

汀 線 浸 食

京都大学助教授 岩 垣 雄 一

1. はしがき

世界の海岸線の大部分を占めている海浜は全体として見れば全く安定し、永久に変らないように見えるが、局所的にはあたかも生き物のように絶間なく汀線は変動し、あるときには堆積がおこり、またあるときには浸食されて、波がそこにおし寄せてくる限りは一時も静止することはない。これは丁度、河川が蛇行し河床が変動するのと全く同じことであつて、人口が増大し陸地のすみずみまで開発されるに従つて、このような現象がわれわれの社会生活に対して重大な関連性をもつようになる。

海岸を防護し、海浜の浸食を防ぐには、汀線浸食の機構を充分理解しているものでなければ、合理的な対策を樹てることはできない。しかしながら不幸にもこの方面の学問には現象の複雑さと観測の困難のために未解決の問題が多く、いまだ体系化される段階には至っていないといつても過言ではない。従つてこの問題に対して公式化されたり図表化されるという定量的な、一般化された取扱いがなされた研究はほとんどなく、汀線浸食に関する法則性はいまだ見出されていない。たゞ冬季の比較的荒い波の場合には浸食されて汀線が後退し、また夏季の穏かな波のときには堆積がおこつて汀線が前進するという事実は、古くから観察されていて、海岸に住む人々あるいは海岸の研究にたずさわっている人々にとつてはすでに常識となつている。しかしながらそれ以上のこと、すなわち例えばどうして荒波のとき浸食され穏かな波のとき堆積するか、堆積も浸食もおこらないような波があるかどうか、どれだけ浸食され堆積するのか、砂礫はどのようにどれだけ移動するのか、というようなことはこゝ10年程前までは全く誰もしかなかつたし、また現在でもそのうちのごく一部しかわかつていない。

海浜過程は非常に複雑である。これを支配する要素としては、海浜へ打ち寄せる波の特性、海底地形、底質、海浜特性、潮汐など多くのものが考えられ、これらが組み合わされて同じ沖波に対してもあるところでは汀線が後退し、また他の場所ではかえつて堆積がおこるというような、局所的な変化をもたらす場合もある。自然的には海浜のカスプの発生とその成長、人為

的には例えば海岸構造物の構築による海岸変形などがこれにあたる。このように汀線浸食には局所的な影響が非常に強く支配するのであつて、問題を一層複雑にし、法則性を見出そうとする努力をますます困難ならしめている。しかしながらこの現象を支配する最も大きな要素の一つである波の特性については、風波の発生、発達、減衰、海底地形による波の屈折、あるいは遮蔽物による波の回折、砕波現象などかなり詳細に明らかにされてきたので、汀線浸食の問題もようやくその研究の方針が見出され、各種の模型実験、あるいは現地観測が行われるようになってきた。

汀線浸食に関連したこれまでの多くの研究は、大別して主につぎのような項目を対象として行われている。

- (a) 海浜の平衡勾配⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾,
- (b) 海浜勾配の季節的变化⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾,
- (c) 砂の大きさと海浜勾配との関係⁽⁵⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾,
- (d) 海浜に直角方向の砂の大きさの分布⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾,
- (e) 砂の大きさと水深との関係⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾,
- (f) 海浜と直角方向の砂の移動量⁽³⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾,
- (g) 汀線附近の砂の堆積量および浸食量⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾,
- (h) 海浜流による砂の移動量⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾,
- (i) 汀線浸食機構の一般的論議⁽²⁾⁽³⁾⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾.

汀線浸食現象は海浜における砂礫の移動に基因することは云うまでもないことであつて、このような砂礫の移動は砕波によつて発生する流れがその原因の主たるものであることも言をまたない。もちろん砕波前においても有限振幅のポテンシャル波の理論によつて説明される海水の実質部分の前進、あるいは海岸附近の潮流などによる浮遊泥砂の輸送が考えられるが、その量は砕波後におけるいわゆるいそ波帯および汀線附近における砂の移動量に較べてそう多い量ではないといわれており、Mason は波の作用による全移動量の20%と見積つている⁽¹⁴⁾。もちろん、この割合も底質の大きさによつて変わることは当然である。このようなことから砕波現象と汀線浸食とは最も密接な関係をもつ

ているのであつて、一にこの砕波現象の徹底的な解明こそ、汀線浸食現象究明の第一歩と云うことができるであろう。砕波の問題および砕波による沿岸流については、それぞれ速水博士および池田博士によつてくわしく述べられるのでふれない。こゝでは主としてこのような流れによる砂礫の移動現象について述べ、またこれによる海浜勾配の変化と海浜砂礫の大きさについて言及し、さらにわが国の代表的な四つの海岸における汀線浸食の機構についても、若干の考察をしたいと思う。

なお海浜変形を論ずるにあつて、海浜の各部の名称を区別して用いる必要があるので、図-1に典型的な海浜断面について各部の名称とその範囲を示した⁽²³⁾。同図において最も砂礫の移動の激しいのは前浜(Beach face or Foreshore)と外浜(Shore face or Inshore)であるといふことができる。

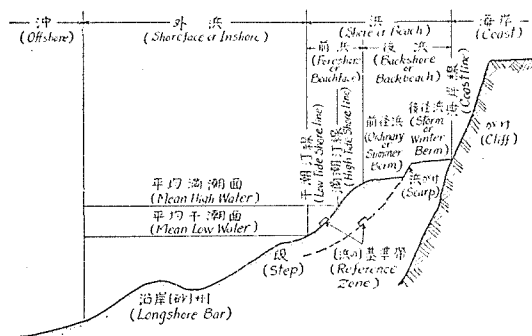


図-1 海岸断面の各部の名称と範囲

2. 海岸の平衡勾配と底質

(1) 平衡勾配 河川において平衡勾配が考えられるように、海浜においても沖波の特性が一定であれば、これ以上海浜の断面が変化しないという海浜勾配が存在するように考えられる。もちろん、河川には平衡勾配というものはないとする立場をとる人もあるように、海浜の平衡勾配を否定ないしは疑問視する人もあるであろう⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。しかしこの平衡勾配の概念を用いることによつて海浜変形の機構がうまく説明できるし、また著者は現地観測の結果その他からその存在を肯定する立場をとっている。

図-2は California 大学で実験して得られた平衡勾配の数例を示したもので⁽¹⁾、横軸に汀線からの距離 x と沖波の波長 λ_0 の比、縦軸には水深 h と λ_0 の比をとつて無次元表示し、沖波の波高 H_0 と λ_0 との比、すなわち沖波の波形勾配 (steepness) の種々の値に対して描かれている。このように無次元表示すれば、模

