

砕波帯内の浮遊砂に関する現地観測

加藤 一正*・田中 則男**

1. はじめに

砕波帯内は、入射波、砕波に伴う強い乱れ、海浜流、長周期波の共存するきわめて複雑な流体運動の場である。最近の流速計の発達（電磁、レーザー・ドップラー流速計）に伴って、現地や実験において流速場の変動時間スケールや内部構造等が徐々に明らかにされつつある。また、砕波帯内は漂砂現象の重要な場でもある。ここでは、底質移動の一形態である浮遊砂は、砕波を伴う入射波によって巻き上げられ、流れによって運ばれると考えられるし、最近注目されている沿岸砂洲、孤状砂洲、カスプ等の沿岸地形の成因を長周期波の存在に求める場合には、長周期波に対応した底質移動が存在しなければならない。すなわち、砕波帯内の底質移動にも流体運動に対応した変動スケール・構造が存在すると考えられるのである。

しかしながら、砂移動についてはある時間内の平均値として測定されていることが多いため、砂移動が複雑な流体運動とどのように関連しているかについて不明な点が多い。この関連性の実態を把握するためには、砕波帯内では掃流砂が卓越しているという指摘^{1),2)}を考慮すると、掃流砂の連続測定をする必要がある。とはいうものの実際に、掃流砂の連続測定が可能な手法、装置はないといえる。

そこで本研究では、砕波帯内の浮遊砂濃度に注目し、現地においてそれと流速変動とを連続同時観測することにより、砕波帯内の砂移動の構造・変動特性と流体運動の関連性について考察を加える。

2. 観測装置・観測概要

(1) 観測装置

① 浮遊砂濃度計……砕波帯内の浮遊砂濃度を連続的に測定するために、10 対の発光受光素子をそれぞれ水平距離 5 cm 間隔で鉛直方向に取り付け、各素子間の光の透過度によって浮遊砂濃度を測定する浮遊砂濃度計を用いた（図-4）。各素子の鉛直間隔

は、1.2 m の範囲で下方ほど密に、上方ほど粗になっている。各素子の応答の時定数は 0.1 s であり、10 対の素子は周期 0.03 s で順次制御された。

浮遊砂濃度計の検定は、現地観測終了後実験室内において持ち帰った現地砂を使用し、水温を現地と同一にして行った。

② 流速計、波高計……2 成分電磁流速計、容量式波高計を使用した。

③ 設置方法……足場パイプを用いて 4 脚のやぐらをつくり、浮遊砂濃度計はやぐらの外側に、また 3 台の電磁流速計はやぐらの内側に鉛直方向に並べてそれぞれ流速の岸沖、鉛直成分が測定できるように取り付けた。浮遊砂濃度計と電磁流速計の水平距離は 1.0 m である。このやぐらをダイバーによって砕波帯に運搬し、浮遊砂濃度計と電磁流速計を結ぶ方向が汀線と平行になるように設置した。やぐらの水面下に相当する部分は 4 本の脚と、やぐらの転倒防止のために陸側につけた斜材だけである。

(2) 観測地点・観測概要

現地観測は、図-1 に示す大洗海岸（茨城県）の防砂小突堤の南約 220 m の水深 0 m (D.L.) 付近で、昭和 57 年 8 月 26、27 日に実施した。対象海岸の底質特性は $d_{50}=0.24$ mm, $S_0=1.34$, $S_k=1.12$ である。

