

# 風波による海浜変形に関する実験

——特に沿岸砂洲の発生限界について——

土 屋 義 人\*・稲 田 和 則\*\*

## 1. 緒 言

従来、規則波による海浜変形に関する実験は数多いが、風波または不規則波による実験結果はほとんど発表されていない。特に、海浜変形に及ぼす波の不規則性の影響や規則波による実験結果の現地海浜への適用においては、なお不明な点が少なくないといえる。

一方、沿岸砂洲の発生限界は Johnson<sup>1)</sup> 以来研究されてきたが、岩垣・野田<sup>2)</sup> らによって波形勾配のみならず、波高・粒径比で表示されることが見出され、さらに Nayak<sup>3)</sup> はこれに底質の比重を付加して発生限界を表わしている<sup>4)</sup>。これらの研究は、すべて規則波の実験結果に基づいているが、最近堀川・砂村<sup>5)</sup> は同様な表示法で実験結果を再検討するとともに、わが国および諸外国の海岸における汀線変化との対応を考察し、現地海浜への適用について興味ある結果を発表している。

本研究では、風波による海浜変形の特性を究明するための第1歩として、4種類の実験砂を用いて、初期勾配が1/15の場合の2次元の海浜変形過程を実験的に考察し、主としてその過程における諸現象の究明と沿岸砂洲の発生限界について検討した結果を述べる。

## 2. 実験装置および実験方法

### (1) 実験装置

実験は宇治川水理実験所にある高速風洞水槽およびドーナツ型風洞水槽を用いて実施した。前者は、全長40m、幅0.8mおよび高さ2.3mの一部片面ガラス張りのコンクリート水槽で、水深は水平床部で1.5mとし、その端部に勾配1/15の模型海浜を長さ約20mにわたって設置したものであり、風波は100HPの送風機によって発生できるようになっている。後者はいわゆる循環式の風洞水槽であって、延長約100m、幅0.5m、高さ1.5m(実験する範囲では0.65m)のドーナツ型の風洞水槽であって、30HPの送風機によって風波が発生できるようになっている。

実験に用いた底質は、比重および中央粒径がそれぞれ2.65および0.073cmの木津川の砂、2.59および0.022cm

の豊浦標準砂、1.36および0.032cmの石炭粉と1.26および0.031cmのおがくずである。それらの粒度分布を図-1に示す。

### (2) 実験方法

最初の予備的な実験には、前述した高速風洞水槽を用いたが、吹送距離が短いために風波の周期が短く発生する波の波形勾配がかなり大きかったので、実験の大部分はドーナツ型風洞水槽で行った。それでもなお実験波の波形勾配が大きい

場合には、水槽の途中にフィルターを入れて高周波の波を減衰させ、所定の実験波にできるだけ近づけるようにした。この場合、実験波の選択は、規則波による沿岸砂洲の発生限界に基づいて決定したが、後述するように風波の場合にはその限界がかなり大きい波形勾配の範囲にあることがわかってきたので、種々の実験波を対象とすることにした。

海浜変形に伴う水理現象を解明するために、海浜形状の時間的变化をはじめ、砕波点の分布とその時間的变化、沖向きおよび岸向きの漂砂量分布とその時間的变化および海浜変形に伴う平均水面の変動などを測定することにした。これらの場合、砕波点の分布については個々の波の砕波点を測定し、また漂砂量の測定には、幅4cmの断面を沖方向と岸方向に2分した小さなトラップを用いた。なお、風波の測定には電気抵抗線式波高計を用い、ペンがき記録計およびデーター・レコーダーに記録させたが、一方平均水面の変動については、模型海浜上の数個所においてかなり長時間にわたる記録をデーター・レコーダーでとることにした。

