

フロート式可變面積指示機構の實驗的研究(その1)

山 岡 義 人

1. 緒 言

近年、流量計測機器にさかんに用いられるようになったフロート式の指示機構は、その堅牢さと巧妙な原理とのために各所に應用されるようになった。特に空気マイクロメータの指示機構や自動制御用計器の指示機構などには好適で、さかんにこの種の指示機構が用いられるようになった。その原理は、流体の流れつつある透明管内に固形フロートを入れて浮かせ、管の内壁をわずかに円錐形あるいはその他の形に仕上げ、流速に応じてフロートの平衡位置が変わるのを観測して流量その他を知ろうとするものである。この指示機構は、機械式指示機構のように摩擦もなく、指示遅れも少く、特に液体を用いるものでは制動力も強くてフロートが振動をおこすようなことが殆んどなく、かつ構造が簡単で堅牢な点が他の機械的指示機構に比べて優れている。しかも、目盛りは一様にするこゝも、また特定の形にするこゝも、管内壁の曲線の形をかえることによつてたやすくできることは利点であろう。

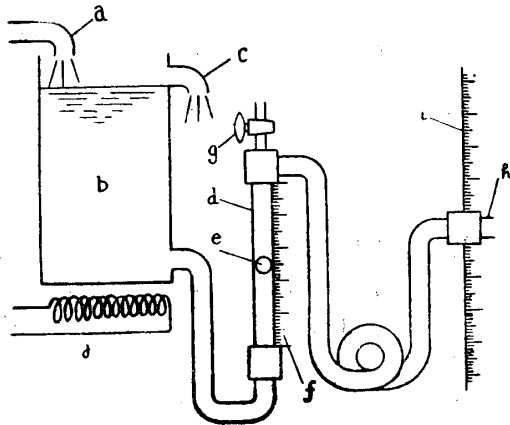
しかし、このような機構も、その理論的または實驗的解明を企図した研究が極めて少く、今後研究すべき問題が多多残されている状態である。わが国におけるこの方面の研究は全く微々たるものであり、しかもその製品は外国品に比べて遙かに性能がおとつている現状である。特にフロートの自転防止の技術に至つては満足すべき製品がない。

そのような見地から筆者はこのフロート式指示機構の實驗的解明を計画し、同時にできれば、この機構を逆に利用して、精密測定の困難な長孔管内径測定に應用しようと試みたのである。

流体中の物体におよぼす流体抵抗の理論としては、古くから球に対する Stokes⁸⁾ の法則があるが、これはレイノルズ数が 0.5 以下の小さい値の流れに対してのみ成立するもので、球の半径に上限があり、われわれの場合には適用できない。その後この法則は、Allen, Ladenburg, Arnold, Zeleny-McKeenan, Liebster らによつて實驗的に検討された。Liebster⁴⁾ の實驗は主としてレイノルズ数の大きい範囲、0.2~500 までのものであるが、われわれの實驗におけるレイノルズ数の範囲は、約 100~4500 の広範囲にわたり、大部分がレイノルズ数 500 を遙かに上廻っているもので、これもやはり適用できない。その上この實驗では管壁が非常に接近して管内径と鋼球直径との比が 1~2 という小さな値になっているので、Ladenburg³⁾ が報告しているように、管壁の影響が甚だしく、これらの理論の適用ができなくなるのである。この管壁面の干渉を考慮に入れた理論は Lorentz⁵⁾ によつて始められ、無限長の管の場合については Ladenburg⁷⁾ によつて完成されてはいるが、この實驗とは条件が異なるのでこれも適用することができない。またこの方式の指示機構に直接関係のある研究としては Head²⁾ のおこなつたものがあるが、これは球を使用していないのでわれわれの場合と条件が異つている。

