

## 水中漂流物体に作用する流体力特性 —水平円板の縦揺安定について—

### Fundamental Study on Hydrodynamic Forces of Underwater Drifting Object -Pitch Stability of Horizontal Circular Plate-

山上路生<sup>(1)</sup>・兼田健一郎<sup>(2)</sup>・戸田圭一<sup>(1)</sup>

Michio SANJOU<sup>(1)</sup>, Kenichiro KANEDA<sup>(2)</sup> and Keiichi TODA<sup>(1)</sup>

(1) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻  
(2) (株) ワークスアプリケーションズ

(1) Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University, Japan  
(2) Works Applications Co., Ltd.

#### Synopsis

Flume experiments were conducted to reveal physical properties of hydrodynamic forces on underwater drifting object, in which drag force, lift force and pitching moment could be measured by digital push-pull gauges varying an angle of attack. The relationship between these forces and the attack angle allows us to examine static and dynamic stabilities. It was found that dependencies of normalized coefficients regarding measured forces acting on a circular plate are not observed in the ranges of small attack angles. The pitching stability is influenced significantly by a position of gravity center. Furthermore, an oscillation period could be also evaluated reasonably.

**キーワード:** 流体力, 水中漂流物, 縦揺安定

**Keywords:** hydrodynamic force, underwater drifting object and pitching stability

#### 1. はじめに

洪水や津波は家屋や車両などを簡単に流しうるエネルギーをもっている(押川ら, 2011; 戸田ら, 2012; Xia et al., 2011). また洪水河川では流木や枝葉が橋脚や防護ネットに引っかかり, 疎通能力を大幅に低下させて被害を大きくする. さらに漂流物の衝突による人的, 物的被害も甚大であり, その対策が急務となっている. そのためには水災害時における受圧物体の漂流挙動を正確に予測する必要があるが, 最近のシミュレーション技術の飛躍的進展がこれを可能にしつつある(水谷ら, 2005; 牛島ら, 2006; 米山・永島, 2009; 後藤ら, 2011).

一方でこのようなトピックを実験的に扱った既往研究もあるが流体力の基礎特性や安定解析を水理実験によって試みたものは少ない. 流体中における物体の挙動については, 空気力学および航空工学において翼の安定性を中心に, 多くの実験的あるいは理論的研究が積み重ねられてきた(牧野, 1980; 岡本・神馬, 2009). 特に安定性の問題は極めて重要で, 2次元場に限定したとしても揚力, 抗力特性だけでなく, 縦揺れモーメントに基づく静安定, 時間軸を考慮した動安定の問題まで詳細に検討されている. 水防災では構造物, 車両および流木などを扱うが, これらの形状は推進抵抗や操縦性を追求したものとは無縁であり, 航空工学の知見のみでは不十分であ

