

論 文

蛍光塗料を用いた多関節平板の振動変位計測

山岸真幸¹・森村浩紀²

¹機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka National College of Technology)

²エコール辻東京 (Ecole Tsuji Tokyo)

DISPLACEMENT ACQUISITION WITH FLUORESCENT PAINT OF AN ARTICULATED FLAT PLATE

Masaki YAMAGISHI¹ and Hiroki MORIMURA²

Abstract

A multi-articulated flat plate oscillates itself in a mean flow, and it has steady oscillating mode. Laser light displacement sensor was necessary to acquire the displacements of an articulated flat plate because the articulated plate had large amplitude in its fluttering motion. The image processing by using a digital video camera was therefore used to clarify the fluttering motion of the articulated flat plate. In the experiment, motion capture technology was applied. Furthermore the fluorescent paint was used for the marker to capture the motion of the plates. From the results of image processing, it was found that the oscillating frequency is extremely periodic, and the amplitude is constant. Furthermore the oscillating frequency is proportional to the mean-flow velocity.

Key Words : *water tunnel experiments, flow-induced vibration, fluttering, imaging analysis, motion capture*

1. 緒言

流体中に物体を配置した際、物体が振動することがある。この流体振動は、タコマ橋の崩落事故や高速増殖炉「もんじゅ」の冷却用液体ナトリウム漏洩事故に見られるように、機械構造物の破損・破壊を引き起こすため、これまでは抑制することに力が注がれてきた。しかし、機器の破損を引き起こすほどのエネルギーを持つ振動を逆に利用できれば、まったく新しいエネルギー源が得られる。

著者らは流体振動を発生させる構造体として、旗の構造を単純化させた、関節を有する平板のモデルである多関節平板を考案、その振動形態を明らかにする風洞実験を試みてきた¹⁾。しかし変位計測においては、多関節平板の振動振幅・変位角が大きいいため、既存の変位計では計測が不可能であることがわ

かった。そこでビデオカメラにより振動の様子を撮影し、画像からスケールを用いて直接変位を読み取る手法を用いた(図-1)。ただしこの手法では手間がかかりすぎ、また精度が低い。

一方、動画による変位・運動挙動測定法にモーションキャプチャー^{2), 3)}という技術がある。これは変位や運動などの注目する点にマーカーと呼ばれる目印を貼り付け、画像解析によりマーカーを追跡する方法である。このモーションキャプチャーは、機械制御・ロボットの分野に限らず、スポーツやリハビリテーション、介護福祉機器開発など人間工学の分野でも応用されている^{4)~7)}。

本報ではモーションキャプチャーを応用し、塗布した蛍光塗料をマーカーとした変位測定法を検討した。さらにこの手法により多関節平板の変位測定を行い、振動特性の解明を行うことを目的としている。

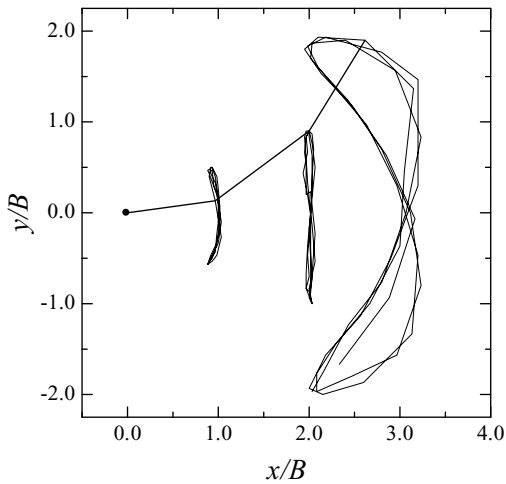


図-1 多関節平板関節のリサージュ曲線¹⁾
(空気流における振動)

2. 蛍光塗料を用いた変位計測

2. 1 モーションキャプチャーの応用

モーションキャプチャーとは、運動する物体の特定位置の空間座標を読み取る方法である。一般的な方法は、注目する点にマーカーと呼ばれる直径 5 cm 程度の球状の色点を取り付け、そのマーカーの位置を動画・画像処理によって読み取る方法である。しかし本実験においては、取り付けられたマーカーが周囲流体の流れ構造に影響を及ぼし、本来の振動から異なる挙動を示すことが明白である。そこで多関節平板の注目点に色を塗り、これをマーカーとする手法を用いた⁸⁾。ただし観測方向が平板面に平行なため、平板の厚さ程度(約 1 mm)のマーカーとなる。

