

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420175

研究課題名(和文) メンテナンスフリー小水力発電のための鞍状板カオス振動発電機の開発

研究課題名(英文) Development of a power generator utilizing chaotic vibrations of a saddle-shaped plate for maintenance free small hydroelectric generation

研究代表者

永井 健一 (Nagai, Ken-ichi)

群馬大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：00110403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：圧電素子内蔵の鞍型薄肉板に流体により動的飛び移りを伴う振動を励振させる発電法の構築のため、モーフィング変形により円筒型初期形状を有する非対称積層CFRP板の流体励振実験を行なった。一边を固定した曲板を風の流れにより励振し、板のひずみと変位を測定した。風速に応じて適切に風向を設定することで、板に動的飛び移りを伴う振動が生じることを示した。また、風による板の振動応答は固有振動数近傍に振幅比が大きくなるが、動的飛び移りを伴うと、固有振動数近傍の他に、低い振動数域において広い振動数帯で高振幅比となることが確認できた。また、主成分分析より動的飛び移りを生じる際に主体となる振動モード形状を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Aiming at establishment of an energy harvesting method by generating dynamic-through flow-induced vibrations in an saddle-shaped thin plate with a piezo-elastic sheet, experimental results are presented on flow-induced vibrations of a bi-stable rectangular CFRP laminated curved plate. The plate has two equilibrium configurations, a cylinder and a saddle. Vibration responses of the plate are measured, with changing the angle and speed of the flow. Maximum strain is obtained when the vibration response is accompanied by dynamic snap-through with specific velocity and angle of flow, in which broader frequency components are generated compared with the response without dynamic snap-through. Contributions of vibration modes to the chaotic responses are inspected by the principal components analysis.

研究分野：機械力学 非線形振動

キーワード：機械力学

1. 研究開始当初の背景

環境への影響が少なく、クリーンかつ再生可能な発電法に小規模河川や用水路を利用した小水力発電がある。従来の小水力発電には、水車を利用した方法があるが、従来の水車は大型であり、用水路等の場所を選ぶという欠点があった。一方、水流中に圧電素子内蔵の薄肉板を置き励振させる発電方法では、長方形板を鞍型にし、動的飛び移りを伴う振動応答を生じさせることで発電効率の向上が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、圧電素子内蔵の鞍型薄肉板に流体により動的飛び移りを伴う振動を励振させる発電法の構築のため、モーフィング変形により円筒型初期形状を有する非対称積層 CFRP 板の流体励振実験を行なった。これより、発電法構築のための、流体励振を受ける鞍型板の振動特性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 試験片及び支持装置

実験に用いた矩形曲板と支持装置を図 1 に示す。板は、厚さ $h=0.11\text{mm}$ 、長さ $b=110\text{mm}$ 、幅 $a=110\text{mm}$ 、密度 $\rho=1.6 \times 10^4 \text{kg/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu=0.30$ である。矩形曲板は薄い CFRP 複合材を 90° ずつ傾けて非対称で 2 層になるように積層してある。製作時の高温から常温に低下する際の、熱収縮の異方性が繊維補強により現れ、双安定性を有する曲率形状を有する。一つの安定状態において曲率を有さない方向の板の一边を図 1 のようにアルミニウム合金製のブロックで固定支持した。座標系は、図 1 のように板の右上端部に原点を置き面内の固定支持境界に沿った方向に x 軸、直交する方向に y 軸、奥行き方向に z 軸とする。

(2) 実験方法

矩形曲板の基本特性として、形状、固有振動数及び振動形、復元力特性を求めた。続いて図 2 に示すように角度 θ を変えて風を送り、板を励振し、図 1 に示す測定点 $ch1$, $ch2$ においてレーザー変位計によりたわみを、 $ch3$, $ch4$ においてひずみを測定し、実効値を求め、周波数分析、主成分分析を行い、最大リャプノフ指数を求めた。結果の整理のために、以下の諸量と無次元量を導入した。

$\xi = x/a$, $\eta = y/b$, $w = W/h$, $\tau = \Omega_0 t$,
 $\omega = 2\pi f_i / \Omega_0$, $q = Qb^2 / Dh$.
 ただし、 $\Omega_0 = (1/q)\sqrt{D/\rho h}$,
 $D = Eh^3 / 12(1-\nu^2)$ である。上式で、 ξ と η はそれぞれ x 軸方向、 y 軸方向の無次元座標である。 w は無次元たわみであり、 W はたわみである。 τ は無次元時間、 Ω_0 は振動数に関する定数、 t は時間である。 ω は無次元固有角振動数であり、 f_i は固有振動数である。 Q は集中荷重であり、 q はその無次元量である。また、 D は曲げ剛性である。

