

漂砂とその測定(第4報)

北海道大学教授 工学部 理学博士 福島 久雄
北海道大学講師 工学部 柏村 正和

1. 緒 言

海岸現象の多くの問題のうち、漂砂、沿岸流、河口密度流、海岸浸食等は模型実験による研究のみで決定的な解決をうることは困難であって、現場における現象の綿密長期の観測と解析なくしては本質をとらえることがむずかしいものである。加うるにこれらの現象の観測のためには従来の方法では不完全の点が多く、より適当な測器を必要とし、観測方法の点においてもなお十分の残された余地があるように思われる。

昭和 10 年ころ池田教授等の岩内における砂の研究に始まり、当研究室では石狩川河口の密度流の研究を経て、戦後苫小牧¹⁾、天塩²⁾、羽幌³⁾、石狩、下湧別、噴火湾海岸⁴⁾等の道内各地で自然現象測定の立場から多くの海岸現象の研究が行われた。その中で主要な課題である漂砂の測定は竹竿による捕集⁵⁾、光電池による透明度測定⁶⁾、金網による底層漂砂採集⁷⁾等の方法によりなされた。このうち苫小牧における漂砂の測定は毎年行われ期間も最も長い。竹竿法による漂砂捕集機構は関係する要素が多く、かつ複雑でまだ研究中に属するものであるが、捕集量は漂砂濃度と期間に比例し流速、水の渦動拡散に関係すると思われる。われわれの称する漂砂量とは竹竿法により採集された漂砂の量、あるいはそれを期間で除した値である。今回は主として昭和 32, 33 年 8 月と 34 年同じく 8 月とに苫小牧港付近において実測した資料をもとにして漂砂量鉛直分布の地域性と、汀線に直角な方向の漂砂量の profile を述べ、さらに近年注目されてきた底層漂砂に重要な影響を持つ波による海底の entrainment current に言及することにする。

2. 漂砂量鉛直分布の地域性

直線状汀線を有する海岸の砂堆から沖側においては海中の漂砂量の鉛直分布は半対数紙上で「く」の字をやや左に傾けた形状を示すのが普通である⁸⁾。すなわち 図-1 の type 1 のごとくなる。漂砂捕集に用いる竹竿の性質上砂堆から岸側のいわゆる碎波帯での測定はきわめて困難で、今までに資料がとばしいため一般的な鉛直形状を確認できないが、少数の資料から判断すると 図-2 のごとく中層部にかなり捕集量の多い層があるようである。漂砂濃度が砂堆から岸側に多いことはよく知られているので、その鉛直形状はまた重要な意味を持つと思われる。苫小牧海岸では汀線から約 180 m 沖付近に砂堆の存在するのがふつうのようであるが、ここでとりあげる鉛直分布は以上の理由から主として砂堆の沖側のものである。

昭和 32, 33 両年に苫小牧港付近に設置した捕集

図-1 漂砂量鉛直分布形状の4つの型

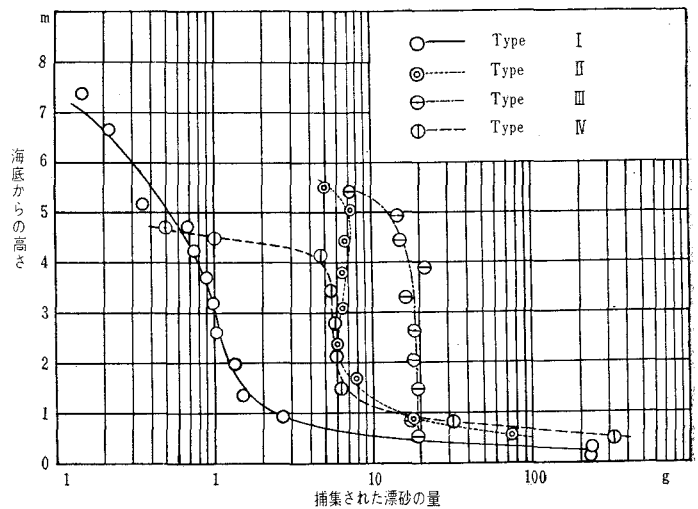
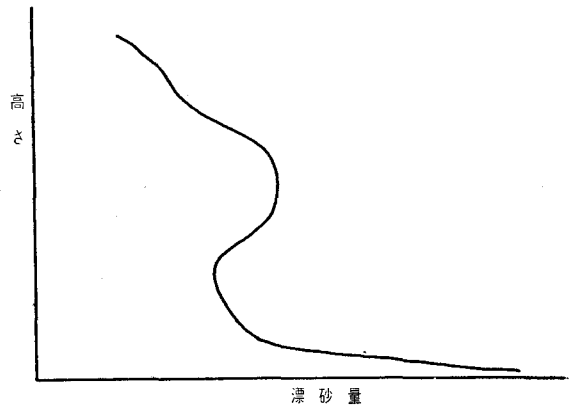


