

## 静水中において壁面近傍で運動を開始する円柱に作用する変動流体力\* (反復運動における非再現的揚力変動の壁面干渉による変化)

羽二生 博之\*<sup>1</sup>, 宮越 勝美\*<sup>1</sup>, 鈴木 聡一郎\*<sup>1</sup>  
長谷川 雅昭\*<sup>2</sup>, 本間 友幸\*<sup>2</sup>

### Fluctuating Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder Commencing their Motion near a Wall in Still Water (Variation of Nonrecursive Lift Fluctuation due to Interaction with the Wall in Repeated Motion)

Hiroyuki HANIU\*<sup>3</sup>, Katsumi MIYAKOSHI, Soichiro SUZUKI,  
Masaaki HASEGAWA and Tomoyuki HONMA

\*<sup>3</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 nonrecursive characteristics even if the cylinder is repeatedly towed or swung under the same conditions. In this study, the cylinder is operated near a wall in towed or swung motion to investigate the effects of interaction with the wall on the nonrecursive characteristics of fluctuating lift. The effects of the interaction were evaluated by standard deviation of ensemble collected lift data at each towed distances or swung angles. The results obtained by this study will be applied to the development of manipulator arms operated in water where the effects of mechanical vibrations are insignificant in comparison of those of fluctuating fluid forces associated with vortex formation and the wall interaction.

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

## 1. 緒 論

静水中でマニプレータのアーム構成要素に見立てた円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揚力が作用するが、水は空気よりも密度が極めて大きいため流体力も極めて大きく、それに基づくアーム先端の変位は物体の固有振動に基づく変位に比べ無視できないほど大きなものであると考えられる。したがって、渦形成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>(1)</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再現性があることが明らかとなった。またその続報<sup>(2)</sup>においては、揚力変動の再現性を高めて揚力変動が予測可能な外乱として扱えるような流れ制御を行え

ばマニプレータの高精度な制御が今後可能になると考えて実験を行った。その結果、トリッピングワイヤ等を円柱の片側表面に設置して境界層のはく離を制御し<sup>(3)</sup>、運動開始直後に円柱背後に形成されるのはく離泡を左右(または上下)非対称に成長させて、必ず一方のはく離泡の巻き込みを先行させることで、揚力変動の再現性を高めることに成功した。

一方、水中マニプレータの実際の稼働にあたっては、多くの場合海底や船体外壁の近くにマニプレータの駆動システムが設置されるものと考えられ、駆動時における壁面との干渉が発生し、揚力変動の非再現的挙動は壁面が近くでない場合とは異なるものと考えられる。したがって本研究においては、静水中で反復的に並進および旋回運動を行う円柱の近傍に壁面を円柱の運動面に対して平行に設置し、円柱と壁面間の距離を変化させたときの揚力変動の挙動を調べた。

これまで静止流体中において壁面付近で運動を開始する柱状物体に関する報告は著者の知る範囲ではないが、定常流中に置かれた柱状物体が壁面近傍にあるときの報告はいくつかある<sup>(4)-(7)</sup>。宮越ら<sup>(8)</sup>は乱流境界層が発達した壁面付近に円柱を設置したときの揚力変動をロードセルを用いて直接計測し、境界層が薄いときには時間平均揚力係数は円柱直径  $d$  に対する壁面

\* 原稿受付 2001年6月15日。

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

\*<sup>2</sup> 学生員, 北見工業大学大学院。

E-mail: harry@mail.kitami-it.ac.jp

との間隙  $s$  の比である  $s/d$  が 1 よりも小さくなると顕著に増加し、変動揚力係数は  $s/d$  が 0.8 付近において最大となることを示している。したがって、本研究の並進運動においては、間隙比を徐々に小さくしていったときには、 $s/d$  が 1 付近から壁面との干渉が顕著に現れるものと考えられる。しかしながら旋回運動では、スパン方向においてレイノルズ数や周方向の移動距離が異なるため、流れ場に三次元性が現れるものと思われ、壁面との干渉によって揚力変動の挙動がどのように変化するか大変興味深い。

2. 実験装置および方法

2.1 並進運動における実験条件 本実験では図 1 に示すように水深約 300 mm、幅 300 mm の断面を有する曳航式水路に円柱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ーリ (0.1 mm/step) によって水平に曳航した。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>(9)</sup> を取付け、その上部を曳航装置の台車に固定し、直接揚力変動を検出した。

曳航速度は 10 cm/s とし、曳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曳航距離  $X$  が 10 cm までは等加速度運動<sup>(1)(2)</sup> をさせ、曳航距離  $X$  が 60 cm まで揚力変動の測定を行った。

