

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420484

研究課題名(和文)「水中振り子式」潮流発電における励振力の強化に関する研究

研究課題名(英文) Study on enhancement of self-exciting force acting on submerged pendulum based tidal energy converter

研究代表者

比江島 慎二 (Hiejima, Shinji)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・准教授

研究者番号：50284526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：振り子の流力振動を利用した潮流発電Hydro-VENUSについて、振り子の自励力の向上により発電性能を高める方法を検討した。振り子の断面形状の改善を試みた結果、ギャロッピングを誘起する断面形状が強い流力振動を励起し、自励力を高められることが明らかとなった。複数振り子を近接して並列配置することにより効率的にHydro-VENUSの発電性能を高めることができた。

研究成果の概要(英文)：Hydro-VENUS is the flow-induced oscillation based tidal energy converter using a physical pendulum. This study aims to improve the energy harvesting performance of Hydro-VENUS by increasing self-exciting force acting on the pendulum. As a result of improving the pendulum cross-section shape, it is found that the cross-section shapes which induce galloping oscillation are effective in causing strong oscillation and increasing the self-exciting force. Multiple pendulums arranged closely in parallel rows can improve the energy harvesting performance of Hydro-VENUS efficiently.

研究分野：耐風工学

キーワード：潮流発電 海流発電 小水力発電 振り子 流体励起振動 ギャロッピング 海洋エネルギー 再生可能エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

太陽光や風力に比べて気象の影響をほとんど受けず、ほぼ正確な流況予測が可能な潮流・海流エネルギーは、極めて安定なエネルギー源として世界的に注目されている。島国であるイギリスは早くから海洋エネルギー開発に力を入れており、スコットランドに設立された欧州海洋エネルギーセンター (EMEC) は世界の海洋エネルギー開発の中心になっている。アジアにおいてもまだ未開発の海洋エネルギーの開発が急ピッチで進んでいる。それに対して、わが国は世界第6位の広大な海洋面積を保有するにも関わらず、海洋エネルギーの開発は進んでおらず、やっと実証海域の開発が始まったばかりである。今後、豊富な海洋エネルギーの開発を加速し、エネルギー自給率の向上と二酸化炭素排出の削減に努めなければならない。

潮流・海流などの水流を利用した発電は、風力と同じく流体の運動エネルギーを利用する点で共通しており、その発電方式には風力発電と同じ回転翼 (プロペラ) が用いられる。しかし、潮流・海流発電で使われる回転翼は、漂流物などを巻き込んで破損しやすいほか、水流の強い流体力に対して高い強度も要求されてコストが高くなる。さらに、鋭利な回転翼で海洋生物を傷つける恐れもある。これに対し、円柱などの単純な柱状物体に生じる流力振動を駆動力として発電する新しい方式の開発が進められている。流力振動とは、流れ中に置かれた円柱などの柱状物体から放出されるカルマン渦などにより、柱状物体に変動流体力が作用することによって励起される振動である。回転翼に比べて単純形状の物体のゆっくりした振動を利用するため、漂流物の巻き込みが少ないほか、高強度化も容易であり、低コストで高耐久性の発電装置を期待できる。また、鋭利な回転翼に比べて海洋生物を傷つける心配もない。

耐風工学分野では吊橋などの長大構造物に風で生じる流力振動が長年研究されており、流力振動を利用した潮流発電への活用が期待される。我々は、耐風工学でよく知られた流力振動で発電する図1のような水中振り子方式を考案した。

