

令和 5 年 4 月 30 日現在

機関番号：10105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12377

研究課題名(和文) 堆肥温度から解析される微生物活性を指標とした堆肥化の発酵診断技術の開発

研究課題名(英文) Development of composting diagnosis method using microbial activity evaluated by numerical analysis of compost temperature

研究代表者

宮竹 史仁 (MIYATAKE, FUMIHITO)

帯広畜産大学・畜産学部・准教授

研究者番号：70450319

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)：堆肥化は、家畜排せつ物を有機肥料に変換するリサイクル技術である。良質な堆肥生産には基本的な科学原理と適切な方法に関する知識が不可欠である。しかしながら、実際の生産現場ではそれらが不足している状況が見受けられる。それ故、本研究では、堆肥の生産現場で専門的な知識を有していなくても、発酵の良否を自動判定することができる発酵診断技術を開発することを目的とした。その結果、堆肥化初期の温度から解析される熱発生速度等を用いることによって堆肥発酵を「良・可・不可」に診断することが可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

良質な堆肥を生産するためには、堆肥生産現場で働くヒトの学術的知識や経験が必要不可欠である。しかしながら、畜産の規模拡大や人手不足などにより、熟練した堆肥生産者が少ない現状にある。そのため、堆肥化が上手くいかないという現場も多く見受けられる。本研究の成果は、このような生産現場において、迅速に堆肥の発酵診断が可能となり、堆肥化施設の管理の一助となるとともに、科学的に裏打ちされた堆肥化技術の創出が図られる。

研究成果の概要(英文)：Composting is a recycling technology that converts livestock waste into organic fertilizer. Knowledge of basic scientific principles and appropriate methods for composting is essential for good compost production. However, these are often lacking in actual production sites. Therefore, this study aimed to develop a diagnostic technique that automatically determines whether composting is good or bad without requiring specialized knowledge at the compost production site. As a result, it was possible to diagnose composting as "good, acceptable, or not" by using the rate of heat production rate, etc., analyzed from the temperature in the initial composting stage.

研究分野：生物資源循環工学

キーワード：堆肥化 発酵診断 温度 熱発生速度 昇温時間

1. 研究開始当初の背景

堆肥化は、家畜排せつ物等の生物系廃棄物を好気性微生物により分解・安定化させて有機肥料等を作る伝統的なりサイクル技術である。この堆肥化では、微生物の活動により 60°C以上の発酵温度を持続させることで病原性微生物が死滅し、衛生的で取扱易い堆肥を提供する。その一方で、「堆肥化が上手くいかない」という現場が数多く見受けられる。不適切に製造された堆肥の利用は、家畜の疾病の蔓延や大腸菌群 (O-157) 等による農作物汚染の原因にもなっている。堆肥化が上手くいかない理由には、1戸当たりの家畜頭数の増加で大量の家畜ふん尿が集中的に排出される様になり、伝統的に培った堆肥作りの経験では対応が難しいこと、高齢化や慢性的な人手不足、家畜頭数の増加に伴う労働時間の増加が、適切な堆肥化を妨げている。

一方、堆肥化研究については1970年代から学術的知見が蓄積されており、例えば、堆肥化の最適条件についても、初期材料含水率は55~65%、通気量は0.5~0.7 L/mim/m³ (宮竹ら, 2008) である、といった様に適正な堆肥化条件は研究者間でほぼオーソライズされている。このような環境を準備することで適切な堆肥化が図られるが、これらの知見が生産現場へは十分に浸透していない。つまり、堆肥化研究は深化を遂げているにも関わらず、これまでの学術成果と実際の堆肥現場では距離が遠く、それらを繋ぐプラットフォームが未整備の状態であることが、生産現場での不適切な堆肥化を引き起こす原因にもなっている。

このような状況を改善するために、研究者達が培ってきた学術知見と生産現場を繋ぐ技術を構築することである。生産現場の課題は、堆肥化の良否判定が難しいことであり、これを学術的知見に基づいて診断、つまり堆肥化の発酵診断技術を開発することができれば、研究成果と現場を繋ぐプラットフォームを構築できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、学術的知見と堆肥生産現場を繋ぐ基本技術を構築することであり、発酵工学的な指標による堆肥化の発酵診断プログラムを開発することである。具体的には、以下である。

