京 都 大 学 防 災 研 究 所 年 報 第47号 B 平成16年4月
Annuals os Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 47 B, 2004

流れ場における不規則波の波浪変形

間瀬 肇・雨森洋司*

* 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

要 旨

本研究は，位相平均モデルの一つである波作用量平衡式に基づき，流れの影響を考慮した砕波限界式とエネルギー減衰，および波峰方向のエネルギー移流（回折効果）を組み込んだ波浪変形予測モデル（WABED: Wave Action Balance Equation with Diffraction effect model）を作成した。まず，１次元伝播における理論値と計算値を比較して両者は良く一致することを確かめた。次に，離岸流モデル場における波浪変形解析を行って，回折効果を導入すると波高の集中が緩やかになることを示した。

キーワード：不規則波，波と流れ，波浪変形，波作用量保存式，屈折・回折，砕波減衰

1. はじめに

河口付近の流れ場，潮流の強い海域，波によって生じる海浜流が波の変形に無視できない領域においては，流れの影響を考慮した波浪変形予測が必要となる。このような波・流れ共存場における波浪解析には，位相解析モデルあるいは位相平均モデルを用いる。このうち，位相解析モデルによる解析においては，入射条件として設定した波が海底地形や流れにより変化するとともに，高波数の波が現れる。これは，波・流れ共存場において，１つの周期に対して２種類の波が存在しうるためである。特に入射波の群速度が逆流と同程度の大きさになる領域で波浪場が複雑になり，高波数の波を表現するための空間格子の細分化が計算効率を悪化させる。また，流れの影響を考慮した砕波条件と砕波減衰項のモデル化も確立されていない。

以上の点を考慮し，本研究では，位相平均モデルの一つである波作用量平衡式に基づき，流れの影響を考慮した砕波限界式とエネルギー減衰，および波峰方向のエネルギー移流（回折効果）を組み込んだ波浪変形予測モデルを構築する。

2. 波・流れ共存場の波浪変形理論

2.1 基礎理論

Bretherton and Garrett (1968) は，波作用量 $N\ (=E/\sigma)$ が保存されることを示した。ここで，E は波のエネルギー，σ は流れに相対的な角周波数であり，これは絶対角周波数ω，波数ベクトル $\vec{k}$，流速ベクトル $\vec{U}$ および水深 h との間に，以下の関係がある。

$$\sigma = \omega - \vec{k}\cdot\vec{U} \tag{1}$$

$$\sigma^2 = g\left|\vec{k}\right|\tanh\left|\vec{k}\right|h \tag{2}$$

流れの場で存在しうる波の波数は式(1) および式(2) を満たすのものである。一次元で逆流の場合，Fig.1 に示すように，逆流が小さい場合にはＢ点で示した解が１つだけ存在するが，逆流が強くなってくると，Ｃ点とＤ点で示される２つの波が存在しうる。Ｃ点で与えられる波は波速および群速度が逆流より大きく，流れ

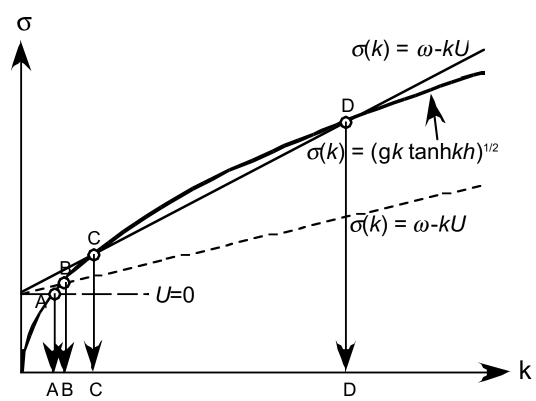

Fig.1 分散関係式の解（逆流の場合）

を遡って伝播することができる。しかし，D点で与えられる波の波速は逆流よりも大きく群速度は逆流よりも小さいので，峰は上流に伝播するが，エネルギーは下流に流される。

Boussinesq方程式といった位相解析モデルで波・流れ共存場の波浪変形を計算する場合，逆流が大きくなるに伴い，A点で示される波数からB点，C点へと波数が大きくなると同時に，D点で示される高波数の波が生じてくる。こうした高波数の波まで表現するために，空間メッシュと時間間隔の細分化が必要になる上に，波浪場が複雑になり，数値的な精度維持が難しくなる。位相平均モデルは波数がA点，B点，C点と変化する波についてのみ，波作用量が保存されるという基礎式を解くものであり，計算が簡単である。

従って，本研究では波作用量平衡式に基づき，流れの影響を考慮した砕波限界式，エネルギー減衰，および波峰方向のエネルギー移流（回折効果）を組み込んだ波浪変形予測モデルを構築する。一概に波作用量平衡式と言っても，その表現方法は以下のように３つある。

(1) 独立変数を平面位置座標 (x, y) とする：

波作用量平衡式は，次式で表される。

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x}+\frac{\partial(C_y N)}{\partial y}=0 \tag{3}$$

上式の中の特性速度 C_x および C_y は，次のように表される。

$$C_x = C_g\cos\theta + U \tag{4}$$

$$C_y = C_g\sin\theta + V \tag{5}$$

ここで，C_g は群速度，(U, V) は流れの (x, y) 成分である。θ は波の伝播方向であり，次式で表される波数の非回転式より求める。

$$\frac{\partial}{\partial x}(k\sin\theta)-\frac{\partial}{\partial y}(k\cos\theta)=0 \tag{6}$$

(2) 独立変数を (x, y) および θ とする：

波作用量平衡式は，次式で与えられる。

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x}+\frac{\partial(C_y N)}{\partial y}+\frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta}=0 \tag{7}$$

波向 θ に関する特性速度 C_θ は，波数の連続式から以下のように求められる。

$$\begin{aligned} C_\theta = &\frac{\sigma}{\sinh 2kh}\left(\sin\theta\frac{\partial h}{\partial x}-\cos\theta\frac{\partial h}{\partial y}\right) \\ &+\cos\theta\sin\theta\frac{\partial U}{\partial x}-\cos^2\theta\frac{\partial U}{\partial y} \\ &+\sin^2\theta\frac{\partial V}{\partial x}-\sin\theta\cos\theta\frac{\partial V}{\partial y} \end{aligned} \tag{8}$$

(3) 独立変数を $(x, y), \theta$ および σ とする：

波作用量平衡式は，次のようである。

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x}+\frac{\partial(C_y N)}{\partial y}+\frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta}+\frac{\partial(C_\sigma N)}{\partial \sigma}=0 \tag{9}$$

相対角周波数 σ に関する特性速度は

$$\begin{aligned} C_\sigma = &\frac{k\sigma}{\sinh 2kh}\left(\frac{\partial h}{\partial t}+U\frac{\partial h}{\partial x}+V\frac{\partial h}{\partial y}\right) \\ &-C_g(k\cos^2\theta\frac{\partial U}{\partial x}+k\cos\theta\sin\theta\frac{\partial V}{\partial x} \\ &+k\sin\theta\cos\theta\frac{\partial U}{\partial y}+k\sin^2\theta\frac{\partial V}{\partial y}) \end{aligned} \tag{10}$$

で与えられる。

2.2 本研究で用いる波作用量平衡式

本研究では，(2) の波作用量平衡式に基づいたモデルを構築する。その理由は，これまでに開発・検証したエネルギー平衡式モデルの計算スキームを有効活用できる，絶対周波数に対するエネルギースペクトルを直接計算することができる，回折項の導入や流れによる砕波の影響の組み込みが容易に実施できること等である。なお，デルフト工科大学が開発したSWAN は (3) の波作用量平衡式を用いている。

(2) の波作用量平衡式に回折項およびエネルギー散逸項を考慮した方程式は，以下のように表される。

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(C_x N)}{\partial x}+\frac{\partial(C_y N)}{\partial y}+\frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} \\ &=\frac{\kappa}{2\sigma}\left\{(CC_g\cos^2\theta N)_y-\frac{1}{2}CC_g\cos^2\theta N_{yy}\right\}-\varepsilon_b N \end{aligned} \tag{11}$$

上式の右辺第１項の回折項の導入方法については，間瀬ら (1999) を参照されたい。

エネルギー散逸項については，高山ら (1991) によるある格子に対して流入エネルギー E_i と流出エネルギー E_o の差および成分波の周波数 f の関数として

$$\varepsilon_b = f\cdot(E_\mathrm{i}-E_\mathrm{o})/E_\mathrm{i} \tag{12}$$

のように与えた。E_i および E_o は砕波波高 $H_{b\mathrm{i}}$ および $H_{b\mathrm{o}}$ から求めるが，ここでは，岩垣ら (1980) によって妥当性が示されたMiche の砕波限界式に，Battjes (1972) による海底勾配 $\tan\beta$ の影響を取り入れた。

$$\frac{H_b}{L_b}=0.14\tanh\left\{\frac{\gamma}{0.88}\frac{2\pi h}{L_b}\right\} \tag{13}$$

$$\gamma=\begin{cases}0.8+5\tan\beta\,; & \tan\beta<0.1\\ 1.3\,; & \tan\beta\geq 0.1\end{cases} \tag{14}$$

ここで，L_b は流れを考慮した場合の砕波点における波長である。これを用いると，格子間隔 dl に対す

る砕波波高の変化は，$\tan\beta \ge 0$ に対して

$$dH_b = -0.28\pi \tan\beta \left(\frac{\gamma}{0.88}\right) \mathrm{sech}^2 \left\{\frac{\gamma}{0.88}\frac{2\pi h}{L_b}\right\} \quad (15)$$

であり，$\tan\beta < 0$ に対しては $dH_b = 0$ とする。これらを用いて，砕波波高 H_{bi} および H_{bo} は

$$\left.\begin{aligned} H_{b_\mathrm{i}} &= H_b - (1/2)dH_b \\ H_{b_\mathrm{o}} &= H_b + (1/2)dH_b \end{aligned}\right\} \quad (16)$$

となる。

3.　波浪変形計算モデルの検証

3.1　１次元伝播における理論値と計算値の比較

１次元の場合，以下の式でエネルギー変化が求められる。

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0}\frac{C_{g0}+U_0}{C_g+U} \quad (17)$$

ここで，下付 0 は基準点（$x = 0$ m）における値を意味する。式 (15) で与えられる理論値と本研究で作成した計算プログラム（WABED: Wave Action Balance Equation with Diffraction effect model）による計算値を比較する。なお, 回折項を入れない計算モデルを以下 WABE と呼ぶことにする。

計算条件は以下の通りである。

1) 海底地形は 25m の一様水深とする。
2) 流れは $x = 0$m の地点で $U = 0$ m/s，x=1200m 地点で U = -1.8 m/s となる逆流と U=1.8 m/s となる順流とする。
3) 波はBretschneider-Mitsuyasuスペクトルを持つ有義波高 1.0m および有義波周期 10s の不規則波とし，計算には，エネルギー値が等しくなるようにスペクトルを 10 分割した成分波を用いた。

理論値は式(17) により 10成分のエネルギー値を求めた後，有義波高に変換したものである。なお，この計算条件においては，すべての成分波は逆流を遡れ，砕波は生じない。

Fig.2 は，理論値と計算値を比較したものである。この図から，理論値と計算値は良く一致し，1 次元の場における計算モデルの妥当性が確かめられた。

3.2 離岸流モデル場における波浪変形解析

ここでは，離岸流（あるいは，河口部の流れ）を模擬した流れ場と海底地形を与え，本計算モデルよる計算結果を SWAN による計算結果と比較・検討する。流れは，以下の式に基づいて作成した。

$$U = -0.0721\,(1200 - x) \times F\{(1200 - x)/250\} F\{(y - 400)/25\} \quad (18)$$

$$V = -1.8\,[2 - \{(1200 - x)/250\}^2] \times F\{(1200 - x)/250\} \int_0^{(y-400)/25} F(\alpha)d\alpha \quad (19)$$

$$F(\alpha) = (1/\sqrt{2\pi})\exp(-\alpha^2/2) \quad (20)$$

上式で表される流速分布の空間分布を Fig.3 に示す。海底地形は，水深 h=25m の一定水深地形と，x = 0m で h = 25m，x = 1200m で h = 1m となる平行等水深一様傾斜海浜地形の 2 種類とした。メッシュ間隔は $\Delta x = \Delta y$ = 10m とした。

入力した不規則波は Bretschneider-Mitsuyasu 型スペクトルを有する S_{max}=25, $H_{1/3}$=1.0m, $T_{1/3}$=10s の多

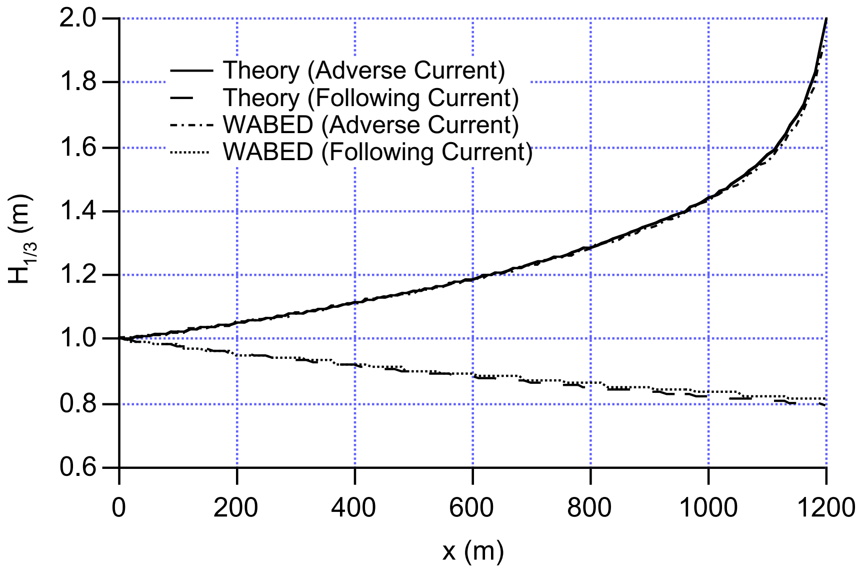

Fig.2 理論値と計算値の比較

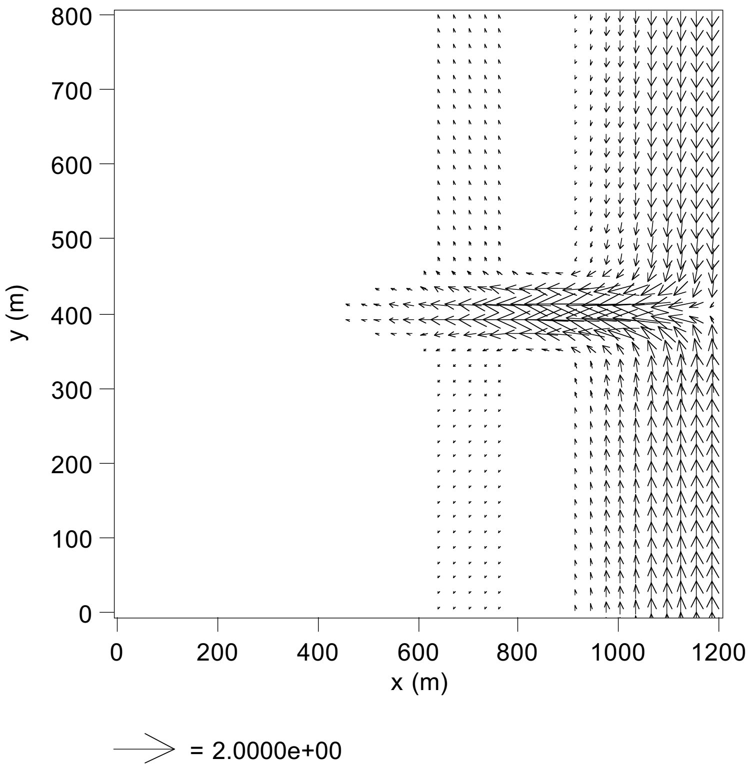

Fig.3 流速ベクトルの平面分布

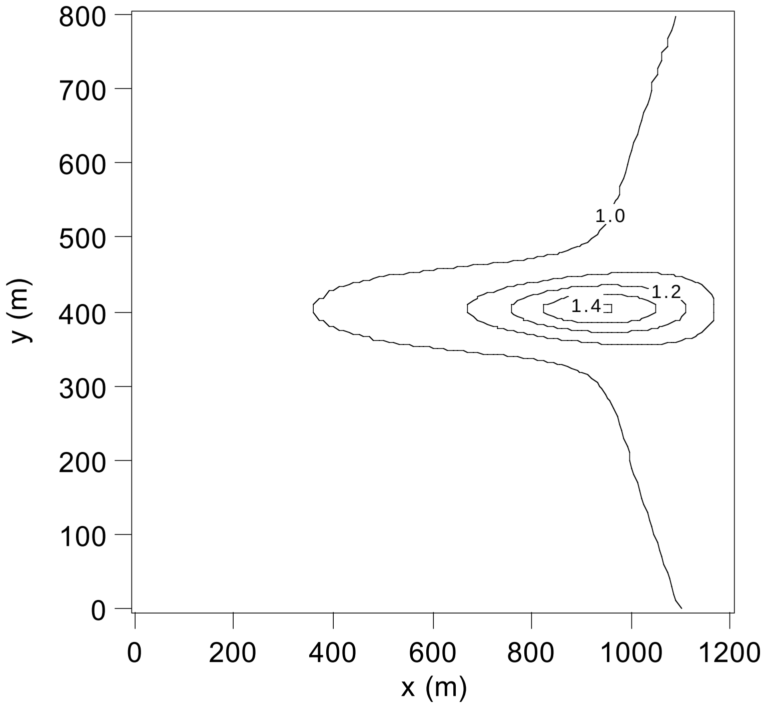

Fig.4 一様水深地形の場合の WABED による波高計算結果

方向不規則波である。

Fig.4 は，流れの効果のみによる波高変化の状況を調べるために，一様水深地形条件に対して，本計算モデル WABED を用いて求めた波高分布を示したものである。なお，Fig.5 は WABE による結果を示したものである。両図とも波は流れの中心線（*y*=400m）に向かって屈折して集中し，波高が増大する。Fig.4 と Fig.5 を比較することにより，回折の効果が読みとれる。Fig.5 では波高の集中が著しいが，Fig.4 では波高の集中が緩やかになって波高分布形状は横方向（*y* 方向）に広がって

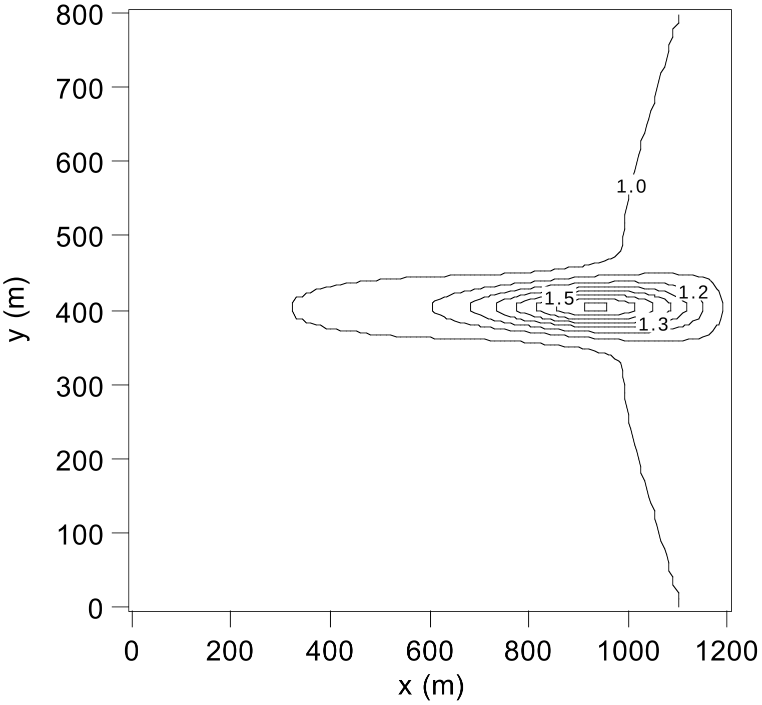

Fig.5 一様水深地形の場合の WABE による波高計算結果

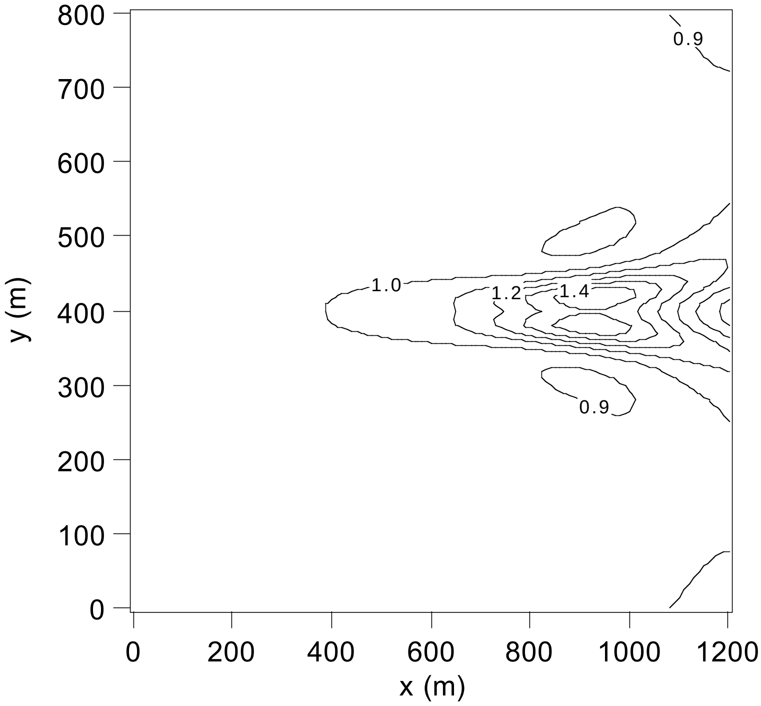

Fig.6 一様水深地形の場合の 高次精度差分スキーム SWAN による波高計算結果

いる。

Fig.6 には高次精度差分スキームの SWAN を用いた計算結果を示した。この図をみると，y=400m の測線での波高がその周辺の波高より小さくなっている領域があり，波高分布形状が若干いびつである。Fig.7 の１次精度風上差分の SWAN による計算結果は，ほぼFig.5 と同様の結果である。

Fig.8 は y=400mの測線についての波高分布を示したものであり，実線は WABED による計算結果，点線は WABE による計算結果，破線は一次風上差分の SWAN による計算結果を示したものである。SWAN による結果と WABE による結果は，ほぼ同じ傾向を示す。この

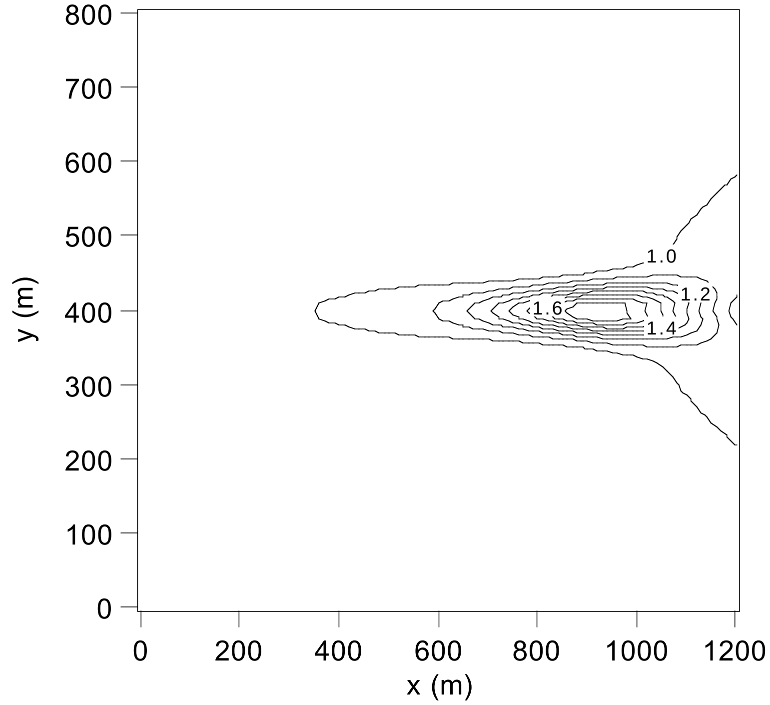

Fig.7 一様水深地形の場合の １次精度差分スキーム SWAN による波高計算結果

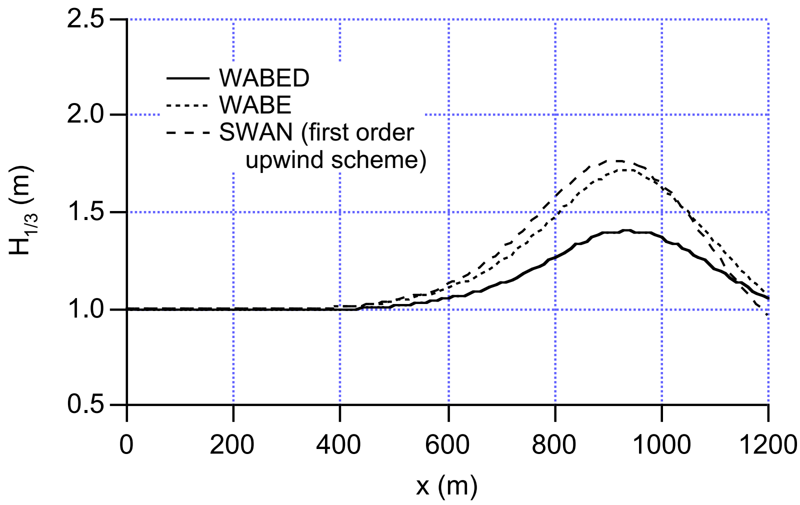

Fig.8 *y*=400m の測線に沿っての波高分布（一様水深地形）

場合，波の砕波は生じていない。

Fig.9 は，一様傾斜海浜の場合にWABEDを用いた波高の計算結果，Fig.10 はWABEによる計算結果を示したものである。これらの図を一様水深地形の結果と比べると，水深変化により*y*=400m に沿っての波高の集中が顕著になっているのがわかる。Fig.10 では波高の集中が著しく最大値は 2.0m を越えているが，Fig.9 では波高の集中が緩やかで最大値は 1.8m である。

Fig.11 およびFig.12は，それぞれ高次精度差分および１次精度差分スキームの SWAN を用いた計算結果を示したものである。Fig.11 では波高の分布形状がいびつである。Fig.12 の波高分布の形状はFig.10 のそれととほぼ同様であるが，波高の最大値が若干大きくなっている。

Fig.13 は *y*=400m の測線についての波高分布を示したものであり，実線は本計算モデルである WABED による計算結果，点線は WABE による計算結果，破線は一次風上差分による SWAN の計算結果を示したものである。SWAN による結果が最も波高変化が急であり，そのピーク値も大きい。SWAN では砕波減衰項は，局所

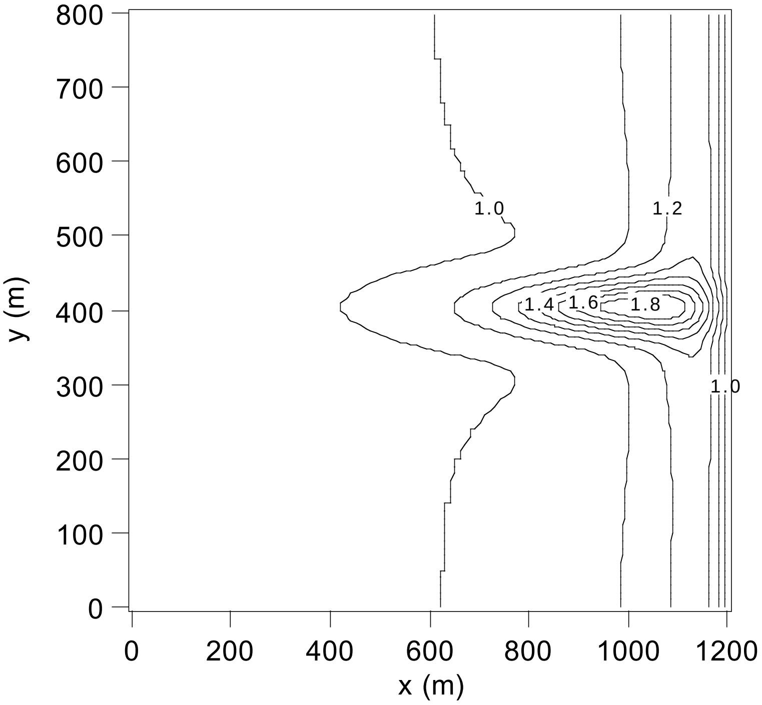

Fig.9 一様傾斜海浜の場合の WABED による波高計算結果

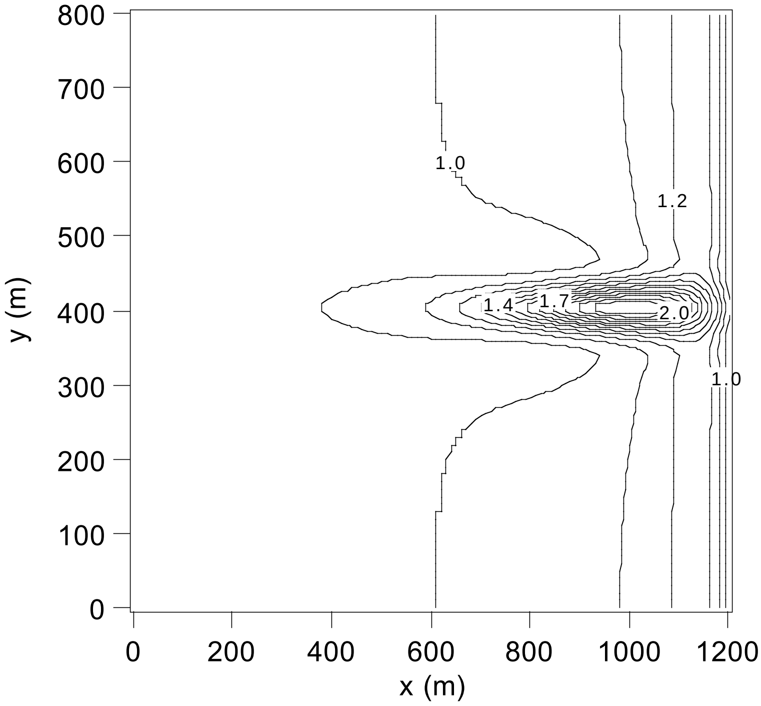

Fig.10 一様傾斜海浜の場合の WABE による波高計算結果

最大波高と砕波率を用いて定式化されている。局所最大波高は局所水深にある定数を乗じたもの，砕波率は局所最大波高と局所波高の関係によって求められるものであり，ここには砕波に及ぼす流れの効果は直接に入っておらず，波作用量保存といった計算を通して流れの効果が波高に入り，その波高を用いて砕波減衰が取り入れられているに過ぎない。一方，本計算モデルでは，式 (13) により砕波およびエネルギー散逸率に流れの効果が直接入れられているのが特徴である。WABE による波高の計算結果は，600m < x < 1000m で SWAN による計算結果と比べて小さくなっているが，これは流れの影響で砕波減衰項が大きくなったためである。

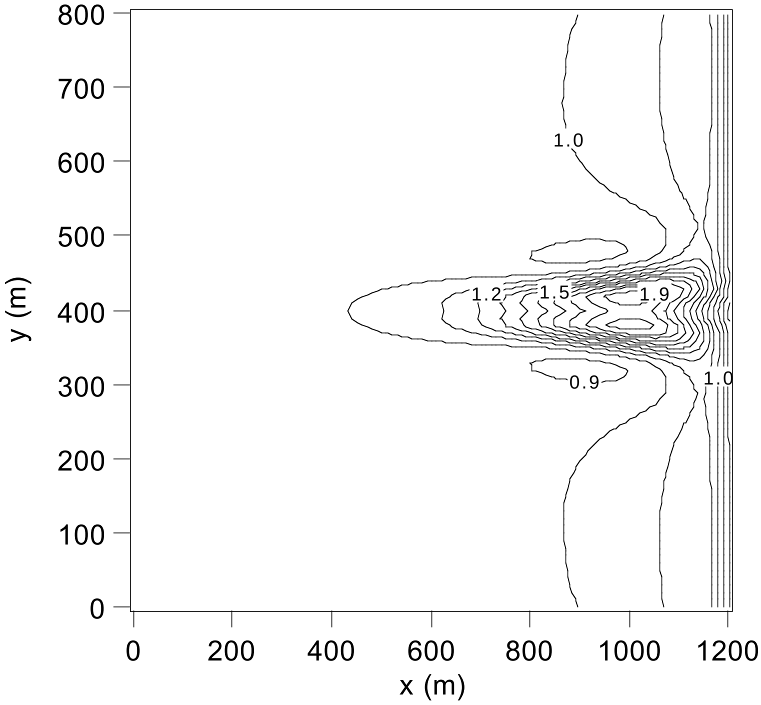

Fig.11 一様傾斜海浜の場合の 高次精度差分 SWAN による波高計算結果

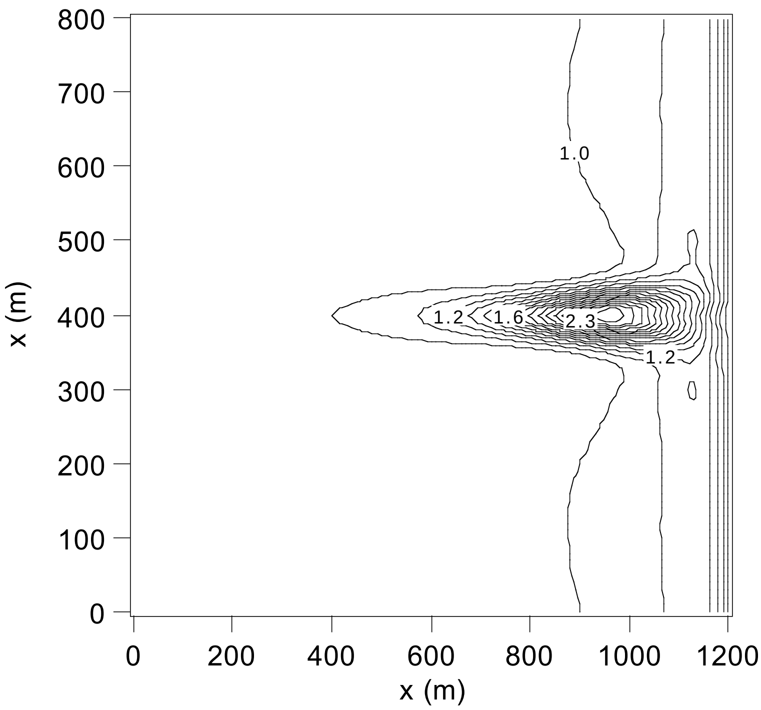

Fig.12 一様傾斜海浜の場合の１次精度差分 SWAN による波高計算結果

WABED では横方向へのエネルギーの移流により, 計算された波高は他の２つのモデルによるものより小さくなる。このように，一様勾配地形の場合には流れによる砕波および回折項の影響により, WABED による計算結果は， WABE や SWAN によるものとかなり異なることがわかった。

4. あとがき

本研究は，位相平均モデルの一つである波作用量平衡式に基づき，流れの影響を考慮した砕波限界式，エネルギー減衰，および波峰方向のエネルギー移流（回折効果）を組み込んだ波浪変形予測モデル（WABED:

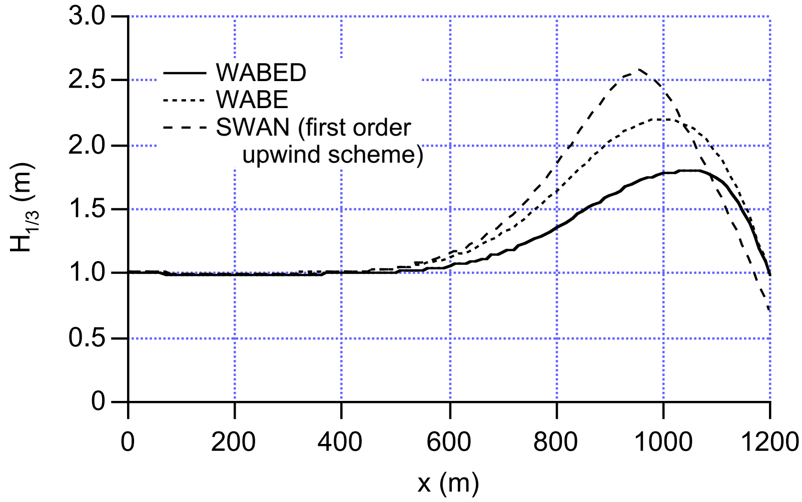

Fig.13 *y*=400m 測線に沿っての波高分布（一様傾斜海浜）

Wave Action Balance Equation with Diffraction effect model）を作成した。

まず，１次元伝播における理論値と計算値の比較して両者は良く一致することを確かめた。次に，離岸流モデル場における波浪変形解析を解析し，回折効果を導入すると波高の集中が緩やかになることを示した。

今後，観測結果や実験結果との比較による精度検証が必要であり，今後の課題とする。

参考文献

岩垣雄一・浅野敏之・山中庸彦・永井文博（1980）：流れによる砕波に関する基礎的研究, 第27回海岸工学講演会論文集，pp.30-34.

高山知司・池田直太・平石哲也（1991）：砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技研報告, 第30巻, 第１号，pp.21-67.

間瀬　肇・高山知司・北野利一・森安里夫（1999）：位相平均波浪変形解析モデルの回折効果のモデリングと適用性に関する研究，第 46 巻，pp.66-70.

Bretherton, F.P. and C.J.R. Garrett (1968): Wavetrains in inhomogeneous moving media, Proc. R. Soc. Lond., Ser. A, 302, pp.529-554.

Battejes, J.A. (1972): Set-up due to irregular waves, Proc. 13rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.1993-2004.

Random Wave Transformation in Wave-Current Coexisting Field

Hajime Mase and Hiroshi Amamori

Synopsis

This study develops a wave prediction model of multidirectional random waves in a wave-current coexisting field, based on a wave action conservation equation. In the wave model, the current effects on wave breaking and energy dissipation are taken into account as well as wave diffraction effect. The present wave prediction model is called WABED (Wave Action Balance Equation with Diffraction effect model). First the predictions by the WABED are compared with theoretical values in the cases of one-dimensional adverse and following current fields. Both results agree very well. Secondly, for a case of rip current field, the significant wave heights are estimated by the present wave model, and these results are compared with the predictions by the SWAN, developed by the Delft University of Technology. There appear differences between the present model predictions and the SWAN predictions due to the different formulation of current related wave breaking and energy dissipation in addition to wave diffraction effect.

Keywords: random waves, wave and current, wave transformation, wave action balance equation, refraction and diffraction, wave breaking