海岸工学論文集，第47巻（2000）
土木学会，856-860

港内係留船舶の水平面運動発達機構とその推定精度向上

中山晋一*・森屋陽一**・関本恒浩***

1. はじめに

近年，船舶の大型化に伴い，港湾係留船舶の長周期動揺が荷役中断や係留索の破断の原因となり，港湾の計画策定や運営上の問題となっている．

港内係留船舶の動揺を数値計算により求める場合には，船体の動揺と港内波浪場を連成させて解くことが望ましく，椹木ら（1988），大山ら（1992）により数値計算法が提案されている．しかし，いずれも規則波を対象とした周波数領域での計算法であるため，長周期波まで含めた多方向不規則波浪場への適用は困難である．一方，長周期波まで含めた不規則波に対する動揺計算を行うには，浮体の運動方程式にメモリー影響関数を導入して浮体の運動を時系列的に解く方法（例えば，久保ら，1988）が最も有効であると考えられるが，港内波浪場と浮体運動の連成を考慮できないのが現状である．藤畑ら（1999）は久保らと同様の手法を用い，代表周波数ごとに港内反射波特性を考慮し，船体重心位置での水位変動を外力とすることで動揺量を精度よく推定できることを示している．しかし，Surgingなどの船体の水平面運動は流体の水平運動に対応して発達すると考えられるため，船体の係留位置が重複波の節の位置に近い場合，水位変動を外力とすると動揺量を著しく過小に見積もる可能性がある．

このような問題を踏まえて，本研究では，水理模型実験により，長周期波が入射した場合について，船舶係留位置の差違が動揺量に与える影響を検討した．次に，久保らの船体動揺計算手法を用い，計算の入射波として用いられる長周期波の波浪外力の新しい評価法を提案した．さらに，提案した評価方法に基づいて計算された船体動揺量と，モデル港湾を用いた水理模型実験および現地観測により得られた船体動揺量とを比較し，その妥当性について検証した．

2. 港内係留船舶の水平面運動の評価

先に述べたように，港内における長周期波は重複波となっているため，長周期水位変動の大きいところで必ずしも船体の水平面運動が大きくなるとは限らない．このため，現在一般的であるopen seaモデルの数値計算方法を用い船体の運動を精度よく推定するためには，港内長周期波の多方向性および反射特性を考慮した上で評価する必要がある．

ここではまず，現象を単純化するため，矩形港湾を用いた水理実験を行い，動揺数値計算の外力評価として，従来の港内静穏度指標（水位変動）を用いる方法と流速変動を用いる方法を比較し，その妥当性を検証した．

2.1 矩形港湾を用いた水理模型実験の概要

図—1に示す平面水槽（20 m×30 m）に，矩形港湾（模型縮尺1/75，水深20 cm）を設置し，70,000 DWT級に相当する石炭運搬船模型（長さ3 m，幅43 cm，吃水10.6 cm，排水量1.05 kN）を係留した．係留には**表—1**に示すバネ定数の線形バネを用い，動揺固有周期の違いによる動揺量の変化を比較した．船体動揺量の計測には2台のCCDカメラによって構成される動揺計測システムを用いた．また，波浪場の計測には容量式波高計および電磁流速計を用い，船体動揺量と等しくサンプリング周波数50 Hzで連続14分間計測した．なお，反射波は造波板で吸収した．矩形港湾に対し，周期10.38 s（現地で90 sに相当），波高1.0 mmの規則波を直入射方向で造波し，副振動によって励起される定常的な重複波浪場を港内に発達させ，模型船に作用する外力とした．

図—2に矩形港湾内に上述の波を入射させた場合の港内波高分布とグリーン関数法（Leeの方法）による計算結果を比較した．実験で得られた波高分布は計算された波高分布に良好に対応しており，矩形港湾内に目標とした波浪場が発生する様子が確認された．港湾内に得られた副振動の腹および節の位置にそれぞれ船体模型を係留し発生する動揺量を計測した．

