

流れと水深変化による波浪屈折計算モデルの 実際海岸への適用

京都大学工学部 正会員 酒井 哲 郎
京都大学大学院 学生会員 村 井 和 彦

1. まえがき

砕波帯における波浪の変形の数学モデルにおいて、流れと水深変化による波の屈折現象は重要である。回折効果をも考慮した数学モデルも既に提案されているが (Kirby, 1986)、実際の海岸には適用されていない。ただし、オランダ南西部の Oosterschelde estuary の河口部に適用された例が 1 例ある (Booij, 1981)。しかし流れの速度が弱く、波浪に対する流れの効果は明らかではない。

明石海峡 (図-1) における潮流は極めて速く、最大 4.5m/sec とされている。最近この領域における潮流のデータが入手出来た。ここでは、流れと水深変化による波浪屈折計算モデル (Iwagaki, Sakai, Tsuda and Oka, 1977) を明石海峡の海岸付近における波浪変形に適用し、波高増加に対する潮流の平面的な流速分布の影響、波高変化の機構および波高増加領域における砕波の可能性について議論する。

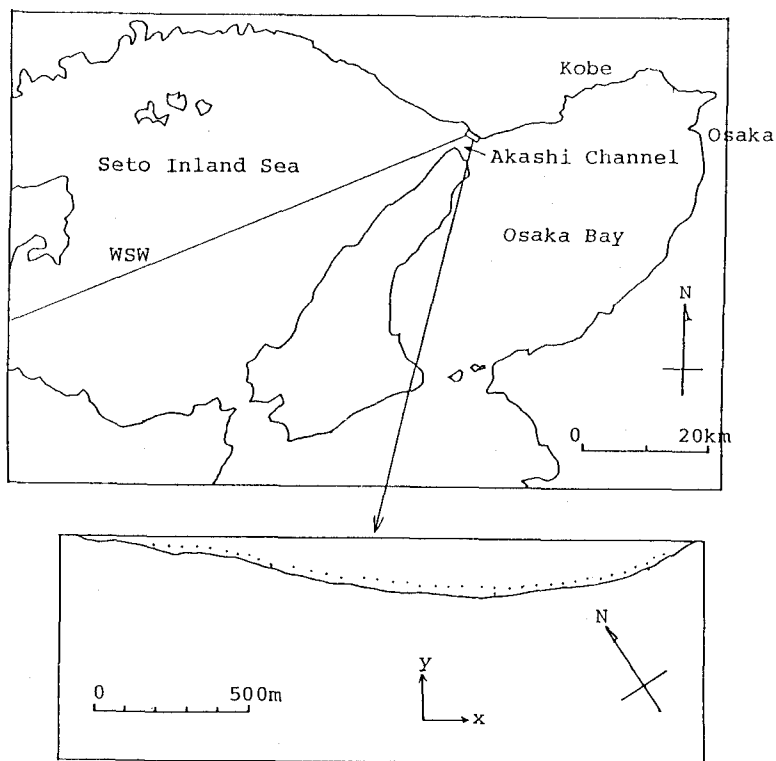


図-1 明石海峡

2. 流れと水深変化による波浪屈折計算モデル (Iwagaki, Sakai, Tsuda and Oka, 1977)

流れと水深変化による波浪屈折計算については、いくつかのモデルがある。その中には、不規則波の方向スペクトル分布の変化をも計算出来るモデル (例えば酒井・小関・岩垣, 1983) もある。この論文では、方向スペクトルに関する情報が入手出来なかったので、波は規則波として扱う。規則波の流れと水深変化による屈折の数値計算モデルとしては、少なくとも次の 3 つのモデルがある: Noda, Sonu, Rupert and Collins (1974)、Skovgaard and Jonsson (1976)、Iwagaki, Sakai, Tsuda and Oka (1977)。用いられている基本方程式はいずれも同じである。ここでは、3 つ目のモデルを適用する。

