

# 砕波帯内の三次元的水粒子軌道の実験的研究

渡 部 靖 憲\*・松 本 靖 治\*\*・佐 伯 浩\*\*\*

## 1. はじめに

砕波帯内では、砕波ジェットのスプラッシュにより斜行渦をはじめとする三次元組織的大規模渦構造が生成され、これらの大規模渦は、海浜流等の沿岸域の流れに影響を与えるだけでなく、海底砂の巻き上げにも大きく寄与することが以前から指摘されてきた (Nadaoka et al., 1989)。しかしながら、三次元的流速場の計測は、流速場の複雑さと計測機器に関わる問題から、側方からの気泡の移動軌跡を元にした観測が主であり、砕波過程を通じて定量的評価はなされていない。

本研究では、砕波後に混入する気泡による非可視領域を低減し中立粒子を撮影したビデオ解析により三次元的水粒子軌道を比較的容易に計測する実験方法を提案している。またこの流体運動の特性を明らかにするための基礎的段階として、中立粒子のフラクタル次元解析、粒子座標及び速度場に対する位相相関の比較、wavelet 解析による三次元流速の発達過程の比較を行った。

## 2. 実験装置と実験条件

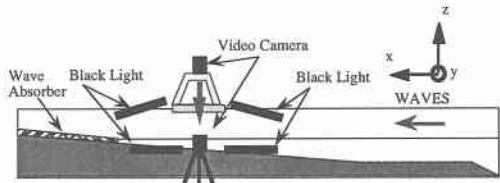
実験は図一1に示すように、延長 24 m, 幅 60 cm, 底面勾配 1/30 の二次元造波水槽で行われた。砕波前後の領域において側方及び上方から二台のビデオカメラ (30 フレーム/秒) を設置し、水槽中の中立粒子を撮影することにより三次元 ( $x$ : 波の進行方向,  $y$ : 水槽奥行き方向,  $z$ : 鉛直上向き方向) 座標を評価することができる (図一1, 図一2 参照)。

砕波後の領域では、連行気泡による非可視領域が波のフロント全面に広がるため、粒子の判別が不可能となる。この気泡のビデオ解析への悪影響を軽減するために、本実験では、螢光塗料を塗布し比重を 1.0 に合わせた直径約 2 mm の中立粒子を用い、撮影領域の前後左右からブラックライトを照明として使用することにより、非可視領域を大幅に低減し発光した中立粒子のみを撮影すること

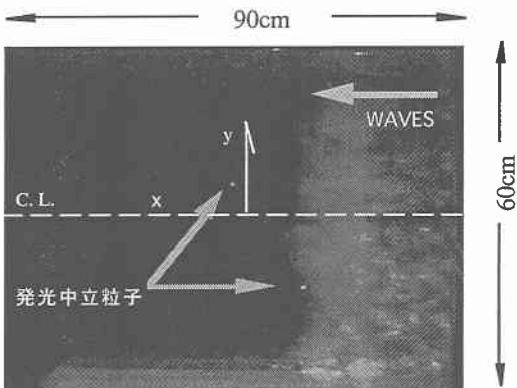
が可能となった。

中立粒子は、計測前は初期条件を統一するため水槽上部に設置された中立粒子固定器によって固定され、砕波点が安定し計測を開始する時、粒子固定器から開放され移動を開始する。粒子の初期位置は砕波点及び砕波点からの岸方向へ距離 ( $x_0$ ) が 0 cm, 80 cm (Plunging Point 背後), 1 m と 2 m 80 cm, 波向きに向かって水槽中央からの距離 ( $y_0$ ) が 10 cm おき、鉛直方向 ( $z_0$ ) に 5 cm おきに計測した。この時、幅約 1 m の撮影可能領域外に中立粒子が移動した場合は欠足のケースとした。また、中立粒子の判別が曖昧あるいは不能となる画像データは欠足データとして前後のデータからスプライン補間される。

