

不規則波による海浜変形

西隆一郎・佐藤道郎・中村和夫
(受理 平成元年5月31日)

BEACH PROCESSES DUE TO RANDOM WAVES

Ryuichiro NISHI, Michio SATO and Kazuo NAKAMURA

Natural beach conditions are dominated by a random sea. Therefore, it is necessary to study beach processes due to random waves, in order to correlate knowledge gained from studies of regular wave conditions, and model experiments. It is also important to define regular wave characteristics for coastal and/or beach process experiments based on real random wave records. This paper is a result of laboratory studies of the following points:

- 1) The development of a measuring system which can simultaneously process a large amount of topography and wave data.
- 2) The effect of wave irregularity on beach deformation by the action of random waves, grouping waves and regular waves on the movable bed beaches, which consist of coarse (0.6mm) or fine sand (0.29mm).
- 3) The effect of three dimensional sediment transport on beach deformation.

The results showed that.

- 1) The topography measuring instrument system with an A/D converter developed here, can collect numerous accurate data simultaneously.
- 2) Beach topographies due to similar energy flux waves result in different topographies.
- 3) Beach topographies due to the same representative wave height as regular wave height result in different topographies.
- 4) Critical water depth for sediment movement due to random waves can be calculated by using significant wave characteristics.
- 5) There are cases where the direction of sediment drift differs from the corresponding longshore and rip-current directions.
- 6) Rhythmic topographies were observed in the inshore region of coarse and fine sand beaches, and were also observed in the offshore region of fine sand beaches.

1. ま え が き

約3万4千kmの海岸線を有する日本では、海岸の治水、利水、さらに親水機能に対する要求が高い。このような状況下で、海岸過程あるいは海浜変形の理解が必要である。海岸過程 (Coastal process) については、今日までに数多くの理論的、実験的、数値解析的なアプローチによる研究や、現地調査が行われてきた。しかし現地調査を除いては、その外力条件すなわ

ち入射波条件は規則波がほとんどであるために、その結果から不規則な波の作用下にある実際の海岸の現象を推し量ろうとした場合、波の不規則性の影響のため、海浜流の発生状況や砂の移動といった物理的な素過程についてはそれらの具体的な結果としての海浜変形は本質的に少し異なったものとなっていることも考えられる。

従来より行われている数多くの規則波による移動床実験の知見を現地海岸に読み替えていく上でまず解明

されるべき問題として、外力として作用している波浪の不規則性の効果、砕波帯付近の諸過程の三次元性、があるように思われる。問題を二次元に絞れば、波の不規則性を考慮すれば良く、これについては、『海浜変形を支配する代表波』という概念を用いて、渡辺ら¹⁾、柴山²⁾は不規則波による数多くの二次元海浜変形実験を行い興味ある知見を述べている。更に、柴山³⁾は数値シミュレーションにより不規則波による海浜変形の代表波の考察を行っている。また、大型水路を用いて急勾配斜面にたいする不規則波実験が、Dette, H. H⁴⁾らにより成されている。理論的な取扱としては、Hsiang Wang ら⁵⁾により、不規則波の作用下での浮遊砂の機構について研究が成されている。また、不規則振動流を用いた、佐藤ら⁶⁾⁷⁾の実験的研究が続けられている。これらの不規則波を用いたのとは異なり、二つの波高を持つ波を不規則波のモデルとして採用し、海浜変形に対するこの波の効果を検討した服部ら⁸⁾の研究もある。この様にして、不規則波による二次元海浜変形に関する研究が行われているが、現地海岸は、三次元的な広がりを持ち(例えば Goldsmith, V., V. D. Bowman⁹⁾)、さらに二次元実験ではなかなか把握し難い海浜流による地形変化等への寄与もあり、二次元実験結果との対応を見るためにも、三次元実験を行う必要があると思われる。

そこで本研究では、まず平面水槽を用いて同じエネルギーフラックスを持つ規則波、群波、不規則波による三次元海浜変形実験(シリーズA)を行い、入射波浪の違いによる海浜変形特性を調べた。さらに不規則波の実験(シリーズB)を行い、海浜変形に対する代表波について考察を進めた。また、浮遊砂の海浜変形に及ぼす影響を調べるために細砂を用いた実験(シリーズC)を行い海浜変形の様子を調べた。特に規則波と不規則波の海浜変形を比較する場合においては、棋木による模型底質の選定条件¹⁰⁾等を参考とし、海浜断面形状の等価性、砂の移動限界水深、汀線位置、砂の移動形態等が重要であると考えられたが、本論文においては砂の移動形態についての観測、考察は行えなかった。

当面、代表波としては、1/10最大波、有義波、平均波を用いて、整理を行った。

波、流れ、地形変化をなんとか総合的に捉えたいと考えたが、室内実験といっても平面水槽となると二次元水路に比べて測得し処理すべきデータが圧倒的に多くなり、波、流れ、地形変化の同時測定によるそれら

の経時変化を求めるのは困難になる。しかし、なんとかそれに一步でも近づきたいと考え、波高測定や地形測定システム作りも行ってきており、それらについても簡単に触れる。

2. 実験条件

実験に用いた平面水槽は、長さ26.7m、幅14m、深さ1.2mの諸元を持つ。一端には、電気油圧サーボモーター駆動のフラップ式造波板が設置してあり、これにより所定の波を起こす。他端には、粒径が0.6mmの自然海浜砂からなる1/20勾配の一樣斜面が設置してある(図1、シリーズA、B)。地形計測は初期の3ケース(シリーズA)は竹ひごを砂に立て定規を用いて50cm間隔の格子点上600ポイント余りで目視により行った(図2)。測点は造波開始前、開始後0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 24時間に行った。この地形測定法では測点を多く設けると測定に多く時間がかかり、波も止めなければならない。そこで、もっと簡便で安価で、出来れば、造波中でも測定できる方法はないものかと考え、図3に示すような砂面計を制作した。これは、砂面の高低に応じたロッドの上下の動きをポテンシオメーターの回転に変え、砂面の高低を電気的な量の変化に変換するという簡単なものである。ロッドの先端にはカゴ状の車がついている。これは波のあるところでも水の動きを阻害せず、洗掘しないようにということで試行錯誤の結果選んだ。また、この車の大きさを選ぶことにより、例えば砂漣のような細かい変化にも

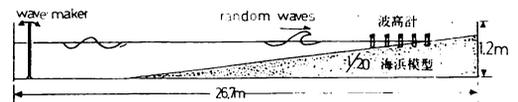


図1 平面水槽図(縦断面)

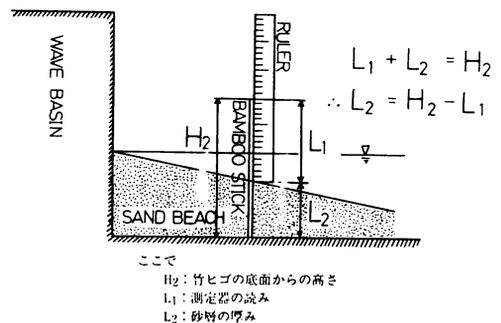


図2 竹ヒゴ計測システム

追従させるか、それらを平滑化した地形に追従させるか決められる。本実験では砂漣の波長10cm程度のところでは15cmの径の車をつけたので砂漣に関しては幾分平滑化した地形を測っている。ロッドの重量がそのまま砂面にかかると車が砂面に食い込み動きも悪くなる。そこで、カウンターバランスを用い砂面への接地圧が小さくなるようにしている。これも余り小さくすると砂面から離れ易くなるので試行錯誤で決めた。

