

機関番号：14401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760667

研究課題名 (和文) 大変形する波面に対応した画像計測システムの開発

研究課題名 (英文) Development of image measurement technique for large deformed free surface

研究代表者

眞田 有吾 (SANADA YUGO)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：30467542

研究成果の概要 (和文)：

水面反射光法 (RLD 法) は拡散面光源からの光が水面で鏡面反射することを利用し、水面にパターンを投影し、その反射像の変位から波高分布を再構成する手法である。本研究では RLD 法のダイナミックレンジを拡大することを目的として、反射像が大きく変形する場合に対応した反射像追跡アルゴリズム、および反復型波高分布再構成アルゴリズムの開発を行った。

研究成果の概要 (英文)：

Reflected Light Distribution method (RLD method) is a method for 3-D wave field measurements by using reflected light image from diffused light source. The unique feature of this method is that it allows free surface mapping by single camera without seeding materials on the water surface. In this study, we developed two techniques for extending dynamic range of the RLD method. The first is wave height reconstruction technique by using iterative calculation. The second is new tracking method for large deformed reflected light images.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：推進・運動性能

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：画像計測，可視化，波面計測，波形解析，水槽試験法

1. 研究開始当初の背景

従来からの水槽試験では、容量式やサーボ式の波高計を用いた点計測が広く行われている。波高計を使えば、ある1点における波高は精度良く計測できるが、広い領域内の波高分布を同時に取得することは困難である。そこで画像を用いて、空間内の波高分布を一

度に計測する試みがこれまでに数多く行われている。従来の画像による波高計測法は、水面上ないしは水中にトレーサーや染料を散布する必要があった。これは、小型水槽ではさほど問題とならないが、数百メートル級の大規模曳航水槽では多大な労力を必要とする。研究代表者らは、拡散面光源からの光が

鏡面反射することを利用し、波高分布を取得できる水面反射光法（RLD 法）を提案している。この手法は、色情報で符号化されたパターンを拡散光源で水面に投影し、静水面と波面での反射像の移動量から波面勾配分布を計測し、波高分布を再構成する手法である。これまでに、大阪大学船舶海洋試験水槽で模型船の航走波計測に RLD 法を適用し、計測範囲は限定的ながらも有望な結果が得られている。水面反射像は静水時と波面形成時とを比較すると、平行移動と近似できないほど大きく変形するため、PIV(粒子画像流速測定法)に用いられる直接相互関連法のような一般的な手法を適用することが困難である。従来の RLD 法では、反射像上の特徴点を目視で抽出し、移動量は特徴点の位置の差から算出していたこの作業は一部自動化ができているものの、実際的水槽では波面傾斜が大きい場合やノイズの混入、周囲環境光の映り込み等で反射像に欠損が生じるため解析を完全に自動化する上で障害となっている。また、従来は計測領域内の平均波高をゼロと近似し定式化していたが、平均波高がゼロでない場合には問題となる。本研究では、反射像が大変形する場合に対応した自動追跡アルゴリズム、および反復型波高分布再構成アルゴリズムを開発し、ダイナミックレンジを拡大することで、RLD 法を実用性の高いシステムとすることをめざす。

2. 研究の目的

本研究では、水面反射光法による計測の冗長性を高め、実用化を加速するため、以下の項目を重点的に実施した。

- ・大変形する水面反射像に対応した追跡アルゴリズムの開発
- ・反復型波高分布再構成アルゴリズムの開発
- ・水面反射像シミュレータの開発と最適なカメラ配置の検討

従来の RLD 法で用いていた反射像の移動量からの勾配算出式は、計測領域内の平均波高がゼロでない場合に破綻が生じる。そこで、平均波高がゼロでない場合にも対応するため、計測原理の再定式化を行うとともに、反復型波高分布再構成アルゴリズムを構築する。また、反射像が大変形する場合、特に複数に分裂する場合などに対応した特徴点追跡アルゴリズムを開発するとともに、実験時に可能な限り変形の小さい反射像を得られるよう検討するため、あらゆる状況を考慮できる水面反射像シミュレータを構築する。

