

画像解析による甲板打込水の流場計測

環境・エネルギー研究領域 *星野 邦弘

海上安全研究領域

沢田 博史、辻本 勝、谷澤 克治

1. まえがき

船舶が荒天中を航走する場合、甲板上への打込水により衝撃的な波浪荷重が発生し、これにより甲板上の積載貨物、構造物、艀装品等の損傷を引き起こすことがある。海上技術安全研究所では甲板打込水による衝撃圧ならびに衝撃荷重の数値計算法を定量的に検証することを目的にして、可視化計測技術を活用した打込水の非定常流場計測実験^{1),2)}を実施している。本報告では、規則波中を向波状態で航走する模型船の甲板上への打込水を対象にした可視化実験結果について報告する。なお、実験の概要については、本講演会論文集の別報³⁾で報告しているので、詳細な実験の説明については割愛し、主に可視化画像の取得と得られた画像の2次元PIV解析結果に焦点を絞って報告する。

2. 可視化実験の概要

(1) 粒子の散布

可視化計測画像のPIV/PTV解析を行うには、流体中に均一にトレーサー粒子が散布されている必要がある。本実験ではトレーサー粒子として、蛍光ポリスチレン粒子（黄色、粒径200~400ミクロン、比重1.03）を用い、模型船の約3m前方の水面にトレーサー粒子を予め水に入れて十分攪拌したものを散布する方式をとった。模型船の航走速度ならびに打込水の速度と比較して、散布水による流場の攪乱速度を十分小さく、計測結果への影響は小さい

と考えられる。

(2) 光学系の設置状態と撮影範囲

甲板打込水の可視化計測は、防水の光学計測機器収納ケース内に収めた2台の高速ビデオカメラを用いて行った。図-1に各カメラの位置と光軸および撮影範囲を図示する。左図は撮影範囲を最も船首寄りにとった場合（以後、前方配置と呼ぶ）、右図は左図より撮影範囲を15cm後方にとった場合の配置（以後、後方配置と呼ぶ）である。撮影画像の歪みを最小にするためには現象を真横から撮影することが望ましいが、それはカメラ設置スペースの制約上困難

