

数値計算手法が長周期波作用下における 長周期船体動揺へ及ぼす影響について

久保雅義*・笹 健児**・白石 悟***・榊原繁樹****

1. 緒 言

外洋性海域に面した港湾およびバースでは、係留中の船舶が激しく動揺することがあり、これに伴う荷役中断や緊急離棧が係留設備設計およびバース運用上でも大きな問題となっている(松良ら, 1994)。係留中は sway, surge および yaw といった長周期船体動揺が問題となることが多く、これらは係留系の非対称性や波周期が数分の長周期波に強く起因することが分かっている。このような背景から、最近では係留設備設計時にも波高だけではなく船体動揺を考慮した検討事例が増えつつある。係留浮体の動揺解析時に使用する数値計算手法は多くのモデルが提案されており、過去に流体力および波力の周波数解析結果の比較研究は行われている(青木ら, 1994)。しかしながら、時系列解析を含めた総合的な数値計算手法の比較研究事例は少なく、特に係留船舶の動揺に大きく影響する長周期波の影響を考慮した場合について、比較検討を行う必要がある。本研究では、長周期波の影響が顕著であった荒天時の外洋性港湾内における係留船舶の動揺観測結果事例(白石ら, 1995)を対象に、いくつかの数値計算手法ごとに再現数値計算を実施した。さらに計算結果と実測値の比較をもとに、長周期波作用下における係留船舶の長周期船体動揺の再現性に関する考察を行った結果を報告する。

2. 計算対象条件の設定

数値シミュレーション対象としたのは、船体動揺観測が行われている 90,000 DWT 型石炭船(全長: 240 m, 垂線間長: 231 m, 船幅: 43 m, 喫水: 9.33 m, 排水量: 75,590 トン)である。係留状態については、観測当時の係留状況を再現している。係留索は、テクミロンの先端にナイロンテールロープを接続した係留索 14 本とナイロンロープ 4 本を使用した 18 本係留とした。また防舷材は空気式防舷材が船体に 4 基ほど接触する状態であった。なお係留索の張力特性については、新品時の特性が

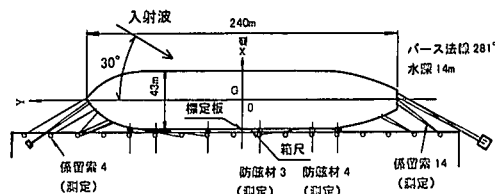


図-1 対象船舶の係留図

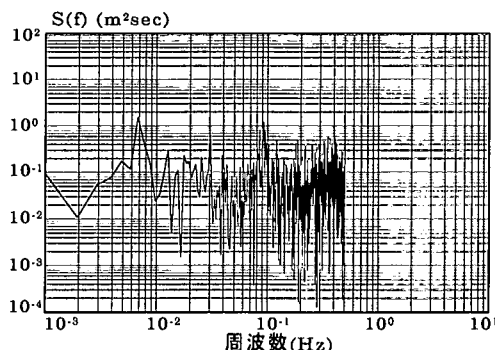


図-2 波浪データの周波数スペクトル

経年変化した状態を考慮した。図-1に 90,000 DWT 型石炭船の係留図(観測当時)を示す。

外力についても、観測当時の波浪および風データをもとにしており、観測当時は冬季荒天時で港内の石炭船バース付近では通常の波浪成分のほか、波周期 140 sec 程度の長周期波の影響が比較的顕著な条件であった。波向については、船首より 30 度方向から入射する進行波とした。図-2に波浪データの周波数スペクトルを示す。

3. 本研究で使用した数値シミュレーションモデル

係留船舶の動揺シミュレーションは周波数解析により流体力および波力を求め、これらを代入した運動方程式を時系列解析によって数値的に解く方法が一般的である。船体動揺解析は周波数解析と時系列解析に大別できるが、ここでは以下に示す数値計算手法を使用した。

流体力計算では、二次元断面ごとに求めた数値を船長

* 正会員 工博 神戸商船大学教授 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

*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 海洋構造研究室長

**** 工博 横浜ゴム(株) MB 開発本部 開発推進部

方向に積分する方法(ストリップ法)と三次元数値解析手法によって求める方法に大別できる。ここでは①矩形近似した船体について固有関数展開を行う三次元領域分割法(樫木ら, 1980), ②船体断面ごとに境界条件を設定する二次元境界要素法(久保ら, 1988a), ③船体断面を写像関数によって表現する無限水深モデルの多重極展開法(元良, 1982)を使用した。

