

17. 6 軸減揺棧橋の開発

～作業船の動揺安定台としての活用事例～

東亜建設工業株式会社
東亜建設工業株式会社
東亜建設工業株式会社

○ 那須野 陽平
今村 一紀
田中 孝行

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、脚光を浴び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、当社は 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」の開発を行っている。そして現在、平成 27 年度の実機完成を目指し、産学共同で開発を進めている³⁾。

2. 6 軸減揺棧橋の概要^{5), 6)}

2. 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、長い歴史と多くの開発実績がある技術として知られている。

現在開発を進めている「6 軸減揺棧橋」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。当該装置は「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-1 参照）。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、棧橋部分にテレスコピック機構を採用することにより、棧橋の伸縮が自在になり、現場条件に合わせて棧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棧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。

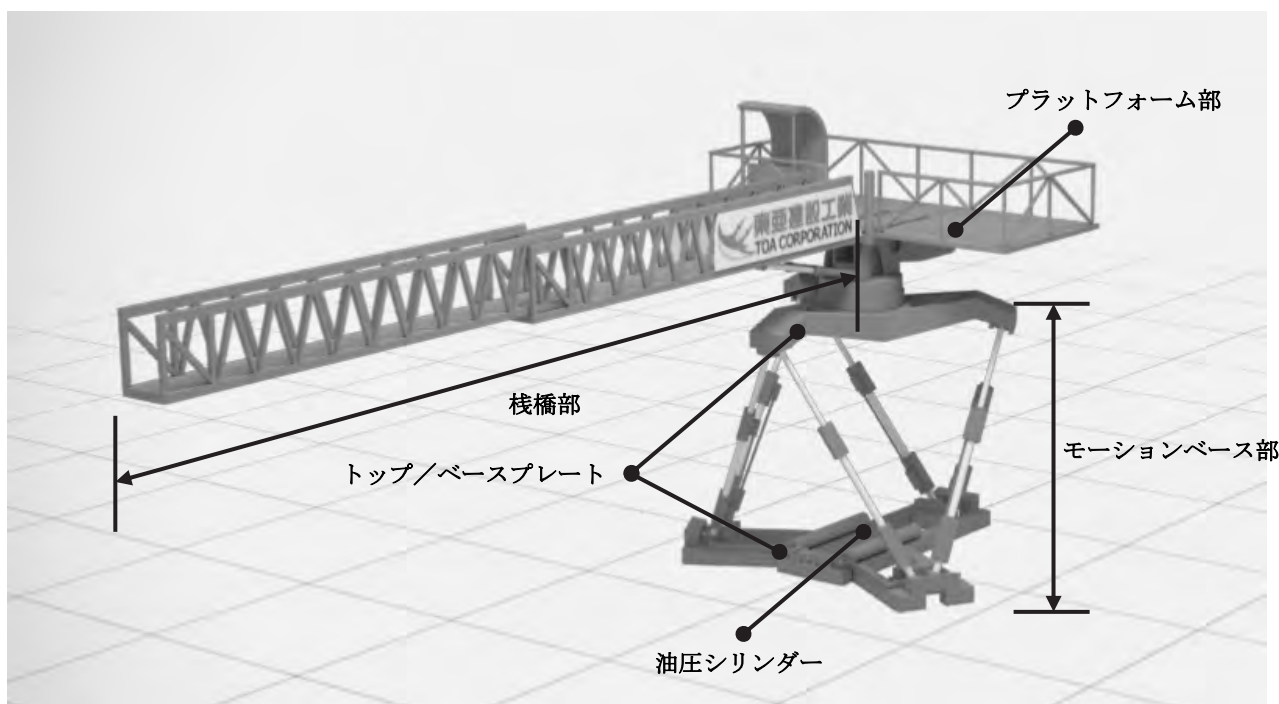


図-1 6軸減揺栈橋 構造図

2. 2 モーションベースプロトタイプ機構

実機製作の前に、基本動特性の確認をはじめ、モーションベースの機構や可動域の決定、制御手法の検討などを行うため、モーションベースの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有効活用した。

