

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月18日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560837

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に関する研究

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・准教授

研究者番号：40276788

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、波と風の共存場で、水中翼が浮体動揺や係留力を大きく低減する効果を確認することができ、本システムの実現可能性を示すことができた。

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 effects of a hydrofoil on reducing the both the forces on the mooring system in waves in waves and winds were confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：浮体式洋上風力発電、沿岸域発電システム、波浪推進、波浪中動揺低減

1. 研究開始当初の背景

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、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。そこで、本研究で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する。

本研究では、まずシステム全体の概念設計を行った。次に縮尺模型を用いた水槽実験を行い、水中翼による波漂流力の低減効果およびピッチ運動の抑制効果を明らかにした。最後に本システムが係留された状態で風と波の共存場における動揺特性実験を行い、本システムの実現可能性を検証した。

3. 研究の方法

(1) 想定実機概念設計

図1に本システムの概念図を示す。本システムは波上に向かって進む波浪推進システムの利用して、1点係留方式を採用している。本システムは600kW級風車を搭載した小規模浮体であり、離島などの地域電力需要に対応することを前提としている。本装置は沿岸域での設置を想定しているため波浪条件も厳しくなく、建造コスト、発電コストの点でも有利である。

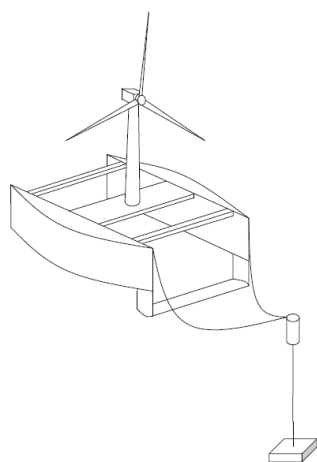


図1 ハイブリッド型洋上風力発電システムの概念図

本研究では、以上の条件を基にシステム全体の概念設計を行った。

(2) 波浪中動揺実験

想定実機の縮尺模型を使用して、規則波中の船体動揺と推進力(波漂流力)を計測する波浪中動揺実験を行った。

写真1に縮尺 1/50 模型を示す。波浪推進機構は、水面下の翼と連動して動くアームに取り付けた2本のばねの強さを変えることにより、翼のピッチ運動の復原力を変化させることができる。なお、実験の都合上、Hullの型深が実機と異なるが、風車の無い状態で実機と重心、喫水、ピッチ慣動半径を合わせている。

船体模型の係留方法は、図2に示すようにピッチフリー、ヨー拘束を目的とするため2点係留とした。係留の向きは模型船のセンターラインと同じ方向である。なお実験の都合上、重心位置から122mm高い位置を回転中心としている。また、波浪中船体運動を計測するために、模型船に3個のターゲットを取り付けている。

計測項目は波浪中のサージ、ヒーブ、ピッチ



写真1 想定実機の1/50縮尺模型

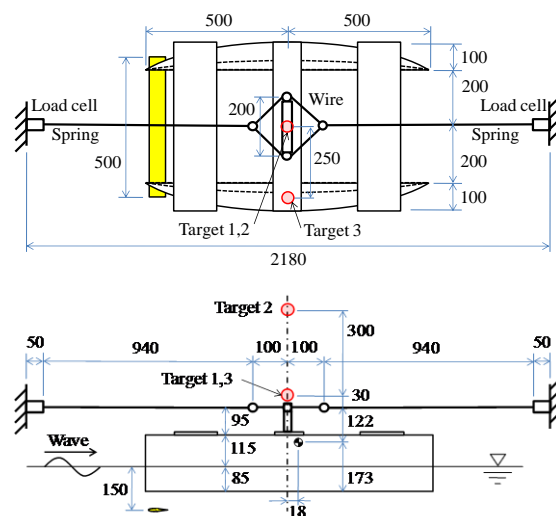


図2 波浪中動揺実験の配置図

チの各振幅とサージ方向の推進力（漂流力）である。サージ、ヒープ、ピッチの各変位は、模型船に取り付けた3個のターゲットの3次元変位を2台のCCDカメラで計測することにより得られる。推進力は分力計を用いて係留索に働く索張力を計測することにより得られる。

