

吸着式自動係留装置導入ガイドライン (案)

令和7年10月

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

※留意事項

- ・当資料は、利用者の責任において利用してください。
- ・当資料の利用に当たって発生するいかなる損害にも責任を負いません。
- ・当資料の著作権は、新潟港湾空港技術調査事務所に在ります。

まえがき

自動係留装置は、港湾における係留作業の効率化と安全性の向上に大きく寄与することが期待されています。しかし、我が国では公共バースにおいて自動係留装置の導入事例がなく、その導入方法や運用に関する技術的知見が十分に蓄積されているとは言えません。

上記のような現状を踏まえ、北陸地方整備局では福井県敦賀港において試験的に導入した既存メーカー（外国製）の自動係留装置の検討で得た知見をとりまとめ、吸着式自動係留装置導入ガイドライン（案）として策定いたしました。本ガイドライン（案）では、自動係留装置を係留施設に設置する際の検討事項及び自動係留装置の運用、維持管理に関する内容を技術情報として提供しています。

今後、本ガイドライン（案）が自動係留装置の導入・運用に活用され、本技術の普及・発展に寄与することを期待しています。

目次

1. 総説	1
1.1 背景、目的	1
1.2 用語及び定義	2
1.3 自動係留装置の分類	3
2. 自動係留装置導入のための検討項目	6
2.1 自動係留装置導入必要性の判断	6
2.2 検討フロー	7
2.3 資料収集・整理	8
2.4 船体条件の把握	17
2.5 係留施設条件の把握	18
2.6 自動係留装置の所要基数・配置の検討	22
2.7 係留施設の安定性照査	27
2.8 装置の維持管理	30
2.9 装置の運用方法	30
3. 自動係留装置の導入効果	32
3.1 自動係留装置導入効果の概要	32
3.2 自動係留装置導入による係留作業効率化効果	32
3.3 自動係留装置導入による動揺量低減効果	42
3.4 自動係留装置導入によるその他の定性的な効果	47

4.	自動係留装置の導入事例	48
4.1	敦賀港の導入事例	48
4.2	北九州港の導入事例	66
4.3	海外での導入状況	67
5.	自動係留装置の導入時及び運用上の留意点	70
5.1	費用対効果の事前確認	70
5.2	荷役・係留作業への影響の確認	70
5.3	故障時の対応	70
5.4	停電発生時の対応故障時の対応	70
5.5	地震・津波発生時	70
6.	参考資料	72
6.1	敦賀港の実証試験で対象とした船舶の操船能力	72

1. 総説

1.1 背景、目的

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、自動係留装置の導入によりその実現が期待されている。

従来の係留方式は主に係留索を用いた方法であったが、海外では自動係留装置を利用した離着岸が実用化されている。これにより、船舶の離着岸における作業時間の短縮、作業者の負担軽減、さらに係留索破断による事故の発生リスク等を低減することが期待される。国内においても、北陸地方整備局により全国に先駆けて福井県敦賀港の公共バースにおいて試験的に自動係留装置が導入され、その効果が検証されている。

本ガイドライン（案）は、自動係留装置導入にあたり、有識者から構成する「自動係留装置技術検討委員会」を設置し、装置製作者側が示した設置基準及び装置の性能を解析し、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」を踏まえた評価を行い、知見をとりまとめたものである。

1.2 用語及び定義

1.2.1 用語の定義

自動係留装置：	船体を機械的に係留し、係留索の取り放しの作業を自動化することで作業の省力化を図る装置である。
吸着式：	自動係留装置が船体を係留する方式の一つ。係留施設上や係留施設側面に装置を設置し、伸縮アーム先端に取り付けた吸着盤を船体に押し当てて吸着力で船体を係留する方式である。
ワイヤ式：	自動係留装置が船体を係留する方式の一つ。係留施設と船舶をワイヤーでつなぐ方式である。
係留索：	船を係留するために船と係船柱とを結ぶロープ、ワイヤー等。
防舷材：	船体に接触する係留施設部分に設置される防衝設備。ゴム防舷材、空気式防舷材、杭式防舷材などがある。
動揺量：	船体の揺れの程度
荷役限界波高：	荷役作業を行うことができる限界の動揺量が生じる波高。
荷役稼働率：	荷役作業を行うことができる頻度・割合。
乾舷：	水面から上甲板までの距離。
吸着盤：	吸着式自動係留装置の一部で、船体に押し当てて吸着する部品。
係船柱：	係船岸のバースに設置する船舶係留用の設備。通常の船舶の係留または離接岸の際に用いるバース水際線近くに設ける係船曲柱（bollard, bit）と、暴風時の船舶の係留のためにバースの両端の水際線より離れた位置に設ける係船直柱（mooring post）がある。

【解説】

個々で示した用語は、本ガイドライン（案）で取り扱う基本的な事項について定義したものであり、狭義の意味での用語に関する定義は付属資料、関係基準・指針等を参照されたい。

1.2.2 略語の説明

装置：	自動係留装置のこと。本ガイドライン（案）p.6以降では特筆しない限り、吸着式の自動係留装置のことを指す。
-----	--

1.3 自動係留装置の分類

自動係留装置とは、船体を機械的に係留し、係留作業の省力化、安全性の向上を図る装置である。主に、吸着式、ワイヤー式、その他の方式の自動係留装置が実用化されている。

【解説】

船舶の係留に係わる作業を自動化することができる様々な製品が実用化されている¹。本ガイドライン（案）では、自動係留装置を吸着式、ワイヤー式、その他に分類する。

(1) 吸着式

吸着式は、係留施設上や係留施設側面に係船装置を設置し、伸縮アーム先端に取り付けた吸着盤を船体に押し当て、吸着力で船体を係留する方法である。吸着式には、吸引式（空気の負圧力）と磁石の力を利用した2つの方式がある。いずれの方式であっても、主な利点として、迅速な入出港が可能であり、係留索を使用しないため、係留施設上や船上での係留作業を省力化できることが挙げられる。

① 吸引式

吸引式は、空気の負圧力を利用して船体を係留する方式である。現在実用されている製品として、CAVOTEC社の「Moor Master」²や、TRELLEBORG社の「Auto Moor」³などが挙げられる。このシステムは、係留施設側面または係留施設上に本体を設置し、遠隔制御によって油圧可動式アームに取り付けた吸着盤が船体に向かって伸び、取り付くことで、係留を完了するものである。

② 磁石式

磁石式は、電磁力で船体を係留する方式である。現在実用されている製品として、Mampaey社の「Intelligent Dock Locking System」⁴がある。このシステムは、係留施設上や浮桟橋、船上に取り付けるタイプがあり、電磁石の吸着力を利用して船体を係留するものである。

¹ 鎌谷崇史. (2022). 「港湾用語の基礎知識 124 自動係留」、港湾、Vol.99、P.49.

² Cavotec. "MoorMaster". Cavotec. <https://www.moormaster.com/>, (参照 2024-10-11).

³ Trelleborg. "AutoMoor". Trelleborg Marine and Infrastructure. <https://www.trelleborg.com/en/marine-and-infrastructure/products-solutions-and-services/marine/docking-and-mooring/automated-mooring-systems/automoor>, (参照 2024-10-11).

⁴ マリックスエンジニアリング株式会社. "IDLS (Intelligent Docking & Loading System)". マリックスエンジニアリング株式会社. <http://www.marixeng.co.jp/product/pdf/idls.pdf>, (参照 2024-10-11).

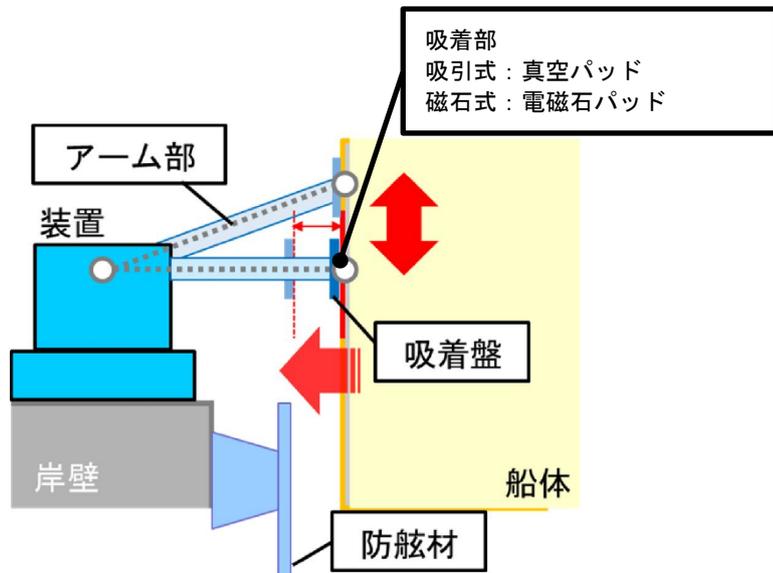


図 1-1 吸着式のイメージ図

(2) ワイヤー式

ワイヤー式は、船舶側面の突起物と係留施設上のワイヤーを繋ぐ方式である。現在実用されている製品として、MACGREGOR 社の「MOOREX」⁵が挙げられる。このシステムは、国内では2018年に岩手県宮古港で初めて採用されており、自動で係留索の張力を調整し、船体を係留施設に沿って係留するものである。なお、導入に当たっては、船体改良が必要となる場合がある。

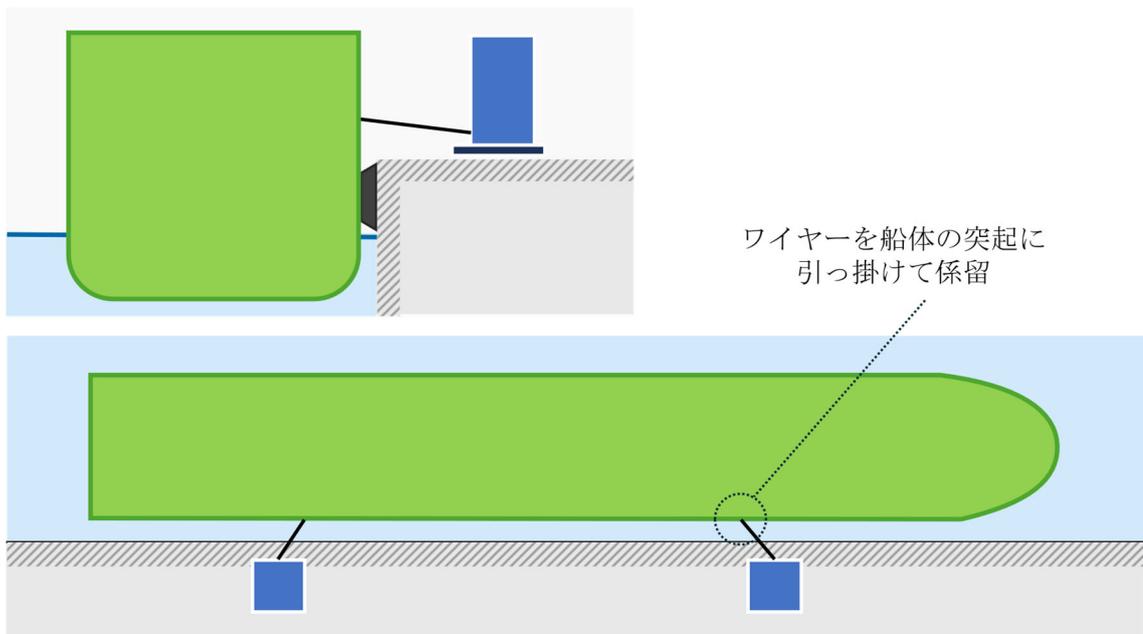


図 1-2 ワイヤー式のイメージ図

⁵ MACGREGOR. "Automated mooring system". MACGREGOR. <https://www.macgregor.com/Intelligent-solutions/automated-mooring-system/>, (参照 2024-10-11).

(3) その他

九州地方整備局関門航路事務所の「海翔丸」の専用棧橋で導入された係船装置は、吸着盤による吸着とワイヤーの引き込みを行う方式を採用している。我が国で開発されたこの装置は船舶の自動操船システムと組み合わせることで、先駆的な係船技術を実現している。詳細は、「4.2 北九州港の導入事例」で紹介する。

2. 自動係留装置導入のための検討項目

2.1 自動係留装置導入必要性の判断

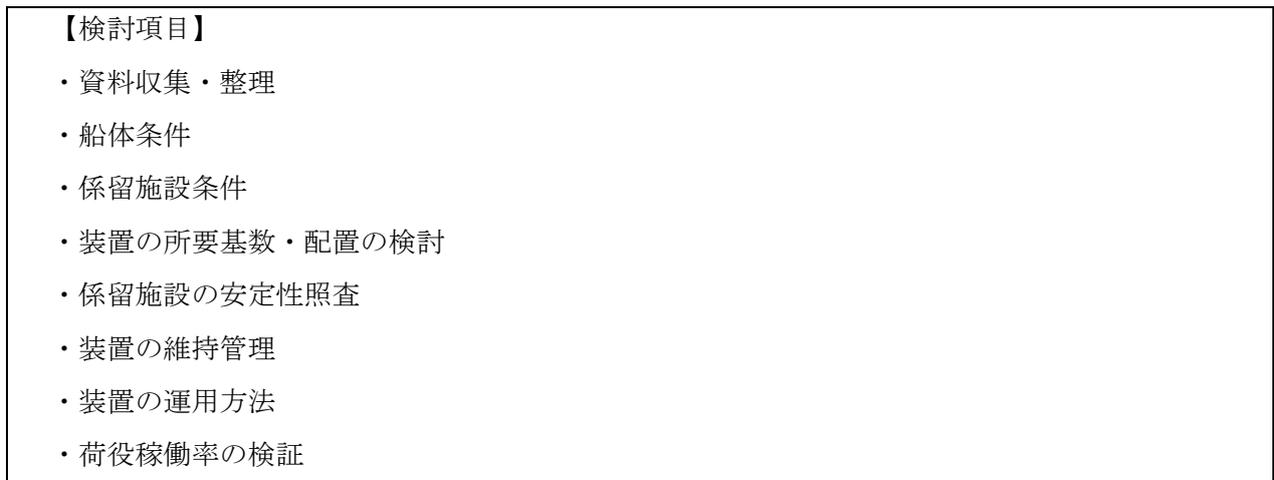
装置の導入に当たっては、対象とする係留施設において、通常行っている船舶の係留・荷役での課題を踏まえて検討する必要がある。

装置導入の判断に当たっては、まず装置導入を検討する対象係留施設・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、また装置導入によって省力化が期待されるかを事前に把握する必要がある。省力化が望まれている場合でも、装置導入による効果が小さい場合（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等）においては、装置導入を見送り、係留索による係留作業の継続や、または他の省力化方策を検討するという選択肢もあり得る。また、装置導入によって省力化が期待される場合においても、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、装置導入に当たっては、係留及び荷役作業の運用実態を踏まえ、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対策に係る費用等について、事前に関係者（船社、港運業者、施設管理者等）間で十分に協議を行った上で決定するのが望ましい。

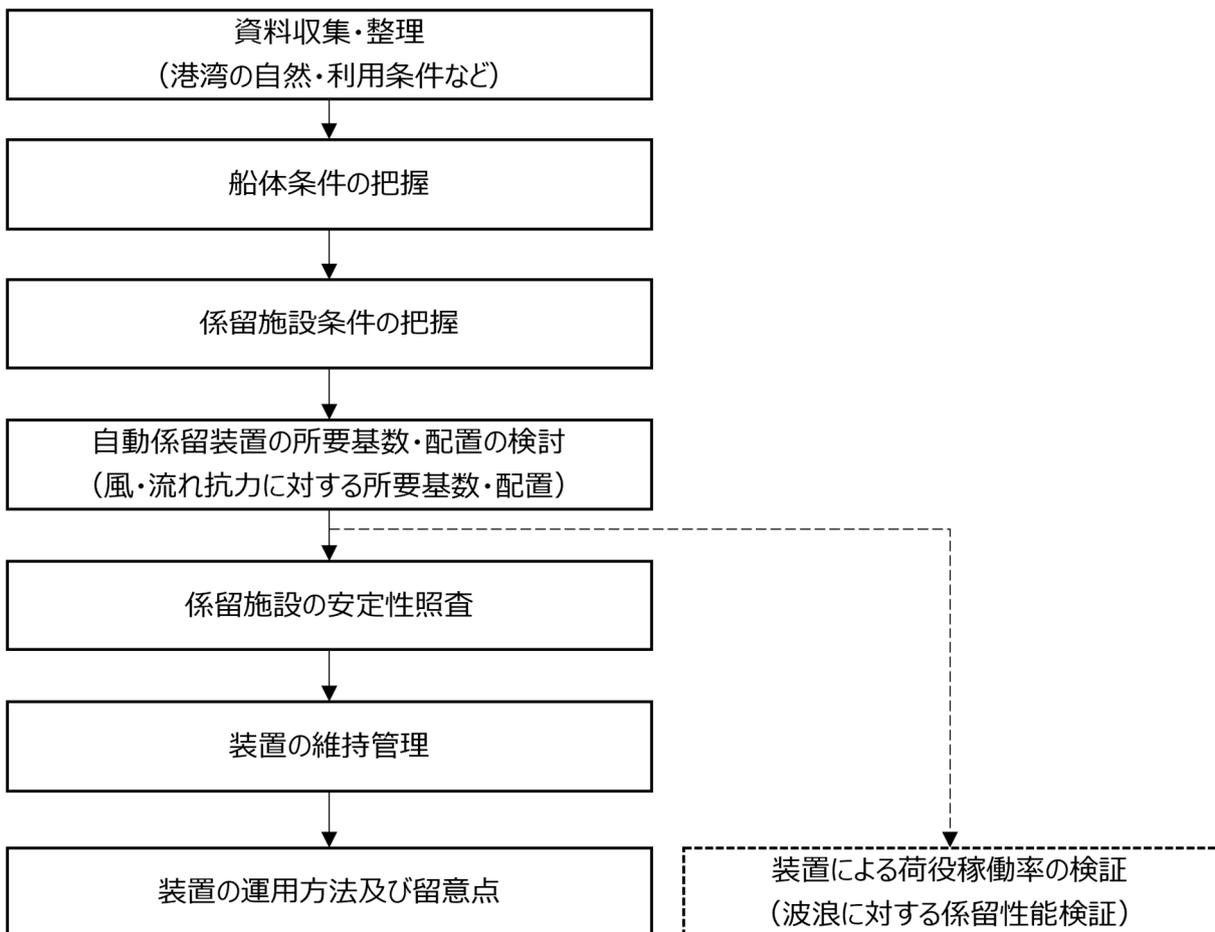
2.2 検討フロー

以下に、装置の導入に当たっての検討フローを示す。



【解説】

以下に、装置導入に当たっての検討フロー例を示す。



※装置導入時の必須項目ではないが、荷役稼働率向上の効果を期待する場合には必要に応じて検討する。

図 2-1 検討フロー例

2.3 資料収集・整理

自動係留装置を導入する港湾における、自然・利用条件、係留施設諸元、船舶諸元等に関する資料を収集・整理する。収集する資料は、以下の通りである。

- ・係留・荷役関連資料
- ・自然条件関連資料（風、波浪、潮位、潮流条件）
- ・係留施設、上部工、附帯設備関連資料
- ・船体関連資料
- ・自動係留装置（吸着式）の諸元

【解説】

以下に、装置の導入検討に当たり、収集・整理すべき資料を示す。

(1) 係留・荷役関連資料

① 係留及び荷役作業の運用実態

係留及び荷役作業に係る人員の作業形態や、作業に当たっての留意事項等の運用実態を予め把握することで、装置導入による係留作業効率化（係留作業の省力化等）が期待できるかを確認する。また、係留・荷役作業手順や、作業に係る時間・人員・頻度等を整理することで、装置導入による係留作業効率化効果を定量的に評価する際の基礎資料として活用することができる。

表 2-1 係留索による係留作業に従事する作業人員と作業時間（例）

		作業人員数 (船首・船尾合計)	1人当たりの 作業時間
入港～接岸	船上	●名	～●分（見張り時間を含む）
	係留施設上	●名	●時間（始業前ミーティング）
着岸作業	船上	●名	約●分
	係留施設上	●名	約●分
離岸作業	船上	●名	約●分
	係留施設上	●名	約●分
出航後	係留施設上	●名	●時間（作業後ミーティング）

② 入出港・荷役中止基準等の運航上の指標とされる基準風速

対象海域において入出港・荷役中止基準としている基準風速は、装置の所要基数・配置を決定する際に必要となる設計風速を設定する上で参考となるため、港湾管理者や船社に運航上の指標とされる基準風速を確認する。

③ 実績の荷役非稼働率

装置の所要基数・配置の決定に使用する設計風速の設定に当たり、設計風速を超過する風速の出現頻度が実績の荷役非稼働率よりも著しく大きい場合、装置の利用に支障が生じる可能性がある。

このため、設計風速を超過する風速の出現頻度が荷役非稼働率の実績値を大きく上回らないことを確認しておくのが望ましい。

なお、荷役非稼働率の実績値については、関係者（船社、港運業者、施設管理者等）へのヒアリングにより入手し、以下の式により概算することができる。

$$\text{荷役非稼働率}^{\ast}\text{の実績値} = \text{荷役障害が発生した年間回数} / \text{全年間荷役回数}$$

※荷役非稼働率は年によってばらつきがあるため統計年数については注意すること。

(2) 自然条件関連資料

① 風関連データ

当該港湾における風観測データを収集し、10分間平均風速の風速・風向頻度表を整理することで、装置の所要基数・配置の決定に使用する設計風速の設定根拠として活用する。

なお、風観測データの収集については、気象庁地域気象観測所又は装置を導入する係留施設付近で観測されている場合には施設管理者等より入手することが望ましい。

表 2-2 風速・風向頻度表 (例)