まず、水深と流れの変化のスケールは波長のスケールより大きいと仮定する。また波は流れのない領域から流れの存在する領域に侵入するとする。基本方程式は、運動学的変形と力学的変形の式からなる。

運動学的変形の式は、波数 k (図-2) の非回転の条件式;

$$\nabla \times k = 0, \quad (1)$$

波数の運動学的保存式 (ω : 絶対的角周波数);

$$\partial k / \partial t + \nabla \cdot \omega = 0, \quad (2)$$

および流れに相対的な波速 c_r の分散関係式;

$$kc_r^2 = g \cdot \tanh kh \quad (3)$$

(g : 重力加速度、 h : 水深) である。

一方、力学的変形に対する基礎式は、流れの中での波のエネルギーの保存式である (Longuet-Higgins and Stewart, 1961);

$$\begin{aligned} & aE/\alpha t + a\{E(U + c_{gr}\cos\theta)\}/\alpha x + a\{E(V + c_{gr}\sin\theta)\}/\alpha y \\ & + S_{xx}aU/\alpha x + S_{xy}aV/\alpha x + S_{yx}aU/\alpha y + S_{yy}aV/\alpha y = 0, \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 E : 波のエネルギー、 x 、 y : 水平面上の直角座標成分、 U 、 V : 流れの流速の x 、 y 成分、 c_{gr} : 流れに相対的な群速度、 θ : 波の伝播方向と x の正方向とのなす角度、 S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} : ライエンション応力の成分。

上述した3つの数値モデルにおいては、基礎式(1)および(4)の変形の仕方に相違がある。Iwagaki et al.(1977)の場合は、式(1)をある経路に沿う波の伝播方向 θ の時間変化の式に変形している。この経路は、次のように定義される(流れの速度と相対的波速の合速度の方向) :

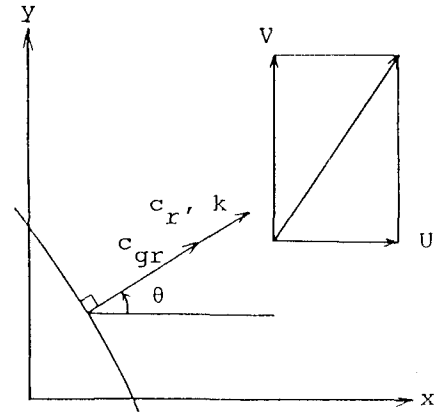


図-2 記号の定義

$$\alpha x/\alpha t = U + c_r \cos\theta, \quad \alpha y/\alpha t = V + c_r \sin\theta. \quad (5)$$

この経路に沿う θ の時間変化は、次式で与えられる :

$$\begin{aligned} d\theta/dt = & (-aU/\alpha y \cdot \cos\theta + aU/\alpha x \cdot \sin\theta)\cos\theta + (-aV/\alpha y \cdot \cos\theta + aV/\alpha x \cdot \sin\theta)\sin\theta \\ & -(-ac_r/\alpha y \cdot \cos\theta + ac_r/\alpha x \cdot \sin\theta). \end{aligned} \quad (6)$$

式(4)は、別の経路(流れの流速と相対的群速度の合速度の方向) :

$$dx/dt = U + c_{gr} \cos\theta, \quad dy/dt = V + c_{gr} \sin\theta. \quad (7)$$

に沿う波のエネルギー E の時間変化の式に変形している :

$$dE/dt = -F(U, V, c_r, c_{gr}, \theta) \cdot E, \quad (8)$$

ここで、

$$\begin{aligned} F = & aU/\alpha x + aV/\alpha y + ac_{gr}/\alpha x \cdot \cos\theta + ac_{gr}/\alpha y \cdot \sin\theta \\ & + c_{gr}(-\sin\theta \cdot \alpha\theta/\alpha x + \cos\theta \cdot \alpha\theta/\alpha y) + \{c_{gr}/c_r \cdot \cos^2\theta + 1/2 \cdot (2c_{gr}/c_r - 1)\} aU/\alpha x \\ & + c_{gr}/c_r \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta (aV/\alpha x + aU/\alpha y) + \{c_{gr}/c_r \cdot \sin^2\theta + 1/2 \cdot (2c_{gr}/c_r - 1)\} aV/\alpha y. \end{aligned} \quad (9)$$

