

平成 22 年 5 月 14 現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19206094
 研究課題名（和文） 深海掘削船のリエントリ時操船訓練シミュレータおよび操船支援システムの開発研究
 研究課題名（英文） Research and Development on a Training Simulator for Reentry Operations of a Deep-sea Drilling Ship and Its Assisting System
 研究代表者
 小寺山 亘（KOTERAYAMA WATARU）
 九州大学・東アジア環境研究機構・特任教授
 研究者番号：80038562

研究成果の概要（和文）：

地球深部探査船「ちきゅう」はライザー管を用いる掘削方式を採用しているが、ライザー管下端部を噴出防止装置に再接続するリエントリ作業では、ライザー管が柔軟構造物であるために、通常のPID制御ではその自動化が困難である。本研究では、HILS（Hardware In the Loop Simulation）の枠組みを用いて、潮流下での様々なリエントリ制御方式を検討し、これに基づきリエントリ作業訓練シミュレータの開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

For a deep sea drilling vessel 'CHIKYU' which is the first riser equipped drilling vessel, the research is concerned with a reentry control problem of moving a riser pipe hanged off and positioning its Lower Marine Riser Package just above a Blow-Out Preventer. It is hard to solve the problem by means of a PID control because of its flexible structural dynamics. Based on design results of control systems for dynamic reentry under a steady current, its training simulator is discussed by HILS (Hardware In the Loop Simulation).

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2008年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2009年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
総計	23,500,000	7,050,000	30,550,000

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：(1)深海掘削船 (2)ライザー管 (3)リエントリ作業 (4) DPS (5)HILS (6)バーチャルリアリティ (7) 訓練シミュレータ (8)ガイダンス

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球深部探査船「ちきゅう」は、統合国際深海掘削計画（IODP）の一環として、2009年5月より「南海トラフ地震発生帯掘削計画」のための研究航海を開始した。「ちきゅう」はライザー管を用いる掘削方式を採用しており、これを支える要素技術は多岐にわたるが、特に、ライザー管下端部を元の掘削場所

に再接続する作業、すなわちリエントリ作業（またはランディング作業）と呼ばれるものに注目する。この作業は、荒天時退避後、海象が回復するのを待って、ドリラーが、水中音響測位や潜水艇画像によるライザー管下端部の相対位置観測を行い、また船位保持システム(DPS)オペレータと緊密に連携しながら、かなりの時間をかけて遂行している。潮

流下で、長大弾性管であるライザー管の上端部を操作しながらの、深部（数千メートル）にある下端部の正確な移動はそう簡単ではないことは想像に難くない。

(2) このように、リエントリ作業は高度な技術を必要とするが、欧米の深海石油掘削の豊富な経験に伴って養成された熟練操船者が不可欠であるのが現状である。我が国が総力を挙げて取り組んでいるプロジェクトの根幹をなす部分を石油関連の外国人操船者にいつまでも依存することは極めて危険である。周知のように石油価格の高騰によって、深海石油掘削現場は極めて活況を呈しており、外国人熟練操船者をいつまでも確保できる保証はない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、ライザー管リエントリ作業の操船者養成を目指して訓練シミュレータの開発を行う。同時に熟練操船者でなくても比較的容易にリエントリ作業を実施できるリエントリ時操船支援システム（半自動化装置）の開発を行う。将来的には、これらの研究成果に基づく、リエントリ作業の完全自動化の研究に発展できるが、現状ですべての状況に対応できるシステムを開発できるだけの現場経験の蓄積がないので、当面は訓練シミュレータによって養成された操船者と半自動化装置からなる人間機械系としてのシステム開発を目的とする。

