

電磁流速計の海浜への応用

東京大学大学院 永 田 豊

海岸浸食あるいは漂砂の問題は非常に複雑であり、そこに働らくおもな外力は波と風であることは明らかであっても、直接これらと漂砂の問題を結びつけて物理的に論ずることはむずかしい。そこで、その中間の現象として海浜近くの流れの状態をできるだけ詳しく調べる目的で、応答が速く、しかも砕波による破壊力や乱れが大きく砂の浮遊量も大きい砕波帯や前浜でも使用できる流速計として、簡単な電磁流速計を試作し、昨秋より数回の観測を行ってきた。主として波の軌道運動の変形の観測を行ってきたが、ここに流速計の簡単な紹介と、現在までに得られた定性的な結果のいくつかを報告する。

1. 電 磁 流 速 計

磁極間に絶縁材料の管をいれ、その中を電導液体を流せば、電磁誘導の法則により起電力が発生する。管の中に電極をのぞかせると、 B を磁束密度 (gauss), d を電極間の距離 (cm), $\bar{v}$ は管内の平均流速 (cm/sec) として

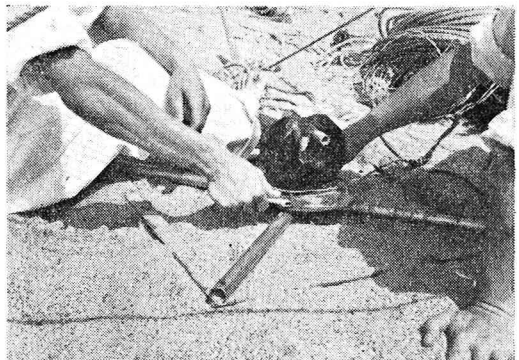
$$E = B \cdot d \cdot \bar{v} \times 10^{-8} \text{ (Volt)}$$

の電圧を取り出すことができる。最近この原理が流量計として用いられており、海流の測定に使用されている GEK も同じ原理によっている。この方法によれば、起電力が管内の平均速度に比例し、流れの状態に無関係であり浮遊する土砂による影響も少なく、しかも応答が速く速隔測定ができる等の利点がある。この性質は現象が非常に複雑であり、浮遊する砂の量も多く、波による破壊力の強い海岸近く、特に砕波帯内の流れや、波の軌道運動を調べるのに有用である。

普通は電極の偏極の影響をさけるために、コイルを用いて交番磁場を作り、起電力を交流増巾するのであるが、実際に海岸で用いる場合には十分な電源を得られない場合も予想されること、砕波帯でも十分たえうるだけの強度を持たせるため測流部の構造をできるだけ簡単にしたいこと、また製作費を安くすること等の目的から、レーダー用の永久磁石を使用し、起電力を直流増巾して記録電流計に導くようにした。使用した磁石の磁束密度は約 5000 gauss, 電極間の距離は 2 cm であるから、流速 1 cm/sec に対する起電力は 0.1 mV になる。これに対して、現在使用している銀塩化銀電極の偏極の影響は、大体 6 mV 程度におよぶため、長期にわたって安定した連続記録をうことは困難であり、測定ごとに 0 点を決めねばならぬ不便さがある。しかし軌道運動の週期の数秒から数分程度の短周期の現象に測定の目的をおくかぎり、1~2 cm/sec 程度の精度をうることができる。

設置方法は、鉄製の台座の上にとりつけて(写真-1)、磁石の自重によって定置させるようにした。測定点までは人力あるいは新潟の場合には空中ケーブルを利用して運び、前浜や砕波点では流速計の移動を防ぐために、さらに鉄杭を用いて台座を固定した。したがって測流は通常海底から約 20 cm の高さで行っている。

