

ラグーン内バース係留船の船体運動に関する実験的研究

久保 雅 義*・Volker Barthel**

1. 緒 言

外洋に面した海域では厳しい波浪条件を避けるために、船はラグーン内のバースに係留される。ラグーン内の波高は当然、沖波波高よりも小さいが、港口近くでの群波の碎波は長周期波を発生し、これが湾水振動により増幅され、係留船の長周期動揺を引き起こすことが考えられる。この長周期波と長周期船体動揺の関係はラグーン内での係留限界を決める重要な現象であるが、高次の波動現象と関係しており数値シミュレーションはかなり複雑になる。そこで本論では水理模型を用いて、ラグーン内係留船の船体運動及びこの場合の船体動揺の低減化について実験を行ったので、これらについて報告を行う。

2. 実験方法

浮体はわずかな係留条件の変化にも非常に敏感である。今回の実験においては、係留索への初期張力、非線形及びヒステリシス特性 (Wilson, 1967)、フェンダーの非線形及びヒステリシス特性 (上田, 1987)、不規則波条件の正確な再現を考慮した。特に波の不規則性に伴って生じるサブハーモニック波 (Barthel et al. 1983) は、容易に長周期船体動揺を引き起こすことが出来るのでサブハーモニック波を含めた正確な不規則波の発生は特に重要である。不規則波列の継続時間は20分とした。

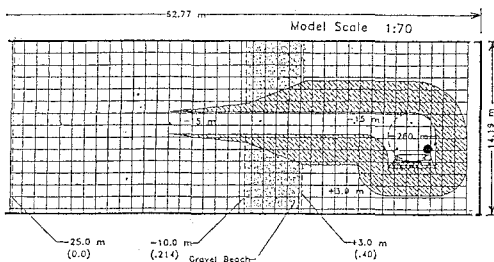


図-1 模型実験で使したラグーンと係留船の位置

図-1 は使用した水槽におけるラグーンと係留船の配置を示している。ラグーンの中央には直径 280 m の船回り場があり、これと港口を結ぶ航路が 15 m の一定水深である。これ以外の水域は図に示すように緩やかな勾配で浅くすることによりラグーン地形を再現している。実験のスケールは 1:70 で、全長 195 m、幅 28.6 m、満載喫水 11.34 m のバルクキャリアーを図-1 に示すラグーンに係留して実験を行った。係留船は出船係留されており、詳細な係留配置を図-2 に示す。係留索は合計14本であるが同一方向に2本の係留索が取られる場合には図示されているように1つの係留索シミュレーターにより特性を与えている。図-3 は係留索シミュレーター (Barthel et al., 1990) を示す。係留索の非線形性はスプリングの強さとスプリングと係留索とのなす角により調整できる。実験に先立ち各係留索に1本当たり10トンの初期張力を加えている。係留索のヒステリシス特性を

