

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04496

研究課題名（和文）任意にカラムを配置した浮体式プラットフォームの渦励起運動簡易予測モデルの開発

研究課題名（英文）Development of a simple prediction model for vortex-induced motion of floating platforms with arbitrarily placed columns

研究代表者

平林 紳一郎 (Hirabayashi, Shinichiro)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：90463877

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：流れの中でのセミサブ型浮体のカラム同士の渦干渉がもたらす流体力について、模型実験による流体力データベースを構築することでその傾向を明らかにし、数理モデルによる推定の可能性と限界を示した。機械学習により2円筒のデータベースから4円筒の各流体力を精度よく推定し、当初の目的であった任意の数、場所に配置した流体力を推定することを部分的にはあるが達成できたと言える。渦励起運動に関する新たな知見としては、浮体没水部に水平に伸びた筒状部材が存在する場合、これまで着目されてこなかった heave, pitch, rollなどの上下方向の渦励起運動が励起される可能性があることを模型実験により初めて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

浮体式洋上風車の浮体部として今後活用が見込まれるセミサブ型は没水部が複数の細長い部材で構成され、流れの中で各部材から放出される渦、あるいはそれらの干渉により複雑な浮体運動を生じる。本研究の成果により、この渦干渉の影響は数理モデルや機械学習を用いて簡易的に予測できることが示され、今後データベースを充実させることにより、将来的には浮体設計に生かせるレベルの実用的なモデル開発に繋がる知見を得た。本研究で新たな知見として得られた縦方向の渦励起運動についても、同様に簡易モデルで扱うことができると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The trend of hydrodynamic forces caused by vortex interference between columns of a semi-submersible floater in a flow was clarified by constructing a hydrodynamic force database based on model experiments, and the possibility and limitation of estimation by mathematical models were shown. It was shown that each fluid force of four circular cylinders from the database of two cylinders was accurately estimated by machine learning, and our initial goal of estimating fluid forces at arbitrary numbers and locations was achieved under partial condition. As a new finding concerning vortex-induced motion, it was shown for the first time that the vortex-induced motion in the vertical direction such as heave, pitch, and roll can happen for the floater with horizontally extending cylindrical member in the submerged part, which have never been focused on so far.

研究分野：海洋工学

キーワード：浮体式プラットフォーム 渦励起運動 複数カラム 低アスペクト比 機械学習 共振

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

わが国には広大な面積ゆえに豊富なエネルギーポテンシャルを持つ EEZ が存在し、これを活用した再生可能エネルギーの利用普及に大きな期待が寄せられている。しかしながら、わが国における総発電量に占める風力発電の割合は 1% 未満に留まっており、太陽光発電に比べて利用が遅れている。一方、欧州では風力発電の利用が拡大しており、デンマークなど一部の国では国内発電量の半分近くを賄うまでに普及が進んでいる。遠浅の海域が広く分布する欧州とは異なり、わが国では沖合での水深が急に深くなるため、着底式ではなく浮体式のプラットフォームに優位性があるとされている。

浮体式洋上風車は風、波浪、海流・潮流から変動する外部荷重を受けて動揺するが、浮体を海底に繋ぎ止めている係留索により稼働範囲は水深条件に拘束される。浅海域では係留索の張力変動が容易に大きくなり、20 年間の長期運用時の疲労蓄積による寿命低下が懸念されている。運用中の係留索の交換によるコスト増を避けるためには、これらの変動荷重を受けた風車浮体 - 係留システムの挙動を定量的に評価し、設計に反映することが必要である。現在、浮体式風車の運動性能評価ツールは FAST や UTWind をはじめ、世界中で開発が進み、設計に用いられている。これらの運動予測ツールでは、風や波浪による荷重は考慮されているが、浮体周りに発生した渦による粘性起因の変動流体力とそれに伴う渦励起運動は考慮されていない。特に複数のカラムで構成されるセミサブ型浮体は、それぞれのカラムから生じた渦同士の干渉効果のために渦励起運動は浮体形状やカラムの配置に大きく依存する。渦励起運動の予測には、浮体形状を決めた後に縮尺モデルによる水槽実験を行うか、粘性影響を考慮できる数値流体シミュレーションを行う必要がある。いずれの場合も大きなコストおよび時間を要するもので、実際には渦励起運動の影響は設計の段階において十分に考慮されているとは言い難いのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、任意に複数のカラムを配置した浮体の渦励起運動を簡易的に予測するモデルを開発することである。カラム形状は代表的な円柱または角柱を対象とする。相互干渉する各カラムに働く流体力について、既往研究で発表されている知見に加えて本研究で模型実験や数値流体シミュレーションを実施することで、カラム同士の位置関係を表すパラメータに応じた関数またはデータベースを構築する。これを外力とする運動方程式を解くことで、任意形状の浮体の運動を簡便に予測するモデルが完成する。さらに、浮体式洋上風車の渦励起運動は報告例も少なく十分に理解されている訳ではないため、これに関する新たな知見を得ることも目的としている。

