

浅水航走波の数値計算

NUMERICAL SIMULATION OF SHIP WAVES IN SHALLOW WATER

谷本勝利¹・小林豪毅²・倉田克彦³・今野博史⁴

Katsutoshi TANIMOTO, Hidetaka KOBAYASHI, Katsuhiko KURATA and Hiroshi KONNO

¹正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 浦和市下大久保255)

²正会員 工修 (株) 東京久栄 技術開発部 (〒333-0866 川口市芝鶴ヶ丸6906-10)

³正会員 工博 (株) 東洋建設 鳴尾研究所 (〒663-8142 西宮市鳴尾浜1-25-1)

⁴ (株) JR東日本 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

Ship waves in shallow water are considerably different from those in deep water. They are greatly influenced by the depth Froude number. In the present paper, the numerical method proposed by Tanimoto et al.(1999) has been confirmed to be applicable to predict ship waves in a shallow water by comparing with experimental data by Kurata et al.(1983). Variations of the maximum wave height by the mid ship section coefficient, the distance from the sailing line and the depth Froude number are discussed together with experimental data. The maximum wave height increases as the depth Froude number increases up to the critical speed condition. In the range of super critical speed, the maximum wave height becomes almost constant or slightly decreasing tendency.

Key Words : Ship waves, shallow water, numerical simulation, Boussinesq type equation, slender ship, depth Froude number

1. はじめに

沿岸を航走する船舶が造る波(航走波)は水辺近くにおける様々な利用や生態系保全において問題化することがある。たとえば、デンマークにおいては高速フェリーによる航走波が水辺利用者に危険であるのでその発生に関し制限が設けられている¹⁾。²⁾、日本においてもアマモ場への影響が指摘されている³⁾。

そうした航走波に関する理論的研究は、船舶工学や航海学の分野において盛んであるが、そこでは造波抵抗や操船への影響が主たる関心事であり、浅海での航走波の伝播・変形についてはこれまであまり研究されていない。そのため、筆者らは浅水航走波の伝播・変形特性を数値計算により検討できるようにすることを目的に研究を進めており、既に、幅の狭い矩形断面水路を対象とした数値計算を行って、船の前方に現れるソリトンの波高や周期が実験結果とよく合うことを示した⁴⁾。

しかしながら、実際の条件で顕著なソリトンが発生することは稀で、船の後方の波(後続波)が問題となることが多い。そのため、本論文は、ソ

リトンが顕著に発達しないような水路幅が比較的広い条件での航走波を対象として、数値計算結果を実験結果と比較することにより検証するとともに、浅水航走波の最大波の諸元、特に航走中心線からの距離、水深フルード数等による最大波高の変化を検討するものである。

2. 数値計算の方法と計算条件

数値計算は Peregrine による Boussinesq 型の基本式⁵⁾を、微小船幅(slender ship⁶⁾)を仮定して、船舶に相当する湧き出しと吸い込みを分布させた線状移動境界条件の下に解いていくものである。基本式は浅海での水深変化領域に適用可能であるが、ここでは、実験データが利用できる一定水深を対象とする。

一定水深の場合の基本式と船舶境界条件式を示すと以下のとおりである。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{h^2}{3} \left(\frac{\partial^3 Q_x}{\partial t \partial x^2} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial t \partial x \partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \frac{h^2}{3} \left(\frac{\partial^3 Q_x}{\partial t \partial x \partial y} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial t \partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$Q_y = \pm \frac{1}{2} U \frac{dS}{dx} \quad (\text{船の位置で}) \quad (4)$$

ここに、 ζ は水位、 Q_x 、 Q_y はそれぞれ x (船の進行方向座標軸)、 y (船の進行方向と直角方向の座標軸) 方向の線流量、 t は時間、 h は静水深、 $D (=h+\zeta)$ は全水深、 g は重力加速度である。また、 U は船の航走速度、 S は船舶の没水横断面積であり、本研究では次のように放物線近似で与える。

$$S(x_s) = S_0 \left[1 - \left(\frac{2x_s}{L_s} \right)^2 \right], \quad -1 \leq \frac{2x_s}{L_s} \leq 1 \quad (5)$$

