

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03663

研究課題名(和文) 生ごみ自然乳酸発酵制御による効率的なメタン発酵原料収集手法の確立

研究課題名(英文) Development of the efficient kitchen garbage collection system by using lactic acid fermentation treatment

研究代表者

大土井 克明(OHD01, Katsuaki)

京都大学・農学研究科・助教

研究者番号：90372557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：生ごみを安定的に貯蔵し、効率的にメタン発酵プラントに運搬するために乳酸発酵による前処理を行った。乳酸発酵後の原料には乳酸菌が含まれるため、嫌気状態であるメタン発酵槽内での影響を調査した。その結果、メタン発酵に対して負の影響は認められず、難分解の原料では分解が促進されメタン収量が増加することが分かった。乳酸発酵処理により一時的に貯留して可溶化することにより、パキュームカーで効率的に運搬することが可能となり、収集運搬時に発生するCO<sub>2</sub>を約40%削減することが試算により判明した。この削減割合は運搬距離が長いほど多くなる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では消化液の液肥利用をともなう生ごみメタン発酵において、マイクロプラスチックのほ場への流入を回避するためにパケツによる非効率な生ごみ回収方法を改善するために、乳酸発酵前処理により安定的に貯蔵・可溶化し、パキュームカーで運搬することにより、生ごみの収集運搬時に発生するCO<sub>2</sub>の排出量を削減する収集運搬システムを提案した。本研究で調査対象とした岡山県真庭市のような広域での合併を行った自治体での生ごみ収集運搬の効率を大きく改善することに意義がある。

研究成果の概要(英文)：In order to store kitchen garbage stably and transport it to an anaerobic digestion plant, we proposed lactic acid fermentation pretreatment. Since the kitchen garbage after lactic acid fermentation pretreatment contains lactic acid bacteria, we have investigated the effects of it on anaerobic digestion. As a result the negative effect on anaerobic digestion has not been observed, and it became obviously that the difficult to decompose organic material was accelerated decomposition and methane yield was increased. Temporary storage and solubilization through lactic acid fermentation pretreatment makes it possible to transport efficiently using vacuum truck, and it became obvious by the estimation that the carbon dioxide generated during garbage collection and transportation can be reduced by approximately 40%. This reduction rate increases as the transportation distance increases.

研究分野：農業環境工学

キーワード：メタン発酵 乳酸発酵 前処理 ハブアンドスポーク回収

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本国内では公設の焼却施設が 1,000 基以上稼働しており、いわゆる「可燃ごみ」と呼ばれる一般廃棄物が日々焼却処理されている。しかし、可燃ごみ重量の 40% 近くは「生ごみ」であり、含水率が高く (70% 以上) 焼却に適さないごみである。生ごみを分別回収し、メタン発酵させ、生成バイオガスをエネルギー利用し、残渣を資源化することは、可燃ごみの大幅な削減、資源化率の向上、焼却による温室効果ガスの排出削減や、肥料の自給など、多くのメリットがある。メタン発酵は一般廃棄物の大部分を占める生ごみ処理の手段として有効であるが、バケツなどの容器で長距離を運搬することで運搬効率が悪いことも一因となり、普及が進んでいない。

生ごみの分別回収によるメタン発酵処理について、国内のいくつかのプラントにおいて調査を行った結果、メタン発酵後の消化液の液肥利用を行わないプラントではプラスチック製の袋により収集運搬をおこなっているが、液肥利用を行うプラントでは液肥に袋の一部が混入する懸念があることからバケツによる回収を行っていることが明らかになった。プラ袋による回収では前処理として破袋機・選別機にかけているが、袋や袋に付着した生ごみは焼却処理されるうえ、メタン発酵槽にも袋の一部が混入してしまう。消化液の液肥利用まで含めた資源循環を前提とすると、プラ袋での収集は不適である。一方バケツによる回収では、生ごみがバケツの約 50% 程度しか入っておらず、調査の結果空隙率が約 50% であることが明らかになった。さらに円筒形のバケツをトラックで運搬するため空間占有率は約 78.5% である。これらのことからバケツ回収では約 20% が生ごみで残りの約 80% は空気を運んでいることになり、長距離の運搬を伴う面積の広い自治体では非常に効率が悪い。

