

漂 砂 と そ の 測 定 (第5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

筆者等は漂砂の諸現象を実測的立場に立つて研究を行なつて来ているが、漂砂の実態は定性的にはかなり明らかになっている。しかしまだ多くの現象あるいは諸量の定量的関係の究明には未解決の問題が沢山残されている。測器の開発が充分でないこともその原因の一つと思われるが、しかし実際の海岸における漂砂の実測研究が如何に困難であるかをあらためて認識せざるを得ない。

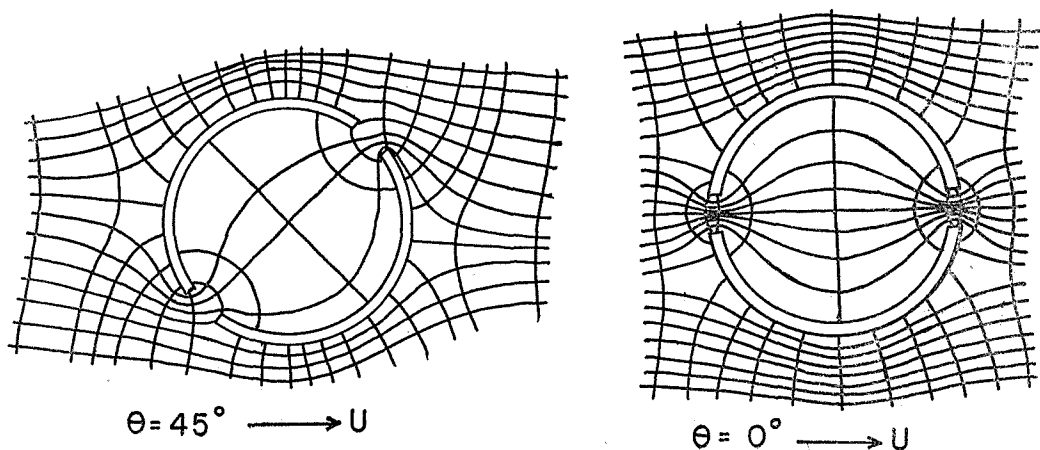
今回は筆者等の実測研究上に良く用いる手法又はその性能やそれによる実測結果等を紹介したいと思う。始めに述べる竹竿法による捕砂機構の研究は尚途上にあるものであるが今まで得た結果からの捕砂機構に対する筆者等の考えや二、三の簡単な実験結果を述べる。又沿岸流の測定装置や汀線の短期変動の測定方法等は筆者等が常に行なっている手法で今までに多くの成果をあげたものである。

2. 竹竿法による漂砂の捕集機構

竹竿の筒に穴をあけて海中に立て漂砂を捕集する方法は当研究室が以前より用いている方法であるが¹⁾、その捕砂機構はなかなか複雑でこれを海中の濃度や流れに結びつけて漂砂を定量的に調べる所までにはいつていない。この困難の理由を考えてみると先ず捕砂にあずかる要素として漂砂の濃度と粒度、竹筒や穴の寸法、穴の流れに対する向き、竹と水との相対運動(流速と波の運動や、又それによる竹の振動等が含まれる)等が考えられる。従つて固定した竹筒の捕砂機構を実験によつて調べても実際の海中の漂砂量を推定するには流れや波そして竹の運動を解決せねばならないから尚多くの問題があるわけである。しかし漂砂濃度の高い所では捕集量が多い事は経験によつて明らかであり、その為従来は定性的な判断に用いるとかあるいは捕砂量を漂砂量の代表量として取り扱うとか等によつて²⁾竹竿法を利用して来た。最近波と捕砂量との直接の関係を調べた実験が東大で行なわれたが³⁾筆者等は竹筒の捕砂機構に主眼をおいて実験を行なつた。

今回は竹筒を水中に固定した場合の捕砂機構について述べる事にする。未だ実験結果としては充分のものではないが捕砂機構の定性的な面ではかなり明らかになった。実験水槽は直径 120 cm、深さ 40 cm の円形水槽で、 $\frac{1}{2}$ HP 電動機により水中のプロペラを廻して環流を発生させる。漂砂として天然の砂の代りに比重の小さい粉炭を篩分けして用い各粒度別に実験を行なつた。竹筒の代りにガラス管を使用した。これはすべて実際に用いる竹筒に寸法をあわせて作ったもので長さ 25 cm 外径 5.0 cm 内径 4.6 cm、捕砂用の穴の長さは 5 cm、巾 1 cm で管の両側に