- ① 様々な条件で得られたラボスケール試験による堆肥化データ、とくに温度情報から数値解析によって得られる熱発生速度などに変換することで微生物活性を評価し、それらが発酵状況を的確に反映するのか検証する。加えて、この微生物活性プロファイルを評価し、且つ、これまで得られた学術的知見などを加味して発酵診断モデルを作成する。
- ② ①で作成したラボスケール実験による発酵診断モデルの有効性を実際に稼働している堆肥化施設の堆肥化データに適用し検証する。

3. 研究の方法

試験1：ラボスケール試験による発酵診断の評価基準

(1) 堆肥化方法と堆肥化データ

発酵診断の基準を策定するために、当研究室の乳牛ふんの堆肥化データ 72点を使用した。これらのデータは、小型堆肥化試験装置を用いて得られた。この装置は、堆肥材料を充填した発酵槽を温度制御可能なチャンバー内に設置して堆肥化を行う仕組みである。堆肥化中は、熱電対で10分毎に堆肥温度が記録されると同時にその温度に追従するようにチャンバー温度を制御した。また通気は、コンプレッサーを用いて反応槽の底部から空気を供給した。堆肥化データは様々な材料含水率 (30.1~85.1%) および通気条件 (0.08~1.80 L/min/kg-dm) の組み合わせで行われて取得されたデータであり、その中でもとくに堆肥化の初期反応部分 (堆肥化の開始から最高温度に達するまでの温度上昇データ) を分析に用いた。

(2) 発酵診断の指標

発酵の良否を評価するために、堆肥化微生物の活性を示す「中温菌」と「高温菌」の熱発生速度のピーク値と「堆肥化進行の円滑さ」を評価する40~60°Cまでの「昇温時間」の3種類を指標として用いた。熱発生速度は、岩渕・木村 (1994) の方法に従い以下の計算式により算出した。なお、本研究では様々な指標を検討したが、最終的に熱発生速度に注目し研究を推進した。

$$Q = \frac{1}{W_{dm}} \left\{ (q_{out} - q_{in}) + \rho CV \frac{d\theta}{dt} \right\}$$

Q : 熱発生速度 (J・h ⁻¹ ・kg-dm ⁻¹)	C : 重量比熱 (J・kg ⁻¹ ・K ⁻¹)
W_{dm} : 初期乾物量 (kg-dm)	V : 材料のみかけ体積 (m ³)
q_{in} : 入気による熱流入 (J・h ⁻¹)	V_L : 体積含水率 (%)
q_{out} : 排気による熱損失 (J・h ⁻¹)	θ : 材料温度 (°C)
ρ : 材料のみかけ密度 (kg・m ⁻³)	t : 時間 (h)

ただし、 $\rho C = 10^4 (22.3 + 4.03 \times V_L)$

試験2：ラボスケール試験によるAI分析による寄与度を用いた発酵診断モデルの策定

(1) 実験データ

試験1と同様に、当研究室にて蓄積した乳牛ふんの堆肥化データ 127点を対象に分析を行った。これらの堆肥化データも前述の小型堆肥化装置を用いて得られた堆肥化データである。

(2) ヒトによる経験的評価と分析方法

堆肥化の発酵を評価するために、ヒトの熟練した堆肥化経験から実験データを良・可・不可の3種類に分類した。この分類したデータを基に堆肥化に熟練したヒトが経験的に（無意識に）堆肥化のどの部分を重要視しているのか明らかにするために、実験データの堆肥温度を25~70℃の間で5℃間隔に区切り、それらの平均熱発生速度を以下の変法した計算式で算出した。

$$Q = \frac{1}{W_{dm}} \left(\rho C V \frac{d\theta}{dt} \right)$$

Q : 熱発生速度 (J・h ⁻¹ ・kg-dm ⁻¹)	V : 材料のみかけ体積 (m ³)
W_{dm} : 初期乾物量 (kg-dm)	V_L : 体積含水率 (%)
ρ : 材料のみかけ密度 (kg・m ⁻³)	θ : 材料温度 (°C)
C : 重量比熱 (J・kg ⁻¹ ・K ⁻¹)	t : 時間 (h)

