

粒子法による船舶の波浪衝撃解析手法の開発 (水槽試験による甲板打込水の可視化計測と 数値計算検証データの取得)

谷澤 克治*、沢田 博史*、星野 邦弘**、辻本 勝*
南 佳成*、南 真紀子***、山田 安平****

Development of MPS code for estimation of wave impact loads on ships
(Visualization of Shipping Water and Acquisition of the Flow data for
Validation of Numerical Computations)

by

Katsuji TANIZAWA, Hiroshi SAWADA, Kunihiro HOSHINO
Masaru TSUJIMOTO, Yoshimasa MINAMI, Makiko MINAMI
and Yasuhira YAMADA

Abstract

Recent development of robust numerical simulation methods such as particle method enables us to simulate severe hydrodynamic impact on a ship hull caused by slamming, sloshing and shipping water. The simulated results look realistic and agree well with experiments data in quality. However, to use the newly developed technology as a design tool, validation is required. Authors are conducting a joint research project with the University of Tokyo and Yokohama National University to develop robust numerical codes for the simulation of shipping water on a running ship foredeck. As a part of this study, tank experiments were conducted to obtain experimental data for the validation. To measure shipping water flow, we applied visualization technology. Two high-speed video cameras and synchronous stroboscopic sheet light were used to take clear movies of shipping water and PIV analysis were applied to analyze the velocity field. A model ship was newly designed for the visualization. Video cameras, a mirror and a device for synchronous stroboscopic sheet light were mounted on the starboard deck and the shipping water on the portside deck was observed through the transparent rectifier plate attached along the centerline of the model. The impact pressure and loads on the deck were also measured synchronously with the video image. This paper reports experimental techniques and acquired data in this study.

* 実海域性能評価プロジェクト ** 海洋部門 *** 運航・システム部門 **** 構造・材料部門
原稿受付 平成18年8月 1日
審査済 平成19年5月15日

目 次

1. 緒言	2
2. 2次元水槽における可視化実験	3
2. 1 可視化計測機材とその構成	3
2. 2 2次元水槽における打込水の可視化	4
2. 3 水槽実験で撮影した打込水の映像	6
2. 4 流場解析の結果	7
3. 航走模型船の甲板打込水の可視化計測	11
3. 1 可視化計測機材とその構成	11
3. 2 模型船	11
3. 3 高速度ビデオカメラの設置状態と撮影範囲	13
3. 4 実座標からカメラ座標への写像関数	13
3. 5 力学的な計測項目とその概要	15
3. 6 試験水槽と実験制御	16
3. 7 トレーサー粒子とその散布方法	18
3. 8 実験条件	18
3. 9 実験結果	19
4. 航走模型船を用いた甲板ならびに甲板上構造物への打込水の可視化計測	47
4. 1 甲板上構造物	47
4. 2 高速度ビデオカメラの撮影範囲	50
4. 3 実験結果	52
5. 結言	63

1. 緒 言

波浪衝撃荷重による船舶の損傷は、船首部折損等の大規模な破損から、フレアパネルの凹損、ハッチカバー損傷、甲板上パイプラインの破損等の局所的な損傷、またスロッシングによるタンク破損等の船体内部の破損など実に様々であるが、これらを包括的に取り扱うことが可能な実用的計算法は現状では存在せず、耐航性分野の開発研究に残された空白部分となっている。この空白を埋めることが船舶の安全設計ならびに海難事故防止の観点から非常に重要であり、特に船舶設計上のニーズが高い分野である。

近年、このニーズに応えられる可能性のあるロバストな数値計算法が種々開発され、造船分野への応用が期待されている。なかでも粒子法は、スラミング、スロッシング、甲板打込等の強非線形な波浪衝撃現象をシミュレート可能なロバスト性を有し、かつ流体と弾性体との連性問題を扱う事もできる計算法であり、残された空白を埋めるための有望な計算法として注目されている。

以上を背景に、海上技術安全研究所（以下、海

技研）では東京大学、横浜国立大学と連携して、鉄道建設・運輸施設整備支援機構の基礎的研究制度により、平成14年度から3年間「粒子法による船舶の波浪衝撃解析手法の開発」を実施し、波浪衝撃現象として甲板打込水に着目した研究を進めて来た。本研究は次の3課題から構成されている。

- 1) 粒子法による波浪解析と海水打込挙動の解析
- 2) 粒子法による構造解析と損傷解析
- 3) 水槽実験による波浪衝撃現象の観察と粒子法コードの検証データの取得

海技研は3)を担当し、甲板打込水の可視化計測に挑んだ。

数値計算コードの検証には、衝撃水圧、衝撃荷重、ハッチカバーの弾性応答等の力学的計測に加えて、打込水の形状と速度分布を定量的に計測する必要がある。これは計算で得られる圧力や荷重が計測値と一致しない場合、流場レベルで比較検討し原因を探るためである。しかし、打込水の可視化は、i) 物体外部の流れであること、ii) 自由表面を伴う事、iii) 3次元流れである事、iv) 高速で非定常な流れである事など、可視化には非常に難度の高い現象である。さらに、3次元流場データを取得するために計測データを重ね合わせる必要があり、実験には高い再現性が求められる。そこで、海技研では3カ年の研究で、次の段階的研究を積み重ねて目標に迫った。

最初に2次元水槽に設置した台上へ打ち込む規則波の挙動を計測対象に、自由表面を有する高速非定常流れの可視化計測手法を開発した。本計測手法は次の2ステップから構成されている。

- ・シート状ストロボ光源を用いて3次元流場から2次元断面を切り出し、断面形状と断面内速度分布を解析するために高速度ビデオで撮影する手法。なお、この撮影には流体とほぼ同じ密度を持った粒子をトレーサーとして使用。
- ・撮影で得られた画像にPIV解析を適用し、打込水の断面内速度分布を解析する手法。

平成14年度はこの可視化計測手法を用い、計算コード検証用の2次元データを取得した。

平成15年度はこの可視化計測手法を活用し、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を実施した。この実験は2次元水槽内での可視化実験とは異なり、次のような技術開発を伴う難度の高いものであった。

- ① 模型船は広い水面を航走するため2次元水槽での撮影と異なりガラス面が存在しない。そこで、船体中心線に沿って透明整流板を設けた可視化用模型を製作した。
- ② 模型船は波浪中を動揺しながら航走するた

め、高速度ビデオ等の撮影機材を模型船に搭載する必要がある。模型船の限られたスペースに撮影機材を搭載するための光学系の設計／製作／校正等を行い、平成14年度に開発した可視化手法が使えるようにした。

- ③ 実験の再現性を高めるため、曳航台車や造波機までを含めて実験の集中制御が必要である。本研究では新たに曳航台車、造波機、撮影・計測機材等を集中制御するシステムを開発した。

平成15年度はこれらの技術開発を行って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し、画像のPIV解析から甲板打込水の流場データを求めた。また、船体運動、甲板上衝撃水圧、衝撃荷重等の計測も行い、画像と同期の取れた計測波形を得た。

平成16年度は平成15年度に用いた可視化用模型船にブリッジ、ハッチ、遮波板の3種類の甲板上構造物模型を搭載し、これらに遮られる打込水の複雑な挙動を可視化計測した。また、ブリッジならびにハッチカバーに作用する衝撃荷重等についても計測し、画像と同期のとれた荷重波形を得た。

本報では以上3カ年にわたって実施した水槽実験を通じて得られた、打込水の可視化計測技術の概要と、計測結果について報告する。

2. 2次元水槽における可視化実験

2.1 可視化計測機材とその構成

(1) 全体構成

最初に打込水の可視化に用いた計測機材

- (a) 高速度デジタルビデオカメラ、
- (b) 高速同期ストロボ、
- (c) データ収集用パソコン

について、その概要を報告する。

(2) 各計測機材

(a) 高速度デジタルビデオカメラ

写真2-1に株式会社朋栄社製のバリアブルフレームレートカメラ VFC-1000を示す。本機は最高8000コマ/秒の撮影速度をもつ高速度デジタルビデオカメラで、撮影画像は一旦カメラ内蔵メモリに記録された後、デジタルデータとして計測機に転送され各種の画像処理解析に用いることができる。内蔵メモリには、最大250コマ/秒で8秒間の連続記録が可能である。本カメラの特徴は、高速電子シャッター（最大：1/100,000秒）、および複数台カメラの同期運転が可能で、

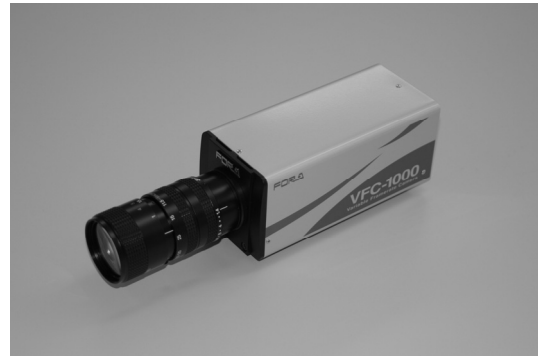


写真2-1 高速度デジタルビデオカメラ

LANケーブルを介してデータ収集用パソコン側から遠隔操作が可能である。レンズはCマウント、F値1.4のCANON製マクロズームレンズで、ズーム範囲は11.5mmから69mmまでのものを装着した。

(b) 同期ストロボ

写真2-2に日進電子工業株式会社製 ショートアークストロボ MODEL SA-130C-Wを示す。ストロボ装置の構成は、電源部、ランプハウス、光ファイバーライトガイド、集光レンズである。本装置は、光源として最大1,000Hzの連続発光が可能な130ワットタイプの点光源キセノンランプを使用している。電源部1台でランプハウスを2台同時に駆動でき最大260ワットの連続光が得られる。ランプハウスと発光部の間は、ステンレス製フレキシブルチューブで外装された光ファイバーライトガイドを介して集光レンズでシート形状のストロボ光を得る。ストロボ光源幅はレンズ出口で約1cmである。



写真2-2 同期ストロボ

これらの撮影機材をパソコンで制御した。カメラとパソコン間はLANケーブルで接続し、カメラで記録した画像のデータを転送し取り込んだ。

可視化計測機器を図2-1に、またそれらの性能を表2-1にまとめておく。

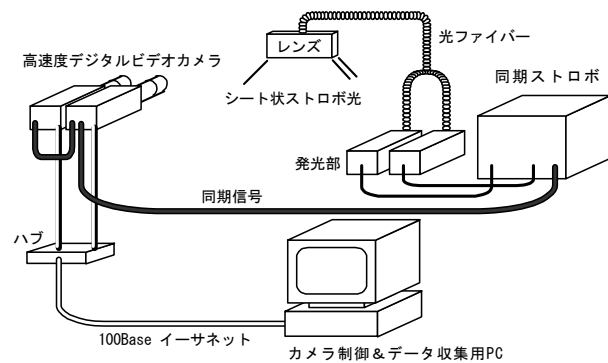


図 2-1 可視化計測機材

表 2-1 可視化機材の性能一覧

高速度ビデオカメラ	
撮影速度	250 frames/sec
分解能	512 x 472 pixels
階調	8 bit
最大撮影時間	8 sec
ストロボシート光	
シート光厚さ	15~20 mm
照度	0.26 x 2 J/F

2.2 2次元水槽における打込水の可視化

(1) 水槽の概要

実験は、海技研の浮体係留実験室 極浅水域流体力測定水路（以下では2次元水槽と書く）を使用し実施した。水槽の主要寸法は、全長 22m、幅 0.5m、深さ 0.7m で本水槽端には吸収式造波機が、反対端には消波板が設置されている。また、水槽の中央部 5m は両側面および底面にガラスの観測窓が備えつけられている。造波機は楔形のプランジャー方式で、内部制御器による周波数 0.1Hz から 3Hz の規則波および外部信号による不規則波を発生させることができる。最大波高は 10cm である。本実験では水深を 30cm に設定した。写真 2-3 には造波制御盤を、写真 2-4 には吸収式造波機を示す。

(2) 撮影機材等の配置

打込水の撮影時の機材の配置を写真とイラストで示す。写真 2-5 左と図 2-2 は2次元打込撮影時、写真 2-5 右と図 2-3 は3次元打込撮影時の配置である。

(4)



写真 2-3 造波制御盤

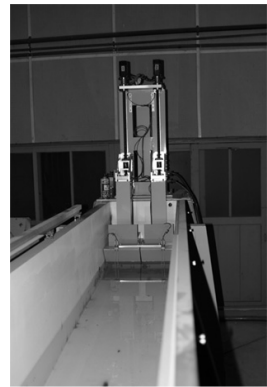


写真 2-4 吸収式造波機

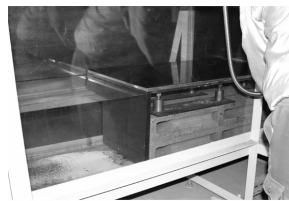
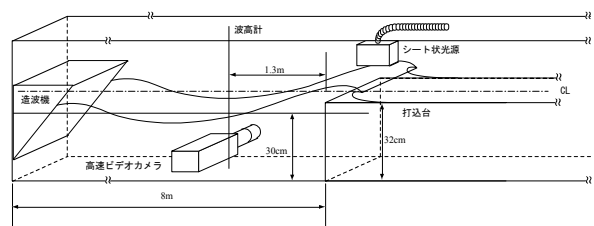
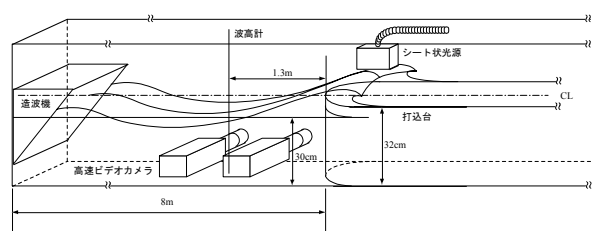


写真 2-5 打込台

（左：2次元計測用、右：3次元計測用）

図 2-2 2次元水槽での打込水の撮影の様子
（2次元打込の計測）図 2-3 2次元水槽での打込水の撮影の様子
（3次元打込の計測）

(a) 打込台

2次元計測、3次元計測共に水深は 30cm、打込台の高さは 32cm、打込台前縁の位置は造波機背面から 8m とした。打込台の上面は静止水面から 2cm だけ高い位置にあり、水平である。また、上面は厚さ 10mm のアルミ板で作られており十分剛な作りになっている。3次元計測用の打込台の形状を図 2-4 に示す。前縁が半径 250mm の半

円形で、上面の丸印は水圧計の取付位置を表す。
5cm 間隔で打込水の圧力を計測した水圧計の仕様
等については後で詳細に示す。

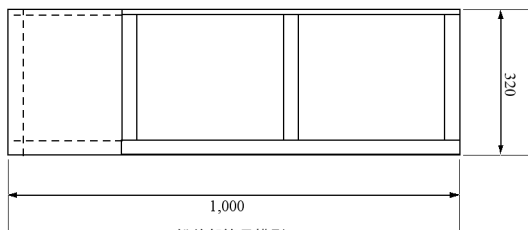
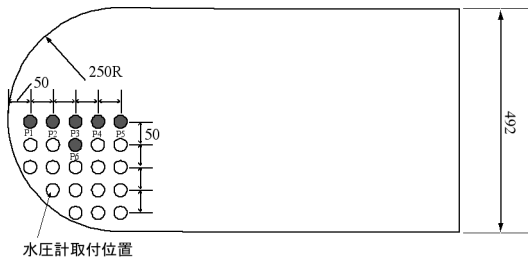


図 2-4 3次元計測用打込台 [単位:mm]

(b) 高速度ビデオカメラの設置

写真 2-6 にステレオ撮影用のカメラの設置状態を示す。台上への打込水は水槽側面のガラス窓を通して撮影した。カメラの横位置は2次元撮影では打込台前縁の真横、カメラの高さは静止水面高さとし、カメラの光軸が水平になるように調整した。3次元撮影では2台のカメラを用いたステレオ撮影を行うため、図 2-3 に示すようにカメラ2台を静止水面高さに設置した。カメラ位置でのレンズ軸間隔は 650mm、水槽の中心線からレンズ前面までの距離は 1950mm で、レンズの光軸は共に打込台前縁を狙うよう左右対称に設置した。この状態で光軸の挟角は 19 度である。

(c) シート状ストロボ光源の設置

ストロボ光源の設置状態を写真 2-7 に示す。図 2-2 に示す2次元計測では、水槽センターラインを含む断面を撮影するため、シート状ストロボ光が打込台の前縁近傍の水槽センターライン上を照らすように発光部を設置した。図 2-3 に示す3次元計測では、水槽センターラインから平行に 5cm 間隔で幅方向の5断面を撮影するため、撮影の都度シート状ストロボ光が撮影断面の真上を照らすように発光部を移動させた。

(d) 波高計の設置

入射波を計測するため、容量式波高計を打込台前縁より 1.3m 波上側の水槽中央部に設置した。波高計の仕様等については、後で述べる。

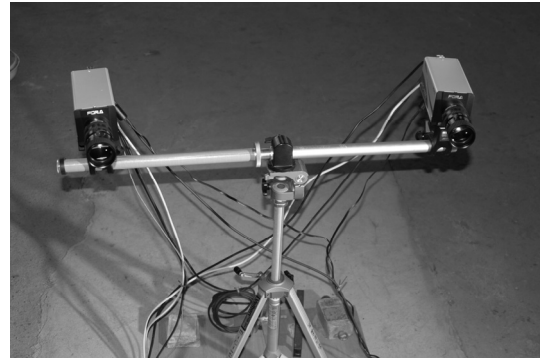


写真 2-6 ステレオ撮影用カメラ配置状態

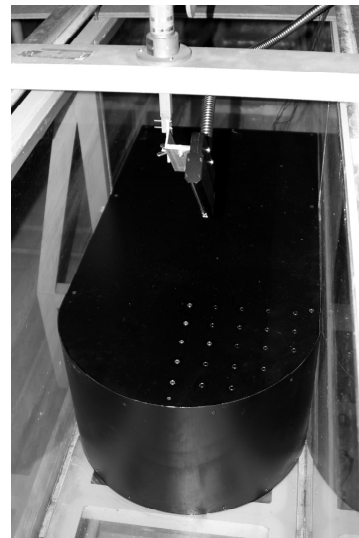


写真 2-7 ストロボ光源の設置状態

(3) 打込水の撮影方法

(a) 高速度ビデオカメラによる画像撮影

撮影は秒間 250 コマで連続 4 秒間行った。一回の計測で 1000 コマの画像が得られ、その容量は 250MB である。レンズの絞りは開放から 1 絞りないしは 2 絞り絞れるだけストロボ光量にまだ余裕があった。

(b) 撮影開始トリガー信号

実験データの再現性を確保するために、外部トリガー信号により造波開始後一定の時間でビデオ撮影を開始するようにした。ビデオカメラの撮影開始のタイミングおよび造波機の造波運転時間はノートパソコンを用いて制御した。具体的には造波機を設定周波数で運転させ入射波の第2波目が打込台の前縁を通過する時刻を計測し、この時刻をビデオカメラの開始トリガーとした。トリガー信号はノートパソコンにおいて D/A 変換したものをカメラの外部入力へ取り入れた。

一方、造波時間もビデオカメラのトリガーと同一のノートパソコンを使用し、造波機の運転開始

から停止までを自動制御した。造波時間は各々の入射波で約6波分の時間を設定した。

(c)トレーサー粒子

トレーサー粒子は、蛍光ポリスチレン（黄色）で粒子径は200から400ミクロン、比重は約1.03のものを使用した。散布方法は、造波機を起動し第1波目の入射波が打込台に到達する間、一握り分をストロボ光源付近に散布した。

(d)波高計測

入射波の波周期・波高を計測するため、株式会社三光精密製、容量式波高計を使用した。計測取り込みには株式会社キーエンス製データロガーNR-2000を使用し、サンプリングレートは50Hz一定とした。波高計は打込台前縁より1.3m上流に設置した。ただし、打込台前縁での水面の盛り上がり量を計測する目的で、打込台の前縁位置に波高計を取り付けた計測も行った。この場合はカメラのトリガー信号も同時にデータロガーに収録したため、サンプリングレートを1kHzにした。

(4) 実験パラメータ

実験パラメータは入射波の波長と波高である。造波機の能力の範囲内で台上への打込が最もダイナミックになるような、波長・波高の組み合わせを探した結果、表2-2に示す組み合わせが適切であった。表中の入射波の波高は打込台を取り除いて計測したもので、打込台がある場合には反射波の影響で打込台前縁での波高はもっと高くなる。撮影に先立ち、2次元計測用の打込台前縁に波高計を設置して水面の盛り上がり量を計測した結果を図2-5に示す。この図より、打込台が存在する場合には、その前縁での水面の盛り上がり量が波振幅の2倍よりも大きくなっていることが分かる。

一方、3次元の計測では入射波3だけを用い、水槽センターラインから平行に5cm間隔で幅方向の5断面を撮影した。撮影断面を図2-6に示す。3次元計測でも撮影に先立ち図2-6にS1～S5で示す各計測断面の前縁に波高計W1～W5を設置して、水面の盛り上がり量を計測した。計測結果を図2-7に示す。この図より、W1～W3の位置では水面上昇量は10cm程度であるが、水槽壁面に近づくにつれて側壁影響により大きくなっており、W5では12cm程度になっている。

2.3 水槽実験で撮影した打込水の映像

水槽実験で撮影した画像の一例を図2-8に示す。この画像は入射波1（波長0.69m、波高7.1cm）が2次元の台上へ打ち込む様子を撮影したものである。撮影速度は毎秒250コマで、4ms刻みであ

表 2-2 実験に用いた入射波

	周波数	波長	波高	前縁での水面上昇量
入射波 1	1.5Hz	0.69m	7.1cm	10.1cm
入射波 2	1.3Hz	0.92m	8.9cm	12.5cm
入射波 3	1.0Hz	1.56m	10.8cm	13.2cm

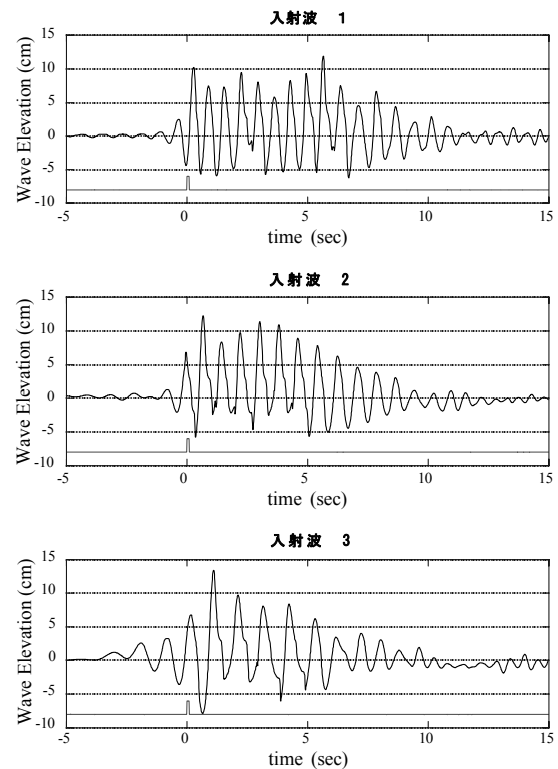


図 2-5 2次元打込台前縁での水面変位

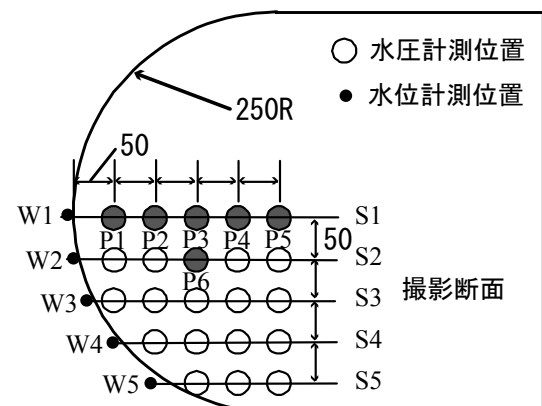


図 2-6 3次元打込撮影断面 [単位:mm]

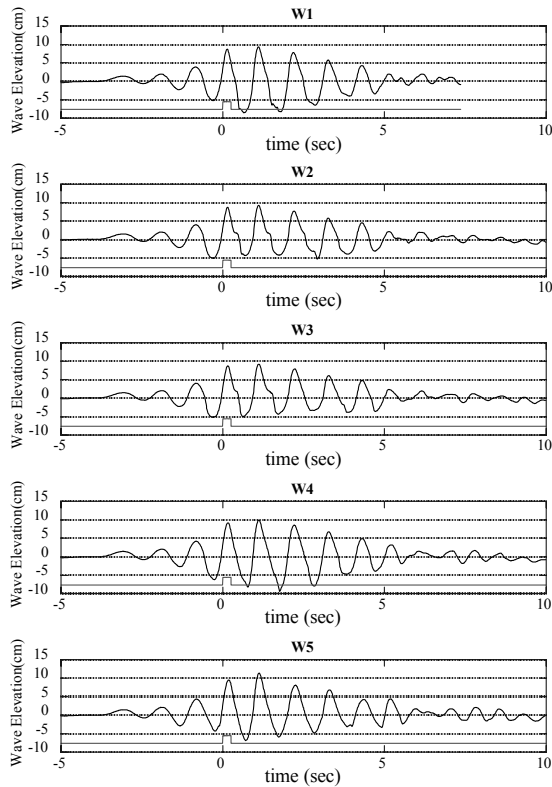


図 2-7 3次元打込台前縁での水面変位

るが、図では 10 コマ (40ms) 毎の画像を示す。左から水面が盛り上がり、台上へ打ち込んでいく様子がよく分かる。水中に白く写っているのは蛍光ポリスチレンのトレーサー粒子である。160ms から 200ms に掛けては、打込水が台前縁で剥離して空気を巻き込み、巻き込んだ空気が打込水の先端近くから空気中へ抜け出していく様子もとらえられている。本画像は水槽センターライン上の部分をシート光で切り出して撮影したものである。しかし、水槽ガラス面と水面との交線近傍では、水の表面張力により水面が大きな曲率でガラス面に対し接している部分があり、この部分がトレーサーや打込台面で乱反射されたストロボ光により照らされて輝度を持って写り込んでいる。打込水を冠のように覆っている薄い膜状のものがそれで、打込水の自由表面形状の解析には、この部分は無視した。他の入射波による打込も本画像と同様に鮮明に撮影することができ、後述する PIV 解析に用いることができる十分鮮明な映像が得られた。3次元の打込についても同様である。

2.4 流場解析の結果

2次元打込の場合の断面形状と PIV 解析結果を図 2-9 (入射波 1)、図 2-10 (入射波 2)、図 2-11

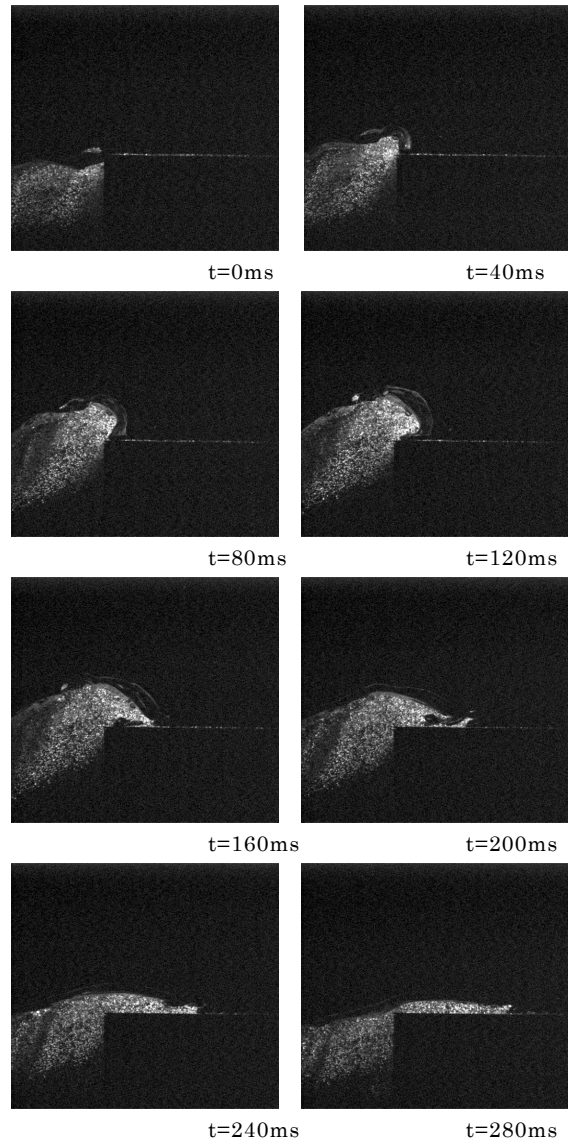
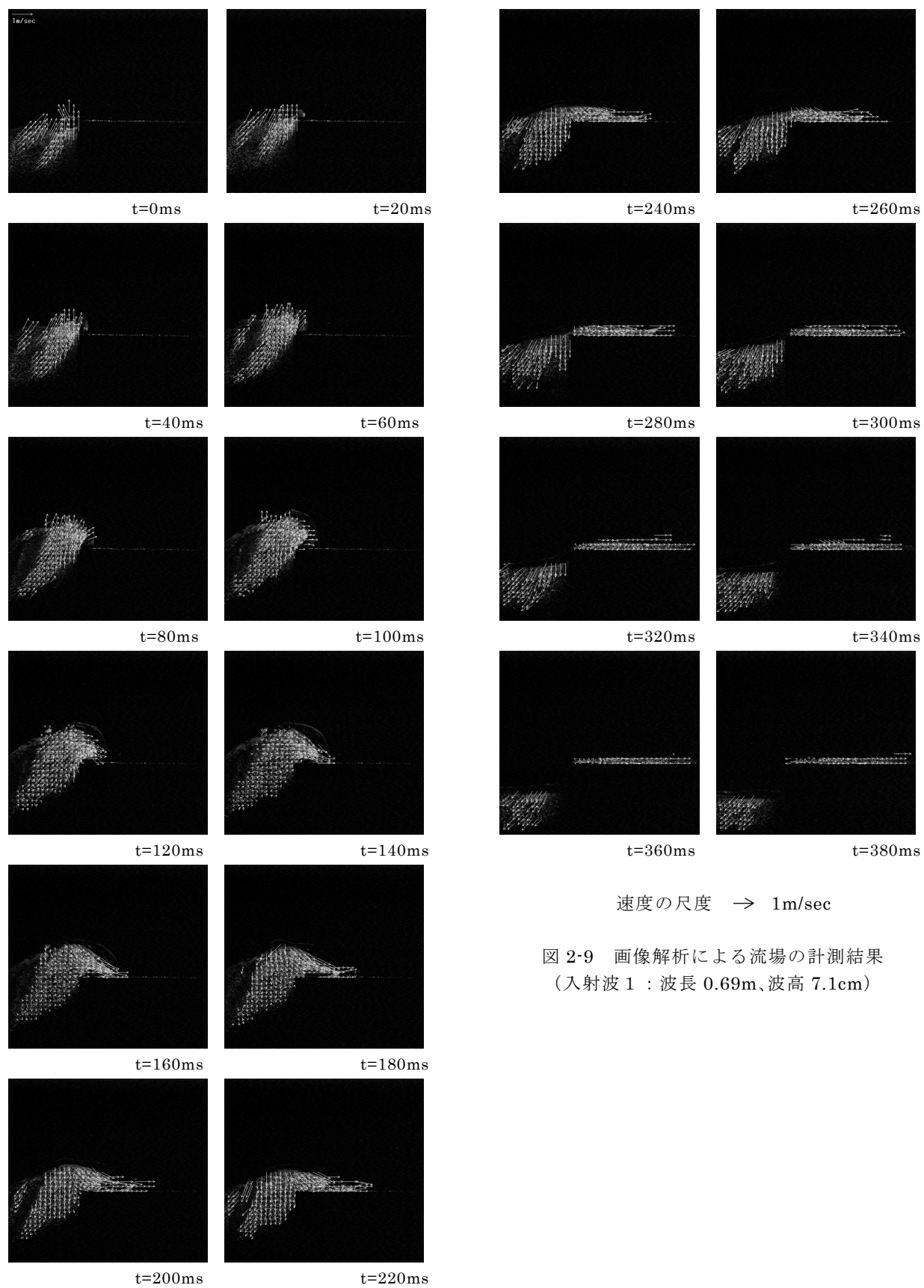
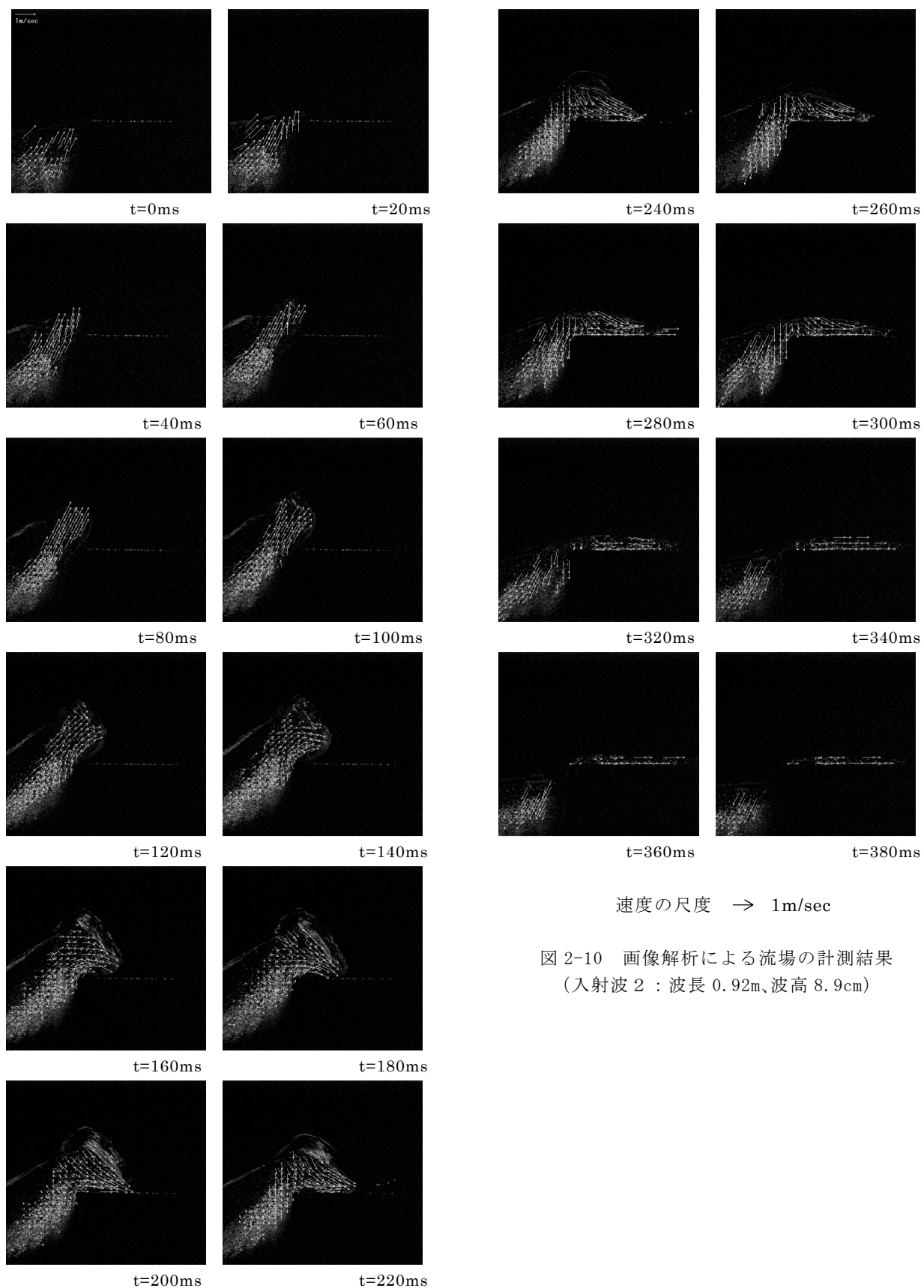


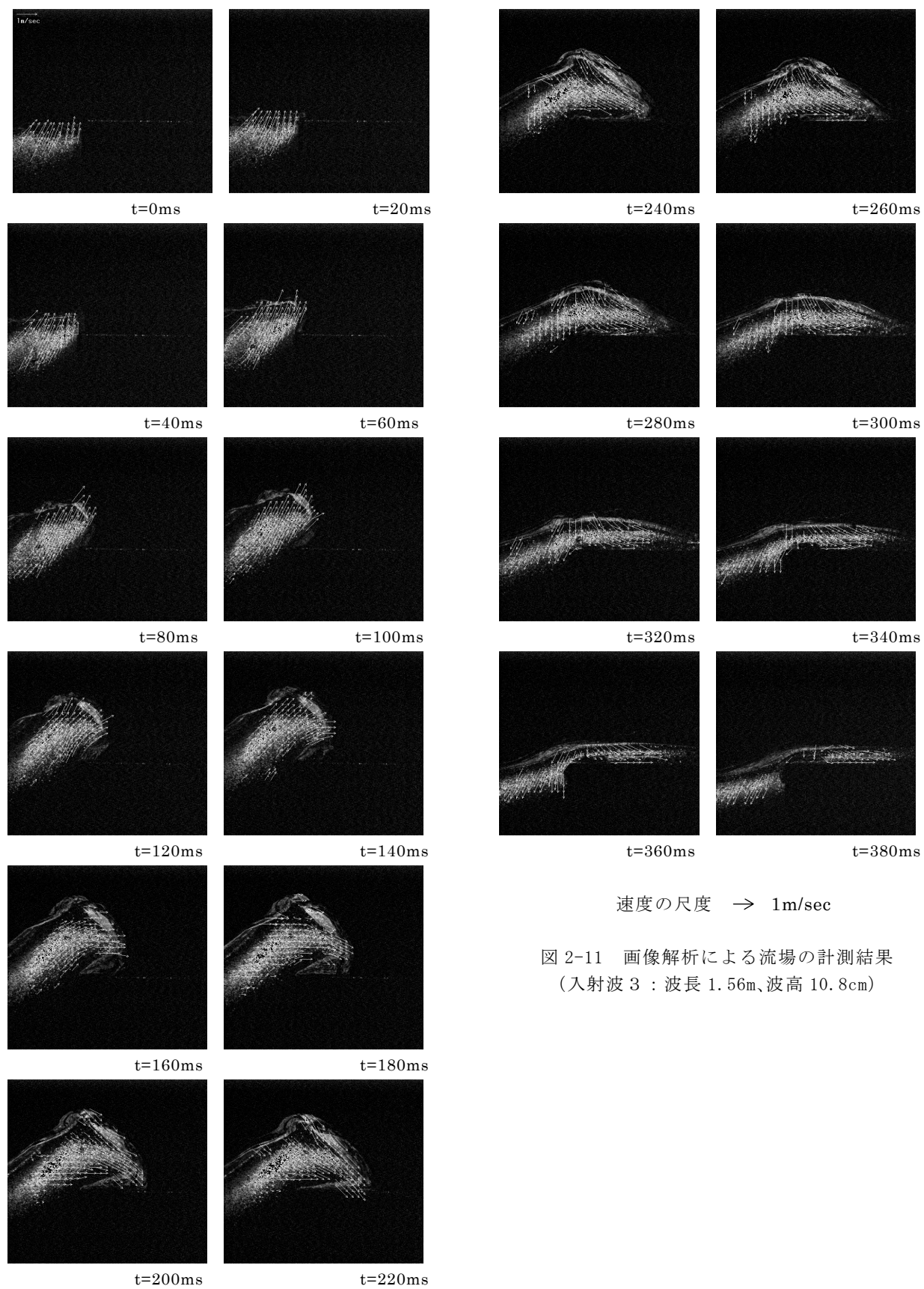
図 2-8 撮影画像の一例
(入射波周波数 1.5Hz, 波高 7.1cm)

