

高波浪時における漂砂観測法

河田恵昭*・吉岡 洋**・藤木繁男***・土屋義人****

1. 緒 言

海浜変形の子測を精度よく行うためには、解決しなければならぬいくつかの問題があり、その1つに現地海岸における漂砂量式の適用性を明らかにすることが挙げられる。それには漂砂量を計測することがまず第一であって、従来よりいくつかの試みが行われてきた。漂砂は、海底に間欠的に接触しながら運動する掃流漂砂と碎波などによる乱れに支配される浮遊漂砂に分けられるが、後者の計測は、たとえば濃度計と流速計を組み合わせで計測することによって可能であり、すでに幾つかの成果が発表されている。しかし、掃流漂砂については、その運動が凹凸のある海底付近に限定されるベクトル量であるため、とくに漂砂の活発な高波浪時の測定が極めて困難であって、これまで精度の高い観測値は皆無と言ってよい。本研究では、現地海岸における掃流漂砂の観測法を開発して、漂砂量式の適用性を検討するとともに、浮遊漂砂についても計測したので、それらの成果について考察する。

2. 掃流漂砂捕砂器の開発・試作

(1) 開発上の諸問題とその解決法

現地海岸において掃流漂砂量を計測するために、問題となる諸点を明らかにし、それらを解決することが捕砂器の開発につながると考えられる。これについてはすでにいくつか指摘されているが(たとえば香取, 1985), 今回検討した諸点とその解決への指針を挙げてみよう。

a) 海底に砂れんなどの凹凸が発生するので、海底のごく近傍を運動する掃流漂砂を正確に捕捉することは困難である。漂砂の運動が一番活発な碎波帯での計測を対象とすれば、海底はほぼ plane bed であり、問題とはならない。ただし、このことを確認するために、漂砂量の測定中に海底の微地形を計測しておく必要がある。

b) 海底より上に構造物が突き出ると、漂砂の運動がその影響を受け、しかも捕砂器周辺の海底地形が変化す

る。捕砂器の主要部分は海底上に極力出さない構造とする。しかも、捕砂器の端部は隣接する海底地形にうまく接続するように平板の構造がよい。

c) 捕砂器で捕捉した掃流漂砂がどの程度の量であり、そのために貯砂する空間の大きさをどうすればよいのか。これらについては従来の漂砂量式である程度評価できるので、これと計測時間との組合せで妥当な大きさを推定することが可能である。

d) 時間的に方向が変わらない沿岸漂砂はさておき、岸沖方向漂砂では方向が周期的に変わり、かつ浅海域では向岸漂砂量と離岸漂砂量が一般に等しくないの、それを分離して測定する必要がある。波による水粒子速度の方向が周期的に逆転することを利用して、いずれか一つの方向の漂砂のみを捕捉するように工夫すればよい。非碎波の波では、海底から離れるほど水平方向の水粒子速度は大きくなるので、捕砂器から少し高い位置から導水すれば、これを利用して漂砂の運動を制御できる。

e) 漂砂の活発な高波浪時に捕砂器を海底に設置し、しかも繰返して計測することが必要である。もちろん人が直接海に入って計測することは不可能である。ワイヤーで捕砂器を海底に降ろすと自動的にほぼ所定の位置付近に静止できる機能をもてばよい。

これらの諸問題を解決するために、たとえば、駆動部分をもつ捕砂器が考えられたが、上述した何れかが致命的な問題となってこれまで開発できなかった。とくに e) の問題は難しく、最近やっと解決策を見いだすことができた。

(2) 問題解決のための2つのアイデア

著者らは、最近波と流れの共存場における円柱周辺の局所洗掘に関する研究を行ってきたが、波のみでは洗掘深は、図-1に示すようにたかだか円柱の直径程度である。すなわち、高波浪時に剛な立体構造物を海底におけば、およそその水平スケール程度は洗掘されるということがわかった。この特性を利用して捕砂器を据え付ける方法を模式的に図-2に示した。すなわち、捕砂器の立体の部分Aの水平スケールBに比べてその深さHを少し浅くすれば、捕砂器自身の洗掘孔にこの立体の部分がすっぽり収まることになろう。また、洗掘孔は掘鉢状で