以上の実験方法によって、海浜変形に関する合計27ケースの実験を行ったが、その実験条件および海浜変形の特徴などは表-1に示すとおりである。

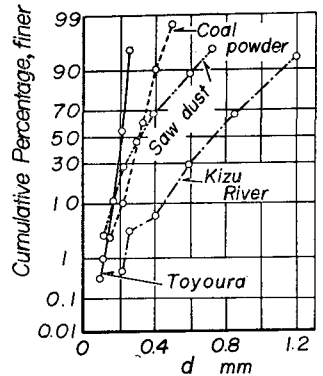


図-1 実験に用いた底質の粒度分布

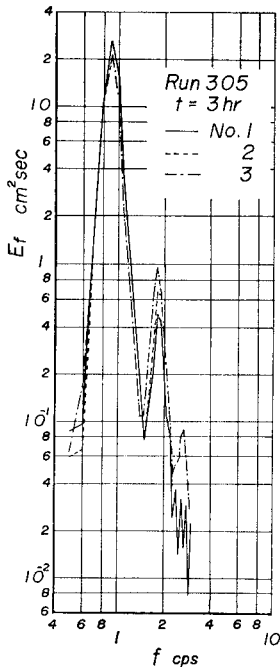
\* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

\*\* 正会員 工修 大阪府土木部港湾課

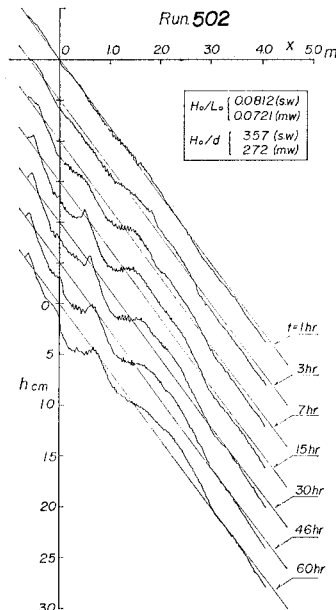
表一 実験条件および海浜変形の特徴

| Run | 粒径<br>$d_{50}$ cm | 比重<br>$\sigma/\rho$ | 有義波高<br>$(H_{1/3})_0$ cm | $(H_{1/3})_0/L_0$ | $(H_{1/3})_0/(\sigma/\rho-1)d_{50}$ | 海浜形状       |
|-----|-------------------|---------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------------|------------|
| 101 | 0.073             | 2.65                | 6.39                     | 0.0352            | 53.1                                | Summer     |
| 102 | "                 | "                   | 8.74                     | 0.0349            | 72.5                                | Transition |
| 103 | "                 | "                   | 9.15                     | 0.0364            | 75.8                                | Transition |
| 104 | "                 | "                   | 16.9                     | 0.0624            | 140                                 | Winter     |
| 201 | 0.022             | 2.59                | 2.08                     | 0.0168            | 59.2                                | Summer     |
| 202 | "                 | "                   | 6.60                     | 0.0352            | 189                                 | Summer     |
| 203 | "                 | "                   | 15.1                     | 0.0631            | 431                                 | Winter     |
| 204 | "                 | "                   | 4.26                     | 0.0233            | 121                                 | Summer     |
| 205 | "                 | "                   | 6.13                     | 0.0290            | 175                                 | Summer     |
| 206 | "                 | "                   | 7.21                     | 0.0257            | 206                                 | Summer     |
| 207 | "                 | "                   | 9.16                     | 0.0358            | 262                                 | Transition |
| 208 | "                 | "                   | 14.7                     | 0.0811            | 420                                 | Winter     |
| 209 | "                 | "                   | 18.7                     | 0.0755            | 534                                 | Winter     |
| 301 | 0.032             | 1.36                | 1.90                     | 0.0155            | 165                                 | Summer     |
| 302 | "                 | "                   | 3.07                     | 0.0205            | 267                                 | Summer     |
| 303 | "                 | "                   | 5.51                     | 0.0296            | 478                                 | Summer     |
| 304 | "                 | "                   | 8.24                     | 0.0328            | 715                                 | Transition |
| 305 | "                 | "                   | 14.8                     | 0.0856            | 1 280                               | Winter     |
| 306 | "                 | "                   | 11.0                     | 0.0785            | 957                                 | Winter     |
| 401 | 0.031             | 1.26                | 1.98                     | 0.0168            | 246                                 | Unknown    |
| 402 | "                 | "                   | 3.41                     | 0.0231            | 423                                 | Unknown    |
| 403 | "                 | "                   | 11.5                     | 0.0813            | 1 430                               | Unknown    |
| 501 | 0.022             | 2.59                | 5.57                     | 0.0717            | 161                                 | Winter     |
| 502 | "                 | "                   | 7.32                     | 0.0812            | 211                                 | Winter     |
| 503 | "                 | "                   | 10.3                     | 0.0923            | 297                                 | Winter     |
| 601 | 0.073             | 2.65                | 7.36                     | 0.0840            | 61.1                                | Winter     |
| 602 | "                 | "                   | 10.3                     | 0.0968            | 85.5                                | Winter     |

