

リモートセンシングによる海底地形・海浜流の同時観測

Field investigations of nearshore current and measurement of bottom profile by using remote sensing technics

○ 建設省土木研究所 正員 宇多高明  
建設省土木研究所 正員 橋本 宏

1. まえがき

近年、リモートセンシング(R.S.)技術が多くの分野で利用され始めたが、海洋調査においては対象が広い面積を有するために、数点の観測でその状況を把握することは困難であり、このためR.S.技術の応用が期待される分野の一つである。ところで、実際に応用の対象となる沿岸の現象としては、海岸付近の海底地形特性、漂砂、海浜流、浅海での波浪特性、熱拡散などが考えられる。

本論文では熱拡散の問題は別の報文に譲り、主に太陽光線の水面と海底面からの反射を利用したR.S.について述べることにする。まず最初に海底面反射を利用した観測、すなわち海底地形測量については、現在のダイバーによる方法では広範囲を短時間で測量するには相当の費用を要し、また海底地形の時間的変化が大きいときは平均的地形しか測定できない欠点があるために、仮りにR.S.を利用した測定が可能になればそのメリットは非常に大きいと言えよう。ところで、この種の研究は堀川・砂村が行っており、透明度の良いときはグリーンフィルターを用いて海底地形の測量が可能なることを明らかにしたが、ここでは更に定量的評価についても検討することにした。また海浜流の観測については、堀川・佐々木らによって気球を用いた観測が行われ、数多くの波浪条件に対応する流れの場が明らかになったが、これらのデータを利用して例えば海浜流モデルによって流れの場を再現しようとする場合には、境界条件を正確に求める必要があり、この点からは更に広範囲の測定が可能なR.S.技術の開発が望まれよう。勿論、R.S.の利用に際しては、測定値と物理的条件との関連を明らかにするためには海上における綿密な測定が必要なことは言うまでもないであろう。

本論文では茨城県の阿字ヶ浦において行ったR.S.による観測の結果について述べるものである。すなわち、この観測では航空機によるR.S.を行うとともに、海上においては多数の波高計と電磁流速計を配置し、空間的に広く、かつ時間的にも長い総合的観測を実施した。

2. 観測方法

カラー写真撮影は茨城県那珂湊市の阿字ヶ浦海岸で行い、磯崎漁港より漂砂観測用桟橋の北側約1kmの矩形領域で行った。撮影はハレーションの影響の少ない午前中を選び、1978年8月23日午前7時45分より8時44分まで行い、航空機によって約1分間隔で1時間の連続的写真撮影を行った。撮影高度は1200mに保ち、縮尺1/8,000の写真撮影した。写真-1がその例であり、これは8時33分に撮影されたものである。写真のほぼ中央にあるのが延長約200mの桟橋であり、写真上方が東向きを表わしている。ただし通常航空写真を撮影する際の測定時間間隔は2.5分が限界と言われているが、ここではコースを8の字型とすることによって撮影時間間隔を短縮した。

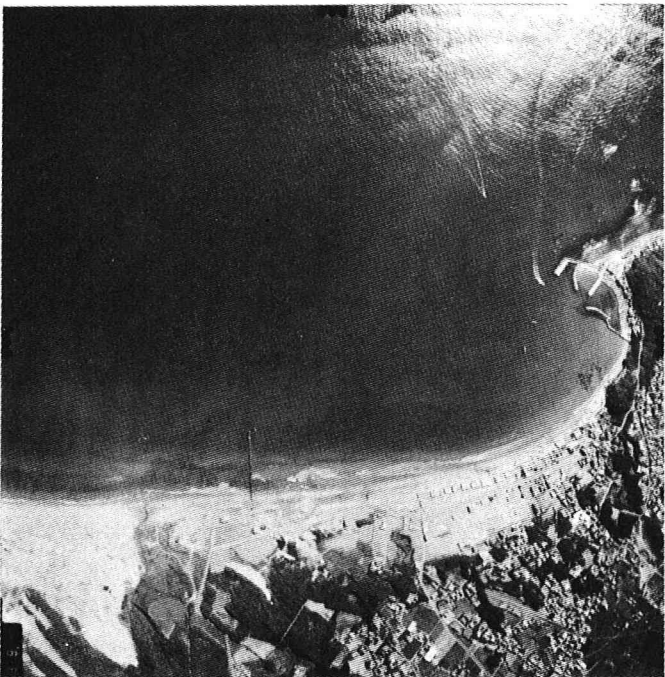
一方、海上においては海浜流の流況を測定するために、桟橋と観測船より多数のフロートを投入した。また波浪や海浜流の場の時間的変化を調べるために、航空機による測定前約1時間より測定後1時間、延べ3時間にわたる波と流れの連続測定を行った。このため砕波帯付近には、容量式波高計と2成分型電磁流速計を積載したソリと、現地用容量式波高計1台、2成分型電磁流速計1台を配置し、また砕波点より沖の桟橋の先端にも容量式波高計を設置し、可能な限り場所的に密にかつ長時間の測定を行った。ただしこれらの測定器の配置は図-1及び図-5に示す通りである。なお、フロートとしては赤、白、黄色に着色した90cm平方のベニヤ板を用いた。ただしベニヤ板の下には25cm立方のウレタンとブロック製の錘りを付けてベニ