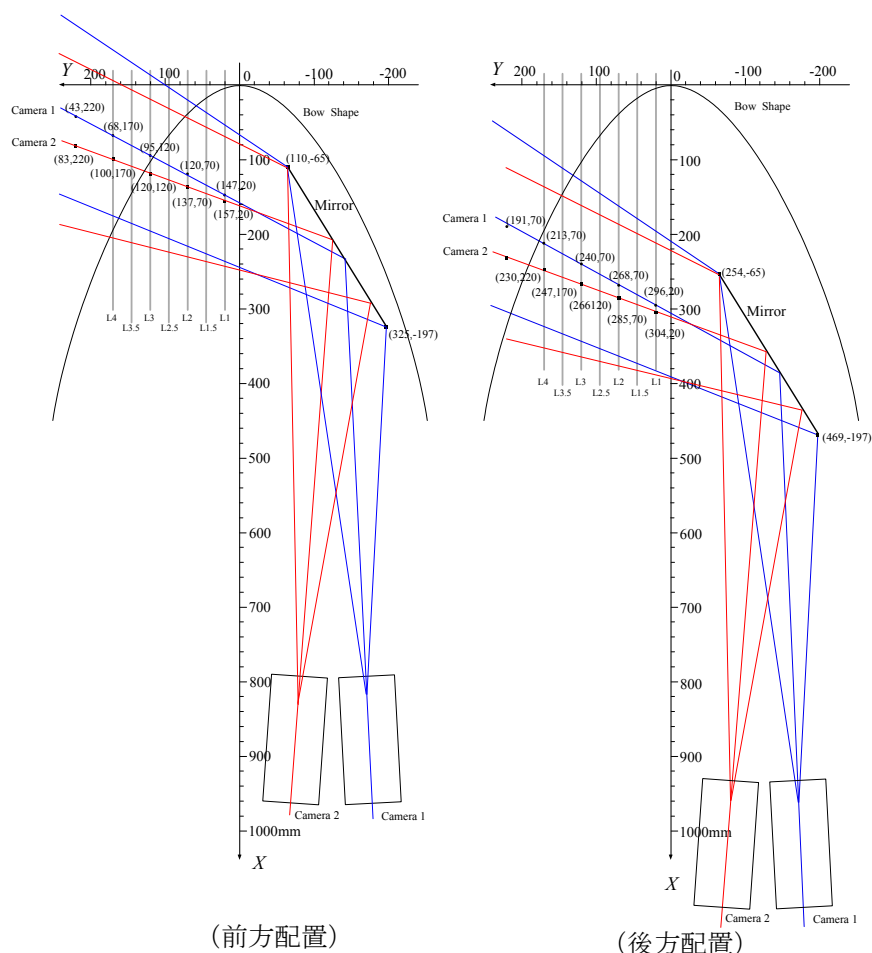


図-1 カメラの光軸と撮影範囲

であったので、本実験ではカメラを防水透明ボックス内に船首方向を向けて設置し、左舷への打込水を鏡に写して撮影する方式をとった。

打込水の撮影断面の中心線を図中に L1 から L4 で示す。実験ではシート光を用いて打込水から厚さ約 20mm 程度の断面を照らし出し、その中に含まれるトレーサー粒子をステレオ撮影することで、断面内の流場を映像化した。その中に含まれるトレーサー粒子をステレオ撮影することで、断面内の流場を可視化し、得られた画像データを用いて PIV/PTV 解析により甲板打込水の速度場を求めた。

3. 実座標からカメラ座標への写像関数

カメラの CCD 撮像面に写る映像は、実空間では甲板上の歪んだ四角形領域に対応する。撮影画像の解析から打込水の正しい速度場を求めるには、この歪みを補正して撮像面画像を実空間と対応させる必要がある。そこで、画像上での座標を実空間座標への対応させる写像関数を求めた。図-2 に模型船甲板上での実座標系と画像の座標系を示す。図-2 a) に示す O-XYZ は船首先端を原点とした模型船甲板上での実座標系であり、図-2 b) に示す o-xyz はビットマップファイルの座標系である。本研究では写像関数として

$$X = \sum_{i=1}^4 cx(i) T_i(x, z) \quad (1)$$

$$Z = \sum_{i=1}^4 cz(i) T_i(x, z)$$

を用いた。ここで、 T_i はテントファンクションで、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T_1(x, z) &= (a - x)(b - z)/ab \\ T_2(x, z) &= x(b - z)/ab \\ T_3(x, z) &= (a - x)z/ab \\ T_4(x, z) &= xz/ab \end{aligned} \right\} \text{where } a = 512, b = 472 \quad (2)$$

係数 cx, cz はビデオカメラで撮影した校正板上の標準点の座標とビットマップ上での座標との対応から最小自乗法により、(1)(2)式を時間で微分することで、速度の関係が次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \sum_{i=1}^4 cx(i) T'_i\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) \\ \frac{dZ}{dt} &= \sum_{i=1}^4 cz(i) T'_i\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

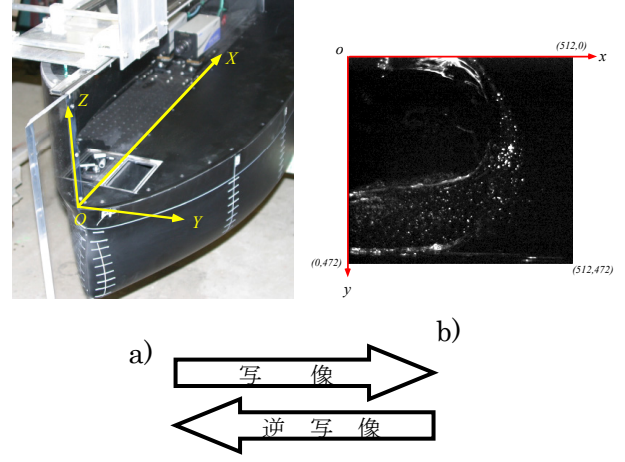


図-2 撮影画像の座標系

$$\left. \begin{aligned} T'_1\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) &= \left\{ -(b-z)\frac{dx}{dt} - (a-x)\frac{dz}{dt} \right\} / ab \\ T'_2\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) &= \left\{ (b-z)\frac{dx}{dt} - x\frac{dz}{dt} \right\} / ab \\ T'_3\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) &= \left\{ -z\frac{dx}{dt} + (a-x)\frac{dz}{dt} \right\} / ab \\ T'_4\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) &= \left\{ z\frac{dx}{dt} + x\frac{dz}{dt} \right\} / ab \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4. 流場解析の結果

撮影した画像を解析し、打込水の速度場を定量的に求めるには、前節で示した写像関数を用いてカメラ座標系と甲板上の実座標系との対応をとる必要がある。これには二つの方法がある。