モーションベースプロトタイプ、油圧ユニット、制御装置を写真-1に、教示装置を写真-2に示す。後述するが、教示装置を操作することにより、モーションベースプロトタイプを遠隔操作することも可能であり、マスタースレーブの環境を構築している。

モーションベースプロトタイプでは、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サーが内蔵されている。

油圧シリンダーの可動範囲は、中立地点から $\pm 250[\text{mm}]$ を確保している。また、総重量は約 $450[\text{kg}]$ 、最大持ち上げ可能重量は約 $100[\text{kgf}]$ 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 $\pm 15[\text{deg}]$ （安全設計）に対応できるようにしている。モーションベースプロトタイプの基本仕様を表-1に示す。



写真-1 モーションベースプロトタイプ（左端より制御装置、モーションベース、油圧ユニット）



写真-2 教示装置

表-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- シ- ョ- ン ペ- ー ス	構造	スチューワートプラットフォーム型バランスメカニズム
	油圧シリンダ	①寸法 : $\phi 50[\text{mm}] \times \phi 35[\text{mm}] \times \text{St500}$ ②最大使用圧量 : $14[\text{Mpa}]$ (耐圧圧力: $21[\text{Mpa}]$) ③受圧面積(押し) : $27.44[\text{cm}^2]$ ④受圧面積(戻し) : $18.90[\text{cm}^2]$ ⑤ストローク検出 : シリンダ内蔵型変位計
	ユニバースジョイント	①最大振れ角 : 30° ②限界負荷荷重 : $1000[\text{kgf}]$ ($9.8[\text{N}]$)
	ベースプレート	①寸法 : $1.687[\text{mm}] \times 1.463[\text{mm}] \times 100[\text{mm}]$ ($W \times D \times H$) ②重量 : $95[\text{kg}]$
	トッププレート	①寸法 : $1.488[\text{mm}] \times 1.290[\text{mm}] \times 90[\text{mm}]$ ($W \times D \times H$) ②重量 : $91[\text{kg}]$
	油圧ユニット	①寸法 : $2.000[\text{mm}] \times 1.000[\text{mm}] \times 1.000[\text{mm}]$ ($W \times D \times H$) ②モータ出力 : 15kW 程度
	制 御 装 置	制御装置機器
	上位データ変換制御装置	PLC方式
そ の 他	可動範囲	①Heave : $500[\text{mm}]$ ②Serge : $150[\text{mm}]$ ③Sway : $150[\text{mm}]$ ④Roll : $\pm 15^\circ$ ⑤Pitch : $\pm 15^\circ$ ⑥Yaw : $\pm 15^\circ$
	ペイロード	$100[\text{kg}]$
	最大加速度	$0.1[\text{G}]$ 程度
	重量	$450[\text{kg}]$ 程度(油圧ユニット、制御装置は含まず)

2. 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。今回の海域試験では、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ーのストローク長を求める、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ーストローク長を代数的に算出する手法を採用した。

図-2 に制御フローを示す。油圧シリンダーの変位は、シリンダー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り、代数的に得られた 6 本のシリンダー長（制御入力）と比較し、その差が小さくなるような制御を行

