

斜降渦による底質浮遊と流体運動に関する現地観測

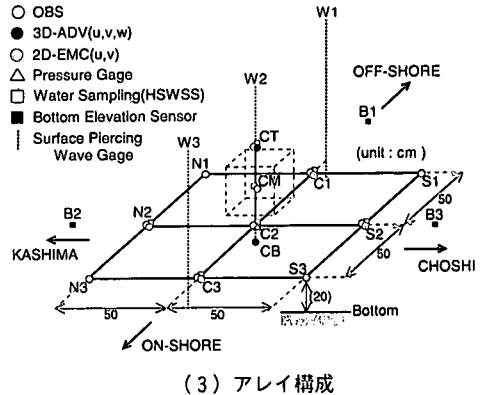
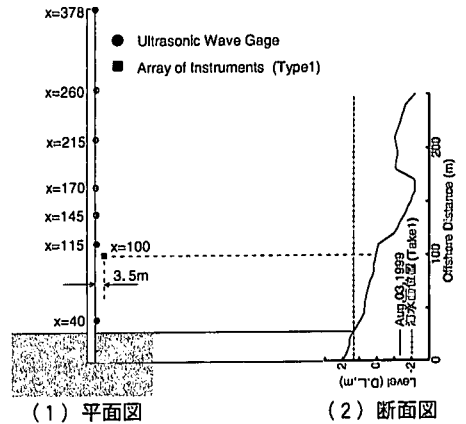
岡 安 章 夫*・鈴 木 崇 之**・片 山 裕 之***

1. はじめに

砕波帯内では砕波による大規模渦やこれによる乱れにより底質が浮遊し、地形変化に大きな影響を与えると考えられる。灘岡ら (1987) は、2つの2成分電磁流速計と濁度計により、砕波帯内での斜降渦によると考えられる3次元流体運動と、これによる底質巻き上げについて現地観測を行った。

濃度計を用いて浮遊砂量を定量的に評価するためには、浮遊した底質と共に気泡や細粒分が存在するため、これらによる影響を補正する必要がある (例えば佐藤ら, 1989)。これらの影響を検討するために、片山ら (1999) は濃度の変動時間よりも短い時間間隔での海水サンプリングによる浮遊砂濃度の時系列データと濃度計による浮遊砂濃度との比較を行っている。また、採取した浮遊砂の試料より、浮遊砂中に含まれる底質の粒度組成や平均粒径の時系列変化について検討を行った。しかし、斜降渦を含めた砕波による大規模3次元流体運動による底質移動を評価するためには、底質巻き上げの定量的把握と共に、3次元濃度分布や砕波による流体運動とこれらの時空間的変動特性との関連を検討する必要がある。

そこで、本研究では、現地観測において斜降渦と考えられる流体運動による浮遊砂の濃度の時系列データを光学式濃度計とともに毎秒の多測点同時連続採水により取得し、まず複数同時計測における浮遊砂濃度計の信頼性について検討した。また、連続採水で採取した浮遊砂の連続試料を用いて、底質浮遊と粒度組成や平均粒径の時系列的変化についても検討をおこなった。さらに、局所観測アレイを用いた多測点同時観測により、砕波による浮遊砂の局所巻き上げ・移流について、採水・濃度・流速等の計測結果より流体運動と底質浮遊との関連という視点から考察、検討を行った。



図一 観測アレイ設置地点とアレイ構成

2. 合同現地観測プロジェクト HORS99 砕波帯内局所観測グループの概要

観測は、合同現地観測プロジェクト HORS 99 の一部として 1999 年 8 月 2～3 日にかけて茨城県波崎町の運輸省港湾技術研究所波崎海洋観測施設 (HORS) にて行った。砕波帯内の 3 次元流体運動と浮遊砂の時空間的変動の把握を目的とし、おおよそ 1 m 立方の 3 次元局所観測アレイに採水管 7 本、3 次元超音波流速計 (ADV) 10 台 (Sontek 社製 9 台, Nortek 社製 1 台)、電磁流速計 (EMC) 4 台 (Alec 社製)、光学式後方散乱型浮遊砂濃度計 (OBS) 11 台 (A&D 社製 10 台, 北斗理研社製 1 台)、容

