

現地実証試験を通した敦賀港における 自動係留装置導入の効果について

山下 裕之¹・小林 千紘¹

¹新潟港湾空港技術調査事務所 技術開発課 (〒950-8011 新潟県新潟市中央区入船町4-3778)

福井県敦賀港において我が国の公共バースでは初となる自動係留装置が導入された。同装置導入にあたり、有識者による技術検討委員会を設置して、導入検討から現地実証試験計画の立案及び導入効果の検討を行ってきた。本論文では、自動係留装置導入の概要、2023年度までの現地実証試験の結果及びその導入効果について報告する。

キーワード 自動係留装置、次世代高規格ユニットロードターミナル、現地実証試験、船体動揺シミュレーション、船体動揺量低減

1. はじめに

我が国の港湾の中長期政策であるPORT2030では、持続可能で新たな価値を創造する国内物流体系の構築を目的として「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・荷役効率化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。

海外では北欧を中心に多くの導入事例が存在する装置であるが、これまでに我が国の公共バースにおいては導入されていなかった。今回、福井県敦賀港において、我が国の公共バースでは初となる装置導入が行われた。

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船が就航し、内貿ユニットロード貨物が取り扱われている。

装置導入にあたり、有識者による技術検討委員会の開催や実船を使用した現地実証試験を行ってきた。

本論文では、装置導入の概要及び2023年度までの現地実証試験結果について報告する。

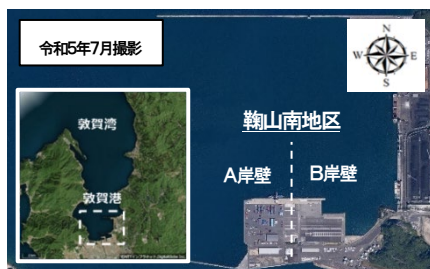


図-1 敦賀港全景

2. 自動係留装置の概要

(1)装置の構成及び係留機構

自動係留装置とは、従来の係留索を用いた係留とは異なり、岸壁に設置した自動係留装置のアームを伸ばし、船体に吸着盤を吸着させ、船体を係留するものである。

船体との吸着は、磁石の力を利用する製品も存在するが、敦賀港に設置した装置は、空気の高圧力を利用する装置であり、世界的には多く普及しているものである。

船体との吸着が完了した後は、アーム部が伸縮し、岸壁の防舷材に引き寄せて船体を固定する。固定が完了した後は、装置を支点とし、風や波浪などにより生じる船体の動揺をアーム部の伸縮で制御する。（図-2）

装置は、専用タブレット端末で遠隔操作でき、数十秒で係留を完了できることから、係留作業全体の効率化や、係留ロープの破断による事故等のリスクの軽減、船舶の揺れの低減などの効果も期待される。（図-3）

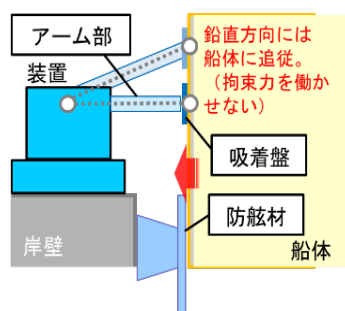


図-2 自動係留装置 係留機構図



図-3 自動係留装置の構成

3. 自動係留装置技術検討委員会の設置

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」を設置した。

技術検討委員会は、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、装置導入効果の妥当性の検討等について議論している。過年度の技術検討委員会では、船舶動揺シミュレーションを用いた自動係留装置による動揺量低減効果の検討や装置の導入効果の検証等を目的とした実証試験計画について検討した。併せて、実証試験計画における、従来の係留方法と比較検証するための測定項目や測定方法についても審議した。

4. 現地実証試験概要

表-1 に現地実証試験の概要を示す。設置した装置は、CAVOTEC社のMoorMasterTM MM400E 6基である。装置は2021年に海外の工場で作製され、敦賀港へ運搬が行われた。2022年4月より現地組立を開始し、2022年5月には自動係留装置メーカー技術者による「船無し試運転」や「動作確認」、「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、2022年8月には装置の引き渡し完了し、実際の船舶を用いた「実証試験」を開始することとなった。以下に、2022年度から2023年度で実施した実証試験の概要について述べる。

