

土木研究所資料 第一二六号

富士海岸模型実験報告書

昭和五十一年三月

建設省土木研究所 鹿島試験所

企画課 武部様 / 部

土研資料第1126号

土木研究所資料

富士海岸模型実験報告書

昭和51年3月

建設省土木研究所

鹿島試験所

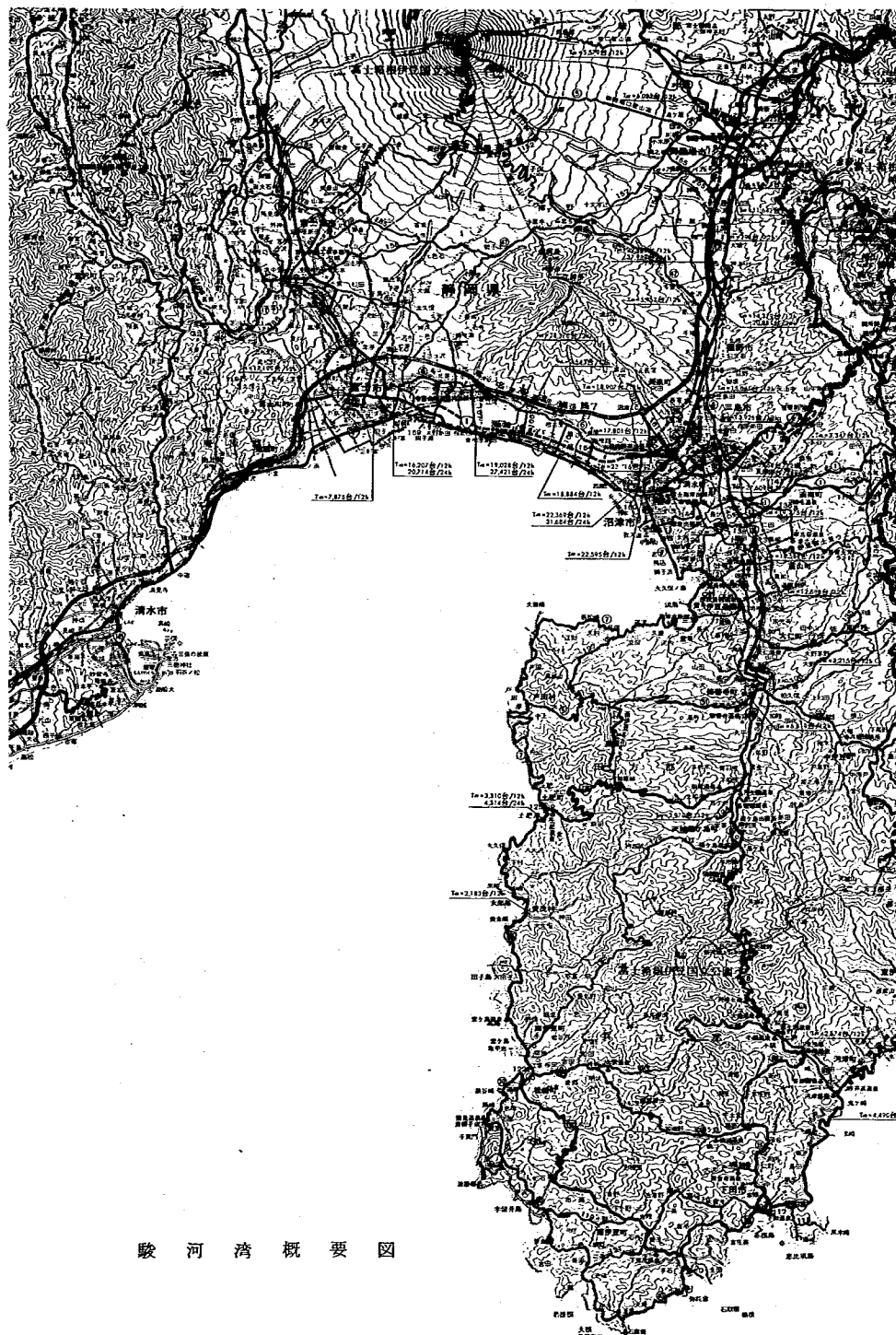
TM-116FT- 13 F- 895

ま え が き

富士海岸は駿河湾の湾奥に位置し、富士川の流出土砂によって形成された海岸である。駿河湾は急深で、1,000mの等深線が海岸近くまで入り込んでおり、海底勾配は $\frac{1}{2}$ から $\frac{1}{3}$ となっている。したがって波は岸近くまでエネルギーを失うことなく来襲し、古来より高波による災害を受けてきた。また近年においては海岸に供給される土砂量の減少ともなつて海岸侵食を生じている。

海岸研究室および鹿島試験所では、中部地方建設局沼津工事々務所の依頼によって、海岸侵食を防止するための各種工法の特徴を模型実験により調査したので、ここにそれらの結果を報告する。

TM-116FT- 13 F- 896



駿 河 湾 概 要 図

TM-116 FT- 13 F- 897

1. 目 的

富士海岸は図-1にその概要を示すように、駿河湾の湾奥に位置する蒲原から富士川の河口を経て沼津に至る延長約25kmの砂浜海岸である。駿河湾は南に向って湾口を開いており、また水深が非常に深く湾口で3,000m、湾の中央でも1,000mに達するために、台風によって発生した巨大な波が湾奥まで侵入する。この海岸は富士山の噴火によって生じた熔岩の基盤の上に、富士川によって運ばれてきた土砂が堆積して造られたものであり、海岸では砂礫による自然堤防が形成されている。背後は地盤の低い低湿地となっており、浮島ヶ原と呼ばれている。このようなことは図-1に示す地形図からも読み取ることができる。

昭和35年頃から三四軒屋地先および田子の浦港の西側の海岸で侵食がはげしくなり、昭和41年に台風26号が来襲した際には三四軒屋の海岸堤防が倒壊している。海岸の侵食状況は図-2に示すように富士川河口から東側に延長3kmにわたって昭和22年から48年までに平均約100mの河線の後退を生じており、また水深10mより浅い部分については昭和45年から48年の間に表-1に示すように土砂量に変化している。

海岸侵食の原因を明らかにし、その対策を検討するために富士海岸保全検討委員会が設けられ、昭和49年度から検討がなされてきた。この模型実験は対策工法を検討するために必要となる防砂突堤などの構造物の効果を明らかにするために行なわれた。検討の対象としたのは侵食のはげしい三四軒屋地先である。

富士海岸の侵食原因は、さきに述べた海岸の成因からも明らかなように富士川の河口から東へ向う沿岸漂砂が卓越している状況にあったが、富士川流出土砂量の減少、田子の浦港の防波堤による沿岸漂砂量の阻止などによっていると考えられる。またこの海岸は海底の勾配が $\frac{1}{50}$ ~ $\frac{1}{100}$ と非常にきつく、沖への砂の移動もあると推測される。したがって侵食を防止するには沿岸漂砂量を構造物によって調節し、場所的には漂砂量に変化しない状態にする必要がある。

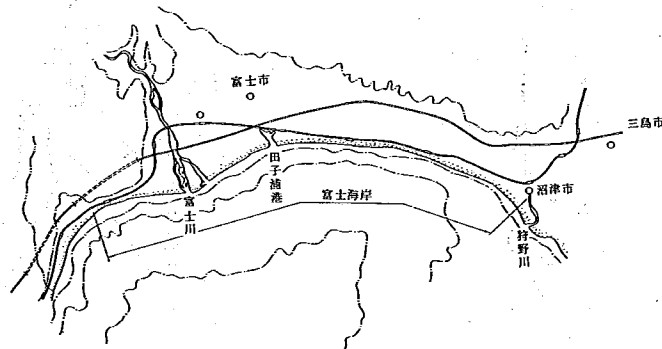


図-1 富士海岸平面図

TM-16FT-13F-899

- 2 -

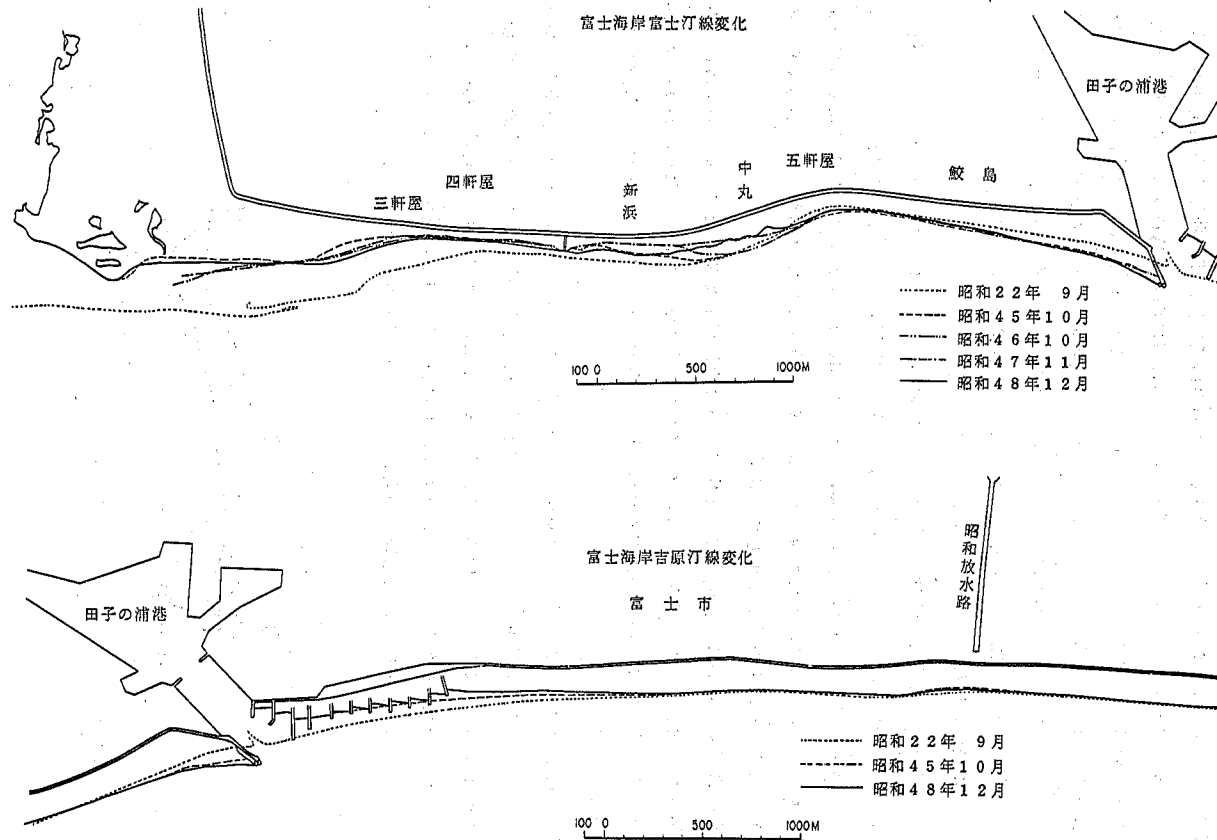


図-2 富士海岸の侵食状況

表-1 富士海岸の土量変化

	富 士 地 区				
	No 90~82	No 82~77	No 77~69	No 69~64	Total
43~44	193,270	587,952	-349,027	113,250	545,445
44~45	1,547,211	-818,562	2,057	91,250	821,974
45~46	-684,899	662,238	-149,100	-95,250	-267,011
46~47	1,457,711	189,193	-82,199	80,250	1,644,955
47~48	-436,630	-268,862	118,574	21,750	-565,168
48~49	2,127,538	-130,037	-222,926	194,25	1,794,000
total	4,204,201	221,921	-682,603	230,675	3,974,195
平均	700,700	36,987	-113,767	38,446	662,366

沿岸漂砂量を少なくするための構造物としては離岸堤と防砂突堤が考えられる。離岸堤は図-3に示すように海岸に平行に消波ブロックなどで造られる構造物であり、連続または不連続なものがある。その機能は波を消波することによって離岸堤背後の波高を小さくし、静穏な海域を造ることによって砂を堆積させ、また移動をおさえることにある。不連続堤の場合には離岸堤の背後に向う回折波を生じ、これによって背後への土砂の移動を生じる。また離岸堤が透過性の場合には沖から離岸堤背後への流れを生じ、離岸堤の両側と沖から砂を集める働きをし、堆積した形状をトンボロと呼んでいる。離岸堤の背後では波高が減少するために当然沿岸漂砂量も減少し、その減少の割合は離岸堤の高さ、設置位置または離岸距離、不連続堤の場合は長さで間隔などによって変化する。

防砂突堤は図-4に示すように海岸線に直角に造られる構造物であって、沿岸漂砂を直接止める働きをする。突堤によって漂砂が止められるために突堤の一方には砂が堆積し他方では侵食生じる。このために海岸線の方向が変化し、突堤のない場所においても沿岸漂砂量が減少する。ただ突堤に沿う沖への流れを生じやすく、海岸の砂が沖へ移動する可能性がある。突堤による沿岸漂砂の阻止効果は突堤の長さ、高さ、間隔などによって変化する。

この模型実験は主として防砂堤と離岸堤による沿岸漂砂の防止効果と構造物の規模や配置の関係および沖への砂の移動状況について検討するために行なった。また三四軒屋地先にこれらの構造物を設けた場合の効果についても侵食を防止するという観点から合せて検討を行なった。

三四軒屋地先においては侵食を防止するのみではなく、越波も防止しなければならないが、これについては検討を行なっておらず、また構造上の問題、例えばブロックの安定性についても調査はしておらず、今後の残された問題である。

TM-116FT-13F-900

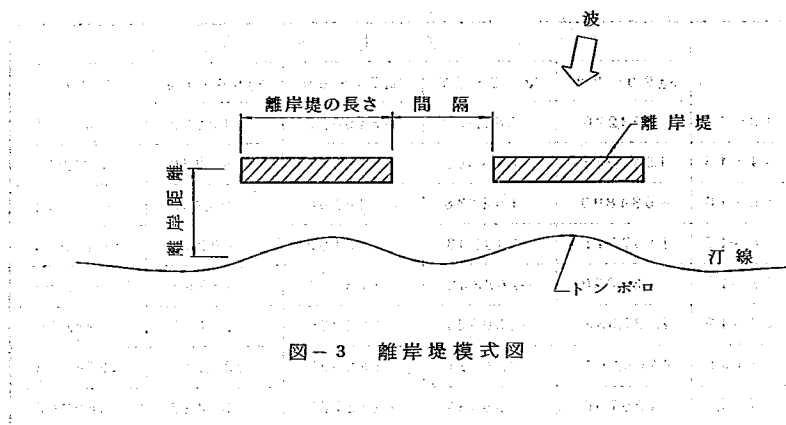


図-3 離岸堤模式図

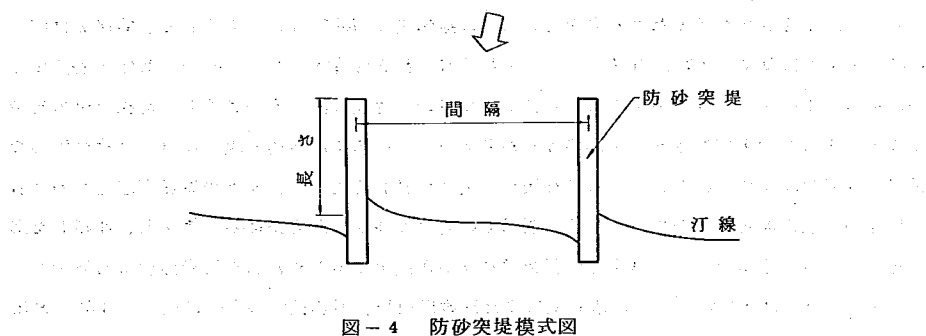


図-4 防砂突堤模式図

2. 模 型 実 験

2.1 相 似 率

模型実験を行なって現象を解明する場合においては、実物と模型の相似性が確立していなければならない。しかし一般には関連するすべての現象を相似することは不可能であるために支配的な二、三の現象を取り出して相似することが行なわれている。波浪に関連する模型実験においても重力、慣性力、粘性力、表面張力などが関係しているが代表的なものを取り出して解析している。

富士海岸の模型実験において重要な現象としては次の三項目があげられる。それらは波浪、海浜流、漂砂である。波浪に関する相似率については現象を支配しているのは重力と慣性力を考えられるので模型と実物のフルード数を一致させればよい。すなわち重力の加速度を g 、速度を V 、高さを h とし、模型と実物に関する量を添字の m と p でそれぞれ表わすと次のような関係が成立する。

$$\frac{V_p}{\sqrt{g h_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g h_m}} \quad (1)$$

したがって長さの縮尺を $1/S$ とすると次のような関係が得られる。

$$\frac{h_m}{h_p} = \frac{1}{S} \quad (2)$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{1}{\sqrt{S}} \quad (3)$$

この場合には表面張力などの影響を無視しているために、模型においても縮尺をあまり小さくすることは出来ない。移動床の模型実験においては歪模型、すなわち鉛直方向と水平方向の縮尺を変えることも行なわれているが、離岸堤の背後には回折波が侵入し、海浜形状もそれに対応した形になると考えられるが、回折現象については歪模型を用いると相似性は保たれない。また富士海岸は海底勾配が急なために砕波現象が海底勾配の影響を受け、歪模型では相似にならないと考えられる。

海浜流に関しては波と同様にフルード数を一致させる他に海底の摩擦係数を同じにしなければならない。しかし海底の物質が動く状態では砂レンなどが発生するために粗度を調節して摩擦係数を一致させることは困難である。

砂の移動現象に関しては波と流れによる移動機構が明確にならなければどのような量を相似にするのが最も適切であるかの判断は困難であるがここでは沿岸漂砂が卓越しているものとして次のような考えのもとで波浪条件や底質の選定を行なった。

砂などの波や流れによって移動する底質で造られた模型においては海底の形状を任意に制御す

ることが困難であり、沿岸方向の移動がない場合においても波と底質とが与えられるとある一つの平衡形状が得られる。したがって実際の海浜形状と相似な模型海浜形状を得るための波と底質の選定を行ない、海浜の横断形状をまず相似にする。次に底質の移動状況を相似にするのであるが、例えば海岸に直角方向の沿岸漂砂量分布などを相似にすることは困難であるのでまず底質の移動する高さを相似にすることとした。これは図-5に示すように汀線が1だけ前進した場合の

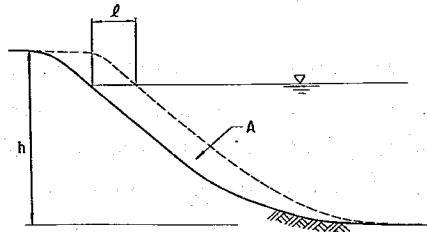


図-5 海浜変形の模式図

海岸に直角方向の断面積の増加量を A とし、 $A = l h$ の関係から求められる底質の移動高 h を実物と模型で相似にするものである。このような値が相似であれば、底質の移動範囲もほぼ相似になっていると考えられる。次に沿岸漂砂量についての相似性は次式で表わされる連続の式

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

から地形変化についての時間の縮尺を決めることによって保つこととした。なお(4)式で q は沿岸漂砂量、 x は海岸に沿った長さ、 t は時間である。したがって時間 t の縮尺は次のようになる。

$$\frac{t_m}{t_p} = \left(\frac{l_m}{l_p}\right)^3 \cdot \left(\frac{q_p}{q_m}\right) = \frac{1}{S^3} \cdot \left(\frac{q_p}{q_m}\right) \quad (5)$$

海岸線に対して直角方向の移動については実際の移動状況についても現在調査中であって明らかになっていないためにここでは定性的な検討にとどめておいた。

2.2 実験方法

実験を開始するに当り、昭和49年12月に実測した深浅測量成果をもとに、初期海浜形状を製作した。

実験区域は実験No 1～4で入道桶門を中心とする距離標No 70～80を、実験No 5～6で入道桶門の東側距離標No 65～75の2区間とした。

実験波の設定は、実験条件の項に示すように、波高3m、周期1.1秒を用いた。周期はモーターの回転数を変えることにより合わせ、毎回モーターを始動するたびにストップウォッチでチェックした。波高は、造波数の振幅を変える事により目的の波を与えることが出来る構造となっている。

2.3 実験装置

本実験は、土木研究所鹿島試験所平面水槽を利用した。水槽概略図を図-6に示す。

平面水槽は巾2.4 mあり、模型はその中に、鉛直・水平共1/100の富士海岸模型を、平均粒径約0.3 mmの粒度調整砂を用いて製作した。この平面水槽内に、巾6 mの造波機を持つ造波機を4基設置して実験を行なった。その他附属設備として、水槽内への給排水設備一式、写真撮影用ローリング・タワー、導波数・消波装置が等が設置されている。なお本実験においては模型下手側に漂砂採砂箱を設置した。

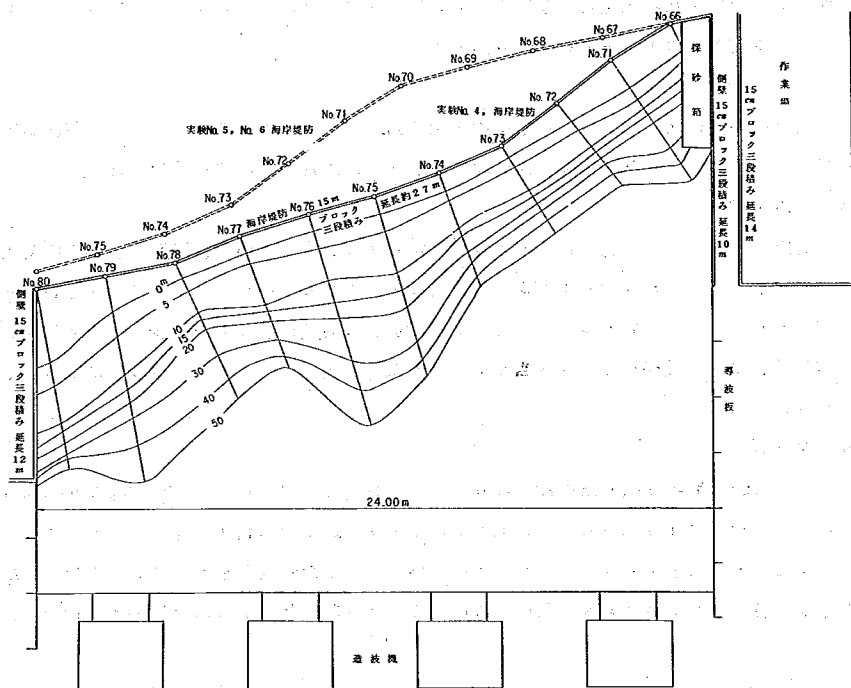


図-6 平面水槽概略図

2.4 測定方法

1) 波高測定

波高測定は、実験中所定の波が与えられているかどうかチェックするための入射波高測定と、砕波点に於ける波高測定がある。

入射波高は、造波板から5 m地点に4台の波高計をセットして2～5時間毎に入射波高の測定を行なった。測定には、階段抵抗式波高計を用い、記録にはペン書きオシログラフを用いた。

砕波々高の測定は、横断方向1 m間隔に砕波点における波高を木製の折尺を用いて読み取った。

2) 汀線測定

汀線の平面形状の時間的变化を知るために行なうもので、縦断方向の基準点から汀線までの距離をテープを用いて、横断方向50 cm間隔で測定した。測定は波を一時止め波のそ上をなくして行なった。測定時間は、実験開始前、2時間後、5時間後、10時間後、20時間後、25時間後の1ケースにつき6回である。