モーションキャプチャーでは、マーカーの色と周囲の色を画像処理により区別し、マーカーの空間座標を算出する。このとき、マーカー色と周囲の色が明確に区別されることが望ましい。通常はマーカーに白色を用い、ライトによって色を際立たせる。しかし本実験ではアクリル樹脂製の端板を解して撮影を行い、また水流を用いるため、板面・水面におけるライトの反射がマーカーの識別を阻害する。そこで本研究では、注目点に蛍光塗料を塗布し、ブラックライトで照らすことで発光させ、それ以外を黒に近い色にする手法を試みた。座標抽出は画像処理によって行われるが、周囲背景が抽出の際に外乱となるため、注目点を際立たせるため遮光して実験を行っている。

モーションキャプチャーは画像処理により行われるため、マーカー部の相対座標および実距離は計測

できない。このため何らかの指標をあらかじめ記録し、この指標を元に座標及び実寸を換算する。この指標はカメラレンズの歪みの補正や、複数のカメラを用いる際にはその配置調整にも用いられる。この前作業をキャリブレーションと呼び、一般には一定の寸法を持つ指標(キャリブレータ)を画像記録する方法が用いられる。本実験においては、低流速下で振動せず、流れ方向に平行となった状態の多関節平板自身をキャリブレータとして用いた。マーカーの整列方向により流れ方向が、マーカーの間隔により平板長さとの寸法比が得られる。

マーカーの位置算出は、まず画像内における画素位置(X,Y)を算出し、その後キャリブレーションにより得られる座標系(x, y)に変換する。通常マーカー位置はマーカー検出画素の重心位置で求めるが、本実験では平板端からある長さを持たせてマーカーを塗布しているため、図-2 に示すように下流側端部を関節位置(X,Y)とした。

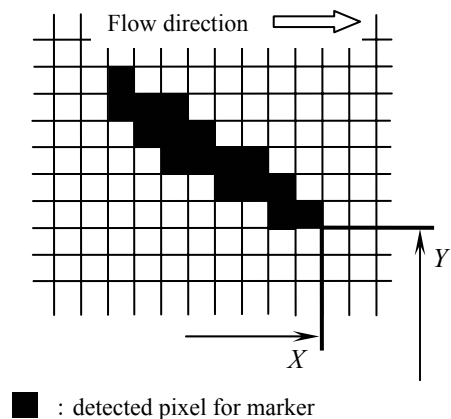


図-2 関節位置の算出

2. 2 蛍光塗料の選別

色情報から注目点を他と区別するためには、明確な差異を生じさせる必要がある。今回遮光することで注目点以外を黒に近い色となるようにしているが、ブラックライトを点灯しているため、反射により紫外光色が若干生じる。画像解析において注目点の検出を適切に行うためには、マーカーとして用いる蛍光塗料の色を適切に選別しなくてはならない。以下に色選別のため行った予備実験を示す。

画像処理において、色情報をR(赤), G(緑), B(青)成分に分解し、0~255の256階調における強度によって蛍光塗料が発光している点を判別する。このとき、用いる蛍光塗料が各成分において明瞭に識別されるようにする。図-3 に選別に用いた