現地実証試験実施箇所は図-4 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。

以下、実証試験手順について述べる。

- ① RORO船またはフェリー岸壁から、実証試験を実施する鞠山南A・B岸壁へ回航、着岸。
- ② 着岸時作業に係る作業員数・時間をUAVやビデオカメラ等により記録（図-5）。
- 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・装置併用）、STEP3（装置のみ）と変更し、STEP移行時の装置吸着に要する時間と、各STEP中の動揺量を計測（図-6）。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、クラウドに集約。集約したデータを船体の重心位置情報に基づいて動揺量・動揺角に変換。
- ④ 動揺量計測終了後、鞠山南A・B岸壁を離岸し、RORO船また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。

表-1 現地実証試験概要

試験期間	2022/7/25～2023/4/25		2023/10/30～2024/2/13	
岸壁	鞠山南A岸壁		鞠山南B岸壁	
対象船舶	RORO船	フェリー	RORO船	フェリー
船型(GT)	約11,000	約17,000	約11,000	約17,000
船長(m)	179.9	224.8	179.9	224.5
船幅(m)	27.0	26.0	27.0	26.0
試験回数	14	1	4	2



図-4 現地実証試験実施箇所

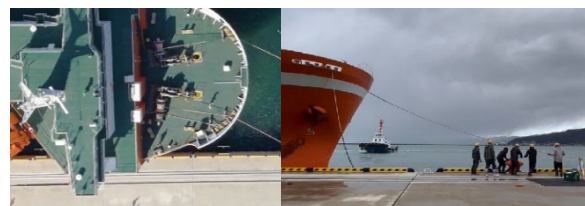


図-5 着岸時における船上及び岸壁上作業状況写真

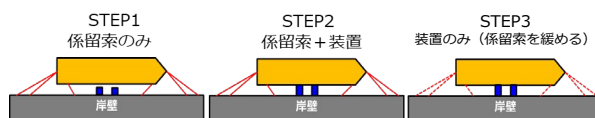


図-6 動揺計測方法

5. 作業効率化効果の検証

船舶離着岸の迅速化向上効果の検証のため、風・波浪が静穏な条件下においてフェリーを対象に係留索を使用しない離着岸試験を実施した。着岸作業については、係留索を使用せずに装置及び防舷材のみで船体を係留させることに成功した。

実施手順としては、船体のスラスターを用いて緩い速度で接岸し、対象船舶が装置のアームの届く範囲に入ったことを確認した上で、アームを伸ばして対象船舶に吸着した。

実際に運用を行う場合、まず、船体のスラスター等で船体を防舷材に押しつけてから装置による吸着動作を行うことで、安定して装置を吸着させることができると考えられる。

一方で、荒天時や船体制御能力によっては、係留索を使用せずに係留する予定位置に船体を係留するのは難しいと考えられる。フェリーのようにランプを下ろす船舶は、ランプと係船柱が干渉しない位置に係留させる必要がある。また、装置は、船体側面の船体防舷材や通用扉等に接触する箇所には吸着できない。

特に、本試験を実施した鞍山南A・B岸壁のような直線上の岸壁においては、係留予定位置に前後のずれ無く船体を着岸することは、係留索を使用しなければ難しい。十分な船体制御能力を有している上で、船舶側が位置を微調整したタイミングで装置を吸着させるなどの工夫を行うか、位置調整に係る労力が大きくないL字型の岸壁形状であれば、静穏時には装置及び防舷材のみによる離着岸が可能と考えられる。（図-7）

離岸作業については、装置脱着後において、離岸時の船体動揺は確認されず、スムーズに離岸できることを確認した。

以上に示す試験結果より、静穏時において、フェリーは係留索を使用せずに離着岸が行えることを確認した。従来の係留索による離着岸作業は10分程度を要するが、装置の吸着・脱着操作はタブレットの入力により行うことができ、操作に係る時間は数十秒程度である。このことから、離着岸作業を大幅に省力化できる可能性があり、生産性向上が期待できると考えられる。また、係留索の破断による作業員の死傷リスクの低減や、災害発生時のクイックリリース効果についても十分に期待できるものと考えられる。

