

リモートセンシングによる海浜流循環の観測

橋 本 宏*・宇 多 高 明**・ 新行内利隆***

1. ま え が き

近年、沿岸流や離岸流の構造およびその発生機構などについて盛んに研究が行われるようになった。しかしながらその多くの研究は砕波帯幅の数倍程度の比較的小規模な海域における流れの解析に重点があり、ポケットビーチ全体における流れのように大規模な海浜流循環に関して議論したものはそれほど多くはない。

このような問題について、O'Rourke・LeBlond¹⁾は砕波帯幅が湾の半径に比較して十分小さいと仮定して半円形状の湾内の海浜流循環を理論的に明らかにした。また著者の1人は²⁾、曲線座標系を導入することによってカスピ状海岸における海浜流循環を理論的に明らかにした。しかしながらいずれの研究においても、この種の大規模海浜流循環が現地海岸で実際に生じうるかどうかの検討は行われていない。このため本研究では、このような流れが実際に生じうるかどうかを現地観測によって調べることにした。

一方、著者らは数年前よりリモートセンシング技術の海岸調査への応用を図って来た^{3)~5)}。これによりリモートセンシング技術は、広域をほぼ瞬時に調査可能という利点を生かせば、海岸調査に相当有効であることが見出された。したがって、本研究ではポケットビーチにおける大規模な海浜流の実態を把握するために、阿字ヶ浦より日立港に至る海域を例としてとり上げ、リモートセンシング技術を用いた観測を実施することにした。観測は昭和54年8月に実施されたが、この結果、当海岸においては、O'Rourke・LeBlond¹⁾が指摘したような砕波によって誘起された大規模海浜流循環が生じることが明らかになった。

2. 観 測 方 法

カラー写真撮影および MSS の測定は、図-1 に示すように、茨城県那珂湊市の阿字ヶ浦より日立港に至る延長約 13km、幅 2km の海域を対象として選び、南端の

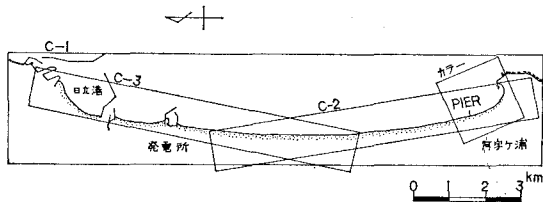


図-1 カラー写真および MSS の測定領域

阿字ヶ浦上空でカラー写真を、また海岸に沿って3コースにおいて MSS の測定を行った。カラー写真については昭和54年8月14日8時15分より9時16分の間、約1分間隔で60枚の撮影を行った。撮影高度は1200mに保ち、縮尺1/8000の写真を撮影した。同時に海上においては海浜流の流れを測定するために、漂砂観測用棧橋と観測船より多数のフロートを投入し、その移動状況を撮影した。また砕波帯には電磁流速計を積載したソリを配置して流速の連続測定を行った。

MSS の撮影は、8月14日の午後に行った。このときの測定時刻や撮影高度などは表-1にまとめられている。これらの撮影と同時に棧橋、日立港、久慈川河口などの地点でサーミスタを用いて測温した。

表-1 MSS の撮影時刻と範囲

コ ー ス	撮 影 時 刻	撮影高度 (m)	範 囲 (km)
C-1	14:58~15:01	約 1900	13.5
C-2	14:05~14:08	700	6.5
C-3	14:16~14:18	700	6.5
C-4	15:05~15:15	700	7.5

3. 阿字ヶ浦～東海村海岸の水温分布

現地観測を行った時期は、台風10号が台湾の東海上をゆっくりと北上し、また銚子沖には熱帯低気圧が停滞するという不安定な気圧配置にあった。

まず最初に、図-2はコースC-1の高度1870m、温度レンジ5°Cで測定された阿字ヶ浦より東海村海岸までの海域の水温分布を示している。図によると、日立港の防波堤と阿字ヶ浦を結ぶ海域において、原子力発電所からの温排水が海岸線より約1.5kmの幅で北より南方向へ次第に拡散しつつあることがわかる。またこのよう

