

敦賀港における自動係留装置導入の効果

小川 秀成*・川村 浩*・大家 隆行**・高橋 武志**・酒巻 健太**・河合 真一***

* (一財) 沿岸技術研究センター

** パシフィックコンサルタンツ (株)

*** 前 国土交通省 北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所

我が国の港湾の中長期政策を示した PORT2030 では、生産性向上等を目的として「次世代高規格ユニットロードターミナル」の形成が掲げられており、その取組の一つとして船舶の離着岸の迅速化・安全性向上等が期待される自動係留装置の導入が示されている。公共バースにおける国内初の自動係留装置導入として、敦賀港鞠山南地区での導入が検討され、装置導入による効果を検証するための現地実証試験が 2022 年度には鞠山南 A 岸壁で、2023 年度には鞠山南 B 岸壁で実施された。本稿では、現地実証試験の概要を整理するとともに、敦賀港における装置の導入効果についてとりまとめた。

キーワード：自動係留装置，実証試験，船体動揺シミュレーション，荷役限界波高

1. はじめに

我が国の港湾の中長期政策を示した PORT2030 では、生産性向上等を目的として「次世代高規格ユニットロードターミナル」の形成が掲げられており、その取組の一つとして船舶の離着岸の迅速化・安全性向上等が期待される自動係留装置（以下、装置とする）の導入が示されている。

装置による係留は従来の係留索による係留方法とは異なり、岸壁に設置した装置のアームを伸縮させ、吸着盤の吸着力で船体を係留するものである（図-1）。アームの伸縮や吸着は船・岸壁上等から遠隔で操作でき、数十秒で係留を完了できることから、従来の係留作業の省力化・効率化とともに、係留索の破断による事故等のリスク軽減も期待される。

公共バースにおける国内初の装置導入として、敦賀港鞠山南地区（図-2）での導入が検討され、装置導入による効果を検証するための現地実証試験が2022年度には鞠山南 A 岸壁で、2023 年度には鞠山南 B 岸壁で実施された。

本稿では、現地実証試験の概要を整理するとともに、敦賀港における装置の導入効果についてとりまとめた。

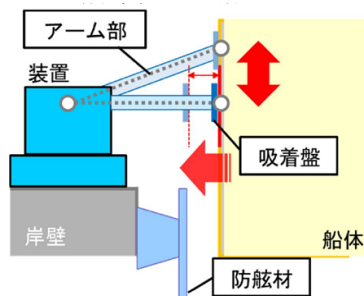


図-1 装置による係留イメージ

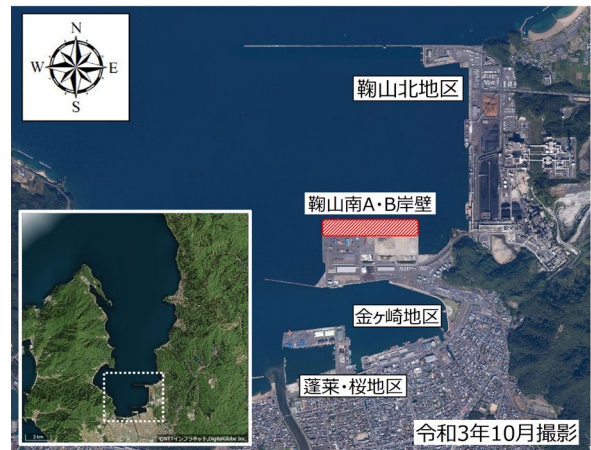


図-2 敦賀港全景

2. 現地実証試験の概要

2.1 試験概要

装置の導入効果の確認及び設計精度向上に資するデータを取得するため、現在敦賀港に就航している船舶（表-1）により、現地実証試験が行われた。

表-1 対象船舶諸元一覧

船名	総トン数 (G.T.)	船長	船幅
RORO 船 (北陸航路)	11,185t	179.90m	27.0m
RORO 船 (九州航路)	9,858t	167.72m	24.0m
フェリー	17,382t	224.5m	26.0m

なお、試験では、以下の3つの係留パターンで作業人員・時間の計測、船体動揺量の計測を行った。

- ① 係留索のみ（従来の係留方法）
- ② 係留索+装置

③ 装置のみ (安全のため係留索を緩めて配置)

