

三角形側線付き円柱に作用する流体力に関する研究

斎藤 隆*・多和 芳雄**・北島 亮***
乗越 晃***・河元 明子*

On the Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder with a Triangle Rib

Takashi SAITOU, Yoshio TAWA, Akira KITAJIMA,
Akira NORIKOSHI and Meiko KAWAMOTO

Abstract

In the preceding paper, we reported that the flows around a circular cylinder with a rib are classified into three patterns of re-attached, bi-stable and separated flow. In this paper, it was investigated experimentally the effect of Reynolds number and the scale of rib on the regions of located rib observed each flow patterns, and in case of the bi-stable flow pattern, in order to confirm that the re-attached and separated flow turn alternatively, the pressure distribution along the surface of a circular cylinder are measured.

The following properties became evident after examining the experimental results. The value of Strouhal number based on the variation on lift force are small in case of the re-attached flow and large in case of separated flow in compared to a circular cylinder without rib and these values change by the ratio of the duration time of each flow patterns.

1. はじめに

前年度の報告で、半円形、帯状側線付き円柱に作用する流体力を測定した結果、揚力・抗力係数と側線設置位置の関係、また揚力変動波形とその頻度分布などから側線付き円柱周りの流況は大きく3つに分類でき、 Re_0 、側線設置位置の増大によりその流況は、「再付着流れ」、再付着流れと剥離流れが間欠的に切り替わる「双安定流れ」、「剥離流れ」へと変化していくことを推測

した。

本研究では、側線上での剥離点が固定できる三角形側線付き円柱に作用する流体力を測定し、3流況の生起条件を明らかにするとともに、側線付き円柱表面圧力分布を測定することによって、推測流況の妥当性を確認した。また、揚力変動波形の周波数特性を調べることで、流況によって渦放出周期が異なることを明らかにした。

2. 実験装置と実験方法

流体力測定方法は前年度の報告で示したとおりである。圧力分布測定円柱はFig. 1に示すように、高さ40mm、直径50mmで、上下面に30mmのダミー円柱を設

*社会建設工学科

**大林組

***社会建設工学専攻

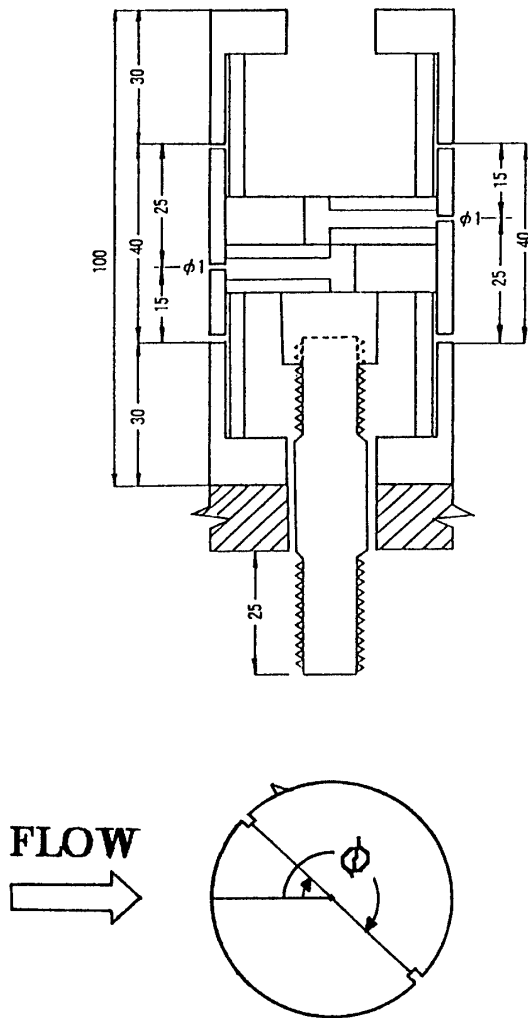


Fig. 1 Measurement apparatus of pressure

置し測定部を完全に独立させることでアスペクト比の問題を解消している。測定円柱の内部には、応答性の高い圧電素子圧力計が中心軸に対称に2基組み込まれており、同時に2角度の測定が可能である。測定円柱と支持軸とは一体になっており、上下のダミー円柱に側線を接着し、側線の位置を固定した状態で測定円柱だけを回転させることにより、側線付き円柱表面圧力分布の測定が可能となっている。

また、双安定流れを再付着流れと剥離流れに分離することを目的とし、側線の下流円柱背後の変動流速を測定するために、流速の変動に対する応答が極めて早いX型ブルーブ熱線流速計を使用した。

