

令和 4 年 5 月 12 日現在

機関番号：44203

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04165

研究課題名（和文）CFDによる海流発電用回転装置の動特性の解析と形状の最適化

研究課題名（英文）Analysis of dynamic characteristics and optimization of shape of rotator for ocean current generation by CFD

研究代表者

河村 哲也（Kawamura, Tetuya）

滋賀文教短期大学・その他部局等・研究員（移行）

研究者番号：40143383

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：海流発電の実用化を目指して、S字型、サボニウス型、J型の鉛直軸抗力型回転装置およびまぐろ型と呼ばれる新型の水平軸抗力型回転装置について、数値シミュレーションにより性能を調べた。発電装置全体の大きさを小さくするためには、複数の回転装置を近接して並べる必要があるが、その場合には回転装置間の相互作用が無視できない。そこで、鉛直軸回転装置については、特に相互作用に注目しながら、流れの角度や回転速度、装置間距離などを変化させて出力に及ぼす影響を調べた。まぐろ型については、予想に反して、ブレードを前に大きく突き出した形状がもっとも高い出力が得られることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複数の回転装置が独立して回転する状況を精度よくシミュレーション可能な数値計算法を開発した。すなわち、全体領域を静止座標系で表示し、その中に回転装置とともに回転する座標系を埋め込むという方法を考えた。領域間の流れ場のデータの受け渡しで計算精度が落ちるが、接合領域を円周にすることにより計算時間や精度が改善された。このように数値計算法の改良という点で学術的意義がある。なお、この方法は回転装置の個数に影響されない。本研究では種々の回転装置に対して、出力に関するパラメータを系統的に変化させてデータ収集を行ったため、海流発電の実用化に向けた基礎データの取得という意味で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Aiming at the practical application of ocean current power generation, we investigated the performance of S-shaped, Savonius-type, J-type vertical-axis drag-type rotary devices and new horizontal-axis drag-type rotary devices called tuna-type by numerical simulation. In order to reduce the size of the entire power generation device, it is necessary to arrange multiple rotating devices in close proximity, but in that case, the interaction between the rotating devices cannot be ignored. Therefore, for the vertical axis rotating device, we investigated the effect on the output by changing the flow angle, rotation speed, distance between devices, etc., paying particular attention to the interaction. As for the tuna type, contrary to expectations, it was found that the shape with the blade protruding greatly forward gives the highest power.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 数値シミュレーション 海流発電 風車形状最適化

## (1) 研究開始当初の背景

風力発電や太陽光発電がもつ天候に左右されやすいという欠点をカバーできる自然エネルギーの代表に海流エネルギーがある。運動する流体が持つエネルギーはその流体の密度に比例するため、空気の約 1000 倍の密度である海水の流れが持つエネルギーは風力に比べて桁違いに大きい。さらに日本には近海に世界最大級の海流である黒潮が流れているほか、潮流の速い海域も多く存在する。このため、狭い国土で風車を建設できる場所が少ないという風力発電のデメリットを克服できる。一方、海流の速い海域は沿岸から離れているため、建設・送電コストが発電量と見合うレベルには至っていない。試験的な研究として、NEDO の委託研究において「水中浮遊式海流発電」が採用され実証実験が行われたものの実用化のメドは立っていないのが現状である。装置形状は風力発電で実績のある水平軸のプロペラ型が海流・潮流発電においても採用される傾向にあるが、実際は水平軸型、垂直軸型のどちらが海流・潮流発電に適しているか明らかではない。また、自然エネルギーの非定常性は送電網に大きな負荷をかけることが問題となっており、実際に回転装置を海底に配置する際は、単独で設置するのではなく、1 サイトに複数台を設置し、非定常性を補うことが予想されている。そこで、回転装置が発生させる流れが互いに与える影響は無視できない大きさであることが想定されるが、複数の回転装置の最適配置を決める定量的データは得られていない。

