

隣接船の相対動揺から見た係留船の安全評価

森田修二*・榎木 享**・出口一郎***・青木伸一****

1. ま え が き

近年、海洋レクリエーションの普及により、マリーナの必要性が年々増加する傾向にある。現在、マリーナによるプレジャーボートの保管隻数は不足している。海岸や河川に不法係留されている放置艇は非常に多く、早急なマリーナ施設の整備が必要である。一方、マリーナにおいて、経営的には可能なかぎり多くの船を保管することが望ましく、近接した位置に係留されることになる。したがって、係留船の安全性や利便性を確保するためには、波高による港内の静穏性の評価だけでなく、係留船の動揺特性を評価する必要がある。また、自然条件の恵まれない地域ではより詳細な係留施設の検討が必要である。従来のマリーナの設計は、既存資料に基づいて経験的な手法で行うか、波高の予測を行う程度であり、係留船の動揺について検討することは希である。一方、隣接船の接触について、利用者から苦情がよく聞かれる。また、異常気象時には船体の破損事故も生じている。

船体動揺の問題については、グリーン関数を用いた数値解析による研究が幾つか見られ、港内の動揺問題についても研究が行われている。しかし、隣接船の動揺問題は久保ら(1991)の研究があるが、研究例は少なく、マリーナのような小規模な港湾における隣接するプレジャーボートの動揺問題を研究した例は極めて少ない。

港内では、特に係留施設が建設される場所は護岸の近辺であり、定常波が形成されやすくなる。この場合、船体運動を単一の運動モードで見ると、SWAYが小さい場合はROLLが大きい等、全てのモードの運動量が一律に低減されることは希で、船体運動の安全評価は困難である。また、単一の船体では比較的運動量が小さくとも、運動のフェーズを考慮すれば、隣接する船体の相対運動から見れば、隣接船の接触に対して必ずしも安全とは言えない。本文では、マリーナにおける船体の複合的な運動や隣接船の相対的な運動に着目し、係留船の安全評価を行ったもので、係留施設の適切な設計手法の研究を目

的としている。

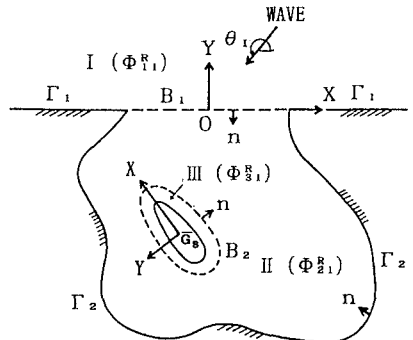
2. 解析手法

港内の船体動揺解析には、榎木ら(1988, 1990)が提案したグリーン関数を用いた境界積分方程式法を適用した。本手法は、入射波の船体による攪乱(回折問題)と船体運動による流体場の変形(造波問題)を別個に求めて、これらから船体の運動方程式を解く手法である。流体の速度ポテンシャルの算出には、対象とする領域(図一1)を港外の半無限領域Iと船体近傍を除く港内領域II船体近傍の領域IIIに分割し、領域IとIIでは2次元問題、領域IIIでは3次元問題として扱う手法である。ただし、本手法では速度ポテンシャルの算出に際して、港口および港湾、仮想境界 B_2 の線分要素と船体および仮想境界 B_2 の面要素に関する境界積分を行う必要があり、現地スケールの解析は計算機と言えども容易ではない。最終的には港口の線要素と船体と仮想境界 B_2 の面要素に関する連立一次方程式を解けばよい。本研究では線積分の計算と面積分の計算を分離して連立一次方程式を算出することで、現地スケールの解析を容易にした。

ここで、波浪外力として正弦波を考える。船体 n の各モードの運動 ξ_n^i は次式で表すことができる。 ξ_{0i} は各モードの複素振幅、 ω は角周波数である。

$$\xi_n^i = \xi_{0i} \exp(-i\omega t) \quad (i=1, 2, \dots, 6) \dots\dots(1)$$

港口における入射波のフェーズ θ_0 に対する各運動モードのフェーズのずれ ε_n^i は次式で表される。



図一1 解析領域の概念

* 正会員 (株)奥村組・電算センター
 ** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科
 **** 正会員 工博 豊橋科学技術大学助教授 建設工学科

$$\varepsilon_i^n = \tan^{-1}\{I_m(\xi_{0i}^n)/R_e(\xi_{0i}^n)\} \dots\dots\dots (2)$$

