

港内係留船の動揺とその制御

久保 雅 義

1. 緒 言

港湾は貿易を支える拠点であり、安全な荷役を行える場所及び安全な泊地を提供することを目的としている。とくに輸送効率の向上のために種々の荷役装置が考えられているが、荷役の効率化を達成する上で、最大の neck point となるのが、船舶が動揺することである。また船舶の動揺のため船内作業員の災害率が高いことも指摘されている。港湾荷役が鉱業や林業について、災害率の高い産業であることは、図-1に示す労働災害統計で指摘されているが¹⁾、この理由の一つとして船舶の動揺に伴う足場の不安定なことが挙げられている²⁾。また図-1にお

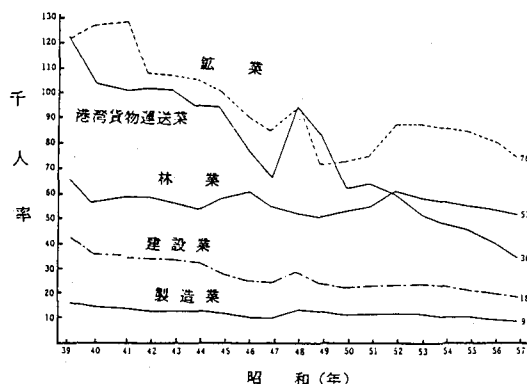


図-1 主要産業別労働災害千人率の推移 (労働省資料より)

いて、港湾荷役の労働災害率が年とともに減少しているのは、昭和40年代に始まったコンテナ輸送による荷役の機械化と関連しているものと考えられる。高度経済成長期には急増した取扱い貨物量に対応して各地に新港が建設されたが、これらの港は外洋に面した所が多かったため、うねりのために荷役に支障をきたすといったことも生じてきた。従来から、荷役が可能なための港内静穏度は50cmと言われているが、波の周期と船舶の動揺周期が近くなると同調して、50cm以下でも荷役中断が生じる³⁾ことより、静穏度も波高

表-1 係留中の船舶の動揺の許容範囲

船 種	サージング m	スウェーイング m	ヒービング m	ローリング 度	ヨウイング 度
タ ン カ ー	± 2.3	± 1 (a way from berth)	± 0.5	± 4	± 3
鉱 石 船 (クラムシェル・クレーン)	± 1.5	± 0.5	± 0.5	± 4	± 2
穀 物 船 (コンベアーまたはホース)	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 1	± 1
コ ン テ ナ 船 (通常タイプ)	± 0.5	± 0.3	± 0.3	± 3	± 2
コ ン テ ナ 船 (船測 ロー/ロー)	± 0.2	± 0.2	± 0.1	nil	nil
コ ン テ ナ 船 (前・後方 ロー/ロー)	± 0.1	nil	± 0.1	nil	nil
貨 物 船	± 1	± 0.5	± 0.5	± 3	± 2
L N G 船	± 0.1	± 0.1	nil	nil	nil

で定義されるよりも船体運動で定義されるべきであることが明らかになった。表－１は、荷役の種類と荷役可能なための船体動揺の閾値を示している⁴⁾。これをみると、在来船からコンテナ船へと代わることに
より、船体動揺は益々制限されることが分る。

このように、船内荷役作業の安全の観点から、また荷役効率の向上の面からも、船体動揺をより小さく
することが要求されていることが分る。港内係留船の動揺の外力としての港内侵入波の減少を計るため、
防波堤の建設および延長や空気防波堤・浮防波堤の研究開発が行われている。このような防波堤により港
の静穏化を図り、それにより係留や荷役の安全を確保するという考え方こそ、我が国の港湾において採用
されている主流をなす考え方であり、港湾整備事業ももっぱら防波堤延長に力が注がれているようである。

このような外力の低減化が船体動揺を制御する第１の方法とすれば、第２の方法として低反射岸壁等に
より、浮体回りの波動場を変えることによる船体動揺の制御が考えられる。最後に第３の方法として係留
システムを振動論の観点から取り上げて、その動揺の低減化を図ることが考えられる。

そこで本論では、以上の三つの観点より船体動揺の制御を論じることとする。

2. 港内係留船の動揺計算について

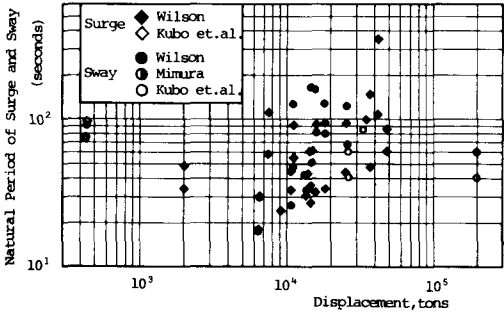
(1) 船体運動の周期と港内波周期について

船体運動は船自身が復原力を持ち 10 秒前後に固有周期を有する Roll , Pitch, Heave と、係留索によ
り復原力を生じ、1 分前後に固有周期を有する Surge, Sway, Yaw の 2 種類に大別できる。今これら
のうち短い方の固有周期はそれぞれ次式にて近似的に与えられる⁵⁾。

$$T_R = \frac{0.8 B}{\sqrt{GM}} , \quad T_P = 0.5 \sqrt{L} , \quad T_H = 2.7 \sqrt{d} \dots\dots\dots (1)$$

ここに添字 R, P, H は Roll , Pitch, Heave を、*B* は船幅 (m)、*GM* はメタセンタ高さ (m)、*L*
は船長 (m)、*d* は吃水 (m) を表わす。例として、5000 G. T. の船の諸元 *B* = 16 m、*GM* = 1.0 m
L = 130 m、*d* = 7 m を式 (1) へ代入すると、*T_R* = 12.8 sec、*T_P* = 5.7 sec、*T_H* = 7.1 sec となっ
て風浪の周期に近いことが分る。Surge, Sway, Yaw は係留索により復原力を与えられるので、係留
索強度、船の重量により固有周期は変化するが、実際
の船についてこれらの固有周期を調べると、図－２に
示すように 1 分前後になることが分る⁶⁾。港内でこの
ような長周期波が共振するのはスリップである。今ス
リップの長さを *L_s*、水深を *h*、*g* を重力加速度とす
れば、スリップの第 1 次モードの共振周期 *T_{SL}* は次
式にて近似される。

$$T_{SL} = \frac{4 L_s}{\sqrt{gh}} \dots\dots\dots (2)$$



図－２ 係留中の船舶の Surge および Sway の固有周期と排出量の関係

$h = 10 \text{ m}$, $L_s = 200 \text{ m}$ とすると, $T_{SL} \doteq 80 \text{ sec}$ となる。

以上より, 港内係留船の動揺を考えていく上で対象とすべき波は10秒前後の波浪と1分前後の長周期波であることが分る。従来, 長周期波が議論される場合, 20分程度の周期のものが取り上げられることが多いが, 上述の観点に立てば, 1分前後の周期をもつ長周期波に関する観測資料の整備が望まれることが分る。