(2) 具体的には、第一にバーチャルリアリティ環境での操作訓練を可能にするリエントリ作業訓練シミュレータの開発を行う。第二に操船支援システムの開発を行う。これらのシステムは、3つのシミュレータからなり、すなわち浮体の運動シミュレータ、ライザー管の運動シミュレータ、ROV（遠隔操縦式無人潜水艇）の運動シミュレータを実現し、大型スクリーンおよびヘッドマウント・ディスプレイ（没入型表示装置）に、ライザー管との相対関係を示す画像を表示する。この画像はROVの運動シミュレータに搭載されたカメラによって得られるものとする。ライザー管下端付近に取り付けたカメラ画像を用いる方式があるが、本研究では「ちきゅう」プロジェクトで現在採用予定の方式に準拠する。必要であれば変換も可能である。操船訓練者は画像を見て最適と判断されるDPS（動的位置制御システム）への指令値を与えるが（リエントリ作業訓練シミュレータに相当）、その候補となる値を、コントローラを実装したサーバが提示するものとする（操船支援システムに相当）。

3. 研究の方法。

(1) 実時間で制御系を確実に動作するように設計するには、HILS (Hardware In the Loop Simulation) アプローチが用いられ、図1, 2, 3に示す3ステップからなる。本研究は、図1に示す非線形シミュレータの開発とコントローラ的设计、図2示す非線形シミュレータの実時間計算とコントローラの実装を行い、図3に示す制御実験を制御動作訓練シミュレータに適用する。

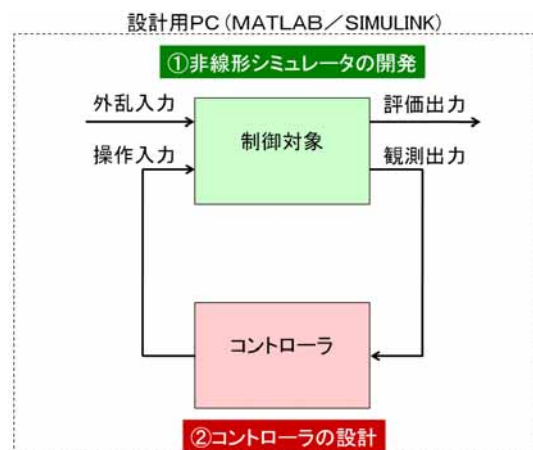


図1 HILSアプローチ（その1）
シミュレータ用PC (Windows Target)

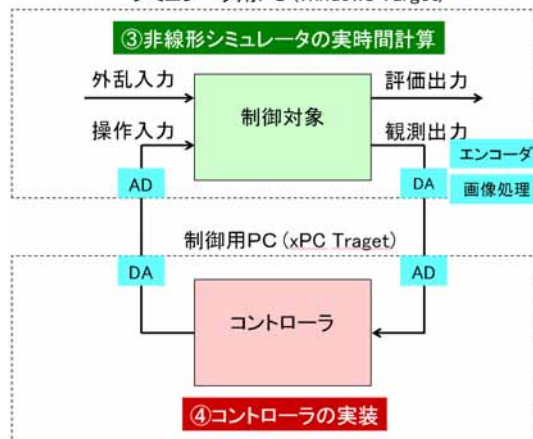


図2 HILSアプローチ（その2）
実対象

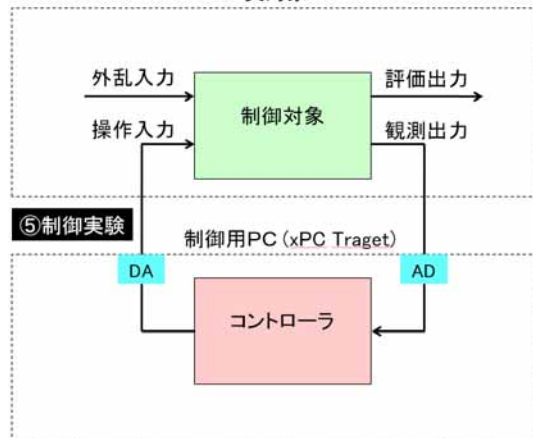


図3 HILSアプローチ（その3）

(2) ライザー管を把持した探査船には、適当な DPS が装備されているが、リエントリ制御系を設計する場合、この DPS に手を加えることは現実的とはいえない。あくまで、既存の DPS に適切な指令値の時系列を与えることで、安定かつ迅速なリエントリを実現することが望まれる(図 4, 5)。また、リエントリ作業は、浮体のヒープ運動によるライザー管下端部の衝突を避けるため、極力、波と風のない穏やかな海象下で行われるが、ライザー管上部への一定速度の潮流の影響は避けられない。さらに、ライザー管下端部の噴出防止装置(BOP)や浮力材のため、ライザー管は一様な質量分布を有しているとは言えない。そこで、本研究では、制御系設計問題を次のような前提条件の下に検討する。ライザー管は潮流分布に応じた変形を受けるが、リエントリ作業時間内では潮流速度は一定と仮定する。リエントリ作業は極力穏やかな海象下で実施されるので、ライザー管の縦方向運動は考慮しない。

