

年間荷役稼働率からみた係留システムの比較について

久保 雅 義*・榊 原 繁 樹**

1. 緒 言

防舷材の選定に関して、技術基準((社)日本港湾協会, 1989)には、波浪の影響を受ける係船岸では係留中の船舶の動揺を考慮すること、性能の良い防舷材を用いて、海象・気象による接岸の遅延を少なくし、荷役効率を高めた方が良いとある。近年、外洋に面する地に埋立による新たな港が建設されることがあり、係留船舶の動揺の考慮を必要とする係留システムの設計が多くなってきているようである。

係留船舶の動揺を考慮した係留システムの設計を行う場合、動揺シミュレーションを行うことが原則である。動揺シミュレーションの利用のされ方をみると、サバイバル・コンディション (係留限界条件)、つまり係留システムが係留船舶の動揺下において、耐えられるかどうかのみに用いられる傾向にある。これは安全性確保が最重要であることによるが、サバイバル・コンディションでの評価が係留システムの許容値とシミュレーション結果との比較により、比較的容易に、かつ定量的に行えるためでもある。一方、オペレーショナル・コンディション (荷役限界条件)、つまり係留船舶の動揺や荷役稼働率への影響に関しては、動揺シミュレーションが有効に用いられていないのが現状である。これはオペレーショナル・コンディションでの評価において、港内波や風などの外力の取扱いが難しく、またそれらを全て考慮して動揺シミュレーションを行った場合、膨大な労力と時間を要して実用的でないこと、さらには動揺シミュレーション結果を荷役稼働率に関連づける手法が知られていないためと考えられる。

上田らは、係留船舶の動揺を考慮した荷役稼働率の計算法を提示している (Ueda・Shiraishi, 1988)。この計算法は、船舶の荷役許容動揺量によりバース前面での荷役限界波高を波向・波周期別に導き、そして港内波高計算を用いて荷役可能沖波波高の未超過確率を求めて各バースでの荷役稼働率とするものである。これは有効な計算法であるが、膨大な計算を要し、かつ従来と同様に波

高で荷役稼働率を表現するものである。係留船舶の動揺は、波・風等の外力だけでなく、係留システムの特性によっても大きく影響されることが知られるようになってきている (Ueda, 1987; 久保・榊原, 1992)。従って、より直接的に係留船舶の動揺量によって荷役稼働率を概算表現できる計算法があれば、より有効となる。

以上をふまえて本研究では、試みとして、動揺シミュレーションを用いて荷役稼働率を簡易的に概算できる計算法を提示する、そして一例として、モデル港湾における年間荷役稼働率を計算し、荷役稼働率に及ぼす係留システムの影響について言及する。

2. 係留船舶の動揺を考慮した荷役稼働率の計算法

(1) 荷役稼働率の定義

本研究で提示する船舶の荷役稼働率は、動揺シミュレーションにより求める。その動揺量の時系列結果を用いて、次のように荷役稼働率を定義する。

$$\text{荷役稼働率}(\%) = (1 - a/b) \times 100 \quad \cdots \cdots (1)$$

a : 荷役許容動揺量を越える時系列データ数

b : 総時系列データ数

ここに、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 (例えば鉤石船の Sway ± 1.0 m, Surge ± 1.0 m, Yaw $\pm 1.0^\circ$) を用いる。また、総時系列データ数とは、例えば動揺シミュレーション時間が 1000 秒、時間ステップ $\Delta t = 0.25$ 秒のとき、総時系列データ数 = 4000 となる。

