

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01644

研究課題名（和文）3次元渦法による波力発電装置の発電性能推定法の開発

研究課題名（英文）Development of Generating Performance Estimation Method of Wave Energy Converter by 3D Vortex Methods

研究代表者

永田 修一（Nagata, Shuichi）

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・特任教授

研究者番号：30404205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：粘性流体の解析に、流速と渦度を未知量とする渦法を用いて、水面の非線形性、浮体表面から発生し、流体中に放出される渦の拡散影響を正確に考慮した浮体の運動と波力発電装置の性能評価を目的とした解析法の開発を行った。没水円柱周りの流れの計算、強制加振された没水平板に作用する流体力計算、波浪中の矩形及び三角形係留浮体の運動等に関する2次元計算を行い、計算結果と水槽実験結果との比較により計算法の有効性を示した。3次元問題に関しては、一様流中にある没水球周りの流れ解析や規則波中の浮体運動解析を行い、計算高速化のための課題を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波浪中の物体や振動水柱の運動等と、入射波の共振状態を利用して発電する波力発電装置の最適設計を行うために、流体の粘性を考え、装置端部から生じる渦の発生と拡散を正確に評価できる“渦法に基づく浮体挙動・発電性能解析手法”を提案した。解析手法の有効性を浮体等の波浪中挙動実験結果との比較を行い検証した。この解析手法は、波浪問題にとどまらず、風と波の同時作用下の環境で係留された、フィン等の動揺低減装置を備えた浮体式洋上風車や浮体式潮流発電装置の浮体・プロペラの一体挙動解析等、多方面への応用が可能で、本研究で提案する解析手法は、粘性影響の考慮が必要な浮体式海洋構造物の一般的な性能解析法となるものである。

研究成果の概要（英文）：In order to estimate motions of a floating body and performance of wave energy converter in nonlinear waves, a numerical analysis method by vortex method, which can consider vorticity creation from the body surface and viscous diffusion of the vorticity into the fluid region is developed. Firstly, this method was applied to a 2D problem such as calculation of a hydrodynamic force acting on a forced submerged horizontal plate, and calculations on motions of a submerged cylinder, a triangular floating body etc. in waves. Tank tests on these cases were also conducted. From the comparison between the calculation results and the experimental results, effectiveness of the proposed calculation method is shown. This calculation method was applied to the motion calculation of a 3D floating body in waves and it was found that the introduction of a high-speed calculation technique was necessary.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：波力発電 3次元渦法 発電性能 境界要素法 振動水柱型装置 水槽実験

1. 研究開始当初の背景

化石燃料の枯渇や地球温暖化への危惧を背景として、海洋再生可能エネルギーの一つである波浪エネルギーを利用して発電する波力発電システムに関する研究開発と具体的な商用化プロジェクトが世界各所で進行している。わが国においても、現在、波力発電の実用化を目指した大型プロジェクトが、経済産業省、NEDO、環境省の主導の下に進められている。これまで、様々なコンセプトに基づいた装置が提案されているが、その主なものは、波エネルギーを空気エネルギーに変換してタービンを回転させ発電する“振動水柱型”と、波エネルギーを可動物体の運動エネルギーに変換して、油圧ポンプ・油圧モータ等を用いて発電する“可動物体型”である。申請者らは、現在、振動水柱型としての浮体型装置“後ろ曲げダクトブイ(BBDB)”と、可動物体型としての浮体型振り子式波力発電装置を開発中である。これらの装置も含め、多くの波力発電装置の最適設計に関連して、以下のような共通の課題がある。

浮体の没水面端部から生じる渦の生成と拡散による流体エネルギー散逸量の評価

波エネルギー吸収装置としての波力発電装置は、装置内の“運動する物体”や“水中ダクト内の振動水柱”の固有周期を、入射する卓越波の周期に一致させ、“共振状態”を作ることでより発電量の向上を図る方法が採用される。このような共振状態では、浮体運動に伴い浮体端部から生じる渦の生成と流体内部への粘性拡散や、振動水柱の壁面摩擦による減衰等の流体の粘性に伴うダンピングが浮体運動や発電効率に大きく影響するため、“流体運動を非粘性の渦なし流れと仮定したポテンシャル理論に基づき計算を行い、浮体運動が大きくなる共振点近傍での粘性影響評価には実験式を用いる”という、これまで浮体構造物設計で常用された性能評価法の適用は不適當で、流体の粘性影響や物体表面から発生する渦の影響を直接考慮できる3次元粘性流体解析法が必須である。

