

波による底質のふるい分け作用

山 本 晃 一*

1. はじめに

海浜の海床材料は均一粒径ではない。特に砕波点と前浜頂の間は底質がふるい分けられ場所的に大きな違いを示す。外海に面している海浜で汀線近くの粒径が 0.4~2 mm の海浜では、前浜および砕波点付近が粒径の大きな場所であり、水深 8 m では 0.3~0.2 mm, 10~15 m では 0.15 mm, 20 m 以深ではシルト質に変わる所が多い。砂利浜海浜においても、水深 10 m 以深では底質は砂質に変わり、10 m では 0.3~0.5 mm ぐらいとなっている。(沖浜の急な駿河湾の富士海浜では、水深 15 m で 1~2 mm ぐらいとなっている。この海岸は沖浜勾配が急であり、波が沖で砕波することなく海岸に達する。このことは海浜地形を決める波高が、他の海浜より大きいことを示している。これが深い所まで粒径を大きくしている理由であろう)。

このような底質のふるい分けがなぜ生じるのか、河川から出た土砂がどのように海浜に分散されていくのか、また海浜養浜材料としてどんな粒径の砂を使えばよいかを把握することは必要なことであろう。そこで底質材料として混合砂を使い、波によって底質がどのようにふるい分けられていくのかを観察し、その原因について考察を行った。

2. ほぼ均一砂を持つ二次元海浜の底質移動機構

混合砂の波によるふるい分け現象について述べる前に、均一砂の場合どのような底質の移動機構を持つか簡単に説明しておく^{1), 2), 3)}。

移動床の場合、底床に ripple を生じるため flat bed の場合と異なった波による質量輸送の分布型を持つ。この質量輸送の分布型は、波高、周期、底質材料の変化によって種々変化するが、基本的には 3 つの型に分けられる。

I 型：波によって底質があまり動かないような場合で、底床には ripple が存在しないか、あっても ripple の波高と波長の比 η/λ が小さい場合である。このよう

な場合 ripple の存在による渦の発生はなく、平坦海床の場合と同様な質量輸送の分布となり、砕波点より沖の底面近くの質量輸送の方向は岸向きである。

II 型：底質がより動くようになると、底床には明確な ripple が生じる。砕波点より少し沖側では岸側に急斜面を持つ ripple であり、岸側の急斜面のみ、あるいは岸側の方が強い渦を生じる。底面近くの質量輸送の方向は沖を向き、ripple は岸向きに前進する。ある程度水深の深い所(沖波波高 H_0 の 3~4 倍より深い所)では、ripple はほぼ対称であり、この場所での底面近くの質量輸送の方向は岸向きであり、ripple の移動速度は遅く、どちらかという冲向きである。

III 型：さらに底質が激しく動くようになると、砕波点より少し沖側では ripple は頂部が平らになり、渦の発生がなくなる。より底質が波によって動かされると ripple は消滅してしまう。このような場合の砕波点より多少沖の位置の質量輸送の方向は岸向きとなり、ripple の動きは小さいが沖を向く。

次に底質の移動について述べてみよう。砕波点より少し沖側の場所では、波による底質の動きが激しくないうちは、砂移動は掃流型式であり岸向きの強い水粒子運動によって岸向きの砂移動量が多く、ripple も岸向きに前進する。このため初期海浜形状が直線的で、勾配が極端に大きくなければ、砕波点の沖側は侵食され前浜の方へ土砂移動が生じる。より底質の移動が激しくなると浮遊砂が多くなり、ripple の岸側斜面上で発生する渦による岸側斜面上の砂の巻き上げによって、ripple の前進速度は遅くなり、浮遊された底質は質量輸送に乗って沖に向かい、冲向きの土砂移動が多くなる。したがって H_0 の 2~3 倍の所に土砂が堆積するようになる。より波によって底質が動くようになると、質量輸送の分布形が III 型になり、土砂は砕波点方向に運ばれるようだ。

上述のような質量輸送の分布形や土砂輸送形式を区分するパラメーターは、次元解析より、沖波波形勾配 H_0/L_0 、底質の動きやすさを示す $\sqrt{gH_0}/w_0$, $s=(\rho_s-\rho)/\rho$ 、初期勾配 i_0 、および粘性の影響を表わす $\sqrt{\nu}(H_0)^{1/4}g^{3/4}/w_0^2$ と考えられる(ここで w_0 は底質の沈降速度)。この中で底質が極端に小さくなければ粘性の影響は大きな

