

離岸流の発生と窪みの形成・維持機構のモデル化

柴 崎 誠* ・ 小 林 昭 男** ・ 宇 多 高 明***
芹 沢 真 澄**** ・ 熊 田 貴 之*****

九十九里浜の一宮海岸を対象として、離岸流と窪みの発生原因について検討した。等深線変化モデルにおいて、離岸流と波による岸向きの砂移動を、吸い込み・湧き出しにより表現した。この結果、海底の窪みは離岸流と岸向き流れとがセットとなった循環流により輸送される漂砂の存在によって動的平衡状態を保つことが分かった。その場合、碎波帯幅と突堤間距離が離岸流の発生と密接に関係しており、突堤脇以外で離岸流が1ヶ所発生するには、少なくとも沿岸方向距離が碎波帯幅の3倍は必要ことが分かった。また、窪みと循環流が動的平衡状態にない場合、窪みは離岸流の発生条件に適合したものへと変化することが確認された。

1. はじめに

離岸流による海水浴中の水難事故は数多く起きており、とくに外洋に面した砂浜海岸ではしばしば離岸流が発生し、重大事故の原因となることが指摘されている(高橋ら, 1999)。したがって離岸流の特性把握は、この種の痛ましい事故を減らす意味から重要なことである。筆者ら(2003)は、凹状の海底の窪みの形状と離岸流の発生について調べ、窪みの形状に応じて流速の異なる離岸流が発生することを明らかにした。しかし、その研究では窪みの存在を前提としており、窪みの形成要因や維持機構に関する検討は行っていなかった。

一方、離岸流はまた、例えば突堤群やヘッドランド群に挟まれた海浜の安定性にも深く関与しているが、そのような構造物間に挟まれた海浜の安定性と離岸流の関係に関する研究も十分ではない。そこで本研究では、数多くのヘッドランドが建設中で、離岸流の発生が著しい千葉県九十九里浜の南端部に位置する一宮海岸を対象として、現地調査と海浜流計算を行い、窪みの形成要因および維持機構について検討した。さらに、上記の検討後、新たに吸い込み・湧き出しという離岸流による砂移動を考慮した等深線変化モデル(宇多ら, 2004)を用いて、一宮海岸における窪みの形成と離岸流の発生を再現した。

2. 海底の窪みと離岸流の発生状況に関する現地調査

千葉県一宮海岸は、図-1に示すように千葉県九十九里浜の南端部に位置し、約1/50と比較的緩勾配の砂浜海岸であり、離岸流の発生が著しい海岸である。この海岸での波向は、夏期には南寄りとなるが、冬期には北寄り

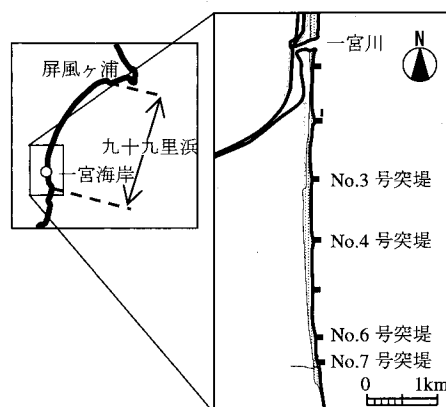


図-1 千葉県一宮海岸の位置

と、波向の季節変動が顕著である。海岸利用面では、季節を問わずサーファーに人気があり、海浜利用者は年間を通じて多い。

本研究では、一宮海岸において建設中のヘッドランド群のうち、突堤部脇と海浜中央部で離岸流の発生が著しいNo.3, 4号突堤間と、突堤脇のみ離岸流が若干発生し、海浜中央部では離岸流の発生が明確ではないNo.6, 7号突堤間を対象として、両者の比較調査を行った。いずれも突堤に挟まれているが、No.3, 4号突堤間の沿岸方向長さは950 m, No.6, 7号突堤間の長さは400 mであり、前者の沿岸距離は後者の約2.4倍である。

まず海底の窪みの形状と発生場所を調べるために、No.3, 4号突堤間とNo.6, 7号突堤間で冬期と夏期に地形測量を行った。なお、2002年12月には千葉県長生土木事務所により冬期の測量が行われているため、本研究では夏期のみ前浜地形測量を実施した。

図-2には2002年12月の3, 4号堤間の深浅図を示す。3号突堤から約330 m, 680 m離れた場所に最大水深3 m程度の窪みが形成されていた。しかし窪みより沖の水深4 m以深の等深線は沿岸方向に互い平行であった。また、突堤沖では等深線が蛇行していた。図-3には、同時期の6, 7号堤間の深浅図を示す。窪みは発生してお