ライザー管の移動に伴って発生する渦励振を、DPS で抑制することは困難であるので、ライザー管の運動は進行方向内のみを考慮する。既存 DPS には手を加えないことが望まれるので、リエントリコントローラが生成する操作信号は、DPS の位置指令とする。

ライザー管の上端位置、上端傾角、下端位置をフィードバックを計測し、フィードバックするものとする。

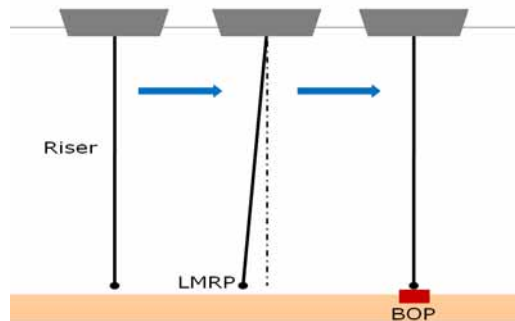


図 4 リエントリ作業の概念

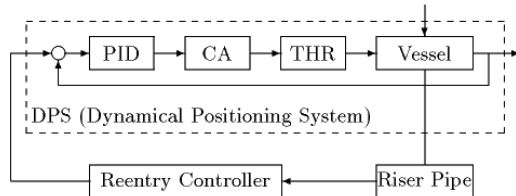


図 5 リエントリ制御系の構成

(3) 公表されている地球深部探査船「ちきゅう」とライザー管の主要目に基づいて、本研究では、図 6 に示すような深さ 1.2m、間口 1.5m × 0.3m の水槽中で移動するライザー管模型(柔軟振り子)を製作する。ただし、上部には深さ 0.2m の回流装置を設置する。いま、

掘削船全長を 200m とし、その稼動範囲を全長の 3 倍である 600m とする。このとき、水槽中の稼動範囲を 0.6m とすれば、ライザー管模型の移動距離は実機の 1/1000 程度となる。一方ライザー管実機の全長は 2500m であり、移動距離より設定された縮尺比 1/1000 に模型を合わせると、2.5m になり深さ 1.2m を超えてしまう。そこで、ライザー管模型の全長を水槽深さに合わせて 1m に設定し、動力学的な相似則を満足するようにライザー管模型の円柱パーツの密度と直径を調整する。さらに表層流は 2500m 深さに対して 200m 程度であるから、回流深さは 0.2m とする。