同期させた 2 台のビデオカメラによる画像データは各ピクセル間の位置に対する相対座標を求めるためにパソコンに取り込まれる。得られた座標とキャリブレーション



図一1 実験装置



図二 上方ビデオによる実験画像 (矢印に発行中立粒子、図右領域に破碎フロントの連行気泡)

\* 正会員 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科環境資源工学専攻

\*\* 北海道大学工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科環境資源工学専攻

ン結果を元にそれぞれのフレームに対する  $x$ ,  $y$ ,  $z$  の絶対座標を得ることができる。実験波は、砕波波高 12 cm, 砕波水深 21 cm, 周期 2.1 秒であり、砕波形態は巻き波砕波であった。

なお、ビデオ画像のサンプリング間隔が 1/30 秒であり、それ以上の高周波変動が解析結果に反映されない点及び、中立粒子の平均径が 2 mm と比較的大きく径以下のスケールの流体運動を中立粒子の三次元運動が適切に

表現していると限らない点が問題として考えられるが、本研究では大規模渦構造を中心とした比較的大スケールの運動を見積もることを目的としており小スケール乱れの効果は考慮していない。また、中立粒子の移動形態は微妙な条件の差異によって全く異なり、強い初期条件依存性を持つ。実験において、波のフロントが通過する時、中立粒子を固定器から開放し計測を開始したが、実験誤差等により厳密な意味で必ずしも全てのケースにおいて

