

CT 型濁度計による碎波帯内底質巻き上げに関する実験的研究

宇野喜之*・岡安章夫**・小林智尚***・島谷 学****

碎波による底質の巻き上がり機構とその輸送機構に関して、掃流砂および浮遊砂の濃度分布を測定する困難さがあり未解明な部分が多い。特に平面 2 次元の浮遊砂濃度分布を測定した例は少ない。本研究では、CT 型濁度計を用いて平面 2 次元の浮遊砂濃度分布測定し、その特性を検証した。その結果、この濁度計計測によって得られる透過減衰量データから平面 2 次元濃度分布を推定し計測断面内の高濃度領域を捉えることができた。また、その定量的把握も可能であることを確認した。そして、室内規則波実験において碎波帯内 2 次元浮遊砂濃度分布を測定し、碎波により発生する浮遊砂の規模や輸送速度について考察を行った。

1. 序 論

近年、碎波帯内の流速場とそれに伴う底質浮遊の解明を図る実験研究が急速に進んでいる。しかし、碎波による底質の巻き上がり機構および輸送機構については、波・流れの場を測定する困難さ、掃流砂および浮遊砂の濃度分布を測定する困難さがあり、解明できていない部分が多い。

近年では、可視化実験などにより碎波後に発生する流体運動が 3 次元的である（例えば灘岡ら（1984））ことから、碎波帯内の底質浮遊現象も 3 次元的であると考えられている。Cox ら（2001）や岡安ら（2000 a, 2001）は室内実験において PIV（Particle Image Velocimetry）法を用いて、碎波帯内底質巻き上げを特徴付ける斜降渦による底質浮遊についての研究している。後者は底面上での砂粒子移動の追跡を行い、底面付近での斜降渦の構造や特性について検討した。また、岡安ら（2000b）は現地観測において採水および濁度計による濃度計測を多測点同時に行い、碎波帯内の底質浮遊平面分布特性について考察を行っている。

近年では、平面 2 次元濃度分布に関するより詳細なデータを取得するための計測器の開発研究も行われている。山田ら（1999）は可視化（ビデオ）画像の輝度分布から浮遊泥の平面濃度分布を逆解析により推定する試みを行っている。また、小林ら（2000）は風波碎波時の飛沫現象を CT（Computed Tomography）型濁度計を用いて計測し空気と飛沫の屈折率の違いから飛沫量の時空間分布特性を調べてその有効性について明らかにしている。

本研究では、CT 型濁度計を用いて平面 2 次元浮遊砂濃度場を計測し、逆解析によって平面 2 次元濃度分布とした。まず、濁度計計測によって出力される平面 2 次元濃度分布と実際の濃度場を比較し、出力濃度分布の特性

について調べた。碎波による底質浮遊現象の基礎的データを取得するため、規則波による室内実験を行った。特性試験の結果を用いて碎波帯内の平面 2 次元分布を推定し、碎波帯内の底質巻き上がりおよびその規模について考察を行った。

2. CT 型濁度計の概要

2.1 基本原理としくみ

本研究で用いた CT 型濁度計（以下、濁度計と記す。）は医療用断層撮影装置とほぼ同じ原理で、透過光の減衰量から計測断面内の濁度分布を逆解析により求める光学式濁度計である。

濁度計は 1）可動部を含まないために高速の計測が可能 2）様々な流れに対してその流れを乱さずに適用可能な構造という特徴を持つ。しかし、発光部、受光部はそれぞれ比較的大きな容器に格納されているので、全体を没入させると流れの場を乱したり洗掘によって底質巻き上げを助長させたりする可能性が高い。本研究では、側面がガラス張りの水路をはさむように濁度計の発光部、受光部を設置して水路内の底質巻き上げを観測することにした。