* 正会員 建設省土木研究所

いと思われる。図-1 は H_0/L_0 と $\sqrt{gH_0}/w_0$ によって質量輸送の分布型がどう変わるか整理したものであり、図-2 は 碎波点より沖側の部分の底床変化型式の違いを、初期勾配 1/10~1/40 の資料を使って整理したものである。

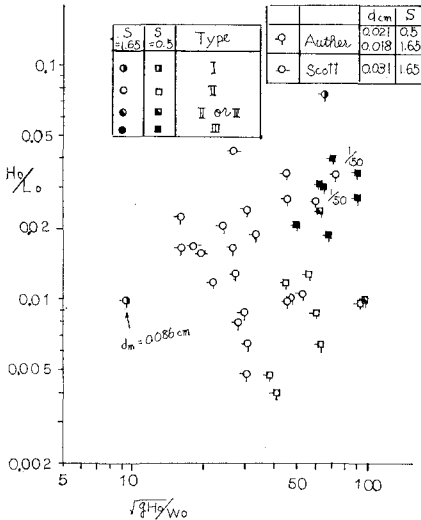


図-1 質量輸送の分布型

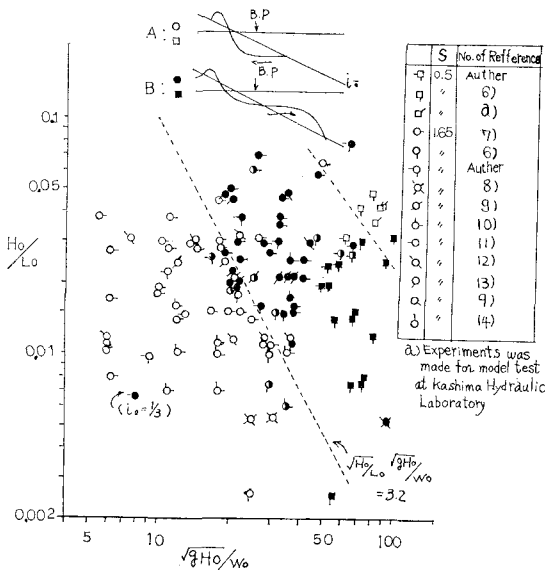


図-2 タイプAとタイプBの区分図

3. 混合砂の波による移動機構の観察

底質材料が混合砂の場合、前述した均一砂の底質移動機構がどのように変わるのか、底質材料がどのように波によってふるい分けられるのか、次のような実験を行って現象の観察を行った。

(1) 実験方法

実験は長さ 70m、幅 6m、高さ 1m のコンクリート水路の中に 2 本並列に設置されている長さ 35m、幅 0.7m、高さ 0.8m の片面ガラス張コンクリート水路で行った。実験開始前に所定の海浜形状を混合砂で作り、所定の波を当て、所定の時間に海床高、底質の動き、ripple の動き、質量輸送の方向を調べた。実験終了後、底床面の粒度分布を調べるために ripple の生じている所は、ripple 高の厚さに、flat bed の所は表層のみ採取するように心がけ、それをふるい分け試験して粒度分布を調べた。実験は 6 ケース行った。初期底床材料の粒度分布は 6 ケースとも同一である。

(2) 観察結果

6 ケースのうち、3 ケースの観察結果を報告する。

ケース 1：ケース 1 は、図-3 の破線の粒度分布を持つ混合砂で初期勾配 i_0 を 1/10 に整形した後に、沖波波高 $H_0=6.85$ cm、 $T=2.11$ sec、 $H_0/L_0=0.0099$ の波を作用させたものである。

初期海床材料 $d_{65}=0.86$ mm、 $\sqrt{gH_0}/w_{65}=9.3$ である。底床材料は水深 23 cm 以浅のみで動き、ripple は生じなかった。質量輸送のパターンは ripple が生じなかったため I 型となった。それゆえ碎波点より沖側は底質は岸向きに動いた。この場合、細砂が速く動き、粗砂に徐々におおわれると思われたが、粗砂は細粒子が動いて