本研究で用いた側線はFig. 2に示すように、高さが $d' = 1.5\text{mm}$ ($d'/D = 0.030$) の三角形側線である。

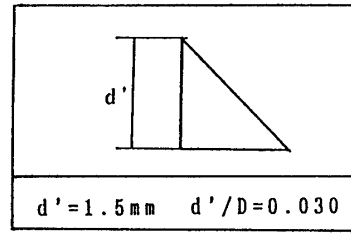


Fig. 2 Shape and size of rib

3. 結果及び考察

3.1 流れパターンの生起条件

Re_c , 側線設置位置 θ を系統的に変化させ円柱に作用する流体力を測定し、流れパターンの生起条件を明らかにしたものがFig. 3である。流れパターンは前年度と同様、揚力変動波形を統計処理し、流れパターンの分類判定基準に基づいて分類を行った。流体力が矩形波状に変化する場合の抗力、揚力の相関などからFig. 3でType Cとしている●描点で示す領域では、双安定流れで、Type B, Dは双安定流れの両流れの安定度の異なるパターンである。これより側線接合位置の小さい場合のType Aが再付着流れで、大きい場合のType Aが側線頂から流れが剥離して後流域を形成する剥離流れである。

3.2 円柱表面圧力分布

推測流況の妥当性、また双安定流れが再付着流れと剥離流れが間欠的に切り替わっている流れであることを確認するために、主流速度を 13.8m/sec ($Re = 47000$) に限定して各流れパターンについての円柱表面圧力分布を測定した。

3.2.1 単円柱の表面圧力分布

本研究で作成した圧力計による測定値の妥当性の確認、また側線付き円柱表面圧力分布と比較するために、まず単円柱の表面圧力分布を測定した。なお圧力係数 C_p は次式により求めた。

$$C_p = \frac{(P - P_0)}{\frac{1}{2} \rho U_0^2}$$

P : 円柱表面圧力

P_0 : 主流静圧

ρ : 空気の密度

U_0 : 主流速度

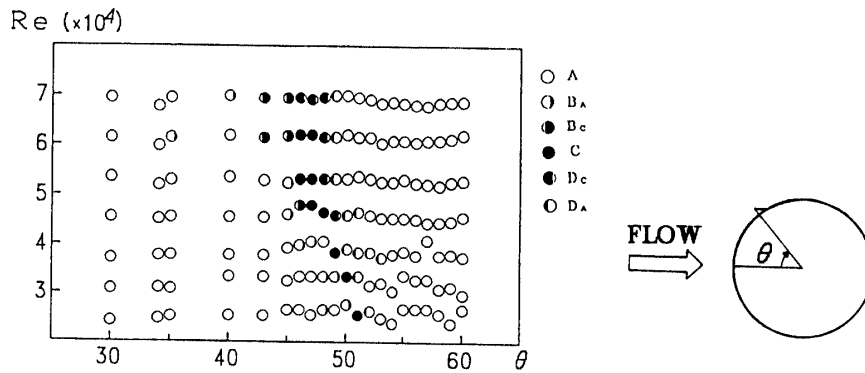


Fig. 3 Relation between flow patterns and experimental conditions

単円柱の表面圧力分布測定結果を示したものがFig. 4である。圧力分布の測定結果を円柱周りで積分し、算出した流体力係数は、 $C_D=1.1394$, $C_L=-0.0091$ となり、測定結果のオーダー、対称性とも良好であった。他の研究者の測定結果と比較しても本実験装置による測定値の妥当性が確認できる。また、剥離位置は、圧力分布の極小値が回復する曲線と剥離域の曲線との交点の近傍に存在していることから90°付近と見ることができる。

圧力分布の測定結果から、円柱表面境界層外縁の流速がベルヌーイの式より算出される。

$$u(x) = \sqrt{1 - C_p} U_0$$

x: 前方停留点から円柱表面に沿った距離

C_p : 圧力係数(x位置における)

U_0 : 主流速度

算出された円柱表面流速分布を前方停留点から、上述の近似的な剥離点までをサインカーブで近似しブラジウス級数に展開する。得られた級数を用いて、境界層方程式をルンゲクッタ法による数値計算により解いた。算出された境界層の排除厚さ δ_1 と、 δ_2 の分布を示したものがFig. 5である。この計算結果によれば、本実験の範囲内では側線がない場合の境界層厚さ δ は、0.2~0.3mm程度と推測される。本実験で用いた側線の場合、 $d'/\delta > 1$ であり、側線が境界層から突出しているといえる。

