

侵食過程における戻り流れと浮遊砂濃度

栗山 善昭*・加藤 一正**・柳 嶋 慎一***・村上 裕幸***

1. はじめに

砂浜造成の要請が高まるとともに、短期的な海浜変形予測の重要性が増してきている。荒天時に起こるような急激な海浜変形の予測精度を向上させるためには流れなどの流体内部の諸特性を把握し、底質移動のメカニズムを考慮したシミュレーションモデルを作る必要がある。しかし、海浜変形と波浪特性との関係については現地観測などによって数多く調べられてきているものの、断面変化に直接関与する流れや浮遊砂濃度が長期間観測された例は少なく、碎波帯内の底質移動については不明な点が多い。そこで、台風によって侵食過程となった二週間、碎波帯内で流れと浮遊砂濃度を測定し、それらの特性を調べた。さらに、流れと浮遊砂濃度から net の浮遊砂量を計算し、断面変化との関係を調べた。

2. 観測方法および海象状況・断面変化

観測は台風 18 号が来襲した 1988 年 9 月 12 日から 9 月 26 日にかけて、鹿島灘に面する波崎海洋研究施設(図-1)で行なった。第二次碎波点よりもやや岸側の観測地点(図-3 において矢印で示した地点)で、電磁流速計を底面上 50 cm から 120 cm までの間に一台設置し水平二成分の流速を測定するとともに、四台の光学式濃

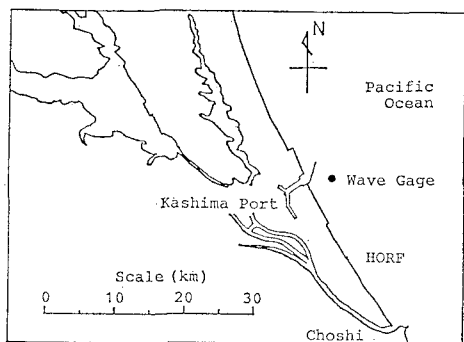


図-1 波崎海洋研究施設の位置

度計を電磁流速計より上方 20 cm, 下方 15 cm, 下方 40 cm, 下方 50 cm の位置に設置し、浮遊砂濃度を測定した。データのサンプリング周波数は 2 Hz で、2 時間間隔(波高の大きいときは 40 分間隔)で 20 分間、観測地点における水面波形と同時に記録した。-115 m から 385 m までの領域の断面形状を、一日一回、5 m 間隔で測量し、観測地点における海底面の位置、電磁流速計の高さを一日数回、測量した。観測地点での測量と同じ時刻に、碎波位置、碎波型式、離岸流の発生位置などを目視によって観測した。9 月 12 日, 19 日, 26 日には前浜部の前浜部の平面測量を行なった。

図-2 の上段は鹿島港の沖、水深 22 m の地点で測定された沖波有義波高(実線)と観測地点における有義波高(破線)の経時変化を示したもので、図-2 の下段は

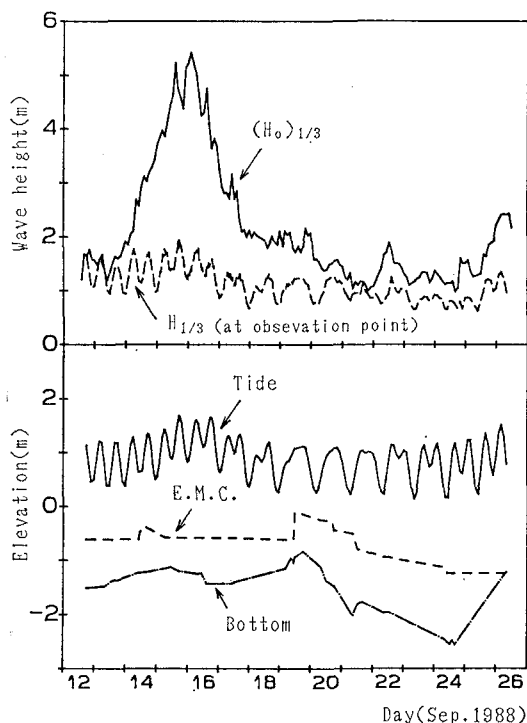
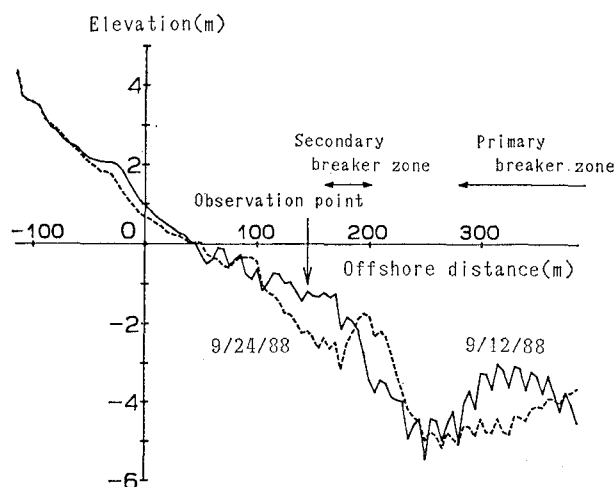


