

海岸汀線物質の砂堆積におよぼす影響 (第1報)

運輸技術研究所 工学博士 井 島 武 士
同 上 青 野 尙

1. 緒 言

われわれが海岸を歩くとき、しばしば見る現象は、砂の堆積している海岸、特に突堤の上手側、あるいは突出した岬の上手側、河口付近では漂砂の上流側においてはきわめて粒径の様な砂が堆積しているのが見られる。反対にこれらの下流側においては、粒径は非常に不揃いである。これはこの部分が局地的な漂砂の源をなしているため、欠潰を示しているからである。このような海岸の堆積部分における砂の特性は、中砂または粗砂以上の海岸ではきわめて明瞭である。著者の経験によっても、高知県浦戸海岸 渥美半島周辺の海岸、特に渥美湾に面する海岸、宮崎大淀川河口付近、宮城県野蒜海岸等で明らかであり、なお他の海岸でも局地的にしばしば見られる。この現象は一般に海岸に垂直な断面に沿った底質粒径の分布においては、すでに各地の調査で知られていることであり、汀線付近の砂が最も粒径が大であって、またふるい分けも良好である。著者の見るところでは、海岸に沿った砂の動きのいちじるしい所で、この現象はさらに明らかである。すなわち海岸全体として見るときには、欠潰している場合にも、局地的に堆積する砂は、上述の特性をよく示していることが多い。この場合堆積する砂の粒径は、その場所に存在する砂の粒径および供給される砂の粒径によって左右され、最も粒径の大きい砂がいちじるしく堆積性を示す場合が多いようであるが、しかし必ずしも常にそうではなく、例えば渥美湾に面する渥美半島海岸では、福江湾より豊橋付近に至る間は、ほとんど汀線は 1~4mm 程度の粒径に限られており、伊良湖岬より立馬岬に到る間は 0.2~1mm 以下の砂であり、立馬岬より福江湾口までは次第に粒径が大きくなり、粒径 0.5~3mm 程度である。反対に遠洲灘に面する海岸では、粒径は 0.3~0.4mm であって、特にやや突出した岬の上流部分に 1~2mm の砂がある。すなわち海岸を構成する地質条件が一定であっても、波の条件が変わるとともに移動し、堆積する砂の粒径は変るという現象がいちじるしい。このように移動し堆積する砂は、必ずしもその海岸に見られる最も粒径の大きい砂とは限らないのである。このような現象は、われわれに次のような疑問を起させる。すなわち

(1) 砂が海岸汀線を移動し、堆積する場合には、特定の粒径の砂に対しては、最も移動および堆積を生じやすい波があるのではないか。

(2) 同様に特定の波に対しては、それによって最も移動し堆積しやすい粒径の砂が存在するものではなからうか。

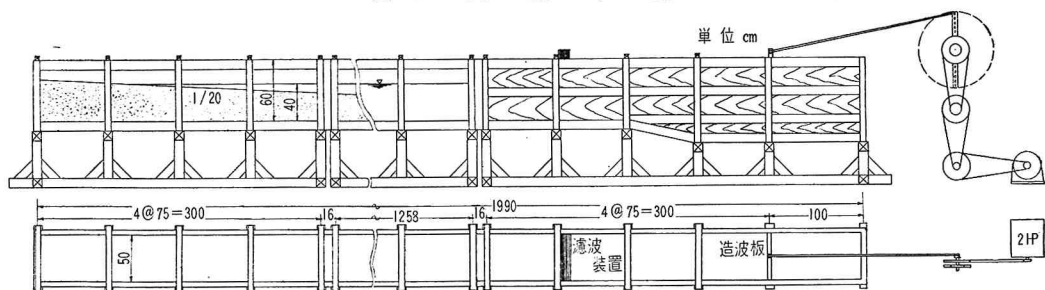
(3) 砂堆積の場合には、なぜ粒径の揃ったものが堆積しやすいのであろうか。このことは (1)、(2) の現象がもし認められるならば、当然の帰結であるが、汀線付近における堆積の場合には、粒径一樣という条件が、何か有利な作用をもっているのではあろうかという疑問が起る。

もちろん上述のような問題は、砂移動の物理的機構を解決して、始めて明らかにされるものであるが、ここでは簡単な実験によって、それに対する推定を行って見たわけである。この実験は、今の段階ではまだ結論をうるに至っていないのであるが、今後の実験の予備的段階として現在までの結果によって、推定されるところを述べることとする。

2. 実験方法

上述した海岸汀線での現象がいちじるしいのは、むしろ汀線に沿う砂移動のはなはだしい場所である。しかしそのような漂砂移動または堆積に対する選択的現象があるとすれば、その作用は主として、波によるものであり、波による水粒子の往復運動がその主体となるものであろうと想像される。すなわち海岸に直角な断面に沿っての砂の slope sorting の現象が、第一に支配的になるのではないかと考えられる。もし横方向に砂移動を起す沿岸流のような、流速に変動があっても方向に変化のない流れでは、そのような選択的現象は起りにくいと思われるからである。従ってわれわれはまず汀線に沿った動きのない、すなわち2次元運動をする場合について、実験を行って見ることにした。