蛍光塗料を示す。用いた蛍光塗料の色はピンク、オレンジ、イエロー、グリーンの4色で、模型用塗料（㈱GSI クレオス, Mr.COLOR）を用いている。なお模型用塗料には蛍光ブルーは無く、比較することはできなかった。これらの蛍光塗料を白色・黒色の背景に塗布し、暗室内でブラックライトを照射、デジタルカメラで撮影した。実際の実験においては、アクリル樹脂製の端板を通してブラックライトの照射および撮影を行うため、ここでの撮影時においてもアクリル板を介して撮影を行った。図-4 (a) にアクリル板無しで撮影した画像を、図-4 (b) にアクリル板を介してブラックライトを照射・撮影した画像を示す。図より、アクリル板を介することで蛍光塗料の発光強度が弱まっており、その度合いが色によって異なることが分かった。そこでアクリル板を介した撮影画像を用いて色の評価・選別を行った。なお実験ではさらにマーカーとアクリル板の間に水流が存在するが、今回はその点を考慮せず静止空气中で撮影した画像を用いている。撮影によって得られた画像（図-4 (b)）をR, G, B各成分に分解し、強度分布を表したものを図-5 に示す。いずれの成分も、256 階調において最大で 80~100 程度の低い値であった。図-5 より、グリーンがいずれの成分でも強度が小さく、G成分においても小さいことが分かった。また赤に近いピンクも、R成分強度がオレンジよりも小さい。このためブラックライト照射による強調効果が高いのは、オレンジとイエローであることが分かった。さらにこの2色はR成分とG成分の両方において強度が大きくなるため、2成分で識別が可能である。すなわちR成分とG成分の積を取ることで、マーカー部を他の色から一層強調することができる。図-6 に $R \times G$ 値の分布図を示す。図-6 において、 $R \times G$ 値は最大でおよそ 1200 となり、単一成分での階調に比べ約 10 倍の数値範囲となっている。この $R \times G$ 値がある閾値以上の画素をマーカー部として検出することができ、数値範囲が広いため閾値の設定が容易となる。また図より、イエローはオレンジより高い値を示したため、本研究ではマーカーにイエローの蛍光塗料を用いることとした。なおブラックライトの紫外光の反射はマーカーの検出の際、ノイズとなって影響を及ぼすが、大部分がB成分に現れるため、検出時にB成分を取り除くことでその影響を少なくすることができる。

通常のモーションキャプチャーでは、マーカーを複数用いる際はマーカーの色を変え、各注目点を区別する方法も用いられるが、本研究では1色とした。

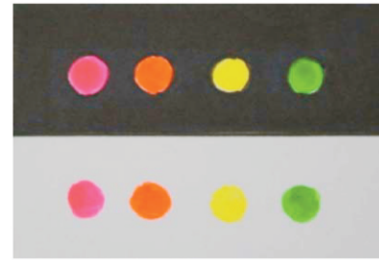
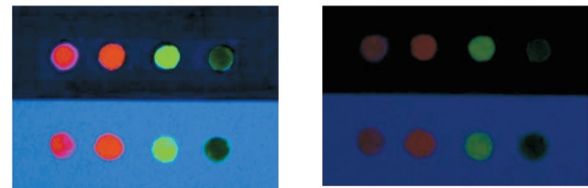
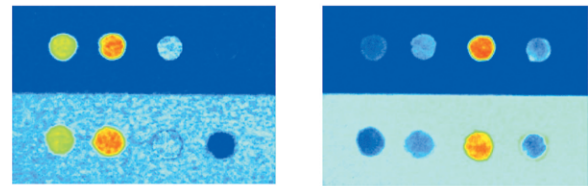


図-3 蛍光塗料試料

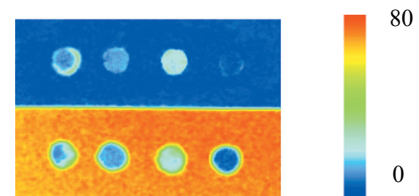


(a) アクリル板無し (b) アクリル板あり

図-4 蛍光塗料発光時の撮影画像



(a) R成分 (b) G成分



(c) B成分

図-5 蛍光塗料発光画像のRGB分解

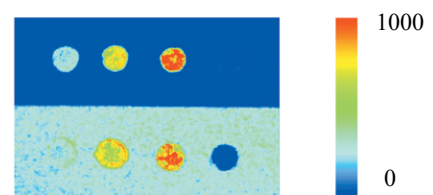


図-6 $R \times G$ 値強度分布

3. 実験装置および解析方法

3. 1 実験装置

実験に使用する装置の構成を図-7 に示す。実験は、長野高専機械工学科の流路断面積 $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ の回流式水槽（榊西日本流体技研）を用いて行った⁸⁾。測定部長さは 680mm である。支持軸及び各平板後端にイエローの蛍光塗料（株GSI クレオス, Mr.COLOR No.172）を塗布した多関節平板を一様流中で振動させ、その様子をミラーを介して水槽底部からデジタルハイビジョンビデオカメラ（SONY SR-1）により撮影した。ブラックライトは、15W の蛍光管形（National, FL15BL-B）を水槽両側に設置した。なお実験装置全体を暗幕で覆い、遮光して実験を行った。流れの平均流速 U_0 は全圧管により測定し、 $U_0 = 0.36, 0.41, 0.46, 0.51\text{ m/s}$ で実験を行った。平板一辺の長さ B によるレイノルズ数はそれぞれ約 $14000, 15800, 17200, 19400$ である。

