

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04860

研究課題名（和文）浮体式風力発電施設の低動揺化のための減揺プレートに関する研究

研究課題名（英文）Study on Damping Plates for Reducing Motions of Floating Offshore Wind Turbine

研究代表者

石田 茂資 (Ishida, Shigesuke)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授

研究者番号：30360712

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）：浮体式風車の実現に必要な低コストの波浪中動揺低減デバイスとして平板プレート構造の研究を行った。有望とされる3種類の形式の内、スパー型の下部を従来のバラストタンクから鉛直平板構造に置換した結果、復原力を損なわず波浪中動揺を低減できることを確認した。また、セミサブ型では、提案されているヒーププレート（水平板）の効果を検証した。さらにバージ型では、類似の減揺デバイスであるスカート（水平板）と特徴的なムーンプール（中央開口）の効果を検証した。その結果、逆に揺れが増大する場合があるため、海象条件によって設計を最適化する必要があることなどを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では有望とされる浮体形式について新しい減揺プレート構造を提案するとともに、他の型式で検討中のプレートの特性について重要な知見を得た。安定性が高く低コストの風車支持浮体の開発は、大量の洋上風力発電を可能にし、地球温暖化等の点で大きな意義を持つ。一般に浮体運動力学では、減揺プレートによりラディエーション流体力を増加させて動揺低減を図るが、提案した新コンセプトでは、浮体の一部を動きやすくする事で運動を抑制しており、浮体設計の新しい考え方を示した。また他の型式では、プレート装着により別の流体力が増加することで波浪中運動が逆に増加する事が明らかになり、設計法に関する重要な視点を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The research was on the effect of flat plate structures as low-cost motion reduction devices in waves, required to realize floating offshore wind turbines. Study was focused on three promising floater types. As a result of replacing the lower part of spar type floater with vertical flat plates from the conventional ballast tank, it was confirmed that the motion in waves can be reduced without impairing the stability. In a semisubmersible type floater, the effect of the proposed heave plates (horizontal plates) was verified. Furthermore, in the barge type, the effects of the skirt (also similar horizontal plate), and the characteristic moonpool (central opening) were examined. As a result, it was clarified that it is necessary to optimize the design according to the sea conditions because the motion reduction devices may increase the motion in waves on the contrary.

研究分野：洋上風力発電

キーワード：洋上風力発電 浮体式 復原性 波浪中動揺 減揺デバイス 減揺プレート ヒーププレート スパー

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初（2019年度）は、カーボンニュートラルへの気運が高まりつつ時期であり、研究期間の中間（2020年10月）には、日本が2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを菅総理（当時）が宣言している。

再生可能エネルギーの内、日本では太陽光発電の導入量が多いが、世界的には風力発電が多く、特に欧州では洋上風力発電の伸びが非常に高い。また、価格も低下傾向が明確である。商業ベースの洋上ウィンドファームは、全て海底に基礎を置く着床式である。しかし、着床式は水深50～60mが限界とされるため、今後のさらなる展開のためには、特に遠浅海岸の少ない我が国では、浮体によって風車を支持する浮体式洋上風力発電（以下 FOWT: Floating Offshore Wind Turbine）が必要となる。

欧州を中心に極めて多くの風車支持浮体が提案され、一部は大型風車を搭載して実証実験の段階である。我が国においても多額の国費を掛けた環境省実証事業（2010～2015年度）が行われ、福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業（2011～2020年度）が行われつつあったが、陸上の既存電源に比較すれば経済的に成立しない可能性が高く、なお研究開発の必要性が指摘されていた。

FOWTの支持浮体に対する要求は、大別して次の2つである。ひとつは、1,000kNにも達する風荷重が海面上100mに作用することから、この転倒モーメントに耐える大きな復原力（静的安定性）を持つことである。もうひとつは、波浪による動揺の抑制、特に傾斜（ピッチング、ローリング）の抑制である（動的安定性）。この2点を両立するため、開発中の支持浮体は大きく重くなりがちで、その重量は搭載物である風車の20倍以上のものが多く、小型・軽量化を図ることが課題である。