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室長
** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室主任研究員
*** 建設省土木研究所システム課

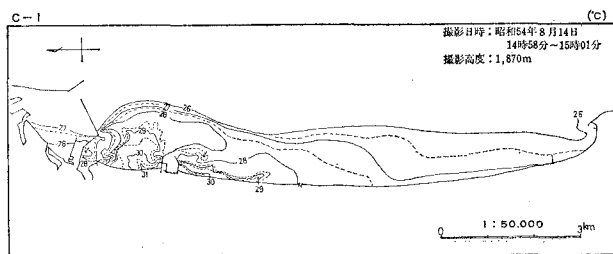


図-2 阿字ヶ浦～東海村海岸水温分布

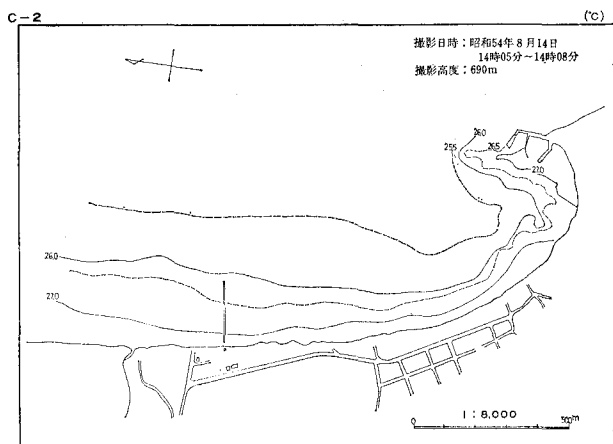


図-3 阿字ヶ浦における水温分布(その1)

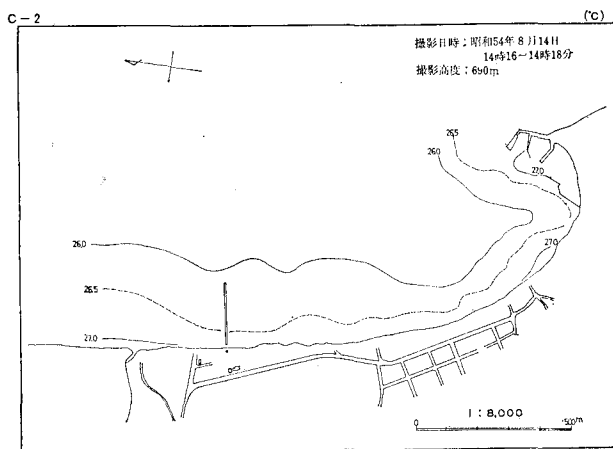


図-4 阿字ヶ浦における水温分布(その2)

な拡散パターンが生ずるためには、海岸線より約1km付近の沖合水は南下する方向に流動していなければならないであろう。ただし、局所的に見ると、阿字ヶ浦の海岸線近傍の27°Cの等温線が北より南方向に楔型となっていることから、この付近では陸域で暖められた海水が南から北へ拡散しつつ流動している可能性が存在⁸⁾する。また発電所専用港の南側約2kmの範囲では等温線の分布より判断すると、この付近の砕波帯では南向きの沿岸流が卓越したと考えられる。

図-3は、低高度690mで8月14日14時5分より8分の間に測定された阿字ヶ浦における水温分布である。

夏期砂浜は日射によって高温となり、これによって海水は熱せられるために汀線近くほど高温となっている⁸⁾。この点は、図-2の阿字ヶ浦における27°Cの等温線分布と一致する。また図-3の右端に位置する磯崎漁港付近では、低温水が沖合より汀線方向へ入り込んで来ている。

図-4は図-3の測定ののち約10分たったあと再び同高度で撮影した水温分図であるが、基本的特徴は図-3の場合と良く一致している。

以上、第3節で得られた結果をまとめると、次のように要約される。

- ① 阿字ヶ浦と日立港に囲まれた区域の海岸線より約1.5kmの範囲では、大局的に見たとき南下する方向の海水流動が存在する。
- ② 海岸線近傍の砕波帯のうち、阿字ヶ浦では北流が発達し、また発電所南約2kmの範囲では南流であった可能性が高い。
- ③ 阿字ヶ浦における水温分布によると、阿字ヶ浦においては沖合水は岸向きに流動しなければならない。

