港内避泊漁船の動的挙動について

正員 梅 田 直 哉* 正員 小 林 弘 明**

Dynamic Behavior of a Fishing Boat Moored in Harbor

by Naoya Umeda, *Member* Hiroaki Kobayashi, *Member*

Summary

It is important to predict the dynamic behavior of a fishing boat moored in harbor. Because, the extraordinary mooring line forces and ship motions cause damage e.g. break of mooring lines or collision with a quay. These dynamic behavior differs from that of a large ship in harbor or a moored offshore structure. That is, a fishing boat is usually moored perpendicular to a straight quay in longitudinal waves. Further, her mooring lines have completely non-linear characteristics.

Then the authors carried out the numerical simulation in time domain; in which wave forces and mooring forces were evaluated by theories and viscous damping coefficients were derived from free decay tests. We got the stochastic values of surging motion and mooring line forces in irregular waves.

Moreover, we conducted model experiments in a tank. A model ship was moored in front of a model quay. Its motions and mooring line forces in irregular waves were measured by means of an optical tracking system and ring-type strain-gauge transducers, respectively.

As a result, the values computed by our numerical simulation procedure were in good agreement with the experimental values. Then it is shown that our proposed simulation procedure is effective to predict the safety of a fishing boat moored in harbor. In particular, we found that wave exciting surge force can be estimated by Froude-Krylov hypothesis and mooring forces can be estimated by the static mooring characteristics and the surging motion of a ship. Furthermore, we discussed the effect of waves, mooring systems and quay structures on the dynamic behavior of a fishing boat.

1 緒 言

一般大型船は、荒天に際し港外にでて錨泊や heave-to などを行う。これに対して、漁船、とりわけ小型漁船は、時間的余裕があれば、漁港内に避難することが多い。しかし港内といえども侵入波を完全に防ぐことは難しい。そこで、港内係留中の漁船の波による動揺や係留特性を知ること、これはその安全性を確保するために解決すべき問題といえる。

港内の風浪に対する静穏度確保は土木工学の一つの大きなテーマである。しかし近年漁港がその需要から地形的に恵まれないところにも建設されるためか係船困難という問題も少なくないと聞く。具体的には係留索切断による漂流や岸壁、他船との接触事故である。港内静穏度はふつう港の内外の波高比により評価され、港湾の平面

模型実験などで十分な検討の後建設が行われる。しかし安全係留という面から考えると、最終的には船の運動そして係留索の張力による評価が望ましく、波高のみによる評価には疑問もあろう。本研究は、この点を考慮し、波浪中船体運動に着目して港内静穏度を見直すという考えによるものである。

港内における岸壁避泊の方法は大まかには次のようにいうことができる。大型船の場合は、Fig. 1 のように岸壁に平行に係留（横付け）されて横波をうけることが多い。これに対し小型船は、横付けよりも Fig. 2 のように岸壁に直角に係留（縦付け）されて縦波を受けることが多いとされている。ここでは漁船を対象としていることから後者の縦付けについてとりあげる。横付け係留については、港内避泊あるいは荷役効率化の観点より多くの研究がなされている^{2)~18)}。たとえば、Lean²⁾、榎木・久保³⁾はじめ多数の論文において、左右非対称な係留による分数調波としての長周期左右揺れの発生が確認され

* 水産庁水産工学研究所

** 東京商船大学

た。一方縦付け係留については、これを取り上げた研究が見当たらないのが現状である。

研究の方法は種々考えられるが、ここでは安全係留の指標となる船体動揺、係留索張力の推定法を提案し、水槽内模型実験によりその有効性を調べることにする。この段階では、運動に関わる力をどのように評価するか、運動の特徴を的確に求められるかといったことが当面の課題となる。本研究においては、係留系の非線型性を重視し、不規則現象を直接取り扱う立場をとった。すなわち理論計算としてランダム・シミュレーション、そして実験にも人工不規則波を用いた。

設定する状況として、直立直線岸壁に対し直角に港内侵入波が入射し、1隻の漁船がそこに縦付けされている

Fig. 1 Mooring condition parallel to a quay

Fig. 2 Mooring condition perpendicular to a quay

Fig. 3 Layout of a fishing boat as an example (Ref. 25)

場合を取り上げる。漁船は矩形に近い形状が多く (Fig. 3 参照)、回折により長波頂波に近づくものと考えられる。よって波の方向性は考えない。また水深の影響は考慮するが、海底は平坦としておく。さらに風の影響は、港の防波堤配置と直接関係しないことから今後の問題としている。

