

でなされた二次元模型実験⁶⁾で砕波点より陸側の掃流砂量 Q_s の全掃流砂量 Q_u に対する割合は 図-8 のようになり、三次元の漂砂機構とやや違うかもしれないが、これをそのまま使用すると著者の実験値 ($\delta_0=0.01\sim 0.03$) は沖の漂砂量を miss したとして約 10~40% 小さく見つかったとも考えられる。② 図-9 のように図表⁷⁾で計算された砕波入射角に対し実測されたものが大きすぎた。この模型の海底地形は複雑で測定値が大きくなる

図-8 $Q_s/Q_u \sim \delta_0$
(二次元の実験)

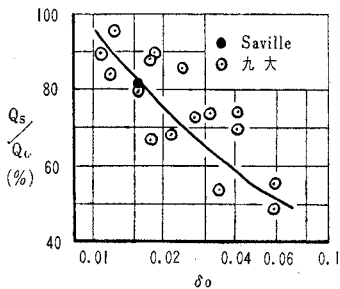
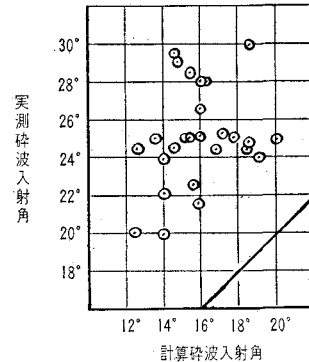


図-9 砕波入射角の実測と計算の比較



ことも考えられるが、 α_b の測定誤差により E_{ib} を約 20~50% 大きく見積りすぎたと考えられる。③ 所定断面より左の海岸地帯に砂の供給がなく地形が定常でなかった。しかし表-1 より Q の時間的な変化をみるに大体一様な砂洲量であることから地形の定常性による誤差はかなり小さいと考えられる。

以上の問題点を考えて 図-6 をみるに δ_0 が 0.02 以下の場合には Johnson の実験と傾向を同じくしているが、0.02 以上になると急に離れる。これは全漂砂量に対する汀線漂砂の割合が δ_0 が大きくなると減少しているいままでの実験からも想像された結果である。しかし汀線漂砂の割合が δ_0 の 0.01~0.02 間でも漸次減少していると思われるのに砂洲量に影響していないことや、 δ_0 が 0.02 以上で急に Q が減少することは、あるいは砂洲量は今までの実験の汀線部分の漂砂量のみによって推定できないことを示しているのかもしれない。またこの実験の初期勾配が約 1/40 であったからでもあろう。それは Johnson の実験の $\alpha_0=10^\circ$ のとき δ_0 が 0.02 が漂砂量最大になっており、海浜勾配がゆるやかであると屈折が大きく $\alpha=10^\circ$ のときの傾向に近づいたのかもしれない。

干潮時の Q の変化は満潮時と傾向を同じくするが海浜形状 (図-5) で述べたようにその量は少なくなっている。

以上により δ_0 が 0.02 くらいの波が砂洲量が最大となり、この波によってできる砂洲は河口の閉そくと河口の流れの変向に強い影響を与えることが知られた。

E_{ib} で整理した 図-7 をみるに E_{ib} を大きく見積りすぎたとしても樫木氏の実験式⁹⁾ に対しかなり差がある。これは初期勾配の相違が大きな原因かと考えられる。

Q の時間的な変化は一般的に大体一様である。ことに δ_0 が 0.02 付近のもの (A6, A7, A25) は時間的な変化はみられない。それに対し δ_0 が大きいもの (A1, 2A) は時間によって多少があり砂洲成長の不規則さをあらわしている。

5. 河口水面勾配および流速限界線

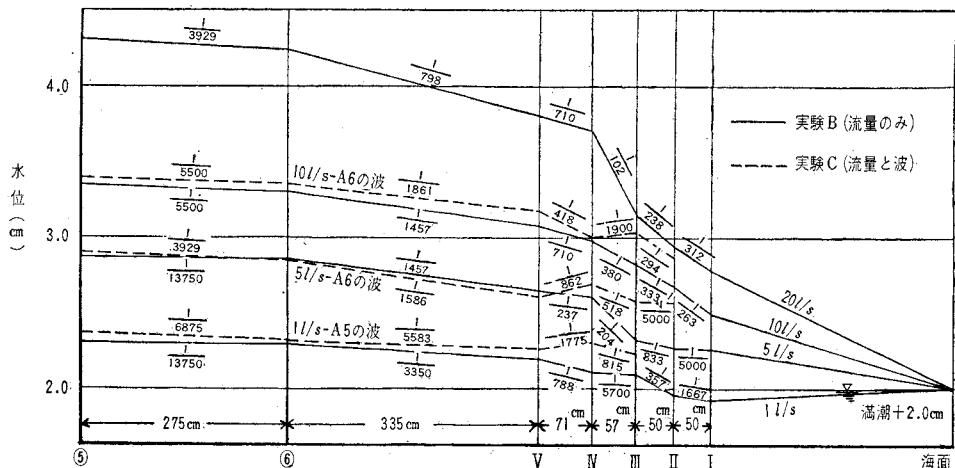
河口付近水位が 図-1 の点で測定され、図-10 に示されている。また紙フロートを流し海側でそれが集まってしまう線をスケッチした。これは流速がほとんどなくなる所と思われ流速限界線として 図-11 に示している。

図-10 によると流量が大となれば河口水面勾配は急になる。水を流しながら波を加えてみると (実験 C) 図-10 の破線のように河口で逆勾配が生ずる。このときは河水は波の下にもぐり水面勾配は動水勾配でなくなる。流速限界線も流量と潮位により一定の傾向をもっている。この形は河水の流入状況を海水の比重などで測定した佐藤博士の実測⁹⁾ とよくにている。実験 C では同じ波に対し流量の大きいほど流速限界線は当然沖の方にあらわれてくる (図-11)。

いま河口砂洲の変形に関する連続式は

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = \int_T \frac{\partial h}{\partial t} dt$$

図-10 河口水面勾配 (満潮時)



と考えられる。 q_x, q_y は移動砂量 (容積) の x, y 成分, h は高さ。砂洲先端では q_y は主として波による漂砂量であり, q_x は河川流量による掃流砂とみると, q_y は前述の砂洲量 Q で推定されるが, q_x は河口水面勾配を明確にしないと求められない。そのため河口水面勾配や海での河水の減速状況を見るための流速限界線を測定したのであるが, 特定地形であるため定性的な結果がえられたのみであった。また実験 C での河口の動水勾配ははっきりしなかった。よって実験 C での砂洲先端の移動状況を見ると A6 の波で 5 l/sec の流量のときは前進し, 10 l/sec であると後退したことなどがわかったのみであった。

これらの解析は後日抽象的な模型による実験結果をまて行ってみたい。

6. 結 言

以上河口砂洲の形状および容積を検討し, δ_0 が 0.015~0.02 の波が河口閉そくに強く影響すること, 砂洲の量は $\delta_0=0.02$ のとき最大であることがわかった。河口砂洲の成長をとどめる流量については明確にしえなかった。

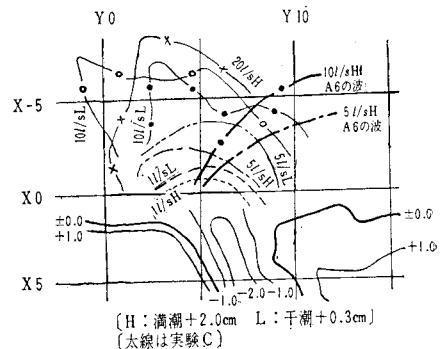
この実験は一つ瀬河口模型でなされたものであるが, 海浜勾配が実験の初期勾配 1/40 に近い海岸には底質を考へてある程度適用されるものと思われる。しかしながら砂洲量などについてまだ実験に不備な点がみられるのでこれらを改良し抽象的な模型で実験を行っている。

