

水中マニピュレータに作用する変動流体力* (静水中で反復的に動き始めるときの渦形成 に基づいて作用する変動揚力の非反復性)

羽二生 博之*¹, 鈴木 聡一郎*¹, 武田 修平*²

Fluctuating Fluid Forces Acting on a Manipulator Arm Submerged in Water

(Nonrepeatability of Fluctuating Lift Produced by Vortex Formation when Repeatedly Commencing Its Motion In Still Water)

Hiroyuki HANIU, Soichiro SUZUKI and Shyuhei TAKEDA

When a manipulator is operated in water, fluctuating fluid forces produced by vortex formation will cause problems in precised positioning control of the manipulator. However, in this kind of studies to date, people were mainly interested in control theory of linearizing the nonlinear drag evaluated from assumption of constant drag coefficient, and nobody paid attention to the fluctuating fluid forces due to vortex formation. On the other hand, the presence of strong irregularity in vortex shedding from a two dimensional bluff body in uniform flow is reported by number of researchers. Therefore, nonrepeatability of fluctuating fluid forces acting on a manipulator arm repeatedly commencing its motion in still water is expected to appear. In this study, two kinds of circular cross-sectioned manipulator arms were provided. Then, one was towed and the other was swung in still water. In each case of motion, variation of fluctuating lift with towed distance or swing angle was measured for one hundred times. From ensemble collected data at particular towed distance or swing angle, presence of nonrepeatability of fluctuating lift was clarified.

Key Words: Vortex, Fluid Force, Fluid Transients, Flow Induced Vibration, Manipulator, Submerged in Water

1. 緒 論

海中などの水中での厳しく危険な環境下における作業の多くは現在人間の手によって行われているが、潜水夫の後継者の確保が難しいことから、今後水中での作業は徐々にロボット化されて行くものと予測される。特に熟練した作業が要求される分野では、技術者が自ら水中にもぐって作業することは、たとえ水深の浅い所でも極めて困難であり、高精度な位置決めや軌跡の制御ができる水中マニピュレータの開発が不可欠である。静水中でマニピュレータのアームのような柱状物体に並進運動や旋回運動を開始させると、物体表面に沿う流れが物体の上下(または左右)から離れて物体背後に巻き込まれてはく離泡が形成される⁽¹⁾。その後上下のはく離泡のバランスが崩れてやがてカルマン渦が放出されるようになり、アームには周期的な変動流体力が作用する。また、空気中で稼働するマニピュレータに比べ水中では流体の密度が1000倍ほど大きいので、流体力もかなり大きなものとなる。さら

に水はアームの振動を減衰させる効果が空気よりもかなり大きいので、水中で稼働するマニピュレータに作用する力を考える上で渦形成に伴う流体力は極めて重要な要素であると考えられる。特にアームの進行方向に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⁽²⁾はるかに大きく、渦放出に基づく揚力変動はマニピュレータの高精度な位置決め制御を行う上で非常に重要な要素であると考えられる。

一方、柱状物体からの渦放出においては、主流速度が一定であっても渦放出周波数や物体下流での速度変動および渦形成長さに強い不規則性があることがわかっている^{(3)~(5)}。このためマニピュレータの運動においても不規則な変動が存在するものと考えられる。したがって曳航による並進運動や旋回運動を繰返し行ったときには、揚力変動は曳航距離や旋回角度に対して非反復性を示すものと予測できる。よって本研究においては水中マニピュレータに作用する不規則流体力の最も基礎的な特性を調べるために、まず円形断面を有する円柱を曳航によって並進運動させて、曳

* 原稿受付 1998年5月15日。

*¹ 正員, 北見工業大学(〒090-8507 北見市公園町165)。

*² 学生員, 北見工業大学大学院。

E-mail: rarry@datana1.mech.kitami-it.ac.jp

航距離に対する揚力の変化を繰返し測定し、特定の曳航距離における集合データから揚力変動の曳航距離に対する非反復性を調べるとともに、円柱端面に円盤を取付けて端面付近における流れの三次元性を抑制した場合の影響を調べた。次に円柱を静水中で180°旋回運動させて、旋回角度に対する揚力の変化を繰返し測定し、特定の旋回角度における集合データから揚力変動の旋回角度に対する非反復性を調べるとともに、曳航時と同様に端面に円盤を取付けて測定を行い、先の曳航した場合と比較した。