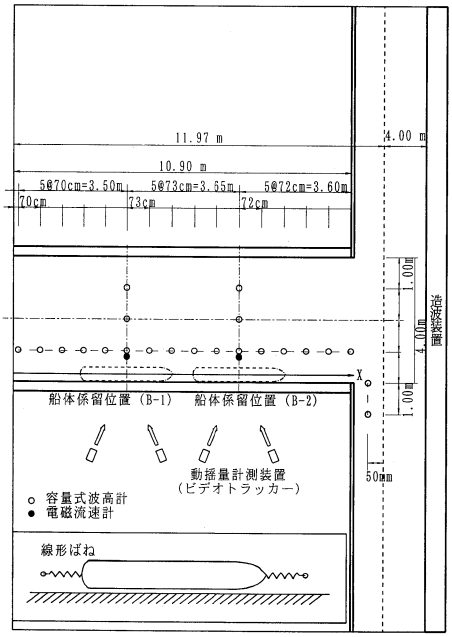
2.2 港内静穏度に基づく評価の問題点

矩形港湾内に係留した船体の動揺量と数値計算結果を比較する．船体動揺の計算手法としては，浮体の運動方程式にメモリー影響関数を導入して運動を時系列的に解く方法（久保ら，1988）を用いた（ただし，入射波が規則波の場合，流体力係数は外力周期での値とした．）．こ

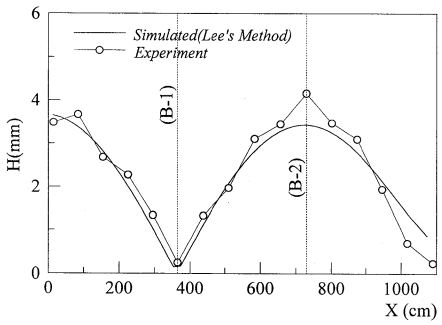
* 正会員　工　修　五洋建設(株)土木本部土木設計部
** 正会員　博(工)　五洋建設(株)技術研究所(現 運輸省港湾技術研究所)
*** 正会員　博(工)　五洋建設(株)技術研究所

表—1　バネ定数と係留船の固有周期

バネ No.	バネ定数 (N/m)	固有周期 (s)	
		実験室	現地
K1	13.72	13.30	115.2
K2	22.54	10.38	90.0
K3	31.36	8.80	76.2
K4	68.60	5.95	51.5



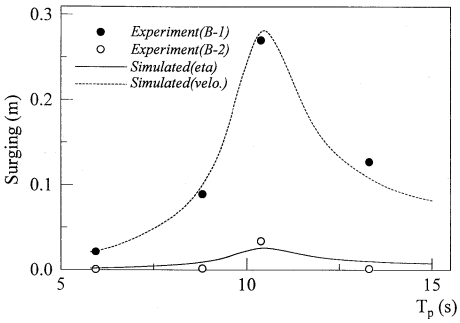
図—1　矩形港湾内の計測器と船体係留位置



図—2　港内波高分布の計測結果と数値計算結果による波高分布の比較

の方法を用いる場合，船体に作用する外力は時系列として評価する必要がある．ここでは副振動として発達した波が重複波として前後から船体に作用しており，船体重心位置で計測された波を入射波として計算を行った．

図—3 に船体動揺量（Surging）の計測結果を示した．



図—3　実験と数値計算による Surging の比較

図の縦軸は Surging の全振幅，横軸は線形バネのバネ定数の変化に伴う係留船舶の固有周期である．実験結果から，船体が港内副振動の節の位置（B-1）に係留され，係留船舶の固有周期が外力周期の近傍にある場合，共振により動揺が大きくなる様子が確認できた．しかし，腹の位置（B-2）に船体を係留した場合，動揺の発達は全く見られない結果となった．また，図中の実線は船体を B-1 に係留し，船体重心位置での水位変動計測結果を外力とした場合の計算結果である．外力が微小であるため，動揺量を著しく過小評価する結果となった．つまり，係留船の水平面運動を推定する場合，従来の静穏度の観点から長周期波を評価することは適切でないと言える．

2.3　流速等価進行波を用いた外力評価

港内長周期波の特性を適切に動揺数値計算に考慮するための検討を行った．**図—3** の破線は，B-1 に係留された船体を対象とし，船体重心位置での流速振幅と等価な流速振幅を持つ進行波の水位変動を入射波とした場合の動揺計算結果である．得られた動揺計算結果は実験結果に良く一致しており，長周期波による波浪外力として船体重心位置での流速と等価な進行波（以下，流速等価進行波）を用いることの妥当性が示された．

3.　流速等価進行波を用いた外力評価法の検証

船体動揺に関するモデル港湾を対象とした水理模型実験結果および現地観測結果を対象とした船体動揺数値計算を行い，前節で示した長周期外力評価法の妥当性について検証する．

3.1　モデル港湾を用いた水理模型実験の概要

図—4 に示すように，平面水槽内にモデル港湾（模型縮尺 1/75，水深 20 cm）を設置し，矩形港湾内に係留した模型と同様の船体を係留した．**図—5** に船体係留状況模式図を示す．船体の係留には実機を模した係留索および防舷材を用いている．また，入射波および実験条件を **表—2** に示す．入射波は基本波（0.06 Hz 以上），長周期波（0.06 Hz 以下）ともに 1,024 成分のシングルサンメン

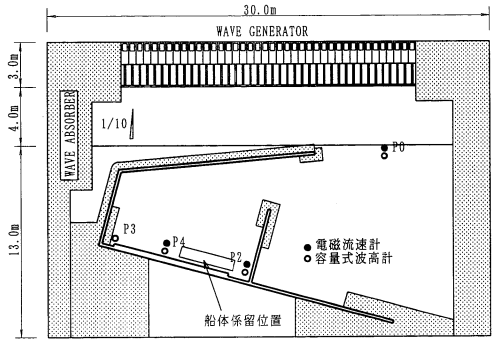
ション法で作成し，各成分波の振幅と周波数は藤畑ら(1998)により計測された港外水位観測結果の周波数スペクトルをエネルギー等分割して決定した．各成分波の位相は反射波特性を考慮して求め，波向は光易型方向分布関数を用いて決定した．なお，モデル港湾における船体動揺および波浪場の計測機器，計測方法は矩形港湾の場合と同様である．

3.2 実験結果に対する適用

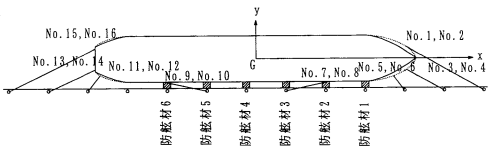
モデル港湾内に係留した船体の動揺量と2で示した長周期外力の評価法に基づく動揺計算結果を比較した．なお，係留船のサブハーモニックモーションを考慮するため，計算に用いる入射波は短周期成分の波浪外力についても考慮した．以下に，入射波作成方法の概要を示す．

① 短周期成分：船体模型のない状態で計測された船体重心位置での水位変動の周波数スペクトルについて0.06 Hzを境に短周期成分と長周期成分に分離し，さらに，短周期側をエネルギー等分割で10成分に分け，それぞれ振幅と周期を決定した．また，各成分波の位相は乱数で与え，波向は港口から船体重心位置への向きとした．

② 長周期成分：同様に計測された船体重心位置での水平2方向流速変動と等価な流速を有する進行波の水位変動の周波数スペクトルをそれぞれエネルギー等分割で10成分に分け，合計20成分の振幅と周期を決定した．また，各成分波の位相は乱数で与え，波向は水平2方向とした．なお，水平2方向とは船体平行方向と法線方向である．



