

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目： 基盤研究（A）
 研究期間： 2006 ～ 2008
 課題番号： 18206089
 研究課題名（和文） 荒天波浪中での浮体の強非線形流体・構造連成解析と波浪防災に関する先端的研究
 研究課題名（英文） Frontier research on strongly nonlinear fluid-structure interactions in severe seas and prevention of wave-related disaster
 研究代表者
 柏木 正（KASHIWAGI MASASHI）
 大阪大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号： 00161026

研究成果の概要：大振幅波浪中の浮体によって碎波や飛沫が発生するような強非線形流体现象に対しても精度の高い計算が可能となるよう、最新の数値流体力学的手法をいくつか開発した。また波浪衝撃による浮体甲板上での圧力、浮体の動揺、波浪中抵抗増加を水槽実験によって計測し、その結果との比較によって開発した数値計算法の妥当性を検証した。さらに 2007 年 11 月には強非線形流れに関する国際会議を主催し、世界トップレベルの研究情報の発信・交換を行った。流体・構造連成解析として、新しい非線形ストリップ法の開発、孤立波の衝突による垂直弾性板の振動に関する計算法の開発なども行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2007 年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2008 年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
年度			
年度			
総計	25,800,000	7,740,000	33,540,000

研究分野： 波浪中船舶耐航性能，浮体流体工学

科研費の分科・細目： 総合工学・船舶海洋工学

キーワード： 強非線形流体問題，流体・構造連成問題，数値流体力学，非線形境界要素法，波浪衝撃

1. 研究開始当初の背景

大型台風による荒天波浪中では、碎波による波浪衝撃、靑波による海水打ち込み、スラミング、タンク内スロッシングなどの強非線形流体现象が船舶には頻発し、結果として船体の損傷、破壊、転覆に至る海難事故が数多く発生していた。

これらの強非線形な流体现象に関するこれまでの研究は、その殆どが実験的なものであり、従来の計算法では計算が極めて困難な碎波・空気巻き込み・飛沫などを伴うため、

数値解析による研究は立ち遅れていた。しかし、研究開始当初、研究代表者が所属していた九州大学応用力学研究所のグループは、世界の船舶海洋工学分野における「水波と浮体の強非線形相互作用」の研究をリードする形で精力的に研究を行い、著しい研究の進展が見られるようになっていた。具体的には、オイラー座標直角格子での差分法に基づいた数値拡散の非常に少ない CIP-CUP (Constrained Interpolations Profile, Combined and Unified Procedure) 法や、逆にメッシュ生成を

一切必要とせず流体運動を粒子でモデル化してラグランジュ的に計算を行う MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法をベースとした、ロバストな数値流体力学的計算法が船舶海洋工学分野へ応用・改良されつつあった。

2. 研究の目的

以上の背景によって、水波と浮体の強非線形相互作用という実際問題に対して、先端的な数値流体力学的計算手法がどの程度適用可能で、その計算精度・発展性はどうかということが国内外で注目を集めていた。それらを受け、本研究では

- (1) 大振幅波浪による波浪衝撃と浮体の応答、構造強度解析に必要な波浪荷重の高精度推定に重点を置いた、CIP 法、MPS 法による計算精度の検証、先端的计算法の確立
- (2) 損傷・破壊過程の動的シミュレーションを含めた流体・構造連成解析法の高度化
- (3) それらを総合した波浪災害予測ツールの構築と防止法に関する研究を行い、強非線形移動境界問題、流体・構造連成問題に対する学術の進展、船舶海洋工学分野における波浪防災という安心・安全問題への貢献を行うことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究目的を達成するために必要な研究課題は以下のものである。

- (1) 浮体と水波の強非線形相互作用に関する水槽実験
- (2) CIP 法と直角格子法による波浪衝撃荷重計算法の確立
- (3) MPS 法をベースとした波浪衝撃荷重計算法の確立
- (4) 流体解析コードの統合・ハイブリッド計算法に関する研究
- (5) 流体・構造連成問題解析手法に関する研究