富田漁港模型実験は宮崎県の委託で行われたもので, 指導・助言を与えられた宮崎大学 川上謙太郎教授, 山口大学 椿 東一郎博士, 実験整理を受持たれた当水理実験室の中原信明君, 工藤邦靖君, 本文彦君らに深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 川上謙太郎・吉高益男: 富田漁港模型実験報告, 宮崎大学工学部研究報告第6号 (昭34)
- 2) J.W. Johnson: Sand Transport by Littoral Currents, Proc. of 5th Hydraulics Conf. Bull. 34, State Univ. Iowa (1953)
- 3) T. Saville: Model Study of Sand Transport along an Infinitely Long, Straight Beach, Trans. A.G.U. Vol. 31, No.4 (1950)
- 4) 樺木 亨・村上 正: 沿岸漂砂量の推定について, 第4回海岸工学講演会講演集 (1957)
- 5) 海岸保全施設設計便覧, p.87
- 6) 栗原道徳・篠原謙爾・椿 東一郎・吉高益男: 波による海浜の砂移動, 第3回海岸工学講演会講演集 (1956)
- 7) 水理公式集, p.259
- 8) 佐藤清一: 河口閉塞とその防止策について, 第2回海岸工学講演会講演集 (1955) p.140

図-11 流速限界線 (昭.31.8 月地形)



波浪，漂砂および海浜変形について

東京大学教授 工学部 工学博士 本 間 仁
 東京大学助教授 工学部 堀 川 清 司
 東京大学大学院 工学部 鮮 于 澈

1. 緒 言

近年とみに海岸の利用度が高まり、各種の工事が活発に行われるようになった。港湾施設、海岸保全施設、あるいは熱交換器冷却用取水施設等々、これらの海岸構造物を建設する場合、その海岸における自然現象、特に波浪、漂砂および海浜の状況を把握することがまず要求される。従って海岸調査が実施され、かつ実験的研究が行われる必要を生じたが、その結果多数の事実が発見され海岸工学の進歩はいちじるしいものがあつた。われわれも過去5年間に現地観測の経験を得、若干の資料を蓄積することができたので、これらを総括して海岸にくる外力である波浪の頻度分布、航空写真より見た漂砂移動、ならびに海浜地形の変動状況について考察を試みた。

2. 波浪の頻度分布

2.1 海洋の波浪

波浪は海岸現象の直接の外力として最も重要な要素である。これは風浪とうねりに分けられるが、ある観測点における波浪の波高および周期の頻度分布は1年間の波浪観測資料によって、かなり正確に求められると推測される。それは波浪の発生原因である気象条件は、ほぼ1年を周期としてくり返されると目されるためである。Jasper^{1),2)}は北大西洋上の定点観測船によって得られた約6年間の波浪の観測資料をもとにして、波高および周期の累積頻度は対数正規分布によって十分に表わされること(図-1)、1年間の資料によって、かなりよい近似

図-1

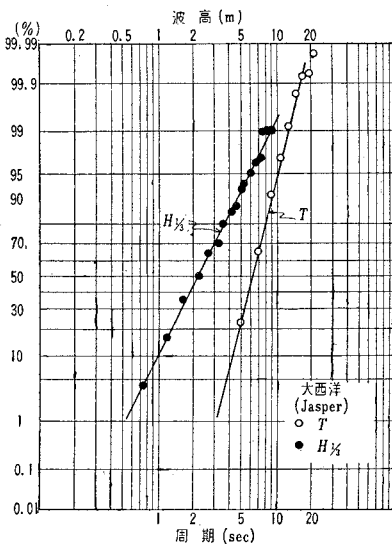
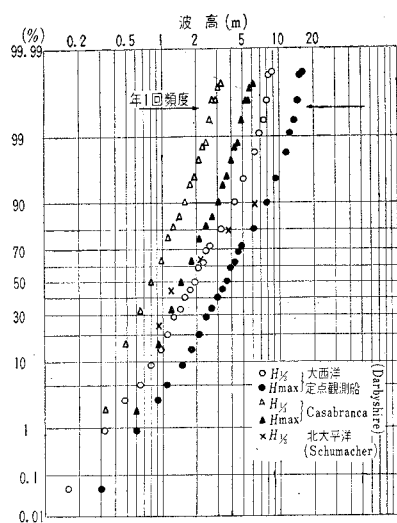


図-2



度が得られることを示した。ここに波高は有義波高として処理されており、有義波高を求めるには、ある場所で、例えば20分間、波を連続観測しなければならない。その短時間の波高および周期はRayleigh分布に従うことが知られている^{1),2),3),4),5)}。つまり短期間の波の変動はRayleigh分布に、長期間の波の変動は対数正規分布法則に従うというのである。

Darbyshire⁶⁾はCasabrancaおよび定点観測船による観測最大波高の分布を対数正規確率紙に示したが(図-2)、ある程度のヒズミは認められる。図-2にはなお有義波高に換算したものおよびSchumacherによる北大

平洋の波高分布もあわせて示してある。

なお波浪予報として Sverdrup-Munk-Bretschneider の方法に対して Pierson-Neumann-James のエネルギー スペクトル法³⁾のあることは衆知のごとくである。後者の予報理論においては短期間の波高分布は Longuet-Higgins⁴⁾に従って前述の Rayleigh 分布をするとの仮定をしていることは注目すべきであろう。

2.2 沿岸付近の波浪

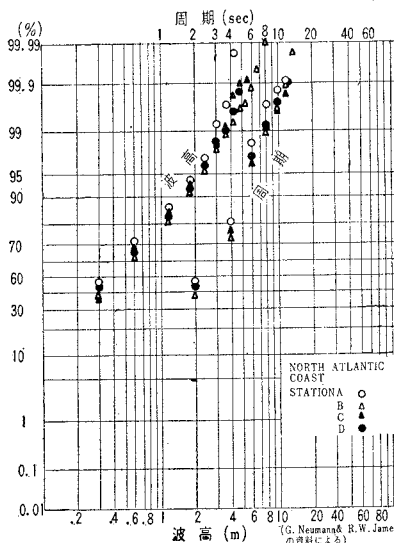
以上は海洋に発生している波を主体にして論じてきたが、われわれ技術者が最も関心を払うのは、沿岸付近の波浪である。猪瀬、佐藤、白石⁹⁾および白石¹⁰⁾は苫小牧における波浪観測資料より波高は対数正規分布、周期は正規分布をなすとの結果を Darbyshire とは独立して得た。また新潟海岸については白石、長谷¹¹⁾は波高、周期ともに正規分布で表わされるとの結果を得ている。われわれ¹²⁾が茨城県久慈港における3カ年間の目視観測の結果を整理したところ、波高、周期ともにほぼ対数正規分布をなすことを知った。

2.3 アメリカにおける波浪資料

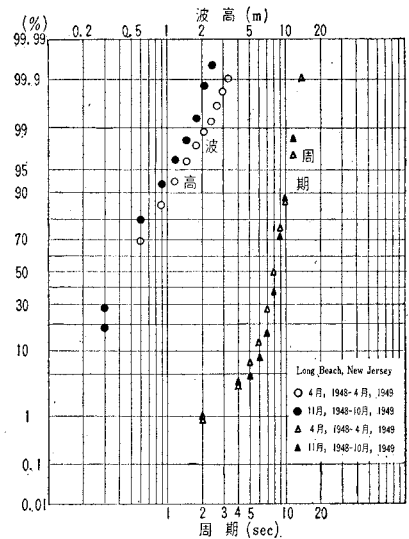
ここにおいてわれわれはできるだけ多くの資料を集め主として沿岸波浪の分布特性を検討することとした。図—3は北大西洋岸の測点 A, B, C, D における波高および周期の分布であり¹³⁾、かなりよく対数正規分布を呈していることが知られる。

図—4は New Jersey 州, Long Branch¹⁴⁾にて階段抵抗式波高計(1948年4月から1949年4月まで)および圧力式波高計(1949年4月以降)で得られた結果を整理したものであるが、波高分布にはある程度の相違が認められる。この理由は明らかでないが、あるいは圧力式波高計により読み取られた波高が小さく出過ぎていること

