

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05860

研究課題名（和文）気候変動下のイチゴ生産に向けたライブイメージング解析に基づく転流制御技術の開発

研究課題名（英文）Development of translocation control technique based on the live-imaging-analysis for strawberry production under climate change

研究代表者

日高 功太（Hidaka, Kota）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・九州沖縄農業研究センター・上級研究員

研究者番号：80547232

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）：本研究は、同化産物の転流プロセスに着目して、増収・果実品質の向上の実現のためにRIイメージング技術を用いて転流制御のための局所環境制御の条件を検証した結果、葉の積算光合成量が増加すると、果実への光合成産物の転流が促進されることが明らかになった。この結果に基づいて葉の積算光合成量の増加による果実への転流促進を目的として葉近傍のみへの局所CO<sub>2</sub>施用を実施した結果、果実の糖度上昇、大玉化、増収効果が確認された。さらに、局所環境制御下における生育への効果を生育特徴量（葉面積、果実体積等）から自動で評価するためのオンサイトフェノタイピング技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温暖化によりイチゴの果実品質の低下（小玉化、糖度低下）が深刻化しつつある中で、本研究は、同化産物の転流プロセスに着目して、果実品質の向上や増収の実現のためにRIイメージング技術を用いて転流促進のための環境制御の条件を解明するとともに、それに基づく転流促進のための局所環境制御技術を開発することで、果実の高品質化や増収効果が確認された。イチゴの転流に関する国内外の研究が少ない中で、転流を可視化するRIイメージング技術で得られた知見に基づいて転流の制御に繋がった本研究は独創的であり、植物環境系輸送プロセスの解明に資する学術的意義とともに、温暖化に対応したイチゴ生産に資する社会的意義を有している。

研究成果の概要（英文）：Focusing on the translocation process of photosynthates, this study verified the conditions of local environmental control for translocation control using RI imaging technology to realize the yield increase and improvement of fruit quality. The results showed that an increase in leaf integrated photosynthesis promotes translocation of photosynthates into fruits. Based on these results, local CO<sub>2</sub> supplementation only near the leaves for the purpose of promoting translocation of photosynthates into fruits by increasing leaf integrated photosynthesis enabled to increase fruit sugar content, produce large-sized fruits, and increase yield. Furthermore, on-site phenotyping technology was developed to automatically evaluate the effects on growth under the local environmental control based on growth characteristics (leaf area, fruit volume, etc.).

研究分野：生物環境調節学、施設園芸学

キーワード：RIイメージング イチゴ 気候変動 転流制御 フェノタイピング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

国内需要だけでなく国外輸出を含めたグローバルなマーケットを対象とする今後のイチゴ生産においては、「高糖度・大玉」イチゴの安定生産技術が求められる。一方、生産現場においては、地球温暖化に伴うハウス温度の上昇による果実の早熟化とそれがもたらす果実品質の低下(小玉化、糖度低下)等が深刻な問題となっており、これへの打開策となる「高糖度・大玉」のイチゴを安定的に生産する技術開発が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、同化産物の転流プロセスに着目して、果実品質の向上や増収を実現するために、RI イメージング技術を用いて転流制御のための局所環境処理条件と、そのメカニズムを解明する。この解明に基づく局所環境制御によって同化産物の転流制御を検討し、その効果をオンサイトフェノタイピング技術を用いた生育特徴量解析(葉面積、果実体積等)で検証することで、温暖化に対応した「高糖度・大玉」イチゴの安定生産を実現する転流制御技術を開発する。

### 3. 研究の方法

本研究は、以下の内容で構成されている。

課題 . RI イメージング技術を用いた転流制御条件の解明

課題 . オンサイトフェノタイピング技術のプラットフォーム構築・解析手法の開発

課題 . 課題 . に基づく転流制御技術の開発とその効果の検証

課題 では、量子科学技術研究開発機構 高崎研が所有する RI イメージング技術を用いて果実への糖の転流制御(課題 )のための処理条件を探索した。具体的には、転流の場である葉を局所的に環境制御することで、果実への転流促進の処理条件(部位、温度、光強度)を検討した。

