

(昭和 32 年 11 月 造船協会秋季講演会に於て講演)

円柱に働く流体力について

正員 高 幣 哲 夫*

On the Hydrodynamic Force upon the Circular Cylinder

By Tetsuo Takahei, *Member*

Abstract

This paper sets forth the results of tank experiments on the hydrodynamical force upon a circular cylinder in uniform flow, which was measured directly and dynamically by the use of a specially designed strain gauge-type dynamometer. As the aim of experiments was to study the dynamical behavior of tall stack under the action of wind, they were carried out over the range covering the critical Reynolds number, $R=0.8\sim6\times10^5$

According to the test results, the drag force is stable in spite of the fluctuation of the lateral force and the Strouhal number referring to the lateral force coincides with the Relf's results which were obtained from the fluctuation in the wake flow. The drag coefficient C_D , the ratio of single amplitude of fluctuating lateral force to drag force, C_L and the Strouhal number S versus the Reynolds number R are shown by the curve with mark TUET in Fig. 1.

From these results it is supposed that beyond the critical Reynolds number $R\approx2\times10^5$ a realistic value of C_L is in the order of 0.1. This value, as compared with the value $C_L\approx1.0$ suggested by Den Hartog and Fung, is considerably smaller, and is of the same order of $C_L\lesssim0.20$ by Ozker and Smith.

1. 緒 言

最近大出力の火力発電所が相次いで建設され、それに附随して大形の煙突の建造の必要が生じ、これを鋼製全溶接構造とするについて、設計上風による煙突の振動が重大な問題となつたり。すなわち煙突が風をうける際、煙突の後方に発生する渦のために風向と直角方向に交番力をうけ、ある風速において大振幅の共振の現象を起す。これは溶接構造の採用で煙突の固有振動数が低くなると共に、減衰性が小さくなつたために問題が顕著となつたものである。

一般に Kármán 渦列の生成は、円柱後方の流れが層流剝離の状態にある場合 ($R=U_0T/\nu \lesssim 2\times10^5$) はほぼ規則的で、かつ単一周期をもっているが、 R 数が高くなるにつれて流れは乱流剝離の状態に移す。このとき剝離点は後退し、後流は連続スペクトル帯をもつ複雑な渦乱流にかわる。これによつて渦の規則性は失われ、同時に抵抗は急激に減少する。

しかるに現実には、米国 Detroit において直径 4.8 m の煙突が 20 m/s (R 数 $\approx 6\times10^6$) の風を受け、毎秒 1 サイクルで大きな振動が約 1 時間続いた後、坐屈破壊するという事故が生じた。こうした現象の解明にあつてまず第一に知らねばならぬ点は、実物の煙突がその置かれた自然的条件のもとで、実際にどのような流体力をうけているかということである。このことは局地気象学で取扱われるべき事柄であるが、観測の困難さのためにこの方面におけるわれわれの知識は余りにも少い。

そこで、事の重要性にかかわらずその究明を将来にまつとして、残された部分でわれわれにさしあたり可能な研究方法として次の 2 つがある。

- (1) 実物煙突による無風時の振動実験、および強風下の振動観測

原稿受付. 7 月 10 日

* 茨城大学助教授

(2) 風洞および水槽内の応用流体力学的模型実験

わが国においても最近に至つて本問題の実際的な重要性に鑑み、木下昌雄、広渡智雪両氏²⁾³⁾、中村清氏⁴⁾、河本俊平氏⁵⁾らによつて上記両種の実験的研究が行われ、それぞれ有益な結果が得られている。

本小文は上掲の分類に従えば(2)の系列に属するものであつて、直径 500 mm というかなり大形の模型を試験水槽内で全没して水平に曳航して行つた実験について述べたものである。

その目的は在来の実験の R 数 7×10^4 と実物の R 数 10^7 との中間を結ぶ R 数 $10^5 \sim 10^6$ の範囲をねらつて実験を行うことにあつた。大気と水槽との固有の初期乱れの構造的相違を一応無視して考えると、今回本実験がねらつた R 数の範囲はあたかも層流剝離から乱流剝離に遷移する R 数に相当している。この遷移の前後において円柱後流渦の特性にどのような変化が認められるものであらうかという点を究明するのがこの実験の第一の目的であつた。実験にあつては、実験状態を純粹の二次元流れに近づけるために、円柱模型を水槽の幅一杯のスペンとし、これを3分して中央の円柱を供試体とし、これに働く各種の力を測定することにした。試験水槽においてこのような模型曳航法を採用することは余り例がないと思われるので、その可否は別として、今回の経験を経験を報告することも全く無意味ではないと考えた次第である。

