

# 海浜の平衡勾配と碎波による砂移動に関する実験

京都大学助教授 岩 垣 雄 一  
同 大学院学生 榎 木 亨

## 1. は し が き

汀線浸食現象はいうまでもなく海浜砂礫の移動に起因するのであつて、この現象を究明するためには、まず海浜の平衡勾配と碎波による砂の移動機構を明らかにすることが必要であることを前報告<sup>1)</sup>で述べた。ある一定の特性をもつ波が長時間海浜に打寄せると、その波に対応した一定の勾配の海浜が形づくられてゆくことは常識的に考えられることであり、このような平衡勾配に達した海浜が、現実の海浜として存在しているかどうかを調べてみることは大いに意義のあることと思われる。このためには波と平衡勾配との関係、さらに底質の粒径の効果を確実に把握しておくことが必要であり、それと同時に碎波による砂移動の性状と波の特性との関係をも明らかにして、複雑な海浜変形の機構を一步一步解析してゆかねばならない。

この研究は、以上の研究方針に従い、まず海浜の平衡勾配に関する実験を行つて、California 大学<sup>2)</sup>において得られた実験結果および著者らによつて実測された泉南海岸及び京都府網野海岸における海浜断面と比較検討するとともに、さらに碎波による砂移動についての実験を行つて、汀線と直角方向の砂移動量分布ならびに砂移動限界水深と波の特性との関係を明らかにしようとしたものである。

## 2. 室 内 実 験

(1) 実験装置 実験水槽は 図-1 (a) に示すように、京大工学研究所内の巾 0.5 m、深さ 1.3 m、長さ 11 m の側面ガラス張り（一部合成樹脂板使用）コンクリート水槽に、水平部分 4.9 m、傾斜部分（勾配 1/10）4 m の床をはり、さらに傾斜床に厚さ 10 cm の砂を敷いたものである。波起し機は、1/4 HP モーターに無段変速機を取付けたフラッター型のものを用い、周期は 0.7~2.25 sec、波高は 5.5~1.9 cm の波を発生させた。砂捕捉装置は、床巾の中心線に沿つて千鳥に孔をあけ、その孔に 図-1 (b) に示すような縦 5 cm、横 3 cm の矩形口をもつように加工した合成樹脂製パイプを挿入し、その矩形口より落ち込む砂をいつたん漏斗で受け、さらにビニール

図-1 (a) 実験水槽と砂捕捉孔の位置

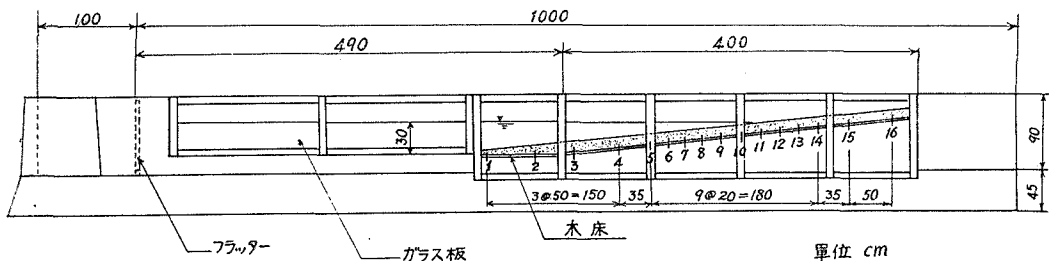


図-1 (b) 砂捕捉装置

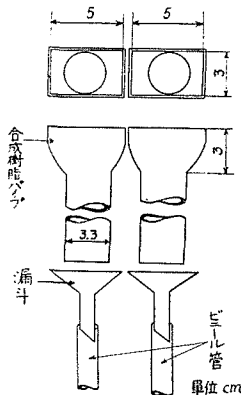
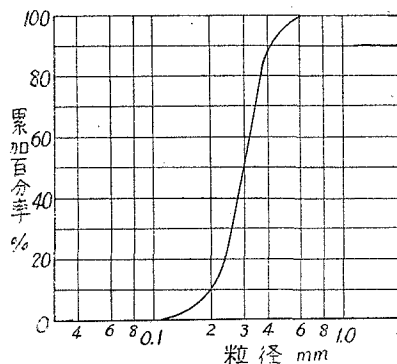