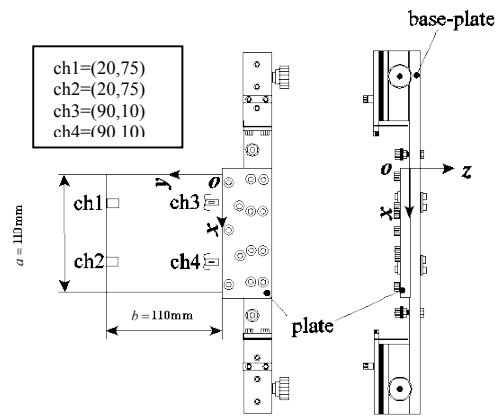


Fig.1 Rectangular curved plate

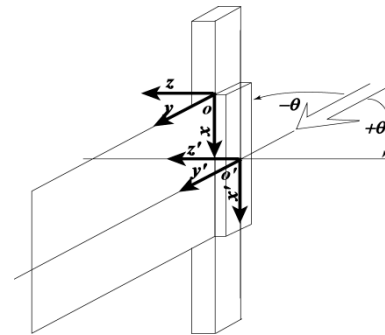


Fig.2 Fixture and angle

4. 研究成果

(1) 板の形状

板の各平衡点における形状を図 3 に示す。板は η 方向のみに曲率をもつ円筒シェル状(図 a)と $\xi-\eta$ 方向で逆向きの曲率をもつ鞍型シェル状(図 b)の 2 つの静的安定平衡点を有していることがわかる。

(2) 線形固有振動数及び振動形

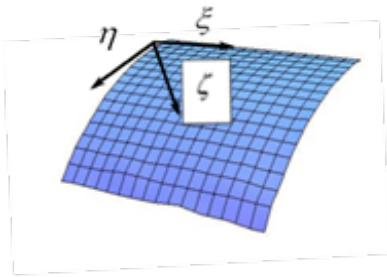
各静的平衡点における無次元線形固有振動数を表 1 に、振動形を図 4 に示す。図 4 のプロットは振動の節を表している。表より、円筒シェルよりも鞍型での固有振動数が比較的高くなっているのがわかる。また、振動形は鞍型では 1 次と 2 次の振動モード形状の逆転が生じている。

(3) 復元力特性

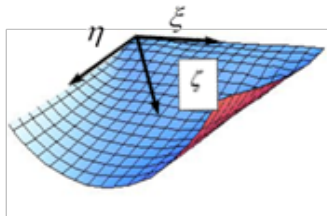
曲板の復元力特性を図 5 に示す。集中荷重を座標 $(\xi, \eta)=(0.19, 0.92)$ で付加し、たわみの測定点は $(\xi, \eta)=(0.19, 0.60)$ とした。図の横軸は無次元たわみ w であり、縦軸は無次元集中荷重 q である。図 5 より、負の勾配を含む非線形の復元力特性で、円筒シェル型と鞍型形状に対応した 2 つの経路を持つヒステリシスを伴い、飛び移り座屈により遷移している。

(4) 板に対する風の角度とひずみ実効値

風の角度 θ とひずみ実効値 ϵ_{rms} の関係を、複数の風速の条件下で図 6 に示す。ひずみの測定点は図 1 の $ch3$ とする。ひずみ実効値 ϵ_{rms}



