

離岸流発生を助長するリップチャネルの形態について

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

現地海岸ではカस्प地形の凹状部分においてしばしば離岸流が観察される。本研究では、砕波帯近傍における凹状の窪みの形態と、離岸流発生との関係について、遠州海岸での実例を示した上で移動床模型実験を行うとともに、波・流れの数値実験により検討した。リップチャネル（窪み）の形態を様々変化させて離岸流の最強流速と窪みの形状の関係を調べたところ、窪みの形状に大きく依存せず離岸流が発生することが分かった。離岸流の発生範囲が窪みの形状から見てブロードバンドであることは、それに近い条件がしばしば発生する可能性を示している。

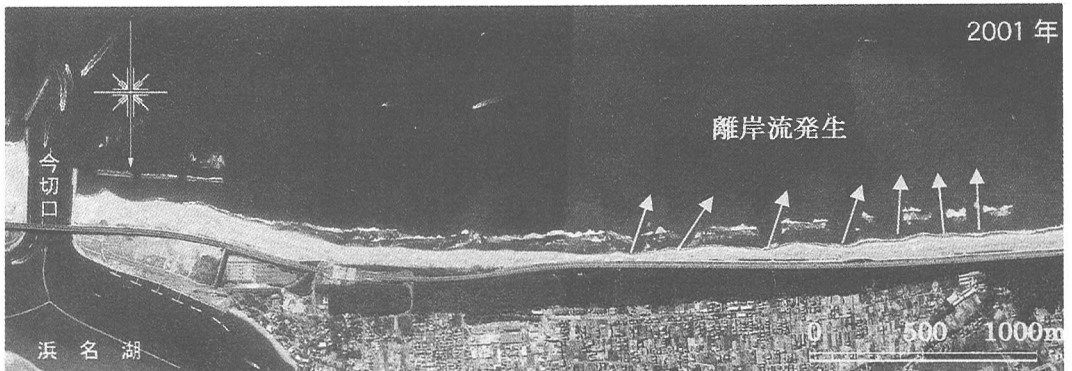
1. はじめに

近年、人々の海のレジャーを楽しむ機会が増えており、中でも海水浴は身近なレジャーとして多くの人々によって楽しまれてきている。しかし海水浴中の水難事故も多く、死亡事故等の重大事故も毎年起きている。水難事故の原因として多いのが離岸流である。とくに外洋に面した砂浜海岸では離岸流が発生し、重大事故の原因となることが指摘されている（高橋ら, 1999）が、未だに死亡事故は減少していない。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。ところで、現地海岸ではカस्प地形の凹状部分においてしばしば離岸流が観察されるが、凹状の海底の窪み（リップチャネル）の形状と離岸流に関する詳細検討は十分でないようである。そこで、本研究では、凹状の窪みの形態と離岸流発生との関係を遠州海岸での実例を示した上で、移動床模型実験を行うとともに、波・流れの数

値実験により検討する。

2. 遠州海岸におけるリップチャネルと離岸流の発生

写真—1 は、浜名湖今切口導流堤の西約 3 km 付近において 2001 年 10 月 12 日に撮影された空中写真である。写真に示すように、緩い弓状の海岸線の 7 箇所でカस्प状地形が見られ、そこでは汀線が凹状となるとともに、その沖では砕波が生じていないことから、そこに窪みが形成されていることが分かる。また砕波帯を貫いた窪みの沖合では、岸側から沖向きに運ばれたと見られる濁りの拡散が見られることから、この窪みはリップチャネルであって、そこでは離岸流が発生していることが分かる。このような窪みが維持されている原因は明らかではないが、窪みの存在は、その形態によらず常に離岸流を引き起こす要因となっているかどうかについては明らかではない。本研究ではこの点に着目し、窪みの形態と離岸流



写真—1 浜名湖今切口導流堤の西約 3 km 付近の空中写真

の発生について調べるものである。

3. 移動床模型実験と波・流れの数値計算の概略

前節で述べた海底の窪み（リップチャネル）と離岸流の関係を詳細に調べる上で、現地海岸の空中写真の分析

* 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 (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)
**** 学生会員 修(工) 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 日本大学理工学部海洋建築工学科助教

