

大型造波水路を用いた渦度の岸沖変化に関する実験的研究

松野健児*・森 信人**・岡安章夫***
池野正明****・柴山知也*****

砕波帯における局所渦や乱流構造の特性解明は、波浪変形や海浜変形の予測を行う上で重要な課題のひとつである。本研究では、大型造波水路にて超音波流速計を用い、砕波帯内外の 3 次元流体運動の観測を行った。計測データから 3 次元渦度ベクトルを計算し、局所渦による乱れや渦度の乱流特性や渦度の岸沖方向変化について検討した。その結果、砕波後に沿岸方向に軸を持つ渦の強度が増大した後に減衰する一方、鉛直方向の渦強度は砕波点付近では相対的に小さな値であるが砕波後の減衰は緩やかであることを示した。さらに、渦強度は砕波後には非等方性が増大し、砕波の進行とともに渦度の等方性が強まることを明らかにした。

1. はじめに

波のエネルギーの大部分が放出される砕波帯内では水平渦や斜降渦と呼ばれる大規模渦やそれにもなう乱れが生成される。砕波によって生成され、底面まで到達するような大規模な乱れは、底質の移動と密接に関連しており、波浪変形や海浜変形の予測を行うには重要な問題である。そのため、砕波によって生成される乱れ構造に関しては、これまでに数多くの研究が行われてきた（たとえば灘岡ら, 1987; 岡安ら, 2000; Cox・Kobayashi, 1999）。しかしながら、砕波による渦度や乱れの生成に関しては未解明な部分が多く残されている。

水理実験を行う上での問題として、砕波帯内の流体運動の観測自体が困難であることがあげられる。水槽実験により流体運動の 3 次元性を観測するためには、レーザードップラー流速計等を用いた点計測を複数地点において繰り返し行い、異なる時刻に観測した結果から 2 次元または 3 次元の流体運動の解析・考察を行う必要がある。つまり、室内実験では計測機器を複数台設置することによって流体運動を乱す可能性があることや、空間的な制約のため、水深スケール以下の現象について同時に複数地点の計測を行うことは困難である。また砕波帯内の流体運動が、PIV 等の画像による計測法を用いるには範囲が広すぎるため、これらの手法を用いて砕波帯全体の描像をつかむことも難しい。さらに、砕波は空気塊を巻き込むため、乱れ構造が実験水槽と現地ではスケール効果を含むことも計測を困難にしている要因の一つである。

スケール効果の影響を最小限に抑えつつ 3 次元性の強い流体運動を観測する方法として、大型造波水路を用いた計測がある。Dally・Barkaszi (1994) は電磁流速計と濁度計、森ら (2001) は、スケール効果の影響を最小限

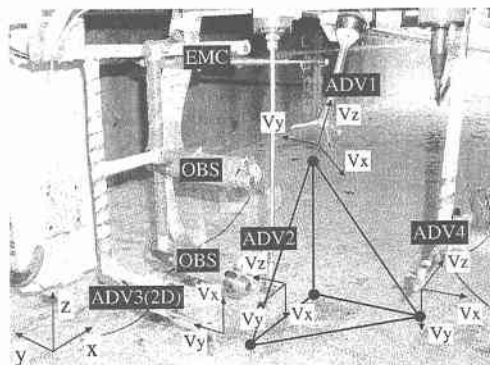


写真-1 局所アレイと計測機器の配置

に抑えつつ 3 次元性の強い流体運動を観測するために、大型造波水路内で超音波流速計 (ADV) を移動可能な局所アレイに組み込み、大型造波水路内で砕波帯内の流体観測を行い、砕波点付近での渦度の時空間特性について検討を行っている。

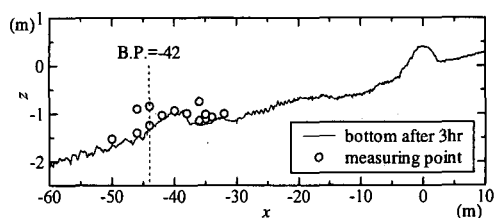
本研究では、森ら (2001) と同様なデータを用いて、流速データに対してノイズ除去等の処理を行うことにより計測データの信頼性を高めると共に、渦度の 3 次元性について、主に岸沖方向の変化特性を中心に検討を行った。またこれにより、砕波による大規模渦の過渡特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験の概要

