

# 水深積分モデルによる洪水流と波浪の 一体解析法(Q3D-FEBS-FWI)の開発

竹村 吉晴<sup>1</sup>・福岡 捷二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 中央大学研究開発機構 准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: y-takemura.77m@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>フェロー 中央大学研究開発機構 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: sfukuoka001t@g.chuo-u.ac.jp

本論文は、洪水流と波浪を一体的に計算できる実用的な解析手法の構築を目指し、河川の洪水流解析に実績のある非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS)の基礎方程式系とその数値解析法を波浪の伝搬・変形、崩れ砕波に適用できるように再考し、Q3D-FEBSを拡張した(Q3D-FEBS-FWI)。そして、一様斜面の崩れ砕波、波・流れ共存場の既往実験を対象にQ3D-FEBS-FWIの適用性について検討した。これらの検討から、Q3D-FEBS-FWIは波の伝搬・変形、砕波帯や波・流れ共存場における位相平均の流速鉛直分布について、その特徴を説明出来ること、砕波点付近では底面付近の戻り流れを大きく計算する傾向があるなど、Q3D-FEBS-FWIの適用性と洪水流と波浪の一体解析手法の構築に向けた課題を明らかにした。

**Key Words:** Q3D-FEBS, wave-current interaction, depth integral model, nonhydrostatic pressure

## 1. 序論

河川・海岸間の土砂動態を解明し、河口部の管理と周辺海岸の保全を一体的に考える上で、洪水流と波浪の相互作用を考慮した洪水流・河床変動解析法の開発が求められている。近年、SWAN<sup>1)</sup>等のオープンソースの開発・普及もあり、エネルギー平衡モデル等の位相平均モデルと平面二次元河床変動解析を組み合わせることで、洪水流と波浪の相互作用を考慮し、河口部の流れと地形変化の解析が行われるようになってきた(例えば、楳田ら<sup>2)</sup>)。著者らは、非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS<sup>3)</sup>)とエネルギー平衡モデル、SR(SurfaceRoller)エネルギー方程式<sup>4)</sup>を組み合わせることで洪水流と波浪の相互作用を考慮した洪水流・河床変動解析法を開発し、阿賀野川を対象に洪水流による河口砂州のフラッシュ、河口テラスの形成・消失過程について検討してきた<sup>5)</sup>。これらの波の位相平均モデルと洪水流解析法を組み合わせた手法では、洪水流と波浪による土砂移動が、それぞれ異なる手法で評価されており、このことが河川・海岸間の土砂移動を議論する際の大きな課題と考えている。

流れと波は、本質的には同様の方程式で記述できるものである。実用的な水深積分モデルの枠組みで洪水流と

波浪を一体的に解析可能となれば、土砂移動についても統一的な考え方で評価することが可能になり、河口部の流れと河床変動、河川・海岸間の土砂動態をより高精度に議論可能になると期待される。

著者らの開発したQ3D-FEBS<sup>3)</sup>は、圧力の非静水圧成分(以下、非静水圧と呼ぶ)を評価可能であるが、流れが時間的に緩やかに変化する洪水流を対象に開発されたことから、定常流を仮定して非静水圧を評価している。このため、流れの非定常性の大きい波浪場の解析には適用できない。本研究では、Q3D-FEBSの基礎方程式系とその数値解法を見直し、Q3D-FEBSを波の伝搬・変形まで解析出来るように拡張する。これをQ3D-FEBS-FWIと呼ぶ(FWIはFlood flow and Wave Interactionの意)。そして、一様斜面上の崩れ砕波、波・流れ共存場の既往実験を対象として、Q3D-FEBS-FWIの適用性と課題を明らかにする。

## 2. Q3D-FEBS-FWIの基礎方程式系とその数値解法

Q3D-FEBS-FWIは、従来のQ3D-FEBSを波の伝搬・変形まで解析できるように拡張するものである。図-1は、Q3D-FEBS-FWIの模式図である。河口部の水位や流速分