図-2 実験砂の粒度累加曲線



管で水槽外に水とともに導くようにした。

また砂捕捉パイプの口は、打上げ波と引き波によつて移動する砂を別々に同一地点で捕えるため、図-1 (b) に示すように2個連続して並べ、さらに各組の砂捕捉パイプの中心間隔を汀線の近傍では 20 cm、沖の部分では 35 cm あるいは 50 cm とし、5 m の区間に合計 16 組を設置した (図-1 (a))。

実験に用いた砂は、図-2 に示すような粒度分布をもつ平均粒径 0.3

mm のほぼ均一と思われるもので、比重は 2.63 である。

(2) 実験方法 平衡勾配に関する実験は、最初傾斜床に平行に 1/10 勾配に砂を敷いた場合から開始し、1 時間ごとに海浜断面形を側面から測定した。そしてほぼ平衡に達したと思われるまで測定を続けたが、測定時間は最も長い場合約 15 時間に達した。また砂移動量に対する測定は、実験開始後 4 時間、7 時間、10 時間および 15 時間目の 4 回にわたって行つた。なお、沖波に換算すべき波高を水深 30 cm の水平床部分において電気ポイントゲージを用いて測定するとともに、砕波水深、砕波高および砕波点附近の波高変化をも側面からスケールを用いて慎重に測定した。

(3) 実験波の特性 実験に用いた波は、沖波に換算して、波長  $\lambda_0$  が 78.6~228.5 cm、波高  $H_0$  が 2.05~5.88 cm の範囲のものであつて、沖波の波形勾配は 0.0594, 0.0488, 0.0328, 0.0325, 0.0185 および 0.0092 の 6 種類である。

### 3. 平衡勾配

実験開始前勾配が 1/10 であつた海浜は、時間の経過とともに漸次平衡勾配に近づいてゆく。図-3 (a) および図-3 (b) はそれぞれ波形勾配が 0.0328 および 0.0092 の場合の変形の模様を示したもので、前者の場合には実験開始後 4 時間までは汀線が急激に後退するが、それ以後は汀線はあまり変動しないことがわかり、また開始後 10 時間経過すれば断面形状はほぼ一定となつている。波形勾配の小さい後者の場合には、開始後 1 時間で前浜部および汀線付近はほぼ平衡勾配に近い形状をとり、4 時間経過すると全く断面形が落ちついてしまい、10 時間経過した後の断面形とほとんどかわらないことがわかる。

図-4 (a) および 図-4 (b) は 図-3 の場合の波形勾配に対応した 1 時間ごとの変形量の時間変化を示したもので、図-4 (a) の (A), (B) および (C) はそれぞれ基準点から 40 cm, 110 cm および 170 cm の位置、図-4 (b) の (A), (B) および (C) はそれぞれ基準点から 30 cm, 80 cm および 110 cm の位置のものである。両者とも (A) は汀線付近、(B) は砕波点付近、(C) はそれより沖のところであつて、波形勾配が 0.0328 である前者の場合には、実験開始後 2~3 時間までは汀線付近および砕波点付近が浸食され、逆に沖の方は堆積するが、それ以後は浸食と堆積が周期的にくりかえされ

