波・流れ共存場における高精度差分を用いた 多方向不規則波浪変形予測モデルの開発

Development of Multidirectional Random Wave Transformation Model in Wave-Current Coexisting Field

沖 和哉¹•間瀬 肇²

Kazuya OKI and Hajime MASE

When waves go upstream against gradually-increasing opposing current, wave breaking will occur and/or be blocked in the case of strong current. Since wave action density is conserved in a current field, the wave action balance equation is suitable for the numerical model of wave-current interaction. In this study, the numerical simulation model based on the wave action balance equation is developed by using QUICK scheme in order to improve the accuracy of wave transformation due to the current. The usability of the present model is verified, through the computation of the wave height change in the fields where the caustic exists or the area around the mouth of a river.

1. はじめに

波は流れによって影響を受ける.例えば,港湾近傍に 河川がある場合,荒天時には来襲波浪が大きいことに加 えて河川からの出水流量も増加するため,流れが波に与 える影響が顕著に見られるようになる.一般に,数値波 浪予測モデルにおいて,流れの影響を考慮するのは難し い.まず,波による流速変動成分を取扱う場合には,場 の流れの成分とどう区別するかが問題となる.次に,波 浪が流れを遡って伝播する場合には流れによって波長が 短くなり,十分な解像度で波形を再現するには非常に細 かい計算格子が必要となるため,数値安定性や計算効率 が悪化する.逆流場を波が伝播する場合には砕波が生じ るが,砕波減衰モデルについては流れの影響を考慮した モデルが確かめられている段階である.また,逆流が非 常に強い場合には,波がそれ以上遡上できない wave blocking も発生する.

波作用量は流れがある場合にも保存されるため,波作 用量平衡方程式モデルは,流れが顕著な領域の解析に向 いている.位相平均されたモデルであるため時間波形を 計算することはできないが,上述の高周波成分の解像度 の問題からは解放され,数値安定性もよい.一方で,位 相平均モデルでは数値計算の簡便さから1次精度風上差 分が用いられることが多いが,数値拡散が大きく見かけ 上の回折効果を生む原因となる.波は流れによって屈折 するため,より精度よく屈折計算を行うためにも,数値 拡散を抑えることが必要である.

本研究では、流れによる波の屈折を含めた波浪変形予

測精度の向上を目的として,波作用量平衡式に基づく波 浪モデルを高精度差分で解く数値モデルを開発する.

2. 波作用量平衡式

本研究では,平面位置座標 (x, y) および波向き θ を 独立変数とする波作用量平衡式に回折項を組込んだ間瀬 ら (2004)の式を用いる.

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

ここで、Nは波作用量、Cは波速、C_sは群速度、 σ は角 周波数、 κ は回折影響係数、 ε_b は砕波等によるエネルギー 減衰係数であり、特性速度(C_s, C_y および C_{θ})はそれ ぞれ次のように表される.

$$C_x = C_g \cos\theta + U \tag{2}$$

$$C_y = C_g \sin\theta + V \tag{3}$$

$$C_{\theta} = \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\sin \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \cos \theta \sin \theta \frac{\partial U}{\partial x} - \cos^2 \theta \frac{\partial U}{\partial y} - \sin^2 \theta \frac{\partial V}{\partial x} - \sin \theta \cos \theta \frac{\partial V}{\partial y}$$
(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.位相平均モデルに分類される波作用量平衡式 は、本来波の回折を考慮することができないが,間瀬ら (2004)の考案した回折項を導入することにより構造物背 後の解析も可能となる.しかし,回折項を有する位相平 均モデルに1次精度風上差分を適用した場合,差分によっ

¹ 正 会 員 博(工) 京都大学助教工学研究科都市環境工学専攻 2 正 会 員 工博 京都大学教授防災研究所

て生じる数値拡散項と,2階微分で表される回折項によ るそれぞれの効果の区別がつかなくなる.そこで,沖・ 間瀬(2004)と同様に,式(1)に対してQUICKスキームを 適用して数値拡散を抑え,流れの影響を考慮できる数値 波浪予測モデルを開発する.沖・間瀬(2004)の提案し たエネルギー平衡方程式モデルは波作用量平衡式モデル と同じ位相平均モデルに分類され,基礎式の形もほぼ同 じであるが,流れを考慮して定式化すると新たにラディ エーション応力に関する項が生じて複雑になる.一方, 波作用量は流れがある場合にも保存されるため基礎式自 身は変わらない.また,波の流速成分も式中に現れない ために場の流速との区別は必要なく,流れ場における解 析に向いている.

