

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420826

研究課題名(和文)複合係留による洋上風力発電浮体の性能向上に関する研究

研究課題名(英文) Study of Improvement of Floating type Wind Turbine Performance by using Hybrid Mooring

研究代表者

末吉 誠 (Sueyoshi, Makoto)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：80380533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：洋上風力発電に用いる浮体式風車の新しい係留方式に関して研究が行われた。従来型のチェーンだけを用いた係留は力の作用方向に制約があり、係留保持力を姿勢安定に有効に生かしていない面があった。そこで本研究では化学繊維索と中間ブイを組み合わせた複合係留方式を提案し、その有効性について確認を行った。

数値シミュレーションにより有効性を検討したある係留方式について、3Dプリンタを利用して縮小模型を製作し、大型の実験水槽内で風と波が併存する現実の運転状況に近い状況を与えて実験が行われた。その結果、提案する係留方式は有効に機能することが確認された。

研究成果の概要(英文)：A new type mooring system for floating wind turbines was studied. Popular chain mooring system has a weak point to stabilize the floating body by using mooring force. In this research, a hybrid system of synthetic fiber ropes and intermediate floating buoys was developed and confirmed the effectiveness.

A floating wind turbine with hybrid mooring system, which was checked through numerical simulation, was modeled by scale-down model composed with 3D printed structural, mechanical parts. Some model trials were carried out in a large experimental basin under some wind-wave conditions like real sea. As the result of the experimental study, the hybrid mooring system's effectiveness was confirmed.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：洋上風力発電 係留 複合係留 浮体式 風車 模型実験

### 1. 研究開始当初の背景

国内における浮体式洋上風力発電開発は着床式、浮体式それぞれについて行われていたものの、社会的合意を含む様々なコストの問題があり、特に浮体式については実用サイズの実証機建造にはほとんどの場合至っていなかった。しかし2011年の東日本大震災以降、再生可能エネルギー開発の機運が高まったことも追い風となり、環境省による椋島の100kW級スパーク式浮体(H24設置)を用いた洋上風力発電実証事業、続いて経済産業省による福島沖で実用規模の2~7MW級の風車を搭載した実用基規模の大型洋上風力発電浮体の実証機の建造が進められていた。

一方欧米においてはすでにイタリアにおいてはTLP形式の浮体を用いたBlueHプロジェクト、ノルウェーにおいてはスパーク型浮体に2MW級の風車を搭載したHyWindが2009年よりすでに運用試験が開始されていた。

またこれらの実機実証試験と並行して船舶海洋工学の研究分野では各種の浮体形式についてこれまでの海洋構造物に対する知見を基にして各種研究が進められ、いくつかの研究機関の合同によるそれらの係留・浮体様式間の特性について直接的な比較研究なども行われるまでになっていた(日本船舶海洋工学会講演会論文集 第16号論文番号2013S-GS5-13~15、二瓶ら)。

こういった背景のもと、研究されていたスパーク型、セミサブ型、TLP型といった従来型の浮体・係留技術に基づく洋上浮体式風力発電装置は浮体式風車独特の要素もあるものの、長年の実績を持った海洋での石油・ガス開発に使用されてきた技術を基盤として発展・開発されていた。一般に浮体式風力発電装置は油田・ガス田の掘削装置と同様にタワー状の構造を持つ背の高い構造物である。その搭載物である風車そのものは浮体重量に比してそれほど重量を占めるものではないが、頂部に巨大なタービンを備えるその特性から外力による転倒モーメントが在来海洋構造物より大きく、復原力を確保するために相応に浮体が巨大化する傾向があった。

本研究実施者はこれまでに博多湾に設置された浮体式洋上風力発電設備(環境省委託事業 博多湾浮体式海上風力発電の実証実験)の基本設計や係留設計に参加するとともに、水産養殖設備の水中挙動に関して数値シミュレーションと模型実験(JST-ASTEP[FS] 沖合用大型生簀の挙動・係留シミュレーション法の検証)などにも携わっていた。これらの経験より軽量・簡便な漁業養殖設備や観測ブイの係留設計思想なども参考にすることが可能であった。こういった経験を踏まえて本研究提案時に複合係留とその着力点・展張方向の工夫により係留の簡易化と同時に浮体の規

