とおもりの質量をそれぞれ m_1, m_2 とし、糸の質量を無視すれば、

$$D_0 = \tan \theta (m_1 + m_2) g; \quad g \text{ は重力加速度}$$

で与えられる。糸の補正が必要な場合には第 5 b) 図のように同じ場所に糸のみ吊るし、支点における糸の傾き角 θ_0 からその補正抵抗 ΔD を

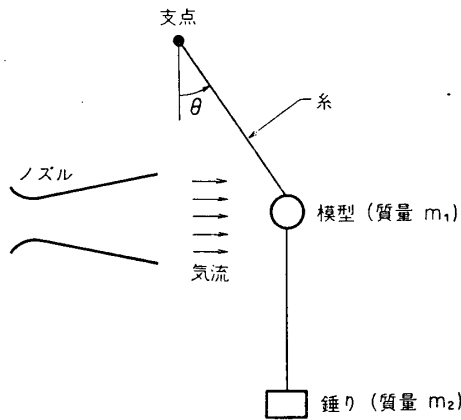
$$\Delta D = \tan \theta_0 \Delta m_2 g$$

で求める。ここで Δm_2 は糸のみ吊るすときに用いるおもりの質量である。模型にはたらく正味の抵抗 D は

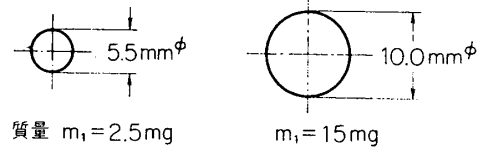
$$D = D_0 - \Delta D$$

である。

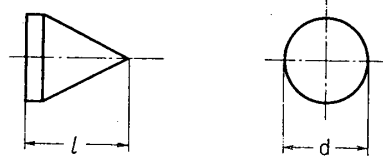
a) 模型の抵抗測定



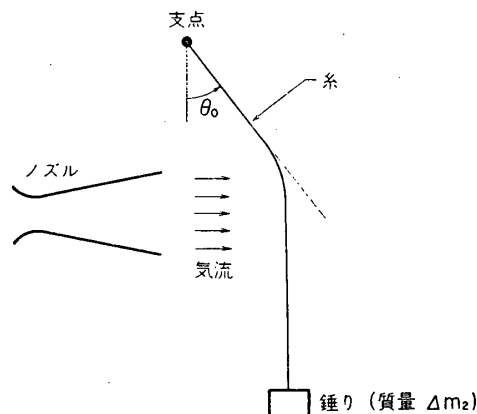
球模型



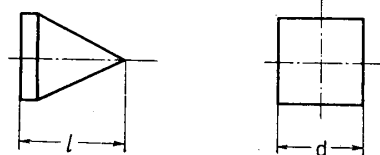
円形模型 (C1, C2, C3)



b) 糸の補正抵抗測定



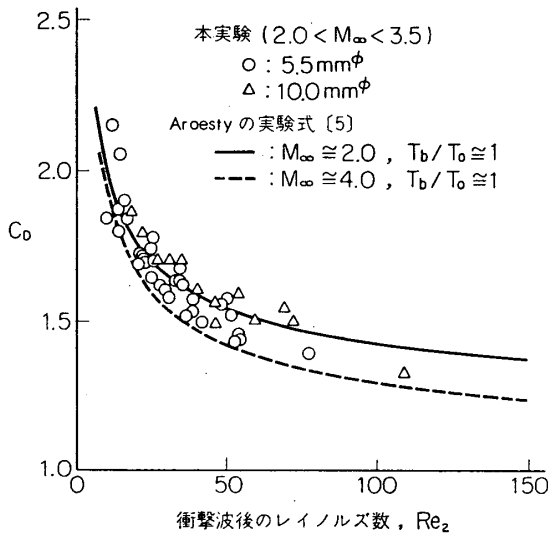
正方形模型 (S1, S2, S3)



模型	l	d	質量 m1
C1	2.0mm	4.0mm	3.0 mg
C2	10.4	9.0	5.0
C3	19.4	9.0	9.5
S1	2.0	10.0	5.0
S2	8.4	8.4	5.5
S3	15.4	8.8	12.0

