

機関番号：53701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560786

研究課題名（和文） 簡易全天日射計測のための波長選択式日射計の開発と各地フィールドテスト

研究課題名（英文） Development of wavelength selective pyranometer for measurement of global solar irradiance and its field test

研究代表者

榊原 建樹（SAKAKIBARA TATEKI）

岐阜工業高等専門学校・校長

研究者番号：10023243

研究成果の概要（和文）：短波長に分光感度を有する太陽電池を用いた PV アレイ日射計を製作し、そのフィールドテストを実施した。その結果、PV アレイ日射計の出力は従来型日射計で計測した日射強度に対して線形性を有することがわかった。また、PV アレイ日射計の出力は部分的な影の影響を受けないことを確認した。これらの特性から、温室を利用する施設園芸への PV アレイ日射計の応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：PV array pyranometer using PV cells had spectral sensitivity in short wavelength was developed and its field test was carried out. Output of the PV array pyranometer varied linearly with solar irradiance measured by conventional pyranometer, and was not affected by partial shadow at surface of the pyranometer. These characteristics have suggested that the PV array pyranometer could be applied to protected horticulture using greenhouse.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
20年度	2,500,000	750,000	3,250,000
21年度	500,000	150,000	650,000
22年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：エネルギーシステム工学，電力工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：日射量計測，民生，農業

1. 研究開始当初の背景

(1) 民生施設や農業現場における日射量や気温などの気象センシングの重要性が高まっている。民生施設においては、気象によって変化する電力・熱需要を賄うエネルギーシステムを気象に応じて制御することでエネルギーコストを低減できる。また、農業用温室においては、気象の変動に即応した温室環境の制御により、作物の生長と経済性とを両立させることが可能となる。

(2) 民生分野および農業分野において主要な気象データである日射量と気温のうち、気温（室温）の計測は非常に重要視され、さまざまな計測・制御システムが普及してきている。一方、日射量については、その重要性は認識されているものの、実際の民生施設および農業現場での計測はほとんど行われていない。その主な原因は、日射計が高価なことによる。現在普及している日射計のほとんどは、サーモパイルをセンサとして用いたものである。サーモパイルは、感度帯域が広く、

入射光の波長による感度の違いがほとんどないというメリットがあるが、高価である。

(3) Si フォトダイオードなどの半導体センサは感度帯域が狭く、感度が一定でないことから、広いスペクトルを有する太陽光の計測には向かないとされてきた。感度帯域が狭い半導体センサでは、計測値がスペクトルの形状に依存するからである。これまでに、複数種類の半導体センサを併用することで、全体の感度帯域を広げる試みがされているが、十分な成果は得られていない。そのため、日射計のセンサには感度波長帯域が広いサーモパイルが主に使用されてきた。

(4) 従来の日射計は、そのセンサ部に少しでも影が生じると、その計測値が低下する。一方、農業用の温室はさまざまな大きさ・形状の資材で組み立てられているため、温室内部には常に影が生じている。そのため、従来の日射計は温室内部での日射計測に適していない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、日射計測にかかるコストを低減することができる民生用および農業用の簡易日射計を開発することを目的とした。

(2) 民生施設や農場（農業用温室等）における日射量モニタリングを容易にするために、新方式の全天日射計を開発することを目的とした。同全天日射計は、従来のサーモパイル日射計とは異なり、半導体センサを用いて特定の波長域の日射強度のみを計測する。

(3) 開発する日射計は、従来の日射計では困難であった部分影の生じる農業用温室などの室内での日射計測を可能とするものであるとした。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に、太陽光発電システムに使われている PV アレイの構成例を示す。PV アレイを構成する PV ストリングに並列接続されたバイパスダイオードの役割は、故障、影、および汚れなどによって一部の PV セルあるいは PV ストリングの出力電流が低下した場合、その影響が他の PV アレイ全体に及ばないように、出力が低下した PV ストリングをバイパスすることである。

