

## 静水中で運動を開始する円柱に作用する変動流体力\* (反復運動における変動揚力の非反復性の境界層はく離制御による抑制)

羽二生 博之\*<sup>1</sup>, 宮越 勝美\*<sup>1</sup>, 鈴木 聡一郎\*<sup>1</sup>  
武田 修平\*<sup>2</sup>, 佐々木 基成\*<sup>3</sup>

### Fluctuating Fluid Forces Acting on Circular Cylinders Commencing their Motion in Still Water (Suppression of Nonrepeatability of Fluctuating Lift by Control of Boundary Layer Separation In Repeated Motion)

Hiroyuki HANIU\*<sup>4</sup>, Katsumi MIYAKOSHI, Soichiro SUZUKI,  
Shyuhei TAKEDA and Motonari SASAKI

\*<sup>4</sup> Dept. of Mech. Eng., Kitami Inst. of Tech., 165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

When circular cylinders are moved in still water, it is known that fluctuating lift exhibits nonrepeatable characteristics even if the cylinders are repeatedly towed or swung under the same conditions. In this study, asymmetric wake is produced by control of boundary layer separation with placing tripping wire on the surface of circular cylinders in towed or swung motion to suppress the nonrepeatability of fluctuating lift. The effectiveness of the suppression was evaluated by standard deviation of ensemble collected lift data at each towed distances or swung angles and flow visualizations. The results obtained by this study will be applied to the development of manipulator arms operated in water where effects of mechanical vibrations are insignificant in comparison of that of fluctuating fluid forces associated with vortex formation.

**Key Words:** Vortex, Fluid Force, Fluid Transients, Flow Induced Vibration, Separation, Circular Cylinder, In Still Water

#### 1. 結 論

水中での危険な環境下における作業は、今後徐々にロボット化されていくものと予測される。特に熟練作業が要求される分野では、技術者が自らもぐって作業することは困難であり、高精度な位置決めや軌跡の制御ができる水中マニプレータの開発が不可欠である。静水中でマニプレータのアーム構成要素に見立てた柱状物体が運動を開始すると、物体背後に渦が形成され、物体の左右の渦のバランスが崩れて変動流体力が作用する。また、水は空気よりも密度が1000倍ほど大きいので、流体力もかなり大きなものとなる。特に物体の進行方向と垂直な方向に作用する揚力変動のrms値は、円柱において流体と物体との相対速度に基づく理論抗力(動圧×投影面積)の50%近くにもなる。これは、抗力変動のrms値が理論抗力の約10%である

ことに比べると<sup>(1)</sup>はるかに大きく、渦放出に基づく揚力変動は水中マニプレータの高精度な位置決め制御を行ううえで非常に重要な要素である。

前報<sup>(2)</sup>においては、このような観点から円柱を静水中で反復的に運動させたときの揚力の挙動を調べた結果、並進運動および旋回運動のいずれの場合においても、揚力変動には移動距離および旋回角度に対して強い非反復性があることが明らかとなった。

本研究においては、揚力変動の反復性を高めて揚力変動が予測可能な外乱となるような流れ制御を行うことによって、マニプレータの高精度な制御が今後可能になることを想定している。反復性を高める手法としては、トリッピングワイヤを円柱の片側表面に設置して境界層のはく離を制御し、運動開始直後に円柱背後に形成されるはく離泡を左右(または上下)非対称に成長させ、必ず一方のはく離泡の巻込みを先行させることを考えた。

一方、揚力変動そのものを抑制する流れ制御によって、マニプレータの制御を容易にすることも考えられる。流体力そのものを抑制する試みはこれまでいくつかあるが<sup>(3)(4)</sup>、いずれも外部流体の導入や円柱直径の

\* 原稿受付 2000年10月30日。

\*<sup>1</sup> 正員、北見工業大学(☎090-8507 北見市公園町165)。

\*<sup>2</sup> (株)エスイーシー(☎040-8632 函館市末広町22番1号)。

\*<sup>3</sup> アルプス電気(株)(☎145-8501 東京都大田区雪谷大塚町1-7)。

E-mail: HANIU-Hiroyuki/me@king.cc.kitami-it.ac.jp

数倍の大きさのプレートの設置を必要とし、工学的な応用において問題がある。また坂本ら<sup>(6)</sup>はごく小さな円柱をはく離せん断層内に挿入して、円柱背後におけるはく離せん断層の巻込みを抑制することによって、変動流体力を十分減少させることに成功している。しかし小円柱の最適な挿入位置の範囲は狭く、水中マニピレータの場合のように初期振動を避けるために静止状態から定速状態まで助走区間において加速運動させる場合は、はく離せん断層の位置が大きく変化するため、制御が難しいものと思われる。特に巡回運動においては、スパン方向のレイノルズ数が変化するため、制御はいつそう難しいものと思われる。