## (2) 研究の目的

本研究では、海流・潮流発電の回転装置形状について、流れの方向に左右されない垂直軸型(図1)、まぐろを模した筐体に沿った加速流れが羽根に当たり効率よく回転できるため海流・潮流発電に適している水平軸型の新型(図2)のどちらがより適しているかを決定する上での条件として回転装置の複数配置を設定した数値シミュレーションを実施し、海流・潮流発電に最適な回転装置の形状を決定するための数値データを得ることを目的としている。

この目的を達成するための方法として、本研究では数値シミュレーションを採用し、時間的、物理的節約をはかる。数値シミュレーションでは計算空間を細かい格子に分割する必要があるが、回転装置を複数配置する場合、各回転物体それぞれに合わせた回転系座標を、

固定された計算領域全体に埋め込むという重合格子的な取り扱いが必要になる。このような方法はまだ発展途上であり、本研究によって開発が進むと学術的にも非常に有意義であり、学術的独自性と創造性を併せ持つと言える。



図1 サボニウス型風車(垂直軸型)



図2 水平軸型の新型

### ( 3 ) 研究の方法

海水の圧縮性はほとんどなく、海流の速度はせいぜい 1 ~ 2 m/s であり、また抗力型の回転装置の回転速度は十分に遅いため、数値シミュレーションを行うための基礎方程式には非圧縮性のナビエ・ストークス方程式を用いた。この基礎方程式を、回転装置のブレードと計算格子が一致するような一般座標系で表現した上で標準的な数値解法を用いて解いた。垂直軸抗力型の回転装置として、S 字型回転装置、S 字型の 2 枚のブレードをずらして間隙をつくることにより効率を上げたサボニウス型回転装置、サボニウス型の改良形であるバツハ型回転装置をさらに発展させた J 型回転装置を選んでシミュレーションをおこなった。水平軸の抗力型回転装置では新しいタイプとして「まぐろ型回転装置」を研究対象とした。計算時間の関係で主として 2 次元の数値シミュレーションをおこなったが、まぐろ型に対しては必然的に 3 次元シミュレーションをおこなったほか、S 字型では 3 次元シミュレーションも併用した。

回転装置が 1 台の場合、回転装置とともに回転する回転座標系を用いるのが自然であり、また精度的にも有利である。しかし、回転装置が複数台ある場合には単純な回転座標系では取り扱うことができない。そこで本研究ではすべての回転装置を含むような全体的な広い領域に対しては静止座標系を用い、個々の回転装置を含む狭い領域(回転装置の台数分ある)に対しては回転装置とともに回転する回転座標系を用い、それらを全体領域に埋め込むという方法を用いた。このような重合格子的な取り扱いでは領域間のデータの受け渡しがもっとも重要な問題になる。すなわち領域間で対応する格子点を探索して結び付けて、補間を行って境界値を予測することになる。このことは計算時間や計算精度に問題が発生することを意味する。本研究では回転装置を含む回転領域の外周を円周とし、外部領域を、円を境界にもつ穴のあいた領域にすることにより計算時間の短縮と精度の向上を図った。この部分が本研究の新規性になる。

### ( 4 ) 研究成果

#### S 字型回転装置

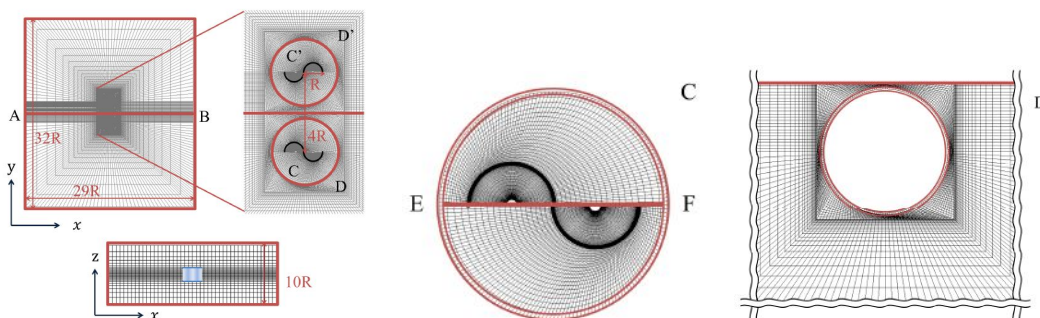


図 3 a. 計算格子の全体図

b. 回転領域

c. 外部領域

図 3 に S 字型回転装置の数値シミュレーションに用いた格子の例を示す。本研究では回転領域と外部領域のデータ受け渡しが重要になるが、図 4 には 2 つの回転領域を埋め込んだ場合の計算例を示す。速度ベクトルからもわかるように特に接続部分で問題は起きていない。垂直軸型の回