3) 流況測定

実験中の波の状況および流れの状態を知るもので、実験中に染料等を流し、写真撮影およびスケッチによって移動状況、波峰線、砕波状態、流れの状態等を観察した。

4) 漂砂量測定

沿岸流によって、輸送される砂の量を測定しようとするもので、模型下手側（模型東側）に数個に区切った採砂箱を汀線付近に設置し、その箱の中にたまった砂の量をはかることにより行なった。測定は原則として、2時間後、5時間後、10時間後、15時間後、20時間後、25時間後の1ケース当り6回としたが、実験ケースにより適宜時間を変更して行なった。

5) 海底測定

海底の断面形状を知るために行なうもので、測定は原則として、横断方向50 cm間隔に各測定線に沿って10 cm間隔で測定した。測定方法は、平面水槽床版を基準にしてこれより1 m上に水平に水糸を張り、これから各々の海底までの鉛直長さを木製の折尺で測定した。測定は、各ケースにつき実験開始前、5時間後、15時間後、25時間後の4回行なった。

2.5 実験条件

1. 波 浪

富士海岸に襲来する波浪に関しては田子の浦港において波浪観測がなされており、それらの資料を用いて実験条件の検討を行なった。昭和33年2月1日から昭和38年12月31日の間に田子の浦で観測された波高と周期の頻度分布は表-2に示すようになっている。周期6～7 sec、波高1 m以下の波の頻度が多いが砂の移動には波高の大きな波が関係していると考えられる。波高2～3 m、周期10 sec程度の値においても頻度が少し大きくなっているため、この程度の値を用いて検討を行なった。

TM-116 FT- 13 F- 905

表-2 田子の浦港における波浪の頻度分布

昭和33.2.1～昭和38.1.2.3.1

	静 穏	0.6～ 以下	0.6～ 1.0	1.0～ 1.5	1.5～ 2.0	2.0～ 2.5	2.5～ 3.0	3.0～ 3.5	3.5～ 4.0	観 測 80	観測 なし	計	%	累加%
静 穏	1,546		33									1,546	28.8	28.8
5以下		454	33	5								489	9.1	37.9
5		411	69	35	5	2						522	9.8	47.7
6		619	133	71	30	6	1	1				861	16.1	63.8
7		433	183	69	18	10	5	1				719	13.4	77.2
8		225	131	55	31	13	3	2				460	8.6	85.8
9		106	82	56	23	5	2	3				277	5.2	91.0
10		55	52	46	18	12	7	8	3	3		204	3.8	94.8
11		19	30	28	12	7	7	3				106	2.0	96.8
12		19	11	27	12	12	2	1	3	1		88	1.6	98.4
13		6	10	5	4	3	3	2		1		34	0.6	99.0
14～17		9	7	8	7	9	2	5		4		51	1.0	100.0
観測なし											898			
計	1,546	2,356	738	405	160	79	32	26	6	9		5,357		
%	28.8	44.0	13.8	7.5	3.0	1.5	0.6	0.5	0.1	0.2				
累加%	28.8	72.8	86.6	94.1	97.1	98.6	99.2	99.7	99.8	100.0				

波高に関しては来襲波の主方向を求める必要がある。ただし沿岸漂砂に關係するのは波のエネルギーと考えられるので主方向を求める場合においても波エネルギーで重みを付けて平均する必要がある。したがって次のような方法によって計算した。

沿岸方向に単位時間に輸送される碎波点での平均の波エネルギー E_b は次のように表わされる。

$$\begin{aligned}
 E_b &= \frac{w}{8} n_b C_b H_b^2 \sin \alpha_b \cos \alpha_b \\
 &= \frac{w}{16} C_0 H_0^2 K_r^2 \sin \alpha_b \cos \alpha_b \\
 &= E_0 \cdot K_r^2 \sin \alpha_b \cos \alpha_b
 \end{aligned} \tag{6}$$

ここで w : 海水の単位体積重量、 n_b : 碎波点における群速度と波速の比、 C_b : 碎波点での波速、 H_b : 碎波波高、 α_b : 碎波点での波の入射角、 K_r : 屈折係数、 $E_0 = w C_0 H_0^2 / 16$ である。

田子の浦港において昭和33年から38にかけて1日3回の波向観測が行なわれ、その結果は表-3に示されるようになっている。田子の浦における海岸線の方向は $S 132^\circ E$ とな

TM-116FT- 13F- 906

るので、表-3 にもとずいて各方向の沿岸方向のエネルギーを計算した。この場合屈折係数と砕波点における波の入射角は平均周期 8.6 sec を用いて海底勾配 1/10 の場合の砕波指標および等深線が海岸に平行な場合の値を用いて求めた。計算結果は表-4 のように表わされ、

表-3 田子の浦港における波向分布

(昭和33年2月1日~昭和38年12月31日)

波向 波高(m)	SW	SSW	S	SSE	SE
0.5~1	76	156	347	64	32
1 ~1.5	28	122	164	25	22
1.5~2	18	59	63	7	4
2 ~2.5	9	27	33	4	1
2.5~3	5	18	17	0	0
3 ~3.5	4	10	7	0	0
3.5~4	1	1	1	0	0
4 以上	2	3	0	0	0
合 計	143	396	632	100	59

表-4 沿岸方向の波エネルギー

(昭和33年2月1日~38年12月31日)

波 向	波数 n	$n \cdot E_b$
S W	143	63.32
SSW	396	157.45
S	632	71.74
SSE	100	-6.23
SE	59	-9.20
$H < 0.5 m$	3,902	0
合 計	5,232	277.08

注: E_b としては単位時間当りの値を使用している。

したがって単位は $\text{ton} \cdot m / m \cdot \text{sec}$ である。

TM-116FT-13F-907

$K_r^2 \sin \alpha_b \cos \alpha_b$ の平均値は次のようになる。

$$K_r^2 \sin \alpha_b \cos \alpha_b = \frac{E_b}{E_o} = \frac{277.08}{2346.2} = 0.1181 \quad (7)$$

したがってもし $K_r \div 1$ とすると $\alpha_b \div 6.8^\circ$ となる。これは砕波点における値のために実験に際しては深海における値になす必要があるが、波高 3 m、周期 8.6 sec の場合 S 方向からの入射波は $\alpha_b = 6^\circ$ の砕波点での入射角を持っている。

沿岸方向の漂砂を突堤や防波堤によって完全に止めた場合には、突堤の位置での漂砂量はなくなり海岸線の方向と波向は一致する。富士海岸においても入道桶門および田子の浦港の防波堤によって漂砂が止められており、防波堤付近の海岸線の方向を調べた。毎年行なわれている測量の結果から海岸線の方向を求めると表-5 のようになる。入道桶門では $S12^\circ W$ になっている。入道桶門は長さが短いことと消波ブロックなどがあるために算近の値はこれらの影響を受けていると考えられる。田子の浦港の西側と東側の海岸で違いがある理由については明らかではないが地形や構造物の影響があると考えられる。ここに示したのは汀線における方向のために砕波点ではこの値より西に寄ると考えられる。

波のエネルギー計算および構造物付近の海岸線の方向から模型実験における波の入射方向としては深海で S 方向を採用することにした。

表-5 構造物周辺の海岸線の方向

測量年月日	入道桶門西側	田子の浦港西側	田子の浦港東側
43年11月	S 9°	S 7°	S 4°
44 11	S 1°	S 6°	S 5°
45 12	S 15°	S 14°	S 6°
46 12	S 15°	S 4°	S 20°
47 12	S 15°	S 3°	S 20°
48 12	S 15°	S 3°	S 18°
平均値	S 11.7°	S 6.2°	S 12.2°

2. 地 形

模型実験の対象とした海岸は富士海岸三四軒地先であり、測定番号で Na 65 から Na 80 の 3.75 km の間であるが、造波板の幅の制約から二つに区分した。すなわち実験番号 Na 1 ~ Na 4 は測定 Na 70 から Na 80 までの 2.5 km、Na 5, 6 は測定 Na 65 から Na 75 の 2.5 km の区間である。海底の地形については昭和 49 年 12 月の深浅測量結果を使用している。これらの実験範囲は図-7 および図-8 に示してある。

TM-116FT-13F-908

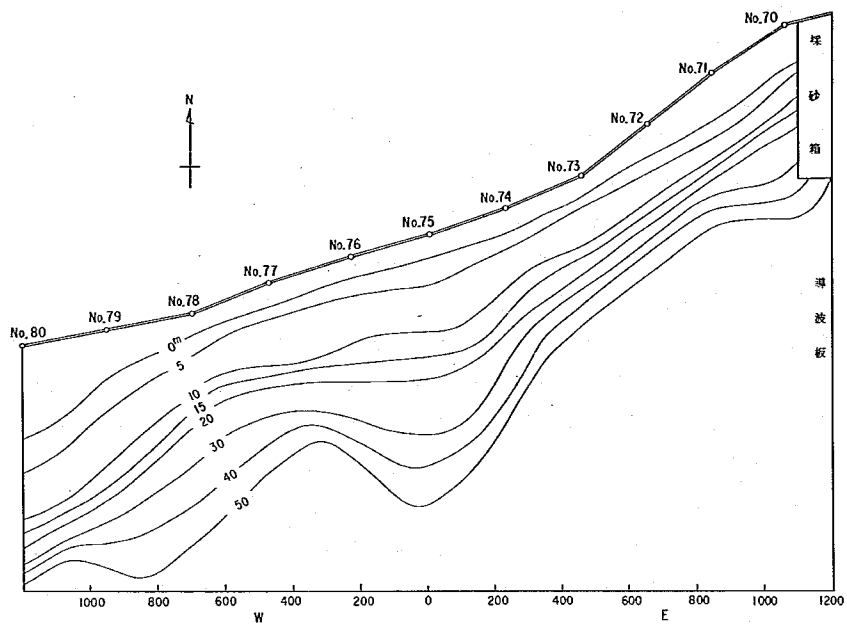


図-7 模型実験の範囲(実験No 1 ~ 4)

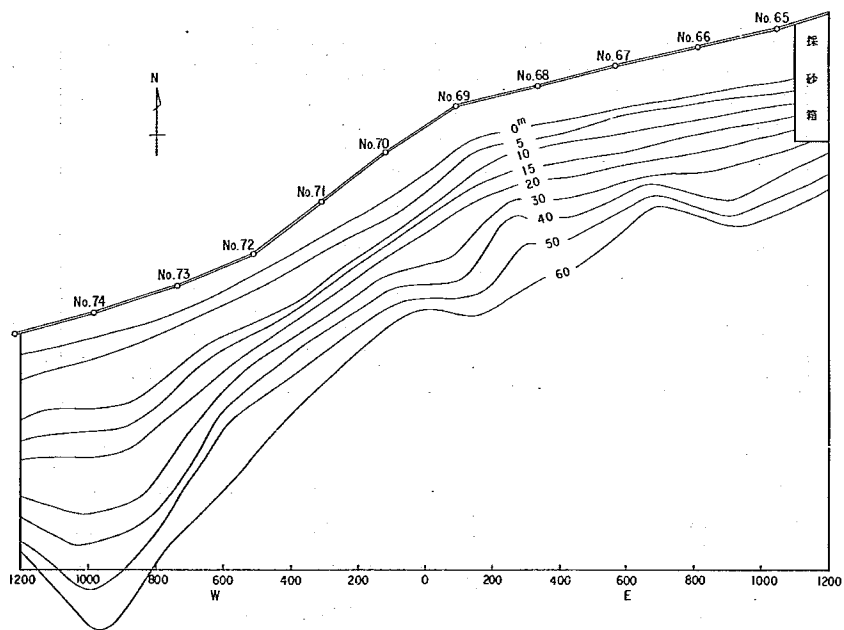


図-8 模型実験の範囲(実験No 5、6)

測定№ 7 7 付近に入導桶門があるがその両側は海岸侵食がはげしく、侵食対策として消波ブロックが多数投入されている。

3. 構造物

実験はまず № 1 として海浜に構造物のない自然海浜を設定して、他のケースの構造物を設置した場合との比較を行なうためのものとして実験を行なった。実験 № 2 として、離岸堤を設置した場合の特性を概略的につかむため、水深 4 m に長さ 100 m、開口部 50 m の離岸堤のみを設置したもの、№ 3 として № 2 と同様突堤について先端水深 6 m に長さ 100 m、間隔 200 m の突堤のみを設置したもの、№ 4 以下として現状海岸構造物の変形特性をつかむため、№ 4 として水深 2 m に連続堤を距離標 № 7 3 ~ 7 9 の区間に、汀線に長さ 50 m 開口部 50 m の離岸堤を距離標 № 7 0 ~ 7 3 の区間に設置したもの、№ 5 として、水深 2 m に連続堤を距離標 № 7 3 ~ 7 6 の区間に、汀線に長さ 50 m、開口部 50 m の離岸堤を距離標 № 7 0 ~ 7 3 の区間に、水深 2 m に長さ 150 m、間隔 200 m の突堤を設置したもの、№ 6 として、水深 2 m に連続堤、水深 2 m に離岸堤、水深 4 m に突堤をそれぞれ実験 № 5 と同様の区間に設置したものについて、以上の 6 ケースの構造物の設置条件について実験を行なった。

4. 漂砂量

波が海岸に斜めに入射するために、この実験においては西から東への沿岸漂砂が存在する。漂砂の上手側、すなわち西側から漂砂を供給しなければ沿岸漂砂量に対応するだけの侵食を生じる。実験 № 1、№ 2、№ 3 については実験の主な目的が突堤および離岸堤の効果を検討するためのものであるために、侵食が西側で生じてもその効果を比較できるものと考えて、上手側からの漂砂の供給は行なわなかった。一方現在存在する構造物を一部に配置し、海浜変形の状況も調べた実験 № 4、№ 5、№ 6 については上手側から漂砂を供給した。供給量については現地における量をほぼ同じ程度とする必要があり、この値の推定はかなり困難であったが一応模型で $15\ell/\text{hr}$ 、実物で $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ とした。富士海岸の侵食状況の調査において富士川から流出する土砂で、海岸に寄与している量は約 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ の沿岸漂砂があったと考えられている。これらの値をもとに考えると沿岸漂砂量としては実験で与えた $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ 程度がほぼ妥当なものであろう。現在消波ブロックの存在する場所では漂砂量は少なくなっていると考えられるために富士川からの土砂の供給があった場合にどのような場所に堆積するかを検討することもできよう。

5. 底質

模型実験に使用する底質については相似性を保つために適当なものを選定する必要がある。現地における底質については実験の対象としている測定 № 6 5 ~ № 8 0 の間では次のようになる。汀線付近については粒径が大きく田子の浦防波堤の西側 № 6 5 ~ 6 8、№ 7 0 ~ № 7 2 № 7 4 ~ № 7 8 にかけては中央粒径が 2 mm 以上になっている。また № 6 5 から № 6 8 では水深 10 ~ 5 m の間でも 2 mm 以上になっている。一方 № 7 2 から № 8 0 にかけては汀線から水

TM-116 FT- 13 F- 910

深 5 m までは中央粒径が 0.4 7 ~ 2.0 mm の範囲に入っている。水深 5 ~ 10 m では中央粒径が 0.4 7 mm 以下になっており、0.1 mm 程度のものが中心となっている。

模型における底質の選定については模型の縮尺と関連して決定しなければならない。特に海浜の横断形状が相似になるように選定を行ない中央粒径 $d_{50} = 0.32 \text{ mm}$ の砂を使用した。当初予定したのは $d_{50} = 0.22 \text{ mm}$ であったが多量に均一の砂が得られないこと、風などによる細粒分の損失などによって $d_{50} = 0.32 \text{ mm}$ を使用した。

6. 実験条件のまとめ

これまでに述べた実験条件をまとめて示すと表-6 のようになる。(図-9・10 参照)

表-6 実験条件

実験番号	波高	周期	波向	実験区域	初期海況形状	実験時間	補給砂	海岸構造物の設置状況
実験No1	3.0 m	11秒	S	No70 ~No80	昭和49年度 現地実測海浜	25時間	0	海岸堤防のみ設置
実験No2	3.0 m	11秒	S	No70 ~No80	S49年度 現地実測海浜	25時間	0	海岸堤防および新たに離岸堤を設置 離岸堤長さ 100 m 開口巾 50 m
実験No3	3.0 m	11秒	S	No70 ~No80	S49年度 現地実測海浜	25時間	0	海岸堤防および新たに突堤を設置 突堤長さ 100 m 突堤間隔 200 m
実験No4	3.0 m	11秒	S	第1区間 (No70~ No80)	S49年度 現地実測海浜	25時間	15 $\frac{\ell}{h}$	実験区間全域に離岸堤を設置 設置地点は水深 2 m、高さは越波しないように +6 m までとする。設置形状は現地に設置されている離岸堤に合わせる。
実験No5	3.0 m	11秒	S	第2区間 (No65~ No75)	S49年度 現地実測海浜	25時間	15 $\frac{\ell}{h}$	実験区間西側に現状の離岸堤、東側には新たに突堤を4基設置 突堤の設置間隔は 200 m、設置延長は堤防から水深 2 m 地点までとした。
実験No6	3.0 m	11秒	S	第2区間 (No65~ No75)	S49年度 現地実測海浜	25時間	15 $\frac{\ell}{h}$	実験No5と同様に突堤を設置した場合の実験 突堤の設置間隔は 200 m、設置延長は堤防から水深 4 m 地点までとした。

TM-116FT-13F-911

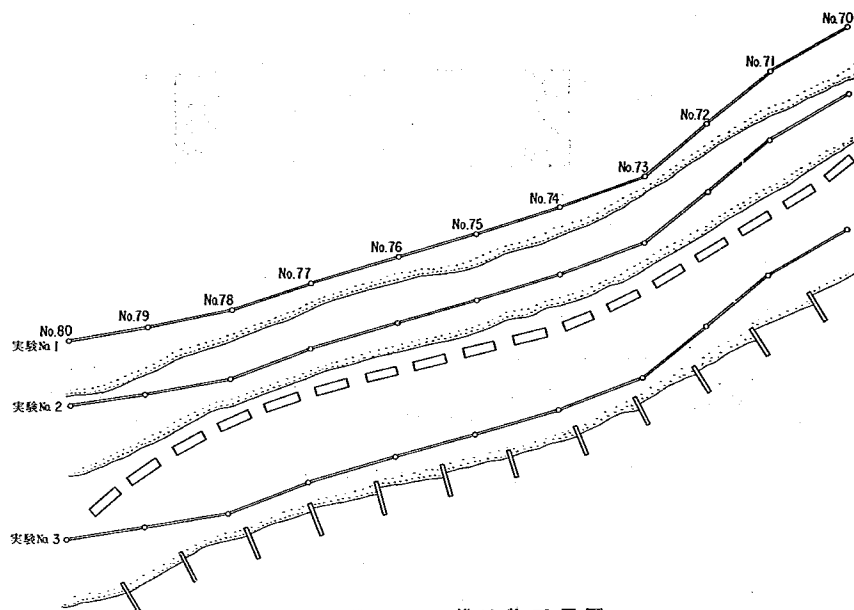


図 9 - 1 構造物配置図

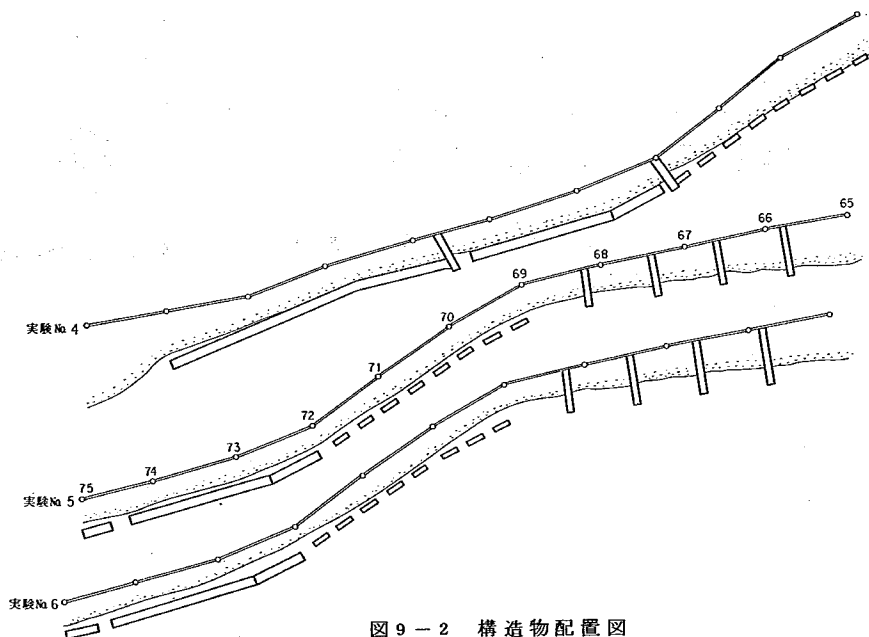


図 9 - 2 構造物配置図

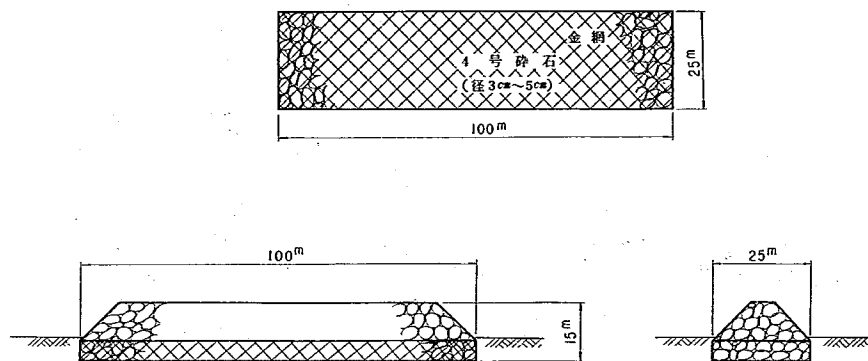


图-10 離岸堤構造図

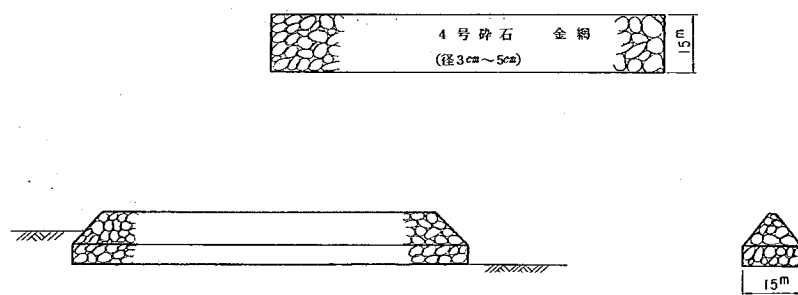


图-11 突堤構造図

2.6 模型縮尺

模型の縮尺は実験装置の規模、測定の精度、相似性などを考慮して決定する必要がある。模型の波の周期は1秒よりも長いものが表面張力の影響を受けないために望ましい。模型の波浪条件は以下に述べる方法で測定したが周期について上記条件を満足するように縮尺を $1/100$ とした。この場合の模型範囲としては造波板の幅が 2.4 m あるために 2.4 km となる。