* 学生会員 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻
** 正 会 員 工 博 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科
*** 正 会 員 工 博 (財)土木研究センター審議役 なぎさ総合研究室長
**** 正 会 員 海岸研究室(有)
***** 正 会 員 (博)工 (株)水圏科学コンサルタント 技術部

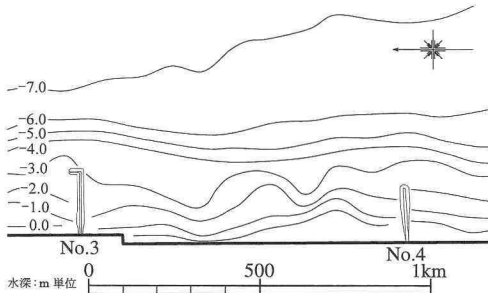


図-2 No. 3, 4号堤間の等深線図 (2002年12月)

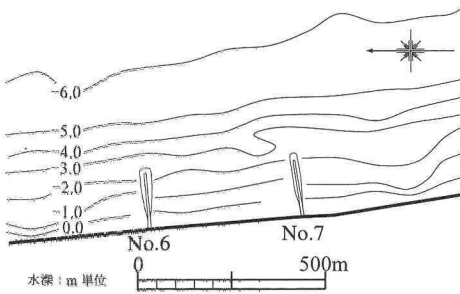


図-3 No. 6, 7号堤間の等深線図 (2002年12月)

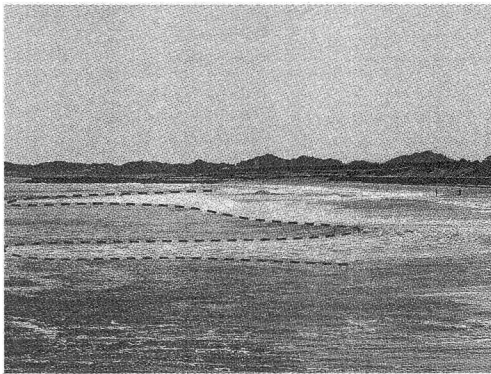


写真-1 離岸流の発生状況 (2004年3月8日撮影)

らず、汀線から沖までの等深線はほぼ平行であり、突堤沖の等深線は同様に蛇行していた。

図-4には2003年9月26日の3, 4号堤間の深浅図を示す。冬期と同様、窪みは2ヶ所で形成されていた。窪みの形成位置は3号突堤から $X=200\text{m}$, 600m と若干北側に移動してはいるものの、窪みは安定的に存在している。 $X=300\sim 600\text{m}$ の範囲では護岸工事が行われており、また $X=450\text{m}$ 付近では河川流が流れ込むため、等深線が沖に向けて凸状となっている。写真-1には2004年3月8日に3号突堤から4号突堤を望んだ状況を示す。破線で示すように、窪みが形成されていた付近と突堤脇で離岸流の発生が確認された。

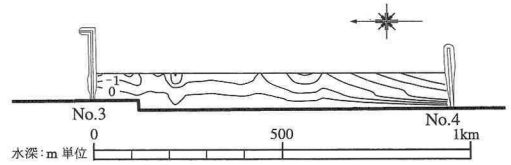


図-4 No. 3, 4号堤間の等深線図 (2003年9月26日)

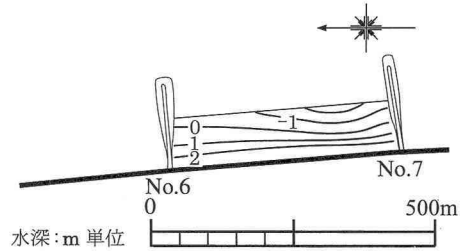


図-5 No. 6, 7号堤間の等深線図 (2003年9月26日)

図-5には夏の6, 7号堤間の深浅図を示す。冬期と同様、等深線は汀線から沖までほぼ平行であり、窪みの形成は確認できなかった。しかし突堤脇においては離岸流の発生が確認された。

以上のことから、窪みの形成は突堤間距離に関係していると推察され、窪みの位置は波向の季節変動により若干変化するものの、ほぼ安定的に形成されていることが代表時期の現地調査より分かった。