(1) は、CIP 法・MPS 法の計算精度検証のための水槽実験であり、具体的には幅広の数式船型 (modified Wigley model) を用いて、甲板上および垂直壁上の圧力分布の計測、高速ビデオによる青波挙動の観察、波浪中での船体運動・抵抗増加の計測を行う。(2) では、実験値との詳細な比較を通して、計算精度の検証、計算法の改良・高度化を行う。(3) および (4) では、実際の 3 次元問題へ適用するため、計算コードの並列化、他の CFD 手法との融合によるハイブリッド化 (例えば MPS 法と CIP 法、あるいは MPS 法と境界要素法) などを検討する。(5) では、強非線形流体解析手法と最先端有限要素法との融合を最終目標とするが、それへの足掛かりとして、船体を弾性梁とみなした流力弾性問題の計算

法、非線形孤立波が垂直弾性板に衝突するときの応答計算法などを開発し、その計算精度の検証を行う。

4. 研究成果

(1) CIP 法をベースとした水波と浮体の強非線形相互作用に関する数値計算コードに RIAM-CMEN (Computation Method for Extremely Nonlinear hydrodynamics) と名前を付け、その計算精度の検証・計算法の改良を行った。特に自由表面の解像度を上げるために、界面捕捉法として THINC (Tangent Hyperbola for Interface Capturing) 法を導入した。この方法は、密度関数に関する移流方程式を保存形としているので、質量の保存は完全に満たされており、また CIP 法に関数変換を適用する従来の方法に比べ、水面の砕波や飛沫の解像度も向上していることを確認した。高速ビデオカメラによる計測値と対応する計算値の比較例を Fig.1 に示している。これは幅広の modified Wigley model が $F_n=0.2$ の速度で $\lambda/L=1.25$ の規則的な向い波中を動揺しながら曳引されているときの自由表面の変形を比較したものである。飛沫の飛び散りなどに差が見られるものの全般的な一致度は改善されている。そもそもこのような計算が可能であるということ自体が画期的である。

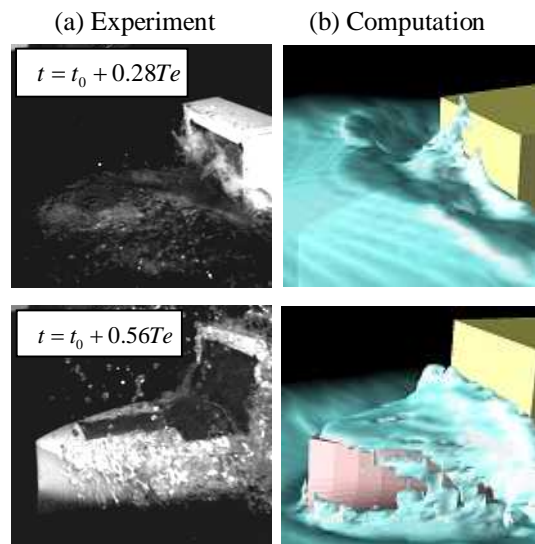


Fig. 1. Comparison of the free-surface profile at $\lambda/L=1.25$ and $F_n=0.20$. The numerical computation is performed by using THINC scheme for interface capturing.

(2) RIAM-CMEN による 3 次元計算が、実際の任意船型に対してもできるように、船体表面オフセットデータから仮想粒子の配置による表示を行う方法を開発した。それを用いて S-175 コンテナ船の波浪中大振幅動揺の計算を行った。計算結果は POV-RAY というコ

コンピュータ・グラフィックス作成ソフトを使ってアニメーション化した。Fig. 2 にその一例を示す。また波浪中での運動および抵抗増加に関する周波数応答についても計算し、既存の実験値および線形理論による計算値との比較を行った。



Fig.2 Example of computer graphics using computed results for wave-induced motions of S-175 container ship.

(3) MPS 法の計算時間を短縮し、実用計算法とするために、浮体近傍の強非線形流れは MPS 法で計算し、それ以外は時間領域境界要素法で計算するというハイブリッド計算法の構築を試みた。まずは基礎的な 2 次元造波機の強制動揺による造波問題について計算を行い、計算の安定性・精度を高めるために幾つかの工夫を行ったが、十分に満足できる結果は得られず、3 次元浮体まわりの強非線形流れの計算に適用できるまでには至らなかった。

