

港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

第 5 卷 11 号

Vol. 5 No. 11

(通卷第 33 号)

海岸構造物の堤脚部洗堀に関する研究 (第 1 報)

一直立壁堤脚部の波による二次元的洗堀実験 — 佐藤昭二・田中則男・入江 功

1966年6月

運輸省港湾技術研究所



海岸構造物の堤脚部洗掘に関する研究（第1報）

—— 直立壁堤部の波による二次元的洗掘実験 ——

目 次

英文概要	1
1. 緒 言	2
2. 実験方法	2
(1) 実験装置	2
(2) 実験方法	4
(3) 実験の範囲	5
3. 正常海浜における洗掘	6
(1) 一般的傾向	6
(2) 洗掘機構	7
4. 暴風海浜における洗掘	18
(1) 一般的傾向	18
(2) 洗掘機構	19
5. 考 察	27
(1) 堤体設置の海底断面に及ぼす影響	27
(2) 洗掘深の極大、又は最大値のおこる位置	29
(3) 最大洗掘深の最大値	30
(4) 洗掘孔の形状について	30
6. あとがき	32
参考文献	33

Study on the Scouring at the Foot of Coastal Structure (1st Report)

— Experimental Study on the Scouring at the Foot of Vertical Wall due to Waves —

Shoji Sato *

Norio Tanaka **

Isao Irie **

Synopsis

The scouring around the coastal structure is one of the important problems for the design and construction of the structure.

But it remains unclear and so, the field engineers depend on their experience to protect the structure against the damage by scouring.

Then, authors have taken up an extensive study on scouring containing field observations and model experiments.

At the first step, the scouring at the foot of vertical wall was tested in the wave channel with waves of 8.7, 26.0 and 42.0 cm in height and 1.3, 3.0 and 5.1 sec in period.

A vertical wall was installed at various points of the equilibrium profile for each waves.

The results are summarized as follows ;

- 1) The phenomena of scouring are classified into 4 groups from the viewpoint of the time change of scouring depth.
- 2) The change of return flow along the bottom and the occurrence of reflected waves due to the wall play important roles in the phenomena of scouring at the foot of wall.
- 3) The maximum scouring appears when the wall is installed near the plunging point of breaking waves.
- 4) The distribution of scouring depth along the beach profile is of V shape for the normal beach and of W shape for the storm beach.

* Chief, Sand Drift Laboratory, Hydraulics Division.

** Research Engineer, Sand Drift Laboratory, Hydraulics Division.

海岸構造物の堤脚部洗掘に関する研究（第1報）

— 直立壁堤脚部の波による二次元的洗掘実験 —

佐藤 昭 二 *

田 中 則 男 **

入 江 功 **

1. 緒 言

防波堤や海岸堤防などの海岸構造物の設計や施工にあたって考慮されねばならない重要な要素の一つは堤脚部の洗掘であり、それは又、既設構造物崩壊の主要因の一つでもある。しかしながら、荒天時における現地観測の困難さと現象の複雑さのためにこれに対する研究は少なく、積極的にこの問題に取り組んだ研究は、楳木、川崎による海岸堤防堤脚部の洗掘に関する実験的研究のみのものである。彼らは、二次元造波水路で出来る平衡勾配の種々の海浜の位置に直立壁を設けて波を作用させ、洗掘深さの時間的変化、洗掘深さと堤脚水深、波形勾配、粒径波高比などの関係や洗掘機構について論じている。

しかし、その実験範囲も後述するように、ある限られた範囲にとどまっている。

本間、堀川らは、潜堤に関する研究において、潜堤の法先洗掘について新潟西海岸の実例と対比しながら二次元的実験研究を行い、洗掘水深と潜堤の設置水深及び

堤高との関係や洗掘機構などについて考察を加えているが、その実験範囲も限られている。

以上のほか、潮汐を加えた場合の Russel, C.H and Sir C. Inglis による実験もあるが、それは一種類の波について行った実験結果の発表にとどまっている。

以上のような現状にかんがみ、著者らはここ数年来、この洗掘全般の問題に取り組んで来ているが、その手初めとして、二次元造波水路で行った直立壁堤脚部の洗掘実験結果を報告する次第である。

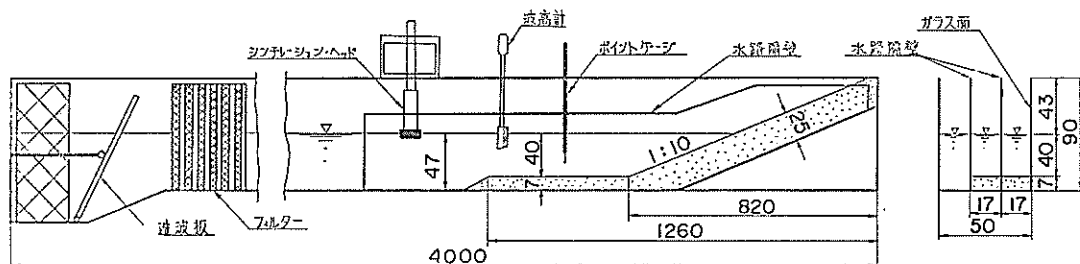
本実験は、正常海浜と暴風海浜の平衡模型海浜を作り、その種々の位置に直立壁を設けて実験を行い、洗掘機構に対する両者の相違、洗掘過程及び縮尺効果に考察を加えたものである。

2. 実験方法

2-1 実験装置

実験には、高さ 90cm 長さ 40m の中型造波水路と高さ 2.5m 長さ 100m の大型造波水路を用いた。

図-1 中型造波水路模型配置図



(単位 cm)

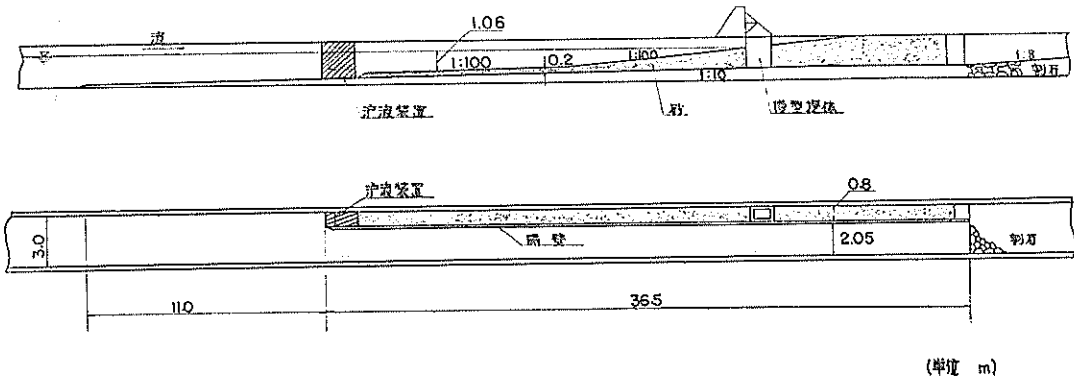
* 水工部漂砂研究室長

** // 漂砂研究員

中型造波水路は片面ガラス張り他面コンクリート壁で図一に示すように、水路の一端に 1/10 勾配の固定床を取り付け、更に鋼板隔壁でその幅を 3 つに仕切り、ガラス側側と、中央の幅 17cm の所を用いて実験を行った。まず、実験砂を 勾配部は 25~30cm、その前の平坦部は

7 cm の厚さに敷きならべ、水深はその平坦部の砂面上 40cm とした。造波装置はフラッター式で、その前には金網製の沓波装置がある。又、水路壁には簡単な測定台車があり、それにポイントゲージや波高計などを取り付けた。

図一 大型造波水路模型配置図



大型造波水路の水底には 1/100 の勾配がついているが、その一端をコンクリート壁で仕切り、幅 2.05 m の部分には消波装置をもうけ、幅 80 cm の所に砂を敷いて実験を行った。中型水路の場合と同様に、実験砂をその水路端から 1/10 勾配で敷き、その前面は 20 cm の厚さで 1/100 勾配になるように砂を敷いた。造波装置はペンデュラム型であり、幅 80 cm の部分の先端には金網式の沓波装置を取り付けた。又、波高計や大型ポイントゲージを取り付けることの出来る台車が水路についている。

図二 中型実験用直立壁

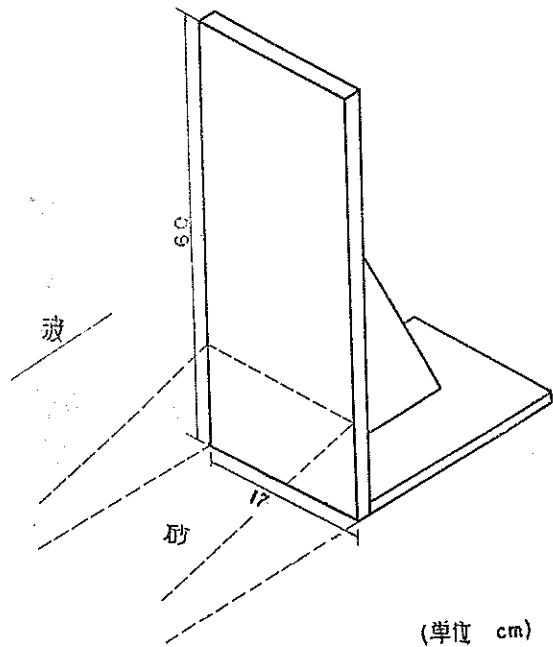


図-4 大型実験用直立壁

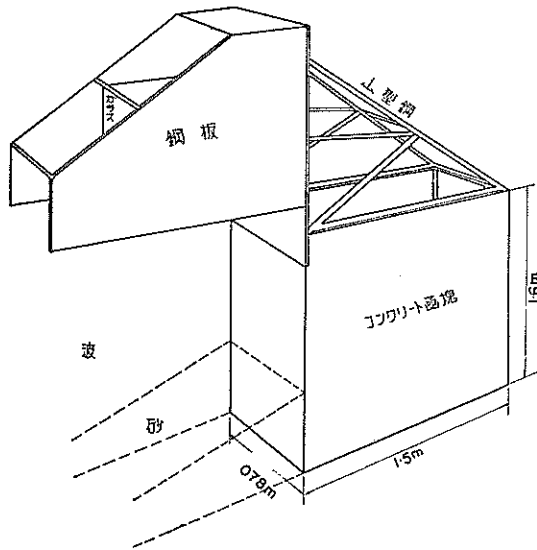
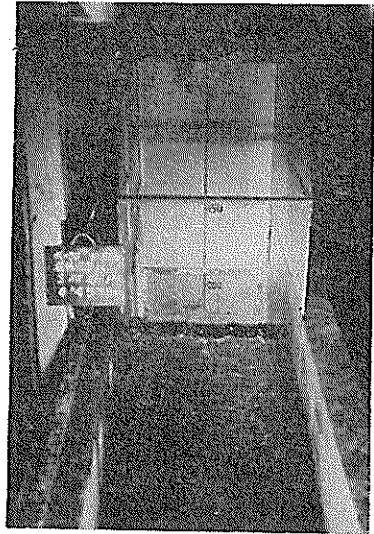
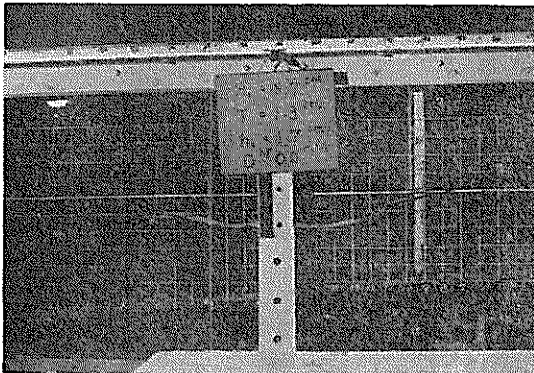


写真-2 大型造波水路の一部



直立壁としては中型造波水路に対しては、図-3に示す1寸厚杉板壁を、大型造波水路に対しては、図-4に示ように、コンクリート函塊と越波防止用鋼製カバーよりなる壁体を取り付けた。写真-1及び2はそれぞれ中型及び大型造波水路の一部で、堤体に波を作用させているところを示す。

写真-1 中型造波水路の一部



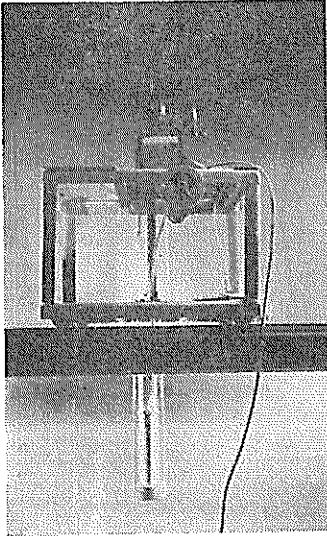
2-2 実験方法

実験は、まず上述のように砂を敷いた後に一定の波を15~20時間作用させて平衡勾配を作る。次に、任意の位置の砂を掘り起こして直立壁を取り付ける。このとき、直立壁の前側の勾配を出来るだけこわさないようにし、多少こわれた部分は元通りにして砂をつき固めておく。それから、同じ波を作用させ、時々波を止めて、海底勾配を水路の中心線上に沿ってポイントゲージで測定する。一般に洗掘は初めが急激に起こるので、測定時間間隔を始めは数分とし、次第にその間隔を長くして行き最後は1~2時間とした。このようにして、洗掘形状及び深さが定常状態になるまで波を作用させた。その時間は大体1ケースにつき6~10時間であった。

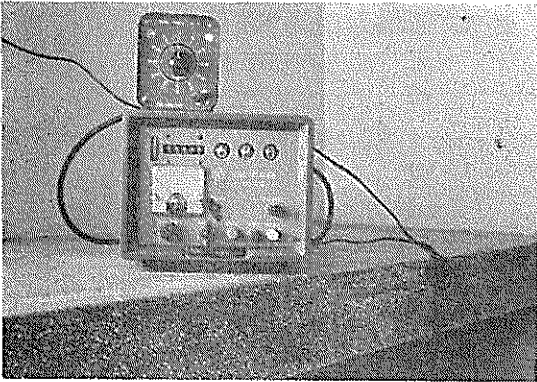
波の測定は、中型造波水路では1mmごとの接点がついた階段抵抗型を、大型造波水路では抵抗線型波高計を用い、それぞれ増幅器を通してペンオッシログラフに記録させた。

又、洗掘された砂の移動方向を知るためにアイソトープ砂を時々使用した。アイソトープ砂としては、実験砂の表面にAu-198を吸着せしめたもの及びCr-51のガラス砂を用い、その分布は写真-3に示すようにシンチレーションプローブを台車に取り付けその先端が砂面上1cmになるようにし、写真-4に示す放射線計数用カウンタに接続して計測した。この場合も、計測は模型浜の中心線にそって行った。

写真—3 アイソトープ砂検出器



写真—4 放射線計数用カウンター



以上の外、直立壁前面における波の状況や洗掘状況を時々写真撮影した。

2—3 実験の範囲

榎木・川崎は、直立壁の堤脚部の洗掘深さ Δh をとりあげ、関係する要素を用いて無次元を作り、粘性の効果を省略して次の式を得た。

$$\frac{\Delta h}{H_0} = (t/T, H_0/L_0, d/H_0, h_0/H_0) \quad (1)$$

ここで、 H_0, L_0 は相対沖波波高及び波長、 T, t, d 及び h_0 はそれぞれ波の周期、波の作用時間、底質粒径及び堤体の設置初期水深である。しかし、砕波帯内の海浜形状は、特に沿岸砂洲のある断面においては、汀線からの距離と共に一様に変化することは稀である。従って、同じ水深であっても、汀線からの距離が異なれば波の作

用力が異なり Δh も変る筈である。従って、堤体の設置初期水深の代りに汀線から沖向きに測った距離 X をとり、それを汀線から砕波線までの距離 X_b で割った無次元量 X/X_b を (1) 式の h_0/H_0 の代りに用いた次式によって実験値を整理した方がよいと思われる。

$$\Delta h/H_0 = (t/T, H_0/L_0, d/H_0, X/X_b) \quad (2)$$

実験に用いた波の諸元は表—1 に示す通りである。

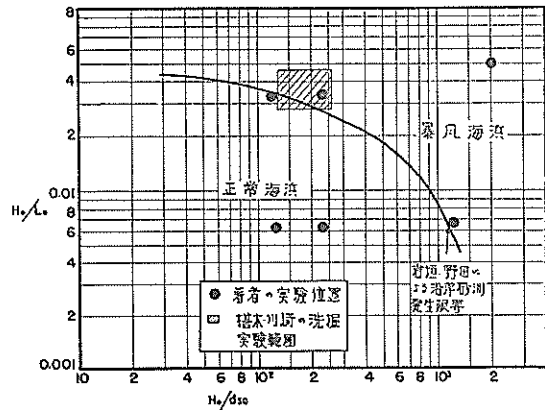
又、この実験範囲を岩垣、野田による模型実験値に對す

平衡勾配	H_0/L_0	H_0 (cm)	T (sec)	d (mm)	H_0/dm	dm/H_0	波の装置
正常海浜	0.0062	8.7	3.0	0.69	1.3×10^2	0.0079	中型
		8.7	3.0	0.38	2.3×10^2	0.0044	大型
暴風海浜	0.0065	26.0	5.1	0.21	1.2×10^3	0.00081	大型
	0.033	8.7	1.3	0.69	1.3×10^2	0.0079	中型
		8.7	1.3	0.38	2.3×10^2	0.0044	大型
	0.051	42.4	2.3	0.21	2.0×10^2	0.0005	大型