図-2 砂堆内の漂砂量鉛直分布形状の想定 (横軸捕集量対数目盛, 縦軸海底からの高さ目盛)



用竹竿の地点数はそれぞれ 24 および 25 カ所であるが、それによる捕集漂砂の鉛直分布は大別すると図-1 に示すように 4 つの型に分けることができる。各型の特徴を列記するとつぎのごとくなる。

- type 1 前述のごとき正常な「く」の字形分布である。
- type 2 上層部に捕集量の極大点がある。
- type 3 底層部の捕集量が type 1 のように多くない。
- type 4 type 2 とよくにているが表層では捕集量が非常に少ない。

以上の 4 つの型は昭和 32, 33 両年ともに現われたものである。

type 3 は竹竿の性質上漂砂が海底から 40 cm の高さの間では捕集できないために底部付近の様子が不明であるが、もっと底近くまで捕集し得た場合には type 1 になるかも知れないが、その場合は「く」の字形分布の屈曲点が非常に海底に近いことになるので、いずれにしても type 1 と区別する必要があると思われる。このような 4 つの型を示す地域を図上に示すと図-3 および図-4 のとおりになる。図-3 は昭和 32 年、図-4 は昭和 33 年の結果である。これによると 4 つの型は

両年ともよく似た配置をしており、さらに type 1 以外の型は港の構造物周辺に集まっていることが注目される。すなわち東防波堤東側に type 2、波除堤沖に type 3、東港口堤西側に type 4 がある。type 1 は東防波堤から数 100 m 東方に位置している。これらの型がいかんしてこのように分布するかを理解するためには、この海岸の沿岸流と港周辺の小さい川の知識が必要である。苫小牧海岸の沿岸流は夏期には東から西へ、冬期にはその逆が卓越することは苫小牧港建設事務所の流向記録または風向配置あるいは沿岸漁民による観察から明らかである。われわれの調査期間における流向もまたそのとおりであって、東から西におおむね向いていた。つぎに東防波堤から東約 500 m の汀線にかんがい用水の幹線排水路が開口し平常は流量 $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 程度と思われるが、これが土砂を排出している。この排水路の口は西に向かう沿岸流によって夏期には西へ移動するが上記の漂砂捕集期間には図に示す位置に移っていた。

ことに昭和 33 年度は東防波堤にまで至り調査期間中はかなりの流量を有していた。また昭和 32 年に船入瀾内の汀線には淡水が湧出していることを水温観測から確認していたが、昭和 33 年にはそれが瀾内に開口し、小さな川となって流出した。以上の沿岸流と川の知識とから 4 つの漂砂鉛直分布の型の地域性をつぎのように解釈することができる。

昭和 33 年度の東防波堤東側に開口した排水路の水は、東防波堤に沿って海水上部を次第に塩水中に拡散しながら南下している。これは流速、水温、塩分の測定から確認している。この流出経路上に設置した竹竿の捕集漂砂量の分布には上層部に捕集量が多く、type 2 の特徴をいちじるしく極端にしたような形状を示している。これを図-5 a, b に示す。この分布は沖に向かうにしたがって形状がなだらかになり、type 2 になることが認め