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

** 理博 京都大学助手 防災研究所

*** 京都大学技官 防災研究所

**** 正会員 工博 京都大学防災研究所長

あるから、捕砂器の天板 C の大きさを掘鉢の直径 W より大きくすれば、この洗掘孔に蓋をする格好になり、周辺の平均的な海底の高さと捕砂器の天板の位置がほぼ一致することになる。しかも、このような条件が達成されれば、海底下の部分がくさびとなるので、波の往復運動に従わず、1点で静止できる捕砂器ができるはずである。

つぎに困難な問題は d) である。海底が plane bed に近い状態ならば掃流漂砂の運動は跳躍、あるいは Shields 数が 1 に近くなれば sheet flow 状態で動いているはずである。そうすると、捕砂器としては単なる適当な落とし穴に開けておくだけで捕捉できるはずである。しかし、余り大きくすると底面付近の流れを乱すので、できるだけ小さい方がよい。そこで、著者らは Shields 数が 1 程度で砂粒が水流によって跳躍する飛距離 (土屋・青山, 1970) を参考にして、これより少し長めに取ることとした。しかし、単に穴を開けたままであると、向岸・離岸漂砂が両方とも入るので、それぞれの漂砂量やその差の net の漂砂量を求めることができない。これを解決するためには水粒子速度の方向が逆転した後の半周期間に、砂面より少し上方で流れをパイプで取り込んで、掃流漂砂が落ち込んでくる穴から逆に噴出させてやればよい。実際には、およそ対象とする海象条件の時に、捕砂器付近の底質の直径から求められる沈降速度の 2 倍以上の流速で逆流するようパイプの径を決定した。

(3) 掃流漂砂捕砂器の試作

以上述べたことを基礎として、掃流漂砂捕砂器を試作した。写真-1 (a) は真上から、(b) は真横から撮影した捕砂器である。平面的な寸法は、100 cm × 80 cm の鉄板の中央部に長さ 10 cm、開口幅 5 cm の穴が開けてあり、その下部に 1 辺が 40 cm、高さ 20 cm の正方形の箱を溶接してある。さらに、この箱の底部は少し傾斜をつけてあり、落ちてきた漂砂が中央部の円筒の中に自動

的に溜るようになっている。この正方形の対角線が波の進行方向と平行になるようにして、局所洗掘を促進するよう工夫してある。なお、今回は正常に掃流漂砂が捕捉されていることを確認するために、写真のように 1 辺 30 cm の鉄板製エプロンを捕砂器につけ、高解像度水中ビデオカメラを設置して、撮影を並行するとともに、鉄板から 17.3 cm の高さの所に超小型 2 成分電磁流速計を取り付け、同時計測を行った。

(4) 計測手順

a) まず、写真-2 に示したような海底地形計測櫓 (長さ 1.8 m、櫓の間隔と長さはそれぞれ 3 cm 及び 25 cm) にグリスを塗布して海底に突き刺し、同時に水中ビデオで球形磁石を写し込んで方向を求めた。海底の漂砂が突き刺した櫓のグリスに付着するので、その長さを測れば海底の凹凸の大きさがわかる。これによって海底がほぼ plane bed であることを確認する。

b) 漂砂の落ち込む穴に蓋をして、テープで接着する。この蓋は捕砂器の上面から飛び出さないようにする。この蓋に細いロープをつないで棧橋から引っ張ればテープごとはずれるようにしておく。

c) 捕砂器をウインチもしくはクレーンで海面まで下ろす。そして、海面より少し下で止め捕砂器内の空気をパイプを通して抜く。

d) 図-2 を参照すれば、まず、捕砂器を海底に下ろす (stage 1)。海底に接触しても波のために岸沖方向にブランコのように揺れるが、徐々に海底に捕砂器の荷重をかけるようにしてワイヤーゆるめていくと (stage 2),