観測地点	敦賀港港内																規定回数: 126864		
	統計期間 2020年10月～2023年2月																測得回数: 126321 (99.57%)		
風速階級 (m)	波向階級																合計	累計	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW			
0.00 ~ 1.00	498 (0.39%)	206 (0.16%)	204 (0.16%)	176 (0.14%)	246 (0.19%)	303 (0.24%)	434 (0.34%)	527 (0.42%)	506 (0.4%)	403 (0.32%)	329 (0.26%)	316 (0.25%)	337 (0.27%)	357 (0.28%)	320 (0.25%)	253 (0.2%)	5415 (4.29%)	5415 (4.29%)	
1.00 ~ 2.00	1003 (0.79%)	629 (0.5%)	434 (0.34%)	228 (0.18%)	342 (0.27%)	632 (0.5%)	1883 (1.48%)	3052 (2.41%)	3438 (2.71%)	1712 (1.35%)	902 (0.71%)	455 (0.36%)	452 (0.36%)	675 (0.53%)	846 (0.67%)	825 (0.65%)	17508 (13.86%)	22923 (18.15%)	
2.00 ~ 3.00	1607 (1.27%)	719 (0.57%)	347 (0.27%)	137 (0.11%)	164 (0.13%)	309 (0.24%)	1851 (1.46%)	3893 (3.07%)	7192 (5.67%)	3151 (2.48%)	795 (0.63%)	239 (0.19%)	271 (0.21%)	595 (0.47%)	620 (0.49%)	875 (0.69%)	22765 (18.02%)	45688 (36.17%)	
3.00 ~ 4.00	2388 (1.88%)	848 (0.67%)	176 (0.14%)	51 (0.04%)	43 (0.03%)	83 (0.07%)	1088 (0.86%)	2648 (2.09%)	4112 (3.24%)	1909 (1.5%)	474 (0.37%)	190 (0.15%)	235 (0.19%)	596 (0.47%)	549 (0.43%)	925 (0.73%)	16315 (12.92%)	62003 (49.08%)	
4.00 ~ 5.00	2670 (2.1%)	812 (0.64%)	63 (0.05%)	17 (0.01%)	8 (0.01%)	19 (0.01%)	993 (0.78%)	3602 (2.84%)	2600 (2.05%)	620 (0.49%)	272 (0.21%)	218 (0.17%)	256 (0.2%)	556 (0.44%)	624 (0.49%)	1017 (0.8%)	14347 (11.36%)	76350 (60.44%)	
5.00 ~ 6.00	2241 (1.77%)	533 (0.42%)	23 (0.02%)	4 (0%)		12 (0.01%)	1160 (0.91%)	3972 (3.13%)	2365 (1.86%)	214 (0.17%)	184 (0.15%)	221 (0.17%)	341 (0.27%)	559 (0.44%)	620 (0.49%)	1283 (1.01%)	13732 (10.87%)	90082 (71.31%)	
6.00 ~ 7.00	1877 (1.48%)	295 (0.23%)	4 (0%)			8 (0.01%)	1051 (0.83%)	3170 (2.5%)	1801 (1.42%)	94 (0.07%)	172 (0.14%)	183 (0.14%)	346 (0.27%)	475 (0.37%)	579 (0.46%)	1398 (1.1%)	11453 (9.07%)	101535 (80.38%)	
7.00 ~ 8.00	1407 (1.11%)	160 (0.13%)	1 (0%)			1 (0%)	731 (0.58%)	1927 (1.52%)	1065 (0.84%)	54 (0.04%)	128 (0.1%)	112 (0.09%)	352 (0.28%)	401 (0.32%)	551 (0.43%)	1277 (1.01%)	8167 (6.47%)	109702 (86.84%)	
8.00 ~ 9.00	1130 (0.89%)	64 (0.05%)					440 (0.35%)	1039 (0.82%)	590 (0.47%)	23 (0.02%)	73 (0.06%)	112 (0.09%)	351 (0.28%)	354 (0.28%)	473 (0.37%)	1221 (0.96%)	5870 (4.65%)	115572 (91.49%)	
9.00 ~ 10.00	943 (0.74%)	19 (0.01%)				1 (0%)	170 (0.13%)	457 (0.36%)	282 (0.22%)	12 (0.01%)	32 (0.03%)	61 (0.05%)	278 (0.22%)	292 (0.23%)	370 (0.29%)	1032 (0.81%)	3949 (3.13%)	119521 (94.62%)	
10.00 ~ 11.00	745 (0.59%)	6 (0%)					102 (0.08%)	222 (0.17%)	93 (0.07%)	1 (0%)	10 (0.01%)	19 (0.01%)	179 (0.14%)	223 (0.18%)	242 (0.19%)	783 (0.62%)	2625 (2.08%)	122146 (96.69%)	
11.00 ~ 12.00	513 (0.4%)	4 (0%)					46 (0.04%)	105 (0.08%)	25 (0.02%)	2 (0%)	3 (0%)	6 (0%)	113 (0.13%)	171 (0.13%)	160 (0.13%)	657 (0.52%)	1805 (1.43%)	123951 (98.12%)	
12.00 ~ 13.00	302 (0.24%)	1 (0%)					44 (0.03%)	42 (0.03%)	10 (0.01%)				1 (0%)	38 (0.03%)	144 (0.11%)	60 (0.05%)	467 (0.37%)	1109 (0.88%)	125060 (99%)
13.00 ~ 14.00	174 (0.14%)						38 (0.03%)	16 (0.01%)	2 (0%)				28 (0.02%)	97 (0.08%)	19 (0.01%)	276 (0.22%)	650 (0.51%)	125710 (99.52%)	
14.00 ~	125 (0.1%)						65 (0.05%)	5 (0%)					13 (0.01%)	113 (0.09%)	3 (0%)	287 (0.23%)	611 (0.48%)	126321 (100%)	
合計	17623 (13.95%)	4296 (3.4%)	1252 (0.99%)	613 (0.49%)	803 (0.64%)	1368 (1.08%)	10096 (7.99%)	24677 (19.54%)	24081 (19.06%)	8195 (6.49%)	3374 (2.67%)	2133 (1.69%)	3590 (2.84%)	5608 (4.44%)	6036 (4.78%)	12576 (9.96%)	126321 (100%)		

注) 上段は出現回数、下段 () は出現率 (%) を示す。

② 波浪関連データ

波浪に対する装置の所要基数・配置の決定及び係留性能の評価を行う場合には、当該港湾における全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）及び装置を導入する係留施設前面の波浪観測に基づきデータを収集し、波高・波向・周期の出現頻度を整理した上で、装置の所要基数・配置の検討及び装置係留時における荷役稼働率の算定に活用する。

表 2-3 波高・波向別頻度表 通年（例）

場所: 敦賀港 期間: 2011年4月1日～2020年3月31日 観測間隔: 2時間																				観測回数:	39456
																				欠損回数:	948
																				欠損率:	2.40%
波高(m)	波向	波向なし	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	計	累計	
0.0~0.5		10082 (26.18%)	604 (1.57%)	559 (1.45%)	266 (0.69%)					1 (0.%)			239 (0.62%)	403 (1.05%)	1033 (2.68%)	1765 (4.58%)	2105 (5.47%)	2181 (5.66%)	19238 (49.96%)	19238 (49.96%)	
0.5~1.0		3066 (7.96%)	125 (0.32%)	89 (0.23%)	50 (0.13%)								51 (0.13%)	91 (0.24%)	314 (0.82%)	1094 (2.84%)	2146 (5.57%)	1934 (5.02%)	8960 (23.27%)	28198 (73.23%)	
1.0~1.5		1274 (3.31%)	15 (0.03%)	9 (0.02%)	3 (0.01%)								3 (0.01%)	11 (0.03%)	92 (0.24%)	651 (1.69%)	1408 (3.66%)	1005 (2.61%)	4489 (11.61%)	32667 (84.83%)	
1.5~2.0		696 (1.81%)											2 (0.01%)	48 (0.12%)	464 (1.2%)	791 (2.05%)	425 (1.1%)	2426 (6.3%)	35093 (91.13%)		
2.0~2.5		450 (1.17%)													33 (0.09%)	337 (0.88%)	522 (1.36%)	203 (0.53%)	1545 (4.01%)	36638 (95.14%)	
2.5~3.0		247 (0.64%)													16 (0.04%)	222 (0.58%)	321 (0.83%)	96 (0.25%)	902 (2.34%)	37540 (97.49%)	
3.0~3.5		136 (0.35%)													10 (0.03%)	157 (0.41%)	173 (0.45%)	53 (0.14%)	529 (1.37%)	38069 (98.86%)	
3.5~4.0		64 (0.17%)													1 (0.%)	79 (0.21%)	75 (0.19%)	28 (0.07%)	247 (0.64%)	38316 (99.5%)	
4.0~4.5		34 (0.09%)													1 (0.%)	39 (0.1%)	36 (0.09%)	7 (0.02%)	117 (0.3%)	38433 (99.81%)	
4.5~5.0		10 (0.03%)														17 (0.04%)	18 (0.05%)	3 (0.01%)	48 (0.12%)	38481 (99.93%)	
5.0~5.5		6 (0.02%)														3 (0.01%)	8 (0.02%)	2 (0.01%)	19 (0.05%)	38500 (99.98%)	
5.5~6.0																3 (0.01%)	5 (0.01%)		8 (0.02%)	38508 (100%)	
6.0~6.5																			(0%)	38508 (100%)	
6.5~																			(0%)	38508 (100%)	
合計		16065 (41.72%)	742 (1.93%)	657 (1.71%)	319 (0.83%)	(0%)	(0%)	(0%)	(0%)	1 (0.%)	(0%)	(0%)	293 (0.76%)	507 (1.32%)	1548 (4.02%)	4831 (12.55%)	7608 (19.76%)	5937 (15.42%)	38508 (100%)		
累計		16065 (41.72%)	16807 (43.65%)	17464 (45.35%)	17783 (46.18%)	17783 (46.18%)	17783 (46.18%)	17783 (46.18%)	17783 (46.18%)	17784 (46.18%)	17784 (46.18%)	17784 (46.18%)	18077 (46.94%)	18584 (48.26%)	20132 (52.28%)	24963 (64.83%)	32571 (84.58%)	38508 (100%)		38508 (100%)	

③ 潮位関連データ

装置の吸着可能範囲の把握等を目的として、当該港湾における潮位情報（朔望平均満潮位、朔望平均干潮位）を収集・整理する。

④ 潮流関連データ

装置の所要基数算定時における流速条件の設定を目的として、装置を導入する係留施設前面の流速を観測することと等により潮流（流速）データを収集・整理する。

表 2-4 流向・流速頻度表（例）

観測地点	敦賀港港内																規定回数:	9544
統計期間	2023年10月20日～2024年2月29日																測得回数:	9544 (100%)
流速階級 (cm/s)	流向階級																合計	累計
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW		
0.00 ~ 2.00	93 (0.97%)	15 (0.16%)	13 (0.14%)	21 (0.22%)	59 (0.62%)	197 (2.06%)	737 (7.72%)	1941 (20.34%)	2257 (23.65%)	977 (10.24%)	772 (8.09%)	771 (8.08%)	547 (5.73%)	213 (2.23%)	117 (1.23%)	70 (0.73%)	8800 (92.2%)	8800 (92.2%)
2.01 ~ 4.00		2 (0.02%)	1 (0.01%)		4 (0.04%)	56 (0.59%)	180 (1.89%)	299 (3.13%)	60 (0.63%)	9 (0.09%)	4 (0.04%)	18 (0.19%)	56 (0.59%)	31 (0.32%)	4 (0.04%)	3 (0.03%)	727 (7.62%)	9527 (99.82%)
4.01 ~ 6.00					4 (0.04%)	4 (0.04%)	2 (0.02%)	3 (0.03%)		1 (0.01%)			1 (0.01%)	2 (0.02%)			17 (0.18%)	9544 (100%)
6.01 ~ 8.00																		9544 (100%)
8.01 以上																		9544 (100%)
合計	93 (0.97%)	17 (0.18%)	14 (0.15%)	21 (0.22%)	67 (0.7%)	257 (2.69%)	919 (9.63%)	2243 (23.5%)	2317 (24.28%)	987 (10.34%)	776 (8.13%)	789 (8.27%)	604 (6.33%)	246 (2.58%)	121 (1.27%)	73 (0.76%)	9544 (100%)	

注) 上段は出現回数、下段()は出現率(%)を示す。

(3) 係留施設、上部工、附帯設備関連資料

装置を用いた係留方法は、通常の係留方法（係船曲柱・直柱＋係留索）を代替または補完するものであることから、通常の係留方法と同程度の係留性能が求められる。このため、装置の所要基数・配置を決定する設定根拠として、装置導入を検討する係留施設に設置されている係船柱の設計条件に関する情報を収集・整理する。

また、装置設置時における安定性照査の条件設定を目的として、装置を設置する係留施設の構造形式、上部工、土質条件、材料条件、健全度等の情報を収集・整理する。また、装置の運用に影響を与える附帯設備（クレーン、パイプライン、電力設備など）の配置や機能についても併せて収集し、これらを活用して装置の適切な設置位置や取付方法を検討する。

(4) 船体関連資料

装置の所要基数及び配置検討に必要となる、係留対象船舶の船型、全長、全幅、喫水、満載排水量等の船舶諸元を収集・整理する。

表 2-5 船舶諸元の例

船舶諸元	備考
総トン数	装置配置検討に活用
載貨重量トン	
全長	荷役稼働率の検証 (船体動揺解析) の入力条件設定 に活用
垂線間長	
型幅	
喫水	
排水量	
ブロック係数	
船底から重心までの距離	
重心と傾心の距離	
重心の見かけ上昇	
見かけの傾心の距離	
重心と船舶中心の水平距離	
環動半径	
横揺れ固有周期	
横揺れ無次元減衰係数	
水面上・水面下船体正面投影面積	風・潮流に対する装置の所要基数 の検討に活用
水面上・水面下船体側面投影面積	

(5) 自動係留装置（吸着式）の諸元

自動係留装置（吸着式）の導入に当たっては、以下の項目について事前に把握する必要がある。

- ・装置の大きさ、重量
- ・装置の係留方法、係留力
- ・装置の吸着・脱着時間、係留継続可能時間
- ・装置による再係留の可否、再係留所要時間
- ・装置の適用温度
- ・装置の設置方法
- ・装置の電力消費量及び電力供給量
- ・装置の操作方法、リモート管理機能の有無
- ・装置のフォールバック機能（停電時等）
- ・装置の耐用年数
- ・装置の製作、運用、維持管理コスト

【解説】

対象係留施設における係留・荷役状況の実態、附帯設備の配置、対象船舶の特性等を踏まえて、導入対象とする係留施設・船舶に適した装置を選定する必要がある。装置諸元等は、既存メーカー（外国製）が公開しているカタログ等に記載されていることが多い。ただし、対象海域や対象船舶に合わせて装置の諸元等を変更することもあるため、詳細はメーカーにヒアリングすることが望ましい。以下に、事前に把握すべき主要な装置の諸元等の例を示す。

① 装置の大きさ、重量

装置の物理的寸法と重量を示す。これらを整理することにより、設置場所、荷役作業（荷役機械や作業員の作業範囲など）への影響、係留施設の安定性・部材への影響の評価に活用する。

② 装置の係留方法、係留力

装置の係留方法及び1基当たりの係留力を示す。対象船舶を安全に係留するための所要基数や配置を決定するために、係留力の把握が必要となる。

③ 装置の吸着・脱着時間、係留継続可能時間

装置が船舶を吸着・脱着するのに要する時間、及び継続して係留可能な時間を示す。短時間での係留・脱着能力の有無は、港湾の運用効率を大きく左右する。また、装置の係留継続可能時間は船舶の荷役時間よりも長いことが必要である。

④ 装置による再係留機能の有無

再係留とは、潮汐や荷役作業に伴う喫水の変化などの要因で、主に係留施設と船体との鉛直方向の位置関係が着岸時点から変化した場合に、装置の吸着位置を変更する機能を指す。特に潮汐変動が大きい港湾や、空載と満載喫水の差が大きい船舶などに対して、再係留機能は有効に働く。

⑤ 装置の適用温度

装置が正常に動作する環境温度範囲を示す。装置が対象地域の温度変化に耐えられるか確認することが重要である。特に寒冷地や高温地域での運用に当たり、現地の気温が装置の適用温度範囲外となる場合には、性能に支障が出る可能性があるため、事前に装置メーカーに適用温度を確認しておく必要がある。

⑥ 装置の設置方法

装置の設置に必要な施工手順や条件を示す。施工の難易度や係留施設への影響を評価するために必要である。例えば上部工にアンカーを打設することで装置を固定する場合、必要に応じて上部工を改良する等の対応が必要となる。

⑦ 装置の電力消費量及び電力供給量

通常時及び係留動作時に装置が使用する電力量及び現状のインフラ設備で供給可能な電力量を示す。両者を比較して所要の電力量が十分供給可能かを確認し、供給できない場合には追加のインフラ整備が必要となる。

⑧ 装置の操作方法、リモート管理機能の有無

装置の操作手順、及び遠隔操作や監視機能の有無を示す。操作の簡便さや安全性、リモート管理機能の有無は、装置の運用効率や保守管理の容易さに影響する。

⑨ 装置のフォールバック機能（停電時等）

停電やシステム障害時に、装置がどのように動作するか、または安全な状態に戻る機能の有無を示す。緊急時に装置が安全に停止または復帰できるかどうかは、船舶と係留施設の安全性を確保するために重要であるため、停電時の対応方法や装置の冗長性について、事前に装置メーカーに確認しておく必要がある。

⑩ 装置の耐用年数

装置が設計された通りに機能し続けることが期待される期間のことであり、導入する製品や使用頻度（係留時間）によって異なる。敦賀港に導入された装置の事例では、以下の条件下で耐用年数を 20 年程度と仮定している。

（既存メーカー（外国製）の場合）

- ・ 係留時間：60,000 時間（導入する装置により異なる）
- ・ 使用頻度：1 日 8 時間、週 7 日稼働
- ・ 耐用年数：係留時間／使用頻度 = 60,000 時間／8 時間/日 = 7,500 日 ≒ 20.5 年

⑪ 装置の製作、運用、維持管理コスト

装置導入にあたり、費用対効果等を比較検討するために必要である。

2.4 船体条件の把握

自動係留装置を用いて係留する船舶の船体に対して、以下の条件を満足することを確認する。

- ・十分な長さの乾舷を有すること
- ・装置の吸着に障害が生じない船体表面を有すること

【解説】

装置が吸着するためには、船体側面に複数の装置が吸着することができる十分な長さの乾舷を有している必要がある。また、船体表面が平板であり、突起物や排水口等は存在しないことも必要である。排水口、船体防舷材、通用口等がある場合には、吸着または安定した係留に支障が生じるため、装置によって係留することができない。装置の吸着が難しい位置を避けるように装置を配置・嵩上げて装置の吸着範囲を拡張することにより、船体の許容着岸精度を緩和することができる。

表 2-6 自動係留装置が吸着可能/不可能な船体の様子

 <p>吸着可能な船体</p>	 <p>十分な長さの乾舷</p>	 <p>大きな突起無し</p>	 <p>排水口等無し</p>
 <p>吸着できない船体</p>	 <p>排水口</p>  <p>ハッチ</p>	 <p>船体防舷材等の突起物</p>	 <p>湾曲部</p>

2.5 係留施設条件の把握

自動係留装置を導入する係留施設に対して、以下の条件を満足することを確認する。

- ・ 係船曲柱・防舷材と装置の位置関係
- ・ 係留索を用いた係留作業と装置の位置関係
- ・ 車止め、クレーンレール等の附帯設備と装置の位置関係
- ・ 係留施設構造との位置関係（ケーソン式の場合）
- ・ 許容係留位置
- ・ 電源供給方法の確保

【解説】

(1) 係船柱・防舷材と装置の位置関係

装置を配置するにあたり、係船曲柱や防舷材が設置されていない位置に装置を配置しなければならない。

また、船舶の接岸エネルギーが装置に及ぶと装置を破損させる可能性がある。吸着式自動係留装置の場合、装置非稼働時の吸着部の法線が防舷材の最大収縮時の船体側面よりも係留施設側に位置している必要がある。防舷材の受衝板が係留施設天端高よりも高い位置まで及んでいる場合には、装置の吸着アームの稼働範囲と干渉しないように装置を配置する必要がある。



図 2-2 係留施設上の附帯設備の例

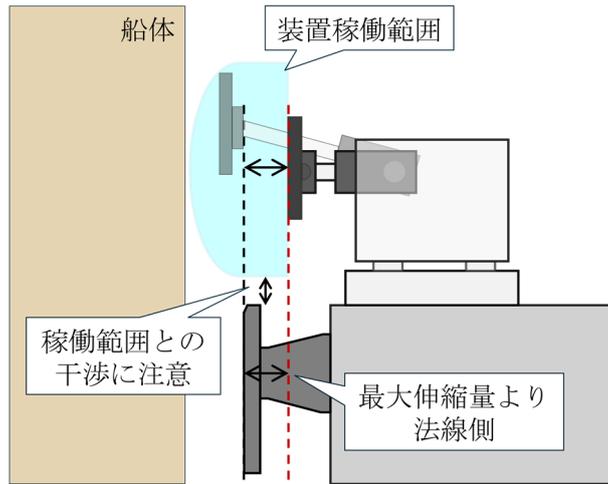


図 2-3 装置と防舷材の位置関係

(2) 係留索を用いた係留作業と装置の位置関係

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ことから、係留索による係留作業を妨げない位置に装置を配置する必要がある。緊張した係留索が通る箇所を避けるとともに、ヒービングライン^{※1}の投下位置などを確認し、綱取り作業を妨げない位置に装置を配置する。なお、万が一の係留索の破断を考慮すると、スナップバックゾーン^{※2}には装置を配置しないことが望ましい。



図 2-4 係留索を用いた係留作業と装置の位置関係（左：船尾側，右：船首側）

※1：ヒービングラインとは、船上から係船索を係留施設上の作業員に送り出す際、係船索のアイ部に結んで投げる細くて長いロープのこと。

※2：スナップバックゾーンとは、張力のかかった状態における係留索の破断による影響範囲をいう。

(3) 車止め、クレーンレール等の附帯設備と装置の位置関係

車止めなどの附帯設備と、装置の吸着アームの稼働が干渉しない位置に装置を配置する必要がある。吸着アームと車止めとの接触が懸念される場合には、架台によって装置を嵩上げて配置することも可能である。また、装置の背後をガントリークレーンなどの荷役機械が移動する場合には、荷役機械の移動を妨げない位置に装置を配置する必要がある。

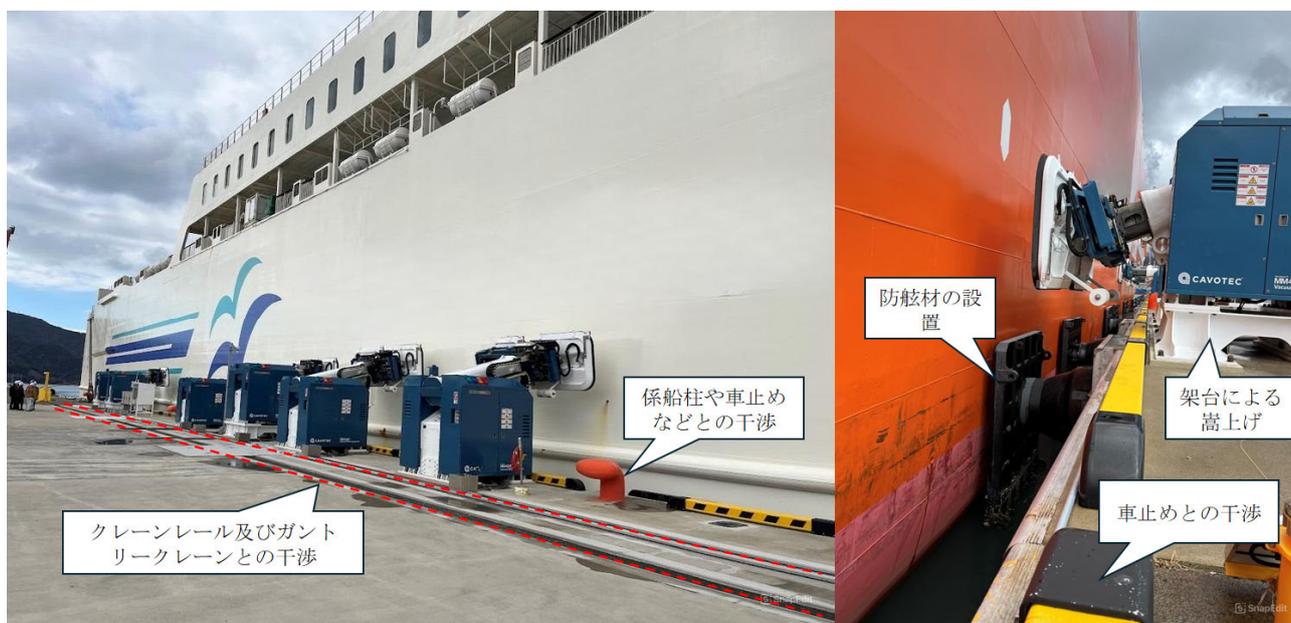


図 2-5 車止め、クレーンレール等の附帯設備と装置の干渉に配慮した事例

(4) 係留施設構造の位置関係

係留施設上への装置の設置に当たっては、構造に影響がない位置で上部工に設置する必要がある。

(ケーソン式の場合：ケーソンの隔壁上など)