Run 101~403 はドーナツ型風洞水槽, Run 501~602 は高速風洞水槽による実験結果を示す。



図一2 実験波のパワースペクトルの一例



図一3 海浜形状の時間的変化の一例

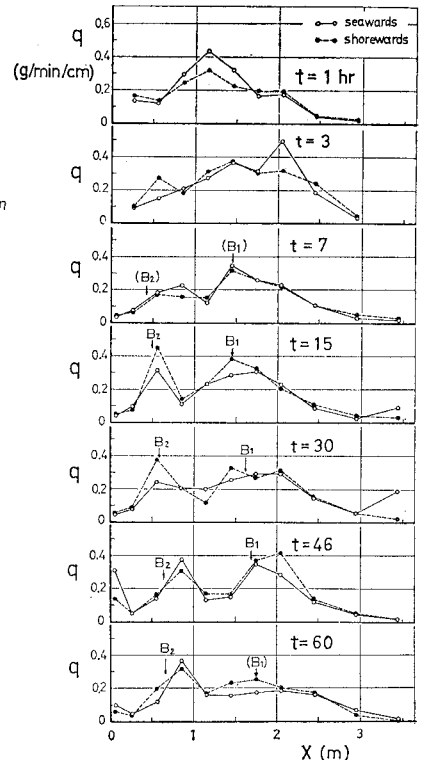
### 3. 海浜変形に伴う水理現象の特性

#### (1) 実験波の特性

図一2 はドーナツ型風洞水槽を用いた場合の実験波のパワースペクトルの一例であるが, かなり波高が大きくなっている, 非線型性の強い波となっている。前述したように, 波形勾配を小さくするために, フィルターを用いているが, その影響は高周波側にスペクトルの変形がみられ, 波高そのものがかなり減少する程度であることがわかった。そのほか, 各種の平均波高間の関係なども, 通常の風洞水槽による風波の場合とさほど変化しなかった, 風波をシミュレートした不規則波として海浜変形のように, 高周波の波が直接影響しない場合には十分実用性があるものと考えられた。

#### (2) 海浜の変形過程

図一3 には海浜形状の時間的変化の一例を示すが, この場合の沖方向および岸方向への漂砂量の分布とその時間的変化を図一4 に示す。図中  $q$  は漂砂量を表わし, また



図一4 海浜変形に伴う漂砂量分布の変化

記号,  $B_1$  および  $B_2$  はそれぞれ 図-3 にみられる砂洲の頂部の位置を示す。これから, 砂洲の発生過程がよくわかるであろうし, 継続時間  $t=15$  hr でほぼ安定した形状となり, 前浜頂部付近の形状やその平均勾配はほぼ一定値をもつようになる。このような過程における漂砂量分布の変化をみると, 変形の初期ではいそ波帯に1つの山をもつ分布となるが, 沿岸砂洲 ( $B_1, B_2$ ) が発生する  $t=7$  hr になると, この分布形に2つの山が現われてくる。しかも, それらは砂洲の頂部の位置に一致している。そして, 沿岸砂洲の発達やその沖方向への移動に伴って, 漂砂量分布はほとんどその形を変えずに沖方向へ移動し, やがて平衡状態に達すると, 沖方向および岸

方向への漂砂量の分布もほとんど等しくなることがわかる。このような過程は, 規則波の場合<sup>6)</sup> とよく似ている。

次に, 図-5 は海浜変形に伴う個々の波の碎波点の位置の分布を示し, その時間的変化を表わしたものの一例である。これらの結果から, 変形の初期においてある分布をしていたものが, 砂洲が発生しない場合には, 一般に岸側へ, また砂洲が発生する場合には沖側へと移動し, 碎波点が一個所に集中する傾向をとるようである。このことは, 規則波の場合のように, その碎波点がほとんど変化しないのに反して, 不規則波の特徴として個々の波の碎波点が異なり, それが海浜変形と互に密接に関

