

砕波乱流下の底質粒子の三次元的挙動及び巻き上げ に関する実験的研究

渡部 靖 憲*・秀島 賢 保**・佐 伯 浩***

粒子追跡を基礎とする PTV システムにおいて, 高粒子数密度をもつ速度場でのフレーム間粒子追跡は困難となり, このシステムの不利な特徴として指摘されている。この論文では, 高粒子数密度を有する三次元固体粒子群運動計測を行うための 3D-Stereoscopic Particle Tracking Velocimetry システムを提案している。また, 静水への粒子群沈降及び砕波乱流下の浮遊砂運動の Volumetric な三次元粒子速度計測を行い, その実践的適用性を検証すると共に, 砕波内移動床上で発生するサルテーション, 巻き上げ等, 砕波遷移に伴う底床構成粒子の移動過程の変化について議論を行っている。

1. はじめに

砕波後, 連続するジェットのスプラッシュは三次元の大規模渦を生成させ, 特に斜行渦は海底砂の浮遊に影響を与えることが指摘されている (例えば, Nadaoka et al. 1989)。この浮遊砂は固相間の接触力が失われ容易に流体力により輸送されるため漂砂過程を表現する重要なパラメータとなる。砕波帯の三次元渦生成, 発達が間欠的かつ局所的であり底質の浮遊イベントは初期的にこれらに連動して発生する (例えば岡安ら 2001) と共に, その後流体との相互作用を経て極めて複雑な固液混相乱流へと発達する。従来なされてきた濁度等スカラー量の計測による浮遊砂の評価ではこうした運動学的情報は計測できず, また三次元固体粒子運動を計測する手法が存在しないため, この領域における海底構成粒子の pick-up function 構築のための定量的情報を得ることができない。

固相の速度情報取得のためには非接触計測が不可欠であり, 特に動画像計測をベースとした PIV (Particle Image Velocimetry) あるいは PTV (Particle Tracking Velocimetry) 解析は非接触で面的速度分布を取得するのに有効である。一方, これらの解析法を三次元に拡張し, 三次元粒子速度を取得するアルゴリズムが積極的に開発されている。最も一般的なシステムは, 薄いレーザーシート内の三次元流速を 2 台の同期されたカメラからの画像視差から算定する 3D-PIV あるいは 3D-PTV である。しかしながら, これらの方法はシート内部の粒子に対してのみ計測可能であるため, 本研究で取り扱う局所的に大きな変化を伴う三次元渦場ではシート奥行き方向の volumetric な流速分布が欠落してしまう。粒子を照射するレーザーシートを奥行き方向に水平移動させながら 3D-PIV を適用することでシート内三次元流速の奥行き分布を計測する 3D-Scanning PIV は有効な方法の一つであるが, 奥行き速度分布がシート移動に必要な時間の関数となり, 本研究が対象とする非定常渦運動を含む粒

子速度計測には不向きである。奥行き解像度と時間解像度が逆比例の関係を持つため, 精度良く三次元粒子速度の局所性を調べるためには非常に高いレコーディング周波数を有するカメラが必要となる。奥村ら (2001) は三台のカメラからの画像視差を利用し非線形写像により Volumetric な三次元粒子速度計測を可能とする 3D-Stereoscopic PTV を開発し, 低密度粒子運動に対してその精度を検証している。また, 最近, Kieft et al. (2002) も 3D-Stereoscopic PTV をベースに円柱背後のウェイクの流速及び渦度を計測している。一方, 3D-Stereoscopic PTV では, 粒子の数密度が高くなると増加するミスマッチだけでなく視軸上の粒子の影となる粒子の評価が測定精度に大きな影響を与えるため, さらなる改善及び検証が必要である。

本研究では, 3D-Stereoscopic PTV を高数密度球状固体粒子運動に適用しその精度評価を行った。さらに, 同様な計測を砕波フロント通過後に発生する巻き上げ及び浮遊イベントに適用し底粒子個々の瞬時三次元的軌道と速度の時間変化並びに遷移領域とボア領域におけるこれらの差異について運動学的見地から議論するものである。

