

砕波帯内の浮遊漂砂量の計測

柴山 知也*・堀川 清司**・村野 正明***

1. はじめに

本論文では、砕波帯内における浮遊漂砂の挙動を解析するために行なった室内実験及び現地観測の結果について報告する。従来から、砕波帯内の底質移動に対して浮遊漂砂の及ぼす効果が大きいと考えられており、多くの浮遊砂濃度の計測例が報告されている。しかし、移動床上において浮遊砂が存在する条件下での水量計測の困難さから、浮遊砂濃度、流速の時間的変化を同時に計測して論じたものはあまり例をみない。そこで、本論文では、室内実験においては超音波流速計と光学式濃度計を並用し、また現地海岸においては超音波漂砂量計を用いて、この問題を取り扱うことを試みた。

2. 室内実験

室内実験には、長さ 25 m、深さ 1 m、幅 0.8 m の 2 次元造波水路を用いた。水路中央を合板でしきり、その一方に中央粒径 0.2 mm の豊浦標準砂を一樣水深部の水深 45 cm、初期勾配 1/10 になるように敷き、侵食型海浜を形成する条件として、周期 1.53 s、沖波波高 10.5 cm の波をあてた。図-1 に座標系と、例として 20 時間後の地形を示す。浮遊漂砂について考察するため、以下の 3 つの実験を行なった。

まず実験 I として、 $x=35$ cm, 67 cm の 2 断面で、底面よりそれぞれ 1 cm~6 cm にわたって 1 cm ごとに超音波流速計を順次設置し、1 時間おきに 20 時間まで流

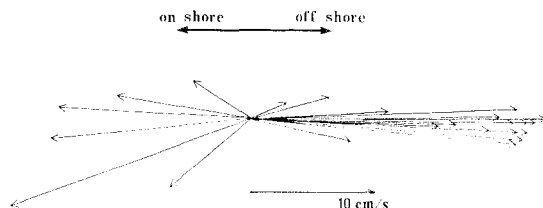


図-2 2次元造波水路の砕波帯内流速ベクトルの例

速を計測した。超音波流速計は気泡の影響を受けるため、砕波による気泡の混入の激しい地点では計測しなかった。 $x=67$ cm の地点は気泡の混入の影響が大きい時間が $x=35$ cm の地点に比して長かった。超音波流速計の 2 チャンネルの出力から算定した水平面内の流速ベクトルの例を図-2 に示す。従来から 2 次元水路を用いて移動床実験をする場合、特に砕波帯内での地形の 3 次元性が著しいことが報告されている。図-2 より、流速の時間変化が 2 次元的でなく、特に流向変化時に水路の奥行き方向にも大きな流速成分をもつことがわかり、地形の 3 次元性を引き起こす一つの原因と思われる。

従来から砕波帯内の冲向き定常流が岸沖漂砂量に密接に関係していることが指摘されている¹⁾。図-3 (a)~(d) に $x=35$ cm の断面での超音波流速計の出力 30 波分から算定した定常流成分の鉛直分布の時間的変化の例を示す。時間を経るに従って漂砂量は減少するが、定常流成分には特に時間の経過と共に減少していく傾向は見られないようである。

漂砂量が流速の 6 乗もしくは 3 乗に比例するという考え方からは、岸向き、冲向きそれぞれの最大流速が大きな意味をもってくる。そこで図-4 に、30 波平均から求めた岸向き、冲向きの最大流速を 3 時間後と 13 時間後と比較して示す。時間の経過により岸沖方向の最大流速のかたよりが小さくなって平均化してきていることがわかる。時間の経過により net の漂砂量が減少していく傾向と関連があると思われる。

次により詳細に現象を観察するために実験 II を行なった。16 mm カメラを用いて撮影することにより、砕波帯内の砂の浮遊・掃流状態を観察し、さらにトレーサーを投入して、その挙動を追跡することによって流速場を観察