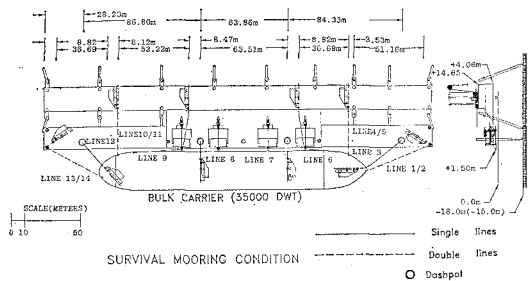


図-2 係留船の係留索、フェンダー及びダッシュポット配置

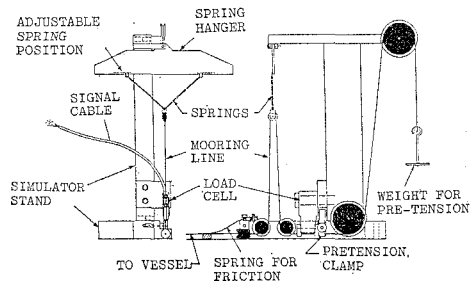


図-3 係留索シミュレーター

* 正会員 工博 神戸商船大学教授 輸送システム工学講座

** Dr.-Eng. Hydraulics Laboratory National Research Council of Canada

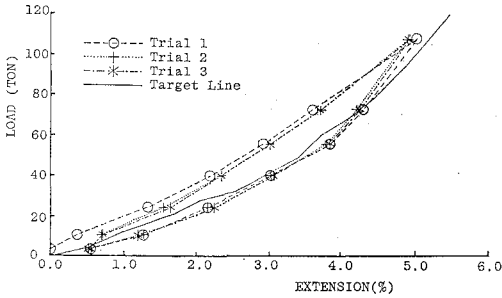


図-4 堅い係留索 (44φ のワイヤーの先端に 10 m の化鐵編索を tail rope として付けたもの) の特性曲線

実現するために係留索をスプリングにより押さえこれにより摩擦を発生させ、結果的にヒステリシス特性を実現している。

図-4 は LINE 1/2 における堅い係留索の変位荷重特性を示す。LINE 3, 7, 8, 12 は一般の係留索としてもダッシュポット係留索としても使えるようになっている。船体動揺の低減のためにダッシュポットを内蔵し、実用性を考慮して引きの時にのみ働く係留索 (以下ダッシュポット係留索と呼ぶ) を用いた。このため図-5 に示すように引きの時はピストンとシリンダーとの間に隙間を設け、これによりピストンの摩擦を防ぐと共に、流体がこの隙間を通過することによる粘性抵抗により減衰力を発生させている。戻り行程では次の引きに素早く追従するために 10 トンの下向き荷重と弁が開くことにより戻り易くなっている。同じく図中のグラフはピストンの移動速度と荷重との関係を示したものである。ピストンとシリンダーの隙間での流れを一般クウェット流 (Schlichting, 1968) と仮定すれば減衰係数は次式で与えられる。

$$k = \frac{A_p \cdot \Delta P}{U} = \frac{12\mu l (A_c - \pi D_c h_0) \left(A_c - \frac{\pi D_c h_0}{2} \right)}{\pi D_c h_0^3}$$

ここに A_p : ピストンの面積, ΔP : ピストン上下面での圧力差, U : ピストン移動速度, μ : 分子粘性係数, l : ピストン厚み, A_c : シリンダー面積, D_c : シリンダー直径, h_0 : ピストンとシリンダーとの隙間である。

実験では 20 CST のシリコンオイルを用いたが、この

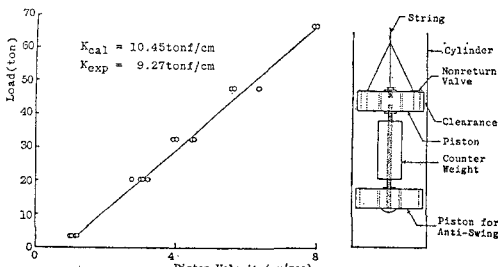


図-5 ダッシュポットの特性 (実験では 20 cst (センチストークス) のシリコン油を使用)

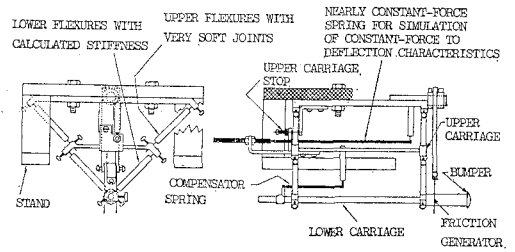


図-6 定反力フェンダーシミュレーター

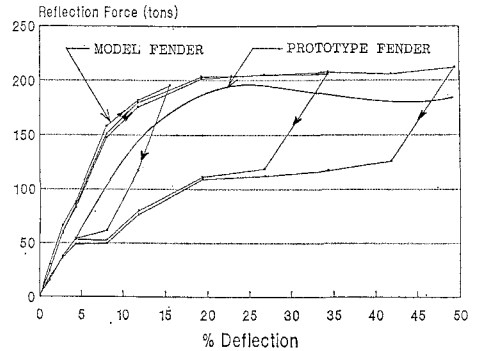


図-7 フェンダーの変位・荷重特性

時、実験と上式から得られた減衰係数は略一致しており上述の近似が有効であることを示している。係留索力は索シミュレーターに組み込まれたロードセルで計測されている。

図-6 は定反力フェンダーシミュレーター (Barthel et al., 1990) を示す。これは上下 2 つのスプリングより成り、下は定反力への立ち上げ、上は定反力を発生する。フェンダーへのヒステリシス特性のために LOWER CARRIAGE の先端部を 2 本の棒で挟み、抵抗を持たせている。

