

ステレオ画像を利用した自由水面の 水位分布計測法の開発

MEASUREMENTS OF WATER SURFACE VARIATIONS BY USING STEREO VIDEO IMAGES

椿涼太¹・藤田一郎²

Ryota TSUBAKI and Ichiro FUJITA

¹学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科後期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 学博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

This paper presents a new innovative method for measuring two-dimensional water level variations. This method uses a pair of images captured by a stereo arrangement of CCD cameras. With this method it is possible to measure the instantaneous water surface form non-intrusively. At first, we explain the measurement principal and the experimental procedure for obtaining stereo images. Second, we exam measurement accuracy by applying our technique to waves and surface ripples generated by a falling drop, and find that we can resolve waves as small as 1mm. Third, we measure periodic surface fluctuation produced in an asymmetry cavity with a reasonable accuracy. Finally, we describe the problems of this technique and future research plans.

Key Words : water level measurement, stereo images, water surface fluctuation, non-contact measurement

1. はじめに

河川, 湖沼, 海洋など, 自然界の流れの多くは自由水面を有する開水路であり, これらは生物に大きな恩恵を与えるとともに, 被害をもたらす事もある. しかし, このような開水路の水面の挙動はさまざまな影響を受け非常に複雑な挙動を示し¹⁾, その振る舞いの理解が十分になされているとは言えない. たとえば, 水と空気の間に見られる相互関係は, 大気から海洋へ吸収される炭酸ガスの量の見積りに大きな影響を与えるが, このような気液界面の挙動についての知識は現在, 十分とは言えない. このような現象を理解する為に, 現在, 数値計算手法を利用した研究が精力的に進められている²⁾³⁾. しかし, 数値的手法はいくつかの仮定や近似の上に成り立っているのが現状であり, 得られる結果が物理的な現象を再現しているかどうかという確認は, 数値計算手法の中で閉じたものではなく, 物理的な現象の計測値と比較することが欠かせない.

水位の空間分布の計測は, 西尾ら⁴⁾, 宮本ら⁵⁾がレーザーシート光を利用した可視化手法を行っている. この手法は, レーザーシート上の水位しか計測できず, また

界面で気泡が混入すると, レーザーが拡散し, 誤差が発生するという短所がある. 壇ら⁶⁾は気液境界を通過する際の光の屈折を利用して, 水底での輝度分布から水面形を推定する方法を提案しているが, この方法には変動量および水深への制約が大きい. 他に, Dabiriら⁷⁾, Suzukiら⁸⁾, 田中ら⁹⁾は水面の反射及び屈折を利用し, 水面勾配を計測しているが, キャリブレーションの煩雑さや, 碎波などの細かな乱れを計測できないという短所を持つ. 本研究は, さまざまな状況で高精度に自由水面の形状を計測する手法の開発するために, ステレオ測量の原理を基礎とし, 液層表面へパターンを投影することで安定した計測を実現した.

2. 計測手法

まず, 本手法の基礎となるステレオ測量について説明する¹⁰⁾. 二つの視点から計測対象を撮影した後, 得られた二つの画像を比較することで, 画像中の各点の三次元的な位置を求めることができる. たとえば, ある模様が二つの画像に共通してみられれば, 二つの視点の位置からこの模様を通過する二本の直線が引け, その交点に

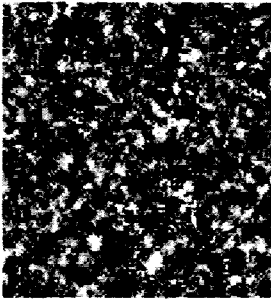


図-1 投影パターン (部分)

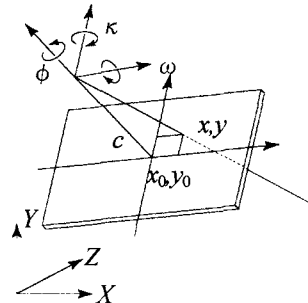


図-2 カメラパラメータ

この模様が位置すると考えることができる。よって交点の座標を計算することで、注目した模様が存在する位置を知ることができる。ここで、問題となるのは、各視点の位置を正確に知ること、二つの視点から明確に確認できる模様が画像上で確認できることである。特に後者は画像を利用する本手法において非常に重要である。気液境界を撮影すると、得られる画像は、光の屈折や反射が起きるため、視点の角度によって模様がさまざまに変化してしまう。そこで、まず染料を用いて水の透過性を抑え、次に輝度にむらを持たせた照明を水面に投影した。