2. 記 号

A 円柱の流れに直角方向への投影面積

$$C_D = D \left/ \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 A \right) \right. \quad \text{抵抗係数—測定値について求めたもの}$$

$$C_{D\infty} = D_{\infty} \left/ \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 A \right) \right. \quad \text{抵抗係数—二次元流れに対するもの}$$

$$C_L = L \left/ \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 A \right) \right. \quad \text{揚力係数—測定値について求めたもの}$$

$$C_{L\infty} = L_{\infty} \left/ \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 A \right) \right. \quad \text{揚力係数—二次元流れに対するもの}$$

$$C_R = L/D = C_L/C_D$$

D 二次元流れが円柱の軸に直角にあたる場合、流れの方向に作用する抵抗の水槽実験による値

D_{∞} D に修正を施して流れが無限に拡がるものと考えた場合の値

L 円柱に作用する流れに直角方向の力。これを揚力と呼ぶこととする。変動する揚力についてはその単振幅を L とする

L_{∞} 流れが無限に拡がるものと考えた場合の揚力

$m_1 = U_m/U_{m\infty}$ 二次元の円柱のまわりの流れを Potential Flow として、側壁の存在によつて側壁に最も近い母線の位置における流れの速度の変化を示す係数

N L の変動する毎秒の振動数

$$n = D/D_{\infty}$$

$$R = U_0 T / \nu \quad \text{Reynolds 数}$$

$$S = NT/U_0 \quad \text{Strouhal 数}$$

U_0 水槽実験における一様な流れの速度

$U_{0\infty}$ 流れが無限に拡がるものと考えた場合の一様な流れの速度

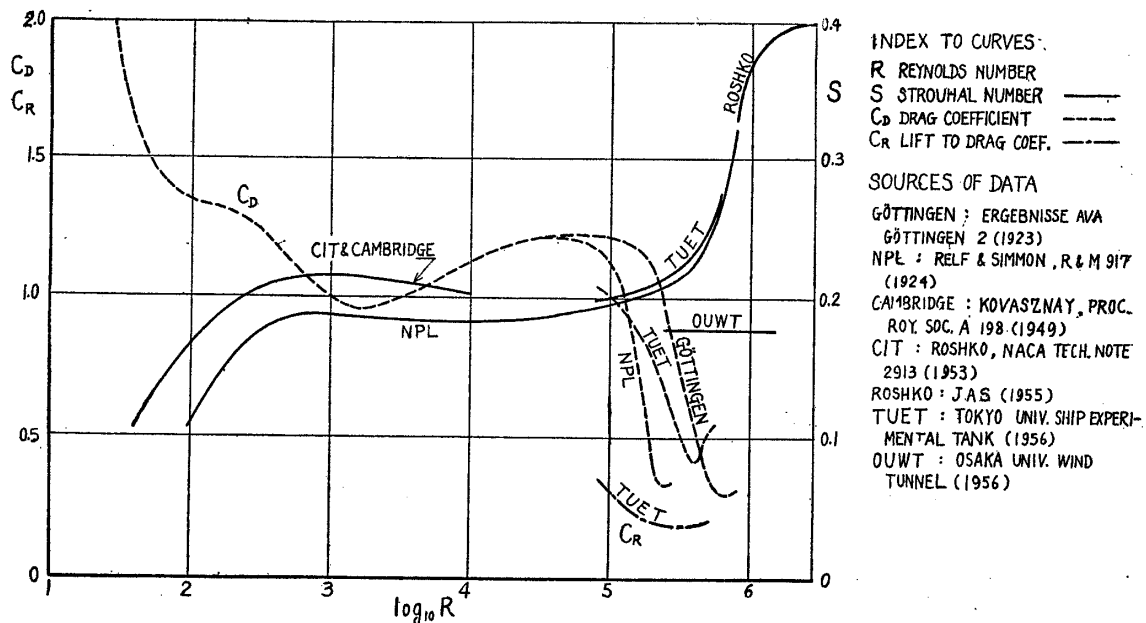
ν 動粘性係数

ρ 流体の密度

3. 実験計画および装置

3.1 実験計画

二次元流れの中におかれた円柱の定常的な抵抗係数 C_D は遷移 R 数の前後において、 R 数に対して極めて敏感となり、 R 数 10^5 における $C_D \approx 1.2$ から R 数 4×10^5 における $C_D \approx 0.3$ とほぼ 1/4 の大きさにまで急激に減少する。この興味ある現象と関連して 10^6 までの R 数について多くの風洞実験が行われている。それらの結果の主なものをまとめたものが第1図である。



