

6 軸減揺棧橋の開発

作業船の動揺安定台としての活用に向けて

那須野 陽 平・田 中 孝 行・今 村 一 紀

近年注目されている洋上風力発電事業では、保守メンテナンス時の発電設備への安全なアクセス方法が課題とされている。現在採用されているアクセス方法としては、小型船舶の船首からの移乗などが挙げられているが、作業員の海中転落・挟まれ事故のリスクが避けられない。このような背景から、著者らはモーションベースと呼ばれる空間リンク機構を作業船の動揺安定台として活用する手法を採用した「6軸減揺棧橋」の開発を進めている。本稿では、海域試験において確認されたモーションベースプロトタイプの水保持性能について報告する。

キーワード：モーションベース, 洋上風力発電, 作業船, 動揺低減, 移乗装置, 安全

1. はじめに

日本のエネルギーをめぐる環境は、化石燃料から再生可能エネルギーへの転換を図るべく、石油等に代わるクリーンなエネルギーとして、さらなる導入・普及への取り組みが進められている。その中で近年、注目を集めているのが洋上風力発電である。日本は四面を海に囲まれた島国であり、日本の領海と排他的経済水域を合わせた海の広さは、世界第6位である。風況の良い広大な海を利用して風力発電を設置することができれば、そのエネルギー量は極めて大きいと言われている¹⁾。

洋上風力発電設備の建設、運用、管理、保守メンテナンスにあたり、発電設備へのアクセス手段の確保は重要課題である。アクセスシステムは、安全性、経済性、海象等の環境条件、稼働率改善の必要性等の要素を考慮して検討されており、様々な方法が試みられている。現在採用されている一般的な洋上風力発電設備へのアクセス方法としては、小型船舶の船首からの移乗などが挙げられているが、気象・海象条件によってはアクセスが困難となることも多く、作業員の海中転落・挟まれ事故のリスクが高まることから、解決すべき課題の1つとして提起されている²⁾。

現在、船舶の動揺を抑制する装置として、アンチローリングタンクやフィンスタビライザーなどの減揺装置が開発・実用化されている。しかしながら、前者は船舶の横揺れ固有周期の変化に追従することが困難であり、後者は高速航行時のみに効果を発揮するため、作

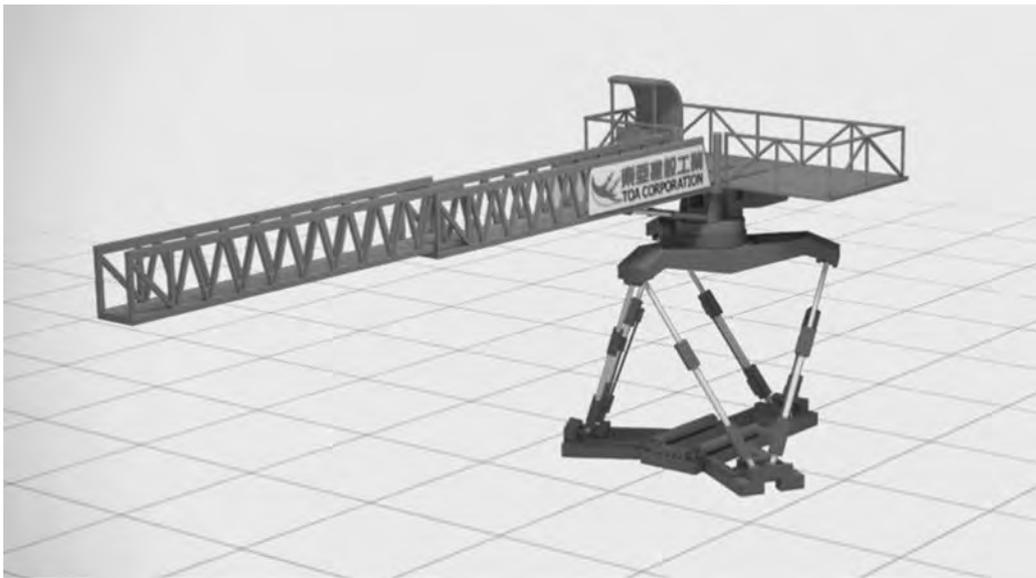
業船のように投錨して定点保持状態で作業を行う船舶に対しては効果的ではない。これらの技術は、船舶自身の動揺を抑制するためのものであるが、これに対し、何らかの制御機構を用いて動揺する作業船の任意の地点を水平に保持することにより、船舶の動揺を考慮せずに安全な移乗が実現できる可能性に着目した。この観点に基づき、著者らは6軸モーションベースを作業船の動揺安定台として活用する手法を採用すると共に、洋上の構造物に対する作業員の安全な移乗を目的として、「6軸減揺棧橋」の開発を産学共同で進めている³⁾。

