強風時における係岸船舶の動揺測定

上田　茂*・白石　悟**・飯牟礼信幸***

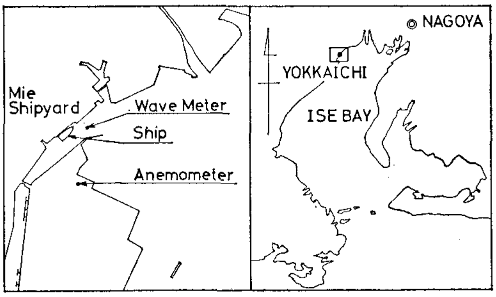
1. まえがき

現在，我国の港湾では，台風等の強風時には，船舶の安全対策上，おおむね 1 000 GT 以上の船舶に対して港内への入港規制および港外退去を勧告している．しかしながら，近年船舶数の増大や船型の大型化に加え，タンカー，LNG 船等の危険物取扱船舶が増加したことにより湾内の避泊スペースが不足する事態が生じており，避泊船舶の安全対策が問題となっている．その対策の1つとして船舶の係岸避泊が検討されている．船舶を強風時に安全に係岸避泊させるためには，係岸船舶の動揺特性を十分に把握し，また，係岸船舶の動揺シミュレーションモデルを開発し，それらの成果を用いて港湾施設の整備目標を定めねばならない．そこで，実船観測を行い，強風時における係岸船舶の動揺量を測定した．また，動揺シミュレーションを行い計算値と観測値との比較検討を行った．

2. 実船観測

(1) 調査対象船舶

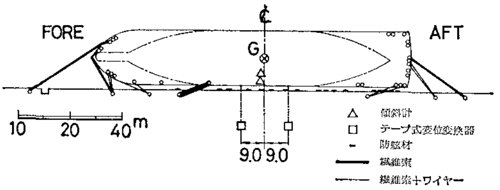
係岸船舶の動揺量の実船観測は，**図―1** に示す四日市港富双地区の艤装岸壁で行った．調査対象船舶は艤装中のコンテナ船である．**表―1** は，その諸元を示したものである．実船観測は2度実施しているが，対象船舶は全く同型のもので喫水が多少違っているだけである．船舶



図―1　観測場所の平面図

表―1　調査対象船舶の主要目

項　目		第1回目観測	第2回目観測
全長	(m)	120.8	120.8
垂線間長	(m)	110.9	110.9
型幅	(m)	20.2	20.2
喫水	(m)	2.45	2.35
重心 $\overline{KG}$	(m)	7.40	7.20
重心 $\otimes G$	(m)	3.50	3.68
メタセンター高さ $\overline{GM}$	(m)	7.33	8.00
ブロック係数 C_b		0.566	0.562
総トン数	(tf)	3 584	3 584
観測時の排水量	(tf)	3 300	3 132
水面上正面投影面積	(m²)	350	350
水面上側面投影面積	(m²)	1 220	1 230



図―2　係留索および防舷材の配置状況

は **図―2** に示すように岸壁に係留されている．**図―2** は第2回目観測の係留状況であるが，係留索は合計 13 本とられており，そのうち5本がナイロン索，ビニロン索またはパイレン索である．それらは図中に太線で示している．その他の8本はワイヤー索と，ビニロン索またはパイレン索との合成索である．船舶と岸壁の間には古タイヤを束ねた防舷材が岸壁から吊下げられている．一個の防舷材は外径 1.05 m，内径 0.55 m のタイヤ 5 本に ϕ 5～30 cm の木材を通したものである．防舷材は図に示すように 3 m～5 m 間隔におかれている．この防舷材の特性は，別途試験を行って調べたところ，非線形な荷重変形特性を示し最大変形量が 35 cm，最大変形量に対する反力が 10 tf (98 kN) であった．

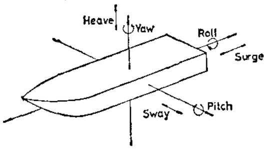
(2) 調査項目および調査方法

調査項目は，1) 波高，波周期，波向，2) 風速，風向，3) 潮位，4) 船舶の動揺量，5) 係留索および防舷材の配置および特性である．

波高は，岸壁前面 80 m の位置に設置した水圧式波高計で測定した．ただし，波向は目視観測とした．また，

* 正会員　運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室長
** 正会員　運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室
***　運輸省第五港湾建設局設計室

