

自動係留装置の導入・運用に向けて ～全国初「自動係留装置導入ガイドライン(案)」策定～

羽田 広希¹・森橋 里菜¹・一越 愛莉¹

¹新潟港湾空港技術調査事務所 技術開発課 (〒951-8011 新潟市中央区入船町4丁目3778番地)

敦賀港における自動係留装置の実証試験を通じ、離着岸の効率化および安全性向上に係る導入効果の検証結果を踏まえ、自動係留装置導入ガイドライン(案)を策定したことから導入・運用時の留意点について報告する。

キーワード 自動係留装置, 現地実証試験, 係留作業効率化, 船体動揺量低減

1. はじめに

我が国の港湾政策における今後の中長期的な方向性を示す「PORT2030」では、生産性の高い海上輸送を支える国内物流体系の構築のため、「次世代高規格ユニットロードターミナル」の形成が提唱されている。その中で、船舶の離着岸の迅速化と安全性の向上が求められており、海外では実用化されている自動係留装置の導入によりその実現が期待されている。

一方、福井県敦賀港は本州日本海側の中心に位置し、関西・中京地域と北海道を結ぶ国内物流の結節点として重要な役割を担っている。また、内航フェリー・RORO船(トラックや車がそのまま乗り降りできる貨物船)が就航し、内貿ユニットロード貨物が取り扱われている。

北陸地方整備局では、同港の鞠山南地区にて、国内の公共岸壁で初めて同装置を試験的に導入した。同装置導入にあたっては、「自動係留装置技術検討委員会」を設置し、現地実証試験結果を踏まえて、同装置導入効果の検証及び同装置導入ガイドライン(案)の審議を行ってきた。同ガイドライン(案)は、2025年10月に新潟港湾空港技術調査事務所のホームページにて公表した。

本稿では、自動係留装置の導入効果及びその効果を検証するため、敦賀港における現地実証試験を行い、その成果をガイドライン(案)として取りまとめを行ったことから、その同装置導入ガイドライン(案)による導入・運用時の主な留意点等を報告する。

2. 自動係留装置の概要

自動係留装置とは、船体を機械的に係留する装置である。同装置導入ガイドライン(案)では、実用化されている吸着式、ワイヤー式及びその他の方式で分類した。さらに、吸着式は空気の高圧力を利用した吸引式と、電磁力で船体を係留する磁石式が実用化されている。

敦賀港では、同装置導入時点で世界的に多く普及していた吸着式(吸引式)を採用した。

同装置は船体との吸着が完了した後、アーム部が伸縮し、岸壁の防舷材に押し当てて船体を固定する。固定完了後は、固定箇所を原点とし、風や波浪などにより生じる船体の変位をアーム部の伸縮で制御する。操作は岸壁上等から少人数で行うことができる。(図-2、図-3)



