

直列2円柱に作用する流体力

Fluid Forced acting on Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement

山口大学工学部

斎藤 隆 Takashi SAITOU

羽田野 袈裟義 Kesayoshi HATANO

奥野 雅晴 Masaharu OKUNO

Experimental investigations on the fluid forces acting on two circular cylinders in tandem arrangement were carried out. The Reynolds number and the distance between the cylinders were varied in the range $1 \times 10^4 < Re < 8 \times 10^4$ and $1 \leq l/d \leq 6$. As a results of systematic investigation on drag and lift forces measured at the same time, fluctuation of fluid forces are divided into four patterns according to their characteristics. It was found that the intermittent changes of time-mean drag and intensity of fluctuating drag and lift occur in the range $l/d=3 \sim 4$ at front cylinder and $l/d=2.5 \sim 4$ at rear. This discontinuous changes of fluid forces is caused by the abrupt change from one stable flow pattern to another. The results were summarized in several figures from which one can obtain the time-mean and the intensity of fluctuating drag and lift and the Strouhal number.

KEY WORDS : Two circular Cylinders, Tandem Arrangement, Strouhal Number, Fluctuating Fluid Forces, Drag and lift Coefficient

1. 序 論

近接した柱状体周りの流れは単柱体の場合と比較して著しく異なる。この様な流れは熱交換器、多脚煙突、化学プラント、吊橋の主塔などにみられ、装置の高速化ならびに構造物の長大化に伴って、それらに生じる空力不安定現象が問題となっている。その要因となる変動流体力についての解明が強く望まれている。

基礎的な配列の一つである直列2円柱に関しても数多く行なわれ^{(1)~(3)}、Zdravkovich⁽⁴⁾によって総説され、円柱直径に対する円柱中心軸間距離 $L/d = 3.5 \sim 3.8$ を境にして2円柱周辺の流況が急変し、これに対応して2円柱の抗力係数やストローハル数が急変することはよく知られている。その後、岡島⁽⁵⁾は亜臨界域から極超臨界域に及ぶレイノルズ数での実験を行ない、亜臨界域ならびに極超臨界域では臨界軸間距離においては抗力係数、ストローハル数が階段的に急変するが、超臨界域においては抗力係数、ストローハル数が軸中心間距離により大きく変らなく、下流側の抗力係数が上流側のその値より大きい場合もあることを明らかにしている。さらに岡島ら⁽⁶⁾は円柱軸間距離が大きな場合についても実験を行ない、円柱軸間距離が大きい場合には円柱に当たる流速でストローハル数値を修正するとほぼ単円柱の場合に一致することを明らかにしている。石井ら⁽⁷⁾は両円柱間に剝離域の形成される低レイノルズ数における実験を行なっている。坂田ら⁽⁸⁾、Arieら⁽⁹⁾は円柱からの渦放出に伴う円柱表面変動圧力の位相平均を求め、これにもとづいて2円柱に作用する変動流体力とその位置関係を検討することで変動流体力の挙動を把握することを試みている。五十嵐^{(10) (11)}は円柱軸間距離をこまかく変化させた実験によって、円柱軸間距離が臨界間隔以下でも円柱間隔とレイノルズ数によってフローパターンが変化することを見出し、詳細なフローパターンの分類を行ない、双安定流れにおいてはフローパターンの変化に伴い円柱表面圧力が間欠的に変化することを明らかにしている。坂本ら^{(12) (13)}は直列2角柱に作用する変動流体力を固有振動数 1 KHzの流体力測定装置で測定し、臨界間隔において変動流体力が間欠的に変化することを見出し、その周期性についての検討を行なっているが、一様流中に置かれた直列2円柱に作用する変動流体力を直接測定した結果はみうけられない。

本研究は、直列に設置された2円柱に作用する流体力の変動挙動と2円柱周辺の流況との関連を明らかに

2. 実験装置および方法

円柱のアスペクト比が小さい場合、2次元的な流体力を測定するため端板が用いられる。本小型風洞では技術的に不可能であるので、流体力測定円柱とダミー円柱間に0.1mmの間隔を用いる手法を考案した。図-2に示す圧力測定円柱を用いて、ダミー円柱の厚さを変えて円柱軸方向の圧力分布を測定したものが図-4である。ダミー円柱の厚さを円柱位置での床面に沿う境界層厚さの約3倍にすると、圧力測定用円柱の表面圧力は軸方向に様な分布となっている。この場合における円柱周りの圧力分布を測定した結果が図-5である。図中には円柱アスペクト比が十分大きい場合の結果が比較のために記入してある。図より、圧力測定円柱に作用する流体力には側壁の効果が除去されていると考えられる。

