

洪水流・波浪・潮位変動が共存する河口部の流れ解析に向けた Q3D-FEBS-FWI の境界条件に関する研究

竹村 吉晴¹・福岡 捷二²

¹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)

²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

本論文では、著者らの開発した洪水流と波浪の一体解析法(Q3D-FEBS-FWI)により、洪水流・波浪・潮位変動の共存する河口部(河口周辺の河道及び沿岸域)の流れを解析するための Q3D-FEBS-FWI の境界条件について検討した。海岸分野で開発された造波ソースとエネルギー減衰帯を用いた造波手法を Q3D-FEBS-FWI に導入するとともに、エネルギー減衰帯においては、波浪の周期に対して洪水流と潮位の時間変動スケールが十分大きい点に着目し、流速の波動成分のみを減衰させる手法を考案した。そして、波流れ共存場の既往実験の再現計算および数値的検討を実施し、本手法により、洪水流・波浪・潮位変動が相互に影響を及ぼし合う河口部の流れを解析できる可能性を示した。

Key Words: Q3D-FEBS-FWI, flood-wave-tide interactions, depth integral model, wave generation

1. 序論

河川と海が接続する河口部(河口周辺の河道及び沿岸域)では、洪水流・波浪・潮位変動が共存し、これらが相互に影響を及ぼし合うことで複雑な流れと土砂移動が生じる。河口は河川の起点であり、そこでの水位変化は河道の長い区間に影響を及ぼすことになる。また、洪水時に河川から大量に流出した土砂は河口沖に堆積し、河口テラスを形成する。その後、波浪の作用により河口テラスが緩やかに消失する過程で、河口及び周辺海岸に土砂が輸送される。これらの現象を解明し、河口部の適切な管理に役立てていくためにも洪水流・波浪・潮位変動を考慮した河口部の流れと土砂移動の解析手法の確立が求められる。

著者らは、河川の洪水流解析に実績のある非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS¹⁾)を拡張した洪水流と波浪の一体解析法を開発してきた(Q3D-FEBS-FWI²⁾)。Q3D-FEBS-FWI を用いることにより、土砂移動についても統一的手法で評価可能となり、河口部における流れと土砂移動の解明に大きく貢献することが期待される。このためには、洪水流・波浪・潮位変動が共存する河口部の流れを、適切な境界条件の下で解析する必要がある。

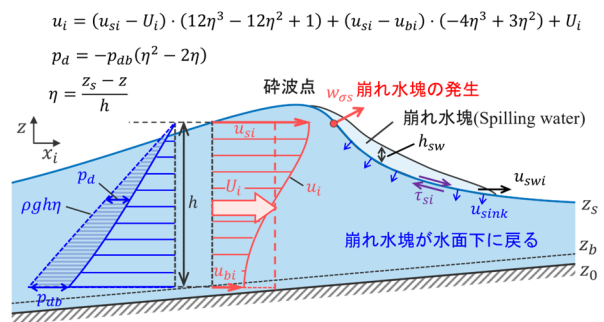


図-1 Q3D-FEBS-FWI の模式図

海岸分野では、造波ソース(湧き出し)とエネルギー減衰帯を組み合わせることで、波の非線形性や構造物などによる反射波の影響を受ける有限領域において、任意の波を造波する技術が確立されてきている³⁾。一方、これらの手法は、潮位変動による海面高の変化や、河川からの流出流量の影響は考慮されておらず、河口部の流れの解析に適用するためには、これらの点に対する工夫が必要と考えられる。

本研究では、造波ソースおよびエネルギー減衰帯を導入し、洪水流・波浪・潮位変動が共存する河口部の流れを解析するための Q3D-FEBS-FWI の境界条件について検

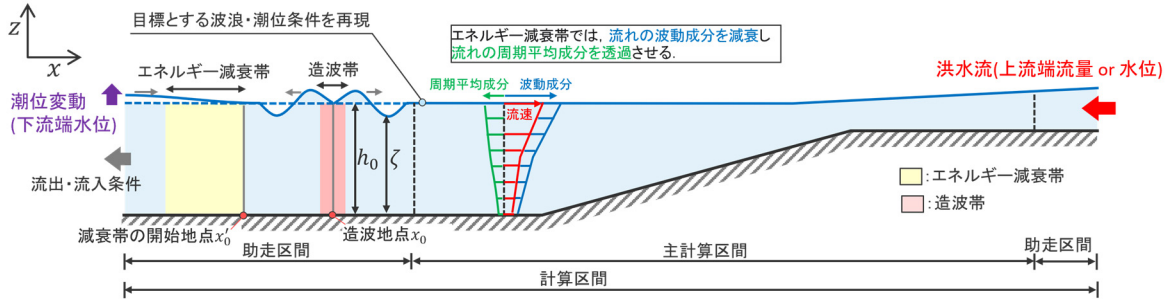


図-2 洪水流・波浪・潮位変動を考慮した境界条件の設定法の模式図

討する。そして、小林・田中⁴⁾による波流れ共存場の実験を対象にその妥当性を検証することを目的とする。あわせて、実用的な計算格子幅および砕波条件の設定方法についても検討する。

