

一様流中における多関節平板の振動特性に関する研究

山岸真幸（長岡高専），渡邊達弥（長岡技大）

Study on the fluttering characteristics of multi-articulated flat plate in the mean-flow

M. Yamagishi* and T. Watanabe**

* Dept. of Mech. Eng., Nagaoka National College of Tech.

** Dept. of Mech. Eng., Nagaoka University of Tech.

ABSTRACT

The flag jointed some flat plates by articulations flutters itself in the mean-flow, and it has steady fluttering mode. The fluttering characteristics of this ‘multi-articulated flat plate’ were investigated experimentally in a wind tunnel. In this paper, the shape of the flat plate is rectangular in several aspect ratios and areas. The results show that the frequency of the fluttering increases with increasing the mean-flow velocity in all shape flat plates. The frequency is large in the large aspect ratio and the small area of the flat plate. Almost all cases show the fluttering mode with node-less flutter. On the other hand, the fluttering mode with node is seen in the shape with low aspect ratio.

Key Words: Flow induced vibration, Flutter, Wind/Water power generation

1. 序論

流体振動利用方式風水力発電を目指し、振動体として旗のはためきをモデル化した多関節平板を考案した。発電システムを構築する上で最適な形状を設計する指針を得るため、一様流中における多関節平板の振動特性を調査した。

流体振動を利用した発電方式は近年研究者により提案されるようになってきた^{1,2)}が、著者らは流体振動により圧電素子³⁾を振動させることを目的としている。圧電素子を振動させる振動体として、旗の構造を単純化させた、関節を有する平板のモデル（多関節平板）を考案し、その振動特性を調査してきた^{4,5)}。多関節平板は一様流中で極めて安定した自励振動を行い、その振動数は流速と共に増加する。しかしその振動特性は不明な点が多く、評価方法も明確ではない。類似の研究として、旗のはためきに関する実験^{6,7)}、シートのはたつきに関する研究⁸⁾、細糸による2次元実験⁹⁾などがあり、これらを参考に振動特性の調査と評価方法の検討を行った。

2. 多関節平板

流体振動を発生させる振動体として考案した、多関節平板の概略を図1に示す。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2枚以上の平板群を言う。今回用いた多関節平板は、いずれも3軸3枚平板で

構成されている。上流側より関節軸をそれぞれ第1関節、第2関節、第3関節、また平板を第1平板、第2平板、第3平板と呼称することとする。各平板は長方形で、3枚とも同一形状である。多関節

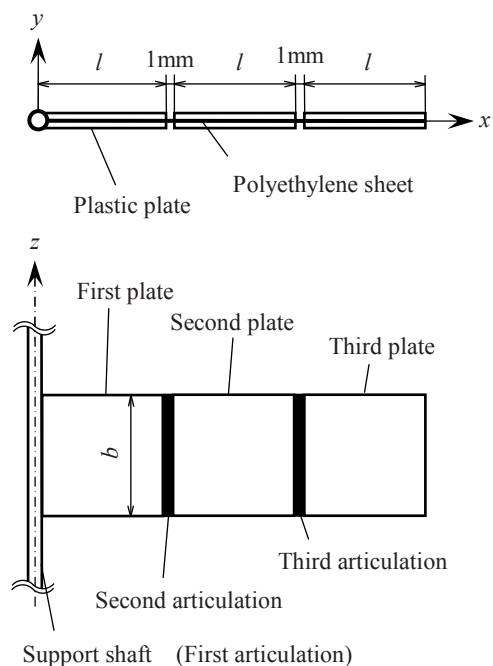


図1 多関節平板

平板は、厚さ 0.08 mm のポリエチレン製シートを厚さ 0.5 mm のプラスチック板で挟む構造となっている。プレート間には 1 mm の隙間を設けており、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。なお、ポリエチレン製シートの曲げ剛性は極めて小さいため、関節には復元力及び減衰力が生じないものと仮定した。

