

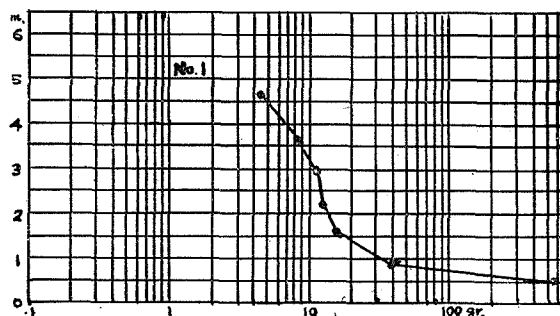
漂砂とその測定(第Ⅲ報)

北海道大学工学部教授 理学博士 福 島 久 雄
北海道大学工学部講師 柏 村 正 和

1. 捕集漂砂の鉛直粒度分布

前年度の講演会において、直線状海岸線に沿う漂砂の鉛直質量分布が半対数紙上で「く」の字型になることを述べた(図-1)。この内容について、昨年度苫小牧海岸にて採集した漂砂をもとにして二、三の事実を述べる。衆知のごとく、鉛直方向の漂砂の交換係数 η を一定とすると、定常状態における漂砂量の鉛直分布は $m=m_0 \exp. \{- (w/\eta)Z\}$ で表わされる。ここに w は砂粒の沈降速度、 Z は海底からの高さ m_0 、 m はそれぞれ海底および高さ Z における漂砂量を表わすものとする。この曲線は横軸に漂砂量を対数目盛に、縦軸

図-1 漂砂の鉛直分布が「く」の字型をしている一例



に高さを等分目盛にとれば、勾配が $-w/\eta$ にて決まる直線になるはずである。従つて上記の「く」の字型特性の原因は次の二通りの場合に分けて考えることができる。一つは交換係数 η を一定と見なした場合にも「く」の字分布を示す場合で、それは漂砂には種々の粒径のものがふくまれるから、ある一定の粒径の砂については直線分布を示しても粒径の異なる砂については勾配の異なる別の直線分布となる。直線の勾配は η を一定にしたから沈降速度 w に依存する。ゆえに粒径の大なるほど勾配は減少するはずで、その結果、各粒度によつて勾配の異なる直線も漂砂の全粒度にわたつて総計した場合は直線性を失ない「く」の字型に近づくことになる。別の一つは交換係数 η を一定とみなし得ない場合で、粒度とは無関係に海中の流れや乱れの構造によつて底近くで η が小さく底から1m近くで急激に大きくなるという見方である。この二つを判定するためには各資料をフルイ分けして各粒度ごとの鉛直分布を求め、これを相互に比較すればよい。図-2は上の考えに従つてフルイ分けしたもののから数例を示したもので、地点の位置は図-3に示してある。またフルイ分けした結果の詳細は表-1に掲げる。図-2からただちに各粒度ごとの鉛直分布がきわめて良好な平行性を有していることがわかる。すなわち第1番目の考え方が成立たぬことを示している。従つて η は Z の関数となり鉛直分布は $m=m_0 \exp. \left\{ - \int_0^Z (w/\eta) dz \right\}$ とせねばならない。海中での η 関数形は「く」の字分布から逆に想定することはできるが、これに関する研究の結果