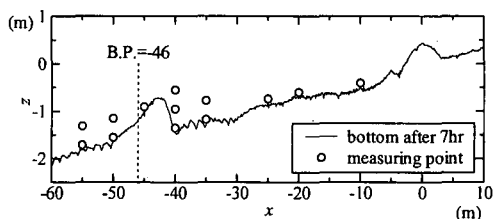
2.1 実験方法

本実験では、スケール効果の影響を最小限に抑えるために長さ 205 m, 幅 3.4 m, 高さ 6.0 m の 2 次元大型造波水路を用いて砕波点付近および砕波帯内の流体観測を行った。波浪条件は、岸沖漂砂が堆積型となる堆積性波浪と、侵食型となる侵食性波浪の 2 ケースで、共に規則波である。堆積性波浪は周期 3.5 s, 波高 0.34 m, 侵食性波浪は周期 3.5 s, 波高 1.0 m を入射波として用いた。初期地形は 1/30 勾配の移動床斜面で、底質として中央粒径 0.2 mm の細砂と中央粒径 0.8 mm の粗砂を重量比 7 対

* 修(工) 東亜建設工業(株)九州支店
** 正会員 工 博 (財)電力中央研究所流体科学部主任研究員
*** 正会員 工 博 東京水産大学助教授 水産学部
**** 正会員 工 博 (財)電力中央研究所環境科学部主任研究員
***** フェロー 工 博 横浜国立大学教授 大学院工学研究科

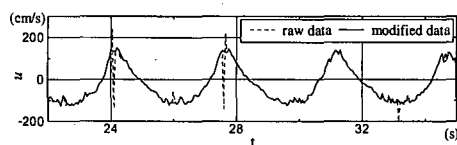


(a) 侵食性波浪 (造波3時間)

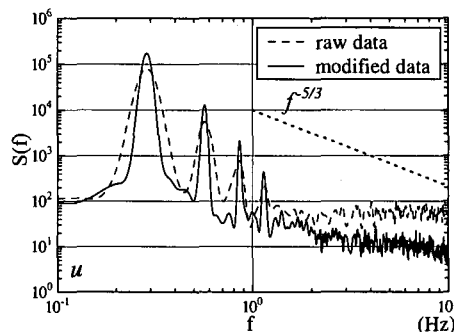


(b) 侵食性波浪 (造波7時間)

図-1 海底地形と移動計測箇所



(a) 時系列データ



(b) スペクトル図

図-2 ノイズ除去とデータ補間

3の割合で一様に混合したものを敷設した。実験では、まず堆積性波浪を38時間作用させた後に侵食性波浪を20時間作用させた。なお、波浪作用後は整地を行っていないため、地形は緩やかに時間変化している。

移動計測は流体運動の3次元性を計測するために、岸沖・鉛直方向に移動可能な局所流速計アレイを用いて行った。計測台車から吊り下げた鋼製フレームに、4台の超音波ドップラー流速計(ADV)を、測点間隔20cmで、それぞれの計測点が直角三角錐の頂点となるよう写真-1のように設置した。併せて光学式後方散乱型濁度計(OBS)をADVの近傍に3台取り付け、ADVとOBSを同期させ、サンプリング周波数20Hzまたは25Hzで計測を行った。

計測は、図-1に示すように砕波点より岸側を中心に地形変化に合わせて水平・鉛直方向にアレイを移動し、各ケース数回行った。この他に固定点で、水路方向に10mピッチで砂面上10cmと50cmの高さに取り付けた濃度計8台と2次元電磁流速計11台および容量式波高計15台により砕波帯内外の下層・中層での浮遊砂フラックスを計測した。計測器の配置や計測条件については池野ら(2000)に詳しく述べられている。

2.2 ノイズ除去とデータ補間

移動計測アレイには、計測点が3角錐の頂点(測点間隔20cm)になるようにADVを設置した。この流速記録より、3次元渦度ベクトルについて検討を行うが、計測された流速値にはスパイク状の不規則なノイズが含まれている場合がある。このノイズは超音波流速計の内部信号処理に関わるノイズの他、砕波による気泡の混入などの原因が考えられる。

スパイク状のノイズを含むデータから渦度を計算すると、計算された渦度にもスパイク状のノイズが含まれることになる。このようなデータでは渦度の解析に不適切なので、ノイズの除去とそれによる欠落データの補間が必要となる。本実験においてもスパイク状ノイズが含まれているケースがあったため、計測データからノイズ除去を行い、データの補間を行った。ノイズ除去については以下の方法に従った。