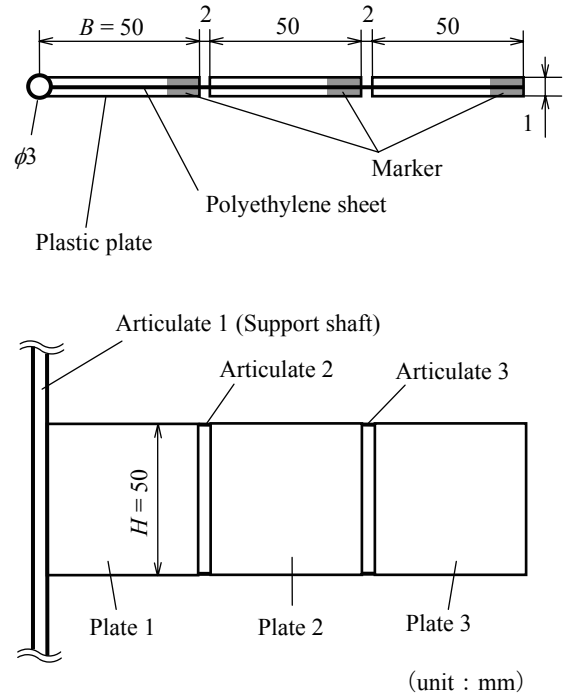


図-8 多関節平板

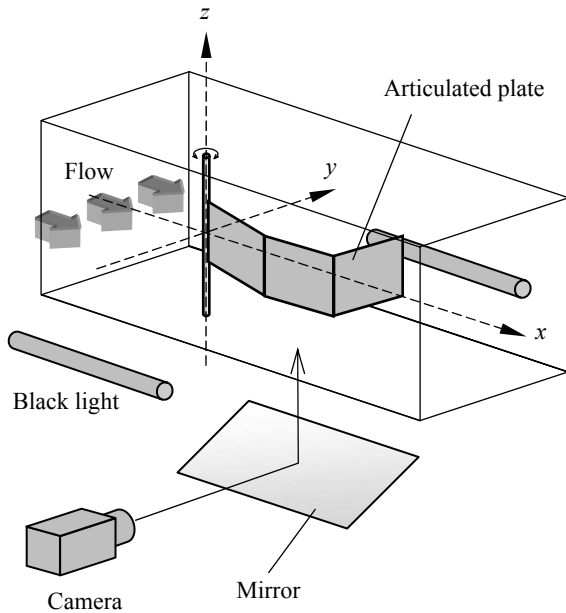


図-7 変位計測の装置構成

実験で用いた多関節平板を図-8 に示す。風洞実験¹⁾同様、3軸3枚の物を用いた。形状、材質も同一である。平板間には 2mm の隙間が設けられ、中央に挟まれたポリエチレン製シートの曲げが関節軸を成す構造となっている。なお各平板を上流側より第1平板、第2平板、第3平板、回転軸を第1関節（支持軸）、第2関節、第3関節と呼称する。

3. 2 解析方法

モーションキャプチャーによる変位測定の手順は次の通りである。

- (1) キャリブレーション用画像を撮影する。
- (2) 動画撮影を行う。
- (3) 画像処理によりマーカー部の位置を検出する。

また位置検出の画像処理方法は次の通りである。

- (1) 撮影した動画から、100フレームをBMP形式の静止画で切り出す。
- (2) 静止画をRGB分解し、 $R \times G$ 値がある閾値以上の場合を1、閾値以下を0として静止画を2値化する。
- (3) 2値化画像からマーカーの位置検出を行う。

なお動画ファイルから静止画の切り出しは、ビデオカメラ付属の動画管理・編集ソフトPicture Motion Browserを用いた。このソフトにより切り出される静止画はJPG形式のため、フリーソフトTinuiousによりBMP形式に変換を行っている。ビデオカメラのシャッター間隔が $1/30\text{ s}$ のため、サンプリング周期も $1/30\text{ s}$ である。

多関節平板の各平板の変位角 θ は図-9のように定義し、次式により算出する。

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} \right) \quad (n = 1, 2, 3) \quad (1)$$

ただし $(x_0, y_0) = (0, 0)$ である．図-9 のように変位角 θ を定義したとき，多関節平板の各平板の運動は， x, y 方向の並進運動（heaving）と平板前端部を回転軸とした回転運動（pitching）の組み合わせと捉えることができる．

