

外洋性シーバース運用の安全性向上と運用支援システムに関する基礎的研究

Basic Research on Progressing Safety of a Sea Berth in Open Sea and a Berth Operation Support System

久保雅義*・津金正典**・笹 健児**・成田豊隆***・榊原繁樹***

Masayoshi Kubo, Masanori Tsugane, Kenji Sasa, Toyotaka Narita and Shigeki Sakakibara

Suspending of cargo handling caused by moored ship motions is serious problem at sea berths facing to open sea area. In this paper, we focus on a tanker sea berth facing to the Pacific Ocean. And we research about the berth operation of the sea berth firstly. Secondly, we measure and analyze the wind waves and swell data at the berth. We simulate mooring ship motions under these waves and winds, then we compared with the hearing result from the berth master and the simulation result. Finally, we propose a berth operation support system for a safe berth operation.

Key Words : Sea Berth, Long Period Waves, Mooring Ship Motions, Berth Operation Support System

1. はじめに

現在、シーバースのほとんどは自然条件の穏やかな内海に位置しており、そのため船舶係留中にも特に支障なく運用されてきた。しかし最近、外洋性海域にもシーバースが建設され始めており、船体動揺に起因した荷役中断・緊急離棧対応が重要な問題となってきた。近年、いくつかの外洋性港湾では係留船舶の激しい動揺による荷役不能あるいは係留索切断事故等が報告されており⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、現場担当者から係留時の安全性およびバース稼働率確保の面から問題提起がなされている。このような激しい船体動揺は周期数分の長周期波や係留系の非対称性等に強く起因していることから、最近では港湾およびバース設計時にも係留中の船体動揺を考慮する事例が増えている。一方、バースの運用に関しては、従来から波高のみによって基準を定めているのが一般的であり、長周期波による船体動揺を考慮した検討結果が反映されている事例はほとんどないのが実状である。本研究では現在運用されている外洋性の大型タンカーシーバースを対象にし、まず着棧、係留および荷役を行う上でのバース運用状況をヒアリング調査した。そして運用上の判断が難しいと考えられる冬季風浪および台風通過後のうねりについて、タンカーシーバース地点で波浪観測および解析を実施した。さらに、これらの外力条件をもとに大型タンカーが係留している状況を想定した船体動揺シミュレーションを実施し、運用上の目安との比較による妥当性を検証した。以上から、これらの解析方法によるバース運用支援システムに関する考察を行った。

2. 研究の手順

本研究では図-1に示す、太平洋に面した外洋性大型タンカーシーバースを検討対象とした。このシーバースは既に20年以上の稼働実績があり、着棧標準船型は主に25万トン級超大型タンカー(VLCC)で、10万トン級タンカーも着棧する。シーバースは海上沖合約4kmの地点に立地しており、外洋性の高波浪やうねりが来襲する。シーバース付近の港湾において長周期波によって係留船舶が激しく動揺した事例があることから、シーバースにおいても長周期波による影響を中心に調査・検討を行った。

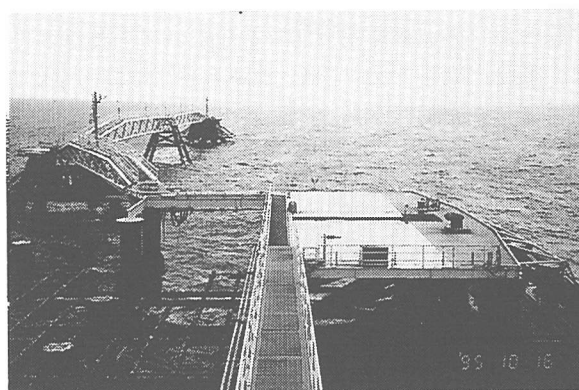


図-1 調査対象としたシーバース

3. シーバースの運用状況

全国各地のシーバース運用基準は従来から波高と風速で設定されており、概ね波高 1.5m、風速 15m/s 程度が

* 神戸商船大学 輸送システム工学講座

** (株)郵船海洋科学 海洋事業本部 調査部 (〒140 東京都品川区南品川 2-3-6 第7小池ビル 3F)

*** 横浜ゴム(株) MB開発本部 開発推進部

荷役中止の基準とされている場合がほとんどである。内海のシーバースでは、台風等の場合以外ではこのような条件で支障なく運用されているが、外洋性海域ではうねりや低気圧の影響で周期の長い波浪が侵入する頻度が高く、波高が低い場合でも係留船舶が大きく動揺し荷役・係留不能となった事例もある。当該シーバースにおいても、当初波高のみを基準に運用を開始したものの、うねり等の影響を無視できず経験的に表-1 および表-2 のような実運用の目安を現場で使用しているとのことである。