2. 洪水流・波浪・潮位変動を考慮した境界条件の設定法

(1) 造波ソースとエネルギー減衰帯を導入した Q3D-FEBS-FWI の基礎方程式

図-1 に Q3D-FEBS-FWI の模式図を示す。Q3D-FEBS-FWI は、水平方向流速と非静水圧の鉛直分布をそれぞれ 3 次関数と 2 次関数で仮定する。そして、砕波により発生する崩れ水塊を図-1 のように定義し、水面下の流れと崩れ水塊の運動を相互作用を考慮しながら解析することで、洪水流と波浪を一体的に解析する手法である。以下に、造波ソース(湧き出し)とエネルギー減衰帯を導入した Q3D-FEBS-FWI の基礎方程式系を示す。ここでは、基礎方程式のみを示すものとし、解析法の詳細は既報²⁾を参照されたい。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_i}{\partial x_i} = -q_{sw} + S \quad (1)$$

$$h \frac{\partial U_i}{\partial t} + h U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial h p_{ab}}{\rho \partial x_i} - \frac{p_{ab}}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - q_{sw} \cdot u_{csi} + S \cdot U_i - D_{xy} \cdot (U_i - \tilde{U}_i) - \frac{\partial h \Delta u_i \Delta u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[h \bar{v}_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \tilde{S} \frac{\tau_{si}}{\rho} - \hat{S} \frac{\tau_{bi}}{\rho} \quad (2)$$

$$h \frac{\partial W}{\partial t} + h U_i \frac{\partial W}{\partial x_i} = \frac{p_{ab}}{\rho} + S \cdot W - D_z \cdot W - \hat{S} \frac{\tau_{bz}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\bar{v}_t \left(\frac{\partial h W}{\partial x_i} + u_s - u_{bi} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - 2 \frac{p_{ab}}{\rho h} \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + S_s \cdot u_{si} - D_{xy} \cdot (u_{si} - \tilde{u}_{si}) + \frac{q_{sw}}{h} \frac{\partial u_i}{\partial \eta} \Big|_s + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{v}_{ts} \left(\frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{sj}}{\partial x_i} \right) \right] + \tilde{S} \frac{v_{ts}}{h^2} \frac{\partial^2 u_i}{\partial \eta^2} \Big|_s + \hat{S} \frac{\tau_{si}}{\rho a h} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_{bi}}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{\partial p_{ab}}{\rho \partial x_i} + u_{bi} \cdot S_b - D_{xy} \cdot (u_{si} - \tilde{u}_{si}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{v}_{tb} \left(\frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{bj}}{\partial x_i} \right) \right] + \tilde{S} \frac{\tau_{bi} - \tau_{oi}}{\rho \delta z_b} \quad (5)$$

$$\frac{\partial h_{sw}}{\partial t} + \frac{\partial h_{sw} u_{swi}}{\partial x_i} = q_{sw} \quad (6)$$

$$\frac{\partial h_{sw} u_{swi}}{\partial t} + \frac{\partial u_{swj} u_{swi} h_{sw}}{\partial x_j} = q_{sw} \cdot u_{csi} - \tilde{S} \frac{\tau_{si}}{\rho} \quad (7)$$

ここで、 $i, j = 1, 2$ ($1=x$ 方向, $2=y$ 方向), U_i : i 方向の水深平均流速, W : 鉛直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, h : 水深, z_s : 水位, ρ : 水の密度, g : 重力加速度, $\Delta u_i (= u_i - U_i)$: i 方向流速の水深平均値からの偏差成分, \bar{v}_t : 渦動粘性係数, τ_{si} : 水面に作用する i 方向のせん断応力, τ_{bi} : 底面に作用する i 方向のせん断応力, τ_{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, \tilde{S}, \hat{S} : 単位面積当たりの水面と底面の面積である。 $\bar{\quad}$ は水深平均の値, $\tilde{\quad}$ は波の周期で平均した値を意味し, 下付き文字の s と b は水面と底面での値をそれぞれ意味する。

式(1)~式(5)右辺の S, S_s, S_b は造波ソース, D_{xy} と D_z は減衰項の係数である。これらを用いた造波方法とエネルギー減衰方法の詳細は次節で説明する。