2. 実験方法

(1) 実験装置

a) 高密度粒子群の沈降実験

幅 58 cm, 奥行き 28 cm, 高さ 35 cm の側面が透明なプラスチック製水槽上部に内径 2 cm のアクリル製中空パイプが設置される。このパイプは予め薄い水層上で冷凍され, パイプ下端は薄い水層で覆われている。このパイプ内に 6~20 個の蛍光着色された直径 2 mm のガラスビーズが投入される。パイプ下端が水面に接する状態で, パイプ内に温水を注入し水層を溶解させ, ガラスビーズをパイプ下面に対してほぼ一様に落下させる。三台のデジタルビデオカメラ (以下 DV と呼ぶ) は水槽側方に設置され (図-1 参照) 撮影が行われた。実験条件を表-1 に示す。

b) 砕波帯の浮遊粒子速度計測

* 正 会 員 工 博 北海道大学大学院助手 工学研究科

** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科

*** フェロー 工 博 北海道大学大学院教授 工学研究科

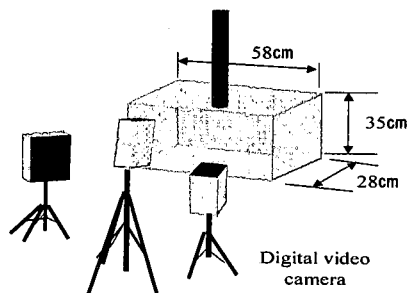


図-1 沈降実験装置

表-1 沈降実験の実験条件

	粒子数	粒子数密度 (#/pixel ²)	粒子径 (mm)
case 1	12	0.037	2
case 3	7	0.022	2
case 4	13	0.02	2
case 6	15	0.015	2
case 7	20	0.057	2
case 8	9	0.011	2
case 11	6	0.023	2

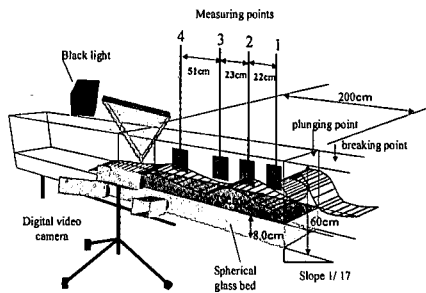


図-2 浮遊粒子速度計測実験装置

ピストン型造波機が設置された延長 800 cm, 幅 25 cm, 高さ 60 cm の全面透明アクリル製の可視化用可変勾配水槽において実験が行われた (図-2 参照)。この水槽の底部には、200 cm 間隔で着脱可能な深さ 8 cm の砂層ポッドが設置されており、流体を乱さない状態で部分的に固体粒子層を配置できる。砂層ポッド内に直径 1 mm のガラスビーズが敷設され、この層内に蛍光着色されたガラスビーズが均等に混合される。同期された三台の DV (8 bit, 解像度 1 K×1 K 画素, レコーディング周波数 30 Hz) は砕波点からボア領域に至るまでの 4 計測点 (図-2 参照) に対して水槽側方に設置された。同期画像は接続された PC にリアルタイムで送信され画像ファイルとしてストックされる。光源として撮影領域側方上部から紫外線ライト (400 W) が設置された。本実験では、底面勾配 1 : 17 において砕波波高 26 cm, 砕波水深 15 cm, 周波数 0.45 Hz の単一条件の波浪を対象とした。なお、撮影は各計測点について連続する 5 周期に渡って行われ、3 セットの試行計測がなされた。

(2) 解析手順

奥村ら (2001) が開発した三台の DV の視差から三次代数方程式で体積的な位置情報を取得し粒子追跡を行う 3D-Stereoscopic PTV システムを底粒子巻き上げ現象に適用する。以下にこのアルゴリズムをフィルタリング、粒子抽出、粒子間リンクについて修正し、多粒子速度解析に拡張した処理手順を示す。

a) 前処理

同期された三台の DV 取得画像は、ガウシアンフィルタでノイズ除去後、直径 10 画素の円形トップハットフイ

ルターにより相当する面積以下の蛍光励起光の領域と不均一な背景画像濃度 (無着色ビーズ全体からの微弱反射光や混入気泡群からの広領域にわたる反射光) を分離する。トップハット変換後の画像は、全画像濃度レベルが 8 bit フルレンジに分布するように変換され画像濃度勾配を乗じて粒子の重心位置を強調し、さらに近隣画素に対する相対閾値を用いて二値化される。この方法は、通常行われる適当な絶対閾値による二値化とは異なり蛍光励起光強度に大きく依存せず画像濃度ピークを抽出可能となるため、流体の存在のために輝度損失するカメラから離れた位置に存在する低画像濃度を示す粒子についても良好に検出が可能となる。二値化画像は個々の粒子に対する画素面積を用いてサブピクセルのオーダーでその重心位置が画像座標上で決定される。