図-3 (a)  $H_0/\lambda_0=0.0328$  の場合の海浜変形

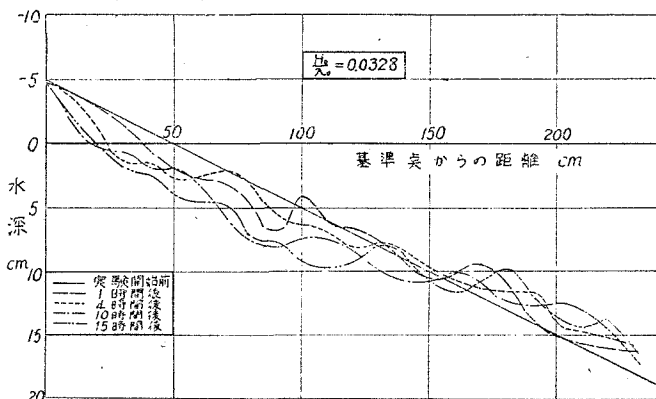


図-3 (b)  $H_0/\lambda_0=0.0092$  の場合の海浜変形

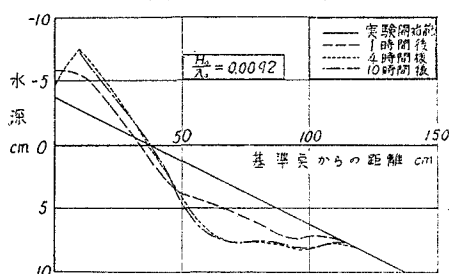


図-4 (a)  $H_0/\lambda_0=0.0328$  の場合の変形量の時間的変化

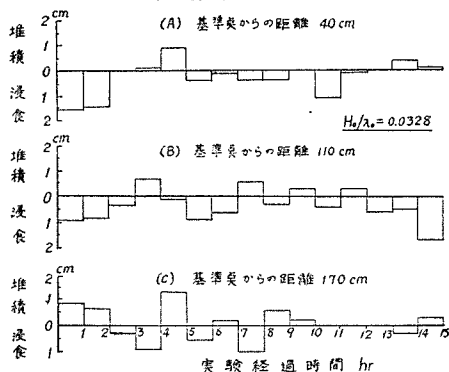
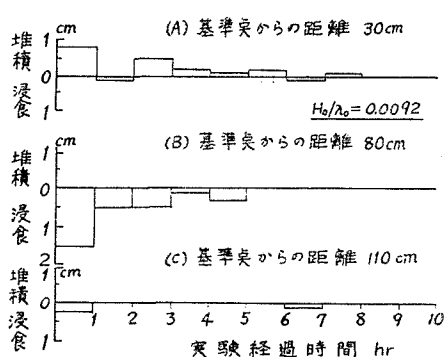


図-4 (b)  $H_0/\lambda_0=0.0092$  の場合の変形量の時間的変化



て、碎波点付近を除けば大体において変形量は時間の経過とともに漸次小さくやつてゆくことがわかる。一方波形勾配が 0.0092 である後者の場合には、図-4 (b) からわかるように汀線付近で若干浸食をうけるときもあるが、大体において汀線付近は常に堆積し、碎波点付近およびそれより沖の方は常に浸食されながら時間の経過とともに変形量が減少してゆく。そしてほぼ平衡に達し、断面形状がほとんど変化しなくなるまでの実験継続時間は波形勾配が 0.0328 の場合よりはるかに短い。この平衡勾配に達するまでの継続時間は、波形勾配が 0.0092 (沖波波高  $H_0=2.09$  cm) の場合で約 4 時間、0.0185 ( $H_0=2.78$  cm) の場合約 7 時間、0.0328 ( $H_0=5.88$  cm) の場合約 12 時間、0.048 ( $H_0=5.39$  cm) の場合約 15 時間であつて、これを実際海岸に適用すれば非常に長時間となる。しかし実際海岸においては 1/10 の勾配から出発して変形するわけではないので、この実験で得られた平衡勾配到達時間から実際海岸における到達時間を推定してもあまり意味がない。また図-5 (a) および図-5 (b) は汀線を原点とし、横軸に汀線からの距離  $x$  と  $\lambda_0$  の比  $x/\lambda_0$ 、縦軸に水深  $h$  と  $\lambda_0$  の比  $h/\lambda_0$  をとつて、各経過時間ごとに断面形を無次元表示してあらわしたものであるが、いずれの波形勾配の場合でも実験開始後 1 時間で前浜部および汀線付近は大体ほぼ平衡勾配に近い形状をなしており、また平衡勾配になかなか達しないのは、砂の移動が少ない沖の部分であることがわかる。

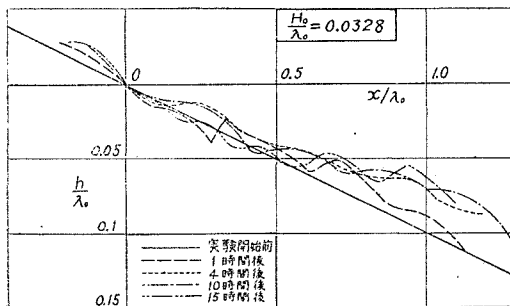
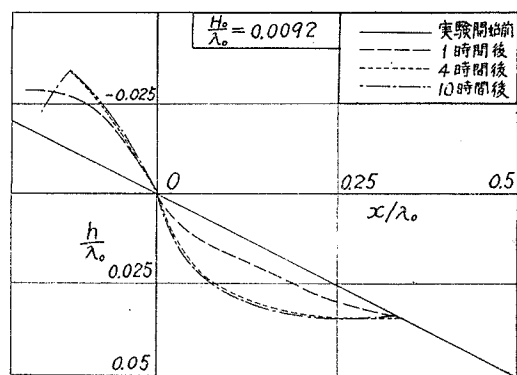
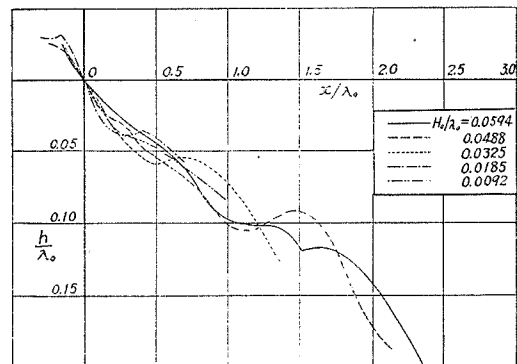
 図-5 (a)  $H_0/\lambda_0=0.0328$  の場合の海浜変形の無次元表示

