

長周期船体動揺の数値計算による再現性に関する研究

白石 悟*・久保雅義**・榊原繁樹***・笹 健児****

1. 研究の目的

外洋に面した海域の港湾およびバースにおいて、長周期波による係留船舶の動揺問題が顕在化するに至り、現象の詳細な解明または動揺の抑制対策等が様々な方面で調査研究されている。また、大型コンテナターミナルに代表されるように将来の運用開始を目指した外洋性港湾の整備計画もいくつかあり、船舶の安全な係留を考慮した係留設備の設計がますます必要となっている。このような検討を数値計算を用いて行う場合、特に長周期波の影響が顕著な場合の長周期船体動揺の再現精度が重要である。著者らは前報(久保ら, 1997)において、冬季荒天時の港内に係留された石炭船を対象に再現計算を実施し、数値計算手法ごとの実測値に対する再現精度を比較した。この結果、船体動揺の運動方程式中における減衰力の評価方法によって長周期動揺の再現精度が大きく異なることが分かった。本研究では比較検討に使用する数値計算手法をさらに増やし、計算手法ごとによる再現精度の違いを詳細に検討した。また、冬季荒天時における観測事例のほかに台風によるうねりの影響が顕著であった港湾での動揺観測事例や船型および係留方法が異なる場合についても比較検討を行った。以上から、長周期波の特性を含めた外力条件、船型および係留状況が異なる事例を総合的に検討することにより、長周期波作用下における長周期船体動揺の再現性に関する数値計算手法ごとの比較および考察を行った。

2. 本研究で用いた数値計算手法

係留船舶の動揺解析を行う場合、係留系が非線形でありかつ不規則波および変動風を取り扱うため、流体力および波浪強制力を周波数解析で求め、ついで時間領域で船体動揺を解析する方法が一般的である。よって、数値計算では周波数解析と時系列シミュレーションについては、前報で使用した三次元領域分割法、二次元境界

要素法らに加え、任意形状の浮体について解析できる三次元特異点分布法(John, 1950)および多重極展開法の有限水深補正モデル(上田, 1984)で検討した。時系列シミュレーションについては、遅延関数を用いた運動方程式モデル(遅延関数法と呼ぶ)の他に、流体力を一定とした運動方程式モデル(一定係数法と呼ぶ)において、通常の有義周期で代表させる方法(有義周期法と呼ぶ)および係留船舶の動揺周期で代表させる方法(固有周期法と呼ぶ)で検討した。表-1に本研究で使用した周波数解析および時系列シミュレーションの数値計算手法の組み合わせを示す。ただし、三次元領域分割法を使用する場合には、箱型近似した浮体質量と船体質量を同一とさせるように浮体長さを調整して計算している。その他の数値計算手法の詳細については前報を参照されたい。

表-1 本研究で使用した数値計算手法

三次元領域分割法	三次元特異点分布法	二次元境界要素法	多重極展開法
遅延関数法	○	○	
有義周期法		○	○
固有周期法			○

3. 対象検討条件

(1) 冬季荒天時における動揺観測例(事例1)

冬季荒天時における90,000 DWT型石炭船の動揺観測例(白石ら, 1995)について再現計算を実施した。なお、石炭船の船体条件、係留条件および外力条件は前報と同一とした。

(2) うねり時における動揺観測例(事例2)

太平洋沿岸に面した港湾では、夏季から秋季に来襲する台風起因したうねりによる船体動揺が問題となることがある。ここでは、苫小牧港東港区に係留中であった60,000 DWT型石炭船(全長:225 m, 垂線間長:215 m, 船幅:32.2 m, 喫水:7.28 m, 排水量:40,677 t)が台風接近時に激しく動揺した1994年9月18日の観測事例(神谷ら, 1995)について再現計算を行った。図-1に観測当時の石炭船の係留図を示す。係留索(16本)は全て合成繊維索を使用しており、高さ1.4 mの定反力型防舷

