

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820421

研究課題名(和文)並進運動および直接駆動を特徴とする渦励振利用発電システムの開発

研究課題名(英文)Development of energy harvesting system using flow-induced vibration with translation motions and a direct drive involved in the energy transmission

研究代表者

西 佳樹(Nishi, Yoshiki)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70470052

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は水の流れからエネルギーを獲得し、それを利用して発電する新しい方法を提案し、その性能を検証するための実験が中心の研究である。流れの中に円柱の様な細長い物体が置かれていると、ある流速条件下においてその物体が振動する現象がある。その振動を発電機と連動させれば発電システムを構成できるというのが本研究の着想である。発電効率をなるべく高められる様に円柱の表面へ突起を付ける、振動する円柱の近くに振動しない円柱を添える、振動する円柱と発電機との間にもうひとつ振動する円柱を挿入するなどの工夫を施し、実験と理論とで性能を検証した。その結果、一次発電効率は従来よりも高まり20%ほどの値を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：This study experimentally and theoretically examined the performance of an energy harvesting system using flow-induced vibration. The methodology of the energy harvesting is novel and advantages over traditional methods in that the proposed method enables us to build a structurally simple system, which is desirable as a system installed underwater, the severe circumstance. We attempted to enhance the energy conversion efficiency by applying dual mass vibrating system, by placing a fixed cylinder near the vibrating cylinder, and by attaching small structures onto the surface of the moving cylinder. The experimental and theoretical outcomes revealed that our method is able to extract the power with the maximum efficiency of 20%, which is hopeful toward a development for a practical application.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海洋資源・エネルギー 再生可能エネルギー 流体励起振動 渦励振 海洋環境工学 船舶海洋工学

1. 研究開始当初の背景

水や空気の流れの中に置かれた細長い物体が振動する現象（渦励振）は、海中で使う長大な管や、橋梁の疲労破壊の原因であるため、振動を少なくするための研究が行われてきている。本研究は、この渦励振を利用する立場をとる。申請者は2008年頃、この振動を継続的に発生させて発電を行えば一般の自然エネルギー技術の抱える問題を解決できるのではと考えた。

海水の流れを利用する発電方法としては可動部を回転させる水中タービンが現在の主流である。しかし、これまでに報告された風車のトラブルの多くが、ギアなどの回転部分の不具合に起因していた。また有力視されていた波力発電は、油圧によるエネルギー伝達に不具合が発覚し開発が暗礁に乗り上げている。申請者は、大気や海水などの過酷な自然環境に直に、かつ長期に曝される機器では、回転部品や油圧系統の使用は最小化されるべきで、流体から吸収したエネルギーを発電機に伝える伝達過程は極力シンプルであるのが望ましいと考える。コイルと磁石の並進運動で起電する発電器を、渦励振がつくり出す並進運動に直接に接続すれば、シンプルかつ小型な、自然界での長期利用に適した発電技術が実現され、深海資源開発に応用できると発想した。

海外ではミシガン大学が流体中での振動現象による発電を研究しており基本概念では申請者と共通している。申請者らは、発電効率向上のために当海外グループとは異なる着想で研究を重ねてきた。申請者らは小型実験装置を用いて渦励振発電の特性を把握した。ばねで支持した円柱を没水させ台車で曳航し、振動変位や流体力を計測した。これまでの実験から、円柱が流体から受けるエネルギーのうち円柱の振動に寄与するのは平均して14%程度という結果を得た。これは現有の装置では流体エネルギーの86%程度は円柱の下流部へと流れ去ることを意味する。この点を克服し、上記の値を数倍程度高められれば、自然エネルギー利用の変換効率としては有望であり産学連携などへの見通しが立つ。よって「流体から物体振動へのエネルギー変換効率40%」を目指すべき目標と定めた。この目標達成に向けて、理論と数値シミュレーションによる予備的研究を過去2年間ほど進めてきた。その結果、下記の4つの点について実験で実証することが必要と考えている。

2. 研究の目的

資源確保の意味で重要度が増す深海利用の推進のために、深海での地産地消エネルギーの実現を目指す。そのために、探査艇の電源補給や、資源採取機器の制御用電源として利用できる小型発電システムを開発する。流体中で細長い物体が振動する現象を利用し、並進運動のみで可動部を構成し、油圧系統なし

で発電器を直接駆動する。深海における微弱な流れからでもエネルギーを十分に吸収できる様、発電効率40%を目標とする。下記の4つの工夫が発電効率向上に寄与するという申請者の仮説を、理論と数値計算ならびに水槽での実験から検証する。(1) 振動物体表面への突起の付加、(2) 第2振動物体の挿入、(3) 並列固定物体の設置、(4) 円柱太さの最適化。