本研究で使用した濁度計は 32 個の発光素子と受光素

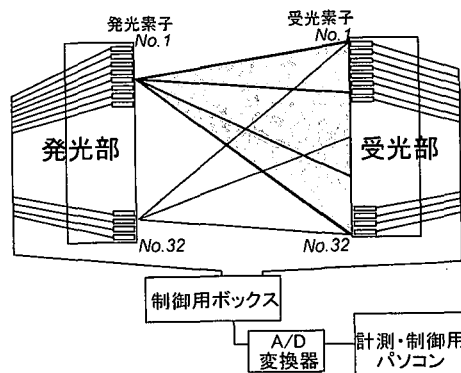


図-1 CT 型濁度計の概略図

* 正会員 修(工) (株)エコー

** 正会員 工 博 東京水産大学助教授 水産学部

*** 正会員 工 博 岐阜大学助教授 大学院工学研究科

**** 正会員 工 修 横浜国立大学助手 大学院工学研究科

子を持つ発光部と受光部からなり、各発光素子から扇状に射光するレーザ光の透過量をすべての受光素子で計測した。図-1に濁度計の計測システムの概要を示す。

計測制御とデータ収録はパーソナルコンピュータで行った。本システムで1断面を計測するのに要する時間は0.09秒である。計測できるフレーム数はパーソナルコンピュータのメモリ容量に依存するが、本研究においては1回の計測で30フレーム、継続時間約2.7秒とした。

計測断面の領域は、前述のように水路横からはさむように設置したため、受光・発光素子が並ぶ岸沖方向465mm×水路幅500mmである。

2.2 解析方法と解像度

計測された各光学経路上での透過光減衰量から正方格子上の透過光減衰率分布を推定するために、仮想荷重法を用いた。これは減衰率の分布形が滑らかであると仮定して、正方格子上で透過減衰率を求める逆推定法である。さらに、拡張ベイズ法と赤池ベイズ情報量基準を用いて透過減衰率分布を最適化した。この逆解析法は小林ら(2002)に詳しい。求められた減衰率分布から減衰率-浮遊砂濃度の関係式を用いて平面浮遊砂濃度分布を求めた。

本研究での濃度データの一格子の大きさ(解像度)は、計測断面範囲を岸沖・沿岸方向に素子の数32個に分割していることから、岸沖方向におおよそ15mmである。

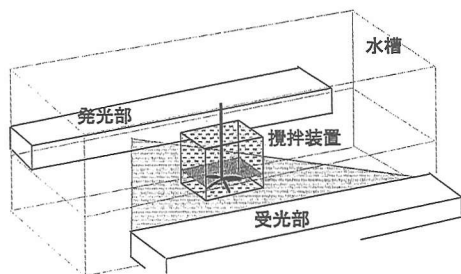


図-2 アクリル容器による濁度計の特性試験

3. CT型濁度計の特性試験

3.1 試験方法

濁度計計測から推定される平面浮遊砂濃度分布と実際の平面浮遊砂濃度を比較するため、濁度計の特性試験を行った。計測対象断面ほぼ中央に設置した立方体容器内の砂と水の混合水を攪拌することによってつくられる人工的な底質浮遊状態を計測し、逆解析によって濃度分布を推定した。

図-2に示すように水槽に水を入れ、計測断面ほぼ中央に一辺10cmの透明なアクリル製立方体容器を設置した。攪拌器で任意の浮遊砂濃度になるように底質浮遊実験で用いた中央粒径0.30mmの相馬珪砂を投入して攪拌させ、人工的に底質浮遊状態をつくった。気泡などが入らないように容器に蓋をした。容器内の浮遊砂濃度は、式(1)を用いて算出した。

$$\text{浮遊砂濃度 (ppt)} = \frac{\text{投入した砂の質量 (g)}}{\text{容器内の水の質量 (g)}} \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

容器内の浮遊砂濃度が0.0pptから8.0pptまでほぼ1.0ppt刻みとなるように珪砂の投入量を調節し、濁度計データから得られる浮遊砂濃度分布と式(1)から得られる浮遊砂濃度を比較した。

3.2 解析結果

平面濃度分布の推定には、透過光減衰量の30フレーム(1回の計測)の平均値を用いた。この際、アクリル容器によってのみ減衰される光の透過量を考慮するため、容器内に砂を投入しないデータを透過光減衰量の基準値とした。