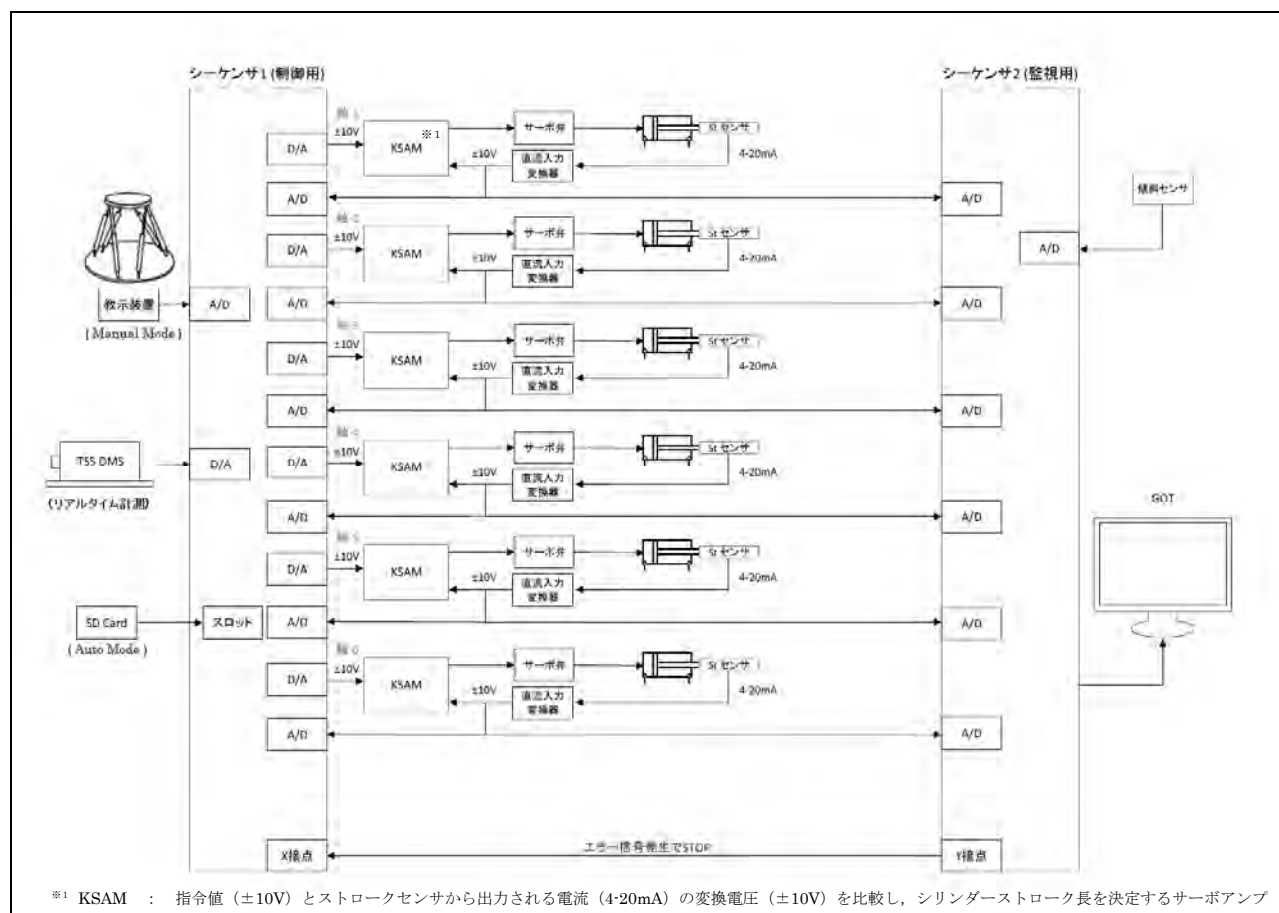


図-2 モーションベースプロトタイプの制御フロー

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、当該試験はモーションベースプロトタイプの水平保持性能を検証するための試験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. 実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

3. 1 艀装作業

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。当該試験では、動揺下におけ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、動揺セン