図-1 敦賀港全景

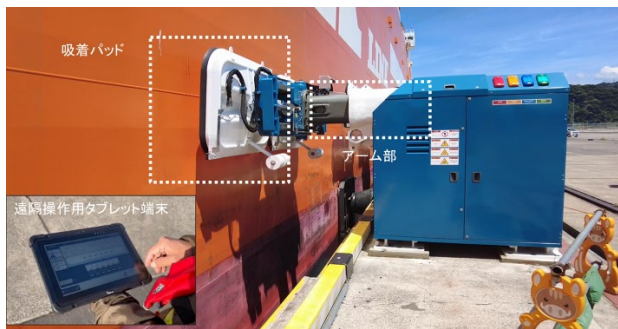


図-2 自動係留装置の構成

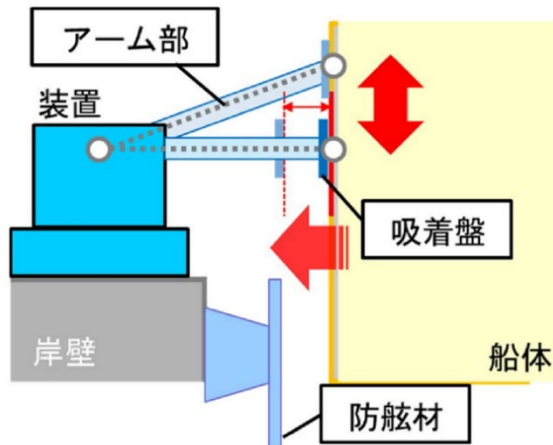


図-3 自動係留装置 係留機構図

3. 自動係留装置技術検討委員会の設置

国内の公共岸壁で初めてとなる同装置の導入に向けた準備を進めるため、2020年8月に「自動係留装置技術検討委員会」を設置して、2025年3月までに10回開催してきた。

同委員会は、波浪、船舶、係留に関する学識経験者、港湾関係者、行政関係者等で構成され、主に下記に示す事項について各段階で審議をいただき、現地実証試験を行った上で、同装置導入ガイドライン（案）の策定を行った。

- ① 同装置導入計画
- ② 現地実証試験に用いる同装置の選定
- ③ 同装置の所要基数の検討
- ④ 現地実証試験の検討方針（作業体制、計測方法・結果の整理方針）
- ⑤ 現地実証試験の実施方針
- ⑥ 同装置導入効果のとりまとめ
- ⑦ 同装置導入ガイドライン（案）



図-4 自動係留装置技術検討委員会の様子

4. 敦賀港における現地実証試験概要

(1) 自動係留装置の所用基数と実施箇所

敦賀港における自動係留装置の所用基数は、風・潮流に対する所用基数と波浪に対する所用基数を比較して6基設置することとした。

同装置は2021年に海外の工場で製作され、2022年4月より現地組立を開始し、同年5月には同装置メーカー技術者による「動作確認」や「係留作業を行う作業従事者に対するトレーニング（座学講義及び現地研修）」を経て、実際の船舶を用いた「現地実証試験」を行った。

以下に、2022年度から2024年度で実施した同試験の概要について述べる。

同試験実施箇所は図-5に示す敦賀港鞠山南地区A、B岸壁とし、対象船舶は敦賀港に就航しているRORO船（北海道航路及び九州航路）及びフェリーの3船舶とした。



図-5 現地実証試験実施箇所

(2) 2022～2023年度の現地実証試験方法

2022～2023年度は鞠山南B岸壁が整備中でRORO船移転前であったため、非荷役作業時（空載時）のRORO船又はフェリーに対して、以下の同試験手順により実施した。

- ① RORO船又はフェリー岸壁から、同試験を実施する鞠山南A又はB岸壁へ回航，着岸。
- ② 着岸時作業に係る作業員数・時間を記録。
- ③ 着岸後，30分程度毎に係留方法をSTEP1（係留索の

み)、STEP2(係留索・同装置併用)、STEP3(同装置のみ:係留索を緩める)と変更し、STEP移行時の同装置吸着に要する時間と、各STEP中の船体動揺量を計測。船体動揺量計測方法は、RTK-GNSS端末を甲板に6箇所設置し、緯度・経度・高度を測定。

動揺量計測終了後、鞍山南A又はB岸壁を離岸し、RORO船又はフェリー岸壁へ回航、離岸時作業に係る時間を着岸時と同様に記録。

(3) 2024年度の現地実証試験方法

2024年度は、2024年8月に鞍山南B岸壁へRORO船移転に伴い、荷役作業時(積載時)のRORO船に対して動揺量低減効果の検証のため、以下の同試験手順により実施した。

- ① RORO船着岸後、荷役作業時(積載時)において、30分程度毎に係留方法をSTEP1(係留索のみ)、STEP2(係留索・同装置併用)へ変更し、非荷役作業時(空載時)と同様に船体動揺量の計測を行った。

①STEP1 係留索のみ



②STEP2 係留索+自動係留装置



③STEP3 自動係留装置のみ(係留索を緩める)



