

港内における航走波の簡易解析手法

Symple Neumerical Method of Ship Generated Waves in Marina

森田修二^{*}・榎木 亨^{**}・出口一郎^{***}・奥田晋史^{****}
S. Morita, T. Sawaragi, I. Deguchi and S. Okuda

To prepare space for mooring of pleasure boats, various marinas or harbors are planned to be constructed. In such planning, full investigation of natural environment has to be carried out to maintain safety mooring and amenity of the marina. In this study the effect of ship generated waves on a tranquility of marina is investigated. For the evaluation of ship generated waves, a simple neumerical method is proposed where an unsteady mild slope equation is utilized. The applicability of the method is examined by model experiments and the effect of the position of fairway in marina on the harbor tranquility is investigated nuemerically.

Keywords:(Marina, Ship generated waves, Unsteady mild slope equation)

1. まえがき

わが国では、海洋レジャーの普及に伴い、ヨット、モーターボートの保有隻数は年々着実に増加する状況にあり、プレジャーボートの不法係留の増加は社会問題になっている。今後さらに増え続けると予想されるプレジャーボートに対応するために、数多くのマリナー、ヨットハーバーの建設が予定されている。一方、従来のマリナーの水域における施設の配置設計は、既存のマリナーを参考にした経験的な手法が用いられることが多く、解析的な検討としては、波浪解析による港内静穏度の検討が希に行われる程度である。その結果、利便性や安全性の面で問題点を抱えているマリナーは少なくない。このようなマリナーの持つ問題点の一つに、航走波の問題があげられる。マリナーにおける航走波の問題は、わが国のマリナーが比較的小規模な港湾であり、港内の航路と係留施設が近接しているためにパワーボート等の航走波が係留船の動揺を引き起こすことである。本研究の目的は航走波による係留施設への影響を極力抑えることのできる港内航路と係留施設の配置設計を行うことである。航走波に関する研究は古くから行われているが、多くの研究は船舶に対する造波抵抗や護岸の防護が目的にされており、実験的あるいは実測による研究が多い。理論的な研究は古くはKelvinの研究があげられるが、その他の研究も含めて定常波の解析であり、非定常の解析は極めて少ない。しかし、マリナーのような小規模な港湾において、航走波を定常波として扱うことは不適切であり、本研究では非定常の簡易解析手法を提案した。本手法の適用性を確認するために、実験による検証や既往の実験データとの比較を行った。また、マリナーのモデル解析によるケーススタディにおいて適切な航路の配置について検討を行った。

2. 解析手法

航走波の発生状況を観察すると、航跡上の点では船舶が通過する間に波が引き起こされ、結果として局所的で断続的な波が生じていることがわかる。港内における航走波の波高は数10cmのオーダーであり、波形としては規則的な微小振幅波のたし合わせで評価できると考えられる。このような局所的で断続的な規則波を評価できる解析手法には非定常の緩勾配方程式法による数値解析が適している。港内の波変形を扱うためには、構造物による反射や回折を評価する必要があるが、これらの変形特性においても非定常の緩勾配方程式法が有効である。ただし、通常の風波の解析とは異なるので、造波条件には工夫が必要である。ここでは、航走波の発生のメカニズムそのものをモデル化するのではなく、現象としての波の発生と伝播をモデル化することを考える。航走波は航跡線に関して対称であり、個々の波を見れば全て同一の波が航跡線から発生している。図-1は本手法における航走波の造波条件を示したものである。航跡線上で個々の波について線分要素として離散化を行い、波の周期と波向に応じた造波条件を設定し、艇の進行方向には艇速に合わせて連続的に造波を行う。式(1)には航跡線上の造波条件としての水面変動量を示した。

$$\eta_0 = \zeta_0 \sin \{ \omega (t - t_m) - x_m k \cos \alpha \} \quad (1)$$

* 正会員 (株)奥村組・電算センター (〒545 大阪市阿倍野区松崎町2丁目2番2号)