H_0, L_0 は相対沖波の諸元、 d は実験砂の平均粒径、 dm は中実粒径である。

表—1 実験に用いた波の諸元

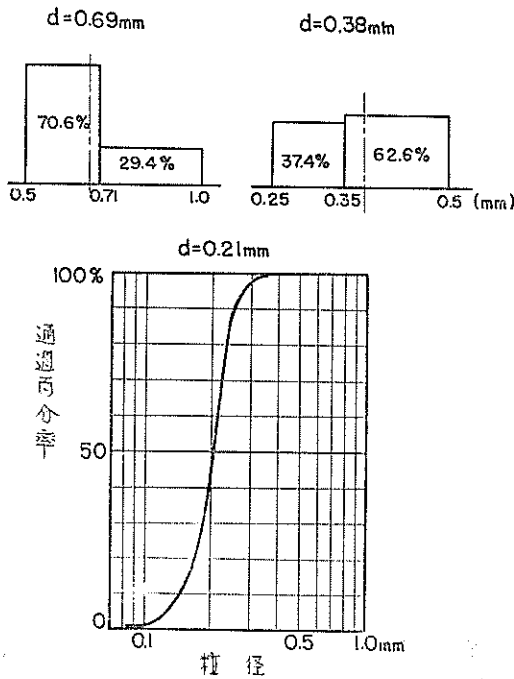
図—5 模型実験値に対する沿岸砂洲の発生限界と実験範囲



る沿岸砂洲発生限界曲線と比較すると図—5 のようになる。この図を見ると、 $H_0/L_0=0.0065$ で $H_0/d=1.2 \times 10^3$ に対する平衡勾配は、それぞれ正常海浜及び暴風海浜であるべきであるが、後述の図—8 及び図—28 に示すようにそうはならない。しかし、この限界曲線がその線の近くでは厳密なものでないことから、当然このようなことはあり得るものである。又、同図には、榎木、川崎の洗掘実験範囲も示してある。実験砂の粒度分布は図—6 に示す。

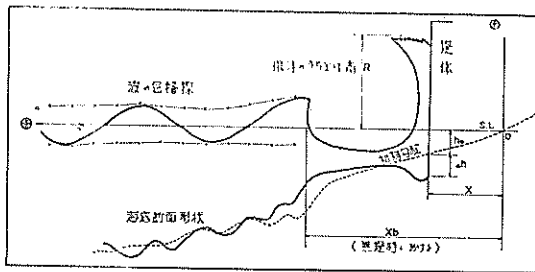
なお、堤体設置水深 h_0 、洗掘深さ Δh などの記号の取り方をモデル的に示したものが図—7 である。又、砕波点を正確に定めることは困難であるが、この実験では波の前面が、ほとんど垂直になる所を砕波点にとった。

図-6 実験砂の粒度曲線



実験砂の粒度曲線

図-7 記号のとり方



3. 正常海浜における洗掘

3-1 一般的傾向

正常海浜の任意の位置に直立壁を設置し、長時間波を作用させると洗掘深はある一定値すなわち最終洗掘深に近づくが、それまでに至る洗掘の時間的変化の眼点から洗掘の形式は次のように分類することが出来る。

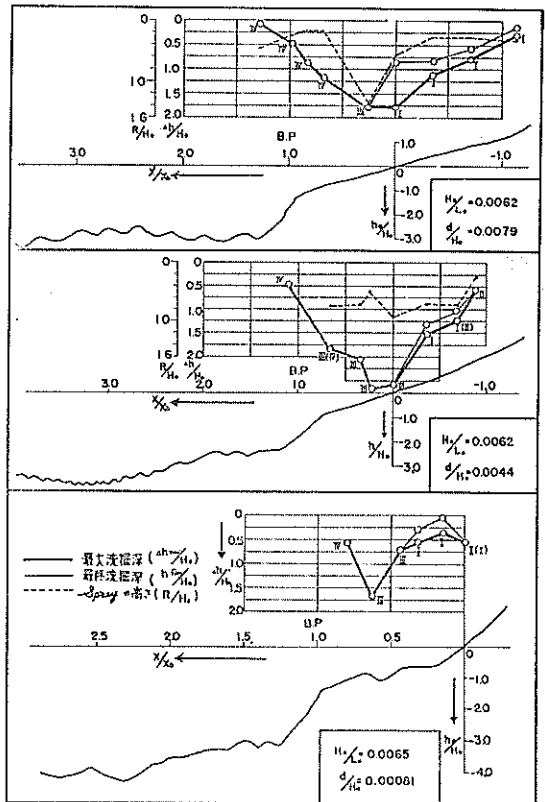
- I 急激に掘れた後、埋まる。
- II 急激に掘れた後、そのままの状態が続く。
- III 急激に掘れた後、徐々に掘れる。
- IV 初めから徐々に掘れる。

表-2 正常海浜における堤体設置位置と洗掘形式

H_0/L_0	d/H_0	X/X_b	h_0/H_0	洗掘型
0.0062	0.0079	-1.13	1.73	I
		-0.69	1.04	I
		-0.32	0.35	I
		0.00	0.00	I
		0.25	-0.35	III
		0.68	-0.69	IV
0.0062	0.0044	0.84	-1.04	IV
		0.98	-1.72	IV
		1.30	3.05	IV
		-0.84	1.32	II
		-0.65	0.97	I (X)
		-0.34	0.50	I
0.0065	0.0081	0.00	0.00	III
		0.22	-0.23	III
		0.35	-0.36	III
		0.68	-0.84	III (X)
		1.10	-1.27	IV
		0.00	0.00	II (I)
		0.15	-0.36	I
		0.32	-0.68	I
		0.45	-0.84	III
		0.64	-0.96	III
		0.80	-1.19	IV

表-2は、著者らが行った実験のうち、正常海浜における堤体設置位置を X/X_b 、及び h_0/H_0 で示し、それらが上記分類のどれに属するかを、 $d/H_0=0.0079$,

図-8 正常海浜における最大及び最終洗掘深、波の飛沫のうちあげ高と堤体位置との関係



0.0044, 0.00081 なる三種の断面について示したものである。またそれらを最大洗掘深、波の飛沫のうち上げ高と共に示したものが図-8である。図で、細線は最終洗掘深であり、太線は最大洗掘深であるが、その差が上記分類のⅠ型における埋戻し量に相当する。他の型の場合は両洗掘深が一致するので最大洗掘深のみを示してあるが、それは又最終洗掘深にも相当する。飛沫のうち上げ高は最大洗掘深を示した時に対するものである。各図の折線にそって示した記号は、前記の洗掘形式分類の型を示すものであり、二重の記号のものは判定が困難なことを示すもので例えばⅢ(Ⅱ)にとあるのはⅡ型の性質を多分にもったⅢ型であることを示す。

この図から、正常海浜における洗掘の一般的特性として次のことがいえる。

- (1) 最大洗掘深の最大値は砕波点より少し岸側すなわち、巻き波の落下点付近で起こる。
- (2) 最大洗掘深の断面方向の分布はこの最大値を中心としたV字型をなす。
- (3) 洗掘の時間的变化は、洗掘の最大値を示す所及びその近傍ではⅢ型、それより岸側では主としてⅠ型であり、沖側ではすべてⅣ型である。Ⅱ型は一般にⅠ型の陸側端で起こる。

3-2 洗掘機構

前節において、洗掘の時間的变化には4つの型があることを述べたが、ここではそれらの分類にもとづいて実験例をあげながらその機構を考察する。

(1) Ⅰ型洗掘

図-9は、図-8の $H_0/L_0=0.0062$, $d/H_0=0.0079$ のケースにおいて、 $X/X_0=0$ の場合の海底断面形状の時間的变化及びアイソトープ砂の移動分布の変化を示したものである。アイソトープ砂は0時間の断面に示したように、波の作用前に堤体前4cmの所に径2cm、深さ15cmになるように埋められた。

図に示すように、波の作用後2分間で堤体前は13cmも洗掘され、ステップの法面は後退したようになった。一方、この時間のアイソトープ砂の分布を見ると、その堆積部分に高いカウント分布のピークが見られる。このことは、堤体前での洗掘砂の大部分がステップ前面に堆積したことを示すものである。

波の作用時間が、5分、10分となるにつれて、堤体前面の洗掘孔が沖向きに拡がると共に、洗掘深 Δh も増加し、20分後の洗掘孔は平衡勾配のステップの上端近くまで達している。この20分後の断面を10分後の断面と比較

したときの著しい相違は、ステップの根本付近の勾配がゆるくなって砂れんが生じ、ステップの長さが短くなり始めたことである。この傾向は、時間の経過と共にいよいよ強まり、1時間後ではステップはほとんどなくなり、堤体前面の洗掘はほとんど最大洗掘深に達した。一方アイソトープ砂の分布を見ると、10分頃のものと比較して沖向きにも広がって来ているが、その先端は、初期平衡勾配と比較して1時間後の断面が堆積を示している部分すなわち堤体から1.5m沖側付近までである。また、上記堆積を示した少し沖側の部分では、初めから少しずつ欠壊が見られ、それより少し岸側の、ステップ法面では、少しずつ堆積されている。土量のバランスから見て、欠壊した砂は岸側へ移動し、ステップ法面に堆積しているものと思われる。また、この欠壊部分は、堤体の反射によって生ずる重複波の腹より少し岸側に相当する。このようにして堆積した砂は、やがて洗掘孔の側面に達して、それを少し埋め戻し始め、6時間から7時間にうつる所で、急激な埋戻しが起こった。アイソトープ砂も同時にその方向に移動し、分布図には二つのピークが見られるようになった。この急激な埋戻しは6時間30分頃の5分間位で起こり、一時的にはほとんど堤体前面に洗掘が見られないほどであったが、それから少し掘れて図に示す7時間後のようになったのである。その後、ほとんど変化なく、13時間まで一様な状態が続いた。

以上のように急激に洗掘された後、埋め戻しが行われた場合を、他の例について平衡勾配別に、初期平衡断面、最大洗掘深を示したときの断面、及び最終断面を示したものが図-10, 11, 12である。これらの図や、図-9について前述したことから、埋戻しの原因として第一にあげられることは、5-1, 考察の所で述べるように、堤体を設置したことによって生ずる底に沿う戻り流れの減少である。また、埋戻しに寄与する今一つの原因は、後のⅣ型洗掘のところで述べるように、重複波の腹の位置を境にして、その少し沖側、及び岸側の底質は、それぞれすぐ隣の沖側、及び岸側の節の位置へ運ばれることである。図-9において、洗掘孔は波の作用と共に急速に大きくなり、洗掘された砂はステップの法面に堆積するが、ある程度洗掘孔が大きくなり、ステップの長さが短くなると、今までステップの先端で砕波していた波は、ステップを越えて堤体に衝突する直前で砕波するようになる。これは、堤脚部に作用する波のエネルギーが増大したことを意味し、洗掘はさらに進むが、やがて最大洗掘に達する。一方、上述のような、堤体の影響による底に沿うもどり流れの減少、及び不完全重複波の下に

図-9 (1) $H_0/L_0=0.0062$, $d/H_0=0.0079$, $X/X_b=0$ の場合の海底断面形状の時間変化

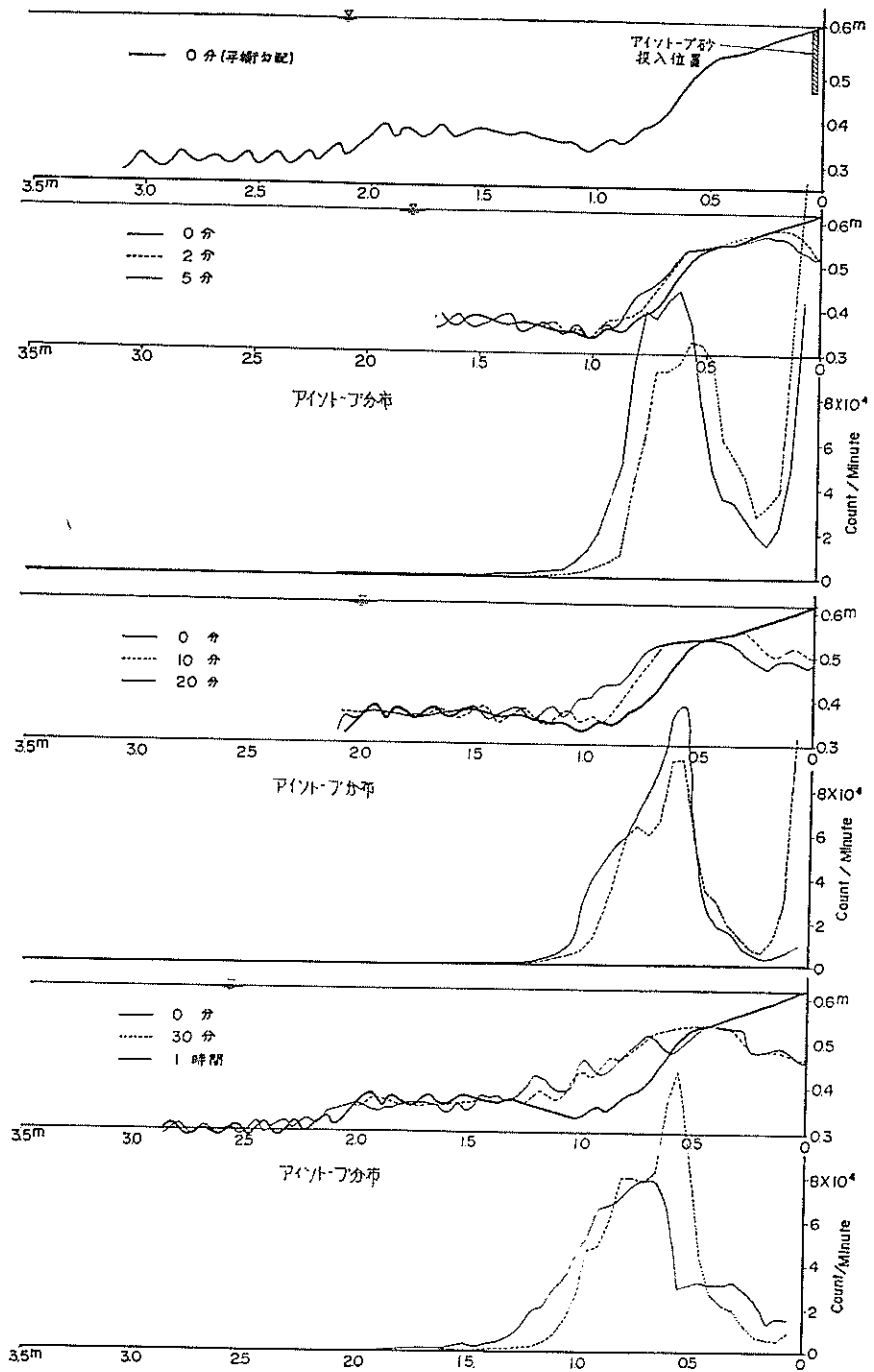


図-9 (2) $d/H_0=0.0062$, $d/H_0=0.0079$, $X/X_0=0$ の場合の海底断面形状の時間変化

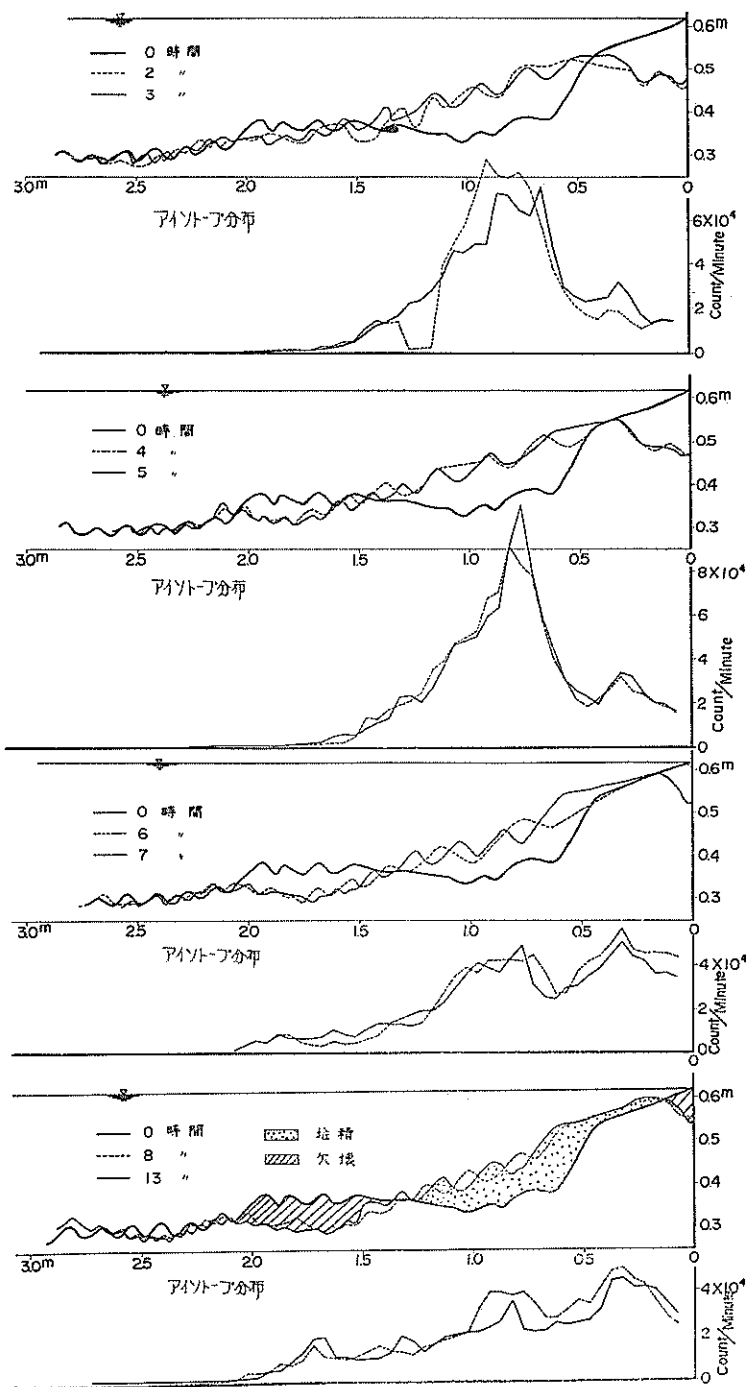


図-10 正常海浜 $d/H_0=0.0079$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=3\text{sec}$, $d=0.69\text{mm}$) に対する I 型洗掘の場合の海底断面変化

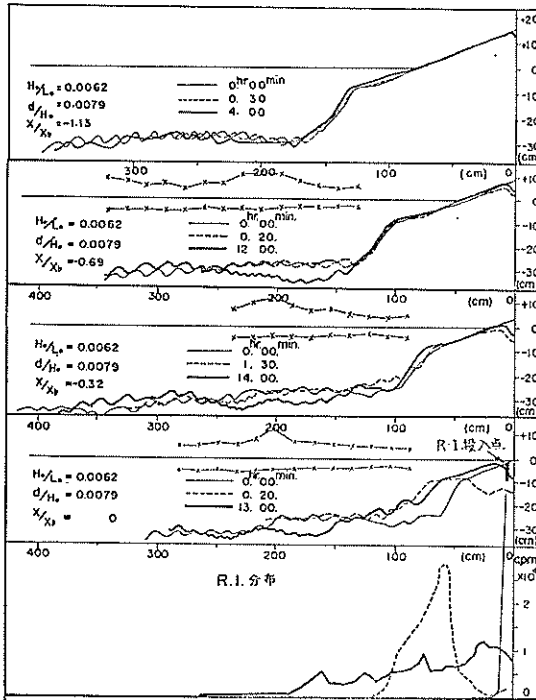


図-11 正常海浜 $d/H_0=0.0044$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=3\text{sec}$, $d=0.38\text{mm}$) に対する I 型洗掘の場合の海底断面変化