シリーズB, Cでは、この砂面計46台を台車に取り付けて、岸に平行な測線に沿ってスキャンしながらデータをパーソナルコンピュータに取り込み30cm間隔の格子点上1820ポイント余りで地形計測を行った。沿岸砂州等による地形変化の大きいケースでは15cm間隔の格子点を交え計2300ポイント余りで地形計測を行った。計測時間は造波開始前、造波開始後0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 24時間である。

沿岸波浪場については、製作した30台余りの容量式波高計のうち15台を横方向1m間隔で計測用台車に取り付け、計測を行った。

海浜流系については、染料と蛍光浮子(ケミホタル)をトレーサーとして観察し写真撮影した。

地形の三次元性については、シリーズAで各計測時

間毎に砂の移動状況を写真撮影し、次いで碎波帯沖合に浮子を投入しその軌跡と砂移動の方向の対応関係について調べた。

また、用いた波の条件は表1に示す通りである。シリーズAにおいては、海浜に作用するエネルギーフラックスが、ほぼ等価になるように試みた(付録参照)。

ここで用いた不規則波は、式(1)で示されるBretschneider-光易型スペクトルを持つ波である。

$$S(f_n) = 0.257 \left(\frac{H_{1/2}}{T_{1/2}} \right)^2 \times f_n^{-5} \exp(-1.03(T_{1/2} f_n)^{-4}) \quad (1)$$

それぞれ、規則波、群波、不規則波の様式図を図4に示す。また波の諸条件を表1に示す。

3. 実験結果と考察

実験は、1)等価なエネルギーフラックスを持つ入射波による実験シリーズA、2)同じ代表波高を持つ入射波による実験シリーズB、3)細砂を用いた実験シリーズCに大きく分けられるので、それぞれ別に考察する。

表1 波の条件

波タイプ	ケース	波高H 1/10	H 1/3	H mean	周期
実験シリーズA					
規則波	A-1			9.5 cm	1.2 sec
群波	A-2			2~13.5 cm	1.2 sec
不規則波	A-3		13.2 cm	9.3 cm	1.2 sec
実験シリーズB					
規則波	B-1			4.0 cm	1.0 sec
規則波	B-2			5.0 cm	1.0 sec
規則波	B-3			9.0 cm	1.0 sec
規則波	B-4			12.5 cm	1.0 sec
不規則波	B-5	9.7 cm	7.6 cm	4.8 cm	1.0 sec
不規則波	B-6	13.3 cm	10.5 cm	6.6 cm	1.0 sec
不規則波	B-7	15.4 cm	12.1 cm	7.6 cm	1.0 sec
不規則波	B-8	18.0 cm	14.2 cm	8.9 cm	1.0 sec
不規則波	B-9	23.2 cm	18.3 cm	11.4 cm	1.0 sec
実験シリーズC					
規則波	C-2			8.9 cm	1.2 sec
不規則波	C-3		7.6 cm	4.9 cm	1.2 sec
不規則波	C-4		11.9 cm	7.8 cm	1.2 sec
不規則波	C-5		14.1 cm	9.3 cm	1.2 sec

3. 1 実験シリーズA

不規則波による海浜変形をとらえる場合に、同じエネルギーフラックスを持つ規則波、群波、不規則波を海浜模型にそれぞれ作用させれば、等価な平衡断面がえられるかどうかについて主に検討を加えた。

3. 1. 1 岸-沖断面形状

二次元水路と異なって平面水槽では特に規則波において海浜循環セルが形成されやすく、離岸流域、向岸流域で地形変化も若干なってくる。各ケースにおける離岸流域、向岸流域での代表的な岸-沖断面形状と全測線の岸-沖平均縦断面形状を、図5(a), (b), (c) から、ほぼ等価なエネルギーフラックスを持つ規則波、群波、不規則波を作用させても現れる平衡海浜形状は、特に波の及ぶ範囲の違いにより前浜部分や、碎波点あたりでかなり異なることが分かる。また、不規則波による実験であるケースA3(図5(c))の縦断面形状は、前の2ケースの結果と比べて、平滑化されており、これは主として、不規則波では個々の波の碎波地点がかなり広い範囲にあることによる不規則性の影響によるものと考えられる。これらの結果より、等価なエネルギーフラックスの波を作用させても、規則波と不規則波で海浜変形の様子は基本的に異なると考えられる。

海浜流系と海浜変形の対応について考える。実験の行われた条件内では、沿岸砂州が発達するとき、離岸流域と向岸流域の地形は互いに異なっており、流れと地形の相互作用が強いことが分かる。また、二次元水

路実験では断面変化は岸沖方向の砂移動に強く依存するが横方向への砂移動の自由な水面水槽では、たとえ、二次元的と考えられる場合でも断面変化が岸沖だけでなく沿岸方向の砂収支によりまかなわれてるところが大きいようである。また、砂移動の状況と海浜変形については、後の節で述べる。

3. 1. 2 水深変動量の分布

図6は、各ケースにおける岸-沖方向の水深変動量の分布を示したものであり、点線が全測線の平均水深変動量、破線が離岸流域の代表的な測線、実線が向岸流域での代表的な側線の分布を表している。シリーズAの沿岸方向に平均した水深の変動量分布では、岸側のピークの位置が規則波に比べ不規則波、群波の方でより岸の方にあることが分かる。これは、不規則波、群波中には規則波に比べ大きな遡上波が数多く含まれているためと考えられる。また、沿岸砂州の発達したケース1, 2では4m付近に水深変動量の負の部分と正の部分が対を成している。さらに、離岸流の発生している場所での水深変動量(破線)をみると、岸側から2番目のピークがバーの発生している位置に、明瞭に現れている。

全体的にみれば、砂州の発生した海浜では、平均水深変動量に比べて、離岸流域の水深変動量の分布が砂州付近にはっきりとしたピークを持っている。

3. 1. 3 岸-沖漂砂分布

単位岸沖方向漂砂量 q_x および海底の変化量(水深

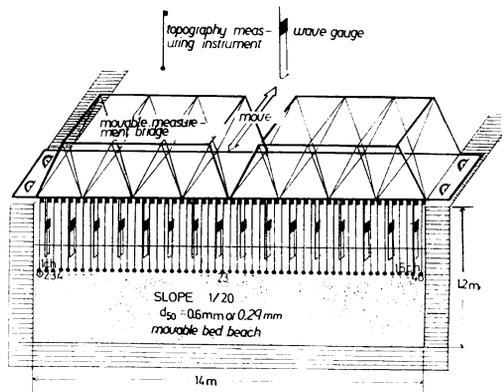
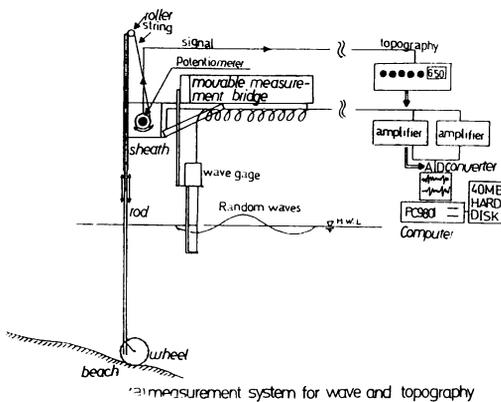


