

令和元年5月29日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00481

研究課題名(和文) 電力系技術者育成に向けた教育・学習支援システムの構築

研究課題名(英文) Development of learning and educational support system for electric power engineers

研究代表者

福本 尚生 (Fukumoto, Hisao)

佐賀大学・理工学部・准教授

研究者番号：60346872

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電力工学やパワーエレクトロニクス分野の技術者育成を促すために、若手技術者のための、ICTを利用した電力工学教育・学習支援システムを開発した。モーターとして最も多く利用されている誘導電動機のインバータ制御について、遠隔実験を行うことで制御原理を学習するシステムを開発した。また、誘導電動機の回転原理を学習するために、模擬誘導電動機を用いた遠隔実験システムも開発した。さらに、スマートグリッドで用いられる、エネルギーマネジメントシステムについて遠隔実験を用いた学習ができるシステムを開発した。開発したシステムの学習効果を実運用によって評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、電力工学系技術者向けの学習・教育支援システムの開発が進むことで、若手技術者の養成につながることである。ICTを用いた遠隔実験が可能な学習・教育支援システムであるので、社会人が技術の学び直す場合の教材としても利用が可能である。また、遠隔実験が可能な学習・教育支援システムのプラットフォームができているので、他の分野の学習・教育支援システムとしての応用も容易に可能である。

研究成果の概要(英文)：In this research, in order to cope with the shortage of engineers in the fields of power engineering and power electronics, we developed some learning and educational support systems using ICT for young electric engineers. We developed a system to learn control principle by remote experiment about inverter control of induction motor which is most used as a motor. In order to learn the rotation principle of an induction motor, a remote experiment system using a simulated induction motor was also developed. In addition, a remote experiment system was developed to learn the energy management system used in smart grid. The learning effect of the developed system was evaluated by real operation experiments.

研究分野：教育工学

キーワード：e-learning 遠隔実験 学習支援システム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の環境・エネルギー問題に対する意識の高まりを受けて、電気機器学、電力工学、パワーエレクトロニクスの重要性が再認識されつつある。中でも、「次世代電力網(スマートグリッド)」などの新技術が注目を集めている。しかし、近年では、古典的な電力技術であるエネルギー分野は、技術的にも成熟したイメージが強く、電気系技術を学ぶ若い技術者にとっては魅力が大きく低下している。近年の少子化の影響もあり、学生に人気のないエネルギー分野の教育カリキュラムは減少傾向にある。これによって、パワーエレクトロニクス分野の技術者が不足するという事態を招いており、これらに対する対策が急務である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、電気機器などの電力工学に関する技術の教育・学習支援システムを構築することである。若い技術者にも興味をもって電力工学の学習が行える教育・学習支援システムの構築を目指している。ICTを援用した電力工学に関する教育・学習支援システムの開発は、背景でも述べた、現在の強電技術者不足を解消する効果が期待される。実際のシステム運用においては、セキュリティの問題や安全性の確保などの対策を十分に行う必要があるが、原理的には、実際の機器を利用した実験がいつでも、どこでも繰り返し行うことが可能になり、実験機器にかかるコストや時間コストの節約にもつながる。

電力工学などの学習を行う場合には、講義などの座学の他に、実験・実習を行うことで理論と実際の現象を踏まえた学習を行っている。しかし、電力工学系の実験では、大型・大重量の機器を高電圧・大電流で扱うため、さまざまな危険が伴う場合もあり、3K(きつい・汚い・危険)のイメージが根強いのが現状である。電力工学の技術の修得には、これらの実験・実習は、欠かせないものであるものの、十分な機器への理解がない場合には、思いもよらない事故につながる恐れもある。そこで、本研究で提案する教育・学習支援システムを用いることで、これらの実験・実習の予習や復習が安全に、何度も繰り返し実施することが可能となるとともに、座学での理論学習の補助としても利用が可能である。ICTを利用した遠隔実験を行うことによって、高価な実験機器の有効利用にもつながると考えられる。

また、電気工学分野の特徴である電磁界現象は、実際に目に見えるものでないため、学習者にとっては、難解で理解し難いと感じられ苦手意識を持つ場合も多い。電磁界現象をCGで可視化するとより理解しやすく、コンピュータを用いたe-learningの利点を最大限に活かすことができるため、AR(拡張現実感)技術の導入も進めている。電磁界解析結果を3DCGで実機に重ねて表示することで、現象の可視化を可能にする。

