

航走波の浅水および屈折変形

SHOALING AND REFRACTION OF SHIP WAVES

谷本勝利¹・小林豪毅²・田村雅宣³

Katsutoshi TANIMOTO, Hidetaka KOBAYASHI and Masanori TAMURA

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 東京大学大学院工学系研究科博士課程 (〒135-2505 東京都目黒区駒場4-8-1)

³東京大学大学院工学系研究科修士課程 (〒135-2505 東京都目黒区駒場4-8-1)

Waves generated by ship navigation become a subject of discussion from the viewpoints of various utilization and ecological environment preservation in a coast. In the present paper, the method of numerical simulation for ship waves was applied to open sea with a constant water depth and a coast with straight, parallel depth contours in order to investigate characteristics of propagation and transformation of ship waves. The ship length is 76m, the breadth is 11.5m, and the draft is 2.5m. The ship sails on a straight course of 12m deep with a constant speed. The ship speed is changed to cover so that the range of Froude number at the sailing depth is from 0.6 to 1.2. Transformations due to shoaling and refraction occur when the ship waves propagate on the sloping coast. The ship waves are greatly influenced by the depth Froude number. When the ship speed is near-critical at the sailing depth, the maximum wave height exceeds 1.5m at the water depth of 1m.

Key Words : Ship waves, shallow water, numerical simulation, Boussinesq type equation, slender ship, depth Froude number, critical speed, maximum wave height

1. はじめに

沿岸を航行する船舶が造る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航走波の発生に関し制限が設けられているし、日本においてもマングローブ林やアマモ場への影響等が指摘されている。しかし、航走波に関する研究は、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、筆者らは任意の水深条件に適用できる航走波の数値計算法を開発し、浅水航走波の特性を明らかにすることを目的に研究を進めている。そのこれまでの経緯を簡単にまとめると次のとおりである。

まず、狭くて浅い直立護岸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Ertekinら(1985)¹⁾の実験結果とよくあうことを示した(谷本ら, 1999)²⁾。次に、水路幅がや

や広い場合を対象として数値計算を行い、航走波の最大波高が倉田ら(1983)³⁾の実験結果とよくあうことを示すとともに(谷本ら, 2000)⁴⁾、水深がやや大きい新河岸川で行った現地観測結果に対しても傾向をよく表すことを示した(谷本ら, 2000)⁵⁾。また、水路幅による航走波の変化を系統的に検討し、航走波の非定常性を論じた(谷本ら, 2000)⁶⁾。さらに、沿岸のような広い水域を対象とした計算を行い、一定水深海域における航走波のパターンおよび伝播・変形特性を検討し、1例ではあるが、直線状平行等深線海岸を対象とした計算結果を示した(谷本・小林, 2001)⁷⁾。

本論文では、これに続いて、直線状平行等深線海岸を対象として船速を系統的に変化させたときの計算を行い、浅水および屈折変形が航走波にどのように影響するかを、一定水深海域に対する計算結果と対比しつつ検討する。

