# 海岸地形に依存した離岸流の発生機構の基礎的数値実験

Fundamental Numerical Study of Rip Current Generation Affected by Coastal Terrain

# 細山田得三<sup>1</sup>・大橋俊樹<sup>2</sup>・アルワフィ プジラハルジョ<sup>3</sup>

# Tokuzo HOSOYAMADA and Toshiki Oohashi and Alwafi Pujiraharjo

The formation of rip currents affected by regularly arranged beach cusps has been investigated quantitatively using 2dimensional Boussinesq type numerical wave simulation. The numerical model has nonlinearity, dispersion, wave runup on the beach and wave breaking effects. The rip currents are generated regularly at the edge of the each cusp. Shape of the beach cusp enhances the formation of rip currents. The rip current takes its maximum velocity at H/Lo=0.013 and corresponding surf zone similarity parameter 0.7-1.0. We found the constantly low water level point at the edge of the beach cusp.

# 1. はじめに

離岸流の研究は海岸工学の分野ではかなり古くから取 り組まれており、離岸流を含む海浜循環流について種々 の理論の提案や現地観測が精力的に行われてきた(堀川 ら1976). 例えば, Bowen (1969) よる離岸流モデルの 提案や日野・林(1972),日野(1973),Hino(1974) による流れの安定解析手法による検討も行われ、今日に おいても継続されている.しかしながら,離岸流が原因 とされる海難事故が後を絶たず(西ら 2004),報道にも 取り上げられ離岸流への社会的関心が依然高い状態であ る.近年,高橋ら(1999),柴崎ら(2003),出口ら(2003), 西ら(2003)により、水難事故予防の観点に立ち、観測 手法の工夫によって実海岸における離岸流の実態解明を 目指した研究が行われている. さらに離岸流の時間変動 特性(出口ら(2006))や離岸流と地形変動の相互作用に よるリップチャンネルの形成(Damagaardら (2002))に ついても検討が行われている.

海域利用者が海浜を安全で快適なレクレーションの場 として利用するためには、離岸流の発生要因やその動態 を明らかにする必要があるが、いまだ未解明の部分が多 い.その理由として、離岸流が問題となる海水浴シーズン は遊泳可能な程度に波高が小さい状態であり流れを駆動 する外力がさほど大きくないにもかかわらず、強力な流 れが生じるという点が挙げられる.現在においても地形 や波浪条件による離岸流の発生や規模が十分に予測でき ていない.さらに、地形形状やそれに対応した砕波、波 のセットアップや流れの発生など波動場の非線形性が強

1正会員	工博	長岡技術科学大学准教授
2 正 会 員	工修	(㈱大林組
3		長岡技術科学大学大学院

く関与しており,問題を複雑で困難なものにしている. 複雑な要因が影響している離岸流の発生を予測するため には,できるだけ単純な海岸地形条件下で入射波浪条件 に対する離岸流の動態を解明することが必要である.出 口ら(2005)は、カスプ地形から発生する離岸流につい て入射波条件とカスプ地形のパラメータとの関係を調べ, さらに離岸流が発生する場合のカスプの地形変化につい ても調査している.

本研究は、地形条件と波浪条件の変化が離岸流の発生 やその動態にどのような影響を与えるかを定量的に調べ ることを目的とし、規則的なカスプを有する仮想地形や 入射条件を種々変化させて数値実験を行った.その計算 結果に基づき、離岸流の動態に及ぼす条件について検討 を行った.

#### 2. 解析モデル

## (1) 数値モデルの概要

本研究では波動場の数値モデルを様々な計算条件に対 して実行して離岸流を発生させた.使用した波動場の数 値モデルは,平面2次元の修正ブシネスク方程式であり, 砕波やそれによって生じる乱流や陸上への波の遡上など が組み込まれている.砕波による乱流は水平方向の運動 量拡散項の渦動粘性係数の増減として評価されている. このため,波の非線形性によって生じる諸現象が各時間 ステップで同時に解けることになる.

#### (2) 計算条件

計算に用いたモデル地形は一様な斜面から凹凸をつけ たカスプ地形まで種々変化させた。カスプ地形の凹凸は 入射してくる波動に対して沿岸方向に非一様性を引き起 こし、それに応じた離岸流の発生を誘導するための地形 の変化である。計算領域は、実海岸を想定し、沿岸方向 に1600m、岸沖方向に800m とし、仮想地形には、一様勾 配のカスプ地形を用いた。カスプの形状は、凹部分の幅



(λ<sub>c</sub>)を200m,振幅(a<sub>c</sub>)を20~60m,海底勾配は1/10~1/100とした.

