

機関番号：17102  
 研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20360395  
 研究課題名（和文） 海底地形追従用自律巡航型海中ビークルの最適機体形状・制御方法に関する研究  
 研究課題名（英文） Research on optimal body form and control method of underwater vehicle following submarine geographical feature  
 研究代表者  
 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

## 研究成果の概要（和文）：

CFD（Computational Fluid Dynamics）手法を用いて海底地形追従型ビークルの機体形状設計を行い、計算された流体力の精度を水槽模型試験により検証した。さらに、得られた流体力係数を用いた運動シミュレーションを駆使することにより運動性能を議論した。運動制御方法については小型 AUV（Autonomous Underwater Vehicle）を使用した実海域試験によっても、検討が加えられた。

## 研究成果の概要（英文）：

The body form design of a underwater vehicle following a submarine geographical feature was carried out by using the CFD(Computational Fluid Dynamics) technique, and the accuracy of the calculated hydrodynamic forces were verified by model tests. Furthermore, the performance of the vehicle was discussed by motion simulations. The motion control method was also examined by field experiments on small AUV(Autonomous Underwater Vehicle).

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：海洋工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋探査・機器、運動制御

## 1. 研究開始当初の背景

最近、地震研究・メタンハイドレード等の海底資源探査・地球深部探査船「ちきゅう」等による深海底掘削の事前調査のため、自律巡航型海中ビークル（AUV:Autonomous Underwater Vehicle）に超音波式海底地形プロファイラーを搭載して、精密な海底断層・地形図を作製することが求められている。こ

の目的のためには AUV を海底地形に精密に追従させて航走させる必要があり、高品質なデータを取得するためには海底地形の傾斜にも追従するようビークルのトリムを制御することが望ましい。このような制御を有利に行うための機体形状は現存する巡航型 AUV とは非常に異なった新しい形状になるはずである。加えて、このような制御を実現するた

めには従来の古典制御に頼るのではなく、新しい制御方法の採用が必要となる。また、海中を長距離航走させるためには、抵抗が少なく、推進効率の良い機体を設計することが不可欠であるが、現在まで開発された自律巡航型海中ビークルはほとんどが紡錘型の物で、現状では最適な機体形状設計がなされているとは言い難い。最適機体形状決定のための手法確立が必要と考えられる。

## 2. 研究の目的

巡航型 AUV は電池等の限られたエネルギー源で長距離を航行しなければならないため、抵抗が少なく、推進効率の良い機体形状設計が不可欠である。また海中を一定水深を保って航走させるのか、海底と定められた距離（高度）を保って海底地形に追従するように航走させるのかなど、使用目的に応じた最適形状は異なるはずである。本研究は海中ビークルを海底地形に追従させて航走させるための最適機体形状・運動制御方法を見出すことを目的とする。

## 3. 研究の方法

海中ビークルの設計にはビークルに働く流体力を把握する必要があるが、縮尺模型を使用した水槽試験が行われてきた。しかし、最適形状を見出すためには、模型製作・水槽試験を繰り返す必要があるが、多大な費用と時間が必要になってしまう。このため、現状では最適な機体形状設計がなされているとは言い難い。この問題を解決するために CFD (Computational Fluid Dynamics) による数値計算により、最適形状を検討する。しかし、CFD は機体形状を変化させた場合の抵抗など流体力学的特性がどのように変化するかについての定性的な所見を得て最適形状を見出すには非常に便利なツールではあるが、定量的には計算精度に疑問が残る。そこで、計算精度を検証するために検討した一つの機体形状について縮尺模型を製作し、水槽試験で流体力を実際に計測し計算精度の検証を行う。最後に得られた流体力係数を使用してビークルの運動シミュレーションを行い、性能を議論する。なお、運動制御方法に関しては研究協力者が所属する機関所有の AUV を用いてシミュレーション・実海域試験により検討する。

## 4. 研究成果

### (1) CFD 手法による流体力計算

CFD コードとして CD-adapco 社の汎用熱流体解析プログラム「STAR-CCM+ver. 4. 06. 011」を用い、まず、流体力の解析に適切なメッシュ数及び乱流モデルを検討した。図 1 に海底地形追従型ビークルの 3D モデル、図 2 に計算領域を示す。ビークル前方の面は速度入口、