3. 研究の方法と成果

(1) 任意に配置された低アスペクト比 2 円筒に作用する一様流中流体力データベースの構築

渦励起運動のモデル化にあたり、水槽での模型実験による流体力データベースを行った。VIM が発生するような低 AR 円筒浮体にかかる流体力データベースを得るために、東京大学の生産技術研究所回流水槽にて円筒模型を用いた強制加振実験を行った。円筒模型最大 4 本で構成される浮体モデルを強制加振装置に固定し、一様流を当てながら cross-flow 方向に強制加振させ、円筒に取り付けた検力計 (LMC3502-A, 日章電機) で各主成分を計測した。また加振中の変位はレーザー距離計 (LK-500, KEYENCE) で計測をした。

2 円筒間の配置とパラメータの関係を Fig. 1 に示す。

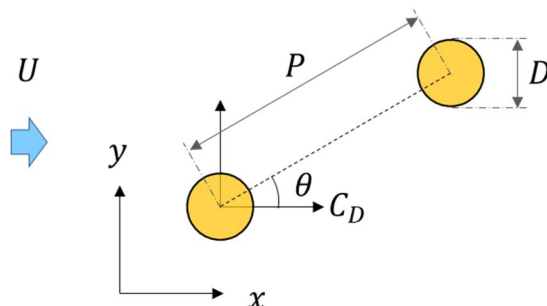


Fig. 1 Schematic diagram of two circular cylinders.

各配置条件における流体力より、抗力および揚力の平均・変動成分、付加質量係数、減衰係数を算出しデータベースとした。結果の例を Fig. 2 に示す。

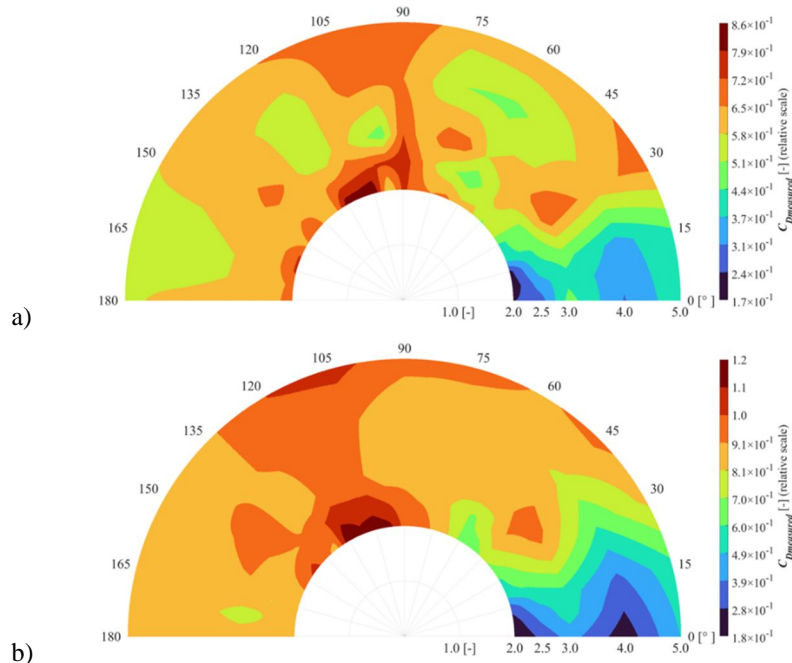


Fig. 2 Contour map of measured C_D , (a) $f^* = 0, A^* = 0$, and (b) $f^* = 0.14, A^* = 0.5$.