図-1 実験水路



実験には巾 50 cm, 深さ 65 cm, 長さ 20 m の木製ガラス張り水路を用い, 水深を 40 cm として, この中に砂を入れて波を起し, 波による海岸断面, 特に汀線の変化を測った。水路の側面は図-1 に示すごとくである。造波装置は下端ヒンジのフラップ タイプとし, 2 IP の可変速超分巻電動機をもって, 周期は自由に変えることができる。濾波装置は, 径 1 mm の鉄線を 5 mm 目に張った網 20 枚を重ねて用いた。これによって周期約 3 秒の波は波高が約 60% に減衰する。なお濾波装置の付近に水路内の水深を, 一定値 40 cm に保持するために, 調節用水槽を準備した。これは波によって汀線が発達し, 汀線付近に beach berm ができ, その背後に水がたまる状態となるが, このとき水を補給してやらないと, はなはだしいときには水深が約 5~7 mm 小さくなるからである。

使用した砂は平均粒径 0.21 mm, 0.28 mm, 0.53 mm, 0.92 mm および 1.85 mm のもの

で, その比重は 0.28 mm のものが 2.9 その他のものは 2.6 である。粒度曲線は図-2 に示すごとくである。

これらの砂で 1/20 の勾配の海岸を作り, これに表-1 に示す周期および波高の波を当てたわけである。

図-2 実験に使用した砂の粒度分布曲線

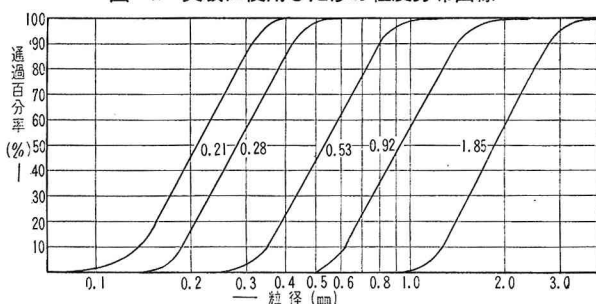
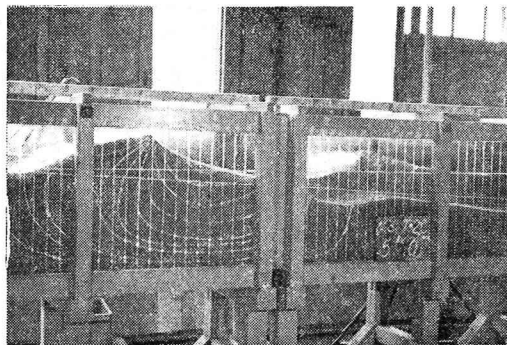


表-1

d_m (mm)	T (sec)	H (cm)	H_0 (cm)	H_0/L_0	E_0 (erg)	E_n (erg/sec)	t (h)
0.21	1.0	8.6	9.2	0.0590	$\times 10^5$ 16.2	$\times 10^5$ 8.06	6.0
	1.5	7.9	8.6	0.0245	31.8	11.22	6.0
	2.0	8.1	8.2	0.0131	51.4	12.99	5.0
	2.5	8.9	8.4	0.0085	84.4	16.88	5.0
	3.0	10.0	8.7	0.0062	130.0	22.15	5.0
0.28	1.0	7.3	7.8	0.0500	11.6	5.33	20.5
	1.5	7.1	7.7	0.0219	25.5	9.07	23.5
	2.0	7.7	7.8	0.0125	46.5	11.75	25.0
	2.5	8.2	7.7	0.0079	70.7	14.32	20.0
	3.0	7.7	6.8	0.0048	79.5	13.14	20.0
0.53	1.5	7.9	8.6	0.0245	31.8	11.22	7.0
	2.0	8.1	8.2	0.0131	51.4	13.49	10.0
	2.5	9.3	8.8	0.0090	92.6	18.41	10.0
	3.0	9.6	8.4	0.0060	121.4	20.40	10.0
	3.3	8.4	7.1	0.0042	50.4	15.86	17.5
0.92	1.0	7.7	8.2	0.0526	12.9	6.47	3.0
	1.5	8.1	8.8	0.0251	33.3	11.80	10.0
	2.0	8.2	8.3	0.0133	52.6	13.32	10.0
	2.5	8.6	8.1	0.0083	78.4	15.75	10.0
	3.0	9.8	8.6	0.0061	127.3	21.29	12.0
1.85	3.3	8.5	7.2	0.0042	107.5	16.23	11.0
	1.5	8.3	9.0	0.0256	34.8	12.36	3.0
	2.0	7.9	8.0	0.0128	48.9	12.40	5.0
	2.5	9.3	8.8	0.0090	92.6	18.43	4.5
	3.0	9.9	8.7	0.0062	130.0	21.70	10.0