五十嵐<sup>(6)</sup>は、円柱まわりの流れに及ぼすトリッピングワイヤの影響を調べ、円柱中心から見て前方よどみ点から計ったワイヤの設置角度  $\beta$  およびワイヤから円柱下流へ引いた接線の接点までの角度  $\alpha$  の和で表される  $\phi_R = \beta + \alpha$  を一つのパラメータとし、もう一つのパラメータをワイヤ直径と境界層外縁の速度に基づく粗さレイノルズ数として、はく離パターンを整理した。その結果  $\phi_R$  が  $76^\circ$  以上においては境界層は粗さレイノルズ数に関係なくワイヤから直接はく離するパターン D であることが示された。したがって本研究においては、 $\phi_R$  が  $76^\circ$  以上になるようにトリッピングワイヤを設置することで、円柱の後流を安定して非対称にできる制御が可能になると考え、並進運動と巡回運動における揚力変動の挙動に与えるトリッピングワイヤの影響を調べた。また巡回運動においては、スパン方向の粗さレイノルズ数がほぼ一定になるようなテーパ形状の薄いプレートを円柱表面に垂直に取付けて揚力変動の挙動を調べた。

## 2. 実験装置および方法

**2.1 並進運動における実験条件** 本実験ではまず、有限長の円柱にえい航による並進運動をさせて揚力変動の測定を行った。図1に示すように水深約300 mm、幅300 mmの断面を有するえい航式水路に円柱

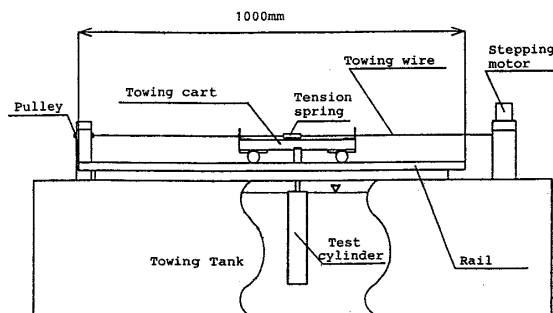


Fig. 1 Schematic view of towing experiment

を上端部がほぼ水面に一致するように垂直に設置し、ステッピングモータとワイヤおよびプリー(0.1 mm/step)によって水平方向にえい航した。円柱は図2に示すように直径48 mm、長さ240 mmで、下端面は薄いプラスチック板によって閉じている。揚力変動は前報<sup>(2)</sup>においては円柱中心軸上部に張られたストレインゲージで曲げモーメントとして検出し、スパン中央の集中加重に換算した。しかし本研究においては図2の右側に示すように、円柱を支える中心軸の上端部にロードセル<sup>(7)</sup>を取付けて、その上部をえい航装置の台車に固定し、直接揚力変動を検出した。

えい航速度は10 cm/sとし、えい航開始時における円柱の慣性力による振動を避けるためにえい航距離が10 cmまでは等加速度運動<sup>(2)</sup>をさせ、えい航距離が60 cmまで揚力変動の測定を行った。等加速度運動における助走距離を10 cmとした経緯については、前報<sup>(2)</sup>を参照されたい。なお揚力の検出方法が本研究ではロードセル方式と変更になったが、助走距離による振動の影響は前報と同様な結果が得られている。

一方、本研究のような実験においては、渦形成に伴う揚力変動の周波数特性と運動システム系のもつ機械的な振動周波数特性を明確に区別する必要がある。そこで静止状態の円柱を水中(円柱先端面に空気抜きの小孔を設けて水を内部に満たした)に設置し、揚力方向に小さな振動を与えて、固有振動数をロードセル出力電圧変動のパワースペクトルから求めた。その結果、固有振動周波数は約15 Hzであった。また、ステッピングモータのステップ動作による振動周波数は約1 kHzと、極めて高いものとなっている。一方、円柱の並進運動が一定速度になったときのレイノルズ数は約  $4.8 \times 10^3$  である。したがって予想される渦放出周波数は、ストローハル数を約0.2と仮定すると、約0.4 Hzと考えられる。したがってサンプリングにおける固有振動によるエリアシングを防止するため、えい航距離に対する十分な分解能を得るために、アナログローパスフィルタのカットオフ周波数を2 Hzに、12 bit A/D変換器のサンプリング周波数を10 Hzに