境界条件として与える入射波は規則波であり,波高, 周期を変化させて各種のケースに応じた計算を行った. 入射波の波浪諸元は,ほぼ平常時の波浪条件を想定して, 周期を5~10秒,波高を0.5~2.0m とした.また,入射 波向は沖向きを0°とし,沿岸方向および直角入射をそれ ぞれ,90°,180°とした.

計算時間は,計算領域全体が定常状態になることを確認したうえで,造波後200秒経過した後の時間を各ケースの比較対象の時間帯とした.波動場の計算結果に含まれる離岸流の成分は波動の瞬時値の流速を入射波周期5周期分の時間で平均して抽出した.本研究では計算条件を種々変化させ,それに応じて発生した離岸流の形状や離岸流流速,平均水面の変動(ビート)との関係について定量的に比較検討を行った.

## 3. 計算結果

#### (1) 離岸流の再現と特性

図-1(a), (b), (c) にそれぞれa。/ 入。=0.1, 0.2, 0.3のカ



図-2 入射角度による離岸流の発達の違い a<sub>c</sub>/λ<sub>c</sub>: 0.3, (a) 170°, (b) 140°



スプ地形に対して直角方向に入射する波高0.5m,周期5s の場合における離岸流の沖向き流速の等高線および離岸 流の流速ベクトルを示す.等高線が負の場合,流れが岸 向きとなる.図-1のいずれにおいてもカスプ地形の凸部 分に地形に応じた離岸流による循環流(セル)が形成さ れている.  $a_c/\lambda_c$ の値が小さくなるほど,離岸流のセル が岸沖方向に長細いものになり,流速も小さくなる.ま た,ここでは示していないが, $a_c/\lambda_c=0$ に相当するカス プ地形のない,一様勾配地形においても計算を行ってお り,砕波帯付近での流速変動は見られるものの,明瞭な セル構造は見られなかった.逆に $a_c/\lambda_c$ が大きい場合, 離岸流のセル構造が明瞭となり,離岸流の最大流速も大 きくなる.地形が離岸流の形成に大きな影響が与えるこ とがわかる.

入射波の条件を同一とし、さらに離岸流セルが明瞭で



図-4 新潟県太夫浜での離岸流流速の計測結果
(a):位置図,(b):計算による流速

あるa。/ λ。=0.3の場合について,入射波の波向きを変化 させた場合の離岸流の形成の違いを図-2(a),(b) に示す. 図-1と同じく,沖向き流速の白黒等値図および離岸流の ベクトルである.波向きが海岸線に対して鋭角になるに つれて入射方向に応じた沿岸方向の流れが卓越していく ことがわかる.沿岸流が卓越することによって離岸流の 流速や規模が小さくなる.また,波向きが変わることに よって,離岸流セルの形成位置が凸の部分から凹の部分 へ移動していることがわかる.

図-3に各波向きにおける離岸流の最大流速の波高に対 する変化を示す.図より,波高が高くなるにつれて,離 岸流の最大流速は一定の値に近づき,波向きへの依存性 が少なくなる.また,波高が0.5m付近に注目すると, 入射方向が岸に直角なものほど離岸流の最大流速は大き い.波高があまり大きくなく,直角方向に入射してくる 波の場合,離岸流が発達することを示している.この結 果は波高の増大が必ずしも離岸流の増大を引き起こすも のではなく,海水浴が可能な程度の低い波高であっても 波向きや地形によって離岸流が十分発達する可能性があ ることを示唆している.