2.2 作業人員・時間の計測

作業人員・時間の計測に関する機器の配置イメージを図-3に示す。

船首・船尾側にドローンを各1台配置し、上空から動画撮影を行い、船上での作業時間・人員を測定した。また、岸壁上にビデオカメラを2基 (前方・後方) 設置し、自動係留装置や係留作業状況を撮影し、各係留パターンにおける作業時間・人員を計測した。

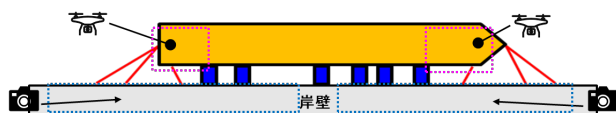


図-3 人員・時間計測用機器の配置イメージ

2.3 船体動揺量計測

船体動揺量計測に関する機器の配置イメージを図-4に示す。

デッキ上のRTK-GNSS センサ及びブリッジ上のジャイロセンサにより、船舶の変位・姿勢角を計測することで、各係留パターンにおける船体動揺量を算出した。

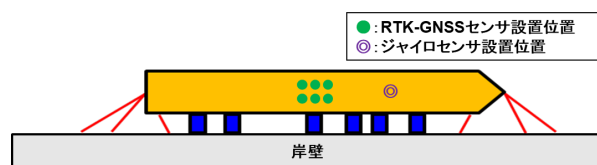


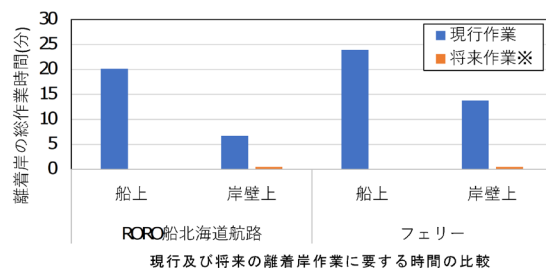
図-4 船体動揺量計測用機器の配置イメージ

3. 自動係留装置導入による効果の検討

3.1 省力化・作業効率化効果

実証試験で計測された鞍山南 B 岸壁における各船舶の離着岸に要する作業 (係留索のみ) の合計時間の平均値を図-5 中の「現行作業」に示す。同図の通り、離着岸の作業時間は船上で 20~30 分程度、岸壁上で 7~14 分程度を要することが確認されている。また、将来的に装置のみによる離着岸が可能となる場合に想定される離着岸に要する作業時間を「将来作業」に示す。装置による係留については、タブレットによる遠隔操作の後、30 秒程度で吸着・脱着動作が完了することが確認されていることから、この値を「将来作業」で要する時間として設定している。同図より、装置の導入によって、省力化及び作業効率化が期待できるといえる。ただし、これはあくまで離着岸作業についてであることに留意が必要である。

なお、装置のみによる離着岸が可能となる条件としては、「船舶が所要の精度で船体位置を調整可能な制御機能を有していること」または「L 字型の岸壁等の位置調整が比較的容易な岸壁を利用すること」等が挙げられる。



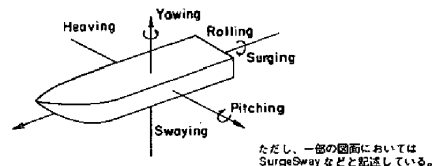
現行及び将来の離着岸作業に要する時間の比較

※船舶が所要の船体制御機能を有している場合や、位置調整が比較的容易な岸壁を利用している場合

図-5 現行及び将来の離着岸作業に要する時間の比較

3.2 実測値に基づく船体動揺量低減効果

RORO 船を対象として実施した実証試験の中で、比較的動揺が大きかった、令和 4 年 11 月 14 日、令和 5 年 12 月 18 日の 2 回についての各係留パターンにおける動揺量 (船舶の運動成分は図-6 参照) を表-2~表-3 に示す。また、PIANC のワーキンググループ 24 によって提案されている RORO 船・フェリーの荷役限界動揺量の基準値 (表-4) と実測値 (安全側として最大値を使用) を基に荷役限界波高を算出した結果を図-7 に示す (荷役限界波高の算出例は図-8 参照)。STEP① (係留索のみ) と STEP③ (装置のみ) を比較すると、Surge/Sway/Roll の動揺成分において、装置導入により、従来の係留索のみの係留方法と比べて船体動揺量を低減 (荷役限界波高を増加) させる効果があることが確認できた。