図-7 は目標としたフェンダーの変位反力特性と実験用フェンダーの特性を示している。

動揺は光学的追跡装置 (SELSHOT) により観測されている。

3. 実験結果

(1) 船体運動に及ぼす係留システムの影響

係留システムの違いが船体運動に及ぼす影響を調べるために表-1 に示すように係留索の条件を変えて実験を行った。また実験で得られたデータを整理するに当り係留索張力は表-2 の係留索強度、船体運動は表-3 の安全荷役のための船体運動限界値、フェンダー変位は限界変位 55% により無次元化して % にて表示している。

図-8 は柔らかい係留索を用いた場合の実験結果を示す。横軸は沖波有義波高である。これより長周期動揺、従って係留索力およびフェンダー変位は沖波入射波高の

表一 係留索の種類

Mooring system	Mooring Line Number							
	1/2	3	4/5	6	9	10/11	12	13/14
L-SOFT	B. R	B. R	B. R	B. R	B. R	B. R	B. R	B. R
L-SOFTDP	B. R	B. R, D. P	B. R	B. R	B. R	B. R	B. R, D. P	B. R
L2-SOFTDP	B. R	S. W, D. P	B. R	B. R	B. R	B. R	S. W, D. P	B. R
L3-SOFTDP	B. R	S. W, D. P	B. R	B. R	B. R	B. R	S. W, D. P	B. R
L-HARD	S. W	S. W	S. W	S. W	S. W	S. W	S. W	S. W
L3-HARDDP	S. W	S. W, D. P	S. W	S. W	S. W	S. W	S. W, D. P	S. W

Remark : B. R means a braid rope of 64 ϕ , D. P means a dash-pot mooring line and S. W means a steel wire rope of 44 ϕ with 10m double nylon tail rope.

表二 係留索強度 (ton)

Mooring system	Mooring Line Number							
	1/2	3	4/5	6	9	10/11	12	13/14
L-SOFT	180	90	180	90	90	180	90	180
L-SOFTDP	180	90	180	90	90	180	90	180
L2-SOFTDP	180	124	180	90	90	180	124	180
L3-SOFTDP	180	124	180	90	90	180	124	180
L-HARD	248	124	248	124	124	248	124	248
L3-HARDDP	248	124	248	124	124	248	124	248

高次のべき乗に比例する事が分かる。

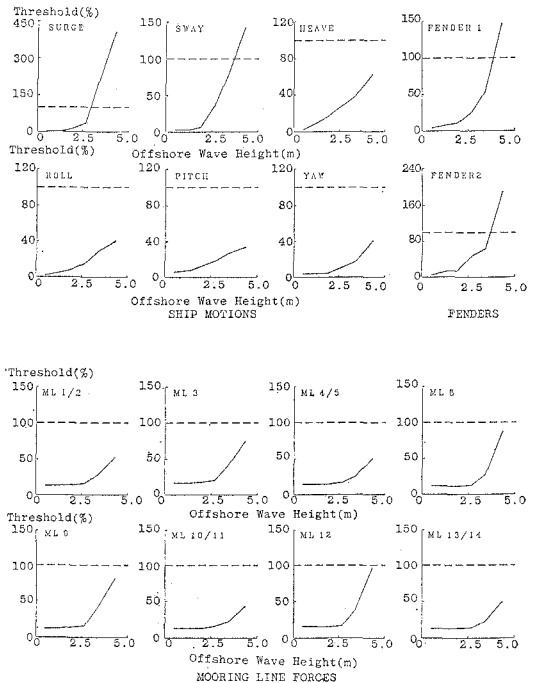
図一は沖波有義波高と船体運動の関係を両対数グラフに表したもので、これより船体運動は、波高が小さいときは波高の一乗に、波高が大きくなると波高の二乗もしくは三乗に比例している。

