

平行等深線海岸における航走波の変形

TRANSFORMATION OF SHIP WAVES ON A COAST WITH STRAIGHT AND PARALLEL DEPTH CONTOURS

谷本勝利¹・赤川嘉幸²・茂木勇佑²・Dam Khanh TOAN³

Katsutoshi TANIMOTO, Yoshiyuki AKAGAWA, Yusuke MOGI and Dam Khanh TOAN

¹フェロー 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

²学生会員 埼玉大学大学院 理工学研究科修士課程 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

³非会員 工修 埼玉大学大学院 理工学研究科博士課程 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

One of the important characteristics in the propagation of ship waves is to reduce the wave height with the increasing distance from the sailing line. In addition, the transformation due to wave shoaling and refraction must be considered in case that ship waves propagate on a sloping coast. In the present study, a method to estimate the maximum wave height has been proposed on the basis of results of numerical simulation for ship waves that are generated by a ferry sailing along the coast with straight, parallel depth contour lines. The proposed formula of the maximum wave height is the product of the relative shoaling coefficient, the relative refraction coefficient, the relative damping coefficient and the characteristic wave height defined at an appropriate distance from the sailing line. The coefficients are calculated by using the finite amplitude wave theory for shoaling and Snell's law for refraction. The damping coefficient is calculated so as to be proportional to $-1/5^{\text{th}}$ power of the distance from the sailing line. The maximum wave height estimated by the proposed method agrees well with the one by numerical simulations.

Key Words : Ship waves, Shoaling, Refraction, Damping, Boussinesq type equation, Snell's law
Depth Froude number, Sloping coast, Maximum wave height

1. はじめに

近年の海上輸送高速化のニーズに応じて、水深10m未満の浅水域を40knots以上で航行する高速フェリーも登場するようになった。そのような高速フェリーによって発生する航走波は周期が長く、浅水域に到達すると急激に波高を増大させ水辺利用者を危険にさらすことがある。そのため、例えば、デンマークでは高速フェリーによって発生する航走波に関して制限が設けられているし、同様な規制はイギリスでも行われている^{1), 2)}。

そうした航走波については、深水あるいは一定水深条件に対しては古くから研究されており、その基本的特性が明らかにされている。例えば、航走波の大きな特色の一つは、航走線から離れるに従って波高が減衰するということである。これについては、Havelock³⁾が既に1908年に深海における縦波の波高が航走線からの距離の $-1/3$ 乗に比例して減衰することを示している。また、現在の港湾の施設の技術上の基準・同解説においては、これを取り入れて、深海における航走波の最大波高を船舶条件から求める方法を示している⁴⁾。

一方、海岸を航走波が伝播する際には、水深変化による浅水変形、屈折変形、さらには碎波変形等を考慮しなければならない。そうした浅水域における航走波は複雑で曳航実験などでは捉えにくい現象であるため、数値シミュレーションによる検討が非常に有効となる。これに対し、筆者らは任意の地形条件に適用できる航走波の数値計算法の開発に取り組んでおり、既に、直線状平行等深線海岸を船が汀線に平行に走る場合の数値計算を行って、屈折変形を伴うときの航走波のパターンなどを示してきた⁵⁾。しかしながら、これまでの研究では、そうした浅水変形や屈折変形を定量的に評価するには至っていない。

そこで、本研究では、引き続き平行等深線海岸を対象として、数値計算結果に基づき、浅水・屈折変形等の特性を定量的に明らかにするとともに、航走波の最大波高を浅水係数、屈折係数等を用いて推定する簡便な方法を検討する。さらに、本研究における数値計算の条件に対して最大波等の定式化を行い、浅水・屈折変形を考慮した航走波の最大波高算定法を一般化するための手がかりを得た。

2. 数値計算の方法と計算結果の例

(1) 数値計算の方法と計算条件

数値計算はMadsen & Sørensen⁶⁾によるBoussinesq型の基本式を、微小船幅を仮定して、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。これらは既発表⁷⁾のものと全く同じであるので、ここでは省略する。

