

鳥取県浦富海岸で観測された離岸流の特性

出口 一郎* ・ 荒木 進歩** ・ 竹田 怜史***
松見 吉晴**** ・ 古河 泰典*****

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った。既設潜堤開口部背後では、入射波高の増大に伴って顕著な地形性離岸流が観測された。このような離岸流は、ラディエーション応力を外力とする従来の海浜流予測モデルでも再現された。またビデオ撮影によっても典型的な離岸流をとらえることができたが、その多くは入射波高が 1 m 未満の場合で、持続時間も 10 分以内という非定常な流れで、発生位置も不規則であった。このような流れは、従来の海浜流予測モデルでは計算されず、その予測方法については、今後に残された大きな問題点である。

1. ま え が き

2002 年度のマリンレジャーに伴う人身事故発生件数は、908 件で、そのうち遊泳中・サーフィン中の事故が 402 件である。その中には離岸流が原因と考えられる事故も数多く含まれている。第 8 管区海上保安本部管内においてもここ十年の平均で毎年ほぼ 100 件の事故が発生し、遊泳・サーフィン中の事故がほぼ半数を占め 20~30 名の死亡・行方不明者が記録されている。鳥取県浦富海岸では、2001 年夏に遊泳中の 7 名の学生が離岸流に流され、そのうち 2 名が水死する事故が発生した。遊泳者の安全性を確保するためには、離岸流の発生条件、発生した流れの特性等を明らかにする必要がある。このような流れは、沿岸浅海域における漂砂などの物質輸送を解明する上でも重要である。

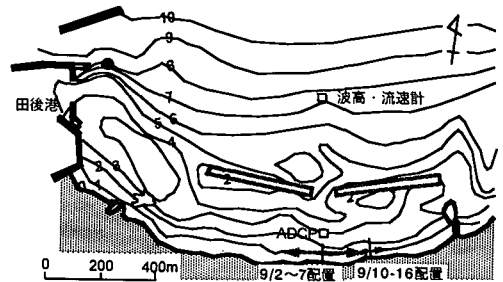
本研究は、浦富海岸での波浪（水位変動）と流速の多点観測と、上空に係留した飛行船からのビデオ撮影による流況観測により、離岸流の発生条件、発生した離岸流の時空間変動特性について検討することが目的である。

2. 浦富海岸の概要と離岸流の実測

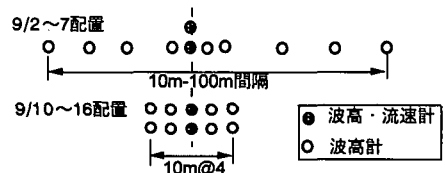
対象海岸の浦富海岸は、東西両端を岩礁に囲まれた約 1.4 km の砂浜海岸で、そのほぼ中央に天端水深 DL-2 m、天端幅 30~50 m、堤長 400 m の潜堤が 2 基設置されている。なお、西側岩礁は田後港に隣接する。

離岸流の実測は、2002 年 9 月 2 日から 16 日の間に、潜堤の沖側、水深約 7 m の地点に波高・流速計 (Wavehunter-Σ)、潜堤開口部岸側水深約 3 m 地点に ADCP (Workhorse)、水深 0.6 m~1.2 m の極浅海域に 10~11 台の圧力式波高計と 2 台の電磁流速計を沿岸方向 10~100 m 間隔で設置し、波と流れの測定を行なった。対象海域の概略と計測機器の配置を図-1 に示す。