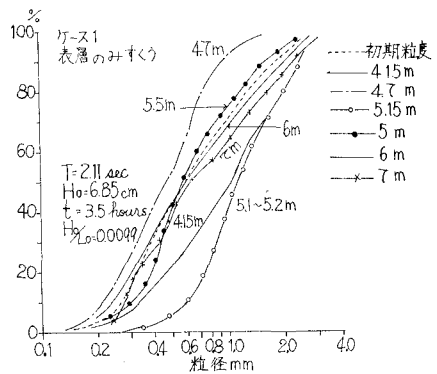


図-3 ケース 1 表面粒度分布変化

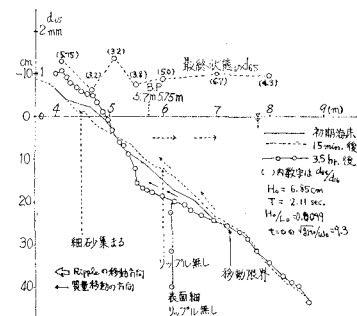


図-4 ケース 1 の海床高の変化と粒度変化

しまうと砂面よりの突出高が高くなり、水粒子の動きにさらされる面積が増加するため、動きやすくなり細砂と同様に岸向きに運ばれた。もし初期底床の粒度の分散がより大きければ、大粒子は動くことができず底床はアーミングされたであろう。前浜では水路幅 70 cm 内で碎波点と汀線間で循環流(軸は垂直)が発生し、その方向が変わるためか、細砂と粗砂が層状にたまった。底床変化のパターンはA型で、 $t=3.5$ hr の表面底床材料は、碎波点より沖側は底質が岸向きに動き侵食されるのみであったので、初期底質材料の粒度分布とほとんど変わらなかった。汀線および汀線より少し沖合は粒度が粗くなった。

ケース 2、ケース 3: 図-5、図-6 に、ケース 2、ケース 3 の観察結果を示す。

ケース 4: このケースは $H_0=22.0$ cm, $T=1.96$ sec, $H_0/L_0=0.037$, 初期 $\sqrt{gH_0}/w_{65}=16.7$ の場合である。 $t=0.5$ hr. では 5.7 m より沖で ripple が発生し、II 型の質量輸送パターンとなっていた。ripple の山部は細砂で谷部は粗砂が集まっていた。 $t=0.5$ hr. には bar 頂が 4.1 m にあったが、時間の経過につれて bar 頂は沖に移動し、 $t=10.0$ hr. には 4.9 m 地点にまで達した。ripple は岸向きに動き bar に達すると消滅してしまう。 $t=10$

hr. に $d_m=5$ mm の小砂利を 1.3 m, 4.3 m, 5 m 地点に投入した所、1.3 m, 4.3 m 地点はほとんど動かず停滞したが、5 m 地点では沖に移動し 5.3 m 地点に達した。同様に $d_m=1.4$ mm の砂を 4.3 m, 4.8 m に投入した所、それぞれ 4.1 m, 5.3 m 地点に集まった。また石炭粉($d_m=0.21$ cm, $S=0.5$)を投入した所 8~10 m 地点に達した。

底質材料の変化を見ると、6.5~9 m 地点は細砂が沖向きの質量輸送に乗って運ばれたため細くなり、8 m 地点で $d_{60}=0.3$ mm にもなった。Bar 地点の 4~5 m の表層は粗くなり、3 m 地点は侵食されるのみであったためか、初期粒度分布とあまり変わらず、汀線である 1.5 m 地点は粗くなり、1 m では多少細かく、0.4 m ではさらに細かくなっていた。

ケース 5: ケース 5 の観察結果を図-8 に示す。

ケース 6: ケース 6 は $H_0=12.0$ cm, $T=1.53$ sec, $H_0/L_0=0.03$, 初期海浜勾配 1/10, 初期 $\sqrt{gH_0}/w_{65}=9.9$ の場合である。 $t=1$ hr. には bar が発生した。汀線付近の砂は細かく、4.2 m 地点は粗砂がたまり、bar 背後には ripple が発生していた。ripple を構成する砂は 0.2~0.3 mm であった。(この実験は新潟大学学生藤巻誠が筆者の指導で行ったものである。筆者自身も、質量