図—4　モデル港湾内の計測器と船体係留位置



図—5　係留状況模式図

表—2　入射波と実験条件の一覧

多方向不規則波 ($S_{max}=25$)	主波向		港外有義波高	
	基本波 (deg)	長周期波 (deg)	基本波 (cm)	長周期波 (cm)
	0.0	0.0	4.00	0.16

*波向きは防波堤法直方向を0°として反時計回りを正

表—3に実験により得られた船体水平面運動3成分と上述の流速変動を用いて外力を評価する方法により計算された動揺量の最大値，最小値およびr.m.s.値を比較した．計算結果はSim 1として示した．また，比較のため藤畑ら（1999）の方法に基づく計算結果（Sim 2）についても併記した．これから，Surgingについては流速を用いた場合の計算結果が実験結果に良好に対応している様子が示されている．さらに，**図—6**にそれぞれの周波数スペクトルを比べた．流速等価進行波高を外力とした計算では，特にSurgingについて船体動揺のスペクトル構造すなわち，周波数領域におけるエネルギーのピーク値，出現位置などを非常に良く再現する結果が得られている．ただし，Swayingの短周期成分において，実験結果と計算結果が一致していない．これはCCDカメラの特性（カメラの設置位置からSwaying方向の変位量はターゲットの面積変化量より求められることによる計測精度の低下）が原因として考えられ，Swayingの統計諸量が一致しない理由もこれによると判断される．また，Surgingに比べSwayingやYawingのスペクトルにおける長周期成分の適合性が悪くなる原因としては，防舷材のバネ定数の評価が十分でなかったことが考えられる．

以上の結果より，本検討で示した波浪外力設定法により，係留系等のモデル化が適切であれば，精度良く港内係留船舶の動揺を推定できることが示された．

3.3 現地観測結果に対する適用

藤畑ら（1999）が動揺数値計算の対象とした現地観測結果と動揺数値計算を比較し，本検討で提案した計算方法の妥当性について検証した．計算の外力条件としては藤畑らと同様に，船体重心位置におけるBoussinesq方程式の数値計算結果を用いた．なお，入射波の作成方法は前頁までの方法と同様である．

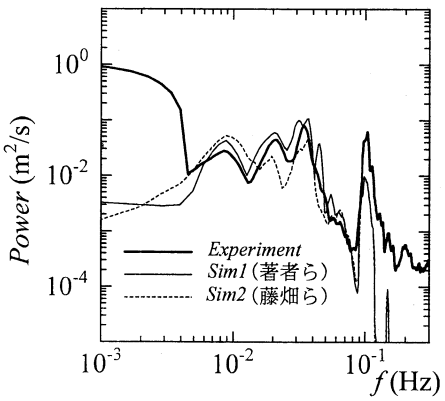
表—4に観測により得られた船体水平面運動3成分と計算された動揺量の最大値，最小値およびr.m.s.値を比較する．計算結果はSim 1が長周期成分の波浪外力として流速等価進行波高を用いた場合，Sim 2が藤畑らの方法に基づく方法による結果である．r.m.s.値より計算結果は観測結果に良好に対応していることが分かる．しかし，計算結果間の顕著な差違は確認できない．また，**図—7**にそれぞれの周波数スペクトルを比較した．Surgingに着目すると，流速等価進行波高を外力とした計算においてエネルギーピーク位置が若干長周期化し，観測結果の

表—3　船体水平面運動の統計諸量の比較

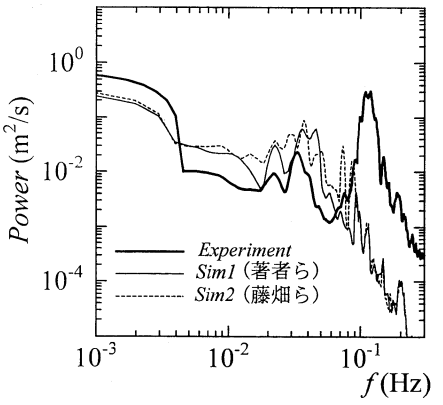
	Surging (m)			Swaying (m)			Yawing (deg.)		
	max	min	r.m.s	max	min	r.m.s	max	min	r.m.s
Exp.	0.17	−0.17	0.05	0.37	−0.33	0.09	0.16	−0.17	0.04
Sim 1	0.16	−0.18	0.05	0.17	−0.09	0.06	0.22	−0.18	0.06
Sim 2	0.11	−0.11	0.04	0.25	−0.06	0.06	0.21	−0.18	0.06

