

第 部門 焦線を含む流れ場における波の屈折計算

京都大学工学部地球工学科 学生会員 岩瀬 諒子
 京都大学大学院工学研究科 正会員 沖 和哉
 京都大学大学院工学研究科 フェロー 酒井 哲郎

1. 研究の背景と目的 潮流, 河川からの流入等, 波浪以外に起因する流れが顕著な領域では, 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, 波作用量平衡式を用いると, 場に流れがある場合でも波作用量は保存量であり, 方程式が複雑にならない利点がある. この背景から, 間瀬ら(2004)は波・流れ共存場における波作用量平衡式を用いた波浪変形予測モデル(WABED)を構築した. 一般に, 位相平均モデルでは, 回折現象が扱えないという問題点があるが, WABED モデルでは波作用量平衡式に回折項が導入されている. 間瀬らは波の伝播する方向と場の流れの方向が同じあるいは逆である一次元問題での波高および波長の増減について, 理論値との比較により妥当性を検証した. 平面場においても検証を行っているが, 主として波の伝播方向と場の流れが直行あるいは平行となる条件のみで, 屈折現象を理論値と詳細に比較した例はなかった. 焦線が存在するような流れ場では, 屈折現象のひとつとして, 波が反射するような状況が生じる. 本研究ではそのような場を対象として WABED モデルによる結果と理論値の比較を通してモデルの検証を行う.

2. 波・流れ共存場における分散関係と波数の変化 波・流れの共存場における分散関係式を以下に示す.

$$\begin{aligned} &= -U/|\vec{k}| \\ &= \pm \sqrt{g/|\vec{k}| \tanh |\vec{k}|h} \end{aligned}$$

ただし, \vec{k} : 波数ベクトル, h : 水深, ω : 絶対角周波数, ω_c : 流れに相対的な角周波数である. この波・流れ共存場で存在する波の波数は両式を満たすものであり, 流れ場の大きさによって波数は変化する. $\vec{k} = (k, 0)$, $\vec{U} = (U, 0)$ とした一次元流れにおける分散関係を Fig.1 に示す. 分散関係式の解は両式の交点として求められ, 逆流が強い場合は直線となり解は存在せず, 波は存在しない. ここで, Fig.2(a) および Fig.2(b)で表される流れの場 $\vec{U} = \{u(y), 0\}$ に θ の角度で波が入射する場合を考える. x 方向に現象は一様であるとする, 波数ベクトルを $\vec{k}(y) = (k_1, k_2)$ としたとき, $k_1 = \text{const.}$ である. 波

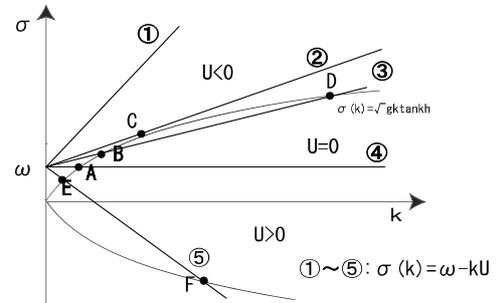


Fig. 1

の伝播の様子は, $|\vec{k}(y)|$, k_1 の大小により異なる. このときの, 波数の変化と波の伝播の様子を以下に示す. $u(y)(>0)$ の値が増加すると $|\vec{k}(y)|$ の値は減少する. 波は波数が $|k_1| < |\vec{k}(y)|$ を満たす領域でしか存在しないため, $|\vec{k}(y)|$ の最小値が k_1 より常に大きい場合(Fig.2(a)), 波は流れの領域を横切るように伝播するが, 波数が k_1 より小さい領域がある場合(Fig.2(b)) には, 波はその領域内に進まずに y の負の方向へ屈折し, 領域境界を示す焦線を $y = y_c$ とすると, $k_2(y_c) = 0$, $|\vec{k}(y_c)| = k_1$ となる.

一方, 波が流れと逆向きに入射する場合は $k_1 < 0$ となり, この場合, 波は流れの流速分布のピーク値を含む区間 $[y_c'', y_c']$ から抜け出せない.

3. 波作用量平衡式モデル 独立変数を平面位置座標 (x, y) および波向方向角 θ とした間瀬らの波作用量平衡式を以下に示す.

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

ここで, N : 波作用量, C : 波速, C_g : 群速度, C_x, C_y, C_θ : x, y 方向の特性速度, κ : 回折影響係数, ε_b : 砕波によるエネルギー減衰係数である. 流れの影響は各特性速度に組み込まれている.

4. 数値解析 WABED モデルを用いて算定した流れの場における波の変化を先述の理論と比較し, その妥当性について

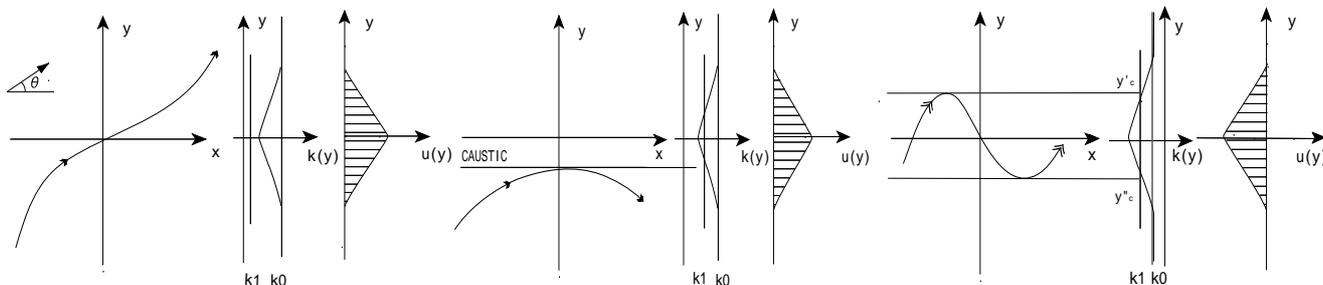


Fig. 2(a)

