

港内係留船舶の動揺に関する実験的研究

中山 晋一* 関本 恒浩*
森屋 陽一*

要 旨

係留船舶の動揺量の算出は、港湾施設における物揚場の荷役稼働率や荷役限界、船舶の係留限界波高の算定を行う上で不可欠である。特に、外洋に面した港湾で例えば“底うねり”と称される長周期波によって船体の長周期動揺が励起され、限界波高以下での荷役の中断や係留索の切断といった事例が多数報告されており(松良ら¹⁾、白石ら²⁾、菅沼ら³⁾)、これら係留船舶の長周期動揺特性を解明することは非常に重要である。そこで本研究では、水理模型実験により港内で卓越する副振動の特性について把握し、これら長周期波によって励起される船体動揺の基礎データを取得した。

また、船体の前後揺を中心に外力条件と船体動揺の関係についての検討を行い、船体長周期動揺と港内副振動の関係を明らかにした。さらに、係留索など船体係留系の諸特性についても調べ、船体動揺との関係について検討した。

1. まえがき

港内係留された船体の長周期動揺の主な原因として、港内副振動により発達する周期1～2分の長周期波が関与していることが近年の研究により明らかにされている⁴⁾。しかし、実験室においては長周期波を含む波を水槽内に発生させることが困難であるため、係留船舶の長周期動揺に対する実験的な検討が行われた前例は少ない。上田⁵⁾は係留船舶の動揺特性に対して、水理模型実験による検討を行っているが、波浪条件に波の長周期成分が考慮されておらず、長周期動揺に対する得る評価は不十分である。

そこで本研究では、平面水槽実験を実施し、模型港湾内で発達する長周期波の基本特性を把握するとともに、港内に係留された船舶の長周期動揺特性についての検討を行った。さらに、実験結果を対象とした船体動揺数値シミュレーションを行い、船体動揺量の実験計測結果と数値シミュレーション結果を比較し、両者の妥当性について検証した。また、係留系についての考察を行い、特に、係留索特性が船体動揺に与える影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 水理模型の概要

当社所有の平面水槽内水平床部にモデル港湾を設置し実験を実施した。モデル港湾の主防波堤は1kmを想定し、水槽の規模を勘案して模型縮尺を1/75とした(図-1)。また、対象とした船舶模型は60,000DWT級船舶(長さ3m、幅43cm、喫水10.6cm、排水量107kg)であり、港湾内のバース位置に係留した状態で船体の動揺量等を計測した。

2.2 模型港湾内の波浪計測実験

模型港湾の港内、港外各測点に容量式波高計および電磁流速計を配置し(図-1)各測点における水位および流速変動を計測した。なお、各計測データは20Hz、現地換算で1時間となるように連続14分間でサンプリングした。また、入射波条件は表-1に示す短周期および長周期の規則波、単一方向および多方向の不規則波であり、入射波については模型港湾を設置しない状態で目標とする波高および波向が得られることを確認している。

2.3 港内波高分布の計測実験

模型港湾内72測点(図-2)の水位変動について容量式波高計を用いて計測し、港内波高分布を求め、港内副振動の特性について検討を行った。

2.4 船体動揺実験

模型港湾内対象バース位置に船体模型(60,000DWT級船舶模型)を設置し、表-1に示す入射波条件下で動揺量を計測した。なお、表-1には模型スケールおよび現地換算での有義波高(測点P0での波浪成分有義波高および長周期成分有義波高)と波向を示した。ここで、波向についてはA防波堤に対して法線直角方向の入射角を0°とし、時計回りを正とした。また、船体動揺量は図-3に示す6自由度計を用いて計測し、係留索と防舷材に張力計と変位計をそれぞれ2箇所づつ取り付け、動揺量と同期した係留索張力と防舷材変位を計測している。図-4に模型船係留時の配索状況と各計測器の設置位置を示す。なお、各計測データは波浪データと同様に20Hz、連続14分間でサンプリングした。写真-1に船体動揺量の計測状況を示す。