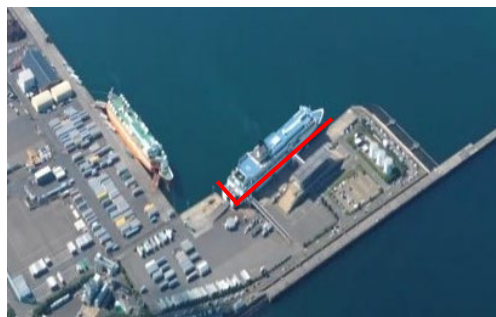


図-7 L字型岸壁（敦賀港フェリー岸壁）

6. 動揺量低減効果の検証

本検証では、現地実証試験において計測したSTEP1（係留索のみ）とSTEP3（自動係留装置のみ）の動揺量の実測値を比較した後、補足的に動揺計算を実施し、実測値との整合を図った上で、装置による動揺量低減効果を検証した。

なお、船舶動揺量の各成分の定義を、図-8 に示す。船舶の動揺は前後動揺（Surge）、左右動揺（Sway）、上下動揺（Heave）の並進運動3成分と、長軸周り回転動揺（Roll）、短軸周り回転動揺（Pitch）、鉛直軸周り回転動揺（Yaw）の回転運動3成分の動揺6成分から構成される。本論文においても、各成分毎に評価する。

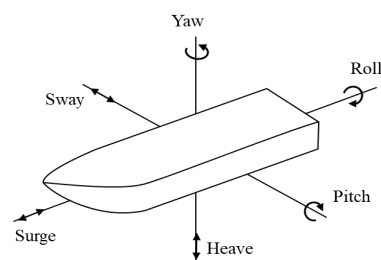


図-8 船舶の動揺6成分

(1) 実測値による検証

装置による動揺量低減効果を検証するため、比較的動揺量が大きかった2022年11月14日及び2023年12月18日のRORO船（北海道航路）における試験結果に対して動揺量を詳細に解析し、STEP1（係留索のみ）とSTEP3（装置のみ）の動揺量の実測値を比較する。

表-2 に、試験条件を示す。事例1、2の対象船舶は同じRORO船である。いずれの事例も風向き北北西～北の風が吹いており、波向は西北西、ピーク周期は10秒程度の波が観測されている。

図-9 に、係船図を示す。装置の設置位置は、船舶の平行舷の範囲、綱取りとの干渉などの関係から、船体中心付近に集中している。

表-2 動揺量低減効果試験条件

項目	事例1 (2022/11/14)		事例2 (2023/12/18)	
船舶	RORO 船		左に同じ	
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	6本※1	-	8本	-
装置	-	6基	-	5基※2
有義波高	0.19m	0.17m	0.16m	0.19m
ピーク周期	10.4s	10.7s	10.3s	10.7s
ピーク波向	WNW	NW	WNW	WNW
平均風速	7.7m/s	6.2m/s	3.5m/s	5.2m/s
平均風向	NNW	NNW	NNW	N

※1：図-9のT2、T7は不使用、※2：MM1は不調のため不使用

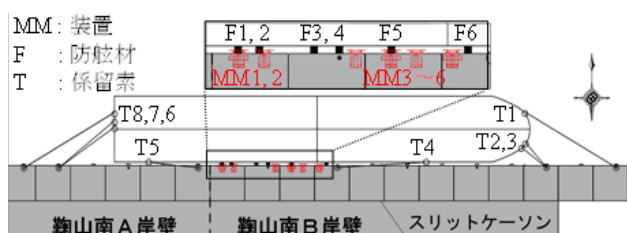


図-9 装置及び係留索による係船図（事例2）

表-3 は、動揺量の実測値を波別解析して求めた動揺量（両振幅）の有義値の一覧である。図-10は、ゼロアップクロス法により抽出した係留方法別のSurge, Roll成分の抽出結果を示す。