図—3



図—4



が一つの原因であるかもしれない。周期は両者はほぼ一致して対数正規分布からはずれている。図—5に示したのは Mexico 湾内の5地点について Bretschneider が追算を行ったものであり¹⁵⁾、やはり小さい波高および小さい周期の部分でいちじるしく直線からはずれている。Michigan 湖, Erie 湖, Ontario 湖については Saville¹⁶⁾が S.M.B.法により 1948, 1949, 1950 の3カ年について波浪の追算を行っており、いずれも Mexico 湾と同じ傾向がみられる。ここには毎年の変動を示す目的でよく一致している例と、散乱のいちじるしいもの2例を示そう(図—6(a), (b))。これから見ても1年の資料をもってほぼ近似的に波高、周期の頻度分布を求めることができるが、場合によってはいちじるしく異なることもあり、従ってできれば3年間の資料を蓄積することが望ましい。ここに注意したいのは、波浪の波高、周期の分布はほぼ統計的に処理されるようであるから1年間のうちでも観測回数を減らしてもよいとの議論は誤りである。1年を周期とした現象と解釈すべきであるゆえ、ある時期だけの観測では役に立たないことは念頭におくべきである。

図—5

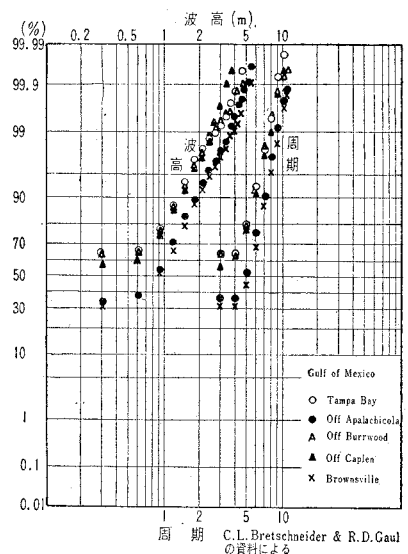


図-6 (a) Michigan 湖における波浪生起頻度

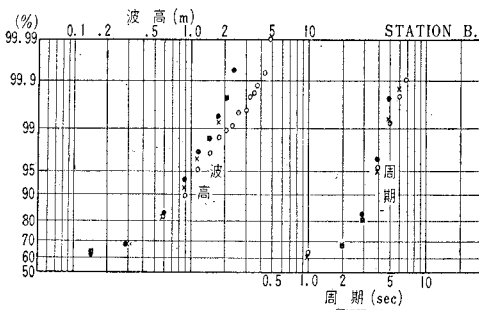
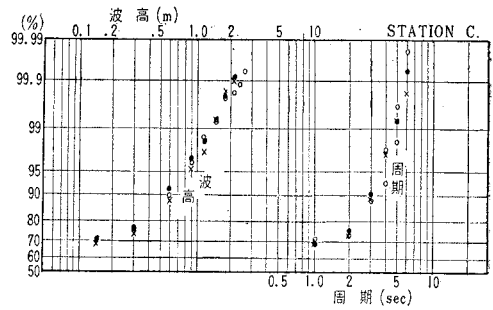


図-6 (b)



2.4 わが国の波浪資料

以上においては海外における資料のみを示したが、わが国では運輸省を中心に波浪観測の努力が続けているが、いまだ完全に使用しうる資料は残念ながら数少なく、手元にある苫小牧、新潟、久慈の観測結果と、江ノ島、鎌倉付近の波と

図-7 (a)

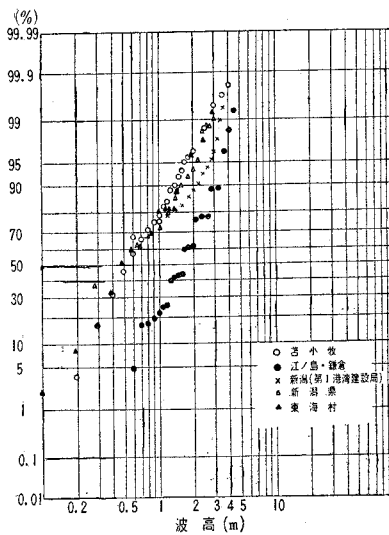
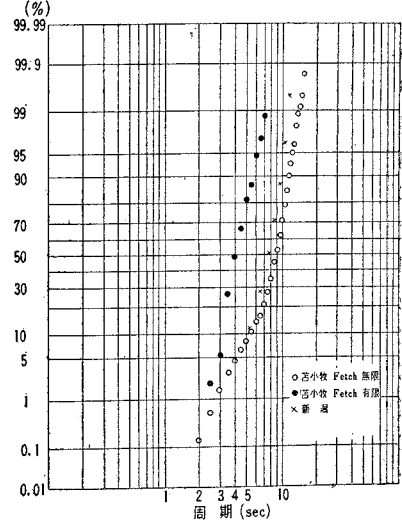


図-7 (b)



として追算した資料¹⁷⁾を図-7に示しうるとどまる。その他気象庁発行の気象要覧には毎日の各地測候所での目視観測の結果を風浪とうねりの階級に分けて印刷発行されている。この1951~1954の資料にもとづいて宇野木¹⁸⁾は日本沿岸を6つの地域に分けて風波およびうねりの状況の相違について報告している。われ

われもこの方式に従い1955, 1956, 1957年の3カ年の資料を整理してみた。階級に従って波高の区分数が少ないために十分な関係を求めることが困難であるのと、周期の観測がなされていない、風波とうねりを区別して記

図-8 (a)

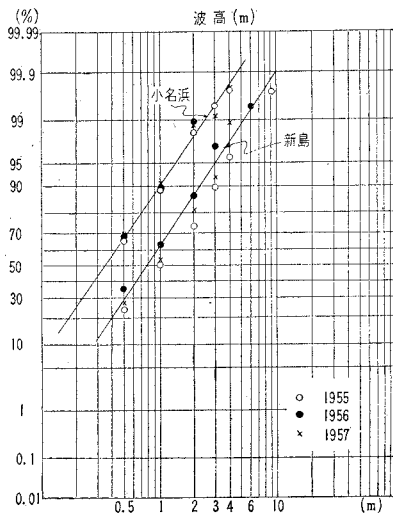
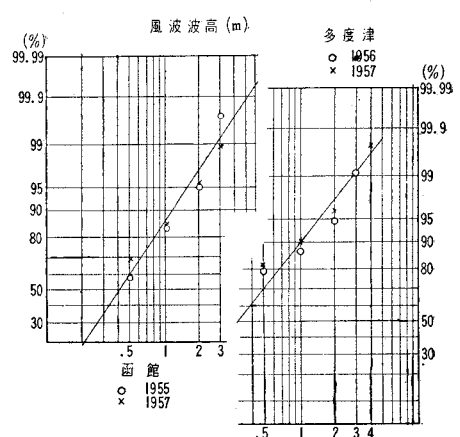


図-8 (b)



れわれの目的には必ずしも十分な資料ではない。まず風波について3年間の資料の散乱の状況を見るため新島と小名浜を例に、また対数正規分布よりのひずむ場合として函館と多度津を例に図示した(図-8)。ここでは観測の精度も考慮の上、対数正規分布法則が適用できると仮定して、妥当と思わ

れる直線を引き、これより 50% の頻度を持つ風波波高と、各直線の傾きを示すために $\log e$ ($H_{1/3}$) の標準偏差を求めた。うねりについても求める場合には 50% の頻度を持つ波高を推定した。これらの分布は 図-9 に示すごとくである。