3.2.2 再付着流れの円柱表面圧力分布

側線接合位置が43°以下の場合の流況、つまり再付着流れの代表として $\theta=35^\circ$ の円柱表面圧力分布測定結果

を示したものがFig. 6である。図中の鎖線は、側線の接合位置を示し、実線は本測定装置で測定した側線がない場合の圧力係数を示している。また、図中の●は側線接合側の圧力係数を表し、○は側線がない側の圧力係数を表している。

図のように、側線の上流側、数度の範囲で圧力がわずかに上昇した後、側線背後で著しい圧力低下が見られる。また θ が約60°付近で単円柱の値近くまで急激に回復し、再び低下していることから、側線背後に剥離渦が形成され、側線上端から剥離した自由流線が円柱表面の θ が約60°付近に再付着し、独立した剥離域を形成していることが確認できる。再付着点の下流では、 $C_p=-1.7$ 程度まで若干の圧力低下を経て $C_p=-0.7$ 程度まで圧力が回復し側線がない場合よりも20°程度下流で流れが剥離している。背圧が上昇しているため、側線がない側に背圧が入り込み、剥離を早めている。この現象は、再付着した流れの境界層が乱流に遷移し、その結果円柱表面からの境界層剥離が側線のない場合よりも下流側にずれて、Achenbachの報告に見られる臨界状態と同様の状態が起こっているものと推測される。

以上のように再付着流れの特徴としては、まず側線背後に独立した剥離域が形成されることである。この剥離域部分の極めて大きな負圧により円柱がこの方向に強く引っ張られる。この力は剥離域の形成位置から抗力には余り影響せず揚力に関与する割合が大きいため、再付着流れでは大きな揚力が生じることになる。つぎに再剥離点が単円柱の剥離点より大きく下流にずれ、背圧が上昇すること、その結果側線と反対側の剥離点は上流側に若干ずれるが、大きなずれではないことである。この結果、後流域の面積は小さくなり、かつ背圧も上昇しているため円柱背後に引っ張られる力、つまり抗力は小さくなる。

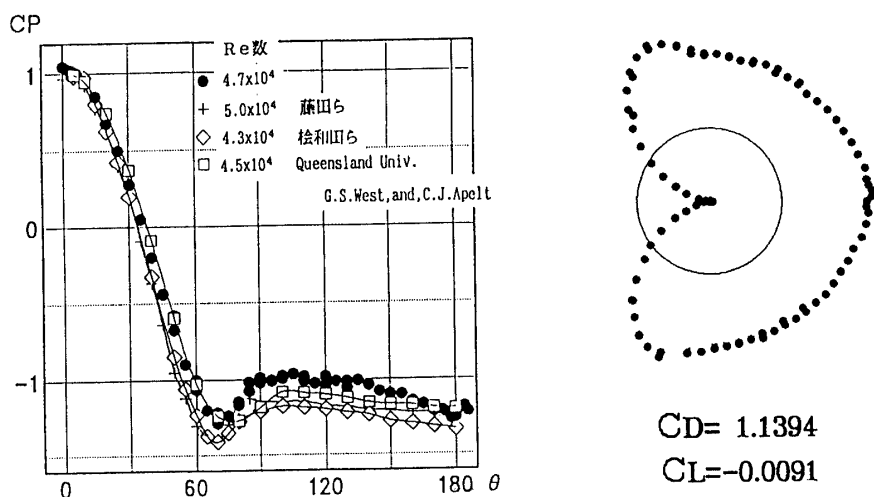


Fig. 4 Pressure distribution along the surface of a circular cylinder

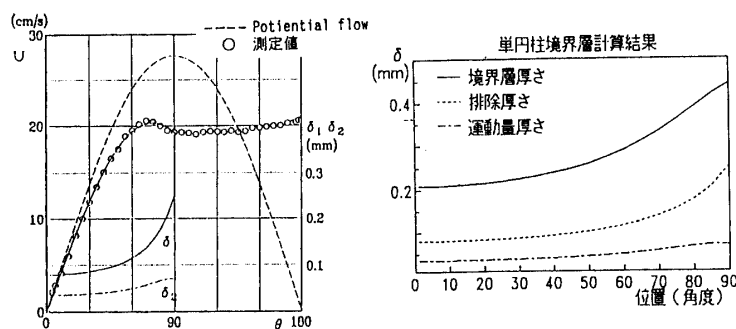


Fig. 5 The calculated results of boundary layer

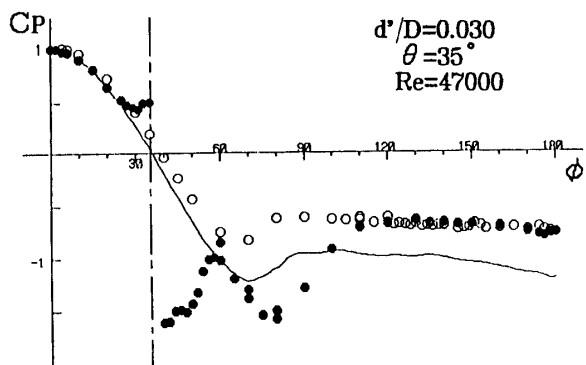


Fig. 6 Pressure distribution along the surface of a circular cylinder in case of re-attached flow pattern

