

PIV法を用いた気液二相乱流場に関する実験的研究

Estimation of Velocity and Turbulence in the Gas-Liquid Two Phase Turbulent Flow by PIV Method

北海道大学大学院工学研究科 学生会員 ○山内 悠司 Yuji Yamauchi
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 渡部 靖憲 Yasunori Watananabe
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐伯 浩 Hiroshi Saeki

1. はじめに

沿岸域において砕波は大量の気泡を水中に混入させ、この混入気泡は海底近くまで到達し、その抗力及び浮力によって、海底砂の巻上げや浮遊砂への影響などの力学的影響など様々な現象に影響を与える。また、砕波帯においては、気泡の混入や海底砂の巻上げなどがさかに行われ、非常に複雑な気液個混相乱流へと発達する。一方で、この領域では、海浜流及び砕波による流体の乱れが底質の巻上げや輸送などの漂砂問題に大きく影響を与えるなど海岸工学においてさまざまな課題が残されているのが現状である。そこで、砕波帯のような気液個混相乱流場において流体運動を評価する際に、流体内に混入している気泡、海底砂の運動が重要なパラメータとして影響することが知られている。しかしながら、砕波帯における流体機構のメカニズムはいまだ未解明な点が多く、上述した問題の観点からもそれらを解明することは非常に重要である。

著者ら(2003)は、可視化用実験水槽を用いて砕波帯に混入する気泡数の時間変化及び局所的变化を明らかにすると共に、砕波下に組織的に生成する気泡塊(Bubble-Clouds)及び斜行渦の様子を可視化した。それによると、気泡数は波の進行と共に増加する傾向が見られるとともに、複数の計測に対する分散値も同様に増加していく傾向が見られた。これは、砕波帯においては流体運動が非定常であり、また空間的にも非周期的であることを示している。さらに、斜行渦に対してもその存在の有無や数さらには形状が異なることが確認された。これは、流体内における乱れ及び砕波によって生成される大規模渦に再現性がないものと考えられる。

また、流体内における気泡の運動はその浮力や抗力によって周りの流体運動とは少なからず異なった軌跡をもつことも確認された。こういった条件の砕波帯においては、気泡はそれの周りに存在する渦または流体塊の運動にある程度追従するが、気泡の運動が大きくなるとそれを飛び出し、瞬間的な気泡速度と流体速度の間に、気泡と流体に相対速度が生まれる。

そこで、本研究は可視化用実験水槽において可視化実験を行い、砕波帯内における気泡の運動とその周りの流体運動の様子をPIV計測により明らかにし、気泡

の存在による流体運動の乱れや試行に対する流体運動の乱れについて議論を行った。

2. 実験方法

(1) 実験装置

2.1 砕波帯における気泡運動計測実験

ピストン型造波機が設置された延長800cm、幅25cm、高さ50cmの全面透明アクリル製の可視化用可変勾配水槽に底面勾配を1/20に設定し実験を行った(図-1参照)。図-1に示すように着水点からボア領域に至るまで10cm間隔で計7点で水槽側面と垂直な視軸を持つように、また撮影範囲を実スケールで10cm×8cmとなるように高速度デジタルビデオカメラ(レコーディング周波数250Hz、解像度640pixel×480pixel)が設置された。カメラは造波機前面に設置された容量式波高計から与えられるトリガ信号により起動し、全ての計測点での画像は同一時刻から撮影される。また、同一計測点において容量式波高計が設置され、同一トリガにより撮影時刻と同一の時刻の水位変動が記録される。連続光源としてアルゴンレーザーが使用され、水槽側壁と平行にレーザーシート(厚さ6mm)が水槽下より上方に向けて照射される。気泡界面におけるレーザーの散乱光の輝度は界面で最も強く気泡を中心に放射状に減衰し、この輝度をフィルター操作(3(a)参照)により正確に抽出することで、画像内の気泡の濃度分布取得し流体運動の評価をおこなった。

