

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 05 月 02 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22686081

研究課題名（和文）

損傷船舶の波浪中動揺シミュレーション開発と高度損傷時復原性評価法の構築

研究課題名（英文）

Development of a Numerical Simulation Method for Damaged Ships in Waves, and of an Advanced Damage Stability Assessment

研究代表者

橋本 博公 (HASHIMOTO HIROTADA)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30397731

研究成果の概要（和文）：衝突や座礁により損傷した船舶の安全性評価のため、粒子法を用いた損傷部に働く流体力推定とストリップ法を用いた非損傷部に働く流体力推定を組み合わせることで、損傷船舶の浸水時動揺シミュレーション手法を構築した。また、損傷区画を有する自動車運搬船模型を用いた水槽実験との比較により、構築した計算手法の妥当性を確認した。本手法を用いることで、現行の損傷時復原性規則では取り扱われていない浸水時の動的影響が考慮可能となった。

研究成果の概要（英文）：For the advanced damage stability assessment, a numerical simulation method for damaged ships was developed by combining the strip method and the MPS method which are used for the estimation of hydrodynamic forces on intact and damaged parts respectively. Through the comparisons with a model experiment using a damaged pure car and truck carrier, it is confirmed that the proposed method can predict the dynamic behaviours of damaged ships under flooding condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2012年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	9,300,000	2,790,000	12,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：損傷時復原性、浸水、滞留水、粒子法、MPS法、ストリップ法、時間領域シミュレーション、残存性

### 1. 研究開始当初の背景

衝突や座礁等の事故によって船舶が損傷・浸水した場合に、乗船者の安全性を担保し、海洋環境への影響を最小限に抑えるために、IMOにより国際条約（SOLAS条約）が制定されている。2009年に発行された改訂SOLAS条約では、損傷船舶の安全性確保に対

する社会的要求の高まりを受けて、損傷時復原性規則が大幅に改正された。この改訂において、貨物船と旅客船に対する損傷時復原性規則は、確率論的手法に基づく機能用件化基準に一本化された。この基本コンセプトは、船体の各水密区画の損傷確率と水密区画が浸水した場合の船全体の残存確率の積の和

が、ある要求値以上であることを求めるものである。

損傷確率については、過去の損傷統計に基づいて損傷範囲および発生頻度が決められているが、水密区画浸水時の残存確率については、最終的な平衡状態を準静的に取り扱うものとして現行基準で定められている。この方法では、転覆・沈没リスクを大きく左右する要因である浸水過程の動的影響が無視されており、損傷時の転覆・沈没リスクを過小に評価する危険性がある。また、浸水後の残存性に影響の大きい波浪影響を考慮することができない。物理則に則したより信頼性の高い安全性評価のためには、損傷発生時点から転覆・沈没を含めた最終状態に至るまでの船体運動および耐波性能を正確に予測できる時間領域シミュレーションが必要となる。

## 2. 研究の目的

衝突や座礁により損傷した船舶の残存性（転覆・沈没に至らない性能）を確保することは船舶設計上の重要課題となっているが、船舶の転覆や沈没自体が強非線形な過渡現象であり、これに非定常な浸水が伴うため、その予測は極めて困難である。また、船内への浸水と船体運動は相互に大きく影響するため、浸水と船体運動の連成解法が必要となる。本研究では、現行の損傷時復原性規則では取り扱われていない浸水時の動的影響を考慮可能な損傷船舶の浸水時動揺シミュレーション手法の開発を行う。また、浸水後の耐波性能を評価するため、損傷船舶の波浪中動揺シミュレーション手法へと拡張する。

シミュレーションの精度検証のため、大型の損傷模型船を用いた水槽試験を実施し、計算結果との比較を通じてその妥当性を確認することで、高度損傷時復原性評価法として構築する。さらには、構築したシミュレーション手法を用いることで、損傷の程度や水密区画アレンジメントが損傷時復原性へ及ぼす影響を明らかにし、より安全な船舶設計へとフィードバックさせることを目指す。これにより、我が国の海事産業の国際競争力を高め、損傷時復原性分野における欧州主導の現状の打破を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) MPS法の浸水問題への適用性検証

