

円柱群に作用する流体力の実験的研究 第1報

Experimental Study on Flow Forces acting on Circular Cylinders, 1st Report

—流れに直角に置かれた2円柱および1列円柱列まわりの流れのパターン—

—Flow Patterns on Two Cylinders and a Row of Cylinder Cascade Normal to Fluid Flow—

小林 敏雄*・佐賀 徹雄*

Toshio KOBAYASHI and Tetsuo SAGA

1. ま え が き

最近、原子炉における熱交換器中の円管の振動破壊の事故とか管群を内包するダクト内に大きな騒音が発生する事故などが起こり、その原因解明のため流体の自励振動を含む非定常流の研究が要望されている。このうち円柱まわりの流れの場合のように、はく離域の不安定性による非定常流は種々のトラブルの原因と考えられ、円柱に作用する変動揚力の研究¹⁾²⁾など多くの研究がなされているがウェークの周期的変動の機構などは未だ明らかにされていない。円柱群をよぎる流れでは各円柱のはく離域の相互干渉が生じ、これが流れの状態をさらに複雑にし熱交換器中の円管群の振動問題を難かしくすると考えられるが、この現象に関する流体力学的な研究はまだ十分でない³⁾。

本研究は、はく離域の相互干渉が起こるような円柱群

について円柱に作用する流体力と流れの状態の関係を系統的に明らかにすることを目的としている。ここでは流れに直角に置かれた2円柱まわりの流れ、およびピッチ・直径比(円柱中心間距離と直径との比)が小さな1列等間隔円柱列をよぎる流れにおいて、円柱の間隔と流速に応じて円柱まわりに幾つかの流れのパターンが存在し、それが円柱に作用する流体力やその変動分の振動数と位相に影響を与えていることを明らかにする⁴⁾。

2. 実験装置および測定方法

本研究では流体として水および空気を使用した。図1に回流水槽実験装置を、図2に風洞実験装置を示す。水槽実験では各円柱に作用する流体力を抵抗線ひずみゲージを用いて直接に測定し、同時に電磁オシログラフによって流体力の変動分の振動数と位相とを記録している。図3に供試円柱を示す。二円柱の場合、円柱間隔を自由