波高は濾波装置から海岸断面の法先までの間の波高をポイント ゲージで測り, それを平均したものである。時間がたつと海岸断面が変わって汀線からの反射波が入ってくるので, 実験開始後 30 分以内の波高を測っている。周期はストップ ウォッチによる。海岸断面形の変化は, 水路のガラス面から 20 cm 離れた所の水底の高さを, 5 cm 間隔で水路長に沿ってポイント ゲージで読んだ。写真-1 は粒径 0.92 mm の砂に, 周期 2 秒の波を当てたときの汀線付近の形状を示すもので, 海底断面内に引いた曲線は色素を流して打上げた波による伏流水の流線を示したものである。

写真-1



沖波波高 8~9 cm, 周期は 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.3 秒というのは, このような水路においては, 多少大きすぎるきらいがあるが, 主として汀線付近の変化を見るという目的のためには, 相当大きな波でないと都合が悪いからである。また波高を大体一定に取り周期を変えることにして, 波形勾配による影響をできるだけ明確にしたいと考えた。おのおの場合における波の継続時間は, 海岸断面形が一定の形に落ちつくまでを取るべきであるが, 一般に粒径および波の周期が大きくなると, その時間はきわめて長くなるので, 粒径の大きい砂では, 断面上の各点でほとんど砂移動がなくなり, 汀線付近でのみ移動するという状態になるまでとした。粒径の小さい砂では, 汀線付近の断面形状が一定になるまでとした。従って粒径の大きい砂に対する汀線断面はまだ増大する可能性があり, 図-5 (c) (d) においてはその傾向がいちじるしい。図-5 (e) においてはほとんど最終状態に達している。

3. 汀線での砂堆積量の変化

おのおのの砂に対する海底断面形状の時間的変化を見るために, 波を起し始めてから, 15 分, 30 分, 45 分, 1 時間, 2 時間, 3 時間……, というように間隔をもって, 断面形状を測ったものの一例が 図-3 (a) (b) に示

図-3 (a)

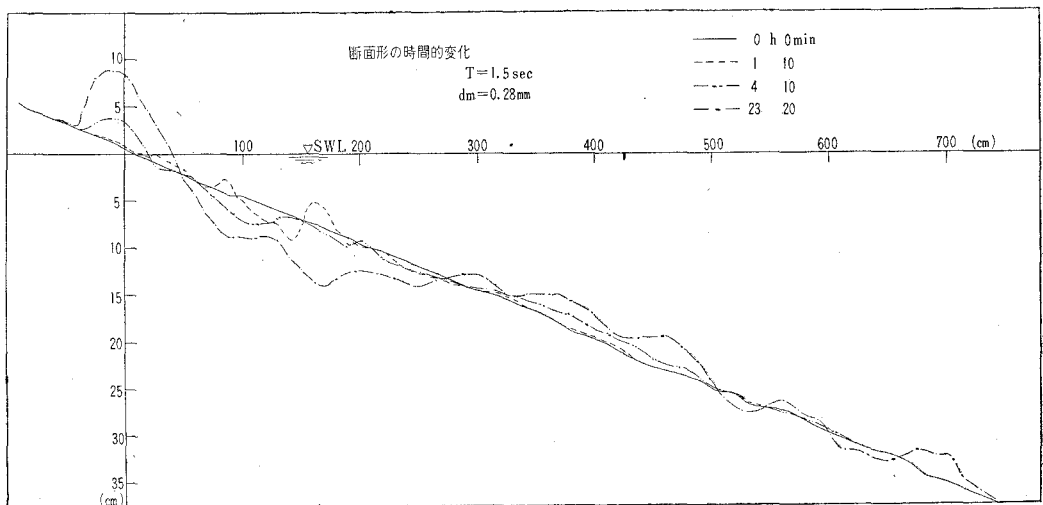
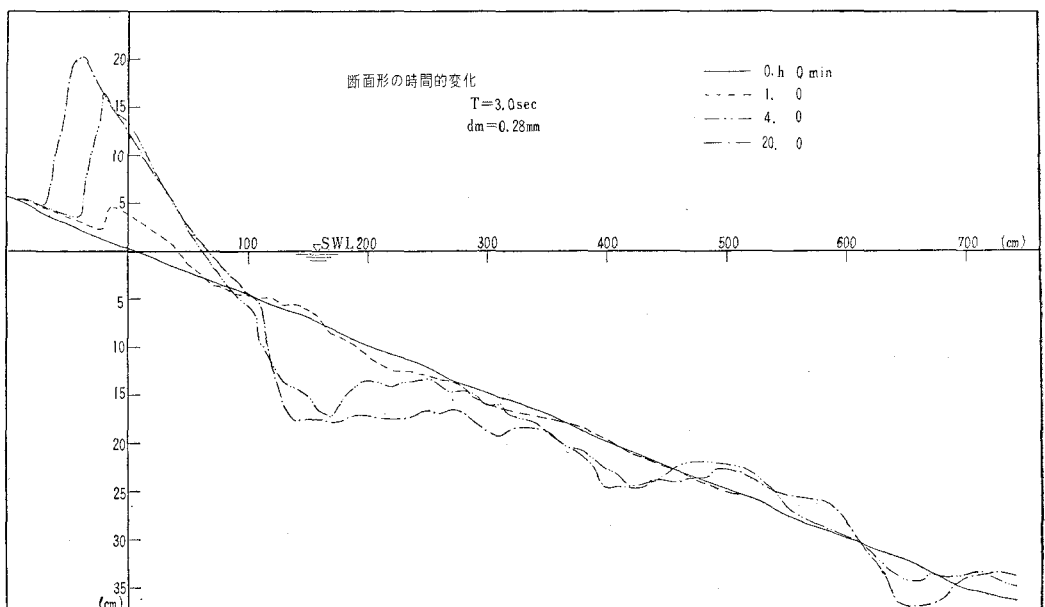
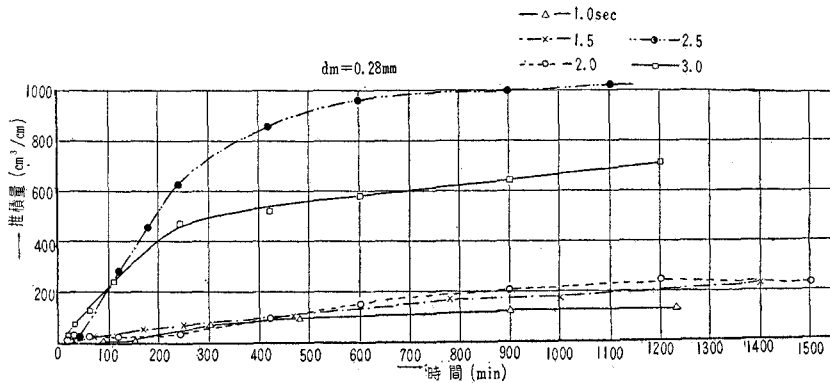