る。この条件ならびに上述した床面の効果の除去を考慮して、流体
力測定円柱の大きさを、直径 5cm、
長さ 6cmと定めた。

圖-1 風洞内压力分布

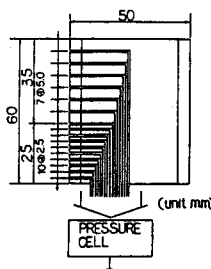


图-2 压力测定凹柱

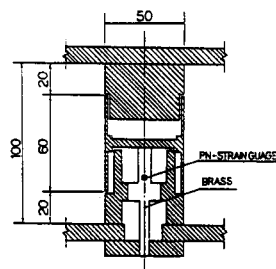


图-3 流体力測定装置

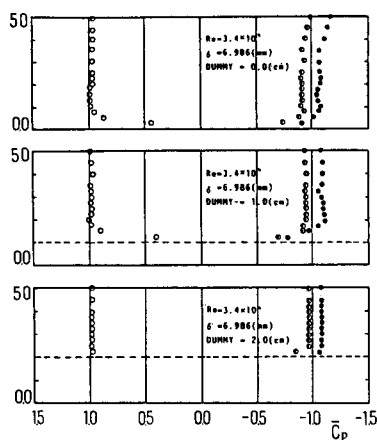


图-4 軸方向表面压力分布

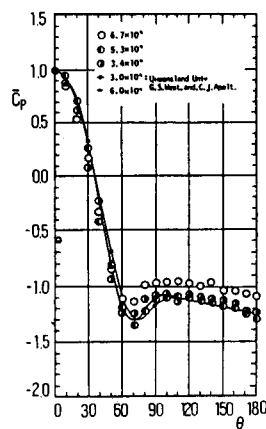


図-5 円柱周り圧力分布

3. 実験結果とその検討

3・1 流体力の変動パターンとその出現条件

両円柱に作用している抗力 (FD) と揚力 (FL) の典型的な変動波形とその出現条件を示したものが図-6である。同図上方に6通りの変動波形を示しているが、基本的には以下で説明する4つの変動パターンに分類することができる。すなわち、

- A：両円柱から剝離渦の放出が行なわれていて、両円柱から放出されている剝離渦が複雑な相互干渉をしていて、両円柱間の流況が渦放出の周期に較べ長い周期で変化していることが変動波形から認められる。
- B, C：揚力ではあまり目立たないが、抗力に瞬間的に大きな変動がみられるパターンである。この場合の流況をみると、前円柱からの剝離せん断層が後円柱に再接して、両円柱間に剝離領域を形成しているが、瞬間的に剝離領域から流体塊が放出され、その瞬間に大きな抗力が起きる。BとCとの違いはこの瞬間的な流体塊の放出が群発的であるか、間欠的であるかである。
- D, E：きわめて特異な変動パターンである。時間平均した揚力の値は変わらないが、抗力の時間平均値が間欠的にステップ状に変化し、これと連動して抗力、揚力の変動値がステップ状に変化する。このような流体力の変動挙動は坂本ら⁽¹³⁾が臨界距離における直列2角柱において、また揚力の変動挙動と類似の変動パターンを五十嵐⁽¹⁰⁾が直列2円柱の円柱表面圧力において見出し、図-7に示す2つの流動パターンが間欠的に繰返されることによると指摘している。図-7は流況の可視化と流体力の測定を同時に行ない、両状態における抗力のパワースペクトルを計算した結果である。両円柱間に安定な剝離領域が形成されている場合、剝離せん断層の不安定に起因するものではないかとみられる高周波の抗力変動成分が卓越していることが注目される。
- F：両円柱間に形成されている剝離領域がきわめて安定した状態にあって、流体力の変動強さがほぼ一定している。五十嵐⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾は円柱中心軸間距離 $L/d = 1.2 \sim 1.8$ (L ：円柱中心軸間距離、 d ：円柱径)、レイノルズ数が $Re < 3.1 \times 10^4$ の範囲では、下流側円柱後流の速度変動パワースペクトルのピークが不明瞭な不安定領域が存在することを指摘しているが、これについては今後の課題とする。

