

半円形側線付き円柱周りの双安定流れ

齋藤 隆*・乗越 晃**・河元 明子*

On the Bi-stable Flows Around a Circular Cylinder with a Semi-circular Rib

Takashi SAITŌ, Akira NORIKOSHI and Meiko KAWAMOTO

Abstract

It is the purpose of this paper to make clear the condition required to bi-stable flow around a circular cylinder with a semi-circular riblet and the change of fluid forces by switching of flow patterns.

We did a few measurements of fluid forces acting on a circular cylinder with a semi-circular riblet.

It is decided quantitatively the condition required to bi-stable flow and the change of fluid forces with switching of two flow patterns by analysed the measured fluctuation of fluid forces transformed into low frequency fluctuation through the low pass filter with 2 or 3 times period of eddy shedding from a circular cylinder.

And it became clear from discussion on the change of pressure distribution at the surface of circular cylinder with the separation region formed at vicinity of riblet that the relation between the change of fluid forces with a position of riblet and the flow pattern around a circular cylinder.

1. はじめに

円柱表面、あるいは円柱のごく近くに小さい柱状体を接合することで円柱周りの流れを制御して、円柱に作用する流体力と円柱の振動を制御することが行われている。数年来、本研究室ではこれに関連した実験を行ってきた。その結果、側線の設置位置によって間欠的に流体力が階段状に変化することが見出された。このような特異な現象は極めて興味もたれる。

本研究では、この特異現象を解明することを目的に、平均流体力と変動流体力の両者が側線接合位置、Re数による変化と合致する円柱周りの流況について考察し、双安定流れの出現状態を変動流体力の統計諸量によって定量的に評価した。また双安定流れの平均切り替わ

り周期とそれに伴う流体力の変動量について検討したものである。

2. 実験装置と実験方法

実験は、測定部が幅100cm、高さ10cmの扁平断面で、長さが100cmの貫流式風洞である。流体力測定部の円柱は、直径5cm、高さ6cmで、その中心が真ちゆう棒によって噴出口より20cm下流の中心部に片梁方式で固定されている。また、境界層の影響を除去するため上下面に2cmのダミー円柱を設置している(Fig. 1)。使用した側線は、前年の実験で揚力係数が最も著しい変化を示した、高さが $d=0.145\text{cm}$ の半円柱($d/D=0.029$)である。円柱に作用する流体力の測定は、真ちゆう棒の四面に貼付られたP・N半導体ゲージの歪を電圧としてブリッジボックスから出力し、アンプを通してペンレコーダー、デジタルレコーダに記録した。また、流速も同様に、ピトー管、差圧計とストレインメーター

*社会建設工学科

**大学院社会建設工学専攻

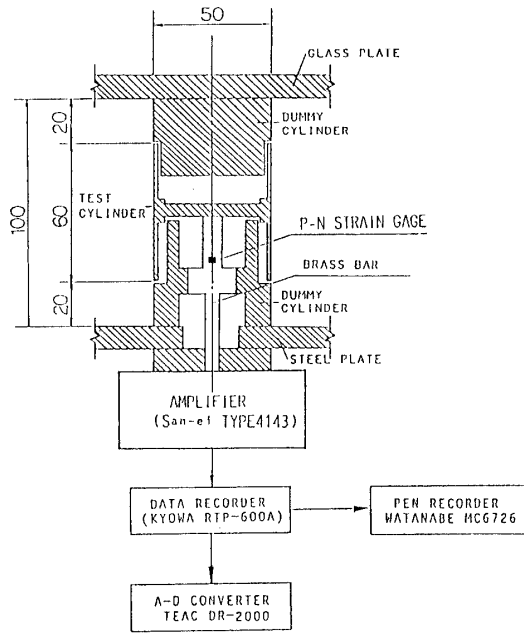


Fig. 1 Measurement apparatus of fluid forces

を介してそれぞれに記録した。

本研究ではRe数が $10^4 \sim 10^5$ の範囲で、側線接合位置を系統的に変化させて流体力を測定した。流体力の定義はFig. 2 に示すとおりである。