3. 研究の方法

- (1) 光線追跡法による水面反射像シミュレ

一タの構築

拡散光源に対応した光線追跡法による反射画像のシミュレータを構築し、カラー符号化された複数の種類のパターン画像を用いて、仮想的な水面反射像を作成する。規則波、Wigley 航走波を既知の波面として与え、この波面形状に対し拡散光源からカメラまでの光線追跡シミュレーションを行い作成する。得られた仮想水面反射像の変形に応じてクラス分けを行う。

- (2) 大変形する水面反射像に対応した特徴点追跡アルゴリズムの開発

特徴点追跡アルゴリズムは二つの部分に分かれる。一つはカラーパターンからの特徴点抽出と、静水面と波面での特徴点間の対応付けである。本研究では、あらゆるカラーパターンに対応可能な特徴点抽出アルゴリズムを開発する。また、反射像の変形時には、特徴点の分裂や消失が発生するため、これに対応した対応付けアルゴリズムを構築する。

- (3) 反復型再構成アルゴリズムの開発

従来 RLD 法では、計測領域内の平均波高がゼロであると仮定し、近似を行うことで波面勾配を一次的に算出していた。しかし、平均波高がゼロでない場合はこの計算が破たんをきたす。そこで、平均波高がゼロとまらない場合にも対応し、より高精度に波高および波面勾配を算出するため、反復型再構成アルゴリズムを導入する。

- (4) 光源および画像取得システムの構築

装置の小型化と画像取得範囲を拡大するため、拡散光源として無機 EL シート光源パネルを導入する。無機 EL シート光源は従来のスクリーンと同程度の厚さながら、従来のプロジェクターとスクリーンの機能を一体化でき、かつ光源面積を拡大することができる。

- (5) 曳航水槽における規則波および航走波試験による検証

(4)で構築した計測システムを曳航水槽に設置し、規則波および航走波計測を行う。これよりシステムの有効性の確認、ならびに上記アルゴリズムの検証を行う。実験には大阪大学船舶海洋試験水槽を使用し、Wigley 模型船を使用する。超音波波高計を用いて同時計測を行う。画像取得後、上記アルゴリズムで波面の再構成を行い、有効性を確認する。

4. 研究成果

- (1) 反復型再構成アルゴリズムの開発

カメラ校正を静水面上 ($z=0$) で行った場合、カメラからは波面上の反射点 P (ここで

は、「真の反射点」とよぶ)は、あたかもカメラの光軸と $z=0$ の交点 P' に見える。 P' をここでは「見かけの反射点」と呼ぶことにする。RLD法で撮影画像から直接計測するのは、静水面時の反射点 P_0 、波面形成時の見かけの反射点 P' の位置である。従来は、波高が十分小さいと仮定し、 P と P' は近似的に同一の点であるとみなして波面勾配と波高を1回の計算で求めていた。しかし、真の反射点 P は O_c と P' を結ぶ直線上に必ず存在するので、反復計算を行うことで求めることができる。開発したアルゴリズムを図2のフローチャートで示す。