これまでの水中マニピュレータに関する研究は制御工学の分野においていくつか見ることができる。福田ら⁽⁶⁾および大川ら⁽⁷⁾はアームの瞬間における旋回角速度に関して非線形な項として流体から受ける抗力を制御において測定可能な外力項や入力項として取扱って、運動方程式を線形化してマニピュレータの振動制御やシミュレーションを行った。また、川島⁽⁸⁾は線形化補償係数を用いて弾性旋回アームに作用する抗力を線形化して、たわみ振動の制御とシミュレーションを行った。しかしながら、いずれの研究においても渦形成や渦放出に基づく揚力変動や抗力変動については考慮していない。このように、これまでの水中マニピュレータに関する研究においては、アームの運動方程式の中に取り入れられている流体抗力は、旋回や振動に基づいて生じる流体とアームとの瞬間における相対速度と定常な抗力係数から得られる流体力であり、渦形

成に基づく変動流体力はこれとはまったく異なった成因と特性を持つ流体力である。したがって今後水中マニピュレータの高精度な制御手法を確立する上で、渦形成に基づく変動流体力の特性を明らかにすることは工学的に大変重要である。

2. 実験装置および方法

本実験では有限長の円柱に曳航による並進運動および旋回運動を与えて変動揚力の測定を行った。まず並進運動においては図1に示すように水深約300mm、幅300mmの断面を有する曳航式水路に直径48mm、長さ240mmの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ー(0.1mm/ステップ)によって水平方向に曳航した。なお円柱の下端面は薄いプラスチック板によって閉じている。揚力変動は図2に示すように、円柱を中心軸で直径10mmの真ちゅう中空パイプによって支え、円柱上端部から上方へ64mmの位置でのパイプ表面にひずみゲージを貼って曲げひずみとして検出した。

一方、旋回運動においては、図3に示すように水深約400mm、幅600mm、長さ1350mmの水槽の水深中央付近に直径50mm、長さ335mmの円柱を水平に設置し、ステッピングモータ(0.1°/ステップ)によって旋回させた。なお図3からわかるように円柱の根本側の端面は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おり、先端面も閉じている。また円柱根本側端面は旋回軸から35mm離れており、旋回軸から円柱の先端面までの距離は370mmである。揚力変動は並進運動の場合と同様、図4に示すように円柱を支える真ちゅう中空パイプ表面の旋回軸から60mmの位置にひずみゲージを貼って、曲げひずみとして検出した。

