

荷役稼働率計算における波群・副振動による 長周期波の影響について

久保雅義*・榊原繁樹**

1. 緒言

近年港内静穏度を、従来のバース前面波高による表示方法（社）日本港湾協会、1989）から直接的に係留船舶の動揺量を指標とする荷役稼働率として評価するようになってきている（上田ら、1994）。これは輸送効率の向上など高度化する港湾に対する要求によるものであるが、一方風や波のない穏やかな気象・海象にもかかわらず、船が突然走り出す、底うねりにより船が動き出すといった係留船舶に大きな長周期動揺が生じる荷役中止事例があり、この場合荷役中止のみならず係留索の切断やさらには本船の沖出しを余儀なくされていたことが各地で明らかになってきた（松良ら、1994；永井ら、1994）。

係留船舶の動揺量に基づく荷役稼働率計算においては、まず港内波計算により港外波からバース前面での波のスペクトルを算出する。次に動揺シミュレーションを行って所定の外力および係留条件における係留船舶の動揺量を求め、荷役許容動揺量との比較により稼働率を算定している。従来の港内波計算では、上述の底うねりといった波群（太平洋側では3大8小、日本海側では3大4小の素波の11倍または7倍の長周期波）や副振動を考慮しておらず、また風浪と波群・副振動による長周期波が共存する波動場での動揺シミュレーション手法が確立していないことから、稼働率計算において実際の荷役中止状況を再現できない恐れがある。以上をふまえて本研究では、実際のモデル港湾における波浪・風データおよび荷役業務日誌を用い、また荷役中止となった状況を詳述して係留船舶の動揺に基づく荷役稼働率計算における波群・副振動による長周期波の影響について検討する。

2. 従来の係留船舶の動揺に基づく荷役稼働率の計算

モデル港湾での夏期8～10月の3ヵ月間の波浪・風データおよびそのときのあるバースにおける荷役業務日誌を用いて、従来の係留船舶の動揺に基づく荷役稼働率の計算を行う。

（1）モデル港湾、対象バースおよび対象船舶

a) 対象港湾・対象バース

モデル港湾は太平洋に面した港で、図-1に示すような埋立式港湾である。今回計算対象としたバースは、15,000 DWT 級の水深 10 m バースである。

b) 対象船舶・係留条件

対象バースは公共岸壁であり、499 GT 程度の内航船から喫水調整した 20,000 GT を超える外航船にいたる様々な船種・船型の船舶が使用している。そこでバースの使用状況から対象船種は貨物船とし、船型は 696 GT と 15,000 DWT 船の最小・最大船型の 2 種類を考えた。また載貨状態は半載とした。表-1 に船体諸元を示す。係留条件は、船型毎に係留索を設定し、防舷材は 15,000 DWT 船の接岸エネルギーから選定した V 型防舷材が取付られていた。図-2 に一例として 15,000 DWT 船の係留状況を示す。

（2）外力条件

港湾における波浪特性は、港外波が年間にわたり波浪

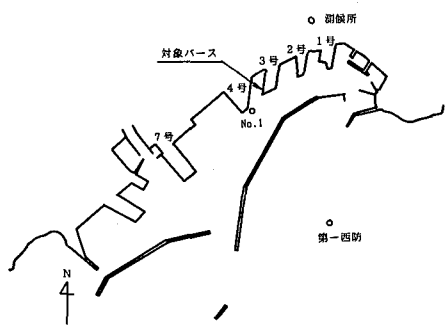


図-1 モデル港湾の平面図

表-1 船体諸元

船型	貨物船	696GT	15,000DWT
船長	L(m)	69.5	153
船幅	B(m)	11.4	22.3
型深さ	D(m)	6.9	12.5
喫水	d(m)	4.0	7.0
排水量	DT(ton)	1,888	14,816

