

2 浮体動揺よりみたマリーナ泊地における船間距離の評価について

久保雅義*・斎藤勝彦**

1. はじめに

人々の価値観の変化, 余暇時間の増大等を背景として国民がレクリエーションを求めるようになってきた. その中でもプレジャーボートによるレクリエーションの需要は近年著しい伸びを示しており, 拠点としてのマリーナの需要も大きく増加している. 現在あるマリーナを参考として, これからのマリーナは質的に高度化, 多様化することはもちろんのこと, 将来プレジャーボートの愛好者の層が更に幅広くなることを考えれば, 安価で効率のよい係留施設等の施設面での充実が必要となるであろう.

マリーナ泊地計画においては, 船舶の安全な係留を可能にするため静穏かつ十分な水深と面積を有する水面を確保する必要がある. しかしながら, 時として係留中の船体動揺によるマストの絡み合いや船体の接触による船体の損傷が起こっているようである. この原因は, 1 艇あたりの水域面積の基準が, 主にこれまでの経験や実績から設定されており(染谷ら, 1988), 現状においては, 1 艇あたりの水域面積はばらつきが多く, 時として狭い水域に多数の船舶を係留しているためであると考えられる. このような問題を考えると, マリーナにおいて安全で効率のよい泊地を計画するためには, 波浪中において船舶同士の接触やマストの絡み合いが起きないように, 1 艇あたりの水域面積の基準を決定しなければならないと考えられる. そこで本研究では, ある距離で並列して係留されているヨットの安全性を, 並列して係留されている船体の船体運動より評価するために, 2 次元数値計算と水理実験を行った.

2. 理論計算

接近して係留される 2 浮体の運動計算は, 船舶工学の双胴船の運動に関する研究で提案されている方法を応用すれば計算可能であるが(大橋ら, 1971), 本研究においては, 2 次元 2 浮体運動計算を行うにあたって, 井島ら(1978)によるグリーン公式を用いた積分方程式法を適

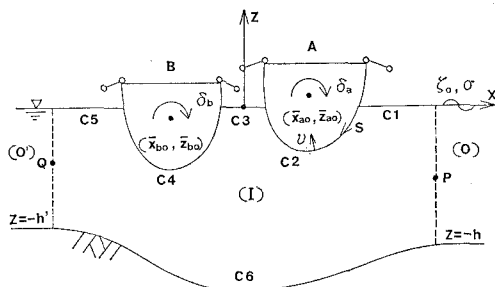


図-1 座標系の設定

用する.

図-1 に示すように, 任意形状の浮体 A, B が弾性索によりそれぞれ対称に係留されている場合を考える. このとき, 振幅 ζ_0 , 角周波数 σ の正弦波により, 2 浮体はそれぞれ周期的な微小運動を行うものとする. 重心位置は, 静止時 $(\bar{x}_{a0}, \bar{z}_{a0})$, $(\bar{x}_{b0}, \bar{z}_{b0})$ から運動中, 時刻 t において (x_{a0}, z_{a0}) , (x_{b0}, z_{b0}) に移り, かつ浮体の重心まわりに δ_a , δ_b だけ回転する. これらの変位と回転角の複素振幅をそれぞれ X_a , Z_a , θ_a , X_b , Z_b , θ_b とすると浮体の運動は次式で表される.

$$\left. \begin{aligned} x_{a0} - \bar{x}_{a0} &= X_a e^{i\sigma t}, & x_{b0} - \bar{x}_{b0} &= X_b e^{i\sigma t} \\ z_{a0} - \bar{z}_{a0} &= Z_a e^{i\sigma t}, & z_{b0} - \bar{z}_{b0} &= Z_b e^{i\sigma t} \\ \delta_a &= \theta_a e^{i\sigma t}, & \delta_b &= \theta_b e^{i\sigma t} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここに, $i = \sqrt{-1}$ である.

このとき流体運動は, ラプラスの方程式を満足する無次元化速度ポテンシャル $\phi(x, z)$ を用いると, 式(2)の速度ポテンシャル $\Phi(x, z, t)$ で与えられる.

$$\Phi(x, z, t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi(x, z) e^{i\sigma t} \dots \dots \dots (2)$$

ここに, g は重力加速度である.