** 正会員 大阪産業大学工学部

*** 正会員 大阪大学工学部土木工学科

**** 学生員 大阪大学工学部土木工学科

ここで、 ω 、 k は波の角周波数と波数、 ζ_0 は航跡線上における波の振幅、 t は時間、 t_m は艇が線分要素 m に到達するのに要する時間、 x_m は線分要素 m における局所座標、 α は航跡線に対する波の角度である。線分要素 m の長さは、要素 m と $m+1$ の波形が1波長のフェーズのずれを持って連続するとして次式で表した。

$$\Delta s = L V_s / (V_s \cos \alpha - c) \tag{2}$$

ここで、 L 、 c は波長と波速、 V_s は艇速である。また、各点における造波時間 t_s は、船体が通過するのに要する時間として次式で与えられる。 L_s は艇長である。

$$t_s = L_s / V_s \tag{3}$$

以上の造波条件をまとめて次式に示した。ここで h は水深、 T は波の周期、 H は航跡線上の波高である。

$$\eta_0 = f(V_s, L_s, h, T, H, \alpha) \tag{4}$$

式(4)からわかるように、艇の速度や長さといった航走波を引き起こす艇独自の条件に加えて、航走波の周期や波向等も造波条件として設定する必要がある。本手法は、艇の航行による航走波の発生過程をモデル化したものではなく、結果として発生した航走波の伝播を解析する簡易解析手法と位置付けられる。したがって、本手法を適用するためには、艇長や艇速、喫水等の艇の条件に関わる航走波のデータを蓄積する必要がある。

3. 既往の実験データによる検証

航走波については、Johnson によって実験的な研究がなされており、模型船体を用いて艇速や模型の艇長、喫水、等の船体の諸元と波高の減衰や周期、cusp locusとの関係が求められている。Johnson が行った実験¹⁾の概要を図-2に示したが、滑車を用いて重りの自然落下により模型船体を牽引することで艇速を与えている。測定は、航跡線に直交する線上の数点に波高計を設置して波形を測定している。この実験から多くのデータが示されているが、式(4)に示した必要なデータの中で航走波の波向 α は示されていないので、波向 α のシミュレーションを行い、本手法で得られた航走波の伝播特性と実験データを比較する。ここで比較するのは、表-1の条件の模型船である。

図-3には航跡線からの距離と波高の関係を示した。記号が実験値、実線が解析値であり、フルード数($\lambda = V_s / \sqrt{g h}$)が0.8, 1.2, 1.4, 1.6の場合の結果を示している。解析値では、航跡線上の波高に対する比が求められるので、航跡線から1.5ft離れた点に対する波高比について比較を行った。横軸は航跡線からの距離を艇長で除して無次元化している。また、解析では実験から得られている波の周期から、フルード数に応じて周期を $T = 0.4, 1.1, 0.9, 0.8$ 秒として計算を行った。波向 α はシミュレーションの結果から 20° とした。解析の結果が振動しているのは、航走波が断続的な波であり、波高の減衰がある周期性を示すことを表している。波高の減衰は実験値と解析値で大きな差は見られず、フルード数による減衰量の変化もあまり差がないことがわかる。これらの結果は、解析によって航走波の減衰がほぼ再現できていることを示している。ただし、波向 α の評価はこの実験では不十分である。また、解析ではフルード数

表-1 模型実験の諸データ(Johnson)

船 体					水深 (cm)
排水量 (cm ³)	艇長 (cm)	艇幅 (cm)	喫水 (cm)	艇速 (cm/s)	
3460	101.2	28.7	3.96	75~249	15.9