表—4　船体水平面運動の統計諸量の比較

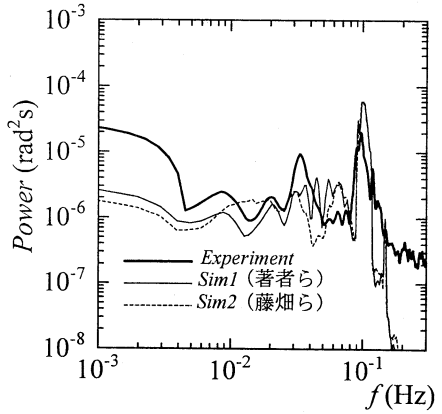
	Surging (m)			Swaying (m)			Yawing (deg.)		
	max	min	r.m.s	max	min	r.m.s	max	min	r.m.s
Meas.	0.56	−0.87	0.21	0.67	−0.12	0.11	0.41	−0.47	0.13
Sim 1	0.53	−0.61	0.22	0.56	−0.06	0.10	0.34	−0.42	0.09
Sim 2	0.55	−0.80	0.21	0.79	−0.06	0.13	0.42	−0.31	0.09



(a)　Surging の周波数スペクトル

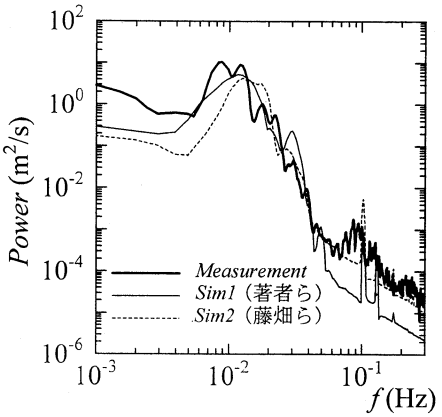


(b)　Swaying の周波数スペクトル

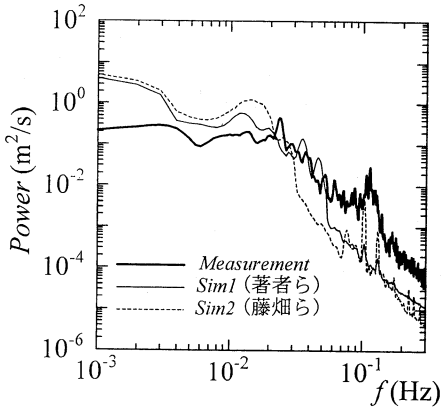


(c)　Yawing の周波数スペクトル

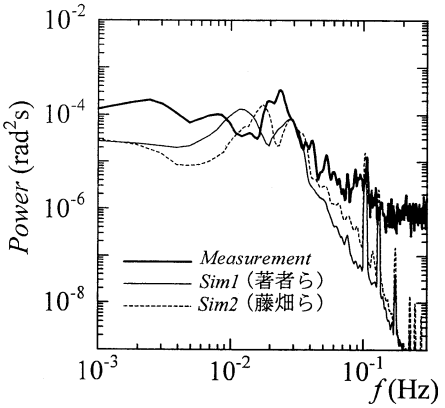
図—6　船体水平面運動の周波数スペクトルの比較



(a)　Surging の周波数スペクトル



(b)　Swaying の周波数スペクトル



(c)　Yawing の周波数スペクトル

図—7　船体水平面運動の周波数スペクトルの比較

ピーク位置に近接する様子がわかる．また，Swayingについてもエネルギーピーク値が観測結果のピーク値に近くなっており，流速等価進行波高を外力条件とすることで現地観測結果についても良好に再現が可能である．なお，計算手法の違いが結果に顕著に現れなかった原因として，対象としたバース位置では特定モードの長周期波がトラップされず，船体の動揺に対して有意な副振動の発達が見られなかったことが挙げられる．