風向，風速は調査地点の東南約 1.8 km にあるコンテナ埠頭の管理棟屋上に設置した KD-110 型風向風速計を用いて観測した．潮位は，四日市港管理組合の検潮所の記録によった．



図—3　船舶の運動成分

船体運動の動揺成分は，**図—3** に示すサージ，スウェイ，ヒーブ，ロール，ピッチ，ヨウの 6 成分である．このうち，サージ，ヒーブは，船体に貼付した目盛をメモモーションカメラで撮影し，これを解析した．この場合，フィルムのコマ送り速度は 1 秒間に 2 コマである．スウェイとヨウは，容量 10 m のテープ式変位変換器を 2 個用いて測定した．ロールとピッチは，容量 0.5G の加速度計を用いた傾斜計で測定した．テープ式変位変換器と傾斜計は **図—2** に示した位置に設置した．それらの記録はデーターレコーダーに収録した．

3. 観 測 結 果

(1) 観測時の概況

昭和 55 年度には 2 度の観測を実施した．第 1 回目の観測は昭和 55 年 9 月 11 日に行った．この時は台風 13 号が九州を縦断している．台風 13 号は，9 月 10 日には沖縄の東海上 200 km に達し，時速 30 km/hr で北上し本土に接近したため，観測班は 9 月 10 日 14 時に観測地に行き，計測器を設置した．台風は，11 日早朝には九州に上陸することが確実になり，その後の台風の進路いかんによっては，東海地方へ影響を及ぼすおそれがあったので，11 日午前 4 時に第 2 次警戒体制をとり観測体制を整えることとした．台風 13 号は，午前 7 時 50 分大隅半島に上陸後速度を早め北上を続け，一たん豊後水道に出たのち本州に再上陸し，16 時日本海に抜けた．台風が九州を縦断するとともに観測地の風速は大きくなり，13 時に最大平均風速 31 m/s を記録した．計測は 17 時から開始し，20 時に終了した．この間に 20 分間ずつ計 6 回の計測を行った．台風の速度は上陸後かなり早くなったため観測体制を整えるのが間に合わず，計測を行ったときには風速はややおさまっていたが，それでも最大平均風速は 28 m/s であった．また，観測地点の最大有義波高は 0.75 m であった．

第 2 回目は昭和 56 年 2 月 22 日に行った．この時は低気圧が本州南海上を通過した．観測は 15 時から 18 時まで 20 分間ごと計 6 回行った．この時の最大風速は 19 m/s であった．ただし，風が岸壁から海側に向って吹いていたので，波高は小さかった．

観測時の有義波高，有義周期，平均風速，風向などはとりまとめて **表—2** に示した．なお，観測値の呼称は，第 1 回目観測については Y-80-1，第 2 回目観測については Y-80-2 とする．

表—2　観測時の風および波の記録

Case No.	Y-80-1				Y-80-2	
	Wave		Wind		Wind	
	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	$\overline{U}$	φ	$\overline{U}$	φ
	m	s	m/s	deg	m/s	deg
1	0.59	5.1	26	107	14	−118
2	0.65	5.0	26	107	17	−109
3	0.75	4.7	28	121	19	−104
4	0.49	5.1	21	112	16	−102
5	0.53	5.1	20	107	9	− 55
6	0.51	5.0	20	130	8	− 42

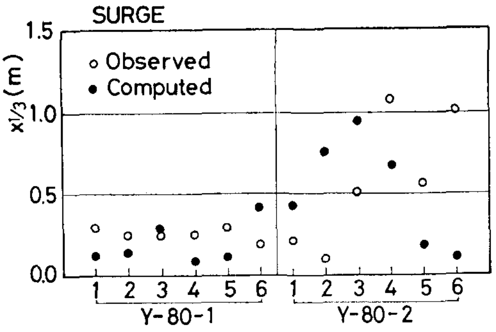
(*) 第 2 回観測では波は記録紙上での振幅が小さく読取不能であった．

(**) 風向は船首方向から吹いてくる場合を 0° として時計まわりに計った角度で示した．

(2) 船体動揺量

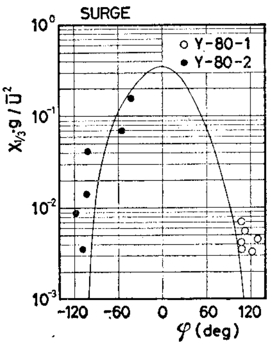
ここでは，船体動揺量の各成分ごとに，観測結果を示す．ただし，Y-80-1 系列についてはサージ，ヒーブ，ロールの記録しか得られていない．

a) サージ　**図—4** は各測定ごとのサージの動揺量



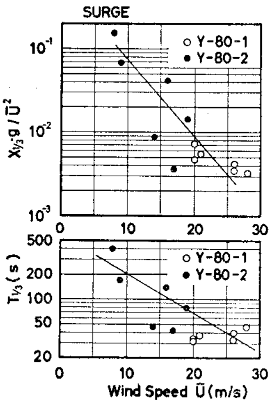
図—4　サージの動揺量

を示したものである．Y-80-1～6 の動揺量は有義値で 0.19～0.29 m でほぼ一定である．この間の波高は 0.49～0.75 m であるが，波高 0.75 m のときの動揺量は 0.26 m であって動揺量は必らずしも波高に比例してはいない．つぎに Y-80-2 系列についての動揺量は，Y-80-2-1～2 では 0.18 m または 0.10 m と小さいが，Y-80-2-3～6 ではかなり大きくなり，0.52～1.08 m にもなる．Y-80-2 のときには波高が小さく記録紙上では読取れなかったが，目視で 10 cm 程度であったことを考えると，この時の船体の運動に対しては風の影響が大きいものと思われる．なお，**図—4** には計算値の有義値をプロットしているが，これについてはあとで述べる．**図—5** には無次元化した動揺量を風向 (φ) に対してプロットした．



図—5　サージの動揺量と風向との関係

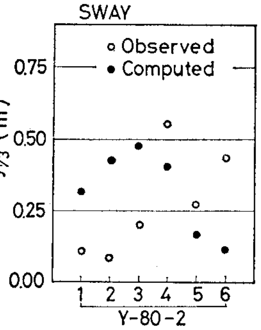
ただし，風向が負のものは岸壁側から風が吹いていることを示す．これをみると，風向が船首方向に近くなると動揺量が大きくなっていることが判る．Y-80-2-6 では，風向が −42° であり，風速が小さいのにもかかわらず大きな動揺をしている．また，Y-80-2-4 の動揺が大きいが，この時には，風向が −100° から −60° に向けて変化し始めている．動揺の傾向を図中に実線で示しているが，曲線の形は船軸方向の風抗力係数の形状とよく似ている．Y-80-2 系列の動揺量が Y-80-1 系列のものよりやや大きめなのは，風が岸壁側から吹いているために船体が岸壁と接触することが少なく，摩擦力などの影響がないためである．サージの動揺周期は，**図—6** に示すよ



図—6　風速とサージの動揺量および周期との関係

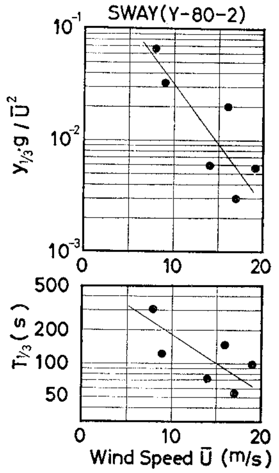
うに Y-80-1 系列では 32～47 s であまり差がないが，Y-80-2 系列ではかなり大きく，Y-80-2-1～2 を除いては 78～400 s である．とくに Y-80-2-6 の動揺周期が長い．**図—6** には，サージの無次元動揺量と動揺周期を風速に対しプロットしているが，この図は，船舶が風速の小さいときに長周期動揺を起し，しかも，そのときに大きな動揺量が観測されたことを示している．船舶が長周期運動を起す原因としては，長周期波の進入や風速の周期変動特性などが考えられる．この点については，いまのところ十分な検討を行ってはいないが，現地の検潮記録などを調べ長周期波の発生があったかどうかを調べるとともに，さらに現地観測や模型実験を行って検討を行いたい．

b)　スウェイ　**図—7** は Y-80-2 系列のスウェイの



図—7　スウェイの動揺量

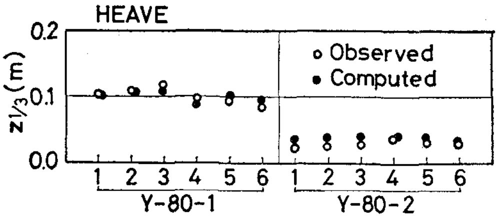
動揺量を示したものである．図には計算値の有義値もプロットしているが，これについてはあとで述べる．Y-80-2-1～2 では 9～12 cm 程度であるが，Y-80-2-3～6 では 21～55 cm とかなり大きい．この傾向はサージの動揺量の傾向とよく似ている．そこで，**図—8** に示すよう



図—8　風速とスウェイの動揺周期との関係

に，スウェイの無次元動揺量と動揺周期を風速に対してプロットしてみる．サージの場合と同様に風速が小さいときに長周期動揺を示し，しかも，そのときに動揺量が大きかったことが判る．

c)　ヒーブ　**図—9** はヒーブの動揺量を示したものである．図には計算値の有義値もプロットしている．ヒーブの動揺量は，Y-80-1 系列では 9～12 cm，Y-80-2 系列では 2～4 cm である．いずれの場合にも動揺量は



図—9 ヒーブの動揺量

小さい．ヒーブの動揺量の波形を見てみると，周期 10 s 程度の波が，周期 200～300 s 以上の振幅の小さい波の上に乗っていることが判る．このことは，長周期波が発生していたことを示唆するが，サージのところでも述べたように，現段階では十分な資料を得ていないので，今後さらに検討を加えたい．

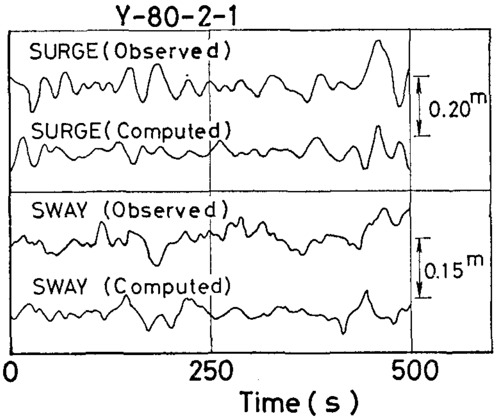
d) ロール　ロールの動揺量は，Y-80-1-5 で 0.16°，また，Y-80-2 系列では 0.08～0.10° であった．また，周期は Y-80-1-5 で 5.5 s，また，Y-80-2 系列では 6.9～20.5 s である．Y-80-2 系列については動揺量が小さいので読み取り精度上長周期成分を拾っていると思われる．いずれにしても今回の計測ではロールの動揺量が小さく，ロールによる舷側の水平方向移動量は 0.5 cm 程度である．

e) ピッチ　ピッチの動揺量は，Y-80-2 系列で 0.03°～0.07° であった．また，動揺周期は 23～31 s と計算されるが，これにも読み取り誤差が含まれ長周期側に計算されているものと思われる．

f) ヨウ　ヨウの動揺量は，Y-80-2 系列で 0.09～0.32° である．また，動揺周期は 21～71 s である．ただし，ヨウイングの波形をみるとスウェイと同じ周期成分の波が乗っており，解析上若干の問題がある．すなわち，動揺周期はやや長めに計算されているのではないかと思われる．Y80-2 系列の船体運動は防舷材の変形に影響を及ぼしていない．しかし，0.32° のヨウイングは船首尾で 34 cm の偏差になる．また，防舷材の位置では 6～7 cm のスウェイ方向の変動量となる．