表-1 実験ケース及びその移動特性

|                                         |          | RUN 1 | RUN 2 | RUN 3 | RUN 4 | RUN 5 | RUN 6 | RUN 7  | RUN 8 | RUN 9 | RUN 10 | RUN 11 | RUN 12 | RUN 13 | RUN 14 | RUN 15 | RUN 16 | RUN 17 | RUN 18 | RUN 19 | RUN 20 | RUN 21 | RUN 22 | RUN 23 | RUN 24 |     |  |  |  |     |  |  |  |   |  |  |  |    |  |  |  |     |  |  |  |    |  |  |  |   |  |  |  |
|-----------------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|--|--|--|-----|--|--|--|---|--|--|--|----|--|--|--|-----|--|--|--|----|--|--|--|---|--|--|--|
| $x_0$ (from B. P., cm)                  |          | 80    |       |       |       |       |       |        |       |       |        |        |        | 100    |        |        |        |        |        | 280    |        |        |        |        |        |     |  |  |  |     |  |  |  |   |  |  |  |    |  |  |  |     |  |  |  |    |  |  |  |   |  |  |  |
| $y_0$ (from the center of flume, cm)    |          | -25   |       |       |       | -15   |       |        |       | -5    |        |        |        | 5      |        |        |        | 15     |        |        |        | 25     |        |        |        | -25 |  |  |  | -15 |  |  |  | 5 |  |  |  | 15 |  |  |  | -15 |  |  |  | -5 |  |  |  | 5 |  |  |  |
| $z_0$ (from the still water level, cm)  |          | 0     | 5     | -10   | -10   | 0     | -5    | -10    | -5    | -5    | -10    | 0      | -10    | 0      | -10    | -25    | 0      | 0      | -5     | -10    | -5     | -10    | -10    | -15    | -5     | 5   |  |  |  |     |  |  |  |   |  |  |  |    |  |  |  |     |  |  |  |    |  |  |  |   |  |  |  |
| average of the particle velocity (cm/s) | $u$      | 0.31  | -0.76 | 0.004 | 0.29  | 1.12  | -1.19 | -1.458 | 1.32  | 0.76  | -2.03  | 1.03   | -1.34  | 0.05   | 0.29   | -0.89  | -0.73  | -0.67  | -2.60  | -0.57  | -0.64  | -0.65  | 0.58   | -0.43  | 0.71   |     |  |  |  |     |  |  |  |   |  |  |  |    |  |  |  |     |  |  |  |    |  |  |  |   |  |  |  |
|                                         | $v$      | 0.43  | 0.20  | -0.06 | 0.48  | 0.02  | -0.13 | -0.56  | -0.41 | 0.53  | 0.27   | -0.77  | -1.07  | -0.19  | 0.48   | 1.27   | -0.31  | -1.30  | 0.82   | -0.05  | -0.31  | -2.02  | -0.13  | -0.61  | -0.14  |     |  |  |  |     |  |  |  |   |  |  |  |    |  |  |  |     |  |  |  |    |  |  |  |   |  |  |  |
|                                         | $w$      | -0.71 | -0.02 | 0.05  | -0.08 | 0.16  | -0.34 | -0.68  | -0.28 | 0.07  | 0.001  | -0.33  | 0.35   | -0.03  | -0.08  | -0.03  | -0.67  | -0.20  | 0.07   | -0.005 | -0.12  | -0.03  | 0.59   | -0.49  | -0.12  |     |  |  |  |     |  |  |  |   |  |  |  |    |  |  |  |     |  |  |  |    |  |  |  |   |  |  |  |
| variance of the particle velocity       |          | 19.02 | 21.23 | 21.36 | 18.28 | 19.29 | 17.32 | 25.96  | 18.73 | 12.69 | 14.90  | 22.38  | 16.42  | 16.30  | 18.28  | 14.57  | 20.25  | 19.59  | 18.53  | 15.33  | 15.23  | 16.06  | 19.55  | 17.82  | 17.28  |     |  |  |  |     |  |  |  |   |  |  |  |    |  |  |  |     |  |  |  |    |  |  |  |   |  |  |  |
| fractal dimension                       | position | 1.63  | 1.39  | 1.50  | 1.46  | 1.69  | 1.70  | 1.42   | 1.51  | 1.61  | 1.49   | 1.36   | 1.77   | 1.31   | 1.98   | 1.35   | 1.40   | 1.38   | 1.26   | 1.56   | 1.39   | 1.27   | 1.54   | 1.49   | 1.42   |     |  |  |  |     |  |  |  |   |  |  |  |    |  |  |  |     |  |  |  |    |  |  |  |   |  |  |  |
|                                         | velocity | 1.19  | 1.6   | 11.47 | 1.15  | 1.85  | 1.88  | 1.46   | 1.9   | 11.39 | 1.87   | 1.5    | 12.08  | 1.29   | 2.62   | 1.42   | 1.63   | 1.69   | 1.60   | 1.77   | 1.73   | 1.57   | 1.59   | 1.88   | 1.40   |     |  |  |  |     |  |  |  |   |  |  |  |    |  |  |  |     |  |  |  |    |  |  |  |   |  |  |  |

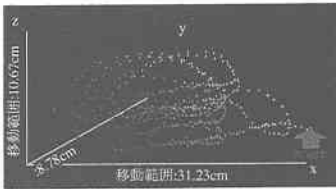


図-3 砕波点における中立粒子移動軌跡  
( $x_0 = 0$  cm,  $y_0 = -15$  cm,  $z_0 = -5$  cm)

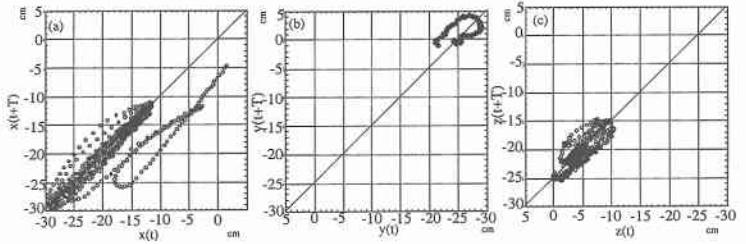


図-6 粒子の座標値の入射波周期に対する相関  
( $x_0 = 0$  cm,  $y_0 = -15$  cm,  $z_0 = -5$  cm)