- (1) 流速データの時系列波形を確認する。スパイク状のノイズが確認された場合は、以降の通りにノイズ除去および補間を行う。
- (2) ノイズ除去を行う計測値のr.m.s.値を求める。
- (3) 時系列計測値で計測時間間隔 Δt での変動値が上記のr.m.s.値を超えた場合をノイズとみなし、当該データの除去及び補間を行う。
- (4) ノイズが連続する場合があるので、次データ以降もノイズチェックを行うが、この場合は閾値としてr.m.s.値に直前の正常値と当該データとの計測時間間隔を乗じたものを用いる。
- (5) 補間するデータは、線形補間によって値を定める。ただし、線形補間の場合は除去するノイズの前後の値を用いて補間するデータを決定するため、上記(4)のように不正な値(ノイズ)が連続して含まれている場合には適切な補間ができない可能性がある点に注意が必要である。

一例として、侵食性波浪造波開始後3時間以降に収録されたデータに関してノイズ除去処理を行った結果を示す。図-2(a)における破線が計測値であり、計測値には

不規則にスパイク状のノイズが入っていることが確認できる。上述の方法に従い、計測データの r.m.s. 値を基準にノイズ除去およびデータ補間を行ったものが実線で示されている。概ね妥当な値となっていると判断できる。

また、この補間処理が適切であるかを確かめるためにスペクトル解析を行った。その結果を図-2(b) に示す。ノイズ除去前のデータ(破線)では 1 Hz 以上の高周波領域においてパワーの減衰が見られない。これに対し、ノイズ除去後のデータ(図中実線)の場合では、入射波の基本周波数 (0.28 Hz) とその倍成分でのピークがより鮮明となっている。また、3 Hz 程度までの周波数領域においてはパワーが $f^{-5/3}$ 乗則に従い減衰しており、ノイズ除去が適正に行われていることが確認できる。

2.3 解析方法

渦度ベクトルは、以下のグリーンの定理を用いて計算を行った。

$$\omega_i = \frac{1}{2} \varepsilon_{jki} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} - \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) = \frac{1}{A_i} \int_{C_i} v_i ds \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、下付添え字 i は、計算対象とする面に垂直な渦度成分を表し、 A_i は計算対象とする面の面積、 C_i は線積分の積分経路、 v_i は C_i 上の接線方向流速を示す。本来ならば、 ω_i は 3 角錐全体の面積分から定義されるべきものであるが、1 台の ADV が 2 成分計測のものであったため、写真-1 に示す 3 角錐の内、直交する 3 平面のみから計算した。従って、計算された渦度の配置点は各面の重心に位置し、それぞれ 10 cm 程度ずれているが、これは入射波の波長あるいは水深に対し十分に短いため、以下では流速、渦度および渦度の計測点は同一であると見なして議論を進める。

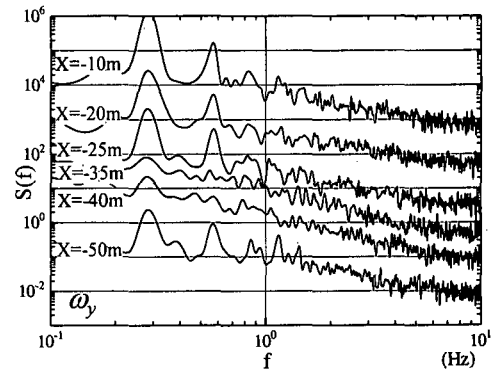
また、座標は右手座標系を用い、 x は汀線を原点とし岸向きを正、 z は底面を原点とし鉛直上向きを正として定義し、 (x, y, z) に対応した流速成分を (u, v, w) 、それぞれの軸に垂直な渦度成分を $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ と定義する。

式 (1) により計算された渦度には、上記の計算誤差の他に計測点の設置誤差および有限体積を対象にしたための誤差が付随する。これについては森ら (2001) と同様考えた。また計測アレイの空間的ゆがみ、同期の微妙なずれ等も考慮し、本実験で得られた渦度ベクトルの計測誤差を 1 (1/s) 程度と推定した。また、計測器の間隔が 20 cm かつ $u_{rms} = 70 \sim 80$ cm/s であることを考え、3 Hz 以上の成分は無視することとする。

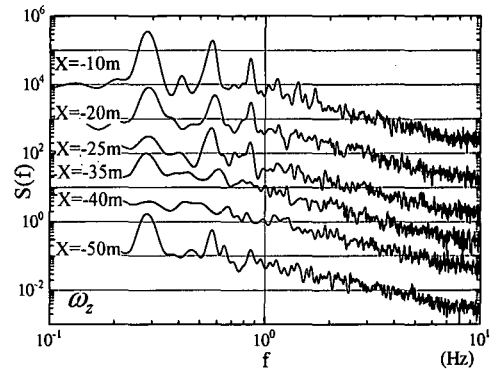
3. 砕波帯内外での渦度の変化特性

3.1 渦度スペクトルの特性

図-3 に示すのは、侵食性波浪(造波時間 7 時間以降)における渦度 (ω_y, ω_z) 成分のパワースペクトルの岸沖方向変化である ($x=0$ m; 汀線, $x=-45$ m; 砕波点)。各