小型・軽量化は、係留など間接的にもコスト低減につながるため重要であり、新しい浮体技術が必要とされていた。

動的安定性の良い「揺れない浮体」は古くからの課題である。浮体を大型化せずに波浪中動揺を抑える手段として、減揺プレート（フィン）を設置する場合がある。たとえば中・大型船舶では、ビルジキール（図1）と呼ばれるフィンがほぼ全船に取り付けられており、横揺れの抑制に効果を上げている。ただし、前進時の動圧を利用しているため停船中の効果は限定的である。

また、石油・ガス開発リグでは、海流によって発生するカルマン渦に起因する水平面内の運動（VIM: Vortex Induced Motion）を防止するストレーキ（図2）が設置されるが、FOWTで問題となるピッチングなど傾斜方向の動揺を低減する効果はない。

これらのように実績のあるデバイスその他、FOWTでは図3のような大型の減揺プレート（ヒーププレート）も提案されているが、体系的な研究は行われておらず評価法や設計指針等は明らかになっていない状態であった。

2. 研究の目的

上記以外にも、低価格で設置できる減揺プレートの利用は様々な試みられている。一般にこのような付加物は、プレート端からの流れの剥離によって減衰力を発生させる。また、運動加速度に比例する流体力（付加質量）によって、浮体の質量が増加したような効果があるため、浮体動揺を低減させると考えられてきた。しかし、矩形平板の振動問題など要素研究はあるものの、浮体との干渉を含めた体系的なアプローチや流体现象の解明は必ずしも十分ではない。

本研究では、複雑な波浪場において浮体に設置された減揺プレート周りの流場、減揺効果発生メカニズム、効果の大きい形状や配置について解明し、新しい減揺プレートの提案や設計指針を得ることを目的としている。

3. 研究の方法

FOWTでは世界的に様々な浮体形式が提案されている。FOWTに特徴的な転倒モーメント（前述）に対抗する復原力の発生機構により、スパー型、セミサブ型、TLP型、バージ型に分類される（図4）。これらの中 TLP（Tension Leg Platform）は、係留力によって浮体を強制的に下方に引っ張り込んで安定させる方式であり、コストや地震対策に難点があるものの浮体動揺は原理的



図1 ビルジキール



図2
ストレーキ



図3 セミサブ型の例
出典：Principal Power

に小さい。そこで、他の3形式を研究対象とした。

減揺プレートとして、スパー型には本研究開始前から検討を初めていた新しい鉛直プレートの検討を発展させた。一方、セミサブ型では、図3に示したようなヒーププレートが既に提案されている。またバージ型でもビルジキール(図1)に類似の減揺プレート(スカートと呼ばれる)が提案されているため、これらの有無や大きさを変化させて効果を検証した。さらに、バージ型では、ムーンプールと呼ばれる中央開口を設けて減揺効果を狙っている。これはプレートによる減揺とは思想・メカニズムが異なるが、関連する事項として検討を行った。また、我が国で予定されている直近の商用洋上wind farmは、一部を除いてモノパイル基礎を用いた着床式である。モノパイル基礎は欧州で多くの実績があるが、台風のような厳しい海象に繰り返しさらされる条件での洗掘(基礎周囲の地盤が掘られる現象)やその防止工の検討は十分ではない。そこで、今後の洋上風力発電の発展に資する関連研究として、洗掘についても基礎的な検討を行った。

研究手法は水槽実験を中心とした。FOWT全体の模型を用いて波浪中動揺実験を行った他、一部については減揺プレート単体を強制動揺させる要素実験を行って基礎となる流体力を計測した。なお、数値計算として、研究分担者が開発を進めている三次元渦法や風力発電用オープンソースであるFASTを用いる予定であったが、開発の遅れや研究対象の浮体形式を増やしたことから、本研究では実施していない。