図-2 沖波有義波高と観測地点における有義波高、潮位、電磁流速計の位置、海底面の位置

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室
 ** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室長
 *** 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室



図—3 観測地点、碎波点の位置および侵食前後の海底断面

観測地点における潮位（実線）、海底面の位置（一点鎖線）、電磁流速計の位置（破線）を示したものである。観測期間における極大沖波有義波高は 5.4 m であった。

図—3 は観測期間中の碎波位置および侵食前の断面（9 月 12 日、実線）と最も侵食された時の断面（9 月 24 日、破線）を示したものである。観測期間中の断面変化をまとめると次のようになる。台風による時化によって -40~20 m の前浜が侵食された。観測地点を含む 120~180 m の範囲が侵食され、その沖の 180~250 m の範囲で堆積が起り、バーが形成された。9 月 12 日にバーが形成されていた 280~360 m の範囲では侵食が起っており、このバーが沖に移動したと思われる。

200 m 付近のバーの形成にともない、第二次碎波点は観測期間中に約 30 m 沖側に移動したけれども、潮位変動による碎波位置の変動はほとんど無かった。

3. 戻り流れ

図—4 は岸沖方向の 20 分間の平均流速の経時変化を示したものである。岸沖方向平均流速は観測期間中ほとんど沖向きであり、最大で約 80 cm/s であった。9 月 20 日以前の沖向き流れは、碎波などによって表面近くで岸側に流入する水塊を補償する戻り流れであると考えられる。しかし、20 日以降はそれは観測点近傍で離岸流が観測されていたため、その影響であると考えられる。

戻り流れの大きさ $\bar{v}$ （沖向きを正とする）は、波動による成分 $\bar{v}_s$ と碎波による成分 $\bar{v}_r$ に分けて考えることができる（Svendsen, 1984; 岡安ら, 1987; 佐藤ら, 1987）。

波動による成分を微小振幅波理論および長波近似を用いて式（1）で評価する。

$$\bar{v}_s = (\gamma^2/8) \cdot \sqrt{gh} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 γ は波高水深比を、 g は重力加速度を、 h は水深を表している。計算では波高としてゼロダウクロス法で求めた観測地点における 1/3 有義波高を、水深として観測地点における 20 分間の平均水面と海底面との距離を用いた。

非線形性の強い碎波帯内で微小振幅波理論を用いて戻り流れの波動による成分を計算することは多少無理があるけれども、碎波による戻り流れの方が波動成分による戻り流れに比べて数倍大きいことが多いため、微小振幅波理論を用いて波動成分による戻り流れを計算してもさほど問題はないと思う。