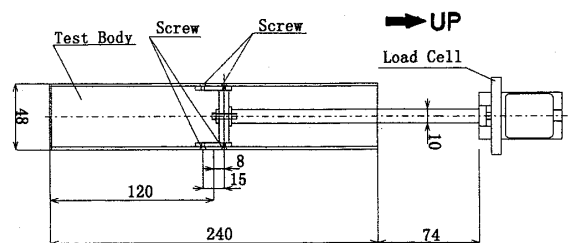


Fig. 2 Test body for towing experiment

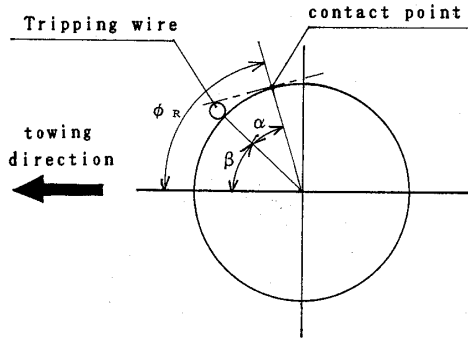


Fig. 3 Definition of setting angles

設定して、コンピュータに揚力変動の時系列データを取り込んだ。なお本実験において揚力成分に対して垂直な抗力成分は、揚力を検出する目的で設置したロードセルに約0.05%検出される。

境界層のはく離制御のために用いたトリッピングワイヤの設置角度  $\beta$ 、円柱表面接点までの角度  $\alpha$  および  $\phi_R$  を図3に示す。円柱直径 48 mm に対し、トリッピングワイヤは直径 4 mm のものを用い、設置角度  $\beta$  は  $30^\circ$  から  $80^\circ$  まで  $5^\circ$  おきに変化させて揚力変動の測定を行った。本研究における  $\alpha$  の値は  $32.2^\circ$  一定であり、各設置角度  $\beta$  に対する  $\phi_R$  および粗さレイノルズ数  $Re_K$  の値を表1に示す。

2.2 旋回運動における実験条件

旋回運動においては、図4に示すように水深約400 mm、幅600 mm、長さ1350 mmの水槽の水深中央付近に図5に示すように直径50 mm、長さ335 mmの円柱を水平に設置し、ステッピングモータ ( $0.1^\circ/\text{step}$ ) によって旋回させた。また図5からわかるように円柱の根本側の端面は旋回軸から35 mm 離れており、中心支持軸となっている真ちゅうパイプと接触しない程度のすきまを残してほぼ閉じていて、先端面も閉じている。揚力変動は円柱を支持する真ちゅう中空パイプ表面の旋回軸から60 mm 離れた位置にひずみゲージを張って、軸の曲げひずみとして検出し、円柱スパン中央への集中加重に換算した。

旋回角速度は  $1.0 \text{ rad/s}$  として  $0 \sim 180^\circ$  まで旋回させたが、並進運動同様旋回開始時の振動を避けるために円柱先端部の円弧運動の軌跡に沿う助走距離が10 cm 程度 (約13 cm) になるように  $0 \sim 20^\circ$  までは等角加速度運動させ、停止時には  $160 \sim 180^\circ$  までを等角減速度運動させた。また、水中での円柱の固有振動数は約7 Hz であり、ステッピングモータのステップ動作周波数は0.5 kHz である。円柱スパン中央付近の周速度から渦放出周波数は約0.8 Hz と予想されることから、エアシング防止のアナログフィルタとA/D変

Table 1 Experimental parameters

$\beta$	$\phi_R$	$Re_K$
$30^\circ$	$62.2^\circ$	400
$35^\circ$	$67.2^\circ$	459
$40^\circ$	$72.2^\circ$	514
$45^\circ$	$77.2^\circ$	566
$50^\circ$	$82.2^\circ$	613
$55^\circ$	$87.2^\circ$	655
$60^\circ$	$92.2^\circ$	693
$65^\circ$	$97.2^\circ$	725
$70^\circ$	$102.2^\circ$	752
$75^\circ$	$107.2^\circ$	773
$80^\circ$	$112.2^\circ$	788

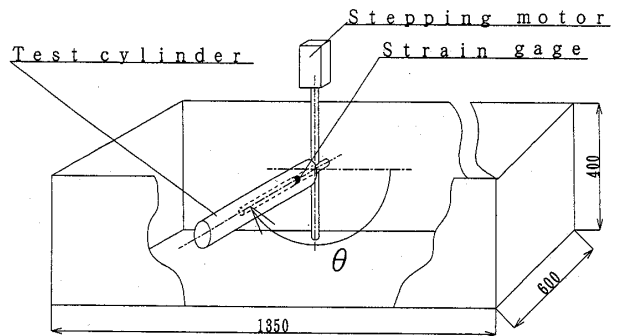


Fig. 4 Schematic view of swing experiment

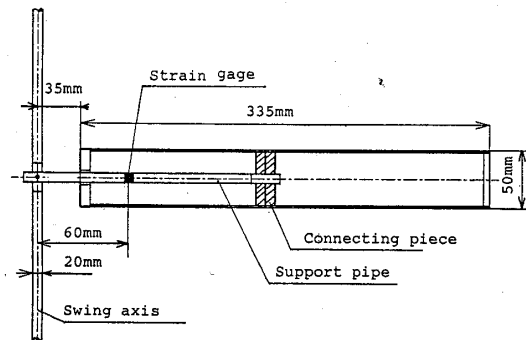


Fig. 5 Test body for swing experiment

換器のサンプリング周波数を並進運動の場合と同じ2 Hz および10 Hz とした。この旋回運動における抗力成分の揚力方向へのリークは約1.5%であるが、抗力変動が揚力変動の1/5程度であることを考慮すると、抗力変動のリークに起因する揚力変動の検出誤差は約0.3%であり、十分無視できる。

