

機関番号：12601
研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2008～2010
課題番号：20360199
研究課題名（和文） 風車と浮体の相互作用を考慮した振動予測・制御システムの開発と実験による検証
研究課題名（英文） Dynamic response prediction of floating wind turbine considering the coupling of the floater and the wind turbine, and its verification by measurement
研究代表者 石原 孟（ISHIHARA TAKESHI） 東京大学・大学院工学系研究科・教授 研究者番号：20323511

研究成果の概要（和文）：浮体式洋上風力発電システムを対象に、浮体と風車の連成振動を考慮した応答予測モデルを開発するとともに浮体の係留を含む構造物の大変形を考慮できる新しい解析モデルを提案し、風力発電設備用浮体の波浪応答予測システムを開発した。また、風車の回転と制御を考慮した風車応答予測システムを開発し、浮体の波浪予測モデルと合併させることにより、浮体式洋上風力発電設備の応答を求めることを可能にした。さらに、浮体式洋上風力発電所設計のために日本全国任意地点において設計波高および設計風速を求める手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：A finite element model is developed for dynamic response prediction of floating offshore wind turbine systems considering the coupling of wind turbine, floater and mooring system. In order to estimate the motion of the system during the operation, the model which can consider the rotation of the wind turbine rotor and the control of the wind turbine is also developed. For the design of the floating offshore wind farm, a assessment methods of the design wind speed and design wave are proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2009 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2010 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：構造工学、地震工学、維持管理工学、風工学

1. 研究開始当初の背景

近年、新エネルギーの導入促進により風力発電設備がかなりのスピードで増えており、新たな社会基盤設備として認知されるようになってきている。平成 19 年度末にわが国の風力発電の設備容量は 150 万 kW、1300 基の風

車が全国各地に建設され、国内における風力発電産業も形成されつつある。2010 年までに 300 万 kW の政府目標を実現するために、今後も日本各地に大規模なウィンドファームが建設されると予想される。

従来、風力発電は陸上を対象としてきた。

しかし、風力発電設備の陸上での設置場所の条件として、安定的な風に恵まれていることはもちろんのこと、設置場所への搬入路や送電線の確保が必要である。地形の複雑な日本にとって、陸上は既に適地不足が指摘され、国立公園内への立地を許可するよう要望も出ており、陸上での風力発電の開発には限界があると指摘されている。風力発電の開発が世界で最も進んでいる欧州についても当てはまり、水深の浅い欧州では既に着底式洋上風力発電の開発が始まっている。その設置可能水深は0~50mという制限がある。沿岸数kmで急激に水深が増加する海域が多い日本で今後風力発電を拡大するには、浮体式洋上風力発電を推進することが重要な要因となると考えられる。

2. 研究の目的

浮体の技術は石油開発分野での経験から確立されたとみられているが、この技術は水深数百~数千メートルでの太い浮体構造に適用され、人間の常駐や事故時の環境への多大な影響を考慮したものであり、浮体に搭載する風車の性能と動的な特性に対応できないのが現状である。また、洋上風力発電は海洋の平均風速が陸上の値を上回るため、発電量が増加する一方、陸上の風力発電設備と比べた場合に、浮体・係留策のコストを加える必要がある。発電事業の事業性を損なわないように、風車性能と動的特性を考慮する安価な浮体の開発が求められる。そのために、合理的な浮体基礎構造の最適化が重要であり、浮体動揺、構造強度および風車の挙動などを評価できるツールの開発と予測精度の向上が不可欠である。そこで本研究では、風車と浮体の連成振動を考慮した応答予測モデルの開発を行うとともに、風車の回転や係留索などを含む構造物の大変形を考慮できる風・波浪応答予測モデルの開発を行い、水槽実験により開発したモデルの検証を行う。また、浮体式洋上風力発電所の設計のために日本全国の任意地点において設計風速と設計波浪を求める手法を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、浮体式洋上風力発電設備の応答予測システムを開発し、洋上風力発電設備の浮体の最適化を目標として、以下に示す研究を行う。