3. 実験装置および方法

実験は吹出し口断面積 400 mm×400 mm の吹出し式風洞を用いて行った。多関節平板は、2 枚の平行な端板により支持されており、端板の間隔は 200 mm とした。

一様流中で振動する多関節平板の変位を、シート型レーザー変位計で計測した。レーザー変位計はシート光を遮る物体の中央位置が計測でき、今回は第 1 平板の変位を計測した。多関節平板の振動数は、変位の時系列データのスペクトルより求めた。さらにデジタルカメラにより連続写真を撮影し、画像を合成することで振動モードを調査した。連続する 2 枚の画像の差分値により移動体部分を抽出し、積算により合成画像を作成している。

多関節平板は、1 枚の平板の縦横比 b/l 及び面積 $b \times l$ を 3 種類ずつの組み合わせで 9 種類用意した。厚さは全て同一である。平板の形状は、面積の大小 (S, M, L) と縦横比 (1, 2, 3) の記号・数字の組み合わせで表記する。旗やシートに関する研究では、スパン方向長さ b は振動に無関係とされているが、風水力発電において得られるエネルギーは受風面積に関係するため、本実験ではスパン方向長さ及び面積もパラメータとして考慮した。なお縦横比 $b/l = 1.0$ 、面積 $b \times l = 2500 \text{ mm}^2$ の多関節平板 (M2) を基準形状とする。

4. 結果および議論

4-1. 振動のヒステリシス

基準形状である M2 の多関節平板について、流速を増速した場合と減速した場合の振動数と振幅の変化を図 1 に示す。なお振幅は y 方向変位 Y の r.m.s 値で表している。多関節平板において、増速して振動を始める流速と、減速して振動が止まる流速が異なることが分かった。振動を始める流速は外乱に大きく影響され、人為的に乱れを与えればより低い流速で振動を始める。ただし振動が止まる流速以下では振動は起こらない。外乱が小さい場合は、多関節平板後縁からの渦放出による、後縁の微小振動がきっかけとなっている。また一度振動を始めた多関節平板は、その流速で静止させることが出来ないことが分かった。なおこのヒステリシスについては、他の 8 種類についても観測された。Zhang らは細糸のはためきの実験において、振動せず落ち着く状態 (stretched-straight state) とはためいて落ち着く状態 (flapping state) があり、ある長さの細糸においては外乱の程度によって 2 つの安定状態を飛び移ることを明らかにした (bistability) ⁹⁾。

表 1 多関節平板形状条件

l (mm)	b (mm)	b/l (-)	$b \times l$ (mm^2)	Symbol
43.3	28.9	0.66	1250	S1
61.2	40.8	0.66	2500	M1
75.0	50.0	0.66	3750	L1
35.4	35.4	1.0	1250	S2
50.0	50.0	1.0	2500	M2
61.2	61.2	1.0	3750	L2
25.0	50.0	2.0	1250	S3
35.4	70.7	2.0	2500	M3
43.3	86.6	2.0	3750	L3

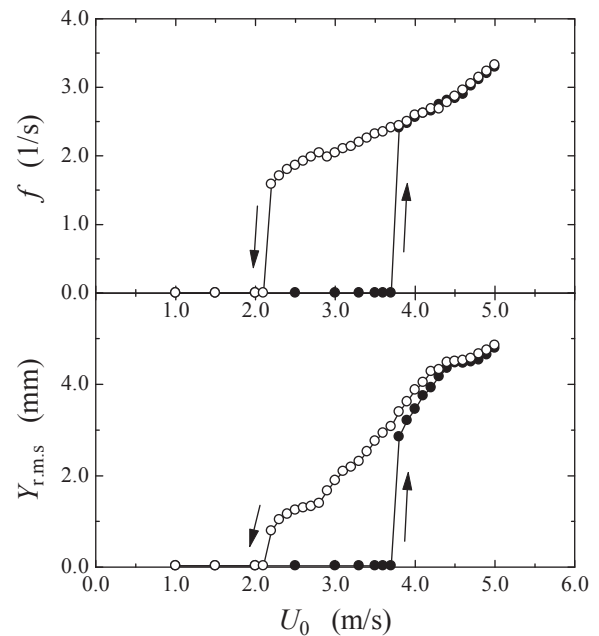


図 1 流速と振動数・振幅の関係 (M2)