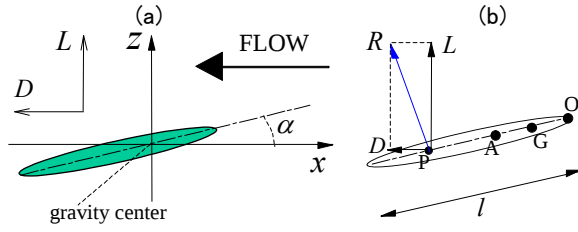


Fig. 1 Coordinate system

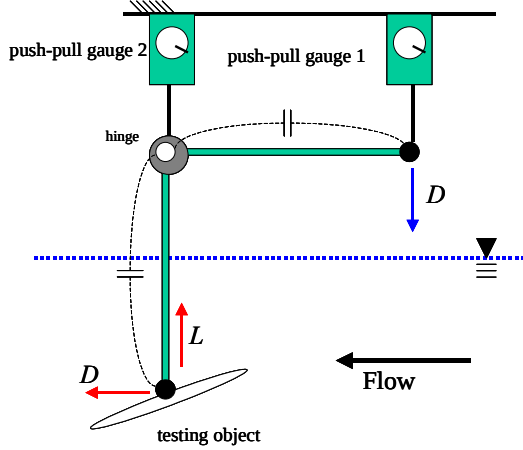


Fig. 2 Measurement system for drag and lifting forces

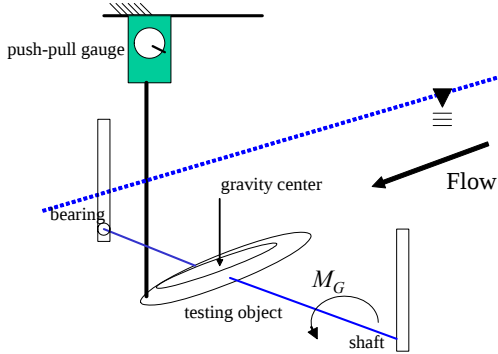


Fig. 3 Measurement system for pitching moment

る。また津波や洪水のような非定常効果、自由水面効果あるいは物体背後に形成される乱流渦との関係についても未解明のままである。本研究では既存の計測データが十分でない、主流に対する方向性依存がない水平円板を取り上げてその水中漂流特性に注目する。特に一様流における3分力を計測して静的および動的安定性を解析する。さらに重心位置やレイノルズ数の依存性についても実験データに基づいて考察する。

## 2. 理論背景

### 2.1 作用流体力

一様流中に浮遊する物体が受ける流体力の理論的

取り扱いについては、航空力学においてその基礎が確立されている（岡本・神馬，2009）。水中の漂流運動についてもこれに応用できる。Fig. 1(a) に水流中に浮遊する円板に作用する流体力と座標系を示す。円板の中心軸に沿う断面を考える。ここでは主流（ $x$ 、円板から流れに向かう方向を正）と鉛直方向（ $z$ ）の2次元面の運動に限定する。円板を中心とした相対流速を考える。

一例として重心  $G$  が物体の上流側に位置する場合を考える。Fig. 1(b) における点  $P$  は水流による円板面に垂直にかかる圧力  $R$  の作用点である。この主流方向と鉛直方向への分力がそれぞれ抗力  $D$  および揚力  $L$  となる。さて主流に対する頭上げ角  $\alpha$  を仰角とよぶが、この大きさによって点  $P$  および流体力は変化する。さらに重心まわりのモーメント  $M_G$  を定義する。一般にこれはピッチングモーメントとよばれ、縦揺安定性を評価する上で重要なパラメータである。 $M_G$  も  $\alpha$  によって変化する。

一方で、 $\alpha$  に依存せず一定のモーメント値  $M_{ac}$  となる点  $A$  が存在することがわかっており、これを空力中心という。一般にこれらの力は動圧との比によって議論され、それぞれ次のように無次元化される。

$$C_D \equiv D / (\frac{1}{2} \rho U_m^2 S) \quad (1)$$

$$C_L \equiv L / (\frac{1}{2} \rho U_m^2 S) \quad (2)$$

$$C_{MG} \equiv M_G / (\frac{1}{2} \rho U_m^2 S l) \quad (3)$$

$$C_{Mac} \equiv M_{ac} / (\frac{1}{2} \rho U_m^2 S) \quad (4)$$

$U_m$  は代表流速で本研究では水流の断面平均流速とする。漂流運動を考える場合、漂流物体からみた相対流速に相当する。 $S$  および  $l$  はそれぞれ円板の水平面積および直径である。特に  $C_D$  および  $C_L$  はそれぞれ抗力係数、揚力係数とよばれる。

次に  $M_G$  は式(5)のように書ける。

$$M_G = -R \cdot \overline{PG} \quad (5)$$

図のように物体の上流端を点  $O$  とすると、  
 $\overline{PG} = \overline{OA} + \overline{AP} - \overline{OG}$  なので

$$M_G = -R \cdot (\overline{OA} - \overline{OG}) - R \cdot \overline{AP}$$

Table 1 Hydraulic condition

| $Q$ (l/s) | $U_m$ (cm/s) | $H$ (cm) | $\delta$ (cm) | $Re$  | $Fr$  |
|-----------|--------------|----------|---------------|-------|-------|
| 11.7      | 15.8         | 18.5     | 12.0          | 18960 | 0.146 |
| 15.8      | 21.3         |          |               | 25560 | 0.196 |
| 20.5      | 27.7         |          |               | 33240 | 0.255 |