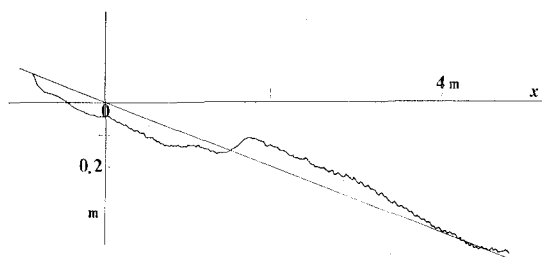
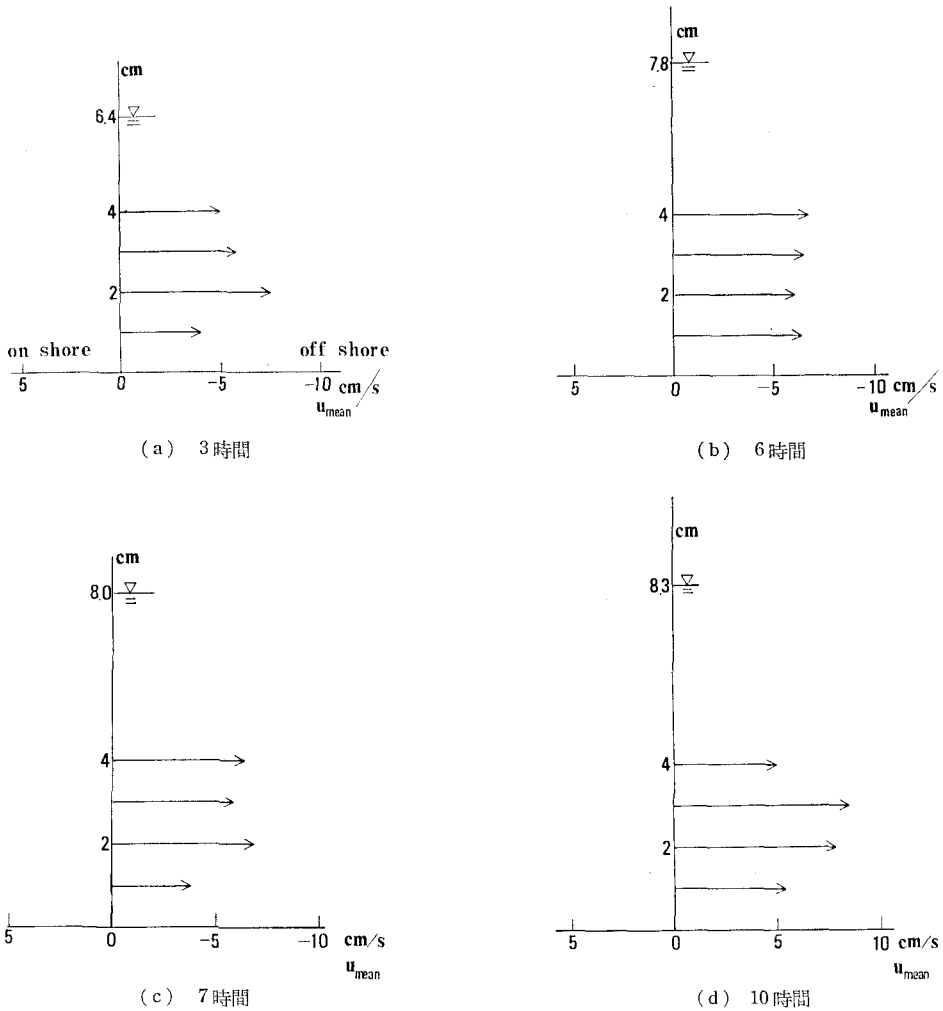
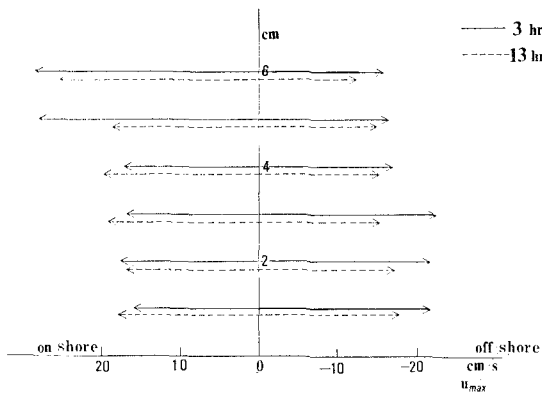