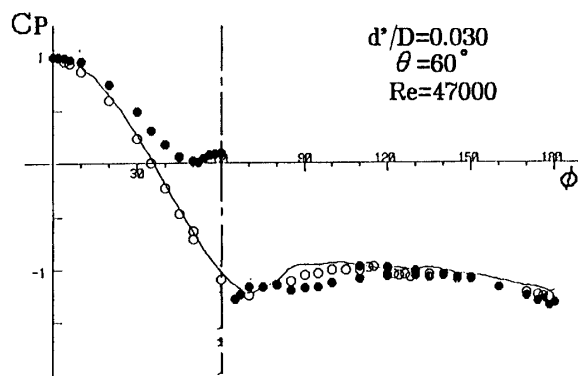


Fig. 7 Pressure distribution along the surface of a circular cylinder in case of separated flow pattern

3.2.3 剥離流れの円柱表面圧力分布

側線接合位置が52°以上の場合の流況、つまり剥離流れの代表としてθ=60°の円柱表面圧力分布測定結果を示したものがFig. 7である。

図のように側線の上方側で、側線がない場合に比べて著しい圧力の増加がみられる。その影響はθ=20°程度の範囲にみられ、接合位置がθ=35°の場合に比べて広くなっている。また、本測定結果の圧力係数の最大値が

らよどみ点 (stagnation point) を決定することは非常に微妙で困難であるが、 $\theta=30^\circ$ 程度までの側線がある側と、側線がない側との圧力係数のへだたりを打ち消すような角度を近似的なよどみ点と見ると、側線が接合されている方に 2° 程度ずれていると見なせる。(側線接合側 2° を中心とするとその点の両側 30° 程度まで圧力係数分布が同じとなる。)側線背後では、円柱背後の圧力が側線背後まで入り込み、側線直後からほぼ一定となっている。このことにより流れが側線位置から剥離し円柱表面に再付着しない流れ、つまり剥離流れであることが確認できる。背圧は側線がない場合とほとんど同じ $C_p=-1.0$ 程度となっている。

以上のように、剥離流れの特徴は側線上流の広い範囲で圧力が上昇することである。側線の下流、側線の反対側の圧力分布は単円柱の圧力分布とほとんど変わらないことから、この圧力上昇により円柱は側線と反対方向に押される。単円柱との圧力差は側線直前が最も大きく、作用力は揚力に關与する割合が大きく抗力にはあまり影響しない。その結果、揚力作用方向は逆転し側線と反対方向に小さな揚力が生じることになる。また抗力も単円柱の場合とほぼ等しくなるか、あるいは後流域の面積の増大により若干大きくなる。

3.2.4 双安定流れの表面圧力分布

双安定流れは、流況が再付着流れから剥離流れに移り変わる非常に狭い範囲で生起し、両流れが間欠的に交互に切り替わる興味ある流れである。

この推測の妥当性を確認するために双安定流れが生起する 49° に側線を設置し、円柱表面圧力分布を測定した。ここで、双安定流れを再付着流れと剥離流れに分離するために、Fig. 8のように熱線流速計を側線側の円柱斜め背後の適切な位置に設置し、円柱表面圧力とともに変動流速を同時測定し、両流れの切り替わりを判断するトリガーとした。変動圧力と側線下流の変動流速を同時測定した結果の波形が Fig. 9である。側線下流の変動流速の出力波形は、ステップ状に間欠的に切り替わっている。側線を $35^\circ, 60^\circ$ に接合した場合にはこのような側線下流の変動流速の挙動はみられない。Fig. 8と照らし合わせて考えると、熱線流速計が円柱の後流域の内外であることによる出力から、流速が高速となっている場合は再付着流れ、低速となっている場合は剥離流れである。よって熱線流速計の波形を同時に測定することにより、ステップ状に切り替わる変動圧力を再付着流れの圧力、剥離流れの圧力のそれぞれに分解することが可能である。