一方、静止状態の円柱(円柱先端面に空気抜きの小

孔を設けて内部に注水した)に揚力方向の小さな振動を与えたときの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固有振動周波数は約 15 Hz であった。また、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  $4.8 \times 10^3$  であり、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、エリアシングの防止と十分な時間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。

2.2 旋回運動における実験条件 旋回運動においては、図 3 に示すように水深約 500 mm、幅 700 mm、長さ 2990 mm の水槽を用いた。水槽の水深中央付近に図 4 に示すように直径 48 mm、長さ 340 mm の円柱を水平に設置し、ステッピングモータ (0.1°/step) によって旋回させた。また図 4 からわかるように円柱の根本側の薄いプラスチック製の端面は旋回軸から 22 mm 離れており、中心支持軸と接触しない程度のすきまを設け、極めて薄い耐水ゴム膜でシールし、円柱内部に揚力計測のためのロードセルを設置した。

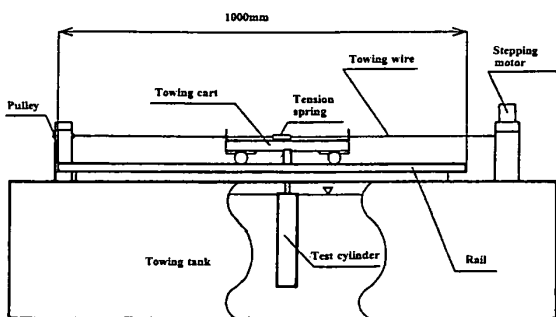


Fig. 1 Schematic view of towing experiment

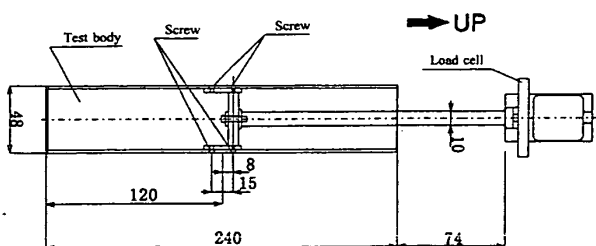


Fig. 2 Test body for towing experiment

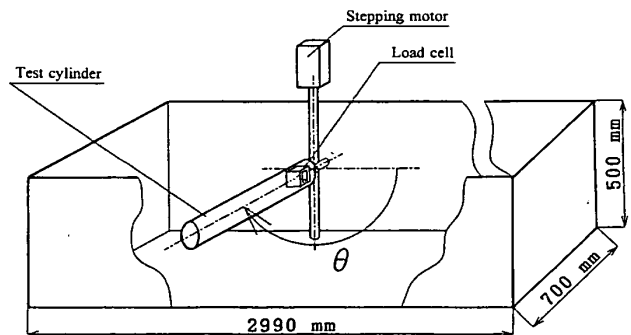
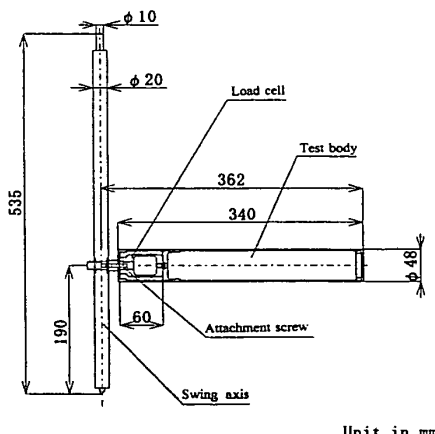


Fig. 3 Schematic view of swing experiment



Unit in mm

Fig. 4 Test body for swing experiment

ロードセルよりも先端側は耐水隔壁を挟んで空洞となっているが、円柱先端面に用いた薄いプラスチック板の上下に小孔を設けて空洞内に水が充てんされるようになっている。

旋回角速度は  $1.0 \text{ rad/s}$  として  $0 \sim 180^\circ$  まで回転させたが、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約  $13 \text{ cm}$  になるように  $0 \sim 20^\circ$  までは等角加速度運動をさせ、停止時には  $160 \sim 180^\circ$  までを等角減速度運動をさせた。水中での円柱の固有振動周波数は約  $40 \text{ Hz}$  であり、円柱スパン中央付近の周速度から予想される渦放出周波数は約  $0.8 \text{ Hz}$  である。したがって、エアシング防止と時間分解能を考え、アナログフィルタと A-D 変換器のサンプリング周波数を  $2 \text{ Hz}$  および  $20 \text{ Hz}$  とした。また旋回運動における揚力係数の算出にあたっては、一定旋回速度に達したときの円柱スパン中央における周方向速度に基づく動圧を用いた。