後方の面は圧力出口、それ以外の面はスリッブ面であり、流体領域は機体周りの流れに影響を及ぼさないよう十分大きくした。

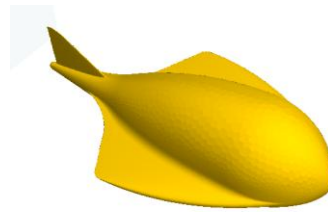


図 1 地形追従型ビークルの 3D モデル

計算メッシュは Boundary-fitted メッシュを採用し、機体周りにレイヤーメッシュを張り、メッシュ形状はポリヘドラルメッシュを採用する。ポリヘドラルメッシュは複雑な形状を持った実問題に対してテトラメッシュと同等の自動メッシュ性を持ちながら、解析精度・安定性・速度に関して大きな優位性を持つ。流れが複雑になる翼まわりはメッシュ制御を施し、より微細にした、地形追従型ビークルのメッシュ構造を図 3 に示す。

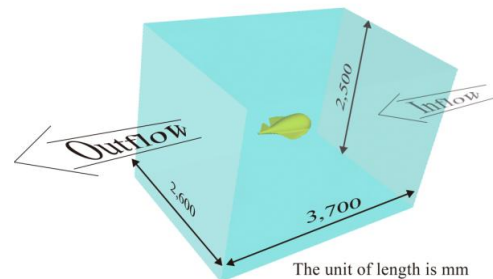


図 2 地形追従型ビークルの計算領域

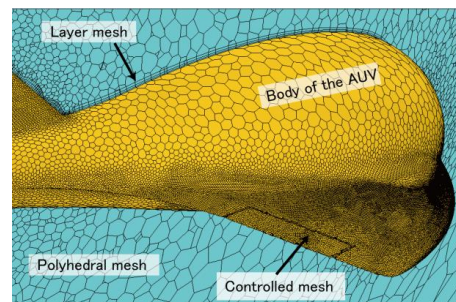


図 3 地形追従型ビークルのメッシュ構造

複雑形状を持つ水中ビークルの解析において、乱流モデルの選択は非常に重要である。乱流モデルは RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation)、LES (Large Eddy Simulation)、DNS (Direct Numerical Simulation) に大きく分類され、RANS をベースにした手法が工学的に最も広く活用されてきている。本研究においては RANS をベースとし STAR-CCM+ で用意されている、Realizable  $k-\epsilon$  2 層モデル (KE)、標準  $k-\omega$  (KO) モデ

ル、SST  $k-\omega$  (SST) モデルの 3 種類を比較検討した。表 1 に示す解析条件で計算したところ、3 つのモデルの中で Realizable  $k-\epsilon$  2 層モデルが模型試験結果と良い一致を示すことがわかった。

表 1 乱流モデル比較における解析条件

解析種別	非圧縮 3 次元定常解析
メッシュ形状	ポリヘドラルメッシュ
レイヤーメッシュ	3 層
レイノルズ数	$1.0 \times 10^7$
メッシュ数	$50 \times 10^4$

CFD の計算精度を高める上でメッシュ数も重要なパラメータの一つである。一般的にはメッシュ数を増加すると計算精度が向上するが、メッシュ数の増加は計算時間の増加をとらうため、効率の良い解析を行うには適切なメッシュ数を設定する必要がある。STAR-CCM+のメッシュ生成の場合、基準サイズと相対最小サイズの 2 つのパラメータによりメッシュ数が決定される。調査に用いた解析条件を表 2 に示す。試計算の結果、ピークル迎角を変化させた時の抵抗係数  $X_{rr}'$  は  $n=100 \times 10^4$  [mesh] 付近で収束、揚力係数  $Z_w'$  は  $10 \times 10^4$  [mesh] 付近で収束し、解析メッシュ数は約  $100 \times 10^4$  [mesh] でよいことがわかった。

