

三次元波動数値計算による海浜流系の発生機構の解明

長岡技術科学大学	非会員	○秋山	義紀
長岡技術科学大学	正会員	熊倉	俊郎
長岡技術科学大学	正会員	楊	宏選

1.はじめに

海浜流には、岸に沿って流れる沿岸流、岸から沖合に向かって流れる離岸流、沖合から海岸に向かって流れる向岸流などがある。海浜流は、70 年以上にわたる海岸工学の発展とともに、主要な研究テーマの一つとして多くの知見が蓄積されてきた。その中でも、特に問題となるのが離岸流である。離岸流は秒速 2 m/s に達することがあり、流れに巻き込まれると、水泳選手であっても流れに逆らって岸へ戻ることが困難となる。

離岸流は実験による再現が難しいことから、その発生機構の解明には数値計算が用いられている。郭ら¹⁾は、一様な直線海岸に直角に入射する規則波を対象とした二次元波動計算により、離岸流のセル構造が形成されることを示した。しかし、二次元数値計算では、wave setup の海岸線方向の均一性が不安定になることでセル構造が形成されるため、わずかな均一性の崩れによって誘発されるセル構造を十分に評価できない可能性がある。

そこで楊ら²⁾は、碎波モデルを用いず、非圧縮性気液二相流 VOF モデルを用いて Navier–Stokes 方程式を直接数値的に解く三次元波動計算を行った。その結果、二次元計算と同じ条件においても、離岸流のセル構造が形成されることを再現した。しかし、この三次元数値実験は、膨大な計算リソースと計算時間の制約から、1 ケースのみの検討にとどまっている。

そこで本研究では、水深や海底勾配、地形などの条件を変化させた複数ケースについて三次元波動数値実験を行い、離岸流セル

構造の発生・発達特性を検討する。

2.三次元波動数値実験の概要

(1) 数値モデルの概要

三次元波動数値計算には、オープンソースである OpenFOAM v2312 を用いて、非圧縮性気液二相流 VOF モデルを扱うソルバー interFoam をベースに行われている。OpenFOAM は非構造格子に基づく有限体積法を用いる性質上、基礎方程式は座標系に依存するデカルト座標などに展開される偏微分方程式系ではなく、座標系に依存しないベクトル表記が基本である。発散や勾配はソースコード中でそのまま $\text{div}()$ 、 $\text{grad}()$ になっており、プログラムの可読性が高い。三次元波動数値モデルの基礎方程式は以下ようになる。

流体分率 α の移流方程式

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{U}) - \nabla \cdot (\alpha(1 - \alpha) \vec{U}_r) = 0 \quad (1)$$

運動方程

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) - \nabla \cdot \vec{T} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F}_\sigma \quad (2)$$

ここで、 U_r は二つの相の相対流速で圧縮速度、 ρ は密度、 p は圧力、 U は流速、 F_σ は表面張力、 t は時間、 g は重力加速度、 $\vec{T}$ は応力テンソルである。

(2) 数値実験の概要

本研究では、楊ら²⁾の先行研究を参考に 4 ケースを設定した。計算領域は汀線方向 (y 方向) を 1000m、岸沖方向は 750m (x 方向)、鉛直方向 (z 方向) はケースごとに海底勾配によって高さが変わるが、図 1 に w1 の汀線に垂直な断面を示している、各ケースにおける格子サイズ、その他の諸元を表 1 に

三次元波動数値計算による海浜流系の発生機構の解明

長岡技術科学大学 非会員 ○秋山 義紀
長岡技術科学大学 正会員 熊倉 俊郎
長岡技術科学大学 正会員 楊 宏選

示す．入射波は沖から汀線に垂直に入射する．波高は 1.5m, 周期は 10s とした．また，海上では波の発生に伴って水と空気の界面が変動するため，z 軸上端から 4.5m 下方の位置を静水面 ($z=0$) とした．