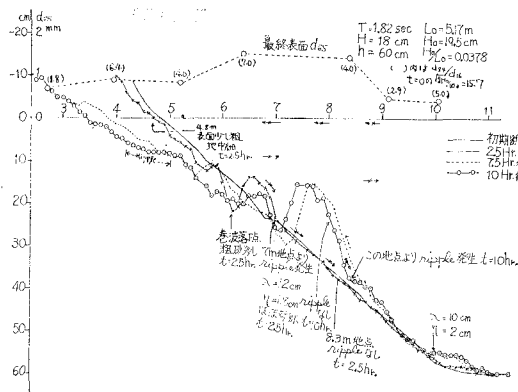


図-5 ケース 2 の水深変化と粒度変化

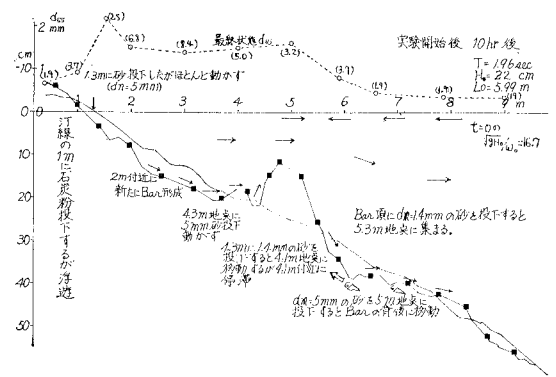


図-7 ケース 4 の水深変化と粒度変化

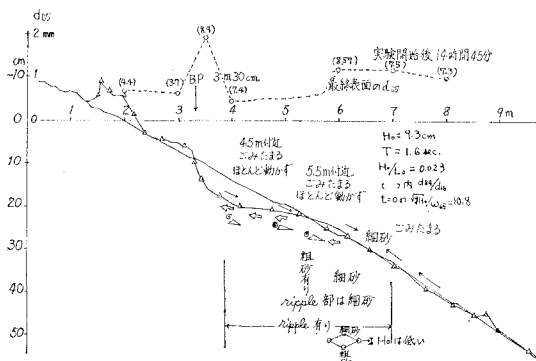


図-6 ケース 3 の水深変化と粒度変化

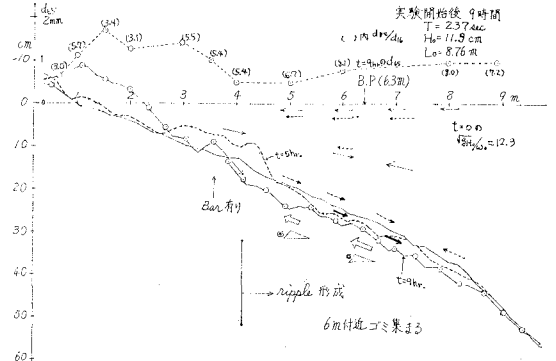


図-8 ケース 5 の水深変化と粒度分布

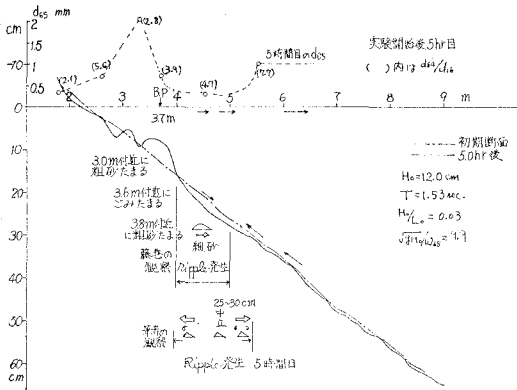


図-9 ケース6の水深変化と粒度変化

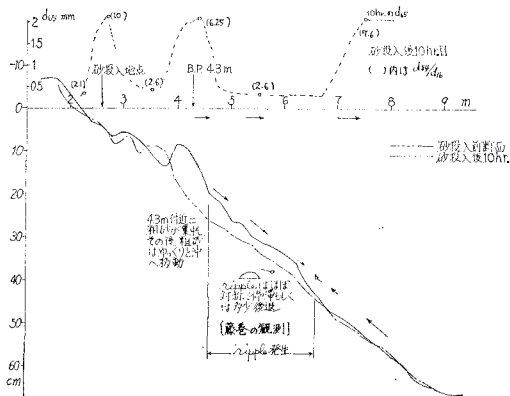


図-10 砂投入後 10 hr. の海床高と粒度変化

輸送の方向、底質移動現象を観察したが、藤巻と多少異なる観察結果となっていた。どちらの観測結果が正しいとも言えないが、ここでは筆者の観察結果を重じて述べる。) Bar 近くの ripple は岸を向き、岸側に強い渦を生じていた。より沖の ripple は頂部がまるく両側に渦を生じほとんど停止していた。 $t=5$ hr. には bar がはっきりしなくなり正常海浜に近くなった。砕波の落下点は d_m が大きくなり、ripple の発生部は $d_m=0.2\sim0.3$ m となった。その後 $d_m=0.33$ mm, $d_{84}/d_{16}=0.45$ mm/0.19 mm=2.4 の砂を 2.0 l/min, 50 回汀線近くに投入して、この砂の移動状況を観察した。砂投入後 4 時間目の観測によると、砕波点は 4.3 m 地点に後退し、投入された砂は前浜部、砕波点背後にたまり、表面粒度はほぼ投入砂の粒径に等しくなった。 $t=10$ hr. には前浜部の形状は砂投入前とほぼ同一となった。投入された砂は前浜から抜けだし、砕波点背後に堆積して、ripple の発生域が 7 m 近くまでなった。