表 2 メッシュ数検証における解析条件

解析種別	非圧縮 3 次元定常解析
乱流モデル	Realizable $k-\epsilon$ 2 層モデル
メッシュ形状	ポリヘドラルメッシュ
レイヤーメッシュ	3 層
レイノルズ数	$1.0 \times 10^7$
基準サイズ	0.2143[m]
相対最小サイズ (基準サイズとのパーセント比)	15.0~0.8[%]

## (2) 模型試験による計算結果の検証

付加慣性モーメント等の動的な流体力を精度良く計測するためには、上下揺れと縦揺れ、左右揺れと船首揺れを組み合わせた運動を模型に与え、純縦揺れ、純船首揺れ状態を実現することが不可欠であり（機体固定座標系で流体力を検討するため、縦揺れのみを模型に与えると、上下揺れと縦揺れが合成された運動に対する流体力が計測されてしまう）、複雑な運動を精度良く与えることが可能な強制動揺装置が必要となる。よって、図 4、図 5 に示す強制動揺装置を製作し、実験を行った。



図 4 縦方向強制動揺装置



図 5 横方向強制動揺装置

昇降舵、方向舵（アクチュエーター）の発生する流体力、揚力等の静的流体力は模型を静水中で曳航することによって（図 6、図 7、図 8）得られる。



図 6 昇降舵角変更試験

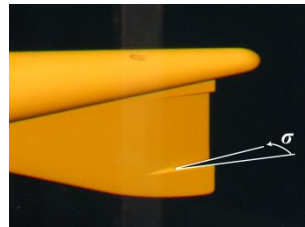


図 7 方向舵角変更試験

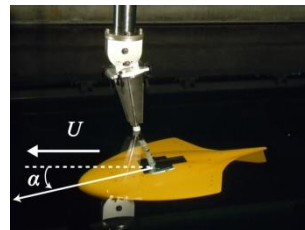


図 8 迎角変更試験

得られた結果の一部を図 9、図 10 に示す。図 9 に示す迎角変更試験では計算結果と実験結果がよく一致しているが、図 10 の昇降舵角変更試験では差が認められる。

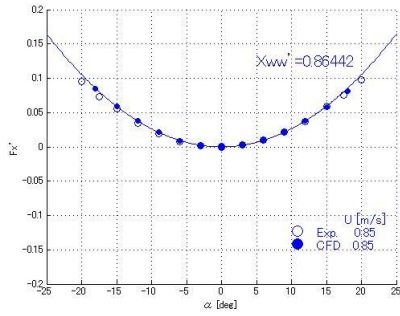


図9 迎角変更試験結果 (抵抗)

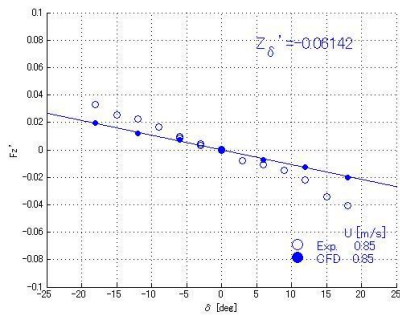


図10 昇降舵角変更試験結果 (揚力)

原因として、可動翼部と固定部間の間隙 (約 2.0[mm]) の影響が考えられたため、クリアランスを約 0.2[mm]に縮小して再計算を行った (模型では間隙が無い) 結果を図 11 に示す。計算結果が改善され、実験結果とよく一致している。最適機体进行を設計するには間隙に十分注意しなければならないことがわかった。

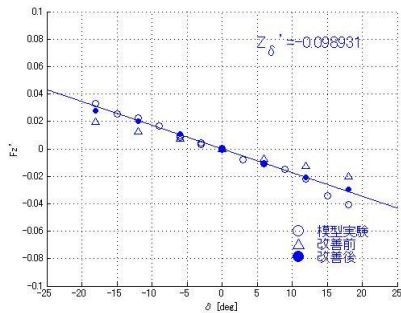


図11 改善された計算結果 (揚力)