2. 数値計算の方法と計算条件

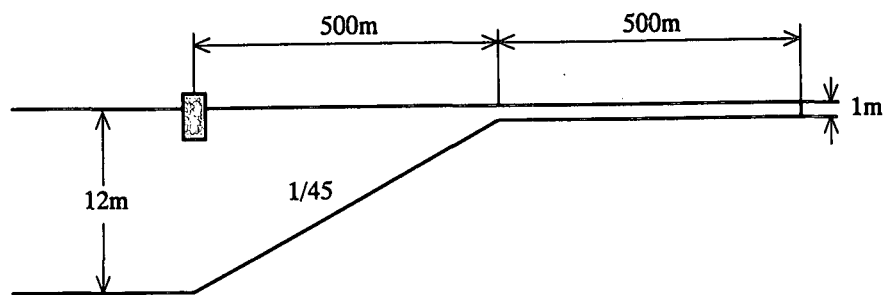


図-1 平行等深線海岸の断面図

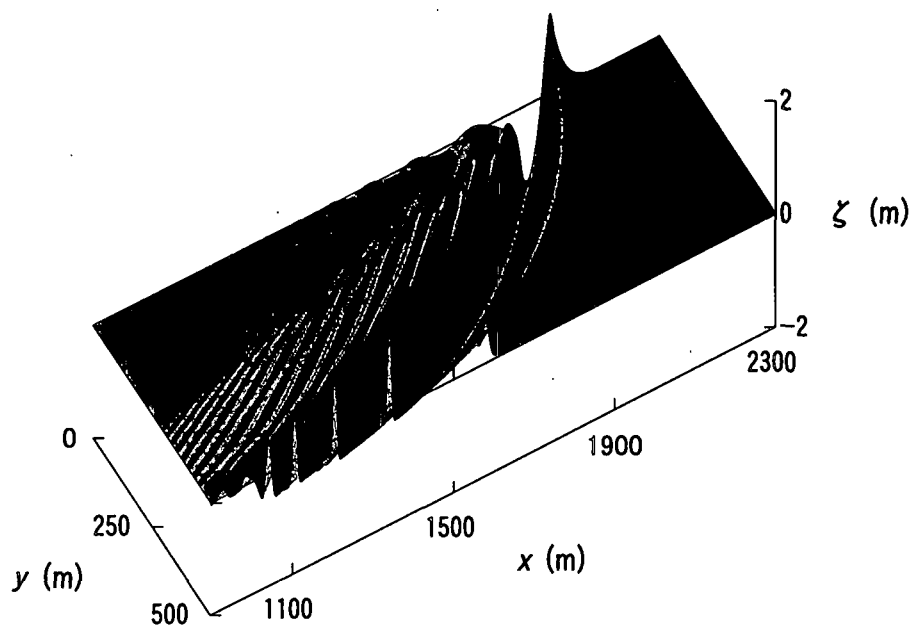


図-2 水位の3次元プロット(平行等深線海岸)

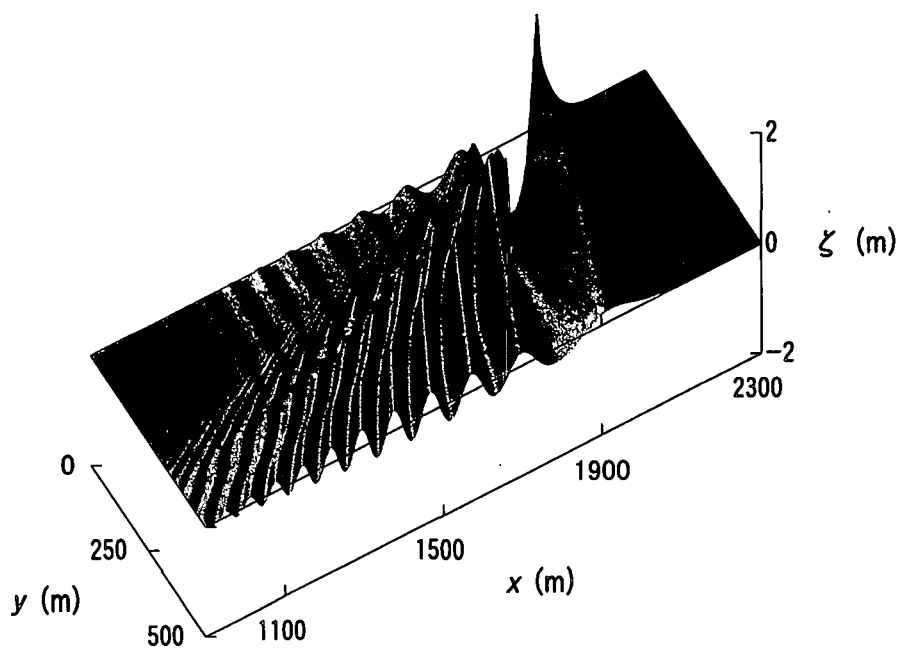


図-3 水位の3次元プロット(一定水深海域)

数値計算はMadsen and Sørensen (1992)⁸⁾による Boussinesq型の基本式を、微小船幅を仮定して、線状移動境界条件の下に解いていくものである。式については、谷本・小林(2001)⁷⁾と同じであるので、ここでは省略する。

対象とした船舶は、Ertekinらが用いた模型船を縮尺1/50として現地換算したもので、長さ76m、幅11.5m、喫水2.5mである。中央横断面積係数の値は0.98である。