波高・流速計は、入射波浪特性を把握するために設置



(a) 浦富海岸概略平面と計測器の配置



(b) 極浅海域における計測器の配置

図-1 浦富海岸の概略と計測機器の配置

したもので、サンプリング間隔 $dt=0.5$ s で設置期間中 (9 月 2 日 10 時~16 日 10 時) の連続計測を行った。ADCP は、後述する海浜流の数値予測結果によって明らかになった、潜堤開口部で発生すると予測される離岸流の計測を目的として設置したもので、 $dt=60$ s で設置期間中の連続計測を行った。測定水深は、海底から 1.7 m、2.0 m、2.2 m の 3 層である。2 台の電磁流速計と同じ位置に設置した 2 台の圧力式波高計は、 $dt=0.5$ s で、1 時間に 20 分間のバーストモード計測を 72~96 時間間隔で、他の極浅海域に設置した圧力式波高計は $dt=1$ s の連続計測を 48 時間間隔で行った。

さらに、風速が 7 m/s 以下であった 9 月 3~6 日及び 10~15 日には、長さ 12 m、容量 14 m³ の飛行船を上空 100 m~150 m に係留し、飛行船に取り付けたビデオカメラから、投入したシーマーカー (海難救助用染料) の軌跡を追跡することによって離岸流を含む極浅海域の流況観測も行った。

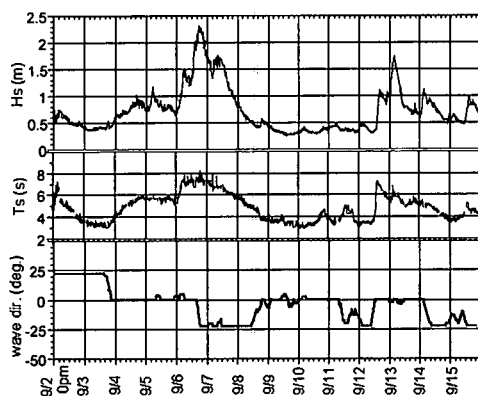
* 正 会 員 工 博 大阪大学大学院教授工学研究科土木工学専攻
** 正 会 員 工 博 大阪大学大学院助手工学研究科土木工学専攻
*** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科
**** 正 会 員 工 博 鳥取大学工学部助教授社会システム工学科
***** 第 8 管区海上保安本部海洋情報部

3. 実測結果

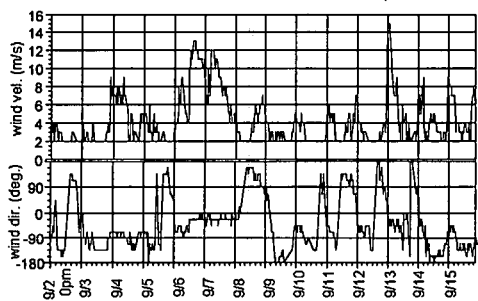
(1) 実測期間中の来襲波と風向、風速

図-2(a)に、水深7m地点で測定された水位変動から20分間隔で計算された来襲波の有義波高、周期及び波向の時系列、(b)に長尾鼻灯台で30分間隔で計測された平均風速と風向、(c)にADCPによって計測された北-南及び東-西方向流速の20分移動平均値の時系列を示す。

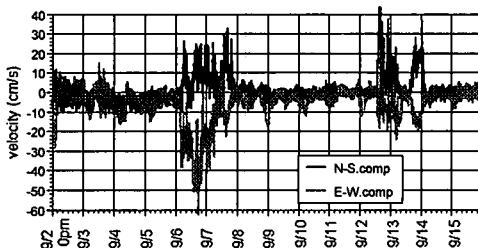
波向及び風向の0度は磁北に対応し、時計回りに計測した方向で、ADCPの測定結果は、3層の平均値である。また、横軸の日付けを付した時間は正午である。長尾鼻灯台は、浦臣海岸の約20 km西に位置する。