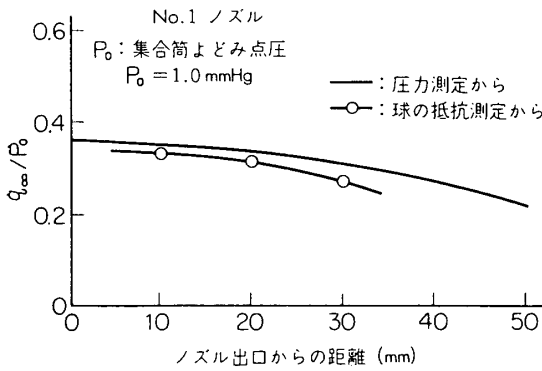
第 5 図 (吊下げ法)

第 7 図 発泡スチロール製模型の寸法と質量

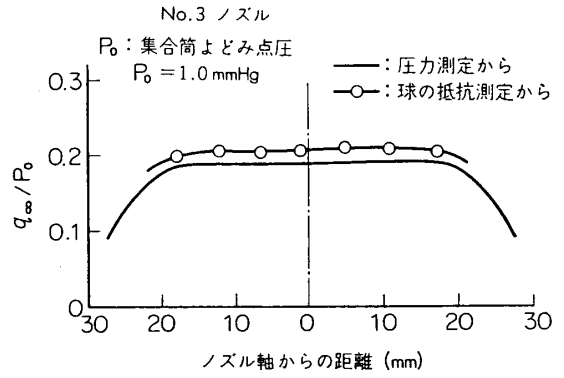


第 6 図 (球の抵抗係数 C_D)

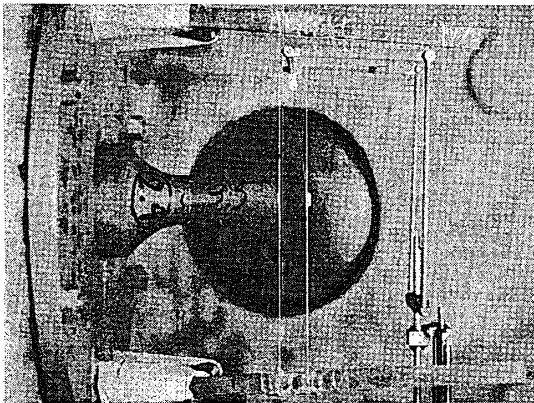
まず吊下げ法を確かめる意味で球の抵抗測定を行ない、圧力測定から定めた動圧を用い抵抗係数を求めた。その結果を第 6 図に示す。Aroesty [5] の実験と比較し一応満足な結果が得られている。前節の最後に述べたように、気流の変化が比較的小さいのはノズル出口から 30 mm までで、一様流の幅は 30~40 mm なので、球模型 (第 7 図参照) としては直径 5.5 mm と 10 mm の発泡スチロール製のもの (質量 2.5 mg および 15 mg) を用い、測定はすべて気流軸に沿ってノズル出口から 20 mm のところで行なった。発泡スチロール製のものは非常に軽く、おもりの質量 (本実験では



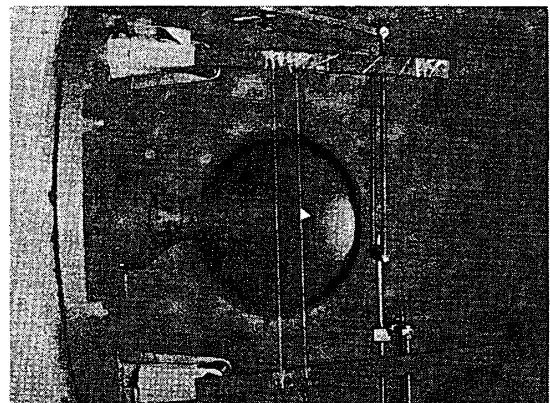
第 8 図 球の抵抗測定から求めたノズル軸方向動圧分布



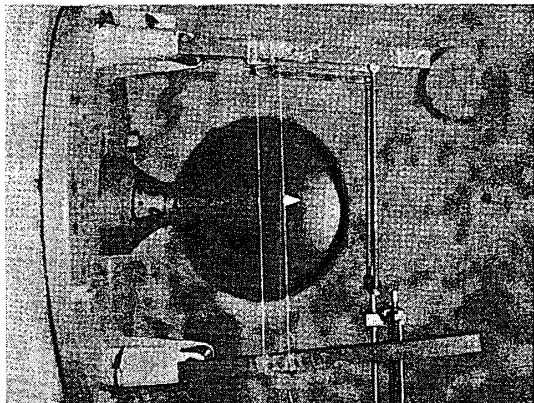
第 9 図 球の抵抗測定から求めたノズル半径方向動圧分布 (ノズル出口から 10mm の所)