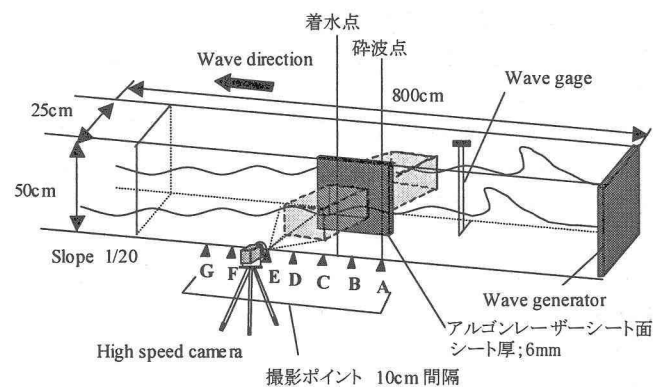


図-1 実験装置

2.2 砕波帯における流体運動計測実験

2.1と同様の水槽、底面勾配、高速ビデオカメラ、アルゴンレーザーを用いて砕波下の流体運動の評価を行った。撮影されたポイントは2.1と同様に計7点で行われた。今回の実験では、湿潤状態で比重が約1.0の中立粒子(径約10~100 μm)に蛍光着色しレーザーとして採用した。また、実験は暗室で行われ、撮影領域に2.1と同様の向きにアルゴンレーザーシートを設置して中立粒子を励起させた。得られた画像にはアルゴンレーザーによって励起した中立粒子と気泡の散乱光が撮影されるが、ここでは発光した中立粒子の光波長以上を通すハイパスフィルターをカメラのレンズにつけることによって気泡の散乱光を画像から除去した。また、今回の実験においては取得画像はフィルター処理を行うことによって、画像ノイズを除去した後、アスキーデータに変換され解析が行われた。実験の波浪条件は2.1, 2.2共に同じ条件で行われ、そのパラメータを表-1に示した。また、両実験において、10回の撮影、計測が行われた。

表-1 波浪パラメータ

| 砕波形態 | 波高 (cm) | 砕波水深 (cm) | 周期 (s) |
|----------|---------|-----------|--------|
| Plunging | 13.0 | 14.0 | 1.6 |
| Spilling | 12.0 | 12.0 | 1.2 |

3. 解析手順

本研究では、撮影によって得られた画像にPIV計測(Particle Image Velocimetry)を適用し、砕波帯における流体の流速及び気泡の運動を評価した。さらには、PIV計測によって得られた速度ベクトルをもとに砕波帯における流体の乱れについても評価を行った。

a) 前処理

高速ビデオカメラによる取得画像は、ガウシアンフィルターによって画像上の小さなノイズを除去し、さらに直径10画素の円形トップハットフィルターにかけることによってそれに相当する面積以下の散乱光の領域と不均一な背景画像濃度(複数の気泡もしくはレーザー粒子からの広領域に広がる放射状減衰散乱光)を分離した。

b) PIV計測

取得画像における画素濃度の相関関数を用いる相関法によって砕波帯における流速の評価を行った。相関法は、対象となる画像におおいて検査領域内の粒子が Δt 秒後の画像上で最大相互相関係数をとる領域(探査領域)に移動したと考えるものである。ここで問題となるのが検査領域サイズ N と探査領域サイズ N_s の設定値である。通常、 N は領域内に粒子が5個以上存在するように、また、 N_s は粒子の最大移動量を X_{max} とすると、

$$|X_{max}| < \frac{N_s}{2}$$

となるように設定する。この条件を考慮して気泡運動計測においては $N=100 \times 100$ [pixel]、 $N_s=130 \times 130$ [pixel]に設定し、流体運動計測では、 $N=50 \times 50$ [pixel]、 $N_s=100 \times 100$ [pixel]に設定し、PIV解析を行った。

c) 後処理

PIV計測によって得られた流速ベクトルには、さまざまな要因による誤ベクトルが含まれ、それらを補正するために流速ベクトルに近隣8点による流速と比較し統計的に誤ベクトルの除去及び、メディアンフィルターによるベクトルの補正を行った。