時系列解析では, メモリ-影響関数を使用した運動方程式モデル(久保ら, 1988b), ある周波数 σ_0 で流体力係数を一定とする運動方程式モデルを検討対象とした。これらは式(1)および式(2)で表される。

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ii} + m_{ij}(\infty)) \ddot{X}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{X}_i(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) X_i(t) = F_j(t) \quad (j=1 \sim 6) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ii} + A_{ij}(\sigma_0)) \ddot{X}_i(t) + \sum_{i=1}^6 B_{ij}(\sigma_0) \dot{X}_i(t) + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) X_i(t) = F_j(t) \quad (j=1 \sim 6) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで M_{ii} : 船体質量, $m_{ij}(\infty)$: 不変付加質量, $L_{ij}(t)$: メモリ-影響関数, C_{ij} : 復元力係数, G_{ij} : 係留力係数, $F_j(t)$: 時間 t での外力を示す。 σ_0 は有義周期または長周期波の卓越周期等に対応した角周波数 ($=2\pi/T$) を意味しており, $A_{ij}(\sigma_0)$ および $B_{ij}(\sigma_0)$ は角周波数 σ_0 に対応した付加質量および減衰係数を示している。メモリ-影響関数および不変付加質量は次式で表される。

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B_{ij}(\sigma) \cos \sigma t d\sigma \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$m_{ij}(\infty) = A_{ij}(\sigma) + \frac{1}{\sigma} \int_0^{\infty} L_{ij}(t) \sin \sigma t dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

係留索のヒステリシス特性に起因する粘性抵抗力(白石ら, 1995)については, sway および surge において式(1)および式(2)ともに考慮した。

4. 数値計算手法ごとの流体力比較

周波数解析による船体の流体力計算結果の比較を数値計算手法ごとに行った。図-3に6モードの減衰係数計算結果を比較したものを示す。図の横軸は角周波数を示しており, sway については三次元領域分割法と二次元境界要素法では大きな違いはないことが分かる。

また周期 10 sec 前後の短周期側では減衰係数が大きい, 長周期側ではゼロに近づく傾向が共通している。yaw については, 三次元領域分割法よりも二次元境界要素法の方が若干大きくなっており, これも高周波数側から低周波数側になるにつれてゼロに近づく傾向があっ

た。

一方, 多重極展開法(無限水深モデル)による減衰係数は1オーダー小さい値となっており, 流体力係数に水深影響が大きく作用していることが確認された。

つぎに係留船体の波浪強制力についても比較を行うこととした。図-4に計算手法ごとの sway の波浪強制力の時系列を比較したものを示す。これより二次元境界要素法で求めた波浪強制力が最も大きく, 多重極展開法(無