図-3には、容器内の浮遊砂濃度を2.0ppt、4.0ppt、6.0pptと8.0pptのときの平面濃度分布を示した。浮遊砂濃度が存在する計測断面中央部で大きい濃度分布を示している。この図から、受発光素子列と垂直な方向(図では上下方向)に分布がなまっており、計測領域中央部ではこの方向の再現性が悪い傾向がみられた。

これは、Smoothing Filter法では推定する浮遊砂濃度

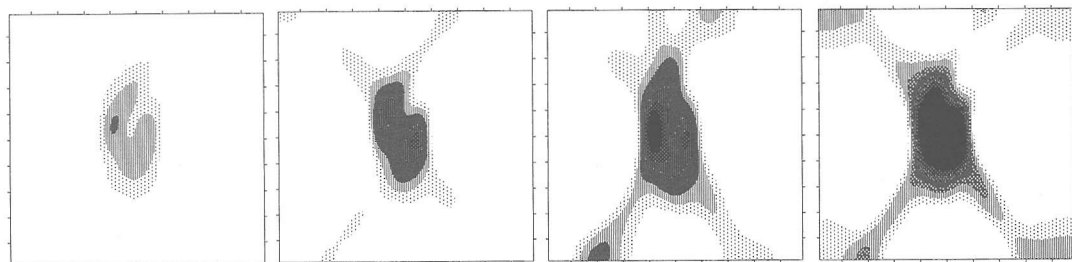
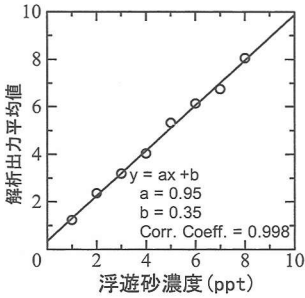


図-3 濁度計特性試験の結果



図—4 特性試験の結果（解析出力値と浮遊砂濃度の関係）

分布は「平面的に滑らかな濃度分布である」という仮定があり、容器の内外のような不連続な濃度変化は平滑化されてしまうためだと考えられる。しかし、碎波による底質浮遊では、このような極端に不連続な濃度

変化は起こりにくいので、本実験の解析においては十分に追従できると考えられる。
図—3 においてはアクリル容器設置領域内の透過減衰率出力値は、計測範囲の全積分量の50%~60%であった。すなわち、解析誤差により浮遊砂の40%~50%が本来存在しない容器の外側にあると誤認してしまっている。容器の外側に誤差として広がってしまっている。アクリル容器設置領域内の平均濃度出力値と式（1）による浮遊砂濃度の関係を調べると図—4に示すように線形の関係にあることが分かった。

ここで、濃度出力とは逆解析によって得られる透過減衰率なので浮遊砂濃度と透過減衰率の平均値は線形な関係にあり、回帰直線は以下の式で表される。

$$C(\text{ppt}) = 0.95 \times A_T + 0.35 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 C は浮遊砂濃度(単位 ppt)、 A_T は逆解析により

出力される透過減衰率である。

4. 碎波帯内2次元浮遊砂濃度計測

4.1 実験装置と条件

実験にはピストン型造波装置を持つ長さ17 m、幅0.5 m、深さ0.55 mの2次元波動水槽を用いた。この水路には1/20（法先1 mのみ1/10）の1様勾配面が設置されている。また、斜面部の側面はガラス張りになっており、側面からの濁度計による計測およびビデオ撮影が可能である。実験水槽の概略図を図—5に示す。ここに、 x は静水位汀線を原点とし、岸向きを正とした岸沖方向座標、 y は波の進行方向右側の側壁を原点とし、左側の側壁を正とした沿岸方向座標である。

実験水槽の1様水深部の水深は30 cmとし1様水深部の波高 H_i は12.0 cm、周期 T_i は1.2 sの規則波を入射させた。碎波点は $x_b = -3.10$ m、碎波波高 H_b は13.7 cmで、碎波形式は崩れ波碎波であった。濁度計計測平面の底面の上には予備実験の結果適度に底質の巻き上げが起きることが確認された相馬珪砂（中央粒径0.30 mm）を厚さ5 mmで均一に敷いた。