* 技術研究所

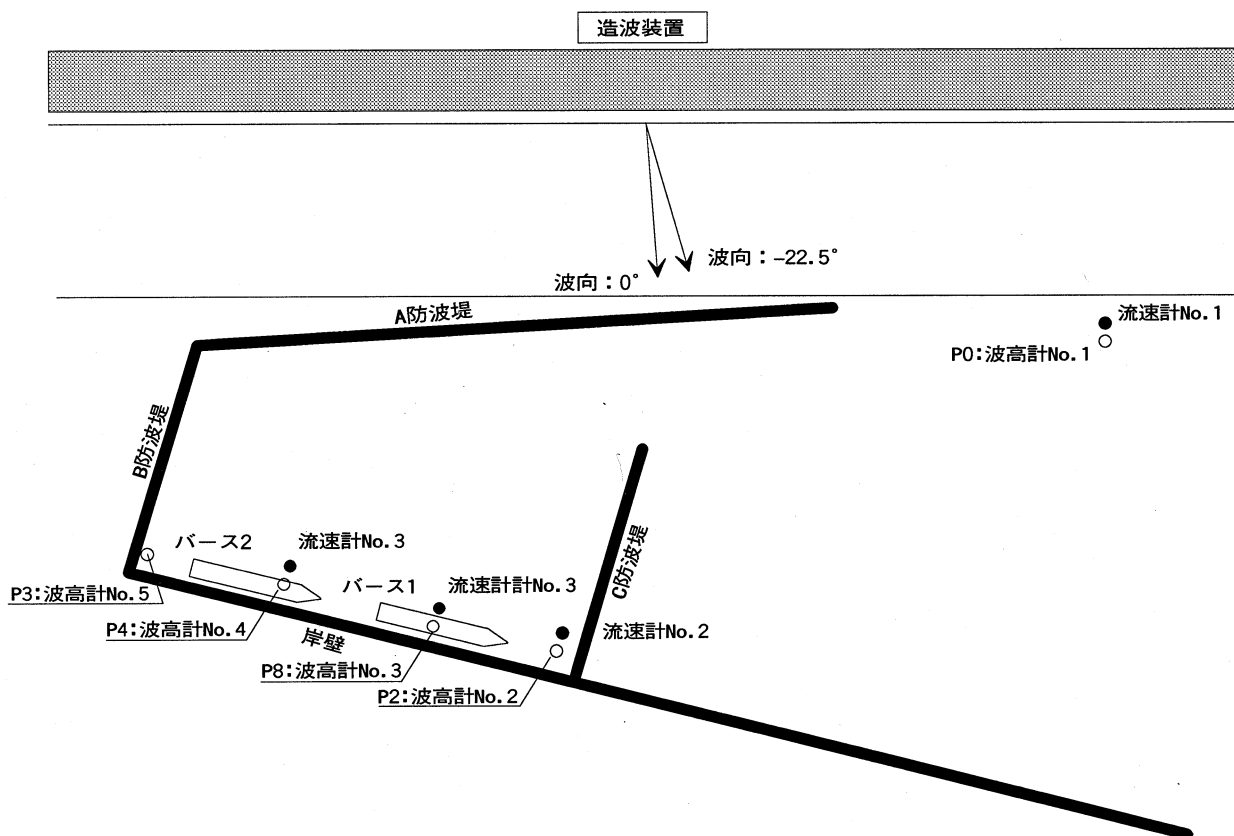


図 - 1 港湾模型と計測機器の配置図

表 - 1 入射波と実験条件の一覧表

入射波条件		ケース	P0での有義波高 (cm/m)		有義波周期 (s/s)	波浪波向 (deg.)	長周期波向 (deg.)
			波浪成分	長周期波成分			
規則波	波浪成分	KW1	4.00/3.00	-	0.94/8.1	0	-
		KW2	4.00/3.00	-	0.94/8.1	-22.5	-
規則波	長周期成分	KS1	-	0.32/0.24	5.12/45.0	-	0
		KS2	-	0.32/0.24	6.93/60.0	-	0
		KS3	-	0.32/0.24	9.24/80.0	-	0
		KS4	-	0.32/0.24	12.70/110.0	-	0
不規則波	多方向	T1	4.00/3.00	0.16/0.12	0.94/8.1	0	0
		T2	4.00/3.00	0.16/0.12	0.94/8.1	-22.5	0
	単一方向	T3	4.00/3.00	0.16/0.12	0.94/8.1	0	0
		T4	4.00/3.00	0.16/0.12	0.94/8.1	-22.5	0
	多方向	T5	3.00/2.25	0.12/0.09	0.94/8.1	0	0
		T6	3.00/2.25	0.12/0.09	0.94/8.1	-22.5	0
	単一方向	T7	3.00/2.25	0.12/0.09	0.94/8.1	0	0
		T8	3.00/2.25	0.12/0.09	0.94/8.1	-22.5	0