具体的な目標としては以下の三つを挙げている。

- (1) これまでに開発を進めてきた模擬誘導電動機の遠隔実験システムに、三相誘導電動機のインバータ制御部を組み込むことで、誘導電動機遠隔実験システムとして完成させる。
- (2) これまでに開発を進めてきた、HEMS(Home Energy Management System)の学習ができるシステムについて、誘導負荷や容量負荷を組込み、太陽光発電、蓄電装置を組み込むことでシステムの完成を目指す。
- (3) 変圧器の実験が遠隔で行えるシステムの構築を行い、電気機器の教育・学習支援システムとして完成させる。

### 3. 研究の方法

(1) これまでに開発・製作してきた、模擬誘導電動機の教育・学習支援システムに、三相誘導電動機のインバータ制御を組み込み、Webから制御実験が可能なシステムを構築する。このシステムでは、インバータ制御の仕組みについても実験を通して学習できるシステムにする。交流を直流に変換するコンバータ、その直流に対し、IGBT素子をDSP(Digital Signal Processor)によってPWM(Pulse Wave Modulation)制御することで、交流に変換するインバータ制御の原理を実験を行いながら学習できるシステムを構築する。

(2) 既に開発を進めてきた、家庭でのエネルギーマネジメントシステム(HEMS)を体験・学習可能なシステムとして拡張をおこなう。これまでのHEMS学習システムでは、単純な抵抗負荷だけで構成しており、模擬負荷としては不十分であった。これに、容量性の負荷や誘導性の負荷を追加することを考えている。HEMSにおいては、蓄電池も重要な役割を果たす機器である。そこで、発電・蓄電システムも組込み、発電・蓄電も含めたスマートシステムとして学習ができるシステムとする。これらをもって、HEMSの教育・学習支援システムとして完成させる。

(3) さらに、変圧器に関する遠隔実験が可能のようにシステム構築を行う。これまでに、電磁界解析CAEソフトを活用し、多巻線モデル変圧器を用いた解析を行ってきた。本研究では、変圧器の特性実験が遠隔実験として行えるようにし、さらに、巻線構造の異なる変圧器を設計・製作し、電磁界解析結果と実験による計測結果の比較を行う。また、拡張現実の技術を活用し、実機の画像に電磁界解析結果を重ねて表示することも既に行っており、同様の手法を用いて変圧器等の電気機器の動作を、分かりやすく提示する教材を開発する。

(4) 別の発展として、研究分担者が開発を進めている模擬マイクログリッドを用いた教育・学習支援システムとの融合も視野に入れて開発を進めてゆく。

提案した教育・学習支援システムが構成できれば、学生実験などで学生に使用してもらい、アンケートを取るなどし、教育・学習支援システムとしての評価を行う予定である。

#### 4. 研究成果

##### (1) インバータ駆動三相誘導電動機遠隔実験システムの開発

インバータ制御の仕組みについて実験を通して学習できるシステムを開発した。図1に開発したシステムの構成を示す。ユーザは、インターネットを利用してWebサーバに接続し、Webブラウザ上で操作を行う。ユーザの指示は、制御用マイコンであるRaspberry Piに送られ、インバータの周波数や電圧などの設定パラメータを、dsPICマイコンにシリアル通信で転送する。dsPICマイコンでPWM信号を生成し、モータドライバICであるIGBT素子を制御し、3相交流電圧を生成する。図2に示すように、Webブラウザ上のGUIで各種パラメータを設定・変更可能である。また、インバータによって生成された電圧や、電動機の駆動電流が計測されて、波形として確認することができる。さらに動画で、実際の電動機の回転の様子や、回転音も確認することができる。インバータによって、三相交流の周波数や振幅を制御可能であり、モータの始動時に用いられる、V/F制御アルゴリズムも実装している。インバータ制御の遠隔実験が可能になった段階で、論文として成果を公表した(雑誌論文)。