b) 実座標上の粒子位置の決定

一般に、三次元物体を撮影する場合、物体の重心 (あるいはカメラの焦点) に対して視軸上の奥行き方向に画像座標は非線形となる。本システムでは、実空間での粒子位置 (X, Y, Z) は画像座標 (x, y, z) を使って以下の三次代数方程式で決定する。

$$\begin{aligned}
 X_i^j = & a_0^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_1^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_2^j x_i^j x_j^j x_k^j \\
 & + a_3^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_4^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_5^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_6^j x_i^j x_j^j x_k^j \\
 & + a_7^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_8^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_9^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_{10}^j x_i^j x_j^j x_k^j \\
 & + a_{11}^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_{12}^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_{13}^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_{14}^j x_i^j x_j^j x_k^j \\
 & + a_{15}^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_{16}^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_{17}^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_{18}^j x_i^j x_j^j x_k^j + a_{19}^j \dots \dots \dots (1)
 \end{aligned}$$

ここで、下の添え字は座標番号、上の添え字はカメラの番号 ($i, j=1, 2, 3$)、 $a^0 \sim a^{19}$ はそれぞれの座標番号に対する 20 個の係数であり予め行うキャリブレーションにおいて既知の実座標と対応する画像座標から最小自乗法で決定される。注目する粒子に対して、視差を持つ同時に撮影された 3 つの画像座標を使った 3 つの組み合わせによって算出された各実座標間の最大誤差が粒子径以下の時、それぞれの画像座標上の注目する粒子が同一のものであるとして粒子マッチングがなされる。画像上の全ての粒子に対してスキャンされ、このマッチング判定がなされる。

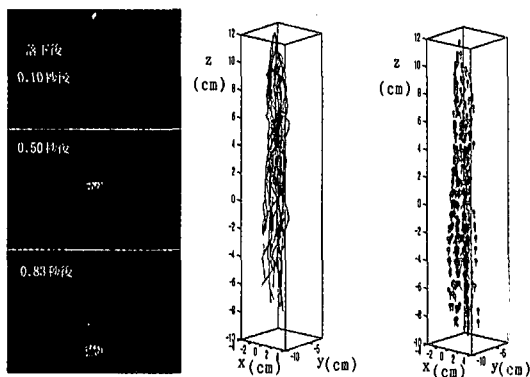


図-3 case 7 における沈降粒子の中央カメラからの元画像(左), 粒子軌道(中央), 粒子速度ベクトル(右)

c) 流速評価

全てのフレームで粒子座標が決定された後, 最小加速度原理に基づきフレーム間にわたる同一粒子のリンクが行われる。この方法は差分化された粒子輸送方程式に基づいた最小誤差の粒子をリンクさせる最もシンプルな3点法である。多粒子計測の場合, 最小加速度を示す候補粒子が重複する可能性が高いため, 全てのリンクの組み合わせに対してスキャンし比較的低い加速度をもついくつかの粒子リンク情報を保持した状態で再スキャンを実行し重複粒子に対して加速度の小さな順にプライオリティーを与え最適な粒子リンクを決定する。多粒子では, この一連スキャンに要する計算時間は莫大なものとなるため, さらなるアルゴリズムの改良が必要である。

3. 結 果

(1) 高密度粒子群の沈降実験

疎な粒子密度を持つ中立粒子については精度の検証が為されている(奥村ら, 2001)が, 海底を構成する高粒子密度をもつ粒子群に対する計測の妥当性を確認するため, まず静水中に高数密度固体粒子を放出する沈降粒子群の速度計測を行った。

図-3は, case 7 における粒子沈降時の中央カメラから撮影された元画像, 三次元沈降粒子軌道及び粒子速度ベクトルを表している。一般に高粒子密度をもつ粒子群が沈降する時, 粒子近傍の局所流が粒子間で相互に影響する群効果により側方への揺らぎが発生する。この結果もまた同様な揺らぎを持ちながら沈降する粒子運動を再現する。なお, この揺らぎは粒子数が少ないケースでは確認されなかった。