この光は、液層の上層部の狭い領域で拡散され、これがカメラへと入射することで模様が撮影される。CCDカメラは Hitachi Denshi製 KP-F100を二台用いた。染料には、白色ポスターカラーを用い、照明には液晶プロジェクター (SONY製VPL-CS4) を用いた。詳細な模様を映すため、プロジェクターは水面に1m程度まで接近させた。また、後の解析において誤差の原因となる反射を抑えるため、光源はプロジェクターの光のみとし、また撮影範囲外の光は黒画用紙に投影させて、不用意な拡散を抑えた。

本研究で用いたカメラの撮影情報 (カメラパラメータ) は、撮影位置、撮影角、焦点距離、レンズ歪みである。カメラパラメータと物理座標、画像座標の関係を次に示す。

$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + dx \quad (1)$$

$$y = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + dy$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varpi & -\sin \varpi \\ 0 & \sin \varpi & \cos \varpi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$dx = dr^2 x$$

$$dy = dr^2 y$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

ここに x, y : 主点を原点とした写真上の座標, x_0, y_0 : 写真の

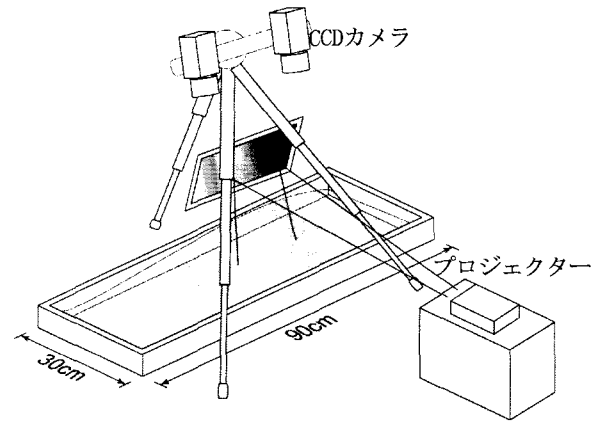


図-3 実験装置図

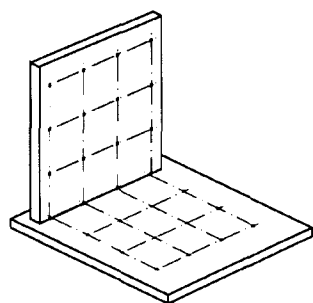
主点座標, c : 画面距離, X_0, Y_0, Z_0 : 投影中心, ω, ϕ, κ : カメラの傾き (x 軸まわりの傾きを ω , y 軸の傾きを ϕ , z 軸まわりの回転を κ とする), X, Y, Z : 空間座標である。カメラの主点座標はほぼ画像の中心とみなせる¹⁰⁾ため、本研究では主点座標を $(0, 0)$ とした。残りの7係数は、物理座標が既知である標定点を利用して、最小二乗法を用いて近似解を求めた。ステレオ計測では、このカメラパラメータを左右の画像それぞれで求めておく必要がある。

撮影された画像から形状を復元するためには左右の画像の各点を対応づける必要がある。本手法では、二つのカメラの一方を第一カメラとし、他方を第二カメラとし、第一カメラ画像を格子状に区切り、格子内 (テンプレート) の画像を第二画像上で検索した。検索する画像は矩形とし、第一画像上の検査領域と第二画像の画像との相互相関係数の最大値となる点は同一の点を撮影していると仮定した。ここで、第二画像上で相関係数が極大となる点は未知であるので、ある範囲内でしらみつぶしに検索する必要がある。しかし、先に述べたカメラパラメータを利用することで、検索範囲はある線分上に絞込むことができる。まず、第一画像上の検査領域 (x_1, y_1) を式(1)に代入することで、式(1)は三次元空間上の直線の式(4)と同一の形になる。