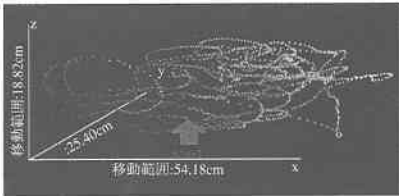


図-4 砕波後 80 cm における中立粒子移動軌跡  
( $x_0 = 80$  cm,  $y_0 = 25$  cm,  $z_0 = -10$  cm)

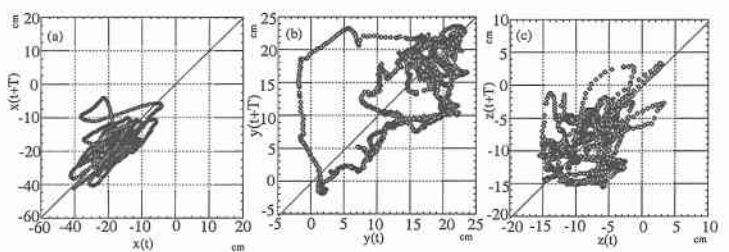


図-7 粒子の座標値の入射波周期に対する相関  
( $x_0 = 80$  cm,  $y_0 = 25$  cm,  $z_0 = -10$  cm)



図-5 砕波後 280 cm における中立粒子移動軌跡  
( $x_0 = 280$  cm,  $y_0 = -15$  cm,  $z_0 = -5$  cm)

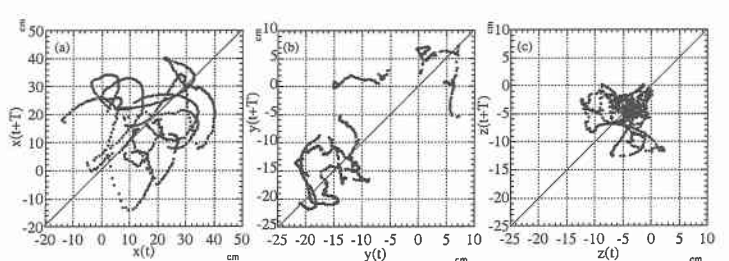


図-8 粒子の座標値の入射波周期に対する相関  
( $x_0 = 280$  cm,  $y_0 = -15$  cm,  $z_0 = -5$  cm)

初期条件が一致しているとは限らないが、粒子の厳密な移動機構を議論するのではなく、その統計的性質及び砕波後の水粒子の運動の三次元的な特徴的性質を抽出することを目的とし、解析した。

### 3. 結果と考察

本実験の状況を示すために、中立粒子追跡時の上方からのビデオ画像の一例を図-2に示す。この図は砕波点から1m岸側( $x_0=1\text{m}$ )の撮影点における画像であり、砕波フロント部の連行気泡が存在するにもかかわらず矢印で示す発光した中立粒子を確認し気泡と区別することができる。この座標を各フレーム毎追跡し側方からの同様な処理と対応させることにより水粒子の三次元軌道の計測可能となる。

#### 3.1 実験ケースと粒子移動特性

表-1は、計測が行われた実験ケース及びそれに対する中立粒子の平均速度成分、速度分散、粒子座標及び速度場のフラクタル次元を表している。粒子平均速度及びその分散については特徴的な空間的傾向は得られなかった。フラクタル次元の結果は、移動空間及び速度場に関して、その軌道の複雑さの指標となる。 $x_0=80\text{cm}$ のケースにおいて移動空間軌道のフラクタル次元は1.31-1.98次元、 $x_0=100\text{cm}$ のケースでは1.27-1.56次元、 $x_0=280\text{cm}$ のケースでは1.43-1.54次元であった。この結果についても粒子軌道のそれぞれの初期条件に対する空間特性は明確に現れず大まかな傾向しかわからないが、砕波前の質量を伴う楕円軌道のフラクタル次元は1.04次元、よく知られているローレンツアトラクターは2.06次元であるので砕波帯内の水粒子は十分に複雑な運動形態をとることがわかる。