ヤ板の波乗りを防止した。

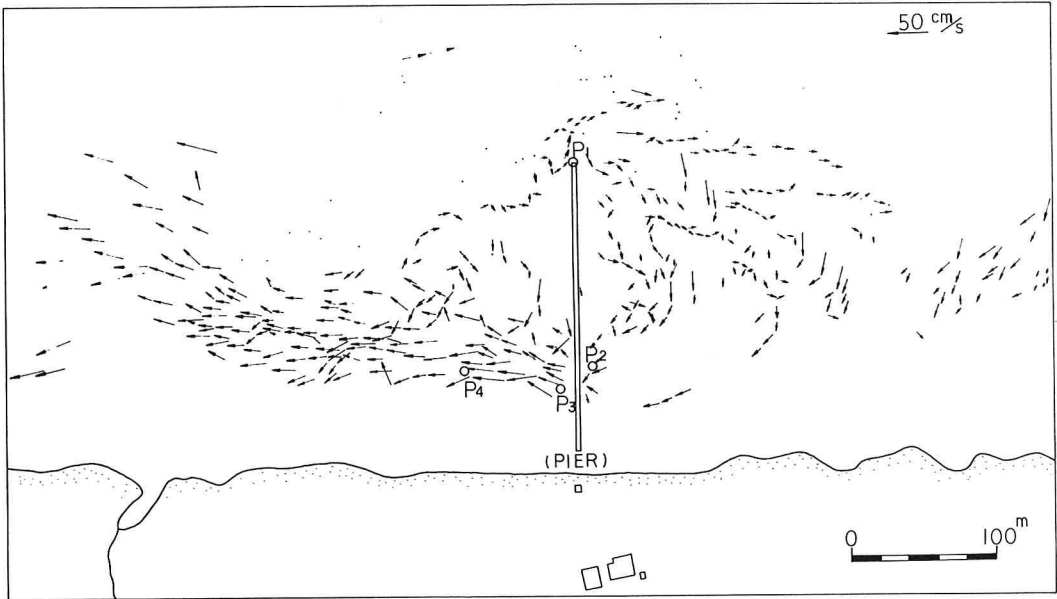
3. 解析方法

まず、航空写真に関しては、60枚の平面写真が得られるために、フロートの位置を時間的に追跡すれば海浜流の流況を求めることができる。また波峰線を連ねることによって波向が求まる。これらは太陽光線の海面反射光を利用するものであるが、今回の観測では海水の透明度が良好であったために、海底面からの反射光を利用し、画像を3色分解することによって海底地形の測定が可能であった。

一方、波高計及び流速計で取得され、データレコーダーに記録されたデータは、 $\Delta t=0.2$ 秒、 $n=2048$ でAD変換を行った後、統計的処理を行った。ただし全記録長は約3時間であるので、計算は10分間隔で行った。なお、座標軸としては汀線に原点をとり、岸より沖向にx軸、汀線方向（北向）にy軸をとり、各々の方向の流速をu, vとおいた。更に有義波高(H)と有義波周期(T)については、栈橋、ソリ、固定点波高計の順に添字1, 2, 3を付けて区別し、またソリと固定点で得られた流速(u, v)についても各々添字1, 2を付けて区別することにした。



写真－1 阿字ヶ浦全景



図－1 流況図

#### 4. 観測結果と考察

##### (1) カラー写真の解析

解析としてはまず最初にフロートの移動状況を追跡した。映像は厳密には約3℃以内の傾きを有しており、このため連続した2枚の写真上の位置をそのままトレースしても真の流速ベクトルとはならないので、この傾きを補正してフロートの位置を図示した。この補正には光学的処理による縮尺変換器（デザインスコープ2型：いずみ社製）を使用した。この結果得られた流況図が図-1である。この図は沿岸方向に800m、岸沖方向に400mの流況を示している。なお図中  $P_1$  の位置には波高計、 $P_2$  にはソリ、 $P_3$  には固定点流速計、 $P_4$  には固定点波高計が配置してある。この図によれば、栈橋を中心とし