損傷船舶の動揺シミュレーションで最も重要となるのは損傷区画に働く流体力の推定であり、本研究では粒子法のひとつであるMPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用いた。MPS法において解くべき支配方程式は、連続の式とNavier-Stokes方程式である。支配方程式中の微分演算子に対して、重み関数を用いた粒子間相互作用モデルを適用することで、連続体である流体の支配方程式を

有限個の粒子（位置）で離散化する。MPS法は計算メッシュを必要としないため、強非線形自由表面流れに適しており、損傷破口からの海水の流出入、浸水滞留水の大変形、ダウンフラディングなどの強非線形流れを取り扱うことが可能である。

本研究では、まず損傷船舶の浸水問題に対するMPS法の適用性を確認するため、損傷区画を有する2次元船体横断面モデルを製作し、大阪大学の2次元水槽で強制横揺れ試験を実施した。強制横揺れ中に船体に働く流体力と区画内の浸水滞留水形状を計測し、MPS法の計算結果と比較することで、MPS法の計算精度を検証した。なお、MPS法における強制横揺れ試験は、船体表面や区画内壁を構成する壁粒子を回転軸周りに強制移動させることで実現する。MPS法によって各タイムステップの圧力場が求めれば、壁粒子位置での圧力を船体表面および損傷区画内壁にわたって積分することで流体力を求められる。また、重心からの位置ベクトルを考慮することで重心周りのモーメントが得られる。

### (2) 損傷船舶の動揺予測法の開発

#### ① 損傷浸水時のシミュレーション手法

船内区画への浸水が存在する状況での船舶の動揺予測に必要な数値シミュレーション手法を構築した。基本的なコンセプトとしては、図1に示すように損傷部の流体力計算と非損傷部の流体力計算を別々の方法を用いて行う。損傷船舶の運動計算において最も重要となるのは船内への浸水や損傷区画内の滞留水挙動の計算である。これらは損傷状況や船体動揺に応じて極めて複雑な流れとなりうるため、強非線形自由表面流れを容易に取り扱うことのできるMPS法を損傷部の流体力計算に用いる。また、MPS法は粒子法のひとつであり、各粒子位置で離散化を行うためメッシュを必要とせず、複雑な区画内アレンジメントへの適用性にも優れている。

具体的な計算手順としては、損傷破口、損傷区画内部を含む計算領域内の3次元粘性流場をMPS法により統一的に計算することで、浸水や滞流水の影響を含めた損傷部に働く流体力を計算する。一方、非損傷部に働く流体力は従来から広く用いられているポテンシャル理論にもとづくストリップ法を用いて計算する。両計算領域間の相互干渉が無視できると仮定すれば、損傷部と非損傷部に働く流体力の和が損傷船舶全体に働く流体力とみなせるので、この流体力を用いて船体運動方程式を解くことにより、微小時間経過後の運動変位が求められる。次の計算ステップでは、得られた運動変位に応じた境界条件を、損傷部の船体表面・区画壁を構成する壁粒子に対して課すことで、微小変位に対する流場（圧力場）の変化および損傷部に働く流体力

がMPS法により計算される。この流体力とストリップ法により求めた非損傷部に働く流体力を用いて運動方程式を解けば、さらに微小時間経過後の運動変位が求められる。これらの計算手順を繰り返すことにより、損傷船舶の浸水時動揺シミュレーションが可能となる。非損傷部を含めた損傷船舶全体に働く流体力をMPS法によって計算することも可能であるが、計算負荷の観点から現実的ではない。また、非損傷部の流体力計算にポテンシャル理論ベースのストリップ法を用いることで、計算速度以外にも、各種理論の適用や実験的修正が可能になるなどの大きな利点がある。

本研究ではこの基本コンセプトにもとづく浸水時動揺シミュレーション手法の検証の第一歩として、2次元MPS法と左右揺れ、上下揺れ、横揺れの3自由度運動方程式を組み合わせた損傷船舶の動揺シミュレーションプログラムを開発した。復原力については、非線形影響が大きいと考えられるため、上下揺れ、横揺れによる没水形状の時間変化を考慮した非線形計算とした。付加質量係数と造波減衰力係数は2次元境界要素法により求め、ストリップ法にもとづいて長手方向に積分（ただし損傷部は除く）することで非損傷部に働く流体力を得る。損傷部に働く流体力はMPS法によって計算された各時刻の圧力場から得ることができる。このように、非損傷部に働く流体力をポテンシャル理論ベースのストリップ法により、損傷部に働く流体力をMPS法により求めて運動方程式を解くことで、損傷船舶の時間領域運動シミュレーションが可能となる。