(a) 水深7m地点での波高・周期・波向



(b) 長尾鼻で測定された風速・風向



(c) ADCPで測定された断面平均流速

図-2 実測期間中の来襲波高、風速・風向及び代表地点の平均流速

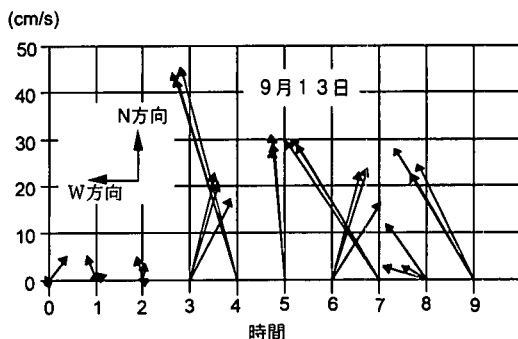


図-3 ADCPで測定された流速ベクトルの時間変化の例

図-2(a)より、実測期間中、水深7mで測定された入射波の有義波高が1mを越えたのは9月5日、6～8日、13日及び14日の4回で、9月7日には2.0mを越える波浪が6時間継続して入射した。これら高波浪の有義周期は6～7sで、来襲方向はN～NNEである。図(b)より、この時期には10 m/sを越える北風が吹いていたことがわかる。しかし、9月13日未明の波高及び周期の急増の原因は不明である。

図-2(c)に示す水深約3mの地点で測定された流速も、来襲波の波高2mを越える時期に急増し、9月13日朝には40 cm/sを越える流速が観測されている。図-3は、離岸方向の流速が急増する9月13日0時から9時の間に毎正時に測定された3層の流速ベクトルの時間変化を示す。図中には、測定水深による区別は示していないが、ある程度の平均流が存在する場合の流速は、測定された範囲内ではほぼ一様であることがわかる。

(2) 飛行船ビデオによってとらえられた離岸流

飛行船を揚げる事ができた9月3～6日及び10日から15日の間で、9月3、5、14及び15日に離岸流の発生が視認できたことから、離岸流発生位置にシーマーカーを投入し、飛行船積載ビデオによりその軌跡の撮影を行った。

図-4にシーマーカー投入点とその流向を、図-5に5日11時に投入されたシーマーカーの3分後の広がりを示す。図-4より明らかなように、観測された多くの離岸流は潜堤開口部背後の汀線近くから発生するが、潜堤背後で発生する離岸流も認められた。図-2より明らかなように、5日及び14、15両日の入射波高は、特に大きなものではなく、強い風が吹いていたわけではない。また、水深約3mでADCPによって測定された流速には顕著な離岸方向流速は生じていない。

図-5に示すシーマーカーの先端は、平均的な碎波線を突き抜け、投入後3分で約80m離岸方向に移流し、離岸流頭を形成している。平均的な離岸流速はほぼ40 cm/sである。しかし、シーマーカー投入後6～7分でこの離

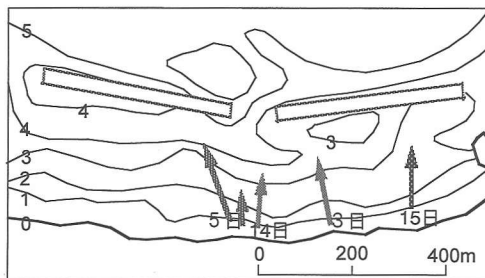


図-4 視認された離岸流発生地点

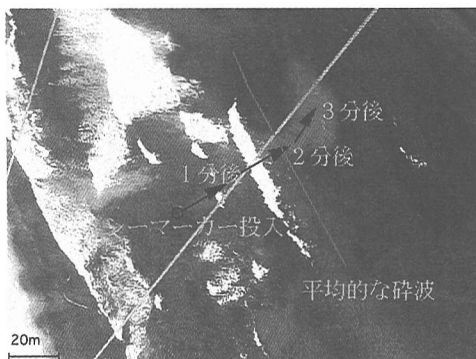


図-5 撮映されたシーマーカーの軌跡 (9月5日11時)

岸流は消滅した。他に撮影された離岸流も、その継続時間は高々10分程度、幅は10m程度であった。

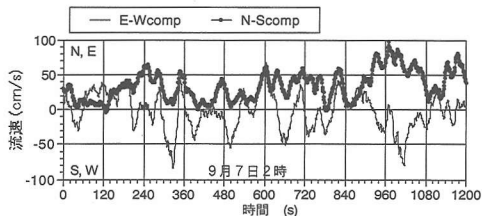
なお、飛行船ビデオでとらえられた離岸流は、全て極浅海域の電磁流速計設置地点を避けて発生した。

