

LDA を用いた砕波帯内の流速場に関する実験的研究

灘 岡 和 夫*, 近 藤 隆 道**, 田 中 則 男***

1. はじめに

海浜における漂砂現象の大半は、砕波帯内部で生じている。それゆえ、海浜過程を理解するには砕波帯内の諸々の水理現象を明らかにする必要があるが、砂移動の直接の外力となる砕波帯内の流速場については、その重要性にもかかわらずその実態の解明はあまり進んでいない。その主たる原因は、これまで砕波帯内の流速場を乱れも含めて精度よく測定し得る測定装置が存在しなかったことにある。たとえば、hot-film 流速計を使用する試みが磯部ら¹⁾や渡辺ら²⁾あるいは酒井ら³⁾によって報告されているが、hot-film 流速計を波動場に用いる場合には、出力信号を流速の水平成分と垂直成分に精度よく分解して表わすことができないので、その意味で大きな制約を受ける。

ここでは、最近新しい流速計として注目を集めているレーザー・ドップラー流速計 (LDA: Laser Doppler Anemometry) を用いて砕波帯内の流速場を測定し、その実態を明らかにすることを試みた。この流速計によれば、hot-film 流速計に関する上述の制約がなくなる上、プローブの作りだす後流の影響や、プローブの固有振動の影響といった問題を全く考えなくてすむ。

砕波帯内の流速場を特徴づけているものには、bore の下部に存在する強い乱れとそれに伴う気泡の存在、それに流速変動の基本波形自体が強い非対称性を有することなどが考えられるが、これらは砂移動の問題に関して、その鉛直拡散や岸・沖漂砂などと密接に結びついている。本論文では、このような砕波帯内の流速場の特殊性を念頭に置き、平均流速分布以外に、乱れ強度、気泡混入量、流速変動の skewness 等の空間分布特性等について検討した。解析は現在進行中のものもあるが、ここではこれまで得られた結果を報告する。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験は、長さ 45 m, 幅 50 cm, 深さ 1 m の一部両面

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室 研究員
 ** 同 上
 *** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室長

ガラス張りの実験区間を有する水路に、勾配 1/20 の木製の斜面を設置して行った。造波機から静水時の汀線までの距離は 34 m で、一様水深部の水深は 70 cm とした。

流速測定に使用した LDA は DISA 社製の 1 カラー前方散乱システムで、光学系 (55X 型)・フォトマルチプライヤー (55X08 型)・ドップラー周波数トラッカー (55N20 型)、周波数シフター (55N10 型)、それにレーザー・ガン (15 mW, He-Ne ガスレーザー, NEC 製) から構成されている。砕波帯内のように気泡を含む流れを LDA で測定すると、ビーム交差点および交差点より手前のレーザー・ビームを気泡が通過してビームを遮断するときに出力の drop-out が生じる。drop-out が生じると、ここで用いた信号処理系ではその期間その直前の値がホールドされて出力されるようになっている。また流速信号とは別に、このようなホールド状態にあるかどうかを示す信号 (drop-out 信号) が出力されているので、この信号を解析することにより、逆に気泡濃度に関する情報を得ることができる。

表面波形の測定には 2 台の容量式波高計を用い、流速測定点の直上と、一様水深部での波形記録をとった。これらの波形データは、上述の流速信号・drop-out 信号とともにデータレコーダーに同時に記録した後、0.02 s のサンプリング間隔で AD 変換して処理した。

(2) 実験方法

実験には表-1 に示すように 6 種類の波を用いた。同表から分るように、今回の実験では換算沖波々高 H_0 をほぼ同一にして沖波々形勾配 H_0/L_0 を変化させるようにしている。砕波点は目視より決定したが、その位置は

表-1 実験ケース

ケース名	周期 T (sec)	換算沖波々高 H_0 (cm)	沖波々形勾配 H_0/L_0	砕波水深 h_b (cm)	砕波高 H_b (cm)	砕波形式
CASE 1	1.32	22.7	0.0833	30.5	20.1	spilling
CASE 2	1.51	22.5	0.0635	28.4	21.2	同 上
CASE 3	1.70	21.4	0.0475	24.8	22.6	spilling + plunging
CASE 4	1.91	21.2	0.0372	25.7	23.7	同 上
CASE 5	2.34	22.8	0.0268	24.8	23.5	plunging
CASE 6	2.99	19.1	0.0137	22.1	25.5	同 上