変動圧力と、変動流速の相関係数を示したのがFig.10

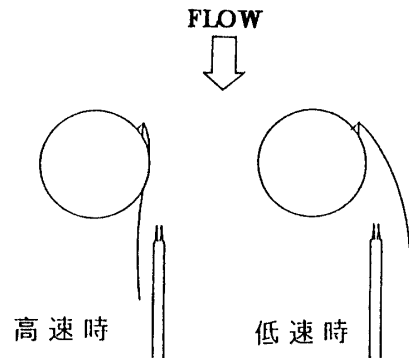


Fig. 8 Position of probe judged flow patterns

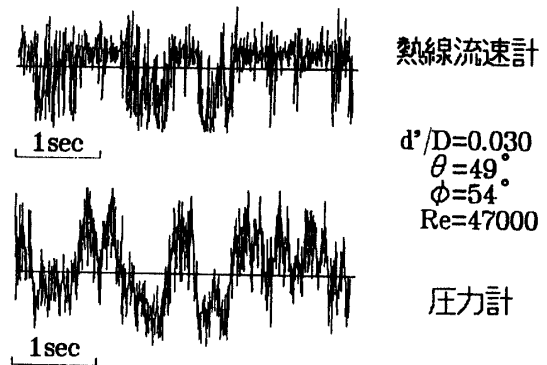


Fig. 9 Typical records of hot-wire anemometer

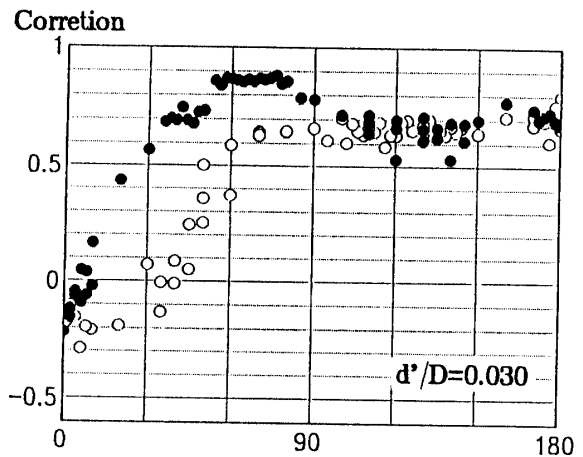


Fig.10 Relation between corretion and position of rib

である。●の描点は側線が付いてる側を表し、○の描点は、側線がない側を表している。

変動圧力と変動流速との相関係数は、側線が付いている側で $\theta=30^\circ$ 付近から、側線が付いていない側で $\theta=60^\circ$ 付近から相関係数が0.5を越えており、強い相関を示

している。この場合、側線背後の下流側（プローブ位置）の流速変動に対応している圧力変動が起きていることがわかる。

双安定流れの、時間平均、高速時平均（再付着流れ）、低速時平均（剥離流れ）のそれぞれの圧力分布を示したものがFig.11である。

高速時(B)の場合、側線直後で圧力係数は $C_p = -1.9$ 程度まで低下している。さらに、 $\theta = 90^\circ$ を越えるあたりまで側線がない場合に比べて圧力係数は低くなっている。圧力が回復していく曲線と、圧力がほぼ一定になっているところとの交点から得られる近似的な剥離点は $\theta = 100^\circ$ 付近となり、側線がない場合に比べて 10° 程度下流になり、結果的に背圧が若干回復し、 $C_p = -0.7 \sim -0.9$ 程度となっている。側線がない側は、その背圧が入り込み、近似的な剥離点は $\theta = 80^\circ$ 付近と上流側に移っている。また、 $\theta = 100^\circ$ 以降の側線がついている側と、側線がない側とで若干の圧力係数の差がみられる。

このように高速時平均の圧力分布は、側線頂から剥離した流れが再付着し、円柱表面から剥離するまでの距離が短いことを考慮すれば、3.2.2で明確にした再付着流れの圧力分布とほぼ同様の分布を示している。

低速時(b)の場合、高速時に比べて側線背後の圧力低下が緩やかとなり、最低点で圧力係数 $C_p = -1.3$ 程度となっている。また、 $\theta = 65^\circ$ 付近以降から側線がない場合に比べて圧力が上昇していることが認められる。 $\theta = 100^\circ$ 以降では、高速時にみられたような、側線のある側、ない側での圧力差はほとんど見られない。側線上流側の圧力は、側線がない場合に比べて大きく、 $\theta = 30^\circ$ 付近までの圧力差からみる、近似的なよどみ点のずれは、高速時に比べて大きくなっている。

このように低速時平均の圧力分布も、3.2.3で明確にした剥離流れの圧力分布とほぼ同様の分布である。

以上のように、全時間平均の圧力分布形状は、(a)のようになっているが、Fig.9に見られる様に変動流速の挙動にともない瞬間的・間欠的に(b)の分布形状、(c)の分布形状に切り替わっていることから、この時の流れが双安定流れであり、再付着流れと剥離流れが瞬時に交互に切り替わっていることが確認できた。