4. 阿字ヶ浦における流況と波向特性

前節で述べたように、阿字ヶ浦における水温分布からは、沖合水が岸向きに流動した可能性が存在するが、この点は流況観測の結果より次のようにして確認される。

図-5は海浜流の平面的流況を把握するために、桟橋および観測船より投入したフロートの移動状況を追跡したものである。観測時、後述するように入射波高が約2mと高かったため、観測船は砕波帯へ接近することはできず、このため沖合600m付近よりフロートを投入した。この結果、桟橋より磯崎漁港へ至る沿岸方向1200m、岸沖方向600mの広範囲の流況をとらえることができた。ただし桟橋より投入したフロートは桟橋付近で若干確認されたものの、大部分砕波による白濁のため確認できず、砕波帯内のフロートは追跡することはできなかった。なお図-5の左端のS点はソリの設置位置を示しており、ソリは高さがT.P. -0.8mの浅海域に設置された。

図-5によると、沖合400~500m付近に南へ向かう流れが存在し、また桟橋より磯崎漁港へ至る海域では岸方向への流れが見られる。一方、桟橋より投入されたフロートの移動は測定することができなかったものの、これらは強い沿岸流によって北向きに運ばれたことから、このような岸方向への流れは時計回りに回り込んで北方への流れに変化したと考えられる。

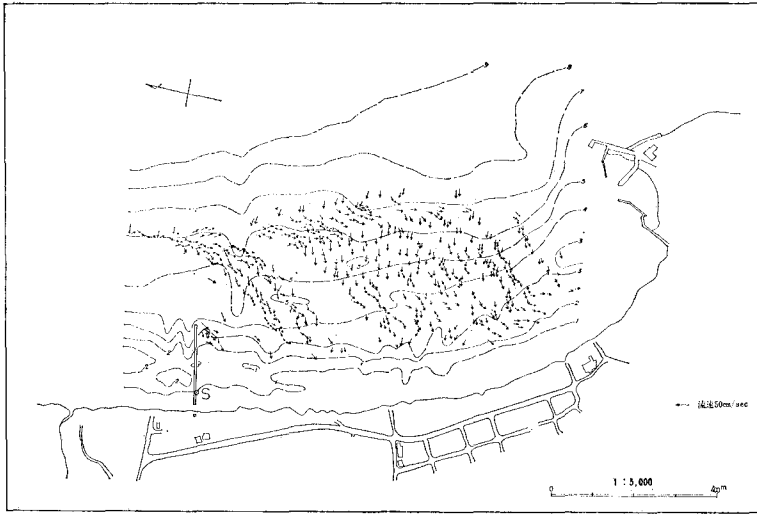


図-5 海浜流の流況図

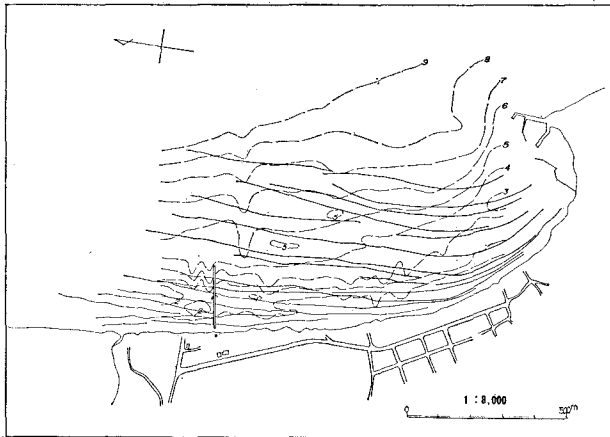


図-6 波峰線図

このような流れが発生した原因を調べるためにカラー写真より波向の平面分布を求めた。図-6 は海岸へ来襲する波の波峰線を写真 60 枚の重ね合せトレースによって合成した波向図を示している。図中太い実線は沖合のうねりを示し、細い実線は砕波帯内の波峰線を示している。またこのときの等深線が示されている。入射波は棧橋付近で汀線と直角方向に対して時計回りの方向に約 9° の傾きをもって入射している。このため棧橋付近では強い北向きの沿岸流が発生したと考えられる。