図-3 (b)



してある。この図から汀線付近における砂の堆積量としては、断面形を示す曲線の初めの 1/20 勾配の線より上にある部分の面積を測り、これを汀線での堆積量とする。このように決めると、この実験において用いた砂と波

図-4 汀線堆積量と時間の関係



では、すべての場合において汀線付近では、砂は堆積しているという結果になる。この堆積量の時間的変化を例示すると図-4 のごとくである。すなわち時間とともに堆積量は次第に増加するが、その割合は時間とともに小さくなり、ある一定値に漸近する形を取る。これはすべての実験について、ほとんど同様の傾向を示している。次にこの汀線に対して入射するエネルギー量 Ent (おのおのの周期と波高について、水深 40 cm の場所を前進する波のエネルギーと時間とを乗じたもの) を横軸に取り、縦軸に巾 1 cm の汀線について、堆積する砂の量を取ったものを、砂の粒径別に図示すると、図-5 (a), (b), (c), (d), (e) のごとくである。(a) および (b) それぞれ平均粒径 0.21 mm および 0.28 mm のものに対する結果であるが、周期 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 秒と周期の増大とともに、堆積量は大きくなるが、周期 3.0 秒に対してはかえって減少する。この両者の場合に対しては、最終堆積量は大体一定値に近づいている。(c), (d), (e) は粒径 0.53 mm, 0.92 mm および 1.85 mm に対するものであるが、この場合は周期の増大とともに堆積量は増加する。また

曲線の形について見るときは、(a), (b) の両者はその曲線の傾斜は堆積量の小さな場合 (すなわちエネルギー Ent の小さいとき) から、大体一定の値を取っている。一方 (c), (d) の曲線群においては、曲線の傾斜は Ent の小なるときには小さく、 Ent とともに傾斜が大きくなり、 Ent による Q の増大の仕方は各周期いずれも大体一致しており、途中から分岐しておおのの周期に対応する一定値に漸近してゆく形を取る。(e) の曲線群では (a) および (b) の形に近く、おのの周期に対応して、ほとんど一定の傾斜を取っている。すなわち粒径 0.53 および 0.92……の砂では、おのの周期の波について類似した堆積量の増加を示し、周期の短い波は早く一定値に達し、周期が長いほど一定値に達する時間が長くなるということになる。粒径が 1.85 mm の砂では、同一波高であると砂移動が起りにくくなって、おのの周期に対して、早く一定値に達する形となる。一方 0.28 mm および 0.21 mm の砂では、波の周期によって堆積量の増加率は初めから相異なっている。そして