(2) 船体運動について

これに関する詳細は, 合田の文献⁷⁾に紹介されているので概略説明にとどめる。

時間領域での浮体の運動方程式とその係数は次式で示される。⁸⁾

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^6 \{ M_{ij} + A_{ij}(\infty) \} \ddot{x}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t \dot{x}_i(\tau) L_{ij}(t-\tau) d\tau \\ + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) x_i(t) = F_j \quad j = 1, \dots, 6 \\ L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{ij}(w) \cos wt dw \\ A_{ij}(\infty) = A_{ij}(w) + \frac{1}{w} \int_0^\infty L_{ij} \sin wt dt \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに M_{ij} は浮体の質量及び慣性モーメント, $A_{ij}(\infty)$ は不変付加質量及び不変付加慣性モーメント, $L_{ij}(t)$ は遅延関数, C_{ij} は復原力係数, G_{ij} は係留力係数, F_{ij} は外力, t は時間, τ は積分変数, $A_{ij}(w)$ は角周波数 w に対応した付加質量及び付加慣性モーメント, $B_{ij}(w)$ は w に対応した減衰係数である。 i と j は船体運動のモードであり, 1: sway, 2: Surge, 3: Heave, 4: Pitch, 5: Roll, 6: Yawを示す。添字 ij は j モードの運動により i モードの運動に生じる係数であることを示す。

以上より, 付加質量 $A_{ij}(w)$, 減衰係数 $B_{ij}(w)$ および波浪強制力 F_j が全周波数領域にわたって求まれば, 運動は求められることが分る。そこで次に港内係留船の A_{ij} , B_{ij} および F_i の求め方について述べる。

(3) 小規模港での係留船の流体力係数の算出について

小規模港湾の場合には, 港内波の変形と流体力係数, 波浪強制力及び船体運動の定常解をポテンシャル論を用いて同時に解くことも可能である⁹⁾。図-3にこの状況を模式的に示している。領域Ⅰでの速度ポテンシャルを Φ_1 , 領域Ⅱでの速度ポテンシャルを Φ_2 , 船底と海底との間の領域の速度ポテンシャルを Φ_3 とすれば, 港口での境界条件と浮体側面での境界条件, すなわち, これらの境界での質量流速とエネルギー流速の連続より, 各速度ポテンシャルの未知数が決定可能

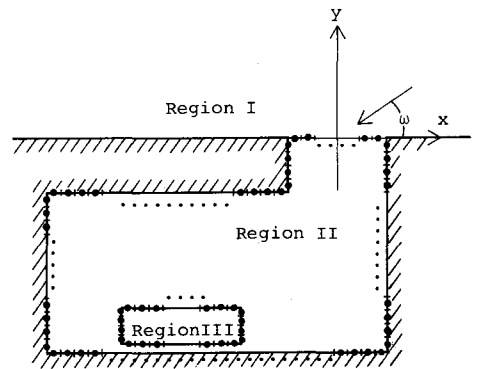


図-3 小規模港での係留船の動揺解析
(黒丸は計算点を示す)

となり、これより船体運動を解くのに必要な係数が決められる。計算の詳細は他の文献^{7), 9)}に譲ることにする。

(4) 大規模港湾での係留船の流体力係数の算定について

以上のように、船の周囲並びに港の岸壁に計算点を設定すれば流体力係数は算定可能であるが、大規模港湾では計算点が多くなり計算の費用がかさむことになる。港の規模が大きくなった場合には係留岸壁の対岸の影響がほとんど無くなるので、このような場合には係留岸壁のみの影響を考えればよいと考えられる。図-4は、これ以外にも港の中でよく生じる三つの例を示している。このような場合には、図にも示しているように鏡像を設定することにより岸壁上に計算点を設定することなく流体力係数、波浪強制力及び船体運動の定常解が求められる^{9), 10)}。図-5は、係留岸壁のみを考慮した(a)の場合の船体運動の計算例である。

(5) 大規模港湾内の係留船の動揺について

以上で定常解が求まるので、不規則波による船体運動を求めるには、対称係留の場合にはこの不規則波に対する定常解の線型重ね合わせを行うことになる。ところで、この場合、係留岸壁への侵入波の方向スペクトルが必要となる。

従来、港内静穏度は波高で評価されていたため、港内波も港内での波高分布を求めることに重点が置かれてい

た¹¹⁾。そのため、港内の係留バースでの入射波の方向スペクトルを求める研究はあまり行われていないのが実情と考えられる。表-2は、従来の港内波の計算手法の代表例を要約したものである。このうち厳密解手法は神戸港のような大型港湾では計算容量、計算時間、および計算費用等がかかりすぎて、実質的には計算が不可能となるため近似解手法を採らざるを得ないと考えられる。そこで次に、高山の方法を改良して、港内のバースへの侵入波の方向スペクトルを求めてみる¹⁵⁾。

図-6は、港湾の配置図であるが、波の回折および反射を計算するに当たって、モデル1, 2, 3に分離する。港内に侵入した波は港内の防波堤や隅角部で2次回折を行うが、この計算手法をモデル1と呼ぶ。港口は主・副防波堤で構成されており、モデル1の組み合わせと考えることができるが、これをモデル2とする。岸壁や防波堤を島堤とみなした計算手法をモデル3と呼ぶことにする。

一例として、モデル2の主・副防波堤の場合は図-7に示すように、防波堤の組み合わせ方と侵入波の方

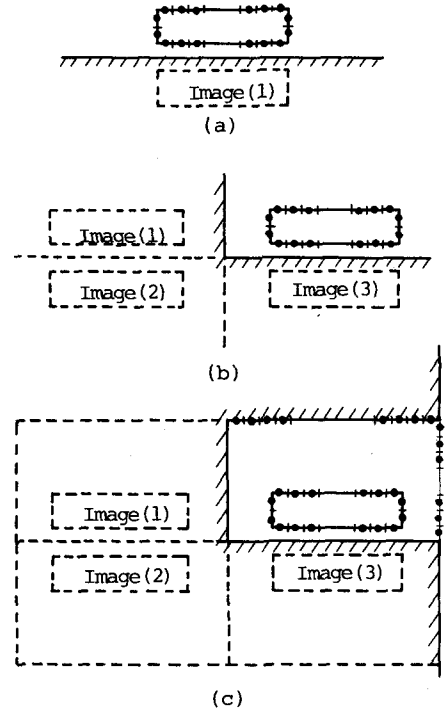


図-4 岸壁による鏡像について
(黒丸は計算点)

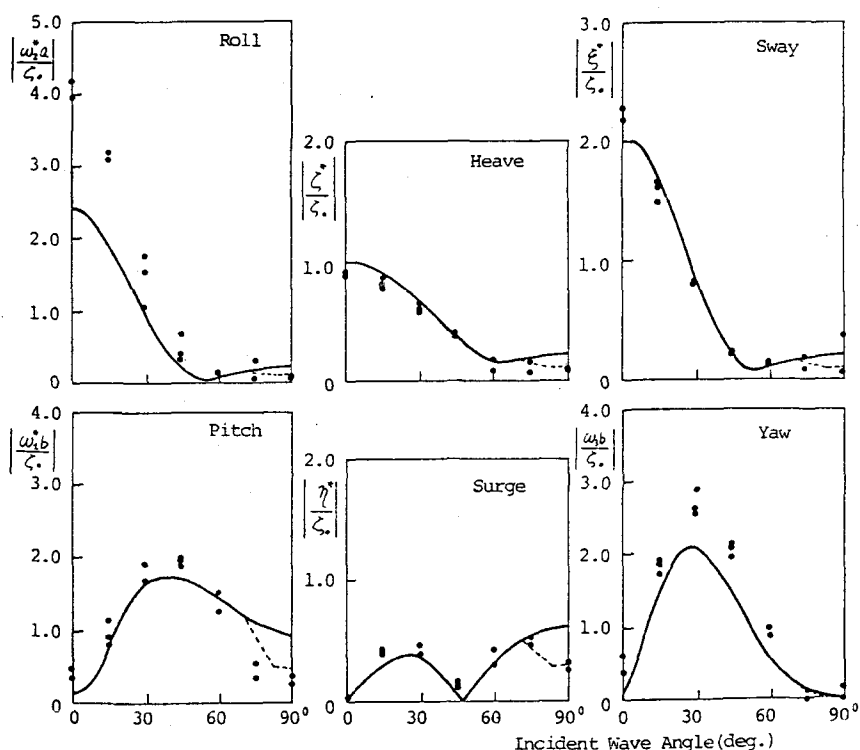


図-5 波周期 1.4 秒で、波の入射角が変化した場合の浮体の応答特性

表-2 従来の港内波計算手法の要約

港内波高計算手法	利 点	欠 点
厳密解手法	精 度 良 好	計算容量, 時間, 費用
数値波動解析 ¹²⁾	非定常解, 水深変化	大型港湾では計算不可能
Green 関数法 ¹³⁾	定常解, 水深変化	規則波
近似解手法	計算容量, 時間, 費用不規則波	若干精度低下
桑島の方法 ¹⁴⁾	方向スペクトル 水深変化	港内形状 港内反射
高山の方法 ¹¹⁾	港口形状 港内反射 2次回折	一定水深 波高表示