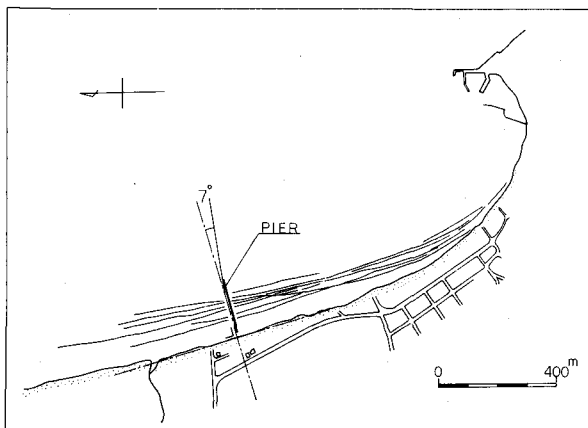


図-2 波峰線図

て半径約100mの時計回りの循環流を認めることができる。栈橋の南側（右側）では栈橋先端付近を南流するものと、蛇行しながら汀線方向へ向かう流れとがある。後者の流れは栈橋付近では沿岸流を形成し、やがて栈橋の北側において強い北向きの沿岸流と沖への離岸流とに分れる。この沿岸流の最大流速は約  $50 \text{ cm/sec}$  に達した。また、このような海浜流の特性は後に述べるように、海底地形と密接な関連を有していた。ところで、海浜流の他の観測法、例えば気球による方法と比較すると、ここで述べた方法は非常に広範囲の測定が可能であり、また画角がほぼ一定しており精度が高いという利点があるが、撮影時間間隔を1分より短くすることが相当困難であるという欠点もある。

次に、図-2は波峰線をトレースすることによって得られた波峰線図を示している。図示されているように、栈橋付近では汀線と直角方向に対して、時計回りの方向に約7°の入射角を有している。このため流れとしては北向きの沿岸流が発生したと考えることができる。

さて、今回の撮影では海水の透明度は透視板の測定によれば3.8mと良好であったために、碎波帯付近の海底地形をとらえた写真が得られた。このため碎波帯内で波の影響の少ない写真（写真-1、8時33分撮影）を選び、写真画面の濃度から碎波帯付近の水深の平面的測定を行った。なお測定を行うには検証データが必要であるが、これには栈橋に沿う深淺測量の結果を利用した。すなわち、測定時の栈橋に沿う海底地形は図-3の実線のように与えられているので、この値と写真濃度との相関図を作ることになる。ただし図中の橋脚（ $P_0 \sim P_8$ ）部分には洗掘されている箇所があるが、写真濃度は橋直下ではなく数m離れた地点の平均濃度を測定するものであるために、洗掘形状は滑らかな曲線で平滑化した。カラー濃度は撮影管に青（ラッテンNa 47B）、緑（ラッテンNa 58）、赤（ラッテンNa 25）色のフィルターを付けてスキヤナー法によって三色分解し測定した。同時にこの信号を計算機に入力し、256段階の濃淡レベルに分割した。

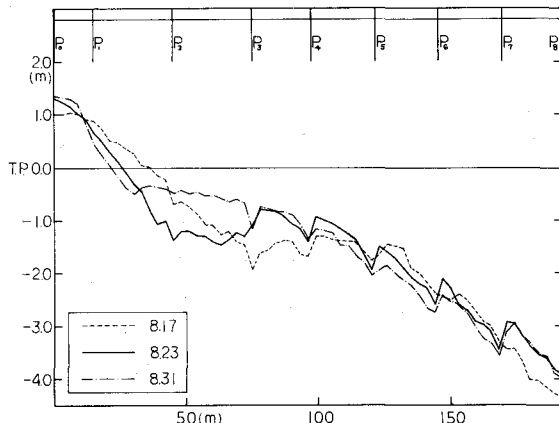


図-3 栈橋直下の海底地形

以上の方法によって得られた写真濃度（ $x$ ）と水深（ $y$ ）の関係を示すのが図-4であり、また

表-1 写真濃度(x)と水深(y)の相関

| 色 | 相関係数 | 回 帰 式               |
|---|------|---------------------|
| B | 0.91 | $y = -7.59 + 9.50x$ |
| G | 0.92 | $y = -4.54 + 5.81x$ |
| R | 0.79 | $y = -3.33 + 4.04x$ |

