離岸流と海岸変形の相互作用に関する研究

Interactions of rip currents and coastal bathymetry change

細山田得三¹・村川はるみ²・犬飼直之³

Tokuzo HOSOYAMADA, Harumi MURAKAWA and Naoyuki INUKAI

Temporal interactions of shapes of rip current and coastal bathymetries are studied with numerical wave simulation. Boussinesq equations for coastal waves, which involve coastal currents as a solution, are combined with equations of littoral drift and deformation of coastal bathymetry. Uniform slope and the beach cusp with regular spacing are used as typical model coastal geography, and Tayuhama beach located in Niigata city, where the in situ rip current was observed, was used as objective of field scale simulation. Results show that interaction between currents and bathymetry change enhances the rip currents more than the case with constant bathymetry. The shapes of rip currents and bathymetrical changes obtained by the numerical study agree with theoretical study by Hino.

1. はじめに

離岸流は、海岸波動の非線形性によって岸側に輸送された海水が局所的な地点において沖へ戻るときに形成される強い流れであり、海難事故の原因となるため社会的関心が高い。離岸流を含む沿岸域における海浜流系は海浜地形形状の影響を強く受けるが、逆に流れが地形変化を引き起こし、rip channelやカスプなどの特異な地形形状が形成される。沿岸域は波・流れ・地形の協働現象が支配する場であり、海浜地形や景観にカオス的な自然造形を形成し興味深い。海浜流系の流れの中でも離岸流は特に強い流れであり、セル構造と呼ばれる規則正しい循環流を形成してそれに応じて汀線付近に凹凸を有する規則的なカスプ地形が生じる（樫木，1982）。

離岸流の研究は古くから観測を主体とした研究が続けられており、個々の事例報告が積み上げられてきている。例えば、離岸流の現地観測として、出口ら（2003）が、鳥取県浦富海岸で係留気球からのビデオ撮影と極浅海域に設置した流速計による離岸流の実測を行い、潜堤開口部背後において、入射波高の増大に伴う顕著な地形性の離岸流を観測した。西ら（2003）も、宮崎県青島海岸での小型フロートでの漂流観測を行い、離岸流発生箇所の特定が可能であること示した。海外においては、数値モデルの妥当性の確認を目的とした実海域計測が精力的に実施されている（Castelleら，2009）。しかしながらいずれの研究においても普遍的な実態や発生メカニズムについては十分な知見が得られているとは言えない。さらにその先の離岸流と海岸変形の相互作用についての研究は未だ不十分と言わざるを得ないが、1970年代に日野に

よって流れの安定解析を応用した理論研究が展開された。この研究成果により波の代表的な諸元や平均的な海浜地形勾配などの外部的な条件を入力して最も成長する離岸流の形状や地形変形を予測する手法が示された。日野（1974 a, b）の理論解析では、波の入射は汀線に対して斜めである必要があり、完全に対称な直行方向入射波を取り扱うことができない。流れの安定性問題においてしばしば引用されるベナール対流は容器や外力の条件の対称性を最大限に仮定した上でそれを破る非対称性としてのセル構造を論じるものである。それに比して流れを駆動する波の入射方向の条件に始めから非対称性が含まれることは理論の限界を提示していると思われる。一方、数値計算では精度の限界として例えば浮動小数点表示の有効桁以下の精度が保証されないが、室内実験や観測に比べてかなり高い対称性の条件を設定することが可能である。しかしながら今のところ、数値計算による離岸流と地形の相互作用に関する既往研究の事例は十分ではないと思われる。本研究では、波動とそれによって引き起こされる離岸流と地形変化のそれぞれのモデルを結合し、それらの相互作用について数値モデルを用いた基礎的な研究を行った。海底地形はモデル地形として一様勾配およびカスプ地形を対象とし、種々の単方向規則波を入射波浪条件として計算を行った。計算結果の考察として日野の理論解析の結果と比較・検討した。また、新潟市郊外の太夫浜における実地形を用いた計算も実施し、実地観測と比較して妥当性の検証も行った。

2. 数値モデルの概要

従来の数値計算では海浜流の計算は、ラジエーションストレスなどを評価するために波動の周期に比して長い時間平均を求める必要があった。このため波動と海浜流の時間分解能に差異が生じ、海浜流や地形変動を調べる

1 正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系 教授
2 工修 鹿島建設北陸支店
3 正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系 助教