(3) 極浅海域の電磁流速計で測定された離岸方向流速

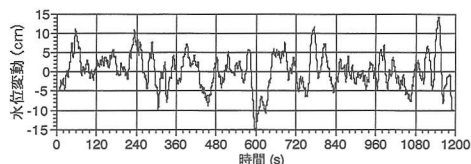
極浅海域(水深約0.8m)に設置した電磁流速計によっても、9月2日、6日夜半から7日未明にかけて、7日夕方、8日午前中、及び15日夕方に強い離岸方向の流速が計測された。このうち、6日から7日にかけては、図-2より明らかなように有義波高が2mを越える波が来襲していたが、その他の場合の来襲波波高は1m以下で、風速も強くない期間である。

9月7日2時及び18時からそれぞれ20分間に測定された流速の北-南及び東-西成分と、同じ地点で測定された圧力変動から LCM 法 (Wang ら, 1986) で変換された水位変動の時系列の例を図-6, 7に示す。なお、流速と水位変動は、20s間の移動平均を取った値である。

図-2に示すように、来襲波は、9月6日深夜に最大となり、7日は来襲波が減衰する時期に対応するが、7日18時の時点ではまだ1m以上の波浪がほぼ北から入射している。図-6(a)に示す7日2時から測定された海浜流の流速は、ほぼ20分間連続して離岸方向を示し、特に

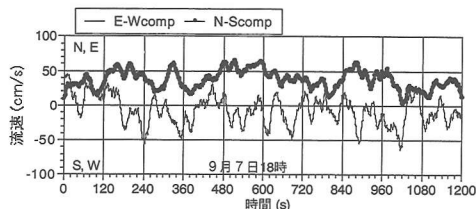


(a) 海浜流流速

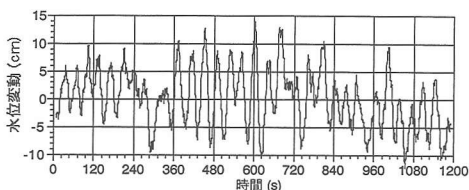


(b) 水位変動

図-6 極浅海域で測定された海浜流流速と水位変動 (9月7日2時)



(a) 海浜流流速



(b) 水位変動

図-7 極浅海域で測定された海浜流流速と水位変動 (9月7日18時)

18分では最大1.0 m/sの流速が記録され、その前後約2分間にわたり0.5 m/s以上の強い流速が連続している。しかし変動が大きく、またその変動のパターンは、図(b)に示す水位の変動とは明確な対応を示さない。

図-7(a)に示す7日18時から測定された流速も20分間連続して平均0.3 m/s程度の離岸方向を示し、その変動量は図-6に示す離岸流より遥かに小さくなっている。しかし(b)に示す水位変動の時系列とは明確な対応を示さないのは、前者の場合と同様である。

図-8は、図-6に示す海浜流のN-S方向(岸沖方向)成分と、流速計と同じ位置に設置した圧力式波高計から LCM 法で計算された水位変動及び水深7m地点で超音波波高計で測定された水位変動のスペクトル (それぞれ

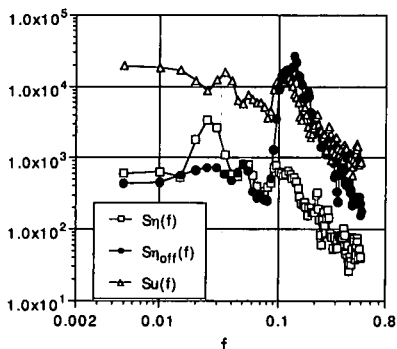


図-8 水位変動と流速スペクトル (9月7日2時)