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 大学院工学研究科人工環境システム学専攻

** 正会員 工修 日本建設コンサルタント (株)

*** 正会員 工修 横浜国立大学助手 大学院工学研究科人工環境システム学専攻

表-1 各 Take の観測条件

take	計測開始日時	h_i (m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (m)
Take 1	8/2/18 : 43 : 36	1.35	0.95	5.85
Take 2	8/2/19 : 59 : 00	1.33	0.95	5.99
Take 3	8/3/07 : 47 : 13	1.23	0.84	6.61
Take 4	8/3/08 : 52 : 41	1.10	0.72	6.97
Take 5	8/3/09 : 58 : 11	1.03	0.60	7.11

表-2 各 Sampling の観測条件

sampling	計測開始日時	h_i (m)	take
Sampling 1	8/2/19 : 14 : 15	1.36	Take 1
Sampling 2	8/3/08 : 26 : 22	1.22	Take 3
Sampling 3	8/3/09 : 08 : 52	1.13	Take 4
Sampling 4	8/3/09 : 45 : 00	1.03	Take 4
Sampling 5	8/3/10 : 20 : 07	0.93	Take 5

量式波高計 3 台 (KENEK 社製)、圧力センサー 1 台を設置して観測を行った。アレイ周辺には 3 台の光電式砂面計 (三洋測器社製) を設置し、底面変動を観測した。計測器アレイの概要をその設置地点と共に図-1 に示す。

観測データはサンプリング周波数 20 Hz で収録し、1 時間の計測を計 5 回 (Take 1~5) 行った。採水に関しては片山ら (1999) と同様な方法により、各サンプリングにつき 40 秒間で計 5 回 (Sampling 1~5) 計測した。採水については OBS の出力をモニターし、浮遊砂濃度の高いイベントについて選択的に計測を行った。それぞれの計測条件を表-1 および表-2 に示す。表-1 は全てアレイ設置位置における各計測時間内の値であり、 h_i は平均水深、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $T_{1/3}$ は有義波周期である。

3. 採水データによる濃度計の検定と濃度変化の比較

ポンプにより、海中から採水ホースを経て海面上約 7 m の棧橋上まで海水を汲み上げ採水を行った。採水には内径 25 mm と 19 mm の 2 種類のホースを組み合わせて使用し、採水量は毎秒約 0.7 リットル、ホース内の流速は内径 25 mm で 1.4 m/s、内径 19 mm で 2.5 m/s であった。HORS 周辺の底質の中央粒径が 0.2 mm 程度であるので、沈降速度 0.03 m/s に対して十分な管内流速であると考えられる。

7 ヶ所同時連続採水で採取した海水の重量と乾燥後の浮遊砂重量から浮遊砂濃度の時系列データを作成し、まず、濃度計データの補正を行った。ここでは、観測に先立つ予備キャリブレーションによる OBS 出力-浮遊砂濃度変換を「一次衡正」、この初期衡正を採水データを用いて調整することを「補正」、補正分を含めた OBS 出力-浮遊砂濃度変換を最終的な「2 次衡正」と呼ぶ。補正方法はほぼ片山ら (1999) と同様である。

濃度計の調整は全て同一としたが、それぞれの濃度計によりその特性は微妙に異なる。従って、濃度出力の補正は本来個々の濃度計について行うことが望ましい。しかし、本観測では全ての濃度計設置点において採水を行っているわけではないので、採水による補正ができない地点がある。そこで、本観測では、全ての OBS (A&D 社製) に対して同一の 2 次衡正直線を適用した。

観測に先立つ予備キャリブレーションの結果、A&D 社製 OBS の一次衡正直線として、

$$\text{濃度}[\text{ppt}] = 4.74 \times \text{OBS 出力電圧}[\text{V}] - 0.801 \cdots (1)$$

を得た。この値を用いて、まず、濃度計データの 1 次衡正を行った。採水と濃度計ではサンプリング間隔が異なるため、20 Hz で収録した濃度計のデータを 1 秒毎の平均値としてリサンプリングした。また、採水ではホースおよびポンプ中を海水が通過するタイムラグが存在し、濃度計とは同期していないため、両濃度データを用いた最小 2 乗法による相関の高い位相を同位相としている。

このようにして得た同位相の濃度データのうち、採水時のトラブルや気泡による影響が顕著なもの等を除いたものを全て使用し、両データの回帰直線を求めた。この回帰直線による係数補正の結果、A&D 社製 OBS の 2 次衡正直線として、

$$\text{濃度}[\text{ppt}] = 4.25 \times \text{OBS 出力電圧}[\text{V}] - 0.620 \cdots (2)$$