3. 結果および考察

3.1 並進運動における制御効果 図6はトリッピングワイヤを設置していない無制御時において、えい航距離  $X$  を横軸に瞬間揚力係数  $C_L$  を縦軸にとって250回のえい航を重ね合わせた結果を示したものである。ここで  $C_L$  はロードセルによって検出された瞬

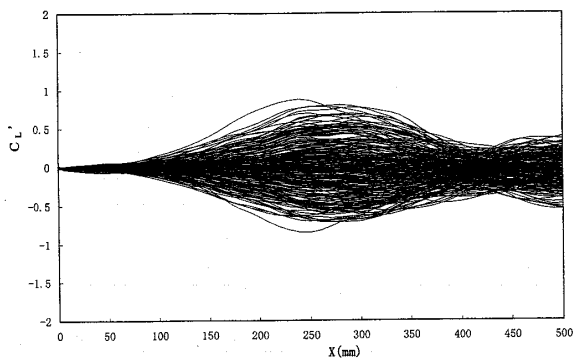


Fig. 6 Variation of instantaneous lift coefficient (no tripping wire)

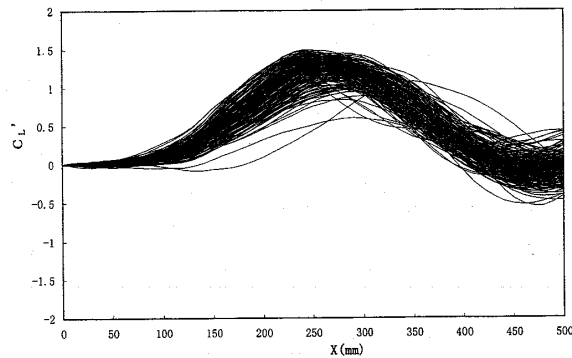


Fig. 8 Variation of instantaneous lift coefficient ( $\beta=50^\circ$ )

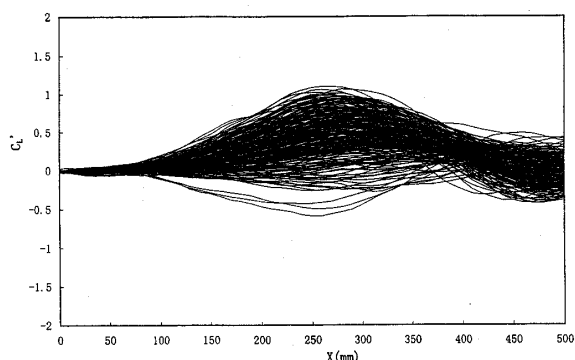


Fig. 7 Variation of instantaneous lift coefficient ( $\beta=30^\circ$ )

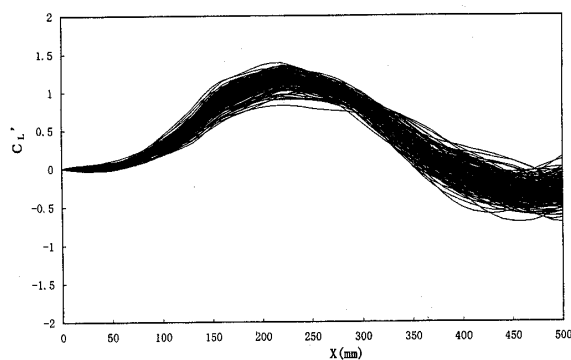


Fig. 9 Variation of instantaneous lift coefficient ( $\beta=65^\circ$ )

間揚力を、定常えい航速度である 10 cm/s における動圧に基づいて無次元化したものである。また個々のえい航は、先のえい航によって生じた乱れが十分に収まるのを待って行った。図 6 から、同一条件での反復的なえい航運動に対して揚力変動はほとんど反復性を示さないという、前報<sup>(2)</sup>の結果とよく一致しているのがわかる。

図 7 から図 9 は、トリッピングワイヤの設置角度  $\beta$  をそれぞれ 30, 50, 65° にしたときの揚力変動を 250 回重ね合わせたものである。図 7~9 から、ワイヤの設置角度  $\beta$  が増加するに従い、揚力変動の軌跡がワイヤを設置した側 ( $C_L$  が正の側) に偏り、軌跡の幅が狭まって非反復性が抑制されているのがわかる。図 7 の  $\beta$  が 30° のときの  $\phi_R$  の値は表 1 に示したように 62.2° であり、五十嵐<sup>(6)</sup>の報告によると、この制御条件ではワイヤが境界層のはく離に影響を与えないパターン A とワイヤから直接はく離するパターン D の遷移領域にあっており、そのためえい航開始直後の後流はわずかに非対称になっているものと考えられる。

