

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04453

研究課題名(和文) 洋上直流システムにおける風力発電機へのMMCの適用に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Application of MMC to Wind Turbines in Offshore DC Systems

研究代表者

柿ヶ野 浩明 (Kakigano, Hiroaki)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30437371

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)：洋上風力発電の交直変換器にモジュラーマルチレベルコンバータ(MMC)を用いることで、風車内の変換器を1つにすることができ、小型・軽量化やコスト低減が期待できる。本研究は、風力発電機の交直変換器にMMCを適用した場合の制御法を明らかにした。具体的には、一段のMMCを発電機として用いる同期機と接続し交直変換を行う実験を行った。同期機の回転速度を400 rpmに制御した状態で、誘導機を用いてトルクを0 Nmから1 Nmまで変化させたところ、問題なく動作することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

洋上風力発電では、高い導入ポテンシャルを有する地域において、電力会社が新たな再生可能エネルギーの連系を保留する事態が続いている。この問題の解決策の一つとして、電力消費の多い地域に直流で送電する方法が検討されている。洋上風力発電の電力を直流で集電して送る場合、洋上風力発電機に交直変換器が必要となる。本研究で得られた成果をもとに、交直変換器にMMCの適用することで高い昇圧比を実現でき、後段のDC-DCコンバータを取り除くことで構成がシンプルとなり、小型・軽量化やコスト低減が期待できる。

研究成果の概要(英文)：By using a modular multilevel converter (MMC) as an ac converter for offshore wind turbines, it is possible to reduce the size and weight of the converter in a wind turbine to one, and thus reduce its size and cost. This study clarifies the control method when an MMC is applied to an ac-dc converter in a wind turbine. Specifically, an experiment was conducted in which a single-stage MMC was connected to a synchronous machine used as a generator to perform the ac-dc conversion. The rotation speed of the synchronous machine was controlled at 400 rpm, and the torque was varied from 0 Nm to 1 Nm using an induction machine.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：洋上風力発電 直流送電 MMC

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化や化石燃料依存低減を背景に太陽光発電や風力発電の導入が各国で進んでいる。洋上風力発電はヨーロッパを中心に導入が進んでおり、日本においても福島沖や北九州沖で実証研究が進んでいる。日本において、洋上風力発電の導入ポテンシャルの高い地域は、北海道、東北、九州で、特に九州は導入ポテンシャルの 29%を占めている。しかしそれらの地域では、固定価格買取制度開始以降、太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入が進んだことから、2014 年 9 月末から再生可能エネルギー接続申込の回答保留が続いている。一方、関西エリアにおける電力消費量は九州エリアの約 1.7 倍であるにも関わらず、電力系統における再生可能エネルギーの導入比率が 1/3 以下である。

そこで、洋上風力の適地に近い電力系統への連系に加えて、電力消費の多い地域にも連系することで、洋上風力発電の導入量増加が期待できる。その際、大電力を長距離送電する必要があり、送電ロスが少なく、送電線数が少なく、安定度の制約がなく、多端子化が容易といった観点から、多端子直流送電システムが適している。

例として、NEDO が実施している「次世代洋上直流送電システム開発事業」で想定されている多端子直流送電システムのイメージを図 1 に示す。図中の洋上変電所、陸上変電所には、交流と直流を相互に変換するための大容量の電力変換器が必要である。近年、この直流送電に適用する変換器としてモジュラーマルチレベルコンバータ(MMC)の適用が検討されている。MMC の回路構成を図 2 に示す。MMC はサブモジュール (SM) を多数直列に接続することで、パワーデバイスの耐圧を低減することができると同時に、出力電圧を正弦波に近づけることで高調波を低減できる。また、サブモジュールの直列接続数を増やすことで、直流側の電圧を高くすることができる。

図 3 に洋上風力発電の集電および送電を行うシステムの構成を示す。風車の出力電力を集める集電は、現在は図 3(a)に示すように中圧交流(MVAC)が主流である。この場合、風力発電の出力は、風車内で交直変換器、インバータで LVAC (1 kV 程度) にした後に変圧器で MVAC (数十 kV) に昇圧し、複数ある風車の出力を交流で洋上変電所に集電する。