ためには時間スケールの長い現象を解析対象とせざるを得なかった。これは地形の季節的な変動のようなさらに長時間スケールの現象を論じるような場合、適当な手法となるが、発生してから消滅までの時間が最大でも数時間程度の離岸流の解析手法としては不向きであると判断した。そこで本研究では、海浜流と地形変化の相互作用を同一時間スケールで評価するために、毎計算ステップで、1. 波・海浜流の計算、2. 底質移動および海底地形変化の計算、3. 地形の修正を行った。これは、実海岸において波、海浜流、地形変化といった現象が同時に発生し、密接に相互作用していると考えられるためである。

波と海浜流の計算に用いた式は修正ブシネスク方程式であり、砕波を含む波の非線形性によって生じる諸現象を解くことができる。従って各時間ステップで求められた波動成分を時間積分すれば海浜流を評価することができる。本研究では海浜流の成分を抽出して計算に利用することはせず、毎時間ステップで計算される波動成分としての流速によって地形変動を逐時的に計算した。この手法により、地形変動は過去の履歴を積み重ねることになり、波動成分の平均としての海浜流による地形変動と等価であると見なすことができる。

底質移動および海底地形変化の計算は、Bailard (1981) によって提案された、流れによって生じる砂の移動（掃流砂、浮遊砂）を考慮したモデルを用いて計算を行った。式 (1) によって掃流砂量を、式 (2) によって浮遊砂量を計算し、式 (3) によって体積漂砂量を求めた。

$$\bar{q}_B = \frac{C_f \varepsilon_B}{(\rho_s / \rho - 1) g \tan \phi} \left(\bar{u}_b |\bar{u}_b|^2 - \frac{s}{\tan \phi} |\bar{u}_b|^3 \bar{i} \right) \dots\dots (1)$$

$$\bar{q}_S = \frac{C_f \varepsilon_S}{(\rho_s / \rho - 1) g w_s} \left(\bar{u}_b |\bar{u}_b|^3 - \frac{\varepsilon_S}{w_s} |\bar{u}_b|^5 \bar{i} \right) \dots\dots (2)$$

$$\bar{q} = \bar{q}_B + \bar{q}_S \dots\dots (3)$$

ここで、 q は体積漂砂量 (m^2/s)、 q_B は掃流砂量 (m^2/s)、 q_S は浮遊砂量 (m^2/s)、 ρ_s は底質の密度 ($2600\text{kg}/\text{m}^3$)、 ρ は水の密度 ($1030\text{kg}/\text{m}^3$)、 C_f は抗力係数 0.01、 ϕ は底質の内部摩擦角 0.1、 s は海底勾配、 i は底面における局所的な斜面を登る向き単位ベクトル、 ε_B 、 ε_S はそれぞれ掃流砂、浮遊砂に対する無次元定数 0.13、0.025、 u_b は底面流速 (m/s)、 w_s は底質の沈降速度 ($0.005\text{m}/\text{s}$) である。

そして式 (3) によって求められた体積漂砂量を局所的な勾配の影響を考慮した修正式 (4) によって修正し、底質の連続式 (5) で地形変化の計算を行った。

$$\bar{q}_m = \bar{q} + c |\bar{q}| \nabla \cdot z_b \dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = (\lambda - 1) \nabla \cdot \bar{q}_m \dots\dots (5)$$

表-1 地形および入射波の計算条件

地形	カスプ地形 (沿岸波長200m, 岸沖振幅60m) 一様勾配地形 (傾斜平板)
地形勾配 s	1/10, 1/30, 1/50
波高 (m) H	0.5~1.5
周期 (s) T	3~12
波向 (°) θ	0: 直角入射, 45

ここで、 q_m は局所漂砂量 (m^2/s)、 ε ($=0.5$) は局所的な勾配の影響を表す係数、 λ ($=0.4$) は底質の空隙率、 z_b は地盤高 (m) である。また、局所的に生じた安息角以上の急斜面を補正するためのアルゴリズムも含まれている。

3. 計算条件

地形条件、および波浪条件による離岸流発生の違いを検討するため、表-1に示すように条件を変化させ計算を行った。波浪は単一方向規則波とし、周期と波高を種々変化させて計算した。

計算領域は、沿岸方向に1600m、岸沖方向に800mの矩形領域である。差分計算のための格子は4m×4mの正方形とし、格子数は沿岸、岸沖方向それぞれ400×200個である。入射波は計算領域の沖側境界の直線上で与え、計算領域の側方はゾンマーフエルトの放射条件およびスポンジ層による吸収条件を付加して側方からの反射の影響を極力低減させた。造波開始後、計算領域全体が定常状態になることを確認したうえで、造波200秒後に地形変化の計算を開始した（移動床）。計算ケースの一部には地形変化を含まないケースが含まれている（固定床）。