観測日を含む 4 日間の有義波高・周期（阿字ヶ浦、

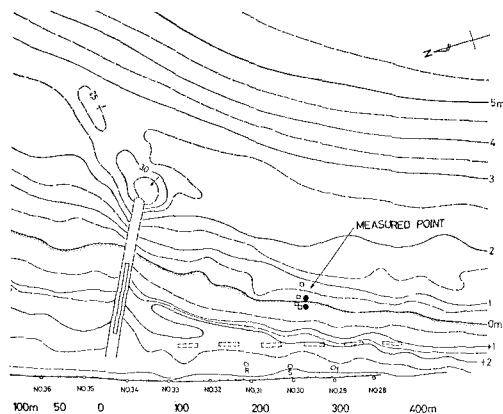


図-1 観測地点周辺の海底地形（大洗海岸）

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 主任研究官

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部長

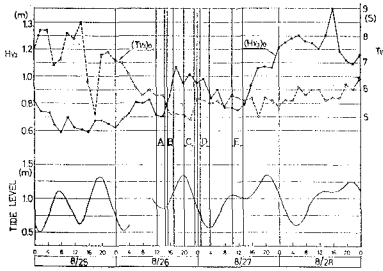


図-2 観測期間中の潮位、波高・周期

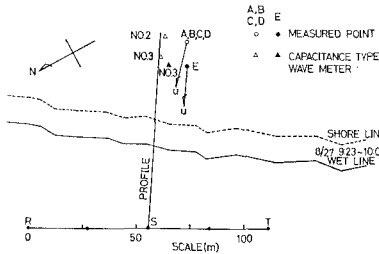


図-3 測定器の配置

-30 m D.L.), 潮位 (大洗港) が 図-2 に示されている. 図中, A~E が観測を実施した時間帯 (以下 A~E と略記する) である. この間の入射波は, $(H_{1/3})_0 = 0.7 \sim 1.1$ m, $(T_{1/3})_0 = 5.0 \sim 6.0$ s, 観測点での波向は汀線に対してほぼ直角であり, 沿岸流はほとんど認められなかった. また, 海水温は $21 \sim 24^\circ\text{C}$ であった.

観測地点の詳細が, 図-3 に示されている. A~D の観測は白ぬき記号で示された地点で, E の観測は黒ぬき記号の地点でおこない, そのときの測定器の設置状況は 図-4 に示すとおりである. 図-5 は, E の測定終了直後に 図-3 に示す測線に沿って測定した海浜断面であり, 観測期間中の最高潮位 (HWL), 最低潮位 (LWL), 各観測時の潮位, 観測地点も合せて示されている.

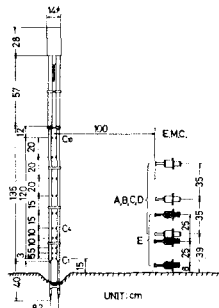


図-4 浮遊砂濃度計と電磁流速計の設置状況

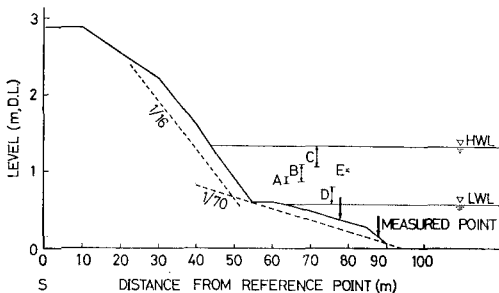


図-5 観測地点の海浜断面

なお, 測定記録を調べた結果, $C_7 \sim C_{10}$ 素子と上方 2 台の電磁流速計はしばしば海面上に露出していたと判断されたので, これらについては解析の対象としなかった.

3. 浮遊砂濃度と潮位の関係

図-6 は, B, D において $C_1 \sim C_3$ (底面から 15~20 cm) で測定した浮遊砂濃度の一例である. これをみると, B では濃度の低いときに C_1 の濃度が負になり, C_3 の濃度がもっとも高くなっている. これは発光受光素子のガラス面が検定時と異なることにより, 出力電圧にバイアスがかかっているためであろう.

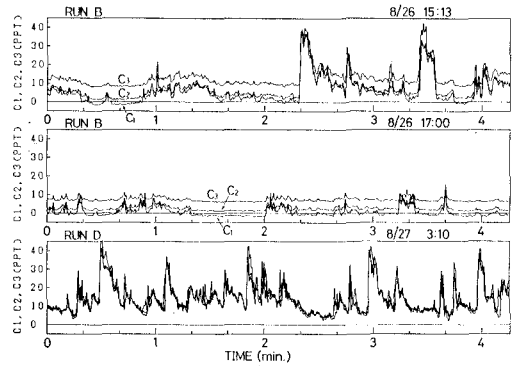


図-6 浮遊砂濃度の変動の一例

図-6 によると, 概略 20 ppt を越える状況が B の前半では 3 回発生し, B の後半では 0 回である. これに対して, D ではきわめて頻繁に現われていることがわかる. そこで, $C_1 \sim C_3$ の濃度が 10 分間に概略 20 ppt を越える頻度を全測定期間について調べ, 図-7 にプロットしてある. その結果, 高濃度の発生頻度の高いのは, 潮位の低い D の時間帯であり, 10 分間の発生頻度が 40 回前後になっている. 一方, 発生頻度のもっとも低いのは, C の前半と E であり, 数回程度になっている. これらの時間帯は潮位が高い. そして, 潮位が中間的な状態にある A, B, C の後半には, 発生頻度が 10 回程度