ただし、一部の図面においては Surge/Sway などと記述している。

図-6 船舶の運動成分¹⁾

表-2 STEP 別の動揺量の比較表 (令和 4 年 11 月 14 日)

	STEP① (係留索のみ)			STEP② (係留索+装置)			STEP③ (装置のみ)		
	最大値	有義値	平均値	最大値	有義値	平均値	最大値	有義値	平均値
Surge (m)	0.17	0.10	0.06	0.05	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02
Sway (m)	0.10	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02
Heave (m)	0.07	0.04	0.03	0.09	0.05	0.03	0.09	0.06	0.04
Roll (deg)	1.29	0.82	0.56	0.96	0.58	0.33	0.77	0.51	0.32
Pitch (deg)	0.12	0.07	0.05	0.12	0.07	0.05	0.12	0.08	0.05
Yaw (deg)	0.18	0.12	0.08	0.18	0.10	0.07	0.14	0.09	0.06

表-3 STEP 別の動揺量の比較表 (令和 5 年 12 月 18 日)

	STEP① (係留索のみ)			STEP② (係留索+装置)			STEP③ (装置のみ)		
	最大値	有義値	平均値	最大値	有義値	平均値	最大値	有義値	平均値
Surge (m)	0.13	0.05	0.03	0.06	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01
Sway (m)	0.05	0.03	0.02	0.05	0.03	0.02	0.05	0.03	0.02
Heave (m)	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02
Roll (deg)	1.20	0.68	0.37	0.47	0.26	0.16	0.73	0.40	0.23
Pitch (deg)	0.12	0.06	0.04	0.11	0.06	0.04	0.09	0.07	0.04
Yaw (deg)	0.12	0.09	0.06	0.21	0.11	0.07	0.13	0.07	0.05

表-4 RORO 船及びフェリーの荷役限界動揺量一覧²⁾

		荷役限界動揺量 (鞍山南岸壁における RORO 船及びフェリー)
SURGE	(m)	±0.4
SWAY	(m)	±0.6
HEAVE	(m)	±0.4
ROLL	(deg)	±2.0
PITCH	(deg)	±0.5
YAW	(deg)	±0.5

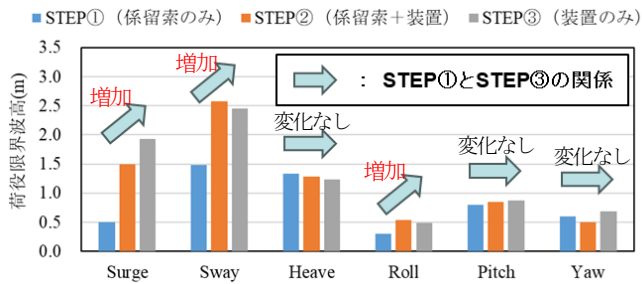
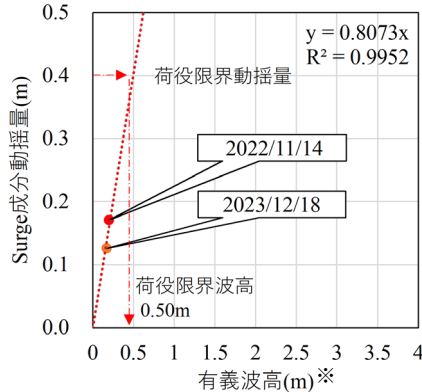


図-7 各係留パターンにおける荷役限界波高



※岸壁前面（岸壁から52.1mの位置）に設置した波浪計から得られた観測値

図-8 荷役限界波高の算出例（STEP①_Surge）

3.3 実測値及び計算値に基づく船体動揺量低減効果

実証試験により得られた船体動揺量計測結果のケース数は限定的であり、少ない動揺計測結果から装置の動揺量低減効果を評価することは妥当性に欠ける可能性がある。したがって、実測値に対する再現性が確保された船体動揺シミュレーションモデルを用いた船体動揺解析結果に基づき、補足的に荷役限界波高を検討することにより、装置の動揺量低減効果を評価することとした。