波浪条件および実験に使用する底質についてはまず海浜の横断形状が相似になるように決定した。三四軒屋地先における実際の海浜形状は図-12に示すように東側では海底勾配がきつく、西側では緩くなっている。すなわち富士河河口に近い測定No. 79～75付近では河口流出土砂の減少にともなう侵食によって汀線付近は後退し、漂砂の卓越する水深 10 m 付近で海底勾配が緩

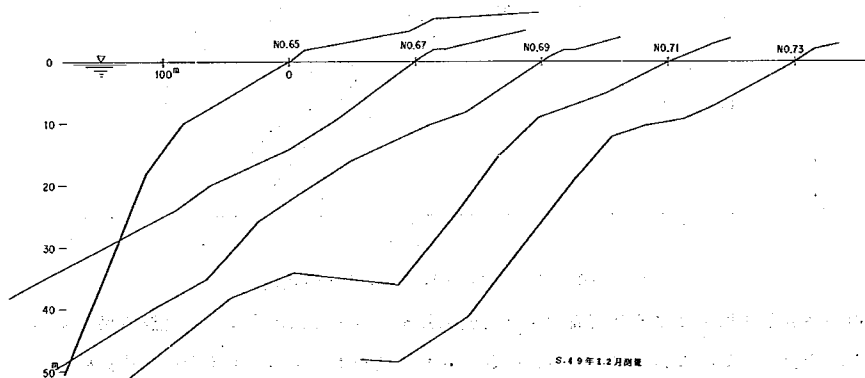


図-12(a) 三四軒屋地先の海浜横断形状

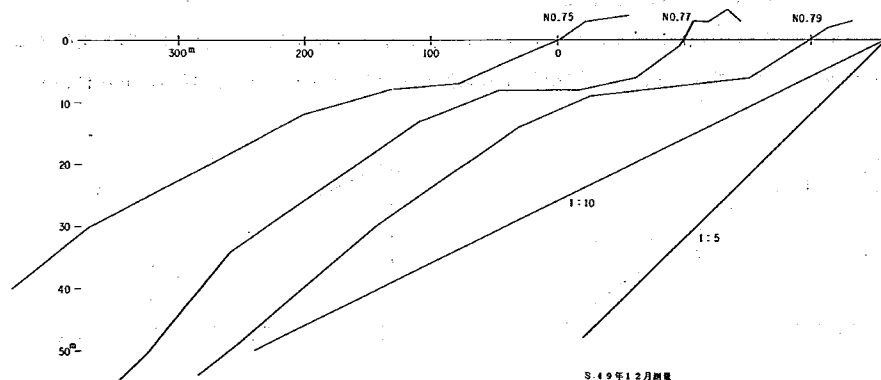


図-12(b) 三四軒屋地先の海浜横断形状

くなり、一方田子の浦港に近い測定点 65 付近では汀線付近に砂が堆積するために海底勾配はきつくなっている。汀線の位置を合せて海浜形状を描いたものが図-13 であるが、勾配が緩い場合もきつい場合も汀線付近の勾配はあまり変化しておらず、この付近は来襲する波とその底質によって形成される平衡形状になっていると推定される。このような勾配のはぼ一定となっている範囲は水深約 8 m より浅い部分である。また他の海岸に比較して特徴的なのは沿岸砂州のないことである。

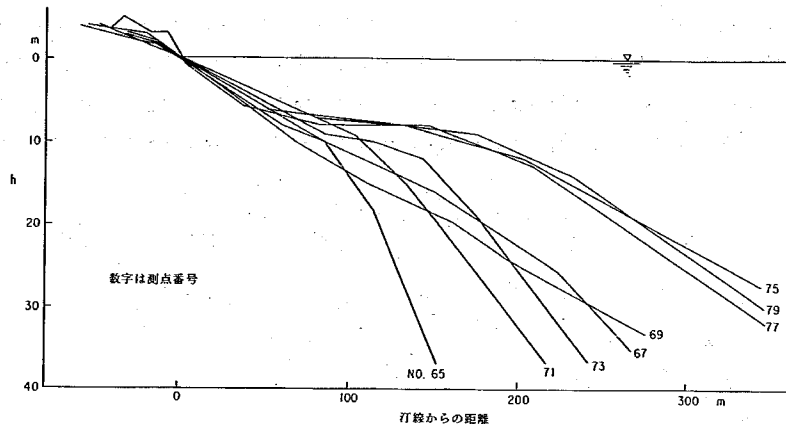


図-13 汀線を基準にした海浜形状

現地の海浜形状に合うような底質および波浪条件を検討するために 2 次元造波水路を使用した予備実験を行なった。これは幅 0.6 m、高さ 0.8 m、延長 1.7 m の水路を用い、中央粒径 $d_{50} = 0.22 \text{ mm}$ の砂を使用して図-14 に示す A、B 2 種類の初期海浜に波を約 4 時間使用させて平衡形状を求めた。与えた波浪条件は表-6 に示す通りであり、これらの条件に対応し、海浜形状は図-15 に示すように変化した。

波高の大きい Case 6、7 については砕波点より沖に沿岸砂州が生じ、現地の地形と比較すると適当でなく、また Case 2、3 も汀線付近の勾配が一様になっていない。現地の形状に最も一

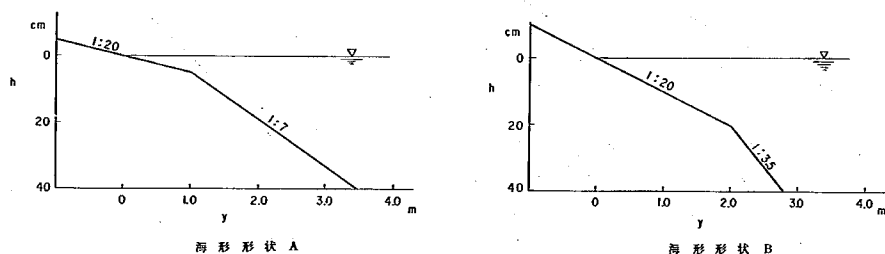


図-14 予備実験の初期海浜形状

TM-116 FT- 13 F- 915

表-7 予備実験の実験条件

Case	波 高	周 期	初期海浜形状	波の作用時間
2	4.5 cm	1.3 sec	A	4 hr
3	4.5	1.3	B	4
6	6.0	1.5	A	4
7	6.0	1.4	B	2.5
10	3.0	1.1	A	4
11	3.0	1.1	B	4
14	6.0	1.1	A	4
15	6.0	1.1	B	4
18	9.0	1.3	A	4
19	9.0	1.3	B	4

注：波高は水深40 cmにおける値である。

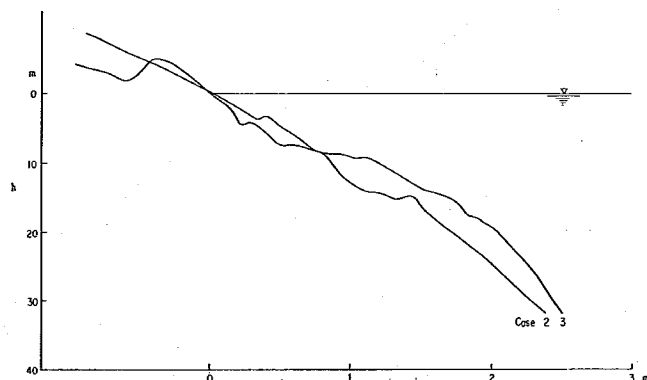


図-15(a) 模型海浜形状

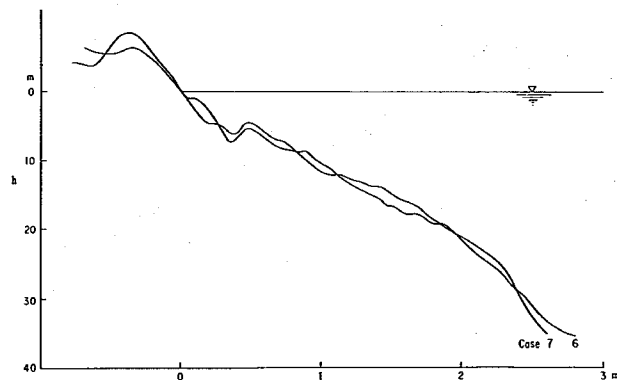


図-15(b) 模型海浜形状

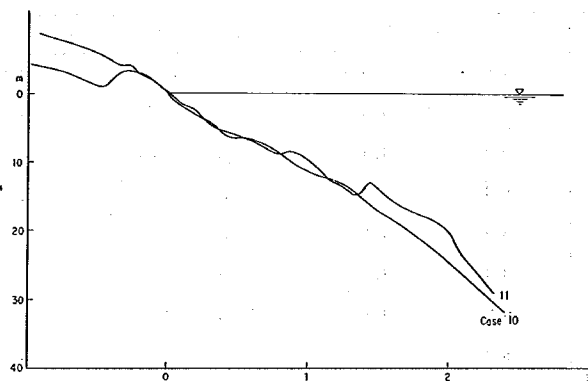


图-15(c) 模型海滨形状

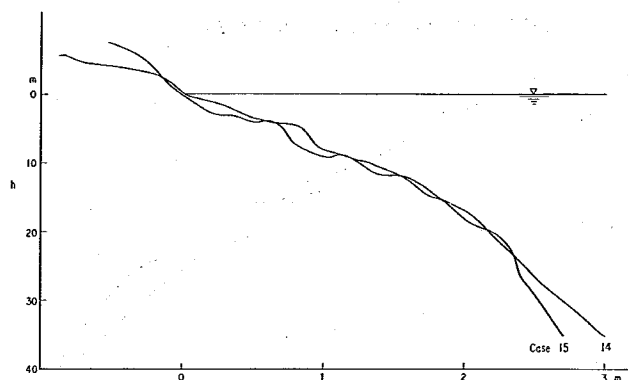


图-15(d) 模型海滨形状

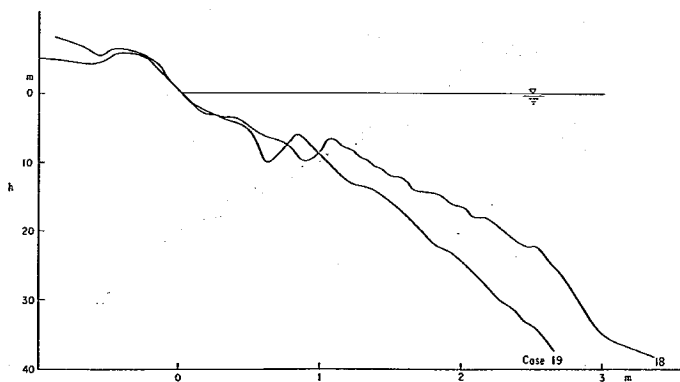


图-15(e) 模型海滨形状

致しているのは Case 10、11 の波高 3 cm 周期 1.1 sec の場合であった。Case 18、19 の場合についても形状はほぼ一致しているが、この場合は波高が大きいためかなり深い場所まで地形変化が生じており、現地の状況と異なっている。なお上記波浪条件は歪模型を必要とする可能性も検討するために決めたものであるが、これらの結果によれば縮尺 1/100 で波高 3 m、周期 1.1 sec の条件で実験すればよいことが明らかになり、歪模型にする必要はなかった。また海浜変化の生じる高さについては別に平面実験によっても検討を行なった。

移動床模型実験の相似率および縮尺を決定する際には模型と比較できる現地の資料が必要である。富士海岸では田子の浦港の建設に際して地形変化および波浪条件についての観測が行なわれ、貴重な資料となっている。さきに述べたようにまず海浜変形の生じる高さについて検討を行なう。田子の浦港の建設にともなって沿岸漂砂が阻止されたために、防波堤の西側、すなわち漂砂の上手側においては堆積を、また東側では侵食を生じた。地形変化の生じた地点においては汀線測量および深淺測量が行なわれており、それらの資料を用いて汀線の変化量と断面積の変化量の関係を求めてみた。図-16 は昭和 34 年 1 月から昭和 36 年 6 月まで汀線および断面積の変化量を昭和 34 年 1 月の測量成果を基準に示したものである。西海岸および東海岸の成果を別々に示してあるが、海岸が侵食される場合には汀線の後退量に対する断面積の減少量は少なく、堆積する場合には汀線の前進量に対して断面積の増加量は大きくなっている。これは侵食する場合には海

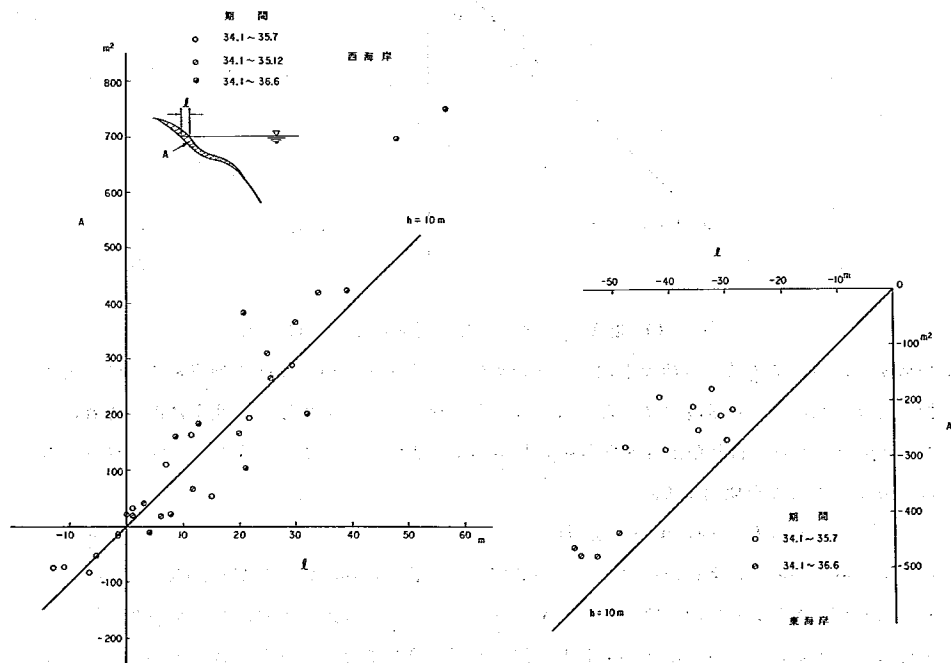


図-16 (a)、(b)田子の浦における汀線と断面積の変化の関係

底勾配が緩くなって侵食されずらくなり、堆積する場合には水深の深い場所まで次第に堆積の影響のおよぶことを示していると考えられる。図-16にもとずいて平均の移動高 h を求めると $h = 10 \text{ m}$ となる。

模型実験において構造物がない場合の侵食または堆積の実験結果（実験No.1）によると汀線の初期値を基準にした変化量と断面積の変化量の関係は図-17に示すように移動高 $h = 10 \text{ m}$ （実物）とすればほぼ一致する。この場合の波浪条件としては波高 3 cm 、周期 1.1 sec を用いており、これを実物に換算すると波高 3 m 、周期 1.1 sec となる。また底質は中央粒径 $d_{50} = 0.32 \text{ mm}$ の砂を使用している。

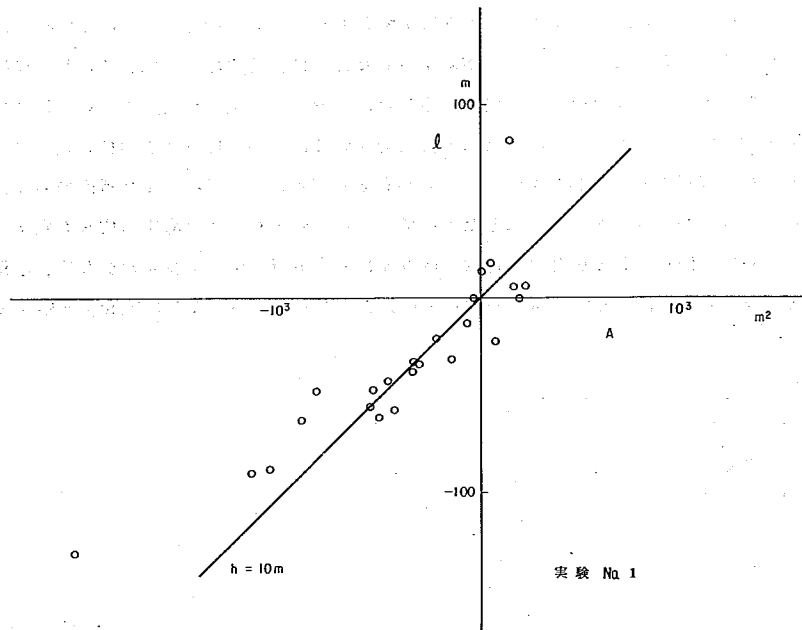


図-17 模型における汀線と断面積の変化の関係

地形変化についての時間の縮尺を検討するために、まず田子の浦港周辺の地形変化についての解析を行なった。田子の浦港のような十分に長い防波堤によって沿岸漂土が完全に止められる場合の地形変化については比較的簡単な解析結果がある。まず沿岸漂砂量公式としてはサベージの式の変形である次式を使用する。

$$q = F (\tan \alpha_0 - \partial y / \partial x) \quad (8)$$

ここで q は沿岸漂砂量、 F は波のエネルギーに関連する係数、 α_0 は波の来襲方向、 x 軸を海岸に平行にとり、それから海岸までの距離を y で表わす。この式は波の入射角が $10 \sim 20^\circ$ 以内の場合に用いることができる。地形変化と沿岸漂砂量の関係を結びつけるのは連続の式であってこれは次のように表わされる。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial hy}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

ここで h は移動高を表し、 t は時間である。

沿岸漂砂を完全に阻止する突波が設けられた場合には突堤の位置 $x=0$ において $q=0$ となる。移動高および F が時間および位置によって変化しない場合にはこれらの式は簡単に解くことができる。初期条件として $t=0$ で $y=0$ を与えて解くと次のような解が得られる。

$$\frac{\sqrt{\pi} y}{\tan \alpha_0 \sqrt{4at}} = \left\{ e^{-\frac{x^2}{4at}} - \frac{\sqrt{\pi} x}{\sqrt{4at}} E\left(\frac{x}{\sqrt{4at}}\right) \right\} \quad (10)$$

ここで $a=F/h$ 、 E は誤差関数を表わし次のようになる。

$$E(v) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^v \exp(-q^2) dq \quad (11)$$

田子の浦港の建設にともなって生じた地形変化を建設開始前の昭和34年5月の測量結果を基準にして、昭和36年6月までの汀線変化の資料をもとに防波堤からの距離と堆積または侵食量の関係を求めると図-18のようになる。西海岸、東海岸ともに堆積、侵食の状況は異なってもその量については差はないと考えられるのでこれらの結果を合せ、式(10)を適用することにする。この場合 α_0 の値としては後に述べる田子の浦港における波浪観測の資料を利用して求めた $\tan \alpha_0 = 0.118$ を使用している。図-19における実線は $a = 1.06 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{year}$ とした場合の値であり、これから沿岸漂砂量は次のように表わされる。

$$q = 1.06 \times 10^6 \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (12)$$

ただしこの場合 $h=1.0$ としている。波浪観測の結果によれば $\sin \alpha_b \cos \alpha_b = 0.118$ となり、この場合には $q = 1.25 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ となる。すなわち田子の浦港が建設される以前には

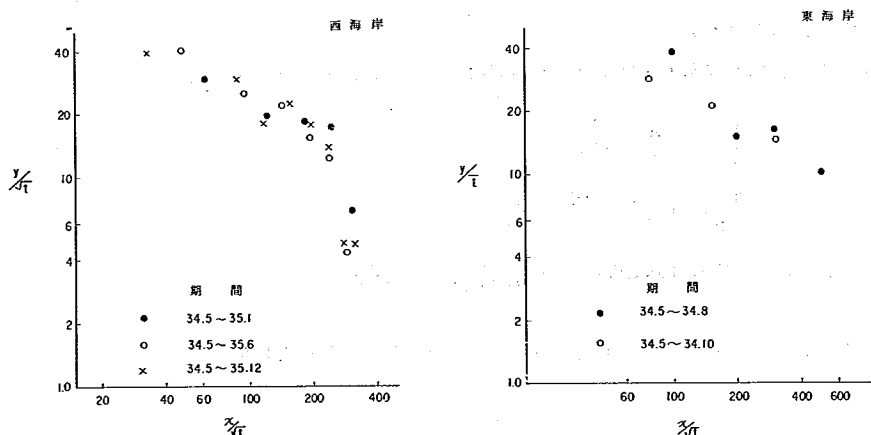


図-18 田子の浦における汀線の変化

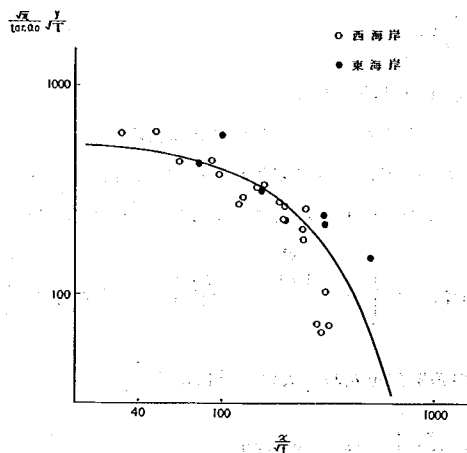


図-19 防波堤による汀線変化

田子の浦港の地点で年間12.5万 m^3 の沿岸漂砂が生じていたと考えられる。

模型実験における沿岸漂砂量については波高 $H_0 \approx 3m$ 、周期11secの条件で実験を行ない、後に述べるような方法によって深海における海岸に対する波の入射方向($\tan \alpha_0$)と沿岸漂砂量の関係を求めると図-20のようになる。この結果によれば田子の浦港付近の波の入射角 $\alpha_0 = 6.8^\circ$ 、 α_0 で 19° に対して沿岸漂砂量は模型で12 l/hr となる。したがって地形変化についての時間の縮尺は(5)式を用いると次のように表わされる。

$$\frac{t_m}{t_p} = \left(\frac{l_m}{l_p}\right)^3 \frac{q_p}{q_m} = 10^3 \frac{12.5 \times 10^5 m^3/year}{0.012 m^3/hr} \approx 10 hr/year \quad (3)$$

したがって模型の10時間が実物の1年に相当する。図-20には式(3)で表わされる沿岸漂砂量の関係も示してある。

これまでの検討の結果をまとめると模型縮尺としては次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{l_m}{l_p} &= \frac{h_m}{h_p} = \frac{1}{100} \\ \frac{T_m}{T_p} &= \left(\frac{l_m}{l_p}\right)^{1/2} = \frac{1}{10} \\ \frac{t_m}{t_p} &= 10 hr/year = \frac{10}{365 \times 24} = \frac{1}{870} \end{aligned}$$