$Su(f)$, $S\eta(f)$ 及び $S\eta_{off}(f)$ とする)を示したものである。

$S\eta_{off}(f)$ は, $f=0.13$ Hz と 0.05 Hz 及び 0.025 Hz の長周期側に計3つのピークを有し, $S\eta(f)$ もほぼ同じ周波数にピークが存在する。一方, $Su(f)$ の 0.12 Hz 周辺のピークは水位変動のスペクトルピークと一致するが, 長周期側では 0.035 Hz にピークが存在し, このピークは水位変動のスペクトルには存在しない。このような傾向は, 顕著な離岸方向流速が生じていない時間における水位変動と流速のスペクトル解析結果においても見られた。

一方, 後述するように, 高波浪来襲時に潜堤開口部で発生する離岸流は, 流速計設置位置近傍では顕著ではないものと予想される。したがって, 図-6, 7 に示されるような強い離岸方向の流れは, 局所的な離岸流を捉えたものである可能性がある。さらに図-6, 7 の流速と水位変動の時系列あるいは図-8 に示すスペクトル解析結果から, 極浅海域で測定された流れは, 水位変動とは無関係に生じていること, すなわち波動性を持たないことがわかる。

4. 海浜流シミュレーションで予測される流況

従来の海浜流数値予測手法で, どのような海浜流が計算されるか検討した。まず非定常緩勾配方程式で波の場とラディエーション応力を計算し, それを外力として海浜流を計算するという方法で計算を行った。計算領域は, 2基の潜堤を含む東西方向 2.4 km で, 水深 10 m 以浅の領域である。また, 計算波浪は, 水深 7 m の地点で測定された波浪条件 (波高・周期・波向) を参考に, 波向 N, 波高 0.5 m~2.0 m, 周期 6 s~7 s の範囲を対象とした。

図-9(a)~(c)に波高 0.5 m, 1.0 m 及び 1.5 m (いずれも周期は 6.5 s) の場合に計算された海浜流ベクトルを示す。

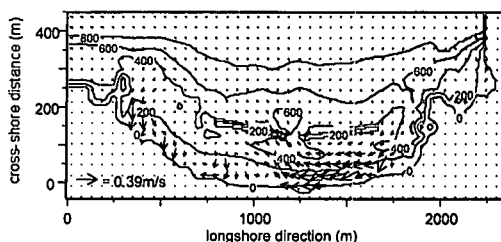
図-9(a)に示す入射波高が小さい場合は, 潜堤の影響を顕著に受けず, 東側潜堤背後の水深 4 m 以浅で発生した沿岸流が西側潜堤に向かって流れ, 西側潜堤背後では,

幅雑な流れが形成される。図(b)に示す入射波高が 1.0 m の場合は, 潜堤の影響を受け西側潜堤背後で生じた沿岸流が潜堤開口部に向かって流れる弱い離岸流が形成される。図(c)に示す入射波高 1.5 m の場合は, 入射波高 1.0 m で現れた開口部の離岸方向流れが強化される。

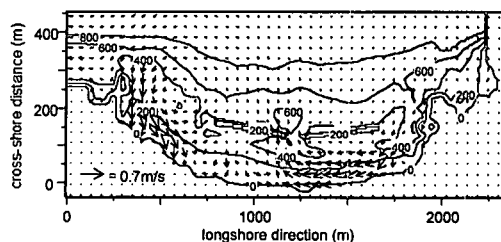
入射波高が 1.0 m 以上の場合に, 西側潜堤背後で形成される沿岸流が開口部背後で流向を変える水深は, 2 m 以深である。この位置は, ADCP 設置位置と一致し, 図-2(c)に示した ADCP 流速計の測定結果に現れる離岸方向流速は, ちょうどこのような高波浪来襲時に発生する離岸流と推定される。

