

## 審査の結果の要旨

氏 名 サイド ムハマド ビラル ワリス アリイ

浮体式洋上風力発電システムの構造最適化を行うためには、風車・浮体・係留の連成振動を考慮した動的応答解析手法の確立は不可欠である。しかし、これまでに風車・浮体・係留の非線形性および相互作用を全て考慮した予測モデルが開発されておらず、数値解析による構造最適化には予測精度の面に問題があると言える。また従来石油開発用の浮体では、安全性の観点から大きな構造体がいわれているため、静水圧近似や浮体の動揺評価が安全側になるような線形係留モデルが用いられてきたが、風車用の浮体は経済性の観点から小さな構造体を用いる必要があるため、非静水圧の効果や係留の非線形性を考慮した精度の高い動揺解析が必要である。さらに、陸上の風力発電設備と異なり、浮体に設置される風車は浮体動揺の影響を受け、風車タワー基部に大きな荷重が発生することが知られているが、そのメカニズムには不明な点が多く、風車ロータの回転、浮体の動揺および係留の非線形挙動を同時に考慮した連成解析手法の開発は急務である。

そこで、本研究は、まず風車・浮体・係留の非線形性および相互作用を考慮した非線形 FEM モデルを開発し、非線形流体力、非静水圧の効果、係留の非線形性を考慮した浮体の動的応答予測を可能にしている。次に直径の異なるヒーププレートを用いた水槽実験およびカタナリー係留と地面の接触実験を実施し、本研究で開発した予測モデルを用いてヒーププレートが浮体動揺に与える影響やカタナリー係留と地面の接触効果を明らかにすると共に、実験結果と比較することにより、その予測精度を検証している。最後に、現在世界最大級の 5 M 風車モデルを用いた浮体式洋上風力発電システムを構築し、カタナリーおよびテンションレグ係留システムが浮体式洋上風力発電システムの動揺および風車タワー基部に作用する転倒モーメントに与える影響とそのメカニズムを明らかにしている。論文の構成ならびにその概要は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、国内外における洋上風力発電の現状並びに日本における浮体式洋上風力発電システムの必要性を述べるとともに、本論文の構成を記述している。

第 2 章では、浮体式洋上風力発電技術のレビューを行い、これまでに行われてきた浮体式洋上風力発電システムに関する研究開発から得られた結論と問題点を明らかにすると共に、本研究の目的を述べている。

第 3 章では、本研究で開発した予測モデルの予測精度を検証するための水槽実験が述べられている。直径の異なるヒーププレートを用いた水槽実験では、ヒーププレートが浮体動揺に与える影響を明らかにすると共に、サージ、ヒープおよびピッチ方向の応答計測を行った。その結果、サージ方向の応答は、ヒーププレートの影響をほとんど受けませんが、ヒープ方向の応答はプレート径が大きくなるに従い減少することが明らかにされた。またカタナリー係留と地面の接触実験では、地面の影響を受けるカタナリー係留の形状を明らかにすると共に、予測モデルの検証に必要な形状データを取得した。さらに、既往の予測モデルを用いて、サージ、ヒープおよびピッチ方向の動的応答予測を行い、その問題点を明らかにした。

第 4 章では、風車・浮体・係留の非線形性及び相互作用を全て考慮した非線形 FEM モデルを開発し、第 3 章で得られた実験結果と比較することにより、その予測精度を検証した。本研究で

開発した予測モデルでは、復元力に非静水圧、係留システムに非線形剛性および地面との接触効果を考慮すると共に、風車ロータの回転に伴う非線形空気力は翼素理論を用いて評価した。風車及び浮体を梁要素で、係留をトラス要素で離散化することにより浮体式洋上風力発電システムを完全連成系としてモデル化した。また、風車ロータの回転・係留の大変形に伴う幾何学非線形性の効果をニュートンラプソン法の反復計算で厳密に求めることにより、風車・浮体・係留の非線形応答予測モデルを確立した。

第5章では、ヒーププレートおよび係留システムが浮体式洋上風力発電システムの動的応答に与える影響が述べられている。ヒーププレートを用いることにより、浮体式洋上風力発電システムにおけるヒープ方向の共振点が長周期側に移動し、短周期側の振動振幅が減少することが分かった。また静水圧近似を用いたヒープ方向の動揺予測は共振点以後過小評価されるが、非静水圧を用いた予測値は水槽実験の結果とよく一致した。またカテナリー係留の線形化はサージ方向の動揺の過大評価をもたらすが、テンションレグ係留の場合にはその影響が小さい。これはテンションレグ係留の張力変動が相対的に小さいことによるものである。一方、張力変動に着目する場合にはいずれの係留システムにおいても、線形モデルによる張力変動が過小評価されていることが分かった。更に、波向きや係留システムが浮体動揺に与える影響も調べた。その結果、サージ、スウェイおよびヨー方向の動揺はカテナリーとテンションレグ係留とも同じオーダーであるが、ヒープ、ピッチおよびロール方向の動揺についてはテンションレグ係留の場合にはほぼ0であることを明らかにした。

第6章では、現在世界最大級の5M風車モデルを用いた浮体式洋上風力発電システムを構築し、環境条件および浮体の動揺が風車タワー基部の荷重に与える影響を明らかにした。風車タワー基部では波浪荷重が支配的であるのに対して、風車タワー頂部では風荷重が支配的である。またカテナリー係留に比べ、テンションレグ係留は浮体のピッチ運動を制限したことにより、風車タワー基部に作用する荷重が大きく低減した。さらに従来の簡易モデルを用いて、浮体の動揺が風車タワー基部の荷重に与える影響を調べ、その問題点を明らかにした。テンションレグ係留の場合には簡易モデルの予測結果が概ね妥当であるが、一方、カテナリー係留の場合には簡易モデルによる風車タワー基部の転倒モーメントが過小に評価されることを明らかにした。

第7章は結論であり、第6章までに得られた結論をまとめるとともに、今後の課題に言及している。

以上のように、本論文ではまず風車・浮体・係留の非線形性および相互作用を考慮した非線形FEMプログラムを開発し、非線形流体力、非静水圧の効果、係留の非線形性を考慮した浮体の動的応答予測を可能にしている。またヒーププレートを用いた水槽実験を実施し、本研究で開発した予測プログラムによりヒーププレートが浮体動揺に与える影響を明らかにすると共に、実験結果と比較することにより、本予測手法が高い予測精度を有することを立証した。最後に、現在世界最大級の5M風車モデルを用いた浮体式洋上風力発電システムを構築し、カテナリーおよびテンションレグ係留システムが浮体式風力発電システムの動揺および風車タワー基部に作用する転倒モーメントに与える影響とそのメカニズムを明らかにした。

これらの研究成果は、浮体式洋上風力発電システムの合理的構造に対する理論的基盤を与え、浮体式洋上風力発電システムの実現に貢献するものである。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認める。