一方、洋上風力発電の大規模化に伴う送電損失の増加に対応するため、図 3(b)に示す中圧直流(MVDC)で集電する方式が提案されている。この場合、風力発電の出力を交直変換器で LVDC (1 kV 程度) に変換し、さらに風車内で DC-DC コンバータで MVDC (数十 kV) に昇圧する。その後、複数の風車の出力を直流で洋上変換所に集電する。洋上変換所では、DC-DC コンバータで MVDC を HVDC に昇圧し、陸上へ送電する。

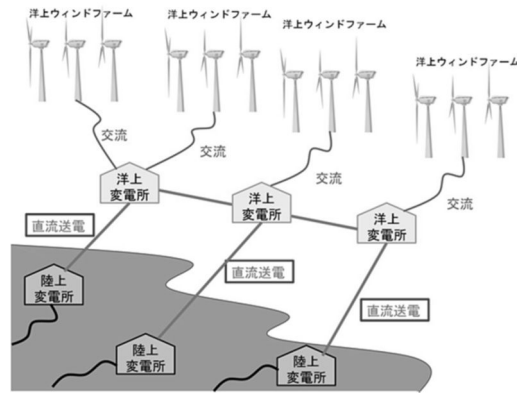


図 1 多端子直流送電システムのイメージ

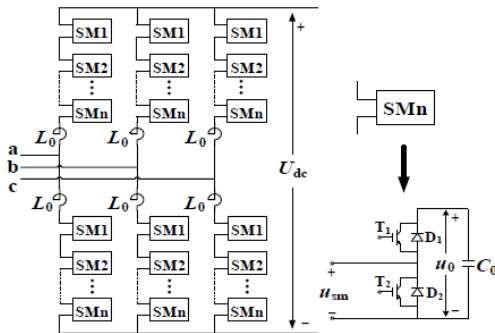
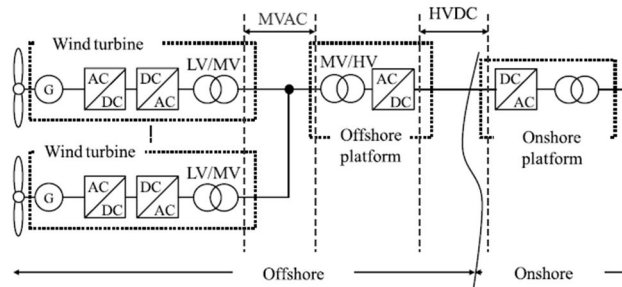
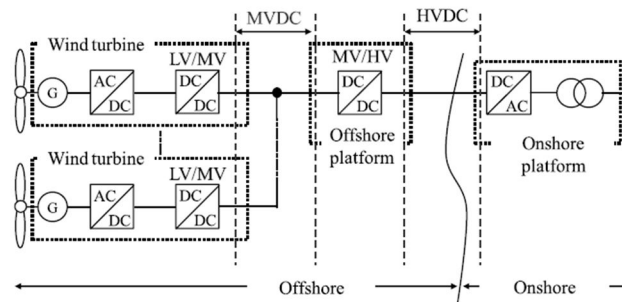


図 2 MMC の回路構成



(a) An example of existing offshore wind farms with AC collection grid



(b) An example of offshore wind farms with DC collection grid

図 3 交流集電方式と直流集電方式

2. 研究の目的

今後、直流集電が実用化される場合、風車内には、風力発電の出力を LVDC に変換する交直変換器と、それを MVDC に昇圧する DC-DC コンバータの 2 つが必要となる。しかし、風車の交直変換器に MMC を用いることで、図 4 に示すように風車内にある LVDC から MVDC に昇圧する DC-DC コンバータを取り除くことができるため、小型・軽量化やコスト低減が期待できる。

本研究では、風力発電機の交直変換器に MMC を適用した場合の制御法を明らかにし、実験により検証することを目的とする。加えて、交直変換器を MMC とした場合に、複数の風力発電機から集電する際の制御法について検討し、シミュレーションによる検証を行う。