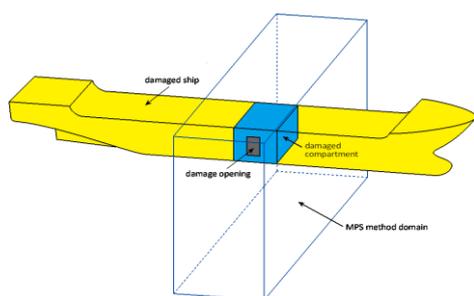


図1 計算領域分割の概念図

## ② 波浪中の動揺シミュレーション手法

損傷浸水時のシミュレーション手法をもとに、波強制力推定を加えることで波浪中動揺シミュレーションへの拡張を行った。この場合も、損傷船舶を損傷部と非損傷部に分けて考える。損傷部では造波境界条件を用いたMPS法により、時々刻々の船体姿勢に対する波強制力を圧力場から計算する。非損傷部ではフルードクリロフ力とSTF法により求めたディフラクション力の和として波強制力を計算する。両計算領域間の干渉は無視できる

と仮定し、両者の和を損傷船舶全体に働く流体力とみなし、この流体力を用いて船体運動方程式を時間領域で解くことで、損傷船舶の波浪中動揺シミュレーションが可能となる。

損傷部に働く波強制力はMPS法により求めるが、粒子法では全計算領域で同一の粒子サイズを用いる必要があるため、数値水槽のサイズは極力小さい方が望ましい。しかしながら、船体運動が過渡状態を経て周期的定常に至るまで反射波の影響を抑えるためには、波長の何倍もの水槽長が必要となる。粒子数の膨大な増加を回避するためには、境界条件のコントロールによる造波が不可欠となる。そこで、ポテンシャル理論にもとづく水波の線形解析解を境界条件として与える造波境界を組み込んだ。造波境界を用いることで、左右の境界位置での波の位相が得られるので、これと船体運動から、各タイムステップにおける船体重心の波に対する相対位置が得られる。この相対位置を非損傷部の波強制力を計算するSTF法に引き渡すことにより、MPS法とSTF法における波と船との位相関係を一致させることができる。

本研究では、船体中央付近の平行部に2次元損傷区画を有する自動車運搬船の横波中動揺を対象としているため、船体動揺は2次元平面内の運動になるとみなして、左右揺れ、上下揺れ、横揺れの3自由度船体運動方程式を用いた。横波を対象とするのは、損傷事故により完全に推進機能が失われた場合、入射波に対する回頭方位の安定解はおおよそ横波状態になるためである

## ③ 検証用模型実験

構築したシミュレーション手法の検証のため、専用の大型損傷模型船を製作した。対象船は自動車運搬船とし、船体中央の平行部に2次元的な2層のカーデッキを有する模型とした。この模型船を用いて、大阪大学船舶海洋試験水槽にて、平水中における浸水時の船体動揺計測を行った。これは、直立に浮かんでいる状態から、ある瞬間に損傷破口を発生させて、その後の船体挙動を計測するものである。横揺れは模型船に搭載のジャイロスコープにより、左右揺れ、上下揺れは船尾に貼り付けたマーカー追跡による画像解析により計測した。数値シミュレーションと条件を一致させるためには、損傷破口を瞬間的に発生させることが望ましいが、本実験では一様に引っ張った状態で損傷破口を覆うように張り付けた薄い天然ゴムの中心部を鋭利な棒で突き、ゴムの瞬間的に縮む特性を利用して損傷破口を発生させる方法を用いた。

また、波浪中動揺シミュレーション手法の検証のため、平水中の動揺計測と同様の損傷自動車運搬船模型、運動計測システムを用いて、規則横波中の動揺計測を行った。実験で

は左右揺れ方向の漂流を抑制するため、横揺れ方向には自由に回転するアイボルトを介して、船首・船尾に緩いロープを取り付けた状態で計測を行った。

### (3) 3次元MPS法の精度検証

2次元MPS法では、現実に即した損傷破口・区画内形状に対応した計算が困難であるため、MPS法の計算コードを2次元から3次元に拡張した。この精度検証のため、3次元流れが伴う浸水実験を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) MPS法の精度検証