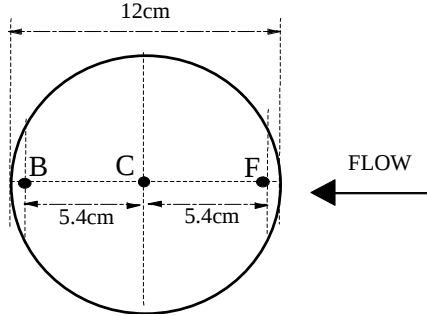


Fig. 4 Imaginary position of gravity center

$$= -R \cdot (\overline{OA} - \overline{OG}) + M_{ac} \quad (6)$$

$R \cong L$  とみなせる  $\alpha$  が小さい範囲では次のように書き換えられる.

$$C_{MG} = -C_L (\overline{OA} - \overline{OG}) / l + C_{Mac} \quad (7)$$

$C_{Mac}$  および  $(\overline{OA} - \overline{OG})$  は  $\alpha$  や  $C_L$  に対して一定であるから、重心まわりのモーメント  $M_G$  は理論的に  $C_L$  に対して線形変化する.

## 2.2 安定特性

一定の仰角で定常的に浮遊する円板を考える. このとき突発的な水流の乱れによって重心周りに回転したときの挙動を解析する. 一般にこのような回転によって、抗力や揚力も変化するため、物体は上下方向にも移動するが、複雑になるためここでは回転運動のみに注目する.

### (a) 静安定

正の迎角 ( $\alpha > 0$ ) の状態で、このとき外乱が生じて迎角が  $\theta$  増加変化したとする. この変化によって  $M_G$  が減少すれば、これが元の状態に戻る頭下げの復元作用となり安定といえる. 一方で  $M_G$  が増加すれば頭上げを促進するため迎角がさらに増加し、不安定となる. 換言すれば  $dM_G / d\alpha < 0$  であれば静的に安定,  $dM_G / d\alpha > 0$  なら静的に不安定である. なお静安定とは初期状態に戻るモーメントが作用するか否かを指す. 一方で、初期迎角回りに時間的に振動しながら戻る場合がある. この振幅が発散するこ

ともあり、これらの時間的な挙動に着目したものを動安定という.

### (b) 動安定

次に外乱による定常状態から仰角が  $\theta$  変化したとき、これによるピッチングモーメントの増減分を  $\Delta M$  とすると次式であらわされる.

$$\Delta M = C_{MG}' \theta \frac{1}{2} \rho U_m^2 A \quad (8)$$

ここで、 $C_{MG}' \equiv dC_{MG} / d\alpha$  は仰角  $\alpha$  に対する縦揺モーメント微係数である. 重心を通る横断軸まわりの円板の回転運動は、次の方程式で表される.

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \Delta M \quad (9)$$

ここで  $I$  は重心まわりの円板の慣性モーメントである. さらに変形して、

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \sigma \cdot \theta \quad (10)$$

ここで  $\sigma = \frac{\rho U_m^2 A}{2I} C_{MG}'$  である.

これはいわゆる振動方程式の一種であり、この微分方程式の一般解は次のようになる.

a)  $\sigma = 0$  のとき

$$\theta = C_1 t + C_2 \quad (11)$$

迎角増加が完全に止まるならば、 $t = 0$  で  $d\theta / dt = 0$  なり  $C_1 = 0$  であるので、 $\theta$  は時間によらず一定となり動的安定といえる.

b)  $\sigma > 0$  のとき

$$\theta = C_1 e^{\sqrt{\sigma} t} + C_2 e^{-\sqrt{\sigma} t} \quad (12)$$

第1項のため  $\theta$  は時間進行とともに発散し、動的に不安定である.

c)  $\sigma < 0$  のとき

$$\theta = C_1 \cos \sqrt{-\sigma} t + C_2 \sin \sqrt{-\sigma} t \quad (13)$$

これは周期  $T = 2\pi / \sqrt{-\sigma}$  の一定振幅振動であり、動的に中立といえる。

4 節ではこれらの理論背景を踏まえて実験データを用いて水中を漂流する円板物体の安定性を考察する。

### 3. 実験水路における流体力の計測方法

全長 9m, 全幅 40cm の循環式直線水路の上流から 6m 地点に、試験模型を設置した。流体力の計測にはフォースゲージ（プッシュプルゲージ）を用い、揚抗力とピッチングモーメントは分けて計測した。Fig. 2 は揚抗力計測に使う円板模型の支持装置である。腕の長さが等しい L 型アームに鉄棒をつけてベアリング支持してある。アームの一端と円板模型の中心を接続した。なおトルクヒンジを介して円板模型を取り付けており、円板の仰角を手動で調整可能とした。もう一端はフォースゲージ 1 で支持している。また L 型アームのヒンジ部位をフォースゲージ 2 で支持している。円板が水流から抗力を受けるとアームを介してその値がフォースゲージ 1 で計測できる。同時に円板に作用する揚力はゲージ 1 および 2 の合算値として計測できる。