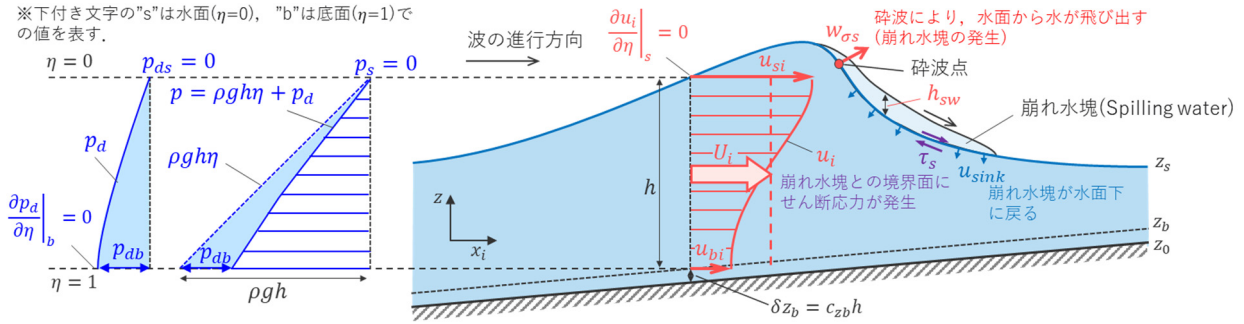


図-1 Q3D-FEBS-FWIの水平方向流速と圧力の鉛直分布、および砕波の解析方法の模式図

布には砕波が大きな影響を与えることから、その影響を考慮することが不可欠である。そこで、崩れ砕波 (Spilling breaker) を念頭に置き、水深積分モデルの枠組みで砕波の影響を考慮することにした。崩れ砕波は、比較的勾配の緩い海岸で見られ、波峰付近で形成された気泡を含む水塊が水面下の流れと相互に影響を及ぼし合いながら波峰前面まで広がり、波のエネルギーを減衰させる現象である。本研究では、水面下の流れと不連続に挙動する崩れ水塊 (Spilling water) を図-1のように定義し、その運動を水面下の流れとの相互作用を考慮しながら解析することにより、砕波の影響を考慮する。以下では、Q3D-FEBS-FWIの基礎方程式系を示し、その数値解法について説明する。

### (1) Q3D-FEBS-FWIの基礎方程式系

水深の浅い河口域 (河口部とその周辺海域) では、水深方向への流速や圧力の変化は水面と底面の存在によって自由度が規定されるものと考え、Q3D-FEBS-FWIでは以下のように流速・圧力の鉛直分布形を仮定する。

Q3D-FEBS-FWIでは、従来のQ3D-FEBS<sup>3)</sup>と同様に河床面 $z_0$ から $\delta z_b (=c_{zb}h, c_{zb}=0.03)$ だけ上方に底面 $z_b$ を定義する。そして、水深平均流速 $U_i$ 、水面流速 $u_{si}$ 、底面流速 $u_{bi}$ に加えて、水面で $\partial u_i / \partial \eta|_s = 0$ の条件を課すことにより、水平方向流速の鉛直分布形を式(1)に示す三次関数で与える。鉛直方向流速は、連続式から式(2)のように求められる。

$$u_i = (u_{si} - U_i) \cdot (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + (u_{si} - u_{bi}) \cdot (-4\eta^3 + 3\eta^2) + U_i \quad (1)$$

$$w = \frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( h \int_0^\eta u_i d\eta \right) + u_i \left( \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \eta \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$\eta = \frac{z_s - z}{h} \quad (3)$$

ここで、 $i, j = 1, 2$  ( $1=x$ 方向、 $2=y$ 方向)、 $u_i$ :  $i$ 方向の流速、 $U_i$ :  $i$ 方向の水深平均流速、 $u_{si}$ :  $i$ 方向の水面流速、 $u_{bi}$ :  $i$ 方向の底面流速、 $w$ : 鉛直方向の流速、 $h$ : 水深、 $z_s$ : 水位、 $\eta$ : 底面から水面の間で無次元化した鉛直座標である。 $\partial u_i / \partial \eta|_s$ は水面が曲率を持つ場合や水面にせん断応力が作用する場合にゼロとならないことに加え、後述する

ように、崩れ水塊との運動量交換の評価に関係するため、今後さらに検討が必要と考えられる。

非静水圧の鉛直分布形は、非線形波の解析に実績のあるBoussinesq方程式<sup>6)</sup>と同様に放物線で与える。非静水圧の鉛直分布が最低限満たすべき条件として、底面での非静水圧 $p_{ab}$ 、水面で非静水圧がゼロ $p_{ds}=0$ 、底面での非静水圧の鉛直勾配がゼロ $\partial p_d / \partial z|_b = 0$ の条件を与えることで式(4)が得られる。なお、 $\partial p_d / \partial z|_b = 0$ は底面形状が時間的に大きく変化する場では成立しないため改良の余地を残す。

$$p_d = -p_{ab}(\eta^2 - 2\eta) \quad (4)$$

ここで、 $p_d$ : 非静水圧、 $p_{ab}$ : 底面での非静水圧である。

Q3D-FEBS-FWIの基礎方程式系は、下記の通りである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_i}{\partial x_i} = -q_{sw} \quad (5)$$

$$h \frac{\partial U_i}{\partial t} + h U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial h p_{ab}}{\rho \partial x_i} - \frac{p_{ab}}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\partial h \overline{\Delta u_i \Delta u_j}}{\partial x_j} - q_{sw} \cdot u_{csi} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ h \overline{v_t} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \hat{S} \frac{\tau_{si}}{\rho} - \hat{S} \frac{\tau_{bi}}{\rho} \quad (6)$$

$$h \frac{\partial W}{\partial t} + h U_i \frac{\partial W}{\partial x_i} = \frac{p_{ab}}{\rho} - \hat{S} \frac{\tau_{bz}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \overline{v_t} \left( \frac{\partial h W}{\partial x_i} + u_s - u_{bi} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - 2 \frac{p_{ab}}{\rho h} \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + \frac{q_{sw}}{h} \frac{\partial u_i}{\partial \eta} \Big|_s + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \overline{v_{ts}} \left( \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{sj}}{\partial x_i} \right) \right] + \hat{S} \frac{v_{ts}}{h^2} \frac{\partial^2 u_i}{\partial \eta^2} \Big|_s + \hat{S} \frac{\tau_{si}}{\rho a h} \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_{bi}}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{\partial p_{ab}}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \overline{v_{tb}} \left( \frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{bj}}{\partial x_i} \right) \right] + \hat{S} \frac{\tau_{bi} - \tau_{oi}}{\rho \delta z_b} \quad (9)$$

$$\frac{\partial h_{sw}}{\partial t} + \frac{\partial h_{sw} u_{swi}}{\partial x_i} = q_{sw} \quad (10)$$

$$\frac{\partial h_{sw} u_{swi}}{\partial t} + \frac{\partial u_{swj} u_{swi} h_{sw}}{\partial x_j} = q_{sw} \cdot u_{csi} - \hat{S} \frac{\tau_{si}}{\rho} \quad (11)$$