(1) 風車と浮体の連成振動を考慮した応答予測モデルの開発

一般に利用されている浮体の応答予測モデルは石油開発浮体に適用する手法であるため、太い部材の浮体に対応しているため、流体粘性による非線形減衰を無視でき、浮体を剛体と仮定し周波数領域で応答関数を求め、浮体の応答を算出する。しかし、このよ

うな近似手法はコスト削減のために浮体を軽量化することにより浮体の部材が細くなり、非線形流体粘性による減衰が大きくなる。浮体の動揺は低減され、弾性変形も顕著になる。また、浅い水深においては波の非線形性が顕著になり、周波数領域の解析において波の非線形に含まれる短周期は浮体の弾性変形による高次モードとの共振を説明できず、浮体の応答予測精度が低下する恐れがある。

本研究ではまず、土木工学の分野において主に杭に作用する流体力の算定法として用いられてきたモリソン式を適用する方法を採用することにより、潮流力も取り入れ、時間領域で浮体・係留の振動を評価できる波浪応答予測モデルを開発する。この方法は水粒子の相対速度を表すことができるため、時間領域で流体粘性による非線形減衰を厳密に評価することが可能になる。

本研究で開発された予測モデルを検証するため、波浪荷重が小さく、建設コストが低く抑えられる可能性が高い構造形式であり、海象条件が厳しい沖合での設置にも適している軽量セミサブ型浮体を対象とし、剛体模型及び弾性体模型の水槽実験を実施し、浮体の応答特性を明らかにすると共に、波浪応答予測モデルの妥当性と予測精度を検証する。具体的には、軽量セミサブ型浮体の剛体模型を作成し、様々な波高の規則波に対して水槽実験を実施するとともに、流体粘性による非線形効果を明らかにする。同時に3次元構造の軽量セミサブ型浮体モデルを作成し、応答予測を行い、自由振動実験の結果と比較することにより浮体の解析モデルの精度を検証する。また、剛体模型の水槽実験から得られた動揺量と比較することにより、モリソン式の流体力の解析モデルを評価する。

更に、浮体の弾性挙動の予測精度を評価するために、浮体の剛性・重量及び浮力を考慮する上で弾性模型を作成し、水槽実験から得られた動揺量と浮体部材の動歪みから部材における応力を算定し、解析から得られた値と比較することにより弾性体浮体の動揺量と弾性変形の予測精度を検証する。更に、剛体モデルの比較することにより浮体の弾性挙動を明らかにする。

(2) 風車の回転や係留索などを含む構造物の大変形を考慮できる風・波浪応答予測モデルの開発

風車の風応答を精度よく予測するために、ロータを回転できる風応答予測モデルを開発する必要がある。本研究では、アップデートラグランジェ法を採用し、増分計算を行いながら、要素の局所座標へ変換を行い、反復法により次の平衡状態を求める。これによりロータの回転を考慮できる風応答予測モデルを開発する。また、ロータ軸にバネ要素を取り入れ、バネ要素の剛性と減衰を調整する

ことにより、ロータの回転特性を再現する。また、風車稼動時においては、風車のヨー制御機構、ブレードのピッチ制御機構、発電に関わるフィードバック制御機構を再現するために、タワー頂部でのバネ要素の導入によるヨー制御機構のモデル化、ブレードのピッチ制御機構のモデル化を行い、反復法により非線形の制御効果及び発電出力のフィードバック制御を実施しながら、時間領域で風車の応答を求める。開発した風車の風応答予測モデルと本研究で開発された波浪応答予測モデルを合併させることにより、浮体式洋上風力発電設備の応答を求めることが可能になる。

また、浮体式洋上風力発電設備の風車と浮体の全体モデルを作成し、風波動揺実験の結果と比較することにより、浮体に及ぼす風車からの空力減衰の効果、風車と浮体との連成効果及び浮体式洋上風力発電設備の応答特性を明らかにすると共に、浮体式洋上風力発電設備の応答予測モデルの精度検証を行う。