係することになるので, 一般に沿岸砂洲の形成がみられにくいことになるのであろう。

### (3) 海浜変形に伴う平均水面の変動

前述した水位変動の長時間の記録にローパスフィルターを用いて短周期の変動を除去し, 平均水面の変動のパワースペクトルを計算した一例を 図-6 に示す。このうち 図-6 (a) は海浜変形の初期 ( $t=3$  hr) における汀線より沖方向の3測点でのスペクトルを示しているが, これに対して 図-6 (b) は測点 No. 1 におけるスペクトルの海浜変形に伴う変化を表わしている。これらの図によれば, もっとも低周波側に現われているピークは水槽の固有振動数に対応するが, そのほかの顕著なピークは測点ごとに異なっている。この後者のピーク周波数と離岸距離との関係

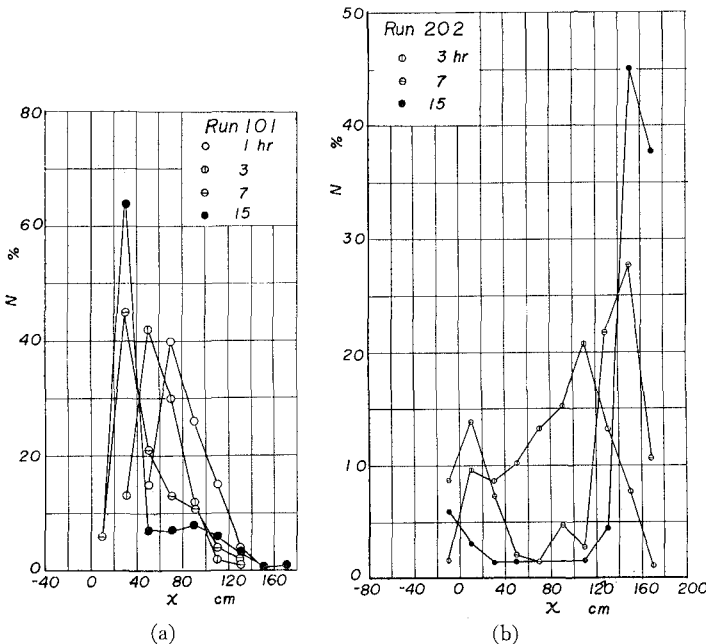


図-5 碎波点の位置の分布とその時間的変化

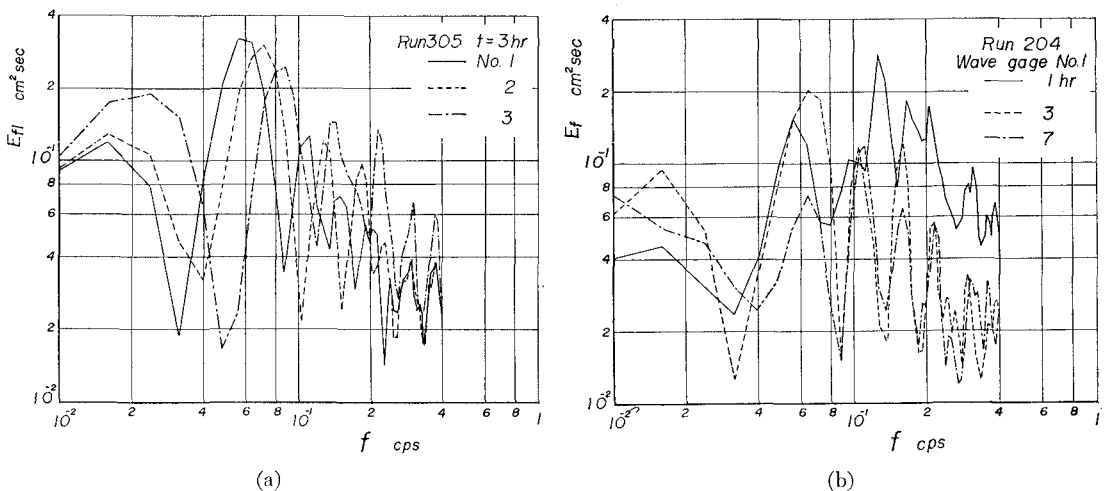


図-6 平均水面の変動のパワースペクトル

を検討した結果では、すでに大潟海岸において著者ら<sup>7)</sup>が指摘したように、離岸距離の整数倍に対応した周期の波が増幅されて測定されたことが再確認された。図-6(b)に示したように、このような水位変動スペクトルは、海浜変形に伴って大きく変化し、しかもそれは変形の初期において著しいことがわかる。