図 1 のヒステリシスもこの bistability に相当するものと考えられるが、多関節平板では振動を静止させる (flapping state \rightarrow stretched straight state) ことができない点が異なる。

4-2. 流速と振動数の関係

図 2 に 9 種類の多関節平板について、流速と振動数の関係を示す。前節で示したとおり、増速変化した場合多関節平板の初動流速が外乱に影響されることから、流速は減速変化させて計測を行なっている。

いずれの多関節平板も、流速が速いほど振動数が大きい。流速 3.0 m/s 以上では、振動数は流速の 3/4 乗にほぼ比例する。同一面積で比較すると、縦横比が大きいほど振動数が高いことが分かる。また同一

縦横比で比較すると、面積が大きいほど振動数が低い。さらに縦横比・面積が異なる多関節平板でも、平板長さ l が等しいものは、ほぼ同じ振動数であることも分かった。なお L1 については、図 3 に示すように、流速約 4.8 m/s で不連続な変化を示し、振動数が約 1.5 倍となった。この流速以上では振動数は L3 の値とほぼ一致する。この不連続な振動数の変化は、後述の振動モードの変化によるものである。

図 2 の結果をレイノルズ数 Re 、無次元振動数 F で表したグラフを図 4 に示す。上述の通り、多関節平板の振動数は平板長さ l に影響されるため、代表長さとして l を用いた。無次元振動数はおよそ 0.02 ~ 0.04 の値を示し、レイノルズ数 Re がおよそ 24000 以上で振動モードの変化による値の不連続な変化を示す。

図 2 で見られたとおり、振動数は流速の 3/4 乗にほぼ比例する。また図 5 に示すように、平板長さの -3/4 乗にほぼ比例する。このことから、振動数は

$$f \propto \left(\frac{U_0}{l}\right)^{3/4} \quad (1)$$

と考えられる。この結果を基に、

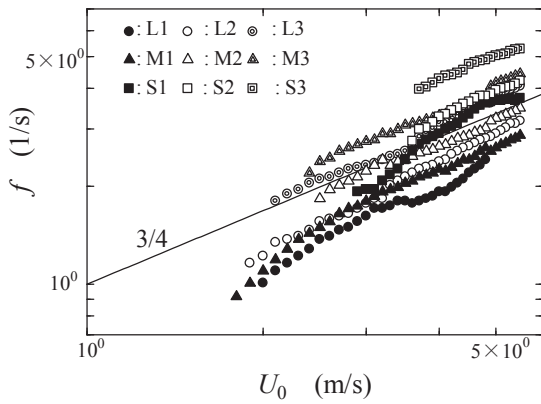


図 2 流速－振動数の関係

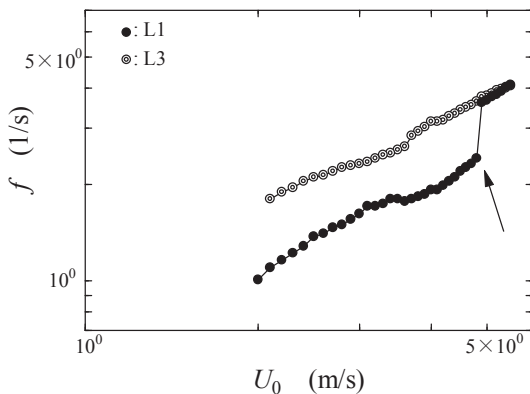


図 3 流速－振動数の関係 (L1, L3 のみ)

$$f\left(\frac{U_0}{l}\right)^{3/4} = \frac{fl}{U_0}\left(\frac{U_0}{l}\right)^{1/4} = F\left(\frac{U_0}{l}\right)^{1/4} \quad (2)$$