4. 研究成果

(1) スパー型

スパー型は、細長い形状を利用して、重心を浮心よりも十分に低くすることで復原力を確保している。そのため、浮体下部をバラスタタンクとし、稼動状態では海水を満たすことが一般的である。しかし、静的な釣り合いを考えた場合、この部分は浮力にも傾斜に対する復原力にも寄与しないため、水密構造である必要はなく自由に変更可能である。そこで、スパー下部を鉛直プレートとした構造を考案するとともに、スパー上部にフィンを取り付けた場合等について、波浪中動揺特性を調べ従来型と比較した(図5)。

結果の一部としてPitch運動の応答関数を図6に示す。ここで横軸は波周波数、縦軸は規則波中のPitch振幅で、波面傾斜の振幅で無次元化した値である。凡例のA、B、Cは図5の模型タイプに対応しており、Tは空気抵抗を模擬するための円盤付きの状態を表す。この図から、下部をプレート構造とした改良型の方が動揺が小さいことがわかる。AT型との比を取ると、ほぼ全周波数で10~20%の減少となった。

この原因は運動の特徴から説明できる。図7ではスパーの底からナセルまでを矢印で表現し、半周期の運動を比較した。ただし、横軸を引き延ばしている。Z=0が静止水面、Z=-1000mmが水槽底である。図から明らかなように、運動の回転中心は極めて低い位置にある。これは喫水の大きいスパーの特徴である。C3T型とAT型を比較すると、ナセルの運動はほとんど変わらないが、底部の運動が増加した結果C3T型のPitchが減少している。

また、図中の楕円は水粒子の軌跡である。スパーの運動

振幅はこれより大きく、また位相は水粒子の運動とほぼ一致している。このような状態では、フィン(図5)が有効に働き運動振幅が減少する結果が得られている。逆に、水粒子の振幅が浮体運動を上回るケースでは、フィンに対する相対流速の方向が逆になるため、フィンによって浮体

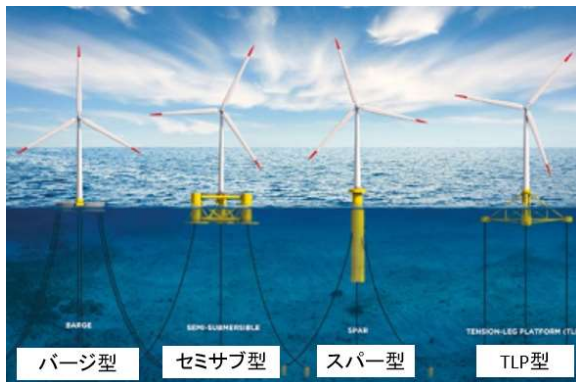


図4 FOWTの分類 出典: NEDO

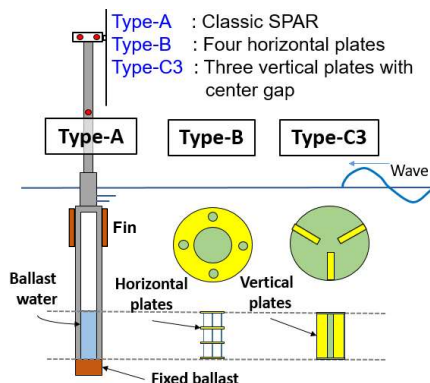


図5 スパー模型(一部)