図3 砂面計システム

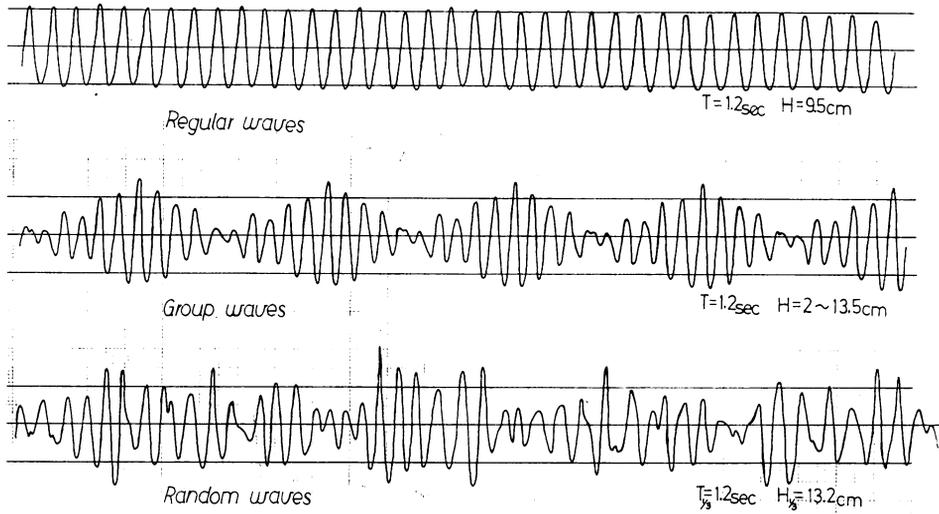


図4 規則波，群波，不規則波の模式図

h の変化で示す) との間には次式の関係が成り立つはずである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-\epsilon)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right) \quad (2)$$

上式に基づき，沿岸方向に平均した各ケースの岸一沖漂砂量分布を図7に示す。上側が岸向き，下側が沖向きの方向の漂砂量分布を表している。ただし，地形変動量の総和はゼロになるという仮定に基づき，水深

変動の誤差は水深変動量に比例して補正してある。シリーズAにおいては，群波，不規則波がほぼ岸向きの漂砂量分布を持つものに対して，規則波のものは，岸側で岸向き，沖側で沖向きの漂砂量分布を持っているのが対照的である。群波不規則波と波の不規則性が大きくなるにつれ漂砂量分布の幅が広がっていることがわかる。

3. 1. 4 海浜変形と砕波帯の水理現象

3. 1. 1で述べたように，弧状沿岸砂州の発生したケース1，2では，測線毎に海浜断面形状が異なっ

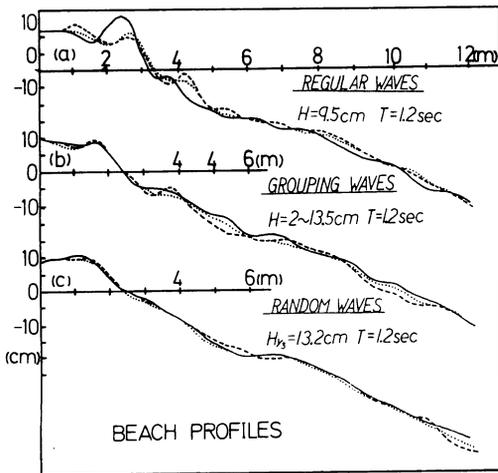


図5 海浜断面図

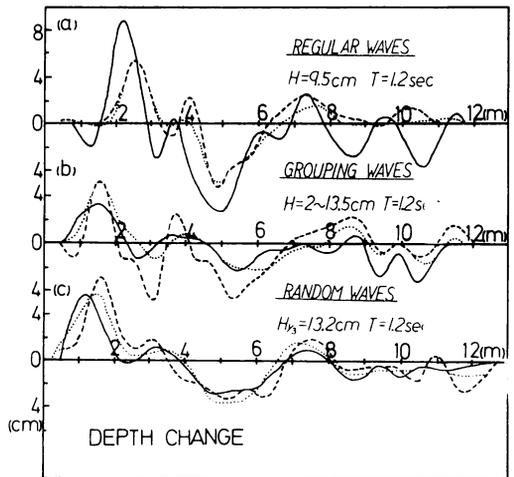


図6 水深変動量

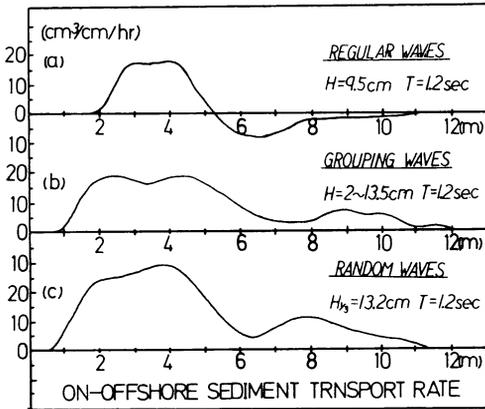
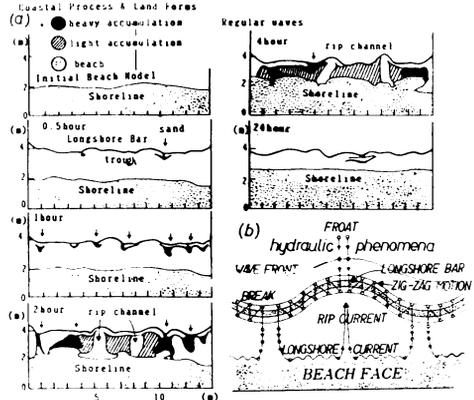


図7 岸-沖漂砂量

ている。このような地形の三次元性を考えるために、規則波実験により観察された経時的な海浜変形と砂の移動状況を図8 (a)に、さらに、それと関連して浮子と染料により観察された碎波帯の水理現象を図8 (b)に示す。図8に (a)において弧状沿岸砂州が形成されると、次第に、矢印で示されるような、砂州が岸側に屈曲した部分を通して砂が集団的に碎波帯に侵入してくる。図中黒い部分が砂が密に堆積している部分であり、斜線部分は少し堆積している部分である。しだいに、その集団的に移動してくる砂のフロントが汀線に接合すると、汀線は部分的に前進し、結果として、カスプ地形が汀線付近に形成される。その後、この砂は、汀線に沿って移動し、汀線の非一様性をならしていく。このような過程から、幅広い領域内で起こる漂砂には、かなり位置的に集中して起こるものがあることが分かった。このような空間的に非一様な漂砂が起きる原因を調べるために、碎波帯に過マンガン酸カリウム溶液を投入して海浜流系を調べた後、弧状沿岸砂州の沖合に浮子を投入し、カメラで2-3分間シャッターを開放して撮影し、その運動を調べた。碎波帯沖合に投入した浮子は、質量輸送により徐々に碎波帯に近づいて来る。そして碎波により沿岸砂州頂部を一たん超えるが、離岸流により沖側に押し返され、砂州頂部を沖側に越える。そして次の碎波により砂州頂部を岸側に越えて来るというような運動を繰り返す。結局、この沿岸砂州上をジグザグ運動をして行き、最終的には、砂州が岸側に屈曲したところを通して碎波帯内に侵入し、その後、沿岸流、離岸流によって移動して行く。このような浮子の運動は、比重、粒径は実際の砂と異なるが、このタイプの海浜変形における