但し l は長さ、 h は高さ、 T は周期、 t は地形変化の時間を表わす。

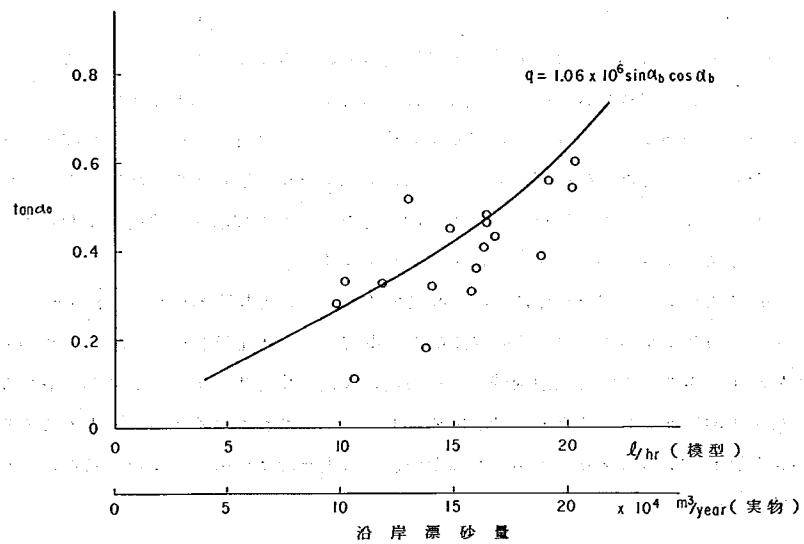


図-20 波の入射角と沿岸漂砂量の関係

TM-116FT- 13 F- 922

4.1 波 浪

実験条件は表-6に示すように波浪として波高3m、周期1.1secの波を起こすようにしたが造波機の造波能力、造波板付近の海底形状などによって必ずしも一定の波を発生することはできなかった。特に実験No.4、5、6については造波機のモーターに支障が生じ均一な波が発生しなかった。入射波高は一樣な水深の場所で、造波板から約5m岸で沿岸方向には図-6に示すように4地点で測定した。波高の各地点における時間変化を図-21に示す。波高の変動は大部分は1m程度になっているが、場合によっては大きい場合もある。

沿岸漂砂に関連するのは砕波点における波高であるために実験開始時と実験終了時(模型で2.5時間、実物で2.5年)における砕波波高の沿岸方向の分布を示したのが図-22(a)~(f)である。実験No.1~No.3については規則的に沿岸方向に波高変化を生じている。変動の幅は2m程度あり、沿岸方向に500~600m間隔で変化している。これが実際に生じるものであるか、この実験装置特有のものであるかは明らかでない。なお実験No.4~No.6についてはこのような変動は生じていない。

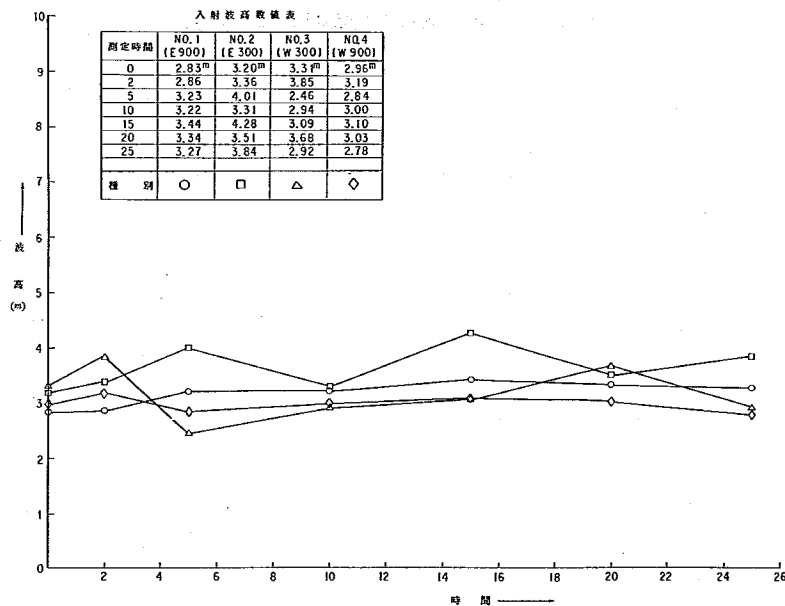


図-21 (a) 入射波高の時間変化

TM-116FT-13F-923

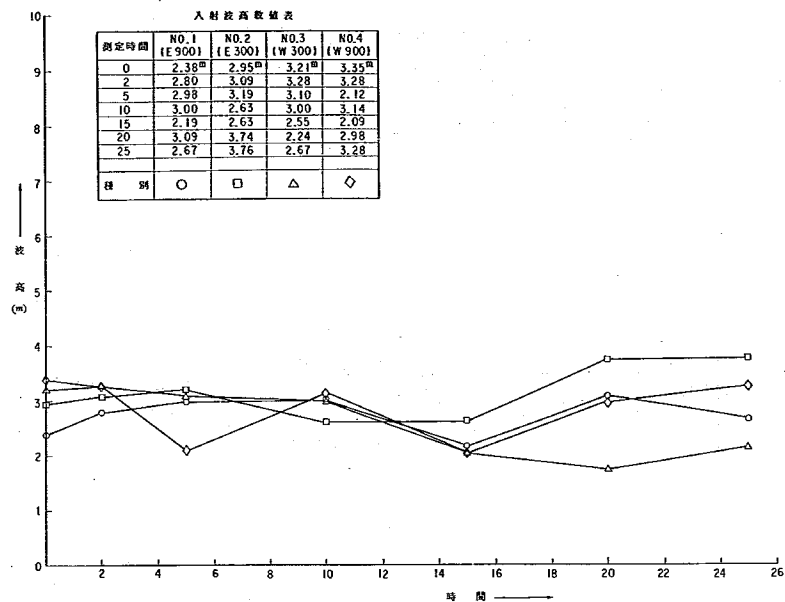


図-21 (b) 入射波高の時間変化

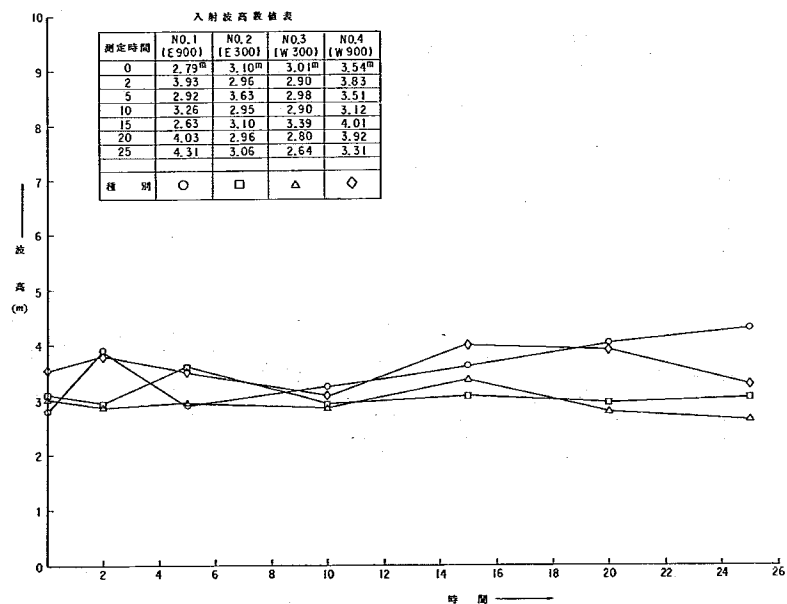


図-21 (c) 入射波高の時間変化

TM-116FT-13F-924

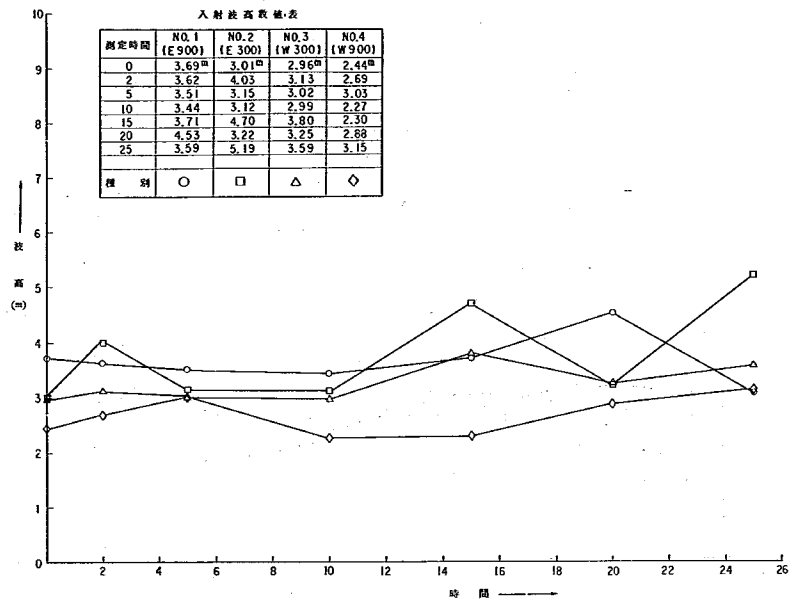


図-21 (d) 入射波高の時間変化

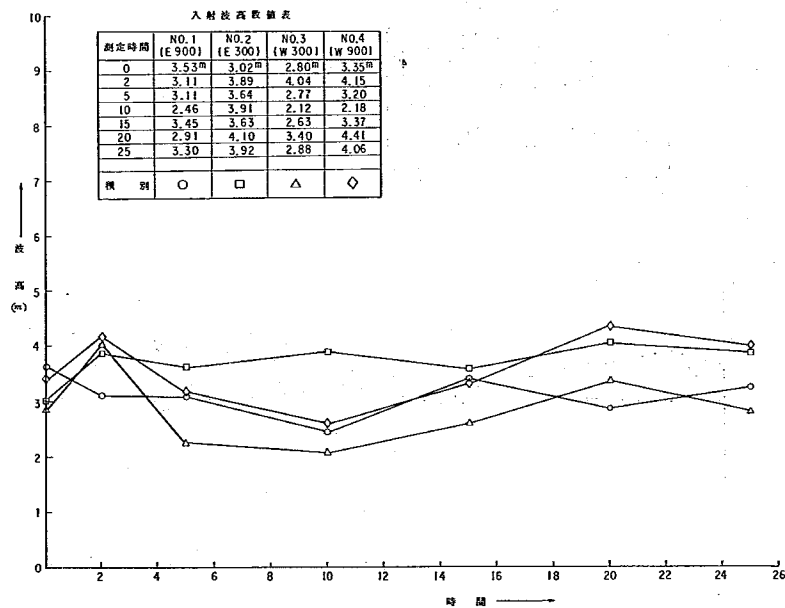


図-21 (e) 入射波高の時間変化

TM-116FT-13F-925

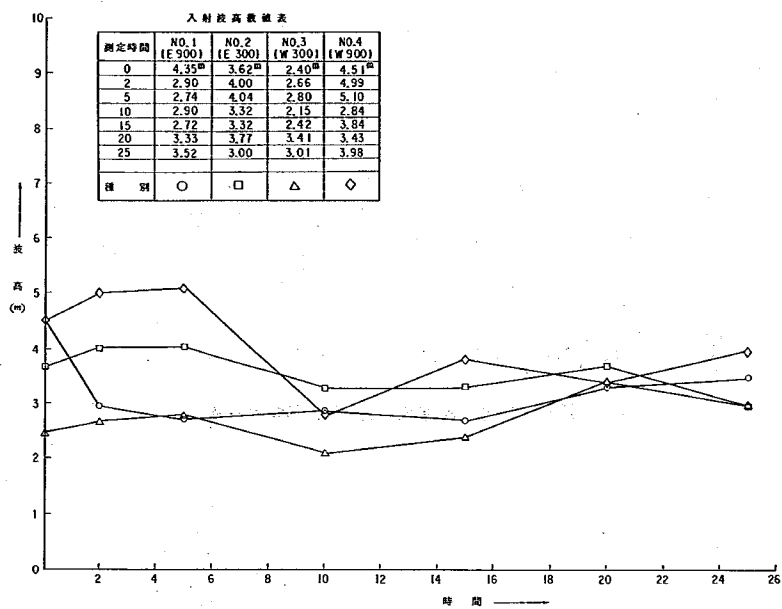


図-21(f) 入射波高の時間変化

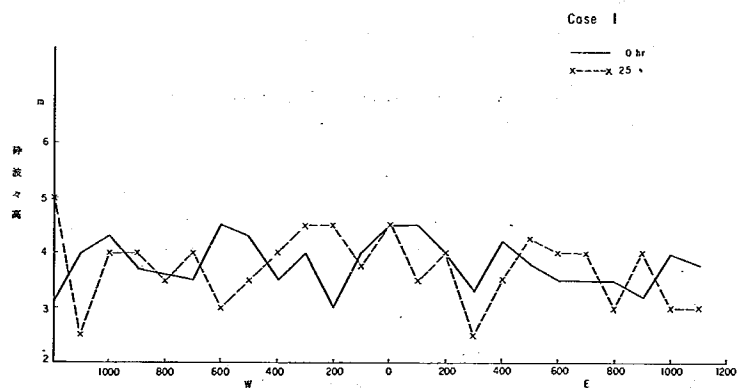


図-22(a) 砕波波高の沿岸方向の分布

TM-116 FT- 13 F- 926

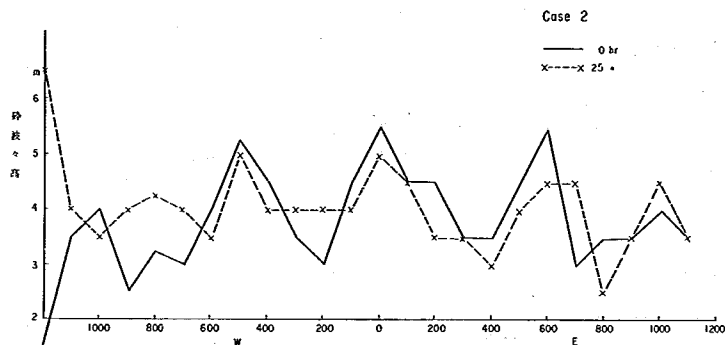


図-22 (b) 碎波波高の沿岸方向の分布

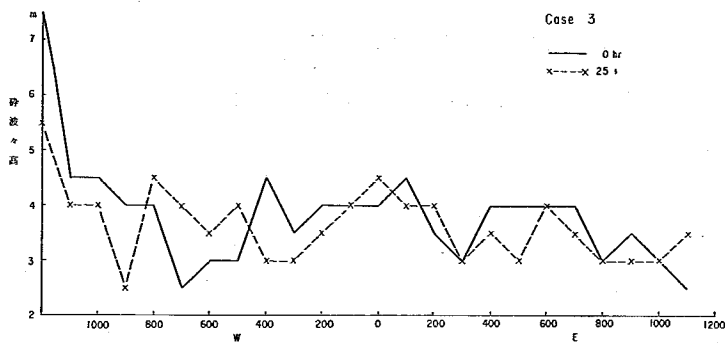


図-22 (c) 碎波波高の沿岸方向の分布

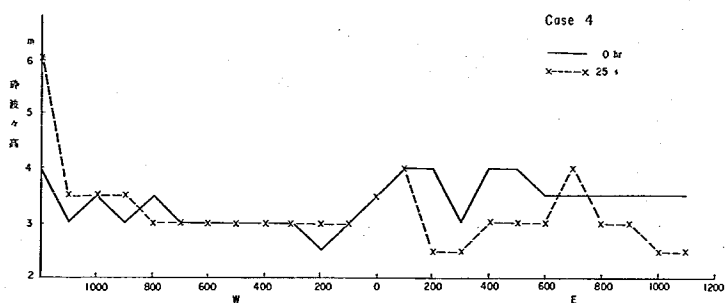


図-22 (d) 碎波波高の沿岸方向の分布

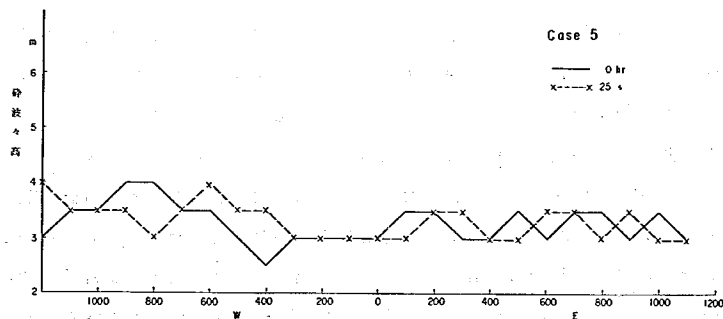


図-22(e) 碎波波高の沿岸方向の分布

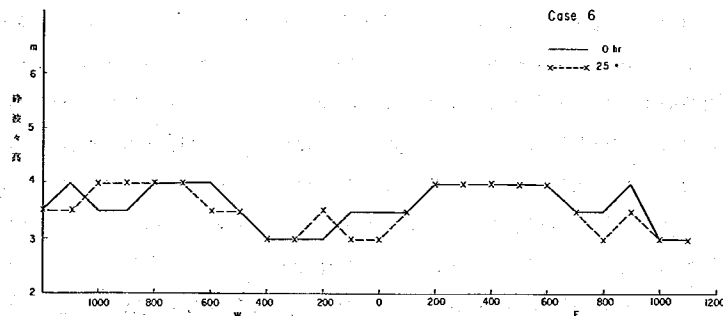


図-22(f) 碎波波高の沿岸方向の分布

4.2 地形変化

初期の海浜形状に波を作用させ海底の地形変化を調べた結果については図-23-1から図-23-12にまとめて示してある。これらの図は初期形状、波を模型で5時間(実物で0.5年)、15時間、25時間作用させた後の等深線を示したものである。

実験No.1の構造物がない場合の地形変化を図23-1と図23-2に示してある。侵食の量がいちじるしいのは漂砂の上手側である測点No.78からNo.80にかけてである。No.75からNo.76にかけては汀線付近および沖側にも堆積している。特にNo.75付近では水深10m水深にも堆積が生じている。測点No.71からNo.74にかけては水深10m以浅に侵食を生じている。このような地形変化の原因は沿岸漂砂量が場所的に変化するためである。特に中央付近(No.76~75)においては海岸線の方向が他の場所と違って波の入射方向に対して直角になるために沿岸漂砂量

が減少している。西および東における侵食は沿岸漂砂の十分な供給がないために生じている。沖への移動については海岸に沿って流れてきた漂砂が汀線付近に堆積し、それがさらに沖へ移動するために生じたと考えられる。測点No 71 付近においても沖への移動が生じているが、これは模型境界近くのために側壁に沿っての沖への移動があったためであろう。

実験No 2 の離岸堤が設置された場合の等深線図は図-23-3 と 23-4 に示してある。離岸堤の背後にはトンボロが生じており、また開口部では侵食を生じている。汀線付近においては、測点No 78 からNo 80 の間およびNo 70 からNo 73 の間では堆積を生じている。一方測点No 75 ~ 77 にかけては汀線付近では侵食を生じているがNo 75 ~ 74 付近では沖で堆積している。これは実験No 1 と同じ状態であるが堆積量は多くはない。離岸堤の前面は水深が深くなっており、この部分にあった砂は沖よりはむしろ沿岸方向および岸側、特に離岸堤の背後に移動したと考えられる。

実験No 3 は突堤が設けられた場合の結果であるが図-23-5 と 23-6 に等深線図が示してある。この場合においても実験No 1 と同様に西側および東側の侵食が特徴的であるが、その量については実験No 1 より少なくなっている。これは突堤が沿岸方向の砂の移動を止めたためと考えられる。ただし実験No 1 に比較していちじるしいのは全体的に汀線付近では侵食を、一方水深10 ~ 18 m 付近で堆積を生じていることである。特にNo 75 ~ No 78 にかけてはこの傾向が強い。これは突堤によって沖への移動が助長されるために生じたと考えられる。なお突堤先端の水深は実験前に比較して深くなっており、また突堤間の海岸線の方向は西向きに変化している。

実験No 4 は不連続の離岸堤が主に設けられており、また実験No 1 ~ No 3 と違って漂砂の上手側からは 1.5 t/hr ($1.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$) の漂砂が供給されている。このために、全体としては堆積の傾向を示しているが測点No 73 ~ No 76 にかけての堤前面の侵食と、離岸堤が連続堤から不連続堤に変化する測点No 71 73 にかけての侵食がいちじるしい。また堆積は水深8 m より沖側で生じており、No 75 およびNo 76 においては沖への漂砂が存在したのではないかと推察される。したがって土砂の供給がなければ連続状態の離岸堤においては離岸堤前部の洗掘とその沖での堆積が生じやすいと考えられる。また沿岸漂砂量に大きな変化をもたらす構造物の配置は大きな地形変化を生じている。この場合には水深2 m 付近に設置された連続堤と汀線付近に設置された不連続の離岸堤では沿岸漂砂量が増加をするために侵食が生じている。また測点No 75 及No 76 では実験No 1、No 3 と同様の沖への移動が生じたと考えられる。これを不連続の離岸堤が設けられた実験No 2 の場合と比較すると、不連続堤の場合には沖への移動を防ぐ機能を有していると考えられる。この実験では突堤および桶門もあるが突堤堤とはほぼ同じ位置までしか先端が延長されていないのでその効果については明らかではなかった。

実験No 5 とNo 6 はNo 1 ~ No 4 と異なり測点No 65 からNo 75 の区間を実験の対象区域としている。構造物としては測点No 70 からNo 75 にかけては実験No 4 と同様に現在存在する連続および不連続の離岸堤が設けられており、No 65 ~ No 70 の間については実験No 5 では水深2 m までの

TM-116 FT- 13 F- 929

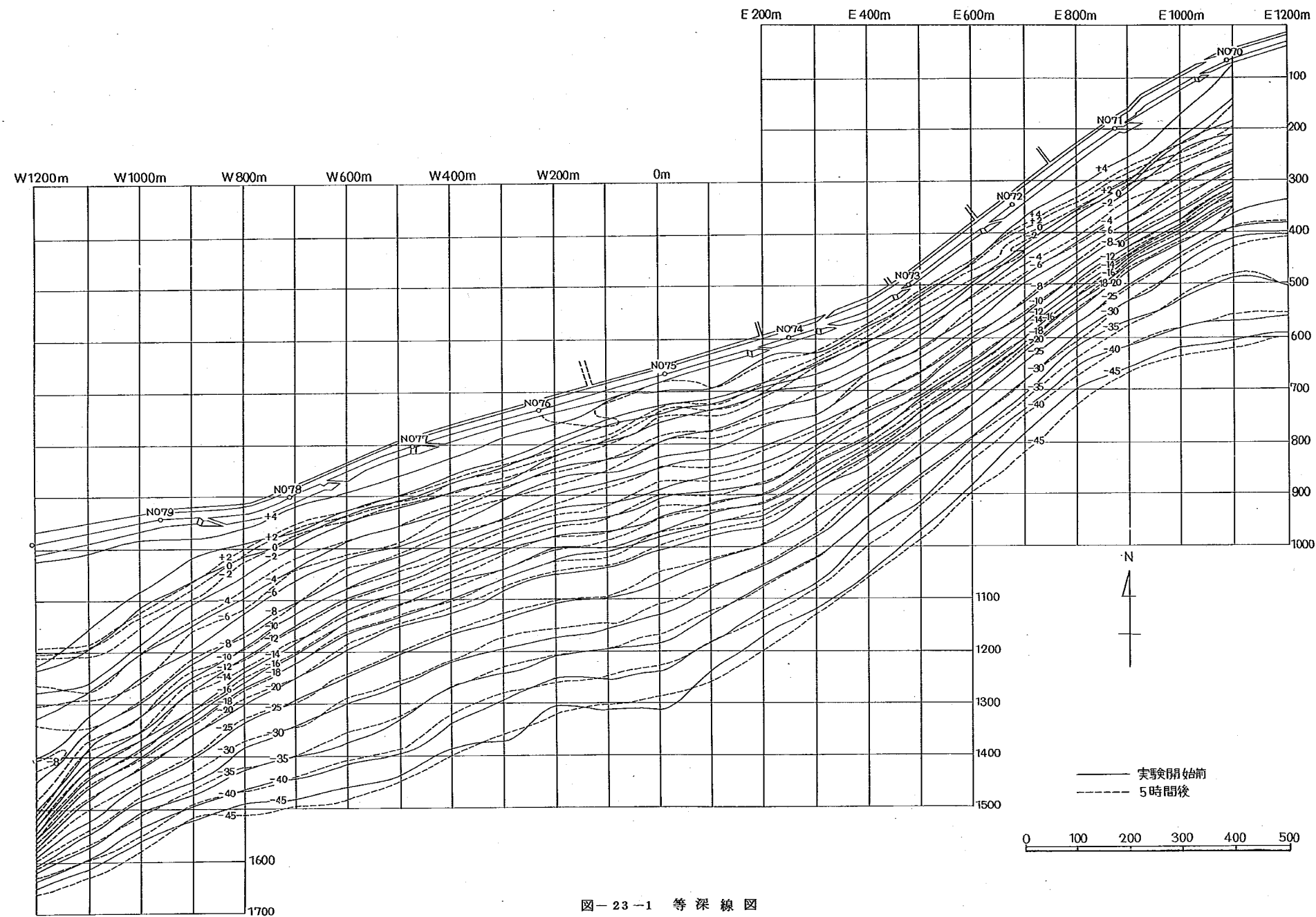
突波、実験№ 6 については水深 4 m までの突堤が設けられている。

実験№ 5 の地形変化については図-23-9 と図-23-10 に等深線図を示す。漂砂の供給が西側であるために№ 7 5 付近では一部堆積しているがそれより東側の離岸堤の部分については侵食がいちじるしい。これは№ 4 と同様に離岸堤の構造が変化し、漂砂量に差を生じたために侵食されたものと考えられる。一方突堤の設けられている場所ではかなり堆積している。これは突堤によって沿岸漂砂が止められるとともに、この付近の海岸線が入射する波に対しほぼ直角になり、沿岸漂砂量が他の場所に比較すると減少すると考えられる。この付近は田子の浦港西防波堤によって漂砂が堆積して生じた場所であって漂砂量は少なくなっている。突堤でも十分に漂砂を阻止し、突堤間に砂が堆積している。測点№ 7 5 付近では浅い場所だけではなく沖にもかなり堆積している。