3.3 流体力測定結果の妥当性

圧力係数を円周方向に積分して算出した流体力を、変動流体力測定結果と比較すると、 $\theta = 35^\circ$ に接合した場合の抗力係数に多少のばらつきはあるものの、その他の場合はほとんど一致している。このことから本研究

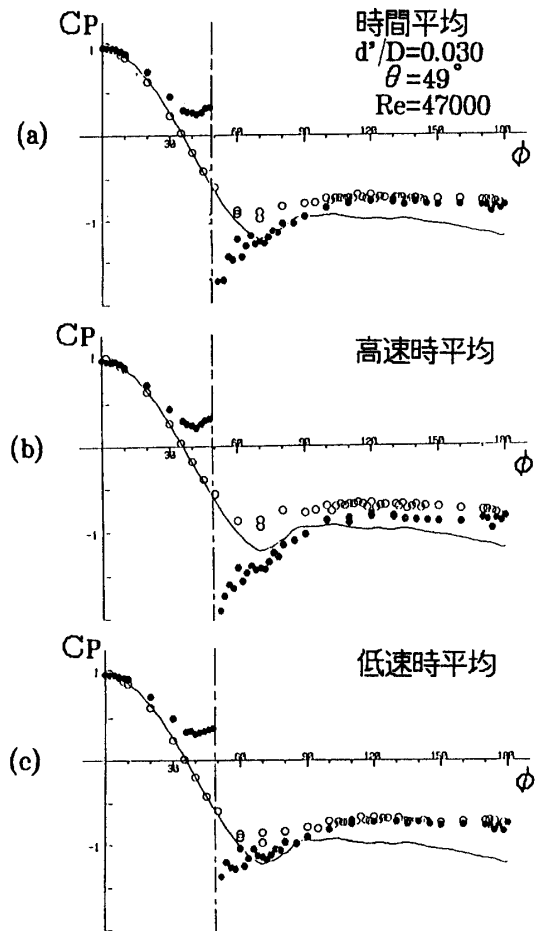


Fig.11 Pressure distribution along the surface of a circular cylinder in case of bi-stable flow pattern

で用いている、変動流体力測定装置の測定結果の妥当性が側線付き円柱の円柱表面圧力分布から確認できたといえる。

3.4 変動流体力の周波数特性

側線を付けたことによる変動、剥離による変動は、抗力成分よりも揚力成分に現れることから、変動流体力の卓越周波数を、揚力の変動をMEM法(Max Entropy Method)によりスペクトル解析を行うことにより求めた。ストローハル数 St の算定には、代表長さ

$$S_t = \frac{fD}{U_0}$$

f : 卓越周波数 (Hz)

側線接合位置 θ をパラメーターとして、 S_t 数と R_ϕ 数と

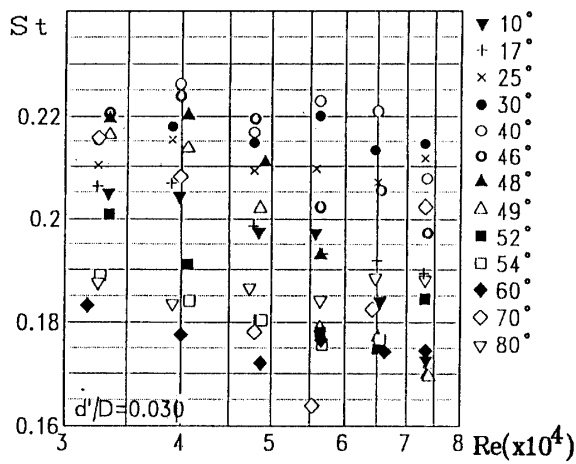
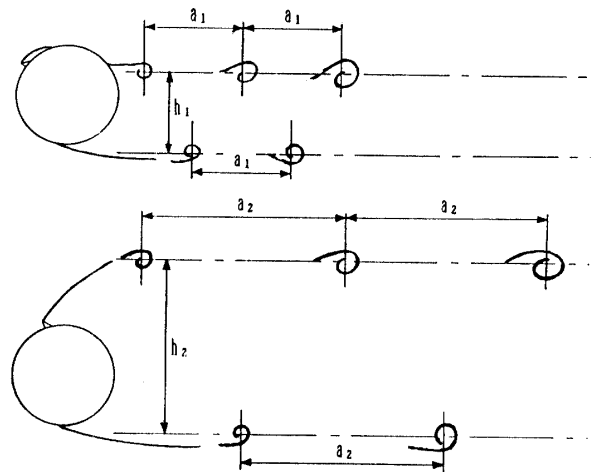