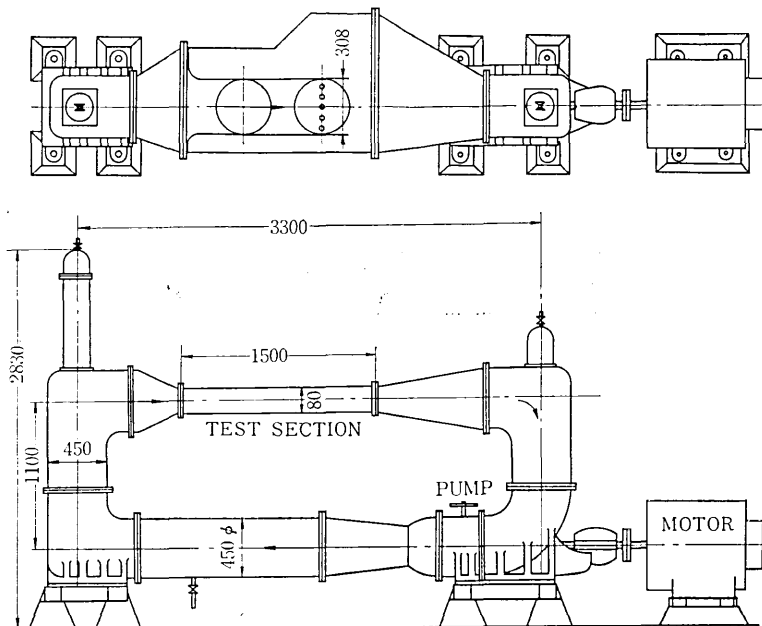


図1 回流水槽実験装置

* 東京大学生産技術研究所 第2部

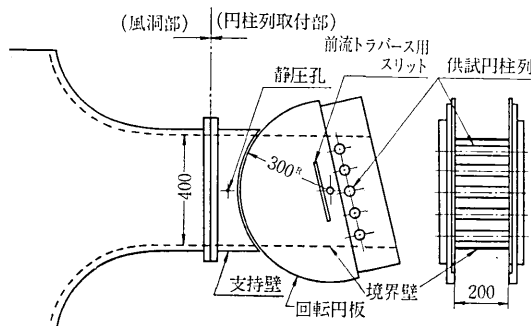


図 2 風洞実験装置

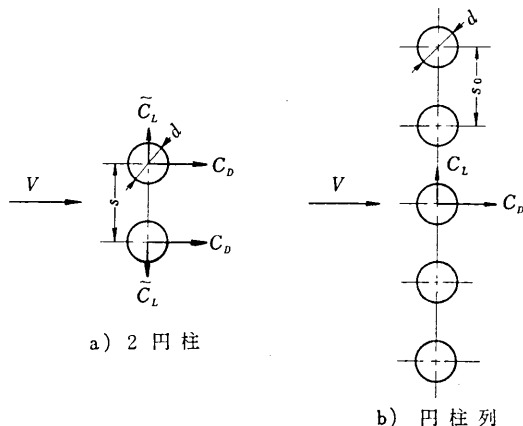


図 4 円柱配列

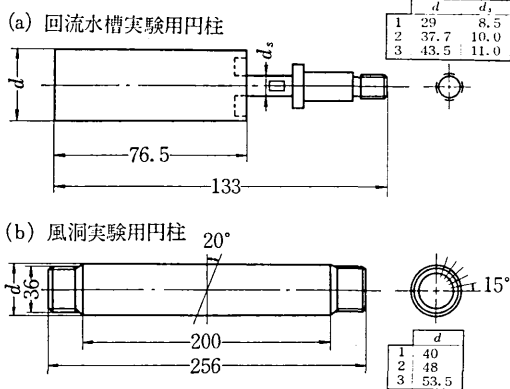


図 3 供試円柱

に変化できる。水槽実験において円柱列のピッチ・直径比は 2.0, 1.54, 1.33 で実験レイノルズ数 (円柱直径基準) は $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ である。実験中にゲージ貼付部が水中にあるためゲージおよびリード線の防水, 絶縁が重要な問題となったがエナメル塗料, エポキシ樹脂系接着剤およびゴム系接着剤の併用によりこの問題は解決された。一方, 風洞実験では円柱表面上の圧力分布および円柱後方のウェークの速度分布を測定するとともに, 流れの様子を観察している。円柱列のピッチ・直径比は 2.0, 1.67, 1.50, 実験レイノルズ数は $4.5 \times 10^4 \sim 5.4 \times 10^4$ である。これら実験装置の試験部の速度分布と静圧分布, あるいは単独円柱の抗力係数と圧力分布を測定し, 従来のデータと比較して装置および測定方法の信頼性を確かめている。このうち回流水槽実験装置について単独円柱の抗力係数が急激に変化するレイノルズ数 (臨界レイノルズ数) が従来のデータ⁵⁾ と比べて低い値となっているが, これは円柱のアスペクト比が小さいこと, 流れが回流しているために主流の乱れが大きいことが影響しているものと思われる。本装置の主流の乱れは流量およびポンプ回転数によって変化すると考えられるが本実験では乱れの測定は行っていない。本文中および図中に現われる記号の主なもの次のとおりである (図 4

参照)。

- d : 円柱直径, V : 主流速度
- s : 隣接する 2 円柱の中心間距離
- s_0 : 等間隔円柱列におけるピッチ
- C_D, C_L, C_p, R_e : d と V を基準とする抗力, 揚力, 圧力係数およびレイノルズ数
- V^* : 修正速度, $V^* = V \cdot s_0 / (s_0 - d)$
- $C_D^*, C_L^*, C_p^*, R_e^*$: d, V^* を基準とする各係数とレイノルズ数