表-2 写真濃度(x)と濃淡レベル(x\*)の相関

| 色 | 相関係数 | 回 帰 式                 |
|---|------|-----------------------|
| B | 0.97 | $x^* = -3.44 + 7.22x$ |
| G | 0.98 | $x^* = 3.17 + 8.98x$  |
| R | 0.98 | $x^* = -5.06 + 10.4x$ |

相関係数と回帰式をまとめたのが表-1である。三種類 (Blue, Green, Red) のいずれを用いても水深の増加とともに濃度が高くなる結果が得られたが、最も高い相関を示したのは緑のフィルターを用いた画像であった。したがって水深の計算には緑のバンドを使うことにした。この際平面的な分布は計算機に入力した濃淡レベルをテレビ画像に出力させたものをトレースするが、出力は256ビットの濃淡レベルになっているので、濃度と濃淡レベルの対応が必要である。表-2はこの対応を示したものであり、また実際に深浅図を作成したのが図-5である。ただしこのバンドの濃淡レベル(x\*)と水深との相関は $r = 0.92$ で回帰式は $y = 4.76 + 0.065x^*$ であった。

なお分散値は約30cmあり、十分精度が高いとは言えない。この原因としては、洗掘形状の平滑化や水深と濃度との相関の求め方などにも問題があると考えられよう。特に相関曲線として計算を簡単化するために一次曲線を用いたが、この代りに二次曲線を用いれば更に精度は向上するであろう。

一般に写真は中心投影であり、写真上の位置によって光路長が異なる。したがって単に濃淡の比較だけではなく、太陽光線の反射、写真上の位置による濃度のムラ等の補正を行わなければならない。しかし、今回は撮影されたカラー写真(23×23cm)の一部分(3×6cm)についてのみ水深情報に関する処理を行ったので、単に写真濃度測定より水深を求めた。ところで、図-4の深浅図に関しては検証は十分ではない。実際検証のための深浅測量は行ったのであるが、測量時期が7月25日であり、一方、桟橋付近の海底地形の経時変化は、図-3に示されているように汀線付近ではR.S.の観測前後で非常に大きな変化が生じており、このため7月末時点で得られた深浅図は検証に用いることができなかった。したがってこの点については問題点として残されている。また、図-4に示された桟橋北側のトラフは沿岸流の発達している位置と重なっており、海浜流の流況と海底地形が相互に密接に関連していることを示している。ただし図中のP<sub>1</sub>~P<sub>4</sub>は図-1と同様に波高計と流速計の観測点を示している。