3. 海浜流計算による離岸流の再現

現地調査では、3, 4号堤間および6, 7号堤間において離岸流は確認されたが、果たして窪み位置で離岸流が真に発生するかどうか波・海浜流の数値実験を行い確認した。波浪の数値計算には、磯部 (1986) による放物型モデルを、海浜流の数値計算には堀川 (1985) のモデルを用いた。計算では、3, 4号堤間の水深3mまでは窪みを形成しているが水深4m以深の等深線はほぼ平行なため、砕波水深を3.5mとし、波浪条件は現地で観察され、ちょうどこの水深で砕波するような波浪条件として、 $H_0=1.5\text{m}$, $T=6.0\text{s}$, 入射波向 $\theta=0^\circ$ の不規則波を入射させた。計算対象は、3, 4号堤間(沿岸方向950m, 岸沖方向750m)と、6, 7号堤間(沿岸方向400m, 岸沖方向500m)である。地形はいずれも2002年12月の深浅図を入力した。

図-6は3, 4号堤間における海浜流の流況である。現地調査と同様、突堤脇以外にも2ヶ所の窪み位置で離岸流が発生し、砕波水深($h_b=3.5\text{m}$)を貫く強い離岸流となっている。図-7は突堤間の距離が短い6, 7号堤間における海浜流の流況である。離岸流は沿岸方向 $X=130\text{m}$ 付近、および現地調査同様流速は弱いものの、7号堤

から北(左)側に約270 m離れた場所にも発生している。

以上の計算の結果より、窪みの形成・維持と離岸流の発生は図-8のように要約されると考えられる。砕波点を貫く離岸流が発生する時、砂は砕波点を貫いて沖に運ばれる。これが海底に窪みを形成させる要因と考えられ、離岸流により運ばれた砂は図-8に示すように窪みの沖合で地形変化を生ずることなく、再び沿岸方向に移動し、岸向きに運ばれ、最終的には沿岸流となって再び離岸流によって流出する。すなわち全体として循環流が形成さ

れ、それによって動的安定な海浜が保たれると考えられる。その証拠の一つに、一宮海岸の実測結果である図-2, 4によれば、窪みは通年で地形変化がほとんど見られなかったことがあげられる。砂は循環流により移動しているものの、沖合へと運ばれて堆積することがないために、窪みは動的平衡状態で安定していると考えられる。

そこで、窪みの形成要因を離岸流による砂の沖向き移動によるものと仮定し、離岸流による砂移動の境界条件を、砕波帯における砂の吸い込み、砕波点沖での湧き出しとして取り扱う新しい等深線変化モデル(宇多ら, 2004)を用いて、窪みの形成・維持と離岸流の発生現象を再現することにした。

4. 吸い込み・湧き出しを考慮した等深線変化モデルによる窪みの形成・維持機構の再現

離岸流による砂移動を考慮した等深線変化モデル(宇多ら, 2004)を用いて、3, 4号堤間の窪み地形の再現計算を行った。さらに計算された海底形状を与えて波・海浜流の数値計算を行い、窪み位置で離岸流の有無を確認した。

海浜変形計算では、離岸流による深掘れを除いた実地形を、海底勾配1/50の一樣勾配斜面にモデル化して初期地形として与え、波を直角入射させた。表-1には計算条件を一括して示す。離岸流の作用は、宇多ら(2004)と同様、漂砂の連続的に湧き出しと吸い込みを付加して表現した。離岸流は砕波点を沖向きに貫く流れであるから、

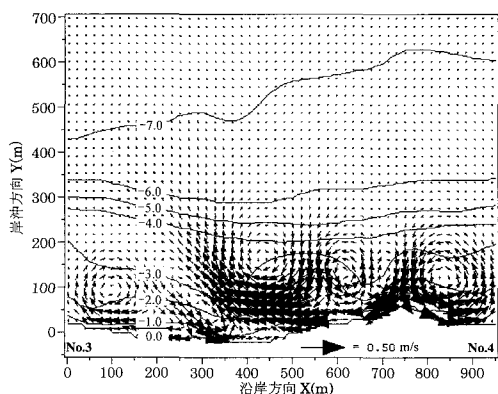


図-6 海浜流の流況 (No. 3, 4号堤間)