をレイノルズ数に対して図示したものが図 6 である。(2)式の値は無次元数ではないが、図より各条件の値が $10000 < Re < 24000$ でほぼ同じ一定値を示

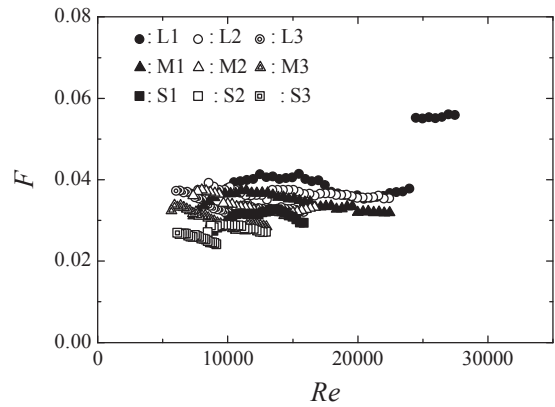


図 4 レイノルズ数－無次元振動数の関係

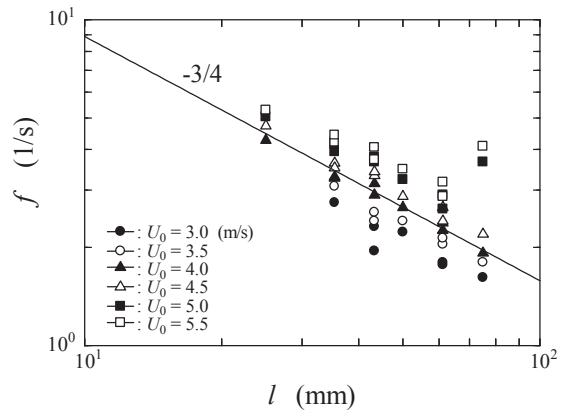


図 5 振動数と平板長さとの関係

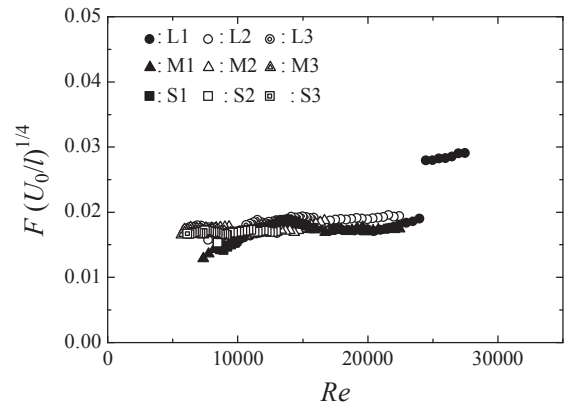


図 6 一様流速・平板長さを考慮した振動の一般化

している. このことから, 多関節平板の振動は, 流速, 平板長さより何らかの無次元パラメータで一般化することが可能であることが窺える.

4.3. 振動モード

図7~9に画像合成により得られた振動モードを示す. ほぼ全ての形状・流速において, 図7, 8のような節の無い振動モードであり, 流速が上がるにつれて角振幅が大きくなる. 第3平板に関しては角振幅が 90° を超え, 後縁が上流を向くほどとなる(図8). すなわち旗のはためきにおいて見られる「鞭打ち」という現象⁷⁾が, 多関節平板においても起こることが分かった. 一方, L1の多関節平板では, 低流速では図7に見られる様な節の無い振動モードであったが, 流速約4.8 m/s以上で第2平板上に不完全な節を持つ振動モードを示した(図9). 振動モードが変化する流速約4.8 m/sでは, ほぼ完全な節とった. 図3に見られた振動数の不連続な変化は, この振動モードの変化によるものであることが分かった.

5. 結論

流体振動利用方式風水力発電を目指し, 考案した振動体である多関節平板の振動の基礎特性を調査した. その結果以下の知見を得た.