戻り流れの碎波による成分は、式（2）で表される（Svendsen, 1984; 岡安ら, 1987; 佐藤ら, 1987）。

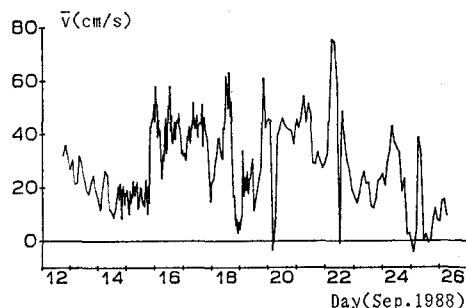
$$\bar{v}_r = H^2/hT \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 H は波高、 T は周期である。（2）に波高としてゼロダウクロス法で求めた観測地点における 1/3 有義波高を、周期として 1/3 有義波周期を代入して計算される戻り流れの碎波による成分の推定値と、観測地点近傍で離岸流がないと判断される期間の戻り流れの実測値から式（1）で表される $\bar{v}_s$ を除いた成分とを比較したけれども、両者の相関が弱かった。

そこで、碎波型式が戻り流れに及ぼす影響を調べた。

図—5 は、目視観測の碎波型式（横軸）とイリバーレン数 ξ （縦軸、 $\xi = \tan \beta / \sqrt{(H/L_0)}$ 、 $\tan \beta$ ：碎波点近傍の海底勾配、 L_0 ：沖波波長）とを比較したものであり、横軸は碎波した波に対する巻き波型で碎波した波の割合を示している。碎波型式とイリバーレン数は良く対応しており、碎波型式を示す指標としてイリバーレン数 ξ を用いる。

図—6 は戻り流れの実測値から式（1）の $\bar{v}_s$ を除いた成分を前述した推定値（式（2）で無次元化した値（縦軸）と、イリバーレン数（横軸）との関係を示したものである。両者の間には正の相関が認められ、巻き波型碎波の割合が多くなると中層での戻りの流れが強くなる。