これらを解決するために、たとえば真庭市においては円筒形のバケツから直方体のバケツに変更し、トラックでの空間占有率を上げるという取り組みが計画されているが、これによる改善はわずかである。また、生分解性プラスチック製の袋での収集・運搬も検討されているが、袋の原価が高いこと、生分解性と耐久性がトレードオフの関係にあることから普及には至っていない。

これらのことからいくつかの拠点で可溶化を行い、スラリー状になった原料をバキュームカーで運搬することが有効であると思われる。しかし、通常可溶化・酸生成では悪臭源となるため、これを回避することが必要であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、生ごみのメタン発酵システムにおいて、通常は一体的なプロセスとして扱われる破碎・可溶化から酸発酵、メタン発酵までのプロセスを切り分けて制御することで、システム全体をよりフレキシブルに、汎用性の高いものとするを目的としている。

背景で述べた通り、一般廃棄物である家庭生ごみを原料とし、バイオ液肥利用をともなうメタン発酵プラントでは生ごみの収集・運搬を丸形バケツで行っており、その効率は著しく低い。また、岡山県真庭市のように町村合併で誕生した面積の広い自治体においては、長距離の運搬が必要となるため低効率な収集運搬システムは深刻な問題となる。

本研究では、効率の低い生ごみ収集・運搬システムを改善するために、「ハブアンドスポーク型生ごみ収集・運搬システム」を提案した。生ごみの収集回数を減少させることは行政サービスの低下である。そこで現状の低効率なシステムでの週 2 回の収集は維持するが、メタン発酵プラントまで直接運搬するのではなく、ハブとなる地域内の拠点に集約して一時貯留を行うとともに可溶化し、バキュームカーにより効率的にメタン発酵プラントへ運搬することで収集・運搬効率を改善しようとするものである。収集された生ごみを 1 週間分安定的に貯留・可溶化し、スラリー状のものを適切なサイズのバキュームカーで拠点 - プラント間輸送を行えば、収集・運搬効率は大きく改善されるものと考えられる。また、行政区内でメタン発酵プラントに近い部分は拠点を置かず従来の方法で収集・運搬し、メタン発酵プラントから離れた地域に 6 か所拠点を置き、拠点 - プラント間の運搬を曜日を変えて実行すれば、メタン発酵プラントに運搬される生ごみ量を平均化することができる。

このハブアンドスポーク型生ごみ収集・運搬システムを実現するためには、拠点での一時貯留を安定的にし、病原性微生物の増殖や臭気発生を抑制しつつ可溶化する必要がある。通常メタン発酵槽内で起こる反応は、加水分解・酸生成・酢酸生成・メタン生成が通常 1 槽または 2 槽の発酵槽内で連続的に同時進行している。本研究ではこれを 2 段階に切り分け、メタン発酵槽が存在するプラントから離れた拠点での加水分解・酸生成を行う。これまで、2 槽式のメタン発酵として 1 槽目で酸生成を優先的にを行い、2 槽目のメタン発酵槽に送る方式は存在しているが、これはメタン発酵プラント内で発酵期間を短縮するための手法であった。本研究では、加水分解、酸生成の段階で自然乳酸発酵を優勢にする微生物制御により悪臭や腐敗を防ぎ、1 週間程度の原料保管を可能にすることを実現する。これにより、通常一体的な処理とされてきたメタン発酵プロセスを完全に 2 段階に切り分けることが可能となる。

乳酸は通常メタン発酵のプロセスでは高濃度に蓄積しないが、初期段階で自然乳酸発酵させた原料をメタン発酵利用する場合の最適化方法の解明も本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

本研究は 3 つのサブテーマで構成される。生ごみ乳酸発酵前処理に関するもの、生ごみ乳酸発酵前処理原料がメタン発酵に及ぼす影響、実際の生ごみ回収データを使用した CO<sub>2</sub> 排出削減量の資産である。