図-1 一様流の中へ筒をおいたときの流線(理想流体)



一對あいている。穴の位置は筒の上端から 6.5 cm に中心が来るようにした。又流速はすべてピトー管によつて測定した。

まず筒の穴を通過する流速と筒外の流速との関係を調べる必要がある。理想流体を仮定すると穴を通過する流れの様子は金属箔上に等電位線を画かせる実験を用いて知る事が出来る (図-1)。この場合には筒外流速 U と穴を通過する流速 u との間には大体

$$\frac{u}{U} \doteq 3 \cos \theta$$

なる関係が認められる。 θ は穴の向きと流れとのなす角度である。実際の流れは勿論粘性があるから穴が流れに平行の時、即ち $\theta = 0$ のとき u/U は 3 よりも小さい。

u と U の関係を $\theta = 0$ の場合について調べた結果は図-2 に示す通りである。これによつて穴を通過する流速が筒外の流速より幾分早い事を知る事が出来る。 $\theta = 0$ のときの u/U は

$$\frac{u}{U} = 1.10 \sim 1.25 \quad (U < 40 \text{ cm/s})$$

の範囲と思われる。つぎに捕集機構の方は、単位時間に流入する漂砂の量を S_i 、単位時間に内部にたまる量を S_f とすると S_f/S_i は捕集率 (これを F とする) を表わすことになる。 F はつぎの諸量の関数と考えられる。

$$F = \frac{S_f}{S_i} = f\left(\frac{\varepsilon}{uD}, \frac{b}{D}, \frac{a}{D}, \frac{w_0}{u}\right)$$

但し u : 流入平均流速

w_0 : 粒子の沈降速度

D : 筒の径

a : 穴の巾

b : 穴の長さ

ε : 筒内の穴の入口と出口を結ぶ水路と他の部分との間の交換係数

従つて一定の寸法 (a, b, D 一定) の筒を用いれば ε は u の関数と見られるから F は結局 u と w_0 とによつて変わることになる。又筒外の漂砂濃度を C_0 、穴の面積を A とすると

$$S_i = C_0 A u$$

であるから

$$S_f = F S_i = F u A C_0$$

となる。今 $F u = g(u)$ とすれば、 $g(u)$ は速度の次元を持ち u と w_0 の関数である。従つて $g(u)$ の特性を調べておけば実際の海中の U を測定して u を推定し、さらに漂砂の捕集量 S_f を測定することにより漂砂濃度 C_0 を求める事が出来る。結局竹竿による漂砂の捕集量は漂砂濃度と流入流速 (これは竹と外の水との相対流速におきかえられる) そして漂砂の沈降速度即ち粒度の三つが主導的な役割りを果すことになる。実験では砂の代りに比重 1.35

図-2 u と U の関係

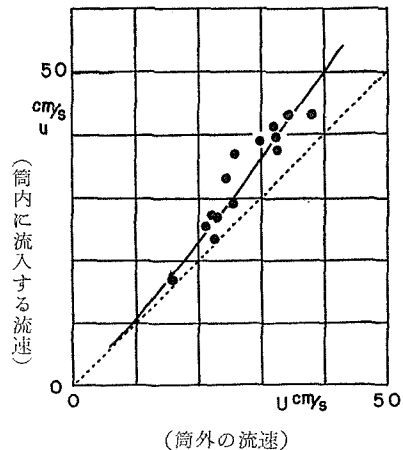


図-3 $g(u)$ と u の関係

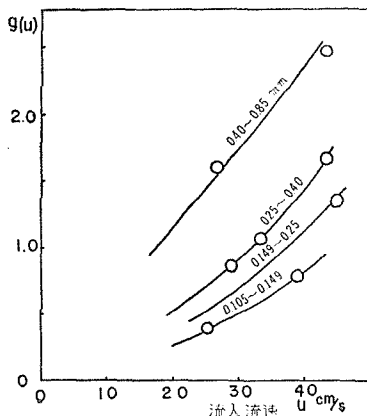
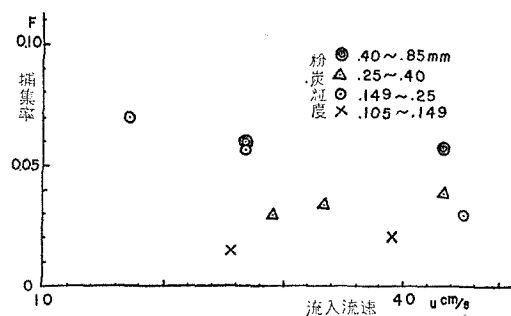