(a) Coastal Process & Land Forms, (b) Hydraulic Phenomena in the Nearshore Zone

図8 海浜変形と砂の移動状況

漂砂移動を代表していると考えられる。これは、前述した砂の位置的に集中した移動を説明している。また砂の移動と沿岸流、離岸流の方向が一致しない場合もあることを示すと考えられる。

3. 2 実験シリーズB

不規則波の一般的な代表波高である、1/10最大波高、有義波高、平均波高がそれぞれの規則波の波高とほぼ等しくなるように入射波条件を設定し、等価な海浜地形がえられるかどうかについて検討を加えた。

規則波、不規則波における最終地形の一例をそれぞれ図9に示す。(a)がケースB4、(b)がケースB8のものであり、沿岸方向に非一様な三次元性の含まれたデータとなっている。図中、測線番号1から46までが沿岸方向30cm間隔の海浜縦断面形状であり、一番下のものが全測線の平均縦断面形状である。図10には、各ケースにおける平均縦断面形状を示してある。図11には平均水深変化量と岸沖漂砂量を示してある。図10、図11より、不規則波における海浜地形は一般的に遡上波の影響のために岸側の変形がより上部まで進み、また沖側の沿岸砂州発生位置もより沖側にあることが読み取れる。従って、碎波帯間隔は不規則波の方が広がっている。また、この平均地形は、弧状の沿岸砂州が発達せず沿岸方向に一樣な断面形状を持つ場合は、この平面的な地形を良く代表している。しかし、弧状沿岸砂州が発達して、沿岸方向に一樣でない場合には、バー、トラフ地形といったものがかなり平滑されたものとなり、この平均縦断面形状を代表断面

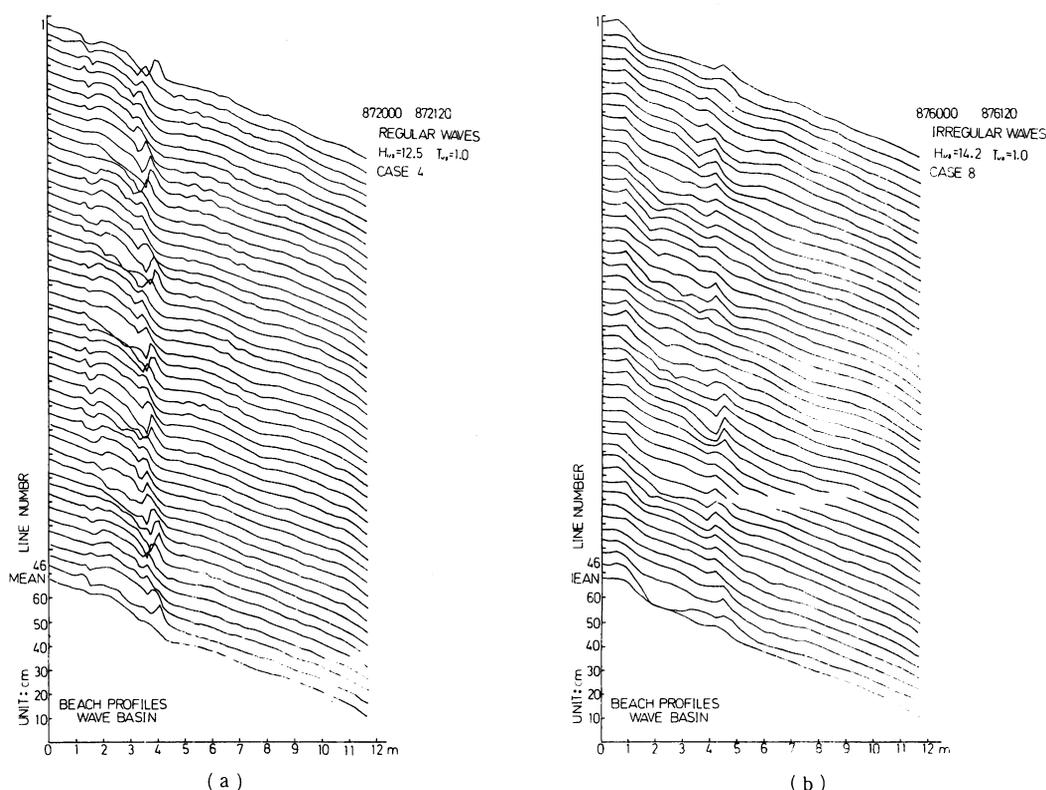


図9 規則波による海浜縦断面図の例

として用いることには若干の疑問は残るが、二次元的な考察を行う上でこの断面を用いることにする。

実際、海浜流等の影響のために、沿岸方向の縦断面形状の非一様性が起きると考えられ、二次元水路で行った実験結果と、どの側線が対応が効くのか、あるいは、平均地形と対応するのか等については、まだ良く分かっていない。

巨視的に、漂砂量分布は規則波のものでは最大値付近に集中して起きるが、不規則波のもとではより広い領域に広がることがわかる。

3. 2. 1) 三次元海浜地形の代表波による比較

さて、規則波による海浜地形と不規則波による海浜変形を比較するときの指標として、まず、規則波波高と不規則波の1/10最大波高、有義波高、平均波高をそれぞれ等しくすることが考えられる。波の周期に関しては、不規則波の1/10最大波周期、有義波周期、平均周期はそれぞれあまりかわらないものと見なし、ここでは Brtschneider- 光易型スペクトルを用いる為に有

義波周期を代表周期として、規則波の周期と等しくなるようにしてある。

図12に、a) 規則波高と1/10最大波高、b) 規則波高と有義波高、c) 規則波高と平均波高がそれぞれほぼ等しい場合の海浜地形を等深線図で示してある。

まず、図12a)はそれぞれ規則波高が9cmと12.5cm、不規則波の1/10最大波高が9.7cm、13.3cmの場合である。規則波の波高が9.0cmの場合には沿岸砂州が発達しているが不規則波の方では前浜部分上に砂が顕著に堆積しており、沿岸砂州の発生は見られない。波高がもう少し大きい規則波高12.5cm、1/10最大波高13.3cmの場合は両方ともに沿岸砂州が発達しているがその比高は規則波におけるものの方が大きく、更に弧状の沿岸砂州地形も規則波におけるものの方が顕著に現れている。ただし不規則波の方においては、前浜頂部における砂の堆積が規則波のものに比べ多くなっている。どちらにおいても、地形変化の量は規則波によるものが大きく、これは、規則波高と、1/10波高を同じにした場合不規則波においては作用する波のほとんどが規