(2) 図 2 に、2 個の PV ストリングを直列に接続し、それぞれに並列にバイパスダイオードを接続した PV アレイの I - V 特性曲線を示す。

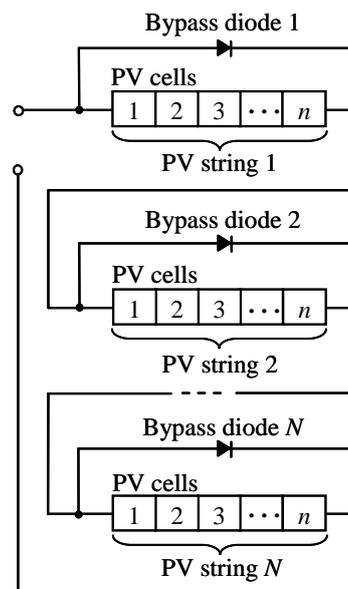


図 1 新型日射計の構成

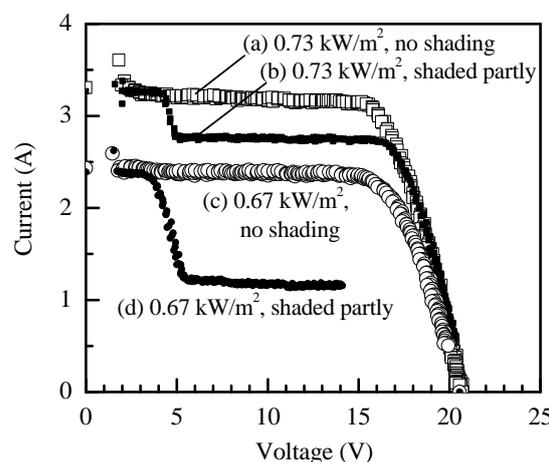


図 2 二個の PV ストリングを直列に接続し、それぞれに並列にバイパスダイオードを接続した PV アレイの I - V 特性曲線

す。同図中の記号はそれぞれ、(a) 日射強度： 0.73 kW/m^2 、遮光なし、(b) 同： 0.73 kW/m^2 、一方の PV ストリングを遮光、(c) 同： 0.67 kW/m^2 、遮光なし、(d) 同： 0.67 kW/m^2 、一方の PV ストリングを遮光、の場合を示す。

(a) および (c) から、日射強度が 0.73 kW/m^2 のときの短絡電流は 3.2 A 、日射強度が 0.67 kW/m^2 のときの短絡電流は 2.5 A と、日射強度によって PV ストリングの短絡電流が変化したことがわかる。また、(b) および (d) のように、一方の PV ストリングを遮光した場合、 I - V 特性曲線に段差が生じたことがわかる。しかしながら、短絡電流は遮光の有無によって変化しなかった。

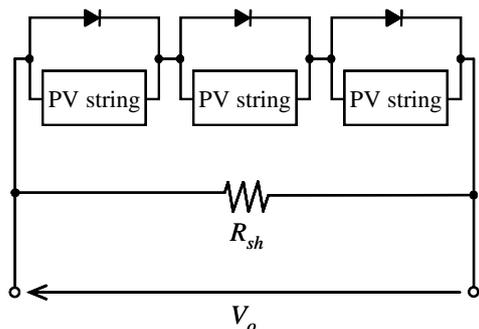


図3 新型日射計の回路

(3) バイパスダイオードを備えた PV アレイの I - V 特性に注目し、センサの一部に影が生じて、計測値にはその影響が及ばない新型を着想した。PV アレイ日射計は、直列接続した複数の PV ストリング、およびそれぞれに並列接続したバイパスダイオードを備えており、その短絡電流によって日射強度を計測する。もし、一部の PV ストリング上に影が生じ、その出力電流が低下しても、バイパスダイオードの作用により、PV アレイ日射計全体の短絡電流は変化しない。したがって、影の有無にかかわらず、日射計近傍の日射強度を計測することが可能である。

(4) 試作した PV アレイ日射計の回路図を図3に示す。同図に示すように、本試作モデルでは、複数の PV セルから成る PV ストリングとバイパスダイオードとを並列接続したものを3組用意し、それらを直列接続して PV アレイを構成した。1個の PV ストリングは、32枚の単結晶シリコン PV セル（16直列、2並列）から成り、その定格電圧は 8 V、定格電流は 120 mA である。バイパスダイオードには 1N5401（General Semiconductor）を使用した。また、日射強度によって変化する短絡電流は、抵抗 R_{sh} を用いて電圧 V_o として検出することとした。今回は、 R_{sh} を 10 Ω とした。

