

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

久保 雅 義*・榊 原 繁 樹**

1. 緒 言

係留船舶の動揺を考慮して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となっている。係留船舶の動揺は、船型、風・波等の外力および係留システムの特性を依存するため、動揺シミュレーションを行うに際して、設計条件の選定や計算結果の判定にかなりの予備知識を要し、かつ時間と労力を要しているのが現状である。そこで、運輸省・(財)沿岸開発技術研究センターにより船型・外力別に膨大な動揺シミュレーションが行われた(運輸省・(財)沿岸開発技術研究センター, 1990)。これは動揺シミュレーション実施に伴う労力を省くために、モデルケースを設定して、技術基準((社)日本港湾協会, 1989)に適合する防舷材の種類・サイズおよび動揺量を列挙したものである。この動揺シミュレーション結果は、係留を考慮した防舷材の選定に際して有効な資料となるが、その計算結果を実際の固有のケースにあてはめるには評価の方法が難しく、また全く同じケースは皆無といった方がよい。

係留を考慮した防舷材選定において、線形性の仮定のもとに、無係留時の船舶の動揺量を用いた簡易計算法がある(上田ら, 1984)。この計算法は動揺シミュレーションを行わずに概算でき、容易で実用的である。しかし実際の係留システムは概ね非線形であり、場合によっては過小評価の危険性もある。また同計算法は防舷材の選定のみにしか使えず、係留索の選定においては係留船舶の動揺を考慮した上述のような簡易計算法は知られていない。

係留船舶の大きな動揺量(サブハーモニックモーション)が、係留システムの非対称性によって生じることはよく知られるようになってきている(楳木ら, 1983)。しかしどの程度の非対称性から大きな動揺量が生じるか、また船型によってその非対称性の影響があるのかなどは明らかになっていない。一般に、動揺シミュレーションを行うに際して、船型および外力条件はあらかじめ

設定されるため、係留システムの特性がこの動揺シミュレーションによって決定されることが多い。このことは、係留船舶の動揺が大略 $(M+m)\ddot{x} + n\dot{x} + K(x) \cdot x = F(t)$ の型の復原力でのバネ定数を動揺量 $x=x(t)$ の関数とする非線形強制振動で記述できることからもうかがえる。したがって係留船舶の動揺において、係留システムの特性、つまり防舷材と係留索のバネ特性が重要なパラメータとなっていることがわかる。

以上をふまえて本研究では、係留船舶の動揺において重要なパラメータとなっている防舷材と係留索のバネ定数比(以下、非対称性パラメータと呼ぶ)を用いて、船型・外力ごとに従来の動揺シミュレーションを行わずに動揺量や係留システムに作用する負荷を概算できる手法を提示し、その有効性およびその利用・用途について検討する。また係留船舶のサブハーモニックモーションに及ぼす非対称性パラメータの影響について言及する。

2. 非対称性パラメータからみた係留船舶の動揺

(1) 非対称性パラメータの定義

本報では係留船舶のサブハーモニックモーションにつ

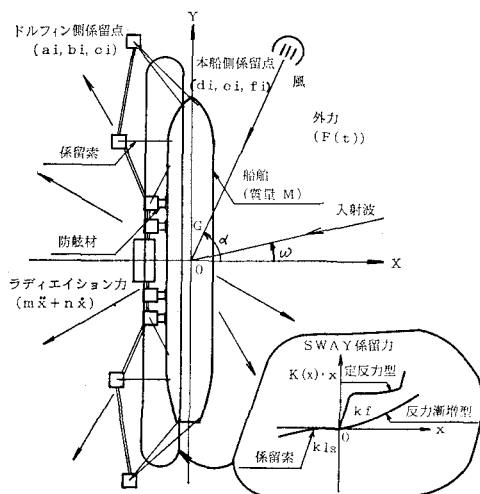


図-1 係留船舶の動揺

* 正会員 工博 神戸商船大学教授 船貨輸送研究施設

** 横浜ゴム(株) 複合商品事業部 EP 技術部

いて言及するため、特に Sway に注目して議論する。

係留船舶の動揺は、動揺シミュレーションにおいて、図-1 のように表される。ここに、 M ；船舶の質量、 $F(t)$ ；風・波等の外力、 $m\ddot{x}+n\dot{x}$ ；ラディエーション力、 $K(x)x$ ；係留力、 $K(x)$ ；係留力のバネ定数および $x=x(t)$ ；Sway 動揺量である。前述のように係留船舶の動揺を防舷材と係留索でのバネ定数化によって表現するに際して、非対称性パラメータ (A. P.; Asymmetrical Parameter) を以下のように定義する。