(5) 許容係留位置

対象船舶がランプウェイを下す RORO 船やフェリーである場合、係留索を使用しない場合における着岸精度を考慮した上で、ランプ降下時のエプロン損傷や係船柱との干渉可能性を確認する必要がある。

(6) 電源供給方法の確保

装置の運用に当たっては、電源供給方法（配電線・光ケーブル経路等）の検討を行う必要がある。以下に、検討に当たっての留意事項を示す。

- ・ 装置の作動に必要なとなる電力条件の把握
- ・ 現状の電気室の位置・スペックの把握
- ・ 既設管路の活用可否の検討
- ・ 設置時における荷役機械・車両・港湾作業者の動線、既設埋設物との取り合い及びガントリークレーンのレールの下越し等を踏まえた光ケーブル経路の設定

2.6 自動係留装置の所要基数・配置の検討

自動係留装置を用いて対象船舶を安全に係留するためには、対象船舶に生じる作用（風圧力・水流による流圧力・波力）に対して安定して係留を継続することができるよう、十分な基数を設置する必要がある。装置の所要基数と配置は、「風・潮流・波浪」に対して検討する。

【解説】

装置を用いた係留方法は、通常に係留方法（係船曲柱・直柱＋係留索）を代替または補完するものであることから、通常に係留方法と同程度の係留性能が求められる。このため、対象船舶に生じる作用（風、潮流、波浪）に対して安定して係留を継続することができる十分な基数を設置する必要がある。

本節では、敦賀港において導入した装置を事例に、対象船舶に生じる作用（風圧力・水流による流圧力）に対する所要基数・配置の検討方法を示す。

また、係船柱に関する既往研究⁶によれば、「係留船舶による牽引力については、これまでの研究成果から、風荷重が係留施設側から係留船舶に作用する場合に大きくなる傾向にあることが明らかになっている。また、風速が大きい場合においては、波浪荷重や流れ荷重の係留船舶の牽引力に与える影響は、風荷重と比較してそれほど大きくないことも確認されている」ことが示されているが、波浪や潮流により作用する荷重が、風により作用する荷重と比較して一定程度の割合を占めると考えられる場合には、これらを考慮して装置に作用する係留力を算定することもできる。

⁶ 米山：係船柱に作用する船舶の牽引力に関する検討、港湾空港技術研究所資料 No.1341

2.6.1 概要

図 2-6 に、風・潮流に対する装置の所要基数・配置の検討のフローを示す。なお、各検討の詳細については「4.1.2 風・潮流に対する所要基数と配置の決定」に示す敦賀港の事例を参考にすることができる。

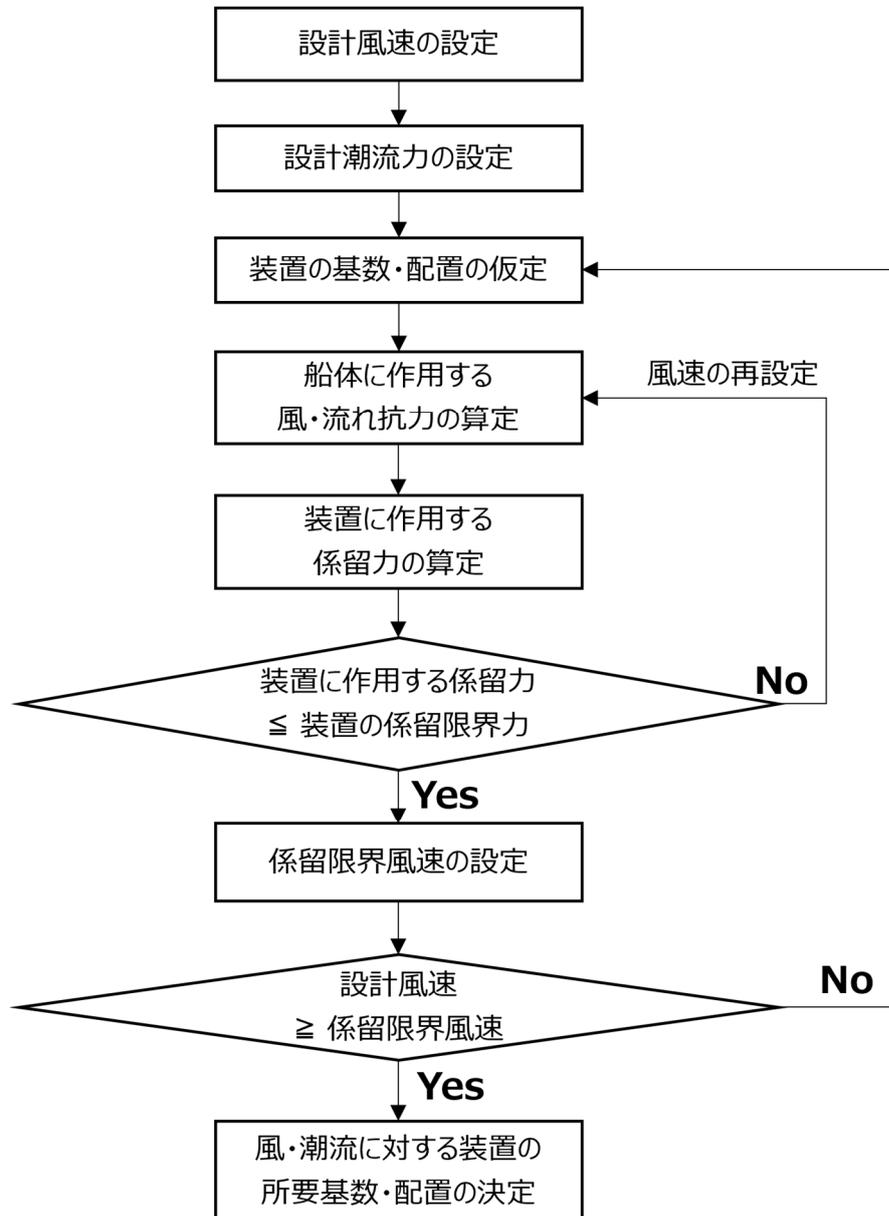


図 2-6 風・潮流に対する装置の所要基数・配置の検討フロー

2.6.2 設計風速の設定

係留中の船舶に作用することが想定される風圧力よりも、装置の係留力の合計値が大きくなるように装置の基数・配置を決定する。装置の基数・配置の決定に使用する設計風速は、図 2-7 に示すフローを参考に設定することができる。

まず、「2.3 資料収集・整理」を参考に、係船柱の設計風速、入出港・荷役中止基準等の運航上の指標とされる基準風速、対象海域における 10 分間平均風速の風速・風向頻度表等を収集・整理する。ここで、対象海域における風観測データや運航上の指標とされる基準風速等の風速値は、同じ標高値に補正した上で比較する必要がある⁷。一般的に、強風注意報や暴風警報などの尺度（気象庁風力階級表による風速の尺度⁸）は標高 10m 相当の風速で整理されることが多い。船舶の乾舷が狭い場合は、風圧力の作用点（乾舷の半分程度）の標高に合わせて風速を補正するとよい。

次に、装置の基数・配置の決定に使用する設計風速を仮定した上で、従来の係留方法と同等の係留性能を確保するために、仮定した設計風速と当該係留施設に設置されている係船柱の設計風速とを比較し、係船柱の設計風速と同等程度であることを確認する。なお、港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成 30 年版）⁹においては、曲柱に作用する牽引力は「曲柱のみで陸側から作用する風速 15m/s の風まで船舶を係留できるように」設定されている。また、直柱に作用する牽引力は「陸側から作用する風速 30m/s の風に対しても曲柱及び直柱によって船舶を安全に係留できるように」設定されている。

次に、装置の基数・配置の設計風速が、入出港・荷役中止基準等の運航上の指標とされる基準風速以下であることを確認する。これは、同基準を超過する風速を設計風速として設定しても、基本的にこのような風速が発生する場合には船舶が係留施設に係留されることは想定されないため、過大設計となるためである。入出港・荷役作業の実施可否は最終的に船長の判断によりなされ、明確な基準がない場合もあるものの、特定の基準風速が定められている場合には、基準風速と同等または下回る設計風速を設定すればよい。

最後に、風速風向頻度表を基に、設計風速を超過する風速の出現頻度が、荷役非稼働率の実績値を大きく上回らないことを確認しておくのが望ましい。設計風速を超過する風速の出現頻度が実績の荷役非稼働率よりも著しく大きい場合、入出港・荷役に支障が生じる可能性があるためである。

なお、船舶に突風が作用した際に、瞬間的に装置の係留力が上昇することがある。敦賀港の事例では、文献¹⁰に記載された 10 分間平均風速に対する 30 秒間平均風速の比（×1.21 倍）を用いて、10 分間平均風速から 30 秒間平均風速への補正を行い、30 秒間平均風速を設計値として採用している。なお、同事例では最大瞬間風速のような 3 秒程度の瞬間的な風速では船の慣性を克服しない（動揺に大きな影響を与えない）ものとし、設計値には採用していない。

⁷ 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成 30 年版）、P.99.

⁸ 「気象観測の手引き」（気象庁）、P.21.

⁹ 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成 30 年版）、P.441.

¹⁰ Port design handbook.

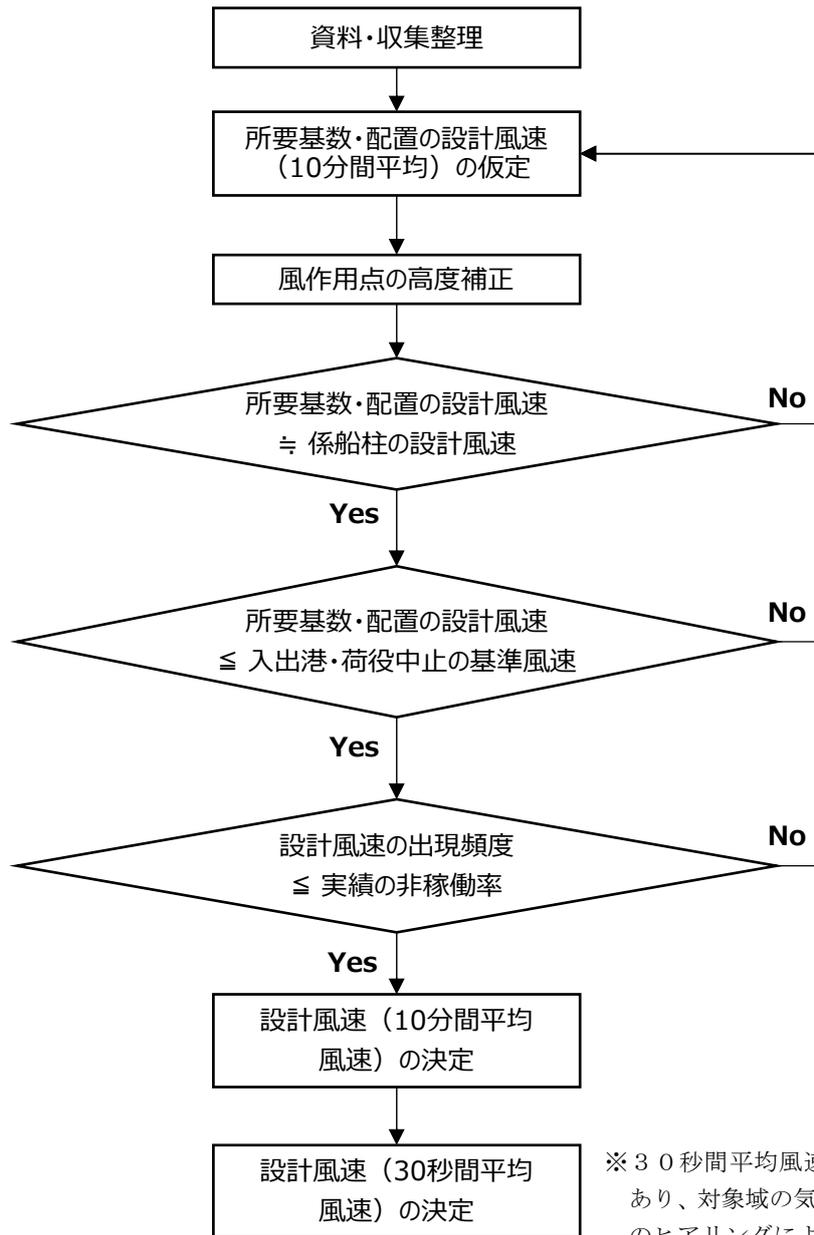


図 2-7 設計風速の設定フロー

2.6.3 設計潮流速の設定

船体に作用する流圧力を算定するために、係留施設前面の潮流速を設定する。潮流速については、装置を導入する係留施設前面の流速を観測すること等により設定するのが望ましい。

2.6.4 装置の基数・配置の仮定

係留・荷役作業実態、係留施設構造、附帯設備配置、船舶諸元及び側面形状等を総合的に勘案し、装置の配置・基数を仮定する。装置の配置に関する留意事項については、「2.5 係留施設条件の把握」を参考にされたい。

2.6.5 船体に作用する風・流圧力の算定

船体に作用する風圧力・流圧力を算定する。ここで、圧力については、前項で設定した設計潮流速に基づき算定する。風圧力については、方位別に風速を変更して、各方位・風速に対応した値を算定する。

2.6.6 装置に作用する係留力の算定

前項で仮定した装置の基数・配置に基づき、船体へ作用する風圧力及び流圧力に対する力とモーメントの釣り合い式より、各装置に作用する係留力を算定する。

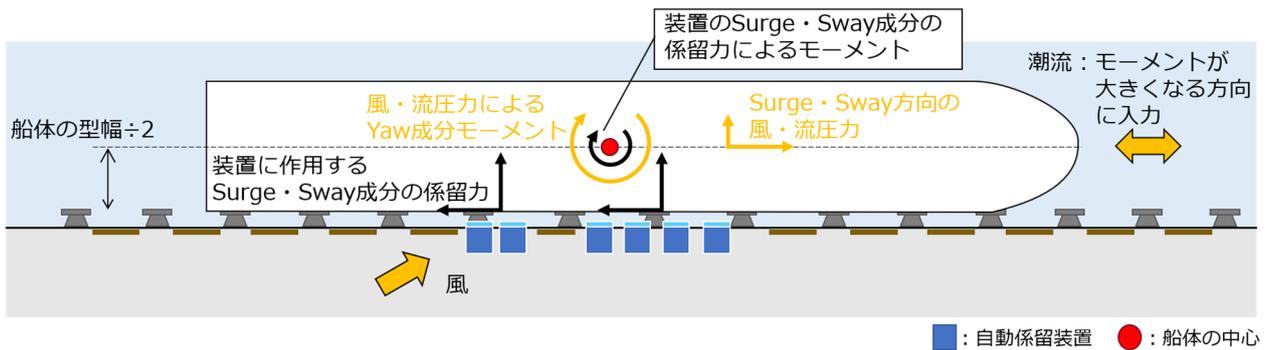


図 2-8 係留力の算定イメージ

2.6.7 係留限界風速の算出

前項に示す係留力の算定について、風速を数段階変更して検討し、最も係留力を受け持つ装置に作用する係留力が、装置の係留限界力に達する風速を算定する。また、同検討を全方位について実施し、各方位のうち最も小さくなる方位の風速を係留限界風速として採用する。

2.6.8 風・潮流に対する装置の基数・配置の決定

前項で採用した係留限界風速が、設定した設計風速を超過しないことを確認する。設計風速を超過する場合には、「2.6.4 装置の基数・配置の仮定」で仮定した装置の配置・基数を見直して同様の検討を行い、係留限界風速が設計風速を超過しない配置を、繰り返し検討により決定する。

2.7 係留施設の安定性照査

自動係留装置設置に伴う上載荷重の増加を考慮して、装置を設置する係留施設の安定性を照査する。なお、自動係留装置は船舶を係留施設に一定程度固定することから、自動係留装置による最大係留力も考慮して本体工及び上部工の安定性を照査する必要がある。

【解説】

本項では敦賀港の係留施設事例を踏まえた、重力式係船岸の安定性照査における概要を以下に示す。

なお、矢板式係船岸や横棧橋及び棧橋等のその他構造形式についても重力式係船岸を参考に、装置設置に伴う上載荷重及び最大係留力を考慮して性能照査を行う必要がある。

2.7.1 係留施設（重力式係船岸の場合）

(a) 一般

装置設置に伴う上載荷重の増加に対して、永続状態及び変動状態に対する壁体の安定性及び基礎地盤の支持力（ビショップ）・円弧すべりの安定性を照査する。

なお、耐震強化施設の場合には、レベル2地震動に対する偶発状態に対しても照査する。

(b) 作用

各設計状態に対して考慮すべき作用の種類

本ガイドライン（案）では、基本的に現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説と同様の解釈を想定する。

(c) 性能照査

永続状態及び変動状態に対する壁体の安定性を照査する。ここで、変動状態時の水平方向の力の設定に当たっては、装置は係留時に常に船舶と吸着しており、この間に地震が発生することも考えられるため、装置を通じて係留施設と接続されている船舶のレベル1地震時の水平方向の力（装置の最大係留力及び装置自重の慣性力）についても考慮する必要がある。

(d) 構造部材の性能照査

装置の最大係留力及びレベル1地震動に対する上部工の安定性を照査する。（次項参照）

2.7.2 係留施設の附帯設備等

① 自動係留装置

(a) 性能照査の基本

装置の構造、大きさ、形状について、「2.3 資料収集・整理」の記載に関連する。

(b) 自動係留装置の配置

装置の配置について、「2.4 船体条件の把握」、「2.5 係留施設条件の把握」、「2.6 自動係留装置の所要基数・配置の検討」の記載に関連する。

(c) 作用

装置が設置された上部工に対して装置の最大係留力^{*}及び装置自重（基礎を含む）による装置の水平方向・鉛直方向の力を設定する。水平方向の力の設定に当たっては、装置は係留時に常に船舶と吸着しており、この間に地震が発生することも考えられるため、装置を通じて係留施設と接続されている船舶のレベル1地震時の水平方向の力（装置の最大係留力及び装置自重の慣性力）についても考慮する必要がある。

^{*}最大係留力とは、1基当たりの装置が発揮しうる牽引力の最大値を示す。

(d) 性能照査

装置が設置された上部工の安定性に関する照査は、変動状態による滑動及び転倒に対して行うものとする。

表 2-7 岸壁本体工の安定性照査結果例（レベル1地震動に関する変動状態）

a点(-14.100m)

	V (kN/m)	H (kN/m)	M _v (kN・m/m)	M _h (kN・m/m)
土 圧	141.593	528.336	2038.940	3292.795
残留水圧		0.000		0.000
壁体重量	3374.098		25542.977	
浮 力	-1359.296		-10422.038	
壁体慣性力		337.410		2244.620
動 水 圧		125.587		733.428
自動係留装置水平力		53.300		997.243
自動係留装置自重		2.300		37.968
自動係留装置自重	22.800		18.308	
合 計	2179.195	1046.933	17178.187	7306.054

[滑 動]
 抵抗項 $R_d = \gamma_R \cdot f \cdot V = 1.00 \times 0.60 \times 2179.195 = 1307.517$ (kN/m)
 荷重項 $S_d = \gamma_S \cdot H = 1.00 \times 1046.933 = 1046.933$ (kN/m)
 作用耐力比 $m \cdot S_d / R_d = 1.00 \times 1046.933 / 1307.517 = 0.801 \leq 1.00 \dots$ OK

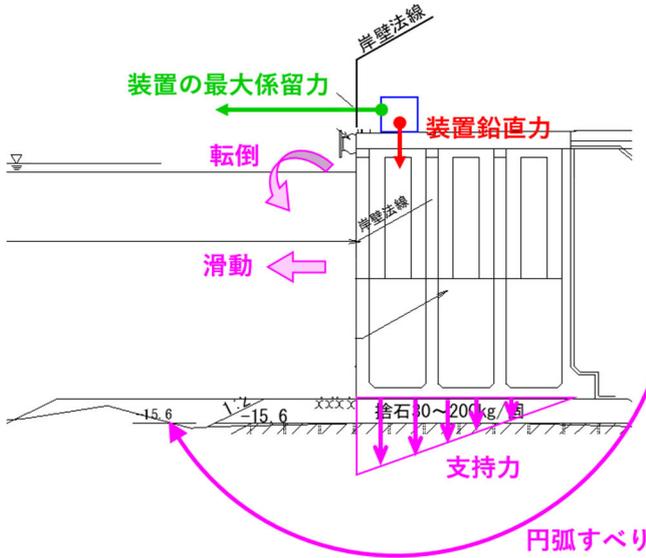
[転 倒]
 抵抗項 $R_d = \gamma_R \cdot M_v = 1.00 \times 17178.187 = 17178.187$ (kN・m/m)
 荷重項 $S_d = \gamma_S \cdot M_h = 1.00 \times 7306.054 = 7306.054$ (kN・m/m)
 作用耐力比 $m \cdot S_d / R_d = 1.10 \times 7306.054 / 17178.187 = 0.468 \leq 1.00 \dots$ OK

表 2-8 重力式係船岸において考慮すべき作用及び照査項目の例

	状態	主たる作用	照査項目
本體工 (壁体)	永続状態	壁体及び装置の自重、 壁体に作用する土圧	壁体の滑動、転倒 基礎地盤の支持力、円弧すべり
	変動状態	レベル1地震動、 装置係留力	壁体の滑動、転倒 基礎地盤の支持力
	偶発状態*	レベル2地震動	法線の変形
上部工	変動状態	レベル1地震動、 装置係留力	上部工の滑動、転倒

※設計対象とする重力式係船岸が耐震強化施設でない場合は、偶発状態に対する性能照査は省略することができる。

【岸壁本體工の安定性照査】



【上部工の安定性照査】

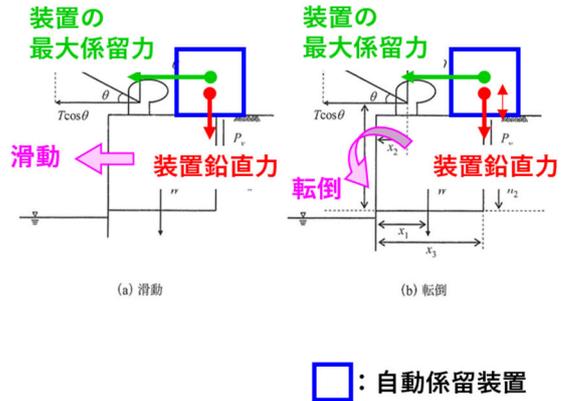


図 2-9 作用及び照査項目のイメージ

2.8 装置の維持管理

自動係留装置を運用するに当たり、以下の項目について確認する。

- ・装置のメンテナンス方法、頻度
- ・装置の維持費用

【解説】

装置は機械製品であり、係留索の代替として使用することで離着岸時作業の効率化が期待される施設であることなどを勘案し、供用期間中の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、設計供用期間中のいずれにおいても装置の係留性能を十分に確保する必要がある。

装置は機械製品であり、その供用年数は製品によって異なると想定される。敦賀港に導入された装置の事例では、装置メーカーとのメンテナンスサービスの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年毎に行い、導入から10年後にオーバーホール点検を行い、適宜部品の交換を行う計画となっている。また、装置が故障した場合においても、適宜部品の交換を行う必要がある。装置の維持に係る費用としては、上記の部品交換代、点検代に加えて、装置を稼働させるための電力代も含まれる。装置の導入に当たっては、供用期間内に発生するこれらの費用を、事前にメーカー等へ確認しておくことが望ましい。