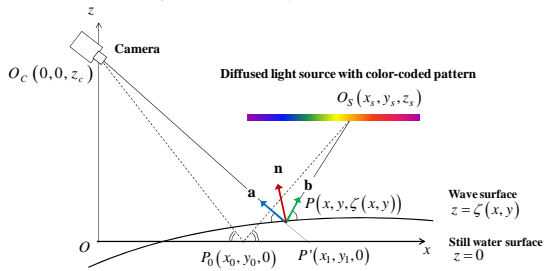


図1 水面反射光法の計測原理

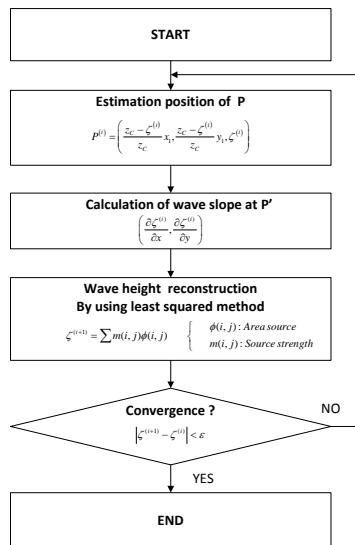


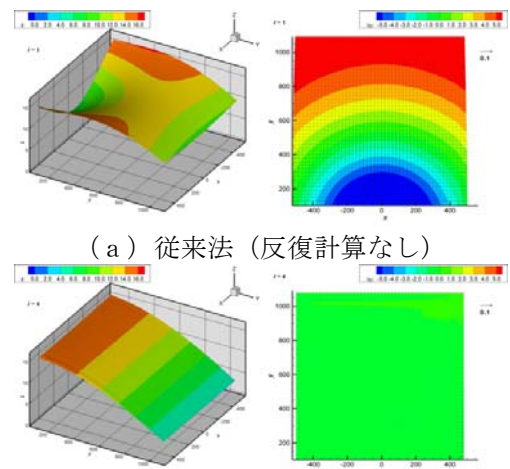
図2 反復型再構成法のフローチャート

本手法の有効性を確認するため、シミュレーションデータによる検証を行った。まず、規則波を対象とし、両振幅 $\zeta_a = 32 \text{ mm}$ 、波長 $\lambda = 5120 \text{ mm}$ を想定した。結果を図3に示す。

図3の左は再構成された波高分布、右は正解値との残差である。従来法では、本来なら存在しない緩やかな傾斜が付加されているが、本手法ではこの緩やかな傾斜が除去され、良好に再構成されていることがわかる。

つづいて、Wigley 航走波のシミュレーションデータをもとに従来法と本手法を比較した結果を図4に示す。従来法は本手法にくらべ

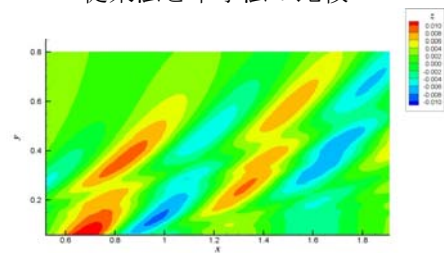
緩やかな傾斜が付加されていることがわかる。図5に図4の $y=0.5$ での比較を示す。本手法は正解値にきわめて近い値がえられていることがわかる。



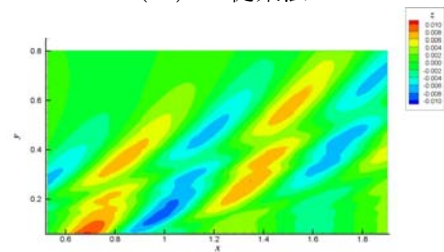
(a) 従来法 (反復計算なし)

(b) 本手法 (反復計算あり, 反復数4回)

図3 シミュレーションデータによる従来法と本手法の比較



(a) 従来法



(b) 本手法

図4 Wigley 船型の航走波の再構成例

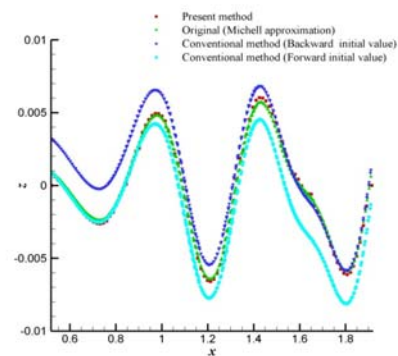


図5 従来法と本手法の比較 ($y=0.5$)

(2) カメラ校正法の改善

RLD法では、カメラ校正法にZhangの方法を用いた。Zhangの方法は、校正用ターゲットを移動させながら、対象のカメラで3回以上撮影することで、カメラの内部パラメータ、外部パラメータ、レンズ歪パラメータを推定できる。従来は校正用ターゲットを水面上で移動させながら複数回の撮影を行い、実験時に全てのパラメータを同時に求めていた。しかし、同一面内でターゲットを移動させた場合、特に内部パラメータが異常値をとることがある。本研究では内部パラメータおよび外部パラメータそれぞれの推定に適した校正用ターゲットを製作し、次の手順による改善を行った。実験前に、内部パラメータ用のターゲットを空間内で移動させ複数回撮影し、内部パラメータを推定しておく。実験時には、計測領域内に固定した外部パラメータ用のターゲットを撮影し、この撮影画像と予め求めておいた内部パラメータから外部パラメータを推定した。