(a) 沿岸方向軸渦度成分



(b) 鉛直方向軸渦度成分

図-3 渦強度のスペクトル

測点のパワー(縦軸)をそれぞれ 10^4 ずつずらして描いている。図-3(a)では、水平渦度成分 ω_y (沿岸方向を回転軸とする渦度) は、入射波の基本周波数と同じ周波数帯 (0.28 Hz) に明瞭なピークを持ちながら砕波直前から値が増大し、砕波直後 ($x=-40$ m, 砕波点より約 1/2 波長岸側) で最大となり、その後減衰している。波の再生と共に ($x=-25$ m) 入射波の基本周波数に再び明瞭なピークをもつことが確認できる。沖側では入射波の基本周波数とその高調波にピークを持ち、それより高周波数領域のベキ則も滑らかではないが、砕波点後では基本周波数のピークも相対的に小さくなり、高周波数領域全体に滑らかな分布形状を持つようになる。

砕波していない波浪は、ほぼポテンシャル運動を維持していると考えられるので、砕波点以深では本来いずれの方向にも渦度が観測されないはずである。これについては、個々の流速計の特性の相違や計測アレイの歪み(計測地点や方向の精度)に起因する見かけ上の渦度のほか、砕波帯内から移流してくる渦度や、測定点が底面付近(アレイ中心が底面上約 20 cm) であるため底面境界層からの渦度を検出している可能性が考えられる。

図-3(b) に示す鉛直渦度成分 ω_z (鉛直方向を回転軸と

する渦度成分) もほぼ同様の傾向であるが, 砕波直後の $x = -40$ m ではピークがほとんど見られず, $x = -35$ m で再びピークが現れるようになる。波の再生後においても ω_y と比べ基本周波数のピークが明瞭ではなく, 3 倍以上の高周波帯域でピークが見られる。

これらの結果から, 水平渦成分は基本周波数帯にピークを持ちながら砕波帯内では岸方向に減衰し, 一方, 鉛直渦成分は岸沖方向に偏在して分布するという構造が見られる。

3.2 渦強度と波高の岸沖変化

次に, 渦強度および渦構造の異方性に関して, その岸沖方向の変化特性を調べ, 砕波の進行に伴う渦構造の変化を検討した。

a) 渦強度の岸沖変化

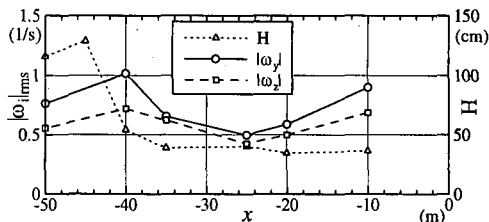
図-4(a) は, 侵食性波浪の造波 7 時間後以降の渦強度の r.m.s. 値, $|\omega|_{rms}$ と波高 H の岸沖変化である。この図より, 砕波点前後 ($x = -50$ m と $x = -40$ m) において波高が $1/2$ 以下となっており, 従って波動エネルギーは砕波後 $1/4$ 程度に低下していることが分かる。これに対して, 渦強度の r.m.s. 値は, 水平渦度, 鉛直渦度ともに砕波後に増大している ($x = -40$ m)。このことは, 砕波により, 波動のエネルギーが渦エネルギーに変換されたことを示唆している。

また, この渦強度は, 波の再生点 ($x = -25$ m) に向かい一旦減少した後, 第 2 砕波点近傍で再び増大している。このことも砕波により波動のエネルギーが渦のエネルギーへ変換されていることを裏付けている。当然ではあるが, 水平渦度は鉛直渦度よりも常に大きく, 砕波点近傍では 2 倍程度の差が見られる。