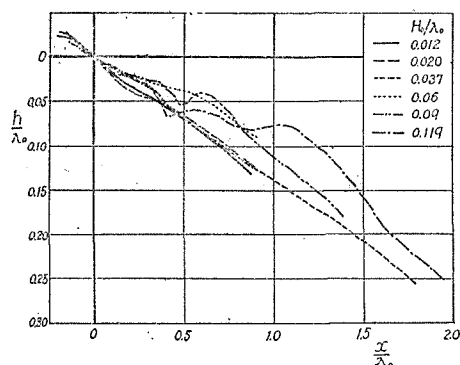


図-2 種々の波形勾配に対する海浜平衡勾配

型実験で得られた結果が実際の海浜にも適用されるということになる。しかしながら底質の大きさに対する効果については、いまだ検討されていないようである。砂の移動を考慮に入れた海浜変形の相似律については、砕波に伴う流れが理論的に表示されるという段階に至っていない現在において、それを厳密に求めることは全く不可能であろう。しかし砕波後の海水の運動に対して浅水方程式⁽²⁴⁾が適用され、また流砂の関係式として Kalinske の表示⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾が用いられるものと仮定すれば、模型を歪まさない場合には底質の粒径の縮尺比は模型の縮尺比に等しくとればよいという結果が簡単に導かれる。一方浜田博士はこの問題について若干の考察を行い、模型の縮尺比の平方根と考えるのが妥当であろうとしている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。あらゆる部分が 1:2:3 の三つの縮尺比によつて作られた模型海浜に対する平衡勾配が、いずれも完全に一致したという U. S. Waterways Experiment Station の実験結果⁽¹⁾から推察すれば、著者の見解の方が妥当のようにも考えられる。いずれにしても大抵の模型縮尺比は $1/50 \sim 1/100$ 程度の order であると考えられるから、底質の粒径縮尺比はかなり大きなものになり、図-2に示されている平衡勾配も、いかなる粒径の砂を用いた結果であるかわからないが、おそらく数 mm あるいはそれ以上の粒径の底質の海浜に対応しているものと考えられる。従つて逆に云えば、底質の粒径が 0.3 mm とか 0.4 mm 程度の細かい砂で構成されている海浜の平衡勾配は、普通の方法による模型実験では求め難いことがわかる。

Johnson は図-2の結果に基づき、 $H_0/\lambda_0 < 0.025$ の沿岸砂州の見られない海浜を正常海浜、 $H_0/\lambda_0 > 0.025$ の沿岸砂州の発生している海浜を暴風海浜と名づけた。図-3は砕波水深 h_0 と沖波の波長 λ_0 の比と沖波の波形勾配との関係⁽²⁷⁾⁽¹⁾を示すものであるが、この図と図-2から沿岸砂州はいずれも砕波点より陸側

のいそ波帯の中にあることがわかり、碎波の強い戻り流れによつてできたものであることが理解される。

置きてつぎに問題となるのは、沖波の状態が変化した

場合海浜がその波に対応する平衡勾配になるのに、何時間かゝるかということである。沖波は気象状態の変化によつて時々刻々変化するから、実験によつて得られた平衡勾配を実際の海浜に適用するとき最も重要な問題の一つとなるであろう。これについての実験はいまだやられていないようであるが、間接的にこれを推定する実験がある。図-4 は沖波の波峰線に対して汀線が 10° の角度をなすようにして行つた模型実験の結果であつて、沖波の状態を急に变えた場合の汀線に平行方向の砂の移動量の時間的変化を示したものであるが⁽²⁰⁾、才2の波に対応する移動量に達するのに約8時間かゝっている (Johnson は18時間あまりとしている)。このことから考え、才2の波に対応する平衡勾配になるのに同程度の時間を要するであろうことが推定される。いま模型の縮尺比を $1/50$ とし、また Froude 数を一致させるとすれば、時間の縮尺比は $\sqrt{1/50} \approx 1/7$ となり、上述の平衡状態到達時間にこれを適用すれば、実際海岸では約56時間となる。

しかし図-4 の場合は正常海浜から暴風海浜への変化であり、海底勾配のわずかな変化 (とくに碎波点附近の変化) が漂砂移動量に大いに影響することも考え

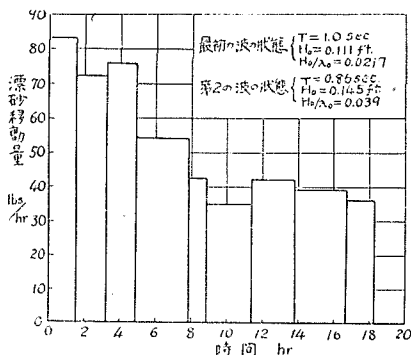


図-4 沖波の状態を急に变えた場合の漂砂移動量の変化 (平均粒径 0.3 mm)

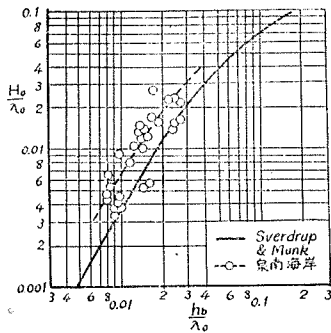


図-3 沖波の波形勾配と碎波水深との関係

られ、約56時間も要する可能性があるということは、海浜勾配に関しては大いに疑問の余地があるであろうとくに汀線附近の変形は他の場所に較べてかなりはやく落ちつくことが後に述べる浜田博士の海浜変形の実験でも見られる。図-5 は著者らが泉南の泉佐野海岸において実測した海浜断面と、図-2 に示す平衡勾配とを比較したものであつて、沖波の波形は水深6mの地点に桿浮子をたてゝ観測した波高と、観測周期から算出した波長とから求めたものである。観測期間中60 cm 程度の潮位変化があつたにもかゝらず、両者はよく一致している。このことはこの海浜がかなり速く平衡勾配に追隨して変化するものであることを示し、沖波状態の変化があまり急激でなく、また波形勾配が大きくなれば、平衡に達するのにそんなに長時間を要しないであろうことを実証しているものと考えられる。

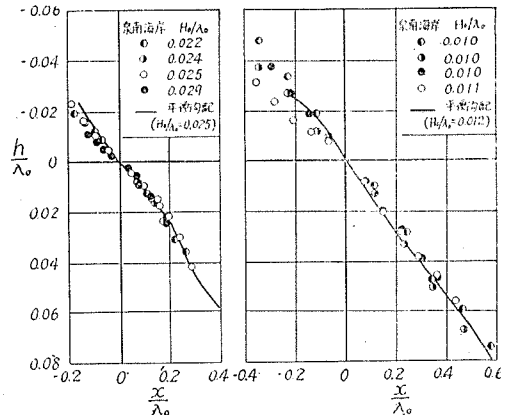


図-5 泉南海岸における海浜断面と平衡勾配との比較

なお沖波が海岸へおしよせるとき、海底地形とか遮蔽物によつて著しく屈折あるいは回折をするような海浜では、同じ沖波でも海岸に沿つて平衡勾配が異なり、沖波の波形勾配によつてこれを分けることが無意味となる。このような場合には、例えば碎波点における波形勾配を採用するというような取扱いが必要であろう。

(2) 前浜勾配と砂粒径 このように沖波の波形勾配が同じであつても、屈折とか回折とかによつて碎波点における波形勾配が各地で異なり、従つて平衡海浜断面もそれぞれ違つた形をとるから、当然前浜帯における砂面勾配も急なところと緩やかなところができる。一般に波の荒い海浜では篩分け作用によつて粒径の大きいものゝみが残ることから、前浜勾配の急なところは粒径が大きく、緩やかなところは粒径が小さいことが推察される。これは淘汰のよくない底質の海浜