図-3 漂砂採集用竹竿設置地点図

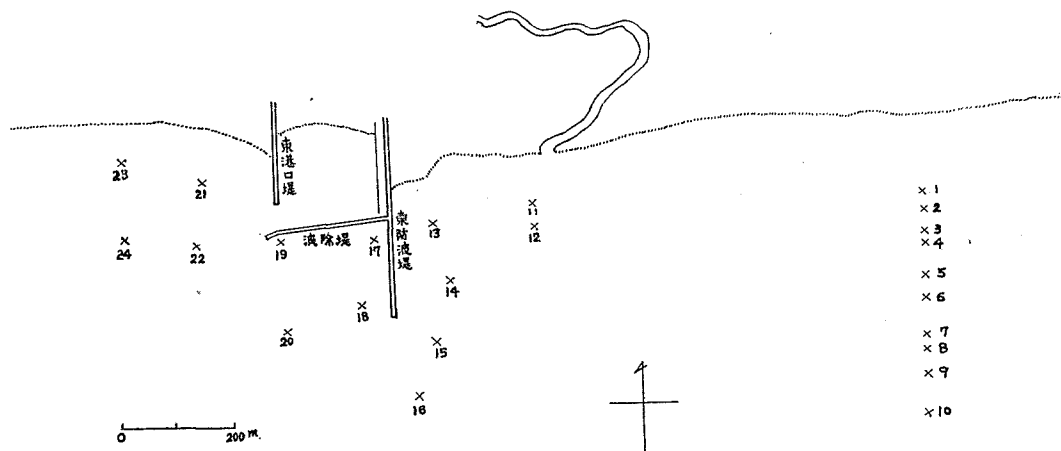


図-2 捕集漂砂の各粒度鉛直分布

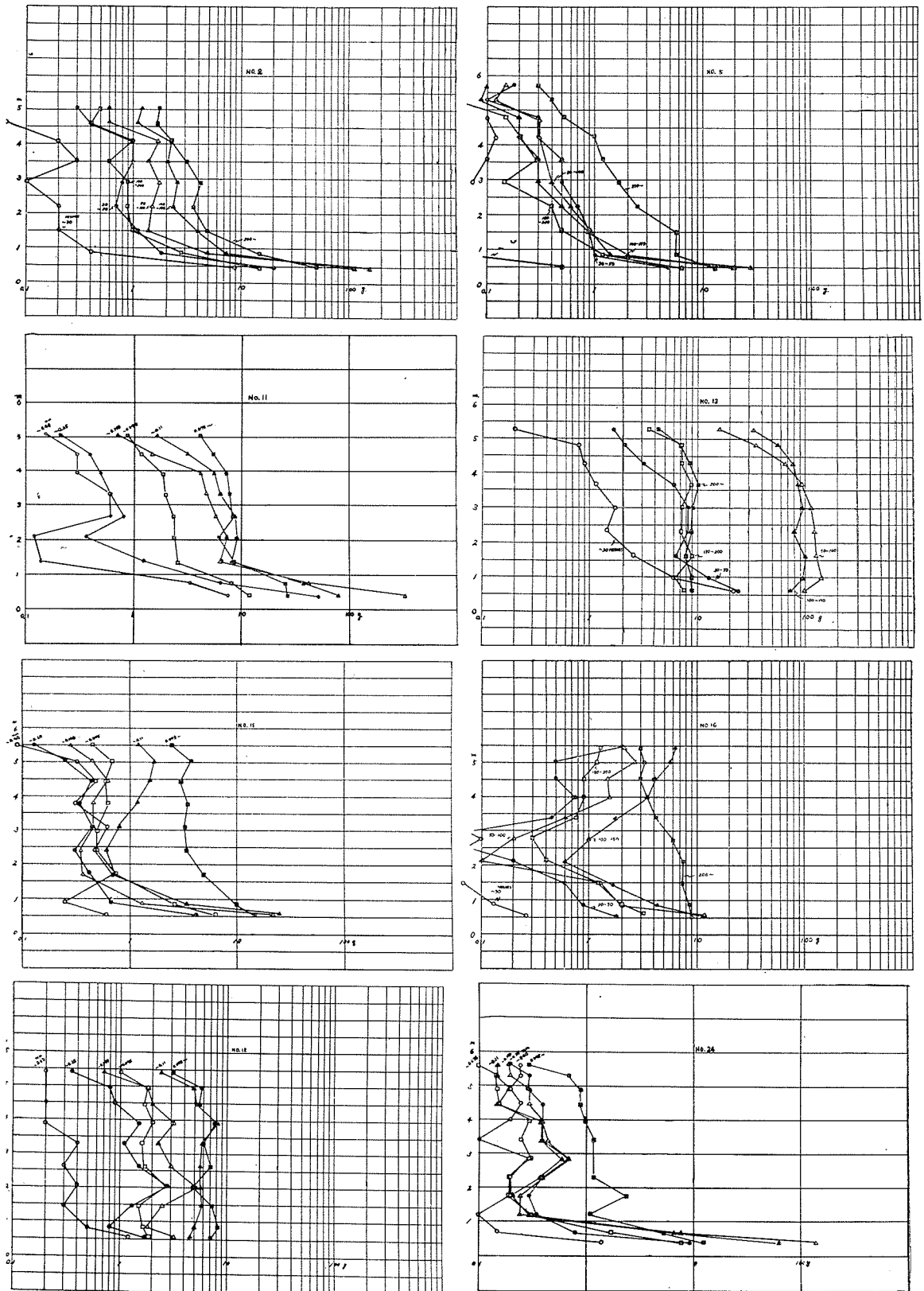


表-1 漂砂の各粒度ごとの鉛直分布(四例)(数値は砂の重量を g で表わしたもの) 備考: 高さは底から測る

No. 11							No. 18						
m 高さ	mm ~0.40	mm ~0.25	mm ~0.149	mm ~0.11	mm ~0.075	mm 0.075~	m 高さ	mm ~0.40	mm ~0.25	mm ~0.149	mm ~0.11	mm ~0.075	mm 0.075~
0.45	7.60	52.50	235.10	80.00	13.80	26.80	0.55	1.20	1.70	3.20	4.50	1.85	7.10
0.80	3.40	6.45	42.90	39.00	8.30	26.35	0.85	0.50	0.80	1.80	5.00	1.55	8.30
1.40	0.14	1.25	6.50	8.20	2.64	8.60	1.45	0.30	1.30	2.50	5.80	1.50	7.20
2.10	0.12	0.36	7.60	9.20	2.38	6.30	2.05	0.40	2.80	5.20	5.55	2.70	2.90
2.70	0.62	0.81	5.90	8.80	2.42	8.60	2.65	0.30	1.50	3.00	5.60	1.70	7.00
3.35	0.60	0.60	3.90	6.50	2.00	8.00	3.30	0.40	1.10	2.30	5.80	1.60	6.00
3.95	0.30	0.50	3.30	5.70	1.90	7.50	3.90	0.20	1.50	3.20	8.00	2.00	7.70
4.50	0.30	0.40	1.50	3.20	1.20	5.60	4.45	0.20	0.90	2.00	5.10	1.70	5.50
5.05	0.15	0.21	0.71	1.68	0.87	4.20	4.95	0.20	0.80	1.80	4.90	1.80	5.80
							5.40	0.20	0.35	0.70	2.40	1.00	3.10

No. 15							No. 24						
m 高さ	mm ~0.40	mm ~0.25	mm ~0.149	mm ~0.11	mm ~0.075	mm 0.075~	m 高さ	mm ~0.40	mm ~0.25	mm ~0.149	mm ~0.11	mm ~0.075	mm 0.075~