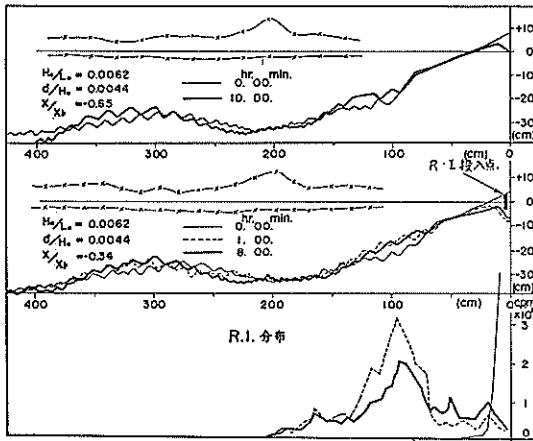
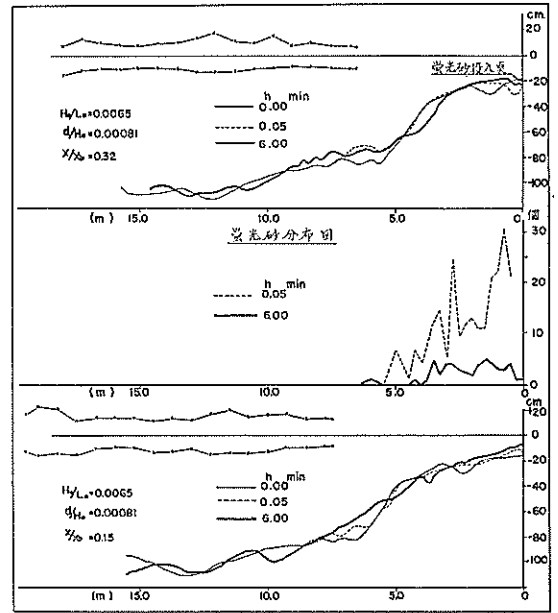


図-12 正常海浜 $d/H_0=0.00081$ ($H_0=26.0\text{cm}$, $T=5.1\text{sec}$, $d=0.21\text{mm}$) に対する I 型洗掘の場合の海底断面変化



おける底質移動により、ステップ法面に初めから継続的に砂が供給されており、その結果ステップ法先から、海底勾配が次第にゆるくなる。ある程度海底勾配がゆるくなると、波がその影響を強く受けるようになり、今までステップを越えて堤体直前で碎波していた波は、次第にその碎波点が沖へ移動し、再びステップ先端で碎波するようになる。碎波点が沖へ移動すれば、堤脚部に作用する波のエネルギーは小さくなるので、堤脚部では埋戻しが行われることになる。このように、埋め戻しが始まるまでには、ステップを完全に消失させるか、その法先をほとんど埋めつくすという過程が必要のために最大洗掘深さに達してから埋戻しが始まるまでに、相当の時間がかかるのである。ステップの法面勾配が次第にゆるやかになるにつれて碎波点が沖へ移動し、堤体に作用する波力が減ずる状態を示したものが、図-13である。堤体前での波の飛沫の立ち上がり高は、波の作用直後から最大洗掘深に達するまでは増大するが、それからしばらくして減少を始め、埋め戻し作用は、その減少より遅れて始まっている。

次に、図-10と図-11における目立つ相違は、ステップのすぐ沖側の不完全重複波の腹付近の海底の変化である。図-10では、この重複波の腹の少し岸側の部分が欠壊し、その砂が埋め戻しに多分に寄与したのに反し、

図-13 $H_0/L_0=0.0062$, $d/H_0=0.0079$, $X/X_b=0$ の場合の洗掘深 Δh と波による飛末のたちより高との関係

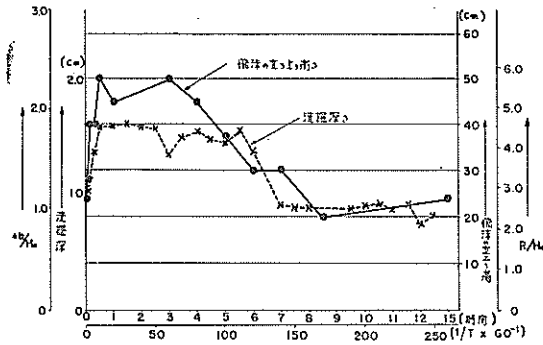
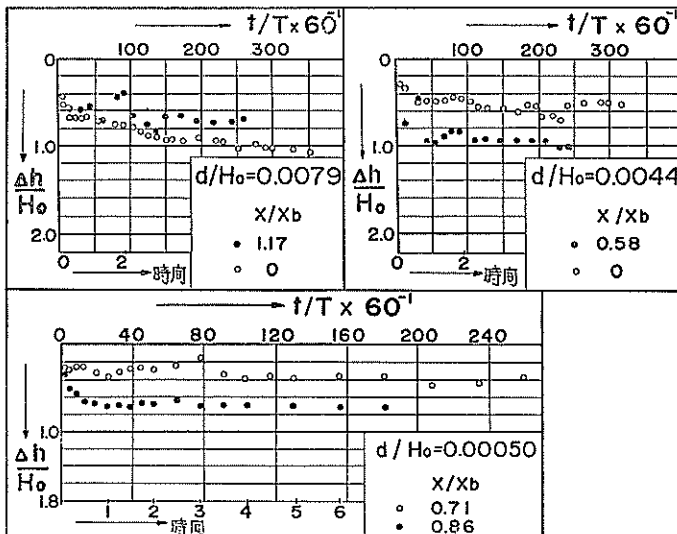


図-11では、そのような目立つ効果が見られないことである。これは、初期勾配の相違によるものであり、図-10に比して図-11では、重複波の腹の生ずる位置が、すでに、付近の海底より深くなっていったことによるもので、洗掘機構に対する本質的な相違ではない。これらに反し、波高の大きい図-12では、明瞭な重複波は見られず、上述のような腹付近における洗掘の現象は現われていない。図-14は、平衡勾配別に洗掘深 Δh の時間変化

図-14 正常海浜 I 型洗掘の場合の洗掘深 Δh の時間変化



掘され、それから 1~2 時間で最大洗掘深に達し、その後はほとんど洗掘深が変わらない。堤体前で洗掘された砂はステップの前面に運ばれ、その法面を沖側へ前進さ

を示したもので、横軸は波の作用時間 t と波の周期 T との比、縦軸には、 Δh と沖波波高 H_0 の比をとってある。また、横軸の下方には、波の継続時間 t を、そのまま記してある。この図を見ると、大部分の場合は初めの数分で急激に洗掘され、1 時間以内で最大洗掘深に達している。それからしばらく定常状態があった後、急激な埋戻しが起こり、次第にそれもゆるやかになり、最終洗掘深に達して定常状態が続いている。洗掘深の時間的変化は、 t/T で示される波数よりも、波の継続時間により密接に対応しているようである。

(2) II 型洗掘

初めに急激に掘れて、そのままの状態が続く II 型の洗掘は、図に示した実験範囲では、 $d/H_0=0.0079$ の場合は見られず、他の場合では、I 型のあらわれた位置よりも岸側の所で起こっている。I 型と II 型の相違は、埋め戻しの有無にある。前述したように埋め戻しが堤体の影響によるステップ付近の底に沿う戻り流れの減少にあるとすれば、堤体が陸側によるほどその戻り流れの減少効果が少くなるのであるから、II 型は I 型より岸側にあらわれてよい筈である。この II 型の場合の変化、及び洗掘深 Δh の時間変化を示したのが、図-15, 16 である。いずれの場合も、I 型と同様に初めの数分間で急激に洗

せたのみであり、ステップの法面長さを減少せしめるほどの沖側からの砂の移動はない。

(3) III 型洗掘

図-15 正常海浜Ⅱ型洗掘の場合の海底断面変化

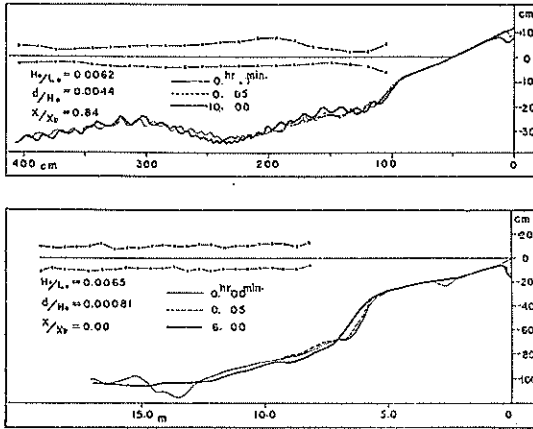
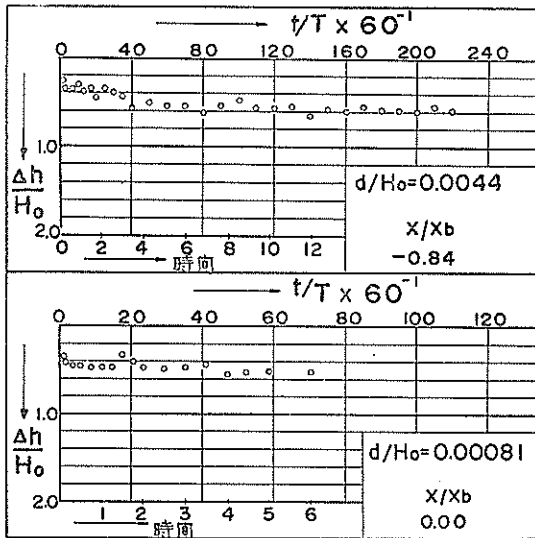


図-16 正常海浜Ⅱ型洗掘の場合の洗掘深 Δh の時間変化



急激に掘れた後、徐々に掘れて最大洗掘深に達するⅢ型洗掘は、ステップ法面より少し岸側に堤体を設置したときに起こるが、その一例を図-17に示す。これは、 $d/H_0 = 0.0044$ の平衡勾配において最も大きい洗掘を示した場合である。波の作用後5分間で、11cmすなわち沖波波高8.7cmの1.3倍も洗掘され、ステップは、前述のⅠ型の場合のように、その法面が前進したというよりは、完全に崩壊したといった方がよい。その後、波の作用時間が10分、20分、30分と経過するにつれて、洗掘速度が

遅くなるとはいえ、さらに洗掘は進み、1時間後では15cmも洗掘された。その洗掘孔前面における丘のような形をした堆積は、その高さは変わらないが冲向きに次第に伸びてきた。その後、時間の経過とともに洗掘速度は次第に弱まりながらも、洗掘深は増加し、8時間後ではほとんど定常状態に達している。この時の最終洗掘深は21cm、すなわち沖波波高の2.4倍にも達している。

この8時間後の断面を、太線で示した初期勾配断面と比較してみると、重複波の腹より岸側では欠損部分の面積と堆積部分の面積は、ほとんど同じ位である。すなわち、この腹を越えて沖側への砂の移動はほとんどなく、この腹より少し沖側、または岸側では、それぞれ沖、または岸向きの砂移動があったことが知れる。特に、腹の少し沖側付近では、目立つ欠損を示している。この腹付近の砂の移動は、堤体設置によって生じた重複波に対応するための海底地形の変化によるものと考えられ、このような現象は、他のすべての場合にも起こっている。

上述したようなⅢ型洗掘他の場合について、初期勾配、途中及び最終の断面形状を示したものが、図-18、19、20である。これらの図や、図-17から、Ⅲ型の洗掘孔の形状が、Ⅰ型やⅡ型と異なることに気付く。すなわち、Ⅰ型及びⅡ型では、壁体と砂面の接合点が最も深い逆直角三角形のような洗掘孔を示すのに反し、Ⅲ型では、その接合点より少し沖側が最も深い凹面形の洗掘孔を示す場合が多いことである。このような相違は、堤体への波の作用状態の相違によるものであろう。すなわち、Ⅰ型、及びⅡ型は、砕波の落下点より岸側にあるため、いわゆる稀薄波、あるいは、遡上流が壁体に作用するのに反し、Ⅲ型の領域は砕波の落下点付近にあるため、段波としての作用を強く受け、次に示すⅣ型の重複波による洗掘機構を多分にもつものと思われる。この傾向は、壁体が沖側にあるほど、また、洗掘が進むにつれて強くあらわれてくるようである。ステップが欠損するまでの最初の数分間は、Ⅰ型、Ⅱ型のように急速に洗掘が起こるが、その後はⅣ型のように徐々に洗掘が進むことは、このような考え方の妥当性を示すものであろう。しかし、時間が十分経過しても、Ⅳ型のように壁面で完全な重複波が起こるのではなく、図-21及び図-22に示すように、飛沫の立上り高も相当あり、波としては、段波として作用していることに変わりはない。その波の上層は飛沫として打上がるが、下層は重複波のように反射されるものと思われる。

いずれにしても、このⅢ型は、Ⅰ型とⅣ型の遷移領域であるために、両者の洗掘機構をあわせもつものと思わ

図-17 $H_0/L_0=0.0062$, $d/H_0=0.0044$, $X/X_b=0.22$ の場合の海底断面形状の時間変化 (Ⅲ型洗掘の例)

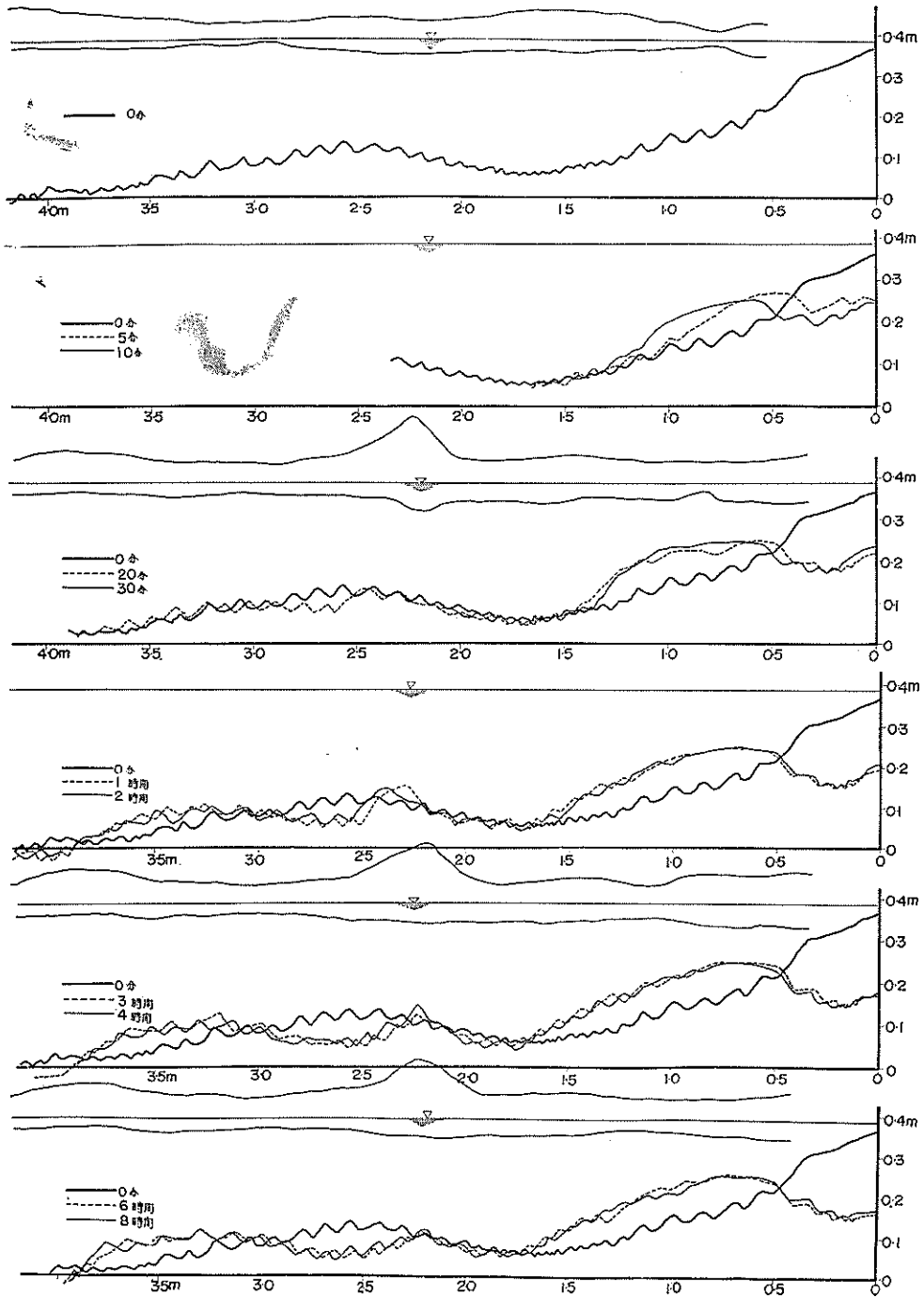


図-18 正常海浜 $d/H_0=0.0079$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=3\text{sec}$, $d=0.69\text{mm}$) に対するⅢ型洗掘の場合の海底断面変化

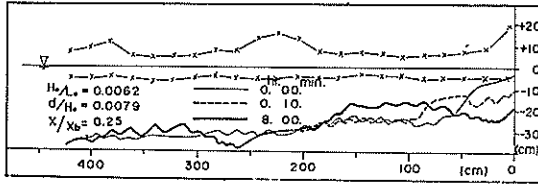


図-19 正常海浜 $d/H_0=0.0044$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=3\text{sec}$, $d=0.38\text{mm}$) に対するⅢ型洗掘の場合の海底断面変化