図-7において、B~Eの特異な変動波形が出現する条件をみると、前円柱では相対円柱軸間距離 L/d が3~4の範囲であって、従来から指摘されている抗力係数、ストローハル数が跳躍する臨界距離に対応している。一方、後円柱では、この範囲がより小さい相対軸間距離にまで広がっていて、この広がった

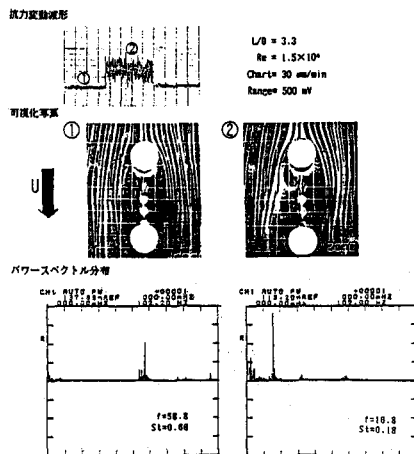


図-7 抗力変動特性と流況

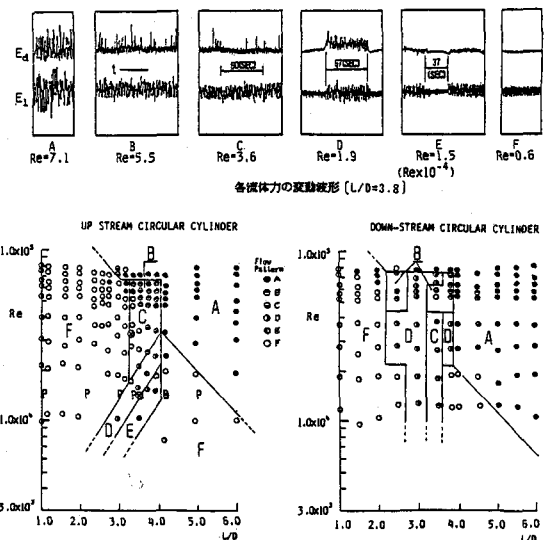


図-6 流体力の変動パターンと出現条件

範囲では後円柱の抗力係数がほぼ零となる範囲で、Kink現象がみられる範囲に対応している。また、レイノルズ数が $Re > 8 \times 10^4$ では、このような特異な流体力の変動パターンがみられなくなっている。岡島⁽⁵⁾は、高レイノルズ数の実験によって、超臨界域では抗力係数、ストローハル数は L/d によって大きく変わらなことを、さらに岡島⁽⁵⁾は粗面円柱では表面粗さによって臨界値が低下することを明らかにしている。本研究では、亜臨界域を対象としているが、可視化のため黒色ラッカーを円柱表面にスプレー塗布しているため、詳細な表面粗度による検討を必要とするが、本実験で用いた円柱は岡島らの用いた表面粗度値がほぼ一致しているとみられ、臨界値が $Re = 7 \sim 8 \times 10^4$ 程度に低下していて、岡島らの実験と定性的に一致している。

3・2 抗力係数

上・下流円柱の抗力係数と相対円柱中心軸間距離との関係をレイノルズ数をパラメーターとして描点したものが図-8である。同図中の実線は Zdravkovich の Review から両円柱の資料がある Bearmann et al、Suzuki et al、Tanida et al の実験結果を引用したものである。また、図中の破線は岡島⁽⁵⁾の亜臨界域 ($Re = 1.7, 2.5 \times 10^5$) における測定結果である。実験を行なったレイノルズ数の違いによるものとみられるが、抗力係数の値はかなり散乱しているが、本実験の描点はほぼ一致している。各実験条件に着目してみると、円柱間隔が臨界間隔より狭い場合には、前円柱の抗力係数はレイノルズ数が大きいほど大きい値となる傾向がみられる。円柱間隔が臨界間隔より大きい $L/d = 4 \sim 6$ では、両円柱の抗力係数は $Re = 7 \sim 8 \times 10^4$ において最大値をとる傾向がみられ、これに伴って抗力係数の跳躍の度合が Re 数によって異なることが認められる。

