

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05906

研究課題名（和文）低コスト・汎用デバイスを用いた高速植物フェノタイピングシステムの開発

研究課題名（英文）Development of High-throughput Plant Phenotyping System Using Affordable Devices

研究代表者

岡安 崇史（Okayasu, Takashi）

九州大学・農学研究院・准教授

研究者番号：70346831

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）：本研究では、育種や農業生産システムの高度化を目的に、小型コンピュータ、RGB-Dカメラをはじめとする各種センサ、ロボット技術、AI等を援用した圃場環境情報の計測や制御、植物の生育状態の精密計測を自動かつ高密度に行う基板技術の開発を目指したものである。開発された技術の妥当性は、植物栽培実験を実際に行うことによって評価した。その結果、一部の技術に関しては改良やさらなる精度向上が必要であると判断されたものの、実用できる水準の技術も開発できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ICTを活用して植物の生育状態を高精度に計測することにより、新たな品種の開発や栽培管理技術の高度化などに役立つ基礎技術の提案を行うことを目的としている。近年では、ICTの目覚ましい発展を背景に、様々な機器の低コスト化やオープンソース化が進んでいる。本研究では、廉価なICT機器やオープンソースハードウェア・ソフトウェアを援用した植物生育特徴量（草高、葉の数、植物の大きさ・動き等）の定量計測技術を開発・実証し、上記の課題解決に対する具体的道筋を提示したもので、農業生産技術の高度化の面から農学ひいては我が国農業の発展に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to develop fundamental technologies for automatic and high-density measurement and control of field environment information and precise measurement of plant growth status by using a small computer, various sensors including RGB-D cameras, robotics, and AI in order to advance breeding and agricultural production systems. The validity of the developed technologies was evaluated by conducting actual plant cultivation experiments. As a result, it was evaluated that some of the technologies need to be improved and the accuracy further enhanced, but some of them were developed to a practical level.

研究分野：農業情報学

キーワード：低コストフェノタイピングシステム 環境モニタリング 植物体センシング 画像解析 複合現実感

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化などともなう異常気象，世界各地で深刻化している水資源の不足等に対応するため，持続的な食料生産を実現する栽培技術や新品種開発への期待が高まっている。

例えば，植物ゲノムの詳細な解析によって，気候変動，干ばつ，病気等に強い遺伝子を選別し，自然交配，遺伝子編集・組換えによって，これらの特徴を持った植物品種を開発しようとする研究が国内外で精力的に行われている。これは植物の遺伝子型が植物の形態，構造，生理的性質等の表現型を決定しているからである。しかしながら，植物の表現型は環境因子に強く影響されることから，実フィールドの実験では設計された遺伝子型がうまく発現しなかったという事例も多数発生している。そこで，遺伝子解析などの研究と併せて，植物の表現型と環境因子との関係を調べる植物フェノタイピング研究が重要視されている（フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術，研究開発戦略センター，2010）。植物の表現型計測は，人手によって行われている場合が多く，また，植物を刈り取って行う破壊計測が一般的であったため，周辺環境の変化に伴って時々刻々変化する植物の表現型を精度よく追跡することが難しかった。近年では，欧米を中心に ICT，コンピュータビジョン等の技術を援用した高速植物フェノタイピングに関する研究が積極的に行われている（Fritsche-Neto and Borém, Springer, 2015 が，計測システムが非常に高額であるなど，我が国でも導入事例は少ない状況（図1参照）で，安価なシステムの開発が求められている。