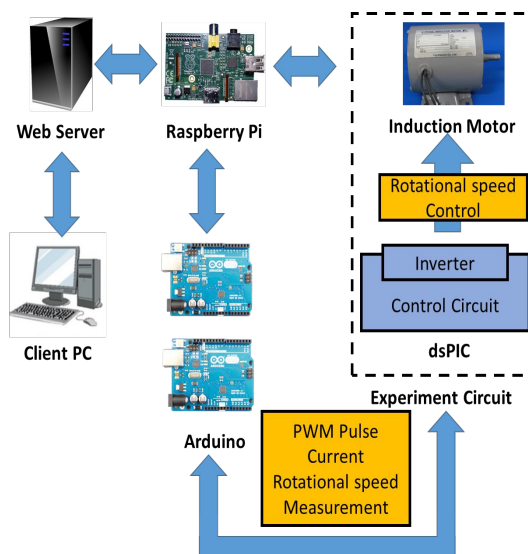


図1 インバータ遠隔実験システム構成  
(雑誌論文 より)

現在までに、インバータ制御におけるPWM信号と生成電圧の関係を、シミュレーションによって学習可能な教材を作成すると共に、初学習者が使用することを想定し、実験課題を段階的に学習することを可能とするために、実験課題に応じてメニューが表示・選択できるような機能の拡張を行った。今後、単独の学習システムとして完成させ、ユーザによる評価実験を行う予定である。

計画では、別途開発を進めていた、模擬誘導電動機の学習支援システムと組み合わせる一つのシステムにする予定であったが、それぞれの実験内容が多くなったため、個別のシステムとして開発を進めている。模擬誘導電動機のシステムにも、別途インバータ制御回路を設計し、インバータで駆動できるようなオプションも加え、さらに、模擬誘導電動機自体の再設計を行い、実験課題や制御GUIを整備し(図3参照)9名のユーザで実運用試験を行った。実運用試験では、小テストを実施し教育効果などの評価を行い、アンケート調査も実施した。これらの成果を学会研究会にて報告を行った(学会発表)。

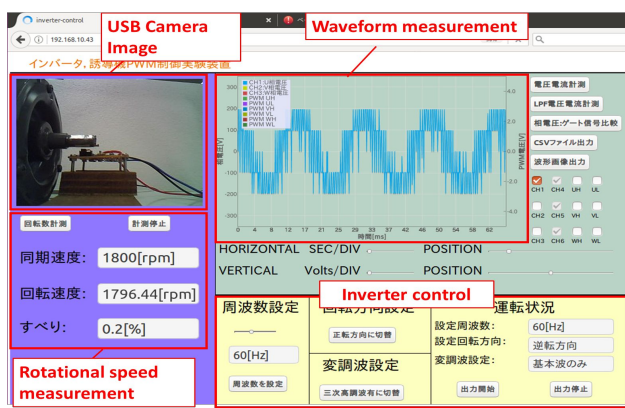


図2 インバータ駆動学習画面  
(雑誌論文 より)



図3 AR(拡張現実)による解説  
(学会発表 より)

##### (2) EMS 遠隔実験教育・学習支援システムの開発

家庭でのエネルギーマネジメントシステム(HEMS)の教育・学習支援システムとして、これまで単純な抵抗負荷だけを用いてシステムを構成していたが、電力計測部の改善を図り、扇風機などの誘導負荷や、容量負荷も導入できるようにした。これまで、有効電力だけを計測していたが、無効電力や力率の計測も可能とし、その成果を学会発表した(学会発表)。電力計