**2.3 干渉壁面** 並進運動における干渉壁面には水路深さ方向に  $300 \text{ mm}$ 、曳航方向に  $900 \text{ mm}$  の大きさの亚克力板を用い、旋回運動においては幅  $600 \text{ mm}$ 、長さ  $1024 \text{ mm}$  の亚克力板を用いた。また円柱の運動に伴う圧力変動によって壁面が変形しないように裏面に小さなアルミニウム製のアングル材を取付けて剛性を高めた。壁面は並進運動と旋回運動のいずれの場合においても円柱の運動面に平行に設置した。また、図 5 に示すように円柱の直径を  $d$ 、円柱と壁面の間隙を  $s$  とし、壁面から遠ざかる方向の揚力を正とした。

**2.4 流れの可視化法** 本研究では円柱後流の可視化を行うために揚力測定と同一形状の円柱を用意し、スパン中央の上下面に直径  $0.5 \text{ mm}$  の小孔を設け、そこからウラン色素を注入した。注入した色素はスライドプロジェクトにスリットカートリッジを装着して生成したライトシートにより照明し、円柱中心軸上の先端側から CCD カメラによって撮影し、そ

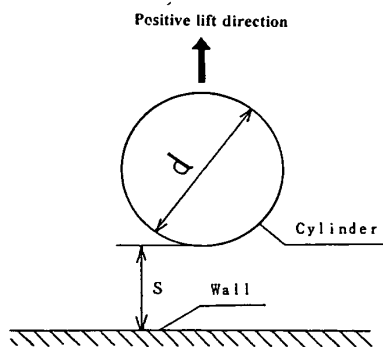


Fig. 5 Definition of symbols for important parameters

の映像をコンピュータに取り込んで二値化強調処理を行った。また壁面は CCD カメラの光軸が壁面上からオフセットしていることと、カメラの焦点深度が浅いために広がりをもって不明りょうに映っているのを、画像処理ソフトを用いて除去した後に画像編集ソフトによって太い実線で描いた。

### 3. 結果および考察

**3.1 並進運動における壁面干渉** 図 6 は干渉壁面がない状態において、曳航距離  $X$  を横軸に瞬間揚力係数  $C_L$  を縦軸にとって  $200$  回の曳航を重ね合わせた結果を示したものである。ここで  $C_L$  は瞬間揚力を定常曳航速度  $10 \text{ cm/s}$  における動圧に基づいて無次元化したものである。また個々の曳航は、先の曳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曳航運動に対して揚力変動が非再現性<sup>(1)</sup>を示すことがよくわかる。

図 7 から図 12 は円柱と壁面の間隙比  $s/d$  をそれぞれ  $2.0, 1.0, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1$  と小さくしていったときの揚力変動を  $200$  回重ね合わせたものである。図

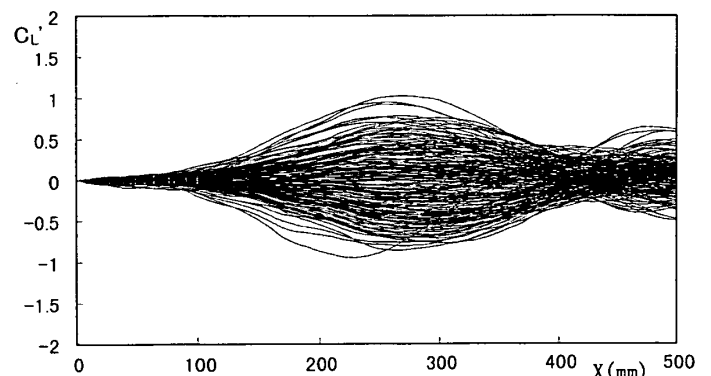


Fig. 6 Variation of instantaneous lift coefficient (without wall)

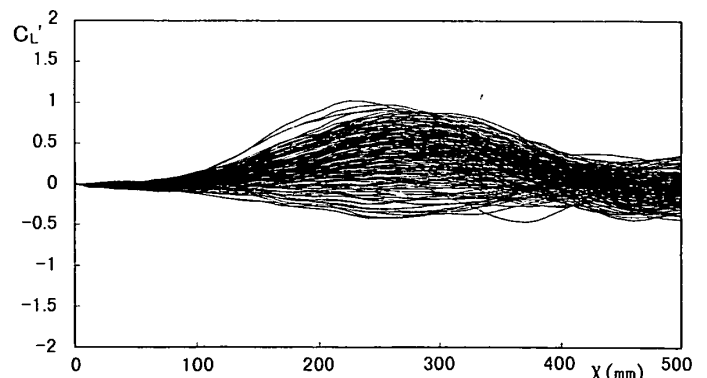


Fig. 7 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 2.0$ )