課題 では、課題 の栽培試験に向けて低コスト汎用デバイスを用いたオンサイトフェノタイピング装置を製作してハウス内に導入し、3次元画像データによる生育特徴量(草高、葉面積、葉色、着果数、果実熟度、果実体積)の自動計測のためのプラットフォーム構築を検討した。

課題 では、イチゴ促成ハウス栽培において、課題 で決定した処理条件に基づく転流制御のための局所環境制御を自家施工の局所 CO<sub>2</sub> 施用システムを用いて実施し、「果実品質」や「収量性」への効果を検証した。

### 4. 研究成果

課題 (1) イチゴ葉近傍の温度環境の変化が、果実への光合成産物の転流動態に及ぼす影響について検討した。

イチゴ「福岡S6号」をプラスチックポットで栽培し、植物3個体を供試した。植物体には展開第9葉まで着葉しており、果房直下の葉は展開第4葉であった。果実は赤熟期の1番果が1果(図1; 果実 )、白熟期の2番果が2果(図1; 果実、 )、緑熟期の3番果が4果着果していた(図1; 果実 ~ )。PETIS の撮像視野に全ての果実が収まるよう植物体を設置した。面状ヒーターを取り付けたアクリルチャンバー内に果房直下葉を入れ、アクリルチャンバー内の気温をイチゴの生育適温である20℃に保ち、約150MBqの<sup>11</sup>C<sub>2</sub>O<sub>2</sub>を投与した。投与と同時にPETIS撮像を開始し、果房直下葉から各果実への<sup>11</sup>C-光合成産物の転流動態を150分間撮像した(20℃区)。<sup>11</sup>Cの半減期の短さ(20分)のため同一個体を繰り返し供試できる利点を活かし、PETIS撮像終了後に面状ヒーターによってアクリルチャンバー内の気温を約30℃まで加温して、再び<sup>11</sup>C<sub>2</sub>O<sub>2</sub>を投与し、同一個体の果実への<sup>11</sup>C-光合成産物の転流動態を150分間撮像した(30℃区)。

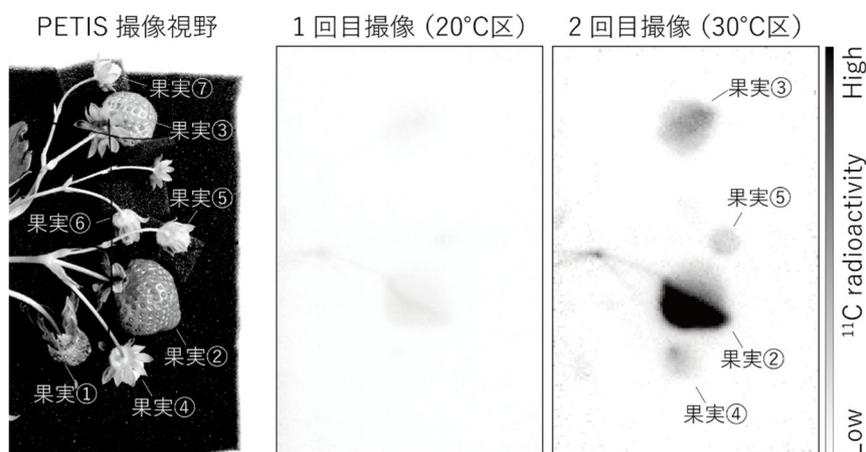


図1 PETIS 撮像視野に設置したイチゴ果実、および20℃区と30℃区におけるPETIS撮像より得られた<sup>11</sup>C光合成産物の分布画像

実験の結果、 $^{11}\text{C}$ -光合成産物が果実へ転流する様子の可視化に成功した(図1)。得られた画像から果実、果実、果実、果実への転流が確認された。特に、果実への転流が顕著であった。20区と30区では、 $^{11}\text{C}$ -光合成産物の転流が確認される果実に変化は無かったが、20区よりも30区の方が各果実への転流が多くなった。転流が確認された果実における $^{11}\text{C}$ 放射活性の経時変化を比較すると(図2)、20区では $^{11}\text{CO}_2$ を投与してから約80分後に $^{11}\text{C}$ -光合成産物の果実への転流が確認されたが、30区では $^{11}\text{CO}_2$ の投与から約30分後に各果実への転流が確認された。20区と30区における $^{11}\text{CO}_2$ 投与から150分後の各果実の $^{11}\text{C}$ 放射活性を比較すると、果実の30区の放射活性は20区の約6.3倍、果実では約4.6倍、果実では約7.5倍、果実では約2.8倍に増加していた。葉近傍の気温の上昇によって、葉からの光合成産物の送り出し速度が増加し、果実への転流速度が増加したことが示唆された。