(2) 流体力のモデル化

数値モデルによる推定

一様流中に存在する複数円筒にかかる流体力係数を互いに独立な複数の変数からなる関数で再現する流体力モデルを構築する。対象となる無次元係数は平均抗力係数 C_D 、平均揚力係数 C_L 、変動抗力係数 C_D' 、変動揚力係数 C_L' の4つである。カラム中心間距離比 P^* 、一様流に対する円筒間角度 θ 、無次元加振振動数 f^* 、無次元加振振幅 A^* が変数である。

各流体力について以下の1式に示すように、 A^* に対して線型近似ができると仮定した。

$$C = a_0(\theta, P^*, f^*)A^* + b_0(\theta, P^*) \quad (1)$$

$$a_0(\theta, P^*, f^*) = \hat{a}_1 a_1(\theta) \times \hat{a}_2 a_2(P^*) \times \hat{a}_3 a_3(f^*) \quad (2)$$

$$b_0(\theta, P^*) = \hat{b}_1 b_1(\theta) \times \hat{b}_2 b_2(P^*) \quad (3)$$

モデル化の結果例を Fig. 3、4 に示す。

Fig. 3 に示す平均抗力係数では、概ね実験値とモデル結果は一致しているが、 $0^\circ < \theta < 30^\circ$ 、 $3 < P^*$ における抗力の極小値を捉えることができず、誤差が大きくなっている。誤差は平均的に10%程度であった。Fig. 4 に示す平均揚力係数では、モデル結果では辛うじて inner lift peak に当たる箇所での負のピークは再現できているものの、全体的にばらつきの少ない分布となっている。揚力には正負両方の値が分布していて、モデル化過程での正負判定が結果に大きく影響している。誤差も100%を超える箇所が見られた。

数値モデルでは平均抗力、変動抗力、変動揚力については概ね傾向を捉えることができているものの、平均揚力成分については推定ができていない。また、前者についても数10%程度の誤差は残っており、数値モデルによる推定には限界があると考えられる。

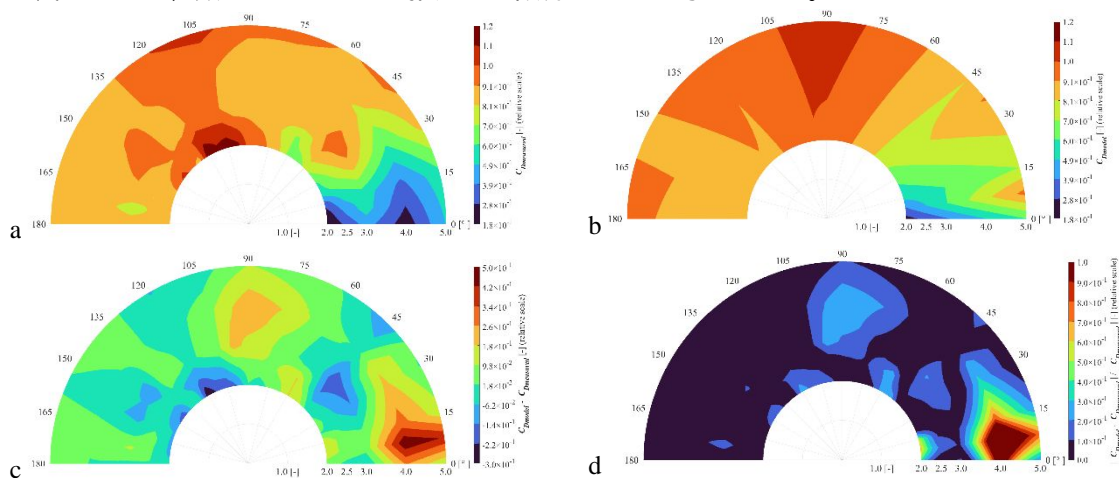


Fig. 3 Contour map of C_D at $f^* = 0.14, A^* = 0.5$, (a) measured and (b) predicted by model, (c) difference between (a) and (b), (d) error ratio.