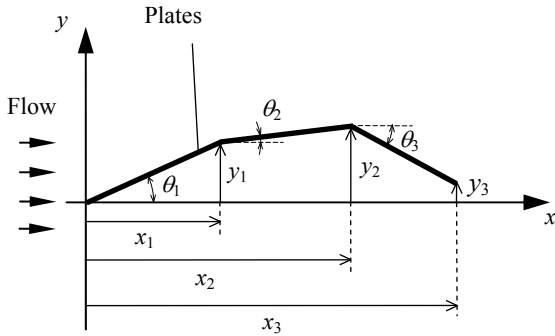
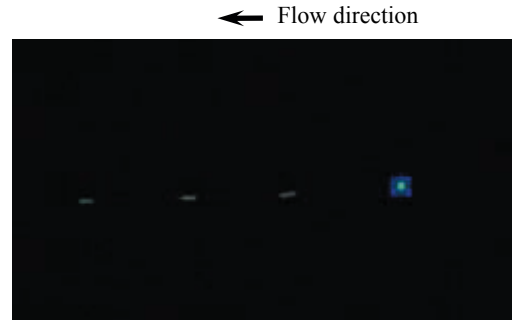
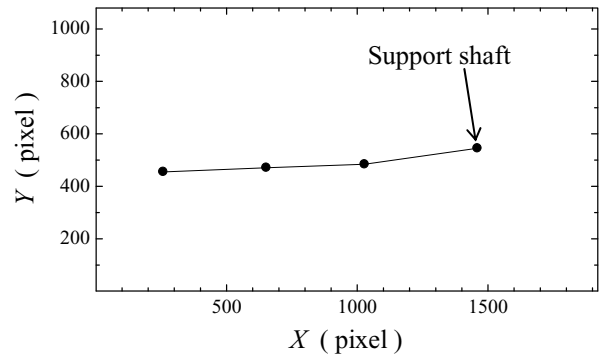


図-9 変位量の設定



(a) 原画像



(b) キャリブレーションデータ

図-10 キャリブレーション画像

4. 結果および考察

4. 1 振動モード

図-10 は多関節平板が振動しない流速 $U_0 = 0.33$ m/sにおける各関節および平板後端位置である．装置の設置上，水流は右から左に向かって流れている状態で撮影を行っている．図-10 (a) の原画像からマーカー位置を抽出したものが図-10 (b) である．図-10 (a)より，マーカーは十分発光しており，前述の水流の影響は無く，マーカーの位置検出が適切に行われた．実験時，水槽壁面に対し第1平板のみ平行となっていないことが目視で確認され，支持軸と平板の取り付けに対称性が無い，あるいは水槽が水平に設置されていなかった可能性がある．しかし第2，3平板は水槽壁面にほぼ水平であったため，平板後端のマーカー位置より主流方向，実寸距離を算出し，かつ流れを左から右に向かう図となるようキャリブレーションを行っている．なお今回の実験におけるカメラ位置での空間分解能は約0.11 mm/pixelである．

図-11は画像処理によって得られた第2，3関節および平板後端の変位軌跡である．100フレームの静止画を用いているので，約3.3 s間の運動となる．支持軸に固定されている第1平板の後端（第2関節）は，当然円弧軌跡を描いている．第3関節およ

び平板後端は8の字の軌跡を描いているが，第3関節については8の字の上下が下流側に歪んだ形となっている．流速が上がるにつれて8の字の中央，交差部分が上流側に移動し，この歪みが大きくなっている．また平板後端軌跡は，第3関節とは逆に，流速が上がるにつれて8の字の上下が上流側に移動していく．いずれも図-1に示す空気流における振動とは，異なる軌跡・振動モードである．

なお図-11において，変位軌跡は x 軸に対し対称となっていない．これは上述の，多関節平板の対称性あるいは水槽の傾きによる影響と考えられる．この変位軌跡の非対称性は流速が上がるにつれて小さくなり，図-11 (d) においてはほぼ対称となっている．これは振動を励起している流体力が増加したため，非対称性の原因である重力の影響を上回ったものと考えられる．

4. 2 振動特性

各平板の変位角 θ の時間変化を図-12に示す．いずれの平板もほぼ一定周期で変化している．また第1平板の変位角に対し，第2平板は約1/4周期，第3平板は約1/2周期の位相差を持ち，今回の実験の範囲では流速が変化しても位相差は変わらない．第2