まず、水平運動のSurge, Sway 成分については、STEP1よりSTEP3の動揺量の方がSurgeで約6～8割、Swayで約1～4割減少した。Yaw成分の動揺量の比率は、約2～3割減少した。

次に、鉛直運動のHeave, Pitch成分については、動揺量の比率は約1～3割増加する傾向にある。

これは、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。但し、Heaveの絶対値は高々0.06m、Pitchは0.08°程度であり、増加したとしても、荷役に影響するほど動揺量は大きくない。

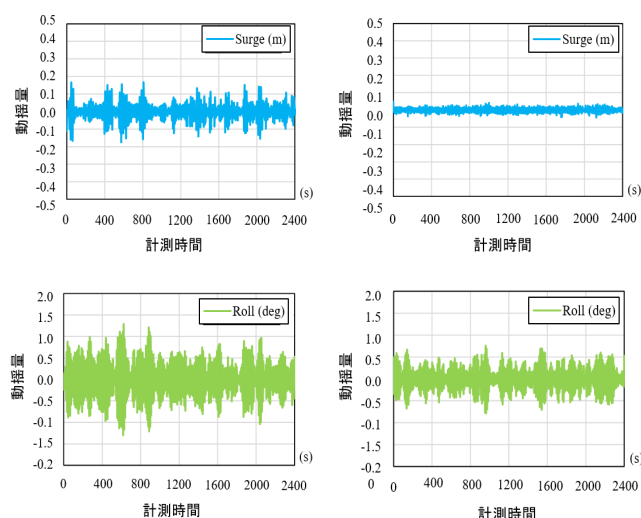
最後に横揺れ振動のRoll成分については、動揺量の比率は約4～6割減少する傾向にある。

以上より、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。敦賀港ではうねり性波浪（周期が比較的長い波）による船舶動揺が荷役障害の主要因であるため、荷役に影響が大きいRoll成分に対して動揺量低減効果が確認できたことは、係留・荷役作業時の安全性や荷役稼働率の向上に対して重要な意味を持つ。

一方、前述の通り装置は船体上下運動に対して拘束力を持たないため、鉛直運動のHeave, Pitch成分に対する動揺量低減効果は、係留索による係留ほど発揮されないと考えられる。

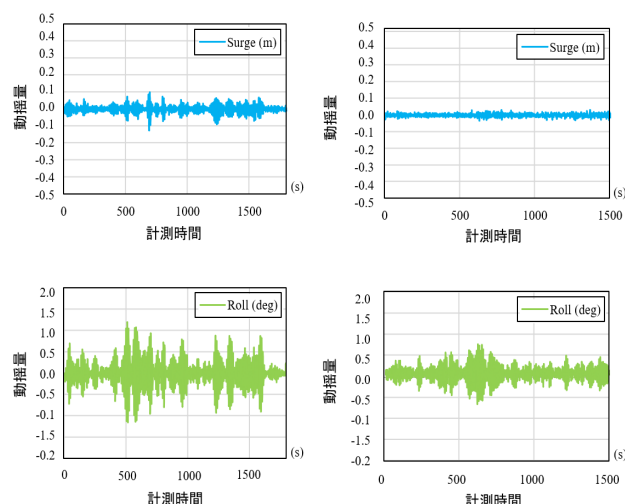
表-3 波別解析により得られた動揺量（両振幅）の有義値

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%



a) STEP1 係留索のみ b) STEP3 装置のみ
(係留索を緩める)

図-10-1 船体動揺量解析結果
(事例1 2022年11月14日)



a) STEP1 係留索のみ b) STEP3 装置のみ
(係留索を緩める)

図-10-2 船体動揺量解析結果
(事例2 2023年12月18日)

表-4 計算条件の概要（再現計算）

項目	設定値
係留方法	事例1, 2と同じ（表-2）
入射波浪諸元	波高：表-2の有義波高を反射率で補正. 周期・波向：表-2のピーク周期・波向
スペクトル型	JONSWAP ($\gamma=10$)
風諸元	表-2の平均風速・風向. 旅客船・カーフェリーの風抗力係数 ²⁾ .
計算時間	造波時間を除いて100周期分. $\Delta t=0.2$ 秒
備考	反射波あり・波浪漂流力あり