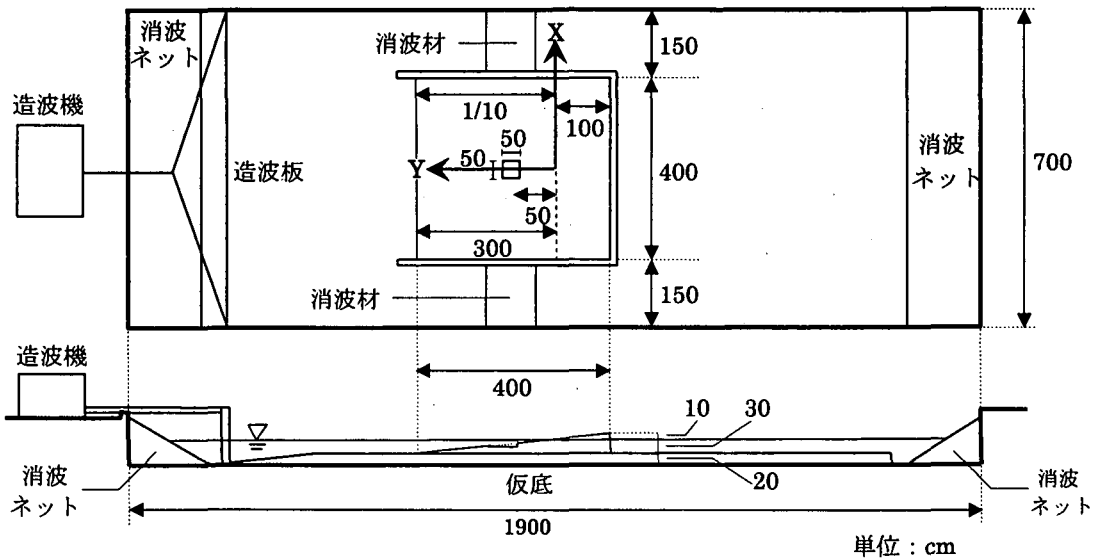


図-1 離岸流に関する平面実験のための模型概要

のみでは限界がある。なぜなら撮影回数が少なく、また海底形状の定量データもないためである。そこで移動床模型実験によって海底の窪みと離岸流発生の関係を調べることにした。実験では、まず図-1に示すように幅7mの平面水槽を用い、この中に沿岸方向4m、岸沖方向4mの区域を導波板で仕切り、そこに中央粒径2mmと0.2mmの砂を用いて海浜勾配1/10の一樣海浜を造った。さらに碎波点(水深5cm)を中心に沿岸方向0.5m、岸沖方向0.5m、深さ5cmの窪みを掘り、それによる波の屈折特性の変化や海浜流について調べた。実験は移動床であるが、離岸流の実験では造波直後に全ての測定を終えた。実験波浪は、 $H_0=4$ cm, $T=0.8$ sの規則波を作用させた。海浜流の流況は、実験開始直後にフロートを投入し、その移動状況を5s間隔で20s間の写真撮影により計測した。なお波浪の作用時間は3時間とし、波の作用による窪みの埋め戻しについても調べている。この場合の海浜形状の測定は沿岸方向に0.5m、岸沖方向に0.2m間隔で行った。

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編(1985)のモデルを用いた。計算では、現地スケールとして模型の100倍を考え、沿岸方向400m、岸沖方向400mの区域を計算範囲とした。窪みの規模も100倍とし、 $H_0=4$ m, 周期8sの波浪条件で計算を行った。

4. 実験結果に対する数値計算結果の比較検証

図-2はフロート追跡によって求められた海浜流の流況図である。窪みの周辺では、 $X=0$ cmを境に右側では反時計回りの循環流が発生している。 $X=0$ cmより左側

でも規模は小さいものの時計回りの循環流が発生している。しかしながら窪みの中では離岸流ではなく、むしろ向岸流が発生した。このことから単に碎波帯付近に、ある規模を有する海底の窪みがあれば離岸流が発生するものではないことが分かる。なお、窪みの中心に対し循環流の規模が左右非対称であり、窪みの中心線より右側で循環流の規模が大きい。これは沖合の等深線が汀線と