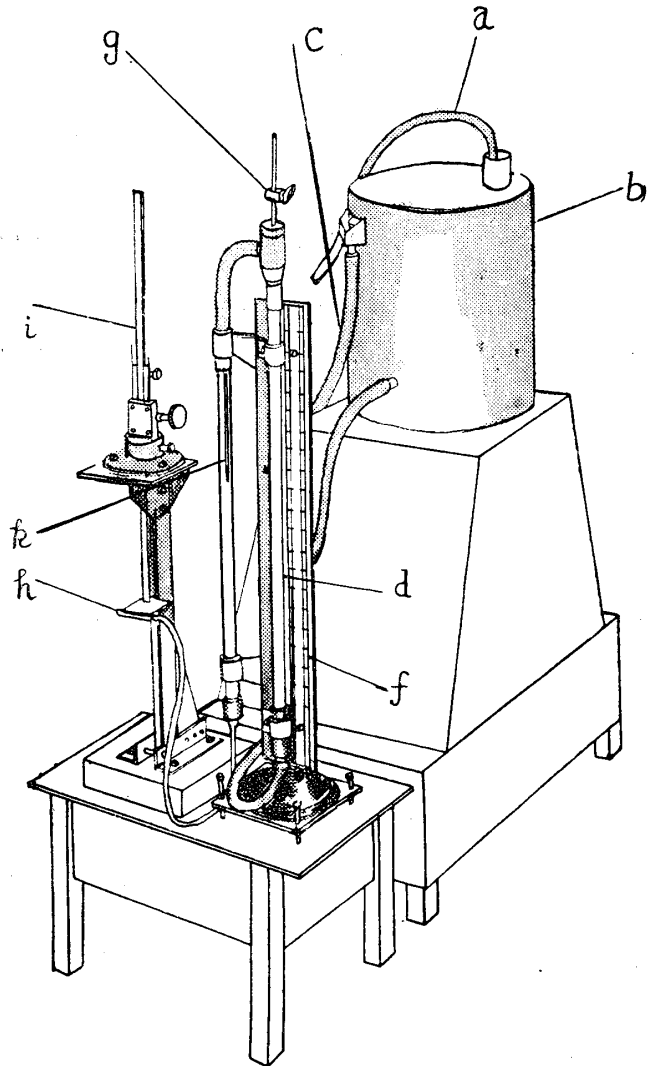
このように理論的に解析することは甚だ困難であるので、實驗によつて性質を解明しようと試みたわけである。

2. 實驗装置ならびに測定法



第1図 実験装置の説明図

第1図はこの実験に使用した装置の説明図、第2図は外観図である。bは定圧水タンクで、aより水を補給し、cよりオーバー・フローさせて水圧を常に一定に保っている。dはガラス管で、その中に鋼球eを浮べ、鋼球の位置は目盛りfによって読みとる。gは鋼球を出し入れる場合に管内に気泡が入るので、それを除くためのコックである。hは水の吐き出し口で、この高さをいろいろ加減することにより、ヘッドを調節する。hの高さは目盛りiによって読み取りうる。第1図のjは電熱器で、水温をかえる場合に用い、水温は管内に挿入した寒暖計k(第2図参照)によって読み取る。管dは垂直に保つ必要があるので、調整ねじをつけた支持台(第2図参照)に固定されている。



第2図 実験装置の外観図

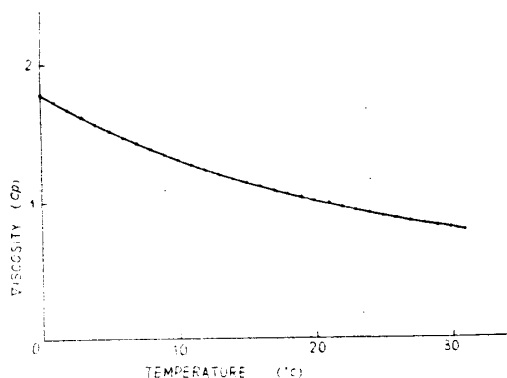
使用した管はゲージ・ガラス管、鋼球はボール・ベアリング用のボールで一級品、流体は水道の水である。流量を測定するためには容量1000ccのメスシリンダーとストップ・ウォッチとを用いた。

測定に際しては、ヘッドを調節して鋼球がちょうど望む位置で平衡を保つようにし、かつ自転しないようにしてその時の流量を測定した。流量は20~500秒間の流出量をメスシリンダーで測定して計算したものである。