* 正会員 工博 神戸商船大学教授 輸送システム工学講座
 ** 工博 横浜ゴム(株) MB 開発本部 開発推進部

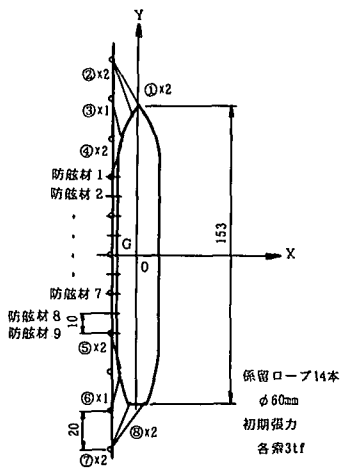


図-2 係留状況 (15,000 DWT 船)

台帳として与えられている (運輸省・(財)沿岸開発技術研究センター, 1991)。当該バース前面での波浪条件は、港外波データから港内波計算を行って求めた (高山, 1981)。表-2 にモデル港湾についての港外波データおよび対象バース前面の港内波計算の結果の一部を示す。

年間の風データは、気象庁などの測候所にて行われている定時観測データを用いた。

(3) 荷役稼働率の計算

係留船舶の動揺に基づく荷役稼働率の計算手法は種々

表-2 港外波およびバース前面波高

(a) 港外波の波向き・周期別波高出現率 (%)

波 高	波 高 $H_{1/3}$ (m)							
	≤ 1.0	$1.0 < \leq 2.0$	$2.0 < \leq 3.0$	$3.0 < \leq 4.0$	$4.0 < \leq 5.0$	$5.0 < \leq 6.0$	$6.0 < \leq 7.0$	$7.0 < \leq 8.0$
S	0	0.64	0	0	0	0	0	0
SSE	0.64	3.18	0.64	0.64	1.27	0.64	0	0
SE	1.91	3.18	0	0	4.46	0.64	0	0
ESE	0	7.64	0.64	0	1.27	0.64	0	0.64
計	2.55	14.64	1.28	0.64	7.00	1.92	0	0.64
周期 $T_{1/3}$ (s)	9				10			

(b) バース前面波高出現率 (m)

波 高	波 高 $H_{1/3}$ (m)							
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
S	0.44	0.87	1.31	1.74	0.91	1.36	1.81	2.28
SSE	0.10	0.21	0.31	0.41	0.23	0.34	0.45	0.58
SE	0.05	0.10	0.15	0.19	0.11	0.17	0.22	0.28
ESE	0.03	0.07	0.10	0.13	0.08	0.12	0.15	0.20
周期 $T_{1/3}$ (s)	9				10			

提案されているが、基本的には動揺シミュレーション結果と荷役許容動揺量との比較により算定している。ここでは久保ら (久保・榊原, 1993) による荷役稼働率の計算手法を用い、また荷役許容動揺量は一般に知られている各運動モード毎の値を使用した (Ueda・Shiraishi, 1981)。

696 GT 船および 15,000 DWT 船について、荷役稼働率の計算した結果はそれぞれ 99.9% と 100% となった。

3. 荷役業務日誌および天気図等による実際の係留状況の把握

(1) 荷役業務日誌による荷役中止率の算定

荷役業務日誌および天気図等の気象・海象条件を参照して、当該バースの使用状況を示す係留状況表を作成した。そして表-3 に 3 ヶ月間での荷役中止原因別の中止時間および中止率を示す。

荒天避泊とは、台風が接近し本船を冲出しする場合を示す。また入港不可とは、本船入港に際し、パイロットが港外で本船へ乗船できず、本船の接岸ができない場合を表わしている。

(2) 荷役中止時の気象・海象状況と係留船舶の動揺および荷役状況

風や波によって荷役が中止されたケースは表-4 に示す 4 例であった。2 例について荷役中止時の状況を詳述する。

ケース①：8月2日 UN 丸：荒天避泊

台風 10 号が 8 月 2 日 0 時頃本州中部に上陸し、日本海に出て温帯低気圧となりゆっくり北上した。当日の天候はほぼ曇であるが、当該バースの風については、8 月 2 日の日最大平均風速が $0700 U_{10} = 13.9 \text{ m/s}$, 0350 に瞬間最大風速 $U_{\text{max}} = 21.6 \text{ m/s}$ を観測している。波については台風接近に伴い周期 13 秒程度の波が来襲し、8 月 2 日