なお、オーバーホール点検に要する期間は、製品によって異なると想定されるが、敦賀港に導入された装置の事例では、点検日数として概ね2週間程度（10営業日）が想定されている。

2.9 装置の運用方法

自動係留装置の係留時に、以下のような緊急事態を想定して、対応方法を検討しておく必要がある。

- ・荒天時における係留方法
- ・停電発生時
- ・地震・津波発生時

【解説】

2.9.1 荒天時における係留方法

装置を導入した係留施設であっても、例えば荒天時等において、装置の係留限界風速近くまで風速が観測される場合には、係留索を併用した係留方法を選択する必要がある場合も想定される。このため、係留索を併用する場合の判断基準や、装置に作用する係留力のモニタリング体制等について、事前に検討しておく必要がある。

2.9.2 停電発生時

停電により電源が喪失した場合、製品によっては装置の吸着が外れ、船舶が漂流するリスクが生じる可能性がある。ただし、電源喪失時においても UPS によって一定時間は制御とモニタリングを継続することができる製品もあるため、装置導入時においては UPS 機能の有無や電源供給時間をメーカーに確認しておく必要がある。また、対象船舶のエンジン稼働や係留ロープの展開時間についても予め確認した上で、実際の停電時の対応を検討するとともに、停電訓練（REF）についても実施しておくことが望ましい。

2.9.3 地震・津波発生時

地震により電源が喪失する可能性があるため、停電発生時の対応と同様に、事前に電源喪失時における対応を事前に検討しておく必要がある。また、地震に伴い発生する津波により緊急離脱を要する状況下における対応方法についても、併せて検討するものとする。

3. 自動係留装置の導入効果

3.1 自動係留装置導入効果の概要

自動係留装置を導入することにより得られる効果は、主に次のものがある。

- ・係留作業効率化効果
- ・動揺量低減効果
- ・その他の定性的な効果

【解説】

- ① 装置は係留作業の効率化（省力化）等に加え、特定の波の種類、船舶、係留施設に対して、係留時の船体動揺量の低減（荷役稼働率向上）効果等が見込まれる。

※荷役稼働率対策として装置の検討を行う場合は、対象係留施設の利用条件等（港湾管理者、利用者の意向等）を踏まえ、必要に応じて検討。

- ② 一方、港全体の静穏度については、港により港形（地形）や係留施設前面の波浪メカニズム（波の種類（風浪、うねり、長周期波等）、出現頻度等）や対象船舶が異なるため、港全体の静穏度確保には防波堤等の外郭施設整備計画の検討が必要。

3.2 自動係留装置導入による係留作業効率化効果

自動係留装置を用いることで、従来の係留索を用いる着岸・離岸方法に比べて、係留作業を省力化できる可能性がある。

【解説】

船舶が係留索を使用せずに、装置による係留や、荷役作業に支障の出ない精度で係留施設に着岸可能な操船能力を有している場合、装置の導入により係留作業の省力化が期待できる。一方、そのような操船能力を有していない船舶については、係留索を用いて着岸位置調整を行う必要があるため、省力化効果が十分に発揮されるためには、船舶の操船能力を改善するか、係留施設の改良を行うことが考えられる。

本ガイドライン（案）では、装置導入効果が発揮されるために必要となる条件を整理するとともに、装置導入による係留作業に係る省力化効果のイメージを以下に提示する。

3.2.1 自動係留装置の導入効果が発揮される条件

装置による係留作業に関する省力化効果が十分に発揮されるためには、船舶及び係留施設が表 3-1 に示す条件を満たしていることが望ましい。

RORO 船やフェリー等、荷役作業や乗客の乗降等を行うに当たり、数 10cm 単位の着岸精度が求められる船舶については、船側にその着岸精度を係留索無しで実現可能な操船能力が求められる。一方、L 字型係留施設のように接岸・係留位置のばらつきが小さい係留施設を使用する船舶については、船舶の操船能力によらず、係留索を使用せずに所定の位置に着岸できる可能性がある。また、コンテナ船等の可動式の機械により荷役が行われる船舶については、許容される着岸範囲が大きいため、操船能力が多少低い場合でも、係留索を使用せずに所定の位置に着岸できる可能性がある。

表 3-1 係留作業に関する省力化効果が十分に発揮されるための条件

船舶	<ul style="list-style-type: none">係留索を使用しない場合においても、所定の位置に着岸可能な操船能力（前後方向の推進器、サイドスラスタ等）を有していることコンテナ船等、可動式の機械により荷役が行われ、許容される着岸範囲が大きいこと
係留施設	<ul style="list-style-type: none">接岸・係留位置のばらつきが小さいこと（L 字型係留施設など）。

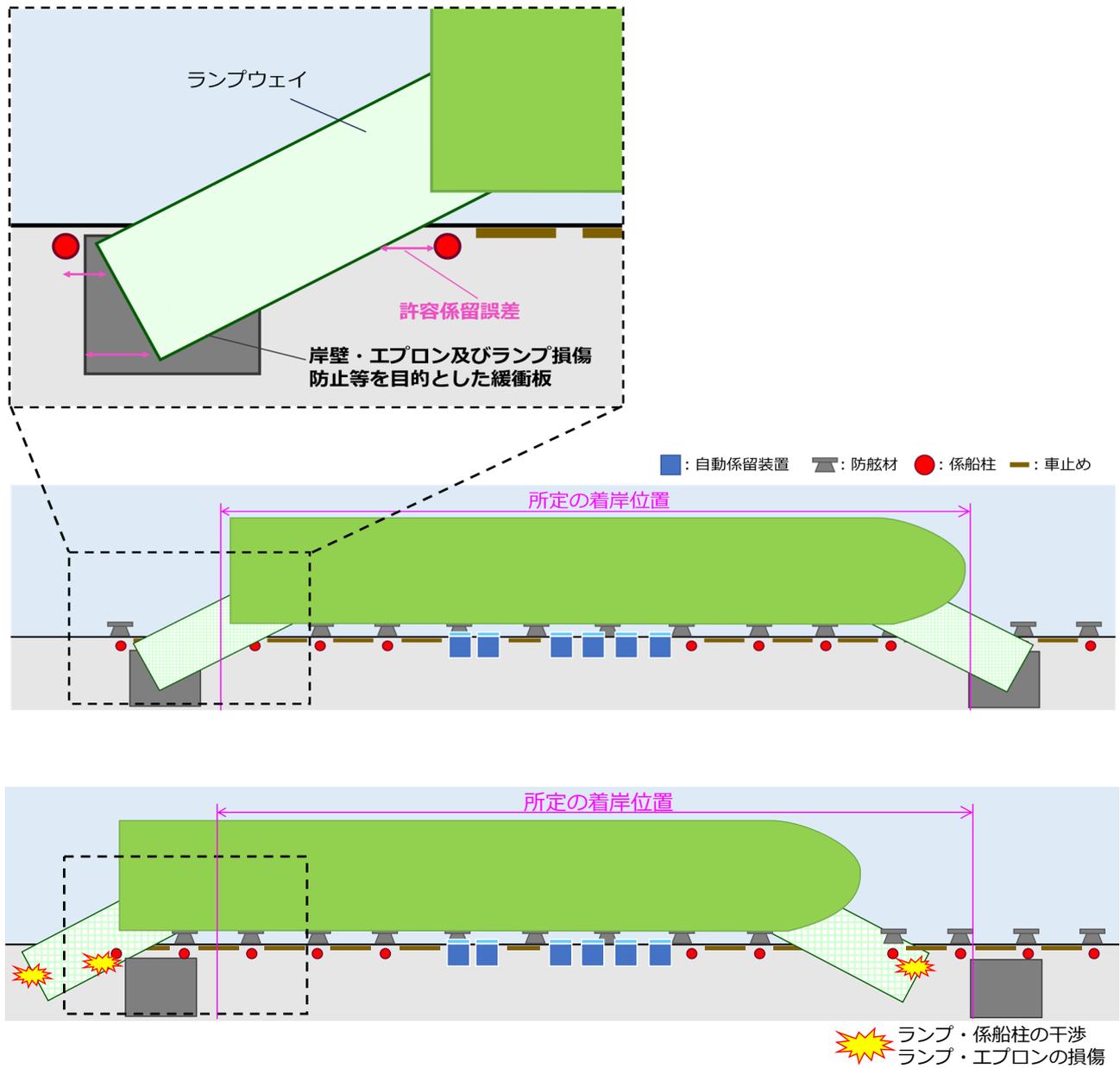


図 3-1 RORO 船の着岸位置の例

(上：所定の位置に着岸する場合 下：所定の位置からずれて着岸する場合)

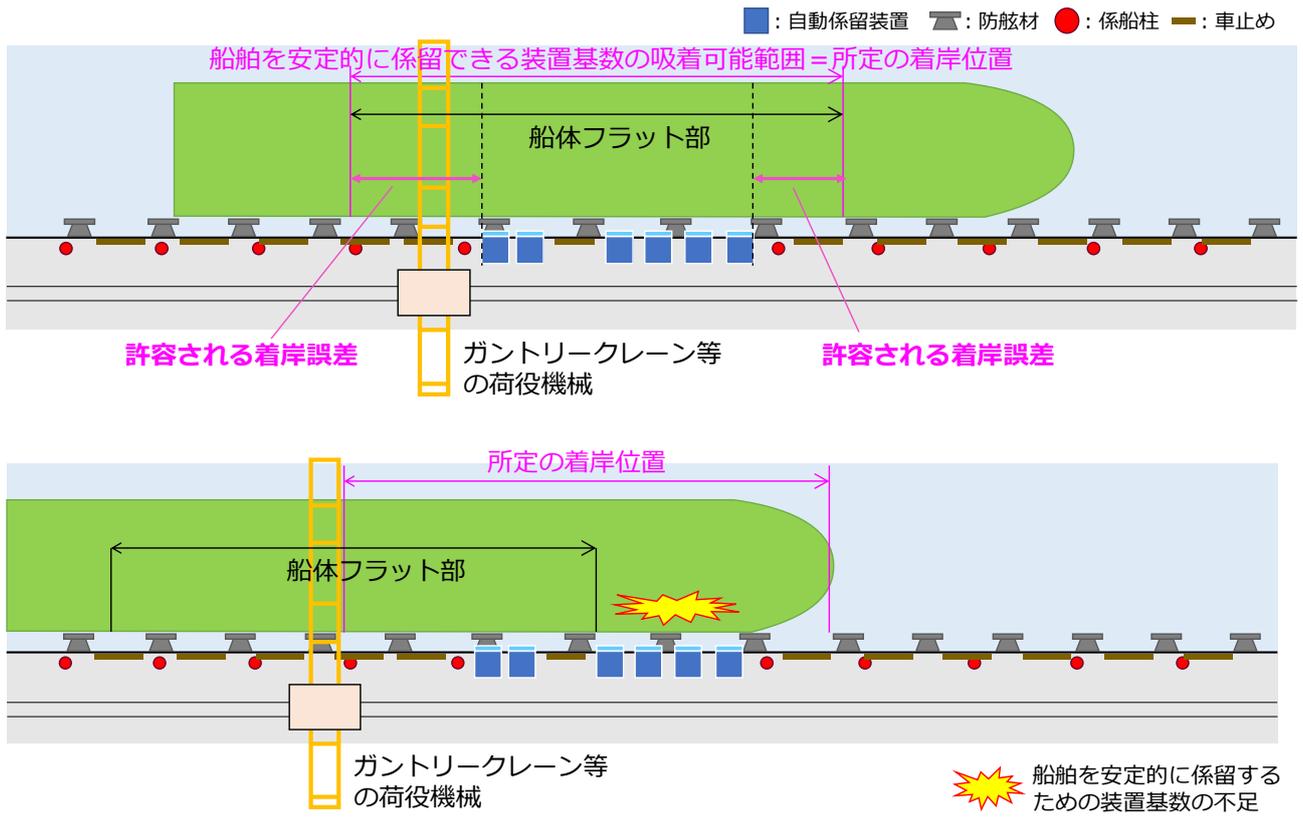


図 3-2 コンテナ船等の可動式の機械による荷役作業を行う船舶の例
 (上 : 所定の位置に着岸する場合 下 : 所定の位置からずれて着岸する場合)

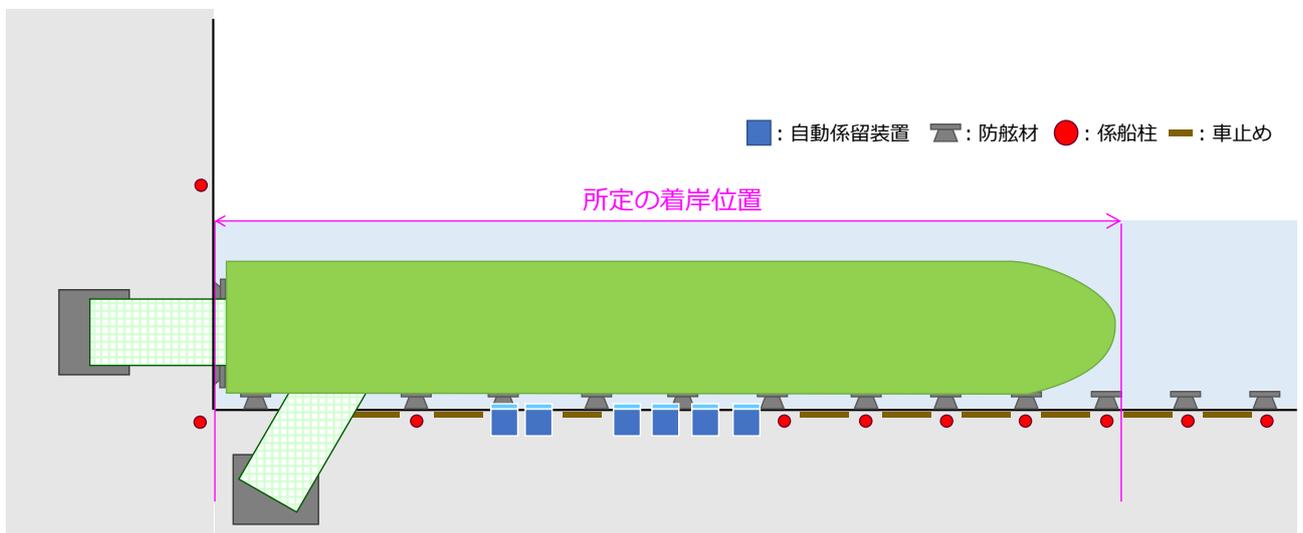


図 3-3 L字型係留施設を使用する船舶の例

3.2.2 所定の位置に着岸できない場合における懸念事項及びその対策

表 3-2 に、所定の位置に着岸できない場合における懸念事項、及び係留施設を改良する場合の対策案を示すとともに、以降にそのイメージを示す。なお、所定の位置に着岸できない場合には、船舶の操船能力の改善を行うことが基本になると考えられるが、そのような改善が困難である場合には、係留施設側で対策を行うこともできる。

装置導入に当たっては、事前に船舶の操船能力や、着岸時に許容される目標位置からの誤差を把握した上で、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対策に係る費用等について、事前に関係者（船社、港運業者、施設管理者等）間で十分に協議を行った上で決定するのが望ましい。

表 3-2 係留索を使用せずに所定の位置に着岸不可である場合に懸念される事項及びその対策案

懸念される事項	係留施設側の対策案	対策が不要な例
<ul style="list-style-type: none"> 船体に装置が所定の基数分吸着できない。 	<ul style="list-style-type: none"> 着岸位置の誤差を踏まえた装置の配置・吸着位置の調整。 架台による装置の嵩上による吸着可能範囲の拡張。 	<ul style="list-style-type: none"> 乾舷や平行舷が広い船舶。 L字型係留施設等の着岸位置のばらつきが小さい係留施設。
<ul style="list-style-type: none"> ランプウェイと係船柱等の附帯設備が干渉する。 	<ul style="list-style-type: none"> 係留位置の誤差を踏まえた干渉する附帯設備の撤去・取替式係船柱の採用。 	<ul style="list-style-type: none"> ランプウェイを用いずに荷役作業を行う船舶（コンテナ船など）。
<ul style="list-style-type: none"> 係留施設・エプロン損傷を防ぐためのエプロン緩衝板の設置位置の都度調整が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> エプロン舗装の改良による損傷防止。 	<ul style="list-style-type: none"> L字型係留施設など、着岸位置のばらつきが小さい係留施設。

(1) 平行舷への装置の吸着可否

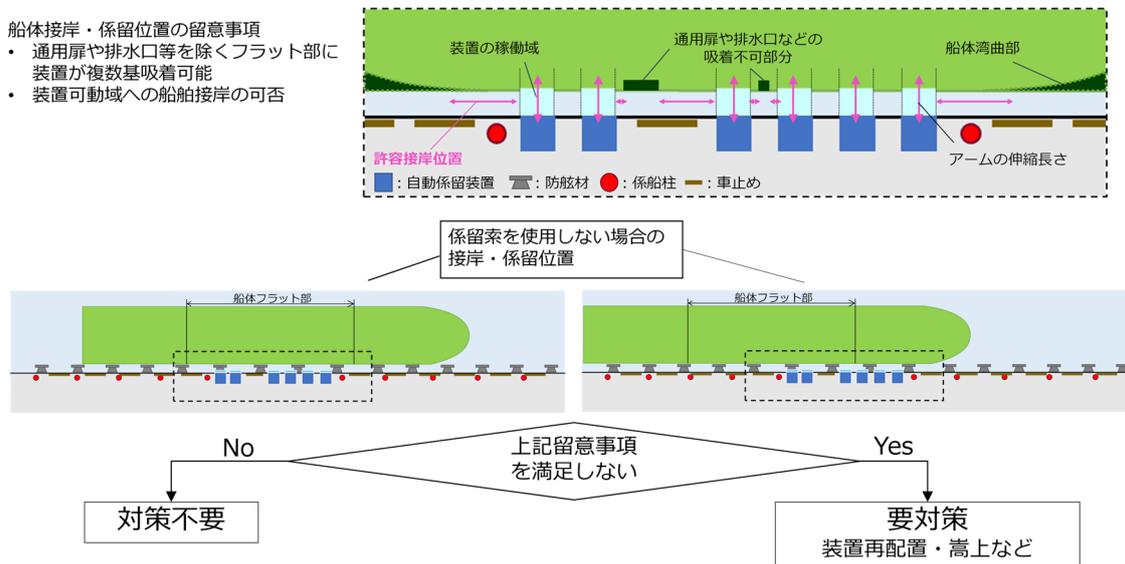
現状の船舶の操船能力により、係留索を使用しない場合において、以下の条件が達成可能であるか確認しておくのが望ましい。

条件①：装置のアームの伸縮範囲（敦賀港の事例では、係留施設から岸沖方向に 1m 等）まで安全に接岸できること

条件②：平行舷に複数の装置*が吸着可能な位置に着岸可能であること

※敦賀港に導入された装置の場合、最低吸着基数は 3 基である。

条件①が達成できない場合には、船舶の操船能力の改善が必要となる。また、条件②が達成されない場合についても船舶の操船能力の改善により対応することが望ましいが、改善が難しい場合には、着岸位置のばらつきに応じた装置の配置や、架台による装置の嵩上等が考えられる。



(2) ランプウェイと係船柱等の附帯設備との干渉

現状の船舶の操船能力により、係留索を使用しない場合において、以下の条件が達成可能であるか確認しておくのが望ましい。

条件①：ランプウェイと附帯設備（係船柱等）とが干渉しないこと

条件②：ランプウェイ・エプロンの損傷防止等を目的としたエプロン緩衝板とランプウェイとのずれが生じないこと

前項と同様に、条件①及び②が達成されない場合については船舶の操船能力の改善により対応することが望ましいが、改善が難しい場合には、着岸位置のばらつきに応じてランプ降下位置付近の係船柱を取替式に変更すること、またエプロン舗装の改良による損傷防止を図ること等による対応が考えられる。

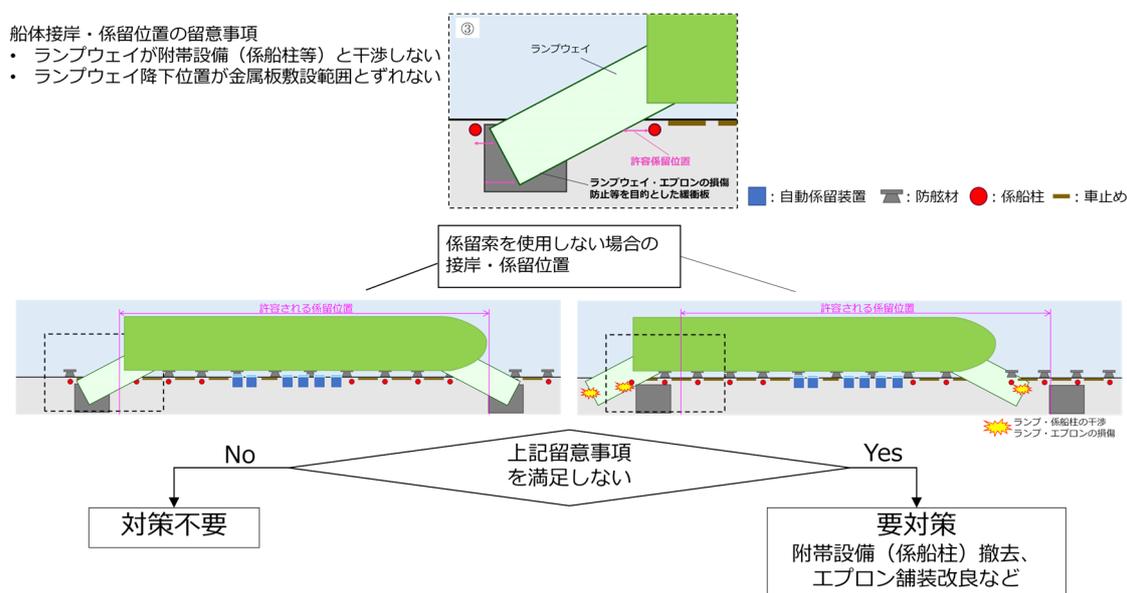


図 3-5 ランプウェイと係船柱等の附帯設備との干渉に応じた対策例

3.2.3 自動係留装置の導入による係留作業に係る省力化効果のイメージ

係留作業を以下の3段階に分け、段階ごとに装置導入により期待される効果を示す。

- ・ A段階：従来の係留索により船舶の離着岸を行う段階
- ・ B段階：着岸時以外は装置のみを用いて係留する段階
(係留索を使用せずに所定の位置に着岸不可である場合)
- ・ C段階：着岸から離岸まで装置のみを用いて係留する段階
(係留索を使用せずに所定の位置に着岸可能である場合)