図-4 F と u の関係



の微粉炭を用い、これについて $g(u)$ を測定したが結果は図—3 のようになる。これによつて $g(u)$ (又は捕集量) は穴を通過する流速の増加に従つて増し、さらに粒度の大きいもの程捕集され易い事が認められる。捕集率 F は図—4 に示したが実験数が不足ではつきりした傾向を見出すのはまだ難しいが、これも又粒度の大きいもの程大きい事を示している。実験の現段階で云えることは大体以上であるがこれはさらに継続中であり間もなく $g(u)$ や F の特性や θ による変化等が定量的に示し得るであろう。微粉炭から砂へ換算しさらに竹の海中に於ける波や流れによる運動を解析すれば海中浮遊漂砂の濃度を計算し得るに至るものと思われる。

尚海中における竹竿の運動はなかなか複雑であるが流れがなく静止している際は下記の式が成り立つ。即ち

$$\theta = \sin^{-1} \frac{H}{L} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}$$

従つて竹の比重をかりに 0.3 とし竹の長さが水深の約 1.8 倍以下であれば竹は直立するはずである。故に岸から見て竹が傾いている場合は自重の為でなく流れによる場合であることが多い。

3. 沿岸流の長期測定法

海岸現象を論ずる場合に沿岸流の知識が不可欠であることはいうまでもない。しかしこれの長期観測によつて長期の、例えば一年間の沿岸流の傾向も知る事はなかなか難しいものである。筆者等はつぎのような簡単な方法によつて噴火湾内における沿岸流の傾向を知ることが出来たり。図—6 のような板を汀線から 400 m 程沖の海中に数箇設置し陸上から板の赤い端が右向きか左向きかを毎日定時に観測する。板は波や風によつて方向が左右されぬように水面上に出る部分はなるべく少なくする。このようにすれば沿岸流はかなり弱くても充分この板を流れの方向に向ける。この板を筆者等は流向指示板又は流向板と称している。潮流の影響の大きい所では一日 2~3 回の定時観測を行なつて最後に潮流と一般流を識別する工夫をせねばならぬ。潮流の弱い所では一日一回でよい。筆者等の観測した噴火湾南西海岸では委託観測により毎日正午一回の記録を一年以上にわたつて得た。その結果沿岸流の方向の頻度は表—1 のようになつてゐる。即ち夏期 (5~8 月) には北上流が、冬期

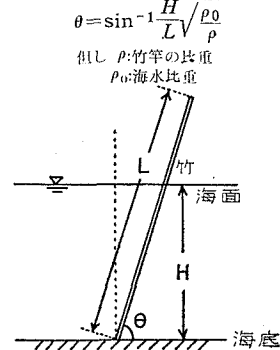
表—1 噴火湾南西海岸 (茂無部) の流向、波向頻度
(昭和32年~33年)

		32年												33年					
		5月	6	7	8	9	10	11	12	1月	2	3	4	5	6	7			
流 向	右へ	...	11	4	6	13	20	10	24	25	8	...	12	8	13	...			
	左へ	1	17	23	21	14	8	...	7	2	...	3	17	23	15	1			
波 向	左から	...	...	1	3	5	10	3	19	20	18	27	16	8	3	...			
	右から	...	...	12	26	19	17	15	11	10	8	4	14	23	27	...			