波浪・空気流・浮体運動・タービン等の装置全体系に関する一体解析

通常の振動水柱型装置の設計では、空気室天井にオリフィス孔を設けて、タービン負荷をオリフィス負荷に置き換えたモデルに関する“波パワーから空気パワーへの変換(一次変換)効率”に関する計算結果(または実験結果)に、空気タービン模型に関する風洞試験結果と発電機特性(二次変換)を追加考慮した発電性能評価法が用いられる。この方法では、装置全体の最適化のための構成要素(浮体形状やタービン緒元等)のマッチングが困難で、波浪、空気流、浮体運動、タービン等の装置全体系に関する一体解析が必要である。

2. 研究の目的

本研究で対象とする波浪中の構造物の周りで振動する流れは、高レイノルズ数であり、計算では、物体表面の薄い境界層内部での渦の発生、発生した渦の流体中への拡散、物体からの渦の剥離等を正確に評価する必要があることを考慮して、本研究では、上記の課題解決を目的とした粘性流体計算手法として、渦法を用いる。渦法は、流場の連続的な渦度分布を多数の微小渦要素によって離散的に表し、渦度方程式を数値的に解き、流れに乗った渦要素の移動と拡散を追跡することにより、流場の時間的変化を計算するもので、各時刻で解くべき未知量は境界面上に限定され、境界要素法が適用できるため、有限要素法等の領域型解法に比べ、計算機容量の大幅縮減が可能である。

そこで、本研究では、近年、著しい発展をみせているものの、海洋分野には適用例が少ない渦法を用いて、従来の計算法では困難とされていた、浮体表面から発生し、流体中に放出される渦の粘性拡散影響を正確に考慮して、3次元浮体構造物に作用する流体力や浮体運動、波力発電装置の発電性能を評価できる解析法を開発する。著者らは、既に、粘性流体解析が可能な手法として、“流れ関数と渦度を未知量とした渦法による2次元浮体構造物の非線形波浪中挙動解析法”を既に開発済みであるが、この方法では3次元問題への適用が難しいので、本研究では、新たに、3次元解析への適用が可能な手法として、“流速と渦度を未知量とした渦法を用いた浮体構造物の非線形波浪中解析法”の開発を行う。

計算法の検証のための実験も行う。まず、没水平板やフィン付き浮体の強制動揺試験を行い、平板等に働く流体力を計測し、計算結果との比較を行う。また、振動水柱型波力発電装置に関する“風・波浪による流体運動・係留系・空気室内の空気流・浮体運動・タービンの一体性能解析”の検証用データの取得のために、空気タービンの風洞実験、固定式及び浮体式(後ろ曲げダクトブイ型装置)の振動水柱型波力発電装置の波浪中発電実験を行い、発電効率等のデータを取得する。

3. 研究の方法

(1)流速と渦度を未知量とした渦法による浮体の波浪中挙動解析法の開発

流体は粘性流体として考え、流速と渦度を未知量とした渦法を用いて大波浪中における3次元浮体の挙動解析法を開発する。計算では、まず、Helmholtz-Hodgeの定理に従い、流速ベク

トルを、速度ポテンシャルの勾配として定義した非回転成分と、回転成分の和で表す。渦モデルには Blob モデルを用いる。流速と渦度を未知量とする“渦度方程式”の解法には、Fractional step 法を用いて、時間方向の 1 ステップの計算を、前半の Convection step と後半の Diffusion step の 2 段階で計算する。速度ベクトルの非回転成分計算を行う前半のステップでは、速度ポテンシャルに関する境界積分方程式に、非線形自由表面条件、水底条件、浮体表面条件、波の放射条件を代入して解くことにより、時々刻々、移動する自由表面と浮体表面位置を追跡する。渦度の粘性拡散を計算する後半のステップでは、拡散方程式の解析解をベースにした Core-Spreading 法を用いて、流体の粘性影響計算を行う。流体圧力の計算には、Uhlman(1992)によって提案された、粘性流体を対象とした“総エネルギーに関する境界積分方程式”を用いる。また、浮体壁からの渦の発生と流体内部への拡散には、今村らの渦層モデルを拡張し、浮体端部からの渦の剥離を考慮できるようにする。境界積分方程式の数値計算には 2 次要素を用いる。開発した計算法は、水面下にある平板やフィン付き浮体の強制加振に関する新規の水槽実験結果との比較により、計算法の検証を行い、計算法の精度向上を図る。

