

令和 6 年 7 月 1 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04964

研究課題名（和文）未利用水力を活用するクロスフロー水車のキャビテーションエロージョン特性の解明

研究課題名（英文）Elucidation of cavitation erosion characteristics of a cross-flow turbine blade for utilizing undeveloped hydropower

研究代表者

飯尾 昭一郎（Iio, Shouichiro）

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：80377647

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）：未利用水力エネルギーの利活用を目指し、他機種と比較して性能が低いものの経済性に優れるクロスフロー水車を対象に、これまで課題となっていた水車効率の改善、振動騒音の抑制、キャビテーション抑制について、ケーシング形状の影響に着目した研究を実施した。その結果、ケーシングにキャビティとガイド壁を設けることで、水車効率の改善、振動騒音の抑制を実現するとともに、キャビテーションの発生原因がノズル先端部での圧力低下が一因であることを特定し、キャビティがキャビテーションの抑制にも有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

未開発の水力エネルギーを効果的に利用するためクロスフロータービンに関する詳細な研究を実施した。本研究では、ケーシングの形状をどのように変更すればタービン効率を向上させ、振動ノイズを緩和し、タービン性能の持続的な課題であるキャビテーションを低減できるかということである。その結果、ケーシングのキャビティとガイド壁を最適に設計することで、タービン効率が向上し、振動・騒音が大幅に抑制されることが実証された。さらに、キャビテーションがノズル先端の圧力損失によって部分的に引き起こされることを突き止め、将来の水車設計に重要な知見を提供した。

研究成果の概要（英文）：To effectively harness untapped hydraulic energy, we conducted an in-depth study on cross-flow turbines, which, while generally less efficient than other turbine types, offer significant economic advantages. Our research centered on how modifications to the casing shape could improve turbine efficiency, mitigate vibration noise, and reduce cavitation-persistent challenges in turbine performance. The findings demonstrated that strategic design adjustments to the cavity and guide wall within the casing markedly enhance turbine efficiency and substantially suppress vibration and noise. Furthermore, the study pinpointed that cavitation is partially triggered by the pressure drop at the nozzle tip, providing crucial insights for future turbine design enhancements.

研究分野：流体工学

キーワード：クロスフロー水車 水車性能

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギー利用による発電電力量増大が求められており、水力エネルギーの利用拡大に向けて構造が単純で部分負荷特性に優れたクロスフロー水車が変流量条件となる流込み式の小水力発電所での採用が増加している。最高水車効率は他機種には劣るものの、部分負荷特性に優れる。一方でガイドベーン開度が小さくなると水車効率の劣化に加えて、ランナ内の流れ場の不安定化により振動騒音が顕著となる場合やキャビテーション壊食によりランナブレードやガイドベーンが損傷する事例が散見される。クロスフロー水車内部は二次元的な流れ場とされているものの、気液二相流で運転されることから振動や騒音が他機種よりも顕著であるとともに内部流動の把握が難しい。クロスフロー水車の特性改善およびキャビテーションの発生メカニズムの解明につながる知見の獲得が待たれている。

2. 研究の目的

本研究では、クロスフロー水車を対象として、(1)水車室内の流れ場の観察と水車性能改善につながる知見の獲得、(2)水車ケーシングの形状と振動・騒音、キャビテーションの発生状況との関係評価を目的とした。

3. 研究の方法

クロスフロー水車に関する従来研究においてランナからの出口流れに焦点を当てたものがなく、本研究ではこの出口流れの制御による水車性能の改善を目指した。一般的にランナ出口流れの向きはランナ回転数とガイドベーン開度で変化するが、円筒形のキャビティとガイド壁を備えた新しい形状のケーシングを提案した。これらの評価には、模型試験に加えて数値流体力学 (CFD) にもとづくシミュレーションを実施した。

図1に試験用水車の模式図を示す。模型試験における水量範囲は 0.013~0.038m³/s、有効落差は 0.63~5.5m である。ノズルはランナ上部に接線方向に接続されている。ノズルの開口角度は 90 度であり、水流はランナ上部からランナへと流入し、ランナからの流出流れは鉛直下方向となる。水車ケーシングには図に示す円筒形のキャビティとノズル外壁の端にガイド壁を有する。キャビティの位置と直径は CFD 解析による予備的検討により約 70 パターンを試行錯誤で調査し、好適形状を模型試験機に採用した。

図2にランナとブレードの詳細を示す。ブレードは 26 枚であり、ランナ内外比は 2:3 である。キャビティとガイド壁の形状と位置を図3に示す。ノズル外壁の延長にキャビティがあり、さらにその先にガイド壁とドラフトチューブがある。