0.55	0.60	4.20	23.60	25.00	6.30	14.60	0.40	1.40	9.40	139.90	60.80	7.70	12.50
0.90	0.14	0.67	1.31	3.39	2.59	9.99	0.70	0.15	0.80	6.70	7.70	1.70	5.40
1.70	0.70	0.42	0.37	0.71	0.71	4.90	1.20	0.10	0.35	0.25	0.30	0.30	1.10
2.40	0.47	0.31	0.35	0.59	0.48	3.44	1.75	0.20	0.30	0.25	0.20	0.20	2.40
3.10	0.61	0.45	0.46	0.81	0.50	3.27	2.30	0.20	0.40	0.40	0.40	0.20	1.20
3.80	0.31	0.34	0.46	1.21	0.61	3.52	2.85	0.30	0.70	0.70	0.60	0.30	0.50
4.45	0.48	0.44	0.61	1.55	0.58	3.00	3.40	0.10	0.40	0.45	0.40	0.25	1.20
5.05	0.32	0.25	0.45	1.69	0.68	3.80	3.95	0.20	0.40	0.40	0.40	0.30	1.00
5.50	0.08	0.13	0.28	1.20	0.45	2.50	4.45	0.25	0.40	0.30	0.15	0.15	0.90
							4.90	0.20	0.29	0.30	0.20	0.15	0.90
							5.30	0.25	0.30	0.20	0.15	0.15	0.70
							5.60	0.25	0.20	0.20	0.15	0.10	0.30

は後日にゆづることにする。ここにはただ η/w の鉛直分布を実測値から算出した図を一例掲げるにとどめる(図-4)。

2. 海底砂の粒度分布と漂砂

海岸に近い海底の砂の粒度および粒度分布から漂砂の局所的な流向を推定することを試み昨年夏小牧工業港周辺にて資料を採集した。汀線上に10カ所、港外14カ所、港内14カ所、計38カ所について採集したが、その地点は図-5に示すとおりである。これらの資料は乾燥してフルイ分けを行ない秤量して各粒度の百分率を求めた。これは表-2に詳細を示す。自然の砂の粒度分布は対数的正規分布を示すことが多い。すなわち横軸の対数目盛上に粒径をとれば分布曲線は左右対称な Gauss の誤差分布曲線となることが多い。フルイ分けしてヒストグラムを作った結果、フルイの目の上限外、下限外に多く出た資料以外は大体正規分布と見てもさしつかえない程度のもとなつた(図-6)。正確にはフルイの数をさらに増加して、フルイを通過する砂の重量の累加百分率曲線を確率紙上に画いて確かめるべきであるが、紙数の都合によつて省略し