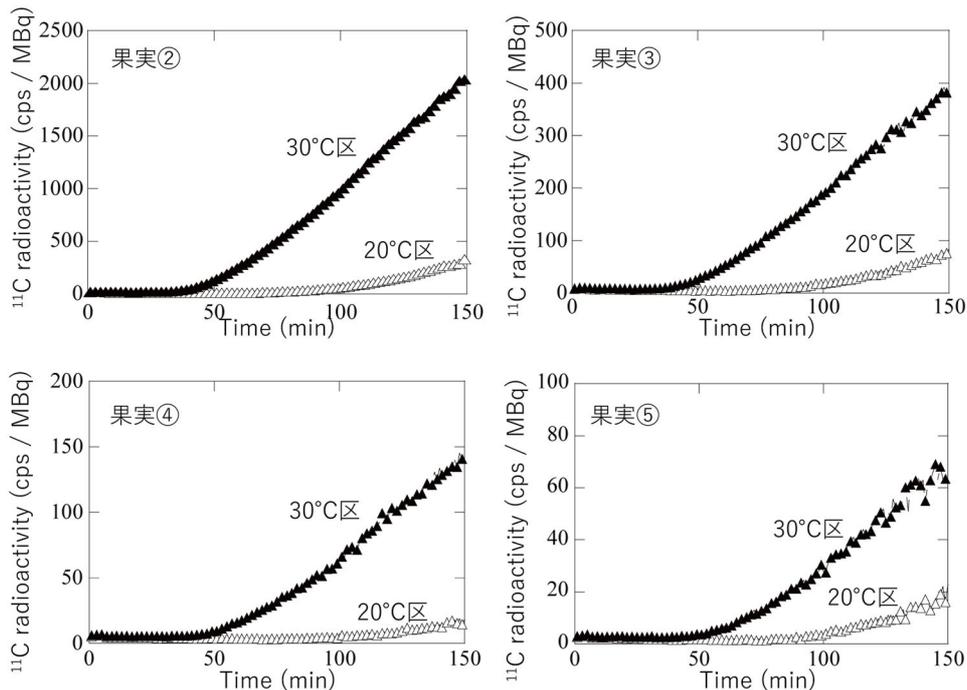


図2 果実、果実、果実、果実における20区と30区の $^{11}\text{C}$ 放射活性(cps)の経時変化

課題(2) イチゴ植物体における明期の経過に伴う葉面積算受光量の増加がイチゴ果実への転流動態に及ぼす影響について検討した。

イチゴ‘福岡S6号’をプラスチックポットで栽培し、1~3番果が着果した植物3個体を供試した。光強度 $400\ \mu\text{mol}\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ に調節したLEDを葉面上で点灯し明期とした。果房直下葉に $^{11}\text{CO}_2$ を投与し、イチゴ果実への $^{11}\text{C}$ 転流動態をPETISで撮像した。 $^{11}\text{C}$ の半減期が短く(20分)同一個体を繰り返し供試できる利点を活かし、LEDを点灯してから0.5時間後(0.5h区)、4.5時間後(4.5h区)、9時間後(9h区)にそれぞれ3時間のPETIS撮像を行った。

実験の結果、同一果房内の各イチゴ果実に対し $^{11}\text{C}$ 標識光合成産物が不均一に転流する様子が確認された(図3)。果実間の $^{11}\text{C}$ 分配割合を比較すると、0.5h区で $^{11}\text{C}$ の分配割合が高い果実は、4.5h区、9h区で分配割合が減少する傾向にあり、一方で0.5h区で $^{11}\text{C}$ の分配割合が低い果実は、4.5h区、9h区で分配割合が増加する傾向にあった(図4)。各果実への積算の転流量に応じて光合成産物の分配が調節されている可能性が示唆された。また、明期の経過に伴い果実への $^{11}\text{C}$ 転流量および転流速度は有意に増加し、各果実の小果柄を通過する $^{11}\text{C}$ の転流速度も有意に増加した。葉の積算受光量が増加し葉内における光合成産物の蓄積量が増えると、葉からの光合成産物の転流が促進され、結果として果実への転流も促進されることが示唆された。

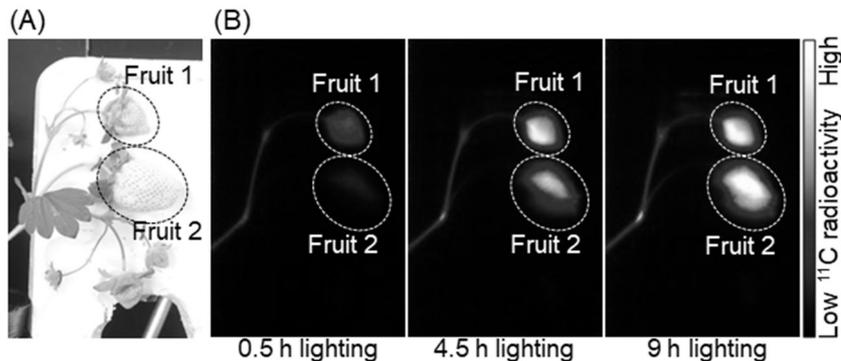


図3 PETIS撮像視野に設置したイチゴ果実(A)および0.5時間、4.5時間、9時間の明期下におけるPETIS撮像より得られた $^{11}\text{C}$ 光合成産物の分布画像(B)

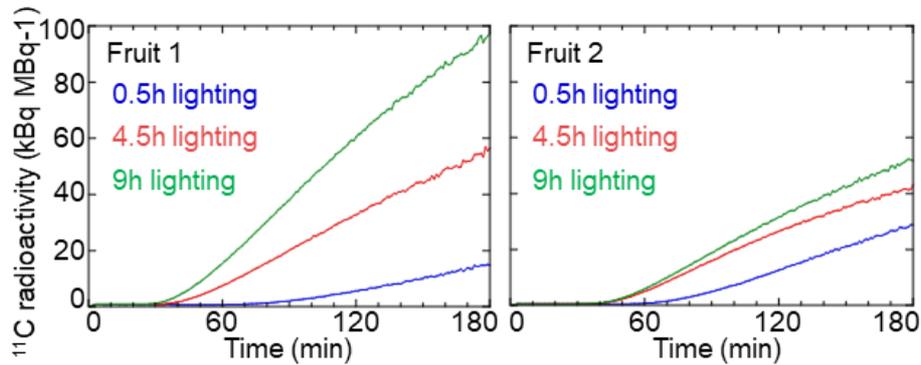


図4 果実1、果実2における0.5時間、4.5時間、9時間の明期下における<sup>11</sup>C放射活性の経時変化

課題 局所環境制御下におけるイチゴの生育特徴量（葉面積、果実体積等）への効果を自動的に評価するために、オンサイトフェノタイピング技術の開発を検討した。

フェノタイピングロボットは、Raspberry Pi 4、モータードライバー（Cytron）、DCモーター（24V）、カメラ、セキュリティスイッチ（DL Limit）および2つのリードスイッチで構成されており、ロボットのフレームは、断面が2cm四方のアルミフレームを使用して構築した（図5）。本フェノタイピングロボットは4つの車輪を有しており、そのうち2つが駆動モーターに接続される仕様とした。ロボットのナビゲーションを容易にするために、車両の前後に2つのリードスイッチを配置し、レールの始点と終点に2つの対応する磁気部品を設置した。スイッチが磁気部品を通過すると、スイッチが作動し、車両が方向と終点を識別できるようになっている。本システムは、2台のカメラで構成されており、1台目のカメラ（赤外線カメラ）はロボットの下部に設置され、温室内の位置を示す識別子を含む正方形のArUco マーカーを検出する。2台目のフェノタイピング用カメラは5MP 解像度と20倍ズーム機能を備え、ロボットの上部に設置している。Raspberry Pi はONVIF プロトコルを使用して構築されており、カメラをさまざまな角度やズーム位置に動かすことが可能となっている。収集された画像はSSD ハードドライブ（1TB）に保存される仕様とした。

実験の結果、オンサイトフェノタイピングロボットは、リードスイッチが作動すると適切に方向を変えて単一の経路を移動した。また、赤外線カメラはArUco マーカーに対して100%の認識精度を持ち、フェノタイピングカメラはイチゴ植物の画像を正確に収集した。また、本フェノタイピングロボットで得られた画像を使用して、イチゴ検出モデルに基づくデータ拡張とアクティブラーニングを実装することで、イチゴの果実を精度良く検出することが可能となった。



図5 イチゴのオンサイトフェノタイピングロボットの動作試験の様子

課題 課題（2）においてイチゴ葉の積算光合成量の増加によるイチゴ果実への転流促進効果が確認された結果に基づいて、イチゴ葉の光合成量増加のために葉近傍に直接CO<sub>2</sub>を供給する局所CO<sub>2</sub>施用がイチゴの平均果重や収量性等に及ぼす影響について検証した。

一季成り性イチゴ品種「恋みのり」を各処理区12株5反復用いた。各処理区とも太陽光型植物工場の3.3a区画で試験を行った。実験処理については、灯油燃焼式光合成促進機を用いて6-18時の間にハウス全体に施用して800ppmで濃度制御する「全体施用区」、6-18時の間で葉近傍にのみ施用して800ppmで制御する「局所施用区」および「無処理区」を設定した。これらのCO<sub>2</sub>施用処理は12月から翌4月末まで行った。局所CO<sub>2</sub>施用の方法については、灯油燃焼式光合成促進機から排出されたCO<sub>2</sub>ガスをブローで回収して塩ビ製のパイプラインを經由して株元に

配置した施用チューブから葉近傍に配風することで実施した。

実験の結果、局所 CO<sub>2</sub> 施用によって群落内の CO<sub>2</sub> 濃度は、天窓閉鎖時で約 800ppm、天窓開閉時で約 600ppm にまで上昇し、その結果、葉の光合成が促進されたことが示唆された（データ略）。その結果、1月初旬のイチゴ果実の糖度は、局所施用区が無施用区よりも有意に高くなった（図 6）。果実の平均加重については、局所施用区が他の処理区に比べて有意に高くなった（図 7）。また、果実収量についても局所施用区が他の処理区よりも有意に高い値を示した（図 8）。このことから、局所 CO<sub>2</sub> 施用によって果実糖度の上昇（高品質化）、大玉化および増収効果が明らかとなった。これは、局所 CO<sub>2</sub> 施用によって葉の積算光合成量が増加することで果実への光合成産物の転流が促進されたためであると示唆された。

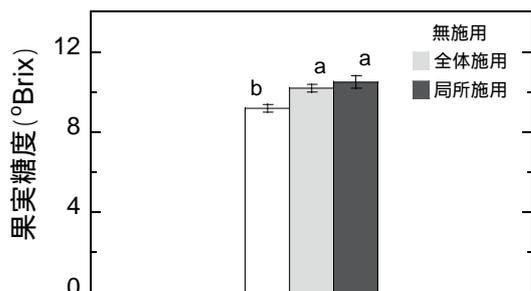


図 6 各 CO<sub>2</sub> 施用下での果実糖度

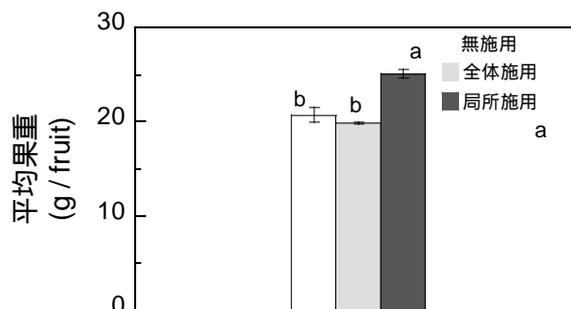


図 7 各 CO<sub>2</sub> 施用下での平均果重

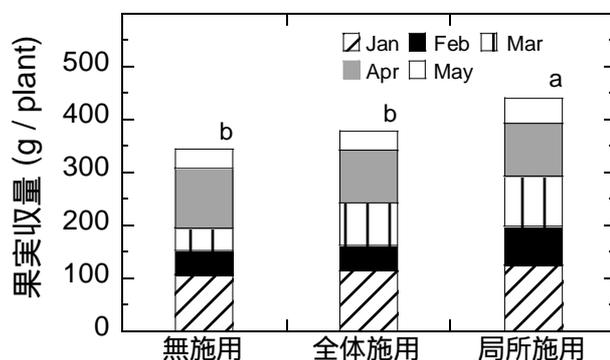


図 8 各 CO<sub>2</sub> 施用下での果実収量

以上、本研究では同化産物の転流プロセスに着目して、イチゴの果実品質の向上や増収の実現のために RI イメージング技術を用いて転流促進のための環境制御の条件を解明するとともに、それに基づく転流促進のための局所環境制御技術を開発することで、果実の高品質化や増収効果が確認された。また、低コストな汎用部材を用いたイチゴのフェノタイピングロボットを開発することで、イチゴ生育特徴量の自動評価が可能になった。以上のように、イチゴの転流に関する最新の知見に基づいて転流の制御に繋げた本研究は独創的であり、インパクトの高いものと考えられる。局所環境制御による転流促進技術については、更なる研究を要するが、気候変動下におけるイチゴの安定多収生産に資するものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kota Hidaka, Yue Zhang (九大), Daisuke Yasutake (九大), Yuta Miyoshi (量研)
2. 発表標題 Development of crop-local CO2 enrichment to improve fuel use efficiency supported with an analysis of CO2 environment using CFD model in protected cultivation of strawberries
3. 学会等名 International Symposium on Models for Plant Growth, Environments, Farm Management in Orchards and Protected Cultivation (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日高功太
2. 発表標題 施設野菜での環境制御の基礎と応用 (CO2施用に着目して)
3. 学会等名 鹿児島県園芸振興協議会主催 施設野菜の環境制御技術研修会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日高功太
2. 発表標題 施設栽培での環境制御の基礎と応用 (CO2施用に着目して)
3. 学会等名 R5年度JA全農ふくれんナス部会役員並びに青年部合同研修会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 三好悠太、日高功太、尹永根、鈴井伸郎、野田祐作、榎本一之、河地有木
2. 発表標題 葉近傍の温度変化がイチゴ果実への光合成産物の転流動態に及ぼす影響
3. 学会等名 日本生物環境工学会2022年福岡大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三好悠太、日高功太、尹永根、鈴木伸郎、野田祐作、榎本一之、長尾悠人、山口充孝、河地有木
2. 発表標題 イチゴ果実の着果によって変化する根への光合成産物の転流動態
3. 学会等名 日本土壌肥科学会2022年東京大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日高功太
2. 発表標題 イチゴにおける光合成産物の転流機構の解明を目指したRIイメージング研究
3. 学会等名 第59回アイソトープ・放射線研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日高功太
2. 発表標題 イチゴの光合成に着目した増収技術の開発と現場実装
3. 学会等名 高知大学令和4年度IoP塾、農業振興と農学（研究・教育）の未来可能性（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三好悠太
2. 発表標題 放射線イメージング技術が明らかにするイチゴの転流戦略
3. 学会等名 高知大学IoP共創センター主催シンポジウム「Internet of Plants (IoP) の共創と挑戦 ～転流の見える化は可能か？有効か？～」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日高功太
2. 発表標題 植物生理と環境制御技術について
3. 学会等名 長崎県東北地域農業振興協議会主催 県北若手いちご塾（招待講演）
4. 発表年 2024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
研究分担者	三好 悠太  (Miyoshi Yuta)  (60855724)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線生物応用研究部・主任研究員   (82502)	
研究分担者	岡安 崇史  (Okayasu Takashi)  (70346831)	九州大学・農学研究院・教授   (17102)	

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