図 6 1m 長さのライザー管模型実験装置

(4) 訓練シミュレータは、図 7 によって構成し、図 8 に示すものを開発する。

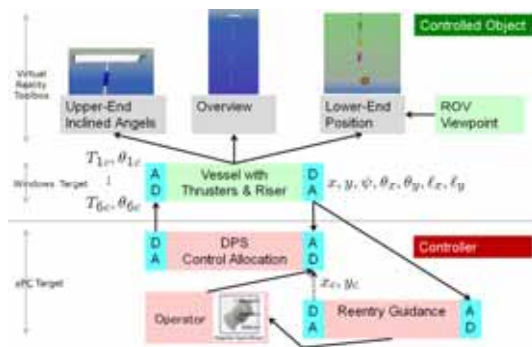


図 7 訓練シミュレータの構成法



図 8 開発した訓練シミュレータ

4. 研究成果

(1) 【平成 19 年度】三井造船昭島研究所の協力を得て、6 基のスラスタを操作する DPS と装備した「ちきゅう」の 1/55 スケールの船体模型、および実験水槽深さの制約から 5 ~ 7[m]のライザー模型を想定し、これを制御対象として、HILS アプローチによって、リエントリ作業訓練シミュレータの開発を行った。第 1 段階として、1 台の PC に、6 基のスラスタをもつ船体模型とある潮流分布を受けるライザー管の運動方程式、DPS と推力配分のアルゴリズム、DPS 位置指令を出力する LQI コントローラのアルゴリズムを連携させて、閉ループ系を構成し、望ましい応答が得られることを確認した。第 2 段階として、まず、船体模型とライザー管の運動方程式を実時間で解き、VR (Virtual Reality) 表示する制御対象シミュレータを、PC1 台を用いて開発した。センサ出力は、船体位置、ライザー管上端傾角、ライザー管下端位置とし、AD ボードを介してアナログ出力した。また 6 基のスラスタへの回転数・首振角の指令信号は DA ボードを介してアナログ入力できるようにした。次に、制御用 PC を 2 台準備し、それぞれ DPS と推力配分のアルゴリズム、DPS 位置指令の規範値を出力するガイダンスアルゴリズムを実時間で実行できるようにし、AD・DA ボードを介して、制御対象シミュレータと結線して、実時間制御系を構成した。

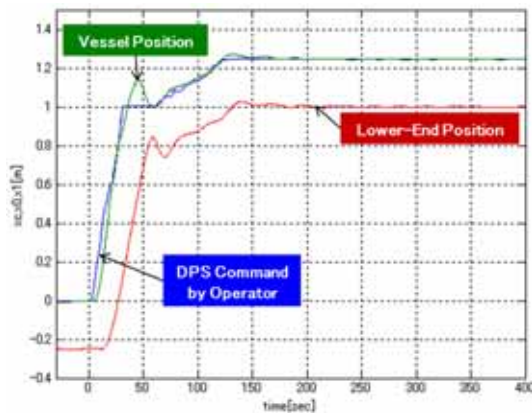


図9 操船支援を受けない場合の制御動作

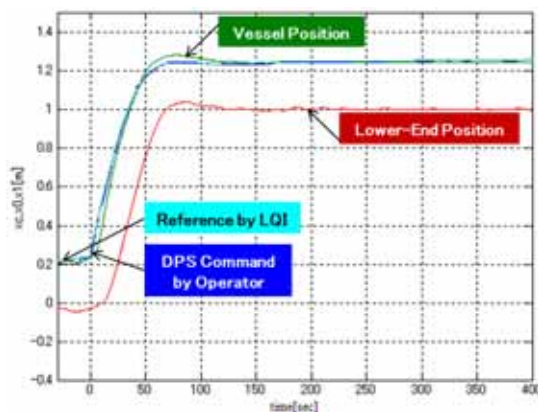


図10 操船支援を受けた場合の制御動作

訓練を受けるオペレータは、ガイダンスを受けずに、安定かつ迅速なリエントリを実現するのは非常に困難であるが(図9)、ガイダンスを受ければ、比較的容易に望ましいリエントリ制御を行えることを確認した(図10)。

(2) 【平成 20 年度】当初計画では、MATLAB / Simulink / Realtime Windows Target / Virtual Reality Toolbox を用いて、平成 19 年度暫定的に開発したリエントリ作業支援シミュレータに加えて、ヘッドマウントディスプレイシステム(HMD)を購入し、ライザー管下端位置を ROV (遠隔操縦無人潜水艇) に搭載したカメラから見た 3 次元画像を模擬することとしていた。平成 20 年 11 月開催の国際会議 PACOMS2008 における研究者との討論を通して、シミュレータにおける 3 次元画像表示は望ましいが、潮流下でも下端位置のずれを正確に模擬できるかなど、運動方程式の妥当性に関するコメントが多かった。これを受けて、ライザー管上端部に潮流をあてることのできる 1 軸トラバース装置(簡易リエントリ実験装置)を製作し、シミュレータと実験の照合を通して、運動方程式の妥当性とリエントリ作業支援に有用な表示情報について検討した。具体的には、新しく追加導入した 1 軸トラバース装置に取り付けたライザー管模型の下端を、水中固定カメラで撮影し、被験者(訓練を受ける者)はその映像だけ見て、実際の状況に近い形で、リエントリ作業を試みさせると、一般にうまく行かない。しかし、開発したシミュレータを用いて一定の訓練を積んだ後、1 軸トラバース装置を用いたリエントリ作業において改善が見られ、訓練シミュレータの有用性を部分的に実証できた。このことは、同時に、運動方程式の妥当性の確認とリエントリ作業支援に有用な表示情報についての検討ができたことを意味する。