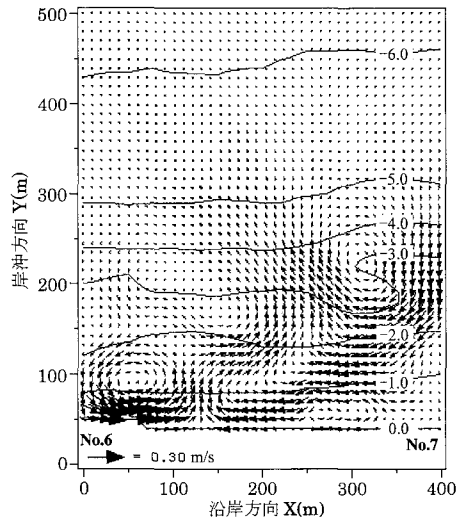


図-7 海浜流の流況 (No. 6, 7号堤間)

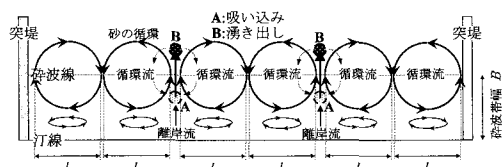


図-8 循環流と砂移動の概念図

表-1 等深線変化モデルの計算条件

計算ケース	ケース1: 離岸流発生による地形変化 ケース2: ケース1の軒岸流発生方向が変化した場合の地形変化 ケース3: No. 3, 4号堤間の地形再現
初期地形	ケース1, 2, 3: 直線平行等深線地形(勾配1/50)
入射波条件	・砕波波高 $H_0 = 2\text{ m}$ ・入射波向 $\alpha_0 = 0\text{ deg}$
地形変化の水深範囲	・地形変化の限界水深 $h = 7\text{ m}$ ・バーム満 $h_b = 2.5\text{ m}$
漂砂量係数	・沿岸漂砂量係数 $K_s = 0.2$ ・岸沖漂砂量係数 $K_x = 0.2x$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	一樣分布
平衡勾配	$\tan \beta_0 = 1/50$
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: $1/2$, 水中: $1/3$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta x = 10\text{ m}$, 鉛直方向 $\Delta z = 0.5\text{ m}$
計算時間間隔 Δt	$\Delta t = 0.5\text{ hr}$
境界条件	左右端: $q_x = 0$, 岸沖端: $q_x = 0$
湧き出し点・吸い込み点	○ケース1: $X = 0, 330, 680, 950\text{ m}$ 測線の-3 m等深線に吸い込み点 ($S = -11765, -25000, -25000, -7353$), $X = 0, 330, 680, 950\text{ m}$ 測線の-4 mの湧き出し点 ($S = 11765, 25000, 25000, 7353$) ○ケース2: $X = 0, 330, 680, 950\text{ m}$ 測線の-3 m等深線に吸い込み点 ($S = -11765, -25000, -25000, -7353$), $X = 0, 340, 690, 950\text{ m}$ 測線の-4 mの湧き出し点 ($S = 11765, 25000, 25000, 7353$) ○ケース3: $X = 0, 330, 680, 950\text{ m}$ 測線の0~-3 mに沖向きに増す三角形分布の湧き出し点 ($S = -1512 \sim -10588, -3214 \sim -22500, -3214 \sim -22500, -945 \sim -6618$). 沿岸方向均一で-4~-6 m等深線に沖向き減じる三角形分布の湧き出し点 ($S = 864 \sim 173$) ※吸い込み量・湧き出し量 S の単位は $\text{m}^3/\text{m/year}$

離岸流による沖向き漂砂の作用は、砕波点の岸側に吸い込み点を、沖側に湧き出し点を与えることで表現できる。ただし、土砂収支を満足させるため湧き出しと吸い込みの総和はゼロとなるように与えなければならない。このため、砕波点(砕波水深 $h_b=3.5$ m)を中心とし、3, 4号堤間において窪みが存在する測線 ($X=330$ m, 680 m) 上において、水深3 mに砂の吸い込み、水深4 mに湧き出しを与えた。また、左右端の突堤脇の離岸流に対しても同様に吸い込みと湧き出しを与えたが、その強さは各々の離岸流の影響する区間長に比例するように与えた。まず、中央部の2組の離岸流の影響範囲がその発生間隔 a の2倍と考える。次に、海岸線長から $2a$ を除いた左右の余剰距離 Δa_1 , Δa_2 を左右端の離岸流の影響範囲と考え、左右端の吸い込み・湧き出しの強さを中央部の一対当りの強さ S に、この影響長さの比率 $\Delta a_1/a$, $\Delta a_2/a$ を乗じたものとした。