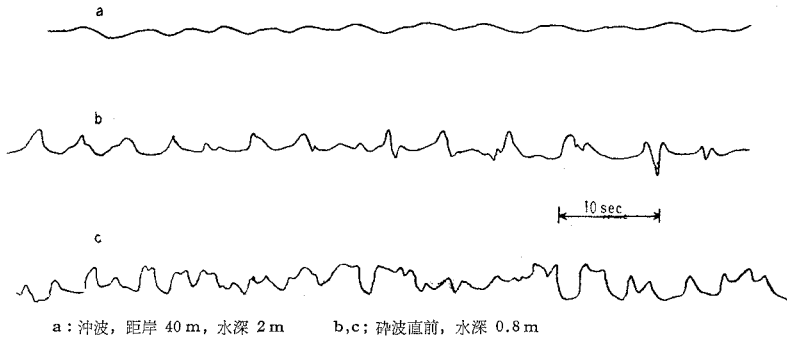
写真-1 電 磁 流 速 計



2. 浅海における軌道運動の変形

正弦波に近いうねりが海岸に近づくにしたがい、海底の影響をうけて次第に変形し、谷が平らになり峯がとがってくる。軌道運動も当然これにともなって変形し、沖では正弦波に近いものが、岸に近づくにつれて峯の部分での岸向きの速度成分の形が大きくとがって、谷の部分での沖向きの流れは平らな形になってくる。図-1 に新潟における観測例を示す。このときの海の状態は非常に静かで 10 秒程度の周期で波高が 30 cm くらいのうねりが見られた。図中 a の記録は距岸 40 m, 水深約 2 m, 単調なうねりを示している。これに対して砕波の少し沖側、水深約 80 cm で得られた b, c の例では孤立波に近い形になる一般的傾向に加えてかなりの乱れが見られる。底層における軌道運動は砕波近くではもどり流の影響をうけるためか複雑な形をとり、峯にあたる岸向きの成分

図-1 軌道運動の変形



がいくつかに分れたり、極端には中央で逆向きの成分を生じたりする。これと同じ現象が東海村海岸でも一、二度観測されたことがあるが、おそらく何かの条件のもとで非常に速いもどり流れが最終砕波線の沖側にも存在するのであろうが、峯の位置になぜ一致して現われるのか、またどのような条件でこのような現象が見られるのかは現在のところ不明である。これとは別に流速の記録が複雑な形をとる場合があり、その例を c に示す。この記録は b に連続した記録の一部であるが、目視による波形とはっきりとした対応もつかないほど乱されている。周期分析をしてみると、a, b とともに 7 秒から 10 秒、3.5 秒を中心にしたスペクトルが得られるが、c の場合には a, b に欠けている 5 秒を中心とした異常な周期がはっきりと現われる。原因は不明であるが、何か海岸特有の乱れがはいったのであろうと考えられる。このように静かな状態でも最終砕波に近づくとき軌道運動は複雑な形をとる。嵐に近いような状態では底層の流れはさらに複雑になり波形との対応もつけにくくなることもあった。