図—4 沖向き平均流速

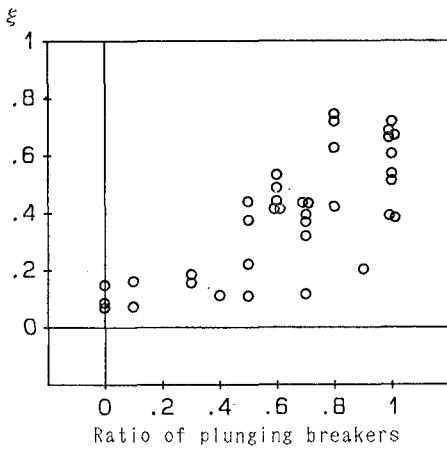


図-5 碎波型式とイリバーレン数

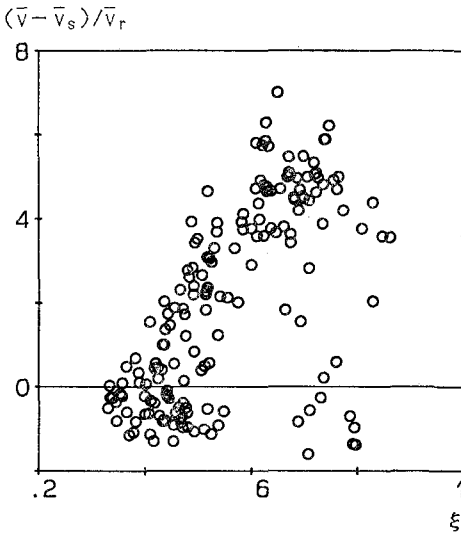


図-6 イリバーレン数と $(\bar{v} - \bar{v}_s)/\bar{v}_r$

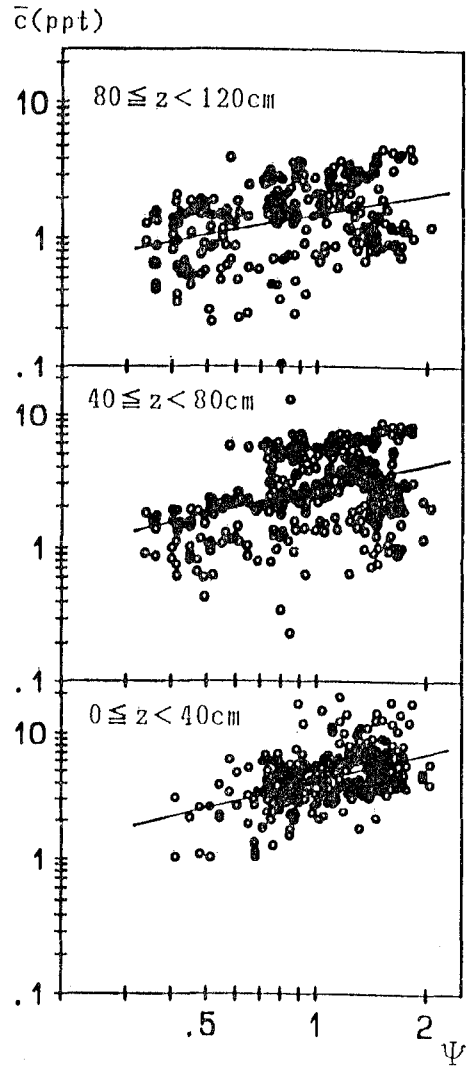


図-7 シールズ数と平均浮遊砂濃度

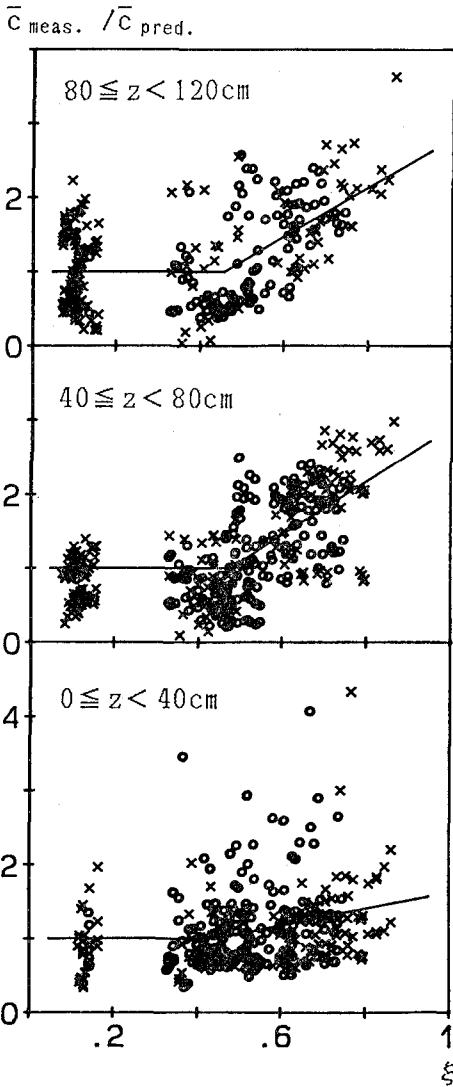
4. 浮遊砂濃度

浮遊砂濃度データを底面からの高さが0~40 cm, 40~80 cm, 80~120 cmの三層に分け, それぞれの層において平均浮遊砂濃度 $\bar{c}$ とシールズ数 $\Psi (\Psi = f_w \cdot v_b^2 / (2sgd), f_w$; Jonsson の摩擦係数, $v_b = (4.0 \times v_{rms})/2$, v_{rms} : 波の主流方向の流速の標準偏差, s ; 底質の水中重量 (1.65), d ; 底質の中央粒径 (0.183 mm)) との関係調べた。図-7 は平均浮遊砂濃度 $\bar{c}$ (縦軸) とシールズ数 Ψ (横軸) との相関を示したもので, 縦軸, 横軸ともに対数表示してある。両者の関係は式 (3) で表される。

$$\left. \begin{aligned} \bar{c} &= 4.15 \times \Psi^{0.724} & 0 \leq z < 40 \text{ cm} \\ \bar{c} &= 2.70 \times \Psi^{0.621} & 40 \leq z < 80 \text{ cm} \\ \bar{c} &= 1.49 \times \Psi^{0.509} & 80 \leq z < 120 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