模縮小を企図する構成の着想に至ったものである。

### 2. 研究の目的

洋上風力発電において通常浮体はチェーンや繊維索などを用いて風浪に耐えるべく係留されている。現状ではこれらの各種索具は石油開発に用いられてきたものと類似の設置様式が多く使用されている。しかしながら洋上風力発電浮体は風を積極的に受け止めるその特性上係留への負荷が浮体規模に比して大きく、その費用が商業的実用化の妨げとなっている。本研究の目的は浮体側における索具の固定位置改善や、ブイ・シンカー、索素材の重量配分などを用いた複合係留を用いることで従来型の方式と比して有利な様式が成立しうることを力学的な机上解析と実験を通して確認し、費用を抑えた浮体式洋上風力発電設備の実現に資することである。

### 3. 研究の方法

(1) ランプドマス法による係留系や浮体の大変位・大変形を取り扱い可能な非線形数値シミュレーション手法を用いて、構想した複合係留洋上風力発電装置の成立性について運動学的な確認を行った。

(2) 構想した係留形式による浮体式風力発電装置について縮小模型を製作し、水槽において風波併存環境下での実験を行いその成立性を確認した。

### 4. 研究成果

複合係留を実装する風車はディフューザを装備した通常の水平軸型風車より風抵抗の大きな方式の風レンズ風車として、500kW級(直径約35m)の風車を搭載することとした。これは実施者の所属する研究機関で研究協力者らによって開発されている形式の風車であるため、既存の設計データが利用できることと地産地消のエネルギー供給構想の一助となることを企図し、比較的低風速でも発電量が得られる方式を選択したためである。そのため風車はシンプルな無制御のフリーヨーを前提とした構成で、中間ブイや化学繊維索などを想定した係留系を用いている。

構想した複合係留浮体風車について数値シミュレーションによる各種検討を行った。この数値シミュレーションによる初期検討段階ですでに係留索の着力点とその作用角度を適切にすることで同じ風抵抗を受ける風車を搭載しても大きく挙動が異なることが確認されていた。通常のチェーンによるカテナリー係留では着力点を単純に上方としても風上側と風下側の係留索の作用角度が張力に応じて自然に形成される角度としかなりえない都合上、傾斜を拘束する方向に有効に働かせることが難しいためである。そこで係留索固定点を重心より上方に大きくずらした上で、中間ブイを利用してスパーク