表-3 荷役中止原因および中止率

荷役中止原因	中止時間 (h)	中止率 (%)
雨	41	4.4
うねり	24	2.6
荒天避泊	12	1.3
入港不可	12	1.3
濃霧	12	1.3

表-4 風・波による荷役中止事例

ケースNo	日付	船名	荷役中止原因
①	8月2日	UN 丸	荒天避泊
②	9月1日	AC 丸(499GT)	うねりのため
③	9月2日	FA 丸(10,293GT)	パイロット乗船できず、入港不可
④	10月21日	EF 丸(9,919GT)	うねりのため

の港外波観測値は、 $H_{\max}=4.0\text{ m}$ 、 $T_{\max}=10.8$ 秒であった。荷役状況については8月1日は完全休日で荷役が行われなかったが、他のバースでは7月31日に既にうねりによる荷役中止がみられた。当日の他の全てのバースにおいても、早朝から荷役は中止されており、気象・海象状況から判断して、本ケースの荷役中止原因は台風接近に伴う強風およびうねりの来襲による荒天港外避泊と判断する。

ケース②：9月1日 AC丸(499 GT)：うねりによる荷役中止

9月1日～3日の天気図を図-3に示す。台風15号は本土に上陸しなかったが、日本の東方海上を通過している様子がわかる。

天候は晴または曇で、風については瞬間最大風速でも $U_{\max}=5.8\text{ m/s}$ と微風である。波については、8月末より周期17秒、波高3.5 m程度の波が観測されている。荷役状況については、他のバースにおいてもうねりによる荷役中止や接岸不可が多数発生していた。また対象船舶は、荷役中止後に他のバースにシフトしたが、9月2日にまたうねりによる荷役中止となり、9月3日にさらに他のバースにシフトして荷役を行った。

以上より、本ケースの荷役中止原因は、風もなく天候良好であるにもかかわらず荷役が出来ない典型的なうねりによる荷役中止と判断する。

(3) 荷役稼働率の計算結果と係船状況表との比較

荷役業務日誌から求めた風・波による荷役中止率は、表-3においてうねり、荒天避泊および入港不可を合せて5.2%となる。これより荷役稼働率は94.8%となり、前述の計算結果と合せて表-5にまとめる。

従来の港内波計算を用いた荷役稼働率の計算手法によれば、696 GT 船および15,000 DWT 船共にほぼ100%の荷役稼働率となる。一方実際の係船状況表から算出した荷役稼働率は、それより小さい値となっている。

計算によって荷役稼働率を算定する場合、少なくとも

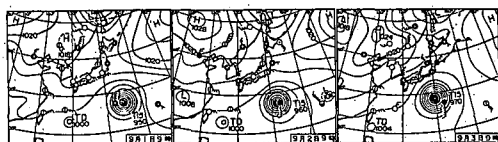


図-3 日本周辺の天気図(9月1日～3日)

表-5 計算結果と係船状況表から求めた荷役稼働率

計算結果		係船状況表
696GT 船	15,000DWT 船	94.8%
99.9%	100%	

実際に荷役中止となったケースを、係留船舶の動揺量レベルにおいて、再現できることが不可欠である。しかし今回の計算では、Surgeで $\pm 2.0\text{ m}$ 程度になるとの荷役業者から聴取した荷役の中止状況をうまく再現できていなかった。