なお本実験では、円柱の-span中央に揚力方向の加重を加えてひずみゲージの出力電圧の校正を行ったた

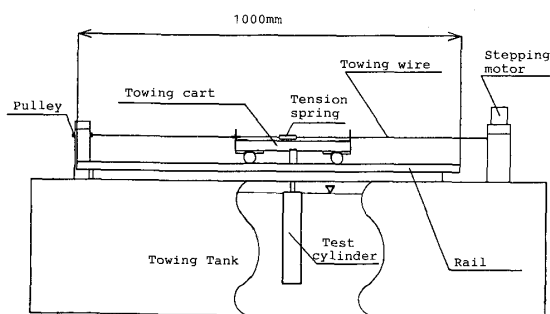


Fig. 1 Schematic view of towing experiment

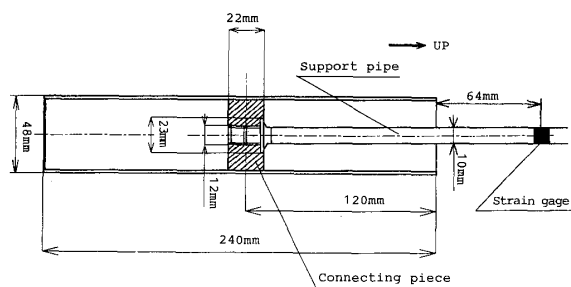


Fig. 2 Test body for towing experiment

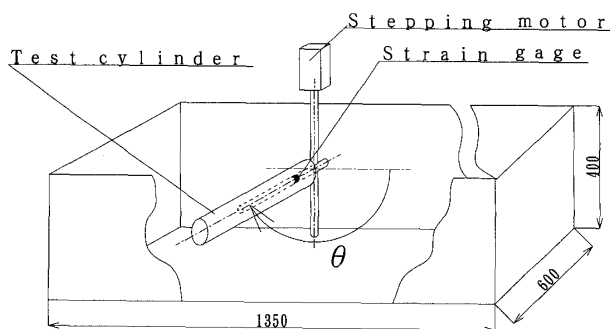


Fig. 3 Schematic view of swing experiment

め、本研究で示す揚力変動はひずみゲージで検出された力を円柱スパン中央への集中加重に換算したものである。

並進運動における曳航速度は 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が 10 cm までは等加速度運動をさせ、曳航距離が 50 cm まで揚力変動の測定を行った。

旋回運動における角速度は 1.0 rad/s に設定して 0° から 180° まで旋回させて実験を行った。また旋回開始時と終了時の振動を避けるために 0° から 20° までは等角加速度旋回を、160° から 180° までは等角減速度旋回をさせて測定を行った。

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持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が空気中および水中(円柱先端面に直径 3 mm の空気抜きの小孔を設けて水を円柱内部に充たした)にあるときに、揚力方向に小さな振動を与えて固有振動数をひずみゲージ出力電圧変動のパワースペクトルから求めた。その結果、並進運動用の円柱においては、空気中で約 15 Hz、水中で約 8 Hz となった。また旋回運動用の円柱においては、空気中で約 16 Hz、水中で約 7 Hz となった。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並進運動と旋回運動の場合それぞれ約 1 kHz および 0.5 kHz と、極めて高いものとなっている。一方、一定速度および一定回転速度におけるレイノルズ数は、並進運動での曳航速度が 10 cm/s であるので 4.8×10^3 、旋回運動での円柱スパン中央での速度が約 20 cm/s であるので約 1×10^4 となっている。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、並進運動においては約 0.4 Hz、旋回運動の場合は約 0.8 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、曳航距離および旋回角度に対する十分な分解能

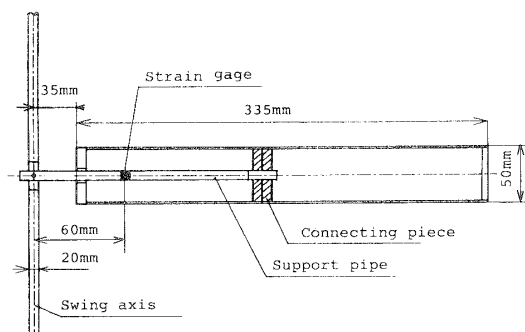


Fig. 4 Test body for swing experiment

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 に設定してパーソナルコンピュータに揚力変動の時系列データとして取り込んだ。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貼られたひずみゲージに約 1.5% 検出される。しかしながら抗力変動は揚力変動の 1/4~1/5 の大きさであり、抗力変動のリークに起因した揚力変動の検出誤差は 0.3% 程度であるので十分無視できるものである。

一方前述の並進運動での等加速度運動における助走距離を決定するにあたっては、助走距離を 2.5 cm, 5 cm, 9 cm, 10 cm, 11 cm と変化させて曳航距離に対する揚力の変化を測定した。その結果、2.5 cm と 5 cm においては、急激な加速度に基づく振動によると思われる揚力変動が曳航開始直後から見られた。一方 9 cm においては、曳航開始直後の振動に基づくと思われる揚力変動はほぼなくなり、10 cm と 11 cm の場合も曳航距離全体にわたってほとんど同じ結果が得られたため 10 cm とした。また助走距離が短い 2.5 cm と 5 cm の場合は、曳航開始直後の振動によって円柱周りの流れが乱れるために円柱背後への渦の巻き込みが抑制されるためと思われるが、曳航距離が 3~40 cm 付近での揚力変動は助走距離が 10 cm の場合よりもかなり小さくなった。このことを踏まえて旋回運動においては、円柱先端部で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、等角加速度における助走旋回角度を 20° とした。