本研究では，平均場から海浜流を抽出した．平均操作は，入射波が岸に到達し，流れが十分に発達した後に行った．データの保存間隔は 1s である．1s 間隔で平均した場合，計算負荷は小さいものの，瞬時の波面の影響が十分に除去されなかった．そこで，本研究では $\Delta t=0.005s$ 間隔で平均操作を行った．

計算領域を 40 領域に分割し，CPU 48 個，RAM 196 GB を搭載した計算機を用いて数値計算を行った．計算時間は 8,000 s とした．

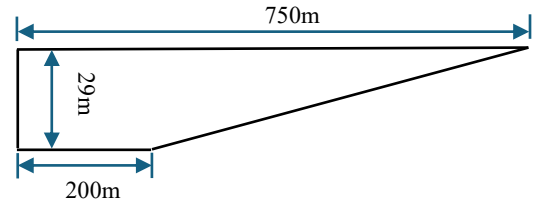


図 1 wavetest1 の計算領域

表 1 計算領域・格子サイズ・その他諸元

	w1	w2	w3	w4
x	750m	750m	750m	750m
y	1000m	1000m	1000m	1000m
z	29m	58m	84m	29m
Δx	2m/1m	2m/1m	2m/1m	2m/1m
Δy	10m/5m	10m/5m	10m/5m	10m/5m
Δz	0.5m/0.25m	0.5m/0.25m	0.5m/0.25m	0.5m/0.25m
沖海水深	24.5m	53.5m	79.5m	24.5m
海底勾配	5.25%	10.50%	15.10%	5.25%
形	一様勾配地形	一様勾配地形	一様勾配地形	カスプ地形

3.数値実験結果

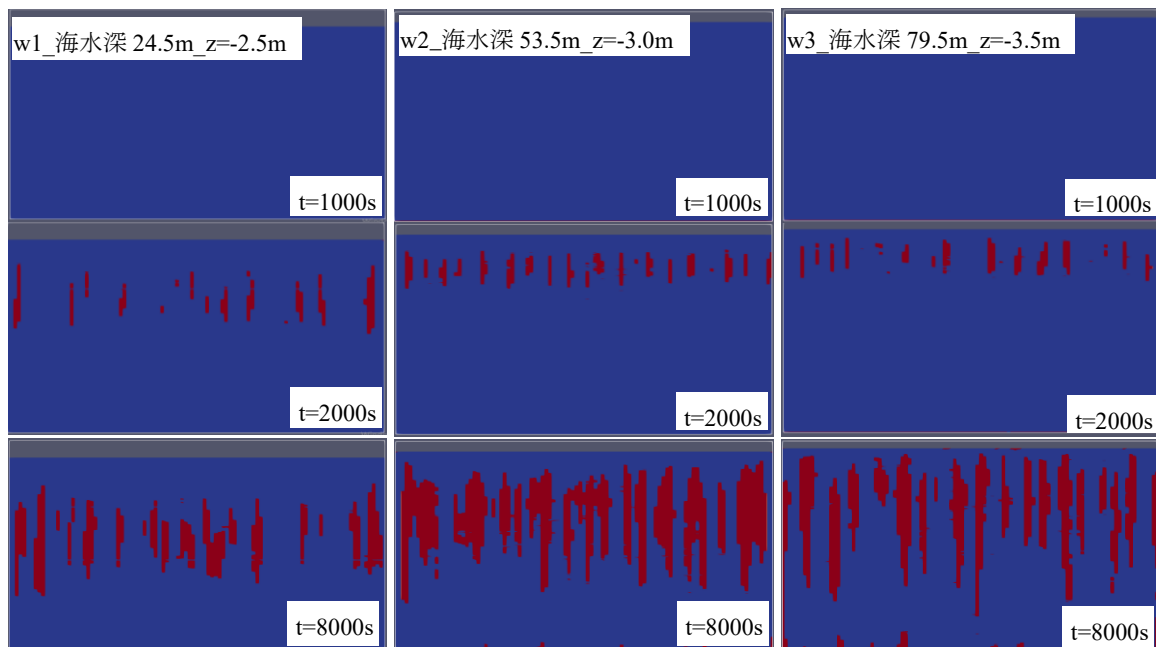


図 2 異なる海水深の水平面における時間経過によるセル構造の発達の比較

上段：1000s 時点の平面 中段：2000s 時点の平面 下段：8000s 時点の平面

(岸向き流れは青，沖向き流れは赤，上：岸側 下：沖側)