4. 計算結果

結果の表示は、いずれも側方境界の影響が十分小さい

図-1 波高による離岸流流速の分布の違い（固定床）
左段：カスプ地形、右段：一様勾配地形、 $T=5\text{sec}$ 、 $\theta=0^\circ$ 、 $s=1/10$

図-2 離岸流の時間発展 (移動床 カスプ地形)

左段: 岸沖流速, 右段: 地形変化, $T=12\text{sec}$, $\theta=0^\circ$, $s=1/30$

図-3 離岸流の時間発展 (移動床 一様勾配地形)

左段: 岸沖流速, 右段: 地形変化, $T=12\text{sec}$, $\theta=0^\circ$, $s=1/50$

と考えられる計算領域の中央部の汀線を含む沿岸方向 500～1100m, 岸沖方向 0～300m とした. これは全計算領域の 14% 程度である.

a) 固定床で発生した離岸流

図-1 では固定床において, 波高の変化に対する離岸流の形成についてカスプ地形と一様勾配地形を比較している. カスプ地形では, 凸部に離岸流と見られる強い沖向き流れが明瞭に発生した. カスプ凸部の両脇の凹部から凸部方向に曲がった波と流れは, 凸部先端から沖側の強い流れを生じそれがセル構造を形成し, その循環流が離岸流へ発達した. 図は地形勾配 s が $1/10$ と本研究の条件の中では急勾配であるがこの場合, 波高が 1.5m よりも 1.0m のほうが離岸流速は大きい. 図には示していないが周期についても 12s よりも 8s のケースの方が離岸流の流速は大きい. 堀川 (1973) 等で得られている一般的知見は波高・周期の増大とともに離岸流の流速や形状が大きくなるということである. 地形勾配が緩やかな場合にはその傾向を確認したが, 急勾配になると離岸流が極大となる波高・周期が存在することが示唆された. 一様勾配地形ではカスプ地形ほどの顕著な沿岸方向の分布構造は見られないが, 汀線付近の流速が沿岸方向に変動している. これは離岸流の萌芽的な構造である可能性があるが, 現時点では判断することは困難である.

b) 離岸流による地形変化 (移動床)

離岸流と地形変化の相互作用を調べるため 3 時間にわたる地形変化を計算した. 計算結果より, 波高が小さく周期の短いケースについては顕著な地形変化は見られなかったが, 高波高, 長周期の波浪条件において地形と海浜流に顕著な時間的な変化が生じた. 以下, 離岸流および地形変化が顕著であったケースに絞って考察する.

図-2 は初期地形勾配 $s=1/30$ のカスプ地形に, 波向 0° , 波高 $H=1.5\text{m}$, 周期 $T=12\text{sec}$ の波を 3 時間作用させた結果である. カスプ凹部沖では侵食され, カスプ凸部沖では砂が徐々に堆積した. 離岸流流速は波の作用開始 1 時間後に 0.2m/s 程度であったが, 3 時間後には 0.5m/s 程度の成長した. これはセル構造において, 凹部の沖から岸向きの海浜流によって輸送された土砂が, 汀線付近に堆積し, さらに沖へ向かう離岸流によって凸部の沖へ輸送され堆積したものと考えられる. その結果, 波が強く屈折する領域が沖へと移動し, 岸に向かうエネルギーが小さくなったことで離岸流が発達したと考えられる.

図-3 には初期地形勾配 $s=1/50$ の一様勾配地形に, $\theta=0^\circ$, $H=1.5\text{m}$, $T=12\text{sec}$ の波を 3 時間作用させた結果である. 波の作用開始 1 時間後に一様勾配だった地形が波状の地形になり, その後徐々に汀線が後退した. また流速については 1 時間で離岸流の分布範囲が狭く流速が強いものとなり, 2 時間後に一旦は流速が弱くなったが, 3 時間後にはまた沖方向に長く伸びる非常に強い離岸流が形成されている. 一様勾配地形については固定床の場合, 図-1 の右段に示すようにカスプ地形ほどの明確な沿岸方向の構造は見られないが, 微小な凹凸を見出すことはできる. 移動床の場合, これが流れに従って変形する地形と協働して大規模な離岸流へと発達したと考えられる.

また, カスプ・一様勾配地形のどちらのケースにおいても固定床の計算時には生じなかった, 離岸流流速の時間的な変化や発生箇所の変化が生じている. 地形変化は離岸流の発達・形成に強い影響を与えるということが分かる. 堀川による現地調査結果の要約によれば, 離岸流の流速は時間とともに変動することが報告されており, それが海底地形の変動によることが予測される.