表-1 シーバースにおける係留時の運用目安

有義周期	限界有義波高および荷役・係留状況
8～9sec	0.7m 以上：係留船に振幅 1m 未満の動揺が生じ始め、ローディングアーム、係留索の状況を監視しながら荷役を継続している
10～13sec	0.5m 以上：波高によっては船体動揺量は 2m を超えることもあり、荷役中断、係留状況の監視および緊急離棧の検討を行う
13sec 以上	0.5m 以上：波高が低くても動揺は収まらず、その後の波高増大傾向や波向を重視し緊急離棧する。10 万トン級のタンカーでは波高 0.3m 程度でも係留は難しい

(注)有義周期が 8sec 以上をうねりとみなしている。

表-2 シーバースにおける着棧時の運用目安

着棧限界波高	限界風速	備考
0.7m	12m/s	周期 10sec 以上ではこれより低い波高であっても、着棧を見合わせる

また、当該シーバースではタンカー着棧時には荷役必要日数および気象状況を考慮した上で着棧可否の現場判断を行っており、波高 1.5m 以下でも表-1 に示す波浪条件が予測されるときには着棧を見合わせているとのことであった。さらに船舶の係留状態は、気象海象条件の他にも船型、載荷・喫水状態、本船の係留設備の能力等によっても異なるため、運用基準を一律に考えることが難しいというコメントも得られた。

4. シーバースでの波浪および風の計測

実運用状況調査結果より、波浪や風といった気象海象条件を正確に把握することが必要と考えた。シーバースでは波高計、流速計および風速計を設置し有義波高・有義周期・波向、流向・流速、風向・風速を観測および記録している。このデータと専門家による気象海象予測をもとに運用目安を考慮した上で着棧および係留・荷役の可否を判定しており、シーバース運用開始以来現在まで大きな事故は発生していない。またヒアリング調査によれば、実運用目安は経験的なもので、科学的な検証による裏付けは少ないとのことであった。

本研究では、実運用目安と一般のバース運用基準との関係より、現場での係留・荷役の判断が難しいと考えられる気象海象条件を対象にシーバースで波浪観測を実施した。観測は 2 回実施し、冬季季節風による風浪時（1996 年 2 月 14 日）と台風の影響によるうねり来襲時（1996 年 10 月 5 日）を対象とした。前者については波周期の比較的短い高波浪を観測対象としており、後者は波周期の長い波高 1m 未満のうねりを観測することを目的とした。また、観測については、シーバースの制御室にある配電盤にデータレコーダーおよび FFT 解析機を接続し、送信データを記録した。観測時の状況および海面状態を図-2、図-3 および図-4 に示す。

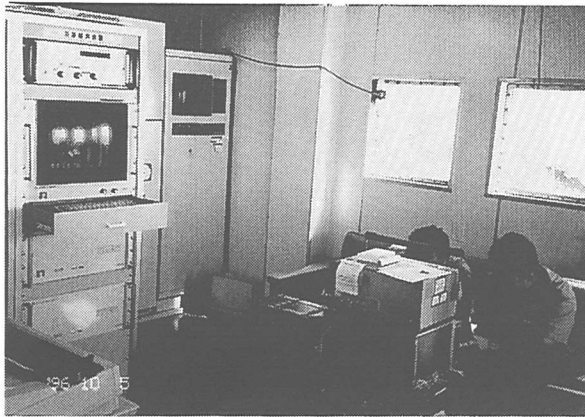


図-2 波浪観測時の状況



図-3 冬季風浪の海面状態

5. 観測データの解析結果

計測された波浪および風の時系列データを AD 変換し、波浪の周波数特性を調べるため FFT 解析を実施した。1 個のデータ計測時間は 20 分間であり、データ時間間隔は 0.5sec とした。ここでは、係留船舶の動揺に最も影響を与えていると言われている周期数分の長周期波成分に注目した。