(3) 日本全国任意地点における設計風速と設計波浪の算定手法の開発

陸上の構造物に対しては、過去の気象官署における観測データから最大風速の 50 年再現期待値を推定することが可能であるが、洋上に建設される風力発電所に対しては信頼できる設計風速を求める手法がない。さらに、浮体式洋上風力発電所は波浪により大きな動揺を示すため、設計波高を求めることも重要である。

本研究では台風モンテカルロシミュレーションにより 1 万年分の台風を発生させるとともに、モンテカルロシミュレーションのばらつきを考慮して最大風速の 50 年再現期待値を求める手法を提案する。また、沿岸の気象官署における観測データを用いて検証を行う。台風のモンテカルロシミュレーションにより発生させた地表・海表面上の風速を境界条件として波浪シミュレーションを行い、波浪の 50 年再現期待値を求め、設計波高を推定する。

4. 研究成果

(1) 風車と浮体の連成振動を考慮した応答予測モデルの開発

浮体式洋上風力発電システムを対象に、時間領域において浮体と風車の連成振動を考慮した応答予測モデルを開発し、風水洞実験結果と比較することにより、本モデルの予測精度を明らかにした。また、非線形抗力による減衰効果、風車と浮体との相互作用、浮体の弾性変形と波の非線形性が浮体の動的応答に与える影響を明らかにした。得られた結論を以下に示す。

①モリソン式は水平方向の動揺量を精度よく予測できるが、垂直コラムを有する浮体の

鉛直動揺量を過大に評価することを明らかにした。一方、Srinivasan らの水力減衰比に関する実験値を採用することにより鉛直動揺量を精度よく予測することを可能にした。②暴風時には水力減衰力が支配的であるため空力減衰による低減効果が小さいが、発電時において風車の回転による空力減衰効果は浮体の動揺を低減させることが分かった。③弾性応答解析法により予測された動的荷重は実験の結果とよく一致するが、弾性変形を無視した二段階解法により予測された動的荷重は弾性挙動による共振が発生する領域において過小評価されることが分かった。④波の非線形性が顕著になる 50m の水深では浮体の弾性モードと非線形波の高次成分と共振し、浮体の動的荷重は、浮体構造を剛体と仮定した時の動的荷重に比べ、1.8 倍に大きくなることを明らかにした。

(2) 風車の回転や係留索などを含む構造物の大変形を考慮できる風・波浪応答予測モデルの開発

風車の回転や係留索の挙動など的大変形を考慮できる応答予測モデルを開発するとともに、風車稼動時の応答を高精度に予測可能とするために風車のフィードバック制御機構をモデル化し、以下の結論を得た。

①アップデートラグランジェ法を採用した増分計算とトラス要素の局所座標へ変換を行うことにより係留応力の平衡状態を求め、厳しい波浪条件での非線形係留の大変形を予測することを可能にした。

②風車の回転を含む構造物の大変形を考慮できる振動方程式に取り入れることによる新しい解析モデルを提案した。

③風車稼動時においては、風車のヨー制御機構、ブレードのピッチ制御機構、発電に関わるフィードバック制御機構を再現するために、タワー頂部でのバネ要素の導入によるヨー制御機構のモデル化、ブレードのピッチ制御機構のモデル化を行い、反復法により非線形の制御効果及び発電出力のフィードバック制御を実施しながら、時間領域で風車の応答を求める手法を開発した。

④風荷重と波浪荷重が同時に作用した際の風車と浮体の相互作用を考慮した、振動特性を明らかにした。さらに、非線形波を考慮した応答予測を可能にするとともに、風車の制御機構を利用した浮体の動揺低減手法を提案した。

⑤軽量セミサブ型浮体を対象として、係留系を含めた全体の動的挙動を風水洞実験により計測し、波浪応答予測モデルの妥当性と予測精度を検証した。これにより、様々な波高の規則波に対して流体の粘性による非線形効果を明らかにするとともに、予測モデルによる応答予測と比較することにより、解析モデルの精度を検証した。