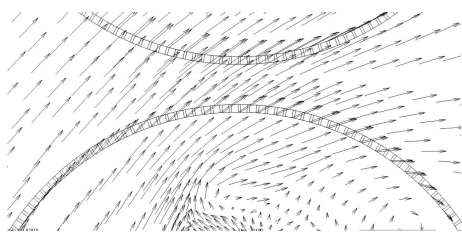


図4 回転装置に挟まれた領域の流れ場

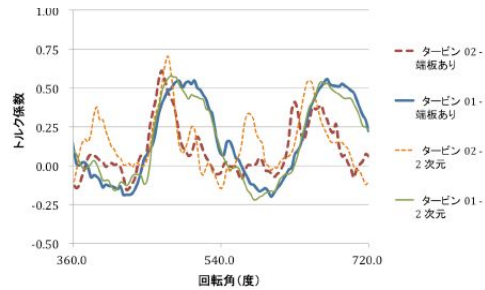


図5 平行な方向から流れが当たる場合のトルク係数 (端板あり、 $\lambda = 0.8$ )

転装置まわりの流れでは回転軸に垂直な断面での流れは上下端を除いてほぼ同一であり、2次元の計算で十分なことが多いが、効率をよくするために上下に端板をつける場合には3次元計算が必要になる。図5は流れが2つの回転装置の中心を結ぶ線に平行に流れがあたった場合のトルク係数(縦軸)が回転装置の回転(横軸)にともなってどのように変化するかを示した図で、流れ上流(タービン1)と下流(タービン2)について、端板の効果(2次元は効果を無視したもの)も含めて図にしたものである。また、表1は回転装置にあたる流れの角度を変化させたときのトルクの平均値を表にまとめたものである。これらのデータは実際の回転装置を設計するときに有用なデータになっている。

|       | タービン01<br>-端板あり | 02-あり | タービン01<br>-端板なし | 02-なし | タービン01<br>-2次元 | 02-2次元 |
|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|----------------|--------|
| 垂直方向  | 0.205           | 0.186 | 0.006           | 0.022 | 0.202          | 0.194  |
| 45度方向 | 0.201           | 0.208 | 0.004           | 0.008 | 0.177          | 0.173  |
| 平行方向  | 0.176           | 0.099 | 0.022           | 0.013 | 0.142          | 0.134  |

表1 トルク係数の平均値

### まぐる型回転装置

新しいタイプの水平軸型の回転装置として図2に示した「まぐる型回転装置」の変形を取り上げ、数値シミュレーションにより形状を種々に変化させて、効率を調べた。図6に計算に用いたモデルの1例を示す。回転体に取り付けたブレードの枚数や長さ、傾斜角などを変化させて最適な形状を数値シミュレーションで提案することを試みた。図7にある瞬間での回転装置表面の圧力分布を示したもので、赤い部分が高圧、青い部分が低圧部分を表している。図8にブレードの高さと出力の関係、図9にブレードの傾きと出力の関係を示す。これらの結果からブレードは長く、さらに上流側に傾けた方が高い出力が得られることがわかった。図2は実用化されなかった実機モデルであるが、数値シミュレーションの結果からもこの形では高い出力が得られないことが分かった。