- ① 写像関数(1)式、(2)式の逆写像を数値的に行って撮影画像の歪みを補正し、歪み補正された画像を解析する方法
- ② 撮影画像を解析した結果に写像関数(3)式、(4)式を適用して速度場を求める方法。

方法①は画像の歪み補正を先に行う方法で分かりやすいが、補正画像を作成する過程で逆写像や内挿補正画像を作成する処理が必要であり、トレーサー粒子の輝度分布が変化する恐れもある。これらは誤差が混入する要因であるため好ましくない。一方、方法②では撮影画像を直接解析するため歪み補正に

伴う誤差は無い。画像解析から得られる速度の単位は Pixel/sec であるが、写像関数(3)式、(4)式により mm/sec に換算することが可能である。また、②の方法では逆写像を必要としない。そこで、本研究では(2)の方法を用いる事にした。

打込水の撮影画像を PIV 解析した結果の一例として、L1 断面の撮影画像を用いた解析結果を、短波長波中 ($\lambda/L=0.7$) の場合を図-3 (前方配置) と図-4 (後方配置) に、入射波と船体との相対運動の同調点付近の波長 ($\lambda/L=1.0$) の場合を図-5 (前方配置) と図-6 (後方配置) に、長波長中の解析結果 ($\lambda/L=1.5$) について図-7 (前方配置) と図-8 (後方配置) に示す。PIV 解析には Nexus 社の PIV-Expert2000 を用いた。図には撮影画像上に PIV 解析で得られた速度情報をベクトルで重ねて表示している。前方の画像には、入射波が打ち込む様子が、後方の画像には打込水が流下する様子が捉えられている。流下する過程で再び盛り上がっているのは、船首外周部からの打込水がその場所に集中しているからである。図中、白く映っている場所では、空気の巻き込みにより気泡が発生しており、PIV 解析には限界があるようである。

5. 画像の歪み補正と統合

打込水の挙動全体を可視化するためには、前方と後方で撮影した2つの別時間に撮影した映像を合成して、より広範囲の映像を作成する必要がある。そこで、撮影画像を(1)、(2)式で示した写像関数の逆写像を用いて画像の歪みを補正し、前後の映像を合成した。(1)、(2)式で与えられる写像関数は非線形項(xz 項)を含んでいるため、解析的に逆写像関数を求める事が困難であるため、数値的に逆写像を行って歪みを補正した。図-9に合成画像の一例を示す。実験の再現性が高いため、左右の画像は非常に良く接続しており、ムービーとして再生すると同時に撮影されたように見える。今後、統合化した画像にも PIV 解析結果を重ねる予定である。

6. まとめ

規則波中を向波状態で航走する模型船の甲板上への打込水を可視化計測することを目標に研究を実施し、膨大な画像データを取得した。また画像データ全てに PIV 解析を実施し、打込水の速度場を求めた。本論で紹介した実験結果は解析結果のほんの一例である。