(5) 試作した PV アレイ日射計の外観を図4に示す。A4サイズ（296 mm \times 210 mm）のプラスチック製プレート上に3個の PV ストリングを配置した。なお、温室内にこのような寸法の日射計を設置した場合、農作業への影響はほとんどないことを農業関係者に確認した。バイパスダイオード、モジュール間配線、および抵抗は、プレートの下側に配置し、屋外への設置を想定して防水加工を施した。

(6) 岐阜高専、津山高専、舞鶴高専、豊橋技術科学大学、および豊橋創造大学においてフィールド試験を実施し、PV アレイ日射計の特性を評価した。本フィールド試験においては、従来の熱電堆型日射計（Thermopile-type

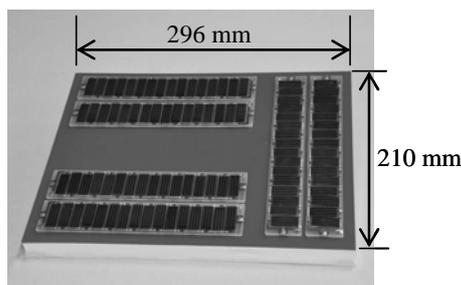


図4 試作新型日射計の外観

表1 日射計の仕様

	PV array	TP
Sensor	PV cells	Thermopile
Response time	3 μ s	17 s (95%)
Area of sensor	620 cm ²	3 cm ²
Price	¥10,000 or less	¥80,000 or more

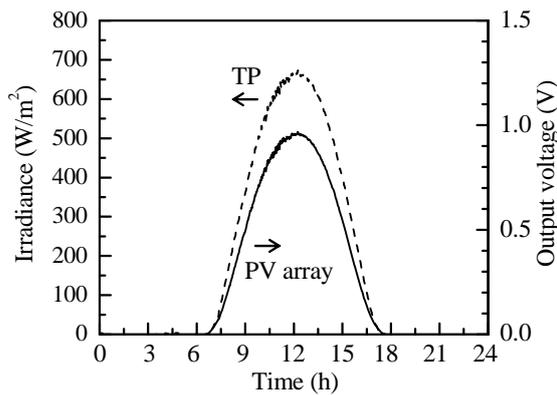
pyranometer; TP 日射計) MS-601（英弘精機）を PV アレイ日射計と同一の場所に設置し、それぞれの計測値を比較した。表1に、それぞれの日射計の仕様を示す。PV アレイ日射計は市販 PV セルをセンサとして用いているため、安価であり応答速度が約 3 μ s と非常に高速だが、TP 日射計は高価であり、かつ応答速度（95%）が約 17 s と遅い。センサ部の面積は、PV アレイ日射計が合計約 620 cm² であるのに対して、TP 日射計は約 3 cm² と小さい。また、TP 日射計はセンサを一つしか持たないため、影がセンサ上に発生した場合、その計測値は影の影響を受けて変化してしまう。

(7) 本フィールド試験では、新型日射計および従来型日射計の計測値を1秒毎に取得した。本フィールド試験は2009年2月に開始した。

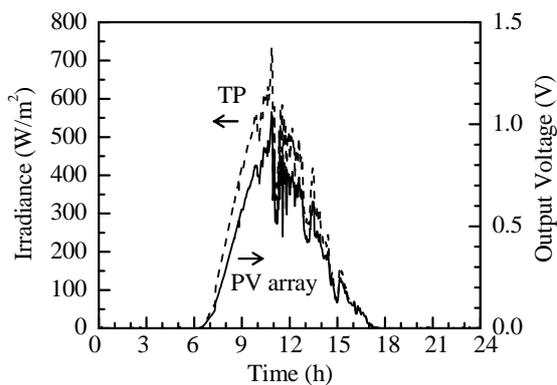
4. 研究成果

(1) 日射強度—出力電圧特性

① 図5に、豊橋技術科学大学において計測した TP 日射計および PV アレイ日射計の日射強度および出力電圧の時系列を示す。同図 (a) は 2009 年 2 月 10 日の、同図 (b) は同年 2 月 22 日の計測結果である。同図 (a) に示すように、2 月 10 日は、両方の曲線が滑らかな曲線を描いていることから、当日は天候の安定した快晴日であったことがわかる。この日の日射強度および出力電圧は、ともに 12 時 13 分に、それぞれの日最大値である 674 W/m²