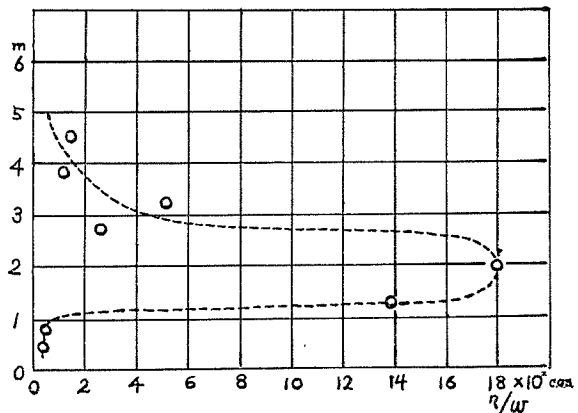
図-4 η/w の鉛直分布の一例(地点は図-3 No. 11)

図-5 海底、汀線の採砂地点図

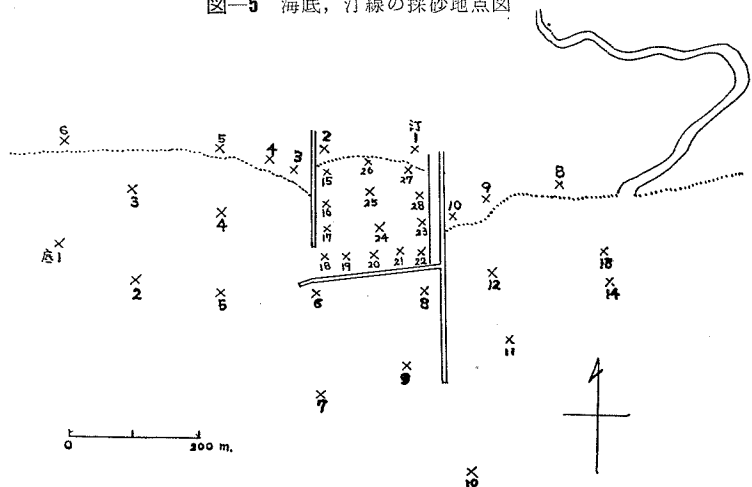


図-6 各地点の海底、汀線における砂の粒度分布ヒストグラム
(横軸: 粒径, 対数目盛, 縦軸: 重量頻度, 等分目盛)

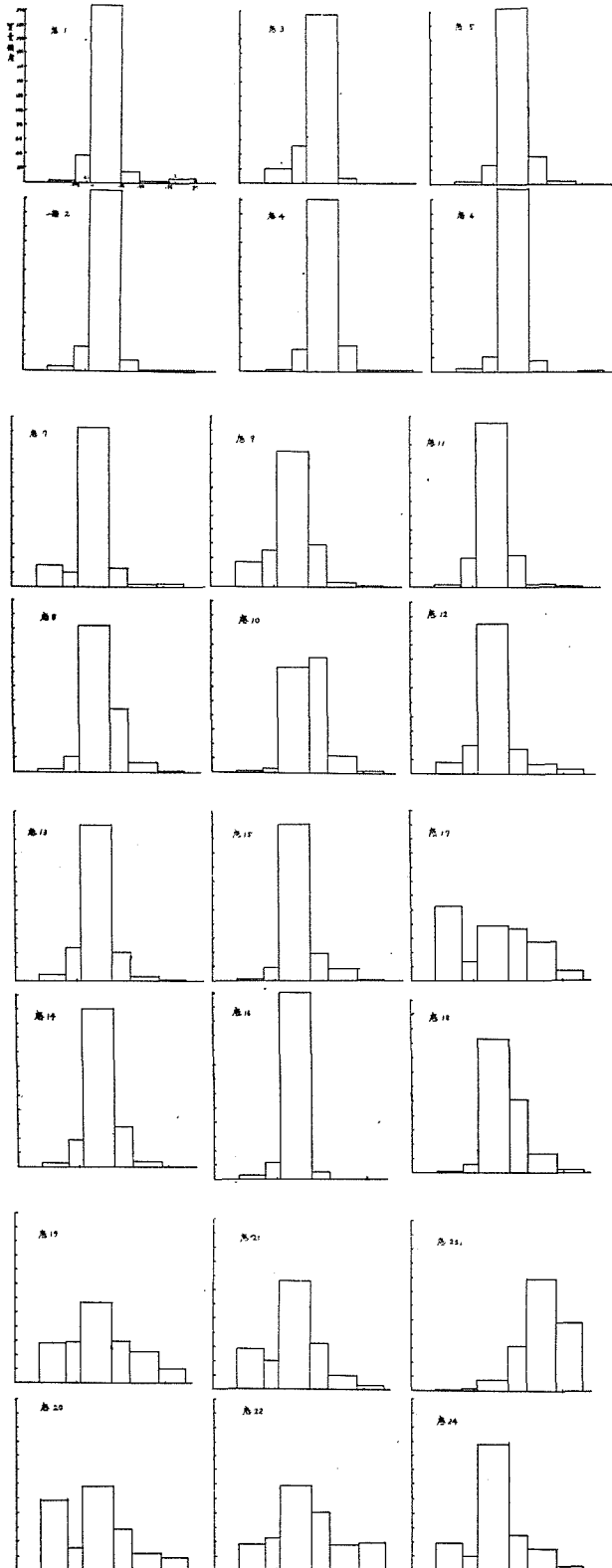


表-2 海底砂、汀線砂の粒度重量百分率表 (%)