図 8 の  $\beta$  が 50° において  $\phi_R$  の値は 82.2° (>76°) であり、流れは直接はく離するパターン D となっている

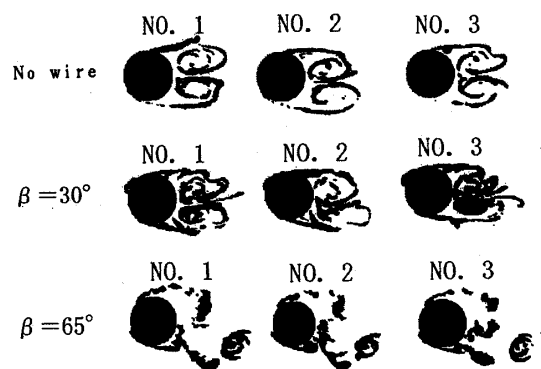


Fig. 10 Flow visualizations for towing experiment ( $X=200$  mm)

ものと思われる。図 9 の  $\beta$  が 65° については、30° から 80° まで 5° おきに行った実験の中で軌跡の幅が最も狭くなったものを示したものである。このときの  $\phi_R$  の値は 97.2° で、やはり流れはワイヤから直接はく離するパターン D となっているものと思われる。

図 10 に無制御時と  $\beta$  が 30° および 65° のときの、揚力の軌跡の偏りが最も強くなるえい航距離  $X=200$  mm におけるスパン中央ではなく離せん断層の可視化画像を示した。図 10 の可視化画像はいくつもの可

視化画像の中から代表的なものを示したものである。まず無制御時では、No. 1 と No. 2 の画像のように上または下側のはく離泡の成長が進んでいるものや、No. 3 の画像のように上下のはく離泡の成長がほぼ同じものがあつたりと、いろいろな流れパターンが見られた。トリッピングワイヤの設置角度  $\beta$  が  $30^\circ$  の場合には、No. 2 や No. 3 の画像のように下側のはく離泡の成長が進んでいるものが多く観測されたが、No. 1 の画像のようにはく離泡が上下ほぼ対称なものも時折見られた。また  $\phi_R$  の値は  $76^\circ$  以下の  $62.2^\circ$  であるため、トリッピングワイヤからはく離した境界層はすぐ下流で円柱に再付着しているのがわかる。これに対して、 $\beta$  が  $65^\circ$  の場合は  $\phi_R$  の値は  $76^\circ$  よりも十分大きい  $97.2^\circ$  であるため、境界層はトリッピングワイヤから直接はく離しているのがわかる。またはく離せん断層は、No. 1 から No. 3 の 3 画像に見られるように、下側のはく離せん断層の巻込みがすでに完了した非対称な流れ場となっており、わずかな違いはあるものの、つねに同じ流れパターンが観測された。

非反復性の強さを表すパラメータとして、特定のえい航距離  $X$  における揚力係数の 250 個の集合データ

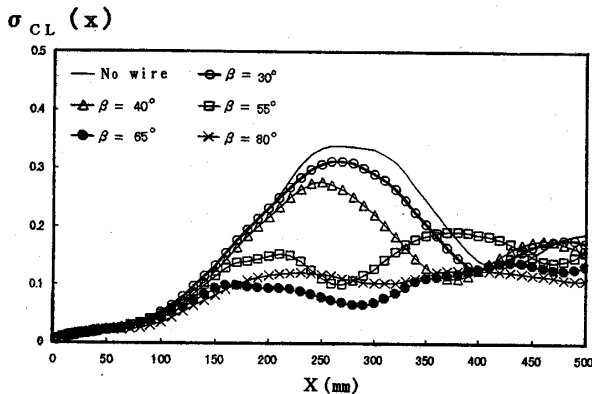


Fig. 11 Standard deviation of lift coefficient at specific towing distances

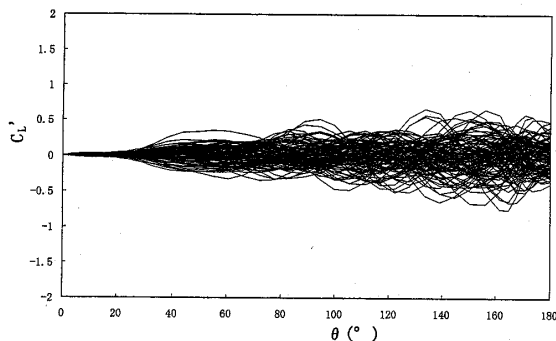


Fig. 12 Variation of instantaneous lift coefficient (no tripping wire)

を用いた標準偏差  $\sigma_{cl}(X)$  を求め、えい航距離に対する変化を図 11 に示した。図 11 からわかるように、 $\beta$  が  $65^\circ$  において揚力変動の非反復性が最も抑制されている。