(2) 洪水流・波浪・潮位変動を考慮した境界条件の設定方法

図-2 は、洪水流・波浪・潮位変動を考慮した Q3D-FEBS-FWI の境界条件の設定法を示す模式図である。計算区間の上流端には洪水流の流量または水位を与え、助走区間で流速分布を発達させて、主計算領域の上流端と接続する。計算区間の下流端水位には潮位を与え、造波帯で波を生成することにより、主計算領域の下流端で目標とする波浪・潮位条件を再現する。造波帯からは波が前後両方向に伝搬するため、エネルギー減衰帯において波を減衰させ、計算区間下流端からの反射波を抑制する。この際、洪水流や潮位変動による流速成分まで減衰させ

てしまうと、河川から海に流入する水が主計算領域内に貯まり続けたり、潮位変動の影響が主計算領域に伝わらなくなる問題が生じる。このため、エネルギー減衰帯では、流速の波動成分のみを減衰させる必要がある。

まず、造波方法³⁾について説明する。規則波の理論に基づいて算出された水深 $\zeta(t)$ と流速分布 $U_0(\zeta, t)$ に従い単位幅流量と水面流速、および底面流速を求める。これらを格子幅で除すことにより、目標とする理論波形に対応した湧き出し量を算出し、造波ソースを式(8)～式(10)のように与える。ここで、造波ソースに2が乗じられているのは、波が造波帯の前後両方向に伝わるためである。

$$S = \phi(x) \frac{2}{\Delta x} \int_0^{\zeta} U_0(z, t) dz \quad (8)$$

$$S_s = \phi(x) \frac{2}{\Delta x} U_0(\zeta, t) \quad (9)$$

$$S_b = \phi(x) \frac{2}{\Delta x} U_0(0, t) \quad (10)$$

$$\phi(x) = \begin{cases} \frac{1}{2B} \left[1 + \cos \frac{\pi(x - x_0)}{B} \right] & , |x - x_0| \leq B \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 ζ : 規則波の水深、 U_0 : 規則波の流速、 Δx : 計算格子幅、 ϕ : 重み関数、 B : 造波帯の半幅である。 ϕ は積分値が1となる重み関数であり、**図-2**に示す造波帯で湧き出し量を分散させることで、滑らかに造波することを目的に導入したものである。

図-2に示すエネルギー減衰帯では、式(2)～式(5)の運動方程式の右辺に減衰項(D_{xy}, D_z が掛かる項)を付与し、流速の波動成分を減衰させる。 D_{xy}, D_z はEricら⁵⁾と同様に次式で与える。

$$D_{xy} = \theta_{xy} \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{|x - x'_0|}{l} \right)^N \quad (12)$$

$$D_z = \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{|x - x'_0|}{l} \right)^N \quad (13)$$

ここで、 h : 水深、 l : エネルギー減衰帯の幅、 x'_0 : エネルギー減衰帯の開始地点、 N : 分布関数の次数、 θ_{xy}, θ_z : 無次元の係数である。

通常、 D_{xy} は流速(U_i, u_{si}, u_{bi})に乘じられるが、洪水流や潮位変動による流速成分までが減衰されてしまうため、上述したとおりこれを回避する必要がある。波浪の周期は数秒から十数秒のオーダーであるのに対し、洪水流および潮位変動の周期は $10^4 \sim 10^6$ 秒のオーダーであり、両者の時間変動スケールには大きな差がある。本研究では、この点に着目し、波の周期で平均した流速(以下、周期平均流速と呼ぶ)からの偏差成分に D_{xy} を乗じることにより、流速の波動成分のみを減衰させることが可能と考えた。式(3)の鉛直方向の水深積分運動方程式については、周期平均した鉛直方向流速はほぼゼロとなるため、数値的な不安定性を回避する目的で W に直接 D_z を

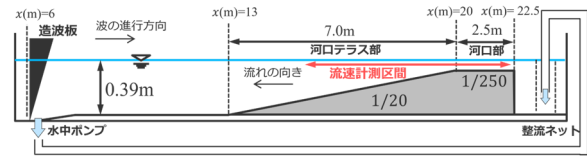


図-3 小林・田中⁴⁾の実験概要

乗じている。

(3) 碎波判定条件の見直し

Q3D-FEBS-FWI²⁾では、水面から流入流出する単位面積あたりの流量 q_{sw} を以下のように定義している。

$$q_{sw} = w_{os} \cdot \delta \quad (14)$$

$$w_{os} = u_{sn} \cdot \delta(x_i) - u_{sink} \quad (15)$$

$$u_{sn} = \frac{1}{\delta} \frac{\partial z_s}{\partial t} \quad (16)$$

ここで、 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.⁶⁾による碎波の判定式から次のように定めている。

$$\delta(x_i) = \begin{cases} 1 & , \partial p / \rho \partial z|_s \geq 0 \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (17)$$