5.1 冬季高波浪のデータ解析結果

1996 年 2 月 14～15 日にかけて計測を行い、表-3 に示す波浪データを解析した。この時の波高は最大で 1.5m、有義周期は 5sec 程度で、波向の主方向は SSE であった。観測時にはサハリン東方海上を中心位置とする発達した低気圧が存在する気圧配置であった。波高は 14 日午後に最大となり、14 日の夜から N 方向からの風が強まると同時に波高も下がっていった。観測時の風速は 10m/s 前後であり、海面状態は荒れている様子が明確に視認できる。観測データ中波高が最も高かった観測データ 1-1 のスペクトル解析結果を図-5 に示す。これより、卓越周期は 5sec 付近であるが、10sec 付近にもピークが見られた。また長周期側では周期 100sec 付近ではエネルギー密度は小さく、むしろ 1000sec 付近にピークが見られた。

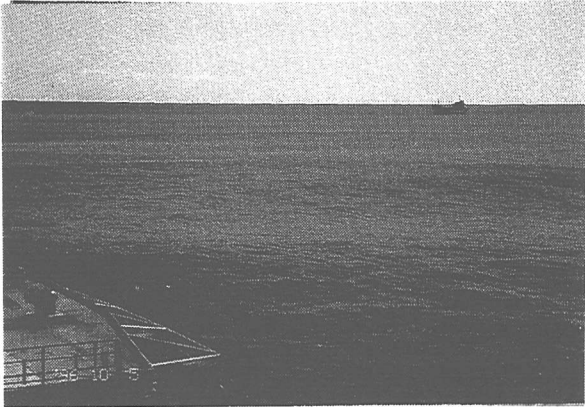


図-4 台風後うねりの海面状態

表-3 冬季風浪観測データ

観測データ	観測日時	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(sec)$
1-1	2/14 13:45～14:05	1.52	5.10
1-2	2/14 15:55～16:05	1.16	5.20
1-3	2/15 09:07～09:27	0.70	4.45

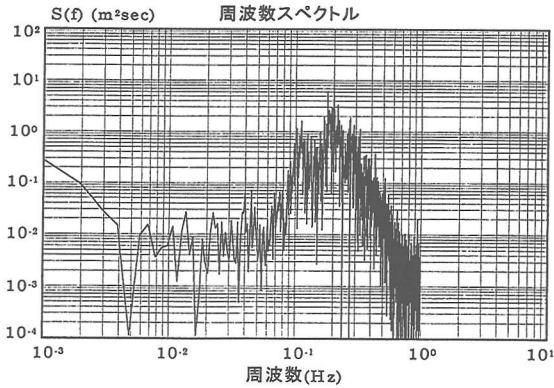


図-5 データ 1-1 のスペクトル解析結果

5.2 夏季うねりのデータ解析結果

1996 年 10 月 5 日に計測を行い、表-4 に示すデータを解析した。この時は 2 つの台風が日本東方海上を通過した後であり、観測当時の気圧配置は好天に恵まれた状態であった。ただし台風の余波による S 方向からのうねりが目視でも明確に確認することができた。図-6 に観測データ 2-1 のスペクトル解析結果を示す。この時のデータはいずれも波高は 0.8～1.1m 程度であるが、卓越周期の 10sec 付近とさらに 100sec 付近に明確なスペクトルピークが見られた。これらの結果より波高 1m 以下であっても、有義周期 10sec 程度のうねりには 100sec 前後の長周期波が 0.1m 程度のオーダーで存在することが明らかになった。以上から波高 1.5m 程度の冬季風浪よりも、むしろ波高 1m 程度のうねりにエネルギー密度が大きい周期 100sec 程度の長周期波の存在が確認された。