図4に水車特性を評価するために使用した測定装置のレイアウトを示す。ランナ回転数はモータで制御し、ランナ軸動力はトルク検出器と電磁式回転計の測定結果から算出した。水車効率と有効落差 H_e は、式(1)と式(2)で定義した。ノズル入口静圧と流量を測定し、ノズル内の断面平均流速をもとに速度ヘッドを求めた。ここで、 g は重力加速度、 ρ は水の密度である。水車の速度係数 C_n と流量係数 C_Q を式(3)と(4)で定義した。流れ場の観察には高速度カメラを用いた。撮影した画像をもとに PIV により、速度分布を求めた。

水車内部の流れの評価には 2 次元の流解析を用いた。CFD 解析ソフトウェアは Ansys Fluent である。計算には SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) 法による非定常ナビエ・ストークス方程式を用い、乱流モデルは k- (SST) である。空気と水の二相流解析には VOF 法を使用した。入口と出口の条件は速度と静圧 (大気圧) として定義した。

$$\eta = \frac{\pi n T}{30 \rho g Q_{\text{water}} H_e} \quad (1)$$

$$H_e = \frac{v_m^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + h \quad (2)$$

$$C_n = \frac{nD}{\sqrt{H_e}} \quad (3)$$

$$C_Q = \frac{Q_{\text{water}}}{DB \sqrt{H_e}} \quad (4)$$

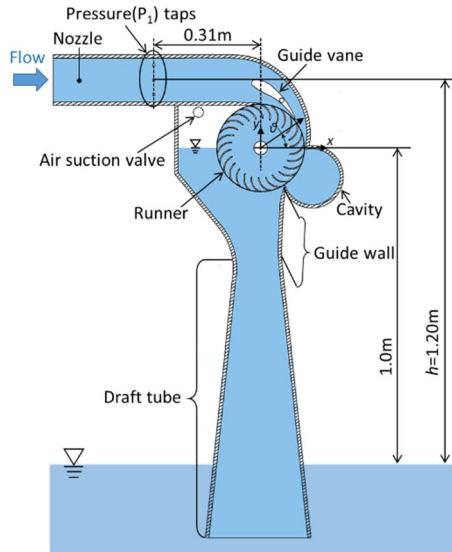


図1 クロスフロー水車の概略

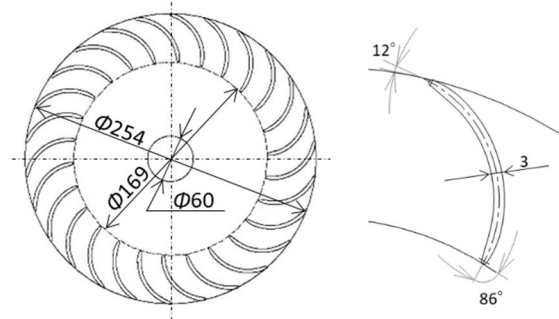


図2 ランナとブレードの形状

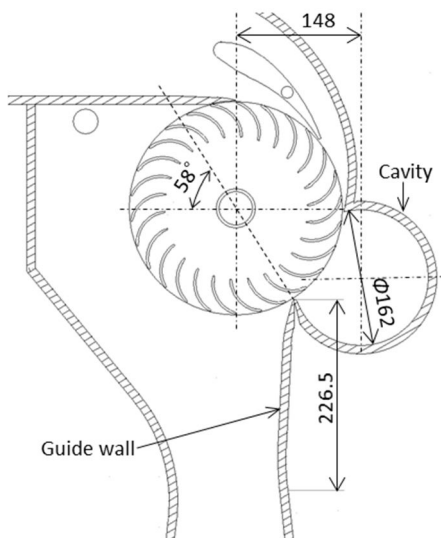


図3 ケーシング形状

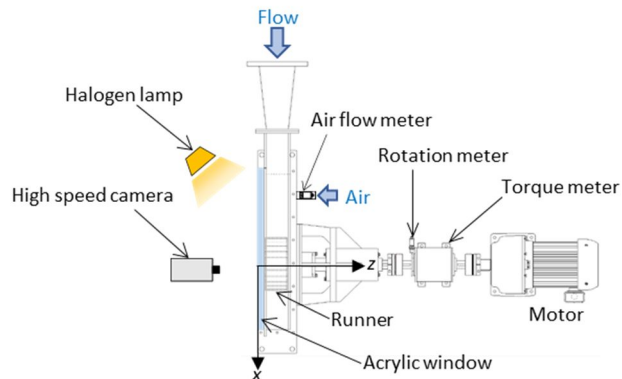


図4 水車性能評価装置のレイアウト

4. 研究成果

図5にキャビティの有無による水車の正規化された完全特性を示す．縦軸と横軸は正規化された流量係数と回転速度係数であり，キャビティなしの最高効率点(B.E.P.)の値で除している．ガイドベーン開度 39%から 100%までの 7 条件と，回転速度係数の条件により合計 67 の運転点の結果から作成している．正規化された効率は 1.033 であり，キャビティを取り付けることで水車効率が 3.3%向上している．水車の呑込み流量はランナ回転数の増加とともに減少し，この傾向はガイドベーン開度が大きいほど顕著である．ガイドベーン開度 39%ではランナ回転数による流量変化は認められない．

図6に水車の性能曲線を示す．キャビティを設けることで過負荷から部分負荷条件までのすべての流量範囲において水車効率が改善していることがわかる．特に流量が少なくなる部分負荷条件ほど効率改善効果が顕著である．

図7にPIV測定によって得られた水車室内の平均速度場を示す．図(a)と(d)は全負荷条件，図(b)と(e)は最適負荷条件，図(c)と(f)は部分負荷条件である．回転速度係数はそれぞれの条件での最適条件である．高速の貫流がランナ内部の回転軸の下を通過する様子が見える．ランナの下部と右側にあるガイド壁に沿った流れに注目すると，キャビティがない場合(図(a)，(b)，(c))にはランナ出口流れはガイド壁上端からはく離する．この場合，ランナからの流出流れは接線方向の速度成分を残している．はく離領域の面積は流量の減少とともに大きくなる．図(a)と(b)でははく離した流れがガイド壁に再付着しており，図(c)でははく離領域がドラフトチューブに達している．一方，キャビティがある場合，はく離領域は小さくなる(図(d)，(e)，(f))．以上のことから，キャビティがガイド壁からの流れのはく離を抑制していることがわかる．