3. 研究の方法

流れの中に置かれた円柱の励振現象を利用して、深海で駆動する小型の自然エネルギー技術を開発する。そのために実験を主体とした研究を実施する。

本研究は最初に、下記の4つの点を組み込んだ実験装置を設計し、その上で装置を製作する。次に、水槽実験を通じて、この4つの点による発電効率の変化を計測する。実験装置の設計段階では、最適な組み込み方を推定するために、数値計算および理論計算も実施する。上記の4つの点とは、

- (1) 振動物体表面への突起の付加、(2) 第2振動物体の挿入
- (3) 並列固定物体の設置、(4) レイノルズ数の最適化

である。

平成25年度に試験機の設計および製作を行い、平成26年度に水槽実験を実施する。

4. 研究成果

(1) 2自由度振動系による渦励振エネルギー吸収について

本研究では、流体力を受けて振動する細長い物体と発電機との間に、振動物体を挿入することで、吸収するエネルギー量を増加させられることを理論的に示した。

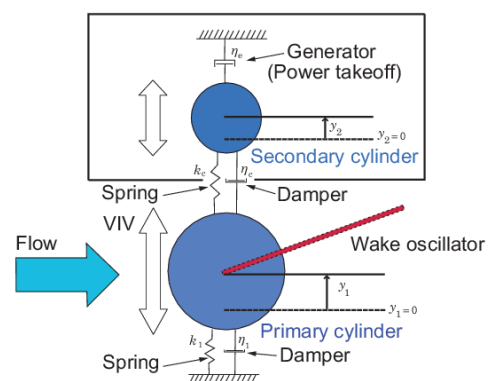
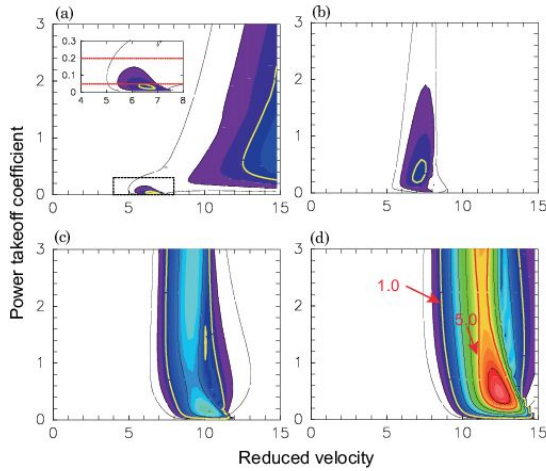


図1: 2自由度振動系を用いた渦励振エネルギー吸収の模式図

図1に示した様な力学系を想定した。第一円柱に渦励振を起こし、その振動が第二円柱を介して発電機に伝達される。第一円柱と第二円柱は線形ばねによって支持される。第一円柱の渦励振は、円柱背面における渦生成・放出をモデリングした後流振動子モデルに



よって記述した。

図2：吸収されるエネルギー量の等高線。横軸は流速（無次元化流速）、縦軸はパワーテイクオフ係数（発電機の負荷の大きさの度合い）。(a)から(d)の順に次第に、質量比(M_2/M_1)が大きくなっていく。等高線が青から赤になるにつれて高いエネルギー量を表す。

記述した方程式を平均化法（非線形振動の解を求めるための方法のひとつ）を用いて解き、吸収されるエネルギー量を計算した。図2にそのエネルギー量が、いくつかの重要なモデルパラメータにどのように依存するかを示した。この等高線図から、ある流速範囲のとき、パワーテイクオフ係数の広い範囲にわたってエネルギー吸収が発生し、特に質量比 $M_2/M_1 : M_1$ 第1円柱の質量、 M_2 第2円柱の質量) が大きいほど高いエネルギー吸収が期待できることが分かった。

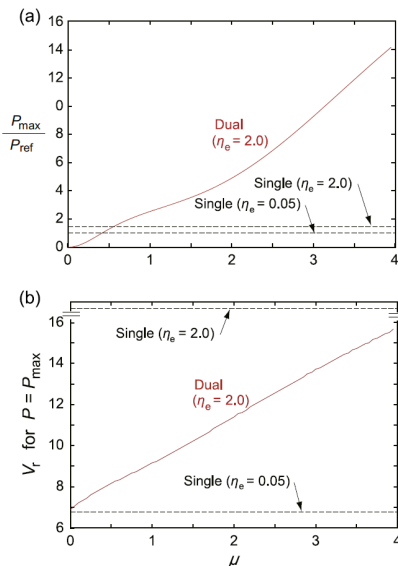


図3：(a)吸収エネルギーの質量比依存性、(b)吸収エネルギー最大値を与える無次元流速の質量比依存性

以上から、質量比が重要な設計パラメータであることが分かった。同時にひとつ設計上の注意点があることも分かった。すなわち、質

量比を上げれば確かにエネルギー最大値は上昇する(図3a)一方で、その最大値を与える無次元流速も上がっていく(図3b)。したがって、本発電システムを設置する環境の流速に合わせて質量比にはある上限を付ける必要がある。