3. 結果及び考察

3.1 抗力係数, 揚力係数

Re数をパラメータにして、抗力係数、揚力係数と側線設置位置 θ との関係を描点したものがFig. 3, 4 である。抗力係数は、 θ が $50^\circ \sim 55^\circ$ 以下では θ の増大に伴ってその値は小さくなっていき、Re数によって異なるが、 θ が $50^\circ \sim 55^\circ$ で最小値をとる。その最小値は、単円柱の値よりも小さい値となり、最小値をとる θ の値はRe数が大きいほど小さい。また、 θ が $55^\circ \sim 60^\circ$ で抗力係数は急増し、単円柱の値近くまで回復する。 θ が 65° 以上になると、大きな変化は見られずほぼ一定値をとっている。

Re数、 θ に伴う揚力係数の値の変化は抗力係数のそれと対応している。すなわち、抗力係数の値が θ の増大に伴って小さくなる $50^\circ \sim 55^\circ$ 以下では、揚力係数の絶対値は θ の増大に伴って大きくなっていき、 θ が $50^\circ \sim 55^\circ$ で0.5 近くの非常に大きな値をとる。 θ が $55^\circ \sim 58^\circ$ で揚力係数の絶対値は急減し、 θ が $60^\circ \sim 70^\circ$ で揚力係数の符号が負から正に変化していき、揚力の作用方向が逆転する。揚力係数の絶対値が最大となる θ は抗力係数と同様にRe数が大きいほど小さい傾向にある。

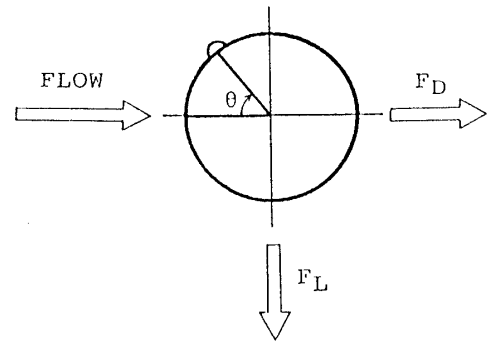


Fig. 2 Definition of fluid forces

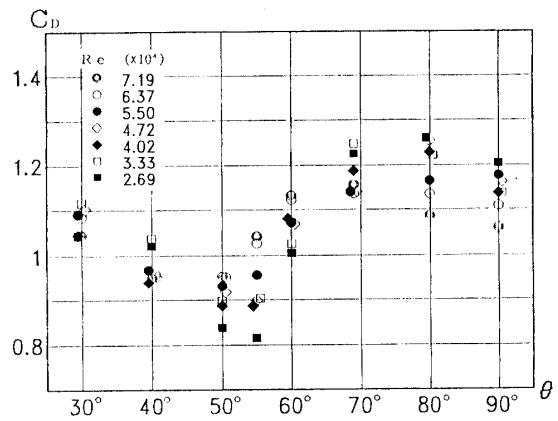


Fig. 3 Relation between the establishment position of riblet and the coefficient of average drag forces

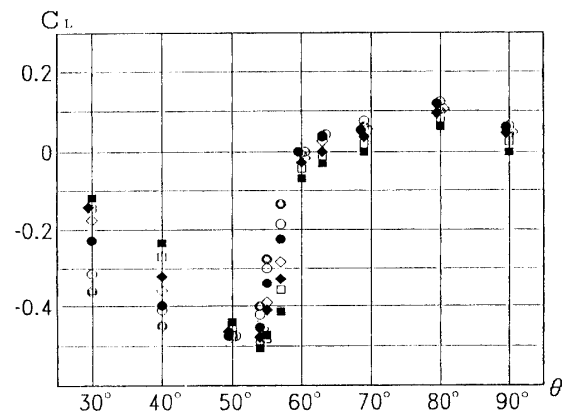


Fig. 4 Relation between the establishment position of riblet and the coefficient of average lift forces