* 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
 ** 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 神戸商船大学助教授 輸送システム工学講座
 **** 正会員 (株)日本海洋科学 調査第一部

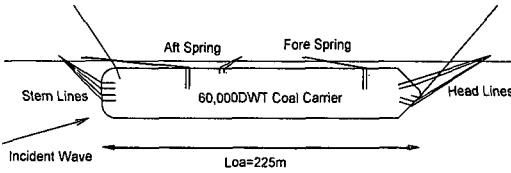


図-1 60,000 DWT 型石炭船の係留図 (事例2)

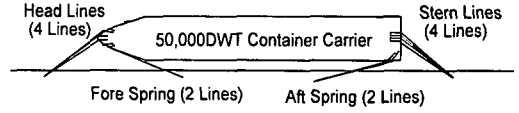


図-3 50,000 DWT 型コンテナ船の係留図 (事例3)

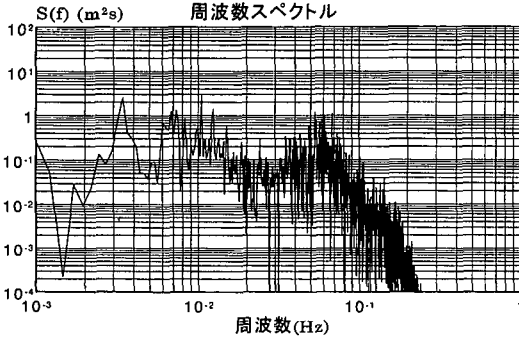


図-2 観測された港内波浪のスペクトル (事例2)

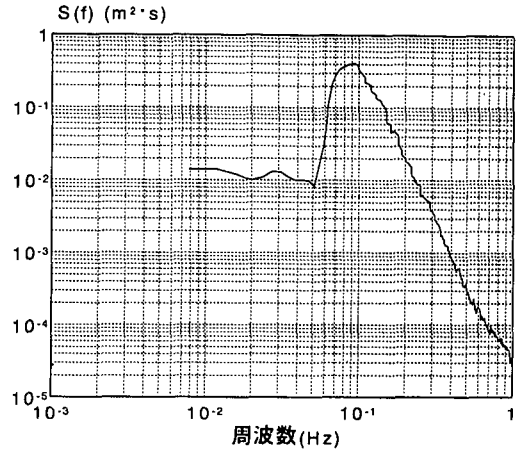


図-4 入射波のスペクトル (事例3)

材6基が船体に接触する状況であった。なお、係留索の初期張力については、観測時のビデオ映像を参考に全てゼロと仮定した。図-2に船体動揺が最も激しかった18日7時~8時における港内観測波のスペクトルを示す。これより、周期100~200sの長周期成分において顕著なピークが見られ、周期30s以上の長周期波成分の有義波高は0.29mであった。

(3) 船型および係留条件が異なる場合 (事例3)

上記の2例は肥大度の大きな石炭船の事例であるが、ここでは肥大度の小さな瘦せた船型であるコンテナ船についても検討を行った。船型については、50,000 DWT 型コンテナ船 (全長: 280 m, 垂線間長: 264 m, 船幅: 37.1 m, 喫水: 8.29 m, 排水量: 48,800 t) とし、係留方法については図-3に示す一般的なコンテナ船の係留索配置 (12本係留) とした。係留索は全て合成繊維索を使用し、防舷材は高さ1.8mの反力漸増型防舷材が船体に8基接触する状態とした。

事例3は観測事例に基づく計算ではないので、長周期波を考慮した標準スペクトル (平石ら, 1997) を参考に波浪条件を設定した。図-4に波浪のスペクトルを示す。これは有義波高0.5mおよび有義周期10sでかつ長周期波を含む波浪を示している。