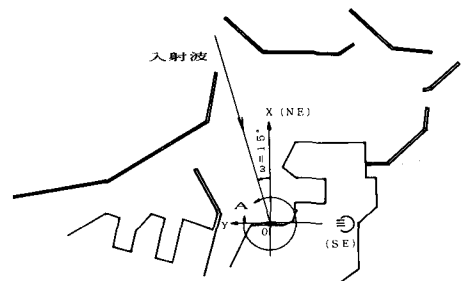


図-1 H 港の平面図

* 正会員 工博 神戸商船大学教授 輸送システム工学講座

** 横浜ゴム(株) 複合商品本部 EP 技術部

(2) モデル港湾における年間荷役稼働率の計算例

a) モデル港湾の形状、波浪および風特性

図-1に示すモデル港H港について荷役稼働率の計算を行う。H港での波浪特性は、当該港の波浪統計を用いて、図-2に沖波の波周期別出現率・累積出現率および月別平均有義波の形で表示している。また風特性は、風向頻度図を参照した。

b) 対象船舶・外力条件

対象岸壁は図-1における水深14mのA岸壁である。A岸壁は50,000 DWT 鉦石船（船長 $L=200$ m, 船幅 $B=32.2$ m, 型深さ $D=18.2$ m, 空載では喫水 $d=7$ m, 重量 $W=34,000$ ton）用鉛直岸壁である。A岸壁に係留された鉦石船の係留状況は図-3に示す。係留システムは係留索と防舷材とした。係留索は $\phi 60$ mm ナイロンロープ12本取りとし、防舷材は本船満載時の接岸エネルギー（ $E=28.3$ tf・m）から定反力型防舷材1000Hを選定した。外力条件は波と風を考える。波については、本来港内波計算により岸壁前面での波高・波周期を求めなければならないが、現象を概ね表現できるまで簡易化するため、波周期については図-2の沖波周期を用い、波高については沖波の波浪特性では長周期波ほど波高が大きくなる傾向があるが、ここでは波周期10秒までは $H_{1/3}=0.5$ m, 10秒を越える長周期側では $H_{1/3}=0.2$ m とした。波向は港口から当該岸壁に入射する波向 $\omega=15^\circ$ とした。風については、H港での卓越風向SE（A岸壁50,000 DWT 船において船尾からの風）から $U_{10}=10$ m/s が作用する場合と風なしの2ケースとした。

c) 荷役稼働率の計算結果

図-4に波周期別荷役稼働率および月別荷役稼働率の計算結果を示す。図-4(a)には、波周期累積出現率に対応した荷役稼働率累積分布も示している。荷役稼働率累積分布は次式のように定義する。

荷役稼働率累積分布 (T_i)(%)

$$= 100 - \sum_{i=1}^j (a_i/b_i) \times \rho_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

a_i : 波周期 T_i での荷役許容動揺量を越える時系列データ数

b_i : 波周期 T_i での総時系列データ数

ρ_i : 波周期 T_i での出現率

T_i : $T_i=1$ s, 2 s, $\dots\dots i=1, 2, \dots\dots$

図-4(a)によると、長周期波ほど低波高であるにもかかわらず、荷役稼働率が低下することがわかる。また荷役稼働率累積分布によると、短周期波のみを考慮すれば、ほぼ100%の稼働率が得られるものの、10秒程度の長周期まで考慮すると同様に低下することがわかった。図-4(b)の月別荷役稼働率によると、稼働率は波周期の月別変動にほぼ合わせて変化するが、100%の稼働率となる

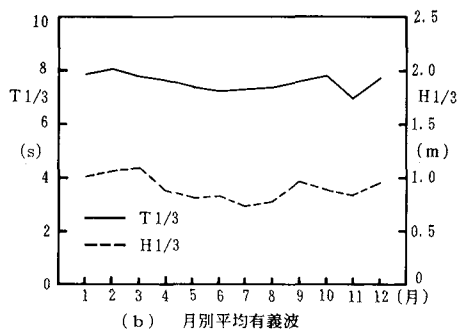
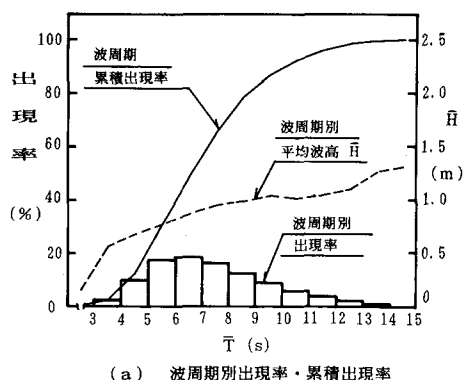


図-2 H港の波浪特性

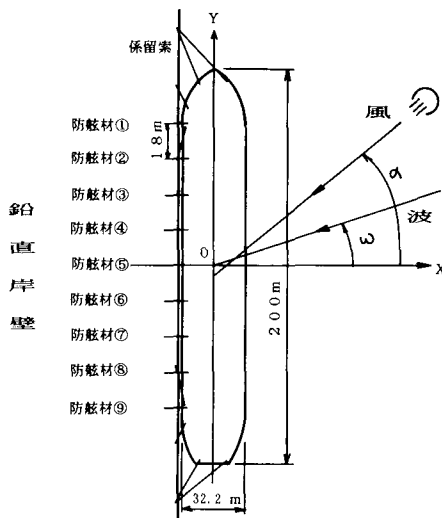
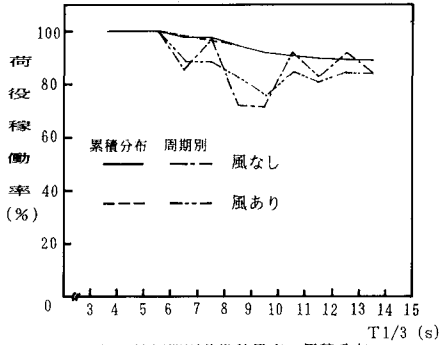
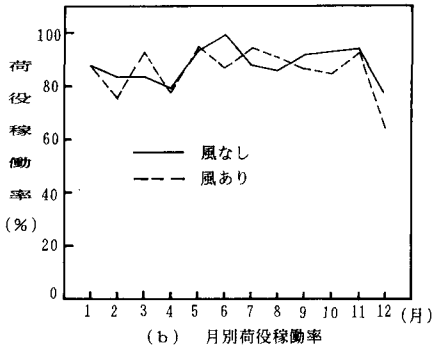


図-3 係留状況 (50,000 DWT 鉦石船)

月間が皆無である結果を得た。一般に荷役稼働率は、岸壁前面波高が荷役限界波高（50,000 DWT 船の場合、荷役限界波高 $H_{1/3}=0.5$ m）以下であれば100%とされる。今回の動揺シミュレーション内で用いた波高が $H_{1/3}=0.2, 0.5$ m であることから稼働率100%と算定されるべきであるが、本研究で提案する荷役稼働率計算法によると、

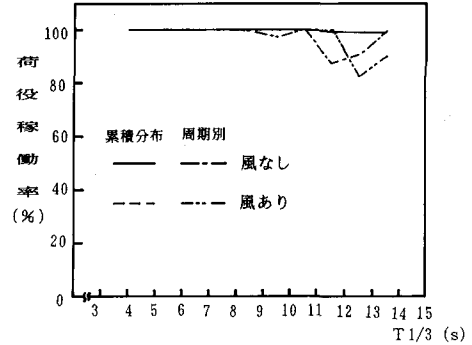


(a) 波周期別稼働率・累積分布

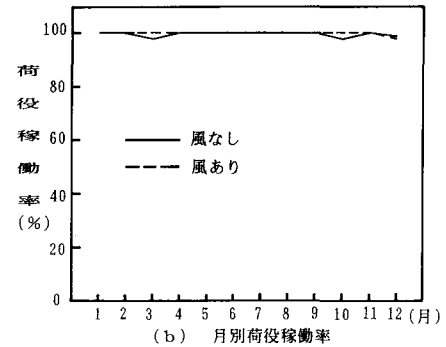


(b) 月別稼働率

図-4 荷役稼働率の計算結果 (定反力型)



(a) 波周期別稼働率・累積分布



(b) 月別稼働率

図-5 荷役稼働率の計算結果 (反力漸増型)

上述のように 100 % に満たない結果が得られることになる。荷役稼働率が波高だけでなく波向・波周期等によって大きく影響される場合があることを考慮すれば、本計算法でも現状の一端を表わせていると考えられる。