また、各船体の運動量は次式で表される。

$$\xi_i^n = a_i^n \sin(\theta + \varepsilon_i^n) \dots\dots\dots (3)$$

添え字の i は運動のモード、 n は船体の番号、 a_i^n は運動の振幅を表す。ここで、隣接する2船体の間隔について見れば、各運動モードにおける船体 n と m の船体間隔の変位 $\Delta\xi_i^{nm}$ は次式で表される。

$$\Delta\xi_i^{nm} = \xi_i^n - \xi_i^m$$

$$= A_i^{nm} \sin(\theta_0 + \varepsilon_i^n - \tau_i^{nm}) \dots\dots\dots (4)$$

$$(A_i^{nm})^2 = (a_i^n)^2 + (a_i^m)^2$$

$$- 2a_i^n a_i^m \cos \varepsilon_i^{nm} \dots\dots\dots (5)$$

$$\tan \tau_i^{nm} = \frac{a_i^m \sin \varepsilon_i^{nm}}{(a_i^n - a_i^m \cos \varepsilon_i^{nm})} \dots\dots\dots (6)$$

$$\varepsilon_i^{nm} = \varepsilon_i^n - \varepsilon_i^m \dots\dots\dots (7)$$

船体間隔の変位 $\Delta\xi_i^{nm}$ が隣接する2船体の接近度を表すため、変位 $\Delta\xi_i^{nm}$ が各運動モードに関する2船体の間隔を越える場合に接触することになる。したがって、変位 $\Delta\xi_i^{nm}$ の振幅 A_i^{nm} によって隣接する2船体の接触に対する安全評価ができる。ただし、図-2に示すように、船体の接触に関わる運動モードはSURGE, SWAY, ROLL, YAWの4つと考えられる。また、ヨットのマストや船首、船尾は、これらの運動の合成で接触の有無が評価される。モード i とモード j の運動の合成量 ξ_{ij}^n は次式で表される。

$$\xi_{ij}^n = a_i^n \sin(\theta_0 + \varepsilon_i^n)$$

$$+ a_j^n \sin(\theta_0 + \varepsilon_j^n) \dots\dots\dots (8)$$

各運動モードと同様に、合成運動による船体間隔の変位は次式で表される。

$$\Delta\xi_{ij}^{nm} = \xi_{ij}^n - \xi_{ij}^m$$

$$= A_{ij}^{nm} \sin(\theta_0 + \tau_{ij}^{nm}) \dots\dots\dots (9)$$

$$(A_{ij}^{nm})^2 = (A_i^{nm})^2 + (A_j^{nm})^2 + 2A_i^{nm} A_j^{nm}$$

$$\times \cos(\varepsilon_i^{nm} - \varepsilon_j^{nm} - \tau_i^{nm} + \tau_j^{nm}) \dots\dots\dots (10)$$

$$\tan \tau_{ij}^{nm} = \frac{\{A_i^{nm} \sin(\varepsilon - \tau)_i^{nm} + A_j^{nm} \sin(\varepsilon - \tau)_j^{nm}\}}{\{A_i^{nm} \cos(\varepsilon - \tau)_i^{nm} + A_j^{nm} \cos(\varepsilon - \tau)_j^{nm}\}} \dots (11)$$

3. 解析モデル

図-3に示したマリーナのモデルにおいて、A点~B

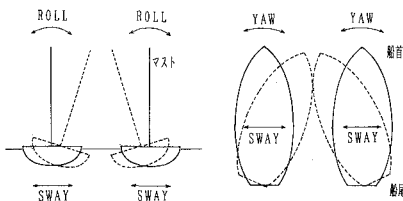


図-2 隣接2船体の相対運動

点~C点を係留位置とした場合の隣接船の相対運動の評価を行った。波浪条件は規則波を対象とし、解析の条件を以下に示した。なお、波向が船体運動の方向性に関係が深いと予想されるので、入射角については3種類の条件について検討を行った。