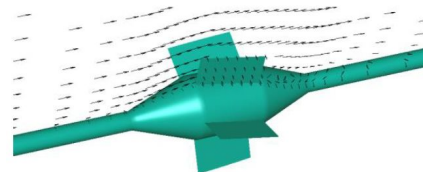


図6 まぐる型計算モデル

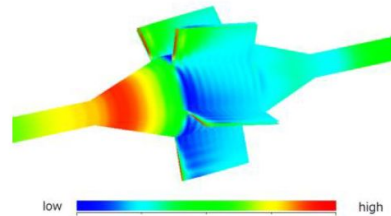


図7 計算結果(圧力分布)



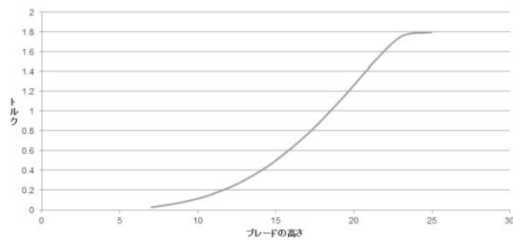


図 8 ブレード高さとの出力の関係

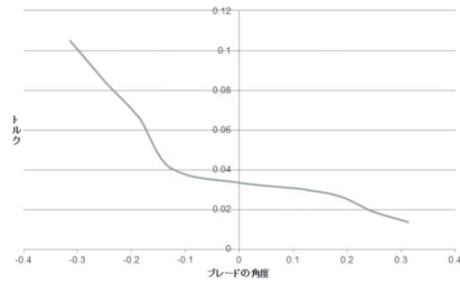


図 9 ブレード傾きとの出力の関係

### サボニウス型および J 型回転装置

まぐろ型でブレードの長さを長くして、前傾にすると装置全体の安定性が悪くなり回転軸に負担がかかると考えられるため、抗力型をさらに詳しく調べる目的でサボニウス型および J 型回転装置に対してシミュレーションをおこなった。本研究で開発した計算方法は回転装置の台数にかかわらず適用可能であるため、サボニウス風車が 4 台、正方形の頂点に回転軸が置かれた場合の