図-4は, 同一フレーム内の全粒子に対する三次元粒子速度の集合平均の時系列を表したものである。側方への粒子速度は前述の揺らぎに応じてゼロ速度まわりに変動するが, 鉛直速度(沈降速度)は大きな変動をみせず

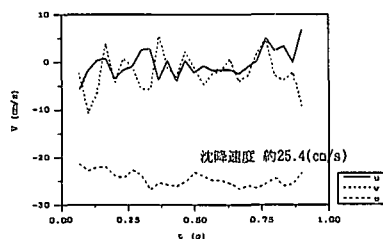


図-4 三次元粒子速度集合平均の時系列

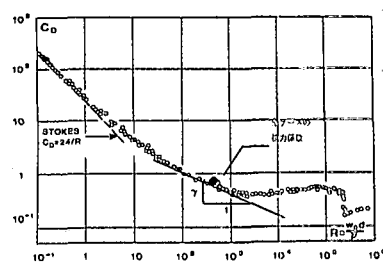


図-5 抗力係数と粒子 Reynolds の関係

にほぼ一定速度で沈降する。この沈降速度を基に抗力と重力の釣り合いから抗力係数を求め, 粒子 Reynolds 数に対してプロットしたものが図-5である。本実験の全てのケースにおいて得られた抗力係数は, 粒状固体粒子の抗力に関する他の実験結果と一致する。この結果は, 高数密度粒子群中の粒子速度解析においても本 PTV システムが高い精度で有効であることを表している。

(2) 砕波帯の水底床構成粒子の移動速度

一般に, 砕波帯の底質輸送形態は砕波遷移を経由して大きく変化する。すなわち, シートフロー状態から掃流砂としての移動形態から, 砕波点においてサンドバーを形成し, その後厚く発達した境界層上から砕波による渦あるいは乱れから極めて短時間に与えられる局所的流体力により底質の一部が局所的に攪拌された到達する渦のスケールに依存して局所的な巻き上げイベントが発生する。さらに砕波が進行すると水底までの距離が小さくなり生成渦は容易に海底に到達し得るため, 定常的に底面境界層と生成渦が影響し合う極めて複雑なせん断場が形成され断続的な巻き上げ及び渦による捕捉過程を経て浮遊砂量が顕著に増加する。この節では, 砕波の進行を通した底床構成粒子の輸送過程の遷移に着目し, 2.(2)の実験結果について議論を行う。

図-6は, 砕波点直下(計測点1)における波浪通過直後からの(8フレーム間隔)中央カメラからの元画像である。水底床を構成するガラスビーズに混合された蛍光ビーズが形成されたサンドバー上を移動する。図-7は図-6と同一砕波が通過した周期において, 蛍光粒子の軌道を表したものである。粒子運動は, 岸沖方向に直線



図-6 計測点1における波浪通過直後の中央カメラからの元画像 (左から8フレーム間隔)

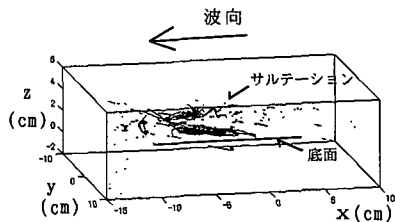


図-7 計測点1における一周期間の粒子軌道 (図-6 参照)

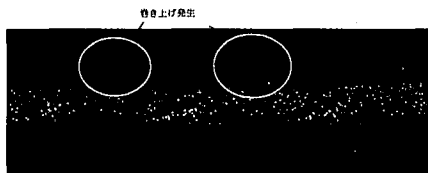


図-8 計測点3における破波通過後の中央カメラからの元画像 (左から8フレーム間隔)

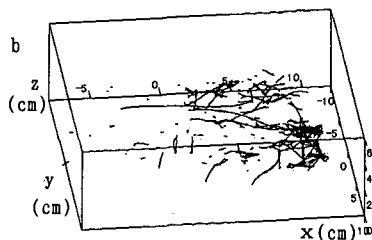
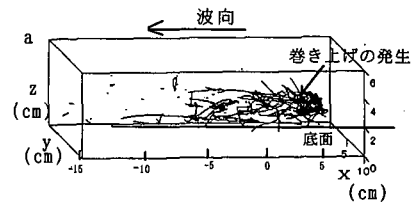