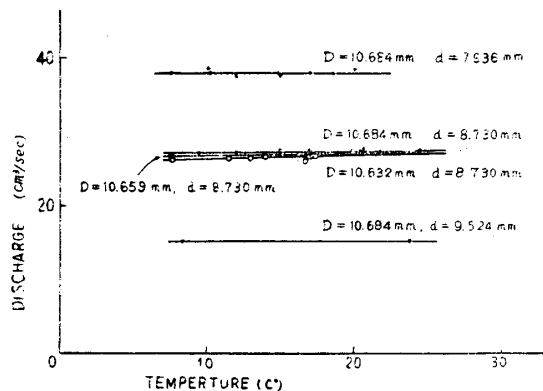
3. 粘性の影響

この測定を開始するにあたって、まず第一に問題となるのは、水温変化による水の粘性の変化の影響である。Stokesの理論におけるように、無限の広がりをもつ流体内の物体でさえそのうける流体抵抗は、その流体の粘性によって著しく左右されることは周知の事実である。この実験ではさらに管壁と鋼球面とが接近しているのでその影響が著しいように思われる。参考のために、水の粘性と水温との関係を、従来の測定値¹⁾を用いて図示すると第3図のようにな

る。このように水の粘性は水温により、広い範囲にわたって変化するので、この影響は重大であると考えた。



第3図 水の温度と粘性係数との関係



第4図 水温と流量との関係

Dはガラス管内径、dは鋼球直径を表わす

そこで管内に鋼球を入れ、鋼球の位置が変わらないようにヘッドを調節しながら、水温を変化させて流量を測定し、水温に対する流量の関係を求めると、第4図に示したような結果になった。

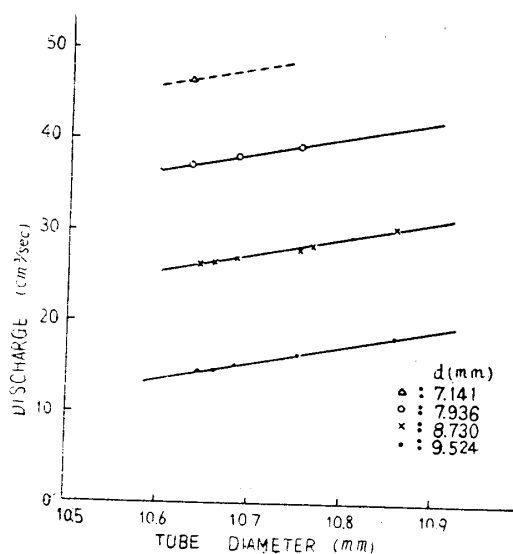
この結果は予想に反して、水温変化に対する流量変化が小さく、殆んど水温には無関係であることを示している。このことは、ガラス管内壁と鋼球との間隙が、この実験では最大 1.374 mmで、管ならびに鋼球直径(10mm前後)に比べて小さく、この間隙が一種のオリフィスを形成していると解釈することによって了解できる。すなわち、この実験では、管内に移動オリフィスが存在するものと考えた場合の、流量とオリフィス面積との関係を調べることになる。しかし、極めてわづかではあるが水温上昇と共に流量の増加もみられるので、精密な測定を必要とする場合には、水温を一定に保つことが望ましい。

第4図の結果は、あるいは水温変化によるガラス管と鋼球との膨脹の差によっての間隙面積の変化によるのではないかという心配もあるので、計算してみたが、この値は水の粘性変化に比べて極めて小さく、殆んど問題にするにたりなかつた。

4. 実験結果

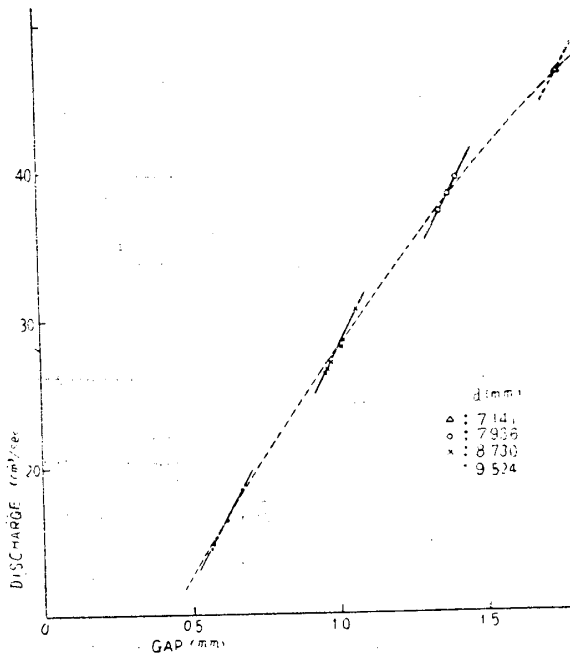
ガラス管の内径は、一般にその長さの方向に変化しているのが普通である。そこでその管内径の変化を利用し、一本のガラス管内において鋼球の位置を移動せしめ、4種類の異った直径の鋼球に対する流量の測定をおこなった。この結果をガラス管内径に対して図示したものが第5図である。