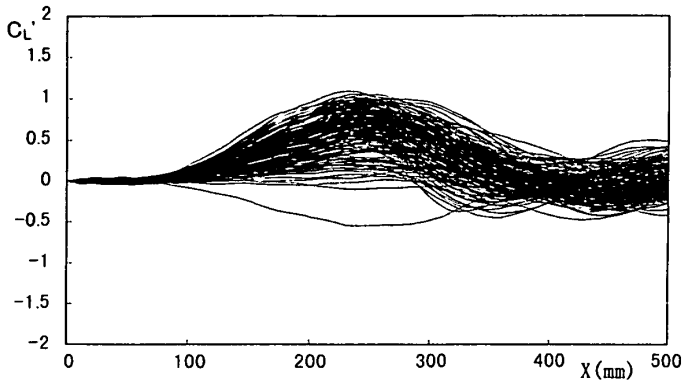


Fig. 8 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 1.0$ )

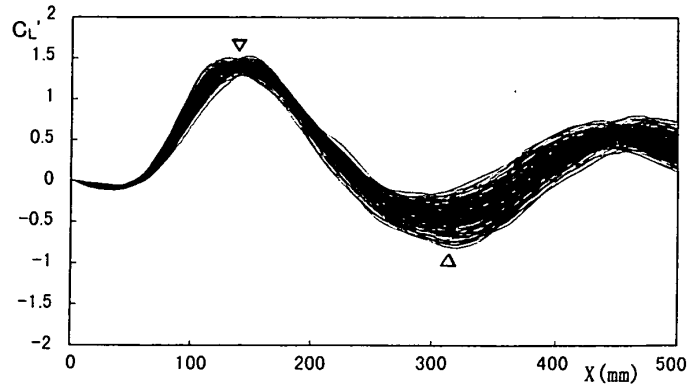


Fig. 10 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 0.3$ )

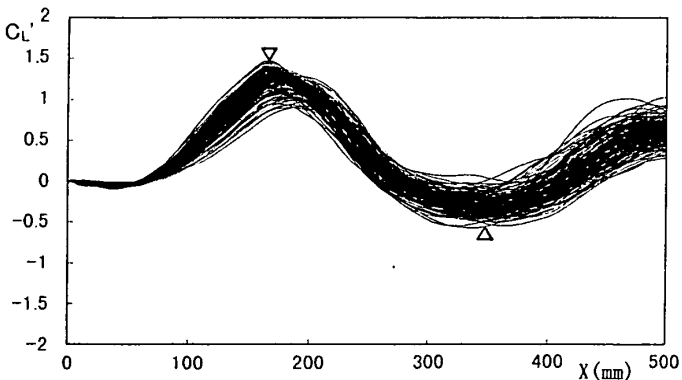


Fig. 9 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 0.5$ )

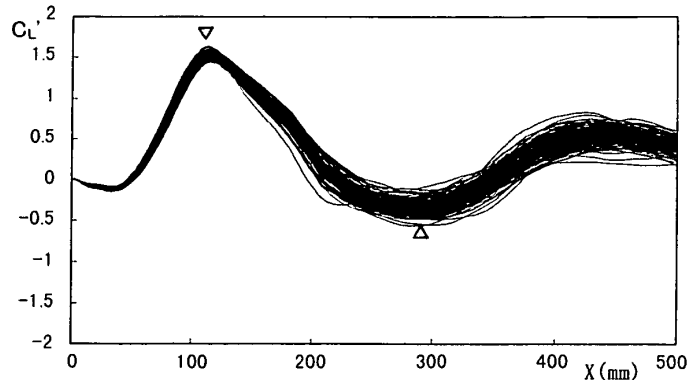


Fig. 11 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 0.2$ )

7~12 から、かんげき比が小さくなるに従い、揚力変動の軌跡が壁面と反対側 ( $C_L$  が正の側) に偏り、軌跡のばらつき (幅) が狭まって非再現性が抑制されているのがわかる。宮越ら<sup>(9)</sup> の報告では、薄い境界層が発達する壁面と円柱の干渉では、 $s/d$  が 0.5 付近においては、壁面側円柱表面のはく離点が下流側に後退し、壁面と反対側円柱表面のはく離点が上流側に前進することが示されている。したがって揚力変動の軌跡が偏るのは、壁面が近づきにつれて円柱と壁面とのかんげきを通過する流れが閉そくされ、円柱上流側 (前縁) のよどみ点が壁面側に移動して壁面側の圧力が上昇し、さらに同時に壁面と反対側の円柱背後に形成されたはく離泡が円柱背後に巻き込まれて負圧を生じるため、円柱を壁面から遠ざける力が作用するものと思われる。また、揚力変動の軌跡のばらつき (幅) が狭まっていくのは、壁面との干渉によって円柱後流が非対称に成長し、必ず一方のはく離泡の巻き込みが先行して流れ場の形成パターンの再現性が高まるためと思われる。