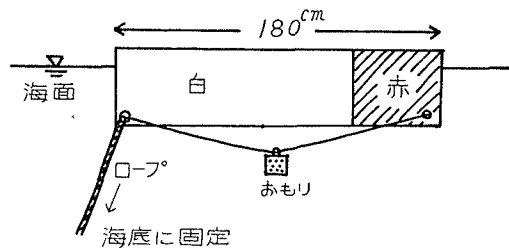
れもまた関係あることを検定により確認した。これによつて湾内の沿岸流が湾外の流れによつて誘起されるものと波浪によつて起るものとが重なつて構成されていることを知り得た。ここに流向と波向、又湾内沿岸流と外の流れの関係の有無を検定した手法を記すと次のようである。表—2 は噴火湾南西海岸の波向と流向の相関表である。これから波向と流向の独立性を検定する。表—3 のような 2×2 分割表における属性 x, y がたがいに独立であるときは

$$\chi^2 = \frac{(f_{11} + f_{12} + f_{21} + f_{22})(f_{11}f_{22} - f_{12}f_{21})^2}{(f_{12} + f_{22})(f_{11} + f_{21})(f_{12} + f_{11})(f_{21} + f_{22})}$$

図—5 竹竿を海中に設置した場合



図—6 流向指示板



(10~2 月) には南下流がそれぞれ卓越している。同時に又波の入射方向をも記録し波の入射方向と沿岸流の方向との相関表を作つてその独立性の検定結果から流向と波向が関係あるのを知る事が出来た。即ち沖に向かつて右側から波の来るときは左向きの沿岸流が発達し逆の波向のときは逆の沿岸流が生ずる傾向がある。しかし沿岸流は単に波向だけで決まるものではなく、漂流瓶や流速計による数次の観測と噴火湾外の同様な流向頻度の記録を調べることにより湾内の沿岸流と湾外の流

は自由度 1 の χ^2 分布をし $\chi^2 > 6.635$ なる確率は 1% である。表—2 から計算される χ^2 の実現値は $\chi^2 = 25.3 > 6.635$ であるから波向と流向の独立性は危険率 1% 以下で棄却出来て波向と流向は極めて低い危険率で関係がある

表—2 噴火湾南西海岸の流向
波向の相関表
(昭和32~33年)

左 へ	23	89
右 へ	72	68
流向 波向	左から	右から

表—3 2 × 2 分 割 表

y_2	f_{12}	f_{22}
y_1	f_{11}	f_{21}
y	x	x_1 x_2

表—4 噴火湾南西海岸と苦小
牧との流向相関表
(昭和32和~33年)

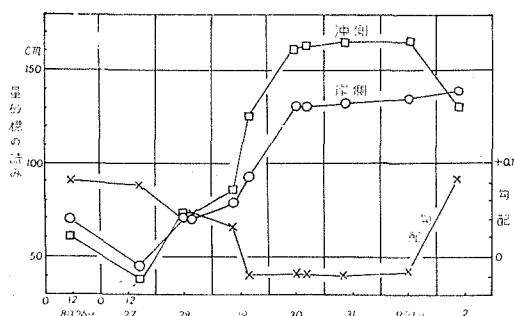
東 へ	38	61
西 へ	101	77
苦小牧 流向 南西海岸 流向	左 へ	右 へ

といい得る。表—4 は南西海岸の 流向と湾外の苦小牧における流向との相関表であつてこれによつて計算した χ^2 の実現値は $\chi^2 = 8.6 > 6.635$ となり前と同様に湾内南西海岸の沿岸流と 湾外苦小牧の沿岸流が関係を持つことを結論出来る。このようにして流向指示板による方法は装置、観測方法共に簡単であるがこれを長期に、又各所に設置すれば沿岸流の傾向や性質を知るのに非常に有効である。