実験№ 6 は№ 5 に比較して突堤の延長が長くなったのみであるために堆積・侵食の全体的な傾向はあまり変化していない。すなわち模型上手側№ 7 5 付近の堆積、№ 7 0 ~ 7 5 にかけての侵食および№ 6 5 ~ № 7 0 の突堤部の堆積である。ただ№ 5 に比較すると突堤が長くなったにもかかわらず突堤間の堆積はあまり大きくなく、むしろ突堤先端付近では侵食を生じており、沖にはかなり堆積を生じている。このことは突堤が長くなったために漂砂を阻止するというよりはむしろ沖への移動を助長する働きを突堤がしているものと考えられる。

等深線図にもとづいてそれぞれの実験について地形変化の状況を述べてきたが次に汀線の変化および海岸に直角方向に 100 m 間隔で分割した各地点における体積の変化について述べる。

TM-116 FT- 13 F- 930



TM-116FT-13F-931

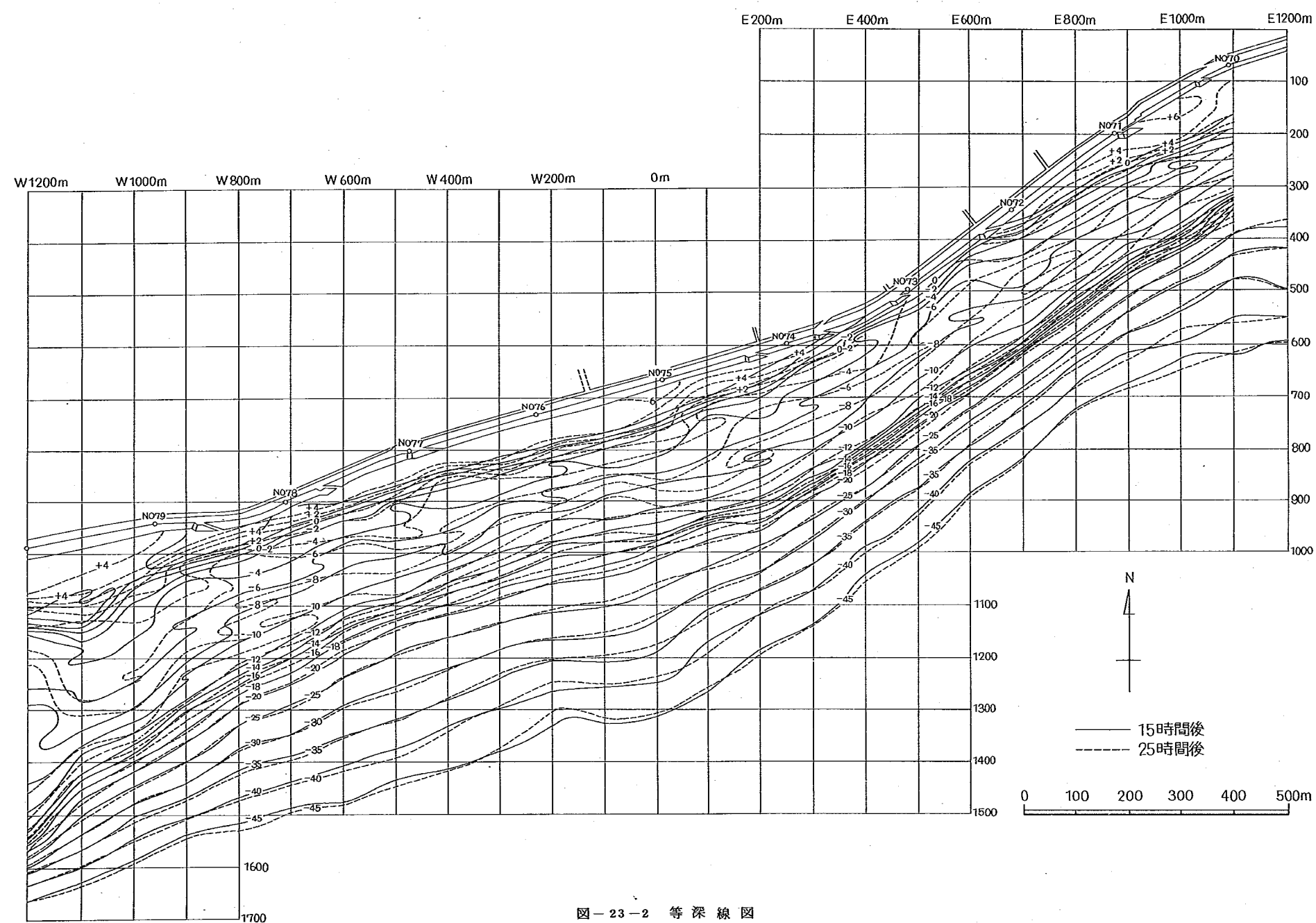
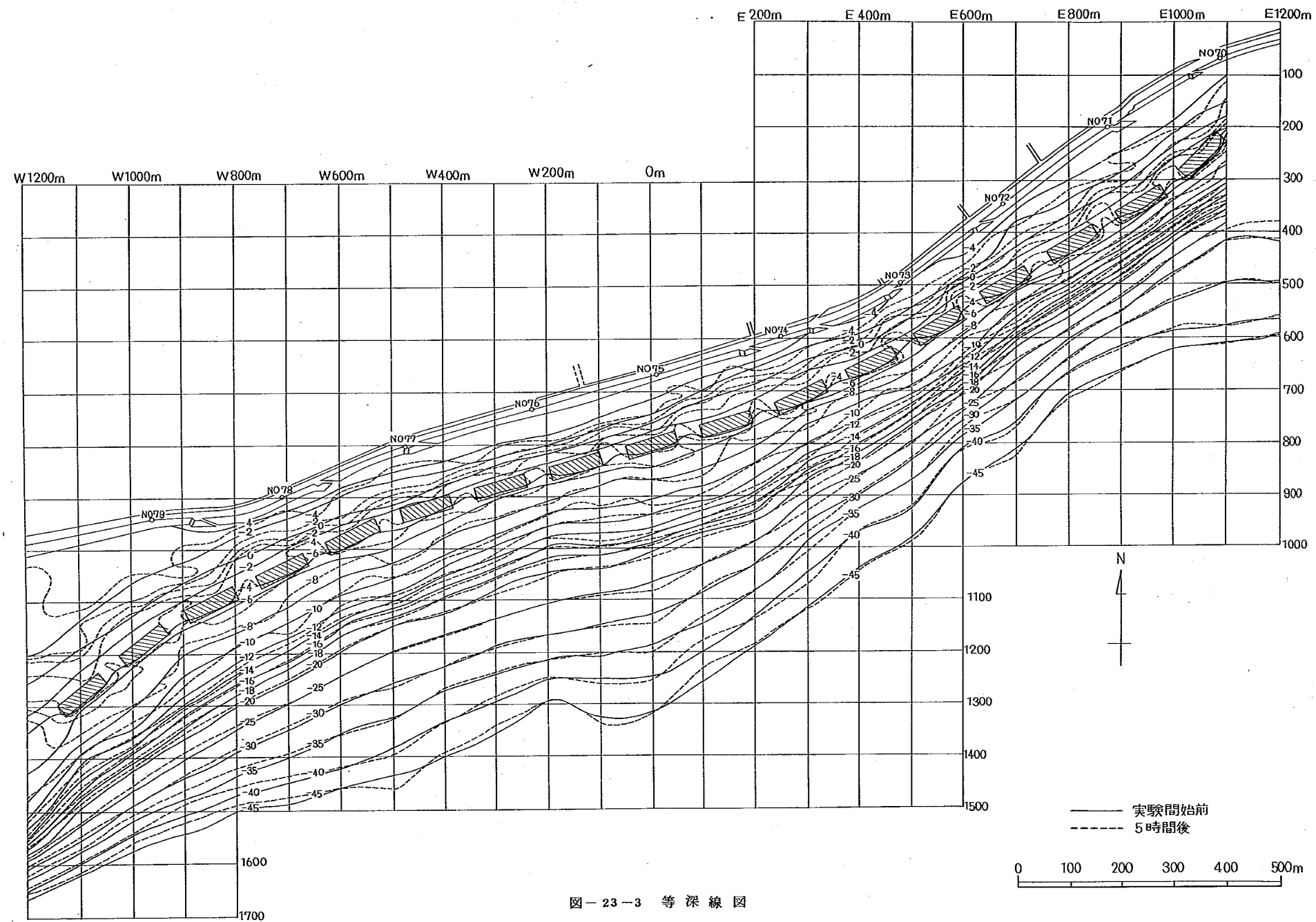