第 1 図

以上抵抗に関する在来資料について述べたが、一方で円柱後方に放出される渦の時間的周期性および位置的非対称性にもとづく交番流体力の性質に関する資料は前者ほどに多いとはいえない。古くは Relf⁶⁾ および Schwabe⁷⁾ の研究があり、最近では前にあげたわが国諸氏の研究と Roshko (1955) の研究とがある。木下、広渡両氏は直径約 60 mm の円筒模型を水槽で鉛直位置で曳航し、 R 数 $1 \sim 7 \times 10^4$ の範囲で strouhal 数 $S \approx 0.18$ 、交番揚力係数 $C_L \approx 0.9 \sim 1.10$ 、定常抵抗に重なる交番抵抗係数 $0.1 \sim 0.20$ をえた。同時にえられた定常抵抗係数がほぼ 1.0 であるところから推してこの範囲では Kármán 渦列の規則性はまだ十分残っており、層流剝離に該当していると考えてよいであろう。これに対して Roshko の研究は 10^6 をかなり越えた高い R 数まで行われているが、残念なことに観測は Strouhal 数のみについてなされ、力の測定がなされていない。前掲第 1 図には彼のえた S 曲線をも示してあるが、これによると、 S の値は R 数 $10^5 \sim 10^6$ で急増し、 $S = 0.18$ から一躍して $S = 0.40$ にも達している。このような S の値の急激な変化は層流剝離が乱流剝離に遷移したためと考えてまず間違いないと思われるが、Roshko の実験は前述のように力の測定を行っていないため、これ以上の推論はできない。

上記のような現状に鑑みて、この実験では遷移 R 数の前後にわたってなるべく高い R 数まで、円柱の抵抗、揚力の大きさおよび変動の状態を直接計測することとした。

なお円柱の表面に Trip Wire を置き、または粗度を与え、あるいは円柱の前方に網や格子をおいて流れに乱れを与える等の方法で、遷移域を R 数の低い方へ移す可能性が風洞実験の結果から示されている。そこでこの実験においても表面に Trip Wire を置いた場合について遷移域の変化の状態を調べた。

3.2 円柱の直径

実験には東京大学船型試験水槽を使用した (第 1 表)。流れを二次元流れとするため水槽の幅一杯の長さの円柱をその軸を水平に一様な深度に置いて曳航する。

円柱の直径 T については、曳引車の能力、水槽の水深 H 等を考慮して、 R 数を 10^5 から 10^6 までの間に変化させることできるように 500 mm とした。 H が 2.4 m であるから H/T は 4.8、円柱を H の中点におくときは、没水深 F と T との比は 2.4 となる。Rosenhead の理論的研究⁽⁸⁾ によれば H/T が 4 以下では生ずる Kármán 渦列に側壁影響があらわれるが、5 まではあまり大きな影響はないという。

3.3 Trip Wire

C_D に急激な変化を生ずる原因は境界層が層流から乱流に遷移し、層流剝離が乱流剝離になると共に剝離点が後退することにある。従つて境界層の遷移を適当な方法で促進すれば遷移 R 数を低い値に移すことができる。

第 1 表 東京大学船型試験水槽

長	さ	85 m
幅		3.5 m
深	さ	2.4 m
曳引車電動機		20 HP × 2
速	度	0.2 ~ 5.0 m/s

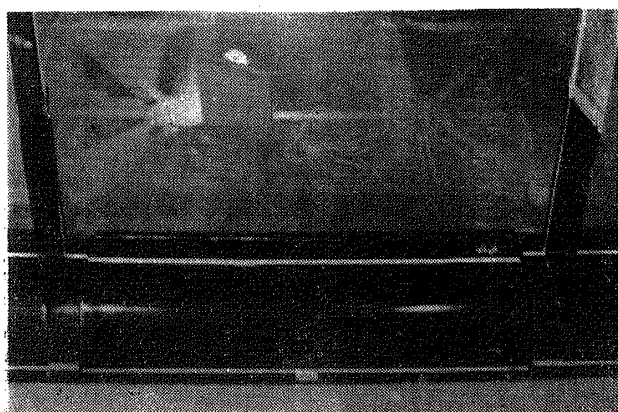
Fage⁽⁸⁾ は円柱の前に Rope Netting を置いた場合, Trip Wire を円柱にとりつけた場合等について実験を行っている。Trip Wire 取付けの位置としては, 層流剝離点のわずか前方すなわち前端母線から $\pm 65^\circ$ の位置が最も効果的であり, またその太さ d はその位置における境界層の厚さの 0.03 倍程度のものでも十分乱流促進の効果があるという。

方向不定の流れの中に置かれた円柱に対して乱流促進の効果を期待するためには, 円周を6等分した位置に Wire を取付けるのが適当と思われる。そこで本実験では円周に 60° 間隔に Wire をとりつけ, これに第7図に示すような2つの方向から流れをあてた場合について実験を行った。

直径 500 mm の円柱の前端母線から 60° の位置における境界層の厚さ δ は R 数 1×10^5 に相当する速度では 3 mm 程度となるので d としては 1 ϕ , 3 ϕ , 5 ϕ を選んだ。 d/δ はそれぞれ 0.3, 1.0, 1.7 となる。