2次元損傷区画に対する強制横揺れ試験について、模型実験とMPS法の比較を行った。ここでは損傷区画に働く流体力と区画内滞留水の時間変化を比較した。その結果、損傷破口からの海水の流出入や滞留水の大変形を伴う場合においても、MPS法は実用的な精度での流体力推定が可能であることを確認した。

### (2) 数値シミュレーションの精度検証

#### ① 損傷浸水時のシミュレーション

初めに、ランプを設けた場合について、損傷浸水時の船体動揺の比較を行った。浸水開始直後の挙動は良い一致を示し、その後も大量の浸水を伴う際の船体動揺を定性的に予測できる結果となった。損傷区画内の浸水状況についても、砕波や飛沫を伴うような非線形流れに対しても計算が破綻することなく、区画内部へと浸水していく様子が良好に再現された。

次にランプを設けない場合の比較を行った。実験結果では、ランプが閉じている場合には損傷区画内に空気が閉じ込められるため、ランプが開いている場合に比べて横揺れ角が大きくなることが確認できる。これは、損傷破口の反対側に溜まった空気によって左右非対称な浮力が生じ、その結果として横傾斜モーメントが発生するためである。また、左右揺れと上下揺れにも少なからず変化が見られることから、浸水時の船体挙動計算では区画内に閉じ込められた空気の影響を無視できないことが分かった。ただし、一般的なMPS法では気液二層流の取り扱いが容易ではないので、本研究では計算アルゴリズムを大幅に変更することなく、ボイルの法則によって閉じ込められた圧縮空気の圧力計算を行い、損傷区画内部の自由表面粒子と粒子数密度の低い(浸水していない)壁粒子にその圧力を作用させることで、空気の影響を簡易的に考慮することとした。この数値シミュレーションと模型実験の比較を図2に示す。計算結果は、ランプを設けた場合に比べて最大横揺れ角が増加し、動揺周期が変化するとい

う特徴を定性的に再現することができている。なお、ランプの有無に関わらず、シミュレーションでは最大横揺れ角を幾分過大に推定する結果が得られており、安全側の評価となっている。

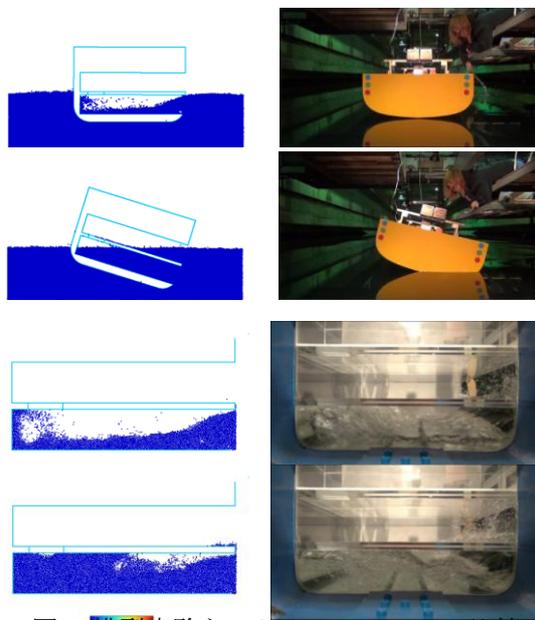
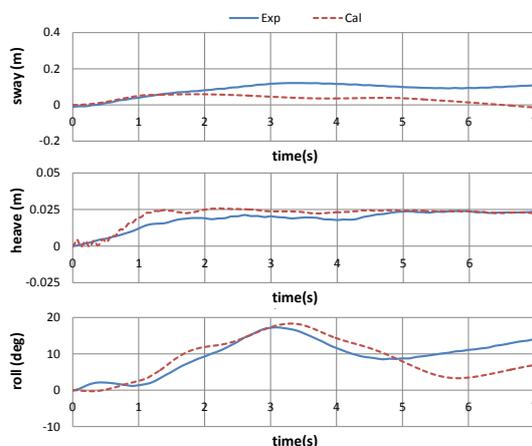


図2 模型実験とシミュレーションの比較  
(平水中浸水時の動揺)