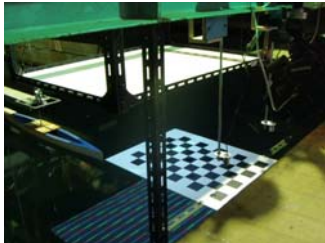


図6 校正用ターゲットの設置例

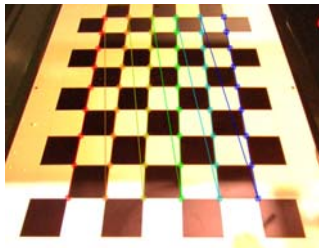


図7 ターゲットの自動認識結果

(3) 誤差要因についての検討とその影響評価

RLD法のシステム内部および外部の誤差要因を列挙し、それらが再構成波高分布に与える影響について調査した。

システム内部の誤差要因としては、(1)カメラ校正結果、(2)波高計の計測精度、(3)面光源の高さの計測精度、(4)再構成アルゴリズムの計算誤差があげられる。

システム外部の誤差要因(実験施設固有の誤差要因)としては、(1)水槽の静振、(2)曳航電車で用いられるレールの沈降が挙げられる。

検討の結果、従来の再構成法で付加されていた定傾斜が他の誤差要因に比べ最も影響が大きいことがわかった。

(4) 水面反射像シミュレータの構築

光線追跡法により仮想的な水面反射像を

作成するシミュレータを構築した。このシミュレータは、実際に使用するカメラのパラメータを使用し、カメラおよび光源位置は任意に設定可能である。このシミュレータで作成した仮想反射像の例をカメラと光源の配置イメージとともに図8に示す。得られた仮想反射像から、反射像の変形をできるだけ抑えるため、最適なカメラ配置を検討した。その結果、航走波計測の場合は、波頂線方向から撮影した場合が最も変形が少ないということがわかった。

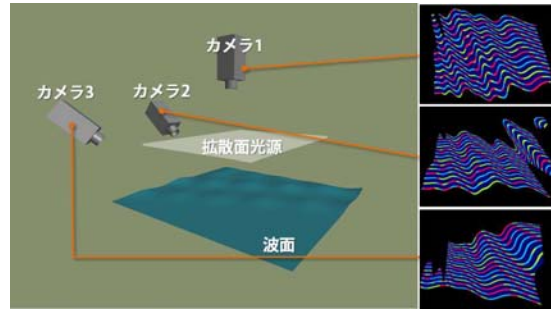


図8 異なる視点からの仮想水面反射像の例

(5) 水面反射像の特徴点追跡アルゴリズムの開発

水面反射像の大変形に対応した新しい特徴点抽出アルゴリズムと対応付けアルゴリズムを開発した。特徴点抽出アルゴリズムでは、はじめに閾値処理で輝度ブロックを抽出し、この輝度ブロックの輪郭を抽出、さらに輪郭をこれを囲む最小矩形で近似し、矩形の4頂点を特徴点とした。

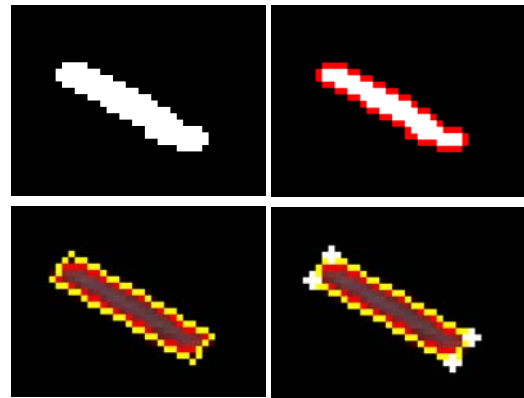


図9 特徴点抽出方法

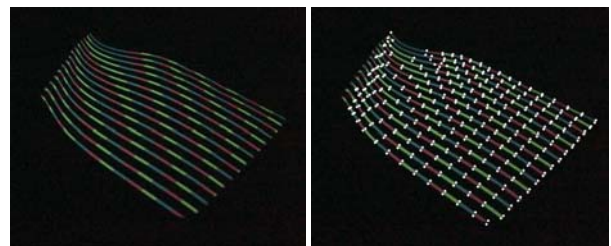


図10 特徴点抽出結果
(左：元画像，右：特徴点抽出後)