生ごみ乳酸発酵前処理については、種々の種菌(1. 無接種、2. 堆肥、3. 糠床 A、4. 糠床 B、5. 糠床 C、6. 糠床 D)を用い、発酵槽は 1L のメジューム瓶を使用し、張り込み量 500 mL で行った。バッチ試験では、温度 30 で実験開始後 1 日経過時に pH を 7.0 に水酸化ナトリウム水で調整した。中温発酵後の理化学特性と細菌叢の安定性を評価するために、実験開始後 2 日以降は pH 調整を行わなかった。サンプリングは 0 日(発酵前)、1 日、2 日、7 日に行った。採取試料について、HPLC 分析(有機酸)および 16S アンプリコン解析(細菌叢)を行った。

上記の実験で使用した 5 種の種菌(2. 堆肥、3. 糠床 A、4. 糠床 B、5. 糠床 C、6. 糠床 D)および実験開始後 2 日の各発酵物(1. 無接種、2. 堆肥、3. 糠床 A、4. 糠床 B、5. 糠床 C、6. 糠床 D)を段階希釈し、MRS 寒天培地および M17 寒天培地に塗抹し、30 でコロニーが形成されるまで培養した。純化後、得られたコロニーより DNA を抽出し、ユニバーサルプライマーを用いて 16S rRNA 遺伝子領域を増幅後、シーケンス解析を行った。得られたシーケンスを Ez Biocloud にて、同定した。

上記の実験で使用した種菌(糠床 D)を用い流加発酵を行った。発酵槽は 1L のメジューム瓶を使用し、初発張り込み量 70 mL で行った。24 時間毎に実生ごみを 70 mL ずつ 6 回添加する流加発酵(最終張り込み量 490 mL)を温度 30、静置で実施した。pH 調整法の影響を調べるために、系統 1(調整なし)、系統 2(24 時間毎に 7.0 に調整)、系統 3(0 時間および 24 時間のみ 7.0 に調整)、系統 4(0 時間のみ 7.0 に調整)を試験し、10 N 水酸化ナトリウム水溶液で調整した。サンプリングは 0 時間(発酵前)から 168 時間まで 24 時間毎に行った。

乳酸発酵前処理原料がメタン発酵に及ぼす影響については、野菜くずに乳酸発酵前処理を行ったものを原料とした高温バッチ試験、食堂から回収した実生ごみに乳酸発酵前処理を行ったものを原料とした高温連続投入試験および中温バッチ試験を行った。

高温試験に使用した発酵槽は、10L のステンレス製圧力容器で、2S のヘルールを介して攪拌機を接続した。またガス排出口、温度調節器用 K 熱電対、温度データロガーは、1S のヘルールキャップを改造して取付け、発酵槽に接続した。原料投入口は 1S のヘルールを使用した。

中温試験に使用した発酵槽は、塩化ビニル製の本体にステンレス製のフランジを取り付けたもので、ステンレス製フランジの中央にベアリングとオイルシールを取付け、攪拌機に接続した。基質投入口はステンレス製フランジに溶接した 1.5 ヘルールを介して行った。ガス排出口、温度調節器用 K 熱電対、温度データロガーはステンレス製フランジに空けた 3 か所の Rc1/2 に R1/2 閉止プラグを介して取り付けた。

いずれの発酵槽もラバーヒーターにより加温し、排出されたバイオガスはガスメータを通してアルミニウム製バッグで捕集した。攪拌はいずれの試験でも 180 rpm に設定した。高温試験では発酵槽内部を 55、中温試験では 37 に設定した。

高温バッチ試験では、種汚泥の比重 1.019 kg/L より各発酵槽への種汚泥投入量の目標値を 8,253.9 g (8,100 mL)、基質の比重は乳酸発酵前処理原料も未処理原料も 1.0 kg/L により基質投入量の目標値を 900 g (900 mL)とした。種汚泥の TS は 4.04 %、VS は 2.44 %、乳酸発酵前処理原料の TS は 4.81 %、VS は 3.93 %、未処理原料の TS は 5.71 %、VS は 5.21 %であった。バイオガス発生量はガスメータにより記録し、バイオガス中のメタン濃度はガスクロマトグラフで分析した。バイオガス発生量は実際の投入基質中の VS 量当たりに換算した。