#### 3.2 中立粒子の移動軌跡

図-3は、砕波点( $x_0=0\text{cm}$ ,  $y_0=15\text{cm}$ ,  $z_0=-5\text{cm}$ )における中立粒子の三次元移動軌跡を表したものである。当然のことながら、中立粒子はほぼ2次元的な楕円軌道を運動する。

図-4、図-5は砕波後の中立粒子の軌道を示した例であり、それぞれ初期位置が砕波点から80cm岸側( $x_0=80\text{cm}$ ,  $y_0=25\text{cm}$ ,  $z_0=-10\text{cm}$ )及び2m80cm岸側( $x_0=280\text{cm}$ ,  $y_0=-15\text{cm}$ ,  $z_0=-5\text{cm}$ )の中立粒子の移動軌跡を表す。これらの図から明らかなように、砕波後の水粒子軌道は非常に複雑な3次元的なものとなる。また初期条件に係わらず、砕波後に単調な運動となるケースはなかった。これら一見とらえどころのない粒子軌道の特徴を抽出するため、第一段階として次に移動空間、速度場の特性を調べていく。

#### 3.3 入射波周波数に対する粒子座標・移動速度の相関

砕波後の流体運動は3次元的な乱流場になるとはいえ

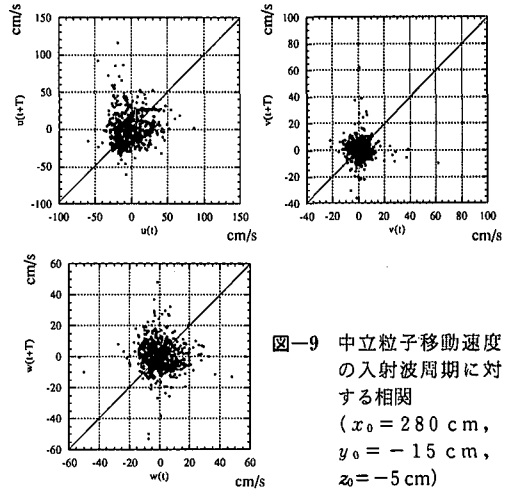


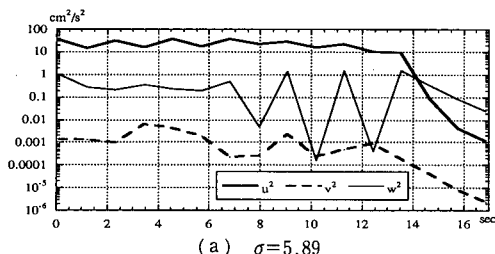
図-9 中立粒子移動速度の入射波周期に対する相関  
( $x_0=280\text{cm}$ ,  
 $y_0=-15\text{cm}$ ,  
 $z_0=-5\text{cm}$ )

依然伝達してきた波動成分の影響を強く受ける。この波動成分からの逸脱を乱れ成分として評価することにより、渦や乱れの空間的な特性を知ることができる。この節では、砕波後の流体運動の入射波の基本周波数成分の依存性を調べていく。

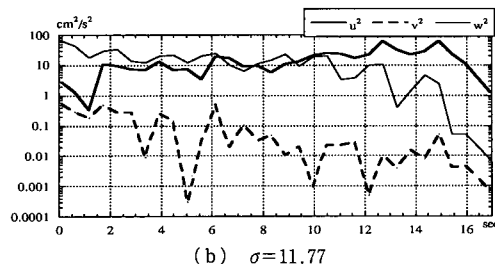
図-6は、初期位置が砕波点である中立粒子の座標値の相関を表したものである。横軸はある時刻 $t$ における座標値であり、縦軸は $t$ から1周期( $T$ )後の座標値を表し、(a), (b), (c)はそれぞれ $x$ ,  $y$ ,  $z$ 座標に対する図を示す。粒子が完全に周期的に運動すればある1点にプロットされ、一定の質量輸送速度をもってあるいは時間平均流によって周期運動をすれば、対角線の法線方向にシフトしながら対角線とほぼ平行な線上にプロットされる。砕波点近傍では、 $x$ 座標、 $z$ 座標に関してほぼ基本周波数をもつ周期的な流体運動が存在していることがわかる。