地点	mm ~0.85	mm ~0.40	mm ~0.25	mm ~0.11	mm ~0.075	mm 0.075~
底 1	1.6	0.6	2.9	88.1	6.2	0.6
2	0.1	0.1	3.1	89.1	5.6	1.4
3	0.0	0.2	1.6	83.3	8.6	6.3
4	0.6	0.7	7.3	85.7	5.1	0.6
5	0.3	1.5	5.8	86.9	4.4	1.1
6	0.7	0.1	3.2	90.8	3.6	1.6
7	1.2	1.2	5.3	80.0	3.2	9.1
8	0.2	4.2	18.0	73.1	3.4	1.1
9	0.3	1.7	11.8	67.8	8.2	10.2
10	0.8	7.7	37.0	52.5	1.0	1.0
11	0.3	1.2	8.9	81.9	6.7	1.0
12	1.9	4.4	7.1	75.0	6.7	4.9
13	0.3	2.0	8.2	79.0	7.8	2.7
14	0.1	2.3	11.4	78.1	6.3	1.8
15	4.0	5.6	7.8	78.9	3.0	0.7
16	0.0	0.0	2.0	92.7	3.8	1.5
17	3.9	17.5	15.0	27.6	4.5	31.5
18	1.3	8.8	21.0	66.3	2.0	0.6
19	6.0	14.5	12.1	40.9	9.6	16.9
20	5.2	7.8	11.6	41.3	5.1	29.0
21	1.7	6.4	13.2	54.9	6.5	17.3
22	11.6	11.6	16.6	41.8	7.4	11.0
23	29.2	51.5	13.0	5.4	0.5	0.4
24	2.0	10.1	10.2	62.7	3.4	11.6
25	10.5	18.2	14.5	34.9	10.5	11.4
26	69.5	21.3	6.6	2.5	0.1	0.0
27	13.4	14.0	17.8	38.7	2.3	13.8
28	1.2	5.1	19.1	72.0	1.8	0.8
汀 1	0.1	1.0	15.2	82.1	1.5	0.1
2	9.1	17.6	30.8	42.2	0.3	0.0
3	1.7	20.5	46.0	31.4	0.4	0.0
4	17.6	49.0	25.3	7.8	0.2	0.1
5	8.6	39.4	30.4	20.9	0.6	0.1
6	1.1	35.1	51.9	11.6	0.2	0.1
7	2.6	26.5	46.5	23.7	0.6	0.1
8	14.8	39.3	33.8	11.6	0.3	0.2
9	9.1	59.9	25.6	5.0	0.2	0.2
10	0.8	9.6	53.6	35.7	0.1	0.2

た。ここでは全部正規分布と仮定して中央値を求め、これをもつて最多頻度粒径とした。図-6 は面積の総和が100%になるように縦軸に $\log d$ の単位値に対する重量百分率をとつてある (d は粒径を示す)。各地点の最多頻度粒径を図上に表わすと図-7 のごとくなる。苫小牧付近すなわち日高沿岸は漂砂の多い海岸として知られており、その沿岸流は夏期は東から西へ冬期は西から東へ向き、1年を通じては東から西へ向く流れが卓越する。従つて東防波堤の東側海岸は年々砂が堆積し、港口堤西側は欠けて行くのが観測されている。図-7 からただちに港外では粒度がほとんど $0.16 \sim 0.17 \text{ mm}$ になつていことがわかる。ヒストグラムから見て最多頻度粒径を中心としての分散は各地点によりいろいろ異なつていことが知られるが、中央値が此

のように一定であることは注目すべきことといわなくてはならない。次に汀線では非常に粒径が大きくなり、東防波堤および港口堤のそれぞれ東および西側では最多頻度粒径は0.3~0.5 mmとなる。防波堤、港口堤に近い汀線ではやや小さく0.26~0.30 mmである。二つの堤の内側ではこれよりもさらに小さく0.18~0.28 mmを示している。汀線と海底の粒径は以上のごとく判然と区別するが、その粒度の境は碎波帯付近にあるものと思われる。以上のごとく沿岸の海底の砂粒は0.16~0.17 mmが多いということは移動漂砂もまた0.16~0.17 mmのものが多くであろうことを推測せしめる。表-1の漂砂鉛直分布では、たしかに0.11~0.25 mmの粒度のものが多く、このことを裏書きしている。次に東防波堤先端より約150 mの沖では最多頻度粒径が0.23 mmとなっており、上記のこれより岸側の地点の値より大きい。この地点では漂砂量も少なくなり上記岸側地帯とは性質が異なつていると考えることができる。次に港内に目を転ずるとここでは粒径が非常に不揃いである。明らかに港外よりは粒径が