3.4 装置

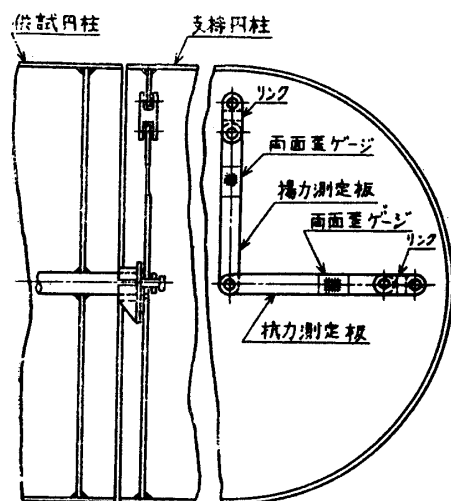
水槽の幅の長さの円柱を3つに分割し, 両側の 1 m 225 の円柱は, 車体から整流覆をもった支持装置で所定の



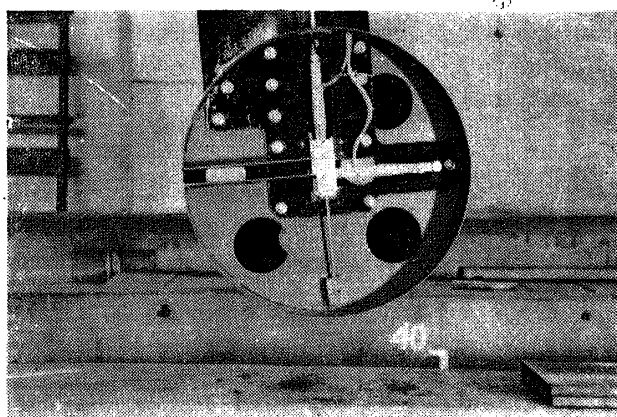
第 2 図

深さに, 1 m 220 の間隔をおいて取付ける。この間に長さ 1 m 200 の供試円柱を後方から挿入して, その中心軸を両側の固定円柱に設けた軸受部にはめた後 (第2図), 押え金で軸受部に固定する。軸受部はそれに設けたピンに取付けられた水平, 鉛直両方向のリンクで支持されていて, 円柱に働く抵抗および揚力はそれぞれこのリンクにかかる (第3図, 第4図)。リンクのうちの測定部は水平方向には磷青銅材を, 鉛直方向には感度を高めるためにヒドロナリウム材を用い, 一部を薄く仕上げて, その両面に2軸ゲージをはり, これを両舷で Double Bridge に組んで用いた。これに

よつて引張, 圧縮には十分の感度をもち, 曲げによる影響を少くし, かつ十分な温度補償が得られた。



第 3 図



第 4 図

測定板は組立前に検定を行い, また実験状態でも検定を行つたが, 両者はよく一致し, 60 kg までの力に対して安定な直線性の指度を与えた。記録は歪計の出力をペン書オツシロに入れて行つた。

4. 実験結果

4.1 実験結果の修正法

実験結果をのべるにあたって, まず得られた結果に対する修正法について述べる。

水槽の幅 3 m 450 に対して供試円柱の長さは 1 m 200 であるから, 水槽の幅による影響は小さいものと考え

る。水槽の水深は 2 m 400 で円柱の直径が 500 であるから, 円柱の投影面積と水槽の断面積との比が 0.208 とな

るので、この影響はかなり大きいものと思われる。二次元流れに対する側壁影響（水面および底面の影響）としては、無限に広がる流れの中にある場合に比べて、物体の周囲の流れは早くなり、受ける抵抗も大きくなる⁹⁾。

Fage の実験結果に従って本実験の 2m 400 の水深の中央においた円柱について、 $U_m/U_{m\infty}=m_1=1.038$ とした。抵抗については Fage によれば側壁の存在によつて $D/D_\infty=n$ として

$$n=1+2.33(m_1^2-1)$$

の関係が成立するという。 $m_1=1.038$ のとき $n=1.19$ となる。

次に自由表面の存在によつて造波抵抗が加わる。本実験における程度の没水深度と水深があれば、この造波抵抗に対する底面の影響は無視することができる¹⁰⁾。実験範囲の速度に対して造波抵抗を計算すると、それが計測される抵抗の 1% 以下の小さな値で、無視することができる。