表-4 台風後うねり観測データ

観測データ	観測日時	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(sec)$
2-1	10/5 10:20～10:40	0.85	10.60
2-2	10/5 10:55～11:15	0.84	9.93
2-3	10/5 11:40～12:00	0.87	10.82
2-4	10/5 12:50～13:10	1.14	10.70

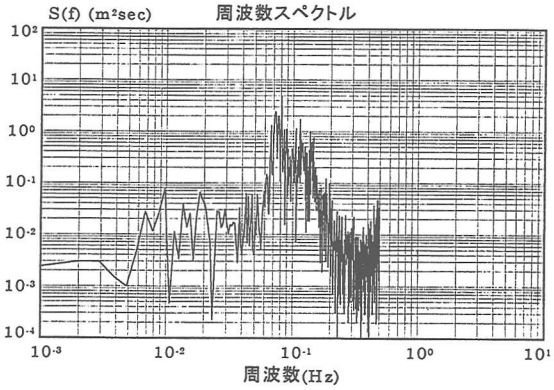


図-6 データ 2-2 のスペクトル解析結果

6. シーバースにおける大型タンカーの荷役・係留状況

シーバースは鋼管杭式のドルフィンであり、船体衝突および動揺時のエネルギーを高さ 3m の定反力型防舷材

6 基で吸収するよう設計されている。また各綱取りドルフィンには緊急離棧対応に基づき、クイックリリースフックが装備されている。今回波浪観測を実施した状況では、表-1 に示すとおり現場の判断でまず着棧しないが、本検討では仮にタンカーが係留していた場合にどのような船体動揺が発生するかを検討した。検討にあたっては、計測した波浪および風を外力とし、時間領域における係留船舶の動揺シミュレーションを用いた。対象船型は表-5 に示す 25 万トン級超大型タンカーとし、船体コンディションは満載とバラストを設定した。また係留方法は OCIMF で推奨されたタンカー係留方法に基づいている⁽⁴⁾配索 (20 本係留) とした。係留索は実船に則して、プレストラインおよびスプリングはワイヤーロープの先端にナイロンロープをテールロープとして取り付けたものとし、ヘッドラインおよびスターンラインは繊維索を使用した。図-7 に本研究でシミュレーション対象とした 25 万トン級超大型タンカーの係留図を示す。

表-5 シミュレーション対象船舶 (VLCC) の要目

全長(m)	321.48	
垂線間長(m)	310.00	
船幅(m)	58.00	
	満載	バラスト
喫水(m)	19.48	8.66
排水量(ton)	290392.00	119497.00
重心高さ(m)	15.31	13.78
メタセンタ高さ(m)	8.84	20.64
重心位置(m)	11.10	8.85
正面受風面積(m ²)	1150.00	1790.00
側面受風面積(m ²)	3660.00	7100.00

7. 船体動揺シミュレーションを用いた検討

計測した外力条件をもとにした動揺シミュレーションにより、現場で過去に発生した船体動揺現象および実運用の目安との比較を行った。動揺シミュレーション手法は、Cummins の運動方程式を時間領域で解くものであり、流体力および波浪強制力は三次元領域分割法を使用した⁽⁵⁾。ここでは波浪強制力は計測された時系列波形を FFT 処理した結果をもとに算定しているが、2 次波力である変動漂流力については考慮していない。計測された風向および風速の時系列データをもとに変動風圧力を求めた。タンカー係留の場合、係留索のヒステリシス特性に起因する粘性抵抗力については不明な点もあるが、ここでは久保らの研究結果⁽⁶⁾を使用した。

7.1 冬季風浪を外力とした場合の船体動揺

表-6 および図-8 に波浪データ 1-1 を外力条件とした場合のシミュレーション結果を示す。冬季風浪を外力とした場合には、全体的に sway は 0.5m、surge は 1m 以下であり、大型タンカー荷役限界暫定値⁽⁷⁾と比較すると荷役可能であると考えられる。surge の時系列波形を見ると船体が前方向に押し出されるような結果となっているが、これはバースに対し前後方向の風が吹いていたためであると推定される。また係留索の最大張力は 20 トン弱であり、係留索の許容張力およびウィンチブレーキ力以内であった。一方で防舷材歪みも 5% 程度であり、実用上問題は無い。よってここで観測したような気象海象条