局所的な入射角の分布については図-6 に示した通りであるが、入射角のより広範囲における沿岸方向分布については MSS 画像の波峰線模様⁴⁾より求めることができる。図-7 は、入射角の沿岸方向分布を求めたものであり、沿岸方向に棧橋を起点として北向きに約 250 m 間隔で汀線に直角な測線を設け、砕波線付近の波向を測定したものである。入射角は棧橋より北へ約 1.7 km の地点で約 16° と最大値をとったのち、次第に小さくなり、

4 km 以北ではほぼ零となる。この入射角の分布図より判断すると、棧橋より北 4 km の区間では北向きの沿岸流が発生していたと考えられる。

ところで、図-6 には午前 8～9 時の間に測定された阿字ヶ浦における波峰線が示されていた。一方図-7 は同日午後 3 時に撮影されたものであり、両者の撮影時刻は約 5 時間相違する。しかしながら波の場が時間的にそれほど変化しなかったと仮定したとき、図-7 の 0 km 地点の 9° という入射角は図-6 における棧橋地点における値と良く対応していることがわ

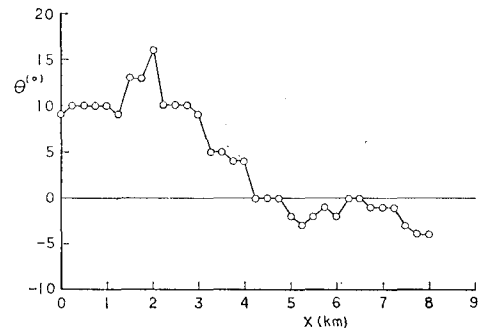


図-7 入射角の沿岸方向分布

かる。

以上、第 4 節で得られた結果をまとめると、次のように要約される。ただし要点は整理の都合上、

第 3 節と一連番号でまとめることにする。

- ④ フロート追跡によると、砕波帯のデータは不足するが、阿字ヶ浦では時計回りの方向に流れは循環していた。
- ⑤ 阿字ヶ浦においては、入射角は棧橋付近で汀線と直角方向に対して時計回りの方向に約 9° の傾きをもって入射していた。
- ⑥ MSS による入射角の沿岸方向分布によると、阿字ヶ浦より北へ約 4 km の区間では汀線と直角方向に対して時計回りの方向より入射していた。

5. 波高計および流速計データの解析

ここでは棧橋先端に設置した抵抗線式波高計による波浪データや、砕波帯内に設置したソリに積載した電磁流速計による沿岸流流速の経時変化などについて明らかにする。まず最初に、図-8 は棧橋先端における波浪観測データを解析した結果を示しており、リモートセンシ

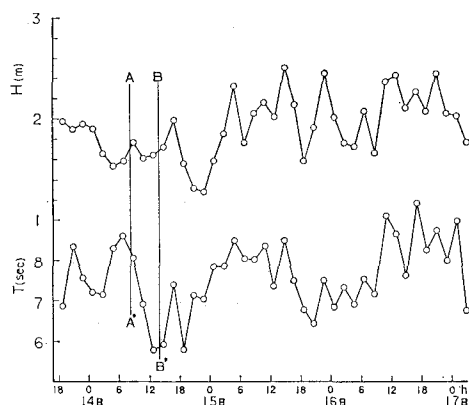


図-8 有義波高・周期の経時変化

グによる観測前日の8月13日19時より8月17日の3時まで2時間おきの有義波高(H)と周期(T)の経時変化を示している。図中 AA' は航空機による1時間のカラー写真撮影の開始時刻を、また BB' は MSS 撮影を開始した時刻を示しているが、これによると桟橋先端における入射波高は $H \approx 1.7\text{m}$ と相当高波浪であったことがわかる。