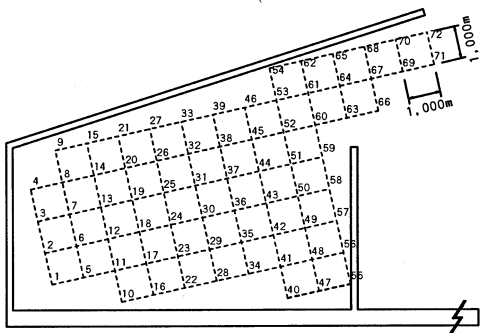


図 - 2 港内波高分布の測定 (水位の多点計測) 図

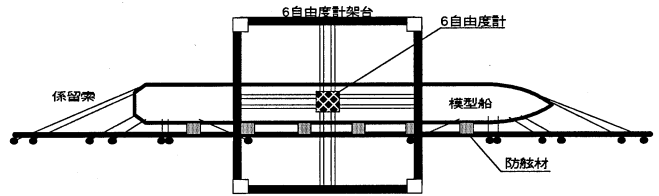


図 - 3 6自由度計の設置模式図

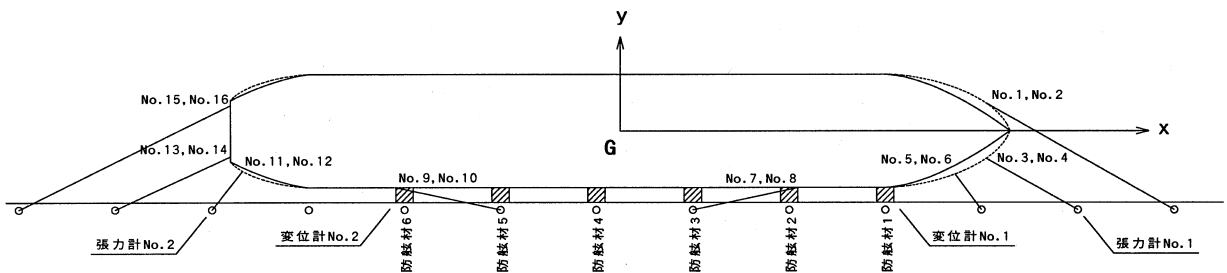


図 - 4 模型船舶係留時の配索状況

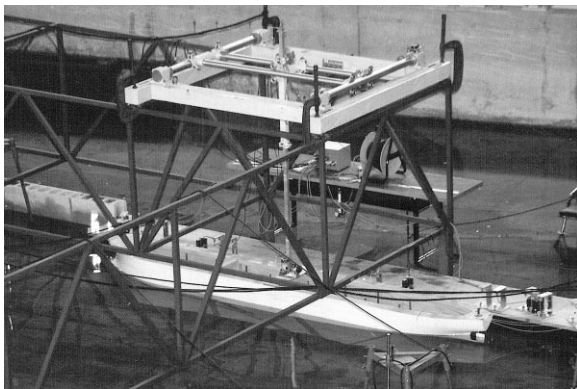


写真 - 1 船体動揺量の計測状況

3. 模型港湾内の波浪特性

表 - 1 に示した条件の波 (不規則波: T1 ~ T8) を入射波として、港内および港外各測点における水位変動および流速変動の計測を行い、模型港湾内外の波浪場の特性について検討を行った。

3.1 水位観測結果に関する検討

表 - 2、3 に、図 - 1 に示した港外計測点 P0 および港内計測点 P2 ~ P3 における有義波高を示す。なお、計測された水位変動は波浪成分 ($0.519\text{Hz} < f$) およびサーフピート成分 ($0.043\text{Hz} < f < 0.519\text{Hz}$) に分けて解析した。表より、各ケースとも波浪成分およびサーフピート成分 (以下、S-B 成分) いずれも表 - 1 に示す波高に近い値が得られており、再現性の良い実験が可能であることが確認された。

表 - 2 波浪成分有義波高

測点	T1	T2	T3	T4
P0	4.005	3.726	3.791	3.707
P2	0.346	0.219	0.275	0.185
P3	0.286	0.209	0.210	0.164
P4	0.484	0.332	0.357	0.285

T5	T6	T7	T8
3.008	3.005	2.957	2.810
0.297	0.205	0.159	0.123
0.197	0.134	0.149	0.192
0.418	0.291	0.308	0.232

* 単位: cm

表 - 3 S-B 成分有義波高

測点	T1	T2	T3	T4
P0	0.224	0.215	0.263	0.240
P2	0.170	0.173	0.198	0.174
P3	0.131	0.121	0.132	0.113
P4	0.066	0.065	0.073	0.074

T5	T6	T7	T8
0.147	0.149	0.157	0.158
0.120	0.139	0.086	0.084
0.080	0.081	0.094	0.065
0.052	0.055	0.050	0.046

* 単位: cm

また、図 - 5 にケース T1 の波を入射波とした場合での各測点 (P0、P2 ~ P4) における水位変動の周波数スペクトルを示す。図より、港内測点 P2 での周波数スペクトル