(2) 振動円柱の表面に突起を付けることによる効果

本研究では、振動する円柱の表面に突起（トリッピングロッド）を付加することで振動応答がどう変化するかを調べた。突起の取り付け位置を変えることで、振動を増幅または抑制できる効果があるかを知ることを目的とした。

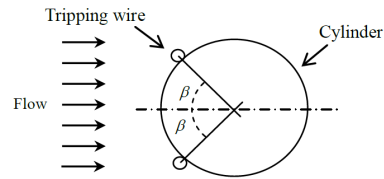


図4：振動する円柱表面への突起（トリッピングロッド）負荷の模式図。は取り付け角度を表す。

図4に示した取り付け角度 β を変化させて、固定された円柱に作用する流体力を計測した(図5)。

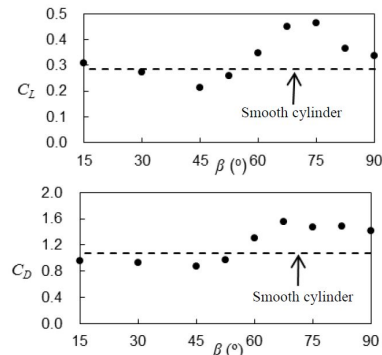


図5：固定された円柱に作用する揚力と抗力(いずれも無次元値)の取り付け角度 β に対する依存性

この結果から β が45度近傍のとき揚力・抗力ともに小さくなり、また β が75度周辺の時大きくなることが分かった。以上より突起付加は流体力に大きく影響し、その影響は取り付け角度に依存することが確認された。

次に振動する円柱の応答の違いを計測した(図6)。突起を付加しない場合、流速無次元値が6を超えると次第に振幅は低下し、流速無次元値が9以上になるとほとんど振動は計測されない。それとは対照的に β を60度及び75度にした場合、流速の無次元値が6を超えると、流速無次元値の増加とともに少しずつ振動が増加した(図6a)。

このとき円柱の振動数は、突起なしでは流

速無次元値が9以上になると固有振動数よりも大きくなるのに対して、突起ありの場合では、固有振動数にきわめて近い振動数が高流速領域でも維持されることが分かった。図6に示した角度で突起を付ければ発電システムの効率向上に応用が可能である。

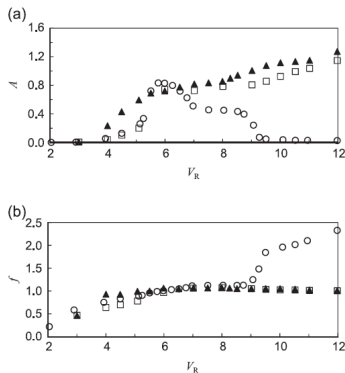


図6：振動の(a)振動振幅（円柱直径で規格化した無次元値）、(b)振動数（固有振動数で規格化した無次元値）。横軸は流速（無次元値）： \square =60度、 \triangle =75度、 \circ ：突起の付加なし。

また η をより大きくした場合には、振動抑制効果があることが分かった(図7)。 θ =105度、120度に設定した場合、振動が極めて微弱となった。

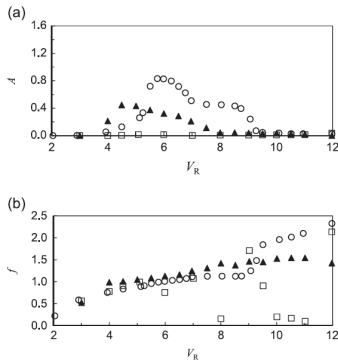


図7：振動の(a)振動振幅（円柱直径で規格化した無次元値）、(b)振動数（固有振動数で規格化した無次元値）。横軸は流速（無次元値）： \square =120度、 \triangle =105度、 \circ ：突起の付加なし。