ただし, z は底面でゼロ, 上向き正の鉛直座標である。

シールズ数が同じであっても, 碎波型式が異なれば碎波による上からの乱れの程度が異なるであろうから浮遊砂濃度も異なってくると考えられる。そこで, 浮遊砂濃度に及ぼす碎波型式の影響を調べた。図-8 は, 式 (3) で表される平均浮遊砂濃度の実測値と推定値との比 (縦軸) と, 碎波型式を表すイリバーレン数 (横軸) との相関を示したものである。白丸印がシールズ数が1よりも大きい場合を, $\times$ 印がシールズ数が1よりも小さい場合を表している。底面上 0~40 cm の層では両者の相関が弱いけれども, 底面上 40~120 cm の層ではイリバーレン数が0.4より大きい領域で両者の相関が強い。底面上 0~40 cm の層において両者の相関が弱かったのは, この層における平均浮遊砂濃度が主として底面せん断力の影響を受けているためであり, 底面上 40~120 cm の層において両者の相関が強くなったのは, この層における



図—8 イリバーレン数と平均浮遊砂濃度の実測値と推定値との比

平均浮遊砂濃度が碎波による上からの乱れの影響を大きく受けるためであると考えられる。

浮遊砂濃度と碎波型式との関係は Kana (1978) によっても調べられている。彼は、幅が約 50 m の碎波帯内の水深約 1 m の地点で観測を行ない、上層、中層のみならず底層での浮遊砂濃度も碎波型式によって異なることを示した。Kana の観測と本観測とでは底層における結果が異なっている。Kana の観測における波高水深比は 0.8 ～ 1.4 であり、本観測における値 (0.3 ～ 0.8) に比べて大きく、上からの乱れが底層に達しやすかったために底層における浮遊砂濃度も碎波型式の影響を受けたのだと思う。ただし、本観測では、底層における浮遊砂濃度と碎波型式との関係が波高水深比によって変化する傾向はみられなかった。

5. Net の岸沖方向浮遊砂量

図—9 は、9 月 16 日 23 時 56 分から 3 分間の生データを示したもので、上段が $z=85$ cm での岸沖方向流速を、中段、下段がそれぞれ $z=105$ cm, $z=35$ cm での浮遊砂濃度を表している。上段における破線は 20 分間の平均流速を示している。底面近傍では入射波の周期にほぼ等しい周期で浮遊砂濃度が変動しているのに対して、中層では、入射波に対応するような浮遊砂濃度の変動はみられない。図—10 は、底面上 40 ～ 120 cm の層において、岸沖方向流速の瞬時値と浮遊砂濃度の瞬時値との積を時間積分することによって求まる net の沖向き浮遊砂量 $\bar{c}\bar{v}$ (縦軸) と、平均浮遊砂濃度と沖向き平均流速の積 $\bar{c} \cdot \bar{v}$ (横軸) とを比較したもので、一点鎖線は $\bar{c}\bar{v} = \bar{c} \cdot \bar{v}$ の関係を表している。図—9 に示されているように、中層では入射波に対応するような浮遊砂濃度の変動はみられないため、底面上 40 ～ 120 cm の層における net の沖向き浮遊砂量は沖向き平均流速と平均浮遊砂濃度との積にほぼ等しかった。

続いて、観測点近傍で離岸流が発生する以前 (9 月 20 日以前) における、電磁流速計の下方 0.35 m から電磁流速計の上方 0.35 m までの層での net の浮遊砂量と断面変化との関係を調べた。電磁流速計の位置は底面上 50 ～ 90 cm であった。Net の岸沖方向浮遊砂量を、岸沖方向流速と濃度の実測値を用いて式 (4) で計算した。

$$\bar{q}_s = 1/1200 \cdot \left(\int_0^{1200(s)} v \int_{z=0.35(m)}^{z=0.95(m)} c dz dt \right) \dots (4)$$

ただし、 $\bar{q}_s$ は net の沖向き浮遊砂量、 v は沖向き正の岸沖方向流速、 ze は電磁流速計の底面からの高さ、 c は濃度、 t は時間である。図—11 は、漂砂量がゼロである -115 m から観測地点までの範囲の変化土量 (縦軸) と、一日平均の中層での net の浮遊砂量 (横軸) とを比較したものである。一つのデータを除いて、土量の減少量は中層での net の沖向き浮遊砂量に比べて小さかった。前浜部 (-115 m ～ 50 m) の平面測量によれば、栈橋に沿った断面は沿岸漂砂の影響をほとんど受けていなかったけれども、前浜部より沖側の領域での沿岸漂砂が断面変化に及ぼす影響度は不明である。よって、沿岸漂砂および底面近傍での岸沖漂砂が断面変化に及ぼす影響度は今後の検討課題としたい。

