

静水中で移動を開始する迎え角のある正方形角柱に作用する変動揚力* (渦形成に基づいて生じる変動揚力の非再現性の抑制)

羽 二 生 博 之^{*1}, 呉 平^{*2}
宮 越 勝 美^{*1}, 鈴木 聡 一 郎^{*1}

Fluctuating Lift Acting on a Square Prism with Attacking Angle Commencing Its Motion in Still Water (Suppression of Nonrepeatability in Fluctuating Lift Produced by Vortex Formation)

Hiroyuki HANIU^{*3}, Ping WU,
Katsumi MIYAKOSHI and Soichiro SUZUKI

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

The purpose of this study is to investigate the nonrepeatable characteristics of fluctuating lift in the case of a square prism. Variation of fluctuating lift with towed distance or swing angle were measured for various attacking angles from 0° to 30°. And the effect of attacking angles on fluctuating lift was evaluated by standard deviation of lift data at specific towed distance or swung angle. Moreover flow visualizations were also carried out to study the flow pattern for different attacking angles. The result of this study shows that attacking angle is helpful to reduce the nonrepeatable characteristics of fluctuating lift most effectively in the case of swing motion.

Key Words: Vortex, Fluid Force, Fluid Transients, Flow Induced Vibration, Manipulator, Circular Cylinder, Towing Motion, Swing Motion

1. 緒 論

近年水中マニプレータシステムの高速化・軽量化が進んでおり、流体力の増加とシステムの剛性の低下により、マニプレータが稼動する際に本体に働く変動流体力がシステムの高精度な位置決めや軌跡の制御を行う際に非常に重要な要素となっている。また、この変動流体力を解明することはマニプレータシステムの設計の容易性、制御の高精度化⁽¹⁾⁽²⁾のみならず、流体力が原因となる事故の防止や原因の究明等にも大いに役立つものと考えられる。著者らのこれまでの研究^{(3)~(6)}において、水中マニプレータのアームを模擬した有限長円柱が静水中または主流速がある流れの中で初期加速運動を伴う並進運動および旋回運動を繰返し行くと、揚力変動には移動距離または旋回角に対して強い非再現性があることを明らかにしている。しかし実際の水中マニプレータの運用を考えると円柱のみならず、角柱においての研究も必要になってくる。

角柱周りの流れ特性については一様流中の静止角柱

において、辺長比、レイノルズ数、迎え角などさまざまなパラメータに対して、後流渦、時間平均および変動表面圧力、時間平均および変動抗力・揚力などに関して多くの研究^{(7)~(9)}が行われている。さらに、Barton⁽¹⁰⁾はSimple法を用い、角柱周りの流れをレイノルズ数250について数値計算し、急発進後の過渡的な流れを明らかにしている。しかしながら、静水中で並進または旋回運動を行う角柱に作用する変動揚力についての研究の蓄積は十分ではない。また、正方形角柱の場合、パラメータが多くなる反面、円柱のように離点移動しないため圧力抵抗が大きく変化せず、レイノルズ数が変わっても平均的な流れ特性はあまり変わらない⁽⁹⁾。ただし、正方形角柱に迎え角をもたせると、角柱の角の位置が移動し、上下面の圧力が非対称となり、後流の流れ特性は大きく変化する。そのため、正方形角柱に作用する変動揚力の非再現性を評価するには、迎え角の変化による影響を明らかにする必要がある。

以上の観点から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正方形角柱の迎え角を0°から30°まで変化させた場合の揚力変動の挙動を調べた。さらに可視化実験を行い、迎え角による流れパターンの違いについても調べた。なお正方形柱の一边を

* 原稿受付 2006年10月16日。

^{*1} 正員、北見工業大学機械システム工学科(〒090-8507 北見市公園町165)。

^{*2} 正員、北見工業大学SVBL。

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

流れに直角に置いた場合の抗力係数が一般的に 2.0 近い大きな値となるため、本研究では抗力係数が 1.5 程度と小さくなる正方形柱の対角線を流れに平行に置いた状態を迎え角 $\alpha=0^\circ$ とした。

