

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560990

研究課題名(和文)ハイブリッド型洋上エネルギー開発システムの実海域性能に関する基礎的検討

研究課題名(英文)A STUDY ON HYBRID TYPE OCEAN ENERGY DEVELOPMENT SYSTEM

研究代表者

砂原 俊之(SUNAHARA, SHUNJI)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号：40276788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、広大な海に囲まれたわが国の特徴を生かした自然エネルギーの積極的活用を目指して、新形式の浮体式洋上風力発電システムを提案し、その実現可能性を検証した。本システムは600kW級風車を搭載した双胴船型浮体の下部に水中翼を設置することで、波エネルギーを利用して浮体の動揺や係留系に働く力を大幅に軽減することを期待するものである。模型実験の結果、水中翼が波浪中動揺を低減する効果は主に粘性減衰力に基づくこと、条件によっては翼形状でなく平板でも高い減揺効果や波漂流力低減効果が得られること等が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we suggested a new type floating ocean WTGS(wind turbine generator system) to utilize a renewable energy positively against the background of Japan's very large ocean, and carried out the feasibility study for the system. This system has a catamaran hull with one 600-kW-order wind turbine and a hydrofoil is installed under the bow of the hull. Then the hull motion or the forces on a mooring system could be significantly reduced using the wave energy. From the results of model tests, the effect of a hydrofoil on reducing the motion in waves is mainly based on the viscous damping forces. And it is confirmed that the effects on reducing the hull motion or the wave drift forces, not only with a hydrofoil but also with a flat plate.

研究分野：海事流体工学

キーワード：浮体式洋上風力発電 沿岸域発電システム 波浪中動揺低減

1. 研究開始当初の背景

日本では、2011年の福島第一原発事故以降、従来の枯渇性エネルギーに頼ったエネルギー政策を転換し、クリーンで安全な自然エネルギー（再生可能エネルギー）の利用を積極的に進めようとする流れが加速している。

自然エネルギーの有効的利用法の1つである風力発電は、日本でも積極的に建設が推進されているが、既に建設に適する土地の減少も指摘されている。今後は洋上への展開が期待されているが、日本の海岸線はすぐに深くなる地形が多く、欧米に多く見られる着底式風車の建設は限られる。そこで日本のメガフロート技術を応用して、浮体工法による洋上発電システムの研究開発が進められている。これまでに様々な型式の浮体式風車が提案・検討されているが、いずれも洋上に浮かぶ風車の波浪中動揺の低減と、浮体を流されないように保持する係留装置のコストダウンが重要な課題となっている。

2. 研究の目的

近年、化石エネルギーの大量消費により排出されるCO<sub>2</sub>による地球温暖化、そして石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料そのものが近い将来枯渇する可能性が高いといった地球規模の環境問題、エネルギー問題が生じている。そして、世界各国でこれらの問題を解決するため自然エネルギーを積極的に利用しようとする動きが活発化してきている。日本においても、2011年の福島第一原発事故以降、クリーンで安全な自然エネルギー（再生可能エネルギー）の利用を積極的に進めようとする流れが加速している。その再生可能エネルギーの中でも発電コストが低く、エネルギー変換効率が高いのが風力発電である。特に、洋上は強く安定した風を得られ、発電効率を上げるための風車の大型化がしやすい等のメリットがあり、長い海岸線を持つ日本の地理条件は、洋上風力発電に非常に適している。

近年、日本の広大なEEZを背景に、浮体工法による風力発電システムの研究開発が進められている。これまでに様々な型式の浮体式風車が提案・検討されているが、係留式の場合、その多くが浮体及び風車の波浪中動揺の低減と、浮体を保持する係留装置のコストダウンが重要な課題となっている。それらの解決策として、浮体下部に水平板や翼を配置することで、動揺抑制効果や漂流力低減効果を狙った研究も行われている。

波浪推進システムは水面下に設置した翼が波による水粒子運動に応じてピッチ運動をすることにより前進力を発生させる仕組みである。このシステムは推力発生効果のみならず、船体運動に対する高い減衰力を有しており、浮体構造物への応用が期待できる。