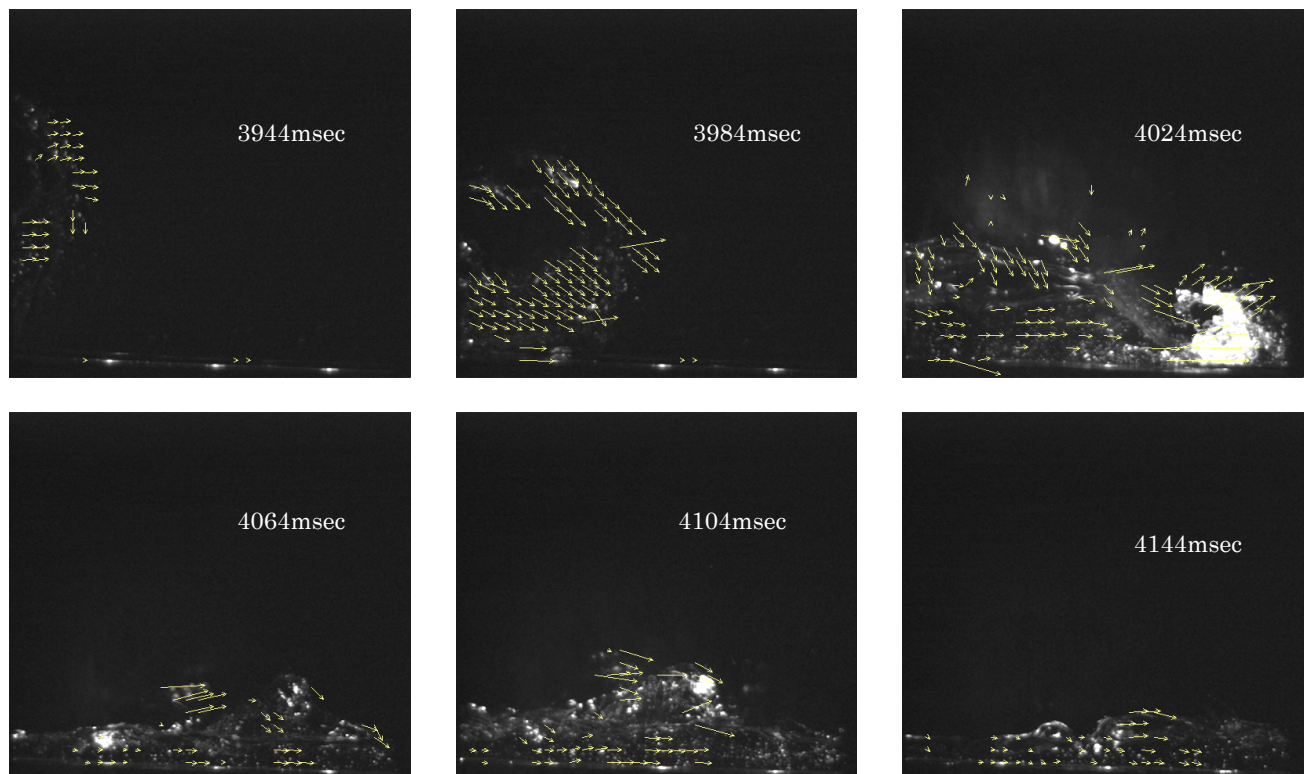


図-3 撮影画像の PIV 解析結果 (L1 断面、 $\lambda/L=0.7$ 、Camera1、前方配置)