- 入射波の周期 4秒
- 入射角 $\alpha = 30$ 度, 45度, 60度
- 港内水深 5m
- 港内の反射率 0.9

図-4には隣接2船体のモデルを示した。船体①がA点側に位置する。船体の形状は楕円体とし、以下に船体の諸元を示した。

船長	10 m	船幅	4 m
喫水	1 m	マスト高さ	10 m
船体間隔	1 m	重心位置	静水面下 0.5 m
慣性モーメント			
SURGE	$20.9 \times 10^3 \text{kg}$	ROLL	65kgm^2
SWAY	$20.9 \times 10^3 \text{kg}$	PITCH	400kgm^2
HEAVE	$20.9 \times 10^3 \text{kg}$	YAW	400kgm^2
メタセンター高さ			
ROLL	1.65 m	PITCH	9.53 m

なお、本研究では係留力を考慮せず自由浮体として解析を行った。本研究では、係留力の影響を省き、港内の静穏度や係留位置と船体運動との関係を明確にすることを目的とした。

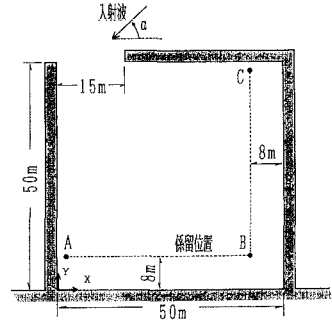


図-3 マリーナの解析モデル

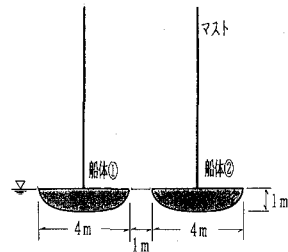


図-4 隣接2船体のモデル

4. 解析結果と考察

港内の静穏度や係留位置と船体運動の関係を明らかにするために、港内波高の定常解を求めた。定常解析には Lee (1971) によるグリーン関数を用いた境界積分方程式法に港内境界の任意反射率を加えた解析手法を適用した。図-5には、A点～B点～C点の波高を示した。波向 α が 30度, 45度, 60度の順に細線→太線で示している。横軸にはA点からの延長距離、縦軸には入射波高で無次元化した波高を示した。全ての波向に共通してC点付近を除き、A点からB点, C点に向かって波高が小さくなる傾向にある。A点～B点は、港口から波が伝播しやすい位置と考えられる。

図-6～図-9には、波向 α が 45度の場合の隣接2船

体の SWAY の運動を示した。図-6, 図-7は運動振幅と船体間隔の変位振幅を示しており、入射波高で無次元化している。図-8, 図-9は入射波に対するフェーズ差と2船体間のフェーズ差を示しており、 2π で除している。各図ともに、船体①を白丸, 船体②を黒丸, 船体間の変位あるいは差を実線で示している。図-6, 図-8はA点～B点, 図-7, 図-9はB点～C点の結果を示している。横軸は船体①の x 座標 (A～B) あるいは y 座標 (B～C) を表している。船体間の変位振幅は、2船体の相対的な運動を示している。今、船体間隔を1mと設定しているため、SWAYに関する変位振幅が1mを越えた場合に2船体が接触することを示している。2船体間のフェーズ差は ± 0.5 の場合に $\pm\pi$ となり、最もフェーズのずれが大きく、変位振幅が大きくなる。逆に $0, \pm 1$ の場合はフェーズ差が 2π の倍数となり、フェーズ差がないことになる。A～Bでは船体①と②の運動振幅が同じような周期的な変動を示しており、船体座標のずれ (5m) を考慮すれば、運動振幅が船体座標に依存しており船体相互の干渉が小さいことがわかる。また、運動振幅が大きく且つフェーズ差が0.5に近い地点で船体間隔の変位振幅が大きくなっているのがわかる。B～Cでは船体①と②の運動振幅は、①の減少傾向に対し②は増大傾向にあり逆の変化を示している。変位振幅は、B点, C点付近の運動振幅が大きい地点とほぼ中央の運動振幅の差が比較的小さいがフェーズ差が0.5に近い地点で大きくなってい