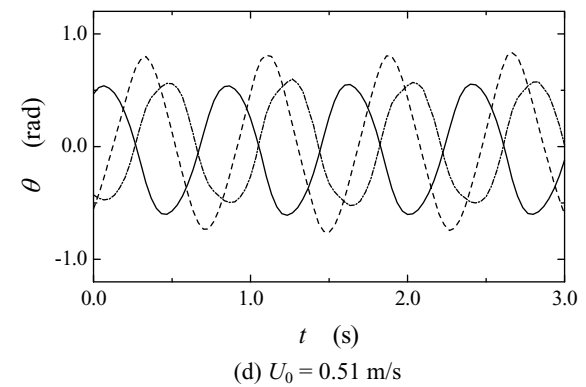
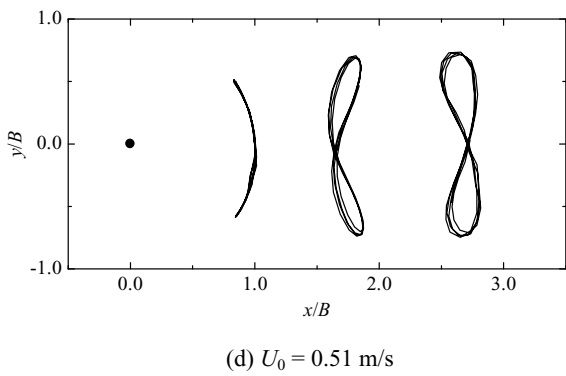
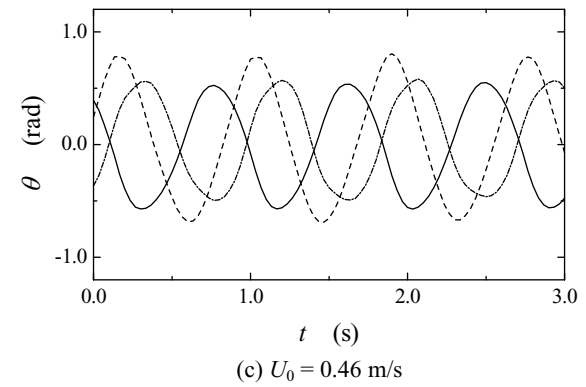
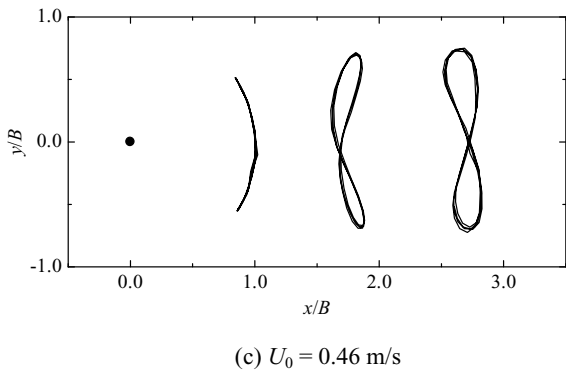
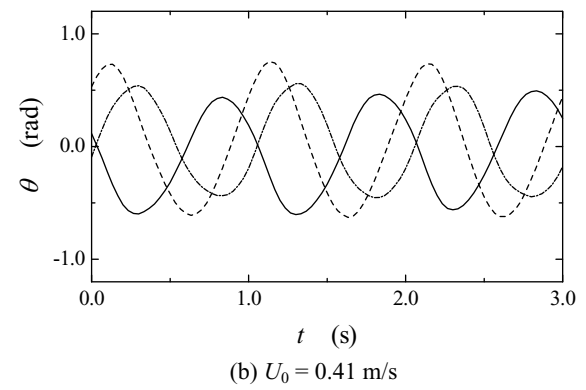
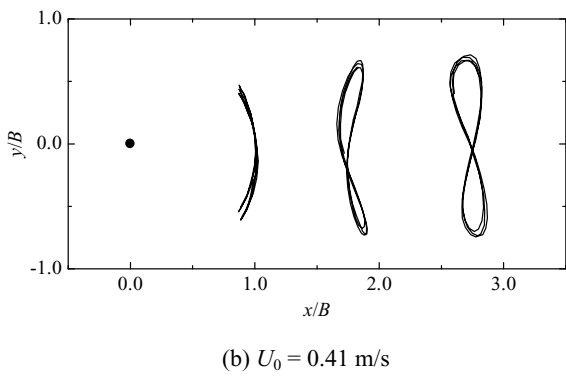
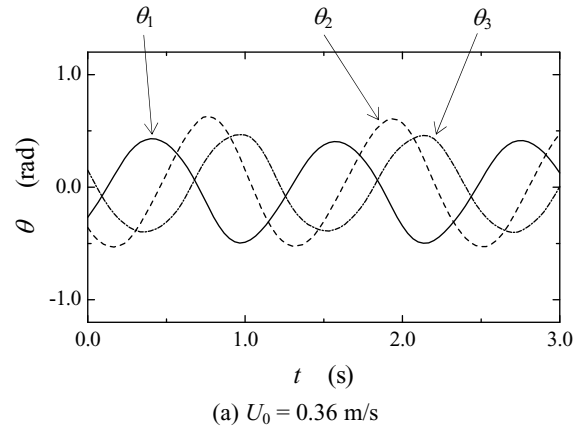
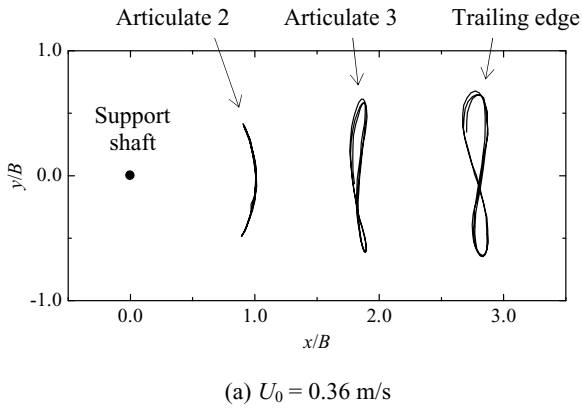