円柱間隔が $L/d = 1 \sim 1.5$ においての後円柱の抗力係数が各実験者によってかなりの違いが認められるが、五十嵐が指摘しているこの領域においてみられる不安定な流れに起因するものと考えられる。また $L/d = 2.5 \sim 3.5$ においても後円柱の抗力係数が散乱するのは、前述した特異な流体力の変動パターンがみられる範囲に相当し、抗力係数の値が小さいので、双安定流れの間欠性によるものと考えられる。

図-9は両円柱の抗力係数を相対円柱中心軸間隔をパラメーターにして Re 数に対して描点したものである。前円柱の抗力係数の Re 数による変化の挙動は円柱間隔が臨界間隔を境にして異なっている。円柱間隔が臨界間隔より狭い場合、 Re 数の増大に伴い抗力係数は急激に減少し、 $Re = 4 \sim 5 \times 10^4$ 程度で最小値となり、さらに Re が増加すると漸増する傾向がみられる。一方、円柱間隔が臨界間隔よりも大きい場合、実験精度上描点の散乱が大きい、 $Re < 3 \times 10^4$ ではほぼ一定値を示し、 $Re = 7 \times 10^4$ まで抗力係数は急激に小さくなり、さらに Re 数が大きくなるとほぼ一定値となるようである。

臨界間隔 ($L/d = 3.5 \sim 4$) を境にして、前円柱の抗力係数の差は Re 数の増加するにつれて大きくなっていき、 $Re = 4 \times 10^4$ で最も大きくなり、 $Re > 7 \times 10^4$ ではその差はほぼ一定となっている。岡島の臨界域近くの亜臨界域での抗力係数の値が Re 数によらない結果と一致している。

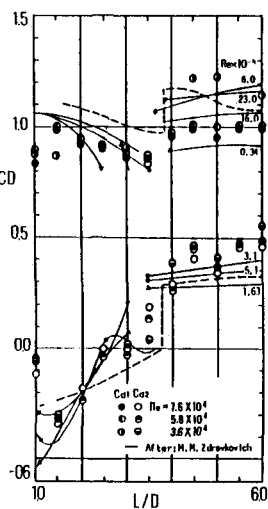


図-8 $CD \sim L/d$ の関係

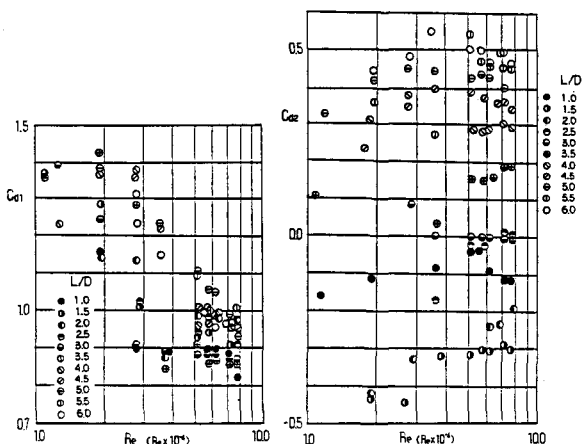


図-9 $CD \sim Re$ 数の関係

後円柱の抗力係数は図-8でみられるように、相対円柱中心軸間隔 $L/d = 1.5$ において最小値を示すが、図-9においても $L/d = 1.5, 2.0$ の場合、全ての Re 数において最小値となっている。この円柱間隔では Re 数の増加によって抗力係数の値は大きくなっている。抗力係数の値が零に近く、Kink現象と呼ばれる $L/d = 2.5 \sim 3.5$ における抗力係数の値は、実験精度との関連からと思われる描点の散乱があるが、 Re 数にかかわらず零に近いほぼ一定の値となっている。円柱間隔が臨界間隔より大きい場合、抗力係数の値は Re 数の増大によって大きくなり、 $Re = 3 \sim 5 \times 10^4$ で最大値を示し、さらに Re 数が大きくなると抗力係数の値は若干小さくなる傾向がみられる。

3.3 変動流体力

抗力 F_D ならびに揚力 F_L の変動強さを次式のように係数の形で表わし、各々の変動係数と呼ぶことにする。

$$CD' = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T (F_D - \overline{F_D})^2 dt / \frac{1}{2} \rho d l u^2 \right\}^{1/2} \quad CL' = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T (F_L - \overline{F_L})^2 dt / \frac{1}{2} \rho d l u^2 \right\}^{1/2}$$