ここに、 S_0 は船舶中央での没水横断面積、 L_s は船の長さ(垂線間長を用いる)、 x_s は船の中央からの距離である。 S_0 は中央横断面積係数 α を用いて次のように表される。

$$S_0 = \alpha B_s d \quad (6)$$

ここに、 B_s は船の幅(型幅を用いる)、 d は喫水である。

計算に用いた水路・船舶の条件は倉田らの実験条件である⁷⁾。実験は幅が約6.7m、長さが約40mの水路で行われたもので、カーフェリー(3624総トン、模型縮尺1/60)を対象としている。模型船の諸元は、垂線間長 $L_s = 1.367$ m、型幅 $B_s = 0.243$ m、喫水 $d = 0.098$ mである。中央横断面積係数 α の値は不明であるが、後述するように0.62を用いる。航走速度 U は0.56~1.88 m/s、静水深 h は0.146~0.246 mの範囲で変化している。

航走波は、図-1に示しているように、航走線から直角方向に0.5mごとの間隔で設置された6台の容量式波高計(G1~G6)で測定されている。ただし、本研究では側壁に近いG6のデータは除き、G1~G5のデータを比較の対象とする。

Boussinesq型方程式の離散化には Madsen ら⁸⁾に従ってADI法を用い、空間的には水位と線流量を交

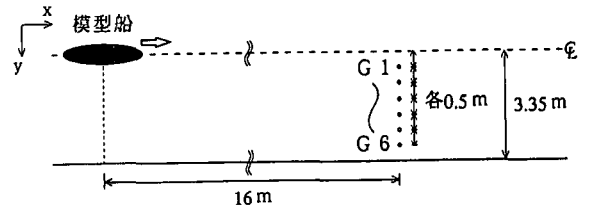


図-1 水槽における波高計位置

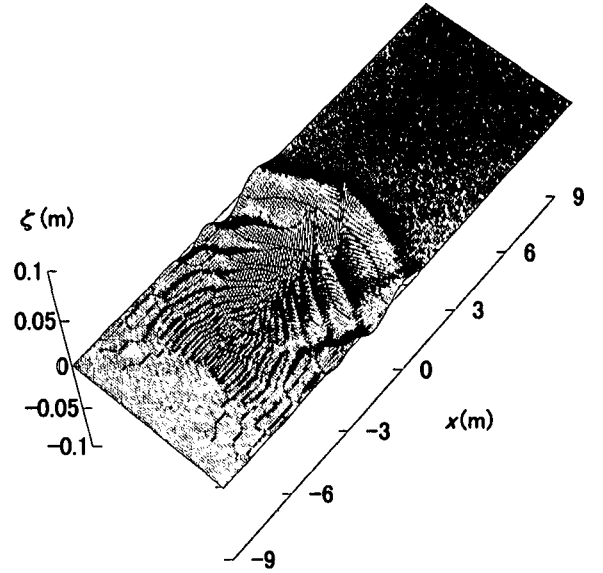


図-2 航走波のパターン ($t=5$ s)

互に配したスタッガード・メッシュを用いている。数値計算は船が水路幅の中央を航走する場合を対象とするので、水路幅の半分の領域で行う。初期条件は静水状態で与え、船舶中心の初期位置は図-1に示したように波高測線から16mとする。側壁は完全反射の条件である。

なお、浅水航走波を支配する重要なパラメータである水深フルード数 F_h の定義は次式のとおりである。

$$F_h = U / \sqrt{gh} \quad (7)$$

3. 計算結果と考察

(1) 航走波の発達

まず、静水中を船が走り始めてからの航走波の発達の状況を示す。図-2は計算開始5s後、図-3は15s後、図-4は30s後の航走波のパターンを水路全幅に対し示したものである。いずれも $h=0.146$ m、 $U=1.09$ m/s の例で、このとき船の水深フルード数は0.91である。船は水路中央を x 軸の正方向に進んでおり、船の長さの中央を $x=0$ とし、それぞれ前後9mの区間を表示している。

このうち5s後のパターンは航走距離が5.5mのもので、船は波高測線まで達していない初期の段階である。これに対し、15s後のパターンは航走距離が16.4mで、船が波高測線位置をちょうど

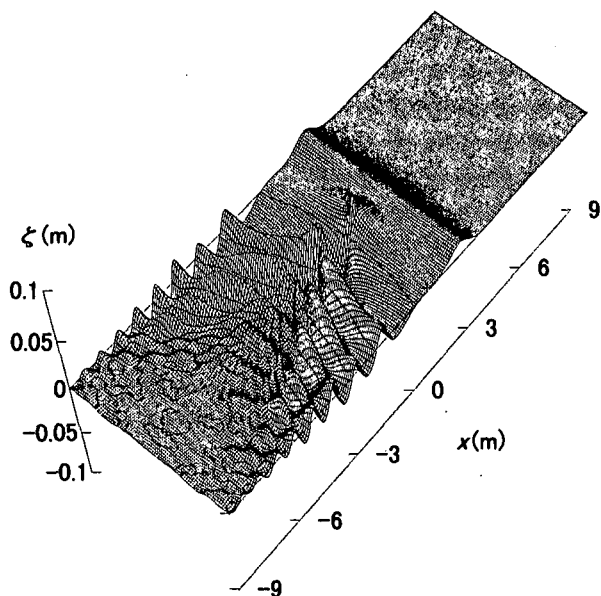


図-3 航走波のパターン ($t = 15 \text{ s}$)

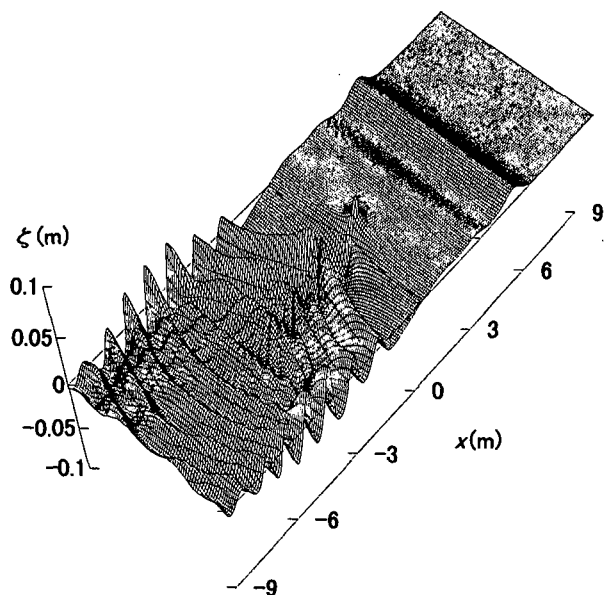


図-4 航走波のパターン ($t = 30 \text{ s}$)

通過中の状態である。この時点においては、船の前の波は水路幅方向にほぼ一様となっているが、まだ完全には二次元化（ソリトン化）していない。さらに、30 s 後の航走距離は32.7mと波高測線の約2倍の距離にあり、船の前に水路幅方向に完全に一様なソリトンが発達していることがわかる。

側壁を有する水路における浅水航走波の大きな特徴の一つはこのように水位分布のパターンが航走時間（航走距離）によって変化することである。本研究における航走波は船の前の波が水路幅方向にほぼ一様化するものの、まだ完全にはソリトン化しない段階のものである。

(2) 航走波の時間波形と最大波の定義

図-5, 6は測点G1～G5（図ではGAUGE1等と表

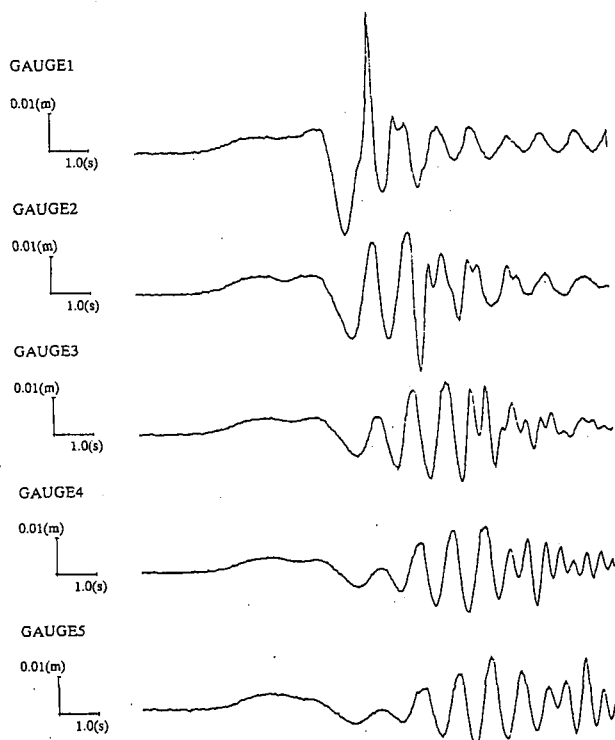


図-5 航走波の時間波形（実験）

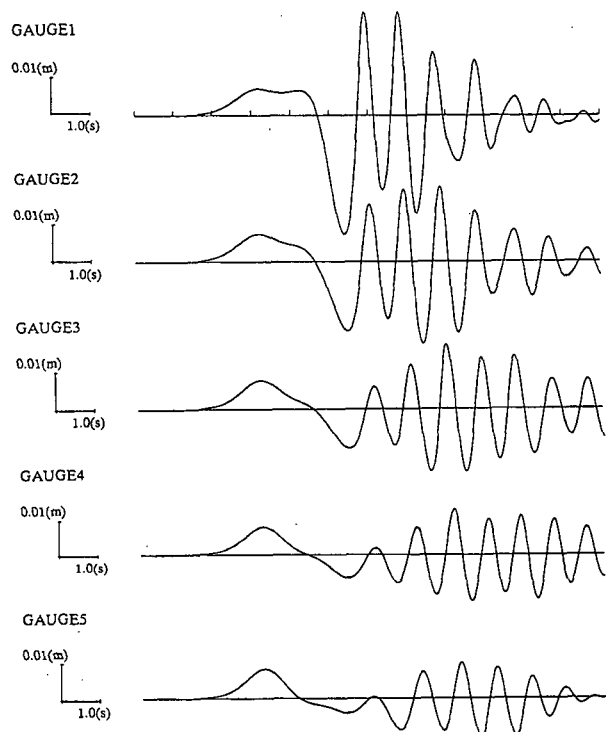


図-6 航走波の時間波形（計算）

示)での実験および計算による時間波形を示したものである。水深は0.183m、水深フルード数は0.85であり、前図の条件と比べると水深がやや大きく、船速がやや遅い例である。実験の水位スケール0.01mは記録器の標準スケールであり、キャリブレーション値はやや小さく、測点によって

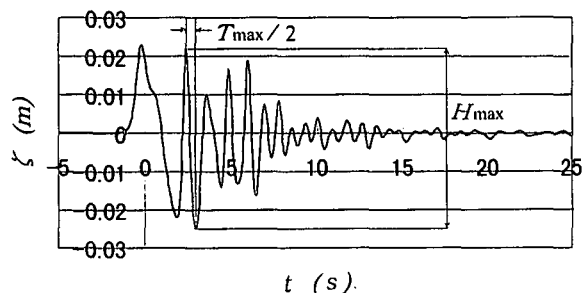


図-7 最大波の定義

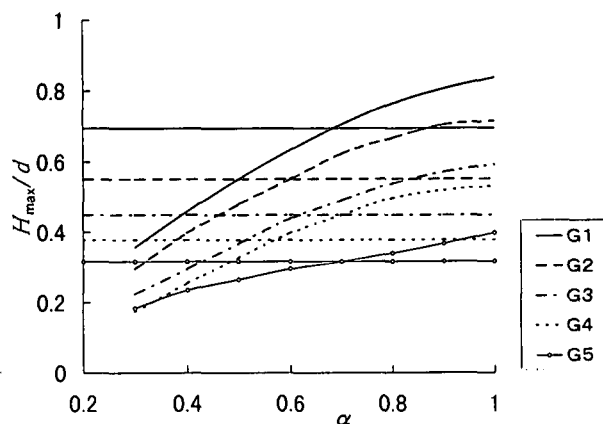


図-8 中央横断面積係数による最大波高の変化

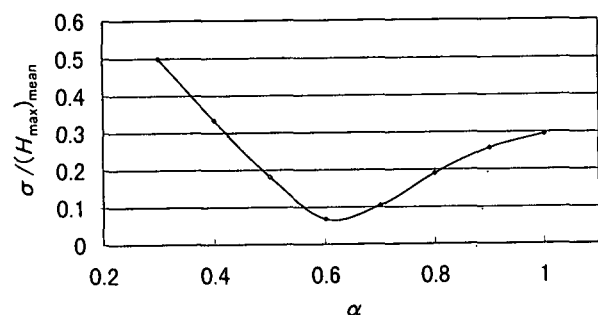


図-9 αによる誤差の変化

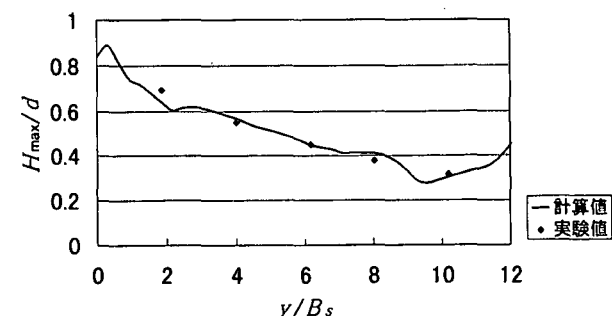


図-10 航走線からの距離による最大波高の変化

0.008～0.009mである。実験と計算による波形を比べると、最初に押し波と引き波が現れ、その後周期の短い波が続くというパターンは合っているものの、細かいところでは違いが認められる。こ

れは計算では船を急発進させていることや砕波（実験のGAUGE1の記録では砕波が生じていると推察される）を取り入れていないことによると考えられる。しかしながら、後述するように最大波高については比較的よく合っている。

図-7はG3すなわち航走線から1.5m直角に離れた位置での航走波の計算波形を示したものである。 $h=0.146\text{m}$ 、 $U=1.20\text{m/s}$ の例で、このとき船の水深フルード数は1.0であり、限界速度の条件である。時間 t は、船の舳先が測点位置の見通し線上を通過する瞬間を0にとっている。船の前方に現れる押し波はこうした時間波形においても確認される。この押し波は、前述したように、航走距離が十分になるとソリトンに発達する。

航走波の最大波をゼロアップクロスおよびゼロダウングロスの両方で定義した波高のうち最大の波高の波と定義する。図の例の場合、最初の押し波を含めて2波目のゼロアップクロス波が最大波であり、その波高を最大波高 $H_{\max}$ 、最大水位と最低水位の時間差の2倍を最大波周期 $T_{\max}$ とする⁹⁾。

(3) 中央横断面積係数による最大波高の変化

前述したように、本論文で対象とした模型船の中央横断面積係数 α は不明である。そのため、まず α の値を0.3から1.0（箱形断面）まで系統的に変化させたとき、最大波高がどのように変化するかを調べた。図-8は $h=0.146\text{m}$ 、 $F_h=0.91$ の条件での、各測点での最大波高（喫水 d で割って無次元化してある）の変化を示したものである。いずれの測点においても、最大波高は α が大きくなるにつれて大きくなる。

図中、横軸に平行な線は各測点で測定された最大波高の値である。計算値との交点（実験値＝計算値）の α の値は測点により0.57から0.70にばらついている。そのため、各測点での誤差を求め、 α に対する誤差の変化を示したのが図-9である。ただし、縦軸は誤差の標準偏差 σ を最大波高の測定値の平均値 $(H_{\max})_{\text{mean}}$ で割って、変動係数の形にしてある。これから、5測点に対する誤差を最小とする α を求めると0.62となる。本数値計算においては、船舶は線状近似、かつ横断面積は放物線近似で与えており、実際の船体条件とは異なっている。そのため、船体条件に応じて、最適中央横断面積係数を用いることは一つの方法であり、本論文における計算では $\alpha=0.62$ を用いることにしたわけである。

(4) 航走線からの距離による最大波高の変化

既に、図-8において認められるように、最大波高は航走線からの距離によって変化する。図-10は図-8と同一条件での航走線からの距離 y による最大波高 $H_{\max}$ の変化を、それぞれ船の型幅および喫水で割って無次元化して示したものである。計算値は単調減少ではないものの、実験値とよく

合っている。距離の大きいところで増加傾向が現れるのは側壁からの反射波の影響と考えられる。側壁は図の横軸の値で13.8の位置にある。

(5) 水深フルード数による最大波高の変化

航走波の最大波高は、船速が限界速度を超えるかどうかによって、傾向が大きく変化することはこれまでの実験的研究によってもよく知られている⁷⁾。

図-11は水深フルード数による測点G3での最大波高の変化を例示したものである。ただし、計算値は最小水深と最大水深の条件についてのみ示してある。これから、計算値においても、最大波高は水深フルード数が1程度までは増大し、それ以上では頭打ちあるいは減少の傾向となることが確認できる。実験結果と比較すると、水深フルード数が1付近で計算値が小さく、また1以上の領域で実験値の減少が大きい傾向にある。しかしながら、実際の多くの条件では船速が限界速度を超すことはなく、計算値は実験値の傾向をよく表している。

なお、水深フルード数が1以上で最大波高が頭打ちあるいは減少傾向となるのは、水深フルード数が大きければ大きいほど造波エネルギーは大きくなるものの、後続波の波速より船速のほうが大きくなってエネルギーが広範囲に分布し、薄められることによると考えられる。

(6) 最大波高および最大波周期に対する計算値と実験値の比較

水深フルード数が1程度以下の条件について、全測点での計算および実験による最大波高を比較すると図-12のようになる。計算値（図の横軸）は実験値（図の縦軸）のばらつきの平均的な関係を表している。

最大波周期は最大波が最初の押し波および引き波によって生じるか、後続波において生じるかによって異なる。計算値によれば、前者の場合2～5 sと長く、後者の場合は1～3 sと短い。したがって、波高が同程度の場合、どちらになるかによって周期は大きく異なる。そのため、計算および実験ともに、測点G1～G5での最大波がすべて後続波において生じる場合に限り、計算値と実験値を比較して示したのが図-13である。データが少ないけれども、計算による周期がやや長い傾向にある。

(7) 航走線が水路の中央でない場合の計算例

以上、本論文では、船が水路幅の中央を航走する場合を対象としたが、そうでない場合は結果は異なることが懸念される。そのため、最後に、1例として、航走線が水路幅を1：3に分ける条件を対象とした計算結果を示す。この場合、当然のことながら水路幅全体に対する計算である。

図-14、15は水深や水深フルード数は前出の図-

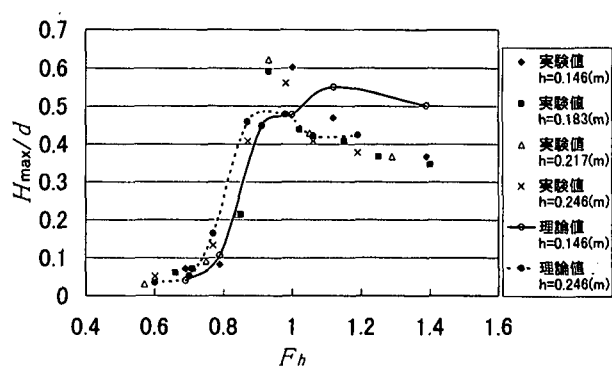


図-11 水深フルード数による最大波高の変化 (G3)

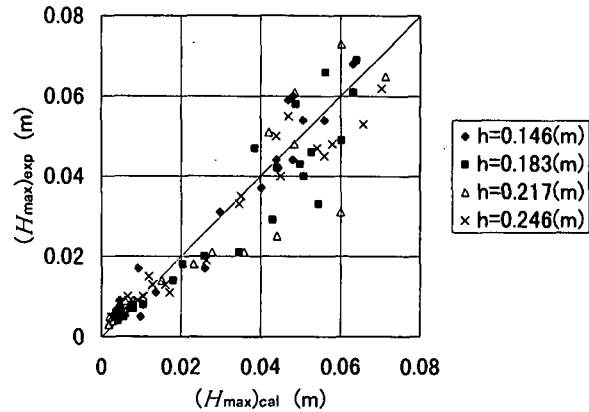


図-12 最大波高の比較

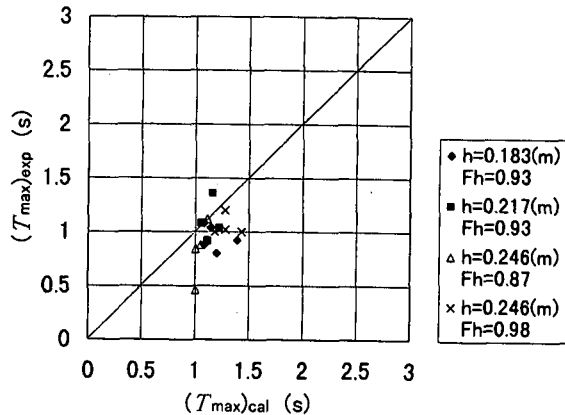


図-13 最大波周期の比較

3, 4と同じ条件での15 sおよび30 s後の航走波のパターンを示したものである。航走線の両側壁からの距離が異なるため、航走波のパターンも航走線に対し非対称となっている。側壁まで幅が狭い領域（進行方向に対し左側）において航走波は大きく、波峰線が早く直角になる傾向にある。また、この場合、船の前の波は30 s後であっても2次元化していない。しかし、他の条件であるが、航走線が水路中央でない場合であっても、長時間後には完全に2次元化したソリトンになることを確認しており、この場合もさらに計算を継続すればソリトン化していくものと考えられる。

一方、図-16は航走線から側壁の遠い方へ1.5 m離れた地点での時間波形の例を、水路中央を走る

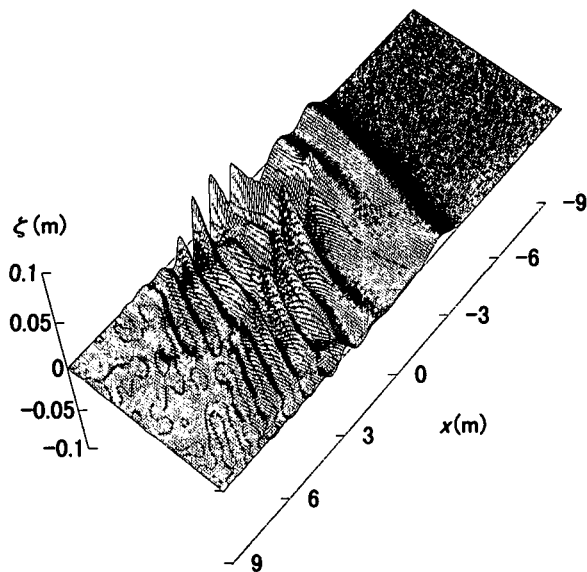


図-14 航走波のパターン (非対称, $t = 15 \text{ s}$)

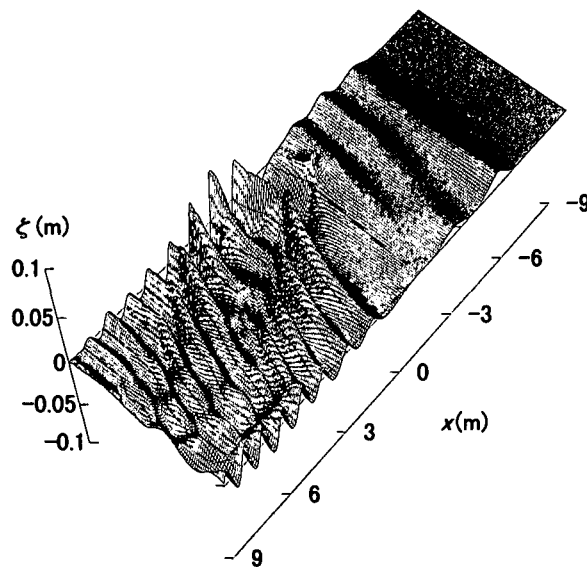


図-15 航走波のパターン (非対称, $t = 30 \text{ s}$)

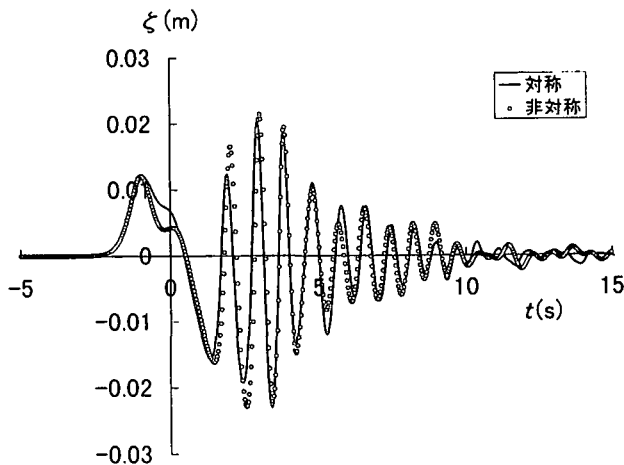


図-16 航走波の時間波形 (G3)

場合のG3での波形と併せて示したものである。図ではこれを対称, 非対称と表示している。両者の波形はやや異なるものの, 最大波高は大差ない。この傾向は航走線から2.5m (G5) まで同様であることから, 今回対象とした実験条件では, 少なくとも最大波高に関する限り, 側壁の影響は小さいといえる。ただし, これは航走距離が短いためで, 十分に長い場合は, 異なることが予想される。

4. むすび

本論文において, 水路幅が比較的広い場合の浅水航走波の数値計算を行い, 実験結果と比較することにより, その適用性を例証するとともに, 最大波高の変化の傾向を検討した。最大波高は水深フルード数, 航走線からの距離等によって変化するが, 数値計算結果は実験結果のばらつきの平均的関係を与える。ただし, 側壁を有した水路における航走波は航走距離によって変化するもので, 今後その変化の過程を系統的に調べる必要がある。本論文における航走波は観測地点が航走距離にして船の長さの約12倍の条件でのものである。

なお, 本研究を進めるにあたり, 大阪市立大学小田一紀教授ならびに角野昇八教授には実験結果のデータを提供いただいた。ここに記して, 心よりお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Kirkegaard, J., Kofoed-Hansen, H. and Elfrink, B.: Wake wash of high-speed craft in coastal areas, *Coastal Engineering* 1998, ASCE, pp.325-337, 1999.
- 2) The Specialist Committee on Safety of High Speed Marine Vehicles: *Final report and recommendations to the 22nd ITTC*, Proc. 22nd Intl. Towing Tank Conf., pp.615-650, 1999.
- 3) 中瀬浩太, 島谷 学, 関本恒浩: 船舶航跡波影響下のアマモ分布特性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1196-1200, 1999.
- 4) 谷本勝利, 小林豪毅, Vu Thanh Ca: 矩形断面水路における浅水航走波の数値計算, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.61-65, 1999.
- 5) Peregrine, D.H.: Long waves on a beach, *J. Fluid Mech.*, Vol.27, pp.815-827, 1967.
- 6) Chen, X.N. and Sharma, S.D.: A slender ship moving at a near-critical speed in a shallow channel, *J. Fluid Mech.*, Vol.291, pp.263-285, 1995.
- 7) 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繫留船舶に及ぼすその影響, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.598-602, 1983.
- 8) Madsen, P.A. and Sørensen, O.R.: A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry, *Coastal Eng.*, Vol.18, pp.183-204, 1992.
- 9) Johnson, J.W.: Ship waves in navigation channels, *Proc. 6th Conf. on Coastal Eng.*, pp.666-690, 1958.