この論文では、まず船体に働く波力の計算法とその拘束実験による検証例を取り上げる。そして surge に着目したランダム・シミュレーションと水槽内係留模型実験の方法を示した後、それらの結果の比較検討について述べることにする。

2 船体に働く波力についての計算と実験

縦付け状態で問題となるのは surge であるが、それにかかわる surging force について船舶流体力学では Froude-Krylov force のみを考えるのが一般となっている¹⁰⁾。港内では水深が小さく、係留系との関連から長周期の波まで考慮する必要がある。このため Morison 式で評価されるうちの抗力成分としての波力が無視しうかどうか明らかではない。そこで surging force について計算と実験の結果を比較した。

2.1 有限水深重複波中の surging force の計算法

$x-y$ 平面で静止水面を表わし、 z 軸を鉛直下方にとる座標系を考える (Fig. 4)。このとき水深 h で平坦な海底をもつ水域における 2 次元進行波の速度ポテンシャルは周知のように次の通りである。

$$\phi = R_e \left[\frac{g \zeta_A}{i\omega} \frac{\cosh K(z-h)}{\cosh Kh} \cdot \exp \{ i(Kx \cos \chi - Ky \sin \chi - \omega_e t) \} \right] \quad (1)$$

ここで ζ_A , ω は、それぞれ波の振幅、周波数である。 χ , ω_e は座標系に対する ($\chi=0$ を追波とする) 波の偏角、出会い周波数を表わす。波数 K は次の方程式の解となる。

$$\omega^2/g = K \tanh Kh \quad (2)$$

船体に働く surging force は、その細長性より船体表面条件を満たす成分が高次となり、入射波のポテンシャルより求められる (原点を船体重心上にとり、 x 軸と船首尾線を一致させ、船首をその正方向とする。 n は船体

Fig. 4 Coordinate system of a ship

表面についての外向き法線である)。

$$\begin{aligned} F_x &= -2 \iint_S \left(\rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \cos(nx) dz dx \\ &= - \iint_V \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) dz dy dx \\ &= F_{xc} \cos \omega_c t + F_{xs} \sin \omega_c t \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{matrix} F_{xc} \\ F_{xs} \end{matrix} \right\} &= \rho g \zeta_A K \cos \chi \int_L \frac{\cosh K \left(\frac{d}{2} - h \right)}{\cosh Kh} \\ &\quad \cdot C_1 S(x) \left\{ \begin{matrix} \sin(Kx \cos \chi) \\ -\cos(Kx \cos \chi) \end{matrix} \right\} dx \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\sin(Ky_w \sin \chi)}{Ky_w \sin \chi} \quad (\chi \neq n\pi) \\ &= 1.0 \quad (\chi = n\pi; 0, 1, 2, \dots) \end{aligned}$$

そして $y_w, d, S(x)$ は船体各断面における水線面半幅、喫水、断面積であり、 S, V は船体没水投影面、没水部を意味する。

次に、岸壁反射を考慮し、船体が縦付け状態（岸壁と船体重心の間の距離を X_G とする）にあるときの surging force F_1 を求めておく。この場合、入射波として船は向波をうけるが、岸壁反射により同時に追波もうけることとなる。流体力の線型重ね合わせは可能としてよいから、二方向の成分波の位相差を考慮して次のように与えられる。

$$\begin{aligned} F_1 &= |F_x(\chi=\pi)| \cos\{KX_G + \omega t - \varepsilon_x(\chi=\pi)\} \\ &\quad + |F_x(\chi=0)| \cos\{KX_G - \omega t + \varepsilon_x(\chi=0)\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} |F_x| &= \sqrt{F_{xc}^2 + F_{xs}^2} \\ \varepsilon_x &= -\tan^{-1}(F_{xs}/F_{xc}) \end{aligned}$$

ここでの計算は、断面間の相互干渉を考慮していないため、船体の前後非対称性が無視される。すなわち追波中と向波中の応答に違いがないこととなる。

$$\left. \begin{aligned} |F_x(\chi=\pi)| &= |F_x(\chi=0)| \\ \varepsilon_x(\chi=\pi) &= -\varepsilon_x(\chi=0) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

これより、

$$F_1 = 2|F_x(\chi=\pi)| \cos\{KX_G - \varepsilon_x(\chi=\pi)\} \cos \omega t \quad (6)$$