現状の係留作業に相当するA段階を基本として、A段階で必要となる作業を表3-3に示すとともに、B及びC段階で省力化される作業のイメージを表3-4に示す。

表 3-3 従来の係留索による係留（A段階）に要する作業一覧

概要	現在の係留作業は、船舶が係留施設に近接した時点で、船上から投げ入れられたヒービングライン（錘が付いた細いロープ）を係留施設上の作業員が手繰り寄せ、その先に繋がれた係留索を係船柱に掛けた後、船上のウインチで巻き締めることにより船体を係留施設に寄せて着岸している。係留索が係船柱に繋がれた後は、船舶の位置を微調整しながら各係留索（ヘッダーライン、スタンライン、スプリングラインなど）をセットしていく。これらの作業は、複数の作業員による物理的な作業を要し、必要に応じてタグボートの支援も要する。
①係留索の準備	係留作業の開始にあたり、まず船舶上の作業員が係留索の準備を行う。必要な長さの係留索をリールから繰り出し、スネイクダウン（蛇行状に配置する方法）により、索が絡まないように甲板上に配置する。準備が完了した後、適切な位置にて待機する。
②スプリングラインによる着岸位置調整	スプリングライン（係留時に船首から後方に、または船尾から前方に、船体の中央方向へ取る係留索）は、船の前後方向の動きを制御するために使用する。船舶の動きに応じてスプリングラインの張力と長さを調整し、船体の位置を調整する。
③ヘッダー及びスタンラインによる係留位置調整	ヘッダーライン（船首部の係留索）及びスタンライン（船尾部の係留索）は、船体の横方向の動きを抑制するために使用する。船舶の動きに応じてヘッダーラインとスタンラインの張力と長さを調整し、船体の位置を調整する。スプリングライン、ヘッダーライン、スタンラインが全てセットされた後、ウインチを使用して係留索を固定する。
④ヒービングラインの回収	スプリングライン、ヘッダーライン、スタンラインを係留する際に投下した、ヒービングラインを回収する。
⑤係留索の点検・監視*	係留中は、船体の動きや気象条件、潮流の変化に応じて定期的に係留索の張力を確認し、必要に応じて増索を行う等の調整を行う。特に、船体の動揺や異常な張力や係留力がかかっていないかを監視する。
⑥係留索の取り外し及び回収	係留作業の終了後、係留索を慎重に取り外し、リールに巻き戻す。係留索の状態を確認し、摩耗や損傷がないことを確認する。必要に応じて、索のメンテナンスや交換を行う。全ての係留索が安全に回収され、適切に保管されることを確認して作業を終了する。

※B・C段階においては、装置の係留力に関する監視も含む。

表 3-4 装置導入により省力化される作業のイメージ

項目	A：係留索により係留する段階	B：着岸時以外装置のみにより係留する段階	C：着岸から離岸まで装置により係留する段階
概要	従来の係留索により船舶の離着岸を行う。	着岸時には、船体の位置を調整するために係留索を使用するが、装置による吸着が完了した時点で係留索を回収する。離岸時の係留索の回収が不要となることで離岸時作業の省力化が図られるとともに、災害時のクイックリリース効果も期待される。	係留索を使用せずに船舶を岸壁に着岸させ、装置により係留する。係留索を使用しないため、着岸・離岸作業が大幅に省力化される。なお、係留索を使用せずに、所要の接岸速度・精度で着岸できることが条件となる。
係留索の使用	○	○	—
装置の使用	—	○	○
装置により効率化される作業	—	⑥-2	①,②,③,④,⑥-2
着岸時	① 係留索の準備作業 (スネイクダウンなど)		
	② 接岸位置調整作業 (スプリングライン)		
	③ 係留位置調整作業 (ヘッド・スターライン)		
	③-2 自動係留装置操作	—	
	④ ヒーピングラインの回収		
係留時	⑤ 係留中		
	⑥-1 自動係留装置操作	—	
離岸時	⑥-2 係留索取り外し/係留索回収作業		—

■：作業員 ■：自動係留装置 ■：係船機 —：係留索

図 3-6 に、係留索による係留作業（表 3-4 A 段階）に要する作業時間の例を示す。赤枠で示す箇所は、係留索による係留作業であり、装置を導入することで省力化することができる可能性がある。なお、船上作業員は見張り等の別作業にも従事していること、法定定員が定められていること等を考慮すると、必ずしも船上作業員の拘束時間を減らすことができるとは限らないことに留意する必要がある。

また、装置により得られる係留作業効率化は、係留作業に関するものであり、荷役作業に関して直接的には影響しない。ただし、次項に示す動揺量低減効果が発揮されることにより、例えば船内車両走行が行いやすくなる等の副次的な効果は得られる可能性がある。

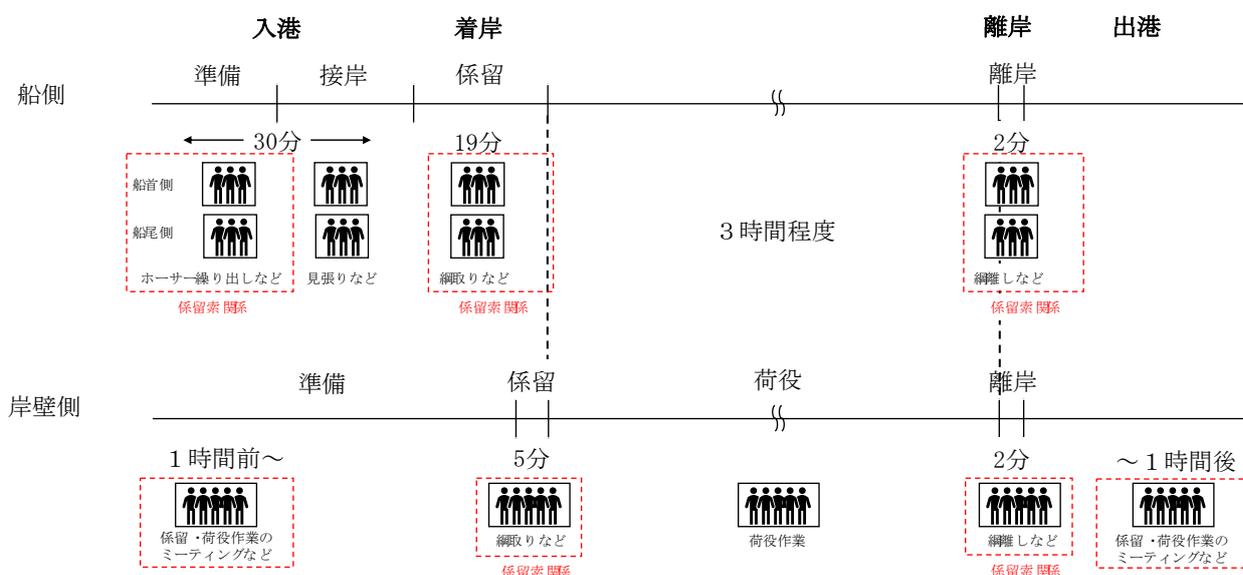


図 3-6 係留作業に従事する作業人員と作業時間の例 (A 段階)

3.3 自動係留装置導入による動揺量低減効果

自動係留装置を用いることで、従来の係留索を用いる係留方法よりも係留船舶の船体動揺量を低減できる可能性がある。

【解説】

以下に、装置の導入による動揺量低減効果に関する既往検討事例や、波浪に対する装置の係留性能の評価方法例を示す。

3.3.1 動揺量低減効果の概要

一般に、装置は油圧機構やスプリング機構を有しており、係留索よりも剛性が高い。また、装置のアーム部分の鉛直稼働域は限定されており、水平方向に強い係留力を発揮する。高い剛性により生じた水平方向の係留力により、特に水平方向成分の船体動揺量を低減する可能性がある。

表 3-5 は、敦賀港における船体動揺量の計測結果を再現可能なパラメータを用いて、船体動揺解析により求めた、係留索に対する装置係留時の荷役限界波高の比である。従来の係留索と比較して、装置を用いることで特に水平方向成分（Surge、Sway）と横揺れ成分（Roll）の荷役限界波高が増大しており、船体動揺量を効果的に低減することが確認されている。一方、鉛直運動成分（Heave、Pitch）については荷役限界波高が大きく変化しない。これは、敦賀港に導入した装置の吸着部及びアームは船体上下運動に追随し、鉛直方向の拘束力を持たないためである。以上より、従来の係留索よりも装置係留時に船体動揺量が低減され、荷役限界波高（稼働率）を向上させる可能性がある。また、係留索と装置を併用した場合に、係留索が受け持つ張力が緩和され、動揺量も低減されることで、係留索の破断リスクが低下し、係留安全性の向上も期待される。

なお、上記の事例では、使用する船体動揺解析ソフト等の制約からバネを仮定した応力・変位特性を設定しているが、装置によっては単純なバネ以外の機構を持つものもあるため、詳細については装置メーカーに確認を行うのが望ましい。

また、表 3-6 に、敦賀港での荷役作業時における動揺量計測結果に基づく、係留索に対する装置係留時の動揺量比を示す。表より、風・波浪に加えて車両走行による動揺が同時に作用した場合においても、装置により水平方向成分（Surge、Sway）と横揺れ成分（Roll）の船体動揺量を低減できることが確認されている。

表 3-5 船体動揺解析により求めた係留索（8 本係留時）に対する装置係留時の荷役限界波高の比¹¹

適用範囲				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%~100%
				Yaw	92~106%

※荷役限界波高比の算定根拠の詳細は、後述の表 4-10 を参照

表 3-6 荷役作業時における係留索係留時に対する装置係留時の動揺量比

対象船舶		動揺量の比	
船種	船型	動揺成分	比率
RORO 船	約 10,000G.T.	Surge	45~100%
		Sway	37~54%
		Roll	34~75%
		Heave	94~111%
		Pitch	73%~119%
		Yaw	82~110%

※動揺量比の算定根拠の詳細は、後述の表 4-9 を参照

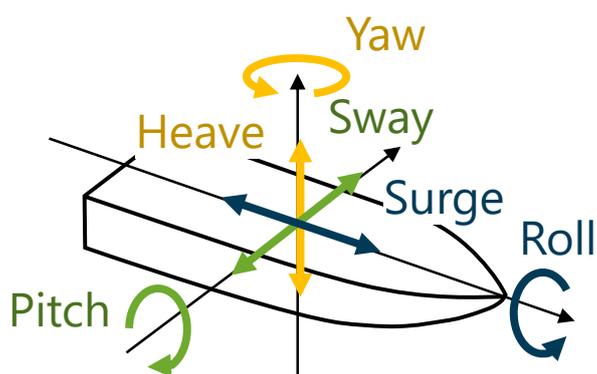


図 3-7 船体動揺成分

¹¹ 大家ら：現地実証試験を通じた敦賀港における自動係留装置導入効果の検討，土木学会論文集特集号（海岸工学），80 巻，17 号，24-17189，2024.

3.3.2 波浪に対する装置の係留性能の評価方法例

(1) 評価手順

前述の通り、装置の導入により従来の係留索による係留と比較して船体動揺量が低減し、対象船舶の荷役稼働率が向上する可能性がある。装置導入による荷役稼働率の向上効果は、例えば以下のフローにより確認することができる。

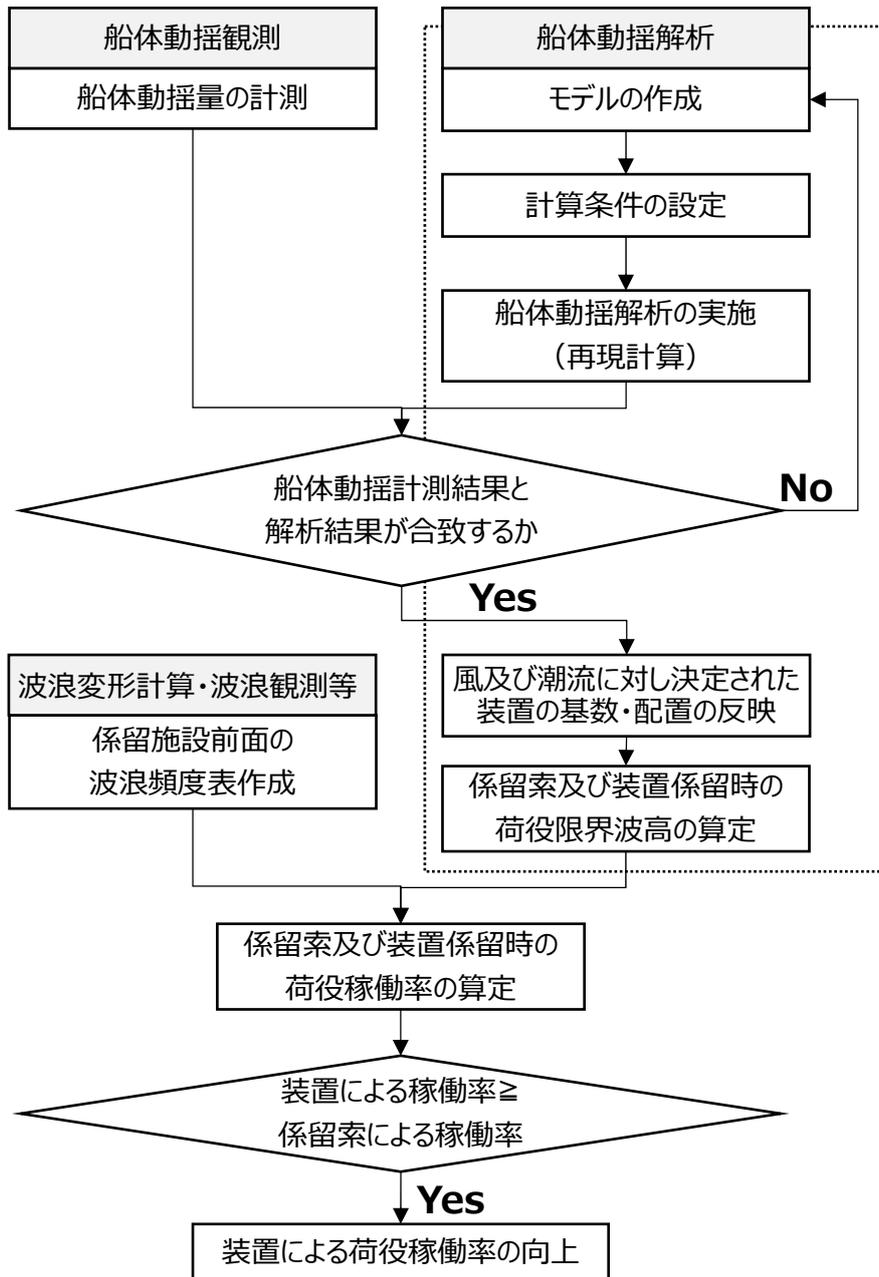


図 3-8 荷役稼働率の検証フロー例

(2) 常時波浪に対する検証

装置のみによる係留時における、常時波浪に対する荷役限界波高を算定した上で、荷役稼働率を検証する。荷役限界波高は、係留施設やドルフィンに係留された船舶が安全に荷役活動を行える限界の波高である。荷役限界波高を超える波高の時間的発生確率を荷役不稼働率とし、100%からこれを差し引いた荷役稼働率を評価する。一般に、対象バースを利用する船舶が不特定の場合や、係留設備等の対策が不要な場合には、利用船舶の船種、載貨重量トン、波浪の波向及び周期等に基づいて荷役限界波高が設定される（図 3-9（標準解析法））。荷役限界波高の設定は、参考資料¹²に示される標準値が用いられることが多い。一方、装置を用いる場合、特定の対象船舶を想定しており、かつ係船設備の対策を要していることから、荷役許容動揺量に基づいて荷役限界波高を算出する（図 3-6 詳細解析法）。

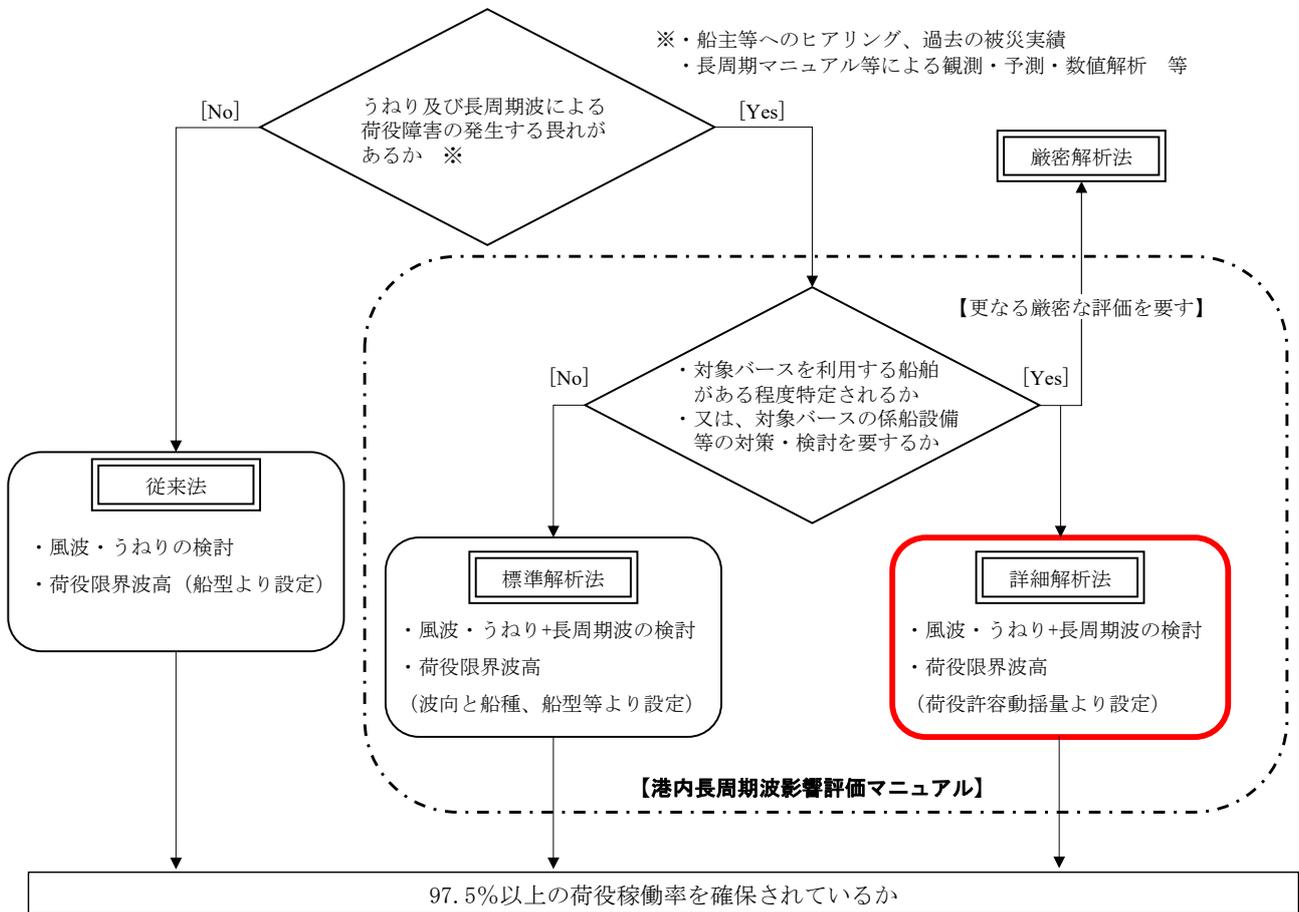


図 3-9 荷役稼働率の検証フロー（常時波浪）

¹² 港内長周期波影響評価マニュアル、P.付録 A-2～A-7.

(3) 長周期波浪に対する検証

長周期波浪に対する限界波高は、長周期波成分に対して船舶が安全に荷役活動を行える限界の波高である。長周期波の荷役限界波高を超える波高の時間的発生確率を荷役不稼働率とし、100%からこれを差し引いた荷役稼働率を検証する。

長周期波浪に対する荷役限界波高は、一般値¹³が示されているものの、対象とする船舶の種類や荷役方式を考慮し、個別に設定するものとされている。現時点では、長周期波浪に対する装置係留時の船舶の動揺特性や装置に作用する係留力について体系的に整理された文献・論文は存在しておらず、不明点が多い。ただし、敦賀港の実証試験の中で、長周期波浪の発生は確認されなかったものの、比較的長い周期帯(0.02~0.05Hz)の動揺を顕著に低減することが確認されていることから、長周期波浪に対しても動揺量低減効果を発揮する可能性はある。また、オマーン国サララ港の事例¹⁴では、長周期波(周期50~100秒程度)及びうねり(周期8秒程度)到達時において、装置係留時に Surge 成分の動揺量が1.45mから0.09mまで顕著に低減される結果も紹介されている。

¹³ 港内長周期波影響評価マニュアル、P.19.

¹⁴ J. de Bont, W. van der Molen, J. van der Lem, H. Ligteringen, D. Mühlenstein, M. Howle, "Calculations of the motions of a ship moored with Moormaster units," TU Delft Repository, 2010.

3.4 自動係留装置導入によるその他の定性的な効果

3.4.1 クイックリリースによる避泊時間低減効果

東日本大震災による津波発災時における船舶離岸事例より、津波発生時においては綱放しを行う作業員は係留施設から避難することが想定され、係留中の船舶の離岸に当たっては、船員による綱放しやナイフによる係留索の切断等が必要である¹⁵。上記作業には時間を要するとともに、作業員の被災リスク（切断後の係留索による被害、係留施設に取り残された場合の津波による被災等）も伴う。また、作業員が綱放しを行ったとしても、綱放しに要する時間は2～3分程度と想定され、作業員が係留施設に到着する時間（作業員待機場所から係留施設までの距離に応じて変化）も考慮すると、地震発生から津波到達までの時間が早い港湾においては船舶が離岸できず、津波による被災が懸念される。

一方、装置を用いた係留が実現すれば、船上等から装置の脱着操作が可能となるため、早期の離岸及び船舶・作業員の被災リスクの低減が期待できる。

3.4.2 二酸化炭素排出量低減効果

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。航行時間が確保されることにより、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。

3.4.3 生産人口の減少への対応

国民生活の安定及び経済の発展のためには、安定的な港湾物流の確保が重要となるが、近年、港湾労働者の生産年齢人口の減少などを背景に、港湾物流の根幹を担う担い手の不足が急速に顕在化しつつある¹⁶。装置の導入により、簡易的かつ重労働を要しない係留作業に移行することで、若手人材や女性でも係留作業に従事可能となる効果が期待でき、持続可能な係留・荷役作業の実現にも寄与すると考えられる。

¹⁵ 国土交通省近畿地方整備局. 津波に遭遇した船の行動事例集～東日本大震災で津波に遭遇した船のその時の行動に学ぶ～. 平成23年9月、<https://www.tb.mlit.go.jp/kinki/content/000006867.pdf>.

¹⁶ 国土交通省港湾局. 港湾労働者不足対策 アクションプラン. 令和4年7月、<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001491733.pdf>.

4. 自動係留装置の導入事例

4.1 敦賀港の導入事例

以下に、敦賀港における装置の導入に際し、検討された事項を示す。なお、特に波浪に対する性能検証の詳細については、参考文献^{17,18}も参照されたい。

4.1.1 敦賀港に導入された自動係留装置の概要

表 4-1 に、敦賀港に導入された装置の諸元等を示す。

表 4-1 敦賀港に導入された装置の諸元等

項目	例：MM400E15 (CAVOTEC)
装置の大きさ、質量 (1 基当たり)	
・幅、高さ、奥行	幅：4000mm、高さ：2300mm、奥行：2750mm
・質量	15,650kg
装置の係留機構、係留能力 (1 基当たり)	
・係留機構	真空パッドによる吸着式
・吸着部の稼働範囲	Surge 方向：±400mm Sway 方向：1500mm Heave 方向：±1000mm
・係留能力	Sway 方向：±400kN Surge 方向：±200kN
装置の係留・脱着時間	
・係留作業速度 - 係留	<60secs
・係留作業速度 - 脱係留	<30secs
装置による再配置の可否	
・装置による再配置の可否	ステップ動作 (自動再配置機能) ワープ機能 (手動操作による水平移動)
装置の提供温度	
・適用温度範囲	-25°C～+50°C
装置の施工方法	
・施工方法	アンカーボルトによる固定
装置の電力消費量	
・ピーク消費電力	32kW
・通常時消費電力	5.5kW
装置の操作方法、リモート管理機能の有無	
操作方法	SCU (陸上制御ユニット) とローカル wifi による接続
リモート管理	遠隔管理、データロギングサービス
装置のフォールバック機能 (停電時等)	
バックアップ電源の有無	有り
バックアップ電源の継続時間	30 分
装置の供用期間	
供用期間	60,000 時間
装置の製作、運用、維持管理	
・製作期間	設計 3 ヶ月、製作 8 ヶ月、運搬 1 ヶ月

¹⁷ 大島ら：敦賀港における自動係留装置導入の有効性に関する検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，77 巻，2 号，p. I_631-I_636，2021.