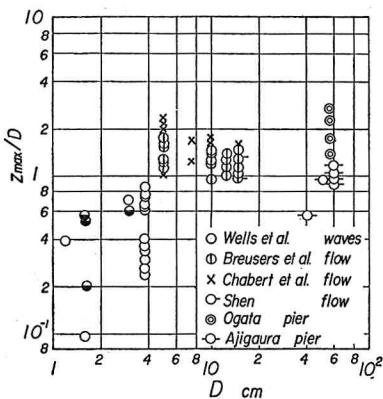


図-1 円柱径と無次元洗掘深との関係 (波及流れによる場合)

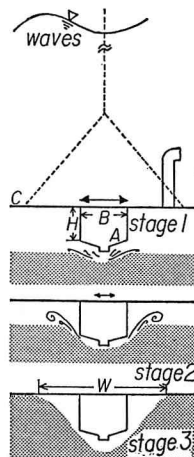
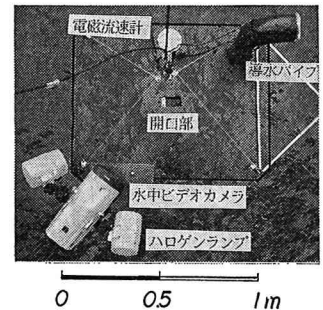
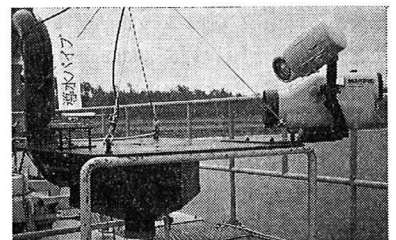


図-2 捕砂器の原理と設置法



(a) 上空から撮影



(b) 真横から撮影

写真-1 掃流漂砂捕砂器



写真-2 海底地形計測櫓と懸架装置

洗掘が進み完全に捕砂器が静止するようになる (stage 3). すなわち、前述した捕砂器の立体の部分が砂中にスッポリ入っているわけである。そこで、ワイヤーをフリーにして、捕砂器の天板と周辺の海底とがなじむようにする。その後、適当な時を見計らって、b) のロープを瞬間的に引っ張り穴を覆っている蓋をテープごと棧橋まで上げてしまうわけである。この時が計測開始であり、後は波浪条件によって、計測時間を決め、終れば速やかに捕砂器を引き揚げてやればよい。

3. 浮遊漂砂の濃度計の開発・試作

掃流漂砂捕砂器の開発と並行して、浮遊漂砂の濃度計の開発・試作を行った。検討した事項は、1) 計測対象濃度に対する適切な発光ダイオードとフォトダイオードの選択、2) 透過型と反射型濃度計の得失、3) 受光・発光面積とその間隔、4) 高波浪時の防水機能とハウジングである。試作品による数度にわたる現地試験を行い最終案を決定し、それに基づいて製作した濃度計群とその1つのユニット (長さ 15 cm および直径 3 cm のステンレス製円筒容器に格納) の拡大写真を写真-3 に示す。この濃度計による漂砂観測を 1988 年 12 月と 1989 年 1 月の 2 回、大潟波浪観測所の T 型波浪・漂砂観測用棧橋で実施した。ただし、濃度計は今回試作したものである。それによる連続計測が可能であることを確認することを第一の目標とした。5 台の濃度計は、写真-3 に示すように、計測枠 (トライボッド) につけたガイドに沿



写真-3 トライボッドと濃度計群

って海底から 10, 35, 80, 160 及び 310 cm の位置にほぼ固定した。なお、このトライボッドには容量式波高計と海底から 1 m の位置に 2 成分電磁流速計 2 台を取りつけてあり、水平と鉛直の 3 成分の流速成分が測定できる。ただし、時定数は 10 である。