(入射波 3) に示す。PIV 解析結果は画像上にベクトルでプロットした。本解析では概ね良好で安定した結果が得られており、撮影に用いたシート状ストロボ光で十分な光量が得られていること、トレーサー粒子の粒径ならびに密度が PIV 解析を実施する上で適切であることが分かった。これらの知見を参考に、波浪中を航走する船舶の甲板上への打込水を可視化計測するための模型船ならびに可視化計測装置をデザインした。これについては次節で述べる。

なお PIV 解析には Nexus 社の PIV-Expert2000 を用いた。詳細は 3.9(5)に後述する。







3 航走模型船の甲板打込水の可視化計測

3.1 可視化計測機材とその構成

本実験に用いた可視化計測機器は高速度デジタルビデオカメラ2台、同期ストロボ光源、光ファイバー、円筒レンズによるシート光発光部、制御用PCで構成されている。これらの機材については2節において図2-1および表2-1に示した通りである。

3.2 模型船

甲板上への打込水の可視化計測用に新たに製作した模型船の立体図を図3-1に示す。本模型船は船体、透明整流板、光学計測機器収納ケース、シート状光源トラバーサ、圧力計測用甲板、荷重計測用甲板、透明甲板等から構成されている。実験は向波中で実施し、船体運動も上下揺と縦揺以外は拘束するため、現象は全て左右対称である。そこで、模型船の中心線に整流板を取り付け、これを対称面として左舷甲板上への打込水を右舷から撮影するように模型船を設計した。

本実験では打込水の可視化画像に加え、甲板上での衝撃水圧や衝撃荷重の計測も行うため、左舷甲板は目的に応じて付け替えられるよう複数枚用意した。実際の船舶では甲板にはキャンパーがあるが、本実験では理想化して平面とした。

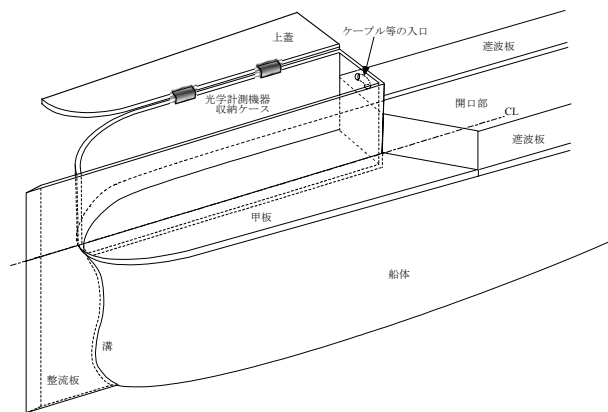


図3-1 模型船の立体図

模型船の上面図ならびに側面図を図3-2に、正面図を図3-3に、また主要目を表3-1に示す。本模型は垂線間長 $L = 3.0\text{m}$ で、満載喫水線まで沈めた状態での排水量は 243kg である。正面図から分かるように本船は船首フレアの小さい肥大船で、船首高さの低いVLCC船型である。肥大船型とし

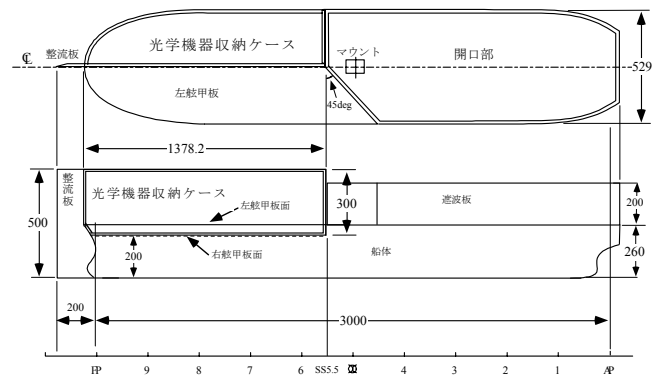


図3-2 上面図ならびに側面図 [単位:mm]

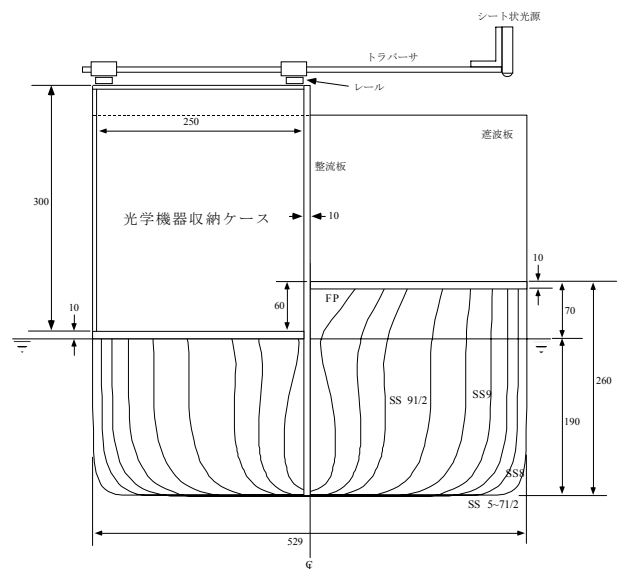


図3-3 正面図 [単位:mm]

てはバラ積船も候補に上げられるが、バラ積船では船首高さが高く大波高にしないと撮影に十分な打込水量が得られない。しかし、あまり波高を上げると高速度ビデオや鏡などの撮影機材の振動により映像がブレたり、カメラの光軸等が設定位置からズレる恐れがある。そこで、本実験では比較的低い波高でも十分な打込水量が得られるVLCCを供試船型として採用した。本模型船は曳航模型であり、舵やプロペラはない。ジンバル、ヒープロッドを介して船体を曳航台車に取り付け、規則波中を向波状態で曳航する仕様である。

甲板打込水を上から照明するシート状光源のトラバーサを図3-4に示す。これは光学計測機器収納ケースの上蓋に取り付けられている。これを用いてシート光発光部を整流板と平行を保ったまま船長方向と船幅方向に移動させ、計測したい打込水の断面をシート光で照射できるようにした。

表 3-1 模型船の主要目

船型	タンカー (VLCC)	
船長	L	3.0 m
船幅	B	0.53 m
型深さ	D	0.26 m
喫水	d	0.19 m
排水量	Δ	240 kg
慣動半径	K_{yy}/L	0.25

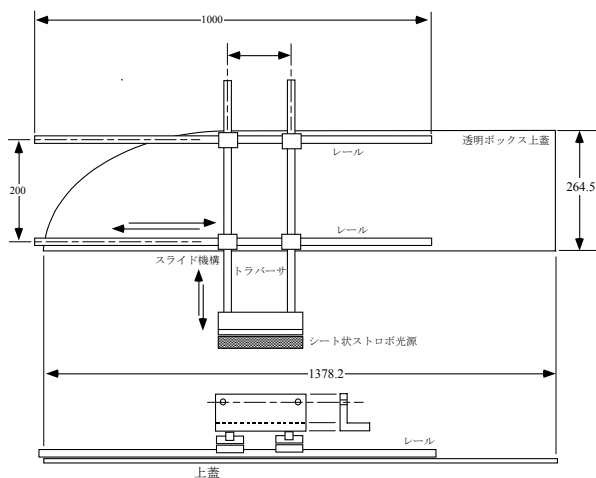
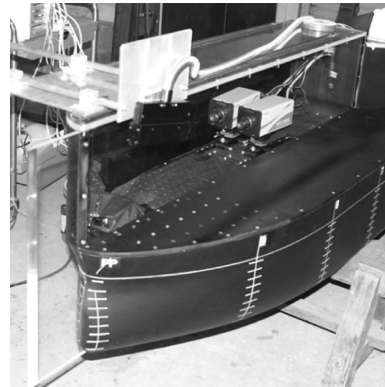
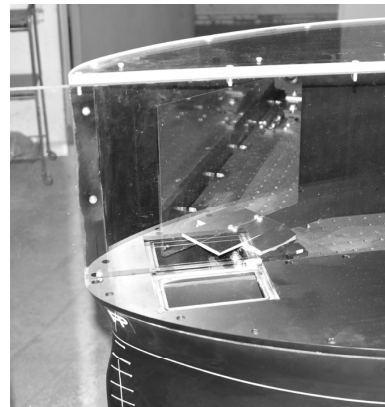


図 3-4 シート状光源トラバーサ [単位:mm]

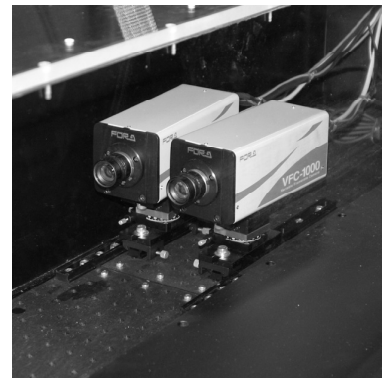
模型船の写真写真 3-1 の(1)から(4)に示す。模型船は、光の反射を防ぐため全体を艶消しの黒で塗装されている。(1)では水圧計測用の甲板が、また(2)では荷重計測用甲板が左舷に取り付けられている。これらの写真から、アクリル製透明整流板、光学計測機器収納ケース内の2台の高速ビデオ、ケース上のトラバーサとシート光発光部等の取り付け状態が良く分かる。



(1) 左舷側から見た模型船の船首部



(2) 鏡の取り付け状態



(3) カメラの取り付け状態



(4) 右舷側から見た模型船

写真 3-1 可視化実験に用いた模型船と撮影機材

3.3 高速度ビデオカメラの設置状態と撮影範囲

高速度ビデオカメラ2台は光軸が模型船の甲板と平行になるよう、光学計測機器収納ケース底のブレッドボードに剛性の高い金属製治具を用いて固定した(写真3-1(1),(3)参照)。鏡についても同様にブレッドボードに金属製治具で固定し、波浪中での船体運動や打込水による衝撃加速度により映像がブレないように、十分な剛性を持たせた。

図3-5に2台のカメラの位置、光軸、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、右図は左図より撮影範囲を約15cm後方にとった場合の配置である。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、カメラ設置スペースの制約上困難であるので、本実験ではカメラを透明ボックス内に船首方向に向けて設置し、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粒子をステレオ撮影することで、断面内の流れを映像化した。

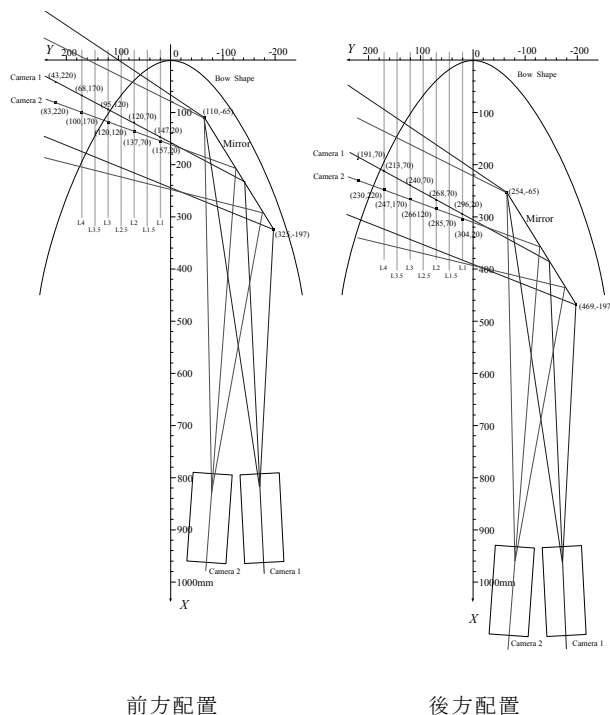
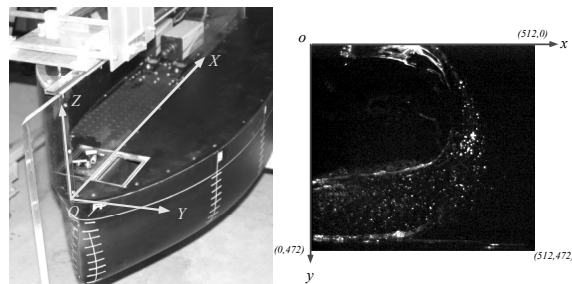
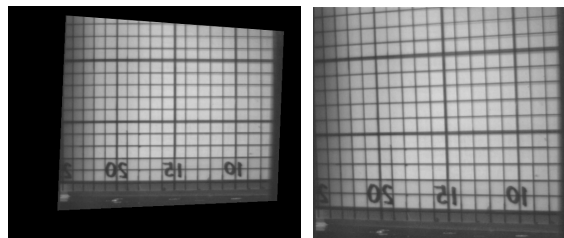
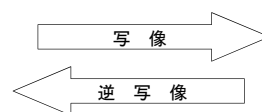


図3-5 カメラの光軸と撮影範囲 [単位:mm]

3.4 実座標からカメラ座標への写像関数



(1) 模型船甲板上の実座標系 (2) 画像の座標系



(3) 実座標系での撮影範囲 (4) 撮影画像(L1 section)

図3-6 撮影画像の座標系

光学機器収納ケース内のスペースと撮影する画像寸法等の兼ね合いから、カメラの光軸と鏡面との角度が必ずしも45度にならない。よって、カメラのCCDに写る長方形の映像は、実空間では甲板上の歪んだ四角形領域に対応することになる。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、歪みを補正して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3-6に模型船甲板上での実座標系と画像の座標系を示す。図3-6(1)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3-6(2)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

$$\begin{aligned} X &= \sum_{i=1}^4 cx(i) T_i(x, z) \\ Z &= \sum_{i=1}^4 cz(i) T_i(x, z) \end{aligned} \quad (3-1)$$

を用い、ビデオカメラで撮影した較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

係数を算出した。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。

$$\left. \begin{aligned} T_1(x,z) &= (a-x)(b-z)/ab \\ T_2(x,z) &= x(b-z)/ab \\ T_3(x,z) &= (a-x)z/ab \\ T_4(x,z) &= xz/ab \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

where $a = 512$, $b = 472$

求めた係数を表 3-2(1),(2)に示す。(1)はカメラ等を前方に配置した場合(図 3-5 の左図)、(2)は後方に配置した場合(図 3-5 の右図)の係数で、カメラ 1 とカメラ 2 について各撮影断面の係数を示している。

撮影画像の PIV 解析からは、画像上での速度 $(dx/dt, dz/dt)$ が pixel/sec を単位として得られる。

本写像関数を用いると、実座標系での速度

$(dX/dt, dZ/dt)$ は mm/sec を単位として

$$\frac{dX}{dt} = \sum_{i=1}^4 cx(i) T'_i\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) \quad (3-3)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \sum_{i=1}^4 cz(i) T'_i\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right)$$

$$\left. \begin{aligned} T'_1\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) &= \left\{ -(b-z) \frac{dx}{dt} - (a-x) \frac{dz}{dt} \right\} / ab \\ T'_2\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) &= \left\{ (b-z) \frac{dx}{dt} - x \frac{dz}{dt} \right\} / ab \\ T'_3\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) &= \left\{ -z \frac{dx}{dt} + (a-x) \frac{dz}{dt} \right\} / ab \\ T'_4\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) &= \left\{ z \frac{dx}{dt} + x \frac{dz}{dt} \right\} / ab \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

で与えられる。

表 3-2 (1) 写像関数の係数 (前方配置の場合)

Camera1				
L	cx(1)	cx(2)	cx(3)	cx(4)
1	5.38124E+01	2.40665E+02	4.65701E+01	2.34837E+02
1.5	3.58528E+01	2.29591E+02	2.86041E+01	2.23491E+02
2	1.78931E+01	2.18517E+02	1.06382E+01	2.12145E+02
2.5	4.37817E+00	2.10956E+02	-6.05857E+00	2.02373E+02
3	-9.13679E+00	2.03395E+02	-2.27553E+01	1.92602E+02
3.5	-2.70568E+01	1.91925E+02	-3.86141E+01	1.82644E+02
4	-4.49768E+01	1.80455E+02	-5.44729E+01	1.72686E+02
4.5	-6.01258E+01	1.70962E+02	-6.75104E+01	1.64767E+02
5	-7.52749E+01	1.61468E+02	-8.05479E+01	1.56848E+02
L	cz(1)	cz(2)	cz(3)	cz(4)
1	1.52666E+02	1.39113E+02	-1.34706E+01	-5.21954E+00
1.5	1.56558E+02	1.42433E+02	-1.55137E+01	-7.90475E+00
2	1.60449E+02	1.45752E+02	-1.75567E+01	-1.05900E+01
2.5	1.64416E+02	1.48660E+02	-1.68195E+01	-1.06620E+01
3	1.68383E+02	1.51567E+02	-1.60824E+01	-1.07340E+01
3.5	1.71329E+02	1.54781E+02	-1.89460E+01	-1.30112E+01
4	1.74274E+02	1.57995E+02	-2.18096E+01	-1.52884E+01
4.5	1.76209E+02	1.59676E+02	-2.64182E+01	-1.86100E+01
5	1.78143E+02	1.61357E+02	-3.10267E+01	-2.19316E+01

Camera2

L	cx(1)	cx(2)	cx(3)	cx(4)
1	7.00671E+01	2.43454E+02	6.51038E+01	2.40360E+02
1.5	5.60688E+01	2.36182E+02	5.08751E+01	2.32879E+02
2	4.20705E+01	2.28911E+02	3.66464E+01	2.25399E+02
2.5	3.18279E+01	2.23931E+02	2.40405E+01	2.19179E+02
3	2.15854E+01	2.18951E+02	1.14347E+01	2.12958E+02
3.5	7.57125E+00	2.12007E+02	-7.24295E+01	2.06941E+02
4	-6.44288E+00	2.05063E+02	-1.28833E+01	2.00925E+02
4.5	-1.80424E+01	1.99110E+02	-2.32371E+01	1.96213E+02
5	-2.96419E+01	1.93157E+02	-3.35909E+01	1.91501E+02
L	cz(1)	cz(2)	cz(3)	cz(4)
1	1.44328E+02	1.35623E+02	-1.79539E+01	-1.11698E+01
1.5	1.47136E+02	1.38397E+02	-1.80620E+01	-1.23593E+01
2	1.49945E+02	1.41171E+02	-1.81702E+01	-1.35487E+01
2.5	1.53720E+02	1.44217E+02	-2.01701E+01	-1.61233E+01
3	1.57495E+02	1.47263E+02	-2.21700E+01	-1.86978E+01
3.5	1.60088E+02	1.49691E+02	-2.51137E+01	-2.11157E+01
4	1.62682E+02	1.52120E+02	-2.80575E+01	-2.35337E+01
4.5	1.63598E+02	1.53615E+02	-3.22414E+01	-2.69456E+01
5	1.64513E+02	1.55110E+02	-3.64252E+01	-3.03576E+01

表 3-2 (2) 写像関数の係数 (後方配置の場合)

Camera1				
L	cx(1)	cx(2)	cx(3)	cx(4)
1	1.99160E+02	3.86949E+02	1.97429E+02	3.83492E+02
1.5	1.80853E+02	3.75171E+02	1.80008E+02	3.72930E+02
2	1.62547E+02	3.63394E+02	1.62586E+02	3.62369E+02
2.5	1.45404E+02	3.54139E+02	1.44902E+02	3.52285E+02
3	1.28262E+02	3.44884E+02	1.27217E+02	3.42202E+02
3.5	1.10386E+02	3.35271E+02	1.08893E+02	3.32423E+02
4	9.25101E+01	3.25657E+02	9.05691E+01	3.22645E+02
4.5	8.05687E+01	3.17870E+02	7.51844E+01	3.12814E+02
5	6.86274E+01	3.10083E+02	5.97997E+01	3.02983E+02
L	cz(1)	cz(2)	cz(3)	cz(4)
1	1.49975E+02	1.37213E+02	-1.09923E+01	-5.29423E+00
1.5	1.45917E+02	1.37176E+02	-1.82469E+01	-1.29574E+01
2	1.56725E+02	1.43324E+02	-1.67461E+01	-1.06977E+01
2.5	1.51631E+02	1.42750E+02	-2.36804E+01	-1.88388E+01
3	1.63404E+02	1.48984E+02	-2.24345E+01	-1.72239E+01
3.5	1.57381E+02	1.47798E+02	-2.93181E+01	-2.41667E+01
4	1.70840E+02	1.54453E+02	-2.89369E+01	-2.16659E+01
4.5	1.63049E+02	1.52842E+02	-3.43623E+01	-2.78836E+01
5	1.77026E+02	1.60806E+02	-3.27160E+01	-2.43144E+01

Camera2

L	cx(1)	cx(2)	cx(3)	cx(4)
1	2.14253E+02	3.90469E+02	2.13374E+02	3.88274E+02
1.5	2.00463E+02	3.83223E+02	2.00040E+02	3.81192E+02
2	1.86672E+02	3.75977E+02	1.86706E+02	3.74111E+02
2.5	1.74218E+02	3.69281E+02	1.74246E+02	3.68071E+02
3	1.61763E+02	3.62585E+02	1.61787E+02	3.62032E+02
3.5	1.48373E+02	3.56804E+02	1.48103E+02	3.55681E+02
4	1.34983E+02	3.51023E+02	1.34419E+02	3.49331E+02
4.5	1.24638E+02	3.45465E+02	1.22066E+02	3.42847E+02
5	1.14294E+02	3.39907E+02	1.09714E+02	3.36363E+02
L	cz(1)	cz(2)	cz(3)	cz(4)
1	1.43008E+02	1.34321E+02	-1.52614E+01	-9.84179E+00
1.5	1.45917E+02	1.37176E+02	-1.82469E+01	-1.29574E+01
2	1.48826E+02	1.40032E+02	-2.12323E+01	-1.60730E+01
2.5	1.51631E+02	1.42750E+02	-2.36804E+01	-1.88388E+01
3	1.54437E+02	1.45468E+02	-2.61285E+01	-2.16047E+01
3.5	1.57381E+02	1.47798E+02	-2.93181E+01	-2.41667E+01
4	1.60326E+02	1.50128E+02	-3.25077E+01	-2.67286E+01
4.5	1.63049E+02	1.52842E+02	-3.43623E+01	-2.78836E+01
5	1.65772E+02	1.55556E+02	-3.62169E+01	-2.90387E+01

3.5 力学的な計測項目とその概要

(1) 衝撃水圧

打込水による衝撃圧は写真 3-1(1)に示した圧力計測用甲板に、株式会社三計エンジニアリング製水圧計 P306V-02S を取り付けて計測した。その写真を写真 3-2 に示す。本水圧計は直径が 5mm、フルレンジは一気圧 (1,000hPa) で、優れた温度補償回路を備えており空中から水中への出入りに伴う温度ショックが小さい。海技研における過去の水槽実験においても、スラミングや甲板冠水による衝撃圧の計測に用いられた実績がある。

水圧計の取り付け位置を図 3-7 に P1 から P26 で示す。図中の L1 から L5 の線は、先に図 3-5 で示した打込水の撮影断面であり、本実験では撮影断面下の衝撃圧を計測した。

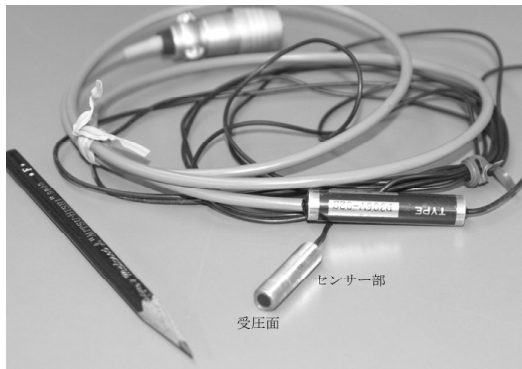


写真 3-2 衝撃水圧の計測に用いた水圧計

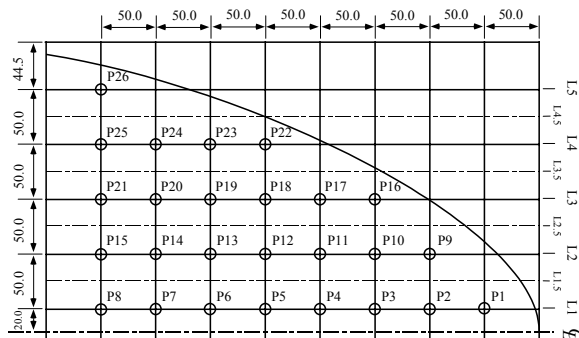


図 3-7 甲板上の衝撃水圧計測点 [単位:mm]

(2) パネルの弾性応答

打込水による弾性パネルの動的応答を計測するため、写真 3-1(2)に示す甲板上の開口部に、三栄測器株式会社製パネルゲージ（写真 3-3）を取り付けた。その外形と主要寸法を図 3-8 に示す。受

圧面の素材はベリリウムで、その裏面には歪ゲージが貼られており、受圧面に作用する平均的な圧力が計測できるようになっている。本実験では荷重の計測よりも、受圧面の流力弾性的な応答の計測を目的に、本ゲージを用いた。

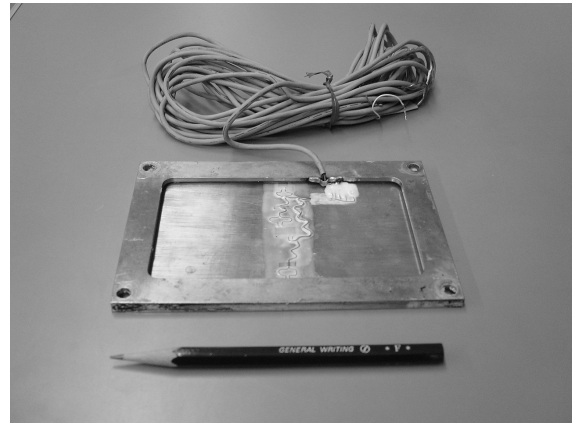


写真 3-3 パネルゲージ

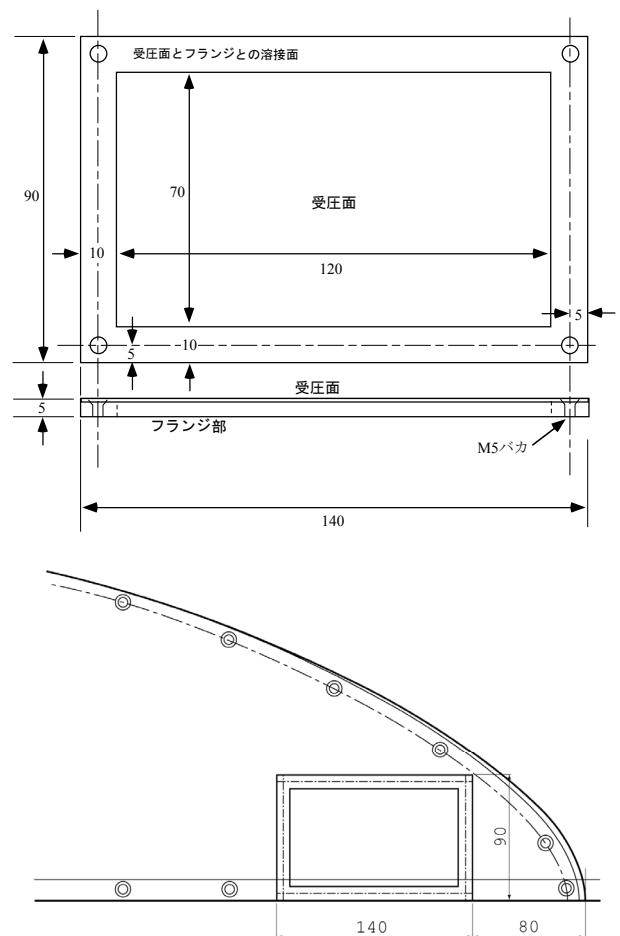


図 3-8 パネルゲージの寸法ならびに取付位置 [単位:mm]

(3) 入射波と船体運動

入射波を計測するため曳航台車に容量式波高計を設置した。設置位置は船首 FP ラインの右舷側方約 1.3m である。ここには模型船からの攪乱波は到達しない。

船体運動としては上下揺と縦揺をヒープロットとジンバルに取り付けられたポテンショメータを用いて計測した。

以上(1)～(3)のデータの収録には株式会社キーエンス製データロガー NR-2000 を使用した。サンプリング周波数は 5.0kHz で、打込水による衝撃水圧の計測にも十分である。

3.6 試験水槽と実験制御

(1) 試験水槽の概要

可視化実験は海技研の 1 号館内にある動揺試験水槽において実施した。試験水槽を図 3-9 に示す。本試験水槽は全長 50m、幅 8m、深さ 4.5m の小型水槽で、曳航台車とフラップ式造波機を備えている。曳航台車は外部信号による速度制御が可能で、造波機も外部信号による制御が可能である。

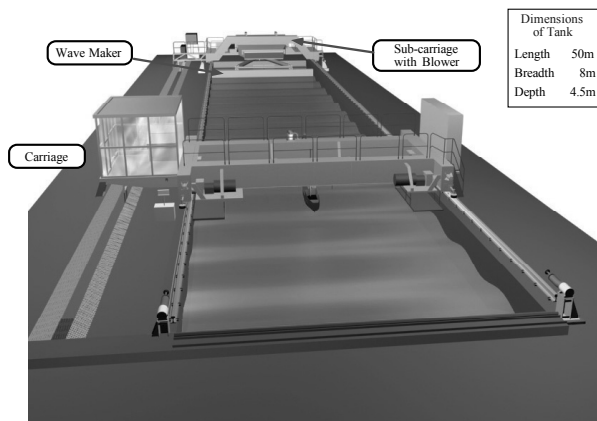


図 3-9 可視化実験に用いた水槽

模型船の設置状態を図 3-10 に示す。この状態で模型船の上下揺と縦揺以外の運動は拘束されている。図には模型船の右舷側に入射波を計測するための波高計が、また曳航台車上から模型船前方にトレーサー粒子散布用のノズルが取り付けられている様子も示されている。トレーサー粒子ならびにその散布方法については、3.7 節で後述する。

(2) 実験の自動制御システム

本水槽実験では、シート状光源を用いて 3 次元

的な打込水の流場から 2 次元断面を切り出し、それを 2 台の高速ビデオカメラでステレオ撮影する手法を用いた。3 次元流場データを求めるためには、シート状光源の位置を船幅方向に移動させて撮影を繰り返し、それらを幅方向に重ね合わせる必要があるため、入射波形状、模型船が入射波と出会う位置と時刻、波浪中での模型船の運動等が毎回まったく同じでなければならない、実験に高い再現性が求められる。そこで、National Instruments 社 LabView を用い、曳航台車、造波機、高速ビデオとストロボ、その他の計測装置を計算機で自動制御するシステムを開発し、実験中のマニュアル操作を排した。この自動制御システムを用いる事で、水槽実験の再現性を格段に向上させることができた。本システムは PC と D/A 変換器から構成されており、その外観を図 3-11 に、表示画面の一例を図 3-12 に、制御ダイアグラムを図 3-13 に示す。

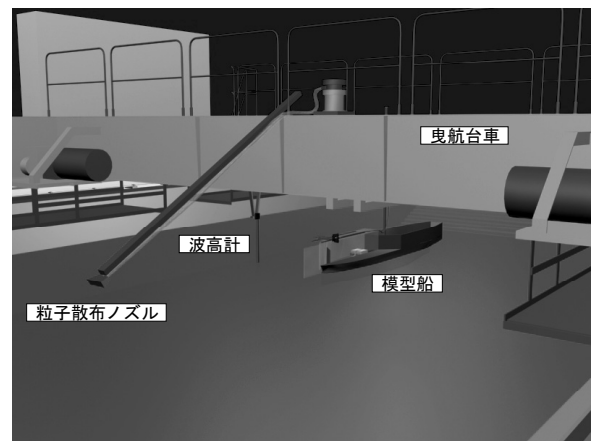


図 3-10 模型船設置状態



図 3-11 自動制御システム

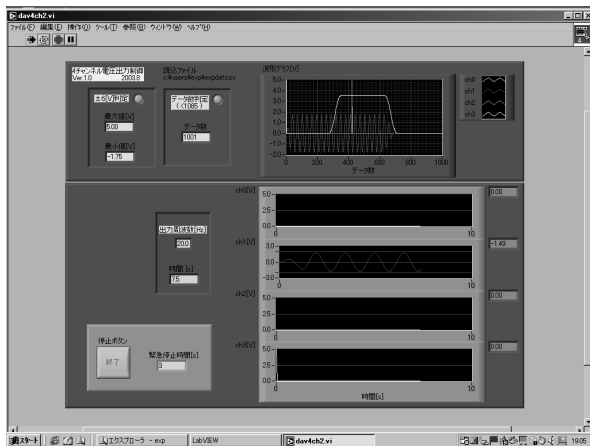


図 3-12 自動制御プログラムの表示画面

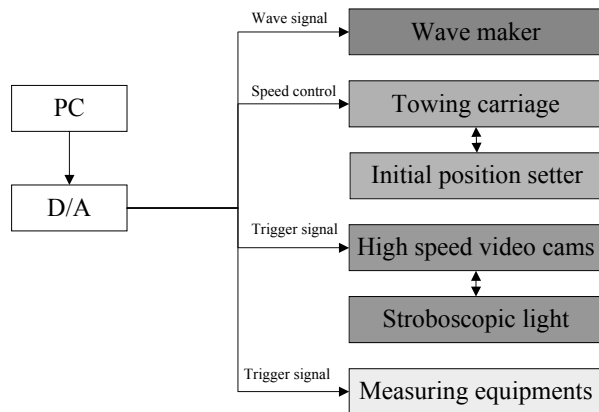
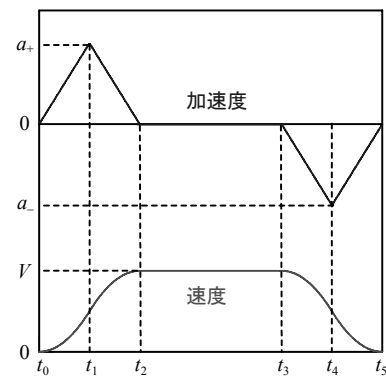


図 3-13 制御ダイアグラム

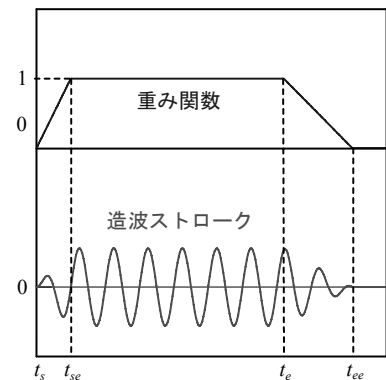
次に、本システムの制御信号を図 3-14 に示す。上が曳航台車の速度信号、下が造波機のスローク信号である。本システムを用いた実験の手順は次の通りである。

- 1) 超音波式変位計を用いて、曳航台車の初期位置を定位置にミリ単位で設定。
- 2) 曳航台車ならびに造波機の制御を実験制御システムに渡す。
- 3) 制御システムによる実験の自動遂行
 - i) 造波機スローク信号を送出し、規則波の造波開始。
 - ii) 一定の待ち時間の後、速度信号を発信して曳航台車加速開始。
 - iii) 加速を終了し、定常速度に到達。
 - iv) 撮影ならびに計測開始トリガー信号の発信
 - v) 模型船が入射波中に入り、過渡運動を経て周期的定常状態に至る。

- vi) 8 秒後に撮影と計測を終了。
- vii) スローク信号により、造波機を緩停止。
- viii) 速度信号により曳航台車を減速／停止。
- 4) 曳航台車ならびに造波機の制御をマニュアルに戻す。
- 5) 曳航台車をマニュアル操作で元の位置へ復帰
- 6) 計測終了



(1) 曳航台車の加速度と速度



(2) 造波機のスローク

図 3-14 曳航台車と造波機の制御信号

3) 自動制御システムを用いた実験の再現性

次に、本自動制御システムを用いた場合の実験結果の再現性について報告する。同一条件(波長 3m、波高 11cm)の実験を 10 回繰り返して計測した入射波ならびに模型船の上下揺と縦揺の波形を図 3-15 に示す。t=0 は高速度ビデオのトリガ信号が入るタイミングである。波形がほぼ重なっており高い再現性があることが分かる。実験の再現性を定量的に把握するため、図中の緑の円内で示したピーク値について、そのバラツキを解析した。また、ピーク値だけでなく波形全体についても相関係数を求めた。これらの結果を表 3-3 にまとめて示しておく。

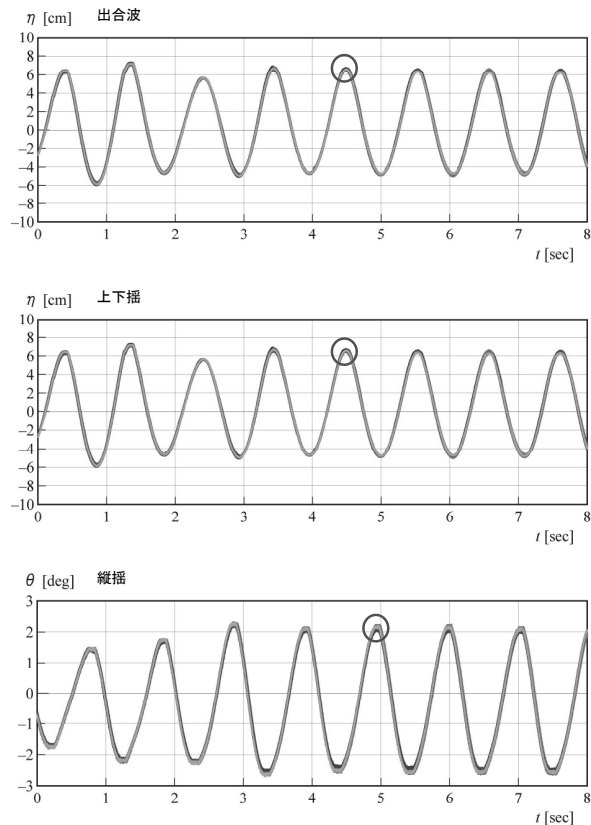


図 3-15 再現性の検証

表 3-3 自動制御システムを用いた実験の
再現性の検証結果

	出合波	上下揺	縦揺
平均値	6.60 cm	2.41 cm	2.19 deg.
標準偏差	0.09 cm	0.07 cm	0.04 deg.
90% 信頼 区 間	6.45 cm	2.30 cm	2.12 deg.
	6.75 cm	2.53 cm	2.26 deg.
ピーク値の 変動	$\pm 2.25 \%$	$\pm 4.75 \%$	$\pm 3.2 \%$
相 関 係 数 (8 秒間)	0.9931	0.9877	0.9877
	0.9998	0.9997	0.9998
相関係数の 平均値	0.9981	0.9961	0.9970