Fig.12 Relation between strouhal number and Reynolds number

の関係を描点してものが、Fig. 12である。

$\theta = 10^\circ \sim 25^\circ$ では R_e 数が最も小さいところで、 $S_t = 0.20$ 程度の値を示し、 $\theta = 10^\circ$ では R_e 数の増加で減少傾向にあるが、 θ の増加にともないその傾向が薄れていき、 $\theta = 25^\circ$ で R_e 数によらずほぼ一定になっている ($S_t = 0.21$)。接合位置 θ が $30^\circ \sim 49^\circ$ では R_e 数が最も小さいところで $S_t = 0.22$ 程度の値をとっており、 $\theta = 30^\circ$ で R_e 数によらずほぼ一定であるが、 θ の増大にともない、 R_e 数の増大にともなう S_t 数の減少傾向がみられる。 $\theta = 48^\circ, \theta = 49^\circ$ で R_e 数が最大のところで $S_t = 0.19$ 程度となっている。接合位置 θ が 52° で R_e 数が低いところでも S_t 数の低下がみられ、 $\theta = 54^\circ$ 以降で R_e 数によらず概ね $S_t = 0.18$ 程度になっている。 S_t 数が $S_t = 0.22$ から 0.18 に移行する条件は (R_e 数、接合位置 θ)、流体力測定結果で見られた双安定流れがみられる条件に一致している。

流体力測定結果、圧力分布測定結果から見いだした再付着流れでは $S_t = 0.22 \sim 0.23$ となり、単円柱での $S_t = 0.20$ よりも大きくなっていて渦放出周期が短くなっていることがわかる。一方、剥離流れでは、 $S_t = 0.18 \sim 0.19$ となり、単円柱の場合に比べて渦放出周期が長くなっていることがわかる。再付着流れと剥離流れの渦放出のモデルをFig.13に示す。剥離流れにおいて、渦放出周期が長くなっているということは渦が放出されるまでに渦が流れから受け取るエネルギーも大きくなり、渦による変動が大きくなることが予想される。この剥離流れにおける放出渦による変動の影響が、流体力測定結果の剥離流れ領域の変動強さの増大に関係していると思われる。



カルマン渦列の安定条件

$$\frac{h}{a} = \text{一定}$$

Fig.13 The conception of the relation between drag force and vortex shedding

4. まとめ

側線付き円柱に作用する流体力測定結果から推測した3つの流れパターンについて、側線付き円柱表面圧力分布測定結果、円柱に作用する揚力についての周波数特性から検討した結果を要約すると、次の通りである。

1. 前年度までに、流体力測定結果から、側線付き円柱まわりの流況には、側線より剥離した流れが円柱表面に再付着し、再び剥離する「再付着流れ」、側線より流れが剥離して円柱表面には再付着しない「剥離流れ」、再付着流れと剥離流れが間欠的に交互に切り替わる「双安定流れ」があること、また、 R_e 、側線接合位置の増大により、流況は双安定流れから剥離流れに移行し、その間の非常に狭い限られた条件で、双安定流れが生起することが推測できた。本研究では、以上の推測の妥当性を、各流れパターンについての側線付き円柱表面圧力分布を明らかにすることにより確認できた。
2. 揚力変動波形の周波数特性を調べることで、再付着流れと剥離流れでは、Fig.12, 13に示すように後流域の違いにより S_t が違い、再付着流れでは $S_t = 0.22 \sim 0.23$ で、単円柱の場合に比べ渦放出周期が短く、剥離流れでは、 $S_t = 0.18 \sim 0.19$ で渦放出周期が長くなっている。