図-7(a)は、図-4のケース( $x_0=80\text{cm}$ ,  $y_0=25\text{cm}$ ,  $z_0=-10\text{cm}$ )に対する同様な図である。このケースでは、依然 $x$ 座標(a)に関して基本周波数に対する相関が強くみられる。この傾向は、同じ初期位置 $x_0$ をもつほとんどのケースに現れていた。 $z$ 方向に関しては比較的对角線を中心としたプロットとなっているがばらつきも大きく、スプラッシュの影響を受け高周波成分による変位が現れていると考えられる。また、三次元性を表す $y$ 方向には基本周波数と相関のない非常に大きな領域にわたってゆっくりとした変位が確認できる。

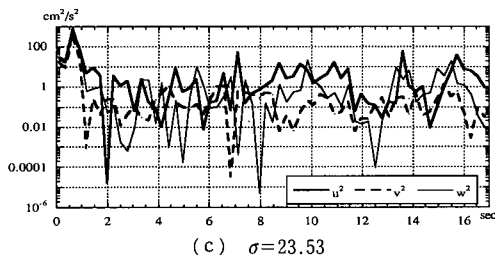
図-8は、初期位置( $x_0=280\text{cm}$ ,  $y_0=-15\text{cm}$ ,  $z_0=-5\text{cm}$ )に対する同様な図である。図-7(a)でみられたような入射波の基本周波数依存性は $x$ 座標にみられず、異なる周波数を持って複雑な運動形態をとることがわかる。 $y$ 座標(b)に関しては非常に広範囲にわたって移動



(a)  $\sigma=5.89$



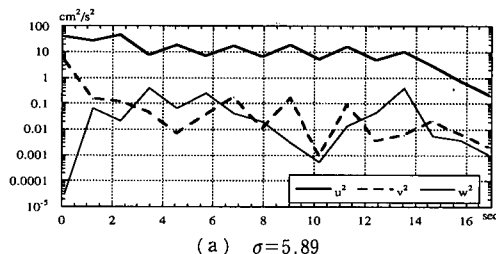
(b)  $\sigma=11.77$



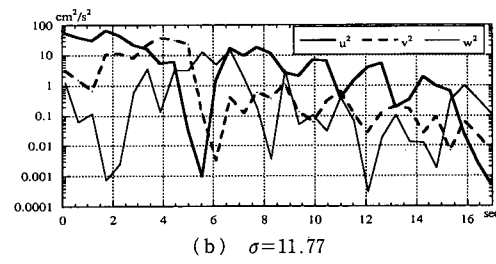
(c)  $\sigma=23.53$

図-10 wavelet スペクトル

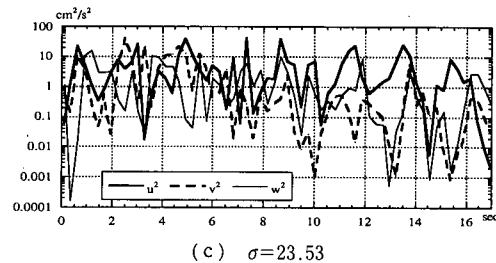
( $x_0=0$  cm,  $y_0=-15$  cm,  $z_0=-10$  cm)



(a)  $\sigma=5.89$



(b)  $\sigma=11.77$



(c)  $\sigma=23.53$

図-11 wavelet スペクトル

( $x_0=80$  cm,  $y_0=25$  cm,  $z_0=-10$  cm)

しており三次元流速場の発達を確認できる。この領域では、スプラッシュアップサイクルも終わりボア状砕波フロントが進行する十分に発達した乱れが存在すると考えられる。図-4、図-5の様に、一見運動形態の区別がつかない結果に対しても砕波過程の進行により流体運動特性は大きく変化していることがわかる。

図-8と同一の初期条件に対する中立粒子の移動速度成分の同様な相関を図-9に示す。この図からこの領域では流速場の基本周波数に対する相関はどの成分に関してもなく別の運動機構に従っていると考えられる。

### 3.4 周波数エネルギースペクトル

Plunging Point を境とした 2 次元流体運動から 3 次元乱流場へのエネルギー遷移を調べるために、各流速成分の周波数解析を行った。中立粒子の運動が非定常であり、ビデオ撮影が可能な領域に限られるので十分長い時間にわたる計測が不可能であるので、本研究では非定常時系列の周波数解析に有利な Wavelet 変換によって粒子運動の周波数特性を調べた。

Wavelet 変換は次のように定義される。

$$W_f(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} f(x) \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $f$  は  $x$  に関する任意の関数で、 $a$  はスケール変

換パラメータ、 $b$  はシフト変換パラメータである。Wavelet 係数  $W_f$  を使ってスケール  $a$  によって正規化された Wavelet スペクトルは、次のように定義される。

$$dE_f = |W_f(b, a)|^2 \frac{da db}{a^2} \quad \cdots \cdots (2)$$

本研究では、基底として周波数分解性の良い 3 次カーディナル B スプライン関数を採用した。(1)式を表す座標  $(b, 1/a)$  を整数  $i, j$  を使って  $(2^{-i}, 2^j)$  と置き換えると、離散 Wavelet 変換は次のように書ける。

$$\tilde{f}_H = 2^j \int \sqrt{2^j - j} a(x) dx \quad \cdots \cdots (3)$$

最初に、砕波後の結果との比較のため、砕波点における wavelet スペクトルを図-10 に示す。(a) 角周波数  $\sigma=5.89$ , (b)  $\sigma=11.79$ , (c)  $\sigma=23.53$  をもって変動する各流速成分に対するエネルギー密度  $u^2, v^2, w^2$  成分を表す。砕波による乱れの存在しないこの領域では、(a) 及び (b) の比較的低周波数に対して入射波による流速成分が卓越するので、 $u^2$  及び  $w^2$  成分が常時高いエネルギーを保有する。流体運動自体が二次元的であるので  $v^2$  成分がこれらの周波数帯で低い値をもつ。

図-11 は、図-4 のケース ( $x_0=80$  cm,  $y_0=25$  cm,  $z_0=-10$  cm) における wavelet スペクトルを表してい

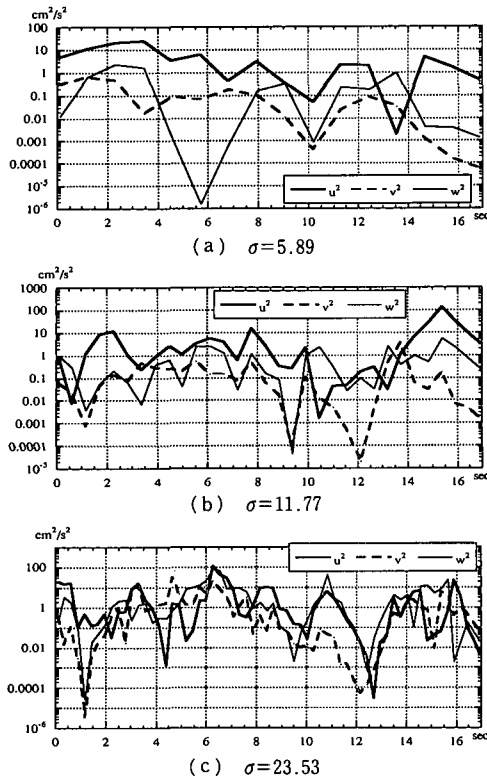


図-12 wavelet スペクトル  
( $x_0=280$  cm,  $y_0=-15$  cm,  $z_0=-5$  cm)