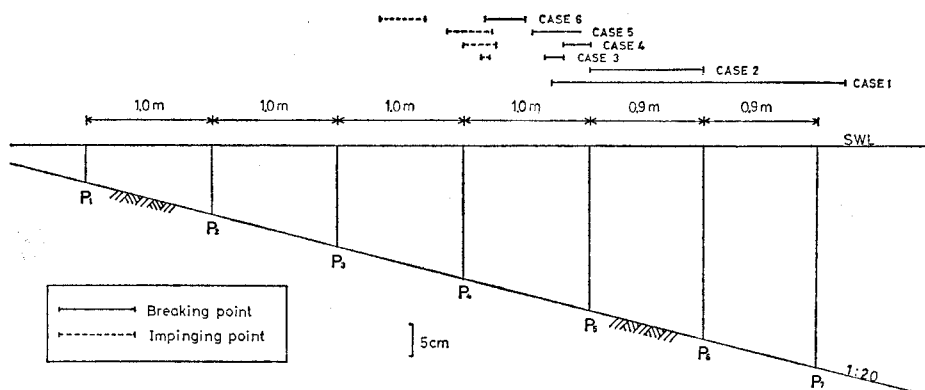


図-1 測定点の位置と各ケースでの碎波位置

spilling 型の碎波の場合は crest 付近に気泡が生じ始める点として, plunging 型の場合は, crest 前面が鉛直になる点として定めた. 表-1 中, spilling+plunging とあるのは両者の中間の碎波型式であったことを意味する.

測定は 図-1 に $P_1 \sim P_7$ で示す 7 地点の水路中央部で行われた. 同図には, 各ケースの碎波点と突っ込み点 (impinging point) の位置も示してある. これらの点の位置は, 水路内に生じる長周期波によって周期的に移動するため, 同図ではある範囲で示してある. 表-1 で示した 6 ケースのうち, CASE 1 と 5 については, $P_1 \sim P_7$ の各測線で鉛直方向に 10~20 ポイントで測定を行った. 他のケースでは, 底面上の 0.5 cm のポイントだけを測定対象とした.

3. 実験結果および考察

(1) 平均流速分布

図-2 は, CASE 1 (spilling) と CASE 5 (plunging) の水平方向の平均流速の空間分布を表面波形の平均 crest レベルと平均 trough レベルとともに示したものである. ここで示す平均流速の値は, 各ケースの 70 波分に相当するデータを平均して求めたものである. ただし, trough

レベルより上の測点は, 測定時間の何割かが空中に位置することになるが, この場合には, 空中での流速値をゼロとして平均操作を行っている. また $P_1 \sim P_4$ の測線では, trough レベルより上での測定結果がないが, これは, これらの点では連行空気の濃度が高すぎ, 測定が不可能であったためである.

図-2 を見ると, 平均流速は trough レベルより下では全測定点で冲向きになり, 逆に trough レベルより上ではほとんどの測点で岸向きになることが分かる. ここで得られる平均流速は, 通常 Lagrange 流の平均流速として定義される質量輸送速度と異なり, Euler 流の平均流速 $\bar{u}$ であるが, Stokes 波の場合にはこれは次式で表わせる⁴⁾.

$$\bar{u} = \begin{cases} = \frac{H^2 \sigma \coth kh}{8h} & \left(-\frac{H}{2} < z < \frac{H}{2} \right) \\ = 0 & \left(z < -\frac{H}{2} \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに, H ; 波高, σ ; 角周波数, k ; 波数, h ; 水深, z ; 平均水位から上方にとった鉛直座標. すなわち, trough レベルでゼロから波の進行方向への一定の流速