三次元波動数値計算による海浜流系の発生機構の解明

長岡技術科学大学	非会員	○秋山	義紀
長岡技術科学大学	正会員	熊倉	俊郎
長岡技術科学大学	正会員	楊	宏選

(1) 海水深の異なるケースにおけるセル構造の比較

海水深の異なる領域に対するセル構造の発達を比べる。異なる海水深の水平面における離岸流と向岸流が交互に現れるセル構造の時間経過による発達を図 2 に示す。異なる水深を用いた理由は、水深が深いほど、セル構造の形成層がより深くなるからである。すべての海水深に対して、2000s 時点で $w1(z=-2.5m)$ の水平面に規則的なセル構造が発生していないのに対して $w2(z=-3.0m)$ と $w3(z=-3.5m)$ は規則性のあるセル構造が出現している。海水深が深いほどセル構造が先に発達しているといえる。浅水波の波速は $\sqrt{gh}$ で、水深 h が大きいほど波速が速く、より短い時間で長い距離を伝播できる。波が一定距離以上伝播すればセル構造が形成されると考えれば、水深が深いほどセル構造が早く計算されることは合理的である。

(2) 海浜流の鉛直方向の考察

細山田ら¹⁾の二次元計算でセル構造が確認されたものの、平面二次元であるために鉛直方向のセル構造の分布が確認できない。本研究は三次元であり、鉛直方向のセル構造を調べた。図 3 に深さの異なる水平面における海浜流の流速分布を示したように、離岸流と向岸流が交互に流れる層は水面から一定の深さ ($z=-3.0m$) にある。表層 ($z=-1.0m$) はすべて岸向き流れ、深い部分 ($z=-10.0m$) はすべて沖向き流れである。この構造は楊ら²⁾の「汀線に直交する鉛直断面に、薄い表層に岸向き流れ、その下層に沖向き流れで構成される流れの大循環が存在する」と一致する。離岸流は水面

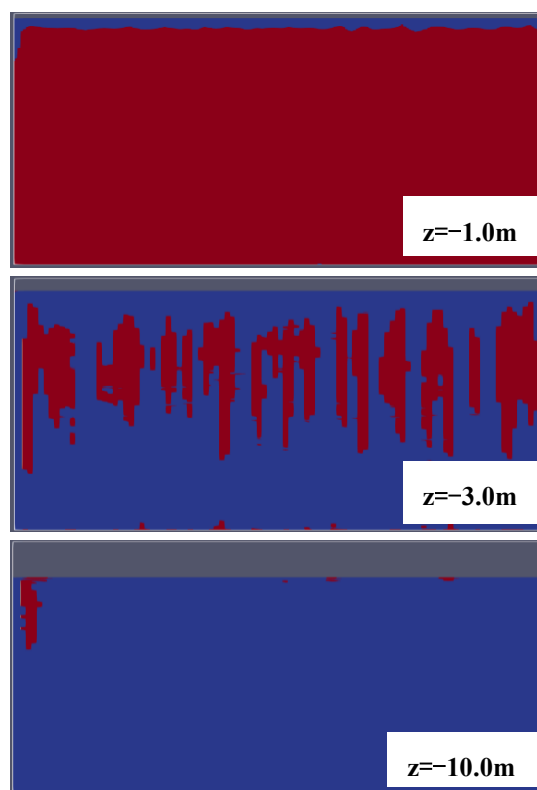


図 3 深さの異なる水平面における海浜流の流速分布(上：岸側 下：沖側)
(岸向き流れは青、沖向き流れは赤)