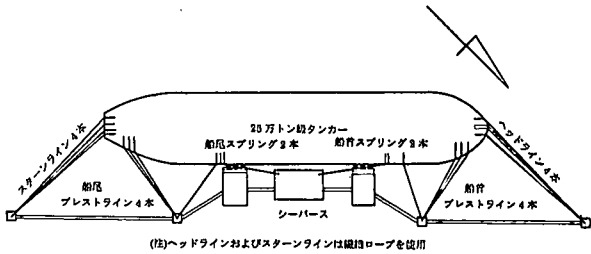


図-7 本研究で対象としたタンカーの係留図

表-6 船体動揺シミュレーション結果その 1

sway	surge	heave	pitch	roll	yaw
0.40m	0.72m	0.09m	0.08°	0.25°	0.41°
ヘッドライン		プレストライン		スプリング	
6.83 tonf		19.85 tonf		11.57 tonf	
防舷材反力		防舷材歪み			
155.80 tonf		5.37%			

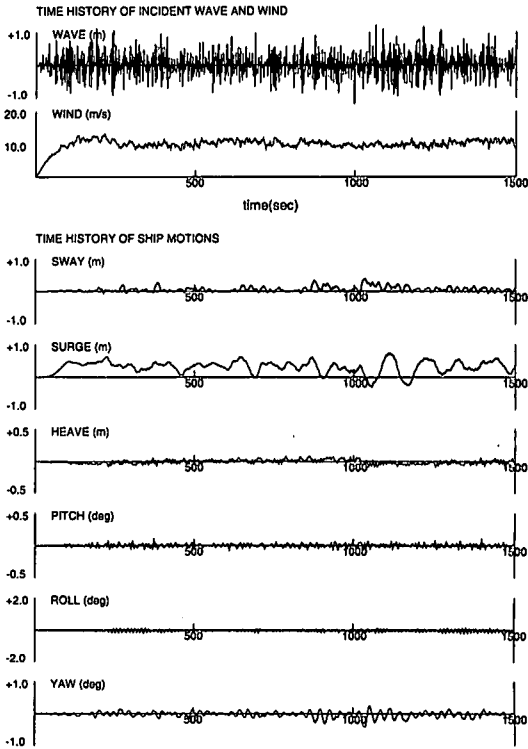


図-8 船体動揺シミュレーション結果その 1
(データ 1-1 を外力とした場合、バラスト)

件の場合、タグボートの推力確保の面で着棧は難しいが、着棧後にこのような状況となっても係留・荷役は可能と考えられる。

7.2 夏季うねりを外力とした場合の船体動揺

表-7 および図-9 に波浪データ 2-2 を外力条件とした場合のシミュレーション結果を示す。うねりを外力とした場合には、sway ではサブハーモニックモーションが顕著に現れており、surge も片振幅 1m 程度の長周期船体動揺が卓越している。この影響で係留索張力も最大で 45 トン程度まで上昇したケースがあった。このような状況下では、荷役はもちろんのこと、タンカーのウィンチブレーキ力 (40 トン程度) を考慮に入れば係留も難しい。喫水状態で見ると、全体的にはバラスト時の方が係留・荷役は厳しいが、満載時の方が動揺が大きいケースもあった。この結果からも、載荷状態等の影響が複雑に作用しており、係留時の運用条件を基準化するのが難しいという現場の感覚が裏付けられた。

波高 1.5m 程度の冬季風浪よりも波高 1m 足らずのうねりの方が、荷役・係留を考える上で厳しいことがシミュレーション結果から検証され、現場から報告されているような現象が再現できていることも分かった。ただしシミュレーション結果の surge が現場での状況よりやや小さいが、この点については

- ① surge の粘性抵抗係数を 500 トンクラスの船での繊維索係留時におけるデータを使用しており、タンカー係留のようなワイヤーロープでは粘性抵抗はこれよりも小さい
 - ② 変動漂流力を考慮していない
- ことが考えられる。