模型 S1 錘りの質量 $m_2 = 0.5 \text{ g}$



模型 S2 錘りの質量 $m_2 = 1.0 \text{ g}$



模型 S3 錘りの質量 $m_2 = 1.0 \text{ g}$

第 10 図 気流中に吊るされた正方形模型の写真 (No. 4 ノズル使用)

0.5~2gのものを使用)だけで糸の傾き角を適当にでき好都合であった。吊下げ糸としてはなるべく細いものが望ましいが、強度的な面から直径0.073mmのナイロン糸を用いたので糸による補正量は全体の5~30%であった。吊下げに必要な糸の長さは約30cmでその質量は約2mgなのでおもりの質量に較べて無視できる。

つぎに抵抗係数を既知とし、直径5.5mmの球の抵抗測定から気流の動圧分布を求めた。一般に連続流からすべり流領域にかけて、球の抵抗係数 C_D は気流マッハ数 M_∞ 、レイノルズ数 Re_∞ 、よどみ点温度 T_0 と物体表面温度 T_b の比 T_b/T_0 に依存すること、そのうちマッハ数 M_∞ 、温度比 T_b/T_0 の影響は比較的小さいことが知られている。Aroesty [5]はレイノルズ数 $Re_\infty > 20$ で、実験的な式

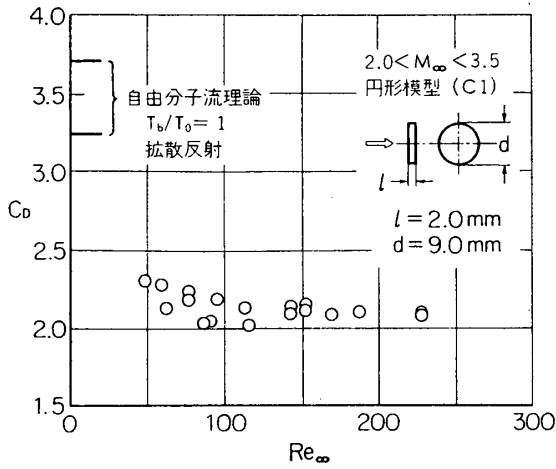
$$M_\infty \cong 2, T_b/T_0 \cong 1 \text{ で, } C_D = 1.143 + 2.792/\sqrt{Re_2}$$

$$M_\infty \cong 4, T_b/T_0 \cong 1 \text{ で, } C_D = 1.029 + 2.63/\sqrt{Re_2} + 0.989/Re_2$$

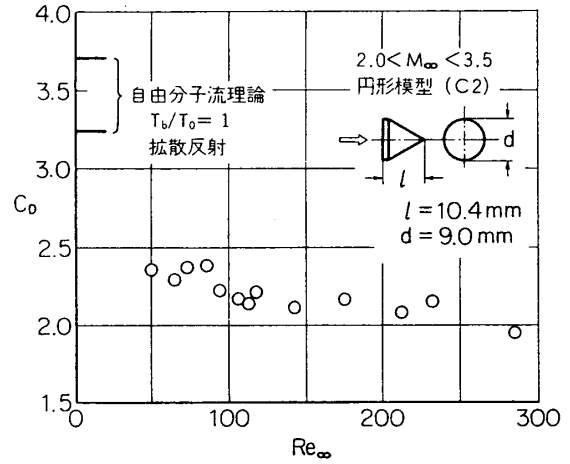
を与えている。ここで Re_2 は球の前方にできる衝撃波直後のレイノルズ数である。本実験では $M_\infty = 2.0 \sim 3.5$, $T_0 = T_b = 300^\circ\text{K}$, 直径5.5mmの球に対して $Re_\infty = 25 \sim 150$ 程度なので抵抗係数としてこれらの式を用い、流れを等エントロピー流と仮定して、抵抗測定値から気流の動圧分布を求めた。その一例として、No. 1ノズル(公称マッハ数2)に対するノズル軸方向の動圧分布を第8図に、No. 3ノズル(公称マッハ数3)に対するノズル出口から10mmでのノズル軸に垂直方向の動圧分布を第9図に示す。図中の実線は圧力測定から求めた結果で、これと比較し、この簡単な方法でもかなりの精度で流れの特性を調べることがわかった。