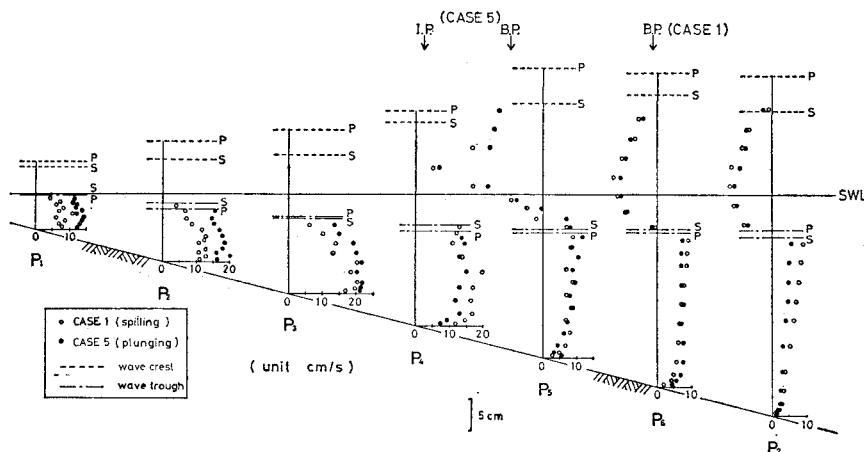


図-2 水平方向平均流速の分布

値に階段的に変化する分布型になる。このことは、図一2で見られる trough レベル付近で急変する速度分布型とよく符合している。しかし、砕波帯内の測点 ($P_1 \sim P_3$) ではこれとは異なり、上層の速度分布型がかなり岸向きにひきずられた型となる。このことは、砕波帯内では、水表面付近で運動量の鉛直混合が盛んに行われていることを示している。

trough レベル上の岸向きの流れは、岸に近づくにつれてその大きさを増し、 P_3 地点で最も大きくなっている。この地点を各々のケースの砕波点の平均位置 (図中 B.P. と記してある) と比較してみると、CASE 5 (plunging) ではほぼ砕波点に近くなっているが、CASE 1 (spilling) では砕波点からかなり岸側にズレていることが分る。 P_3 からさらに岸側では測定結果がないので明らかではないが、trough レベル下の沖向き流速の状況から推定すると、相当大的な岸向き流れが存在しているものと思われる。

一方、沖向きの流れは、その最大値は砕波帯内の P_3 地点に現われており、20 cm/s 以上にも達する値 ($\sqrt{gh_0}$ の 0.1~0.15 倍) になっている。このような沖向き流れは砕波点に近づくにつれて急激にその大きさを減ずるものの依然として存在し、砕波帯外の P_7 地点でも数 cm/s の沖向き流れが存在している。このことは、hot-film 流速計による底面近傍の流速測定結果から、底面近傍で砕波点に向かい、砕波点近くで上昇して上層で砕波点から遠ざかるような定常的な2つの循環流が存在するものとした渡辺ら²⁾の推定結果と異なるものである。

ただし、図一3に示す鉛直方向平均流速 (上向きが正) の空間分布を見ると、砕波帯内では、砕波点近くの P_3 、

P_4 地点の上層では上昇流が生じており、逆に、岸近くの P_1 、 P_2 地点では下降流が存在している。このことは上述の渡辺らの推定結果と一致している。

(2) 流速変動の skewness について

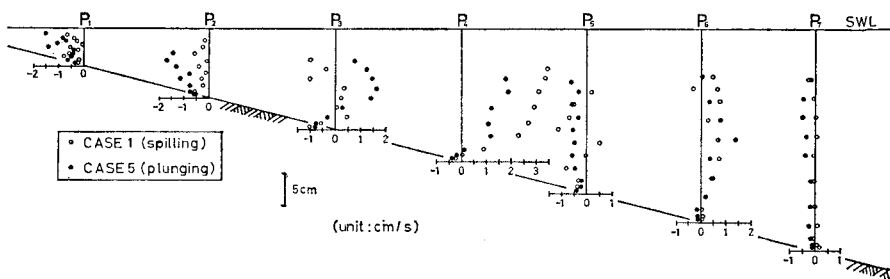
流速変動の非対称性は漂砂現象、特に岸沖漂砂に密接に関連している。例えば著者ら³⁾は、螢光砂を用いた現地観測の結果から、砂粒子の波の進行方向への平均的な移動速度が流速変動の非対称性を表わすパラメーターの一つである skewness の増大に対応して増加することを示している。

そこでここでは水平方向流速変動 (流速記録から平均流速をさし引いたもの) の skewness を算定し、その空間分布について調べてみることにする。図一4は沖向きの流速を正にとって計算したときの skewness の算定結果を示したものである。これを見ると、skewness の鉛直分布型は、砕波帯内と外ではかなり異なっていることが分る。すなわち、砕波帯外では鉛直方向にほぼ一様な分布型を示すが、砕波帯内の P_3 以浅の測点では、底層では比較的 skewness の値は小さいのに対し、上層に行くにつれて skewness は急激に増大する。このような特徴を示す点は上述の平均流速分布型が岸側に引きずられる部分とほぼ対応している。