一方、図 9 から図 11 に示した間隙比  $s/d$  が 0.5 から 0.2 にかけては、揚力変動が顕著な周期的変動を示し、図 7 や図 8 のように間隙比が比較的大きい場合で

もわずかに周期的変動の傾向が見られる。これは曳航の初期において、まず壁面と反対側の円柱背後に形成されたはく離泡が円柱背後に巻き込まれて渦塊を形成し、次にその渦の連行によって壁面側の円柱背後に形成されたはく離泡が円柱背後に巻き込まれ、以後同様な過程が繰返されるためと思われる。また、図 9~11 中▽印で示した揚力の最初の極大値から後の△印で示した極小値までの曳航距離  $X$  に関する長さスケールは 200 mm 程度 (円柱直径の約 4 倍) とあまり変化はないが、 $s/d$  が 0.5 以下では最初の極大値 (▽印) に達するまでの曳航距離が短くなっている。

これは間隙比が小さくなるに従って間隙における閉そく効果が大きくなり壁面と反対側の円柱表面付近の流れが加速されてはく離泡の成長が促進され円柱背後への巻き込み開始の時期が早まったためと思われる。

$s/d$  が最も小さい 0.1 の場合を示した図 12 では、揚力変動が  $X = 300$  mm 付近で極小値を示した後の変化は少なくなり、周期的変動が顕著に抑制されていることがわかる。図 13 は  $s/d$  が 0.1 において揚力が最初の極大値を示す曳航距離 110 mm におけるスパン中央での可視化画像であるが、壁面と反対側の円柱背

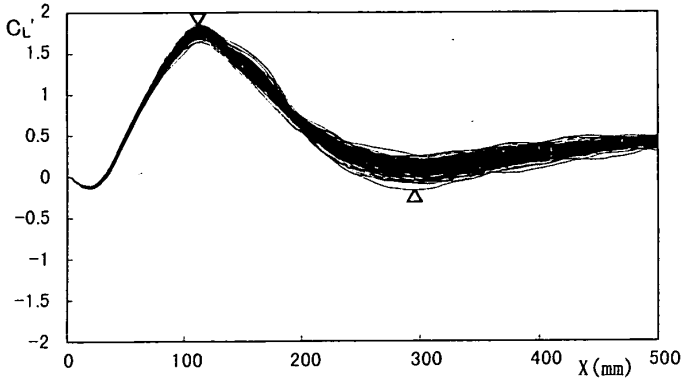


Fig. 12 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 0.1$ )



Fig. 13 Flow visualizations of towing experiment ( $s/d = 0.1, X = 110 \text{ mm}$ )

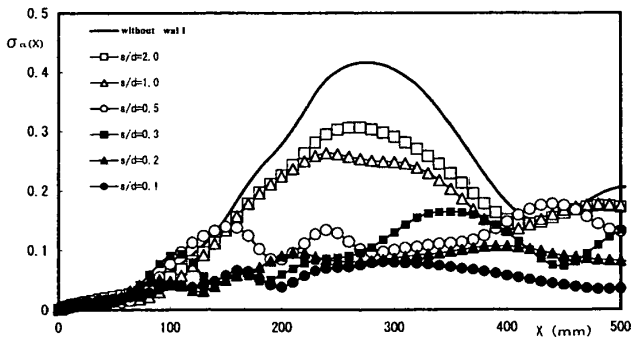


Fig. 14 Standard deviation of lift coefficient at specific towing distances

後には大きな渦塊が形成されているのに対して、壁面側の円柱背後には小さな渦塊が形成されているのがわかる。したがって、 $s/d$  が 0.2 付近までは円柱の両側に形成された渦塊が交互に連行作用を及ぼし合っていたが、 $s/d$  が 0.1 においては間隙を通過する流量が少なく、十分な連行作用を生じる渦塊が壁面側に形成されないために周期的変動が抑制されたものと思われる。