を得た。ただし、北斗理研社製 OBS (図-1 中の S2) については別途単独で衡正直線を求めた。

このようにして得られた濃度計の濃度出力について Take 2 の 1 時間に渡って平均浮遊砂濃度および rms 値を算出したものが図-2 である。これを見る限り、最下層 (底面上およそ 21 cm) の濃度計出力がほぼ同じ値となっており、濃度計衡正が妥当であったことが分かる。rms 値についても S1 を除きほぼ同等の値となっている。CM、CT は中、上層の測定点であり、平均濃度も低くなっている。最上層の CT では、中層の CM とほぼ同じ値となっているが、これは気泡の影響によるものと考えられる。このことは CT の rms 値の上昇からもうかがえる。

Bosmanら (1987) は、採水管を主流に対して直角においた場合、吸入速度と吸入口の周辺の流速の比が 2.5 以上であれば、採水による測定値が真値の 80% 程度であると報告している。本観測においてはこの条件をほぼ満足している。また、式 (2) の右辺第 1 項の係数は式 (1) の 90% 程度であり、このことから本観測での吸入効率も 80% 以上であると推測される。砂の吸入効率に関しては、吸入による流体加速度や吸入管径等多くの要素が関係していると考えられるため、本観測における吸入効率を正確に推測することは難しい。そこで、本観測においては採水による濃度計測を真値と仮定し、式 (2) を衡正直線として用いて以後の議論を行う。

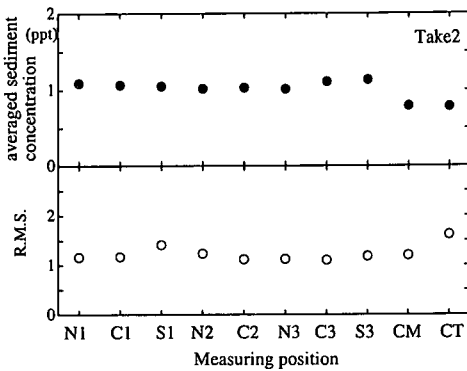


図-2 補正後の各濃度計の平均浮遊砂濃度と rms 値 (Take 2)

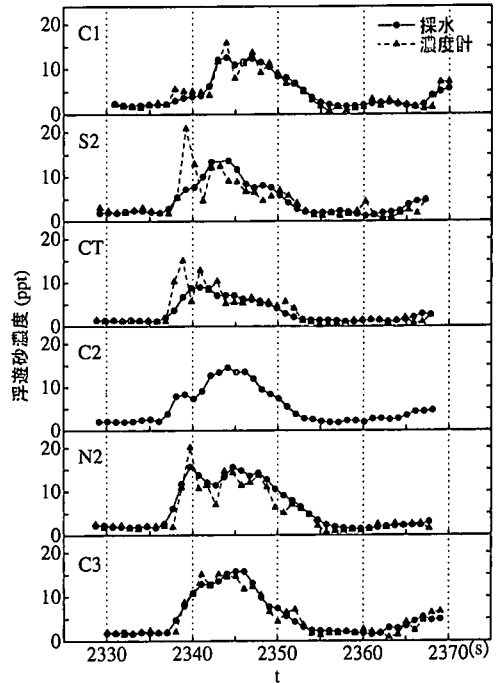


図-3 採水と濃度計による浮遊砂濃度の比較 (Sampling 2)

図-3 は、得られた濃度計による濃度変化と採水による濃度計測結果とを Sampling 2 について比較したものである。このケースでは採水で 16 ppt, 濃度計では 20 ppt を越える濃度が検出されているが、ピーク値を除いては高濃度域も含めて良好な一致を得られることが分かった。ピーク付近で採水による濃度変化が緩やかなのは、ホース内で若干の混合が起きているためと考えられる。

4. 平面配置濃度計による浮遊砂雲の挙動追跡

(1) 流体運動と局所巻き上げ・移流の判別

図-4 (a), (b) は測定点 C3 および C1 における Sampling 2 時の水位変動 η , EMC により計測された流速変動のうち周波数 1 Hz 以上の乱れ成分 w' , 濁度計および採水による浮遊砂の濃度変動および採取された底質サンプルの中央粒径 d_{50} の時系列変化を示したものである。時刻 t は Take 3 の計測開始時を基準としている。このうち、流速の乱れ成分と濃度とを比較してみると、乱れの増加 ($t=2338$ s 付近) と共に浮遊砂濃度の上昇する場合 (図-4 (a)) と乱れ成分の増加と同時に浮遊砂濃度が上昇しない場合 (図-4 (b)) とがあることが分かる。