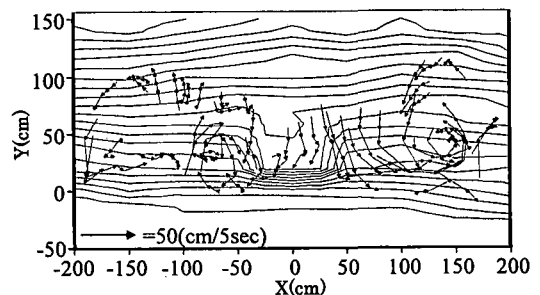


図-2 フロート追跡による海浜流の流況(模型実験)

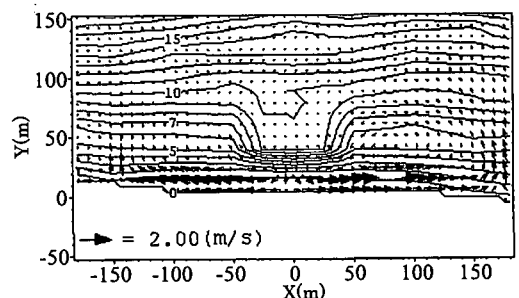


図-3 海浜流の流況(数値計算)

平行ではなく、全体に右側の方が浅い地形であったために、波の屈折により窪みの右側で波の集中があったことに起因すると推定される。

図-3は実験と同一条件での海浜流計算の結果である。窪みの中心($X=0\text{ m}$)を境に、右側では反時計回りの、また左側では時計回りの循環流が生じるとともに、汀線付近では窪みの中心から両側へと、窪みの中心から離れる方向に強い沿岸流が生じている。これらのうち窪みの両側における一対の循環流の発生は実験結果と良く合致し、海浜流モデルの実験への適合性はかなり高い。また計算で明瞭に見られる窪みの中心線から左右へと向いた強い沿岸流は、窪みの岸側の汀線を凹状とする作用を引き起こすと考えられる。

以上の平面実験と数値計算両者による検討によれば、実験で設定した条件のもとでは、窪みの中で離岸流の発生はない。このことは、単に窪みを形成させるのみでは離岸流の発生とは無関係であり、窪みの形状についての詳細な検討が必要なることを示唆する。少なくとも、実験で設定した窪みの平面形状、すなわち窪み側面の等深線の、汀線とのなす角が約 90° では離岸流が発生しないことが分かる。窪み側面の形状と離岸流の関係を詳細に調べるには、窪みの形状を様々な変えた平面実験を行う必要がある。しかし、多くの平面実験を行うことは容易でない。一方、少なくとも数値計算では、実験で与えた窪み条件での海浜流の再現性はかなり良好であったことを考慮すれば、この種の検討に対する数値モデルの適用性はかなり高いと判断できる。そこで以後の検討では数値モデルを用いて検討を進めることにした。

5. 離岸流の発生に関する数値実験

碎波帯付近における海底の窪みの側面の形状に注目し、窪み側面の等深線(例は水深 7 m)の汀線となす角(θ)がほぼ直角のものを基本とし、図-4の模式図に示すように8ケースの窪み条件を考えた。窪みは基本水深分布を平滑化して設定した。等深線と汀線とのなす角は、ほぼ 90° 、 80° 、 70° 、 55° 、 45° 、 30° 、 12° 、 6° と変えている。こ

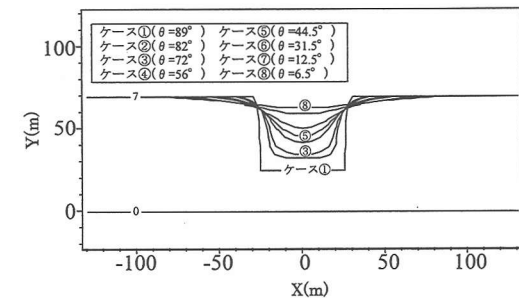
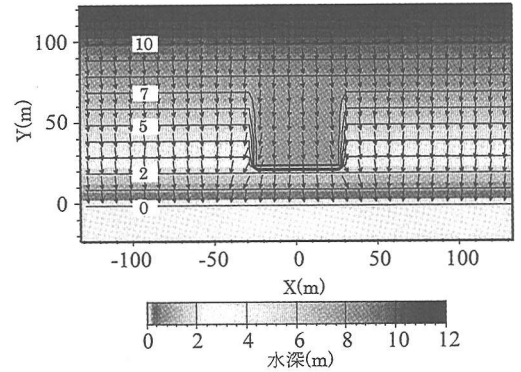