3. 荷役稼働率に及ぼす係留システムの影響

(1) 防舷材タイプによる荷役稼働率の違い

本研究で提示する荷役稼働率の計算法を用いて、係留システムの変化が稼働率に与える影響について検討してみる。

図-5 には、図-4 に対比して、防舷材のみを反力漸増型に変更した場合の荷役稼働率の計算結果を示す。防舷材は図-6 に示すように、定反力型 1000H と同じ接岸エネルギーに対して選定された反力漸増型空気式 $\phi 1330 \times 1330H-1.2 \text{ kgf/cm}^2$ である。図-5(a) によると、長周期側で同様の稼働率の低下がみられるものの、防舷材に定反力型を用いる場合に比べその低下が小さい。また荷役稼働率累積分布においては、長周期側までほぼ 100 % の稼働率を確保している。図-5(b) の月別荷役稼働率においても、図-4(b) の定反力型防舷材を用いる場合に比べ、年間を通してほぼ 100 % の稼働率を達成している。このように係留システムで、防舷材を変更するだけでも荷役稼働率に顕著に違いが生じることが明らかとなった。

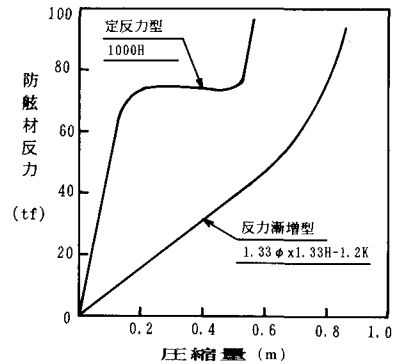


図-6 防舷材の特性

(2) 防舷材タイプによる動揺量、防舷材反力および係留索張力の違い

上述のように、長周期波が作用するときほど荷役稼働率が低下すること、また係留システムにおける防舷材を変更しただけで荷役稼働率が顕著に変化することがわかった。そこで、係留船舶の動揺量が波周期および防舷材タイプによりどのように違ってくるかを確認してみる。更には、係留船舶の動揺に伴う防舷材反力や係留索張力の違いについても検証してみる。

a) 動揺量

図-7 および図-8 に前述の荷役稼働率の計算で用いた 50,000 DWT 船の動揺量の時系列結果を示している。

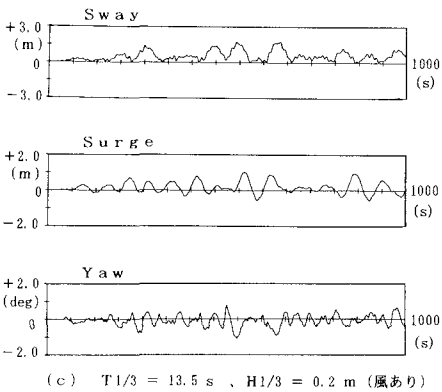
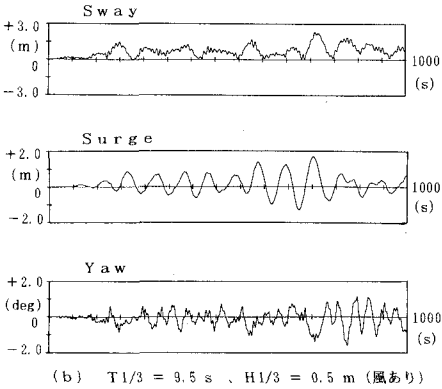
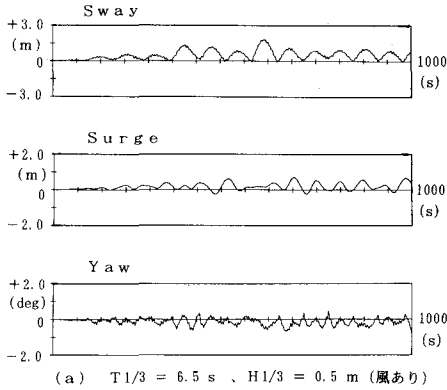


図-7 50,000 DWT 船の動揺量時系列 (定反力型)