図-3 昭和 32 年 8 月 2 日～7 日の鉛直形状の分布

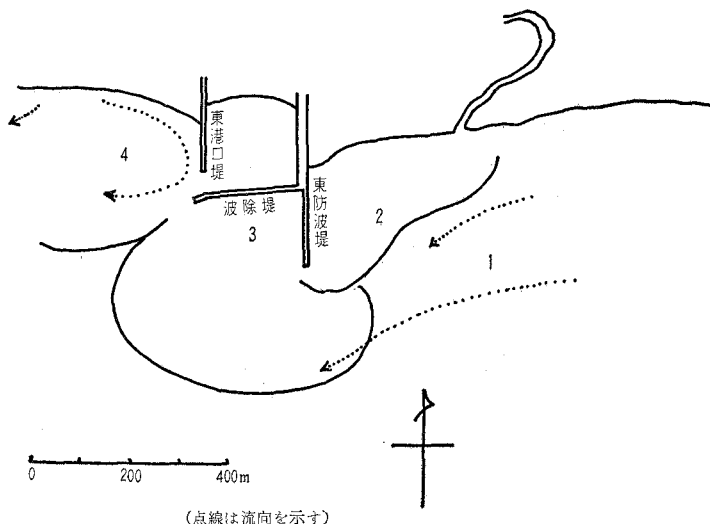
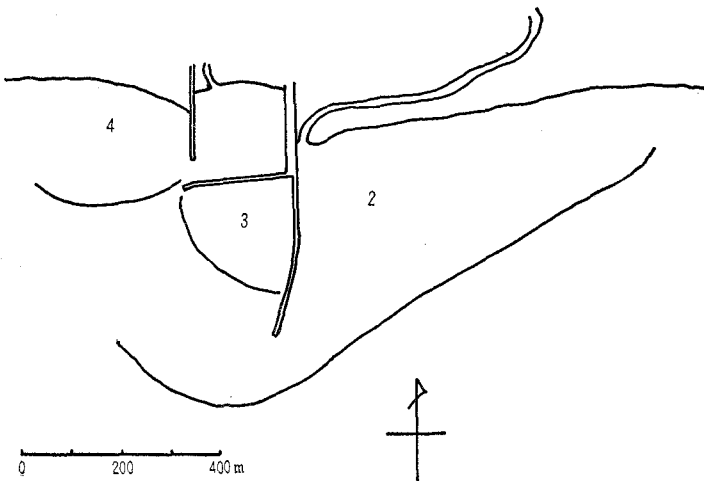
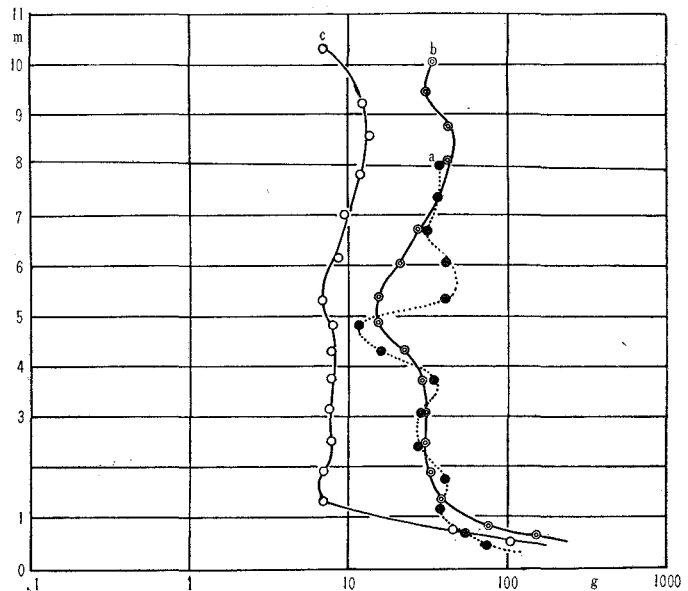