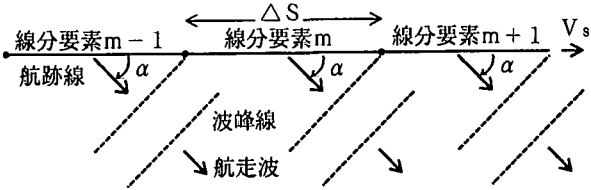


図-1 航走波のモデル化

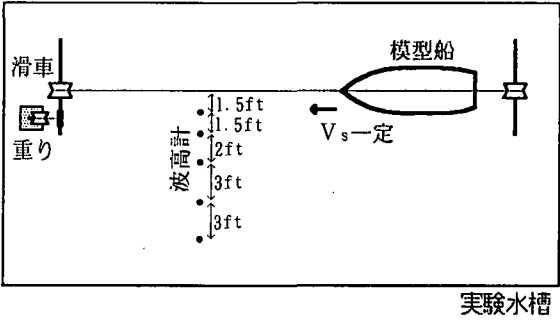


図-2 模型実験の概要 (Johnson)

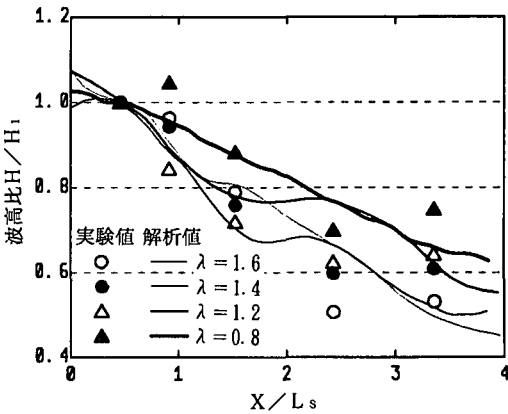


図-3 航跡線からの距離と波高

の増加に伴い、僅かながら波高減衰が大きくなる傾向が見られるが、Johnson の一連の実験では波高の減衰は、水深によって変化することも確認されている。

図-4 には、航跡線と cusp locus のなす角度のフルード数による変化を示した。航走波の波峰の最高点が船首から直線 (cusp locus) に並び、航走波による海面の主な攪乱がくさび状になることが知られている。図中の白丸は Johnson による実験結果、実線は Kelvin による理論解であり、黒丸は本手法による解析結果 (図-3) を示した。図-5 には、解析によって得られた水面変動 ($\lambda = 0.8$) のコンターを示したが、波峰毎のコンターの極値を結んだ直線を cusp locus と仮定して角度 β を求め、図-4 の計算値として示した。解析領域は、航跡線が対称軸となるので半分の領域を設定している。解析によって得られた水面変動の極値は cusp locus の発生過程を再現したものではないが、航走波による海面の主な攪乱領域を示す一つの指標と考えることはできる。図-4 を見ると、フルード数が 1 の近傍で極値を示しているが、このような傾向は解析にも見られ、解析値と実験値および理論解には大きな違いがないことがわかる。

一方、倉田ら²⁾による実験的研究では、一定の条件のもとで波高の距離減衰が距離の $-1/3$ 乗にほぼ従うことが示されている。倉田らの実験条件を表-2 に示したが、Johnson による実験と同様に水深や艇速に対する波高の変化が求められている。フルード数 λ と波高の関係は、水深の変化に関わらずほぼ同一の曲線上に乗っており、全体的な傾向は、Johnson の結果と同様である。

図-6 には波高の距離減衰を示しているが、横軸には航走波の特性波長 ($L_0 = 2\pi V_s^2 / g$, V_s は艇速であり、艇速に等しい波速をもつ深海波の波長を意味する) によって無次元化した値、縦軸には航跡線に最も近い測点 (航跡線から 50cm の位置) の波高に対する比をとっている。図中の 2 本の実線で囲まれた領域に倉田らの実験値が得られており、ほぼ実線の勾配 ($-1/3$ 乗) に沿って変化している。図中の白丸は、本手法による解析結果を示したもので、水深が 14.6cm ($\lambda = 0.8, 1.25$) と 24.6cm ($\lambda = 0.8, 1.20$) の 4 ケースの結果である。ここで、解析に用いた波の周期については、倉田らによって得られた特性周期 ($T_0 = 2\pi V_s / g$) との関係から、 $T = 0.65 \times T_0$ ($\lambda \leq 8$)、 $T = 0.7 \times T_0$ ($\lambda \geq 1.2$) として設定した。また、式(4)の波向 α は Johnson との比較と同様に 20° とした。解析結果と実験結果を比較すると、解析結果の絶対値は実験結果の範囲に入っており、距離減衰の勾配も航跡線のごく近傍を除けば、倉田らが考察した勾配とほぼ一致していることがわかる。