3.7 トレーサー粒子とその散布方法

可視化計測画像の PIV 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、粒子径 200～400 ミクロン、比重は約 1.03）を使用した。（写真 3-4）実験に用いた動揺水槽全体に粒子を散布することは不

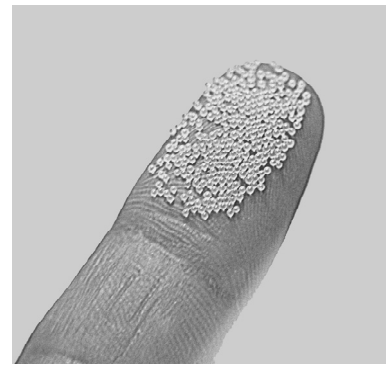


写真 3-4 トレーサー粒子

可能である。また、粒子の比重は 1 より僅かに大きく、ゆっくりと沈殿する。そこで、実験では航走する模型船の 3m ほど前方の水面に散布することを試みた。しかし、水面に散布された粒子は殆ど同じ速度で沈下するため、打込水中に層状に存在することになり、均一に分布させることができなかった。そこで、流れの攪乱は少し大きくなるが、トレーサー粒子を予め水に入れて十分に攪拌したものを、水といっしょに模型船の 3m ほど前方の水面に散布する方式に変更した。（図 3-10 参照）これにより、比較的良好な可視化画像が得られるようになった。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は十分小さく、計測結果への影響は問題にならないレベルであると考えられる。

3.8 実験条件

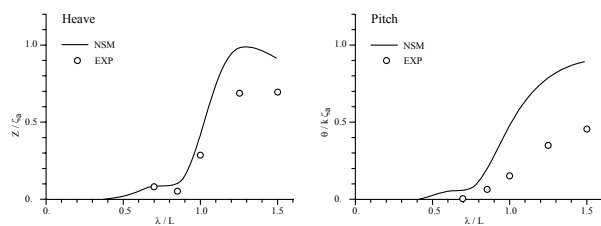
実験は規則波中を向波状態で実施した。表 3-4 に実験に用いた入射波を示す。本実験では波長を主な実験パラメータとし、波高は約 11cm で一定とした。ただし、最も短波長の場合だけは、打込水量が可視化計測を行う上で不十分であったため、波高を少し上げて 12.5cm とした。船速は 0.724m/s、垂線間長さベースのフルード数では 0.134 で、一定である。

表 3-4 入射波

波長	波長船長比	波高
λ (m)	λ/L	Hw (cm)
2.1	0.7	12.5
2.55	0.85	10.8
3	1.0	10.9
3.75	1.25	10.8
4.5	1.5	10.7

3.9 実験結果

(1) 規則波中での模型船の運動



(1) 上下揺

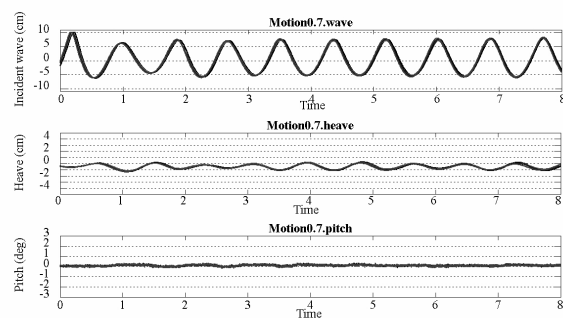
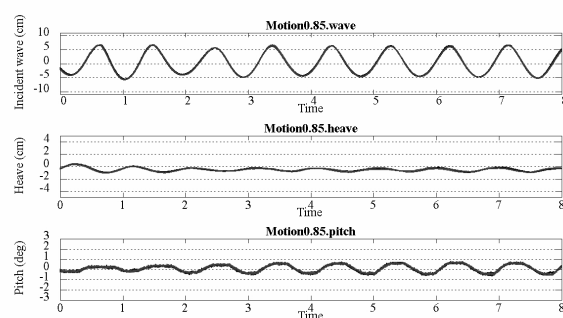
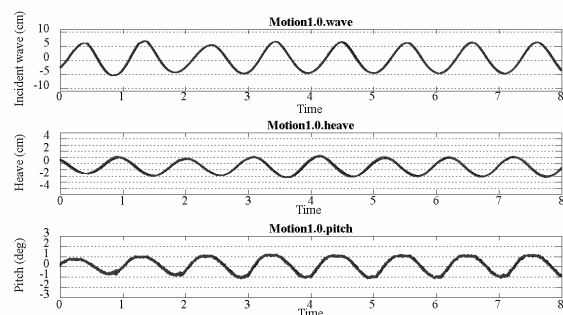
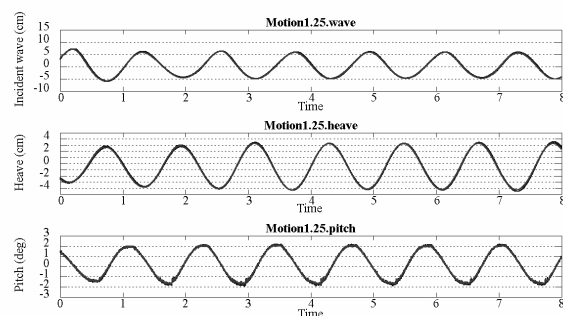
(2) 縦揺

図 3-16 模型船の規則波中での運動振幅

図 3-16 に上下揺と縦揺の運動振幅を示す。横軸は波長 λ と船長 L_{pp} との比、縦軸は運動振幅の無次元値で、上下揺は波振幅 ζ_a で、また縦揺は波傾斜の振幅 $\kappa\zeta_a = 2\pi\zeta_a/\lambda$ で無次元化してある。図中の実線はストリップ法 (NSM) で計算した船体運動で、○印が実験結果である。計算で得られた運動の傾向としては、 λ/L が1より小さな波長域では、上下揺も縦揺も非常に小さいが、1付近から急激に大きくなり始める。上下揺は $\lambda/L=1.25$ 付近でピーク値をとり、より大きな λ/L では一旦減少しているが、波長無限大の極限では無次元振幅で1に漸近するので、さらに波長が長くなると再び増加に転じる。縦揺では明確なピーク値は見られず、単調増加で波長無限大の極限でやはり1に漸近する。実験で計測された運動も、定性的には理論計算と同じ傾向を持っているが、定量的には甲板打込水による非線形効果で、実験値は全体的に計算値より小さな値になっている。特に縦揺はその傾向が顕著である。これは、甲板打込水による衝撃荷重の力点から模型船の重心までの距離が長いこと、打込水による衝撃荷重縦揺により大きく影響するからである。

図 3-17(1)～(5)に入射波、上下揺、縦揺の計測波形を示す。入射波と上下揺の極性は上向きが正、縦揺の極性は船首下げが正である。短波長域では上下揺も縦揺も小さいが、波長が長くなるに連れて運動の振幅が大きくなっている。縦揺の波形には、そのピーク部分が打込水の影響で歪んでいることが見て取れる。

図 3-17 に示した時間波形は、同じ条件で実施した4回の計測波形を重ねてプロットしたものである。これらが互いに良く一致していることから、本実験においても予備実験で定量的に検証した通りの再現性が保たれている事がわかる。

図 3-17(1) 入射波と船体運動の計測波形
(波長船長比: $\lambda/L=0.7$)図 3-17(2) 入射波と船体運動の計測波形
(波長船長比: $\lambda/L=0.85$)図 3-17(3) 入射波と船体運動の計測波形
(波長船長比: $\lambda/L=1.0$)図 3-17(4) 入射波と船体運動の計測波形
(波長船長比: $\lambda/L=1.25$)

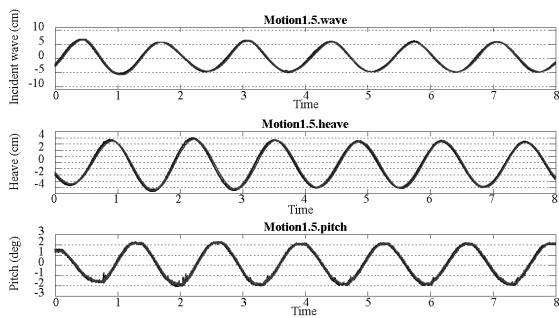


図 3-17(5) 入射波と船体運動の計測波形
(波長船長比： $\lambda/L=1.5$)

(2) 打込水による甲板上での衝撃水圧

次に、打込水による甲板上での衝撃水圧の 8 秒間の計測波形を図 3-18～3-22 に、また、2 波目の衝撃水圧の 0.4 秒間の拡大波形を図 3-23～3-27 に示す。P1～P26 は、先に図 3-7 で示した位置で計測された衝撃水圧である。水圧計が 7 個しかいないため、P1～P26 は同時に計測したものではない。取り付け位置を変えた実験を複数回繰り返し、合計 26 カ所での衝撃圧を計測した。

図 3-18,3-23 は $\lambda/L=0.7$ で最も短波長域での計測波形で、衝撃水圧特有の鋭い立ち上がりが見られる。この波長域では船体運動は小さく、打込水の挙動に及ぼす船体運動の影響は小さいと考えられる。

図 3-19,3-24 は $\lambda/L=0.85$ の計測波形で、少し波長が長くなるだけで第一波目の波と模型船の衝突は緩和されている。この波長でも、衝撃水圧特有の鋭い立ち上がりが見られ、衝撃圧のピーク値は高い。

図 3-20,3-25 は $\lambda/L=1.0$ の計測波形である。この波長域では船体運動が大きくなって来っており、船首での相対水位変動も大きく甲板上に大量の水が打ち込んでいる。また、それに伴い大規模な空気巻き込みが生じている。この波長域では船首近くの点での衝撃圧波形に激しい振動が見られるが、これは空気の巻き込みによるものである。打込水が空気を巻き込むと、衝撃圧により圧縮された空気の振動により圧力波形に激しい振動が現れる。振動周期は気泡の寸法に依存する。振動周期と気泡寸法に関するについては、3.9(7)節で詳しく述べる。

図 3-21,3-26 ならびに図 3-22,3-27 は $\lambda/L=1.25, 1.5$ の長波長域での計測波形である。長波長域では船体運動の振幅自体は大きいですが、波に沿った運動に近づくため水面との相対運動は小さ

くなり、打込水の挙動も船首から流れ込むような滑らかな挙動になる。そこで、波長が長くなるに連れて衝撃圧の立ち上がり形状もなだらかになり、ピーク値自体も低くなっている。空気巻き込みは船首近くでまだ見られるが、その規模は小さい。

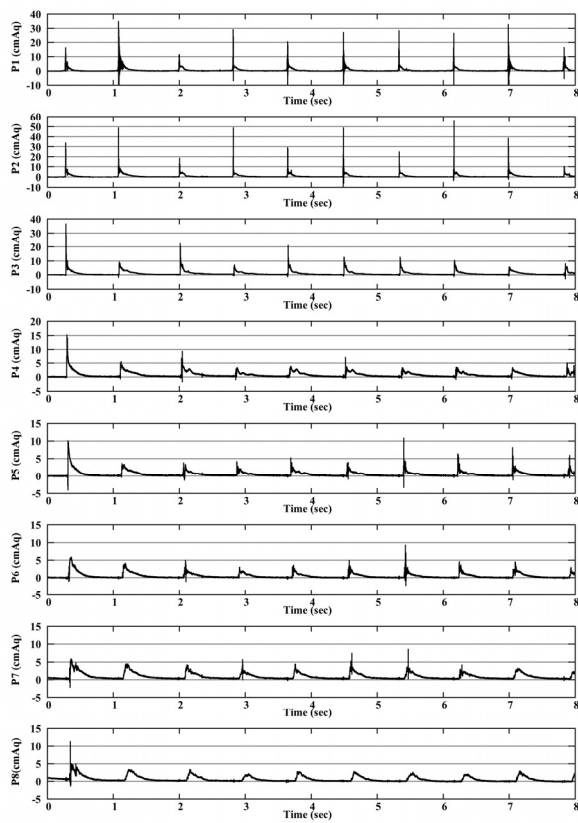


図 3-18(1) 衝撃水圧の計測波形 L1断面 $\lambda/L=0.7$

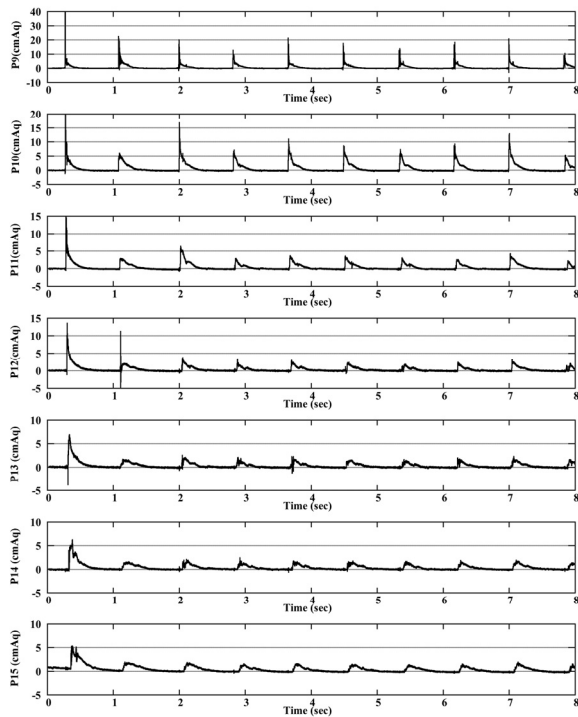


図 3-18(2) 衝撃水圧の計測波形 L2断面 $\lambda/L=0.7$

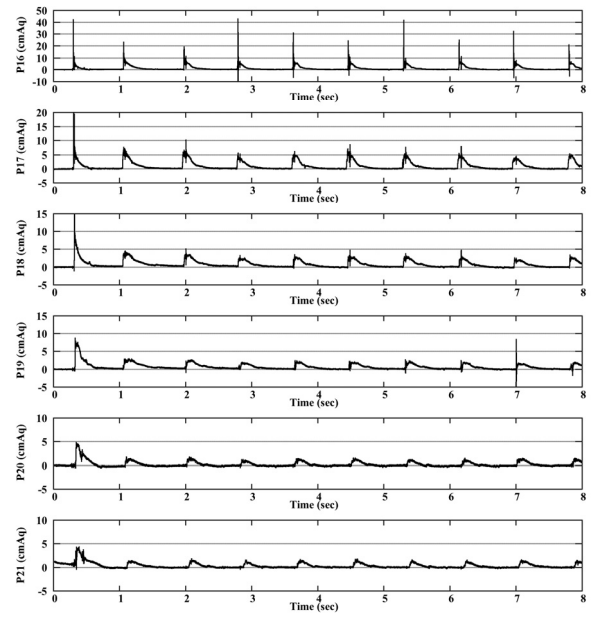


図 3-18(3) 衝撃水圧の計測波形 L3断面 $\lambda/L=0.7$

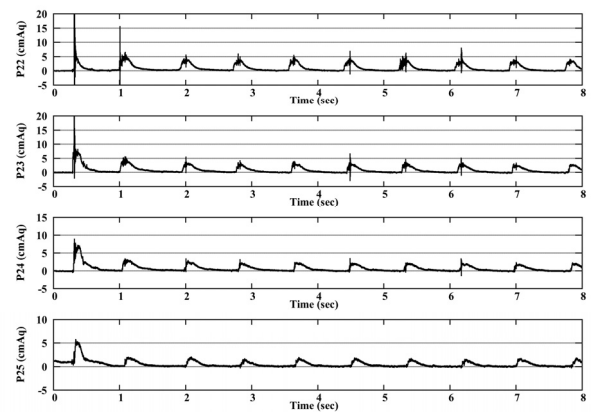


図 3-18(4) 衝撃水圧の計測波形 L4断面 $\lambda/L=0.7$

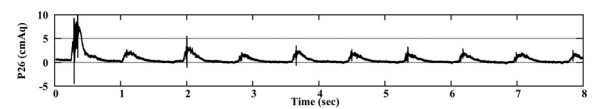


図 3-18(5) 衝撃水圧の計測波形 L5断面 $\lambda/L=0.7$

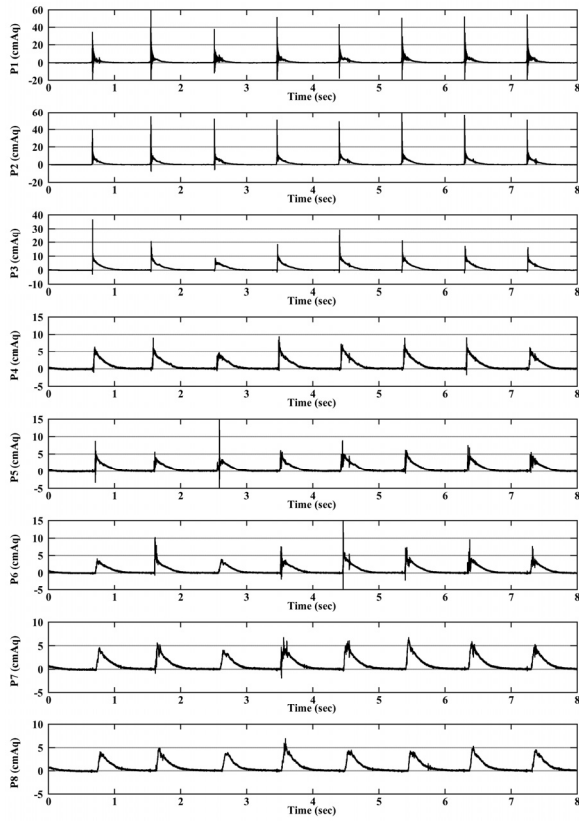


図 3-19 (1) 衝撃水圧の計測波形 L1 断面 $\lambda/L=0.85$

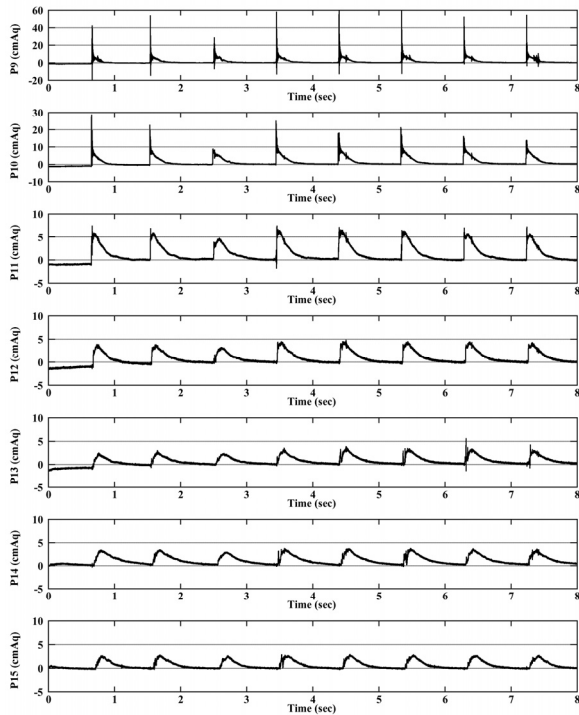


図 3-19 (2) 衝撃水圧の計測波形 L2 断面 $\lambda/L=0.85$

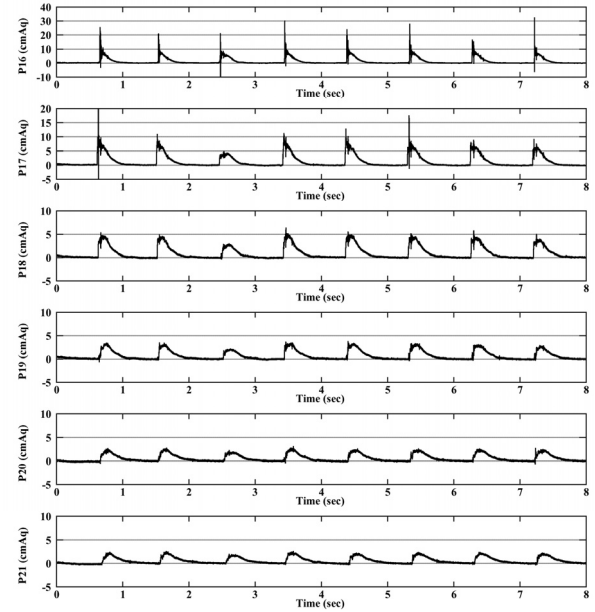


図 3-19 (3) 衝撃水圧の計測波形 L3 断面 $\lambda/L=0.85$

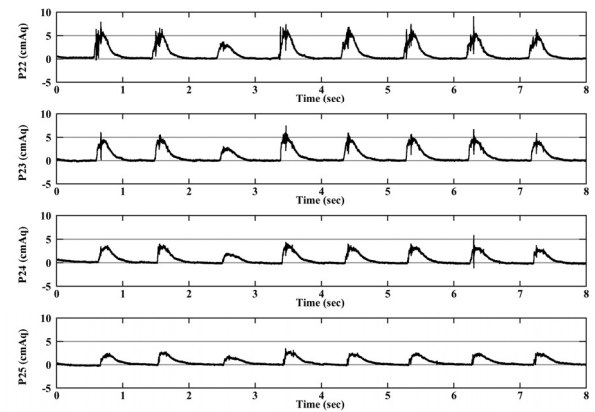


図 3-19 (4) 衝撃水圧の計測波形 L4 断面 $\lambda/L=0.85$

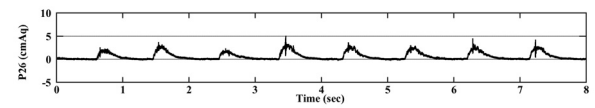
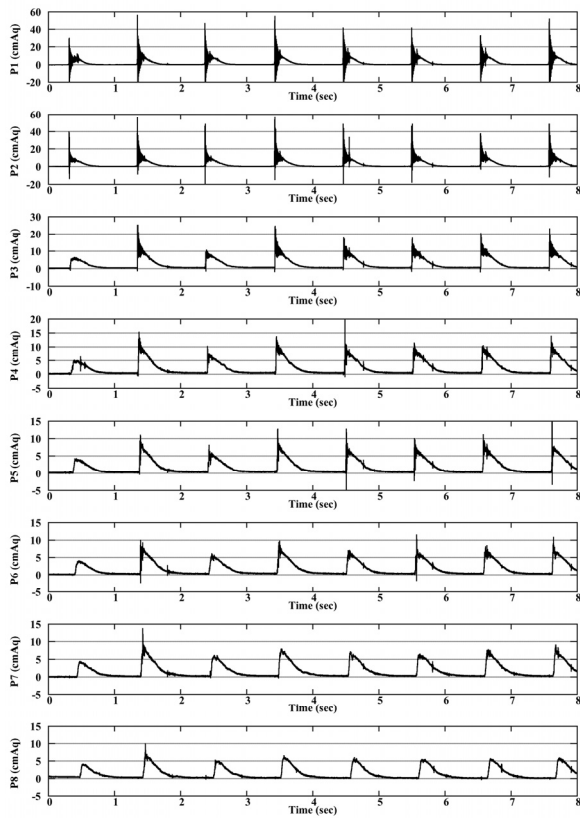
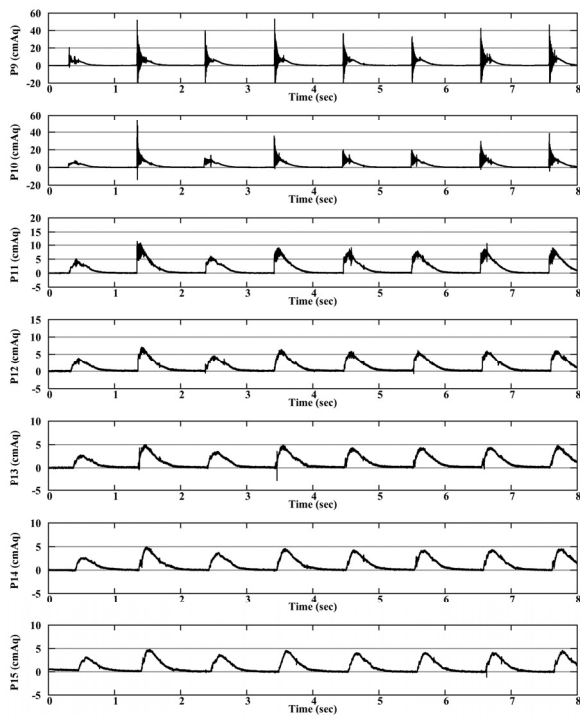
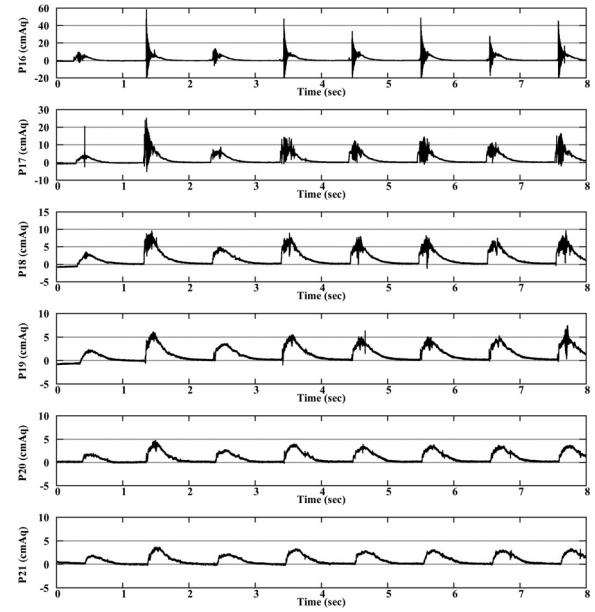
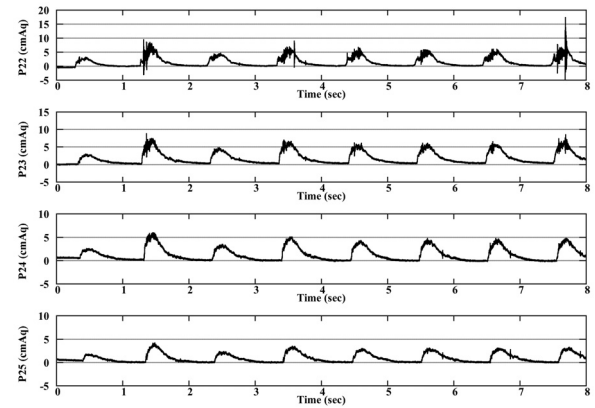
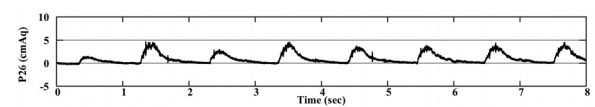