図一は沖波波高の増大に伴う、沖と港内での波のスペクトル形状の変化を示している。図中 HMO はスペクトルの 0 次モーメントより求めた有義波高、TP はピーク周期である。沖波波高が小さい時は通常の波が卓越するが波高が大きくなるとサブハーモニック波の方が卓越することが分かる。これは波高が大きくなるにつれて非線形現象が卓越することに対応していると考えられる。沖波有義波高と港内での有義波高を両対数グラフに表すと図一となる。これより港内の有義波高は沖波波高が小さい時は波高の一乗に、波高が大きくなると波高の二乗に、比例している事が読み取れ、ラグーン内での船体運動、従って稼働限界は沖波波高が大きくなるに従い、サブハーモニック波に支配されているといえよう。

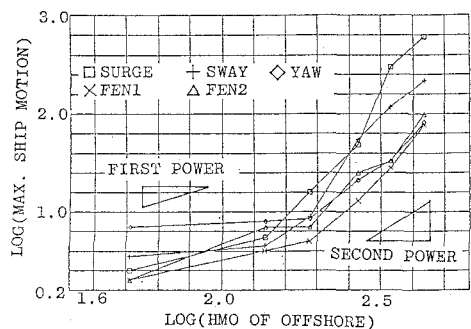
表三 安全荷役のための船体運動の限界値

Mode	By Per Bruun	By Authors
Surge	$\pm 1.5m$	$\pm 1.5m$
Sway	$\pm 0.5m$	$\pm 1.5m$
Heave	$\pm 0.5m$	$\pm 0.5m$
Roll	$\pm 4^\circ$	$\pm 4^\circ$
Pitch	/	$\pm 1^\circ$
Yaw	$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$

図一は堅い係留索を用いた場合の実験結果を示す。これを図一と比較すると船体運動、係留索力共に小さくなっており、SOFT-SYSTEM においては SURGE, SWAY, FENDER 1, 2 で限界値を越えていたのがではにおいて限界値をこえるのみであり、これより HARD-SYSTEM により係留条件を改善できることが明らかである。図一、図一 およびここでは記載出来なかった他のシステムの実験結果より各々の限界値を越える時の限界波高を求めると表一が得られる。L-SOFTDP では L-SOFT で用いた ML3 と ML12 の柔らかい係留索の先端にダンシュポットを連結したが係留索にかかる力は索の伸びに吸収されてダンシュポットの機能は発揮出来ずそのために代えて限界波高が小さくなっている。そこで L12-