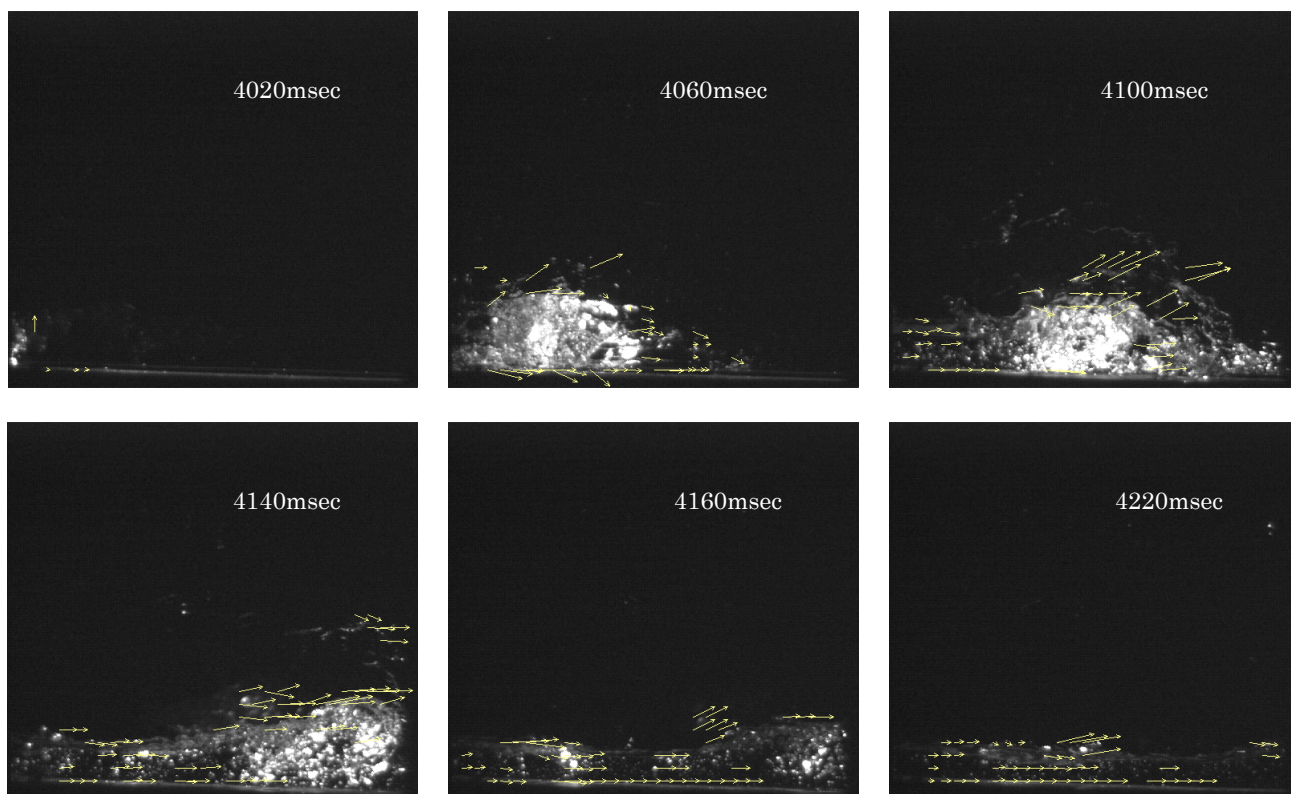


図-4 撮影画像の PIV 解析結果 (L1 断面、 $\lambda/L=0.7$ 、Camera1、後方配置)

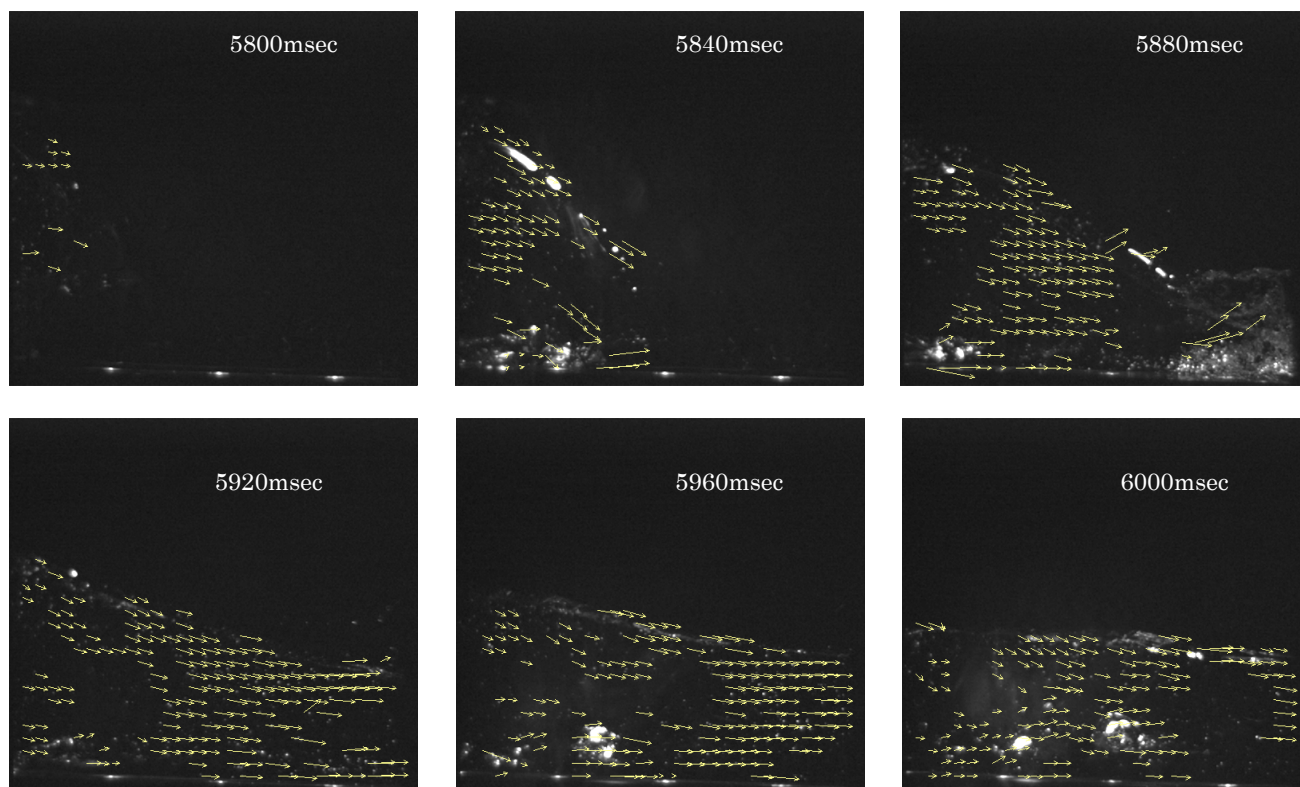


図-5 撮影画像の PIV 解析結果 (L1 断面、 $\lambda/L=1.0$ 、Camera1、前方配置)