ここで、 $\rho$ : 水の密度、 $g$ : 重力加速度、 $W$ : 鉛直方向の水

深平均流速,  $\Delta u_i (= u_i - U_i)$ :  $i$ 方向流速の水深平均値からの偏差成分,  $\nu_t$ : 渦動粘性係数,  $\tau_{si}$ : 水面に作用する $i$ 方向のせん断応力,  $\tau_{bi}$ : 底面に作用する $i$ 方向のせん断応力,  $\tau_{oi}$ : 河床面に作用する $i$ 方向のせん断応力,  $h_{sw}$ : 崩れ水塊の水深,  $u_{swi}$ : 崩れ水塊の $i$ 方向流速,  $q_{sw}$ : 水面から流入流出する単位面積あたりの流量,  $u_{csi}$ : 水面から流入流出する水の $i$ 方向流速,  $\bar{S}, \hat{S}$ : 単位平面積当たりの水面と底面の面積である。 $\bar{\cdot}$ は水深平均の値を意味し, 下付き文字の $s$ と $b$ は水面( $\eta=0$ )と底面( $\eta=1$ )での値をそれぞれ意味する。

式(5)と式(10)の右辺項は崩れ水塊と水面下の流れの質量交換を表す項である。式(6)の右辺第5項と第7項, 式(8)の右辺第3項と第6項, 式(11)の右辺第1項と第2項は移流とせん断応力を介した崩れ水塊と水面下の流れの運動量交換を表す項である。崩れ水塊内部の圧力分布については不明な点が多いため, 鉛直方向の運動方程式は考えず大気圧(圧力ゼロ)を仮定している。このため, 崩れ水塊と水面下の流れの鉛直方向の運動量交換は無視している。また, 式(8)の右辺第3項については, 式(1)との関係から $\partial u_i / \partial \eta|_s = 0$ としている。これらは砕波点付近の流れの解析精度に関わるものと考えられるため, 今後検討を進めて行く予定である。

$q_{sw}$ は次のように定義される。

$$q_{sw} = w_{os} \cdot \bar{S} \quad (12)$$

$$w_{os} = u_{sn} \cdot \delta(x_i) - u_{sink} \quad (13)$$

$$u_{sn} = \frac{1}{\bar{S}} \left( w_s - u_{si} \frac{\partial z_s}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

ここで,  $u_{sn}$ : 水面に対して垂直上向きの流速,  $u_{sink}$ : 崩れ水塊が水面下に戻る速度である。 $\delta(x_i)$ はデルタ関数であり, Nadaoka et al.<sup>7)</sup>による砕波の判定式から次のように定める。

$$\delta(x_i) = 1(\partial p_d / \rho \partial z|_s \geq 0), \quad 0(\partial p_d / \rho \partial z|_s < 0) \quad (15)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_d}{\partial z} \Big|_s = -g - \frac{\partial w_s}{\partial t} - u_{si} \frac{\partial w_s}{\partial x_i} \quad (16)$$

$$w_s = \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_{si} \frac{\partial z_s}{\partial x_i} \quad (17)$$

$u_{csi}$ は,  $q_{sw}$ が正の時に $u_{csi} = u_{si}$ ,  $q_{sw}$ が負の時に $u_{csi} = u_{swi}$ とし風上側の流速を使用する。これらにより, 砕波地点において, 水面下の流れから崩れ水塊に質量と運動量が供給され, それらが $u_{sink}$ の速度で水面下に戻ることを表現している。

水面に作用するせん断応力 $\tau_{si}$ は, 水面流速と崩れ水塊の速度差に比例するものと考え, 境界混合係数<sup>8)</sup>を用いて次式で評価する。

$$\tau_{si} = \rho f (u_{swi} - u_{si}) \sqrt{(u_{swj} - u_{sj})^2} \quad (18)$$

ここで,  $f$ : 境界混合係数である。式(8)の右辺最終項は,  $\tau_{si}$ の影響が $ah$ の範囲で線形分布で伝わるものと仮定し

与えている。 $\alpha$ の値は砕波帯のレイノルズ応力分布の計測結果<sup>例えは9)</sup>を参考に $\alpha=0.4$ と定めた。

崩れ水塊については, 空気混入の影響を無視するなど, かなり割り切った定式化であるが, 運動量を持った水塊が水面から飛び出し, 水面下の流れと運動量を交換しながら水面下に戻る機構を考慮できればよいものと考え定式化している。

式(7)は鉛直方向の水深積分運動方程式である。従来のQ3D-FEBSから, 左辺第1項の水深平均の鉛直流速の時間微分項と右辺第3項にレイノルズ応力項が加わっている。左辺第1項は波の伝搬・変形を解析する上で不可欠な項であり, 右辺第3項は非静水圧を拡散し波高を減衰させる効果を持つ。本来は, 式(6)の右辺第4項に対応する流速鉛直分布の偏差による運動量輸送項を含むが, 計算の安定性から省略している。