ただし、 $\rho C = 10^4(22.3 + 4.03 \times V_L)$

次に、これらの各温度帯の熱発生速度と経験的評価（良・可・不可）の関係をAI（人工知能）で学習させることでヒトによる経験的評価による予測モデルを作成し、堆肥化の各温度帯がどの程度、その予測に寄与しているのかを分析した。加えて、その寄与度が高い堆肥化の温度帯に注目して発酵診断モデルの作成を試みた。なお、予測モデルの作成には既存のAI分析ツール（Predicton One, ソニー株式会社）を使用した。

試験3：実規模施設による堆肥化の発酵診断モデルの策定

(1) 対象の堆肥化データ

ラボスケールデータを用いて作成した発酵診断モデルが実規模の堆肥化にも適用可能か検討するために、実際の堆肥化データを用いて検証を行った。検証に用いたデータは北海道大樹町のY牧場で2020年10月30日~2022年7月15日の堆肥化データである。この牧場では、当研究室で開発された堆肥化ロボットが導入されており、その堆肥化システムで行われた乳用育成牛ふん尿の堆肥化データ76点を対象とした。なお、これらの堆肥化は材料含水率が56.9~69.7%の条件下で行われたものであり、通気量は発酵状況に応じた適切な通気量に自動調整された。

(2) ヒトによる経験的評価と分析方法

試験2と同様にAI分析ツール（Predicton One, ソニー株式会社）を用いて解析を行った。

4. 研究成果

試験1：ラボスケール試験による発酵診断の評価基準

(1) 堆肥化微生物の熱発生速度のピーク値解析

堆肥化の初期過程では、いわゆる「中温菌」と「高温菌」と呼ばれる微生物が活発に有機物を分解することで代謝熱が蓄積され、堆肥温度が上昇する。この中温菌と高温菌は概ね40℃近辺と60℃近辺に活性のピークが存在することが知られており、これらの活性を表す代表的な指標として、堆肥温度が上昇するときの初期過程における「熱発生速度」がある（例えば、宮竹ら、2008）。この中・高温菌の熱発生速度のピーク値の関係を各堆肥化条件に応じて色分けして図1に示した。2つの熱発生速度のピーク値の関係は高い相関性（ $r^2=0.724$ ）を示し、それぞれ熱発生速度が低くなるほど適正条件下の堆肥化は観測されなくなった。

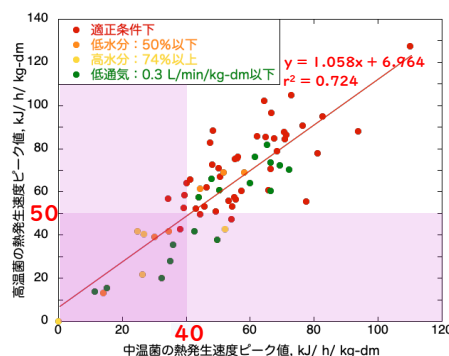


図1 中温菌と高温菌の熱発生速度のピーク値の関係

特に、中温菌と高温菌のピーク値が40 kJ/h/kg-dmおよび50 kJ/h/kg-dm未満の領域では、一般的に堆肥化が不適とされている材料含水率や通気量条件のデータが多くを占めていた。

(2) 堆肥化初期の昇温時間の解析

堆肥化初期の温度上昇は、堆肥化の良否を図るための経験的項目であり、実際の堆肥化施設では施設管理を効率的に行う上で極めて重要な指針となる。そこで、図2に各通気量条件における含水率と40~60℃までに掛かる昇温時間の関係を示した。40~60℃の温度範囲に限定したのは、その温度帯が中温菌の活性のピークと高温菌の活性のピークの範囲であり、中温菌から高温菌へとスムーズに遷移できているかを判断できるためである。適正な含水率範囲において、堆肥化の最適通気量である0.5~0.6 L/min/kg-dmの値が、40~60℃までに12時間以内に上昇しており、含水率の準適正範囲内でも24時間までに温度が上昇していることが明らかとなった。

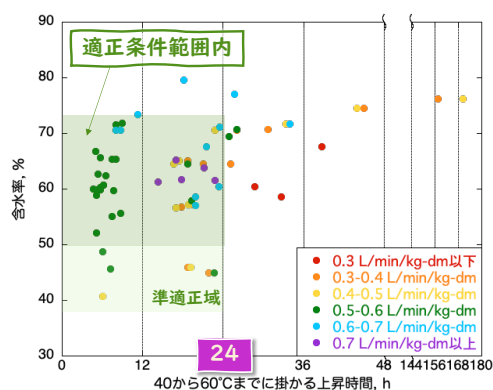


図2 各通気量条件における含水率と40~60℃までの昇温時間の関係

以上の結果から、堆肥化発酵を40~60℃までの昇温時間で判断した場合、発酵良否のしきい値は24時間であると考えられる。なお、この昇温時間のみによる発酵良否の検出率は57%であった。