¹⁸ 大家ら：現地実証試験を通じた敦賀港における自動係留装置導入効果の検討，土木学会論文集特集号 (海岸工学)，80 巻，17 号，24-17189，2024.

4.1.2 風・潮流に対する所要基数と配置の決定

(1) 検討条件及び検討手法

① 設計風速

設計風速は、全風向に対し、装置導入対象岸壁に設置されている係船柱の設計風速と同じく 10 分間平均風速で 15m/s、30 秒間平均風速で 18.1m/s と設定されている。

② 設計潮流速

メーカーによる導入検討時点では対象岸壁前面の潮流速が不明であったため、潮流速を 0.5m/s と仮定して検討が実施されている。なお、その後、対象岸壁前面の流速が観測され、上記の値以下の流速が発生していることを確認している。

③ モデルの設定

風圧力・流圧力と、装置の係留力のつり合いは、式(1)～(3)で表現する。

$$R_{w,su} + R_{c,su} = \sum_{i=1}^N f_{su_i} \quad (1)$$

$$R_{w,sw} = \sum_{i=1}^N f_{sw_i} \quad (2)$$

$$M_w = \sum_{i=1}^N f_{sw_i} x_{su_i} + f_{su_i} x_{sw_i} \quad (3)$$

ここで、 $R_{w,su}$ 、 $R_{w,sw}$ は Surge 方向及び Sway 方向に船舶に作用する風圧力、 $R_{c,su}$ は Surge 方向に作用する潮流による流圧力である。また、 f_{su_i} 、 f_{sw_i} ($i = 1, 2 \dots N$) は、 N 基の各装置に生じる係留力である。また、 x_{su_i} 、 x_{sw_i} は、船舶の中心を原点とした場合の各装置の Surge 方向及び Sway 方向の座標である。式(1)、(2)は、Surge 方向、Sway 方向における船舶に作用する風圧力、流圧力と装置の係留力の総和のつり合いの式である。また、式(3)は、船舶の中心周りの風圧力と装置の係留力のモーメントの総和のつり合いの式である。

風圧力 $R_{w,su}$ 、 $R_{w,sw}$ 及び流圧力 $R_{c,su}$ は、H30 港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁹などを参考にし、求めて求める。風圧力の算出に用いる風速は、前項で設定した設計風速を基に、船舶に突風が作用したときを考慮して、30 秒間平均風速に補正した設計風速が採用されている。

敦賀港の事例では、 x_{sw_i} は、船体の中心に対する Sway 方向の座標であるので、装置の位置に依らず船幅 B の半分と仮定している (図 4-1)。また、Sway 方向における各装置の係留力が装置の設

¹⁹ 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (平成 30 年版)、pp.438-439.

位置の中心 $x_c = \sum_i \frac{x_{sui}}{N}$ からの距離に比例すると仮定している。これらの係留力の考え方については、導入する装置メーカーにも確認を行うことが望ましい。

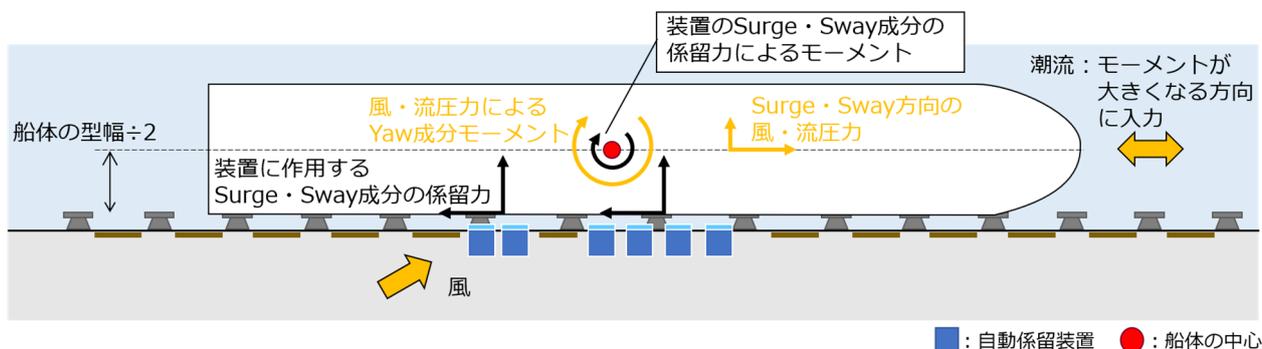
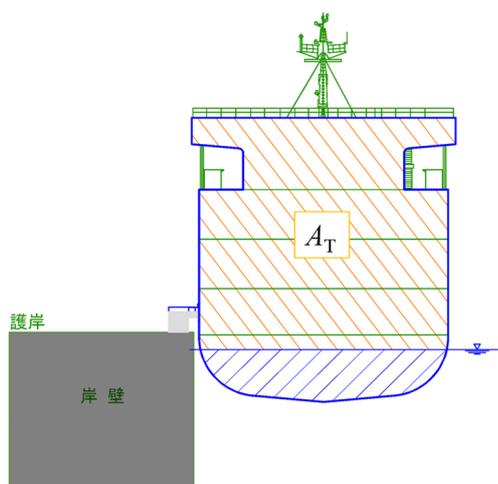


図 4-1 係留限界風速の検討時に考慮する作用（再掲）

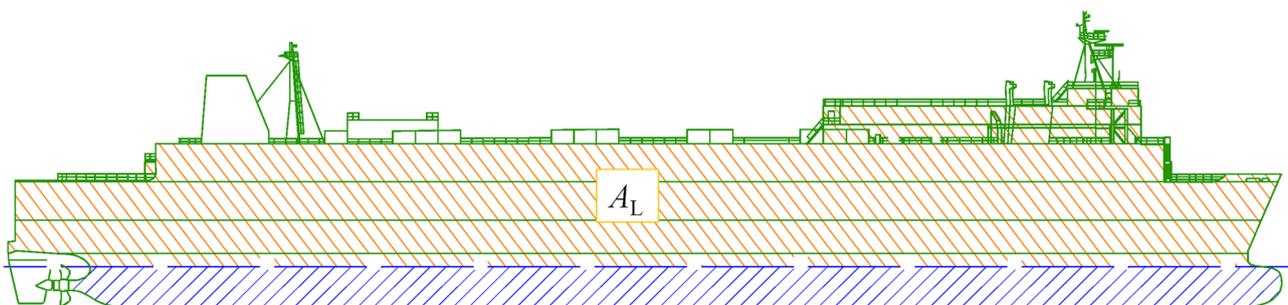
④ 計算条件の設定

風圧力の算出に使用した船体諸元（水面上船体正面投影面積 A_T 、水面上船体正面投影面積 A 、水面上船体側面投影面積 A_L ）は、船舶設計資料や一般配置図などを基に求める。なお、敦賀港の事例では、水面上船体側面投影面積 A_L は、岸壁による風の遮断を考慮して、岸壁天端より上側の船体側面投影面積を用いて風圧力の算出に使用している（図 4-2）。

【水面上船体正面投影面積 A_T 】



【水面上船体側面投影面積 A_L 】



【岸壁天端上側面投影面積】

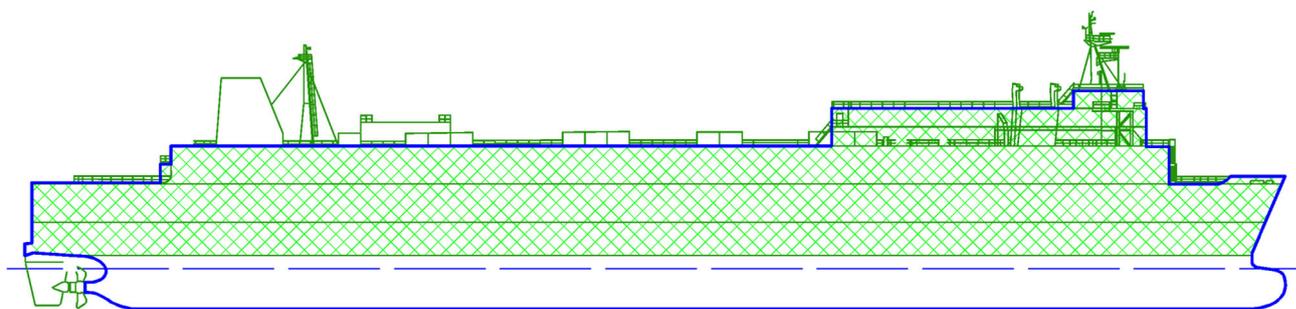


圖 4-2 投影面積

(2) 係留限界風速の算定及び装置基数の決定

図 4-3 は、風向を 15° ずつ変更して全方位から設計風速による風圧力を作用させ、装置の係留力が大きくなる条件を検討したものである。敦賀港の事例では、風向別に設定した設計風速を用いて装置の係留力を計算し、各装置の許容率（安全率約 1.05*を考慮した、設計係留力に対する装置の係留力の比）を求めている。図 4-3 の例では、120° の方向から風を作用させた場合に、船首側の装置 6 で許容率が最大となっているが、その許容率は 100%を下回っていることが確認できる。許容率が 100%を上回る装置が存在する場合、装置の基数が不足しているため、装置の基数及び配置を再度仮定し、繰り返し照査することにより基数・配置を決定する。

なお、装置の許容率の考え方や、Sway 方向、Surge 方向の係留力の扱い方（方向別に評価するか、合力として評価するか）等は、製品によって異なると考えられる。詳細は、各メーカーの専門技術者に確認することが望ましい。

※安全率は各メーカーにより異なる場合がある。

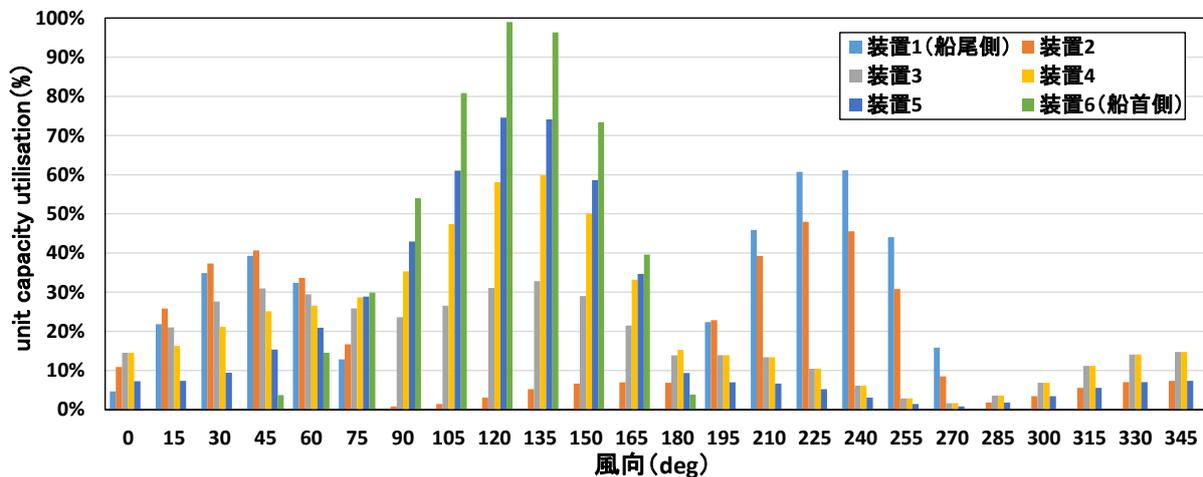


図 4-3 風向別・装置別に求めた装置の許容率の例

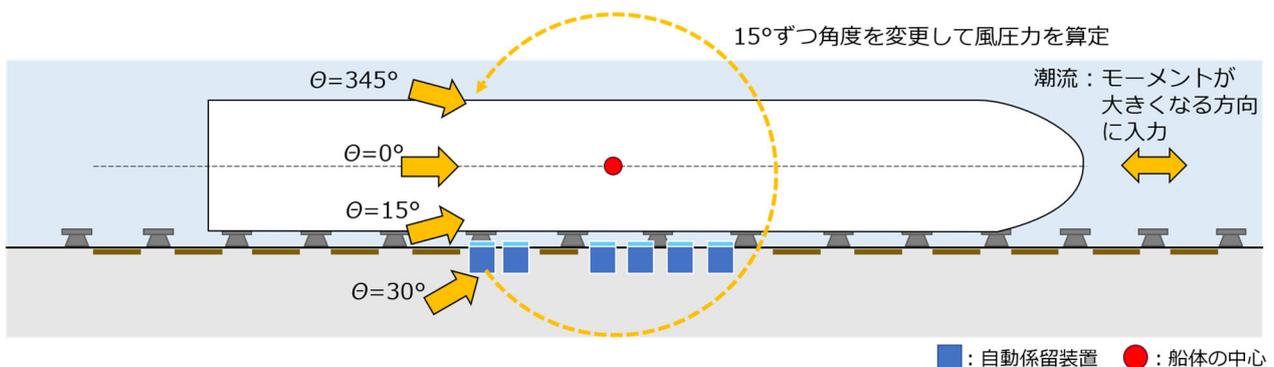


図 4-4 敦賀港の事例における風・流圧力の入力方法

4.1.3 安定性の照査

敦賀港の導入事例では、装置の配置及び基数決定後、装置設置に伴う上載荷重の増加及び装置による最大係留力を考慮して、装置を設置する岸壁の安定性照査を実施している。以下に同事例における照査項目を示す。

- ① 岸壁本体工の安定性照査：永続状態及び変動状態（地震時、装置による最大係留力）に対する本体工の安定性照査。
- ② 岸壁上部工の安定性照査：装置による最大係留力に対する上部工の安定性照査。
- ③ 部材照査：当該岸壁がスリットケーソン構造であるため、上部工の配筋照査を実施。

(1) 自動係留装置による荷重

敦賀港の導入事例では、ケーソン1函に最大2基（架台有1基、架台無1基）の装置が設置されるものとして、安定性照査を実施している。以下に、装置による荷重条件の一覧を整理する。

表 4-2 装置の荷重条件の設定例

鉛直力			
自動係留装置	16000	kg	
台座無	157.0	kN	
自動係留装置	18900	kg	
台座有	185.4	kN	
2基合計	342.4	kN	
ケーソン幅	15	m	
作用荷重	22.8	kN/m	
作用位置	岸壁法線より803mm陸側		
設計震度(A区間)	0.1		
設計震度(B区間)	0.11		
慣性力(A区間)	2.3	kN/m	
慣性力(B区間)	2.5	kN/m	

水平力		Operational	
台座無	係留力	400	kN
	ケーソン幅	15	m
	作用荷重	26.7	kN/m
	作用位置	DL+4.35m(岸壁天端+1.95m)	
台座有	係留力	400	kN
	ケーソン幅	15	m
	作用荷重	26.7	kN/m
	作用位置	DL+4.86m(岸壁天端+2.46m)	
合計	係留力	800	kN
	ケーソン幅	15	m
	作用荷重	53.3	kN/m
	作用位置	DL+4.61m(岸壁天端+2.21m)	

※マイナスは陸側に作用する荷重を示す。

表 4-3 装置による鉛直方向荷重の作用位置

装置重量重心位置の算定（装置海側前面からの距離）

項目	A	B	A × B
	重量(kg)	距離(mm)	
自動係留装置(台座無)	16000	196	3136000
自動係留装置(台座有)	18900	301	5688900
合計	34900	—	8824900
鉛直力作用位置（重心位置の算定）(mm)			253
岸壁法線から装置海側までの距離(mm)			550
装置重心位置（岸壁法線からの距離）(mm)			803

表 4-4 装置による水平方向荷重の作用位置

装置重量重心位置の算定（岸壁設置面からの距離）

項目	A	B	A × B
	重量(kg)	距離(mm)	
自動係留装置(台座無)	16000	1434	22944000
自動係留装置(台座有)	18900	1687	31884300
合計	34900	—	54828300
水平力作用位置（重心位置の算定）(mm)			1571
岸壁天端高（標高、DL(m)）			2.50
慣性力作用位置（装置重心位置（標高、DL(m)）			4.07

(2) 堤体の安定性照査

堤体の安定性照査結果より、装置を設置した場合には基礎の支持力（ビショップ）では変動状態（L1 地震時）、円弧すべりでは永続状態で安定性が確保できなくなる結果となった。このため、同事例では岸壁前面に 12.5m の基礎捨石を設置することにより、装置設置時における安定性を確保している。

(3) 円弧すべりの安定性照査

装置は船舶に吸着した状態となるため、船舶の動揺に伴い岸壁への押し込み力が作用することが想定されることから、同事例では、仮に装置の最大係留力 400kN が装置鉛直下向きに作用する場合における円弧すべりの安定性に対する影響を検討している。

図 4-5 に示す検討結果より、当該岸壁ではに示す対策を実施することにより、最大係留力 400kN を考慮した場合についても円弧すべりの安定性が確保されることを確認している。

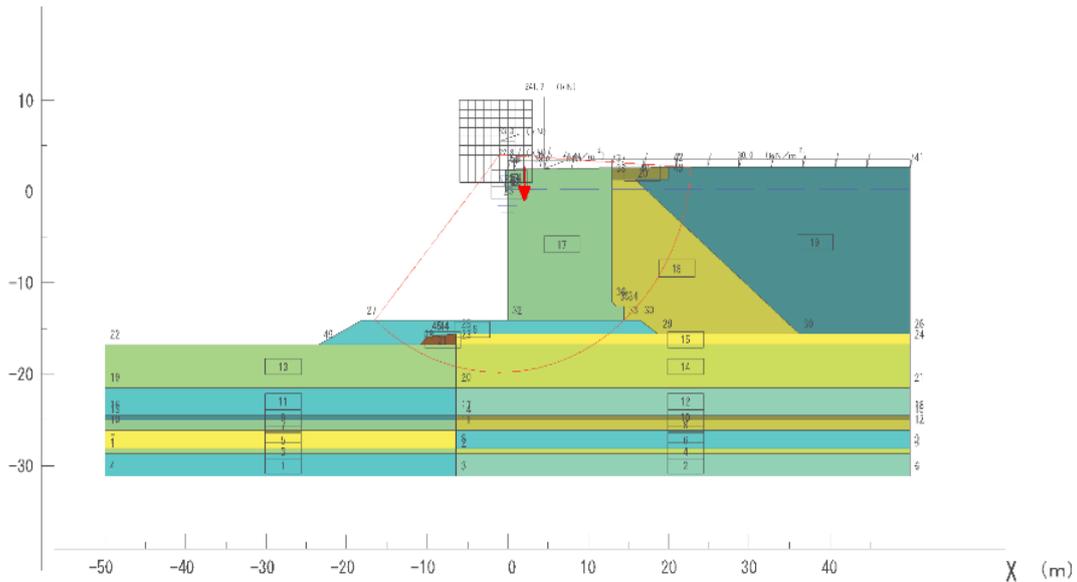


図 4-5 円弧すべりの検討結果例

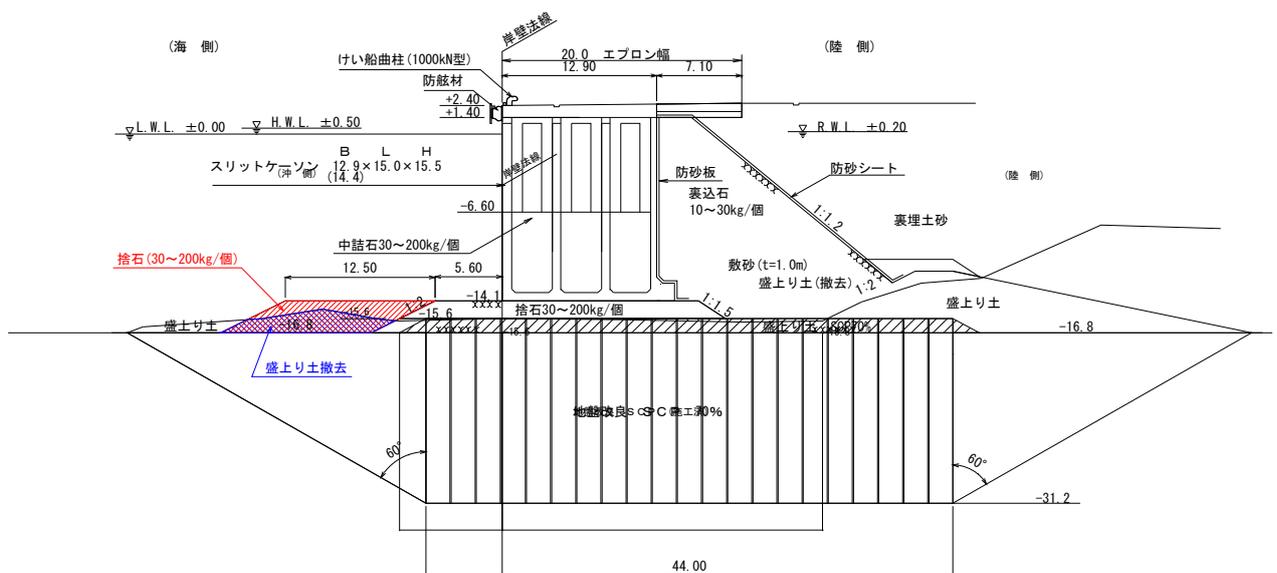


図 4-6 当該岸壁の対策断面図

(4) 上部工の安定性照査

同事例では、上部工についても安定性照査を実施し、装置による係留力に対する安定性が確保されていることを確認している。

(5) 上部工の部材照査

当該岸壁はスリットケーソン構造であり、上部工はスリットケーソンの側壁・隔壁に支持された構造であることから、同事例では岸壁上部工に装置及び設置基礎が載荷された場合の上部工の部材照査を行っている。上部工に作用する外力は、原設計時に見込まれている「上部工自重」、「上載荷重」、「クレーン輪荷重」に加えて、「装置自重（基礎を含む）」を考慮している。

整理した外力に基づき、FEM 計算により各設計状態の断面力を算定している。なお、FEM 計算ではケーソン上部梁内壁端部を支点としてモデル化を行い、四辺単純支持及び四辺固定の 2 ケースについて断面力を算定し、最も断面力が大きくなるケースについて部材照査を行っている。