3. 結果および考察

3.1 並進運動における揚力変動の非反復性 図 5 は横軸の曳航距離 x に対する揚力の変化を 100 回重ね合わせた結果を示したものであり、縦軸はひずみゲージで検出された曲げ応力を円柱スパン中央での集中

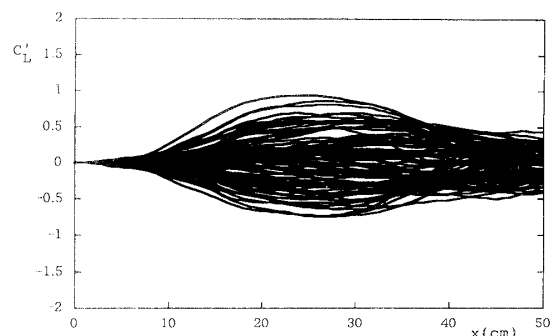


Fig. 5 Variation of instantaneous lift coefficient for towing (100 times repetition)

加重として換算した瞬間揚力を定常曳航速度である 10 cm/s における動圧に基づいて無次元化した、瞬間揚力係数 C_L' 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。一方、図 6 は個々の曳航における揚力変動がわかりやすいように、図 5 から無作為に 20 回の曳航を抽出して示したものである。図 6 から曳航距離に対する揚力変動は、同一条件で繰り返し行った曳航運動に対しほとんど反復性を示していないのがわかる。永田ら⁽¹⁾の突然出発して平行移動する二次元的円柱における可視化観測によると、円柱がその直径の 4 倍程度まで移動する期間は円柱背後に上下対称な双子渦が形成され、流れ場の顕著な非対称性は円柱がその直径の 5 倍程度移動した所から現れている。本研究においては図 5 または図 6 からわかるように、ほとんどの場合曳航開始後まもなく非対称性に基づくと思われる揚力が現れ始め、直径の約 4 倍程度まで曳航された所では大きな揚力が生じている。これは、永田らの場合のレイノルズ数が 1 200 程度で円柱のアスペクト比が 8 程度だったのに対し、本研究においてはレイノルズ数が約 5 000 と高く、アスペクト比も 5 程度と小さいことが主要因だと思われる。

また図 6 において注目すべき点は、出現回数は少な

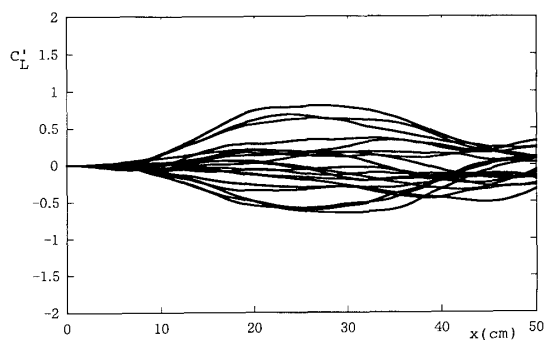


Fig. 6 Variation of instantaneous lift coefficient for towing (20 times repetition)

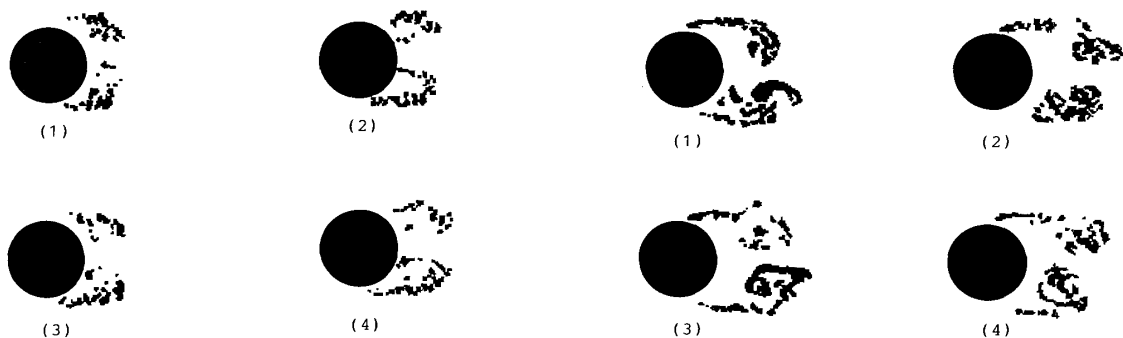


Fig. 7 Flow visualizations for towing ($x=10$ cm)