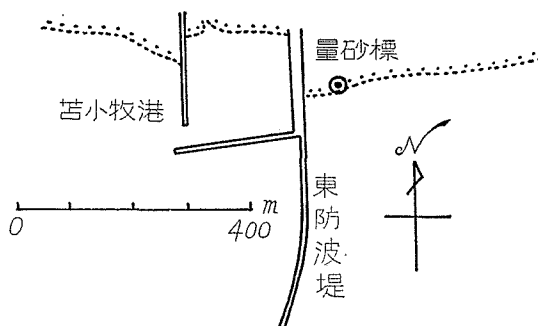
4. 汀線の短期変動の測定

汀線の前進後退は漂砂の研究における究極の問題であつてその実測は例えばトランシットやレベルによつて各地点の標高を求めてなされるがこれはなかなか労力を要しひんぱんに行なう事は難しい。特に波の性質や沿岸流の変化に伴う汀線や前浜の変動を刻々調べる為には適当と思われぬ。筆者等の研究室で以前より行なつていた方法は量砂標と同様に 1 cm 毎に目盛りを刻んだヌキ板 (長さ約 180 cm) を砂中 70~100 cm 程度埋め込み砂の堆積高を目盛によつて刻々読み取るだけの極めて簡単なものである。筆者等はこれを量砂標と呼んでいる。量砂標自体が砂地をかくらんして読取値を誤らせる心配はあまりない。又上記の程度に埋め込めば板に特別の工作を施さなくても抜け出したり倒れたりする心配はない。長期に観測する時には材質を補強すればよい。筆者等はこの方法により今までしばしば各地で一週間程度汀線の砂の堆積浸蝕の観測を行なつた。図—7 は昭和33年 8 月下旬~9 月上旬に上記の方法で苦小牧港東防波堤東側の汀線で行なつた実測結果の中の一例である⁹⁾ (図—8 参照)。量砂標を汀線に直

図—7 量砂標による実測例 (昭和33年)



図—8 量砂標の地点 (昭和33年 8 月, 苦小牧港)



角に 5~10 m 間隔に数本設置すれば前浜勾配の変化も測定し得る。図—7 は 5 m 間隔に 2 本設置した場合の変化であつて設置地点間の勾配も同図に記してある。これによると僅か 3 日程の間に堆積する砂の高さが 1 m 以上にも及んでいるがこのような大きな変動でも量砂標や他の目標物を使わなければ目視だけでは殆んど気がつかぬことが多い。

汀線が堆積したり又浸蝕したりする型には二通りある。

直線状の海岸線でそれに直角方向の砂移動のみを注目するならばある海底勾配に対して、ある臨界波形勾配の値を境にしてそれ以上の波形勾配の波は浸蝕、以下では堆積をもたらす⁹⁾。少々大ざつぱに言えば「しけ」の際に浸

蝕が起りそれがおさまると堆積して元の汀線に戻る事がよく観察される。これが第一の型であるが別の型は碎波帯内に強い並岸流が発達して、しかも汀線に直角に沖へのびた防波堤のような構造物のある場所におこる。「しけ」によつて汀線が後退しおびただしく発生した漂砂が並岸流に運ばれて移動する際に、沖へのびた構造物により移動がさえぎられ構造物に対し並岸流の上流側の浅海海底を浅くし「しけ」がおさまつた後にそれらが汀線に集められて上流側の汀線に著しく堆積し以前より汀線は沖にのびることになる。下流側では補給される砂の欠乏により汀線は復旧されずに浸蝕されたまま残る。これが第二の型で苫小牧や厚賀、節婦等北海道の日高地方沿岸諸港によく見られる型である。図一7に戻ると、8月25日にSSEの強風が一日中続き26日はS～SSEのはげしい波浪が海岸をおそい沿岸は欠潰が始まつて27日には汀線が最も後退した。この現象は第一の型のものである。又これと同時に27～28日頃のS～SEの波により並岸流が発達し漂砂はそれによつて運ばれ防波堤東側の海底を浅くしたであろう。28日に風は次第にNに変わり始め波は静まつて汀線は堆積を開始した。海底にたまつた漂砂は汀線に集まり29日には1日で1m近くも砂が堆積し汀線は以前よりはるかに沖へのびた。これは第二型の典型的なものである。以上のように筆者等は量砂標を用いて各地の海岸で堆積浸蝕の型を研究しているが非常に有効であつてその都度豊富な資料を得ている。量砂標を多数海岸に設置すれば刻々の堆積量、浸蝕量の定量化や、さらに波浪の性質と堆積浸蝕のくわしい関係も得られるであろう。現在筆者等はさらに量砂標の読取り自記化を企て研究中である。

参 考 文 献

- 1) 福島, 溝口, 柏村: “漂砂とその測定”第1回～第6回海岸工学講演集の各号.
- 2) 福島, 柏村: 第6回海岸工学講演集、昭和34年11月.
- 3) 堀川清司、鮮干敏: “波による浮遊砂の濃度分布について”第15回土木学会年次講演会、昭和35年5月.
- 4) 柏村: “噴火湾内の沿岸流”日本海洋学会誌第16巻第1号、1960年4月.
- 5) 昭和33年度苫小牧港調査報告、北大工学部理学第一研究室、昭和34年3月.
- 6) 速水頌一郎: “碎波の機構 (II)”第2回海岸工学講演集、昭和30年11月.