同様に波 ζ_w については、次のような重複波の式を得る。

$$\zeta_w = 2\zeta_A \cos KX_G \cos \omega t \quad (7)$$

さらに任意反射率 K_R をもつ岸壁反射を考慮し、不規則波に拡張すると、surging force は次の通りである。

$$\begin{aligned} F_1(t) &= \sum_{i=1}^N \left[\frac{|F_x(\chi=\pi)|}{\zeta_A} \sqrt{\frac{2S(\omega_i)}{\Delta\omega_i}} \cos\{K_i X_G \right. \\ &\quad \left. + \omega_i t - \varepsilon_i - \varepsilon_x(\chi=\pi)\} \right. \\ &\quad \left. + K_R \frac{|F_x(\chi=0)|}{\zeta_A} \sqrt{\frac{2S(\omega_i)}{\Delta\omega_i}} \cos\{K_i X_G - \omega_i t \right. \end{aligned}$$

$$\left. + \varepsilon_i + \varepsilon_x(\chi=0)\} \right] \Delta\omega_i \quad (8)$$

波スペクトル $S(\omega)$ は $\Delta\omega_i$ の幅で N 個に離散化され、それぞれに対して $0 \sim 2\pi$ の一様乱数 ε_i が与えられるものとする。

2.2 拘束模型実験

実験には、東京商船大学運航性能水槽（長さ 50m × 幅 10m）を利用した。同水槽の一端にはフラップ式造波機が備えられ、かつその付近の底面は掘り込まれており、浅水状態での造波にも配慮がなされている。そしてもう一方の端に模型岸壁を設置した。（Fig. 5 参照）

供試船としては、第3種漁港など比較的大きな港において利用の多い種類のものとして、19.9GT 型鮭鱒流し網漁船を選んだ。載貨状態については、出入港時のものを想定した（Fig. 6, Table 1）。なお拘束実験には、縮率 1/7.6 の模型を用いた。

模型は、縦付け状態とするが係留索は用いず、歪みゲージ式検力計を介して曳航台車に固定した。ただし heave, pitch は自由とし、surge のみを拘束した。検力計により拘束力を検出し、ゼロアップクロス法により解析を行い、その変動成分を surging force としている。heave, pitch については、P. S. D. (Position Sensor Detector) のカメラを船体の横方向において光学的に計測した。また波変位もサーボ式波高計により取り出した。なお拘束実験は、すべて水深 0.642m における規則波について行った。

Fig. 5 Arrangement of the model basin

Fig. 6 Body plan of the fishing boat

Table 1 Principal particulars of the fishing boat (full scale)

Length B. P.	L_{pp}	15.2 [m]
Breadth	B	3.8 [m]
Depth	D	1.48 [m]
Draft Fore	d_f	1.084 [m]
Aft	d_a	1.654 [m]
Trim Angle	θ	0.0375 [rad]
Displacement of Volume	V	60.97 [m ³]
C. G. from midship	l_{cb}	0.846 [m]
Longi. Gyradius	k_{yy}/L	0.351

2.3 計算と実験の比較

まず Fig. 7 に、岸壁付近の波計測の一例を示した。これは、規則波によるもので、重複波の形成が認められる。計算値は反射率 1.0 として求めたもので、実験値よりやや大きい。しかしその差は小とみなして、以後の計算においても $K_R=1.0$ として取り扱った。

Fig. 8 は、重複波中の surging force の周波数応答である。ここにおける波振幅は、入射波のそれを用いている。波長 λ がかなり大きな低周波数域まで実験と計算はよく一致しており、理論計算法の有効性が認められる。

Fig. 7 Clapotis near the quay
($T=1.36$ sec, $h=0.244$ m)

Fig. 8 Wave exciting surge force in clapotis

すなわちこの場合の surging force は Froude-Krylov force として説明できることを示している。境界層剝離による抗力成分に当たるものは特に見当たらない。大波高のもとでは問題となる可能性もあるが、防波堤内ということで対象外と考える。

実験と計算で示されるように、波の節 (node) に船体重心があるとき surging force が極大となる。逆に、波の腹 (loop) に船体重心があるとき極小となる。surging force の原因が波による浮力変動であるとする容易に首肯されるであろう。同時に計測された pitch も同様の傾向を示し、heave は逆の傾向を示した。これらも同様のメカニズムによると判断される。

3 係留船の運動と索張力について

3.1 シミュレーションの方法

縦波を受ける船の運動は、surge, heave, pitch の 3 方向考えられる。ここでは surge と他のモードとの連成は小さいと考え、surge $x_1(t)$ のみのシミュレーションを行った。運動方程式は次の通りである。

$$M\ddot{x}_1(t) + B_E\dot{x}_1(t) + G(x_1(t)) = F_1(t) \quad (9)$$

ここで

$$\begin{aligned} M &: \text{船の質量} & B_E &: \text{粘性減衰係数} \\ G(x) &: \text{係留力} & F_1(t) &: \text{surging force} \end{aligned}$$