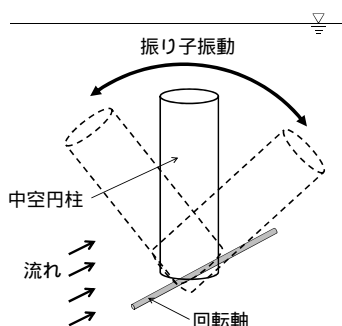


図1 Hydro-VENUS 方式

Hydro-VENUS (Hydrokinetic Vortex ENergy Utilization System) と名づけたこの方式は、円柱のような柱状物体が水流によって流力振動する極めてシンプルな構造が特徴である。当初は円柱に生じる渦励振と呼ばれる流力振動を利用していましたが、共振流速付近に限られた流速範囲でしか振動が発現しないという渦励振の特性により、潮流のように時々刻々と流速が変化する流れではエネルギー取得性能の低下が懸念される。ところが、振り子上流に別の固定円柱を近接設置することでより強い励振力が発生する現象がこれまでの実験で見られた。これは、固定円柱から剥離した流れが振り子に作用することで振動が増幅される Wake Galloping 現象が生じたのが要因と推測される。このことから、振り子周辺の剥離流れ性状の改良により、さらに強い励振力が得られ、より大きなエネルギーを取得できる可能性を着想するに至った。

## 2. 研究の目的

Hydro-VENUS における振り子周辺の剥離流れの改良による励振力強化によって、エネルギー取得性能をさらに高め、より広い流速範囲で振動維持可能な手法を開発する。励振力強化には、振り子形状の改良が最も効果的と思われる。特に、渦励振よりも自己励起性の強いギャロッピングなどの流力振動を水流により励起できれば、高いエネルギー取得性能が期待できる。ギャロッピングにおいては、振り子とその周辺の剥離流れとの相互作用が重要であるが、より強い励振力が得られる断面形状を検証する。

また、さらなる励振力強化策として、複数振り子を用いる手法について検討する。潮流の速い海峡などは限られたスペースにいくつもの振り子を設置できるかが重要である。その際、振り子どうしを近接設置した場合に流れが干渉し合って、振り子1本あたりのエネルギー取得性能が低下する恐れがある。従来のプロペラ方式の場合は、プロペラどうしの間隔として、流れ方向にはプロペラ直径の10倍程度、流れ直角方向には直径の3倍程度を空けることが望ましいとされている。Hydro-VENUS の振り子形式の場合、どの程度、近接設置が可能かを明らかにする。

## 3. 研究の方法

ギャロッピングを生じやすい様々な断面形状の振り子について、エネルギー取得性能を水槽実験により検証した。水槽実験で用いた振り子の各種断面の形状を図2に示す。振り子長さはずべて15cmである。