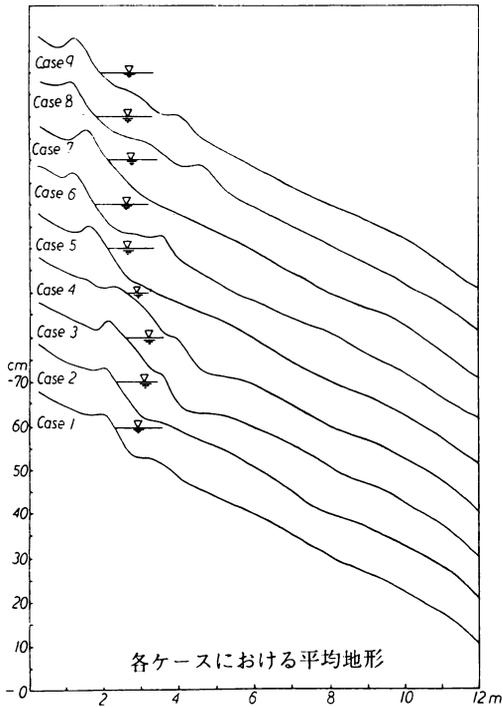


図10 平均縦断面図

規則波に比べ小さくなってしまふ事に起因していると思われる。

次いで、規則波高と有義波高がそれぞれ12.5cm, 12.1cm とほぼ等しいものについて述べる。これについても、規則波では沿岸砂州が発達しており、逆に不規則波の方では前浜付近に砂が堆積した形状となっており、地形変化量も規則波のものに比べ不規則波のものは小さい。規則波高と有義波高が各々等しいものは今の所1ケースしか行われていないが、この結果からは地形変化の等価性は良くないことが分かる。

3番目に規則波高が5cmと9cm、不規則波の平均波高が4.8cmと8.9cmの場合の等深線図を見ると、波高が小さい方では沿岸方向に一樣なステップ地形となり、波高が大きい方ではともに沿岸砂州の発達する海浜地形を示している。しかしながら、沿岸砂州から前浜頂部までの距離は、不規則波の方が大きい。沿岸砂州の比高は規則波におけるものの方が大きくなっていく。規則波高と平均波高を等しくした場合、規則波においては地形変化が狭い領域において強く現れ、不規則波においては波のエネルギーが広い領域に作用し地形変化が弱く現れていると言える。規則波高と不規則

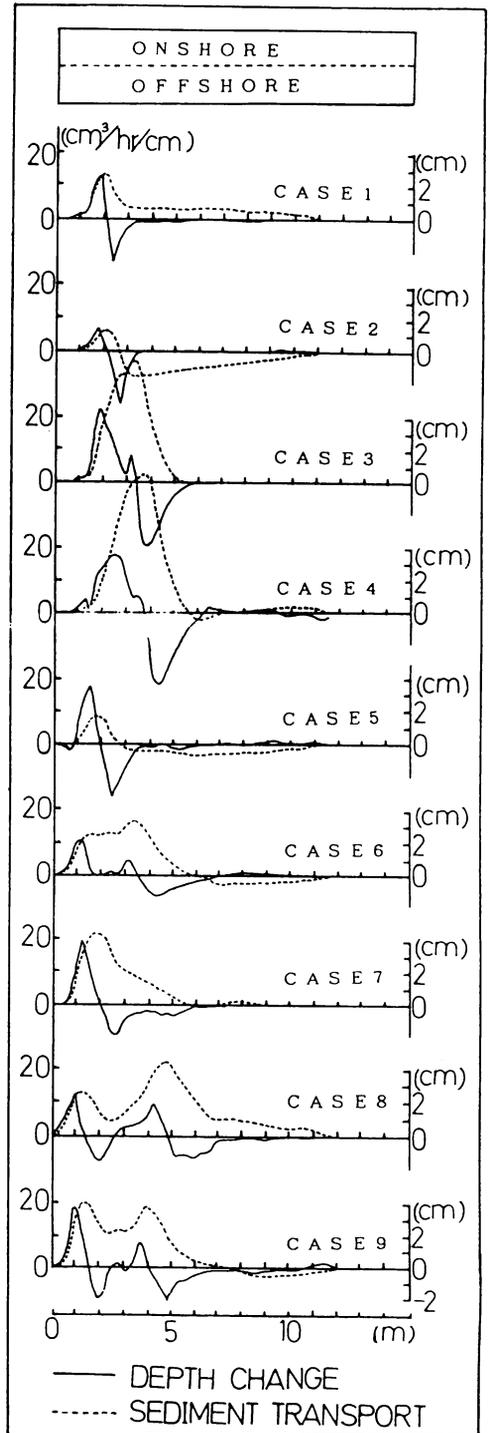


図11 各ケースにおける水深変化量と漂砂量分布図

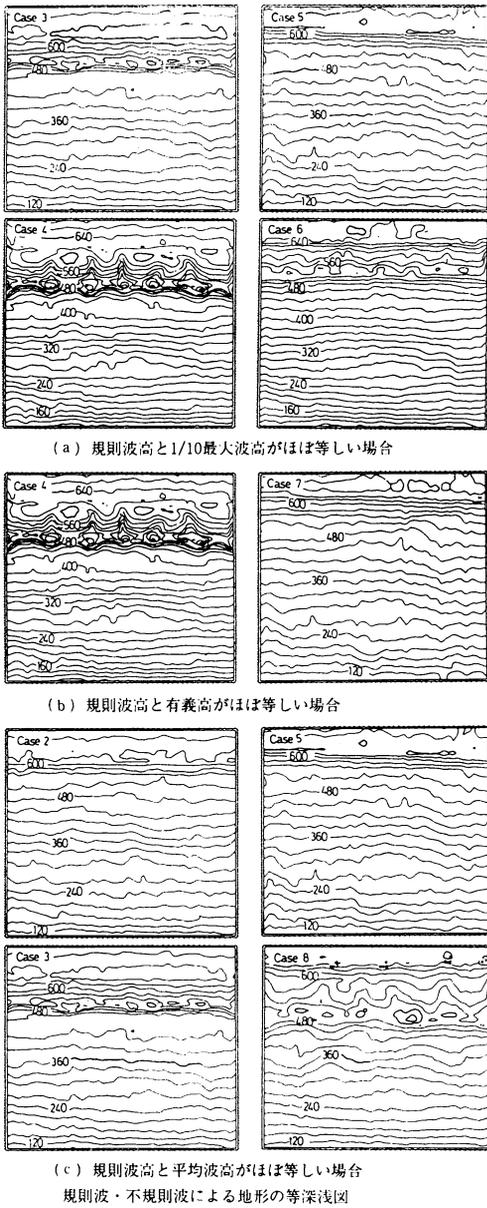


図12 規則波，不規則波による地形の等深線図

波の各代表波高を等しくした場合の三次元海浜地形を比較した結果，各々の代表波高では海浜地形の等価性を得ることは出来なかった。実際，不規則波中には砂州を発生させる波と前浜部に堆積を及ぼすような波とが共存しているとも考えられ，規則波の様に一つの波高で，不規則波による海浜地形と等価な地形を得ようとするには，無理があるとも言える。