# (2) 実地形への適用

本研究では実験による計算結果の検証が行われていないため、ここでは実地形で観測された離岸流の発生状況や分布などの定性的な比較を行い、計算手法の妥当性について検討する.比較対象領域は新潟市東部に位置する島見浜であり、海上保安庁第九管区海上保安本部が2006年5月に現地観測を行っている.その際、ブイや染料(シーマーカー)の投入による流れの定量的な計測も実施している(第9管区海上保安本部2006).一方、数値計算の



図-6 カスプ地形に依存した最大流速 (砕波帯相似パラメータとの関係)

入射波の境界条件は、離岸流観測が行われた日時の波浪 条件を使用し、海図を用いて現地の海岸地形のデジタル データを作成した、図-4(a).(b)には新潟市島見浜付近の 太夫浜の航空写真および離岸流流速の計算結果を示す. 沖から岸に向かう流れ(負)と離岸流(正)が構造物の配 置によって影響を受けていることがわかる、特に突堤の 先端付近で離岸流が顕著に発生していることがわかる. 現地観測でも、突堤付近から発生している離岸流が数多 く確認されている.計算と比較できる現地観測による表 層流速は、計算領域左上部付近でのブイの追跡結果によ るものでしかないが、現地観測による流速は0.15~0.35 m/sであり、計算結果とほぼ同程度であった. これ以外 の定量化されたデータがないため双方の比較は十分では ないが、離岸流の発生位置および流速値のオーダーに関 しては、実海域と一致しており、計算の妥当性が評価さ れたと判断した.

#### (3) 離岸流の指標

離岸流の規模や強さを定量的に評価するために,離岸 流の最大流速(Umax)を沖波波速(Co)で除すことで 無次元化した.また,波のパラメータとして各地点での 波高Hを沖波波長(Lo)で除した波形勾配H/Loを用いた. 図-5(a),(b),(c)に各地形の波形勾配(H/Lo)に対する無次 元最大流速の分布を示した.なお,波向きは直角入射の みである.図より、 $a/\lambda_e = 0.10 f$  - スではやや明瞭で はないが、それ以外の地形では波形勾配が0.013のとき ピークの値を示していることがわかる.波向きが流速に 及ぼす影響は小さいため、カスプ地形において $a/\lambda_e$ が 0.2以上の地形では、波形勾配が0.013のとき離岸流が最 大流速を示す.以上の結果より、現地において波高,周 期、カスプの波長と振幅比をもとめることで、その地形 に応じた離岸流の最大流速を求めることが可能である.

離岸流の評価には、しばしば次式で表される砕波帯相 似パラメータが用いられる.

$$I_r = \frac{I}{\left(H/L_o\right)^{1/2}} \tag{1}$$

ここに*i*, *H*, *Lo*はそれぞれ海底勾配, 波高, 沖波波長 である. 砕波帯相似パラメーター (*I*,) を用いて, 離岸流 の流速の特徴を示す. 図−6(a),(b)より, 最大流速・平均流 速ともに *I*, が0.7~1.0の間で最大流速となることがわか る.

I,は、海底勾配と波形勾配の比を求める式となっており、海底勾配と波形勾配の1/2 乗が同等または少し低い 値となるとき離岸流の流速は最大値となる傾向がある.

本研究では、海底勾配を統一することで離岸流の傾向 を検討した。そのため、海底勾配や地形が大きく変化し た場合の予測は困難であるが、カスプ地形においては、 a<sub>e</sub>/λ。と波形勾配が離岸流の最大流速に影響を与えるこ とがわかった。また、周期が長くなるにつれて離岸流面 積が大きくなり,最大流速は小さくなる傾向が得られた. 波高が1.0m付近で最大流速を示し,それよりも高く なると沿岸流も発達するため,離岸流の流速は減少する. 図より波形勾配(*H/Lo*)をとることで離岸流の最大流 速を予測することが可能であることがわかる.

#### (4) 水位変動と離岸流の発生の関係

離岸流の発生要因を解明するため,離岸流のセル内お よび外の水位・流速を比較検討した.図-7に比較に用い た各点の座標を示し,図-8(a)に各点の水位,図-8(b)に 各点の流速,図-8(c)に領域全体の水位総量を示す.こ の値は各計算格子における初期の水位からの変動量の総 和であり,初期の状態から計算領域内の水の総量が変化 したかを示す指標となる.また,計算領域全体の定常性 を示す指標と考えている.この値が負を取ることは,計 算領域内部の平均水位が減少していることを示している.

図-8(c)よると、領域全体の水位が上昇する300秒前後 で各点の水位が上がり、その影響で380秒前後の流速が 速くなっている.水位が上昇することで、離岸流の最大 流速が大きくなり、水位が減少することで、離岸流の最 大流速が減少する.離岸流の流速は領域全体の水位の変 動に合わせて変化していることがわかる.