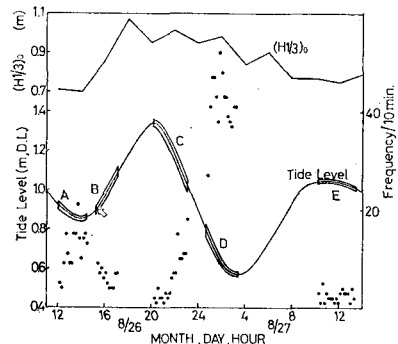


図-7 浮遊砂濃度 20 ppt 以上の発生頻度 (底面より 15~20 cm) と潮位・波高の関係

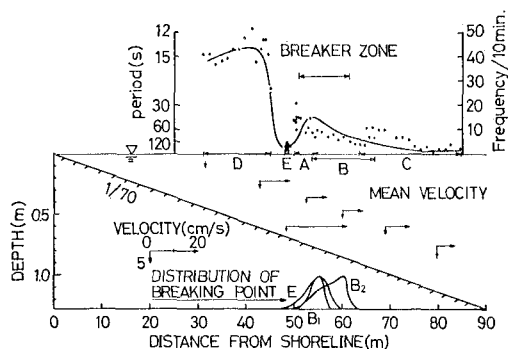


図-8 汀線からの相対位置における 20 ppt 以上の濃度の発生頻度と岸沖平均流速

である。このように、浮遊砂が高濃度になる頻度には、潮位と負の相関があることがわかる。

固定された観測地点における潮位変化は、潮位変化に伴って変化する汀線位置から観測地点までの相対的な距離の変化としてとらえることもできる。図-8 は、このような観点で 20 ppt 以上の浮遊砂濃度の発生頻度をプロットしたものである。このときの海底勾配としては、図-5 に破線で示す $1/70$ とした。また高濃度浮遊砂の発生頻度の岸沖分布を、以下のことを考慮して実線で示した。すなわち、図-7 において沖波有義波高は、B, D, E ではほぼ 0.9 m であるのに対し、A では 0.7 m, C では 1.1 m となっている。このことは、入射波は A ではより岸側で、C ではより沖側で砕波することをそれぞれ意味している。したがって、A, C の高濃度発生位置を B, D, E と同列で見るとするためには、A を沖側に、C を岸側にそれぞれシフトさせる必要がある。なお、図-8 には砕波点位置の分布(下段)、岸沖平均流速が示されている。

図-8 によると、高濃度発生頻度の岸沖分布には 2 つのピークが存在し、岸寄りのピーク(D)は高濃度発生平均の周期が 12~16 s 程度になっている。同時に測定された No. 2 波高計の波形データをもとに、17 分毎にゼロダウンクロス法で計算した有義波周期は $T_{1/3}=14.2 \pm 1.6$ s となった。すなわち、波の周期とほぼ同じ周期で高濃度が発生していることになる。D の時間帯が夜間であったために観測点周辺の状況が観察できなかったけれども、水深が 50 cm 前後であったことから最終砕波が生じていたものと考えられる。一方沖側のピークは、ほぼ砕波帯の位置に対応しているが、高濃度の発生周期は 40 秒程度以上であり、明らかに入射波の周期よりは長い。

4. 砕波帯の浮遊砂濃度の長周期変動

砕波帯の浮遊砂濃度が高くなる周期が入射波の周期より長くなることは、これまでも報告されており^{3),4)},

長周期波との関連性が指摘されている。本節では、この長周期変動について考察を加える。

図-9 は、B の時間帯の岸沖流速と C_1 の浮遊砂濃度をクロススペクトル解析⁹⁾した結果である。ただし、データは 0.1 s 間隔で AD 変換した後 1 秒平均して $\Delta t=1.0$ s、データ数 2048 とし、NH=5 (三角フィルターの繰返し回数)とした。また、スペクトル