表-7 船体動揺シミュレーション結果その 2

sway	surge	heave	pitch	roll	yaw
1.12m	0.91m	0.10m	0.25°	0.33°	0.54°
ヘッドライン		プレストライン		スプリング	
8.28 tonf		44.78 tonf		16.30 tonf	
防舷材反力		防舷材歪み			
309.07 tonf		10.64%			

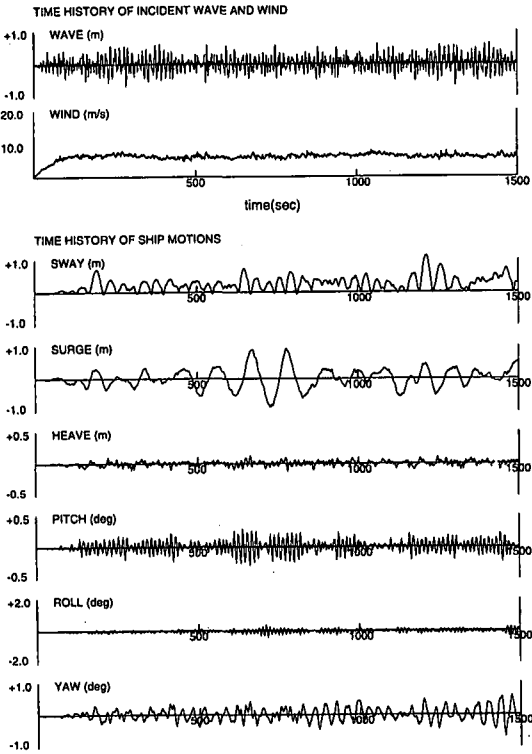


図-9 船体動揺シミュレーション結果その 2
(データ 2-2 を外力とした場合、バラスト)

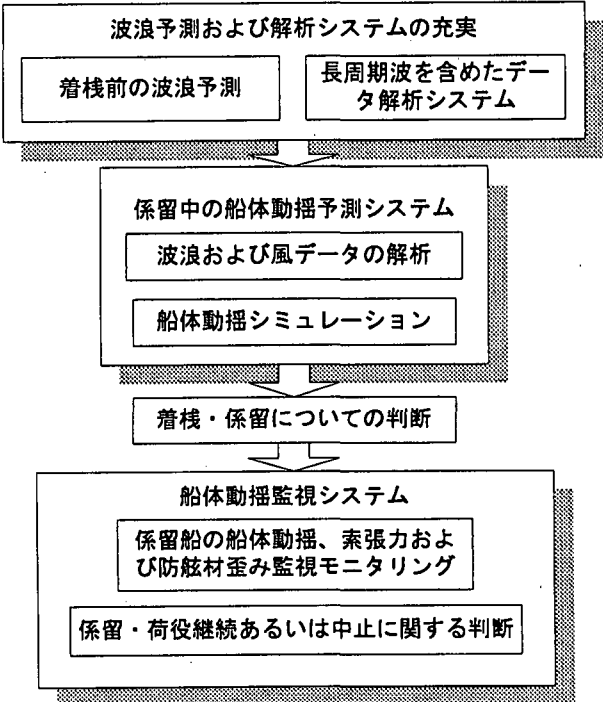


図-10 バース運用支援システムの概念フロー図

8. バース運用支援システムへの適用

有義波高のみによるバース運用基準では、特に外洋性シーバースの運用が困難であることが裏付けられた。うねりや長周期波の影響を取り込んだ運用基準を採用することが望ましいが、現場での目視等による判断は困難である。動揺シミュレーションシステムを現場ベースで設置するという提案は過去にも行われているが⁽⁹⁾、長周期波や副振動の影響まで考慮したものでなかったため、特に長周期動揺の再現性において課題が残されていた。し

かし本検討のように長周期波および長周期船体動揺の影響を考慮したシミュレーションおよび解析システムを導入することによって、係留・荷役中の状況に関する再現精度を向上させることが可能となり、経験と勘に依存した判断を少なくできるものと考えられる。これらから運用支援システムは、①長周期波の抽出を含めた波浪データ解析および波浪予測、②予測データに基づいた船体動揺シミュレーションによる係留・荷役中の安全性検討、③現場での船体動揺観測システムの3要素から構成されるものと考えられる。この概念フロー図を図-10に示す。③については、係留中の船体動揺、係留索張力、防舷材歪みをリアルタイムで観測するシステムである。LNGバースでは既に係留索張力監視システムが採用されているが、外洋性シーバースではこのようなシステムが安全対策上必要と考えられる。