4. 結果

4.1 気泡運動と流体運動計測実験

図-2, 3は、巻き波砕波のB点(遷移領域)とF点(ボア領域)において、それぞれの地点の水位変動がゼロアップをとる時刻から1/4周期毎に気泡運動と流体運動の速度ベクトルを示したものである。ここでいう水位変動がゼロアップをとる時間とは、それぞれの地点で砕波ジェットが通過する直前の時間と考えてよい。図-2,3において、気泡の速度が流体の速度よりも大きい値を示す箇所がいくつか見られる。これは、本来なら気泡は周りの流体運動の影響を受けて移動するため、このような現象は考え難い。これは今回の実験で、所得画像内の気泡の分布が中立粒子のそれに比べて極端に少なく、検査領域 N と探査領域 N_s の値を大きく設定したため流速の大きさに誤差が生じたものと考えられる。しかしながら、所得画像と流速分布を比較した結果、速度ベクトルの方向に対してはある程度信頼できる結果が得られたと考えられる。

図-2より、遷移領域では全体的に流体運動は比較的一様な速度ベクトルを持つものに対して、気泡運動は浮力や気泡同士の抗力によって速度ベクトルに乱れが生じている様子がわかる。気泡運動と流体運動共に砕波クレストでは水面直下で非常に複雑な流れを形成し、ジェットが通過した後も局所的に乱れが生じている。また、砕波クレスト付近($T=0$, $T=1/4$)では気泡運動は流体運動の影響が支配的であるのに対して、砕波トラフ付近($T=1/2$, $T=3/4$)では先に述べた浮力の影響が支配的になり鉛直上向き速度ベクトルが多く見られる傾向を持つ。

図-3はF点(ボア領域)における同様の図であるが、この領域においても、C点(遷移領域)と似た結果が得られた。ただ、この領域では、比較的径の小さい気泡が底面付近にまで大量に存在しているため(渡部ら, 2003)、気泡運動は砕波トラフにおいても浮力による影響が小さいと考えられる。