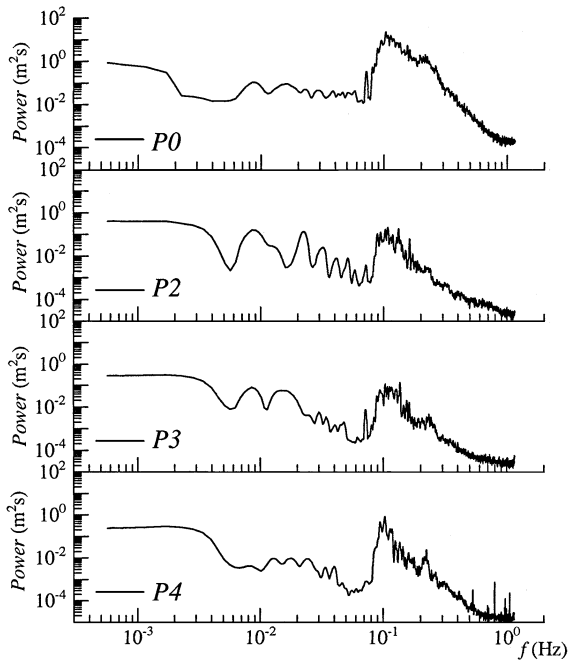


図 - 5 水位のパワースペクトル

は港外測点P0のそれに比べS-B成分におけるエネルギーの比率が増しており、特に、周期110sと90s付近のエネルギー増幅率が高いことから、特定モードの長周期波が港内で発達している状況が明らかと言える。

3.2 水位観測結果に関する検討

次に、図 - 1 に示した各測点での流速計測結果について解析を行った。図 - 6 はケースT1の波を入射波とした場合での各測点 (P0、P2、P4) での流速をスカッタープロットしたものである。図より港外測点 (P0) では波浪成分においてE-W方向の流速が卓越し、造波波向に対応した流速が発達しているのに対し、港内測点 (P4) ではS-B成分においてN-S方向 (岸壁平行方向) の流速が卓越している様子が明らかである。これは、模型港湾内の岸壁に沿った方向の副振動の存在を示した結果であると言える。特に、P2に比べP4においてこの現象が顕著であることから、測点P4は副振動構造の腹の位置に近いものと判断される。

4. 港内副振動特性

ここでは、水位変動の多点計測結果より港内波高分布を求め、港内副振動についてさらに詳細な検討を加えた。

図 - 7 は表 - 1 に示した長周期規則波 (周期45s、60s、80s、110s) を入射波とした場合の港内波高分布を示した結果である。図より周期45sの波を入射波とした場合では、入射波高 $H=3.2mm$ に対して岸壁とC防波堤の隅角部において $H=5.6mm$ まで波高が発達し、周期110sの場合

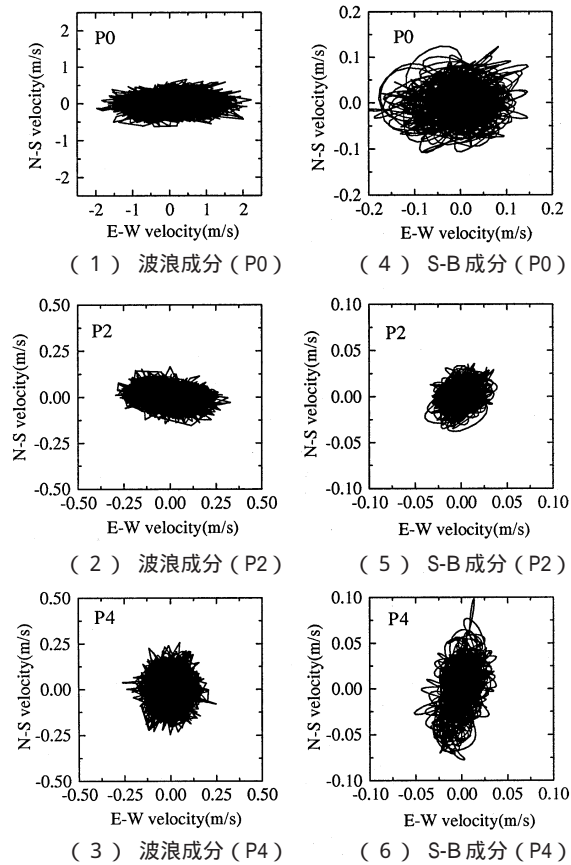
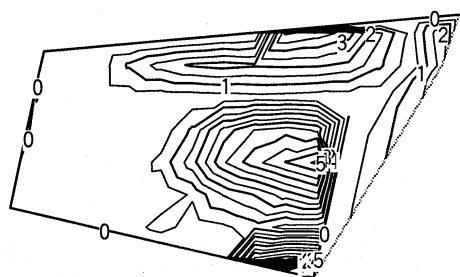


図 - 6 流速のスカッタープロット

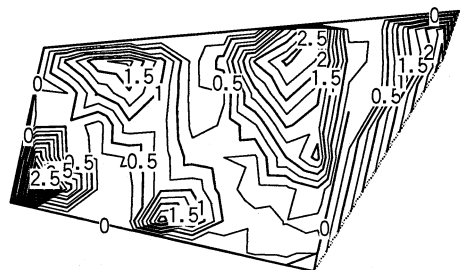
でも最大で入射波の1.7倍まで波高が増大している様子が分かる。しかし、同じ長周期規則波を入射波とした場合であっても、周期60sおよび80sを入射波とした場合では、港内波高は入射波高より小さくなった。また、同様に波高が増大する場合でも、周期45sと110sとではその発達構造 (波高分布パターン) が異なることから、港湾の形状と入射波の波長 (周期) の関係により港内副振動が発達していることが確認された。図 - 8 にモデル港湾で卓越する副振動モードの模式図と各波の波長を示す。