図 3-19 (5) 衝撃水圧の計測波形 L5 断面 $\lambda/L=0.85$


図 3-20(1) 衝撃水圧の計測波形 L1断面 $\lambda/L=1.0$

図 3-20(2) 衝撃水圧の計測波形 L2断面 $\lambda/L=1.0$

図 3-20(3) 衝撃水圧の計測波形 L3断面 $\lambda/L=1.0$

図 3-20(4) 衝撃水圧の計測波形 L4断面 $\lambda/L=1.0$

図 3-20(5) 衝撃水圧の計測波形 L5断面 $\lambda/L=1.0$

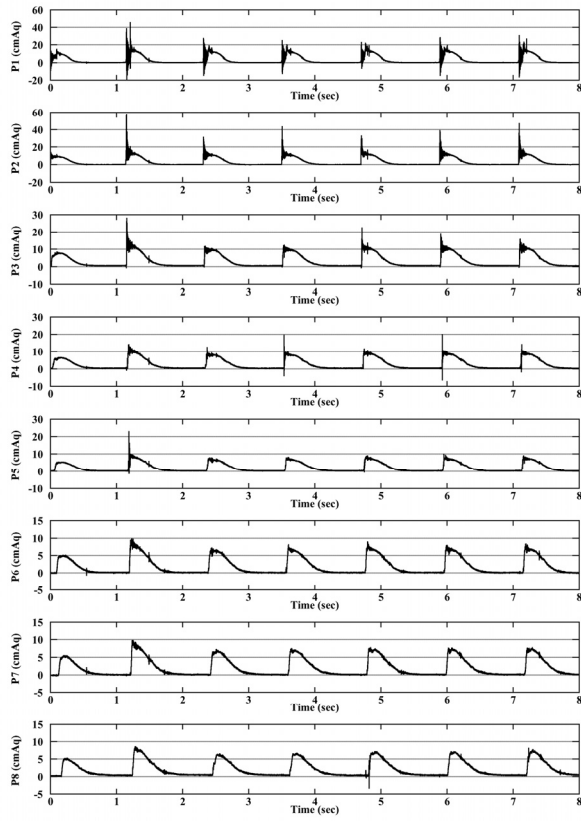


図 3-21 (1) 衝撃水圧の計測波形 L1 断面 $\lambda/L=1.25$

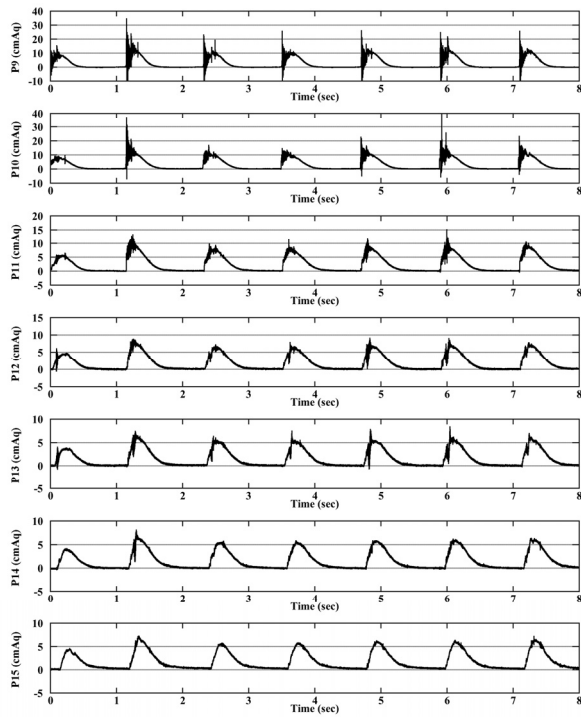


図 3-21 (2) 衝撃水圧の計測波形 L2 断面 $\lambda/L=1.25$

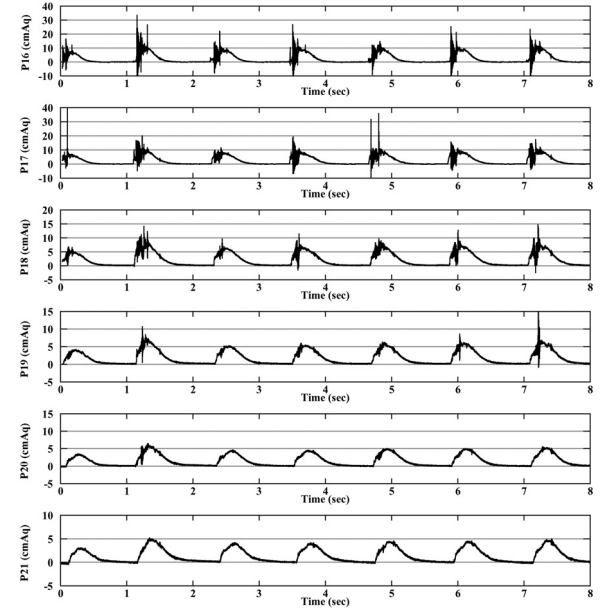


図 3-21 (3) 衝撃水圧の計測波形 L3 断面 $\lambda/L=1.25$

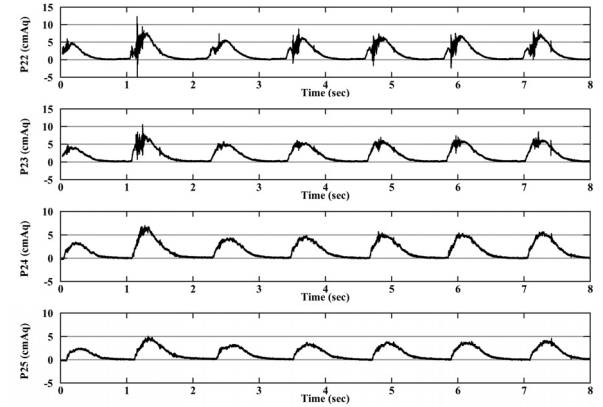


図 3-21 (4) 衝撃水圧の計測波形 L4 断面 $\lambda/L=1.25$

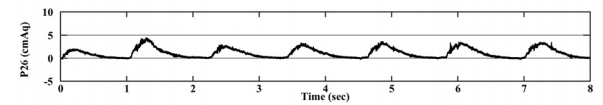


図 3-21 (5) 衝撃水圧の計測波形 L5 断面 $\lambda/L=1.25$

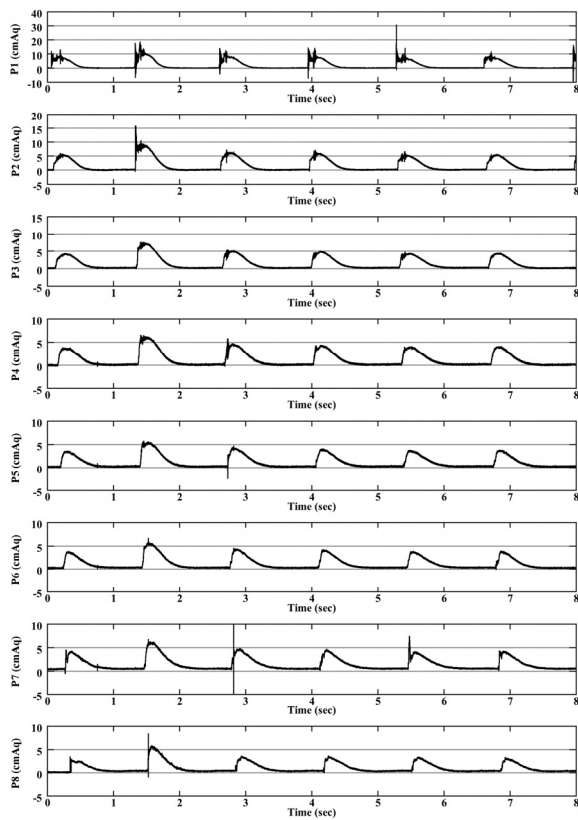


図 3-22 (1) 衝撃水圧の計測波形 L1断面 $\lambda/L=1.5$

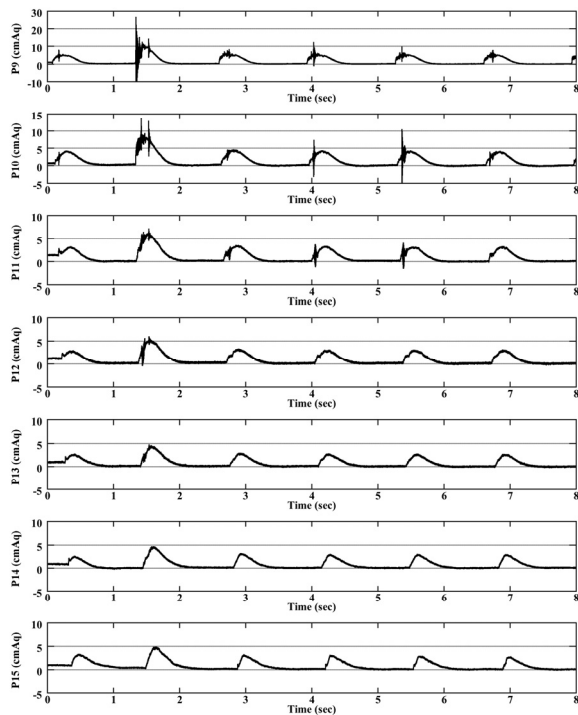


図 3-22 (2) 衝撃水圧の計測波形 L2断面 $\lambda/L=1.5$

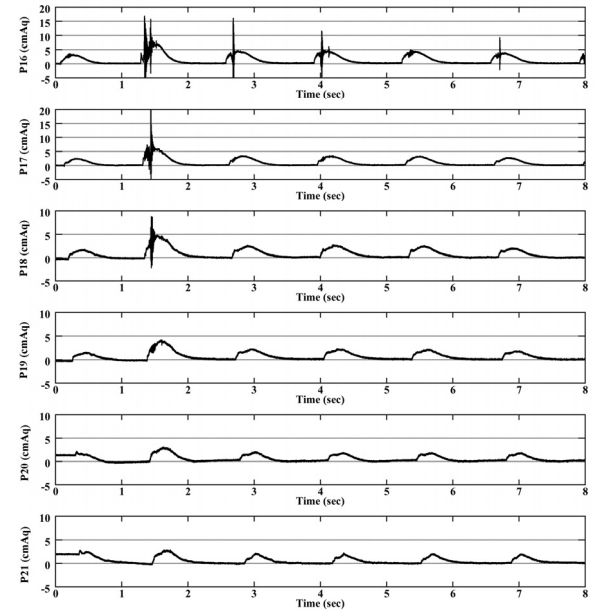


図 3-22 (3) 衝撃水圧の計測波形 L3断面 $\lambda/L=1.5$

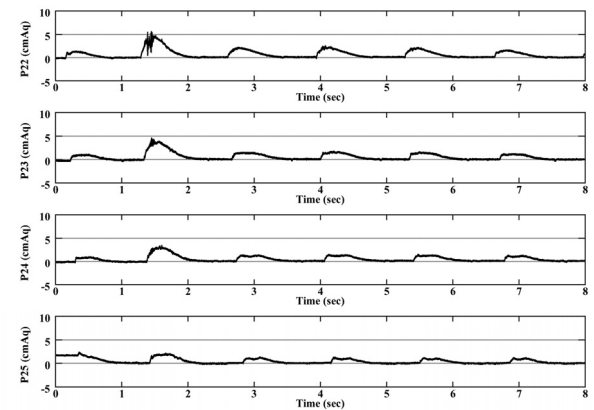


図 3-22 (4) 衝撃水圧の計測波形 L4断面 $\lambda/L=1.5$

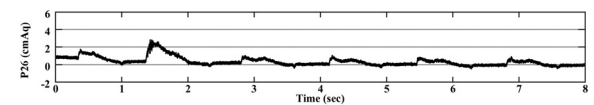


図 3-22 (5) 衝撃水圧の計測波形 L5断面
 $\lambda/L=1.5$

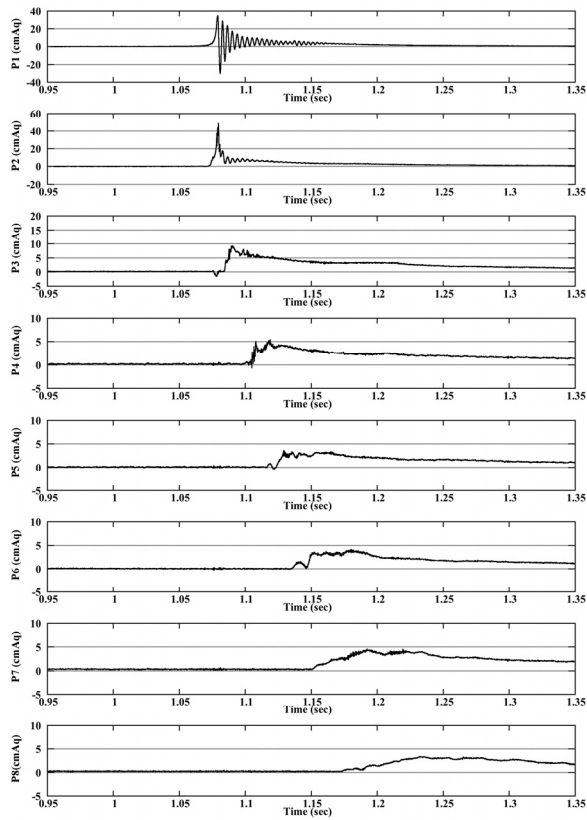


図 3-23 (1) 衝撃水圧の計測波形 L1 断面 $\lambda/L=0.7$

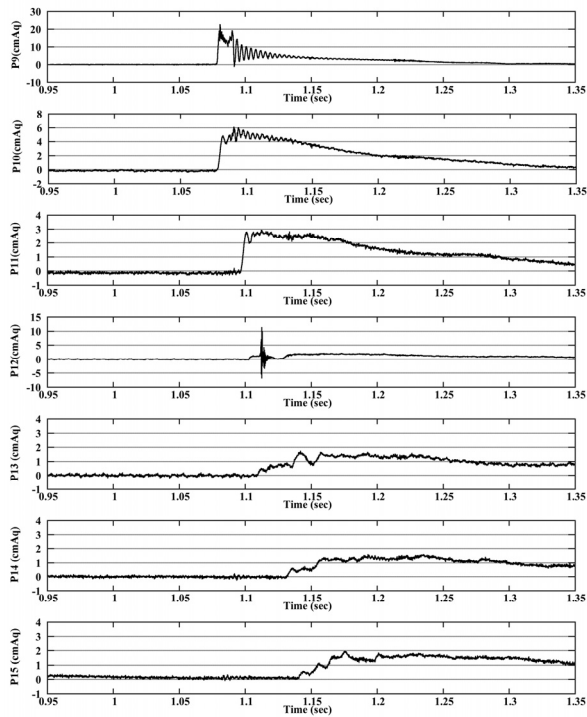


図 3-23 (2) 衝撃水圧の計測波形 L2 断面 $\lambda/L=0.7$

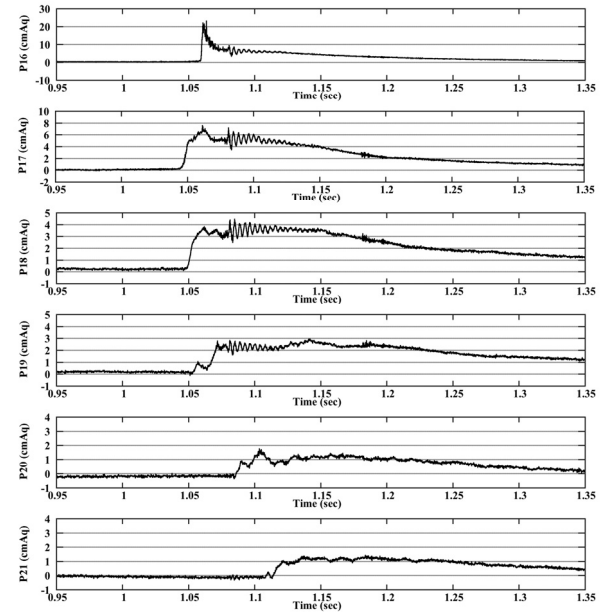


図 3-23 (3) 衝撃水圧の計測波形 L3 断面 $\lambda/L=0.7$

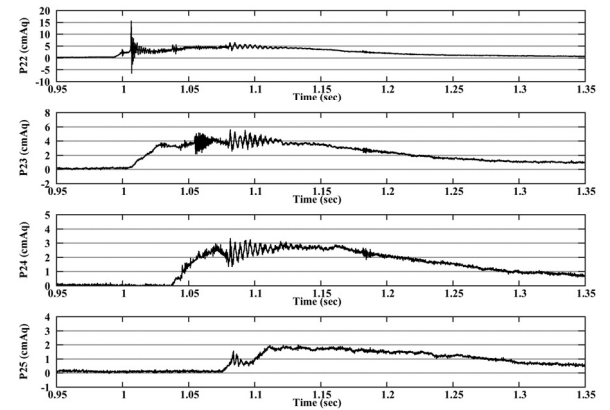


図 3-23 (4) 衝撃水圧の計測波形 L4 断面 $\lambda/L=0.7$

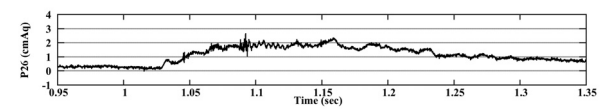
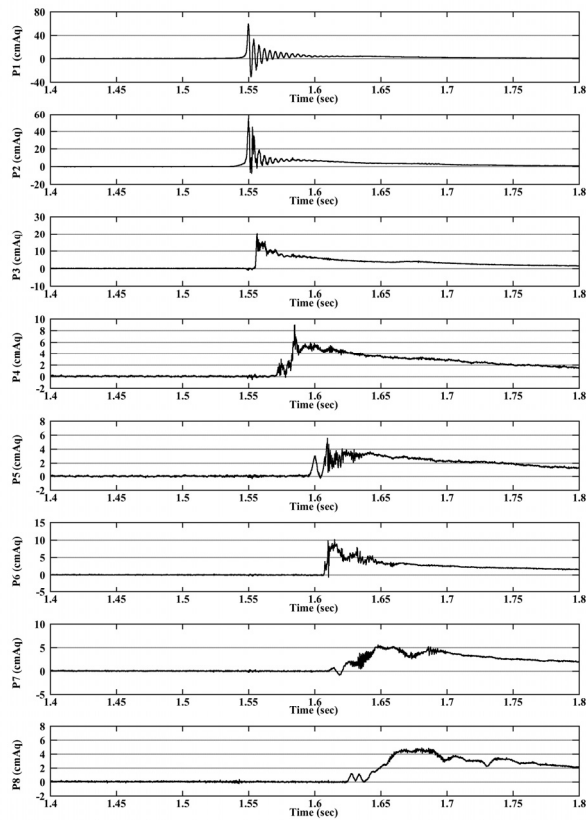
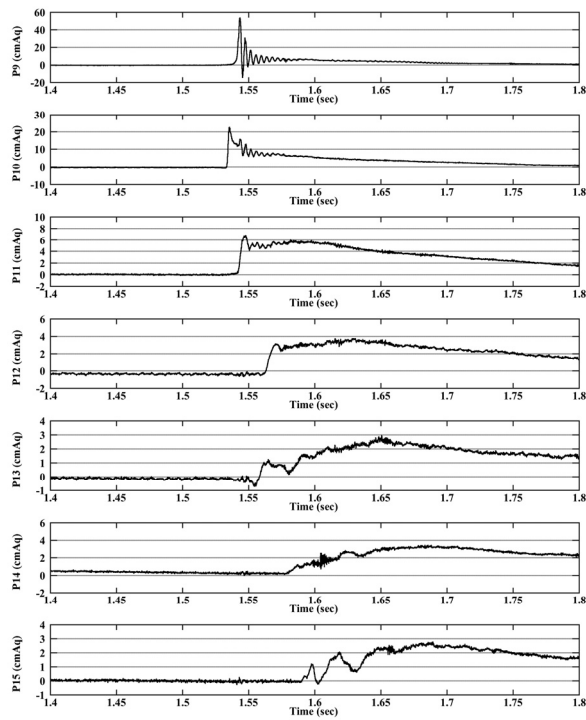
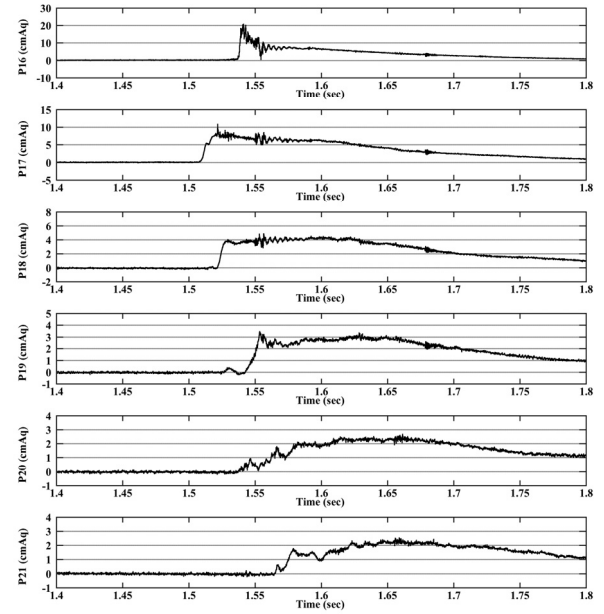
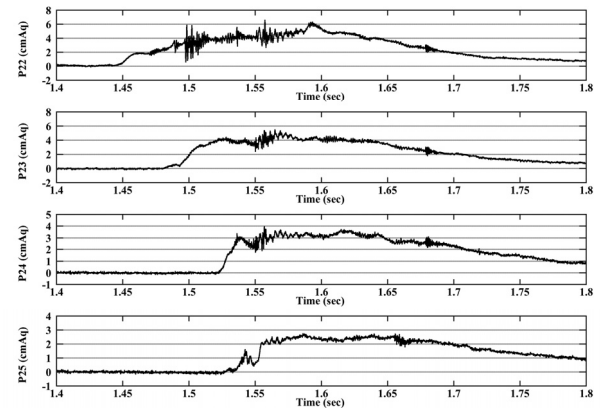
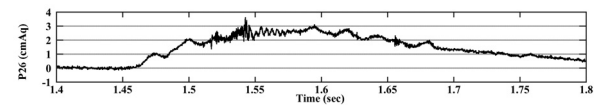


図 3-23 (5) 衝撃水圧の計測波形 L5 断面 $\lambda/L=0.7$


図 3-24 (1) 衝撃水圧の計測波形 L1断面 $\lambda/L=0.85$

図 3-24 (2) 衝撃水圧の計測波形 L2断面 $\lambda/L=0.85$

図 3-24 (3) 衝撃水圧の計測波形 L3断面 $\lambda/L=0.85$

図 3-24 (4) 衝撃水圧の計測波形 L4断面 $\lambda/L=0.85$

図 3-24 (5) 衝撃水圧の計測波形 L5断面 $\lambda/L=0.85$

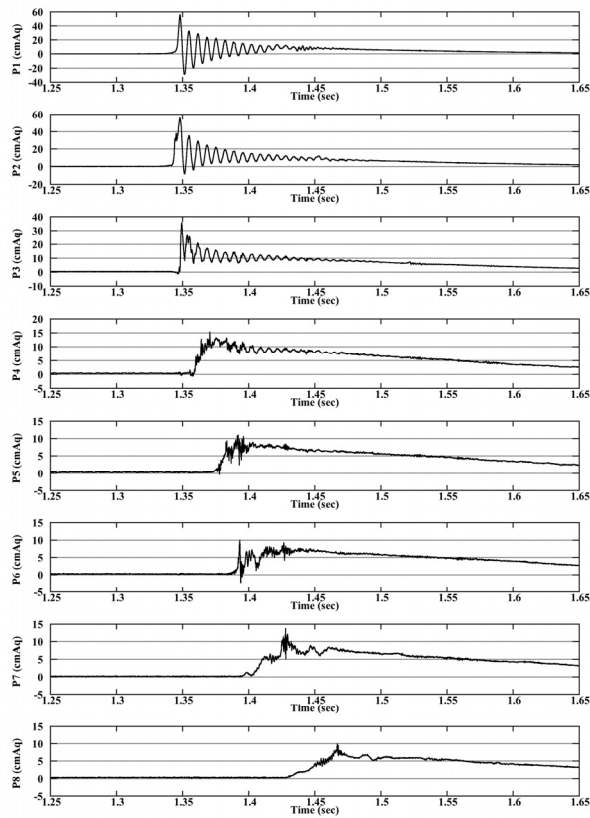


図 3-25 (1) 衝撃水圧の計測波形 L1 断面 $\lambda/L=1.00$

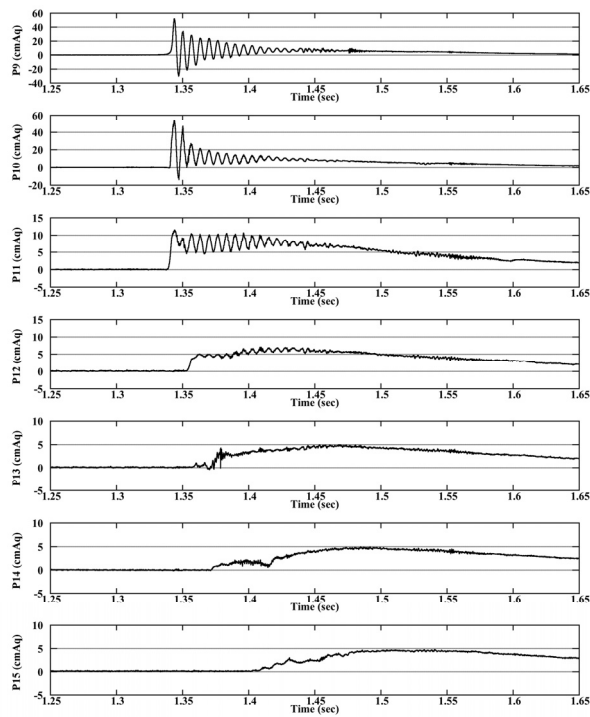


図 3-25 (2) 衝撃水圧の計測波形 L2 断面 $\lambda/L=1.00$

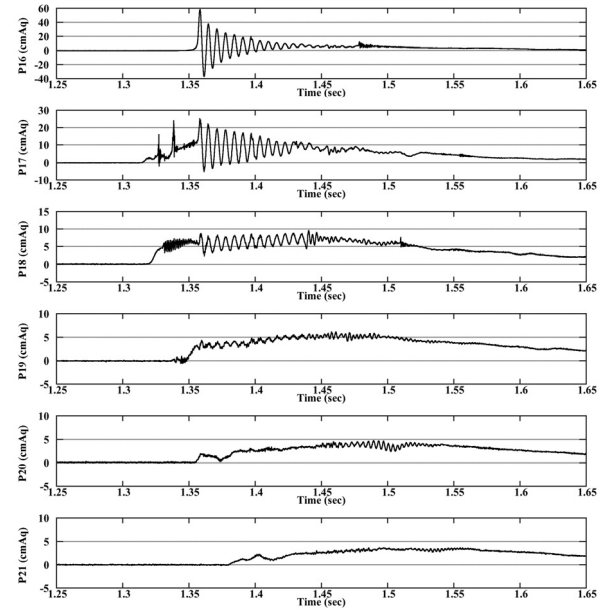


図 3-25 (3) 衝撃水圧の計測波形 L3 断面 $\lambda/L=1.00$

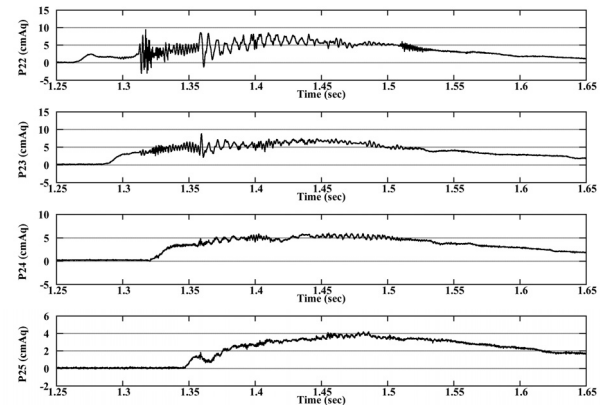


図 3-25 (4) 衝撃水圧の計測波形 L4 断面 $\lambda/L=1.00$

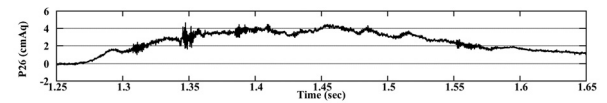
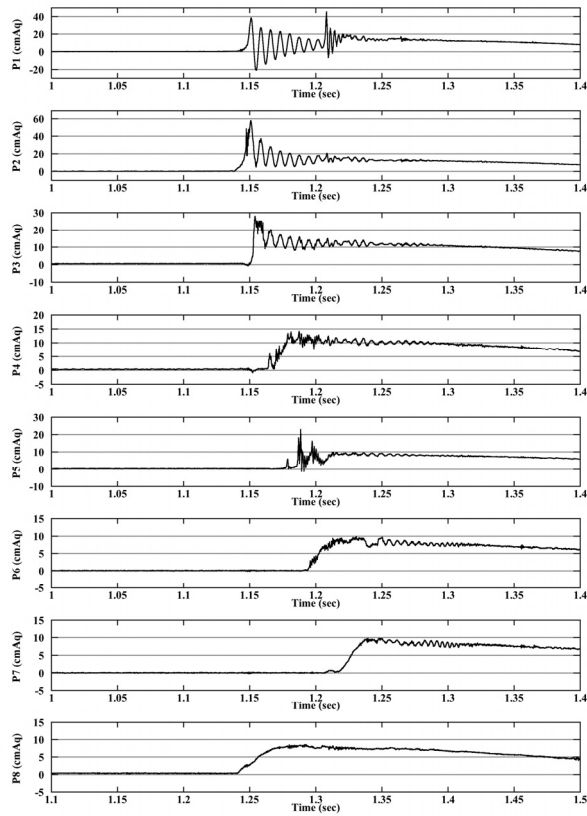
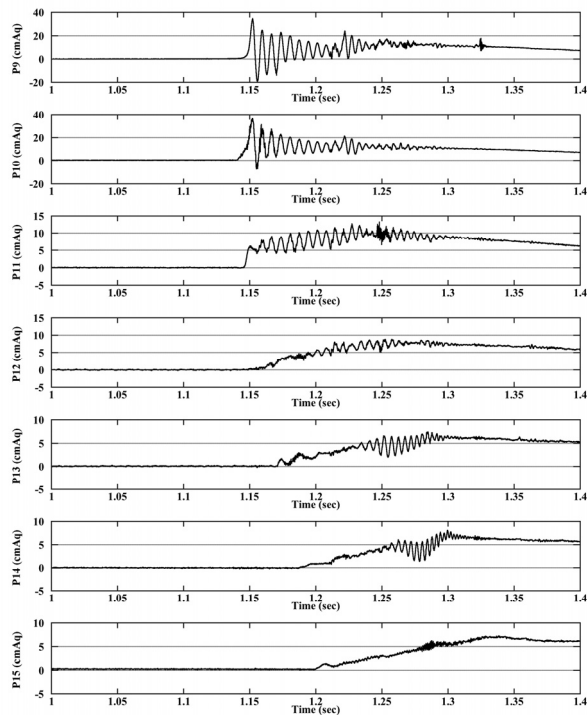
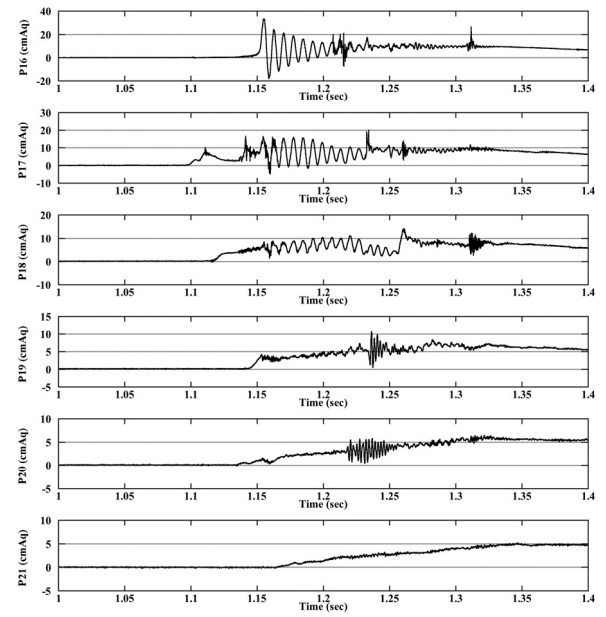
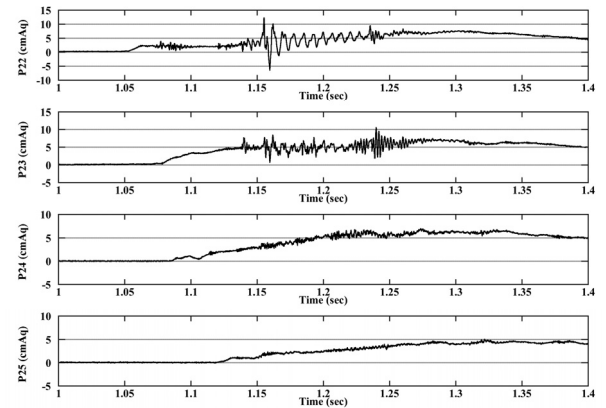
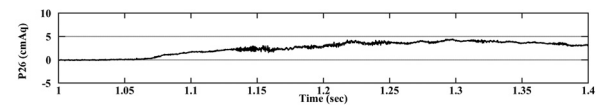


図 3-25 (5) 衝撃水圧の計測波形 L5 断面 $\lambda/L=1.00$


図 3-26 (1) 衝撃水圧の計測波形 L1断面 $\lambda/L=1.25$

図 3-26 (2) 衝撃水圧の計測波形 L2断面 $\lambda/L=1.25$

図 3-26 (3) 衝撃水圧の計測波形 L3断面 $\lambda/L=1.25$

図 3-26 (4) 衝撃水圧の計測波形 L4断面 $\lambda/L=1.25$

図 3-26 (5) 衝撃水圧の計測波形 L5断面 $\lambda/L=1.25$

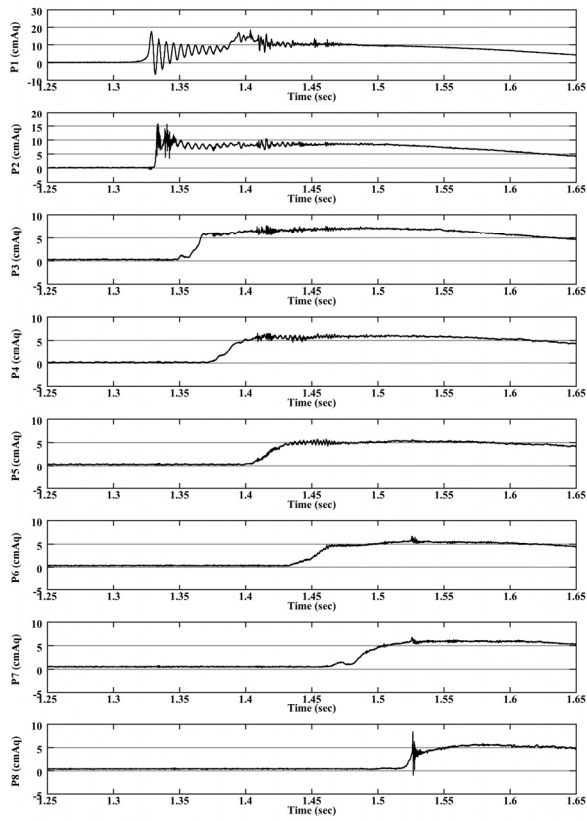


図 3-27 (1) 衝撃水圧の計測波形 L1 断面 $\lambda/L=1.50$

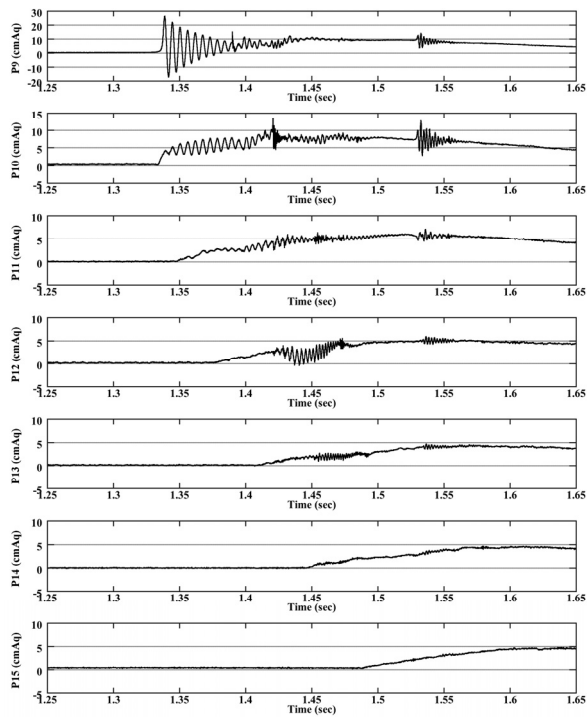


図 3-27 (2) 衝撃水圧の計測波形 L2 断面 $\lambda/L=1.50$

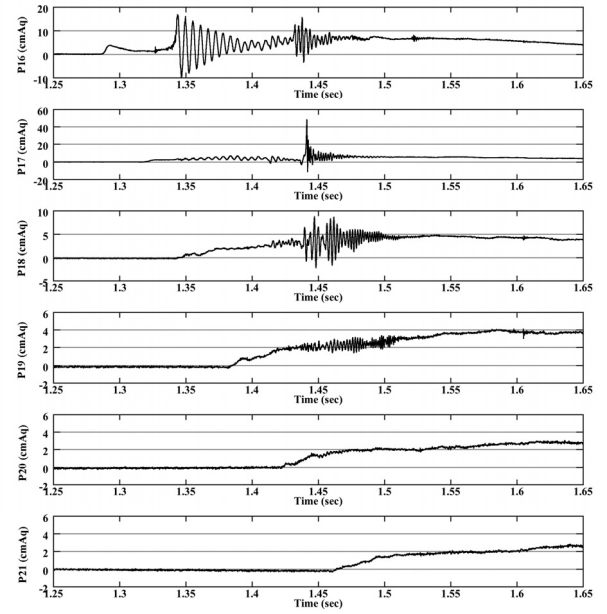


図 3-27 (3) 衝撃水圧の計測波形 L3 断面 $\lambda/L=1.50$

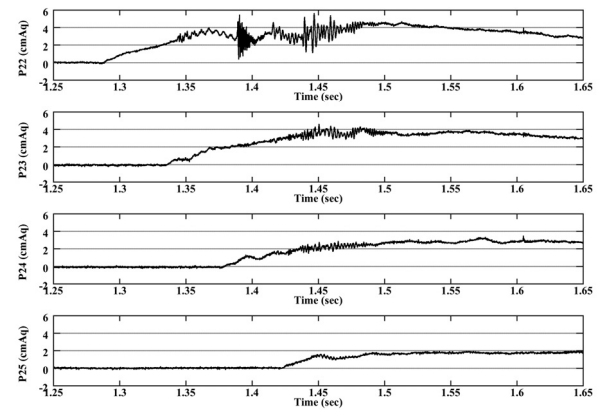


図 3-27 (4) 衝撃水圧の計測波形 L4 断面 $\lambda/L=1.50$

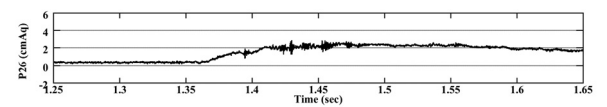


図 3-27 (5) 衝撃水圧の計測波形 L5 断面 $\lambda/L=1.50$

(3) 打込水により甲板パネルに働く 衝撃荷重

次に、写真 3-3 に示したパネルゲージの応答波形を図 3-28 に示す。図ではパネルに働く荷重を、パネル全面に均等にかつ静的に働く等価な圧力として示している。船舶の耐衝撃圧設計では等価静水圧は良く用いられる概念である。波形に見られる振動は、やはり空気巻き込みによるものと考えられる。パネルの応答は $\lambda/L=1.0$ の場合が最も大きく、また振動も激しい。 $\lambda/L=1.5$ では、応答がなだらかになり、振動も少なくなっている。これらの傾向は先に示した衝撃圧の波形と共通したものである。

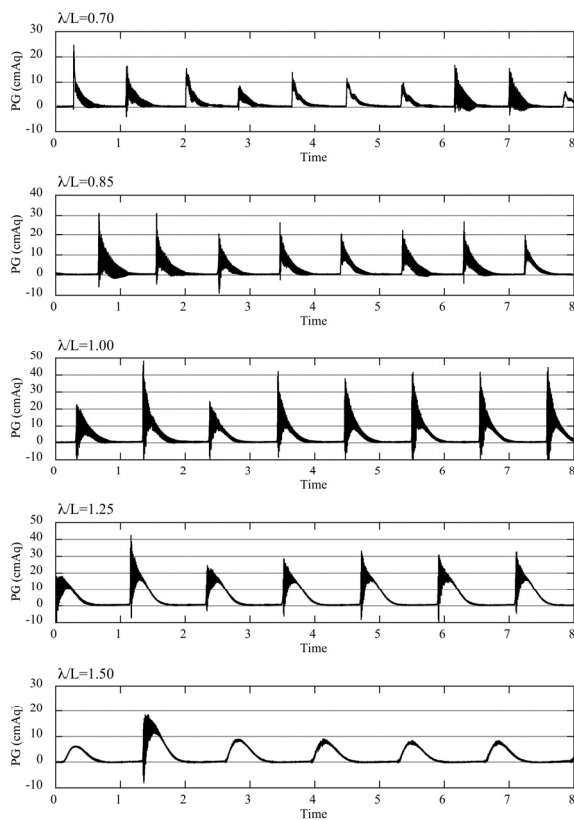


図 3-28 パネルゲージの弾性応答

(4) 打込水の映像

図 3-29 に甲板上の 4 断面（L1, L1.5, L2, L2.5）で撮影された打込水の画像を例示する。この図は、水が甲板に打ち込んだ瞬間の同時刻の画像であり、高速な現象の一瞬を切り取ったものである。L1～L2.5 断面は模型船の中心線からそれぞれ 20mm, 45mm, 70mm, 95mm 離れており、互いに平行である。画像の左側が船首で、打込水は左から右へ走る。図 3-5 に示したカメラと反射鏡との角度関

係から、外側ほど撮影範囲が船首方向に移っており、船体中心線に近い断面では船首先端は画角に入っていない。撮影範囲は船体中心線に最も近い断面で約 18cm x 16.6cm の大きさであり、これも外側ほど少し広がっている。また、長方形の撮影画像は実空間では歪んだ四角形領域を投影したものになっており、定量的な解析には 3.4 節で示した写像関数を用い、カメラ座標から実座標へ変換する必要がある。本節では撮影された原画像を、そのまま掲載する。

さて、図 3-29 には短波長波中（左列： $\lambda/L=0.7$ ）、水と船体との相対運動の同調点付近の波長（中間： $\lambda/L=1.0$ ）、長波長波中（右列： $\lambda/L=1.5$ ）での打込水の画像が示されている。

まず、短波長波中では船体運動は小さいが、入射波が船首で反射されるため船の進行方向に巻波を形成し、それが甲板上に打ち込む。よって、打込水の挙動は 3 次元的であり非常に複雑である。画像中に見られる巻波形状が認められる。

水と船体との相対運動が最も激しい波長付近（ $\lambda/L=1.0$ ）では、特に船首部で入射波と船体との相対運動の振幅が大きく、叩き付けるような激しい打込が発生している。3.9(2)節で示したように、衝撃圧力はこの波長付近で最も高く船舶にとって危険である。打込水量が多く、大規模な空気巻き込みも観察される。

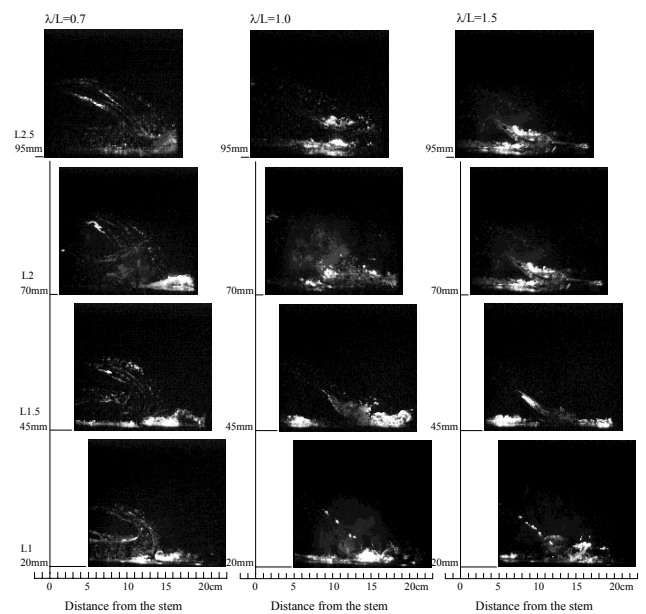


図 3-29 撮影画像
(L1～L2.5 断面、Camera1、前方配置)

(5) 流場解析の結果

撮影画像の解析から打込水の速度場を定量的に求めるには、3.4 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)3.4 節の写像関数(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 3.4 節の写像関数(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等の処理が必要であり、トレーサ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、流場解析には(2)の方法を用いる事にした。

図 3-30(1)～3-34(2)に示した打込水断面の撮影画像を PIV 解析した結果を、図 3-35(1)～3-39(2)に示す。ここでも 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がベクトルで表示されている。速度場の解析は 16pixel の格子で行い、画像の相関を求める窓寸法は 10pixel の正方形、相関を求める探索範囲は横は正の方向に 30pixel、縦は±10pixel とした。横の探索範囲を正方向だけに限定したのは、模型船に前進速度がある場合、打込水は船首方向へ逆流しないからで、こうすることにより過誤ベクトル数を大幅に減じることができた。解析パラメータをまとめて表 3-5 に示す。PIV 解析は全ての撮影断面について全フレーム実施した。また解析結果は汎用作図ソフト Tecplot で直接読み込める形式に変換した。

表 3-5 PIV 解析パラメータ

	横方向	縦方向
解析間隔	16 pixel	16 pixel
解析窓寸法	10 pixel	10 pixel
探索範囲	0～30 pixel	-10～10 pixel
相関値閾値	0.7	
有効輝度差	10/256	
サブピクセル補間	あり	

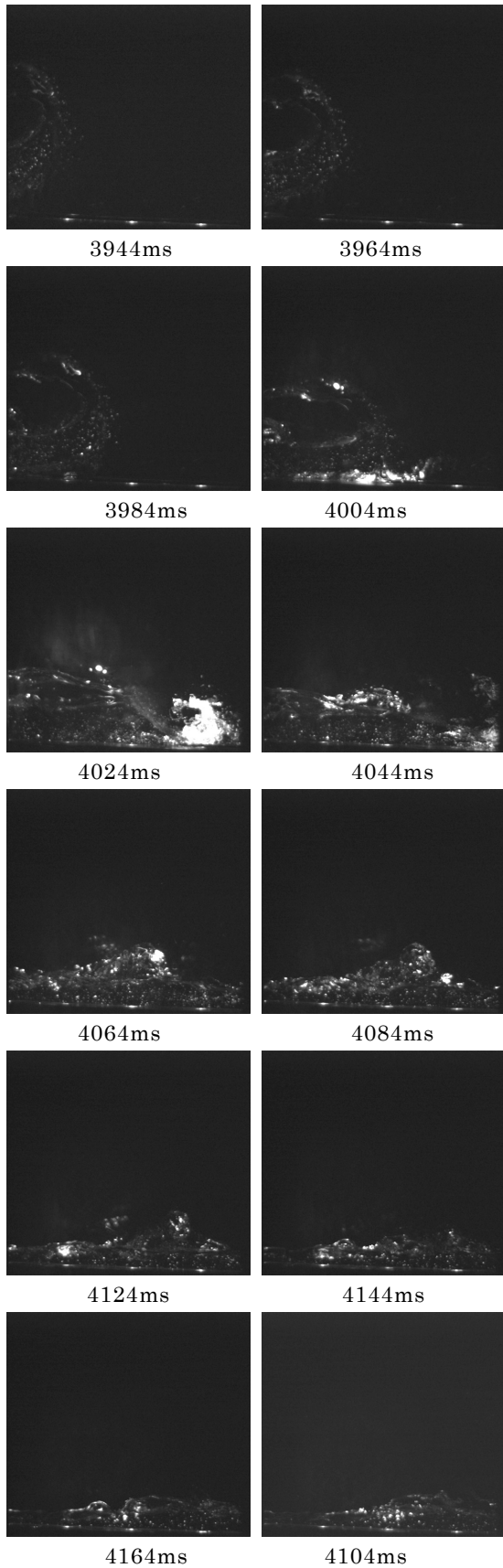


図 3-30 (1) 撮影画像
(L1 断面、 $\lambda/L=0.7$ 、Camera1、前方配置)