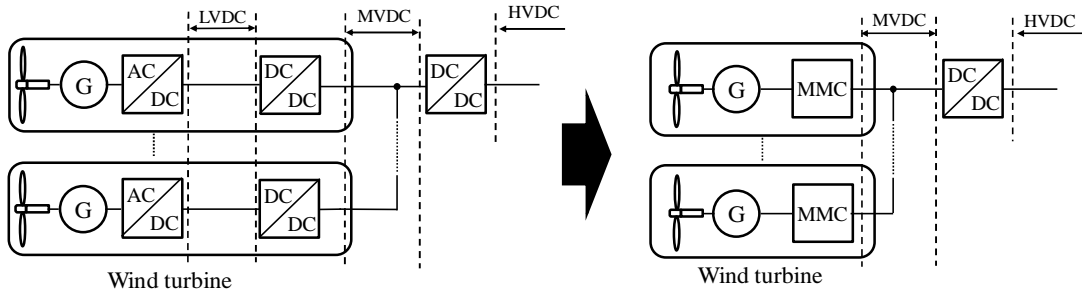


図 4 風力発電の交直変換器に MMC を適用した場合の構成の変化

3. 研究の方法

まず、回路シミュレータにより永久磁石同期発電機に対する MMC の制御法を検討した。次に、モータベンチを用いて風力発電機を模擬し、MMC のミニモデルを構築した。本ミニモデルを用いて、制御法の実験による検証を行った。最後に、複数の MMC が並列接続する場合についてシミュレーションによる検証を行った。

4. 研究成果

本報告書では、回路シミュレータでの制御の検証と、ミニモデルを用いた実験結果、そして 2 台の MMC が並列接続した場合のシミュレーション結果について述べる。

(1) 回路シミュレータでの制御の検証

本研究では、図 5 に示すシステムについてシミュレーションを行った。各アームに接続するセルの段数 N は 5 とした。また、MMC の回路パラメータは表 1、PMSG のパラメータは表 2、ウインドタービンのパラメータは表 3 を使用した。

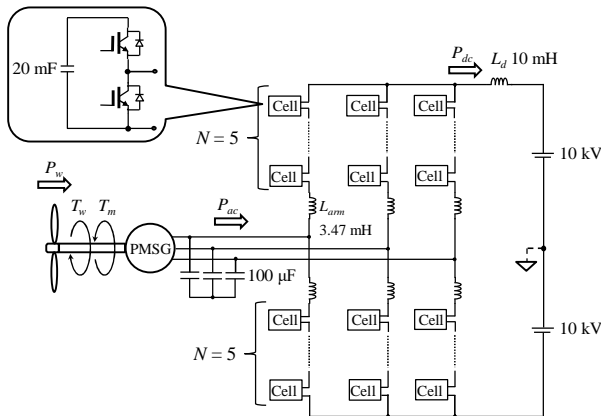


図 5 シミュレーション回路の構成

表 1 MMC のパラメータ

| Parameter | Symbol | Value |
|-----------------------------|-----------|------------|
| Rated power [MW] | P | 5 |
| Arm inductor [mH] | L_{arm} | 3.47 (10%) |
| DC inductor [mH] | L_d | 10 |
| DC voltage [kV] | V_{dc} | 20 |
| Cell capacitor [mF] | C | 20 |
| Cell capacitor voltage [kV] | V_c^* | 4 |
| Cell number | n | 5 |
| Carrier frequency [kHz] | f_c | 10 |

(On 3-phase, 3.3 kV, 5 VA, 10 Hz base)

表 2 PMSG のパラメータ

| Parameter | Symbol | Value |
|-------------------------------------|--------|-----------------|
| Stator resistance [mΩ] | R_s | 6.24 |
| d-axis inductance [mH] | L_d | 5.01 |
| q-axis inductance [mH] | L_q | 7.51 |
| Magnetic flux [Wb] | ψ | 27.8 |
| Inertia moment [kg.m ²] | J | 2×10^5 |
| Pole number | p_o | 100 |