4. 長周期船体動揺の再現性についての考察

(1) swayの長周期動揺の再現性

表-2は事例1について、各数値計算手法によって求められた surge および sway のゼロアップクロス法で算定した有義振幅を示す。

表-2を見ると、swayの長周期動揺の再現性において、数値計算手法ごとにかなりの差異が生じていることが分かる。この大きな要因としては、前報で示したように運動方程式中における造波減衰力の評価方法によって考えられる。そこで本研究で検討した事例について、有義周期における減衰係数と固有周期における減衰係数の比が sway の長周期動揺の再現性に及ぼす影響度を考察した。

swayの減衰係数比 R_{BSW} と sway 有義振幅比 R_{VSW} を式(1)および式(2)で定義する。

$$R_{BSW} = \frac{B_{SW}(T_N)}{B_{SW}(T_{1/3})} \dots\dots\dots (1)$$

$$R_{VSW} = \frac{(Y_{1/3})_{LW}}{(Y_{1/3})_{SO}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $B_{SW}(T_N)$: 固有周期における sway の減衰係数値と粘性抵抗の和、 $B_{SW}(T_{1/3})$: 有義周期における sway

表-2 手法ごとにおける船体動揺量の有義値 (事例1)

数値計算手法	surge	sway
実測値	1.46 m	1.24 m
遅延関数・領域分割法	2.02 m	1.69 m
遅延関数・特異点分布法	2.49 m	1.59 m
有義周期・境界要素法	1.21 m	0.50 m
有義周期・多重極展開法	1.07 m	0.25 m
固有周期・多重極展開法	1.93 m	3.68 m

の減衰係数値と粘性抵抗の和, $(Y_{1/3})_{LW}$: 多重極展開法と一定係数法 (固有周期法および有義周期法) で求められた sway の有義両振幅, $(Y_{1/3})_{SO}$: 三次元特異点分布法および遅延関数法で求められた sway の有義両振幅である。

図-5 は横軸に R_{BSW} を, 縦軸に R_{YSW} を取り, 両者の関係を示したものである。ここでは, 事例 1~3 の全てについての結果を示している。

図中の○は有義周期法による計算結果からの有義振幅比を, △は固有周期法による計算結果からの有義振幅比を示す。この図より, R_{BSW} の値が小さい場合には有義周期法と固有周期法による R_{YSW} の値の差が著しく大きい, R_{BSW} の値が大きくなるにつれて両者の R_{YSW} の値の差が小さくなる傾向が見られる。また, R_{BSW} が 0.5 よりも大きくなると R_{YSW} の値が 1.0 よりも若干小さい程度に漸近している。よって, 一定係数法による sway の長周期動揺の再現精度は R_{BSW} が 0.5 以上のような場合には良好であるが, R_{BSW} が 0.2 以下のような場合には有義周期法および固有周期法による R_{YSW} の値がかなりばらつく傾向にあるといえる。表-2 によると, ここで R_{YSW} の分母とした三次元特異点分布法を用いた遅延関数法の計算値が実測値に最も近い値となっていることを考えると, sway の減衰係数比が小さい場合には遅延関数法による数値計算を用いるのが適切であると考えられる。

(2) 船体形状の考慮の有無による影響

流体力計算等において, 計算を簡略化するために船体形状を箱型近似する場合があるが, コンテナ船のような肥大度の小さな船型の場合には形状を考慮する影響が無視できないと考えられる。そこで三次元領域分割法と三次元特異点分布法による計算結果について, 船体動揺量の比較を行う。図-6 は, 事例 1~3 についてブロック係数 C_b ごとの surge および sway の有義振幅比をそれぞれ

