

論 文

関節を有する平板の一様流中における 振動特性の解明

山岸真幸¹・吉野貴文²・前田龍³

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

²ユニオンツール株式会社 (Union Tool Co.)

³電子機械システム工学専攻 (Electrical & Mechanical System Engineering Advanced Course, Nagaoka National College of Technology)

ANALYSIS OF FLUTTERING CHARACTERISTICS OF AN ARTICULATED FLAT PLATE

Masaki YAMAGISHI¹, Takahumi YOSHINO² and Ryu MAEDA³

Abstract

The fluttering characteristics of an articulated flat plate was investigated experimentally in a wind tunnel. An 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 it 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. It was found that the fluttering frequency is extremely periodic, and the amplitude is constant. Flow visualization around an articulated flat plate was also conducted. From the results of visualization, it was found that the separated flow region behind the plate is disappeared.

Key Words : *wind tunnel experiments, flow-induced vibration, fluttering, flow visualization, vortex structure*

1. 緒言

近年、環境問題の深刻化に伴い環境に配慮したクリーン・エネルギーの研究・開発が精力的に行われている。クリーン・エネルギーの代表例としては風水力発電、太陽電池、燃料電池などが挙げられるが、圧電素子を用いた発電もCO₂を排出しない発電方法である。この圧電素子は発電量が小さいものの、小型化することができるため、分散型電力源として装置内部に組み込むことが可能である。この圧電素子は、衝突による機械的衝撃エネルギーを外部から圧電振動子に印加し、振動を励起して圧電効果により

電気エネルギーを取り出す発電方式が用いられる¹⁾。この圧電素子と、振動を励起する構造体を組み合わせることで、発電機が構成される。

一方、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・破壊につながる“やっかいもの”として、これまで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、まったく新しい風水力発電システムが構築できる。

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を考案した。これはフラッターにより自励振動を起こす振動体であるが、このような関節を有する振動体に関する研究は現在のところ見当たらない。このため、関節を有する平板（多関節平板）の振動現象のメカニズムは明らかにされていない。類似の研究として、シートのばたつきに関する研究²⁾、旗のはためきに関する実験³⁾があるが、これらは柔軟な変形をする、いわば無限関節体である。また、魚類の尾ひれの波動運動に関する研究⁴⁾もあるが、これらはいわば強制振動であり、推進力を得る流れ場を意図的に形成する運動である。

本報では、風洞実験によりこの多関節平板の振動形態を明らかにすることを目的としている。また実験を通じ、計測および解析手法の検討を行った。

2. 多関節平板

図1に流体振動を発生させる振動体として考案した多関節平板を示す。多関節平板は、旗の構造を単純化させたモデルで、支持軸を含めた複数軸で連結されたプレート群を言う。ここで挙げる基本形状は、3軸3枚プレートで構成されている。上流側よりそれぞれプレート1、プレート2、プレート3と呼称することとする。プレートは正方形で、3枚とも同一形状である。主に軸部分を種々試作した結果、実際に軸と軸受けを設ける構造では重量が増し、また軸受での摩擦により振動しなかった。このため図1に示すように、厚さ0.08mmのポリエチレン製シートを厚さ0.5mmのプラスチック板で挟む構造とした。このとき、プレート間には2mmの隙間を設けている。この隙間でのポリエチレン製シートの曲げが、軸回転に相当することとなる。なお、ポリエチレン製シートの曲げ剛性は無視した。

多関節平板の振動原理を図2に示す。図2(a)のように、流れに対して平行に置かれた多関節平板が、流れの微かな乱れなどによって左右どちらかに振れると、図2(b)のようにプレート周辺の流れが非対称となり、圧力差が生じる。この圧力差によってプレートの変形が増大する方向に進むが、ある程度変形すると平板上の流れが剥離し、渦が形成される（図2(c)）。剥離域や渦中心では圧力が低下するため、プレート両側での圧力差が逆転し、その結果プレートの変形方向も逆転する。この圧力差の周期的な変化によりプレートは振動する。実際にはプレート上下からの流れの回り込みにより縦渦が発生し、