(2) 渦法計算の波力発電装置への適用と計算法の検証

a) 計算

流速と渦度を未知量とした渦法に粘性流体解析法の有効性を示すために、まず、2 次元問題を対象に、2 次元の没水円柱周りの流れの計算、強制加振された没水平板に作用する流体力計算、波浪中の矩形及び三角形係留浮体の運動に関する計算を行い、計算結果と水槽実験結果を比較する。浮体式の振動水柱型波力発電装置“後ろ曲げダクトブイ”の波浪中漂流力の計算、を行った。

次に、流速と渦度を未知量とした渦法を 3 次元問題へ適用する。一様流中にある球周りの流れ解析や規則波中の浮体運動解析へ適用する。

b) 実験

まず、水面下にある没水平板やフィン付き浮体の強制加振に関する実験を行い、平板や浮体に作用する流体力を計測し、計算法の検証用データとする。

次に、振動水柱型波力発電装置に関する“風・波浪による流体運動・係留系・空気室内の空気流・浮体運動・タービンの一体性能解析”の検証用データの取得のために、衝動型空気タービンの風洞実験、固定式及び浮体式(後ろ曲げダクトブイ型装置)の振動水柱型波力発電装置に関する波浪中発電実験を行う。

4. 研究成果

(1) 計算関係

a) 流速と渦度を未知量とした 3 次元渦法の基礎方程式の誘導

流速と渦度を未知量とした 3 次元渦法を水面波や浮体運動の計算に用いる際の 3 つの基礎方程式(2 つの積分方程式と 1 つの微分方程式)を明確にした。具体的には、非圧縮粘性流体に関する微分型表示の連続の式と Navier-Stokes 方程式から、Uhlman と別の方法で、Uhlman と同様な流速と渦度を未知量とする 3 つの積分方程式から構成される積分型境界値問題を導いた。第一の式は流速に関する積分方程式であり、流体の境界を考慮した Bio-Savart の式である。第二の式は、渦度に関する積分方程式である。第三の式は、総エネルギーに関する積分方程式である。ただ、この 3 つの式の使用では、計算の過程で、流体内部の渦度も未知量となるため、第二の式の積分方程式の代わりに、対応する微分型の式(渦度方程式)を用いることにする。さらに、この渦度方程式に、Viscous splitting 法(Fractional Step 法)を適用する。この結果、計算の過程において、未知量は流体境界のみに存在するため、境界要素法が適用できることになり、計算機容量の大幅縮減が可能となった。

b) 流速と渦度を未知量とした渦法による浮体の波浪中挙動解析法の開発

流速と渦度を未知量とする渦法をベースに、水面の非線形性、浮体表面から発生し、流体中に放出される渦の拡散影響を正確に考慮して、3 次元浮体の運動を時間的に追跡する高速の粘性流体解析法を示した。この解析法の有効性を示すために、まず、この解析の次元を一つ下げた 2 次元問題について、定式化、計算プログラムの作成、実験結果との比較を行い、一連の計算手法(流速と渦度を未知量とした解法、Core-Spreading 法による粘性拡散手法、渦層モデル等による物体表面からの渦の発生と流体内部での渦の粘性拡散モデル、Uhlman によって提案された、粘性流体を対象とした“総エネルギーに関する境界積分方程式”を用いた流体圧力計算等の計算要素部分)の有効性を調べた。具体的には、計算手法の有効性を示すために、以下の作業を行った。

一様流中にある 2 次元円柱周りの粘性流体の流れ解析を行い、円柱周りの流速に関する計算結果と実験結果を比較することにより計算法の有効性を示した。
自由表面下で鉛直周期運動を行う 2 次元没水水平平板に作用する鉛直流体力に関する計算結果と実験結果を比較することにより計算法の有効性を示した。

係留された没水円柱の非線形波浪中の時系列計算を行い、浮体運動の時系列に関する計算値と対応する実験値を比較し、両者が良く一致することを確認した。係留された矩形浮体や三角形浮体の波浪中運動に関する計算値と実験値を比較して計算手法の有効性を示した(図1、図2、図3)。これらの図中で、EXP は実験値、Method-1 は、流体の粘性を考慮した渦法を用いた計算値、Method-2 は、流体の粘性と渦を無視した計算値(ポテンシャル計算値)、Tは無次元化時間である。