 図-5 (b)  $H_0/\lambda_0=0.0092$  の場合の海浜変形の無次元表示


図-6 は波形勾配別に平衡勾配を図-5 に示したように無次元表示してあらわしたものであり、また図-7 は California 大学で行われた実験<sup>2)</sup> による平衡勾配と著者らによるものとを比較して示したもので、図中 (J) と記したものが California 大学の実験結果である。この図からわかることは、前浜部および汀線より少し沖までは California 大学における実験結果と著者らの結果とはよく一致するが、沖側ではかなり異なっている。これは California 大学の実験は継続時間が短か過ぎてまだ平衡に達していないか、あるいは実験に用いた砂の粒径が著者らのものより大きくて、沖側は砂の移動が微弱であつたためではないかと思われる。このような底質の粒径が平衡勾配に及ぼす影響については、多くの粒径の砂礫について実験を行うとともに、相似律についての考察や実際海岸の断面形との比較がなされなければならない。

図-6 波形勾配別に示した平衡勾配の無次元表示



実際海岸における海浜断面形と実験による平衡勾配とを比較する場合、図-6 に示すような沖波の波形勾配とか波長などをそのまま用いているあらわし方では正確な比較はできない。というのは、海底地形とか遮蔽物によつて波が屈折したり、あるいは回折したりするので、同じ沖波であつても場所によつて碎波条件が異なってくるからである。図-8 は実験値ならびに泉南海岸および網野海岸の実測結果から、沖波の波形勾配と碎波点における波形勾配との関係をプロットしたもので、実線は

$$H_b/\lambda_b = (H_b/H_0)(H_0/\lambda_0)(\lambda_0/\lambda_b)$$

の関係から、Breaker Index<sup>3)</sup> を用いて得られる屈折も回折もしない場合の  $H_0/\lambda_0$  と  $H_b/\lambda_b$  との関係を示したも

図-7 California 大学の実験結果との比較

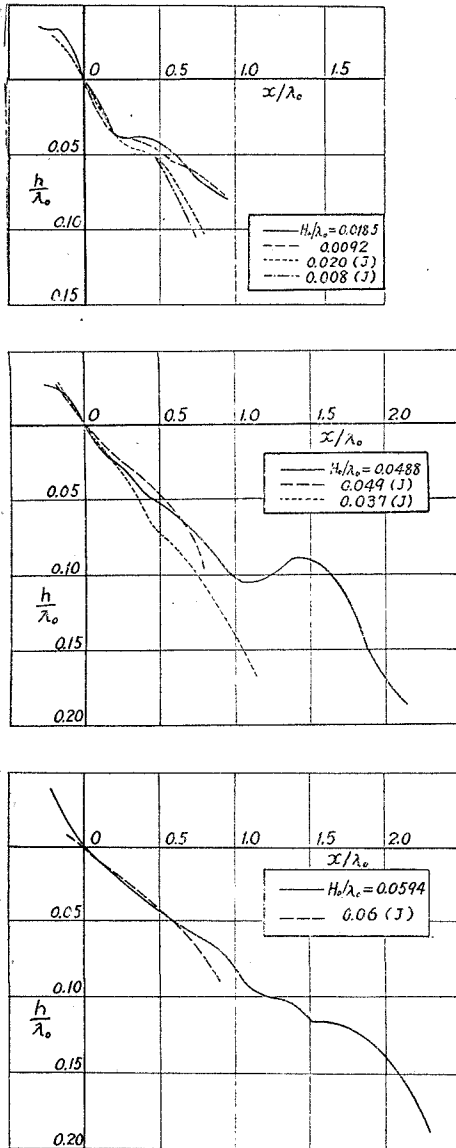
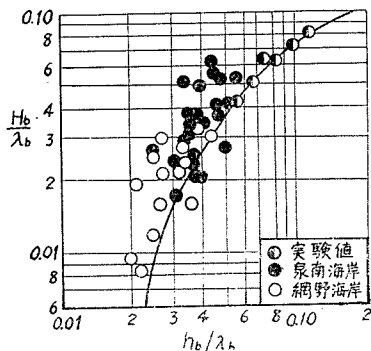
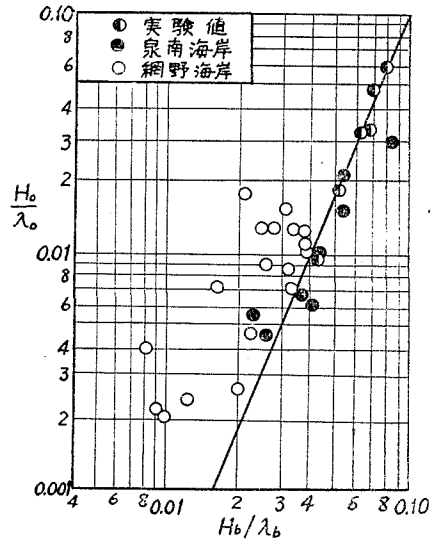
図-9 (b)  $H_b/\lambda_b$  と  $h_b/\lambda_b$  との関係