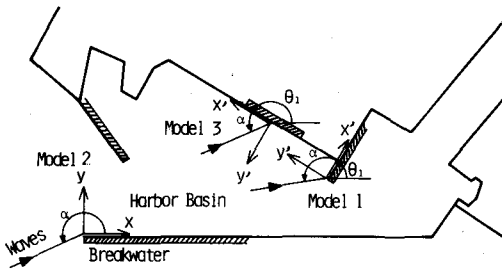


図-6 港内波計算モデルの概念図

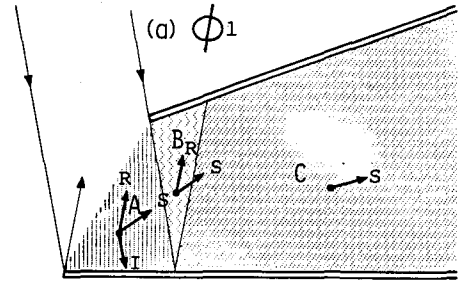


図-7 防波堤によって生じる速度ポテンシャル

向により種々の組み合わせが考えられる。またこの場合には反復反射も生じるので、これらも考慮すると多くの速度ポテンシャル ϕ が生じる。この場合、入射波（図中 I にて示す）、反射波（図中 R にて示す）、散乱波（図中 S にて示す）が生じるが、反射波の方向は幾何光学的に、散乱波の方向は防波堤先端より円筒状に拡がるものとする。

以上より、図-8の港の中のバースでの入射波の方向スペクトルを求めるには、図のような計算点を設定し、計算点相互間の波の授受を行うことになる。図において、ステップ1の港口から計算点1~10へ波はモデル2を、計算点7と16はモデル1を、他の計算点はモデル3を用いて波の計算を行う。今図9(a)のような方向スペクトルをもつ波が港口から入射されると、バースへの入射波の方向スペクトルは図9(b)となる。

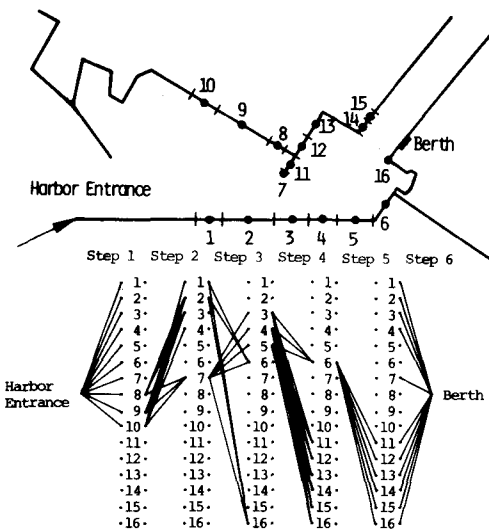


図-8 港内任意バースにおける波の方向スペクトル計算手順例

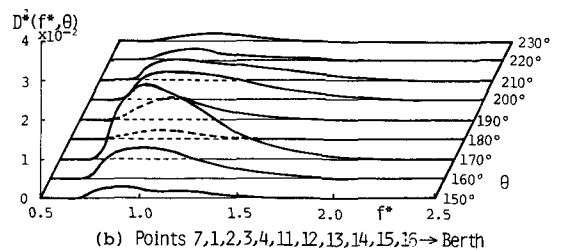
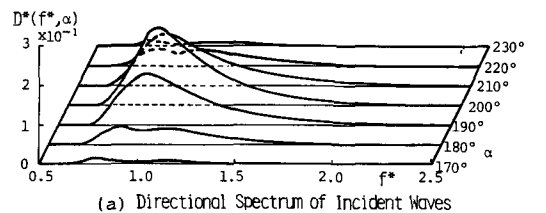


図-9 港口からの入射波の方向スペクトルと射バースへの入射波の方向スペクトル

今、船体運動のスペクトルを $\Phi(f, \alpha)$ 、係留岸壁への入射波の方向スペクトルを $S(f, \alpha)$ 、運動の応答関数を $H(f, \alpha)$ とおけば、これらは次式で関係づけられる¹⁶⁾。

$$\Phi(f, \alpha) = |H(f, \alpha - \theta_1)|^2 S(f, \alpha) \dots\dots\dots (4)$$

ここに θ_1 は、図 10 に示すように X 軸からみた岸壁及び船首尾船の方向であり、 H は例えば図 - 5 にて与えられる。上記のスペクトル Φ および S は $H_{\frac{1}{3}}^2 T_{\frac{1}{3}}$ で、周波数 f は $T_{\frac{1}{3}}$ で無次元化し、無次元化の記号として * を付し、さらに方向 α について積分すれば無次元周波数スペクトルが与えられる。

$$\Phi^*(f^*) = \int_0^{2\pi} |H(f^*, \alpha - \theta_1)|^2 S^*(f^*, \alpha) d\alpha \dots\dots\dots (5)$$

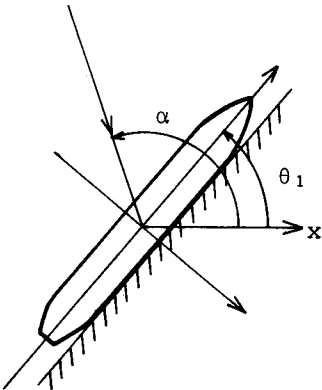


図 - 10 Berth 係留中の船の座標系の設定

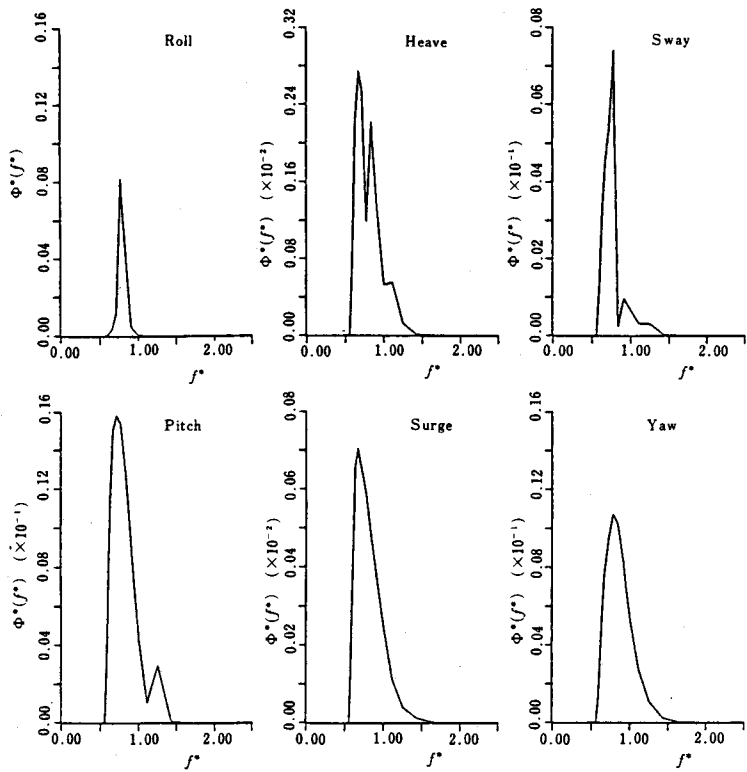


図 - 11 港内係留船の船体運動計算例

先の図-5の応答関数と図-9 (b)の入射波の方向スペクトルを式(4)に従って線形重ね合わせを行い、更に式(5)に従って積分すれば、図-11に示すように港内係留船の動揺の無次元周波数スペクトルが得られる。