(1) 船体動揺シミュレーションモデルの妥当性確認

船体動揺シミュレーションにおけるモデルの妥当性は、以下の手順で確認した。

- ① 浮体動揺解析システム（(国研) 海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所¹⁾）を用いて、係留索のみによる係留条件で再現計算を行う。
- ② ①の結果を RTK-GNSS センサの計測結果と比較し、適宜キャリブレーションする。
- ③ ②で再現性が検証されたモデルを用いて、装置のみによる係留条件で再現計算を行う。

装置のみによる係留条件の実測値と計算値の動揺量の比較結果を表-5 に示す。有義値をみると、最も荷役障害に影響を与えやすい Roll 成分の動揺量の実測値と計算値の誤差は-6%である。また、誤差は大きいもので30%程度あるものの、その絶対値は1cm程度と大きくないため、再現性は良好だと判断した。

(2) 荷役限界波高の算出

実証試験の実測値と船体動揺解析による計算値を基に算出した、係留索のみと装置のみの荷役限界波高の比（装置/係留索）を表-6 に示す。Surge, Sway, Roll 成分については、係留索に対する装置の荷役限界波高の比は100%よりも増加する傾向にあることから、装置により動揺量は低減するといえる。一方で、Heave, Pitch, Yaw 成分については、ほとんどのケースで荷役限界波高の比が90~105%程度の値を取ることから、動揺量はほぼ変化しないと思われる。

(3) 稼働率の算出

前述の荷役限界波高を基に、鞍山南B岸壁における稼働率を算出した結果を表-7 に示す。稼働率は、比較的荷役障害が発生しやすい冬季（12月~2月）と通年に分けて算定した。なお、岸壁前面における波浪観測結果から、波向は出現頻度の高い15°~60°とし、荷役限界波高は、動揺成分6成分でそれぞれ算出した荷役限界波

表-5 装置による係留条件の実測値と計算値の比較結果

測定日	船種	STEP	周期	統計値	項目	動揺量 [m,deg]					
						Surge [m]	Sway [m]	Heave [m]	Roll [deg]	Pitch [deg]	Yaw [deg]
2023/12/18	RORO船(北海道航路)	STEP3	短周期	最大値	実測値 (GNSS)	(0.4)	(0.6)	(0.4)	(2.0)	(0.5)	(0.5)
					計算値	0.034	0.048	0.034	0.731	0.093	0.126
					(計算/観測)	65%	88%	132%	67%	120%	69%
2023/12/18	RORO船(北海道航路)	STEP3	短周期	有義値	実測値 (GNSS)	0.020	0.030	0.024	0.396	0.067	0.072
					計算値	0.013	0.031	0.032	0.372	0.077	0.061
					(計算/観測)	65%	103%	133%	94%	115%	85%

※()内の数字は、荷役限界動揺量

表-6 荷役限界波高の実測値と計算値の比（装置/係留索）一覧

適用範囲				係留索(8本係留時)に対する荷役限界波高※の比	
船種	船型	周期	波向	動揺成分	比率
RORO船	約10,000G.T.	8~12s	15~60°	Surge	100~147%
				Sway	100~122%
				Roll	90~179%
				Heave	88~100%
				Pitch	100%
				Yaw	92~106%

※荷役限界波高の比は数値解析値、0.5mを上限値として打切った場合の値

表-7 稼働率の一覧

係留手法		算定方法		荷役限界波高				稼働率 (通年)	稼働率 (冬季 [※])
係留索		実証試験 計測結果		0.30m				98.76%	96.91%
装置		実証試験 計測結果		0.49m				99.98%	99.96%

※:12.1,2月

係留手法		算定方法		荷役限界波高						稼働率 (通年)	稼働率 (冬季 [※])	
				周期8秒		周期10秒		周期12秒				
係留索	船体動揺 解析結果	15°	0.50m	0.50m	15°	0.50m	0.37m	15°	0.50m	0.30m	99.64%	99.10%
		30°	0.50m		30°	0.37m		30°	0.28m			
		45°	0.50m		45°	0.33m		45°	0.20m			
		60°	0.50m		60°	0.28m		60°	0.21m			
装置	船体動揺 解析結果	15°	0.50m	0.50m	15°	0.50m	0.46m	15°	0.50m	0.35m	99.88%	99.72%
		30°	0.50m		30°	0.50m		30°	0.44m			
		45°	0.50m		45°	0.50m		45°	0.27m			
		60°	0.50m		60°	0.33m		60°	0.19m			