これは海浜変形に伴って、風波の長周期波成分の反射特性も変化していることを示すものであって、海浜形状との関係をさらに詳細に検討する必要がある。

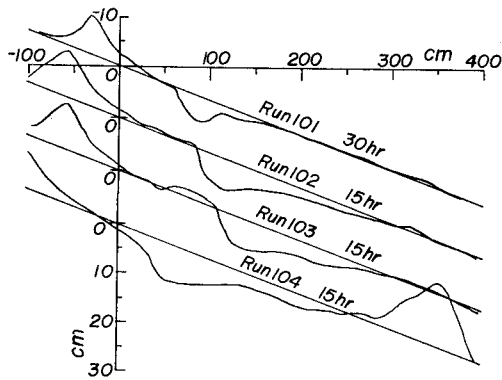
#### 4. 平衡海浜形状と沿岸砂洲の発生限界

以上、風波による海浜変形に関する若干の水理現象に

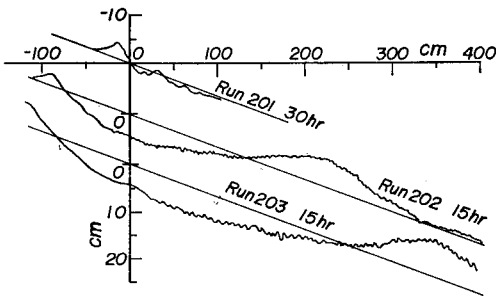
ついて考察したが、ここでは著者らの実験によって得られた海浜の形状について検討することにする。

##### (1) 平衡海浜形状

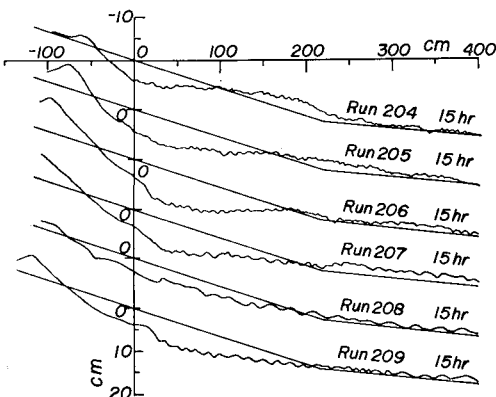
風波による海浜変形において、その平衡海浜形状を著者らの実験結果について示すと、図-7のようになる。ただし、ここで平衡海浜形状としては、図中に示す経過時間によって形成されたものを図示してあるので、必ずしもすべて平衡状態に達しているとは限らない。これらの結果からすると、海浜形状は波形勾配のみならず波高・底質粒径比(比重を付加したものも含めて)によって大きく変化するし、またおがくずによる実験結果は底質の運動機構の相違が影響してそのほかのものと非常に異



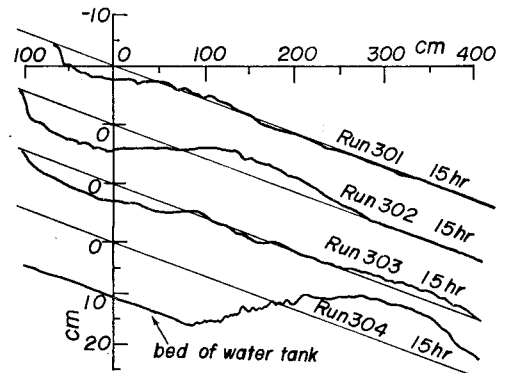
(a)