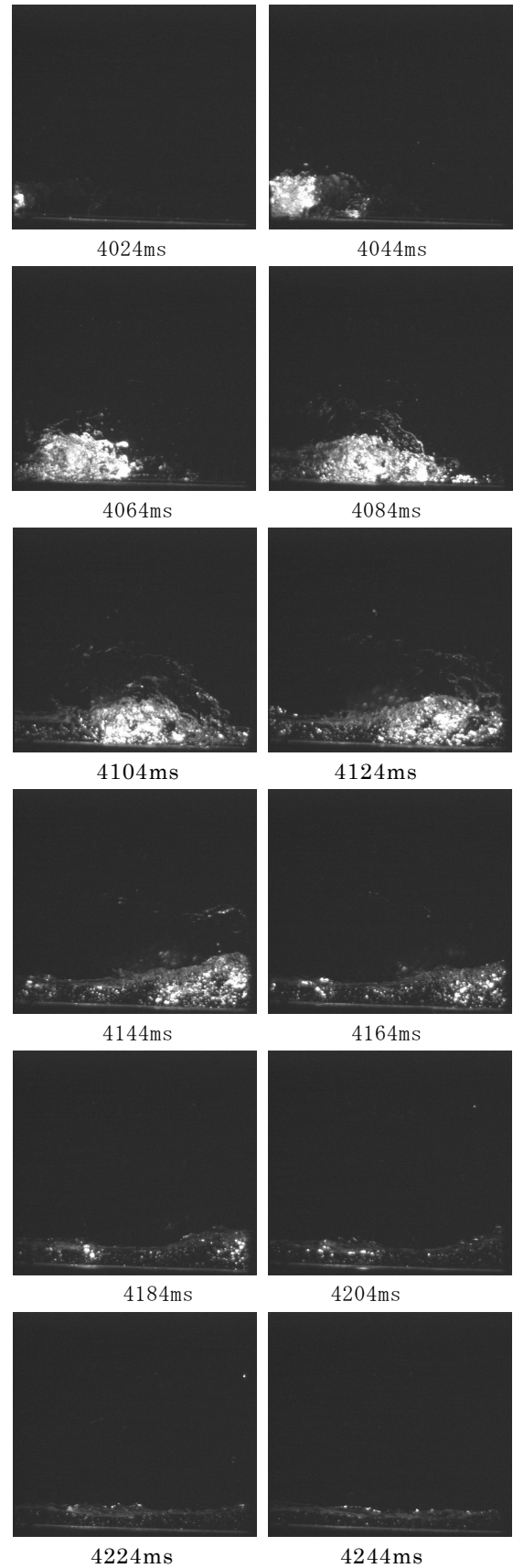


図 3-30 (2) 撮影画像
(L1 断面、 $\lambda/L=0.7$ 、Camera1、後方配置)

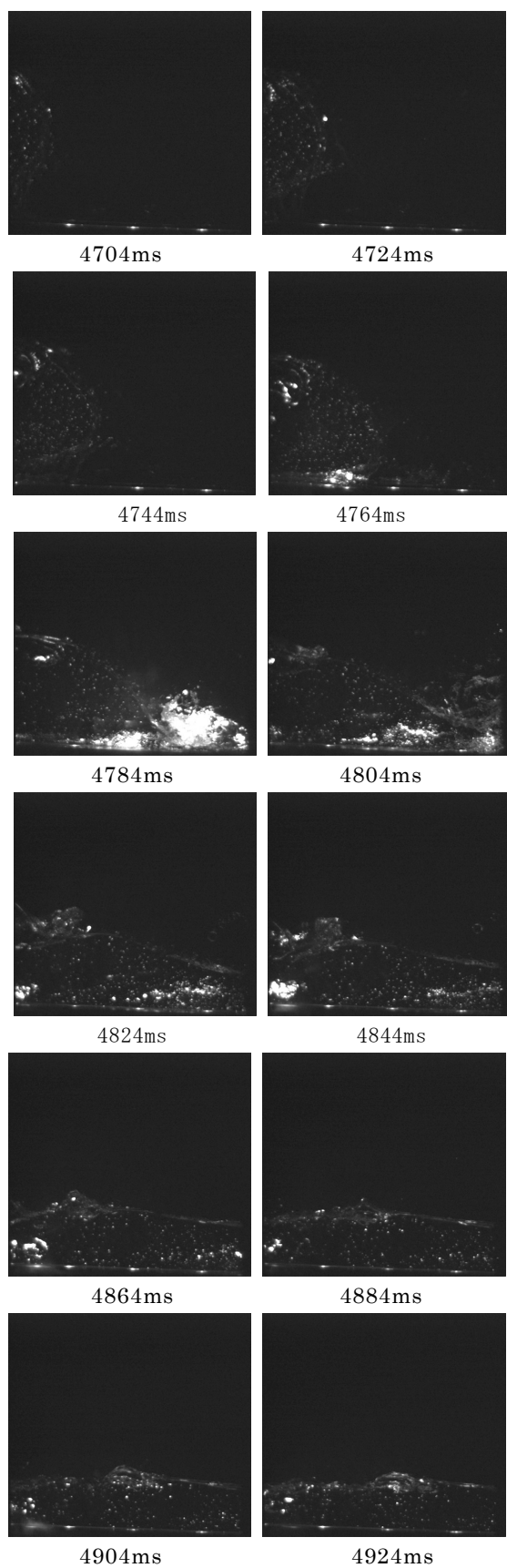


図 3-31 (1) 撮影画像
(L1 断面、 $\lambda/L=0.85$ 、Camera1、前方配置)

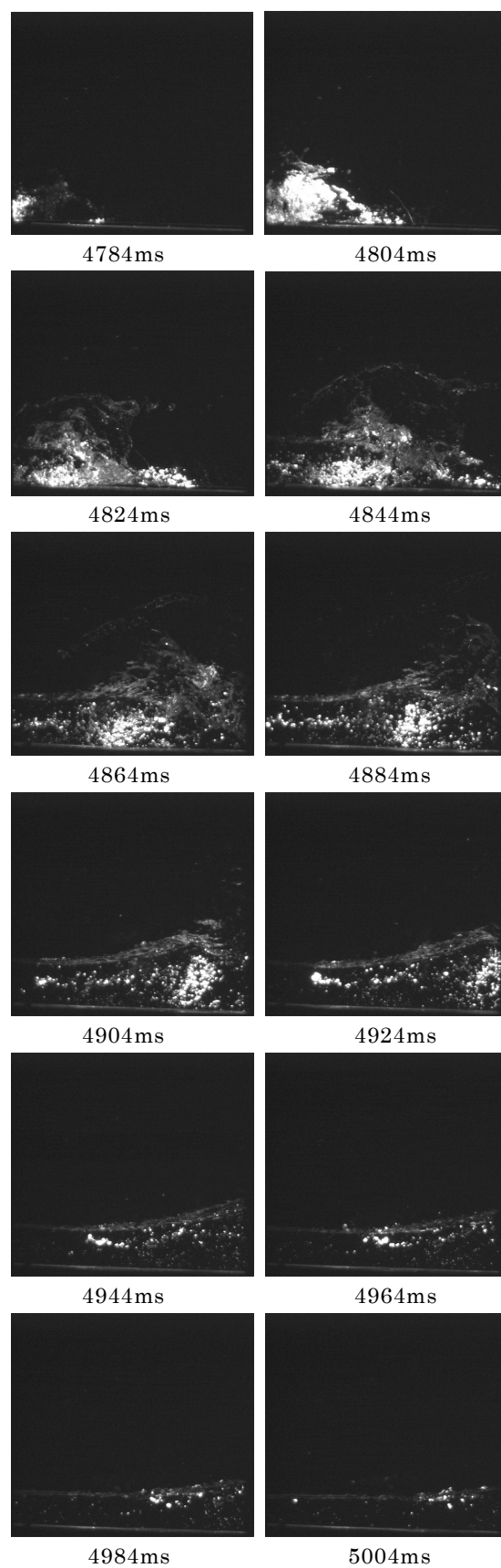


図 3-31 (2) 撮影画像
(L1 断面、 $\lambda/L=0.85$ 、Camera1、後方配置)

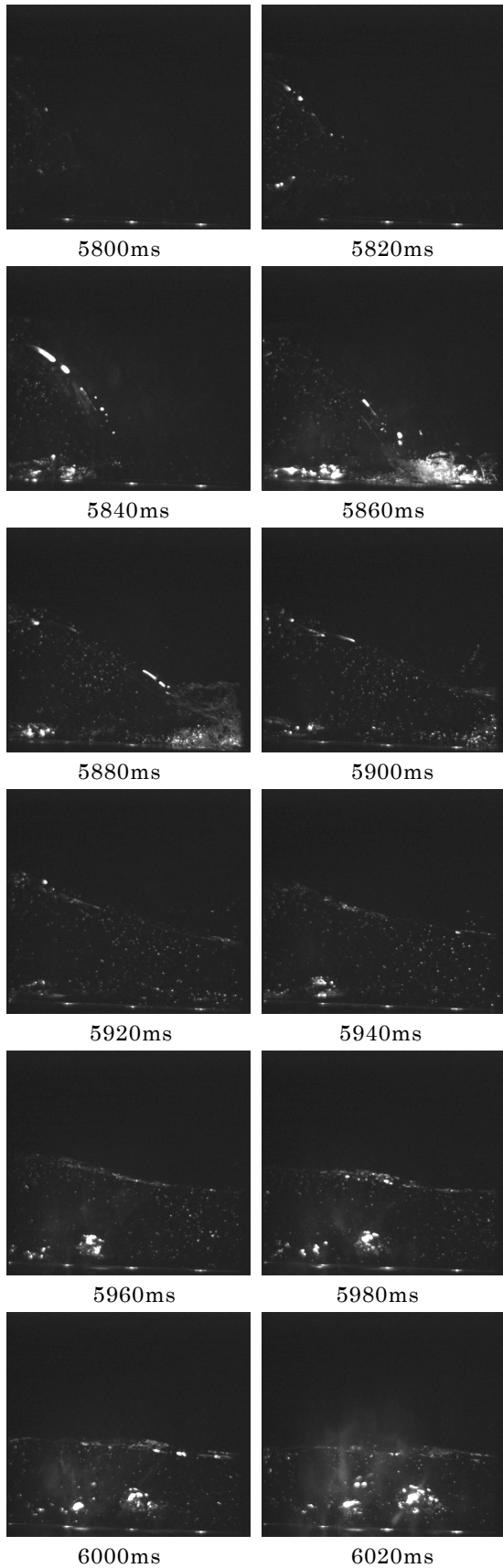


図 3-32 (1) 撮影画像
(L1 断面、 $\lambda/L=1.0$ 、Camera1、前方配置)

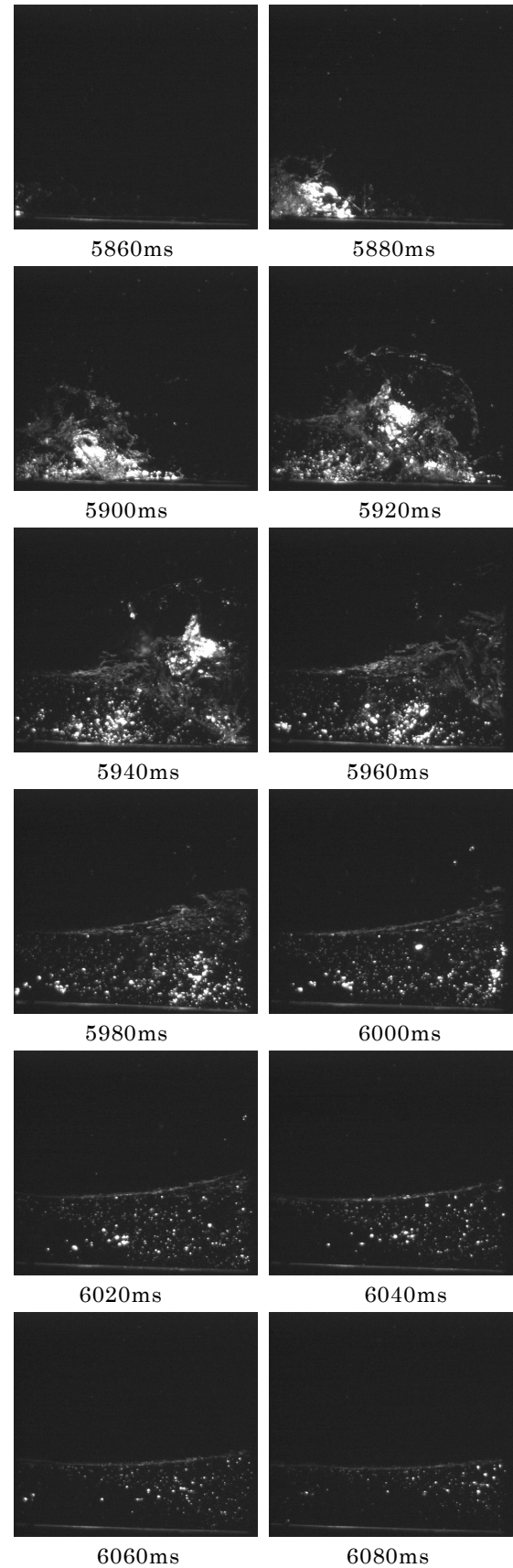


図 3-32 (2) 撮影画像
(L1 断面、 $\lambda/L=1.0$ 、Camera1、後方配置)

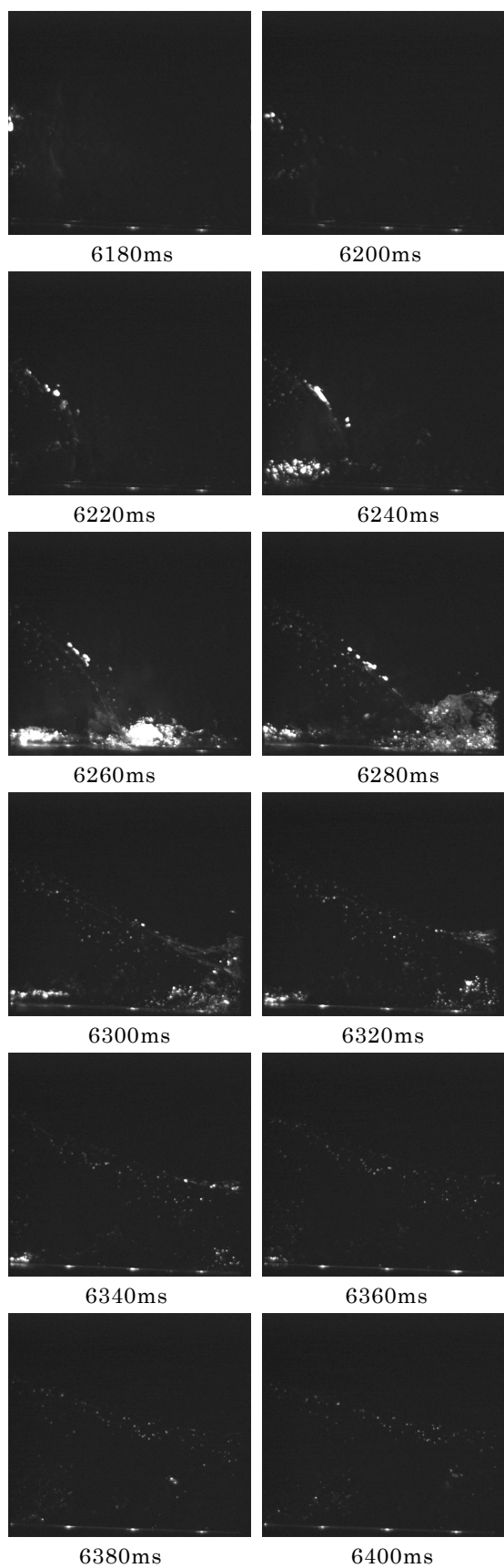


図 3-33 (1) 撮影画像

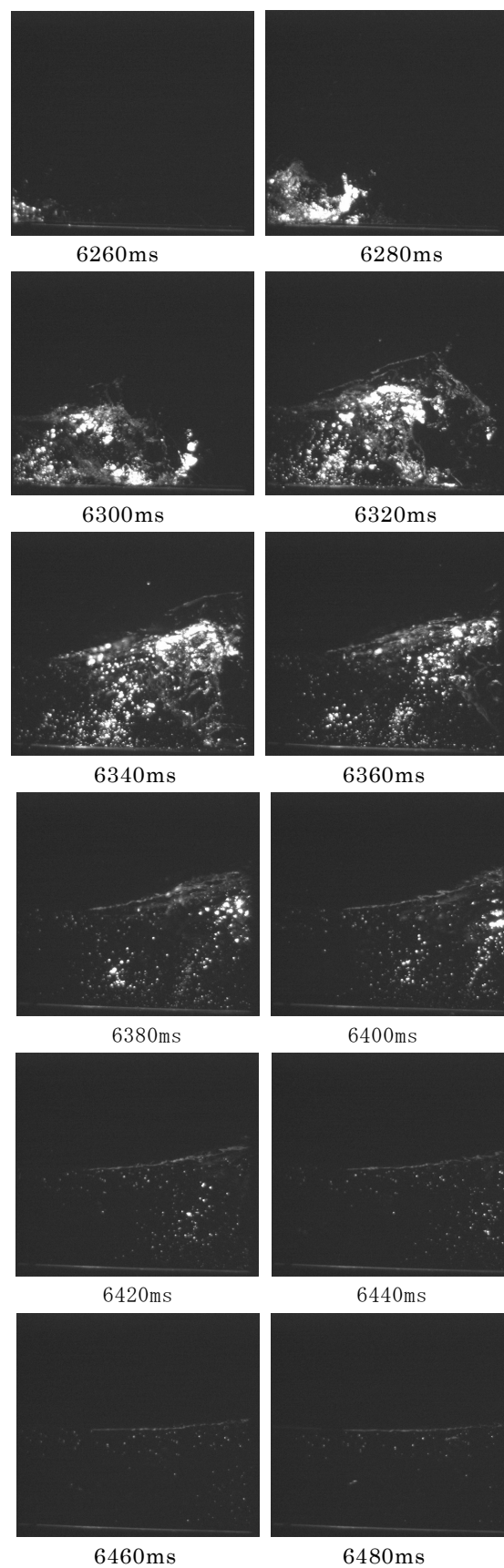
(L1 断面、 $\lambda/L=1.25$ 、Camera1、前方配置)

図 3-33 (2) 撮影画像

(L1 断面、 $\lambda/L=1.25$ 、Camera1、後方配置)

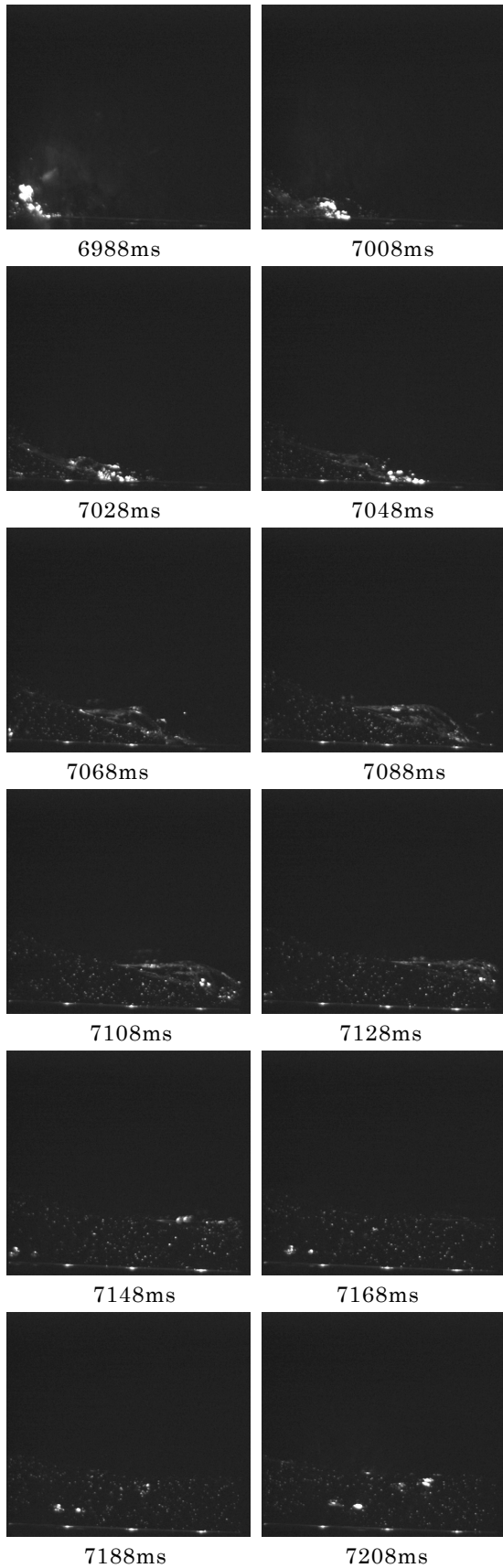


図 3-34 (1) 撮影画像
(L1 断面、 $\lambda/L=1.5$ 、Camera1、前方配置)

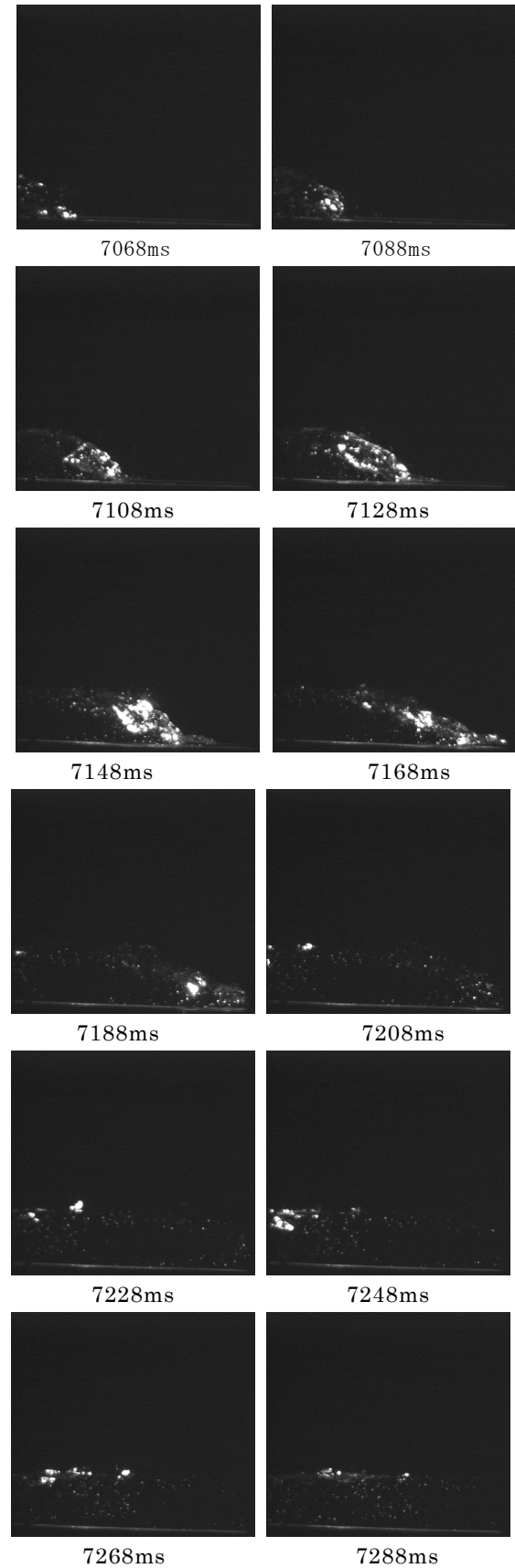
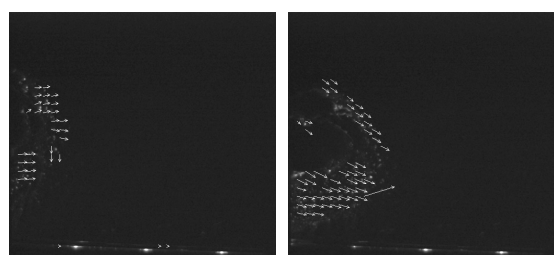
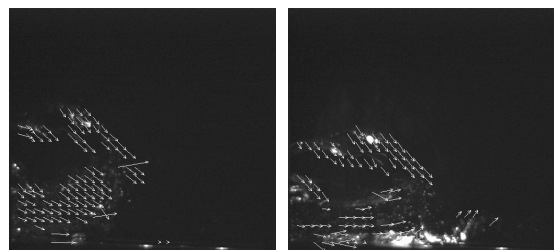


図 3-34 (2) 撮影画像
(L1 断面、 $\lambda/L=1.5$ 、Camera1、後方配置)



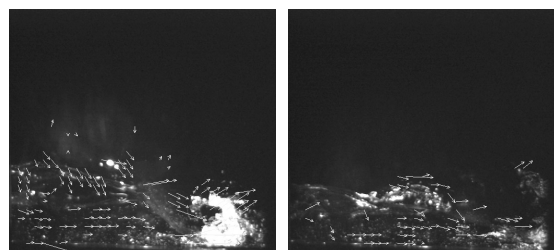
3944ms

3964ms



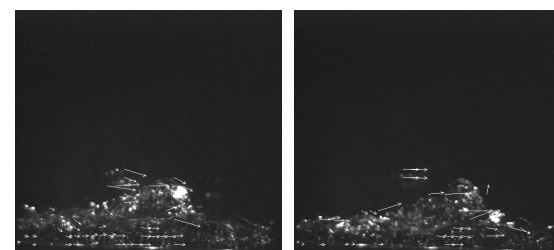
3984ms

4004ms



4024ms

4044ms



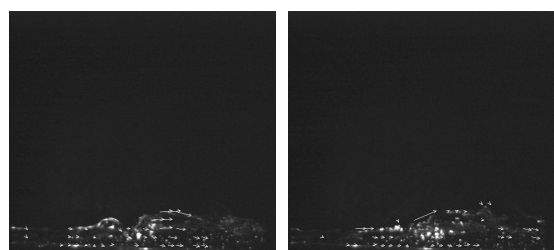
4064ms

4084ms



4104ms

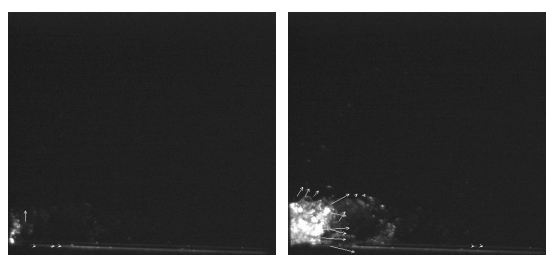
4124ms



4144ms

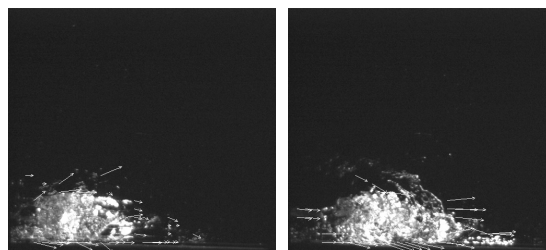
4164ms

図 3-35 (1) 撮影画像の PIV 解析結果
(L1 断面、 $\lambda/L=0.7$ 、Camera1、前方配置)



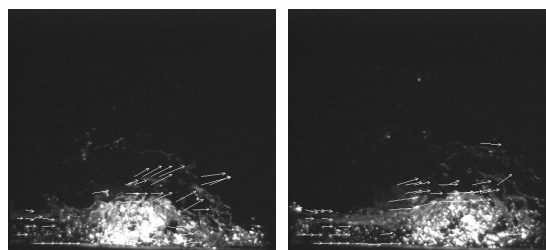
4020ms

4040ms



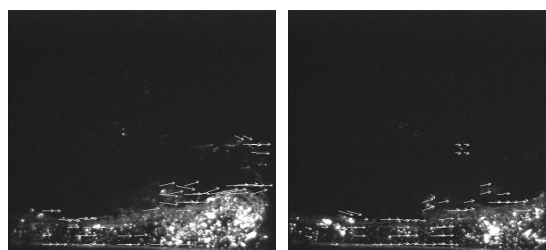
4060ms

4080ms



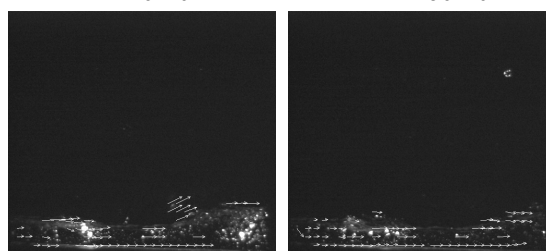
4100ms

4120ms



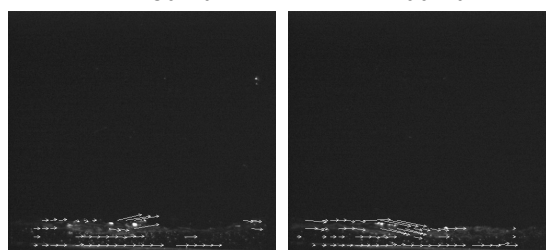
4140ms

4160ms



4180ms

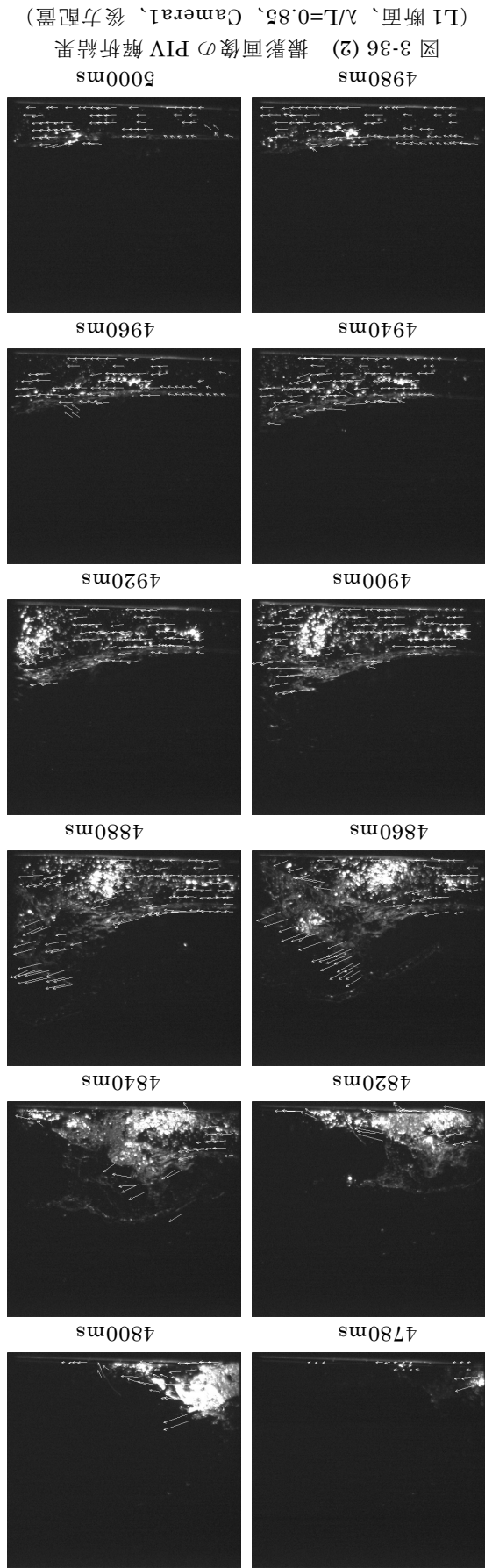
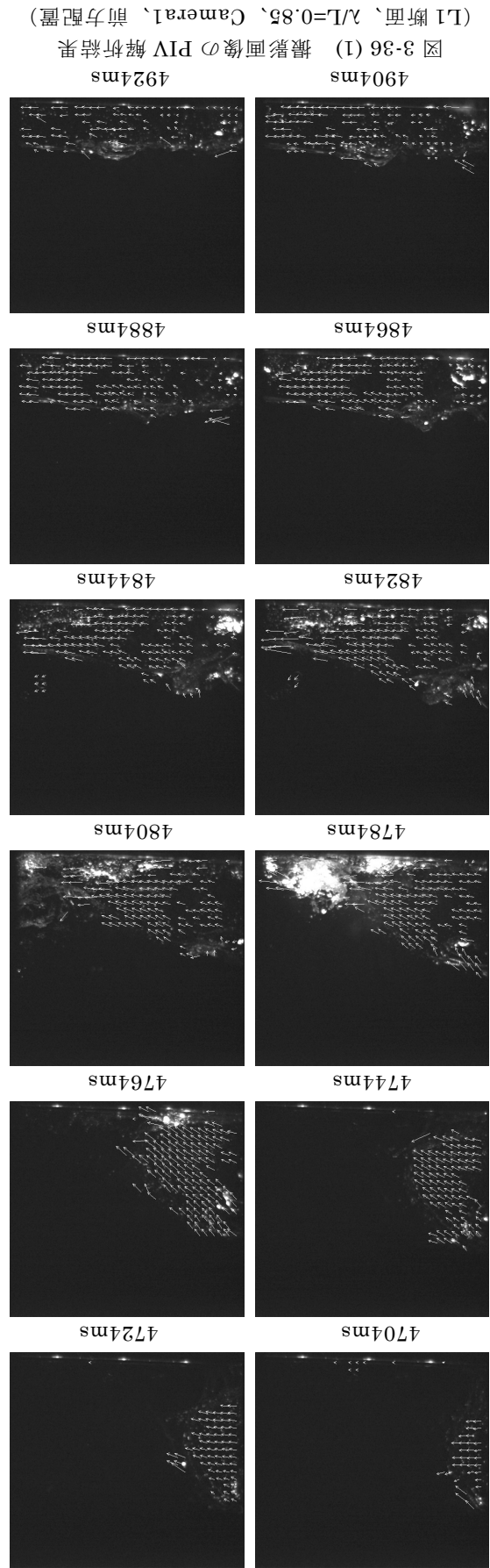
4200ms



4220ms

4240ms

図 3-35 (2) 撮影画像の PIV 解析結果
(L1 断面、 $\lambda/L=0.7$ 、Camera1、後方配置)



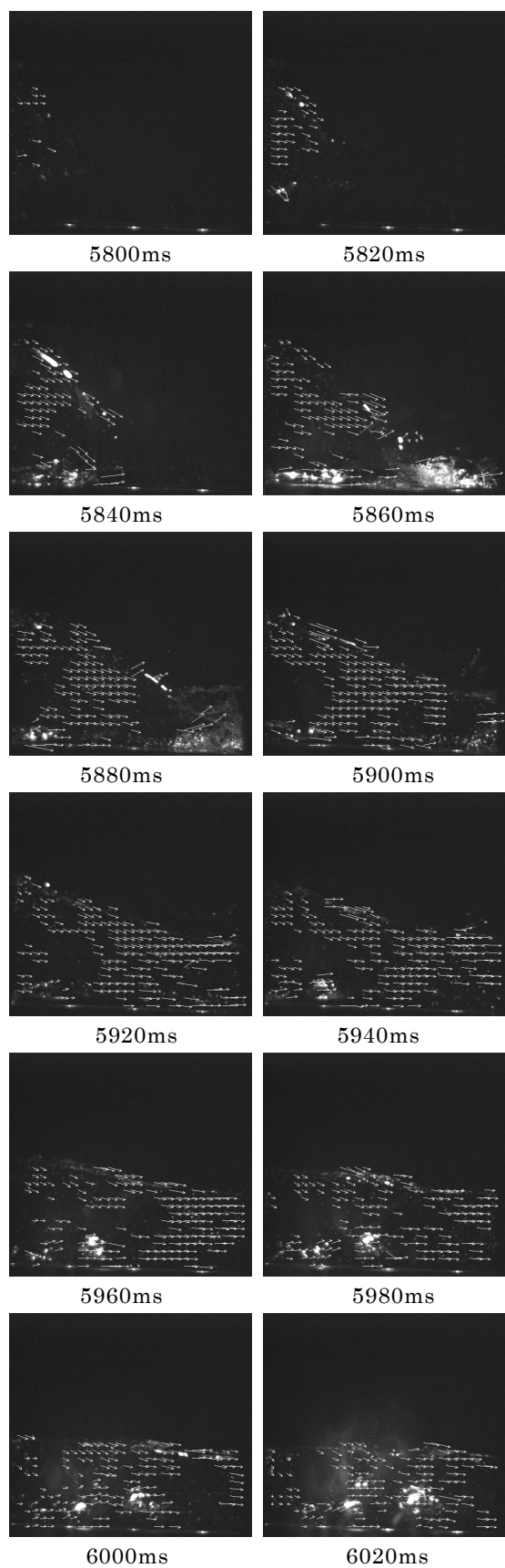


図 3-37 (1) 撮影画像の PIV 解析結果
(L1 断面、 $\lambda/L=1.00$ 、Camera1、前方配置)

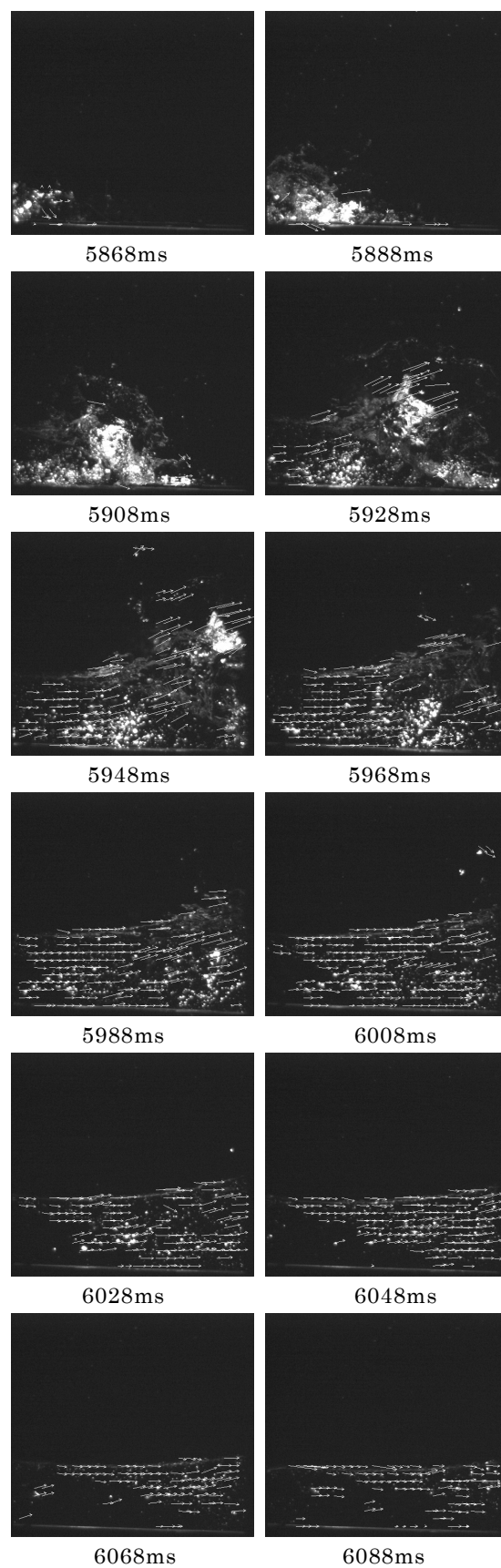
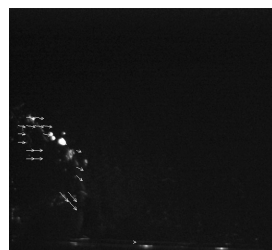