実験条件は、波浪推進機構部の水中翼については翼形状（NACA0015）、翼幅、深さを統一して、翼弦長50mm、100mmの2種類を比較した。また、機構部のばね強さは13N/m、22N/mの2種類を比較し、さらに固定翼の場合も計測した。波浪条件は、波浮港沖合の平均周期7s、平均波高1~1.5mを基に、波周期0.566~1.838s、波高は20mmで一定とした。

(3) 波と風の共存場における係留特性実験

実海域の海象により近い状態における本システムの成立可能性を検証するために、1点係留されたハイブリッド型洋上風力発電船模型に、想定海域の条件にあわせた様々な条件の波と風を当てた時の係留力や船体動揺を計測し、1点係留システムの基本的な成立可能性について調べた。

本実験では波浪中動揺実験に用いた船体部に、ローター部とナセル部がなめらかに回転する風車部を取り付けた模型（写真2参照）を使用した。水中翼は翼幅500mm、翼弦長50mm、翼形状NACA0015を使用した。波浪推進機構部のばね強さは可動翼の場合は13N/mの1種類とし、さらに固定翼の場合を用意した。

本実験は、写真3に示すように、1点係留した実験模型に正面から波と風を当てた状態で、1点係留の係留点に働く力および3次元船体運動を計測した。係留装置は実験模型の船首部2か所と係留点を2本の軽量のアルミパイプで繋いで1点係留とした。係留点は模型船首から前方471mm、高さは模型重心高さに合わせている。なお、係留点に球面すべり軸受けを取り付け、かつ船体部とアルミパイプとの接続部に柔らかい板ゴムを用いることで、実験模型のヒープ、ピッチ、ロール、ヨー各運動を妨げない構造となっている。送風装置は風速を無段階で調整できる業務用扇風機を水槽の波上側前面に3台配置し、さらに整風用枠を設置することで風の乱れをある程度抑えて一方向の風が模型風車部に当たるようにしている。係留力は係留点に取り付けた分力計で計測した。船体運動は模型船に取り付けた3個のターゲットの3次元変位を2台のCCDカメラで計測することにより得た。

本実験の風条件は波浮港沖の平均風速より1.03m/sで一定とし、波浪条件は波周期0.566~1.414s、波高は20mmで一定とした。

また、より実海域の海象に近づけた条件下

での動揺特性や係留特性を調べるために、様々な条件下での波と風が斜めに入射した場合に、実験模型が1点係留によって風下、波下側に振れ回る様子を確認するために、波と風を当てた状態で実験模型を20°傾けてから自由動揺させる振れ回りの実験も行った。この場合の実験条件は、(1)平均風速1.03m/s、波高30mm、波周期1.055s、(2)定格風速2.12m/s、波高40mm、波周期1.161s、(3)カットオフ風速3.54m/s、波高50mm、波周期1.161s、の3通りである。

なお、波条件は本来は風速に合わせて不規則波中での様子を計測すべきであるが、今回は波浮港沖の波浪分布を基にして、簡単に平均風速1.03m/sの場合は平均波周期1.055s、平均波高3cmの規則波を、定格風速2.12m/sの場合は3分の1有義周期1.161s、3分の1有義波高4cmの規則波を、カットオフ風速3.54m/sの場合は10分の1有義周期1.161s、10分の1有義波高5cmの規則波を発生させて計測を行った。