- (1) 多関節平板は極めて周期的で振幅が一定の振動を行う.
- (2) 振動の開始と停止にはヒステリシスが存在する.
- (3) 振動数は流速と共に増加する. また平板長さが長いほど振動数は低くなる.
- (4) 平板形状・流速によって, 異なる振動モードが存在し, モードが変化する際, 振動数も変化する.

参考文献

- 1) 比屋根: 特開 2001-157433 (P2001-157433A).
- 2) 鈴木, 神谷, 松本: 特開 2006-226221 (P2006-226221A).
- 3) 梅田, 坂井, 中村, 電気学会論文誌 E, Vol. 123, No.12 (2003), pp. 534-540.
- 4) 山岸, 吉野, 小林, 前田: 日本機械学会流体工学部門講演会 (2007), No.07-16, pp.50.
- 5) 山岸: 日本流体力学会年会 2008 講演要旨集, pp.47.
- 6) S. Taneda: *Journal of the Physical Society of Japan* (1968), Vol. 24, No.2, pp. 392 - 401.
- 7) 佐藤, 斎藤, 中村: JAXA-SP-05-012 (2006), pp.23-26.
- 8) 山口, 関口, 横田, 辻本, 日本機械学会論文集, Vol.65, No.632 (1999), pp.1232-1239.
- 9) Zhang, J., Childress, S., Libchaber, A., Shelly, M.: *Nature* (2000), Vol. 408, pp. 835 - 839.

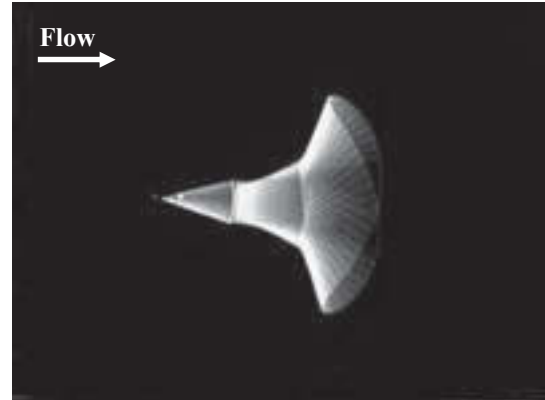


図7 振動モード (M2, $U_0 = 2.5$ m/s)

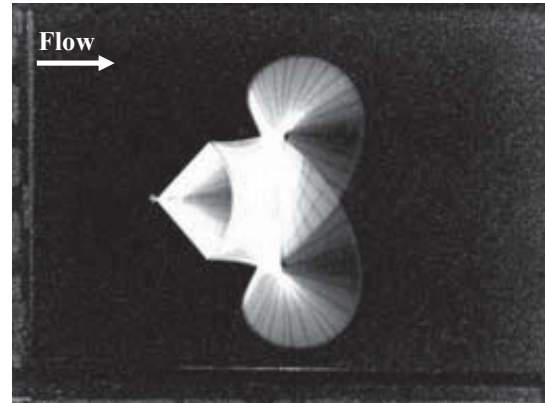


図8 振動モード (M2, $U_0 = 5.0$ m/s)

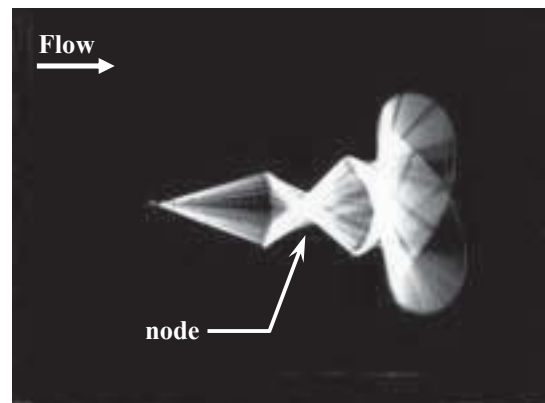


図9 振動モード (L1, $U_0 = 5.0$ m/s)