図-4 理論解析との比較のための計算結果（移動床）（岸沖・沿岸方向分布）
左：岸沖流速（ $\theta=0^\circ$ ）（m/s），中：岸沖流速（ $\theta=45^\circ$ ）（m/s）右：碎波係数分布（ $\theta=0^\circ$ ） $T=12\text{sec}$, $H=1.5\text{m}$, $s=1/30$

本論文では示していないが、地形勾配 s の変化に対する離岸流の形成についても検討しており、 s が小さく勾配が緩やかなほど、地形や岸沖流速の沿岸方向変化が生じやすいことを確認した。これは堀川らによる現地調査結果の知見と一致している。

c) 日野による理論解析との比較

離岸流と地形変化との関係については、日野（1974a, b）によって以下のような理論解析結果が示されている。

1. 入射角度が大きくなり、斜め入射となる場合、ピーク波数は小さく、離岸流セルの間隔が大きい。
2. 離岸流セルの波長は、汀線から碎波帯までの距離 L_b の2～4倍程度である。
3. h_b を碎波帯での水深としてパラメータ（ h_b/L_b ）が小さく、海底地形勾配が小さいほど、地形変化の増幅率の値が大きくなる。（遠浅の海岸ほど離岸流やカस्प地形がよく発達する。）
4. 凸型地形ほど離岸流の発生が顕著である。

結果3., 4.は今回の解析結果においても多くのケースで再現された。さらに1., 2.についても比較を行った。

結果1.の入射射角度による離岸流セルの間隔について検証するため、 $s=1/30$ の一樣勾配地形に、 $H=1.5\text{m}$, $T=12$ 秒、そして波向 $\theta=0^\circ$, 45° と変化させ3時間の計算を行った。それぞれの造波3時間後における流速分布図を図-4左および中央に示す。 $\theta=0^\circ$ の場合、離岸流の発生間隔は140m程度であり、地形の凸型もこの間隔で形成されていた。一方、 $\theta=45^\circ$ として斜め入射の条件で計算した場合、離岸流の発生間隔は240m程度となり、 $\theta=0^\circ$ の時と比べて離岸流セルの間隔が大きくなっていることが分かり日野の理論との整合性が確認できる。

次に結果2.の離岸流セルの波長について検証するため、 $s=1/30$ の一樣勾配地形に、 $H=1.5\text{m}$, $T=12$ 秒、 $\theta=0^\circ$ とし3時間の計算を行った。計算開始3時間後の碎波係数分布を図-4右に示す。汀線から碎波帯までの距離が70m程度であるのに対し、離岸流セルの波長は140m程度と汀線から碎波帯までの距離の約2倍であった。離岸流セルの波長は、汀線から碎波帯までの距離 L_b の2倍程度となり、

図-5 離岸流セルの形状について既往研究との比較

これは日野の結論2.「離岸流セルの波長は、汀線から碎波帯までの距離 L_b の2～4倍程度である。」と概ね一致している。

本研究で得られた種々の離岸流のセル構造とこれまで現場で観測されたものとの一致性について検討する必要がある。離岸流セルの沿岸方向の間隔を l_o とし、 H_o , L_o をそれぞれ沖波波高と沖波波長とする。従来の研究では無次元パラメータ l_o/L_o を縦軸として横軸をイリバーレン数 $s/(H_o/L_o)^{1/2}$ とした図-5によって両者の依存関係が整理されている。本数値実験によって形成された離岸流セルの形状とイリバーレン数の関係を調べた結果、従来観測で得られた分布と十分よく一致しており、本研究の知見を現場の現象に適用できることが示された。

d) 実地形計算

新潟県島見浜付近（太夫浜）を対象とし、離岸流の再現計算を行った。計算領域は海岸線方向に800m、沖方向に400mとした。図-6の左端はデータより作成した地形図である。現地には突堤などのコンクリートの海洋構造物が設置されている。この地点において、海上保安庁第九管区海上保安本部が離岸流観測調査を行った、平成18年5月25日の波浪を作用させ、計算を行った。当日の波浪は波向きが北北西、波高 H が0.5～1.0m、周期 T を5秒とし15分程度の高浜流と地形変化の計算を行った。計算結果として、図-6の中央に流速分布図を、図-6の右端に計算後の地形標高を示す。流速分布図より、図の中央部

図-6 新潟県島見浜を対象とした計算 (岸沖・沿岸方向分布)
左：地形標高 (m)，中央：岸沖方向流速 (m/s)，右：計算後の地形標高 (m/s)