3. 流れに直角に置かれた 2 円柱まわりの流れ

円柱群における各円柱の相互干渉を考えるとときその基本となる円柱配列は 2 円柱であろう。そこで, まず 2 個の円柱が互いに接近し流れがそれと直角にあたる場合について作用する流体力と流れの状態との関係を実験的に求めてみた。図 5 に揚力係数の測定結果を, 図 6 に円柱

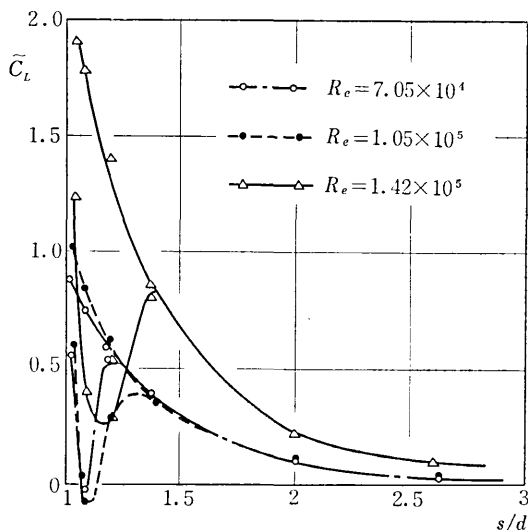


図 5 揚力係数 (2 円柱)

研究速報

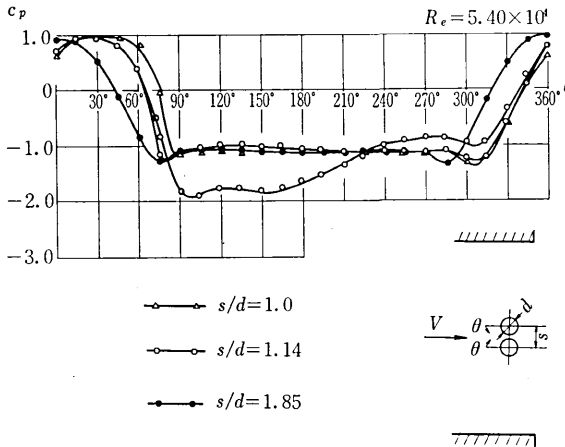


図6 円柱まわりの圧力分布

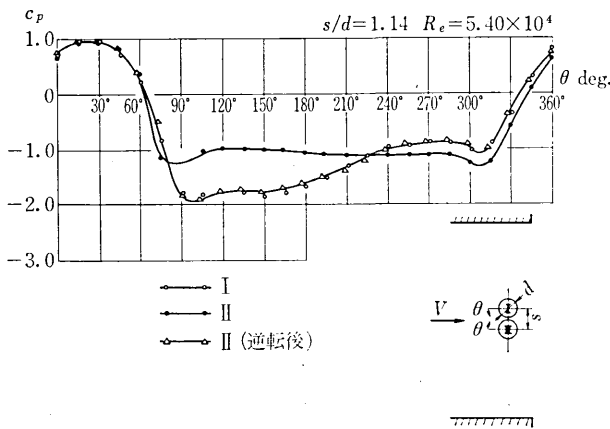


図7 圧力分布の逆転(2円柱)

まわりの圧力分布の測定結果を示す。図5において、たとえば $Re=7.05 \times 10^4$ のとき $1 < s/d < 1.2$ の範囲では両円柱に作用する揚力係数の値は異なる。しかもそれらの値は flip-flap 的に互いに逆転する。この流れによる特徴的な圧力分布を図7に示す。すなわち Re と s/d の組合わせによっては同一条件で2種類の流れが存在し、それらが flip-flap 的に逆転することが確かめられた。これらの図および流れの観察結果から2円柱まわりには s/d および Re に応じて図8に示すように

- (2) 対称逆相流れ
- (2) 非対称同相流れ
- (3) 対称同相流れ

と名付ける3種類の流れ(以下それぞれを第1, 2, 3種の流れと呼ぶ)の存在が確かめられる。第1種の流れは両円柱間の間隔が大きいときに起こり、流れのパターンは両円柱の中心を結ぶ線分の垂直二等分面(以下二等分面と呼ぶ)に関して対称である。この流れでは、はく離域の相互干渉は小さい。ところが両円柱が接近してくる