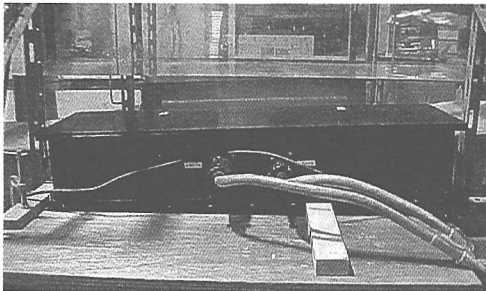
濁度計は、碎波点岸側の $x = -280$ cm ~ -236 cmに設置した。鉛直方向には計測対象平面内に気泡が入らないように初期底面から2 cmに設置した。写真—1は濁度計の設置の様子であり、波は写真の左から右に伝わり、手前側に発光部、水路向こう側に受光部が設置してある。

1様水深部の造波板から2.0 mの地点と、それぞれ計測対象断面の沖側と岸側、碎波点に計4本の波高計を設置した。

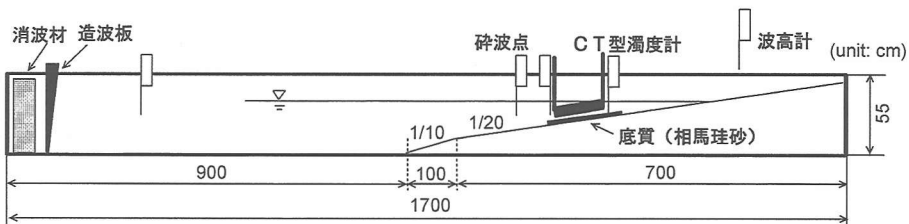
4.2 実験手順とデータ収録

砂を均一に敷き詰め、静水状態になったところでビデオ撮影と波高データの収録を開始した。波がほぼ安定した造波開始30秒後から、底質の巻き上げに影響する地形変化のない80秒後までの間に濁度計で底質浮遊の計測を行った。計測は1回の造波につき8回程度行い、計100波分の計測を行った。

水位変動データはサンプリング周波数500 Hzでデータ収録を行い、濁度計からのトリガー信号により濁度計データとの同期を取った。



写真—1 CT型濁度計による碎波帯内の計測



図—5 実験装置

4.3 底質浮遊計測の解析結果

図-6, 7 に計測された平面浮遊砂濃度分布の例を示す。図では左側が沖であり、濁度計の計測断面全体を示した ($x = -280 \text{ cm} \sim -236 \text{ cm}$, $y = 0 \sim 50 \text{ cm}$)。濁度計出力値は式 (2) を用いて浮遊砂濃度に変換した。

本研究では底質浮遊の位相変化を調べる。しかし、濁度計計測断面内に計測器を設置することができなかったため、波の位相と底質浮遊の位相関係を以下の方法で評価した。規則波実験であることから碎波点と計測断面中央の位相差は一定であるとし、まず予備実験において対象断面中央と碎波点の波高データの位相差を算出した。そして、本実験で計測している碎波点の水位変動の位相に計測対象断面中央の波の位相を加え、底質浮遊と波の位相関係を調べた。

位相の原点 $t/T = 0.0$ は、計測断面中央の水位がゼロアップクロスした時刻であり、 t は時刻、 T は波の周期である。

また、図中の矢印は計測断面中央の波動流速 $u (\text{cm/s})$

であり、長波近似を用いて、として求めた。ここに、 η , h は計測断面中央の水位変動と静水時の水深、 g は重力加速度である。戻り流れに関しては考慮していない。

計測した 100 波のうち、解析によって浮遊砂濃度の平面 2 次元分布として濃度のパターンが明確に出たのは 7 ケースあった。また、それらの計測結果はビデオ撮影による画像と顕著に異なる平面分布となっていないことを確認した。他の計測では、計測断面内に浮遊砂が巻き上がっていないものや計測断面内に多量の気泡が混入してしまい、推定した浮遊砂濃度分布が明確でなかったものである。

(1) 測定ケース 1 (図-6)