2.5 結 果

波浪の頻度分布について明確なことを述べるには至らないが、少なくとも次のようなことはいえるのではないかと考える。

(1) 外海、あるいは外海に直面しななら遮蔽されていない地点に襲来する波浪の波高頻度分布は対数正規法則に従う。

(2) 湾、湖あるいはなんらかの遮蔽を受ける地点での波高は必ずしも対数正規法則に従わず、ひずむ場合が多く、かつひずみ度は 1 以下、つまり凹形の分布を呈するようである。この場合に、もし対数正規分布を仮定すれば小波高および大波高の推定を大きい方に誤まる可能性が大きい。

(3) 周期は一般には対数正規分布に従わず、正規分布に近いようである。

(4) 波浪観測を 1 年実施すれば、かなり正確に頻度分布を推定しうるが、できれば 3 年間の資料を使用することが望ましい。

以上数多くの資料を整理して痛感したことは、(a) 残念ながらわが国の波浪資料は十分でない、(b) 周期の測定がほとんど行われていない、(c) 測定の精度はできうるかぎり高めねばならぬ、(d) 欠測が多いから統計的資料として使用できない、(e) 観測は少なくとも 1 年間継続すべきである、できうれば 3 年間の資料をうるようにしたい。

現在行われている波浪観測の努力を今後も一そう継続され、日本全海岸に襲来する波の性質が早く明確に把握されるように念願してやまない。

3. 漂砂の移動形式

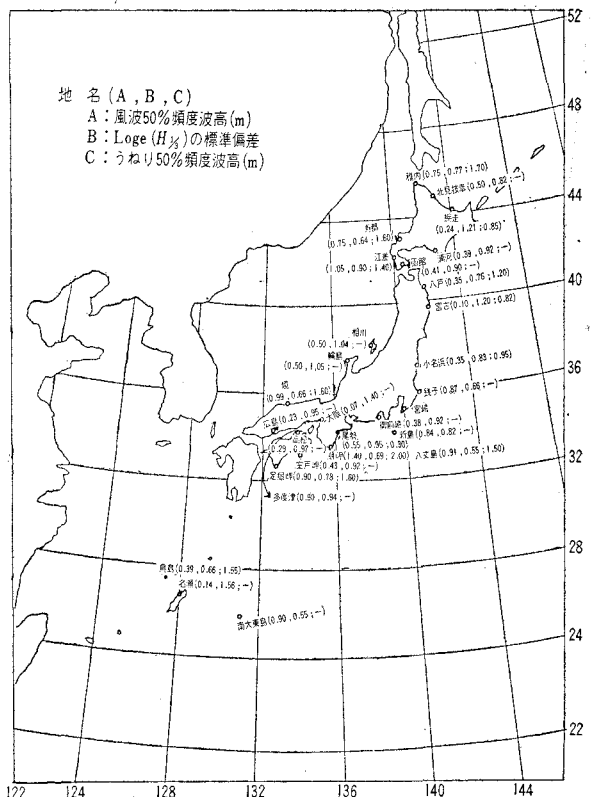
一般にいう漂砂の移動形式としては、海岸保全施設設計便覧に詳細に説明されているように、移動状態としては浮遊漂砂、掃流漂砂、躍動漂砂に分たれ、移動方向としては、汀線に直角方向の漂砂と、汀線に平行な浜漂砂および沿岸漂砂とがある。

漂砂現象において、その供給源、移動方向、移動量、移動限界水深などは最も関心の払われる事項であるが、定性的には過去の研究、調査観測によりかなり明らかにされてきた。しかし定量化されるには至らず一段の努力が要望される。

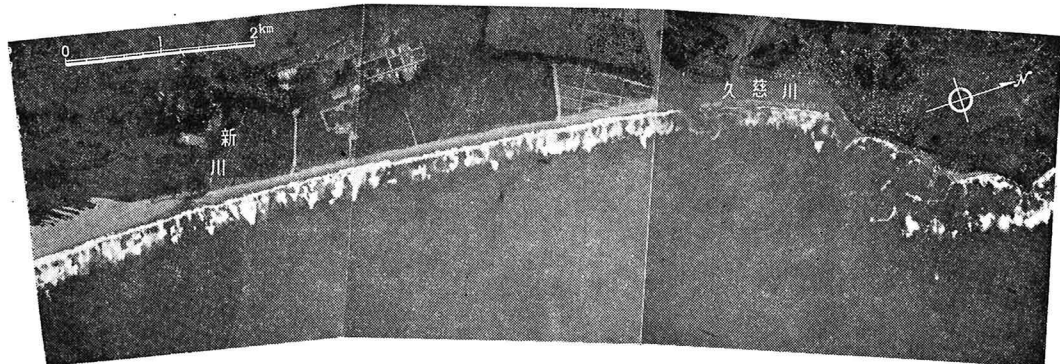
3.1 河川よりの排出土砂の移動

漂砂の供給源として、わが国において最も重要なものは河川であろう。しかも洪水時の排出土砂は莫大な量にのぼるが、その量的な推定には多くの困難をとまうとともに、海中に排出されてからの経路については明らかでない。もちろん粒径の粗なものは河口付近の海域に沈積して洲を形成するが、洪水時の流れにより浮遊運搬される細砂、あるいは泥土はかなりの距離まで運搬されるようである。この間の事情を推測するには、航空写真はさわめて有力な手段である。写真-1 は日本原子力発電会社により久慈川河口付近より以南、東海村区域を、昭和 33 年、台風 22 号通過直後 (9 月 27 日、15.20~15.50 時) 撮影したものである。久慈川湾曲部の砂嘴は洪水時には容易に切れて、土砂は主としてここから海中に排出されている。また浮遊砂は広い範囲に拡散または運搬されている模様が見られ、土砂の一部は少なくとも距岸 3000 m までも広がっているのではないかと推測さ

図-9 波浪分布図



写真—1 東海村海岸 (昭 33.9.27, 日本原子力発電会社)



れる。また砂嘴部分から南へかけて、いくつかの独立した小さい濁水群が横たわり、それぞれ南へ移動しており、河川よりの土砂排出の流況を示さるものと思われる。すなわち砕波エネルギーによって、河水の自由な流出が妨げられ、河道部の水位が漸次上昇し、これがある限度に達すると、河水は砕波エネルギーに打ちかって、急激に沖合にはき出される。そのときの大きな流速によって、底部にかく乱をおよぼし、濁度が大きく、かつ排出される水塊が大きいため、沖合で拡散中の比較的濁度の低い水域と区別しうる部分が現われたものと考えられる。このような運動がパルスのくり返される結果、いくつかの濁水群が並ぶようになったのであろう。

沿岸流速の推測ができないので、パルスの周期も十分な信頼性をもって予測することはできない。しかし、試みに沿岸流速を 50 cm/sec とすれば、濁水部分前進間隔は約 1 km であるから、パルス周期は約 30 分と推算される。

その後、建設省地理調査所に保管されている相模湾、新潟海岸の航空写真にも同様な現象を見出すことができた。また河口に導流堤のある場合にはその形状の影響を強く受けて、濁水域の進行方向が決定される。たとえば旧信濃川においては、東海岸に向うことが多いようである。

3.2 沿岸の浮遊漂砂

上記は河川よりの流出土砂についてであったが、その他海岸においては、磯波帯およびそのやや沖合にわたって浮遊土砂による濁りが観察され、沖合との間に判然とした境界を現わすことが多い。東海村海岸において昭和 33 年 11 月 6 日波高 70 cm, 周期 7~8 秒程度の波浪条件のもとに距岸 1000~1500 m (水深 10~15 m) の範囲が茶色に濁っていた。Vincent¹⁹⁾によれば、風波減衰期には、しばしばこのような清濁境界線が出現するといわれ、この線より岸側では冲向きの濁度流が存在し、沖側では入射波の質量輸送中や吹送流による反流が存在しているという。そして風波の減衰時には濁度流が相対的に卓越するので、清濁境界線は次第に沖側へ移動し、シルト性浮遊漂砂は、やがて徐々に沈殿するか、あるいは拡散によって消滅状態になるものと解釈している。