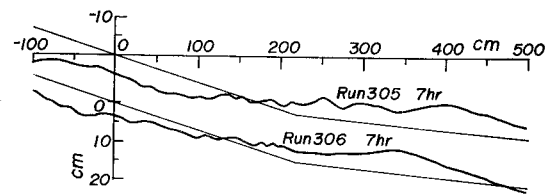
(b)



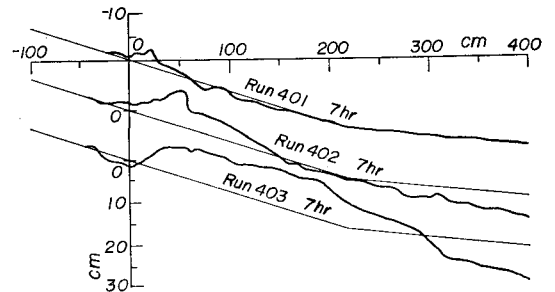
(c)



(d)

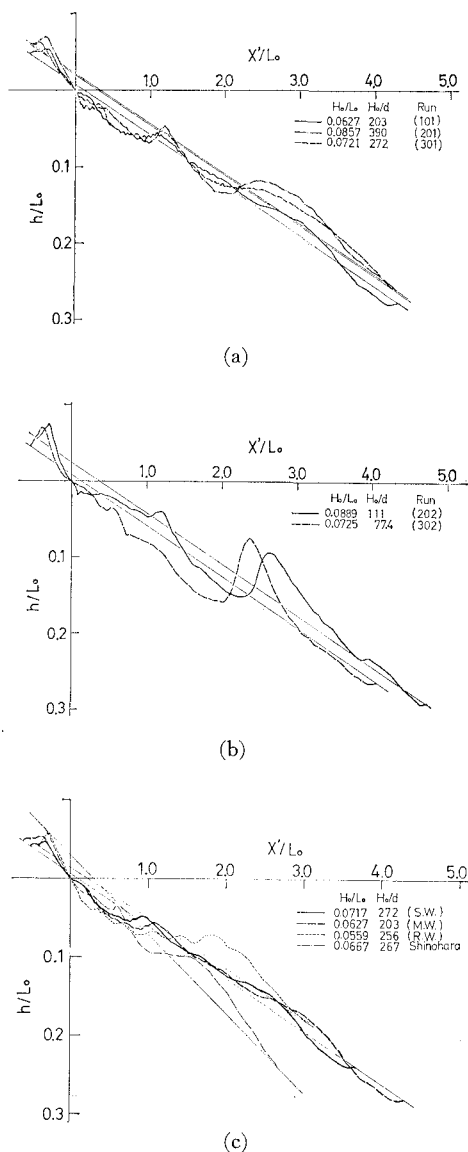


(e)



(f)

図-7 風波による平衡海浜形状



図—8 風波による平衡海浜形状の無次元表示

なることがわかる。このことからすると、Nayak<sup>9)</sup> による実験は同様なナッツの皮かくを用いていることから、たとえばかれの沿岸砂洲の発生限界には若干問題があるように思われる。

図—8 は規則波の場合について、通常行われるように、有義波の沖波波長を用いて平衡海浜形状を無次元表示したものであって、図—8 (c) には篠原ら<sup>9)</sup> による規則波 (R.W.) の実験結果との比較を示す。この図には、風波の表示法として、有義波 (S.W.) および平均波 (M.W.) を用いているが、規則波による場合とかなりの相違があることがわかる。

## (2) 沿岸砂洲の発生限界

海浜形状は通常正常海浜と暴風海浜とに区別され、前

者はステップ状の海浜であるのに対して後者は沿岸砂洲の存在で特徴づけられてきた。そして、これらがそれぞれ堆積型および侵食型の海浜と密接に関係づけられ、その限界が前述したような沿岸砂洲の発生限界として検討されてきたのである。しかし、これら両者の関係は必ずしも明確でなく、堀川・砂村ら<sup>9)</sup> は海浜変形のタイプを漂砂の移動方向から分類して、3つのタイプを提案し、その発生限界を詳細に調べて有用な表示を試みている。風波による海浜変形の場合にも、この点は全く同様な考察が必要であるが、ここでは風波による沿岸砂洲の発生限界が規則波の場合とどのように対応するかを従来の結果と比較考察することにする。