図-4 昭和 33 年 8 月 27 日～29 日の鉛直形状の分布



られた (図-5 c 参照)。type 3 は波除堤と東防波堤にいだかれた区域に存在するが、この付近は水深がかなり深く海底を転動する漂砂は少ないので、捕集される漂砂は東防波堤をう回して来た浮遊漂砂に限られるためである。type 4 の存在する東港口堤西側は 33 年度講演会に述べたように西進する沿岸流の逆流があって、これが汀線の砂を沖へ運ぶ (図-3 点線の流向を参照)。また前述のごとくこの区域は地下湧水および濶内の淡水流出があって、これより海面には淡水の層があることが水温や塩分の測定から知られている。この淡水は浮遊土砂をふくんでいないので海面近くの捕集漂砂量の少ない type 4 の特徴を解釈することができる。

図-5 昭和 33 年 8 月 27 日～29 日の東防波堤にそう
漂砂量鉛直分布 (a, b, c の順に沖に向く)



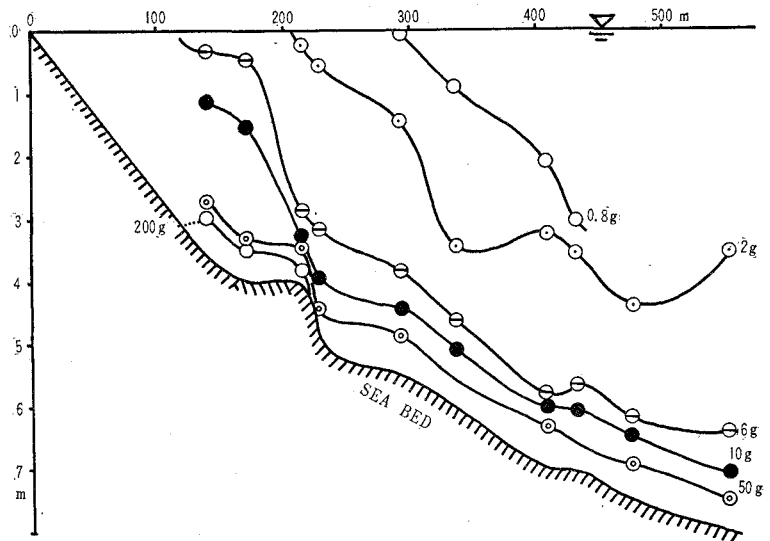
以上から結論すると直線状海岸の砂堆から沖では最もふつうの型と思われる漂砂量の「く」の字型鉛直分布は、河川の流出土砂により type 2 に、また構造物や他の影響で type 3 または type 4 のごとく変形されるものであるといえる。以上解釈の裏づけとなった諸観測の詳細は、苫小牧港調査報告に記載してある⁹⁾。

3. 汀線に直角な方向の漂砂の profile

汀線に直角に沖へ向かって漂砂量がいかに分布しているかを述べる。苫小牧海岸では防波堤がかなり沖まで出ているので、その近くでは一般の漂砂の動向を乱すことは前節に述べた。ここにとりあげる漂砂の profile は防波堤の影響を除き一般性を持たせるために東防波堤から 500～1000 m 東で捕集したものをを用いて調べた。

昭和 32 年 8 月に東防波堤から 1000 m 東方で汀線から沖 500 m までの間に 10 カ所漂砂を採集したが、それから等漂砂線を描くと図-6 のごとなる。これによると汀線から 180～200 m 付近にある砂堆を境にして岸側と沖側とは様子が大きく異なる。汀線に近いごく浅い部分は前にも述べたように竹竿の性質が不適当なために測定ができなかった。この図によれば砂堆から沖 500 m くらいまでの間

図-6 昭和 32 年 8 月 2 日～7 日の捕集漂砂量の profile
(東防波堤東方 1000 m, 卓越風向 SSE～ESE, 平均風速 8 m/sec)



の contour line は大体海底に平行である。すなわちこの地域では捕集される漂砂量の鉛直分布がお互いによくにている。ただしここに示した漂砂は主として海中に浮遊するものであって、ごく海底近くを転動する漂砂は沖に向かって減少しているのである。砂堆から岸側では非常に漂砂量が多くなり各 contour line の間隔は沖にくらべて大きくなっている。