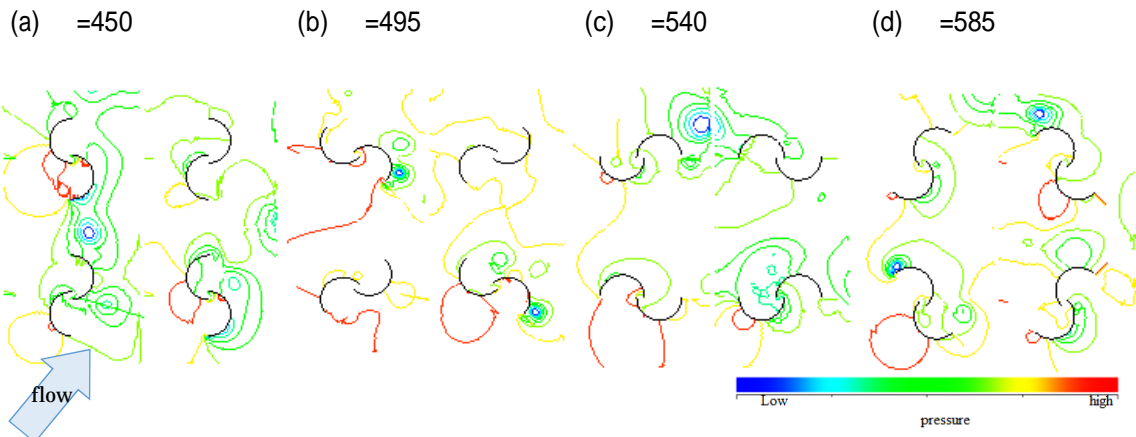


図 10 回転装置周りの圧力分布（流れ：対角線）

計算例を示す。図 10 は回転装置まわりのある瞬間での圧力分布で、流れが正方形の対角線に平行にあたっている場合を示している。

なお、現在までに風力発電の回転装置に関する流体力学的な研究は多数あると共に、すでに研究段階を経て実用段階へ移行している。しかし、海流・潮流発電に用いられる回転装置については、国内外を見渡してもいまだ研究は試行錯誤の段階であり、いくつかの実証実験は行われているものの、実用化へ至るには数年～10 数年単位で時間がかかるものと思われる。その理由の一つに最適形状や配置を決定するための定量的なデータが不足していることがあげられる。本研究は海流・潮流発電の実用化へ必要なデータ収集のための第一歩になると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3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<br>河村 哲也  | 4. 巻<br>23             |
| 2. 論文標題<br>サボニウス型回転装置まわりの差分格子生成法   | 5. 発行年<br>2021年        |
| 3. 雑誌名<br>紀要 = BULLETIN OF SHIGA BUNKYO JUNIOR COLLEGE   | 6. 最初と最後の頁<br>75,87    |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.32125/00000077  | 査読の有無<br>無             |
| オープンアクセス<br>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<br>-              |
| 1. 著者名<br>Anna Kuwana, Xueyan Bai, Dan Yao, Haruo Kobayashi                                    | 4. 巻<br>38             |
| 2. 論文標題<br>Numerical Simulation for the Starting Characteristics of a Wind Turbine             | 5. 発行年<br>2020年        |
| 3. 雑誌名<br>Advanced Engineering Forum   | 6. 最初と最後の頁<br>215,221  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.4028/www.scientific.net/AEF.38.215                              | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>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<br>-              |
| 1. 著者名<br>Tetuya KAWAMURA, Akari ONIIWA and Aya SAITO  | 4. 巻<br>71             |
| 2. 論文標題<br>Numerical simulation of flow around Wing-in-Surface-Effect under various conditions | 5. 発行年<br>2021年        |
| 3. 雑誌名<br>Natural Science Report, Ochanomizu University  | 6. 最初と最後の頁<br>1,12     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>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<br>-              |
| 1. 著者名<br>荒木美保、河村哲也  | 4. 巻<br>75             |
| 2. 論文標題<br>複数の三次元垂直軸型回転機構の相互作用に関する数値シミュレーション   | 5. 発行年<br>2019年        |
| 3. 雑誌名<br>2019年度土木学会論文集A2分冊 (応用力学) 特集号   | 6. 最初と最後の頁<br>277, 288 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2208/jscejam.75.2_1_277   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>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<br>-              |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>河村哲也                          | 4. 巻<br>24            |
| 2. 論文標題<br>2台のサボニウス型回転装置まわりの流れのシミュレーション | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>滋賀文教短期大学紀要                    | 6. 最初と最後の頁<br>153,165 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし          | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hao Xing, Anna Kuwana, Bai Xueyan, Yao Dan, Haruo Kobayashi  |
| 2. 発表標題<br>Examination of Optimum Shape of Savonius Wind Turbine with Different Number of Blades using CFD Technology |
| 3. 学会等名<br>4th International Conference on Technology and Social Science (ICTSS 2020) (国際学会)                          |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>ケイ浩, 桑名杏奈, 白雪妍, 姚丹, 小林春夫 (群馬大学)      |
| 2. 発表標題<br>CFD技術を用いたブレード数の異なるS字型風車の最適形状の検討      |
| 3. 学会等名<br>2020年度 (第11回) 電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会 |
| 4. 発表年<br>2021年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ikuko Hiraga, Tetuya Kawamura   |
| 2. 発表標題<br>CFD Analysis of Dynamics of Rotating Device Having Horizontal Axis for Ocean Current Power Generation |
| 3. 学会等名<br>Proc. TJCAS2019 (Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems) (国際学会)                          |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Miho Araki, Tetuya Kawamura   |
| 2. 発表標題<br>Three-dimensional Numerical Simulation on Interaction of Two Vertical Axis Turbines |
| 3. 学会等名<br>Proc. TJCAS2019 (Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems) (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Anna Kuwana and Tetuya Kawamura   |
| 2. 発表標題<br>Analysis of interaction between multiple wind turbines by CFD   |
| 3. 学会等名<br>Proc. ICMEMIS2019 (International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Xueyan Bai, Dan Yao, Anna Kuwana, Haruo Kobayashi                                |
| 2. 発表標題<br>Numerical Simulation for Optimization of Unsteady Rotating Wind Turbine          |
| 3. 学会等名<br>3rd International Conference on Technology and Social Science (ICTSS2019) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Qigong Teng, Xueyan Bai, Dan Yao, Anna Kuwana, Haruo Kobayashi                     |
| 2. 発表標題<br>Examination of Optimum Shape of 3-stage Savonius wind Turbine using CFD Technology |
| 3. 学会等名<br>Proc. TJCAS2019 (Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems) (国際学会)       |
| 4. 発表年<br>2019年   |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>荒木美保、河村哲也                                   |
| 2. 発表標題<br>独立に回転する複数個の物体まわりの流れに対する数値計算法の開発とS字型回転装置への応用 |
| 3. 学会等名<br>第65回理論応用力学講演会 / 第22回土木学会応用力学シンポジウム          |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>齋藤文、河村哲也                           |
| 2. 発表標題<br>種々の格子による垂直軸直線翼型回転装置まわりの流れのシミュレーション |
| 3. 学会等名<br>日本流体力学会 年会2019                     |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>平賀郁子、河村哲也                  |
| 2. 発表標題<br>CFDによる水平軸型海流発電用回転装置の動特性の解析 |
| 3. 学会等名<br>日本流体力学会 年会2019             |
| 4. 発表年<br>2019年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>皆川晶子 河村哲也                    |
| 2. 発表標題<br>独立に回転する2つのサボニウス風車まわりの流れの相互作用 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会 2021年度年次大会            |
| 4. 発表年<br>2021年                         |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>皆川 晶子 河村 哲也                          |
| 2. 発表標題<br>独立して回転する複数台のサボニウス風車まわりの流れの数値シミュレーション |
| 3. 学会等名<br>日本流体力学会 年会2021                       |
| 4. 発表年<br>2021年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>皆川 晶子 河村 哲也                     |
| 2. 発表標題<br>独立して回転する4台のサボニウス型回転装置周りの流れの相互作用 |
| 3. 学会等名<br>第35回数値流体力学シンポジウム                |
| 4. 発表年<br>2021年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐々木 桃 河村 哲也                          |
| 2. 発表標題<br>独立して回転する2台のバツハ型回転装置まわりの流れの数値シミュレーション |
| 3. 学会等名<br>第35回数値流体力学シンポジウム                     |
| 4. 発表年<br>2021年                                 |