Boussinesq型方程式を、空間的に水位と線流量を交互に配置したスタッガード・メッシュを用いて離散化し、ADI法を用いて解いた。

対象とした船舶と海岸の条件も文献⁷⁾と同じである。すなわち、船の条件は沿岸フェリーを想定して、船長82m、船幅14.6m、喫水5.88m、中央横断面積係数0.62である。船は、図-1に示すように、水深15mの等深線を直線的に走るものとし、その沖側は一定水深で、岸側は水深1.5mまで1/50の勾配をもつような斜面が続く直線状平行等深線海岸である。さらに、計算境界からの反射波の影響を避けるために、斜面の外側に水深1.5mの一定水深領域を設けているが、これは、本数値計算では砕波・遡上の現象を取り入れていないためである。格子間隔はx方向、y方向ともに2.5mとし、x方向の長さは航走開始位置から4000mとした。

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。

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

ここに、 h_s は航走水深（15m）である。本研究では、 $F_h=0.6 \sim 1.2$ の範囲で変化させた。

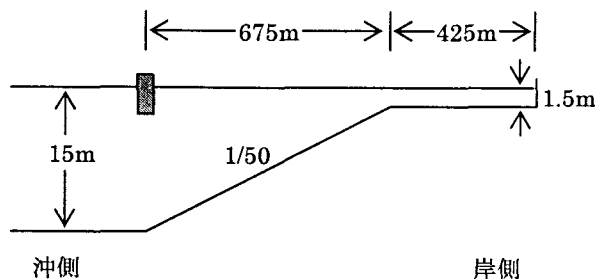


図-1 平行等深線海岸の断面図

(2) 数値計算結果の例

図-2は $F_h=1.0$ で、航走距離が2914mのときの航走波の平面パターンである。左側（沖側）が一定水深領域、右側（岸側）が斜面領域である。この図から、浅水域における航走波のパターンは深水域におけるそれとは異なった傾向を示すことが分かる。すなわち、水深フルード数が大きくなると、縦波がカスプラインの外側へと抜け出したパターンとなって、波が長く連なって連続的に岸へと押し寄せる状況となることがうかがえる。さらに、横波は認識できないほど小さい。

図-3は $x=2000m$, $y=-200m$ （沖側）の地点における航走波の時間波形で、時間は船首が測点位置の見通

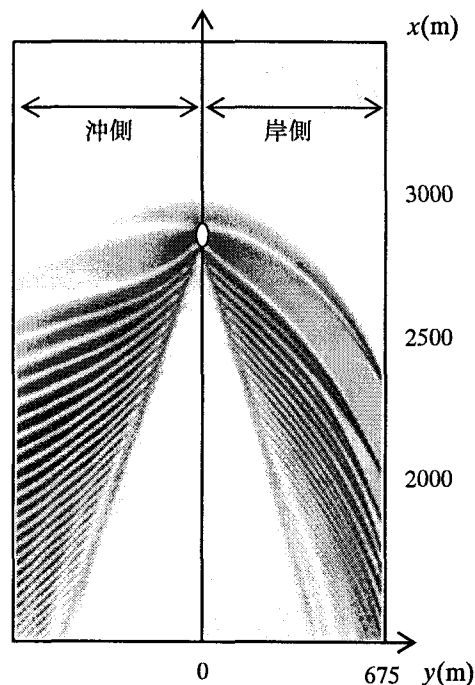


図-2 航走波の平面パターン ($F_h=1.0$)

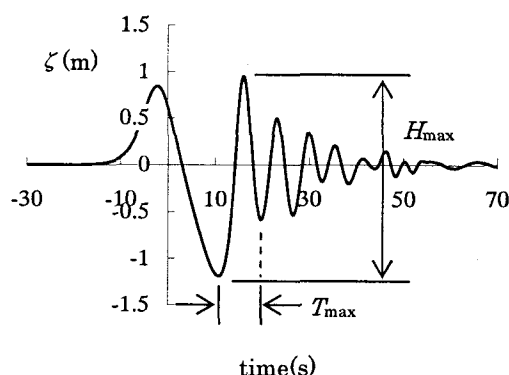


図-3 最大波の定義

し線を通した時刻を0秒としている。この図に見られるように、航走波はまず船首による掻き分けに起因する水位の盛り上がりとそれを補償する顕著な引きがあり、後続波が続くという変化を示す。

本研究では、こうした航走波の最大波に着目して議論を進める。最大波は航走線の近傍を除く斜面上では後続波において現れるので、データ解析においては引き波の谷以降の後続波のみを対象とする。そのため、本研究では谷を基準とした負のpeak to peakを1波と定義し、最大波高 H_{max} および最大波周期 T_{max} を求めている。

図-4は $x=2000m$ 地点の斜面上における航走波の時間波形の変化で、横軸が航走開始からの時間、縦軸が水位である。 $y=100m$, $y=300m$, $y=500m$, $y=675m$ の波形が示してあるが、航走線から離れるに従って波形は変化し、水深の浅いところ（ $y=675m$ ）では非線形性の強い波になっていく様子が認められる。

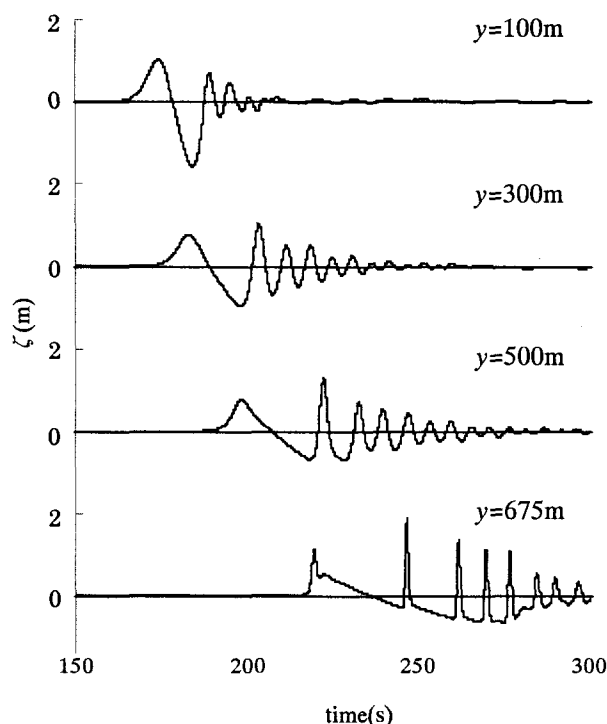


図-4 斜面における航走波の時間波形 ($F_h=1.0$)

3. 屈折に対する検討

図-2に示したように斜面上を伝播する航走波は屈折変形を受ける。このような屈折による波向きの変化を評価する方法として、本研究では、流速分布、波峰線、スネルの法則に着目して検討した。ただし、船首によって造られる航走波の第1波は2波目以降の後続波とは波の性質が異なるため、本研究ではそれを取り除いて考える。

図-5は $F_h=1.0$ における流速ベクトル先端の時間変化(軌跡)を $x=1500\text{m}\sim 2500\text{m}$ の範囲で x 方向に 150m 、 y 方向に 100m 毎の各地点においてプロットしたものである。これは、航走波がどの方向に大きく動いているかを示しており、航走線からある程度離れた地点では流速の方向はほぼ一定で、特に斜面領域ではその方向が航走線からの距離によって変化していることが分かる。従って、流速の方向の y 軸に対する傾き角 β はその地点での波向き角とみなせる。図-6は横軸に航走線からの距離 y をとって、縦軸に流速の傾き $\tan \beta$ をとりプロットしたものである。このように、波向きの傾きは y の関数として表されるので、図中に示した近似関数を $\tan \beta = dy/dx$ とおいて積分することにより波向線の式を決定できる。図-5に示した実線は以上のようにして流速分布から決定した波向線であり、一定水深領域(沖側)に比べて斜面領域(岸側)の波向線は屈折変形を受けて大きく曲がっていることから、この波向線は航走波の伝播の様子を的確に表しているといえる。

次に、波峰線の方角を調べることで波向きの変化

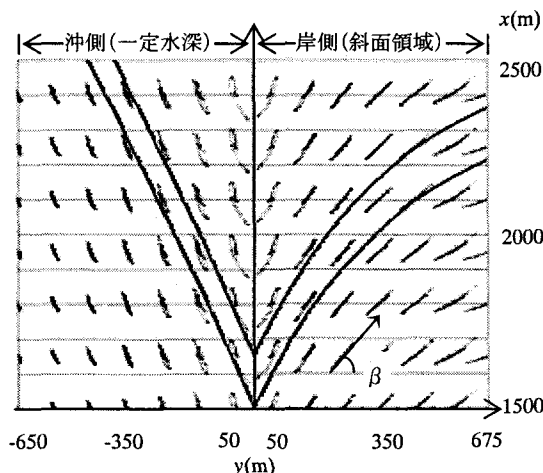


図-5 流速分布より求めた波向き角と波向線 ($F_h=1.0$)

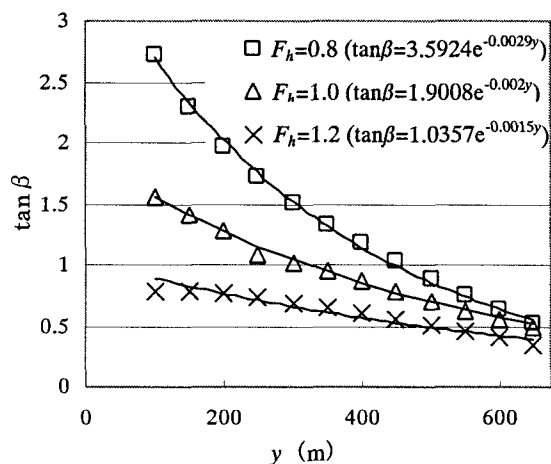


図-6 斜面における波向き角の傾き

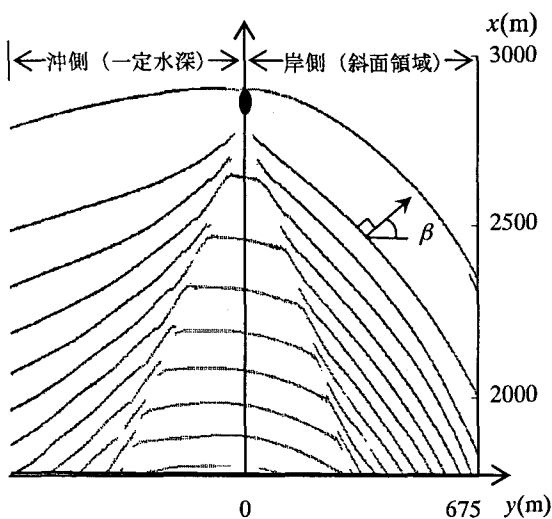


図-7 航走波の波峰線 ($F_h=1.0$)

を評価する方法を述べる。図-7は図-2の水位分布から求めた波峰線の平面分布である。こうした波峰線の法線方向を波向きと考えて、波向線を求めることにする。具体的には、第1波を除いた第2波から第5

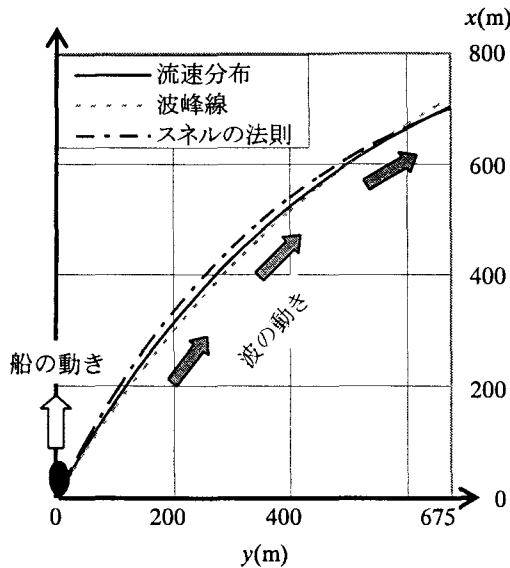


図-8 波向線の比較 ($F_h=1.0$)

波までの波峰線が $x=2000\text{m}$ の線上を横切る瞬間の波向き角を求め、その平均値を用いて、図-6と同様に y に対して $\tan \beta$ をプロットした。そして、 $\tan \beta$ の近似関数を積分することで波峰線から求めた波向線を決定した。

一方、スネルの法則による波向線の傾きは、 $y=100\text{m}$ での値を基準値として、次式のように表される。

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{(C/C_1 \times \sin \beta_1)^2}}{\sqrt{1 - (C/C_1 \times \sin \beta_1)^2}} \quad (2)$$

ここに、 β_1 は $y=100\text{m}$ での y 軸に対する入射角（基準入射角という）、 C_1 は $y=100\text{m}$ での波速、 C は任意の y の位置での波速である。波速は周期と水深（ y の関数である）を与えれば、分散関係式を用いて計算できる。従って、式（2）は y の関数になっているので、流速分布から波向線を求めたときと同じ手法を用いて積分し、スネルの法則に基づく波向線の式を求めることができる。

図-8は $F_h=1.0$ の条件において、これら3通りの方法から決定された波向線を示したものである。ここに、スネルの法則による波向線は図-6の $y=100\text{m}$ での β_1 を、また周期は $y=100\text{m}$ での最大波の周期 T_1 （基準波周期という）を用いて求めたものである。以上のように、流速分布、波峰線、スネルの法則の3つの手法を用いて航走波の波向線を求めたが、どの方法を用いてもほぼ同等な結果が得られることが分かった。従って、航走波の屈折変形も通常の波と同様にスネルの法則を用いて評価できるといえる。スネルの法則が適用できるとすると、 $y=100\text{m}$ を基準とした相対屈折係数 K_r は次式で表される。

$$K_r = \left[1 + \left\{ 1 - \left(\frac{C}{C_1} \right)^2 \right\} \tan^2 \beta_1 \right]^{-1/4} \quad (3)$$

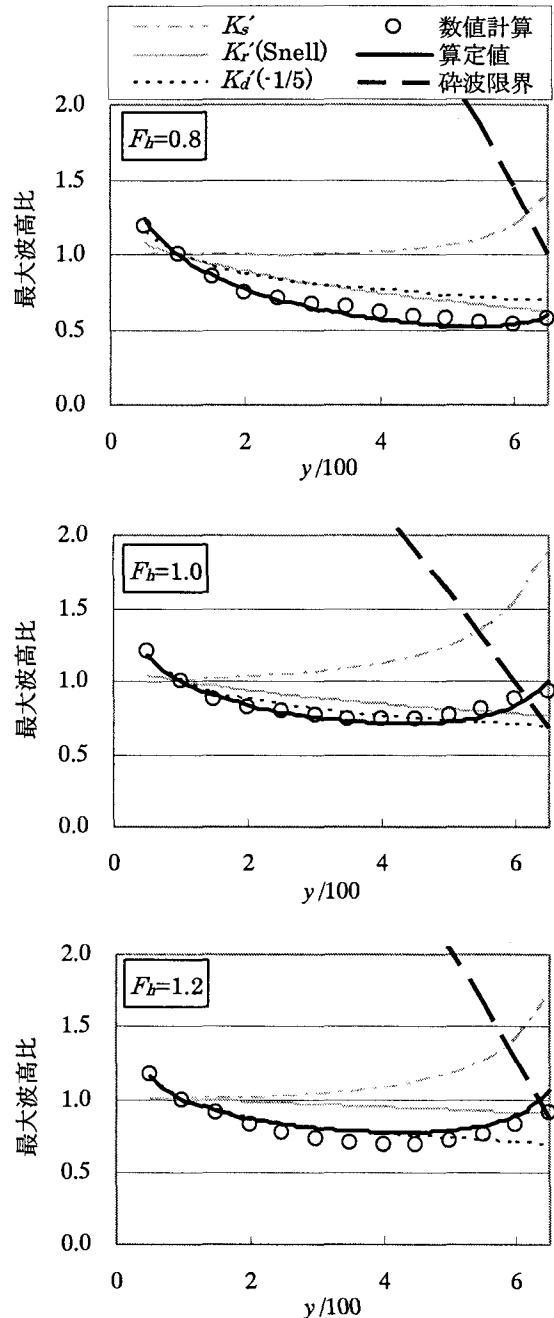


図-9 各相対係数と最大波高比の計算値と算定値

4. 最大波高の算定法

(1) 算定式

傾斜海岸を伝播する航走波は、航走波特有の距離による減衰のほか、浅水変形、屈折変形を受ける。本研究では、そうした変形を受ける航走波の最大波高 $H_{\max}$ を次式によって推定する方法を提案する。

$$H_{\max} = K_s' \times K_r' \times K_d' \times H_1 \quad (4)$$

ここに、 H_1 は $y=100\text{m}$ における最大波高（基準波高）、 K_s' 、 K_r' 、 K_d' はそれぞれの $y=100\text{m}$ における値で割った相対浅水係数、相対屈折係数、相対減衰係数である。このうち、相対屈折係数は3章で説明したようにスネルの法則に基づいて与える。

ここでは、相対浅水係数、相対減衰係数の算定法について説明を加える。相対浅水係数は非線形性を考慮して有限振幅波理論⁹⁾による浅水係数 K_s を用いて次式により与える。

$$K_s' = \frac{K_s}{K_{s1}} \quad (5)$$

ここに、

$$K_s = K_{s1} + 0.0015 \left(\frac{h}{L_0} \right)^{-2.9} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1.3} \quad (6)$$

$$K_{s1} = \frac{1}{\sqrt{\tanh \frac{2\pi h}{L} + \frac{2\pi h}{L} \left(1 - \tanh^2 \frac{2\pi h}{L} \right)}} \quad (7)$$

$$L_0 = \frac{gT_1^2}{2\pi} \quad (8)$$

$$H_0 = \frac{H_1}{K_{s1}} \quad (9)$$

$$L = \frac{gT_1^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (10)$$

g は重力の加速度、 h は任意の y における静水深、 K_{s1} は $y=100\text{m}$ における K_s 、 T_1 は基準波周期、 H_1 は基準波高である。

相対減衰係数 K_d' は一般化して次式で表す。

$$K_d' = \left(\frac{y}{100} \right)^{-n} \quad (11)$$

ここに、 n は減衰定数である。

減衰係数については、既に述べたように深水域ではHavelock³⁾による $n=1/3$ が通常用いられている。そのほか、Kofoed-Hansen et al.⁹⁾は、船が限界速度を越えて走るときは $n=0.55$ になることを示しており、Whittaker et al.¹⁰⁾は、浅水域における実験結果より、最低値として $n=1/5$ を提案している。以上のように、深水域における減衰定数については $n=1/3$ が標準的に用いられているものの、浅水域については依然不明なところが多い。本研究では、数値計算結果との適合度を考慮して $n=1/5$ を採用した。

(2) 最大波高に対する計算値と算定値の比較

図-9は各相対係数と基準波高で割った最大波高の算定値、および数値計算によって得られた最大波高比を示したものである。ただし、横軸は y を100mで割って無次元化して表示してある。 F_h が0.8, 1.0, 1.2の例であり、減衰定数はいずれも1/5を使用している。従って、相対減衰係数は3ケースとも同じ減衰曲線である。これに対し、相対屈折係数は低下曲線であることは同じであるが、 F_h が大きくなるにつれて低下率がやや減じるという傾向を示している。相対浅水係数は y が大きくなるにつれて、すなわち水深が浅くなるにつれて増大傾向を示し、特に水深が非常に浅

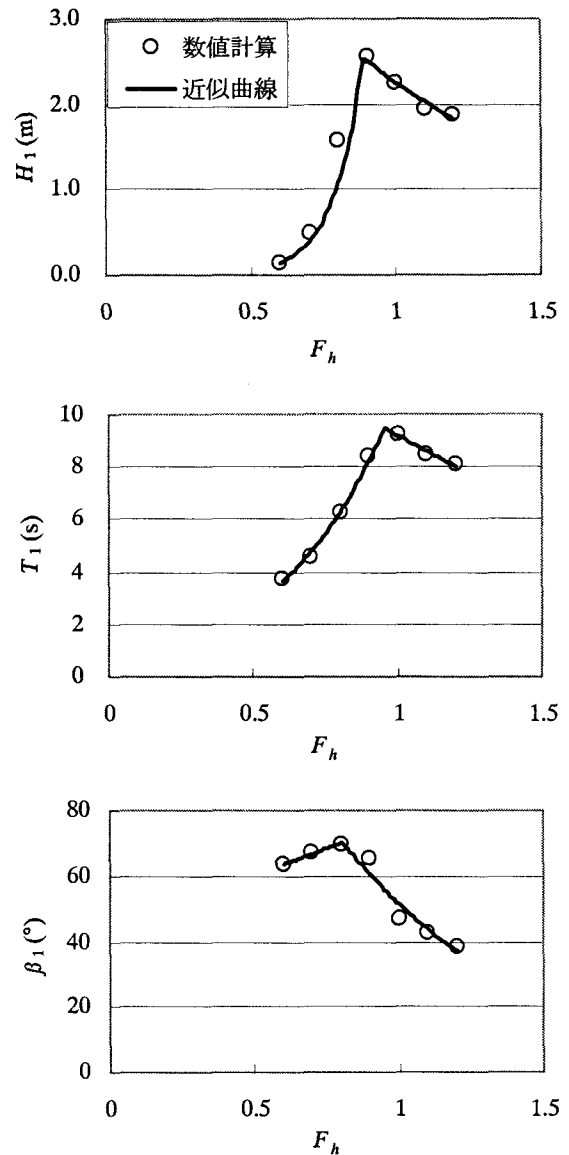


図-10 H_1 , T_1 , β_1 の定式化

いところで非線形性のため急増するという変化を示している。これらの係数の積である最大波高比の算定値は、斜面上を伝播するに従い航走波の減衰特性や屈折変形の影響を受けて一度低減しつつも、浅水変形の影響を受けて増加に転じるといった変化を示し、数値計算結果と良く合っている。

以上のことから、浅水域における航走波は、浅水変形には有限振幅波理論による浅水係数、屈折変形にはスネルの法則、航走波の減衰定数には $n=1/5$ をそれぞれ用いることで、基準地点における最大波高 H_1 と最大波周期 T_1 、入射角度 β_1 が与えられれば、任意の点における最大波高の推定が可能であるといえる。

なお、図-9には合田¹¹⁾による碎波限界波高に相当する線（太破線）も同時に示してあり、それと算定値の線（太実線）との交点付近で波は碎波すると考えられる。そうした碎波の現象を取り入れた数値計算による検討は今後の課題である。

(3) 最大波の基準値

提案した算定法は、ある基準点 ($y=100\text{m}$) における最大波の諸元 H_1 , T_1 , β_1 を与えることで、任意の地点における航走波の最大波高を算定できるものである。そのため、数値計算結果に基づいて、今回の条件の下でのそれら (H_1 , T_1 , β_1) の定式化を試みた。図-10は $x=2000\text{m}$, $y=100\text{m}$ における H_1 , T_1 , β_1 の水深フルード数に対する変化を示したものである。各基準値に対し、図の実線で表される近似式は以下の通りとなる。

基準波高 H_1 :

$$F_h \leq 0.89 \text{ のとき } H_1 = 0.0004e^{9.871F_h} \quad (12)$$

$$F_h \geq 0.89 \text{ のとき } H_1 = 6.4636e^{-1.0531F_h}$$

基準波周期 T_1 :

$$F_h \leq 0.95 \text{ のとき } T_1 = 0.7264e^{2.697F_h} \quad (13)$$

$$F_h \geq 0.95 \text{ のとき } T_1 = 18.022e^{-0.6729F_h}$$

基準入射角 β_1 :

$$F_h \leq 0.8 \text{ のとき } \beta_1 = 48.003e^{0.473F_h} \quad (14)$$

$$F_h \geq 0.8 \text{ のとき } \beta_1 = 256.9e^{-1.6108F_h}$$

いずれも F_h が $0.8 \sim 0.95$ でピークを有するような変化を示しているが、これらの一般性については今後さらに検討していかなければならない。

5. むすび

本研究において、直線状平行等深線海岸を船が汀線に平行に走る場合の航走波について、ケーススタディ的な数値計算を行い、浅水変形や屈折変形等を考慮した最大波高の簡便な算定法を検討した。提案した算定法は、航走線から適当に離れた地点に基準点を設け、そこでの最大波の基準値（波高、周期、波向き角）を用いて、斜面上の最大波高を求めるものである。基準点は航走線から 100m の距離にとった。

算定式は基準点での値を1とした相対浅水係数、相対屈折係数、相対減衰係数を基準波高に乘じるものである。相対浅水係数は有限振幅波理論、相対屈折係数はスネルの法則に基づき与える。航走波特有の相対減衰係数については、距離の $-n$ 乗に比例するものとした。

提案した算定法による最大波高は、斜面を伝播する初期の段階において、減衰特性や屈折変形の影響を受けて一度低減するけれども、浅水変形の影響を

受けて増加に転じるといった変化を示す。数値計算結果と比較した結果、浅水航走波の減衰定数 n は $1/5$ とすると良いことが分かった。

最大波の基準値については、本研究における数値計算の条件に対しては、航走水深に対するフルード数で定式化することができた。いずれも、水深フルード数が $0.8 \sim 0.95$ でピークを有するような変化を示すが、これらの一般性については今後検討していかなければならない。また、砕波を取り入れた検討も今後の課題である。

参考文献

- 1) Kirkegaard, J., Kofoed-Hansen, H. and Elfrink, B.: Wake wash of high-speed craft in coastal areas, *Proc. 26th Conference on Coastal Engineering*, pp.325-337, 1998
- 2) Kofoed-Hansen, H., Jensen, T., Sørensen, O.R. and Fuchs, J.: Wake wash risk assessment of high-speed ferry routes – A case study and suggestions for model improvements, The Royal Institution of Naval Architects, London, 2000
- 3) Havelock, T.H.: The propagation of groups of waves in dispersive media, with application to waves on water produced by a traveling disturbance, *Proc. of the Royal Society of London, Series A*, Vol. LXXXI, pp.398-430, 1908
- 4) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999
- 5) 谷本勝利, 小林豪毅, 田村雅宣: 航走波の浅水および屈折変形, 海洋開発論文集, 第17巻, pp.25-30, 2001
- 6) Madsen, P.A. and Sørensen, O.R.: A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part2. A slowly-varying bathymetry, *Coastal Engineering*, Vol.18, pp.183-204, 1992.
- 7) Tanimoto, K., Kobayashi, H. and Ca, V.T.: Ship waves in a shallow and narrow channel, *Proceeding of 27th Conference on Coastal Engineering*, pp.1141-1154, 2001
- 8) 合田良實: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp.54, 1990
- 9) Kofoed-Hansen, H., Jensen, T., Kirkegaard, J. and Fuchs, J.: Prediction of wake wash from high-speed craft in coastal areas, *Hydrodynamics of High Speed Craft*. The Royal Institution of Naval Architects, London, pp.1-10, 1999
- 10) Whittaker, T.J.T., Doyle, R. and Elsaesser, B.: An experimental investigation of the physical characteristics of fast ferry wash, In: V. Bertram (Editor), *HIPER'01 2nd International EuroConference on High Performance Marine Vehicles*, Hamburg, pp.480-491, 2001
- 11) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻 第3号, pp.31-69, 1973