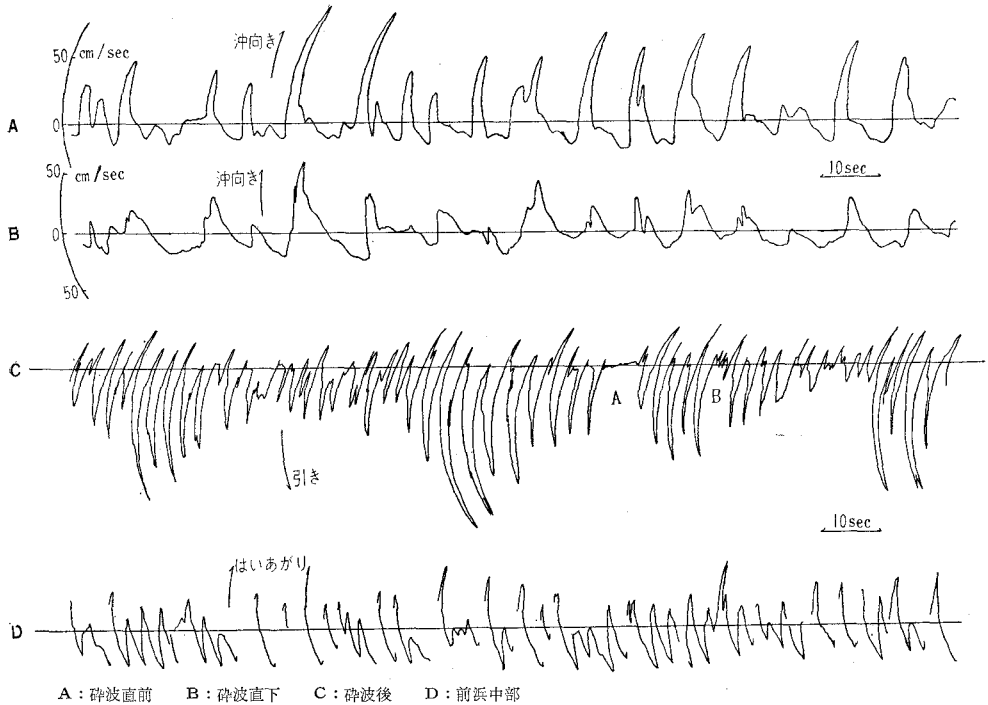
3. 最終砕波線および前浜での軌道運動

砕波の直前、直下、直後の軌道運動を測定し、その変化の様子を知ることは非常に興味深い問題であるが、現実には砕波の位置は一波ごとに多少とも変り、またほとんど完全な巻き波であっても、くずれ始めからくずれ終るまでを考えればかなりの巾をもっているし、その状態も一波ごとに複雑に変り、砕波位置を正確に決めることがむずかしく、砕波点で杭を打つことも容易でないで、なかなか思うような観測はできない。しかし、前浜での水の往復運動および最終砕波の前後の軌道運動の測定は昨年 11 月から数回行っているで、その結果からこの付近における特徴的な流速の形と思われるものを選んで図-2 に示した。観測にあたっては以上の困難さに加えて、波が高い場合には砕波点の観測は危険をとまなげて不可能となるし、逆に波が低い場合には前浜上に十分な水量がもたらされないため、流速計が空中に露出してしまう時間が多くなって観測は事実上不可能となる。そのため同一条件で全部を比較することには成功していないので図-2 に示した記録はそれぞれ波浪の条件が違った場合のものである。図-2 A および B は砕波高が 1~1.5 m のときに同時観測を行ったもので、A は最終砕波線で急に深くなる位置から沖側約 50 cm、B は岸側約 1 m の位置に設置したもので、砕波は大体 B の位置の直上で起り、B の位置よりやや岸側で波はくずれ終る。C は砕波高が 2 m から 2.50 m のときで、大体砕波が終る位置に設置し、流速計の露出をなくするためにカスプの湾部の前面においた場合である。D に示したものは砕波高がさらに高く、ほぼ 4 m 近くあった場合で、設置位置は砕波から 2~3 m 岸よりの前浜でとったものである。

図-2 A に示したものは、砕波直前の軌道運動の典型的な形と考えられ、峯の位置での岸向き成分へのエネルギーの集中が特徴的であり、はっきりとした形に谷の部分と区別されている。しかしこの流速の形は海底の形状にかなり密接に関係するように思われ、砕波線での水深の急なおちこみが安定した形で存在しない場合には、このようなはっきりした形は認められなかった。逆にいえば、このような速度の形が砕波線のすぐ沖側でのこの急勾配を維持しているのであろう。これに対して、B に示されたものでは岸向きの成分は A におけるほどきわだって区別されず、前浜からのもどり流れの影響がはっきりと見られ、なだらかに引きに転ずる傾向をもつ。また岸向きの成分がわるる傾向が見られ、上下運動の乱れに関係するものと思われるが流速も一般に A にくらべて小さくなっている。またこれとは別に、同様にほとんど砕波の真下と考えられる観測で、岸向き成分が平らになり、あたかも矩形波を見るような形をとる場合があったが、どのような条件によるものか現在のところ不明である。