(4) 船体を弾性梁とみなした非線形波浪中弾性応答の計算法について研究した。基本となる計算法は時間領域での非線形ストリップ法であるが、動的な流体力に対するメモリー影響関数に対しても時々刻々の没水表面の変化を近似的に考慮しており、船底および船首フレアでのスラミングも近似的に計算することができる。それによる甲板上での構造歪や船体運動 (Springing) の計算値を対応する計測値と比較し、実用的な精度で一致していることを確認した。

(5) 非線形孤立波が垂直弾性板に衝突したとき、あるいは垂直弾性板がある初期変位から解放されたときの、弾性板の振動ならびに自由表面上に発生する波の伝播を、モード展開法と時間領域非線形境界要素法によって計算できる計算コードを開発した。それを基に、弾性板の剛性率や拘束条件の違いが応答に及ぼす影響について調べた。計算結果の例として、Fig. 3 に弾性板上端の変位を、Fig. 4 に

自由表面上の波変位を示している。

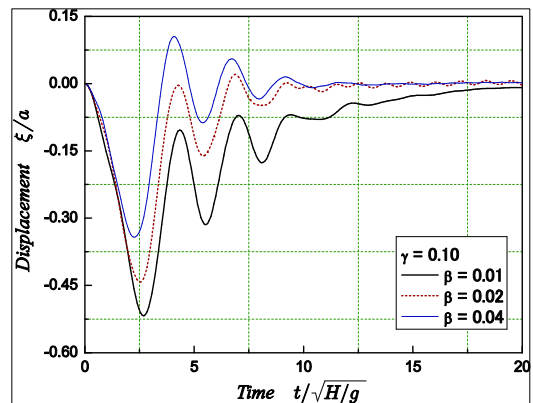


Fig.3 Comparison of elastic displacement at the top of plate with different elastic rigidity of the plate, when the top of plate is free.

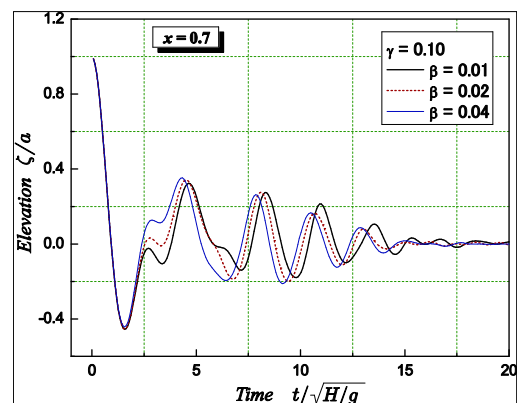


Fig.4 Comparison of free-surface elevation at $x/H=0.7$ (with H water depth) with different elastic rigidity of the plate, when the top of plate is free.

(6) 船舶海洋工学の分野がリーダーシップを取りながら、学際的な「強非線形流れ」に関する研究コミュニティを形成し、強非線形流れに関する研究を世界レベルで加速させるために、2007 年 11 月 20 日～22 日まで強非線形流れに関する国際会議 (International Conference on Violent Flows; VF-2007) を福岡国際会議場にて開催した。Call for Papers を作成・配布し、会議のホームページを作成して広報にも努力した。そのときに作成・使用したロゴマークを Fig. 5 に示している。



Fig. 5 Logo mark used for VF-2007 International Conference

アブストラクトの申し込みは 69 編あったが、最終的には 57 編の全文原稿が印刷論文としてプロシーディングスおよび CD に収められた。また会議への参加登録者数はスタッフを除いて 74 人であり、国内から 36 人、海外から 38 人であった。講演論文を数値計算の手法でみると、いわゆる粒子法と呼ばれる SPH 法、MPS 法による論文が多かった。一方、現象別にみると、明確に分けることは難しいにしても、船舶工学の分野では砕波、スロッシング、スラミング、靑波、波浪荷重などがあり、それ以外の分野では津波、水と空気の干渉、流体・構造連成などのトピックスがあった。強非線形流れに関する研究はまだまだ発展しなければならないが、特に今後は、流体・構造連成問題に関する研究が注目を浴びるだろうと感じさせるものがあった。

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 22 件)