のT字型の突堤付近から0.3m/s～0.4m/s程度の離岸流が発生している (矢印 (2))。また、計算領域中の左端は長い突堤があり、そこでは流速が大きい離岸流が形成され、それに伴う地形変化が確認できる。計算領域の沖側での地形が急激に浅くなっている事が目立つ (矢印 (1)，(3)) が、造波境界が近く、波が実海域とやや異なることが原因ではないかと考えられる。海底地形変化の最終的な一致性については、現地での測量結果がないため確認できなかった。この日、付近の突堤で行われた離岸流の観測では、0.2m/sから0.4m/sの流速が観測されており、これは解析の結果形成された離岸流の流速のオーダーと合致している。

5. まとめ

海岸波動によって生じる離岸流と海岸変形の相互作用について検討を行うことを目的とし、様々な波浪条件、および地形条件について基礎的な数値解析を行った。特に一様勾配地形からのカスプ地形生成に至るまでの離岸流の影響について検討した。

本研究の結果、カスプ地形では固定床の場合でも離岸流が発生した。一様勾配地形の固定床では、計算条件が対称となるため明確な離岸流を見出すことはできなかった。しかしながら、計算結果に沿岸方向のゆらぎが生じ、現時点では明確ではないが、そのゆらぎが離岸流に発展する可能性がある。計算機の有効桁数以下の打ち切り誤差がこのゆらぎを誘起している可能性を否めない。本研究はすべて単精度で計算しているが、倍精度で計算してもそのレベルでの打ち切り誤差の問題が生じる。単精度と倍精度の計算結果を比較して打ち切り誤差の影響を比較検討することは今後の研究課題としたい。

地形変化を考慮する場合 (移動床) の計算は、固定床と比べて大きな違いがあることが分かった。カスプ地形の場合、いずれの場合もカスプの凸部において沖向きの流れが生じる点は同じであったが、地形変化に応じた離岸流の形態の変動を確認した。一様勾配地形の場合、固定床では前述の通り、離岸流の萌芽を確認するのみであったが、移動床では大きな地形変動とそれに伴う離岸流セルの発生と時間変動を確認した。移動床の場合には地

形勾配 $s=1/50$ 、波高 $H=1.5\text{m}$ 、周期 $T=12$ 秒という計算ケースの中では緩勾配、高波高、長周期の条件において0.5m/s程度の強い離岸流が生じることが分かった。

日野の理論解析および現地で発生した離岸流セルの従来の計測結果とは、定性的によい一致が見られた。実海岸で観測された離岸流セルの形態と本研究で得られた離岸流については無次元パラメータの関係においてほぼ一致することを確認した。本計算モデルの現地観測との一致性については現段階では満足できるものであった。

今後の課題としては、地形変化と離岸流について定量的な評価を行うこと、実海域での離岸流発生指標の作成を行うことがあげられる。本研究では平面2次元のモデルを用いて解析を行ったが、離岸流の3次元構造についても調べる必要がある。

本研究を行うにあたり科学研究費補助金 (基盤研究 (B)，23360205 代表者：関口秀雄) の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 樫木 亨 (1982)：漂砂と海岸侵食，森北出版，195 p.
- 第九管区海上保安部 (2006)：新潟県島見浜付近流況調査報告書，48 p.
- 出口一郎，荒木進歩，竹田怜史，松見吉晴，古河泰典 (2003)：鳥取県浦富海岸で観測された離岸流の特性，第50回海講論文集，pp.151-155.
- 西 隆一郎，萩尾和央，山口 博，岩根信也，杉尾 毅 (2003)：水難事故予防のための離岸流調査に関する基礎的研究，第50回海講論文集，pp.156-160.
- 日野幹雄 (1974 a)：海浜流系の発生理論，土木学会論文報告集，No.225，pp.17-29.
- 日野幹雄 (1974 b)：応答性を考慮した海浜流系と海浜地形の発生発達に関する理論，土木学会論文報告集，No.237，pp.87-98.
- 細山田得三，大橋俊樹 (2008)：海岸地形に依存した離岸流の発生機構の基礎的な数値実験，第55回海講論文集，pp.86-90.
- 堀川清司 (1973)：海岸工学，東京大学出版会，304 p.
- Castelle, B., P. Bretel, S. Moreisset, P. Bonneton, M. Tissier, C. Sotin, A. Nahol, N. Bruneau, J.-P. Parisot, S. Capo, S. Bujan, V. Marieu (2009)：Rip current system over strong alongshore non-uniformities: on the use of HADCP for model validation, Journal of Coastal Research, SI 56, pp.1746-1750.
- James A. Bailard (1981)：An Energetics Total Load Sediment Transport Model For a Plane Sloping Beach, Journal of Geophysical Research, Vol.86, No. C11, pp.10938-10954.