表-5 再現計算による計算値と実測値の比較
(ゼロアップクロスにより求めた動揺量の有義値)

測定日	STEP	項目	動揺量[m,deg]						動揺周期[s]					
			Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
事例1	STEP1	実測値	0.10m	0.04m	0.04m	0.82°	0.07°	0.12°	11.8s	19.4s	10.1s	10.4s	9.3s	11.4s
		計算値	0.06m	0.08m	0.04m	0.81°	0.08°	0.13°	14.4s	15.1s	11.2s	11.2s	11.2s	20.8s
		計算／実測	62%	188%	95%	98%	114%	105%	122%	78%	112%	107%	120%	183%
	STEP3	実測値	0.02m	0.03m	0.06m	0.51°	0.08°	0.09°	7.3s	10.3s	9.7s	10.2s	9.0s	8.9s
		計算値	0.03m	0.04m	0.04m	0.46°	0.07°	0.11°	12.0s	11.9s	11.0s	11.8s	11.0s	11.9s
		計算／実測	117%	135%	64%	90%	92%	120%	164%	116%	114%	115%	123%	133%
事例2	STEP1	実測値	0.05m	0.03m	0.02m	0.68°	0.06°	0.09°	10.4s	10.1s	12.0s	10.3s	9.6s	10.7s
		計算値	0.04m	0.06m	0.03m	0.71°	0.06°	0.05°	12.2s	17.6s	10.8s	11.5s	10.9s	11.8s
		計算／実測	78%	172%	104%	104%	109%	53%	117%	175%	90%	112%	113%	110%
	STEP3	実測値	0.02m	0.03m	0.02m	0.40°	0.07°	0.07°	7.4s	9.5s	10.2s	10.1s	9.1s	10.3s
		計算値	0.01m	0.03m	0.03m	0.37°	0.08°	0.06°	7.8s	12.3s	11.7s	12.2s	11.5s	12.4s
		計算／実測	65%	103%	133%	94%	115%	85%	106%	129%	114%	121%	126%	120%

(2) 計算値による検証

船体動揺シミュレーションとは、波浪の波向方向、有義波周期及び有義波高を変化させて船舶の最大動揺量（6成分）を求め、荷役限界波高を算出するものである。

実測値による動揺量低減効果の評価は2事例のみの結果に基づくものであるため、動揺計算により補足検証を行った。本検証では、再現計算により再現性を確認した上で、予測計算による装置の荷役限界波高を求める。

a) 再現計算

表-4 に、再現計算条件の概要を示す。事例1, 2の動揺量を対象に再現計算を実施する。表-5 は、事例1, 2の再現計算により得られた動揺量・周期の有義値と実測値とを比較したものである。係留索や防舷材などの係留系の影響を受けにくいHeave成分、Pitch成分の動揺量の実測値と計測値の誤差はそれぞれ $\pm 0.02\text{m}$ 、 0.01° 以内に収まる結果となった。また、最も荷役障害に影響を与えるRoll成分の誤差は ± 1 割程度であり、動揺周期も $+1\sim 2$ 割程度であった。Surge成分、Sway成分については誤差がやや大きいものの、絶対値が高々 0.05m 程度のオーダーであることから、設定した条件により概ね係留索及び装置係留時の動揺量が再現できているものと判断した。

b) 予測計算

再現計算を基に設定したパラメータを用いて予測計算を行い、係留索及び装置で係留した場合の荷役限界動揺量相当となる波高（荷役限界波高）を算出した。係留索は8本、装置6基として、風外力は与えない条件とした。

$0.10\text{m}\sim 0.50\text{m}$ （ 0.10m 間隔）の入射有義波高に対して動揺計算を行った。荷役限界動揺量は、国際航路協会（PIANC）による提案値³⁾を採用した。なお、本論文では荷役限界波高の上限値を 0.5m として整理した。