3.2 流況の推測

Fig. 5はFig. 4で揚力係数が急変している部分を詳細に示したものである。θ55°=58°で揚力係数の描点を直線で結んであるのは、変動波形から、揚力のステップ状変化が間欠的に生起しているからで、ここではその両状態での揚力係数を求め、それぞれを描点している(Fig. 4ではその平均値を描点している)。抗力係数においても同様なステップ状変化が見られるが、平均値に対する変化は揚力に比べて数分の一である。この図より、短時間継続する揚力の平均値の絶対値が極端に異なり、かつ作用方向も変ることが分かる。この変化の度合いは単円柱からの渦放出に伴う変化に比べ著しく大きい。このような大きな流体力の転換が生じることから流況が大きく異なることが推測される。すなわち、双安定流れの流れパターンの変化の結果と考え

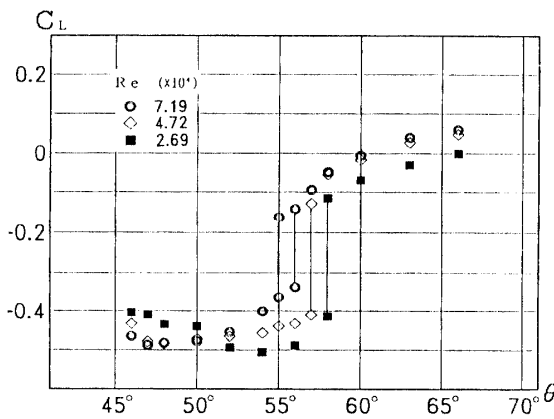


Fig. 5 Relation between the establishment position of riblet and the coefficient of lift forces

られる。そこで、側線接合位置による流体力の変化と、特定の接合位置での流体力の間欠的な階段状の変化を、側線下流部に形成される剥離領域による円柱表面圧力分布の変化との関連で検討してみる (Fig. 6)。

i) 再付着流れ

側線設置位置θが55°~58°以下では、側線より剥離した流れが円柱表面に再付着して、側線背後に独立した剥離領域を形成する。この独立した剥離領域の形成によりその部分の円柱表面の圧力が単円柱のそれより低下し、その結果、円柱の中心から独立した剥離領域方向、つまり負の方向に単円柱との圧力差分 (Fig. 6の斜線部分) の大きな揚力が生じることになる。側線設置位置θが下流であるほど、この独立した剥離領域は下流側に形成され、円柱に再付着した流れの再剥離点も下流側に移り、円柱背後の剥離域が狭まる。この結果、側線設置位置θが下流であるほど、抗力係数は小さくなり、揚力の絶対値は大きくなっていく。抗力係数が最小かつ、揚力係数の絶対値が最大となるのは、側線背後の独立した剥離領域の規模と強さによる。

ii) 剥離流れ

θが53°~58°以上では再付着は起こらず、円柱背後の剥離域が側線背後に達する剥離流れである。円柱背後の剥離域の圧力がそのまま側線背後まで入り込み、単円柱の表面圧力より高くなる。よってこの圧力差 (Fig. 6の黒い部分) で揚力の作用方向の逆転が起き、その力は小さい。