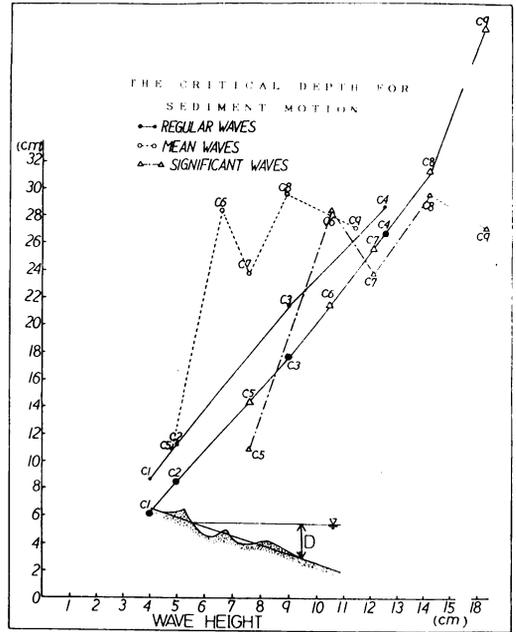


図13 砂の移動限界水深図

3. 2. 2 二次元海浜地形の代表波による比較

上記したように三次元的な海浜地形の代表波はまだ具体的には求められなかったが規則波による海浜変形の実験においてこれまでに得られた数多くの知見を利用するという観点に立ち，全46個線の平均としての二次元的な縦断面形状を用いて，砂の移動限界水深，汀線位置，前浜頂部の高さ等について，規則波高と有義波高，平均波高を指標として考察を行う。

3. 2. 2. 1) 砂の移動限界水深

初期断面と比較して，水深変化が現れた水深として砂の移動限界を図13に示す。図中には，佐藤・田中らによる表層移動限界¹¹⁾による計算値もあわせて示してある。実線で示す規則波を用いた場合の移動限界水深は，佐藤・田中の式によるものに比べ2 cm 程どのケースにおいても多くなっているが，大体の傾向において，合っているといえよう。不規則波による実験結果は，規則波によるものに比べるとかなりばらつきが大きくなっている。平均波で整理したものは，規則波のものに比べて大きめの値をとるものが多い。また計算値に比べても，全ケースにおいて大きい値をとっている。有義波高を用いて整理したものは，規則波の実験値のものに比べると，やや小さめの値を与えているが，計算値と比べると，その回りにばらついており，

不規則波による海浜変形の移動限界水深の計算を行うには、有義波を用いて整理する方が妥当な結果を与えることが分かる。また、図には示していないが1/10最大波を用いて整理した場合には、有義波高で整理したものとはほぼ類似した線が右にずれたものとなり、計算値に比べてかなり小さな移動限界水深となってしまう。

3. 2. 2. 2) 汀線移動について

図14に初期汀線位置からの汀線変動量を波作用時間を横軸に示してある。堀川・砂村等により提唱された海浜縦断面の分類に従えば、実験結果はタイプⅠ、タイプⅡ a, Ⅱ b 型のものだけが現れており漂砂量が全断面において沖向きとなり汀線後退に続くタイプⅢのものは再現できていない。この粗砂を用いた実験条件では、完全な浸食型の断面を得ることは難しく、細砂を用いた実験の必要性がある。ケース B 1 と B 2 は波作用 4 時間以降は汀線の変化も少なく、ほぼ平衡状態に達している。これは作用している波が小さい為に地形変化も大きくなく平衡状態に早く達しやすいと思われる。ケース B 3 と B 4 は、B 3 では 4 時間、B 4 では 8 時間において急激に汀線の移動が起きている。これは、沿岸砂州の一部が Welded-bar として汀線に接続し、更にこの部分を通しての砂輸送が汀線付近に行われ、見掛け上汀線が急激に沖側に前進したためである。不規則波のケースにおいては、規則波のものに比べてその変動量が小さいことが分かり、波作用 12 時間後の汀線変動量を平均波、有義波を用いて整理したのが図14 (b) である。これで見ると、平均波、有義波を用いて整理した場合どちらにおいても同じ不規則波の代表波高に対して、規則波の方における汀線

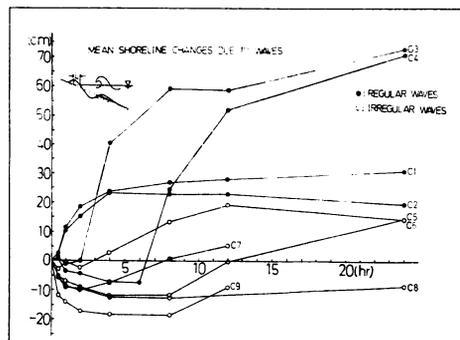
変動量大きいことが分かる。また実験を行った範囲では、規則波を用いた場合には、同じ代表波高のもとで汀線の後退が起きると言ったように、全く逆の結果を生ずる例が見られることに注意すべきであろう。

3. 2. 2. 3) 前浜の高さ

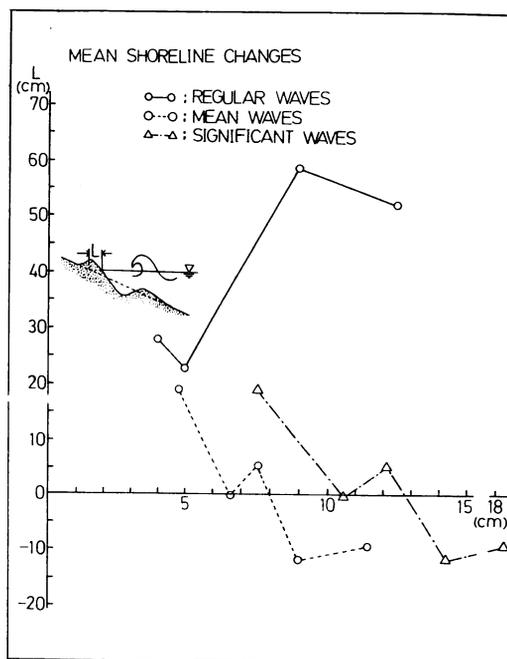
遡上波の特性を示すものとして前浜頂部の高さが考えられ、図15に示す。図より、汀線変動とは逆に平均波で、整理すれば不規則波の方が前浜頂部の高さは高くなっている。これは、不規則波の方が大きな遡上波が大きく含まれているためである。重なり合う波高領域は少ないが、有義波で整理した場合規則波によるものの方が若干小さいが、有義波のものに対応がとれそうである。

3. 2. 2. 4) 平均的な水深変化量について

既に幾人かの研究者らにより、不規則波による海浜変形は、規則波によるものに比べ小さく平滑化されているようであるという感想が述べられている。これについて示したのが、図16 (a) と図16 (b) である。図16 (a) は岸側と沖側において水深変化が表れた点としての移動限界間の水平距離をプロットしたもので



(a)



(b)