これまでに研究代表者らは、洋上では風力発電を行い、水面下では波浪推進システムを用いて波漂流力を大幅に低減して係留装置のスリム化を図りつつ、波浪中動揺の低減も

実現するハイブリッド型洋上風力発電船を提案し、その基本的な成立可能性について検証してきた。具体的には、写真1に示す想定実機の縮尺模型を用いて規則波中性能実験を行い、船体下部の水中翼により、係留力の大幅な低減と波浪中ピッチ運動が大きく軽減されることが確認されている。さらに、風と波の共存場での係留力や浮体がどのような挙動をするかを詳細に調べた結果、風と波の中での1点係留方式には特に大きな問題がないことが確認されている。表1に想定実機の主要目を示す。

今後、本システムの実現可能性をより高めるためには、実海域性能、すなわち波、風、潮流などの自然外力に対して本システムがどのような性能を示すのか、そして設置海域に応じた本システムの最適化のために、そもそも実際に船体や翼部にどのような流体力が働き、どのようなメカニズムで波浪中動揺が抑制されているのか、その詳細を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、まず縮尺模型を用いた水槽実験を行い、波浪中の船体動揺の基となる波浪外力を明らかにすると共に、水中翼の可動、固定による違いや、翼形状の違いについて明らかにする。次に回流水槽を用いて縮尺模型に働く潮流力の計測を行い、本システムの潮流影響を評価する。最後に、本システムの波浪中ピッチ運動に関する静水中強制動揺実験（ラディエーション実験）を行い、船体に働く付加慣性モーメント、減衰力を求め、さらに造波減衰力と粘性減衰力を求めて、その特性を明らかにした。



写真1 想定実機の1/50縮尺模型

表1 想定実機の主要目

船体部	全長	50m
	全幅	30m
	深さ	14.25m
	喫水	4.25m
	水中翼長	25m
	水中翼設置水深	7.5m

風車部	定格出力	600kW
	ローター直径	45m
	ハブ高さ (船体部デッキ上面から)	34m
全体	排水量	894.6t
	重心高さ	8.65m

### 3. 研究の方法

#### (1) 規則波中波浪荷重計測実験

想定実機の縮尺模型を使用して、規則波中の波浪荷重を計測するディフラクション実験を行った。水中翼は写真 2 に示すように、翼弦長 50mm の NACA0015 と、比較のために投影面積が同じになる翼厚 7.5mm、幅 50mm の平板を使用した。本実験では、水槽中央部に予定喫水で固定した実験模型に規則波を入射させた時の船体模型に働くサージ、ヒーブ、ピッチ各方向の波強制力及び波漂流力を、3 分力計を用いて計測した。規則波の波周期は 0.566~1.697s の 10 通り、波高は 20, 40, 60mm である。写真 3 に実験時の様子を示す。



写真 2 使用した平板と NACA0015 翼型板



写真 3 波浪荷重計測実験時の様子

#### (2) 潮流力計測実験

本システムの潮流影響を評価するために、縮尺模型を用いて、一樣流中の荷重計測実験を行った。本実験では条件の異なる 8 種類の翼および平板を用意し、水中翼を取り付ける機構部のみ、浮体のみの場合を計測した。本実験は回流水槽で行った。架台に三分力計を固定し、水面を喫水線の高さに合わせ模型を取り付けた。回流水槽で異なる流速の潮流を起こし、様々な潮流の入射角度に対するサージ方向、スウェイ方向にかかる荷重とヨーモーメントを計測した。模型の座標系を図 1 に

示す。

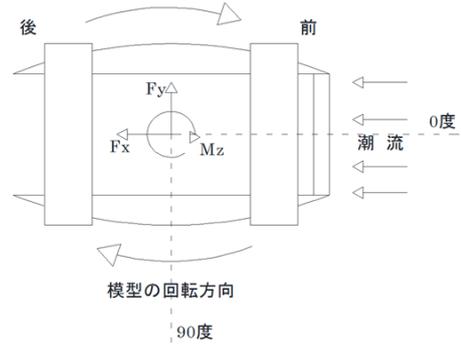


図 1 潮流力計測実験における座標系

#### (3) 静水中強制動揺実験

本実験では、静水中でピッチ運動のみを許された風力発電模型をピッチ強制動揺させ、その反力として得られるピッチモーメント及び船体周りで生じる発散波の振幅を計測するラディエーション実験を行った。今回は模型重心を回転中心として、模型後端部を 1 軸強制動揺装置で上下動させて模型全体をピッチ強制動揺させた。図 2 に模型及び実験装置の詳細を示す。