2. 実験装置および方法

2.1 並進運動における実験条件 本実験では図 1 に示すように水深約 480 mm, 幅 1 200 mm, 長さ 2 000 mm の測定部を有する大型水槽を用いた。測定部には可視化観測ができるように底面と側面に観測窓を設けてある。供試物体には、一辺が $t=50$ mm, 長さが $l=340$ mm のアルミニウム製正方形角柱(以後角柱と呼ぶ)を用いた。角柱上端部にはアルミニウム製のロッドが固定されており、角柱はそのロッドを介して揚力計測用のロードセル⁽³⁾に固定されている。また角柱は上端部がほぼ水面に一致するように垂直に設置され、図 2 に示すように迎え角 α を 0° から 30° まで変化させ、実験を行った。供試物体の移動にはアルミニウムアングル材のフランジ構造にて剛性を高めたアクリル製の台車を使用した。水路測定部の上には水路長手方向に直径 25 mm の円形断面スチールレールが平行に 2 本敷かれており、その上を台車が移動できる構造になっている。台車はステッピングモータとワイヤおよびプーリによって水平にえい航した。えい航速度 V は 100 mm/s に設定し、えい航距離 X が 600 mm まで揚力変動の測定を行った。円柱の慣性力による機械的振動を避けるため、並進運動の開始と終了の 100 mm を等加減速度運動⁽³⁾とした。なお本研究における計測系の固有振動数は 8.6 Hz、静水中における角柱の最大移動速度に基づくレイノルズ数は約 4.8×10^3 であり、ストローハル数を 0.13⁽⁷⁾とすると渦放出周波数は約 0.18 Hz と予想される。アナログフィルタによる波形ひずみを抑えるとともにエリマジ

ングを防止するために、データサンプリング周波数は 10 Hz とし、ローパスフィルタのカットオフ周波数は 2 Hz とした。本実験では角柱のスパン中央に揚力方向の加重を加えてロードセルの出力電圧の校正を行ったため、本研究で示す揚力変動はロードセルで検出された力を角柱スパン中央への集中加重に換算したものである。なお、揚力成分に対して垂直な抗力成分はロードセルに約 1.5% 検出されており、抗力方向の加重の漏れによる影響を無視できるものとした。

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 2 990 mm の測定部を有する水槽を用いた。角柱は水路測定部に設置した直径 20 mm の旋回軸に固定され、水槽の水深中央付近に水平に設置した。旋回軸とステッピングモータの回転軸をカップリングで接続し旋回運動を行わせた。また旋回軸上部をベアリングで支持し、旋回軸下部先端の突起を測定部底面の穴に差込むことにより角柱を支えた。また図 4 からわかるように角柱の根元側のプラスチック製端面は旋回軸心から 22 mm 離れており、角柱側壁材と接触しない程度のすきまを設け、それを極めて薄い耐水ゴム膜でシールし、角柱内部に揚力計測のためのロードセル