(a) 晴天 (10 Feb. 2009)



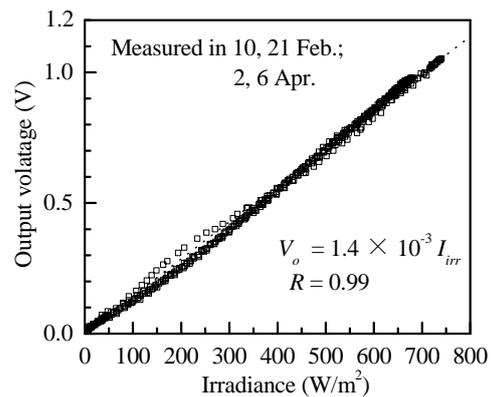
(b) 晴れのち曇り (22 Feb. 2009)

図5 TP日射計およびPVアレイ日射計の日射強度および出力電圧の時系列

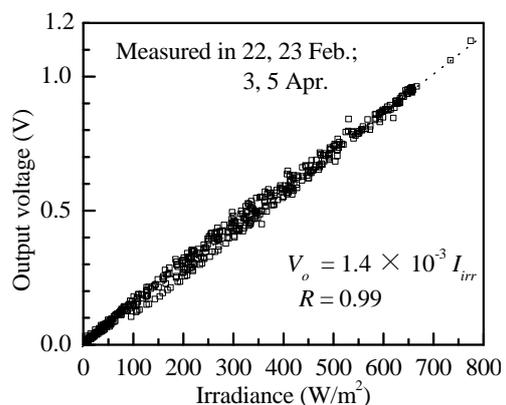
および 0.97 V を記録した。一方、同図 (b) に示すように、2月22日の場合は、午後には雲が次々と太陽にかかり日射強度が不安定であった。この日の日射強度および出力電圧は、ともに10時51分に、それぞれの日最大値である 734 W/m^2 および 1.06 V を記録した。

② 2月10日およびその日と同様に天候の安定した快晴日であり、日射強度が安定であった2月21日、4月2日、および4月6日における日射強度-出力電圧特性を図6(a)に、2月22日およびその日と同様に天候が変化し、日射強度が不安定であった2月23日、4月3日、および4月5日における日射強度-出力電圧特性を図6(b)に示す。なお、両図のプロットは1秒毎の計測値から求めた1分平均値である。図6(a)から、快晴日においては、PVアレイ日射計の出力電圧はTP日射計で計測した日射強度に対して比例関係にあることがわかる。

③日射強度 $I_{irr} (\text{W/m}^2)$ と出力電圧 $V_o (\text{V})$ との関係式を図6中に示す。それらの相関係数 R



(a) 晴天



(b) 曇りおよび晴れのち曇り

図6 日射強度-出力電圧特性

は 0.99 と非常に強い相関性を有していることがわかる。同図 (b) から、日射強度が不安定であった日においても、PVアレイ日射計の出力電圧はTP日射計で計測した日射強度に対して比例関係にあることがわかる。それらの相関係数 R は 0.99 と非常に強い相関性を有している。図6(a)および(b)中に示す日射強度 $I_{irr} (\text{W/m}^2)$ と出力電圧 $V_o (\text{V})$ との関係式における係数は、いずれも $1.4 \times 10^{-3} \text{ V}/(\text{W/m}^2)$ であり、快晴日とそれ以外の日との間に違いはない。日射強度と太陽電池の短絡電流との間にはほぼ線形の関係があることは、従来の研究で示されており、今回の計測結果はそれらと矛盾しない。なお、日射強度が不安定であった日ばかりを集めた図6(b)のプロットが、日射が安定した日ばかりを集めた図6(a)のそれよりややばらついているのは、PVアレイ日射計およびTP日射計のセンサであるPVセルおよび熱電堆の応答速度が互いに異なることが主な原因である。