高温連続投入試験では、種汚泥の比重 1.020 kg/L より種汚泥投入量の目標値を 8,721.00 g (8,550 mL)とした。連続投入試験は HRT20 日とし TS が 8.0 %になるように希釈した乳酸発酵前処理原料、未処理原料を 450 g (450 mL)投入し試験を開始した。原料の比重はいずれも 1.0 kg/L であった。試験開始後 24 時間ごとに発酵槽から 450 mL 引き抜き、基質を 450 mL 投入した。種汚泥の TS は 2.33 %、VS は 1.30 %、乳酸発酵前処理原料の TS は 19.14 %、VS は 18.10 %、未処理原料の TS は 21.25 %、VS は 20.68 %であった。バイオガス発生量はガスメータにより記録し、バイオガス中のメタン濃度は基質投入 23 時間後にサンプリングし、ガスクロマトグラフで分析した。バイオガス発生量は実際の投入基質中の VS 量当たりに換算した。

中温バッチ試験では、種汚泥の比重 1.009 kg/L より種汚泥投入量の目標値を 4086.45 g (4,050 mL)とした。原料の性状については高温バッチ試験と同様である。この原料を 2 倍希釈したもの 450.00 g (450mL)を投入目標とした。バイオガス発生量はガスメータにより記録し、バイオガス中のメタン濃度はガスクロマトグラフで分析した。バイオガス発生量は実際の投入基質中の VS 量当たりに換算した。

生ごみハブアンドスポーク収集・運搬システムでの CO<sub>2</sub> 排出削減量の試算については、岡山県真庭市久世地区で実証試験として行われている、生ごみ分別回収のデータを使用した。生ごみのバケツ内充填率はサンプリング調査を行った。また、生ごみの比重・空隙率の調査は 18L のペール缶を用いて行った。無作為に抽出したサンプルでペール缶を満たし、質量を測定した。その後生ごみで満たされたペール缶を水道水で満たし質量を測定した。久世地区では 2 台のトラックにより毎日 2 便で月木収集ルートと、火金収集ルートがあるため、合計 8 収集ルートが存在する。これらの各ルートでの生ごみ収集重量のデータと、GPS ロガーで記録した各収集ルー

トの移動距離から CO<sub>2</sub> 排出量を推定した。

#### 4. 研究成果

生ごみ乳酸発酵前処理について、異なる微生物種菌を用いた中温乳酸発酵を行った。図 1 に乳酸濃度、図 2 に酢酸濃度の経日変化を示す。

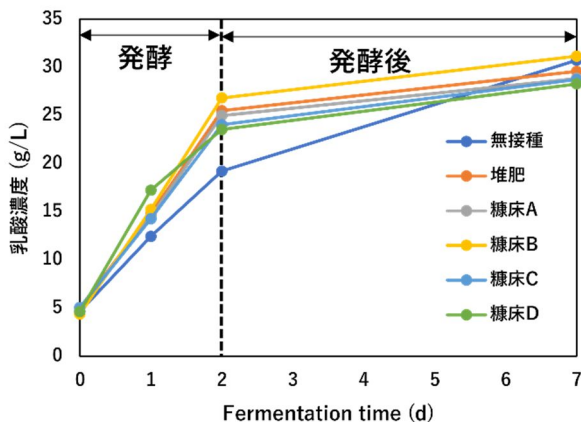


図 1 中温発酵における乳酸濃度変化

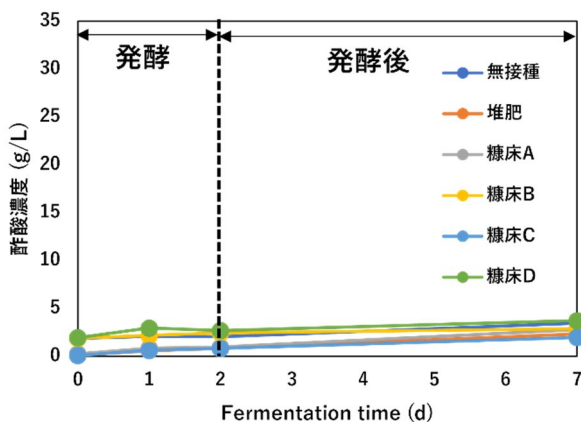


図 2 中温発酵における酢酸濃度変化

無接種およびいずれの種菌を接種した場合でも発酵 1 日より乳酸が蓄積され、発酵 1 日後の pH 調整後も発酵 2 日まで断続的に生産された。発酵 2 日までの乳酸蓄積濃度は無接種の 19.2 g/L より、種菌接種した場合に 23.5-26.8 g/L と大きくなり、糠床 B を接種した場合最大乳酸蓄積濃度となった。一方、酢酸濃度は発酵 2 日までほとんど変化しなかった。また、悪臭の原因となる酪酸は検出されなかった。以上より、無接種の自然発酵でも乳酸生産が可能であるものの、種菌を接種することにより乳酸生産が促進されることが明らかになった。

さらに、発酵 2 日、pH を 4 付近で調整せずに 30 °C で放置した結果、いずれの場合も緩やかに乳酸が蓄積されたものの、減少しなかった。さらに、酢酸蓄積濃度もほとんど変わらなかった。以上より、2 日間の実生ごみ中温乳酸発酵後に低 pH で維持することにより、メタン発酵プロセスまでの間に悪臭発生および炭素損失がなく、安定的に維持できることが明らかとなった。

発酵開始時点で pH が 3.7 であり、初発乳酸濃度が 10 g/L であったことから、使用した実生ごみは回収時点である程度乳酸発酵が進行していた。pH 非調整の系統 1 では、発酵 96 時間までほとんど乳酸がされず、96 時間以降徐々に生産され最終濃度 15 g/L となり、pH は 3.2 まで低下した。24 時間毎に pH 調整する系統 2 では、時間の経過とともに乳酸が生産されて本試験で最大となる乳酸蓄積濃度は 53 g/L となった。発酵開始および発酵開始と 24 時間にそれぞれ pH 調整する系統 3 と 4 では、系統 1 よりも乳酸生産が活発化し、24 時間以降非調整でも乳酸蓄積濃度は維持された。また、酢酸は実生ごみに含まれる <2 g/L 以下で維持されるとともに、悪臭の原因となる酪酸は蓄積されなかったことから、酢酸生産と酪酸生産が見られないホモ乳酸発酵が実施され、生ごみ中温流加発酵が可能であることが明らかとなった。生ごみ中温乳酸発酵はメタン発酵前の一次貯留法として活用するため、大きい乳酸蓄積濃度は重要ではなく、pH 調整に係るコスト、労力等から、発酵開始前に pH を 1 回調整する流加発酵法が適していると結論付けた。

野菜くずに乳酸発酵前処理を行ったものを原料とした高温バッチ試験では、各発酵槽の基質投入量にばらつきがあり、また、乳酸発酵前処理原料と未処理原料では VS 濃度に差があること

から、投入 VS あたりのバイオガス量に変換し、比較した。図 3 は各試験区の 1 日当たりのバイオガス発生量と各試験区のバイオガス中のメタン濃度から推定される 1 日当たりのメタン発生量の積算値の平均値と標準偏差である。

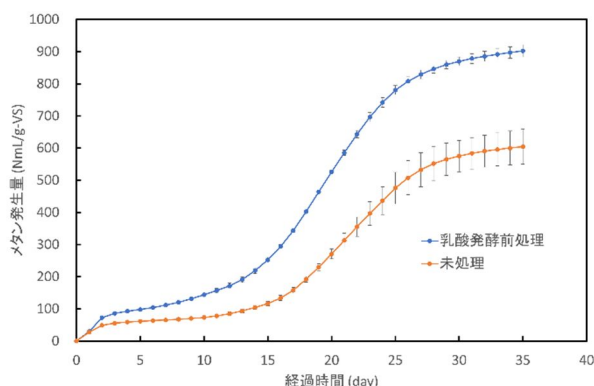


図 3 メタン発生量 (推定値)

推定されるメタン発生量では、1 日目から乳酸発酵前処理が未処理を上回っている。バッチ試験終了時のメタン発生量の推定値は乳酸発酵前処理を行うことで未処理の約 1.49 倍となった。乳酸発酵前処理原料では、前処理の乳酸発酵処理により難分解性のセルロース等が分解され、すぐにメタン菌が利用可能な状態にあるためメタン濃度が上回ったものと思われる。一方、未処理原料ではまず酸生成過程が進行し、その後メタン生成過程が進行するため、メタン濃度の上昇に時間を要する結果となった。

社員食堂で発生した実生ごみの乳酸発酵前処理原料の高温連続投入試験では、乳酸発酵前処理の有無で VS 濃度が異なったため、前日投入 VS あたりのバイオガス発生量、メタン発生量を比較した。試験は 3 反復で行い、各試験区の HRT は 20 日に設定した。試験開始から 20 日目までを立ち上げ期間、21 日目から 41 日目までを定常状態として計測した。図 4 にバイオガス発生量とバイオガス中のメタン濃度から推測したメタン発生量を示す。

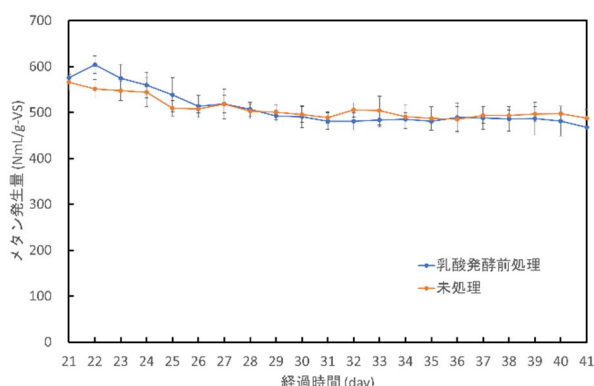


図 4 メタン発生量 (推定値)

バイオガス発生量、メタン発生量について t 検定を行ったところ 22 日目のメタン発生量を除いては有意な差は認められなかった。実生ごみを入手後、乳酸発酵前処理を行うまでにタイムラグがあったため、未処理のものについても有機酸が既に生成していたことが野菜くずでの試験結果と異なる原因になったものと考えられる。しかし、乳酸発酵前処理がメタン発酵に及ぼす悪影響はないものと結論付けられる。

岡山県真庭市の久世地区で行われている生ごみ回収実証試験のデータでハブアンドスポーク収集運搬システムによる効率改善を評価した。18 L のペール缶を満たす生ごみの質量は平均して 10.85 kg、空隙を満たす水道水の質量は平均して、9.24 kg であった。したがって、生ごみの空隙率は 51.3 %、比重は 1.23 であった。調査の結果、久世地区 8 ルートの平均生ごみ回収重量は 344 kg であり、最大積載量 2,000 kg のトラックで運搬されている。したがって、生ごみが占める割合は 17.2 % であり、本研究で仮定した 20 % は概ね妥当な結果であった。久世地区にハブとなる拠点を設置した場合の CO<sub>2</sub> 排出量を改良トンキロ法で計算した結果、収集・運搬で排出される CO<sub>2</sub> は約 40 % 削減できることが分かった。久世地区は建設予定のプラントから 8 km 程度であるが、これを 33 km 離れた蒜山地区で計算すると約 67 % 削減できることが分かった。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 周寛涵, 大土井克明, 中嶋洋, 宮坂寿郎
2. 発表標題 乳酸発酵前処理を行った生ごみのメタン発酵特性に関する研究
3. 学会等名 関西農業食料工学会第146回例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎原ひな, 大土井克明, 中嶋洋, 宮坂寿郎
2. 発表標題 生ごみ乳酸発酵原料のメタン発酵特性
3. 学会等名 関西農業食料工学会第147回例会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池遼, 大土井克明, 中嶋洋, 宮坂寿郎
2. 発表標題 メタン発酵におけるアンモニア阻害の発生条件
3. 学会等名 関西農業食料工学会第147回例会
4. 発表年 2022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	酒井 謙二  (SAKAI Kenji)  (50205704)	九州大学・農学研究院・特任教授    (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	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	田代 幸寛  (TASHIRO Yukihiro)  (90448481)	九州大学・農学研究院・准教授    (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