非再現性の強さを表すパラメータとして、特定の曳航距離  $X$  における揚力係数の 200 個の集合データを用いた標準偏差  $\sigma_{\alpha}(X)$  を求め、曳航距離に対する変化を図 14 に示した。円柱と壁面の間隙比  $s/d$  が小さ

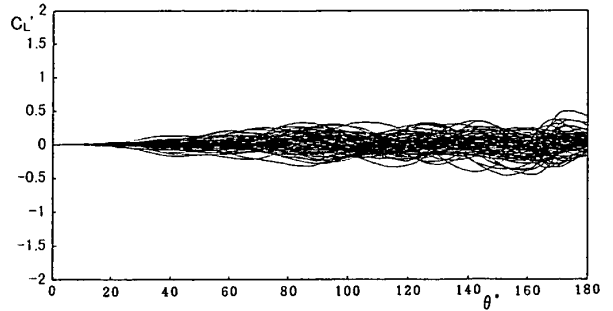


Fig. 15 Variation of instantaneous lift coefficient (without wall)

くなるに従い揚力変動の非再現性が弱まり、 $s/d$  が 0.5 以下では壁面がないときに比べて非再現性が顕著に抑制されていることがわかる。

**3.2 旋回運動における壁面干涉** 図 15 は干涉壁面がない状態において、旋回角度  $\theta$  を横軸に、瞬間揚力係数  $C_L'$  を縦軸にとって 200 回の旋回を重ね合わせたものである。ここで  $C_L'$  は瞬間揚力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 19.2 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 15 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再現性を示さないことがわかる。一方、前報<sup>(1)</sup>においては円柱根本付近の支持軸に作用する曲げモーメントをストレインゲージによって検出し、それをスパン中央における集中加重に換算して揚力を求めたため、円柱先端付近における圧力分布が揚力の値により大きく反映されていた。しかし本研究においては、円柱全体の圧力分布が均一に反映されるようにロードセルを用いて揚力を直接測定しているため、並進運動と旋回運動における揚力係数を同一の尺度で比較することができる。そのような観点から図 6 の並進運動の場合に比べると、旋回運動での揚力変動の軌跡のばらつき(幅)が半分程度に狭くなっている。旋回運動においては、円柱の先端側に行くほど周方向の移動距離と速度が大きいため円柱背後に形成される渦の成長が早くなるものと考えられる。その結果、圧力変動の位相がスパン方向の位置によって異なるために揚力の相殺が生じて、円柱全体の圧力分布を積分した値としてロードセルに検出される揚力変動の軌跡のばらつき(幅)は狭くなるものと考えられる。

図 16 から図 21 は円柱と壁面の間隙比  $s/d$  をそれぞれ 2.0, 1.0, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1 と小さくしていったときの揚力変動を 200 回重ね合わせたものである。図

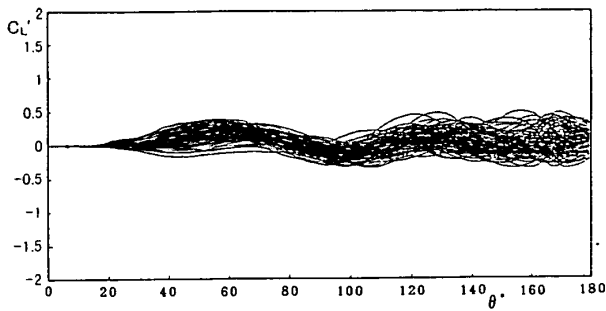


Fig. 16 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 2.0$ )

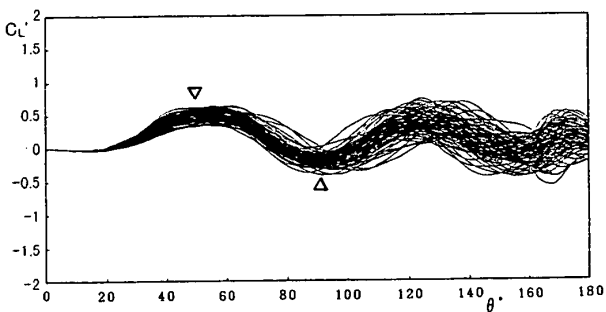


Fig. 17 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 1.0$ )

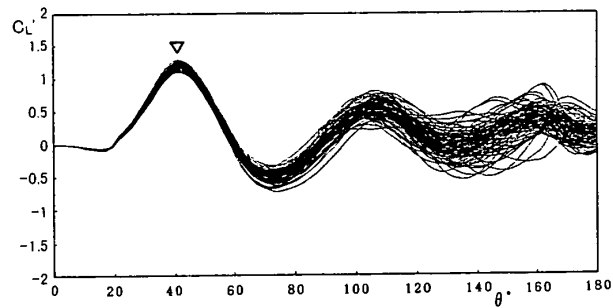


Fig. 18 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 0.5$ )