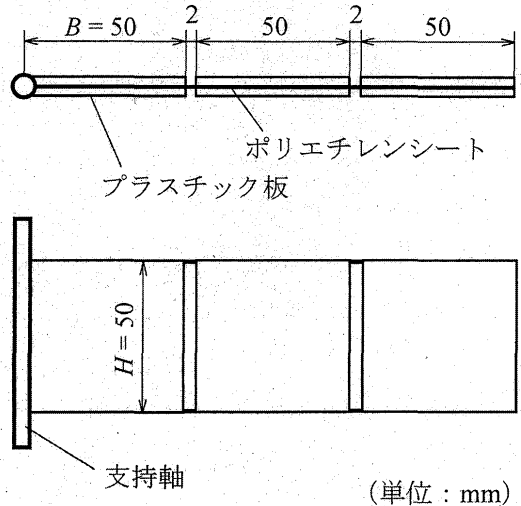


図1 多関節平板

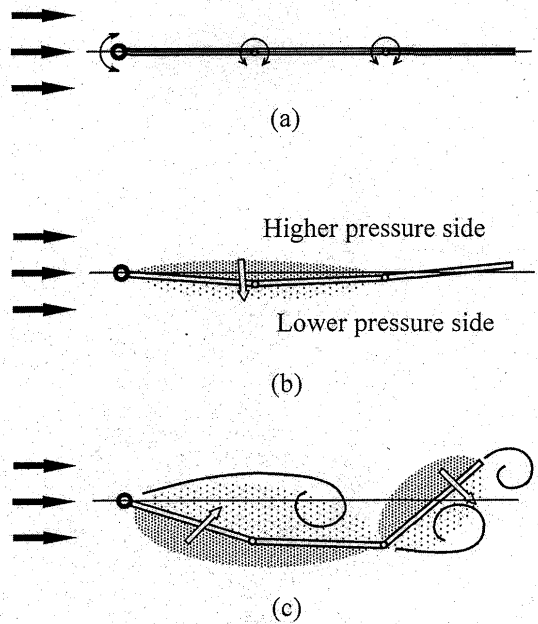


図2 多関節平板の振動原理

前述の渦との干渉により3次元渦構造を形成する。

製作した多関節平板は、およそ2.0 m/s以上の一樣流中において、一定の振幅・振動数で振動することを確認した⁵⁾。

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3、4に示す⁵⁾。実験は、測定洞断面積200mm×200mmの吹出し式

風洞⁹⁾を用いて行った。多関節平板の振動形態を調査するため、図3に示すように、シート光レーザー変位計(オムロン株式会社 Z4LC)により、流れに垂直な断面における多関節平板の変位を計測した。レーザー変位計は、トラバーズ装置により主流方向に移動ができる。またビデオカメラでの撮影により、振動形態を直接観測する手法を試みた(図4)。風洞測定部下面側の端板に50mm間隔のグリッド線を引いた方眼紙を敷き、撮影にはデジタルビデオカメラ(SONY DCR-VX2000)を使用して行った。