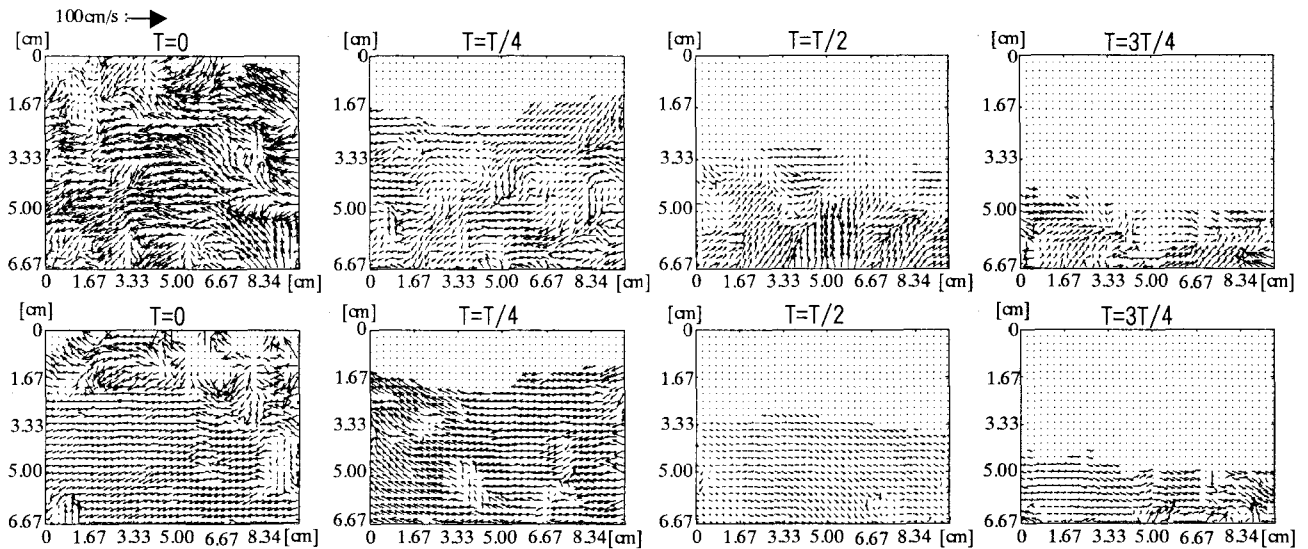


図-2 C点(遷移領域)における気泡(上段)と流体(下段)の速度ベクトル

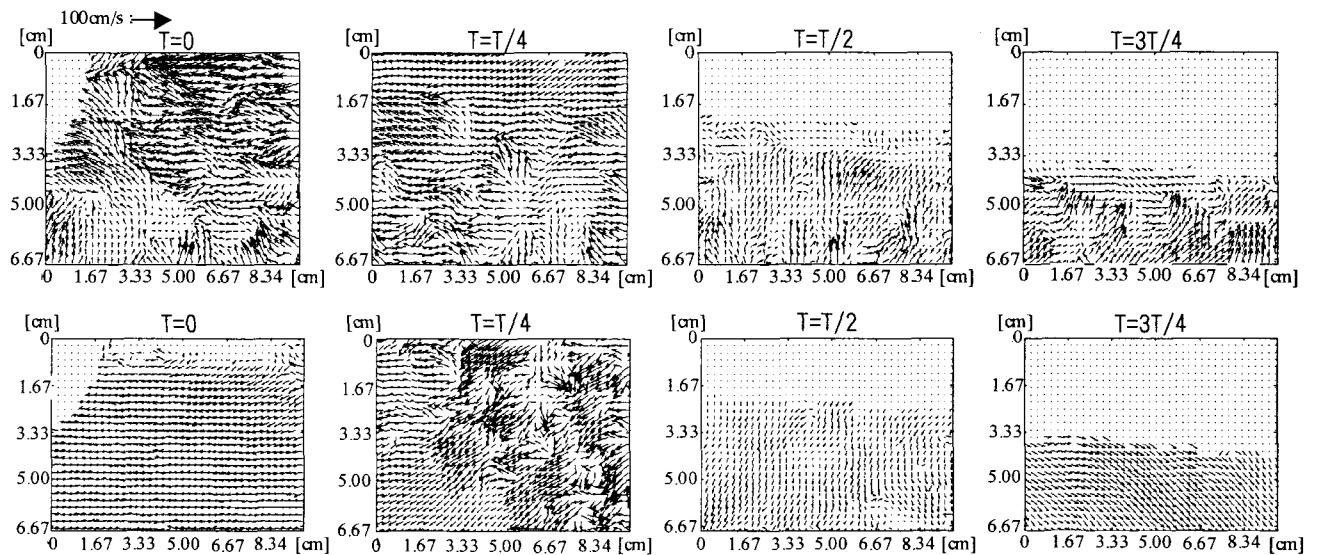


図-3 F点(ボア領域)における気泡(上段)と流体(下段)の速度ベクトル

4.2 砕波帯における流体乱れ

この項では4.1で得られた気泡と流体の速度ベクトルから Reynolds-Stress を計算し、以下の式から乱れエネルギーを算出した。

$$\text{乱れエネルギー} : K = \frac{1.33}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} \right)$$

上の式から得られた乱れエネルギーをもとに流体内における乱れについて議論を行う。

図-4, 5は巻き波砕波のB点(遷移領域)とF点(ボア領域)において、それぞれの地点の水位変動がゼロアップをとる時刻から1/4周期毎に気泡運動と流体運動の乱れエネルギーを示したものである。乱れエネルギーは、砕波クレスト直下で高い分布を示し、トラフ部分においてはあまり高い分布を示していない様子が分かる。これは砕波が着水と同時に大量の気泡を水中に取り込み、非常に複雑な気液二相乱流場を形成し流体内に強いせん断力分布もつためにあられるものと考えられ