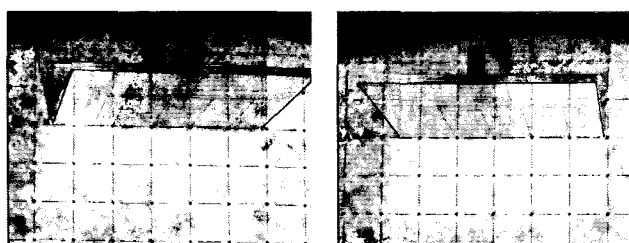
$$\frac{X - \beta_1}{\gamma_1} = \frac{Y - \beta_2}{\gamma_2} = \frac{Z - \beta_3}{\gamma_3} \quad (4)$$

ただし、(1)の各係数は $\beta_1, \beta_2, \dots, \gamma_3$ にまとめられる。

この直線の式を第二カメラの(1)に代入すると、写真座標 x, y は二次元空間上の直線上に存在することがわかる。つまり、第一カメラ上のある写真座標に撮影された実座標上の点は、第二カメラでは、カメラパラメータによって決定されるある直線の写真座標上に映ることがわかる。また、実験条件から実座標はある空間内に収まる (たとえば Z の範囲) と考えることで第二カメラでの検査領域は線分へと限定することができる。限定条件は実験条件により異なるので、それぞれのケースで適切に設定する必要がある。



a) パネル形状



b) 左画像

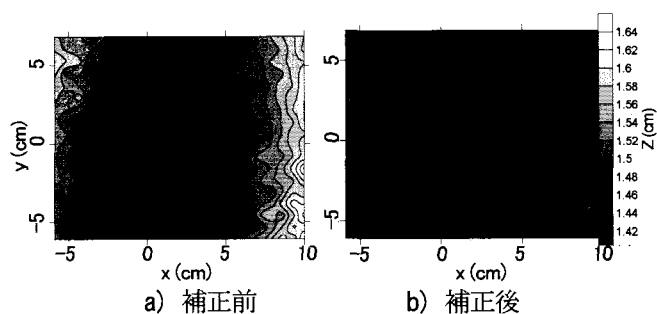
c) 右画像

図-4 標定グリッド

第一，第二画像間のパターンマッチングには，PIV法と同様に，矩形の検査領域を利用した相互相関法を用いた．まず，検索範囲の線分上で相関の最も高い点を探した後，周辺の輝度分布を利用してサブピクセル補正を行った．

3. 小型水槽を利用した実験

実験装置を図-3に示す．水槽は幅30cm，長さ90cmであり，水深1.5cmとなるように着色した水を満たした．画像は毎秒12コマで撮影され，画素数は1304×1024ピクセル



a) 補正前

b) 補正後

図-5 静止水面

ルでモノクロ画像を取得した．撮影範囲は約18×14cmである．またカメラ間の距離は30cmとした．

カメラパラメーターを得る為に標定パターンを撮影した．これは図-4に示すような2.5cmグリッドの模様を利用した．

(1) 静止水面の計測

誤差評価及び，計測値のキャリブレーションを目的として，静止水面を撮影した．得られた水位分布を図-5aに示す．計測は約0.6cmピッチの格子で行った．また検索する範囲は $1 < z < 2$ とした．本来は同じ高さとなるべきであるが，図-5aには中央部で低く左右で高いという歪みが確認される．そこで，この歪みを取り除くために，座標の関数である二次関数（式(5)）を利用して補正した（図-5b）．

$$z' = z + b_1 x^2 + b_2 x + b_3 y^2 + b_4 y + b_5 \quad (5)$$

ここに， z' :補正後の高さ． b_1, b_2 等:補正係数である．補正係数はポイントゲージで計測した水位に各点での z' が近づくように最小二乗法で求めた．この補正で歪みは概ね取り除かれ，また高さの標準偏差は0.015cmであった．