この乱れは碎波による大規模渦によるものと類推される。これによって底質が巻き上げられると考えた場合、乱れと共に浮遊砂濃度が上昇する場合はその場所における底質の局所巻き上げと考えらる。一方、乱れ発生時以外での上昇では底面からの直接の底質供給とは考えにくく、近隣で巻き上げられた底質の移流によるものと考えることができる。従って、測定点 C1 と C3 との距離が 1 m であることを考えると、巻き上げの空間スケールは 1 m (ほぼ平均水深に相当する) 未満、他の測定点の結果も総合すると、およそ 50 cm 程度であると推定される。

そこで、Sampling 2 での高濃度イベントの構成を考えるために、移流によると考えられる濃度上昇の傾きを用いて、局所巻き上げと移流による濃度の分離を行った。

浮遊砂濃度は、測定点 C1, C2, C3, N2, S2 については採水データを、それ以外の点については OBS 濃度を 1 s リサンプリングしたものを用いた。C1 での高濃度部分の立ち上がり ($t=2341\sim 43$ s) を見ると、その増加率はおおよそ 4 ppt/s となっている。この値を用いて、移流と考えられる後半 ($t=2345$ s 付近) のピークについて、その立ち上がりを外挿法により推定し移流分を評価した。これを測定濃度から差し引いた残りを局所巻き上げ分とし、両者の分離を行った。

(2) 浮遊砂雲の巻き上げ地点と移動経路

図-5 は分離されたそれぞれについて、底面付近での濃度分布の時間変化を描いたものである。砂面計等の記録から、Take 3 でのこれらの測定点 (同一水平面内) の平均的な高さは、底面上約 12 cm であった。図中央の矢印はアレイ中央部測定点 CB で得られた ADV による流速の 1 s 平均値であり、局所アレイ付近での流速を代表しているものと考えることができる。浮遊砂濃度の重心から、浮遊砂雲の動きを判断すると図-5, 上側の図 (a) に示した局所巻き上げによるものと推定される浮遊砂雲は、当初 ($t=2338$ s) 観測アレイ中央部分 (C2) で濃度が上昇し、直ぐに鹿島一岸側へと移動していくことが分かる。また、下側の図 (b), 移流によるものと考えられる浮遊砂雲は、 $t=2341$ s 付近で銚子側より観測アレイに進入し、鹿島側へと移動したことが分かる。

さらに、観測アレイ周辺の波浪場はほぼ一様であり、

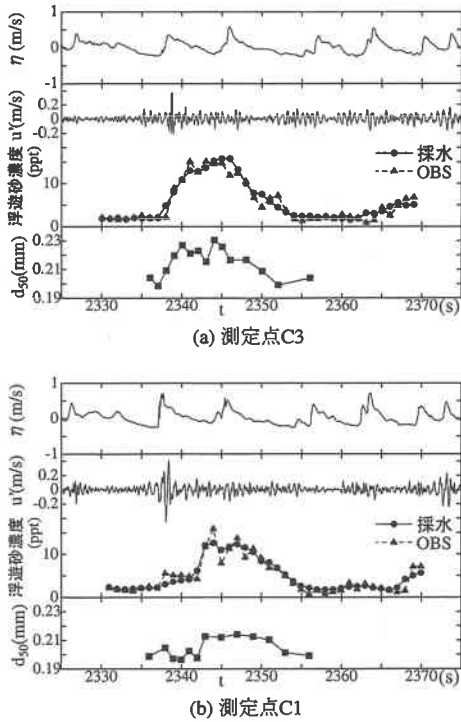


図-4 流速の乱れ成分と浮遊砂濃度、中央粒径の時系列変化 (Sampling 2)

波動流速もおおむね一様であると仮定して、測定点CBで得られた流速変動をもとに、2つの浮遊砂雲の移動経路を推定したものが図-6である。イベントの後半、移流によると判断された浮遊砂雲も、乱れ成分の観測結果から同じ波のほぼ同位相で巻きあがったと仮定すると、この浮遊砂雲はアレイから約1m 銚子側で巻き上がったものと推測できた。局所巻き上げ、移流による浮遊砂雲共に、図-5にある濃度分布変化と良く一致している。