図-5 (a) エネルギーと堆積量との関係

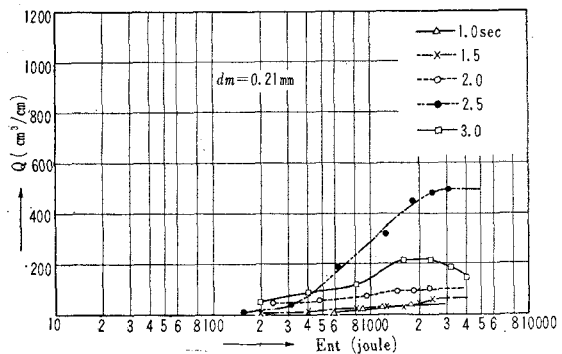
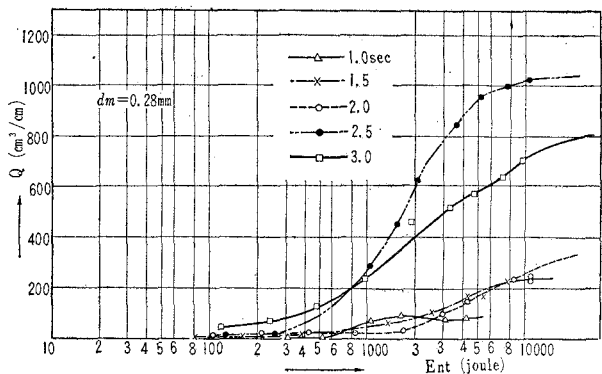


図-5 (b) 同 上



特に目立つのは、2.5 秒の波では堆積量は初めは小さいが、次第に堆積の仕方が早くなって、終極値はかえって3.0 秒の波に対するよりも大きくなることである。このような堆積量の増加の仕方と、周期による終極値が、(a), (b) および (c), (d), (e) の両者でいちじるしく相違するのは、波による砂移動の型式が、両者において全く相違することによるのである。それは 0.21 および 0.28 mm の砂においては、波による砂移動の型式に、掃流と浮游の両者が起り、いちじるしい slope sorting の影響をうけるからである。すなわち水底面には全面的に sand ripple

を生じ、図-6 (a) に示すごとく、水粒子の前進運動とともに ripple に沿って、前方に掃流状態で押し出された砂は、水粒子の後退運動に際して、ripple の前面に生ずるうずによって浮游し、一部分は後方に戻されるのである。砕波点より沖では波の変形によって短時間であるが、強い前進流速で前方に進んだ砂は、弱いが長時間続く後退流によりいちじるしく後方に運ばれる傾向が強い。砕波点より岸ではこれがあまりいちじるしくない。従って汀線付近においては、堆積を生じていても、砕波点より沖ではいちじるしい欠損を示すことになる。しかるに 0.5 mm 以上の砂の場合には、波高 9 cm ではこのような運動はなく、図-6 (b) に示すごとく、水粒子の強い前進速度によって、前方に押された砂はうずによって浮游することがなく、後退流が弱いために水粒子の後退運動によってもほとんど後退することがなく、砂の運動は至るところ常に前進するのみである。そして水粒子の前進速度による掃流力が限界掃流力をこえなくなる深さでは、砂は全然移動を起さず、それより浅い砂がすべて汀線に移動してくることになる。従って長時間の後には、水底の砂粒が至るところ移動しなくなる水底断面