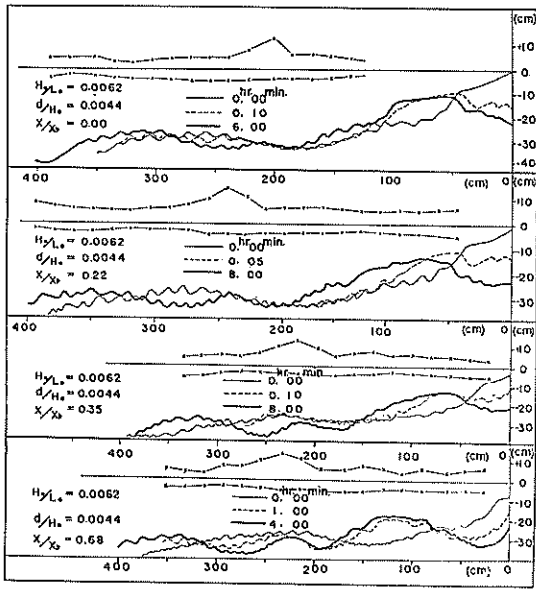


図-20 正常海浜 $d/H_0=0.00081$ ($H_0=26\text{cm}$, $T=5.1\text{sec}$, $d=0.21\text{mm}$) に対するⅢ型洗掘の場合の海底断面変化

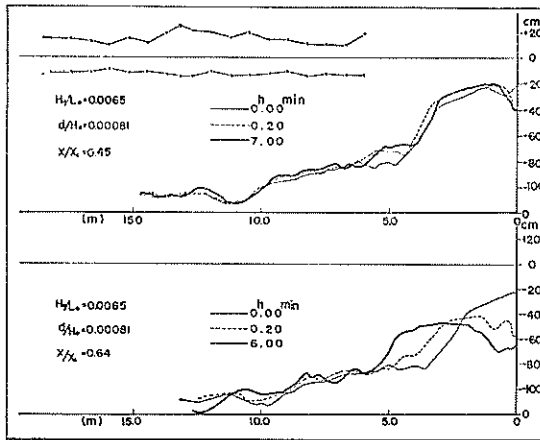


図-21 正常海浜 $d/H_0=0.0079$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=3\text{sec}$, $d=0.69\text{mm}$) に対する飛沫の立上り高

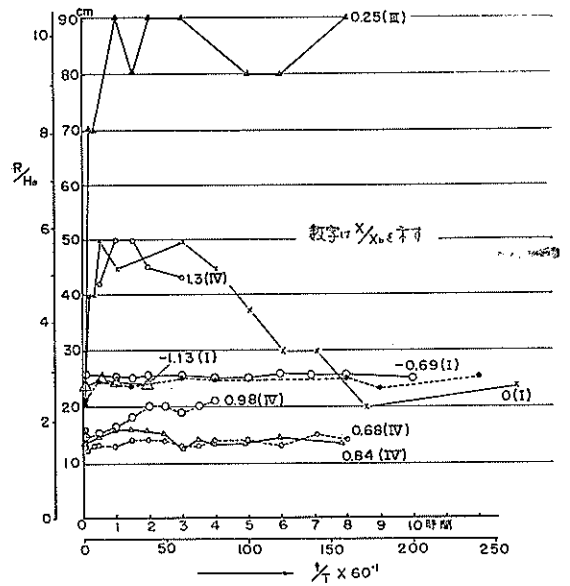
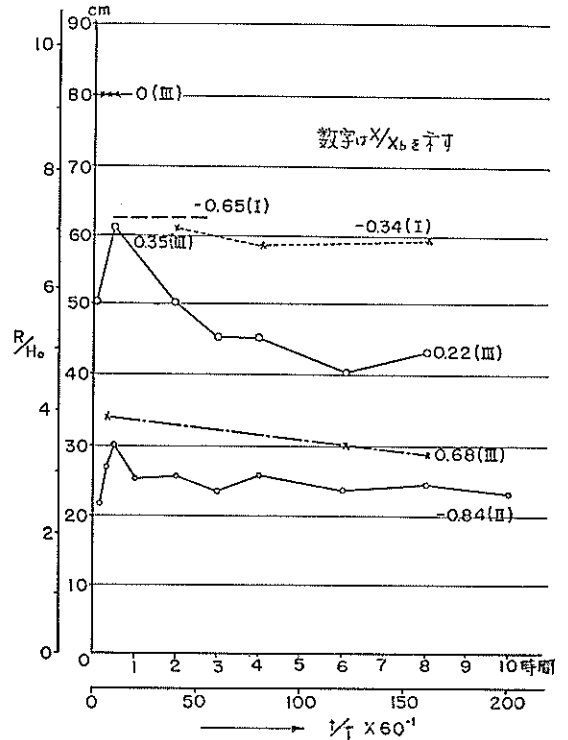


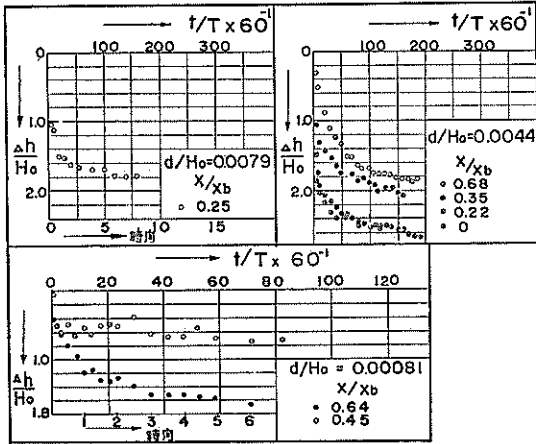
図-22 正常海浜 $d/H_0=0.0044$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=3\text{sec}$, $d=0.38\text{mm}$) に対する飛沫の立上り高



れるが、砕波の落下点に近いので、水の運動量が大きいため、最も大きな洗掘深を示すのであろう。

図-23は、Ⅲ型洗掘の場合の洗掘深 Δh の時間的変化

図-23 正常海浜Ⅲ型洗掘の場合の洗掘深 Δh の時間変化



を示したものであるが、いずれの場合も初めの数分で急激に洗掘されている。 $d/H_0=0.0044$ で、 $X/X_b=0.68$ のものは、他と比較して初めの掘れ方が少ないようであるが、先に示した図-22における飛沫の立上がり高から見ても、Ⅲ型に入れるべきであり、このため図-8の、堤体設置位置別による洗掘型の分類では、Ⅳ型の性質をもつⅢ型として(Ⅲ)Ⅳと記してある。

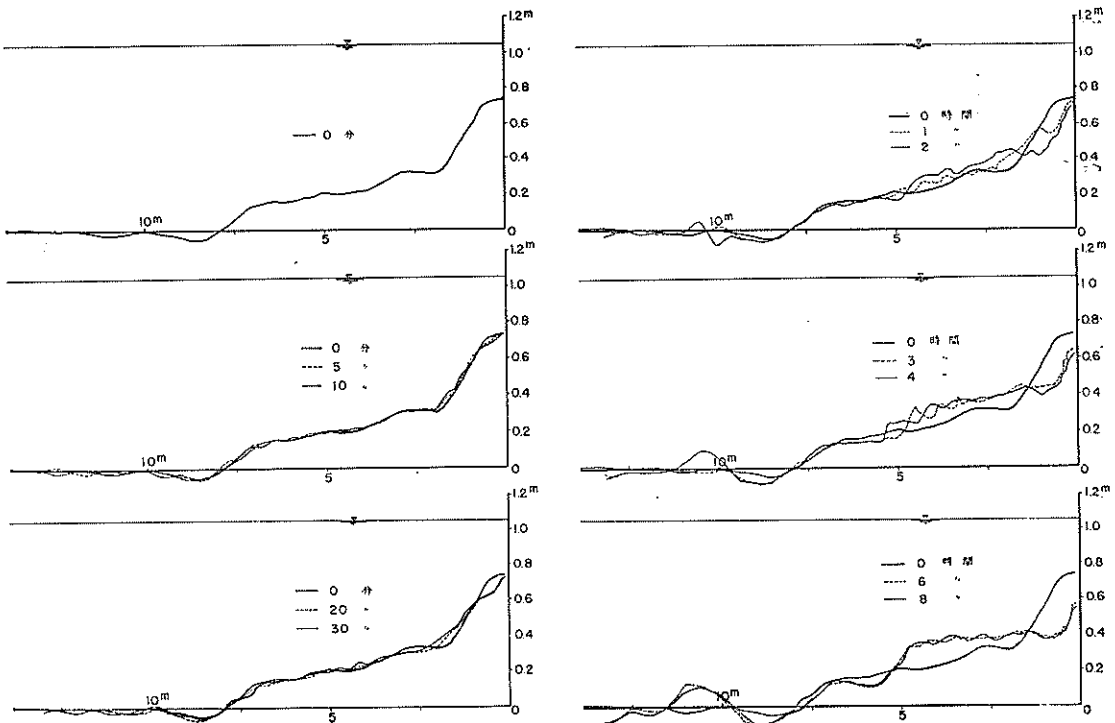
(4) Ⅳ型洗掘

初めから徐々に洗掘されるⅣ型洗掘は、Ⅲ型洗掘より沖側で起こるが、その一例を示したのが図-24である。これは、波高26cm、周期5.1sec、堤体位置 $X/X_b=0.80$ の場合で、砕波点と落下点の間に堤体が設置された場合である。

波の作用時間が、5分、及び10分の断面では、堤脚部の洗掘は、わずかであり、前述したⅢ型のようなステップの急激な崩壊も見られない。

15分、30分と経過するにつれ、堤体と砂面の接点が洗掘されるといより、少し沖側の方が洗掘され、1時間

図-24 $H_0/L_0=0.0065$, $d/H_0=0.00081$, $X/X_b=0.80$ の場合の海底断面形状の時間変化 (Ⅳ型洗掘の例)



後の洗掘孔の断面は、V字形をなしている。その後は、このV字形の洗掘孔が、沖向き、及び下向きに拡大し、その結果洗掘孔の岸側法面が崩れてくるという形で、洗掘が進んでいる。洗掘深 Δh は、2時間経過後でも4cm ($\Delta h/H_0=0.15$) にすぎないが、洗掘孔の最深部では

16cmも洗掘されている。その後は、洗掘孔の沖側面が次第に洗掘されると共に、洗掘も比較的急速に進み、6時間でほぼ平衡に達している。

IV型の他の例として、波高8.7cm、周期3.0secで、 $d/H_0=0.0044$ の場合を、図-25に示す。これは、堤体

図-25-1 $H_0/L_0=0.0062$, $d/H_0=0.0044$, $X/X_b=1$ の場合の海底断面形状の時間変化 (IV型洗掘の例)

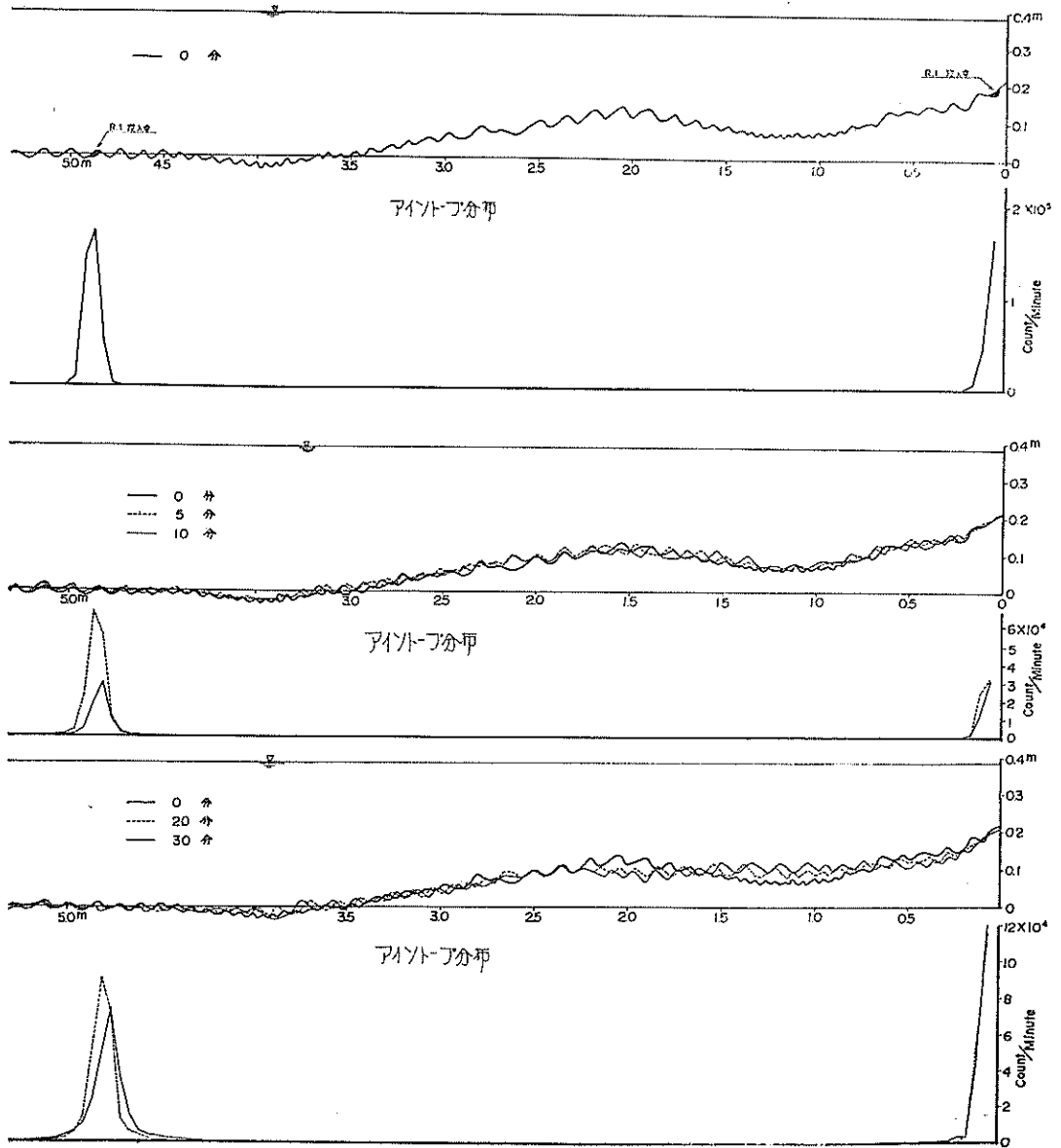
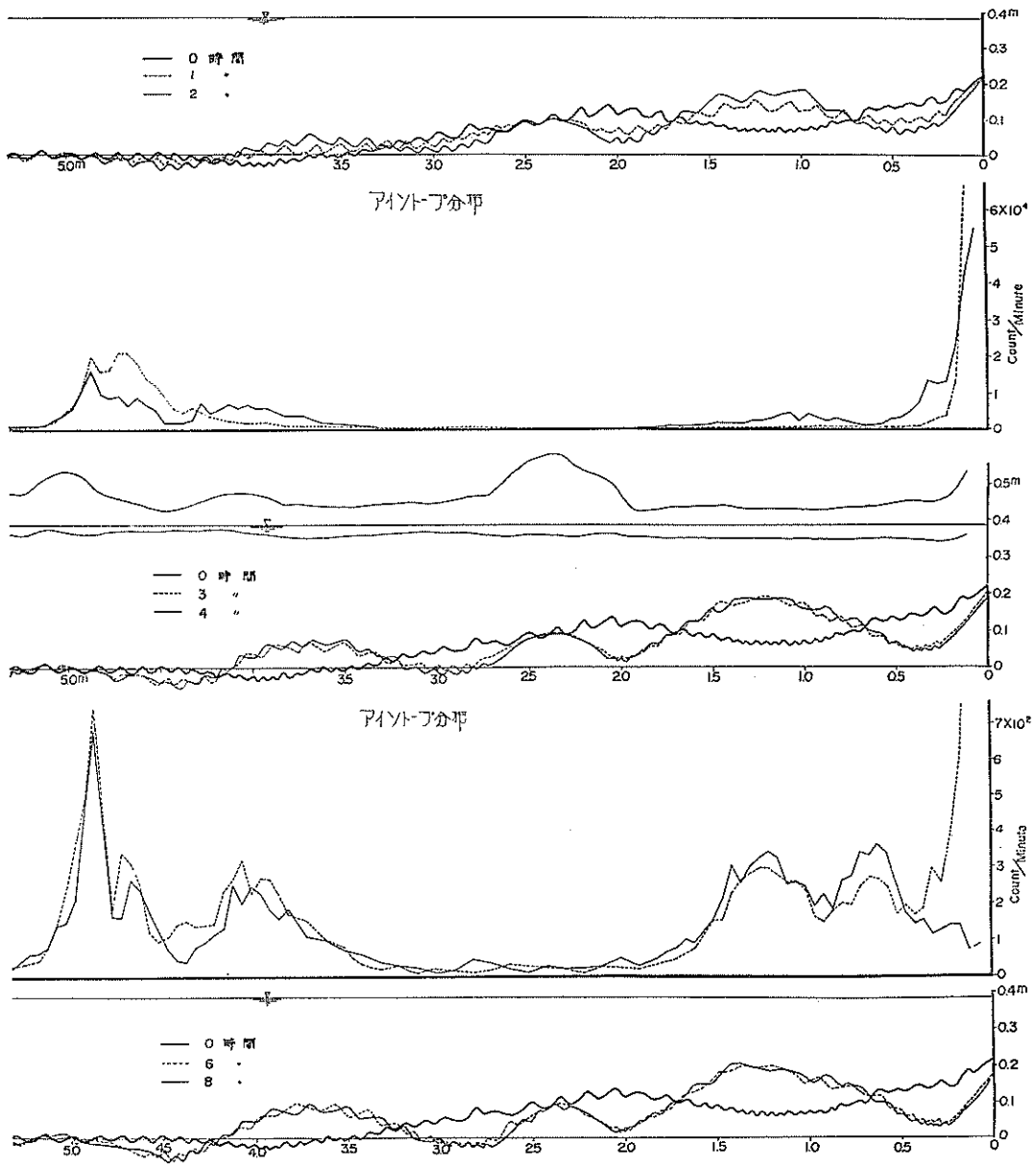


図-25-2 $H_0/L_0=0.0062$, $d/H_0=0.0044$, $X/X_0=1$ の場合の海底断面形状の変化 (VI型洗掘の例)



がステップ法面上に設置されたときのもので、アイトーブ砂は、堤脚部と、沖の海底の2点に、0時の断面に示すように置かれた。

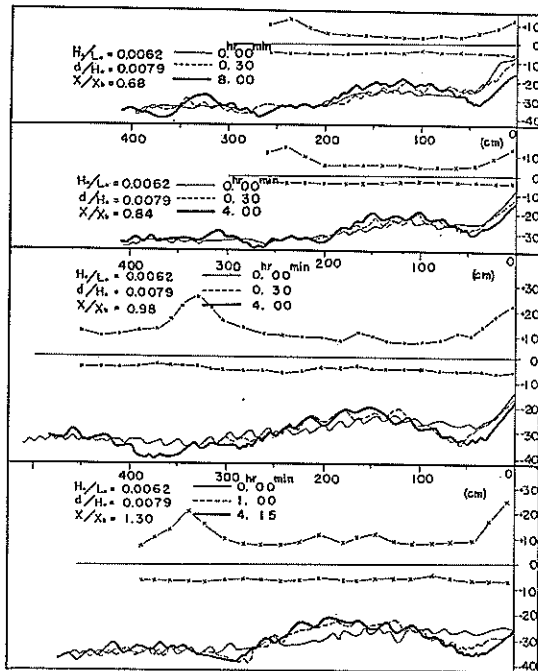
波の作用時間が5分及び10分では、海底断面形状、及びアイトーブ砂の分布に殆んど変化がない。20分、

30分で、ステップの法先のすぐ沖側の洗掘と、この洗掘部に隣り合った沖側の堆積が明瞭になってきたが、堤脚部の洗掘は、ごくわずかである。1時間、2時間と経過するにつれて洗掘孔は、次第に深くなり、それにつれて沖側の堆積も増加している。4時間の断面では、洗掘孔

は明瞭なV字型を示し、その中央近くでは10cmもの洗掘が見られるが、堤脚部の洗掘深 Δh は2cmにすぎない。また、波高分布と対比してみると、重複波の腹より少し離れた所が洗掘されている。アイソトープ砂の分布を見ると、堆積した所にカウント値のピークが見られ、堤体前のアイソトープ砂は沖向きに、沖側に投入されたものは岸向きに移動しているのが明瞭に見られるが、いずれも重複波の腹を越えてはほとんど移動していない。その後は、わずかに洗掘深が増加しながら8時間でほとんど平衡状態に達している。この8時間後の断面で、堆積部分の水深は20cmであり、堤体前面では、ほとんど完全な重複波が発生していた。

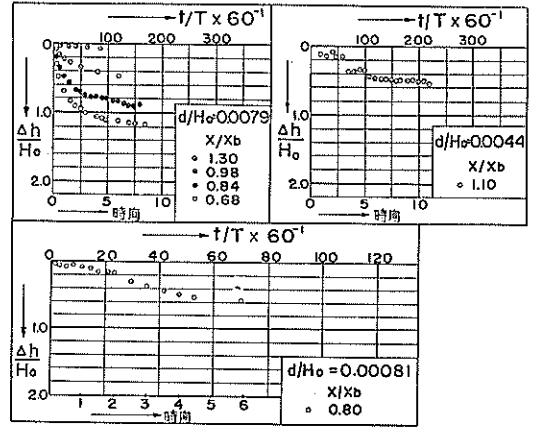
IV型洗掘を示した他の場合、すなわち、 $d/H_0=0.0079$ のときについて、その断面変化を示したのが図-26である。これらの図や、先に示した図-24、及び25から知れ

図-26 正常海浜 $d/H_0=0.0079$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=3\text{sec}$, $d=0.69\text{mm}$) に対するIV型洗掘の海底断面変化



るように、洗掘孔が初めからV字形をなし、時間の経過と共に、そのV字形が下方、沖向きに拡大する結果として、V字形の堤側面が崩れるような形で、徐々に洗掘が進むのがこのIV型の特徴である。図-27は、正常海浜におけるIV型洗掘の時間変化であるが、いずれの場合も洗

図-27 正常海浜IV型洗掘の場合の洗掘深 Δh の時間変化



掘の進行が初めから極めてゆるやかである。このように、ほとんど完全な重複波の下における底にそった水粒子速度と釣合った形に海底地形が変化するため、その影響が堤脚部に及び、その結果がIV型洗掘として現われるのである。

4. 暴風海浜における洗掘

4-1 一般的傾向

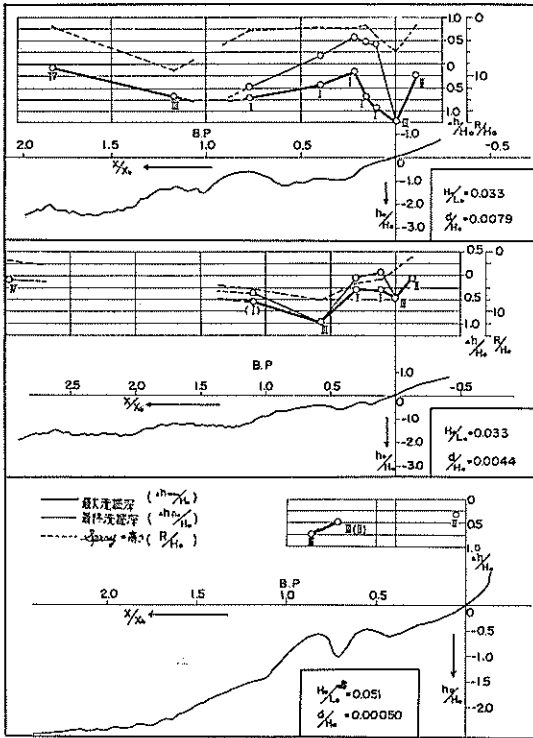
暴風海浜に直立壁を設けたときの洗掘の時間変化も、正常海浜の場合と同様にI、II、III、IVの4つの型に分類

表-3 暴風海浜における堤体設置位置と洗掘形式

H/L	d/H_0	X/X_b	h_r/H_0	井塚型
0.033	0.0079	-0.11	0.13	Ⅱ
		0.00	0.00	Ⅲ
		-0.11	-0.17	I
		0.16	-0.35	I
		-0.22	-0.80	I
		0.40	-0.84	I
0.033	0.0044	0.76	-0.53	I
		1.17	-1.27	Ⅲ
		1.82	-2.05	Ⅳ
		-0.12	0.32	Ⅱ
		0.00	0.00	Ⅲ
		0.12	-0.17	I
0.033	0.0050	0.30	-0.41	I
		0.50	-0.43	Ⅲ
		1.10	-1.15	(I)
		3.00	-1.55	Ⅳ
		0.06	-0.12	Ⅲ
		0.71	-1.05	Ⅲ (I)
		0.86	-0.62	Ⅲ

できる。表-3は、それらの出現位置を、 $d/H_0=0.0079$, $d/H_0=0.0044$, $d/H_0=0.00050$ の3つの平衡断面について示したもので、それらを最大洗掘深、最終洗掘深、飛沫の立上り高とともにプロットしたのが、図-28であ

図-28 暴風海浜における最大及び最終洗掘深、
波の飛沫のうち上げ高と、堤体位置との関係



る。細線で示した最終洗掘深と、太線で示した最大洗掘深の差がⅡ型洗掘における埋戻し量に相当する。また、前と同様に、飛沫のうち上げ高は、最大洗掘深を示した頃におけるものである。

この図-28から、暴風海浜における一般的傾向として次のことがいえる。

(1) 最大洗掘深を示す曲線は一般にW形をなし、2つの極大値をもつ。その一つは、第一碎波点(図-28では、単に B.P と記してある)より少し岸側で、他は最終碎波点(図-28では大体汀線より少し沖側)の少し岸側、すなわち、それぞれ碎波の落下点付近にある。

以下、前者を第一極大値、後者を第二極大値とよぶ。

(2) 洗掘深の時間変化による分類では、極大値を示す位置付近ではⅢ型であり、その中間ではⅠ型、最終碎波点付近のⅢ型を示す位置の岸側ではⅡ型である。第1碎波点付近のⅢ型を示す位置より沖側では主としてⅣ型であるが、埋戻しの小さいⅠ型となることもある。

(3) 洗掘深の大きい所は、波による飛沫のうち上げ高も大きい。

5-2 洗掘機構

正常海浜の場合と同様に、4つの洗掘型について、実例を挙げながら、その機構について述べる。

(1) Ⅰ型洗掘

急激に洗掘された後、埋戻しが行われるⅠ型の例を、

図-29 $H_0/L_0=0.033$, $d/H_0=0.0079$, $X/X_0=0.4$
の場合の海底断面形状の時間変化
(Ⅰ型洗掘の例)

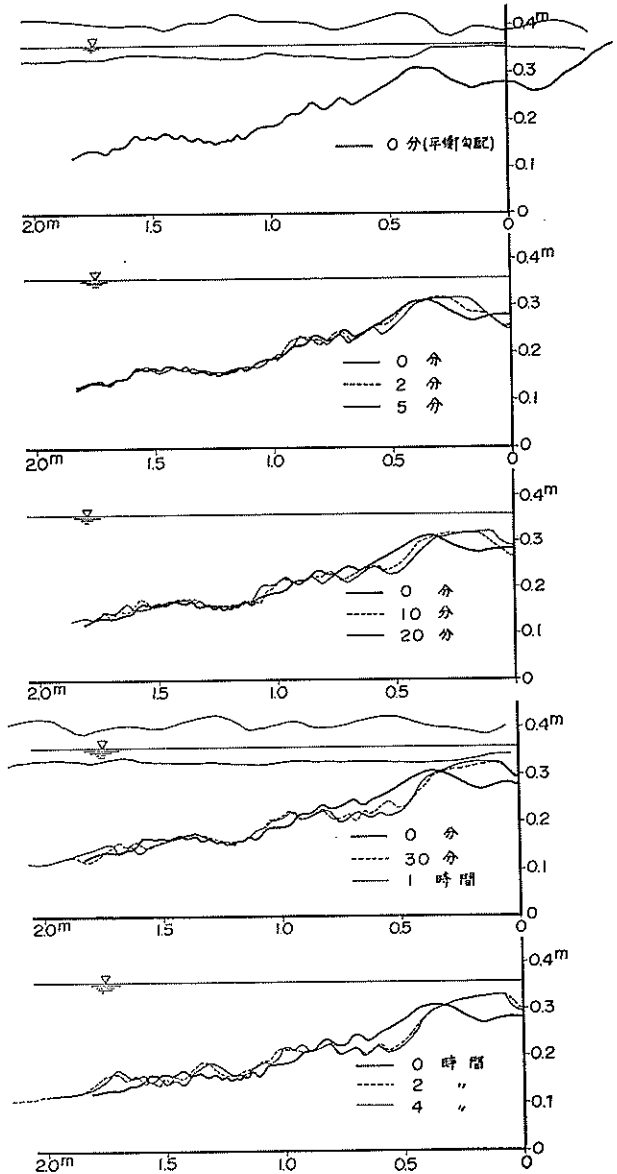


図-29に示す。これは、 $d/H_0=0.0079$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=1.3\text{sec}$) の場合で、堤体は第一砕波点と最終砕波点との中間に置かれた。波が2分間作用しただけで洗掘深10cmはとなり、5分後には最大洗掘深に達した。

洗掘孔は、逆直角三角形を示しているが、この洗掘孔の沖側法面では、2分後から、すでに堆積を示している。すなわち、沿岸砂州が岸向きに移動したような形を示し、10分後の断面では、その堆積が堤脚部まで及び、早くも埋戻しが始まっている。その後、20分、30分と比較的急速な埋戻しが起こり、2時間後で洗掘深は7cmとなり、それ以後は、ほとんど変りなく、定常状態に達している。

同じ暴風海浜で、他の場合について、その初期勾配、最大、及び最終洗掘時における海底断面を示したのが図-30、31である。また、それらに対する洗掘 Δh の時間的変化は、図-32に示してある。これらの図から知れるように、正常海浜のI型洗掘の場合と同様に、初めの数分間で逆三角形の洗掘孔を示しながら急激に洗掘され

図-30 暴風海浜 $d/H_0=0.0079$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=1.3\text{sec}$, $d=0.69\text{mm}$) に対するI型洗掘の海底断面変化

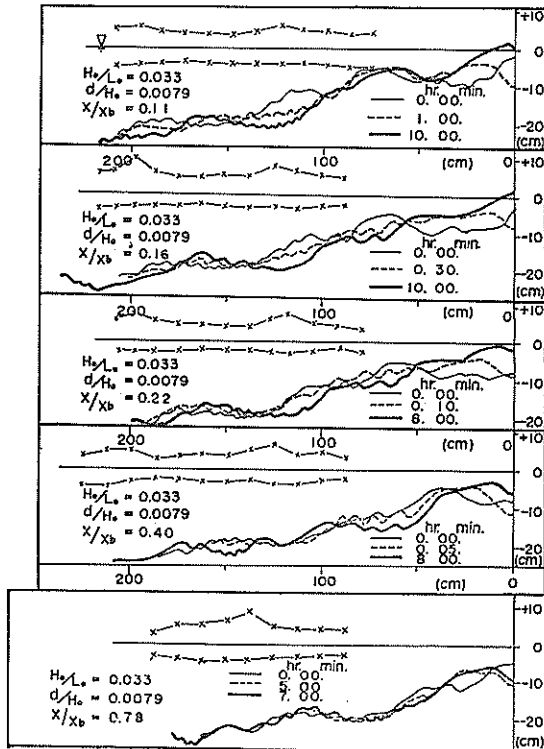


図-31 暴風海浜 $d/H_0=0.0011$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=1.3\text{sec}$, $d=0.38\text{mm}$) に対するI型洗掘の海底断面変化

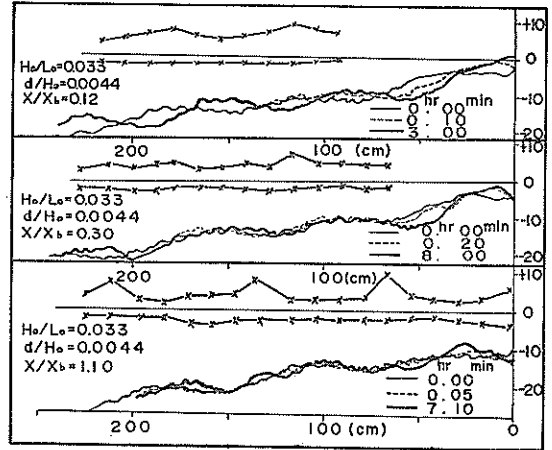
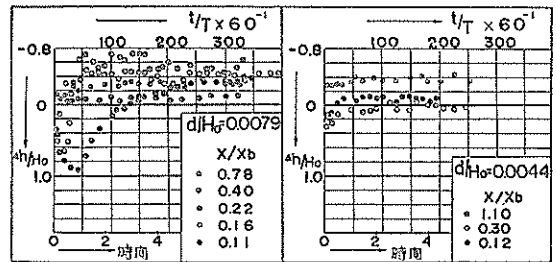


図-32 暴風海浜I型洗掘の場合の洗掘深 Δh の時間変化



るが、その後直ちに埋戻しが始まる場合と、それからしばらく比較的ゆるやかに洗掘された後、埋戻しが起こる場合とがある。後者は、前者より汀線に近い所で起こっている。この埋戻しが始まる時間的相違は、沖から供給される砂が前面を埋めながら堤脚部に達するまでの経過時間によるもので、本質的相違ではない。

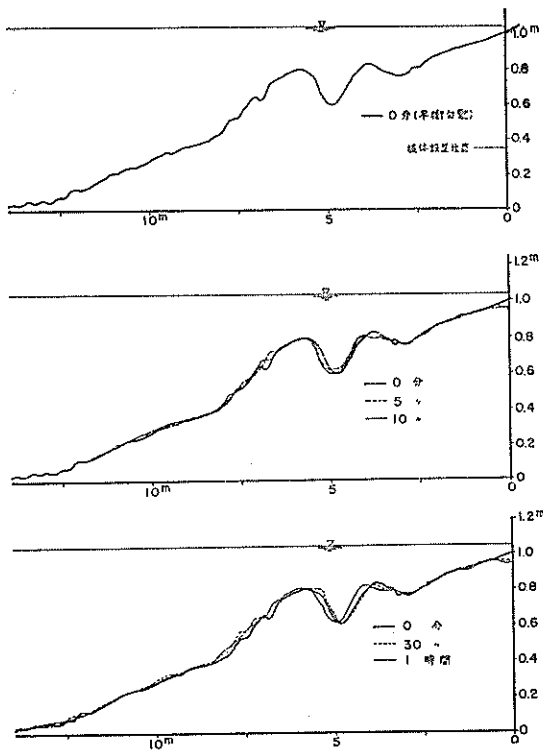
埋戻しが起こる理由は、正常海浜の場合と同様に波による前浜からの底にそう戻り流れの減少にあると考えられる。平衡勾配における沿岸砂州の発生の原因については、現在明確ではないが、沿岸砂州形状それ自身は、その沖側から岸向きへの砂移動と前浜付近から沖向きへの砂移動とのバランスの上に保たれているものと考えられる。従って、この砕波帯における沖向きへの砂移動の主要原因の1つである底にそう戻り流れが減少すれば、当然バランスがくずれて、砕波帯内では岸向きの砂移動が増加し、沿岸砂州は岸向きへ移動する筈である。しかし、

このような岸向きへの砂移動は、沿岸砂州の岸側のトラフを埋めながら堤体前面に達するので、その間に堤脚部は砕け波によって洗掘されるわけである。この場合、洗掘孔が逆直角三角形をなしているのは、砕波後の奔流のごとき流れが堤脚部に作用するためであろう。

(2) II型洗掘

初めに急速に洗掘されるだけで、それ以後は洗掘深がほとんど変化しない場合の例として、図-33に

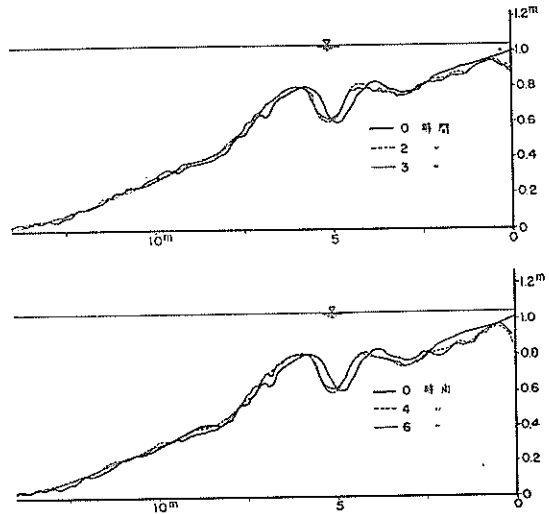
図-33-1 $H_0/L_0=0.051$, $d/H_0=0.00050$,
 $X/X_b=0.06$ の場合の海底断面形状の
時間変化 (II型洗掘の例)