図-6 船体動揺量計測時の係留方法

5. 係留作業効率化効果の検証

上記の現地実証試験結果より、風・波浪が静穏な条件下において、フェリーを対象に低速で接岸を行うことで係留索を使用せずに船体を係留させることに成功した。

(図-7)

実施手順としては、船体の位置を細かく調整するための推進装置を用いて低速で接岸し、同装置のアームが船舶に到達可能な位置まで接近したことを確認した上で、アームを伸長して船体に吸着した。

なお、実際に運用を行う場合、まず、船体の位置調整用の推進装置等を用いて船体を防舷材に押しつけた後、同装置による吸着操作を行うことで、安定した係留が可能になると考えられる。

よって、船舶が十分な操船能力を有し、船体位置の微調整が比較的容易な直立岸壁(L型岸壁)では、静穏時において同装置及び防舷材のみによる離着岸が可能であることが示された。

また、将来的に操船能力の向上等により係留索を使用せず、同装置のみで離着岸が可能となった場合、係留索作業に係る船員・作業員の負担や係留索切断等による死傷リスクを低減できる可能性がある。

特に離岸時においては、網外し作業に要する時間が最低でも2~3分程度削減され、津波発生時等の非常事態下における迅速な離岸(クイックリリース)も期待される。

一方、船種や岸壁利用条件によっては、所定の位置に船体を合わせるため、係留索を用いた位置調整作業が必要となる場合がある。このような船舶については、着岸時における係留作業の効率化効果が発揮されない場合もあることがわかった。

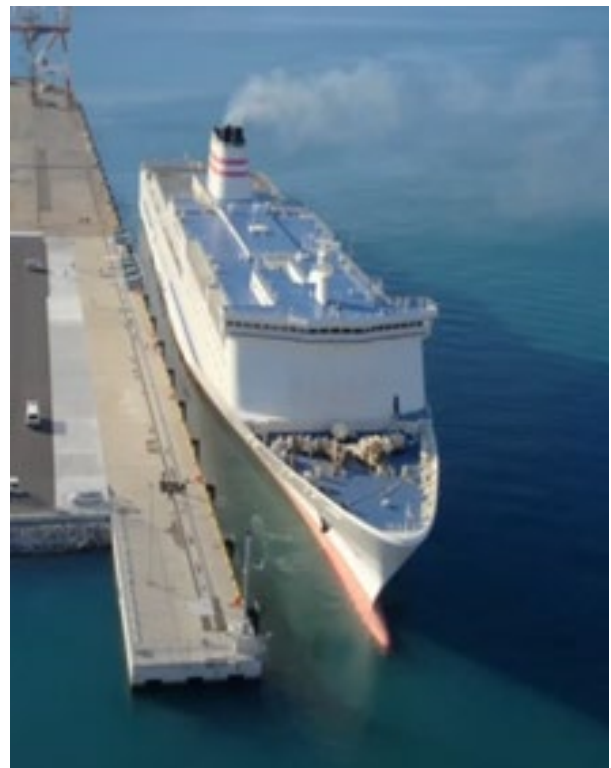


図-7 フェリーによる同装置離着岸状況

6. 動揺量低減効果の検証

(1) 非荷役作業時（空載時）の動揺量低減効果

表-1、表-2に、2022～2023年度の現地実証試験で一定の船体動揺量が計測された2事例の実験条件及び、船体動揺量の実測値を波別解析して求めた有義値の一覧を示す。

水平運動のSurge、Sway成分は、STEP1（係留索のみ）よりSTEP2（係留索・同装置併用）、STEP3（同装置のみ：係留索を緩める）の船体動揺量の方が小さい。特に事例1において、STEP1に対するSTEP2、3の船体動揺量の比率は、Surgeで約7～8割、Swayで約3～4割減少した。

鉛直運動のHeave、Pitch成分は、船体動揺量の比率は約1～3割増加する傾向にある。これは、同装置の吸着部が上下方向に追随し、鉛直方向の拘束力を持たないためと考えられる。また、横揺れ振動のRoll成分については、船体動揺量の比率は約3～6割減少する傾向にある。