3. 係留船の動揺の制御について

(1) 短周期船体動揺の制御について

(a) 防波堤配置計画よりみた動揺制御

我が国の港内静穏度の水理実験では、港内の波高分布を測ることに重点が置かれているが、ヨーロッパでは防波堤の延長計画を立案するに当たって模型港の係留位置での船体運動を比較する方法が取られている。この場合、模型船の動揺測定精度を確保するには模型船の長さは最低でも1～2mとなり、これに見合った港湾模型とするためにはかなりの広さの水槽が必要となる。模型船を含めたこのような水理模型実験による船体動揺の測定とは別に、先の2-(5)で提案した方法によっても船体動揺は計算可能である。

今1例として図-12の港の防波堤延長計画に際して、港内の④、⑧、⑨、⑩の各バースでの船体動揺を計算して如何なる延長計画が最良であるかを論じてみよう¹⁷⁾。

表-3は、図-12の防波堤配置における各種延長計画を示す。表中の α 、 Δl 及び $\Delta l'$ は、図-12中の記号と

表-3 延長計画案

改良計画案	α	Δl	$\Delta l'$
I	145°	100 m	0
II	145°	150 m	0
III	145°	00 m	0
IV	155°	150 m	0
V	135°	150 m	0
VI	145°	150 m	50

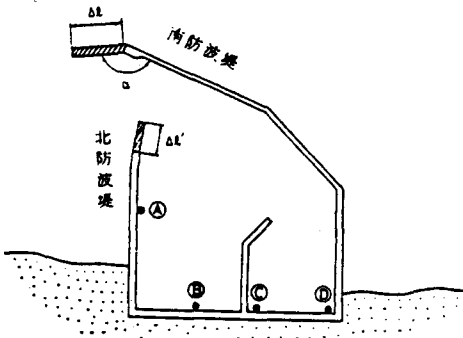


図-12 既設港湾の防波堤延長による動揺制御

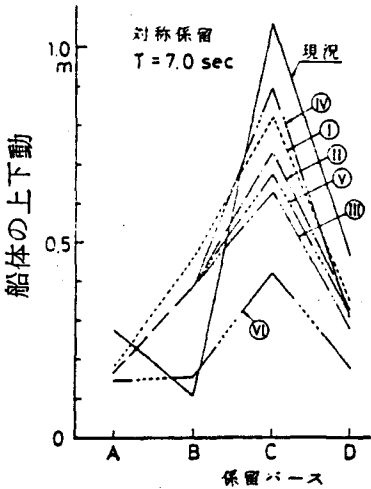


図-13 防波堤延長計画案と各バース

対応するものである。④、⑤、⑥、⑦の各バースにおける船体の上下動を改良計画案別に示したのが図-13であって、バース位置によって船体運動が大きく変化すること及び改良計画案によって船体運動を大きく低減できることが判明する。

しかしながら、バースにより船体動揺に大小が生じるのは避けることができないのも事実である。このような場合には、表-1に示したように船の種類によって動揺の許容範囲が異なることを利用して、船の種類によるバース配置計画を立てることが有効であると考えられる。

(b) 岸壁構造並びに離岸距離による係留船の動揺制御

港内波高を減少させるために低反射岸壁が用いられているので、次にこのような岸壁前面に係留した場合の船体運動について考察を行う。低反射岸壁は大別して、流体抵抗が流速に比例するものと、流速の2乗に比例するものと2種類がある。図-14は、透過堤の流体抵抗が流速に比例する場合の船体運動の応答を表わしている¹⁸⁾。まず図-14において、 T は波の周期、 T_{Rn} はRollの固有周期、 l_w は堤体幅、 r_0 は空げき率、 $r_2 - l_w$ は遊水部幅、透過堤内の水の抵抗係数 $\mu_d = 4\pi/T$ である。これらの図を見ると、波の周期 T がRollの固有周期の1.5倍より短い領域ではRollとSwayが小さくなり低反射岸壁は有効であるが、波の周期が1.5 T_{Rn} よりも大きくなるとこの関係は逆転している。一方、Heaveは波の周期が1.2 T_{Rn} より小さい所ではほぼ同程度であるが、波の周期が1.2 T_{Rn} よりも大きくなるとHeaveをかなり顕著に小さくできることが明らかになる。

以上より、かなり広範囲にわたり低反射岸壁は不透過岸壁より優れていることが明らかとなる。しかし、不透過岸壁から船幅だけ離して係留（横棧橋に係留した場合に相当する）した場合は、図より明かなように低反射岸壁の場合のように運動をすべて小さくすることはできないことが分る。

図-15は、多孔壁の流体抵抗が流速の2乗に比例する場合の船体運動の応答を示している¹⁹⁾。この場合の船体運動を鉛直壁前面での係留船体運動と比較すると、波の周期 T が1.2 T_{Rn} よりも小さい領域ではRollとSway