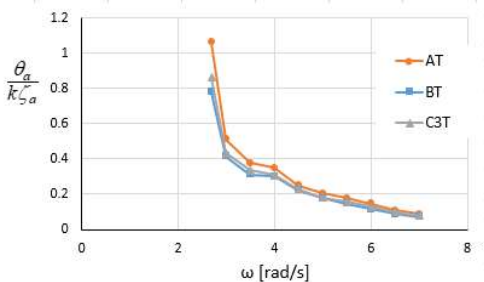


図6 Pitch 応答関数

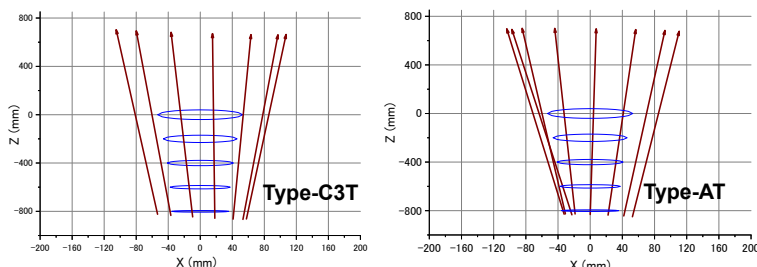


図7 半周期の間の運動比較 ($\omega=2.7 \text{ rad/s}$, $dt=0.18\text{s}$)

運動が増加する結果となっている。

このように、提案した新コンセプトでは、浮体の一部を動きやすくする事で、風車にとって重要な傾斜運動を抑制しており、浮体設計の新しい考え方を示すことができた。また、フィンの効果は相対流速から説明できることがわかった。

(2) セミサブ型

セミサブ型は、水線面積を小さくすることで波浪荷重を軽減し、かつ Heave 固有周期を大きくしている。また、カラムを広く配置することで傾斜に対する復原力を確保する形式である。多くの種類のうち、比較の実用に近いとされている形式で特徴となっているヒーププレートに着目し(図8)、波浪中動揺を比較した。結果の一例を図6と同様の形式で図9に示す。ここで P0、PS、PL は、それぞれプレート無しの場合、小さいプレートの場合、標準プレートの場合である。

波周期が Pitch 固有周期に近い荒天時 ($\omega=2.7 \text{ rad/s}$) では、ヒーププレートの効果で Pitch が小さくなり、安全性を高めている。しかし、他の波周期範囲では逆の結果である。このような発生頻度が高い波浪条件では、揺れの角度は小さいものの疲労の点で注意が必要である。FOWT の安全評価では DLC (Design Load Case、波、風、



図8 セミサブ型のヒーププレート変化

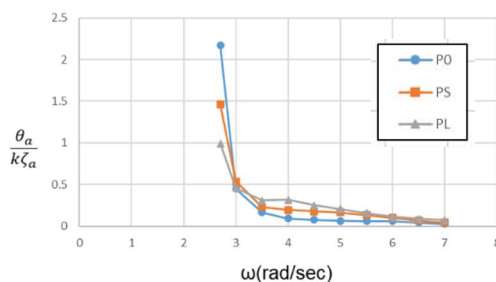


図9 Pitch 応答関数

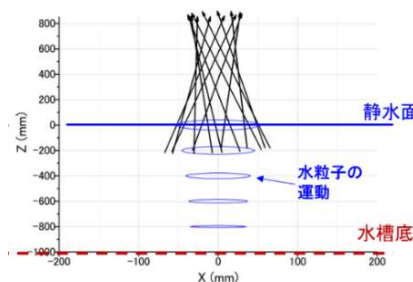


図10 1周期の運動 ($\omega=2.7 \text{ rad/s}$)

流れ、及び風車の稼動状態の組合せ) が用いられ、特に荒天時の損傷の有無が重視される。しかし、本研究の結果から、設置海域の通常海象にも十分考慮した減揺プレート設計の必要性が示された。

なお、図10はこのセミサブ浮体の運動を表したものであるが、図7に示したスパー型とは大きく異なっており、排水量が集中している水面付近の水平運動が大きく、回転中心は水面上にあることがわかる。また、プレートによる Pitch 運動の増減は、やはりプレートに当たる波粒子の相対速度で説明することができた。