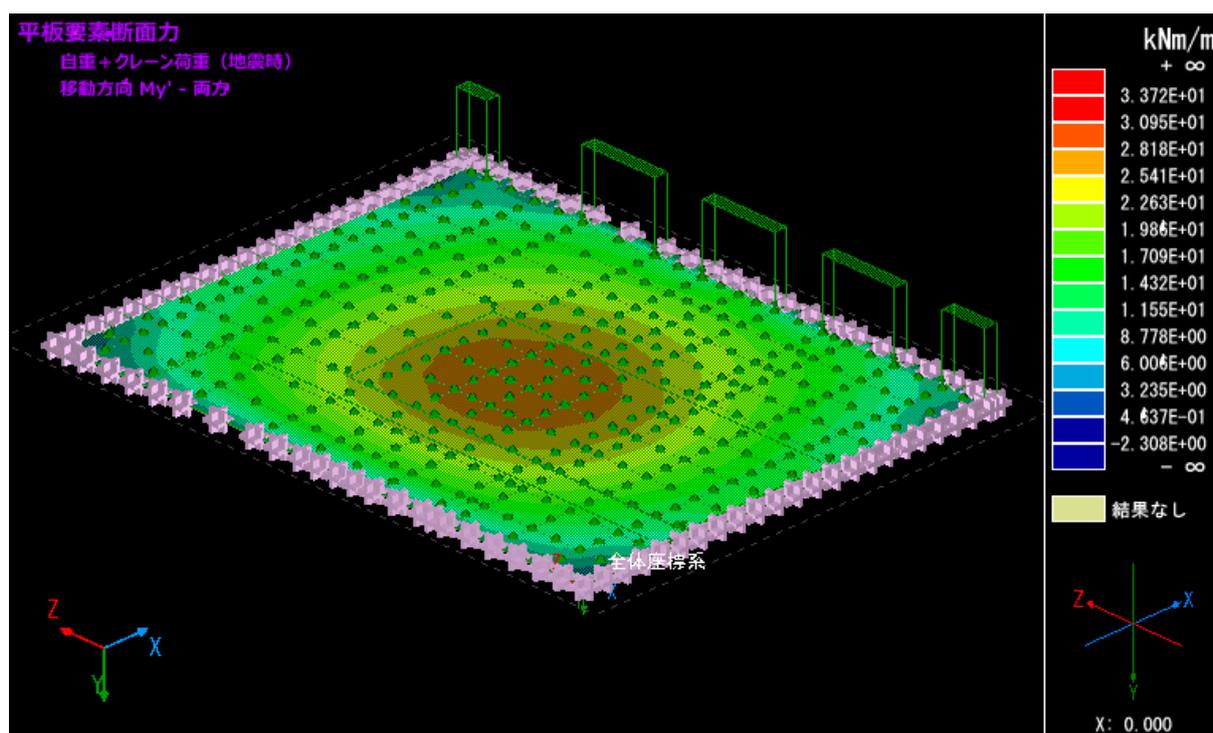


図 4-5 FEM 計算結果例（クレーン作用時、四辺単純支持、法線直角方向）

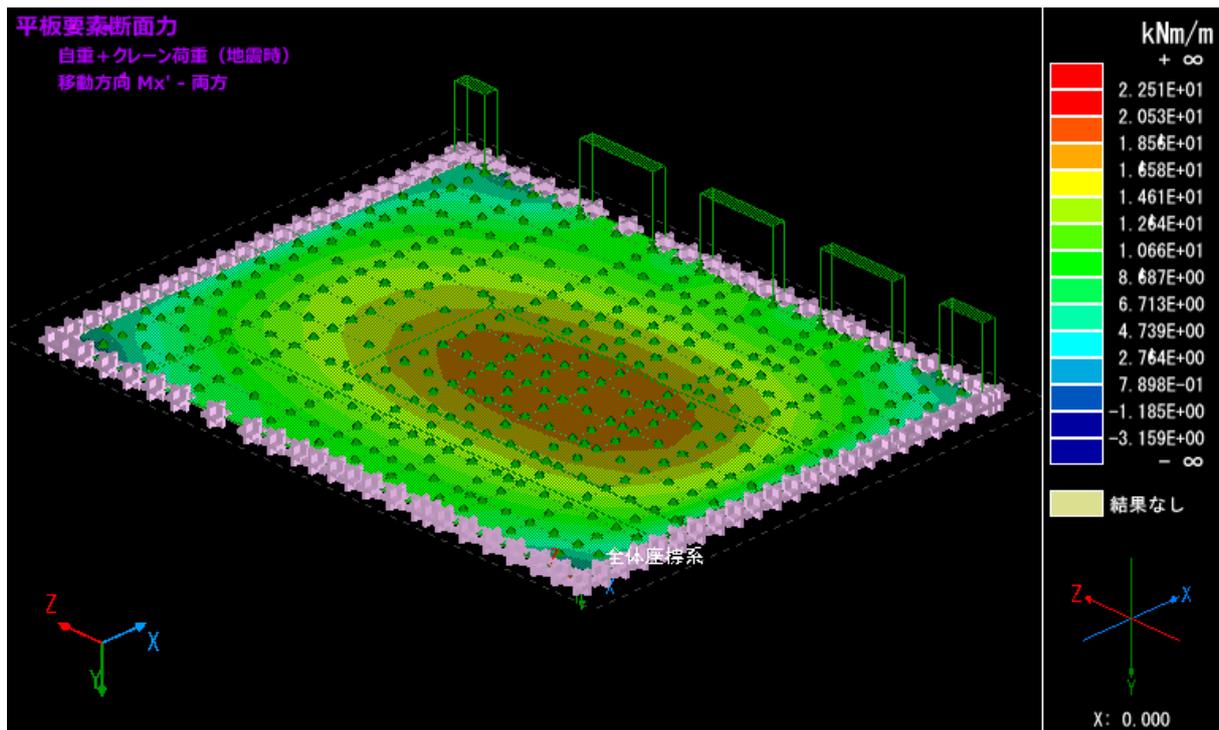


図 4-6 FEM 計算結果例 (クレーン作用時、四辺単純支持、法線平行方向)

4.1.4 自動係留装置の導入効果

(1) 自動係留装置導入による係留作業効率化効果

敦賀港の実証試験では、船舶によっては緩い速度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ており、船が十分な操船能力を有するか、位置調整に係る労力が大きくなり岸壁形状であれば、静穏時においては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、将来的に船体制御機能の向上等により係留索を使用せず装置のみで離着岸が可能となると想定する場合、これらの作業に係る船員・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、綱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クイックリリース効果も期待される。

一方、所要の位置への係留を行うために係留索による位置調整作業が必要な船舶もあり、このような船舶については着岸時の係留作業効率化効果は発揮されない場合もある。また、船上の作業員については見張り作業等を兼務しているため、装置のみでの係留が可能となったとしても、拘束時間は低減されないとの意見も得られている。ただし、見張り作業については、技術進展によりカメラ画像の高解像度化及びリアルタイム化の進展に伴い、ブリッジ等から周辺状況の把握が行える場合には、不要となることも想定される。表 4-74-7 に、敦賀港における実証試験を通して得られた装置導入により得られることが期待される係留作業効率化効果を示す。

表 4-5 係留索による係留作業に従事する作業人員と作業時間（敦賀港実証試験における A 船の例）

緑：装置導入による作業負担・時間低減効果（小）、青：〃（効果大）

		作業人員数 (船首・船尾合計)	1人当たりの 作業時間
入港～接岸	船上	4名	～30分（見張り時間を含む）
	岸壁上	10名	1時間（始業前ミーティング）
着岸作業	船上	6名	約19分
	岸壁上	10名	約5分
離岸作業	船上	6名	約2分
	岸壁上	9名	約2分
出航後	岸壁上	10名	1時間（作業後ミーティング）

表 4-6 係留索による係留作業に従事する作業人員と作業時間（敦賀港実証試験における B 船の例）

緑：装置導入による作業負担・時間低減効果（小）、青：〃（効果大）

		作業人員数 (船首・船尾合計)	1人当たりの 作業時間
入港～接岸	船上	6名	ホーサー繰り出し：約10分 待機：約30分
	岸壁上	-	-
着岸作業	船上	8名	約45分
	岸壁上	7名	待機：約10分 係留作業：約10分
離岸作業	船上	8名	約20分
	岸壁上	6名	約5分

表 4-7 敦賀港実証試験の対象船舶における装置導入により期待される係留作業効率化効果

船舶	作業		係留作業効率化効果		概要
			現時点・近い将来	将来	
A 船	入港 ～接岸 着岸作業	船上	×	×	現時点では係留索による位置調整作業が必要。また、見張り作業等を兼務しているため、装置のみでの係留が可能となったとしても拘束時間は低減されない見込み。ただし、将来の技術進展に伴い、見張りが不要となる場合には、低減できる可能性有。
		岸壁上	△	○	将来的に船体制御機能が向上すれば装置のみの係留により係留に係る作業員の負担・時間は低減可能と想定。また、始業前ミーティングの拘束時間も低減。
	離岸作業 ～出航後	船上	△	△	装置のみによる係留が許可された場合には、離岸時の係留索回収作業が不要となり作業負担は低減。ただし、作業員の拘束時間は変化なしと想定。
		岸壁上	○	○	装置のみによる係留が許可された場合には、離岸時の係留索回収作業が不要となり作業負担及び拘束時間は低減すると想定。作業後ミーティングの時間も低減。
B 船	入港 ～接岸 着岸作業	船上	×	△	乗下船作業（貨物のラッシングや誘導等）に最も人を要するため、装置のみでの係留が可能となったとしても船上作業員の拘束時間は低減されない見込み。ただし、将来的に乗下船作業の自動化が進むことで、装置導入による削減効果が発現されるようになる可能性がある。
		岸壁上	○	○	岸壁の形状がL字型岸壁であり、係留索による細かい位置調整が不要のため、装置のみの係留も可能であり、作業負担及び拘束時間は低減すると想定。
	離岸作業 ～出航後	船上	△	○	装置のみによる係留が許可された場合には、係留索回収作業が不要となるとともに、乗下船作業終了後直ちに休息に入ることも可能となり作業負担・拘束時間が軽減。
		岸壁上	○	○	装置のみによる係留が許可された場合には、離岸時の係留索回収作業が不要となり作業負担及び拘束時間は低減すると想定。

(2) 自動係留装置導入による動揺量低減効果（波浪に対する係留性能検証）

① 実測値に基づく動揺量低減効果

(a) 空載時・非荷役作業時

図 4-7 に、敦賀港で実施された実証試験で一定の船体動揺量が計測された事例の水位・動揺量の実測値の時系列の一例を示す。また、表 4-8 に一定の船体動揺量が計測された 2 事例の動揺量の実測値を波別解析して求めた動揺量の有義値の一覧を示す。ここで、実測値の時系列には周期 600 秒程度の長周期振動がみられたため、実測値に周期 30 秒未満のハイパスフィルタを掛けた上で、ゼロアップクロスによる波別解析を行っている。

水平運動の Surge、Sway 成分は、STEP1（係留索のみによる係留）より STEP2（係留索と装置の併用による係留）、STEP3（装置のみによる係留）の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 の動揺量の比率は、Surge で約 7～8 割、Sway で約 3～4 割減少する。事例 1 よりも事例 2 の Sway の比率が大きいのは、事例 2 の波向が西寄り（Surge 方向）に近く Sway 成分の絶対値が小さいためと考えられる。Yaw 成分の動揺量の比率は±約 3 割の幅で増減する。

鉛直運動の Heave、Pitch 成分は、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従し、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 0.05m、Pitch は 0.07 ° 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。また、横揺れ振動の Roll 成分については、動揺量の比率は約 3～6 割減少する傾向にある。

図 4-8 に、スペクトル解析により求めた事例 1、2 の水位及び動揺量スペクトルを示す。図 4-8 上図に示す STEP1 の水位・動揺量スペクトルでは、周波数 0.1Hz 程度の波浪が作用することで、同周波数帯の水位・動揺量スペクトルが高くなっていることが確認できる。なお、水平運動の Surge、Sway、Yaw 成分には、0.02～0.05Hz 程度の周波数帯にもピークがみられるが、水位スペクトルにはピークがみられないことから、係留索による係留系でのサブハーモニック振動や、風に起因する振動であると考えられる。図 4-8 下図は、STEP1 に対する STEP3 のスペクトルの比率である。水位のスペクトルは、全周波数帯で概ね 1 程度であり、STEP1 と STEP3 の波浪の違いは小さいと言える。次に、表 4-8 で動揺量が低減していた Surge、Sway、Roll 成分の動揺量のスペクトルは、0.02Hz～ピーク周波数 0.1Hz の周波数帯において 1 を下回っている。

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のは、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。また、スペクトル解析結果より、周波数 0.02～0.05Hz 程度の振動を抑制することが確認できたことから、周期 20 秒～50 秒程度の係留系によるサブハーモニック振動や長周期波による振動に対しても効果を発揮する可能性がある。一方、前述の通り装置は船体上下運動に対し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発揮されないと考えられる。

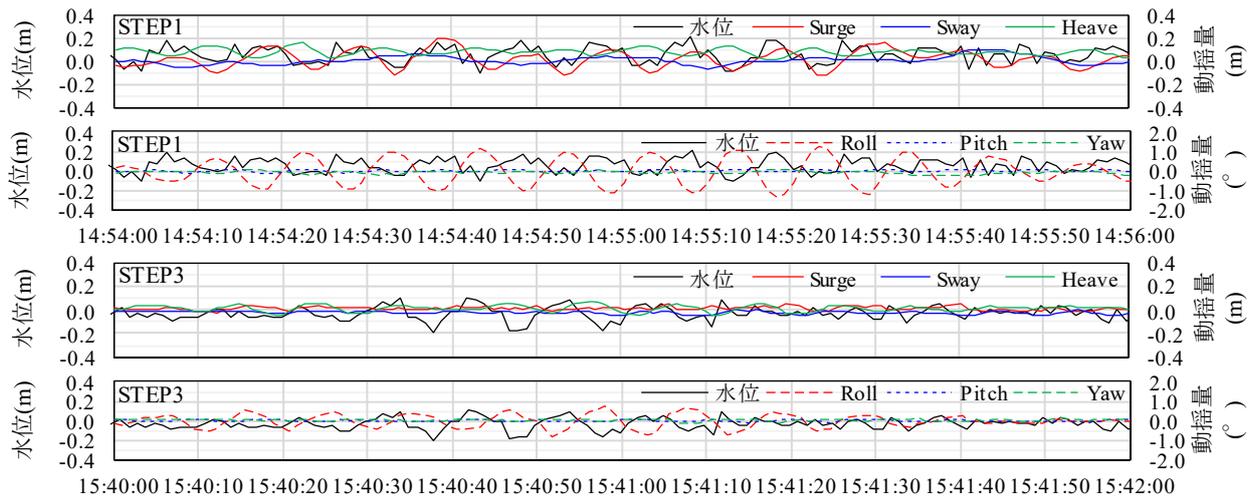


図 4-7 水位・動揺量の実測値の時系列の例 (2022/11/14, STEP1 及び STEP3)

表 4-8 波別解析より得られた空載時・非荷役作業時における動揺量の有義値の例

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%

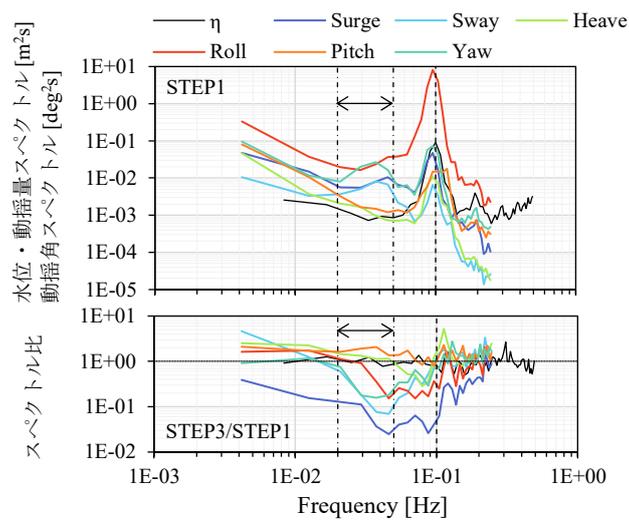


図 4-8 (上) 水位・動揺量・動揺角スペクトル (STEP1) (下) スペクトル比 (STEP3/STEP1) 例

(b) 荷役作業時

図 4-9 に、敦賀港で計測された、荷役作業時における動揺量の計測結果の一例を示す。また、「(a) 空載時・非荷役作業時」と同様に、動揺量の実測値を波別解析して求めた動揺量の有義値の一覧を示す。

水平運動の Surge、Sway 成分は、STEP1（係留索のみによる係留）よりも STEP2（係留索と装置の併用による係留）の動揺量の方が小さい。STEP1 に対する STEP2 の動揺量の比率は、Surge で約 0～5 割、Sway で約 4～6 割減少する。Yaw 成分の動揺量の比率は約 0～3 割減少する。

鉛直運動の Heave、Pitch 成分は、動揺量の比率はほぼ変化しないか、または約 1 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。ただし、Heave の絶対値は高々 0.04m、Pitch は 0.09° 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。また、横揺れ振動の Roll 成分については、動揺量の比率は約 2～6 割減少する傾向にある。

以上より、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、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、装置により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、装置導入により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。一方、前述の通り装置は船体上下運動に対し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発揮されないと考えられる。

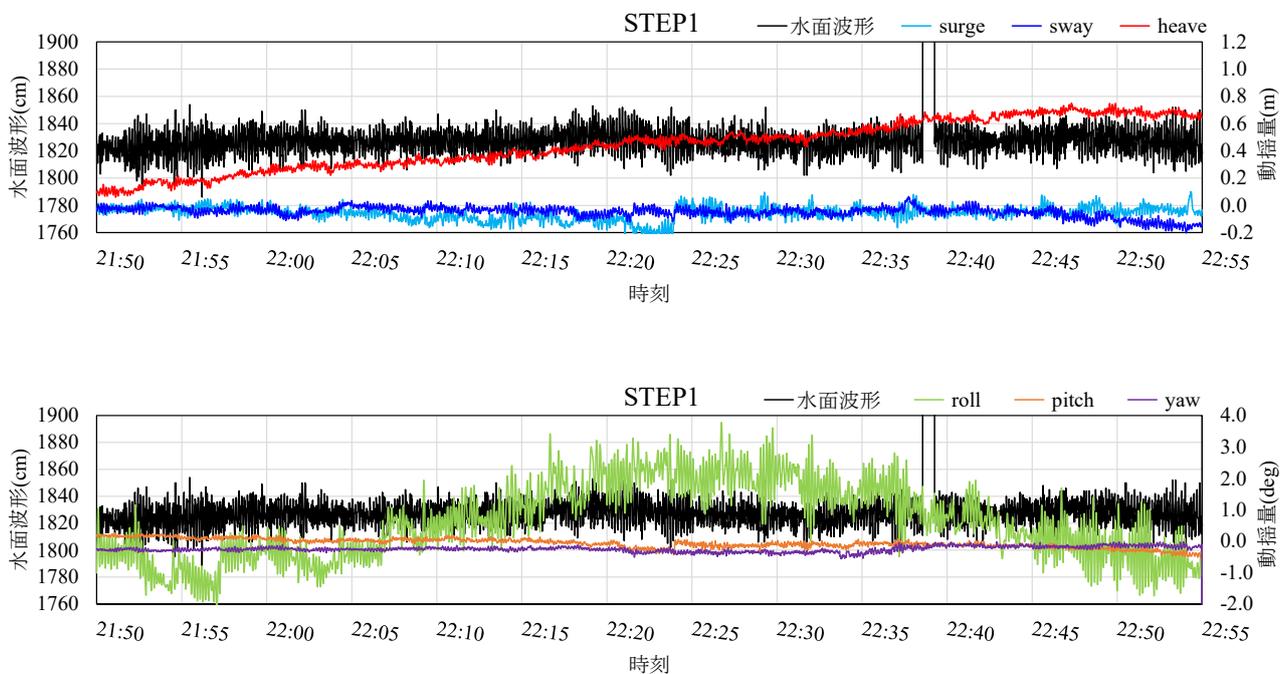


図 4-9 水位・動揺量の実測値の時系列の例（2024/12/21，STEP1）

表 4-9 波別解析より得られた荷役作業時における動揺量の比較例

計測日	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 (°)
R6.12.21	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%
R7.1.15	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%
R7.2.9	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%
R7.2.18	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%
R7.2.21	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%

② 船体動揺解析に基づく動揺量低減効果

敦賀港の検討事例では、前項で示した動揺量計測結果に対する再現性を確認した船体動揺解析モデルに基づき、係留索（8本）及び装置係留時の荷役限界波高を算定している。同検討では、鞍山南B岸壁のRORO船（北海道航路）を対象に、敦賀港において荷役障害発生実績のある周期8～12秒、鞍山南B岸壁に到達し得る入射波向15～60°を対象に、荷役限界波高を算出している。

表 4-10 に、検討結果の一覧を示す。ここで、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として整理されている。装置で係留した場合、係留索（8本）に比べて、Surge成分の荷役限界波高は最大約1.5倍、Sway成分は最大約1.2倍、Roll成分の荷役限界波高は最大約1.8倍程度になることが確認できており、数値解析結果からも装置導入により荷役に影響を及ぼすSurge、Sway、Roll成分の船体動揺量を低減可能であることが示されている。なお、上記以外の成分については、係留索と同程度か、最大1割程度動揺量が増大する結果が示されている。

表 4-10 敦賀港の検討事例における船体動揺解析に基づく荷役限界波高の算定結果

(上：係留索係留時の荷役限界波高算出結果一覧、下：装置係留時の荷役限界波高算出結果一覧)

算出方法	係留条件	周期 $T_{1/3}$	波向 θ	荷役限界波高[m]						最も厳しい 荷役限界波高[m]	長周期マニユアル 荷役限界波高[m]
				Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw		
実証試験	係留索	-	-	0.50 (0.50)	0.50 (1.48)	0.50 (1.34)	0.30 (0.30)	0.50 (0.80)	0.50 (0.60)	0.30 0.30	
船体動揺解析	係留索8本	8s	15°	0.50 (2.71)	0.50 (11.75)	0.50 (1.92)	0.50 (3.37)	0.50 (2.34)	0.50 (7.09)	0.50 1.92	0.50
船体動揺解析	係留索8本	8s	30°	0.50 (2.97)	0.50 (7.86)	0.50 (1.88)	0.50 (1.88)	0.50 (1.82)	0.50 (3.80)	0.50 1.82	0.50
船体動揺解析	係留索8本	8s	45°	0.50 (2.29)	0.50 (5.48)	0.50 (1.60)	0.50 (1.20)	0.50 (1.17)	0.50 (2.13)	0.50 1.17	0.50
船体動揺解析	係留索8本	8s	60°	0.50 (1.27)	0.50 (3.43)	0.50 (0.62)	0.50 (1.02)	0.50 (0.87)	0.50 (1.27)	0.50 0.62	0.40
船体動揺解析	係留索8本	10s	15°	0.50 (1.47)	0.50 (1.91)	0.50 (2.07)	0.50 (0.75)	0.50 (0.95)	0.50 (2.06)	0.50 0.75	0.50
船体動揺解析	係留索8本	10s	30°	0.50 (1.04)	0.50 (1.36)	0.50 (1.55)	0.37 (0.37)	0.50 (0.77)	0.50 (1.03)	0.37 0.37	0.50
船体動揺解析	係留索8本	10s	45°	0.50 (0.73)	0.50 (1.07)	0.50 (0.86)	0.33 (0.33)	0.50 (0.61)	0.50 (0.73)	0.33 0.33	0.35
船体動揺解析	係留索8本	10s	60°	0.50 (0.64)	0.50 (0.99)	0.50 (0.50)	0.28 (0.28)	0.50 (0.62)	0.50 (0.63)	0.28 0.28	0.20
船体動揺解析	係留索8本	12s	15°	0.50 (0.66)	0.50 (1.15)	0.50 (1.41)	0.50 (0.73)	0.50 (0.71)	0.50 (1.21)	0.50 0.66	0.35
船体動揺解析	係留索8本	12s	30°	0.41 (0.41)	0.50 (0.72)	0.50 (1.06)	0.28 (0.28)	0.50 (0.62)	0.48 (0.48)	0.28 0.28	0.30
船体動揺解析	係留索8本	12s	45°	0.34 (0.34)	0.50 (0.55)	0.50 (0.75)	0.20 (0.20)	0.50 (0.54)	0.33 (0.33)	0.20 0.20	0.25
船体動揺解析	係留索8本	12s	60°	0.38 (0.38)	0.41 (0.41)	0.47 (0.47)	0.21 (0.21)	0.50 (0.56)	0.37 (0.37)	0.21 0.21	0.20