図-23-2 等深線図

TM-116FT-13F-932



TM-116FT-13F-933

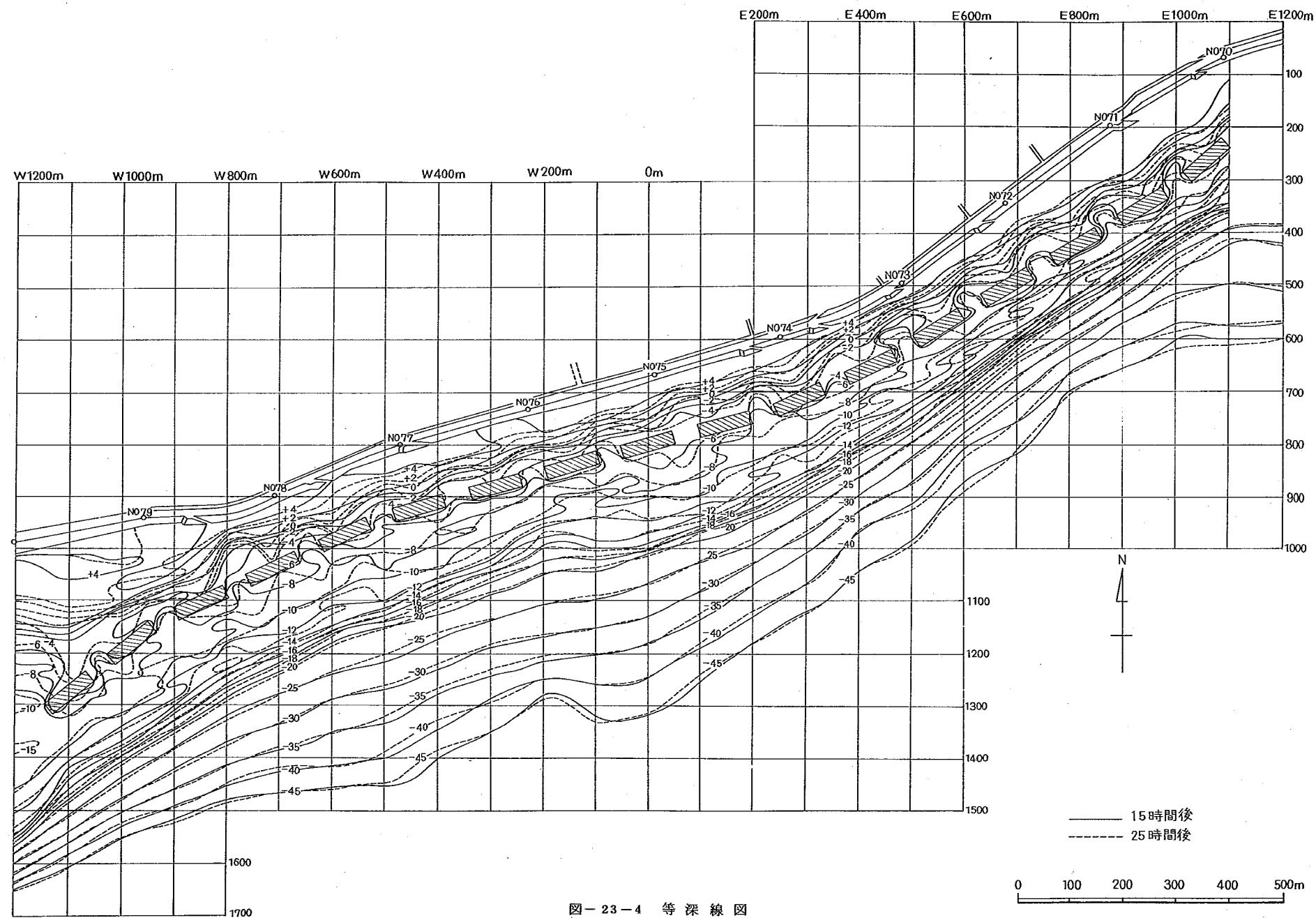


圖-23-4 等深線圖

-41~42-

TM-116FT-13F-934

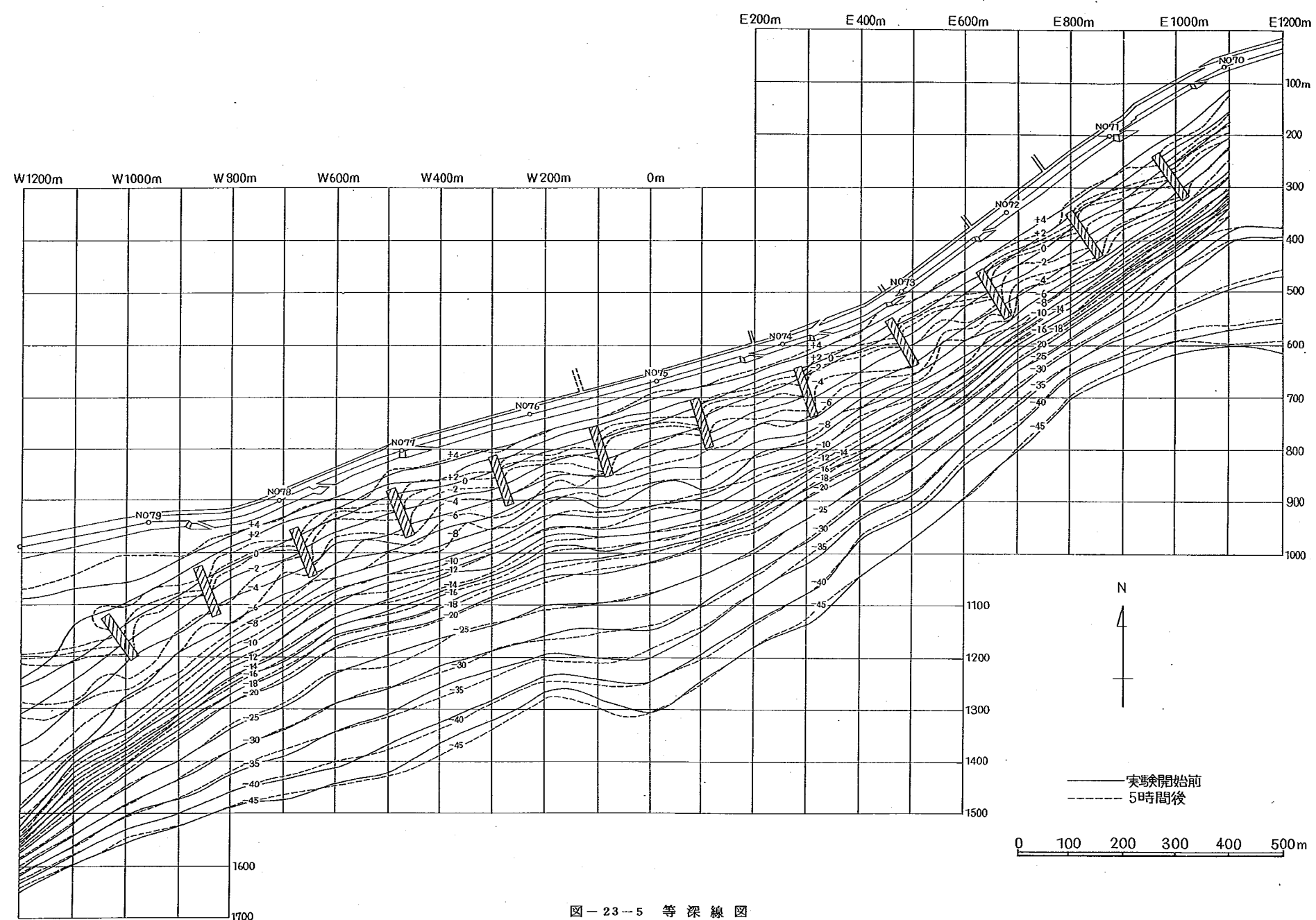


图-23-5 等深线图

-43-44-

TM-116FT-13F-935

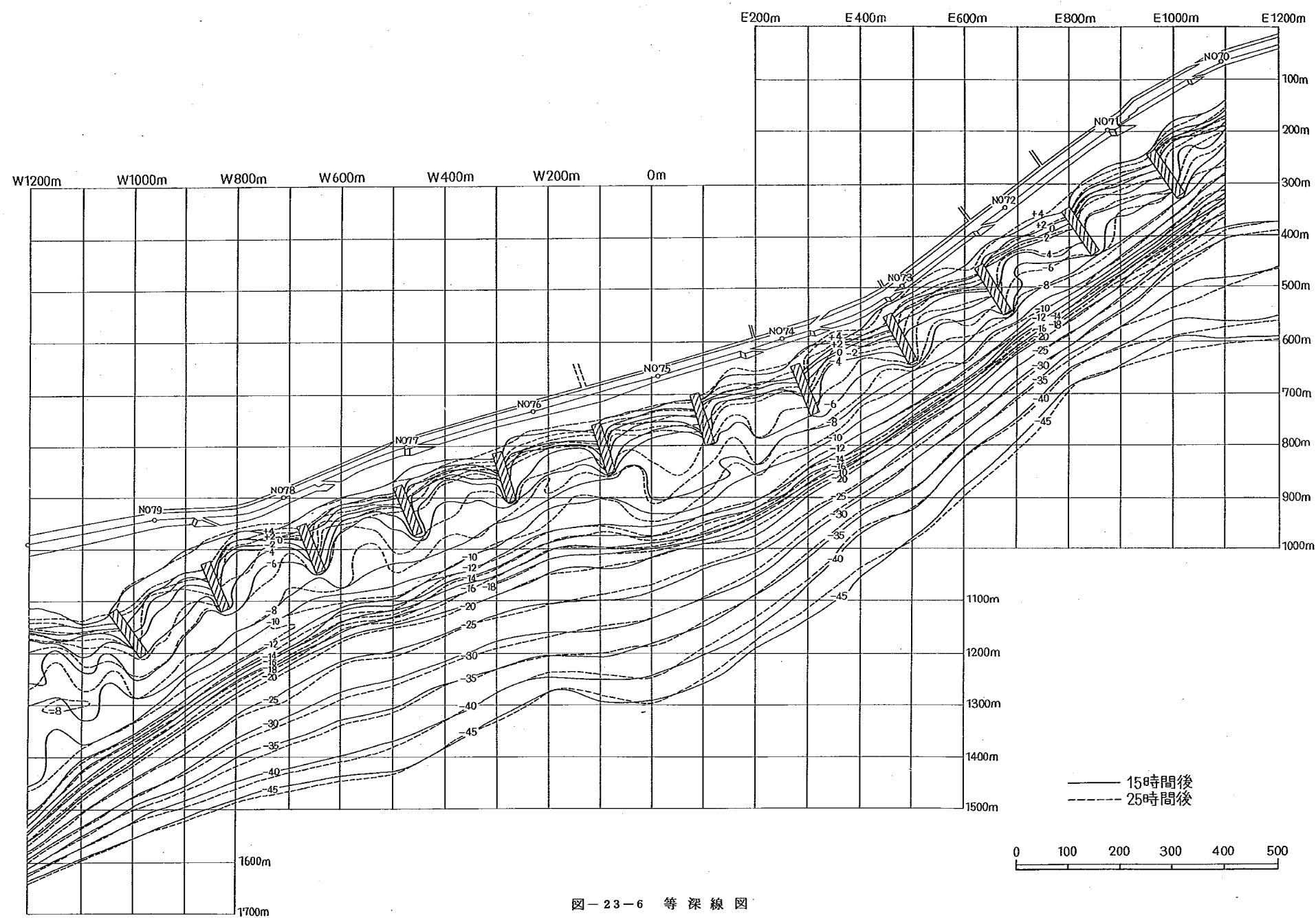


図-23-6 等深線図

TM-116 FT- 13 F- 936

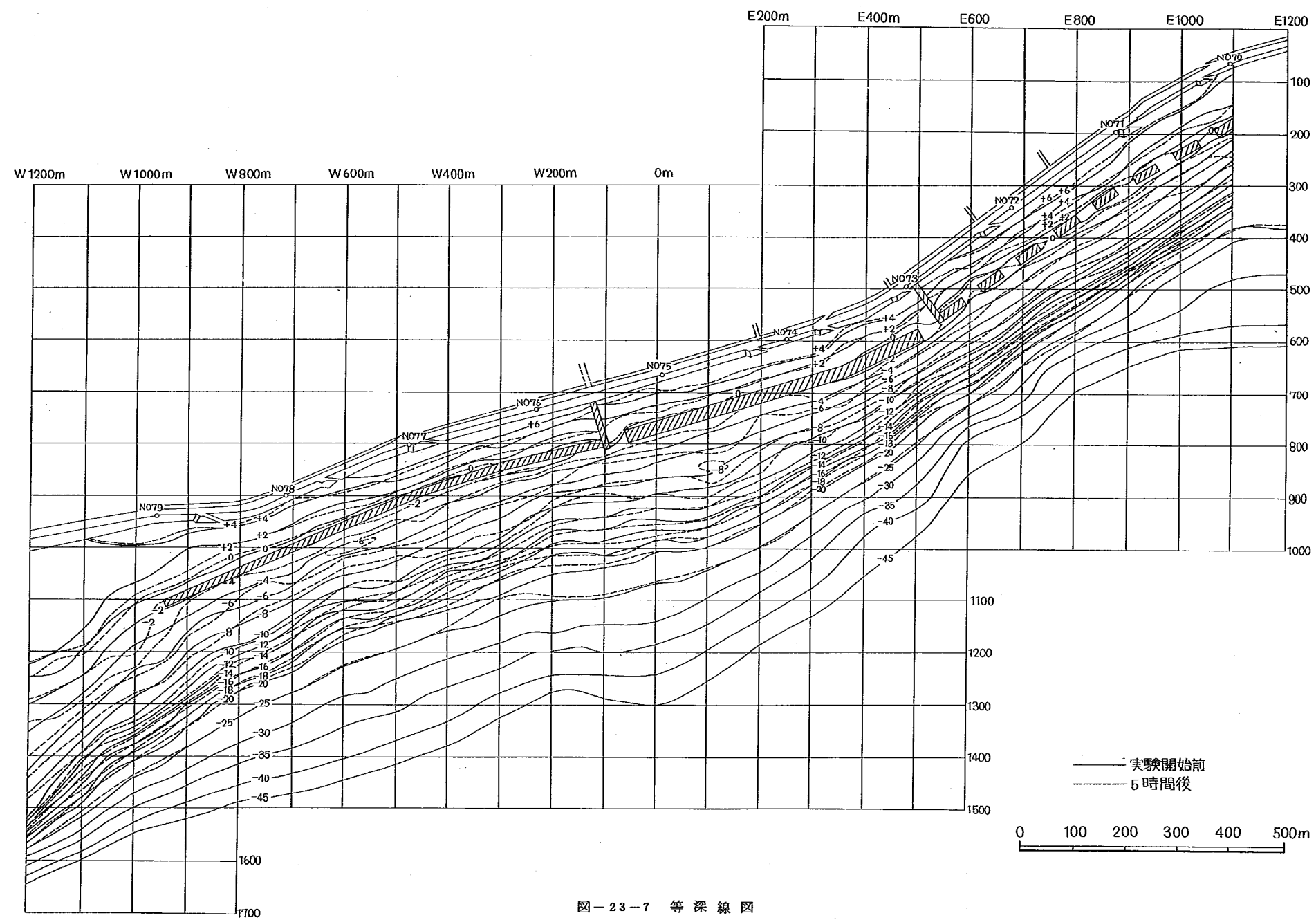
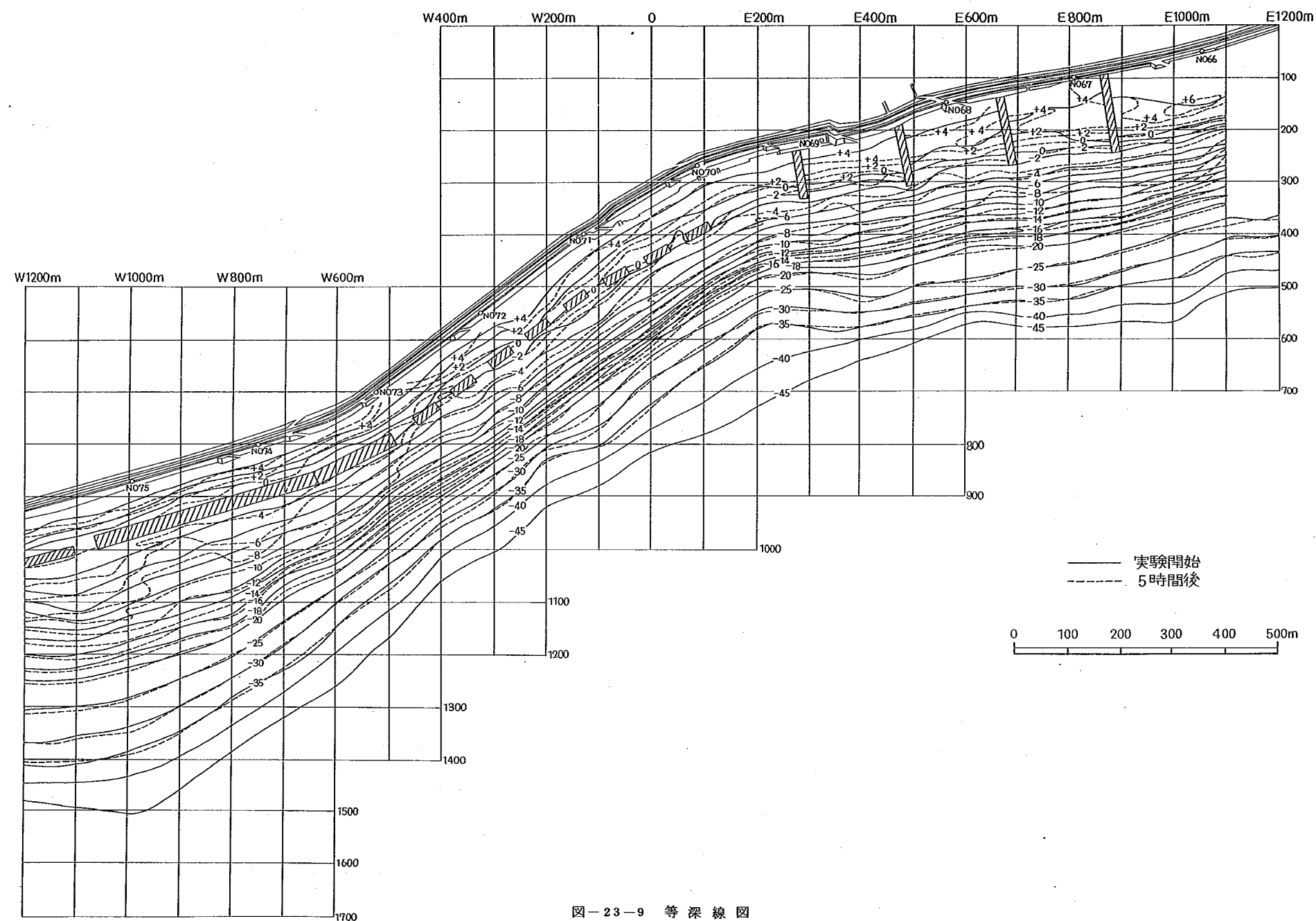


图-23-7 等深线图

TM-116FT-13F-937



TM-116FT- 13F- 939

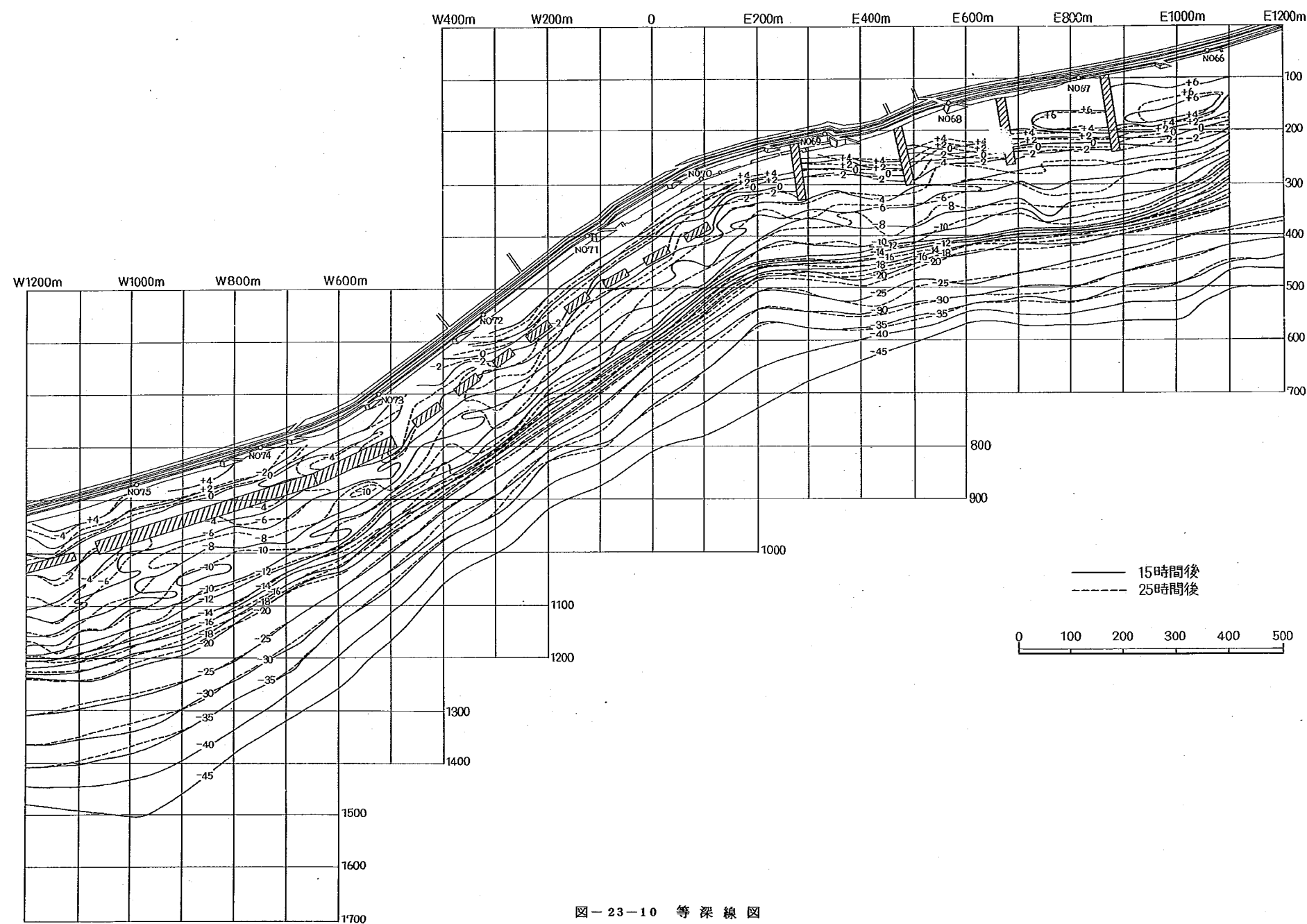


図-23-10 等深線図

TM-116 FT- 13 F- 940

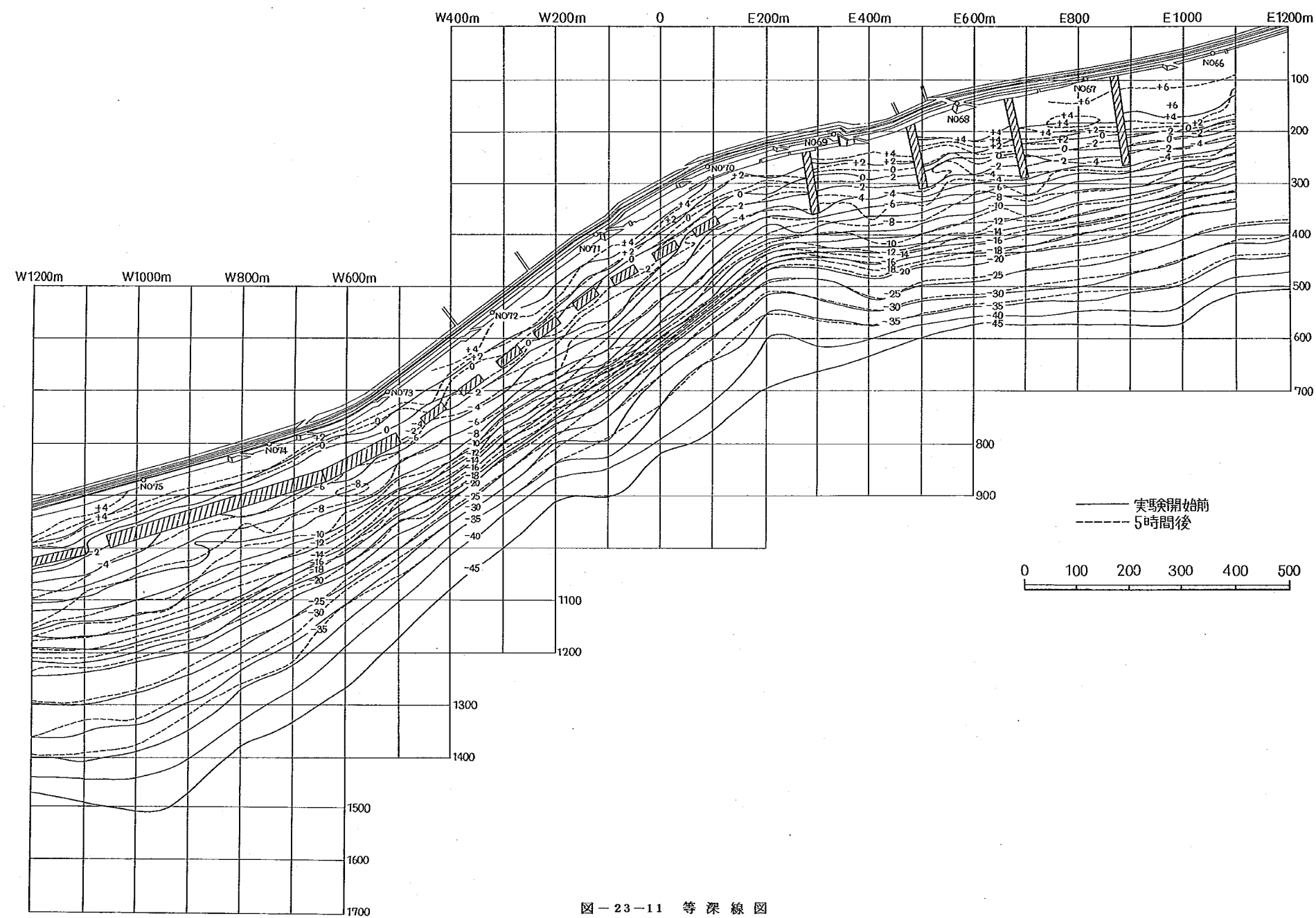


図-23-11 等深線図

TM-116 FT- 13 F- 941

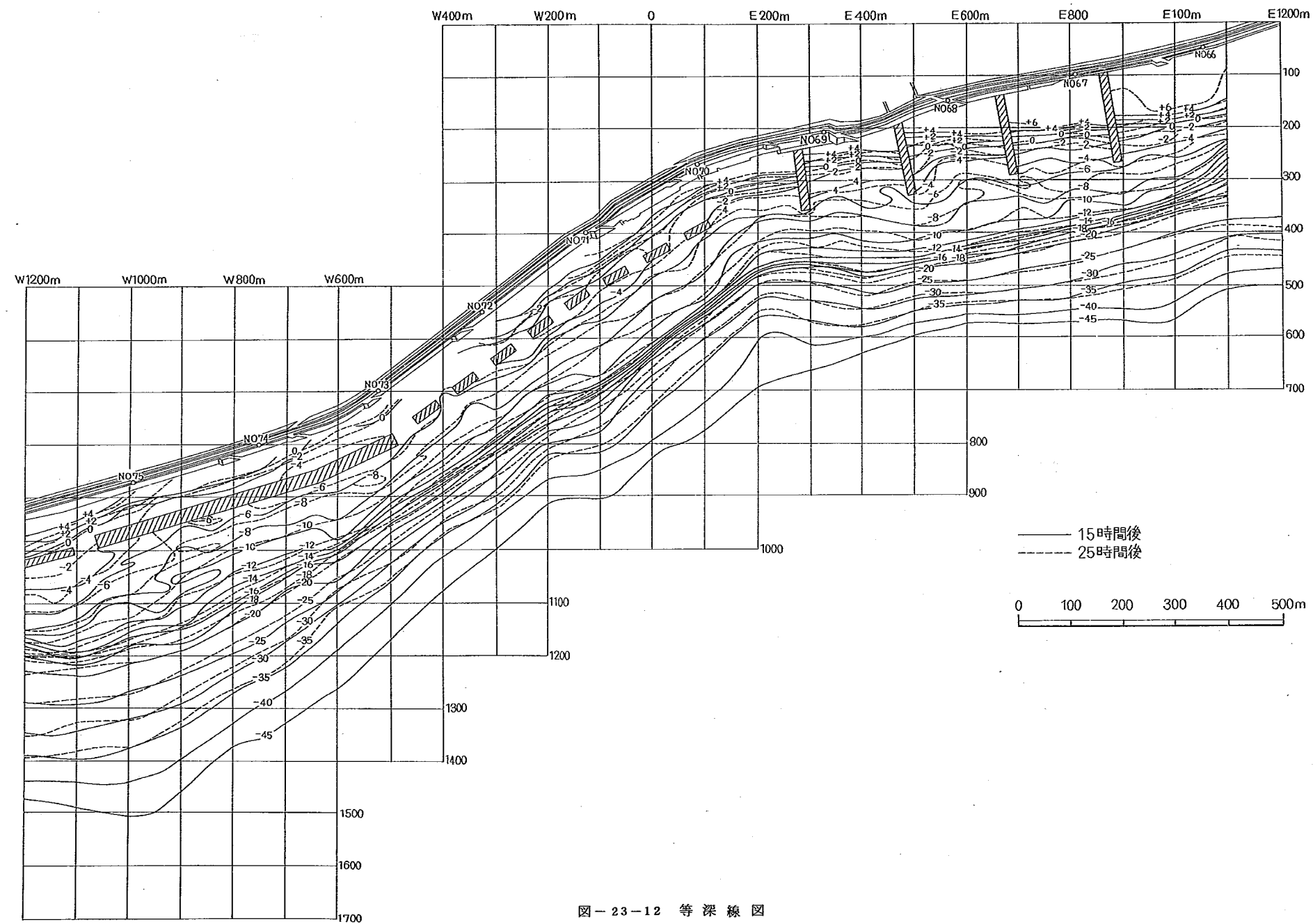


図-23-12 等深線図

TM-116FT- 13F- 942

構造物がない場合の実験No. 1, についての初期値を基準にした 25 時間後 (実物で 2.5 年後) の汀線の変化を図-24 に、また 100 m ごとの体積の変化を図-25 に示す。さきに図-17 で示したように構造物のない場合には汀線の変化と体積の変化は対応しており、汀線の変化から侵食、堆積の状況を知ることができる。図-24 に明らかなように東側および西側では侵食を、中央部では堆積を生じている。西側の侵食は沿岸漂砂があるにもかかわらず模型の西側の境界では砂を供給していないために、ここで漂砂の釣合がくずれて侵食が生じたものである。後に沿岸漂砂について述べるように中央部および東側の侵食は海岸線に対する波の入射角が沿岸方交に変化し、このために漂砂量の変化を生じ地形変化に結びついたものと考えることができる。侵食量としては年間 20 m の単位である。

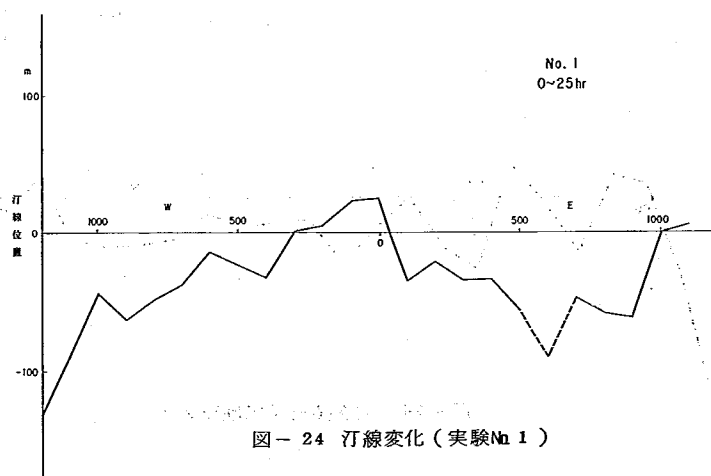


図-24 汀線変化 (実験No. 1)

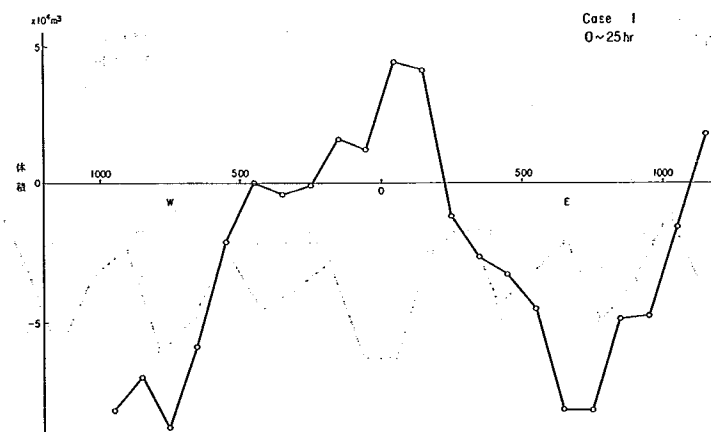


図-25 体積変化 (実験No. 1)

海岸に一樣に離岸堤が設けられた場合の汀線の変化および体積の変化は図-26と図-27に示してある。この場合には離岸堤があるために汀線の変化と体積の変化は必ずしもよい対応は示しておらず、一部には汀線が後退してもその断面の体積は増加している場合がある。これは沿岸方向の動きばかりでなく海岸に直角方向の動きのあることを示している。汀線の後退量は実験No. 1に比較するとかなり少なく、離岸堤が砂の移動を防止していると考えられる。体積の変化は図-22(b)の波高変化と比較するとよく対応しており、波高が大きい場所では堆積を、小さい場所では侵食を生じている。

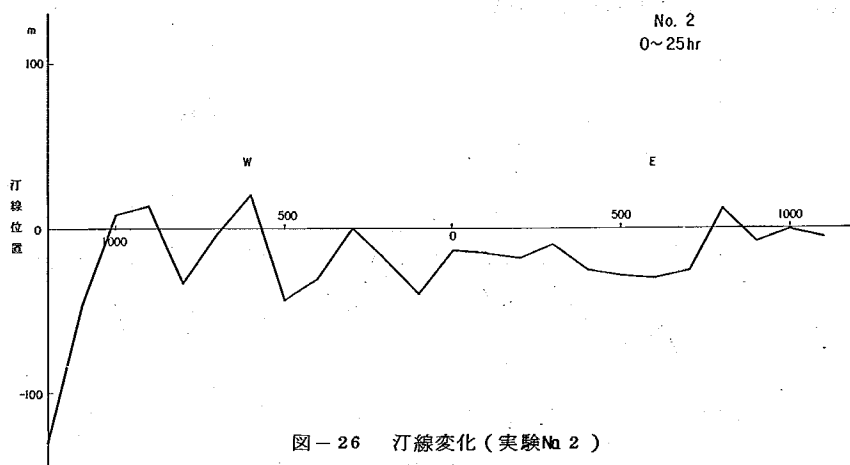


図-26 汀線変化 (実験No. 2)