#### ② 横波中動揺シミュレーション

ランプを設けない場合について、規則横波中の動揺比較を行った。図3に結果を示す。損傷破口がない場合の実験では微小な線形横揺れが確認されたが、損傷破口を設けた実験では、同じ波条件化において、浸水滞留水の影響により波周期の二倍の周期の非線形な横揺れが発生しているが、数値シミュレーションにおいても、この非線形応答を高精度に再現することができている。他の波条件についても同様の精度が確認できており、今回構築したシミュレーション手法は、損傷船舶の横波中動揺や損傷区画内部への浸水状況を高精度に予測可能であるといえる。

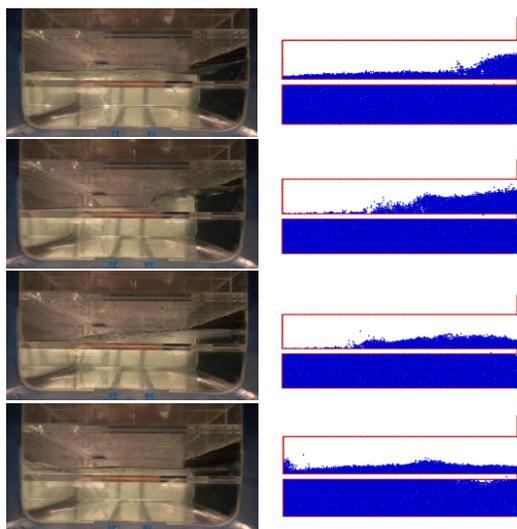
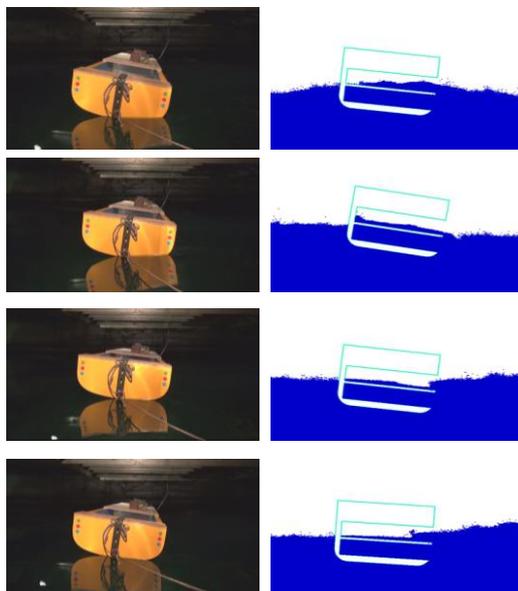
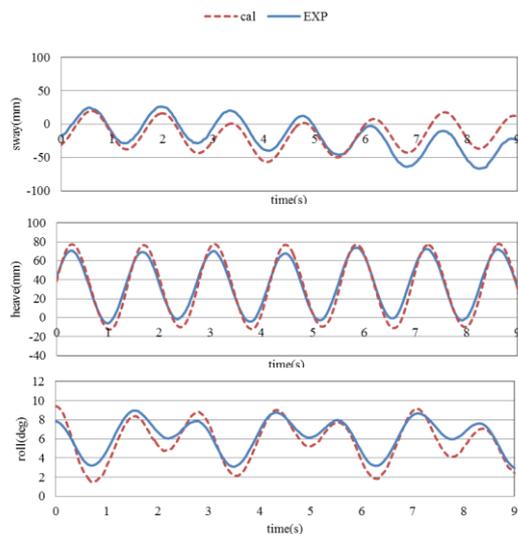


図3 模型実験とシミュレーションの比較  
(規則横波中の動揺)

### (3) 3次元MPS法の精度検証

損傷破口形状を四角形とした場合のシミュレーションと実験映像との比較を図4に示す。3次元計算としては総粒子数が少ないために計算における自由表面形状が明瞭ではないが、損傷破口からの浸水の広がりや反対側の内壁からの反射など実験結果と概ね一致している。計算ではいくつかの水粒子が飛散しているが、これは自由表面上で圧力0のディリクレ境界条件が課されているためであり、自由表面の取り扱いについては今後改良が必要である。