この場合、図—7 に示した海浜形状において、沿岸砂洲が発生しているかどうかの判定はきわめて困難であるが、いちおう海浜の断面形状とともに、その時間的変化を考慮して、沿岸砂洲の発生および不発生を区別して正常および暴風海浜とし、また、区別できなくて遷移状態にあるものはそのまま分類することにした。表—1 には、このようにして分類した海浜形状が図—9 との対応のもとに一括表示してある。ただし、おがくずを用いた場合は、前述した理由から、沿岸砂洲の発生限界の考察には用いないことにした。

このような比較検討を行う場合に、風波の特性の表示が問題であるが、ここでは有義波および平均波の両者を用いて考察することにする。図—9 は有義波を用いてその沖波の波形勾配  $(H_{1/3})_0/L_0$  および波高・粒径比  $(H_{1/3})_0/(\sigma/\rho-1)d_{50}$  を求めて、規則波による沿岸砂洲の発生限界と比較した結果である。実験条件の制約のため、実験結果は十分でなく、 $(H_{1/3})_0/(\sigma/\rho-1)d_{50} \geq 10^3$  の範囲について検討することはできないが、規則波の場合に比べて沿岸砂洲が発生しにくく、その限界の波形勾配はかなり大きくなることが見出され、実験の範囲内ではその波形勾配は  $(H_{1/3})_0/L_0 \approx 0.04 \sim 0.05$  程度である。そして、それは Johnson<sup>1)</sup> によって与えられた限界値  $0.025 \sim 0.03$  より大きく、また Nayak<sup>9)</sup> の限界曲線とは全く異なった傾向を示し、岩垣・野田らのそれよりもかなり大きくなることがわかる。特に、 $(H_{1/3})_0/(\sigma/\rho-1)d_{50}$  の値が比較的大きい範囲では、その傾向が著しいようである。

一方、図—10 に示す比較は、風波の特性として有義波の代りに平均波を用いた場合である。図—9 と同様に、波形勾配  $(H_m)_0/L_0$  と波高・粒径比  $(H_m)_0/(\sigma/\rho-1)d_{50}$  で図示してあるが、これから  $(H_m)_0/(\sigma/\rho-1)d_{50} \leq 400$  の範囲では、Johnson<sup>1)</sup> の与えた限界値にほとんど一致する。それ以上の領域では岩垣・野田ら<sup>9)</sup> の限界曲線よりかなり大きい、波高・粒径比の影響が現われるような傾向を示す。このような比較からすれば、 $(H_m)_0/(\sigma/\rho-1)d_{50}$  の値が比較的小さい範囲では、有義波よりも平均波を用いたほうが、規則波による沿岸砂洲の発生限界に近くな

るといえる。

前述したように、波高・粒径比が大きい場合に對しては、沿岸砂洲の發生に関する実験結果がないので、その限界を考察することはできない。したがって、ここでは堀川・砂村ら<sup>5)</sup>によって示されたわが国および諸外国の10個所の海岸について調べた波浪および底質の特性と汀線変化の実態表に加えて、著者らによる東海村海岸、大湊海岸、越中宮崎海岸および遠洲灘海岸などの推定結果を用いて、現地海岸における汀線変化との対応を検討する。図-9および10には、それらの結果を比較して図示してある。すでに述べたように、沿岸砂洲の發生・不發生と汀線の後退・前進とは必ずしも一致しないかもしれないが、多くの場合沿岸砂洲が發生している海岸が侵食海岸となっている場合が少なくない。図-9および10には、実験結果と従来の規則波による發生限界とを考慮して、 $(H_{1/3})_0/(\sigma/\rho-1)d_{50}$  または  $(H_m)_0/(\sigma/\rho-1)d_{50}$  の小さい範囲を対象とし、沿岸砂洲の發生限界曲線を太い実線で描くと、図に示したようになる。いま、現地海岸の資料に基づいて汀線の後退・前進の限界へとこれを延長すると、両図にみるように、沿岸砂洲の發生限界と比較的よく結びつくことがわかる。したがって、沿岸砂洲の發生限界に対してなお資料は不十分であるが、現在までの考察から図-9および10に示した太い実線でその限界を表示することにした。