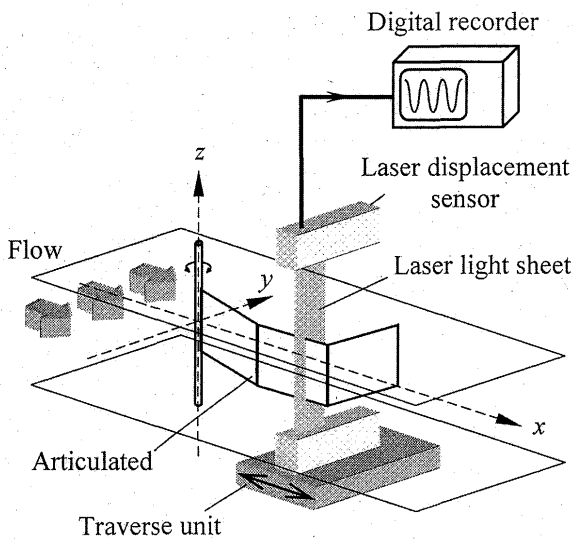


図3 変位計測の装置構成

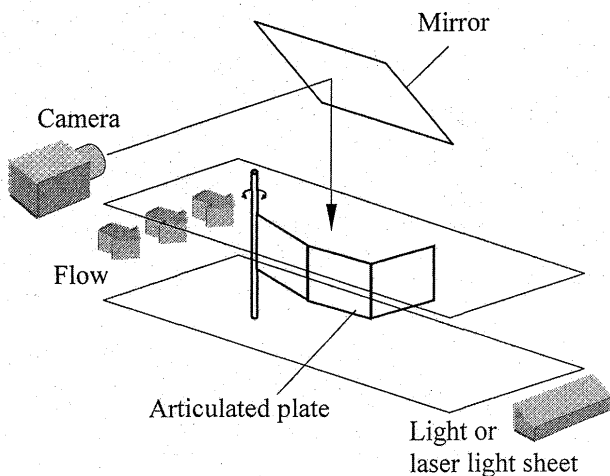


図4 ビデオカメラ撮影の装置構成

多関節平板の振動は、周囲流体の性情によってその形態が決まる。そこで多関節平板周囲の流れを、スモークワイヤ法により可視化した。撮影には前述のデジタルビデオカメラと、高速度ビデオカメラ(ナック・イメージテクノロジー社 MEMRECAN fx RX-6)を用いて行った。光源には、デジタルカメラ撮影時はハロゲンライトを、高速度ビデオカメラ撮影時にはレーザーライトシートを用いた。ワイヤは多関節平板に垂直に、平板の中央断面を可視化するように設置した。

実験はいずれも主流速度 $U_0 = 2.5 \text{ m/s}$ で行った。プレート高さ $H = 50 \text{ mm}$ によるレイノルズ数は $Re = 7200$ である。

3.2 解析方法

多関節平板の振動形態を解析する上で、各値を図5の通り定める。多関節平板支持軸を座標原点とし、流れ方向を x 、流れに垂直な方向を y とする。各プレート後端の x 方向変位量と y 方向変位量を計測し、この x 値、 y 値より、変位角 θ を次式で算出する。

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

上式 n は各プレート番号を示す。ただし $x_0 = 0$ である。

デジタルビデオカメラにより撮影した動画はAVIファイル(30 fps)としてパーソナルコンピュータに取り込み、JPEGファイルの静止面に展開した。この静止画より、各プレート後端の x 、 y 変位量を、風洞端板に施設したグリッド線を参照し、パソコンのディスプレイ上でゲージにより計測した。

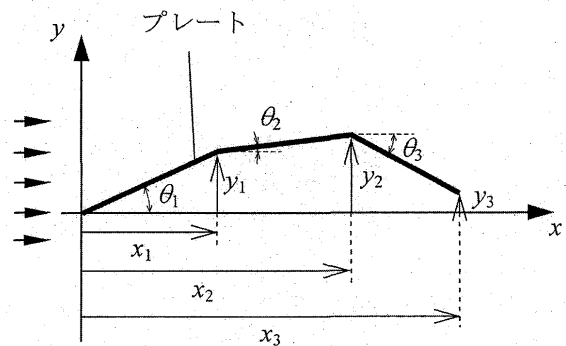


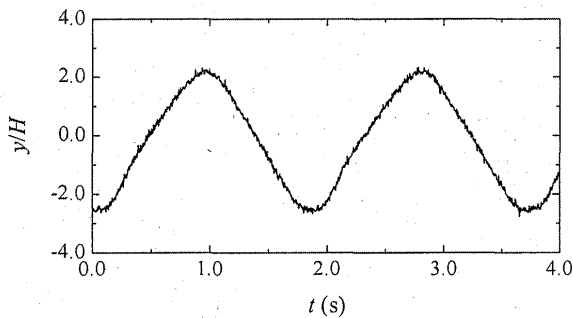
図5 変位量の設定

4. 結果および考察

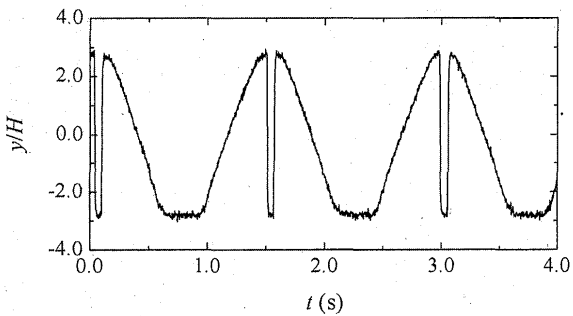
4. 1 振動モード

レーザー変位計による多関節平板の変位測定結果を図6に示す。横軸 t は時間を表す。この変位量は、特定の x 断面における y 変位量であり、プレート上では異なる位置となる。図6(a)に見られるように、プレート1はほぼ正弦波状の変位モードを有していることが分かる。また振動周期はおよそ0.5 sであった。しかし、図6(b), (c)に見られるように、 $x/H = 0.4$ 以降は変位幅がレーザー変位計の測定範囲28 mmを超え、測定が行えなかった。(使用したレーザー変位計は測定範囲を超えた場合、最低値を出力する)