4. 実験による検証

(1) 実験の概要

以上の実験データとの比較から、本手法によって航走波の波変形が相対的な距離減衰の観点では、ほぼ再現で

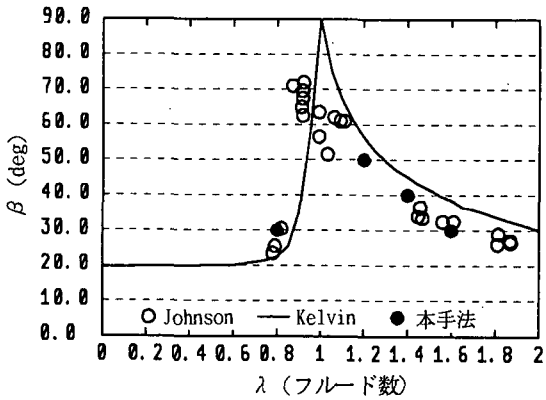


図-4 cusp locusと航跡線の角度

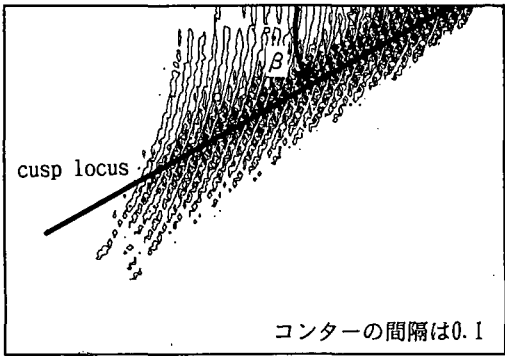


図-5 水面変動のコンター

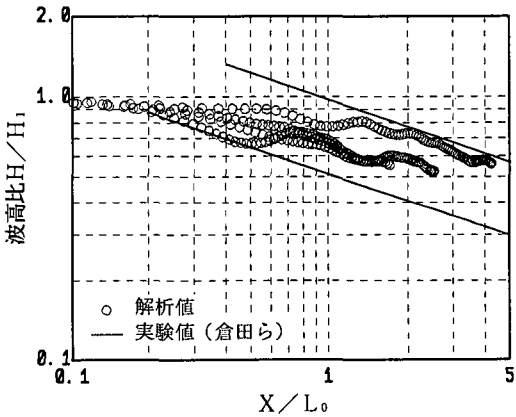


図-6 航跡線からの距離と波高

表-2 模型実験の諸データ (倉田ら)

船 体				水深 (cm)
艇長 (cm)	艇幅 (cm)	喫水 (cm)	艇速 (cm/s)	
136.7	24.3	9.8	56~188	14.6~24.6

きることが確認できた。ただし、式(4)の波向 α や時間的な波の変動については明確になっていない。したがって、以上の模型実験とほぼ同様の実験を実施し、ビデオ解析も併用することでこれらの点を明確にする。実験の方法は、図-2のJohnsonの実験とほぼ同様であるが、波高計による測定は航跡線の両側で対称となる3点（航跡線から20cm間隔）で1m間隔にとった2つの測線①、②で測定を行った。ただし、測線②では2点で測定した。模型船のスタート位置は、最も近い測線①から2m離れた地点である。さらに、ビデオを側面と正面に2台設置して、艇速の測定や波面形状の撮影から航走波の波向の測定を行った。模型実験の諸データは表-3に示したが、現地の1/20程度を想定したもので、艇速はマリナー内の制限速度が5ノット程度であることを考慮して、現地の5~7ノットを設定した。また、模型船はプレジャーボートの水際線以下の形状を模倣して楕円体の模型を使用した。