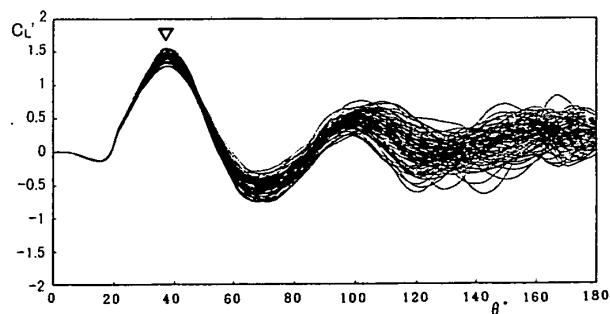


Fig. 19 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 0.3$ )

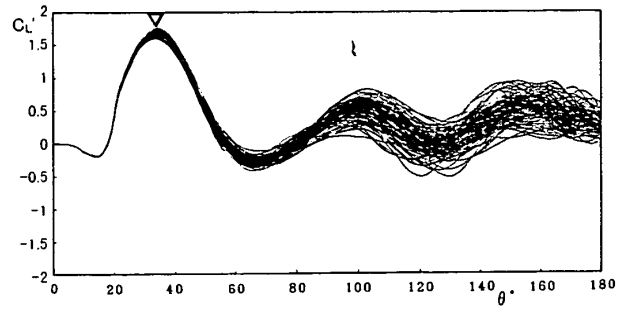


Fig. 20 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 0.2$ )

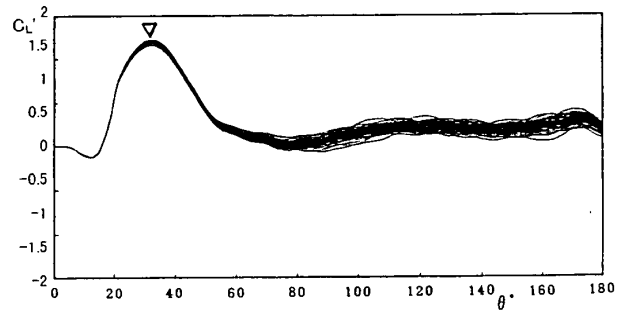


Fig. 21 Variation of instantaneous lift coefficient ( $s/d = 0.1$ )

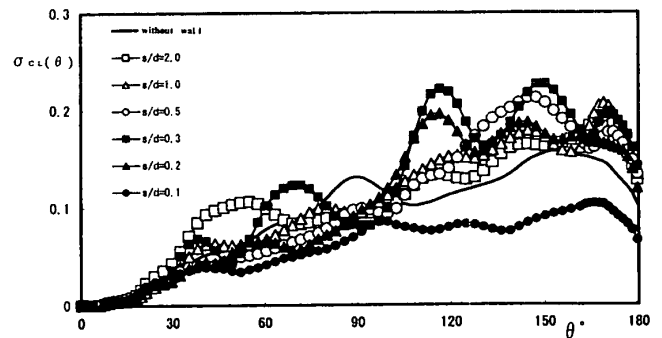


Fig. 22 Standard deviation of lift coefficient at specific swing angles

16~21 から、並進運動の場合と同様に間隙比が小さくなるに従い、揚力変動の軌跡が壁面と反対側に偏り、 $s/d$  が 1.0 付近から 0.2 にかけては周期的な変動を示すとともに揚力が最初の極大値(図中▽印)に達するまでの旋回角度が小さくなっており、 $s/d$  が 0.1 では周期的な変動が抑制されているのがわかる。これらの現象の発生要因は基本的に並進運動の場合と同じと考えることができる。しかしながら、揚力の非再現性を示す軌跡のばらつき(幅)は、旋回角度が  $90^\circ$  付近までは狭まる傾向にあるが、 $90^\circ$  を超えると  $s/d$  が 0.1 の場合を除き逆に広がって非再現性が強くなっている。このことは、図 22 に示した非再現性の強さを示すパラ

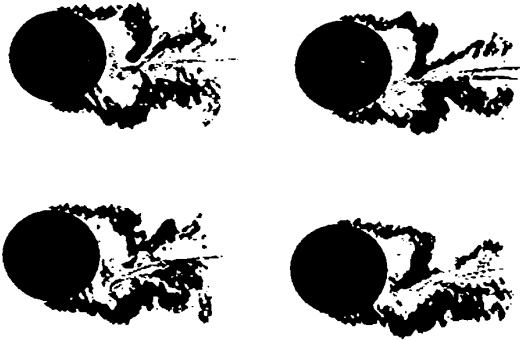


Fig. 23 Flow visualizations of swing experiment  
( $s/d=1.0$ ,  $\theta=50^\circ$ ,  $C_L=0.5$ )