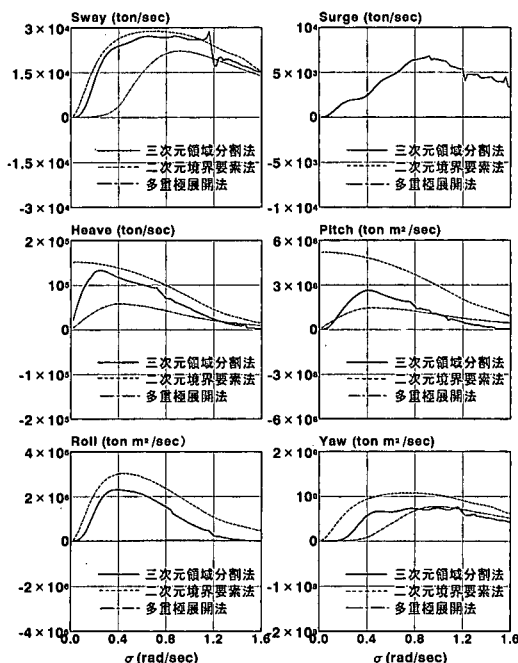


図-3 数値計算手法ごとの減衰係数周波数特性

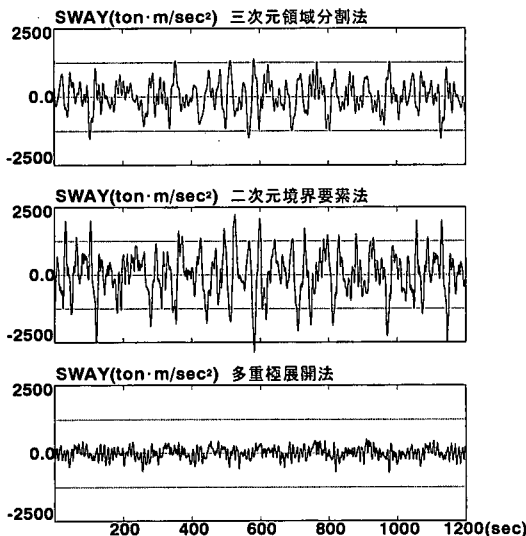


図-4 計算手法ごとの sway の波浪強制力時系列

限水深モデル)による波浪強制力は他の2手法に比べ、かなり小さいことが分かる。

5. 数値計算手法ごとの船体動揺解析結果比較

ここでは実際に周波数および時系列解析による船体動揺を計算した。表-1にここでの数値計算ケースを示す。また、外力は波浪のみとした。

二次元境界要素法や多重極展開法によるストリップ法では通常、入射波の有義周期で求めた流体力係数を式(2)に代入・解析する(以後、二次元手法と呼ぶ)。そこで二次元手法と三次元領域分割法で求めた流体力をもとに式(1)を解析する方法(以後、三次元手法と呼ぶ)での長周期船体動揺に注目した。図-5に sway, surge および yaw の計算手法ごとの時系列解析結果を示す。これより、sway および yaw については三次元手法で求めた場合には長周期船体動揺が極めて明確に現れているが、二次元手法ではほとんど現れていない。

入射波には通常波浪成分のほかに波高 0.3 m, 周期 140 sec 程度の長周期波が存在し、長周期船体動揺が発生しやすい状況であった。一方、surge については三次元手法で求めた場合が最も大きい、二次元境界要素法によ

る二次元手法でも振幅 1 m 弱の長周期船体動揺が現れている。しかし多重極展開法(無限水深モデル)を使用した場合、どのモードも長周期船体動揺はほとんど現れていない。二次元手法では surge の流体力を求められないため、近似的に造波減衰係数はゼロとしている。よって二次元手法でも長周期船体動揺が発生しやすいものと考えられるが、多重極展開法の場合には水深影響による波長変化および水深喫水比の影響等を考慮していないため、船体動揺量が微小であったと考えられる。

6. 外力を分離した場合の長周期船体動揺の再現

sway および yaw が三次元手法と二次元手法によって大きく差が生じているが、著者らは時系列解析による運動方程式中での流体力係数の設定方法に着目した。

流体力係数は周波数依存性を持っており、実際の状況では船体動揺の固有周期、外力の卓越周期などによって微妙に左右されている。周波数一定型の運動方程式(2)はある周波数で流体力係数を代表させなくてはならず、通常は入射波の有義周期を用いている。しかし対象としたのは周期 10 sec 前後の波浪成分のほかに周期 140 sec 程度の長周期波が卓越した状況であり、係留船舶の固有周期と長周期波の卓越周期が近い、長周期成分に対する流体力の影響を無視することはできないと考えられる。そこで、以下の手順により解析を行った。

① 短周期成分(周期 20 sec 以下)および長周期成分(周期 20 sec 以上)のそれぞれのみを外力とした。

② 短周期成分のみを外力とした場合には、流体力係数を有義周期 10 sec で代表させた式(2)を用いて解析した。

③ 長周期成分のみを外力とした場合には、流体力係数を長周期波の卓越周期 140 sec で代表させた式(2)を用いて解析した。

④ 短周期および長周期外力下でそれぞれ求められた船体動揺量を時間領域で足しあわせ、全体の外力作用下における長周期船体動揺の再現性について検討した。

表-2にここでの数値計算ケースを示す。またケース 4 および 5 における、sway の動揺量時系列を図-6に示す。

これより、短周期成分の外力のみではほとんど動揺は生じていないことが分かる。ここでは有義周期は 10 sec 程度であったが、波向が比較的船首方向であったこと、パネ定数の比較的小さな空気式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は生じていない。一方、長周期成分の外力のみでは振幅 1 m 弱の長周期船体動揺が発生しており、対象とした船型での係留状況下で発生する sway の長周期船体動揺は長周期波に起因してい

表-1 数値計算ケースその 1

ケース	外力条件	数値計算手法
1	波浪のみ	三次元領域分割法および式(1)
2	波浪のみ	二次元境界要素法および式(2)
3	波浪のみ	多重極展開法および式(2)