$d/H_0=0.00050$ (波高42cm, 周期2.3秒) の場合の断面変化を示す。

このときの平衡勾配は、2つの沿岸砂州をもち、波は2段砕波していた。波作用5分で、堤脚部は5cm洗掘され、それと同時に第2の沿岸砂州(岸側の)の頭部が沖向きに、削り取られるように移動し、第1のトラフの岸側面が堆積し、その沖側面が欠壊した。すなわち、2つの沿岸砂州が沖向きに移動したようになった。この傾向は、時間がたつにつれて次第に強まり、1時間後の断面

図-33-2 $H_0/L_0=0.051$, $d/H_0=0.00050$,
 $X/X_b=0.06$ の場合の海底断面形状の
時間変化 (II型洗掘の例)



では堤脚部の洗掘孔より、少し沖側の斜面も洗掘され始め、4時間後の断面では、第二沿岸砂州から岸側の斜面全体にわたって洗掘を示した。沿岸砂州は、全体として沖向きに動移したような断面形状を示すようになり、その後は、ほとんど変化がない。

一方、洗掘深は、波作用2時間で10cmとなり、ほとんど平衡状態に達した。4時間後の断面で Δh は14cmとなったが、それは一時的現象で、6時間後の断面では10cmにもどって、その後はほとんど変化がない。

$d/H_0=0.0079$ と 0.0044 のII型洗掘に対する断面形状の変化も、図-34と35に、また、それらに対する洗掘深 Δh の時間変化を図-36に示す。

図-34 暴風海浜 $d/H_0=0.0079$ ($H_0=8.7$ cm,
 $T=1.3$ sec, $d=0.69$ mm) に対するII型洗掘の
海底断面変化

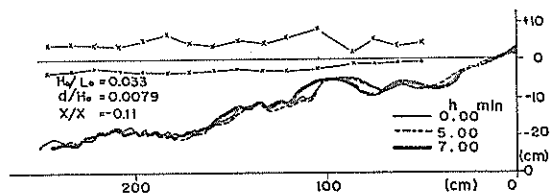


図-35 暴風海浜 $d/H_0=0.0044$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=1.3\text{sec}$, $d=0.38\text{mm}$) に対する II 型洗掘の海底断面変化

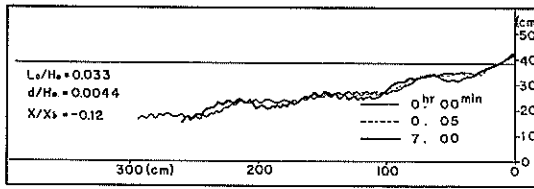
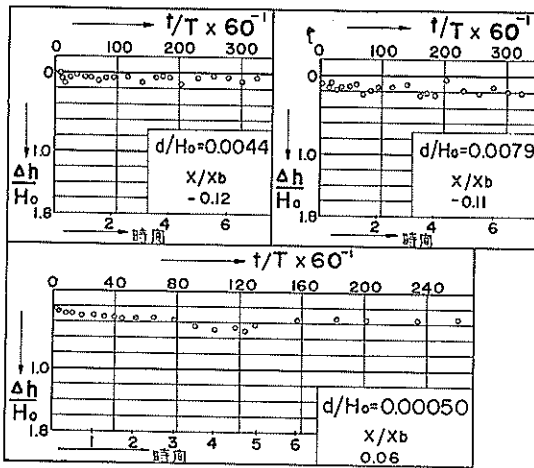


図-36 暴風海浜 II 型洗掘に対する洗掘深 Δh の時間変化

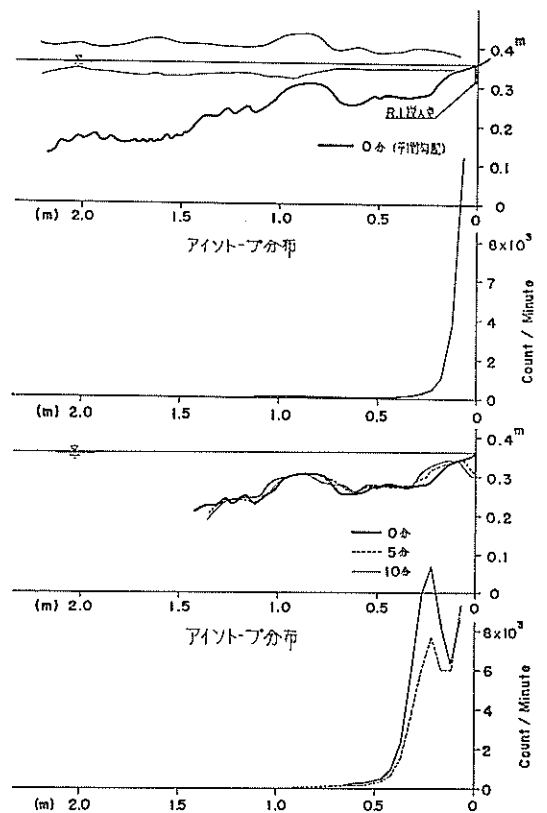


以上のように、最終砕波点の落下点と思われる所より岸側に堤体を設置したときは、堤脚部で洗掘された砂が沖へ動移するのみでなく、第一砕波点の岸側の斜面も洗掘され、沿岸砂州が全体として沖向きに移動したような形状を呈する。これは、堤体を設置したことによる、底にそう戻り流れの増加に起因するものと思われる。これについては、後の考察の所で述べることにする。また、II型洗掘は、初め急激に洗掘され、その後ほとんど変化しないという型であるが、上述した3つの例は、初めの数分で洗掘されてから最大洗掘深に達するまで2時間程度かかっており、見方によってはIII型の規模の小さいものと考えてもよいようである。

(3) III型洗掘

暴風海浜におけるIII型洗掘は、砕波の落下点近くで起こっている。まず、最終砕波点の近傍の例として、 $d/H_0=0.0079$, $X/X_b=0$ の場合の深底断面の時間的変化を図-37-1, 2, 3に示す。

図-37-1 暴風海浜 $H_0/L_0=0.033$, $d/H_0=0.0079$, $X/X_b=0$ の場合の海底断面形状の時間変化 (III型洗掘の例)



波作用後5分で、堤脚部の洗掘深 Δh は5 cmを示し、その洗掘砂はアイソトープ砂のカウンタ分から、主として洗掘孔のすぐ沖側のステップの法面上に堆積したことがわかる。このようにして、1時間頃までは、堤脚部での洗掘の進行も速く、洗掘された砂はステップの法面上の堆積される過程が続く。しかし、2時間、3時間と時間がたつにつれ、アイソトープ分布から、ステップの法面に堆積した砂が次第に沖へ移動していくのがわかる。これは、後の考察の所で述べるように、洗掘孔が大きくなるにつれ、底にそう戻り流れが増大したために生じたもので、10時間後のアイソトープ分布から、アイソトープ砂は、その過半近くが、沿岸砂州付近へ達しているのがわかる。この例のように、暴風海浜の汀線付近に堤体が設置されたときは、初めは砕波後運動量の著しく大きな波の作用で、急速に洗掘されるが、やがて定常状態に達し、それ以後は沖向き流れのため底質が沖へ移動

図-37-2 暴風海浜 $H_0/L_0=0.033$, $d/H_0=0.0079$, $X/X_b=0$ の場合の海底断面形状の時間変化 (Ⅲ型洗掘の例)

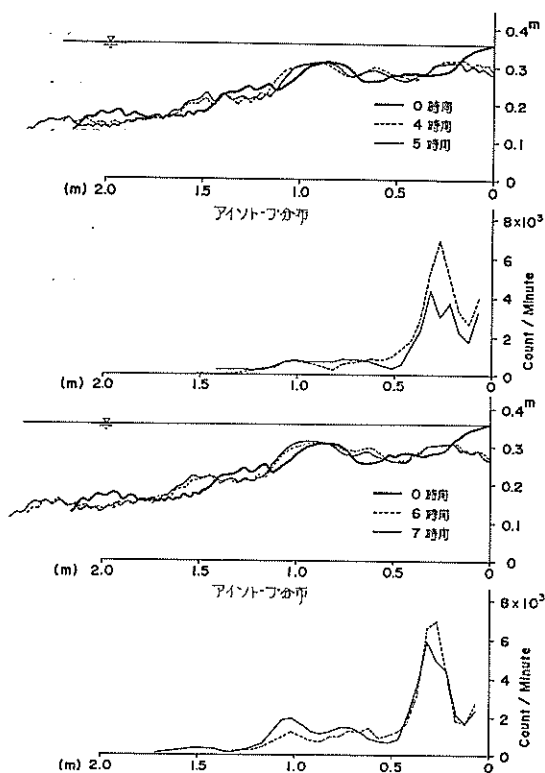


図-37-3 暴風海浜 $H_0/L_0=0.033$, $d/H_0=0.0079$, $X/X_b=0$ の場合の海底断面形状の時間変化 (Ⅲ型洗掘の例)

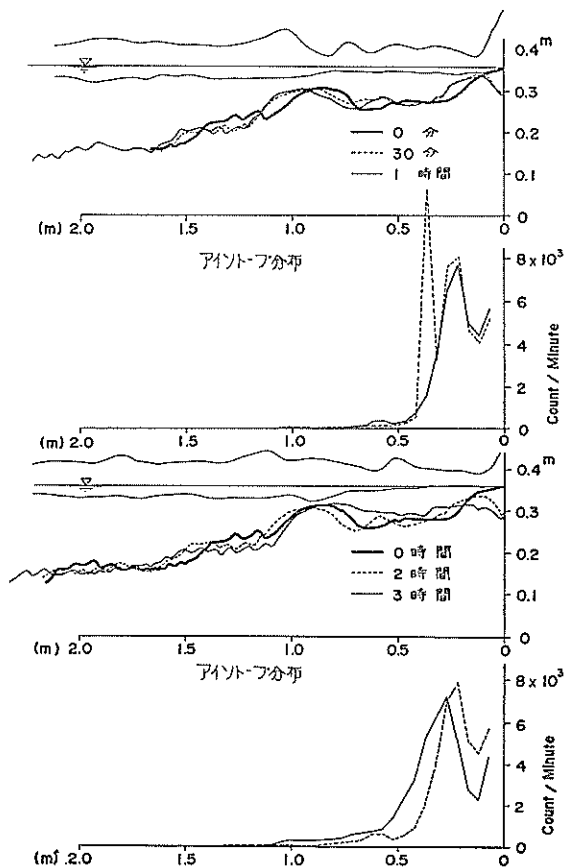
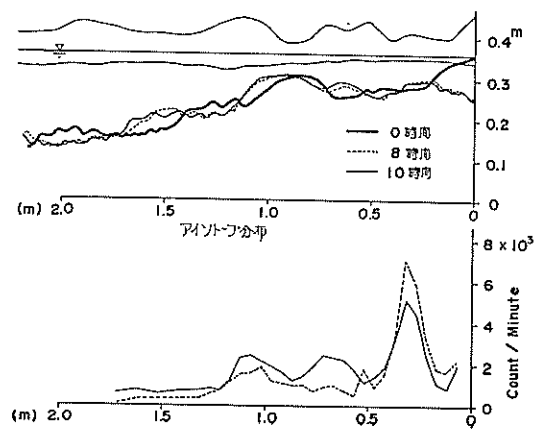


図-37-4 暴風海浜 $H_0/L_0=0.033$, $d/H_0=0.0079$, $X/X_b=0$ の場合の海底断面形状の時間変化 (Ⅲ型洗掘の例)



し、それにつれて徐々に洗掘が進む、いわゆるⅢ型の典型が現われるのである。また上の場合、洗掘孔が大きくなると、波は堤体前で完全に砕けることがなくなり、砕け波の1部は、重複波のごとき反射をするようになったため、洗掘面に小さなりリップルが見られるが、これは正常海浜におけるⅢ型洗掘の洗掘孔にも見られたものである。図-38は、暴風海浜で $d/H_0=0.0079$ の場合の X/X_b の種々の値に対する波の飛沫の立上がり高を示したものであるが、上の例、すなわち $X/X_b=0$ の場合は、他の場合に比べて飛沫の立上がり高も大きい。これは、堤脚部に作用する波の運動量が大いことを示すが、今一つ、底に沿う戻り流れが増大したことによる、沖向の底質移動が加わったため、図-28に見られるように、他の場合に比べて最も深く洗掘される結果となったのであろう。

次に、同じⅢ型であっても、第一砕波点付近における洗掘の例として、図-39に $d/H_0=0.00050$, $X/X_b=0.86$

図-38-1 暴風海浜 $H_0/L_0=0.033$, $d/H_0=0.0079$,
の場合の波による飛沫の立ち上がり高
の時間変化

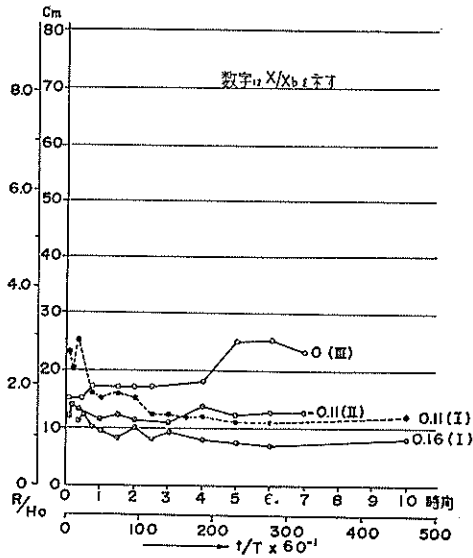


図-38-2 暴風海浜 $H_0/L_0=0.033$, $d/H_0=0.0079$,
の場合の波による飛沫の立ち上がり高
の時間変化

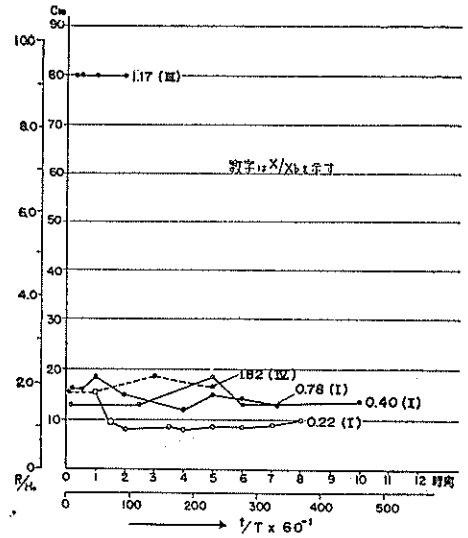


図-39-1 暴風海浜 $H_0/L_0=0.051$, $d/H_0=0.00050$,
 $X/X_b=0.86$ の場合の海底断面形状の
時間変化 (III型洗掘の例)

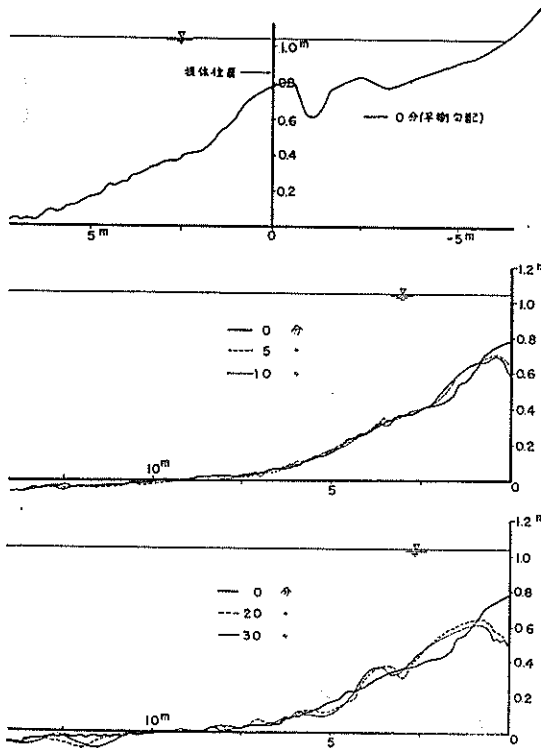
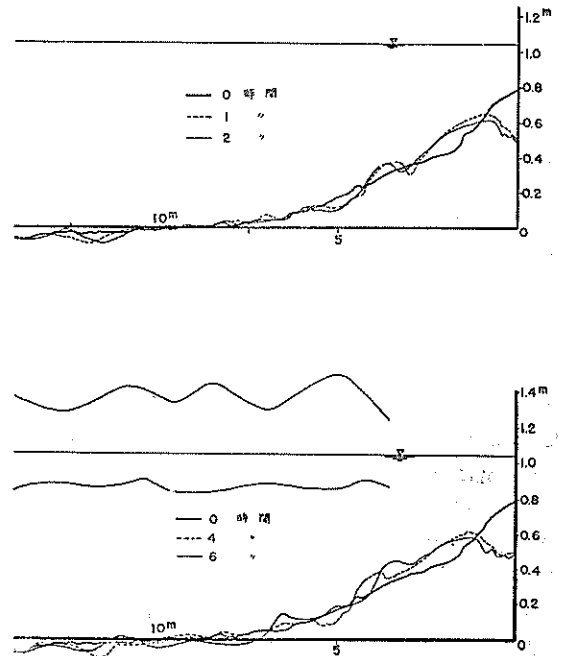


図-39-2 暴風海浜 $H_0/L_0=0.051$, $d/H_0=0.00050$,
 $X/X_b=0.86$ の場合の海底断面形状の
時間変化 (III型洗掘の例)



の場合を示す。堤体は、沿岸砂州の頂部より多少沖側に設置された。波作用5分で、洗掘深 Δh は14cmを示し、その洗掘砂はそのすぐ沖側に堆積した。10分後では、 Δh は22cmとなり、その後徐々に増大して行ったが、同時に沿岸砂州の沖側法先付近にも砂が集まり、1時間後には小さい山のような形状を示した。その後は、洗掘深 Δh にほとんど変化は見られないが、洗掘孔の幅は次第に拡がり始め、洗掘砂は沿岸砂州の沖側法面に堆積した。6時間後の断面では、沿岸砂州はほとんど消失し、洗掘面には、小さいリップル状の凹凸ができた。また、この頃には、洗掘孔も重複波による洗掘に特有なV字形の様相を示してきた。

以上のように、第1砕波点より少し岸側上堤体を設けた場合は、初めは砕波による落下の強い水流により洗掘孔は急速に大きくなるが、その後は、堤体前面の水深の増加にともなって堤体により沖向に反射される波の割合も次第に増大し、重複波によるゆるやかな洗掘に移って行くものと思われる。