図-5 (c) エネルギーと堆積量との関係

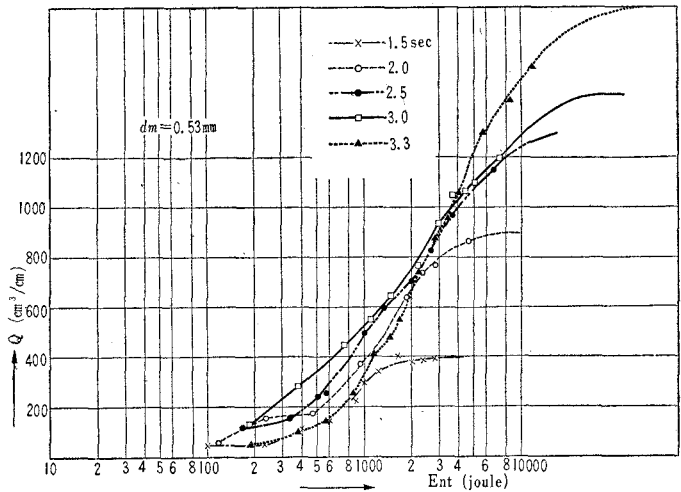


図-5 (d) 同 上

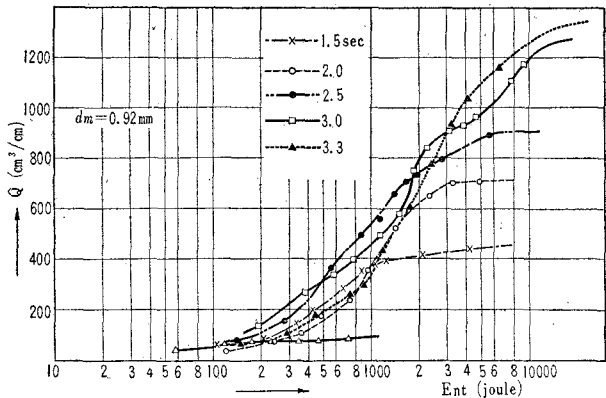


図-5 (e) 同 上

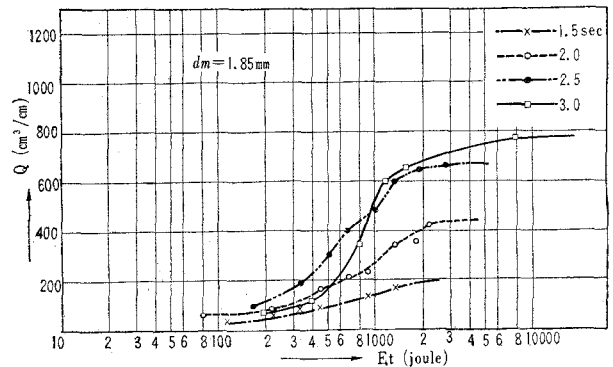
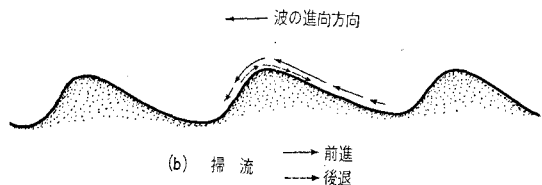
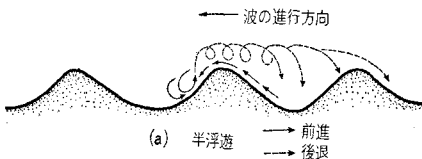


図-6 砂漣と砂移動の形式



形ができて、堆積は終ることになる。

この実験では、波の継続時間は観察によって、断面変形が非常に少なくなるか、あるいは汀線の勾配が一定のままその位置がわずかに前進するという程度になるまでとした。上述のごとく 0.53 mm 以上の粒径の砂は、この実験条件では、砂は前進するのみで後退することがない。従って砂移動の限界水深より、岸側の水底の砂のみが汀線を発達せしめるので、水底が洗掘されて一定水深に達すると、至るところ砂の移動はなくなるという終極状態に到達する時間が明らかに存在する。例えば 図-5 (e) の粒径 1.85 mm の砂では、すべての波に対してこの終極状態が見られた。粒径 0.92 mm の砂に対してもほとんど同様である。しかし粒径 0.53 mm 以下の砂に対しては、周期 1 秒の波の場合を除いては、砂移動の限界水深が 40 cm 以上であるため、0.53 mm の砂においては、3.0 秒および 3.3 秒の波の場合は、海底断面形の法先部分の砂も汀線方向に動き、40 cm 以上の水深の部分からの砂の移動も、また汀線の砂堆積にいくぶんの影響を与えるものと考えられた。それゆえこのような場合には、この水深の水路では最終の海岸断面をうることは困難であることがわかった。粒径 0.28 および 0.21 mm の砂では、上述のごとく明瞭な slope sorting のために、一部分の砂が断面の法先をこえて、沖方向に移動したのが見られた。このような場合にも最終的な断面形が得られるかどうかは明らかでないが、図-5 (a), (b) から見るように、ほとんどすべての場合堆積量は一定値に近づいていることは、間違いないと考えられる。

そこで 図-5 (a), (b) では、この終極値と考えられる堆積量 Q (汀線の単位巾について、1/20 勾配線よりも堆積した量) をもって (正確には 図-5 (a) では、 $Ent=3000$ joule に対する Q , 図-5 (b) では $Ent=10000$ joule に対する Q)、おのおのの波による堆積量とし、図-5 (c), (d), (e) では、 $Ent=10000$ joule での Q をもって堆積量として、粒径別に Q と波との関係を示すために、縦軸に QT/E_0 、横軸に H_0/L_0 を取って示すと 図-7 のごとくである。ここで E_0 は沖波のエネルギー、 T は周期である。この図から見ると粒径 0.21 mm および 0.28 mm の砂に対しては、明らかに $H_0/L_0=0.008$ の付近にピークがあり、これより大きいあるいは小さい波形勾配については、砂の堆積量は小さくなっている。しかるに粒径 0.53 mm 以上の砂では、波形勾配が小さいほど堆積量は大きくなっている。このことは両者において前述したような砂移動型式に、いちじるしい相違があるためである。実際海岸においては、波の大きさに比較して考えると、この実験におけるごとき 0.53 mm に対応する砂は、大体 2 mm 程度の砂と考えられ、このような大粒径の砂が相当水深まで存在する海岸は少ないので、多くはこの実験での 0.28 mm 以下の砂と相似の運動をする砂浜が多い。従ってこの実験条件に当てはまると仮定すれば、