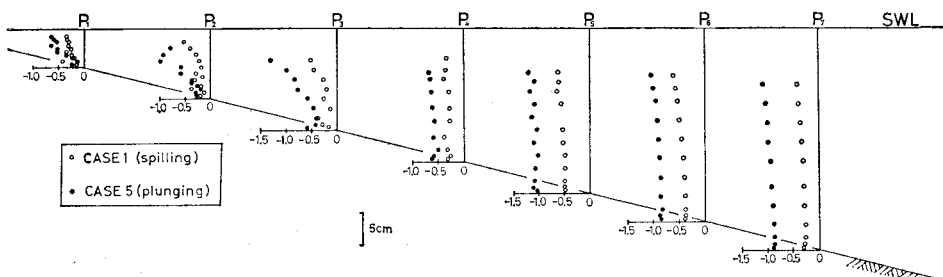
また、全体の傾向として見ると、CASE 5 の方が CASE 1 に比べてかなり skewness が大きくなっていることが分るが、このことは後の (4) で詳しく検討することにする。

(3) 連行空気および乱れ強度

2. で述べたように、流体内部に気泡が存在する場合レーザー・ビームを気泡が遮断するとき出力はホールド状



図一3 鉛直方向平均流速の分布



図一4 流速変動の skewness の分布

態となり、その間 drop-out 信号が出力される。この drop-out 信号の全測定時間に対する割合は、気泡の濃度に直接関連しているものと考えられる。図-5 はこの drop-out 時間の割合 (drop-out rate) の空間分布を示したものである。これから、drop-out rate は、底面近くではほぼゼロであるが上層にいくにつれて急激に増加していることが分かる。

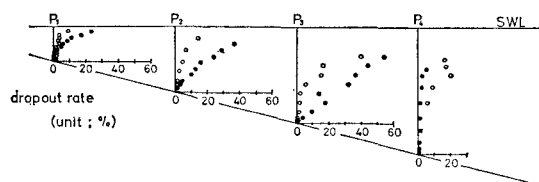


図-5 drop-out rate の分布

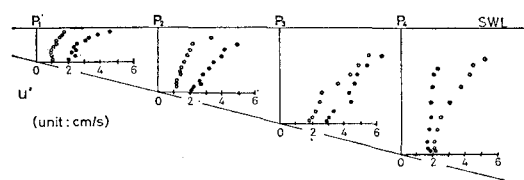


図-6 水平方向乱れ強度 u' の分布

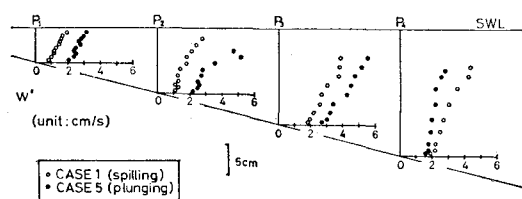


図-7 鉛直方向乱れ強度 w' の分布

次に乱れ強度分布について述べる。この場合には乱れの定義が問題になるが、流速測定結果を見ると波動運動に伴う流速変動の基本波形自体が波ごとにかなり変動することが分かったため、従来良く用いられていた波の各位相でのアンサンブル平均をとる方法はこの場合には用いることができない。そこで、ここでは米山ら⁹⁾にならって、出力信号を 10~100 Hz の Band Pass Filter に通して得られた信号を乱れと定義した。図-6, 7 は、このようにして算出された乱れ強度の水平成分 u' と垂直成分 w' の分布を示したものである。これから分るように、乱れ強度も上述の drop-out rate の分布と同様に底面近傍で小さく、上層にいくにつれて急激に増大している。また、上層での乱れ強度の岸・沖方向の分布の仕方を見ても、その大小関係は drop-out rate におけるそれと良い一致を示すことが分かる。

このように、碎波帯内においては上層の bore に伴う乱れが支配的であって、その分布状況は drop-out rate とかなり類似している。このことから逆に、drop-out rate の鉛直分布状況を知ることによって、碎波あるいは bore に伴って発生する乱れが支配的な領域を底面近傍で発生