また、 $X=400$  mm 付近で非反復性が増加しているのは、渦生成の位相のずれがえい航距離が増加するに従って大きくなるためと思われる。

以上のことから、トリッピングワイヤを適切な位置に設置することによって、後流の非対称性が強まり、揚力変動の非反復性が抑制されることがわかる。

**3・2 旋回運動における制御効果** 図 12 はトリッピングワイヤを設置していない無制御時において、旋回角度  $\theta$  を横軸に瞬間揚力係数  $C_L$  を縦軸にとり、繰返し旋回運動をさせたときの揚力の軌跡を重ね合わせたものである。ここで  $C_L$  はひずみゲージで検出された円柱支持軸の曲げ応力から円柱スパン中央の集中加重に換算した瞬間揚力を求め、それを定速旋回運動時のスパン中央での周方向移動速度である  $20$  cm/s における動圧に基づいて無次元化したものである。また個々の旋回は、先の旋回によって生じた乱れが十分収まるのを待って行った。図 12 から、並進運動の場合と同様に揚力変動は反復運動に対してほとんど反復性を示さないことがわかる。

トリッピングワイヤの設置角度  $\beta$  を  $30^\circ$  から  $80^\circ$  まで  $5^\circ$  おきに変化させて実験を行った。その結果設置角度の増加とともに揚力変動の軌跡の非対称性は生じたが、並進運動の場合のように軌跡の広がり顕著な減少は見られなかった。図 13 はその中で軌跡の広がりが最も小さくなった設置角度  $\beta=55^\circ$  における揚力変動の軌跡を示したものであり、旋回前半部での非反復性の抑制効果がほとんどないことがわかる。これは、旋回運動においては円柱の周方向の移動速度がスパン方向で変化するため、円柱自体のレイノルズ数およびワイヤの粗さレイノルズ数が一定とならず、境界

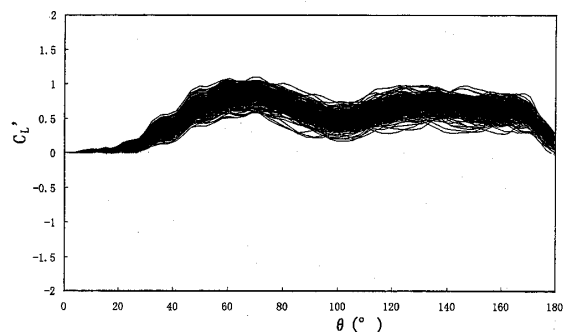


Fig. 13 Variation of instantaneous lift coefficient ( $\beta=55^\circ$ )

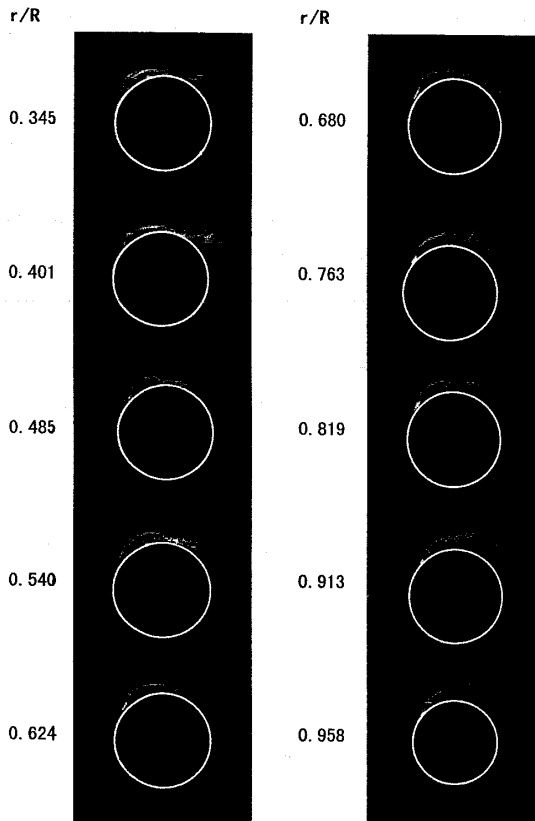


Fig. 14 Visualization of flow separation from tripping wire ( $\theta=60^\circ, \beta=55^\circ$ )

層のはく離パターンがスパン方向で異なるためと思われる。 $\beta=55^\circ$ における $\phi_R$ の値は並進運動の場合の $87.2^\circ$ とほとんど同じであり、五十嵐<sup>(6)</sup>の報告によると、粗さレイノルズ数に関係なくトリッピングワイヤから直接はく離するパターンDのはずである。しかしながら五十嵐の報告では粗さレイノルズ数が200以下のデータは示されておらず、本研究の旋回運動では、旋回軸付近でのワイヤの粗さレイノルズ数は200以下の部分もあり、パターンD以外の流れパターンが円柱の根本付近に存在しているものと考えられる。