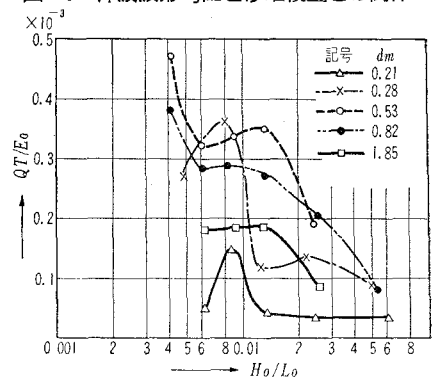
粒径に対応して、最も砂移動および堆積を促進する波形勾配がありそうに思われる。ここでこの実験条件を考えるに最も大きな要素は、初めの海底勾配を一樣に 1/20 に取ったことである。このことは 図-5 の $Q \sim Ent$ の関係図から見ると、粒径 0.21 および 0.28 mm の砂に対しては、おのおのの波に対して、 Q の増加は最初の状態を除けば、対数紙上で大体直線的であり、従って単位時間の増加量は、時間に逆比例して減少しており、この状況はほとんど Q の最終値に到達する直前まで続いていることが多い。従ってこのような小粒径の砂では、いずれの波でも 1~2 時間後には、初期の勾配の効果はあまり利かなくなっているとも考えられる。このことは 図-2 に例示した海底断面からもほとんど推察される。それゆえ初期勾配の影響は、この結果を全く変えることはないと考えられる。しかし堆積量そのものを測ることはいずれにしても、初期勾配がなんらかの形で入っていることになるので、砂が堆積しやすいかどうかの判断の一つの方法として、図-5 (a), (b) での直線部分の勾配を比較することも考えられる。それは 図-2 のごとく海底断面形状から見て、海底地形が十分 1/2 勾配の線から離れたときから、ほとんど一定の断面形状を取ったと考えられるときまでの堆積量の時間的変化を見ることである。このような考え方で、図-5 (a), (b) の曲線から求めた Q の時間的変化は

$$Q = a \log Ent + b$$

とおくと、 $dm=0.21$ mm の砂に対しては、

$T=3.0$	2.5	2.0	1.5	1.0
$H_0/L_0=0.006$	0.0085	0.0131	0.0245	0.0590
$a=342$	524	63.4	43.9	34.5

図-7 沖波波形勾配と砂堆積量との関係



$$b = -878 \quad -1420 \quad -117 \quad -106 \quad -83.1$$

$dm=0.28$ の砂に対しては

$$H_0/L_0 = 0.0048 \quad 0.0079 \quad 0.0125 \quad 0.0219 \quad 0.0500$$

$$a = 461 \quad 1034 \quad 312.5 \quad 242 \quad 20.0$$

$$b = -1123 \quad -2830 \quad -992 \quad -715 \quad 5.0$$

これからおのおのの周期の波の単位時間に入射するエネルギー量による Q の増加率 $dQ/d(Ent)$ は a/Ent であるから、これを各粒径および各波に対して示すと

$$d=0.21 \text{ m} \quad T=3.0 \quad 2.5 \quad 2.0 \quad 1.5 \quad 1.0$$

$$\frac{a}{En} = 1544 \quad 3102 \quad 488 \quad 391 \quad 428$$

$$d=0.28 \text{ m} \quad T=3.0 \quad 2.5 \quad 2.0 \quad 1.5 \quad 1.0$$

$$\frac{a}{En} = 3508 \quad 7220 \quad 2660 \quad 2670 \quad 375$$

のごとくなり、一定の時刻 t におけるおのおのの波による単位エネルギー当りの堆積量がわかる。これを比較するために $t=2 \text{ h}$ における増加率を横軸に H_0/L_0 、縦軸に a/Ent を取って 図-8 に示した。これによって見ても明らかに、 $H_0/L_0=0.08$ 付近において砂の堆積の割合は最大を示している。粒径 0.5 mm 以上の砂に対しては、砂は汀線に移動するのみで後退することがないので、海底地形の変化は粒径小なる場合に比して長時間を要するので、初期勾配の効果は、堆積量にかなりの変化を与えることは考えられる。この効果については勾配を変えた実験を行うべきであると思う。いずれにしてもこの実験条件については、粒径 0.3 mm 付近を境界として、砂の移動型式が急変することがわかる。次に 図-5 の結果から、同様にして横軸に dm/L_0 を、縦軸に QT/E_0 を取って、おのおのの波に対する粒径による堆積量の変化を示すと 図-9 のごとくである。これからおのおのの波に対しては、明らかに堆積量のピークを示す粒径が存在することがわかる。この曲線の形からすれば、このピークより大きい粒径では、堆積量の減少は徐々であり、このピークより小さい粒径に対しては、堆積量は急速に減る傾向が認められる。このおの

図-8 波形勾配と単位エネルギー当りの堆積量との関係
($t=7200 \text{ sec}$ における)