(2) 日射計の温度特性について検討した。

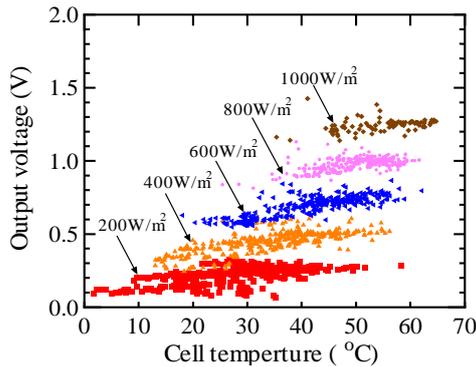


図7 日射計の温度特性

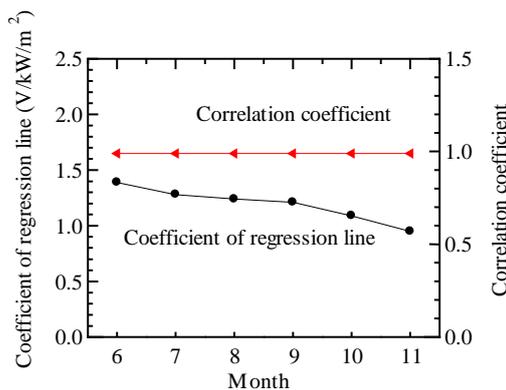


図8 日射計の劣化特性

図7にPVアレイ日射計で計測した出力電圧とPVセル温度を 200 W/m^2 ごとに抽出した場合の関係を示す。同図は、1秒毎の計測値から求めた1分平均値であり、2010年6月から11月にかけての計測結果である。同図に示すように、各日射強度の出力電圧は、PVセルの温度変化に対しほぼ一定であり、日射強度によって決まることがわかる。なお、各日射強度において、多少の傾きやばらつきが生じているが、これは季節変動や長期フィールド試験によるPVセルの劣化が主な原因である。

(3) 日射計の長期仕様による劣化について検討した。図8に、月ごとの回帰直線の係数と相関係数を示す。同図に示すように、相関係数の値は常に0.99と高く、相関が極めて高いことがわかる。一方、回帰直線の係数は徐々に低下していることがわかる。これは、PVセルの温度上昇によって起こる熱膨張や耐候性に不足したシール剤の使用によるPVアレイ日射計の劣化が主な原因である。今後は、このような現象を考慮に入れ、PVセルの周りを保護した改良版日射計を製作し、フィールド試験を実施する構想がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 6件)

- (1) S. Oke, N. Fukushima, Y. Kemmoku, H. Takikawa, T. Sakakibara, K. Araki: "A new simple model of direct spectral irradiance with easily observable atmospheric parameters", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 2010, No.5, pp.548-552 (2010), 査読有
- (2) 桶真一郎, 東山伸, 村田浩之, 滝川浩史: 「エコエネルギーシステム設計・運用支援ツールEcoTOP (エコトップ)」, 電気学会論文誌B, Vol.130, No.5, pp.536-537 (2010), 査読有
- (3) 高野浩貴, 山下芳紀, 所哲郎, 今田太一郎: 「学校施設におけるPV導入効果に関する基礎検討」, 岐阜高専紀要第46号, pp.71-76 (2011), 査読有
- (4) 桶真一郎, 杉山智美, 須田善行, 滝川浩史, 川嶋和子: 「温室内日射計測のための太陽電池アレイ型簡易日射計の開発」, 太陽エネルギー, Vol.35, No.5, pp.71-76 (2009), 査読有
- (5) 桶真一郎, 市川直毅, 滝川浩史, 榎原建樹, 荒木建次: 「二軸追尾低集光リニアアレイ太陽光発電システム」, 電気学会論文誌B, Vol.129, No.9, pp.1154-1155 (2009), 査読有
- (6) 森内基隆, 中川重康: 「モジュールの積雪による変換効率の低下を防ぐためのモジュール設置方法」, 舞鶴工業高等専門学校紀要, No.44, pp.17-22 (2009), 査読有

[学会発表] (計 13件)