汀線に平行に移動する漂砂の大半が砂堆内部に存在することはよく知られているが、上記の状況もまたその事実を裏書きするものである。

図-7 は昭和 33 年のものであるが、これは東防波堤から東約 500 m において捕集したものである。汀線から同じく 500 m 沖までであって砂堆はこの付近でははっきり認められない。また岸から 180 m 付近までの間の漂砂は捕集し得なかったもので、この地帯の様子はわからない。岸から 200 m と 500 m との間の様子は図-6 ににているが各 contour line とともに左端が上方に曲げられているのが特徴である。この理由として東防波堤に近い浮遊漂砂が沖にまで張り出したであろうことと、排水路の流出土砂の影響とが考えられる。

つぎに昭和 27 年 7 月に行われたものを図-8 にかかげる。これは東防波堤が建設の初期であって汀線から 70 m くらいまでしか沖に出ていなかったときであるが、東防波堤から東約 600 m の場所で岸から沖約 900 m の間の 5 点の捕集結果から得られたものである。このときも砂堆ははっきりしないが岸から 200 m の間では濃度が高く、200 m ないし 500 m では contour line が海底に平行で、さらにその沖では濃度が減少し contour line は依然海底に平行であるが、間隔が小さくなっていることが見受けられる。

以上に述べた profile は海底からかなりの高さまで浮遊している漂砂の様子であるが、海底のすぐ近くでは前にも述べたように漂砂量は沖に向かって次第に減少している。漂砂量の鉛直分布を見るとすぐわかるように、海底近くの漂砂量は上層部に比し圧倒的に多いので、鉛直方向に漂砂量を底から海面まで積分した量は、おおむね底層部の漂砂量に支配される。昭和 32 年と 33 年の測定結果からこのように鉛直方向に積分した漂砂量と汀線から沖への距離との関係を調べてみた。これを図-9 にかかげる。これによると岸から 200 m よりやや遠い所までの間では沖に向かって急激に漂砂量は減少し、220~240 m から沖はかなりジグザクとはなるが減少の傾向は非常にゆるやかになることが知られる。

以上の二つの方法による profile の結果では、いずれにしても汀線に直角方向に漂砂量は砂堆のあたりを境にして岸と沖とで非常に顕著な差があり、量的に岸側が非常に多く、例えば砂堆から数 10 m 岸側では砂堆の沖側の 10 倍以上の漂砂量に達し、かつ底から表面に至るまで相当の漂砂を浮遊せしめていることが示されている。これは現在すでに常識と思われることであるが、実際の海中におけるこの種の profile の測定はあまり例がないと思われる。砂堆を境にして岸と沖とで漂砂の傾向が異なるのは、もちろん波の運動によるのであって、沖から進行して

図-7 昭和 33 年 8 月 27 日~29 日の捕集漂砂量の profile

(東防波堤東方 500 m, 卓越風向 SSW~S, 平均風速 6 m/sec, 波向 SE~S, 平均波高 55 cm)

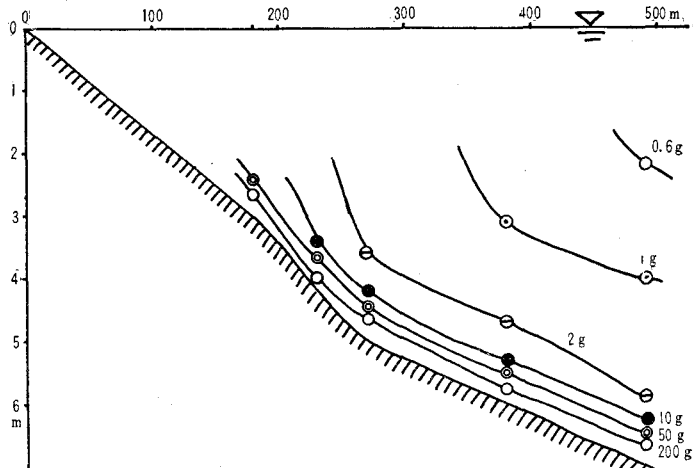


図-8 昭和 27 年 7 月 8 日~14 日の捕集漂砂量の profile (東防波堤 東方 600 m, 卓越風向 SW~S, 平均風速 4 m/sec)