る。Plunging Point の背後に位置するこの領域では (a) における  $u^2$  成分のエネルギーの高さは水粒子速度が依然入射波の波動性を強く受けていることを意味する。また (a) において、 $v^2$  成分のエネルギーが図-10(a) と比べて低下する結果は、この領域において  $v^2$ ,  $w^2$  成分は生成された乱れとしての変動が卓越することを表しているといえる。

図-12 は、大規模なスプラッシュを伴う流体運動が終わりボア状の砕波フロントが進行する領域である初期位置 ( $x_0=280$  cm,  $y_0=-15$  cm,  $z_0=-5$  cm) における wavelet スペクトルを表す。この領域では低周波数をもつ  $u^2$  成分のエネルギーは前図と比較して大きく減衰し、 $v^2$  及び  $w^2$  成分の値に近づいているのがわかる。このような波動エネルギー成分の低下と共に (b), (c) においては各成分の変動の傾向が類似性をもつことがわかる。この結果はこの領域ではこのスケールの変動が方向性をもたない発達した速度場に遷移したことを意味していると思われる。これに関してはさらに詳細な調査が必要である。

これらの結果は、特定の初期条件に限定される中立粒子の運動特性であるが初期位置に依存して前述したよう

な運動形態をとるケースが多くみられた。こうした三次元流体運動を特長づけるパラメータの特定及び統計的性質を明らかにするためさらに研究を進める必要がある。

この実験法により、比較的容易に砕波帯内の流体運動を計測できるので、さらに広い計測点において多くのケースについて調査することにより砕波後の三次元流体運動について多くの情報が得られると考えられる。そのためには PTV による動画画像処理法と組み合わせシステム化することによりさらなる効率化が必要となると考えられる。

#### 4. 結 論

- ・砕波後の 3 次元流速場及び渦構造を計測するために、砕波後に混入する気泡による非可視領域を低減し中立粒子を撮影したビデオ解析により三次元的水粒子軌道を計測する実験方法を提案した。

- ・砕波帯内において入射波の周波数依存性を調べることで水粒子軌道及び変動流速成分の空間特性を議論した。

- ・Wavelet スペクトルにより流速成分の周波数特性を解析し、砕波後の 3 次元変動スケールの空間特性を把握できることを示した。

- ・三次元流体運動を特長づけるパラメータの特定及び統計的性質を明らかにするためさらに研究を進める必要がある。

- ・この実験法を PTV 等の動画画像解析と結びつけ、広い範囲にわたって 3 次元流速場を計測することにより、さらに効率よく流体運動機構を把握することが可能となると考えられる。

#### 参 考 文 献

- 渡部靖憲・佐伯 浩 (1995): 画像処理による砕波帯内の運動機構に関する考察, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 116-119.
- 渡部靖憲・森 憲広・稲垣 啓・佐伯 浩 (1997): 砕波帯内の平均流速場と流体運動スケールについて, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 121-125.
- Okayasu, A., T. Shibayama and N. Mimura (1986): Velocity Field under Plunging Waves, Proc. Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp. 660-674.
- Nadaoka, K., M. Hino and Y. Koyano (1989): Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone, J. Fluid Mech., Vol. 204, pp. 359-387.
- Watanabe, Y., and N. Mori (1997): Three-Dimensional Characteristics of Velocity Field and Effects of Undertow in a Surf Zone, Proc. the Seventh Int. Offshore and Port Eng. Conf., Vol. 3, pp. 247-253.
- Farge, M. (1992): Wavelet Transforms and Their Applications to Turbulence, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 24, pp. 395-457.