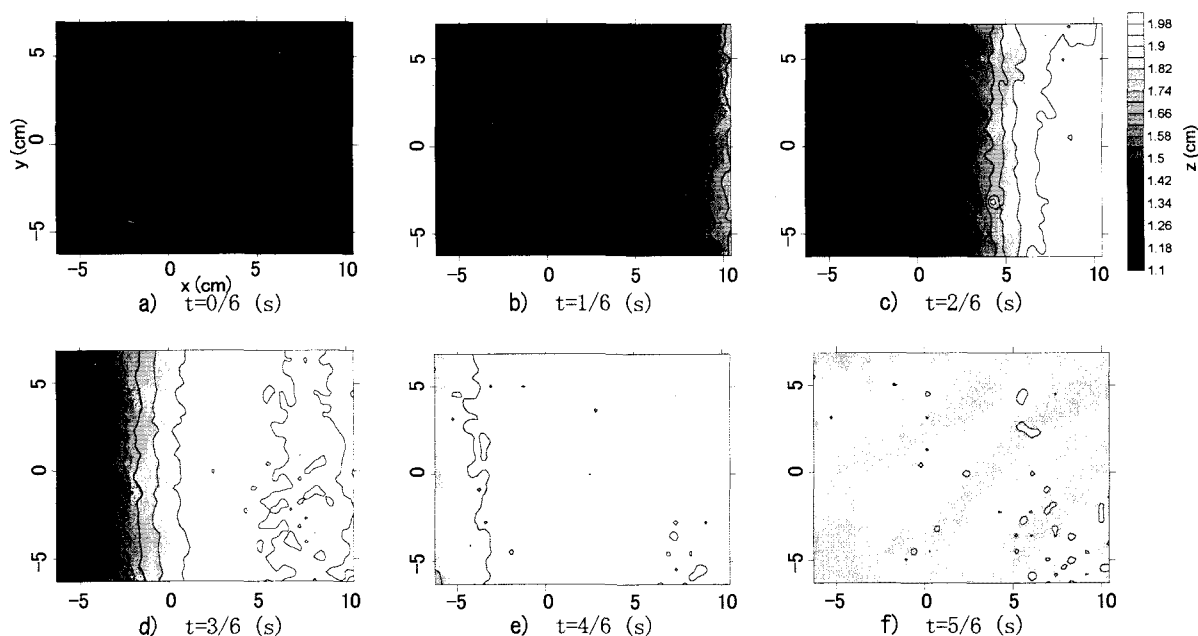


図-6 平行な波

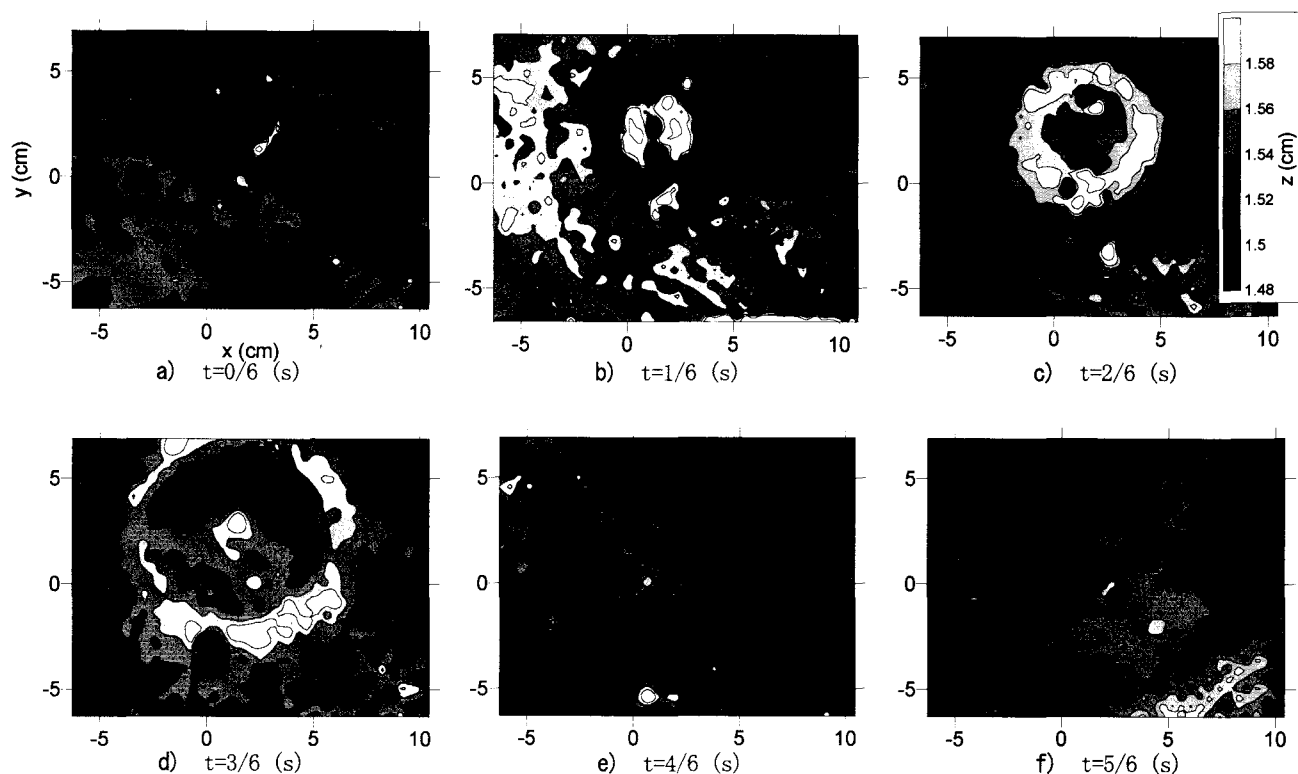


図-7 放射状の波

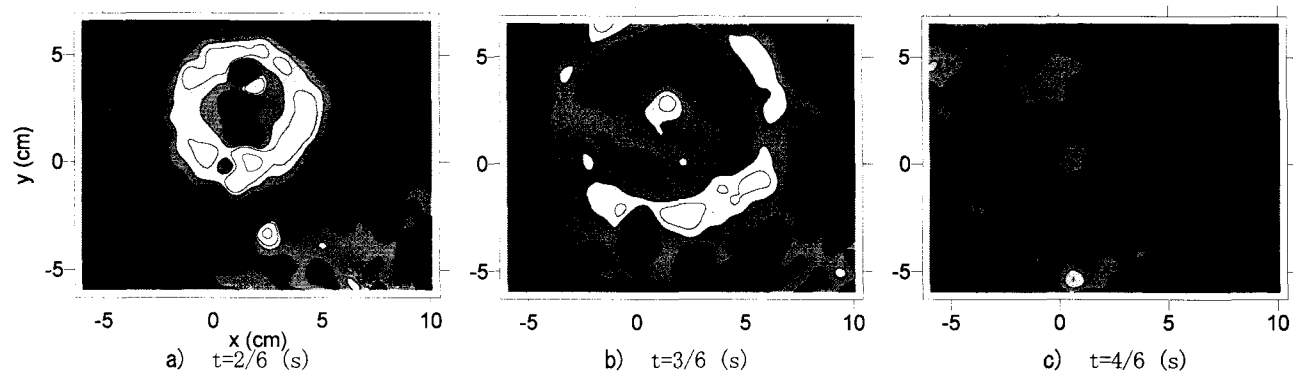


図-8 放射状の波 (ノイズ除去)

この歪みの原因としては、カメラ校正の誤差か、前章で述べたカメラパラメーター中のレンズ歪みのモデル(式(3))が不適切であった可能性がある。

(2) 平行な波

同様の水槽を用い、水槽の片側を3cm程度持ち上げ、水面を安定させた後に水槽を水平に戻すことで平行な波を発生させた。波高は約0.5cmであった。5/6秒間の各時刻での水深分布を図-6に示す。ここではx軸マイナス側を上下させ、同方法へ向かう波を発生させた。解析条件は静止水面と同様とした。x軸マイナス側へ重力波が伝播していく様子が非常に明確に捉えられている。計測によって得られた伝播速度は約28cm/sであった。