iii) 双安定流れ

θが55°~58°では、i), ii)の両流況の移行領域で、ともに安定性が弱まる結果、再付着流れと剥離流れが間

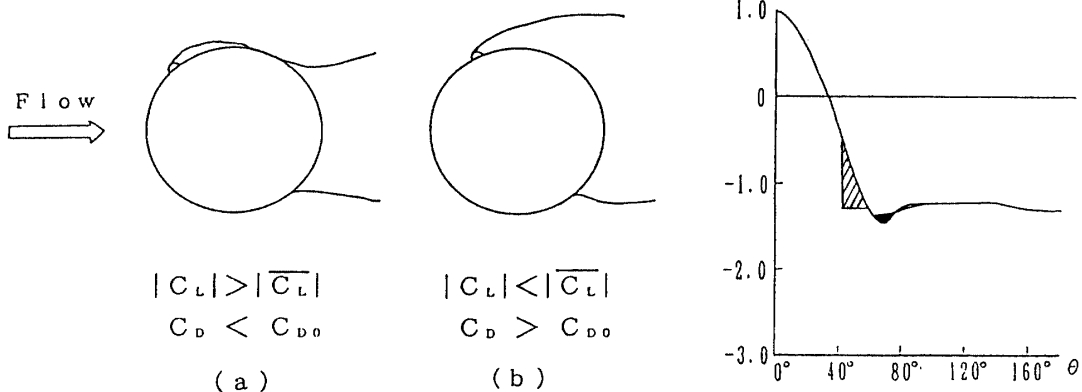


Fig. 6 Diagram of working fluid forces by flow patterns

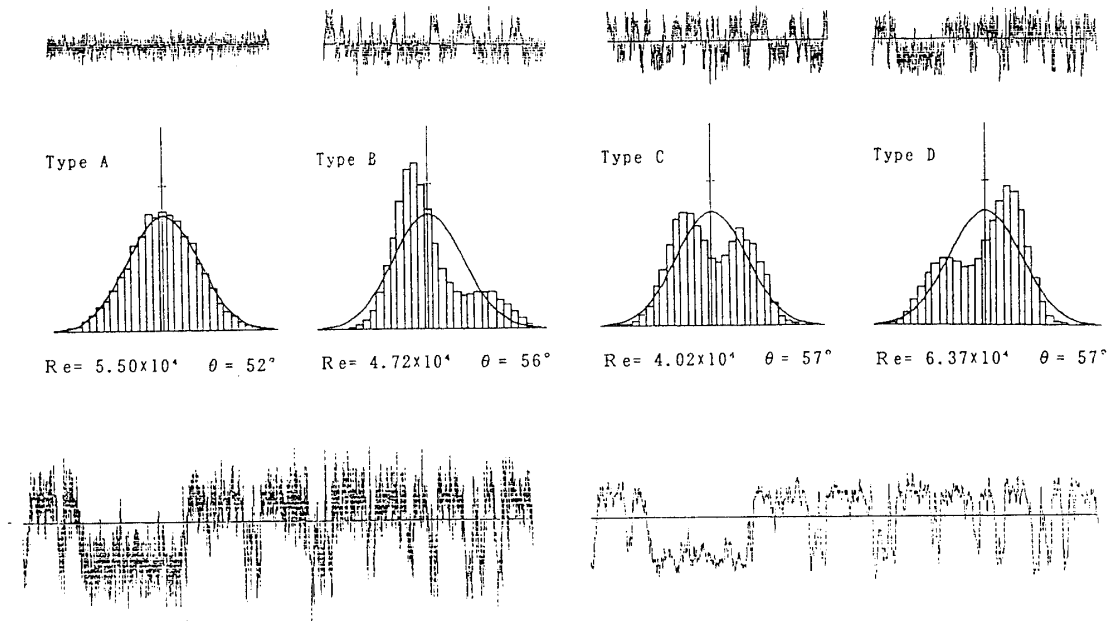


Fig. 7 The variation wave form of lift forces and histogram

欠的に交互に切り替わり，前述したように，揚力が流れパターンに対応して大きく変化する．いわゆる，双安定流れがみられる．

3.3 揚力の変動波形と頻度分布

典型的な揚力の変動波形と変動値の頻度分布を图示したものがFig. 7である．典型的な頻度分布は，図のようなTYPE A～Dの四つである．大きく分類すると正規分布であるTYPE Aと，二つの山を持つTYPE Cの二種類で，TYPE B, DはTYPE Cの二山の度合いが異なる場合である．すべての流れをTYPE A～Dに分類する際に，頻度分布の形状で判定するのは主観的であり，不正確なため，頻度分布の歪係数，尖り度，また抗力と揚力の相関係数を求め，量的判定を試みた．ここで揚力変動波形はFig. 7 (a)のようにステップ状の大きな変化に高周波成分がのっている形である．本研究はステップ状に変化する流体力を解析の対象としているので，渦放出の2～3周期の移動平均をとることによってフィルターをかけたFig. 7 (b)のような変動波形として解析した．