した乱れが支配的な領域と区別して表わすことができる。図-8 は drop-out rate の値が最上点の値の半分になる点の trough レベルから測った深さ (以下、半値水深と呼ぶ) をその点の波高に対してプロットしたものである。図中の各ポイントに付されている数字は測点番号を示しているが、impinging point の前後にあたる CASE 5 の P_3 と P_4 のポイントを除けば、ほぼ同一の直線にのってることが分かる。ケース数が少ないので明確には結論づけられないが、この結果を見る限りでは、各点の半値水深はその点の波高の 3 割程度になるようである。

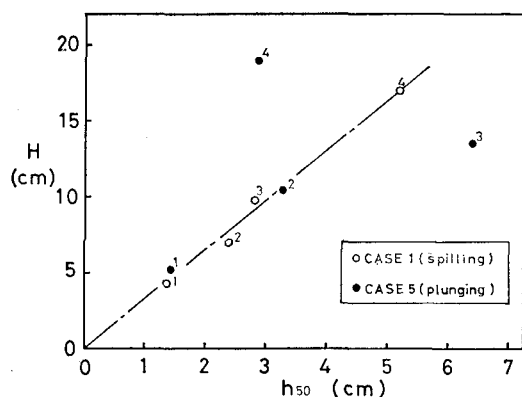


図-8 drop-out rate の半値水深 h_{50} と波高 H の関係

(4) 底面近傍の平均流速、skewness と沖波々形勾配の関係について

図-9 は、底面上 0.5 cm の位置での平均流速 (冲向きが正) の岸・沖方向分布を全ケースについてプロットしたものである。ただし、図の横軸には各点の水深を碎波水深 h_b で無次元化したものを用いており、また縦軸は平均流速 $\bar{U}$ を碎波点での長波の波速 $\sqrt{gh_b}$ で無次元化して表わしている。同図によれば、底面平均流速の岸・

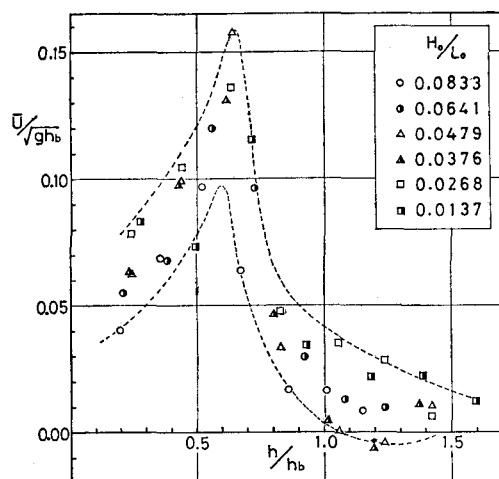


図-9 底面近傍 ($z=0.5$ cm) の平均流速の岸・沖分布

沖方向分布はきわめて特徴的な形状を示すことが分る。すなわち、砕波帯内ではどのケースも全域にわたって沖向きの流れを示し、しかも $h/h_b \approx 0.6$ 付近にきわめて明瞭なピークが現われる。このようなピークが現われる原因は明らかではないが、目視によるとこの $h/h_b \approx 0.6$ 付近を境にして砕波直後の遷移領域から bore の形成が明瞭になる領域に移るようであった。一方、砕波帯外では CASE 3, 4 のうちの 1, 2 点がわずかに岸向きの流速を示す他は、すべて沖向きの流れとなる。しかし、この場合の流速値は砕波帯内に比べてかなり小さくなっている。

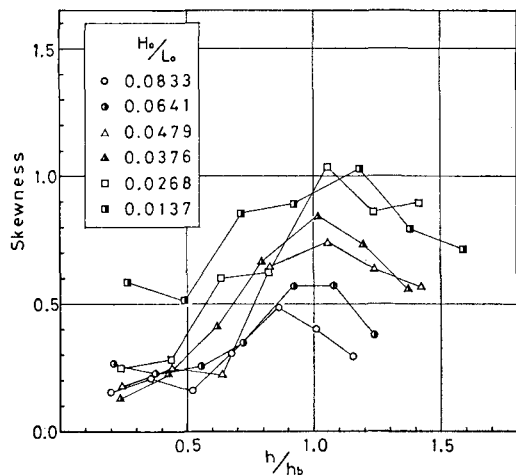


図-10 底面近傍 ($z=0.5$ cm) の skewness の岸・沖分布

次に、図-10 には (平均流速をさし引いた後の) 水平流速変動の skewness の分布が各ケースについて示されている。これから分るように、この場合には平均流速とは異なってそのピークがほぼ砕波点付近に現われる。また、沖波々形勾配 H_0/L_0 の効果が明瞭に現われ、 H_0/L_0 が小さくなるほど skewness が全体的に大きくなることが分かる。