4. 長周期波を考慮した荷役稼働率の計算とその必要性

(1) 長周期波を考慮した係留船舶の動揺解析の必要性

前述のように従来の荷役稼働率の計算値と係船状況とに違いが生じ、また係留船舶の動揺量においても荷役中止となったケースを再現できていないことがわかった。

そこでもう一度現象の把握に立ち返って、当該バースの荷役業者やパイロットへの状況聴取を行い、荷役が中止される時の気象・海象条件、港内の波の様子および係留船舶の動揺の様子を調べた。それらの中で注目すべき点を挙げると、以下のようなものである。

- ① 荷役中止時、Surgeで $\pm 2\text{ m}$ 程度となる。
- ② 船が走り出す。
- ③ 風もなく天気も良いのに、船が大きく動く。
- ④ 海面は穏やかでも、底うねりにより船が動く。
- ⑤ 港外波が防波堤を越えてくるほど大きい時に、船が動き、荷役が中止する。

今回計算で用いた波は、港外波で最大波高 $H_{1/3}=5.25\text{ m}$ 、最大周期では $T_{1/3}=15.7$ 秒、バース前面波では最大波高 $H_{1/3}=0.72\text{ m}$ 、最大周期で $T_{1/3}=15.7$ 秒程度である。15,000 DWT 船で Surgeの動揺量が $\pm 2\text{ m}$ となる波外力条件は、波外力 $H_{1/3}=1.0\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=16$ 秒でも Surgeの動きはたかだか $+0.96\text{ m}$ 、 -1.14 m 程度である。上述の注目すべき点の中で、波高が小さくても大きな Surge 動揺が生じている事実から、波周期が $T_{1/3}=16$ 秒程度でなくさらに長い周期の波が係留船舶に作用していたものと考えざるを得ない。

太平洋側では、3大8小、日本海側では3大4小といった素波の11倍または7倍の周期をもつ長周期波の存在が知られている(久保ら, 1994)。モデル港は太平洋に面した港であることから、例えば港外波周期が13秒のと

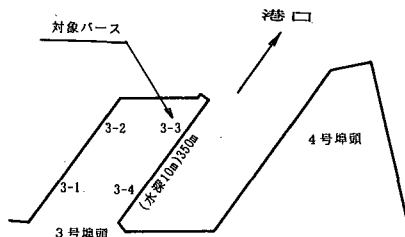


図-4 対象バース配置

表-6 当該スリップの固有振動周期

モード数(m)	0	1	2	3
$T(s)$	141	47	28	20

フリップの奥行: 350m

平均水深: 10m

き $T=13 \times 11=143$ 秒となる。また波高は港外波の 10 % 程度といわれている (合田, 1994)。

一方当該バースは、図-4 に示すようにスリップの入口側に位置する。スリップの奥行を 350 m とするとき、モード毎の固有振動周期を表-6 に示す。

以上のことから当該バースでの荷役中止の状況においては、140 秒程度の長周期波またはスリップ内に発生する副振動が、係留船舶に作用していたものと考えられる。

そこで上述のような長周期波を考慮して荷役稼働率の計算を行ってみた。長周期波を考慮する条件は、前述の荷役中止時の港外波やバース前面の海面状態から判断して、港外波データの中で波高 3 m 以上、波周期 10 秒以上程度の波が連続して発生している場合とした。また周期は港外波の 11 波分とし、波高は大ざっぱではあるが素波の波高の 10 % とした。そして係留船舶に作用する波外力としては、表-2 のバース前面波に長周期波を重ね合わせることで与えた。なお長周期波の波向きは埠頭の配置から船首方向とした。

(2) 荷役稼働率の計算結果と係船状況表との比較

上述のように長周期波を考慮するケースを設定して、まず表-4 に示した風・波により荷役中止となったケースに係留船舶の動揺量レベルで再現できているかを確か

めてみた。

ケース①: 8月2日 UN丸: 荒天避泊

8月2日6時のバース前面における海象条件は以下のようである。

波 $H_{1/3}=0.58$ m, $T_{1/3}=13.4$ 秒, $\omega=85$ deg

風 $U_{10}=10.3$ m/s, 風向 SSW ($\psi=15$ deg)