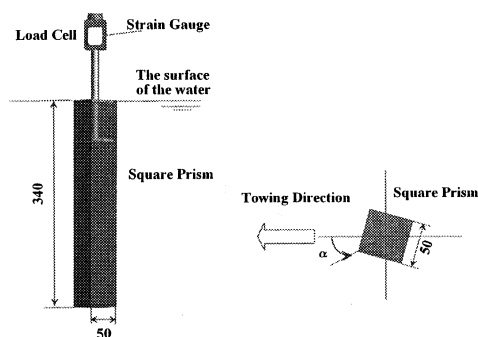


Fig. 2 The test body for towing experiment

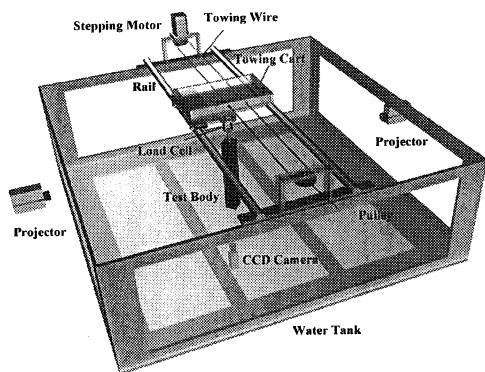


Fig. 1 Schematic view of towing experiment

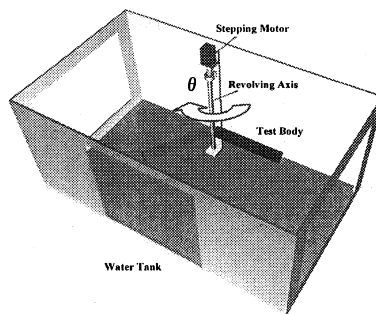


Fig. 3 Schematic view of swing experiment

を設置した。旋回運動における角速度は $\omega=1.0 \text{ rad/s}$ に設定し、旋回角度 θ を 0° から 180° まで旋回させて実験を行った。また旋回開始と終了時の振動を避けるために 0° から 20° まで等角加速度旋回、 160° から 180° までは等角減速度旋回をさせて測定を行った⁽³⁾。水中での円柱の固有振動数は約 30 Hz であり、ストローハル数を 0.13 と仮定すると、角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 0.35 Hz である。したがって、エリアシング防止と波形ひずみ

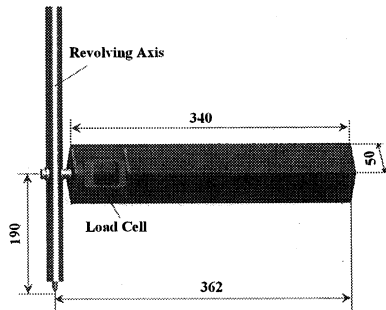


Fig. 4 The test body for swing experiment

を抑えるために、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 Hz および 20 Hz とした。また旋回運動における揚力係数の算出に当たっては、一定旋回速度に達したときの角柱スパン中央における周速度に基づく動圧を用いた。

2・3 流れの可視化法 可視化実験においては揚力測定と同じ形状の角柱を用意し、角柱のスパン中央の上下角部に直径 0.8 mm の色素流出孔を設けている。この二つの流出孔に設置されたアダプタからポリエチレン細管が角柱内を通してトレーサ注入装置につながれている。また旋回の開始と同時にトレーサを流出させるように手動バルブを操作した。可視化撮影においては、あらかじめ角柱を撮影したい位置まで並進または旋回させ、角柱の端面が正面に映るようにカメラを設置し、水路上方または側面に配置されたスライドプロジェクタのスリット光が小孔から流出するウラン水溶液の流脈線に照射されるようにした。これらの調整が終了した後、カメラの設置アングルが撮影したい移動距離または旋回角度になるように角柱を初期位置に移動させてから、可視化撮影を行った。