ほど著しいであろう。また同じ沖波に対しても、底質の大きさによつて平衡勾配が異なるであろうということはすでに述べたが、このことから前浜勾配と砂粒径との間に何らかの関係があるように思える。この関係については豊原博士の夜見ヶ浜海岸その他における興味深い研究がある⁽⁸⁾。図-6 は米国の太平洋岸各地 (Half Moon Bay を含む) 遠州灘海岸および La Jolla 海岸⁽⁹⁾ の夏季と冬季における前浜の勾配と平均粒径との関係を図示したものであつて、上述の関係をよく説明している。とくに Bascom が最小可能勾配のあることを示したのが注目される。しかし同じ底質からなる海岸においては、前浜勾配が 0.1 あたりまでは平均粒径は大して増加せず、0.1 を越えると急激に粒径が増大することは興味あることであり、遠州灘海岸の資料が夏季のものであることからみて、おそらくこれらが Johnson のいわゆる正常海浜および暴風海浜に対応しているのではないと思われる。

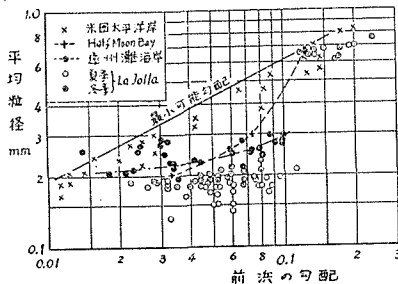


図-6 前浜勾配と砂粒の平均径との関係

(3) 底質の粒径と水深 図-6 には前浜の砂の平均粒径を問題としたが、汀線に直角方向に対しても底質の粒径は一樣ではなく、沖の方へ行くに従つて順次小さくなることが推察される。図-7 は Bascom⁽⁵⁾ が太平洋各地で実測した底質の平均粒径の汀線と直角方向の分布を示すもので、中間潮位において波の作用をうけやすい前浜の部分 (汀線附近) を基準点

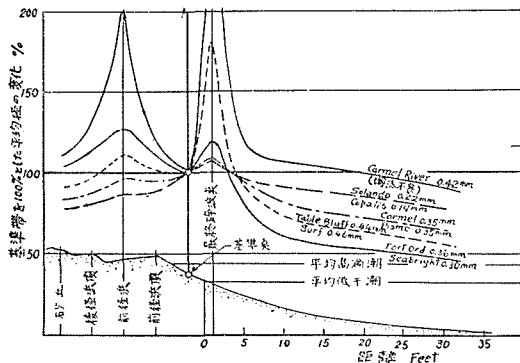


図-7 汀線と直角方向の底質粒径の分布

(Reference point) として選び、その点における砂粒径を 100 % として比較したものである。

図からわかることは、一般に山が二つ見出されることである。これは粒径が大きく淘汰の悪いほど著るしい。これらの山のうち大きな方のものは最終砕波点に位置し、他の一つは前浜の中央あたりにある。この理由として Bascom は、最大の粒径の砂礫が最終砕波点にあるのはその点が乱れの最大の点であるからであり、才 2 番目に大きい砂礫が前浜にあるのは、最終砕波点で攪乱され浮遊状態となつて前浜を打ち上げられ前浜頂をこえた砂礫が、引き波のとき最速点に残されて返つてこないためであると説明している。

図-8 は泉南海岸の波有手と岡田における底質粒径の分布を示したものであつて⁽¹⁰⁾、基準点より沖側は図-7 に示される分布とかなりよく似ているが、も

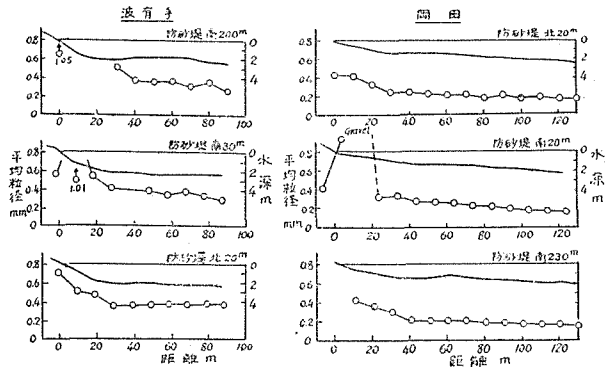


図-8 泉南海岸における底質粒径の分布

つと密に資料をとれば二つの山が見出されるかもしれない。とくにこの海岸の底質は淘汰が悪く、最終砕波点における最も大きい底質が礫となつているところが多い。またこの最終砕波点における砂礫の粒径は大抵は防砂堤の直ぐ北側のものより南側のものの方が大きく、このことは採砂当時 (昭.26.12.7~11) 防砂堤の南側の方からやってくる波 (西よりの風による波) がこれらの海岸へ打ち寄せたことを物語っているものと見てよいであろう。このように沖の方へ行くに従つて底質粒径が小さくなるということから、水深と粒径との間に何らかの関係があるように考えられる。図-9 は図-8 の資料を用いて平均粒径と水深との関係をプロットしたものであるが、水深が約 2 m 以上では平均粒径の変化はあまり顕著でなく、それより水深が浅くなると粒径は段々と増大し、最終砕波水深附近 (図-9 では岡田で 0.5 m 前後) において最大値となる。

佐藤博士および岸の両氏はこの点に着目して波による海底の剪断力と底質粒径について研究を行い、限界掃流力の考え方から平均粒径は水深の $3/2$ 乗に逆比例

することを理論的に導き、岩船海岸においては水深 8.5 m から 5.5 m の部分に対してこの関係が当てはまり、この部分が沿岸漂砂とみなされうことを指摘した。海底においては河川の場合と異なり、海水とともに底質が往復運動をするため、このような粒径分布則を理論的に求めることに多くの問題が存在すると思われる。

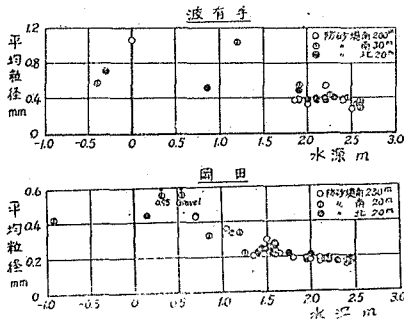


図-9 泉南海岸における底質の平均粒径と水深の関係

3. 碎波による砂礫の移動

海底の砂は波が砕ける以前から海水の運動に伴って移動するが、海浜における全移動量の約80%は碎波後のいそ波帯におけるものであると見られていることを前に述べた。図-10 は Mason が示した New Jersey の Long Branch における海浜の砂の移動の有様を図示したものである。

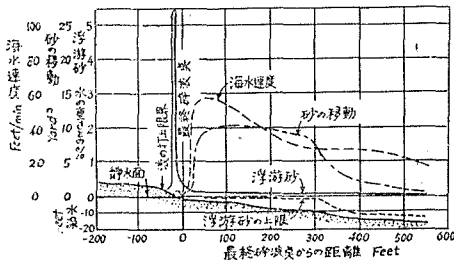


図-10 New Jersey の Long Branch における砂の移動

この図は実測された結果であるか推定されたものであるか明らかでなく、また図中の“砂の移動”がどのような量であるかも理解し得ないが、浮遊砂が最終碎波点で非常に大きな値を示し、その含有率が 5% 以上にもなっている点がとくに注目される。図-11 は Saville によって行われた直線海浜に沿う漂砂量に関する模型実験(沖波の波峰線と汀線との角は 10°)において、小さい採砂孔に入つた砂の量(主として掃流による移動量と考えられる)の全体の移動量に対する割合と沖波の波形勾配との関係を示したものである。