北大 福島教授²⁰⁾らの方法に従い、われわれも竹の捕砂器を神奈川県 江ノ島、鎌倉海岸および茨城県東海村海岸に使用した。捕砂の平均粒径は海底からの高さによって次第に細粒化してゆく。たとえば東海村海岸で調査を行ったときには、海底から 0.5 m の高さでは約 180 μ , 2.00 m の高さになると約 90 μ となる。海底からの高さによる中央粒径値はもちろん、その地点におけるかく乱の強さにも影響されるものであり、かく乱の強さは水深の大小によって異なるものであるから、設置水深についても考慮しなければならない。微細砂として分類される 125 μ 以下の砂は浮遊性が良好で、たとえば水深 5~6 m においても海底から 2~3 m 付近に浮遊し、水深が 10 m でも海底から 1.5 m 付近まで見出せる。細砂 (125~150 μ) は水深 10 m 付近では海底より 1 m 以上の部分には存在しないが、水深 8 m 以下になるとかなり高いところまで浮遊している。上記の調査を行った期間では、水深 10 m で $H_{1/3}=0.5$ m, $T=8$ sec であった。竹トラップによって捕捉した浮遊砂量は、きわめて微小であり、平均せいぜい 1 g/h 程度である。従って上記はごく平常な状態であると解釈される。このような状態では前述のように、濁度流などによる細粒部分の拡散が支配的であって、漂砂の見地からはさして問題になくてもよいと思われる。

昭和 33 年台風 21 号が襲来したときの資料を東海村海岸において不完全ながらうることができた。その結果によると、平均して約 10~20 g/h の捕砂量があり、平時の 10~20 倍にも達することが知られる。また砂の平均粒径は 180~300 μ にも達し、中砂ないしは中細砂に属する。以上から判断すると、台風時以外の場合の浮遊漂砂はシルト性のものが多く、海水中にほとんど定常的に浮遊していると考えられるが、中細砂の場合には激浪

によって巻き上げられた底質が集团的に雲状をなして運動する状態と考えられる。

以上大規模な漂砂運動に注目して移動形式を論じたが、このようなことがらも念頭において、普通取扱いの対象とする磯波帯付近の漂砂運動の検討を進めねばならない。

4. 海浜地形の変動

ここでは工学的な立場から重要である前浜部分から水深約 20 m に至る沖浜の区域を対象とする。われわれが資料として使用したのは、外海に直面する、(1)浸食性の新潟海岸、(2)ほぼ安定している東海村海岸、(3)相模湾に面する片瀬西浜、東浜および鎌倉海岸である。

4.1 前浜部分の変動

前浜部分の変動については東海村海岸での資料によって説明する。図-10 は東海村海岸における前浜部分の季節的な変化状況ならびに鉛直変動量を示したものである。これから明らかなごとく、汀線の前進後退は 10 m におよび、いちじるしい所では 30 m にも達した。従って汀線付近の鉛直変動量はかなり大きいものである。このような前浜部分の変化はほぼ 1 年を周期としてくり返されると考えるのが常識であるが、台風など異常な波浪による変形は非常に大きく、容易に回復しない。

われわれは東海村海岸において汀線付近の沿岸方向の漂砂移動量を捕捉しようと barrier を設けた。水中部分に延長した長さが十分ではなかったが、少なくとも前浜部分では波による横方向の移動は認められず、径浜を形成する比較的乾燥した砂の飛砂よりの移動のみであった。

4.2 沿岸砂洲

海岸付近の海底地形がいちじるしく変動するのは沿岸砂洲の存在によるものである。砕波の衝撃によって落下地点付近が洗掘されて trough が生じその部分の土砂は沖向きのもどり流れによって砕波線のやや沖側に堆積して沿岸砂洲を形成する。また砕波直前の進行波によって岸向きのせん断力が作用するので、沖側の底質は引きずられて、ちょうど沿岸砂洲の近辺に運搬される傾向を有する。沿岸砂洲の形状は岸側では急傾斜をなして trough に落ち込み、沖側では比較的なだらかな傾斜を維持する。沿岸砂洲の生成、変動を支配する主要な外力は砕波であるので波浪の状態が変れば沿岸砂洲は汀線に近づくか、あるいは全く存在しない場合さえあり、波浪が大きい場合には沿岸砂洲はより沖合に形成され、海岸によっては 2 段ないし 3 段を数える場合すらあるという。

沿岸砂洲の大きさを表示する尺度としては沿岸砂洲の trough 水深、頂部水深、その水深差である比高、頂部の距岸が考えられる。東海村海岸における砂洲の発達状況を見ると、台風によって沿岸砂洲の規模はいちじるしく大きくなり、比高、距岸、砂洲、頂部、trough の間隔はともに平常時の約 2 倍に成長する。深浅測量図より 97 測線を定め、沿岸砂洲の距岸、比高の生起頻度を調べた結果、図-11 に示すようになった。当然場所によって襲来波の条件が違うから、それぞれ異なった関係図が得られる。東海村および新潟海岸深浅測量図を整理した資料から、沿岸砂洲頂部水深と trough 水深との相関図を画いたのが 図-12 (a)(b) である。図中 Shepard の直線はカリフォルニア海岸で観測した数 1000 個の資料から得られたものである²¹⁾。Keulegan の直線は二次元波動水槽における実験より得られたものである²²⁾。東海村海岸では散乱はいちじるしいが Shepard と Keulegan の中間にあり、新潟海岸では Shepard の結果に近いようである。上記の議論においては潮差を度外視したが当然ならぬかの影響はあろう。

図-10 前浜部変動

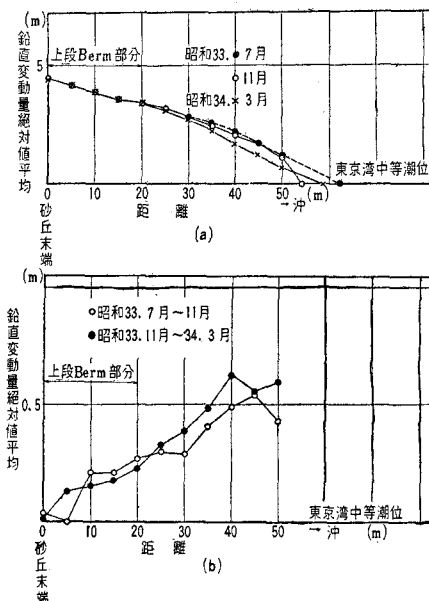
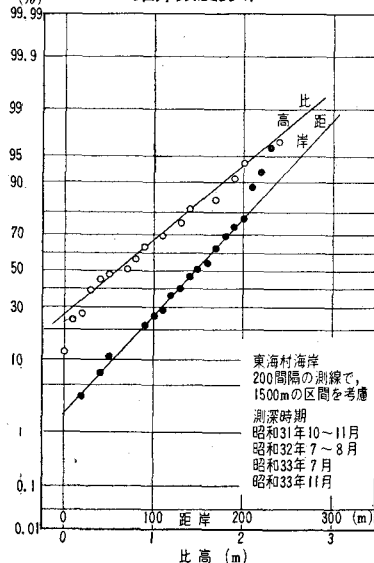


図-11 沿岸砂洲比高および距岸頻度分布



また一般に比高の大きい砂洲は水深の大きい場所で形成され、従って距岸も大きい。

Shepard の研究によれば、同時に存在する波高と沿岸砂洲構造とは密接な相関関係を有し、砂洲頂部水深 d_{bar} および trough 水深 d_{trough} (ほぼ最低低潮面以下) は波高 H と直線関係にあり、ほぼ次のような経験式

$$H = 2.22 d_{\text{bar}} - 3.14 \dots \dots (1)$$

$$H = 1.70 d_{\text{trough}} - 3.32 \dots \dots (2)$$

で表わされるという。ここに単位は m である。ただ波高をどのようにして決定したかは不明である。

沿岸砂洲の海岸線に沿う分布状態を見ると、比高が大きい砂洲ほど連続した距離が大きく、逆に小さいほど不連続の部分(砂

洲が全くないか、沿岸砂洲頂部が急激に低くなっている部分)が現われやすい。trough についても沿岸砂洲の比高が大きいほど連続した水路状を呈するが、比高が小さい場合にはポケット状の凹地が点在するにすぎない。