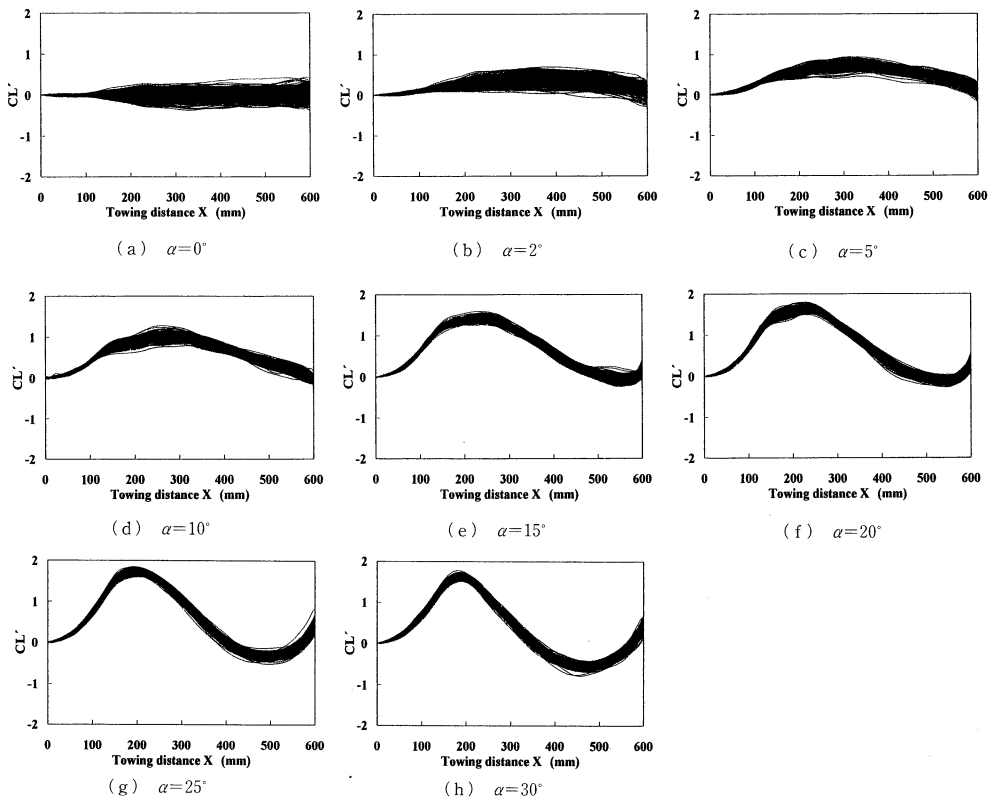


Fig. 5 Variation of instantaneous lift coefficient with different attacking angles (towing experiment)

3. 結果および考察

3.1 並進運動における揚力変動 図5(a)～(h)は角柱の迎え角 α をそれぞれ 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30° と変化させたときの角柱のえい航距離に対する変動揚力係数の変化について、200 回のえい航を重ね合わせたものである。

図5(a)～(h)を見ると迎え角の変化に対する揚力変動は大きく三つのパターンに分けて考えることができる。一つめは、迎え角 $\alpha=0^\circ$ の場合のように角柱がえい航方向に対して対称に設置された状態では、円柱^{(3)～(6)}の場合と似たような揚力変動の非再現性が生じるパターンである。二つめは、図5(b)～(d)に示した $\alpha=2\sim10^\circ$ の場合のように、移動開始直後から正の揚力が発生し、100 mm 程度移動してから非再現性が現れ、300 mm 付近で揚力が極大値を示した後緩やかに零に近づき、全体的な揚力変動の軌跡が正の揚力方向に偏っているパターンである。揚力変動の軌跡が偏るのは、迎え角をもたせることによって、角柱上下の圧力分布の対称性が失われ、必ず上部の角からはく離泡の巻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。また対称性が失われた状態においても非再現性が生じることについては詳細は明らかとはなっていないが、はく離せん断層に形成される小渦の生成タイミングに再現性がないことによるものと思われる。三つめは、迎え角 α が 15～30° の場合のように、移動開始直後から正の揚力が発生し、 $X=200$ mm 付近において揚力変動の極大値を示した後、減少して極小値となってから再び増加し始め、揚力が周期的な変動を示すパターンである。パターン1の $\alpha=0^\circ$ では移動開始直後の揚力はほぼ零に近く、100 mm 程度移動してから非再現性が現れている。このように角柱に迎え角をもたせると流れの対称性が崩