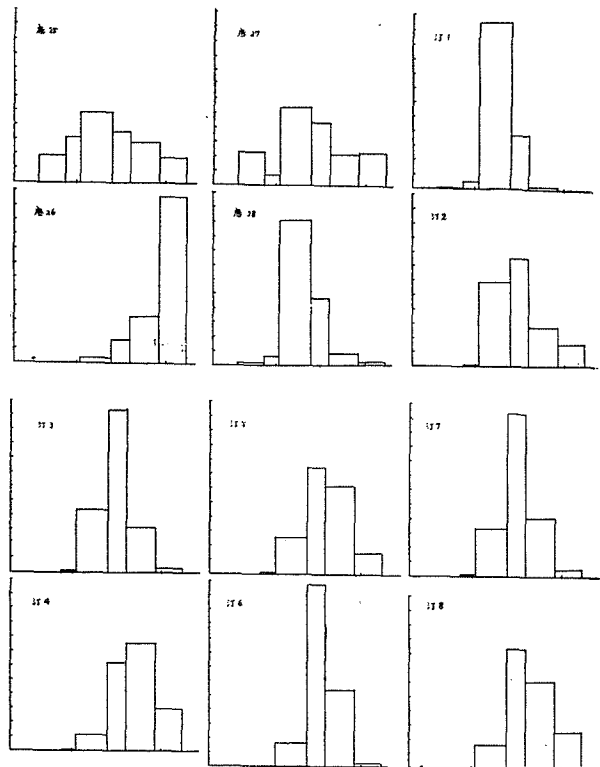
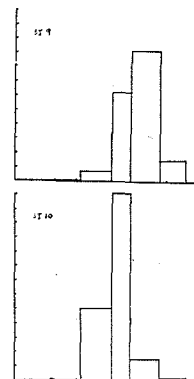
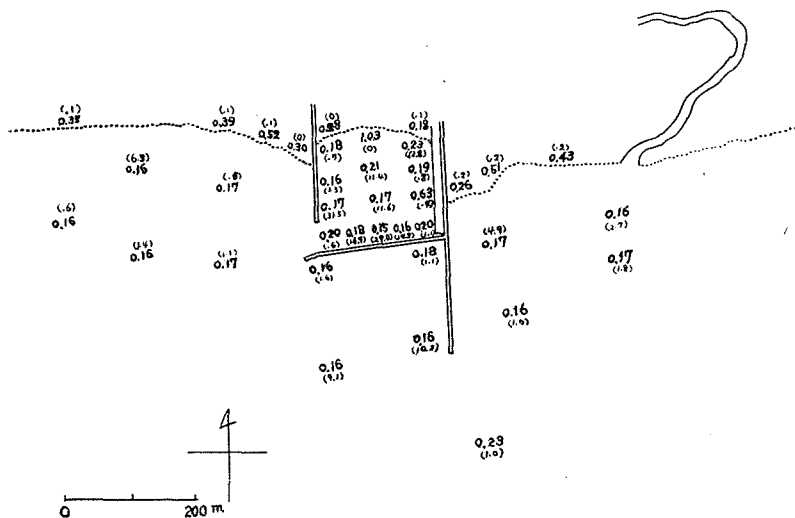


図-7 各地点の最多頻度粒径分布図

(カッコ内は0.075 mmより小さい粒子の百分率)



一般に大きい、汀線よりは小さい。大きく分けて東防波堤の内側と汀線近くが粗で、波除堤と港口堤の内側が細かい。

これは次のごとく解釈できる。まず汀線側は陸地に向かつてしゅんせつ工事が行なわれているため、いままで内部にあつた粗砂が水底に出てきているので粒度が粗であると考えられる。

また東防波堤内側は現在はシートパイルによつて外部の水塊を遮断しているが以前にはなかつたので、防波堤下部の捨石を水が透過し防波堤東側に堆積する粗砂の一部がここを通過して内側に溜つたものと思われる。沖側を移動する砂は細砂が多いが汀線の付近を動くものは粗砂、礫が多いから、上記の No. 23 の粒径が0.63 mm といふかなりの粗さを示すことは不自然ではない。細砂の溜っている部分すなわち波除堤と港口堤の内側の部分は