Fig. 8 Flow visualizations for towing ($x=20$ cm)

いものの曳航中にほとんど揚力変動を示さないものがあることであり、双子渦の対称性を崩さないまま十分な距離を曳航される場合もあることを示唆している。

一方、図 7 と図 8 はそれぞれ曳航距離が 10 cm と 20 cm における円柱スパン中央断面で撮ったはく離せん断層の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。揚力変動の非反復性がまだ強く現れていない図 7 の曳航距離 10 cm においては、左右のはく離せん断層が多少の非対称性や発達の違いを示しながらも双子渦を形成しているのがわかる。これに対して揚力変動の非反復性が強く現れている図 8 の曳航距離 20 cm においては、カルマン渦のように右または左のはく離せん断層の巻き込みが先行していたり、図の(3)の場合のように多少の非対称性はあるものの、はく離せん断層が双子渦の形態を保ったままのものが見られた。したがって、水中マニピュレータの実用的な稼働条件における揚力変動の非反復性は自然な現象と考えることができる。

再び図 5 と図 6 を見てみると、曳航距離が 40 cm 付近において揚力変動の非反復性が弱くなっているのがわかる。これは双子渦の非対称性が曳航の初期から大きく崩れ、右または左のはく離せん断層の巻き込みが大きく先行して左右のはく離せん断層の交互の巻き込みが開始されたときの揚力変動の軌跡が曳航距離の 40 cm 付近で交差するためである。

3・2 先端面に取付けた円盤の影響 円柱の先端付近の流れは三次元性が強く、特にアスペクト比の小さい円柱の場合への影響は大きいものと思われる。そこで固有振動数をほとんど変えないように、円柱の先端面に厚さ約 1 mm のプラスチック板を用いた直径 100 mm と 150 mm の円盤を取付けて、円柱の先端付近の流れの二次元性を高めたときの揚力変動を調べた。図 9 は円盤直径が 100 mm の場合の 100 回の曳航を重ね合わせたものであり、円盤直径が 150 mm の場合もほぼ同様な結果が得られた。図 9 から、円盤が

ない場合に比べ曳航距離が 40 cm における軌跡のくびれがより明確になったことがわかる。これは曳航初期における双子渦の形成が促進されて、曳航を繰返し行ったときに右または左のはく離せん断層のいずれかが同じタイミングで強く巻き込む確率が高くなったためと思われる。

一方、本研究においては非反復性の強さを表す量として、瞬間揚力係数 C_L' の特定の曳航距離 x における 100 回の抽出データから求める標準偏差を $\sigma_{C_L}(x)$ と定義し、円柱先端面に円盤がない場合と直径 100 mm の円盤がある場合の曳航距離に対する変化を図 10 に示した。図 10 から、円盤による制御効果と曳航距離に対する揚力変動の非反復性の変化がよくわかる。

3・3 旋回運動における揚力変動の非反復性

図 11 は横軸の旋回角度 θ に対する揚力の変化を 100 回重ね合わせた結果を示したものであり、縦軸はひずみゲージで検出された曲げ応力を円柱スパン中央での集中加重として換算した瞬間揚力を、スパン中央での定常旋回速度時の円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瞬間揚力係数 C_L' である。また個々の旋回は、先の旋回によっ生じた乱れが十分に収まるのを待って行った。一方、図 12 は個々の旋回における揚力変動がわかりやすいよう