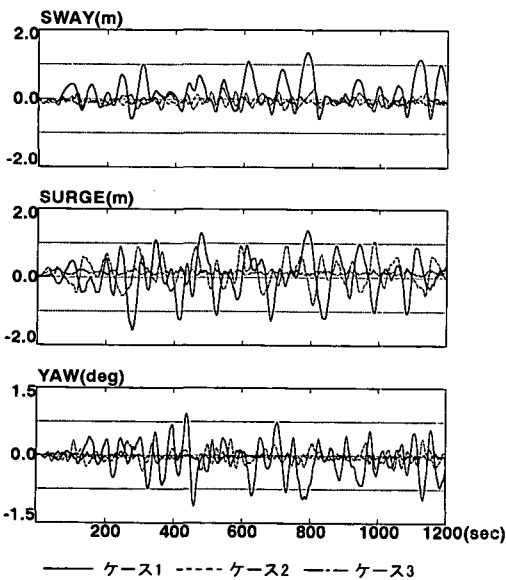


図-5 数値計算手法ごとの船体動揺時系列比較

表-2 数値計算ケースその2

ケース	外力条件	数値計算手法
4	短周期成分のみ	二次元境界要素法および②
5	長周期成分のみ	二次元境界要素法および③

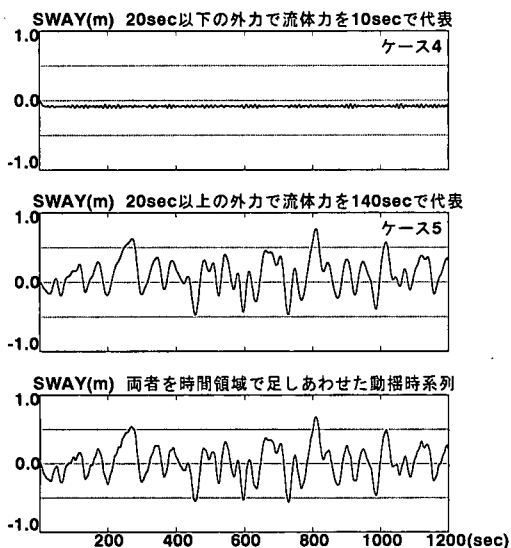


図-6 外力を分離した場合の sway の船体動揺時系列

ることが明らかとなった。また式(2)における流体力係数の設定において、長周期側の流体力係数を使用すると二次元境界要素法でもある程度の長周期船体動揺が再現されている。長周期船体動揺が卓越するモードについては流体力係数を有義周期で代表させることにより、実際の状況よりも造波減衰力を過大評価していることが分かる。よって、実際にはここで外力を分離して足しあわせた計算結果のような長周期船体動揺が発生するはずであり、また有義周期での流体力を一定とした運動方程式による二次元手法では、正確な長周期船体動揺を解析できないことが明らかとなった。

7. 船体動揺実測結果と数値計算結果の比較

ここでは数値計算結果の精度をより詳細に比較するため、船体動揺実測時の再現数値計算を実施した。表-3に数値計算ケースの内容を示す。また実測された風の影響についても考慮した。表-4に時系列計算の最大・最小値を、図-7に sway の実測値と計算値の船体動揺スペクトル解析比較結果を示す。

これより、三次元手法では長周期船体動揺がかなり明確に現れているが、実測値よりも若干過大評価している傾向がある。sway および surge の周波数応答特性を比較してみると、0.01~0.02 Hz にあるピーク周波数でよく

表-3 数値計算ケースその3

ケース	外力条件	数値計算手法
6	波浪・風	三次元領域分割法および式(1)
7	波浪・風	二次元境界要素法および式(2)
8	波浪・風	多重極展開法および式(2)

表-4 実測値と再現数値計算値の比較

		実測	ケース6	ケース7	ケース8
sway (m)	max	1.00	1.52	0.32	0.11
	min	-0.74	-0.59	-0.37	-0.20
surge (m)	max	1.07	1.10	1.05	0.24
	min	-1.32	-1.79	-0.84	0.01