図-9 計測点3における巻き上げイベントを含む一周期間の粒子軌道 (a: 側方投影図, b: 斜め上方投影図, 図-8 参照)

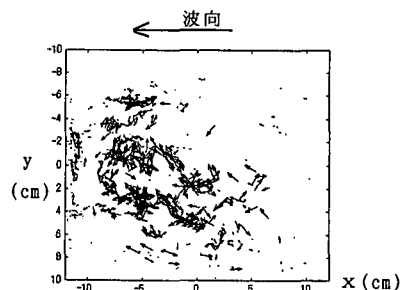
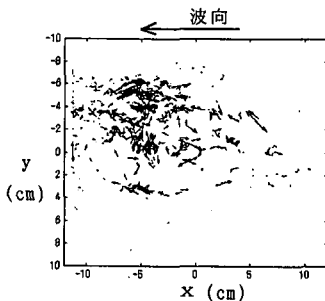


図-10 計測点1 (上) 及び計測点3 (下) の粒子ベクトルの平面図

的な単純往復軌道が支配的であり、砕波に起因する渦の影響を受けないため顕著な巻き上げは生じない。しかしながら、サンドバーを乗り越える際に、加速された掃流状態の一部の粒子は若干浮遊状態になり小さなサルテーションが発生していることが確認できる。

図-8は、遷移領域(計測点3)において、砕波通過後、底面に到達する大規模渦によって粒子の巻き上げが発生している状態を撮影した画像である。この巻き上げイベントを含む一周期間の粒子軌道を表したものが図-9である。大規模渦による攪拌により大量の粒子がまず鉛直方向に巻き上げられ、その一部は複雑な軌道を描きながら沈降し、一部は岸方向へ輸送される。また図-9bからこの砕波下で有意な巻き上げイベントが発生した個所は水槽前面の側壁近傍のみであり、背後の側壁近傍では掃流状態からのサルテーションが確認される。底粒子の巻き上げは、極めて局所的な現象であることを表している。なお、図-7と図-9において粒子間のリンクが十分でない個所が存在するが、原因としてレコーディング周波数が粒子運動を追従できていないまたは混入気泡によって光が拡散され部分的に粒子を抽出できていない可能性が考えられる。また、特にスパン方向流速(v)について異常流速が間欠的に検出されており、本実験対象のような急激な変化を伴う速度場を処理する場合精度を向上させるために何らかの処理を行う必要があることを示唆している。

図-10は、計測点1及び2における典型的な粒子ベクトルの平面図($x-y$ 平面)を表したものである。比較的岸沖方向流速が強く現れる計測点1と比較して、計測点2ではスパン方向流速も有意な値を有し、またその分布も屈曲した筋状にベクトルが向く極めて局所性の強いものとなる。この周期では直接大規模渦による顕著な巻き

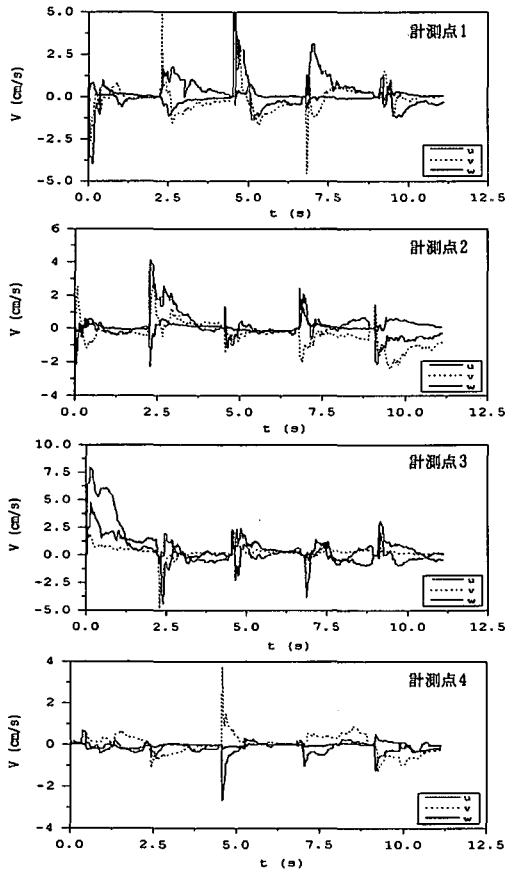


図-11 各計測点における粒子速度集合平均の時系列

げは確認できなかったことからこうした完全に三次元的な粒子移動は、襲来する大規模渦に直接起因するものだけではなく、これによって局所的に不均一に輸送、堆積された局所地形が掃流状態の粒子移動経路を拘束し変化させたものと考えられる。