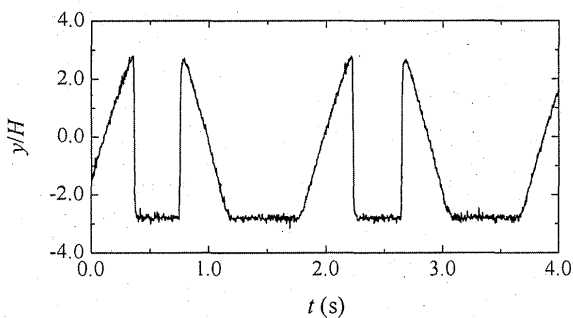
デジタルビデオカメラによる撮影結果を図7に示



(a) $x/H = 0.2$



(b) $x/H = 0.4$



(c) $x/H = 0.6$

図6 変位の時間変化

す。図は変動の1周期を8分割したものである。この結果より、多関節平板は極めて規則的な振動形態であることが分かる。またプレート3は主流方向に対し垂直となっている。流速2.5m/s以上では、プレート3の変位角が $\pi/2$ を超え、後端が上流を向くことも確認されている。この結果から、一般的な非接触光学式の変位計による測定は困難であることが分かった。

図7の結果を踏まえ、撮影された動画を静止画に分割し、画像からスケールで直接変位を読み取る手法を試みた。この手法は極めて原始的ではあるが、最もバグの少ない手法である⁷⁾。各プレート後端の x 変位および y 変位より得られるリサージュ曲線を図8に示す。図8において、プレート2後端は対称な8の字の軌跡を描くが、 x 方向にあまり変位していないことが分かる。またプレート3後端は上流側に歪んだ8の字を描く。さらに、式(1)より算出した変位角 θ の時間変化を図9に示す。図9より、プレートの変位角変化はいずれもほぼ正弦波状であることがわかる。また θ_1 と θ_2 , θ_3 はおよそ $3\pi/4$ の位相差があるが、 θ_2 と θ_3 はほぼ同位相である。

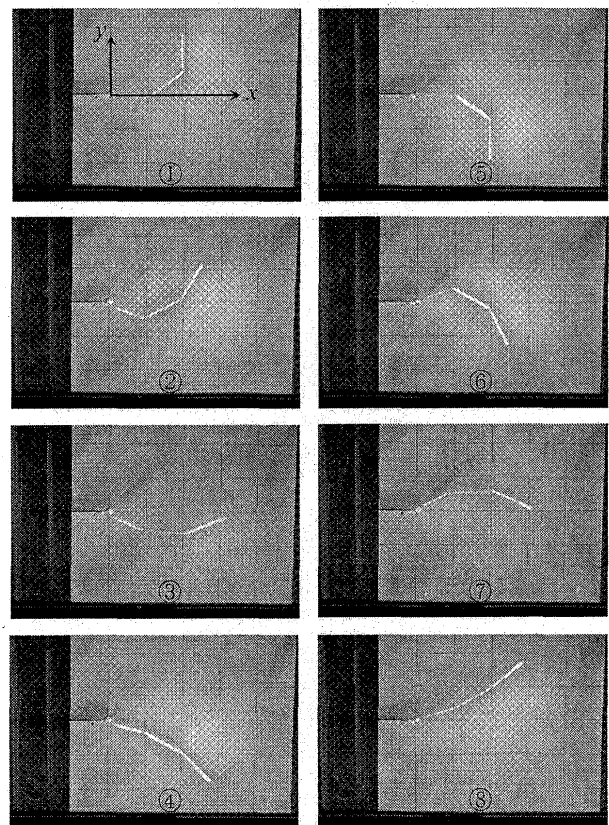


図7 多関節平板の振動モード

なお、このデジタルビデオカメラによる振動モードの解析は、静止画像の画像処理解析により、デジタル処理で行うことができる。ただし、動画撮影時に背景とプレートを区別する工夫が必要であり、その手法を現在検討中である。