5. 船体動揺実験

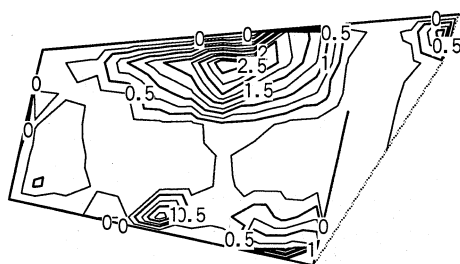
模型港湾内の岸壁に船体模型を設置し、6自由度計を用いて船体動揺量の計測を行い、表 - 1 に示す入射波に対する船体動揺量について比較した。また、バース位置を図 - 1 に示す2ヶ所とし、バース1とバース2の位置にそれぞれ船体模型を係留し、係留位置の違いによる発生動揺量の変化についても評価した。なお、動揺量については船体重心位置での6自由度成分 (Surging、Swaying、Heaving、Swaying、Rolling、Yawing) を解析対象とする予定であったが、運動方向によって質量が変化するなど6自由度計の構造的な問題から、計測された動揺量を重



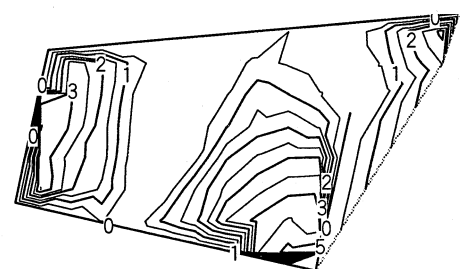
(1) 周期45s



(2) 周期60s



(3) 周期80s



(4) 周期110s

図 - 7 港内波高分布

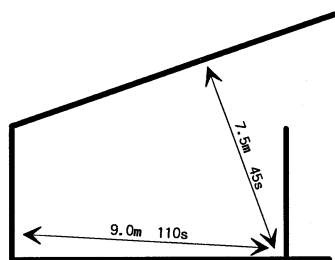


図 - 8 港内副振動モードの模式図

表 - 4 パース1での船体動揺量 (規則波)

Surging (mm)	短周期規則波		長周期規則波			
	KW1	KW2	KS1	KS2	KS3	KS4
max	0.613	0.436	5.810	2.291	0.338	4.513
min	-0.720	-0.473	-5.890	-2.059	-0.424	-3.287
r.m.s	0.196	0.112	3.700	1.335	0.079	2.587

表 - 5 パース2での船体動揺量 (規則波)

Surging (mm)	短周期規則波		長周期規則波			
	KW1	KW2	KS1	KS2	KS3	KS4
max	0.360	0.303	0.319	7.298	0.434	5.578
min	-0.545	-0.297	-0.281	-7.702	-0.473	-5.672
r.m.s	0.149	0.080	0.055	4.528	0.148	3.436

心回りの6自由度成分に分解できないため、本検討では他の動揺成分と運動の連成が少ない船体前後揺 (Surging) のみを解析対象とした。

5.1 規則波を入射波とした場合の動揺量特性

表 - 1 に示す規則波 (短周期および長周期) を入射波とした場合の船体動揺量 (Surging) について比較した。表 - 4、5 にパース1およびパース2それぞれでの動揺量を示す。表より短周期の規則波を入射波とした場合、発生する長周期動揺量は微小であり波の短周期成分は直接的にはSurgingモードに寄与しないものと判断される。しかし、長周期の規則波を入射波とした場合では、パース1では周期45sおよび110sの波を入射波とした場合に動揺が発達した。この原因としては前述の卓越する副振動モードの腹節構造が関係しているものと判断される。また、パース2に船体を係留した検討では、周期60sの波を入射波とした場合に最も動揺が卓越する結果が得られた。つまり、同じ岸壁延長上に位置する物揚場であっても、物揚場付近の副振動モードが異なれば船体の長周期動揺特性が大きく異なることが示された。

5.2 不規則波を入射波とした場合の動揺量特性

次に、単一方向および多方向不規則波を入射波とした場合の長周期動揺量について検討した。表 - 6、7 はパース1およびパース2の位置におけるSurgingモード動揺量の統計値 (動揺変位の最大値および最小値、r.m.s.値) を比較した結果である。表より、パース2でのSurgingがパース1での値を上回る傾向にある。これは、前述の検討で示した周期60sの波が、パース2付近でSurgingを卓越させる方向に副振動構造を持つことによるものと考えられる。つまり、港内副振動によって卓越する長周期波は波高だけでなく波向も船体の動揺に対して重要となる。

表 - 6 パース1での船体動揺量 (不規則波)

Surging(mm)	T1	T2	T3	T4
max	3.517	2.587	2.946	2.288
min	-3.723	-2.521	-2.975	-2.184
r.m.s.	1.208	0.746	0.990	0.681

T5	T6	T7	T8
1.836	1.300	1.200	0.931
-2.361	-1.310	-1.200	-1.298
0.658	0.453	0.330	0.287

表 - 7 パース2での船体動揺量 (不規則波)

Surging(mm)	T1	T2	T3	T4
max	3.365	2.550	3.512	3.030
min	-3.924	-2.701	-4.020	-2.970
r.m.s.	1.256	1.013	1.408	1.039

T5	T6	T7	T8
2.006	2.071	1.792	1.995
-2.496	-2.342	-2.425	-1.960
0.741	0.782	0.704	0.686

5.3 数値シミュレーションの概要

実験で得られた船体動揺量の妥当性について検証するため、船体動揺量の数値シミュレーション結果との比較を行った。以下にその概要について説明する。

船体の動揺を記述する運動方程式は、船体を質点とする振動方程式に遅延関数を導入し、動揺量の時系列解析が可能な久保らの手法²⁾を用いて次式のように表される。

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ij} + m_{ij}(\infty)) \ddot{X}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \left(\int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{X}_i(\tau) d\tau + D_i(t) \right) + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) X_i(t) = F_i(t) \quad (1)$$

ここで、 $X_i(t)$: 船体変位および回転角、 M_{ij} : 船体質量および慣性モーメント、 m_{ij} : 不変付加質量および不変付加慣性モーメント、 $L_{ij}(t)$: メモリー影響関数、 $D_i(t)$: 粘性減衰力、 C_{ij} : 復元力定数、 G_{ij} : 係留力係数、 $F_i(t)$: 波浪強制力および風圧力といった外力、 t : 経過時間、添え字 ij : j モードの運動によって i モード (1:Surging 2:Swaying 3:Heaving 4:Rolling 5:Pitching 6:Yawing) の運動に影響することを意味する。また、メモリー影響関数および不変付加質量は次式で表される。

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

$$m_{ij}(\infty) = A_{ij}(\sigma) + \frac{1}{\sigma} \int_0^{\infty} L_{ij}(t) \sin \sigma t dt \quad (3)$$

ただし、 $\omega = 2\pi/T$ 、 T は動揺周期を示し、 $A_{ij}(\omega)$ は周波数 ω に対応した付加質量および付加慣性モーメント、 $B_{ij}(\omega)$ は周波数 ω に対応した減衰係数である。また、水の粘性や係留索のヒステリシス等に起因する粘性減衰力は、ポテンシャル理論では扱えないため、本検討では実験データを基に設定した。粘性減衰は次式で表される。

$$D_i(t) = a_i \dot{X}_i(t) + b_i \dot{X}_i(t) |\dot{X}_i(t)| \quad (4)$$

$$a_i = \frac{4\alpha_i}{T_i} (M_{ii} + m_{ii}(\infty)) \quad (5)$$

$$b_i = \frac{3\beta_i}{4} (M_{ii} + m_{ii}(\infty)) \quad (6)$$

ここで、 α_i : 線形項の粘性減衰係数、 β_i : 非線形項の粘性減衰係数、 T_i : 各モードにおける船体動揺固有周期を示している。減衰係数 α_i 、 β_i は船型、係留条件および岸壁構造等によって異なってくるものであり、対象とする条件ごとに設定しなければならないものである。しかし、実船ベースでは、現在 α_i 、 β_i を設定するための指標は存在せず、ここでは430DWTの小型船の自由振動実験結果⁶⁾より求められた係数 ($\alpha_{Surge}=0.5$ 、 $\alpha_{Sway}=1.0$) を使用した。

5.4 実験結果と数値シミュレーション結果の比較

実験による船体動揺量の観測結果と上述の船体動揺数値シミュレーションによる計算結果との比較を行った。数値シミュレーションの外力条件は、実験での計測波 (パース1では測点P2、パース2では測点P3) を用い、波浪成分、長周期波成分それぞれを周波数スペクトル上で各周波数帯のエネルギーが等しくなるように10成分に分割し成分波を作成した。これらの成分波を合成する際に、波形が元波形と一致するように成分波の位相を最小二乗法で決定し入射波の時系列を作成した。さらに、入射波は港口からの進行波とし、岸壁での反射を考慮しない open sea モデルとして計算を行っている。以上の要素を考慮した時間領域の運動方程式 (1)式) をニューマーク・法による数値積分で解き、船体動揺量、係留索張力および防舷材反力の時系列を求めた。また、時系列の計算時間は実験での動揺量計測時間と同様に現地スケールで3600sとした。以下に実験による動揺量の計測結果と数値計算結果との比較を行う。

表 - 8 にケース T1 および T5 を入射波とした場合の Surging モードの統計解析結果を示す。

表より、数値計算による動揺量 (Surging) は実験結果に比べて大きくなる傾向があり、r.m.s. 値では実験結果に

表 - 8 船体動揺量の統計解析結果

Surging (mm)		バース1		バース2	
		T1	T5	T1	T5
実験	max	3.517	1.836	3.365	2.006
	min	-3.723	-2.361	-3.924	-2.496
	r.m.s.	1.208	0.681	1.256	0.741
数値計算	max	4.486	2.968	7.658	2.807
	min	-4.982	-2.554	-4.863	-2.538
	r.m.s.	1.972	0.922	2.336	1.167

比べ最大で2倍弱の値となった。

さらに、動揺量の周波数特性について検討を行うため、実験結果と数値計算結果の周波数スペクトルについて比較した。図 - 9 はその結果であり、実験での動揺量のエネルギーは計算値のそれに比べ周期 80s 付近で極端に過小評価となっている。この原因としては、実験では船体動揺に連動する6自由度計の質量が加わっていたこと、さらに、6自由度計の運動に伴う摩擦力によるものと推察される。そこで、船体動揺に対する6自由度計の影響を除くため、船体から6自由度計を分離し、非接触型の計測装置を用いた動揺量の計測を行った。なお、変位計による動揺量の計測はバース2において行った。

表 - 9 はバース2の位置に船体を係留し、変位計を用いて動揺量を計測した場合のSurgingモードの統計結果である。併せて、測点P3での計測波を入射波条件とする数値計算結果も示した。表より、変位計による動揺量の計測値は6自由度計による計測値に比べ、動揺量の最大値および最小値で約1.3倍、r.m.s.値についても約1.4倍となる結果が得られ、数値計算結果との差も減少することが明らかとなった。また、図 - 10 はこのときのSurgingの周波数スペクトルを比較した結果であるが、変位計により計測されたSurgingは、6自由度計によるものに比べエネルギーのピークが増大し、ピーク位置も若干であるが長周期化することで数値計算結果の分布形状に近くなる傾向にある。しかしながら、実験値と計算値の差異は依然大きく、これは、係留系の影響であると考えられる。なお、精度良く船体動揺量を計測するには非接触型の計測器を用いる必要があると言える。

6 . 係留系に関する検討

本実験で使用した船体の係留系は、現地での係留船舶の動揺を再現可能とするため、実際に現場で使用される係留索(パイレンマルチブレード)を模した繊維索を使用している。ここではこれら係留系の諸特性を把握することで、船体の動揺に及ぼす影響、特に、係留系から算出した動揺の固有周期についての検討を行った。

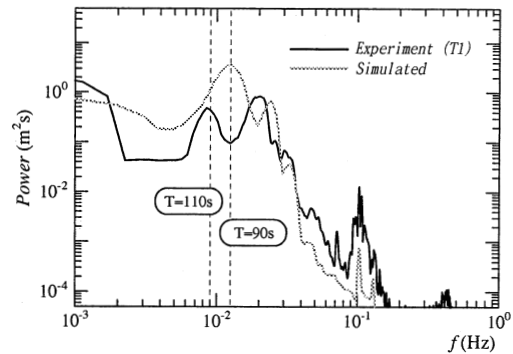


図 - 9 Surgingの周波数スペクトルの比較(6自由度計)

表 - 9 変位計を用いて計測した Surging の統計量

Surging (mm)	6自由度計	変位計	数値計算
max	3.365	4.607	7.658
min	-3.924	-5.068	-4.863
r.m.s.	1.256	1.789	2.336

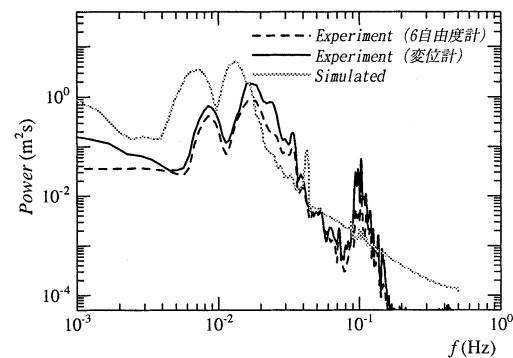


図 - 10 Surgingの周波数スペクトルの比較(変位計)

6 . 1 係留索と防舷材のパネ定数

係留系の固有周期の算出にあたり、まず、個々の係留索についてパネ定数を計測した。図 - 11 は実験に使用した係留索(No.1)の反力-歪み曲線の計測結果であり、繊維索の特徴である反力増大時と減少時の経路の違い(ヒステリシス)および非線形性が実験で使用した係留索にも現れている。これら繊維索の特性を考慮し、係留索のパネ定数は初期の構造的な伸びが少ないと考えられる2回目以降の反力-歪み曲線を線形近似することで推定した。図中のaが推定されたパネ定数である。

