

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00664

研究課題名（和文）メタン発酵消化液のエリアンサスへの周年施用によるエネルギー利用型資源循環の構築

研究課題名（英文）Construction of resource circulation with energy use by the application of methanogenic digestate to Erianthus arundinaceus as liquid fertilizer

研究代表者

大土井 克明 (OHDOI, 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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：メタン発酵消化液を液肥として利用しエネルギー作物を栽培した。施用量を変化させ収量に与える影響を調査したところ1平方メートルあたり15リットルまで収量が増加することがわかった。1回目の収穫後の追肥が2回目の収量増加に有効であるがトータルの施肥量は同じで良いことが明らかになった。エネルギー作物を原料としたメタン発酵の前処理方法として、熱処理、アルカリ処理、熱アルカリ処理を行い、熱アルカリ処理で1.4倍のガス収量となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本国内でのメタン発酵消化液の液肥利用は北海道と九州を除いては全量を利用することが困難であった。その理由は水稲以外で液肥の需要がほとんどないためである。本研究では耕作放棄地でのエネルギー作物栽培に消化液を利用することで、消化液の液肥利用期間を拡大し、収穫した植物体をメタン発酵の原料として利用する地域内の小さな資源循環を構築することができた。栽培面積当たりの最大バイオガス収量を明らかにし、また、施用についても検討し、単位面積当たり水稲の3倍程度理王できることが明らかになった。これにより、メタン発酵施設の効率的な運用が可能になる。

研究成果の概要（英文）：Energy crops were cultivated using methanogenic digestate as liquid fertilizer. The relation between the energy crop yield and quantity of application of methanogenic digestate was investigated, as a result, the maximum yield was obtained when the methanogenic digestate was applied 15 liters per square meter. Additional application of methanogenic digestate after first harvesting was effective for increase of second yield, however, total quantity of application of methanogenic digestate did not have to be increased. We investigated three treatments, such as thermal treatment, alkaline treatment, and thermal alkaline treatment, as pretreatment of energy crop for anaerobic digestion, as a result, the biogas yield increased up to 1.4 using thermal alkaline treatment.

研究分野：農業機械学

キーワード：メタン発酵 資源循環 消化液 液肥 エネルギー作物

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、大気汚染、酸性雨、温室効果ガスの排出などの環境問題や化石燃料の枯渇への懸念から、再生可能エネルギーが注目を集めている。2015年7月に閣議決定された長期エネルギー需給見通しは、2030年の一次エネルギー供給と電源構成における再生可能エネルギーのシェアをそれぞれ13~14%、および22~24%に設定した。メタン発酵により得られるバイオガスも再生可能エネルギー源の一つであり、約60%のメタンと約40%の二酸化炭素で構成されている。このメタン発酵は、生ごみ、食品加工残渣、家畜糞尿、し尿、余剰汚泥などの有機物が原料として使用され、嫌気条件下で微生物によりバイオガスとメタン発酵消化液(以下、消化液という)に分解される。高水分含有の有機物を原料として使用する湿式メタン発酵では、投入した原料とほぼ同じ量の消化液が発生する。この消化液は環境への負荷が高いため、懸濁物質の除去、硝化・脱窒といった排水処理を行う必要がある。懸濁物質の除去には高分子凝集剤を投入する必要があるが、この費用がメタン発酵施設の支出の約1/3を占めると言われている。また、消化液中のアンモニアを硝化するには好気性の硝化細菌を利用するため、エアレーションを行う必要がある。このエアレーションに必要な電力が、得られたバイオガスにより発電した電力の大部分を占めるため、エネルギー収支も悪化する。

(2) 消化液には、アンモニア、リン酸、カリウムといった肥料の三要素が含まれているため、液肥として農地に還元することで前述の問題点を回避することができる。ドイツやデンマークなどでは、畜産農家が家畜糞尿を処理するためにメタン発酵施設に持ち込み、持ち込んだ量と同じだけ消化液を持ち帰り、飼料を生産するための肥料として活用する循環の仕組みが構築されている。日本国内においても、北海道では同じような仕組みが構築され全量液肥利用されている。しかし、広大な牧草地や畑作地の存在する北海道を除いては、水稻を中心とした作物に利用する必要があり、日本独自の液肥利用体系を構築する必要があった。福岡県大木町、熊本県山鹿市といった九州における消化液の液肥利用先進地域では、し尿の好気処理で有機液肥を製造し、独自開発の散布機械による散布方法、あるいは水田への追肥として流し込みによる施用方法を確立していた福岡県築上町を参考にし、消化液の全量液肥利用を達成していた。