4. 2 流れの可視化

図10、11にスモークワイヤ法による可視化結果を示す。図10はデジタルビデオカメラ、図11は高速度ビデオカメラを使用した結果である。

図10は、プレート1の y 変位が最大となる瞬間の画像である。多関節平板前縁で流れが剥離し、第1関節凹面側に剥離域を形成していることが分かる。同様に第一関節凸面側角部でも流れが剥離し、多関節平板後方にかけて後流が形成されている。この後

流域はプレート2、3の傾きに沿って、主流方向に対し傾きを持って流下している。またこの後流域には、カルマン渦のような互い違いの渦構造が見て取れる。第2章で述べた流れ構造が実際に形成されていることが分かった。

図11は、プレート3が流れに対し垂直になった瞬間の画像である。この画像において、多関節平板凸面側で剥離域が消失していることが分かる。動画では、剥離していた流れが平板に引き寄せられるようにして消失していく様が見られた。人為的な操作無しで、流れに垂直な壁面背後の剥離域が消失する

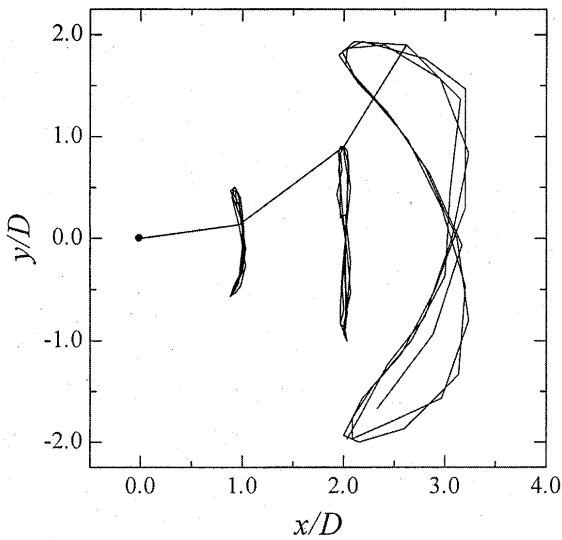


図8 各プレート後端のリサージュ曲線

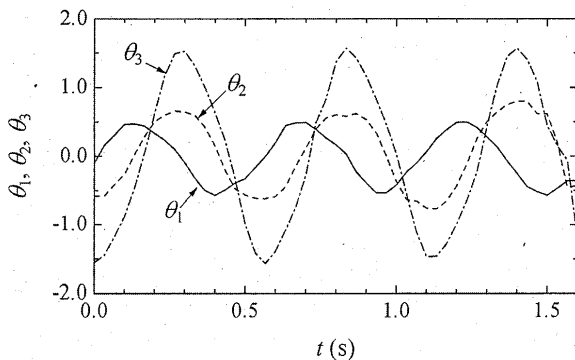


図9 各プレート変位角の時間変化

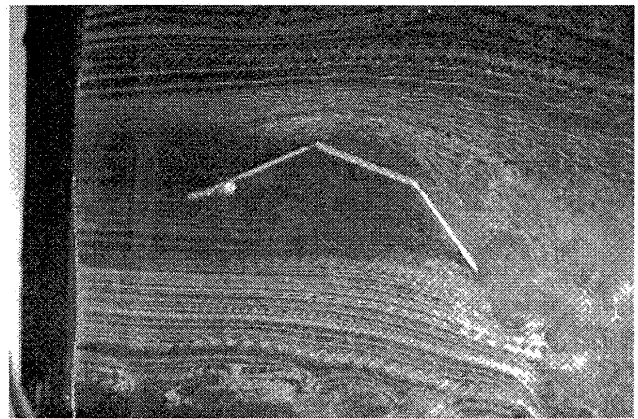


図10 スモークワイヤ法による流れの可視化 (デジタルビデオカメラ)