参考文献

- 1) 佐藤 正義, 他 1 名; 曲面に沿う流れの剝離位置制御の研究 (各種方式における制御特性, 効果の比較), 日本機械学会論文集 (B編), 50巻289号 (昭45-1)
- 2) 上田 新次郎, 他 1 名; 吹き出しによる円柱まわりの流れの制御 (第 1 報 定常空気力及び制御に関する実験), 日本機械学会論文集 (B編), 41巻350号 (昭50-10)
- 3) 若 良二, 他 3 名; 接線方向吹き出し口を持つ円柱の翼幅中央断面における翼性能, 日本機械学会論文集 (B編), 46巻410号 (昭55-10), 日本機械学会論文集 (B編), 48巻433号 (昭57-9)
- 4) 若 良二, 他 2 名; 接線方向吹き出し口を持つ円柱の側壁付近における諸特性値の分布 (側壁部の構造およびスロット位置の影響), 日本機械学会論文集 (B編), 50巻458号 (昭50-10)
- 5) 久保 喜延; 無補剛吊形状水管断面の渦励振制御法, 土木学会第46回年次学術講演会, pp.490 (平成3-9)
- 6) 五十嵐 保, 他 1 名; 小円柱による円柱まわりの流れの制御に関する研究 (第 1 報, 剝離せん断層の強制再付着), 日本機械学会論文集 (B編), 55巻511号, pp.701 (1989-3)
- 7) 五十嵐 保, 他 1 名; 小円柱による円柱まわりの流れの制御に関する研究 (第 2 報, 円柱に働く流体力), 日本機械学会論文集 (B編), 55巻511号, pp.708 (1989-3)
- 8) 宮崎 正男, 他 1 名; V-ストライプ方式斜張橋ケーブルの制振効果に関する実験的研究, 土木学会第44回年次学術講演会, (平成 1-10)
- 9) 宮崎 正男, 他 1 名; 斜張橋ケーブルの空力不安定振動と制御対策, 風工シンポジウム, 25, 145 (1988)
- 10) 五十嵐 保, 円柱まわりの流れに及ぼすトリップワイヤの効果, 日本機械学会論文集 (B編), 52巻473号, pp. 358 (昭63-1)
- 11) 藤田 秀臣, 他 2 名; 円柱表面からの熱伝達に及ぼすトリッピングワイヤの効果 (第 1 報, 円柱まわりの圧力分布および抗力係数), 日本機械学会論文集 (B編), 50巻453号, pp.1275 (昭59)
- 12) 藤田 秀臣, 他 2 名; 円柱表面からの熱伝達に及ぼすトリッピングワイヤの効果 (第 2 報, 熱伝達特性), 日本機械学会論文集 (B編), 51巻464号, pp.1334 (昭60-4)
- 13) 松本 勝, 他 5 名; 風雨条件下の斜張橋ケーブルの空力特性に関する考察, 土木学会第43回年次学術講演会 (昭63-10)
- 14) 松本 勝, 他 5 名; ケーブルの空力振動における動的応答特性と静的空力特性の対比, 土木学会第45回年次学術講演会 (平2-9)
- 15) 小西 俊之, 他 1 名; 斜張橋ケーブルの Rain vibration発生機構に関する解析的研究, 土木学会第43回年次学術講演会 (昭63-10) I 331, pp.714
- 16) 宮崎 正, 他 1 名; Rain vibrationに及ぼす水路寸法の影響等に関する解析的研究, 土木学会第44回年次学術講演会 (平1-10) I 372, pp.796
- 17) 松本 勝, 他 5 名; 傾斜円柱の空力特性および Rain vibration発生機構, 土木学会第44回年次学術講演会 (平1-10) I 371, pp.794
- 18) 松本 勝, 他 5 名; 斜張橋ケーブルのレインバイブレーション発生機構と水路形成位置の関係, 土木学会第46回年次学術講演会 (平3-9) I 242, pp.522
- 19) 須志田 藤雄; 直列 2 円柱に作用する流体力に関する研究, 山口大学修士論文 (平2-2)
- 20) 岡本 哲史, 他 1 名; 風洞側壁が二次元円柱のまわりの流れおよびその交流に及ぼす影響, 日本機械学会論文集, 41巻341号, pp.181 (昭50-1)
- 21) Achenbach, E., J. Fluid Mech., 34-4 (1968), vol. 34, part4, pp.625-639
- 22) 日野幹雄著; スペクトル解析, 朝倉書店
- 23) Schlichting Boundary-Layer Theory, MCGRAW. HILL SERIES IN MECHANICAL ENGINEERING
- 24) 中村育雄, 大坂英雄著; 工科系流体力学, 共立出版株式会社
- 25) 椿東一郎著; 水理学, 森北出版
- 26) 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善株式会社
- 27) 齋藤 隆, 他 1 名; 半円形側線付き円柱に作用する流体力, 第 9 回西日本乱流シンポジウム, (1991-7)
- 28) 齋藤 隆, 他 3 名; 半円形側線付き円柱に作用する流体力, 土木学会中国四国支部研究会, (1992-5)
- 29) 齋藤 隆, 他 2 名; 半円形側線付き円柱に作用する流体力とその変動特性, 土木学会第44回年次学術講演会, (1992-9)
- 30) 齋藤 隆, 他 2 名; 半円形側線付き円柱の空力特性, 第24回乱流シンポジウム講演論文集, (1992) (平成 6 年 4 月15日受理)