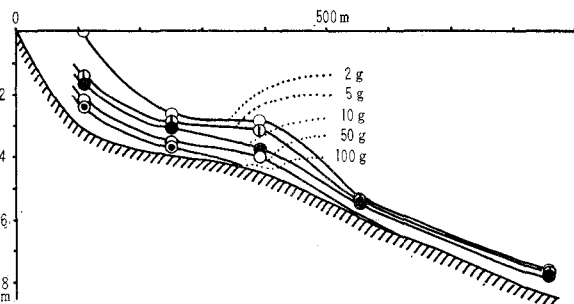
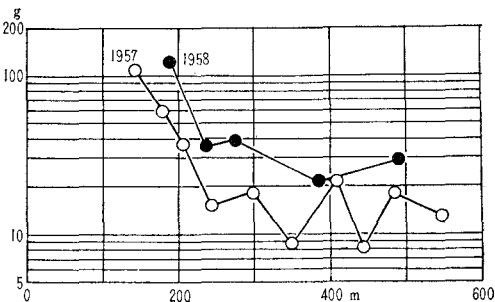


図-9 1 日当りの鉛直捕集量積分値と汀線からの距離との関係

(昭和 32 年 (下) は東防波堤 東方 1000 m, 昭和 33 年 (上) は同じく 500 m の所である。気象条件は 図-6, 7 の註を参照)



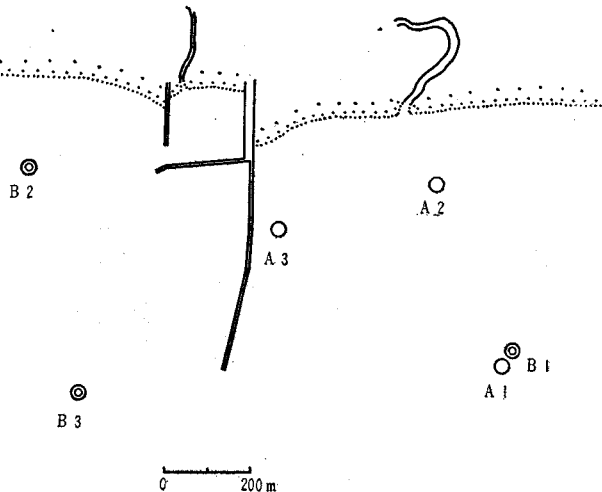
きた波が砂堆を境に性質を変え自己の持つエネルギーを、つぎつぎに水の渦動エネルギーに変えて漂砂を浮遊せしめるためである。砂堆の沖側でも海底に漂砂がかなり見られるのは、波による海水分子の往復運動が海底に作用するためであって、もちろん量的には波の性質や水深等によって変るが、砂堆の岸側とは以上のようにその機構を大分異にするものである。