図 3-37 (2) 撮影画像の PIV 解析結果
(L1 断面、 $\lambda/L=1.00$ 、Camera1、後方配置)

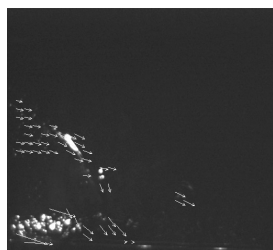


6180ms

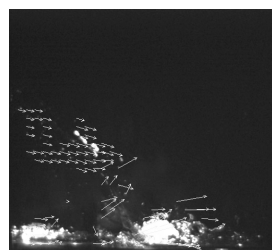
6200ms



6220ms



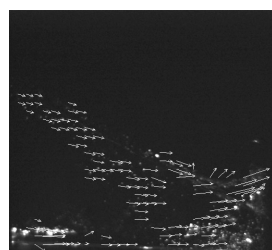
6240ms



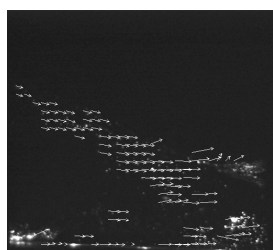
6260ms



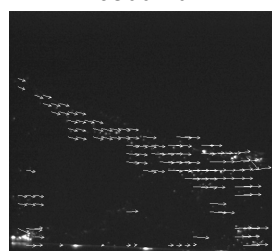
6280ms



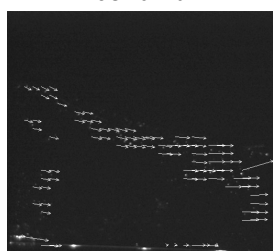
6300ms



6320ms



6340ms



6360ms

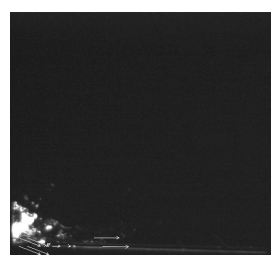


6380ms



6400ms

図 3-38 (1) 撮影画像の PIV 解析結果
(L1 断面、 $\lambda/L=1.25$ 、Camera1、前方配置)

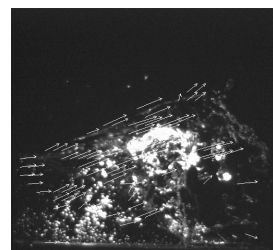


6264ms

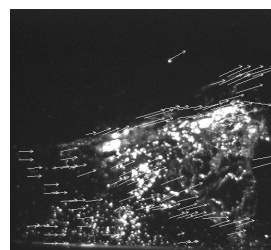
6284ms



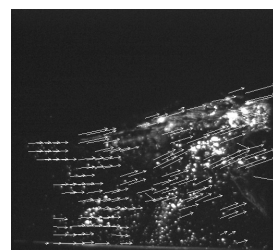
6304ms



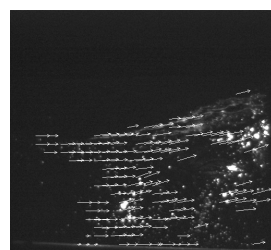
6324ms



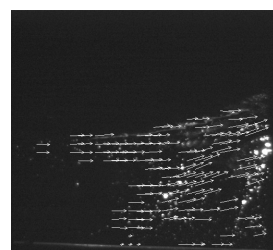
6344ms



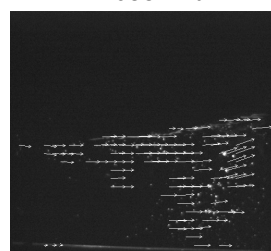
6364ms



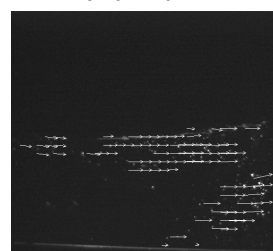
6384ms



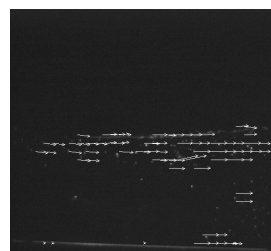
6404ms



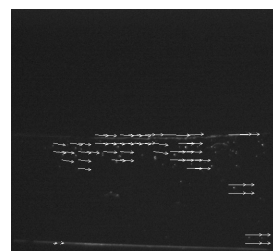
6424ms



6444ms



6464ms



6484ms

図 3-38 (2) 撮影画像の PIV 解析結果
(L1 断面、 $\lambda/L=1.25$ 、Camera1、後方配置)

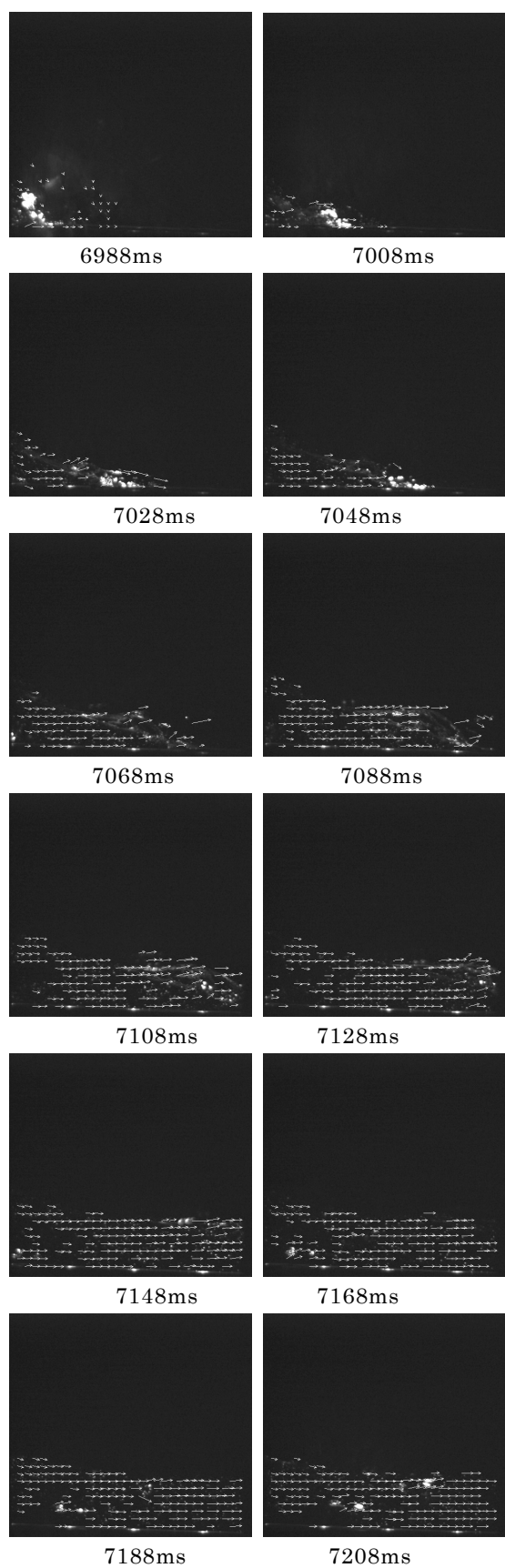


図 3-39 (1) 撮影画像の PIV 解析結果
(L1 断面、 $\lambda/L=1.5$ 、Camera1、前方配置)

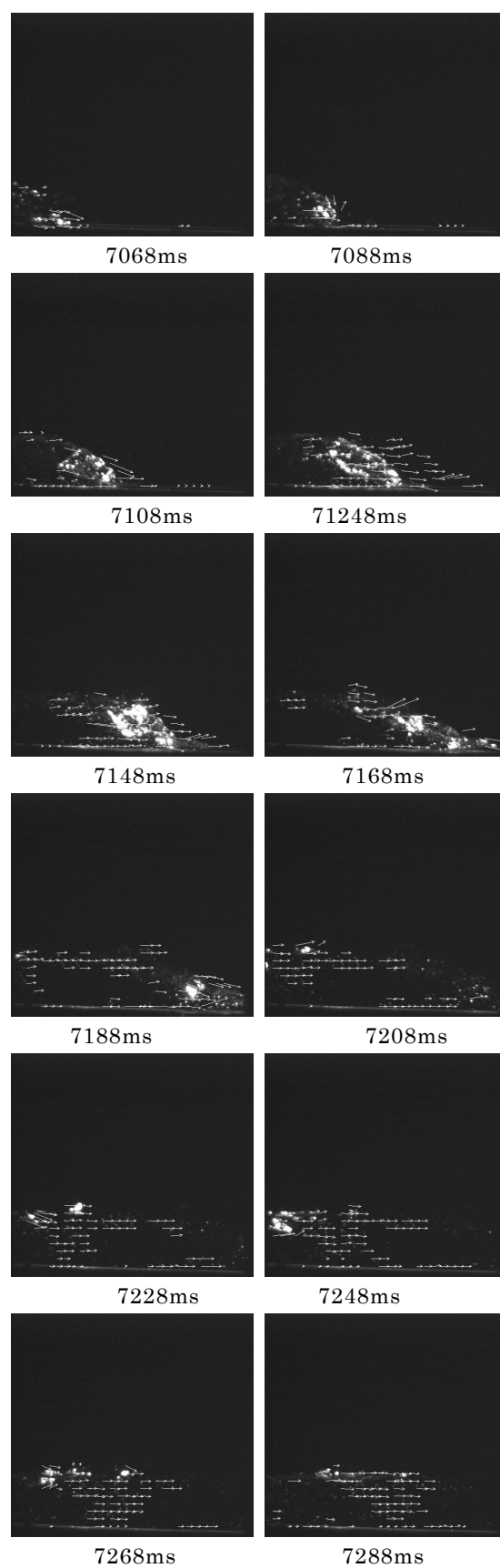


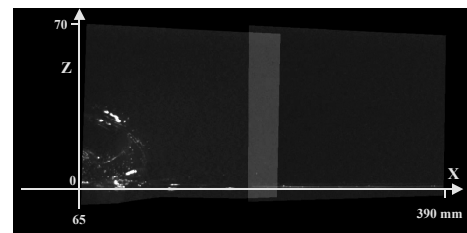
図 3-39 (2) 撮影画像の PIV 解析結果(L1 断面、
 $\lambda/L=1.5$ 、Camera1、後方配置)

(6) 画像の歪み補正と統合

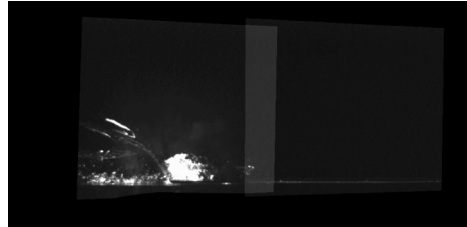
打込水の挙動全体を可視化するためには、前方と後方で撮影した映像を合成して、より広範囲の映像を作成する必要がある。しかし、先に述べたように鏡を用いて撮影した画像は歪んでおり、そのままでは合成することができない。そこで、本節では撮影画像を 3.4 節の(1)(2)式で示した写像関数の逆写像を用いて画像の歪みを補正し、前後の映像を合成した。(1)(2)式で与えられる写像関数はアフィン変換と異なり非線形項 (xz 項) を含んでいるため、解析的に逆写像関数を求める事が困難である。そこで、数値的に逆写像を行って歪みを補正した。歪み補正に要する時間は 1.7GHz のペンティアム4の PC を用いた場合、 514×472 pixel の1画像あたり約1秒で、高速度ビデオによる約8秒間の映像（2037画像）一本を補正するのに約35分要する。

図 3-40 (1)(2)に合成画像の一例を示す。この図は、Camera2 を用いて撮影した L1 断面の画像の歪みを補正し、左に船首側（前方）、右に船尾側（後方）の画像を並べて示したものである。撮影範囲に重複を持たせてあるため、図には重なった領域が存在している。図 3-40 (1)の最上段の画像には、参考のため図 3-6 に示した甲板上での座標を重ねた。この座標軸から長さ方向には船首先端からの距離が 65mm から 390mm、高さ方向には甲板上面 0mm から 70mm までの映像であることが分かる。他の画像には座標軸は示していないが、皆同じである。

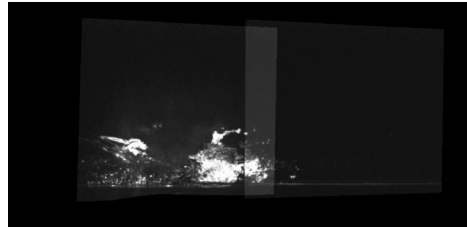
船首側（前方）と船尾側（後方）の画像は同時に撮影されたものではなく異なる実験で撮影されたものであるが、実験の再現性が高いため、左右の画像は非常に良く接続しており、ムービーとして再生すると同時に撮影されたように見える。画像を合成することで同時に観察できる領域が広がり、打込の様子が個別の画像を観察するのと比較して格段に良く分かるようになった。



3168ms



3188ms

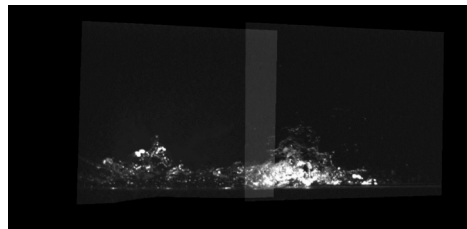


3208ms

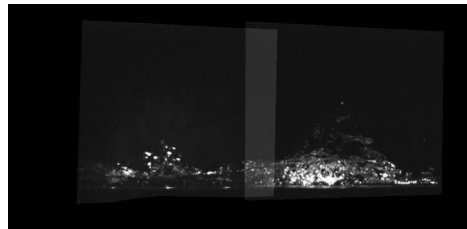
図 3-40 (1) 前方と後方の画像の統合
(L1 断面、 $\lambda/L=0.7$ 、Camera2)



3228ms



3248ms



3268ms

図 3-40 (2) 前方と後方の画像の統合
(L1 断面、 $\lambda/L=0.7$ 、Camera2)

(7) PIV による流場解析で得られる
速度成分の解説

打込水画像の PIV 解析結果ならびにその写像変換から得られる速度成分について解説する。図 3-41 にカメラのレンズ軸と打込水の水速度ベクトルとの関係を示す。図中のレンズ軸は、船体中心線の法線方向、すなわち Y 軸に対して角度 θ 傾斜している。打込水の水速度ベクトルを V 、その x, y 方向の成分をそれぞれ V_x, V_y と書く。カメラの CCD はレンズ軸に直交しているので、CCD に写る打込水の映像の PIV 解析から得られる速度成分は、図中に V_n で示すレンズ軸と直交する平面への V の写像になっている。すなわち、

$$V_n = V_x \cos \theta + V_y \sin \theta \quad (3-5)$$

である。

一方、図中に Sheet light として示したバンドはシート光の照射断面である。この断面内に設置した検定板の撮影画像を用いて CCD 上の位置と検定板上の位置との写像関数を求め、これを用いて速度成分を補正すると、図中に V'_x で示す値が得られる。これを式で表すと

$$V'_x = V_n / \cos \theta = V_x + V_y \tan \theta \quad (3-6)$$

となる。 V'_x が画像の PIV 解析から最終的に得られる成分であり、 θ がゼロでない限り V_x に一致しない。そこで、粒子法による甲板打込水の計算結果と、水槽実験結果とを比較するには、計算で求めた V_x, V_y

を (3-6) 式に代入して V'_x を求め、これと水槽実験結果とを比較する必要がある。カメラ 2 台を用いたステレオ PIV では、各カメラの光軸の傾斜角を θ_1, θ_2 とすると

$$\begin{cases} V'_{x1} \\ V'_{x2} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \theta_1 \\ 1 & \tan \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \theta_1 \\ 1 & \tan \theta_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V'_{x1} \\ V'_{x2} \end{bmatrix}$$

の関係により、原理的には V_x, V_y を求めることが可能であるが、今回の実験では信頼性のある値が得られなかった。そこで、実験結果としては V'_x を示すにとどめる。

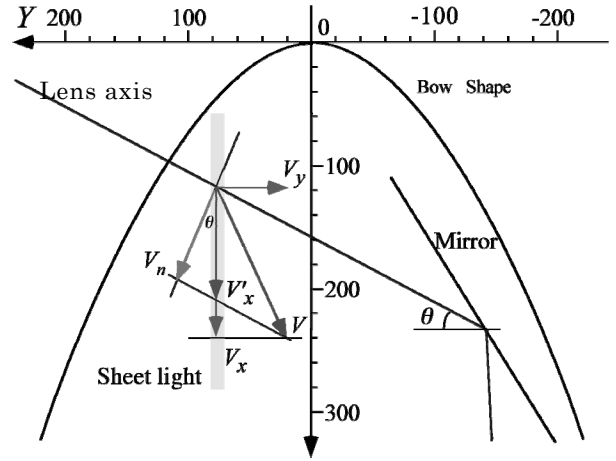


図 3-41 PIV 解析から得られる速度成分
[単位:mm]

(8) 打込水による衝撃水圧の計測波形に
見られる激しい振動と空気巻込量との関係

甲板打込水の可視化実験では、大規模な打込には大量の空気巻込を伴うことが観測されている。また、空気巻込を伴うと、打込水による甲板上への衝撃圧に激しい振動が生じる事が確認されている。スラミングによる船底衝撃等においても空気巻込があると、衝撃圧が激しく振動することが知られているが、空気巻込量と振動数の関係等はこれまであまり議論されていない。そこで、気泡径と振動数との関係について簡単な解析を行い、可視化画像から読み取った気泡径と衝撃圧の振動数との関係を比較検討した。

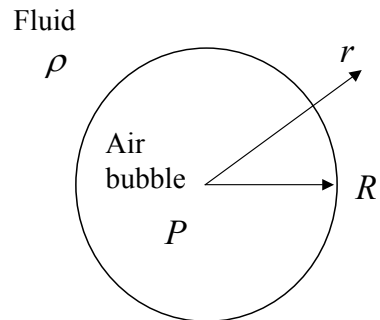


図 3-42 無限流体中の単気泡

まず、密度 ρ の無限理想流体中に、半径 R 、内圧 P の球形気泡が一つ存在する単純な問題を考える。流体は非粘性、非圧縮で、流れは非回転である。気泡

の振動は微小で断熱過程、気泡内圧は均一、重力の影響は無視できるものとする。この問題では現象を支配する量は ρ , R , P であり、次元解析により振動数の次元を持つ量を作り出すと、

$$\omega = \frac{k}{R} \sqrt{\frac{P}{\rho}} \quad (3-8)$$

が得られる。ここで k は次元解析からは求められない常数である。この式から振動数は気泡半径と流体密度の平方根に反比例し、圧力の平方根に比例することが分かる。

より詳細な解析を行うため、気泡の振動に伴う気泡外部の流体運動を、振動する吹き出しで表現する。その速度ポテンシャルは

$$\phi = \frac{c}{r} \cos \omega t \quad (3-9)$$

で与えられ、流体の速度と圧力は

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = -\frac{c}{r^2} \cos \omega t \quad (3-10)$$

$$\frac{P}{\rho} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{c\omega}{r} \sin \omega t \quad (3-11)$$

と書ける。ここで c は吹き出しの強さである。

次に、気泡の振動を平均半径 R_0 周りの微小振動で表現すると、

$$R = R_0 + \delta \sin \omega t \quad (3-12)$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta \omega \cos \omega t \quad (3-13)$$

となる。ここで $\delta \ll R_0$ は気泡の振幅である。気泡

の体積は、平均体積を V_0 とすると

$$\begin{aligned} V &= \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi (R_0 + \delta \sin \omega t)^3 \\ &\cong \frac{4}{3} \pi R_0^3 + 4 \pi R_0^2 \delta \sin \omega t + O(\delta^2) \\ &= V_0 + \Delta V \end{aligned} \quad (3-14)$$

であるので、その変化率を求めると

$$\frac{V}{V_0} = 1 + \frac{4 \pi R_0^2 \delta \sin \omega t}{\frac{4}{3} \pi R_0^3} = 1 + \frac{3}{R_0} \delta \sin \omega t \quad (3-15)$$

となり、さらにその逆数を取り

$$\frac{V_0}{V} = 1 - \frac{3}{R_0} \delta \sin \omega t + O(\delta^2) \quad (3-16)$$

その γ 乗のリーディングオーダーを取ると

$$\left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma \cong 1 - \frac{3\gamma}{R_0} \delta \sin \omega t \quad (3-17)$$

が得られる。ここで γ は空気の比熱比である。

気泡内の圧力は気泡振動が断熱過程であると仮定すると $PV^\gamma = P_0 V_0^\gamma$ であるので、(3-17) 式により

$$P - P_0 = -\frac{3\gamma P_0}{R_0} \delta \sin \omega t \quad (3-18)$$

となる。

さて、ここまでの解析で、流体運動と気泡運動の線形基礎式が得られた。そこで次にこれらを気泡表面の境界条件を用いて接続する。

まず、幾何学的境界条件

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right|_{r=R_0} = \frac{dR}{dt} \quad (3-19)$$

に (3-10), (3-13) 式を代入すると、

$$\delta \omega = -\frac{c}{R_0^2} \quad (3-20)$$

が得られる。次に、力学的境界条件

$$\frac{P - P_0}{\rho} = -\left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{r=R_0} \quad (3-21)$$

に (3-11), (3-18) 式を代入して

$$c\omega = -\frac{3\gamma P_0}{\rho} \delta \quad (3-22)$$

を得る。(3-20), (3-22) 式から c と δ を消去すると、気泡の振動数の理論式

$$\omega = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}} \quad (3-23)$$

を得る。(3-23) 式を次元解析から求めた (3-8) 式と比較すると、 $k = \sqrt{3\gamma}$ であることが分かる。また、

流体の圧力は気泡の平衡圧力 P_0 を基準として、(3-11) 式に (3-22) 式を代入して

$$P = -\frac{3\gamma P_0 \delta}{r} \sin \omega t = (P_b - P_0) \frac{R_0}{r} \quad (2-24)$$

で与えられる。ここで P_b は (3-18) 式で与えられる

気泡内の圧力である。この式より、空気巻き込みによる圧力振動の振幅は、気泡内圧ならびに気泡寸法に比例し、気泡からの距離に反比例することが分かる。このため気泡寸法が大きい大規模な空気巻き込みを伴う場合、甲板上で計測される衝撃圧力に大きな振動が生じる事が理解できる。

先に図 3-23～3-27 に衝撃水圧波形の拡大図を示した。これらに振動波形が明瞭に示されている。図 3-25 は波長船長比： $\lambda/L=1.0$ の場合の計測波形である。この波長では大規模な甲板打込水が発生し、空気巻込量が多いため気泡径が大きい。船首に近い P1, P2, P8, P10, P16 ではきれいな Sin カーブを描いた減衰波形が計測されている。振動数は約 150Hz である。船首から後方へ移ると、振幅がだんだん小さくなっている。これは後方に行くに従って巻き込んだ空気が浮上して甲板から離れるため、気泡振動の衝撃圧力に及ぼす影響が弱まるからであると考えられる。後方では振幅は小さくなくても振動数は変わらない。巻き込んだ空気は最終的には大気中に逃げ出し、その時点で空気の影響はなくなる。

図 3.23 は $\lambda/L=0.7$ の場合の計測例で、この波長では空気巻込は発生し難いが、少量の空気が巻き込まれ、図に示すような振動波形が計測されることがある。小規模の空気巻込で振動数は高いが、P1 で計測された波形はやはりきれいな Sin カーブを描いており、後方へ行くに従って振幅が小さくなるのは、 $\lambda/L=1.0$ の場合と同じである。

図 3-43 に $\lambda/L=0.7, 0.85, 1.0, 1.25, 1.5$ の 5 波長の出会波中で計測された圧力の振動数を整理して示す。 $\lambda/L=1.0, 1.25$ 付近で、空気巻込量が最も多く、この波長域から離れるほど少なくなることが、可視化計測から分かっている。衝撃圧力の振動数と空気巻込量との間には、明らかに相関があると言える。

図 3-44 に打込水の可視化画像の一例を示す。これは $\lambda/L=1.0$ の画像で図 3-25 の圧力波形に対応している。画像から読み取れる気泡寸法は大凡 25mm と 30mm である。これを気泡の直径と考え、(16)式に代入して振動数を求めると、それぞれ 261Hz、217Hz になる。ここでは $\gamma=1.4$ 、 $P_0=1,000hPa$ 、

$\rho=1,000kg/m^3$ とした。図 3-25 の振動数は約 150Hz

であり、近い値を示していることから、衝撃圧の計測波形に見られる振動は、巻き込まれた空気振動に起因するものと結論づけられると考える。

以上の解析は観測された圧力振動の原因を定性的に説明するために実施した無限流体中での単一気泡の振動数解析である。定量的には甲板上への空気巻込では気泡振動に及ぼす甲板の影響、気泡間の相互作用の影響、自由表面の影響等を考慮した振動

数解析を行う必要があろう。

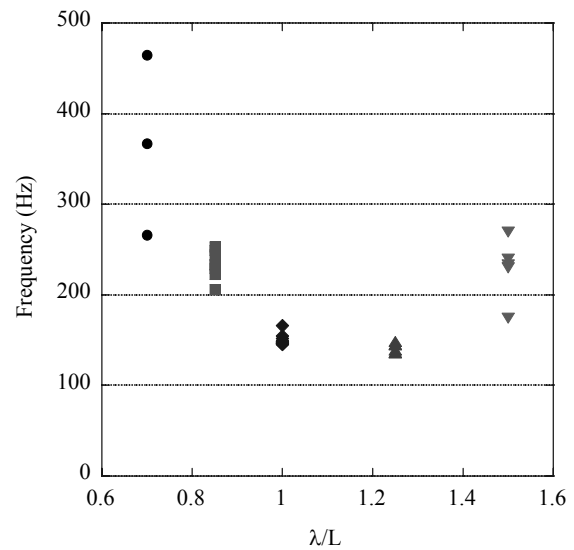


図 3-43 圧力振動の周波数

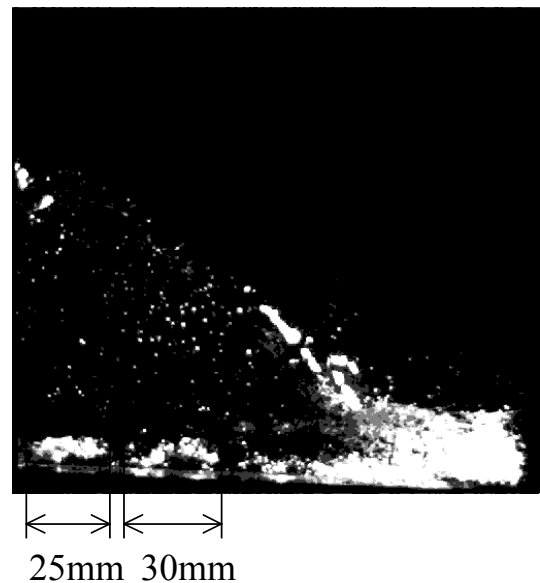


図 3-44 画像に見られる気泡の寸法 ($\lambda/L=1.0$)

4 航走模型船を用いた甲板ならびに甲板上 構造物への打込水の可視化計測

甲板上に構造物が存在する場合には、打込水の挙動はさらに複雑になることが予想される。粒子法は甲板上に構造物が存在する場合の打込水の解析にも適用できるため、ブリッジ、ハッチ、避波板の3種類の構造物模型を製作して模型船に設置し、それらにより攪乱を受ける打込水の挙動を観察することを目的とした可視化実験を実施した。

可視化に用いた撮影機材、模型船、試験水槽等は3節で報告したものと同一である。以下では、本追加実験について報告する。

4.1 甲板上構造物

甲板上構造物の代表として用いたブリッジ、ハッチ、遮波板の形状寸法等をまとめて図4-1から4-3に示す。

(1) ブリッジ

図4-1にブリッジ模型の写真ならびに形状寸法を示す。本実験ではブリッジの詳細な形状は省略し直方体の箱に簡略化した。ばら積船、コンテナ船、油送船等ではブリッジは船尾寄りにあるが、観測船や客船ではブリッジは船首寄りにある。そこで本実験では打込水が直撃する船首寄りの二カ所にブリッジを配置した。これらの配置で船首に近い方を前方配置、それより後方の配置を後方配置と呼ぶ。船首先端からブリッジ前縁までの距離は前方配置では328mm、後方配置では553mmである。

本ブリッジ模型内部には打込水によりブリッジに作用する衝撃荷重を計測するためロードセルが取り付けられている。ブリッジ模型はロードセルを介して甲板に取り付け、ブリッジと甲板ならびに透明整流板との間には1mm弱の隙間を設け甲板以外の船体部品から力が作用しないように隔離した。ロードセルは日計電測(株)製の4分力計Y115M2である。定格容量は荷重が100N、モーメントが10Nmである。ロードセルの検定中の様子を写真4-1に示しておく。

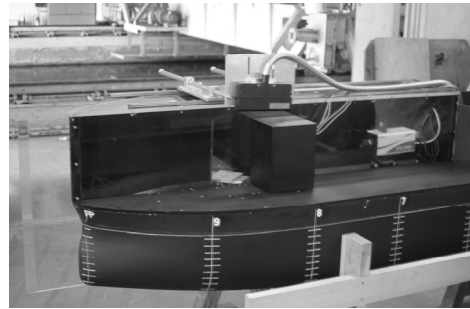


図4-1 (a) ブリッジ模型の甲板上への取り付け状態

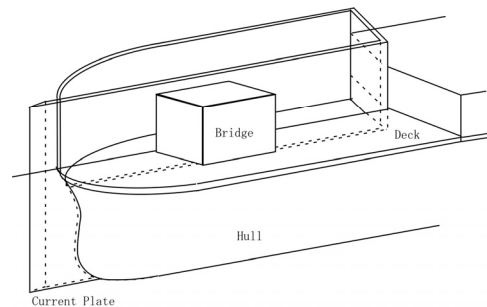


図4-1(b) ブリッジと模型船のイラスト

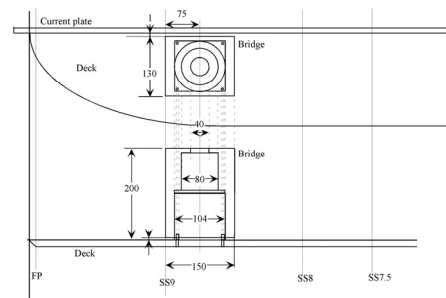


図4-1(c) ブリッジ模型
上面図と側面図 [単位:mm]

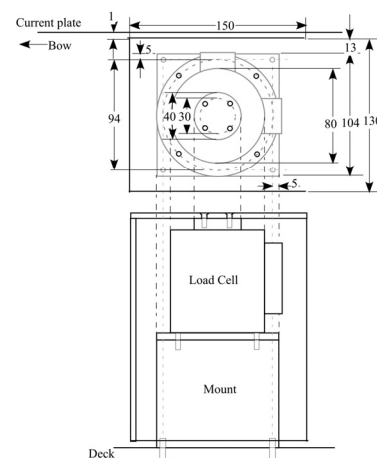


図4-1 (d) ブリッジ内のロードセル [単位:mm]



写真 4-1 検定中のロードセル

(2) ハッチ

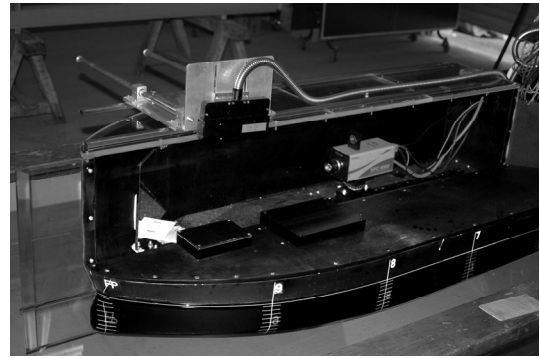
図 4-2 にハッチ模型の写真ならびに形状寸法を示す。これはばら積船を想定した模型で、No. 1 ハッチと No. 2 ハッチの二つのハッチで構成されている。No. 1 ハッチの上面には先に 3.5(2)節で説明したパネルゲージが取り付けられており、ハッチカバーに働く衝撃荷重が計測できるようになっている。No. 2 ハッチは単なる箱である。これらのハッチの船首先端からの位置は、No. 1 が 220mm、No. 2 が 450mm である。

(3) 遮波板

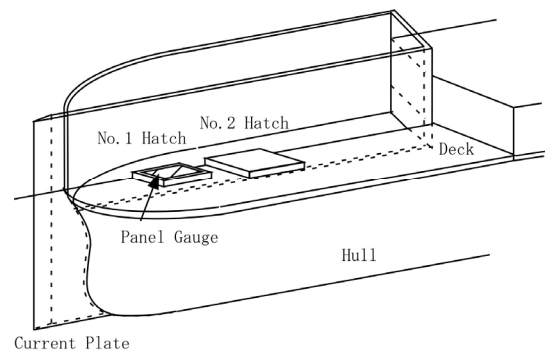
図 4-3 に遮波板の写真ならびに形状寸法を示す。材質はアクリルで、板厚 1.5mm、0.5mm、高さ 50mm、30mm の組み合わせで 4 種類の遮波板を製作した。幅は 160mm である。遮波板を取り付けるために製作した甲板を図 4-3(c) に示す。遮波板の取り付け位置として船首先端から 200mm、300mm、400mm の 3 カ所を用意したが、実験では時間の関係上、300mm の位置は使用しなかった。

遮波板を用いた本実験は粒子法による流力弾性衝撃の解析結果を検証する目的で実施したものである。図 4-4 にレーザー変位計を用いた曲げ弾性率の計測の様子を示す。図中に示すようにアクリル板の撓みは大変形時でも荷重に対して線形であり、この関係から求めた曲げ弾性率は 2897MPa であった。この値はアクリルの標準的曲げ弾性率(3000MPa)と比較して妥当なものである。撓み量は高速度ビデオによる撮影画像から求められるので、遮波板には歪みゲージは取り付けなかった。

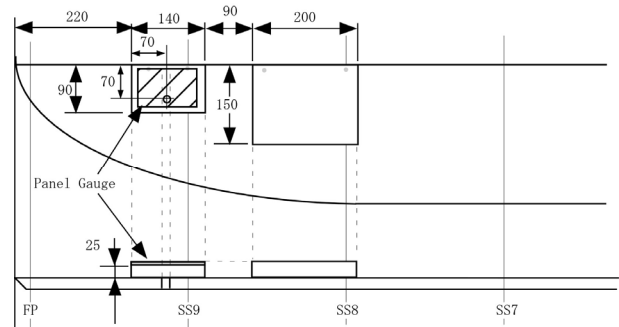
粒子法では破壊の解析も可能である。そこで遮波板の破壊計算を検証するため、ガラス製の遮波板を用いた破壊実験も行った。薄板硝子は旭硝子から提供して頂いた AN100 (厚さ 0.5mm) で、高さを変えて打込水により破壊される様子を観察した。しかし、薄板硝子は予想していたよりも強



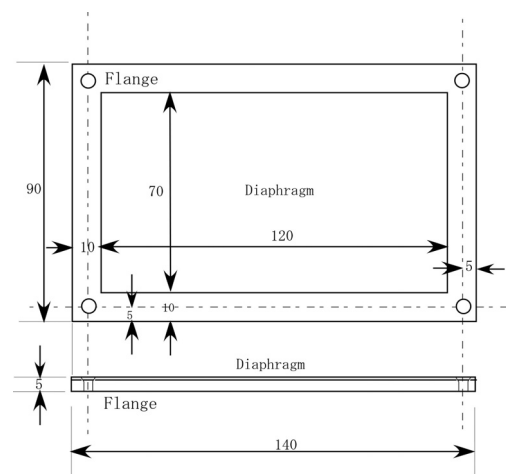
(a) ハッチ模型の甲板上への取り付け状態



(b) ハッチと模型船のイラスト

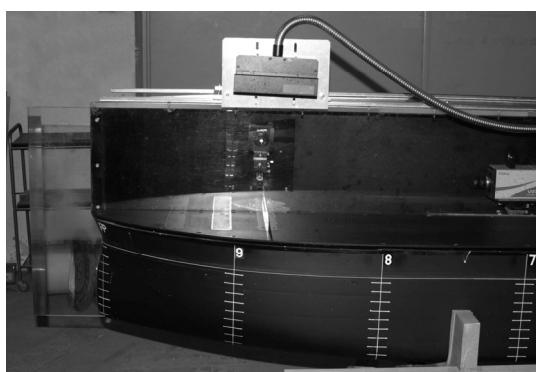


(c) ハッチの上面図と側面図

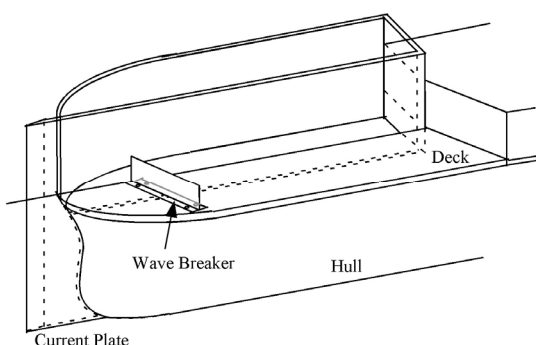


(d) No. 1 ハッチに取り付けたパネルゲージ

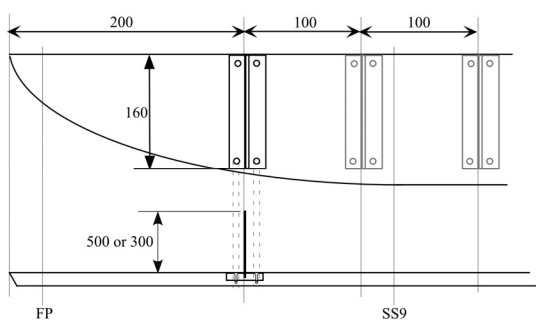
図 4-2 ハッチ模型 [単位:mm]



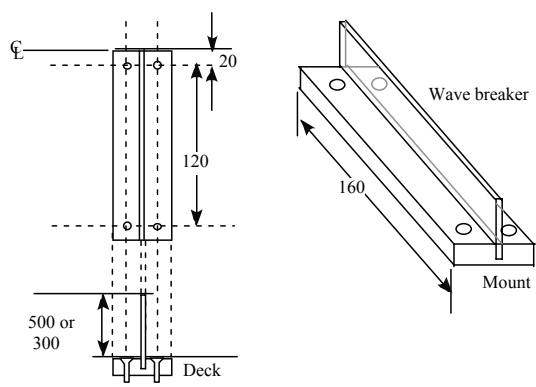
(a) 遮波板模型の甲板上への取り付け状態



(b) 遮波板と模型船のイラスト



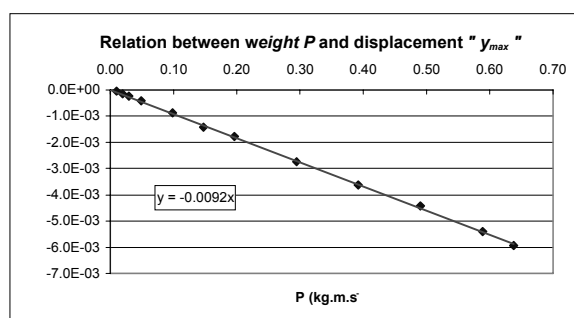
(c) 遮波板の上面図と側面図



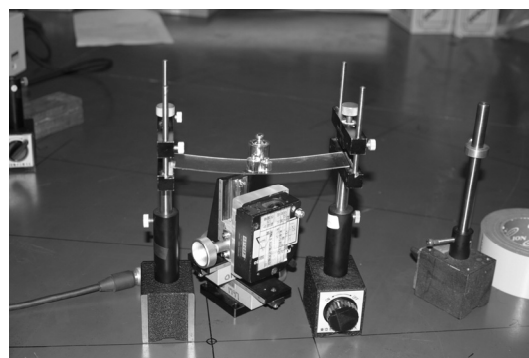
(d) 遮波板の詳細図

図 4-3 遮波板模型[単位:mm]

度があり、高さを 12cm 程度にしても割れる場合と割れない場合があり、再現性のある破壊実験はできなかった。そこで、本研究では実験の再現性にはこだわらず、破壊した際の流場の観察を行うことにとどめた。なお、硝子板 AN100 の曲げ弾性率はカタログ値で 7900kgf/mm² (77,420MPa) である。



(a) 荷重の撓みの関係



(b) レーザー変位計による撓量の計測

図 4-4 遮波板材の曲げ弾性率の計測

4.2 高速度ビデオカメラの撮影範囲

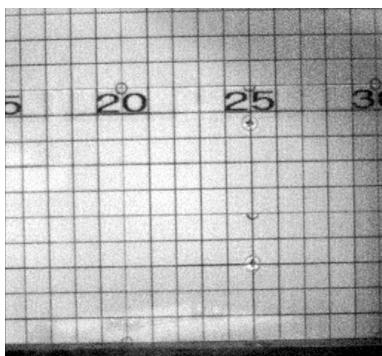
本可視化計測では甲板上の構造物の位置に従って、右舷の防水ケース内に設置した高速度ビデオカメラと鏡の位置を変えたため、その都度検定板の撮影を行って撮影範囲ならびにカメラのレンズ軸の計測を行った。図 4-5 に甲板上に設置した検定板とその撮影画像例を示す。図 4-5(a) には検定板を整流板から平行に 2cm 離して置いた状態が示されている。撮影範囲の計測では、検定板の整流板からの距離を整流板近傍から舷側まで変化させて撮影し、その映像から撮影範囲を求めた。図 4-6～図 4-8 の灰色の縦線はシート光を照射した撮影断面である。

カメラならびに鏡の設置状態については写真 3-1 を参照されたい。本実験ではカメラは 1 台である。

図 4-6 から図 4-8 に計測した撮影範囲を図示する。図中に鏡から延びる 3 本の線は撮影範囲の左右端と中心線（カメラのレンズ軸）を示している。本可視化計測では現象を真横に近い角度から撮影するため、鏡の設置角度を出来るだけ 45 度に近づけ、レンズ軸が整流板とできるだけ直交するように撮影機材を調節した。これにより、画像の歪みも小さくなった。図 4-5(b) に示した高速度ビデオによる検定板の撮影画像でも、画像に大きな歪みが無いことが分かる。

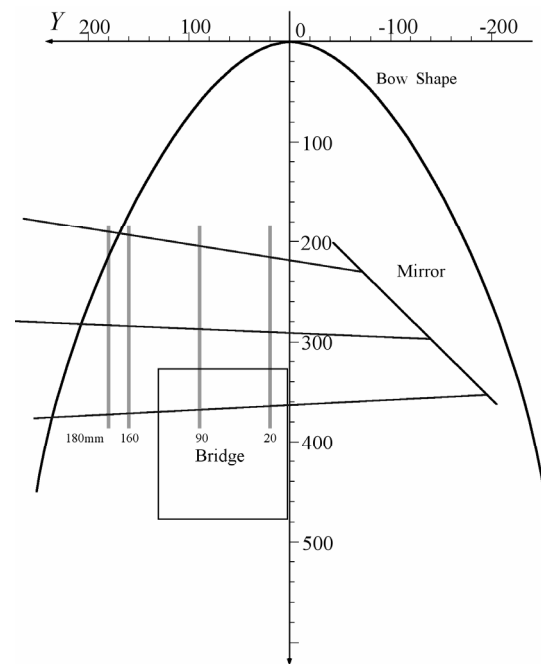


(a) 甲板上に設置した検定板

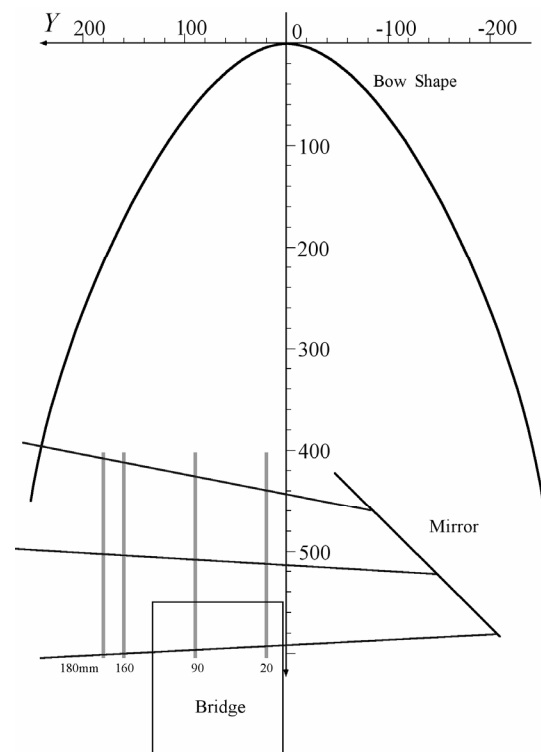


(b) 高速度ビデオによる検定板の撮影画像

図 4-5 甲板上に設置した検定板とその撮影画像例

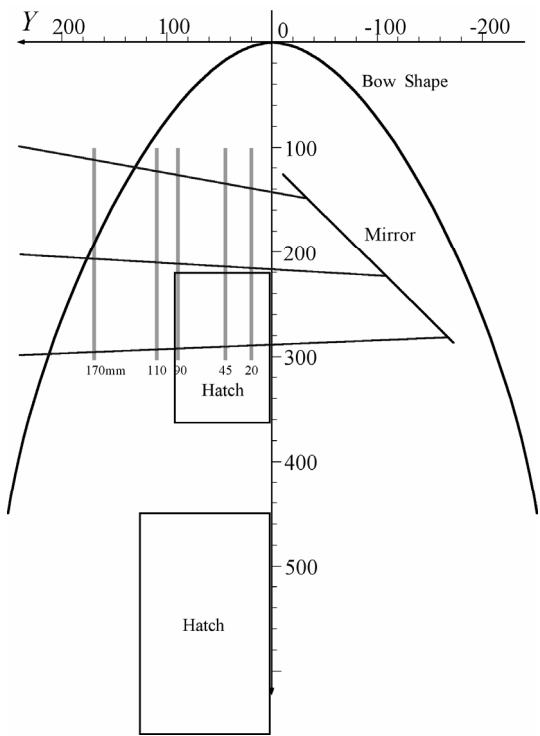


(a) ブリッジ前方配置

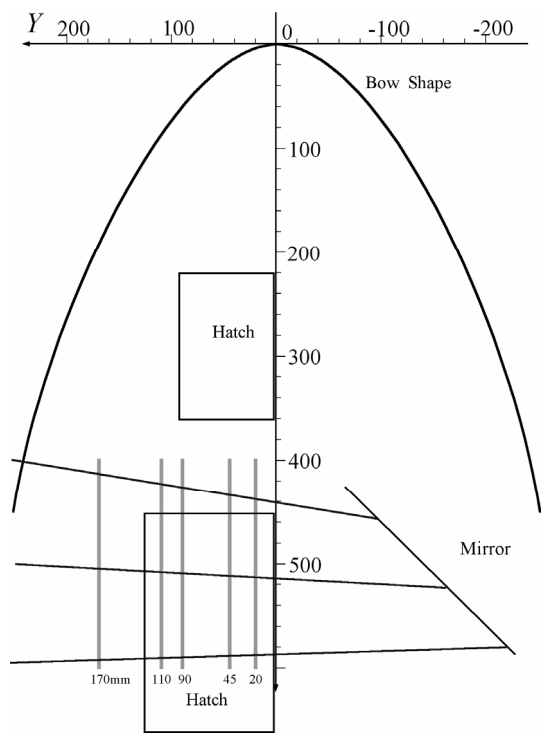


(b) ブリッジ後方配置

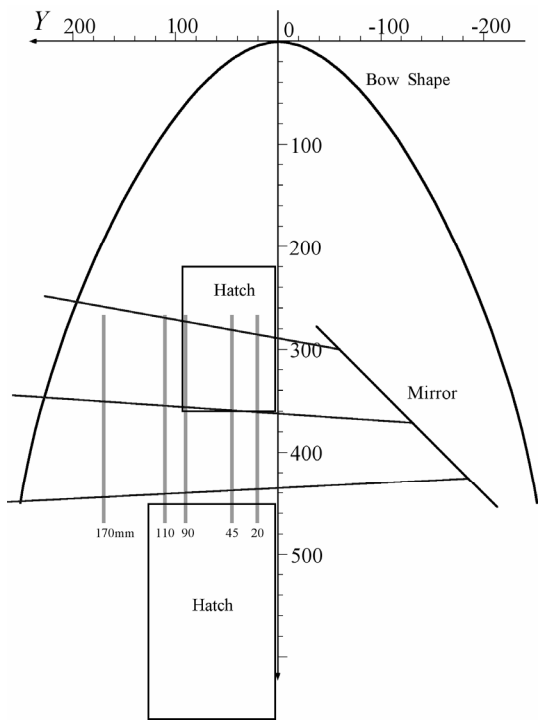
図 4-6 ブリッジ撮影時のカメラスコープと撮影断面 [単位:mm]



(a) カメラ前方配置

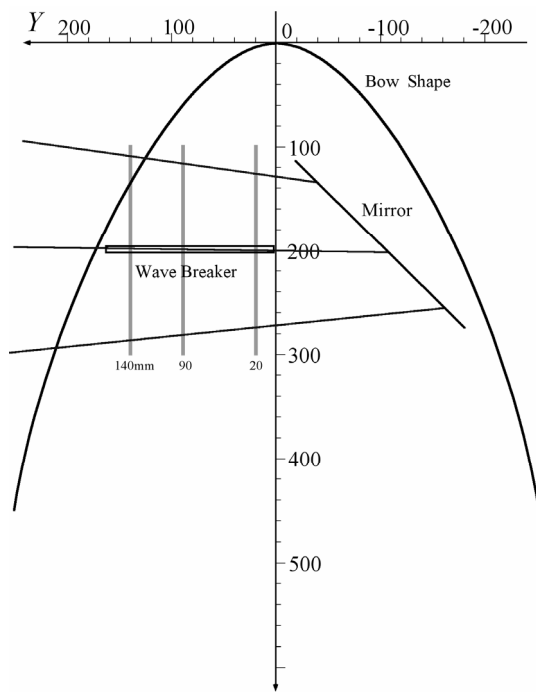


(c) カメラ後方配置

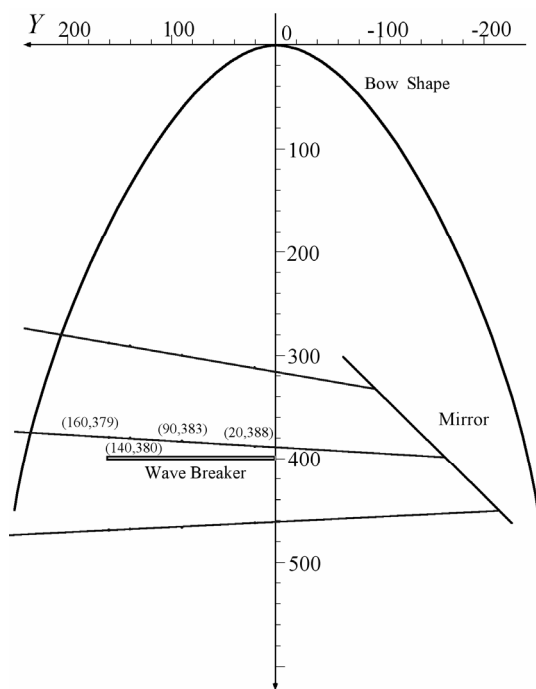


(b) カメラ中央配置

図 4-7 ハッチ撮影時のカメラスコープと撮影断面 [単位:mm]



(a) 遮波板前方配置



(b) 遮波板後方配置

図 4-8 遮波板撮影時のカメラスコープと撮影断面
[単位:mm]

4.3 実験結果

本水槽実験も海技研 1 号館の動揺試験水槽で実施した。試験水槽ならびに実験制御については既に 3.6 節で説明したので省略する。

実験の条件は、

波長：3m (波長船長比で 1)	波高：10.9cm	船速：0.724m/s ($F_n = 0.134$)
---------------------	-----------	----------------------------------

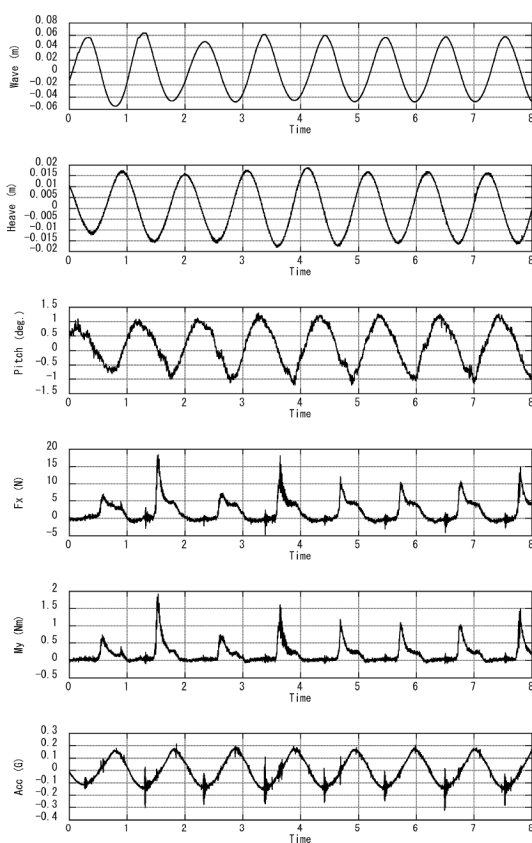
である。実験パラメータとして甲板上構造物の種類と位置を変化させたため、波については最も激しい甲板打込が発生する波長船長比 1 の波一種類に限って実験を実施した。

(1) ブリッジに働く衝撃荷重とモーメント

甲板上にブリッジを搭載した時の力学的計測項目の計測値を図 4-9 に示す。上から、入射波、Heave、Pitch、打込水によりブリッジに働く衝撃荷重とモーメント、ブリッジに位置での上下方向の加速度が示されている。図 4-9(a) はブリッジを船首端から 328mm の位置に設置した時の値、また図 4-9(b) は 553mm の位置に設置した時の値である。ブリッジに働く衝撃荷重とモーメントの極性は図 4-10 の通りである。図 4-9 からブリッジが打込水から受ける衝撃荷重は最大で 20N 程度であることが分かる。打込水がブリッジに当たった際に、20N 程度の大きなピーク値が発生し、それに続いて小さなピーク値が観察される。ブリッジに働くモーメントは最大で 2Nm 程で、この波形にも大きなピークに続いて小さなピークが見られる。小さなピークは、衝突してブリッジ全面を上昇した打込水が、下降して再び船首方向に戻される際に発生している。

(2) ハッチカバーに働く衝撃荷重

図 4-11 に甲板上にハッチを搭載した時の計測値を示す。上から、入射波、Heave、Pitch、打込水により No. 1 ハッチの上面に働く衝撃荷重が示されている。甲板上構造物の重量は船体重量と比較して小さいので、図 4-9 に示したブリッジを搭載した時の運動と較べて船体運動に大きな差はない。No. 1 ハッチの上面に取り付けたパネルゲージの形状寸法等は 3.5(2) 節に述べた通りである。3.9(3) 節の図 3-28 で示した実験結果はパネルゲージを甲板の打込水が直撃する位置に、その受圧面が甲板面と同じ高さになるよう取り付けて計測したものであったが、本節で示す計測結果はパネルゲージをハッチの上面に、また前後位置も打込水の直撃を受ける場所より 140mm 後方に取付けて計測したものである。このため、図 4-11 に示すパネルゲージによる荷重



4-9(a) 入射波、船体運動ならびに
ブリッジに働く衝撃荷重の計測波形
(ブリッジ前方配置)

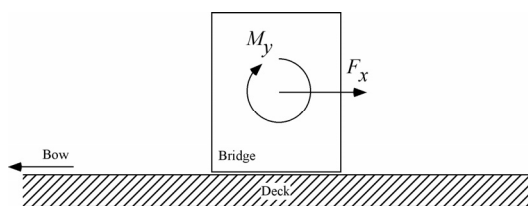


図 4-10 ロードセルの極性

の計測値は、図 3-28 と比較してずっと小さく、6cmAq 程度になっている。No. 1 ハッチカバー上への打込は、甲板上へ打込流下する水がハッチ全面に衝突してジェットとなって斜め上に上昇し、後に下降して覆い被さるようにハッチカバー上に落下するのが特徴である。この様子については、次節で画像を紹介しながら説明する。

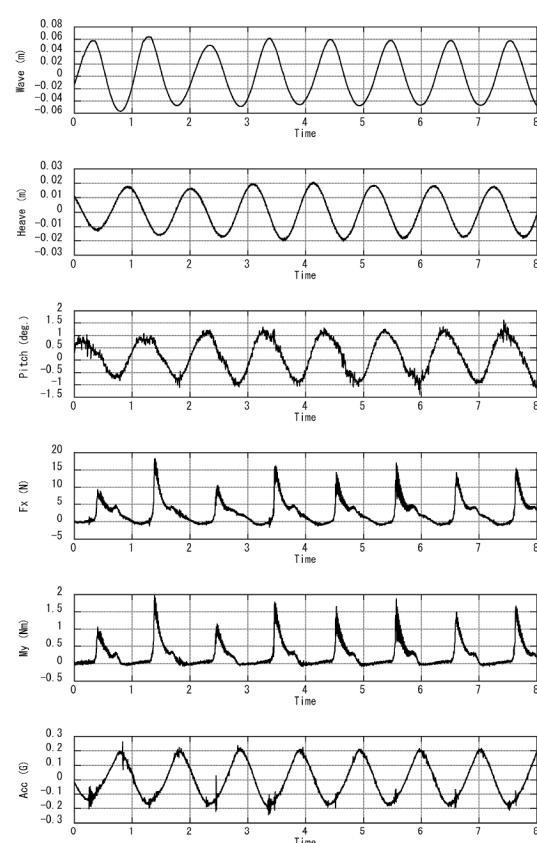


図 4-9(b) 入射波、船体運動ならびに
ブリッジに働く衝撃荷重の計測波形
(ブリッジ後方配置)

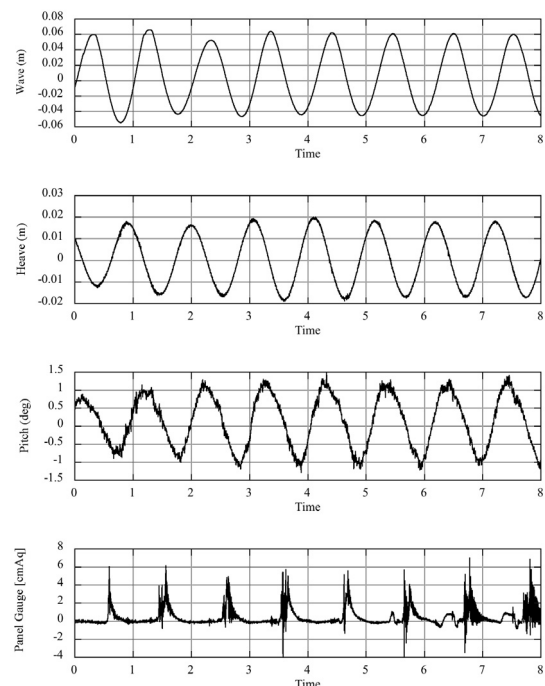


図 4-11 入射波、船体運動ならびに
No.1 ハッチの上面に働く衝撃圧の計測波形

(3) 打込水の映像

図 4-12 ならびに図 4-13 に甲板上への打込水がブリッジに衝突する映像を時間発展的に示す。図 4-12 はブリッジを前方配置した時の映像、図 4-13 は後方配置した場合の映像で、両図共に撮影断面は整流板から 2 cm 離れた断面である。撮影速度は毎秒 250 コマで 4ms 刻みである。これらは撮影された原画像で、歪みの補正は行っていない。図では甲板上を流下する打込水がブリッジに衝突して上昇し、再び下降して船首方向へ戻される様子が見て取れる。先に打込水による衝撃荷重の計測波形で、一回の衝撃で荷重に二つのピーク値が発生することを示したが、一つは打込水が衝突した際に発生し、二つ目はブリッジに衝突して上昇した打込水が下降して船首方向へ戻される際に発生することが、画像との比較から分かる。図中の白く小さい点はトレーサ粒子であるが、比較的大きく光っている点は、巻きこまれた気泡である。甲板を流下する打込水が砕けてブリッジに衝突するため、多くの気泡が巻き込まれ、PIV 解析を困難にしている。甲板上に構造物が存在する場合の映像では、不特定形状の気泡が多く巻き込まれているため、PIV 解析は断念した。

次に図 4-14 から図 4-16 にハッチへの打込水の映像を示す。撮影範囲はそれぞれ前方、中央、後方である。前方で撮影した映像では、打込水が No. 1 ハッチの前面に衝突して剥離し、右上約 45 度の方向へ噴出し、その後ハッチカバー上へ覆い被さるように下降する様子が観察できる。中央で撮影した画像では、下降した打込水が No. 1 ハッチと No. 2 ハッチの間に落ち、ハッチ間の隙間で大きな渦を形成する複雑な流れとなる様子が観察できる。また後方で撮影した画像では、ハッチ間の隙間を乗り越えて流下した打込水が、空気を巻き込んだ非常に乱れた流れとなって No. 2 ハッチの上を流下していく様子が観察できる。これらの映像を統合すると、ハッチへの打込水の全容を見る事ができる。図 4-17(a), (b) に前方、中央、後方で撮影された映像の歪みを補正して一繋がり合成した映像を示す。図は合成した動画から代表的なフレームを抜き出したもので、報告書では静止画として掲載するしかないが、動画を見るとハッチへの打込水の挙動をより良く理解することができる。

次に図 4-18 から図 4-25 に遮波板に衝突する打込水の撮影画像を示す。遮波板は厚さと高さの組み合わせで 4 組、取り付け位置で 2 組の合計 8 組の組み合わせがあり、これらの 8 枚の図はそれぞれの組み合わせに対応している。図 4-18 ならびに図 4-22 に示す遮波板の厚さが 1.5mm、高さ 30mm

の映像では遮波板の撓みはほとんど観察できず、剛体的に打込水の流下を食い止めている。甲板上を流下して遮波板に衝突した打込水は、遮波板に遮られて斜め上方に跳躍し、遮波板後方に覆い被さるように落下している。これはハッチ前面に衝突する打込水と同じ挙動である。図 4-19 ならびに図 4-23 に示す高さを 50mm にした映像でも、遮波板の撓みは 2mm 程度で顕著ではない。打込水を遮る効果が高くなった分、打込水の衝撃はより強くなり、高さ 30mm の場合と比較して打込水の挙動はより激しくなり、かつ遮波板を乗り越えて上昇する打込水の跳躍角度も大きくなっている。次に、図 4-20 ならびに図 4-24 に示す遮波板の厚さを 1/3 の 0.5mm にした映像では、打込水の衝突により遮波板が撓る様子が観察されるが、高さが 30mm ではまだ撓みは 2mm 程度であり、打込水の挙動は厚さ 1.5mm の時と大きな差はない。一方、高さを 50mm に上げた図 4-21 ならびに図 4-25 に示す映像では、顕著な撓みが観察されている。遮波板が撓む事で打込水の衝撃を吸収するため、打込水の挙動は厚さ 1.5mm の場合と比較して、和らいでいる。また、跳躍する角度も小さくなっている。

これらの画像から定量的に時々刻々の撓み量を読み取ることができる。これについては次節で述べる。

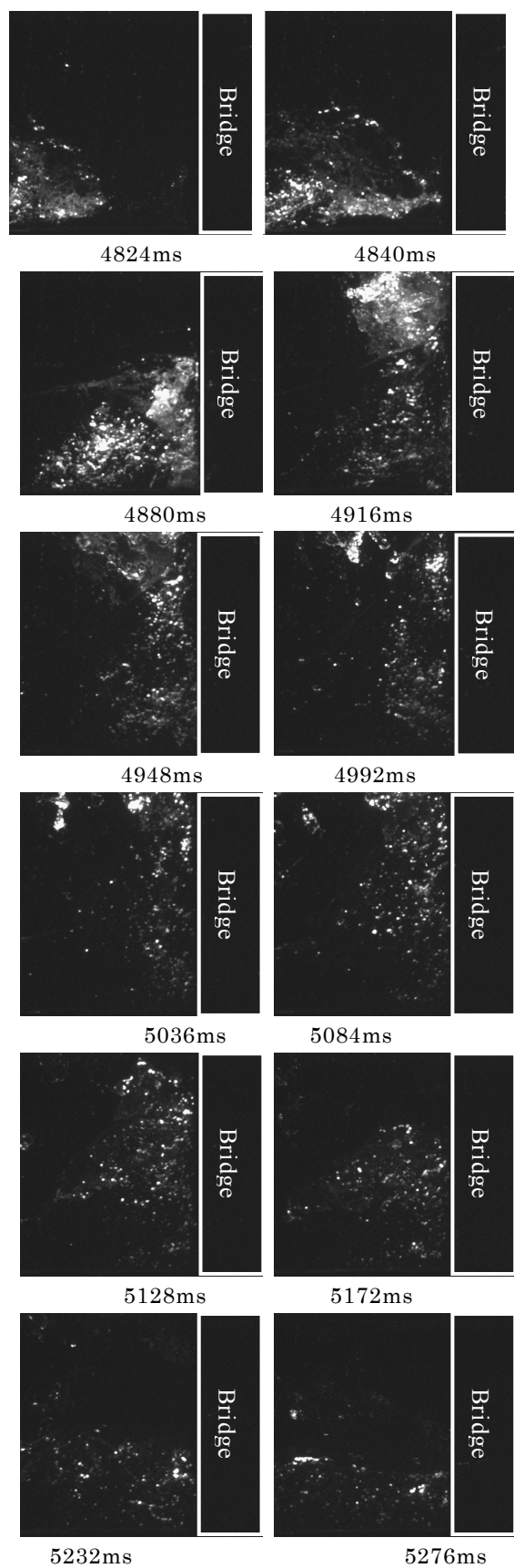


図 4-12 ブリッジへの打込水映像
(前方配置、L1 断面)

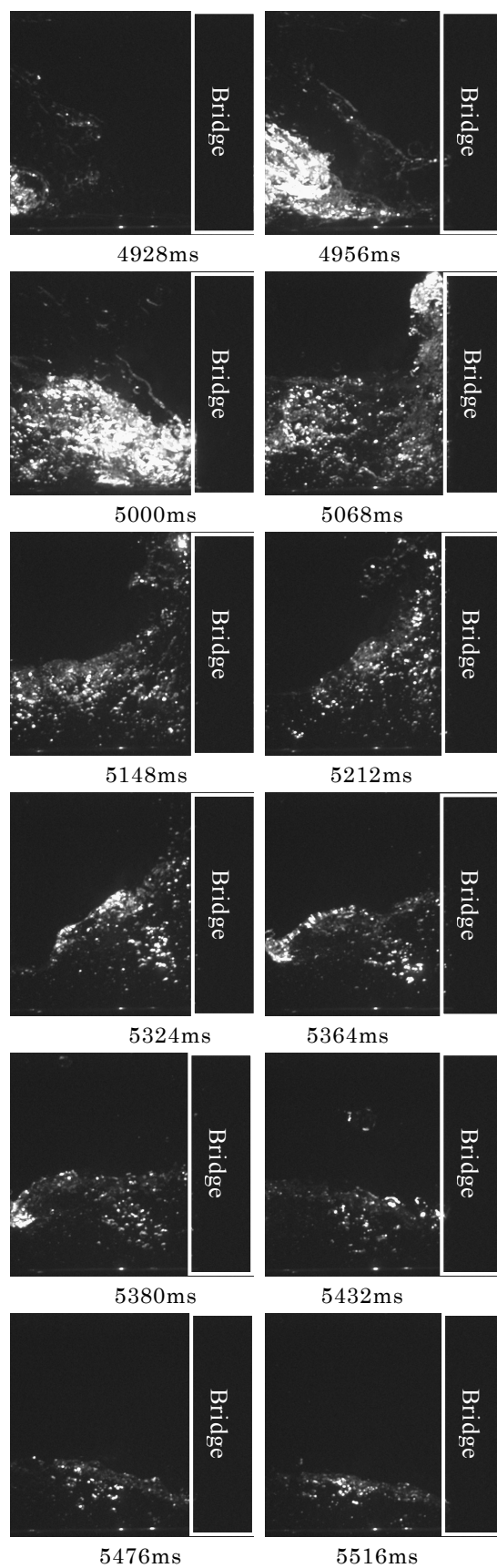


図 4-13 ブリッジへの打込水映像
(後方配置、L1 断面)

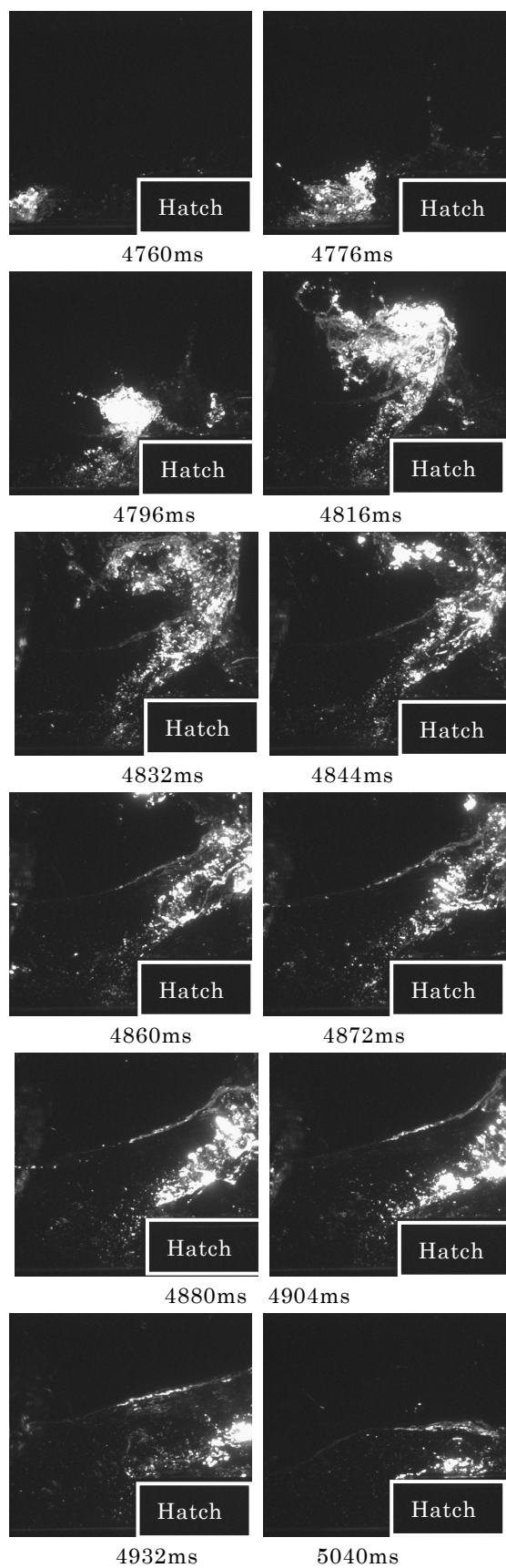


図 4-14 ハッチへの打込水の映像
(カメラ前方配置、L1 断面)

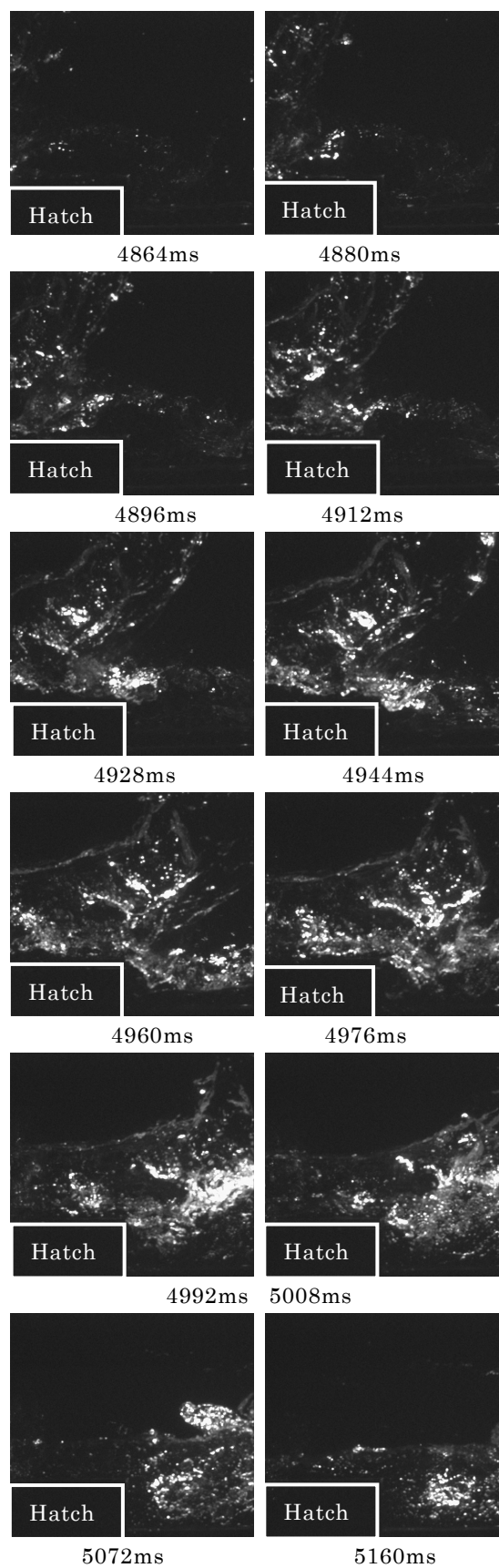


図 4-15 ハッチへの打込水の映像
(カメラ中央配置、L1 断面)

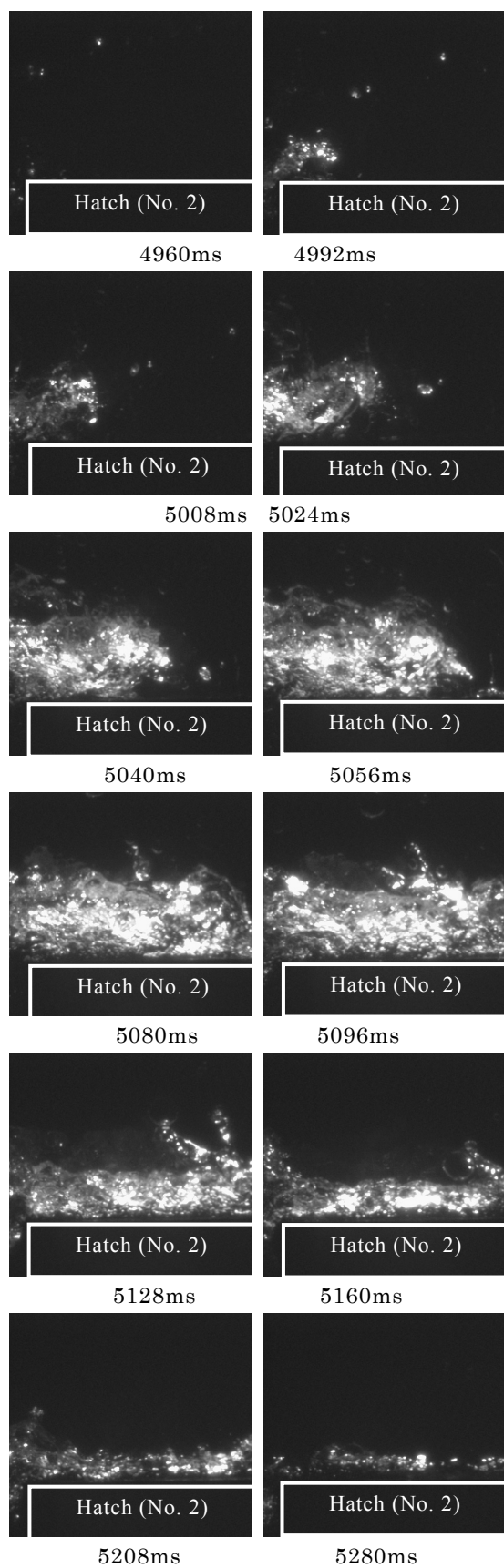


図 4-16 ハッチへの打込水の映像
(カメラ後方配置、L1 断面)