図14は揚力変動の軌跡の非対称性が顕著となる旋回角度 $\theta=60^\circ$ におけるスパン方向のいろいろな断面での境界層はく離の可視化画像である。図14の $r$ は各可視化断面の旋回軸からの距離であり、 $R$ は旋回軸から円柱先端面までの距離である。図14からわかるように、 $r/R$ の値が0.763以上の先端付近の流れはトリッピングワイヤから直接はく離するパターンDであるが、 $r/R$ が0.68以下では一度ワイヤからはく離した流れが下流で再付着するパターンAとなっている。非反復性が抑制されないおもな原因は、パターンAからパターンDに変わるスパン方向における位置が旋回運動をさせるごとに少しずつ異なるためと考え

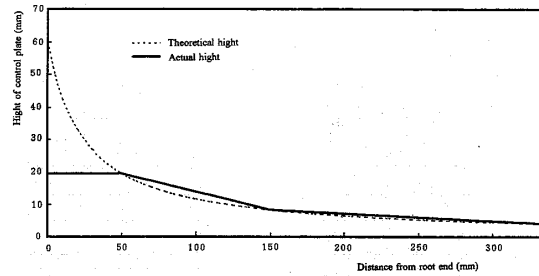


Fig. 15 Hight variation of control plate

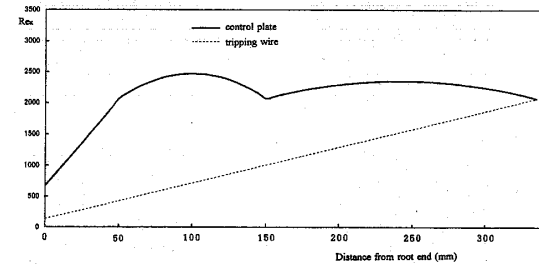


Fig. 16 Variation of roughness Reynolds number

られる。

### 3.3 テーパ形状小平板による制御 旋回運動に

おいては、スパン方向の各位置での粗さレイノルズ数をおよそ一定にすることによって、スパン方向の広い範囲にわたって境界層のはく離状態をパターンDに統一することができ、その結果揚力変動の非反復性を抑制することが可能であると考えられる。そこでトリッピングワイヤにおける円柱先端付近の粗さレイノルズ数と同じ粗さレイノルズ数がスパン方向全体で得られるような小平板を $\beta=55^\circ$ の位置に取付ける場合の突起高さのスパン方向における値を求め、図15に破線で示した。図15からわかるように突起高さの変化は逆関数形の曲線のため加工が難しく、円柱の根本端面付近での突起高さはかなり高いものとなる。根本端面付近の周方向速度は遅く、その部分の揚力変動全体へ及ぼす影響は小さいので、図15の実線で示したように加工の容易なテーパ部と矩形部を組合せ形状の厚さ3mmの制御小平板を用いて実験を行った。なお、スパン方向における粗さレイノルズ数の変化を、トリッピングワイヤと制御小平板を用いた場合についてそれぞれ破線および実線で図16に示した。図16からスパン方向の広い範囲において制御小平板の粗さレイノルズ数がおおむね一定であることがわかる。

図17は、旋回角度 $\theta=60^\circ$ におけるスパン方向の各断面での境界層はく離の可視化画像である。図17からわかるようにスパン方向のすべての断面において境界層が制御小平板から直接はく離するパターンDとなっている。また、図18はこの制御条件における揚力

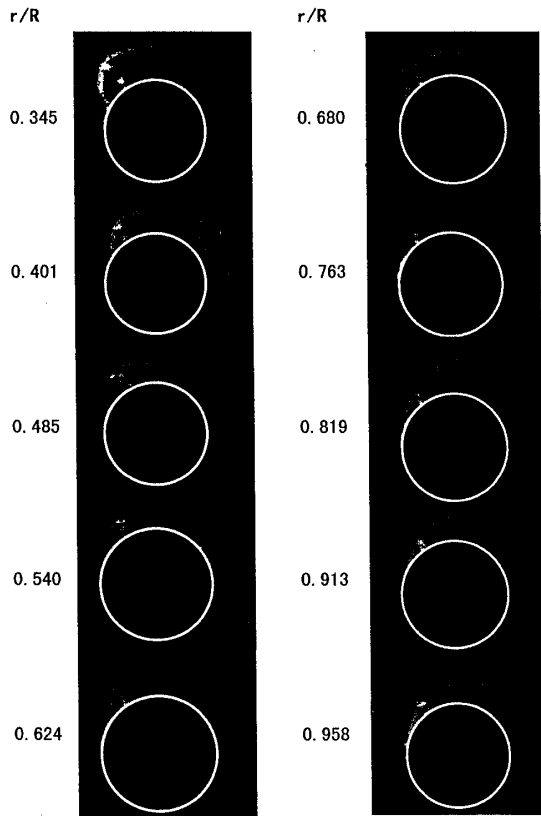


Fig. 17 Visualization of flow separation from control plate ( $\theta=60^\circ$ ,  $\beta=55^\circ$ )