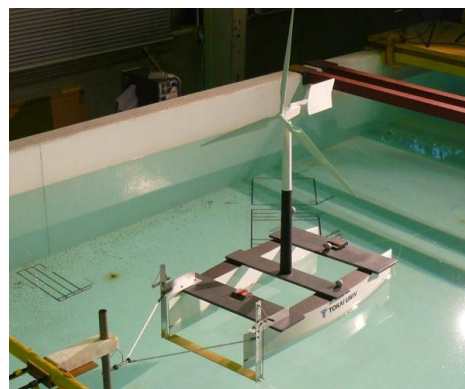


写真2 実験模型を1点係留した様子

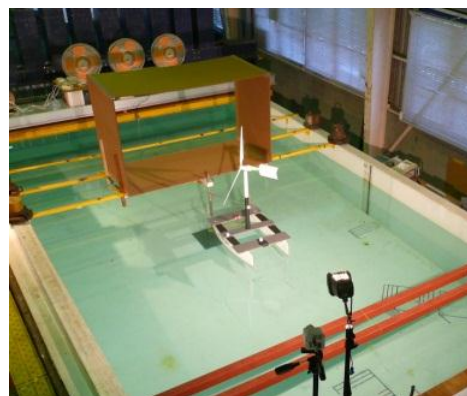


写真3 係留特性実験の様子

4. 研究成果

(1) 想定実機のプロトタイプ設計結果

本研究では、概念設計のための想定海域として、伊豆大島の南端に位置する波浮港沖を選んだ。伊豆大島は火山島であり、陸上には利用可能な平地の面積が少ない。一方、波浮

港沖の海上 50m における年平均風速は NEDO の局所風況マップより 7m/s 強であり、風力発電が十分可能である。波浮港沖に 600kW 級風車一基を設置した場合の年間発電量を試算した結果 172 万 kWh であり、この発電量は約 500 世帯分の電力消費量に相当し、伊豆大島の電力需要の約 10%を賄うことができる。

想定実機の船体形状は、1 点係留により船首は常に波上方向を向くので、向い波に対して波漂流力を受けにくいことと横揺れの復原性が高いことから、双胴船型とした。また、600kW 級風車を搭載するのに必要な大きさとして、全長 50m、全幅 30m とした。また、暴風時にデッキが冠水しないように、プラットフォーム部の乾舷 10m、喫水 4.25m、型深 14.25m とした。表 1 に想定実機の主要目を示す。

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

(2) 波浪中動揺実験結果

ヒープ、ピッチ、ロール運動を拘束しないでヨー運動を拘束する目的で 2 点係留した状態で、規則波を正面から当てた場合の模型に働く推進力 (波漂流力) の結果を図 3 に、ピッチ運動の振幅を図 4 に示す。

図 3 より、翼が無い場合はすべての周期でマイナスの推進力すなわち波漂流力が生じているが、一方、翼を設置すると、翼条件に関わらず、波漂流力に打ち勝って船体を前進させようとする推進力が幅広い周期で働いていることが分かる。推進力は可動翼のばね定数によって大きく変化しており、翼弦長に対して適切にばね定数が存在することが分かる。また、固定翼の場合でも小さいながら幅広い周期で推進力が生じている。

図 4 より、翼が無い場合はピッチ復原力の小さい双胴船型であるため、かなり大きくピッチ運動している。一方、翼を設置すると、ピッチ運動が大きく減衰されている。特に翼弦長が大きい場合や、ばね定数が大きい場合、さらに固定翼の場合はピッチ運動の減衰効果が高いことがうかがえる。

翼弦長の違いについて見てみると、可動翼

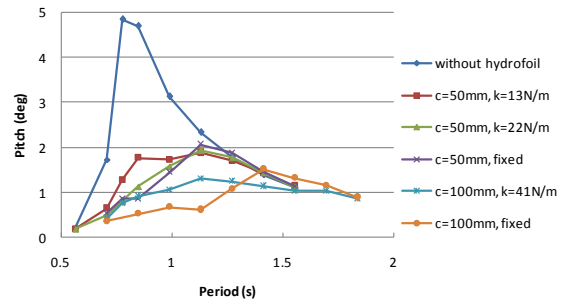


図 3 規則波中における推進力 (波漂流力)

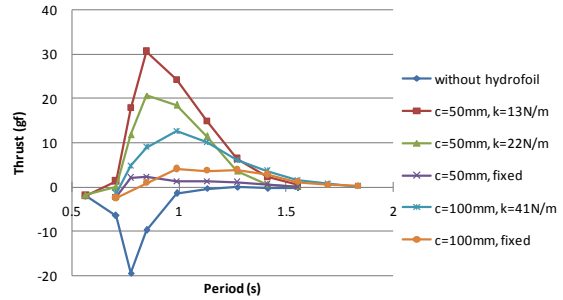


図 4 規則波中におけるピッチ運動の振幅

では翼弦長 50mm の方が強い推進力が生じているが、ピッチ運動の減衰効果は翼弦長 100mm の方が大きい。また、翼弦長が大きくなるにつれて、水中翼が有効である周期の範囲が長周期側にずれると共に、推進力が最大になるピーク周期も長くなっている。このことから、本システムを設置する海域の波浪条件に合わせて翼弦長を最適化する必要があることが分かる。