波のエネルギー E の値によつてその割合は多少異なっているが、沖波の波形勾配が 0.025 のあたりで砂はほとんど掃流の移動形式をとり、それより波形勾配が大きくなると順次浮遊形式による移動を含むようになることがわかる。また波形勾配が 0.025 より小さくなくても浮遊形式による移動が若干入ってくる傾向を示していることは興味あることである。

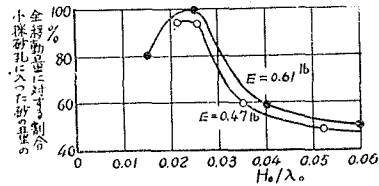


図-11 漂砂の移動形式と沖波の波形勾配との関係

(1) 移動量分布 汀線に直角的な海浜断面における砂の移動量の分布を明らかにすることは、汀線浸食の問題以外に防砂堤とか導流堤などの計画に対してもまた問題を解決するための重要な資料を与えることになる。もし波が汀線に対してある角度をなして砕けると、汀線に平行な流れを生じ、いわゆる沿岸流が発生する⁽²⁸⁾。この沿岸流により外浜の底質は主として浮遊形式をとつて海岸と平行な方向に移動し(沿岸漂砂)、また前浜の砂礫は最終碎波後の打上げ波および引き波による海水のジグザグ運動に伴い掃流形式をとって移動する(汀線漂砂)。図-12 は Saville の漂砂量分布に関する実験の結果を示したものであるが、沖波の波形勾配が 0.0597 の場合(暴風海浜)、発生した沿岸砂州あたりで漂砂量が最大となっており、一方波形

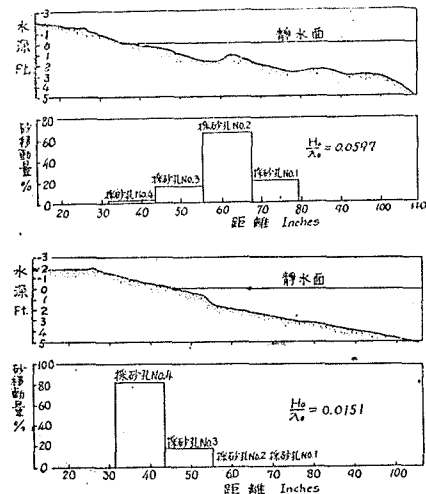


図-12 漂砂量分布に関する Saville の実験結果

勾配が0.0151の場合(正常海岸)には漂砂量は前浜部分で最大となっている。このことは海浜構造物の計画に対して非常に有効な意義をもつことになるであろう。

著者らは昭和28年に泉南の泉佐野海岸にて、図-5に示す海浜断面の変化とともに汀線に直角方向の砂礫移動量分布を実測した。砂礫捕集器の口は巾4cm、高さ2cmの矩形断面をもち、後に細長い布の袋をつけたものであつて、掃流形式による砂礫の移動量を捕集しようとするものである。図-13はこれらの捕集器を用いて測定した引き波および打上げ波による砂礫移動量、すなわち沖側へ移動する量と陸側へ移動する量の分布を示したもので、横軸には平衡勾配の表示のしかたと同じように汀線からの距離 x と沖波の波長 λ_0 の比がとつてある。この図から見出される興味ある事実は、一般に引き波、打上げ波いずれの場合にも二つの山があらわれることで、とくに沖波の波形勾配の小さい場合にはそれが顕著である。そして沖側の山は碎波点より少し沖の方にあらわれている。しかしこの山は波形勾配の増大とともに小さくなり消滅してしまうようである。波形勾配が0.027の場合は碎波高が80~100cmのかなり荒い波のときであつて、汀線より沖の方は実測不可能であつた。

もし引き波による量の分布と打上げ波による量の分布が完全に一致すれば、そのときは海浜の変形はおこらないはずである。完全に一致することは実際の海浜ではおこり得ないであろうが、両者の分布の違いの程度によつて海浜勾配が平衡に近いかどうかを判定できるし、海浜変形の模様を推察することができる。

波形勾配が0.0069の場合は両者の分布が非常によく似ていることから、このとき海浜はほぼ平衡に近く、海浜変形はごくわずかしおこっていないものと推定される、(しかし実際はこの海岸では潮汐のため汀線が移動するので、変形が常に行われている)。波形勾配が0.0057の場合に例をとつて見よう。斜線の部分は引き波による量から打上げ波による量を差引いたものであつて、正の側は引き波による量の多いことを、負の側は打上げ波による量の多いことをあらわす。流れの方向に段々と移動量の増大する部分は浸食され、逆に段々と減少する部分は堆積することになるから、図に示すように浸食部分と堆積部分とが存在することになる。

(2) 海浜変形量 このように

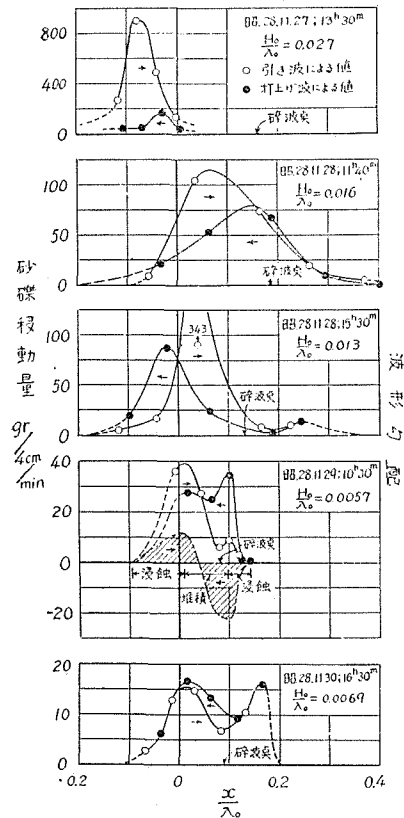


図-13 泉南海岸における汀線と直角方向の砂礫移動量分布

沖波の状態が変わるとか潮汐による汀線の移動などの原因によつて、海浜に浸食される部分と堆積する部分があらわれ、海浜断面は変形して行く。図-14は浜田博士⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾によつて行われた海浜変形についての模型実験の結果の1例を示したものであつて、はじめ海浜勾配を一様に10°および15°とし、これに波をあて

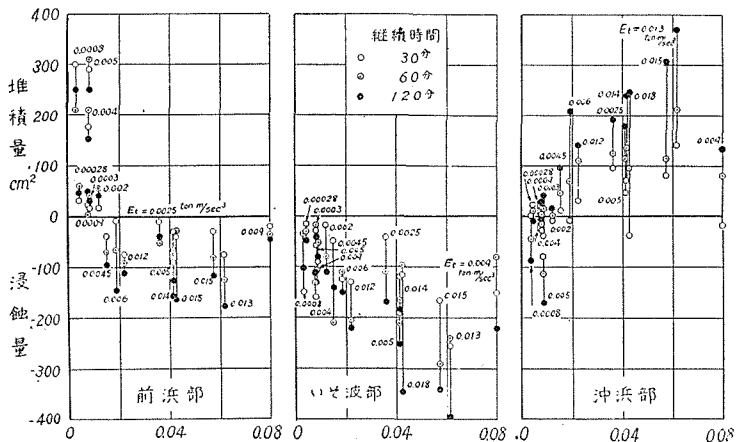
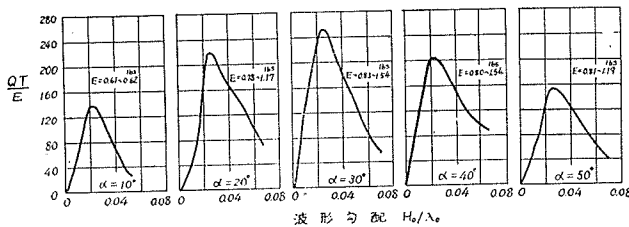