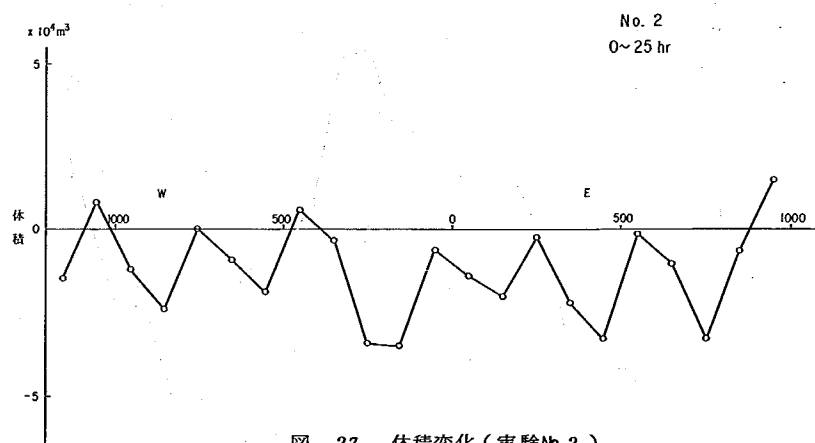


図-27 体積変化 (実験No. 2)

実験No. 3の汀線変化を図-28に、また体積の変化を図-29に示す。汀線および体積とも実験No. 1と同様に東側および西側で侵食を、中央付近で堆積を生じているが、ただ堆積の位置はNo. 1に比較すると西へ移動している。汀線の変化はかなり変動があり、これは突堤によって汀線がかなり変化していることを示している。また体積の変化と比較すると堆積を生じる場合には汀線の前進があまりなくても体積は大きく増加することを示している。このことは沖に堆積する傾向にあると推定され、さきに述べた等値線図の結果によっても確認されている。

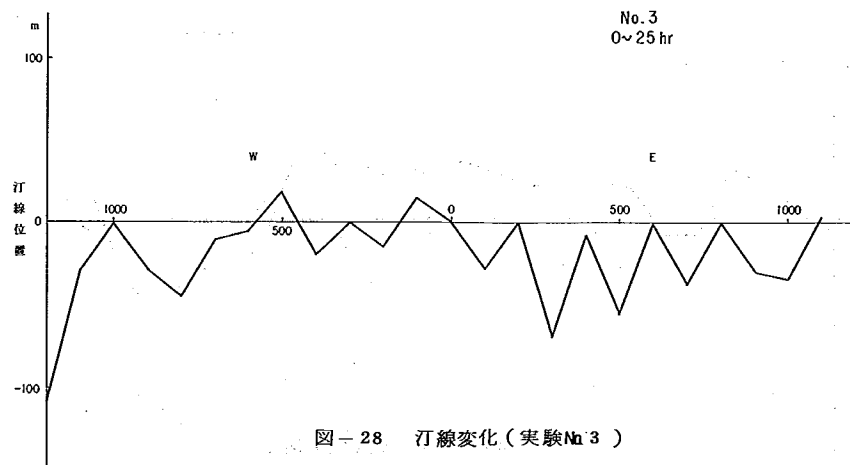


図-28 汀線変化(実験No. 3)

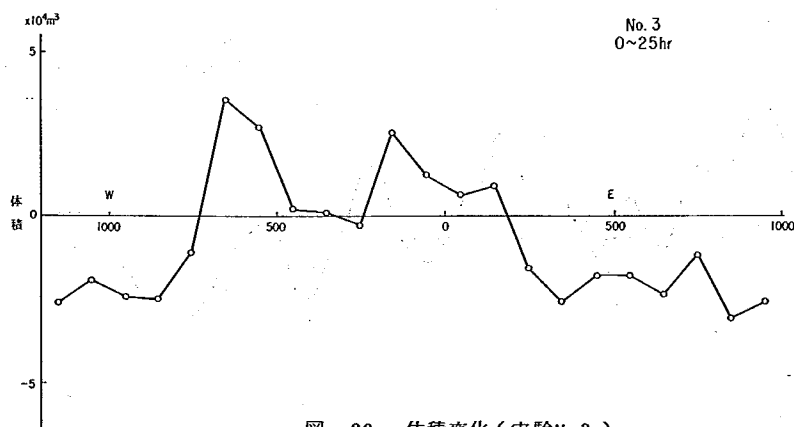


図-29 体積変化(実験No. 3)

実験No. 4の汀線変化については図-30に、また体積変化については図-31に示してある。汀線の変化でいちじるしいのは汀線がE 500からW 500(測点No. 73~77)の間で前進していることである。この度は連続した離岸堤が設けられており、汀線の侵食が防止されている。またE 500 (No. 73)より東側については離岸堤の規模が小さくなるために汀線は後退している。体積の変化については一様ではなく、かなりの変動がある。これは実験No. 1やNo. 2と同様に波高変化と一部は対応しているようであるがそれだけでは説明がつかず、構造物の前面水深や海岸線の方角と結びついていると考えられる。不連続の離岸堤の部分では汀線変化と体積変化は対応している。

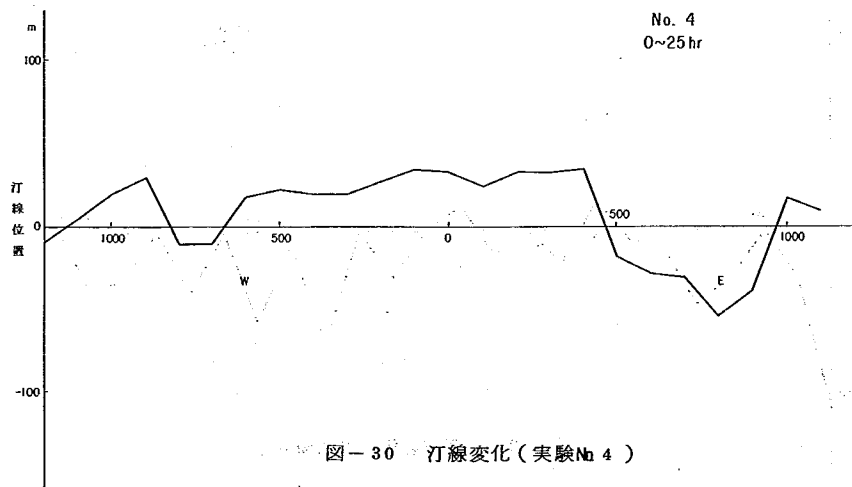


図-30 汀線変化(実験No. 4)

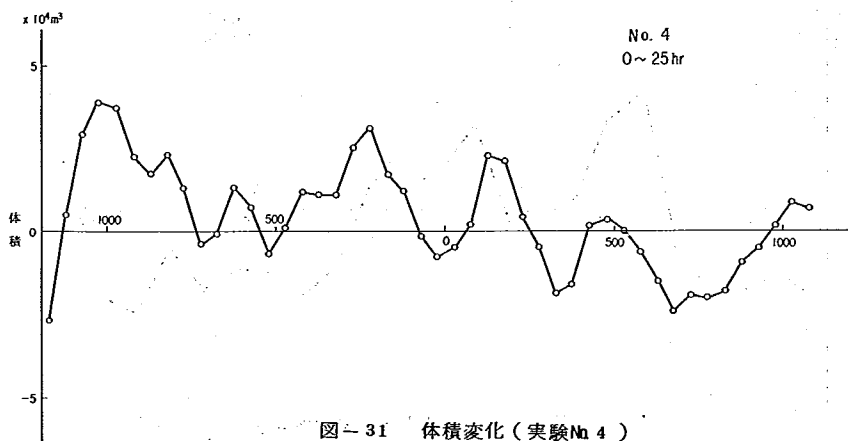


図-31 体積変化(実験No. 4)

実験No 5 についての汀線変化と体積変化は図-32と33に示す、汀線は中央部で後退しており、これはさきに述べたように沿岸漂砂量の増加によってもたらされたものと考えることができる。またE 500より東側、すなわちNo 68より東側については汀線はあまり変化しておらず、この区間には突堤が設けられている。体積の変化については汀線の変化とはほぼ同じ傾向を示しているが、ただE 500より東側については汀線はあまり変化していないにもかかわらず体積は大きく増加している。これは突堤が存在するためにこの場所では沖への移動が生じ汀線よりは沖側に堆積したものであろう。また中央部の侵食は汀線の後退量に比較して体積の減少量は少ない。沖では堆積している傾向を表わしている。

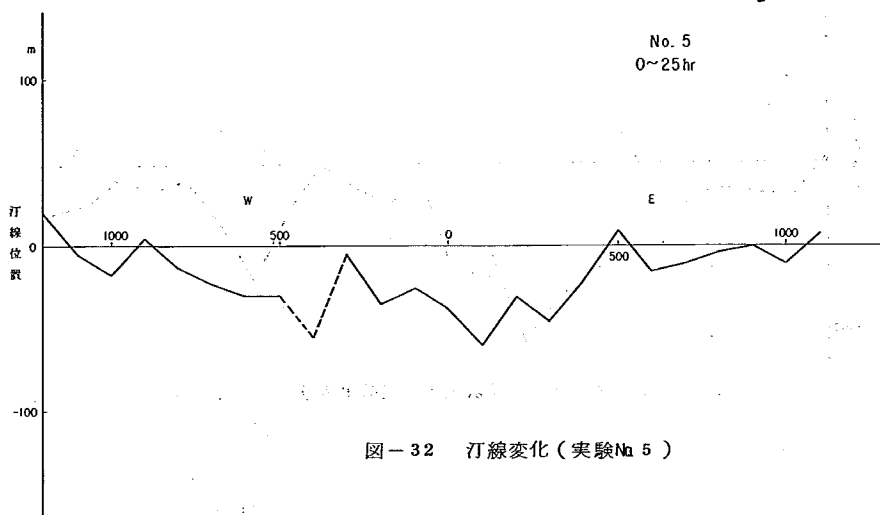


図-32 汀線変化(実験No 5)

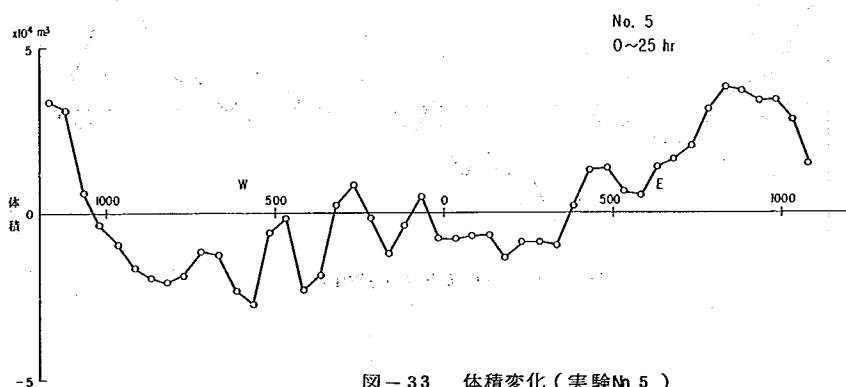


図-33 体積変化(実験No 5)

実験№ 6 についての汀線変化と体積変化を図-34と35に示す。この実験は№ 5と東側の突堤の長さのみが異なっている。汀線の変化については、侵食と堆積の傾向は№ 5と同様であるがただその量は№ 6が大きくなっている。汀線の変化は体積の変化とはほぼ対応しているが、この場合も№ 5と同様に堆積する場合において汀線はあまり前進せずに体積のみが増加している。すなわち沖に堆積している。実験№ 5とはほぼ同じ条件で実験したのではあるがかなり量的には異なっており、その原因として波高の違いが影響しているのではないかと考えられる。

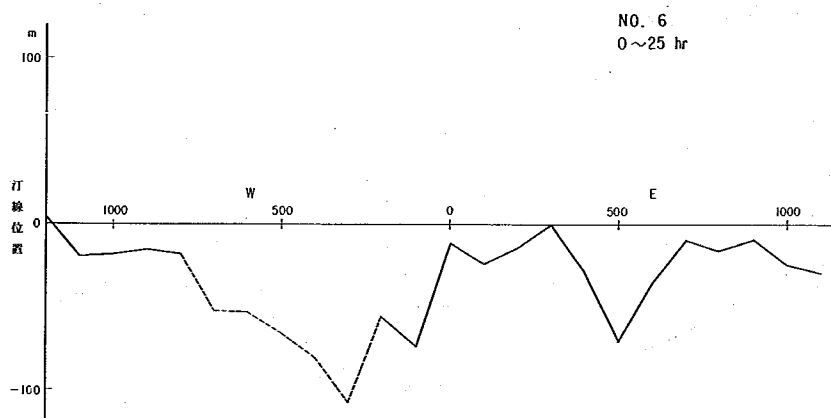


図-34 汀線変化(実験№ 6)

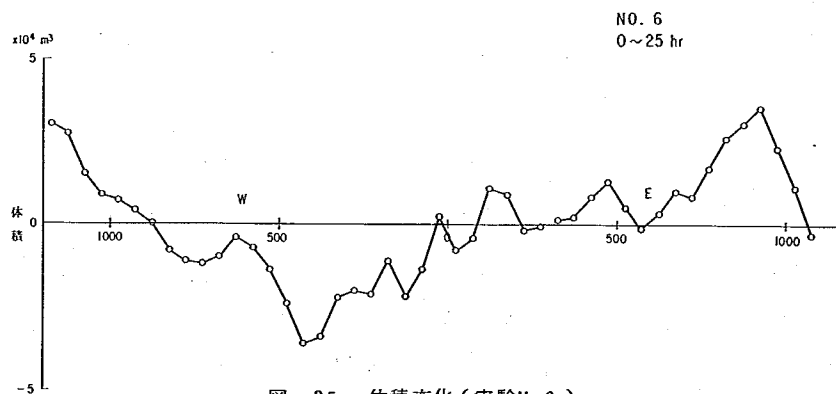


図-35 体積変化(実験№ 6)

4.3 沿岸漂砂量

富士海岸の侵食は主として沿岸漂砂量の釣合が崩れたために生じていると考えられるために、何らかの方法で漂砂量を調節する必要がある。その一つの方法として離岸堤や突堤を造り、それによって漂砂を減少させることが考えられる。海岸全体を考えると単に漂砂量を減少させるだけでは侵食の速度が減るのみであり、侵食を生じないようにするには沿岸漂砂量をなくするか一定にしなければならない。したがってまず各構造物の配置や規模に対応して沿岸漂砂量がどう変化するかを調べた。

漂砂の下手側の模型終端においては海底に採砂箱を置き漂砂量の測定を行なっているの、それより上手側の海岸の各断面における沿岸漂砂量は地形変化量を測定することによって連続の式から求めることができる。ただこの場合に問題になるのは海底地形の測定精度である。したがっ

表-8 体積の増減量

実験番号	供給量	採砂量	体積変形量	増減量
No 1	0	529ℓ	-750ℓ	-221ℓ
2	0	43.2	-418	-375
3	0	96.5	-274	-178
4	375ℓ	148	187	-40
5	375	14	80	-281
6	375	0	16	-359

てまず模型全域の砂の量の増減について検討を行なった。

模型全体の砂の体積変化量、模型始点での供給土砂量、終点での採砂量の関係を示したのが表-8である。いずれの場合においても体積は実験後に減少している。このような系統的な違いが生じるのは単に地形測定上の問題のみならず他の原因が考えられる。第1の原因は空隙率が一定にならないことであろう。実験前に海底地形を決められた形状に成形する場合に空隙率が大きくなり、波を長時間作用させることによって空隙率が減少し、全体の体積が減少する。第2は構造物の空隙が砂によって埋められることが考えられる。これは砂が堆積する場合も、また構造物が沈下する場合にも生じる。このような原因について十分解明していないために誤差は一樣に分布していると考えて沿岸漂砂量についての解析を行なった。すなわち模型両端の流入または流出土砂量が測定されているので必要な補正量を求めて各断面に配分した。

構造物がない場合の実験No 1について模型終端における沿岸漂砂量の汀線に直角方向の分布を示したのが図-36である。またこの断面における海底形状を図-37に示す。この実験では碎波波高が約4mであり、碎波水深は5m程度と考えられるから、図-37において水深5mより

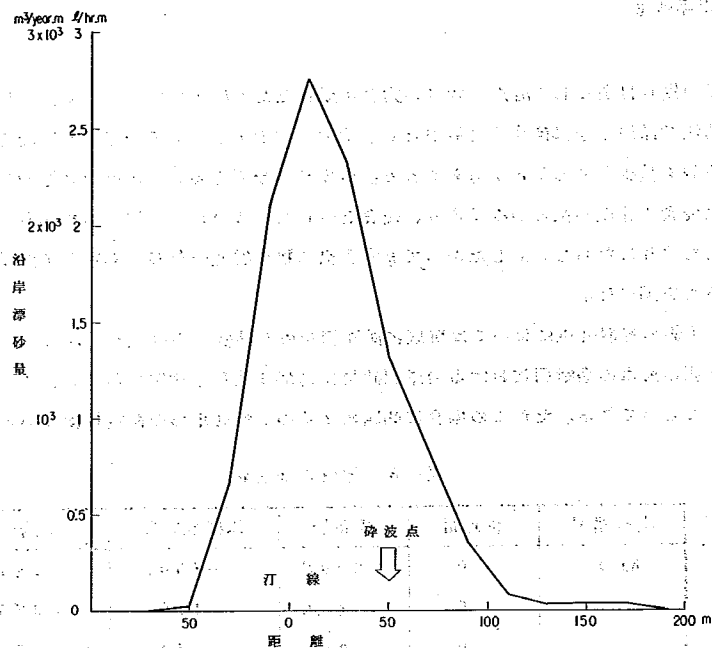


図-36 沿岸漂砂量の汀線に直角方向の分布

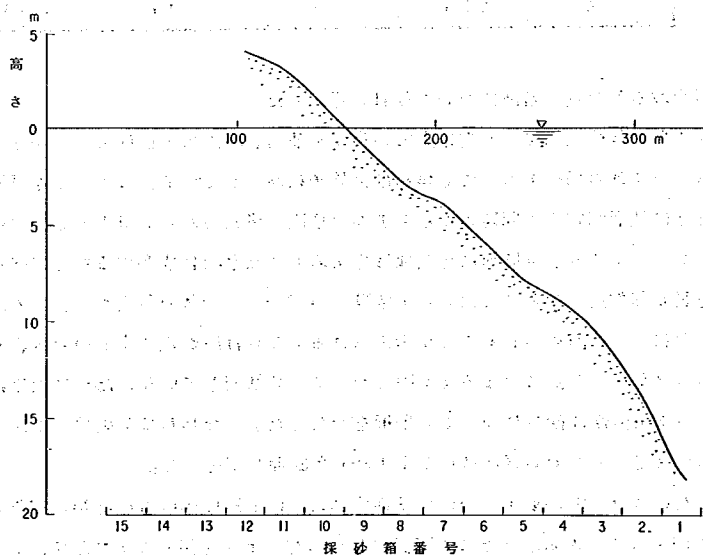


図-37 漂砂測定断面の海浜形状

浅い場所の漂砂量を求めてみると全漂砂量の80%程度になっており、漂砂は砕波帯内に集中していることを示している。また海岸のある位置より沖側の断面を通過する漂砂量を図-36から求め、全漂砂量に対する割合で示したものが図-38である。

構造物が存在する場合についての沿岸漂砂量の汀線に直角方向の分布は図-39のようになる。これには構造物がない場合の漂砂量も合せて示してあるが離岸堤(No.2)突堤(No.3)を設けると沿岸漂砂量はかなりの減少する。

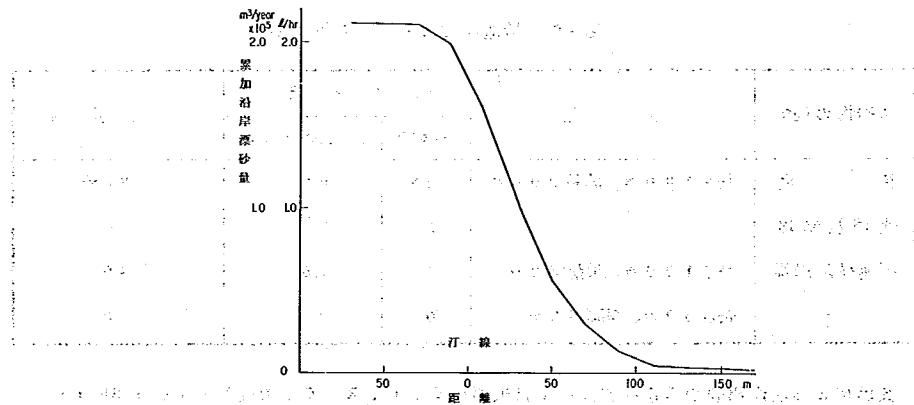


図-38 沿岸漂砂量の累加分布

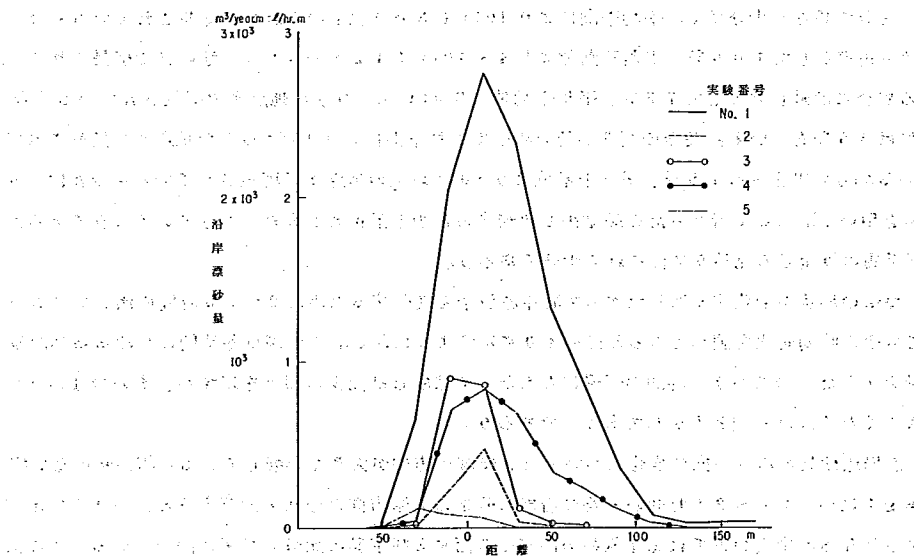


図-39 沿岸漂砂量の汀線に直角方向の分布

漂砂量の減少は汀線付近で生じるのではなく、全体として減少している。沿岸漂砂量は構造物の有無の他に、来襲波の波高、周期、海岸線に対する波の入射角、底質などによって変化する。したがって図-36の結果から地形などの条件が同じである実験№1から№4を比較することによって構造物の沿岸漂砂を阻止する効果を求めることができる。表-9には阻止率を構造物がない場合に対する割合として示してある。砕波点付近に設けられた離岸堤は阻止率が90%で突堤は80%であり、離岸堤が岸に寄って汀線と砕波点の中間に設けられる場合には70%となっている。

表-9 構造物による漂砂の阻止率

構造物の種類	諸 元	前 面 水 深		阻 止 率
		実験前	実験後(25hr)	
突 堤	長さ100m、間隔200m	4m	6m	80%
連 続 離 岸 堤		2	5	75
不連続離岸堤	長さ100m、間隔50m	4	7.5	90
〃	長さ50m、間隔50m	0	2	70

突堤による沿岸漂砂の阻止率については米国のC. E. R. C.で発行している Shore Protection - Planing and Design.の中に下手側の侵食量を見積る場合の値として次のような値が設計の参考として示してある。