る。気泡の運動の乱れエネルギーと流体運動の乱れエネルギーを比較するとB点、F点共にほぼ全ての時刻において気泡運動の方が高い分布を示しているのが分かる。これは、強いせん断力分布を持つ流速場において、その力を気泡が強く影響を受けたために、気泡の運動に乱れが生じたものと考えられる。また、浮力によって上昇する際に、周囲の流体との相対運動に起因する可能性も少なからず考えられる。気泡運動の乱れエネルギーの分布をB点とF点で比較してみると、F点(ボア領域)の方が全体的に高い値を示しているが、これはボア領域にあたるF点では非常に多くの気泡が存在し、せん断力の影響を受けたものと考えられる。さらに、先に述べた気泡の浮力による効果は、気泡が空間的に密に存在すると、それぞれの気泡流の乱れが形成され、それらの干渉等で広範囲に広がり、その強度は増幅されるために高い値の分布を示すとも少なからず考えられる。

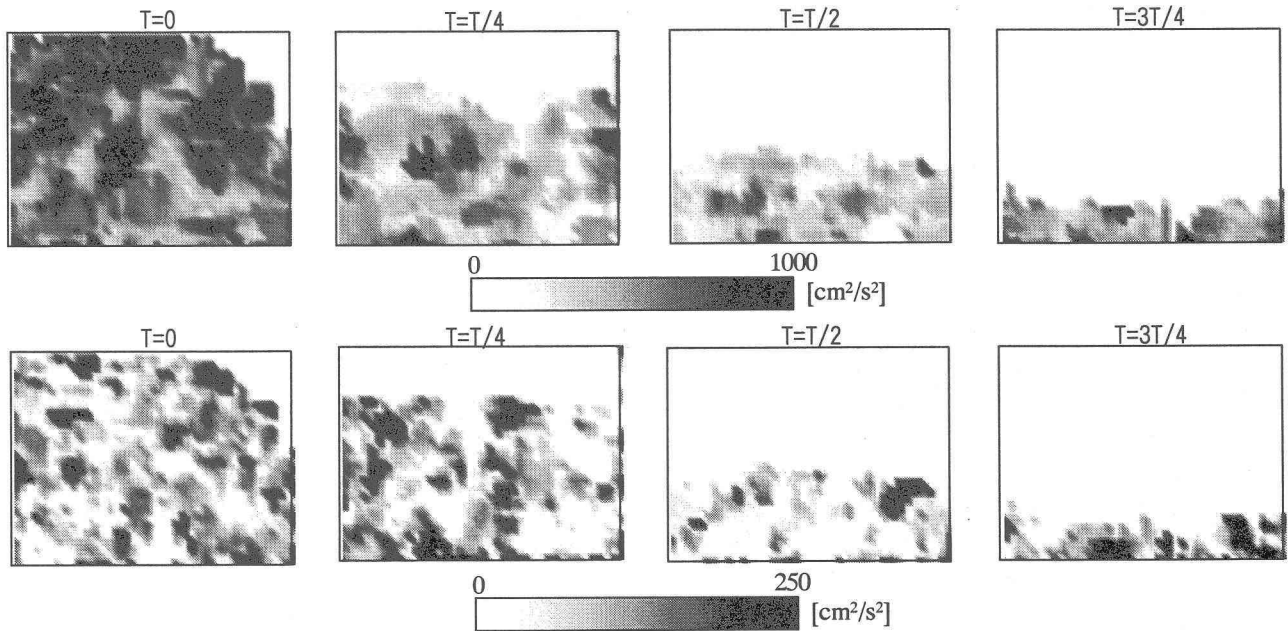


図-4 B点(遷移領域)における気泡(上段)と流体(下段)の乱れエネルギーの分布

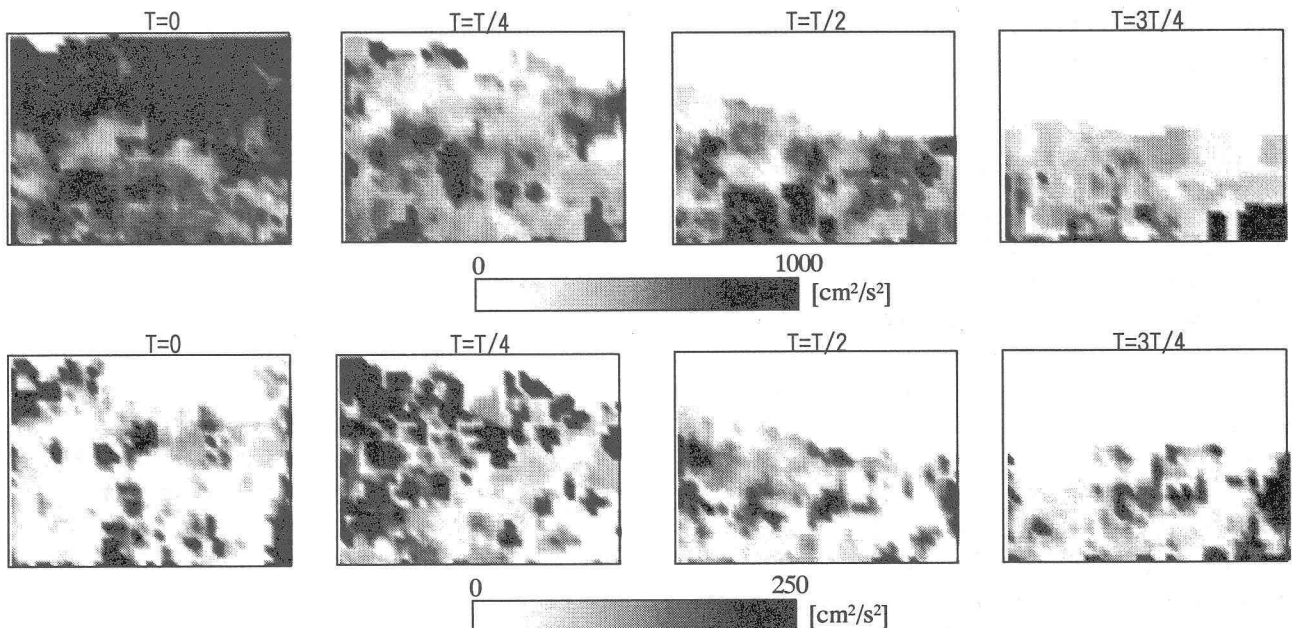