沿岸砂洲の不連続部は離岸流の通路になりやすい。離岸流の発生する地点では海岸の他の部分よりも水位が高いので、入射波の Swash が前浜のより高い部分に作用し、従って浸食をうける可能性が大きいといわれるが、離岸流は必ずしも常に同一地点で発生するとはかぎらない。沿岸砂洲の不連続部は東海村海岸ではほぼ 200 ないし 1800 m の間隔で分布しているようである。また茂木昭夫²⁴⁾は cusp の規模と比高の規模とはかなりの相関性のあることを示した。

沿岸砂洲地形は作用する波力に依りてかなり忠実に変形するものである。Shepard は砂洲と波浪との関係を比較するにあたり沿岸砂洲地形特性と、その地形の出現に先立つ 5 日間の最大波高とを対応させたが満足すべき相関は得られなかった²³⁾。このことから判断すると、おそらく沿岸砂洲地形の形成と入射波の時差はせいぜい 2~3 日程度のものではないかと想像される。

大波浪時には波力が大きいので小波浪による既存の小さい沿岸砂洲は容易に洗掘されて消滅し、その沖合に新しい大きな沿岸砂洲が形成される。このようにして形成された沿岸砂洲は、さらに大規模な波浪の来襲がないかぎり急激に変形されることなく、一般には小波浪によって砂洲頂部の底質が岸向きに運搬されて徐々に前面の trough を埋め次第に不鮮明になってゆく。異なる時期に異なる距岸で沿岸砂洲がみられるのは沿岸砂洲自体の水平移動によるものではなく、古い沿岸砂洲の消滅と新しい沿岸砂洲の形成によるものである。

4.3 海底地形の変動

ここではほぼ水深 20 m 付近までの海底地形の変動について概観してみよう。

新潟海岸、東海村海岸ならびに片瀬、鎌倉海岸の深淺測量図を利用し、それぞれを適当な区域に分けて海底の縦断形状を図化した。東京湾中等潮位を基準にして 10~30 測線の平

図-12 沿岸砂洲の規模

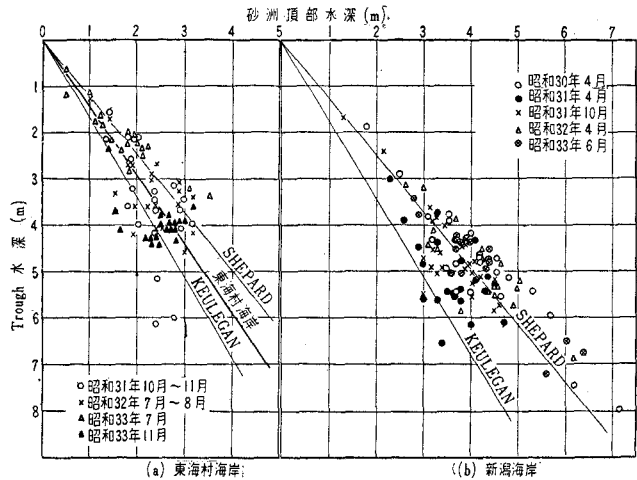


図-13 鉛直変動量分布 (新潟海岸)

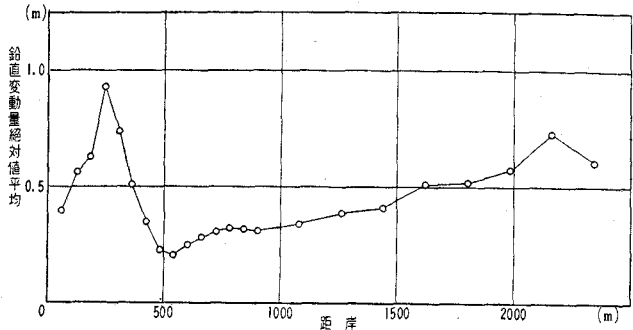


図-14 鉛直変動量分布 (東海村海岸)

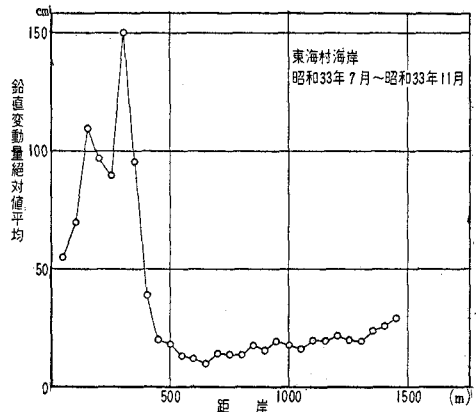


図-15 鉛直変動量分布 (片瀬西浜)

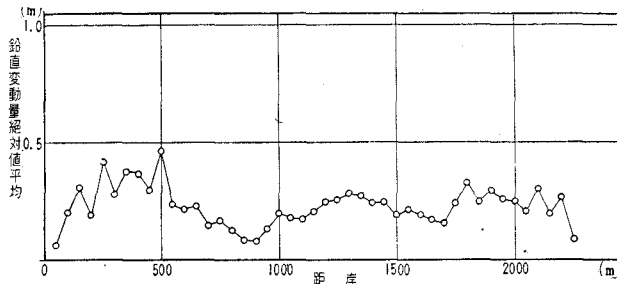


図-16 鉛直変動量分布 (片瀬東浜)

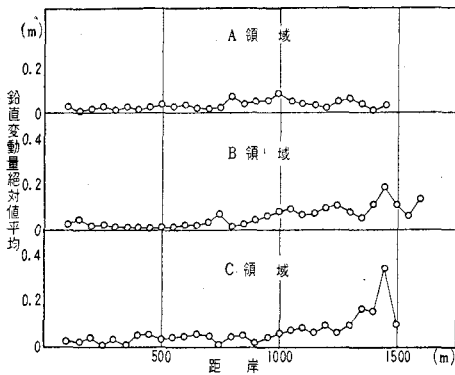


図-17 鉛直変動量分布 (鎌倉Ⅰ)

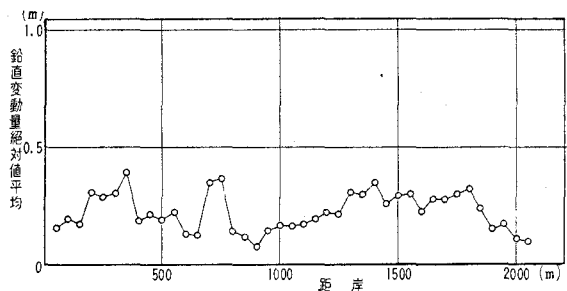


図-18 鉛直変動量分布 (鎌倉Ⅱ)

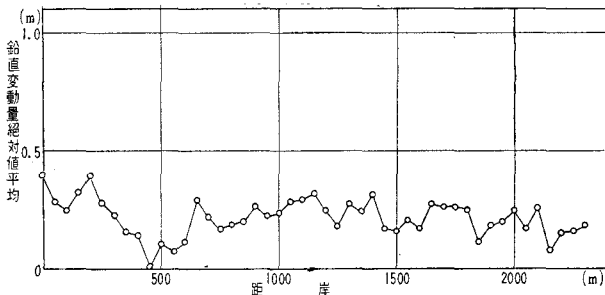
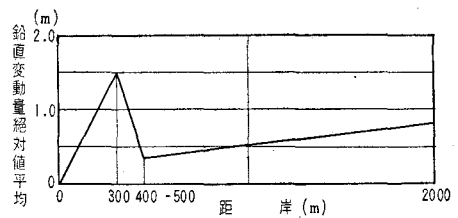


図-19 鉛直変動量分布 (略図)