れ示す。ここでは有義振幅比は三次元領域分割法による動揺量の有義値を三次元特異点分布法による動揺量の有義値で除した値とする。

surge については, 一部の計算ケースを除けば全体的に C_b ごとの有義振幅比の比較では大きな差異はないことが分かる。一部の計算例を除けば, 船体形状を考慮しない三次元領域分割法による計算結果の方が, 三次元特異点分布法のそれよりも有義両振幅で全体的に 10~20% 小さいといえる。sway については, $C_b=0.8$ 程度の石炭船の場合, 動揺振幅比は 1.1~1.3 で分布しているが, C_b が 0.6 程度のコンテナ船の場合, 動揺振幅比が 1.0~2.5 の範囲で大きくばらつく結果となった。また全体的に surge とは逆に三次元領域分割法を使用した計算結果の方が動揺振幅が大きくなる傾向が見られる。これは三次元領域分割法においては箱型近似をする際に浮体と船体の質量を実船と同一とするために, 浮体長さを調整して計算していることに起因する。

(3) 係留索のばね特性の硬化による影響

事例 1 における 90,000 DWT 型石炭船の再現計算結

Sway有義振幅比 R_{YSW} (一定係数法/遅延・特異法)

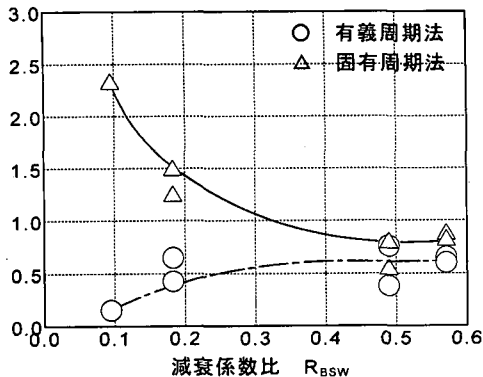
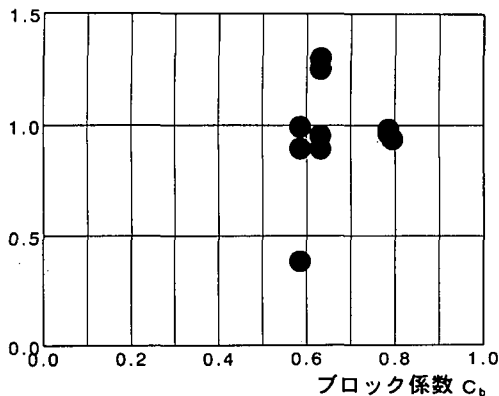


図-5 sway の減衰係数比ごとにおける有義振幅比

Surge有義振幅比 (領域分割法/特異点分布法)



Sway有義振幅比 (領域分割法/特異点分布法)