図-1 座標軸と 20 時間後の地形変化

* 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 大成建設(株)

図-3 定常流の鉛直分布の例 ($x=35$ cm)図-4 岸沖向き最大流速 ($x=35$ cm)

した。その結果、実験を通じて砕波形式は plunging 型であり、第一次砕波、第二次砕波いずれの場合にも砕波により発生した horizontal roller の作用により、砂が浮

遊状態で運動していた。Shibayama・Horikawa²⁾が指摘しているように、波の峰通過直後に horizontal roller の作用によって浮遊した砂が、波の谷通過時に沖向きに運ばれ、その一部が沈降するという過程が支配的な運動形態であった。このような場合、一周期間の浮遊砂濃度の変動が大きいため、浮遊漂砂 flux を考える場合には、一周期間平均砂浮遊濃度と定常流速の積というような考え方では対応できない。速度と濃度の位相関係が大きな効果をもつといえる。

そこで、濃度計と流速計を同時に設置して実験Ⅲを行なった。すなわち $x=5$ cm の断面に3本の光学式濃度計をそれぞれ底面上約 1 cm, 2 cm, 3 cm の3点に設置して濃度の時間変化を求めた。また超音波流速計で底面から 2 cm の位置の流速を測定した。超音波流速計プローブが数 cm 程度の大きさをもつことおよび波が長波の領域に相当することから、この出力を三点の代表流速と

して用いた。図-5 に速度と濃度の位相関係を示す。図より、このデータを用いて各点における漂砂 flux を求める場合、岸向き流速、沖向き流速時の漂砂移動のバランスによって net の移動量の方向性が定められており、濃度と速度の位相関係が重要な要因となることがわかる。図-5 で底面から 1 cm の地点より 2 cm の地点の濃度が高くなっているが、これは浮遊砂雲中の濃度分布による効果と考えられる。

次に浮遊漂砂 flux と全漂砂 flux の関係を考察することを試みた。図-5 にも現れているように、実験を通じて規則波をあてているにもかかわらず、砕波帯内では濃度変動は著しく不規則であった。そこで浮遊漂砂 flux を 1 時間の連続データから求め、地形変化から逆算した全漂砂 flux と比較することとした。気泡の影響が小さいことから $x=5\text{ cm}$ の地点（水深 7.9 cm）を検査断面に選び、実験開始から 6～7 時間の 1 時間について、連続デ

ータをサンプリング周波数 125 Hz で AD 変換し、濃度と速度をかけ合わせ、さらに 1 時間の平均をとって浮遊漂砂 flux の鉛直分布を求めたのが 図-6 である。図で $\Phi=q/wd$ (q : 単位幅当たり体積漂砂量, w : 底質沈降速度, d : 底質粒径) である。次にこの領域で浮遊漂砂 flux が全漂砂 flux に占める割合を検討するため、地形変化量から逆算して求めた全漂砂 flux と比較した。底面から 3 cm 以上の領域では浮遊砂濃度が下の領域に比べてかなり小さくなることから、底面から 3 cm までの領域に全漂砂 flux が均等に分布すると仮定して求めた分布が 図-6 に示した破線である。この比較から、この場合に浮遊漂砂 flux の全漂砂 flux に占める割合はかなり大きいと言える。