これに対して、C に示したものは砕波直後の形であり、前浜での往復運動が始まる所にあたる。ここでの流速の形は非常に非対称で岸向きの速度は引きの速度に比較して $1/5 \sim 1/6$ の大きさしかもたない。これに対して前浜のやや上部では D に示すようにほぼ対称の形をとる。この傾向は一般的なもので、カスプの形状等の影響や、

図-2 砕波前後および前浜での軌道運動



A: 砕波直前 B: 砕波直下 C: 砕波後 D: 前浜中部

砕波が非常に大きい場合には砕波直後の流速の型はかなり乱されるが岸向き成分が引きの成分にくらべて小さい傾向は常にあらわれる。これは砕波のときに特に砕波が完全な巻き波の状態であれば、岸向きの速度成分はほとんど失われしてしまうためと考えられる。そうして砕波直後この位置では急激な水位上昇が起るから、それが岸側に向う水面勾配を通して前浜を上昇する速度成分を再び作り出してゆくものと考えられる。そのために砕波直後の流速の型に著しく岸向きの速度を欠く結果となる。このことはまた岸および沖方向への水の移動量の平衡を考えれば当然予想されることで、はい上り流れの水位を H 、流速を V 、もどり流れの水位を h 、流速を v とすれば、

$$\int HVdt = \int hvdv$$

が成立しなければならない。それぞれの時間がほぼ等しければ、 $H > h$ であるから $V < v$ でなければ平衡がとれないことになる。砂の移動量を考えてみても短かい時間をとれば前浜はほぼ安定しているから第一近似としては平衡状態にあるはずである。浮遊する砂の量をそれぞれ Q, q とすれば浮遊してはこぼれる砂の量は、それぞれ

$$\int HQVdt, \int hqvdt$$

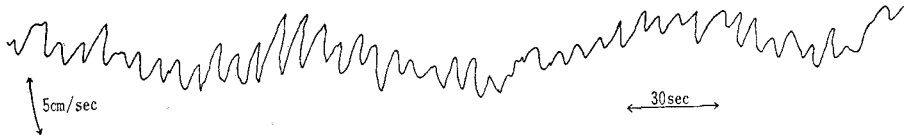
で表わされるが、 $Q \gg q$ であるから前者の方が非常に大きく、この差は底にそった輸送でまかなわなければならないが、そのためにも $V < v$ は必然的に要求される。これに対して前浜のやや上部では $H \approx h$ 、 $Q \approx q$ であるから $V \approx v$ として平衡がたもたれていると考えられる。実際の問題として重要なのはこの平衡状態ではなく、そこからのはずれの浸食量あるいは堆積量であるが、そこまで論じるのは困難であるが、このような流速の型は当然沖波勾配や前浜勾配、したがって砕波形式によって変るであろうから、この型のそれぞれの場合における違いを観測することによって、これらの諸量と、浸食、堆積の関係において定性的にでも物理的な説明を下す可能性があると思われる。

なお 図-2 C において A で示された部分は礫が流速計のパイプをほとんど完全にふさいでしまった場合の、また B で示された部分は前面からの打ち上げによるものでなく、少し離れたところに押し上げられた水が流速計の側面からきたときのそれぞれ代表的な例である。また D において流速の記録のとぎれている部分は流速計が空中に露出された部分で、記録から除いてある。

4. 離岸流、長周期の変動

波浪とともに岸に運ばれてきた海水がどのようにして沖に帰るかは、漂砂、浸食の問題を論ずる上に非常に重要である。しかし離岸流 (Rip current や Undertow) の細かい性質については、ほとんど知られていないとい