付加質量、付加慣性モーメント等の動的流体力は模型を定常流中 (模型を静水中で曳航) で強制動揺することによって (図 12、図 13) 得られる。結果の一部を図 14、図 15 に示す。計算結果は計測結果と概ねよく一致していることがわかる。得られた全係数の試験結果との比較を表 3、表 4 に示す。 $X$  は前後方向の力に関する係数、 $Y$  は左右方向の力に関する係数、 $Z$  は上下方向の力に関する係数、 $L$  は  $x$  軸まわりのモーメントに関する係数、 $M$

は  $y$  軸まわりのモーメントに関する係数、 $N$  は  $z$  軸まわりのモーメントに関する係数を表し、添え字  $u, v, w, p, q, r$  は 3 軸方向の速度 (図 16)、3 軸まわりの角速度に起因する流体力係数であることを示している。なお、値はビークル全長、全幅、曳航速度、水の密度を使用して無次元化されている。

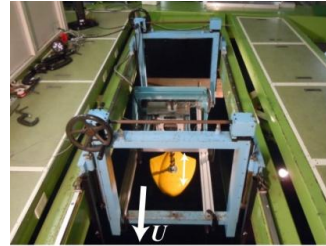


図12 強制前後揺試験

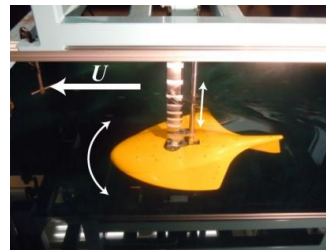


図13 強制純縦揺試験

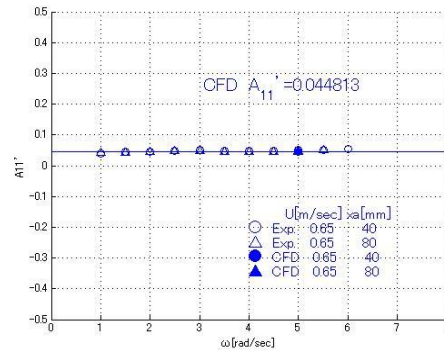


図14 強制前後揺試験結果 (付加質量)

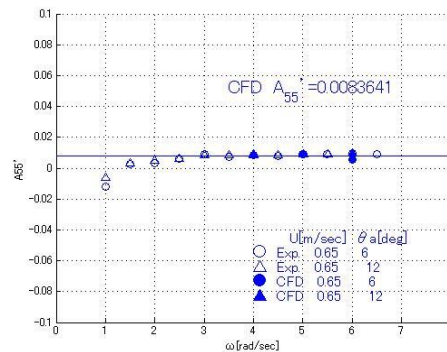


図15 強制純縦揺試験結果 (付加慣性モーメント)

表 3 流体力係数の比較一覧 (a)

流体力係数	静的試験		動的試験	
	模型実験	CFD	模型実験	CFD
$X_{\dot{w}}'$	-0.027711	-0.030406	-0.030517	-0.027099
$X_{\dot{v}}'$	0.063102	0.024255		
$X_{\dot{w}w}'$	0.789390	0.864420		
$X'$	-0.024516	-0.016189		
$X''$	-0.034919	-0.027119		
$Y_{\dot{w}}'$	-0.485610	-0.354650		
$Y_{\dot{v}}'$	-0.355230	0.332420	-0.389700	
$Y'$	0.074136	0.045567		
$Y_r'$				0.018819
$Y_v'$			-0.160020	
$Z_{\dot{w}}'$	-0.053395	0.066443	-0.044276	-0.027531
$Z_{\dot{v}}'$	-1.950100	-1.866900	-1.762100	-1.946100
$Z_{\dot{w}w}'$			-0.3018	-0.345090
$Z'$	-0.106380	-0.098931		
$L_{\dot{w}}'$	-0.013329	0.003715	-0.016376	
$L_{\dot{v}}'$	-0.010947	-0.010915		
$L'$	0.004206	0.002300		
$L_p'$				-0.023264
$L_r'$			-0.020425	
$M_{\dot{w}}'$	0.188570	0.187100	0.145200	0.14692
$M_{\dot{v}}'$			-0.064182	-0.074619
$M'$	-0.013703	-0.013438		
$N_{\dot{w}}'$	0.066640	0.057389		
$N_{\dot{v}}'$	0.033483	0.023814	-0.083901	
$N'$	-0.036937	-0.023887		
$N_p'$				-0.000739
$N_r'$			0.078750	
$L''$	0.054962	-0.003235		
$L''$	0.036291	0.041929		