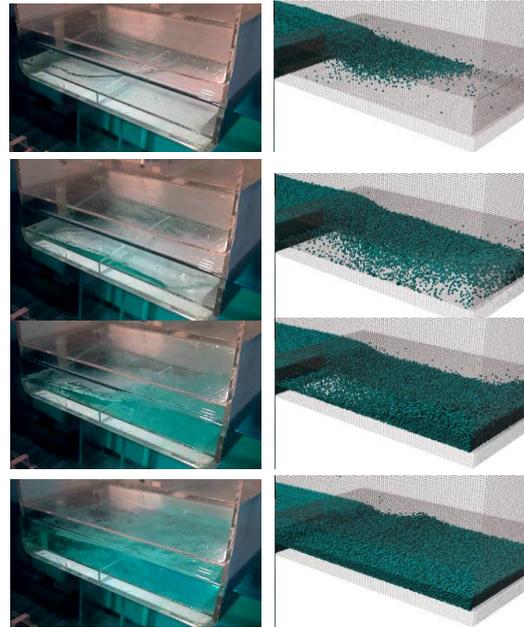


図4 実験とシミュレーションの比較  
(損傷区画への3次元浸水)

### 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11件)

① 橋本博公、伊藤悠人、末吉誠、損傷船舶の浸水時動揺シミュレーション手法の構築、日本船舶海洋工学会論文集、査読有、第17号、(2013)、掲載可

② Hashimoto, H., Kawamura, K., Sueyoshi, M., Numerical Simulation Method for Damaged Ships under Flooding Condition, Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, refereed, (2013), accepted for publication

③ 橋本博公、河村昂軌、末吉誠、損傷船舶の横波中動揺シミュレーション手法の構築、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第16号、査読無、(2013)、掲載可

④ Hashimoto, H., Ito, Y., Kawakami, N.,

Sueyoshi, M., Numerical simulation method for coupling of tank fluid and ship roll motions, Proceedings of the 11th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, refereed, (2012), pp. 477-486

⑤ Shimizu, Y., Hashimoto, H., 2-D Simulations of Water Flooding by a CIP-Based Method, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, refereed(abstract), (2012), pp. 289-294

⑥ Hashimoto, H., Ito, Y., Kawakami, N., Sueyoshi, M., Wave Load Prediction for Structural Analysis of Damaged Ships, Proceedings of the 6th International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, refereed, (2012), pp.173-182

⑦ 橋本博公、末吉誠、川上渚、3次元MPS法を用いた損傷区画への浸水シミュレーション、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第14号、(2012)、pp.227-228

⑧ 橋本博公、伊藤悠人、末吉誠、損傷船舶の浸水時動揺シミュレーション手法の構築、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第14号、(2012)、pp.223-226

⑨ 伊藤悠人、清水唯、橋本博公、損傷船の浸水状態における流体力推定、査読無、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第13号、(2011)、pp.429-432

⑩ Hashimoto, H., Sugimoto, T., Ito, Y., Sueyoshi, M., Two-Dimensional Simulations of a Damaged Ship Using the MPS Method, Proceedings of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, refereed, (2011), pp.618-625

⑪ 橋本博公、杉本友宏、末吉誠、MPS法を用いた損傷船舶の2次元シミュレーション、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第12号、(2011)、pp.537-540

⑫ Hashimoto, H., Ito, Y., Sugimoto, T., Sueyoshi, M., Numerical Simulation of Dynamic Coupled Motions of Ship and Tank Liquid, Proceedings of the 5th Asia Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, refereed(abstract), (2010), pp.373-378

[学会発表] (計1件)

① Hashimoto, H., Ito, Y., Sueyoshi, M., Numerical Simulation of a Damaged Floating Body by the MPS Method, International RIAM Symposium on Analysis on Marine Renewable Energy Dynamics and Marine Environment Dynamics, (Dec. 2011), Fukuoka

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 博公 (HASHIMOTO HIROTADA)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：30397731

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

末吉 誠 (SUEYOSHI MAKOTO)  
九州大学・応用力学研究所・助教  
研究者番号：80380533

杉本 友宏 (SUGIMOTO TOMOHIRO)

伊藤 悠人 (ITO YUTO)

清水 唯 (SHIMIZU YUI)

川上 渚 (KAWAKAMI NAGISA)

河村 昂軌 (KAWAMURA KOUKI)