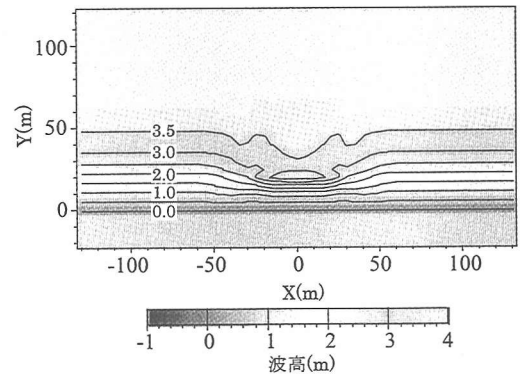
図-4 7 m の等深線で代表させた窪みの形状

れらの窪みの形状を与えてそれぞれ数値実験を行った。計算結果については各ケースとも(a)波向分布、(b)波高分布、(c)海浜流の分布の順に表示する。なお、数値計算範囲は沿岸方向に 400 m 、岸沖方向に 400 m であるが、計算結果を見易くするために窪み周辺を切り出し、沿岸方向に 260 m 、岸沖方向 140 m の範囲を拡大して結果を示す。

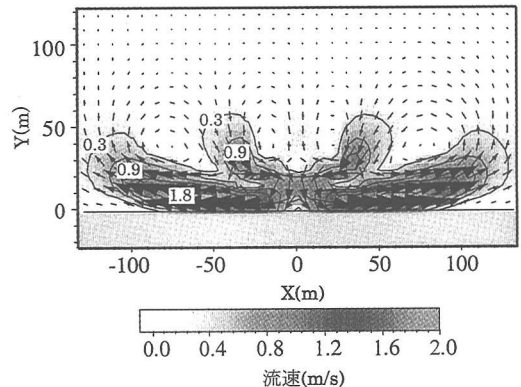
図-5(a), (b), (c)には $\theta=89^\circ$ の計算結果を示す。こ



(a) ケース① 波向分布



(b) ケース① 波高分布



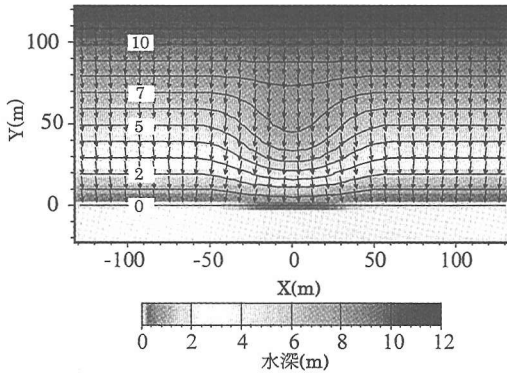
(c) ケース① 海浜流の分布

図-5 計算結果 ($\theta=89^\circ$)

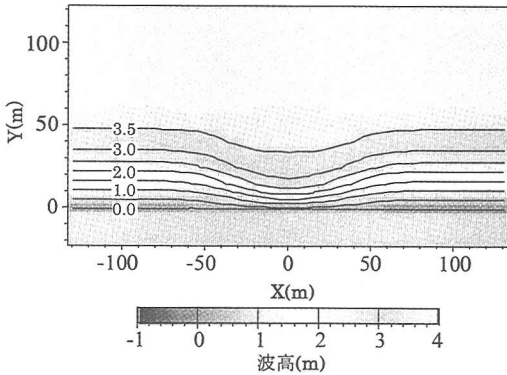
の場合、汀線近傍まで深みが迫っているため窪みの陸側端部付近で急激な屈折が生じ、汀線近傍での波の入射方向は窪みから離れる向きとなる。これに対して窪みの両側の区域では、等深線が平行で波の入射方向と直交している。波高分布に関しては、窪みがあるために汀線近傍に高波高が現れている。以上の波向と波高分布に応じて、汀線近傍において窪みから両側へと向かう強い沿岸流と