(3) バージ型

バージ型は、構造が単純で製作しやすいが、水面付近の体積が大きく水平に広がることから、波浪荷重が大きいばかりでなく、Heave や Pitch の固有周期を波周期の範囲から離す事が難しく、その結果波浪との同調が問題となる。このため図11の形式では、スカートと呼ばれるフィンとムーンプール(別名ダンピングプール)と呼ばれる開口によって動揺を抑制できるとしている。

そこでスカートについて、セミサブ型と同様に大(図12のSTDT)、小(SHT)、無し(SNT)の3種類に変化させて効果を検証した。なお、ムーンプールは、内部の水が入射波と異なる動きをすることで減揺効果があるとされているが、この検討結果は省略する。

図9と同様に Pitch 応答関数を図12に示す。このように、バージ型ではスカートの減揺効果は広い周波数範囲で見られた。ただし、セミサブ型と同様に高い波周波数では逆転している。今後風車や浮体が大型化するにつれて、遭遇する波周波数は相対的に高くなるため、やはり疲労強度の面から注意する必要がある。

(4) まとめ

洋上風力発電に用いられる風車支持浮体の安定性を低コストで確保するためのデバイスとしてプレート(フィン)を付加することが行われる。これは古くから試みられ、また直感的に分かりやすい手法であるが、当然ながら浮体との組み合わせによって効果は異なる。本研究では、スパー型のバラストタンク部をプレート構造とし動きやすくする事で逆に動揺を低減できることや、波周波数によってプレートがセミサブ型の運動を増加させること等を示すことができた。また、そのメカニズムも概ね明らかにすることができた。これらの結果は、浮体付加物の設計における指針として有効に活用できるものと考えられる。

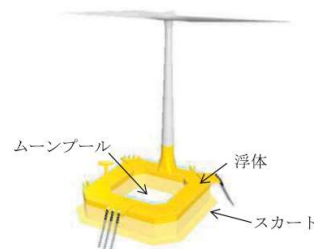


図11 Barge型 出典: NEDO

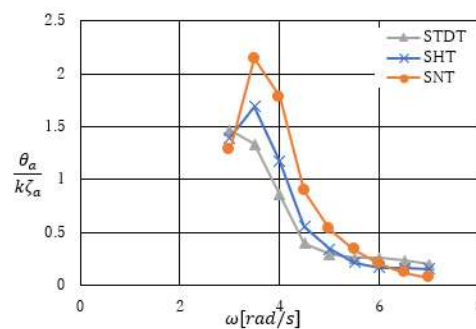


図12 Pitch 応答関数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yutaka Okamoto, Shuichi Nagata, Yasutaka Imai, Hideyuki Niizato	4. 巻 1
2. 論文標題 Application of vortex method using fluid velocity and vorticity as unknown variables to motion analysis of a floating body in waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference 2020	6. 最初と最後の頁 1851-1858
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Ishida and Y. Imai	4. 巻 1
2. 論文標題 New Spar Design for Floating Offshore Wind Turbine with Damping Plates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. Int'l Conf. on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 1 6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石田茂資
2. 発表標題 風力発電用スパー型浮体の運動特性
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石田茂資
2. 発表標題 洋上風力発電の現状と今後の展望
3. 学会等名 第25回動力・エネルギー技術シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田茂資
2. 発表標題 洋上風力発電の国内状況と浮体式基礎の動向
3. 学会等名 第16回再生可能エネルギー展示会オンラインフォーラム（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

佐賀大学 海洋エネルギー研究所 洋上風力エネルギー分野の研究 https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/research/ioes_present_study/offshore_wind_energy_present_study

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	永田 修一 (Nagata Shuichi) (30404205)	佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・特任教授 (17201)	
研究分担者	今井 康貴 (Imai Yasutaka) (90284231)	佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・准教授 (17201)	
研究分担者	村上 天元 (Murakami Tengen) (90611278)	佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・准教授 (17201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------