ピッチングモーメントについては後述するように円板の仮想重心位置ごとに計測した。いずれの重心も円板の主流方向に沿う中心軸上にあるものとする。Fig. 3 のように対象とする仮想重心を通るように水路横断方向に径 3mm の金属棒を円板下部に接着する。さらに水路側壁に軸受け用のベアリングを装着した金属プレートをセットして、ここに金属棒を通す。さらに主流方向の中心軸上の重心とは異なる点を水路上部にあるトラバース装置に接続された鉄棒で支持する。鉄棒はフォースゲージで接続されており、またこのゲージはトラバース装置によって上下方向に移動が可能である。さらにトラバース装置は主流方向に移動できる台車に固定されている。支持鉄棒の上下方向位置および台車の主流方向位置の調整によって、円板模型の迎角を微調整できる。フォースゲージの出力値と重心と指示位置の距離をかければ、重心周りのピッチングモーメントが計測できる。なおこれらの流体力の計測にあたっては、ヒンジの抵抗やアームの自重による影響を考慮するため、円板模型に既知の力を作用させてフォースゲージのキャリブレーションを行った。

Table 1 に水理条件を示す。断面平均流速  $U_m$  を 3 通りに変化させて、水深  $H = 18.5\text{cm}$  と固定した。表中の  $\delta$  は円板直径で、Re 数は  $U_m$  と  $\delta$  から評価し

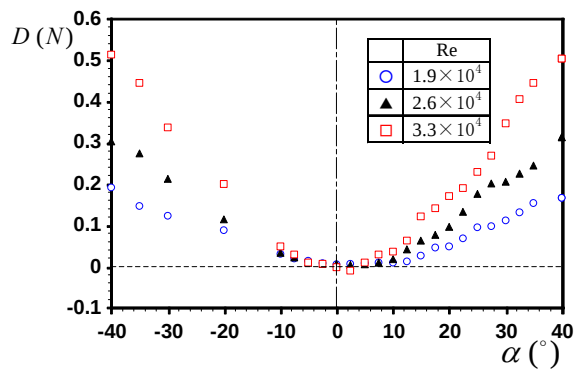


Fig. 5 Variation of drag force against attack angle

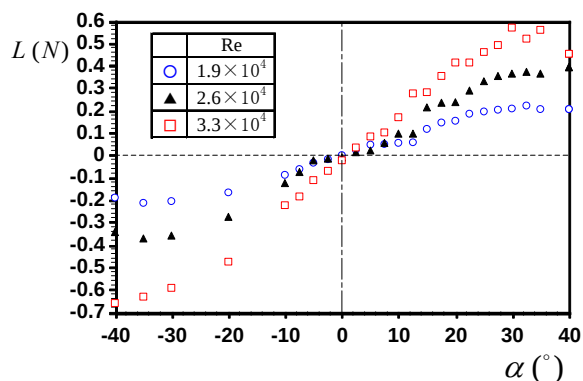


Fig. 6 Variation of lifting force against attack angle

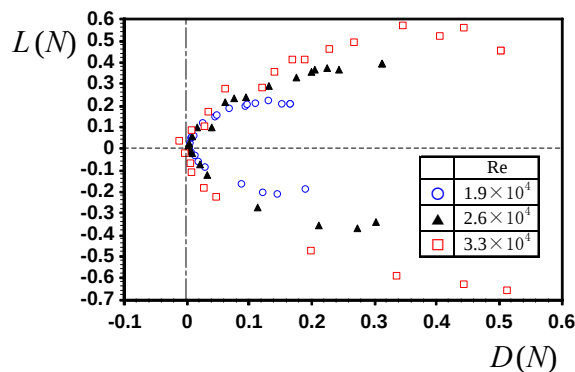


Fig. 7 Comparison of polar curves

た。試験模型は円板形状で市販の CD メディア（径 12.0cm, 厚 1.2mm）を用いた。これを仮想重心位置が路床より 9cm（半水深）の高さにセットした。迎角は最小  $2.5^\circ$  刻みで、 $\pm 40^\circ$  の範囲で変えた。仮想重心位置は Fig. 4 のように、流れ方向に沿って上端、下端、中央の 3 点を選択した。ポンプをインバータ制御することで規定の流量を発生することができる。円板模型を設置しない状態で、下流堰、勾配および循環部の各バルブを調整して、擬似等流を再現した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 抗力と揚力特性