- (1) 土井英生, 桶真一郎: 「フィールド試験に基づくPVアレイ日射計の特性評価」, 計測自動制御学会中国支部津山地区計測制御研究会平成22年度学術講演会講演論文集, pp.45-46 (2011), 津山圏域雇用労働センター
- (2) 山根啓司, 桶真一郎, 見目喜重, 荒木建次: 「津山高専における集光式太陽光発電システムのフィールドテスト」, 計測自動制御学会中国支部津山地区計測制御研究会平成22年度学術講演会講演論文集, pp.27-28 (2011), 津山圏域雇用労働センター
- (3) 東弘久, 高橋俊明, 桶真一郎: 「晴天日における直達日射カーブの推定」, 計測自動制御学会中国支部津山地区計測制御研究会平成22年度学術講演会講演論文集, pp.19-20 (2011), 津山圏域雇用労働センター
- (4) 高橋俊明, 桶真一郎: 「全日射スペクトル推定モデルの直達日射強度を用いた誤差低減」, 計測自動制御学会中国支部津山地区計測制御研究会平成22年度学術講演会講演

論文集, pp.9-10 (2011), 津山圏域雇用労働センター

- (5) 桶真一郎, 山根啓司, 見目喜重, 荒木建次: 「集光式PVシステムの発電量に及ぼす黄砂の影響の定量的評価」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2010, pp.343-346 (2010), 日本大学
- (6) 見目喜重, 荒木建次, 平松雅男, 宮崎憲徳, 桶真一郎: 「集光式太陽光発電の発電量への結露による影響の定量的評価」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2010, pp.489-492 (2010), 日本大学
- (7) 山下芳紀, 高野浩貴, 所哲郎, 今田太一郎: 「PV導入による学校施設の省エネ効果の簡易評価」, 平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, p.25 (2010), 九州大学
- (8) 山下芳紀, 高野浩貴, 所哲郎, 今田太一郎: 「学校施設における太陽光発電導入効果に関する基礎検討」, 平成 22 年電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, J5-1 (2010), 中部大学
- (9) 杉山智美, Mohd Arif Farizul, 須田善行, 滝川浩史, 桶真一郎, 川嶋和子: 「太陽電池アレイ型簡易日射計の温度補正」, 平成 22 年電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O4-1 (2010), 中部大学
- (10) 杉山智美, Mohd Arif Farizul, 田上英人, 須田善行, 滝川浩史, 桶真一郎, 川嶋和子: 「太陽電池アレイ型簡易日射計の温度特性の計測」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2010, pp.585-588 (2010), 日本大学
- (11) S. Satomi, A. Farizul, H. Tanoue, Y. Suda, H. Takikawa, S. Oke, K. Kawashima, "Development of simple pyranometer using PV-cell array", 17th Asian Symposium on Ecotechnology, Unazuki, Japan, p.92 (2010)
- (12) 杉山智美, Mohd Arif Farizul, 桶真一郎, 須田善行, 滝川浩史: 「太陽電池アレイ型簡易日射計の開発とフィールド試験」, 太陽/風力エネルギー講演論文集, pp.235-238 (2009), 長崎ブリックホール
- (13) 杉山智美, 桶真一郎, 須田善行, 滝川浩史: 「温室内日射の計測のための太陽電池を用いた新型日射計の開発」, 平成 20 年度電気学会東海支部若手セミナー「環境と調和した電力・エネルギー技術」 (2008), 豊橋技術科学大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 日射計測装置

発明者: 桶真一郎, 滝川浩史, 杉山智美

権利者: 豊橋技術科学大学

種類: 特許

番号: 特願 2008-323006

出願年月日: 20 年 12 月 18 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榊原 建樹 (SAKAKIBARA TATEKI)

岐阜工業高等専門学校・校長

研究者番号: 10023243

(2) 研究分担者

所 哲郎 (TOKORO TETSUROU)

岐阜工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号: 10155525

桶 真一郎 (OKE SHINICHIRO)

津山工業高等専門学校・電子制御工学科・講師

研究者番号: 20362329

滝川 浩史 (TAKIKAWA HIROFUMI)

豊橋技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 90226952

中川 重康 (NAKAGAWA SHIGEYASU)

舞鶴工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号: 60155679

見目 喜重 (KEMMOKU YOSHISHIGE)

豊橋創造大学・情報ビジネス学部・教授

研究者番号: 60273330