なお、付加質量は、船体の細長性より無視した。減衰力についても、その造波成分は無視されるべきであるが、粘性減衰力の考慮のため自由動揺試験の結果を利用した。これは係留状態で行ったものを横揺れにおける N 係数の取り扱いに準じて解析した。

係留力については、ロープの動的影響を無視した。これは浅水域のためロープの長さが短く、質量も小さいことによる。しかし、重力、浮力、弾性力による成分はこれを考慮した。弾性力は岸壁係留における索がスラック状態と限らないことから定量的評価に欠かせないものと予想された。またロープの弾性特性は線型的ではないため、弾性係数の非線型影響も計算に取り込んだ。微少索要素についての基礎式はつぎの通りである²⁰⁾ (Fig. 9)。

Fig. 9 Coordinate system of mooring line

$$\left. \begin{aligned}
 dV &= wds \\
 dT &= w \sin \phi ds \\
 d\phi &= w/T \cos \phi ds \\
 dX &= [1 + T/\{A(\delta)E(\delta)\}] \cos \phi ds \\
 dZ &= [1 + T/\{A(\delta)E(\delta)\}] \sin \phi ds
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

w : 単位長さ当たりの索重量

A : 索の断面積 E : 索の弾性係数

具体的な解法は、井上²¹⁾によるセグメント分割法のアログリズムを両端が海底に接しない場合も考慮できるよう拡張して用いている。

波スペクトルとしては、Pierson-Moskowitz 型スペクトルの一つである I. T. T. C. スペクトルを用いた。

$$S(\omega) = A/\omega^5 \exp(-B/\omega^4) \quad (11)$$

$$A = 173 H_{1/3}^2 \bar{T}_{01}^{-4}$$

$$B = 691 \bar{T}_{01}^{-4}$$

港内波の観測結果にこのスペクトル形をあてはめると概略よく一致する。しかし I. T. T. C. のスペクトル幅よりも長周期側に観測スペクトルのピークが現われる。これは港内、湾内の振動などの影響といわれている²⁰⁾。これらのピークが係留船の固有周期にあたる場合には問題となろう。ここでは船の自由動揺周期に一致する平均周期の波を取り上げ、この点についても検討を試みた。

運動方程式の解法は次の手順によった。まず、波スペクトルを離散化し、波浪強制力の時系列を作成した。この際スペクトルの分割は、周波数間の有理比が存在しないよう行い、信号の反復を防いだ²²⁾。そして Runge-Kutta-Gill の数値解法を用いた。船体静止時より計算を始めるが、データ処理は過渡応答減衰に十分な時間後開始した。

3.2 係留模型実験

試験水槽 (50m×10m) に、岸壁模型を設置し、係留模型実験を実施した。供試船は前述の 19.9 GT 型鯉流し網漁船の縮尺 1/20 の 0.76m 模型である。係留状態は船尾縦付とした (Fig. 10)。係留索は、アンカーライ

Fig. 10 Arrangement of the mooring system

Table 2 Mooring line characteristics (full scale)

	bow line	stern line
weight w	644 [g/m]	532 [g/m]
	(in water)	(in air)
AE ($\delta=0$)	2.56×10^5 [kg]	1.20×10^5 [kg]
length s	41.2 [m]	15.94 [m]

ンとして 14mmφ ワイヤ、岸壁側ラインとして 35mmφ ロープを想定し、それぞれ水中重量、空中重量をあわせるよう模型係留索を作成した。Table 2 にその特性を実スケールで記した。

計測項目については次の通りである。模型上方に P. S. D. のカメラを置き、surge, sway, yaw の計測を光学的に行った。そして pitch rate をレートジャイロにより検出した。また係留張力はリングゲージにより、船側で計測した。さらに静水中船体重心の真横でサーボ式波高計により波変位も取り出した。これらの計測器の出力電圧は A/D 変換され、デジタルフィルタリング、トレンド除去の後、スペクトル解析、極値統計解析にかけられた。なお、データの取り込みは、波が船に達した後、過渡応答が十分減衰すると思われる時間以降行った。

