

称号及び氏名 博士（工学） 山本 裕介

学位授与の日付 2023年3月31日

論文名 「高精度洋上風況観測を可能とする浮体式プラットフォームの
低動揺化に関する研究」

論文審査委員 主査 片山 徹
副査 馬場 信弘
副査 橋本 博公
副査 谷口 友基（（国研）海上・港湾・航空技術研究所）

論文要旨

四方を海に囲まれている我が国の洋上風力発電ポテンシャルは、離岸距離 10 km かつ水深 50 m 以下の海域では約 2.1 億 kW であるが、離岸距離 30 km、水深 200 m 以下の海域にまで広げれば約 12 億 kW と高く、カーボンニュートラルなエネルギーとして注目されている。これまでに検討され設置されてきた洋上風力発電施設は主として着底式であったが、水深が 50 m を超える海域では着底式施設の設置コストが増大するため浮体式が検討・試設計されており、近い将来の実用化が望まれている。

洋上風力発電所の計画段階における発電量予測および風車設計・設置にかかわる評価項目には、平均風速、風速出現度分布、風向別出現頻度分布、乱流強度、ウィンドシアのべき乗数、及び気流傾斜角の 6 項目がある。これらは、連続観測された風況データから 10 分間隔の統計量として算出され、この観測にはカップ式風速計を着底式観測タワーに取りつける方法、海岸に設置した水平型レーザー照射式風向風速計（ドップラーライダー）を一つもしくは二つ用いる（シングルスキャニングライダー、デュアルスキャニングライダー）方法が用いられてきたが、風力発電施設設置海域拡大のために陸から離れた比較的水深の深い海域にも対応可能な浮体式プラットフォーム上に搭載した鉛直照射型ドップラーライダー（フローティングライダー）による方法が検討さ

れている。

既に欧州では船型やブイ型の浮体式プラットフォームを採用したフローティングライダーが開発されている。しかし、これらフローティングライダーは10分間平均風速の計測精度保証はされているものの、構造強度等の評価に必要な乱流強度の計測精度はカップ式およびデュアルスキャンングライダーの精度に及ばない。また、欧州の海域は有義波高が6 m程度と日本近海での有義波高(10 m以上で最高波高も時期と海域にもよるが20 m程度)に比べて低く、日本沿海・近海での既存のフローティングライダーによる風況観測で高い有効データ率および精度を担保することは難しい。

このような背景のもと、本研究では、鉛直照射型ドップラーライダーを搭載するための浮体式プラットフォームの風波浪による運動(動揺や定傾斜)を抑える方法を提案することで、高い有効データ率を担保し、10分間平均風速だけでなく、乱流強度や風速変動の直接観測を可能とすることを目標としている。

本論文は、第1～第6章で構成される。

第1章では、本研究の背景と目的を示すとともに、研究概要について述べる。

第2章では、まず水深50 m以下の浅海域を対象に、潮流、風、波による影響を低減できる姿勢安定装置を取り付けた1点緊張係留スパー型プラットフォーム(以下、姿勢安定装置付き低動揺プラットフォームと呼ぶ)を提案し、その性能を詳細に調査するとともに姿勢安定装置の形状を最適化する。この姿勢安定装置は潮流による定傾斜をなくすることができるが、流速が速くなると直立状態の他に下流方向に傾斜するつり合い角を持つ可能性があることがわかった。また、同姿勢安定装置は波による動揺を低減するが、高波高時に定傾斜を生じる可能性があることがわかった。ここでは、両定傾斜の発生メカニズムをその形状と作用する流体力の関係から明らかにし、その回避方法を示した。

第3章では、姿勢安定装置付き低動揺プラットフォームを用いた山形県庄内沖(水深:19.84 m)で3期(3年3か月)にわたって行われた洋上風況観測の実証実験結果について説明するとともに、そこから得られた知見について示す。2017年7月開始の第1期実証実験は、設計条件より強い突風(ダウンバースト)の発生により、姿勢安定装置が海底に接触して損傷し、観測中断を余儀なくされた。海底洗堀対策および発生海象予測法の見直し、姿勢安定装置の再設計を実施した2018年9月からの第2期実証実験では、予想を上回る係留索摩耗進展のため、2か月足らずで観測中断した。安全性を優先して係留にユニバーサルジョイントを採用した2019年5月からの第3期実証実験では、1年を超える計測に成功し、風速観測精度と乱流強度観測精度が既存の浮体式風況観測システムに比べて優れ、また陸上ライダーによる計測精度と同程度であることが確認できた。一方、ユニバーサルジョイントは係留索に比べて高価であり、また敷設時水中での取付作業が難しく作業安全性等の観点からは係留索の利用が望ましい。そこで、第2期実証実験データを用いて摩耗予測法を見直し、摩耗低減を目的として係留系とブイ形状を最適化し、係留索長またはブイの重量を調整することで摩耗量が低減できることを示した。