(a) Cylinder



(b) Saddle

Fig.3 Configurations of CFRP plate

Table 1 Natural frequencies

i	1	2	3	4
ω_i (cylinder)	4.7	14.8	27.9	44.6
ω_i (saddle)	9.6	13.8	33.5	48.5

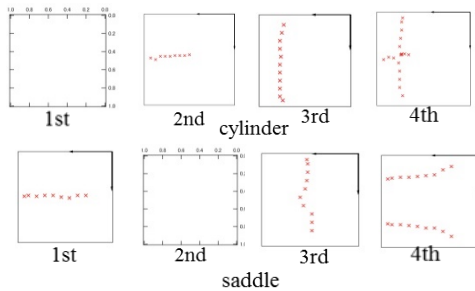


Fig.4 Natural vibration modes

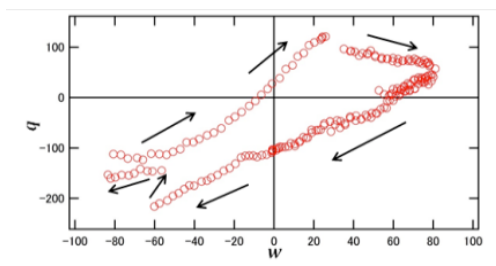


Fig.5 Characteristics of restoring force of CFRP plate

は振動応答から DC 成分を除去した値とする。図 6 より、 $V=7.1$ [m/s] および $V=8.1$ [m/s] では風の角度に対して ϵ_{rms} に大きな変化はなく、動的飛び移りには至らなかった。 $V=8.5$ [m/s] および $V=8.9$ [m/s] においてそれぞれ -3 [deg] から $+15$ [deg], 0 [deg] から $+15$ [deg] の区間で、動的飛び移りの発生が時間波形から確認できた。 $V=8.5$ [m/s] では -2 [deg], $V=8.9$ [m/s] では 0 [deg] で ϵ_{rms} が最大となる。これらから、風速ごとに ϵ_{rms} が最大となる角度 θ が異なる

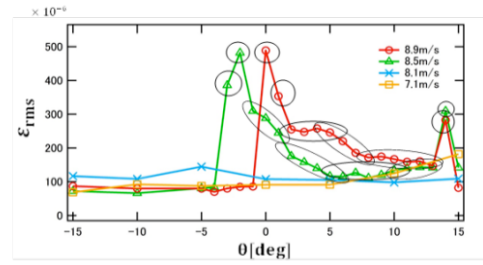
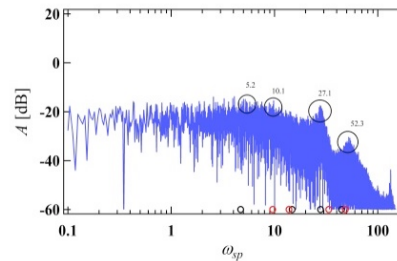
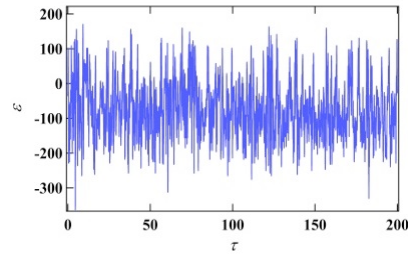
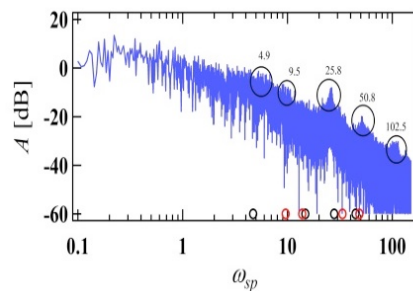
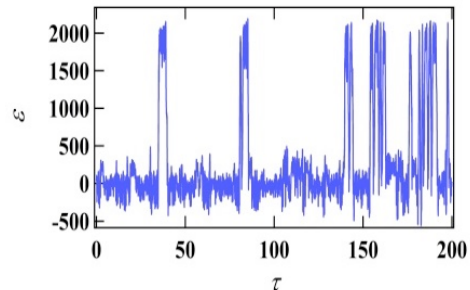


Fig.6 Root mean square value of strain related to angle of flow



(a) $V=7.1$ m/s, $\theta=-5$ deg



(b) $V=8.9$ m/s, $\theta=0$ deg

Fig.7 Time histories and Fourier spectra

こと、および ϵ_{rms} が最大となるのが最大風速でないことから、風速 V と角度 θ を適切に調整することで大振幅の動的飛び移りを誘起し、ひずみ実効値を大きくすることができると考えられる。

(5) 時間波形と周波数分析

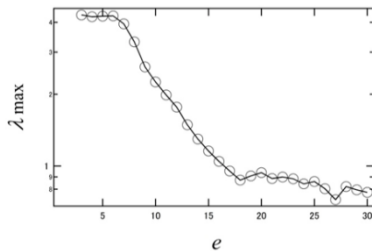
動的飛び移りを伴わない振動応答の一例として $V=7.1[m/s]$, $\theta=-5[deg]$, 動的飛び移りを伴う振動応答の一例として, $V=8.9[m/s]$, $\theta=0 [deg]$ の時間波形及び周波数分析結果を図7に示す. ひずみの測定点は図1のch3である. 時間波形は横軸が無次元時間 τ であり, 縦軸がひずみ ε である. 周波数分析結果は横軸が無次元分析振動数 ω_p で, 縦軸がひずみ振幅のデシベル値 $A[dB]$ である. 図7(a), (b)の時間波形は, ともに非周期的な波形となっている. 図(b)の動的飛び移りを伴う波形では, 二つの平衡点近傍での振動とその間を飛び移る挙動が認められる. 周波数分析結果を見ると横軸にプロット○で示した固有振動数で大きい振幅比を有しており, とくに動的飛び移りを伴う場合は広帯域で大振幅となっている.

(6) 最大リアプノフ指数

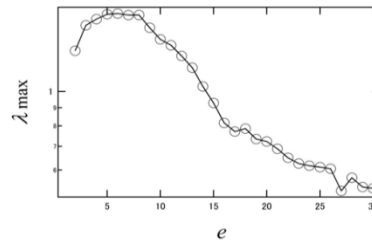
Wolf の手法に基づき最大リアプノフ指数 λ_{max} を求めた. 結果を図8に示す. 全ての条件において λ_{max} は正值であり, 振動応答はカオス振動である. 図8(a)に示す動的飛び移りを伴わないときの最大リアプノフ指数が図8(b)に示す動的飛び移りを伴う風速の最大リアプノフ指数より大きい結果となった.

(7) 主成分分析

ch1, ch2 の変位および ch3, ch4 のひずみの時系列波形に主成分分析を適用し, 得られた結果を表2, 3および表4に示す. 表2, 3はそれぞれ, 円筒シェル型と鞍型の各固有振動形の第一主成分の固有ベクトル, 表4は風速 $V=8.5[m/s]$, $8.9[m/s]$ の動的飛び移りを伴った風の角度 θ における第一主成分の固有ベクトルと寄与率を示したものである. 表2, 3と表4の固有ベクトルのパターンを比較すると, 飛び移りを伴う振動応答の場合, 風速 $V=8.5[m/s]$ の $\theta=0[deg]$ を除き円筒シェル型の3次モード(C_3)に近いパターンを第1主成分としており, 寄与率も高い結果となった. これは板の飛び移りからこの結果は妥当だと考えられる.



(a) $V=7.1 m/s, \theta=-5 deg$



(b) $V=8.9 m/s, \theta=0 deg$

Fig.8 Maximum Lyapunov exponent

Table2 Principal component of natural vibration (cylinder)

Eigen mode	C_1	C_2	C_3	C_4
Ch1	0.130	0.082	-0.017	0.013
Ch2	0.130	-0.077	-0.016	-0.110
Ch3	0.690	-0.710	0.690	-0.670
Ch4	0.700	-0.690	0.710	0.750

Table3 Principal component of natural vibration (saddle)

Eigen mode	S_1	S_2	S_3	S_4
Ch1	0.790	0.360	-0.300	-0.410
Ch2	-0.110	0.690	-0.180	-0.260
Ch3	-0.600	-0.014	0.900	0.780
Ch4	0.075	-0.630	0.260	0.400

Table4 Results of principal component analysis of flow-induced vibration of the plate (1st component)

Wind Velocity [m/s] and θ [deg]	8.5[m/s]	8.5[m/s]	8.5[m/s]	8.5[m/s]	8.9[m/s]	
	-3[deg]	0[deg]	2[deg]	4[deg]	0[deg]	
1st component	Contribution ratio [%]					
	98.9	67.9	96.9	85.1	97.2	
Eigen vector	Ch1	-0.048	-0.05	-0.041	-0.049	-0.055
	Ch2	-0.045	0.026	-0.011	-0.043	-0.049
	Ch3	0.74	0.89	0.98	0.80	0.76
	Ch4	0.67	-0.45	0.20	0.51	0.65

8.9[m/s]	8.9[m/s]	8.9[m/s]
2[deg]	4[deg]	6[deg]
92.2	82.7	90.2
-0.052	-0.041	-0.048
-0.05	-0.038	-0.044
0.76	0.83	0.79
0.65	0.56	0.61

5. 主な発表論文等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井 健一 (NAGAI KENICHI)

群馬大学・名誉教授

研究者番号：00110403

(2) 研究分担者

丸山 真一 (MARUYAMA SHINICHI)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：60344295