- (1) 対称逆相流れ
- (2) 非対称同相流れ
- (3) 対称同相流れ

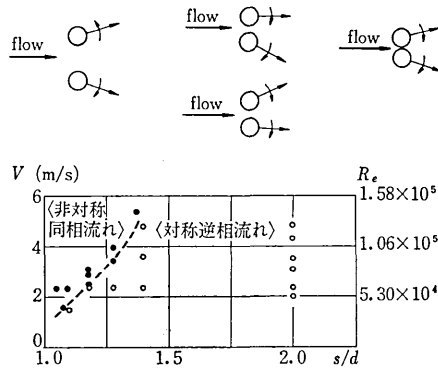


図8 3種類の流れのパターンと存在領域

と第2種の流れが起こる。この領域ではともに安定な2種類の流れが存在する。一方の流れのパターンから他方への移行はわずかな外的条件の変化で起こり、しかもこの2種類の流れのパターンは図7に示したように互いに逆転し合う。はく離の相互干渉はこの領域で特に大きい。第3種の流れは両円柱が接するか、あるいは両円柱間に発達するそれぞれの円柱に沿う境界層が接するとき起こる流れで、両円柱に作用する揚力係数や圧力分布は2等分面に関して対称である。この流れでは両円柱のはく離域は合体し、1物体のはく離域として挙動する。図8に第1種および第2種の流れの起こる範囲を s/d と V (Re) の関係で示す。両円柱に作用する流体力の変動分の振動数と位相については、図9に示すように第1種の流れの場合には V, d および振動数 f によって定まる Strouhal 数 ($St=f \cdot d/V$) が 0.2 程度

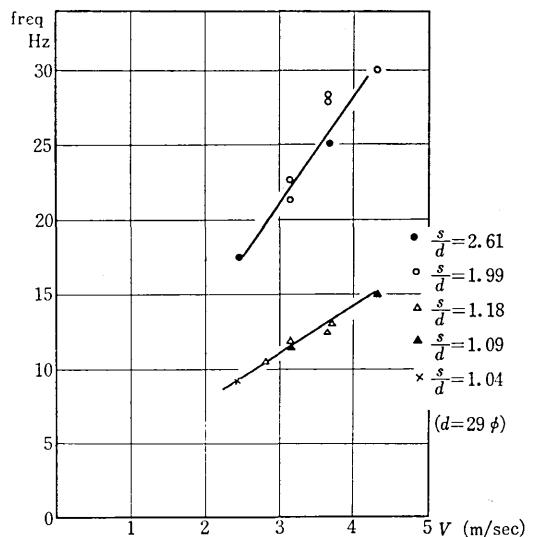


図9 流体力の変動分の振動数(2円柱の場合)