(3) 【平成 21 年度】平成 19 年度と平成 20 年度の結果を受けて、最終年度として、次を実施した。

平成 20 年度に導入したライザー管リエントリ実験装置(長さ 1m ライザー管模型の上部 20cm は回流の影響を受けるようにして、その上端位置を 1 軸トラバース装置によりボールネジ駆動するもの)において、1m ライザー管模型の下端位置を水中カメラでモニタリングし、これだけの情報に基づいてジョイスティック操作するリエントリ操作卓を開発した。

1m ライザー管模型は、動力学的相似則と幾何学的相似則を考慮して、実機(全長 2500m、表層流深度 200m)を想定しているが、これに

対する訓練シミュレータに組み込むリエントリ作業支援機能の生成のために、新たにリエントリ自動制御則を水中移動速度によるスケジューリング制御(LPV 制御)の観点から再検討し、その有効性を確認した。また、比較的浅い場所での想定実機(全長 1000m, 表層流深度 500m)に対してもリエントリ自動制御則を検討した結果、スケジューリング制御よりむしろロバスト制御則が有用であることがわかった。さらに、リエントリ時間は 1 次モード周期(全長 2500m の場合約 200 秒)の 4 倍程度で済むことが分かった。

平成 19 年度に開発したリエントリ訓練シミュレータにリエントリ操作卓を接続し、被験者(訓練を受ける者)のリエントリ作業を支援できるようにした。1m ライザー管模型に対して、まずシミュレータでリエントリ作業を支援し、次に実験でその効果を確認した。

(4) ライザー管に関する研究は、渦励振による疲労影響の検討が多く行われているが、本研究では、リエントリ作業の効率化という、ニッチではあるが、国家基幹技術の一つである深海掘削作業をより堅固にするための重要な課題に取り組んできた。特に、リエントリ自動化のための制御系設計について、移動速度によるスケジューリングのアプローチを適用したこと、そのために必要十分なライザー管挙動を表す数理モデルを得たこと、そしてリエントリ時間は長さに依らず 1 次モード周期の 4 倍程度であることを明らかにしたこと、また副産物として、アジマススラストの推力配分問題、ライザー管下端の画像計測技術など、多くの学術的知見が得られた。今後の課題としては、被験者の訓練過程すなわち学習過程を支援する機能を、モデル予測制御の観点から考察し、人間機械系の安定性について検討する必要がある。

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 9 件)

大坪和久, 梶原宏之, アジマススラスト首振角に制約がある場合の推力配分法について, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読あり, 第 6 号, 2007, pp.1-8

五百木陵行, 梶原宏之, 区分的線形補間による首振角制限付きアジマススラストの最適推力配分法, 査読あり, 第 6 号, 2007, pp.183-190

X.Xu, M.Nakamura and W.Koterayama, An Image Analysis Approach to the 3D Position Measurement of Riser End, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読あり, 第 7 号, 2008, pp.31-38

五百木陵行, 門元之郎, 五十嵐和之, 小寺山亘, 梶原宏之, 中村昌彦, ライザー管の動特性を考慮したリエントリ制御の開発, 三井造船技報, 査読あり, 第 195 号, 2008, pp.1-7

五百木陵行, 門元之郎, 五十嵐和之, 小寺山亘, 梶原宏之, 中村昌彦, アジマススラストの首振角制限付き最適推力配分法の開発, 三井造船技報, 査読あり, 第 195 号, 2008, pp.8-13

梶原宏之, 乗富賢蔵, 小寺山亘, 中村昌彦, 門元之郎, 潮流下におけるライザー管模型のリエントリ制御実験, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読あり, 第 8 号, 2009, pp.557-558

中村昌彦, 徐雪松, 伊東高志, 小寺山亘, 梶原宏之, 門元之郎, 動揺する 1 台のカメラによる 3 次元位置計測精度の検証, 第 21 回海洋工学シンポジウム, 査読あり, 2009, pp.なし