(3) 放射状の波

次に、水滴を落下させる方法で波を発生させた。図-7に液滴が落下した後にみられる放射状に広がる波の伝播の計測結果を示す。

全体的に細かな変動がみられる状態は液滴の着水により、波が同心円状に広がり ($t=0/6 \sim 4/6$ s) また、細かな変動状態に戻る様子が確認できる。波紋の高低差は1mm程度であるが、十分水面の変動をとらえていることが確認できる。全体的な値のばらつきは、液滴を連続的に落下させたため、前回の変動が十分減衰せず、水槽が小さい為、反射を繰り返すという物理的な状況も考えられるが、計測誤差の可能性もある。参考のため、データに移動平均操作をおこなった水深分布を図-8に示す。平均前に比べ、細かな変動が抑えられ、より明確に円状に広がる波を確認することができた。

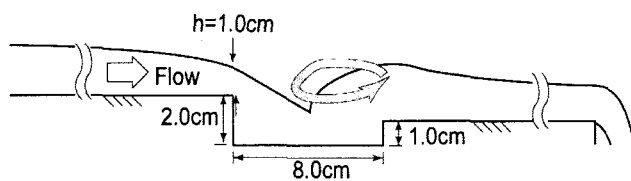


図-9 側面図

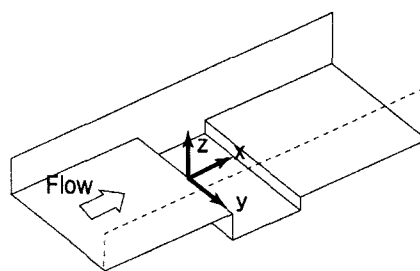


図-10 トレンチの座標系

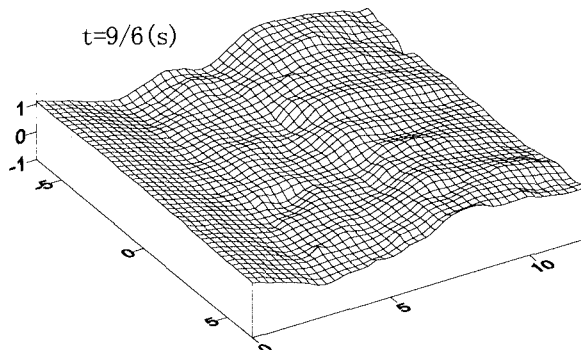
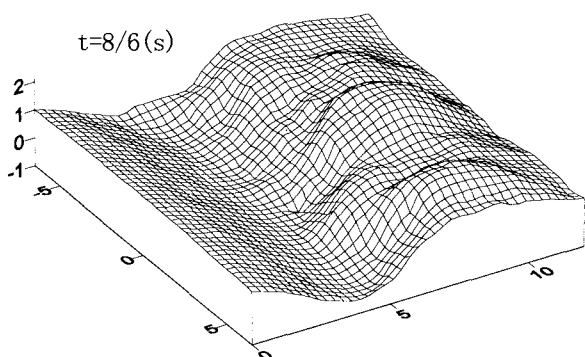
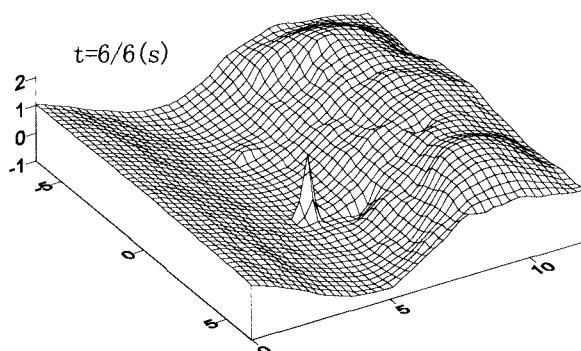
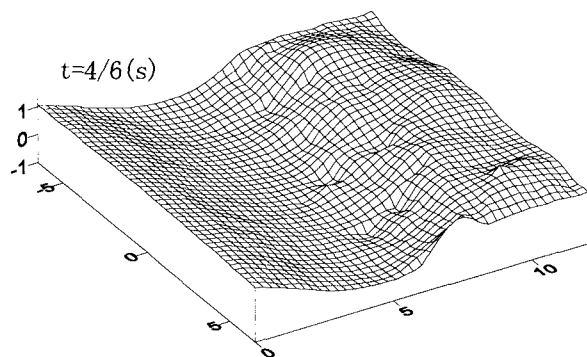
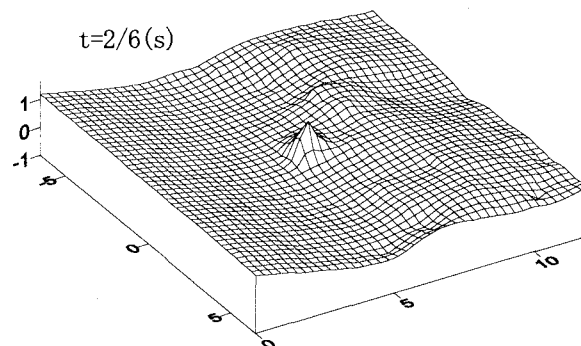
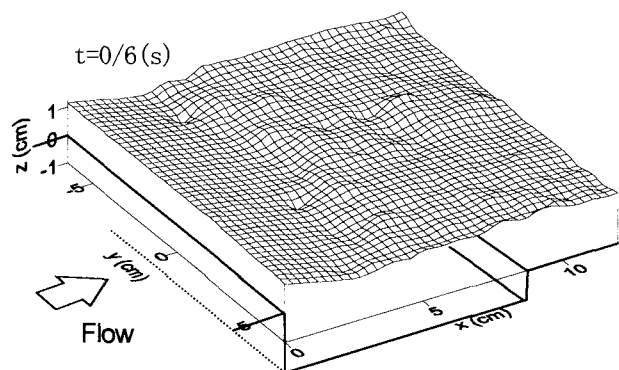