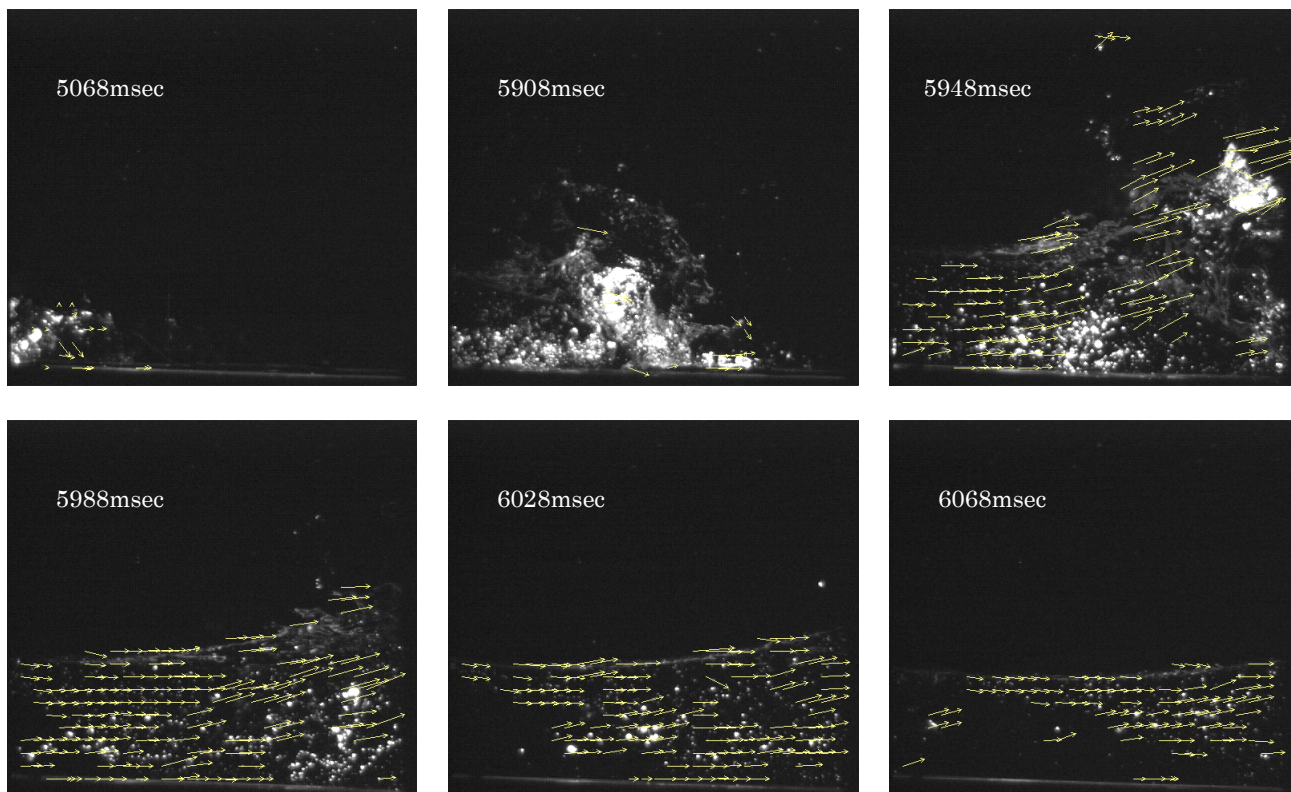


図-6 撮影画像の PIV 解析結果 (L1 断面、 $\lambda/L=1.0$ 、Camera1、後方配置)