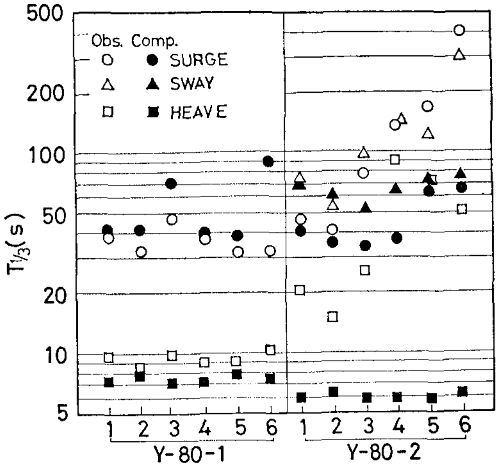
（3） 観測値と計算値との比較

観測時の条件で，船体の動揺シミュレーションを行った．動揺シミュレーションには港湾技術研究所のプログラムを用い，時系列解析を行った．ここでは，サージ，スウェイ，ヒーブについてその結果を示す．**図—10** は Y-80-2-1 の，サージとスウェイの観測値と計算値の波形を示したものである．計算値はダーベンポートのスペクトルを用いて発生させた変動風荷重に対する動揺の時系列の一部である．したがって，観測波形とは一対一に対応してはいない．そこで，観測値と計算値の有義値をとって比較してみる．それらの値はすでに示した**図—4**，**図—7** および **図—9** にプロットされている．**図—9** のヒーブの動揺量の観測値と計算値とは良く一致している．



図—10 サージおよびスウェイの観測波形と計算波形

また，**図—4** に示したサージの動揺量は Y-80-1 系列については観測値がやや大き目ではあるが比較的合っている．しかし，Y-80-2 系列についてはサージおよびスウェイともに観測値と計算値の差は大きい．先に述べたように Y-80-2 系列では船体が長周期動揺をしている．ここで示した計算値は，ほとんどの係留索が有効に働いていると仮定して求めたものであるが，係留索のごく一部だけが有効に働いていたと考えれば観測値と計算値はもう少し良く合うと思われる．この点についてはさらに検討をしてみたい．



図—11 動揺周期の観測値と計算値

図—11 は，サージ，スウェイ，ヒーブの動揺周期の観測値と計算値を示したものである．まず，ヒーブとサージについては Y-80-1 系列の観測値と計算値とは良く一致している．Y-80-2 系列については，Y-80-2-3～6 の観測値と計算値とが合わない．観測値の方がかなり大きい．スウェイについても同様である．この差は次の点に起因するものと思われる．

Y-80-1については船体動揺に及ぼす波の影響が大きく，また，風速が20 m/s前後であった．しかし，Y-80-2系列については風が支配的であり，しかも，風速が小さかったので風速の変動成分の周期が長かったことである．また，長周期波が発生していた可能性がある．

4. 結　論

（1） 波高が小さく，風が岸壁側から吹いて船体が防舷材にはほとんど接触しないで動揺しているとき，風速が小さいにもかかわらずサージおよびスウェイの動揺量が大きく，しかも，動揺周期が200 s以上にもなる長周期動揺が観測された．

（2） この長周期動揺の原因としては，風速の周期変動特性や長周期波の進入などが考えられる．

（3） 船舶がこのような長周期動揺をするときは，船舶の動揺特性に係留索の特性がかなり大きな影響を及ぼすので，この点についての留意が必要である．

（4） 観測値と計算値とは波と風が動揺に影響を及ぼすような条件では良く一致したが，風のみが影響を及ぼすような条件では合わない．

5. あとがき

昭和55年度には，当初，台風通過時に2度実船観測を行うことを計画した．台風13号は，はじめ伊勢湾を直撃するコースをとるものと予想されたが，九州に上陸後そのまま北上を続け，伊勢湾に及ぼす影響はあまり大きくなかった．そこで，冬期に観測を行ったが，このときには風の作用だけによる船舶の長周期動揺現象が観測された．これは筆者らが当初考えていなかった現象である．このことからしても，係岸船舶の動揺現象についてはまだまだ十分にその性質を把握したとはいえない．今後，さらに実船観測を行って十分に検討したいと思っている．なお，実船観測は運輸省第5港湾建設局が実施し，港湾技術研究所が解析を行った．また三重造船（株），ブリジストン（株）の協力をいただいた．ブリジストン（株）の方々は，この観測時にLED（発光ダイオード）を用いてサージとヒーブの観測を実施された．その記録は，筆者らが測定をした記録と全く一致した．LEDによる計測が有効であることが確認されたので，今後の船体動揺観測に活用できるものと思う．