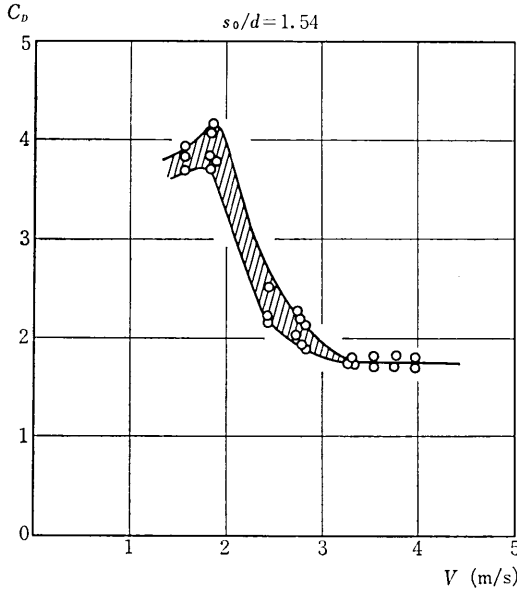


図 10 等間隔円柱列の抗力係数

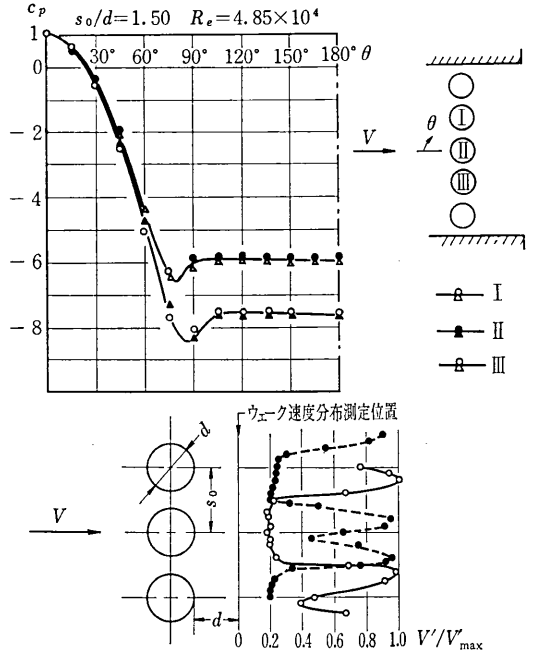


図 12 等間隔円柱列の圧力分布とウェーク速度分布

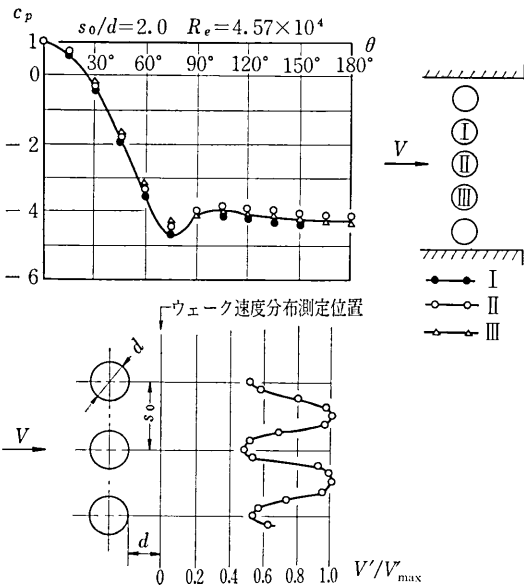


図 11 等間隔円柱列の圧力分布とウェーク速度分布

相」は流体力の変動分の瞬時的位相関係を意味するものである。

4. 等間隔円柱列をよぎる流れ

1 列等間隔円柱列に直角に流れが当たる場合、直径に比べて円柱間隔が十分大きいならば個々の円柱に作用する流体力は単独円柱の場合とほぼ同じであると予想される。しかし前述の 2 円柱の場合に s/d が 2 以下になると円柱相互の干渉が増大したように、等間隔円柱列においても s_0/d が小さくなると円柱相互の干渉が問題となってくる。等間隔円柱列の各円柱に作用する流体力を選移域を含む Re_c 数範囲で測定した結果を図 10 に、選移域以下の Re_c 数における円柱まわりの圧力分布とウェークの速度分布を図 11 と図 12 に示す。図より等間隔円柱列の場合にも s_0/d が小さければ円柱列両端の境界条件に差がなくても円柱をよぎる流れは必ずしも 1 種類ではなく、ともに安定な 2 種類の流れが存在することがわかる。すなわち図 11 に示すように s_0/d が大きいうちは各円柱まわりの圧力分布は同一でありウェークの速度分布は周期的である。ところが s_0/d が小さくなると図 12 に示すようにウェークの周期性は崩れ中央円柱まわりの圧力分布とその両隣の円柱まわりの圧力分布は同一でなくなる。しかも外的条件のわずかな変化によって円柱まわりの流れは変化した圧力分布は逆転する。この 2 種類の流れは修正速度 V^* を基準とする修正抗力係数 C_D^* と修正レイノルズ数 Re^* の関係からみて Re^* が