突堤の高さが十分高く、平均干潮位より10ft(3m)以下の地点まで延長されている場合には阻止率として100%、平均干潮位より4~10ft(1.2m~3m)の地点まで延長されている場合には阻止率として75%、平均干潮位より4ft(1.2m)の地点まで延長されている場合には50%を用いる。突堤の高さが低い場合で平均干潮位より10ft以下の地点まで延長されている場合の阻止率は75%、平均干潮位より10ft以上の地点まで延長されている場合には50%を用いる。ここで行なった実験結果と比較すると少し阻止率が大きくなっているようであるが、下手側の侵食量の見積りにはこれで十分であろう。

海岸の形状が変化するにしたがって沿岸漂砂量も変化するために0~25時間の漂砂量についてもその時間変化を調べてみると図-40に示すようになる。この図は冬時間における累加漂砂量を示したものであり、時間の経過にともなって漂砂量は減少の傾向を示すが、その量はあまり大きくなくほぼ一定とみなしてもよいであろう。

沿岸漂砂量の沿岸方向の変化については海岸線の方向が大きく影響している。構造物のない実験№1について0~25時間の平均の沿岸漂砂量の沿岸方向の分布を計算すると図-41に示すようになる。中央付近では海岸線の方向がその西および東側に比較して南に向いているために沿岸漂砂量は減少している。また漂砂の上手、すなわち西側では側壁の影響によって漂砂量が少な

TM-116 FT- 13 F- 952

くなっていると考えられる。初期の汀線および模型で波を25時間作用させた後の汀線から波の入射角をそれぞれの位置で求め平均すると図-42に示すようになる。この図からも明らかなように中央部は入射角($\tan \alpha_0$)は小さく、西および東で大きく、特に東側ではかなりの角度となっている。沿岸漂砂量と波の入射角を比較すると傾向は一致しているが漂砂量の大きい場所は入射角の大きい場所に対応していない。これは模型の側壁の影響とともに波の入射角が変化してもそれがその位置での沿岸漂砂量の増加として表われず、漂砂の下手側のある距離だけ離れた地点に表われるためであろう。このような観点から位置を400m(実物)だけずらして入射角と漂砂量の関係を求めると図-43に示すように表わされる。入射角の増加に対応して漂砂量は増加している。田子の浦港西側の堆積量から求めた沿岸漂砂量の関係は次式のようにになっている。

$$q = 1.06 \times 10^6 \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (m^3/year) \quad (14)$$

深海における入射角 α_0 と砕波点における波の入射角 α_b の関係として、波高3m、周期11secの波が1/10の勾配の海岸に來襲する場合の値を用いると図-43に示した実線のようにになる。なおこの場合の海底変化についての時間の縮尺としては次式を使用している。

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{10 \text{ 時間}}{1 \text{ 年}}$$

図-43によると実物の1年を模型の10時間に対応させるよりは9時間程度が一致はよくなるが、現地における沿岸漂砂量公式の信頼性や模型実験の精度などを考慮すると換算に便利な10式を用いることとした。

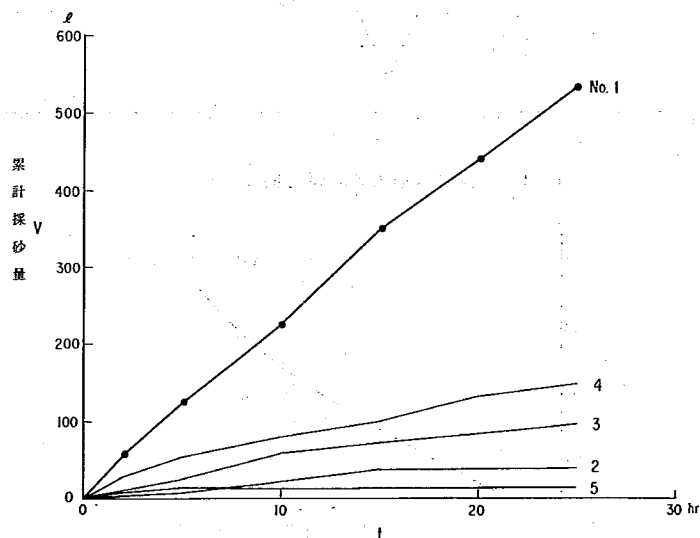


図-40 沿岸漂砂量の時間変化

TM-116 FT- 13 F- 953

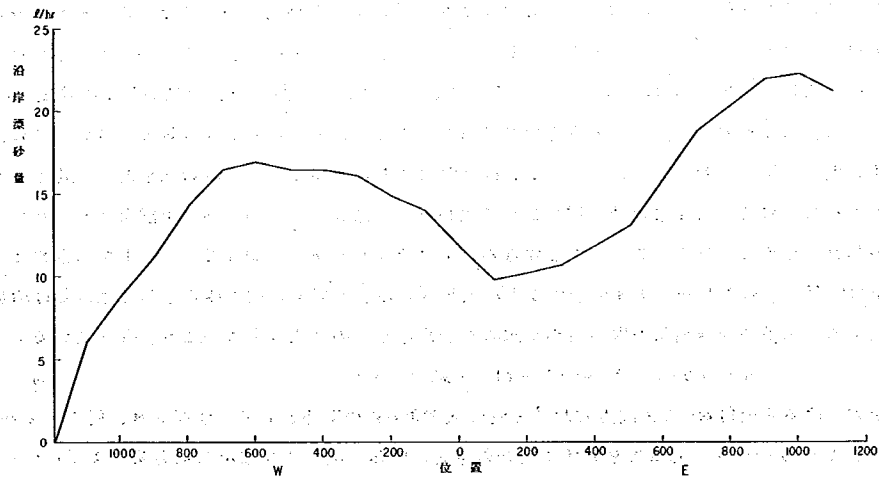


図-41 沿岸漂砂量の沿岸方向の分布 (実験No.1)

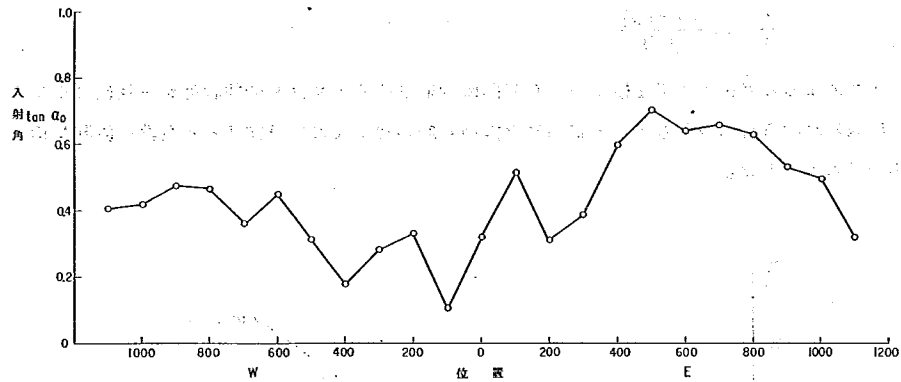


図-42 波の入射角の沿岸方向の分布

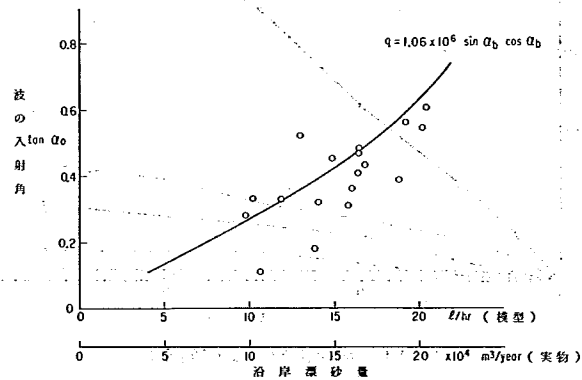


図-43 波の入射角と沿岸漂砂量の関係

不連続の離岸堤が設けられた場合の沿岸漂砂量の沿岸方向の分布は図-44に示すようになり、海岸線の方による影響はあまり表われておらず、全体の漂砂量がほぼ一定になっている。このような状況は侵食対策工法として望ましい。比較的水深の深い位置に設置しているために表-9または図-44に示すように沿岸漂砂量が少なく、離岸堤が砂の移動をおさえていると考えられる。また漂砂量が一定になる理由としては海底が侵食されて海岸が後退すると離岸堤の前面水深は深くなり、また汀線からの離岸距離も増大するために沿岸漂砂を大きく阻止し、海岸侵食を防ぐようになる調節機能によると考えられる。図-45には離岸堤前面の水深を示すが、漂砂の上手側のW600~1000にかけては前面の水深が初期の値に比較すると大きくなっている。

突堤がある場合(No3)の沿岸漂砂量の沿岸方向の分布と各突堤の先端水深を図-46と図-47にそれぞれ示す。突堤がある場合にはない場合に比較して漂砂量はかなり減少しているが分布形状はほぼ似ている。漂砂量がほとんどないと考えられるE400~0の間においては、図-46に示すように突堤の先端水深が深くなっており、漂砂を止めているにもかかわらず突堤付近には砂は堆積していない。平面図(図-23)で明らかなように砂は突堤先端より沖側に堆積している。突堤によって止められた砂が汀線付近に堆積すれば、突堤の先端水深が浅くなって漂砂量が増加するという調節機構が働くのであるがこの場合には突堤に沿って沖へ出る流れが強くなり汀線付近には堆積しなかったためであろう。E800~600にかけては突堤間に堆積し、且つ先端水深が浅くなっている。特に0付近でこのような現象が生じたのは海浜の形状によると考えられる。中央付近では海岸線が他の地点に比較して南に向いているために西からの沿岸流が突堤のために岸から離れて沖へ向ったものであろう。すなわち海岸線が凸形をしている場合には突堤は沖への砂の移動を助長する傾向にある。

離岸堤が連続堤として配置されている場合(No4)の沿岸漂砂量の分布と各構造物の前面水深をそれぞれ図-48と図-49に示す。沿岸漂砂量は実験No1と同様に地形の影響を受けて中央付近で減少している。この場合には上手側(西側)から砂を供給して実験している。沿岸漂砂量は離岸堤などの前面水深が深ければ少なく、浅ければ多くなっている。

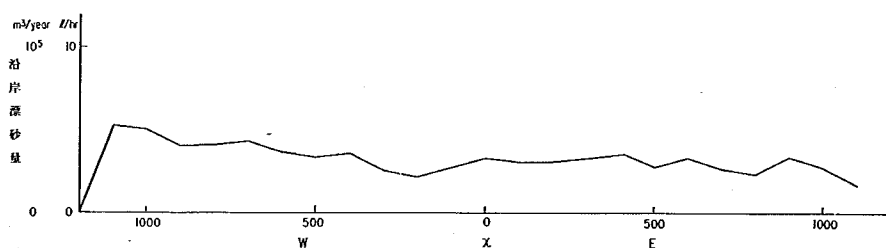


図-44 沿岸漂砂量の沿岸方向の分布(実験No2)

TM-116FT-13F-955

すなわち W 4 0 0 ~ W 8 0 0 にかけては前面水深が 3.5 m で沿岸漂砂量は 8 ℓ/hr、W 1 0 0 ~ E 1 0 0 では前面水深が 5 m で沿岸漂砂量は 3 ℓ/hr、E 2 0 0 ~ E 3 0 0 では前面水深が 7 m で沿岸漂砂量は 1.5 ℓ/hr、E 4 0 0 ~ E 6 0 0 では前面水深が 4.5 m で沿岸漂砂量は 2.5 ℓ/hr となっている。ただこの他に海岸線に対する波の入射方向も場所によって異なっているために直接的な比較は出来ないが大略この程度であろう。構造物のない場合の漂砂量と比較すると 5 0 ~ 8 5 % の漂砂が阻止されていることになる。

実験 No 5 についての沿岸漂砂量の沿岸方向の分布および構造物の前面水深を図 - 5 0 と 5 1 に示す。沿岸漂砂量に E 5 0 0 (測点 No 6 7) より西側ではほぼ沿岸漂砂量は一定であるが E 5 0 0 より東側では一様に減少している。この場所には突堤が設置されている。構造物の前面水深は図 5 1 に示すようにばらつきはあるが西側では深く、中央部では浅くなっており、これに対応して W 1 0 0 0 付近では漂砂量が少なくなっている。

実験 No 6 についての沿岸方向の漂砂量分布と構造物の前面の水深を図 - 5 2 と 5 3 に示す。沿岸漂砂量は実験 No 5 と比較すると少なくなっているが傾向はほぼ一致しており、また構造物の前面水深についてもばらつきはあるが大きな違いはない。実験 No 6 は No 5 と比較して E 5 0 0 (No 6 7) より東側に設けられた突堤の長さだけが異なるのであるから同じような結果になるのが当然ではあるが、次のような点に違いを生じている。実験 No 5 では突堤の長さが短かいために漂砂が突堤によって堆積する範囲は狭いが、実験 No 6 では突堤の長さが長いためにその影響は広くなると考えられる。したがって沿岸漂砂量の変化する範囲も実験 No 5 では E 4 0 0 ~ E 1 0 0 0 まで、No 6 では E 1 0 0 から E 1,000 までにおよんでいる。また漂砂量は突堤が長いほど減少している。

TM-116 FT-

13 F-

956

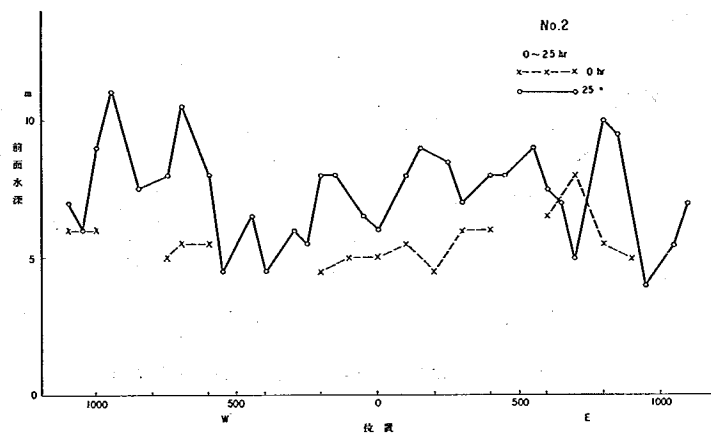


図-45 構造物の前面水深(実験No.2)

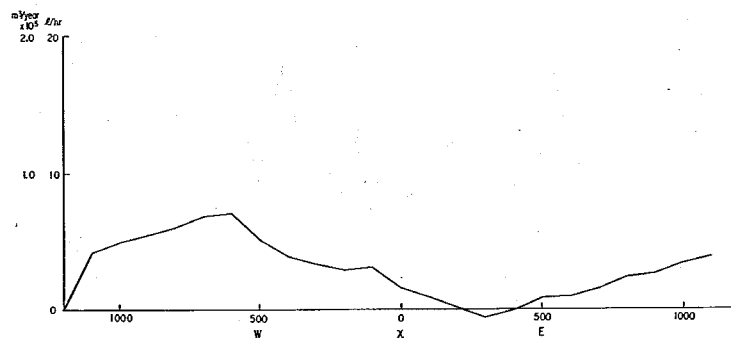


図-46 沿岸漂砂量の沿岸方向の分布(実験No.3)

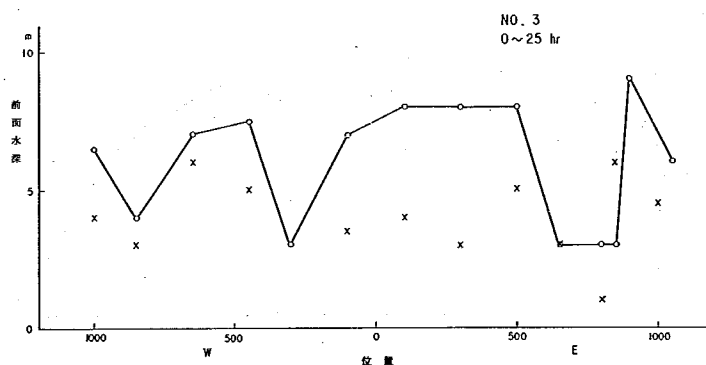


図-47 構造物の前面水深(実験No.3)

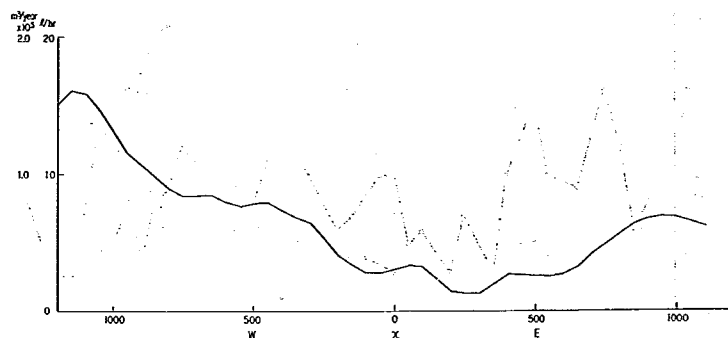


図-48 沿岸漂砂量の沿岸方向の分布 (実験No. 4)

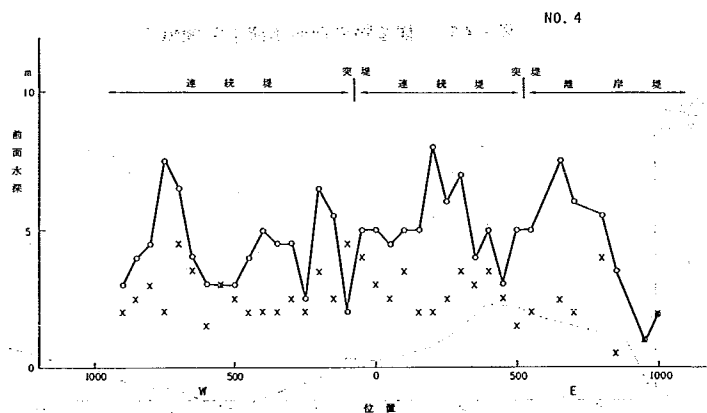


図-49 構造物の前面水深 (実験No. 4)

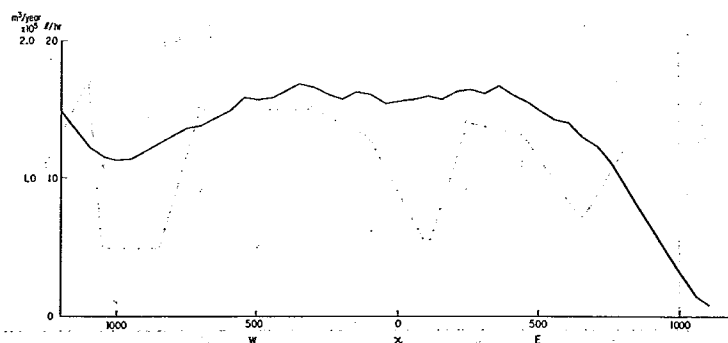


図-50 沿岸漂砂量の沿岸方向の分布 (実験No. 5)

TM-116FT-13F-958

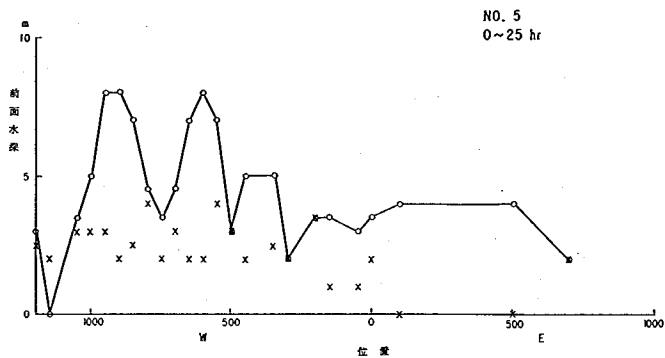


図-51 構造物の前面水深(実験No.5)

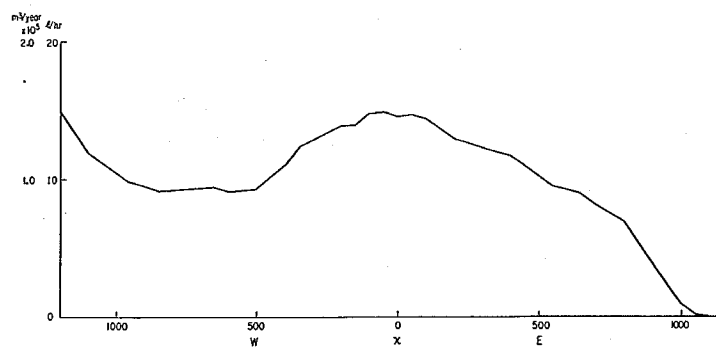


図-52 沿岸漂砂量の沿岸方向の分布(実験No.6)

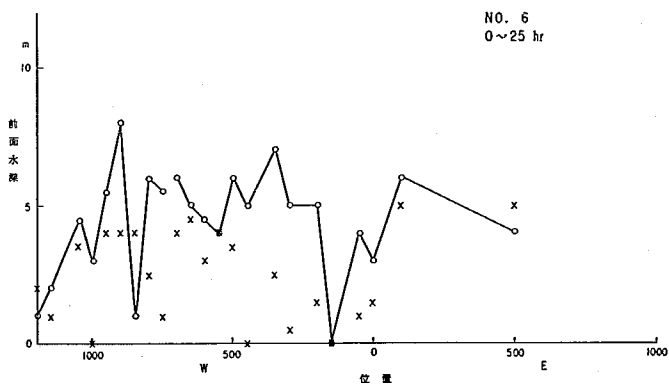


図-53 構造物の前面水深(実験No.6)

ま と め

富士海岸三四軒屋地先における侵食を防止する工法として離岸堤や突堤などが検討されているが、移動床の模型実験によってこれらの構造物の沿岸漂砂に与える影響によってこれらの構造物の沿岸漂砂に与える影響について検討を行なった。その結果次のような結論が得られた。

1. 離岸堤および防砂突堤の沿岸漂砂を阻止する効果については、連続離岸堤で前面水深が 5 m の場合に 75 %、不連続の離岸堤で前面水深 7.5 m の場合に 90 %、前面水深 2 m の場合に 70 % であった。また防砂突堤については先端水深が 6 m の場合に 80 % であった。
2. 離岸堤の長さ 100 m、間隔 50 m の不連続の離岸堤の場合には波の入射方向が場所によって変化しても沿岸漂砂量はほぼ一定となった。
3. 防砂突堤は沖への砂移動が生じる場合があり、特に海岸線が凸形になっている場所（測点 № 74 ~ № 76 ではこの動きを助長し、突堤先端より沖に砂が堆積する。
4. 沿岸方向に構造物の規模を大きく変化させることは沿岸漂砂量に変化を生じ、侵食または堆積の原因となるのでさけるべきである。
5. 測点 № 69 より東側については海岸に直角に波が入射する傾向にあり、長い突堤は漂砂を沖へ堆積させるために、短いものの方が望ましい。

ここでは主として沿岸漂砂量を制御するための構造物の機能を明らかにすることを目的として検討を行なったために構造物自体の安定性や越波防止については十分な成果が得られておらず今後検討すべき問題と考えられる。

最後に実験を行なうに際して現地資料の提供を受けた沼津工事々務所の各位に感謝の意を表します。

海岸研究室 室長 橋 本 宏
鹿島試験所 所長 馬 場 亨
林 敏 夫

TM-116FT-13F-960