れ、全体的な揚力変動軌跡のばらつき(幅)が狭まって非再現性が抑制される傾向が見られる。

図6は迎え角 α の各設置角度でのえい航距離ごとの200個のデータを用いた揚力変動の標準偏差 $\sigma_{cl}(X)$ を示したものである。図6に示すように角柱の迎え角 α が 15° から 25° において、揚力変動の非再現性が特に抑制されることがわかる。したがって $\alpha=5\sim10^\circ$ のパターンでは揚力変動が緩やかで、スパン方向のたわみによる角柱先端の変位を予測しやすいが、非再現性の影響をある程度考慮する必要がある。また α が 15° 以上のパターンでは非再現性がより抑制されて先端変位の予測はさらにしやすくなる反面、周期的な大きい揚力変動を考慮する必要がある。

図7～9に角柱の迎え角 α がそれぞれ 0, 5, 25° の可視化結果を示す。各迎え角において可視化を行った移動距離は、揚力に非再現性が大きく生じる前、非再

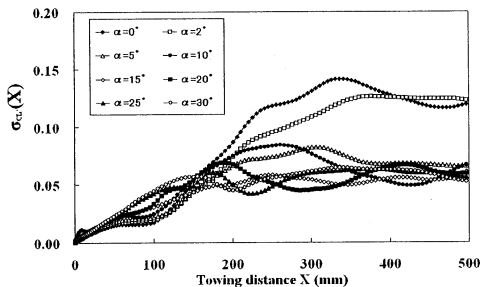


Fig. 6 Standard deviation of lift coefficient at specific towing distance (towing experiment)

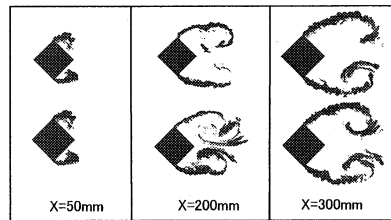


Fig. 7 Flow visualization with $\alpha=0^\circ$ (towing experiment)

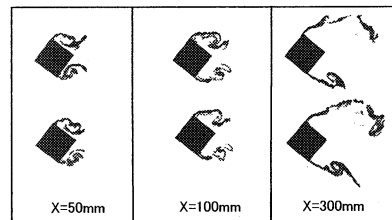


Fig. 8 Flow visualization with $\alpha=5^\circ$ (towing experiment)

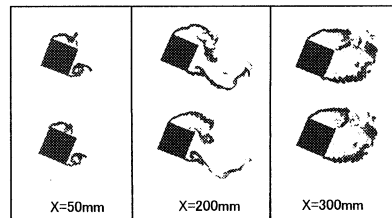


Fig. 9 Flow visualization with $\alpha=25^\circ$ (towing experiment)

現性が大きく生じ始めたとき、非再現性が大きく生じているときは最大揚力が生じたときの代表的な画像を2枚ずつ示した。

図7に示すように、 $\alpha=0^\circ$ において非再現性が生じる前の $X=50\text{ mm}$ では、上下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お互いに干渉していない双子渦が形成されているのがわかる。よって流れの非対称性による揚力が発生しないため、非再現性も生じないと思われる。これに対して $X=200\text{ mm}$ 以降では上下のはく離せん断層の巻込みが大きく成長してお互いに干渉することにより、上下の圧力分布に非再現的な非対称性が生じ、揚力変動の非再現性が現れたと思われる。

また、図5に示したように、角柱に $\alpha=5^\circ$ の迎え角をもたせると、上下の圧力分布の対称性が失われ、移動開始直後から揚力が発生することを示した。これに対応して図8の $X=50\text{ mm}$ では上下の渦の対称性が崩れ始めていることがわかる。その後の $X=100\text{ mm} \sim 150\text{ mm}$ では、渦の対称性の崩れがさらに大きくなり、 $X=200\text{ mm}$ 以降では完全に非対称になって、移動距離が増加しても毎回のえい航において流れパター