4. 海底面近くの流れ

われわれはかねて砂堆から沖の漂砂量鉛直分布の形状が半対数紙上で「く」の字をやや左に傾けたものになることに対し、その原因には海中の流速ことに海底から1 mの高さの範囲の流れが主要な働きをするであろうと考えてきた。Stokes によると有限振巾の波による質量輸送速度は海面から鉛直下方向に exponential に減少することが知られている¹⁰⁾。これは非粘性非回転運動を仮定しているが、粘性回転運動に対しても微小振巾の場合には別に求められている¹¹⁾。いずれにしても波の往復運動のために有限水深の海底近くではそれに応じた水平往復運動が誘起され、その結果として海底近くでも波の進行方向に質量輸送を起すことを示すものである。しかし全くの海底面では水の粘性によって常に速度を持たないはずであって、ゆえに海底面近くには鉛直方向に大きな速度勾配を有する境界層ができる。Longuet-Higgins はこの境界層中に生ずる質量輸送速度が境界層上端の速度より大きいことを理論的に示し¹²⁾、さらに Russell と Osorio は水槽でこの事実を確かめている¹³⁾。海底にこのような層が存在すれば、漂砂は底で高濃度を持つから、これが漂砂に重要な働きををすると思われる。Vincent はこの考えのもとで水槽において漂砂の研究を行い¹⁴⁾、底近くを波の進行方向に漂砂が進むことをたしかめている。表面から底まで波の進行方向に質量輸送が行われるならば、当然それを補償する逆向きの流れがなくてはならない。Vincent はさらにそのような補償流により中層部が逆の流速を有しても海底の境界層における entrainment current は波の進行方向に進み、したがって海底漂砂も同方向に進むことを示している。その上砕波帯から汀線の間で高濃度に発達した漂砂をふくむ水塊は海底勾配により密度流を形成して沖に移動するが、それと沖から岸に向かう上記の entrainment current による移動漂砂とが合するところに砂堆を形成するであろうことも述べている。さて以上のような砂堆から沖の海底境界層の厚さは、これが層流境界層の場合はきわめて薄いですが、Longuet-Higgins が指摘しているように、乱流状態のときに水の粘性係数の代りに渦動粘性係数が使用できるものとすれば、それを $10 \sim 10^2$ CGS にとり波の周期を6秒前後にとると数10 cmの厚みを持つものとなる。われわれの意図したところは、このような層を実際の海底でたしかめることにあった。これを完全に遂行するには底層用の精密な流向流速計を製作し、しかも自記記録することが望ましいし、質量輸送速度を実測するには染料等を使用する別の方法を考案する必要がある。本年度は測器の準備ができなかったので、さしあたって改良型プライス流速計により海底から10, 20, 30, 50, 70, 90 cmの高さの流速絶対値を求めることにした。したがって、ここに得られたものは、もちろん海底の質量輸送速度ではなく、また海底の平均速度でもない。ただ海底付近における水の動きの一面を探知したにとどまるものである。改良型プライス流速計とは本来プライス流速計が淡水で使用するために設計されていて、海水中で用いると電食で短時間に接点をそこなってしまうので、当研究室で一部改良し、内部に油を入れ、接点および端子を海水から全く絶縁したものであって、性能は一般のものと変わらない。なおこれを海底に固定して吊るすために鳥かご状をした鉄製のわくを作り測定をつと船上から上げ下ろしした。測定を行った場所は図-10に示してある。

測定結果によると非常に流速に変動のあることを示している。ただし瞬間流速自体はかなりおそいので流速計の一接点

図-10 海底流速測定地点(Aは昭.34年8月1日13~16時, 風2 m/sec S, うねり SSE $H=40$ cm, $T=8$ sec, Bは同じく8月5日10~14時, 風5.5 m/sec N, 風波 N, うねり S $H=20$ cm, $T=11$ sec)



ごとの時間が長すぎて波の一周期ごとの変動を調べることはできなかった。流速計の感じた流速と時間との関係を 図-11 に示す。この図に現われてくる流速変動は上記のごとく波の一周期によるものではなく周期が 1~2.5 分の変動である。砕波帯に試験的に設置した step 式高波計の記録にも同程度の周期の水位変動があって、われわれはこれを surf beat によると解釈していたが、海底のこの種の変動は多分 surf beat の原因となる波高の変動によるものではないかと考えている。これらの流速変動の振巾は岸に近づくに従って非常に大きくなることが見られる。つぎにこれらの変動する流速測定値を平均して鉛直方向の分布を求めてみると 図-12 のとおりになる。これによると海底近くの水の動きは岸に近づくにしたがって増大し、流速極大点の高さは岸に近づくにしたがって低くなっていくようである。その他この曲線から種々海底の水の動向に関しての予想を立てることはできるが裏づけの資料が不足のため今後の研究にまづきたい。