(2) 解析の条件

解析に際しては表-3の実験データに加えて波の周期と波向が必要であるが、周期については実験による測定値から、 $T=0.35$ 秒(CASE1)、 $T=0.30$ 秒(CASE2)、 $T=0.25$ 秒(CASE3)とした。これらの値は、Johnsonや倉田らによって得られている周期とフルード数の関係にほぼ合致している。また、波向 α の値は、実験におけるビデオ解析の結果から $\alpha=20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ でほぼ一定であることがわかったので、解析では $\alpha=20^{\circ}$ とした。

表-3 模型実験の諸データ

船 体				水深 (cm)
艇長 (cm)	艇幅 (cm)	喫水 (cm)	艇速 (cm/s)	
45.0	18.0	9.0	CASE1:82.0 CASE2:73.0 CASE3:59.0	20.0

(3) 実験と解析の結果

図-7には、波高の距離減衰を示した。横軸は航跡線からの距離を艇長で除した値であり、縦軸は波高を示している。丸、三角、四角印は実験値であり、丸がCASE1($\lambda=0.59$)、三角がCASE2($\lambda=0.52$)、四角がCASE3($\lambda=0.42$)の結果である。実線が解析値を示しており、線の太さの順が艇速の速さに相当している。解析値は、航跡線に最も近い点の波高に対する相対的な値を示している。図-7を見ると、全ての艇速に対して、実験値の波高の距離減衰が解析値に比較してやや大きくなっていることがわかる。このような波高の減衰はJohnsonや倉田らの実験と比較しても大きなものである。減衰が大きくなる原因には模型のスケールや形状が関わっていると考えられるが、減衰のオーダーとしては極端な差異ではない。実験値の方が減衰が大きいことから、予測手法としては安全側の結果であり、実用的な範囲にあると考えてよい。実験結果を見ると、CASE3の波高はCASE1やCASE2の波高と比較してかなり小さくなっており、艇長の1.5倍程度離れた地点ではほとんど波を検知することができなかった。これに対して、CASE1の場合には、艇長の1倍から1.5倍にかけて波高減衰が鈍化する傾向が見られる。この結果は、現地のスケールでは艇速を5ノット程度に抑えれば、艇長の1.5倍程度の範囲に航走波の影響を限定できるが、艇速が7ノットを越えると航走波の影響が広範囲に広がる可能性を示している。

図-8には、CASE1の各測点における時間波形を示した。左図が解析結果、右図が実験結果、実験結果は航跡線に対して対称となる2点の値を太線と細線で示している。A~Cは測線①、D、Eは測線②の測点であり、A