$\tau_{bi}$ と $\tau_{oi}$ はそれぞれ次式で評価する。

$$\frac{\tau_{bi}}{\rho} = -\frac{\nu_{tb}}{h} \frac{\partial u_i}{\partial \eta} \Big|_b, \quad \nu_{tb} = \frac{\kappa \sqrt{\tau_{oi} / \rho}}{6} \frac{h}{\sqrt{1 + c_{zb}}} \quad (19)$$

$$\tau_{oi} = \rho c_b^2 u_{bi} \sqrt{u_{bj}^2 + w_b^2} \quad (20)$$

$$w_b = \frac{\partial z_b}{\partial t} + u_{bi} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (21)$$

$$c_b = \frac{1}{\frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z_b - (z_0 - d_r/4)}{2d_r} \right) + 8.5} \quad (22)$$

ここで,  $\kappa (=0.41)$ : カルマン定数,  $d_r$ : 代表粒径である。底面摩擦係数 $c_b$ は, 対数則分布から底面流速と摩擦速度を関係付けて式(22)のように与えた。対数則の原点位置は, 河床表面高 $z_0$ から $d_r/4$ だけ下がった位置とした。 $\bar{\nu}_t$ と $\nu_{ts}$ は, 水深平均の乱れエネルギーの輸送方程式および水面の乱れエネルギーの輸送方程式から評価する<sup>3)</sup>。また,  $\tau_{si}$ による乱れエネルギーの生産は以下のように定式化し, 水深平均および水面の乱れエネルギーの輸送方程式<sup>3)</sup>の生産項に付与した。

$$PROD_{sw} = \frac{1}{h} \left( \frac{\tau_{si}}{\rho} \sqrt{(u_{swi} - u_{si})^2} \right) \quad (23)$$

## (2) 基礎方程式系の数値解析方法

非圧縮性流体の三次元解析では, 圧力のポアソン方程式を介して, 連続式と運動方程式を満たす流速・圧力場が求められる。水平方向の流速鉛直分布形を仮定するQ3D-FEBS-FWIでは, 連続式から水平方向流速と鉛直方向流速の関係が式(2)のように規定される。このため, 式(2)と式(5)~式(9)の連続式と運動方程式を満たすように流速・圧力場が決定される必要がある。

式(2)を水深積分することで水深平均の鉛直方向流速は式(24)のように求まり, その時間微分は式(25)となる。

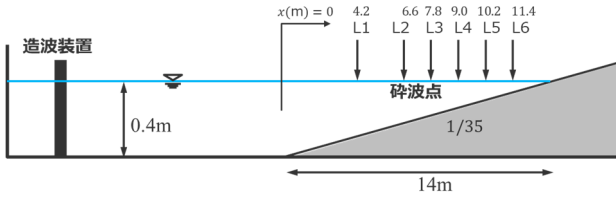


図-2 Cox<sup>11)</sup>の実験概要

$$W = \frac{\partial z_s}{\partial t} - \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial t} + U_i \left( \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{h} \left\{ \frac{1}{10} \frac{\partial (u_{si} - U_i) h^2}{\partial x_i} + \frac{1}{20} \frac{\partial (u_{si} - u_{bi}) h^2}{\partial x_i} \right\} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} &= \frac{\partial U_i}{\partial t} \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{11}{2h} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( h^2 \frac{\partial U_i}{\partial t} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \frac{\partial h}{\partial t} \\ &+ \frac{\partial^2 z_b}{\partial t^2} + U_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial z_b}{\partial t} \right) \\ &- \frac{1}{h^2} \frac{\partial h}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{(u_{si} - U_i) h^2}{10} + \frac{(u_{si} - u_{bi}) h^2}{20} \right] \right\} \\ &+ \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{h^2}{10} \frac{\partial (u_{si} - U_i)}{\partial t} + \frac{h^2}{20} \frac{\partial (u_{si} - u_{bi})}{\partial t} \right] \\ &+ \frac{1}{h} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{(u_{si} - U_i) h}{5} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{(u_{si} - u_{bi}) h}{10} \frac{\partial h}{\partial t} \right] \right\} \quad (25) \end{aligned}$$

嶋原<sup>10)</sup>を参考に水平方向の水深積分運動方程式と、水面及び底面上の運動方程式を次式のように書き直す。

$$\frac{\partial U_{si}}{\partial t} = f_i - \frac{2}{3} \frac{\partial p_{ab}}{\rho \partial x_i} \quad (26)$$

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} = f_{si} \quad (27)$$

$$\frac{\partial u_{bi}}{\partial t} = f_{bi} - \frac{\partial p_{ab}}{\rho \partial x_i} \quad (28)$$