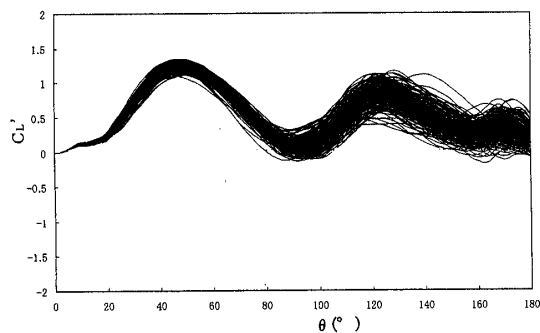


Fig. 18 Variation of instantaneous lift coefficient (With control plate,  $\beta=55^\circ$ )

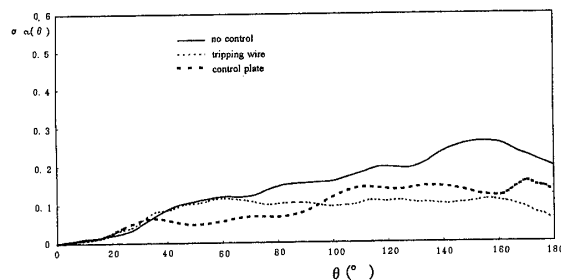


Fig. 19 Standard deviation of lift coefficient at specific swing angles

変動の軌跡を重ね合わせたものであるが、旋回前半部において軌跡の幅がトリッピングワイヤの場合よりもかなり狭くなり、非反復性が図9に示した並進運動の場合と同じ程度抑制されていることがわかる。さらに、特定の旋回角度ごとの揚力係数の標準偏差  $\sigma_{C_L}(\theta)$  を求め、その旋回角度  $\theta$  に対する変化を図19に示した。図19では無制御時のものを実線で、 $\beta=55^\circ$  にトリッピングワイヤを設置したときのものを細い破線で、小平板による制御時のものを太い破線で示した。図19から旋回前半部における小平板による非反復性の抑制効果が十分得られていることがわかる。これに対して旋回後半部では、小平板はトリッピングワイヤよりも非反復性の抑制効果が低いことがわかる。これは旋回後半部において渦の巻込み位相のずれが大きくなるためであり、揚力の各軌跡に周期変動する特性が現れていることから、旋回後半部においても揚力変動の予測は無制御時やトリッピングワイヤを用いた場合よりも容易であるものと考えられる。

一方円柱先端部の旋回円弧に沿った移動距離は  $\theta=90^\circ$  において約 580 mm であり、ここまでの揚力変動の軌跡は図9に示した並進運動でのトリッピングワイヤによる制御の場合とよく似ている。したがって、旋回運動後半部での流れの展開は並進運動での 600 mm から 1 200 mm 付近までのえい航距離における流れの展開に相当するものと考えられ、並進運動での 500 mm 以上のえい航距離でも揚力変動の予測は容易であると思われる。

#### 4. 結 論

(1) 並進運動において円柱表面の片側にトリッピングワイヤを適切な位置に設置することによって、後流の非対称性が強まり、必ず一方のはく離せん断層の巻込みが先行して、反復的な並進運動を行ったときの揚力変動の非反復性が十分に抑制されることがわかった。

(2) 旋回運動において円柱表面の片側にトリッピングワイヤを設置してもスパン方向での粗さレイノルズ数が変化するため、はく離パターンが異なり非反復性があまり抑制されないことがわかった。

(3) 旋回運動において粗さレイノルズ数がスパン方向でほぼ一定になるような粗さ高さをもった小平板を適切な位置に設置することによって、はく離パターンがスパン方向の広い範囲で統一され、旋回前半部において非反復性が十分に抑制されることがわかった。

(4) 小平板による制御での旋回後半部においては渦の巻込み位相がずれるために非反復性はあまり抑制

されないが、揚力変動に周期性があるため、揚力変動の予測は無制御時やトリッピングワイヤによる制御時よりも容易であることがわかった。

文 献

- (1) Sakamoto, H. and Haniu, H., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **116** (1994), 221-227.
- (2) 羽二生博之・ほか2名, *機論*, **65-630**, B (1999), 642-647.

- (3) 例えば, 上田新次郎・田中英穂, *機論*, **41-350**, (1975), 2853-2865.
- (4) 例えば, Roshko, A., *NACA, Tech. Note*, No. 3169 (1954).
- (5) 坂本弘志・ほか2名, *機論*, **57-535**, B (1991), 882-890.
- (6) 五十嵐保, *機論*, **52-473**, B (1986), 358-366.
- (7) 坂本弘志・ほか2名, *機論*, **52-475**, B (1986), 1175-1183.