図-8 沖波の波形勾配と碎波点における波形勾配との関係



のであるが、この図から2次元の著者らの実験結果や屈折の少ない泉南海岸の場合はほぼ実線と一致しているのに反し、湾入した網野海岸の場合には、屈折のために実線で示す関係を満足していないことがわかる。また図-9 (a) はやはりこれらの実験値および実測値について  $H_0/\lambda_0$  と碎波水深および沖波波長の比  $h_0/\lambda_0$  との関係プロットしたもので、実線は Breaker Index を示したものであるが、図-8 の場合と同様、網野海岸の実測結果はこのような沖波の特性を用いたあらわし方では、屈折も回折もしないような場合の碎波条件と一致しない。従つてこのような屈折や回折の影響を除くためには、どうしても碎波点における波の特性を用いてあらわさなければならない。図-9 (b) はこのような考え方から実験値

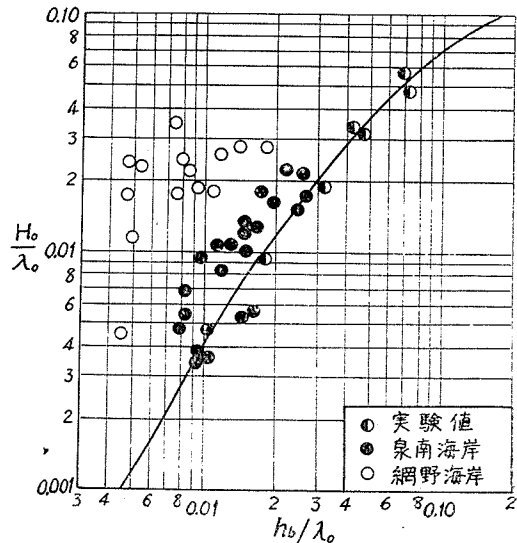
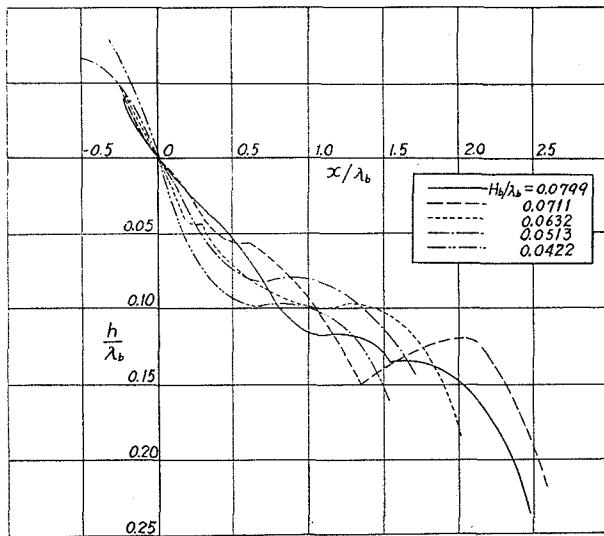
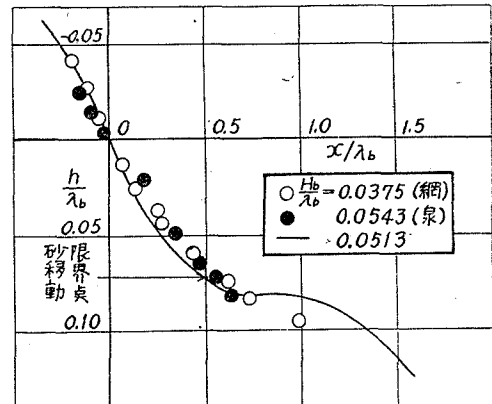
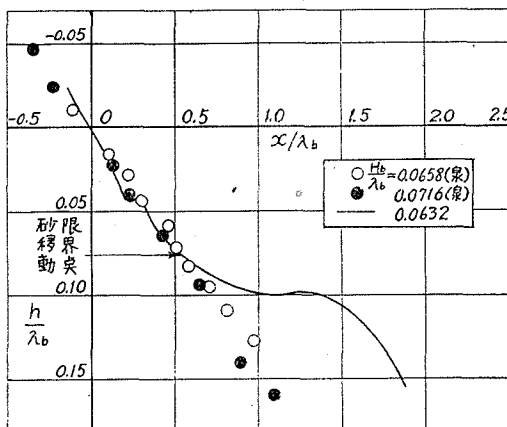
図-9 (a)  $H_0/\lambda_0$  と  $h_b/\lambda_0$  との関係

図-10 砕波の特性を用いてあらわした平衡勾配の無次元表示



および 実測値を  $H_b/\lambda_b$  と  $h_b/\lambda_b$  との関係によつてプロットしたものであるが、網野海岸における実測値はこのあらわし方によると、Breaker Index による実線に非常に近接してくることがわかる。これらのことから、図-6 に示す平衡勾配を屈折あるいは回折をとまう海岸へ適用する場合には、沖波の特性を用いず砕波の特性によるあらわし方に変えなければならない。図-10 は砕波の特性を用いてあらわした平衡勾配の無次元表示を示したものである。このような表示の仕方では泉南海岸および網野海岸の海浜断面形と実験による平衡勾配とを比較したものが 図-11 (a), (b) である。これらの図からわかることは、ある水深から岸側は両者が非常によく一致するが、それより沖側は平衡勾配と異なつた海浜断面形をなしていることである。いま後述

 図-11 実験による平衡勾配と実際海岸の海浜断面形との比較  
(a) (b)


する砂移動限界水深に等しい点を示すと図のようになり、ほぼこの点が実験による平衡勾配と実際海岸の海浜断面形とが異なってくる境界となつている。このことから、実際海岸の海浜では砂移動限界水深より岸側の部分は砂の移動が激しいので、その波形勾配に対応した平衡勾配にかなり速やかに到達するが、限界水深より沖側の部分は、砂の移動が非常に少ないのでなかなか平衡勾配に近づかず、以前の異なつた波形勾配に対する平衡勾配に近い形をそのまま維持しているものと考えることができる。

#### 4. 砕波による砂の移動

(1) 移動量分布 前報告<sup>1)</sup> においては、Saville<sup>4)</sup>の漂砂量分布に関する実験結果を示して、沖波の波形勾配が大きい暴風海浜の場合には、沿岸砂州の付近で漂砂量が最大になり、一方波形勾配の小さい正常海浜のときには漂砂量は前浜部分が最大となることを述べた。しかし汀線と直角方向の移動量の分布の特性についてはまだ明らかにされていない。著者らは泉南海岸<sup>1)</sup>および網野海岸においてこの実測を試みたが、波高が大きくなると実測が非常に困難となり、波形勾配の大きい資料が得られない。従つて移動量分布の特性と波形勾配との関係を明らかにするためには、どうしても実験によるしか方法がない。このような理由から、著者らは前述した実験装置によつて、砂捕捉パイプの口から落ち込む砂の量を測定し、砂の移動量分布の特性を把握しようとしたわけである。図-12 は縦軸に 1 cm 巾、1 分当りの砂移動量を、横軸に汀線からの距離  $x$  と沖波の波長  $\lambda$  との比をとつて、平衡勾配に達したときの移動量分布を示したものである。この図からわかることは、波形勾配が小さい波の場合には砂

の移動は汀線付近に集中しているが、波形勾配が大きくなるに従つて移動量の分布はだんだんと平坦になつてくることであつて、このことから前浜部の移動量の全体に対する割合は波形勾配が増加すれば減少してゆくのに對し、いそ波部の移動量の割合は波形勾配の増加とともに増大することになる。しかしこの実験では、Saville の漂砂量に対する実験のように、波形勾配が大きい場合砕波点付近の沿岸砂州あたりで移動量が最大になるような現象はみられなかつた。この相違はおそらく汀線に平行方向に移動する漂砂と汀線に直角方向に移動する砂の輸送機構の相違に原因するものと思われる。すなわち、波形勾配が大きい場合は砂は浮遊して、もしそれに流れが加われば容易に輸送される状態になつているから、波が汀線に斜めにあつて沿岸流を生ずると砂の移動量は非常に多くなるが、波が汀線に直角にあたる著者らの実験では沿岸流のような強い流れは生じないので、たとえ浮遊する砂の量が多くても移動量はそんなに大きくはないということによつて、両者の相違が説明される。このことは海浜変形の問題のみならず、汀線から沖の方へ向つて構築する海岸構造物の計画に對して、とくに重要視されるべき現象であらう。

(2) 砂移動限界点 図-12 に示した砂移動量分布において、砕波点の近傍で砂の移動が顕著でなくなる点が存在する。この点より沖側は砂の移動はごくわずかであつて、沿岸流をともしなわぬ海浜変形に對しては、あまり大きな影響を及ぼさないものとみなすことができよう。著者らはこの点を砂移動限界点、

その点に對應する水深を砂移動限界水深とよんでいるが、図-11 において示したように、この限界点を基準として海浜が変形し、打ち寄せる波の波形勾配に對應した平衡勾配に近づいてゆくように思われる。前報告<sup>1)</sup> において