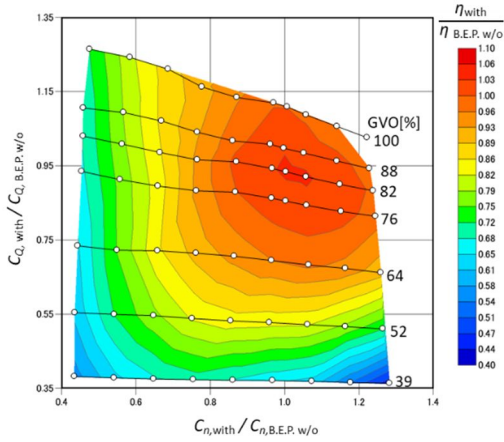


図5 水車の完全特性

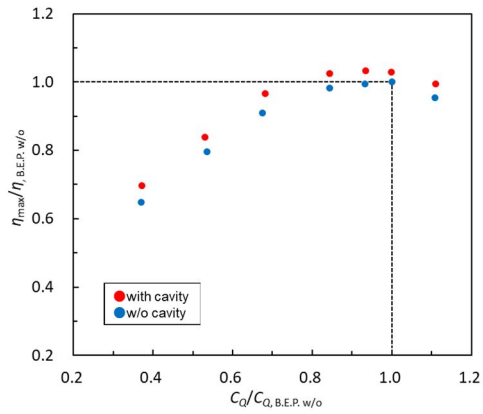


図6 水車性能曲線

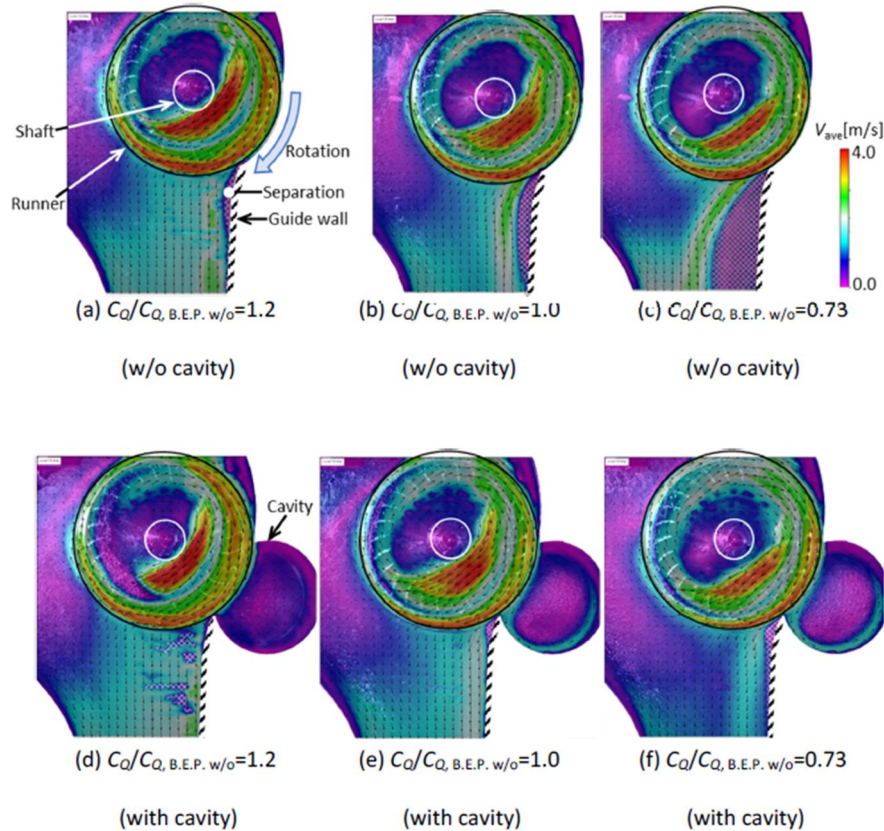


図7 内部流れのPIV測定結果

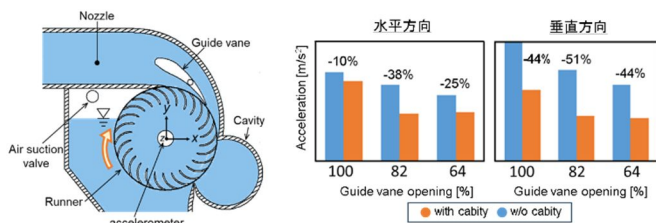


図8 模型試験での水車ケーシングの振動測定結果

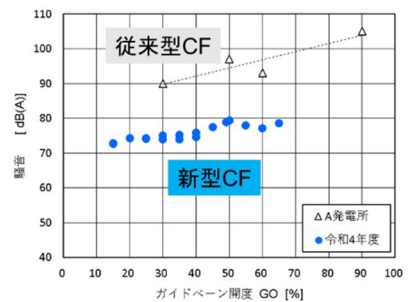


図9 発電所での騒音測定結果

図8は水車ケーシングの振動の大きさをキャビティの有無で比較した結果である。キャビティを設けることで水平方向と鉛直方向の振動の抑制がすべてのガイドベーン開度で確認される。図9はキャビティとガイド壁を有するクロスフロー水車（新型CF）と伝統的な形状のクロスフロー水車（従来型CF）について、ほぼ同様の有効落差と流量、出力の発電所で測定した騒音の比較である。キャビティとガイド壁を設けた新型クロスフロー水車の騒音が約15dBほど小さいことが確認された。

クロスフロー水車の振動や騒音の周波数解析を実施したところ、ブレード通過周波数、いわゆる nz 周波数が卓越しており、キャビティの設置により、この卓越成分が約 $1/3$ にまで低下することが確認された。この振動や騒音の原因は、ノズル先端部をブレードが通過する際の圧力変動によるものであり、キャビティがない場合には圧力の周期的かつ顕著な低下が発生していることが示された。模型試験でブレード通過周波数に同期した気泡の発生が観察されていることから、ブレード通過によるノズル先端部の静圧低下がキャビテーションによる気泡発生の原因だと結論づけた。

<引用文献>

Naoto Ogawa, Mirei Goto, Shouichiro Iio, Takaya Kitahora, Young-Do Choi, Morihito Inagaki, Performance improvement of cross-flow turbine with a cylindrical cavity and guide wall, Journal of Fluids Engineering, 143(2021), 121104

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ogawa Naoto, Goto Mirei, Iio Shouichiro, Kitahora Takaya, Choi Young-Do, Inagaki Morihito	4. 巻 143
2. 論文標題 Performance Improvement of Cross-Flow Turbine With a Cylindrical Cavity and Guide Wall	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluids Engineering	6. 最初と最後の頁 121104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4052046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Otsuka, N. Ogawa, S. Iio, T. Kitahora, Y. D. Choi, M. Inagaki	4. 巻 2217
2. 論文標題 Characteristics and suppression of vibration in cross-flow turbine with a cavity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12063
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2217/1/012063	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 該当する