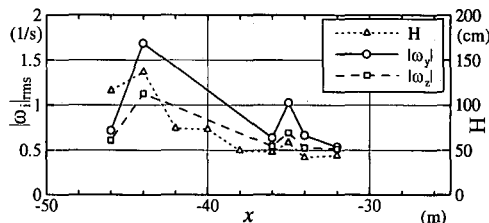
図-4(b) は造波開始後 3 時間の渦強度の岸沖方向変化である。図-4(a) と異なり, 渦強度が砕波点から徐々に小さくなっているように見えるが, これは砕波点岸側の計測点でノイズが多く, 結果として砕波点のすぐ岸側で計測データがなくなってしまったことが影響している見かけ上の分布であると解釈できる。また, $x = -35$ m 付近で再度波高, 渦強度ともに大きくなっているが, $x = -35$ m はこの時の第 2 砕波点近傍にあり, 第 2 砕波による増大によるものと考えられる。このケースでの海底地形 (図-1(a)) を見ると, 該当する付近に小さなバーが形成されており, 第 2 砕波はこれによるものと思われる。また, 第 1 砕波点付近のバーの大きさは計測 7 時間後の方がかなり大きく, このケースでの砕波が激しく, 従って第 2 砕波地点がずっと岸側に移動したものと理解できる。

b) 渦強度の異方性の岸沖変化

続いて, 渦度の水平, 鉛直方向の強度を比較することにより, 渦の異方性が岸沖方向にどのような変化をする



(a) 侵食性波浪 (造波 7 時間)



(b) 侵食性波浪 (造波 3 時間)

図-4 渦強度の岸沖方向変化

かについて検討を行った。

図-4(a) において水平渦強度 $|\omega_y|$ は, 砕波点付近で鉛直渦強度 $|\omega_z|$ に比べ相対的に大きな値をもち, 砕波直後において最大となる。両者の差はその後減少し, 砕波点から約 1 波長 ($x = -35$ m) ほどで $|\omega_y|$ と $|\omega_z|$ は同等の値をもつようになる。再生点付近まで水平, 鉛直渦度ともにほぼ同程度の強度を保ちながらゆるやかに減少するが, 第 2 砕波点付近で両者の差は再び顕著となっている。図-4(b) における水平, 鉛直渦度の変化も概して同様の变化となっているが, 第 2 砕波点付近での変化はより顕著なものとなっている。

以上のことから, 砕波による渦は, 第 2 砕波も含めて, 砕波直後には 2 次元性が強いものの, 砕波が進行し, 強度が小さくなっていくとともに等方性を増していくことが分かる。

4. 結 論

大型造波水路にてアレイ配置した超音波流速計より, 砕波帯における 3 次元渦度ベクトルの時空間変化を計測した。その結果, 以下の結論を得た。

- 1) 水平渦成分は基本周波数帯にピークを持ちながら砕波帯内では岸方向に減衰し, 鉛直渦成分は岸沖方向に偏在して分布するという構造が見られる。
- 2) 砕波後に沿岸方向に軸を持つ渦の強度が増大した後に減衰する一方, 鉛直方向の渦強度は砕波点付近では相対的に小さな値であるが砕波後の減衰は緩やかな傾向となる。
- 3) 渦強度は砕波後には非等方に増大し, 砕波の進行とともに渦度の等方性が強まる。

最後に、本計測に際して、東京電力(株)田中正博氏、東京大学佐藤慎司教授をはじめとする LAMBDA プロジェクト参加の皆様には多大なご協力を頂いた。また、Texas A&M 大学 Daniel T. Cox 博士には貴重な助言を頂くと共に、ADV 2 台を使用させて頂いた。関係者の皆様には謝意を表す。本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 B (No. 1345023 代表者：岡安章夫) によることを付記する。

参 考 文 献

- 池野正明・宇野喜之・後藤宏志・田中正博・森 信人・片山裕之・岡安章夫 (2000): 混合粒径砂を用いた大型海浜実験による粒径別浮遊砂フラックスとモデル化, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 556-560.
- 岡安章夫・鈴木崇之・片山裕之 (2000): 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. 546-550.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987): 碎波帯内の 3 次元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.
- 森 信人・松野健児・岡安章夫・片山裕之・池野正明 (2001): 大型造波水路における碎波帯内 3 次元局所渦の計測, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 86-90.
- Elgar, S., B. Raubenheimer and R.T. Guza (2002): Current Meter Performance in the surfzone, *J. Atmos. & Oceanic Tech.*, in press.
- Cox, D. T. and N. Kobayashi (1999): Identification of Intense, Intermittent Coherent Motions under Shoaling and Breaking Waves, *Journal of Geophysical Research*, 105, C 6, pp. 14223-14236.
- Dally, W. R. and S. F. Barkaszi Jr. (1994): 'High-resolution measurements of sand suspension by plunging breakers in a large wave channel', *Coastal Dynamics*, pp. 263-278.
- Jaffe, B. E. and A.H. Sallenger, (1992): The contribution of suspension events to sediment transport in the surfzone, *ICCE'92*, pp. 2680-2693.