前にも述べたように、砂粒子の運動には流速変動の skewness が密接に関連するが、掃流砂が卓越する場合には skewness の増大に伴って砂粒子はより岸向きに移動するようになる。一方、底面平均流速は、skewness のこのような岸向きの効果に対抗して砂粒子を沖向きに輸送する効果をもつ。このような相反する効果を有する二つの外力要因 (より正確に言うと重力効果等も考える必要があるが) のもとでの砂粒子は、二つの要因がちょうどバランスする点で静止することが期待される。そして、底面平均流速は砕波帯内で大きく、逆に skewness は砕波帯外で相対的に大きな値を示すことや、底面平均流速のピーク位置が $h/h_b \approx 0.6$ 付近であるのに対し skewness のピークは $h/h_b \approx 1$ 付近となることから上述のバランス点は、砕波点付近から $h/h_b \approx 0.6$ 付近までの範囲に存在し、他の地点にある砂粒子はこのバランス点に向って収

束してくることが予想される。そこで、このことを確認するために、直径 2.5 mm、比重 2.5 のガラス玉を砕波帯の内外に数個投入し、その運動を観察してみた。その結果、各ケースとも砕波点付近ないしはややその岸側に全てのガラス玉が集まることが確認され、このことから上述の予想が正しかったことが示された。

また、沖波々形勾配 H_0/L_0 の減少に伴って skewness が全体的に増加するという事実は、例えば、堀川ら⁷⁾ の海浜変形のタイプ分けの議論に関連して言えば、ある特定の粒径の砂に対して H_0/L_0 を減少していくと、沖向きの砂移動が卓越する Type I から岸向きの砂移動が卓越するタイプ III に変化していくという事柄と密接に関連しているものと考えられる。ただし、今回の実験は、沖波々高や海底勾配を一定にして行われたものなので、より明確な結論を出すにはこれらの効果も加えたさらに広範な条件下での実験データを蓄積していく必要があると考えている。

4. おわりに

本論文では、レーザー・ドップラー流速計を用いて、これまで精度良い計測が行えなかった砕波帯内の流速場についての二次元実験を行い、平均流速分布、流速変動の skewness、乱れ強度および気泡混入量に関連する drop-out rate の空間分布について検討した。また、底面近傍の平均流速や skewness の岸・沖方向分布およびそれらの沖波々形勾配との関連から岸・沖方向の砂移動形態に関する理解を深めることができた。

なお、ここでは報告できなかったが、乱れや drop-out rate の波の各位相ごとの分布に関する検討や、Dean の stream function の計算値との比較なども行い、いくつかの興味ある結果を得ている。これらについては近いうちに別の機会に報告する予定である。

参考文献

- 磯部雅彦・福田直利・堀川清司：砕波帯における流速場に関する二次元実験、第26回海岸工学講演会論文集、pp. 41~45, 1979.
- 渡辺 晃・磯部雅彦・野沢是幸・堀川清司：斜面上で砕波する波の底面流速に関する実験的研究、第27回海岸工学講演会論文集、pp. 40~44, 1980.
- 酒井哲郎・稲田義和：斜面上の砕波による乱れの測定、第35回年次講演会講演概要集、II, pp. 83~84, 1980.
- 土屋義人・岡村 隆・安田孝志・山下隆男：定形進行波の質量輸送、第26回海岸工学講演会論文集、pp. 36~40, 1979.
- 瀬岡和夫・田中則男・加藤一正：螢光砂を用いた局所的砂移動と移動量の観測、第28回海岸工学講演会論文集、1981.
- 米山 晋・沢本正樹・山下俊彦：波動下での砂鏈上の乱れ分布と浮遊砂の拡散、第35回年次講演会講演概要集、pp. 85~86, 1980.
- 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三：波による海浜変形に関する一考察、第20回海岸工学講演会論文集、pp. 357~363, 1973.