4. 観測結果と 2, 3 の考察

(1) 掃流漂砂の観測

a) 海底の微地形: 図-3 の地点で海底地形計測櫓で測った観測用棧橋の長手方向 (NW 方向) の海底の凹凸を示したものが図-4 である。ただし、4 ケ所の測定点は図中に示し、その内 A, B および C は 1989 年 1 月、A' および D は 3 月の測定である。とくに、D はストームの通過直後のダイバーによる前述の計測櫓とビデオ撮影による解析結果であり、測線長は 5.4 m である。これから今回捕砂器を投入した時の B (汀線から 150 m, 水深 5 m) および A' (同 200 m, 5.2 m) では、海底の微地形はほぼ plane bed であることが確認される。それより 50 m 沖の A では波高約 14 cm, 波長約 1 m の砂れんが認められる。一方、B 点より 100 m 岸の C では砂れんのスケールが小さくなり、波長 40 cm, 波高 5 cm 程度のものが存在するようである。一方、後期の観測ではうねりが来襲しており、D 点で平均波長 14.5 cm, 平均波高 1.36 cm の 2 次元性の強い砂れんが認められる。これから、観測当時の碎波帯 B および A' では海底の微地形は plane bed であると言える。

b) 掃流漂砂の運動: 写真-4 は捕砂器のビデオカメラ

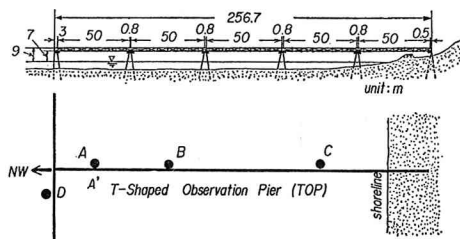


図-3 T型波浪・漂砂観測用棧橋と漂砂観測位置

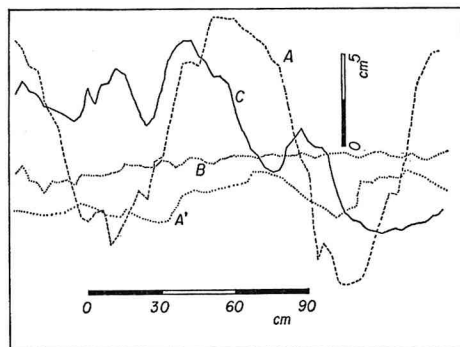


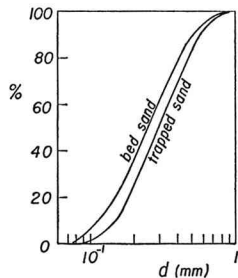
図-4 海底微地形



写真—4 海底での捕砂器に捕捉される掃流漂砂

ラに撮影された掃流砂の運動の一コマである。沿岸方向にはほぼ平行な渦模様を描きながら間欠的に岸に向かう掃流漂砂の運動と、沖に向かう掃流漂砂が天板の穴から吹き出る流れで、これに落ち込まず吹き飛ばされる様子がはっきりと撮影されている。天板の片隅の導水パイプの影響は見られなかった。さらに、砕波によって天板上の漂砂が一瞬後に円軌道を描きながら巻き上げられる現象も確認された。掃流漂砂の運動形態は sheet flow 状態であったが、砂粒群の移動によって天板の艶消しの黒色が灰色に変わる程度であることから、その移動層厚は粒径の数倍程度であると判断された。

c) 掃流漂砂量: 図—5 は捕砂器に捕捉された漂砂とその付近の海底の底質の粒度加積曲線を示す。図から、中央粒径は前者が 0.3 mm, 後者が 0.25 mm であり、かつ粒度加積曲線がかなり平行なことから、底質の比較的粗い部分が掃流形式で輸送されているが、その標準偏差はあまり変化していないことがわかる。さて、表—1 は



図—5 捕砂器周辺と捕砂器中の漂砂の粒度加積曲線

今回の観測結果であり、漂砂量の実測値が向岸漂砂量であることに留意して、単位時間、単位幅当りの漂砂量に直した後、摩擦速度と平均粒径の積で割って無次元化し、Shields 数との関係で図示したものが、図—6 である。ただし、波浪特性は有義波と平均波の波高と周期で代表させ、微小振幅波理論を適用して諸量を計算し、海底の摩擦係数は Jonsson (1966) によるものを用いた。図中の曲線は、河田 (1989) が砂粒の運動機構に立脚して、水平の plane bed における半周期漂砂量を理論的に求めたものであり、すでに plane bed での漂砂量の実験値と極めて良く一致することが確認されている。図—6 から今回の観測値は有義波より平均波高と周期を用いて整理すれば、漂砂量の実験値に近づくことが認められる。波の諸量の用い方については、不規則波による実験値や現地の観測値をさらに取得して検討することが必要であるが、ビデオで撮影された限りにおいては、捕砂効率が高いと判断されるので、現時点では平均波でまとめるとよいと結論される。