3. 流れ場における波の屈折

波は流れによって,波高および波向きが変化する.1 次元問題における波高の変化については,間瀬ら(2004) によって式(1)に基づくモデルの結果が理論値に一致す ることが確かめられているため,本研究では平面二次元 における波向きの変化すなわち流れによる波の屈折につ いて検証する.

以下にその特徴的な例を紹介する.x方向には一様なx 方向のみの流れで,yが大きくなるにつれて流速が大き くなる場を考える.この流れ場を波浪が横切る場合,流 速および入射波の波向きの条件によっては波が流れを乗 り越えられずに,yの負の方向への流速成分がないのに も関わらず,大きく屈折する現象がある.その乗り越え られない境界を焦線と呼ぶ.河口付近あるいは沿岸域で の反射波と沿岸流の関係によって起こりうる現象である.

一般的に,流れ場における波の分散関係式は次式で表 される.

$$\omega - \vec{k} \cdot \vec{U} = \left(gk \tanh kh\right)^{1/2} \tag{5}$$

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, ω は角周波 数, hは水深, gは重力加速度である. ここで, x方向に 一様である $\vec{U} = (U(y), 0)$ という流れ場を考えると, 式(5)は次式に書き換えられる.

$$\omega - k_{x}U = (gk \tanh kh)^{1/2} \tag{6}$$

焦線が存在する具体的な例として, yが大きくなるほ ど U(y)も線形的に大きくなる場合を図-1 に示す. (a)は 波向線の変化, (b)は場の流速分布を表している. A地点 を通過した波が B 地点へ到達すると, x 方向の波数成分 & は変化しないが, y方向の波数成分 & は減少する. そ れに伴って波向きも徐々に変化する. さらに伝播してC





地点へ到達すると、 $k_s = 0$ すなわち $k = k_s$ となる. このと き、C地点は焦線上にあり、これ以上波はyの正の方向 へは進むことができず、逆にその後はyの負の方向へと 屈折する.入射波の波数によって定まる焦線における流 速の理論値Uは、次式を満たすものとして求められる.

$$\omega - k_x U = \left(gk_x \tanh k_x h\right)^{1/2} \tag{7}$$

本数値モデルによる波の屈折現象の再現性を検討する ために、上で述べた焦線が存在するような流れ場におけ る波向き線の変化について、流れの向きと入射波向きを 変えて計算を行う.さらに、従来の1次精度風上差分を 用いたモデルによる結果と比較する.

(1) 順流場

まず,流れの向きと波の伝播方向が主として同じ向き である平面順流場の計算を行う.水深20mの一様水深場 (400m×400m)に周期5.0sの規則波を入射させる.格子 間隔は2.0mで,周波数分割数は10,方向分割数は36で ある.境界はすべて透過境界とする.図-2に順流場の条 件に用いた流速分布と,QUICKスキームを適用した本 モデルと1次精度風上差分を用いた従来のモデルによる 波向線に関する計算結果,および理論値による焦線の位置を示す.実線が本モデルによる結果,破線が従来モデ ルによる結果,一点鎖線が理論値による焦線の位置を示 す.図の右側に示すようにx方向にのみ一様な流れ場で あり,yが大きくなるにつれて流速も大きくなる.なお, 本来入射波は波峰方向に同位相の波の広がりを持つが, 波向きの変化を調べ易くするために左側境界の一部から の入射とする.入射位置における波向きは x軸に対して





図-3 順流場における波光線の変化(焦線なし)

30°であり、入射波条件に対応する焦線位置での流速は 0.47m/sである.本数値波浪モデルでは、yの位置によっ て変化するx方向流速によりyの負の方向へ屈折する様子 が精度良く再現された.1次精度風上差分モデルにおい ても焦線付近における波の屈折は再現できるが、yの負 の方向へ屈折する位置での場の流速は0.41m/sであり、 本研究で提案するモデルの方がより理論値に近い位置 (0.45m/s)で屈折している.従来のモデルによる結果に おいて、yの負の方向へ屈折した後、その屈折の度合い が大きくなっているのは、入射位置から遠ざかるにした がって数値拡散の影響が顕著になったためであると考え られる.