実験条件は、減揺板として、長さ 500mm、厚さ 7.5mm の平板、NACA0015 の翼弦長 50mm と 100mm の計 3 種類、NACA0015 の翼弦長 50mm のみ翼を可動にし、これに翼なしを加えた計 5 種類を比較した。動揺周期は実機ベースで 4~12s とし、動揺振幅は ±20, 40, 60mm の 3 通りを行った。

データの解析方法は、まず得られたピッチモーメントをフーリエ解析して、付加慣性モーメントと減衰力を求めた。次に、発散波振幅から造波減衰力を求めて、減衰力との差から粘性減衰力を求めた。最後に、得られた各ラディエーション係数を用いて縦波中ピッチ動揺の RAO を求めて、過去の波浪中動揺実験の結果と比べて評価した。

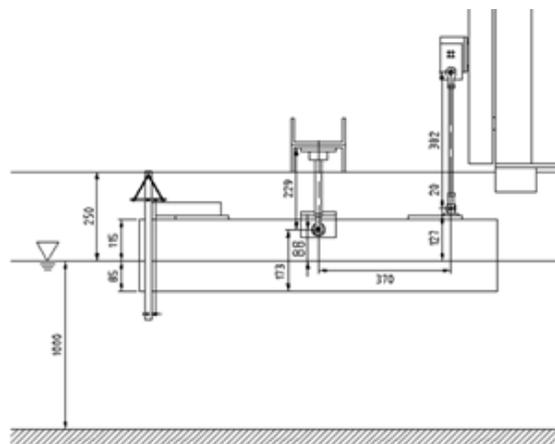


図 2 模型及び実験装置

### 4. 研究成果

#### (1) 規則波中波浪荷重計測実験結果

本システムの規則波中波強制力の振幅と

波漂流力の結果を翼条件で比較した結果を図3～図6に示す。

図3および図4より、サージ強制力、ヒープ強制力は翼条件による違いはほとんどみられず、可動翼、固定翼、平板のいずれもサージ強制力、ヒープ強制力に影響を及ぼさないことが分かった。

図5より、波浪中ピッチ運動の原因となるピッチ強制モーメントは翼なしに比べて、翼や平板の存在にかかわらず、逆に生じる力が小さくなっており、波浪荷重においても、翼や板の存在が動揺低減にプラスになっていることが分かった。また、可動翼、固定翼、平板のいずれもピッチ強制モーメントに大きな差はなく、翼なしを除き翼条件によるピッチ強制モーメントの違いはみられない。

図6より、サージ漂流力は、翼なし、平板、固定翼、可動翼の順に漂流力（波下側に流そうとする力）が小さくなっており、さらに可動翼では、船体動揺を伴わないにもかかわらず推進力（波上側に進めようとする力）が生じていることが分かった。また、固定翼でもはっきりとした波漂流力低減効果が得られており、さらに翼形状ではない単なる平板の場合でも漂流力低減効果が得られている。これは本システムの構造をよりシンプルにできる可能性を示している。

結局、翼条件による違いは、ただの平板も含めて波強制力にはその影響はほとんど生じておらず、一方波漂流力は翼形状や可動、固定の違いによって大きく異なることが改めて分かった。