計算では、最初沖側境界から岸向きに、式(5)で与えられる経路に沿って、式(6)を用いて波の伝播方向 θ の変化を計算する。この計算は、沖側境界上一定間隔で経路を出発させ、全領域をおおうようにする。次に同じ沖側境界から岸向きに、式(7)で与えられる経路に沿って、式(8)と既に計算された波の伝播方向を用いて、波のエネルギー E の変化を計算する。

3. 明石海峡への適用

明石海峡における潮汐は、1日2回潮である。1日の内に、東向き流れおよび西向き流れが夫々2回生じる。ここでは、WSWからの波(図-1)と西向き流れの組み合わせを計算の対象とした。WSWからの波は吹送距離が長く、また流れと波は対向する。潮流のデータは、平均大潮時の潮流の数値計算結果(本州四国連絡橋公団、1985)を用いた。

計算は、明石海峡の本州側海岸に沿う2000m x 700mの領域で行なった。この領域での水深と最大の西向き潮流時の流速分布を、図-3、(1)、(2)に示している。等深線は、 x 軸方向にほぼ平行である。この領域内での最大水深は、約40.0mである。図の(2)の流速分布からわかるように、この領域の左上の部分に流れの滞留しているところがある。この滞留領域は、潮流の反流している領域にあたる。計算領域内での最大の流速は、約2.0m/secである。

計算の便宜上、図-4に示すように、計算領域を上述の領域からさらに拡大した。このうち領域1は、上述の2000m x 700mの領域である。領域2では、その水深と流速を領域1の $x = 1500$ m での値と同一とした。領域3および4では、その水深と流速は夫々領域1および2の $y = 1350$ m での値と同一にした。

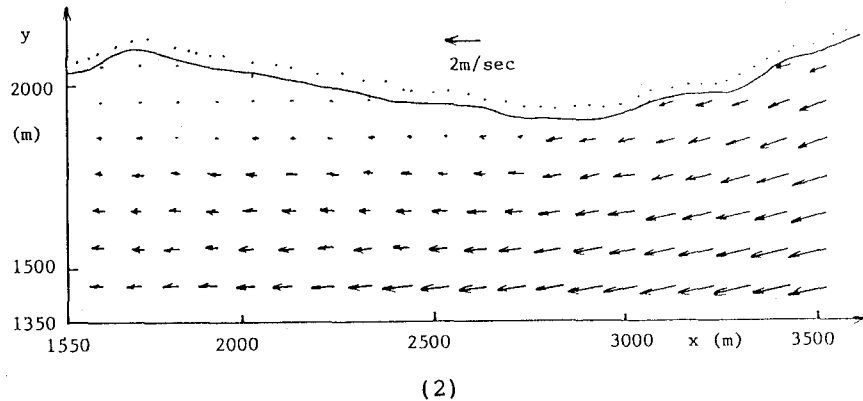
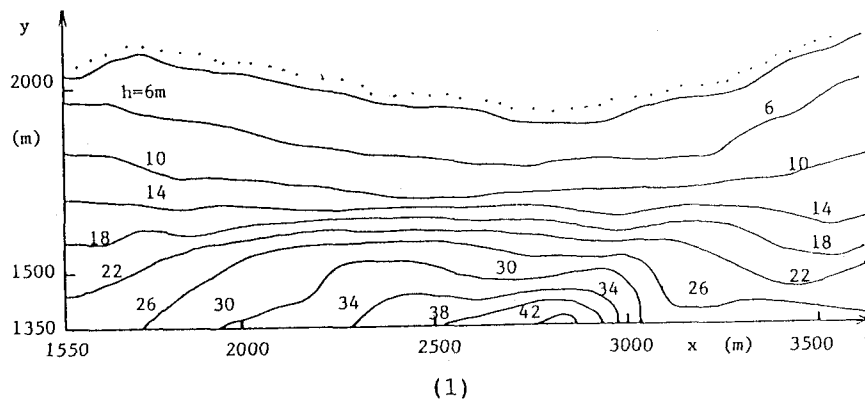


図-3、(1) 計算領域の水深、(2) 潮流流速

波の周期は、7.5sec である。沖側境界 ($y = 0$) での波の伝播方向 θ_0 は、 x の正の方向から反時計周りに 55° である。沖側境界での波高 H_0 は、1.8m である。格子間隔 Δx および Δy は 50.0m、計算時間間隔 Δt は 4.0sec である。計算経路は沖側境界線上から 50.0m 間隔で与えた。

図-5は、 $2950\text{m} < x < 3550\text{m}$ および $1350\text{m} < y < 2000\text{m}$ の領域での、計算された波の伝播方向を示す。また図-6は、領域 $1700\text{m} < x < 3500\text{m}$ および $1350\text{m} < y < 2000\text{m}$ の領域での、計算された波高 H と沖側境界上での波高 H_0 との比を示している。

図から、波高が増大している領域が2つあることがわかる。1つは $x = 3200\text{m}$ および $y = 1900\text{m}$ 付近にあり、もう1つは $x = 3500\text{m}$ および $y = 1700\text{m}$ 付近にある。

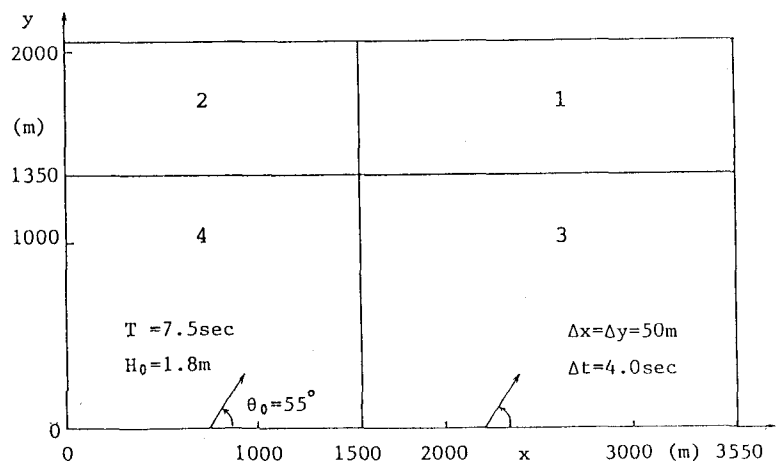


図-4 計算領域

4. 考察

4.1 水深、潮流および波高の分布のパターン

図-3からわかるように、水深はほぼ y 方向にのみ変化している。潮流の方は、 x および y 方向両方に変化している。すなわち正の y 方向に減少し、正の x 方向に増加している。図-6からわかるように、波高分布は2つの異なったパターンを示している。2つのパターンの境界は、 $x = 2900\text{m}$ 付近にある。 $x > 2900\text{m}$ の領域では、2つの波高増加領域とその間に1つの減少領域がある。 $x < 2900\text{m}$ の領域では、このような波高の変化

は見られない。

3. で述べたように、 $x < 2900\text{m}$ の領域は、反流領域である。このことから、この計算ケースでは潮流の流速分布のパターンが波高の分布のパターンを支配していると言えそうである。

4.2 波高変化の機構

式(7)で与えられる経路に沿う波高の変化は、式(8)で与えられる。式(8)は、 F の値が負の場合は波のエネルギーすなわち波高が増加することを意味する。 F は式(9)で与えられ、次の4つの項からなる。

$$A = \partial U / \partial x + \partial V / \partial y,$$

$$B = \partial c_{gr} / \partial x \cdot \cos \theta + \partial c_{gr} / \partial y \cdot \sin \theta,$$

$$C = c_{gr} (-\sin \theta \cdot \partial \theta / \partial x + \cos \theta \cdot \partial \theta / \partial y),$$

$$D = \{ c_{gr} / c_r \cdot \cos^2 \theta + 1/2 \cdot (2c_{gr} / c_r - 1) \} \partial U / \partial x$$

$$+ c_{gr} / c_r \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta (\partial V / \partial x + \partial U / \partial y) + \{ c_{gr} / c_r \cdot \sin^2 \theta + 1/2 \cdot (2c_{gr} / c_r - 1) \} \partial V / \partial y. \quad (10)$$

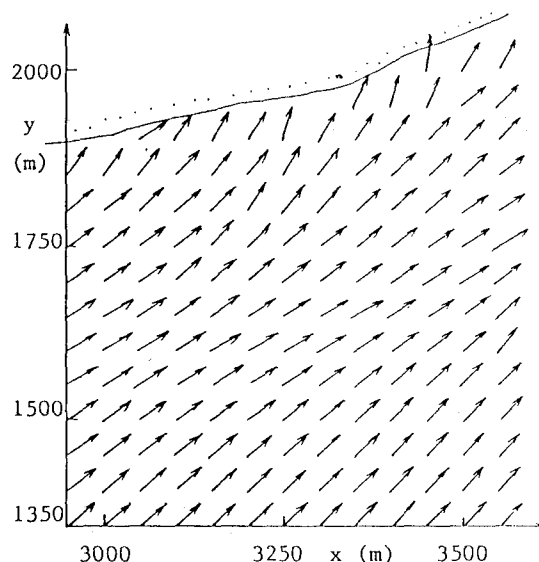


図-5 波の伝播方向の計算結果

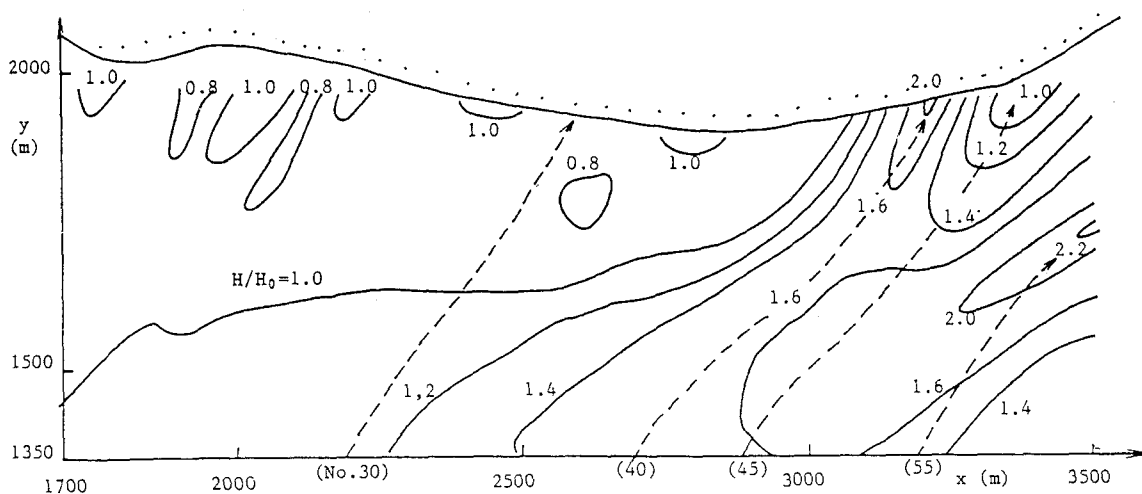


図-6 波高比 H/H_0 の計算結果 (破線: 波高計算経路の例)

A 項は、流速の勾配による波高の変化を表わす。B 項は群速度の変化による波高変化を表わす。C 項は、波の伝播方向の変化による波高の変化を表わす。最後の D 項は、ラディエーション応力による波高の変化を表わす。

図-6の破線は、波高変化の計算におけるいくつかの経路を示している。No.30 は、上述の波高が変化しない領域を通過している。No.40 および 55 は、それぞれ左右の波高増加領域を通過している。No.45 は、2つの波高増加領域の間の波高減少領域を通過している。

図-7は、これら4つの経路に沿う上述の A から D 項の値の変化を示している。図の(4) (No.55) は、右側の波高増加領域

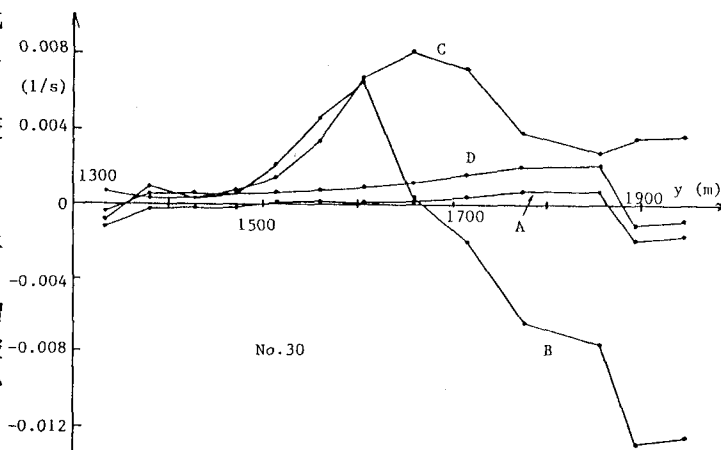


図-7、(1) 波高変化計算経路 No.30 に沿う F の4つの項の値の変化

では波の伝播方向の変化項 c が波高増加に支配的であることを示している。図の(2) (No.40) は、左側の波高増加領域では波の伝播方向の変化項 c とともに群速度の変化項 B も波高増加に支配的であることを示している。図の(3) (No.45) は、波高減少領域では波の伝播方向の変化項 c が波高減少に支配的であることを示している。最後に図の(1) (No.30) は、波高が変化しない領域では波の伝播方向の変化項 c と群速度の変化項 B とがほぼ釣り合っていることを示している。

波の伝播方向の変化項は、波の屈折による変化を表わしている。また群速度の変化項は、波の浅水変形による変化を表わしている。したがってここで計算したケースにおいては、波の屈折と浅水変形が波高変化に支配的であり、潮流の流速勾配の項 A およびラディエーション応力の項 D はそれほど支配的でないと言える。

4.3 流れによる碎波の可能性

碎波の可能性を調べるために、波形勾配を計算した(図-8の実線)。図から、左側の波高増加領域では波形勾配は0.12に達するが、右側の波高増加領域では0.07程度に留まっていることがわかる。

岩垣・浅野・山中・永井(1980)は、流れの中の碎波時の波形勾配はMicheの式:

$$(H/L)_b = 0.142 \cdot \tanh(2\pi h/L)_b \quad (11)$$

で与えられることを示した。この式と水深および波長を用いて計算したMicheの碎波波形勾配を、図-8の破線で示している。図から、碎波波形勾配はほぼ水深で決まっていることがわかる。ハッチをした領域は、波形勾配が碎波波形勾配より大きい領域である。これから、左側波高増加領域では波が砕けている可能性があるが、右側波高増加領域では碎波の可能性が低いことがわかる。

5. 結論

流れと水深変化による波の屈折の数値計算モデル

(Iwagaki, Sakai, Tsuda and Oka, 1977) を、明石海峡の本州側海岸での波浪変形に適用した。明石海峡の潮流は速く、最大で4.5m/secと言われている。計算は、西向き流れに対して斜めに逆流状態で入射するWSWからの波に対して行なった。0.7km(岸沖方向) x 2.0km(沿岸方向)の領域での波浪変形を計算した。この領域での最大潮流は、約2.0m/secである。また波の周期は、7.5secである。次のような結論が得られた:

- (1) 波高が、沖側境界での波高の2倍以上になる領域がある。
- (2) 潮流の流速分布のパターンが、この海岸での波高変化の分布のパターンを支配している。

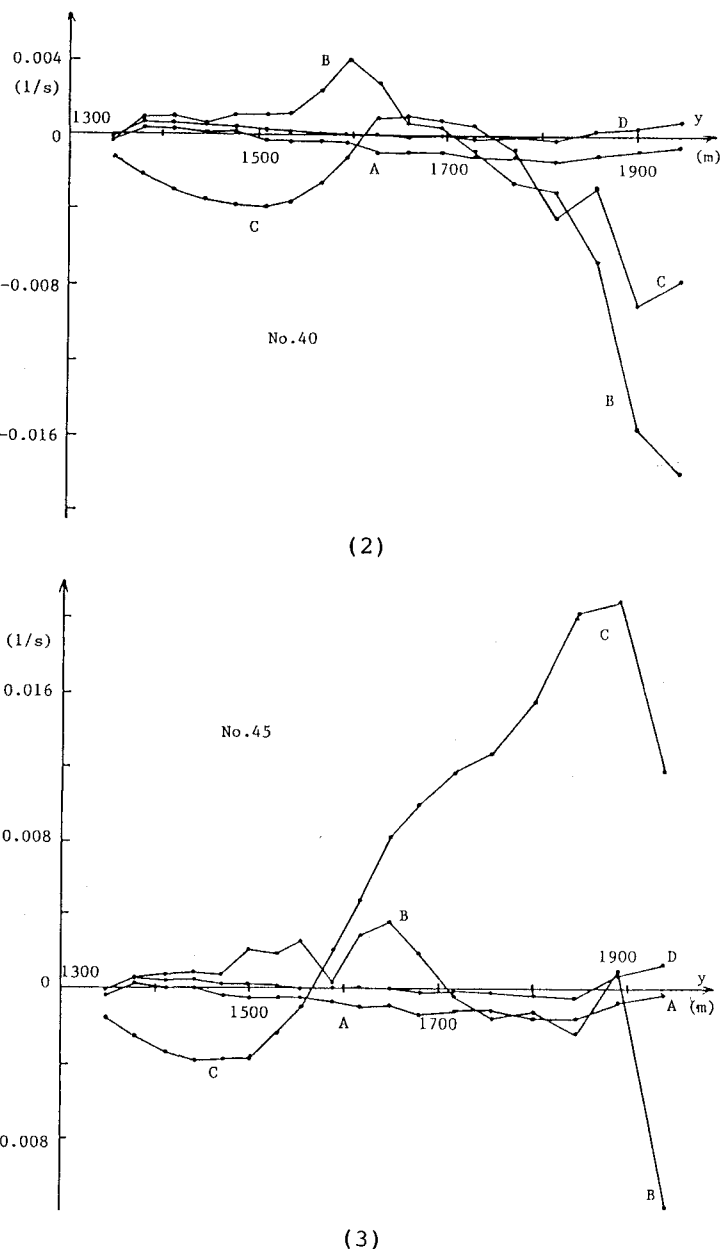


図-7、(2) No.40、(3) No.45

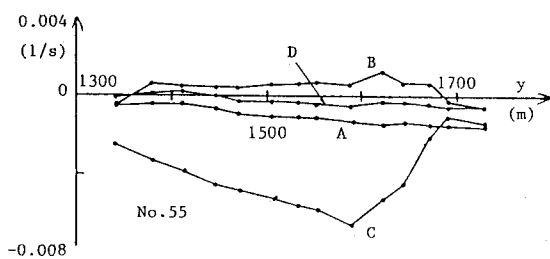


図-7、(4) No.55

(3) 波の伝播方向の変化(屈折)と群速度の変化(浅水変形)が、波高変化に支配的である。流速勾配とラディエーション応力は、波高変化に対しては支配的ではない。

(4) 波高が沖側境界での波高の2倍以上になる領域においても、碎波していない可能性がある。

最後に、この研究に対して貴重な御意見を賜った京都大学名誉教授(名城大学教授)岩垣雄一先生に謝意を表するとともに、データの公表を許可していただいた本州四国連絡橋公団および数値計算において援助していただいた国際航業(株)の宗像義之氏に感謝する。

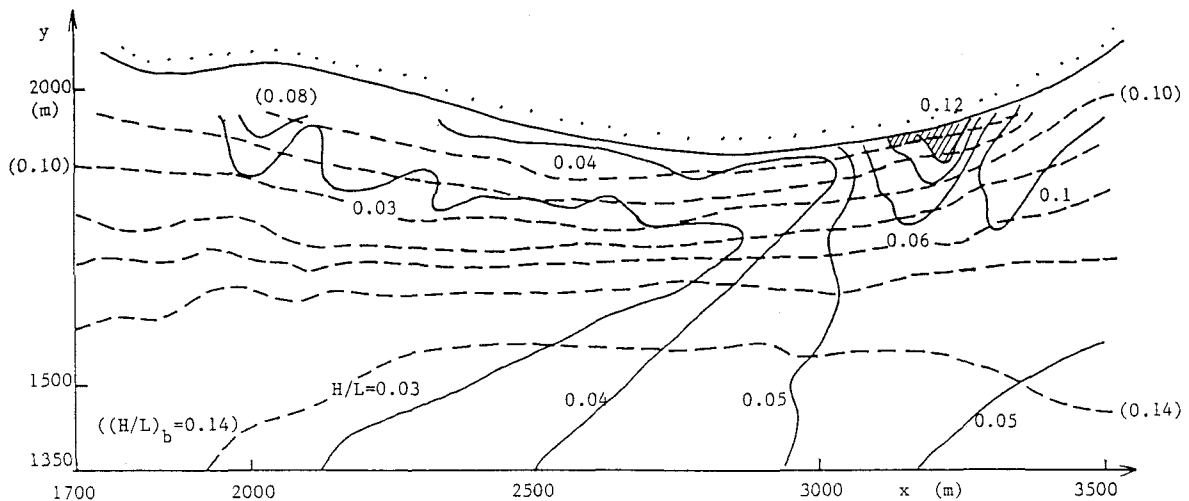


図-8 波形勾配の計算結果(実線)と限界波形勾配(破線)

6. 参考文献

Booij, N., "Gravity waves on water with non-uniform depth and current", Communication on Hydraulics, Dept. of Civil Eng., Delft Univ. of Tech., No.81-1, 1981.

本州四国連絡橋公団、"明石海峡大橋の作業基地埋立が周辺海域に及ぼす影響に関する調査研究(その1)", 本州四国連絡橋公団、1985.

Iwagaki, Y., Sakai, T., Tsuda, T. and Oka, Y., "Wave refraction and wave height variation due to current", Bull. of Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.27, Part 2, No.248, 1977, pp.73-91.

岩垣雄一・浅野敏之・山中庸彦・永井文博、"流れによる碎波に関する基礎的研究"、第27回海岸工学講演会論文集、土木学会、1980, pp.30-34.

Kirby, J. T., "Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves", Jour. of Geophysical Res., Vol.91, No.C1, 1986, pp.933-952.

Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W., "The changes in amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents", Jour. of Fluid Mech., Vol.10, 1961, pp.529-549.

Noda, E.K., Sonu, C. J., Rupert, V. C. and Collins, J. I., "Nearshore circulations under sea breeze conditions and wave-current interactions in the surf zone", Tetra Tech., Rep., TC-P-72-149-4, AD 776643, 1974.

酒井哲郎・小関仁彦・岩垣雄一、"流れによる不規則波の屈折の数値計算"、第28回海岸工学講演会論文集、土木学会、1981, pp.118-122.

Skovgaard, O. and Jonsson, I.G., "Current depth refraction using finite elements", Proc. of 15th Conf. on Coastal Eng., ASCE, 1976, pp.721-737.