図-11 多関節平板後端の軌跡曲線

図-12 平板の角振動特性

平板は角振幅が流速の増加と共にやや増加しているが、第1平板および第3平板の角振幅は流速が増加しても変わらない。また第1平板の角振幅と第3平板の角振幅がほぼ同じであることも興味深い。

図-13に流速と振動数の関係を示す。今回の実験では、流速を変えた範囲が0.15 m/s、レイノルズ数においても5000程度であるため、現象の傾向を論じるには狭い範囲ではあるが、この条件内において、振動数は流速に比例する。これは風洞実験における結果⁹⁾と一致する。しかし同一の多関節平板で行った風洞実験の結果と比較すると、流速-振動数の比例関係は図-14の通り一致しない。レイノルズ数-無次元振動数で比較しても、同一レイノルズ数の範囲においても無次元振動数が一致しない(図-15)。水と空気では密度が約1000倍、粘性係数で約50倍異なり、振動を励起する流体力が異なるため、相似則が成り立たないと考えられる。流体の物性による振動形態への影響に関しては、動粘性係数で整理できるものと考えられる¹⁰⁾が、現時点ではデータ量が不十分であるため相似性を議論し得ない。

5. 結言

一様流中で自励振動する多関節平板の変位測定法として、モーションキャプチャーを応用した。変位測定の実験及び解析を行い、以下の結果を得た。

- (1) 蛍光塗料を用いた手法により、多関節平板の変位計測が可能であることがわかった。
- (2) 水流中においても、空気流同様多関節平板は規則的な振動をすることが分かった。ただし空気流の場合と振動モードが異なる。
- (3) 本実験の流速条件範囲では、多関節平板の振動数は流速に比例し、各平板の位相差は流速により変化しない。
- (4) 流速と振動数の関係は、水流と空気流では一致しない。

謝辞：本研究は著者の一人が平成19年度高専間教員交流派遣期間中に、派遣先の長野工業高等専門学校において同校卒研究生の森村浩紀君と共に行ったものである。研究・実験環境を手配していただいた長野高専機械工学科の皆様へ感謝申し上げます。特に戸谷順信教授には、回流水槽と実験スペースをお貸しいただきました。また第一技術班技術職員の皆様には、実験装置製作の際、ご指導をいただきました。平成19年度長野高専機械工学科卒研究生 小林弘昌君(現 三機工業株)には、装置の製作と実験補助を行っていただきました。ここに謝意を表します。