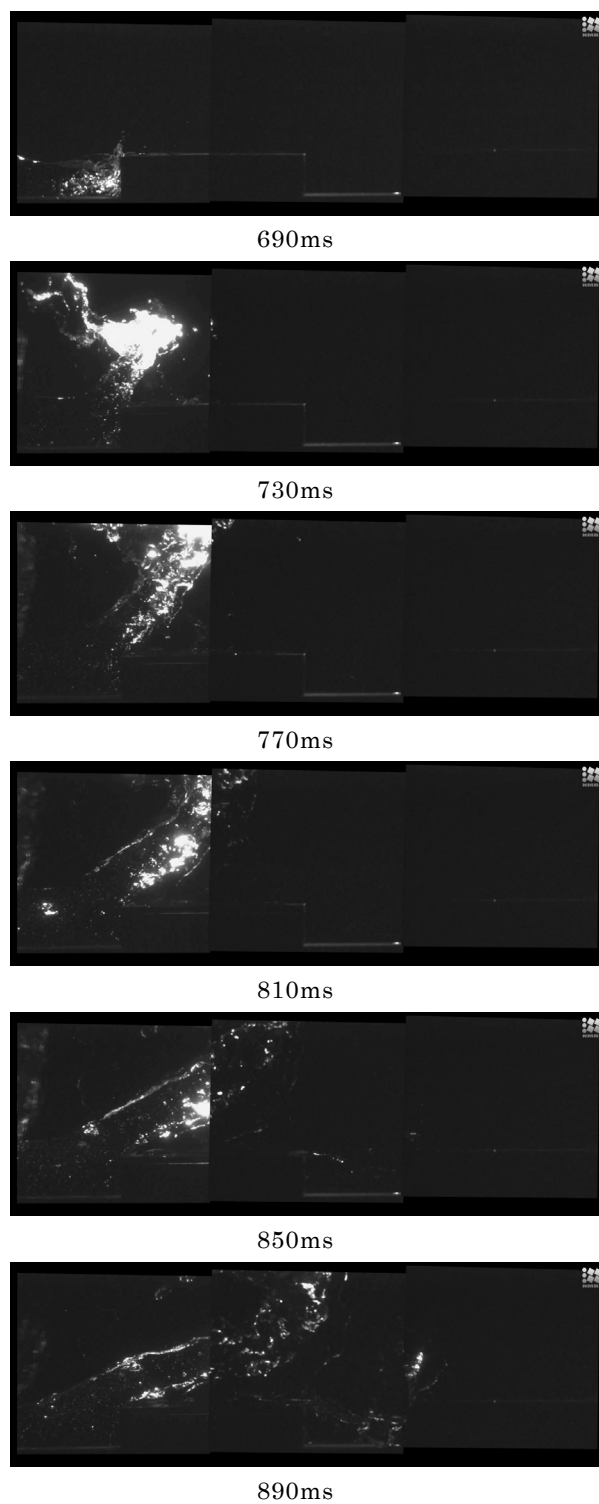


図 4-17(a) ハッチへの打込水の映像
(統合画像その1、L1 断面)

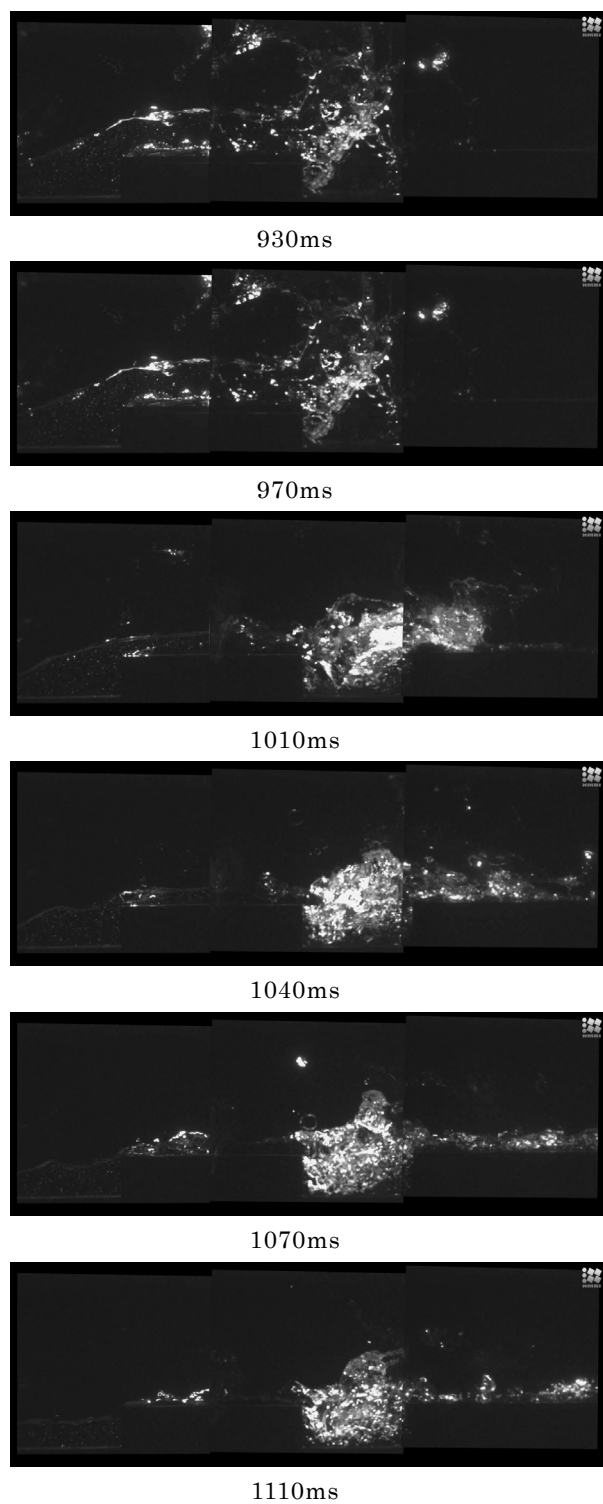


図 4-17(b) ハッチへの打込水の映像
(統合画像その2、L1断面)

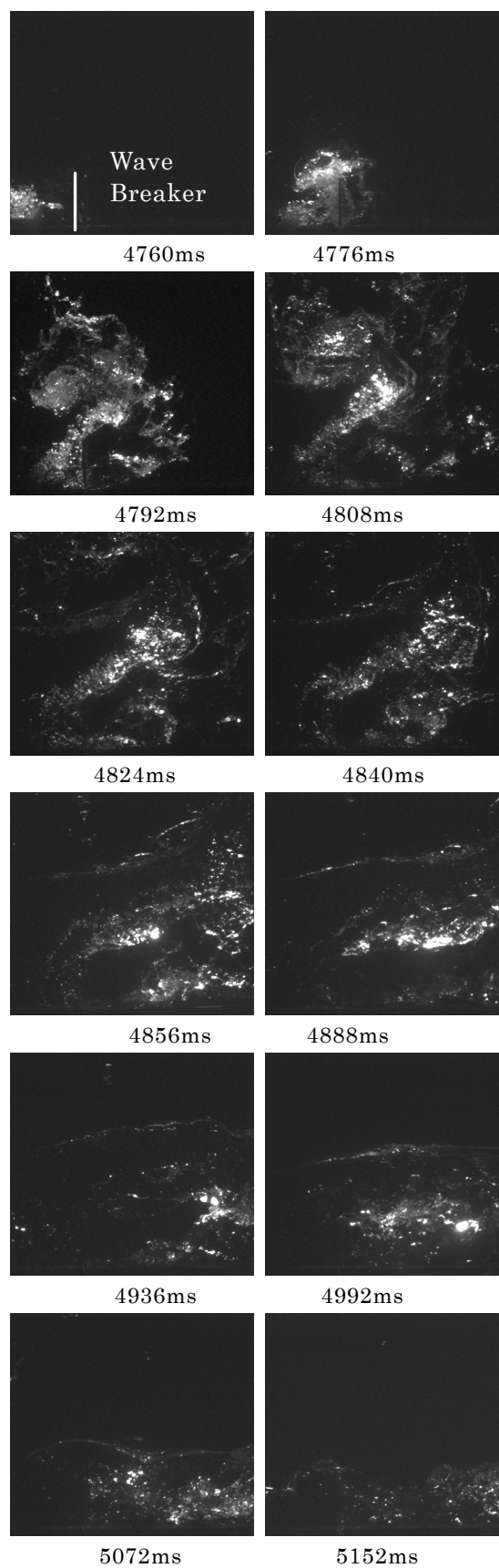


図 4-18 遮波板への打込水の映像 ($t=1.5\text{mm}$
 $h=30\text{mm}$) 前方配置、L1断面

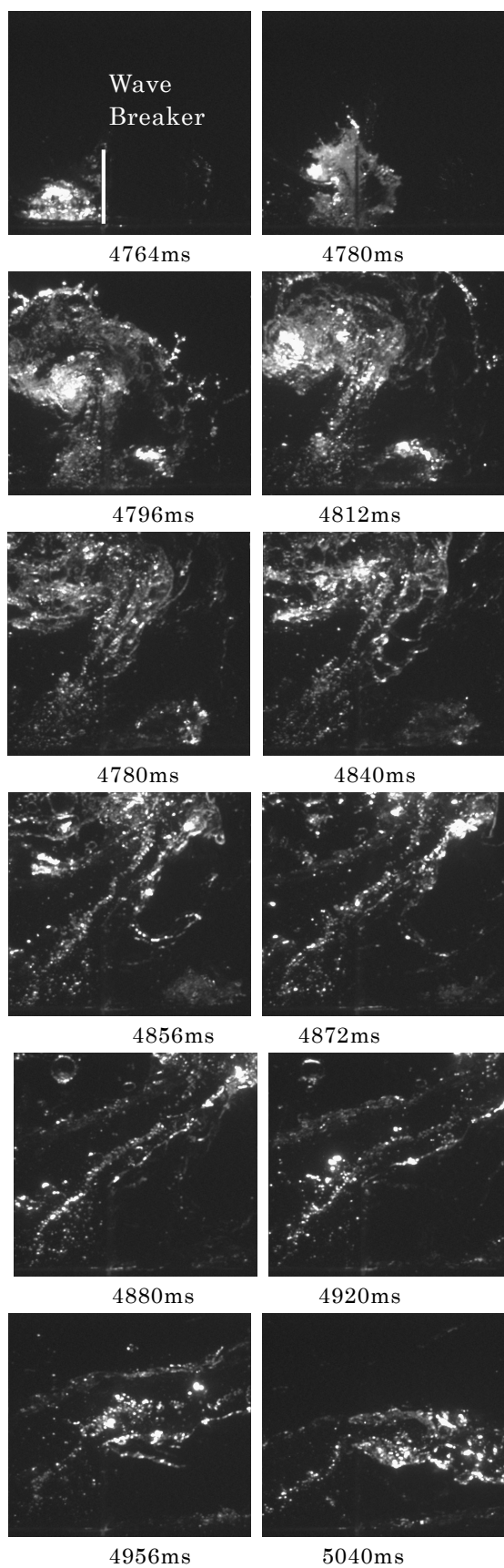


図 4-19 遮波板への打込水の映像 ($t=1.5\text{mm}$
 $h=50\text{mm}$) 前方配置、L1 断面

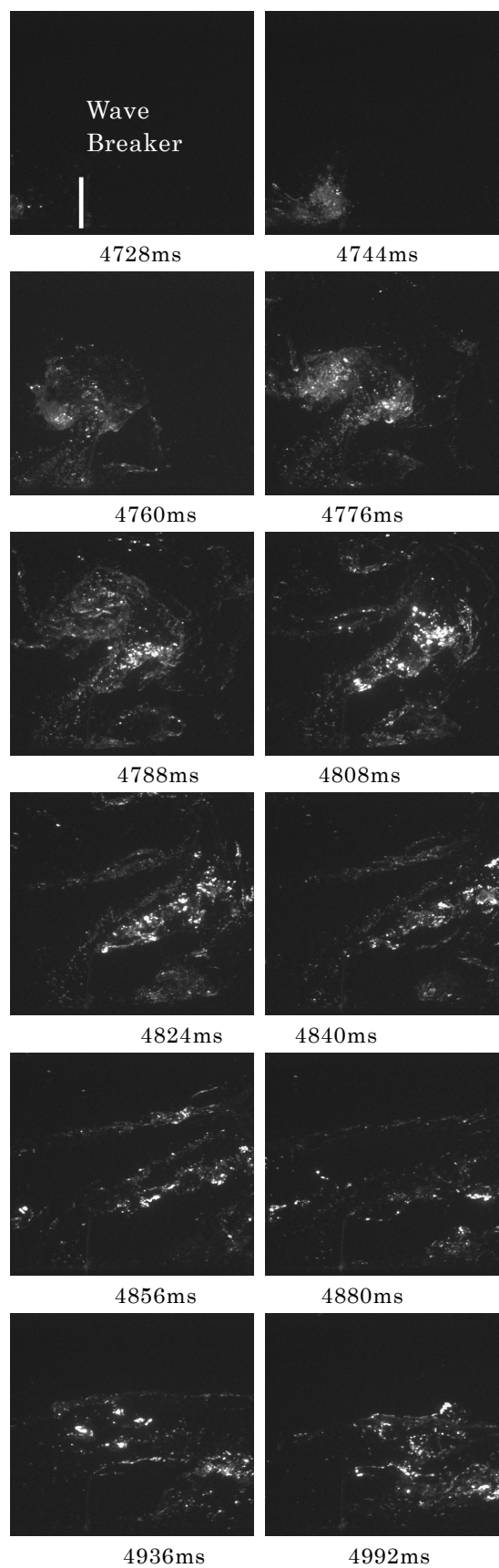


図 4-20 遮波板への打込水の映像 ($t=0.5\text{mm}$
 $h=30\text{mm}$) 前方配置、L1 断面

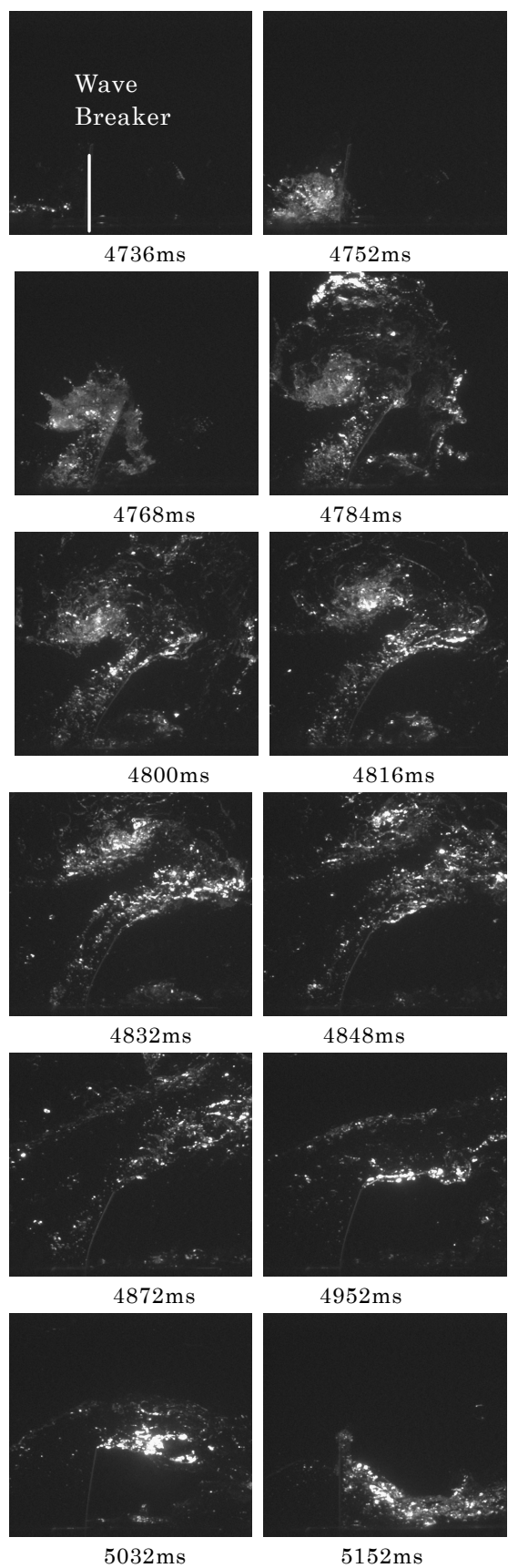


図 4-21 遮波板への打込水の映像 ($t=0.5\text{mm}$
 $h=50\text{mm}$) 前方配置、L1 断面

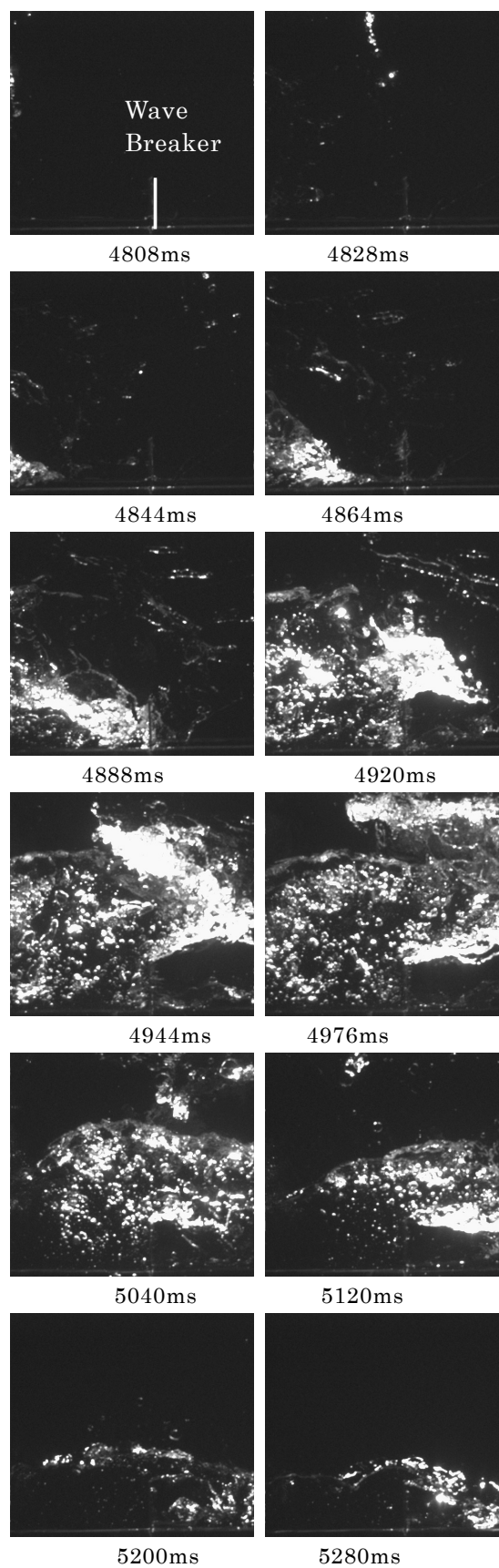


図 4-22 遮波板への打込水の映像 ($t=1.5\text{mm}$
 $h=30\text{mm}$) 後方配置、L1 断面

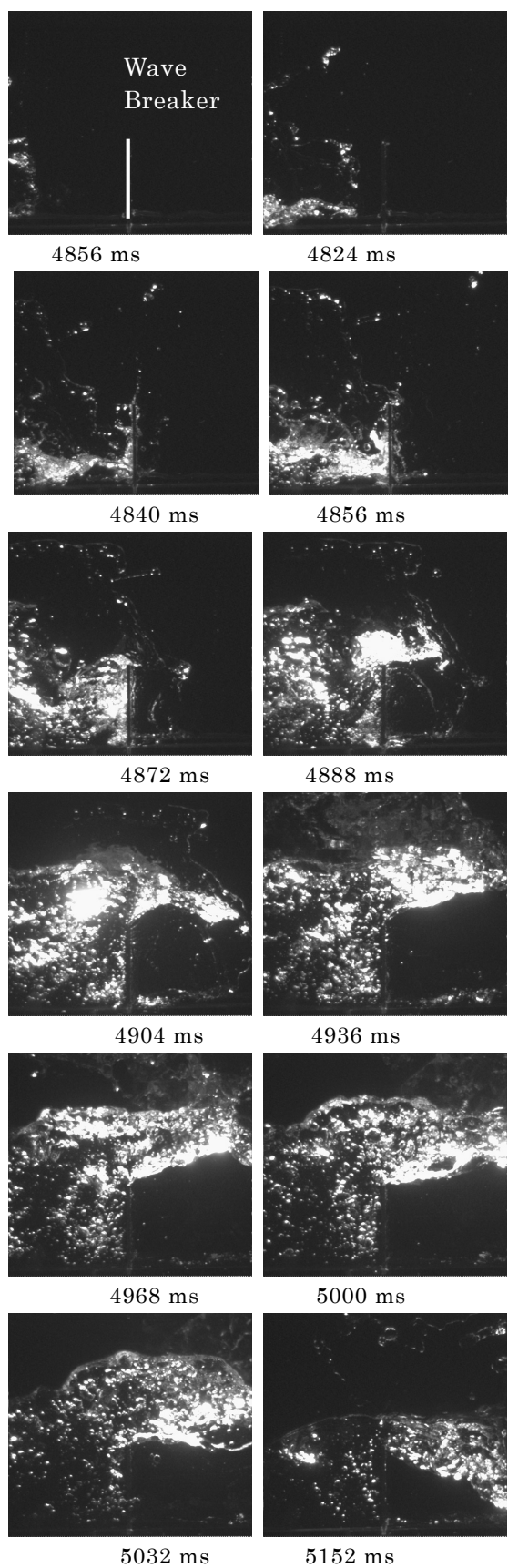


図 4-23 遮波板への打込水の映像 ($t=1.5\text{mm}$
 $h=50\text{mm}$) 後方配置、L1 断面

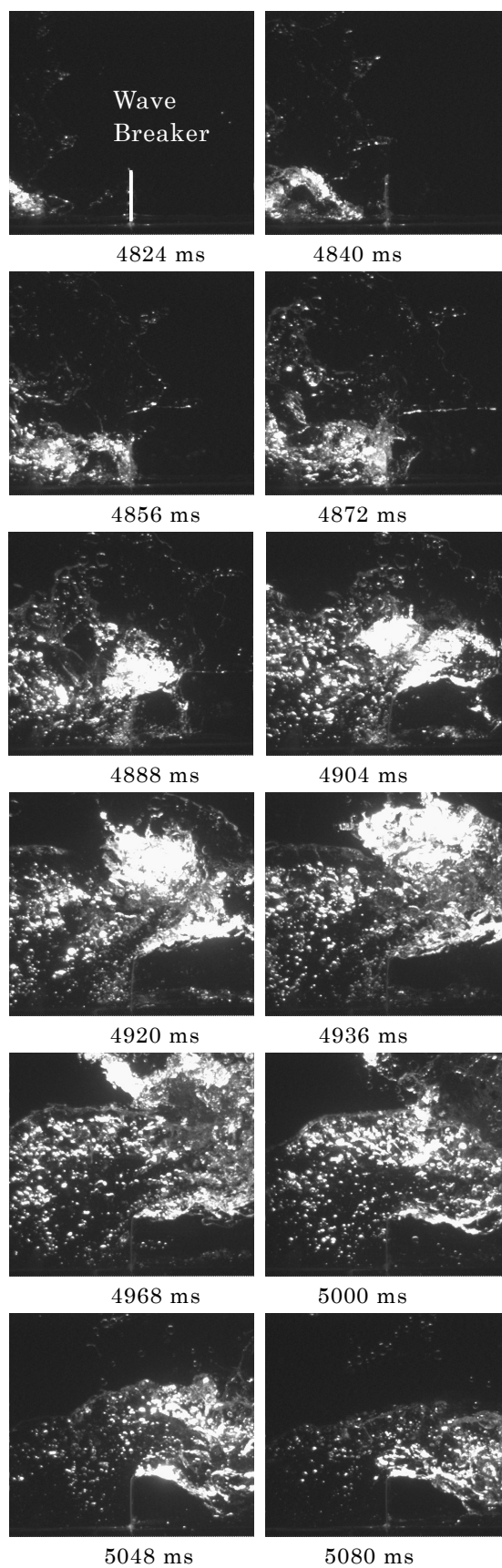


図 4-24 遮波板への打込水の映像 ($t=0.5\text{mm}$
 $h=30\text{mm}$) 後方配置、L1 断面

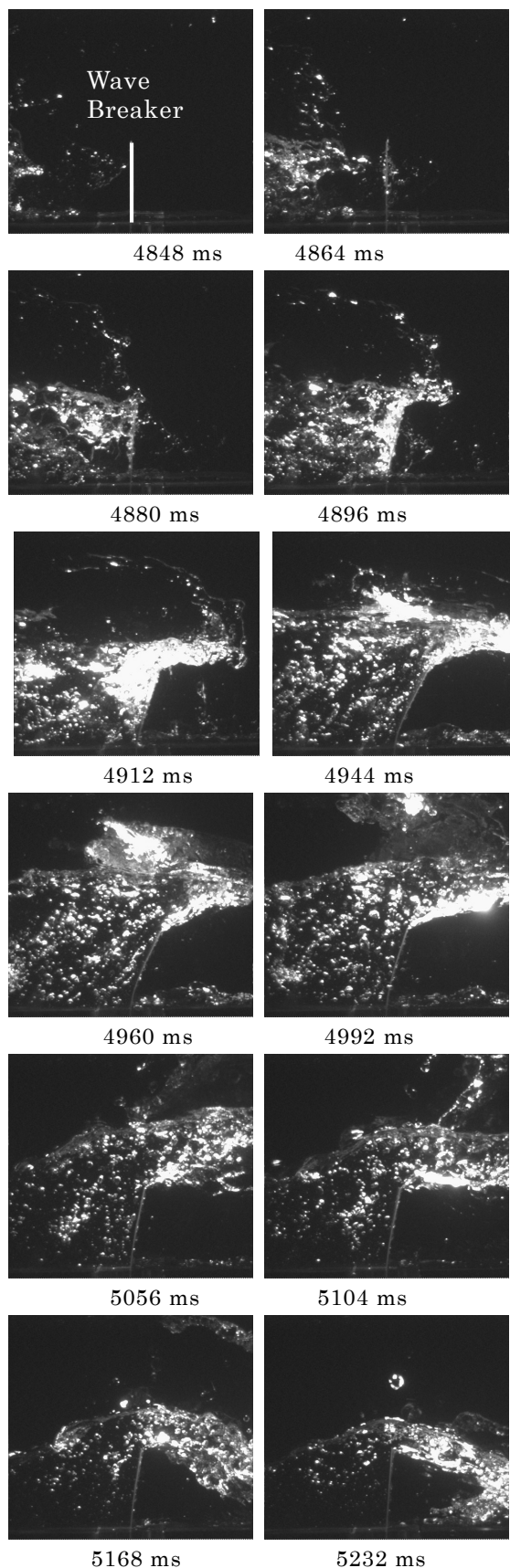


図 4-25 遮波板への打込水の映像 ($t=0.5\text{mm}$
 $h=50\text{mm}$) 後方配置、L1 断面

(4) 遮波板の弾性変形 ($t=0.5\text{mm}$, $h=50\text{mm}$ の場合)

アクリル製遮波板への打込水の撮影画像から、遮波板の弾性変形量を読み取った。結果の一例を表 4-1 ならびに図 4-26 に示す。これらは図 4-27 に示す検定板画像と打込水画像の合成画像から目視で読み取ったものである。検定板の格子間隔が 1cm であるため、読み取り精度は 1mm 程度であるが、粒子法による流弾性解析コードの検証用データとしては十分な精度であると考ええる。

表 4-1 遮波板の変形量 (遮波板前方配置)

Frame No.	Time(sec)	撓量(mm)
150	0.6	0
160	0.64	3
163	0.652	9
165	0.66	13
170	0.68	16
175	0.7	17
180	0.72	16
185	0.74	15
190	0.76	13
200	0.8	11
210	0.84	9
220	0.88	7
230	0.92	5
240	0.96	2
250	1	3
260	1.04	1
270	1.08	1

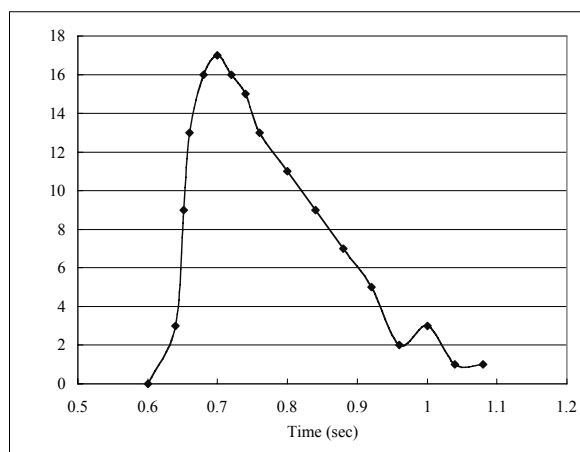


図 4-26 遮波板の弾性変形の時間波形
(遮波板前方配置)

5. 結 言

海上技術安全研究所では、平成14年度、15年度、16年度の3カ年にわたり、甲板打込水の可視化計測を実施し、打込水の挙動の理解に資する膨大な高速度ビデオ映像を取得した。また同時に入射波、船体運動、衝撃水圧、衝撃荷重等の計測を行った。これらの力学的計測項目は、高速度ビデオ映像と同期がとれており、打込水による衝撃現象を研究する上で、貴重なデータが得られた。また、高速度ビデオ映像のPIV解析から、定量的な流場のデータも取得した。これらのデータは粒子法等の数値計算法の検証に活用できるものである。以下、本研究の成果を具体的に列挙する。

平成14年度に実施した可視化計測では、2次元水槽に設置した台上へ打ち込む規則波の挙動を計測対象に、自由表面を有する高速非定常流れの3次元可視化計測手法を開発した。また、この可視化計測手法を用い、計算コード検証用の次の水槽試験データを取得した。

- (1) 2次元打込水の撮影画像とそのPIV解析による中央断面内の速度場データ
- (2) 3次元打込水の撮影画像とそのPIV解析による5断面内での2次元速度場データ
- (3) 撮影画像と同期の取れた打込台上での衝撃水圧

続いて平成15年度には、平成14年度に開発した可視化計測手法を活用し、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た。本計測は難度が高いため、水槽実験の実施にあたっては、

- (1) 可視化計測用の模型船の製作
- (2) 模型船に搭載する高速度ビデオカメラ等の光学系の設計ならびに検定
- (3) CCD上での座標を実空間座標への対応させる写像関数の計算
- (4) 種々の光学用部品、鏡面、カメラを固定するための機材、シート状光源の延長用光ファイバー等の準備
- (5) 高速度ビデオカメラの撮影可能時間を4秒から8秒に延ばすためのメモリー増設
- (6) 模型船の艤装、重量ならびに慣動半径の計測・調整
- (7) 曳航台車、造波機、高速度ビデオとストロボ、その他の計測装置を一台の計算機で集中制御するシステム開発（プログラムの著作権登録済み）
- (8) 水圧計較正、パネルゲージの製作・較正、

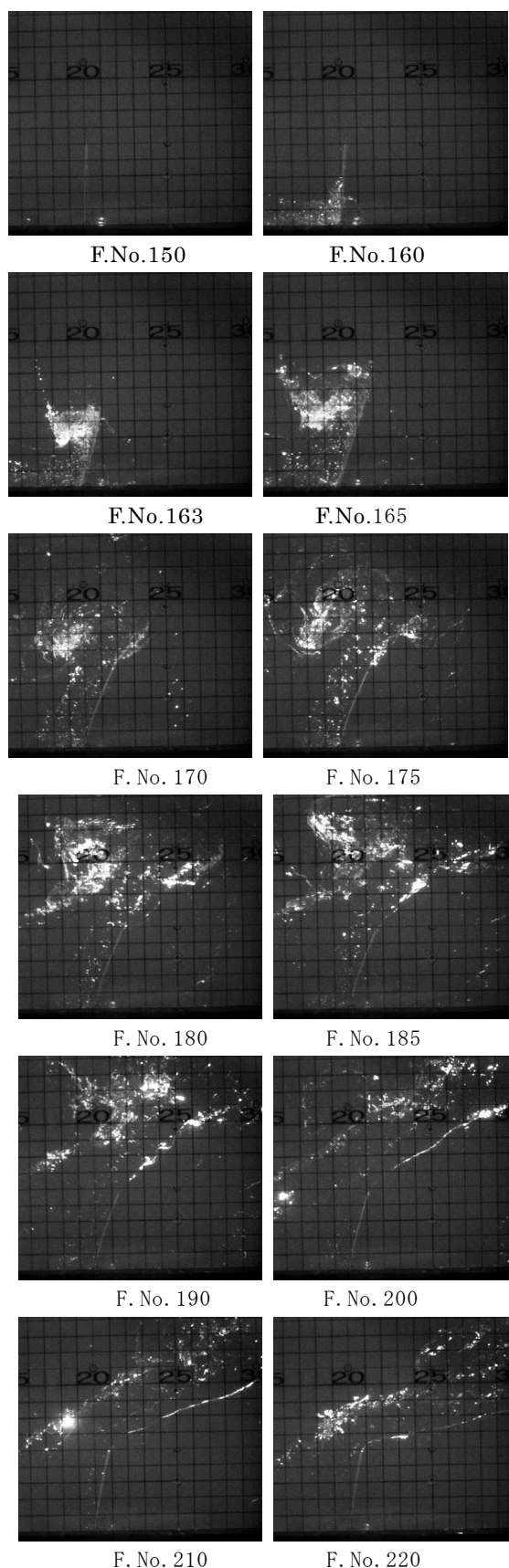


図 4-27 検定板画像と高速度ビデオ映像との合成図（遮波板前方配置）

水位計較正等、力学的計測項目の準備

(9) 画像データ保存用大容量 HD の手配

(10) トレーサー粒子の散布方法の模索

等の準備を入念に行った。実験は海技研 1 号館内の動揺水槽において、準備期間も含めると 4 月から 9 月中旬まで約半年かけて実施し、200GB 以上の膨大な計測データを取得した。

また平成 15 年度の後半には以下の画像解析を実施し、可視化実験から定量的な流場計測値を得た。

- (1) 全撮影画像について 2 次元 PIV 解析を実施
- (2) 2 次元 PIV 解析結果を Tecplot 形式に変換
- (3) 画像データ上に速度ベクトルを重ねてプロットした映像の製作（動画）
- (4) 逆写像による撮影画像の歪み補正と実座標系との対応付け
- (5) 打込水の前方画像と後方画像を統合した映像の製作（動画）
- (6) 水圧、衝撃荷重、運動等の力学的計測項目の解析と作図

最終年度には、甲板上に構造物が存在する場合のより複雑な打込水挙動の観察を行うため、ブリッジ、ハッチ、避波板の 3 種類の模型を製作して模型船に設置し、それらにより攪乱を受ける打込水の挙動を観察することを目的とした可視化実験を実施した。実施にあたっては甲板上構造物模型の製作から始め、昨年度と同様の実験準備を入念に行った。実験は昨年度と同じ動揺水槽において、準備期間も含めると 4 月から 8 月末まで 5 ヶ月かけて実施し、200GB 以上の膨大な画像データを取得した。本実験により次のデータが得られた。

- (1) ブリッジ、ハッチ、避波板の 3 種類の甲板上構造物により攪乱を受ける甲板打込水の高速度ビデオ映像
- (2) 映像と同期のとれた、入射波、船体運動、ブリッジに働く衝撃荷重と衝撃モーメント、No. 1 ハッチカバーに働く衝撃圧の計測値
- (3) 甲板打込水の衝突による弾性避波板の撓み量（画像から計測）
- (4) No. 1 ハッチと No. 2 ハッチへの打込水の全容が観測できる統合映像

本研究は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構の基礎的研究制度により東京大学、横浜国立大学と連携して実施して来たもので、研究成果の普及を図るため粒子法コードユーザグループを結成し、開発した粒子法コードを公開した。また、本研究で得られて甲板打込水の可視化実験データについても整理・蓄積し、甲板打込水の可視化実験データベースを構築した。このデータベースは粒子法コードユーザグル

ープ会員に公開しており、

<http://dynaxserve.nmri.go.jp/MPSCUG/VisualDB/index.html>

からアクセスできる。また非会員の方でも、PIV 解析結果、水圧計測結果の数値データ、動画を除いて閲覧可能である。

謝 辞

本研究は鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「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、お世話になった支援機構の関係各位ならびに評価委員の先生方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 沢田博史、星野邦弘、谷澤克治：高速度カメラを用いた甲板上打込水挙動の PIV 計測，第 31 回可視化情報シンポジウム講演論文集，2003 年 7 月
- 2) 沢田博史、星野邦弘、谷澤克治：2 次元水路内に設置した台上への打込水の可視化計測，第 3 回海上技術安全研究所研究発表会講演集，2003 年 6 月
- 3) 谷澤克治、沢田博史、星野邦弘、辻本勝：粒子法コード検証のための甲板冠水の可視化実験，日本造船学会講演会論文集 第 2 号，2003 年 11 月
- 4) 越塚誠一、酒井譲、谷澤克治：粒子法による船舶波浪衝撃解析手法の開発、九州大学応用力学研究所研究集会報告集、2003 年
- 5) 谷澤克治、沢田博史、星野邦弘、辻本勝：船首甲板上への打込水の 3 次元挙動について，第 53 回理論応用力学講演会講演集、2004 年
- 6) Tanizawa K., Sawada H., Hoshino K., Tsujimoto M.: Visualization of shipping water on running ship foredeck in regular head seas, Proc. 14th ISOPE Conference, 2004, 6
- 7) 谷澤克治、沢田博史、星野邦弘、辻本勝：甲板打込水の数理解析手法の妥当性について，九州大学応用力学研究所研究集会報告 15ME-S6, 2004 年 3 月
- 8) 星野邦弘、沢田博史、辻本勝、谷澤克治：PIV/PTV による甲板打込水の流場解析，可視化情報シンポジウム講演論文集，pp435-438, 2004 年 7 月
- 9) 沢田博史、星野邦弘、辻本勝、谷澤克治：規則波中を航走する船舶の甲板打込水の可視化技術について，可視化情報シンポジウム講演論文集，pp439-442, 2004 年 7 月
- 10) 沢田博史、辻本勝、谷澤克治、星野邦弘：甲板打込水の可視化技術，第 4 回海技研研究発表会 講演集，pp211-214, 2004 年 7 月
- 11) 星野邦弘、沢田博史、辻本勝、谷澤克治：画像解析による甲板打込水の流場計測，第 4 回海技研

- 研究発表会講演集, pp215-220, 2004年7月
- 12) 谷澤克治, 沢田博史, 星野邦弘, 辻本勝: 粒子法コード検証のための甲板冠水の可視化実験, 第2報, 日本造船学会講演会論文集, 2004年11月
 - 13) Tanzawa, K., Sawada, H., Hoshino, K., Tsujimoto, M., Koshizuka, S.: Experimental and numerical study of shipping water impact on running ship foredeck in regular head seas., Proc. 6th ICHD, pp125-134, 2004年11月
 - 14) 谷澤克治, 沢田博史, 星野邦弘, 辻本勝, Nicolas Leconte: 甲板打に構造物が存在する場合の打込水挙動の可視化実験, 一空気巻込に起因する圧力振動の数理解析一, 九州大学応用力学 研究所研究集会報告-浮体と流体力学に関する数理解析, 2005年1月
 - 15) 柴田和也, 越塚誠一, 谷澤克治「船体の強制運動を伴う海水打込の粒子法による3次元数値解析」日本船舶海洋工学会講演会論文集, pp. 59-60, 2005年11月