実験で得られた抵抗、揚力は次の関係式を用いて純粋の二次元流れにおける値に換算し、これにもとづいて曳航速度 U_0 を用いて、それぞれの係数 C_D , C_L を算定した。

$$D_\infty=D/n, \quad L_\infty=L/n$$

別に揚力の抵抗に対する比 $C_R=L/D$ として直ちに求まる。Strouhal 数については、曳航速度 U_0 のとき、円柱背後の渦の生成位置での平均流速が $m_1 U_0$ になるものと考え

$$S=NT/(m_1 U_0)$$

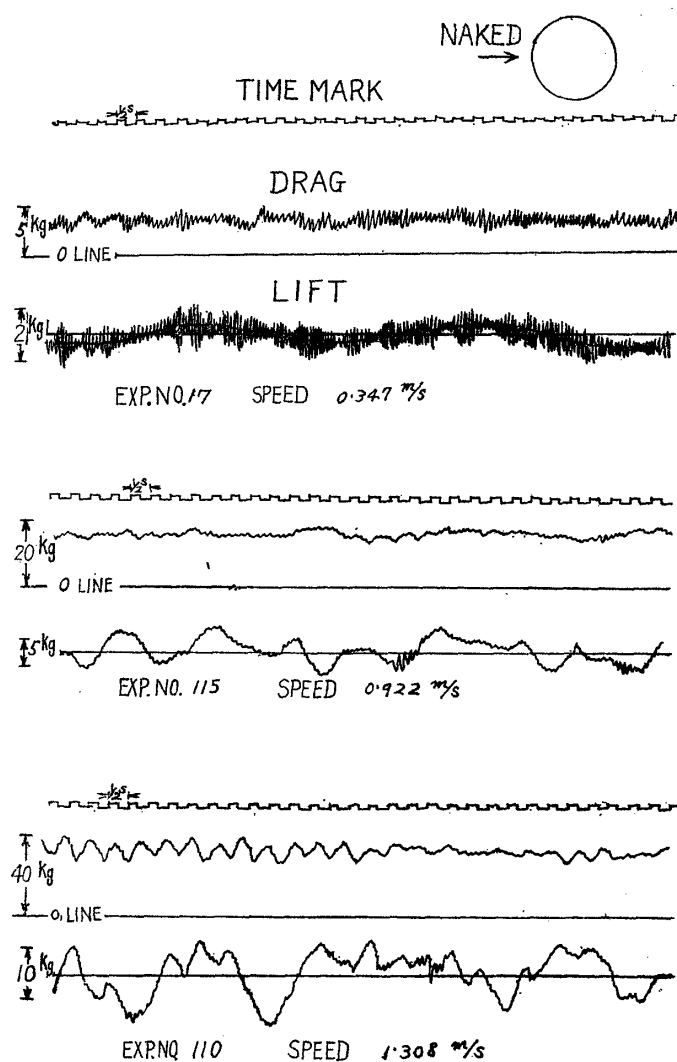
として求めた。

4.2 実験結果

得られた実験記録の一例を第 5 図に示した。このうちで実験番号 17 の揚力の記録にあらわれた高い振動数の細かい振動は曳引車の車体の振動を拾ったものである。また実験番号 110 のように速度が大きくなると、曳引車の能力に対して極めて大きな抵抗が働くため、曳引車の速度に小さい脈動を生ずる。このような場合を除けば、円柱に働く抵抗は揚力の変動にもかかわらずほぼ一定の値を示す。揚力は R 数 $\leq 1 \times 10^5$ までは周期的な規則正しい変動を示すが、 R 数の上昇と共に周期も振幅も次第に規則性を失う。ここではこのうちの比較的規則的なものの振動数から S を求めた。これを統計的に処理することも試みたが、航走距離が短いため意味のある結果が得られなかった。Trip Wire をつけない裸の円柱に対する結果をまとめたものが第 6 図である。また 1φ, 3φ, 5φ の Trip Wire を取付けた場合の結果を第 7, 8, 9 図に示した。この図で実線と破線はそれぞれ第 7 図に示した Trip Wire 取付け位置に対するものである。第 10 図は第 6~9 図の結果をまとめたものである。

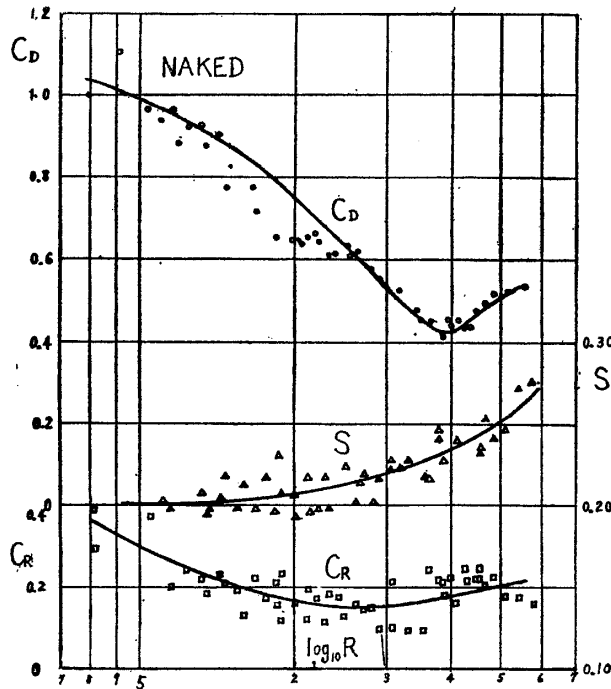
4.3 実験結果の検討

球の圧力抵抗については水槽実験と風洞実験との間には本質的な差異はみとめられず、 R 数によつて統一される。ただ球、円柱等に関する実験結果はその使用した風洞、水槽によつて、また同じ風洞においても使用した模