算出方法	係留条件	周期 $T_{1/3}$	波向 θ	荷役限界波高[m]						最も厳しい 荷役限界波高[m]
				Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw	
実証試験	装置6基	-	-	0.50 (1.93)	0.50 (2.46)	0.50 (1.24)	0.49 (0.49)	0.50 (0.87)	0.50 (0.69)	0.49 0.49
船体動揺解析	装置6基	8s	15°	0.50 (2.04)	0.50 (20.00)	0.50 (1.91)	0.50 (9.09)	0.50 (2.35)	0.50 (7.80)	0.50 1.91
船体動揺解析	装置6基	8s	30°	0.50 (2.42)	0.50 (10.62)	0.50 (1.87)	0.50 (3.69)	0.50 (1.81)	0.50 (5.36)	0.50 1.81
船体動揺解析	装置6基	8s	45°	0.50 (3.64)	0.50 (6.31)	0.50 (1.58)	0.50 (1.58)	0.50 (1.18)	0.50 (2.15)	0.50 1.18
船体動揺解析	装置6基	8s	60°	0.50 (3.36)	0.50 (3.55)	0.50 (0.61)	0.50 (0.85)	0.50 (0.90)	0.50 (1.09)	0.50 0.61
船体動揺解析	装置6基	10s	15°	0.50 (3.02)	0.50 (6.00)	0.50 (2.05)	0.50 (2.68)	0.50 (0.93)	0.50 (1.87)	0.50 0.93
船体動揺解析	装置6基	10s	30°	0.50 (2.66)	0.50 (2.78)	0.50 (1.56)	0.50 (1.07)	0.50 (0.76)	0.50 (0.96)	0.50 0.76
船体動揺解析	装置6基	10s	45°	0.50 (2.37)	0.50 (1.62)	0.50 (0.85)	0.50 (0.52)	0.50 (0.61)	0.50 (0.64)	0.50 0.52
船体動揺解析	装置6基	10s	60°	0.50 (2.17)	0.50 (1.14)	0.44 (0.44)	0.33 (0.33)	0.50 (0.57)	0.50 (0.54)	0.33 0.33
船体動揺解析	装置6基	12s	15°	0.50 (2.19)	0.50 (2.27)	0.50 (1.42)	0.50 (1.36)	0.50 (0.70)	0.50 (0.68)	0.50 0.68
船体動揺解析	装置6基	12s	30°	0.50 (1.56)	0.50 (1.20)	0.50 (1.11)	0.50 (0.50)	0.50 (0.62)	0.44 (0.44)	0.44 0.44
船体動揺解析	装置6基	12s	45°	0.50 (1.37)	0.50 (0.85)	0.50 (0.76)	0.27 (0.27)	0.50 (0.55)	0.35 (0.35)	0.27 0.27
船体動揺解析	装置6基	12s	60°	0.50 (1.29)	0.50 (0.66)	0.47 (0.47)	0.19 (0.19)	0.50 (0.56)	0.35 (0.35)	0.19 0.19

※括弧内の数値は上限値を0.5mとしない場合の荷役限界波高

4.1.5 装置の維持管理

敦賀港に導入された装置メーカーのメンテナンスサービスは、メーカー技術者が全てのメンテナンスを行うもの、メンテナンスの一部及び年間消耗品の交換を地元メンテナンス企業が行うものなど、メーカー技術者によるメンテナンスや頻度について複数のプランが用意されており、それぞれ費用は異なる。

また、メンテナンス作業に当たっては、メーカー技術者でなければできない作業、専用器具・工具の使用も想定される。装置が故障した場合、メーカーによっては交換部品の調達に要する期間や、交換作業に当たって必要となる専用機材・工具等、異なることが想定されるため、事前にメーカーへ確認しておくことが望ましい。なお、敦賀港に導入された装置メーカーは海外企業であり、場合によっては通訳が必要となることも想定され、その手配や費用についても考慮しておく必要がある。

4.1.6 装置の運用上の留意点

装置の故障時の対応において、予備部品によっては温度や湿度を一定に保てる環境で保管する必要がある部品が含まれる場合があることから、事前にメーカーへ保管方法も確認しておくことが望ましい。

また、装置の故障期間が長期となる場合は、その故障を生じさせた要因にもよるが、故障した装置自体も長期間停止状態となるため、故障部品だけでなく、その部品につながる経路上の主要部品にも、同様の不具合が生じていないか確認しておくことが望ましい。海水等の水の流入や浸入が要因の場合は、特に注意する必要がある。

4.2 北九州港の導入事例

九州地方整備局関門航路事務所所有のドラグサクシオン浚渫兼油回収船「海翔丸」の専用栈橋で導入された係船装置は、吸着盤による吸着と、ワイヤーの引き込みを行う方式である。同事例では、「操船～接岸～陸上排送～離岸」を全自動化するシステムを実装しており、船舶の自動操船システムと係船装置とを組み合わせた先駆的な係船技術である。

自動離着栈システム及び自動係留装置の概要を以下に示す。詳細は参考文献²⁰を参照されたい。

- ① 自動離着栈システム：本船の推進器をコンピュータ制御下で自動操作し、ドルフィンまでのアプローチ操船と、接岸及び離岸を自動化するシステムを導入。
- ② 自動係留装置：吸着式係留装置は、先端にリップゴムを装備した吸着盤、吸着盤を船体に押付けるためのアーム部、船を係留するワイヤー、潮位変化等に対して本装置を上下方向に稼働させる昇降装置、等で構成。

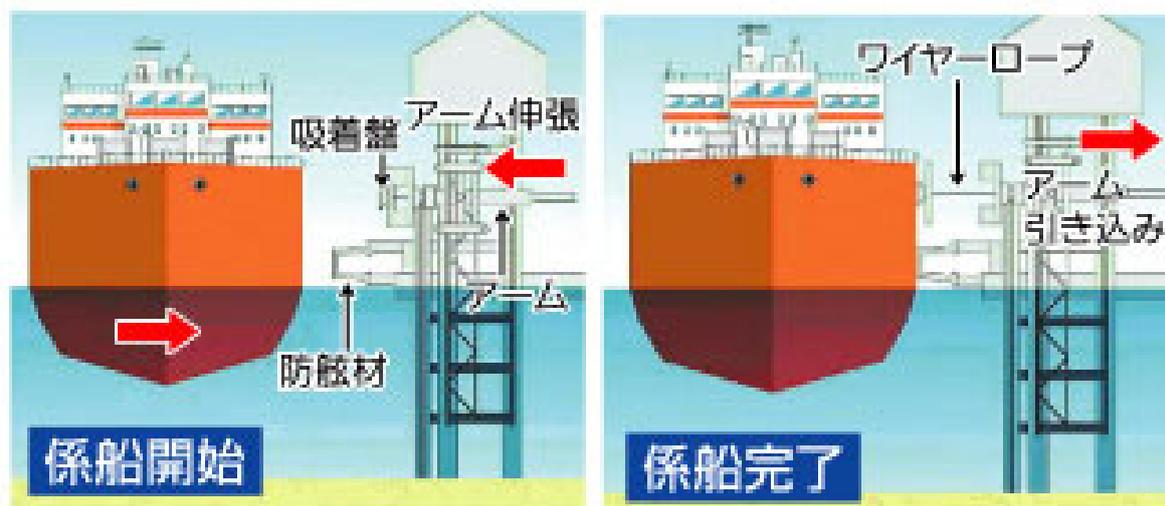


図 4-10 ワイヤー式の自動係留装置による係留方法の概要図（海翔丸）²¹

²⁰ 宮部宏彰、堀内敏光、渡辺学、田崎哲夫、川崎恭弘。"「海翔丸」向け自動係留・自動陸上排送装置"。石川島播磨技報、Vol. 44、No. 5。

<https://dl.ndl.go.jp/view/prepareDownload?itemId=info%3Andljp%2Fpid%2F8791244&contentNo=1>、(参照 2024-10-11)。

²¹ 国土交通省 九州地方整備局 関門航路事務所：自動係船及び自動陸上排送システム。from <https://www.pa.qsr.mlit.go.jp/kanmon/3syozokusenpaku/index1-2.html>、(2024年10月8日参照)。

4.3 海外での導入状況

4.3.1 自動係留装置の導入状況

海外で、装置を RORO 船及びフェリー岸壁等に導入している港湾を整理する。

表 4-11 海外の導入事例

製品	導入箇所	国名	係留頻度	管理者	対象船舶	稼働期間	
CAVOTEC 社 Moor Master	ピクトン港	ニュージーランド	21回／週	インターア イランダー (株)	RORO 船・フェリー	全長 181m	2005 年
	バレン港	デンマーク	28回／週	モリスリン ジェン (株)	RORO 船・フェリー	全長 99m	2015 年
	カロンボー港	デンマーク	28回／週	モリスリン ジェン (株)	RORO 船・フェリー	全長 99m	2015 年
	スポツビャー港	デンマーク	126回／週	モリスリン ジェン (株)	RORO 船・フェリー	全長 99m	2011 年
	タールス港	デンマーク	126回／週	モリスリン ジェン (株)	RORO 船・フェリー	全長 99m	2011 年
	ヘルシンキ港	フィンランド	42回／週	ヘルシンキ 港	RORO 船・フェリー	全長 212m	2016 年
	カペルシャー港	スウェーデン	14回／週	ストックホルム港	RORO 船	—	2023 年
	ナーンタリ港	フィンランド	14回／週	ナーンタリ 港	RORO 船	—	2022 年
	タリン港	エストニア	49回／週	タリン港	RORO 船・フェリー	全長 222m	2020 年
	トゥルク港	フィンランド	14回／週	トゥルク港	RORO 船・フェリー	全長 212m	2020 年
	ハウ港	デンマーク	49回／週	ソムリ・レ デリ (株)	RORO 船・フェリー	全長 99m	2009 年
	セルヴィク港	デンマーク	49回／週	ソムリ・レ デリ (株)	RORO 船・フェリー	全長 99m	2009 年
	デンポート港	オーストラリア	21回／週	シーロード (株)	RORO 船・フェリー	全長 182m～ 210m	2003 年
	メルボルン港	オーストラリア	21回／週	シーロード (株)	RORO 船・フェリー	全長 182～ 210m	2003 年
	デン・ヘルダー 港	オランダ	21回／週	テソ (株)	RORO 船・フェリー	全長 110～ 130m	2014 年
	フィッシュボーン 港	イギリス	21回／週	ワイトリン ク (株)	RORO 船・フェリー	全長 62 ～89m	2017 年
	ポーツマス港	イギリス	21回／週	ワイトリン ク (株)	RORO 船・フェリー	全長 62 ～89m	2017 年
	ヘッドランド港	オーストラリア	21回／週	ピルバラ港 湾局	バルク船	最大 135,000 DWT、 全長 295m	2010 年

	ナルビク港	ノルウェー	4回 ／週	ルカブ (株)	バルク船	最大 160,000 DWT、 全長 305m	2015年
	ネイピア港	ニュージー ランド	—	ネイピア港	コンテナ船	—	2022年
	ンクラ港	南アフリカ	2回 ／週	トランスネ ット (株)	コンテナ船	全長 366m	2009年
	ベイルー港	レバノン	2回 ／週	ベイルー港	コンテナ船	全長 350m	2014年
	サハラ港	オマーン	2回 ／週	—	コンテナ船	全長	2015年
	モントリオール 港など	カナダ	21回 ／週	五大湖セン トローレン ス水路開発 公社	コンテナ船等	—	2017年
	セントローレン ス海路	アメリカ	21回 ／週	SMC (株)	コンテナ船等	—	2019年
	その他 63 か所	—	—	—	電動船舶	全長 58 ～114m	—
Manpeay 社 Intelligent Dock Locking System	テムズ側両岸	イギリス	5回 ／ 時間	BRIGGS MARINE 社 (外部委 託)	フェリー	全長 62m	2018年
Trelleborg 社 Auto Moor	マリエハムン港	フィンラン ド	—	—	コンテナ、フェリー	—	—
	ランガス港	フィンラン ド	—	—	RORO 船	110m	—
	モス～ホーテン フェリーターミナル	ノルウェー	—	—	フェリー	—	—
	メルボルン	オーストラ リア	—	—	フェリー	—	—

出典：各メーカーホームページ

4.3.2 オマーン国サラール港の事例

オマーン国サラール港では南南東のモンスーンによって生じるうねり(**Infra Gravity Wave**)が海浜で反射して港内に入し、係留している船舶の突発的な **Surge** 方向の動揺が荷役に影響を及ぼすことがある。メーカー提供資料では、係留中の船体の最大動揺量 (**Surge**) が、係留索時の 1,489mm から、CAVOTEC 社の Moor Master 600kN 4 基で 57mm まで低減された計測事例が紹介されている。

4.3.3 オーストラリア国メルボルン港の事例

メルボルン港ジーロングターミナルでは、タスマニア航路の 3 万トンの船舶に対して 6 基の CAVOTEC 社の Moor Master を用いて係留している。同ターミナルは湾奥に位置しており、波高は最大でも 1m 程度発生するが、外力による装置の離脱は発生していない。風外力に対しては、風速 33m/s まで耐えられるように設計されている。現在、4 万 8 千トンの船舶に対応するための切り替えが進行中である。

メルボルンの事例では船体を補強したとの話があり、装置の吸着面や防舷材の接触面において、船体に作用する面圧に対する強化が必要かどうか確認しておくのが望ましい。

現地の装置の運用方法としては、1 基が不良の場合は注意喚起され、2 基が不良の場合は致命的な条件として注意喚起され、3 基が不良の場合は装置による係留を中止しているとのことである。

今後、新規に装置導入を検討する場合には、装置不良が発生する際にどのような運用をするべきか検討しておくのが望ましい。

5. 自動係留装置の導入時及び運用上の留意点

5.1 費用対効果の事前確認

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、前項に示す通り装置の運用に当たっては維持管理費用及び装置作動のための電力代が継続的に発生する。このため、事前に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概算した上で、十分な費用対効果が得られるかを確認しておくのが望ましい。

5.2 荷役・係留作業への影響の確認

公共バースにおいては様々な船舶が使用する可能性があることから、特定の船舶に対して装置の配置を最適化した場合、他の船舶の係留・荷役作業を妨げる可能性がある。このため、利用船舶の係留・荷役作業状況を事前に把握した上で、装置の配置を検討するのが望ましい。

5.3 故障時の対応

装置が故障した場合、健全な装置のみによる係留方法及び荷役限界風速等を事前に検討するとともに、故障期間が長期にならないように予備部品の保管を計画しておくことが望ましい。

また、前項のオーストラリア国メルボルン港の事例にあるように、装置不良が発生した際、どのような運用をするべきかを検討しておくのが望ましい。

5.4 停電発生時の対応故障時の対応

災害などによる停電発生時において、製品によっては、UPS によって一定時間は制御とモニタリングを継続することができる。また、電力が切断された場合であっても、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することができる。電源喪失時に装置の吸着が外れ、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 UPS による電源供給時間を長く確保する必要がある。なお、装置に電源が供給され正常に操作できる状態であれば、数分程度で吸着を外すことが可能である。装置の運用に当たっては、実際の停電イベントに対処できるよう、停電訓練 (REF) を実施することが望ましい。

5.5 地震・津波発生時

地震・津波などの災害により緊急離脱を要する状況下における対応方法を以下に示す。

例えば、大津波の来襲が予想される場合、タブレットを船上で操作して装置を脱着すれば、係留施設上での作業は不要となるため安全に避難することができる。タブレットを係留施設上で操作しなければならない場合であっても、数 10 秒で装置を脱着することが可能であり、通常の係留索を外す場合と比較して避難時間を確保することができる。また、装置に電源が供給されていない場合で

あっても、係留施設上の装置本体の真空開放バルブを操作すれば、比較的短時間で装置を切り離すことができる。

なお、装置に電源が供給されず、かつ、係留施設上の装置本体の真空開放バルブを操作することもできない等の最悪ケースを想定する場合、装置を緊急切断する必要があるが、船舶の推進力により係留中の装置を剥離することが可能か、確認しておくことが望ましい。

6. 参考資料

6.1 敦賀港の実証試験で対象とした船舶の操船能力

本項では、敦賀港の実証試験で対象とした船舶（RORO 船及びフェリー）をモデル化し、操船シミュレーションによって係留索を使用せずに着岸を試みた場合における接岸速度や接岸精度を評価した事例を紹介するとともに、得られた結果に基づく船舶の操船能力の現状を示す。

6.1.1 操船シミュレーションの概要

以下に、操船シミュレータに入力可能な情報及び出力される結果の概要を示す。同シミュレータは、360度の水平視野と下方視野を備え、港湾施設や岸壁、周辺景観等の3D映像を再現している。また、船（浮体）に作用する力（風、波、潮流等の外力）、船の動きをコントロールするプロペラ、舵、サイドスラスタ、タグボートによる牽引力を反映することにより、シミュレーション中で船舶の挙動を再現するものである。

表 6-1 操船シミュレーションの入力情報及び出力情報の概要

入力情報	港湾施設や岸壁、周辺景観等の3D映像	
	船体に作用する外力	風、波、潮流
	船の推進器	プロペラ、舵、サイドスラスタ
	タグボートによる牽引力	
出力情報	航行時の漂流角	
	航行時における予定進路からの横偏位量	
	係留施設、防舷材への接近距離、接岸速度	
	航行・離接岸・回頭時の制御余裕	

6.1.2 対象とする船舶の概要

敦賀港の事例では、敦賀港に入港する RORO 船及びフェリーの実船の船舶諸元を参考にしてモデル化したモデル船舶を対象に、操船シミュレーションが実施されている。以下に、対象船舶の概要を示す。

表 6-2 操船シミュレーションの対象船舶の概要

主要目	モデル船舶 A (RORO 船)	モデル船舶 B (フェリー)
総トン数	約 11,000GT	約 17,000GT
排水量 (入港時喫水)	約 11,000 トン	約 21,000 トン
全長	約 180m	約 225m
船幅	約 25m	約 25m
入港時喫水	平均約 6.5m	平均約 7.5m
主機関 (1 軸 1 舵)	14,940KW×1 基	POD 推進器 1 基でモデル化※ 12,900KW×1 基
バウスラスター	1,350KW×1 基	1,200KW×2 基
スタンスラスター	700KW×2 基	—
航海速力	約 24kt	約 28kt
正面受風面積	約 680 m ²	約 710 m ²
側面受風面積	約 3,400 m ²	約 4,500 m ²

※モデル化に当たって参考にしたとしたフェリーの実船は、主機に直結した 1 軸プロペラと、アジマススラスター (全方向推進器) 1 基を装備した、タンデム CRP 推進装置を装備している。しかし、同じ推進装置は極めて特殊でモデル化が難しいため、敦賀港の事例では 1 基のアジマススラスター装備船としてモデル化している。

6.1.3 シミュレーション条件

敦賀港の事例では、表 6-3 に示す通り、風況及び時間帯条件を数ケース変更した条件においてシミュレーションが実施されている。船長はブリッジから岸壁への接岸状況等を確認するとともに、操船シミュレーションに精通したオペレータが、岸壁からの距離、岸壁に対する船体の傾き、接岸速度等の情報を適宜船長に伝達することで、実際の操船体制に近い状況となるように工夫が行われている。

表 6-3 シミュレーションケースの概要

設定項目	設定値	備考	
風況条件	0m/s	外力無し条件、2 船舶に共通	
	5m/s	冬季における平均風速、2 船舶に共通	
	8m/s	事前のテスト操船から得られたモデル船舶 A の操船限界風速	
	10m/s	事前のテスト操船から得られたモデル船舶 B の操船限界風速	
	風向	向岸風・離岸風 各 3 方位	合計 6 方位
波浪条件	波高	0.0m	外力無し条件、2 船舶に共通
	波高	0.3m	岸壁前面での波高、2 船舶に共通
	周期	8s (モデル船 B)、9s (〃 A)	
時間帯条件	昼間・夜間	視認性の差による操船能力の差異の確認	

6.1.4 結果の概要

操船シミュレーションにより得られた、着岸操船時に使用する推進器及び操船方法と、操船能力（目標位置に対する誤差及び接岸精度）との関係例を表 6-4 に示す。また、併せて敦賀港で実施された実船のフェリーによる係留索無し着岸試験における結果を示す。結果の概要及び考察は以下の通りである。

- RORO 船を模したモデル船 A では、風速 8m/s 以下の条件下では、一部のケースを除き目標着岸位置に対して概ね±5m 以内の誤差で制御できており、敦賀港の事例では、平行舷に全ての装置が吸着可能な精度で着岸できる。
- 一方、フェリー船を模したモデル船 B では、風速 5m/s 以下の条件下においても、目標着岸位置に対して±5m 以上の誤差が生じるケースが存在する。
- モデル船 A の推進器は前後方向及び正横方向の運動を独立して制御可能である一方、モデル船 B の推進器はこれらの方向の運動を同時に制御する^{※1} ため、このような結果の差異が得られた可能性がある。
- 上記より、前後方向及び正横方向の運動を独立して制御可能な推進器を有する船舶であれば、最低限必要な精度（平行舷に全ての装置が吸着可能）で着岸できる可能性がある。
- 一方、RORO 船やフェリーの実運用に当たっては、より詳細な着岸精度^{※2}での制御が求められるが、シミュレーション上では数 10cm 単位のスケールの把握が困難であることから、より詳細な着岸精度までは検証できていない。時間をかけて位置調整を行えば、所要の誤差以内で着岸できる可能性もあるが、その実証は今後の課題である。
- 接岸速度については、モデル船 A において、風速 8m/s 以下では接岸速度を 0.1m/s 以下に制御できることを確認した。一方、モデル船 B では風速 5m/s 以下でも接岸速度 0.1m/s を超過するケースが存在する。
- 着岸精度と同様に、前後方向及び正横方向の運動を独立して制御可能な推進器を有する船舶であれば、一定の風速以下であれば、所要の接岸速度以下で船体を制御できる可能性がある。
- 船長へのヒアリング結果より、係留索を用いる場合であっても、スラスタなどを用いて防舷材の設計接岸速度を超えないように操船するとの意見が得られたことから、係留索を使用しない場合でも接岸速度は変化しないものと想定される。

※1：モデル船 B は、POD 推進器により前後方向及び正横方向の制御が行われる（正横方向の制御にはバウスラスタも使用）ため、両方向を独立して制御できない。一方で実船のフェリーでは前後移動には主機関、正横移動には POD 推進器及びバウスラスタを使用するため、モデル船 B よりも位置調整は容易であることに留意が必要。

※2：RORO 船：ランプウェイ降下位置と岸壁及びランプウェイの損傷防止用に敷設されたエプロン緩衝板との誤差の許容値

フェリー：船体側面ハッチ部と乗客乗降用のギャングウェイとの取付誤差の許容値 など