既に明らかにした図-5の流況図では汀線近傍の砕波帯部分での沿岸流流速については明らかにすることができなかった。この理由は、砕波帯では波が白濁してしまうため、フロートを見出すことができなかったことによる。実際には、これを補うために砕波帯にはソリを設置したわけであるが、準備が間に合わず、測定は8月14日の午後9時からとなってしまう、リモートセンシングと同時刻には行うことはできなかった。このためリモートセンシング実施中の砕波帯における沿岸流の特性については、単に北流であったとのみ記述された。

しかしながらこの点は以下に述べる、その後の観測によって間接的に証明されることがわかる。

まず、図-9は砕波帯内に設置されたソリに積載された電磁流速計によって測定された沿岸流流速の経時変化を示したものである。8月14日午後9時より8月15日9時までは北向きに0.5m/s程度であったが、その後急

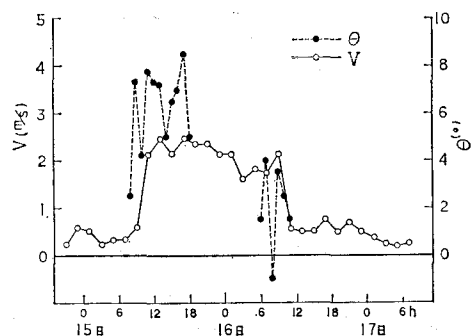


図-9 沿岸流流速と波向の経時変化

速に流速が増加し、約1日の間2m/sにも達している。その後は8月16日午前11時より再び0.5m/s程度と弱い流れに戻っている。

一方、このような沿岸流流速の変化に対応する外力の変化を調べるために、海岸背後約300mにある高さ約30mの砂丘上よりアリダードを用いて波向観測^⑦を実施した。この結果は同じく図-9に黒丸印で示されており、桟橋の沖合約100m地点の波向を汀線と直角方向に対して時計回りを正として整理されている。波の入射方向は8月15、16両日ともほぼ南寄りとなっているが、注意すべき点は、沿岸流流速の経時変化と相当良好な対応関係が見られることである。すなわち沿岸流流速は8月15日9時に急速に増大し、その後大きな流速値を保ったが、これは波向 θ の約 3° より平均約 7° への変化に対応している。また、その後の波向は変動はあるものの、ほぼ 7° 前後という大きな値となっている。更に、沿岸流流速は8月16日9時以降再び弱まったが、この期間波向は再び $\theta \approx 2^\circ$ 程度と値が小さくなっている。以上の点より、波向と沿岸流流速とは対応関係を有していたことがわかる。

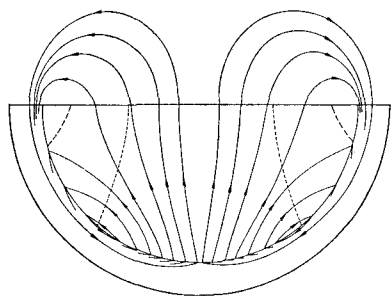
一方、リモートセンシングによる測定中の波向は図-9に示したように、桟橋の先端付近でほぼ $\theta = 9^\circ$ という値を有していた。いま、アリダードによる波向測定と航空写真によるものとをほぼ対応するとすれば、図-9に示した波向と沿岸流流速の対応関係より、砕波帯における沿岸流流速は北向きであったと考えることができる。図-8によれば、有義波高は平均して1.8~2.0m程度であったことから、リモートセンシングによる測定中、相当強い沿岸流流速であったことがわかる。

以上、第5節で得られた点を要約すると次のようになる。

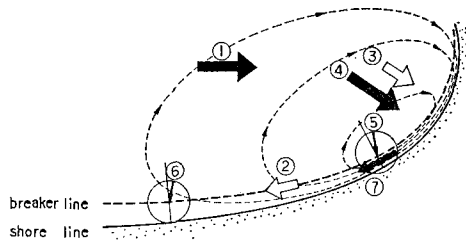
⑦ アリダードを用いた波向観測データと、砕波帯の沿岸流流速データは良好に対応し、観測期間中南寄りの入射波に対応して北向きの沿岸流が発達した。前日の航空写真による波向は、桟橋付近で時計回りに $\theta = 9^\circ$ であったが、アリダードによる波向観測と航空写真によるものとが対応するとすれば、観測時北流が発達したと考えられる。