以上により、同装置は水平運動のSurge、Sway成分、横揺れ振動のRoll成分に対し、動揺量低減効果を発揮することが確認できた。荷役に影響が大きいRoll成分に対して動揺量低減効果を確認できたことは重要な意味を持つ。

(2) 荷役作業時（積載時）の動揺量低減効果

表-3、表-4に、2024年度の現地実証試験で実施した荷役作業時の実験条件及び船体動揺量の有義値の一覧を示す。

非荷役作業時と同様に水平運動のSurge、Sway成分は、STEP1に対するSTEP2の船体動揺量の比率が、Surgeで約0～5割、Swayで約4～6割減少する。

また、横揺れ振動のRoll成分についても、船体動揺量の比率は約2～6割減少する傾向にある。

以上により、荷役作業時の車両走行に伴う動揺が発生した場合においても、同装置は水平運動のSurge、Sway成分、横揺れ振動のRoll成分に対し、動揺量低減効果を発揮することが確認できた。

同事例における港運事業者へのヒアリング結果では、同装置により船体動揺量が低減されることで、車両運転が行いやすくなったとの意見も得られており、同装置導入により係留・荷役作業時の安全性や効率性の向上も図られる可能性がある。

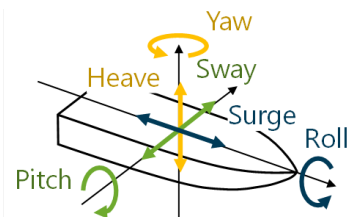


図-8 船体動揺量成分

表-1 非荷役作業時の実験条件

項目	事例1（2022/11/14）		事例2（2023/12/18）	
船舶	RORO 船		RORO 船	
岸壁	鞠山南 A 岸壁		鞠山南 B 岸壁	
係留方法	STEP1	STEP3	STEP1	STEP3
係留索/装置	6 本	6 基	8 本	5 基-
平均風向	NNW	NNW	NNW	N
平均風速	7.7 m/s	6.2 m/s	3.5 m/s	5.2 m/s
有義波高	0.19 m	0.17 m	0.16 m	0.19 m
ピーク周期	10.4 s	10.7 s	10.3 s	10.7 s

表-2 非荷役作業時の船体動揺量の比較

計測日	係留方法	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
事例1	STEP1	0.10m	0.04m	0.04m	0.82°	0.07°	0.12°
	STEP2	0.03m	0.03m	0.05m	0.58°	0.07°	0.10°
	STEP3	0.02m	0.03m	0.06m	0.51°	0.08°	0.09°
	STEP2/STEP1	24%	64%	124%	70%	106%	84%
	STEP3/STEP1	22%	62%	131%	62%	109%	74%
計測日	係留方法	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
事例2	STEP1	0.05m	0.03m	0.02m	0.68°	0.06°	0.09°
	STEP2	0.03m	0.03m	0.02m	0.26°	0.06°	0.11°
	STEP3	0.02m	0.03m	0.02m	0.40°	0.07°	0.07°
	STEP2/STEP1	63%	88%	88%	37%	113%	119%
	STEP3/STEP1	41%	94%	100%	58%	122%	80%

表-3 荷役作業時の実験条件

調査番号	実施日時	風向	平均風速 (m/s)	最大瞬間風速 (m/s)	有義波高 (m)	ピーク周期 (s)
①	2024/12/21	W	5.8～9.6	9.1～18.5	0.20	9.7～10.7
②	2025/1/15	N	3.2～7.4	5.3～12.4	0.20	9.8
③	2025/2/9	WSW	2.5～6.3	5.4～9.6	0.10	9.8
④	2025/2/18	NNW	11.3～13.8	15.8～22.0	0.40	9.8～10.0
⑤	2025/2/21	S	1.5～2.3	2.3～3.4	0.05	8.5