他の場合も含めて、Ⅲ型洗掘の代表的断面変化を、図-40, 41, 42に、また、それらの場合の洗掘深 Δh の時間変化を図-43に示す。図-41に示した $d/H_0=0.0044$ で $X/X_b=0.58$ の場合は、他の場合のように最終的な洗掘孔がV字型を示す様相が見られないが、この部分は

図-40 暴風海浜 $d/H_0=0.0079$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=1.3\text{sec}$, $d=0.69\text{mm}$) に対するⅢ型洗掘の海底断面変化

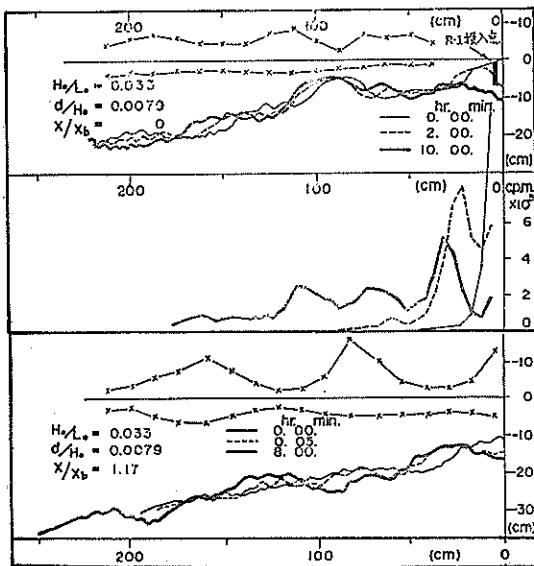


図-41 暴風海浜 $d/H_0=0.0044$ ($H_0=8.7\text{cm}$, $T=1.3\text{sec}$, $d=0.38\text{mm}$) に対するⅢ型洗掘の海底断面変化

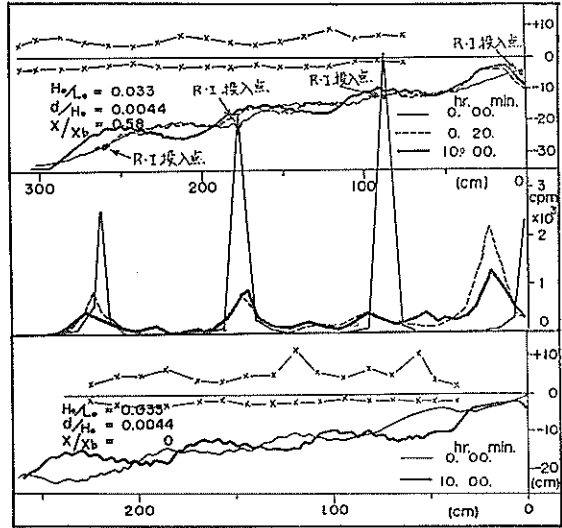
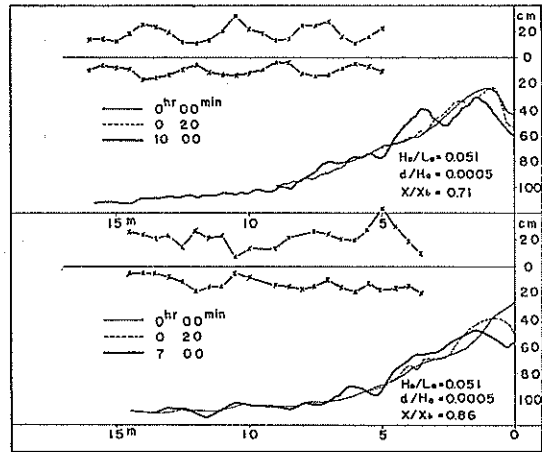


図-42 暴風海浜 $d/H_0=0.00050$ ($H_0=42\text{cm}$, $T=2.3\text{sec}$, $d=0.21\text{mm}$) に対するⅢ型洗掘の海底断面変化



他と比較して砕波点からの相対的距離がより大きかったために、重複波による洗掘機構の様相を帯びるまで堤体前の水深が深くならなかったことによるであろう。

(4) Ⅳ型洗掘

Ⅳ型洗掘の例として、図-44に $d/H_0=0.0044$, $X/X_b=3.0$ の場合を示す。

図-43 暴風海浜IV型洗掘に対する洗掘深 Δh の時間変化

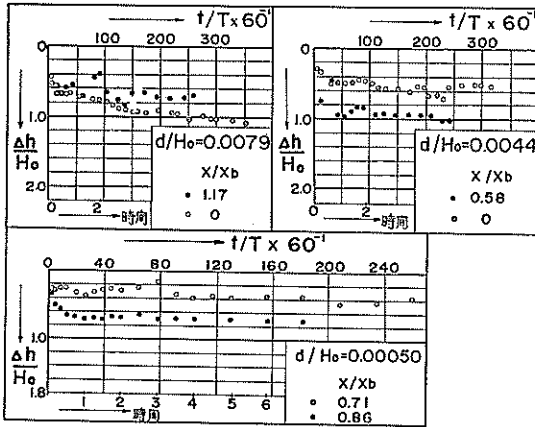
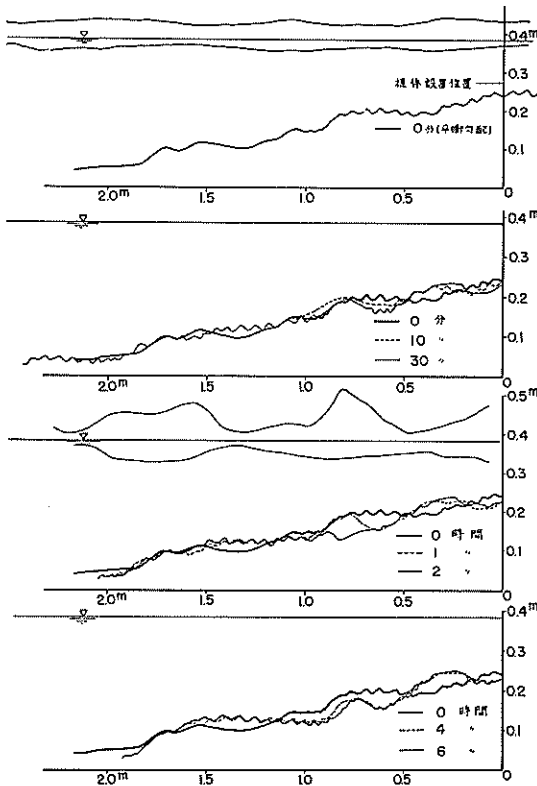


図-44 暴風海浜 $H_0/L_0=0.033$, $d/H_0=0.0044$, $X/X_0=3.0$ の場合の海底断面形状の時間変化

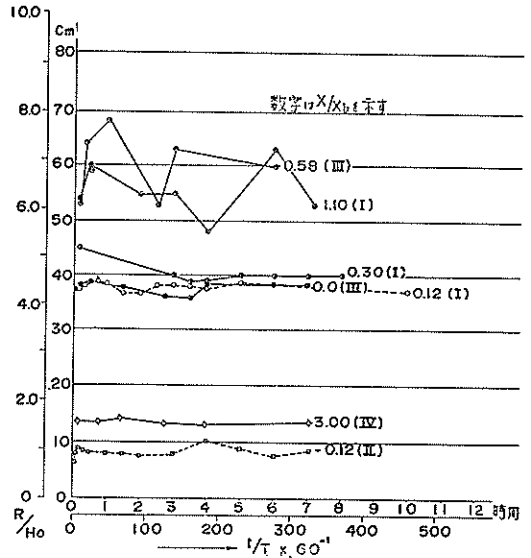


堤体は、砕波点から十分遠く離して、沖浜に設置された。10分後の断面では、堤脚部の洗掘深 Δh はほとんど零に近いが、少し沖側では13cm位掘れている。すなわ

ち、1時間後の海底断面と波高分布を対比してみると、重複波の腹より少し離れた所が洗掘され、その洗掘砂はそれぞれ隣りの節の位置に集まっているのがわかる。これは、正常海浜の型洗掘の場合にも見られたもので、そのような海底地形の変化の影響が堤脚部に及び、堤脚部では、極めてゆるやかな洗掘が行われる。

図-45は、暴風海浜における $d/H_0=0.0044$ の場合の飛沫の立上がり高を示したものである。図中 $X_b/X=3.0$ の線からも知れるように、堤体前で、ほとんど完全な重複波が生じている。

図-45 暴風海浜 $H_0/L_0=0.033$, $d/H_0=0.0044$ の場合の波による飛沫の立ち上がり高



他のIV型洗掘の代表的な例を図-46に、また、それらに対する洗掘深の時間的変化を図-47に示す。

図-47を見ると、 $d/H_0=0.0044$ の場合は、3時間頃に埋戻しがわずかに見られるが、これは何らかの、わずかな外力の変動によるものと考えられ、本質的な埋戻しとは、考えられない。

以上、暴風海浜における洗掘機構について述べたが、図-28に示した洗掘型の海底断面にその分布において、第1砕波点付近の洗掘型の分布が、特に乱れている。その最も大きな原因は、波の周期が短いために、堤体の反射によって生ずる第一の重複波の腹の位置が、正常海浜と比較して堤体のすぐ近くに生ずることではないであろうか。すなわち、前述したように、堤体前の海底は、

図-46 暴風海浜におけるIV型洗掘の海底断面変化

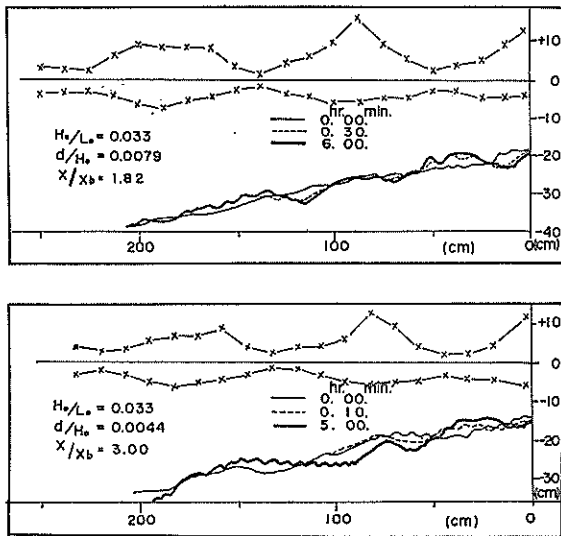
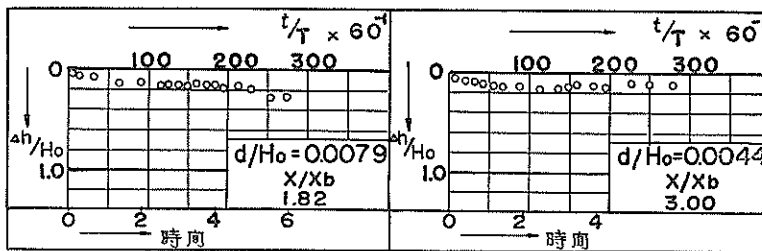


図-47 暴風海浜IV型洗掘に対する洗掘深 Δh の時間変化



5-1 堤体設置の海底断面に及ぼす影響

3, 4 節の例に見られたように、堤体を設置することにより海底断面は相当に変化した。そして、堤脚部での洗掘は、堤体沖の海底断面の変化と密接な関係があった。ここで、堤体設置により、海底断面がどのような影響をうけるかを、少し検討してみる。

初期勾配として用いた平衡勾配は、海底に沿う向岸流、砂粒子に働く重力、及び摩擦抵抗などの釣合いの上に形成されたものである。従って、海底断面の変化について論ずる場合、その外力たる海底に沿う水の流れについて、まず言及する必要がある。

Longuet-Higgins は、水路において、ある断面を通過する正味の水移動量が零と仮定して、進行波による質量輸送について理論的解析を行い、水の質量輸送に関する理論式を導いた。図-48は、その結果から、進行波の質量輸送速度の鉛直分布を、3つのケース、すなわち、

重複波の腹よりわずかに岸側では水深が常に節の部分より深くなる。そして、その腹の部分が周囲に比較して浅ければ浅いほど、節へ向かっての砂移動量も、多くなる。重複波の腹の位置における水深がある程度浅いと、堤脚部までその影響が及び、わずかな埋戻しが現われることがある。例えば、図-28の $d/H_0=0.0044$ の場合の第一碎波点に見られるI型洗掘は、このような効果によるものと思われる。

5. 考察

以上、洗掘現象を、正常海浜と暴風海浜について実験結果を示しながらそれらの特性をあげて来たが、ここでは、両者の相違と縮尺効果に重点をおきながら、洗掘現象を実験の範囲内で総括的に考察してみる。

$kh=0.5, 1.0, 1.5$ の場合について、プロットしたものである。ここで、 $k=\frac{2\pi}{L}$ (L は波長)、 h は水深で、 $F^{(P)}(\mu)=\frac{5}{8k^2h^2}(3\mu^2-1)$ で表わされ、水の質量輸送速度を表わす函数である。上の式で、 $\mu=Z/h$ で Z は、水面から深さ方向にとったものである。

図から、 kh が小さくなるほど、いいかえれば、水深が浅くなるほど、水面からある深さまでは沖向き、それ以上は岸向きの質量輸送流が卓越するようになるのわかる。著者らの実験において、第1碎波点より少し沖側(沖浜領域)の水深における kh の値を、実験に用いた4種の波について示すと、(表-1参照)、図-49のようになる。図から、正常海浜 ($T=3.0\text{sec}, 5.1\text{sec}$) においては、明らかに、 $kh < 0.5$ であり、暴風海浜 ($T=1.3\text{sec}, 2.3\text{sec}$) においても、 kh は、 $T=1.3\text{sec}$ のとき、0.5近傍の値を示し、 $T=2.3\text{sec}$ のときでも、0.5

図-48 進行波の質量輸送の鉛直分布

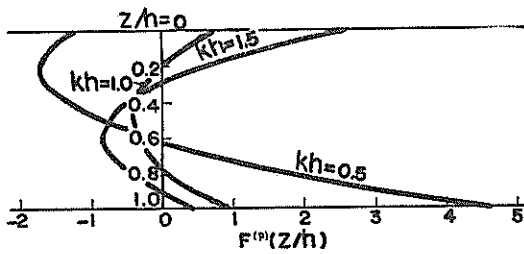
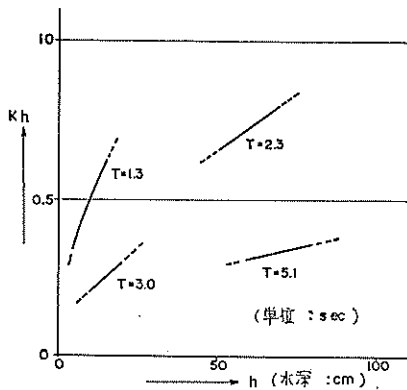


図-49 本実験における沖浜領域での kh の値



より大きいとはいえ、1.0よりは、はるかに小さな値を示している。これらの事実から、本実験の範囲の沖浜領域では、第一砕波点に近くなるにつれて、図-48の $kh=0.5$ の場合のように、ある水深より上では沖向の質量輸送流が卓越し、それ以深では、岸向きの質量輸送流が卓越しているものと思われる。

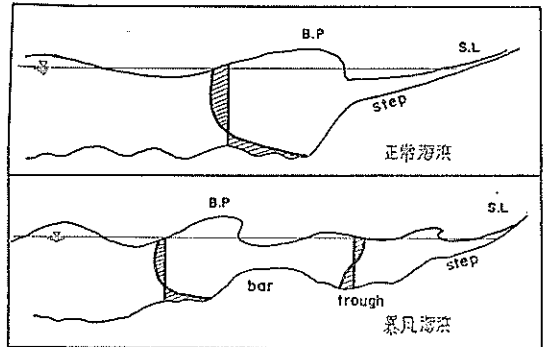
以上は、沖浜領域における質量輸送速度分布であるが、砕波帯内においては、様子もかなり違って来るのである。樫木は、差圧式流速計を試作し、それを用いて、砕波帯内の流速分布を測定し、次のような結果を得ている。砕波帯内での水粒子の輸送速度分布は、波形勾配が大きい波と小さい波とでは、両者の砕波時の波形が異なるため、かなりの相違が見られる。波形勾配が大きいと、崩れ波となって上層部から白泡をたてて砕けるので、砕波後の岸向きの流れにおいては、上層部では流速が大となり、海水を陸側へ輸送する力が非常に強いが、下層では、その力が弱くて強い戻り流れがある。

一方、波形勾配が小さいと、巻き波となって砕け、上下両層部であまり速度差を生じない。これは、一様勾配の模型浜での実験結果であるが、移動床の模型浜でも、

同様のことがいえるであろう。

以上の事実を、正常海浜、及び暴風海浜について、概念的に示したのが、図-50である。

図-50 無堤時における質量輸送分布の概念図



図のように、無堤時においては、第1砕波点(図中B.P.)のすぐ沖側では、いずれの海浜でも、水表面からある水深までは沖向き、それ以深では岸向きの質量輸送がある。砕波帯内(B.P.より岸側)においては、正常海浜では上下層に流れの違いが見られないが、暴風海浜では、水面からある水深までは岸向き、それ以深は沖向の流れがある。従って暴風海浜の海底においては、砕波点の沖側では岸向きの質量輸送流が、岸側では沖向きの流れがあり、沿岸砂州は、この両者の流れによる底質輸送力が釣合ったところに形成されたものであろう。

無堤時における、このような流れの分布は、堤体設置後の海底断面変化、さらには堤脚部での洗掘を考察する上に極めて重要と思われる。

まず、正常海浜の前浜領域に堤体設置した場合を考える。堤体設置により、波の反射率が急に増し、無堤時に比べて全体としての離岸流は増加するが、その流速分布は無堤時と比較して表面に集中するので、結果として水底近くの戻り流れが減少するものと思われる。

このことは、図-50の正常海浜における水底附近の岸向きの質量輸送流が増大することにもなり、底質は岸向きへ移動する。正常海浜の前浜領域に堤体を設置したとき、ある程度洗掘された後、常に埋戻しが認められる、いわゆるI型洗掘が現われたのは、このためによるものであろう。

堤体が波の遡上限界点近くに設置された場合は、堤の反射による離岸流が無堤時より増加するとしても、堤体に当る水流の厚さが薄いので、離岸流の流速分布は無堤

時とほとんど変りなく、沖浜における底に沿う戻り流れもほとんど影響を受けない。従って堤脚部では、初期の洗掘を維持するにとどまる。正常海浜で、Ⅰ型洗掘の岸側にⅡ型が見られたのは、このような機構によるものであろう。