海浜変形計算時の波浪諸元は、 $H_0=1.5$ m, $T=6.0$ s, 入射波向 $\theta=0^\circ$ とした。また、波向変動時の流況を調べるため、 $X=330$ m, 680 m 測線上における砂の湧き出し位置が、漂砂の下手側にはほぼ 10° 傾けたケースも行った。

湧き出し・吸い込みを考慮して上記波浪を作用させて等深線変化モデルによる計算を進めていくと地形変化のない平衡状態が達成され、動的安定地形が得られる。さらに現地地形の再現性を向上させるため、湧き出し・吸い込みの与え方を工夫した計算も行った。計算された地形に対する波・海浜流の数値計算での波浪は、 $H_0=1.5$ m, $T=6.0$ s, 入射波向 $\theta=0^\circ$ の不規則波を入射させた。

図-9は3, 4号堤間における等深線の計算結果である。砂の吸い込みと湧き出しを与えた測線では、窪みが動的平衡(安定)状態で求められている。この測線を中心として沖合では等深線が突出し、岸側では凹状となる。図-10は等深線変化モデルにより計算した海底地形時の海浜流である。吸い込みと湧き出しを与えた測線に沿って離岸流が発生し、それを取り囲むようにして循環流が発達している。この循環流は、3対の強い循環流が汀線に沿って並んでいるが、このすぐ沖側にも流速は弱いと同様の3対の循環流が沿岸方向に並んで形成されており、循環流群が岸沖で2列できている。図-6に示した現地地形での海浜流と比較すると、計算結果の沖側に並んだ循環流が現地地形の循環流とよく対応しているが、岸側の強い循環流の形成は現地地形による結果には見られない。これは、現地地形の窪み形状が汀線まで凹状であるのに対し、計算では汀線から水深2.5 mまでの等深線がほぼ直線であるため、現地地形では生じない岸側の強い2列の循環流群が形成されたためと考えられる。

図-11は3, 4号堤間における砂の湧き出し位置を沿岸漂砂の下手方向にはほぼ 10° 傾けたケースの等深線の計算結果である。砂の湧き出し位置が下手側へ移ったために、図-9のケースより沖に凸な部分の位置が沿岸方向にずれている。しかし窪みの形状はほぼ同様であり、動的安定形状が求められる。図-12は、図-11の海底地形時の海浜流である。窪みは右に 10° 傾いて形成されているが、離岸流は窪みの傾きとは逆に左に傾いて発生している。離岸流の作用を考えれば、窪みと離岸流の matching

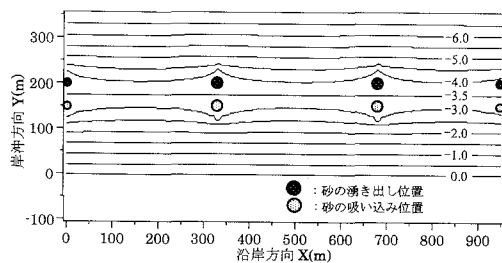


図-9 等深線結果 (ケース1)

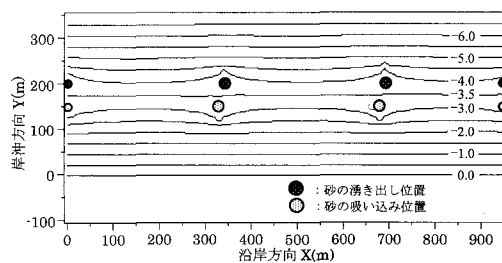


図-11 等深線結果 (ケース2)

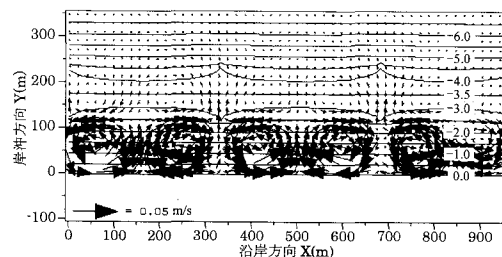


図-10 海浜流の分布 (ケース1)

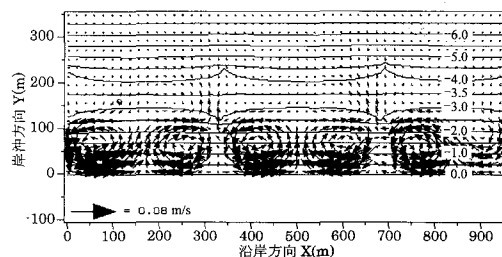


図-12 海浜流の分布 (ケース2)