管内径は最大約2%変化していた。この横軸にとった管内径の値は、実験終了後、流量を測定した位置でガラス管を切断し、精度 $1/1000$ mmの座標測定機を用いて数回おのおの異った方向に直径を測定し、その平均をとった値である。このように、ガラス管内径に対する流量の



第5図 ガラス管内径と流量との関係
dは鋼球直径を表わす

関係は、鋼球直径が異なるごとに異った直線となる。しかもそれらの直線はほぼ平行である。



第6図 ガラス管内壁と鋼球との間隙巾と流量との関係 dは鋼球直径を表わす

同じ測定値を、管内壁と鋼球との間隙の大きさに対して図示すると第6図のようになる。第6図は第5図に比べるとかなり統一され、全体的には二次曲線に近い一本の曲線で統一されているようであるが、まだ各鋼球ごとの関係直線の傾斜が曲線の傾斜と一致しない。従って流量と間隙との関係は、鋼球の直径をかえていった場合と、管内径をかえていった場合とで異っていることになる。すなわち、ガラス管内径の変化による流量変化率は、鋼球の直径変化による流量変化率と異なることを示している。

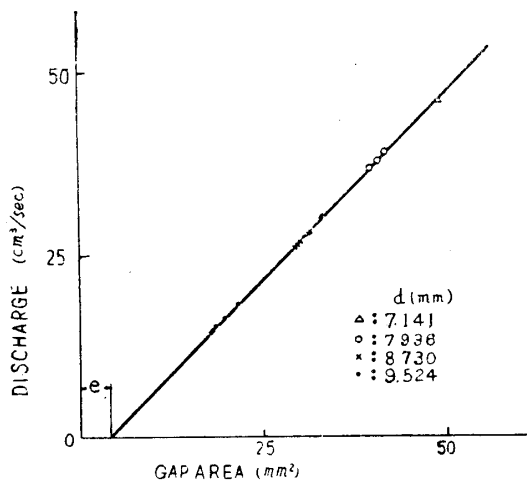
そこで流量と間隙面積との関係をとってみると第7図のように直線関係がえられた。

第7図ではすべての点が直線上にのっており、流量 Q と管内径 D および鋼球直径 d と

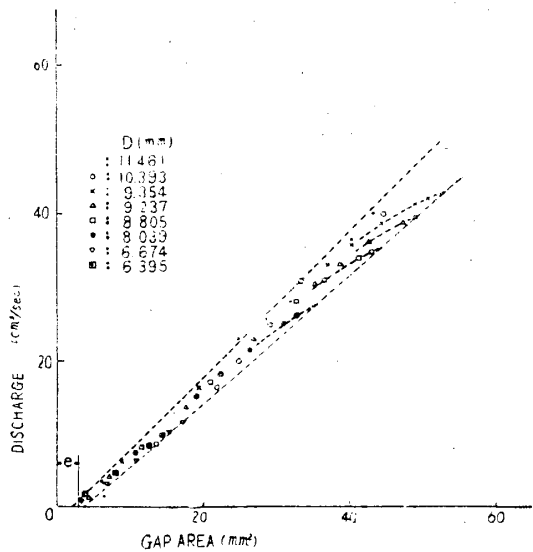
の間には、 k を一つの比例常数として、次の関係が成立することがわかる。

$$Q = k \left\{ \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) - e \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q を cm^3/sec 単位で、また D および d を mm 単位で表すと、第7図より $k=1$ となる。また e はこの直線が横軸を切る点の座標である。



第7図 ガラス管内壁と鋼球との間隙面積と流量との関係 dは鋼球直径を表わす



第8図 ガラス管内壁と鋼球との間隙面積と流量との関係 Dはガラス管内径を表わす

このように、管内径および鋼球直径と流量との間の統一された結果がえられたので、さらにこれを確認するために、8本のそれぞれ内径の異なるゲージ・ガラスと、12個の直径の異なる鋼球