4. 円板および正方形板の抵抗係数

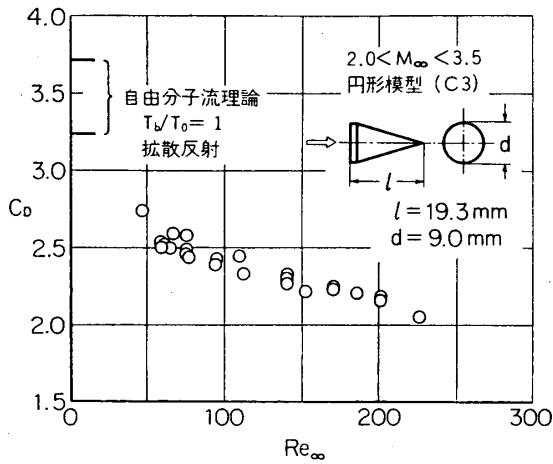
第7図に示すような円形模形(円板および円板後部が円錐状のもの)と正方形模型(正方形板および正方形板後部が四角錐状のもの)の抵抗係数を吊下げ法で求めてみた。模型は全て発泡スチロール(密度約0.027g/cm³)製で非常に軽い。模型の寸法および質量も同じく第7図に示す。最初吊下げ法でこれらの模型を気流に平行かつ安定に置くことができるかどうか懸念されたが、糸の取付位置をいろいろ変えて調べちょうど適当な取付方法を見出すことができた。これには模型が非常に軽いことが幸いした。第10図に気流中に吊下げ法でこれらの模型の写真数例を示す。したがって、吊下げ法でこれらの模型の抵抗測定が可能になり、No. 1~4ノズルで集合筒よどみ点圧 p_0 を0.6~2mmHgと変えて実験した。測定場所のちがいによるデータのばらつきを避けるため、模型の位置はどの場合も前面が気流軸に沿ってノズル出口から20mmのところに来よう糸の支点を動かし調整した。抵抗係数の結果をレイノルズ数 Re_∞ の関数として第11~16図に示す。ただし正方形模型に対するレイノルズ数には、円形模型と比較するため、長さとして断面積の等価な円の直径を用いた。これらの図を比較して見ると、円形模型の方が正方形模型よりやや抵抗係数が大きく、後部の影響をみた場合、後部のあるものの方が抵抗係数がいくらか大きいことがわかる。これは全体の抵抗に対する後部の効果として圧力による底面抵抗よりその部分の摩擦抵抗の方がまさるためと思われる。また、これらの図からレイノルズ数に対する抵抗係数の変化を見ると



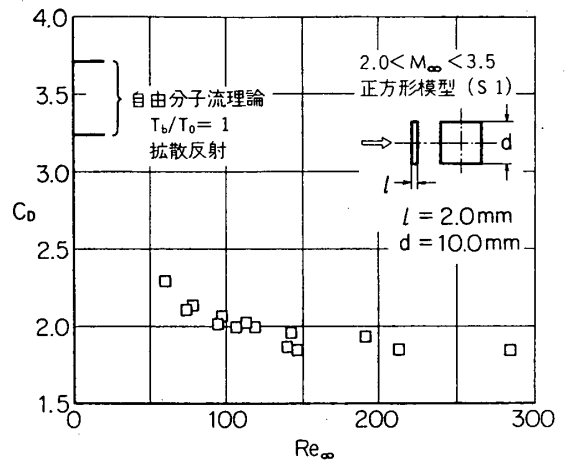
第 11 図 円形模型の抵抗係数 C_D



第 21 図 円形模型の抵抗係数 C_D

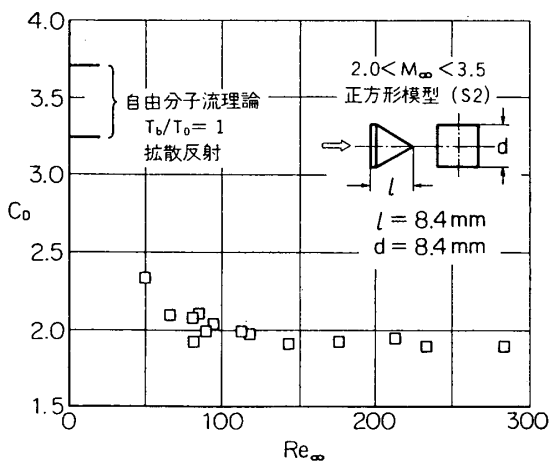


第 13 図 円形模型の抵抗係数 C_D



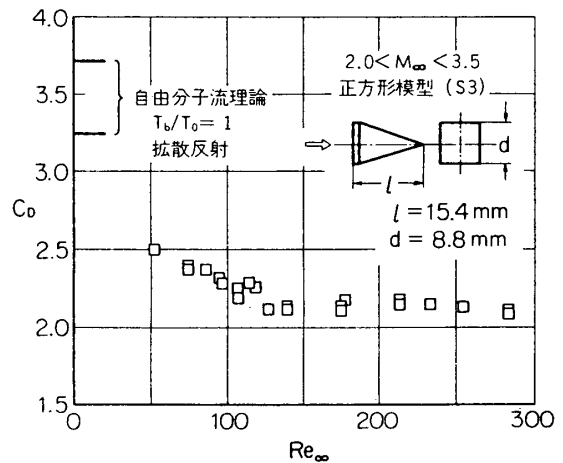
(基準長は断面積の等価な円の直径)