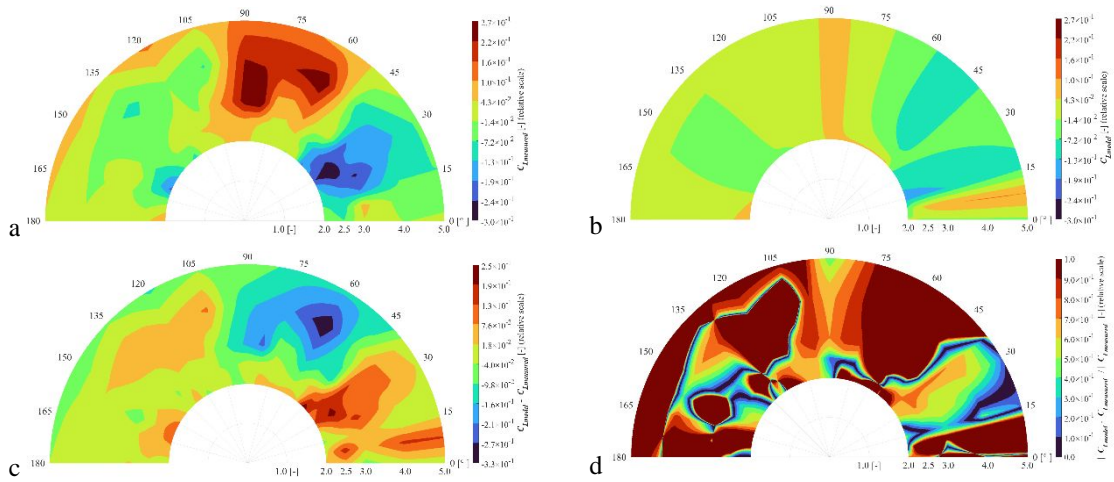


Fig. 4 Contour map of C_L at $f^* = 0.14$, $A^* = 0.5$, (a) measured and (b) predicted by model, (c) difference between (a) and (b), (d) error ratio.

機械学習モデルによる推定

本章では、4つの円筒を有する浮体のそれぞれの円筒に作用する流体力を、2つの円筒間の流体力データベースから推定することを目指す。既に提案されている今井(2021)のモデルに加えて、機械学習を導入したモデル化を行った。使用した流体力は先の実験によるデータベースのうち固定状態にある条件のものである。

4円筒の位置関係は円筒 a を基準にし、隣り合う円筒との中心間距離を直径で割った値 P/D と4円筒が作る正方形の中心からの流れに対する角度 θ によって表される。円筒 a の流体力は、円筒 b , c , d が作る流れの干渉によって決まると考え、各円筒からの影響をパラメータとして導くことを考える。

今井(2021)は最大影響円筒モデルと重ね合わせモデルの2つの数理モデルを提案した。

$$\begin{aligned} \text{最大影響円筒モデル} & \quad \text{model}_{max} = \max(E_i) + C_{single} \\ \text{重ね合わせモデル} & \quad \text{model}_{add} = \Sigma E_i + C_{single} \end{aligned}$$

ここで、 E_i は円筒 a と円筒 i (b, c, d のいずれか)の2円筒配置の場合の流体力係数から、単一円筒の流体力係数を引いた差である。これらは高アスペクト比条件で提案されたもので、本研究では低アスペクト比条件でこのモデルを検証する。本研究では線形回帰(LR)、決定木回帰(DTR)、勾配ブースティング回帰(GBRT)、ガウス過程回帰(GPR)、ニューラルネットワーク(NN)による回帰の5つの手法でモデルを構築し、予測値を算出した。