## 5. 結 語

以上、風波を用いて不規則波による2次元の海浜変形に関する若干の実験を行い、海浜の変形過程における二、三の水理現象をとりあげて考察したのち、主として沿岸砂洲の發生限界に関する検討を規則波の場合との比較から行った。風波による海浜変形には、不規則波としての特性よりも、むしろ個々の波による海浜変形への寄与のほうが重要であるとも考えられるので、比較的大きい個々の波による海浜変形を考察して、沿岸砂洲ができにくい原因をさらに追求していくつもりである。

最後に、本研究の実施にあたり、熱心にご助力いただいた山口正隆助教授および芝野照夫助手の労に謝意を表す。なお、本実験の一部は元大学院学生 吉岡 茂氏(現株式会社大林組)の努力によるものであることを明記して感謝する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) Johnson, J. W.: Scale Effects in Hydraulic

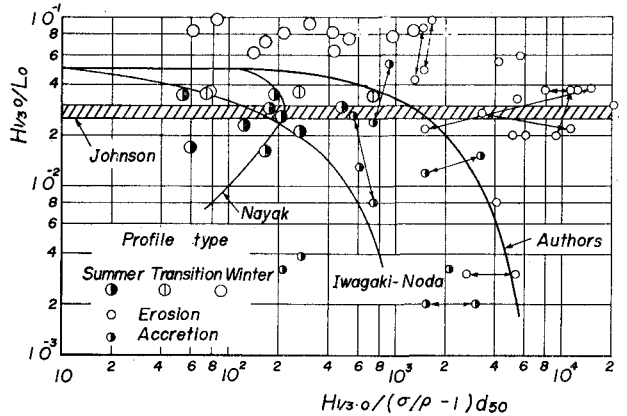


図-9 風波による沿岸砂洲の發生限界 (1)

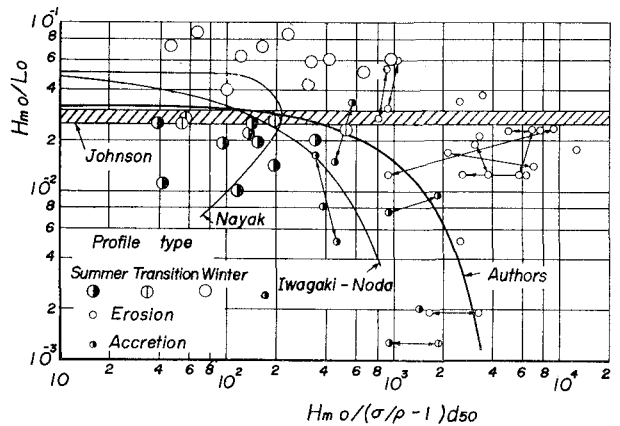


図-10 風波による沿岸砂洲の發生限界 (2)

Models Involving Wave Action, Trans. A.G.U., Vol. 30, pp. 517-525, 1949.

- 2) Iwagaki, Y. and Noda, H.: Laboratory Study of Scale Effects in Two-Dimensional Beach Processes, Proc. 8th Conf. on Coastal Engg., pp. 194-210, 1963.
- 3) Nayak, I. V.: Equilibrium Profiles of Model Beaches, Univ. of California, Berkeley, Tech. Report, HEL-2-25, 1970.
- 4) 田中則男・新保 修: 移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について, 運輸省港湾研報告, 第12巻, 第1号, pp. 3-57, 1973.
- 5) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三: 波による海浜変形に関する一考察, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 357-363, 1973.
- 6) 岩垣雄一・榎木 亨: 海浜の平衡勾配と碎波による砂移動に関する実験, 第2回海岸工学講演会講演集, pp. 99-105, 1955.
- 7) 土屋義人・山口正隆・芹沢重厚: 長大棧橋を利用した容量型波高計群による波浪観測について, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 531-534, 1973.
- 8) 篠原謹爾・椿東一郎・斎藤 隆: 漂砂と波の特性に関する研究, 第5回海岸工学講演会講演集, pp. 61-64, 1960.