写真-5 油圧ユニット 艀装状況



写真-6 機器配置状況



写真-3 タグボート「つばさ」

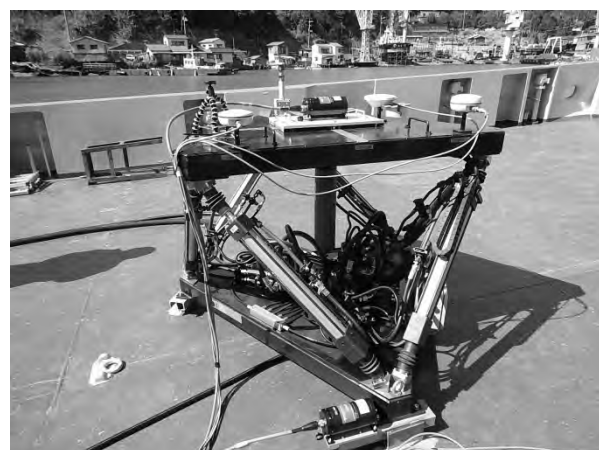


写真-4 モーションベースプロトタイプ 艀装状況



写真-7 計測室内機器配置状況

サー「TSS DMS-05」を使用して計測した³⁾。また、今回の試験は洞海マリンシステムズ株式会社所有のタグボート「つばさ」を使用して実施した。使用した船舶と、各種装置の艀装状況を写真-3～写真-7 に示し、各種計測機器の一覧を表-2 に示す。

表-2 計測機器一覧

機器名	型式（メーカー）	用途	設置場所
GPS	MS750 (Trimble)	船位置計測	船尾甲板
		モーションベース位置計測	トッププレート上
補正情報受信機	GS-1401A (古野電気)	RTK-GPSとしての位置計測	計測室内 ※受信アンテナは屋外
GPS方位計	VS110 (Hemisphere)	船方位計測	船尾甲板
		モーションベース方位計測	トッププレート上
動揺センサー	TSS DMS-05 (Teledyne)	船体動揺計測	ベースプレート上
		モーションベーストッププレート挙動計測	トッププレート上

3. 2 水平保持性能検証結果

当該試験では、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証した。2 台の TSS DMS-05 を使用して得られた結果を、図-3～図-5 に示す。細いラインが船体動揺、太いラインが制御後のトッププレートの挙動を示しており、横軸に時間、縦軸に角度（Roll, Pitch）と上下の変位量（Heave）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。

その後、トッププレート上に乗り、動揺低減効果の体感試験を実施した。試験状況を写真-8 に示す。体感者からは、揺れをほとんど感じないというコメントをいただくことができ、数値解析による結果と併せ、水平保持に関しては十分制御できたと言える。