第4章では、建造コストおよび設置コストを抑えるために姿勢安定装置付き低動揺プラットフォームを小型化し、無係留状態でその運動性能を評価するとともに、50 m以深の海域にも適用できるように係留系を最適化する。小型化した無係留ブイに係留反力が無いため、浅海域において緊張係留型姿勢安定装置付き低動揺プラットフォームに比べて運動が小さく、深海域においてもその性能は変わらないことを確認した。この性能を損なわないように、3種類の弛緩係留系(カタナリー係留、中間ウエイト型係留、中間フロート型係留)を検討し、それぞれの特徴を把握するとともに、中間ウエイト型係留が最適であることを示した。

第5章では、風況観測精度のさらなる向上を目指し、浮体式プラットフォーム上でドップラーライダーを搭載する動揺吸収台を提案する。機構として、プラットフォームの動揺の影響を受けないカウンターウエイト型を提案し、その制御方法にスカイフック理論(スカイフックダンパ、スカイフックスプリング)を採用し、数値シミュレーションによってその性能を評価した。この動揺吸収台を一般的なディスク型プラットフォームに搭載した場合でも、十分に動揺を吸収し

ドップラーライダーをほぼ鉛直に維持できることを示した。

第6章では、結論として各章で得られた結果を総括する。

本研究は、浮体式プラットフォームに鉛直照射型ドップラーライダーを搭載した風況観測システム(フローテングライダー)の日本近海における有効データ率および計測精度の向上を目指し、姿勢安定装置付き低動揺プラットフォームを提案し、水槽試験と数値シミュレーションによりその運動特性を流体力学的特性にもとづいて明らかにするとともに、実証実験によってその動揺低減性能と風況観測性能の向上を確認し、さらに実証実験結果を踏まえた数値シミュレーションにより係留系を含めた最適化を行ったものである。また、風況観測精度のさらなる向上を目指して、ドップラーライダー自身の揺れを低減する動揺吸収台の機構と制御方法を提案し、数値シミュレーションによりその性能を明らかにしたものである。

審査結果の要旨

本研究は、浮体式プラットフォームに鉛直照射型ドップラーライダーを搭載した風況観測システムの日本近海での有効データ率と計測精度の向上を目指し、姿勢安定装置付き低動揺プラットフォームを提案し、水槽試験と数値シミュレーションによりその運動特性を明らかにし、実証実験によりその動揺低減性能を確認し、実証実験結果を踏まえた数値シミュレーションにより係留系を含めた最適化を行ったものである。また計測精度のさらなる向上のため、ドップラーライダーの揺れを低減する動揺吸収台の機構と制御方法を提案し、数値シミュレーションでその性能を明らかにしたものであり、以下の成果を得ている。

(1) 水深 50 m 以下の浅海域を対象に、潮流、風、波による影響を低減できる姿勢安定装置を取り付けた 1 点緊張係留スパー型プラットフォームを提案し、その性能を調査し姿勢安定装置の形状を最適化した。この姿勢安定装置は潮流による定傾斜をなくすることができるが、流速が速くなると直立状態の他に下流方向に傾斜する釣り合い角を持つ可能性があることがわかった。また、同姿勢安定装置は波による動揺を低減するが、高波高時に定傾斜を生じる可能性があることがわかった。ここでは、両定傾斜の発生メカニズムをその形状と作用する流体力の関係から明らかにし、その回避方法を示した。

(2) 姿勢安定装置付き低動揺プラットフォームを用いた山形県庄内沖で 3 期にわたる洋上風況観測の実証実験結果から得られた知見に基づいて、洋上風力発電施設設置予定海域の発生海象予測法と係留系の摩耗進展予測法の見直しを行った。また、これら方法を用いて、摩耗低減を目的として係留系とブイ形状を最適化し、係留索長またはブイの重量を調整することで摩耗量が低減できることを示した。

(3) 建造と設置のコストを抑えるために低動揺プラットフォームを小型化し、浅海域において弛緩係留を採用した時の運動性能を評価し、50 m 以深にも適用できるように係留系を最適化した。小型の弛緩係留低動揺プラットフォームは、浅海域において緊張係留低動揺プラットフォームに比べて運動が小さいことを確認した。深海域においても、3 種類の弛緩係留系（カテナリー係留、中間ウエイト型係留、中間フロート型係留）を検討し、それぞれの特徴を把握するとともに、中間ウエイト型係留が最適であることを示した。

(4) 風況観測精度のさらなる向上を目指し、浮体式プラットフォーム上でドップラーライダーを搭載する動揺吸収台を提案した。プラットフォームの動揺の影響を受けにくいカウンターウエイト機構を提案し、その制御方法にスカイフックダンパとスカイフックスプリングを採用し、数値シミュレーションによりその性能を評価した。この動揺吸収台を一般的なディスク型プラットフォームに搭載した場合でも、十分に動揺を吸収しドップラーライダーをほぼ鉛直に維持できることを示した。

以上の諸成果は、鉛直照射型ドップラーライダーを搭載するための浮体式プラットフォームの潮流、風、波による動揺や定傾斜を抑える方法を提案することで、高い有効データ率を担保し、10 分間平均風速だけでなく、乱流強度や風速変動の直接観測を可能にしたものであり、関連分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。