対象船舶の大きさは不明であるが、荷役状況から判断して、10,000 GT 船程度と推定される。そこでこのときの 15,000 DWT 船の船体動揺を図-5(a) に示す。強風が作用するケースであるが、いずれの運動モードにおいても Surge ± 1.0 m, Heave ± 0.5 m の荷役許容動揺を越えるほどの動揺は発生していない。

これに長周期波 ($H=0.4$ m, $T=143$ 秒, 波向き船首) を加味した時の動揺量の時系列を図-5(b) に示す。これは示していないが Sway, Pitch, Roll, Yaw に関しては波向きが船首方向であることからあまり変化はなかったが, Surge, Heave に顕著な違いが見られた。特に Surge では、実際の荷役中止時にみられる ± 2.0 m を越える程度の大きな動揺が生じている。このように長周期波を考慮することで荷役中止の現象を概ね表現できることがわかった。

ケース②: 9月1日 AC丸(499 GT): うねりによる荷役中止

9月1日6時のバース前面における海象条件は以下のようである。

波 $H_{1/3}=0.31$ m, $T_{1/3}=15.7$ 秒, $\omega=85$ deg

風 $U_{10}=1.4$ m/s, 風向 NNW ($\psi=150$ deg)

このときの 499 GT 船型に近い 696 GT 船の船体動揺

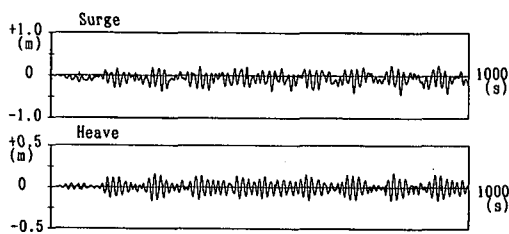


図-5(a) 15,000 DWT 船の船体動揺 (8月2日6時)

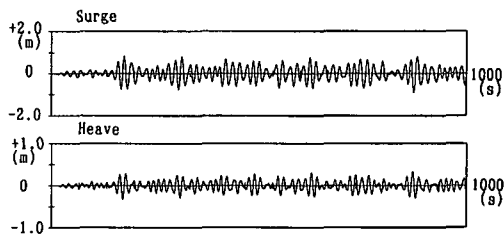


図-6(a) 696 GT 船の船体動揺 (9月1日6時)

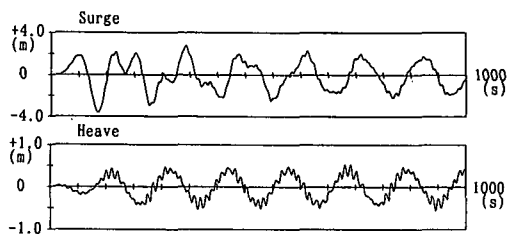


図-5(b) 長周期波を考慮した 15,000 DWT 船の船体動揺 (8月2日6時)

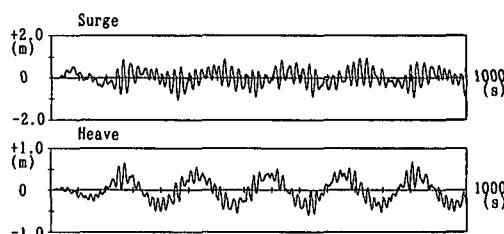


図-6(b) 長周期波を考慮した 696 GT 船の船体動揺 (9月1日6時)

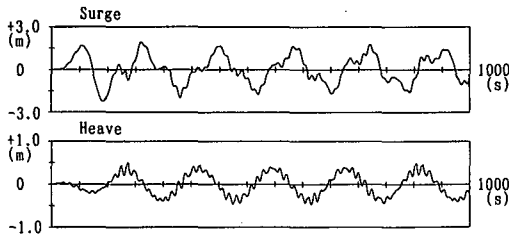


図-7 長周期波を考慮した 15,000 DWT 船の船体動揺
(9月1日6時)