の値となり、変動流体力の瞬時的変動方向は互いに逆方向である。これに対して第 2 種および第 3 種の流れの場合に S_c は約 0.1 で変動方向は同方向である。ここで特に第 2 種の双安定な流れの場合について、一方の流れから他方の流れへの flip-flap 的移行が $S_c=0.1$ に対応する振動数で起こるのではないことに注意されたい。前述の 3 種類の流れにおける「対称、非対称」は両円柱に作用する流体力ベクトルの時間平均値が両円柱間の 2 等分面に関して対称であるか否かを意味し、「逆相、同

研究速報

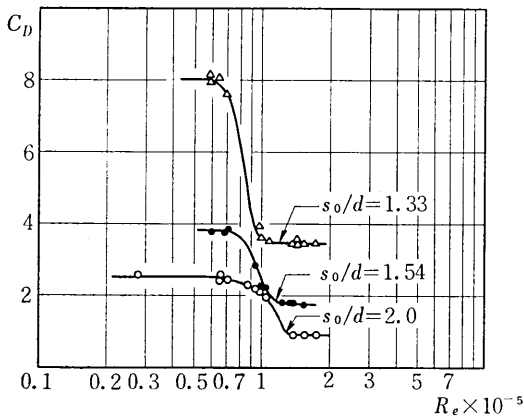


図 14 抗力係数のピッチ・直径比による変化

遷移域にあるときのみ起こり、円柱に沿う境界層の性質が円柱ごとに異なるために起こるものと思われる。

図 13 に s_o/d を変化させたときの C_D の平均値と R_e の関係を示す。これを基準速度として V^* を用いて整理し直すと図 14 のようになる。図より s_o/d が小さいとき遷移域を含む広い速度範囲で C_D^* と R_e^* の関係が s_o/d によらずに表わされることがわかる。

5. ま と め

近接する 2 円柱や円柱間隔の狭い等間隔円柱列に流れが直角にあたるとき、円柱間隔と速度に応じて円柱まわりに双安定な流れが存在し、それが円柱に作用する流体力に特徴的な変化をひき起こし、従来の抗力係数等のバラツキ⁶⁾の原因となることを明らかにした。同時に円柱まわりの各流れのパターンと変動流体力の振動数および位相との関係を明らかにした。また修正速度の導入によ

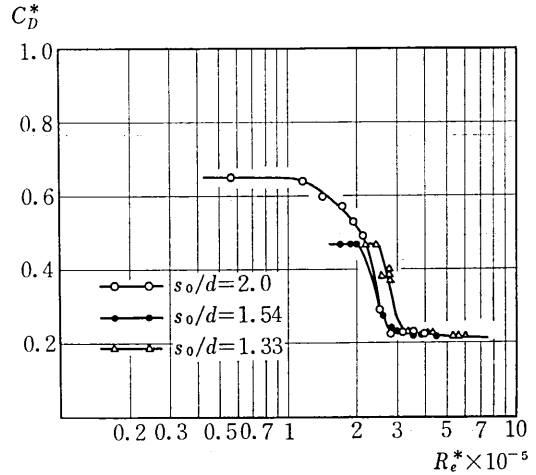


図 14 修正抗力係数と修正レイノルズ数

り抗力係数とレイノルズ数の関係が円柱間隔によらずに表わせることを示した。今後円柱の配列を変えて研究を進めることを予定している。

終りにいろいろご討論ご指導下さった第 2 部石原智男教授、東京大学工学部白倉昌明教授に感謝します。

(1971 年 6 月 18 日受理)

文 献

- 1) R. E. D. Bishop & A. T. Hassan, Proc. Roy. Soc., Ser. A, 277 (1964)
- 2) A. W. Marris, Trans. ASME, Ser. D, 86 (1964)
- 3) H. M. Spivack, J. Aeron. Sci., 13 (1946)
- 4) 小林: 機械学会講演論文集, 700-11 (1970)
- 5) H. Schlichting, Grenzschicht-Theorie, G. Braun, Karlsruhe (1951)
- 6) D. Biermann & W. H. Herrnstein, Jr., NACA Rep. No. 468