に、図 11 から無作為に 20 回の旋回を抽出して示したものである。図 12 から旋回を開始後間もなく揚力変動のわずかな非再現性が現れはじめ、旋回角度が 20° 付近から非再現性が顕著になっているのがわかる。旋回角度が 20° においては、円柱のスパン中央部と先端部はそれぞれ円周に沿って 7 cm と 13 cm 移動しており、非再現性が顕著に現れ始める移動距離は図 5 に示した曳航運動の場合とほぼ同じである。 20° 以降の旋回角度においては、図 5 で見られたような非反復性が弱まることはなく、上または下側のはく離せん断層が巻き込むタイミングの再現性(同じタイミングで巻き込む確率)は曳航の場合よりも弱いものと考えられる。これは旋回運動での円柱の移動速度が円柱の先端部へ行くほど速いために、スパン方向におけるはく離せん断層の成長の早さが異なり、流れ場が曳航運動の場合よりも三次元的になりやすいためと思われる。一方図 12 からは大きな旋回角度において、位相はバラバラではあるものの、はく離せん断層が交互に巻き込まれて渦列が放出されるために生じる周期的な揚力変動が見られる。変動周期は旋回角度においておおむね 65° であり、旋回角速度が 1 rad/s であるので、揚力の変動周波数は約 0.9 Hz である。これは、2 章でスパン中央の移動速度とストローハル数 0.2 を用い

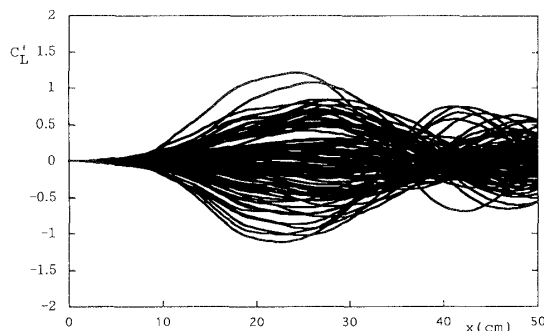


Fig. 9 Variation of instantaneous lift coefficient for towing with disk (100 times repetition)

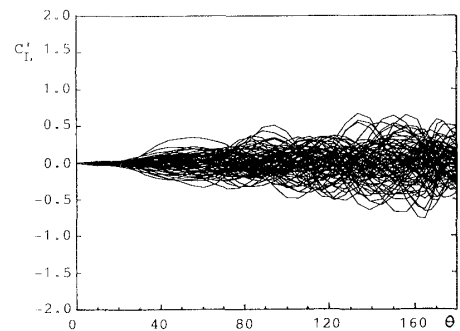


Fig. 11 Variation of instantaneous lift coefficient for swing (100 times repetition)

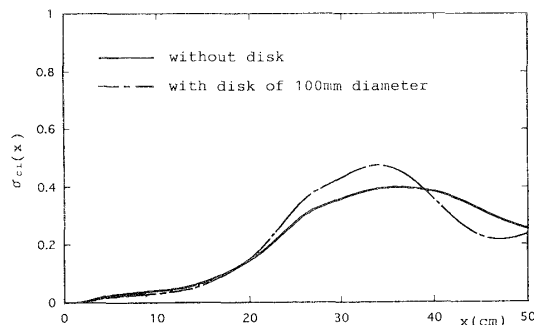


Fig. 10 Standard deviation of lift coefficient at specific towing distance

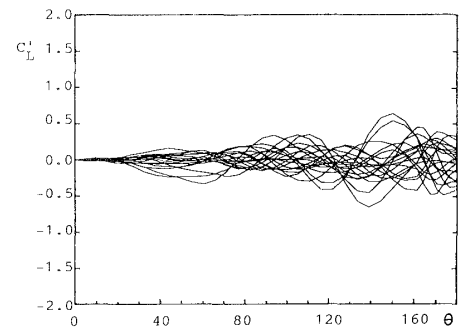


Fig. 12 Variation of instantaneous lift coefficient for swing (20 times repetition)

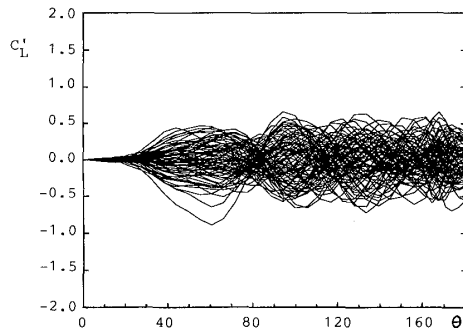


Fig. 13 Variation of instantaneous lift coefficient for swing with disk (100 times repetition)