(3) 点数化による発酵診断基準

堆肥発酵の良否を総合的に評価するために、中温菌と高温菌の熱発生速度のピーク値が 40 kJ/h/kg-dm および 50 kJ/h/kg-dm 以上の場合を各々 1 点、40~60 °C 間の昇温時間が 24 時間以内を 1 点として点数化し、これを中温菌と高温菌の熱発生速度のピーク値と重ね合わせた結果を図 3 に示した。その結果、0 点および 1 点は図 3 の左下の楕円部分にてクラスターとして抽出された。合計 0 点や 1 点として評価された 16 データの内、15 データが「50 %以下の低水分」、「74 %以上の高水分」、「0.3 L/min/kg-dm 以下の低通気条件」であった。また、全 72 点のデータにおいて、20 データが上述のいずれかの不適条件に適合した。つまり、この診断基準で点数化し、2 点以上を適正、1 点以下を不適とすると、75 %の検出率で不適切な堆肥化を評価することが可能であった。

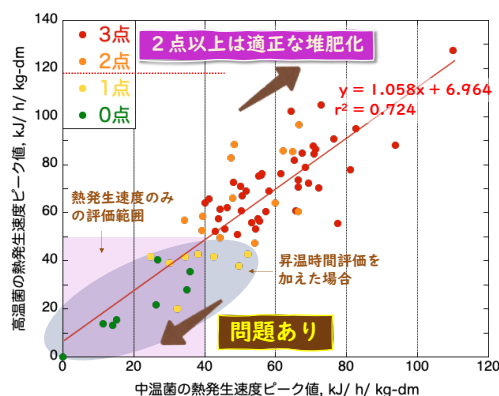


図 3 堆肥発酵の点数化における中温菌と高温菌の熱発生速度のピーク値の関係

試験 2 : ラボスケール試験による AI 分析による寄与度を用いた発酵診断モデルの策定

試験 1 では、中温菌と高温菌の熱発生速度のピーク値に基づき発酵診断が可能であったが、実際の堆肥化施設のデータを解析した結果、中・高温菌の熱発生速度のピーク値は不明確な場合が多かった。そのため、各温度帯に応じた平均熱発生速度を使用することでも発酵診断の基準になると考え、AI 等も用いて現場でも適用可能な診断モデルの策定を試みた。

(1) 発酵診断指標の探索

堆肥化に熟練したヒトが発酵の良否を判断する際、何を根拠に良否を決定しているのかを明らかにするために、ラボスケール堆肥化試験の 127 点のデータを経験的評価(ヒトによる知識や経験、勘)にもとづいて堆肥化を「良・可・不可」に分類した。また、それら 127 点の堆肥化の昇温時において 5 °C 間隔で平均熱発生速度を計算した。加えて、材料含水率、通気量の関係も加味してヒトによる経験的評価および堆肥化データを AI に学習させることで、ヒトによる経験的評価の予測モデルを作成し、AI から得られる寄与度を分析した。その結果、AI が予測した良・可・不可の判定とヒトによる経験的評価の良・可・不可の分類は 80.56 % と高い精度で合致した。そこで AI が良・可・不可を予測する際に、どのパラメータがより判断に寄与したのかを AI から得られる各パラメータ(平均熱発生速度、含水率、通気量)の寄与度を比較した結果、40 °C 付近と 60 °C 付近の温度帯の熱発生速度が予測に高く寄与していることが判明した。これは試験 1 における中温菌と高温菌の熱発生速度のピーク値に十分代替できるものであり、これらの指標が発酵診断の策定基準になり得ると考えられた。

(2) ラボスケール堆肥化試験による発酵診断モデルの策定

(1) の結果から、ヒトは感覚的に中・高温菌の活性を良否の基準にしていると推察されたことから、中温菌と高温菌の活性温度帯である 40~45 °C と 55~60 °C における平均熱発生速度に焦点を当て調査した。図 4 に堆肥化の良否判定の分類と 40~45 °C と 55~60 °C 間の平均熱発生速度の関係を示した。これらの関係には高い相関 ($R^2=0.709$) を示し、ヒトが「良」と判断したデータはグラフ右上に、「可・不可」と判断したデータはグラフ左下に散布する傾向を示した。