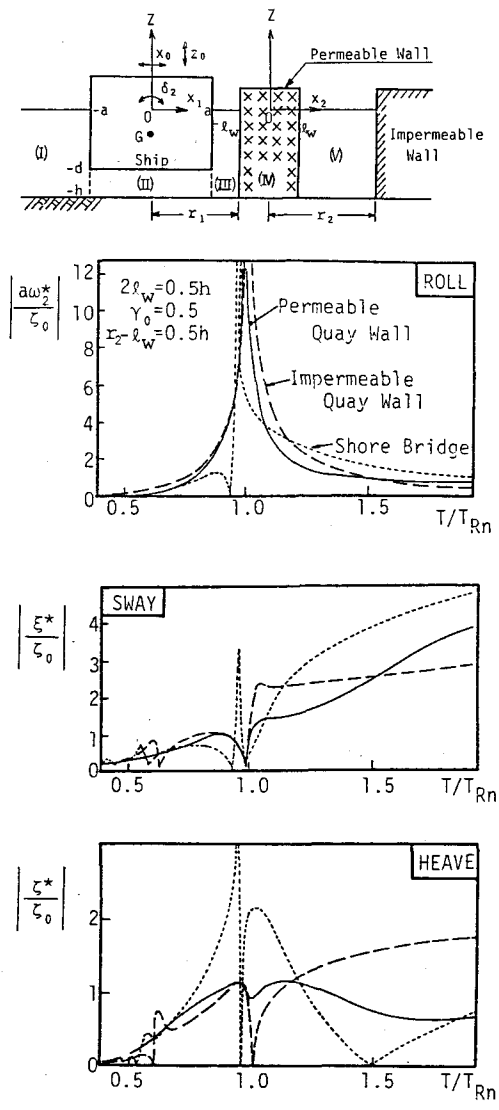


図-14 岸壁構造による船体動揺の制御

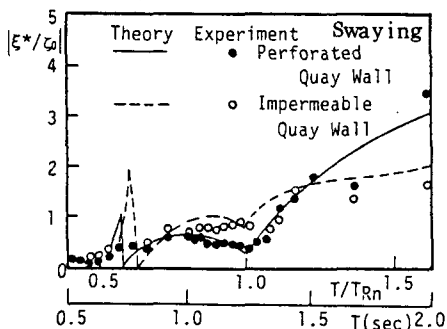
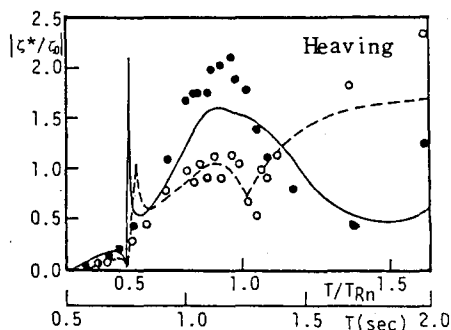
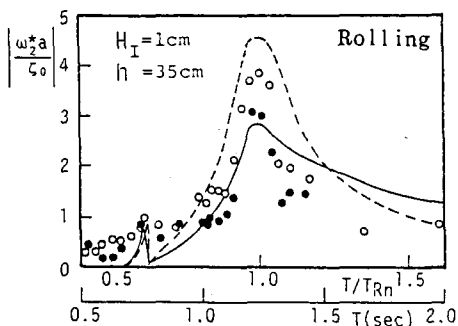
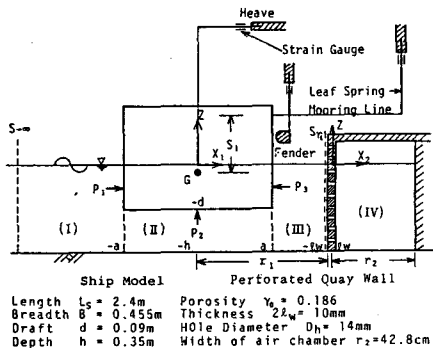


図-15 流体抵抗が速度の2乗に比例する型の低反射岸壁による船体動揺について

の動揺が小さくなって有効であるが、Heaveは大きくなることが分る。波の周期が $1.2 T_{Rn}$ よりも大きくなるとこの関係は逆転している。図-16は、入射波高を1 cmから3.5 cmへ大きくした場合である。入射波高が大きくなれば圧力方程式やRoll の方程式中の非線型抵抗が大きくなり、入射波高で無次元化されたRoll とHeave はRollの共振周期の近傍でかなり小さくなる。このように波高が小さい時には多孔壁式低反射岸壁は動揺制御効果は小さいことが分る。

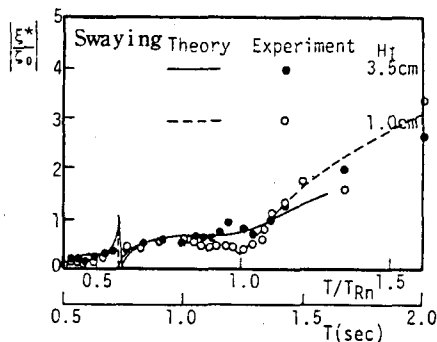
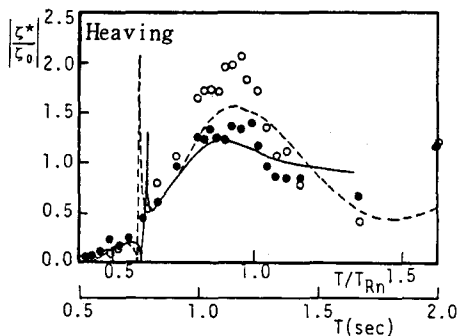
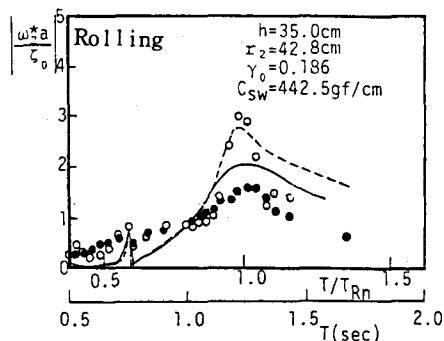


図-16 入射波高が船体運動に及ぼす影響

以上で、2種類の低反射岸壁による係留船の動揺制御について述べたが、港内波高はもともと小さい事を考えると、港内における低反射岸壁としては波高が小さい時でも動揺制御効果の優れた速度に比例する型の流体抵抗をもつ低反射岸壁の方が望ましいことが明らかになる。

(c) 係留バネ特性による係留船の動揺制御

船を係留する場合、Sway の係留力は係留索による拘束力とフェンダーの反発力より成り立っている。図-17は、この係留力と Sway の変位量との関係を示したものである。この図に示されるように、一般の係留船では、領域 I で示される係留索のバネ定数 C_L は、フェンダーのバネ定数 C_F よりかなり小さい。一般的な係留ではこの C_L と C_F との比は 1 : 100 ~ 1 : 1000 にも及んでいるが、このようにバネ定数が異なる場合をここでは非対称係留と呼ぶことにする。一方、 C_L と C_F の比が 1 : 1 に近い場合をここでは対称係留と呼ぶことにする。

図-18は、規則波が作用した場合の Sway の時間波形を示している。この図より、Sway は長周期の運動と短周期の運動とから成り立っていることが分る²⁰⁾。短周期の運動は波の周期と対応するが、長周期の運動は波の周期よりもかなり長くなっている。今、 m_d 波に対して一度船が岸壁へ衝突する時、モード数 m_d の運動を行っていると呼ぶことにする。このようにして得た実験結果（図の黒丸）と数値計算結果（図の実線）とを比較したのが図-19である。図の横軸の T_{sn} は自由振動実験における船のフェンダーへの衝突時間間隔であり、図の縦軸の $\hat{X}_0$ は離岸距離の最大値を、 M_{sw} は Sway の見掛け質量、 M は船の質量を表わしている。図-19における共振ピークは $m_d \cdot T = T_{sn}$ を満たす波の周期において生じており、本来の固有周期 T_{sn} より小さい周期で生じる共振ということから、これをサブハーモニックモーションと呼んでいる。ところで、モード数 m_d は 10 より大きくなると Sway の振幅増幅率は急に減少し、モード数