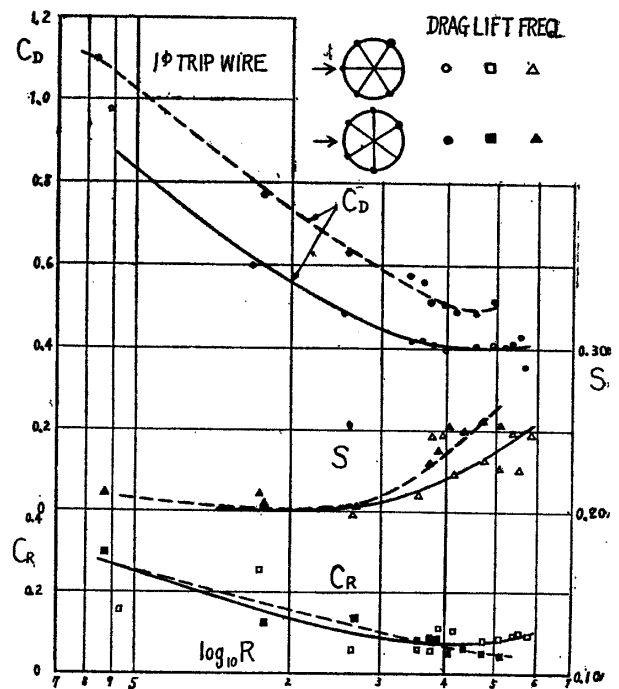


第 5 図

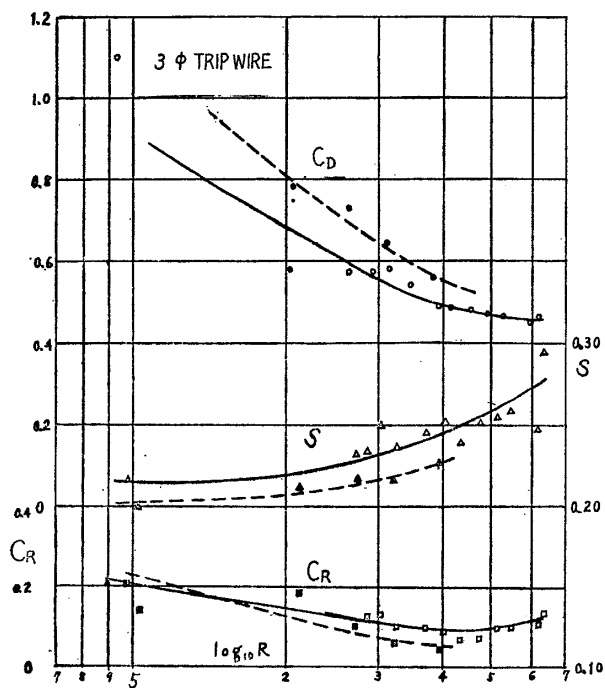
型の寸法によつて変化があらわれる¹¹⁾¹²⁾。これらの原因のうち最も重要なものは風洞あるいは水槽の乱れの相異であるといわれる。水槽における乱れは航走間隔、模型の形状、大きさ、速度等によつて左右される¹³⁾。本実験においては模型が極度に大きいこと、期日の関係上航走間隔が5~10分程度と短かつたことなどのために引続いて航走する際の残留乱れがかなり大きかつたのではないかと考えられる。