- 1) Changhong Hu and Masashi Kashiwagi: Two Dimensional Numerical Simulation and Experiment on Strongly Nonlinear Wave-Body Interactions, *Journal of Marine Science and Technology* 査読有, accepted, in press
- 2) Changhong Hu, Masashi Kashiwagi and Makoto Sueyoshi: Improvement towards High-Resolution Computation on Strongly Nonlinear Wave-Induced Motions of an Actual Ship, *Proc. of 27th Symposium on Naval Hydrodynamics* 査読有, pp.525-534, (2008)
- 3) Changhong Hu, Masashi Kashiwagi, Makoto Sueyoshi and Izumi Nakagiri: Numerical Simulation of Strongly Nonlinear Wave-Ship Interaction by CIP/Cartesian Grid Method, *Proc. of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference* 査読有, Vol.3, pp.143-147, (2008)
- 4) Makoto Sueyoshi, Masashi Kashiwagi and Shigeru Naito: Numerical Simulations of Wave-Induced Nonlinear Motions of a Two-Dimensional Floating Body by Moving Particle Semi-Implicit Method, *Journal of Marine Science and Technology* 査読有, Vol.13, No.2, pp. 85-94, (2008)
- 5) Changhong Hu, Masashi Kashiwagi, Makoto Sueyoshi and Izumi Nakagiri: Numerical Simulation of Strongly Nonlinear Wave-Ship Interaction by CIP/Cartesian Grid Method, *Proc. of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference* 査読有, Vol.3, pp.143-147, (2008)
- 6) Makoto Sueyoshi, Masashi Kashiwagi and Shigeru Naito: Numerical Simulations of Wave-Induced Nonlinear Motions of a Two-Dimensional Floating Body by Moving Particle Semi-Implicit Method, *Journal of Marine Science and Technology* 査読有, Vol.13, No.2, pp. 85-94, (2008)
- 7) Masashi Kashiwagi, Changhong Hu and Makoto Sueyoshi: CFD Computation of Strongly Nonlinear Wave-Body Interactions on the Free Surface, *Proc. of 6th Osaka Colloquium on Seakeeping and Stability of Ships (OC-2008)* 査読有, pp. 83-92, (2008)
- 8) Guanghua He and Masashi Kashiwagi: A Full Nonlinear Solution for Vibration of Vertical Wall by an Initial Elevation of Free Surface, *Proc. of 6th Osaka Colloquium on Seakeeping and Stability of Ships (OC-2008)* 査読有, pp. 67-72, (2008)
- 9) Takashi Mikami and Masashi Kashiwagi: A Time-Domain Nonlinear Strip Method in View of Elasticity of Ship Hull and Green Water on Deck, *Proc. of International Conference on Violent Flows (VF-2007)* 査読無, pp. 413-420, (2007)
- 10) Changhong Hu, Masashi Kashiwagi, and Feng Xiao: 3D Numerical Simulation of Violent Sloshing by Conservative CIP Method, *Proc. of International Conference on Violent Flows (VF-2007)* 査読無, pp. 373-377, (2007)
- 11) Hajime Kihara, Makoto Sueyoshi, and Masashi Kashiwagi: A Hybrid Computation Method for Nonlinear Free Surface problems, *Proc. of International Conference on Violent Flows (VF-2007)* 査読無, pp.305-314, (2007)
- 12) 胡長洪, 柏木正: 強非線形自由表面流れに関する CFD コードの開発, 九州大学応用力学研究所所報, 第 133 号, pp. 139-146 (2007) 査読無
- 13) Masashi Kashiwagi, Changhong Hu, Ryuji Miyake, and Tingyao Zhu: A CIP-Based Cartesian Grid Method for Nonlinear Wave-Body Interactions, *Proc. of 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures* 査読有, Vol.2, pp.894-902, (2007)
- 14) Takashi Mikami and Masashi Kashiwagi: A Time-Domain Nonlinear Strip Method with Whipping Taken into Account, *Proc. of 9th Numerical Ship Hydrodynamics* 査読有, Vol. 3, pp.186-19, (2007)
- 15) Makoto Sueyoshi, Hajime Kihara and Masashi Kashiwagi: A Hybrid Technique Using Particle and Boundary-Element Methods for Wave-Body Interaction Problems, *Proc. of*