表 4 流体力係数の比較一覧 (b)

流体力係数	動的試験	
	模型実験	CFD
$A_{11}'$	0.047186	0.044813
$A_{22}'$	0.165690	
$A_{33}'$	0.495040	0.474380
$A_{44}'$		0.004630
$A_{55}'$	0.008127	0.008364
$A_{66}'$	0.005891	
$A_{31}'$	0.011116	0.007679
$A_{21}'$	0.008484	0.003813
$A_{12}'$	-0.006030	
$A_{22}'$	-0.002615	
$A_{11}'$	0.007441	0.009829
$A_{31}'$	0.003634	0.017342
$A_{32}'$		-0.004288
$A_{64}'$		-0.000203
$A_{12}'$	0.030543	-0.002466
$A_{31}'$	0.006132	0.011971
$A_{26}'$	-0.001512	
$A_{66}'$	0.000257	

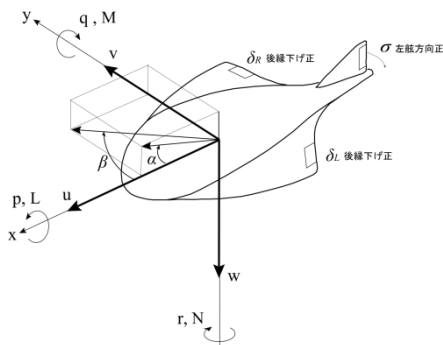


図 16 座標系

(3) 運動シミュレーション結果

運動シミュレーション結果の一例を図 17 に示す。潜航深度を 10m 変更する場合の結果である。安定して深度変更が行えていることがわかる。

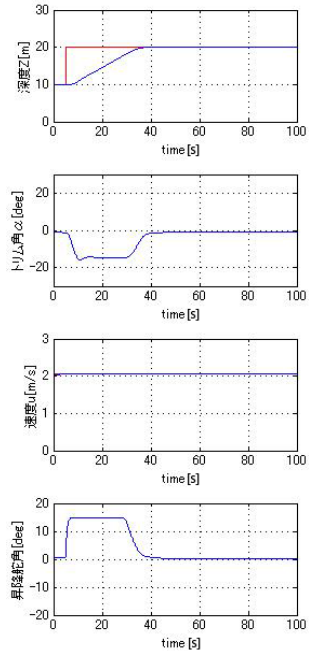


図 17 深度変更シミュレーション結果

(4) 運動制御方法の検討

運動制御方法の検討は JAMSTEC 所有の小型 AUV “MR-X1” (図 18) を使用して行った。速度・針路・深度制御を LQI (最適) 制御で行った結果を図 19 に示す。