図-6 で示したケースは計測断面全域に浮遊砂が巻き上がっているケースであるが、 $\square$ と $\circ$ で囲んだ高い浮遊砂濃度を示している領域は浮遊砂雲と考えられる。

$\circ$ で囲んだ浮遊砂雲は、 $t/T = 0.2$ から 0.3 の間に、突っ込み点 $x = -250 \text{ cm}$ あたりに巻き上がっている。これは Sato ら (1990) と同様の結果と言える。その後、矢

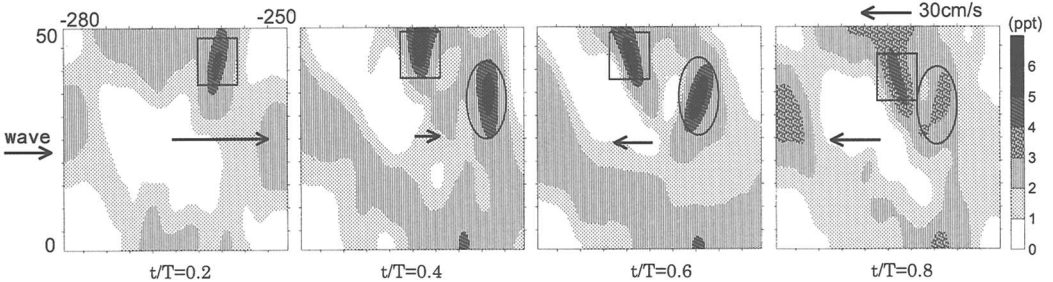


図-6 底質浮遊実験による平面二次元浮遊砂濃度分布の例 (その1)

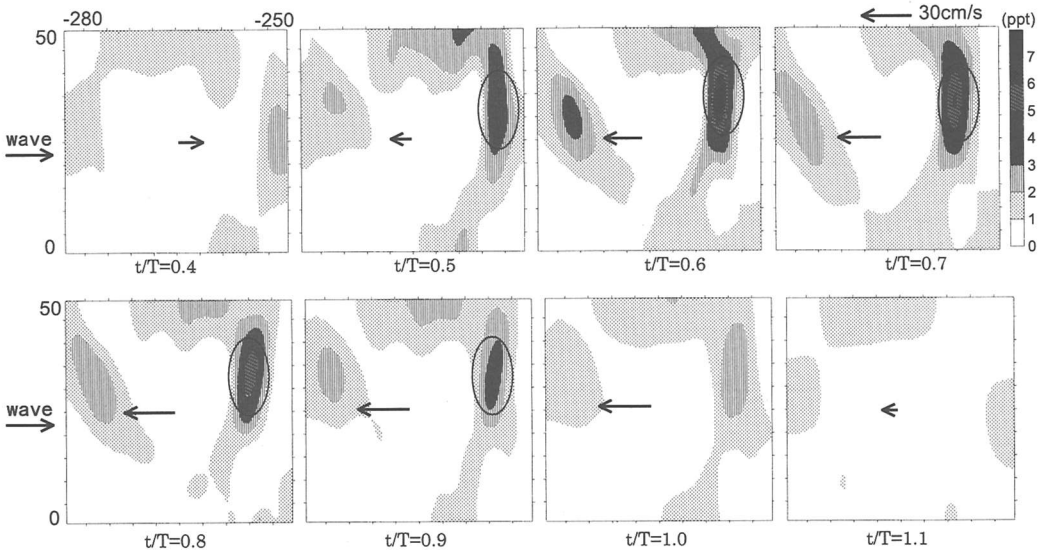


図-7 底質浮遊実験による平面二次元浮遊砂濃度分布の例 (その2)

印と同様に水粒子と同じ方向に浮遊砂雲が移動しているが、その流速に比べ浮遊砂雲の移動速度はほとんど変わらない。

□で囲まれた浮遊砂雲は、過去の研究に比べ比較的真い波の位相で形成されており、巻き上がり後の移動も水粒子の移動方向とも異なっている。このことから壁面によって拘束された縦渦によって巻き上げられた可能性が強く、現地での浮遊砂雲の形成とは異なるメカニズムによるものである可能性が高い。このような例は他のケースでも多く見られ、壁面付近で発生する乱れによって巻き上がっていると考えられる。