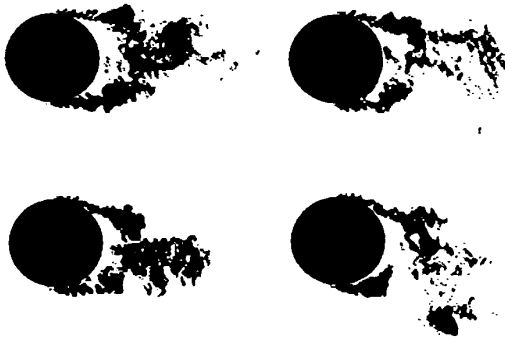


Fig. 24 Flow visualizations of swing experiment  
( $s/d=1.0$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $C_L=-0.25$ )

メータである  $\sigma_{cl}(\theta)$  の変化からもよくわかる。これは、先に述べたように旋回運動においてはスパン方向の位置によって流れ状態が異なり、流れ場が三次元的に不安定な状態になっているためと思われる。図 23 は  $s/d$  が 1.0 の場合に揚力が極大(図中▽印)となる旋回角度  $50^\circ$  でのスパン中央におけるいくつもの可視化画像から代表的なものを抜粋したものである。図 17 で旋回角度  $50^\circ$  における軌跡のばらつき(幅)がある程度の広さをもつことから想像できるように、可視化画像でもはく離せん断層の巻込みの形態にわずかな違いが見られるが、壁面と反対側(図の上側)のせん断層の巻込みの位相はいずれもほぼ同じであることがわかる。これに対して揚力が極小(図中△印)となる旋回角度  $90^\circ$  における可視化画像を示した図 24 においては、上下のはく離せん断層の円柱背後への巻込み位相が異なっていることがわかる。したがって、旋回角度が

$90^\circ$  付近を超えたときの揚力変動の軌跡のばらつき(幅)の広がり、円柱後流が三次元的に不安定な流れ場になるために、上下のはく離せん断層の交互の巻込みの位相や周期が旋回運動を行うごとに変化することがおもな原因であると思われる。また旋回角度が  $50^\circ$  を超えた付近から三次元的な円柱後流の不安定性が顕著になるものと思われる。

#### 4. 結 論

(1) 並進運動と旋回運動のいずれの場合においても、円柱と壁面の間隙比が小さくなるに従い揚力変動の軌跡が壁面と反対側に偏り、間隙比が 1.0 付近から 0.2 付近にかけて揚力は周期的な変動を示すことがわかった。

(2) 並進運動と旋回運動のいずれの場合においても、間隙比が小さくなるに従い揚力が最初の極大値に達するまでの曳航距離または旋回角度は小さくなり、間隙比が 0.1 においては周期的な変動が抑制されて揚力変動の非再現性も十分弱まることわかった。

(3) 並進運動においては、間隙比が小さくなるに従い揚力変動の軌跡のばらつき(幅)が狭まり、揚力変動の非再現性が抑制されることがわかった。

(4) 旋回運動においては、間隙比が小さいと旋回角度が  $90^\circ$  付近を超えたときの揚力変動の軌跡のばらつき(幅)が広がり、揚力変動の非再現性が強まることわかった。

本研究の遂行にあたり、実験装置の製作にご協力いただいた本学機械システム工学科の佐藤敏則技官および実習工場技官の方々に感謝の意を表す。

#### 文 献

- (1) 羽二生博之・ほか 2 名, 機論, 65-630, B (1999), 642-647.
- (2) 羽二生博之・ほか 3 名, 機論, 67-659, B (2001), 1726-1733.
- (3) 五十嵐保, 機論, 52-473, B (1986), 358-366.
- (4) Bearman, P. W. and Zdravkovich, M. M., *J. Fluid Mech.*, 89 (1978), 33-47.
- (5) Marumo, E., ほか 2 名, *J. Fluid Mech.*, 87 (1978), 121-141.
- (6) 亀本喬司・ほか 2 名, 機論, 49-448, B (1983), 2929-2936.
- (7) Taniguchi, S. and Miyakoshi, K., *Exp. Fluids*, 9 (1990), 197-204.
- (8) 宮越勝美・ほか 2 名, 機論, 52-483, B (1986), 3660-3665.
- (9) 坂本弘志・ほか 2 名, 機論, 52-475, B (1986), 1175-1183.