

# 渥美湾福江海岸の波と漂砂の特性

運輸技術研究所 運輸技官 工学博士 井 島 武 士  
 同 上 佐 藤 昭 二  
 同 上 青 野 尚 一  
 愛知県伊良湖港湾工事々務所 愛知県技師 石 井 晃 一

## 1. は し が き

渥美湾福江港の修築計画に対する基礎資料として、同海岸の波浪及び漂砂につき、昭和33年冬から継続して調査を行つた結果を茲に報告する。我が国で小海湾に面する海岸の波及び漂砂の特性については、泉南海岸の調査例が著明であるが、この報告では長期間の観測から得られた資料につき簡単に説明することに止める。

## 2. 福江海岸の特性

福江湾は渥美半島の北側渥美湾に面し、湾口には西側から長さ2,000 mの砂洲が略東西に伸びており、東側からは1,000 mの長さの砂洲が湾内に曲りこんでいる。西側の砂洲の根元の波高観測地点から測つた渥美湾の対岸距離は、WNW方向7 km, NW方向8 km, NNW方向7 km, N方向13 km, NNE方向14 km, NE方向24 km, ENE方向23 km, E方向4 kmである。又渥美湾の最深部は基準面下-19 mで、海上保安庁の潮汐表によると、福江湾の各潮位は次の様である。

|         |           |          |
|---------|-----------|----------|
| 大潮平均高潮位 | H. W. L.  | + 2.20 m |
| 平均水位    | M. W. L.  | + 1.19 m |
| 東京湾中等潮位 | T. P.     | + 1.16 m |
| 大潮平均低潮位 | L. W. L.  | ± 0      |
| 基本水準面   | D. L.     | - 0.09 m |
| 最低潮位    | L. L. WL. | - 0.41 m |

海岸性状 — 渥美半島の南岸遠江灘海岸は中砂及び細砂の欠壊海岸で漂砂は東から西に移動する。伊良湖岬から立馬岬の間は礫の混入する中細及び細砂の欠壊性海岸で、漂砂は立馬岬に向つて移動しており、立馬岬附近から砂粒径は増加し粗砂となり、福江港海岸に向つて移動している。福江湾にはこの漂砂の終点と考えられ、砂嘴の生長となつて現われている。福江湾により東の海岸は欠張り著しい欠壊性を示し、数個の岬（馬草、山の神、白谷、西崎等）を迂回して粗砂又は砂利が北西に移動している。この附近の海底勾配は1/10前後、水深5 mまでの海底勾配は1/40前後で、汀線附近の底質は、平均径が2 mm～10 mmで小砂利を多量に含む粗い砂である。一方図-1に示すように福江湾東側砂洲前面の海底勾配は、汀線附近はすべて1/10程度勾配であるが、それより沖側で

図-1 福江海岸附近の底質分布

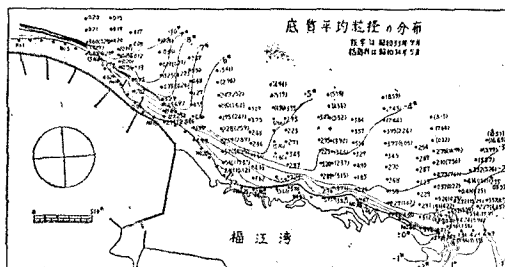
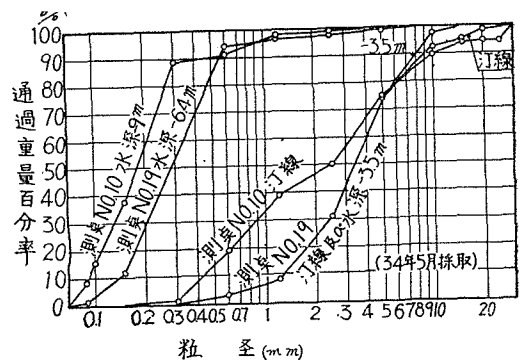
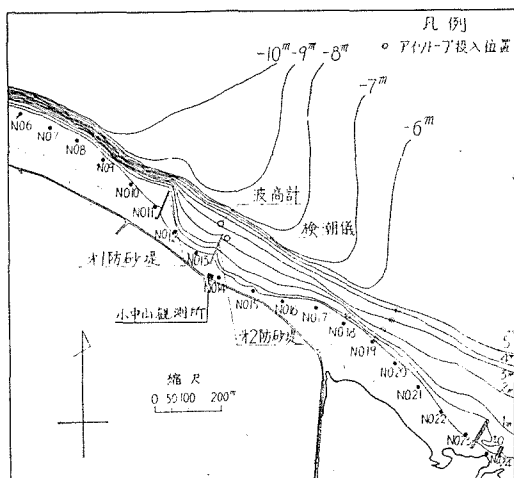


図-2 粒径加積曲線



は、第一防砂堤の西側で、水深10mまで1/10、No. 19附近では-5mまでは1/20で、湾口に近づくと共に-2m~-10mの等高線が沖側に伸び、勾配が次第にゆるくなっている。底質は汀線付近で、平均径2~5mmで図-2に示すように、5mm~20mm程度の小砂利が20~30%含まれる。それより沖側の部分では、No. 19から西側では0.2mm前後の平均径を示すが、湾口近くは砂利が多く、汀線附近の底質分布と殆んど同じで、この部分の海底は藻草が密生している。この様な海岸性状と汀線に設けられた突堤附近の地形及び湾口西側の砂洲の発達等からみて、明らかに漂砂は西に移動しており、又その移動範囲は汀線より-2~-3mまでの深さに限られているものと推定されるが、この湾では潮位変動が波高よりも大きく、入射波向が殆んど海岸に平行である点が著しい特性である。この様な海岸での砂移動の限界水深、移動方向、速度或は移動量等についての量的推定を行うために、図-3に示す位置に観測所を設けて、継続観測を行つたのである。

図-3 観測地点位置図



### 3. 福江海岸の風

図-3に示す観測所に設置した風速、風向計により昭和34年1月から9日26日迄の記録と昭和34年9月27日から12月末日までの福江観候所の風記録とによつて、福江海岸の風の特性を調べた(昭和34年9月26日伊勢湾台風により小中山観測所の風速計は故障したため、33年12月から9月までの小中山観測所及び福江観候所の風速と風向の相関を求め、福江観候所の風を小中山の風に換算した値を9月27日以降は使用している)。小中山観測所の風速計の海面上の高さは、T.P.上7.7mである。図-4は夏及び冬の方角別の観測回数を示す(観測値は毎時のものであるから1日24回である)。

之によると

(i) 年間を通じてWNW~NNWの風が最も多く、ついでENE~E及びS~SSWが多い。この傾向は名古屋、津、伊良湖でも類似しているが、最多風向は上記3点ではNWで、福江ではNNWである。福江ではE方向の風が夏多いが、名古屋では殆んど現われず、津ではESEが多く、伊良湖ではE及びSEが多い。従つて伊勢湾沿岸では冬はNWを中心とする風、夏はE~Sの風が多いことが分る。

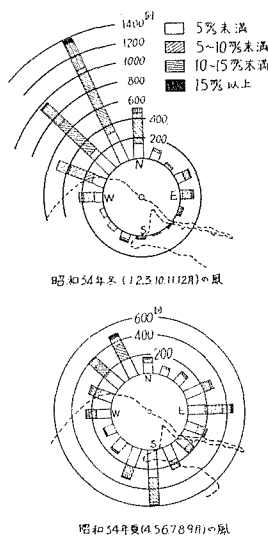
福江の冬の風はW又はWNW方向から吹き始めて、風速の増加と共にNW~NNWに移り、吹送時間及び風速が最も大きく、次でN方向に変つて終るという傾向が強い。夏の風は陸風が殆んどで、風速も小さく、波に対しては殆んど関係がないが、東寄りの風ではかなりの波を生ずる。この風は吹き始めから風向は殆んど一定で、風速は急激に増加し、最大値を過ぎてから風向がESE~SEに変つて終るのが一般で、伊勢湾台風時の風はその一例である。冬の風では風速20m/sをこえる事は殆んどないが、継続時間は長く、40時間程度が最も多く、夏の風は継続時間は短いながら20m/sをこえることもある。

### 4. 福江海岸の波

図-3に示す様に基準面下-3.2mの地点に水圧式波高計を設置し、長さ300mの鎧装ケーブルを観測所に引きこみ、昭和33年11月末から波の観測を続けている。波高計の感度は水圧2.7gr/cm<sup>2</sup>に対して記録振幅1mmの割合である。尚補正係数は波高計設置位置に立てられた波高桿による水面波高との比によつて求め、昭和33年12月、34年12月及び35年2月の3回の観測により、1.37と決定した。

図-3から分る様にこの海岸の汀線は、殆んどNW方向で海底勾配は-5m以深で1/100程度、それ以浅には1/10以上の急勾配である。冬の波はNWの風で起るものが多いが、海岸線に平行に進むことになり、汀線付近では、かなりの屈折を生ずると思われるが、沖波としてはこの方向に対しては周期3~4秒程度の波は深海波と考えてよい。夏のEの風による波は、砂洲前面の浅海部の影響で3~4秒の波に対しても、ある程度浅海波の

図-4 福江海岸の風



性質を示すことになる。

先づ風向とそれによる波の進行方向との関係を見るために、トランシット及び目測により、毎日1回8時に行つた観測結果により、相関を調べると 図-5 (a) (b) の様である (観測期間は34年1月17日から35年5月9日までで、波高計設置位置附近の波向を測定したものである)。観測回数が少ないが、風向が  $W \sim N$  の場合は波向は  $NW \sim NNW$  が多く、風向よりも  $N$  寄りの波向を示す傾向が強い。又風向が東寄りの場合は、波向は  $NE \sim ENE$  が多いことが分る。平均的には  $N \sim W$  の風では波向は  $NW \sim NNW$ ,  $E \sim ESE$  の風では波向は  $ENE$  と考えて大差ないと思われる。

そこで屈折図によつて種々の方向からの波に対し、波高計位置での屈折係数  $Kr$ , 浅水度係数  $Ks$  及び波向の変化を求めると、図-6 (a) (b) に示す様になる (水深は平均水位に取る)。(a) によると  $NW$  方向からの波は  $Kr$  及び  $Ks$  の地形効果による減衰が著しく、沖波の約70%程度の波高を示すことが予想される。(b)によると、沖波方向が  $N \sim NW$  の場合、周期3秒~4秒の波では、波高計付近では大体  $N \sim NNW$  の範囲に入ることになり、周期が大きい程北寄りになる。一方東からの波は殆んど屈折の影響を受けることなく、観測地点に到達することとなる。

図-5 風向と波向の関係

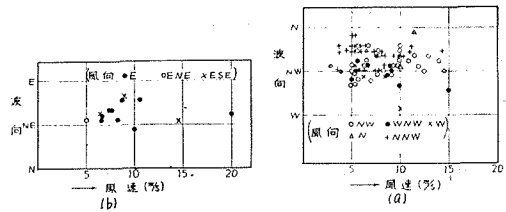


図-6 (a) 周期と地形効果 ( $Kr$ ,  $Ks$ ) の関係

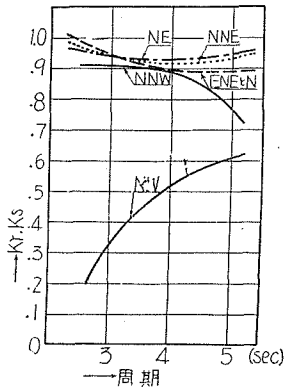


図-6 (b) 屈折による波向の変化

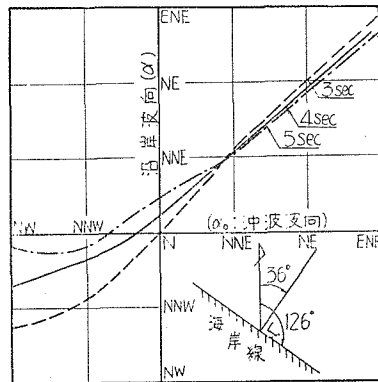
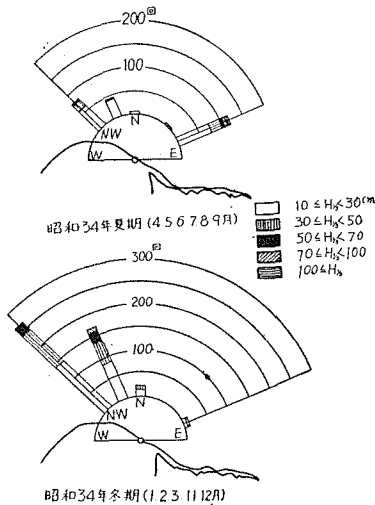


図-7 波向別の波高の出現回数



即ち西寄りの風による冬の波は、地形の効果によつて波高は沖波よりもかなり小さく、又波の方向も北によつており、東寄りの風による波は、海底摩擦の効果を受けるが、地形効果を余り受けないと考えてよい。

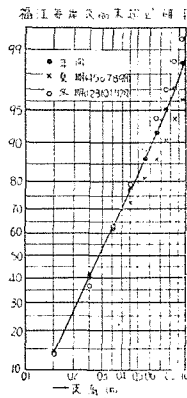
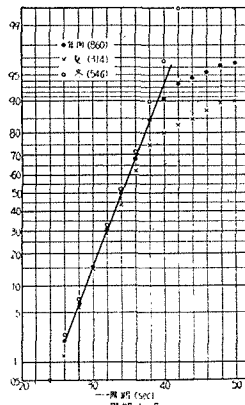
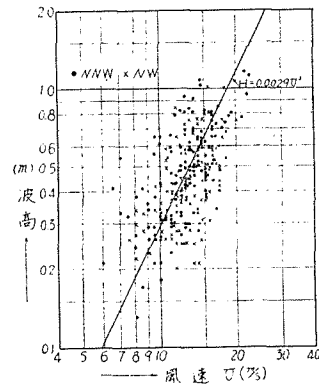
**統計的性質** — 以上の様な条件の下で昭和33年12月以降継続して2時間毎に10又は20分間の連続記録を取り33年12月から35年4月までの観測値について調べ、34年の波高の波向別出現回数を調べたものが 図-7 である (この場合波向はその時の風向と一致するものと仮定し、 $W$  及び  $WNW$  の風による波は  $NW$  の波向、 $E$  の風による波は  $ENE$  の波向を取ると仮定した)。

この結果をみると、波高1mをこえる波は極めて少く、而も之は夏の  $ENE$  からの波である。又この海岸では、 $NW \sim NNW$  及び  $ENE$  の波が大部分で、垂直に入射する波は極めて少いと考えられる。図-8 (a)

(b)は夏及び冬のすべての方向の波について、波高及び

周期の出現頻度を示したもので、波高は対数正規分布に近く、中央値は約0.3mである。周期は冬の波については、正規分布をなし、4秒以上の波は極めて少いが、夏は台風15号に伴ううねりが入っているため、正規分布から外れている。中央値は3.4秒である。

図-8 (a) 波高出現率

図-8 (b) 周期出現率  
(周期未超過確率)図-9 (a) 風速と波高の関係  
(NW~NNW)

風と波との関係 — 風と波の関係をみるために、風速及び風向が殆んど一定で、3時間以上継続し、波高が 0.2 m 以上を示した場合について、風速は考える時刻とその1時間前の値との平均を取り、風速と波高との関係を示したものが図-9(a)(b)である。観測値はかなり分散を示すが、傾向としては波高は風速の平方に比例すると見做され、(a)(b)何れの場合についても、その関係は次式で表わされる。

$$H = 0.0029 U^2 \quad \text{.....(1)}$$

$H$ : 波高 (m)       $U$ : 風速 (m/s)

周期と風速との関係について同様に示すと 図-10(a)(b) の如くである。この場合は E~ENE 方向については、

$$T = 1.08 U^{1/2} \quad \text{.....(2)}$$

NW~NNW 方向については

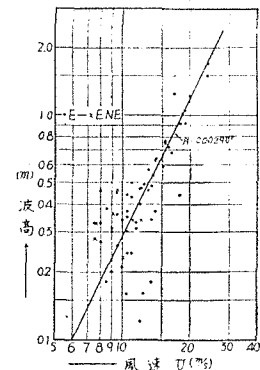
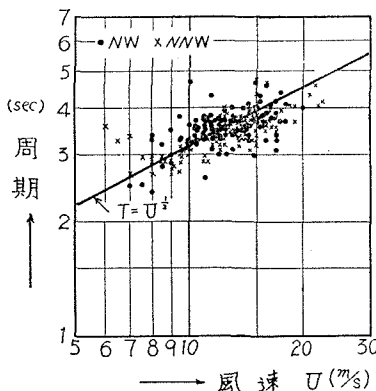
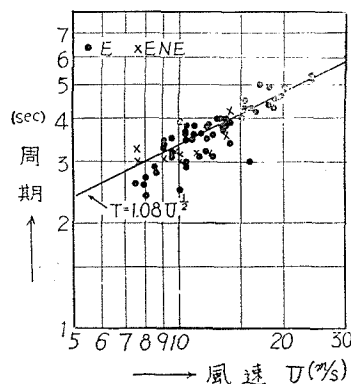
図-9 (b) 風速と波高の関係  
(E~ENE)

図-10 (a) 風速と周期の関係



$$T = 1.0 U^{1/2} \quad \text{.....(3)}$$

図-10 (b) 風速と周期の関係



という関係が求められ、東寄りの波では同一風速について約 1 割程度周期が大きい傾向がある。

NW~NNW 方向に対しては、対岸距離は約 8 km で、3~4 秒の波については、海底地形の効果から波高が沖波の 20~30%程度低くなるとはれる。

ENE 方向の波については、対岸距離は 15~20 km 程度と考えられるが、その方向は海岸線に殆んど平行で、又福江海岸附近では約 2 km にわたって -5 m の等深線に沿って、波が進行することになり、10 m/s 程度以上の風速に対しては海底摩擦の効果が利いて来ること、及び風域が海岸線に平行なための風域幅の有限性によって、波高及び周期の減少が考えられる。この様な効果から東寄りの波と北西寄りの波については同じ風速に対して略同程度の波高と周期が観測されたものと考えられる。

今 NNW~NW 方向の波について吹送距離を 8 km として、浅海波の図式計算法<sup>2)</sup>をこの方向の fetch に適用して風速と波高の関係を計算した結果は

$$H=0.072U-0.12 \quad \dots\dots\dots(4)$$

で表わされる。即ち波高は風速に比例することになって  $U<20\text{m/s}$  では、(1) 式による波高よりも大きな値を与える。Darbyshire<sup>3)</sup> の求めた fetch 100 mile 以下の場合の深海波の式において  $F=8\text{ km}$  とすれば、

$$H=0.036U^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

として与えられ、(1)式による波高は Darbyshire による値の 0.8 倍である。此事は前述の如き NW~NNW 方向の波に対する地形効果を考えると、Darbyshire の結果が、福江港の冬の波についてよく適合することを示している。

周期について同様の比較をすると Bretschneider の深海波によると、

$$T=0.99\sqrt{U} \quad \dots\dots\dots(6)$$

前述と同様の浅海波の計算によるときは、

$$T=0.070U+2.55 \quad \dots\dots\dots(7)$$

Darbyshire の結果では、次の如く与えられる。

$$T=0.78\sqrt{U} \quad \dots\dots\dots(8)$$

之等と比較するときは、Darbyshire の結果よりも Bretschneider の深海波の結果が良く適合することが分る。

E~ENE 方向の波については上述の如く海底摩擦の効果と風域幅の有限性ととの両方の影響が加わるので、比較をすることは困難であるが、周期に対する之等の効果は波高に対するよりも小さいと考えられるので、周期について考えると、(2) 式による周期は Bretschneider の深海波では  $F=12.2\text{ km}$  に対応し、Darbyshire の深海波では  $F=18\text{ km}$  に対応する。従つてこの方向に対しては、有効 fetch として 15~18 km 程度を考えるのが妥当であり、之は地形上の対岸距離 (ENE 方向では  $F=23\text{ km}$ ) の約 65~80 %に相当する。

**潮位の影響** — この海岸において最も著しい特徴は、潮位の変化が波高よりも大きいということである。

潮位変化そのものは、水深の増減を生ずるにすぎないが、それに伴う潮流は波の発生及び進行に対して、かなりの影響を与えることが予想される。特に波高に対してその影響は著しいであろう。一般流と波との共存関係については、エネルギー損失を考慮しない場合について取扱われたものがあるが、実際には潮流及び風による渦動粒性による波高の減衰を考慮すべきであるとされるが、その取扱いについては全く不明である。然し我々の福江海岸の調査においては屢々波高に対する潮位変化の効果が著しく現われている例が見られたので、ここでその 1 例を示すことにする。

図-11 は 34 年 3 月の実測値で、風向、風速、波高、周期及び水深 (波高計位置における) の時間的変化を示したものである。之によると周期に対しては顕著な変動は見られないが、波高と水深の変化を見ると、明らかに波高が水深と共に変化し、潮位が大きいときに波高も大きい事が分る。

図-11 福江海岸の波と風及び潮位 (昭和34年3月)

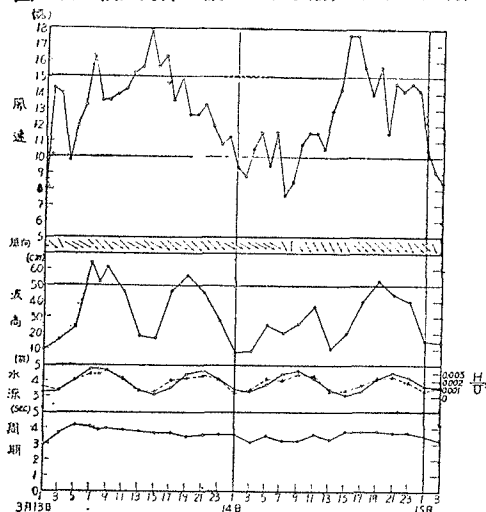
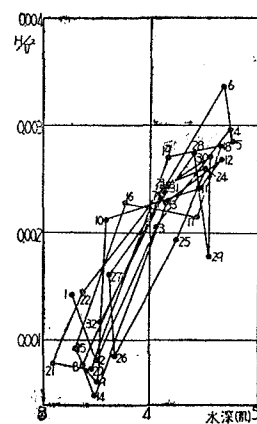


図-12 水深と  $H/U^2$  の関係

(昭和34年3月14日~15日)



波高に対する風速の効果を除くために、その時刻の風速と 1 時間前の風速の平均値を風速とし、 $H/U^2$  を計算した。之が潮位と共に変化する状態を水深の欄に記入して示した。図-12 は  $H/U^2$  と水深の関係を分り易く示した。

たものである。この様な著しい波高の変動は常に起つてゐるものではないが、福江海岸ではこの観測期間中、35年4月までにこの様な現象が顕著に認められたのは冬に多く、11回に及んでおり詳細に調べると更に多く認められると思う。この原因は測定法又は場所的な特性によるものでないことは、隣接する田原海岸において行つてゐる階段抵抗式波高計による結果でも認められる。この場所は、基準面下約-6mの位置に設置されたもので、特に局地的特性は認められない。図-13は田原における実測結果の1例を示したものである。

上記福江及び田原附近の潮流は、水路部の観測結果<sup>5)</sup>によると、恒流は何れも北東に向い夫々0.1及び0.06ノット程度、大潮時の最強流速は福江附近では、高潮後1時間後及び低潮後に現われ、夫々西流及び東流で0.6ノット程度である。田原附近では高潮後2~3時間後及び低潮後2時間後に最高となり0.3~0.4ノットとなっている。

### 5. アイソトープによる漂砂観測

放射性ガラス砂の製作—今回の実験では、先ずCOを含んだ非放射性のガラス砂を作り、それを原子炉で照射することにした。このガラスの試料の混合割合は次のようである。

|                  |                   |                   |                   |                                |                                |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> | CaCO <sub>3</sub> | NaCO <sub>3</sub> | NaNO <sub>3</sub> | Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| 150 gr           | 40 gr             | 50 gr             | 4 gr              | 5 gr                           | 6 gr                           |

これに5~10ccの水を加え、ルツボに入れて溶解し1,300°位まで温度を上げた後、コンクリート板の上に流して急冷し、その後粉碎し篩分けして、所要の粒径のものを得た。このガラス砂は2%のCOを含み、青味をおびており、比重は2.67である。これを50grづつポリエチレンの袋に入れ、原子力研究所の原子炉(JRR)で中性子を照射した。この原子炉は一週間の中全出力運転が20時間位で、二週間この炉に入れて得られた放射能は、50gr当たり1mc前後であつた。ガラス砂は原子炉に入れると、COの外にガラス成分としてのSi, Ca, Na, Pb, N等も同時に放射能をもつが、それらは半減期が非常に短いか、透過力の弱いβ線を放射するだけであるので、炉から出した後1ヶ月すぎると、ガラス砂から出るγ線はCO<sup>60</sup>から出るγ線が大部分となる。従つてガラス砂は、照射後1ヶ月以上経過した後で使用した。

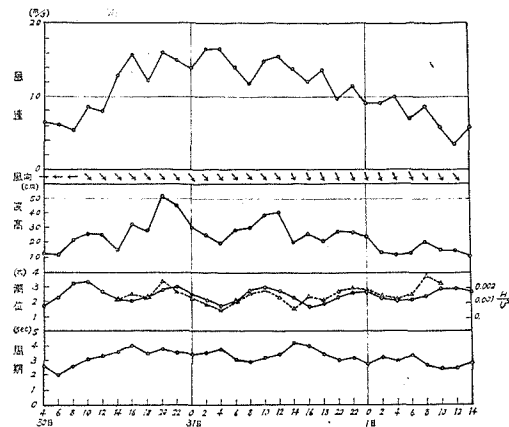
海底砂の移動観測—先ず水深別による海底砂の移動を調べるために、35年1月26日に図-3に示す測線No.19上の基準面下2, 3, 4mの地点に、この放射性ガラス砂を次の様な割合で投入した。

| 投入水深 | ガラス砂の量           | 合計     | 放射能    |
|------|------------------|--------|--------|
| -4 m | 0.6~1.2 mm 50 gr | 150 gr | 約 3 mc |
|      | 1.2~2.5 mm 50 gr |        |        |
|      | 2.5~5 mm 50 gr   |        |        |
| -3 m | 0.6~1.2 mm 50 gr | 150 gr | 約 3 mc |
|      | 1.2~2.5 mm 50 gr |        |        |
|      | 2.5~5 mm 50 gr   |        |        |
| -2 m | 0.6~1.2 mm 50 gr | 200 gr | 約 4 mc |
|      | 1.2~2.5 mm 50 gr |        |        |
|      | 2.5~5 mm 100 gr  |        |        |

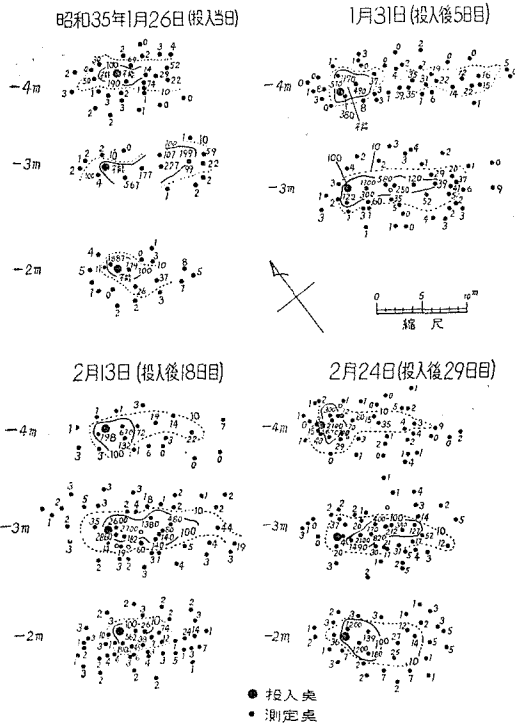
放射性ガラス砂の追跡方法は、伊良湖港で行つた時と全く同様な測定機械<sup>9)</sup>を用いて、船上から検知器を海底に下げて、放射能を測定した。その結果は図-14の如くである。図示の数字は毎分当りのカウント数を示し、又不能はこの測定器の測定範囲以上の強度を示す点である。図-15にはこの観測期間中の毎日の最大有義波と、平均最大風速を示した。黒丸は風速より式(1)から算出したものであり、白丸は波高計による観測値である。アイソトープ砂は、投入時に潮流によつて海岸に平行に南西の方向に流れ落ち、長さ5~10m、幅3~5mの帯状に分布した。しかしそれ以後、この分布は、水深2mにおいて29日の観測で、投入点附近のカウント数が下がつて来た以外は、投入後29日目の2月24日の観測まで殆んど変化していない。又図-15に示したように、この期間中の最大有義波高は83cmであつた。又34年3月にもNo.10の測線上水深5m及び9mにアイソトープガラ

図-13 田原海岸の波と風及び潮位

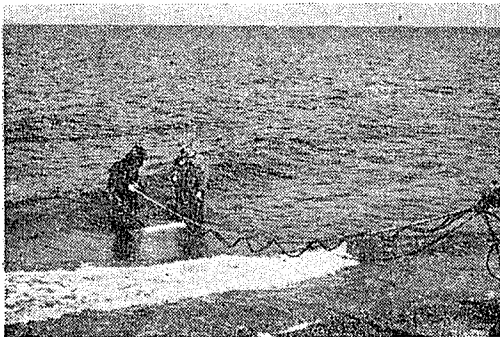
(昭和34年1~2月)



図一14 アイストープの砂分布

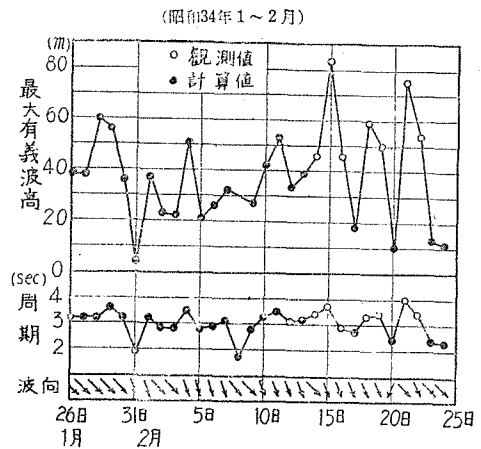


写真一1アイストープ観測 (漂砂)



混合し、各点につき 300 gr づつ投入した。観測には 写真一1 に示すように、レートメーターその他の計器部分を、リヤカーに積み陸上を移動し、それとケーブルで連絡される検知器を2人で海浜上を測定しながら、持ち運

図一15 波高と周期の変化



ス砂を投入したが、同様に殆んど移動を示していない。

以上の結果から次のことが考えられる。

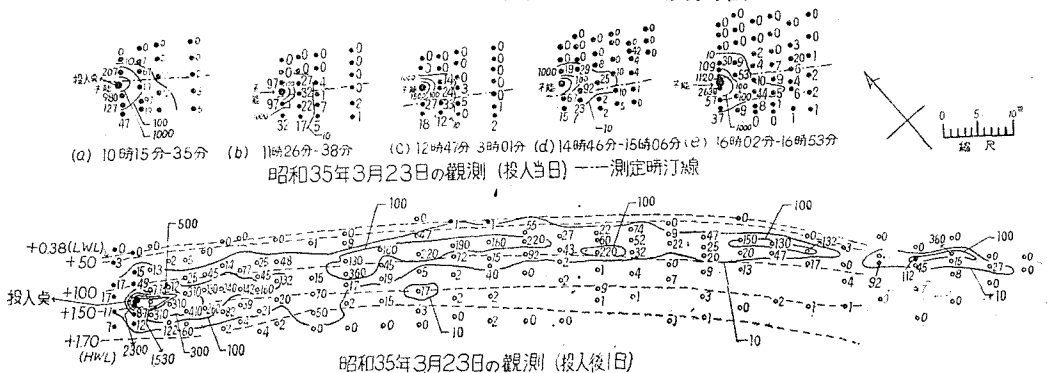
(1) 水深 2 m 以深においては、粒径 0.6 mm 以上の海底砂は、波高 80 cm 以下の冬期風浪によつては、掃流的な移動はしない。

(2) 分布が変化せずカウント数が多少下るのは、微粒の放射性ガラス砂が浮游によつて移動したか、又はその場所で多少の埋没を生じた結果であろうが、その量は殆んど問題にならない程度であるが、強いて云えば汀線に平行な移動を示す傾向がある。

(3) 前述したように、この海岸の波高が 1 m をこえることは極めて少いので、水深 2 m 以深におけるこの海岸の漂砂は殆んど問題にならない。

汀線漂砂の観測 — 以上の結果によつて、この海岸では汀線附近の砂移動が漂砂特性を支配することが分つたので、汀線における砂の移動を観測するために、図一3に示す測線 No. 19 上 +1.23 m の地点に、35年3月22日に及び測線 No. 18 上の ±0 m の地点に、35年3月23日に、アイストープ砂を投入した。粒径は 0.6 ~ 1.2 mm, 1.2 ~ 2.5 mm, 2.5 ~ 5 mm のものを各 100 gr

図一16 +1.23mにおけるアイストープ砂分布図



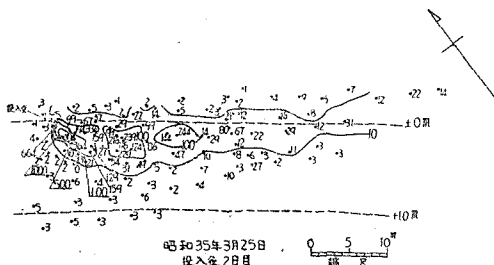
ぶこととした。

この観測結果は次のようである。

(1) +1.23 m における観測 観測結果は図-16 に示される。又この観測期間中の波と風は図-17 に示す。放射性ガラス砂は、22日10時頃+1.23 m の地点におかれたが、この場所は潮位及び波高によつて、波の作用を受ける回数が変動する。10時15分に最初の波をうけたが、その有義波高約30 cm、周期約3秒のNWの波で、その汀線となす碎波角は約 $30^\circ$ であつた。この波を間歇的に数十波うけた後の放射能の毎分当りのカウント数の分布は、図-16 (a) の如くであつた。図-16 の各回の投入点より左側にカウント線の記入がないのは、数点の測定で全く放射性を検知出来なかつたためである。その後次第に波は小さくなつたが、潮位が高くなり11時20分頃より大部分の波が投入点に及ぶようになった。しかし1,000 カウントの等カウント線は、全体を通じて変化なく、100 カウントの線は11時30分以後変化なく、10 カウントの線のみが多少全体的に東南方向に移動したのみであつた。碎波角が初めは約 $30^\circ$ であつたが、風が西にまわると共に次第に大きくなり、14時頃で $60^\circ$ になつたが、この碎波角の変化と(d), (c)の100 カウント線の東南方向への伸びに、関係があるものようである。尚投入地点に残つたガラス砂は波をうけ始めて、1時間後には完全に埋没した。この観測中のフロートによる碎波線附近の表面沿岸流は、20~30 cm/s であつた。一方図(e)の分布を示して後、約18時間の後の23日の観測結果では、すべての等カウント線が移動し、特に100と10のカウント線は、投入点から100 m も移動し、22日20時35分のL.W.L.及び23日3時30分のH.W.L.の中間に分布している。このように大中にガラス砂が移動したのに拘らず、この間の波は22日の観測中の波より小さく10 cm 以下であつた。これは汀線附近の砂の移動に対する潮位の影響が明らかにあらわれたもので、この程度の小さい波によつては、地表面の第1層のみが波及び流れの作用をうける結果、カウントの分布は帯状に長くなるものと考えられる。

(2)  $\pm 0$  m における観測 35年3月23日16時頃、潜水夫により、アイソトープガラス砂を投入した。この

図-18  $\pm 0$  m におけるアイソトープ砂分布図



地点は観測中常に水面下にあつて、波の継続した作用をうけた。この時は、波も全くなく船の上から投入されたガラス砂が1地点に固つておかれたのが見られた。投入後2日後の観測結果は図-18の如くであるが、500及び1,000 カウントの等カウント線は、投入点を離れ、SSW 方向に海岸に向つて2.5 m ほど移動し、100と10の等カウント線は、海岸線にそつて南東に移動した。この間の波は、図-17 に示すように、有義波高1.2 m 周期4.6秒を最大とするNNW 方向の波であり、この方向は高カウントの線の移動方向と一致している。低カウントの線は、このような波によつて攪乱されたガラス砂の一部が、沿岸流によつて海岸線方向に動かされたものと思われる。

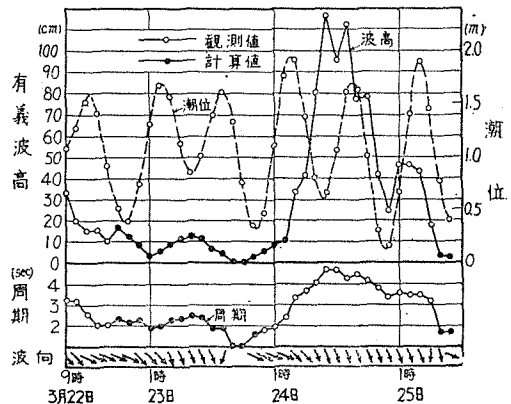
以上の二つの観測結果から、この海岸の汀線の砂移動の方向と型式に対して次のことが考えられる。

- ① 汀線の高潮面に近く継続的に波の作用をうける部分では、表層の砂のみが汀線に平行に掃流的に移動する。この場合の移動速度は、波高が10 cm 程度でもかなり大きい。
- ② 低潮面に近く、常に水面下にあつて、波の継続的作用をうける部分では、碎波によつて一部の砂は波の入射方向に掃流的に移動し、一部は碎波による攪乱と沿岸流により汀線に平行に移動する。
- ③ 汀線附近の砂は潮位の変化と共に、上の2つの型式を繰返しつつ移動するものと考えられる。

## 6. 着色砂利による汀線漂砂の観測

観測方法—汀線附近の物質は、前述したように小砂利が相当入っているが、之はアイソトープ砂では製作が困難であるから、この小砂利の移動を追跡するために、着色砂利を用いた。汀線附近から白い石英質の砂利を集め、こ

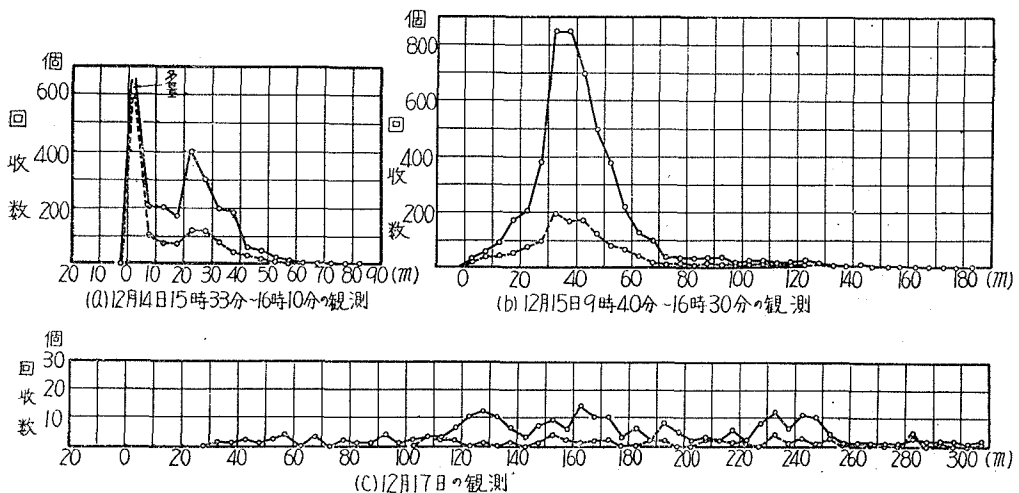
図-17 波高、周期及び潮位の変化(昭和35年3月)



れをブリキの箱に入れ、市販のマゼックインクを加えて、箱を振ることにより簡単に着色することが出来た。これを干潮の時に汀線附近に投入して、或時間経つた後、汀線を1 m 平方の区間に分け、約20 cm 位掘り下げて着色砂利を拾い出し、その数を記録した後、拾い出した砂利は、その位置にそのままどしておく事にした。海中の部分は採取が困難であるので調べなかった。

観測結果—34年12月14日14時28分に図-3のNo.19の測線上±1.30 mの地点に、着色砂利を投入した。着色砂利は、粒径5～10 mmを赤色、10～20 mmを青色に着色し10ℓずつ同じ点に同時に投入した。概算粒数は赤色が19,500個、青色が4,400個であつた。同日15時33分から16時14分までに第1回の採取を行い、更に15日、17日に分布を調べ、汀線方向の分布を示したのが図-19である。

図-19 着色砂利の分布



之は+0.8 m～+1.70 mの範囲内の分布である。又この観測期間中の波及び潮位は、図-20に示してある。14日と15日は波高は10 cm程度以下であつたが、着色砂利の大部分は35 mほど移動し、16日には波高69 cm周期3.7 secを最大とするNW～NNW方向の波をうけ、17日の観測では、更に150 mほど移動した。この時青色の砂利、赤色の砂利も殆んど同様に移動し分散した。又1月23日に同じ方法で着色砂利を投入した結果は、この時は波高が30～40 cm位あり、1夜で急速に分散し、分布図を得ることが出来なかつたが、着色砂利は表層から20 cm程度の深さまで分布し、その一部は投入点より600 m離れた点にも見出された。この様に砂利の移動は、すべて投入点に埋没することなく、汀線に平行に掃流的に移動分布する。

## 7. 漂砂量の推定

観測地点の選定 — 図-3に示す様に第二防砂堤の東側は欠壊を示し、その先端の2 m以深の等深線の位置は防砂堤建設当時と殆んど変化しておらず、又アイソトープによる漂砂の移動観測で知れるように、水深2 m以深では年間を通じて砂の移動は殆んどないものと考えられた。従つてこの第二防砂堤の先端を廻る砂の移動は殆んど問題にならない。又一方第一防砂堤は、34年には既に砂を阻止することが出来ず、写真-2に示すよう

図-20 波高、周期及び潮位の変化(昭和34年12月)

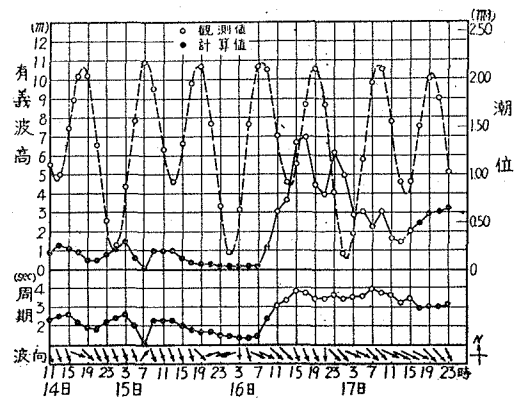


写真-2 第2防砂堤(漂砂)



に砂が堤の先端より20~30m陸側の高さ+2~2.5mの部分を超えて東側に移動しており、この堤の西側の±0m以上の等深線の位置は、昭和34年10月と35年7月の測量結果とで変化していない。又この堤の東側の汀線はENE方向に対して、ほぼ直角であるから、この附近の海岸に西向きのエネルギーを生ぜしめるようなENE及びNE方向からの波によつて、この堤を超えて西の方向に砂が移動する量は、殆んど問題にならない。

以上の考えから、この二つの堤に囲まれた領域のある期間の土量増加は、波のエネルギーの東向の成分の和に対応するものと考えられる。従つて吾々は、この領域を漂砂量観測地点に適した点として選んだ。

**漂砂量とエネルギーとの関係**—第1、第2防砂堤間の領域を10m間隔に測線を設け、水深-4m位まで陸上はレベルで、海中はレッド測量を34年3月より行つている。しかし±0m以深も測量出来たのは2、3回であつた。

この測量結果からの、この領域内における土量の増加と、一つの測量時から次の測量時までの波のエネルギーの計算は、次の様に行つた。

(1) -4mの線と2つの防砂堤及び防砂堤基部を結ぶ線によつて囲まれた領域の-4m以浅の土量を計算する。

(2) ±0m以深の測量値のない場合は、±0m以深の海底勾配は、各測線ごとに同じであるものとして、±0m以浅の横断面積から推定した。

(3) 波は2時間ごとの風速を用い、式(1)、(2)及び(3)から波高と周期を求め、風向と波向は一致とした。但しW及びWNWの風に対しては、NW方向の風速成分をとり、E及びESEに対してはENE方向の風速成分をとつて、波高、周期を計算し、それぞれNW及びENE方向の波とし、その他の陸風に対しては、波はないとした。