ここに、 F_D, F_L は直径 d 、長さ l の円柱に作用する抗力、揚力の瞬間値、 $\overline{F_D}, \overline{F_L}$ は抗力、揚力の時間平均値、 u は一様流れの流速、 ρ は空気密度である。

図-10上部の図が前円柱と後円柱の抗力変動係数を Re 数に対して描点したものである。前円柱の抗力変動係数値は、描点がかかなり散乱しているが、相対円柱中心軸間隔による差異は認められず、 $Re < 5 \times 10^4$ においては、ほぼ Re 数の-2乗に比例して減少していて、抗力の変動の絶対値は流速に関係なくほぼ一定値となっている。 $Re > 5 \times 10^4$ では抗力変動係数はほぼ一定値とみられ、抗力の変動強さの絶対値は流速の増大に伴い急激に増大している。

後円柱の変動係数は前円柱のそれとほぼ同じ挙動を示しているが、 $Re > 3 \times 10^4$ ではほぼ Re 数に逆比例して減少していて、この範囲では流速に比例して抗力の変動強さの絶対値は大きくなっている。詳細にみると、臨界間隔を境にして描点が分かれていて臨界間隔よりも円柱間隔が狭い場合の方が狭い場合の方が若干小さい値となっている。

両円柱の抗力変動係数を比較してみると、従来後円柱に作用する流体力の方が特異な挙動をすると思われていたが、抗力の変動強さは前円柱の方が大きな値となっている。

両円柱の揚力変動係数の Re 数による変化は臨界間隔を境にして異なっている。円柱間隔が臨界間隔より狭く両円柱間に剝離領域が形成される場合、前円柱の揚力変動係数は $Re < 4 \times 10^4$ の範囲で Re 数の増大に伴い急激に減少し、それ以上の Re 数ではほぼ一定となっている。後円柱では $Re = 1 \times 10^4$ を除くと、揚力変動係数は Re 数によってあまり変化しない。

円柱間隔が臨界間隔よりも大きい場合、前円柱の揚力変動係数は $Re = 3 \times 10^4$ を境にして Re 数の増大に伴う減少の割合が異なっている。後円柱の揚力変動係数は $Re < 4 \times 10^4$ の範囲での Re 数の増大に伴う減少率は小さく、変動強さが抗力の平均値に

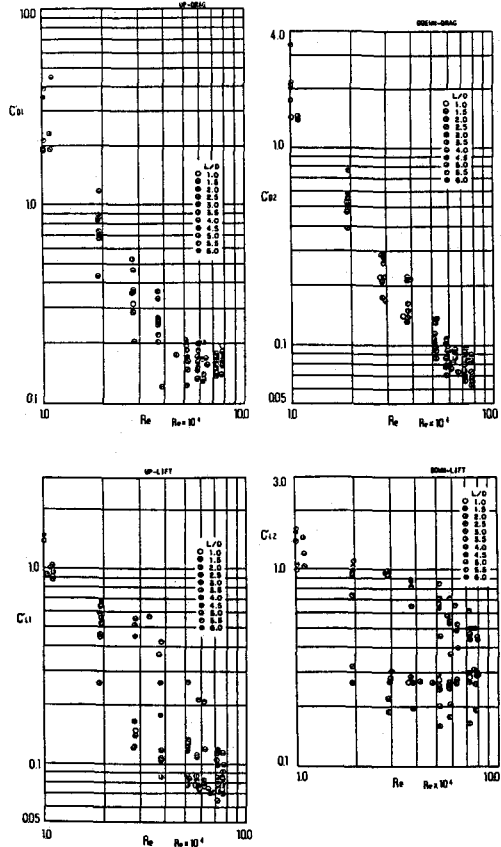


図-10 流体力の変動係数と Re 数の関係

相当する値であることが注目される。

図-11は揚力の変動卓越周波数から求めたストローハル数を相対円柱中心軸間隔に対して描点したものである。円柱間隔が臨界間隔より狭い場合、前円柱の揚力変動には広範囲にわたり複数の卓越周波数が存在する。各卓越周波数のパワースペクトルが大きい順に番号を付けてある。 $Re < 4 \times 10^4$ での第一卓越周波数が最も高周波で、前円柱からの剝離せん断層の不安定が揚力変動に大きく寄与しているものと考えられる。 $Re > 5 \times 10^4$ では第一卓越周波数が最も低周波となっていて、 $L/d=1$ を除くと、単円柱の場合よりも St 数が小さいことから、両円柱間に形成されている剝離域の揺動が揚力変動に大きく関与していると考えられる。