ンがほぼ同じになるために非再現性が弱まることわかる。また上下の渦が離れているために、周期的な交互渦の生成が抑制されているものと思われる。

さらに図9に示すように角柱に 25° の大きな迎え角をもたせると、移動開始直後の $X=50\text{ mm}$ においては上下のはく離せん断層が完全に非対称になっている。揚力変動が正の極大値を生じる移動距離 $X=200\text{ mm}$ 付近においては、上側のはく離せん断層が角柱後縁付近に巻き込まれて渦塊を形成していることがわかる。次に、その渦の連行によって、 $X=300\text{ mm}$ 付近においては、下側のはく離泡が角柱の背後に巻き込まれ、揚力変動が極小値となる。以後同様な過程が繰返されるために揚力が移動距離に対して周期的に変動するとともに、フローパターンは毎回のえい航においてほぼ同じとなるため、揚力変動の非再現性が抑制されていると考えられる。

以上のことから、角柱に迎え角をもたせると、流れ場の上下の対称性が失われ、毎回同じ側のはく離せん断層の巻込みが先行するため、同じ流れパターンが形成され、非再現性が生じにくくなるとともに、揚力変動が予測しやすくなることがわかる。

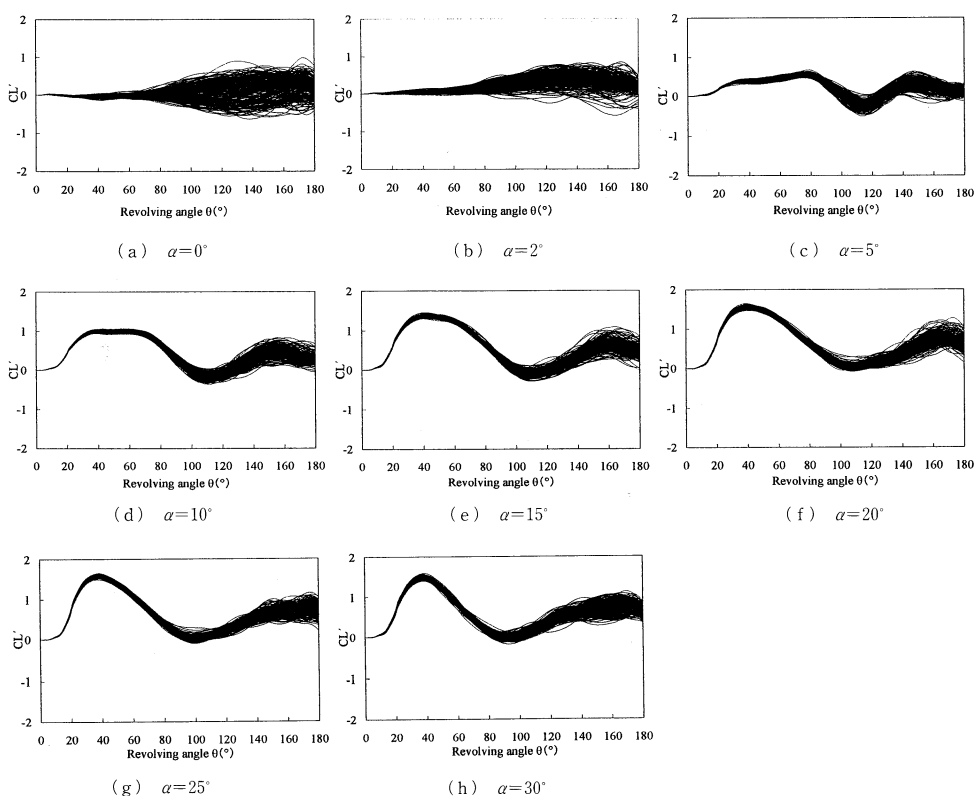


Fig.10 Variation of instantaneous lift coefficient with different attacking angles (swing experiment)