$f_i$ ,  $f_{si}$ ,  $f_{bi}$ は、式(6), 式(8), 式(9)のうち、式(26), 式(27), 式(28)に現れない全ての項を含む。これらを式(25)に代入した後、式(7)の鉛直方向の水深積分運動方程式に代入し、整理すると以下に示す底面の非静水圧 $p_{ab}$ に関するポアソン方程式を導くことが出来る。

$$\begin{aligned} \frac{p_{ab}}{\rho} &= \frac{9}{20} h \frac{\partial}{\partial x_i} \left( h \frac{\partial p_{ab}}{\rho \partial x_i} \right) - h \left( \frac{13}{60} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \frac{\partial p_{ab}}{\rho \partial x_i} \\ &- h \frac{1}{2} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \frac{\partial h}{\partial t} - h \frac{1}{2} \frac{\partial (hf_i)}{\partial x_i} + hf_i \left( \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \\ &- \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial t} \left( \frac{1}{10} \frac{\partial (u_{si} - U_i) h^2}{\partial x_i} + \frac{1}{20} \frac{\partial (u_{si} - u_{bi}) h^2}{\partial x_i} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{h^2 (f_{si} - f_i)}{10} + \frac{h^2 (f_{si} - f_{bi})}{20} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{(u_{si} - U_i)}{5} + \frac{(u_{si} - u_{bi})}{10} \right) h \frac{\partial h}{\partial t} \right] \\ &- \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \bar{v}_t \left( \frac{\partial h W}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} + u_s - u_b \right) \right] \\ &+ U_i h \frac{\partial W}{\partial x_i} + \bar{S} \frac{\tau_{bz}}{\rho} \end{aligned}$$

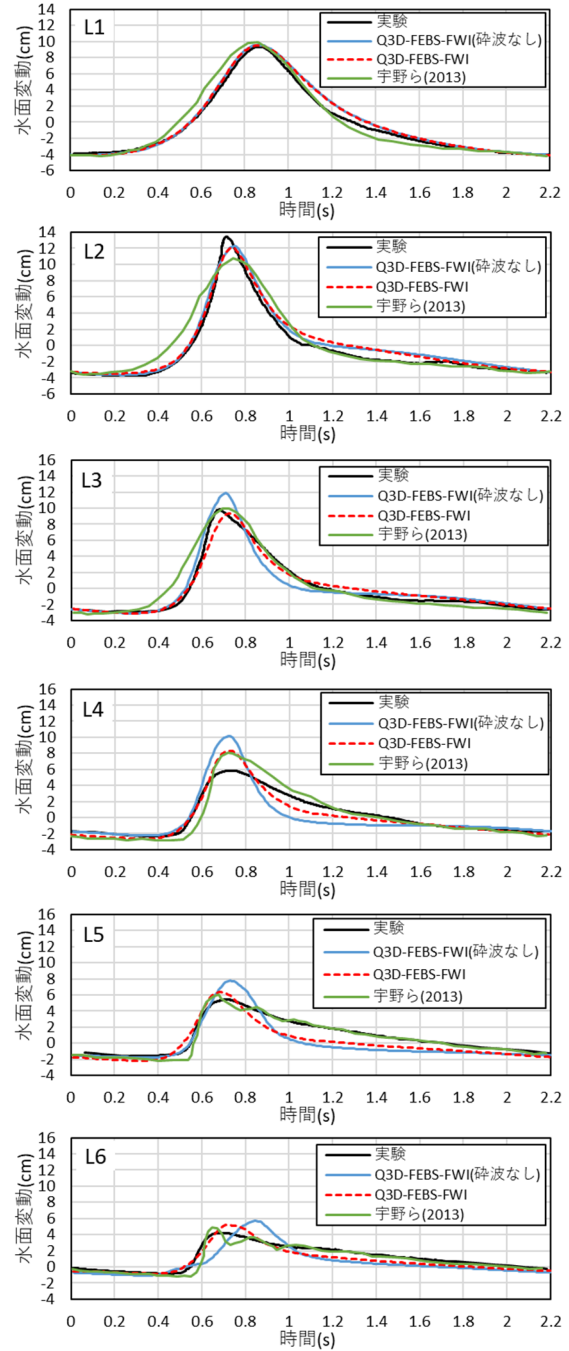


図-3 実測と解析による静水面からの水面変動の比較

$$- \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \bar{v}_t \left( \frac{\partial h W}{\partial x_i} + u_s - u_{bi} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \right] \quad (29)$$

上式をSOR法等の反復計算を用いて解くことにより、従来のQ3D-FEBSで無視されていた式(7)の第1項 $\partial W / \partial t$ を考慮して、流速・圧力場の計算を行うことが可能となる。