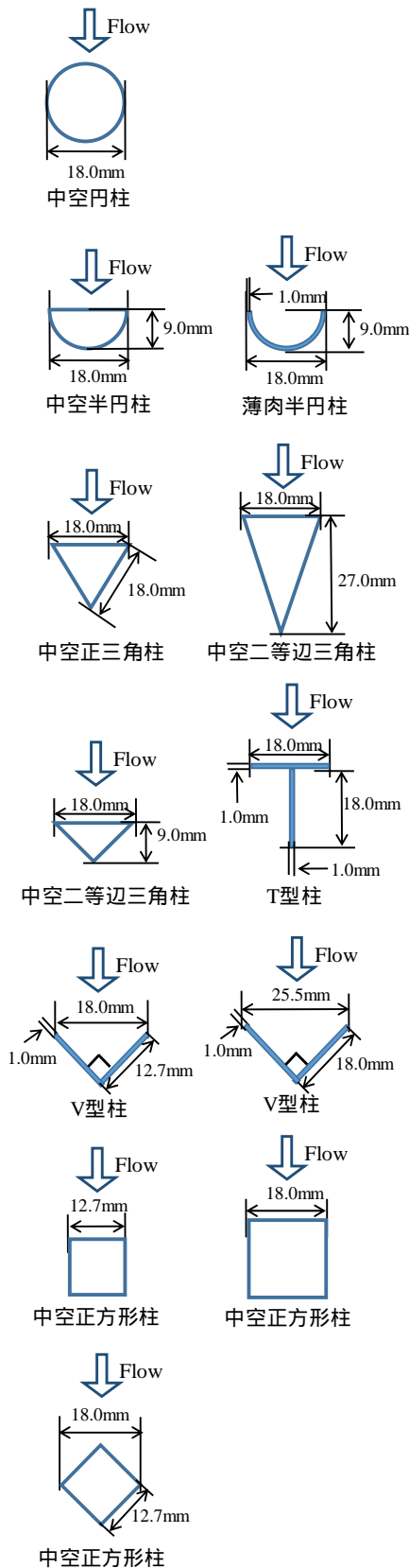


図2 様々な振り子断面形状

また、複数振り子を用いた場合のエネルギー取得性能を水路実験により検証した。特に、振り子どうしを近接設置した場合に、単独振動の場合に比べてどの程度のエネルギー損失があるか調べた。複数の円柱振り子を流れに対して並列に配置して互いに連結した同

期振り子(図3),および複数の振り子を連結せずに互いに独立して振動させる非同期振り子(図4)を検討した。同期振り子は、複数の振り子の回転軸を互いにタイミングベルトで連結することで常に同位相で振動し、複数の振り子の回転力を1本の回転軸に集約して1つの発電機を駆動する。一方、非同期振り子は、複数の振り子が独立に振動してそれぞれ独立の系統で1つの発電機を駆動する。同期振り子は2連と3連の2通り、非同期振り子は2本の振り子を直列配置した場合と並列配置した場合の2通りを検討した。なお、振り子の励振力を高める目的で固定円柱を振り子上流に設置するケースでは、固定円柱下流端と振り子上流端の間隙間距離は2cmとした。振り子直径は11.5cm,長さは50cm,上流固定円柱の直径は振り子直径と同じ11.5cmにした。



(a) 2連同期 (b) 3連同期

図3 同期振り子



(a) 2連非同期直列 (b) 2連非同期並列

図4 非同期振り子

#### 4. 研究成果

##### (1) 様々な断面形状の振り子のエネルギー取得性能

図2に示した各種断面形状の振り子について、振り子に様々なトルク負荷を与えながら、各流速 $U$ で得られる最大のパワー $P$ を測定した結果を図5に示す。円柱は渦励振、円柱以外の形状はギャロッピングが生じていると考えられる。ギャロッピングの方が円柱の渦

励振よりも大きなパワーが得られている場合が多いが、中空二等辺三角柱 と中空正方形柱 については、円柱と同等かそれよりも低い。

中空二等辺三角柱 は、図2に示すように、流れ直角方向から見たときの振り子幅が大きく、流れ直角方向への振動の抵抗が大きい。そのため振動しにくいのが原因と考えられる。同じ三角柱で比べると、流れ直角方向から見たときの振り子幅が最も小さい中空二等辺三角柱 のパワーが最も大きく、次に中空正三角柱 のパワーが大きいことも、このことを支持する。T型は三角柱に近い形状と見なせ、流れ直角方向から見たときの振り子幅が中空正三角柱と中空二等辺三角柱 の中間に位置するが、やはり上記の傾向が当てはまる。なお、トルクは、流れ直角方向から見たときの振り子幅が大きいほど大きく、角速度は、逆に流れ直角方向から見たときの振り子幅が小さい方が大きくなる傾向があることを別途確認している。

一方、V型柱では、V型柱の方がV型柱よりも流れ直角方向から見たときの振り子幅が大きいものの、パワーはV型柱の方がやや大きい。これは、V型柱の方が、流れ方向から見たときの見付幅がV型柱よりも大きいことが要因と考えられる。なお、トルクはV型柱の方が大きく、角速度はV型柱の方が大きいことを別途確認している。

中空正方形柱 は、断面の上流側の2つの角部で剥離した流れが、下流側の2つの角部に衝突することによって振動が減衰する可能性が想像される。断面の上流側に剥離点となる2つの角部が存在し、その下流にアフターボディが連なるような断面においてギャロッピングは生じやすいが、剥離後の流れが衝突するような別の角部が存在すると、このように振動を抑制する働きをするものと考えられる。中空正方形柱 は、そのような下流側の角部が存在しないため、中空正方形柱 よりもパワーが大きくなっていると解釈できる。