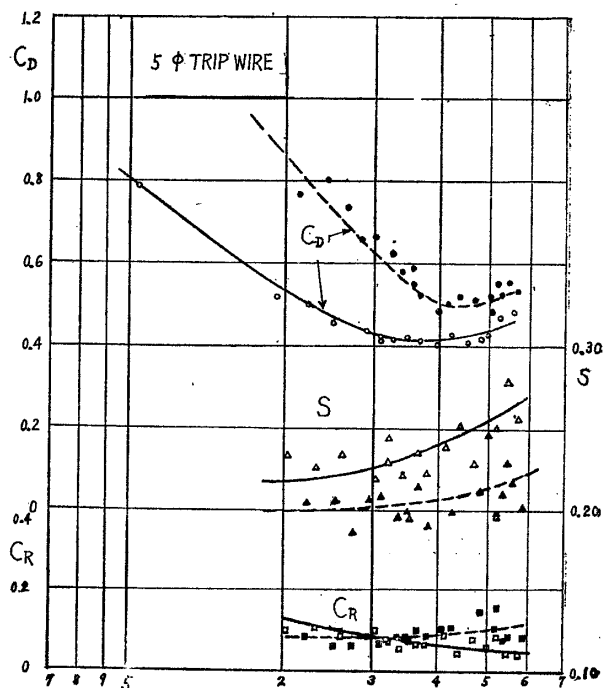
第 6 図



第 7 図



第 8 図

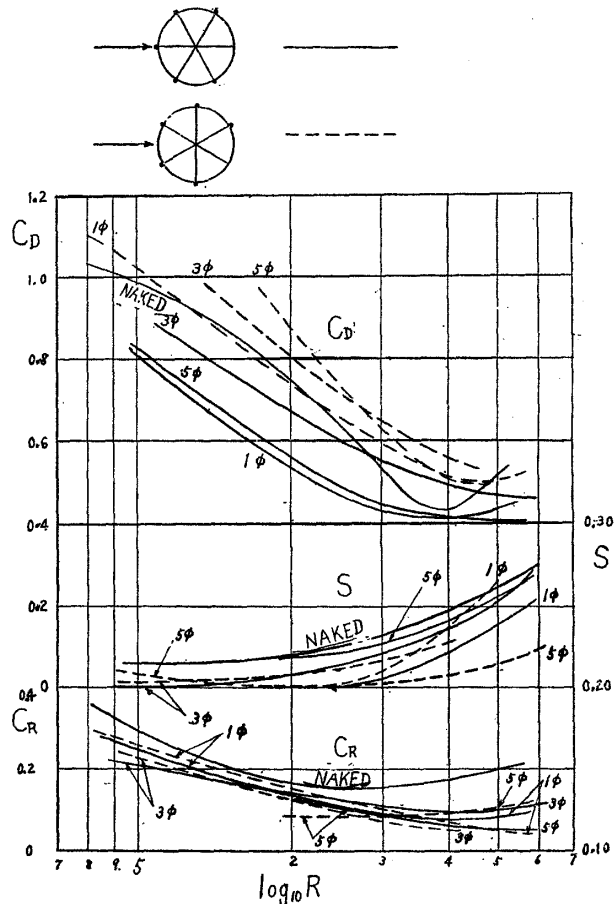


第 9 図

以上のことを念頭において実験結果を検討する。第1図は従来の実験結果と今回の結果とを比較したもので、Strouhal 数の変化の状態は Relf の実験とよく一致し、渦の発生と揚力の変動とが一致することを示している。遷移 R 数も従来の実験とほぼ同じ位置にあるが、この R 数の前後における C_D の変化は従来の結果よりも小さい。

またこの実験の結果では C_L は $R \approx 8 \times 10^4$ における 0.3 という値から R 数の上昇につれて小さくなり、遷移 R 数およびそれを超えた処ではほぼ 0.2 となる。従つて遷移 R 数を超えた乱流剥離の状態では C_L はほぼ 0.1 というかなり小さい値となるものと考えられる。 C_L については従来 Den Hartog⁽¹⁾, Fung⁽¹⁴⁾ 等が $C_L \approx 1.0$ と推定しているが、これにくらべてかなり小さい値である。最近 Ozker および Smith⁽¹⁶⁾ は $C_L \leq 0.2$ と述べているが、本実験の結果はこれとよく一致する。

円柱に Trip Wire をつけた場合については、適当な位置（流れの方向と 60° の位置）につけた Wire による乱流促進の効果は確かに認められるが、風洞実験⁽¹²⁾ におけるほど顕著ではない。これは前述のように水槽の残留乱れの影響が既に大きく作用しているためと思われる。



第 10 図

5. 弾性支持された円柱に対する流体力について

以上述べたのは円柱を固定した場合であるが、円柱が弾性的に支持された場合は、円柱の振動によつて境界層内の流れが固定された場合とは異なつてくることが考えられるので、最後にこのことについて簡単に触れたい。これについては低い R 数に対しては河本俊平氏⁽⁹⁾ が水槽で実験を行い、高い R 数（最大 R 数 1.8×10^6 ）に対しては藤野勉氏⁽¹⁵⁾ が風洞で実験を行つている。