入射波は I. T. T. C. スペクトルに従う不規則波を目標とした。水深は 0.244m であった。この水槽には、造波機の前面に幅一杯の回流装置吹き出し部が水底に突出している。これが潜堤として作用したと思われ²³⁾、今回のような浅水状態では波峰分裂がある周波数域で生じた。すなわち本来の波周波数の 2, 3 倍の周波数の波が発生し、消えることなく伝播したのである。このため当初予定した、造波機の伝達特性による修正は、システムの非線型性のため困難となりおこなうことができなかった。またこの 2, 3 倍の周波数成分波の除去のため、代表波周波数の 2 倍弱のカットオフのデジタルフィルタリングをすべての応答に対して行った。ただし、係留張力はスパイク状の応答であり、その極値統計解析に限ってはフィルタリングを行っていない。波の伝播速度による修正は水深影響を考慮して行い、模型位置ではすべての波周波数成分を含むよう信号を作成した²²⁾。

そして造波板により反射された波が再び船にあたるのを防ぐため、入射波の周期に応じて 1~5 回に分けて実験を実施した。非線型現象では一般にエルゴード性が必ずしも期待できない²⁴⁾。その点を考慮し、造波信号成分波の位相をかえて、それぞれ 5 回ずつ実験をおこなうことを標準とした。

3.3 静的係留特性

係留力計算の直接的な検証と係留特性の把握のため、

静的な係留力実験を実施した。係留された模型船に外力を加えて強制的な変位を与え、そのときの係留張力を計測した。この結果を Fig. 11 に示す。実験値と計算値はおおむね一致しているとみなされる。しかし小変位における船尾索の計算値は実験値より小さい。また大変位における船首索の計算値は大である。全般的に係留設定精度の不足がある一方、船首索については船首トリムの影響があげられる。すなわちトリムを自由とした計測であったため、アンカー側の船首索張力により船首トリムが

Fig. 11 Static mooring force

Fig. 12 Zero crossing periods of surge

Fig. 13 Significant amplitude of surge

生じ、張力は小さくなったものと思われる。なお、索単独の庄司による実験²⁰⁾と今回の計算プログラムの結果の比較では良好な一致が認められ、計算法自体は十分な有効性をもつものと考えている。

また実験によると、初期張力は、船首索 0.042kg、船尾索 0.006kg という値を得ている。自由動揺における surging 周期は、約 3.1 秒（初期変位：約 4 cm 後方）であった。Fig. 11 のように係留力-変位特性には不動帯があり固有周期の明確な定義は難しい。しかし、この surging 周期はバネ系の固有周期に相当するものといえよう。

3.4 計算と実験の比較

3.4.1 応答の極値について

不規則波中応答の時系列の極値統計解析を行い、各種統計量を求めた。ここではその中から、surge の有義振幅、ゼロクロス周期、そして係留張力の最大値を取り上げた。それらはゼロアップクロスの全振幅解析値である。

Fig. 12~15 は、不規則波の平均波周期 T_{01} を変化させた結果を示している（有義波高は $H_{1/3}/L=0.01$ 程度）。

Fig. 14 Largest amplitude of tension (bow line)

Fig. 15 Largest amplitude of tension (stern line)

横軸は、入射波の T_{01} (設定値) を無次元化したものである。縦軸については、応答のゼロクロス周期、有義両振幅をそれぞれ入射波の T_{01} , $H_{1/3}$ (設定値) により無次元化している。無次元化に用いた L は船の垂線間長である。

surge および係留張力については一部差異があるものの両者の一致はよい。高周波数域の surging 周期に傾向の違いがあり、長周期動揺の発生が実験では顕著に認められるが、その振幅は小さい。 $T_{01}/\sqrt{L/g}=11.24$ が係留船の自由動揺周期に平均波周期をあわせた場合である。明らかに surge とそれに伴う係留張力の応答は大きい。しかし $T_{01}/\sqrt{L/g}=8.04$ においてもこれらの応答は同じオーダーであり、かつ動揺周期が自由動揺周期に近い点も注目される。 $T_{01}/\sqrt{L/g}=4.85, 2.51$ ではこれらに比べその応答は著しく小さい。このように安全係留指標としての surge と係留張力についてみると波周期による影響が著しい。港の内外の波高比のみによる静穏度判定の限界を示すものといえる。

Figs. 16~19 は、有義波高 $H_{1/3}$ を変化させたものである (平均波周期 $T_{01}/\sqrt{L/g}=8.04$)。ここでも計算値は実験値をある程度説明している。ただ低波高域の係留張力に不一致が認められる。計測量が小さくなることに

より計測や実験設定の精度不足が現われるものと考えられよう。Fig. 11 の係留力特性からも推測されるように、係留張力の波高についての非線型性は顕著である。surge の非線型性はこれに比べると弱い。

ここでの実験値は位相を変えた5種類の不規則波信号について行ったもののアンサンブル平均である。計算においても位相5種類について、それぞれ実験と同じ長さの時系列を求め、解析を行った。1種類の位相に対する極大値の数は、波について50~100個、surge について30~50個であった。5種類のアンサンブル平均をとった段階でのデータの量は、統計的に十分なものと考えられる。

3.4.2 応答のスペクトルについて

非線型現象の場合、その低次スペクトルにより確率過程の性質がすべて明らかになるわけではない。しかしなおその情報は周波数領域における現象理解には役立つものと判断される。そこでFFTによる、各応答のオートおよびクロススペクトル解析を実施した。ここではその一部として、2つの波周期に対する、船体重心横の波と

Fig. 16 Zero crossing periods of surge

Fig. 17 Significant amplitude of surge

Fig. 18 Largest amplitude of tension (bow line)

Fig. 19 Largest amplitude of tension (stern line)

Fig. 20 Spectral density of wave at C.G. of ship (Incident wave ; $H_{1/3}/L=0.014$, $T_{01}/\sqrt{L/g}=8.04$)

Fig. 21 Spectral density of surge (Incident wave ; $H_{1/3}/L=0.014$, $T_{01}/\sqrt{L/g}=8.04$)

surge のオートスペクトルの例を紹介する。(Figs. 20～23)

実験値と計算値は平滑の程度の差を別にすると概略対応している。規則波中の surging force の解析同様、波の節に船体重心のあるとき ($\omega \approx 2.3$), surge のスペクトルの密度が大きくなり、波のスペクトル密度は零に近くなっている。一方波の腹に船体重心のあるとき ($\omega \approx 4.4$), surge のスペクトル密度はなくなり、波のスペクトル密度のピークが現われている。このような重複波の性質から、 $T_{01}/\sqrt{L/g}=8.04$ と $T_{01}/\sqrt{L/g}=11.24$ と異なる不規則波に対してほとんど変わらない形の surge スペクトルが生じている点は印象的である。すなわち船体の応答は成分波周波数に対して、進行波中の場合よりも鋭い選択性を示しているわけである。統計解析における $T_{01}/\sqrt{L/g}=8.04$, 11.24 で同程度の応答がみられたのはこの理由によるものであった。重複波中の解析にあたっては代表波周期のみならずスペクトル幅に注意する必要がある。

横付けにおいては、通常岸壁と船体重心の距離は小さい。これに対して縦付けにおいてはその距離が大であり、係留船固有周期に関わる比較的長い成分波の節ある

Fig. 22 Spectral density of wave at C.G. of ship (Incident wave ; $H_{1/3}/L=0.010$, $T_{01}/\sqrt{L/g}=11.24$)

Fig. 23 Spectral density of surge (Incident wave ; $H_{1/3}/L=0.010$, $T_{01}/\sqrt{L/g}=11.24$)

いは腹に重心がある場合が強調される。なお横付けで離岸距離の相当大きな状態についての、井上・本田の規則波中の実験的研究では波の節あるいは腹の影響が論じられている⁴⁾。

また横付けで問題となる大振幅の分数調波現象は、今回の縦付けについての検討範囲では明確には認められなかった。これはフェンダーとアンカーラインという 100:1～1,000:1 程度の係留非対称性に比べ、縦付けの係留非対称性が弱いためであろう。

3.4.3 応答の時系列について

Fig. 24, Fig. 25 には、計算、実験による各応答時系列の一例を示した。船体重心横の波、surge、船首尾の係留索張力であるが、実験における船尾係留索張力は左右両舷のものを示している。実験精度不足等から左右対称とはいいがたい。先の船尾係留索張力の実験値としては、左右両舷それぞれから得られた値の平均を用いていた。なお計算と実験において入力となる入射波の位相は一致させていない。

統計解析あるいはスペクトル解析ですでに明らかにされたように、surge の振幅、周期、係留張力最大値についての計算と実験の一致は良好である。そして係留張力はいずれにおいても鋭いスパイク状の応答が得られてい

Fig. 24 An example of computed time traces
(Incident wave ; $H_{1/3}/L=0.010$,
 $T_{01}/\sqrt{L/g}=11.24$)

る。

surge と係留張力の位相関係に着目すると, surge 負すなわち船体後退のとき船首索のピークが現われ, surge 正すなわち船体前進のとき船尾索のピークが認められる。surge に対する静的係留特性を用いた計算では当然の結果である。実験においても同様の結果が得られたことは, 計算に用いられた仮定の正しさを裏付けるものといえる。同様のことはここに示していないクロススペクトル解析からも得られている。このようにしてこの場合の係留索張力は, surge に対する静的特性では決定され, pitch, heave との連成や索の動的効果は十分小さいものと判断される。

4 数値シミュレーションによる検討例

前節で検討された数値シミュレーション手法を用いて, 係留索の長さや岸壁反射率の係留船の挙動に及ぼす影響を調べることをとする。また模型実験においては係留索特性は, 重量のみを実物相似とし, 弾性については相似としていなかった。そこでここでは弾性についても相似として計算を行っている。すなわち実スケールで AE ($\delta=0$) は, 船首索 7.43×10^5 [kg], 船尾索 4.0×10^8 [kg] とした。なお波高は実船スケール 0.6m としたが, その他の条件は模型実験によるものと同じとしている。

係留索の長さの影響をみるため, 実験対応の長さ s_0 とその 10% 増, 20% 増の長さの 3 種類の状態についてシミュレーションを実施した。その結果として, Figs. 26~28 に surge の有義振幅と係留索の最大張力の変化の様子を示した。船首と船尾のそれぞれの索の長さを増

Fig. 25 An example of measured time traces
(Incident wave ; $H_{1/3}/L=0.010$,
 $T_{01}/\sqrt{L/g}=11.24$)

すにつれて船体動揺と張力は小さくなっている。索が長くなるにつれて, 係留力-変位特性の不動態が大となる。その結果, パネ系という固有周期にあたる周期が長くなることとなり, 同調点が長周期側にずれる。このため今回対象とした波周期の範囲では動揺が小さくなったものと判断される。このような点より, 港内の波周期分布に適した係留索の配置法の選定も可能と思われる。しかしながら, その場合各波周期ごとの粘性減衰係数を何らかの方法で求めておくことが必要である。

次に岸壁反射の影響をみるため, その反射率 K_R を 1.0, 0.7, 0.4 そして 0.0 と変化させて計算を行った。Fig. 29 は, その結果のうち surge 振幅を示している。 $K_R=1.0$ では船は向波と追波を同時に受け, $K_R=0.0$ では向波のみを受けることとなる。反射率が小さくなるにつれ, 船体動揺も小さくなることが認められる。このような結果より縦付けにおける低反射岸壁の利用は, 横付けの場合と異なり¹³⁾船の動揺面からも有利であることが確認された。

5 結 言

港内避泊漁船の安全性検討のため, 縦波縦付け状態における係留船の動的挙動の推定を試みた。また, 水槽内に岸壁の模型を設置し, 係留された模型船の動揺と係留索張力の計測を実施した。得られた結果をまとめると次の通りである。

——時間領域のシミュレーションによる推定計算結果は係留実験値とほぼ一致し, 今回用いたシミュレーション・モデルの有効性が示された。特に,

Fig. 26 Significant amplitude of surge

Fig. 28 Largest amplitude of tension (stern line)

Fig. 27 Largest amplitude of tension (bow line)

Fig. 29 Significant amplitude of surge ($s=1.2s_0$)

a) 有限水深、重複波中の surging force は Froude-Krylov force として説明できる。

b) 係留索張力は、surge に対するカタナリー係留特性によりほぼ決定され、pitch, heave との連成や索の動的効果は十分小さい。しかし、索の弾性影響は重要である。

といった点が明らかとなった。

— 船の surge や係留索張力といった安全指標は、波周期に強く依存することが確かめられた。このため波高のみによる従来の港内静穏度評価には限界がある。

— 波高について応答が非線型であること、そして重複波の節、腹においてスペクトルの極値が現われることが確認された。このため、線型重ね合わせを用いる設計スペクトル法や規則波に置き換える設計波法の適用は難しい。

今後の課題としては、港内波の特性すなわち多峰性波スペクトルや波エネルギーのスペクトル形状の考慮、そして変動風の影響の検討などが挙げられる。いずれも長周期の非線型現象と関連するため、模型実験は容易ではない。そこで今回のシミュレーション手法に粘性減衰力

推定等の改良を加え、現地における実船計測と比較していくことが望まれる。

本研究は(財)漁港漁村建設技術研究所における研究委員会の一環として実施されたものである。種々御検討いただいた同委員会(委員長尾崎晃教授)の各委員および北海道開発庁北海道開発局水産課各位に厚くお礼申し上げる。また日立造船(株)高木又男博士、大阪大学齊藤公男助教授はじめ、運動性能研究委員会の各委員より熱心な御討論、御助言をいただいた。さらに水槽実験実施にあたっては水産工学研究所鈴木四郎主任、山越康行室長および東京商船大学大学院豊水洋一氏の助力を受けた。ここに記して感謝の意を表する次第である。なお数値計算の一部には農林水産研究計算センター ACOS 850 を使用したことを付記する。

参考文献

- 1) 合田良実, 佐藤昭二: 海岸・港湾, 彰国社, (1972)
- 2) Lean, G. H.: Subharmonic motions of moored ships subjected to wave action, T. R. I. N. A.,

- 113 (1971).
- 3) 本田啓之輔, 松木 哲, 井上欣三: 接岸避泊に関する模型実験, 日本航海学会論文集, 第 57 号, (1977)
- 4) 井上欣三, 本田啓之輔: 横波中の離岸係留避泊に関する模型実験, 日本航海学会論文集, 第 60 号, (1978)
- 5) 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 1~3 報), 第 24~26 回海岸工学講演論文集, (1977~1979)
- 6) 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 27 回海岸工学講演論文集, (1980)
- 7) 樫木 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 回海岸工学講演論文集, (1982)
- 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 回海岸工学講演論文集, (1983)
- 9) 上田 茂, 白石 悟: 係岸船舶の動揺計算法とその評価, 港湾技術研究所報告, 第 22 巻, 第 4 号, (1983)
- 10) 上田 茂, 白石 悟: 係岸船舶の動揺に及ぼす波向と係留索の影響, 第 31 回海岸工学講演論文集, (1984)
- 11) 上田 茂, 小熊康文: 荒天時の係岸避泊の限界条件と係船付帯設備の設計手順について, 第 31 回海岸工学講演論文集, (1984)
- 12) Huntington, S. W.: The Use of Random Wave Physical Models in Port Design, BAHRAIN 84, International Maritime Engineering Conference, Manama (1984).
- 13) 清川哲志, 平山彰彦: 任意反射率岸壁に非線型係留された船体の不規則動揺解析, 第 32 回海岸工学講演論文集, (1985)
- 14) 小田一紀, 石上昌男, 秋山 斉: ハイブリッド型シミュレーション法による荒天時船体動揺解析, 第 32 回海岸工学講演論文集, (1985)
- 15) 樫木 亨, 青木伸一: 不規則波中での港内係留船舶の運動予測手法に関する一考察, 第 32 回海岸工学講演論文集, (1985)
- 16) 上田 茂, 白石 悟, 小熊康文: 強風下の係岸船舶の動揺とこれに対する防風壁の効果について, 第 32 回海岸工学講演論文集, (1985)
- 17) Scheffer, H.-J., Kohlase, S.: Functional Harbour Design under Consideration of Ship Motions, International Conference on Numerical and Hydraulic Modelling of Port and Harbours, Birmingham, (1985)
- 18) Mynett, A. E., Keuning, P. J., Vis, F. C.: The Dynamic Behaviour of Moored Vessels inside a Harbour Configuration, International Conference on Numerical and Hydraulic Modelling of Port and Harbours, Birmingham, (1985)
- 19) 高石敬史, 黒井昌明: 波浪中船体運動の実用計算法, 第 2 回耐航性シンポジウム, 日本造船学会, (1977)
- 20) 庄司邦昭: 係留浮体の運動と係留索の張力に関する研究, 日本造船学会論文集, 第 138 号, (1975)
- 21) 井上義行: 任意係留ラインの静的特性計算, 石川島播磨技報, 第 16 巻, 第 5 号, (1976)
- 22) 竹沢誠二: 海洋構造物水槽試験に使用する波浪 (Ⅱ), 日本造船学会誌, 第 614 号, (1980)
- 23) 中山哲蔵, 山本正昭: 浅瀬上を通過する波の変形に関する実験的研究, 水産工学研究所技報 (水産土木) 第 5 号, (1984)
- 24) 高木又男: 漂流力について, 第 2 回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会, (1976)
- 25) 昭和 59 年度漁港内における漁船動揺に関する技術検討業務報告書, 漁港漁村建設技術研究所, (1985)
- 26) 渡辺栄一, 坂田年隆: 港内じょう乱調査・解析, 第 1 回水産工学試験研究推進全国会議資料, 水産庁研究部, (1982)