2.1 浮体の運動方程式

浮体 A に作用する動水圧力およびモーメントを P_{ax} , P_{az} , $T_{a\theta}$ とし, 係留力およびモーメントを F_{ax} , F_{az} , $M_{a\theta}$, 静水圧による復原力と復原モーメントを P_{as} , T_{as} とすると, 浮体 A の運動方程式は次式のように表すことができる.

* 正会員 工博 神戸商船大学教授 船貨輸送研究施設

** 正会員 商船修 神戸商船大学助手 船貨輸送研究施設

$$\left. \begin{aligned} Ma \frac{d^2 x_{a0}}{dt^2} &= P_{ax} + F_{ax} \\ Ma \frac{d^2 z_{a0}}{dt^2} &= P_{az} + F_{az} + P_{as} \\ Ia \frac{d^2 \delta_a}{dt^2} &= T_{a0} + M_{a0} + T_{as} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 M_a 、 I_a は浮体 A の質量および慣性モーメントである。同様に、浮体 B についても式 (3) のような運動方程式が成立する。

2.2 ポテンシャル関数とグリーンの公式

2 浮体から十分離れた領域において、速度ポテンシャルは次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \phi(x, z) &= (e^{ikx} + K_T e^{-ikx}) A(k, z) \\ &\quad : \text{region (0)} \\ \phi(x, z) &= K_t e^{ik'x} A(k', z) \\ &\quad : \text{region (0')} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $A(k, z) = \cosh k(h+z)/\cosh kh$ 、 $A(k', z) = \cosh k'(h'+z)/\cosh k'h'$ で、 k および k' は、 $\sigma^2 = gk \tanh kh = gk' \tanh k'h'$ で表される波数、 h および h' はそれぞれ領域 (0)、(0') での水深である。

さて、領域 (I) を囲む境界線 c におけるポテンシャル関数 $\phi(x, z)$ は、境界線上の動点の値 $\phi(x', z')$ と外向き法線微分値 $\partial\phi(x', z')/\partial\nu$ により次式のように表される。

$$\phi(x, z) = \frac{1}{\pi} \int_c \left[\phi(x', z') \frac{\partial}{\partial\nu} \left\{ \log \left(\frac{r}{h_0} \right) \right\} - \log \left(\frac{r}{h_0} \right) \frac{\partial\phi(x', z')}{\partial\nu} \right] ds \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 r は (x, z) と (x', z') との距離、 h_0 は代表長さである。また境界線 c において、領域 C1, C3, C5 には自由表面条件、C6 には水底条件、点 P, Q においては式 (4) と (5) で表されるポテンシャルによるエネルギー流束と質量流束の連続条件が適用される。よって、式 (3) と式 (5) を、境界線において微小要素に離散化した連立方程式を解くことによって、境界上のポテンシャル関数および反射率、透過率、2 浮体の運動変位を求めることができる。また、2 浮体の運動の位相差も、得られた運動変位の実数部と虚数部の値を考慮することで求めることができる。

3. 水理実験による理論の検証

理論計算の検証のために、図-2 に示すように並列係留 2 浮体の運動実験を、神戸商船大学の水槽 (長さ 60 m, 幅 6 m, 深さ 2 m) で行った。実験中の水深は 50 cm, 浮体間隔 3 ケース (B, 1/2B, 1/3B : B は大きい方の船の幅), また浮体間隔 1/2B については浮体の位置関係を逆転した実験も行った。波浪中の運動は、6 自由度船体運動測定装置を 2 つの浮体に交互に取り付ける

ことで、Sway, heave, roll を計測し、実験をビデオカメラで撮影して実験後コマ送り再生して 2 浮体の運動の位相差も計測した。

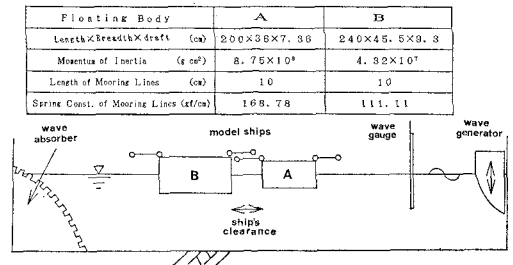


図-2 実験の配置と模型船の諸元

今回の実験によると、並列に係留されることにより波が透過していく側の船の短周期の運動が、単独もしくは波が入射してくる側に船がある場合よりもやや小さくなる傾向にあった。これは、短周期の波についての入射側の船の消波効果があらわれているものと考えられる。また今回の実験では、浮体の間隔を変えても運動の周期特性に大きな変化はみられなかったが、船の運動による造波現象と船の位置関係によっては、運動特性に明確な変化が生じることは考えられるので、今後さらに船間距離の変化についての綿密な実験を行う予定である。

図-3 は、水理実験と理論計算により得た入射波振幅による無次元運動振幅の一例である。ここに、 h_0 は水深を表す。図より実験と計算による結果はほぼ一致しており、今回の計算手法は妥当であることがわかった。図は、波の入射方向に対する係留位置を変えた場合の、小さい船の運動であるが、heave について、係留位置を変えると波周期によっては顕著な相違がみられる。この原因は、大きな船の消波と反射の効果が影響していると考えられるので、大きな船が単独で存在する場合の反射率と透過率を 2. で述べた方法により計算した。図-4 はその結果であるが、これより実験において顕著な特徴がみられた周期 0.5~1 秒付近では船の反射率は大きく、透過率は小さいことがわかる。つまり、小さな船が大きな船の入射側にある場合は、ほぼ重複波動場であり、波の透過側に小さな船があるときは入射波の影響は著しく小さくなっているものと考えられる。

図-5 は、実験と計算による各運動モードの位相差である。図をみるかぎり位相差についても計算の妥当性はある程度確認できたと考えられる。ただし、今回の実験方法では、運動が小さい場合は位相差の測定が不可能で、運動がある程度大きい場合でも正確に位相差を測定することはできなかった。浮体運動の位相差を正確に測定するためには、両方の浮体の運動を同時に測定する必要があり、位相差の測定については今後さらに綿密な実

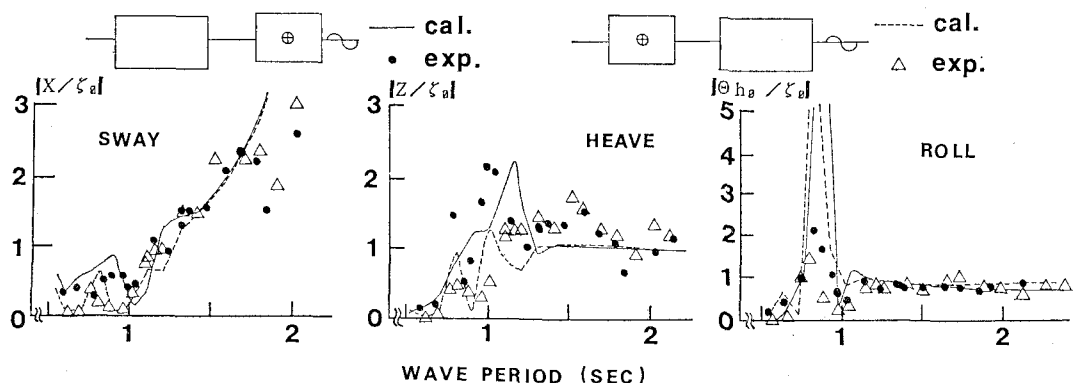


図-3 2浮体運動の実験と計算の比較

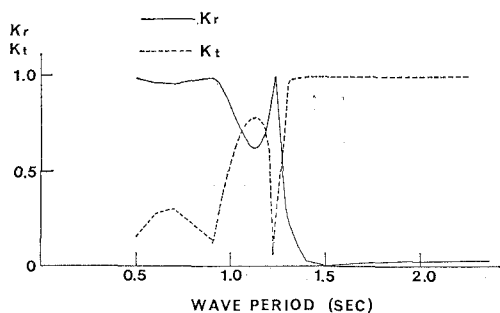


図-4 大きな浮体の反射率と透過率

験を行いたく考えている。

4. 波浪中の動揺よりみた係留ヨットの船間距離

マリーナ泊地において、プレジャーボートの安全な係留を保証するためには、泊地水面は十分な静穏性と水深を確保しながら効率のよいバースの配置計画を行わなければならない。特に1艇あたりの必要水域は、波浪中の船体運動による船体同士の衝突やマストの絡み合いが起らないように十分な面積が必要である。しかしながら、1艇あたりの泊地面積について明確な基準はなく、かろうじて泊地内の波高を30cm以下に抑えるという目

標があるに過ぎないのが現状であろう。そこで以下では、これまで述べた浮体の運動計算を用いて、マリーナ泊地における1艇あたりの水域面積の評価法について述べる。

図-6は、現在日本で販売されている425隻のクルーザーヨットの諸元の関係の一例である。この様な図より標準的なヨットのサイズが決められる。今回の計算では、図-7に示すように、標準的なヨットの一例を矩形浮体に近似した。図-7は、本サイズのヨットが係留される時の代表的な係留の例である(染谷ら, 1988)。図より、両船の運動の位相が最悪の場合、波浪によるSwayの振幅の合計($X_1 + X_2$)もしくはrollによりマストが船側から出る量の合計($R_1 + R_2$)が、80cmよりも大きくなれば両船が接触することになる。

図-7に示すような係留状態で、2浮体が真横より波を受ける場合、2.で述べた方法により浮体の運動変位は図-8のようになる。図-8は入射波振幅による無次元値であるので、ある入射波高を与えれば運動の変位量が求められる。一般に泊地内の波高は30cm以下に抑える必要があるとされているので、計算結果に入射波振幅15cmを考慮すれば、この2浮体が波浪中に接触する可能性があるかどうかの判別を行うことができる。図-9によれば、rollの固有周期付近ではマスト同士の絡み合

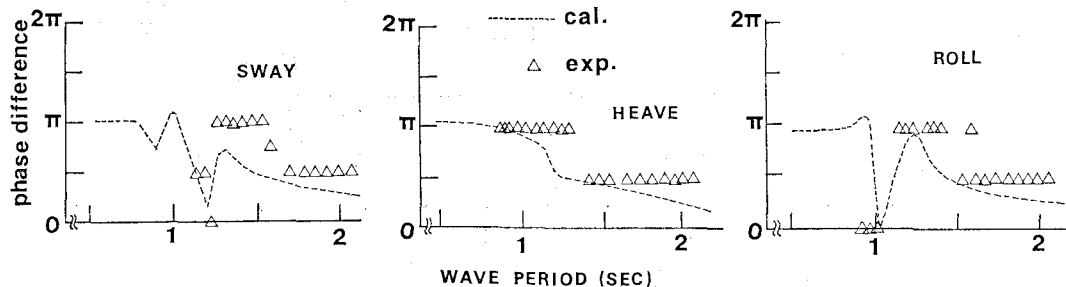


図-5 実験と計算による2浮体運動位相差

より係留中船舶の安全性が問評価されるべきであり、特に波の周期と roll の固有周期の関係には注意すべきである。

5. あとがき

まず、2次2元浮体運動計算に井島らによるグリーンの公式を用いた積分方程式を適用し、水理実験により理論適用の妥当性を検証した。なお本計算手法を用いれば計算の能力が許される限り、3つ以上の浮体が接近して係留する場合でも適用可能であることは言うまでもない。さらに、マリーナ泊地における波浪中の係留ヨットの安全性を2浮体運動より評価し、マリーナ泊地計画を行うにあたっては、船体運動より評価した1艇あたりの水域面積が用いられるべきであることを指摘した。

クルーザーヨットは高価なものであり、係留中の破損は許されない。海洋性レジャーの拠点となるマリーナが真に庶民の憩いの場になるためには、ソフト面での充実もさることながら、ハード面についても積極的に研究が行われる必要があると考えられる。

最後に、本研究を行うにあたって、大阪大学工学部榎木亨教授、青木伸一助手には終始貴重な御意見を賜った。また、実験や資料整理について当時学生小林健君には御援助頂いた。ここに諸氏に対して厚くお礼申し上げます次第である。

なお、この研究の一部は文部省科学研究費重点領域研究(1):異常時風浪に対する港湾区域の防災力とその向上システムに関する研究(名古屋大学工学部岩田好一郎教授代表)によったことを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 井島武士・吉田明徳・山本督夫(1978): 任意断面浮体の二次元係留問題と波の変形, 土木学会論文集, 第272号, pp. 55~63.
- 大楠 丹・高木幹雄(1971): 双胴船の運動について, 日本造船学会論文集, 第129号, pp. 29~40.
- 久保雅義・斎藤勝彦・榊原繁樹(1988): 岸壁前面船体運動へのストリップ法の拡張, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 682~686.
- 染谷昭夫・藤森泰明・森 繁泉(1988): マリーナの計画, 鹿島出版会, pp. 99~143.