その結果としての循環流が生じる。これに対して離岸流の発達には弱い。

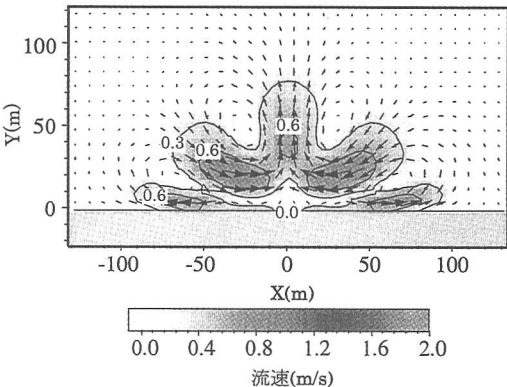
図-6(a), (b), (c)には窪みが中程度の場合($\theta=45^\circ$)の計算結果を示す波向分布で注目されるのは汀線近傍においては窪みの存在に起因して窪みから離れる方向に波が入射しているが、それ以上に明確な変化として、汀線より沖合において等深線が斜めに傾いたために結果と



(a) ケース⑤ 波向分布

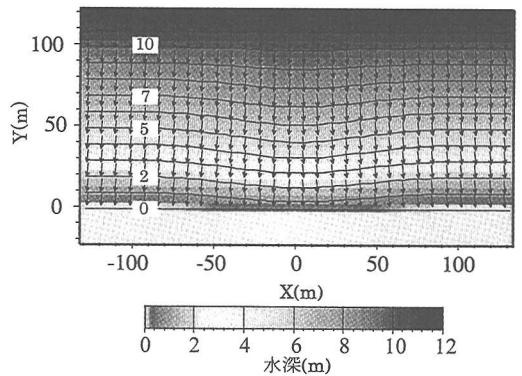


(b) ケース⑤ 波高分布

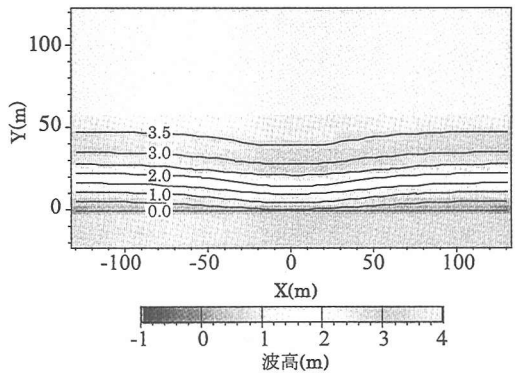


(c) ケース⑤ 海浜流の分布

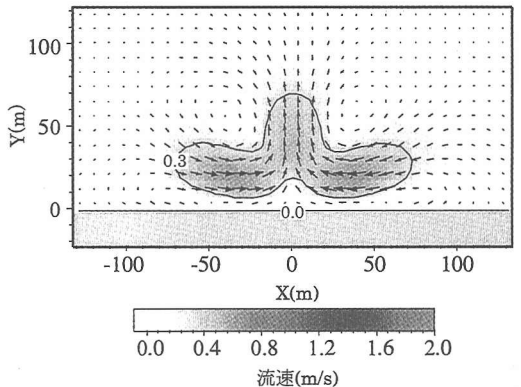
図-6 計算結果 ($\theta=45^\circ$)



(a) ケース⑧ 波向分布



(b) ケース⑧ 波高分布



(c) ケース⑧ 海浜流の分布

図-7 計算結果 ($\theta=6.5^\circ$)

して入射波が斜め入射することになったことである。またこの場合も波高分布については窪みの存在によって汀線近傍で高波高が現れている。以上の結果汀線近傍での窪みから両側へと向いた沿岸流およびその結果としての循環流は弱まったが、逆に離岸流が非常に強くなった。