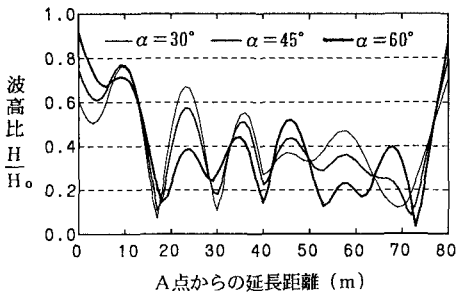


図-5 波高の分布

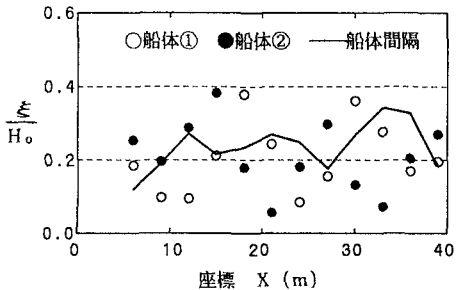


図-6 SWAYの運動振幅と変位振幅 (A～B)

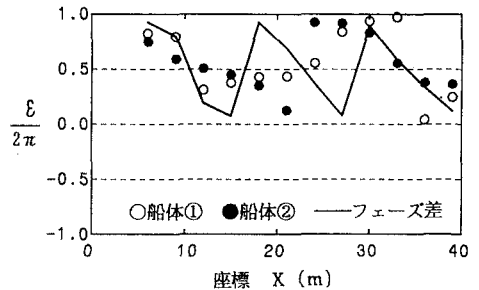


図-8 SWAYのフェーズ差 (A～B)

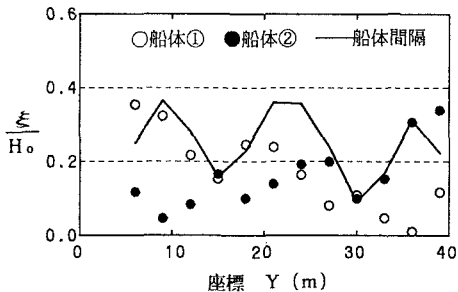


図-7 SWAYの運動振幅と変位振幅 (B～C)

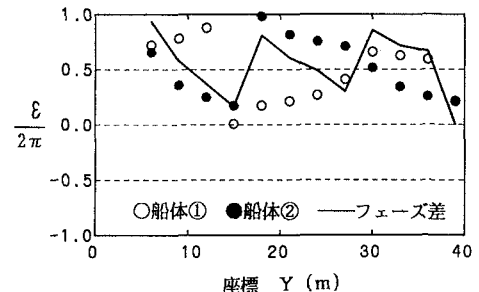


図-9 SWAYのフェーズ差 (B～C)

る。A～BとB～Cの変位振幅を比較すると、A～Bは変動が小さく絶対値も小さい。図-5の波高分布との関係で見ると、A付近の最も波高の大きい地点では逆に変位振幅が小さいことがわかる。B～Cの比較的波高が小さい地点で変位振幅が大きくなっている。C点付近では波高が特に大きくなっているが、変位振幅は逆に小さくなる傾向にある。この結果から、波高の大小だけでは隣接2船体の接触に対する安全評価ができないことがわかる。

図-10～図-15には、波向 α が30度、45度、60度の場合のSWAY・ROLL(黒丸)の合成運動とSWAY・YAW(白丸)の合成運動による2船体間隔の変位振幅の解析結果を示した。軸の示し方は図-6、図-7と同じである。ROLLやYAWの運動振幅にマスト高さ、船長の半分を乗じてマスト先端や船首、船尾の運動振幅として評価している。変位振幅はマストや船首、船尾の接近度であり、船体間隔(5m)を越えると接触することを示している。

SWAY・ROLLの変位振幅を見ると、全ての波向についてA～Bの変位振幅がB～Cよりも小さく、波高が最も高いA付近でより小さくなっている。この傾向は波向の角度が大きいほど明確である。入射角が大きければA～Bの位置では船体の縦方向に波が入り易い。逆に、B