図1ドイツ製の高速植物フェノタイピングシステム

### 2. 研究の目的

本研究では，農業生産の高度化に応用できる，植物の発芽から収穫までの表現型の高速かつ網羅的な計測・可視化を実現する低コスト植物フェノタイピングシステムの開発を行うことを目的としている。具体的には，市販の低コストマイコンに様々な低コストのセンサーやカメラを実装した植物生育環境・画像計測装置と，植物生育画像から様々な生育特徴量を自動抽出するプログラムから成るシステムを開発する。一方，植物に様々な環境ストレスを与えて栽培実験を行えるように，ユビキタス環境制御システム（UECS）を導入した植物栽培システムも製作する。これらを用いて種々の環境下における植物の表現型の時空間計測を実施し，同時に計測データをクラウド上のデータベースに保存・蓄積する。さらに，栽培中の植物画像に対して，データベース上の各種情報や生育画像の解析結果などを MR（複合現実）によりリアルタイム合成・可視化できるプログラムを開発し，情報可視化技術の高度化の面から植物フェノミクス研究の発展に寄与する。

### 3. 研究の方法

低コストマイコン（Raspberry Pi 等）を用いた高速植物フェノタイピングシステムを開発する。アルミフレームを用いた植物栽培用チャンバーを製作する。チャンバー内には水耕栽培装置，LED 照明（低コスト LED パネルにより製作，性能は実証済）および CO<sub>2</sub> 供給装置を配置し，初年度はタイマー制御でこれらの制御を行う。次に，Raspberry Pi に各種カメラを実装した植物体計測装置を試作する。チャンバー内では，植物（葉菜類，果菜類）を栽培し，環境（気温，湿度，照度，CO<sub>2</sub> 濃度等）の計測と植物体画像（上面および側面）の撮影を一定時間毎に行う。現有の解析プログラムを用いて，生育画像からその特徴量（発芽率，葉色，葉面積，草高等）の抽出を行う。なお，草高および葉面積の計測には RGB-D カメラを用いて計測する。収集した情報は申請者が開発・運用するクラウドデータベース上に転送・保存する。さらに，MR に基づく計測情報や植物生育特徴量の可視化プログラムの開発を行う。

次に，UECS に基づく環境計測・制御システムを導入することにより，栽培環境条件を種々変えた植物の栽培実験が行えるようにチャンバーの拡張を行う。その際，UECS ゲートウェイの試作・導入も行うことにより，インターネット経由で植物栽培の管理や観察が行えるようにする。植物の栽培環境として，照明の照査時間，CO<sub>2</sub> 濃度を変えた栽培実験を行い，各々の環境条件下における植物の表現型を収集する。現有の特徴量抽出プログラムに，深層学習に基づく画像解析を導入し，植物形質情報の数値化などを行う機能も追加する。

#### 4. 研究成果

##### RGB-D カメラおよび深層学習を用いた植物生育特徴量の計測とその精度評価

RGB-D カメラを用いた植物体計測装置を製作した(図2)。本装置はRGB-Dカメラ、カメラ固定用フレームおよび計測用PCから構成される。本装置を撮影植物の上部に取り付けた後、計測用PCを用いて植物の画像を計測できるようにした。RGB-Dカメラで撮影された画像から植物の生育特徴量を抽出するための手法として、植物個体群から個葉情報を抽出する画像処理プログラムを開発した。同プログラムの精度評価を行うため、小型水耕栽培ベッドを用いて生育ステージの異なるホウレンソウの計測を行い、葉面情報の抽出性能(例えば、葉群落の抽出と個葉の分割の精度)、葉面積の補正精度等の評価や、生育特徴量と実際の植物の生育指標との比較を行った。

図3に群落容積(RGB-Dカメラで計測した情報から算出)と乾物重との関係を示す。乾物重は、対象となるホウレンソウを採取・乾燥させて求めるので、各生育ステージのホウレンソウは別個体を用いた。乾物重はホウレンソウの成長とともに増大した。画像から推定される群落容積も乾物重の傾向とよく一致しており、生育状態評価の一指標として利用できる可能性を示した。