図-14 模型海浜の各部分の変化量と波形勾配との関係

開始してから30分, 60分および120分後の模型海浜の断面変化を測定した。図に示したものは最初の勾配が 10° の場合であつて, 2次元の実験であるから変形量を断面積であらわしてある。浜田博士は横軸に単位時間, 単位巾当りの波のエネルギー E_t をとつてあらわしたが, こゝでは沖波の波形勾配をとつた。図において前浜部というのは汀線より陸側の部分, いそ波部は碎波点から汀線の間, 沖浜部は碎波点から沖の部分を目指す。前浜部では沖波の波形勾配が0.010~0.015より小さい場合は堆積し, それより大きい場合は浸食がおこつており, いそ波部ではいかなる場合でも浸食され, 沖浜部では前浜部と逆の現象がおこっていることがわかる。要するに波形勾配が0.01~0.015より小さいときは, 碎波は汀線より沖側の部分の砂を前浜部へ運び上げる作用をし, 0.01~0.15より大きい波形勾配の場合は, 前浜部およびいそ波部の砂を碎波による戻り流れによつて沖波部へ運ぶ作用をする。そしてそこへ運ばれてきた砂は堆積して, 波形勾配が0.025より大きい場合は沿岸砂州を形成し, 暴風海浜の様相を呈することになる。この実験は波の始動後の継続時間最大2時間であつて, 波形勾配の大きい場合ならびにいそ波および沖波部はまだ平衡に達せず変形が進行している。しかし前浜部は他の部分に較べて, かなりはやく平衡状態に近づいて行くように思われる。

海岸に沿つて移動する漂砂量は, 河川における流砂量が河道設計と密接な関係があるように, 海浜変形を制御し, 海岸防護計画を樹立するに際しての最も重要な要因である。しかし実際海岸でこの漂砂量を評価することは非常に困難な事柄である。もしその海岸に漂砂の移動をとめるような海岸構造物があれば, その構造物の両側にたまった砂の量および浸食された量を測定することによつて, その海岸における漂砂量を見積ることができる。新潟海岸⁽²¹⁾とか Santa Barbara 海岸における漂砂量の推定がその好例であろう。

Munch-Petersen⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾は簡単に漂砂量 Q は, 波の海岸に対する迎角を α_0 として, 波のエネルギー E と $\cos \alpha_0$ の積 $E \cos \alpha_0$ に比例するものと考え, さらに

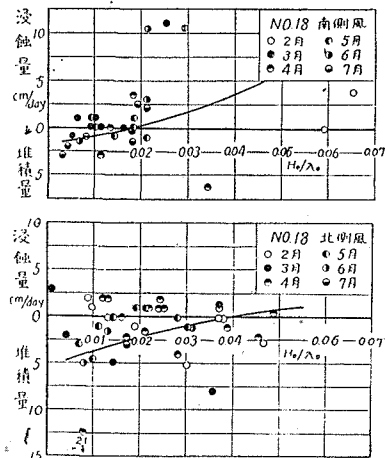


図一五 漂砂量の無次元表示 QT/E と沖波の波形勾配および波の汀線に対する迎角との関係(平均粒径 0.3 mm)

波のエネルギーの代りに対岸距離および風速を用いた公式を提案した。しかし Saville の実験範囲を拡張した Shay および Johnson⁽²¹⁾ の模型実験の結果によれば, 図一15に示すように Q は沖波の波形勾配に非常に関係し, また簡単に $\cos \alpha_0$ に比例するとあらわすことはできない。

この図でとくに注目すべきことは, 波形勾配が0.025附近で漂砂量が最大となること, 沖波の波峰線に対する角度が 30° までは漂砂量が増加して行くが, この角度を越えるとかえつて減少することである。

昭和25年2月から7月まで6ヶ月間, 泉南泉佐野海岸の防砂堤の両側の前浜帯における浸食量および堆積量の実測が大坂管区気象台によつてなされた⁽³¹⁾。実測は防砂堤の両側の前浜帯3断面, 1断面に3点, 計18点に杭を打つて毎日砂面からの杭の高さを測定したもので, 図一16は防砂堤の北側20mの断面における満潮時の前浜帯に位置する No. 18 の点の変化量と, 風の資料から Fetch グラフ⁽³²⁾⁽¹⁰⁾を用いて推定した沖波の日平均波形勾配との関係を示したものである⁽¹³⁾。これらの関係はあまり明瞭ではないが, この図からつ



図一六 泉南海岸における前浜帯の浸食堆積量と波形勾配との関係(日平均)

ぎのようなことが云える。南側風の場合は観測点が防砂堤の風下になるため一般に浸食を受けることになるが, 波形勾配の小さい場合は前浜部は堆積する傾向にあるから, 結局これらが差引かれて, 波形勾配が0.015~0.02以下の場合は堆積が, 以上の場合は浸食がおこるものと説明される。また北側風の場合は逆に観測点が防砂堤の風上側にあるため一般に堆積することになる

が、波形勾配の大きい場合は前浜部が浸食される傾向にあるため、結局大きい波形勾配のときには堆積がおこらず、かえって浸食されるということになる。そして限界の波形勾配は南側風の場合よりも大きく、0.04あたりとなるようである。このことから波形勾配の大きい場合は防砂堤の効果はあまり期待できないということができよう。

4. 汀線浸食機構の一考察

海浜変形は1時間、1日あるいは数日というような短期間の変形と、1年あるいは数年、数十年という長期間の汀線変化とに分けて考えることができる。短期間の変形は海岸構造物のごく近くの場所を除けば、汀線に直角方向の砂の移動に支配され、海岸に沿う砂の移動は一般に考慮する必要がない。しかし長期間の汀線変化は海岸に沿う砂の移動が支配的であつて、海岸に沿つて漂砂量が一定でないことに基因する。こゝでは主として短期間の海浜変形の機構について考察を進めて見よう。

海浜変形について、これまで述べてきたことを要約すれば、(1) 海浜には平衡勾配の存在が考えられ、これは沖波の波形勾配によつて変化すること、(2) 波形勾配が0.02~0.03以下の波の穏かな場合には前浜部に堆積がおこり、それ以上の波の荒いときには浸食される傾向があること、である。では沖波の状態が与えられたとき、どれだけのよう海浜が変形するかについては現在のところ推定の方法がなく、この問題は将来における重要課題の一つであろう。これについて著者の二つの考え方を述べて見たい。

(1) 平衡勾配法 これは沖波の状態が変わつた場合、海浜断面は変化した沖波の波形勾配に対応する平衡勾配に漸次変形して行くという考え方に基づくものである。この方法で問題となるのは、どの点を基点として変形するかということ、平衡勾配に達するまでにどのような変形の過程をとるかということである。後者の問題はもし平衡勾配に達するまでの時間が沖波の継続時間以内であれば、さほど重要な事柄でなくなるし、また前浜部分の変形が他の部分に較べてかなり速く平衡に達するものと考えられることから、汀線の落ちつく位置のみを推定する場合には前者の問題よりも取り扱いやすいことになる。結局この方法で最も問題となるのは、どの位置を基点として海浜が変形するかである。この基点としてまず考えられるのは、波によつて海底砂礫が全く移動しない点、あるいは多少移動しても海浜変形にはあまり影響しない程度の移動量であるような位置である。この砂礫移動限界点は沖波の波形勾配によつて変化するのであろうし、また底質の