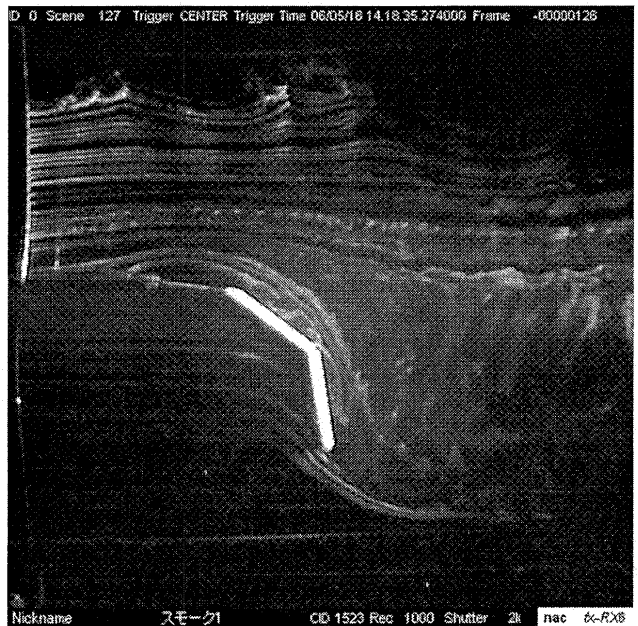


図11 スモークワイヤ法による流れの可視化 (高速度ビデオカメラ)

報告例は、現時点では他に見つかっておらず、非常に興味深い現象である。

5. 結言

流体振動を利用した発電システムの振動体として、自励振動する多関節平板を考案した。その振動特性を明らかにする実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 多関節平板はおよそ2.0 m/sの低流速より振動し、極めて周期性の強い安定した振動をする。
- (2) 流速2.5m/sでは、プレート3が垂直となるほどの大振幅となる。このため非接触光学式の変位計での計測は不可能である。一方ビデオカメラを使用した画像による変位計測が有用である。
- (3) 流れの可視化により、周囲流体の周期変化と連成した振動であることが分かった。さらに変位角が増大する位相において、剥離域が消失することが分かった。

謝辞：長岡工業高等専門学校電子制御工学科 梅田 幹雄助教授には、圧電素子の発電に関する特性についてご教授いただき、また圧電素子による発電システムの構築に関するアドバイスをいただきました。長岡技術科学大学及び同大学機械系 白樫正高教授、高橋勉助教授、山田修一氏には、新潟県中越地震以降、実験室を貸与いただきました。諸先生方、担当者の方々に謝意を表します。デジタルビデオカメラは、長岡工業高等専門学校総合情報処理センターの物品をお借りいたしました。また㈱ナック・イメージテクノロジー 様には、高速度ビデオカメラおよびレーザーライトを貸与いただき、可視化映像の撮影を行っていただきました。各担当者様に謝意を表します。

なお本研究の一部は、長岡技術科学大学学長裁量経費により行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 梅田幹雄, 坂井康弘, 中村健太郎, “圧電素子を用いた衝撃・振動による自己発電型ドアアラームシステム”, 電気学会論文誌E, Vol. 123, No.12, pp. 534-540, 2003.
- 2) 例えば, 山口信行, 関口徹, 横田和彦, 辻本良信, “柔軟で薄いシートの高速度気流中における挙動に関する研究”, 日本機械学会論文集, Vol.65, No.632, pp.1232-1239, 1999.
- 3) 佐藤浩, 斎藤博之助, 中村宏, “風の中のはためき”, 「境界層遷移の解明とその制御」研究会講演論文集, JAXA-SP-05-012, pp.23-26, 2006.
- 4) 例えば, 渡辺昌宏, 村松功一, 小林信之, “柔軟な尾ひれの波動運動を利用した魚型水中移動ロボットの推進性能”, 日本機械学会論文集, Vol.68, No.665, pp.188-196, 2002.
- 5) 吉野貴文, “流体振動を利用した風力発電デバイスの開発”, 2005年度長岡工業高等専門学校専攻科特別研究論文
- 6) 山口良生, “風洞実験システムの構築と物体後流場の測定”, 2003年度長岡工業高等専門学校専攻科特別研究論文
- 7) 前田昌信, “VIVAシンポジウム, 出会いと研究”, 日本機械学会論文集, Vol.68, No.669, pp.1317-1321, 2002.

(2007. 1. 19 受付)