## (2) 波浪と流れの場の経時変化

前節で述べた流況や波向の特性は時間的・空間的に平均化されて求められたものであり、このような特性

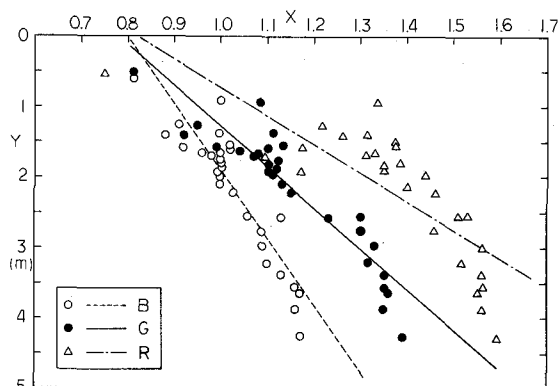


図-4 写真濃度(x)と水深(y)の相関図

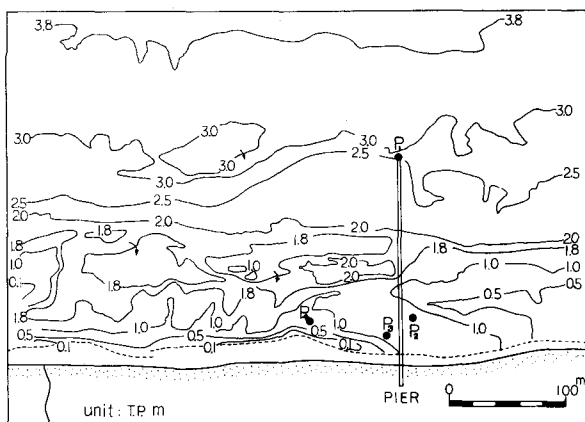


図-5 深 浅 図

がほぼ定常的なものか、あるいは時間的に変化するものかどうかは極めて重要な問題である。本節ではこの問題について考察することにする。

さて、まず図-6は航空写真撮影前約1時間より測定後約1時間の有義波高の変化を示すものである。図中の「S」がR.S.の開始時刻、「E」が終了時刻を示しており、また $H_1, H_2, H_3$ は各々栈橋先端( $P_1$ )、ソリ( $P_2$ )、固定点( $P_3$ )の波高を表わしている。栈橋先端付近での入射波の波高はほぼ25cm程度であるが、ソリ及び固定点では浅水変形のため各々 $H_2 \approx 40\text{ cm}$ 、 $H_3 \approx 50\text{ cm}$ と発達している。またこれらの波高の経時変化としては、8時40分のデータを除けば、ほぼ安定した状態を示している。ところで8時40分には波高のみではなく後述するように流速値も相当変化した。これは、この時刻に短期間ではあるが、高波浪の波が来襲したためでと考えられよう。同様に図-7は栈橋、ソリ、固定点の波高計の有義波周期の経時変化をまとめたものである。栈橋先端より入射する波の周期はほぼ8秒程度である。また図-6と同様に8時40分に急激な変化が起こり、周期に極大値が表われている。ただし固定点波高計の周期( $T_3$ )が20秒に達しているが、これはデータ長が約7分と短いために統計値が歪んだものと考えられる。

また、図-8は平均流速の経時変化を示している。 $\bar{u}$ は岸沖、 $\bar{v}$ は沿岸流速であり、添字1, 2はソリ( $P_2$ )及び固定点流速計( $P_3$ )のデータを示している。固定点の流速はR.S.の観測期間(図中S~E区間)の平均値を求めると、 $\bar{u}_2 = -2.3\text{ cm/sec}$ 、 $\bar{v}_2 = 12\text{ cm/sec}$ となる。一方、図-1によれば、この流速計付近の流速としては $\bar{u}_2 = 10\text{ cm/sec}$ 、 $\bar{v}_2 = 28\text{ cm}$ となっており、 $\bar{v}_2$ は方向は一致するが絶対値は約 $1/2$ と小さくなっている。しかし $\bar{u}_2$ は方向も逆転している。流速計は底面より約0.2mにあり、また、水深は平均すると約1.5mであったことから、沿岸流流速については水深方向に流速値が相当減少しうること示している。また岸沖流速については表面と底面近くでは流向が逆転しているが、流速値そのものが小さいので明確な結論を出すには至らなかった。更に、 $\bar{u}_2$ は8時40分に流向が反転しているが、これは図-6の有義波高の変化と対応している。なお、この時刻以後R.S.の終了時まで流向が変化したので、図-1の流況図の作成に当ってはこの時刻以後のフロートの移動は図示しないことにした。

最後に有義波高と周期の関係を示したのが図-9である。添字1, 2, 3は栈橋先端( $P_1$ )、ソリ( $P_2$ )、固定点波高計( $P_3$ )における値を示している。図-9によると、ソリと固定点では波高と周期の間に見かけ上線型な関係が存在する。ただし測定中に水位(水深)も変化しているので、整理の際には注意を要する。ところで、浅水係数の定義式を長波近似を用いて変形すると、式(1)が得られる。