とを用いて、50回の測定をおこなった。その結果を第8図に示す。

この結果からみると、測定値は完全に一直線上にのらないで、図中に点線で示した範囲内にちらばっているが、それでも全体の傾向は第7図の結果を確証しているようである。従って流量は間隙面積に比例する性質をもつものと考えられる。この場合にも全体の平均をみれば、依然として $k=1$ であり、 e の値も (1) 式のそれとほぼ等しい。

5. 実験結果の検討

もしも第7図および第8図の関係、すなわち (1) 式の関係が成立するならば、第5図に示したように、管内径と流量との関係は直線にはならない筈である。しかるに第5図では直線になっている。これは (1) 式を変形してみることによって了解できる。すなわち、

$$Q+ke=k\frac{\pi}{4}(D-d)(D+d)=k\frac{\pi}{4}(D-d)(2d)$$

となるから d を一定とすると流量は管内径 D に近似的に正比例することになり、第5図のように直線関係が現れることが了解できる。

また第6図の各鋼球に対する線分の傾斜が二次曲線のそれと異なるのは、管内径を単位量かえた場合と、鋼球直径を単位量かえた場合との流量変化率が異なるからである。すなわち、(1) 式を偏微分して

$$\frac{\partial Q}{\partial D}=k\frac{\pi}{2}\cdot D$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d}=k\frac{\pi}{2}\cdot d$$

しかるに、 $D>d$

$$\therefore \frac{\partial Q}{\partial D}>\frac{\partial Q}{\partial d}$$

すなわち、管内径をかえた場合の流量変化率の方が鋼球直径をかえた場合のそれよりも大となり、第6図のような結果が現れたことが了解できる。

次に第8図をみると、各測定値が全体的には点線で示したある範囲内に散布されているが、さらに注意してみると、管内径が大きい程鋼球直径をかえた場合の流量—間隙面積直線の傾斜が大であり、同時にまた各流量—間隙面積直線は点線で示したようにその先が彎曲してくる傾向がみられる。すなわち、第8図の場合には性質は同じでも少しづつ条件の異った測定値の群が集って (1) 式の関係を表しているものようである。第7図の場合には、管内径の変化がわずかに 2% 程度であったものが、第8図の場合では、管内径が最大 11.461mm から最小 6.395mm までかえられた。すなわち、約 44% も後者では管内径が変化している。また鋼球直径の変化も大きく、第7図の場合では、間隙巾が最大 1.75mm であったものが、第8図では最大 2.30mm にも増大している。従ってそれだけ流速も増加しているわけである。これらの諸点が流量と間隙面積との直線の傾斜を変化せしめる原因の一つと考えられる。

Drag D は、物体の流速方向への投影面積を A 、流体の密度を ρ 、流速を v 、レイノルズ数を R とすれば、

$$D=f(R)A\frac{\rho v^2}{2}$$

で表される⁶⁾。またレイノルズ数 R が2240以上では管内流れは層流から乱流にかわるといわれているから、われわれの実験の場合のようにレイノルズ数が4500にも達するような場合には当然その影響を考慮に入れる必要がおこってくる。しかしながら、この実験では、間隙を流れる流体の流体摩擦の影響は左程大きくないものと考えてよい。その理由は、第4図に示したように、水の粘性の影響が殆んど流量に影響をおよぼさないからである。そこでこの実験に用いた測定値についてレイノルズ数を計算し、第8図の流量と間隙面積との関係を表す直線が、ちょうど彎曲を始める附近のレイノルズ数を調べてみると、およそ、3500附近でどのガラス管内径の場合にも、図中に点線で示したように彎曲を始める傾向がみられる。またガラス管内径 D と鋼球直径 d との比、 D/d を計算してみてもほぼ1.5前後の値においてその傾向が現れるようである。この附近ではすでに管内は乱流になっていると考えられるので、(1)式の関係は管内が層流の場合にのみあてはまるものと考えの方が妥当であろう。従って、このフロート式指示機構では、管内の流れが層流である範囲内においては、流量と間隙面積との関係は、ほぼ直線的であるといえよう。特に管内径の変化が小さい場合には第7図のように非常に密接にこの関係が成立する。