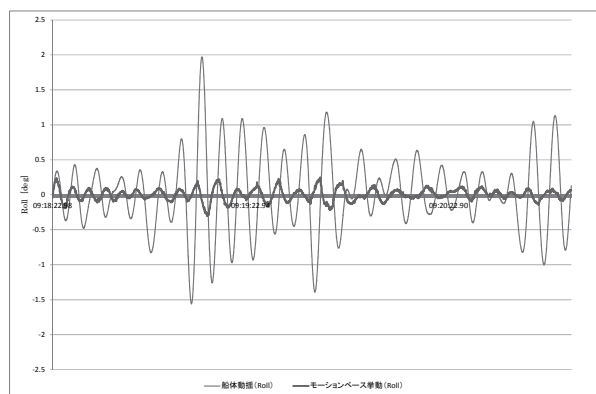


図-3 水平保持制御結果（Roll）

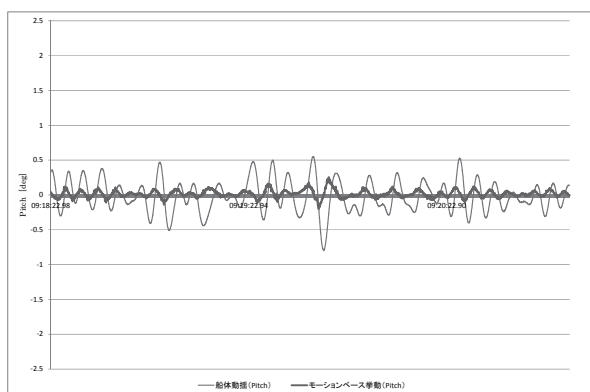


図-4 水平保持制御結果（Pitch）

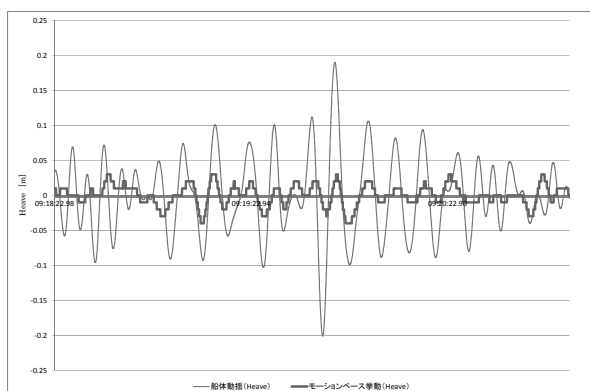


図-5 水平保持制御結果（Heave）



写真-8 動揺低減効果体感試験

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棧橋の開発として、モーションベースプロトタイプを用いた実海域試験を実施し、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。また、動揺低減効果の体感試験でも、揺れをほとんど感じさせない高い水平保持性能を示すこ

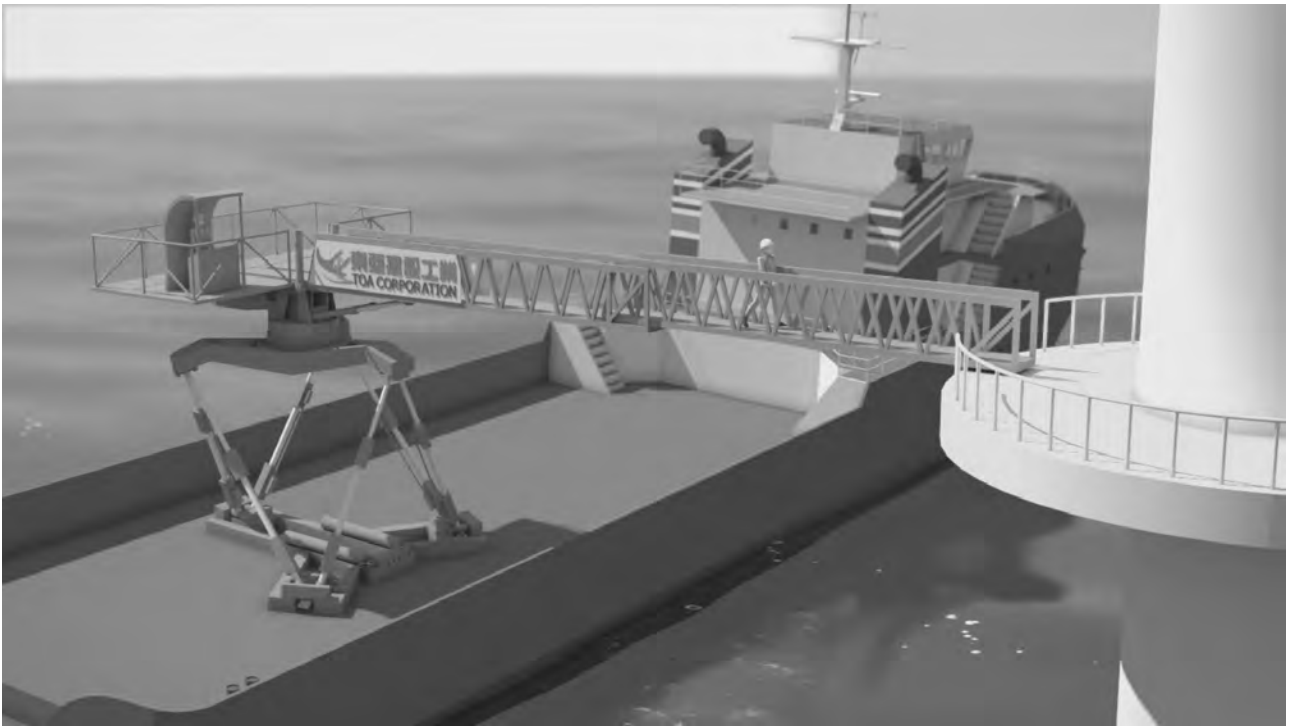


図-6 6軸減揺栈橋のタグボートへの搭載イメージ

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、当該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。

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

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