これらにより、碎波地点において、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。

しかし、水面での圧力の鉛直勾配 $\partial p / \rho \partial z|_s$ を高精度に算出するためには、計算格子を波の波長 L や波高 H に対して十分細かく設定する必要がある、実用性の観点から課題が残る。そこで、より柔軟な碎波判定条件として、式(18)に示す水面流速と波速の比を導入する。

$$\delta(x_i) = \begin{cases} 1 & , \sqrt{u_{si}^2 + w_s^2} / \sqrt{gh} \geq \gamma_b \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 γ_b : 碎波発生の閾値である。水面流速と波速の比が γ_b 以上の値をとる場合に碎波が発生したものと判定する。

3. 河口部の流れ解析に向けた Q3D-FEBS-FWI の境界条件の妥当性検証

小林・田中⁴⁾は、**図-3**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0.06m、周期1.9sの規則波を注入し、これに水中ポンプを使用して流量 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 η_{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。本章では、小林・田中の実験条件を対象として、2.で提示した境界条件の設定法の妥当性を検証する。

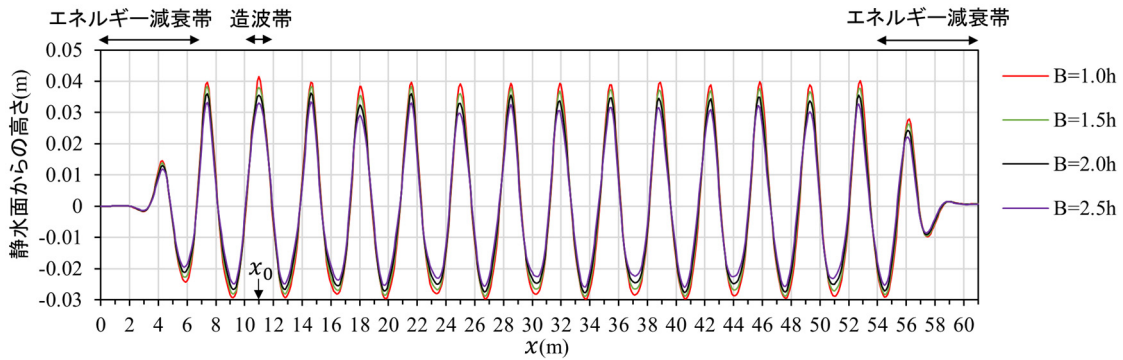


図4 造波帯の半幅Bの違いによる水位縦断分布の比較

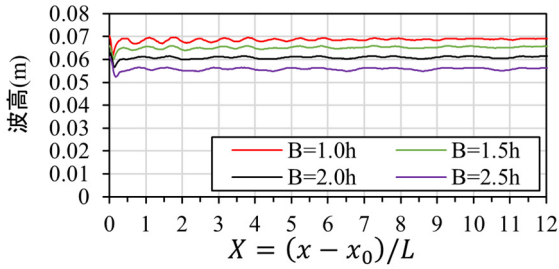


図5 造波帯の半幅Bの違いによる波高縦断分布の比較

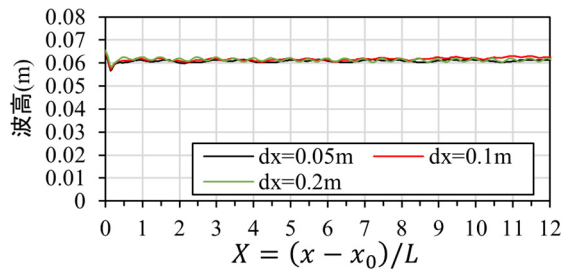


図7 計算格子幅Δxの違いによる波高縦断分布の比較

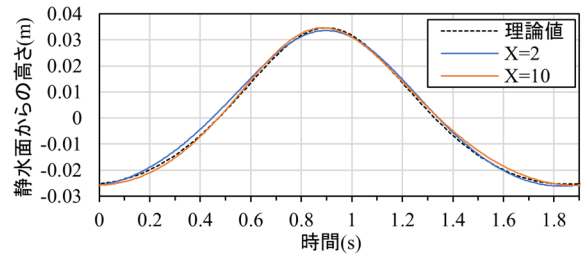


図6 理論波形とX=2, X=10 地点における解析波形の比較

表-1 計算格子幅と波長・波高の関係

Δx (m)	0.01	0.05	0.10	0.20
$\Delta x/L$	1/345	1/69	約1/34	約1/17
$\Delta x/H$	1/6	約0.8	約1.6	約3.3
Δx_L (m)	0.29	1.45	2.90	5.80
Δx_H (m)	0.50	2.50	5.00	10.00