〔図書〕 計5件

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名<br>河村 哲也                  | 4. 発行年<br>2021年 |
| 2. 出版社<br>インデックス出版               | 5. 総ページ数<br>97  |
| 3. 書名<br>流体力学の基礎 (コンパクトシリーズ流れ 1) |                 |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>河村哲也                         | 4. 発行年<br>2021年 |
| 2. 出版社<br>インデックス出版                     | 5. 総ページ数<br>89  |
| 3. 書名<br>流体シミュレーションの基礎 (コンパクトシリーズ流れ 2) |                 |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>河村哲也                         | 4. 発行年<br>2021年 |
| 2. 出版社<br>インデックス出版                     | 5. 総ページ数<br>83  |
| 3. 書名<br>流体シミュレーションの応用 (コンパクトシリーズ流れ 3) |                 |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>河村哲也                         | 4. 発行年<br>2021年 |
| 2. 出版社<br>インデックス出版                     | 5. 総ページ数<br>85  |
| 3. 書名<br>流体シミュレーションの応用 (コンパクトシリーズ流れ 4) |                 |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>河村哲也                           | 4. 発行年<br>2021年 |
| 2. 出版社<br>インデックス出版                       | 5. 総ページ数<br>103 |
| 3. 書名<br>流体シミュレーションのヒント集 (コンパクトシリーズ流れ 5) |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                    | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                  | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 桑名 杏奈<br><br>(Kuwana Anna)<br><br>(00624628) | 群馬大学・大学院理工学府・助教<br><br><br><br>(12301) |    |
| 研究分担者 | 齋藤 文<br><br>(Saito Aya)<br><br>(00837510)    | 成蹊大学・理工学部・助教<br><br><br><br>(32629)    |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |