

伊良湖港の漂砂について

運輸技術研究所 工学博士 井 島 武 士
同 佐 藤 昭 二
愛知県土木部 早 瀬 幸 一

1. 諸 言

渥美半島の先端にある伊良湖港は昭和 23 年避難港として着工された港であるが、工事が進捗するにつれて漂砂防止対策をいかにするかということが工事進捗上重要な課題となり、昭和 31 年、32 年に漂砂に関する調査が行なわれ工事計画に対する指針をうることができた。この調査結果の全部を記すには余白がないので、まず風、波、潮流、底質等の調査によって推定された伊良湖港の漂砂の特性の概要を示し、つぎに着工当時よりの深浅測量図による漂砂量の推定結果、最後にこれらの推定を確かめるために行なわれたアイソトープによる漂砂観測について述べる。

図-1 伊良湖港 Fetch 図

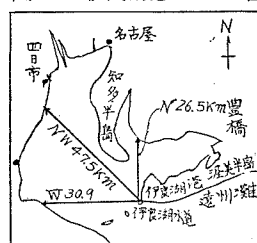
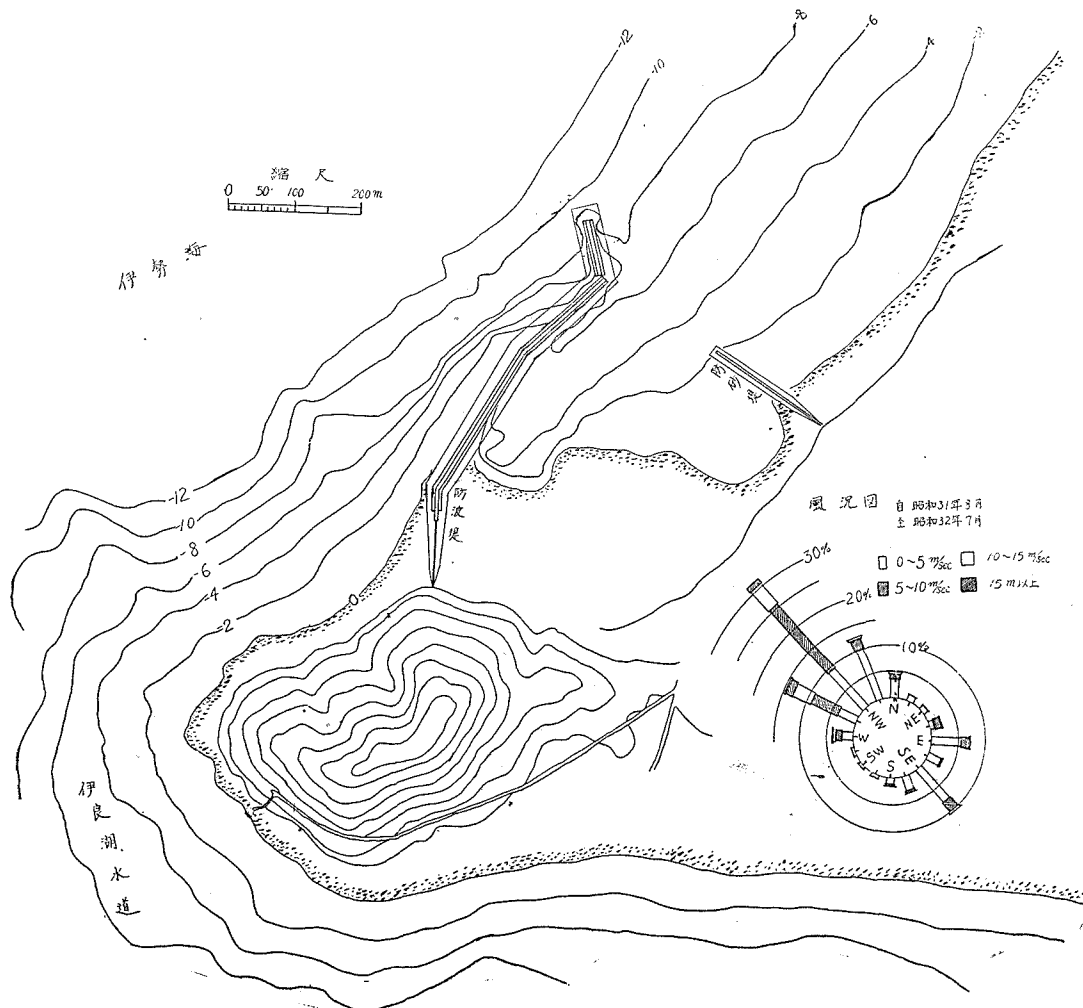


図-2 伊良湖港深浅図 (32 年 10 月測量) および風況図



2. 風, 波, 潮流, 底質等より推定された漂砂の特性

伊良湖港は図-1に示すように西から北方向にかけては北西方向に 47.5 m の最大吹送距離を有する伊勢海に面し、南西から北東方向にかけては伊良湖岬に完全に遮蔽されている。一方、伊良湖港の裏山の山頂で得られた風の観測結果は図-2に示すとおりである。

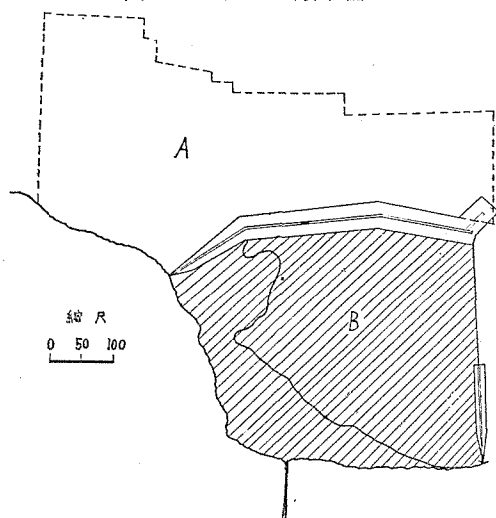
従つて伊良湖港に襲撃する波は、冬期季節風による北西～北北西方向の風浪と夏期および秋期に遠州灘に到達し伊良湖水道をまわつてくるうねりが考えられる。観測結果によれば、風浪は北西方向のものが圧倒的に多く全体の 60% 以上に達し、波高 0.6～1.2 m, 周期 4～6 sec, Steepness 0.01～0.05 のものが最も多く 80% を占め、継続時間は 24 時間程度以上である。この波はほとんど波高を減ずることなく港前面に達し、防砂堤より東側の海岸に対しては入射角 10° をもつて入射し、北東より南西に向う砂移動を起こす可能性を示し、防波堤に対しては直角または北寄りに 5° 程度の角度をもつて入射し、やはり南西に向う砂移動を起す傾向をもっている。一方外洋に発生したうねりは伊良湖岬を屈折う回してほとんど 90° の方向変動をなしてこの海岸に入射するが、水深 -7 m における入射方向は W および $W10^\circ N$ 方向を取るものが全体の 60% に達する。この方向は汀線と波峰線とのなす角が $35\sim45^\circ$ 程度であることを示すものであつて、既往の実験結果によると最も横方向の砂移動を促進する方向である。そして観測結果から台風通過による第一級の波のこの入射波高は大体 2 m 程度と考えられる。従つて、このうねりは汀線に沿つて砂を北上させる作用をもち防波堤付近に大量の砂の堆積を生ずる第一の原因となる。

次に伊良湖港の漂砂を論ずる場合考えねばならない問題は、防波堤の先端にそつて流れる潮流である。観測結果によると、防波堤前面水深 -8 m 以深では、漲潮時 3 時間のみが 0.5 ノット以下の微弱な北東流を示すのみで、他の 9 時間は 1.5～1.2 ノットの南西流を示しており特に防波堤先端部には強力な南西流があり最大 2 ノットに達する。従つて、-8 m 以深では沈降速度 4～7 cm/sec 程度の 0.2～0.4 mm 小粒径の砂がほとんど存在し得ず、潮流により転動掃流せられるものと考えられる。一方、防波堤前面の水深 -4 m 以浅ではほとんど規則的な潮流を示さず風浪に左右される。また防砂堤東側においては防砂堤に沿うて港口を横断する北西流が見られ比較的明確な潮流性を示しているが、0.2 ノット以下でありこの程度の流速によつては漂砂移動はほとんど問題にならない。

最後に底質について概略述べると、防波堤取付部前面付近は汀線を除いて年間を通じ 0.2～0.3 mm の平均粒径を示す sorting 良好な砂であるが、防波堤前面の水深 -8 m 以深では年間通じて不良で 1～2 mm の粗砂が存在し、特に防波堤先端部および港口付近の -6 m 以深では同様に 2～3 mm の極めて大粒径の砂が存在している。しかし防波堤前面の -8 m 以浅では採取時期によつて底質粒径の変動が大きい。これら境界は前述せる潮流の卓越する限界の水深 8～6 m の等深線と一致する。また港内には 0.2～0.3 mm の sorting 良好な砂が年間通じて分布しており、防砂堤以東の水深 -6 m 以浅では一般に sorting が良好であるが、-2 m 付近には小規模の砂堆の消長がありこれと対応して 0.3 mm 以上の sorting 不良な砂が定常的に存在している。

以上要するに

図-3 堆積土量計算範囲



(1) 夏期のうねり特に台風による波によつて伊良湖岬南岸の太平洋岸における汀線に沿う砂の一部は岬をう回して防波堤前面に到達する。しかし、この砂は防波堤の先端の屈曲部と先端にそう南西方向の強力な潮流とによつてさらに北東進することを妨げられ、防波堤と水深 -8 m の等深線とに囲まれた区域に堆積し、現在の所港口に到達することはない。

(2) 夏期防波堤前面に堆積された砂は冬の季節風による北西方向を中心とする波によつて水深 -4 m 以浅の部分は削り落され、その一部は直接波的作用によつて防波堤に沿つて南下し、一部はより深い所に払いおとされて潮流により南西方向に押し戻される。

(3) 防波堤の東側においては、冬期風浪によつて攪乱された砂の一部が港口方向に向う流れによつて移動することが考えられるが、流速が 0.2 ノット以下であるため現状ではその量は問題とするほどでない。

(4) 従つて、現況で港内に入る可能性のある砂は荒天時において波によつて攪乱された 0.2~0.3 mm 以下の浮游砂の一部が防波堤の先端を廻つて入ってくるものであるが、その量は僅少で現在のところは問題とするに足らないことは後述せる港内土量のここ二、三年の変化を見れば明らかである。

2. 漂砂量の推定

着工直前の昭和 23 年 8 月より昭和 32 年 10 月までの深淺図より港外 A 部、港内 B 部 (図-3) の堆積土量を計算すると図-4.5 のようになる。図-4 の点線は A 部と B 部の土量の和を示すものである。防砂堤の東側は起工当時より今日まであまり等深線が変化していないので、これは除外し、港外 A 部の沖側は -12 m の等深線位までとつた。

この土砂堆積の特徴を上げると次のとおりである。

港外 この堆積量の変動においていちじるしい特徴は数年の周期で堆積量の増減の変動が起こっていることである。これはもちろん防波堤工事の影響を考えねばならないが、単にそれのみとはいえず、台風出現回数の周期的変化を考慮すべきであろうと思われる。すなわち、台風によるうねりの少ない年には、冬期風浪および潮流による南西方向に流れる漂砂量がうねりによる北東方向に流れる漂砂量に打ち勝つために、このような現象を示すものと考えられる。第二の特徴は土砂堆積量の経年増加である。すなわち周期の谷を結ぶ線上では、年間平均 10 万 m^3 、谷を結ぶ線上では 5 万 m^3 となつており、工事着工以来現在まで増加の一途をたどっている。

港内 港内の堆積は、昭和 28

年 9 月から昭和 29 年 9 月末までの約 20 万 m^3 の増加によつてその大勢が決せられた。これは、ちょうどこの時期には防波堤取付部の開口部がようやく狭められ (防波堤工事は中央部から始められた)、防砂堤工事も開始されて港内が益々静穏となつたときで、昭和 28 年の台風 13 号、29 年の台風 14 号などがこの土砂の堆積に大きな役割を演じたものと思われる。

図-4 防波堤外側堆積土量変化図

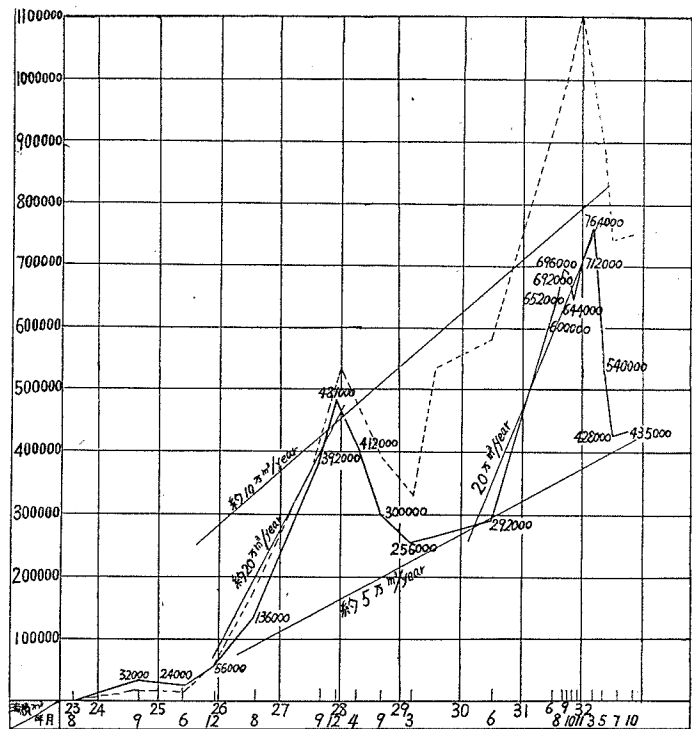
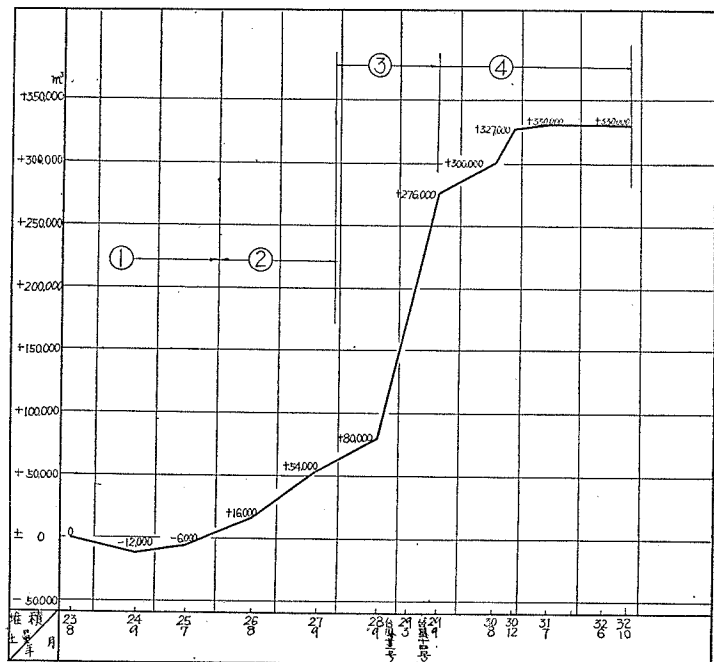


図-5 港内堆積土量変化図



以上要するに、伊良湖港前面における年間漂砂は、台風等によるうねりの来襲度合によつてその方向は南西あるいは北東を示し、その量は極大は 20 万 m^3 程度であり、経年的に考えた場合には 10 万～5 万 m^3 であるといえる。

3. 放射性ガラス砂による漂砂動態の観測

アイソトープによる漂砂追跡は北海道苫小牧港で昭和 29 年始めて開始され、英国のテムス河等で実施されて以来漂砂観測の一方法として各国で注目されてきた。しかし他の観測方法と比較して、観測器械および施設に費用がかかることと、アイソトープの取扱いに特別の知識を必要とするため、一般には行なわれていない現状である。

われわれがこのような困難を克服して、あえて本観測を取りあげた主なる理由は次のごとくである。

(1) 本港のように潮流の強い漂砂海岸における漂砂の調査にアイソトープを使用することの可能性を検討すること。

(2) 一般に漂砂は波あるいは流れの掃流力によつて動かされる掃流漂砂と浮游漂砂に分けられるが、これをアイソトープによる観測によつて区別しうるかどうかを検討すること。

(3) 本港の防波堤および防砂堤外側における砂の移動方向を観測すること。

(4) 港内に流入する砂の性質と、その流入経路を追跡すること。

(5) 防波堤の先端をまわつて海底砂が港内に入る可能性があるか否かを明らかにすること。

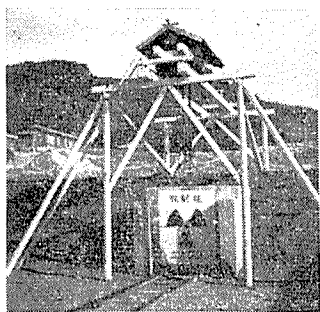
以上漂砂観測の方法の確立と前述せるわれわれの伊良湖港漂砂の推定結果をさらに明確なものとするために、昭和 32 年 9 月防波堤先端屈曲部において予備調査を開始し、つづいて本格的なアイソトープによる漂砂観測を行なつた。

4. 観測方法と資料の整理

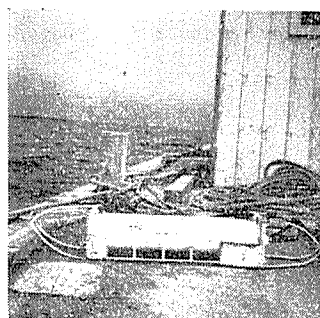
観測が長期間にわたることを考慮して、放射性同位元素は Co^{60} (半減期 5.3 年) を輸入し、東京大学生産技術研究所加藤正夫氏に依頼して所要の比重、粒度を有する放射性ガラス砂を製作した。

本観測のために購入した機械器具のおもなるものは、水中検出器 (GM 管入、ケーブル 20 m つき) レートメーター、自記電流計、インバーター (入力 24 V、出力 100 V) 自動電圧調整器 (入力 80～110 V、出力 100 V)

写真—1 放射性ガラス砂格納庫



写真—2 放射能水中検出器



100 進法放射能測定装置、ミリレントゲン メーター、サーベイ メーター、ポケット線量計、荷電器、遠隔操作把手、鉛容器等であり、新しく設けた施設は、放射性ガラス砂貯蔵庫、放射性ガラス砂取扱い室、観測船 (土運船改造) 等である。

観測方法の原理は苫小牧港と同様、放射性ガラス砂を投入用鉛容器を用いて海底に投入し、投入点付近の放射能強度を数カ月にわたつて海上で静穏であるときに測定し、このガラス砂の分散状況を調べることである。観測方法が苫小牧の場合と異なる点をあげれば次のごとくである。

(1) 本観測においては、上述のごとく苫小牧港において行われた方法をさらに検討し、漂砂観測方法としてのアイソトープの利用法を発展させることも主要な目的の一つとしている。すなわち動く砂の粒径とそれが掃流または浮遊形式で動く機構を明らかにすることが最も先決の問題であつて、これが明らかになつて後始めて現地と同じ粒径のガラス砂について全体的な移動を観測することができると思われる。この意味で当初はできるだけ均一の粒径をもつ放射性ガラス砂を各種の粒径について作り、それらの移動の相違を観測把握することとした。

(2) 水中検出器は海底を引きづつて移動させることも可能なように、写真—2 に示すように底をソリのようにした。

(3) 検出器に入る放射線の量を計算する計数器は、レートメーターを使用し、自記電流計に記録させた。

資料の整理と考察はすべて他の調査におけると同様重要なことであるが、本観測の資料考察の主眼点をあげれば次のごとくである。

(1) 等カウント線

まず第一に、得られた資料により等カウント線を描く。このカウントの分布から放射性ガラス砂の分布状態を知る。

(2) 最高放射能強度位置の移動

最高カウントの位置が移動したということは、投入された放射性ガラス砂の全量がその方向に移動した結果であり、いわゆるこの付近の海底砂が波浪あるいは潮流の掃流力によって、海底にそつて躍動あるいは掃流されたと考えることができる。従つて、最高カウントの移動はすなわち掃流砂の移動と考えることができる。

(3) 低カウント線の変化

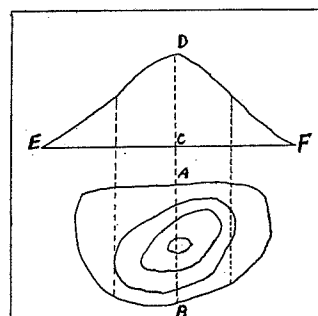
低カウント線は、浮遊した状態でガラス砂が動く場合にも変動するものである。従つて、最高カウントの位置が動かず、低カウント線のみが広く分布した場合は、この付近は、その時期に浮遊の状態、砂が動いたものと考えられる。すなわち、低カウント線の動きは浮遊砂の動きと一致するものと考えられることができる。

(4) 放射能強度の方向別変化

得られた計数値の分布図によりある一定方向の、例えば、図-6の部に示すような放射強度の等カウント図が、得られた場合、EF方向の分布形式の変化をうるには、AB線上的カウント値を積算し、その値に比例してCDを取り以下同様にして行えば、EDFなる分布曲線が得られる。そこで各測定時ごとにこのようなEF方向の分布曲線を描いて、それらを比較することによりEF方向の放射性ガラス砂、すなわちこの付近の海底砂の移動形式を知ることができる。

最後に、定量的な考察であるが、放射性ガラス砂が観測中いかなる状態で、いかなる深さまで海底に投入しているか明らかでない現状では不可能と思われる。従つて、われわれは漂砂の移動量の調査には、本観測ではふれず漂砂の移動方向と、その方式（掃流か浮遊か）を確かめることに主眼をおいて本観測を行なつた。

図-6 放射能強度の積算



5. 観 測 結 果

昭和32年9月16日より行なつた予備観測は、余白の都合上省略するが、その結果より本観測の方針を次のように決定した。

冬期に考えられる港内への漂砂の侵入経路および冬期防波堤外側に堆積した砂の冬期の移動状態を調べるため、下記3カ所を選定するとともに、その投入ガラス砂の粒径は現地の底質中、比較的移動しやすいかつ割合均一な小粒径のものを、少量用いることとした。

(1) 防波堤先端水深 -10 m ~ -11 m

いままでの観測によれば、防波堤先端部においては水深が -8 m 以上もあるため波による掃流漂砂は考えられず、また南西に向う潮流が早いので、一般には浮遊砂もここを西からまわり込んで港内に入ることは少ないと思われる。しかし特にエネルギーの大きいうねりが来襲するときには、それによる防波堤に沿う沿岸流によつて浮遊砂がまわり込むことの可能性も考えられるが、冬期風浪によつては、ここから浮遊砂すらも入ることはないと推定された。そこでこのような考えの妥当性を検討するために、0.2~0.4 mm の範囲のガラス砂を 3~5 mc 投入する。

(2) 防波堤東側本堤より約 80 m の水深 -3.0 m 線上

冬期、港内に入りうる漂砂の最も可能性のある経路として、防波堤東側からの浮遊砂が考えられた。これを明らかにするために、0.1~0.2 mm の粒径を持つガラス砂、3~5 mc 投入する。

(3) 防波堤中央部外側、水深 -2 ~ -3 m

夏期うねりによつて防波堤外側の水深 -3 ~ -4 m 以浅に堆積する土砂は、冬期から春期にかけて消滅するが、このとき、この土砂の動きを明確にすることを目的とした。なお、この地点は冬期風浪の影響を大きく受け、砂の移動も激しいと思われるので、投入ガラス砂の粒径は 0.2~0.4 mm とし、その量は 5~10 mc とする。

かくて、昭和33年1月21日に防波堤先端部から、本格的調査を開始した。そのガラス砂の投入位置は図-7示す通りであり、ガラス砂の性状は次のごとくである。

番号	投入 mc 数	投入瓦数	比重	粒度分布	投入年月日
No. 1	2.3 mc	150 g	2.65 b	図-8	32.1.21

No.2	4.9 mc	317 g	2.65 b	図-8	31.1.26
No. 3	7.3 "	476 "	"	"	33.3. 1

また観測中における風および波の状況は図-9に示す。

図-7 放射性ガラス砂投入位置図

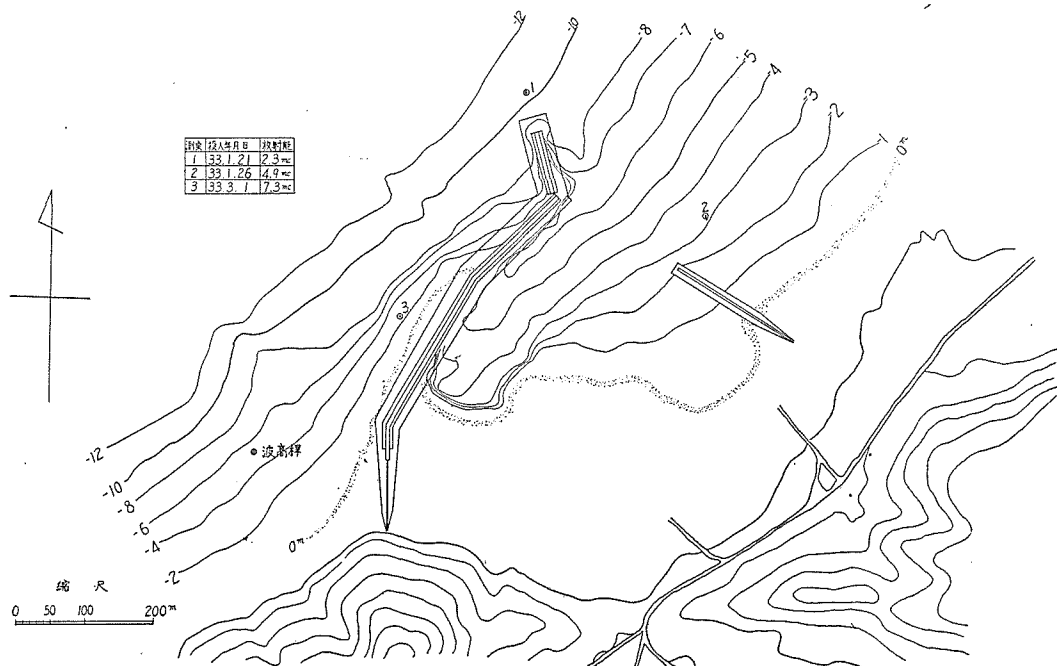
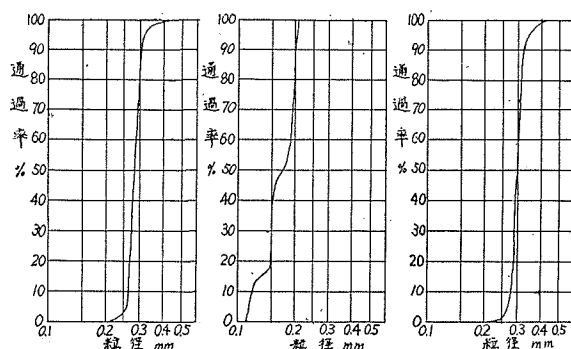


図-8 放射性ガラス砂の粒度分布図



(A) 防波堤先端における観測 (No.1) この観測による放射能分布図は、図-10に示すごとくであり、図中の数字は自然放射能 11 cps を引いた cps の値である。

1月21日の観測：投入直後の観測である。投入点と最高カウントの点がずれているのは、この付近の潮流が早く投入容器が海底にとどくまでに、アンカーがゆるんで船が流されたため、投入点のトランシットによる確認と実際の投入点がずれたためと思われる。また 10 cps の等カウント線がW方向に約 10 m も離れて存在するのは、投入砂の一部が、流れ落ちたものと思われる。このときの計数の最高値は 2389 cps であった。

1月26日の観測：最高カウントの点は投入点より西方に約 18 m 移動し、最高計数値は 309 cps に下り、100 cps の等カウント線が3つに分離している。投入後この日まで 10~14 m/sec の WNW の風が連日吹き続け、1月23日には波向 WNW、平均波高 1.2 m、平均周期 5 sec 程度の風浪があつた。しかしガラス砂の動きがこの波の方向と全く関係がないのは、0.3 mm 程度の砂は完全に潮流の掃流力によつて、動かされることを証明するものである。

1月28日の観測：最高点はさらに西方に移動し、投入点から約 20 m の地点に達し、最高計数値は 329 cps を記録した。そしてすべての等カウント線は帯状に細長い分布を示すようになった。例えば、50 cps の等カウント線は

W-E 方向に 30 m, N-S 方向に 5 m 位の帯状分布を示している。一方波は 1 月 27 日において波向 NW, 平均波高 1.20 m, 平均周期 5 sec 程度の風浪があつたが、この影響が現われていないのは、前記観測同様である。

2 月 11 日の観測：最高点は投入点から西方 25 m の位置に移動し、前観測で 50 cps を示していた付近は、20 cps に下つた。すなわちガラス砂はますます広く分布し、西方に流されたものと思われる。また波は前観測からこの日まで波向 WNW ~ NW, 平均波高 1.0 m 前後, 平均周期 5 sec 程度のものが 2 回ほど襲来した以外大したものは見られなかつた。

以上防波堤先端の観測結果から次のことが判断される。

(1) 防波堤先端部における潮流は 0.3 mm 以下の海底砂を完全に掃流し、その方向は W ~ WSW 方向であること。

(2) この程度の水深では、平均波高 1.2 m 以下の風浪は粒径 0.2 mm 以上の海底砂を浮遊させる力のないこと。

(3) 冬期風浪によつては、防波堤の先端をまわつて港内に入る砂の動きはないこと。

(B) 防波堤東側における観測 (No.2) この放射性ガラス砂による放射能分布は、図-11 に示す。

1 月 26 日の観測：投入直後の分布図であるが、一部 SW 方向に流れ落ち、10 cps のカウント線がその方向に 10 m ほどのびている。しかし大部分は一点にかたまつて投入され、投入点は器械の測定可能範囲以上の最高カウントを示した（最高測定可能計数値は約 30 000 cps である）。

1 月 29 日の観測：この間 1 月 27 日に波向 NW, 平均波高 1.20 m, 平均周期 5 sec 程度の風浪があつた。しかしガラス砂は波の方向とは直角に SW 方向に浮遊砂の状態で流

図-9 観測期間中の風と波（波高桿によるトランシット観測）

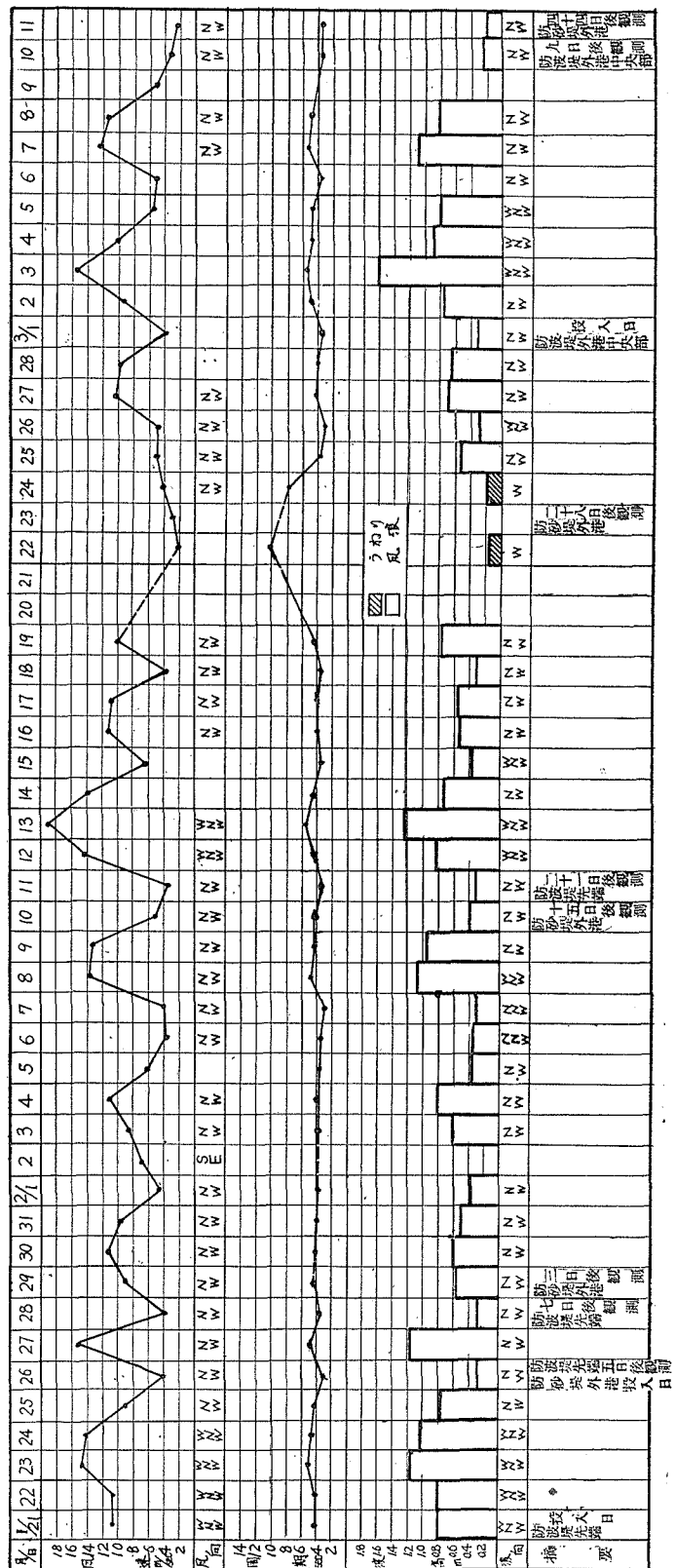
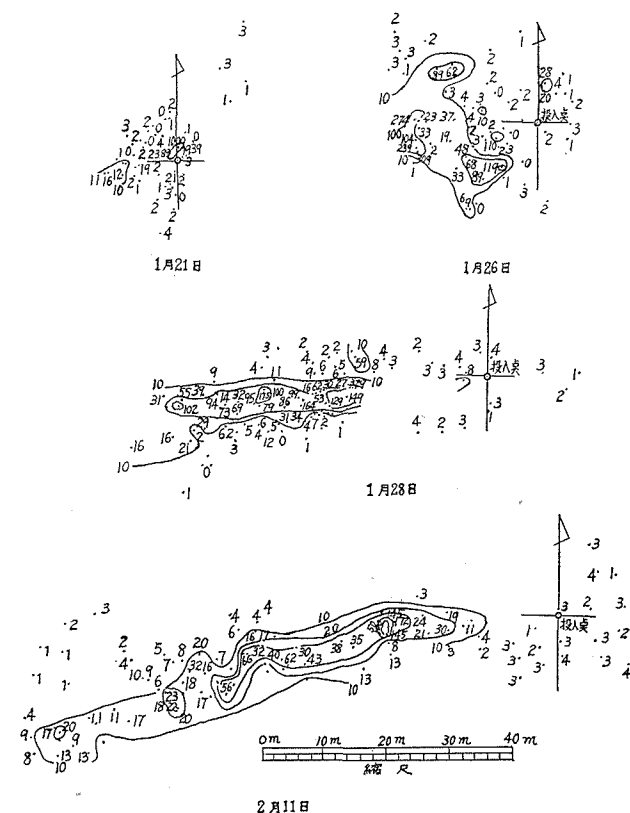


図-10 防波堤先端における放射能ガラス砂による放射能分布図



以上観測結果について判断すれば次のごとくである。

(1) 防砂堤東側水深 -3m 以浅では、平均波高 1.20 m 程度の風浪について 0.2 mm 以下の砂は、その主方向に完全に掃流される。

(2) この付近の潮流は、防波堤先端のごとく強くないが、防砂堤先端方向に向うため、0.2 mm 以下の砂は浮遊状態で防砂堤先端をまわつて侵入する傾向がある。

(C) 防波堤中央部外側における観測 (No.3) 投入後の観測結果は、図-12に示す。

3月1日の観測：投入地点の最高カウントは 3000 cps 以上を示し、ほぼ一点に集中して投入されたが、一部は防波堤とほぼ平行な SW 方向に流れ、228 cps を示す部分がある。これはもちろん投入方法によるものである。

3月10日の観測：この間、最も卓越した波は3月3日の波向 WNW、平均波高 1.60 m、平均周期 5.5 sec の風浪である。ガラス砂は、完全に投入点を離れて N 方向に移動し、沖に向つて拡散を示している。また最高点は 10 m ほど沖側に移動し一挙に 98 cps に減少している。これは完全に風浪によつて巻き上げられ、離岸流によつて沖へ押し出されたものと考えられる。

4月26日の観測：この間は 0.7 m 以下の W 方向のうねりと、1.0 m 以下の NW~WNW の風浪が交互に来襲したが、ガラス砂は沖側に高度に分散した。

以上の観測から、夏 -3m 線以浅に堆積した砂の大部分は、冬期の風浪によつて沖側に押し出されるということがわかつた。

6. 結 論

以上伊良湖港の漂砂で最も注目されるのは、防波堤前面に夏秋に台風のうねりによつて堆積される土砂であるが、これは現状ではほぼ安定した状態にあり、特に防波堤先端に沼う強い潮流は、この土砂が港内に入るのをさまたげ、先端のはね出しはこの効果をさらに有効なものとしている。また荒天時に港口に達する 0.2~0.3 m 以下の浮遊砂特に冬期季節風による防砂堤先端をまわってくるものは、その量が僅少であり、さほど問題とする必要はないであろうと思われる。従つて多少の港内への砂の進入はまぬがれないがきわめて異常な気象と海況の変化

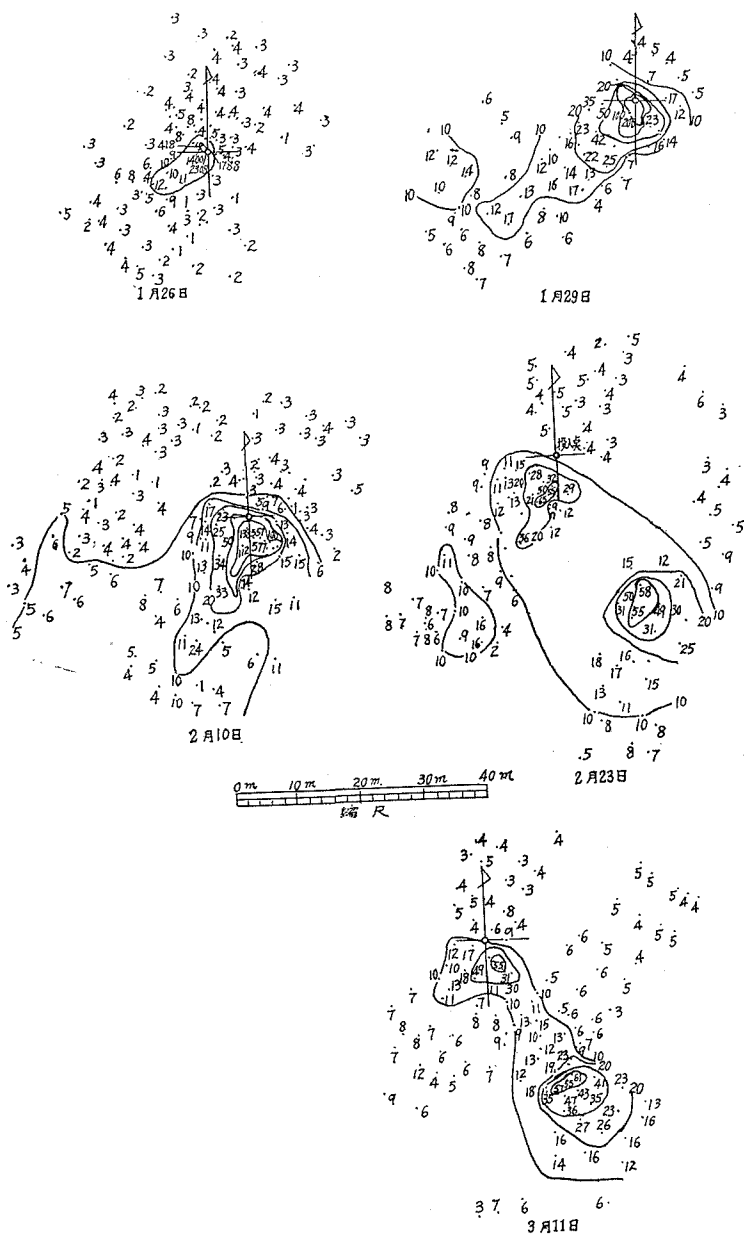
れたことがわかる。最高カウントの点は不変であるが、その強度は前回と比較して、急激に減少し 268 cps であつた。

2月10日の観測：この間では、2月8日、9日の両日に波向 NW~WNW、平均波高 1.0 m 前後、平均周期 5 sec 程度の波が発生、その他はあまり目立つものはない。最高点は SSE 方向に約 4 m 程度移動し 667 cps を示している。また等カウント線は、全体的に SSE 方向、すなわち防砂堤の先端方向に動いている。

2月23日の観測：前観測後ほぼ2週間後の観測である。この間2月13日には波高 WNW、平均波高 1.20 m、平均周期 5.5 sec の波が発生、その他は 0.8 m 以下の NW 方向の波であつた。最高カウントは、投入点から陸側 SSE 方向 25 m の位置で 58 cps となつた。また高カウント線が投入点の近くと、最高カウントを示す地点付近の2つに分離された。

3月11日の観測：この間で最も卓越した波は3月3日の波向 WNW、平均波高 1.60 m 平均周期 5.5 sec の風浪である。投入点の付近の高カウント線は SSE 方向に動き、全体的にも陸側に移動したようである。

図-11 防砂堤東側における放射能分布図

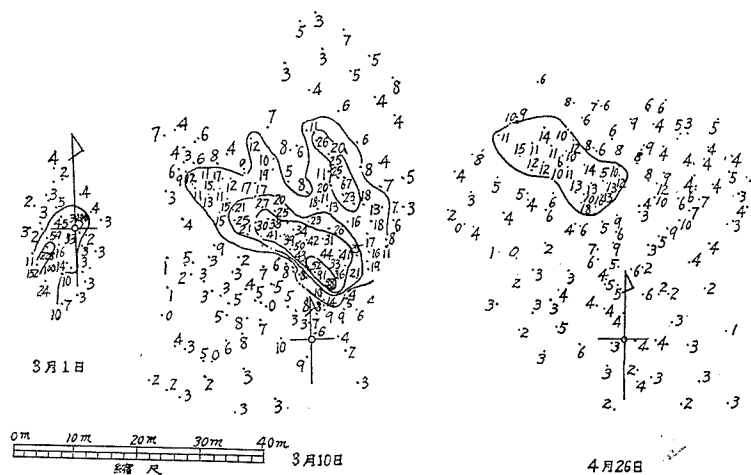


が起ころぬかぎり、現在の状況はほぼ維持されてゆくものと考えられる。

アイソトープによる漂砂観測の結果は、従来の方法のみで、われわれが推定した漂砂結果とほぼ一致し、ますますそれを確実なものとしてきたとともに、その動きが掃流形式か浮遊形式であるかの区別を大体把握することができたのであり、苫小牧港における観測とあいまって、漂砂観測の方法に大きな進歩をもたらすことができたものと思う。さらに実験室における研究をも並行することによって、移動方向のみなさず、移動量までも測定しうる可能性があり、またそれが本観測における今後の使命であろう。

本文は愛知県土木部「渥美海岸調査報告書」を要約したもので詳細については、同報告を参照されたい。

図—12 防波堤中央部外側における放射能分布図



参考文献

- 猪瀬亭雄：放射性ガラス砂を用いた漂砂現場実験について，海岸工学講演会講演集昭和 30 年 11 月
 愛知県土木部：渥美半島海岸調査報告書（伊良湖港の漂砂に就て）昭和 33 年 3 月