図-11 プライス流速計による海底の流速の時間変動

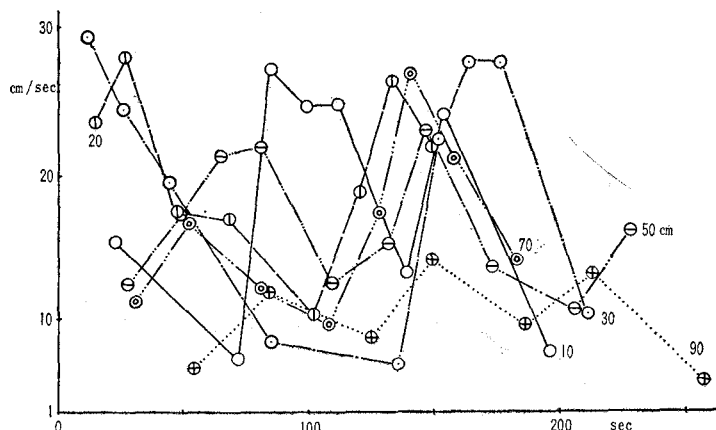
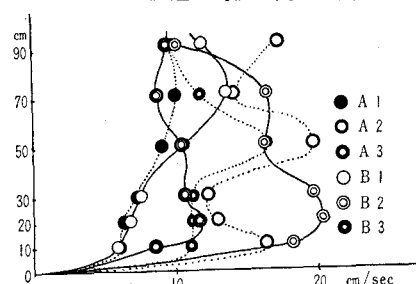


図-12 プライス流速計による海底の流速平均値と高さの関係



最後にこの調査に御援助をうけた北海道開発局港湾部、同室蘭開発建設部および苫小牧市役所に謝意を表する。また現地の苫小牧建設事務所長 加藤市郎氏以下各位の御好意と御援助に対し厚く感謝の意を表する。なおこの研究の一部は文部省科学試験研究費によったことを付記する。

参考文献

- 1) a 土木試験所集報第5号 昭和25,26年度苫小牧海岸調査報告書, 昭和27年3月 北海道開発局土木試験所
b 苫小牧海岸調査報告昭和27,28年度, 昭和29年9月 苫小牧市役所
c 昭和29,30年および31年度苫小牧港調査報告, 北海道開発局土木試験所, 北海道大学工学部理学第一研究室
d 昭和32年度苫小牧港調査報告, 北海道大学工学部理学第一研究室
e 昭和33年度苫小牧港調査報告, 昭和34年3月 北海道大学工学部理学第一研究室
- 2) 天塩港調査報告(昭和26~31年) 昭和34年6月天塩町, 北海道大学工学部理学第一研究室
- 3) 羽幌港調査報告(昭和27~30年) 昭和34年6月 羽幌町, 北海道大学工学部理学第一研究室
- 4) 未発表
- 5) Ikeda, Y. T. Soeya and Y. Mizoguchi: Drifting Sand in the Sea: J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. II Vol. IV No. 2 1952 または海岸工学講演会講演集(1954~1958)
- 6) Fukushima, H. and I. Yakuwa: On the Photo-Electric Measurement of the Concentration of Suspended Load. 北海道大学工学部紀要第9冊第3号
- 7) 佐藤 修: 苫小牧市附近の海底の砂及びその移動 1) a 所載
佐藤 修: 苫小牧港附近の海底漂砂 1) c 所載
- 8) 福島・溝口・柏村: 漂砂とその測定について(第II報) 第4回海岸工学講演会講演集, 昭和32年11月
- 9) 1) d 1) e に同じ
- 10) Lamb, H.: Hydrodynamics, 6th ed. P. 419
- 11) Longuet-Higgins, M.S.: Mass Transport in Water Waves. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A No. 903 Vol. 245 p. 535 1953
- 12) Longuet-Higgins, M.S.: The Mechanics of the Boundary-Layer near the Bottom in a Progressive Wave. Coast. Eng. Proc. 6th Conf. 1958 p. 184 Appendix.
- 13) Russell, R.C.H. and J.D.C. Osorio: An Experimental Investigation of Drift Profiles in a Closed Channel. Coast. Eng. 6th Conf. 1958 p. 171
- 14) Vincent, G.E.: Contribution to the Study of Sediment Transport on a Horizontal Bed due to Wave Action. Coast. Eng. 6th Conf. 1958 p. 326