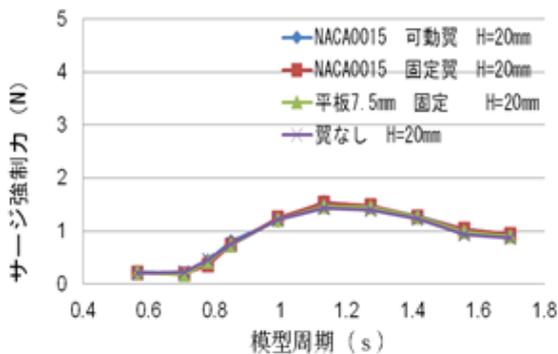


図3 サージ方向の波強制力

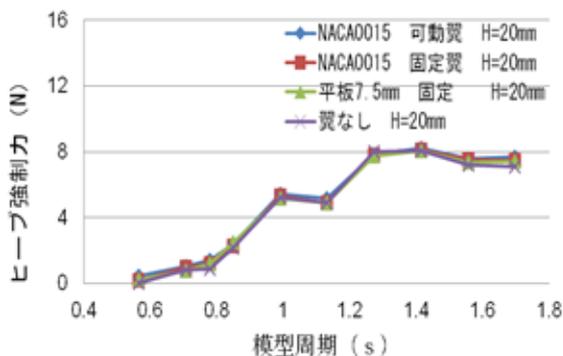


図4 ヒープ方向の波強制力

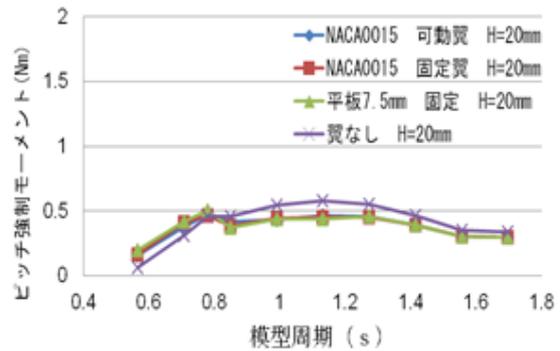


図5 ピッチ方向の波強制モーメント

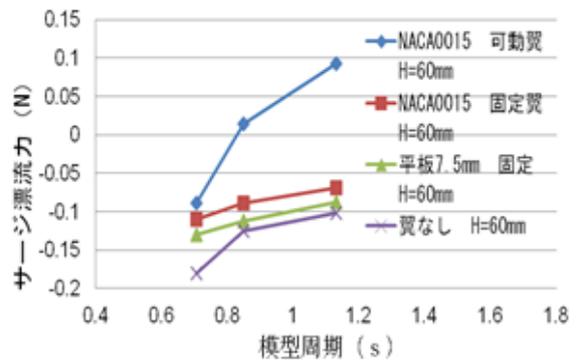


図6 サージ方向の波漂流力

## (2) 潮流力計測実験結果

翼条件、流速、および入射角度を変化させて計測した潮流力を無次元化してCd、Cmを求め値を比較した。その結果を図7～10に示す。

図7および図8より、サージ方向の荷重はスウェイ方向の荷重に比べて極めて小さい値であることがわかった。また図7より、機構部と翼に働くサージ方向の抗力は浮体のみが受ける抗力の半分前後の大きになることが確認できた。また、図9よりサージ方向の抗力係数の翼形状による違いはほとんどなかったが、平板では同じ翼弦長の翼に比べて抗力係数が少し大きくなることがわかった。一方、スウェイ方向とヨーモーメントに関しては、翼形状・平板による違いはほとんどないことが確認できた。

図10より、係留中心回りのヨーモーメントは、0°以外すべての角度で安定する方向にヨーモーメントが大きく働くことがわかった。また、機構部には浮体と比較して割合大きなヨーモーメントが働いていることも確認できた。

結局、潮流が斜めから入射した場合、翼等の減揺板を支える部材に比較的大きな抗力が生じることから、本システムの設置海域や設置方法によっては、生じる抗力を極力低減できるように、構造を工夫する必要があることが分かった。