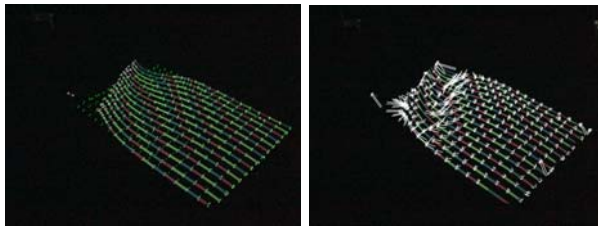


図 11 特徴点の対応付け結果
(左：静水面と波面の特徴点，
右：対応付け結果)

(6) 曳航水槽での検証

上記 (1) から (5) までの有効性を確認するため，大阪大学船舶海洋試験水槽にて，規則波計測ならびに Wigley 模型船の航走波計測を実施した。

①_r 規則波計測による検証

図 12 に規則波計測装置の例，図 13 に変位追跡結果，図 14 に再構成結果をそれぞれ示す。反射像の追跡が正しく行われ，波面が良好に再構成されていることが確認できる。計測範囲内に設置した超音波波高計との比較を図 15 に示す。振幅，位相ともに良好に一致していることが確認できる。

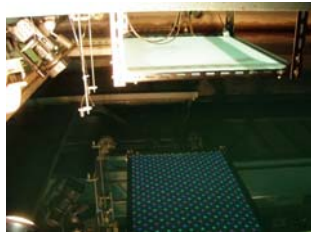


図 12 計測装置

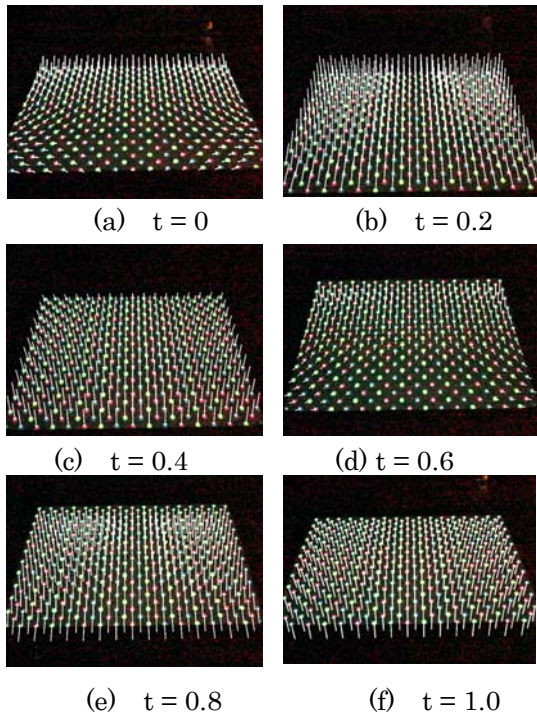


図 13 変位追跡結果 (t: Time [s])

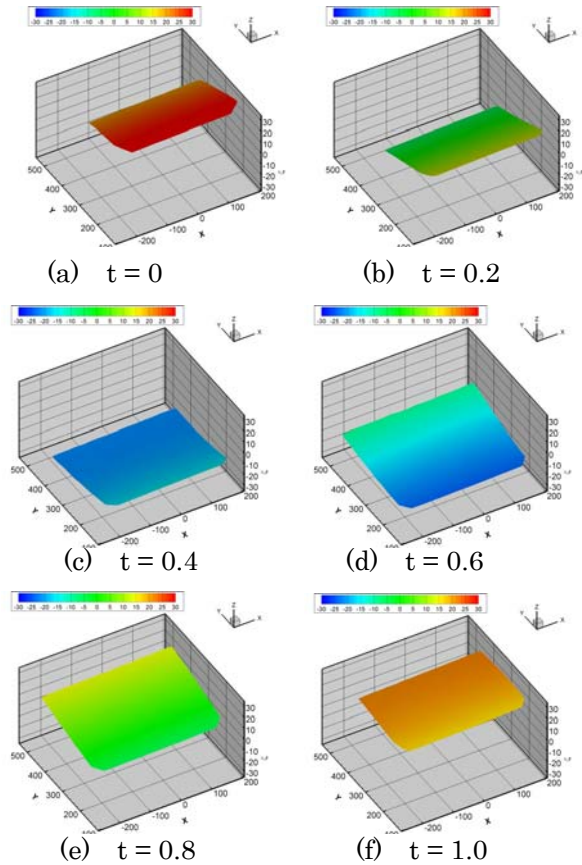


図 14 再構成結果 (t: Time [s])