図14 汀線変動図

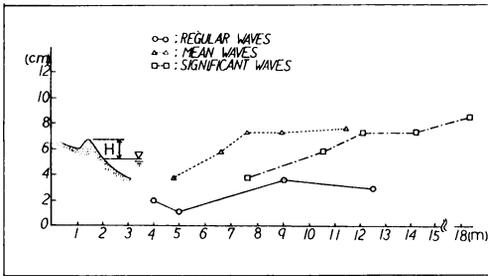
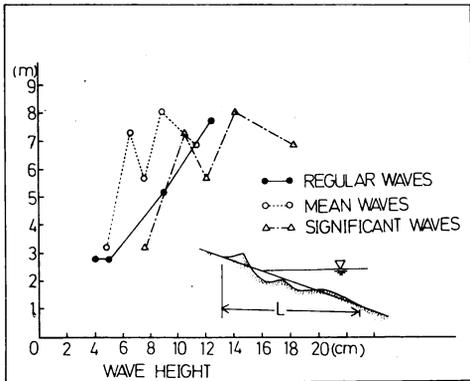
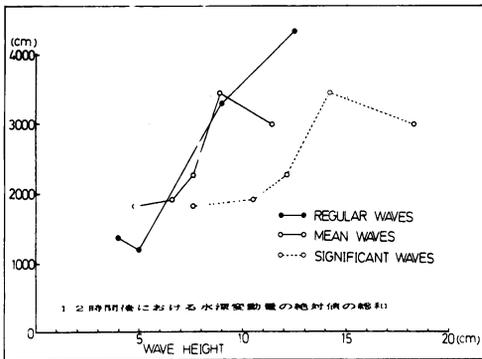


図15 前浜頂部の高さ



(a) 岸沖水深変動部の水平距離



(b) 水深変動の総和

図16

ある。規則波で整理したものは、平均波と有義波で整理したものの中に位置することが分かる。また図16 (b) は、各ケースにおける全計測点での初期地形に対する12時間後の水深変化の総和をプロットしたものである。これからデータのばらつきはあるが、平均波で整理した場合、水深変化量の総和(地形変動量)は、規則波のものとはほぼ重なり合っている。有義波で行っ

た場合は、規則波のものに比べかなり小さめの値をあたえている。よって、水深変化量の総和÷岸沖方向移動限界点間距離により、平均的な水深変化量を定義すれば、規則波による平均的な水深変化量は、平均波、有義波で整理した場合の不規則波の平均的な水深変化量に対し大きいことが分かる。

3. 3 実験シリーズC

上記の実験では粗い砂(0.6mm)を用いており、実験波にたいして大きな地形変化を得にくかった。よって、浮遊砂の現象が卓越し大きな地形変化が起こる実験を行うために、細砂(0.29mm)を用いて海浜模型を設置し規則波、不規則波を作用させ、4ケースの海浜変形について調べた。その結果についてこれまでにを行った粗砂による実験結果を加えて検討した。

3. 3. 1 代表波による比較

規則波の波高と不規則波の平均波高がほぼ等しい場合の細砂による海浜変形の等深線図を図17に示す。それぞれ、ケースC2とケースC5のものである。

規則波のものは弧状沿岸砂州で、不規則波のものは若干屈曲したステップ地形で特徴付けられ、地形の類似性はよくない。両ケースともに粗砂を用いたものに比べ、ステップ沖合にも地形の三次元性が表れている。

さらに移動限界水深については佐藤・田中の式によりほぼ妥当な値が求まることがわかっているが、移動限界水深を水深変化が現れる水深と定義した場合、この水深が初期海浜断面形状にも依存するのではないかと考え、種々のパラメーターを用いて整理した。そのうち、堀川、砂村によるC値を用いて整理したものが比較的よい関係を示していた。それを図18に示す。ここで、C値は次式で計算される。

$$\frac{H_0}{L_0} = C (\tan \beta)^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{0.67} \quad (3)$$

ついで、図19にそれぞれ同一波浪条件下における細砂と粗砂の場合の平均縦断面形状を示す。規則波の波高と不規則波の平均波高がほぼ等しい場合のものは上から2つと下から2つの断面形状であり、それぞれ同じ代表波高のもとで、平衡断面形状の類似性はよくない。上から3番目のものから下が不規則波を作用させ

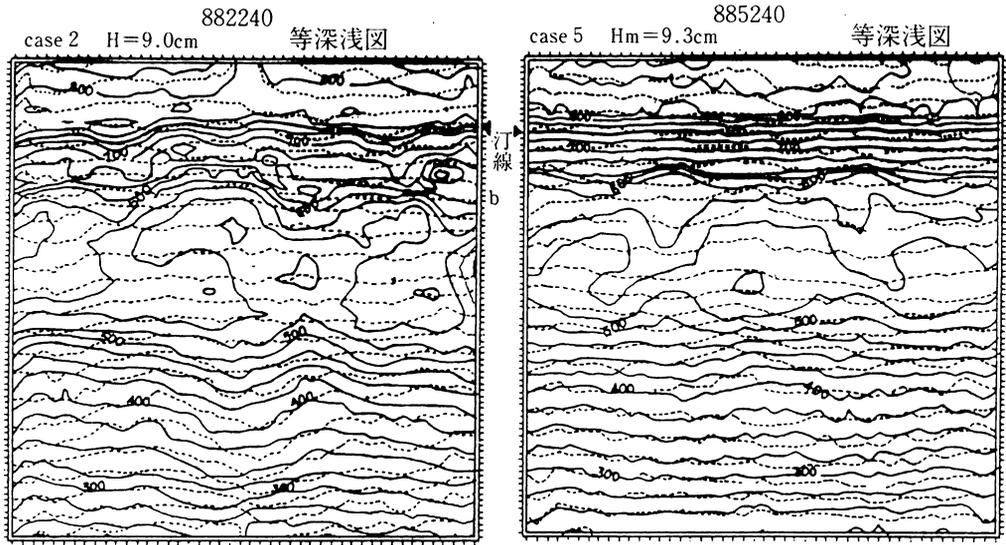


図17 等深线图 (細砂)

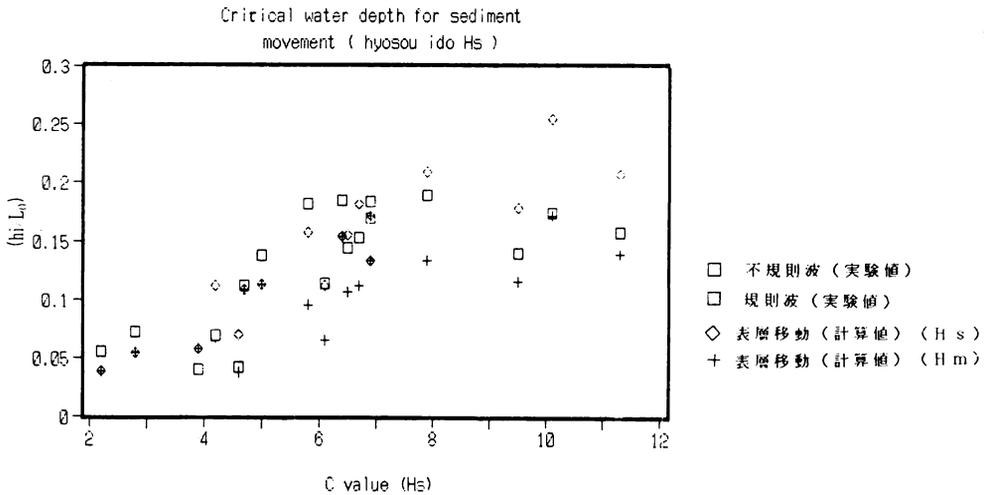


図18 移動限界水深

たときのケースであるが、細砂を用いた場合の方が地形変化の起きている範囲、またその地形変動量も大きい。これら断面形状はそれぞれ砂が前浜に堆積する範囲のものであるが、細砂を用いた場合の方が前浜の発達が進んでいる。これは細砂の方が砂移動が起きやすいことと関連していると考えられる。