図 18 運動制御方法の検討に使用した AUV

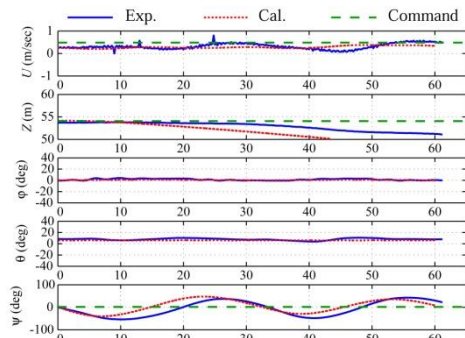


図 19 運動制御結果

針路が振動的であるが、スラスターの動特性を考慮してコントローラーの設計を行うと防止できることがシミュレーションによりわかった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ①中村 昌彦、百留 忠洋、吉田 弘、石橋 正二郎、青木 太郎：小型 AUV “MR-X1” の測線上航走性能向上に関する研究、日本船舶海洋工学会論文集、査読有り、第 12 号、2010 年、pp.165-173
- ②中村 昌彦、石橋 正二郎、百留 忠洋、吉田 弘、青木 太郎：小型 AUV 「MR-X1」 の実海域試験 —その 1 針路制御試験—、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読なし、第 11 号、2010 年、pp.341-344
- ③H. Yoshida, T. Hyakudome, S. Ishibashi, T. Sawa and M. Nakamura: New Attempts in the MR-X1 Sea-Trials - The Working AUV Tries to Survey of the Sea Floor and Take Mud Samples, Proc. of the ASME 29<sup>th</sup> Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有り、2010 年、pp.1-5
- ④M. Nakamura, T. Hyakudome, H. Yoshida, S. Ishibashi and T. Aoki: Motion Control of AUV “MR-X1” for Following Observation Line, Proc. of the 20<sup>th</sup> Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 査読あり、Vol.2, 2010 年、pp.406-412
- ⑤中村 昌彦、百留 忠洋、吉田 弘、石橋 正二郎、青木 太郎：小型 AUV 「MR-X1」 の制御性能向上に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読なし、第 9E 号、2009 年、pp.175-178
- ⑥中村 昌彦、百留 忠洋、吉田 弘、青木 太郎：小型 AUV “MR-X1” のスラスターによる運動制御、日本船舶海洋工学会論文集、査読有り、第 9 号、2009 年、pp.139-153
- ⑦M. Nakamura, T. Hyakudome, H. Yoshida and T. Aoki: Path Control of AUV ” MR-X1” using Thrusters, Proc. of the 19<sup>th</sup> Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 査読有り、Vol.2, 2009 年、pp.657-664
- ⑧T. Hyakudome, M. Nakamura, S. Tsukioka, H. Yoshida, A. Ishikawa, T. Sawa, S. Ishibashi, H. Nakajoh, J. Ishiwata and T. Aoki: Maneuverability Experiments of AUV, Proc. of the 18<sup>th</sup> Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 査読有り、Vol.2, 2008 年、pp.389-393
- ⑨百留 忠洋、中村 昌彦、月岡 哲、石川 曉久、澤 隆雄 (他 5 名)：数式モデル構築のための自律型無人潜水機の実運動特性試験、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読なし、第 6 号、2008 年、pp.461-464

[学会発表] (計 8 件)

- ①中村 昌彦、石橋 正二郎、百留 忠洋、吉田 弘、青木 太郎：小型 AUV 「MR-X1」 の実海域試験 —その 1 針路制御試験—、平成 22 年日本船舶海洋工学会秋季講演会、2010

年 11 月、佐世保

- ②H. Yoshida, T. Hyakudome, S. Ishibashi, T. Sawa and M. Nakamura: New Attempts in the MR-X1 Sea-Trials - The Working AUV Tries to Survey of the Sea Floor and Take Mud Samples, The ASME 29<sup>th</sup> Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2010 年 6 月、上海 (中国)
- ③M. Nakamura, T. Hyakudome, H. Yoshida, S. Ishibashi and T. Aoki: Motion Control of AUV “MR-X1” for Following Observation Line, The 20<sup>th</sup> Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 2010 年 6 月、北京 (中国)
- ④中村 昌彦、百留 忠洋、吉田 弘、石橋 正二郎、青木 太郎：小型 AUV 「MR-X1」 の制御性能向上に関する研究、平成 21 年日本船舶海洋工学会東部支部秋季講演会、2009 年 11 月、東京
- ⑤M. Nakamura, T. Hyakudome, H. Yoshida and T. Aoki: Path Control of AUV “MR-X1” using Thrusters, The 19<sup>th</sup> Int. Offshore and Polar Engineering Conf., 2009 年 6 月、大阪
- ⑥中村 昌彦、百留 忠洋、吉田 弘、青木 太郎：小型 AUV 「MR-X1」 の経路制御、平成 21 年日本船舶海洋工学会春季講演会、2009 年 5 月、神戸

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

小寺山 亘 (KOTERAYAMA WATARU)  
九州大学・応用力学研究所・名誉教授  
研究者番号：80038562

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

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

百留 忠洋 (HYAKUDOME TADAHIRO)  
海洋研究開発機構・海洋工学センター・  
技術研究主任  
研究者番号：90359133

西 佳樹 (NISHI YOSHIKI)  
横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：70470052