3.4 流れパターンの分類と双安定流れの生起条件

変動波形の歪係数 (α_3)，尖り度 (α_4)，ならびに抗力と揚力との相関係数を計算した一例がFig. 8である．図において θ が55°～58°で歪係数は0，尖り度は3より小さいことから，変動流体力の頻度分布の形状は明らか

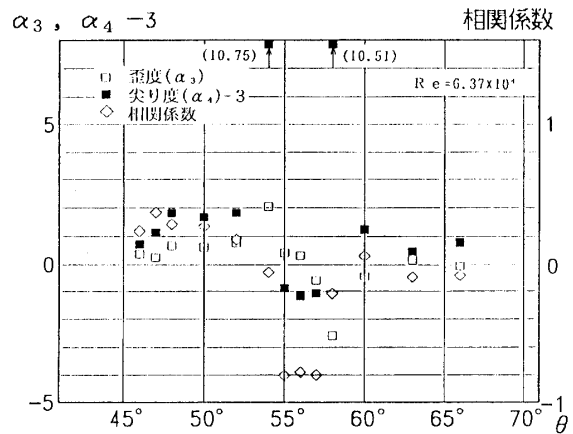


Fig. 8 Relation between the establishment position of riblet and the statistics volume of variatiohh fluid forces

かに平均値に対して対象な双山の分布である．さらに相関係数の値から，抗力の変動波形の頻度分布も同じ分布形状である．この場合，比較的安定した流れの状態が間欠的に変る双安定流れであると推測される． θ が50°～55°の範囲では，平均の揚力よりも絶対値が非常に小さいスパイク状の揚力が間欠的に混在していることから，歪度は正の値となり，尖り度が大きな値となる．一方， θ が58°～60°の範囲では，逆に絶対値が非常に大きいスパイク状の揚力が間欠的に混在していて，歪度

は負の値となる。

各統計量の特異値によって流れのタイプ分けをした説明図がFig. 9である。図の下部にFig. 7にあげてある変動波形とその頻度分布に対応させて流れのタイプを記号で示している。

- TYPE A 1) $\alpha_3 \doteq 0$
 2) $\alpha_4 - 3 \doteq 0$
 3) 相関係数 $\doteq 0$
- TYPE B 1) $\alpha_3 > 0$, 絶対値 大
 2) $\alpha_4 - 3 > 0$, 絶対値 大
- TYPE Ba 3) 相関係数 $\doteq 0$
- TYPE Bc 3) 相関係数 < 0 , 絶対値 大
- TYPE C 1) $\alpha_3 \doteq 0$
 2) $\alpha_4 - 3 < 0$
 3) 相関係数 $\doteq -1$
- TYPE D 1) $\alpha_3 < 0$, 絶対値 大
 2) $\alpha_4 - 3 > 0$, 絶対値 大
- TYPE Da 3) 相関係数 $\doteq 0$
- TYPE Dc 3) 相関係数 < 0 , 絶対値 大

なお、TYPE Cで α_3 の絶対値のある程度大きいものをTYPE Cb, またはTYPE Cdとした。また、 $\alpha_3, \alpha_4 - 3$ の値は0に近い値でなくても広い範囲でほぼ一定の値をとっていれば $\alpha_3, \alpha_4 - 3 \doteq 0$ と同様の意味をもっているとみなす。