(3) 日本全国任意地点における設計風速と設計波浪の算定手法の開発

台風モンテカルロシミュレーションを行うとともにモンテカルロシミュレーションのばらつきを考慮して設計風速を評価する手法を提案するとともに、モンテカルロシミュレーションにより算定された風速を境界条件とする波浪シミュレーションを実施し、以下の結論を得た。

- ① 提案した手法を用いモンテカルロシミュレーションのばらつきを考慮することにより推定した気象官署における設計風速は、長期観測データから求めた設計風速と一致する。
- ② モンテカルロシミュレーションにより求めた風速のみを境界条件とした波浪シミュレーションは波高を過小評価するが、うねり成分を加えることにより台風時の波浪を精度よく推定することができる。またこの手法により求めた波浪の50年再現期待値は既存の指針と整合性のある値を示す。

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8件)

- ① 石原孟、ファミンフック、助川博之、浮体の弾性変形を考慮した動揺予測モデルの開発、第30回風力エネルギー利用シンポジウム、査読無、2008年、pp. 221-224
- ② 嶋田健司、助川博之、大山巧、宮川昌宏、難波治之、石原孟、洋上風力発電のためのセミサブ浮体構造の開発、第20回海洋工学シンポジウム、査読有、2008年
- ③ 福本幸成、池谷毅、安野浩一朗、大山巧、石原孟、鈴木英之、洋上風況の観測結果と洋上風力発電システムの研究開発状況について、第33回海洋開発シンポジウム、査読無、Vol. 24、2008年、pp. 1-6
- ④ ファミンフック、石原孟、セミサブ浮体式洋上風力発電システムの動的応答予測モデルの開発と実験による検証、土木学会論文集A、査読有、Vol. 65、No. 3、2009年、pp. 604-617
- ⑤ 石原孟、洋上風力発電、日本機械学会誌、査読有、Vol. 114、No. 11-9、2011、pp. 40-42
- ⑥ 石原孟、地理情報システムを利用した洋上風力賦存量の評価、電気評論、査読有、2010年、pp. 39-43
- ⑦ 石原孟、石井秀和：風車タワーに作用する発電時最大風荷重の予測、第21回風工学シンポジウム論文集、査読有、pp. 375-380、2010。
- ⑧ 山口敦、石原孟：台風シミュレーションと気象解析を利用した設計風速と階級別風速出現頻度推定手法の提案、第21回風工学シンポジウム論文集、査読有、

pp. 215-220、2010。

[学会発表] (計6件)

- ① T. Ishihara, A Numerical Study of The Dynamic Response of a Floating Offshore Wind Turbine System, Global Wind Power 2008, 2008年10月30日、北京
- ② T. Ishihara, M. B. Waris and H. Sukekawa, A study on influence of heave plate on dynamic response of floating offshore wind turbine system, 3rd EOW, 2009年9月15日、ストックホルム
- ③ A. YAMAGUCHI and T. ISHIHARA: An assessment of the external condition for offshore wind energy using a mesoscale simulation and a typhoon simulation, Proc of 3rd EOW, 2009年9月15日、ストックホルム
- ④ M. B. Waris and T. Ishihara, Influence of mooring force estimation on dynamic response of floating offshore wind turbine system, Renewable energy 2010, 2010年6月29日、横浜
- ⑤ H. Ishii and T. Ishihara: Numerical study of maximum wind load on wind turbine towers under operating conditions, Proc of CWE 2010, 295, pp. 1-8, 2010, チャペルヒル(アメリカ)
- ⑥ A. Yamaguchi, S. Oikawa and T. Ishihara, A Study of The Normal Turbulence Model in IEC61400-1, European Wind Energy Association Annual Event, 2011年3月、ブリュッセル

[図書] (計1件)

石原孟編、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010年版]、土木学会

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原孟 (ISHIHARA TAKESHI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：20323511

(2) 研究分担者

山口敦 (YAMAGUCHI ATSUSHI)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：00376500

(3) 連携研究者

藤野陽三 (YOZO FUJINO)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：20111560