Fig. 2(b)

Fig. 2(c)

検証する．なお，Fig.2(b),(c)の流れ場は x 軸に関して対称であるため，ここでは片側のみを取り扱う．波作用量平衡式では不規則波を扱うのが通常であるが，波・流れ共存場における分散関係からわかるように，成分波の周波数および流れ場の速度ベクトルと成分波のなす角によって屈折する状況が変わるため，不規則波を入射させると波向きの追跡が難しい．そこで本研究では擬似的な成分波を考え，仮想的に開口防波堤からの入射を考える．これは，一様に入射した場合のある場所から入射した波浪成分を抽出した計算に相当する．主として波の伝播する方向と場の流れの方向が同じ場合を順流場，逆の場合を逆流場とし，それぞれの場合について計算を行う．
 (1) 順流場 一様水深 $h=0.20\text{m}$ とし， $y=8.2\sim 10.8\text{m}$ の位置から波高 $H=0.04\text{m}$ ，および周期 $T=1.13\text{s}$ の 1 方向周波数成分をもつ擬似的な規則波を x 方向に対して 30 度方向に入射させる．なお，方向成分は 36 分割し，メッシュ間隔は $x=y=0.20\text{m}$ とした．順流場における流速分布を，以下の式に基づいて作成し，Fig.3(a)に示す．

$$U = \begin{cases} 0 & (0 < y < 24) \\ 0.25(y - 24) & (24 < y < 40) \end{cases} \text{ (m/s)}$$

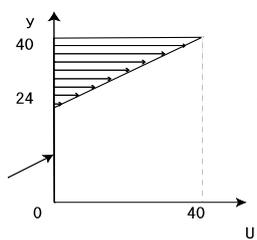


Fig. 3(a)

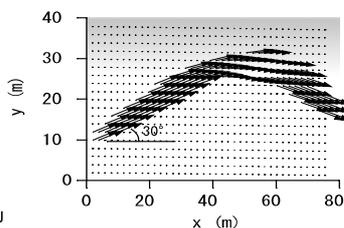


Fig. 3(b)

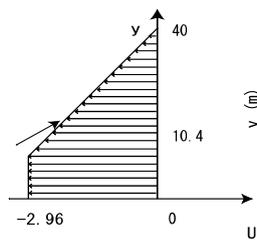


Fig. 4(a)

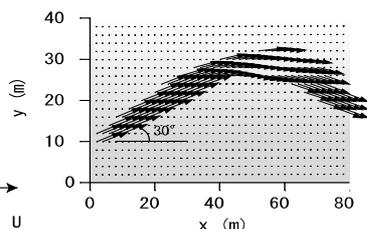


Fig. 4(b)

$V=0$
 Fig.3(b)は平面座標 (x,y) における波向きの計算結果をベクトルで示したものである． y の値が大きくなるにつれ， x 方向流速 U は増加するが，それに伴い主波向は徐々に変化し，Fig.2(b)で示したように，波が流れに跳ね返される位置で， $|\vec{k}(y)|=k_1$ の関係が成立する．計算結果において，波向きが x 方向を中心として正から負となる位置の y_c を調べ，そこでの U を求めると， $U=0.012\text{m/s}$ となった．一方，入射条件から $u(y_c)$ の理論値を求めると， $u(y_c)=0.0118\text{m/s}$ となる．これらの結果より，計算結果はほぼ理論値と一致する事が確かめられた．なお，数値拡散によって，入射位置から遠ざかるにつれ波高の最大値は小さくなるが，横断方向に波高の分布が広がる．そのため，波向きを示した範囲も入射位置から遠ざかるにつれて広がっている．従って y_c を求める際には y 方向断面において波高が最大となる点の波向きを用いて判定した．

(2) 逆流場 次に Fig.2(c)に相当する屈折計算の検証を行う．流れの場は以下の式で与え，Fig.4(a)に示す．

$$U = \begin{cases} -2.96 & (0 < y < 10.4) \\ -0.10(40 - y) & (10.4 \leq y < 40) \end{cases} \text{ (m/s)}$$

$V=0$

波の入射位置は $y=13.4\sim 16.0\text{m}$ ，その他計算条件は順流場のものと同様である．ここでは，波が y の増加する方向へ進行するとともに波の進行方向と逆向き流速が減少し，それに伴い，波は屈折し， $y=30\text{m}$ あたりで， y 方向の波の伝播速度がほぼ 0 となる(Fig.4(b))．このとき， $|\vec{k}(y)|=k_1$ の関係が成り立っている．順流計算と同様に，この位置での流速および理論値を求めると，それぞれ $U=-0.0144\text{m/s}$ ， $u(y_c)=0.0138\text{m/s}$ となる．これらの計算より，逆流場においても計算結果と理論値とはほぼ一致する事が確かめられた．

参考文献 間瀬ら：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.6-10，2004.