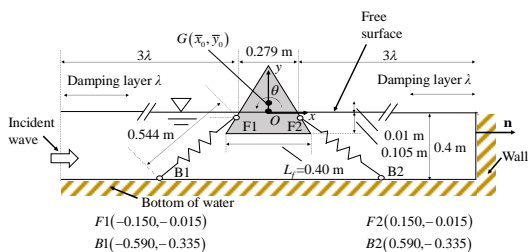


図1 三角形浮体

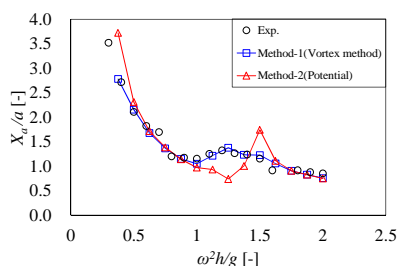


図2 浮体の鉛直運動振幅の周波数特性

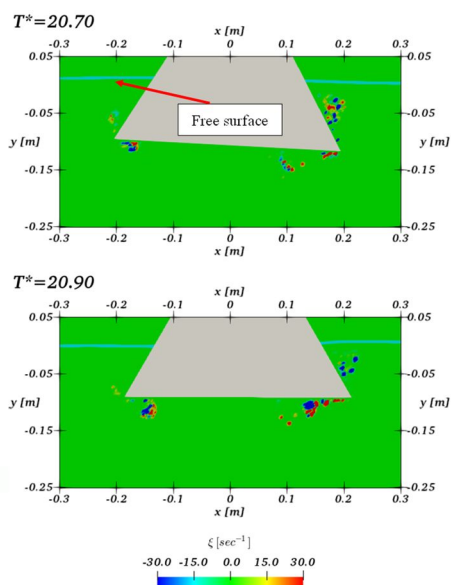


図3 浮体周りの渦度分布
(2つの時刻 $T^*=20.7, 20.9$)

浮体式の振動水柱型波力発電装置“後ろ曲げダクトブイ”の波浪中漂流力の計算を行った。

以上の2次元問題に対する計算結果と実験結果は良く一致しており、本計算法の基本的な方法の有効性が示された。

次に、3次元問題への適用として、この計算法を一様流中にある没水球周りの流れ解析と規則波中の浮体運動解析へ適用した。これらの計算から、本計算法を実用的な計算とするためには、高速多重極法やCPGPU技術等の計算高速化手法の導入や自由表面に近づいた渦の処理法を考慮する必要があることがわかった。

(2)実験関係

開発した計算法をOWC型波力発電装置へ適用することを考慮して、計算法の検証データの取得と、波浪中の固定式及び浮体式の振動水柱型波力発電装置の特性把握を目的に、各種実験を行った。

- a) 2次元造波水槽に空気室、衝動型空気タービン、発電機を備えた固定式振動水柱型波力発電装置を設置して、波浪やタービン等の条件を変化させた実験を行い、波パワーから空気パワーへの変換効率(一次変換効率)、空気パワーからタービンパワーへの変換効率(タービン効率)、発電効率等を計測して、空気室形状やタービン形状が各変換効率に及ぼす影響について調べた(図4)。
- b) 浮体式の振動水柱型波力発電装置“後ろ曲げダクトブイ(BBDB)”の3次元模型に関する波浪中発電実験に関して、従来実施したタービンを強制的に回転させながら、トルク変動を計測して発電量を求める方法、タービンを強制回転させずに、空気流に即したタービンの回転から発電量を求める、の2つの発電方法による実験結果を再整理して、比較することにより、タービンの運転方法が発電出力に及ぼす影響について調べた(図5)。
- c) 自由水面下で鉛直周期運動する2次元没水水平平板に作用する鉛直流体力や、強制加振されたフィン付き浮体に作用する流体力に関する実験を行い、流体力係数等に関する実験値を取得した。

d) 浮体式の OWC 型波力発電装置の設計では、風・波作用下での装置の運動推定が必要となるため、このような自然環境の下での計算法の検証データ取得のために、2次元造波水槽に、新規に製作した送風装置を設置して、風・波作用下での浮体の挙動実験を実施して、風と波が浮体運動に及ぼす影響について調べた。