図-3 に、焦線が存在しない順流場における計算結果 を示す.入射位置における波向きは56°である.入射波 周期および流速分布は上記の条件と同じであるが、入射 波向きの違いにより波は流れを横切って伝播する.この 条件では本モデルによる結果と従来のモデルによる結果 に大きな差は見られない.

(2) 逆流場

次に、流れの向きと波の伝播方向が逆向きである逆流 場の計算を行う.図-4 に流れ場の流速分布および2つ のモデルによる計算結果と理論による焦線の位置を示す. 入射位置における波向きは30°であり、入射波条件に対 応する焦線位置での流速は-0.22m/sである. 順流場の結 果と同様に、いずれのモデルにおいても焦線を乗り越え ずに大きく屈折する様子が再現されているが、従来のモ デルにおいて屈折する位置での流速(-0.25m/s)と比較し て、本モデルによる結果は理論値に一致している.

波が流れを乗り越えて伝播する場合の波向きの変化に ついては,順流の場合と同様に,逆流の場合においても 両モデルによる結果に大きな差異はなかった.



図-4 逆流場における波向線の変化

4. 砕波およびwave blocking

水深の変化だけではなく,流れによっても波は砕波す る,砕波モデルとしてさまざまなものが開発されている が,流れも考慮した砕波モデルは多くない.水深の変化 のみによって生じる砕波は複雑な現象であるが,流れが 加わることによってさらに難解なものとなる.本研究で はこれまでに提案されたいくつかの砕波減衰モデルを検 討した沖 (2008)の結果にしたがい,以下に示す Battjes and Janssen (1978)のモデルを採用する.

$$\varepsilon_b = \frac{-\beta}{\pi} k \sqrt{\frac{8E}{\rho h}} \tag{8}$$

ここで、 β は砕波パラメータ、 ρ は密度である.また、 Eは波のエネルギーであり、波作用量とは $N=E/\sigma$ の関係がある.

さらに逆流の強い場では、波がそれ以上遡ることので きないwave blockingが生じる.1次元問題を考えると、 wave blocking の生じる条件は、次の分散関係式から求 められる.

$$\sigma = (gk \tanh kh)^{1/2} \tag{9}$$

$$\sigma = \omega - kU \tag{10}$$

式(9)は流れがない場合における分散関係式であり,式 (10)は流れ場における波数と相対周波数および絶対周波 数の関係を表す式である.ただし, σ は相対周波数, ω は絶対周波数である.この2つの式で表される曲線と直 線の接点における流速が限界流速であり,それ以上場の 流速Uが大きくなると分散関係式を満たす解が存在せず, 波は流れを遡ることができない.

図-5 に Chawla and Kirby (1998)の実験装置を示す. この実験では,一方向流を発生可能な造波水路に波の進 行方向に向かって漸縮区間 (*x* =12.4m~15.2m)を設ける ことによって流速を変化させている.水深は50cm,入 射波周期および入射波高はそれぞれ1.2sおよび1.223cm である.図-6に波が流れを遡る場合の波高変化を示す. 実線は最適化した砕波減衰モデルを組込んだ本数値波浪