表-4 荷役作業時における船体動揺量の比較

調査項目	係留状態	係留索本数 装置基数	動揺量有義値					
			Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (°)	Pitch (°)	Yaw (°)
①	係留索	10本	0.062	0.040	0.035	0.943	0.087	0.079
	係留索+装置	" + 5基	0.028	0.020	0.039	0.703	0.080	0.065
	動揺量比		45%	50%	111%	75%	92%	82%
②	係留索	8本	0.037	0.038	0.034	0.565	0.090	0.052
	係留索+装置	" + 5基	0.024	0.014	0.032	0.359	0.089	0.052
	動揺量比		65%	37%	94%	64%	99%	100%
③	係留索	8本	0.036	0.029	0.024	0.452	0.067	0.040
	係留索+装置	" + 5基	0.032	0.013	0.025	0.339	0.061	0.044
	動揺量比		89%	45%	104%	75%	91%	110%
④	係留索	10本	0.032	0.039	0.037	0.592	0.094	0.060
	係留索+装置	" + 5基	0.032	0.021	0.040	0.356	0.112	0.037
	動揺量比		100%	54%	108%	60%	119%	62%
⑤	係留索	8本	0.044	0.024	0.024	0.525	0.071	0.071
	係留索+装置	" + 5基	0.020	0.009	0.017	0.179	0.052	0.030
	動揺量比		46%	38%	71%	34%	73%	42%



図-9 2024年度現地実証試験の様子

7. 自動係留装置導入・運用時の留意点等

前項までの敦賀港における現地実証試験結果を踏まえた同装置導入ガイドライン（案）による導入・運用時の主な留意点等を報告する。

(1) 自動係留装置必要性の判断

まず、同装置の導入にあたっては、対象施設において、通常時の船舶係留及び荷役作業時の課題を検討する必要がある。

同装置導入を検討する対象施設・船舶において、係留作業の担い手不足等により係留作業の省力化が望まれているかを事前に把握する必要がある。また、省力化が望まれている場合でも、同装置導入効果が小さい場合も考えられる。

例えば、作業員が係留作業と荷役作業を連続して行っており、係留作業のみを省力化できたとしても全体の拘束時間が変化しない場合もある。

また、荷役作業の運用実態によっては、定まった位置での係留が必要となり、現状の操船能力により、係留索による係留を選択する場合もある。

従って、同装置導入にあたっては、係留及び荷役作業の運用実態を踏まえて、同装置導入による効果が十分に期待されるかや、導入に際し必要となる費用等について、事前に関係者間で十分に協議を行った上で決定する必要がある。

(2) 船体条件の把握

同装置を用いて係留する船舶に対して、同装置が吸着するためには、水面から上に出ている船体側面（乾舷）が十分に確保されている必要がある。

また、同装置の吸着に障害が生じないよう、船体表面は平板であり、突起物が存在しないことも必要である。

排水口、船体防舷材、通用口等の突起物がある場合に

は、同装置の配置見直しや架台による嵩上げなど、同装置の吸着範囲を検討する必要がある。

(3) 係留施設条件の把握

同装置を導入する対象施設に対して、係船曲柱、防舷材、車止め及びクレーンレール等の附帯設備や、係留索を用いた係留作業と同装置との位置関係及び電源供給方法の確保などを事前に把握しておく必要がある。

吸着式の場合、同装置非稼働時の吸着部法線を防舷材の最大収縮時の船体側面よりも対象施設側に配置し、防舷材の受衝板が対象施設の天端高よりも高い場合には、同装置の吸着アームの稼働範囲と干渉しないように同装置を配置する必要がある。

また、高波浪時等の荒天時においては、係留索と併用する場合も想定される。万が一の係留索破断を考慮すると、係留索が切れた際に跳ね戻る危険な範囲（スナップバックゾーン）には同装置を配置することは望ましくない。