$$\text{非対称性パラメータ (A. P.)} = \frac{K_f}{K_{ls}} \dots\dots\dots (1)$$

$$K_f = \sum_{i=1}^{N_f} k_{fi} \dots\dots\dots (2)$$

$$K_{ls} = \sum_{i=1}^{N_l} k_{li} \left(\frac{d_i - a_i}{l_i} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 K_f ；防舷材のバネ定数、 k_{fi} ；各防舷材の中立点 ($x=0$) におけるバネ定数、 N_f ；防舷材個数、 K_{ls} ；係留索のバネ定数の Sway 方向成分、 k_{li} ；各係留索の中立点におけるバネ定数、 N_l ；係留索本数、 (a_i, b_i, c_i) ；各係留索の船舶静止時陸側 (ドルフィン側) 係留点、 (d_i, e_i, f_i) ；各係留索の船舶静止時本船側係留点および l_i ；各係留索長である。

(2) 対象船舶・計算条件

船種はタンカーを例にとり、船型は表-1 に示す3船を扱った。係留状況は、各船ごとに一般的な係留状況を設定した。例として、図-2 に 10,000 DWT 船および 50,000 DWT 船の係留状況を示す。係留システムは、係留索について係留索種類および取り方を表-2 のように設定し、係留索バネ定数の Sway 方向成分 (K_{ls}) を固定して防舷材のバネ定数を変化させた。なお係留索の初期張力は無視した。外力条件は表-3 に示すケース

表-1 対象船舶 (タンカー)

DWT	岸壁 (m)	水深 (m)	船長 (m)	船幅 (m)	型深さ (m)	喫水 (m)	排水量 (ton)
10,000	鉛直壁	10	139	19.0	9.9	4.0	6,544
50,000	ドルフィン	14	226	32.1	16.5	6.2	30,504
100,000	ドルフィン	18	270	39.0	19.2	7.2	58,969

表-2 係留状況

DWT	防舷材		係留索 (ナイロンロープ)			
	取付けピッチ (m)	個数	索径 (mm)	破断荷重 (tf)	本数	Kls (tf/m)
10,000	16.5	6	60	60	8	17.8
5,000	2, 15, 24	6	60	60	12	20.6
100,000	3, 18, 28	6	65	72	12	19.9

表-3 外力条件

波			風	
周期 $T_{1/3}$ (sec)	波高 $H_{1/3}$ (m)	波向 ω (deg)	風速 U_{10} (m/sec)	風向 α (deg)
5, 8, 15	0.25, 0.5, 0.75	0	0, 15	0, 180

を設定した。ここに、不規則波および変動風速は各々 Bretschneider・光易型スペクトル、Devenport スペクトルを用いて時系列を作成した。

以上のような設定につき、船型・外力ごとに動揺シミュレーションを行って、動揺量 (Sway)、防舷材発生反力および係留索張力の非対称性パラメータに対する変化を示すグラフを作成した。ここに動揺シミュレーションは、Cummins によって提案された時間領域の運動方程式を解く時系列解析を用い、流体力の算定は三次元領域分割法 (樺木ら, 1980) で行った。

(3) 非対称性パラメータによる Sway 防舷材反力および係留索張力の変化

図-3 に、船型による沖側への Sway 動揺量、防舷材反力および係留索張力の変化を示す。ここに各々は、シミュレーション内で発生した最大値である。また防舷材反力は防舷材 1 についてであり、係留索は 10,000 DWT 船についてはバウ・スプリング、船ではバウ・プレストラインを扱っている。外力条件は、風なし波 ($T_{1/3}=5$ sec, 15 sec, $H_{1/3}=0.25$ m) のみ作用する場合である。各船型とも Sway、防舷材反力および係留索張力において、ほぼ同様の傾向を示している。A. P.=1 より急激に上昇してあるピーク値をとり、その後 A. P. の増加に伴い一定または緩上昇となっている。