表-6 は、予測計算により求めた荷役限界波高の一覧である。黄色でハッチングした値は、荷役限界波高が 0.5m 未満の動揺成分を示す。波向が大きく周期が長いほど、荷役限界波高は小さい。Surge, Sway, Roll成分については、係留索に比べて装置の荷役限界波高の方が大きくなった。また、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が同程度であった。この傾向は、実測値で評価した動揺量低減効果と同様である。限られた実測値に基づいて評価した動揺量低減効果の傾向と、広範な周期・波向条件による動揺量計算結果に基づいて評価した傾向が同様であることから、装置によるRORO船に対する動揺量低減効果は、限られた条件下でのみ発揮されるものではなく、汎用的なものであると考えられる。

表-6 予測計算より求めた RORO 船の
荷役限界波高の一覧

係留条件	周期 $T_{1/3}$	波向 θ	荷役限界波高[m]						
			Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw	※1
係留索8本	8s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		30°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		45°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		60°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40
	10s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		30°	0.50	0.50	0.50	0.37	0.50	0.50	0.50
		45°	0.50	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.35
		60°	0.50	0.50	0.50	0.28	0.50	0.50	0.20
	12s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.35
		30°	0.41	0.50	0.50	0.28	0.50	0.48	0.30
		45°	0.34	0.50	0.50	0.20	0.50	0.33	0.25
		60°	0.38	0.41	0.47	0.21	0.50	0.37	0.20
装置6基	8s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		30°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		45°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		60°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
	10s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		30°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		45°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		60°	0.50	0.50	0.44	0.33	0.50	0.50	-
	12s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		30°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.44	-
		45°	0.50	0.50	0.50	0.27	0.50	0.35	-
		60°	0.50	0.50	0.47	0.19	0.50	0.35	-

※1：長周期波影響評価マニュアルで提案されている荷役限界波高（ロールオン・ロールオフ船 2000DWT）⁴⁾

7. まとめ

本実証試験における主な結論及び今後の課題は、以下の通りである。

- (1) 船が十分な船体制御能力を有するか、位置調整に係る労力が大きくないL字型の岸壁係留であれば、静穏時には装置及び防舷材のみによる離着岸が可能と考えられることから、船舶の離着岸作業を大幅に迅速化できる可能性があることを確認した。
- (2) 係留索と比較して、特に水平運動成分（Surge, Sway）や横揺れ成分（Roll）に対し、装置による動揺量低減効果が高いことが示唆された。一方、鉛直運動成分（Heave, Pitch）については、係留索と比較して動揺量低減効果が発揮されないが、これは装置の吸着部及びアームは船体上下運動に追従し、拘束力を持たないためである。

(3) 装置脱着直後において、離着時の船体の動揺は確認されず、スムーズに離岸できることを確認したことから、災害発生時のクイックリリース効果についても十分に期待できるものと考えられる。

(4) 今後の課題として、これまでの実証試験では、対象船舶であるRORO船・フェリーが荷役作業を行っている時間帯での動揺量低減効果の検証は実施できなかった。そのため、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。

また、荒天時における試験が実施できておらず、強風・高波浪作業時における装置による係留の安全性については十分に検証できていない。

今後は、荷役作業時及び強風・高波浪作業時における船体動揺量の継続調査を実施して、本装置の導入効果や船体動揺解析の精度向上を図りたい。また、本装置の全国展開に向けて、本装置導入検討に資する基礎資料を整理する計画である。

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、船舶運航及び各種離着岸作業にご協力頂いた。また、装置導入効果の取りまとめに際し、高山知司京都大学名誉教授、上田茂鳥取大学名誉教授、米山治男港湾空港技術研究所特別研究主幹及び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頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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、港湾技研資料, No. 504, pp. 29 -30, 1985.
- 2) 上田茂, 白石悟, 浅野恒平, 大島弘之：新しい風抗力係数の計算式の提案および係留船舶の動揺への影響の検討, 港湾技研資料 No. 760, pp. 42 -44, 1993.
- 3) PIANC : Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours-A Practical Guide-, Report of Working Group 24 of the Permanent Technical Committee II, 1995.
- 4) (財) 沿岸開発技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル, 沿岸開発ライブラリー21, 付録A-4, 2004.