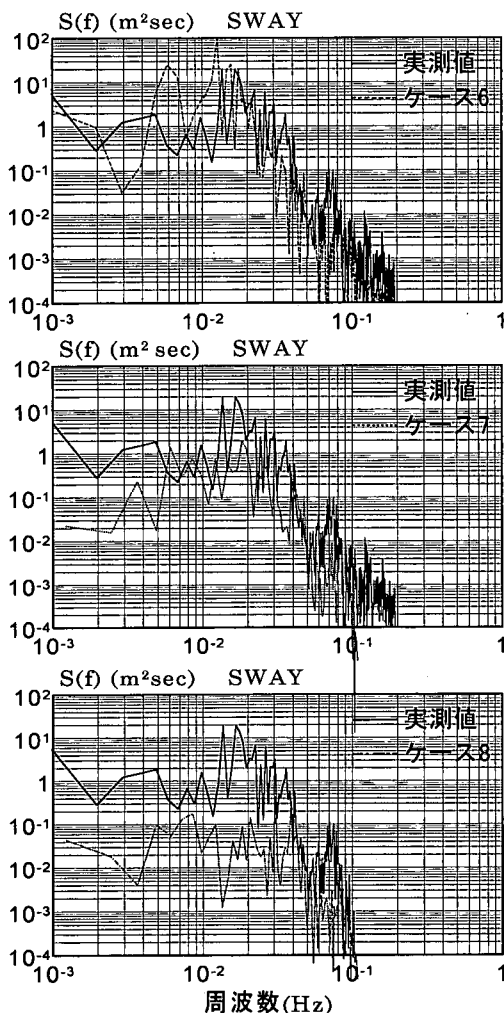


図-7 実測値と計算値の船体動揺スペクトル比較

対応しているが、0.01 Hz よりも低周波数側で計算値の方が大きくなっている。原因としては粘性抵抗に関する正確なデータが存在しないこと、湾水振動による影響

を考慮せず進行波として与えたこと等が考えられる。

ケース7の場合は surge は実測値に対し良好な対応をしているが, sway は長周期側において計算値が実測値を過小評価している。

ケース8の場合, sway および surge と実測値とかなりの違いが生じている。sway と surge の実測値再現精度をあわせて考えると, 本研究で対象としたような係留条件および外力条件の場合, 今回使用した数値計算法中では周波数に依存しない運動方程式(1)を用いた三次元手法が現場での長周期船体動揺を比較的精度よく再現しているといえる。これより, 流体力係数の周波数依存性を考慮し, 長周期船体動揺時の減衰力を運動方程式による時系列解析に正しく反映させることが極めて重要である。また水深影響などの境界条件を正しく取り込んだ流体力計算モデルが必要である。

ただし, 数値計算法以外としてはここで示した以外にもいくつか使用されている。流体力の計算過程においては, 多重極展開法の有限水深補正モデルや三次元境界要素法等との比較検討が今後の研究課題として考えられる。

8. 結 論

本研究では, 長周期波の影響が顕著な港湾内に係留された船舶が長周期船体動揺を行う状況について, 数値計算法ごととの再現性に関する比較検討を実施した。結論は以下のとおりである。

(1) 手法ごとに求めた時系列解析結果を比較すると, 運動方程式(1)による三次元手法を使用した場合には sway および yaw の長周期船体動揺が明確に出ているが, 運動方程式(2)による二次元手法では現象の再現がほとんどできていないことが分かった。

(2) 本研究で対象とした船型での係留条件下では, 短周期成分の外力では船体動揺はほとんど発生せず, 長周期成分の外力によって長周期船体動揺が引き起こされている。また流体力係数の代表周波数を使い分けること

で, 実際の長周期船体動揺が近似的に表現できる。

(3) 流体力を有義周期で代表させた場合には減衰力を実際よりも過大評価するため, 運動方程式(2)による二次元手法では長周期船体動揺を再現できていない。

(4) 船体動揺実測値の再現数値計算を行ったところ, 運動方程式(1)による三次元手法が実測値をやや過大評価するものの, 全体的に見て実測値に最も近いことが分かった。一方, 運動方程式(2)による二次元手法では, 特に sway や yaw が実際よりも過小評価され, よって本研究の対象としたような外力条件下での安全な係留設備設計および運用基準策定のためには, 長周期船体動揺を正確に再現できる数値計算法が必要である。

なお船体動揺解析においては, 本研究で使用した以外にもいくつかの数値計算モデルが使用されており, これらの手法も含めた総合的な検討がさらに必要と考えられる。ここでは船首方向から長周期波が卓越する条件を対象としたが, 長周期波の特性や係留条件等が異なる場合についても, 今後比較検討を実施していく必要がある。

参 考 文 献

- 青木伸一・小林昭男・喜岡 渉・高橋俊彦・池野正明 (1994): 浮体の動揺計算における流体力の計算精度とその応答に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 976-980.
- 久保雅義・斎藤勝彦・榊原繁樹 (1988a): ストリップ法による岸壁前面係留矩形浮体の動揺解析, 日本航海学会論文集, 第79号, pp. 195-201.
- 久保雅義・斎藤勝彦・下田直克・岡本俊策 (1988b): 岸壁前面係留浮体の不規則波による船体運動の時系列解析について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 687-691.
- 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内係留船舶の運動特性—, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 307-311.
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹 (1995): 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.
- 松良精三・瀧美洋一・菅沼史典・宮本義滋 (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.
- 元良誠三 (1982): 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, pp. 39-121.