図-7(a), (b), (c)には緩やかな窪みの場合($\theta=6.5^\circ$)の計算結果を示す。この場合、窪みの存在による波の屈折が弱まり、汀線付近では波がほぼ直角入射することになった。しかしこの条件でも窪みの両側では等深線が斜めに走るために、海岸線に対して直角入射する波が窪みの右側では右回りから、窪みの左側では左回りから入射する斜め入射条件となっている。波高分布については他のケースと同様、窪み部分では波高が高くなる。以上の結果、汀線付近において窪みから離れる方向の沿岸流は消失し、沖合で窪みに向かう沿岸流が発生すると同時に、窪みの両側から窪み中心へと両側から集まる沿岸流が会合して離岸流が発生した。

全8ケースについての離岸流の最強流速と θ の関係を示すのが図-8である。窪みの程度を表す θ については 10° から 80° の間で 50 cm/s 以上の離岸流となり、窪みの形状に大きく依存せずに離岸流が発生することが分かる。 θ に関して鋭いピークを有する固有値ではなく、広いバンドで離岸流が発生することが興味深い。また θ が大きい場合(図-5(c))、ごくわずかに離れた場所でも汀線付近で流れの向きが反転する複雑な流況となることも注目される。

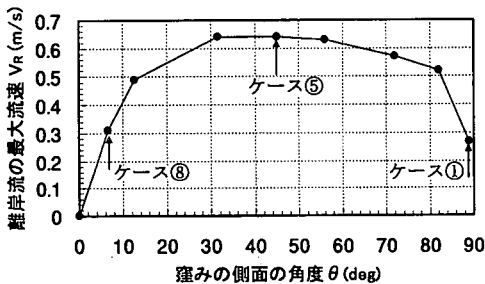


図-8 離岸流の最強流速と θ の関係

6. 考 察

全8ケースについての離岸流の最強流速と θ の関係(図-8)によれば、窪みの形状に大きく依存せずに離岸流が発生することが分かった。 θ に関して鋭いピークを有する固有値であれば、離岸流の発生は非常に限られた条件下で発生するので事故防止を図り易いと考えられる。しかし発生範囲がブロードバンドであることは、それに近い条件がしばしば発生する可能性を示している。

このことは離岸流による流出事故の防止を図る上でより難しい条件にあると考えられる。

また θ が大きい場合($\theta=90^\circ$)、ごくわずかに離れた場所でも汀線付近で流れの向きが反転する複雑な流況となったことも注目される。一方向の流れのみであれば、流れに抵抗する姿勢を保つことは海水浴に慣れていない人でも可能である。しかし、ごく短い距離で流れの向きが反転することは、ある方向からの流れに抵抗しようとする姿勢そのものが逆流に対しては逆効果となってバランスを失う原因となることから、危険度の増加を招くと考えられる。

本研究では、入射波高 4 m という条件で計算を行っている。したがって離岸流の最強流速の絶対値自体には深い物理的意味を有していない。注目すべきは、流れの流速の絶対値ではなく、窪み側面での等深線の形状に依存した波向場の変化である。窪みの存在によって沿岸方向に等深線がなだらかに後退していれば窪み中心へ向かう沿岸流と、その結果としての離岸流が発生し、急深な窪みではむしろ窪みの汀線近傍に強い沿岸流が引き起こされることである。このような急深な窪みの両側における窪みから離れる方向の強い沿岸流は、窪み背後の汀線後退を引き起こす原動力になると考えられる。このことが海底谷や急深な海底掘削穴背後の汀線が凹状となることの理由を与えている。

7. ま と め

本研究では、砕波帯近傍における凹状の窪みの形態と、離岸流発生との関係を水理模型実験および波・流れの数値実験により検討した。水理実験によると、砕波帯付近に海底の窪みがあればいつも離岸流が発生するものではなかった。しかし、数値実験によれば、窪み側面の角度 θ がほぼ 10° から 80° の範囲で 50 cm/s 以上の離岸流が発生した。窪みの形状に大きく依存せず広いバンドで離岸流が発生することは、窪み周辺での離岸流による流出事故の防止を図る上で厳しい条件にあることを意味する。また、 θ が大きい場合($\theta=90^\circ$)、汀線付近で流れの向きが反転し、遊泳者にとって危険度の増加につながることも明らかになった。

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・碎波変形の計算法, 第33回海講論文集, pp. 134-138.
- 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.