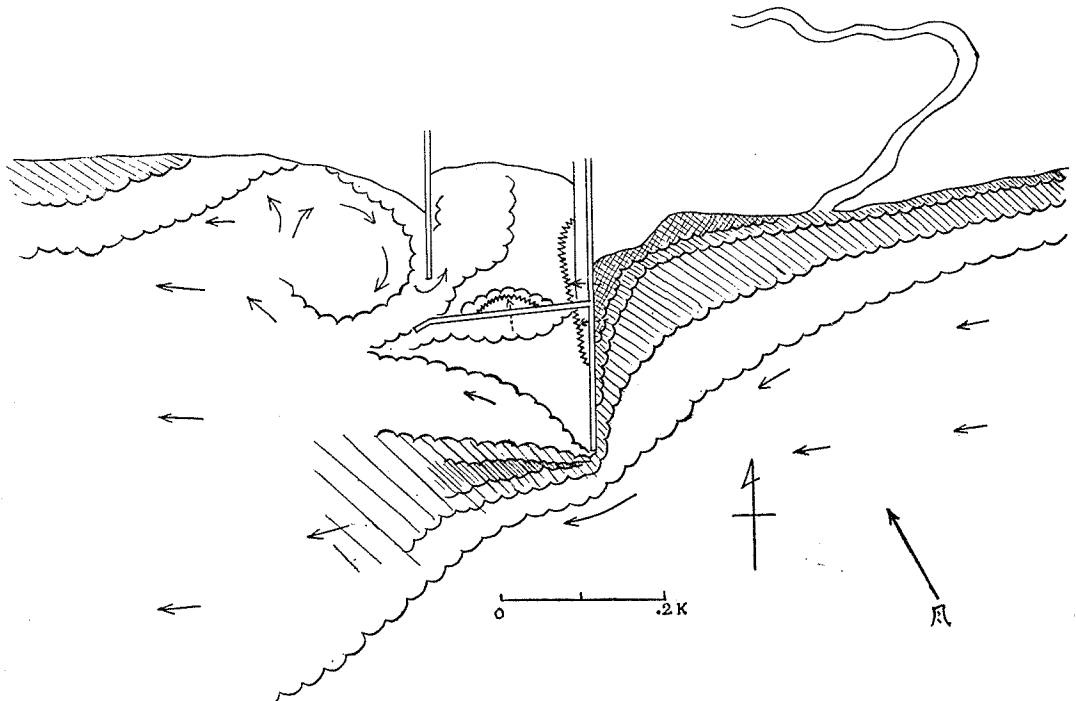
外部の漂砂とかなりの関連がある。港口は卓越風(SSE)沿岸流主方向(東→西)を避けて逆の方に開いているからここから入り込む砂は比較的少ないのではないかと思われるのであるが、しかし外の海面が漂砂で褐色に濁っているときによくそれが港口から No. 17, No. 16, No. 24, No. 25 の方向に拡がつて入っていることをしばしば観測している。また No. 19, No. 20, No. 21, No. 22 は波除堤がこれまた一種の水の透過堤なので捨石の空隙を通つて、波が押し寄せるたびに大量の水塊が通過して内部に入り込む。そのため港口から入ってきた流れはこれに押されて No. 19~No. 21 の方向には拡がらない。この透過水は波によるものであるから多量の砂をとまなっていることは想像できる。No. 19~No. 21 はこれによる砂が堆積したと考えられ最多頻度粒径は外海のそれと同じ程度である。ただこの地点は粒度分布の分散度が大きく粗砂、細砂(シルトもふくむ)をかかなりふくんでいる。No. 18 は港口であるが粒径がやや大きい。この地点は次第に浅くなつてきているので大量の砂がここに運ばれて沈積するのであるが、この砂の補給源は粒度から見て波除堤の南や防波堤の東の砂によるものとは考えられない。これは港口堤西の汀線からくるものと思われる。

港口堤西側の汀線はだんだん後退しているが東には港があつて東からの砂の補給を断たれているために起つている現象と解釈できる。この砂はおおむね西へ移動してゆくのであるが、港口堤から西の方へ 200~300 m の付近から、港口堤までの間の地域では沖の沿岸流が東から西へ向いているために、港口堤の存在によつて一種の副流を構成して、その地域の汀線から出た砂は底を転動したりまた浮游して東に移動し港口堤基部に達し、一部堆積しつつ南に下つて港口に至る。この砂は補給源に近いので粒径はまだかなりあらく、その中の粗砂は港口付近に堆積する。港口を出入する流れはかなり強いので細砂はここに沈積せず一部は港内に入つて No. 17, No. 24, No. 16 の方向へ向かい、一部は波除堤外側の沿岸流に乗つて西へ移動するものと考えることができる。