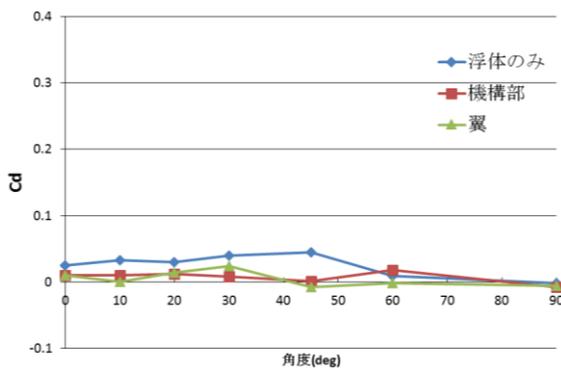


図7 入射角ごとのサージ方向のCdの比較

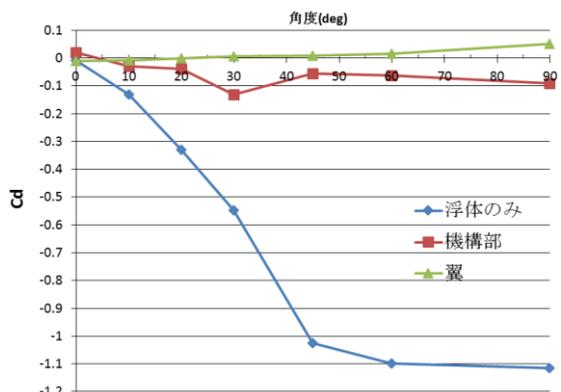


図8 入射角ごとのスウェイ方向のCdの比較

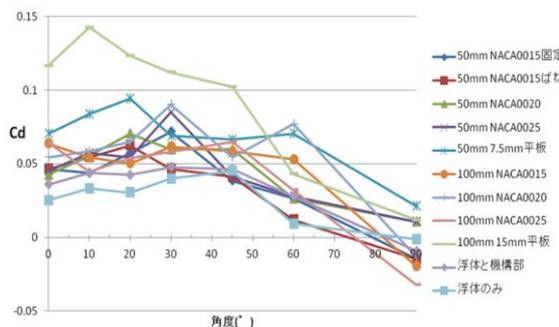


図9 翼形状の違いによるサージ方向のCdの比較

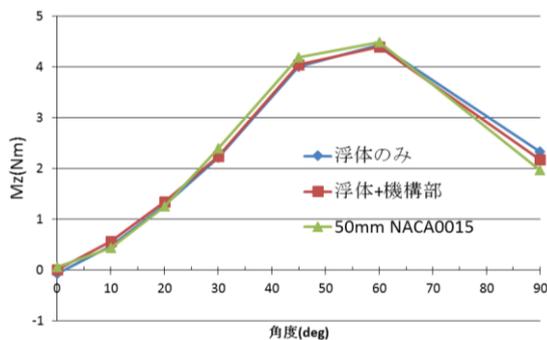


図10 係留点回りのヨーモーメントの比較 (流速 0.2m/s)

### (3) 静水中強制動揺実験結果

翼型板や平板などの減揺装置を付けた洋上風力発電模型の静水中強制動揺実験(ラデ

ィエーション実験)を行い、付加慣性モーメントと減衰力を求めた。その結果を図11~13に示す。また、ラディエーション係数を用いて求めたRAOを図14~15に示す。

図11より、付加慣性モーメントは、NACA0015, 50mm, 固定と、NACA0015, 50mm, 可動を比較すると、可動状態の方が低周期域で小さい値を取ることが分かった。

図12より、翼弦長の大きい翼型板は長周期域における減衰効果が高いことがわかった。また、翼面積(板面積)や投影面積が等しい平板と翼型板とでは、付加慣性モーメント及び減衰力共にほとんど違いは見られないことがわかった。

図13より、今回調べた範囲では、減衰力は全体的に造波減衰の影響は小さく、ほとんどが粘性減衰力である。つまり減揺板によりピッチ動揺が低減する効果は粘性減衰が主であることが分かった。これは、減揺板の取り付け位置が深いため、減揺板の形状や動きの違いが造波減衰力に与える影響が小さくなっているためと思われる。

結局、設置する海域に合わせて最適な翼弦長や振幅を選べばよい、そして条件によっては単純な平板や翼型板を固定した状態においても、粘性減衰力の効果によって高い波浪中動揺抑制効果が得られることが改めて分かった。