### 3. 洪水流と波浪の一体解析に向けたQ3D-FEBS-FWIの適用性の検討

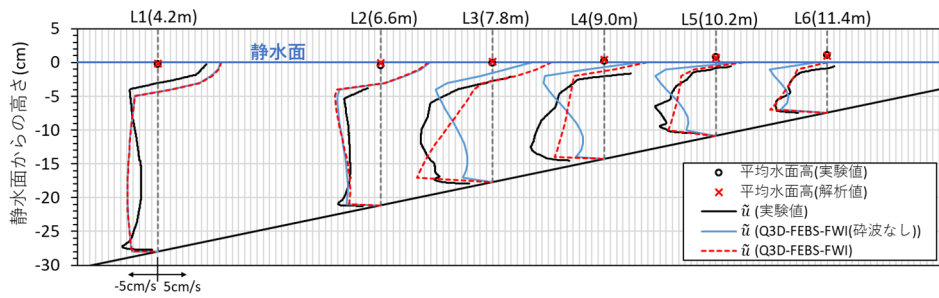


図4 実測と解析による静水面より下方での位相平均した水平方向流速の鉛直分布の比較

(1) 波の伝搬・変形と崩れ砕波への適用性

Cox<sup>11)</sup>は、図-2 に示す一様斜面に規則波を入射した崩れ砕波の実験を行い、L1~L6 地点で水面変動、流速鉛直分布を観測している。宇野ら<sup>12)</sup>は、Boussinesq 方程式と砕波による乱れの生産・逸散過程を考慮した乱れエネルギーの輸送方程式を解くとともに、波高水深比 ( $H/h$ ) が閾値を超えた場合に浅水流方程式に切り替える (非静水圧を無視する) ことで、Cox の実験の再現を試みている。本研究では、実験と宇野らの解析結果との比較から、Q3D-FEBS-FWI の波の伝搬・変形と崩れ砕波への適用性を検討する。

実験では水深 0.4m の水平床区間において造波されているが (図-2)、水深が浅く正弦波を与えることは出来ない。このため、解析では、宇野ら<sup>12)</sup>に習い正弦波を与えることが可能な水深 1.5m となるまで斜面部分を沖側に延伸し、十分な水深を確保した上で波高 13.0cm、周期 2.2s の正弦波を入射した。河床抵抗は実験と同じ 1mm を代表粒径  $d_r$  として与えて式(20)から評価した。実験と同様に波を与え続け初期条件の影響が消えた状態から 50 波分の解析データを取得し、波の周期の各位相の平均値を求めて実験結果と比較した。

図-3、図-4 は、L1~L6 地点における実験と解析の静水面からの水面変動、および静水面より下方での位相平均 (各位相の流速を平均) した水平方向流速  $\bar{u}$  の鉛直分布の比較である。位相平均の水平方向流速  $\bar{u}$  は、Q3D-FEBS-FWI の解析結果から各瞬間の静水面より下方の水平方向流速を取得し、これを波の周期で平均化して求めている。

実験では、L2 地点と L3 地点の間で砕波が生じている。青の実線で示す Q3D-FEBS-FWI (砕波なし) は、砕波前の L2 地点まで実測を良好に説明している。一方、L3 地点以降は乱れの影響により波高が減衰するものの実測を十分に説明できていない。また、図-4 に示すように、実験は砕波による戻り流れの影響を受けて L3 地点以降は、底面付近において波の進行方向と逆向きの流速が大きくなるが、その特徴を捉えられていない。これは、水面を平面座標の一関数で表現する水深積分モデルでは、水面の大変形を伴う砕波現象の解析に限界があるものと考えている。図-3、図-4 の赤の点線は、崩れ水塊の運動を水面下の流れとともに解析し、砕波の影響を考慮した

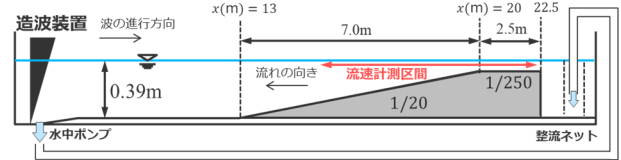


図-5 小林ら<sup>13)</sup>の実験概要

Q3D-FEBS-FWI の解析結果である。砕波を考慮しない場合に比べて、実験の水面変動と位相平均の流速鉛直分布の再現性が向上しているのが分かる。なお、本解析では境界混合係数  $f=0.02$ 、崩れ水塊が水面下に戻る速度  $u_{sink}=0.01m/s$  を与えている。これらは実験との対応や崩れ水塊の挙動などを確認しながら試行錯誤的に定めたものであり、引き続き検討を進めて行く必要がある。

図-3 の実験結果のように、砕波後は非静水圧の影響 (分散項) に対し、流れの非線形性が卓越することで波形が前傾化するが、Q3D-FEBS-FWI は波形の前傾化が鈍い傾向にある。また、図-4 の位相平均の流速鉛直分布は、砕波点直下の L3 地点で顕著のように底面付近の戻り流れが実験に比べて大きく計算される傾向にある。この理由として、底面付近で平衡状態を仮定して渦動粘性係数を与えていることが考えられる (式(19))。非定常性の大きな場では、このような仮定に課題があるものと思われ、河床変動解析にも密接に関わるため、さらなる検討が必要である。このような課題は残すものの、図-3 と図-4 に示したように Q3D-FEBS-FWI は波の伝搬・変形、崩れ砕波の解析に十分適用可能と考えられる。

(2) 波・流れ共存場への適用性

小林ら<sup>13)</sup>は、図-5 に示す河口部から河口テラスの区間を模した水路に波高 6.0cm、周期 1.9s の規則波を入射し、これに水中ポンプを使用して流量 4200cm<sup>3</sup>/s の流れを波の進行方向と逆向きに与えることで、波・流れ共存場の実験を実施し縦断的な波高  $H_x$ 、平均水位  $\eta_{tm}$  の計測を行うとともに図中の区間で流速鉛直分布を計測している。解析では、流量 4200cm<sup>3</sup>/s の定常流を作成した後、3. (1) と同様の方法で正弦波を入射した。実験と同様に波を与え続け初期条件の影響が消えた状態から 54 波分の解析データを取得し、波の周期の各位相の平均値を求めて実験結果と比較した。河床抵抗は実験と同じ 0.23mm を代表粒径  $d_r$  として与えて式(20)から評価した。  $f$  と  $u_{sink}$  は