6. おわりに

本論文では、① 巻き波型碎波の割合が多くなると中層での戻り流れが強くなり、中層での浮遊砂濃度が高くなること、② 中層での net の浮遊砂量が平均の沖向き流速と平均浮遊砂濃度との積にほぼ等しいこと、③ 中層での net の沖向き浮遊砂量が観測地点よりも岸側領域の土量の減少量に比べて大きいことを示した。

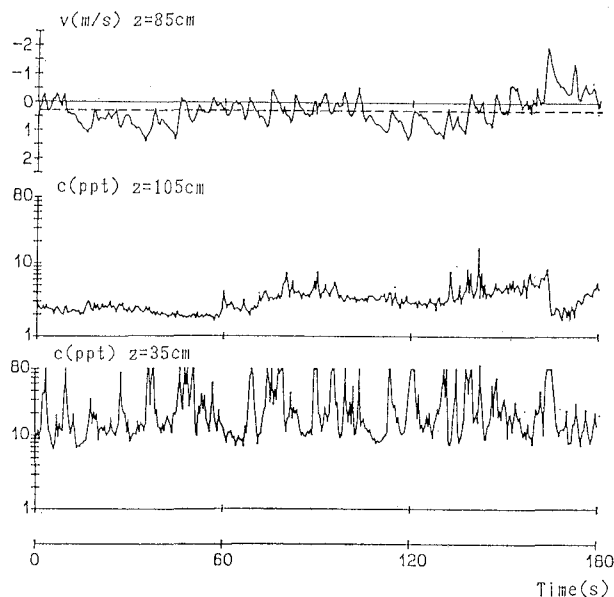


図-9 沖向き流速と浮遊砂濃度の経時変化

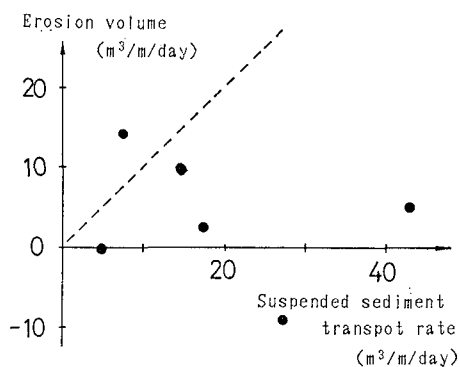
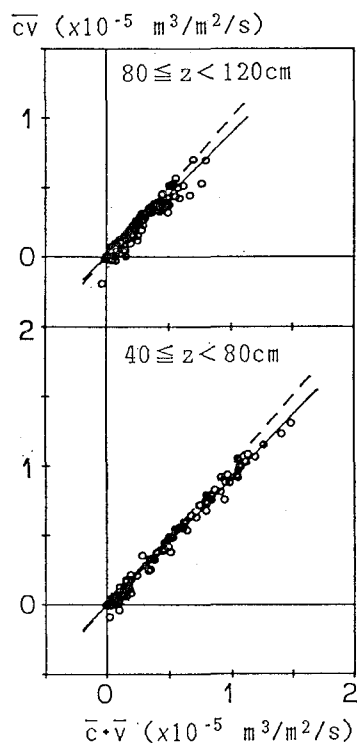


図-11 中層での net の沖向き浮遊砂量と変化土量

最後に、本観測の実施にあたって、目視観測などを手伝って下さった(株)エコーの臼井竜夫氏に、感謝の意を表する。

図-10 $\bar{c} \cdot \bar{v}$ と $\bar{c} \bar{v}$

参考文献

- 岡安章夫・柴山知也・堀川清司 (1987): 碎波帯内定常流速場の鉛直分布に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 31-35.
- 佐藤慎司・福濱方哉・堀川清司 (1987): 斜面上における不規則波の碎波変形と底面流速に関する実験的研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 36-40.
- Kana, T. W. (1978): Surf zone measurement of suspended sediment, Proc. 16th ICCE, pp. 1725-1743.
- Svendsen, I. A. (1984): Mass flux and undertow in a surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 347-365.