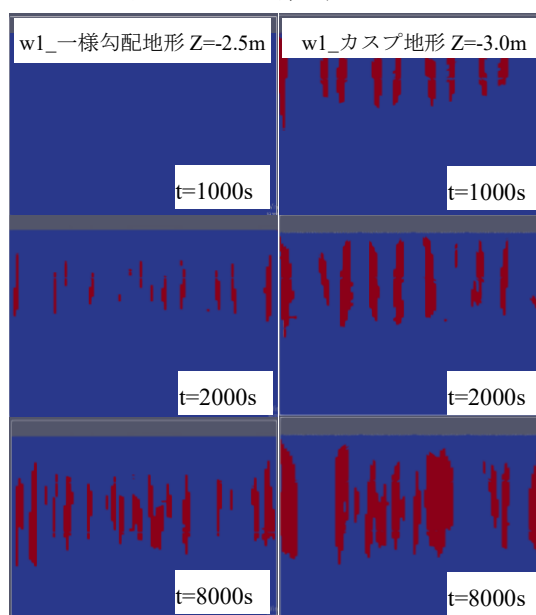


図 4 一様勾配地形とカスプ地形によるセル構造の比較(流速分布・流れの向きは図 3 と同じ)

三次元波動数値計算による海浜流系の発生機構の解明

長岡技術科学大学	非会員	○秋山	義紀
長岡技術科学大学	正会員	熊倉	俊郎
長岡技術科学大学	正会員	楊	宏選

ではなく、その下に発生しているということになるが、世間の一般的な認識ではないと思われる。これが本当ならば、離岸流によって沖に人が流された水難事故への対策として、水面に浮かぶ方が有効であろう。

(3) 一様勾配地形とカस्प地形の比較

一様勾配地形とカस्प地形によるセル構造の発達を比較する。カस्प地形の形状として細山田ら³⁾によるカस्प地形の二次元数値計算モデルを参考にして、沿岸波長 200m、岸沖振幅 60m とし、w1 の汀線だけをカस्प地形に変更して w4 とした。図 4 に示されたように直線汀線地形とカस्प地形によるセル構造の発達様子を比較した。1000s 時点で直線汀線地形である w1($z=-2.5\text{m}$)はまだセル構造に出現していないのに対してカस्प地形である w4($z=-3.0\text{m}$)は規則性のあるセル構造が発生し始めている。また、2000s 時点で、w1 に規則的なセル構造が出現しはじめたが w4 では、離岸流がより大きく発達していることがわかる。また、8000s 時点で w4 は w1 よりも強い離岸流が形成されている。カस्प地形は直線地形より離岸流が形成されやすいことは、予測できるものでもある。

4.まとめ

- ・沖海水深の異なる一様勾配地形を対象とした三次元波動数値計算では、沖海水深が深いケースほど離岸流セル構造が早期に出現するといえる。
- ・直線汀線の場合、離岸流と向岸流は水面ではなく、ある一定の水面以下に発生していることが確認できた。
- ・カस्प地形は一様直線地形と比較してセル構造が早期に出現し、時間経過に伴ってより強く発達することが確認された。

参考文献

- 1) 郭徳杰, 細山田得三: 波動数値計算から平均場を抽出して可視化された離岸流の動態, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.78, No.2, pp.I_7-I_12, 2022.
- 2) 楊 宏選, 熊倉俊郎, 細山田得三, 陸旻皎: 三次元数値計算による離岸流とセル構造の解明, 土木学会論文集, Vol.81, No.17, 25-17110, 2025.
- 3) 細山田得三, 村川はるみ, 犬飼直之: 離岸流と海岸変形の相互作用に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, 2011, I_556-I_560.