(3) このような取り組みは本州の地域にも普及していったが、温暖な気候により二毛作が可能な九州地域とは異なり、大規模な需要期が水稻の基肥、追肥にしかないため全量利用はなかなか進んでいない。京都府南丹市の八木バイオエコロジーセンターは、地域の酪農家の乳牛糞尿、豆腐工場のおからや廃豆乳を原料として投入しており、消化液の年間発生量は約20,000トンである。消化液中のアンモニア態窒素含有量は約0.2%であり、水稻の基肥で10aあたり3トン、追肥で2トン施用しているため全量利用するためには400haの水稻作付面積が必要となる。南丹市の水稻作付面積は1,122haあるため約35%で消化液による栽培を行えば全量利用が可能となる。しかし、水稻の基肥、追肥の施肥適期は限られており、短期間で施用するには大規模な散布体系が必要となり、散布コストの増加につながる。また、消化液の発生量は毎日ほぼ一定量であるのに対し、施肥適期は短期間に限られているため全量を液肥利用するためには大量に貯留するための貯留槽の設置が必要となる。そのため液肥利用は年間5,000トン程度にとどまっているが、処理すべき廃棄物の量が20,000トンあるため残りの消化液は排水処理をして河川放流している。

(4) 一方、京都府京丹後市にある京丹後市エコエネルギーセンターは、市外の食品加工場の残渣や賞味期限切れ食品、社員食堂から発生する生ごみといったいわゆる産業廃棄物を原料として投入してメタン発酵を行っている。この施設は湿式高温のメタン発酵を行っており、水理学的滞留時間を短くすることで効率的な発酵を行っており、年間処理量は約30,000トンである。この施設では当初は全量を排水処理したうえで、河川放流していた。しかし、コスト面においてもエネルギー収支の面においても不利なことから、液肥利用を検討し、徐々に使用量を増やしていった。この施設はもともと排水処理をして河川放流が前提の設計であったため、大きな液肥貯留槽を持っていなかった。そのため液肥利用量が増加してくると、施肥適期に消化液が足りないという問題が発生した。この問題に対処するために排水処理を停止し、排水処理施設自体を貯留槽として活用することとなった。排水処理をしないということは全量を液肥利用する必要があるため、排出される消化液が農地還元できる量になるように投入原料を減少させた。このような方法が可能であったのは、この施設は市外の産業廃棄物を原料としているためである。この結果、この施設では消化液の発生量が約5,000トンとなるように投入原料が調整され、メタン発酵槽の設計負荷を大きく下回るHRT100日以上の低負荷で運転されることとなった。

2. 研究の目的

(1) 背景で述べた通り、水稻以外に大きな肥料需要が望めない地域では発生する消化液の全量利用を達成するためには解決すべき問題点が多く存在する。南丹市の八木バイオエコロジーセンターの場合、全量利用を達成するためには、施設内に貯留槽を設置するとともに、散布の対象となる市域が非常に広いサテライトタンクを設置することで、散布時の消化液輸送距離を短くして散布効率を上げるなどの対策が考えられる。

(2) 一方、京丹後市エコエネルギーセンターの場合、投入原料を絞ることで消化液の全量液肥利用は達成できているが、運転負荷が低くなるというデメリットが発生している。そこで、本研究では、消化液を肥料として利用して単位面積当たりのバイオマス収量が非常に大きい、エリアンサスやソルガムといったエネルギー作物を栽培し、収穫したエネルギー作物をメタン発酵の原料として投入することで、メタン発酵施設の運転負荷を上げることが可能になるのではという着想に至った。水稻では、収量・食味の観点から施肥設計は厳密にする必要がある。本研究で対象としたエネルギー作物は、耕作放棄地で栽培することを想定しており、収量・食味は重視せずに粗放型の農業を想定した。これにより、耕作放棄地を農地として維持することも可能となり、将来に食料不足に陥った場合にもすぐに食用作物の栽培に戻すことができるという利点も併せ持つことになる。