図一 柔らかい係留索を用いた場合の実験結果



図二 L-SOFT システムでの沖波波高と船体運動の関係

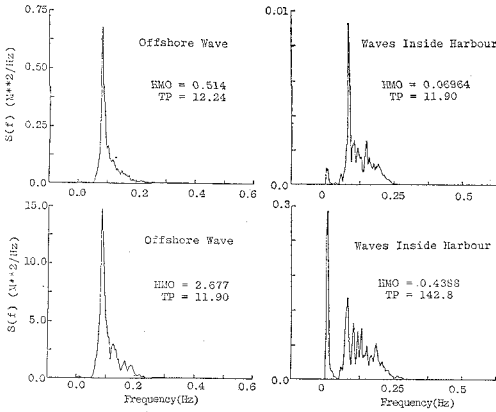


図-10 沖波波高の増大に伴う、沖と港内での波のスペクトル変化の形状

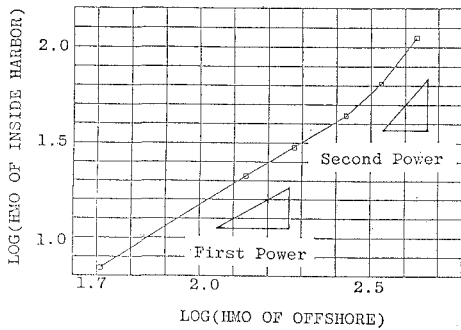


図-11 沖波波高と港内波高の関係

SOFT-DP と L3-SOFTDP ではダッシュボット用の係留索として堅い係留索を用い、ダッシュボットを効き易くしその上で粘性係数を上げた実験を行うとその有効性が現れて限界波高が大きくなるのが分かる。L3-HARDDP では ML3 と ML12 の係留索先端にダッシュボットを着けたものであるが結果的にはフェンダーに現れた限界波高を大きくしており、これでもダッシュボットが有効であることが分かる。

(2) ラグーン内係留船体運動の周波数特性

図-13は沖波有義波高が 2.6 m に於ける L-SOFT, L-HARD 及び L3-HARDDP の船体運動の周波数特性を示す。ラグーンではサブハーモニック波が卓越するために船体運動も長周期側にピークを持っている。今回のロールの自由振動実験から得られる固有周期は約 18 sec であるが、卓越周期は 107 sec と長周期の横揺れをして

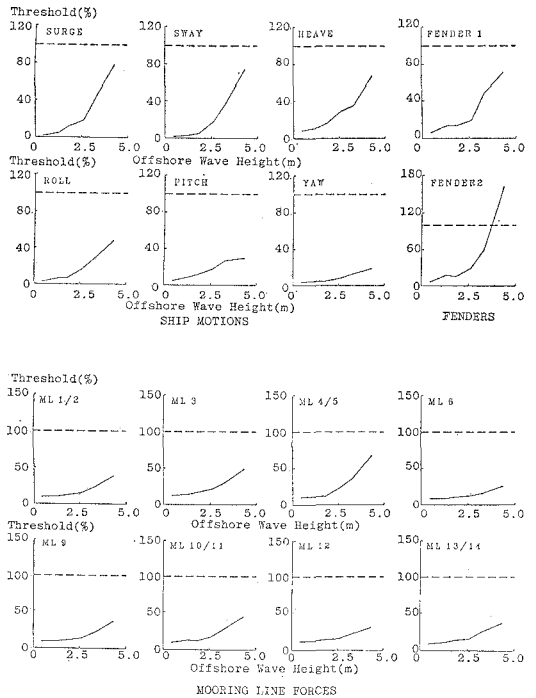


図-12 堅い係留索を用いた場合の実験結果

いることが分かる。図より長周期運動としてのサージとスウェーは SOFT-SYSTEM を HARD-SYSTEM へ替えることにより船体運動がかなり小さくなっている。サージとスウェーの自由振動実験から得られる固有周期を表-5 に示す。ダッシュボットを用いた場合には減衰が早く固有周期が読み取り難く、そのために記載を省略している。図-10 より港内の短周期波のピーク周期は 12 秒、サブハーモニック波のピーク周期は 142 秒である。一方、表-5 より係留船の船体運動の固有周期を上記 2 つのピークの谷間に於て、サブハーモニック波の周期よ

表-4 ラグーン内における船舶係留に対する限界波高

Mooring system	Offshore Wave Height Limit					Remark
	First	Second	Third	Forth	Fifth	
L SOFT	2.97m surge	3.6m sway	3.67m fender2	3.83m fender1		soft line with hysteresis
L-SOFTDP	2.89m surge	3.31m fender2	3.83m sway	3.91m fender1	4.22m ML12	soft line with hysteresis suege dash-pots with 5cst
L2-SOFTDP	2.89m surge	3.36m fender2	3.75m sway	3.83m fender1	4.06m ML12	soft line with hysteresis suege dash-pots with 5cst
L3-SOFTDP	2.97m surge	3.52m fender2	3.59m ML12	3.83m sway	3.91m fender1	soft line with hysteresis suege dash-pots with 20cst
L-HARD	3.67m fender2					hard line with hysteresis
L3-HARDDP	3.7m fender2					hard line with hysteresis suege dash-pots with 20cst