この中空正方形柱 は、下流側半分の形状が中空二等辺三角形と同じであるが、パワーはやや低い。この低下の要因は、上流側半分の三角形部分にあると解釈できることから、この場合、上流側にはなるべく突起がない平坦な形状の方が、高いパワーが得られると理解できる。

中空半円柱、薄肉半円柱は特に大きなパワーが得られた。中空半円柱と薄肉半円柱は、パワーにほとんど違いがないことから、上流側の平面の有無はほとんど関係ないと解釈できる。同様のことは中空二等辺三角柱 とV型柱の間にも当てはまり、両者のパワーはやはりほぼ同等になっている。なお、中空半円柱と薄肉半円柱のトルクは円柱より大きかった。

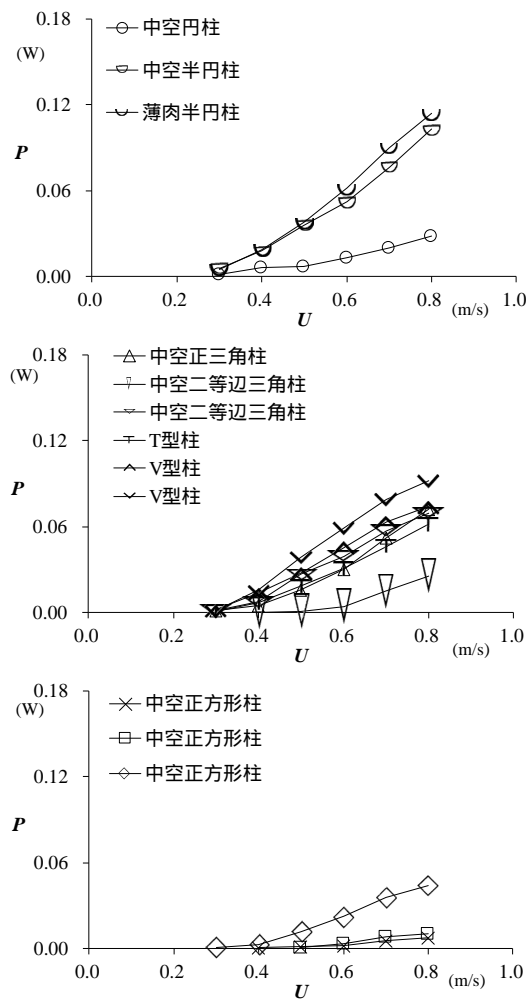


図5 各振り子のエネルギー取得性能

(2) 複数振り子設置時のエネルギー取得性能

単一振り子、2連同期振り子、3連同期振り子、2連非同期振り子の並列配置、2連非同期振り子の直列配置のそれぞれで発電したときの発電電力  $E_a$  の最大値を図6に示す。2連非同期振り子の直列配置では、固定円柱の設置はむしろ振り子振動の励振力を低下させることから、振り子の上流に固定円柱は設置しなかった。2連非同期(直列)以外は、固定円柱を振り子上流に設置することで励振力が強化されるため、すべて固定円柱を設置している。

発電電力の最大値は同期振り子では単一振り子に比べ2連で約2倍、3連で約3倍に増加している。このことから、隣り合う振り子どうしを近接設置しても、それらを同期して振動させればほとんどエネルギー損失を伴うことなく、振り子本数に比例したエネルギーを得ることができると言える。なお、このとき、同期振り子では連結本数の増加に比例してトルクが増加していることが発電電力増大の要因となっていることを別途確認した。

一方、2連非同期振り子(並列)では、発電電力は単一振り子の1.4倍程度しか増加せず、同じ2本の振り子を用いた2連同期振り子よりも低い。非同期振り子では、2本の振り子