(3) 本研究ではまずエネルギー作物としてエリアンサスを対象とし、消化液の施用量と収量の関係、およびエリアンサスを原料としたメタン発酵における発酵特性を明らかにすることを目的とした。しかし、エリアンサスの栽培は株数を多くとることができず、また少ない株数では個体差を排除するのが困難であることから、施用量と収量の関係については主にソルガムを用いることとした。エリアンサスを原料としたメタン発酵では、難分解性のヘミセルロースやリグニンが問題となる可能性があるため、前処理として熱処理、アルカリ処理、熱アルカリ処理を行い、分解速度への影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 消化液を液肥として使用したエリアンサスの栽培試験

京都市右京区京北熊田町のほ場において研究協力者が平成 27 年度に定植したエリアンサス 34 株のうち生育の良い 20 株を選定し、10 株を 5 L/m² (10a あたり 5 トン) 施用区、残り 10 株を 10 L/m² 施用区とした。エリアンサスは条間 1.5 m、株間 1.5 m で定植されており、株を中心とする 1 m 四方の正方形を試験区とし、試験区内に消化液をそれぞれの規定量を施用した。試験は前年度の立ち枯れ状態の植物体を除去したのち開始した。図 1 に施肥後の株の様子を示す。平成 30 年度の栽培試験では、7/23、8/13、8/22、10/2、10/22、11/5、11/23、12/19 にそれぞれ収穫し、収量、乾物率、乾物重を測定した。また、7/23、8/13、8/22 に収穫した株については、11/22 に再生したものを二次収穫として収量、乾物率、乾物重を測定した。乾物率の測定は、1 株から無作為に選択した 5 本のサンプルを対象として行った。乾物率測定用のサンプルは収穫後ただちに密封し、冷蔵保存したのちに 103 で 24 時間の感想を行った。乾物率は乾燥後のサンプルの重量を収穫直後のサンプルの重量で除すことで求め、5 サンプルの平均値をその株の乾物率とした。また、株全体の乾物量は、エリアンサスの収量に乾物率を乗じ算出した。肥料として利用した消化液は八木バイオエコロジーセンターにて採取したものである。



図 1 施肥直後のエリアンサス

(2) 消化液を液肥として使用したソルガム栽培試験

平成 29 年度のエリアンサス栽培予備試験でエリアンサスの株数が少ないことから、施用量と生育量および収穫期の差異について個体差の影響を排除できないことが判明したので、バックアップとしてソルガム栽培試験を京都市左京区の修学院離宮内のほ場にて行った。平成 30 年度は播種時期をずらして 7 回行い、1~4 回目の播種では 5 L/m² 区と 10 L/m² 区を、その後 10 L/m² 区の方が明らかに生育状況が良いことから、5~7 回目の播種では 10 L/m² 区と 15 L/m² 区を設定した。また、2 回目の播種では 0 L/m² 区 (無施肥区) と 2.5 L/m² 区も設定した。本試験では 1 区画を縦 1.25 m、横 1.5 m の 1.875 m² に設定し、条間 25 cm で条播による播種を行った。播種数は 1 条当たり 125 粒であり、発芽後、株間が 5 cm、1 条当たり 25 株となるよう間引きを行った。収穫は区画の約半数が出穂するか、播種から 3 か月が経過した時点でを行い、収穫後に再生したものについては 1 回目の収穫から 3 か月が経過した時点で行った。

平成 31 年度は 15 L/m² を施用基準とし、播種時期をずらして 8 回の播種を行った。1 区画の面積を縦 1.5 m、横 1.5 m の 2.25 m² とし、条間 25 cm で条播による播種を行った。播種数は 1 条当たり 150 粒であり、発芽後、株間が 5 cm、1 条当たり 30 株となるよう間引きを行った。平成 30 年度の一次栽培は半数が出穂するか、播種から 3 か月が経過した時点で収穫を行ったが、平成 31 年度は播種から 1 か月、2 か月、3 か月が経過した時点で収穫し、その後再生株を 1 回目の収穫から 3 か月経過した時点で収穫した。したがって、1 回の播種で 3 区画の栽培を行った。また、1 回目の播種時には 20 L/m² 区を 1 区画設定し、3 か月経過時に 1 回目の収穫を行った。さらに 4 回目の播種時には 15 L/m² 区と 20 L/m² 区を追加で設定し、通常の区画の間引き後と同様の栽植密度となるように点播を行い、施用量の違いが発芽率に及ぼす影響について調査した。各試験