(4) 海岸線に沿う2時間当りの波のエネルギー $E_i$ は、この附近の海岸線の方を $N55^\circ W$ として、次の式により計算した。

$$E_i = \left( \frac{nw}{8T} LH^2 \right) \times 2 \times 3,600 \times \sin \alpha \cos \alpha$$

$n$ : 群速度と波速の比,  $w$ : 海水の単位重量 ( $1.03 \text{ t/m}^3$ ),  $L$ : 波高計設置位置の平均水深4.20mにおける波長(m),  $H$ : 波高(m),  $\alpha$ : 波向と汀線とのなす角。

以上の様にして得たこの領域内の34年3月15日を基準とした土量の増分と、同日から各測量時までの海岸線単位巾当りの波のエネルギーの東向きの成分の合計値とを示すと、図-21のようになる。この図をみると、34年10月から35年3月までエネルギーの増加も土量の増加も、時間の経過に対して、ほぼ様な関係にある。この区間を10月1日を基準として、時間の経過 $t$ を月単位にとり、エネルギーの累積値 $E$ を $\text{ton} \cdot \text{m/m}$ 、土量の累積値 $Q$ を $\text{m}^3$ の単位で表わすと、

$$E = 6.01 \times 10^5 t^{1.57}$$

$$Q = 7.66 \times 10^2 t^{1.31}$$

となる。この式を時間 $t$ で微分し $\frac{dE}{dt} = e$ ,  $\frac{dQ}{dt} = q$

として、 $e$ と $q$ との関係を求めると、

$$q = 0.62 e^{0.54} \dots \dots \dots (9)$$

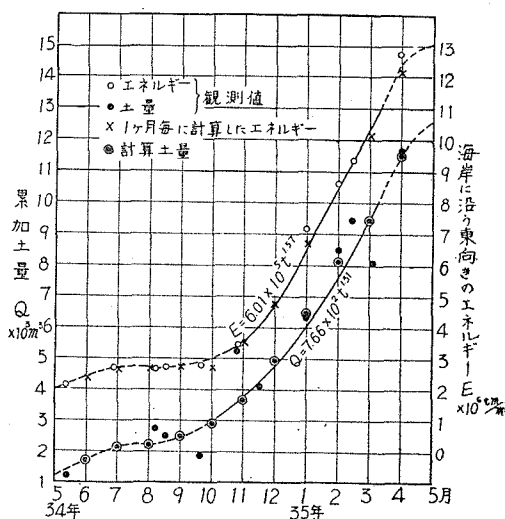
ここで $q$ は $\text{m}^3/\text{month}$ 、 $e$ は $\text{t} \cdot \text{m}/\text{m} \cdot \text{month}$ の単位である。尚1ヶ月当りの土量と1ヶ月当りのエネルギー

という単位を用いたのは、この式を求めるに当つて用いた資料が、ほぼ1ヶ月ごとの計算値だからである。

**漂砂量の推定**—2時間ごとの風の資料から、34年3月より35年5月までの波のエネルギーを前と同様な方法で求め、西向きと東向きのエネルギーを別々に求め、東向きのエネルギーを用いて、式(9)により各月ごとの漂砂量を計算し、34年3月を原点0として図-21に記入した。当然のことであるが、土量の計算値は実測値とよく一致している。

次に34年1月より12月までと、34年4月より35年5月までの漂砂量を集計し、東向きの漂砂を+、西向きを-とすると、次の表となる。

図-21 波の入射エネルギーと堆積土量の変化



| 期 間                     | 漂 砂 量 ( $m^3$ ) |        | 合 計    |
|-------------------------|-----------------|--------|--------|
| 34 年 1 月 より 12 月 まで     | +10,200         | -4,200 | +6,000 |
| 34 年 4 月 より 35 年 5 月 まで | +11,300         | -3,300 | +8,000 |

従つて、この海岸に沿う年間の漂砂量は、東向きに  $7,000 m^3$  程度と考えられる。

## 8. 結 び

以上述べた所から、此の海岸の波と漂砂の特性として次の諸点が認められる。

(1) 此の海岸の支配的な波は夏の *ENE* 及び冬の *NW~NNW* の波で波高はほとんど  $1 m$  以下、周期は  $3 \sim 4$  秒で、その出現頻度は 図-8(a) 及び (b) に示す様である。風速と波高及び周期の関係は式 (1) (2) (3) に示す如くで、波高は *Darbyshire*, 周期は *S.M.B.* の深海波の關係に近い。

(2) 波高に対する潮位の影響が著しく現われることが多いが、その機構は不明である。

(3) 此の海岸の漂砂の移動する限界水深は  $-2 m$  附近で以深の砂は殆んど移動しない。

(4) 最も移動の著しいのは、 $\pm 0 m$  以浅であり、特に小砂利は汀線附近で極めて小さな波高でも著しく移動する。

(5) 移動方向は冬の *NW~NNW* の波で支配され、西方向である。

(6) 移動量は年間約  $7,000 m^3$  程度で、入射する波のエネルギーと移動量については、式 (9) の關係が認められる。

尚此の観測は現在も続けて居り、漂砂の機構と移動量について更に詳細に調査を行う予定である。

此の観測は愛知県港湾課及び伊良湖港工事々務所と運輸技術研究所との協力によつて行われたものであり、愛知県港湾課伊藤弘美技師及び工事々務所副長小笠原毓之助技師の御尽力に負う所極めて大きい。茲に厚く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 愛知県土木部：渥美半島海岸調査報告、昭和 33 年 3 月
- 2) 坂本・井島・佐藤・青野：作図による浅海波の一般的計算法と伊勢湾台風による福江港外の波について、第 15 回土木学会年次学術講演会、昭和 35 年 5 月
- 3) J. Darbyshire : an Investigation into the generation of Waves when the Fetch of the Wind is less than 100 miles. Quart. Jour. Roy. meteo. soc. Vol. 82. 1956.
- 4) C.L. Bretschneider : Revisions in Wave Forecasting. Deep and Shallow Water. Proc. 6th Conf. on Coast. Eng. Dec. 1957.
- 5) 第四管区海上保安本部水路部：渥美湾及び伊勢湾の海象並びに潮流観測報告、昭和 28 年 4 月 1 日
- 6) 1) に同じ。