Fig. 9に基づいて、各流れのタイプが生起する条件を示したものがFig. 10である。図において特異な変動波形 (TYPE B, C, D) が出現する範囲は、前述した抗力、揚力係数がリブ接合位置 θ によって大きく変化する範囲とほぼ一致し、 $55^\circ \sim 58^\circ$ で双安定流れ (TYPE C) が見られる。双安定流れの出現範囲は、Re数の最も大きい $Re = 7.19 \times 10^4$ では約 3° であるのに対して、Re数が小さくなるとその範囲は狭くなり、約 $1^\circ \sim 0.5^\circ$ である。TYPE B, Dについても同様に、Re数が大きいほど出現範囲が広いことがいえる。

3.5 双安定流れでの流体力の変動特性

3.5.1 双安定流れの平均切り替わり周期

揚力がステップ状に変化するとして、その平均周期 T (Fig. 11) を求め、ポテンシャル流れとして求めた側線位置での流速と側線高さとで、次式によりストローハル数の形に無次元化した周期を θ にたいして描点した

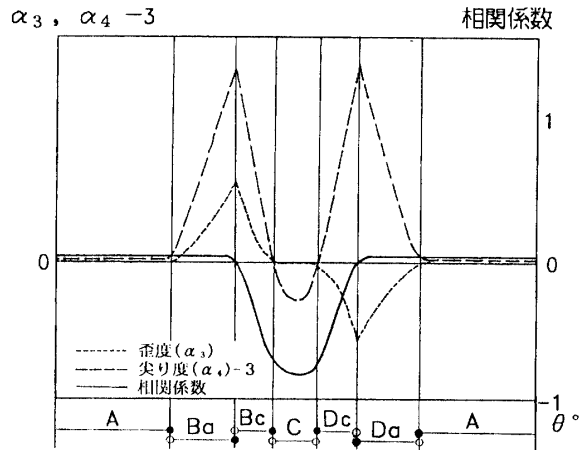


Fig. 9 Diagram of classification of flow by statistics volume

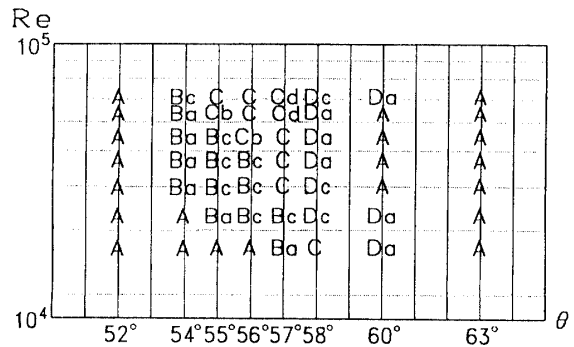


Fig. 10 Appearance conditions of flow patterns

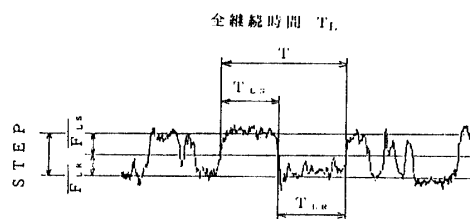


Fig. 11 Definition of switching cycle and the variation volume of fluid forces

のがFig. 12である。

$$S_{ts} = d' / (U_\theta T)$$

ここで d' : 側線高さ

U_θ : 側線位置での極部流速

$$U_\theta = 2 U \sin \theta$$

T : 平均切り替わり周期

Fig. 12から、 S_{TS} はある側線設置位置 θ において急に小さな値をとっていることが分かる。この θ はFig. 10で明らかにした双安定流れの出現する θ と一致する。そこで双安定流れの S_{TS} とRe数の関係を示したものがFig. 14の○である。この図から、双安定流れではRe数の大きさに関係なく 2.0×10^4 付近のほぼ一定値をとることが明らかとなり、側線背後の剥離域の安定により長い周期で双安定流れのスイッチング（再付着流れと剥離流れが切り替わる現象）が起こっていることを示している。特異な変動流体力が生起しない場合は、 S_{TS} は無限小になるはずであるが、間欠的に出現するスパイク状の流体力や流体力の微妙な描動をも拾っていて、 S_{TS} の値は数倍から十数倍まで急増している。