Fig. 5aは、 $P/D = 3$ における変動抗力係数の、今井の最大影響モデル(Imai(max))、重ね合わせモデル(Imai(all))、線形回帰モデル(LR)と実験値(Exp)を比較したグラフである。平均抗力係数と変動揚力係数は実験値をあまり再現できなかったが、変動抗力係数と変動揚力係数は、重ね合わせモデルが実験値に近い値や増減を示した。線形回帰モデルは、全ての流体力係数において今井の両モデルより精度が高かった。構築されたモデルから、4円筒配置では下流側の円筒による影響は小さくなり、上流側にある円筒からの影響が支配的となった。

Fig. 5bに示すように、機械学習によるモデルの出力結果を手法ごとに比較した。ガウス過程回帰はいずれの流体力係数においても柔軟にグラフを表現できている。ニューラルネットワークは C_D はある程度値の増減を表現できていたのに対し、他の流体力係数については直線的なグラフとなっていて、 θ との関係を表現することはできていない。決定木は C_D' , C_L' についてはグラフの増減を比較的正確に表現できている。

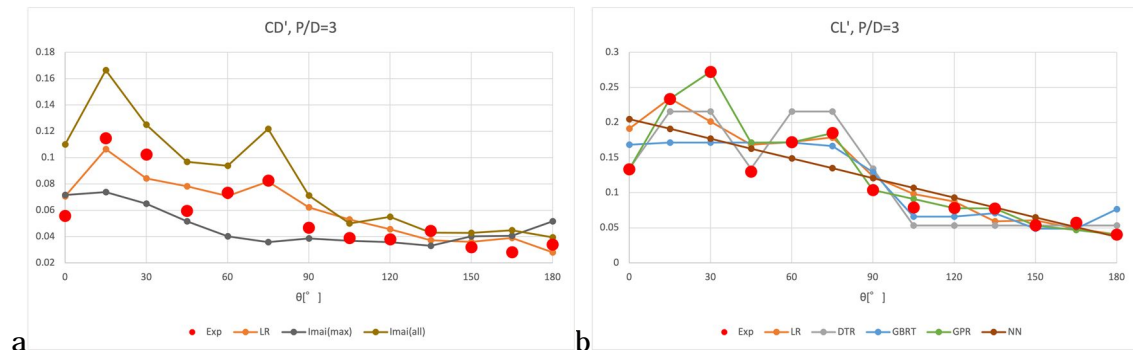


Fig. 5 (a) C_D' by Imai's models and Linear, and (b) C_L' by machine learning models ($P/D = 3$).

$P/D = 3$ における各流体力係数の推定値と実験値との誤差を RSME として比較したところ、線形回帰モデルでは今井のモデルよりも精度がやや向上しているが、これは今井の数理モデルでは考慮しきれていない円筒間干渉要素が取り入れられているためである。また、実験値との比較ではガウス過程回帰モデルが最も再現精度が高いという結果が得られたが、これは入力データに依存することが考えられる。

(3) 新たな VIM 現象の提案と実証

これまで VIM 研究は水平方向の長周期動揺に限定されてきたが、特殊な条件下では浮体の Heave, Pitch, Roll などの縦方向の動揺強制力が発生し、それぞれの固有周期と共振する可能性があると考え、実験にて実証した。

1/60 モデルの浮体に対し流れを当てる実験を行い、その流速と浮体の角度を変化させることによりポンツーン周りに発生する渦が、浮体の Heave, Roll, Pitch に与える影響を調べる。実験は浮体を曳引台車に係留した状態で曳航する曳航実験の形式をとった。

実験には細長いポンツーンを有するセミサブ型の模型を用いた。渦励起運動について調べるため、曳航速度、浮体角度の 2 つの条件を変化させて実験を行った。流速は 0.05 m/s から 0.40 m/s までを 0.01 m/s ずつ、また角度条件は 0° , 15° , 30° , 45° , 60° について行った。