4. 港内静穏度指標としての流速等価進行波高

従来，荷役稼働率は港内静穏度で評価されてきた．しかしながら，本質的には係留船舶の動揺を考慮して荷役稼働率を評価すべきである．ただし，前述までの方法により荷役稼働率を算出することで精度の良い評価が可能となるが，船体動揺計算を行うことは非常に煩雑な作業となる．船体動揺量まで評価できる簡便な静穏度指標を示すことができれば，港湾管理・運用上有用である．

これまでの検討から，港内係留船の長周期動揺量を評価するパラメタとして流速情報を用いることの必要性が示され，流速等価進行波高を数値計算の入力として用いることで精度良く船体動揺量を推定できることが明らかとなった．そこで，簡便な港内静穏度指標として，この流速等価進行波高を用いる方法を提案する．

藤畑ら(1998)は，港内への入射長周期波のエネルギーを周波数によらず一様に与えることで，実用的に良い精度で長周期波の波高分布を算定することが可能であることを示している．そこで，Green関数法等を用い，港湾への入射長周期波のエネルギーを周波数によらず一様として与え，港内バース位置で，各周波数に対してエネルギー的に合成した流速振幅を算定することで流速等価進行波高を求める．これを通常の波高と同様に既存の荷役限界に対する閾値（例えば，朝崎ら（1996））と比較すれば簡便に荷役稼働率を算定できる．なお，この方法は水平面運動について有効であり，Heavingなど鉛直運動については，従来のように波高を用いて静穏度の評価を別途行う必要がある．ただし，長周期の動揺が顕著な場合は，水平面運動が荷役に対して厳しい条件となるので，長周期波による荷役稼働率については水平面運動のみを考慮すれば充分な場合が多いと考えられる．

5. おわりに

本研究で得られた結論を以下にまとめる．

① 船体の水平面運動については，従来の静穏度の観点から動揺量を推定することは適切でなく，副振動による長周期波の発達が顕著な閉鎖性が強い港湾においてこの傾向が顕著であることが示された．

② 水理模型実験結果および現地観測結果と数値計算結果の比較により，船体に作用する長周期波の波浪外力として，船体重心位置での流速等価進行波高を用いることで動揺量を精度良く推定できることが示された．

③ 船体動揺量に基づく簡便な港内静穏度指標として，Green関数法等によって得られる港内バース位置での流速等価進行波高を用いる方法を提案した．

最後に，貴重な現地観測結果の使用を許可していただいた九州電力（株）藤畑定生氏ならびに秦禎勝氏に感謝の意を表す．また，本研究の一部は，(株)日本海洋科学と共同で実施したものであり，同社津金正典氏ならびに笹健児氏（現在，神戸商船大学大学院）に深謝する．

参考文献

朝崎勝之・松尾憲親・藤畑定生・鵜飼亮行・清水琢三（1996）：港内副振動に関する現地観測と長周期波を考慮した荷役稼働率の評価，海岸工学論文集，第43巻，pp. 886-890.

大山 巧・土田 充・清川哲志（1992）：部分三次元モデルによる任意海底地形・任意形状港湾内の船体動揺解析，海岸工学論文集，第39巻，pp. 821-825.

久保雅義・斉藤勝彦・下田直克・岡本俊策（1988）：岸壁前面係留浮体の不規則波による船体動揺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.

椹木 亨・青木伸一・濱本 敏（1988）：港湾形状を考慮した港内船舶の回折・造波問題，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 692-696.

藤畑定生・秦禎勝・森屋陽一・中山晋一・関本恒浩（1998）：現地観測による港内長周期波浪流速特性とその予測方法に関する検討，海岸工学論文集，第44巻，pp. 306-310.

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.