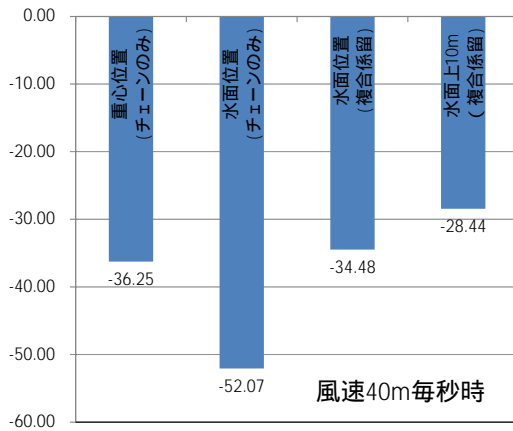


図1: スパー型浮体の係留索固定点と取り付け角度による定常傾斜角の差異

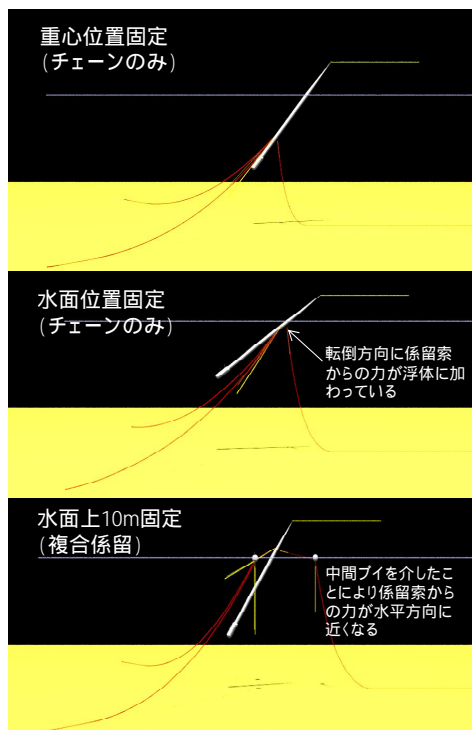


図2: スパー型浮体に対する大傾斜・大変位シミュレーションの例

となす角度を直角に近づけることで、強い張力が発生する風上側の張力を有効に傾斜の抑制に働かせることを企図した配置とするとその効果が大きいことが図1、2に示すように得られていた。

以上の知見から近年広く使用可能となった軽量高強度な化繊索の利用を前提として、浅い角度で重心より高い位置において浮体と中間ブイを結合する様式を今回開発対象とした。またコンパクトな係留範囲とすることを企図して、中間ブイはテンションスパーブイを採用することとした。

最終的に縮小模型を製作して実験を実施した浮体風車について数値シミュレーションを実施した際のスナップショットを図3に示す。シミュレーションで設定した条件下では波高10mの条件下でも安定的な挙動を示し、かつ風車が水面に接触するような事

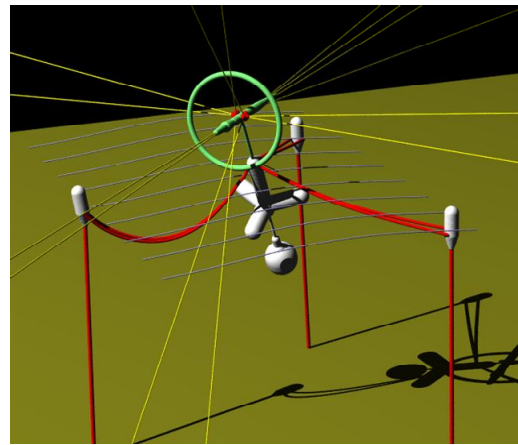


図3: 想定浮体風車の数値シミュレーション例

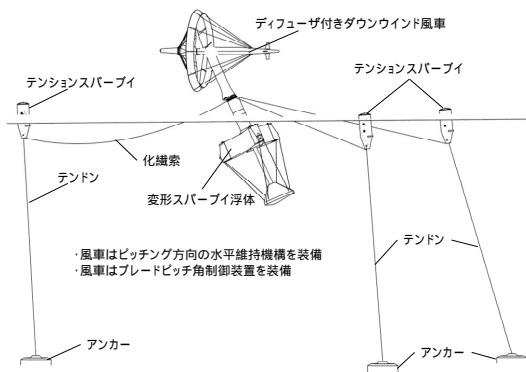


図4: 係留系と風車浮体の概要

態にも至らないことが確認された。また係留系が中間ブイを含むことで多体問題となり複雑になったことによる意図しない挙動が発生する可能性があった。しかしながら設定した範囲内では破滅的な発散運動や風車がダメージを受けるような大傾斜などは発生せず、かつ制御を全く行わなくても無動力のフリーヨーで風に風車が正対できることが確認された。図4に最終的に模型実験を行うこととした係留系を含む風車浮体の概要説明図を示す。浮体形状は喫水の縮小とヨー方向のダンピング増強などを企図して設計された変形スパー型浮体である。

同浮体風車について1/100スケールの模型を製作し、搭載した各種制御装置も含めた風波併存環境での実験を2回に渡り行った。シミュレーションで予想された通り、特段の制御を行わない状態でも風に風車は正対し、安定的に運転が可能なが確認された。実験の様子を撮影した写真を図5に、また光学測定により計測された浮体の波浪中応答関数を図6に示す。小スケールながらも高速で回転するブレードの様子が視認できるとともに風車が節水するような状況にないことが確認できる。