Fig. 5 は、迎角による抗力の変化を比較したものである。いずれのケースでも共通の傾向がみられる。ゼロ迎角付近では垂直応力の作用面積が最小となるため、抗力も極小値をもつ。また迎角の正負にはほとんど関係なく、絶対値の増加とともに、ゼロ迎角をはさんで対称的に大きくなる。また迎角の増加とともに高  $Re$  数ほど大きな抗力が発生する。

Fig. 6 は、迎角と揚力の関係である。抗力と同様にゼロ迎角付近では揚力はほぼゼロとなる。抗力と異なり、正の迎角では揚力は正、負の迎角では揚力は負となる。すなわち流れに対して頭上げ状態では自由水面へ向かって浮上させ、頭下げでは底面へ降下させる力が発生する。

Fig. 7 は抗力と揚力の対応関係を示すもので、極曲線とよばれる。ある抗力値に対しては正負が逆で絶対値がほぼ等しい2つの揚力が対応する。抗力がゼロ付近では揚力の変化が大きいが、抗力の増加に対して揚力の変化は次第に小さくなる。この傾向はいずれの  $Re$  数においても同様の傾向がみられる。

Fig. 8 は抗力係数と迎角の関係である。頭上げおよび頭下げの双方において、2次関数的に増加する。また本研究の実験条件の範囲内であれば、 $Re$  数の依存性は小さいようである。比較のために平円板（径 27.6cm, 厚 32mm）を用いた安田（1999）の風洞実験データもプロットした。この風洞実験は風速が 10m/s で、 $Re$  数は  $1.73 \times 10^5$  と本研究より 1 オーダー大きい。 $\alpha = 0 \sim 26^\circ$  の範囲のみの比較になるが、本水路実験値と同様に2次曲線的な分布をもち定性的な一致がみられる。定量的には迎角の増加とともに風洞の方が小さくなりずれが生じるがこれは、 $Re$  数や自由水面の影響かもしれない。あるいは風洞で用いた円板は、径に対する厚み比が CD メディアの 10 倍程度大きく、形状による影響も考えられる。

Fig. 9 は揚力係数と迎角の関係である。Fig. 8 と同様に風洞実験値とも比較した。抗力迎角の正負に関わらず、 $20^\circ$  より頭上げおよび頭下げが進むと揚力変化は小さくなり、さらに  $30^\circ$  付近でピークをもったのち減少に転じるケースもみられる。航空力学的には失速とよばれる現象であり、上下方向の力のバランスが崩れて非常に不安定になる。 $\alpha = 0 \sim 26^\circ$  の範囲では風洞と水路はどちらも増加を続けている。定量的には抗力と同様に風洞の方が小さい。