図-11は、それぞれの計測点において、各フレームの計測領域に存在する全ての検出された粒子に対してその速度の集合平均値の時系列を表したものである。ここで、この比較では初期状態では底粒子中にはほぼ均等に分布していた蛍光粒子は継続的な移動経験を経て局所的に不均一な分布を持つ点及び移動形態や移動粒子数の全く異なる掃流及び浮遊粒子も同一の重みで平均されているため、定量的な評価は困難であるため、定性的な波動スケールの平均粒子速度の特徴を議論していく。単純な往復流が支配的で鉛直速度は比較的小さい計測点1の結果と比べ、遷移領域の計測点2では粒子の巻き上げイベント発生に起因して鉛直速度が相対的に増加し、さらに計測点3では支配的に発達しているのがわかる。また、ボア領域内の計測点4では全ての粒子速度成分について波浪とは異なるスケールの変動が支配的であり、相対的に粒子

速度は小さくなるがランダム性の強い粒子運動が存在していることを示唆している。なお、前述したように間欠的に特にスパン流速の異常な流速が検出されているのがわかる。この異常流速は、何らかの理由で抽出された粒子数が少ない時刻において発生しており、本来リンクされるべき粒子が次のフレームで検出できていないために誤評価されているものと考えられる。乱流場でのさらに信頼性の高い三次元計測を実現するためには、フィルタリングのさらなる改善及びリンクアルゴリズムの改良が不可欠であることが明らかとなった。

4. 結 論

3D-Stereoscopic PTVを高粒子数密度をもつ球状粒子運動測定のために改良し、その適用性及び問題点について調査を行った。

沈降粒子群がその群効果として側方に揺らぎながら沈降する個々の粒子軌道並びに粒子速度ベクトルを良好に解析することができた。この時の集合平均沈降速度を用いた抗力係数は他の実験結果と一致する。

砕波遷移を経由した砕波後の浮遊砂輸送過程の変化を調べるため同システムを球状ガラスビーズからなる移動床可視化実験に適用した。砕波による大規模渦が底面まで到達しない砕波点近傍では、主として岸沖方向に直線的な粒子軌道をもち明確な巻き上がりは発生しなかった。遷移領域では、気泡を伴った大規模渦が海底に達し、局所的かつ間欠的に巻き上げイベントが発生する。これにより浮遊状態となった粒子群の一部は複雑な軌道をもって沈降し、上方まで巻き上げられた粒子の多くはスパン方向に揺らぎながら岸方向へ輸送される。また、これと同時に掃流状あるいはサルテーションを発生させながら移動する異なる形態がその周辺で存在する。

乱流中で駆動される多粒子の測定において、いくつかの問題点が明らかになった。この測定を精度良く行うためには、混入気泡によるエネルギー減衰が影響しないレベルの十分な強度の連続光源の確保、カメラのフレームレートに関わる問題の解決、粒子抽出及び粒子リンクアルゴリズムのさらなる改良が必要である。

参 考 文 献

- 岡安章夫・岩澤秀光・片山裕之・敦賀 仁 (2001): 斜降渦による底面近傍3次元流速変動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 81-85.
- 奥村悠樹・渡部靖彦・佐伯 浩 (2001): 砕波帯内の3次元流速の実験的評価, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 96-100.
- Kieft, R. N., K. R. A. M. Schreel, G. A. J. van der Plas and C. C. M. Rindt (2002): The application of a 3D PTV algorithm to a mixed convection flow, *Experiments in Fluids*.
- Nadaoka, K., M. Hino and Y. Koyano (1989): Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone, *J. Fluids Mech*, 204, pp. 359-387.