結局、浮体式洋上風力発電と波浪推進装置を組み合わせた結果、水中翼の存在により幅広い周期で係留力低減効果およびピッチ動揺減衰効果が得られることが分かった。また、固定翼でも小さいながら同様の効果が得られており、船体構造を簡略化できる可能性を示すことができた。

(3) 波と風の共存場における係留特性実験の結果

想定実機の係留方法を模して模型を 1 点係留した状態で、波と風を正面から当てた場合の係留力 (定常成分) の結果を図 5 に、係留力 (1 次強制力の振幅) の結果を図 6 に、ピッチ運動の振幅の結果を図 7 にそれぞれ示す。

図 5 より、係留力 (定常成分) は、翼なしの場合は常にプラスの係留力、すなわち波下側に引っ張られる力が働いているのに対し、可動翼ではほとんどの周期で推力が発生しており、大きく係留力 (定常成分) を減じていることが分かる。特に周期 0.778~1.131 秒では風荷重が加わっているにもかかわらず、マイナスの値を取っている。また固定翼

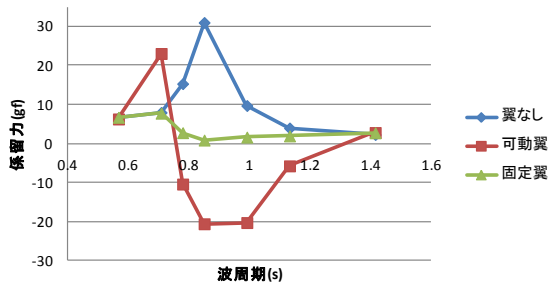


図5 波と風を正面から当てた場合の係留力(定常成分)

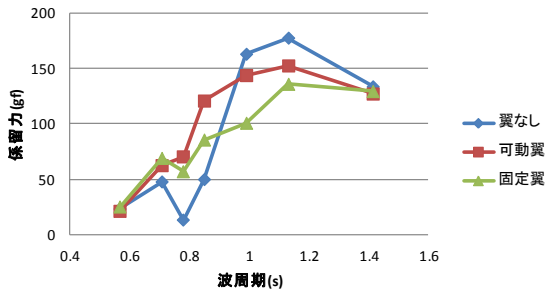


図6 波と風を正面から当てた場合の係留力(1次強制力の振幅)

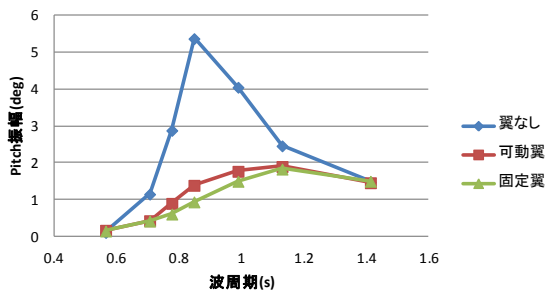


図7 波と風を正面から当てた場合のピッチ運動の振幅

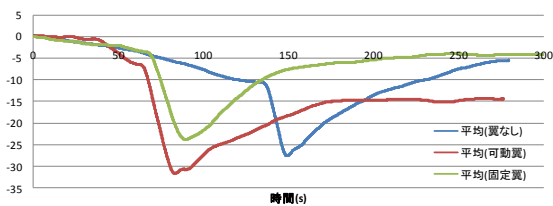


図8 波と風を斜めに当てた場合のヨー振り回り角度(平均風速)