表-7 荷役稼働率の比較

波条件の取扱方法	計算結果		係船状況表
	696GT 船	15,000DWT船	
短周期波のみ	99.9%	100%	94.8%
短周期波+長周期波	96.6%	87.8%	

を図-6(a)に示す。Surge に大きな動揺が生じているが、いずれの運動モードにおいても荷役許容動揺量を越える大きな動揺は発生していない。これに長周期波($H=0.36$ m, $T=176$ 秒, 波向き船首)を加味した時の動揺量の時系列を図-6(b)に示す。

長周期波を加味することで Surge, Heave に荷役許容動揺量を越える長周期の運動が生じている。ただし前述の Surge の顕著な増加は見られない。図-7に同じ条件下での 15,000 DWT 船の船体動揺を示す。15,000 DWT 船では長周期波を考慮することにより ± 2.0 m ほどの Surge がみられる。一方 696 GT 船では ± 1.0 m 程度である。この原因としては、Surge の固有周期や慣性力の違いが考えられる。696 GT 船の Surge 固有周期は T_{su} (696 GT) = 36 秒, 15,000 DWT 船では T_{su} (15,000 DWT) = 67 秒であり, 15,000 DWT 船の方が比較的長周期波の周期に近い。また 15,000 DWT 船の方が慣性力が大きく、一端動き出すと係留索による係留力では動揺を抑えられないためと考えられる。いずれにしても小型・大型船を問わず、長周期波を考慮することにより、荷役中止に至る程の大きな動揺が発生することがわかった。

長周期波を考慮して、3ヵ月間の荷役稼働率を改めて

計算した。表-5での係船状況表から求めた荷役稼働率との比較も合せて表-7にまとめる。

長周期波を考慮して荷役稼働率の計算を行うことで、かなり実際の係船状況を表わせることが明らかとなった。

5. 結 語

以上、荷役稼働率計算における波群・副振動による長周期波の影響について検討を行った。その結果を要約すると次のようになる。

① 荷役中止時の係留船舶の動揺量レベルでの再現性において、バース前面波の特性把握を従来の風浪のみ扱う港内波計算によるだけでなく、天気概況や港湾の特性を鑑み、波群や副振動・セイシュ等による長周期波を考慮する必要性が明らかとなった。

② 港内波評価に際して、うねりや風浪だけでなく必要に応じて波群や副振動・セイシュ等による長周期波を考慮した荷役稼働率計算により実際の係船状況表をよく表現できることがわかった。

参 考 文 献

- (社)日本港湾協会 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説。
- 上田 茂・白石 悟・大島弘之・浅野恒平 (1994): 係留船舶の動揺に基づく荷役許容波高の提案及び稼働率, 海岸工学論文集第 41 巻, pp. 916-920.
- 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲 (1994): 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.
- 永井紀彦他 (1994): 現地観測に基づく港内係留船舶の動揺の及ぼす港外長周期波, 海岸工学論文集第 41 巻, pp. 931-935.
- たとえば運輸省港湾局監修・(財)沿岸開発技術研究センター (1991): 全国港湾海洋波浪観測資料 (NOWPHAS).
- たとえば高山知司 (1981): 波の回折と港内波高分布に関する研究, 京都大学学位論文。
- 久保雅義・榊原繁樹 (1993): 年間荷役稼働率からみた係留システムの比較について, 海岸工学論文集第 40 巻, pp. 941-945.
- Ueda S. and S. Shiraishi (1981): The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves, Report of the Port and Harbour Research Inst., vol. 27, No. 4, pp. 3-61.
- 久保雅義・水井真治・斎藤勝彦 (1994): 自然環境の厳しい漁港における入港問題について, 日本航海学会論文集第 91 号, pp. 1-10.
- 合田良実・佐藤昭二 (1994): 海岸・港湾, 土木学会, pp. 155-156.