この問題については、以上のごとく一応の結果がえられはしたものの、なお、さらに多くの不明の問題が提出された形になった、すなわち、層流と乱流との境界のレイノルズ数は一般に2240といわれているのに、この実験では約3500となったのは、レイノルズ数を算定する場合に管内径を用いた点に誤りがあるのか、それとも鋼球の直径や間隙巾などをなんらかの方法で加味すべきものであるのかかわからない。また D/d の値がある程度この現象に関与しているらしいが、それがいかなる形で測定結果に影響してくるのかもはっきりしない。さらに間隙巾が約0.13mm以下、すなわち、間隙面積が約4mm²以下の点でデッド・エリア e が現れてくるが、これは実在するのか、またはこれ以下では直線が急に彎曲して零点を通るのが疑問である。なお管内径が変わると傾斜がわづかながらかわってくる点も考慮を要する点であろう。この実験においては、極力鋼球の自転を避けて実験をおこなったが、鋼球が自転を開始すると、その平衡位置が相当変化するので、この鋼球の自転の影響の問題は重要である。

以上のように、多くの困難な問題が、この実験の結果提出されたことは、この実験の収穫もあり、また同時に今後検討を要する問題でもある。これらの問題については、さらにより多くの実験を重ねた上で検討する積りである。

6. 結 言

フロート式指示機構の原理は全く流体力学の問題に帰着することになるが、その理論的解明は今日では未だ困難な段階にある。そこでこの問題を解明するために、われわれは実験的方法を選んだわけである。その結果、一応の結果がえられ、同時に今後研究すべき諸問題が提出された形となったので、以下その結果を要約する。

a. 管内径と鋼球直径との比が1~2の小さい値の間は、少くとも水の粘性の影響は無視することができ、従ってこの際、管壁と鋼球との間隙は一種のオリフィスを形成しているものとして考えた方が了解しやすいという結果をえた。

b. 管内径と鋼球の間隙面積と、流量との関係は、管内径の変化が小さく(数%)、管内の流れが層流であると考えられる範囲では、非常に密接に直線関係で表された。すなわち、流量を Q 、管内径を D 、鋼球直径を d とし、 e をおよび e を常数とすると、次式で統一されることがわかった。式中 e はデッド・エリアともいふべき性質の常数である。

$$Q=k\left\{\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)-e\right\}$$

c. 管内径の変化が大きく(数十%)なると, 測定値はある範囲内に散布されるが, やはり上の関係式が成立することがわかった。

d. なお今後の問題としては, レイノルズ数のとり方, D/d の影響, 管内径 D と曲線の傾斜の問題, デッド・エリア e の意味, 鋼球の自転の影響などの諸問題が提出された形となった。

これらの諸問題を解明することは, この指示機構によってより正確な指示をおこなわせ, または逆にこの方法を利用して長孔管内径の精密測定をおこなう上に, 最も重要な問題であろう。

終りにのぞみ, この実験を手伝われた原田洋雄君, 本間敬三君, 橋口宏君に深甚の感謝の意を表すると共に, いろいろと御助言をいただいた上岡豊助教授に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Fowle, F.E. : Smithsonian Physical Tables. Smithsonian Instit., Wash., 1934.
- 2) Head, V.P. : Coefficients of Float-type Variable-Area Flowmeters. Trans. ASME, Vol. 76, No. 6, p.851~862, 1954.
- 3) Ladenburg, R. : Über die innere Reibung Zäher Flüssigkeiten und ihre Abhängigkeit vom Druck. Ann. Physik, Bd. 22, S. 287, 1907.
- 4) Liebster, H. : Über den Widerstand von kugeln. Ann. Physik, Bd. 82, S. 541, 1927.
- 5) Lorentz, H.A. : Abh. über Theor. Physik, Vol. I, p. 23, Leipzig, 1907. (cited by Prandtl and Tietjens)
- 6) Prandtl, L. and Tietjens, O. G. : Applied Hydro- and Aeromechanics, McGraw-Hill Book Co., N.Y., p. 0~311.
- 7) Prandtl, L. and Tietjens, O.G. 著 :
松本昌藏, 糸川英夫, 宮崎洋共訳 : 航空流体力学(合本), 昭和19年12月, 第7版, 理工学出版.
- 8) Stokes, G. : Trans. Cambridge phil. Soc., Vol. 8, 1845 and Vol. 9, 1851.