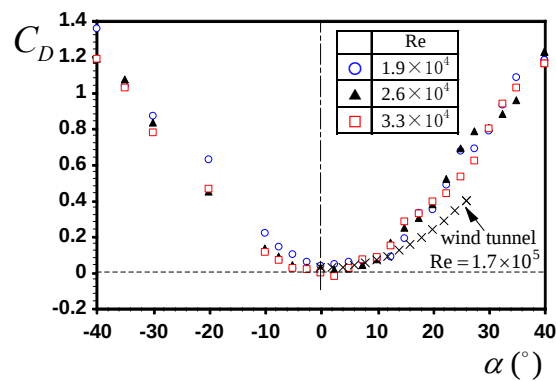


Fig. 8 Profiles of drag coefficient

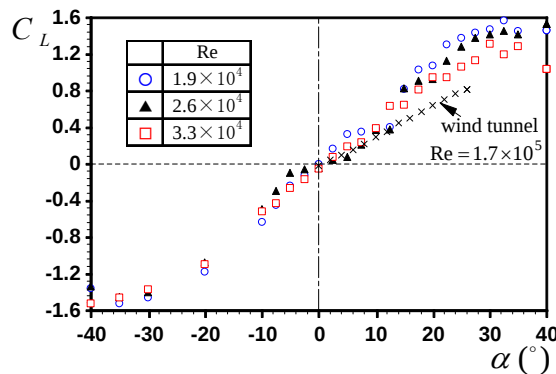


Fig. 9 Profiles of lifting coefficient

### 4.2 ピッチングモーメントと静安定性

Figs. 10 - 12 はそれぞれ重心位置が、Fig. 4 の F, C, B に一致する場合のピッチングモーメントと仰角の関係である。まず F については仰角の増加とともにモーメントが減少する。すなわち静安定といえる。揚力および抗力と同様に迎角が大きいくほどレイノルズ数による差異が明かとなるが、定性的な傾向は一致する。C については  $-40^\circ$  から  $15^\circ$  の範囲ではモーメントは増加するため静的に不安定である。一方で  $15^\circ$  以降ではわずかながら減少するため静的には弱い安定性をもつといえる。B については、ほぼ全域でモーメントは増加するため、静的不安定である。したがって水中を漂流する際には、F のように流れに向かう側に重心が位置するほど安定であるといえる。またこれは今回の水理実験の範囲ではレイノルズ数への依存性は小さいことがわかった。

### 4.3 空力中心モーメントと上下運動の考察

式(7)と比較して考察するために、揚力係数と 3 種類の重心位置におけるピッチングモーメントの関係を Figs. 13 - 15 に示す。小迎角に対応する小さい  $C_L$  の範囲では、全ケースにおいて式(7)に対応する線形関係がみられる。静安定である F についてはいずれの  $Re$  数についても  $C_L$  に対する  $C_{MF}$  の勾配が負となる。 $C_{MF}$  には  $Re$  数による差異がみられるが、小

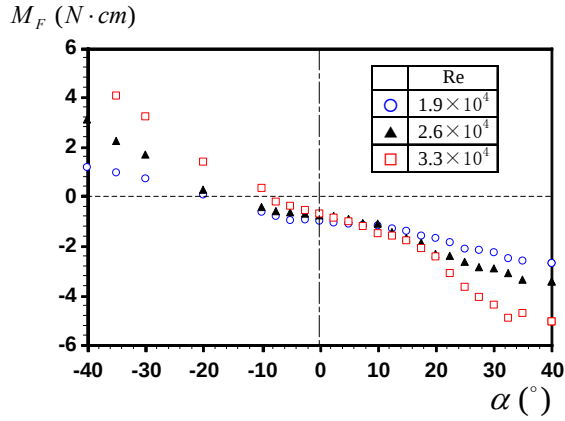


Fig. 10 Variation of pitching moment against attack angle, gravity center: upstream-side F

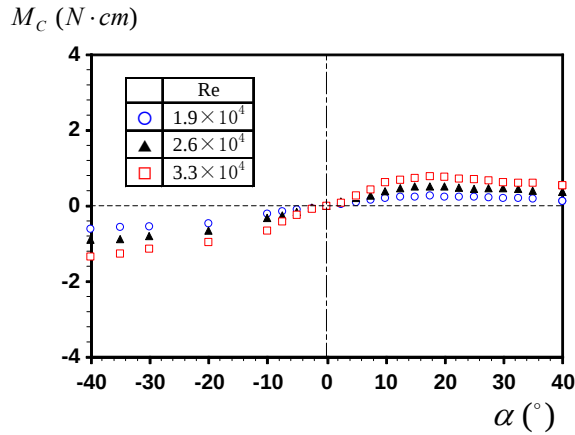


Fig. 11 Variation of pitching moment against attack angle, gravity center: center-axis C

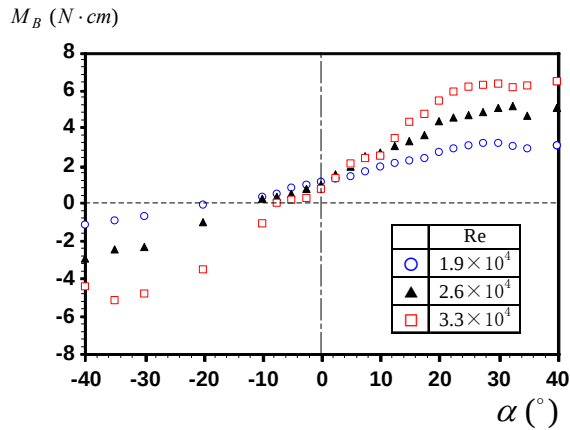


Fig. 12 Variation of pitching moment against attack angle, gravity center: downstream-side B