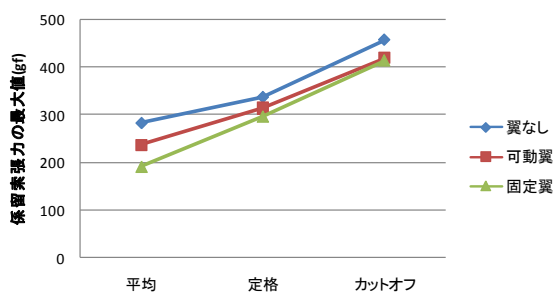


図9 係留索張力の最大値の比較

の場合でも可動翼ほどではないが、全周期にわたって係留力(定常成分)を大きく減じていることが分かる。

図6より、係留力(1次強制力の振幅)は、いずれの場合も波周期が大きくなるにつれて大きくなる様子が見られるが、可動翼や固定翼があるとその変化(波周期特性)が翼無しに比べてなだらかになっている様子が分かる。また固定翼は他の翼条件と比べて振幅が全体的に小さいことが分かる。特に可動翼の結果と比べると振幅がかなり小さくなっていることが分かる。これは模型前部に付いている固定翼によって波浪推進効果(推力の発生および減揺力の増加)のみならず入射波の消波効果(波高減衰効果)が出ているためであると推測される。

図7より、ピッチ運動の振幅は、翼なしの場合全体的に揺れが大きく、最大で約5.5度と激しく揺れていることが分かる。一方、可動翼や固定翼がある場合は全周期を通じて角度が大幅に小さくなっており、「波+風」の条件下でも水中翼の減揺効果が著しいことが分かった。また、可動翼と固定翼を比較すると、固定翼の方が減揺効果が高いことが分かった。

次に、1点係留された模型に波と風が斜めに当たった場合にどのようにヨー振り回り運動を生じ、どのように係留力が変化するかを調べた結果を示す。図8に平均風速、平均波高下でのヨー振り回り角度の変化を時系列で示す。グラフより模型を放した後は緩やかに風下、波下側に振り回っており、最終的には少し左舷側に角度がついた状態で安定することが分かった。この左舷側に少し振れた状態で安定する現象については、水槽上で起こした風が左舷側に少し斜めに吹いてしまっていたことが主な原因であると思われる。

最後に、各条件下における係留索張力(波下側に引っ張る力)の最大値を比較した結果を図9に示す。これは係留力(定常成分)の値と係留力(1次強制力の振幅)の値を足し合わせたものである。グラフより、平均、定格、カットオフいずれの条件下でも固定翼が最も小さい値を取っていることが分かる。このことから1点係留の方法や構造様式にもよるが、今回の実験で採用した係留方法のように比較的剛性の高い状態で係留する場合は固定翼が有利であることが予想される。

結局、本実験の結果、ハイブリッド発電船模型が1点係留により船体運動が一部拘束されている場合でも、水中翼の存在により係留力の低減効果とピッチ運動の減揺効果に大きな違いが無いことが分かった。また、可動翼と固定翼を比較した場合、可動翼は係留力(定常成分)の低減効果に優れており、固定翼はピッチ運動の減揺効果及び係留力(1

次強制力成分)の低減効果に優れていることが分かった。ハイブリッド発電船模型に波と風が斜めに当たる状態からの振れ回りの様子を計測した結果、いずれも風下、波下側に振れ回った後、一定の角度でヨー運動が収束し、調べた範囲では1点係留方式に特に大きな問題は見られなかった。

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3件)

- ① 砂原俊之、寺尾裕、波浪推進システムの海洋構造物への応用、日本船舶海洋工学会平成23年度春季講演会論文集、査読無、第12号、2011、367-370
- ② Y. Terao、S. Sunahara、Wave Devouring Propulsion And It's Application、フラッターの制御と利用に関する第1回シンポジウム論文集、査読有、2011、152-157
- ③ 砂原俊之、ハイブリッド型洋上風力発電船に関する研究、査読無、日本風力エネルギー学会誌、第35巻、第3号、2011、29-30

[学会発表] (計2件)

- ① 砂原俊之、寺尾裕、波浪推進システムの海洋構造物への応用、日本船舶海洋工学会平成23年度春季講演会、2011年5月19日、福岡県中小企業振興センター
- ② Y. Terao、S. Sunahara、Wave Devouring Propulsion And It's Application、フラッターの制御と利用に関する第1回シンポジウム、2011年9月16日、東京大学山上会館

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・准教授
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