Δx : 実験の再現計算の計算格子幅

Δx_L : 波長比で換算した現地計算格子幅(波長 100m)

Δx_H : 波高比で換算した現地計算格子幅(波高 3m)

(1) 造波方法の妥当性検証

静水深 $h_0=0.39\text{m}$ 、長さ61mの様な仮想水路を作成し、小林・田中⁴⁾と同様に波高0.06m、周期1.9sの規則波を対象として造波方法の妥当性を検証する。Ursell数($=gHT^2/h_0^2$)は約14であることから、磯部ら⁷⁾によるStokes波の第5次近似解を用いて規則波の水深 $\zeta(t)$ と流速 $U_0(z,t)$ を与え、式(8)~式(11)により造波ソースを算定した。水路から水は流出しないものとし、上下流端に波長 $L(=3.45\text{m})$ の2倍程度のエネルギー減衰帯を設けた($N=2, \theta_{xy}, \theta_z=0.1$)。

図4と図5は、造波帯の半幅Bが波の生成結果に及ぼす影響を確認するため、造波開始後、ほぼ安定状態になった時点の水面形と波高の縦断分布について、 $B=1.0h_0, B=1.5h_0, B=2.0h_0, B=2.5h_0$ の条件について比較したものである。図5の横軸は、造波地点からの距離を波長Lで無次元化している。計算格子幅 Δx は0.05m($\Delta x/L=1/69$)である。図4に示すように、反射波の影響が若干見られるものの、造波地点(11m)から波が形成され、エネルギー

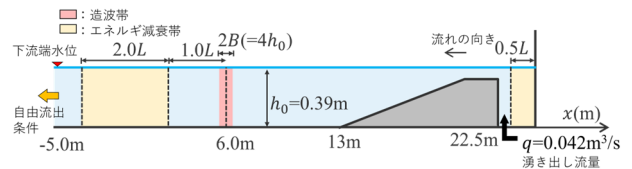


図8 小林・田中の実験⁴⁾の再現計算における造波帯とエネルギー減衰帯の配置図

減衰帯で波が減衰される様子が確認できる。また、図5に示すように、造波帯の半幅Bが波高に及ぼす影響は大きく、Bを静水深 h_0 の2倍とした場合が目標波高0.06mとの整合性が最も高い。図6は、 $B=2h_0$ とした場合のX=2とX=10地点における解析波形と目標とする理論波形を比較したものである。解析波形は理論波形を良好に再現しており、造波地点から十波長先の地点でも波高の減衰は小さいことが確認できる。

図7は、計算格子幅 Δx の影響を確認するため、造波帯の半幅を $B=2h_0$ で固定し、 $\Delta x=0.05\text{m}, 0.1\text{m}, 0.2\text{m}$ とした場合の波高の縦断分布の解析結果を比較したものである。表-1には、各計算格子幅 Δx と波長L、波高Hとの関係を整理している。さらに、実問題への適用性を検討す