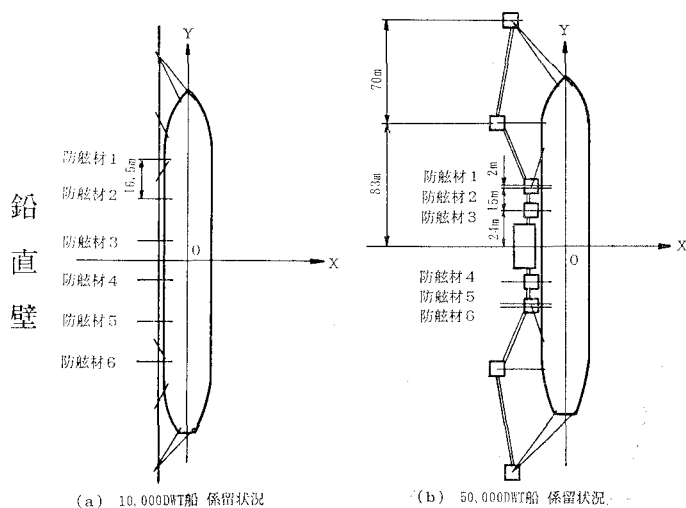
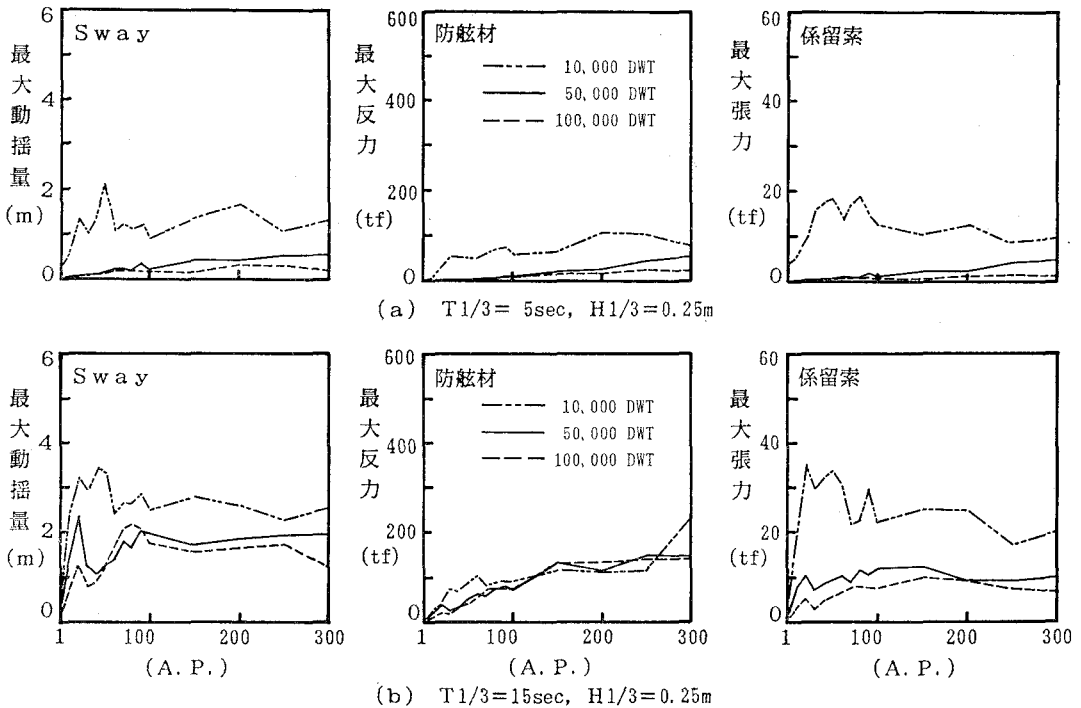


図-2 係留状況

図-3 船型による変化 ($T_{1/3}=5$ sec, 15 sec, $H_{1/3}=0.25$ m)