1. 著者名 Y. Geng, T. Kitahora, S. Iio, Y. D. Choi, M. Inagaki	4. 巻 2707
2. 論文標題 Study on the optimum design of cross flow water turbines using RSM with weighted least squares method	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12066
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2707/1/012066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 林 良和, 飯尾 昭一郎, 小川 直人, 北洞 貴也, Young-Do Choi, 稲垣 守人
2. 発表標題 キャピティを有するクロスフロー水車のキャピティ形状に関する検討
3. 学会等名 一般社団法人ターボ機械協会 第86回総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Aiba, Mitsuteru Fujimori, Kota Otsuka, Shouichiro Iio
2. 発表標題 Investigation of the Flow Field around a Guide Vane in a Cross-flow Turbine at Partial Load Operation
3. 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toru Sakai, Yoshikazu Hayashi, Shouichiro Iio, Takaya Kitahora, Young-Do Choi, Morihito Inagaki
2. 発表標題 Investigation of Draft Tube Shape for a Cross-flow Turbine with Guide Wall and Cavity
3. 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 良和, 巽 洗人, 坂井 透, 飯尾 昭一郎, 北洞 貴也, Choi Young-Do, 稲垣 守人
2. 発表標題 ガイド壁とキャピティを有するクロスフロー水車のケーシング形状と流れ場との関係評価
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚 航汰, 藤森 光照, 相場 一広, 飯尾 昭一郎
2. 発表標題 クロスフロー水車における有効落差の変化が流れ場と水車性能に与える影響
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川 直人, 林 良和, 上條 俊, 飯尾 昭一郎, 北洞 貴也, Young-Do Choi, 稲垣 守人
2. 発表標題 ガイド壁と円筒状キャビティを設けたクロスフロー水車の翼枚数と水車性能との関係評価
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 良和, 小川 直人, 上條 俊, 飯尾 昭一郎, 北洞 貴也, Young-Do Choi, 稲垣 守人
2. 発表標題 ガイド壁とキャビティを有するクロスフロー水車の吸出管形状について
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsuteru Fujimori, Kazuhiro Aiba, Shouichiro Iio, Tatsuya Arai, Kotaro Takamura, Tomomi Uchiyama
2. 発表標題 Influence of nozzle tip shape length on the characteristics of a Cross-flow turbine
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME 流体工学国際会議2023(AJK2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Kuroda, Hiroto Tatsumi, Toru Sakai, Shouichiro Iio
2. 発表標題 Influence of the edge curvature connecting between the cavity and guide wall on Cross-flow turbine
3. 学会等名 Twentieth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ken Suzuno, Mitsuteru Fujimori, Kazuhiro Aiba, Ayuki Yamaguchi, Shouichiro Iio
2. 発表標題 Relationship between inlet flow conditions and Cross-flow turbine performance
3. 学会等名 Twentieth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ayuki Yamaguchi, Mitsuteru Fujimori, Kazuhiro Aiba, Ken Suzuno, Shouichiro Iio
2. 発表標題 Analyzing the impact of operating conditions on energy loss in a Cross-flow turbine
3. 学会等名 Twentieth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyuki Tatsumi, Toru Sakai, Yuki Kuroda, Shouichiro Iio, Takaya Kitahara, Young-Do Choi, Morihito Inagaki
2. 発表標題 Study on partial load characteristics of Cross-flow turbine
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 相場一広, 藤森光照, 飯尾昭一郎
2. 発表標題 クロスフロー水車のガイドベーン周りの流れ場と水車性能の評価
3. 学会等名 ターボ機械協会 第88回 総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂井透, 林良和, 飯尾昭一郎, 北洞貴也, Young-Do Choi, 稲垣守人
2. 発表標題 キャビティとガイド壁を有するクロスフロー水車の吸出し管形状に関する検討
3. 学会等名 ターボ機械協会 第88回 総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 巽洗人, 坂井透, 飯尾昭一郎
2. 発表標題 クロスフロー水車のガイドベーン開度と流れ場の関係評価
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2023 年合同講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 飯尾昭一郎 (分担執筆)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 CMC出版	5. 総ページ数 194
3. 書名 再生可能エネルギーの開発と市場	

1. 著者名 シーエムシー出版編集部	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 270
3. 書名 クリーンエネルギーの技術と市場 2022	

〔産業財産権〕

〔その他〕

信州大学工学部機械システム工学科流体エネルギーシステム研究室
<http://www.comput-mech.shinshu-u.ac.jp/~iiolab/>
信州大学学術オンライン情報システムSOAR
<https://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.HecNbpkh.html>

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		
韓国	Mokpo University		