(2) 浮遊漂砂の観測

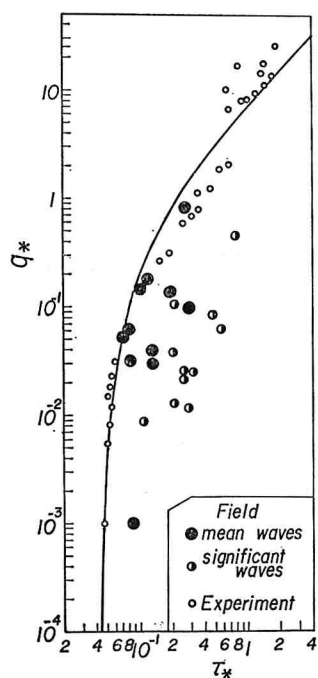
濃度計群による浮遊漂砂の観測は、図—3 の A 地点で行った。図—7 (a) 及び (b) は観測例であって、下より波高、高さ 10, 80 cm の漂砂濃度、流速計の出力 x, y [x は $N+10^\circ W$ 方向, y は $W+10^\circ S$ 方向を向いているので、図—3 からわかるように、観測時には観測機橋 (NW 方向に向いている) に対して、若干 E 方向から波が入射していることがわかる] 及び高さ 35 cm の漂砂濃度である。なお、波形にノイズの様なものも認められるが、これは崩れ砕波が起こったときに、波高計が干渉を起こしたためで、その場合には沿岸方向に約 4 m 離れた超音波波高計の記録を用いることにした。これから次のことが指摘できる。すなわち、まず、1 波のみが砕波した場合、波形と流速の位相にずれは認められないが、漂砂濃度のピークは鉛直方向に位相の遅れが認められる。高さ 10 cm の漂砂濃度は波の谷に向かう途中でピークが現

表—1 観測結果

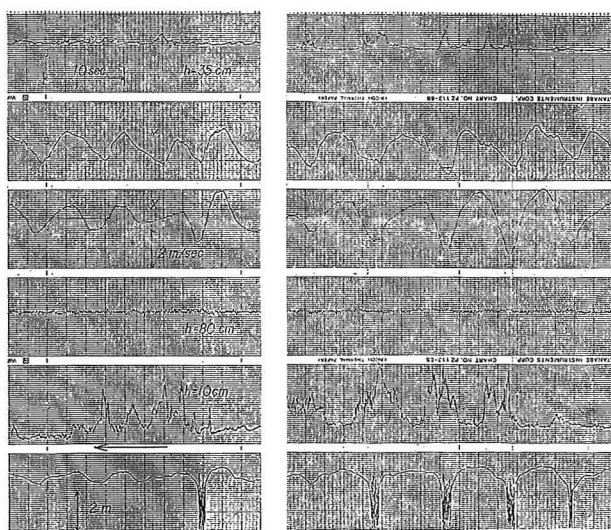
No.	有義波高 (m)	有義周期 (s)	平均波高 (m)	平均周期 (s)	有義流速振幅* (cm/s)	平均流速振幅 (cm/s)	計測時間 (s)	漂砂量** ($\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{s}$)
1	1.38	5.41	0.88	4.51	—	—	658	9.48×10^{-3}
2	1.71	6.00	1.00	4.86	—	—	1 583	69.8
3	0.94	4.65	0.63	3.97	58.5 (47.7)	34.6 (27.6)	1 476	0.952
4	1.09	4.48	0.71	3.71	47.7 (52.5)	27.3 (37.5)	1 554	2.18
5	1.00	4.43	0.68	3.87	—	—	1 440	0.466
6	1.13	4.47	0.76	4.20	65.8 (52.0)	40.2 (30.2)	4 967	1.03
7	0.88	4.82	0.61	4.07	50.3 (56.8)	26.5 (33.2)	1 477	2.82
8	0.93	4.40	0.67	4.27	58.5 (64.0)	26.9 (46.0)	2 398	7.36
9	1.10	4.98	0.75	4.38	41.7 (62.3)	23.7 (39.6)	1 410	2.26
10	1.04	4.66	0.75	4.45	46.0 (64.0)	23.9 (44.3)	1 366	1.73
11	1.59	4.94	1.07	4.93	72.6 (81.2)	43.9 (51.6)	1 800	7.84