測部の改善を行うことで、電圧、電流波形を計測し、電力を求める基礎原理の学習ができるようにシステムを構成した。

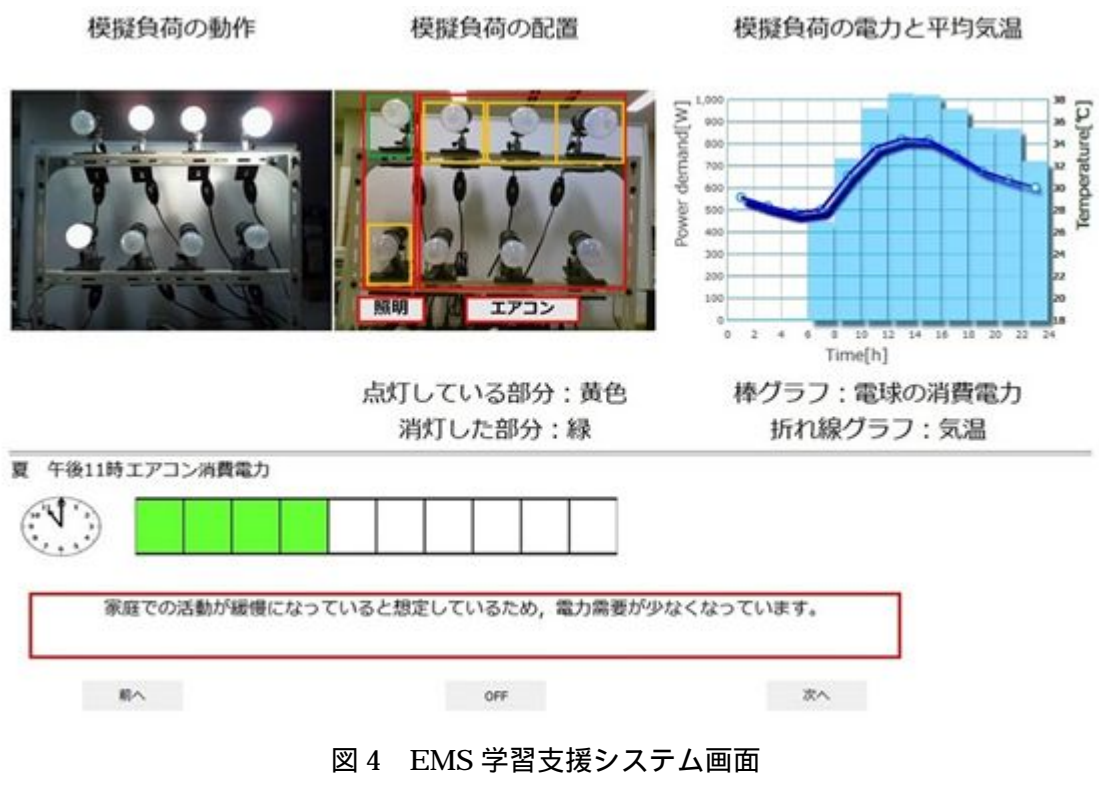


図 4 EMS 学習支援システム画面

同時に、従来の HEMS 教育・学習支援システムについて、ユーザがインターネットを利用して単独で学習できるようにシステムの拡張・整備を行った。従来、動画取得部分には、既存のソフトウェアを活用していたが、Node.js と OpenCV を用いた独自のシステムを開発し、複数のマイコンによるネットワークとの連携が柔軟に取れるようになった。さらに、実験課題メニューや、ピークシフト制御・ピークカット制御等のエネルギーマネジメントの解説コンテンツを充実させ、システムだけで HEMS の学習ができるように、実運用に向けた実装を行った（図 4 参照）。この時、複数ユーザの同時アクセス対策として、ここでは、個々の実験課題が短時間で終了するので、実機を用いた実験は、最初に実験ページにアクセスしたユーザだけに限定し、その他のユーザは、実験ページにアクセスできないようにした。実験ページにアクセスできないユーザは、実験を伴わないページにアクセスすることは、可能であり、しばらく時間をおいて実験ページにアクセスするように誘導した。このように、システムの教育・学習内容を整理し、遠隔実験のユーザインタフェースを再構築し、初学者が利用しやすいシステムに改良を行った。その結果、20 名のユーザに対して、システムを用いた学習評価実験を行い、小テスト等を実施して教育効果などの評価を行った。さらに、アンケート調査も実施し、システムの利点や欠点などの分析を行った。これらの成果をまとめ論文誌に投稿し、掲載が決定している（雑誌論文）。

システムの利用前後における小テストの結果を図 5 に示す。システムの利用前に対して、システムの利用後には有意に小テストの結果が向上しており、一定の学習効果があるものと評価できる。しかしながら、対象人数をさらに増やし、システムを用いて HEMS の学習を行った場合と、システム以外の方法で HEMS の学習を行った場合の比較など、より詳細な評価を行う必要がある。また、現在、太陽光発電パネルを用いた発電や蓄電部分の開発も進めているが、まだシステムへの実装には至っておらず、誘導性負荷や容量性負荷も取り入れた教材の作成を進める予定である。