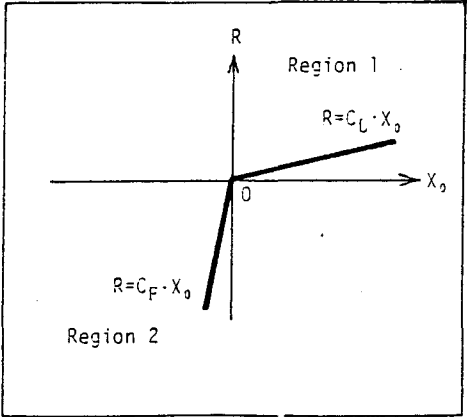


図-17 Sway の拘束力

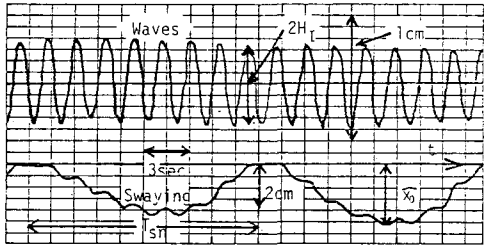


図-18 非対称係留時の Swaying 波形（模型実験）

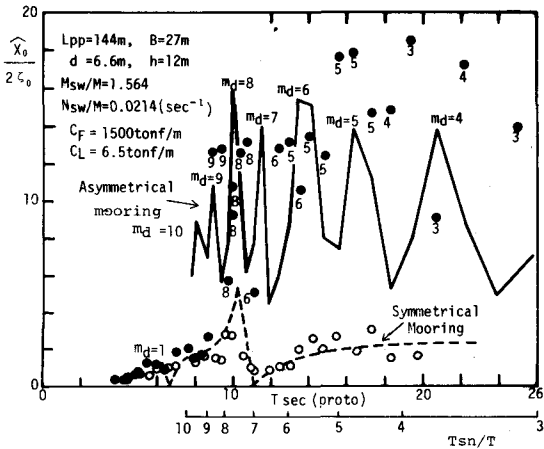


図-19 係留システムのバネ定数の対称化による船体動揺制御

も急に1に減少することより、モード数は一つの係留系では有限の値までしか取り得ないことが分る。今係留をフェンダーのみ、または係留索のみで行ったとした場合の Sway の固有周期 T_{SF} 及び T_{SL} はそれぞれ次式にて与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T_{SF} &= 2\pi\sqrt{\frac{M_{SW}}{C_F}} = 2T_{Sn} = 10 \text{ 秒 (現地換算)} \\ T_{SL} &= 2\pi\sqrt{\frac{M_{SW}}{C_L}} = 156 \text{ 秒 (現地換算)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

これより、最大モード数 m_d は大略次式にて推定できる。

$$max(m_d) = \frac{T_{Sn}}{T_{SF}} \dots\dots\dots (7)$$

以上より明らかなように、非対称係留における Sway は大略 T_{Sn} と T_{SF} の間に非常に広い領域にわたってサブハーモニックモーションを生じる。このため C_F と C_L の比が大きければ大きい程共振は広い周期領域で生じることになるが、逆に C_F と C_L が近づけば短周期領域での共振はなくなり、振幅増幅率が小さくなることが予想される。図-19の白丸と破線は対称係留時の Sway の振幅増幅率を示しているが、これより対称係留にすることにより Sway の振幅を非対称係留の場合より1桁小さくできることが分る。

(d) dash-Pot による船体動揺の制御について

船体運動を制御するには、係留システムに減衰力を有するダッシュポットを含ませるのが有効である。図-20は、ダッシュポットとダッシュポットの模型船への取り付け状況である。図-21は、ダッシュポットがある場合とない場合の船体運動の比較を行ったものである²¹⁾が、これよりダッシュポットを取り付けることにより、すべてのモードにおいて、またすべての周期において動揺が小さくなっていることが明らかである。これからすると、ダッシュポットによる動揺制御は、3-(1)-(b)で述べた低反射岸壁による動揺制御よりも有効であると考えられる。

(2) 長周期船体動揺の制御について

(a) 非対称係留を対称係留に変えることによる動揺制御

先の 3-(1)-(c)において、非対称係留では通常の波浪によりサブ・ハーモニック・モーションと呼ばれる長周期船体運動が生じるが、これは対称係留にすることにより、取り除くことが可能であることを述べた。

このような対称係留を実現する方法として Russel は重力式フェンダーを提案している。また従来から使用されているニューマチックフェンダーも対称係留を実現するための装置と見なすことができよう。一方、係留索の

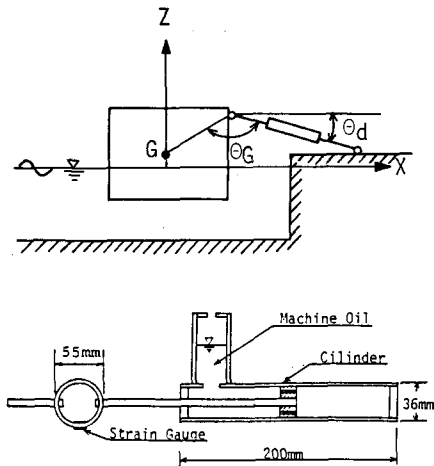


図-20 ダッシュポットと係留船への取り付け状況

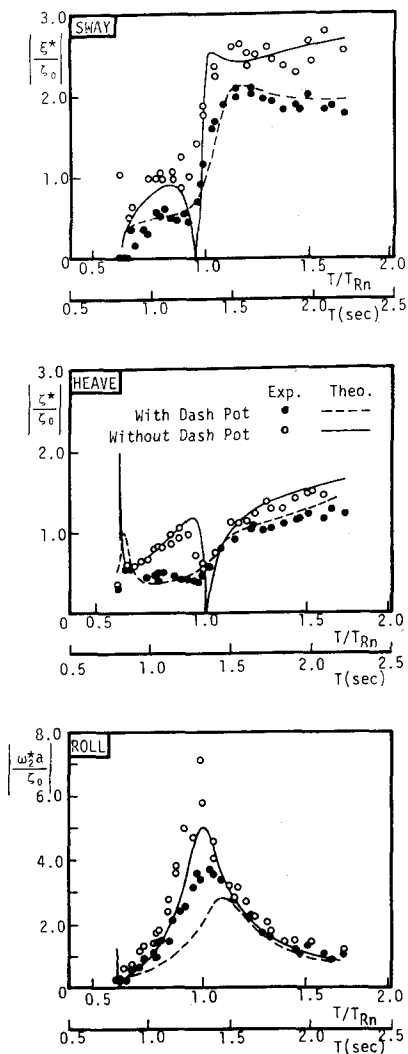


図-21 ダッシュポットによる船体動揺制御

の固有周期と船の Sway の固有周期とがずれるように係留系のバネ定数を選定して、長周期船体運動が十分小さくなった場合を想定すると、短周期領域での動揺に伴う伸びにバネ定数を乗じた力が係留索、岸壁のビット及び船上のボラードにも働くので注意を要する。

バネ定数を大きくする方法としてワイヤー・ロープと化繊ロープを結合したロープが使用されているが、これも船体運動の低減化に有効であると報告されている。

(b) 係留系のバネ定数の変化による動揺制御²²⁾

ここでは、対称係留とした場合の係留系のバネ定数の変化が長周期船体動揺に及ぼす効果について述べる。今 1 例として長さ 144 m、幅 27 m、吃水 6.6 m の箱船を鉛直不透過岸壁に係留し、この時の係留系のバネ定数を 5.6 tonf/m と 108.4 tonf/m の 2 種類に設定した時の長周期領域での Sway の応答特性を示すと図-22 となる。これより、バネ定数を変化させることにより 30 ~ 120 秒に対応する長周期領域での船体運動は非常に大きく変化することが明らかとなる。図には横棧橋 (Shore bridge, この場合は鉛直壁より 30 m 離れて係留されることになる) に船を係留した場合の Sway の応答も示しているが、鉛直壁のすぐ横に係留した場合よりも動揺が大きくなっており、横棧橋は長周期船体運動にも好ましくないことがわかる。一方図-23は、このようにバネ定数を変化させた時の短周期側での Sway, Heave 及び Roll を示している。これより、係留索のバネ定数を変えても、短周期領域での動揺は制御できないことが分る。そこで、港内で卓越するセイッシュ