6. 考 察

O'Rourke・LeBlond^⑧は半円形の湾内の海浜流の機構を理論的に明らかにし、図-10に示すような輸送流関数の分布を求めた。すなわち、湾の中心軸の方向より入射した波は、砕波線に沿って砕波するが、砕波線における入射角が岬に接近するほど大きいために、湾の中央部へ向かう沿岸流が発達する。この流れは次第に離岸方向流れに変化し、全体として大スケールの循環流を形成する



図—10 半円形の湾内における海浜流循環



図—11 阿字ヶ浦における流れのパターン

ものである。

今回の観測で得られた要点は、すでに7項目としてまとめられているが、ここではそれらを総合的に検討することとし、図—11に示す概念図としてまとめた。図中の番号は既に得られた7項目の要点である。図—11によると、7項目の要点は互いに補い合う性格と有することがわかる。例えば、③で示された阿字ヶ浦の水温分布から得られた結論（すなわち沖合水が岸向きに流動するという結論）は、④のフロート観測によって証明された。またフロート観測では砕波帯内の流速はとらえられていないが、これについては、⑤、⑦の波向観測と沿岸流流速測定によって間接的ではあるが証明された。以上の点を総合すると、阿字ヶ浦周辺における流れについて次のように結論しうると考えられる。すなわち、まず波が南寄りより入射すると、砕波帯においては砕波によって強い北流が生ずる。一方、岬周辺ではこの沿岸流の補償流として時計回りの方向の流れが発生し、沖合水はや

がて岸向きに流動する。このような流れに対応する流関数は基本的には図—11に破線で示されるパターンを有すると考えられる。この流れのパターンは O'Rourke・LeBlond¹⁾ の求めた図—10と基本的に対応関係を有し、このことより阿字ヶ浦での観測結果は O'Rourke・LeBlondの理論解を現地海岸で実証したものと考えても良いであろう。ただし図—10ではポケットビーチの形状は半円形であるのに対し、阿字ヶ浦～東海村海岸の形状ははるかに扁平であるという相違はあり、この点は今後更に検討が必要であろう。

7. あとがき

本論文では、リモートセンシング技術、特に赤外バンドの映像やカラー写真を利用した海浜流の観測について述べ、阿字ヶ浦で行った観測の結果が、O'Rourke・LeBlondの理論解に対応することを明らかにした。

リモートセンシングによる観測時、ソリの観測準備が間に合わず、またアリダードによる波向測定も行うことができなかったことから、当初、得られたデータは整合性に欠けるのではないかと心配した。しかしながら単一の測定では説得力に欠けるデータを数種類集めることによって、総合的な議論を行うことができたことは一応成功であったと言えよう。この意味において現地観測を行うに際しては、各測定の間相互関係を良く見きわめた上で、根気良くデータを集めることが必要とされよう。

参 考 文 献

- 1) O'Rourke, J. C., and P. H. LeBlond: Longshore currents in a semicircular bay, Jour. Geophys. Res., Vol. 77, pp. 444~452, 1972.
- 2) 宇多高明: 円弧状、および大規模カスプを有する海岸における海浜流循環, 土木学会論文報告集, 第326号, 1982.
- 3) 橋本 宏・宇多高明・田中邦一: 熱映像による砕波帯の熱拡散係数の測定法, 第26回海講演文集, pp. 119~123, 1979.
- 4) 橋本 宏・宇多高明: リモートセンシングによる砕波帯の水温分布の測定, 第34回年講演集, pp. 551~552, 1979.
- 5) 橋本 宏・宇多高明: リモートセンシングによる海底地形海浜流の同時観測, 第24回水講演文集, pp. 215~220, 1980.
- 6) 橋本 宏・宇多高明: 経験的固有関数による海浜地形変化の解析, 土木学会論文報告集, 第305号, pp. 59~72, 1981.