て予測した 0.8 Hz にほぼ近い値である。

3・4 旋回運動における円盤の影響 次に図 13 に旋回円柱の先端面に厚さ約 1 mm のプラスチック板を用いた直径 100 mm の円盤を取付けて 100 回の旋回運動をさせた結果を重ね合わせたものを示した。図から曳航運動の場合と同様に、旋回角度が 60° 付近 (スパン中央部の移動距離が約 20 cm) において揚力変動の非反復性が顕著に強まり、その後旋回角度が 80° 付近 (スパン中央部の移動距離が約 28 cm) において弱まって軌跡にくびれが生じているのがわかる。さらに旋回が進むと同様なくびれが繰返し生じているのがわかる。一方図 14 には、曳航運動の場合と同様に、瞬間揚力係数 C_L' の特定の旋回角度における 100 回の抽出データから求めた標準偏差 $\sigma_{C_L}(\theta)$ を非再現性を表すパラメータとして示した。図 14 から円盤がない場合の標準偏差は旋回角度が 20° 以降において滑らかに増加するのに対して、円盤がある場合は 40° 付近まで急激に増加した後周期的な変化をしているのがわかる。このことから、旋回円柱の先端面に円盤を取付けることによって、上または下側のはく離せん断層の巻き込みが同じタイミングで開始される確率が高まる制御効果があることがわかる。

4. 結 論

(1) 同一条件下で繰返し行った曳航による円柱の並進運動において、揚力変動はほとんど反復性を示さないが、右または左側のはく離せん断層のいずれかに着目したとき同じタイミングで巻き込むことの反復性

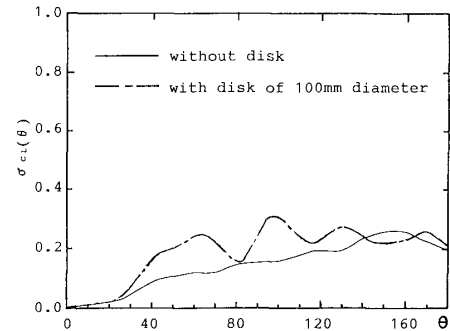


Fig. 14 Standard deviation of lift coefficient at specific swing angle

が多少あることがわかった。

(2) 並進運動において、円柱の先端面に円柱直径の 2 倍程度の薄い円盤を取付けることにより先端付近の流れの二次元性が高まり、繰返し並進運動を行ったときに右または左側のはく離せん断層のいずれかが同じタイミングで強く巻き込むことの反復性(確率)が高まることがわかった。

(3) 同一条件下で繰返し行った円柱の旋回運動においても揚力変動の反復性はなく、上または下側のはく離せん断層が同じタイミングで巻き込むことの反復性は流れの三次元性が強いために並進運動の場合よりも低いことがわかった。

(4) 旋回運動において、円柱の先端面に円柱直径の 2 倍程度の薄い円盤を取付けることにより、並進運動の場合と同様に上または下側のはく離せん断層の巻き込みが同じタイミングで開始される確率が高くなる制御効果があることがわかった。

文 献

- (1) 永田拓・ほか 3 名, 機論, 51-463, B(1985), 738-747.
- (2) Sakamoto, H. and Haniu, H., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 116(1994), 221-227.
- (3) 例えば, 種子田定俊・ほか 2 名, 九州大学応用力学研究所報, 63(1987), 15-26.
- (4) 羽二生博之・ほか 3 名, 機論, 61-582, B(1995), 379-387.
- (5) 羽二生博之・ほか 3 名, 機論, 62-595, B(1996), 833-840.
- (6) 福田敏男・原文雄, 機論, 54-507, C(1988), 2702-2706.
- (7) 大川不二夫・ほか 4 名, 機論, 61-583, C(1995), 1072-1077.
- (8) 川島豪, 機論, 56-529, C(1990), 2421-2426.