- 9th Numerical Ship Hydrodynamics 査読有, Vol.1, pp.241-252, (2007)
- 16) Changhong Hu and Masashi Kashiwagi: Numerical and Experimental Studies on Three-Dimensional Water on Deck with a Modified Wigley Model, *Proc. of 9th Numerical Ship Hydrodynamics 査読有*, Vol.1, pp. 159-169, (2007)
 - 17) Changhong Hu and Masashi Kashiwagi: A CFD Approach for Extremely Nonlinear Wave-Body Interactions: Development and Validation, *Proc. of IUTAM Symposium on Fluid-Structure Interaction in Ocean Engineering 査読有*, (2007)
 - 18) 柏木 正, 胡 長洪: 水波と浮体の強非線形相互作用に関する数値計算法と実験的検証, 日本混相流学会 2006 精選論文集 (混相流研究の進展 2), pp.189-196 (2007) 査読有
 - 19) Yoshiki Nishi, Changhong Hu and Masashi Kashiwagi: Multigrid Technique for Numerical Simulations of Water Impact Phenomena, *International Journal of Offshore and Polar Engineering 査読有*, Vol.16, No.4, pp. 283-289, (2006)
 - 20) Changhong Hu and Masashi Kashiwagi: Validation of CIP-based Method for Strongly Nonlinear Wave-Body Interactions, *Proc. of 26th Int. Symposium on Naval Hydrodynamics 査読有*, Vol.4, pp.247-258, (2006)
 - 21) Changhong Hu, Masashi Kashiwagi and Akihiko Kitadai: Numerical Simulation of Strongly Nonlinear Wave-Body Interactions with Experimental Validation, *Proc. of 16th International Offshore and Polar Engineering Conference 査読有*, Vol.3, pp.467-472, (2006)
 - 22) Yoshiki Nishi, Changhong Hu and Masashi Kashiwagi: A Numerical Simulation of Water Impact Phenomena by the CIP-based CFD Combined with the Multigrid Method, *Proc. of 16th International Offshore and Polar Engineering Conference 査読有*, Vol.3, pp.420-427, (2006)

[学会発表] (計 28 件)

- 1) Changhong Hu: Improvement towards High-Resolution Computation on Strongly Nonlinear Wave-Induced Motions of an Actual Ship, *27th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 2008 年 9 月 (Seoul)
- 2) Changhong Hu: Numerical Simulation of Strongly Nonlinear Wave-Ship Interaction by CIP/Cartesian Grid Method, *18th International Offshore and Polar Engineering*

- Conference*, 2008 年 6 月 (Vancouver)
- 3) 胡 長洪: CIP・直交格子法による Wigley 船型に関する船体運動・抵抗増加の計算, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2008 年 5 月 (長崎)
 - 4) Makoto Sueyoshi: Numerical Simulation of Deck Wetness for a 2D Pontoon-type Floating Structure, *Oceans'08 / Techno-Ocean'08 (OTO'08)*, 2008 年 4 月 (Kobe)
 - 5) Changhong Hu: A Conservative CIP Method for Violent Free Surface Flows, *23rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, 2008 年 4 月 (Jeju, Korea)
 - 6) Makoto Sueyoshi: Numerical Simulation Using Particle and Boundary Element Method for Highly Nonlinear Interaction Problems between Waves and Floating Body, *6th Osaka Colloquium on Seakeeping and Stability of Ships (OC-2008)*, pp. 2008 年 3 月 (Osaka)
 - 7) Masashi Kashiwagi: CFD Computation of Strongly Nonlinear Wave-Body Interactions on the Free Surface, *6th Osaka Colloquium on Seakeeping and Stability of Ships (OC-2008)*, pp. 2008 年 3 月 (Osaka)
 - 8) Guanghua He: A Full Nonlinear Solution for Vibration of Vertical Wall by an Initial Elevation of Free Surface, *6th Osaka Colloquium on Seakeeping and Stability of Ships (OC-2008)*, pp. 2008 年 3 月 (Osaka)
 - 9) 末吉 誠: CIP・直角格子法による水波と船舶の強非線形相互作用の 3 次元数値計算, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, 2007 年 12 月 (東京)
 - 10) Changhong Hu: 2-D Numerical Simulation of Water Entry Using CIP Based Method, *3rd Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM'07)*, 2007 年 12 月 (Kyoto)
 - 11) 胡 長洪: 規則波中コンテナ船の強非線形動揺に関する数値シミュレーション, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2007 年 11 月 (今治)
 - 12) 末吉 誠: 粒子法と境界要素法による水波に関するハイブリッド計算法, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2007 年 11 月 (今治)
 - 13) Guanghua He: Linear Solutions for Vibration of Vertical Wall by an Initial Elevation of Free Surface with Numerical Method, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2007 年 11 月 (今治)
 - 14) Takashi Mikami: A Time-Domain Nonlinear Strip Method in View of Elasticity of Ship Hull and Green Water on Deck, *International Conference on Violent Flows (VF-2007)*, 2007 年 11 月 (Fukuoka)