3. 現地実験とその結果

現地実験は、茨城県阿字が浦海岸において昭和 56 年 9 月 8 日に行ない、また昭和 57 年 8 月 24 日から 8 月 26 日にかけて茨城県大洗海岸において行なった。計測に用いた超音波漂砂量計は海洋科学技術センターが開発したもので、計測の原理は筆者ら³⁾が製作したものと類似しており浮遊砂の速度と濃度を同時に計測できる。原理図を 図-7 に示す。送波器 (S) から発射された超音波は、浮遊している砂によって反射散乱しながら進む。図の横線部の領域で反射された超音波は受波器 (M1) によって受波される。またこの領域を透過した超音波は受波器 (M2) に受波される。漂砂の移動速度の S—M1 に対して垂直な成分 U は、S と M1 の間のドップラー周波数変化によって次式により評価できる。

$$U \doteq \frac{C \cdot \Delta f}{2f \cdot \cos \theta}$$

ここで C : 水中音速, Δf : ドップラー周波数変化, f : 送波周波数, θ : 入射角である。また浮遊砂濃度は、発射された超音波が浮遊砂によって反射される量 (M1) もしくは浮遊砂雲を透過して伝播する量 (M2) より求め

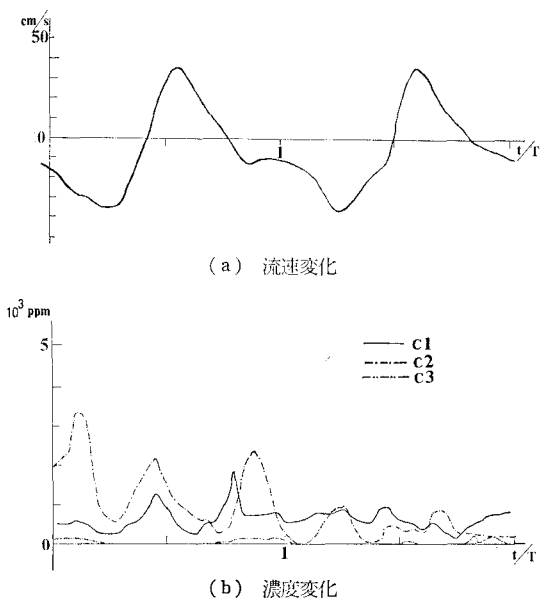


図-5 流速と浮遊砂濃度の時間変化 (C1: 底面より 1 cm, C2: 2 cm, C3: 3 cm, $x=5\text{ cm}$)

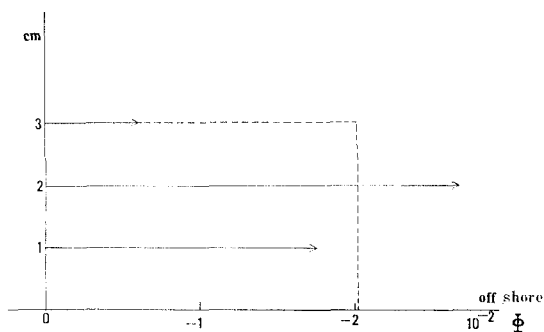


図-6 浮遊漂砂 flux 分布の算定例 (6～7 時間後, $x=5\text{ cm}$)

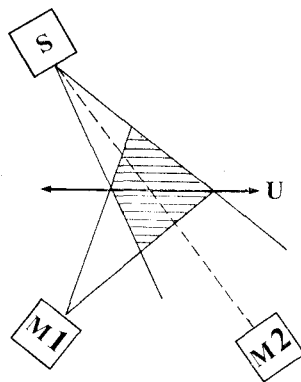


図-7 超音波漂砂量計の原理図

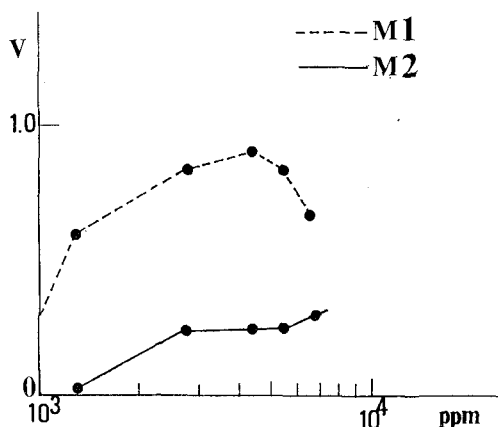


図-8 濃度検定曲線の例 (V: 出力電圧(ボルト), M1: 反射出力, M2: 透過出力)