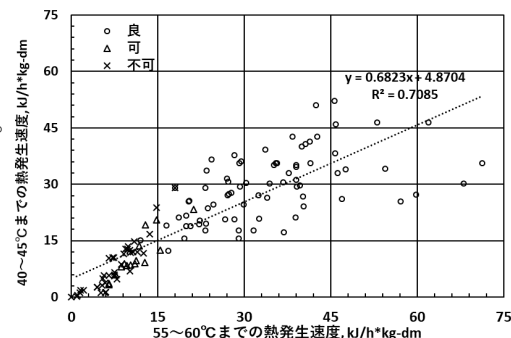


図 4 発酵診断の分類と 40~45 °C および 55~60 °C における平均熱発生速度の関係

また、40~45 °C と 50~55 °C の平均熱発生速度は、双方とも 15 kJ/h/kg-dm 付近を境に堆肥化の良否評価が分かれ、これをしきい値として両温度帯で 15 kJ/h/kg-dm 以下を不可領域、片方のみが 15 kJ/h/kg-dm 以上を可領域、両方が 15 kJ/h/kg-dm 以上を良領域として発酵診断が可能であると考えられた。さらに、このしきい値を基準とした良・可・不可の分類とヒトの経験的評価の良・可・不可の分類は 86.7 % と高い精度で合致した。

試験 3 : 実規模施設による堆肥化の発酵診断モデルの策定

試験 3 では、試験 2 の結果を踏まえて、実際の牧場で稼働している堆肥化施設における堆肥温度データを用いて発酵診断モデルの策定を試みた。

(1) 実規模堆肥化施設における発酵診断モデルの適用

図 5 に実規模堆肥化施設で得られた温度で解析された 40~45 °C ならびに 55~60 °C 間の平均

熱発生速度の関係を示し、ヒトによる経験的評価（良・可・不可）毎に分けて分類した。ラボスケール試験と同様にヒトが「良」と判断したデータは右上に、「可」や「不可」と判断したデータは左下に固まる傾向がみられたが、ラボスケール試験よりもデータのばらつきは増加し ($R^2=0.434$)、明確なしきい値は示されなかった。これは、実際の施設では外気温度や天候、人の作業性といった外的要因が相互に影響するためであると考えられる。

そこで経験的評価の良・可・不可が多く並存する $3\sim 8 \text{ kJ/h/kg-dm}$ の範囲において最も高い正答率で良否を判断できるしきい値を探索するため、ヒトによる経験的評価が「良」であるデータを良好な発酵、

「可・不可」を不良な発酵として正答率を比較した結果、 $40\sim 45^\circ\text{C}$ 、 $55\sim 60^\circ\text{C}$ ともに 5 kJ/h/kg-dm をしきい値としたとき、最も良否判定の正答率が高かった。この結果から 5 kJ/h/kg-dm をしきい値として、両温度帯がしきい値以上を「良」、片方がしきい値以上を「可」、両方がしきい値以下を「不可」とし、良否判定を行った。その結果、発酵診断モデルとヒトの経験的評価の分類は 75.3% の精度で合致したが、ラボスケールのモデルでは 86.7% と高い精度であったが、実規模では 75.3% と精度が低下した。

(2) 実規模堆肥化に対応した発酵診断モデルの精度向上のための指標追加

実規模堆肥化の診断精度の向上を図るために外気温を考慮した。実際、低気温下では昇温が遅延するため、この遅延が評価されていないことが精度の低下に影響を与えたと考えられた。そこで 35°C 以上に到達する時間とヒトによる経験的評価では、ヒトによる経験的評価で「良」と分類されたデータは 48 時間以内、「可」では 96 時間以内に概ね 35°C 以上の温度に到達していた。一方で「不可」と分類されたデータに関しては 96 時間以上かかるデータが多く、「良・可・不可」で明らかな差がみられた。以上の結果から、 35°C 以上の到達時間を新たな診断指標として追加することで診断精度の向上が図られると考えられた。