表 3 風車のパラメータ

| Parameter | Symbol | Value |
|-------------------------------------|-----------------|-------|
| Density of air [kg/m ³] | ρ | 1.205 |
| Blade radius [m] | R | 60 |
| Maximum power coefficient | $C_{p,max}$ | 0.438 |
| Tip-speed ratio at maximum power | λ_{max} | 6.35 |
| Pitch angle [°] | β | 0 |
| Cut-in wind speed [m/s] | $v_{w,in}$ | 5 |

風力発電機の出力電力が急激に変化する場合の動作を確認するため、風速をステップ変化させるシミュレーションを行った。シミュレーションは風速が 11.9 m/s (出力 5 MW) で安定して動作するところから始め、1.0 s で風速を 11.0 m/s (出力 4 MW) にステップ変化させた。

シミュレーション結果を図 6 に示す。上から順に風速、発生トルク、発電機の回転速度、三相交流電圧、三相交流電流を表している。どの波形においてもステップ変化後は速やかに過渡状態から定常状態に移行していることが確認できた。各電力についても 5 MW から 4 MW に指令値通り追従できていることが確認できた。実際の風力発電では風速が瞬時にステップ状に変化することは考えられないため、本制御は実システムにおいても有用であると考えられる。各アームのセルキャパシタ電圧についてもステップ変化直後は各セルキャパシタ電圧に大きなバラつきが見られたが、提案したバランス制御により指令値に収束することを確認した。

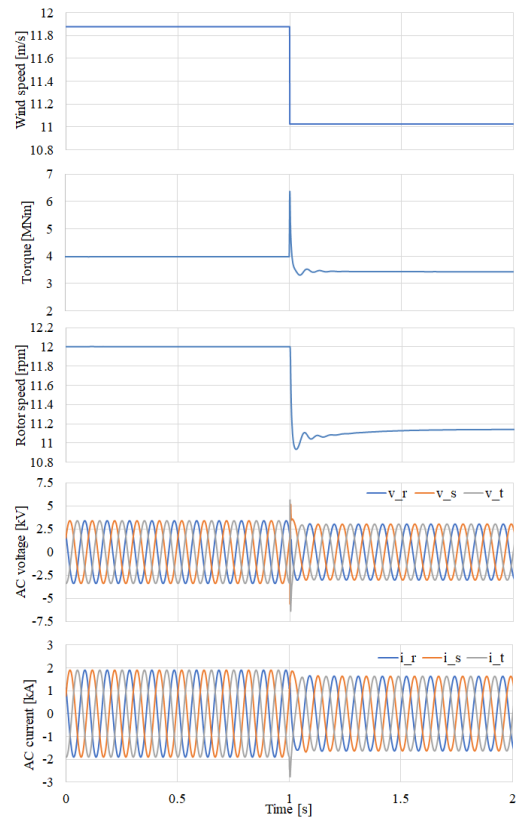


図6 シミュレーション結果

(2) ミニモデルを用いた実験結果

図 7 に示すミニモデルを用いて実験を行った。各アームに接続するセルの段数は 1 とした。実験は以下の手順で行った。

キャパシタ平均電圧制御を追加。セルキャパシタ平均電圧を 50 V に昇圧する。

同期機の回転速度制御を追加し、回転速度指令値を 10 秒かけて 0 rpm から 400 rpm へランプ変化させる。

上下アームバランス制御を追加する。

誘導機を用いて、同期機に 1 Nm のトルクを加える。

相間アームバランス制御を追加する。

セルキャパシタ電圧の実験結果を図 8 に示す。セルキャパシタ電圧は、回転速度やトルクが変動した場合でもそのバランスを保っていることを確認した。また、同期機の回転速度で指令値を変化させた際、その指令値に追従することを確認し、トルクをで変化させた場合でも追従したままであることを確認した。また、図 9 に同期機が出力した交流電圧と交流電流の波形を示す。交流電流が不平衡になっているが、想定する電力を交直変換することができた。今後は、セルの段数を増やして実験を行っていく予定である。