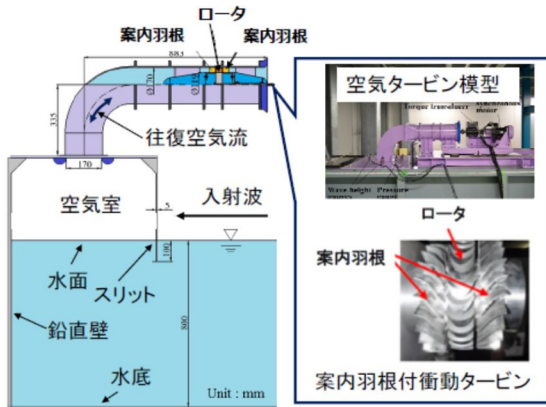


図4 固定式の振動水柱型波力発電実験装置



図5 浮体式振動水柱型波力発電装置 (BBDB)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 岡本 豊, 永田 修一, 今井 康貴, 新里 英幸	4. 巻 29
2. 論文標題 渦法による自由表面下で強制振動する平板周りの流場解析 - 流速と渦度を未知量とした基礎式に基づく2次元粘性流体解析 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会論文集	6. 最初と最後の頁 25-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.29.25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 B. Chen, S. Nagata, T. Murakami, D. Ning	4. 巻 179
2. 論文標題 Improvement of Sinusoidal Pitch for Vertical-Axis Hydrokinetic Turbines and Influence of Rotational Inertia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 273-284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2019.03.038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 高尾学, 山田航平, 奥原真哉, 木上洋一, 永田修一, 瀬戸口俊明	4. 巻 46
2. 論文標題 波力発電用二重反転衝動タービンに関する研究(性能に及ぼす中間羽根の影響)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 692-698
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11458/tsj.46.11_692	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 T. Murakami, Y. Imai, S. Nagata and M. Takao 14	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental Investigation on a Fixed Oscillating Water Column with an Impulse Turbine for Wave Energy Conversion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Energy and Power Engineering	6. 最初と最後の頁 16-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17265/1934-8975/2020.01.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 永田修一	4. 巻 56
2. 論文標題 波力発電の研究開発動向	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 マリンエンジニアリング学会誌	6. 最初と最後の頁 66-73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5988/jime.56.236	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 1件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yutaka Okamoto, Shuichi Nagata, Yasutaka Imai, Hideyuki Niizato
2. 発表標題 Calculation of Hydrodynamic Force Acting on the Forced Oscillating Plate by Vortex Method
3. 学会等名 Proc. of the 29th ISOPE Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuichi Nagata
2. 発表標題 Development of a Floating OWC-type Wave Energy Converter "Backward Bent Duct Buoy"
3. 学会等名 International Ocean Energy Symposium & 18th Joint Young Researcher Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuichi Nagata, Yasutaka Imai, Tengen Murakami, Shigeki Okubo, Yutaka Okamoto
2. 発表標題 Application of Vortex Method to performance Analysis of Wave Energy Converter: Vorticity Creation Method from the boundary
3. 学会等名 Proceedings of the 4th Asian Wave and tidal Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasutaka Imai, Shuichi Nagata, and Tengen Murakami
2. 発表標題 Conversion characteristics of permanent magnet synchronous generator on wave energy converter
3. 学会等名 Proceedings of the 4th Asian Wave and tidal Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Manabu Takao, Seisuke Fukuma, Miah Md. Ashrafal Alam, Yoichi Kinoue, Shuichi Nagata, Toshiaki Setoguchi
2. 発表標題 Performance Prediction of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion -Effect of Simple Cascade on the Performance
3. 学会等名 Proceedings of the 4th Asian Wave and tidal Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Murakami, Y. Imai, S. Nagata, M. Takao, T. Setoguchi, T. Kanemoto
2. 発表標題 Primary and Secondary Conversion Efficiencies of a Fixed Oscillating Water Column-Type Wave Energy Converter with Generator
3. 学会等名 Conference on Modelling Fluid Flow (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本豊、永田 修一、今井 康貴、新里 英幸
2. 発表標題 渦層モデルを用いた二次元渦法による円柱周りの流場解析
3. 学会等名 第27回海洋工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Okamoto, S.Nagata, Y.Imai, H. Niizato
2. 発表標題 Application of vortex method using fluid velocity and vorticity as unknown variables to motion analysis of a floating body in waves
3. 学会等名 Proc. of the 30th ISOPE Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hideo Kondo, Yusaku Kyozyuka, Shuichi Nagata, Yasuyuki Ikegami, Takeaki Miyazaki, Kenji Yano	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Institute of Ocean Energy, Saga University	5. 総ページ数 176
3. 書名 Ocean renewable Energy Engineering with Japanese Experience	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高尾 学 (Takao Manabu) (00332057)	松江工業高等専門学校・機械工学科・教授 (55201)	
研究分担者	石田 茂資 (Ishida Shigesuke) (30360712)	佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授 (17201)	
研究分担者	今井 康貴 (Imai Yasutaka) (90284231)	佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・准教授 (17201)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	村上 天元 (Murakami Tengen) (90611278)	佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・准教授 (17201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関