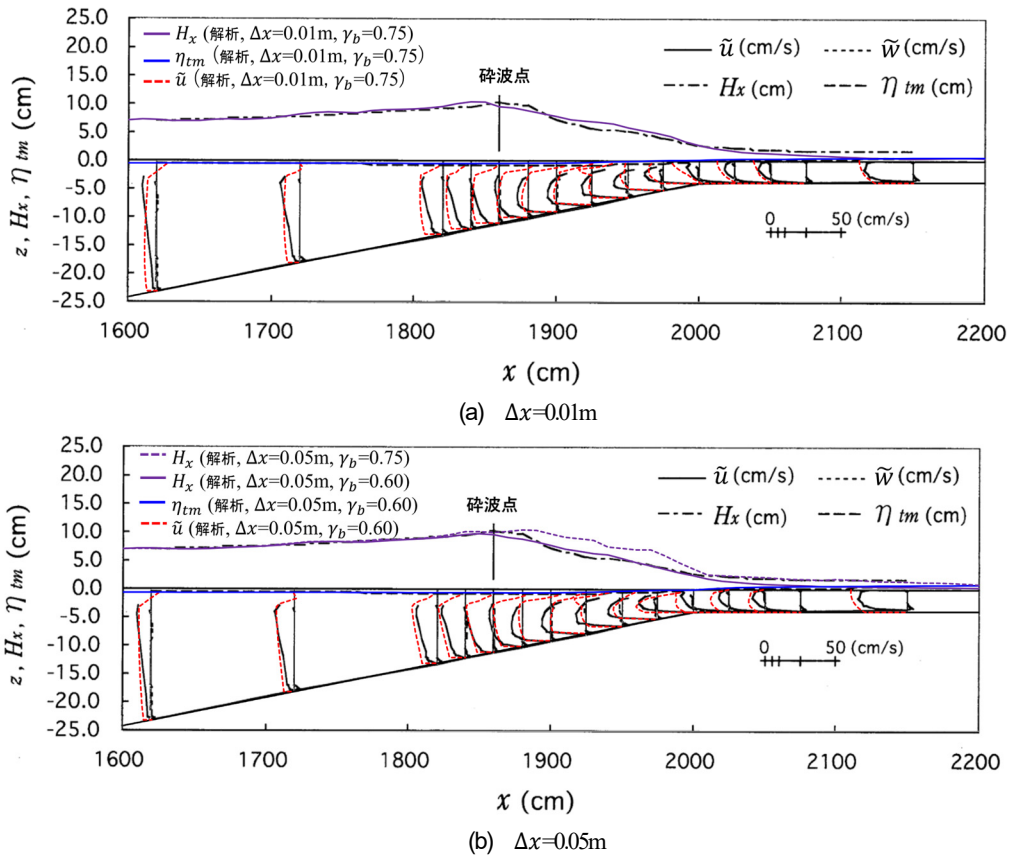


図-9 実測と解析による波高 H_x と平均水位 η_{tm} の縦断分布, 位相平均の水平方向流速 \tilde{u} の鉛直分布の比較 (小林・田中⁴⁾の図-4に加筆)

るため、波長 100m、波高 3m の波浪を想定し、 $\Delta x/L$ および $\Delta x/H$ の比率を基に現地換算した計算格子幅 (Δx_L , Δx_H) を算出している。図-7 に示すように、 $\Delta x = 0.1$ ($\Delta x/L \approx 1/34$), $\Delta x = 0.2$ ($\Delta x/L \approx 1/17$) の比較的粗い計算格子を用いても波高の減衰は小さく、造波帯の幅を適切に設定することにより、目標波形を適切に造波できる可能性が高い。今回は、静水深 h_0 を造波帯幅の指標としたが、より一般性の高い指標の検討が課題である。

(2) 河口部の流れ解析に向けた Q3D-FEBS-FWI の境界条件の妥当性検証

図-8 に示すように、本研究では、小林・田中⁴⁾の実験条件に従い上流端から流量 $0.042\text{m}^3/\text{s}$ を供給し、6.0m 地点で波高 6.0cm、周期 1.9s の規則波を造波する。造波方法は、3. (1) と同様であり造波帯の半幅は $B=2h_0$ とした。実験では、造波板の手前で上流端から供給される流量と同量の水を水中ポンプにより排水している (図-3)。本研究では、河口部の流れ解析を想定し、造波地点から 1 波長下流側に離れた位置にエネルギー減衰帯を設け、下流端に水位 (0m) を与えて計算を実施した。

前節では、計算格子幅 Δx を波長 L の約 $1/17$ まで粗く設定しても解析結果に大きく影響しないことが確認された。一方、波が水深の浅い領域に侵入するにつれて、非線形性の影響が卓越するようになり、波形が前傾化・先鋭化

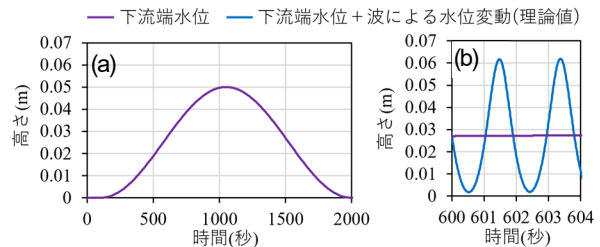


図-10 潮位変動を模した下流端の水位ハイドログラフ

し、碎波が生じることになる。碎波現象の解析においては、波頂付近の先鋭化を再現する必要があるため、波長よりもむしろ波高との関係が計算格子幅の設定においてより重要な要素になるものと考えられる。

図-9 は、計算格子幅を既報²⁾と同様に $\Delta x=0.01\text{m}$ ($\Delta x/H \approx 1/6$) に設定した場合と、 $\Delta x=0.05\text{m}$ ($\Delta x/H \approx 0.8$) に設定した場合の解析結果を、小林・田中⁴⁾の図に重ねて比較したものである。 $\Delta x=0.01\text{m}$ では $\gamma_b=0.75$ 、 $\Delta x=0.05\text{m}$ では $\gamma_b=0.6$ とすることにより、実験による波高 H_x と平均水位 η_{tm} 、および周期平均の流速鉛直分布 \tilde{u} を概ね再現できている。両ケースともに、碎波点の下流において、底面付近の流速が実験値より大きく計算される傾向がある。この点は既報と同様²⁾であり、引き続き検討が必要である。また、実験では、 $x=2000\text{cm}$ より右側の区間において波高がほぼ一定で安定しているのに対し、解析では波