二つの浮遊砂雲は $t/T=0.8$ ではすでに拡散もしくは沈降している。

(2) 測定ケース2 (図-7)

底面付近の水粒子のベクトルが岸向きから沖向きに反転する $t/T=0.5$ 程度で底質が巻き上がっている例である。その後 $t/T=0.6\sim0.8$ において水粒子と同一方向に浮遊砂雲は移動しながら、拡散・沈降している様子が見られる。

図-6, 7 から、浮遊砂雲の平面規模は、巻き上がりの直後で 10 cm 程度と推定される。これはほぼ水深と同程度の規模、またはそれよりやや小さい規模である。これは現地観測での観測例(岡安ら(2000b))とほぼ一致している。

また、底質の巻き上がりは側壁近傍において発生する割合が大きかった。これは側壁と波・流れとの摩擦により発生する乱れや渦によって底質の浮遊が生じることによる(岡安ら(2000a))。

また、計測された遊砂雲の中心付近の濃度は 5 ppt 程度となっており、過去の研究(例えば柴山ら(1984))とほぼ同じ値を示した。

5. 結 論

CT 型濁度計の特性試験とこれによって規則波での砕波帯内底質浮遊現象を計測し、以下の結論を得た。

1) 推定される平面浮遊砂濃度分布は、実際の平面濃度分布に比べて平面的に平滑化されてはいるものの、高濃度領域の位置はほぼ良好に再現されている。

2) 特性試験の結果、計測された濃度は、浮遊砂濃度とほぼ線形な関係にあり、浮遊砂濃度の定量的な評価を行うことが可能である。

3) 砕波帯内における底質巻き上げ現象を計測して本濁度計を用いて平面 2 次元の浮遊砂濃度分布を計測できることが確認できた。

最後に、本研究のデータ解析に関して岐阜大学大学院修士課程の松下裕昭氏にご協力頂いた。ここに感謝の意を表する。また、本研究の一部は学術振興会科学研究費補助金基盤研究 B (No. 13450203 代表者: 岡安章夫) によることを付記する。

参 考 文 献

- 岡安章夫・敦賀 仁・松川 祐・Nimal Wijaratna・片山裕之 (2000a): 画像解析による斜降渦の特性とその発生分布について, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 141-145.
- 岡安章夫・鈴木崇之・片山裕之 (2000b): 斜降渦による底質浮遊と流体運動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 141-145.
- 岡安章夫・岩沢秀光・片山裕之・敦賀 仁 (2001): 斜降渦による底面近傍 3 次元流速運動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 81-85.
- 小林智尚・杉浦公彦 (2000): CT 型濁度計を用いた白波砕波上飛沫量の時空間分布特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1341-1345.
- 小林智尚・松下裕昭・安田孝志 (2002): 仮想荷重法と拡張ベイズ法を用いた CT 型濁度計の濁度分布逆推定法, 海岸工学論文集, 第 49 巻 (投稿中)
- 酒井哲郎・内田雅博 (1984): 巻き波砕波による乱れと底質浮遊機構, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 296-300.
- 樫木 享・出口一郎・岡田 学 (1979): 二次元海浜砕波帯における漂砂移動について, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 167-171.
- 柴山知也・樋口明彦・堀川清司 (1984): 砕波による低質の浮遊, 第 39 回年次学術講演会後援概要集, 第 2 部, pp. 183-184.
- 中村聡志 (1999): 現地観測による砕波帯内の流れ構造および底質浮遊機構の解明, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 566-569.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987): 砕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.
- Cox, D. T. and S. L. Anderson (2001): Statistics of intermittent surf zone turbulence and observation of large eddies using PIV, Coastal Engineering Journal, JSCE, Vol. 43, No. 2, pp. 121-131.
- Shinji Sato・Kiichi Homma・Tomoya Shibayama (1990): Coastal Engineering in Japan, Vol. 33, No. 2.