密度は流速について示したものであり、濃度については同図におさまるように前もって係数 (ppt/50) をかけてある。図-9 によると、流速、濃度ともに低周波数領域(周期 67 s, 125 s)にきわだったピークが存在し、両者のコヒーレンスも高い。さらに、これらのピーク周波数における両者の位相差が -180° に近く、お互に逆位相で変動していることを示している。すなわち、浮遊砂濃度が高くなるのは、流速が負(沖向き)になっているときである。しかしながら、入射波の周波数に相当する付近 (0.1 Hz) に浮遊砂濃度のピークは認められない。

図-9 の解析時間帯にほぼ相当するときに、入射波一波毎に砕波点位置、砕波形式を目視観測しデータレコーダに音声入力した。

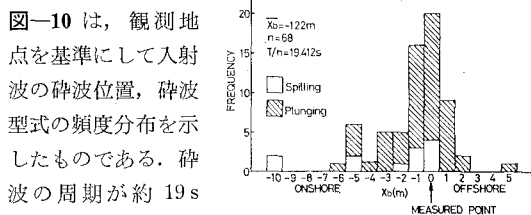


図-10 観測点を基準にした砕波位置、砕波形式の頻度分布

していると考えられる。その分だけ、Spilling 型の砕波の割合が少ないのであろう。図によると、観測地点は砕波帯の中にあり砕波発生頻度が最大である。

図-11 は記録の一例であり、上段に岸沖流速、下段に C_1 の浮遊砂濃度、中段に砕波点の位置が示されている。砕波点位置は観測点を基準にしており、沖測が白ぬき矢印、岸側が黒矢印であり、添数字は観測点からの距離 (m) である。また、すべて Plunging 型砕波と判断された。この図によると、浮遊砂濃度が 20 ppt を越えるときは、必ず観測点の沖側で砕波が生じている。そして、20~60 s の間を除いて、高濃度になるときの濃度変

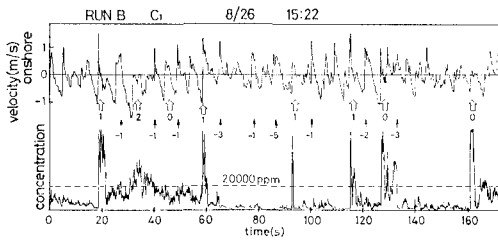


図-11 浮遊砂濃度と砕波点位置の関係

化は急激に増減している。このことから次のことが言えよう。観測点の沖側で砕波したとき巻き上げられた多量の浮遊砂は、前面に投げ出されると同時に波の峰通過時の岸向き流れによって岸方向に大きな浮遊砂雲状になって運ばれる。そして続いて生じる沖向きの流れによって沖方向へ運ばれるのだが、このとき濃度が急激に減少するのは、この間に浮遊砂の拡散が十分進行しないためと考えられる。

一方、20～60 s の間の濃度変化は、徐々に増減するものである。この間、砕波は観測点の岸沖側で交互に生じていること、および 30 s 付近で沖向き最大流速が生じていることが他の時間帯と異なる。したがって、観測点の岸側の砕波によって生じた高濃度の浮遊砂が拡散しながら観測点に運ばれ、繰り返し発生する砕波によって長時間浮遊状態が継続するものと考えられる。

浮遊砂濃度が長周期変動をしており、かつ砕波状況にも関連が深いという2つの事実は、長周期波の沖向き流れと入射波の干渉によって浮遊砂濃度が高くなることを示唆している。

5. Net の浮遊砂量

ある断面を通過する Net の浮遊砂量は、浮遊砂が流体と同じように移動すると仮定して

$$\int_0^t \int_{-h}^{\eta} c \cdot u \, dz \cdot dt \dots\dots\dots (1)$$

で評価される。今回の測定では、鉛直方向の測定に限りがあるので、以下においては時間積分だけを考慮する。

まず最初に、岸沖方向および鉛直方向の平均流速について示す。流速計の設置位置は、底面から 39 cm (A～D)、8 cm (E) である (図-4 参照)。図-12 は、各測定時の岸沖流速の 5 分間平均流速の経時変化を示している。A、B、C の時間帯の平均流速はほぼ -10 cm/s で沖向きである。D の時間帯は、前半に -15 cm/s 程度であるが、後半において 0 cm/s 程度になっている。D の後半は、潮位が最も低く流速計が海面上に露出することによるノイズが含まれる状態があったので、これを経ずして平均流速を計算してある。E の時間帯では、最初に -40 cm/s 程度で沖向き流速であるのが、徐々に減少し後半には -25 cm/s 程度になる。