図-11 振動跳水

(4) 振動跳水

Fujita¹¹⁾は非対称トレンチ流れにおいて、ある条件を満たした場合に発生する振動跳水現象について報告している。彼らは側面から断面形を推定しているが、砕波を伴う現象であり、気泡が混入した領域でレーザーシート光が拡散されるため、誤差の原因となる。そこで、本研究の方法を用いて計測を行い、適用性の確認を行った。

水路はアクリル制で幅15.0cm、長さ600cmであり、中央

の下流側の図-9に示す非対称トレンチ部を設けた。下流端は自由流出とした。流量を1.11/sとしたところ、周期1.75sの振動跳水が発生した。水温は約23度であった。なお、座標軸は図-10のようにとった。

計測結果を図-11に示す。t=0/6sには河床面の概形を示した。まず、t=0/6sでは、上流から流入する流れがx=3cm周辺まで流下して水面を窪ませている。0<x<3cmの領域は射流であり水面が乱れており、3<x<8cmでは跳水が発生していると見られる。t=2/6sでは、射流部が

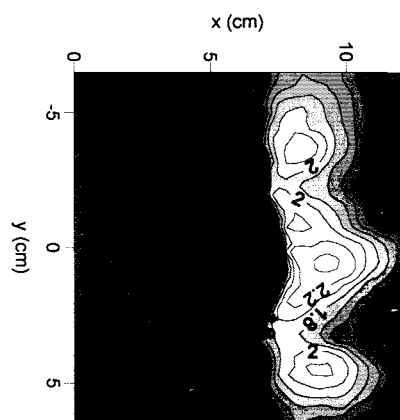


図-12 $t=8/6s$ の水位分布図

$x=6\text{cm}$ 付近まで伸張して入り込み、トレンチ下流部に衝突し、水面を盛り上げる。なお、中央付近にみられる突起部は光源の反射による誤計測である。 $t=4/6s, 6/6s$ と、跳水開始位置は $x=6\text{cm}$ で移動せずに水深が低下していき、 $x=10\text{cm}$ 付近の水面の盛り上がりが発達してく。この盛り上がりは低層にある射流部に覆いかぶさるような構造となっており、 $t=8/6, 9/6s$ と上流へ向けて崩れていく。 $t=9/6s$ では、碎波によって引き起こされる乱れによって、水面が細かく乱れている。また、 $x=3\text{cm}$ と $x=8\text{cm}$ の二つの位置で水面が窪んでいることが確認できる。このうち $x=8\text{cm}$ の窪みは速やかに消滅し、 $x=3\text{cm}$ の低水深部が発達し次の水面振動が繰り返される。