Fig. 6 に示すのは 0° における各運動の卓越する周波数をプロットしたものである。横軸は換算流力、縦軸は(a)が周波数、(b)が周波数をその方向の固有周波数で無次元化したものとなっている。(b)のグラフより、Pitch と Heave については $V_r < 5$ では渦放出周波数で運動しており、Heave については $V_r = 5$ 付近でロックインが生じていることが分かる。このとき、Pitch も同時にロックインになっており、(b)のグラフより、両者は同じ周波数となっていることから、Pitch が Heave に引き込まれて連成運動が生じていることが分かる。

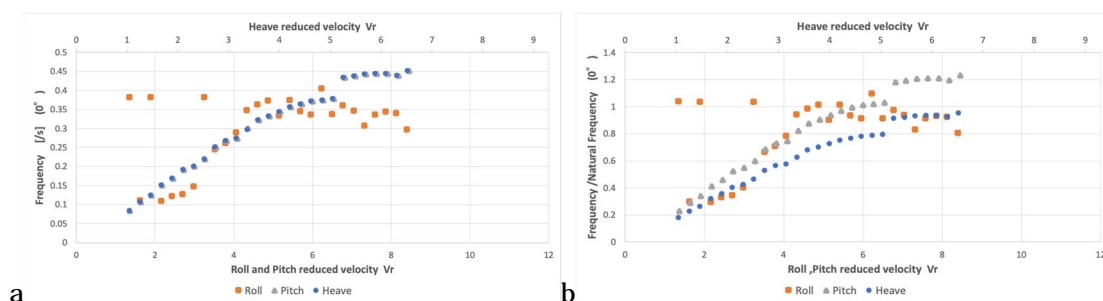


Fig. 6 Frequency of dominant motion at 0° condition, with (a) frequency with dimension and (b) non-dimensional frequency.

本実験により、細長いポンツーンを有する浮体については縦方向の VIM 起振力が生じ、固有周波数と共振し得ることが初めて実証された。また、本浮体については Pitch, Roll は Heave と連成し、それぞれの固有周波数の外に Heave の固有周波数でもロックインとなることが示された。

4. 研究成果

国内学会

内藤 悠基, A Study of Heave and Roll and Pitch Motion in Flow of Lightweight Floating Offshore Wind Turbines, 日本船舶海洋工学会令和 4 年秋季講演会若手ポスターセッション, 2022 (最優秀賞を受賞).

平林 紳一郎, 松下 凜太郎, 一様流中に配置された低アスペクト比 2 円筒に作用する流体力のモデル化, 日本船舶海洋工学会令和 5 年春季講演会, 気仙沼, 2023.

DOI: 10.14856/conf.36.0_491

国際学会

Yuki Naito, Shinichiro Hirabayashi, Hideyuki Suzuki, Rodolfo T. Gonçalves, Experimental Study on Flow-Induced Pitch, Roll, and Heave Motions of a Semi-Submersible Floater with Long Pontoons, ASME 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2023), Melbourne, 2023 (査読あり).

DOI: 10.1115/OMAE2023-104664

学位論文

松下 凜太郎, 任意に配置された低アスペクト比 2 円筒に作用する一様流中流体力に関する研究, 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文, 2022.

羽田 奎介, 機械学習による複数カラム型浮体に作用する流体力のモデル化, 東京大学工学部卒業論文, 2023.

内藤 悠基, ポンツーン周りの渦影響による浮体式洋上風の Heave・Roll・Pitch に関する研究, 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 内藤 悠基
2. 発表標題 A Study of Heave and Roll and Pitch Motion in Flow of Lightweight Floating Offshore Wind Turbines
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 令和4年秋季講演会 若手ポスターセッション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平林 紳一郎、松下 凜太郎
2. 発表標題 一様流中に配置された低アスペクト比 2 円筒に作用する流体力のモデル化
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 令和5年春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Naito, Shinichiro Hirabayashi, Hideyuki Suzuki, Rodolfo T. Goncalves
2. 発表標題 EXPERIMENTAL STUDY ON FLOW-INDUCED PITCH, ROLL, AND HEAVE MOTIONS OF A SEMI-SUBMERSIBLE FLOATER WITH LONG PONTOONS
3. 学会等名 ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------