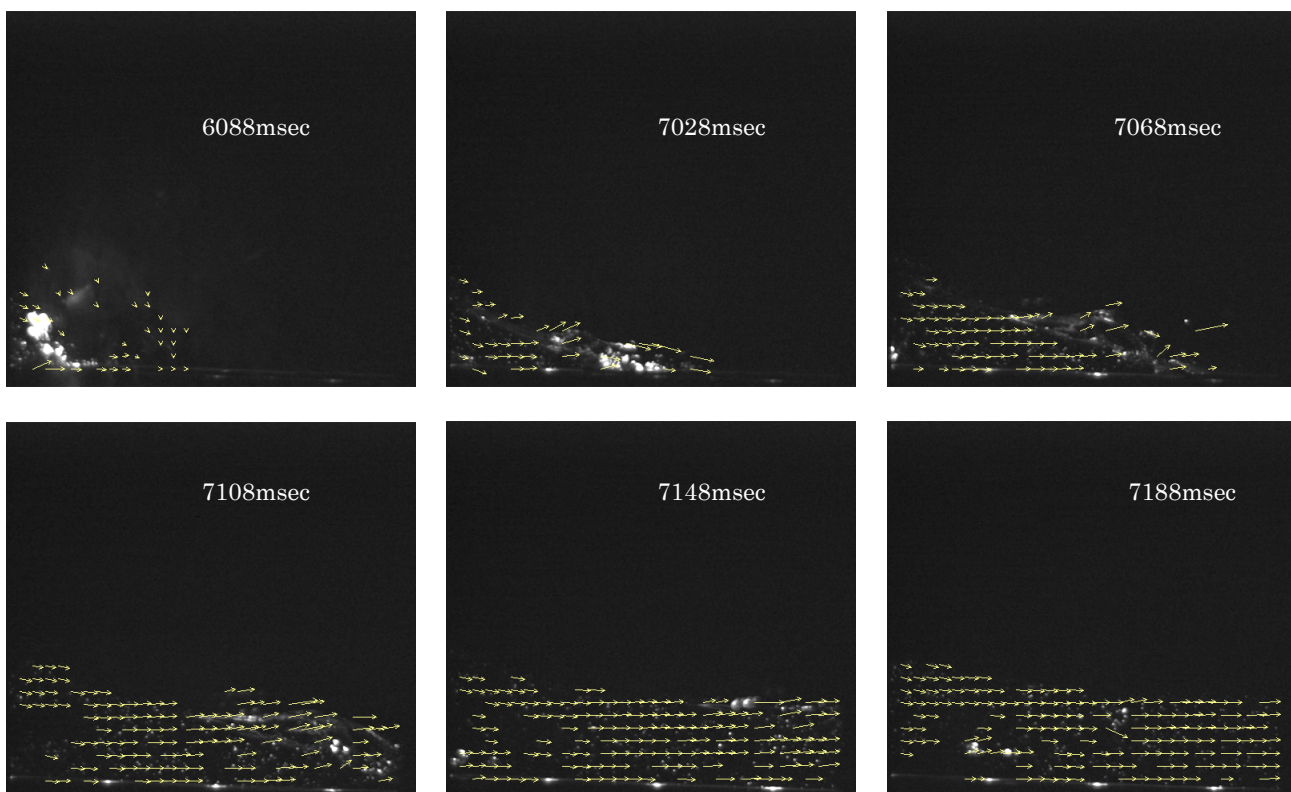


図-7 撮影画像の PIV 解析結果 (L1 断面、 $\lambda/L=1.5$ 、Camera1、前方配置)