- 15) Changhong Hu: 3D Numerical Simulation of Violent Sloshing by Conservative CIP Method, *International Conference on Violent Flows (VF-2007)*, 2007年11月 (Fukuoka)
- 16) Makoto Sueyoshi: A Hybrid Computation Method for Nonlinear Free Surface problems, *International Conference on Violent Flows (VF-2007)*, 2007年11月 (Fukuoka)
- 17) Masashi Kashiwagi: A CIP-Based Cartesian Grid Method for Nonlinear Wave-Body Interactions, *10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, 2007年9月 (Houston)
- 18) Takashi Mikami: A Time-Domain Nonlinear Strip Method with Whipping Taken into Account, *9th Numerical Ship Hydrodynamics*, 2007年8月 (Ann Arbor, Michigan)
- 19) Hajime Kihara: A Hybrid Technique Using Particle and Boundary-Element Methods for Wave-Body Interaction Problems, *9th Numerical Ship Hydrodynamics*, 2007年8月 (Ann Arbor, Michigan)
- 20) Masashi Kashiwagi: Numerical and Experimental Studies on Three-Dimensional Water on Deck with a Modified Wigley Model, *9th Numerical Ship Hydrodynamics*, 2007年8月 (Ann Arbor, Michigan)
- 21) Changhong Hu: A CFD Approach for Extremely Nonlinear Wave-Body Interactions: Development and Validation, *IUTAM Symposium on Fluid- Structure Interaction in Ocean Engineering*, 2007年7月 (Hamburg)
- 22) Changhong Hu: Wave-Body Interaction Experiments for Validation of CFD method on Strongly Nonlinear Problems, *9th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS'06)*, 2006年10月 (Le Croisic, France)
- 23) Masashi Kashiwagi: Validation of CIP-based Method for Strongly Nonlinear Wave-Body Interactions, *26th Int. Symposium on Naval Hydrodynamic*, 2006年9月 (Rome)
- 24) 胡長洪: THINCスキームを応用した3次元スロッシングの数値計算, 日本機械学会年次大会講演, 2006年9月 (熊本)
- 25) 胡長洪: 船舶・波浪の強非線形相互作用の数値シミュレーション, 日本流体力学会年会講演会, 2006年9月 (福岡)
- 26) 柏木正: 水波と浮体の強非線形相互作用に関する数値解析と実験, 日本混相流学会年会講演会, 2006年8月 (金沢)
- 27) Chnaghong Hu: CFD Simulation and Laboratory Experiment on 2-D Strongly Nonlinear Wave-Body Interactions, *3rd Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics*, 2006年6月 (Shanghai)
- 28) Masashi Kashiwagi: Numerical Simulation

of Strongly Nonlinear Wave-Body Interactions with Experimental Validation, *16th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2006年6月 (San Francisco)

[図書](計1件)

Masashi Kashiwagi, Changhong Hu and Makoto Sueyoshi: Advances in Numerical Simulation on Nonlinear Water Waves (Editor: Qingwei Ma) Chapter 12: Numerical Computation Methods for Strongly Nonlinear Wave-Body Interactions, *The world Scientific Publishing Co.*(2009年4月発行予定) ISBN: 978-981-283-649-6

[その他]

ホームページ等

VF-2007 International Conference

<http://riam.kyushu-u.ac.jp/ship/VF2007/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏木 正 (KASHIWAGI MASASHI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00161026

(2) 研究分担者

胡 長洪 (HU CHANGHONG)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号: 20274532

藤久保 昌彦 (FUJIKUBO MASAHIKO)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30156848

谷澤 克治 (TANIZAWA KATSUJI)

海上技術安全研究所・プロジェクト長

研究者番号: 70373420

(3) 連携研究者

安澤 幸隆 (YASUZAWA YUKITAKA)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 10191123

末吉 誠 (SUEYOSHI MAKOTO)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号: 80380533