##### 深層学習による発芽特性の評価

図4に製作した植物栽培用チャンバーを示す。小型コンピュータを用いてLEDパネルや灌水用ポンプなどを制御可能な植物の発芽試験装置を自作した。チャンバー内の温湿度や画像(USBカメラで撮影)は定期的に計測され、データベースサーバに送信・蓄積した。図5に深層学習による発芽率の評価結果を示す。発芽初期は精度良く検出できていたもの、発芽にムラがあったため、生育が進むにつれてダブルカウントにより検出数が過大評価される結果となった。図6に生育評価器の結果を示す。誤判定の割合が大きい結果となったが、その割合は目視による評価と同程度であった。評価器の精度向上には訓練データを増やす必要があることがわかった。



図2 製作した計測装置及び実験の様子

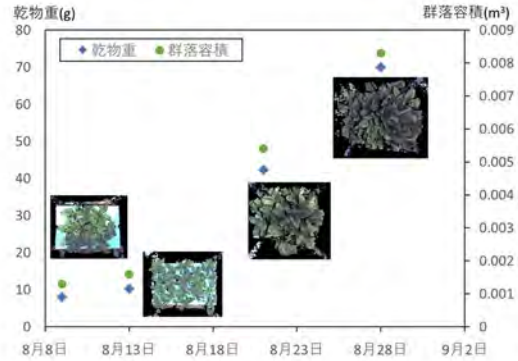


図3 群落容積と乾物重の関係



図4 製作した植物栽培用チャンバー

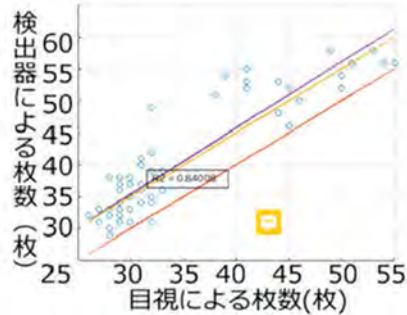


図5 深層学習による発芽率の評価

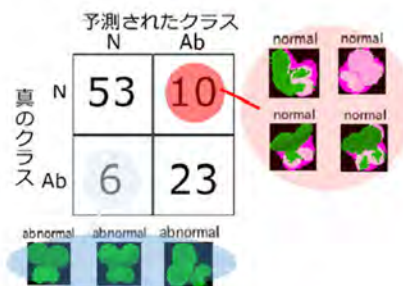


図6 生育評価器の評価

## 葉菜類を対象としたフェノタイピングシステムの開発とその性能評価

図7に開発した植物フェノタイピングシステムの構成を示す。本計測システムは計測ロボットとレールフレームから構成される。計測ロボットはアルミフレーム部材を組合せた構造で、小型コンピュータ、モータドライバ、DCモータ、USBカメラを用いてモータ制御、位置認識、植物画像撮影等を自動で行うことが可能である。また、RGB-Dカメラは植物の生育・成長の3次元構造を計測するために機体上部に配置した。

図8に草高の計測値と実測値の比較結果を示す。Active IR Stereo方式 (RealSense) と Time of Flight方式 (Azure Kinect) のRGB-Dカメラによる草高計測精度は、いずれも決定係数0.95程度であった。図9に2つのRGB-Dカメラ画像から推定された草高の分布を示す。RealSenseでは、葉の先端付近に赤色の分布が認められ、草高計測に異常が発生した。この現象は特に強日射条件下で発生していることがわかった。一方、Azure Kinectでは異常値の発生はなく、強光下でも高精度の計測が可能であった。RealSenseの強光条件下による異常値発生の影響は図10に示されるように、定植から収穫まで見られた。この結果からRealSenseを利用する場合には、朝夕の日射量が少ない条件下で利用する必要があるとの結論を得た。一方、Azure Kinectは、日射などの外乱に対しても高精度の計測が可能であり、この利点を活かせば1日の植物生育の経時変化の計測も可能で、植物のより詳細な生育分析が可能になるものと期待される。

図11に植物栽培ベッドの3次元点群画像を示す。撮影画像からSfM (Structure from Motion) による3次元再構成画像も作成可能であった。図のように栽培空間を3次元情報として数値化できれば、MRなどの可視化ツールの活用により、データの高度可視化も期待できる。