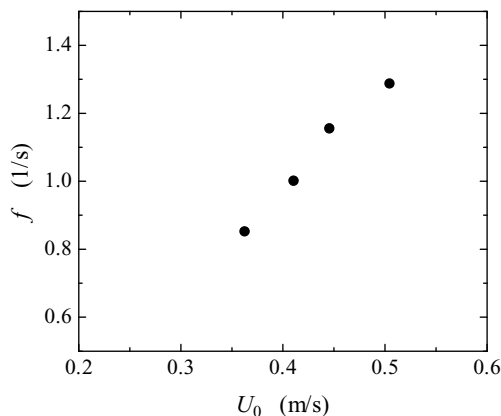


図-13 流速と振動数の関係

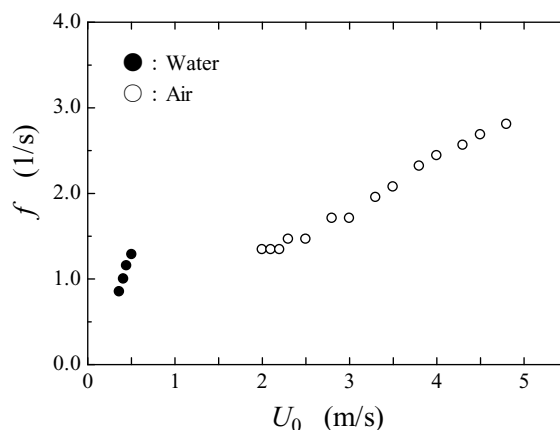


図-14 流速と振動数の関係
(水流と空気流の比較)

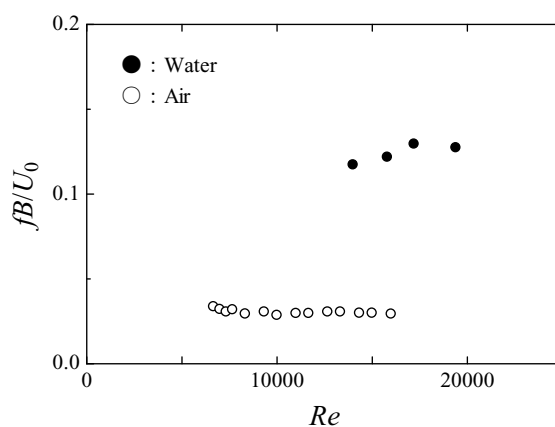


図-15 レイノルズ数と無次元振動数の関係
(水流と空気流の比較)

参考文献

- 1) 山岸真幸, 吉野貴文, 前田龍: 関節を有する平板の一樣流中における振動特性の解明, 長岡工業高等専門学校紀要, Vol.43, No.1, pp.11-16, 2007.
- 2) 榎ライブラリー編: モーションキャプチャー実践入門ガイド, <http://www.motion-capture.jp/> (2008.8.28現在)
- 3) コンピュータグラフィックス編集委員会編: コンピュータグラフィックス, (財)画像情報教育振興協会, 2004.
- 4) 須藤誠一, 菅康彦, 矢野哲也, 露木浩二: ゲンゴロウの遊泳原理に基づく泳動メカニズムの運動特性, 日本機械学会論文集, Vol.73, No.736, pp.2440-2449, 2007.
- 5) 飯田明由, 中村瑞木, 治田真一, 富川昌義, 荻巢宏幸, 水野明哲: 飛翔昆虫の非定常流体力と流れの相關解析, 日本機械学会論文集, Vol.73, No.733, pp.1781-1789, 2007.
- 6) 松内一雄, 山田圭一, 野村武男, 榊原潤, 新谷治樹, 三輪飛寛: クロール泳者の手の動作分析とPIV計測法による流れ場の可視化, 日本機械学会論文集, Vol.73, No.734, pp.2027-2037, 2007.
- 7) 岡本芳三, 住谷正夫: 歩行する人体の運動と動的揺らぎ特性, 第36回可視化情報シンポジウム講演論文集, Vol.28, Suppl. No.1, pp.137-138, 2008.
- 8) 森村浩紀: 画像解析による多関節平板の変位測定法の構築, 平成19年度 長野工業高等専門学校卒業論文.
- 9) 前田龍: 多関節平板の一樣流中における振動特性, 平成19年度 長岡高専専攻科 特別研究論文.
- 10) 小出瑞康, 高橋勉, 白樫正高: 風洞実験における低流速測定を目的としたリング流速計の試作, 日本機械学会論文集, Vol.67, No.657, pp.1105-1111, 2001.

(2008. 8. 28 受付)