※:12.1,2月

高の内、最もクリティカルとなるもの（小さい値）を設定した。また、荷役限界波高が0.50mを超える場合には、十分に動揺が小さいものとし、荷役限界波高を0.50mとして整理した。

同表を見ると、実測値に基づき設定した荷役限界波高を基に稼働率を算出する場合、稼働率（冬季）は係留索で96.9%、装置で99.9%となり、3.0%程度向上する結果となった。また、解析結果に基づき設定した荷役限界波高を基に稼働率を算出する場合、稼働率（冬季）は係留索で99.1%、装置で99.7%となり、0.6%程度向上する結果となり、いずれの荷役限界波高を用いた場合でも、装置係留時には稼働率がほぼ100%となった。

3.4 その他の効果

（1）省力化効果・船体動揺低減効果による便益

綱取り作業に係る省力化が期待できる。また、船体動揺低減により荷役時間の短縮が期待できるとともに、稼働率向上によって、これまで荒天を理由に代替港を利用していた船舶の一部が荷役可能となり、貨物利用率の向上による便益が見込まれる。

（2）港湾労働者の人手不足の解消効果

装置のみで係留できる場合、これまで係留作業で要していた人員を別作業に割り振ることや、離着岸作業のための出勤の削減の可能性がある、生産性向上・省力化が期待できる。また、装置の操作は簡易なことから、若手人材や女性でも係留作業を可能とする効果が期待でき、持続可能な荷役作業の実現にも寄与すると考えられる。

（3）航行時間の確保・稼働率向上によるCO2削減効果

装置導入による動揺量の低減に伴い荷役作業時間が短縮された場合、その分航行時間を長く確保できることにより、従来よりも燃費の良い速度で航行することが可能になると考えられることから、CO2の削減についても見込まれる。また、装置導入による稼働率の向上により、代替港利用時の陸上輸送量が削減され、それに伴い排気ガスの排出量が削減されると想定される。

（4）係留索破断の防止効果

装置の導入により、係留索の破断が発生せず、係留索の再購入費用が削減されるとともに、人的被害が回避される。

（5）災害時のクイックリリース効果

装置のみで係留できる場合、タブレットのみによる操作で、数十秒での離岸が可能であるため、津波襲来時等における迅速な離岸が期待できる。

4. 今後の課題

現地実証試験において、ある程度の船舶動揺が確認されたのは、2022年11月14日及び2023年12月18日のRORO船北海道航路の事例2ケースのみであり、この結果のみをもって装置による動揺低減効果を他の港湾を利用する船舶に適用するのは難しい。また、最も揺れる空載状態において車両走行時における装置係留時の船体動揺量や装置に作用する係留力を計測し、問題が無いことを確認しているものの、実際の荷役作業時における、貨物量や船体重心位置の変化に応じた動揺量や係留力は未計測である。さらに、本試験で検討したRORO船とは船種やトン数が異なる場合、動揺傾向および装置導入による動揺量低減効果は異なる可能性がある。

したがって、今後もモニタリング等を通じて、荒天時や荷役作業時の動揺量の計測を行い、様々な船種・船型のデータを蓄積することで、荷役作業時の船舶の挙動、装置係留時の動揺量低減効果や安全性等に関する検証を行うのが望ましい。

5. おわりに

2箇年に亘る現地実証試験と、その結果を基に実施した数値解析により、自動係留装置導入が有用である可能性が示された。今後もモニタリング等により、装置導入効果の確度や適用性等の検証を行い、本装置の全国的な普及が進むことを切に願う。

謝辞

本稿は、国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所発注の令和5年度港湾施設の設計等に関する技術支援業務のうち、自動係留装置の設置に関する技術的検討での成果の一部をまとめたものである。

業務にあたっては、自動係留装置技術検討委員会（委員長：高山知司京都大学名誉教授）の各委員、国土交通省北陸地方整備局、関係機関から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 上田 茂：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究、港湾空港技術研究所資料、No.504、1984年12月
- PIANC: Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours, A Practical Guide; Report of Working Group 24 of the Permanent Technical Committee II, 1995.