図7 開発した植物フェノタイピングシステム

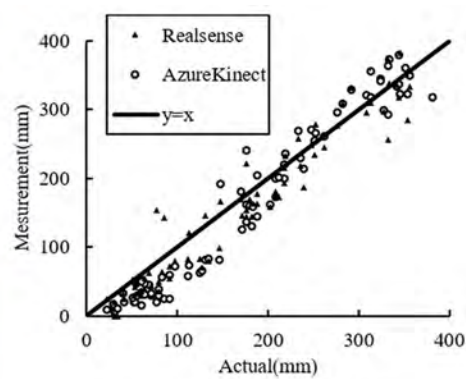


図8 草高算出精度実験の結果

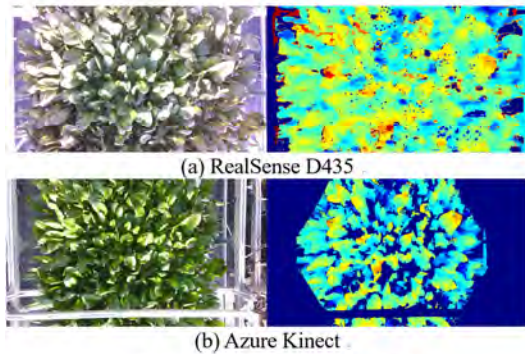


図9 草高分布ヒートマップ

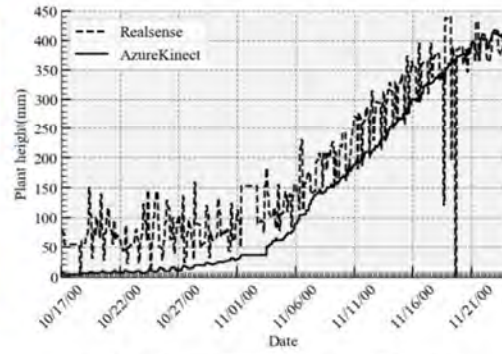


図10 栽培期間における草高の推移

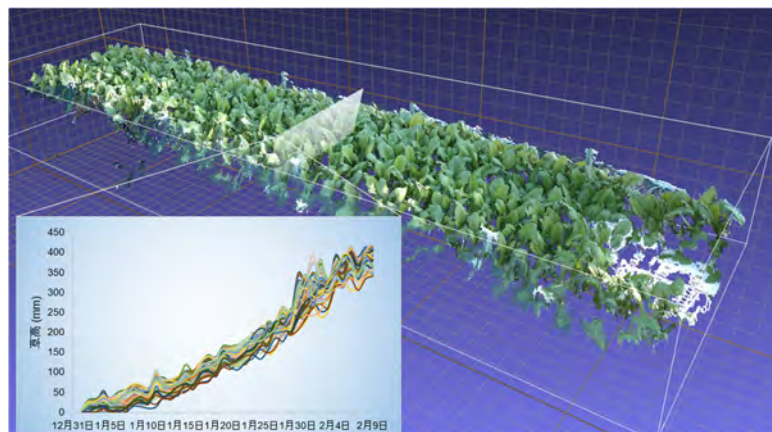


図11 SfMによる栽培空間の可視化

### 水分動態と画像情報を用いた植物の生育状態の評価

ユビキタス環境制御システム (UECS) でハウス内の環境制御が行えるハウス内で植物の栽培試験を行った。図 8 に計測システムの構成を示す。本システムは温湿度や植物の重量変化を計測する環境計測部と、植物各部の変位量を計測する画像撮影部から成る。前者は、温湿度センサーとロードセル、ひずみアンプおよび小型コンピュータボードから構成される。ロードセルは栽培ポットの下部とフレーム上部に設置し、植物の重量変化が計測できる仕組みとなっている。後者は RGB-D カメラと画像撮影用コンピュータで構成され、15 分間隔で植物の生育画像を撮影し、Optical Flow により植物各部の動きを計測している。供試植物にはトマト (品種: フルティカ) を用いた。