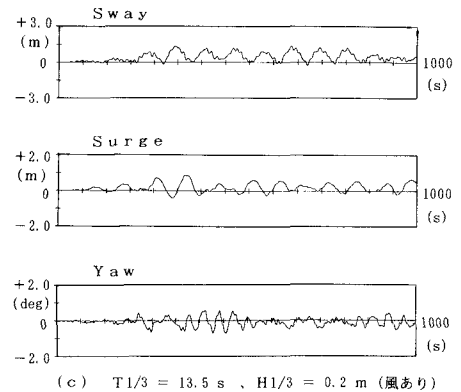
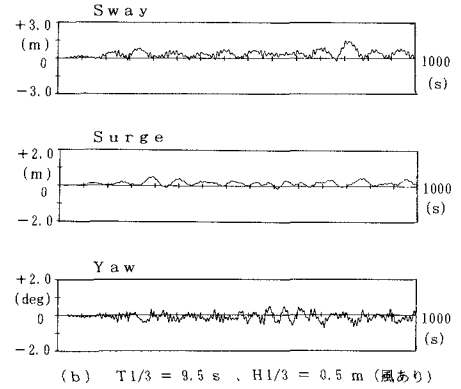
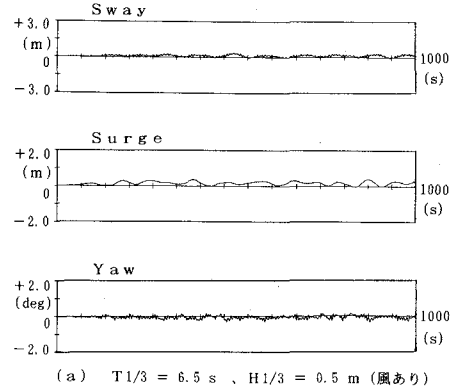


図-8 50,000 DWT 船の動揺量時系列 (反力漸増型)

運動モードは、係留システムの特性に顕著に影響される Sway, Surge, Yaw を例として挙げた。外力条件は波周期 $T_{1/3}=6.5$ 秒, 9.5 秒, 13.5 秒, 風ありの場合である。図-7 は防舷材に定反力型を用いる場合、図-8 は反力漸増型を用いる場合である。防舷材に定反力型を用いる場合には、波周期 $T_{1/3}=6.5$ 秒で既に Sway に荷役許容動揺量を越える大きな動揺が生じている。大きな Sway が生じると、係留索張力を介して Surge, Yaw にも大きな動揺が生じることになる。波周期 $T_{1/3}=9.5$ 秒ではこれ

が顕著であり、Surge, Yaw にも荷役許容動揺量を越える大きな動揺が生じている。一方、防舷材に反力漸増型を用いる場合、波周期 $T_{1/3}=9.5$ 秒までは全運動モードで荷役許容動揺量内にほぼ抑えられている。この現象はよく知られているように係留システムの非対称性の強弱に起因するもので、定反力型防舷材を用いる場合、係留システムの非対称性が強いためである。波周期 $T_{1/3}=13.5$ 秒の場合、防舷材タイプによる違いがあまり見られない。これは Roll の固有周期が $T_R=12.9$ 秒であり、波周

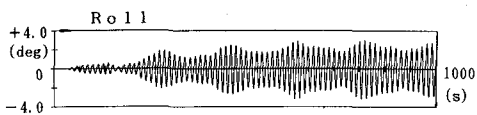
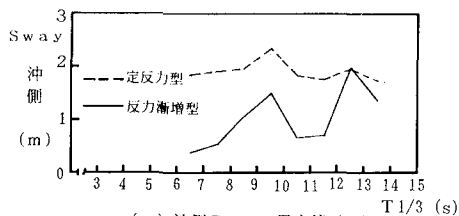
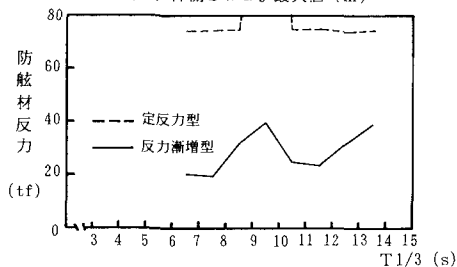