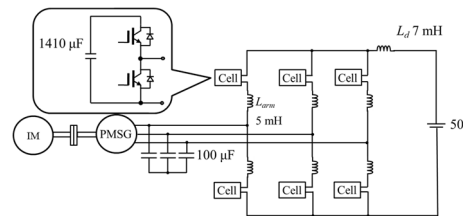


図 7 ミニモデルの構成

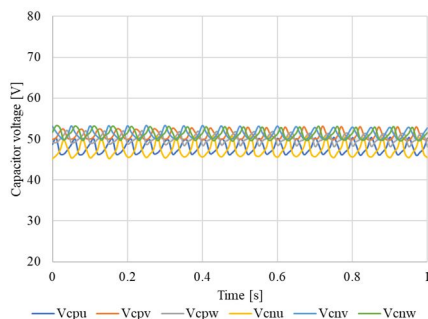


図 8 セルキャパシタ電圧波形

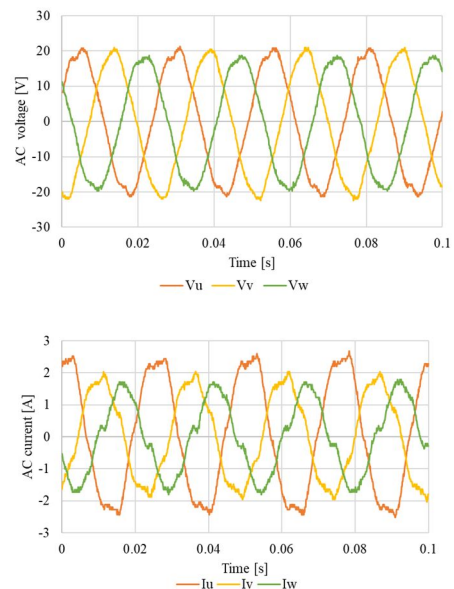


図9 交流電圧・電流波形

(3) 2 台の MMC が並列接続した場合のシミュレーション

海底直流ケーブルによって接続された 2 台のウインドタービン間について、海底ケーブルのインピーダンスを考慮に入れ、風速の変化に対する制御系の相互干渉についてシミュレーションによる検証を行った。多端子化されたウインドタービンの構成を Fig. 2 に示す。ウインドタービン A とウインドタービン B が海底ケーブルによって接続された構成となっている。MMC は複数のチョッパセルとインダクタから構成される。風力発電機は永久磁石同期発電機 (PMSG) とし、増速機を使用しないダイレクトドライブ方式について検討した。海底直流ケーブルは距離に比例したインピーダンスを集中定数回路として挿入することによって模擬している。ウインドタービン Fig. 5 に風速をステップ変化させた場合のシミュレーション結果を示す。シミュレーションはウインドタービン A において風速が 8.7 m/s (出力 2 MW) で動作しているところから始め、1.0 s で風速を 11.9 m/s (出力 5 MW) にステップ変化させた。一方、ウインドタービン B は風速を 11.9 m/s (出力 5 MW) の状態から始め、1.0 s で風速を 6.9 m/s (出力 1 MW) にステップ変化させた。Fig. 5(a) にウインドタービン A, Fig. 5(b) にウインドタービン B のキャパシタ電圧の結果をそれぞれ示す。ステップ変化直後は急激な変化の影響でキャパシタ電圧にも大幅な変動がおき、大きなバラつきが見られる。しかし、使用したバランス制御によりこのバラつきが解消されていることが確認できた。また、ステップ変化においてもウインドタービン間での相互干渉が起きないことを確認した。