図 9 に 4 日間の温湿度、植物体重量 (両ロードセルの合計から算出) および植物体各部の平均変位量の経時変化を示す。天候は 1, 4 日目が晴天, 2, 3 日目が雨天であった。晴天時は、毎時間の灌水量よりも植物による水の消費量の方が多く、植物体重量が徐々に減少した。植物は光合成による糖生成や葉の気孔からの蒸散により水を消費する。水の消費量は光合成速度の増加に伴って一般に増大するので、植物体への水分供給が不足している場合には、葉の萎れなどが発生する。つまり、晴天時は変位量が大きことから、植物体には萎れが発生していることが確認できる。一方、雨天時は、光強度も弱く光合成速度も低下するので、水の消費が大幅に減少している。雨天の場合は、灌水による植物体への水の供給は十分なため、灌水した水は直ちに排水されている様子も読み取ることが可能である。また、葉や茎などに萎れなども発生しないため、目立った植物体の動きは検出されていないこともわかる。このように、植物体の動きから植物体への水の供給量が十分なのか不十分なのかを判断できる様子を示した。

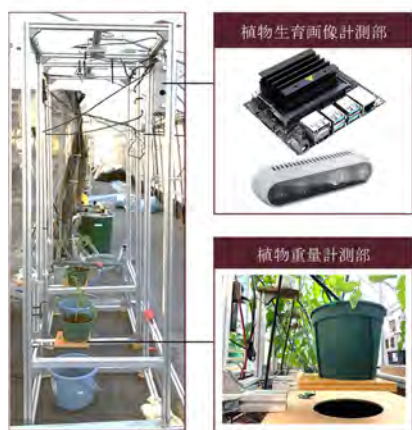


図12 計測システムの構成

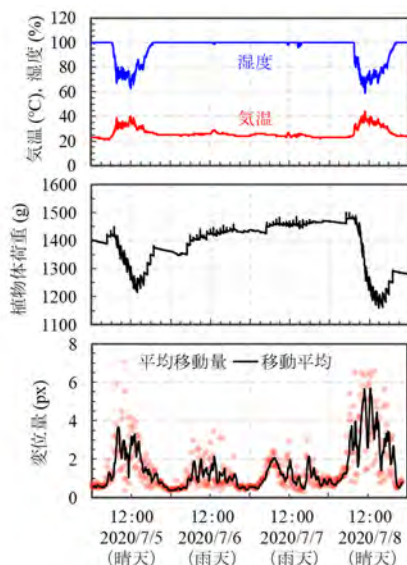


図13 環境, 植物体重量・変位量の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 伊藤次郎, 岡安崇史, 野村浩一, 安武大輔, 岩尾忠重, 尾崎行生, 井上英二, 平井康丸, 光岡宗司	4. 巻 -
2. 論文標題 低コストIoTデバイスを用いた植物フェノタイピングロボットの開発とその性能評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業情報研究	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 岡安崇史, 伊藤次郎, ハミダ アストリアティ	4. 巻 104(6)
2. 論文標題 植物の生育特徴量計測における低価格小形コンピュータの可能性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 532-537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 畠中大陸, 岡安崇史, 長浜義典, 井上英二, 平井康丸, 光岡宗司
2. 発表標題 簡易育苗チャンバによる植物発芽・初期生育特徴量の計測と可視化
3. 学会等名 農業食料工学会・農業施設学会・国際農業工学会第6部会 2019年合同国際大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長浜義典, 岡安崇史, 野田龍一, 野村浩一, 安武大輔, 岩尾忠重, 北野雅治, 井上英二
2. 発表標題 RGB-D画像を用いた葉菜類の生育特徴量の計測と可視化
3. 学会等名 農業食料工学会・農業施設学会・国際農業工学会第6部会 2019年合同国際大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Okayasu
2. 発表標題 Smart Agriculture Utilizing Affordable IoT Devices
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural, Food, Environmental and Life Sciences in Asia 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Astriati Hamidah, Takashi Okayasu, Yu Hoshino, Eiji Inoue, Yasumaru Hirai, Muneshi Mitsuoka, Andri Prima Nugroho, Lilik Sutiarmo
2. 発表標題 Accuracy Evaluation of Low-cost Weight Measurement Sensor for Plants
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural, Food, Environmental and Life Sciences in Asia 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡安崇史, 伊藤次郎, 野村浩一, 安武大輔, 政井隆之, 田中泰洋, 岩尾忠重, 尾崎行生, 有田大作
2. 発表標題 画像情報を用いた植物生育特徴量の計測と利用
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡安崇史, 有田大作, 安武大輔, 黒崎秀仁, 井上英二, 平井康丸, 光岡宗司
2. 発表標題 Fabとオープンソースを活用した植物フェノタイピングシステムの開発