(3) 巻き上げによる浮遊砂粒径変化と巻き上げ規模
採取した浮遊砂の粒度分析の結果、濃度の上昇とともに中央粒径も大きくなり、局所巻き上げにおける場合(図-4 (a), 一番下のグラフ)では急激な変化を示すことが分かった。これは、巻き上げの関与していない低濃度時においては、粗粒分が多く沈降し、結果的に浮遊砂に含まれる細粒分が多くなるためと解釈できる。また、中央粒径の減少時に比較的速度やかに値が下降するのは、粗粒分の沈降によるものではなく、浮遊砂雲そのものが計測対象地点を通り過ぎるためと考えられる。

一方、片山ら(1999)の測定結果では、濃度上昇時に逆に中央粒径が小さくなっている。これは、濃度変動が比較的小さいことも考えると、底質の長時間の浮遊によって粗粒分が沈降し、主に細粒分が多く残った浮遊砂雲によるものと考えれば説明できる。また、片山らにお

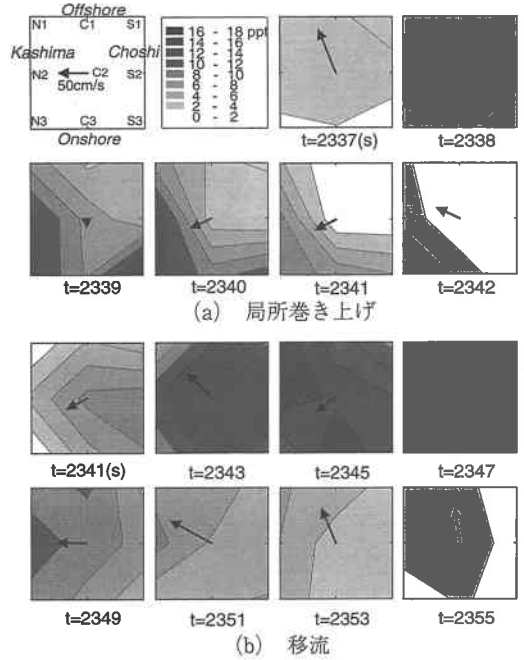


図-5 浮遊砂濃度平面分布の時間変化

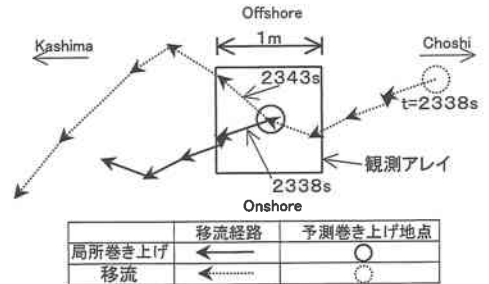


図-6 浮遊砂雲移動推定経路

いては、計測点直下での底質サンプリングが行われておらず、底質粒径の局所的な偏りによる影響を否定することはできない。

浮遊砂雲の規模については、巻き上げ直後(図-5(a), $t=2338$)においてその平面規模が1m未満であったことが分かる。また、巻き上げ後数秒経た時点においても(図-5 (b), $t=2343$) 差し渡し1m程度となっている。このときの平均水深が1.23mであり、巻き上げを促す3次元大規模流体運動(斜降渦)の現象規模がほぼ水深によって規定されるであろうことを勘案すると、浮遊砂巻き上げの空間スケールは局所的な水深よりも小さいと考えられる。

5. 高濃度時と低濃度時の鉛直拡散係数

アレイ中央に設置した鉛直方向3測点での濃度の1時

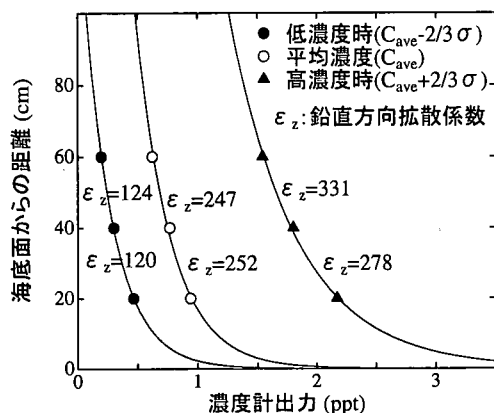


図-7 高濃度時・低濃度時の鉛直拡散係数

間平均値 (Take 2) を用いて鉛直拡散係数の評価を行った。また、最下部 C2 での濃度を基準に、低濃度時、高濃度時に分けた場合の鉛直拡散係数の算出も試みた。