図-3 長周期の変動



ってよい。電磁流速計を海浜に応用する一つの目的は、このような流れの分布や性質および変動性を調べることにあつたが、現在の簡単な直流型の流速計では偏極の影響をまぬかれることができないので、一様流の測定には数 cm/sec の誤差はまぬかれず、実際には軌道運動が重なって記録されるため読みとりの誤差が加わる。このほかに実際の海岸では思いどおりに流速計の位置を変えてゆくことも容易でないこと等の設置の点でも困難がある。

これらの難点をさけるために本年 4 月新潟海岸の空中ケーブルを利用し、距岸 120 m の沖の底層を基準として、その地点での鉛直方向の流速変化および砕波のすぐ沖側での底層流の測定を行ったが、その結果は

砕波のすぐ沖側 (距岸 20 m, 水深 1.5 m)

1.5 m 水深……………25 cm/sec (沖向き)

沖 (距岸 120 m, 水深 4.5 m)

0.5 m 水深……………30 cm/sec (沖向き)

1.5 m 水深……………10 cm/sec (沖向き)

2.5 m 水深……………0 cm/sec

3.5 m 水深……………0 cm/sec

4.5 m 水深……………0 cm/sec (基準, 水底)

であつた。なおこのときの波の状態は約 50 cm の波高で周期約 7 秒のうねりが卓越していた。

この結果を見て興味ぶかいのは、砕波のすぐ沖側には底にそったかなりはっきりした沖向きの流れがあるのに、約 100 m 沖では離岸流は表面に集中していることである。それぞれが Undertow, Rip current に対応するものと考えられるが、沖の表面流が砕波のすぐ沖の底層流より大きくなっているのは、ケーブルの位置が、縦堤と縦堤のちょうど中央に位置すること等の地形条件から、離岸流がたまたまこの位置に集中していたものと推定される。この一つの観測から一般的な状態を類推することは危険であるが、離岸流の一つの型として、岸近くでは底にそったもどり流れがあり、やや沖側ではそれが表面に集まってゆく型が予想され今後の問題としてさらに細かい観測を行えば面白いと考えている。

またこのような流れがどの程度に安定なものか、またどのような周期性をもった変動をするかということも非常に興味ある問題である。このような海浜流の変動のほかに、海浜でかなりよく知られた現象に 2~3 分の周期をもつ surf beat があるが、実際に海岸で軌道運動の観測を行っているときにしばしば 2~3 分の周期の変動が認められるがその代表的な例を図-3に示す。この例は正弦波に近いきれいな形をしており、2 周期にわたってはっきりと認められたが、もっと乱れた形をしている場合も多く、何周期にもわたってはっきり認められることはまれである。図-3 の例は、離岸流の観測を行った日に水深 4.5 m の底層で見られたものであるが、流速の鉛直分布を調べているときには表面流にはいくぶんかの変動が見られたが、底層ではほとんど認められなくなっていた。また同じような波浪条件で数時間連続した観測中、一度もこのような変動が見られなかったこともあり、正確なことは今後の観測にまたねばならないし、現在の段階ではこれが surf beat といわれるものかは不明であり、何点かの同時観測を行う必要があると考えられる。

5. 結 言

以上、現在までの観測結果の中で、それぞれの場合に代表的な型と思われるものを概述した。実際に観測した場合には、そのときどきの条件にしたがつて種々の変形が見られるであろうし、またそれが今後の観測の目的でもあるが、ここに述べたものは今後の観測の一つの基準になりうると考えている。もちろん、この中には推測の域を出ないものも多いので、今後の結果によってかなりの訂正を行わなければならないことは十分予想されるところである。

最後に、この研究に対して終始御指導をたまわった本間 仁教授ならびに日高孝次教授に感謝するとともに、実際の観測は日本原子力発電株式会社および新潟県の海岸調査の一部として行ったもので資料の使用はその御好意によつたものである。なお研究の一部を文部省科学研究費によつたことを付記する。