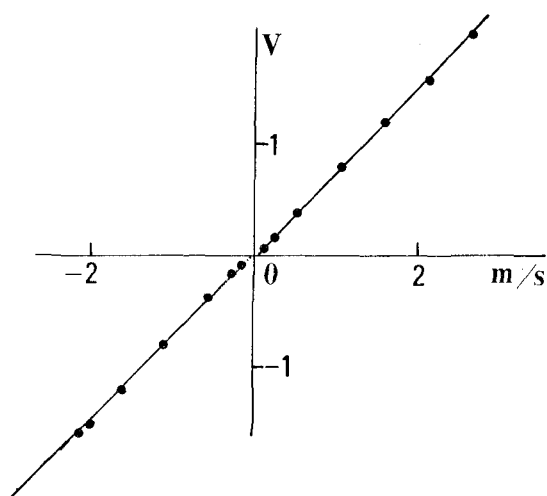


図-9 速度検定曲線

る。

図-8 に濃度に対する検定曲線の例を示し、図-9 に速度に対する検定曲線の例を示す。特に濃度に対する検定結果は底質の粒度組成によって大きな影響を受けるた

め、現地海浜の砂をサンプルとして用いた。また、反射してきた超音波を受波する場合 (M1)、濃度計の出力は 4000 ppm 程度までは濃度と共に上昇するが、それ以降はあまり変化しなくなる。これは、浮遊砂による反射効果よりも超音波伝達経路での減衰が卓越するためであり、この範囲での濃度は透過型 (M2) の出力から判定する必要がある。

現地海岸において一つの送波器に対して 3 つの受波器を沿岸方向、岸沖方向、対角線方向に設置し、浮遊砂濃度、沿岸方向及び岸沖方向の浮遊砂速度を計測した。沿岸方向に約 5 m 離れて設置した電磁流速計の岸沖方向出力と、超音波漂砂量計の岸沖方向砂粒子速度出力を比較したのが 図-10 である。2 つの出力は若干の位相差をもって似たような変動パターンを示している。2 つの計器が沿岸方向に離れており、不規則な波が角度をもって入射していることを考え合わせれば超音波漂砂量計の出力は妥当と言える。

図-11 に昭和 57 年 8 月 21 日午前 10 時に行なった観測結果を示す。観測点は砕波帯内水深約 0.5 m の地点であり、砕波線より約 10 m 岸側にある。超音波漂砂量計センサーを底面から 25 cm に設置して観測を行なった。水中マスクをつけて観察した結果、気泡の混入による影響はほとんどないと思われた。図は上から順に、浮遊砂濃度、岸沖方向浮遊砂速度、沿岸方向浮遊砂速度である。実験室における観測と同様に、現地データにおいても、濃度の時間変化は大きくその変化と流速変化の位相差によってその場所における漂砂 flux の方向性が定められていることが推察できるが、この場合さらに現象の不規則性が大きいため取り扱いが難しい。

今回用いた漂砂量測定装置は、1) 気泡の混入による効果の検討、2) 現地海浜での作業が困難であることから装置の操作性の向上、3) 混合粒径による効果の検討など、残された課題は多いが、現地海岸での漂砂量を定量的に把握するのに有効であると思われる。