3・2 旋回運動における揚力変動 図10(a)～(h)には、角柱の迎え角 α がそれぞれ 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30° において、静水中で角速度 $\omega=1.0$ rad/s で旋回運動させたときの旋回角度 θ に対する揚力係数 CL' の変化を示した。旋回運動での角柱の移動速度が角柱の先端部へ行くほど速いため、スパン方向におけるはく離せん断層の成長の速さが異なり、流れ場がえい航運動の場合よりも三次元的になりやすく、スパン方向の局所的な揚力変動特性がかなり違うものと考えられる。本研究で示す揚力変動はロードセルで検出された円柱全体に作用する揚力を円柱スパン中央での集中加重として換算した。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10(a)は $\alpha=0^\circ$ の場合であるが、図5(a)の並進運動と比較すると、旋回運動する供試物体では、旋回開始直後の揚力変動パターンは同様であるが、非再現性の生じ方が異なっている。これは並進運動では静水に対するスパン方向の速度が一樣であるのに対して、旋回運動ではスパン方向の速度が旋回中心軸からの距離に比例して増加し、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非再現性が強くなっていると思われる。

図10(c)～(h)から、並進運動の場合と同様に角柱に迎え角をもたせると、揚力変動の軌跡が正の揚力側に偏り、 α が 10° から 30° においては、旋回運動開始直後から正の揚力が発生し、 $\theta=40^\circ$ 付近において揚力変動の極大値を示した後、減少して極小値となった後再び増加し始め、緩やかな周期的な変動を示している。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 80° 付近までは狭まる傾向にあ

るが、80° を超えると非再現性が徐々に強くなっていく。

また図10(c)に示すように、旋回運動における $\alpha=5^\circ$ では、旋回開始直後から正の揚力が発生し、 $\theta=40^\circ$ 付近から揚力は緩やかに直線的に増加し、 $\theta=80^\circ$ 付近で極大値を示してから θ に対して周期的な変動を示している。これは並進運動での $\alpha=5\sim10^\circ$ において移動距離に対する揚力変化が緩やかであることに類似しているものと思われる。

図11は迎え角 α の各設置角度での旋回角度ごとの200個のデータを用いた揚力変動の標準偏差 $\sigma_{CL}(\theta)$ を示したものである。図11から標準偏差の値は $\theta=80^\circ$ 付近まではどの迎え角においても違いはほとんどないが、 $\theta=80^\circ$ 以降では迎え角を有することによって標準偏差は並進運動の場合よりもかなり大きく抑制されていることがわかる。

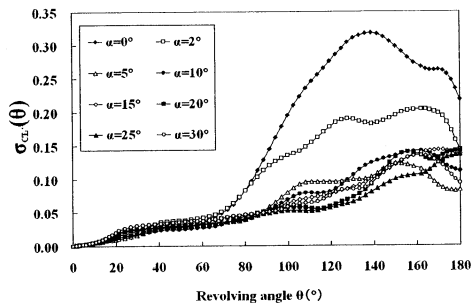


Fig. 11 Standard deviation of lift coefficient at specific towing distance (swing experiment)

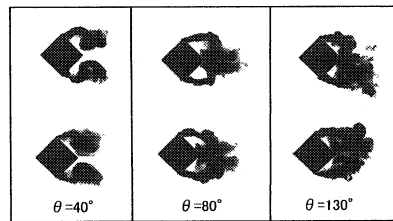


Fig. 12 Flow visualization with $\alpha=0^\circ$ (swing experiment)

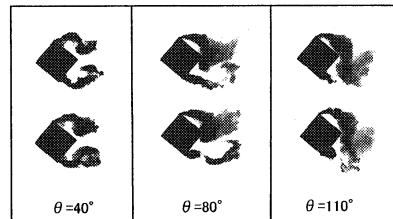


Fig. 13 Flow visualization with $\alpha=5^\circ$ (swing experiment)