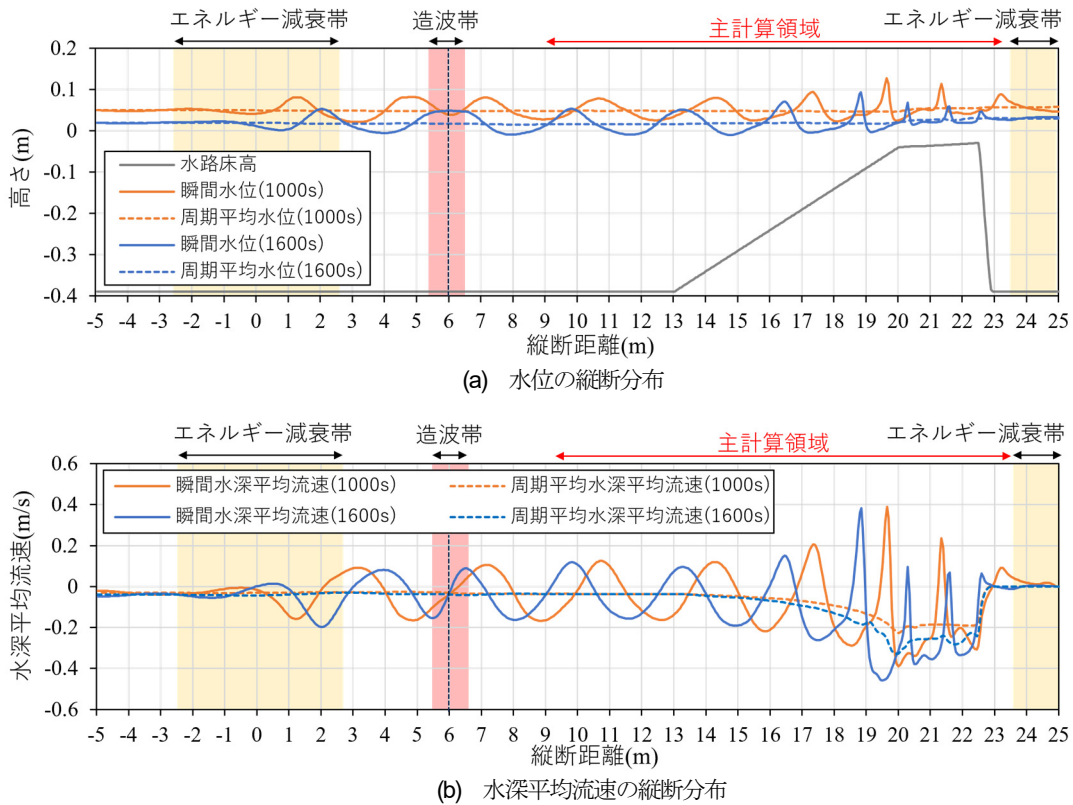


図-11 水位と水深平均流速の瞬間値と周期平均値の縦断分布

高の減衰が確認される。この区間では射流に近い流れとなっており、碎波の判定条件に γ_b を用いたことで、解析上は碎波が発生してしまっていることが原因である。実際の河口部において射流に近い流れが生じる状況は限定されるが、一定の波高水深比以下では碎波が生じないように制約を加えるなどの工夫が必要と考えられる。

図-9に示したように、 γ_b を適切に設定することで、比較的粗い計算格子を用いても Q3D-FEBS-FWIにより、波流れ共存場の流れ場を計算できる可能性がある。一方で、波高に対して計算格子が粗くなると、浅水域での波形の先鋭化を十分に再現できなくなり、底面流速の周期変動に差が生じる点には留意が必要である。これらは土砂移動と密接に関係する問題のため、波流れ共存場における流砂量の評価方法とあわせて検討を進めていく予定である。

次に、潮位変動を考慮した解析が可能か検証するため、図-10(a)に示す潮位変動を模した水位ハイドログラフを下流端の境界条件に与えて解析を実施した。下流端の水位変動周期は波浪の周期(1.9s)の 10^3 倍としている。図-10(b)には、潮位と波浪による水位変動の時間スケールの違いが分かるように両者を重ねて示している。図-11は、1000 秒時点と 1600 秒時点の水位と水深平均流速の瞬間値と周期平均値の縦断分布を示している。図-11(a)に示すとおり、下流端水位に連動して主計算領域の周期平均水位が変化しており、潮位変動の影響がエネルギー