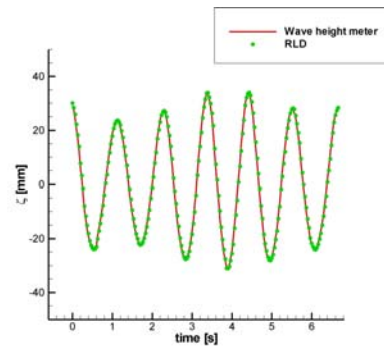


図 15 超音波波高計との比較

② 計測領域の拡大と航走波計測

計測領域をさらに拡大するため，本研究では大型 EL 光源を導入し，Wigley 模型船の航走波計測に適用した。図 16 に計測領域内に設置したカメラ校正用ターゲット，図 17 に大型 EL 光源を示す。

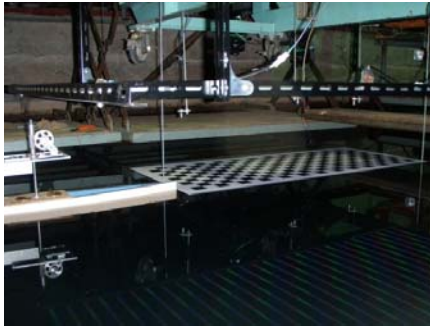


図 16 計測領域内に設置した校正用ターゲットと Wigley 模型船



図 17 大型 EL 光源

図 18 は航走波計測時に得られた反射像の特徴点抽出結果，図 19 は特徴点の対応づけ後に得られた変位追跡結果である．新しく開発したアルゴリズムによって，計測範囲を拡大した場合においても良好な追跡結果が得られた．

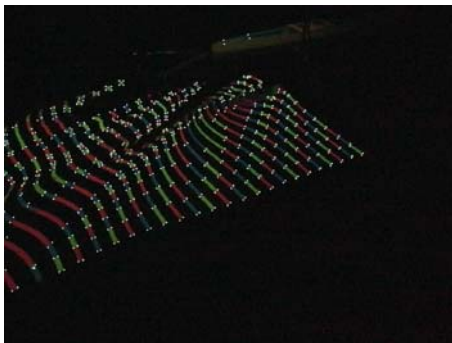


図 18 特徴点抽出結果

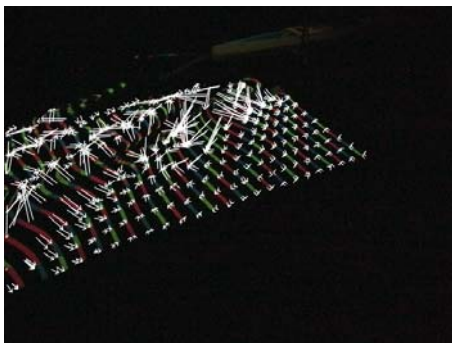


図 19 変位追跡結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者，研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

1. 眞田有吾，長屋茂樹，第 6 章 画像計測技術，日本船舶海洋工学会，推進性能研究会シンポジウム「水槽試験の現状と展望」，2010 年 12 月 17 日，神戸大学深江キャンパス総合学術交流棟 (神戸市)
2. 谷本憲治，眞田有吾，戸田保幸，水面反射光法を用いた計測における誤差要因に関する研究，No. 11, 455-458, 2010 年 11 月 16 日，神戸市産業振興センター (神戸市)
3. 原 英太郎，眞田有吾，戸田保幸，水面反射光法を用いた非定常波面計測-規則波計測への適用- 可視化情報学会誌 30, 349-354, 2010 年 7 月 21 日，工学院大学新宿校舎 (東京都新宿区)
4. 眞田有吾，高山明秀，原英太郎，戸田保幸，水面反射光法を用いた非定常波面計測法の開発 -反復再構成法の三次元への拡張-，日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 10 号 459-462, 2010 年 6 月 8 日，タワーホール船堀 (東京都江戸川区)
5. 原 英太郎，眞田有吾，戸田保幸，水面反射光法を用いた非定常波面計測に関する基礎的研究 日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 9K 号, 67-70, 2009 年 11 月 5 日，大阪大学コンベンションセンター (吹田市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

眞田 有吾 (SANADA YUGO)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号：30467542