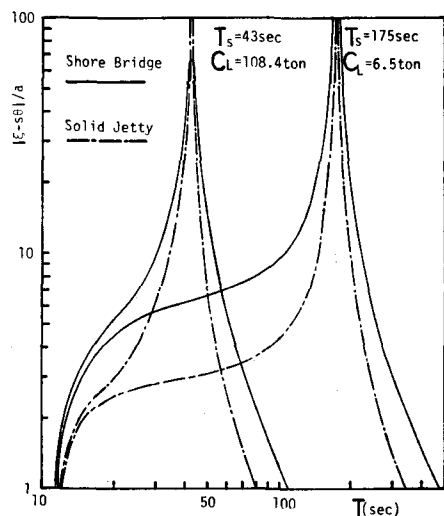


図-22 長周期領域での Sway の共振特性

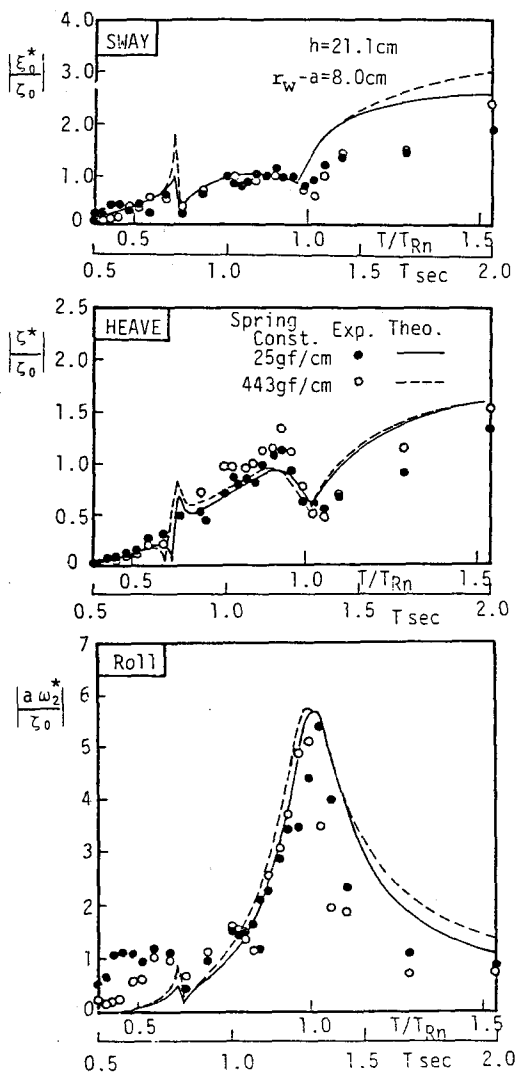


図-23 係留系のバネ定数が短周期船体運動に及ぼす影響について

今1例として Surge について考える。Surge の波浪中での非連成運動方程式は次式にて表わされる。

$$\ddot{X} + \varepsilon_{SU} \dot{X} + n_{SU}^2 X = H_I A_{SU} \sin \sigma t \quad \dots (8)$$

ここに ε は減衰係数, n は運動の角周波数, H_I は入射波高を, A は H_I で規格化した外力の振幅, 添字 S_U は Surge を, σ は外力の角周波数を表わしている。この時の定常解の運動振幅 $\hat{X}$ は次式にて与えられる。

(c) バース位置による船体動揺の制御²³⁾

長周期波は波長が長いので, 係留位置により船体動揺は変化する。さらに 2-(1) でも述べた如く, 長周期船体動揺周期はスリップの共振周期とも近いので, ここではスリップ内のバース位置による動揺制御について考える。

係留場所は図-24に示すように3バースで, それぞれバース①, ②, ③と名付ける。スリップ真正面から波が侵入するとき, バース①, ②では Surge が卓越し, 他の Sway 及び Yaw はほとんど無視できる程度であり, バース③では Sway が卓越し他の運動はほとんど生じないことが実験より明らかになった。そこで, バース①と②については Surge を, バース③については Sway を図-25に示す。なおここではすべての位置で対称係留とする。図中の l はスリップの奥行, L は波長, ξ^* , η^* および ζ_0 はそれぞれ Surge, Sway および入射波の振幅を表わす。図からもわかるように, バース①の Surge は②の Surge より大きい。これに比してバース③の位置での Sway は小さく, これから判断して, スリップ内での最も好ましい係留位置は最奥部のバース③の位置であることがわかる。

(d) 減衰力による長周期動揺制御²⁴⁾

係留船の Surge と Sway は1分前後の長周期の大振幅運動を行うので, これらについて検討を行う。

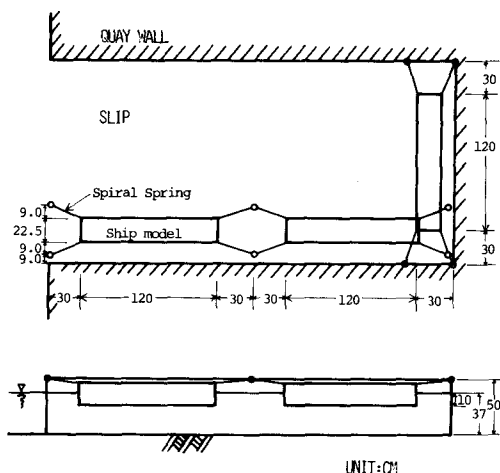


図-24 スリップ内での係留船配置

$$\frac{\hat{X}}{H_1} = \frac{A_{SU}}{\sqrt{(n_{SU}^2 - \sigma^2)^2 + (\epsilon_{SU} \sigma)^2}} \quad \dots (9)$$

今、ダッシュポットがない場合の船自身の減衰係数を ϵ' 、
ダッシュポットによる減衰力を ϵ'' 、両者の合計の減衰係
数を ϵ とおけば次式が成立する。

$$\frac{\hat{X}_d \max}{\hat{X}_0 \max} = \frac{\epsilon_{SU}'}{\epsilon_{SU}} = \frac{1}{m_{SU}} \quad \dots (10)$$

ここに添字 d と 0 はダッシュポット係留索の有無を、 m
は ϵ の ϵ' に対する倍率を示している。船自身の減衰係数
 ϵ は実船実験より次式にて推定できることが分った。⁶⁾

$$\epsilon_{SU}' = \frac{2}{T_{SU}} \quad \dots (11)$$

今、図-26のように船首尾索とスプリングラインは岸
壁と δ の角で張られているものとする、索に装着され
たダッシュポットの減衰係数を k_d とすれば Surge の減
衰力は $(2k_d \cos^2 \delta) \dot{x}$ となる。これより、Surge の
みかけ質量を C_{vSU} とすれば、ダッシュポットにより増
加した Surge の減衰係数 ϵ_{SU}'' は次式にて与えられる。

$$\epsilon_{SU}'' = \frac{2k_d \cos^2 \delta}{C_{vSU} \cdot M} \quad \dots (12)$$

そこで、Surge の運動振幅を $1/m_{SU}$ に減衰させるのに
必要な k_d 、この時ダッシュポット係留索に働く最大張
力を F_{SU} とすれば、これらは次式にて与えられる。

$$k_d = \frac{(m_{SU} - 1) C_{vSU} \cdot M}{T_{SU} \cdot \cos^2 \delta},$$

$$F_{SU} = k_d \cdot n_{SU} \cdot \frac{\hat{X}_0 \max}{m_{SU}} \cos \delta \quad \dots (13)$$

同様にして、Sway の場合は次式となる。

$$k_d = \frac{(m_{SW} - 1) C_{vSW} \cdot M}{T_{SW} \cdot \sin^2 \delta},$$

$$F_{SW} = k_d \cdot n_{SW} \cdot \frac{\hat{Y}_0 \max}{m_{SW}} \cdot \sin \delta \quad \dots (14)$$

今 $m = 5$ 、 $C_{vSU} = 1.1$ 、 $C_{vSW} = 2$ 、 $T_{SU} = T_{SW} = 60 \text{ sec}$ 、