で肥料として使用した消化液は、八木バイオエコロジーセンターで採取したものである。

(3) ソルガムを原料としたメタン発酵試験

平成 31 年度に栽培したソルガムを対象とし、ソルガムのバイオガスポテンシャルおよび発酵特性を調査した。本試験では、異なる条件下で栽培したソルガムを原料に用いることで、栽培期間の長さ、および栽培時期の違いがバイオガス収量に与える影響についても調査した。本試験ではバッチ試験のみを行い、その結果をもとに、連続投入試験の原料にソルガムを用いた際に獲得できるバイオガス量についてシミュレーションを行った。収穫したソルガムを 1 cm 以下になるように刻んで原料とした。発酵条件は 37 ℃ の中温湿式発酵で 500 mL のフラスコを発酵槽として用い、ソルガム 20 g と種汚泥 380 g を発酵槽に密封し発酵を行った。各発酵槽の攪拌にはマグネティックスターラーを用い、420 rpm で常時攪拌を行った。図 2 に実験装置を示す。投入した原料はソルガムの茎と葉を混合し、計 20 g を発酵の原料とした。その際の混合比は、試験区ごとに、収穫時に回収した 3 本のソルガムをサンプルとして茎と葉の比率を算出し、その比率をもとに投入量を決定した。また、1 試験区につき 3 反復の発酵試験を行い、1 試験区ごとにブランクとして種汚泥 380 g のみで発酵を行う試験区を設けた。種汚泥として使用したものは、八木バイオエコロジーセンターで採取したものを 2 mm のふるいにかけてのものである。



図 2 実験装置

(4) ソルガムを基質としたメタン発酵における前処理方法の検討

エネルギー作物はリグニンのような難分解性有機物を多く含んでおり、分解を促す前処理が実用化に向けて不可欠である。既往研究で、下水汚泥に熱アルカリ処理を施すとメタン発酵の効率が向上すると報告されているため、この前処理をソルガムに対して行った。五つの条件で中温/高温メタン発酵をすることで、エネルギー作物のメタン発酵に対して熱・アルカリ処理がどのような影響を与えるか検討した。ソルガムは乾燥機にて十分乾燥させてからフードプロセッサーにて粉砕し純水に混合して 15 g/L のソルガム混合水を用意した。未処理区、熱処理区ではソルガム混合水 20 mL に対し純水 20 mL、アルカリ処理区、熱アルカリ処理区ではソルガム混合水 20 mL に対し 15 wt% の NaOH を 20 mL 加えた。熱処理区では 120 ℃、熱アルカリ処理区では 70 ℃ で 3 時間加温した。これらの試料 20 mL に種汚泥 20 mL を加えバイアル瓶に密封した。また、ブランクとして蒸留水 20 mL と種汚泥 20 mL を合わせたものをバイアル瓶に密封した。種汚泥には中温発酵は八木バイオエコロジーセンターの消化液を、高温発酵は株式会社ヴァイオスの高温発酵槽の消化液を使用した。

4. 研究成果

(1) エリアンサス栽培試験

エリアンサス栽培試験については施肥量を 2 段階、収穫時期を 8 回変化させたが、試験区ごとに 1 株しかなかったことから、試験結果に明確な相関は見られず個体差によるものと判断せざるを得なかった。また、遅い時期に収穫した株については、翌年に再生せずに枯れてしまうものが見られた。栽培期間中の草丈の推移は 5 L/m² 区 10 L/m² 区に大きな差異は見られなかった。平成 30 年度と平成 31 年度の草丈の推移においては栽培終了時に約 350 cm、SPAD 値は約 50 と、エリアンサス 1 本ごとの生育状況について大きな変化はなかった。また、同時期に収穫を行った 2 株の間には前年の試験同様大きな差がみられ、収量は茎数や品種などそれぞれの株が元来持つポテンシャルに左右されることがわかった。また株全体の収量には年度をまたいで減少する傾向がみられた。

(2) ソルガム栽培試験

平成 31 年度のソルガム栽培試験の収量を図 3 に示す。5 月中旬に播種した 1st、2nd では播種の 3 か月後に収穫したものでも二次栽培の収量が十分に確保できるが、6 月以降に播種したものでは十分な収量が得られないことが分かった。また、6 月上旬に播種した試験区を除き、一次栽培を長くとる方が収量が大きくなることが分かった。一次栽培終了時の追肥の有無による二次収量の差を検討したところ、追肥を行った試験区で収量が多くなることが分かった。1 か月で収穫した試験区