9. 結論および今後の検討課題

- ①運用状況の調査より、波高が低い場合でも周期が長い時にはバース運用が困難であることが明らかとなった。
 - ②冬季風浪および台風通過後のうねりを現地観測した。これより、周期 100sec 程度の長周期波のエネルギー密度は後者の方が強く、有義波高 1m 未満のうねり中にも 0.1m 程度の長周期波が存在することが確認された。
 - ③観測されたデータを外力条件とする船体動揺シミュレーションを実施したところ、うねりを外力とした場合で sway と surge の長周期船体動揺が卓越している結果となり、現場で過去に報告された状況を概ね再現できた。
 - ④当該シーバースではバネ定数の大きな定反力型防舷材を使用しているため、サブハーモニックモーションが起りやすいと考えられ、抑制対策としてバネ定数の小さな空気式防舷材が有効であることが検証されている⁽⁹⁾。
 - ⑤surge の長周期船体動揺については、係留索変更等による固有周期の変更が提案されている。ただしタンカー係留の性格上、係留索変更は現状では不可能と考えられる。またタンカーは喫水変化も大きいため、他船型と比べると固有周期の変動幅も大きく、長周期波との共振を完全に避けるのは難しいものと予測される。
 - ⑥過去に係留索や防舷材の適切な組み合わせ・変更などによって、長周期船体運動が大きく抑制できる係留システムに関する研究事例がある⁽¹⁰⁾。一方、OCIMF の係留方法は静穏度良好なバースを前提としているため、静的な荷重しか考慮していない。よって外洋性シーバースでは、動的な要素を考慮した係留システムの検討と、現場での長周期波を含めた気象海象監視や船体動揺予測および監視システムを含む船舶荷役・係留中の支援システムの構築を行っていくことが必要である。
 - ⑦運用支援システムの精度向上を図る上で、本研究で使用した動揺シミュレーションも今後高次オーダー波力等を取り込んだモデルに改良していく必要がある。
- 最後に、本研究を実施するにあたり多大なご支援およびご意見を賜った、出光興産株式会社・川上克彦氏に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1)松良精三、渥美洋一、菅沼史典、宮本義憲：波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測、海岸工学論文集第 41 巻、pp.71～75、1994
- (2)菅沼史典、神谷昌文、渥美洋一、小泉信男：現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討、海岸工学論文集第 42 巻、pp.951～955、1995
- (3)永井紀彦、橋本典明、浅井 正、戸引 勲、伊藤一教、東江隆夫、小林昭男、柴田孝雄：現地データに基づく港内係留船舶の動揺に及ぼす港外長周期波、海岸工学論文集第 41 巻、pp.931～935、1994
- (4)OCIMF: Mooring Equipment Guidelines, Oil Companies International Marine Forum, 1992
- (5)榎木 亨、久保雅義、青木伸一：係留システムの改善による船体運動および船舶の接岸エネルギーの低減化、第 30 回海岸工学講演会論文集、pp.460～464、1983
- (6)久保雅義、今枝彬郎、奥村宗行：長周期船体運動計測装置の試作と計測結果について、神戸商船大学紀要第 2 類第 28 号、pp.289～298、1980
- (7)上田 茂：係留施設の計画および設計に係わる係留船舶の動揺、港湾技術研究所講演会講演集、pp.53～61、1990
- (8)上田 茂、永井紀彦、平石哲也、白石 悟、清水正巳、小林昭男：係留船舶の動揺のリアルタイム予測システムの開発及び現地観測による評価、海岸工学論文集第 41 巻、pp.921～925、1994
- (9)久保雅義、榎原繁樹：係留システムのバネ定数比から見た係留船舶のサブハーモニックモーション、海岸工学論文集第 39 巻、pp.801～805、1992
- (10)白石 悟、久保雅義、上田 茂、榎原繁樹：係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策、海岸工学論文集第 42 巻、pp.941～945、1995