堤体設置位置が、前浜領域から、さらに沖側へ移ると、堤脚部の水深も深くなり、堤体に作用する波は、重複波へと移行するので、以上に述べたような進行波による質量輸送の特性は失われ、海底断面は、重複波の下での平衡断面に近づいて行く。この場合、波が段波として堤体に作用するときはⅢ型、完全反射するときは、Ⅳ型が現れるのは、3節で述べた通りである。

次に暴風海浜の砕波帯内に堤体を設置した場合を考える。この区域では、図-50からわかるように、砕波後の岸向きの運動量が、砕け波の形で水表面近くに集中している。堤体が設置されると、それがそのまま沖向きに反射されることになり、無堤時に比べて上層における沖向きの流れが増大する。入射する運動量は無堤時と同じであるから、これは底にそう沖向きの流れの減少をきたす。この底にそう戻り流れの減少は、沿岸砂州のすぐ沖側までも及ぶものと思われる。従って堤体沖側の暴風砂州付近を構成していた砂は、堤体の方へ運ばれることになる。暴風海浜の場合、この区域に堤体を設置したとき、急速な埋戻しのあるⅠ型洗掘が見られたのは、このためであろう。

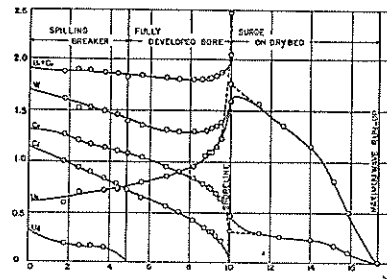
次に堤体が、暴風海浜の前浜に設置されたときは、正常海浜におけるような埋戻しは行われず、堤体設置の戻り流れに対する影響が、両者において異なることを思わせた。この理由は明らかでないが、次のようにも考えられる。正常海浜では、ステップ先端で1回砕波した波が、直接前浜領域を遡上するので、その水量も多い。従って、前浜に堤体を設置した場合、堤体に作用する水流の厚さが、かなり厚いので、堤の反射による戻り流れは水表面に集中することになる。これは底にそう戻り流れの減少を意味し、堤脚部の埋戻し効果をもたらす。一方、暴風海浜においては、沿岸砂州付近、すなわち、第1砕波点で砕波し、エネルギーの著るしく減少した波が、ステップの近くで第2砕波し、前浜を遡上するのでその水量も少い。従って、前浜に設置された堤体に作用する水流の厚さは、正常海浜の場合に比べて著るしく薄く、堤の反射により戻り流れの流速分布も無堤時の場合と、ほとんど変わらない。これが、正常海浜の場合のような埋戻し効果が見られない原因ではないかと思われる。しかし、それは作用する波の波形勾配と海底断面形

状の相違によるものとも思われ、明確さを欠いている。正常海浜と暴風海浜の前浜における、このような違いを解明するには、詳細な流速分布の解明が必要であり、今後の課題であらう。

5-2 洗掘深の極大、又は最大値のおこる位置

前述したように、洗掘深は、正常海浜、暴風海浜共に砕波の落下点付近で極大値を示した。海浜断面に沿う最大、又は最終の洗掘分布が、正常海浜では極大値を1つもつV字型、暴風海浜では極大値を2つもつW字型であったのは、前者においては1回砕波、後者においては回砕波であったためである。砕波の落下点付近で極大を示す理由は、そこでは水粒子速度が極大を示すからである。例えば、Freeman-Méhaute は、鉛直方向の流速を無視して、砕波限界の孤立波が1/10の勾配を進行し、汀線より岸側は1/5の勾配をもつ斜面上をうち上げる場合を、特性曲線法で計算し図-51を得た。ここで、Wは

図-51 波の front の特性の変化 (F-Mより)



Bore の伝播速度で、CとUは、それぞれ波速と水粒子の水平速度であり、添字のuとdは、それぞれ、Bore-front の後面、及び前面を示す。この図で、水粒子の水平速度 U_u は、汀線付近、すなわち砕波の落下点で、急激に大きくなっている。この計算は、一様勾配で Bore が発生し、崩れ波として砕ける場合で、そのまま著者らの実験結果に当てはめることは出来ないが、少なくとも砕波の落下点付近で水粒子速度が正常海浜のみならず、暴風海浜でも極大になることは想像される。

次に、洗掘深の最大値の生ずる位置について考えてみる。まず、正常海浜の場合は、洗掘深の極大値は通常1カ所であり、その位置は、図-8を見ると、 d/H_0 が0.0079と0.0014の場合は汀線近く、 X/X_b がほぼ0.2付近にある。しかし、 d/H_0 が0.00081のときは、それが $X/X_b=0.65$ 付近にある。この場合は、平衡断面が前二者と異って、ステップの勾配が $X/X_b=0.2$ のところで折れており、波は2段階砕波していた。これは、

図-6 からも知れるように、この実験ケースが沿岸砂州の発生限界曲線の近くにあり、厳密に正常海浜とはいえないためである。3. においては、ステップが十分発達していたので正常海浜として取扱ったが、洗掘様式の観点から考えれば、これは暴風海浜に入れるべきであったようである。すなわち、この場合の洗掘深の海浜断面にそっての分布曲線を見ると、第一砕波点と汀線附近の2個所に極大値をもつように思われる。

暴風海浜に対しては、図-28を見ると、洗掘深の最大値は、 $d/H_0=0.0044$ に対しては、 $X/X_b=0.58$ に、 $d/H_0=0.00050$ に対しては、 $X/X_b=0.86$ で、いずれも第一砕波の落下点付近で起こっているのに反し、 $h/H_0=0.0079$ に対しては、汀線で起こっている。この場合も、図-6 を見ると、 $d/H_0=0.0079$ に対する平衡海浜は限界曲線の近くにあり、図-28では明らかにその海底形状に沿岸砂州が見られるが、正常海浜の特性もそなえている。すなわち、 $X/X_b=0.3$ 付近に明瞭なステップが存在する。これは、 $d/H_0=0.0079$ の場合、波が、第一砕波点ではさほどエネルギーを失わず、汀線に作用することにもよるであろう。

以上のように、沿岸砂州の発生限界曲線の近傍では明瞭ではないが、一般に最大の洗掘は、正常海浜では、汀線より少し沖側で起こり、暴風海浜では、第1の沿岸砂州付近で起こるといってよいであろう。

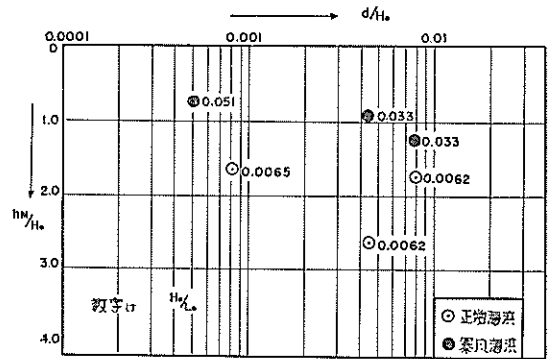
5-3 最大洗掘深の最大値

次に、一つの海浜の種々の位置に堤体を設置したときに見られる時間的最大の洗掘のうちの最大値、すなわち、最大洗掘深の最大値について考えてみる。

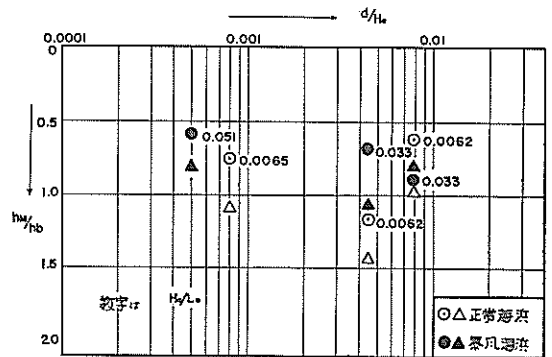
図-52は、各平衡勾配に対する最大洗掘深の最大値 h_M と粒径との関係を示したものである。図の(1)は、縦軸に沖波波高に対する相対洗掘深 h_M/H_0 をとり、(2)は砕波水深に対する相対洗掘深 h_M/h_b によって示してある。但し砕波水深については、実験により砕波水深を正確に求めることは困難であるので、(著者らの実験における砕波水深を用いたのが、図の△印) 砕波指標により求めた砕波水深に対する相対洗掘深も、同時に記しておいた。(図の○印)

図の(1)によると、正常海浜の方が暴風海浜より h_M/H_0 の値が大きくなり、とくに $d/H_0=0.0044$ で、 $H_0/L_0=0.0062$ の場合は、沖波波高の2.6倍も洗掘されている。これは、正常海浜の場合、一段砕波であるために、波のエネルギーが一度に流れのエネルギーに変換されるためと思われる。一方、図の(2)から、 h_M/h_b は、 h_M/H_0 の場合ほどの波形勾配による違いが見られない。また、著

図-52 最大洗掘深の最大値と、粒径との関係



(1)



(2)

者らの実験における砕波水深を用いた場合(図の△印) $d/H_0=0.0044$ 、 $H_0/L_0=0.0062$ の点を除けば、 h_M/h_b の値は、ほぼ 1.0 付近にあるようである。砕波指標により求めた砕波水深を用いた場合(図の○印)は、 d/H_0 が小さいほど h_M/h_b は小さくなる傾向を示し、この実験の範囲では、 h_M/h_b は、その大部分が 1.0~0.5 の範囲にきている。

5-4 洗掘孔の形状について

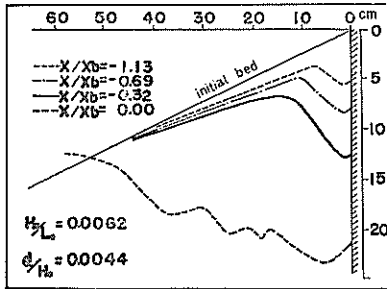
堤脚部の洗掘曲面が、いかなる形状をしているかということは、洗掘機構を考察する上に、また、現地における洗掘計のデータを解析する上に、極めて興味深い。実験データが少ないので、それを解析的に取扱うことは出来ないが、ある程度、定性的なことはいえるようである。

3, 4節において、洗掘孔を大体3つの形に分類できた。すなわち、I、II型洗掘でのそれは逆直角三角形、III型では凹面形、IV型ではV字形であった。

以下、それらの代表例をあげ説明してみる。

図-53は、 $d/H_0=0.0044$ 、 $H_0/L_0=0.0062$ の場合において、前浜のいろいろな位置に堤体を設置したときの、最大洗掘時における洗掘孔の形状をプロットしたもので、Ⅰ、Ⅱ型洗掘における逆直角三角形の代表例である。

図-53 逆直角三角形の洗掘孔の例



る。図から、堤体位置が汀線より岸側のときは、洗掘孔の形状は、ほぼ、相似形をなしているのがわかる。

土屋氏は、水平噴流による洗掘においては、洗掘孔に水平軸をもつ局所的な渦が発生し、これが洗掘形状に大きく関係するが、また渦そのものが、洗掘孔に応じて発達することから、両者関連して相似な洗掘形状を作っている。前浜領域においては、この噴流による洗掘と類似の現象を示し、水平軸をもつ軸が発生するので、同じ理由から、洗掘孔の形状が互いに相似形をなしたものであろう。一方、堤体が汀線に設置された場合、すなわち、 $X/X_b=0$ のときは、洗掘の初期においては、噴流による掘削と類似の洗掘形状を示すが、洗掘孔が大きくなるにつれ、単なる噴流と類似の洗掘とは考えられなくなる。

図-54 凹面形洗掘孔の1例

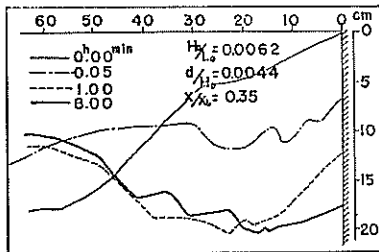


図-54は、Ⅲ型洗掘における代表的な凹面形洗掘孔の時間的変化を示したものである。初期における洗掘孔は噴流による洗掘に近いが、やがてステップが崩壊して、重複波による洗掘に近くなり、洗掘孔の形状も、別の形

態をとっている。

図-55 V字形洗掘孔の1例

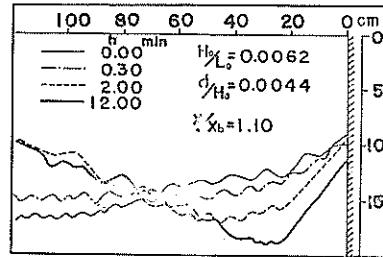


図-55は、Ⅳ型洗掘における代表的なV字形洗掘孔の時間的変化を示す。この場合は、噴流による洗掘とは、まったく違っており、堤体より少し沖側の部分が掘り下げられ、それと釣合うために堤脚部の砂が沖向きに移動する。それが堤脚部の洗掘として現われるものである。

5-5 洗掘機構について

洗掘深の時間的変化から、洗掘形式をⅠからⅣ型まで分類し、正常海浜と暴風海浜について、実験例をあげながら、それぞれの機構を説明してきたが、最大洗掘深を示す位置では、いずれの場合もⅢ型であった。Ⅲ型洗掘は、初め急激に洗掘された後、徐々に洗掘されて定常状態に達するものである。急激に洗掘されるのは、砕波によって波のエネルギーが、急速な水粒子速度に変わった奔流によるものであり、徐々に洗掘されるのは、反射波が増大による重複波の発生によるものであることに述べた。

従って、海浜における波による直立壁堤脚部における洗掘は、機構上からは、砕波によって生ずる奔流のごとき向岸方向の流れが壁体に当たって堤脚部の砂を攪乱し、反射するときに持去ることと、堤体による波の反射によって生じた不完全重複波が、砂を沖向きに持去ることの2つから成立っている。前者のみによる洗掘がⅡ型洗掘であり、後者のみによるものがⅣ型洗掘である。

従って、砕波しない沖浜帯では常にⅣ型洗掘であるべきであるが、重複波それ自身の、底にそう水粒子速度と釣合うための海底断面変化が、堤脚部へ及ぶことがあれば、多少の埋戻しが起こり、Ⅰ型となることがある。また、完全に砕波した波、すなわち向岸方向の流れの作用のみをうける前浜では、Ⅱ型となるべきであるが、無堤時の平衡勾配それ自身が、向岸流と離岸流の釣合いの上に形成されたものであるために、底にそう戻り流れの減少の効果のあらわれる所では、Ⅰ型洗掘となる。

6. あとがき

以上の造波水路での二次元的洗掘実験の結果を要約すれば、次のようになる。

- (1) 波による堤脚部の洗掘は、堤体の設置水深より、むしろ砕波線に対する相対的設置位置によって定まる。
- (2) 堤体を設置したとき、海底地形は、堤脚部に極く近いところだけが変化するのではなく、相当沖側までその影響をうけ、またその沖における海底地形の変化は、堤脚部における洗掘に密接な関係がある。
- (3) 堤脚部における洗掘は、その時間的変化から、4つの形式に大別され、各々の形式が現れるのは、場所的に定まった傾向がある。
- (4) 最大洗掘深の場所的分布は、正常海浜ではV字形をなし、砕波の落下点付近に1つの極大値があるが、暴風海浜ではW字形をなし、第1砕波の落下点及び最終砕波の落下点付近に、2つの極大値がある。
- (5) 最大洗掘は、第1砕波の落下点付近で起き、洗掘形式は、Ⅲ型である。
- (6) 最大洗掘深の最大値は、波形勾配が小さくなるほど、大きい。
- (7) 最大洗掘深の最大値は、暴風海浜では底質の粒径が小さくなるほど減少する傾向があるが、正常海浜では明確にそのような傾向は見られない。

前節までは、これらの事実に対して、定性的解釈を与

えてきたわけであるが、中には明解な説明が困難な現象も多々あり、今後の課題として残っている。その解決のための1つの方法は、先にも述べたように、流速分布の測定である。これに対しては、現在、新しい流速計の試作を進めている。

しかしながら、この実験は、二次元的なものであり、この結果をそのまま現地に適応させることは勿論出来ない。特に、離岸流、あるいは戻り流れの分布は、現地と、この模型では相当に異なる筈である。一般に現地では、波は海岸構造物に斜めに作用し、構造物の面にそう流れが生ずるため、離岸流や戻り流れはこの実験のように強くはならないのではないかと思われる。本実験で埋戻しが起こったのは、この戻り流れの変化によることが大きいわけであるから、現地で、このような埋戻しが顕著にあらわれるかどうか疑わしい。現地におけるもう1つの問題は、堤にそう流れのために、堤体前で攪乱された砂が、堤にそって横方向に移動するという現象である。また、この実験は規則波による実験である。現地における波は、不規則波であり、かつ時間的に、常に変化している。従って、海浜のいかなる位置に堤体を設置したとしても、波の条件によっては、砕波の落下点付近に相当するようになることは、十分あり得るわけである。

以上のように、この実験には多くの問題が残されているが、波による洗掘機構にに対する考え方に、ある程度の指針を与えることはできたものと信ずる。

最後に、本実験や、資料の整理に多大の御協力を得た同研究室、平原、杉山、浅川の各技官に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 榎木享, 川崎芳一 : 海岸堤防脚部の洗掘について, 京大防災研究年報第4号, 昭, 35
- 2) Masashi Homma, Kiyoshi Horikawa : A Study of Submerged Breakwaters, Coastal Engineering in Japan, Vol. 4 1961.
- 3) Russel, R.C and Sir C. Inglis : The Influence of Vertical Wall on a Beach in front of it, Proc. of Minnesota Intern of Hydraulics Convention 1953.
- 4) 佐藤昭二, 田中則男, 入江功: 放射性同位元素の漂砂模型実験への利用について
港湾技術研究所 昭和39年8月 港湾技研資料 N.o 13
- 5) 岩垣雄一, 野田英明: Laboratory study of scale effects in two dimensional beach process
proc. 8th conf on Coastal. Eng. 1963
- 6) Longuet Higgins, N.S: Mass Transport in water waves, Proc, Cambridge Philo Society, Vol. 245, 1953
- 7) 榎木享: 漂砂の運動機構に関する基礎的研究(第一報)第5回, 海岸工学講演集, 1958
- 8) Freeman, J.C and B.C. Mehaute: wave Breakers on a Beach and Surges on a Dry Bed,
Proc. ASCE, Vol. 90, No. HY2, 1964
- 9) 土屋義人: 水門下流部における局所洗掘に関する研究, 京大防災研究年報第8号(昭.40.3)

昭和41年6月30日受付

湾港技術研究所報告 第5卷11号

1966年6月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 柿野屋印刷所
横浜市鶴見区鶴見町394