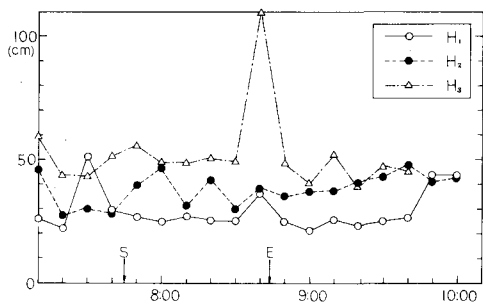


図-6 有義波高の経時変化

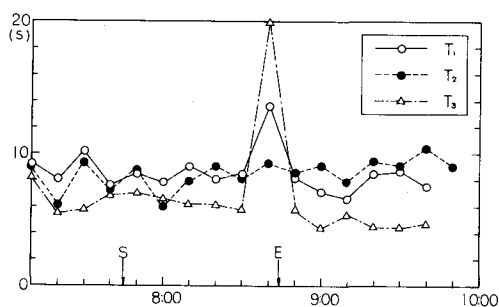


図-7 有義波周期の経時変化

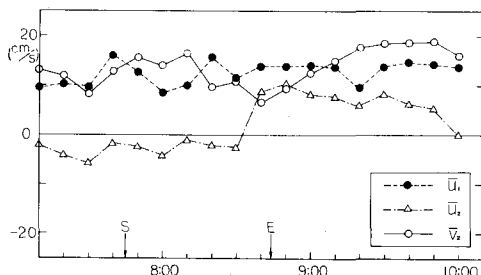


図-8 海浜流速の経時変化

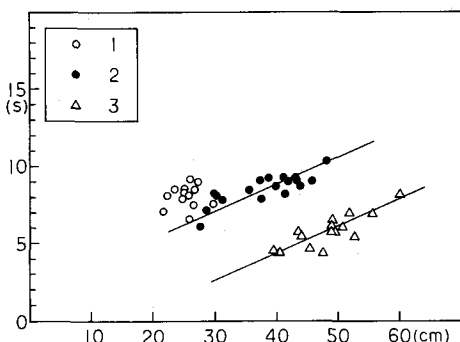


図-9 波高と周期の相関

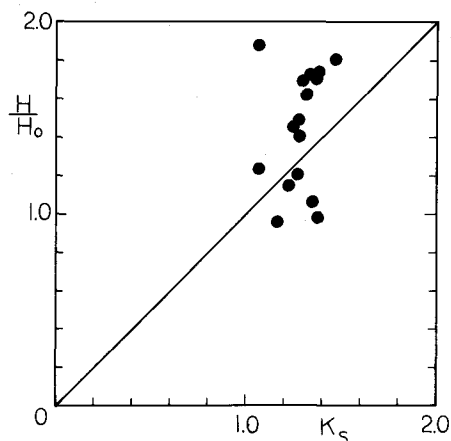


図-10 波の浅水変形

$$K_s = \frac{H}{H_0} = \frac{\sqrt{g}}{4\pi} \cdot T^{1/2} \cdot h^{-1/4} \quad (1)$$

図-10はソリの波高 ( $H$ ) を用いて  $H/H_0$  を計算するとともに、式 (1) で定義される  $K_s$  を求めて両者の比較を行ったものである。測定値はほぼ 0.9~1.9 の間にあり、有限振幅性によって計算値よりも大きな値となっている。ただし  $H_0$  としては波高が小さいために栈橋先端での波高を用いている。また、図-9のような周期と波高の関係が得られた理由としては次の理由が考えられる。すなわち測定期間の潮位変化によって水深 ( $h$ ) は約 1.7m より 1.2m へ低下したが、この場合式 (1) における  $h^{-1/4}$  は 0.88 より 0.96 と変化する。これに対して  $T^{1/2}$  は、周期の変化 ( $6 \leq T \leq 10$  秒) に対応して 2.4 より 3.2 まで変化する。このように、式 (1) では周期の効果がより強く表われるためであろう。

## 5. まとめ

本報ではリモートセンシングによって広域における海浜流や海底地形を調査するための新しい調査法について述べた。これにより航空機を利用した海底地形測量の可能性が明らかになり、阿字ヶ浦における観測では沿岸方向に約 500m、岸沖方向に約 400m の範囲の深浅図を得ることができた。また海浜流については沿岸方向に約 800m、岸沖方向に約 400m という広い領域の流況図を得ることが可能になった。

一方、このような観測によって現象の時間的変化を把握することは相当困難なために、海上に波高計や流速計を配置して、時間的変化を測定し、有義波高や流速の経時変化について考察した。リモートセンシングによれば広域の測定は可能であるが、時間的変化や、現象のミクロな構造を調べるには適しておらず、一方、流速計や波高計は一点では精密であるが広域の測定には適さないという互に相反した性質があるために、ここで用いた方法は相互の弱点を相補うものと考えられよう。ただし、ここで得られた観測結果については定量的な検討は十分とは言えず、これらの点に関しては今後も検討が必要であろう。

## 参 考 文 献

- 1) 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算定法，第26回海講論文集，1979.
- 2) 堀川清司・砂村健夫：可視領域リモートセンシングによる海岸環境の計測，第23回海講論文集，pp.567~571, 1976.
- 3) 佐々木民雄・堀川清司・久保田進：海浜流に関する研究（第5報），第24回海講論文集，1977.
- 4) 橋本 宏・宇多高明・林 敏夫：海岸構造物周辺の海浜流と地形変化の特性，第23回水講論文集，pp.181~186, 1979.
- 5) 橋本 宏・宇多高明：海浜流と摩擦係数の現地観測，第25回海講論文集，pp.435~439, 1978.