B から A を 5km, ウインドタービン A と B の集合地点から直流電圧源までを 10km とした。

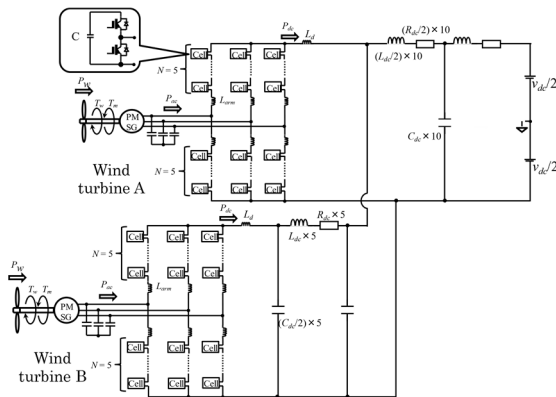
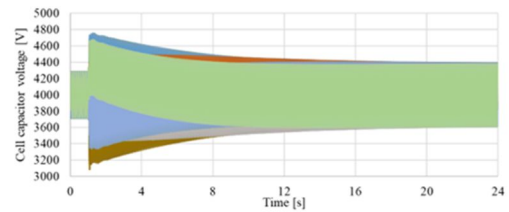
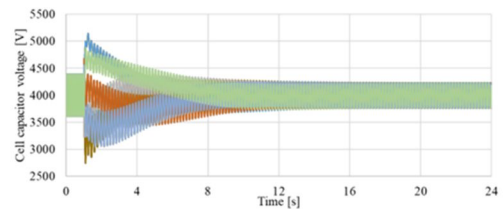


図 10 シミュレーション回路



(a) Cell capacitor voltage at wind turbine A.



(b) Cell capacitor voltage at wind turbine B.

図 11 各 MMC のセルキャパシタ電圧波形

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 前田悠介, 小川一樹, 山本侑典, 柿ヶ野浩明 |
| 2. 発表標題 洋上風力発電のための多端子直流システムに適用する複数台MMCの相互干渉に関するシミュレーションによる検証 |
| 3. 学会等名 電気学会 半導体電力変換・モータドライブ合同研究会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小川一樹, 柿ヶ野浩明 |
| 2. 発表標題 洋上風力発電の同期発電機の交直変換器にMMCを適用した場合のミニモデルによる実験的検証 |
| 3. 学会等名 電気学会 半導体電力変換・モータドライブ合同研究会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuusuke Yamamoto, Hiroaki Kakigano |
| 2. 発表標題 A Control Method of MMC Connected to Permanent Magnet Synchronous Generator |
| 3. 学会等名 IPEC2022 -Integration of Power conversion, Electric machine, and Control- Student Poster Competition |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 柿ヶ野浩明 |
| 2. 発表標題 洋上風力発電機に適用するモジュラーマルチレベル変換器の制御法 |
| 3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 前田 悠介, 柿ヶ野 浩明 |
| 2. 発表標題 洋上直流システムに適用するMMCの負荷変動に対する直流キャパシタ電圧制御 |
| 3. 学会等名 パワーエレクトロニクス学会, 第241回定例研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小川 一樹, 柿ヶ野 浩明 |
| 2. 発表標題 直流送電に適用するMMCのセルキャパシタの電圧リップル低減に関する基礎検討 |
| 3. 学会等名 パワーエレクトロニクス学会, 第241回定例研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河野佑弥, 前田悠介, 柿ヶ野浩明 |
| 2. 発表標題 洋上直流システムに適用するMMCの直流電流制御および直流電圧制御の負荷変動に対する制御応答の実験的検証 |
| 3. 学会等名 電気学会 半導体電力変換・モータドライブ合同研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山下雄大, 柿ヶ野浩明 |
| 2. 発表標題 洋上風力発電機に適用するフライングキャパシタMMCの制御法 |
| 3. 学会等名 パワーエレクトロニクス学会, 第236回 定例研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 河野佑弥, 柿ヶ野浩明 |
| 2. 発表標題 洋上直流システムに適用するMMCの直流キャパシタ電圧制御の実験的検証 |
| 3. 学会等名 令和2年電気関係学会関西連合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長田甲斐, 山下雄大, 柿ヶ野浩明 |
| 2. 発表標題 洋上風力発電の同期発電機に接続するMMCの直流キャパシタ電圧の変動低減に関する基礎検討 |
| 3. 学会等名 令和2年電気関係学会関西連合大会 |
| 4. 発表年 2020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 |
|---------|---------|
|---------|---------|