ただし、小型船および長周期波が作用するときほど A. P.=1 からの立ち上がりが大きく、また大きな値を生じている。

(4) 非対称性パラメータによる Sway 等のグラフの有効性の検討

上述のグラフの有効性を検証するため、実際の防舷材を用いるときの動揺シミュレーション結果との比較を行う。船型は 50,000 DWT 船をとり、防舷材は本船満載時の接岸エネルギー ($F=66.6$ tf・m) から反力漸増型空気式 $\phi 1800 \times 1800^H-1.0^K$ を定反力型 1450 H 防舷材を選定した。各々非対称性パラメータは A. P. (反力漸増型)=29.4, A. P. (定反力型)=162.3 である。

図-4 に、50,000 DWT 船についての波周期・波高および風圧力による変化を示している。図-4 には上述の実際の防舷材を用いたときの動揺シミュレーション結果も添付している。

防舷材に反力漸増型を用いる場合、モデル防舷材による動揺シミュレーション結果とよく一致している。図-5 には Sway の時系列結果も例示したが、図-7 の A. P.=30 の結果とよく一致している。これは反力漸増型防舷材の特性曲線が、モデル防舷材の特性によく類似しているためと考えられる。

一方、定反力型防舷材を用いる場合、防舷材に大きな負荷が生じる外力下において、反力が過大評価されている。これは図-6 に示すように、防舷材の変形が定反力

部にまで達するために過大評価されていると考えられる。過大評価された反力は、次の手順で容易に修正できる。

① 過大評価された反力におけるモデル防舷材の変形量を算出する (過小変形量)。

② 過小変形量に至るまでに、モデル防舷材が吸収したエネルギーに等しい定反力型防舷材の変形量を決定する (修正後変形量)。

③ 修正後変形量での定反力型防舷材の反力を修正後防舷材反力とする。

実際の定反力型防舷材はヒステリシス特性をもつ。今回の動揺シミュレーションではこれを考慮して行っているが、図-4 において Sway および係留索張力については、ヒステリシスを考慮しないモデル防舷材にはば一致している。また図-5 の Sway 時系列も図-7 の A. P.=150 の結果によく一致している。以上から、定反力型防舷材のもつヒステリシスロスによるエネルギー散逸程度では、係留船舶の動揺を抑制できないと言える。このことから、係留船舶の防舷材に接触するときの運動エネルギーはモデル防舷材と定反力型防舷材ではば一致していたと考えられる。今回提示した防舷材反力の修正法は、この主旨に従っており、この修正法による修正後の防舷材変形量が動揺シミュレーションで発生した定反力型防舷材の変形量にはば一致することも確認している。