均海底縦断形状を求め、これからある期間にどのような変動が起っているかを調べてみた。距岸別にその鉛直変動量の絶対値平均を求めたが、その数例を 図-13~18 にかかげる。片瀬西浜、東浜および鎌倉海岸においては、その変動量自体が非常に小さく、特に取り上げるべき傾向は認められない。しかし外海に直接面する新潟海岸と東海村海岸では、共通した傾向が認められる。これを模型化したものが 図-19 である。これから次のようなことが認められる。

- (1) 距岸約 400~500 m 付近に極小点があり、これを境にして岸向き、沖向きに変動の規模が漸増する。
- (2) 沖向きの変動増大傾向は、距岸 2000 m 付近 (水深約 20 m) において一般に 70~80 cm であり、特に 1 m を超える場合も見られる。
- (3) 岸向きの変動傾向は距岸約 300 m の砂洲の発達する付近で最高となり、その値は 1~1.5 m である。
- (4) 距岸約 300 m の最大変動点から汀線にかけて、すなわち一般に磯波帯と称せられる部分では、変動傾向は岸向きに漸減する。

(5) 沖向きの変動状態、特に水深 20 m 付近で年間変動量が 1 m 近くに達するという結果は、新潟の場合には地盤沈下の影響を考慮するとしても、なおかつ、かなり大きい量であり、従来“水深 20 m において有意義な漂砂移動は存在しない”，という考え方とは相反する結果である。その原因としては測深誤差がまず第一に考えられるが、このような大きな誤差を生ずるほど、測深技術の精度は悪くない。従って上述の結果は海底の年間変動の傾向をある程度反映しているとみるべきであり、地質時代の堆積物のあらわれ始まる水深 20 m 付近で、現に海底面がかなりの規模で上下運動しているという事実は注目すべきと考える。

(6) 距岸 400~500 m で変動量が最小となる点に関しては、ここが沿岸砂洲の外縁にあたるから 図-20 に示した略図からも知られるように一種の nodal point になっていると考えられる。

次に変動の上下、つまり堆積と浸食を考慮して代数平均を求めたものの一例を 図-21 に示してある。これから

(1) 距岸 400 m 以内では、やはり沿岸砂洲地形の影響をうけて変動が不規則である。またその規模も大きく、東海村、新潟海岸では ± 50 cm 程度である。

(2) 距岸 600 m より沖では、新潟海岸の場合ほぼ一様に堆積過程もしくは浸食過程を示す傾向がある。ただし、東海村海岸では堆積、浸食が相殺するために、変動量の代数平均は 0 に収れんする。ただここにかがげた例は 4 カ月間についての変動であるから、年間傾向はやや異なるかもしれない。しかしながら新潟海岸の場合とは形状が明らかに異なっており、これは浸食海岸と安定海岸の相違によるものではないかと思われる。

(3) 新潟西海岸では、旧信濃川西突堤基部から汀線沿いに西へ No. 1, No. 2, No. 3 の 3 つの区間に分かった。各区間巾は約 2.3 km であり、各区間における海底変動傾向を比較してみた。距岸 270 m から 2070 m までの延長 1800 m の部分における単位巾土積量を概算した結果が 図-22 である。これから突堤に近い No. 1 の区域では土積変化が負、すなわち浸食である。No. 2, No. 3 の区域は年によって異なるが、No. 2 で堆積ならば No. 3 はさらに強い堆積、No. 2 で浸食ならば、No. 3 はさらに強い浸食となっている。

(4) 上記(3)の結果から判断すると、No. 1 は土砂供給源に接しているにもかかわらず、常に供給と浸食が不均衡になっている。

前浜部分では波による横方向の移動は認められなかったが、水深 20 m (距岸約 2000 m) の沖にはシルトの沈積がみられるのみであり、海浜の変動を考える場合、どうしても横方向の動きに着目せざるを得ない。沿岸砂洲が汀線に平行な方向に移動するらしいことは、茂木昭夫氏も指摘しているが、東海村海岸においても、われわれはそのような印象をうけ、新潟海岸においてもそれらしい結果を認めている。図-23 の結果もこのことをあるいは裏書きしているのではないかと思われる。

4.4 海浜変動に関する実験の相似性

今までは現地の資料を用いて海浜変動についての考察を加えてきた。ここでは実験室でえられた結果について簡単に紹介し、相似性に関する問題点を述べたいと思う。

1957 年の国際水理学会 (I.A.H.R.) にて Thorndike Saville, Jr.²⁵⁾ は "Scale Effects in Two Dimensional Beach Studies" と題して一文を提出している。今日まで小規模な波に相対的にかなり大きな粒径の砂を用いて海浜変形の実験を行ってきた。これらの実験結果をもととして、平衡勾配、臨界波形勾配 $0.02 \sim 0.025$ なるものが得られ、ただちに実際海浜に適用されてきた。後に Rector²⁶⁾ は種々の粒径砂を用いて実験を行い、臨界波形勾配が粒径と波長との比により変化することを示した。この結果を実際の波と底質粒径にまで拡張すると、臨界波形勾配は 0.02 よりも 1 ケタ下ってしまう。

つまり非常に小さい波形勾配でも浸食をうけることとなる。Saville はこの間の事情を明らかにするために、

図-20 海浜変形

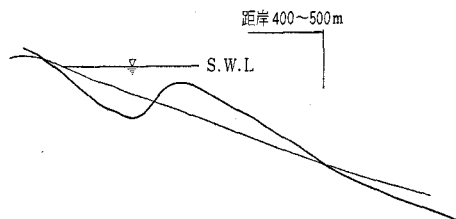


図-21 鉛直変動量分布

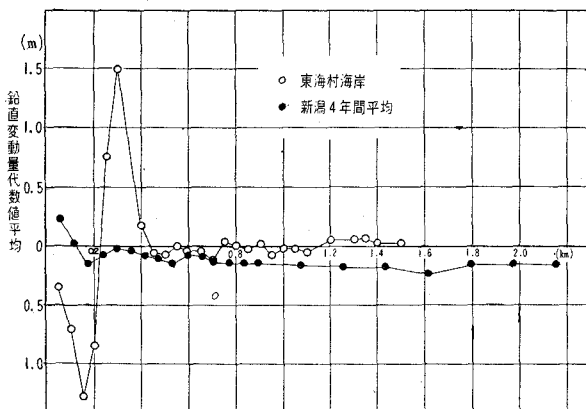
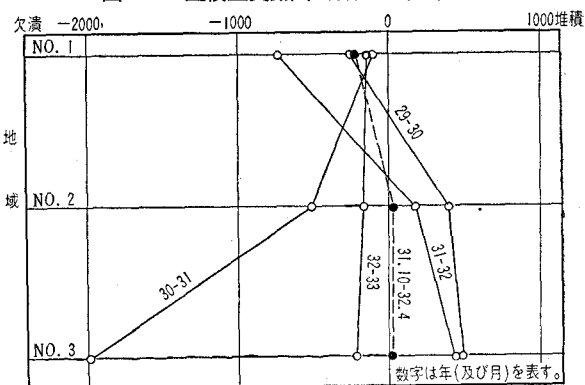
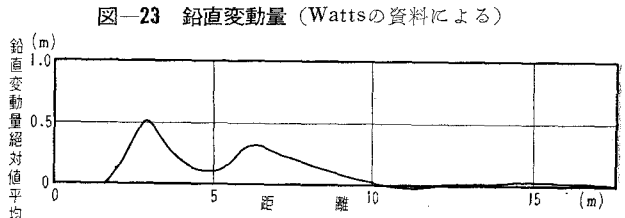


図-22 土積量変動図 (新潟西海岸)



Beach Erosion Board の長さ 180 m, 深さ 6 m, 巾 4.5 m の大きな波動水槽を使用し, 波高 0.5~1.6 m, 周期 5.6~11.3 秒という実際とはほぼ同じ波に平均粒径 220μ の砂を用いて実験を行った。一方この 1/10 および 1/15 の模型で (ただし粒径は同じとして) 小さい波動水槽でも同様な実験を行った。その結果, 波形勾配が 0.0053 でも大型模型では浸食性であった。もちろん小型模型ではこれまでの結果と同じく堆積性であった。波形勾配が 0.0023 に至って大型模型では臨界状態あるいは, やや堆積性の傾向を持つに至った。上記の研究は完成されていないが, これらの結果はきわめて注目に値する。すなわち小さい模型でかなり粗な砂を用いての実験結果は現実とかなり顕著な違いがでてくる。つまり scale effect の大きいことは十分慎重に考慮されねばならないのである。