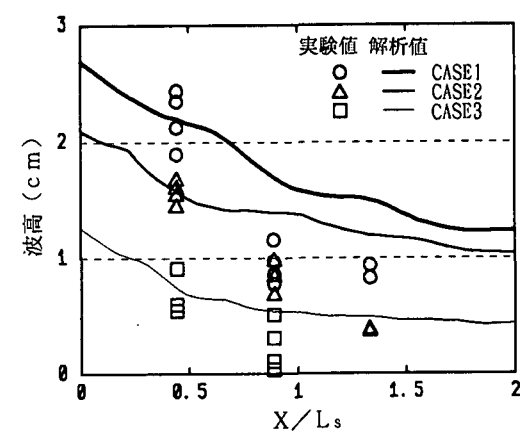


図-7 波高の距離減衰

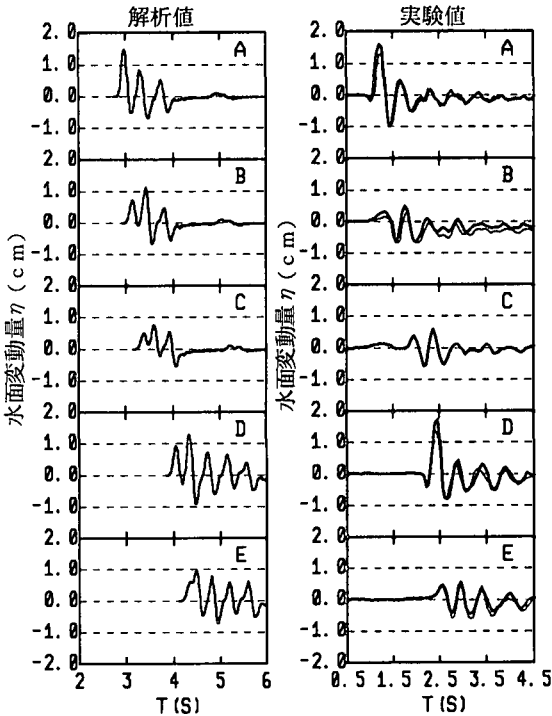


図-8 航走波の時間波形

およびDが航跡線に近い点である。解析値の波形はA点およびD点の波高が実験値の波高に合うように係数を乗じている。縦軸は水面変動量、横軸は時間であるが、実測の開始時刻が解析と少し異なるため、波形がほぼ一致するような時間の範囲について示している。実験値と解析値を比較すると、波高の距離減衰等の絶対値の差異はあるが、波形の全体的な形はほぼ合っていることがわかる。A点の波形がB点やC点と異なり、初期の立ち上がり大きい事も解析と実験でよく合っているが、航跡線に近いほど波の分散効果が小さくなるため、測点到達する第1波の波高が比較的大きくなると考えられる。一方、D点の解析値はややA点と傾向が異なるようにも見える。本手法の数値計算上の影響も考えられるが、波群としての形状やE点との差異を考慮すれば、やはりA点と同様の傾向があると考えてよい。また、測線①（A～C）と測線②（D、E）の比較では、測線②の方が波動がやや長く継続する傾向が見られるが、模型船のスタート地点と測線の位置関係が影響したと推測される。この傾向は解析結果にも見られ、航走波の非定常性が再現されていると考えられる。

本実験では、既往の実験データでは不明確であった波向 α や水面変動の時間変化について検討を加えることができた。波高の距離減衰についてはやや異なる結果ではあったが、簡易的な解析手法としては本手法の適用性がほぼ良好であることが確認できた。

5. 港内航路の検討

港内における航走波が特に問題となるのは、パワーボート等の入出港によって生じる航走波である。多くのマリーナでは、パワーボートは陸上に保管されることが多く、陸上に保管している利用者ほど航走波に対する意識が弱いと考えられる。係留保管されるパワーボートもあり、クルーザーによる航走波にも問題はあるが、係留施設の利用者は航走波に対する意識があることから、比較的に港内での速度に注意していると思われる。したがって、ここでは陸上保管されている艇が入出港のために利用する港内航路の配置について、航走波に対する港内静穏度の確保の観点から検討を行う。図-9には、マリーナのモデルを示した。港内の航路として3通りのケース（CASE1～CASE3）を想定し、港内静穏度に対する適性について比較を行った。図に示した3箇所から出艇し、矢印に沿った航路をとりながらマリーナを出港するまでの解析を行う。ただし、艇が出港した後の波の伝播や反射も考慮した港内の最大波高が把握できる程度の計算時間をとる。また、非定常の航走波の伝播は、進行方向によって大きく異なると予想されるので、各々の航路に対して出港と全く逆の方向で入港する場合の解析も行った。港内の境界条件は構造物の反射率を全て0.8として、解析領域はマリーナよりやや広い程度にとり、周囲の境界では徐々に波を強制的に減衰させることで反射波を極力消去した。図中の点線（A～I）を艇の係留位置として想定し、港内静穏度の評価において代表的な地点と考えたが、港口の位置や外海からの来襲波に対する静穏性を考慮して設定したものである。なお、航走波の解析条件を表-4に示した。