モデルによる計算結果、破線が砕波減衰を考慮しない場 合の結果,。は実験結果である.本モデルではパラメー タを $\rho = 1.0$, $\beta = 1.0$ とするが, β については Batties and Janssen の推奨する値の半分である. これは、もとの砕 波減衰モデルが前提として水深の変化および流れの両方 の影響を同時に受ける条件で考案されたものであり、こ こで検証する流れのみによる砕波とは条件が異なるため である. 図中の波高Hは入射波高によって基準化したも のである.図から明らかなように、本モデルによる結果 と実験結果はよく一致している。波が遡ることのできな い限界すなわち wave blocking の位置については流れ場 における分散関係式から得られる理論値に一致している. なお,波高が大きくなると非線形性が強くなり,実験結 果における wave blocking の位置も不明瞭となって,線 形理論によって得られる wave blocking の位置とは一致 しなくなった. そのため、ここで示した砕波モデルは波 高が極端に大きくない範囲で有効である.

5. 平面二次元数值解析

本研究で提案するモデルをより具体的な条件で検証す るため、図-7 に示すような河川からの流入と導流堤を 有する海域に波を入射させ、波浪数値予測計算を行う. 対象とする領域は9.0mの一様水深場で、用いる入射波 は有義波周期5.0s、Sma=70の多方向不規則波である.波 は左側境界からx軸に対して10°の傾きをもって入射さ せる.河川からの流入がある右側境界は河口部を除いて 閉境界とし、その他の境界はすべて開境界とする.図-8 は河川流入を想定した対象領域内の定常流速分布であり、



河川からの流入位置における流速は0.57m/sとする.導流堤に沿って強い流れが存在し,導流堤の先端付近では循環流のパターンが発生している.定常流速分布の計算には,長田(1999)のプログラムを用いた.

図-9に示す波高分布は本数値波浪モデルによる計算結 果である.計算波高は入射波高で基準化してある.入射 波に対して逆向きの流速が最大となる構造物先端付近で の波高が大きくなる.河口付近においても逆向きの流速 が強いが,構造物の背後であるために波高は大きくない. 一方,入射波に対して順流となる領域では波高が小さく なっている.これらの傾向は,1次元問題で検証した結 果に一致する.

図-10に y=200mの断面における波高分布を示す. 実 線が本数値波浪モデルによる結果,破線は従来のモデル による結果,一点鎖線は流れを考慮しないモデルによる 結果である.本モデルによる計算波高は従来のモデルの それに比べて大きい.また,このような状況下で流れを 考慮しないと,かなり異なる計算結果となることがわか る.波高の最大値を比較すると,従来のモデルの結果に 対して本モデルでは約1割大きく,流れを考慮しない場 合に対しては,本モデルでは約1.5倍の値になっている.

6. おわりに

波・流れ共存場を対象とし、流れによる波の屈折計算 の精度向上を目的とした多方向不規則波浪変形予測モデ ルの開発を行った.構築したモデルについて,まず,焦 線が存在する流れ場での検証を行った.次に,砕波およ び wave blocking モデルの導入を行ってこれらの現象に も対応可能なことを示した.以上の検証により,本研究 で提案するモデルは,位相平均モデルの簡便さも相まっ て,波・流れ共存場において有効であることを示した. 最後に具体的な例として,導流堤を有する海域に波が入 射する場合を想定し,1次風上差分を用いる場合と本モ デルの結果および流れを考慮しない場合の結果とを比較 して,それぞれの差異について示した.これにより,本 モデルの優位性が示された.なお,場の流れの計算プロ グラムの使用法については京都大学音田慎一郎助教に助



言いただいた.ここに記して謝意を表する.

今後は実験あるいは現地観測データとの比較を通じて より汎用性の高いモデルへと改良させたい.

参考文献

- 沖 和哉(2008):流れによる波の屈折とその砕波減衰モデル に関する研究,京都大学防災研究所年報,第51号(印刷 中).
- 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.
- 長田信寿 (1999): 一般座標系を用いた平面2次元非定常流れ の数値解析,水工学における計算機利用の講習会講義集, 土木学会水理委員会基礎水理部会, pp.61-76.
- 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.
- Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen (1978): Energyloss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th ICCE, pp.569-587.
- Chawla, A. and J. T. Kirby (1998): Experimental studyof wave breaking and blocking on opposing currents, Proc. 26th ICCE, pp.759-772.