第 14 図 正方形模型の抵抗係数 C_D



(基準長は断面積の等価な円の直径)

第 15 図 正方形模型の抵抗係数 C_D



(基準長は断面積の等価な円の直径)

第 16 図 正方形模型の抵抗係数 C_D

$R_{e\infty} < 100$ でその変化が大きい。これは頭部が円形のピトー管での総圧測定にさいし、 $R_{e\infty} < 100$ でレイノルズ数補正が増すことと対応している。

5. むすび

高速低密度風洞で吊下げ法により球の抵抗を測定し、その抵抗係数は既知 (Aroesty の実験式) とみなし気流の動圧を求めることを試みた。圧力測定からの結果と比較して、この簡単な方法でも流れの特性がある程度調べられることがわかった。また、頭部が円形状および正形状の発泡スチロール製の非常に軽い模型を用い、吊下げ法でその抵抗係数を求めた。レイノルズ数の効果は $R_{e\infty} < 100$ で顕著で、 $R_{e\infty} > 100$ では抵抗係数の変化は比較的ゆるやかである。形状差についてみれば円形状のものの方が正形状のものより抵抗係数がやや大きく、後部の効果は抵抗係数を増す傾向にある。

われわれは今後もっと形状の異なった、たとえばロケットや人工衛星などの発泡スチロール製模型を用い抵抗測定を行なう予定である。

終りにこの実験について種々の御助言をいただいた玉木教授に厚く感謝する。また永井達成助手に図面などの製作を手伝っていただいたことを付記しここに感謝の意を表したい。

1971年2月27日 新設部(工学)

参 考 文 献

- [1] 玉木章夫: 稀薄気体力学の実験装置, 日本航空学会誌11巻, 117号 (1963) p. 324.
- [2] Ashkenas, H. and Wegner, P. P.: A Simple Method of Sphere Drag Measurement in Rarefied Supersonic Gas Flow, in Rarefied Gas Dynamics (L. Talbot ed.), Academic Press (1961) p. 663.
- [3] Ashkenas, H.: Low-Density Sphere Drag with Equilibrium and Nonequilibrium Wall Temperature, in Rarefied Gas Dynamics (J. A. Laurmann ed.), Academic Press (1963) p. 278.
- [4] Masson, D. J., Morris, D. N. and Bloxson, D. E.: Measurements of Sphere Drag from Hypersonic Continuum to Free Molecule Flow, in Rarefied Gas Dynamics (L. Talbot ed.), Academic Press (1961) p. 643.
- [5] Aroesty, J.: Sphere Drag in a Low-Density Supersonic Flow, in Rarefied Gas Dynamics (J. A. Laurmann ed.), Academic Press (1963) p. 261.
- [6] Bailey, A. B.: High-Speed Sphere Drag in the Transition-Flow Regime in an Aeroballistic Range, in Rarefied Gas Dynamics (C. L. Brundin ed.), Academic Press (1967) p. 1127.
- [7] Phillips, W. M. and Kuhlthau, A. R.: Drag Measurements on Magnetically Supported Spheres in Low Density High Speed Flow, in Rarefied Gas Dynamics (L. Trilling and H. Y. Wachman ed.), Academic Press (1969) p. 711.
- [8] Smolderen, J. J., Wendt, J. F., Naveau, J. and Bramlette, T. T.: Sphere and Cone Drag Coefficients in Hypersonic Transitional Flow, in Rarefied Gas Dynamics (L. Trilling and H. Y. Wachman ed.), Academic Press (1969) p. 903.
- [9] Hersh, A. S., Friichtenicht, J. F. and Slattery, J. C.: Drag Coefficients of Microscopic Spheres

in Free-Molecule Flow, in Rarefied Gas Dynamics (L. Trilling and H. Y. Wachman ed.), Academic Press (1969) p. 757.

- [10] Koppenwallner, G. and Legge, H.: Sphere Drag Measurements in a Free Jet and a Hypersonic Low Density Tunnel, in the Preprint of the Seventh International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Italy (1970) p. 156.