～Cには船体の横方向に波が入り易いと考えられる。このため、SWAY・ROLLの運動についてはB～Cの方が大きくなっている。したがって、船体運動に対しては、波高だけでなく波向の評価が重要であることが確認できる。

SWAY・YAWの変位振幅を見ると、波向が60度の場合はA～Bの方が小さいが、その他の波向ではB～Cの方が小さい。本文では記述していないが、SWAY・YAWのフェーズ差はSWAY・ROLLに比較して小さくなっている。運動振幅はA～BとB～Cは同様のパターンを示しているが、絶対量の差によって変位振幅の大小が生じている。波向が60度の場合はA～Bの方が小さいことから、SWAY・ROLLと同様に、波高だけでなく波向との関係が深いと考えられる。

本文では記述していないが、波強制力の解析結果について見ると、YAWの波強制力はSWAYやROLLに比較して小さくなっている。付加質量や減衰係数も小さいため、結果的にYAWの運動が大きくなっている。したがって、本解析では考慮していないが、係留力を考えればYAWの船体運動は他のモードに比較して容易に制御できると考えられる。現地では、船首や船尾といった船体自体の接触よりもマストの接触がよく問題となっていることから理解できる。

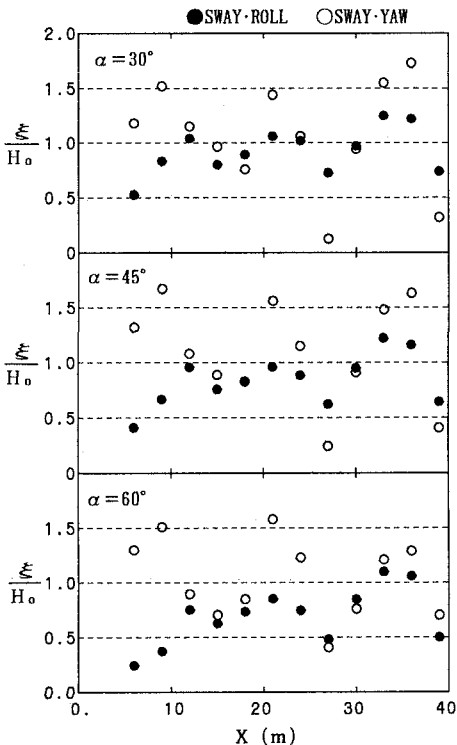


図-10 合成モードの変位振幅 (A～B)

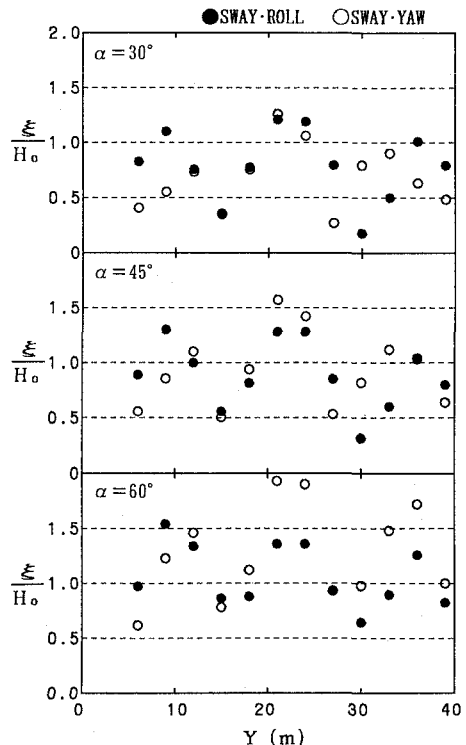


図-11 合成モードの変位振幅 (B～C)