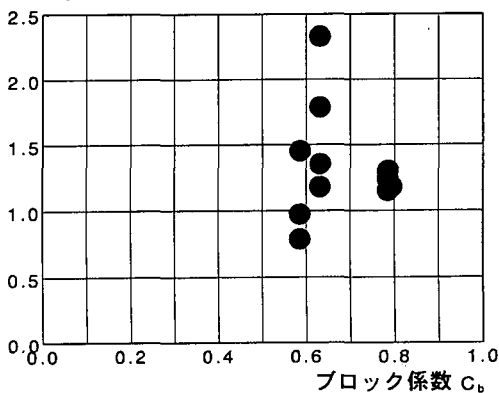


図-6 ブロック係数ごとの有義振幅比

果について、表-2に示すとおり surge および sway とともに遅延関数法で計算した場合においても定性的な傾向は合致しているが、より厳密に見れば観測時の動揺状況を完全には再現できていない。この原因にはいくつかの理由が考えられる。その1つとして波浪強制力の計算過程において、副振動の影響を考慮せず一方向から入射する進行波で与えていることが挙げられている(白石ら, 1995)。この他に著者らは表-2の計算において、係留索の主索であるテロンダイニーマ(テクミロン)については繰り返し使用による特性の硬化の影響を考慮したが、テールロープで使用したナイロン係留索の特性については新品時の特性を使用したことに原因があると考えた。係留索に強度の大きな荷重が繰り返し作用した場合、係留索の破断強度が低下するだけでなく、変位復元力特性も変化することが指摘されている(Shiraishi, 1998)。係留索に強い初期張力を作用させ続けた場合や船体動揺によって大きな荷重が作用した場合、特に繊維索のばね定数は新品時に比べて大きくなる。係留索のばね定数が大きくなれば、船体動揺の固有周期が変化し、船体動揺も若干異なったものとなる。観測時の状態におけるナイロン係留索の変位復元力特性に関するデータが存在しないので、テールロープの特性が硬化しているものとして特性を仮定した上で再度計算を行った。数値計算手法については、三次元特異点分布法による遅延関数法を用いた。図-7は実測値、特性変更前および特性変更後の surge の動揺波形を、表-3はそれぞれの計算結果についての surge および sway の動揺量の有義振幅および動揺周期の有義値を示す。これらより、surge の動揺時系列の位相は実測値に比べるとずれているが、動揺振幅および周期はかなり合致している結果となった。

以上より、変位復元力特性の変化を考慮することによ

表-3 surge および sway の実測値、係留索の変位復元力特性を変更しない場合および変更した場合の計算結果

	実測値	新品時特性	特性変更後
surge	1.46 m	2.49 m	1.62 m
	57.6 s	97.7 s	55.3 s
sway	1.24 m	1.59 m	0.90 m
	65.6 s	89.8 s	60.3 s

り、動揺周期および動揺振幅は実際の状況にさらにかなり近づくことが分かった。したがって、長周期動揺を正確に再現するにあたっては、係留索の繰り返し使用等によるばね定数の変化状況を把握することが重要である。

(4) surge の粘性減衰力に関する考察

図-8は事例2について実測値および数値計算手法ごとに求めた surge の時系列波形を比較したものである。これより、全体的には数値計算手法の違いによる大きな差異は生じておらず、どの手法も動揺量をやや過大評価する傾向が見られるが、動揺周期を含めて実測結果を比較的良好に再現しているといえる。

surge については長周期動揺の周波数領域においては造波減衰力は極めて小さく、粘性抵抗力の影響が支配的である。粘性抵抗力については、本研究で対象としたよ

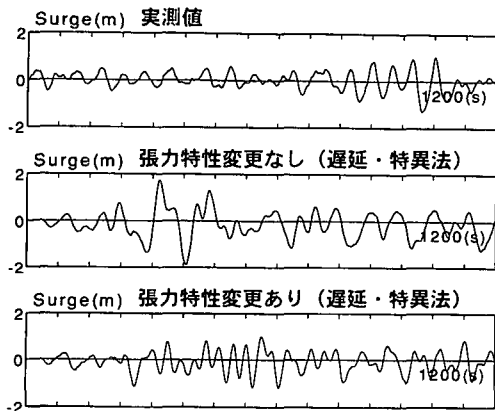


図-7 surge の実測値、係留索の変位復元力特性を変更しない場合および変更した場合の時系列 (事例1)

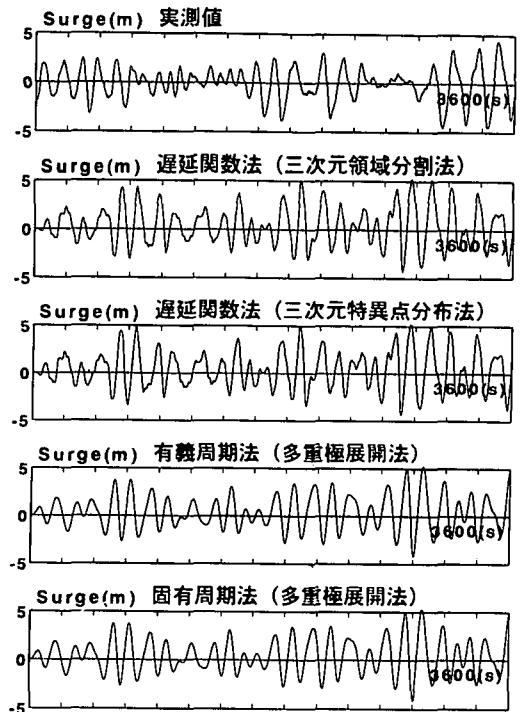


図-8 実測値および数値計算手法ごとの surge の時系列 (事例2)