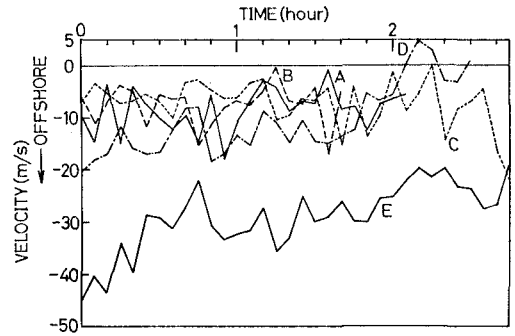


図-12 岸沖方向 5 分間平均流速の経時変化

これらの平均流速を、鉛直平均流速とともに、汀線から測定点までの相対位置を考慮して 図-8 に示してある。データ数が少ないので、砕波帯内の平均流速場の全体構造を示しているとは言い難い。しかし、砕波帯内の流速場について灘岡ら⁹⁾が実験水槽でレーザー・ドップラー流速計を用いて測定した結果と比較すると、入射波のトラフレベル以下の平均流速は沖向きであるという特徴は認められる。ただし、今回の鉛直流はすべての点において下向きとなっている。

Net の浮遊砂量の計算には、気泡の混入の影響をほとんど受けていないと判断された C_0 の濃度値を用いる。ただし、図-6 に見られるように、測定された浮遊砂濃度にはバイアスがかかった状態になっていると考えられたので、ここでは各観測時間帯の最小濃度が 0 ppt になるように全体をシフトさせる補正をおこなった。

図-13 は、式 (1) の時間積分を $\Delta t=0.5$ s (0.1 s 間隔で AD 変換した後 0.5 s で平均した値) のデータを用いておこなった、浮遊砂 Flux の累積値を示したものであり、縦軸は沿岸方向 1 m、鉛直方向 0.1 m の長方形断面を通過するとしたときの重量である。この場合も平均流速の計算と同じように、ノイズを除いて計算した。最終的な浮遊砂の累積 Flux に関してはすべて沖向きであり、C、B、E、A、D の順に多くなる。このうち、D の場合は後半において沖向きの累積 Flux が減少していることが認められる。

図中点線は、D について 5 分間の平均濃度と平均流

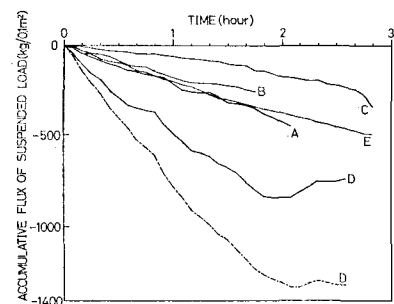


図-13 各観測時間帯の浮遊砂累積 Flux の経時変化

速から計算した累積 Flux であり、実線で示される値より冲向きの累積 Flux が多くなっている。このことは、流速が岸向きとき浮遊砂濃度が高いことを意味している。同様な傾向は A にもあったが、両者の累積 Flux の差は 10% 程度と少ない。それ以外については、計算方法の違いによる差はほとんどないという結果になった。

単位時間当りの Net の浮遊砂量は、図-13 の曲線の傾きに相当する。計算された 1 分間当りのそれらを、汀線から観測点までの相対距離を考慮に入れて、図-14 に黒い矢印で示されている。また、同図の上段には C_s の濃度で計算した 10 分間平均濃度がプロットされている。この図によると、Net の浮遊砂量は汀線が一番近いところを除いてすべて冲向きである。沖に向う Net の浮遊砂量だけを考えると、観測期間中に相当の地形変化が生じたことになるのだが、実際にはそのような変化は生じていない。このことは、観測点以外において岸向きの砂移動があることを意味している。