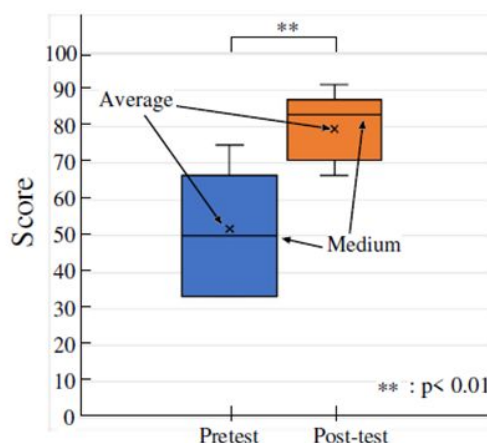


図 5 EMS 学習支援システムによる学習効果（雑誌論文 より）

### (3) 変圧器の遠隔実験システム

変圧器については、巻線構造が通常とは異なる、5巻線変圧器を設計・製作し、特性実験を行うことができた。また、その設計パラメータを用いてCAEツールを用いた電磁界解析を行い、実験結果との比較・検証を行った。「変圧器に関する遠隔実験が可能なようにシステム構築を行う」ことを目標としていたが、多巻線変圧器の特性計測実験を行う段階で、実験結果が数値電磁界解析結果と大きく異なったため、その原因の追究を重ね、少しずつ実験結果と数値解析結果が近づいてきている段階である。これらの結果を今後まとめて公表する予定である。

### (4) 模擬マイクログリッドシステムの実現に向けた遠隔発電実験システムの開発

研究分担者が進めている模擬風力発電システムを完成させた。近年、風力発電設備は増加しており、その発電原理である誘導発電機の原理は、電力工学を学ぶ上で重要である。しかし、多くの高等教育機関では、電動機動作に関する実験学習だけを行う場合が多く、発電動作について取り上げた実験が少ない。そこで、電力工学教育模擬マイクログリッドシステムの実現に向けて、二つの誘導モータの軸を直結し、一方のモータをインバータ制御で駆動し、もう一方の誘導モータで発電を行う、模擬風力発電の遠隔実験システムを構築した。風力に相当する部分を、インバータ制御の誘導機で置き換えた模擬風力発電システムである。インバータで駆動する誘導機の回転速度を、発電用誘導電動機の同期速度の周辺で変化させ、発電用誘導機の線間電圧と線間電流を計測することで、有効電力、皮相電力を算出する。同期速度を上回ると、有効電力が負の値になり、発電動作に移行したことが確認できるシステムを構築した。図6に、模擬風力発電の遠隔実験システムの動作画面を示す。さらに、模擬太陽光発電装置として、太陽電池と太陽を模した電球を用いて発電電力のシミュレーションが可能なシステムが構築できた。これらを統合して発電実験システムとして、Webを用いた遠隔実験が可能なシステムを構築し、論文として成果を公表した(雑誌論文 )。

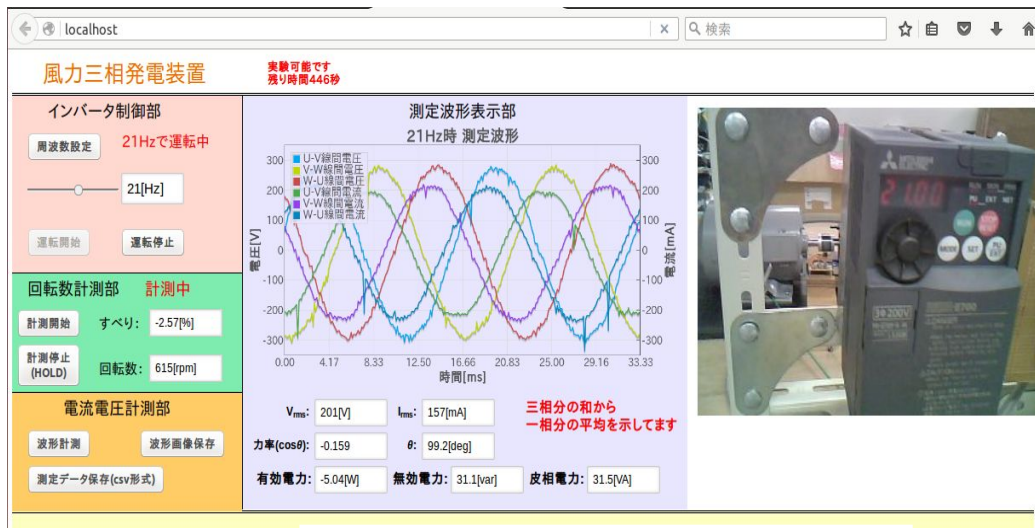


図6 模擬風力発電学習支援システム  
(雑誌論文 より)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