(5) Sway 動揺量等のグラフの利用例

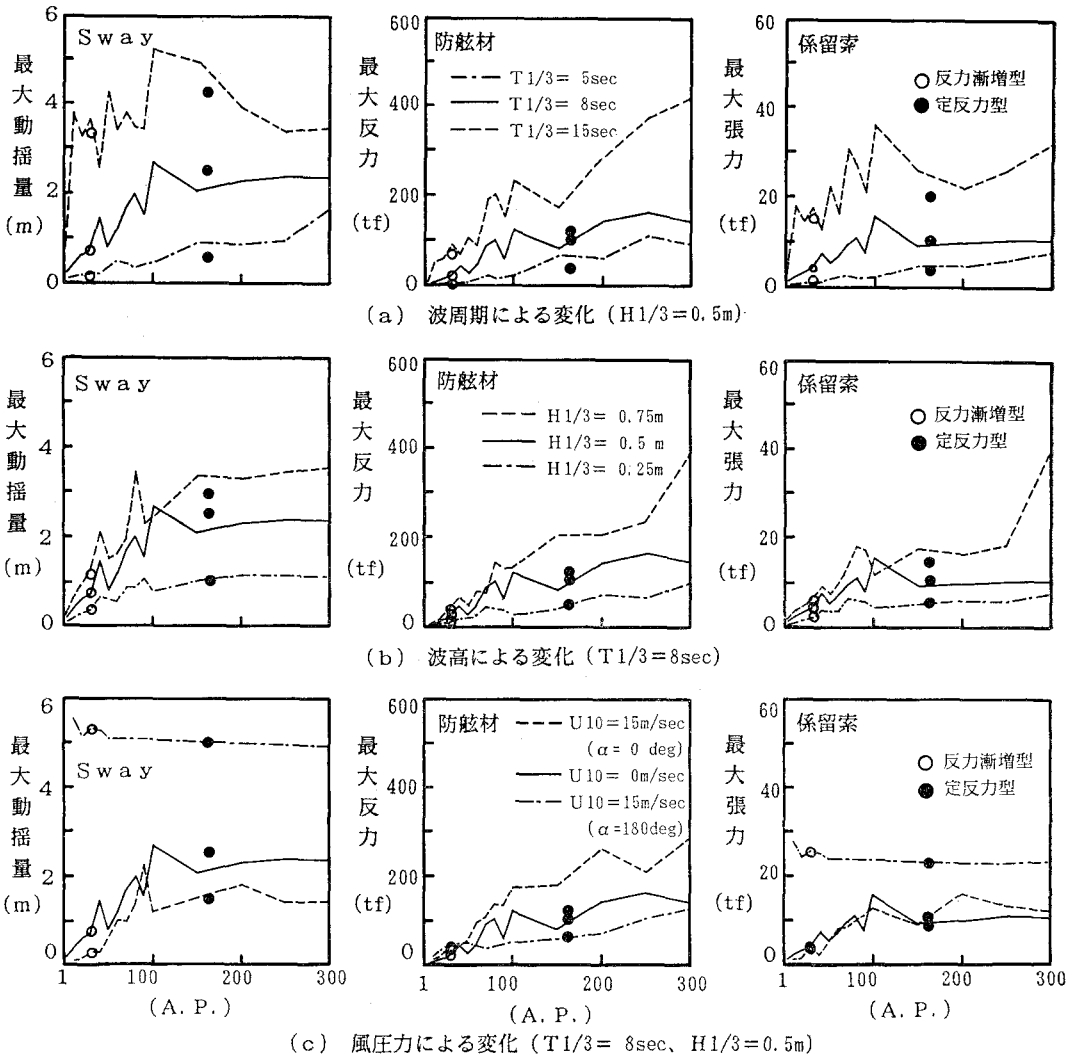


図-4 波周期・波高および風圧力による変化 (50,000 DWT 船)

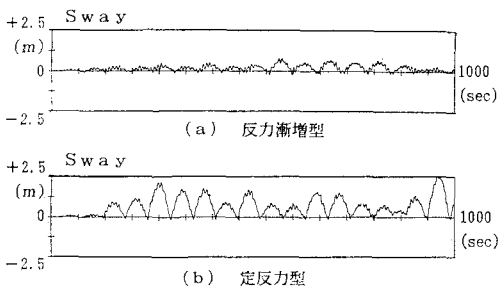


図-5 Sway 時系列 ($T_{1/3} = 8\text{sec}$, $H_{1/3} = 0.5\text{m}$)

非対称性パラメータに対する Sway 等の変化を示すグラフは様々な利用があると考えられるが、一例として表-4 に荷役許容動揺量 (1m の沖側への Sway) を越える非対称性パラメータを船型・波周期ごとに示した ($H_{1/3} = 0.25\text{m}$).

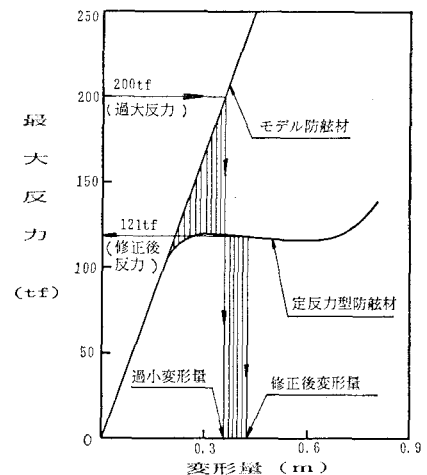


図-6 定反力型防舷材の反力過大評価の原因・修正法

表-4 Sway の荷役許容動揺量を越える非対称パラメータ ($H_{1/3}=0.25$ m)