またこの実験では研究協力者らにより開発・提供された制御コントローラを模型にサーボモータなどのアクチュエータとともに組み込み、ブレードピッチ角の動的制御などによる運動抑制も試みた。これについては一定の効果は発揮したものの、大きな効果を得

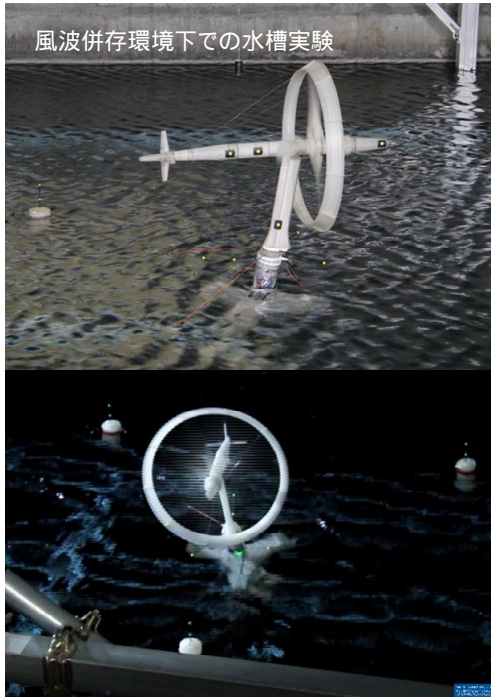


図5: 1/100スケール模型実験の様子

るまでには至っていない。図7にいくつかの制御設定値で行われたその運動角速度の計測例を示す。この理由は実験に必要な大型水槽設備を使用可能な期間などの制約があったため、制御パラメータの十分なチューニングが行えなかったことが主因と考えられている。将来的な追加実験・制御シミュレーション等でこの点については改良を進められるであろう。

本研究で得られた成果はすくなくとも500kW級程度の風車サイズにおいては、この中間パイと繊維索を使用する複合係留を採用した係留方式が、効果的にフリーヨーの水平軸風車に適用できることを示した。本方

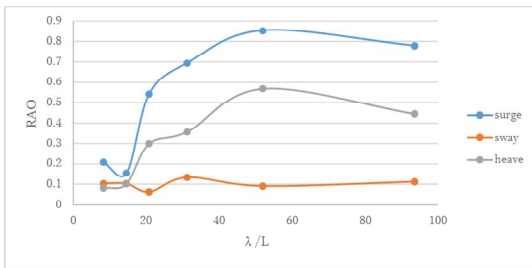


図6: 波浪中での試験浮体運動振幅に関する応答関数

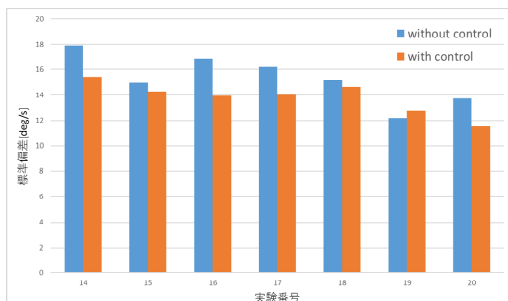


図7: 制御試験における計測されたピッチ角度の標準偏差の例

式は風抵抗が相対的に大きな増速用ディフューザ付き風車でも可能であったことが示されたので軽量・低抵抗な通常風車を搭載する場合さらに効率的な浮体サイズで実現できることが推測される。将来的には強い潮流環境下の影響やさらに大型化した場合についてのケーススタディを行うことでさらに実用化に際しての現実性・応用範囲が広がると考えられる。