3.5.2 双安定流れの継続時間と流体力変動量

次に双安定流れの、再付着流れと剥離流れの切り替わりに伴う流体力の変動量と両流れの継続時間について詳しく調べていくことにする。Fig. 5より平均流体力より小さい負の値（絶対値の大きい値）を再付着流れの流体力、平均流体力より大きい負の値を剥離流れの流体力とし、Fig. 11に示すように、再付着流れの全継続時間を T_{LR} 、剥離流れの全継続時間を T_{LS} 、両流れの全継続時間を T_L 、また、再付着流れの平均流体力の平均流体力との差を F_{LR} 、剥離流れの平均流体力の平均流体力との差を F_{LS} 、再付着流れと剥離流れの切り替わりによる流体力変動量をSTEPと定義すると、次の式が成り立つ。

$$F_{LR} \times T_{LR} = F_{LS} \times T_{LS}$$

$$T_{LR} + T_{LS} = T_L \quad T_{LR} = T_L - T_{LS}$$

$$F_{LR} + F_{LS} = STEP \quad F_{LR} = STEP - F_{LS}$$

よって

$$(STEP - F_{LS}) \times T_{LR} = F_{LS} \times T_{LS}$$

$$F_{LS} \times (T_{LS} + T_{LR}) = STEP \times T_{LR}$$

$$F_{LS} = STEP \times T_{LR} / T_L$$

同様にして

$$F_{LR} \times T_{LR} = (STEP - F_{LR}) \times T_{LS}$$

$$F_{LR} \times (T_{LR} + T_{LS}) = STEP \times T_{LS}$$

$$F_{LR} \times T_L = STEP \times T_{LS}$$

$$F_{LR} = STEP \times T_{LS} / T_L$$

ここでSTEPを抗力、揚力係数と同様に $C_{LS} = STEP / ((1/2)\rho AU^2)$ で無次元化し、Re数別に T_{LR}/T_L 、 C_{LS} と設置位置 θ の関係を図示するとFig. 13のようになり、両流れのそれぞれの継続時間の全継続時間に占める割合と、双安定流れの、流れの切り替わりに伴う流体力の

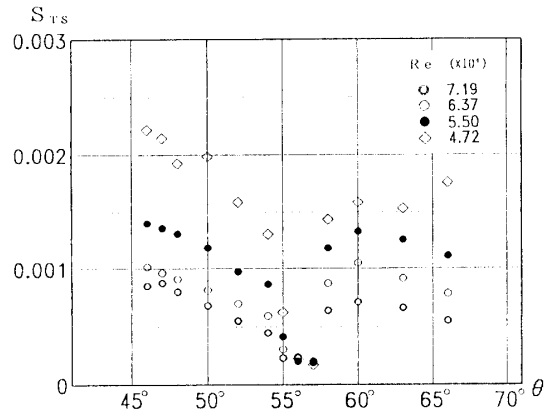


Fig. 12 Relation of the establishment position of riblet and switching cycle of variation fluid forces

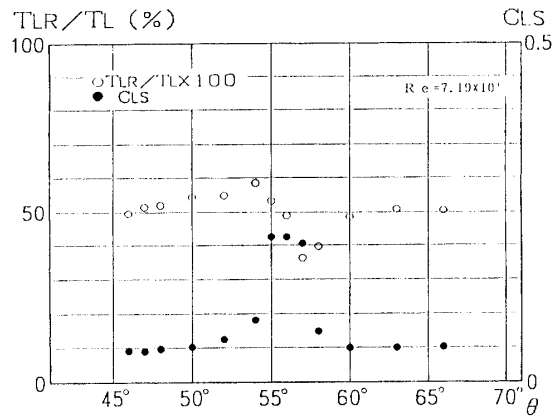


Fig. 13 Relation of the establishment position of riblet and the variation volume of lift forces