鉛直拡散係数の算出に際しては、OBS による平均濃度計測の誤差が係数に大きな影響を及ぼす。特に 0 濃度付近での計測誤差に敏感なため、OBS 出力の修正については統一的な修正式 (2) ではなく、個々の OBS について改めて個別の修正直線を求めて使用した。

図-7 に示した白丸は、C2, CM, CT の各測定点における平均濃度である。これをもとに、平衡状態での 1 次元拡散方程式、

$$\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} + w_0 = 0 \quad (3)$$

を用いて拡散係数 ε_z を評価した。ここで、 c は浮遊砂濃度、 z は鉛直座標、 w_0 は底質の沈降速度である。各 OBS の底面からの距離は、砂面計の記録をもとに補正してある。得られた拡散係数は約 250 m^2/s となり、既往の研究による値とオーダー的には一致する。

低濃度時と高濃度時では、関連する流体運動が異なると考えられるので、拡散係数についても相違があると考えられる。そこで、C2 における濃度が、 $C_{\text{ave}} - 2/3\sigma$ (C_{ave} : C2 での平均濃度、 σ : C2 での濃度の標準偏差) を下回った場合を低濃度時間帯、 $C_{\text{ave}} + 2/3\sigma$ を上回った場合を高濃度時間帯と定義し、各々の時間帯での平均濃度を求めた。それぞれの濃度時の拡散係数は、図-7 に示すように、おおよそ 122 m^2/s および 305 m^2/s となった。

高濃度時と平均濃度によるものとは拡散係数が大きく違わない。これは高濃度時のイベントが移流によるものを含み、流体運動と直接結びつくケースがそれほど多くないためと解釈できる。一方、低濃度時には局所巻き上げのようなイベントが含まれていないため、平均濃度によるものと比べて拡散係数が半分程度になっている。

また、このような時間的に著しく変化する場において、平衡 1 次元を仮定した方程式を用いるのは適切ではないかもしれないが、多くの時間帯での平均量を扱うことによって、この問題はある程度は正 (あるいは平均化) されるものと考えられる。

6. 結 論

現地碎波帯において、計測器および高速採水装置を 3 次元的に配置した局所観測アレイを用い、流体運動と浮遊砂濃度の多測点同時観測を行い、以下の結論を得た。

- 1) 採水により、高濃度時を含め全ての濃度計出力を統一的に修正することができる。
- 2) 斜降渦による巻き上げの空間スケールは水深オーダーよりも小さい。
- 3) 多測点同時計測により浮遊砂の動きを局所巻き上げと移流との区別も含めて把握することができる。
- 4) 局所巻き上げ時の浮遊砂中央粒径は若干大きくなる。
- 5) 浮遊砂濃度が低いときは、中・高濃度時より相対的に鉛直拡散係数が小さい。

本観測では、アレイ中央部 20 cm の立方格子上に流速計を配置した計測も行っている。今後は、これら流速計のデータ等を利用して、流体運動と底質巻き上げの関連についてさらに検討を行っていく必要がある。

最後に、本観測の実施に当たり、HORS での観測に便宜を図って頂いた運輸省港湾技術研究所漂砂研究室長栗山善昭氏、観測において協力いただいた東京工業大学灘岡和夫教授をはじめとする合同現地観測プロジェクト HORS 99 参加の皆様には謝意を表す。また、砂面計および粒度分析器は五洋建設 (株) 技術研究所所有の装置を、容量式波高計は大成建設 (株) 技術研究所所有の装置を使用させて頂いた。

また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金基盤研究 B (No. 11450187 代表者: 柴山知也) による研究であることを付記する。

参 考 文 献

- 片山裕之・岡安章夫・永田達也 (1999): 連続採水による現地碎波帯浮遊砂濃度および粒度分布の時系列変化, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 571-575.
- 佐藤慎司・本間基一・柴山知也 (1989): 碎波による底質の巻き上げ量の評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 279-283.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐龍行 (1987): 碎波帯内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 21-25.
- Bosman, J. J., E. T. J. M. van der Velden and C. H. Hulsbergen (1987): Sediment concentration measurements by transverse suction, Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 353-370.