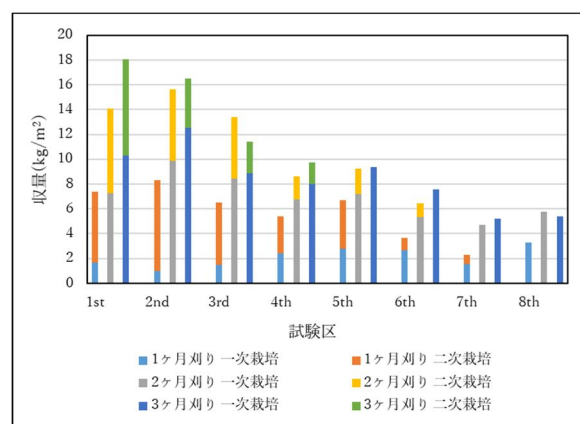


図 3 ソルガム収量

では、基肥 15 L/m²、追肥 0 L/m²、基肥 15 L/m²、追肥 10 L/m²、基肥 5 L/m²、追肥 10 L/m² の3つの試験区を、2か月で収穫した試験区では基肥 15 L/m²、追肥 0 L/m²、基肥 15 L/m²、追肥 5 L/m²、基肥 10 L/m²、追肥 5 L/m² の3つの試験区を設定したところ、一次収穫後の追肥は有効であるが、基肥・追肥のトータルで 15 L/m² の施肥量で十分なことが分かった。

(3) ソルガム発酵試験（未処理）

播種日が異なる3か月刈りのソルガム4種類と、播種日が同じで生育期間が異なるソルガム3種類で発酵試験を行った。バッチ試験で得られた結果から HRT30 日で連続投入を行ったときのガス発生量シミュレーションの結果を図4および図5に示す。これらのシミュレーション結果と収量から算出すると2nd-3で栽培面積1 m²あたり1日あたりのバイオガス収量が877 Lで最大となった。

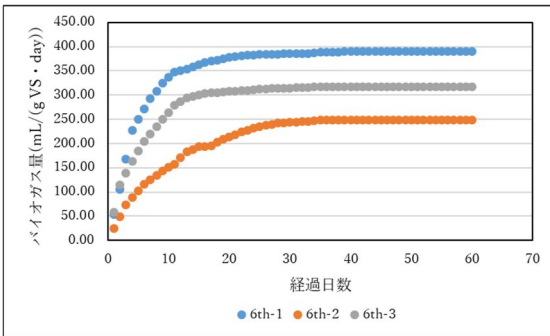


図4 栽培期間とバイオガス収量の関係

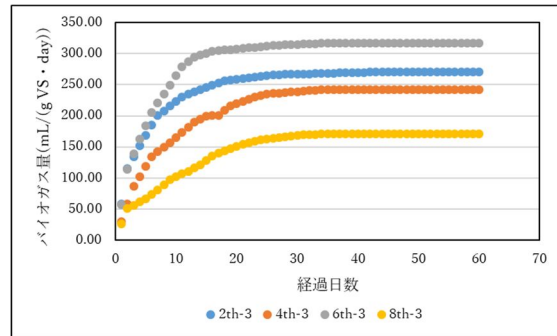


図5 栽培時期とバイオガス収量の関係

(4) ソルガム発酵試験（前処理）

発酵期間中のメタンの発生量をそれぞれ図6、図7に示す。ここでの気体の体積は理想気体を仮定した上で標準状態に換算している。まず、中温発酵におけるメタン発生量について述べる。熱アルカリ処理によって2日目以降のメタン発生量は大幅に増加し、16日目には未処理の場合の1.4倍にまで達した。アルカリ処理においても6日目以降から差が開き、16日目には未処理の場合の1.2倍まで増加した。熱処理の場合は未処理とほぼ変わらない増加傾向を示した。次に、高温発酵のメタン発生量について述べる。熱処理とアルカリ処理によって増加傾向はほぼ変わらなかった。一方で、熱アルカリ処理によって8日目以降で大幅な増加が見受けられ、13日目には未処理の1.3倍まで達した。