3. 学会等名 第73回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Astriati Hamidah, Takashi Okayasu, Yu Hoshino, Eiji Inoue, Yasumaru Hirai, Muneshi Mitsuoka, Andri Prima Nugroho, Lilik Sutiarto
2. 発表標題 Accuracy Evaluation of Low-cost Weight Measurement Sensor for Plants
3. 学会等名 第73回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Astriati Hamidah, Takashi Okayasu, Yu Hoshino, Eiji Inoue, Yasumaru Hirai, Muneshi Mitsuoka, Andri Prima Nugroho and Lilik Sutiarto
2. 発表標題 Plant Weight Measurement Using Low Cost Load Cell and Its Accuracy Evaluation
3. 学会等名 農業情報学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi OKAYASU
2. 発表標題 Plant Phenotyping for Smart Agriculture Utilizing Affordable IoT Devices
3. 学会等名 Forum "Math-for-Industry" 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤次郎, 岡安崇史, 野村浩一, 安武大輔, 岩尾忠重, 尾崎行生, 井上英二, 平井康丸, 光岡宗司
2. 発表標題 低コスト植物フェノタイピングプラットフォームを用いたハウレンソウの生育計測
3. 学会等名 2020年度農業情報学会年次大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 伊藤次郎, 岡安崇史, 野村浩一, 安武大輔, 岩尾忠重, 尾崎行生, 井上英二, 平井康丸, 光岡宗司
2. 発表標題 低コストIoTデバイスを用いた植物フェノタイピングプラットフォームの開発
3. 学会等名 2020年度農業情報学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡安崇史, 伊藤次郎, ハミダ アストリアティ, 野村浩一, 安武大輔, 岩尾忠重, 尾崎行生, 星野 友
2. 発表標題 画像センシングによる植物生育特徴量の計測とその利用
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサエティ大会2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Okayasu T.
2. 発表標題 Smart Agriculture Based on Affordable IoT Devices and Verification of Its validity
3. 学会等名 International Conference on Sustainable Agriculture and Biosystem (ICSAB) 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡安 崇史
2. 発表標題 低コスト電子デバイスを用いた植物生育情報の計測と可視化
3. 学会等名 (一社)照明学会 光源・照明システム分科会 公開研究会 光・画像計測とデータのAI活用、UV照射による農作物・環境応用の現状と課題 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Okayasu, T.
2. 発表標題 Plant phenotyping technologies using low cost devices
3. 学会等名 The 14th TSAE International Conference & 22nd TSAE National Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 農業情報学会(編) (分担執筆)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 農林統計出版	5. 総ページ数 516
3. 書名 新スマート農業	

〔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
研究 分担者	吉永 崇  (Yoshinaga Takashi)  (10598098)	公益財団法人九州先端科学技術研究所・オープンイノベーション・ラボ・特別研究員   (87103)	

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
---------	---------