図-12 汀線と直角方向の砂移動量分布

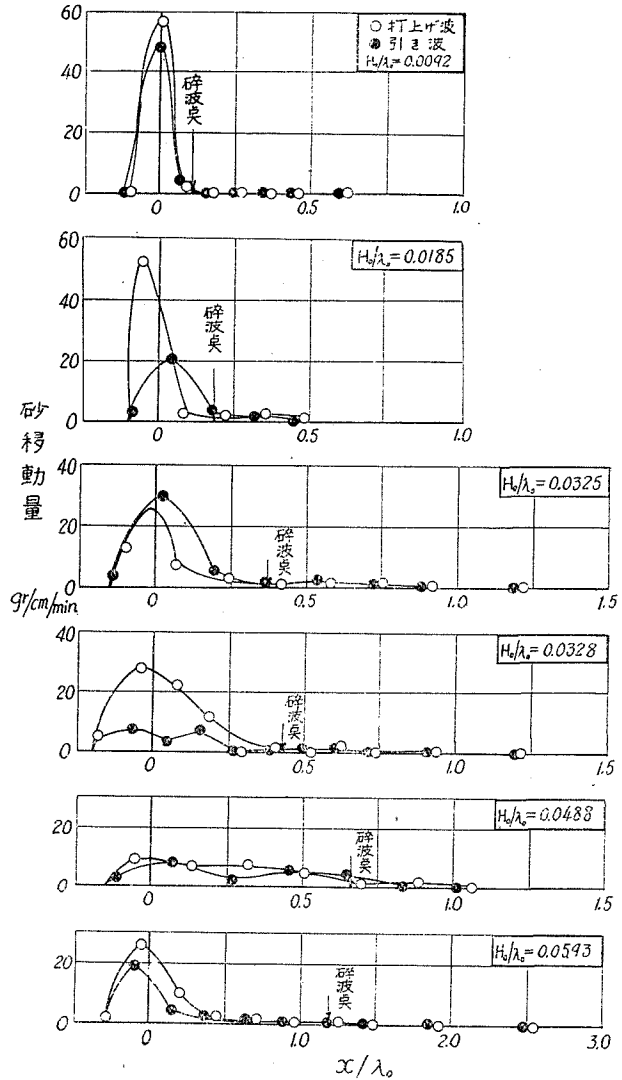


図-13 (a) 沖波の特性を用いた砂移動限界水深の無次元表示

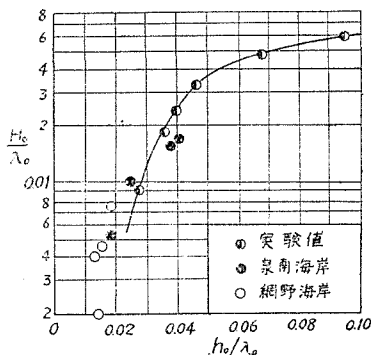
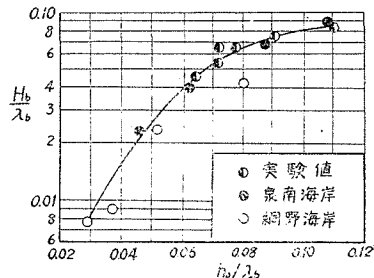


図-13 (b) 砕波の特性を用いた砂移動限界水深の無次元表示



は、この移動限界点をあらわすのに、汀線から限界点までの距離  $x_0$  と汀線から砕波点までの距離  $x_b$  の差を沖波の波長  $\lambda_0$  でわつた無次元量  $(x_0 - x_b)/\lambda_0$  で示したが、汀線よりの距離よりも水深であらわした方が海浜の断面形の影響が入らなくて都合がよいので、ここでは移動限界水深  $h_0$  と沖波の波長  $\lambda_0$  との比  $h_0/\lambda_0$  と波形勾配との関係であらわすことにした。図-13 (a) は実験ならびに泉南海岸および網野海岸の実測から、限界水深を上述の関係によつて示したものである。また波が屈折したりあるいは回折するような場合には、このような沖波の特性を用いた関係では十分でないので、前述したように砕波の特性を用いなければならない。図-13 (b) は砂移動限界水深を砕波の特性を用いて無次元表示したものであつて、実験値と実際海岸の実測値とがほぼ同じ関係によつて示されることがわかる。ただ網野海岸における実測値は他の実験や実測にくらべて、若干大きい限界水深を与えるようである。これは泉南海岸の底質が 2~3 mm 前後の粒径であるのに対して、網野海岸の底質はこの実験に用いた程度のかなり細かい砂であつて、波と底質の大きさの関係から、実験との相似性が網野海岸の場合はよくないためと考えられる。しかしこれは今後さらに多くの実験や実測の資料に基づいて検討されなければならない。

## 5. 結 語

以上海浜の平衡勾配と砕波による砂の移動に関する実験の結果について述べ、この結果を波の屈折や回折の現象が行われる実際海岸に適用するには、沖波の代りに砕波の特性を用いて無次元表示しなければならないことを示した。砂の移動をとまらぬ現象において、最も重要でかつ困難な問題は、実験の結果を実際の問題に適用するときの相似律を確立することである。海浜変形は砕波による砂の移動がその主要原因をなすものであるから、その量的関係を明らかにしなければ、海浜変形に対する相似律を確立することができない。ところが波が砕けてそれが海浜に打上げられるまでの砕波の力学的機構を理論的に解明することは当然不可能なことであろう。従つてどうしても実験の結果と実測結果とを比較して trial に、経験的に両者の相似性を見出すしか方法がない。Simmons<sup>9)</sup> は可動床の水理実験に際しての相似律に対してとくにこの点を強調している。このことから著者らは実験の結果と泉南海岸および網野海岸における実測の結果を比較し、両者の相似性を検討するように努めた。このように海浜変形の問題を明らかにするためには、慎重な実験とともに実際海岸における実測を数多く行つて、つねにそれらの間の相似性を検証してゆくことが必要であらう。

最後にこの研究に対して終始御指導を賜つた石原藤次郎教授ならびに実験に協力していただいた大学院学生鈴木、喜多、三井の諸君に感謝するとともに、この研究は文部省科学研究費によるものであることを付記したい。

## 参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一：汀線浸食，海岸工学研究発表会論文集，昭.29.11，pp. 69-80.
- 2) J.W. Johnson: Scale Effects in Hydraulic Model Involving Wave Motion, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 30, No. 4, Aug. 1949, pp. 517-525.
- 3) M.A. Mason: The Transformation of Waves in Shallow Water, Proc. of 1st Conference on Coastal Engineering, 1951, pp. 22-32.
- 4) T. 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.
- 5) H.B. Simmons: Contribution of Hydraulic Models to Coastal Sedimentation Studies, Proc. of 1st Conference on Coastal Engineering, 1951, pp. 161-168.