最後に、図14~15より、RAOの計算結果は過去の実験結果と傾向が似ている。このことから、本研究で仮定した運動方程式でかかる現象を説明できることが分かった。

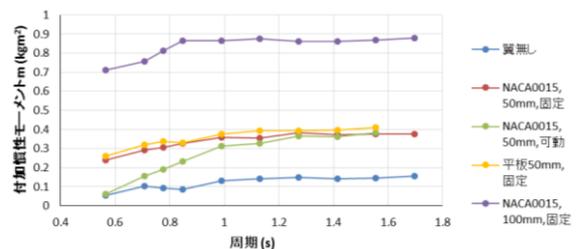


図11 付加慣性モーメント m (動揺振幅±10mm)

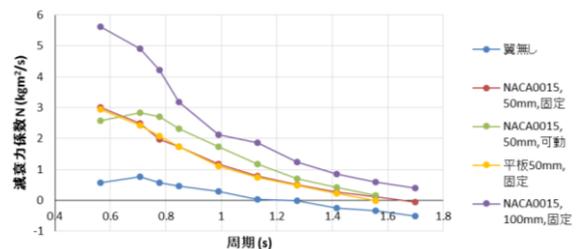


図12 減衰力係数 N (動揺振幅±10mm)

年 6 月 29 日、Rio de Janeiro、Brazil

6. 研究組織

(1) 研究代表者

砂原 俊之 (SUNAHARA SHUNJI)  
東海大学・海洋学部・教授  
研究者番号：40276788

(2) 研究分担者

寺尾 裕 (TERAO YUTAKA)  
東海大学・海洋学部・教授  
研究者番号：10138638

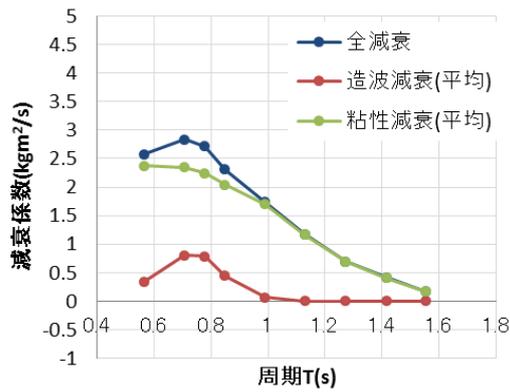


図 13 造波減衰と粘性減衰  
(NACA0015, 50mm, 可動 動揺振幅±10mm)

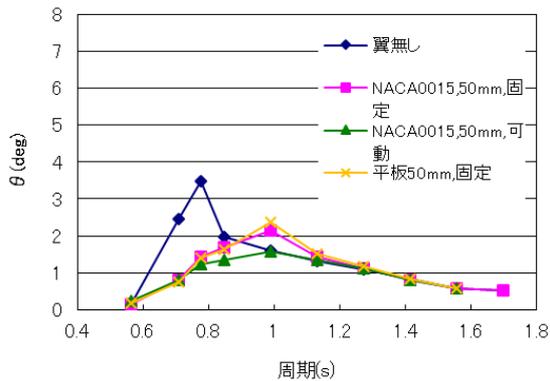


図 14 縦波中ピッチ運動の RAO (波高 2cm)

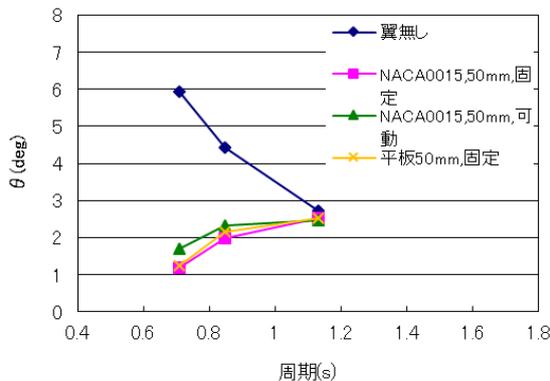


図 15 縦波中ピッチ運動の RAO (波高 4cm)

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 1 件)

- ① Y. Terao, S. Sunahara, APPLICATION OF A WAVE DEVOURING PROPULSION SYSTEM TO OCEAN ENGINEERING、Proceedings of OMAE2012, OMAE2012-83122、査読有、2012、1-8

[学会発表] (計 1 件)

- ① Y. Terao, S. Sunahara, APPLICATION OF A WAVE DEVOURING PROPULSION SYSTEM TO OCEAN ENGINEERING、OMAE2012、2012、2012