H.Kajiwara and K.Noridomi, Reentry Control System Design for a Riser Pipe Experimental Model Under Steady Current, CDROM of The ICROS-SICE Int. Joint Conf., 査読あり, 2009, pp.3C12-4

H.Kajiwara, K.Uemura, K.Noridomi, W.Koterayama, Control System Design for a Riser Pipe Experimental Model under a Steady Current CDROM of Asian-Pacific Universities' Underwater Engineering, 査読あり, 2009, pp.なし

[学会発表](計 19 件)

梶原宏之, CA 行列の零化空間基底操作による推力配分問題の解法について 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2007 年 5 月, 東京

五百木陵行, CA 行列の零化空間基底操作による推力配分法の実証実験, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2007 年 5 月, 東京

中村昌彦, ライザー管の動特性を考慮した DPS 及びリエントリ制御の実証実験, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2007 年 5 月, 東京

X.Xu, A Development of Image Analysis Scheme for the Control of the Riser End, The 17th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 2007 年 7 月, Lisbon (Portugal)

X.Xu, A 3D Image Analysis Scheme for Riser End Survey by a Single Waving, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2007 年 11 月, 東京

五百木陵行, アジマススラスト首振角に制約を課す場合の最適推力配分法, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2007 年 11 月, 愛媛

荒金俊光, モデル予測制御方式によるライザー管リエントリ制御, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2007 年 11 月, 愛媛

上村幸平, 水中柔軟振り子のリエントリ制御実験, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2007 年 11 月, 愛媛

五百木陵行, ライザー管の動特性を考慮した DPS 及びリエントリ制御, 第 20 回海洋工学シンポジウム, 2008 年 3 月, 東京

柏木正, 造波水路での強制動揺実験における 3 次元影響, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 2008 年 5 月, 長崎

乗富賢蔵, ライザー管リエントリ作業のための訓練シミュレーターの開発, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 2008 年 5 月, 長崎

H.Kajiwara, Development of a Training Simulator for Dynamic Reentry Operations of a Riser Pipe Hanged off, The 18th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 2008 年 7 月, カナダ

M.Kashiwagi, Consideration on 3-D Effects on Results of Forced Oscillation Test in a 2-D Wave Channel, The 18th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 2008 年 7 月, カナダ

W.Koterayama, Model Experiments of Reentry Control Based on Riser Pipe Dynamics, The 8th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp., 2008 年 11 月, タイ

胡長洪, CIP・直交格子法の並列化と性能評価, 第 21 回計算力学講演会講演会, 2008 年 11 月 1 日, 沖縄

梶原宏之, 潮流下におけるライザー管模型のリエントリ制御実験, 平成 21 年日本船舶海洋工学会春季講演会, 2009 年 5 月, 神戸

中村昌彦, 動揺する 1 台のカメラによる 3 次元位置計測精度の検証, 第 21 回海洋工学シンポジウム, 2009 年 8 月, 東京

K.Noridomi, Reentry Control System Design for a Riser Pipe Experimental Model, Under Steady Current, The ICROS- SICE Int. Joint Conf., 2009 年 8 月, 福岡

H.Kajiwara, Control System Design for a Riser Pipe Experimental Model under a Steady Current, Asian-Pacific Universities' Underwater Engineering, 2009 年 12 月, Adelaide(Australia)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小寺山 亘 (KOTERAYAMA WATARU)
九州大学・東アジア環境研究機構・特任教授
研究者番号: 80038562

(2) 研究分担者

梶原 宏之 (KAJIWARA HIROYUKI)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 30114862

中村 昌彦 (NAKAMURA MASAHIKO)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号: 40155859

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
平成 20 年度より分担者に追加

柏木 正 (KASHIWAGI MASASHI)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号: 00161026
平成 20 年度より連携研究者, また同年度より大阪大学へ異動

千賀 英敬 (SENGA HIDETAKA)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号: 60432522
平成 20 年度より連携研究者

大坪 和久 (OHTSUBO KAZUHISA)
海上安全技術研究所・研究員
研究者番号: 50435773
平成 20 年度より連携研究者