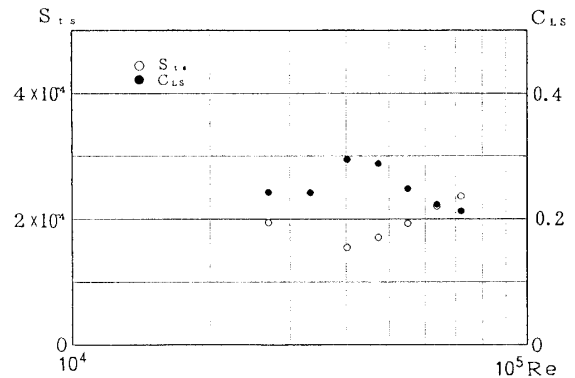


Fig. 14 Relation of the establishment position of riblet and switching cycle and the variation volume of variation fluid forces

変動量が評価できる。

この図から、特異波形の出現の条件を再確認することができる。 T_{LR}/T_L において、前半と後半の50%の値をとる θ の範囲が、再付着流れ(前半部分)又は剥離流れ(後半部分)のみが存在する範囲である。その間の θ で2つの流れ場が存在し、この範囲で T_{LR}/T_L が50%になっている θ の範囲が双安定流れ(TYPE C)の生起領域である。ここで、このときの流体力変動量について注目すると、その値は非常に高くなっていることがわかる。

T_{LR}/T_L が50%より高くなっている範囲は、両流れが存在するが再付着流れが主流であり、低くなっている範囲は剥離流れが主流である。Fig.10でははっきりと確認できなかったが、 T_{LR}/T_L が50%より高い範囲は低い範囲に比べて広い。このことから、再付着流れが優勢であると剥離はおこりやすいが瞬間で、剥離しても安定しないためその範囲は広い範囲にわたる。逆に剥離流れが主流であると再付着はおこりにくいため、その範囲は狭くなると考えられる。

揚力の変化が最大である値をRe数にたいして描点したのがFig.13の●である。無次元変化強さはほぼ0.2~0.3で、Re数 = 4×10^4 で最大値をとるようである。

4. まとめ

双安定流れによる流体力の特異な変動に注目して、その出現条件ならびに変動特性について検討した結果を要約すると、次の通りである。

1. 渦放出周期の2~3倍の移動平均値を変動波形と

して、その歪度、尖り度によって客観的に特異な変動波形を判別することが可能であり、その結果の一つである双安定流れの生起状態はFig.10に示したとおりである。

2. 双安定流れで、流れパターンが切り替わる平均周期をストローハル数の形で表すと、Fig.14に示したとおり、Re数によって若干変化するが、Re数 = 3.5×10^4 で $S_{ts} = 1.5 \times 10^{-4}$ の最小値をとり、実験Re数の範囲では $S_{ts} = 1.5 \sim 2.5 \times 10^{-4}$ で、変化は小さい。
3. 双安定流れで、流れの切り替わりによる揚力変化の大きさは、Re数 = 3.5×10^4 で $C_{L,S} = 0.3$ と最大値をとり、実験範囲では $C_{L,S} = 0.2 \sim 0.3$ で変化は小さい。
4. 2, 3の結果から、双安定流れによる階段状に変化する流体力の大きさと周期を量的に評価できた。両者の値が大きく変化しないことは注目される結果である。

参考文献

- 1) 椿東一郎：水理学 I, II (森北出版, 1973)
- 2) 斎藤隆, 横山均, 多和芳雄：半円形側線付円柱空力特性(第24回乱流シンポジウム講演論文集 1992)
- 3) 原田敏行：側線付円柱に作用する流体力(山口大学卒業論文 1992)
- 4) 斎藤隆, 羽田野袈裟義, 奥野雅晴：直列二円柱に作用する流体力(水工学論文集 第34巻 pp.229-234 1992)

(平成5年4月15日受理)