(3) 実規模堆肥化施設に対応した発酵診断モデルの策定

ラボスケール試験で作成した発酵診断モデルに 35°C 以上の到達時間を新たな指標として組み込み、発酵診断精度の向上を図った。まず中温菌と高温菌の活性の指標である $40\sim 45^\circ\text{C}$ および $55\sim 60^\circ\text{C}$ 間の平均熱発生速度が 5 kJ/h/kg-dm 以上のデータにそれぞれ「1点」を付与し、これに初期の温度の立ち上がりの円滑さの指標である 35°C 以上到達時間が 48 時間未満のデータを「2点」、 96 時間未満のデータを「1点」、 96 時間以上のデータを「0点」として点数を加算し、合計「4点」満点で初期発酵をスコア化した。この合計スコアが「3点以上」のデータを「良」、「2点」を「可」、「1点以下」を「不可」として初期発酵診断を行った。

その結果、診断結果は 80.9% で合致し、中・高温域の2つの平均熱発生速度の指標のみの診断に比べ、精度が向上した。また点数ごとの堆肥化の温度推移の一例でも発酵特性が明瞭化し (図6)、実際の現場においても、このモデルを用いて初期発酵診断が十分可能であることが示された。

5. 結論

本研究では、ラボスケールの堆肥化データを用いて、ヒトの経験的評価に寄与する要因を分析し、中温菌の活性の指標 ($40\sim 45^\circ\text{C}$ 間の平均熱発生速度) と高温菌の活性の指標 ($55\sim 60^\circ\text{C}$ 間の平均熱発生速度) の2つの指標から発酵診断モデル作成した。さらに、実規模データを用いて実規模にもこの診断モデルが適応可能か検証した結果、ラボ試験よりも精度が低下したが、初期温度の立ち上がりの円滑さの指標である 35°C 以上の到達時間を加え、且つ、初期発酵をスコア化することで、 80.9% の精度による初期発酵の診断が可能であった。以上から、堆肥化の発酵診断には、初期の温度の立ち上がりの円滑さ、中温域 ($40\sim 45^\circ\text{C}$) の平均熱発生速度、高温域 ($55\sim 60^\circ\text{C}$) の平均熱発生速度の3種類の指標を解析することで発酵状況を数値化でき、堆肥化の発酵診断プログラムを作成することに成功した。

参考文献

- ・岩渕和則, 木村俊範 (1994): 家畜糞の好気性分解反応特性, 農業機械学会誌, 56(2), 67-74.
- ・宮竹史仁ら (2008): 吸引通気式堆肥化の初期反応特性, 農業施設, 39(1), 33-40.

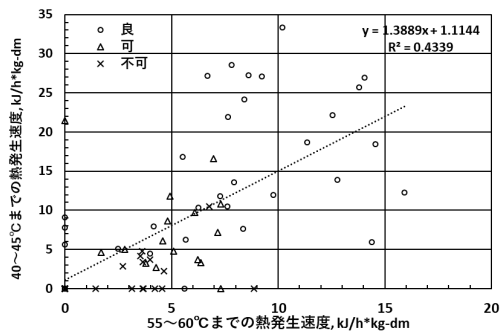


図5 発酵診断の分類と $40\sim 45^\circ\text{C}$ および $55\sim 60^\circ\text{C}$ における平均熱発生速度の関係 (実規模試験)

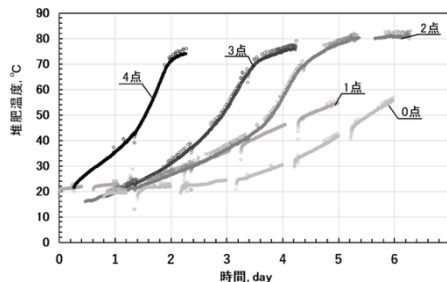


図6 スコア化した堆肥化の一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮竹史仁
2. 発表標題 堆肥温度から解析される微生物活性を指標とした発酵診断技術の開発 乳牛ふんを原料とした堆肥化の評価基準の検討
3. 学会等名 2022年度農業施設学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村凌駆, 由佐哲郎, 宮竹史仁
2. 発表標題 堆肥温度から導出される熱発生速度を用いた初期発酵診断モデル 経験的評価のAI分析と堆肥ロボット施設への適用
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会北海道支部研究発表会
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
---------------------------	-----------------------	----

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