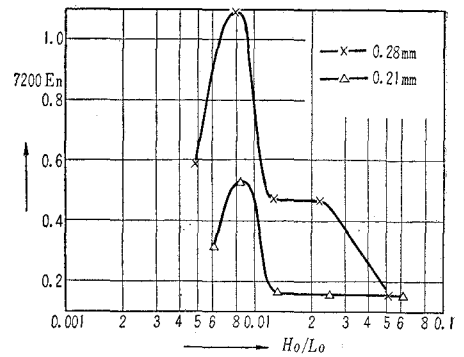


図-9 砂粒径と砂堆積量との関係

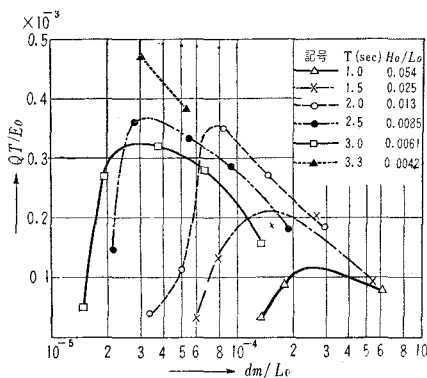
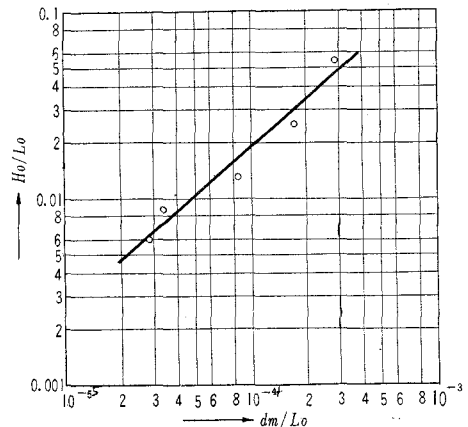


図-10 最も移動堆積しやすい粒径と波との関係を示す曲線



おのの波に対するピークの粒径を読み取り、横軸に dm/L_0 、縦軸に H_0/L_0 を取って、その関係を示すと 図-10 のごとくである。すなわちピークを示す dm/L_0 と H_0/L_0 の関係は指数的であって、これを式で示すと次のようになる。

$$\frac{H_0}{L_0} = \left(\frac{100 \, dm}{L_0} \right)^{0.874}$$

すなわち最も移動堆積しやすい粒径は、波の波形勾配が大なるほど大きいという傾向があることがわかる。

4. 結 論

すなわちこの実験の範囲内では、われわれが最初に考えた現象が、0.21 mm および 0.28 mm の砂について起ることがわかった。しかし実験条件は波高を大体一定値 9 cm に取り、初期勾配を 1/20 としたものであり、さらに堆積量はこの初期勾配を基準として測っている。このような条件での結果が現実に即応した説明を与えることは、もちろんできないわけである。一般に海岸が欠潰し、堆積するという場合は、きわめて長年月にわたって、種々の性質の波を受けたのちに、海岸汀線が前進したかまたは後退したかということで決められるのであって、それ以外に正しい決め方は考えられない。従って実験的に欠潰または堆積という場合には、何を基準として決めるかは、すこぶるあいまいである。われわれは初期勾配 1/20 という一様海底を与えて、それからの汀線付近での堆積を考えたから、これが実際に持つ意味は、すこぶる不明瞭なものであるということが考えられる。従って実験室的には、種々の初期勾配について、上述の実験をくり返し、また波高を変えた結果をも調べねばならない。あるいは考え方としては最終勾配に到達した海底断面形状から出発して、supply された砂がいかなる程度汀線を形成するものであるかを見る必要もある。このような種々の問題があるが、現在までのところでは、ほとんど次のことがいえるように思う。

(1) この実験条件に対しては、粒径 0.3 mm および 0.2 mm の砂は、沖波波形勾配 0.08 付近の波によって、最も海岸汀線に堆積する傾向が強い。0.5 mm 以上の砂は、波形勾配が減少するとともに堆積量は増加する。すなわち粒径の大きい砂は、flat な波ほどよく海岸に付着する傾向があり、小粒径の砂では、必ずしもそうでなく、一定の波形勾配の波に対してのみ、最もよく海岸に付着する傾向がある。

(2) 一定の沖波波形勾配をもつ波では、最も汀線に付着しやすい粒径が存在する。これよりも小さい粒径では、堆積量は急激に減少し、大きい粒径では漸減する。

(3) 海岸汀線に対する砂堆積の現象は、粒径 0.3~0.4 mm 付近を境界として、急激に変る可能性がある。

緒言に述べた(3)の問題に対しては、簡単な実験を行ったが、まだ結論をうるに至っていない。

この実験には、九州大学工学部土木工学科学生 園田敏道、佐々木武彦両氏の御協力を得た。ここに厚く感謝の意を表する次第である。