図-10 対象施設上の附帯設備の例

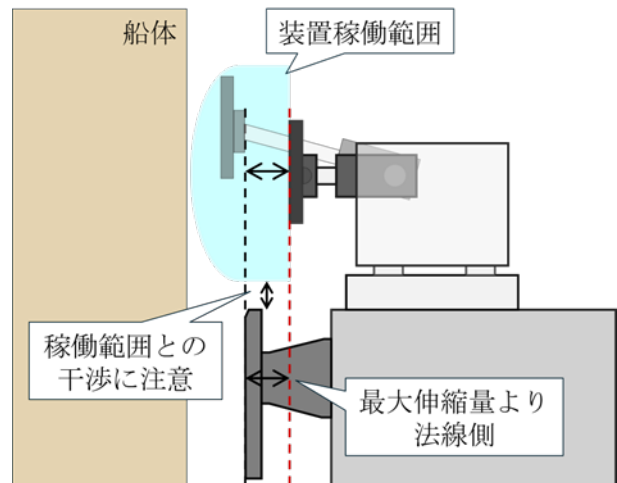


図-11 自動係留装置と防舷材の位置関係

(4) 自動係留装置の運用方法

同装置は機械製品であり、定期的な部品交換等を行いながら、故障・部材劣化等に対する計画的かつ適切な点検診断・維持補修を実施することにより、供用期間中は同装置の係留性能を十分に確保する必要がある。

敦賀港に導入された同装置の事例では、同装置メーカー

ーとのメンテナンスサービス契約や消耗部品の交換は年に1回程度、その他の定期点検は5年毎、同装置導入から10年後にオーバーホール点検を行い、計画的な部品交換が必要である。

また、同装置を稼働させるための電気代や予備品の保管費用なども必要となる。

(5) 費用対効果の事前確認

同装置の導入により、係留作業効率化や動揺量低減効果が期待される一方、前項に示すとおり同装置の運用にあたっては、維持管理費用が継続的に発生する。このため、同装置導入により期待される効果に伴う便益と、供用期間中に発生する費用を踏まえて、十分な費用対効果が得られるかを事前に確認が必要である。

(6) 地震・津波などの災害発生時の対応

地震・津波などの災害により電力が切断された場合であっても、敦賀港に導入された同装置の事例では、吸着パッドの真空密着状態が損なわなければ、一定時間は係留した状態を継続できるとされている。電源喪失時に同装置の吸着が外れ、船舶が漂流するリスクを防止するために、対象船舶のエンジン稼働に要する時間（或いは係留ロープの展開に要する時間）よりも無停電電源装置による電源供給時間を長く確保する必要がある。

また、緊急離脱を要する状況下においては、対象施設上で操作ができれば、数十秒で同装置を脱着することが可能である。また、同装置本体の真空開放バルブを操作すれば、比較的短時間で同装置を切り離すことができる。

同装置の運用にあたっては、停電訓練などを実施して緊急時の対応に備えておくことが必要である。

8. 最後に

同装置導入ガイドライン（案）は、海外メーカー製の同装置を敦賀港に試験的に導入し、技術的検討及び実証試験を通じて得られた知見をとりまとめたものである。

今後は敦賀港のみならず、全国の港湾における同装置の導入検討に活用されることで、本技術の普及・発展に寄与するとともに、港湾物流の省人化、安全性向上及び生産性向上の推進が期待される。さらに、技術的検討及び実証試験を通じて得られた知見が、同装置の全国展開に向けた第一歩となり、将来的には我が国港湾における係留作業の標準技術として定着するとともに、PORT2030が目指すSmart Portの実現を支える基盤技術として、世界に先駆けたSmart Port形成の礎となることを期待する。

謝辞： 現地実証試験にあたり、近海郵船株式会社、新日本海フェリー株式会社、敦賀海陸運輸株式会社には、船舶運航及び離着岸作業にご協力いただいた。また、同装置導入効果の取りまとめ及び同装置導入ガイドライン（案）の策定に際し、自動係留装置技術検討委員会の委員の方々より貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表す。