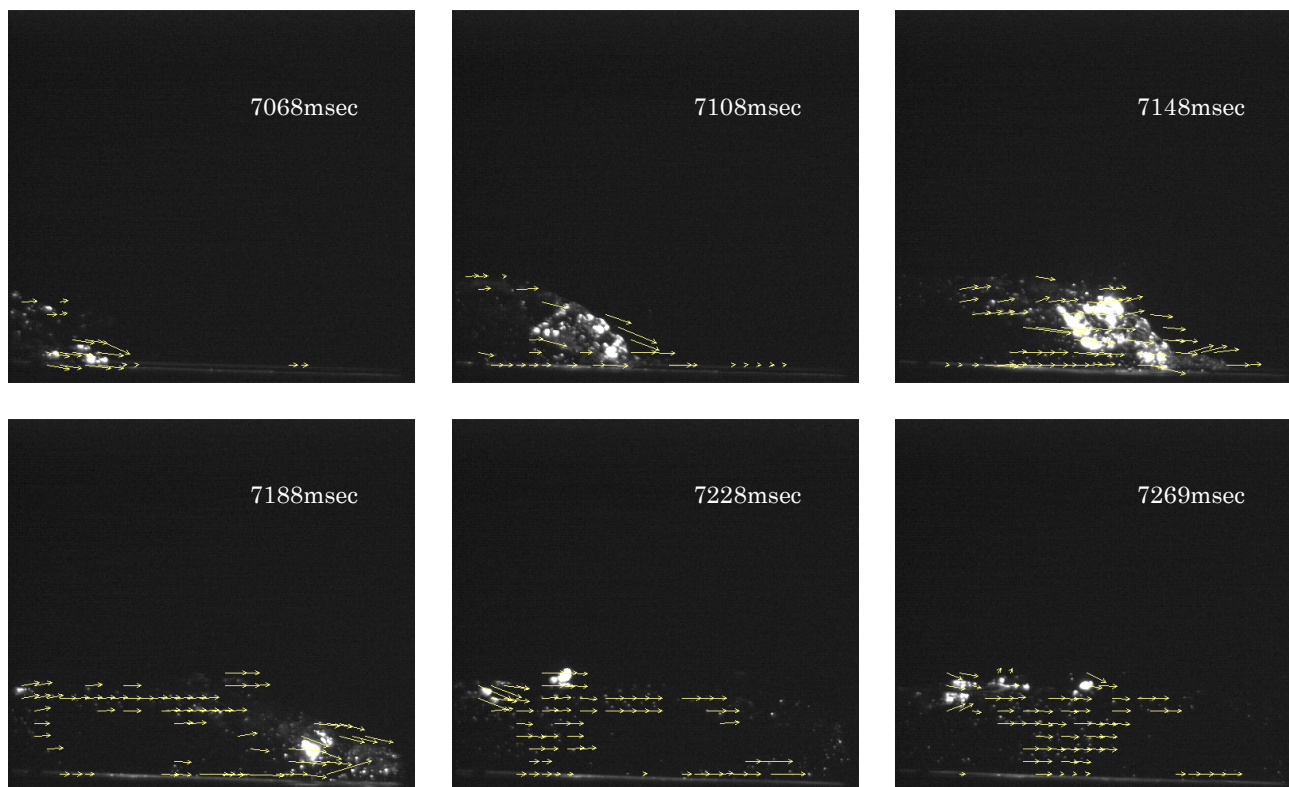


図-8 撮影画像の PIV 解析結果 (L1 断面、 $\lambda/L=1.5$ 、Camera1、後方配置)

最終的には、撮影画像と解析結果を 3 次元的な立体映像として構成したいと考えている。また、甲板打込水の挙動の画像データベース化を計画中で、画像データ解析にあたってデータベース化を考慮して作業を進めている。

謝 辞

本研究は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構公募型研究「運輸分野における基礎的研究推進制度」により実施したものである。本研究を実施するにあたり、お世話になった関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 谷澤克治：粒子法コード検証のための甲板冠水の可視化実験、日本造船学会講演論文集 第 2 号、(2003) pp. 55-56.
- 2) Tanizawa, K., Sawada, H., Hoshino, K. and Tujimoto, M.: Visualization of Shipping Water on Running Ship Foredeck in Regular Head Sea, Proceeding of ISOPE-2004, (2004).
- 3) 沢田博史他：甲板打込水の可視化技術、第 4 回海上技術安全研究所講演論文集、(2004).

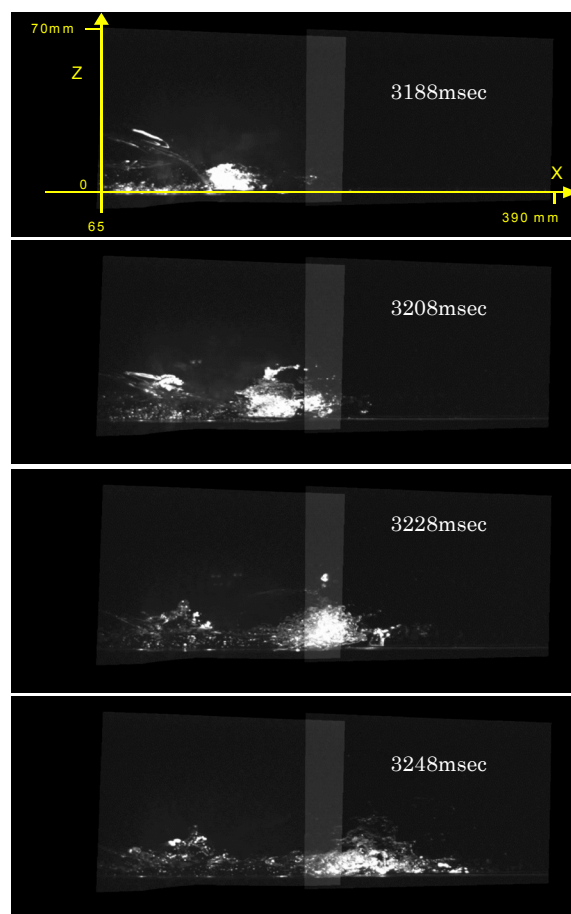


図-9 前方と後方の画像の統合 (L1 断面、 $\lambda/L=0.7$ 、Camera2)