4. 結論

実験を通して、次のような結論がえられた。

実験シリーズA

1) ほぼ等価なエネルギーフラックスを持つ、規則波、群波、不規則波を海浜模型に作用させると、それぞれの平衡海浜形状は異なる。

2) ケース1, 2, 3の結果より、不規則波による断面形状は、その他のタイプの波によるものと比べて、

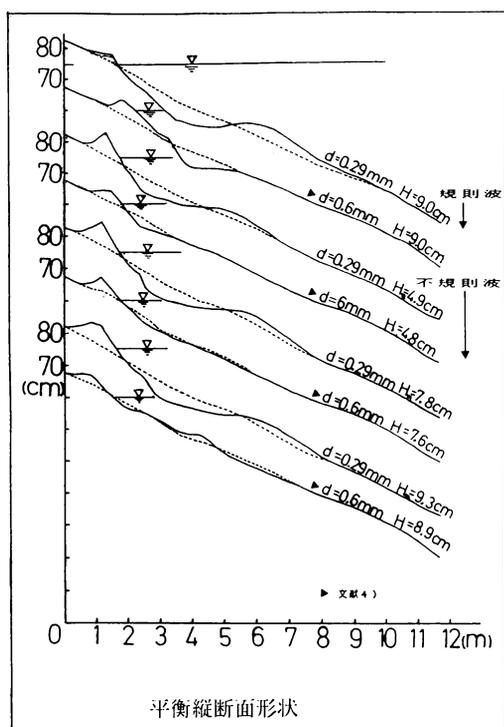


図19 平均地形

平滑化されており、これは波の不規則性の影響と考えられる。さらに、実験では、海浜流の強さは、不規則波によるものの方が、規則波によるものに比べかなり弱いことが観察された。

実験シリーズB

3) 三次元的な広がりをもつ平面水槽を用いて実験を行った結果、その平均的な海浜地形は、規則波に対し、不規則波の1/10最大波高、平均波高、有義波高を用いて整理しても、海浜地形の等価性は良くない。

4) 二次元的な、海浜地形の等価性を考える為に、沿岸方向46個線の平均としての平均縦断面形状を用いて種々の指標の比較を行った。これによれば、規則波による砂の移動限界水深はほぼ、平均波、有義波の間の代表波高を用いれば整理できそうである。

5) 汀線の変動に関しては、規則波のものに比べ不規則波によるものは、その変動量が小さい。さらにこれについては有義波、平均波のどちらを用いても、規則波のものと同じ結果を得ることはできず、同じ代表波高に対して規則波では汀線前進、不規則波では汀線後退というように逆の変動を示すことがある。

6) 漂砂現象の起きている区間として、岸側と沖側の水深変化の限界点間の距離について見ると規則波によるものは、平均波と有義波を用いて整理したものの間に存在する。また、その水深変化量の総和は平均波を用いた場合、ほぼ一致している。よって、平均的な水深変化量は、不規則波の有義波、平均波を用いて整理したものの方が規則波によるものに比べ小さい。

実験シリーズC

7) 細砂を用いた模型に対し、規則波の波高と不規則波の平均波高がほぼ等しい場の海浜地形の等価性は良くない。

8) 地形の三次元性が、碎波帯内、碎波帯外の両方で観察された。

規則波により、不規則波と等価な海浜断面形状を得るということについて考えれば、一つの規則的な波高をもつ波で不規則波による海浜断面を再現するという点について肯定的な結果を得ることはできなかった。ただし、二次元海浜断面を用いて個々の現象について見ると、平均波、有義波あるいはその間の代表波により整理できそうである。

謝 辞

実験に当たっては、卒業生の矢車美政、又野康治、泉誠司郎、北村司、有田征宏の諸氏にご協力を頂き、深湛の謝意を表します。さらに本研究の一部は科学研究費奨励研究による補助のもとで行われたことを記し深湛の謝意を表します。

参考文献

- 1) 大塚行則・三村信男・渡辺見：不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂、第31回海岸工学講演集 pp.321~325,1984.
- 2) 入江 靖・柴山知也・渡辺見：不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量、第32回海岸工学講演集 pp.316~320,1985.
- 3) 柴山知也・堀川清司：不規則波による底質移動量の数値実験、第40回年講演集、第2部、pp.305~306.
- 4) Dette, H.H. and K.Ueiczka: Velocity and sediment concentration fields across surf zones. 20th Conf. Coastal Eng., pp.1062~1076, 1986.
- 5) Hsiang Wang and S. S. Liang: Mechanics of Suspended Sediment in Random Waves. Journal of

Geophysical Research, Vol. 80, No 24, pp.3438~3494.

- 6) 佐藤慎司・杉浦志樹・渡辺 晃：不規則振動流中における砂移動機構と砂漣の消滅限界，第34回海岸工学講演集，pp.246~250, 1987.
- 8) 植村直登・服部昌太郎：合成波による海浜地形変化について，第40回年講講演集，第2部，pp.617~618.
- 9) Goldsmith, v., D. Bowman, K. Kiley, B. Burdick, Y. Mart and S. Sofer: Morphology and dynamics of crescentic bar systems 18th Conf. Coastal Eng., pp. 941-953
- 10) 榎木 亨：移動床模型実験の相似率，1984年度(第20回)水工学に関する夏期研修会講義集 Bコース
- 11) 佐藤昭二・田中則男：水平床における波による砂移動について，第9回海岸工学講演集，pp.95100.1962.
- 12) 西 隆一郎・佐藤道郎・中村和夫・矢車美政・又野康治：規則波・群波・不規則波を用いた三次元海浜変形実験について，第34回海岸工学講演集，pp.302~306, 1987
- 13) 西 隆一郎・佐藤道郎・又野康治・牧野一正・安易広宣：不規則波による海浜変形に関する実験的研究(第一報)，第35回海岸工学講演集，pp.462~466, 1988.

付 録

不規則波のエネルギーフラックスの算定について述べる。

規則波のエネルギーフラックスは次式で示される。

$$W = -\frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad (1)$$

これは、不規則波を構成する各成分波にも適用できると考えると、不規則波のエネルギーフラックスは、

$$W = \sum_{n=1}^{\infty} -\frac{1}{8} \rho g H_n^2 C_{gn}$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \rho g S(f_n) C_{gn}$$

ここで深海波近似を用いると、

$$W_{ran} = \sum_{n=1}^{\infty} 0.78 \rho g S(f_n) / f_n \quad (2)$$

スペクトル関数に、Bretschneider-光易型のもを $s(f_n)$ に用いると、

$$W_{ran} = 0.0854 \rho g H_{1/3}^2 \quad (3)$$

(3) 式を不規則波のエネルギーフラックスに算定に用いた。