うな大型船型についてのデータがなく、本研究では500トンクラスの船型の現地実験から求められた粘性項における係数の値(久保ら, 1980)を用いた。しかし、図-8に示す計算結果から見ると、事例2における実際の船舶の粘性抵抗力は再現計算で考慮した粘性抵抗力よりもやや小さいと推定される。

しかし、他港におけるほぼ同船型の動揺観測結果についての再現計算結果によれば(藤畑ら, 1999)、久保ら(1980)が求めた減衰係数による粘性抵抗力を用いると動揺量の計算値は実測値よりも小さくなるのが結論付けられている。このように、surgeの粘性抵抗力は単に船型や係留方法だけではなく、港湾形状や波浪条件などによっても影響されることが考えられ、さらに詳細な検討が必要である。

5. 結 論

本研究では、長周期波の影響が顕著な港湾における船体動揺観測例および船型・係留条件が異なる条件について、数値計算手法の違いによる長周期動揺への影響度を比較検討し、さらに長周期動揺を再現する際に支配するパラメーターについて詳細な考察を行った。これらの検討結果より、得られた結論は以下のとおりである。

(1) swayの長周期動揺の再現性を左右するパラメーターとして、減衰係数比を導入した。減衰係数比が0.5以上の領域では手法ごとの計算結果の相違が小さいが、減衰係数比が特に0.2よりも小さい場合には一定係数法(有義周期法および固有周期法)による再現精度はかなり低下することが明らかとなった。よって、減衰係数比が小さな場合には遅延関数法を使用するのがより適切である。

(2) 船体形状の有無による計算結果の相違については、ブロック係数が0.8程度の肥大船型の場合には影響はそれほど大きくないが、ブロック係数が0.6程度の瘦せた形状の船型では大きい。

(3) 事例1について係留索の繰り返し使用による変位復元力特性の変化を近似的に考慮することで、動揺周期および振幅が実測値にかなり近づくことが明らかと

なった。よって、係留索の特性の正確な把握が長周期動揺の再現に極めて重要であり、今後はこのようなデータを蓄積する必要がある。

(4) surgeの粘性抵抗力について小型船型の実験値を用いたが、本研究の事例では実際よりも小さいと考えられた。しかし、他港における同船型での観測事例の検討結果では実際よりも大きいことが報告されており、今後さらに検討を要する。

本研究は平成9年度および平成10年度の2ヵ年間にわたり、運輸省港湾技術研究所、横浜ゴム(株)および(株)日本海洋科学の共同研究として実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 上田 茂 (1984): 係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No. 504, pp. 1-372.
- 神谷昌文・瀧美洋一・菅沼史典・小泉信男 (1995): 苫小牧東港における船体動揺に関する現地観測, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 339-344.
- 久保雅義・今枝彬郎・奥村宗行 (1980): 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.
- 久保雅義・笹 健児・白石 悟・榎原繁樹 (1997): 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, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 236-240.
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榎原繁樹 (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.
- 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三 (1997): 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 246-250.
- 藤畑定生・秦 禎勝・中山晋一・森屋陽一・関本恒浩・池野正明・笹 健児 (1999): 船体動揺計算における港内副振動の考慮方法と粘性減衰係数の評価, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 856-860.
- John, F. (1950): On the Motion of Floating Bodies II, *Comm. Pure & Appl. Math.*, Vol. 3, No. 1, pp. 45-101.
- Shiraishi, S. (1998): Low-Frequency Ship Motions due to Long Period Waves in Harbours, and Modifications to Mooring Systems That Inhabit Such Motions, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第4号, pp. 37-78.