図-10と図-11には、出港時と入港時の代表地点の波高を示したが、縦軸は航跡線上で発生する波高に対する波高比であり、横軸は図-9のA点からI点までの点線上の延長距離である。波高は、時間変化の中で得られる最大波高を示したものであり、図中の太線がCASE1、中太線がCASE2、細線がCASE3の解析結果である。出港時の結果を見ると、いずれの航路においても波高の最小値は0.2程度になっており、港内における多重反射によって港内の全域に航走波が伝播していることがわかる。CASE1とCASE2の結果を比較するとほぼ同様の変化が見られ、多くの領域に比較的に大きな波が伝播しているが、D点～E点とH点～I点は航走波の伝播方向から見て波高が小さくなっているのがわかる。CASE3では、全域でほぼ0.3程度の一様な値を示しているが、航路が接近しているA点～B点、F点～G点の領域ではやや波高が大きくなっている。これらの出港時の相対的な港内静穏度の結果からは、CASE3の場合が最も航路として適していることがわかる。港内静穏度を最大波高で評価することが妥当か否かは検討を要するが、航走波は一時的な波動であり、主な波群はせいぜい1つか2つであることは各地点の波の時間変化からも確認できる。したがって、港内静穏度を評価する上で最大波高が重要な要素であることは明かである。

表-4 解析の諸条件

船 体		航走波		水深 (m)
艇長 (m)	艇速 (m/s)	周期 (sec)	波向 α (deg)	
10	4.0	1.5	30	3

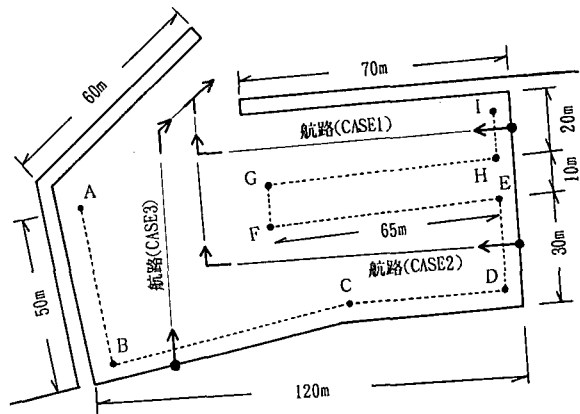


図-9 マリーナのモデル

入港時の結果を見ると、出港時とは全く傾向が異なることがわかる。CASE1とCASE2の結果は、出港時と同様にほぼ同じような変化をしており、CASE1ではG点～I点が比較的航路に近いために波高が大きく、逆にCASE2ではC点～F点が波高が大きくなっている。CASE3ではA点～C点の付近が航路に近いために波高が大きくなっているが、その他の領域では0.2～0.3程度でほぼ一律な値になっている。これらの入港時の結果においても出港時と同様に、相対的にはCASE3の場合が航路として適していることがわかる。また、CASE3では入港時と出港時で比較的波高が大きくなる領域が一致しているために、A点～C点、F点～G点付近の係留に対して配慮することや、入港時の波高がやや大きいことから入港時の艇速により注意することで航走波による問題をさらに改善することができる。

図-12と図-13には、CASE2の航路で出港時の水面変動の鳥観図と波高のコンター図を示した。水面変動は出艇後30秒で、港内で右折して20mほど航行した地点での状況を示したものである。図面中央に見られるくさび状の波群の先端が艇の位置であるが、艇が方向転換をしているために、転換前に発生した波と転換後の波が重複波を形成している様子や方向転換前の波の後方で港内境界による反射波が伝播している様子が確認できる。図-13は出艇後90秒までの最大波高のコンターを示したものである。航路上の波高が大きいことと航路近辺の港湾境界による反射や方向転換による波の重複領域においても波高が大きくなっていることがわかる。係留施設の配置を決定する場合には、このような波高分布を考慮することも必要である。

6. あとがき

本研究では、港内における係留施設の配置計画に際して航走波の伝播を評価するために、簡易的な手法であるが、港内の航走波の特徴である非定常性や構造物による反射や回折が考慮できる手法を提案した。既往の実験データ等の比較することで本手法が実用的な解析精度を有していることが確認できた。また、モデルマリーナを対象とした解析例によって、相対的に適切な航路の検討が可能であることを示し、本手法によって従来にない航走波の定量的な評価できることを述べた。ただし、本手法は航走波の発生過程を明かにしたのではなく、結果としての現象をモデル化した簡易手法であるため、発生する航走波の波高が求められない等の問題点もあり、今後も航走波の実測データの蓄積が必要である。

<参考文献>

- 1) Johnson, J. W. : Ship waves in navigation channels, Proc. of 6th Conf. on Coastal Eng., pp. 666-690 (1958)
- 2) 倉田克彦・小田一紀・平井住夫：浅海水路中の航走波の特性および係留船舶に及ぼすその影響，第30回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 411-415，1984

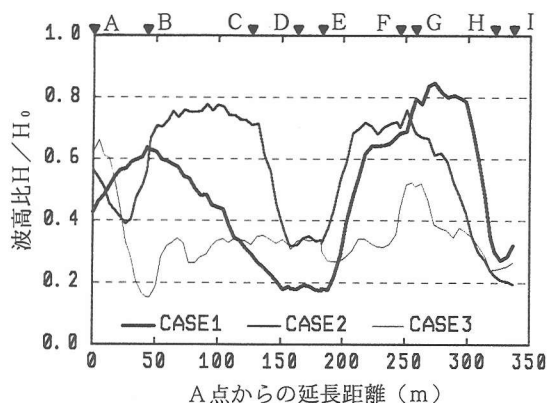


図-10 出港時の代表地点の波高

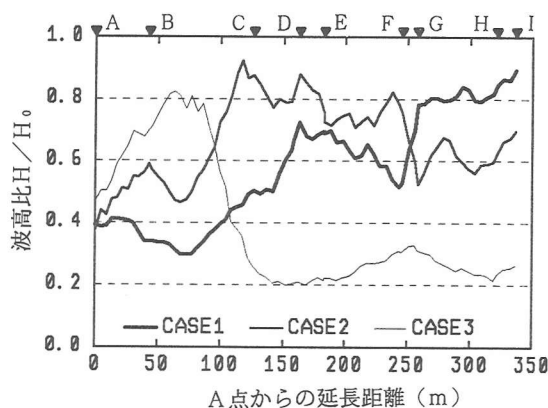


図-11 入港時の代表地点の波高

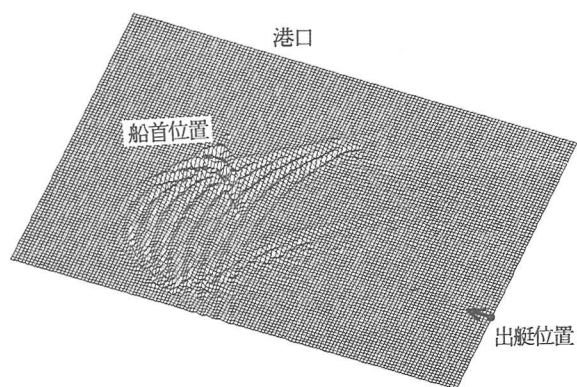


図-12 海面の鳥観図 (CASE2)

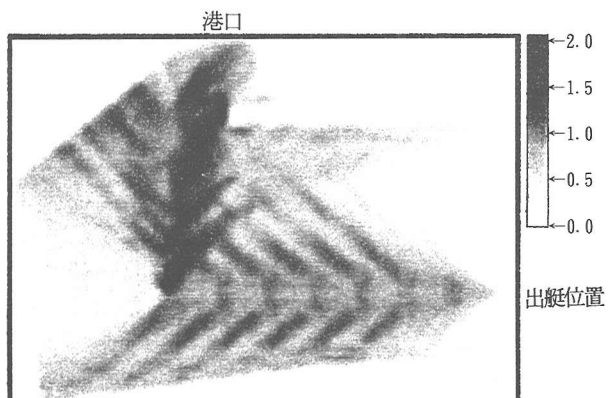


図-13 波高のコンター (CASE2)