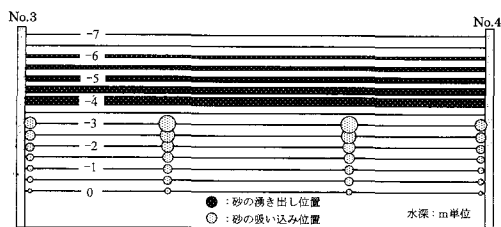


図-13 ケース3の計算条件模式図

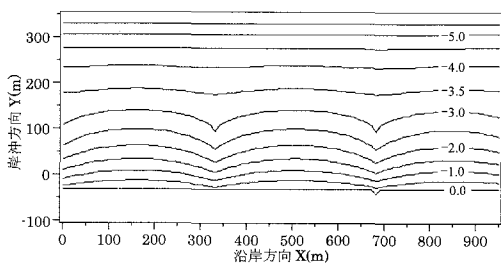


図-14 等深線結果 (ケース3)

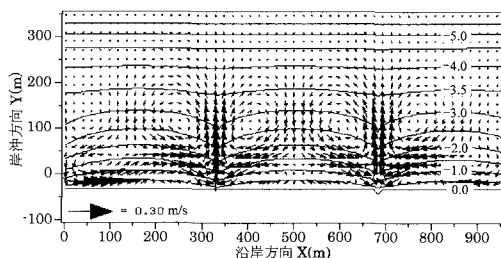


図-15 海浜流の分布 (ケース3)

が取れておらず、したがってこの窪みは与えられた形状を維持することが困難と考えられる。

次に、砂の吸い込みと湧き出し条件について、それらを複数与えた条件について検討した。まず、離岸流が発生する場合、汀線から砕波点に向けて流れが加速され、それによって土砂が運び去られるが、砕波点を通過すると波の岸向きの radiation stress から開放され減速する。これによる砂移動を考えると、砂はむしろ砕波帯の外側一帯に均一に配分されると考えられる。そこで、図-13に示すように離岸流発生箇所の測線上の、砕波点から岸側の水深0~3 mの各等深線に土砂の吸い込み点を設け、その強さは汀線から沖向きに増加する三角形分布として与えた。また、砕波帯沖の水深4~6 mの等深線の沿岸方向の全点に湧き出し点を設け、その強さは水深4 mから沖向きに減少する三角形分布として与え、沿岸方向

は均一の強さの湧き出しを設けた。

図-14は等深線変化モデルにより計算した海底地形である。汀線付近まで砂の吸い込みを与えた地点では等深線が凹状となり、図-2の現地地形とほぼ同様の地形が形成された。図-15は図-14の海底地形時の海浜流である。図-6の現地地形に対する循環流パターンと同様の結果となり、汀線付近の循環流の規模が縮小したことが分かる。現地の地形と流れの再現性が大きく向上している。以上の数値計算より、離岸流による窪みの形成および維持機構が理論的に明らかとなった。これは前報(柴崎ら, 2003)の物理的根拠を与えている。

以上の3ケースの海浜流の数値計算より、窪みが形成されている付近の一つの循環流の大きさ l は砕波帯幅 B とほぼ等しく、3, 4号堤間で沿岸方向に6個の循環流が見られることから、両端突堤で沿岸方向距離が $6B$ ($B=175$ m)の場合、2ヶ所で離岸流が発生すると考えられる。すなわち離岸流が1ヶ所発生するには、少なくとも沿岸方向距離が $3B$ 必要となる。6, 7号堤の沿岸距離は400 mしかないので突堤脇以外で離岸流が発生できない条件であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、海底の窪みは離岸流と岸向き流れとがセットとなった循環流により輸送されている漂砂の存在によって動的平衡状態を保っていることが分かった。その場合、砕波帯幅と突堤間距離が離岸流の発生と密接に関係しており、突堤脇以外で離岸流が1ヶ所発生するには、少なくとも沿岸方向距離が砕波帯幅の3倍は必要であることが分かった。また、窪みと循環流が動的平衡状態にない場合、窪みは離岸流の発生条件に適合したものへ変化することが確認された。

参考文献

- 磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法, 第33回海講論文集, pp. 134-138.
- 宇多高明・芹沢真澄・古池 鋼・三波俊郎 (2004): 2次元ポテンシャル流とのアナロジーに基づく動的安定海浜形状の予測法, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 491-495.
- 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ネルの形態について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 146-150.
- 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.
- 堀川清司 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 221-301.