以上のため港口付近が浅くなつていくことは認められており、また副流と波除堤南側の主沿岸流との交叉する波除堤西方延長線上でも、また水深が浅くなつていくであろう。また事実その傾向が見えている。もつともここに溜る砂の量は東防波堤東側に堆積していく砂量にくらべれば少ないものではあるが港を出入する船にとつては航路の障害になるので好ましくない。以上のごとく海底と汀線の最多頻度粒径をもとにして砂の移動の状態を考察したが、これを図上で一目瞭然ならしめるため上記の結果を図にまとめたのが図-8である。これらの向きは筆者等が観測または経験している流向とよく一致する。

次に海底や汀線の砂の粒度分布の中から最も浮游性の大きい 0.075 mm 以下(シルトに相当)の砂の百分比を各地点について調べてみる。この百分比は図-7の各地点における最多頻度粒径を表わした数値の下のカッコ内

図-8 苫小牧工業港周辺の漂砂の流れの状態



にその数値が記されている。遠方からまたは上空から海が褐色に濁って見えるのは、主として 0.075 mm よりも粒径の小さな上記のシルトのためであつて、海底の砂を採集してシルトの百分比を求めて、地域的にいかに変化しているかを調べることは直接に上記のような漂砂の動向を調べることになる。汀線付近ではシルトの絶対量はもちろん沖の海底にくらべて多いであろうが、その地帯では粗砂の比率はシルトに比して、はるかに高いから、百分比で表わすと汀線付近はシルトの比率は非常に低い。図-7 によつてそれが認められる。次に 図-7 の東防波堤先端の西側 (No. 9 地点) では非常にシルトの百分比が高いことが示されている。このことは防波堤東側に拡がつた漂砂帯が沿岸流によつて西進するときに防波堤があるためにその先端を迂回せねばならないが、そのとき、この先端を漂砂の流れが集中して通過することを予想させる。実際に上空から見ると東側の褐色に濁った海水がこの部分に集束して、さらに西方へ拡がつてゆくことが観測されている。西方へ移動する漂砂量は莫大なものであると思われるが、その中で粗砂は防波堤東側基部に多く堆積され、細砂シルト等がこの先端に集束して西方へ廻つてゆくと思われるので、この先端付近の漂砂濃度はかなり高いものであつて、このことは竹竿による漂砂の捕集結果からも、うかがい知ることができる。図-2 の No. 18 がこの地点に相当する。底部から表面までほとんど一様な濃度を示している所は他の地点といちじるしく異なるものである。ここを通過して西方に進んだ漂砂は拡がつてゆくことが上空から観測されているが、No. 7 の地点ではシルトの比率がここよりやや小さくなつていてその間の事情に適合している。

一方港内ではシルトの比率は地点により複雑な分布を示しており No. 17, No. 19, No. 20, No. 21, No. 24, No. 25 等が非常に多い。

このことは最多頻度粒径をもとにして考察した漂砂の動きに全くよくあてはまつている。港口の No. 18 が少ないのは前にも述べたとおり 港口を出入する流れがかなり早いために沈降しないで通過してしまうからであろう。港口を通過して中に入ってくるシルトは No. 17, No. 24 の方向に進んで、そこに沈殿する。特に No. 17 は非常に多く沈積する地点であることがわかる。No. 19~No. 21 は外海の細砂やシルトが波除堤を透過してくる地域なので、この地点もまたシルトの百分比は高い値を示す。No. 27 の地点では非常に多いが、これは工事のためと考えられるので上記の各地点とは、おのずから別問題であり除外してよい。港外西方に目を転ずると No. 3 ではかなりシルトが多く前述したようにこの点よりやや東の汀線を境にして 東は副流として 東へ西は主沿岸流の方向と同じく西へそれぞれ流れが向いていると思われるので、この点に見られるシルトは 直接西方へ移動する汀線地帯からの漂砂の一部によつて補給されたものであろう。

以上のごとく海底の砂、汀線の砂の粒度および微細粒子の百分比等の地点による 分布から漂砂の方向をある程度推定することが可能である。また竹竿等の捕集装置を併用すれば一層漂砂の実体がわかる。ただ、このように海底の粒度分布のみで推定することは 苫小牧港のように直線的な、しかも漂砂の多い海岸線に防波堤のような漂砂の障害物があつて漂砂の一様性を乱しているような場合に特に有効な判定方法であると考えられることができる。

終りに臨んでこの調査に御援助を戴いた北海道開発局土木試験所、同室開発建設部苫小牧港修築事業所、苫小牧市役所の関係各位に対し謝意を表する。

なおこの研究には防衛大学校教授 溝口 裕氏が北大在職中に参加されたことを付記する。