(3) 実験結果の考察

実験結果をとりまとめると次のようなことが言える。

① 均一砂の場合、底床材料が動きだすと ripple が生

じるが、混合砂の場合、粒径の違いによって水粒子の運動に対する応答が異なるため、ripple の発生がおきられるようだ。

② 砕波点より沖の砂粒子の運動は (ただし $h/H_0=2\sim3$ 位の所), ripple の生じない場合、質量輸送の分布は I 型となり、初期勾配が極端に急でなければ底質は岸向きに動き A 型となる。ripple の生じる場合、質量輸送の分布は II 型となり、Bar 背後近くの砂粒子の移動方向は、粗砂は岸向き、細砂は沖向きとなる。沖向きになるか岸向きになるかの限界は、粒径ごとの $\sqrt{gH_0}/w_0$ を計算し、図-2 を使えばある程度把握しえるようだ。

③ 前浜部の底質材料より細かい材料を前浜に投入すると、投入された砂は沖に出てしまい、前浜形状は投入される前とほとんど変わらなくなる。

④ 粗砂は、細砂の中に入ると突出高が大きく、均一砂に比べて動きやすくなる。ケース 1 ではアーミング現象が生じなかった。

⑤ 粗砂は、前浜、砕波帯にとどまり沖に出ることはない。もしより大きい波で沖にもっていかれても、より小さい波で前浜にもどってこよう。

⑥ 前浜部では、循環流の発生のためか堆積面をみると細砂と粗砂の互相が見られた。前浜部は、砕波帯内より粒径が小さいようだ。

4. あとがき

実際の海浜で生じている底質のふるい分け現象の生じている場合は、砂利海浜を除けば本実験で行った $\sqrt{gH_0}/w_{65}$ を越えた所で生じている。実際の海浜で生じる現象を把握するためには、今後波高 50 cm 以上、長さ 100 m 以上の造波水路での実験および現地海浜での観測が必要となろう。また汀線方向のふるい分け現象把握も今後の課題となろう。

参考文献

- 1) 山本晃一・野積 尚: 海浜変形の相似性に関する研究, 土木研究所資料第 975 号。
- 2) 山本晃一・野積 尚: 海床における砂の移動と水粒子の運動, 第 30 回土木学会年講, 1975。
- 3) 山本晃一: 波によるリップルの相似性, 第 29 回土木学会年講, 1974。
- 4) Bascom, W.N.: The relationship between sand size and beach-face slope, Trans. A.G.U. Vol. 32, No. 6, 1951。
- 5) Rector, R.L.: Laboratory study of equilibrium profiles of beaches, Beach Erosion Board, Tech. Memo., No. 41, 1954。
- 6) 田中則男・新保 修: 移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について, 港湾研報告, Vol. 12, No. 1, 1973。
- 7) 須賀堯三・松村圭二・末吉一成: 河口二次元砂

- 州に関する実験的考察, 第27回土木学会年講, 1972.
- 8) Saville, T.: Scale Effects in Two Dimensional Beach Studies, Trans. I.A.H.R. 7th General Meeting, 1957.
- 9) Iwagaki, Y., N. Noda: Laboratory Study of Scale Effect in Two Dimensional Beach Processes, Proc. 8th Conf. Coastal Engineering, 1963.
- 10) Rector, R.L.: Laboratory Study of Equilibrium Profiles of Wave Motion, Trans. A. G. U. Vol. 130, 1949.
- 11) Popov, I. J.: Experimental Research in Formation by Waves of Stable Profiles of Upstream Faces of Earth Dams and Reservoir Shores, Proc. 7th Conf. Coastal Engineering, 1961.
- 12) Watts, G.M.: Laboratory Study of Varying Wave Period on Beach Profiles, Beach Erosion Board Tech. Memo., No. 53, 1954.
- 13) Eagleson, P.S., B. Glenne, and J.A. Draucup: Equilibrium Characteristics of Sand Beaches, A.S.C.E. Hy. 1, Jan. 1963.
- 14) 篠原謹爾・椿東一郎・斉藤 隆: 漂砂と波の特性に関する研究, 第5回海岸工学講演集, 1958.
-