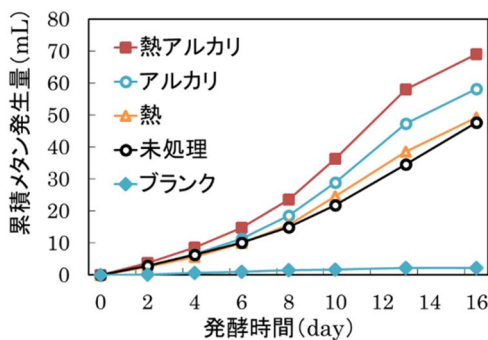


図6 累積メタン発生量（中温）

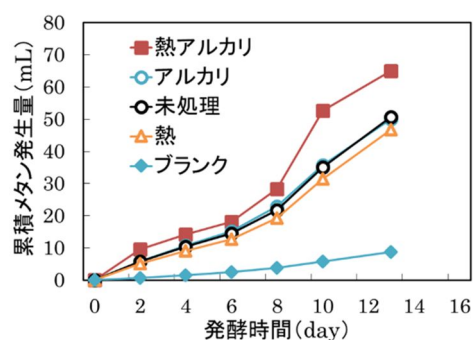


図7 累積メタン発生量（高温）

図8に前処理後のCOD_{Cr}量を示す。アルカリ処理によってCOD_{Cr}の値は未処理の場合に比べて4.4倍になった。これは熱とアルカリ溶液によってセルロースやリグニンなどの有機物が加水分解したものと考えられる。メタン菌のプロセスの中で微細化と加水分解が律速段階であると指摘されており[4]、メタン菌が分解を始める前に水溶物を増加させる前処理は有効だと言える。

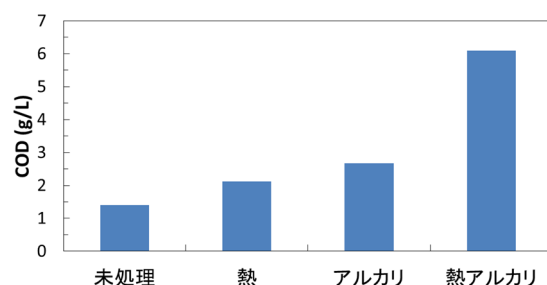


図8 前処理後のCOD_{Cr}量

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 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井口拓也, 大土井克明, 楠田啓, 日下英史, 清水浩, 中嶋洋, 宮坂寿郎
2. 発表標題 メタン発酵とエネルギー作物の栽培を用いた資源循環の構築
3. 学会等名 環境資源工学会第137回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 脇坂肇, 楠田啓, 日下英史
2. 発表標題 海洋系大型藻類のメタン発酵に向けた前処理の研究
3. 学会等名 環境資源工学会第137回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉村渉, 楠田啓, 日下英史
2. 発表標題 スラグ肥料の添加によるメタン発酵におけるアンモニア阻害の緩和
3. 学会等名 環境資源工学会第137回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉村渉, 楠田啓, 日下英史, 大土井克明
2. 発表標題 エネルギー作物のメタン発酵における前処理への消化液の利用
3. 学会等名 平成30年度資源・素材学会関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永田貴大, 大土井克明, 清水浩, 中嶋洋, 宮坂寿郎
2. 発表標題 豚糞を基質とした高温メタン発酵におけるアンモニア阻害回避
3. 学会等名 農業食料工学会関西支部第141回例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉村渉, 楠田啓, 大土井克明, 日下英史
2. 発表標題 グリシンペタインを添加した海水メタン発酵におけるグルコースの流加培養および藻類の連続培養
3. 学会等名 資源・素材学会平成31(2019)年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉村渉, 楠田啓, 森康平, 大土井克明, 村岡秀樹, 森光俊仁, 御前明郎, 松本洋俊
2. 発表標題 エネルギー作物のメタン発酵に向けた前処理の研究
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉村渉, 楠田啓, 大土井克明
2. 発表標題 エネルギー作物のメタン発酵におけるアンモニアによる前処理の検討
3. 学会等名 第14回『若手研究者・学生のための研究発表会』 資源・素材学会関西支部
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 メタン発酵とエネルギー作物を用いた資源循環の構築
2. 発表標題 井口拓也, 大土井克明, 清水浩, 中嶋洋, 宮坂寿郎
3. 学会等名 農業食料工学会関西支部第139回例会
4. 発表年 2018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	楠田 啓 (KUSUDA Hiromu) (90169988)	京都大学・エネルギー科学研究科・准教授 (14301)	