減衰帯で阻害されることなく、主計算領域に伝わることが確認できる。また、周期平均水位の上昇に伴い、波浪が波高を保ったまま遡上する様子も確認できる。図-11(b)から、エネルギー減衰帯において、水深平均流速の瞬間値が縦断的に大きく減衰しているのに対し、水深平均流速の周期平均値は縦断的にほぼ同じ値となり、流速の波動成分のみを適切に減衰出来ていることが分かる。これらの検討から、2. で提示した洪水流・波浪・潮位変動を考慮した境界条件の設定法は、概ね妥当なもの判断できる。

4. 結論

本論文では、海岸分野で開発された造波ソースとエネルギー減衰帯を Q3D-FEBS-FWI に導入し、洪水流・波浪・潮位変動が共存する河口部の流れを解析するための境界条件について検討した。具体的には、造波ソースを分配する造波帯の半幅 B を静水深 h_0 の 2 倍に設定するとともに、周期平均流速からの偏差流速成分に Eric ら⁹⁾の減衰係数を乗じることで、流速の波動成分のみを減衰させた。この手法により、洪水流・波浪・潮位変動の相互作用を考慮して河口部の流れを解析できる可能性を示した。一方、洪水流量が時間的に変化する場合や、波浪・地形条件がより複雑な場合にも同様の手法により、洪水

流・波浪・潮位変動の境界条件を適切に与えることが可能かは不明であり、実河川を対象に検討を進めていく予定である。

近年、河川では河口部を含めて洪水時の水位観測が行われるようになったが、河口部周辺の波浪データはほとんど取得されていない状況にある。今後、本解析手法と観測データの活用により、河口部における洪水時・荒天時の水位変化特性や河川・海岸間の土砂動態の解明を進める上で、河口部における波浪データの取得は重要な課題である。特に河口部における地形変化の影響は波浪場に表れるものと考えられるため、最新の測量技術や画像解析技術を活用し、河口部周辺の波浪情報を面的に把握できるようになれば、本解析手法と組み合わせることで河口テラスの形成・消失過程の解明に貢献することが期待される。こうした観点からも、今後さらに研究を進めていきたい。

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る。

REFERENCES

- 1) 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.]
- 2) 竹村吉晴, 福岡捷二：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, 土木学会論文集, Vol.81, No.16, 24-16202, 2025. [Takemura, Y. and Fukuoka, S.: Development of integrated analysis method for flood flows and waves using depth-integrated flow mode, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Special Issue (Hydraulic Engineering), Vol.81, No.16, pp. 24-16202, 2015.]
- 3) 川崎浩司：VOF 法による数値波動水槽, 第 48 回水工学に関する夏季研修会, B2, pp.1-20, 2012. [Kawasaki, K.: Numerical wave flume based on VOF method, 48th Summer Workshop on Hydraulic Engineering, JSCE, B1, pp.1-20, 2012.]
- 4) 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, 2002.]
- 5) Eric Cruz, 横木裕宗, 磯部雅彦, 渡辺晃：非線形波動方程式に対する無反射境界条件について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.46-50, 1993. [Eric, C., Yokogi, H., Isobe, M. and Watanabe, A.: A Study on Non-Reflecting Boundary Conditions for Nonlinear Wave Equations, *Proceedings of coastal engineering*, JSCE, Vol. 40, pp.46-50, 1993.]
- 6) 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.
- 7) 磯部雅彦, 西村仁嗣, 堀川清司：保存波の摂動解の波高による表示, 第 33 回土木学会年次学術講演会, II, pp.760-761, 1978. [Isobe, M., Nishimura, H. and Horikawa, K.: *The 33rd Annual Meeting of the Japan Society of Civil Engineers*, II, pp. 760-761, 1978.]

(Received May 30, 2025)

(Accepted September 18, 2025)

A STUDY ON BOUNDARY CONDITIONS OF Q3D-FEBS-FWI FOR FLOW ANALYSIS IN RIVER MOUTHS WITH COEXISTING FLOOD FLOWS, WAVES, AND TIDAL FLUCTUATIONS

Yoshiharu TAKEMURA and Shoji FUKUOKA

In this study, the authors examined the boundary conditions of the Q3D-FEBS-FWI to enable flow analysis in river mouths where flood flows, waves, and tidal variations coexist. A wave-generation method utilizing wave source terms and energy dissipation zones was introduced into the Q3D-FEBS-FWI framework. In the energy dissipation zones, a new approach was proposed to attenuate only the wave-induced component of the velocity field, based on the recognition that the temporal scales of flood flows and tidal variations are much longer than the wave period. Reproduction of previously reported experiments on wave-current interactions and numerical investigations demonstrated the potential of this method to analyze complex flow fields in estuarine areas where flood flows, waves, and tides interact.