の角速度に差があるとき、角速度の小さい方の振り子で空回りが生じるため、2 連同期振り子に比べて発電電力が低下したと考えられる。

2 連非同期振り子の直列配置は、並列配置のときの発電電力より小さい。直列の場合、上流と下流の振り子のそれぞれの振動による流れの影響によって、互いの振り子の運動を阻害する様子が断続的に見られた。

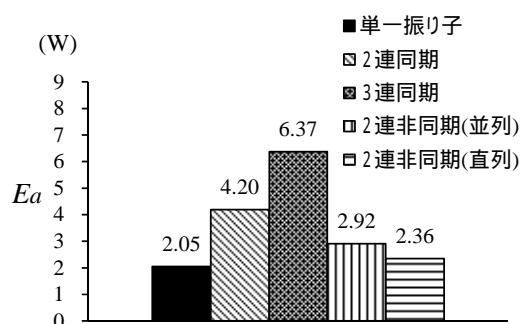


図6 振り子形式による発電性能の比較

## 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6件)

比江島慎二，大熊広樹，振り子式潮流発電機の円柱振り子に作用する流体力特性，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，査読有，Vol.72, No.2, pp.315-321, 2016

比江島慎二，川東一幸，平板回転加振による円柱流体力振動のフィードバック増幅，第23回風工学シンポジウム論文集，査読有，pp.325-330, 2014

高島優，比江島慎二，平板並進加振による円柱流体力振動のフィードバック増幅，第23回風工学シンポジウム論文集，査読有，pp.319-324, 2014

比江島慎二，中野正史郎，空力振動発電のためのフィードバック増幅特性の検討(円柱間距離の影響)，日本風力エネルギー学会論文集，査読有，Vol.105, pp.8-13, 2013

比江島慎二，川東一幸，角柱回転振動によるウェイクギャロッピングのフィードバック制御，日本風工学学会論文集，査読有，Vol.38, No.2 (No.135), pp.27-34, 2013

比江島慎二，岡圭人，林健一，井上浩男，倒立振り子の流体力振動を用いた発電のための基礎的実験，土木学会論文集 B3(海洋開発)，査読有，Vol.69, No.1, pp.12-21, 2013

[学会発表](計8件)

HIEJIMA, S.，Hydro-VENUS: Pendulum-based tidal energy converter, Int. RIAM Symp. on Ocean Renewable Energy Technologies and related fluid dynamics researches / RIAM Research Workshop of Designated Joint Research Project on Development of Floating Marine Renewable

Energy Systems, 2015.12.7-8, Fukuoka

佐々木拓人，比江島慎二，振り子の流体力起振動のフィードバック制御，土木学会年次学術講演会，2015.9.16-18, 岡山

大熊広樹，比江島慎二，Hydro-VENUS の倒立振り子に作用する流体力特性，土木学会年次学術講演会，2015.9.16-18, 岡山

佐々木拓人，比江島慎二，複数振り子を用いた Hydro-VENUS の発電性能，土木学会中国支部研究発表会，2015.5.23, 山口

大熊広樹，比江島慎二，Hydro-VENUS の倒立振り子に作用する流体力特性，土木学会中国支部研究発表会，2015.5.23, 山口

HIEJIMA, S.，OKA, K.，HAYASHI, K.，INOUE, H. and SHEENA, R.，Energy harvesting by flow-induced vibration of Hydro-VENUS converter, Grand Renewable Energy 2014, 2014.7.27-8.1, Tokyo

川東一幸，比江島慎二，角柱の回転加振によるウェイクギャロッピングのフィードバック制御，土木学会年次学術講演会，2013.9.4-6, 習志野

比江島慎二，岡圭人，林健一，井上浩男，倒立振り子の流体力振動を用いた発電のための基礎的実験，第38回海洋開発シンポジウム講演集，2013.6.27-28, 米子

[その他]

ホームページ等

<http://www.cc.okayama-u.ac.jp/~hiejima/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

比江島 慎二 (HIEJIMA, Shinji)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・准教授

研究者番号：50284526

### (2) 連携研究者

大久保 賢治 (OKUBO, Kenji)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・教授

研究者番号：50135612