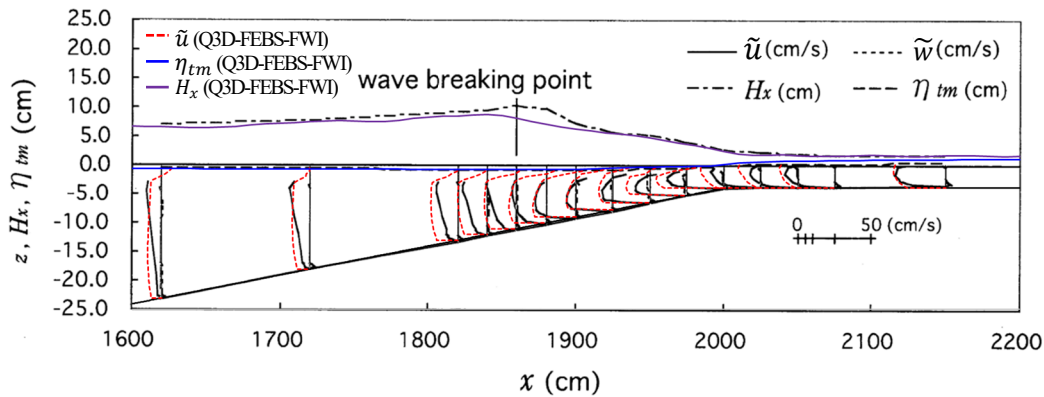


図-6 実測と解析による波高 $H_x$ と平均水位 $\eta_{tm}$ の縦断分布, 位相平均の水平方向流速 $\tilde{u}$ の鉛直分布の比較 (小林ら<sup>13)</sup>の図-4に加筆)

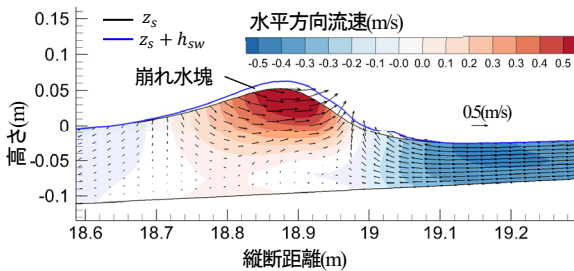


図-7 Q3D-FEBS-FWIによる砕波点付近の解析結果

3. (1)で用いた値を使用した。

図-6は、小林ら<sup>13)</sup>の図にQ3D-FEBS-FWIの解析結果を重ねたものである。流速は位相平均の値であり、水平方向流速 $\tilde{u}$ のみを比較している。実験結果が示すように波・流れ共存場では波の影響を受けて、最大流速が水面より下方に生じる。Q3D-FEBS-FWIの解析結果は、その傾向を捉えていることが分かる。一方、砕波点付近から沖合にかけては、3. (1)の結果と同様に、底面付近の流速が実験に比べて大きくなる傾向にある。また、青の実線で示すように、河口部に相当する $x=2000\sim 2200\text{cm}$ の区間では、波の影響により平均水位が上昇するが、Q3D-FEBS-FWIは実験に比べて水位上昇量が大きく計算されている。その一方で同区間の流速は、Q3D-FEBS-FWIの方が実験よりも大きい傾向にあり矛盾が見られるため、実験の精度も含めて検討が必要である。紫の実線で示す波高の縦断分布は、実験に比べて波の減衰が早いものの砕波後の波高を説明できている。

図-7は砕波点付近のある瞬間の解析結果である。黒実線は水位 $z_s$ 、青実線は水位 $z_s$ に崩れ水塊の水深 $h_{sw}$ を加えたものである。本解析では、式(15)より砕波判定を行い、その後、崩れ水塊の運動を解析する。解析では波峰のやや前方で砕波が発生しており、この点は既往研究<sup>7)</sup>とほぼ同様の傾向を示している。一方、崩れ水塊は波峰前面を中心に存在するものと考えられるが、図-7に示す崩れ水塊(黒実線と青実線に挟まれた部分)は、波峰付近の水深 $h_{sw}$ がやや大きく計算される傾向にある。これは、図-6に示した砕波点付近の波高が実験に比べて低く計算される理由の一つと考えられる。

これらの結果から、Q3D-FEBS-FWIの枠組みにより洪水流と波浪の一体解析が可能と考えられる。今後、2.(1)で述べた砕波点付近での流速鉛直分布の表現方法や崩れ水塊との鉛直方向の運動量交換の影響を含め、本研究で明らかになった課題を解決し河口部の実問題に応用できるように研究を進めていく予定である。

#### 4. 結論

本研究では、底面の非静水圧のポアソン方程式を導出するとともに、水面下の流れと不連続に挙動する崩れ水塊を考えることで、河川の洪水流解析に実績のある非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS)を波浪の伝搬・変形、崩れ砕波に適用できるように拡張した(Q3D-FEBS-FWI)。

崩れ水塊と水面下の流れの相互作用を考慮して解析することにより、Q3D-FEBS-FWIにより波の伝搬・変形、砕波帯や波・流れ共存場における位相平均の流速鉛直分布について、その特徴を説明出来ることを明らかにした。