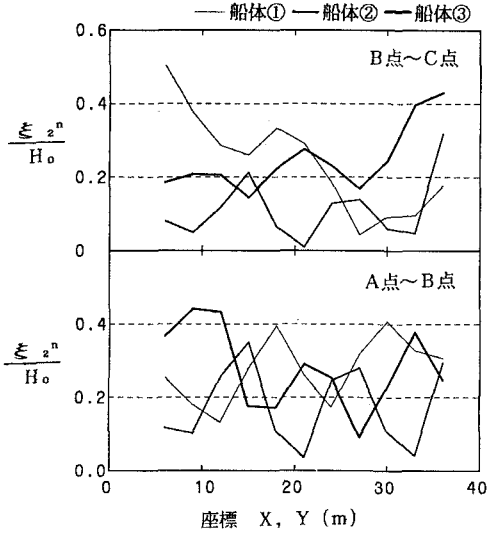


図-12 3船体の運動振幅

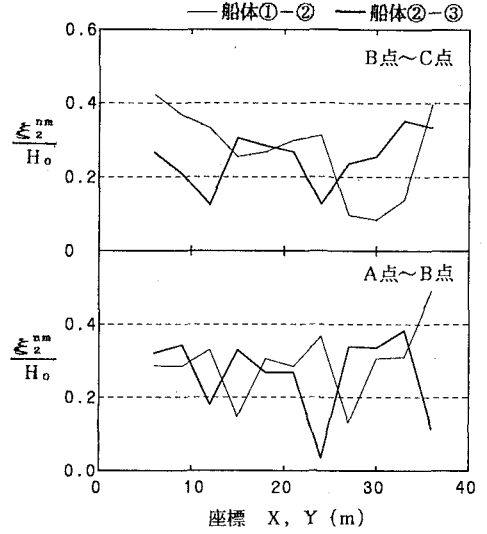


図-13 3船体間隔の変位振幅

図-12, 図-13には、隣接する3船体の場合で波向 α が45度の解析結果を示した。隣接の形態は、2船体の場合と同様である。図-12はSWAYの運動振幅で、船体①、②、③の順に細線→太線で示している。図-13はSWAYによる船体間隔の変位振幅で、船体①と②、船体②と③の間隔の順に細線→太線で示している。各図ともに上段がA～Bの結果、下段がB～Cの結果であり、軸の示し方はこれまでと同様である。

図-12の運動振幅の結果を見ると図-6, 図-7の2船体の結果と比較して絶対値としては大きな違いはない。A～Bでは変動のパターンも類似しており、2船体の場合と同様に、運動振幅は隣接船の干渉よりも船体座標に依存していると考えられる。B～Cでは、船体①と③の変動が2船体の変動に類似しており、船体②の運動振幅は比較的小さくなっている。このような定性的な相違は波向との関係が深いと考えられる。

図-13の変位振幅の結果を見ると、絶対値としては2船体の場合と大きな違いがないことがわかる。変動のパターンでは、2船体の場合と比較して、A～Bは境界付近で若干異なる部分もあるが、ほぼ同様の傾向を示している。船体①と②、船体②と③の変動パターンも類似しており、変位振幅においても隣接船の干渉よりも船体座標が支配的であることがわかる。B～Cでは、変動パターンは2船体の場合と異なり、変位振幅が大きくなる位置も異なっている。中央に位置する船体②の運動振幅が異なっているためである。以上のことから、3船体の場合は2船体と比較して、波向によっては運動のパターンが異

なることもあるが、運動の絶対量としては大きな違いはないと考えられる。

5. あとがき

本研究では、先に提案した船体動揺の解析手法を用いて、マリーナにおける係留施設の平面配置について一つの設計手法を示した。従来、係留施設の平面配置については十分な検討がされず、波高の検討が希に行われる程度であった。本研究により、隣接船の相対的な動揺から見れば、港内では波高が小さい場所でも、逆に安全性に問題となる場合があることが確認された。係留施設の平面配置を考える場合は、係留様式に応じて隣接船の特定の相対動揺に着目する必要がある。本研究では、船体の運動特性を明確にするために、係留力は考慮しなかったが、今後は係留力を考慮した研究や実験による検証も行う予定である。

参考文献

榎木 亨・青木伸一・濱本 敏 (1988): 港湾形状を考慮した港内船舶の回折・造波問題の解析, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 692-696.
 榎木 亨・青木伸一・馬場英通 (1990): 港内係留船の波浪動揺特性とその予測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 709-713.
 久保雅義・斉藤勝彦・大音宗昭・芳田利春 (1991): 近接して係留された2浮体の波浪動揺に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 766-770.
 Lee, J. J. (1971): Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, J. Fluid. Mech., Vol. 45, pp. 375-394.