大きさによつて異なることはもちろんである。図-17は図-13に基づいて推定した泉南泉佐野海岸における砂礫移動限界点と沖波の波形勾配との関係を示した

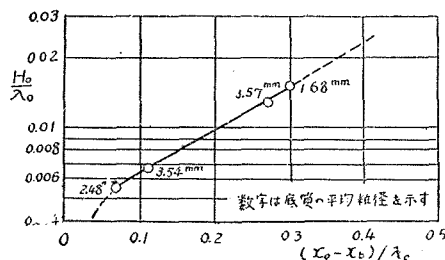
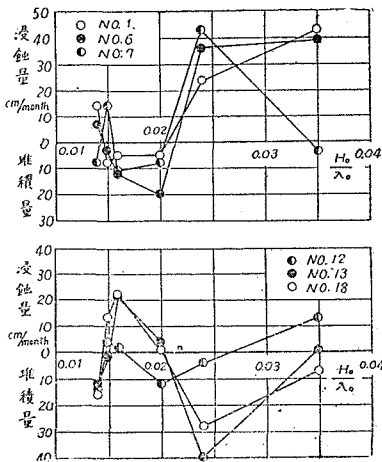


図-17 泉南海岸における砂礫移動限界点と沖波の波形勾配との関係

もので、横軸に汀線から砂礫移動限界点までの距離 x_0 と汀線から砕波点までの距離 x_b の差 $(x_0 - x_b)$ を沖波の波長 λ_0 でわつた無次元量がつとてある。従つて変化した沖波の波形勾配が与えられると、その沖波の平衡勾配に対する移動限界点の水深が図-2および図-3と、例えば図-17とから見出されるから、変形前の海浜断面形において、その水深に等しい点を探し出すとその点が基点となり、その沖波に対する到達すべき平衡海浜断面が確定されることになる。この方法には多くの議論すべき問題点があるが、海浜変形を推定する有力な方法の一つと考え、この方法の模型海浜ならびに実際海浜への適用を試みたいと思つている。もちろんそのためには海浜の平衡勾配および砂礫移動限界点などについての徹底的な究明がなされなければならない。

(2) 限界波形勾配法 この方法は実際の海浜には平衡勾配が存在せず、たとある波形勾配以上では浸食が、以下では堆積がおき、かつそれぞれ波のエネルギーの大きいほどその度合が大きいという経験的事実に基づくものである。波形勾配および波のエネルギーと浸食、堆積量の関係を現地海浜の多くの実測資料から予め決めておいて、沖波の状態がわかれば直ちにその海浜の変形量が推定できるようにしようという考え方である。この方法は平衡勾配法の考え方からすれば、多くの矛盾する点があるが、例えば10日とか1ヶ月というようなかなり長期間の変形ならば、その間の平均の波形勾配および波のエネルギーと結びつけることは可能と考えられ、また工学的には大いに意味があるものと思われる。図-18は泉南泉佐野海岸における前浜帯の月変化量と月平均波形勾配との関係⁽¹³⁾を示したもので(この海岸は方向によつてFetchがあまり変化しないので、波の方向に無関係に波のエネルギーは波形勾配に含まれて関係づけることができる)、図-16に較べてかなり奇麗な関係が得られている。図にお



図一18 泉南海岸における前浜帯の浸食堆積量と波形勾配との関係(月平均)

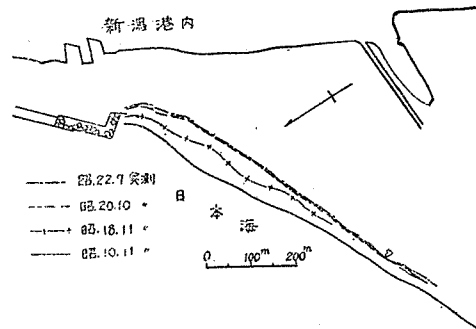
いて No. 1, 6, 7 は防砂堤の南側それぞれ 20 m, 12 m, 4 m 離れた満潮時の前浜帯における変形量であり, No. 12, 13, 18 はそれぞれ防砂堤の北側 4 m, 12 m, 20 m 離れたやはり満潮時の前浜帯の変形量を示す。この場合は観測点が防砂堤の近傍であるため, 海岸に平行な砂の移動をも考慮しなければ, 得られた結果を理解することができない。この図で注目すべき点は防砂堤に近い No. 12 を除けば, 防砂堤の北側と南側は浸食堆積関係が逆になっていること, 限界波形勾配が 0.02 付近にあることである。前者は図一16で説明したように防砂堤の影響によるものであることが直ちに理解される。また図一15で示したように波形勾配が 0.025 付近で漂砂量は最大となり, 従つて防砂堤の影響による両側の変形量も大きくなることを, 図一18も示しているように考えられる。

5. わが国の海岸における汀線浸食

以上海浜変形についての一般的な考え方を述べてきたのであるが, つぎに多くの権威者によつて調査研究されたわが国における代表的な4ヶ所の海岸の汀線浸食をとり挙げ, その機構についていま論じてきた考え方に基づいて若干の考察をして見たいと思う。

(1) 新潟海岸 新潟海岸の浸食については, 新潟港の埋没問題とともに昭和21年12月調査委員会が発足して以来多くの専門家によつて調査研究が続けられ, 多大の成果を収めた報告書が発行されている⁽²¹⁾⁽³²⁾。図一19は西海岸の汀線変化を示したもので, 東海岸のより顕著な後退とともに年々欠潰は重大な問題となつてい。この新潟海岸に加えられた最も大きな人工的要素は, 明治36年に完成された導流堤工事と大正11年に通水が開始された大河津の分水工事であろう。前者

は海岸に沿つて移動する漂砂をとめ, また後者は漂砂の補給源を全く断つに至つたと考えてよい。このことから海岸に対しては, 防砂堤を海岸線に対して斜めに北の方向に 10 m の水深附近まで出したことに相当し, 従つて漂砂の下側は浸食され上側は堆積すること



図一19 新潟西海岸の汀線変化

になるが, とくにこの海岸は両側とも浸食をうけていることが注目され, この点がこの海岸浸食の最も大きな特徴といえるであろう。この海岸の底質は汀線附近で 0.3~0.5 mm, 水深が約 4 m 以上の沖浜部で 0.1~0.2 mm の平均径を示し, かつ沿岸砂州が汀線から 300~400 m の位置にあつて暴風海浜の様相を呈している。従つて波形勾配の大きい冬期の荒い波の場合には容易に底質は浮遊し, 沿岸流あるいは潮流がいかにか弱いものであつても, 底質は運搬されることになる。波形勾配の大きい場合は図一12に示すように, 漂砂量は碎波点の沿岸砂州の附近がとくに大きいことから, このあたりの沿岸流あるいは潮流の方向がこの海岸の長期間の海浜変形に対して最も支配的な要因と考えられる。浸食量は東海岸の方が多いことから, 全体としての漂砂の移動方向は西から東へと考えるのが妥当であろう。そして東海岸と同様西海岸も浸食されるのは報告書で述べられているように⁽²¹⁾, 屈折して碎波点附近ではほぼ海岸線に直角に方向を変えた波が西突堤にあたつて反射し, 海岸に平行な西南方向の強い流れを生じ, この流れがかなり遠くまで影響力を持つということも, この西海岸の浸食機構の有力な要因の一つと考えられているようである。

この海岸の欠潰防止のための対策の一つとして, 港内の堆積土砂をポンプ船によつて西海岸へ3ヶ年平均 100万 m³, 東海岸へ12万 m³ 補給しており, 推定欠潰量西海岸3ヶ年平均約 34万 m³, 東海岸約 26万 m³ と比較して, 西海岸は補給量のはるかに上廻っているが, 補給土砂の大きさが微細なために, 有効土量は全体の約 60%と見なされている。

米国では最近海岸浸食の防止のため, この人工養浜

(Artificial nourishment) が各地で行われ、その方法を Offshore dumping method, Stockpiling method, Continuous supply method 及び Direct placement method と四つの型に分けて、それぞれ調査を続けているようである⁽³³⁾。

(2) 富山湾海岸 この海岸は砂浜に乏しく、波による被害を直接受けるという特殊な海岸が多い。富山湾は過去において約 700 m 以上急激に沈降したものであることが海底の各種の資料から推定されており⁽³⁴⁾、多くの洋谷が存在して、海底地形は非常に複雑である。また沈降海岸であるため図-20 に示すように外浜から沖は急激に深くなるところが多く、従って波の

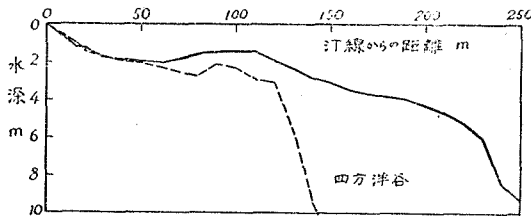


図-20 富山湾海岸における海浜断面の1例

屈折範囲が狭いため波のエネルギーの分散が行われず、北ないし北東から侵入する波は波高を減少せず直接海岸へ来襲する。また長周期の波の場合は、洋谷のため河口の両側において波がとくに収斂し、屈折係数の値が150%に及ぶところも見られる⁽³⁵⁾。さらに東海岸は海岸線の方がほとんど沖波の方向と平行であつて、北から南への汀線漂砂がはげしいことが考えられる。この海岸の浸食原因の最も大きいと思われるのは、漂砂の補給源である各諸河川の流出土砂が波の作用の及ばない深海へ排出されるためと考えられ、そのため砂浜が乏しく、短期間の海浜変形が直ちに陸地に及ぶものと思われる。海浜の平衡勾配の見地から考察すれば、図-20 の点線で示すような海浜断面は平衡に達することがなく、海岸に構造物がないとすれば、永久に浸食を受けることになる。

(3) 泉南海岸 この海岸線はほぼ北東から南西に向つて走つており、北の風の場合は南へ、西の風の場合は北へ、漂砂が運ばれる。またこの海岸は北および西の風の場合とも Fetch が最大 40 km 程度であつて、波高はあまり大きくないが、波形勾配は風速が 10 m/sec を越えるとかかなり大きくなる。著者らは図-5 で示したように、泉佐野海岸の海浜断面は模型実験による平衡勾配とかかなりよく一致することを見出し、また現地観測によつて海浜変形と碎波特性との関係を明らかにすることができた⁽³⁾⁽¹³⁾。長期間にわたる海浜変形は、海岸に沿つて漂砂量が一律でないこと

に原因するという一般的な理屈はすでに述べたが、この考え方によつてこの海岸の浸食機構を考察して見よう。

図-21 はこの海岸における屈折図⁽³⁶⁾と Fetch グラフによつて求めた風速 15 m/sec の場合の碎波高分布を示したものであるが⁽²⁾、一般に北風の場合には碎波高が南海岸に行くほど大きく、また西風の場合には北海岸に行くほど大きくなっていることがわかる。碎波

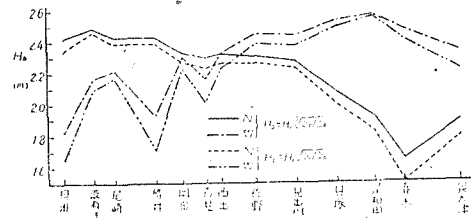


図-21 泉南海岸における碎波高分布

高の大きいほど漂砂量は大きいことから、この海岸では漂砂の移動方向の下側ほど漂砂量が大きくなり、結局図-13 において論じたように海浜は北の風の場合でも西の風の場合でも浸食されることになる。もちろん、図-21 に示すように碎波高分布は一様には変化していないので、局所的には堆積する部分も存在することになる。結局この海岸は全体としては段々と浸食される運命にあるものと云える。

(4) 皆生海岸 この海岸を含む弓ヶ浜の長期にわたる汀線変化についても、泉南海岸の場合と同じ考え方によつて説明されるように思われる。図-22 は多くの観測者を動員して碎波高を同時観測した結果の1例であつて⁽³⁷⁾、北および北東の方向から沖波がやつてきたと推定されるものを示した。皆生海岸は日野川河口の左岸側にあつてはほぼ北に面しており、西に行くに従つて汀線は北東から東北東へ面するようになる。この海岸も漂砂の方向は一方的ではないようであり、昭和

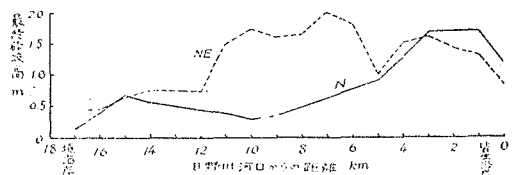


図-22 弓ヶ浜における碎波高分布

12年7月から昭和13年10月までの日野川河口における砂州のつき方の変化から、このことが推察される⁽¹⁷⁾。すなわち冬季の西寄りの季節風による波の場合は東へ、また夏季から秋季にかけての東寄りの風による波の場合は西へ移動する。北の方向からくる波の場合は皆生海岸ではほぼ汀線に直角に波はあたり、また西の

方の海岸も島根半島による回折と、かなり遠浅の海底地形による屈折とによつて、波はほぼ汀線に直角に碎け、あまり漂砂はないように思われる。北東の方向よりの波の場合は図-22に見られるように、碎波高は皆生海岸から西に行くに従つて増大し、河口から7kmのあたりから西へは漸次減少している。(5kmの点で急に波高が小さくなっているが、これは沿岸砂州のため沖の方で波が碎け、観測した汀線近くでの碎波高が小さくなつたものと思われる)。従つてこのような波の場合は0~7kmの間が浸食をうけ、それより西は堆積するものと考えられ、とくに変化の急な0~1kmの間の皆生海岸では浸食の著しいことが推察される。西寄りの風の場合は島根半島に遮蔽されるため波高分布は東に行くほど大きくなり、また漂砂は東の方向へ移動することから、結局全体として浸食をうけることになる。しかしこの方向の波の波高は島根半島までの対岸距離から考えてかなり小さいものと思われ、問題とならない程度であろう。むしろ回折波の方が皆生海岸附近では有力と考えられる。従つてこの海岸浸食に支配的な波は東よりの波と考えると差支えないであろう。もちろん、この海岸の浸食も日野川からの土砂補給が砂防工事によつて近年急激に減少したことが主な原因であることは、佐藤博士、細井両氏の研究⁽¹⁷⁾によつて明らかにされている。

6. 結 論

以上汀線浸食に関する数少い最近の研究を、著者らの研究結果を織り込んでまとめて見たのであるが、この部門の研究は現在ほとんど研究方針が明らかにされて、ようやく緒についたばかりであるという感が深い。著者はなるべく考え方を一貫させて述べてきたつもりであるが、いまだ相互の研究成果が結びついていない点が多い。この研究が少しでも海岸防護対策の合理化に役立てば幸と考へている。

最後に本文をとりまとめるに当つて、終始御激励を賜つた石原教授に深く感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) J. W. Johnson, "Scale effects in hydraulic model involving wave motion," Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 30, No. 4, Aug. 1949, pp. 517-525.
- (2) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 土屋 昭, "泉南海岸の浸蝕に関する基礎的研究, 第5報, 泉南海岸の海底勾配と波高分布について", 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第2報, 昭. 27, pp. 27-40.
- (3) S. Hayami, T. Ishihara and Y. Iwagaki, "Some studies on beach erosions," Disaster Prevention Research Institute Bulletin No. 5, Kyoto University, Aug. 1953, pp. 1-29.
- (4) H. Rouse, Engineering Hydraulics, 1950, pp. 834-842.
- (5) W. N. Bascom, "The relationship between sand size and beach-face slope," Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 32, No. 6, Dec. 1951, pp. 866-874.
- (6) 運輸省第三港湾建設部, "皆生海岸における漂砂とその防止対策", 鳥取県漂砂対策調査報告書, 昭. 25, pp. 75-98.
- (7) 塘 恒夫, 西條時也, 金子松雄, 清水光八, "浅海部に於ける海底地形と底質", 新潟港技術調査報告, 第3報, 新潟海岸の欠損について, 昭. 26, pp. 40-104.
- (8) 豊原義一, "夜見ヶ浜における砂粒の配列について", 日本学術協会報告, 第11巻, 第2号, 昭. 11, pp. 177-182, その他.
- (9) D. L. Inman, "Areal and seasonal variations in beach and nearshore sediments at La Jolla, California," Tech. Memo., No. 39, Beach Erosion Board, Corps of Engineers, Wash. D. C., March 1953, pp. 1-82.
- (10) 速水頌一郎, 足立昭平, 土屋 昭, "泉南海岸の浸蝕に関する基礎的研究, 第4報, 泉南海岸における底質について", 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第2報, 昭. 27, pp. 3-26.
- (11) F. P. Shepard and D. L. Inman, "Sand movement on the shallow inter-canyon shelf at La Jolla, California," Tech. Memo., No. 26, Beach Erosion Board, Corps of Engineers, Wash. D. C., Nov. 1951, pp. 1-29.
- (12) 佐藤清一, 岸 力, "漂砂に関する研究(7), 波動による海底剪断力と底質の移動", 土木研究所報告, 第85号の6, 昭. 27, pp. 140-154.
- (13) 速水頌一郎, 石原藤次郎, 岩垣雄一, "泉南海岸の浸蝕に関する基礎的研究, 第6報, 汀線碎波とこれによる砂礫の移動について", 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第3報, 昭. 29, pp. 1-21.
- (14) M. A. Mason, "Surface-water wave theories," Proc. A. S. C. E., Vol. 78, Separate No. 120, March 1952, p. 24.
- (15) 浜田徳一, 柴山煥彦, "2次元の碎波及び海岸欠損の実験", 新潟港技術調査報告, 第3報, 新潟海岸の欠損について, 昭. 26, pp. 248-283.
- (16) T. Hamada, "Breakers and beach erosions," Report of Transportation Technical Research Institute, Report No. 1, 1951, p. 116.
- (17) 佐藤清一, 細井正延, "漂砂に関する研究(3) 弓ヶ浜(夜見ヶ浜)の漂砂について", 土木研究所報告, 第81号の5, 昭. 26, p. 30.
- (18) 石原藤次郎, 岩垣雄一, "網代港埋没防止に関する研究, 港内の漂砂について", 鳥取県漂砂対策調査報告書, 昭. 25, pp. 26-31.
- (19) Thorndike Saville, Jr., "Model Study of sand transport along an infinitely long, straight beach," Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 31, No. 4, Aug. 1950, pp. 555-565.
- (20) J. W. Johnson, "Sand transport by littoral

- currents," Proceedings of the fifth Hydraulics Conference, Bulletin 34, State University of Iowa Studies in Engineering, 1953, pp. 89-109.
- (21) 新潟県, "新潟港の改良について(埋没対策)" 新潟港技術調査委員会報告, 昭. 29, p. 77.
- (22) 佐藤清一, 吉川秀夫, "漂砂に関する研究(2), 砕け波と陸岸浸蝕に関する実験", 土木研究所報告, 第79号, 昭. 25, pp. 144-163.
- (23) Robert L. Wiegel, "Waves, tides, currents and beaches, Glossary of terms and list of standard symbols," published by Council on Wave Research, The Engineering Foundation, July 1953.
- (24) J. J. Stoker, "The formation of breakers and bores," Communications on Applied Mathematics, Vol. 1, No. 1, 1948.
- (25) A. A. Kalinske, "Movement of sediment as bed load in rivers," Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 28, No. 4, 1947, pp. 615-620.
- (26) H. Rouse, Engineering Hydraulics, 1950, p. 799.
- (27) U. S. Hydrographic Office, Breakers and surf, principles in forecasting, 1944.
- (28) J. A. Putnam, W. H. Munk and M. A. Traylor, "The prediction of longshore currents," Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 30, No. 3, 1949, pp. 337-345.
- (29) Paul Nemenyi, "The Munch-Petersen formula for the so called "coastal transportation force", Trans. Amer. Geophys. Union, 1940, pp. 352-353.
- (30) S. Svendsen, "Munch-Petersen's littoral drift formula," The Bulletin of the Beach Erosion Board, Corps of Engineers, Vol. 4, No. 4, Oct. 1950, pp. 1-31.
- (31) 橋本義愛, 中野道雄, "泉南海岸に於ける海岸漂砂移動調査", 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第1報, 昭. 26, p. 119.
- (32) 新潟港技術調査委員会, "新潟港技術調査報告, 第1報, 新潟港の埋没並びに海岸欠損に就て", 昭. 23.12; "第2報, 新潟海岸の欠損について(浜田徳一, 井島武士, 大久保喜一)", 昭. 24. 5; "第3報, 新潟海岸の欠損について", 昭. 26. 12; "第4報, 新潟港の埋没と新潟海岸の欠損について", 昭. 27. 7.
- (33) Jay V. Hall, Jr., "Artificially nourished and constructed beaches," Proc. of the Third Conference on Coastal Engineering, Council on Wave Research, 1953, pp. 119-136.
- (34) 富山縣海岸対策協議会, 富山湾海岸浸蝕調査報告書, 昭. 27. 5, pp. 54-104.
- (35) 富山縣土木部河港課, 富山湾海岸浸蝕調査報告書(斎藤外吉), 昭. 28. 2, p. 23.
- (36) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 堀 俊之, "泉南海岸の浸蝕に関する基礎的研究, 第2報, 泉南海岸における海波の屈折について", 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第1報, 昭. 26. 4, pp. 100-110.
- (37) 速水頌一郎, "弓ヶ浜の波高分布について", 鳥取縣漂砂対策調査報告書, 昭. 25. 4, pp. 61-71.