河川と海岸では、土砂移動の捉え方が異なり、このことが河口部の土砂動態を議論する際の大きな課題になっている。Q3D-FEBS-FWIは、土砂移動に重要な底面付近の流れも含めて、洪水流と波浪を同じ方程式系で計算出来るため、今後、崩れ水塊の運動方程式や水面下の流れとの相互作用の評価方法等を改良することにより、河川と海岸の土砂移動を統一的に評価できると期待される。

謝辞：本研究ではJSPS科研費JP 23K04050の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### REFERENCES

- 1) Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijse, L.H: A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104(C4), 1999.
- 2) 楳田真也, 根岸和憲, 由比政年: 手取川河口域における洪水・波浪による地形変化及び土砂移動過程,

- 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.75, No.2, pp. I\_631-I\_636, 2019. [Umeda, S., Negishi, K. and Yui, M.: Numerical study on morphological change and sediment transport at the mouth of Tedor River, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B2 (Coastal Engineering), Vol.75, No.2, pp.I\_631-I\_636,2019.]
- 3) 竹村吉晴, 福岡捷二: 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019. [Takemura, Y. and Fukuoka, S.: Analysis of the flow in undular and hydraulic jump stilling basins using non-hydrostatic quasi-three dimensional model considering flow equations on boundary surfaces, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019.]
  - 4) 田島芳満, Madsen, O.: Surface Roller による影響を考慮した戻り流れの鉛直分布のモデリング, 土木学会論文集, No.803, II 73, pp.133-144, 2005. [Tajima, Y. and Madsen, O.S.: Modeling surface rollers and undertow velocity profiles, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.803, II73, pp.133-144, 2005.]
  - 5) 竹村吉晴, 福岡捷二, 渡辺洋: 洪水流と波浪による阿賀野川河口テラスの形成と消失過程の考察, 土木学会論文集, Vol.79, No.17, 23-17088, 2023. [Takemura, Y., Fukuoka, S and Watanabe, H.: A study of the formation and erosion processes of the river mouth terrace in the agano river by flood flows and waves, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.79, No.17, 23-17088, 2019.]
  - 6) Castro-Orgaz, O. and Hager, W.H.: Non-Hydrostatic Free Surface Flows (Advances in Geophysical and Environmental Mechanics and Mathematics), Springer, pp.1-696, 2017.
  - 7) Nadaoka, K., Ono, O. and Kurihara, H.: Analysis of Near-Crest Pressure Gradient of Irregular Water Waves As a Dynamic Criterion of Breaking, *Proc. The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, 1997.
  - 8) 福岡捷二, 藤田光一, 新井田浩: 樹木群を有する河道の洪水位予測, 土木学会論文集, No.447, II 19, pp. 17-24, 1992. [Fukuoka, S., Fujita, K. and Niida, H.: Prediction in flood water level of river courses with vegetation, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.447, II 19, pp. 17-24, 1997.]
  - 9) 酒井哲郎: 斜面上の砕波による乱れ, 土木学会論文集, No.357, II 3, pp. 207-216, 1985. [Sakai, T: Turbulence generated by wave breaking on beach, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.357, II 3, pp. 207-216, 1985.]
  - 10) 嶋原良典, 藤間功司: 津波数値解析における分散波理論モデルの適用性と新しい数値計算法の提案, 土木学会論文集 B, Vo. 63, No.1, pp.51-66, 2007. [Shigihara, Y. and Fujima, K.: Adequate numerical scheme for dispersive wave theory for tsunami simulation and development of new numerical algorithm, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B*, Vol.63, No.1, pp.51-66, 2007.]
  - 11) Cox, D.T.: Experimental and numerical modeling of surf zone hydrodynamic, Doctoral Thesis, University of Delaware, pp.1-293, 1995.
  - 12) 宇野喜之, 平山克也: プシネスクモデルによる砕波帯内波・流れ場の推定精度の向上に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I\_61-I\_65, 2013. [Uno, Y. and Hirayama, K.: Improvement of estimation accuracy of waves and currents in the surf zone by boussinesq wave model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol.69, No.2, pp.I\_61-I\_65, 2013]
  - 13) 小林英樹, 田中博通: 波・流れ共存場の平均流速分布に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.49, pp.21-25, 2002. [Kobayashi, H. and Tanaka, H.: A study on mean flow velocity distribution at wave-current interaction field, *Proceedings of coastal engineering*, JSCE, Vol. 49, pp.21-25, 200.]

(Received May 31, 2024)

(Accepted September 15, 2024)

## DEVELOPMENT OF INTEGRATED ANALYSIS METHOD FOR FLOOD FLOWS AND WAVES USING DEPTH-INTEGRATED FLOW MODEL

Yoshiharu TAKEMURA and Shoji FUKUOKA

This paper aims to develop a practical integrated analysis method of flood flows and waves. For this purpose, the quasi three-dimensional flow analysis method(Q3D-FEBS) has been extended by reconsidering the basic equation system and its numerical procedure to be applicable to wave propagation and spilling wave breaker (Q3D-FEBS-FWI). The applicability of the Q3D-FEBS-FWI was examined in experiments of spilling wave breaker and wave-current interactions. From these studies, it was demonstrated that Q3D-FEBS-FWI can explain the characteristics of wave propagation, as well as the phase-averaged vertical velocity distribution in the surf zone and wave-current coexistence field. Additionally, the challenges for developing an integrated analysis method for flood flows and waves were clarified.