DWT $T_{1/3}$ (sec)	10,000	50,000	100,000
15	4	7	15
8	9	86	100
5	16	—	—

3. サブハーモニックモーションに及ぼす非対称性パラメータの影響

係留船舶のサブハーモニックモーションの発生原因が、係留システムの非対称性にあることは知られるようになってきている。ここでは、波周期に着目して言及する。

図-7 に、図-4 (a) での代表的な非対称性パラメータ (A. P.=10, 30, 150) の時系列結果を示した。図-7 からは、波周期を変化させてもサブハーモニックモーションの周期が変化しないことがわかる。ここで係留索のみで船舶を係留した場合の Sway の固有周期を求めてみる。

$$T_{sl} = 2\pi \sqrt{\frac{W_a}{K_{ls}}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 W_a は船舶の Sway の仮想質量である。この場合、仮想質量は排水量の約 2 倍であるので、 $T_{sl} \approx 109$ sec となる。この周期は、図-7 でのサブハーモニックモーション周期にはほぼ一致している。次に動揺量についてみると、波周期 $T_{1/3}=5, 8$ sec では、非対称性パラメータを反力漸増型防舷材程度 (A. P.=30) まで低下させることで、かなり動揺量を低減させることができることがわかる。サブハーモニックモーション周期は係留索による固有周期であることから、この場合動揺量を抑えるためには、防舷材のバネ定数をできる限り小さくし、係留索のバネ定数を大きくして固有周期を短周期側に移すことが一つの方法である。これは、係留索に初期張力を与える、あるいは化繊ロープをワイヤーロープに変更する処置に対応している。

4. 結 語

以上、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検討を行った。その結果を要約すると次のようになる。

① 小型船および長周期波が作用するときほど、小さな非対称性パラメータでサブハーモニックモーションが生じる。

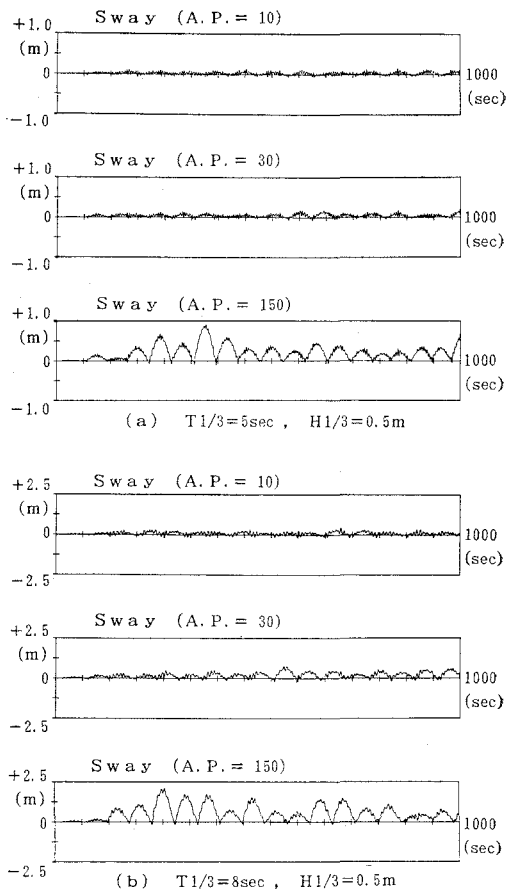


図-7 サブハーモニックモーションに及ぼす非対称性パラメータの影響 (50,000 DWT 船)

② 非対称性パラメータのみを用いて、Sway 動揺量、防舷材反力および係留索張力を概算する手法を確立できた。

③ サブハーモニックモーション周期は、波周期により変化せず、ほぼ係留索固有周期に一致する。

参 考 文 献

- 運輸省港湾技術研究所・(財)沿岸開発技術研究センター (1990): 防舷材の設計に関する研究の為に動揺シミュレーション計算報告書。
- (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・小熊康文 (1984): 荒天時の係岸避泊の限界条件と係船付帯設備の設計手順について、第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 456-460。
- 榎木 亨・久保雅義 (1980): 荷役限界からみた港内静穏度に関する研究——直線岸壁および Slip 内係留船の運動特性——, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 307-311。
- 榎木 亨・久保雅義・青木伸一 (1983): 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。