さい迎角ではその勾配は  $Re$  に依存しないようである。  $C_L = 0$  に対応する  $C_{MF}$  が  $C_{Mac}$  と等しいが、いずれの  $Re$  数でも  $C_{Mac} < 0$  となる。  $C_{Mac}$  の絶対値は  $Re$  数が大きいほど小さくなる。また  $C_{MF} = 0$  のとき  $C_L < 0$  となり、重心周りの回転作用がない状態では、

負の揚力によって下降する特性があるといえる。

C のケースでは  $Re$  数依存性がみられず、3 ケースともほぼ同一のラインに分布し、  $C_L$  に対する  $C_{MC}$  の勾配は全域において微小である。また  $C_{Mac}$  はいずれのケースにおいてもほぼゼロとなる。静的不安定の B では F と反対に勾配が正となる。  $C_{Mac}$  は 3 ケースとも正となり、  $Re$  数が小さいほどその値は大きくなる傾向をもつ。また  $C_{MB} = 0$  の  $C_L$  は負であり、F と同様に回転作用を受けない状態では、負の揚力が発生することがわかる。

#### 4.4 動安定性の考察

迎角と  $Re$  に無関係に静安定である重心位置 F のケースに注目する。2 節で説明したように動安定はパラメータ  $\sigma$  の符号、すなわち  $C_{MG}' \equiv dC_{MG}/d\alpha$  の正負によって議論できる。Fig. 10 のピッチングモーメント分布より  $\alpha$  に依らず  $C_{MG}' < 0$ 、すなわち  $\sigma < 0$  となるため、静的に安定であっても、動的には中立といえる。すなわち円板への作用力がバランスした状態から迎角が変化した場合に、復元作用は働くが理論的には振動し続けることになる。またいずれの  $Re$  数においても、i)  $\alpha < -15^\circ$ 、ii)  $-15^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ 、iii)  $15^\circ < \alpha \leq 30^\circ$  および iv)  $30^\circ < \alpha$  の範囲でピッチングモーメント  $M_F$  の傾きが変化するようにみえる。これは Fig. 6 および Fig. 9 の揚力の迎角特性に対応する。したがって振動周期も迎角帯によって変化する。Fig. 16 に迎角ごとに算出した  $T = 2\pi/\sqrt{-\sigma}$  をプロットする。この際に  $C_{MG}$ - $\alpha$  曲線を多項式近似し、この微分値を  $C_{MG}'$  とした。まず、いずれのケースもゼロ角近傍でピークをもち、迎角の絶対値の増加とともに短周期となるが、  $30^\circ$  以上では再び増加に転じることがわかる。また一部の領域を除いて、高  $Re$  数ほど短周期振動となる。

#### 5. おわりに

水中漂流する物体に作用する流体力特性に着目して、円板模型を用いた水理実験を行った。特に抗力、揚力およびピッチングモーメントをフォースゲージによって計測した。特に縦揺れ安定性に注目して、静安定性と動安定性を考察した。今回は円板の挙動を流体力から考察した。実際には剥離渦や境界層の形成といった乱流構造との関係が大きいことが容易に予想されるため、今後は流速の時空間計測も合わせて行って水中漂流運動の理解を深めたい。

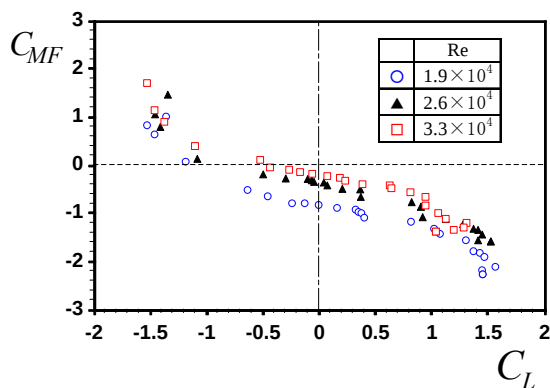


Fig. 13 Relationship between lifting and pitching coefficients, gravity center: upstream-side F