2. 6軸減揺棧橋の概要^{5), 6)}

(1) 構造

モーションベースとは、機構学的には、出力となるリンクを複数の駆動用リンク列により並列に駆動する機構の総称であり⁴⁾、スチュアートプラットフォーム型、Hexa型、直動固定型などの種類がある。また、モーションベースは、大型フライトシミュレータやアミューズメント機器の揺動装置として実用化され、長い歴史と開発実績がある技術として知られている。

「6軸減揺棧橋(図-1)」は、上下2枚のプレート(トップ/ベースプレート)が6本のシリンダーで接続されたスチュアートプラットフォーム型モーションベースを採用している。本装置は「モーションベース部」の他、作業員が乗降する場所となる「プラットフォーム部」、作業員の通路となる「棧橋部」から構成される。



図一 6軸減揺栈橋 構造図

作業船に固定された「モーションベース部」は、上下2枚のプレートを連結する6本のシリンダーを伸縮させることにより、6自由度の運動が可能となる。別途搭載するセンサーによって計測される船舶の動揺を打ち消すように、各々のシリンダーを適切に制御することにより、波浪で船舶が動揺した場合でも、プラットフォームを常に水平に保つことが可能となる。また、栈橋部分にテレスコピック機構を採用することにより、栈橋の伸縮が自在になり、現場条件に合わせて栈橋の長さを調整することができる。

このように、モーションベースと可動式栈橋を組み合わせることで、小型船舶を使用したアクセスが不要となり、作業船や台船上から直接、洋上の構造物への移乗が可能となるため、洋上作業に従事する作業員の安全と作業効率の向上への寄与が期待される。

(2) プロトタイプの機構

モーションベースの機構や可動域の決定、基本動特性の確認などを行うため、まず初めにプロトタイプを製作した。本装置は、水平保持性能を検証する海域試験でも使用し、実機製作を想定した制御手法の検討にも活用した。

プロトタイプ(写真一)は、モーションベース、油圧ユニット、制御装置、教示装置から構成されている。教示装置を操作することにより、モーションベースを遠隔操作することも可能である。

プロトタイプでは、栈橋を組み合わせた実機を想定し、高い出力と応答性が比較的容易に得られる油圧サーボ機構を採用した。また、油圧シリンダー内部には、シリンダーの伸縮量を計測するための磁歪式セン



写真一 モーションベースプロトタイプ (左から制御装置, モーションベース, 油圧ユニット)

サーを内蔵した。

油圧シリンダーの可動範囲は、中立地点から ± 250 [mm]を確保している。また、総重量は約450 [kg]、最大持ち上げ重量は約100 [kgf]である。油圧シリンダーとトップ/ベースプレート接続部にはユニバーサルジョイントを配置し、最大振れ角 ± 15 [deg]に対応できるようにしている。基本仕様を表一に示す。

(3) 制御系の構成

モーションベースプロトタイプの駆動方式には、教示装置(写真二)による手動操作モード、予め決められた運動をSDカードから読み込み再現する自動再生モード、そして、動揺センサーの挙動を再現するリアルタイムモードの3種類がある。海域試験では、リアルタイムモードで船体動揺の低減効果を検証した。

一般的に、パラレルリンクに対する逆運動学、すなわちベースプレートに対するトッププレートの位置及

表一 1 モーションベースプロトタイプ 基本仕様

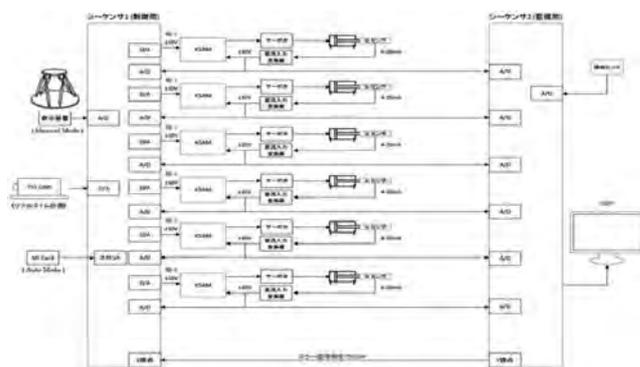
| 機器名称 | 項目 | 仕様 | |
|-------------|-----------------------------|--|-----------------------------|
| 6軸モーションベース | 構造 | スチュワートプラットフォーム型パラレルメカニズム | |
| | 油圧シリンダ | ①寸法 | φ 50[mm] × φ 35[mm] × St500 |
| | | ②最大使用圧量 | 14[Mpa] (耐圧圧力: 21[Mpa]) |
| | | ③受圧面積 (押し) | 27.44[cm ²] |
| | | ④受圧面積 (戻し) | 18.90[cm ²] |
| | | ⑤ストローク検出 | シリンダ内蔵型変位計 |
| ユニバーサルジョイント | ①最大振り角 | 30° | |
| | ②限界負荷荷重 | 1,000[kgf] (9.8[N]) | |
| ベースプレート | ①寸法 | 1,687[mm] × 1,463[mm] × 100[mm] (W × D × H) | |
| | ②重量 | 95[kg] | |
| トッププレート | ①寸法 | 1,488[mm] × 1,290[mm] × 90[mm] (W × D × H) | |
| | ②重量 | 91[kg] | |
| 油圧ユニット | ①寸法 | 2,000[mm] × 1,000[mm] × 1,000[mm] (W × D × H) | |
| | ②モータ出力 | 15kW 程度 | |
| 制御装置 | 制御装置機器 | ①寸法 : 1,000[mm] × 400[mm] × 2,000[mm] (W × D × H) ②電源 : 三相 AC200V | |
| | 上位データ変換制御装置 | PLC 方式 | |
| その他 | 可動範囲 | ① Heave | 500[mm] |
| | | ② Serge | 150[mm] |
| | | ③ Sway | 150[mm] |
| | | ④ Roll | ± 30° |
| | | ⑤ Pitch | ± 30° |
| | | ⑥ Yaw | ± 30° |
| ペイロード | 100[kg] | | |
| 最大加速度 | 0.1[G]程度 | | |
| 重量 | 450[kg]程度 (油圧ユニット, 制御盤は含まず) | | |



写真一 2 教示装置

び姿勢を指定し、アクチュエータの長さを求める問題は、解析的に解くことができるため、比較的容易に求めることが可能である。今回のケースでは、船体に固定されたモーションベースが揺動した際、任意のベースプレート姿勢に対し、トッププレートが常に水平となるような各油圧シリンダのストローク長を求め、という問題に相当する。本稿では、動揺センサーにより計測されたロール、ピッチ、ヒープを打ち消すように、仮想三次元空間に配置した幾何学モデルを回転移動させ、ある瞬間の船体動揺に対して理想となるシリンダストローク長を代数的に算出する手法を採用した。本システムの制御フローを図一 2 に示す。

油圧シリンダの変位は、シリンダに内蔵された磁歪式ストロークセンサによってセンシングされてお



図一 2 モーションベースプロトタイプ 制御フロー

り、代数的に得られた6本のシリンダ長と比較し、その差が小さくなるような制御を行っている。また、実際のシリンダストローク長を使用してトッププレートの位置及び角度を演算すると共に、ユニバーサルジョイント部の角度も演算している。機械的に負荷がかかるトッププレート角度を閾値として設定し、その値に演算結果が近づいた際にアラートを出すようにしている。

なお、本試験は、モーションベースプロトタイプの水平保持性能の検証を目的として実施したものである。そのため、栈橋を組み合わせた際の振動の影響などは考慮していない。

3. 海域試験におけるモーションベースプロトタイプの水平保持性能検証

(1) 試験概要

平成 27 年 3 月、山口県響灘周辺において、モーションベースプロトタイプの海域試験を実施した。本試験では、動揺する作業船上にモーションベースプロトタイプを搭載し、センシングされた船体動揺を打ち消すような制御を施すことにより、トッププレートの水平保持性能を検証することを目的として実施した。

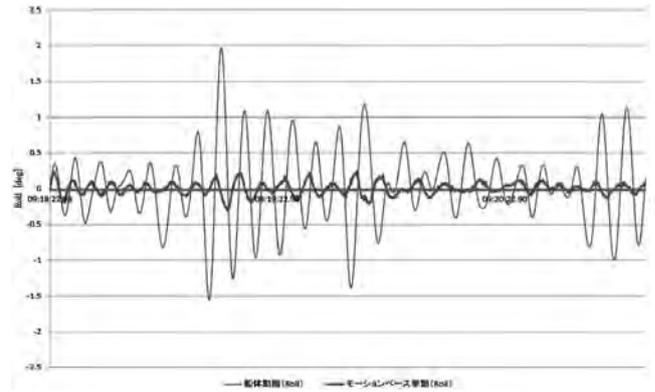
船体動揺及びトッププレートの挙動は、TELEDYNE TSS 社製の動揺センサー「DMS-05」を使用して計測した³⁾。また、モーションベースプロトタイプを搭載するプラットフォームとして、洞海マリンシステムズ株式会社所有の曳船「つばさ(写真一 3)」を使用した。また、モーションベースと油圧ユニットの艤装状況を写真一 4 及び写真一 5 に示す。

(2) 水平保持性能検証結果

本試験では、モーションベースプロトタイプで再現可能な6自由度の運動のうち、船体動揺の主要素であるロール、ピッチ、ヒープについて動揺低減効果を検



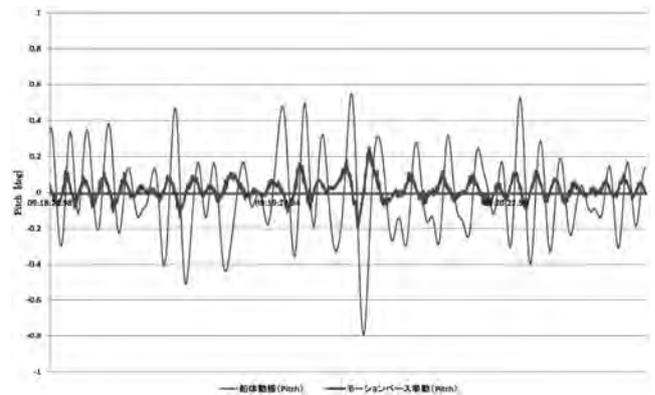
写真—3 曳船「つばさ」



図—3 水平保持性能 (ロール)



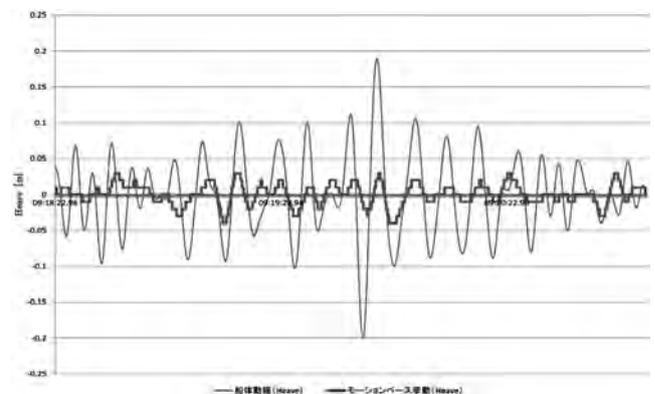
写真—4 モーションベース 機装状況



図—4 水平保持性能 (ピッチ)



写真—5 油圧ユニット機装状況



図—5 水平保持性能 (ヒープ)

証した。2 台の動揺センサーを使用して得られた結果を図—3～5に示す。振幅の大きい波形は船体動揺を示し、振幅の小さい波形は制御後のトッププレートの挙動を示している。また、横軸に時間、縦軸に角度(ロール、ピッチ)と上下方向の変位量(ヒープ)を取っている。ヒープ方向に対するモーションベースの可動範囲が±250[mm]であるため、試験海域に制約があったものの、船体動揺が大きく低減されていることが確認された。計測中に発生する大小の波を総合的に評価するため、各波がゼロラインをクロスする部分の面積

をサンプリング時間ごとに求め、標準偏差に基づく統計処理を行った。その結果、動揺低減率はロールで約85%、ピッチ及びヒープで約73%と高い水平保持性能が示されることを確認した。

4. おわりに

本稿では、6軸モーションベースを用いた減揺栈橋の開発として、モーションベースプロトタイプを用いた海域試験を実施し、トッププレートの水平保持性能について報告した。ハードウェア上の可動域制限があるものの、船体動揺の主要素であるロール、ピッチ、

ヒープを70～80%程度低減可能であることを確認した。船体動揺を完全に打ち消すことができなかった要因としては、モーションベースが予期しない挙動を示した際の安全対策として、シリンダーの伸縮速度に制限を設けていたが、実際の船体動揺がこの速度を超えていたため、シリンダーが追従しきれなかったことが考えられる。また、高圧窒素ガスを封入したアキュムレータにより確保される油圧量に対し、当初想定された波高よりも大きな波の連続出現に伴い、油圧不足となったことも影響していた。

これら以外にも得られた知見は多く、今後の実機製作の足掛かりとして活用していく予定である。特に、本装置には人間が介在するため、モーションベースのみならず、栈橋部分も含めた装置全体としての機械安全設計及び安全対策を講じることが重要となる。実際の運用で緊急事態が発生した際、例えば、移乗設備と連結された栈橋を短縮・起伏させ、迅速な離脱を行う機能を付加するなど、人間が介在する設備として、安全対策にも注力した開発を進めていく。

なお、実機化に向けた本装置の詳細設計は、昨年度までに完了している。今後、高い減揺効果が要求される海洋工事への適用を視野に入れ、実機製作に着手する予定である。

謝 辞

最後に、本装置開発にご賛同・ご支援いただいた関係者各位に、この場をお借りして深く謝意を表す。

JCM A

《参考文献》

- 1) 洋上風力発電ナビ <http://www.o-wp.net/>
- 2) 原子力安全・保安院：平成23年度 洋上風力発電に係る安全規則を中心とした動向調査 成果報告書, pp.49～52, 2012
- 3) 今村一紀, 田中孝行, 那須野陽平, 岡山健次, 立野圭祐:6軸モーションベースを用いた動揺吸収型可動式栈橋の開発(第一報 作業限界条件の検討と動揺計測実験), 第14回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.119～128, 2014
- 4) 五嶋裕之:パラレルメカニズムと建設施工技術への応用, 建設機械施工 Vol.66, No.8, pp.19～22, August, 2014
- 5) 那須野陽平:パラレルメカニズムを用いた動揺吸収栈橋, 油空圧技術, Vol.54, No.4, pp.53～57, 2015
- 6) 今村一紀, 田中孝行, 那須野陽平:6軸モーションベースを用いた動揺吸収型可動式栈橋の開発, 電力土木, No.377, pp.67～69, 2015

【筆者紹介】

那須野 陽平 (なすの ようへい)
東亜建設工業(株)
土木事業本部 機電部 電気グループ
主査



田中 孝行 (たなか たかゆき)
東亜建設工業(株)
土木事業本部 機電部 電気グループ
グループリーダー



今村 一紀 (いまむら かずき)
東亜建設工業(株)
土木事業本部 機電部長