後円柱においては、 $L/d=1$ の場合を除くと、揚力変動における卓越周波数は一つであって、ほぼ単円柱のものに近い値となっている。

4. 結 語

ごく小型の風洞で適切なダミー円柱を用いることで2次元的な流体力の測定法を考案し、2円柱に作用する流体力の2方向成分を同時に測定した。この結果、抗力係数の跳躍ならびにKink現象がみられるところでは2円柱周辺の流況と関連してステップ状

あるいはスパイク状の流体力の変動がみられ、流体力の変動強さは以外と大きく、平均抗力の大きさに匹敵する値であることが明かとなった。また、従来あまり注目されていなかった前円柱に作用する流体力の変動には剝離せん断層の不安定に起因するとみられる高周波成分ならびに2円柱間に形成される剝離領域の揺動によるとみられる低周波の成分が存在し、2円柱周辺の流況と両円柱に作用する流体力ならびにその変動特性とは密接に関連していることが明かとなった。

参考文献

- 1) 渡辺、岡島、谷田；日本機械学会論文集、40-331, pp765-773, 1974
- 2) S.Ishigai, E.Nishikawa, K.Nishimura, K.Cho ;JSME, 15-86, pp949-956, 1972
- 3) Y.Tanida, A.Okajima, Y.Watanabe ;JFM, 61, pp769-784, 1973
- 4) M.M.zdravkovich ;Trans. ASME, Ser 1, 99-4, pp618-633, 1977
- 5) 岡島；日本機械学会論文集、44-384, pp2663-2671, 1978
- 6) 岡島、杉谷；日本機械学会論文集、50-458, pp2531-2538, 1984
- 7) 石井、辰野；九州大学応用力学研究所所報、57号、pp267-278, 1982
- 8) 阪田、木谷、塚田；日本機械学会論文集、51-461, pp43-50, 1984
- 9) M.Arie, M.Kiya, M.Mariya, H.Hori ;Trans. ASME, Vol.105, pp161-167, 1983
- 10) 五十嵐；日本機械学会論文集（B編）、46-406, pp1026-1036, 1980
- 11) 五十嵐；日本機械学会論文集（B編）、50-451, pp594-601, 1984
- 12) 坂本、羽仁生、小畑；日本機械学会論文集（B編）、52-475, pp1175-1183, 1986
- 13) 坂本、羽仁生、小畑；日本機械学会論文集（B編）、52-484, pp3964-3969, 1986

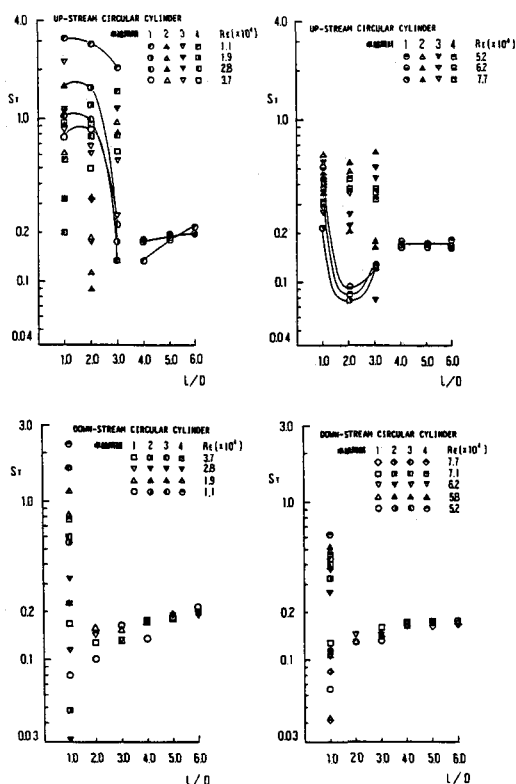


図-11 ストローハル数