しかし, 本研究で行った海浜流シミュレーションは, 定常な波の入射によって発生する定常な海浜流を対象としているため, 当然図-6 に示したような変動の大きな離岸流は計算されない。また, 来襲波浪がさほど大きくない 9 月 5 日に観測された寿命の短い離岸流や 9 月 15 日に観測された潜堤背後で発生する離岸流も計算することができない。

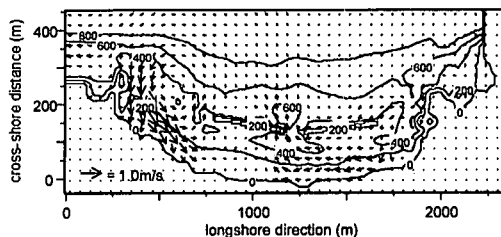
一方, 実測期間中には, しばしば計測器の埋没が生じ



(a) 海浜流ベクトル (波高 0.5 m, 周期 6.5 s, 波向 N)



(b) 海浜流ベクトル (波高 1.0 m, 周期 6.5 s, 波向 N)



(c) 海浜流ベクトル (波高 1.5 m, 周期 6.5 s, 波向 N)

図-9 海浜流計算結果

た。例えば ADCP 設置地点では、5 日間に約 1 m の堆積が生じ、設置架台が埋没し、潜堤開口部(初期水深 5 m)に設置した圧力式波高計が約 0.7 m 埋没し、回収不能となった。浦富海岸の底質は平均粒径約 0.02 cm と細かく、顕著な漂砂移動が生ずることにより短時間に大きな水深変化が生じる海岸である。このような海岸での離岸流の発生を議論するには流体系と移動床上での両方の不安定増幅機構を考慮した解析(日野, 1974)も必要と思われる。また、寿命の短い非定常な離岸流の発生機構についても、新たな理論の構築が必要である。

このとき、波浪場あるいは海浜流は、水深に大きく依存することから、より正確に海浜流の予測を行うには、簡便で精度の高い海底地形の測定方法を開発する必要がある。

5. あとがき

浦富海岸で行った離岸流の実測結果に基づきその特性の解析を行った。得られた結果を要約すると、以下の通りである。

① ADCP で実測された流速は、強い海浜流が発生している場合は海底から 1.7 m~2.2 m の領域ではほぼ一様で、入射波高が 1.0 m 以上になると 0.3 m/s~0.4 m/s の冲向き平均流が観測されたが、この結果は従来の海浜流数値シミュレーションで再現された。

② 飛行船を上げることができた期間内で計 5 回、ビデオ撮影により明確な離岸流が観測できた。このうち、

4 回の入射波高は 1.0 m 以下で、人工リーフ開口部背後で発生したのは 3 回、その他は東側人工リーフ背後で発生した。観測された離岸流はいずれも 0.4~0.6 m/s の流速を有し、平均的な碎波帯を突き抜けて離岸流頭を形成したが、ほとんどが 5 分以内で消滅し、10 分以上継続するものは観測されなかった。

③ 極浅海域で計測された平均流の流速も入射波高が 1.0 m を越えると急激に増大し、冲向き平均流速が 1.0 m/s 以上となる流れもしばしば観測されたが、この様な強い冲向き流れは、高々数分程度しか継続しない。

④ 上記②及び③で述べた入射波浪場がほぼ定常な場合でも発生する継続時間の短い離岸流(冲向き流れ)あるいは人工リーフ背後で発生する離岸流は、いわゆるラディエーション応力を外力とする浅水方程式で予測することはできず、その予測方法については、今後に残された問題点である。

最後に本研究を行うに当たり、第 8 管区海上保安本部の支援を受けた。また本論文は、文部科学省科学研究費(基盤研究(B)(2)15360266)によって作成され他ものであることを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 日野幹雄 (1973): 海浜流系の発生理論, 土木学会論文報告集, 第 225 号, pp. 17-29.
Wang, H., D. Y. Lee and A. Garoia (1986): Time series surface-wave recovery from pressure gauge, Coastal Engineering, Vol. 10, pp. 379-393.