

乱流により励振された磁気弾性梁の振動とエネルギー収集

窪田 まど華[†] 引原 隆士^{††}

^{††} 京都大学大学院 工学研究科 電気工学専攻

〒 615-8510 京都市西京区京都大学桂

E-mail: [†]kubota@dove.kuee.kyoto-u.ac.jp, ^{††}hikihara@kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 昨今, 流体の流れからエネルギーを収集するエネルギーキャベンジングが注目されている. 本研究では, 乱流も含めた流体の流れからエネルギーを回収する方法として, 流体中にさらした梁を振動させることによりエネルギーを回収する機構を考える. 乱流は, 一次元的にはカオス的な振動とスペクトル部分において類似性があることから, 本報告では静磁場中に置いた強磁性体の弾性梁をカオス的に励振し, 表面に貼った圧電膜から得られる電気エネルギーの見積りを試みる.

キーワード 乱流, エネルギーキャベンジング, 弾性梁

Turbulence-induced Magnetoelastic beam Oscillation and Energy Scavenging

Kubota MADOKA[†] and Takashi HIKIHARA^{††}

^{††} Kyoto University, Department of Electrical Engineering

Katsura, Nishikyo, Kyoto, 615-8510 Japan

E-mail: [†]kubota@dove.kuee.kyoto-u.ac.jp, ^{††}hikihara@kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract In this research, we explore the possible model to sacavage energy from fluid including turbulence. The energy can be extracted from a beam oscillation excited hydrokinetically. One demension of turbulence is similar to chaotic oscillation in the spectrum distribution. In this report, exciter vibrates a magnetoelastic beam chaotically in static magnetic field. We can estimate the amount of energy scavenged from PZT attached on the beam.

Key words turbulence, energy scavenging, magnetoelastic beam

1. はじめに

われわれの周りには様々な形の流体の流れがある. 流れには流速で測られる平均的な運動と, それを構成する渦などの乱流に分けて考えることができる [1]. 水車などで平均的な流れからのエネルギーを採っている一方で, 渦などの乱流からもエネルギーを回収できる可能性がある.

乱流は複雑であるほど広帯域の連続なパワースペクトルを持つ振動が含まれていることが知られている [2]. これは充分に発達した乱流が空間的に自己相似的な渦から成ることによると考えられる. しかしながら, 無限の自由度を有する流体において, 低次元の自由度に限った座標系に拘束された種々のデバイスを用いてこの様な連続スペクトルに分布したパワーを回収する方法については必ずしも明らかではない.

エネルギーキャベンジングについては, 例えば, マイクロファイバー状にしたしなやかな圧電素子を互いに絡ませ振動を与えると電気エネルギーを発生させる技術が知られている [3]. また多数の片持ち梁を, 風による気流中に置き, 渦や流体弾性振動によって励振させて, 圧電素子で電気エネルギーに変換する試みもなされている [4]. もちろんこれらは一例に過ぎない.

これらの研究結果を受けて, 本研究では低次元の乱流と考えられているカオス振動 [5] により励振を受けた振動系が, その励振からどれだけエネルギーを回収できるか, またできるとすればそのエネルギーを回収する振動系がどのような特性を持てば良いかについて, 基礎的な検討を進めている. 本報告では, この様な観点に立って, カオス励振を発生する 1 自由度の機械振動系の変位信号を増幅して励振生成し, この励振を受けた別の 1 自由度機械励振系を検討対象として用いる.

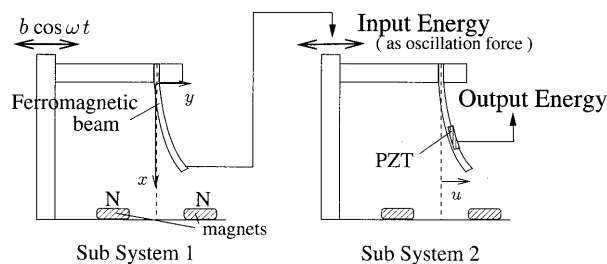


図1 検討するシステム：サブシステム1が発信系，サブシステム2がエネルギー回収系

エネルギーを回収する機構はカオスによる広帯域のパワースペクトルを有する励振を受けており，もし振動系が乱流による励振を受けたとしたら，どのような特性を与えればエネルギーの回収に適するかという観点で何らかの手がかりを得られると考えられる。

本報告は以下の様な構成となっている。まずエネルギー回収機構の概要を述べ，次にエネルギー回収系の梁が1つの安定点まわりで振動する場合，また2つの安定点を行き来する振動をする場合について梁の変位と速度から回収できるエネルギーを見積る。

2. エネルギー回収機構

2.1 システム構成

乱流を含む広帯域の振動スペクトルを梁の歪みエネルギーから電気エネルギーとして回収する機構を考える。その1自由度の振動子系の構成を図1に示す。梁の変位が無い状態における板の中立軸を基準位置として，2つの磁石を基準位置から等間隔に左右に置く。強磁性体の梁は磁場中で周期的に励振すると，そのたわみがカオス的に振動することが知られている[6]。これを非線形磁気弾性梁と呼ぶ。提案するエネルギー回収機構は，この非線形磁気弾性梁をエネルギー回収系と想定する。

この非線形磁気弾性梁を乱流中に置くことを，励振が広帯域の振動スペクトルを有することと等価と仮定する。これに基づきエネルギー回収系である非線形磁気弾性梁と同じ構造のシステムを，広帯域の励振スペクトルを有するカオス振動を発生する信号源として設置する。信号源とする系の梁に，機械-電気信号変換が可能な圧電膜(PZT)を貼り，その出力を励振信号とする。これを電氣的に増幅し，再び電気-機械変換を介してエネルギー回収を機械的に励振するものとする。現実の実験系では，システムのサイズや質量によるが，電気-機械変換系として大きな力が必要な時は電磁加振器を，比較的小さな力で良い時は圧電素子を用いることができる。以上の想定の下に図1のシステムを考え，入出力間のエネルギー伝達を評価することにより，エネルギーキャパシタンスの可能性を検討する。

図1に示す各サブシステムにおける振動する梁の y 方向の変位 u に関する運動方程式は以下の式で与えられる。

$$\ddot{u} = -k\dot{u} + f(u) + F(t) \quad (1)$$

k は梁の運動の減衰定数， $f(u)$ は磁場の影響を含めた梁の復元

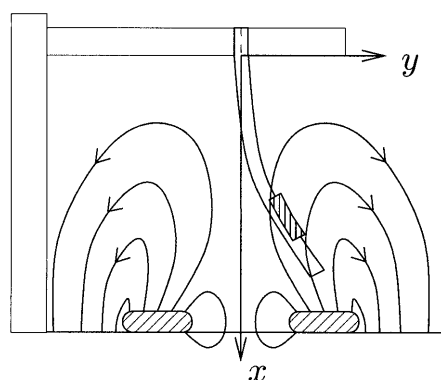


図2 磁石による静磁場の概略

力を表し， $F(t)$ は外力である。

これらのサブシステムを上述の様に連携させ，サブシステム1をサブシステム2の励振系と考えた梁の変位に関する全体のシステムを以下の式で与える。

$$\ddot{u}_1 = -k\dot{u}_1 + f(u_1) + b\cos\omega t \quad (2)$$

$$\ddot{u}_2 = -k\dot{u}_2 + f(u_2) + \alpha u_1 \quad (3)$$

u_1, u_2 はサブシステム1,2における梁の変位を， b はサブシステム1に加える外力の振幅を， ω はサブシステム1に与える外力の角速度を， t は時間を表している。式(3)の第3項はサブシステム1からの励振入力で，梁の変位 u_1 に比例するものとし，その比例定数を α とする。この2式が示すように各サブシステムは同じパラメータの値を持つものとする。

2.2 信号系

図1の各サブシステムでは磁石により図2に示すような磁場が形成されている。この磁場により磁化された強磁性体は磁石に近づく方向の磁力を受けるので，磁気弾性梁は図3のような概形のポテンシャルを持つ。この図は磁石を梁の中立軸から単位距離1だけ離れた場合のポテンシャルを表している。 $y = \pm 1$ を安定な点とするポテンシャルより導かれる復元力は定数 $\beta(>0)$ を用いて

$$f(u) = -\beta u(u^2 - 1) \quad (4)$$

と表せる。このとき式(2)が表すサブシステム1に正弦波の励振を加えると，あるパラメータ領域において，図4のように梁の変位 u は y 方向に1次的に不規則な振る舞いを示す。乱流は3次元の不規則な振る舞いであるが，このシステムを用いた1次元の不規則な梁の振る舞いを発信系として利用する。

2.3 エネルギー回収系

エネルギー回収系であるサブシステム2に於いても機械-電気エネルギー変換に圧電膜を用いる。この出力電圧は歪み速度に比例する[7]。梁に貼った圧電膜が受ける歪みは曲げ歪みである。梁の長手方向の曲げ歪み ε は

$$\varepsilon(x) = \delta \frac{d^2 u}{dx^2} \quad (5)$$

で表される[8]。梁は長手方向と直角に厚みを持っているため梁

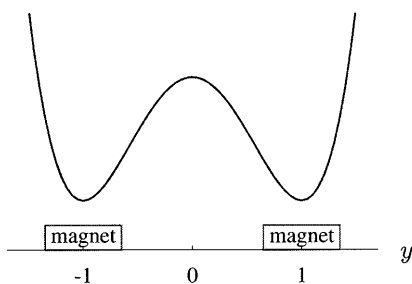
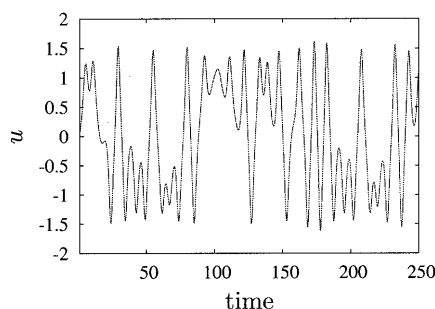


図3 ポテンシャルの概形

図4 u の時間変化: $\alpha = 0.12$, $\beta = 0.5$, $k = 0.045$, $b = 0.12$, $\omega = 0.74$

の上面は縮み下面は伸びる。梁の厚みの中間に伸びも縮みもしない中立層がある。中立層を基準として厚み方向へ測った位置を δ とする。従って出力電圧は

$$\frac{d\varepsilon(x)}{dt} = \delta \frac{d^2}{dx^2} \frac{du}{dt} \quad (6)$$

に比例するものと考えることができる。当然、出力が負荷を有する場合を考える必要があるが、ここでは圧電膜の出力インピーダンスが負荷に比べて大きいものとしている。

3. 梁の運動が周期振動である場合

3.1 エネルギー回収系の復元力が線形の場合

図3のポテンシャルの形状下で励振した梁の挙動は、安定な2点の回りで周期振動をする。そこでまず、エネルギー回収機構の梁に関する式(3)の復元項 $f(u)$ で u の3次以上の非線形項の影響を無視し、安定な点が $y = 0$ の1点の場合を考える。このとき、入力信号として図5のように安定点 $y = +1$ まわりの小振幅の周期振動を用いる。 $y = +1$ 近傍の振動からの変位信号を $\alpha(u_1 - 1)$ とおくと、全システムの運動方程式は以下の式となる。

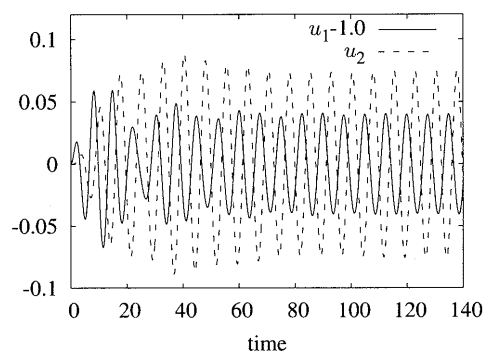
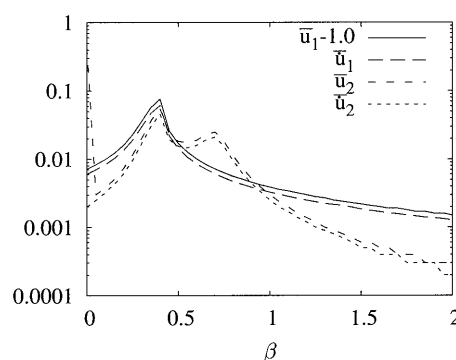
$$\ddot{u}_1 = -ku_1 - \beta u_1(u_1^2 - 1) + b \cos \omega t \quad (7)$$

$$\ddot{u}_2 = -ku_2 + \beta u_2 + \alpha(u_1 - 1) \quad (8)$$

図6に $k=0.08$, $b=0.02$, $\omega=0.84$, $\beta=1.0$ の場合における、 β によって変化する絶対値時間平均 $\overline{u_1}$, $\overline{u_1}$, $\overline{u_2}$, $\overline{u_2}$ を示す。

3.2 エネルギー回収系の復元力が非線形の場合

復元項 $f(u)$ が u の3次以上の非線形項を含む場合を考える。同様に図??のように安定点 $y = +1$ まわりの小振幅の周期振動を励振入力とする場合を考える。 $y = +1$ 近傍の振動からの変

図5 u_1, u_2 の時間変化: $\alpha=1.0$, $\beta=0.6$, $k=0.08$, $b=0.02$, $\omega=0.84$ 図6 非線形項を無視した場合の β によって変化する絶対値時間平均 $\overline{u_1}$, $\overline{u_1}$, $\overline{u_2}$, $\overline{u_2}$

位信号を $\alpha(u_1 - 1)$ とおくと、全システムは以下の式となる。

$$\ddot{u}_1 = -ku_1 - \beta u_1(u_1^2 - 1) + b \cos \omega t \quad (9)$$

$$\ddot{u}_2 = -ku_2 - \beta u_1(u_1^2 - 1) + \alpha(u_1 - 1) \quad (10)$$

図8は $\alpha=1.0$, $k=0.08$, $b=0.02$, $\omega=0.84$ である場合の、 β によって変化する絶対値時間平均 $\overline{u_1}$, $\overline{u_1}$, $\overline{u_2}$, $\overline{u_2}$ を示す。

3.3 考察

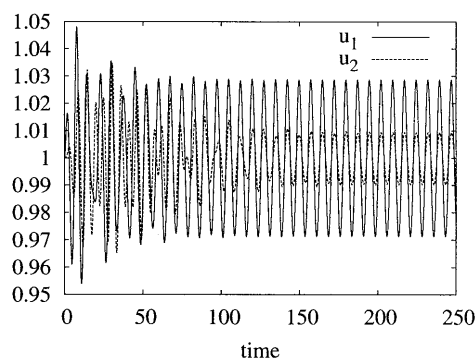
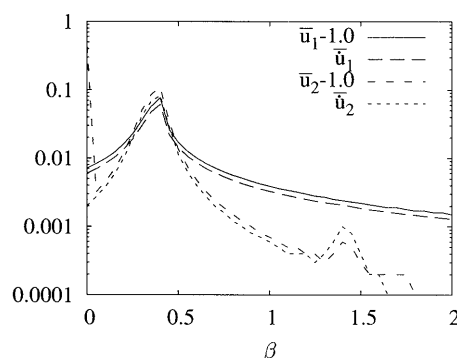
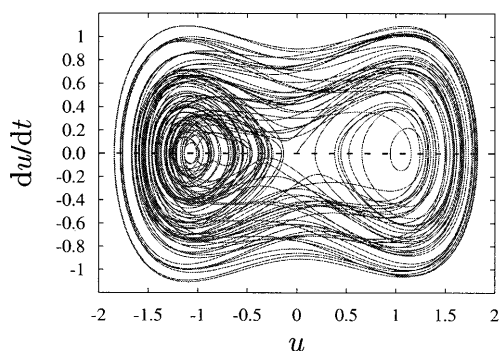
エネルギー回収系の復元力で非線形項の影響を考慮した場合、図8より $\beta=0.0$ を除き回収系の梁の安定点からの変位および速度は入力信号より小さい。しかし図6では $\beta=0.7$ 付近で入力信号の変位かつ速度に対して出力の変位かつ速度が上回っている。これはエネルギーを単に安定点からの変位や速度のみで見積もると、パラメータによっては出力のエネルギーが入力エネルギーを越えてしまうことを意味する。この様に、入力エネルギー及び出力エネルギーの評価がエネルギーキャベンジングでは大きな問題となる。

4. 梁の運動が周期振動でない場合

3節では梁の振動が安定点近傍の周期振動に限った場合を考える。ここでは図4に示した2つの安定点を行き来する大振幅の振動を考える。 $y = 0$ からの変位信号を αu_1 とおくと全システムは以下の式となる。

$$\ddot{u}_1 = -ku_1 - \beta u_1(u_1^2 - 1) + b \cos \omega t \quad (11)$$

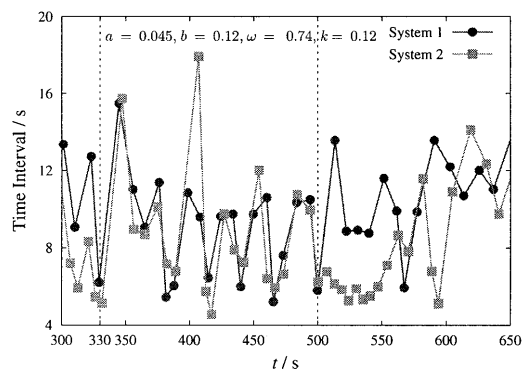
$$\ddot{u}_2 = -ku_2 - \beta u_1(u_1^2 - 1) + \alpha u_1 \quad (12)$$

図 7 u_1, u_2 の時間変化: $\alpha=1.0, \beta=0.7, k=0.08, b=0.02, \omega=0.84$ 図 8 非線形項を考慮する場合の β によって変化する絶対値時間平均 $\bar{u}_1, \bar{u}_1', \bar{u}_2, \bar{u}_2'$ 図 9 $\alpha=0.12, \beta=0.5, k=0.045, b=0.12, \omega=0.74$ における u の位相平面

この系において u_1 と u_2 が同期している区間と同期していない区間に分けて得られるエネルギーを以下に評価する。

4.1 振動の同期について

図 4 の振動を位相平面上で表すと図 9 のようになる。 $\alpha=0.12, \beta=0.5, k=0.045, b=0.12, \omega=0.74$ とした場合について、サブシステム 1, 2 における $\dot{u}_1, \dot{u}_2$ が図 9 の破線を負から正に横切る時間 t を横軸に、前回横切ったからの時間間隔を縦軸にプロットすると図 10 の結果が得られる。ここで t が [330, 500) では時間間隔が揃っており同期している区間と見なす。 $t \geq 500$ ではこれらが揃っていないことから同期していない区間と見なす。パラメータを (Case 1) $\alpha = 0.12, \beta=0.5, k = 0.045, b = 0.12, \omega = 0.74$, (Case 2) $\alpha = 0.07, \beta=0.5, k = 0.035, b = 0.05$,

図 10 $\alpha=0.12, \beta=0.5, k=0.045, b=0.12, \omega=0.74$ における $\dot{u}_1$ と $\dot{u}_2$ が、相図中に定めたある断面へ帰還する時間間隔の時間変化表 1 変位の時間積分をエネルギーとしたスカベンジング前後のエネルギー比 $E_2/\alpha^2 E_1$

	同期部分	非同期部分
Case 1	75.1	76.2
Case 2	176.7	227.4

表 2 速度の時間積分をエネルギーとしたスカベンジング前後のエネルギー比 $E_2/\alpha^2 E_1$

	同期部分	非同期部分
Case 1	86.7	73.1
Case 2	127.0	102.9

$\omega = 0.84$ とした 2 つの場合に対して考察する。これらのパラメータはサブシステム 1 においてカオスが発生し、上記のような同期する区間が存在するパラメータから選定したものである。

4.2 得られたエネルギー比較

振動子のエネルギーを $y=0$ からの変位の時間積分と考えた場合に、同期部分、非同期部分におけるサブシステム 2 への入力 $\alpha^2 E_1$ とサブシステム 2 からの出力 E_2 の比 $E_2/\alpha^2 E_1$ を求め、これらの比を計算したものを表 1 に示す。振動子のエネルギーを速度の時間積分と考えた場合を、同様に表 2 に示す。エネルギー比は Case 1 ではほぼ変わらないが、変位に注目した場合どちらも非同期区間の比が総量として若干多い傾向がある。速度に着目した場合どちらも同期区間の比が総量として若干多い傾向がある。またどの場合においても入力に対する出力の比が 1 を越えている。このことは、前章で述べた様に入力エネルギー及び出力エネルギーの評価に検討の余地があることを示している。

5. おわりに

乱流からのエネルギー回収を試みるためにまず 1 次元の不規則に振る舞う梁の振動の様子について、あるパラメータにおける梁の変位、速度、復元力の関係について考察した。振動子が安定近傍の小さな振幅での周期振動をする時、復元力に非線形項を無視する場合と、考慮する場合に分けて梁の変位と速度の大きさを比較した。復元力に非線形項を無視する場合は、エネルギー回収系への入力信号の振幅より出力の振幅の方が大きく

なるパラメータ領域があることが確認できた。また、振動子が2つの安定点を行き来する大振幅の振動をする時、同期する場合としない場合に分けてエネルギー回収系への入力エネルギーに対する出力エネルギーの比を見積もった。エネルギー評価として変位に注目する場合と速度に注目する場合では、同期する区間と同期しない区間どちらの入力出力比が大きいかの違いが出た。これらの結果よりエネルギーの評価として用いる状態変数をどの様に決めるかを、スカベンジングの観点及び、システム実現の観点から検討すると共に、偶力のエネルギー等についても検討する必要があると考えている。

文 献

- [1] 瀬津家久, 富永晃宏: 水理学; 朝倉書店 (2007).
- [2] 木田重雄, 柳瀬真一郎: 乱流力学; 朝倉書店 (2000).
- [3] Yong Qin, Xudong Wang and Zhong Lin Wang: Microfiber-nanowire hybrid structure for energy scavenging; nature, Vol. 451, No. 14, pp. 809-813 (2008).
- [4] F. C. Moon: Vibro-Wind Energy Technology for Architectural Applications; Windtech International October (2010).
- [5] Isabelle Daumont and Michel Peyrard: One-dimensional 'turbulence' in a discrete lattice; Chaos, Vol. 13, No. 2, pp. 624-627 (2003).
- [6] F. C. Moon and P. J. Holmes: A Magnetoelastic Strange Attractor; Journal of Sound and Vibration, Vol. 65, No. 2, pp. 275-296 (1979).
- [7] 関根信義他, 構造物振動を利用した発電手法に関する研究, 日本機械学会関東支部第15期総会講演会講演論文集, 2008(14), pp. 507-508
- [8] 渡邊英一: 構造力学 I: 丸善株式会社 (1999).