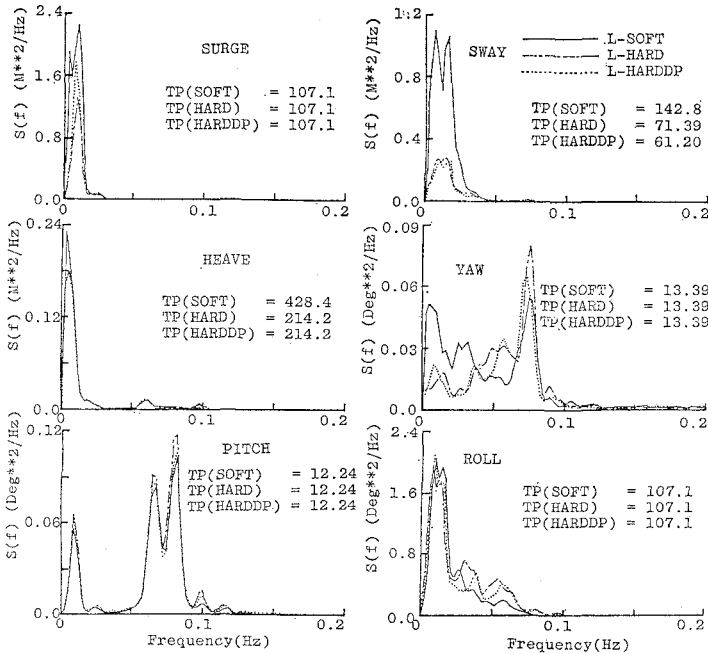


図-13 L-SOFT, L-HARD, L3-HARDDP の係留システムにおいて沖波波高 2.6 m の場合のラグーン内係留船体運動の周波数特性

表-5 船体運動の固有周期

Mooring system	SURGE		SWAY	
	SEC	Hz	SEC	Hz
L-SOFT	88	0.011	62	0.016
L-SOFTDP			62	0.016
L-HARD	42	0.024	53	0.019
L3-HARDDP	39	0.026	53	0.019

3. 結 語

ラグーン内係留船の模型実験を行い幾つかの興味ある実験結果を得ることが出来た。これらを要約すれば次のようになる。

(1) 入射波高が大きくなるとサブハーモニック波が

大きくなり、従って船体運動も長周期領域で卓越する。

(2) サージ、スウェーそしてヨーと言った長周期船体運動、従って係留索力は沖波入射波高の高次のべき乗に比例する。これよりラグーン内での船体運動はサブハーモニック波に支配されており、この波の正確な議論無しにはラグーン内での船体運動さらには荷役限界や係留限界といった稼働限界は語れないことを示している。

(3) 長周期運動の固有周期は堅いバネ定数の係留索の使用により比較的容易に変えることが出来る。これらの固有周期を通常の波とサブハーモニック波の周期の谷間で、サブハーモニック波の周期より遠ざける様にすれば長周期船体運動はかなり低減出来る。

(4) 長周期船体運動を抑える第一義的方法是固有周期の変更であるが第二義的にはダッシュボット係留索が効

り遠ざける様にすれば (L-SOFT から L-HARD へ替えることに対応する) 長周期船体運動はかなり低減化出来ることが分かる。

果的である。

最後に本研究は著者の一人久保が文部省の在外研究制度によりカナダの国立研究所に於て行った研究成果の一部で、実験に当たり多くの方にお世話になった。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- Barthel, V. et al. (1990): Simulation of a Moored Ship in Waves, Report of National Research Council of Canada.
- Schlichting, H. (1968): Boundary-Layer Theory, 6th Edition, P. 79, McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- Ueda, S. (1987): Motions of Moored Ships and Their Effect on Wharf Operation Efficiency, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol. 26, No. 5.
- Wilson, B. W. (1967): Elastic Characteristics of Moorings, J. of the Waterways and Harbors Division, Proceedings of A.S.C.E.