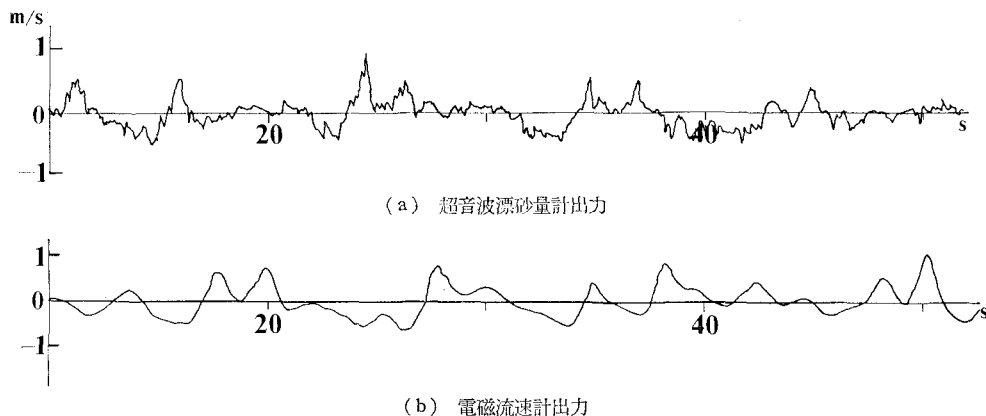
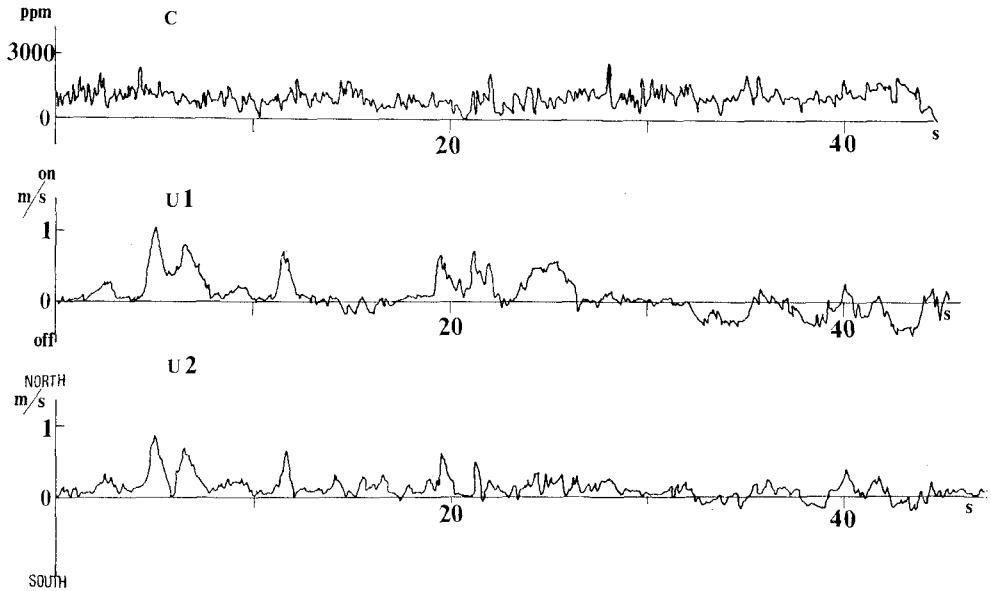


図-10 超音波漂砂量計と電磁流速計の比較



図—11 超音波漂砂量計計測例 (C: 濃度, U1: 岸沖方向漂砂速度, U2: 沿岸方向漂砂速度)

4. おわりに

今回の観測により、砕波帯内の浮遊漂砂 flux を論ずる場合、時間平均浮遊砂濃度、時間平均流速等の情報では不充分であることが再認識された。浮遊砂濃度、水粒子速度の時間変化をその位相関係をも含めて評価しなければ、漂砂 flux の方向性をも正確に予測することはできない。また、砕波帯内浮遊漂砂の発生、運動については浮遊漂砂 flux を算定するには plunging 砕波により発生する horizontal roller の性質を把握することが急務であるといえる。

超音波漂砂量計は海洋科学技術センターが製作し、その試用を筆者らに委ねられたものである。その使用に当

っては海岸環境工学研究センターの方々にお世話になり、また渡辺晃助教授の助言を受けた。

本論文の一部は、昭和 57 年度文部省科研費奨励研究 A (柴山知也) による研究成果の一部である。

参 考 文 献

- 1) 服部昌太郎・上原義和: 戻り流れを考慮した岸沖漂砂の評価モデル, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 223~227, 1982.
- 2) Shibayama, T. and K. Horikawa: Sediment suspension due to breaking waves, Coastal Eng. in Japan, Vol. 25, pp. 163~176. 1982.
- 3) 柴山知也・渡辺 晃・堀川清司: 超音波ドップラー方式による漂砂量計の試用, 第 37 回年次学術講演会概要集, pp. 759~760, 1982.