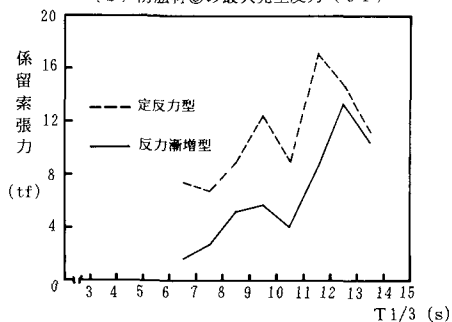
図-9 Roll の時系列 ($T_{1/3}=13.5$ s, $H_{1/3}=0.2$ m, 風あり)



(a) 沖側 Sway 最大値 (m)



(b) 防舷材⑨の最大発生反力 (tf)



(c) スプリング・ラインの最大張力 (tf)

図-10 波周期別最大値 (風あり)

期との間で共振を生じたためと考えられる。図-9に防舷材に定反力型を用いる場合の波周期 $T_{1/3}=13.5$ 秒での Roll の時系列結果を示す。防舷材に反力漸増型を用いる場合でもほぼ同様の時系列結果を得ており、明らかに共振現象が発生していることがわかる。このように船体自体の諸元によって決まる固有周期においては、防舷材タイプによる違いはあまりみられないと言える。一方、H 港の防波堤設計波周期が $T_{1/3}=13$ 秒であることから、上記の点に留意すべきである。ただし、図-2(a)の波周期別出現率でみると、 $T_{1/3}=13.5$ 秒波の出現率は 1.4 % に過ぎない。図-10(a)には、時系列内で発生した Sway の沖側への最大値を波周期別に示している。防舷材に反力漸増型を用いる場合、波周期 $T_{1/3}=10$ 秒程度まで、最大値においても荷役許容動揺量内である。

上述のように、荷役稼働率は波高だけでなく波周期や

係留システムの特性により大きく影響される。港の設計に際して、荷役稼働率をどれだけ達成したいか、また当該港の波周期累積出現率をどの値と設定するか、両者を共に 100 % とすることは厳密には難しい問題と言える。

b) 防舷材反力

図-10(b)には、防舷材⑨についての波周期別の動揺シミュレーション内で発生した最大反力を示す。防舷材に反力漸増型を用いる場合、外力に合わせた防舷材反力が生じている。一方、定反力型の場合、短周期側から防舷材の最大反力に相当する反力が生じ、波周期 $T_{1/3}=9.5$ 秒では定格変形量 (52.5 %) を越える防舷材の変形が生じていた。また船舶係留中においては、防舷材反力は反力漸増型の方が定反力型に較べ小さく、約半分程度以下に抑えられることがわかった。

c) 係留索張力

図-10(c)においては、アフター・スプリングについての発生張力を示す。係留索の破断荷重は 60 tf であり、動揺シミュレーション中、初期張力は考慮していない。係留索発生張力は、係留船舶の動揺に大きく影響される。図-10(a)の沖側 Sway 動揺量において、定反力型防舷材を用いるの方が大きな動揺量を生じている。このことから、防舷材に定反力型を用いる場合の方が大きな張力が発生していることがわかる。

4. 結 語

以上、年間荷役稼働率からみた係留システムの比較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 動揺シミュレーションを用いた荷役稼働率の簡易計算法を提示した。
- ② 荷役稼働率に及ぼす係留システム、特に防舷材タイプの違いによる影響は顕著である。
- ③ 防舷材に非対称性の弱い反力漸増型を用いることで荷役稼働率を改善できる。
- ④ 係留船舶の固有周期に相当する波周期では荷役稼働率が著しく低下する。

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 Ueda, S. and S. Shiraish (1988): The allowable ship motions for cargo handling at wharves, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 27, No. 4.
- Ueda, S. (1987): Motions of moored ships and their effect on wharf operation efficiency, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 26, No. 5.
- 久保雅義・榊原繁樹 (1992): 係留システムのバネ定数比からみた係留船舶のサブハーモニックモーションについて, 海岸工学論文集第 39 巻, pp. 801-805.