低い R 数においては円柱の固有振動数と円柱を固定したと考へた場合の渦の発生対数とが一致した場合は、円柱の運動が渦の発生に影響を与え自励振動的な現象が起る。

遷移 R 数を超えた処では、固定した円柱では後流にもはや規則的な渦の生成は認められなくなり、これに働く揚力も不規則な変動を示すことは既に述べたが、弾性的に支持された場合は、風速と無関係に円柱の固有振動数で振動し、その振幅は共振の現象を示した。その最大振幅を与える風速について求めた Strouhal 数は 0.17 となつた。第1図の OUWT の実線はこの結果を示したものである。そして共振の場合も、後流中に置いた熱線風速計によれば、気流の変動はかなり不規則性が強いという。藤野氏はこの現象を、円柱が風による流体力のスペクトル成分のうち、自己の振動数に一致したものを選択して、それに共振するものとして説明している。この遷移 R 数を超えた領域における共振の現象の解明には統計的な取扱いを必要するものとする。その完全な解析は今後に残された問題であるが、これを便宜上単純な強制振動と考えると、 $C_L \leq 0.1$ と推定される。これは大形煙突の振動の計測結果⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ からほぼ妥当な値と考える。

6. 結 語

この実験のために設計した諸装置は実験中何らの支障を生ずることなく、この種の実験装置として適当であつた。

本実験によつて円柱に働く流体力を直接動的に計測することができ、渦の生成と揚力の変動とが相対応することを確め、交番揚力の振動数と R 数との関係を求め、特に揚力変動の状態を記録し、その振幅について求めた

揚力係数 C_L が乱流剝離の状態では 0.1 というかなり小さな値をとるらしいことをほぼ明らかにすることができた。ただし、本実験において模型寸法の決定、曳航方式の検討、力の計測方式などあらかじめ準備すべき点についてはほぼ十分なことがなし得たように思われるが、実験の実施に際し、ゆるされた航走日数が少く、そのため毎回航走間隔を最大 10 分以内に限つたのは明らかに失敗であつた。使用模型の大きさからいつても航走間隔は最少 30 分、できれば 120~240 分位の長い時間間隔をおくことが必要と考えられる。近い将来許されれば、この点に関する再実験の機会を得たいと考える次第である。

緒言で述べたように、この実験は大形煙突建造の基礎資料を得るために、三菱造船広島造船所がその計画を提案され、同本社技術部の依頼によつて東京大学船型試験水槽において昭和 30 年 12 月 23 日から 31 年 1 月 7 日の間にわたつて実施されたもので、この間にあつて種々御配慮を賜つた関係各位に深甚な謝意を表する。特に東京大学乾崇夫助教授には終始熱心な御指導と御鞭達を賜り、水産庁漁船研究室の横山信立技官には計測器の借用について特別な御厚意にあずかつた。また実験の実施にあつては水槽職員各位、学生高野健、田辺藤男の両君の御協力をいただいた。記して深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) J. P. Den Hartog : 機械工学における最近の振動問題, 日本機械学会誌, 昭和 30 年 7 月
- (2) 木下, 広渡 : Proc. 5th Japan Nat. Congr. for App. Mech. (1955)
- (3) 広渡智雪 : Proc. 6th " " (1956)
- (4) 中村 清 : Proc. 4th " " (1954)
: Proc. 5th " " (1955)
: Proc. 6th " " (1956)
- (5) 河本俊平 : Proc. 5th " " (1955)
- (6) Relf, E. F. : The Frequency of the Eddies Generated by the Motion of Circular Cylinder through a Fluid, R & M 917
- (7) Schwabe : Ingenieur-Archiv 6 (1935)
- (8) Rosenhead, L. : The Kármán Street of Vortices in a Channel of Finite Breadth, Phil. Trans. Roy. Soc. 1929
- (9) Fage, A. : On the Two-Dimensional Flow past a Body of Symmetrical Cross-Section Mounted in a Channel, R & M (1223)
- (10) Sezawa, K. : Wave Resistance of a Submerged Body in a Shallow Sea
- (11) 徳川武定 他 : 水中を進行する球, 紡錘及類似形体の抵抗に関する実験について, 造船協会会報第 61 号, 昭和 12 年 12 月
- (12) Fage & Warsap : The Effects of Turbulence and Surface Roughness on the Drag of a Circular Cylinder, R & M 1283
Fage, A. : Further Experiments on the Flow around a Circular Cylinder, R & M 1369
Fage, A. : The Drag of Circular Cylinders and Spheres at High Values of Reynolds Number, R & M 1370
- (13) Macovsky, M. S. & Breslin, J. P. : Model Turbulence, Taylor Model Basin Report 726, Sept. 1950
- (14) Fung : The Theory of Aeroelasticity, Wiley 1955
- (15) 藤野, 高幣, 中川, 政木 : 風による煙突の振動, 日本機械学会九州支部講演会, 昭和 32 年 6 月
- (16) Ozker, M. S. & Smith, J. O. : Factors Influencing the Dynamic Behavior of Tall Stacks Under the Action of Wind, ASME, Nov. 1955
- (17) 藤野, 中川, 高幣, 有田 : 風による煙突の振動, 第 7 回応用力学連合講演会に発表の予定, 昭和 32 年 9 月