* 底面から 17.3 cm の高さでの岸方向の流速であり、括弧内は沖方向流速である。

** 漂砂量は実質部分の体積であり、空隙率は 0.4 として求めた。



図—6 Shields 数と無次元漂砂量との関係



(a) 砕波が1回の場合

(b) 砕波が連続する場合

図—7 浮遊漂砂の鉛直方向の濃度分布、波高及び流速の測定例

れているようである。そのピークは複数個数えられ、時間的に脈動しながら減衰していくようである。しかも、砕波後、波高の大きな波が連続していないにもかかわらず、流速には顕著な変動と波形との位相のずれが記録されている。高さ 35 cm の濃度記録にはそれほど顕著な変動はないが、第 1 ピーク通過後、6, 7 秒経過後、複数のピークがやはり計測されている。このような位相のずれは、海底近くでは図—4 に示すようにかなり規模の大きい砂れんが存在しており、そこで発生した渦が沖に移動するに伴って漂砂雲も移動し、これが記録されたことによるのであろう。この渦の規模は砂れんの大きさに規定されるので、海底から高さ 1 m のところに設置してある流速計にそれが記録されたのであろう。一方、砕波が連続した (b) では、初期の漂砂濃度のピークと波形や流速との位相差は、砕波の繰り返しによって認められなくなり、漂砂濃度のピークが減衰せず、むしろ時間的に大きくなるのがわかる。これは、砕波によって浮遊した漂砂がその繰り返しによって空間的に拡散され、そこに漂砂雲が加わったためであろう。

このような機構は、さらに波高の大きな波が砕波する場合のデータを取得して、大規模渦の形成やその移動との関連を踏まえて検討する必要がある。

5. 結 語

ここでは、現地海岸で漂砂を観測するための計測器の開発研究を行い、次のような成果を得た。すなわち、こ

れまで現地海岸で計測できなかった高波浪時の掃流漂砂量を観測するため、2つのアイデアに基づく捕砂器を開発・試作した。そして、水中ビデオによる掃流漂砂の捕砂状況の検討から、この捕砂器が十分機能を発揮していることが確認できた。この捕砂器を用いて中程度のストームの条件下で 11 ケースの観測値を取得した。そして、平均波の波高と周期から微小振幅波理論を用いて Shields 数や無次元漂砂量を計算したところ、従来の plane bed の無次元漂砂量の実験値とかなり対応し、また計算値との対応も良好であった。さらに、砕波による浮遊漂砂の濃度分布が砕波の回数などによって時空間的に大きく変化することが明かとなった。

ここで示した捕砂器は 10 数年来にわたって検討し、開発したものであって、現地海岸ばかりでなく実験水槽においても高精度かつ簡便に漂砂量を計測できる能力をもっており、その汎用性は高いと言える。なお、本観測は京都大学工学部及び東京大学工学部との協同観測の一環として実施したものであって、関係各位に謝意を表する。

最後に、本研究は文部省科学研究費一般研究 (C) による研究成果の一部であることを付記して感謝する。

参 考 文 献

- 香取完和 (1985): 捕砂器, 海岸環境工学, 堀川清司編, (第 5 編第 5 章), pp. 453-463.
- 河田恵昭 (1989): 傾斜海浜における漂砂量則について, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 289-293.
- 土屋義人・青山俊樹 (1970): 水流による砂れきの saltation の機構, 京大防災研年報, 第 13 号 B, pp. 199-216.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layer and friction factor, Proc. 10th ICCE, pp. 127-148.