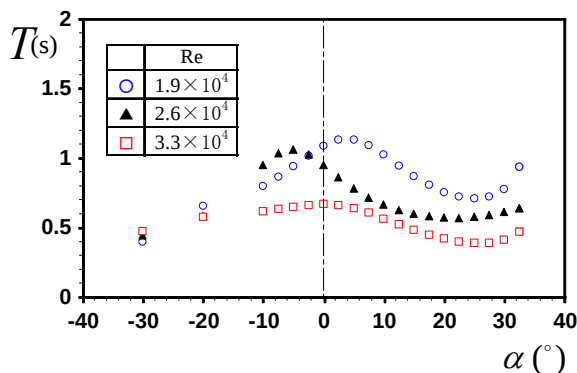


Fig. 16 Relationship between oscillation period and attack angle

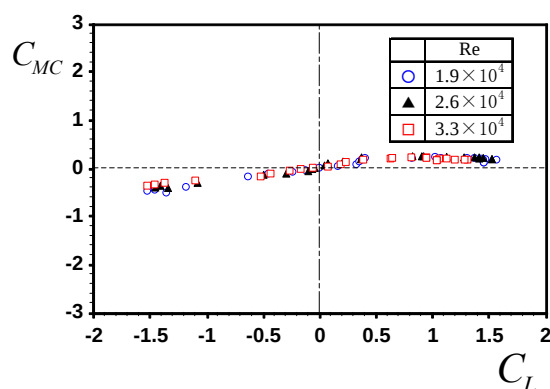


Fig. 14 Relationship between lifting and pitching coefficients, gravity center: center-axis C

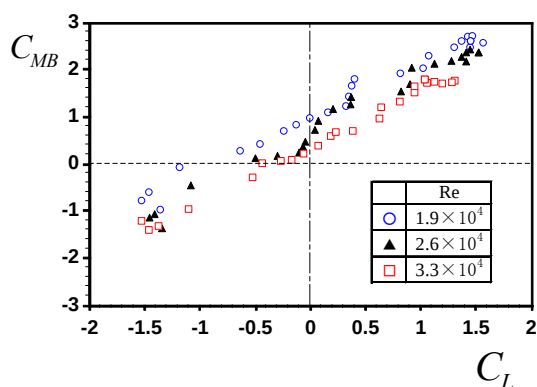


Fig. 15 Relationship between lifting and pitching coefficients, gravity center: downstream-side B

## 参考文献

- 牛島省・山田修三・藤岡奨・瀬津家久 (2006) : 3次元自由水面流れによる物体輸送の数値解法 (3D MICS) の提案と適用性の検討, 土木学会論文集, Vol.810/II-74, pp.79-89.
- 岡本正人・神馬義貴 (2009) : 低レイノルズ数における翼の平面形空力特性の実験的研究, 秋田高専研究紀要, 第44号, pp.42-50.
- 押川英夫・大島崇史・小松利光 (2011) : 冠水時の自動車通行の危険性に関する研究, 河川技術論文集 第17巻, 土木学会, pp.461-466.
- 後藤仁志・五十里洋行・柴田卓詞・小倉和己・殿最浩司・志方建仁 (2010) : 津波来襲時のコンテナ群漂流・水没シミュレーション, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.806-810.
- 戸田圭一・石垣泰輔・尾崎平・西田知洋・高垣裕彦 (2012) : 氾濫時の車の漂流に関する水理実験, 河川技術論文集 第18巻, 土木学会, pp.499-504.
- 牧野光雄 : 航空力学の基礎, 産業図書, 1980.
- 水谷法美・高木祐介・白石和睦・宮島正悟・富田孝史 (2005) : エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.741-745.
- 安田邦男 (1999) : フライングディスクの飛行・空力特性について, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.47, pp.314-320.
- 米山望・永島弘士 (2009) : 複雑な移動・回転を考慮した津波漂流物の三次元数値解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.266-270.
- Xia, J., Teo, F.Y., Lin, B. and Falconer, R.A. (2011): Formula of incipient velocity for flooded vehicles, *Natural Hazards*, Vol.58, pp.1-14.

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり (財) 戸田育成財団の援助を受けた。ここに謝意を表する。

(論文受理日 : 2014年6月11日)