そこで岸向きの Net の漂砂量について考察する。まず、砕波帯の沖側では、実験水路における水平流速変化の非線型性 (skewness) の増大および底面上に置かれたトレーサーが岸向きに移動する⁶⁾ということから、底質は掃流状態で岸向きに移動していると考えられる。

一方、砕波帯内においては、底面近傍の水平流速の非線型性が岸に向って減少することや、その平均流速が冲向きであること、さらには底面上に置かれたトレーサーが沖へ移動する⁶⁾ことから、岸向きの掃流砂の存在は考えにくい。むしろ海面に近いところで、岸向きの Net の浮遊砂が存在する可能性が高い。というのは、現地において砕波帯内の浮遊砂の表層濃度が波の峰通過時に高くなる⁷⁾ことや、実験水路での詳細な流速場の測定から波のトラフレベル以上のところの平均流速が岸向きであると考えられる⁶⁾からである。図-14 において、観測点が最も海面に近づくところで (この場合は、最終砕波点後である)、岸向きの Net の浮遊砂量が存在することも

この機構の存在を示唆している。このように推察される底質の移動パターンを 図-14 に白ぬき矢印で示している。この表示にあたっては、最終砕波も考慮に入れてある。

なお、図-14 の上段に示した平均濃度が、砕波帯を中心に岸沖で非対称になっている。これは、砕波帯で浮遊状態になった底質が冲向き平均流速で沖方向へ運ばれたためと考えられる。また、平均濃度は砕波帯で 7~8 ppt、最終砕波点より岸側で 15 ppt となっており、これらの値は直接サンプリングして測定した浮遊砂濃度⁷⁾とほぼ一致している。

6. おわりに

以上をとりまとめると以下ようになる。砕波帯内の浮遊砂濃度は、砕波帯と最終砕波点より岸側で高濃度になる。このうち、最終砕波点付近の濃度変化は入射波の周期と関係がある。砕波帯のそれは、1~2 分程度の長周期変動をしており、流体運動の長周期成分の冲向き流れと入射波の砕波状況との関連性が認められた。

砕波帯内の Net の浮遊砂量は冲向きである。これに対する底質の補償移動として、砕波帯の沖側では岸に向う掃流砂、岸側では表面近くの岸向きの浮遊砂移動が考えられた。

今回の観測は固定された一点で実施された。さらに詳細に検討するためには、同時に砕波帯内の複数点で測定する必要がある。また沿岸流の効果、底質が浮遊状態になる機構については、今後の調査課題としたい。

最後にあたり、本観測の実施に際しては、東京工業大学灘岡和夫氏、当所漂砂研究室諸氏、海岸研究会の皆様の協力を得たことを記し謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Sawaragi, T. and I. Deguchi: On-offshore sediment transport rate in the surf zone, Proc. of 17th Conf. on Coastal Eng., pp. 1195~1214, 1980.
- 2) Komar, P. D.: Beach Processes and Sedimentation, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 429 p., 1976.
- 3) Brenninkmeyer, B. M.: Mode and Period Sand transport in the surf zone, Proc. of 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 812~827, 1974.
- 4) Wright, L. D., R. T. Guza and A. D. Short: Dynamics of a high-energy dissipative surf zone, Marine Geology, Vol. 45, pp. 41~62, 1982.
- 5) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 300 p., 1977.
- 6) 灘岡和夫・近藤隆道・田中則男: レーザー・ドップラー流速計による砕波帯内の流速場の構造の解明, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp. 49~106, 1982.
- 7) 田中則男・加藤一正・灘岡和夫: 砕波帯内における浮遊砂濃度分布——2, 3 の興味ある観測例について——, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 182~186, 1979.

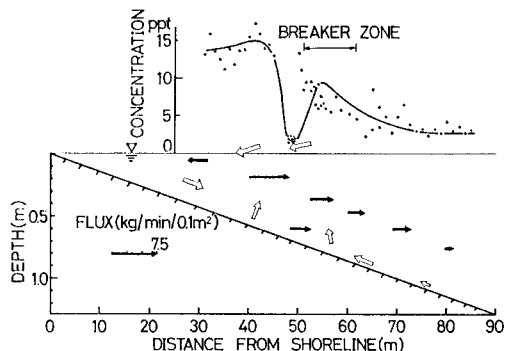


図-14 Net の浮遊砂量分布と平均濃度の岸沖分布