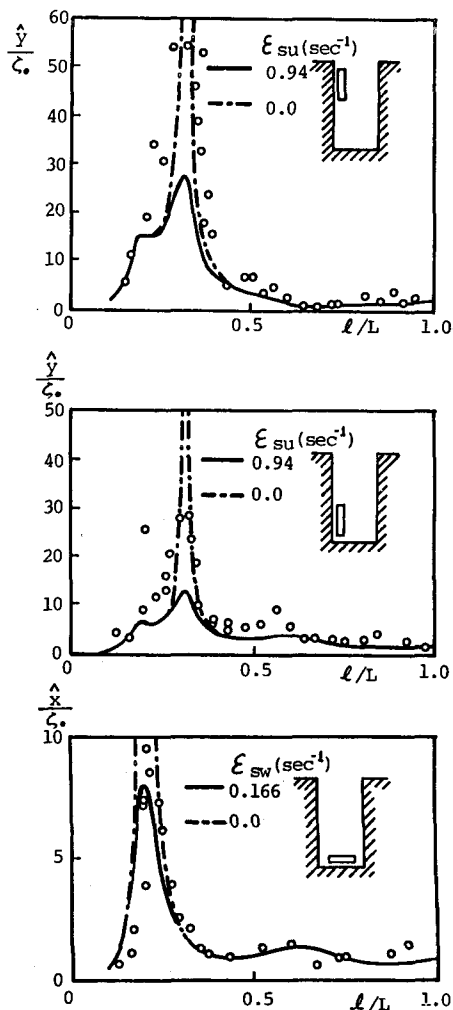


図-25 係留場所による長周
期船体動揺の周期

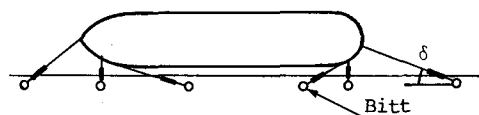


図-26 係留索配置図

$\delta = 30^\circ$, $\hat{X}_0 \max = \hat{Y}_0 \max = 1 \text{ m}$, $M = \text{満載排水トン数}$ として、船の総トン数と最大張力との関係を表わすと図-27となる。図中には NK による船の係留索強度並びに港湾構造物の技術基準に示されている曲柱の強度を示しているが、これより G.T. 20,000 以下の船であればダッシュポット係留索を現有の係船施設に取り付けることにより、荷役の安全や能率を向上できる可能性があることが判明する。

4. 結 語

計算機の発達により、個別になされてきた研究を総合化しやすくなってきた。港内係留船の動揺も従来の研究の総合化の上に成り立つ研究テーマであると考えられる。このため、一見して明らかなように上述のモデルにはまだまだ解決すべき近似も多々ある。これらについては今後さらに改良を加え、現実に近いモデルに近づけて行きたいと考えている。

新しい港湾建設はほぼ終わり、これからはこれらの港湾をいかに有効に使うかということに焦点が移ると考えられるが、使い易い港湾を達成するに当って計画の一助になれば幸いである。

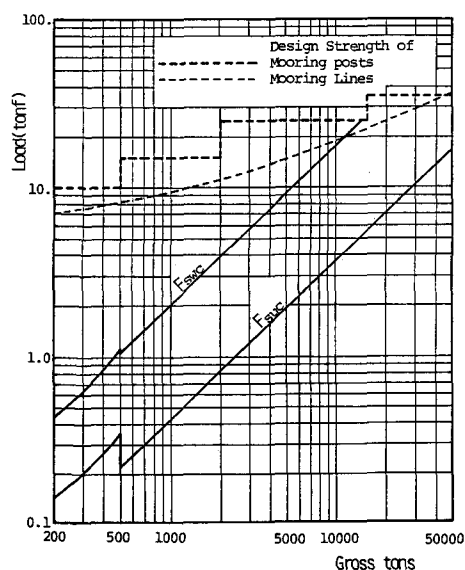


図-27 荷役限界に近い船体運動を $\frac{1}{5}$ に減衰させる時、係留索に作用する最大張力と、係船柱、係留索強度との関係

参 考 文 献

- 1) 港湾労災防止協会：港湾荷役の労働災害とその事例，昭和58年版。
- 2) 今井 実：港湾荷役の安全性と法規・規格，生産と運搬，1977. 5.
- 3) 樫木 亨・久保雅義：荷役限界からみた港内静穏度に関する研究（第1報），第24回海岸工学講演会論文集， pp.610～614， 1977.
- 4) Brunn, P. : Breakwater or Mooring System, The Dock and Harbor Authority, pp.126～129, 1981.
- 5) 関西造船協会編：造船設計便覧， pp.421～425， 1981.
- 6) 久保雅義・今枝彬郎・奥村宗行：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， pp.289～298， 1980.
- 7) 合田良実：浮体係留の諸問題，水工学シリーズ，84-B-6， pp.1～18， 1984.
- 8) 樫木 亨・久保雅義・青木伸一：係留システムの改善による船体運動および船舶の接岸エネルギーの

低減化, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 460~464, 1983.

- 9) 榎木 亨・久保雅義・青木伸一: 港湾 Slip 内における船体運動および定常漂流力について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 511~515, 1982.
- 10) 榎木 亨・久保雅義: 荷役限界からみた港内静穏度に関する研究—直線岸壁及び Slip 内係留船の運動特性—, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 307~311, 1980.
- 11) 高山知司: 波の回折と港内波高分布に関する研究, 京都大学学位論文, 1981.
- 12) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦: 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 35~58, 1975.
- 13) Lee, J. J. : Wave induced oscillations in a harbor of arbitrary shape, Calif. Inst. of Tech., 1970.
- 14) 桑島 進: 港内侵入波の計算について, 日本航海学会論文集, 54号, pp. 83~91, 1976.
- 15) 久保雅義: 港内波の方向スペクトルによる係留船の船体運動に関する基礎的研究, 船貨輸送研究施設研究報告, 第3号, pp. 29~42, 1987.
- 16) 山内保文: 海洋波中の応答, 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, pp. 53~97, 1969.
- 17) 榎木 亨・久保雅義: 係留船体運動からみた港内静穏度の算定について(2)—港内係留船の船体運動の計算例—港湾, pp. 76~83, 1982-12.
- 18) 榎木 亨・久保雅義・京谷光高: 低反射岸壁前面に係留された矩形断面浮体の運動特性, 第33回年次学術講演会講演概要集, II-365, 1978.
- 19) 榎木 亨・久保雅義・京谷光高: 荷役限界からみた港内静穏度に関する研究(第3報)—低反射岸壁前面での浮体の運動特性について—第26回海岸工学講演会論文集, pp. 646~650, 1979.
- 20) 榎木 亨・久保雅義: 荷役限界からみた港内静穏度に関する研究(第1報), 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 610~614, 1977.
- 21) 榎木 亨・久保雅義・青木伸一: Dash-Pot による短周期船体運動の低減化に関する一考察, 日本航海学会論文集, 66号, pp. 127~135, 1982.
- 22) 榎木 亨・久保雅義・京谷光高: 荷役限界からみた港内静穏度に関する研究(第2報)—特に係留方法による—, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 593~597, 1978.
- 23) 榎木 亨・久保雅義: 湾水振動に伴う長周期船体運動の実証的研究, 日本航海学会論文集, 65号, pp. 49~57, 1981.
- 24) 久保雅義: ダッシュポット係留索の実船への適用可能性に関する基礎的研究, 日本航海学会論文集, 73号, pp. 163~172, 1985.