図-5 F点(ボア領域)における気泡(上段)と流体(下段)の乱れエネルギーの分布

5. 結論

PIV計測を砕波帯の流体に適用することによって以下の結論を得た。

- ・PIV計測により砕波帯での流体と気泡の運動を個々に評価した。
- ・PIV計測において、速度ベクトルなどまだまだ誤差が大きく生じるため、この点に関しては今後の課題である。
- ・砕波帯における気泡の運動は流体運動に大きく依存するが、比較的乱れの小さな砕波トラフ付近では浮遊の影響が大きくなる。
- ・気泡運動の乱れはその周りの流体運動の乱れに比べ非常に大きい値を示す。

・気泡運動及び流体運動の乱れは砕波クレスト直下で非常に強い分布を示し、砕波の進行と共に小さくなる。

参考文献

- ・PIVハンドブック：可視化情報学会（2002），森北出版
- ・混相流体の力学：日本流体力学学会（1991），朝倉書店
- ・渡部 靖憲，山内 悠司，佐伯 浩（2003）：砕波下に形成される気泡群と気泡数遷移に関する研究，海岸工学論文集，第50巻，vol.1，pp121-125
- ・渡部 靖憲，山内 悠司，佐伯 浩（2002）：砕波遷移に伴う気泡生成特性変化とマイクロバブル量に関する研究，海岸工学論文集，第49巻，vol.1pp106-110