水面形は、大まかに y 軸にほぼ一様な二次元形状であり、内部も水面形に沿って、二次元流が支配的な流れとなっていると考えられる。しかし、水面の隆起が発達した $t=6/6, 8/6s$ において、局所的なふくらみが見られるようになる。図-12では、 $x=8\text{cm}$ 付近の隆起に三つのピークがみられることが確認できる。

これは、内部で局所的な沸きあがり起きていていることを示しており、流れが二次元から三次元性の強い流れへと変化していくことを示していると考えられる。この流れの変化によって乱流拡散が促進され、隆起部分の崩壊を促す原因となると考えられる。

4. 終わりに

ステレオ画像計測を利用した、自由水面形状の計測手法を開発した。また、精度検証および適用性を調べる為、水深 1.5cm 程度の水槽に二つの方法で波を起こし、水深分布の変動を調べた。これにより、本手法の有効性が確認された。次に非対称トレンチ流れの振動跳水を本手法で計測し、水面形の推移を捉えることができた。また、二次元性の強い流れが三次元流れへと変化していくことで、隆起部を破壊するプロセスが確認された。

今後の課題としては、表面が大きく乱れた際の光源の

反射による誤計測の対処法を考える必要がある。本手法は、表面近傍の液層内での拡散光を利用して形状を復元するため、反射光は必要ではない。今回の計測では、カメラと照明をともにほぼ水面に垂直に配置したが、照明の入射角を調整することで、撮影する反射光を低減することができるのではないかと考えている。また、今回は画像処理によってある程度反射光を除去することができたので、これを発展することでより誤差を減らすことができるかもしれない。また偏向フィルタを利用することで、反射を防ぐことができるのではないかと考えている。今後は、本手法を利用して、滑面および粗面での水面変動の構造の解明に利用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 柳津家久, 中山忠暢: 自由水面近傍における組織渦の時空間相関構造に関する研究, 土木学会論文集, No.586/II-42, pp.51-60, 1998.
- 2) 三石暁彦, 長谷川洋介, 笠木伸英: 気液界面乱流場における高シュミット数物質輸送のLES, 第16回数値流体力学シンポジウム講演論文集, on CD-ROM, 2002.
- 3) Nakayama, A. and Yokojima, S.: Modeling Free-Surface Effects for Calculation of Turbulent Open-Channel Flows, Env. Fluid Mech., Vol.3, No.1, pp.1-21, 2003.
- 4) 西尾茂, 中尾茂樹, 奥野武俊: 光散乱度差を利用した波高の画像計測(第3報), 第27回可視化情報シンポジウム講演論文集, Suppl.no.1, Vol.19, pp.121-124, 1999.
- 5) 宮本仁志, 神田徹, 大江和正: 画像解析による水面変動・流速の同時計測法と開水路凹部流れへの適用, 水工学論文集, 第45巻, pp.511-516, 2001.
- 6) 檀和秀, 山本佳代, 中嶋綾: 波面透過後の自然光がつくる水底での輝度分布と水面波形の関係, 第31回可視化情報シンポジウム講演論文集, Suppl.no.1, Vol.23, pp.127-130, 2003.
- 7) Dabiri et al., Quantitative Visualization of Three-Dimensional Free Surface Slopes and Elevations, Atlas of Visualization III, CRC Press, pp.1-22, 1997.
- 8) Suzuki et al., J. Vis. Soc. Japan, Vol.15, pp.351, 1995.
- 9) 田中源太郎, 岡本孝司: スペックル法における液面変動計測の位置再構成精度の検討, 第28回可視化情報シンポジウム講演論文集, Suppl.no.1, Vol.20, pp.71-72, 2000.
- 10) 日本写真測量学会編: 写真による三次元測定 -応用写真測量編-, 共立出版株式会社, pp.1-9, 1983.
- 11) Fujita, I.: Particle Image Analysis of Open-channel Flow at a Backward Facing Step Having a Trench, Journal of Visualization, Vol.5, No.4, pp.335-342, 2002.

(2003. 9. 30受付)