一方、防舷材については使用した線形パネのパネ定数を測定したところ $k=88.7gf/mm$ ($0.87N/mm$)となることが確認された。

6 . 2 係留系の固有周期

上述の係留索と防舷材のパネ定数から船体動揺(Surging)の固有周期を算出した。

Surgingの固有周期 T_{sr} は以下の式により求める。

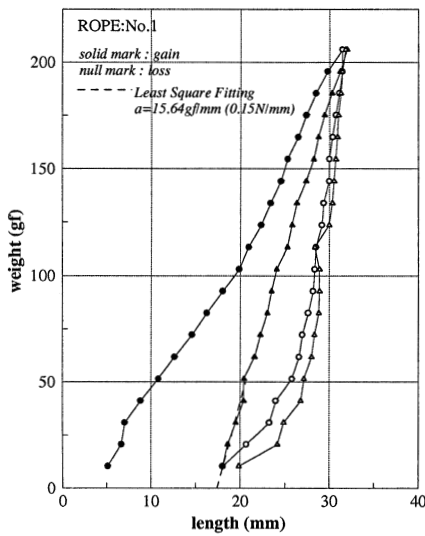


図 - 1 1 係留索の反力 - 歪み曲線

$$T_{sr} = 2\pi \sqrt{M_{sr} / K_{sr}} \quad (7)$$

ここで、 M_{sr} は船舶の前後方向の仮想質量で、 M を模型船の排水量として、 $M_{sr}=1.15M$ とする。 K_{sr} は係留索の前後方向の合成バネ定数である。

K_{sr} を求めるには、係留索の配置状況から係留索長および係留索の陸側取り付け鉛直角 および水平角 を求め計算する。

$$K_{fsr} = \sum k_{fsr} = \sum (k_f \cos \theta_c \sin \psi) \quad (8)$$

$$K_{bsr} = \sum k_{bsr} = \sum (k_b \cos \theta \cos \psi) \quad (9)$$

ここで、 K_{fsr} および K_{bsr} は船首方向および船尾方向へのバネ定数の総和であり、 k_f および k_b は前後方向それぞれの各係留索のバネ定数である。

式(1)より本実験での Surging モードの固有周期は前方向で 8.3s (現地換算：71.8s)、後方向で 9.3s (現地換算：80.2s) であり、平均すると Surging モードの固有周期は 8.8s (現地換算：76.0s) と推定される。

しかし、前述の船体動揺数値シミュレーションによる Surging モードの固有周期は約 90s と、推定値は計算結果に比べ 15s 近くも短周期化している。この原因としては、上述した個々のバネ定数の推定に、索の伸縮経路の違い (ヒステリシス) および伸縮経路の非線形性の影響が考慮されていないことが挙げられる。これが数値シミュレーションで得られた動揺量と実験結果との差異の原因の一つと考えられる。また、このような係留索の特性を考慮した適正な弾性曲線のモデル化が必要であると言える。

7. まとめ

模型港湾に現地での波を対象とする入射波を与えた場合、水位および流速の計測結果から、特定成分の波が港内副振動によって発達している様子が確認された。

長周期規則波を入射波として港内の波高分布を計測した結果、周期 45s および 110s の波を入射させた場合に顕著な副振動が発達する結果が得られ、副振動の発達には入射波の周期と副振動のモードを決定する港湾形状が密接に関係していることが明らかとなった。

長周期規則波を入射波とする船体動揺実験を行った結果、港内副振動を卓越させるモードの波の寄与により船体の長周期動揺量が発達することが確認された。また、数値シミュレーションによる船体動揺量との比較を行ったところ、非接触型の計測器を用いた動揺量の計測により妥当な計測結果が得られることが確認された。

係留系についての諸特性について検討を行った結果、実験で使用した係留索も繊維索の特性であるヒステリシスおよび非線形性を有することが明らかとなり、これらの特性を考慮した個々のバネ定数の設定に基づく固有周期の算定が必要であることが示された。

謝 辞

本研究を行うに際し(株)郵船海洋科学の津金正典氏、笹健児氏から貴重なご助言、ご尽力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲：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、海岸工学講演会論文集、第41巻、pp.71 ~ 75、1994
- 2) 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹：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、海岸工学講演会論文集、第42巻、pp.941 ~ 945、1995
- 3) 菅沼史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信男：現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討、海岸工学講演会論文集、第42巻、pp.951 ~ 955、1995
- 4) 田端竹千穂・田所篤博・平石哲也・玉城重則：港湾における長周期波の増幅現象に関する現地観測、海岸工学講演会論文集、第42巻、pp.301 ~ 351、1995
- 5) 上田 茂：係留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.42 ~ 138、1984
- 6) 久保雅義・斉藤勝彦・下田直克・岡本俊策：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、海岸工学講演会論文集、第35巻、pp.687 ~ 691、1988