Boussinesq型方程式の離散化にはADI法を用い、空間的には水位と線流量を交互に配置したスタッガード・メッシュを用いている。

また、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。

$$F_h = U / \sqrt{gh_s} \quad (1)$$

ここに、 U は船速、 g は重力の加速度、 h_s は航走水深である。

図-1は対象とした直線状平行等深線海岸の断面図を示したものである(以降、単に平行等深線海岸と呼ぶ)。船舶は水深12mの等深線上を直線的に走るものとし、その沖側は水深12mの一定水深領域、岸側は水深1mまで勾配が1/45の斜面とした。さらにその外側には水深1mの一定水深領域を設け、計算境界からの反射波の影響を避けるようにしている。これは本数値計算では、まだ砕波・遡上の現象を取り入れていないことによる。格子間隔はx方向(航

走方向)、y方向(直角方向)ともに2.0mとした。船速 U は6.61~13.0m/s($F_h=0.6\sim1.2$)の範囲で、6種類に変化させている。なお、比較のために、水深12mの一定水深海域を対象とした計算も行っている。

3. 計算結果と考察

(1) 航走波のパターン

図-2は平行等深線海岸における、水深フルード数が1.0すなわち限界速度で、航走距離が1900mのときの水位の3次元プロットである。 $y=0$ (m)が航走線であり、斜面上の領域、すなわち、 $y=500$ (m)までの範囲を示してある。航走波の第1波は船の前に発生する押し波であり、それを補償する引き波の後、発散波(diverging waves)と横波(transverse waves)が続くパターンを示している。

比較のために、図-3に水深12mの一定水深海域に対する3次元プロットを示す。水深フルード数は1.0で、航走距離も同じ1900mである。両者を比較すると、波のパターンに明らかな違いが認められる。すなわち、一定水深海域においては波峰線がどちらかといえば直線状であるのに対し、平行等深線海岸においては大きく曲がっており、屈折変形の影響を受けていることが明らかである。

(2) 第1波の波峰線の伝播

ここでは、航走波の第1波目に着目し、その波峰線がどのように伝播するかについて調べる。図-4は

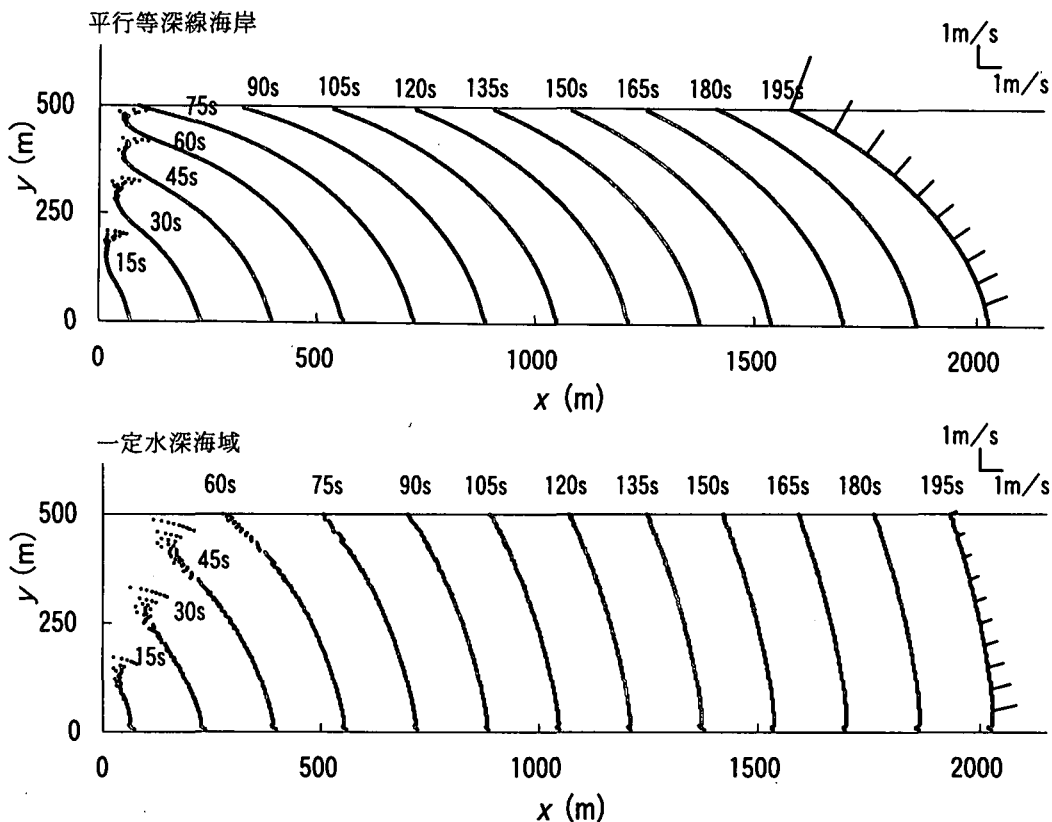


図-4 第1波の波峰線の伝播

平行等深線海岸と一定水深海域における第1波目の波峰線の時間的发展を対比して示したものである。水深フルード数が1.0の例で、15 sごとに、 x の負の方向に走査したときの最初の最大水位の位置を点でプロットしてある。特に、初期の段階の端部で点のばらつきが目立つのは、その辺では波は非常に小さいことによる。両図ともに、航走時間が195 sのときのみ平均流速のベクトルを示している。

両者を比較すると、波峰線の曲がりの程度に違いがあり、ここでも屈折の影響を確認できる。また、流速ベクトルは波峰線にほぼ直角であり、波は波峰線に直角方向に伝播していることを例証している。ただし、流速の大きさの分布は両者で大きく違っている。すなわち、一定水深の場合には航走線から離れるにつれて、流速は小さくなるのに対し、平行等深線海岸の場合には浅いところでは逆に大きくなる

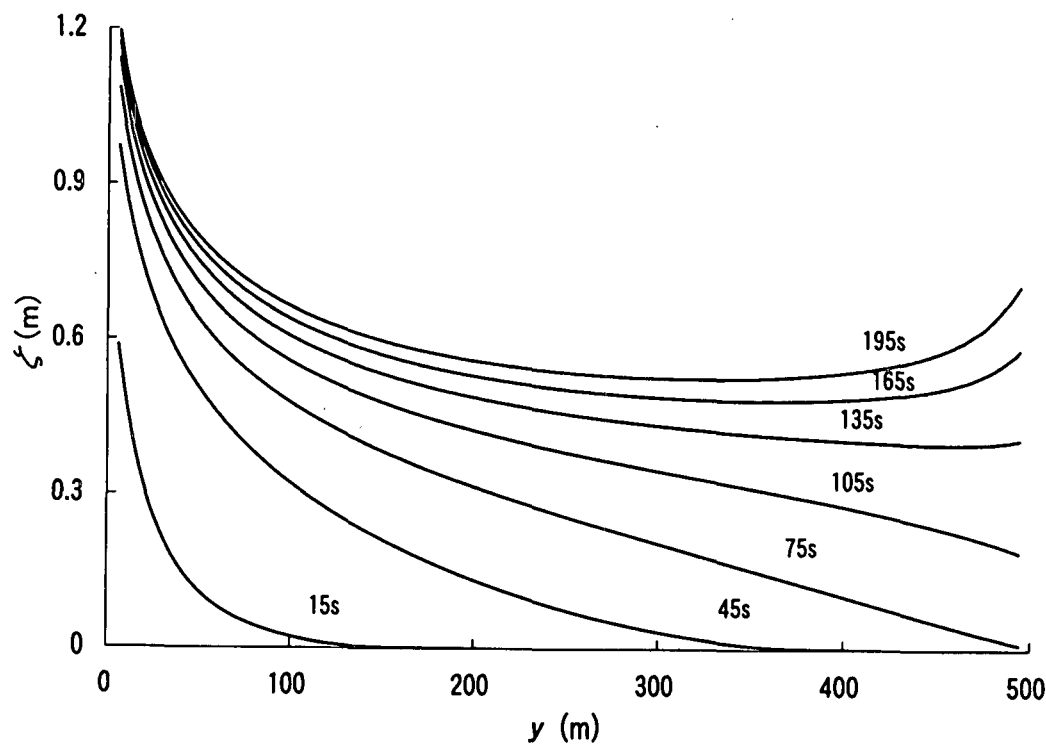


図-5 波峰線に沿う水位分布(平行等深線海岸)

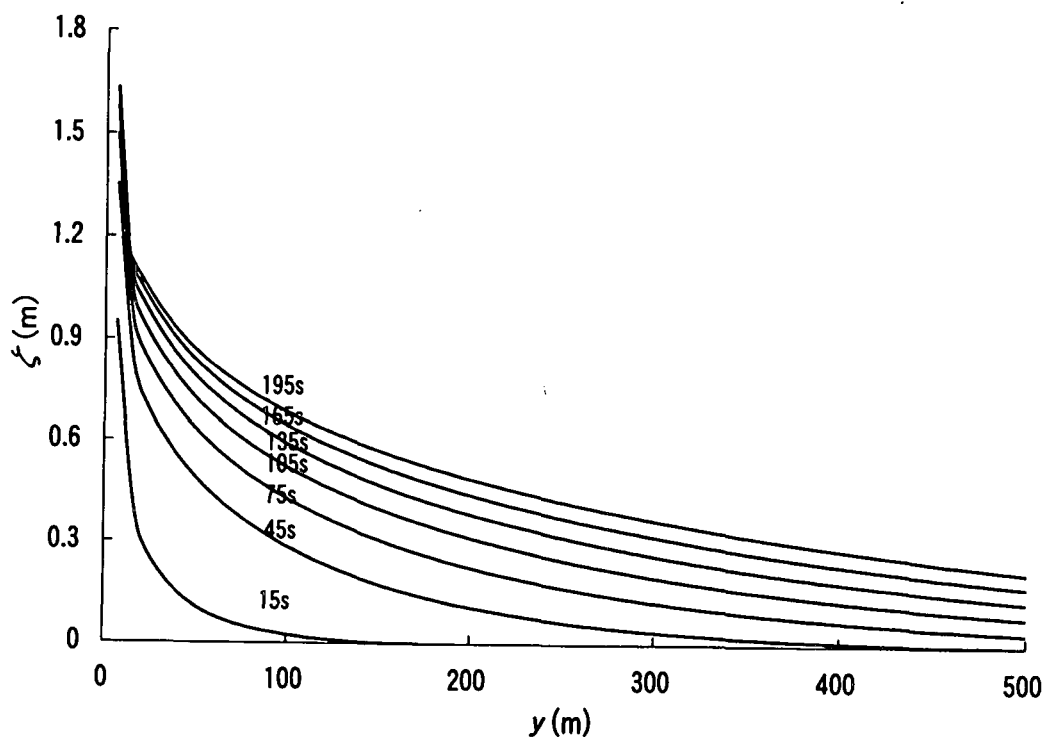


図-6 波峰線に沿う水位分布(一定水深海域)

傾向を示している。これは、浅水変形の影響を受けて、波高が大きくなっていることによる。次に、そのことを調べる。

図-5、図-6は平行等深線海岸と一定水深海域における第1波目の波峰線に沿う水位分布を時間別にしたものである。いずれの場合も、波峰線に沿う水位は時間が経つにつれて上昇し、500mの範囲においても定常状態に達していない。そうした状態での結果であるけれども、たとえば、195 sの時の水位分布を見れば、その特徴は明らかである。すなわち、一定水深海域では、水位は航走線から離れるにつれて低減するのに対し、平行等深線海岸では最初は低

減するものの、水深の非常に浅いところでは増大する変化を示している。これは航走波そのものが距離とともに減衰していくという性質を有していることに加え、屈折変形により低減が助長される反面、浅水変形によって増大するということの現れである。

(3) 最大波高

$F_h = 1$ の条件で、 $x=1200\text{m}$ での水位の時間波形を見てみる。図-7は平行等深線海岸での y が100m ごとの時間波形を示したものである。時間 t は船首が $x=1200\text{m}$ に達した時を0としている。これにより、水深が浅くなるにつれて、非線形的波形に変化して

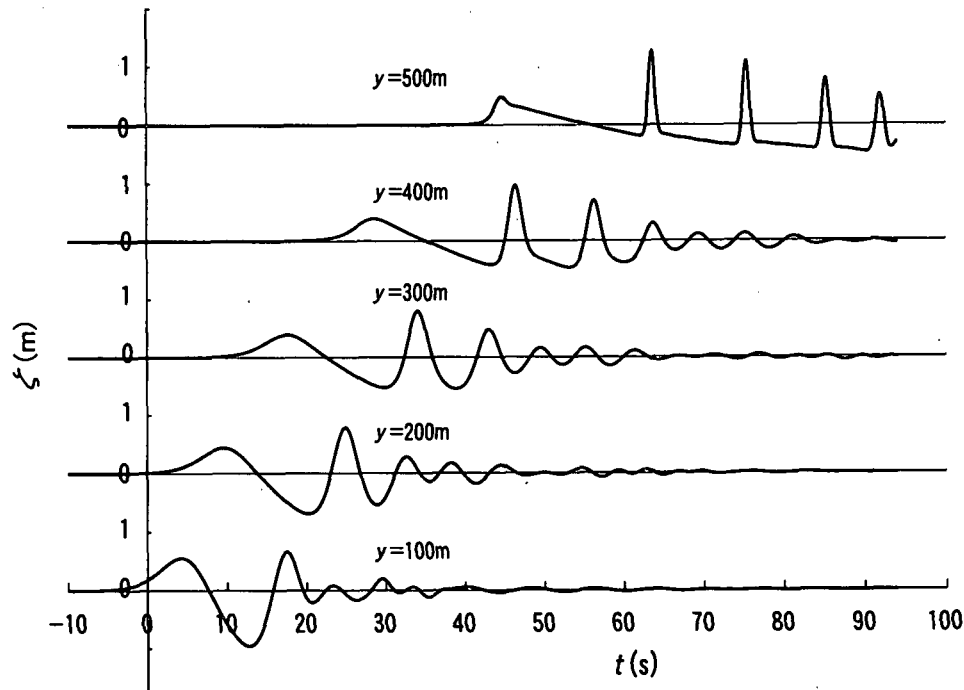


図-7 航走波の時間波形(平行等深線海岸)

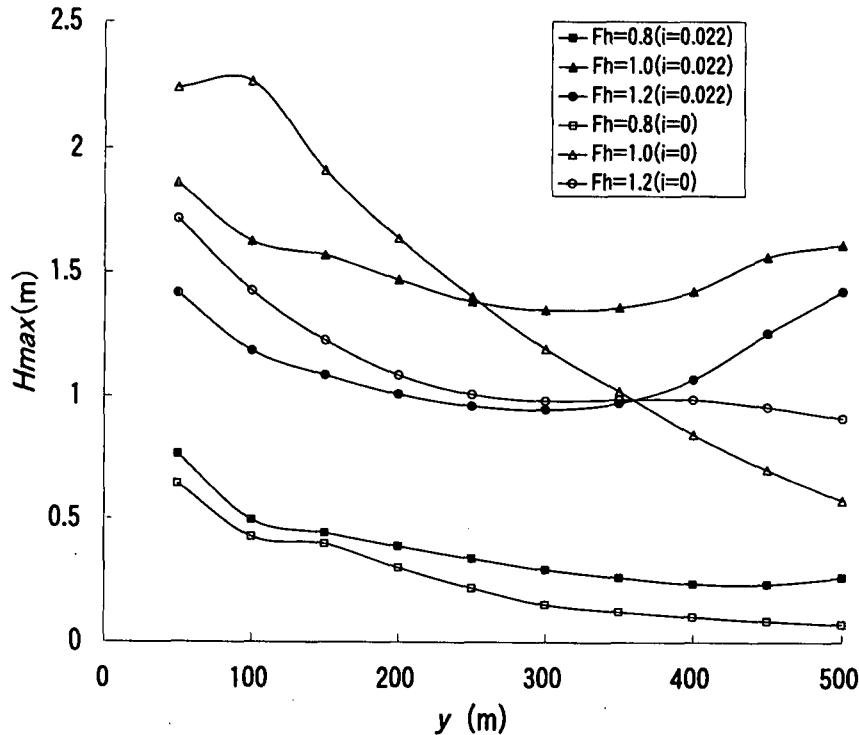


図-8 航走線からの距離による最大波高の変化

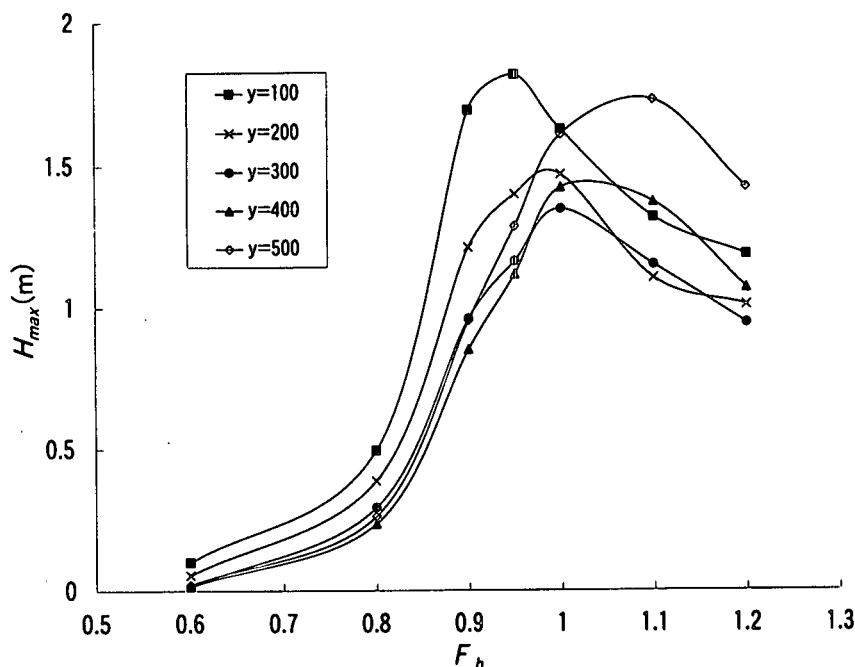


図-9 水深フルード数による最大波高の変化（平行等深線海岸）

いく様子がよくうかがえる。本例の場合、最大波高は最初の引き波と次の峰との間に生じている。

図-8はそうした最大波高を航走線からの距離に対してプロットしたものである。水深フルード数が0.8, 1.0, 1.2の例であるが、一定水深海域 ($i=0$) の結果も示してある。一定水深海域の場合には、最大波高は一部を除いて航走線からの距離とともに低下する傾向を示し、その傾向は限界速度のとき特に著しい。これに対し、平行等深線海岸では、低下傾向は鈍化し、浅いところでは増大傾向を示す。これは浅水変形の影響である。

一方、図-9は平行等深線海岸に限って、水深フルード数に対し最大波高をプロットしたものである。最大波高は限界速度付近までは増大し、以降低下傾向に転じる。特に、0.8程度を超えると急増することに特徴がある。 $y=500\text{m}$ 、すなわち水深1mのところでは、限界速度付近で最大波高は1.5mを超え、実際には砕波するものと考えられる。数値計算への砕波・遡上現象の導入は今後の課題である。

4. むすび

本論文においては、平行等深線海岸における航走波の伝播・変形特性を検討した。主要な結論をまとめると以下のとおりである。

- 1) 第1波の波峰線の伝播を調べた結果、波峰線はその接線の直角方向に伝播・拡大していくことが例証された。
- 2) 航走波は航走線から離れるにつれて低減する特性を有する。平行等深線海岸を船が平行に走る場合、汀線に向かう航走波は屈折変形によって低減が助長される反面、浅水変形によって増大する。

- 3) 最大波高は水深フルード数が大きくなるにつれて増加し、限界速度付近を超えると低下傾向に転じる。
- 4) 本研究で対象とした船が水深12mのところを限界速度で航走する場合、水深1mのところでの最大波高は1.5mを超え、実際には砕波するものと推測される。今後、砕波・遡上の現象を数値計算に取り入れることが課題である。

参考文献

- 1) Ertekin, R.C., Webster, W.C. and Wehausen, J.V.: Ship-generated solitons, *Proc. 15th Symp. Nav. Hydrodyn.*, pp.347-364, 1985.
- 2) 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.
- 3) 倉田克彦, 小田一記, 平井住夫: 航走波の特性および繫留船舶に及ぼす影響, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.598-602, 1983.
- 4) 谷本勝利, 小林豪毅, 倉田克彦, 今野博史: 浅水航走波の数値計算, 海洋開発論文集, 第16巻, pp.375-380, 2000.
- 5) 谷本勝利, 中村廣明, 小林豪毅: 河川における航走波について一直立護岸水路に対する数値計算一, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.369-374, 2000.
- 6) 小林豪毅, 谷本勝利, 倉田克彦: 水路幅による浅水航走波の変化と非定常性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.26-30, 2000.
- 7) 谷本勝利, 小林豪毅: 沿岸における浅水航走波の伝播と変形, 沿岸域学会論文集, No.13, 131-140, 2001.
- 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 Engineering*, Vol.18, pp.183-204, 1992.