前節にては海底変動について調べたが, ここでは Watts²⁷⁾ の実験結果を利用して, 同様な考えのもとに整理してみた。Watts は 125μ を最小とした 4 種類の砂を用い, 波のあて方, 潮汐の影響を加味して実験を行っている。この資料の鉛直変動の大きさを算出した結果は, 概略 図-23 に示したようであり,



り, 実質土砂の粒径が主要な要素であることがしられる。Saville の実験ともあわせて考えれば底質の粒径と波の大きさそのものに関係してくることがわかる。さて, 先に示した実際の変動状況を 図-23 と比較すると, 深い所での傾向は全く異なっている。これは実験が初期勾配 1/15 から出発していることにも原因があるが²⁸⁾, 実際に用いた最小粒径の砂でも実験波に比較して, なお過大であったことも大きな原因である。そのほか実際の海底変動は 3 次元적であるのに対し, 実験は 2 次元的条件のもとで行われたことも理由の一つであろうか?

ここで相似性について明確なことがらを述べるには, われわれの知識はあまりにも貧弱であるので, ただ問題の諸点を摘記するにとどめる。

5. 結 言

海岸工事を行う場合に最も重要な要素となる波浪, 漂砂現象, および海浜変形に関して主として現地資料を整理した結果を並べてみた。今までに比較的単純化して考えられていた自然に対する概念は, 必ずしも正しく実際の現象を説明するには至っておらない。ここでは種々の問題点を指摘したにとどまるが波高および周期の頻度分布, 日本本土周辺に襲来する波の特性の分布, 漂砂の供給源よりの移動形体, ならびに海浜地形の変動の状況等について一そう詳細な調査研究が進められねばならない。また各方面からの資料の御提供ならびに御意見を賜われれば幸甚である。

最後に本研究を行うにあたり多くの資料, 特に第一港湾建設局, 海上保安庁水路部, 新潟県, 神奈川県, 原子力発電会社において実施された深浅測量図, また航空写真に関しては原子力発電会社, 建設省地理調査所のものを利用させていただいた。また東海村の現地観測の資料は日本原子力発電会社よりの委託調査として実施したものの一部である。資料整理にあたっては本学職員 手賀 啓, 秋山一夫, 布川尚子, 本間久枝ほか東京大学工学部土木教室港湾研究室一同の努力によってなされたものである。以上各方面の方々へ深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Jasper, N.H.: Statistical Distribution Patterns of Ocean Waves and of Wave-Induced Ship Stresses and Motions, with Engineering Application, Trans. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1956.
- 2) Jasper, N.H.: Distribution Patterns on Wave Heights, Ship Motions and Hull Stresses, Proc. of 1st Conf. on Ships and Waves, 1955.
- 3) Putz, R.R.: Statistical Distribution for Ocean Waves, Trans. A.G.U., Vol. 33, 1952.
- 4) Longuet-Higgins, M.S.: On the Statistical Distribution of the Height of Sea Waves, Jour. of Marine Research, Vol. XI, No. 3, 1952.
- 5) Bretschneider, C.L.: Revisions in Wave Forecasting, Deep and Shallow Water, Proc. of 6th Conf. on Coastal Engr., Dec. 1957.
- 6) Darbyshire, J.: The Distribution of Wave Heights, Dock and Harbour Authority, May 1956.
- 7) Russell, R.C.H. and D.H. Macmillan: Waves and Tides, London, 1954.
- 8) 猪瀬孝雄, 佐藤清一, 白石直文: 苫小牧港の漂砂について (第1報), 海岸工学講演集, 1956.
- 9) 白石直文: 港湾建設に関連する海岸漂砂の調査について, 海岸工学講演集, 1957.
- 10) 白石直文, 長谷直樹: 新潟港テトラポッド防波堤の設計, 施工について, 土木学会誌, Vol. 44, No. 6, 1959.
- 11) 本間 仁編: 東海村海岸調査報告書, 日本原子力発電会社, 1959.
- 12) Pierson, W.J., Jr., G. Neumann, and R.W. James: Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics, H.O. Pub. No. 603, U.S. Navy Hydrographic Office, 1955.
- 13) Neumann, G. and R.W. James: North Atlantic Coast Wave Statistics Hindcast by the Wave Spectrum Method,

- Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 57, Feb. 1955.
- 14) Hall, J.V., Jr. and W.J. Herron : Test of Nourishment of the Shore by Offshore Deposition of Sand, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 17, June 1950.
 - 15) Bretschneider, C.L. and R.D. Gaul : Wave Statistics for the Gulf of Mexico Off Brownsville, Texas, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 85, Sept. 1956.
Bretschneider, C.L. and R.D. Gaul : Wave Statistics for the Gulf of Mexico Off Caplen, Texas, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 86, Sept. 1956.
Bretschneider, C.E. and R.D. Board : Wave Statistics for the Gulf of Mexico off Burrwood, Louisiana, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 87, Oct. 1956.
Bretschneider, C.E. and R.D. Board : Wave Statistics for the Gulf of Mexico off Apalachicola, Florida, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 88, Oct. 1956.
Bretschneider, C.E. and R.D. Board : Wave Statistics for the Gulf of Mexico off Tampa Bay, Florida, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 89, Oct. 1956.
 - 16) Saville, T. Jr. : Wave and Lake Level Statistics for Lake Michigan, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 36, March 1953.
Saville, T. Jr. : Wave and Lake Level. Statistics for Lake Erie, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 37, March 1953.
Saville, T. Jr. : Wave and Lake Level Statistics for Lake Ontario, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 38, March 1953.
 - 18) 本間 仁, 堀川清司 : 神奈川県片瀬東浜, 鎌倉海岸における沿岸流及び漂砂について, 神奈川県土木部河港課, 片瀬鎌倉海岸浸食対策調査報告書, 1958.
 - 18) Unoki, S. : General Aspect of Wind Waves and Swell in the Vicinity of Japan, Meteorology and Geophysics, Vol. VI, No. 2, 1955.
 - 19) Vincent, G.E. : Contribution to the Study of Sediment Transportation a Horizontal Bed due to Wave Action, Proc. 6th Conf. on Coastal Engineering, Dec. 1957.
 - 20) 福島久雄, 溝口 裕 : 漂砂とその特性について, 海岸工学講演集, 1955.
福島久雄・溝口 裕 : 漂砂とその測定 (第3報), 海岸工学講演集, 1958.
 - 21) Shepard, F.P. : Longshore-bars and Longshore-troughs, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 15, Jan. 1950.
 - 22) Keulegan, G.H. : An Experimental Study of Submarine Bars, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 3, 1948.
 - 23) Shepard, F.P., K.O. Emery, and E.C. La Fond : Rip Currents, A Process of Geological Importance, Jour. Geol., Vol. 49, 1941.
 - 24) 茂木昭夫 : 江ノ島および東海村付近沿岸の地形, 地理学評論, Vol. 32, No. 3, 1959.
 - 25) Saville, T. Jr. : Scale Effects in Two Dimensional Beach Studies, Proc. 7th general Meeting, IAHR, 1957.
 - 26) Rector, R.L. : Laboratory Study of Equilibrium Profile of Beaches, Beach, Erosion Board, Tech. Memo. No. 41, 1954
 - 27) Watts, George M. : Laboratory Study of Effect of Varying Wave Periods on Beach Profiles, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 53, 1954.
 - 28) 篠原龍爾, 椿東一郎, 斎藤 隆 : 漂砂と波の特性に関する研究, 海岸工学講演集, 1958.