(3)渦励振のうなりが発電効率に与える影響に関する考察

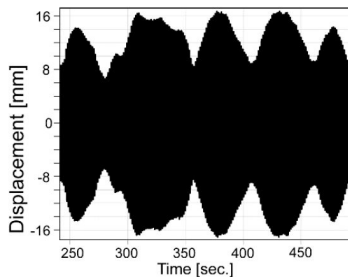


図8：円柱の変位の時刻歴。

本研究では、細長い円柱を水中に沈め、そ

の円柱に流れを作用させ渦励振を発生させた。その様子の観察から、振幅が周期的に変動する、うなりとよばれる現象がしばしば起きていたことが分かった(図8)。

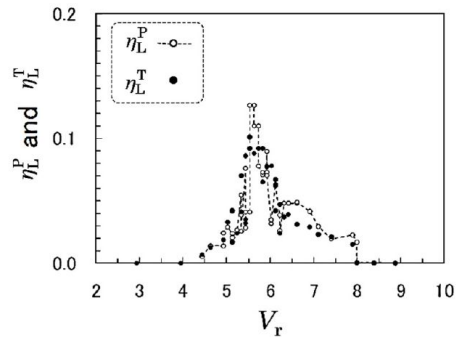


図9：流速（無次元値）に対する1次変換効率の変化。破線+白丸は振動成分の中で最も卓越したものによる1次変換への寄与、黒丸はすべての振動成分による1次変換への寄与を、実験データを基に計算したものを。

このうなりがエネルギー変換に与える影響を考察した。うなりは一般的に、振動数が互いに近接した複数の振動数成分が卓越するために発生する。本実験の変位時刻歴フーリエ変換した結果からも、そのことが確認された。最も卓越している成分だけ取り出して、その成分の1次変換効率を計算するとともに、すべての成分による1次変換効率も計算し比較した(図9)。この結果、両者はほぼ一致することから渦励振によるエネルギー変換はほぼ第一卓越成分によって担われていることが分かった。また、すべての成分を考慮した効率の方が低くなることから、この場合には第2以下の成分が渦励振を減衰させる（エネルギーを放出する）方向に寄与していることも分かった。

(4)振動する円柱に近傍に固定円柱を並列させることによる効果の検証

複数の円柱が近傍に設置されているとき流体が励起する振動の特性が変化することは以前から指摘されていた。もしその振動を増幅させることができれば発電効率の向上に応用できると着想し実験を実施した(図10)。

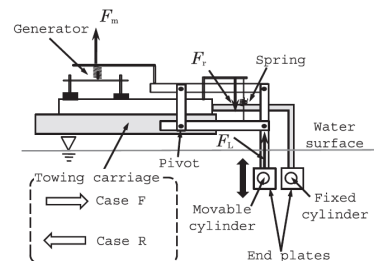


図10：振動する円柱とその近傍に設置された固定円柱の模式図。

実験の結果、振動する円柱の下流側に固定円柱を設置したとき、振動が非常に顕著になり発電量も向上することが判明した(図11)。

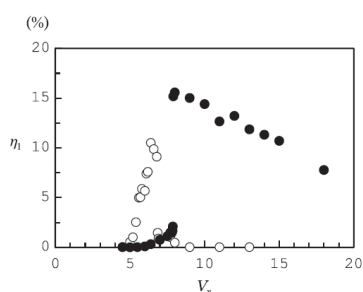


図11：1次変換効率の流速(無次元値)に対する依存性。●：固定円柱設置あり、○：固定円柱設置なし。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

[1] Y. Nishi, M. Nishio, Y. Ueno, L.A.R. Quadrante, K. Kokubun, Power extraction using flow-induced vibration of a circular cylinder placed near another fixed cylinder, Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(10), 2863-2880, 査読あり.

[2] L.A.R. Quadrante, Y. Nishi, Amplification/suppression of flow-induced motions of an elastically mounted circular cylinder by attaching tripping wires, Journal of Fluids and Structures, 2014, 48, 93-102, 10.1016/j.jfluidstructs.2014.02.18, 査読あり.

[3] Y. Nishi, Power extraction from vortex-induced vibration of dual mass system, Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(1), 199-212, 査読あり.

[4] Y. Nishi, K. Kokubun, Effect of modulation on energy conversion from uniform flow into vortex induced vibration of a rigid circular cylinder, Journal of Fluid Science and Technology, 2013, 8(3), 309-321, doi: 10.1299/jfst.8.309, 査読あり.

[5] L.A.R. Quadrante, Y. Nishi, Attachment of tripping wires to enhance the efficiency of a vortex-induced vibrations energy generation system, Journal of Power and Energy Systems, 2013, 7(3), 162-176, 査読あり.

〔学会発表〕(計1件)

Y. Nishi, Y. Ueno, T. Miyamoto, Energy harvesting using wake-induced vibration: experiment in a circulating water channel, International Conference on Offshore and Polar Engineering, June 25, 2015, USA, 査

読あり.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ

<http://www.med.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西 佳樹 (Nishi Yoshiki)

横浜国立大学大学院工学研究院准教授

研究者番号: 70470052

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: