

## 流れによる波の屈折とその碎波減衰モデルに関する研究

沖 和哉

京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

本研究では流れがある場合にのみ生じる特殊な現象である焦線付近での波の屈折, 碎波および wave blocking について, 波作用量平衡式モデルの適用性の検証を行った。規則波実験および不規則波実験との比較により, 非線形性の影響が小さい場合には本数値モデルは wave blocking の位置も含めて波高の変化を精度良く計算できることがわかった。これまでに提案されている碎波減衰モデルを適用する際にはパラメータの変更が必須であった。焦線付近の波の屈折については, 理論値に近い結果が得られた。

**キーワード:** 波作用量平衡式, 屈折, 焦線, 碎波, wave blocking

### 1. はじめに

波浪は流れによって影響を受ける。断面 1 次元問題を考えると, 流れによって波高が変化する。逆流を遡って波浪が伝達する場合には, 碎波も生じ, さらに強い流れ場においては条件によって波がそれ以上伝播できなくなる wave blocking が発生する。平面 2 次元場では, 流れによって波は屈折する。一様な流れ場に対して波がある角度をなして横切る場合, 流れ場の強さによっては, 波が流れを乗り越えられずに大きく屈折する場合がある。この乗り越えられない境界を焦線とよぶ。これは河口付近あるいは潮流および沿岸流が顕著な場所で発生しうる現象である。

これまでにいくつかの波・流れ共存場における波浪数値予測モデルが提案されている。時間領域モデルにおいては, 例えば水谷ら (2002) による VOF 法に基づくモデルや沖ら (2003) の Boussinesq 方程式に基づくモデルがあり, 位相解析モデルにおいては, 波作用量平衡方程式に基づくモデル (Kirby, 1984; 間瀬ら, 2004) などがある。一般的に流れの影響を波浪モデルに組込むのは困難で

ある。その原因として, 時々刻々の水位および流速の変動を計算する位相解析モデルの場合には, 波浪による流速変動成分と場の流速成分とを区別するのが難しいことが挙げられる。また, 波が流れを遡って伝播する場合には波長が短くなるため, 波形を十分な精度で再現するためには格子の大きさを小さくしなければならないという問題もある。流れの影響を考慮したモデルにおいても, 焦線付近での波向きの変化および wave blocking を取扱った計算例は少ない。

波作用量は流れ場においても保存されることから, 波作用量平衡方程式を用いると波に対する流れの影響を取扱いやすい。本研究では流れがある場合にのみ生じる特殊な現象である焦線付近での波の屈折, 碎波および wave blocking について, 波作用量平衡式モデルの適用性の検証を行う。

### 2. 波作用量平衡式モデル

本研究では, 間瀬ら (2004) によって提案された回折項を有する波作用量平衡式に基づくモデルを用いる。

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

ここで、 $N$  は波作用量、 $C$  は波速、 $C_g$  は群速度、 $\sigma$  は角周波数、 $\kappa$  は回折影響係数、 $\varepsilon_b$  は碎波等によるエネルギー減衰係数であり、特性速度 ( $C_x$ ,  $C_y$  および  $C_\theta$ ) はそれぞれ次のように表される。

$$C_x = C_g \cos \theta + U \quad (2)$$

$$C_y = C_g \sin \theta + V \quad (3)$$

$$\begin{aligned} C_\theta &= \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left( \sin \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ & \quad + \cos \theta \sin \theta \frac{\partial U}{\partial x} - \cos^2 \theta \frac{\partial U}{\partial y} \\ & \quad - \sin^2 \theta \frac{\partial V}{\partial x} - \sin \theta \cos \theta \frac{\partial V}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $(U, V)$  は場の流速ベクトル、 $k$  は波数、 $h$  は水深である。式(1)で表される波作用量平衡方程式は、付加された回折項により本来考慮できない回折の効果を検討することができる。時間領域モデルと比較すると、直接波の流速成分を取扱わないため場の流れとの流速の区別の必要がなく、また、位相平均化されているために、高周波数成分による解像度の問題も生じない。同じ位相平均モデルに分類されるエネルギー平衡方程式モデルと比較すると、エネルギー平衡方程式では流れを考慮して定式化した場合にラジエーションストレスに関連する項が新たに付加されて計算の簡便さが失われるが、波作用量は流れがある場合でも保存されるために、基礎式自体は変わらない。したがって、波作用量平衡式は流れの影響を考慮するモデルの基礎式として適している。また、本研究では1次精度風上差分を適用するため、数値安定性がよく、計算時間も早いという利点がある。

### 3. 碎波および wave blocking

流れの影響によって波高は変化する。また、波が流れを遡って伝播する場合には碎波が生

じ、さら強い流れ場ではそれ以上波が遡上できない wave blocking という特殊な現象も生じる。断面1次元伝播問題における波高の変化については、間瀬ら(2004)により理論値と一致することが確認されている。したがって、ここでは流れによる碎波および wave blocking について検証する。

1次元の流れ場においては、次の分散関係式が成り立つ。

$$\omega - kU = \sigma = (gk \tanh kh)^{1/2} \quad (5)$$

ただし、 $\sigma$  は相対角周波数、 $\omega$  は絶対角周波数であり、波の進行方向を正とする。Fig. 1は式(5)の分散関係を表したもので、破線と曲線の交点により解が求められる。破線(b)で表される場の流速  $U = 0$  の場合、すなわち流れがない場合には交点 B により解が得られる。波の伝播方向と流れの向きが同じである順流場の場合には、式(5)は破線(a)のように表され、交点 A により解が求められる。波の伝播方向と流れの向きが逆である逆流場の場合には、破線(c)で表されるように、交点 C および交点 X の2つの解が得られる。交点 C では波および波のエネルギーは流れをさかのぼって伝播するが、交点 X では波は流れを遡るものの、波のエネルギーは流れを遡ることができず流れと同方向に伝播する。交点 X では波数が大きくなることから高周波数の波となり、数値計算上取扱うのが困難となるが、本研究で取扱う波作用量平衡式モデルはエネルギーの伝播する方向に解を求める手法であるため、交点 X での解は考慮しなくてよい。さらに場の逆流速が大きい場合には、破

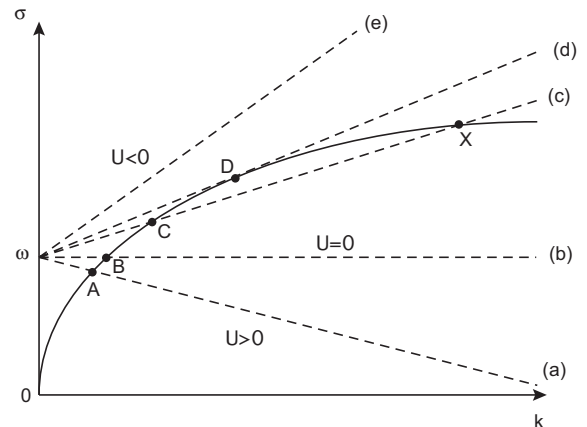


Fig. 1 Dispersion relations in the flow fields

線 (d) で示されるように、曲線とは1点で接する。このときの流速は、波のエネルギーが流れを遡って伝播することのできる限界流速である。破線 (e) で示されるように、この限界流速以上に逆向きの流れが強い場合には、曲線との交点をもたず、波は存在できない。

波が流れを遡る場合には、波高が増大し、さらに大きくなると砕波する。波のエネルギーの遡上が阻止される wave blocking が生じる場合にも、その直前においては波高増大に伴う砕波が生じる。一様水深場でも流れによって砕波が生じるため、水深 (勾配) の変化のみによる砕波とは異なるメカニズムがあると考えられる。

以下では規則波および不規則波を対象として行われた実験との比較を通じ、本モデルにおける砕波減衰モデルの適用性について検証する。

### 3.1 規則波実験との比較

Chawla and Kirby (1998) によって行われた室内実験との比較をおこなう。Fig. 2 に実験装置の概要を示す。流れを発生させることのできる水層の中央部に水路幅を変化させる壁を設置し、水路幅に応じて流速が変化する。水路最狭部での流速は  $U = -0.53\text{m/s}$ 、最拡部では  $U = -0.32\text{m/s}$  であり、水路幅が変化する場所では流速もなめらかに変化している。水深は  $0.5\text{m}$  で、用いられた入射波の周期は  $1.2\text{s}$ 、入射波高は  $1.223 \sim 12.61\text{cm}$  に変化させた6ケースである。この入射波の条件では  $kh > 2.4$  となり、深海条件である。

まず、波高が1番小さい  $1.223\text{cm}$  のケース (Test1) では wave blocking により波が反射したために、実験においては詳しく検証されていない。入射波高が  $1.8\text{cm}$  である Test2 の波高分布を Fig. 3 に示す。実線が計算結果、○が実験結果を表す。計算結果においては、場の流速が式 (5) によって得られる

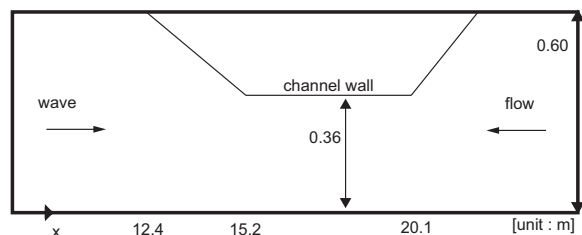


Fig. 2 Experimental setup (Chawla and Kirby, 1998)

wave blocking の生じる流速の理論値  $U = -0.47\text{m/s}$  に一致する  $x = 14.8\text{m}$  付近で波高が最大となり、それ以上波が遡上していない結果が出ている。実験結果では、 $x = 14.8\text{m}$  付近で波高が最大となった後一気に減衰しており、計算結果と実験結果はよく一致している。

次に入射波高が  $3.344\text{cm}$  である Test3 の結果を Fig. 4 に示す。入射波周期および水深は全ての実験において変わらないため、wave blocking が生じる流速の理論値およびその場所は変わらない。計算結果では、 $x = 14.8\text{m}$  付近で波高が最大となり、wave blocking が生じている。実験結果においては、 $x = 15.0\text{m}$  を越えた辺りで波高が最大値をとり、その後急激に減衰している。計算結果において wave blocking が発生するまで

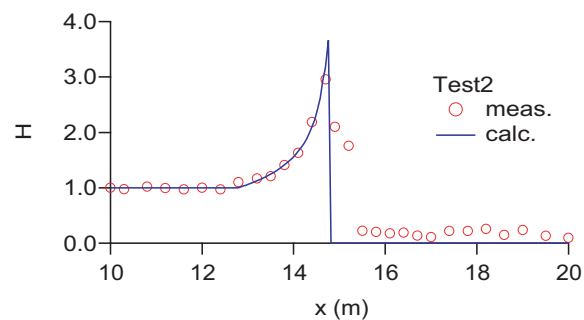


Fig. 3 Wave height distribution (Test 2)

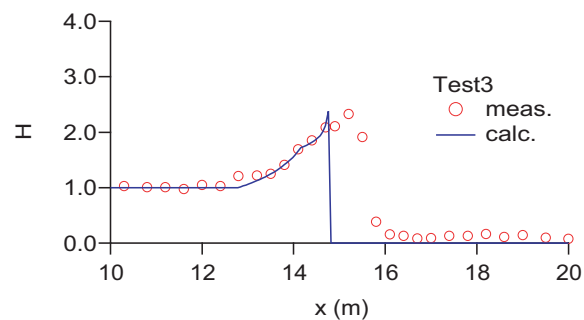


Fig. 4 Wave height distribution (Test 3)

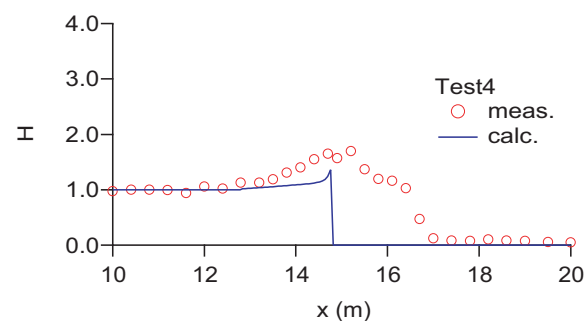


Fig. 5 Wave height distribution (Test 4)

は、実験結果と計算結果はよく一致している。

Fig. 5 に Test4 の結果を示す。入射波高は 6.607cm である。計算結果では、 $x = 14.8\text{m}$  付近で wave blocking が生じているが、実験結果では  $x = 15.0\text{m}$  付近で波高が最大値となるが、その後はゆるやかに波高が減衰している。さらに、wave blocking の位置は、より流速の大きい位置へ移動している。

ここには示さないが、Test5 の実験結果では波高が最大となる位置は上述のケースと変わらないものの、wave blocking は発生していない。Test6 でも同様に wave blocking が発生していないが、本モデルではこれらを再現することはできない。これらの実験結果と計算結果の違いの原因は、式(5)が微小振幅波理論に基づいているためである。有限振幅波理論では、分散関係式は波高の関数になる。Chawla and Kirby (1998) は 3 次のストークス波理論により計算を行い、Test3 および Test4 における wave blocking の位置の変化を再現した。しかし、Test5 および Test6 のように、wave blocking が生じない結果は再現できなかった。

ところで、本研究では流れを考慮した 3 種類の碎波減衰モデルを上記の計算の際に適用して検証を行った。そのひとつは、碎波減衰係数には高山ら (1991) の定義を用い、海底勾配の影響を取り入れた Miche の碎波限界式を組み合わせたモデルで、碎波限界式は次式で表される。

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.14 \tanh\left(\frac{\gamma}{0.88} \frac{2\pi h}{L_b}\right) \quad (6)$$

$$\gamma = \begin{cases} 0.8 + 5 \tan \beta; & \tan \beta < 0.1 \\ 1.3; & \tan \beta \geq 0.1 \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $L_b$  は碎波波長、 $\beta$  は海底勾配である。ふたつ目は、Battjes and Janssen (1978) の碎波減衰モデルで、減衰係数は次式で表される。

$$\varepsilon_b = \frac{-\beta}{\pi} k \sqrt{\frac{8 N}{\rho h \sigma}} \quad (8)$$

ここで、 $\beta$  はパラメータである。もうひとつは、次式で表される Chawla and Kirby

(2002) による碎波減衰モデルである。

$$\varepsilon_b = \frac{-3\beta}{4\bar{\sigma}\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{g\bar{k}^3}{\tanh \bar{k}h}} \left(\frac{\bar{k}}{\gamma \tanh \bar{k}h}\right)^2 H_{\text{rms}}^3 \times \left[1 - \left\{1 + \left(\frac{\bar{k}H_{\text{rms}}}{\gamma \tanh \bar{k}h}\right)^2\right\}^{-5/2}\right] \quad (9)$$

ここで、 $\beta$  および  $\gamma$  はパラメータ、 $\bar{\sigma}$  および  $\bar{k}$  はそれぞれ代表相対角周波数および波数、 $H_{\text{rms}}$  は波高の自乗平均値である。ここに示した碎波減衰モデルには、流速成分が変数として直接含まれていないが、波数（あるいは波長）および周波数にその影響が含まれている。いずれのモデルを適用した場合においても、入射波高が小さいケースにおいては実験結果とほぼ一致した。特に、Battjes and Janssen (1978) のモデルは Test3 においても Fig. 4 に示すように実験結果と良く一致しているが、推奨されるパラメータを変更する必要があった。他の碎波減衰モデルにおいても同様に、パラメータを変更した。用いた碎波減衰モデルには碎波の要因として海底勾配も含まれているため、一様水深の様な場合の碎波現象には一致の程度が悪いことが考えられる。

### 3.2 不規則波実験との比較

不規則波を対象として手賀ら (1998) によって行われた室内実験との比較を行う。実験では、水槽内の計測区間の両側に吸込み口と湧き出し口があり、水を循環させることによって水路内に流れを発生させる。水深は 0.5 m であり、実験に用いられた条件を Table 1 に示す。W1 ~ W3 は流れがない場合の条件で、3 種類のスペクトルピーク周期

Table 1 Test particulars (Tega et al., 1998)

Test	$T_p$ (sec)	H (m)
W1	0.97	0.080
W2	1.40	0.096
W3	2.22	0.095
		U (m/s)
CW1	0.97	-0.32
CW2	1.40	-0.32
CW3	1.40	-0.264
CW4	0.97	-0.18
CW5	1.40	-0.18
CW6	2.22	-0.18
CW7	0.97	-0.18
CW8	1.40	-0.18

を有する不規則波を用いた。CW1 ~ CW8 は水槽内に流れがある条件で、本研究ではピーク周期が 0.97s および 1.40s の結果について比較を行う。

Fig. 6 に  $T_p = 0.97s$  の場合の波高スペク

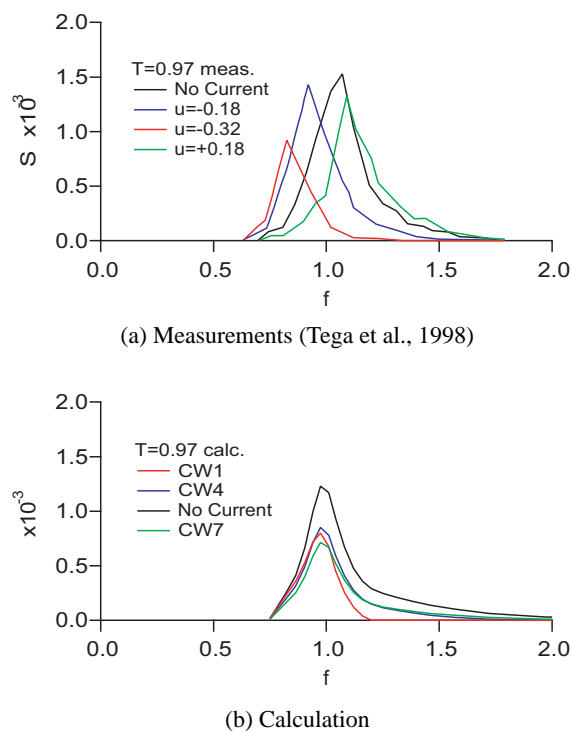


Fig. 6 Wave spectral density distributions ( $T_p = 0.97s$ )

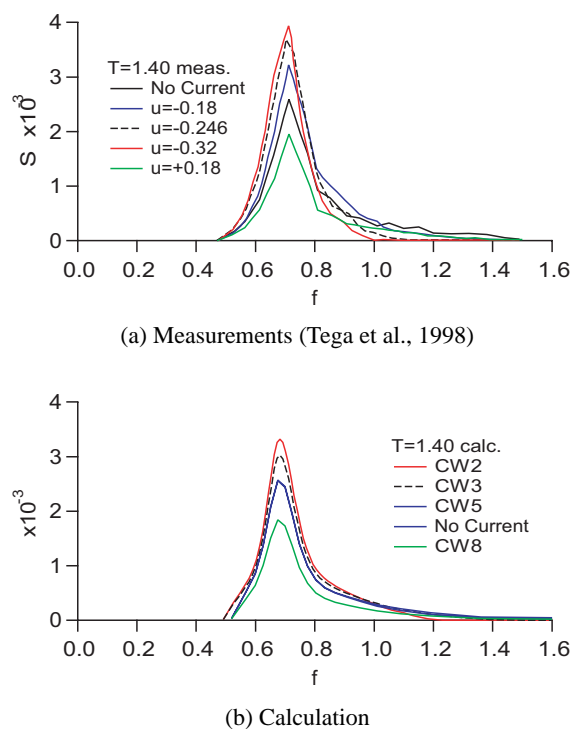


Fig. 7 Wave spectral density distributions ( $T_p = 1.40s$ )

トルの変化を示す。(a) は実験結果、(b) は本モデルによる計算結果である。実験結果においては、逆流が強くなるほどスペクトルのピークは低周波数側に移動し、スペクトルエネルギーは減少している。一方、順流の場合には、スペクトルピークが高周波側へ移動し、スペクトルエネルギーもやや減少している。計算結果においては、逆流および順流いずれの場合においてもスペクトルエネルギーが減少する様子は再現できているが、スペクトルエネルギーは分布形はそのまま全体として減少しており、スペクトルピークの移動は見られない。ただし実験では、逆流の条件においては流れのある領域と流れのない領域との境界で碎波が顕著であったと記述されている。

$T_p = 1.40s$  の場合の波高スペクトルの変化を Fig. 7 示す。実験結果では、逆流が強くなるほどスペクトルエネルギーが減少しているが、 $T_p = 0.97s$  の場合のようにスペクトルピークが移動することはない。また、順流の場合でもスペクトルピークは移動せず、スペクトルエネルギーが減少している。一方、計算結果においても流れによってスペクトルエネルギーが減少する様子が再現されており、実験結果とよく一致している。

不規則波の場合には成分波ごとに wave blocking の流速が異なるため、現象を複雑にしている。逆流条件の実験結果から、碎波によってエネルギーが低周波数側へ移動していると考えられるが、本モデルにおいては成分波間のエネルギー移動を考慮していないため、このような現象は再現できない。碎波が顕著ではない条件においては、不規則波の場合においてもスペクトル分布の再現性はよい。手賀ら (1998) は数値計算も行っているが、 $T_p = 0.97s$  の条件では数値発散が生じて解を得ていない。また、流れのない領域と流れのある領域との境界で発生する碎波は、水槽湧き出し口の流れの影響を受けているため、スペクトルエネルギー減衰とピーク周期移動のメカニズムの解明には、これらの影響を受けていないデータが必要であるとしている。したがって、本研究で用いたモデルでは、碎波が顕著でない場合の適用性は高い。碎波による低周波数へのエネルギー移動のメカニズムは明らかになってはいないが、この影響をモデル化して組込む場合には、本モデルでは入射波の条件に応じて決定される周波数分割数

(分割幅)に大きく依存する結果となることが予想される。

#### 4. 流れによる波の屈折

平面2次元問題を考えると、流れの影響によって波向きが変形する。以下では流れによる波の屈折について検証する。岩瀬ら(2007)によって一部の条件について検証されているが、ここではそれらも含めて詳細に調べる。

##### 4.1 焦線

流れの影響による特徴的な現象である焦線付近における波の屈折現象について述べる。Fig. 8 (b)に対象とする領域における流速分布を示す。 $x$ 方向のみの流れ場であり、 $y$ によって流速が変化し、 $x$ 方向には一様である。(a)はその流れ場にある角度で入射する波浪の波向き線の変化を示したものである。A地点を通過した波浪は流れによって屈折しながらB地点へ伝わるが、 $x$ 方向波数成分 $k_x$ は $x$ 方向流速の一様性により常に一定である。屈折によって $y$ 方向波数成分 $k_y$ は小さくなる。やがてC点では $y$ 方向波数成分 $k_y$ は0となり、波数 $k$ は $x$ 方向成分 $k_x$ に一致する。その後、波は $y$ の負の方向へと屈折する。このとき、 $y$ 方向波数成分が0となる地点すなわちそれ以上波が $y$ の正の方向へと伝わるできない境界を焦線(caustic line)とよぶ。場の流れには $y$ の負の方向成分はないにもかかわらず波浪は焦線を横切って伝播することができず、 $y$ の負の方向へと屈折する。

平面2次元の流れ場においては次式の分散

関係式がなりたつ。

$$\omega - \vec{k} \cdot \vec{U} = (gk \tanh kh)^{1/2} \quad (10)$$

ただし、 $\vec{k} = (k_x, k_y)$ は波数ベクトル、 $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ は波数、 $\vec{U} = (U, V)$ は場の流速ベクトル、 $\omega$ は角周波数、 $h$ は水深、 $g$ は重力加速度である。焦線においては $y$ 方向波数成分が0となるため、分散関係式は次式で表される。

$$\omega - k_x U = (gk \tanh kh)^{1/2} \quad (11)$$

したがって、ある地点(たとえばA地点)での波数成分が既知であれば、 $x$ 方向波数成分 $k_x$ は常に一定であることから、式(11)より焦線における流速が理論的に求められる。

以上の例では波の進行方向と流れの向きが同じであったが、流れが逆向きの場合においても焦線は存在する。

##### 4.2 波の屈折計算

ここでは、対象とする領域の流速分布および入射波の波向きの条件を変え、2.で示した波作用量平衡方程式モデルによる波の屈折現象の再現性を検討する。

###### (1) 順流場における波の屈折

Fig. 9に示す領域を対象とする。場の流速は(b)に示すように $y = 200\text{m}$ において最大値 $U_f (> 0)$ となり、 $x$ 方向には一様な分布を有する。波は主として場の流れと同じ方向に伝播するので、ここでは順流とよぶ。実際には計算領域内に平面的に入射しているはずだが、波向き線の変化を調べるために、領域左側入射境界の1ヶ所からのみ波浪を入射さ

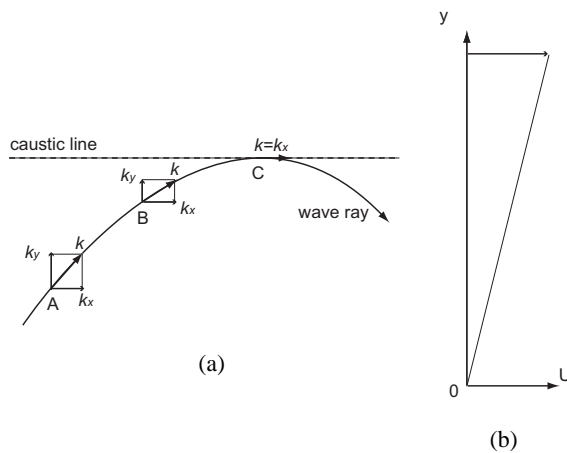


Fig. 8 Wave ray change in the flow field

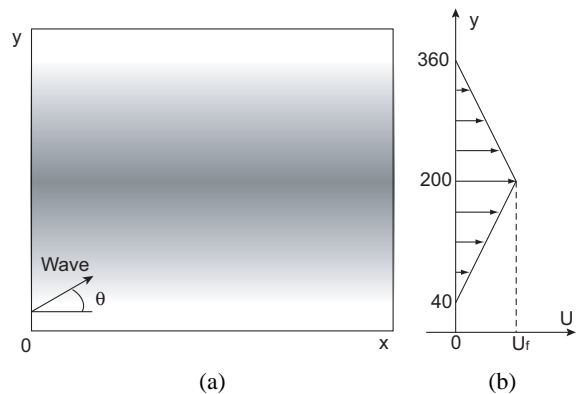


Fig. 9 Calculation setup in the following current

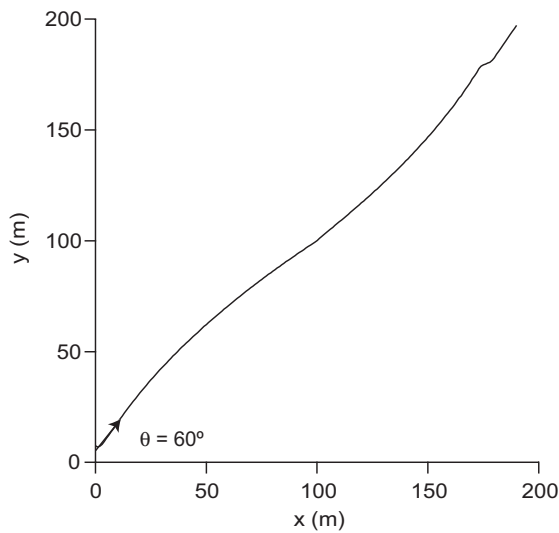


Fig. 10 Wave ray change ( $\theta = 60^\circ$ )

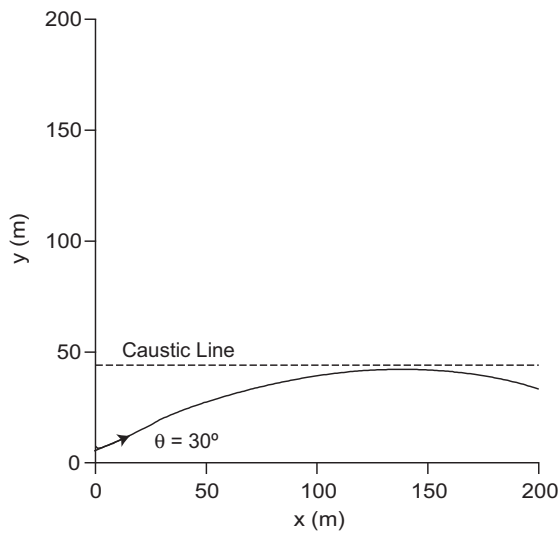


Fig. 11 Wave ray change ( $\theta = 30^\circ$ )

せた条件で計算し、波高が最大の位置を追跡して波向き線の変化とする。以下では  $U_f = 1.6\text{m/s}$  とし、水深  $20\text{m}$ 、入射波周期  $5.0\text{s}$  とし計算する。

まず、 $\theta = 60^\circ$  で入射した場合の波向き線の変化を Fig. 10 に示す。入射した波は流れによって屈折して方向を変えながら、流れ場を横切って伝播している。このとき、屈折によって  $y$  方向波数成分が 0 になることがないため、波は流れを横切ることができる。

次に、 $\theta = 30^\circ$  で入射した場合の波向き線の変化を Fig. 11 に示す。 $y = 6\text{m}$  から入射した波は、 $x = 140\text{m}$  付近においてそれ以上  $y$  の正の方向へ伝播することができず、 $y$  の負の方向へと屈折している。波が到達した最大の  $y$  座標における流速は、 $u = 0.41\text{m/s}$  で

ある。一方、入射条件から式 (11) によって求めた焦線における流速の理論値は  $u = 0.47\text{m/s}$  となり、本モデルによる計算結果とおおよそ一致していることがわかる。

## (2) 逆流場における波の屈折

Fig. 12 に示す領域を考える。場の流速は (b) に示すように  $y = 200\text{m}$  において最大値  $U_a (< 0)$  となり、 $x$  方向には一様な分布を有する。波は主として場の流れと逆方向に伝播するので、ここでは逆流とよぶ。以下では  $U_a = -0.96\text{m/s}$  として、順流の場合と同様に波向き線の変化を計算した。

Fig. 13 に、 $\theta = -50^\circ$  で入射した場合の波向き線の変化を示す。入射地点は流れ場の中にあるが、波は流れの影響を受けて屈折しながら伝播し、流れの外へと伝わっている。流れのない領域においては波はまっすぐ伝播する。

Fig. 14 は、 $\theta = -30^\circ$  で入射した場合の波向き線の変化を示したものである。 $y = 84\text{m}$  から入射した波は、 $x = 150\text{m}$  付近においてそれ以上  $y$  の負の方向へと伝播することができず、 $y$  の正の方向へと屈折し、流れから外へ出ることができない。 $y$  の正の方向へと屈折した地点における流速は  $u = -0.25\text{m/s}$  である。式 (11) から入射地点の条件を用いて焦線における流速の理論値を求めると  $u = -0.22\text{m/s}$  となり、逆流場においても計算結果とほぼ一致していることがわかる。

以上の結果より、本数値モデルにより焦線付近での屈折変化をおおよそ再現できた。

## 5. おわりに

本研究では流れがある場合にのみ生じる特

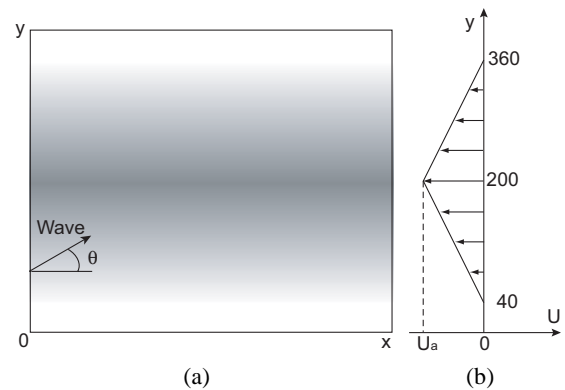


Fig. 12 Calculation setup in the opposing current

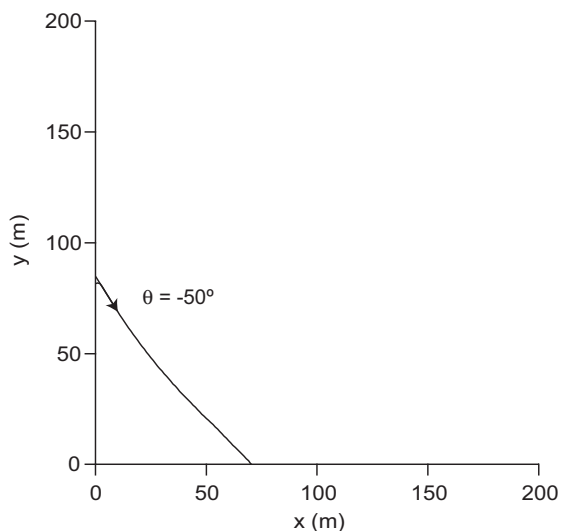


Fig. 13 Wave ray change ( $\theta = -50^\circ$ )

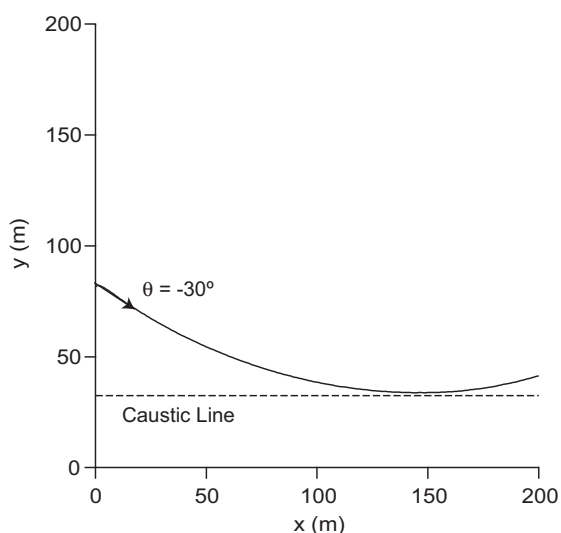


Fig. 14 Wave ray change ( $\theta = -30^\circ$ )

殊な現象である焦線付近での波の屈折，砕波および wave blocking について，波作用量平衡式モデルの適用性の検証を行った。

まず，1次元問題の規則波の条件では，非線形性が小さい場合には，砕波減衰および wave blocking 現象を含めた波高分布について，実験結果と本モデルによる計算結果の一致の程度はよかった。非線形性が強い場合には，wave blocking の位置のズレが大きくなった。不規則波の条件では，砕波が顕著ではない場合において，スペクトルエネルギー減衰について，実験結果と本モデルによる計算結果はよく一致していた。砕波が顕著な場合にはスペクトルピーク周波数の移動については再現できなかったが，実験装置の特性にも問題があり，今後さらなる検討が必要であ

る。これらの計算においては，砕波減衰モデルのパラメータを推奨されている値と変更する必要があった。次に，平面2次元問題について，焦線が存在するような流れ場において波向き線の変化を計算したところ，理論値にほぼ一致する結果が得られた。以上より，波・流れ共存場における本数値モデルの妥当性が示された。

## 参考文献

- 岩瀬 諒子，沖 和哉，酒井 哲郎（2007）：焦線を含む流れ場における波の屈折計算，平成19年度土木学会関西支部年次学術講演会，II-42（CD-ROM）。
- 沖 和哉・酒井 哲郎・芦谷 淳志（2003）：波と流れの相互干渉を考慮した Boussinesq 方程式による数値解析，海洋開発論文集，第19巻，pp.159-164。
- 沖 和哉・間瀬 肇（2004）：位相平均型波浪予測モデルの高精度化に関する研究，海岸工学論文集，第51巻，pp.1-5。
- 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，港湾技術研究所報告，第30巻，第1号，pp.21-67。
- 手賀 夕紀子・小林 信久・多田 彰秀（1998）：不規則波と流れの干渉による波動場の変化，海岸工学論文集，第45巻，pp.36-40。
- 間瀬 肇・由比 政年・雨森 洋司・高山 知司（2004）：波・流れ共存場における砕波および回折効果を考慮した位相平均波浪変形予測モデルの構築，海岸工学論文集，第51巻，pp.6-10。
- 水谷 法美・許 東秀・前田 祐介（2002）：港内の波と流れの非線形相互作用の数値解析に関する研究，海岸工学論文集，第49巻，pp.51-55。
- Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen (1978) : Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th ICCE, pp.569-587.
- Chawla, A. and J. T. Kirby (1998) : Experimental study of wave breaking and blocking on opposing currents, Proc. 26th ICCE, pp.759-772.
- Chawla, A. and J. T. Kirby (2002) : Monochromatic and random wave



breaking at blocking points, Jour.  
Geophys. Res., Vol.107, No.C7, pp.(4-  
1)-(4-19).

Kirby, J. T. (1984) : A note on linear sur-

face wave-current interaction over  
slowly varying topography, Jour.  
Geophys. Res., Vol.89, pp.745-747.

## **Study on Wave Refraction due to Steady Current and its Energy Dissipation Model for Wave Breaking**

Kazuya OKI

Graduate School of Engineering, Kyoto University

### **Synopsis**

Waves propagating on a current field are affected by the ambient current. Firstly, wave is refracted by the current. In a particular condition, wave cannot cross the strong steady current and is refracted back in the opposite direction. Secondly, wave cannot go upstream against the strong adverse current. In this study, the applicability of wave action balance equation model in these situations is verified by comparing the calculated result with theoretical solution. As a result, the model can predict the wave refraction and the phenomena around the caustic line due to the current. As for wave blocking, some characteristics are derived from the numerical calculations.

**Keywords:** wave action balance equation, refraction, caustic, wave breaking, wave blocking