図8: 小型模型専用に設計され3Dプリント部品で構成された風車主要機関部

また、縮小模型の製作過程において、3Dプリンタを随所に活用して三次元的な各種機構を再現する模型が開発・製作された。従来の船舶海洋工学分野ではこのような小スケールの模型ではコストの問題などもあり外形のみの再現にとどめるか、もしくは各所が省略されがちであった試験用模型の製作に関して、1/100においても実際に稼働する各種機構を備えたものが実現可能であることを実証した。係留用ターレット構造や風車ナセル内部の遊星ギヤによる増速装置付き発電装置、ヘリコプターと類似のサイクリック・コレクティブ両方のピッチコントロール機構や本体の軽量化構造の使用が可能となることが示された。この模型に置いて特に複雑な機構部であるブレードピッチ制御部、発電装置を駆動する遊星ギヤによる増速装置の写真を図8に示す。この機関部で風車より前方に配置される個所はほぼ全体がナセル直径の3cm以下に収まるように非常にコンパクトに設計・製作された。

また多数のセンサーやアクチュエータ、コントローラ類を結ぶ配線類は設計時にあらかじめ駆動軸内を含む内部に経路を確保す

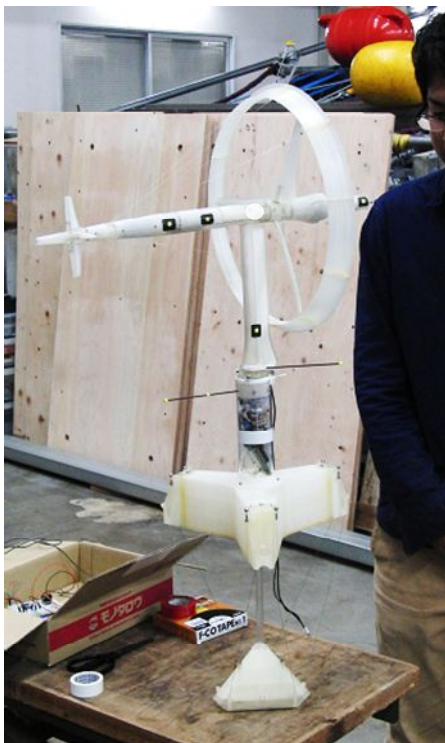


図9: 3Dプリンタを活用して製作された試験用縮小模型

ることですべて内装式とされ、小スケールの模型に置いて特に有害となる配線類に加わる流体力起因の有害乱動を発生しない仕上がりを実現している。外部への配線は浮体のスパー部から被覆多心線により水中へ導かれ十分な可動範囲を取った上で陸上の計測器・電源類に接続されている。この模型全体の外観を図9に示す。なお風車タワー基部から突出したロッドは光学計測を行う際に使用するマーカーを固定した CFRP 製のロッドである。

成果発表については共用設備である大型の試験水槽を利用した研究であるため、実験期間の制約などにより学会発表や論文誌での議論などに耐えられるだけの十分な量のデータが残念ながら現時点では得られていないが、今後自主的な継続研究を行うことで日本船舶海洋工学会などに関連の研究成果を研究協力者らと制御アルゴリズムなどと併せた形で発表し、議論を深めていく予定である。また研究過程で風車などの付随的な機構に特許性のある形態も考案され、出願を研究協力者らとともに検討中である。

現在、各種の再生可能エネルギー資源の中でエネルギーポテンシャルが非常に高く有望とされる浮体式洋上風力発電の実用・商用化においてもっとも大きなハードルとされている問題の一つがその係留設備、送電設備などを含む海上施工コストの高さである。本研究は新たな方式を試みることで、係留系と浮体のコンパクト化を図った方式について、その実現可能性を示した。国外においても浮体式風力発電装置に関して類似の風車浮体と係留構成の例は見当たらないため、日本発

で新しいタイプの効率的な浮体風車を発信していきける可能性も併せて示されたと考える。

#### 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 0件)

〔学会発表〕(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

特になし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

末吉 誠 (SUEYOSHI Makoto)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：80380533

##### (4) 研究協力者

朱 洪忠 (ZHU Hongzhong)

池田 亮 (IKEDA Ryou)

大屋 裕二 (OHYA Yuuji)

胡 長洪 (HU Changhong)