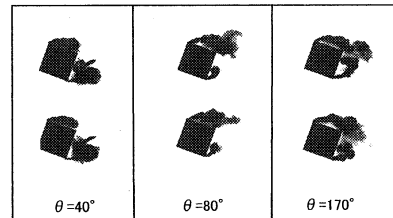


Fig. 14 Flow visualization with $\alpha=25^\circ$ (swing experiment)

図 12~14 には角柱の迎え角 α がそれぞれ 0, 5, 25° の可視化結果を示す。図 12~14 に示すように並進運動の場合と同じように、角柱に迎え角をもたせることによって、流れが上下非対称となり、毎回の旋回において同じ側のはく離せん断層の巻込みが先行するため、同じ流れパターンが形成されて、非再現性が抑制されることがわかる。また $\theta=80^\circ$ 付近から上下の渦がお互いに干渉し始めることがわかる。

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、角柱に迎え角をもたせることによって、揚力変動の軌跡が偏り、並進運動では迎え角が 15° 以上において、旋回運動では 5° 以上において揚力変動の非再現性が顕著に抑制されるとともに、揚力が周期的な変動を示すことから、揚力による角柱先端部の変位を予測しやすくなることがわかった。

(2) 旋回運動のほうが並進運動よりも迎え角 α による非再現性の抑制が顕著に現れることがわかった。

(3) 可視化実験により、並進運動と旋回運動のいずれの場合においても、角柱に迎え角をもたせることによって流れが非対称となり、毎回同じ側のはく離せん断層の巻込みが先行するため、同じ流れパターンが形成されて、非再現性が抑制されていることがわかった。

(4) 並進運動において迎え角が小さい場合には角柱後流の上下に形成される渦が離れているために交互渦の形成が抑制されて揚力変動に周期性が生じにくく、揚力は緩やかに変化することがわかった。

(5) 旋回運動においては、迎え角によって揚力変動の軌跡のばらつき(幅)は、旋回角度が 80° 付近までは狭まる傾向にあるが、80° を超えると非再現性が徐々に強くなっていくことがわかった。

文 献

- (1) Dunnigan, M. W. et al., Hybrid Position/Force Control

of a Hybrid Underwater Manipulator, *IEEE Proceedings Control Theory Application*, Vol. 143, No. 2 (1996), pp. 145-151.

- (2) Timothy, W. M. and Stephen, M. R., Development and Experimental Validation of an Underwater Manipulator Hydrodynamic Model, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 17, No. 7 (1998), pp. 748-756.
- (3) Haniu, H. et al., Fluctuating Fluid Force Acting on a Manipulator Arm Submerged in Water (Nonrepeatability of Fluctuating Lift Produced by Vortex Formation When Repeatedly Commencing Its Motion in Still Water), *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 65, No. 630 (1999), pp. 642-647.
- (4) Haniu, H. et al., Fluctuating Fluid Force 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), *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 67, No. 659 (2001), pp. 1726-1733.
- (5) Haniu, H. et al., Fluctuating Fluid Force 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) *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 68, No. 668 (2002), pp. 1080-1086.
- (6) Haniu, H. et al., Asymptotic Process of Fluctuating Lift Acting on Circular Cylinders Commencing Their Motion in Still Water, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 72, No. 713 (2006), pp. 32-39.
- (7) Igarashi, T., Characteristics of the Flow Around Square Prisms, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 50, No. 449 (1984), pp. 210-218.
- (8) Kurata, M. et al., Effect of Cutout at Edges to Drag Reduction of Square Prism with Angle of Attack, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 68, No. 668 (2006), pp. 1087-1094.
- (9) Tamura, T., Flow Past a Square and a Rectangular Cylinder Turbulence Effects on Its Aerodynamics, *Nagare*, No. 22 (2003), pp. 7-13.
- (10) Barton, I. E., Comparison of simple- and piso-type Algorithms for Transient Flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 26 (1998), pp. 459-483.