福本尚生、古川達也、相知政司、EMS 遠隔実験教育・学習支援システムの開発、電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌)、査読有、Vol. 139、No.11、2019、掲載決定

山口優太、福本尚生、古川達也、PWM 制御方式インバータ駆動三相誘導機遠隔実験システムの開発、電子情報通信学会論文誌 D 情報・システム、査読有、Vol. J101-D、No. 6、2018、pp. 801-809、DOI:10.14923/transinfj.2017LEP0004

山口優太、古川達也、福本尚生、伊藤秀昭、相知政司、比良優貴、電力工学教育模擬マイクログリッドシステムの実現に向けた遠隔発電実験システムの開発、電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌)、査読有、Vol. 146、No. 11、2016、pp. 1574-1580、DOI:10.1541/ieejieiss.136.1574

[学会発表](計 14 件)

松尾駿宏、福本尚生、古川達也、誘導電動機の回転原理を学習するシステムの開発と評価、電子情報通信学会技術研究報告 教育工学、ET2018-44、pp. 35-40、2018

山口嵩史、福本尚生、古川達也、学生実験での利用を目的としたステッピングモータの遠

隔実験システムの評価、電子情報通信学会技術研究報告 教育工学、ET2018-45、pp. 41-46、2018

田中誠屋也、福本尚生、古川達也、インバータ学習支援システムにおける初学者向けコンテナの開発、電子情報通信学会技術研究報告 教育工学、ET2018-46、pp. 47-52、2018

松尾駿宏、福本尚生、古川達也、模擬誘導電動機の固定子における磁束計測およびシミュレーションの評価、電気学会研究会資料 計測研究会、EM-18-31、pp. 1-6、2018

坂本陽樹、福本尚生、古川達也、電力工学初学者のための Web を用いた電力計測実験システムの開発、電気学会研究会資料 計測研究会、EM-18-32、pp. 7-12、2018

田中誠也、福本尚生、古川達也、誘導電動機のインバータ制御における二相 PWM 法の学習システムの開発、電気学会研究会資料 計測研究会、EM-18-34、pp. 19-24、2018

坂本陽樹、福本尚生、古川達也、EMS 学習のための遠隔実験システムにおける電力計測回路の設計と実装、IEEE 主催 2017 年度第 1 回学生研究発表会、2017

松尾駿宏、福本尚生、古川達也、模擬誘導電動機遠隔実験システムにおける回転子の安定化および計測回路の実装、電気学会研究会資料 計測研究会、EM-17-44、pp. 21-26、2017

山口優太、福本尚生、古川達也、誘導電動機遠隔実験用インバータおよび電圧電流計測システムの開発、電気学会研究会資料 計測研究会、EM-17-46、pp. 33-38、2017

山口優太、福本尚生、古川達也、瀬戸口和明、教育支援用誘導機およびインバータ遠隔実験システムの開発、平成 28 年度電気学会 基礎・材料・共通部門大会、2016

本川良真、福本尚生、古川達也、EMS 学習支援システムにおける気温と電力需要の関係についての学習教材の開発、電子情報通信学会技術研究報告 教育工学、ET-2016-43、pp. 9-14、2016

古賀優太、福本尚生、古川達也、多巻線方式を模したモデル変圧器の漏れリアクタンスの計測と解析結果の比較、電気学会研究会資料 計測研究会、IM-16-44、pp. 7-12、2016

山口優太、福本尚生、古川達也、調光制御を付与した太陽光発電シミュレーションシステムの開発、電気学会研究会資料 計測研究会、IM-16-48、pp. 27-32、2016

本川良真、福本尚生、古川達也、EMS 学習支援システムのための計測回路の改善、IEEE 主催 2016 年度第 2 回学生研究発表会、2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：古川 達也

ローマ字氏名：(Furukawa, Tatsuya)

所属研究機関名：佐賀大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号(8桁)：90173525

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。