また,離岸流発生の岸側端部であるF点に注目すると, F点のみ常に周りの領域に比べ水位が低く,沖向き流れ が常に発生していることがわかる.離岸流の発生にはこ の水位差が影響していると予想される.その他の領域で も同様に水位を調べたところ,F点付近のみで水位が低 いことがわかった.従来の考察では,離岸流は水の収支 によって発生するとされている.領域内部の平均水位が 上下し領域内部の水の総量が増減しても離岸流は常に発 生している.一方F点の水位低下は離岸流の発生と連動 して継続している.また,常に水位が低い領域が存在す ることで循環した流れが継続され,離岸流が駆動される と解釈される.

### 4. まとめと考察

修正ブシネスク方程式を用いた波動場の数値実験によっ て波高0.5~2.0m,周期5~10sまでの範囲で種々のカス プ地形を有する海岸での離岸流の形成状況について定量 的な評価を行った.本研究により得られた結果を総括す る.カスプ地形および入射波の波向きに依存した離岸流 セルの形成を示すことができた.本モデルを実海岸(新 潟県島見浜付近(太夫浜))へ適用した結果,離岸流の形 成について定性的な一致が見られた.離岸流の形速の定 量化を行った結果,砕波帯相似パラメータが0.7~1.0付 近で最大流速になり,波形勾配(HLo)が0.013程度で 最大流速を示す結果を得た.離岸流の発生に関してカス プ地形凸部の離岸流セルの岸側端部における定常的な低 水位領域を見出した.離岸流セルの定常的な形成と同時



(a) 水位, (b) 流速, (c) 全体水位総量

に生じており,離岸流の生成原因との関係があるものと 推測しており,その形成プロセスを理解するための基礎 研究を進めたい.今後,画像処理を用いた現地観測を行 い,実現象との比較を行うことで,離岸流の発生要因を 更に検証していきたい.

謝辞:本研究を遂行するにあたり,長岡技術科学大学の 犬飼直之助教,㈱アイエヌエーの山田文則博士には有益 な助言を頂いた.ここに謝意を表する.また,科学研究 費(基盤研究C,19560519 代表者:細山田得三)の補助 を受けたことを付記する.

#### 参考文献

- 柴崎 誠・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之・小林昭男(2003) 離岸流発生を助長するリップチャンネルの形態について, 海講論文集,第50巻, pp146-150.
- 高橋重雄・常数浩二・鈴木高二郎・西田仁志・土棚 毅・小林 雅彦・小沢保臣(1999):離岸流に伴う海水浴中の事故発 生に関する一考察,海洋開発論文集,第15巻, pp.743-748.
- 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,pp151-155.
- 出口一郎・荒木進歩・竹田怜史・吉井匠・薮崎洋隆(2005): カスプ地形で発生する離岸流の特性について,第52回海講 論文集,pp117-120.
- 出口一郎・吉井匠・野村尚生・荒木進歩(2006):離岸流の時 間変動特性について,第53回海講論文集,pp.101-105.
- 西 隆一郎・山口 博・岩淵 洋・木村信介・村井弥亮・徳永企 世志・古賀幸夫(2004):宮崎県青島海岸での離岸流観測 — 水難事故予防のために-,第51回海講論文集,pp151-155.
- 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,海 講論文集 第50 巻, pp156-160.
- 日野幹雄・林直樹(1972):リップ・カレントの発生理論,第 19回海講論文集,pp93-96.
- 日野幹雄(1973):海浜流系の発生理論(3) -単純化され理論-, 第20回海講論文集, pp.339-344.
- 堀川清司・佐々木民雄・堀田新太郎・桜本 弘(1975):海浜流 に関する研究(第3報)-海浜流系の規模-,第22回海講 論文集, pp.127-134.
- 海上保安庁第9管区海上保安本部: 新潟県島見浜付近流況調 査報告書2006年5月(オンライン), http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN9/gaiho/2006/h18\_shimami. pdf, 参照2008-05-20.
- Damagaard, J., N. Dodd, L. Hall, T. Chesher (2002):

Morphodynamic modeling of rip channel growth, Coastal Engineering 45, pp. 199-221.

- Hino, M. (1974) : Theory on formation of rip-current and cuspoidal coast, Coastal Eng. Jpn, Vol.17, pp. 23-27.
- Bowen, A.J. and D.L. Inman (1969): Rip currents. 2.Laboratory and field observations, Journal of Geophysics Research 74 (23), pp.5479-5490.