

令和元年6月11日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21607

研究課題名(和文)堆肥発酵熱発生メカニズム解明のための生物化学的アプローチ

研究課題名(英文) Biochemical approach to clarify the mechanism of generation of compost fermentation heat

研究代表者

小島 陽一郎 (KOJIMA, Yoichiro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・中央農業研究センター・主任研究員

研究者番号：80577916

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、微生物の作用により有機物が酸化分解され、発酵熱が発生する堆肥化初期過程において、堆肥原料の生物化学性変化の観察から熱発生メカニズムを明らかにすることを目的として研究を実施した。具体的には、1)堆肥化初期における有機物の分解程度を推定するための、堆肥化の熱発生期における堆肥原料の酸化還元状態の把握ならびに、2)堆肥化による熱の発生と通気による熱の移動を明示するための堆肥化過程における熱移動・抽出モデルの構築と、そのための堆肥原料-空気間の伝熱係数の算出をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国において、年間7900万t発生している家畜ふん尿の大部分は堆肥化により処理されており、堆肥化時に発生し、利用されことなく環境中に放出されている発酵熱量は膨大である。本研究では、この発酵熱を有効利用するためのボトルネックである熱の発生及び移動・抽出過程において、学術的に新たな知見を提供したものである。本研究の成果は、今後の堆肥発酵熱の利活用技術の開発だけではなく、堆肥化過程の制御等にも活用可能である。

研究成果の概要(英文)：In this project, the following research was done to clarify the heat generation mechanism from the observation of the biochemical changes in the compost material at the initial stage of composting where the organic matter is oxidized and decomposed by the action of the microorganism and generated fermentation heat. Specifically, 1) comprehending the redox state of raw composting materials in the heat generation period, to estimate the degree of decomposition of organic matter at the early stage of composting, and 2) construction of movement and extraction model of fermentation heat for generation of fermentation heat and movement by aeration, and the heat transfer coefficient between the compost material and air was calculated.

研究分野：農業工学 農業環境・情報工学

キーワード：堆肥 発酵熱 酸化還元状態 伝熱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

堆肥化は、日本における家畜ふん尿や生ごみなどの有機性廃棄物を資源化するための主要な方法であり、酸素を供給し有機物を好気性微生物の作用により分解し、安定化させる手法である(Goluke, 1977)。有機性廃棄物を堆肥化処理するには有機物の酸化反応により熱(以後、発酵熱)が発生し、その熱量は家畜ふんで、有機物 1kg あたり 20MJ にも達する。しかし、これまでの堆肥化技術では、発酵熱は有効に利用されることなく環境中へ放出されてきた。研究代表者らは、堆肥原料底部から空気を吸引して通気を行う吸引通気式堆肥化システムを用いて、堆肥化促進には不可欠な通気によって、発酵熱を 60 前後の排気(以後、発酵排気)として回収し、そのうち利用可能な熱量をエクセルギを用いて明らかにするとともに(小島ら, 2011)、実規模レベルでその有用性を明らかにした(小島ら, 2014)。このように実規模レベルで発酵熱の回収・利用に成功した例は国内外をみてもほとんどない。さらに、この発酵熱を 63 以上の排気温度で回収することで発電ができる(科研費 No. 26870838 ; Kojima et al., 2017)。また、本堆肥化方式と同様に発酵熱を排気として回収可能で、普及台数が多い密閉型の堆肥化装置(縦コン)における熱利用についても検討をおこなっている。

この発酵熱を効果的に利用するためには、発酵温度を上げて排気エクセルギ率(総熱量あたりの排気エクセルギの割合)を向上させる必要がある。研究代表者らは、より高温の排気を得るための通気方法についても検討を行い、間欠的に通気をおこなうことで熱発生量が増加し、排気のエクセルギ率が向上することを明らかにした。また、排気中のエクセルギは、有機物分解による熱発生がピークに達した後に上昇することもわかった(図 1)。つまり、堆肥発酵時の熱発生メカニズムを、より精緻に解明することで、より高温で多量の熱量を利用できる可能性が示された。また、縦コンにおいては、研究代表者らの調査で新規の原料投入により原料温度および発生熱量が低下することが明らかになったが、その後の発酵熱再発生過程の詳細は明らかになっていない。

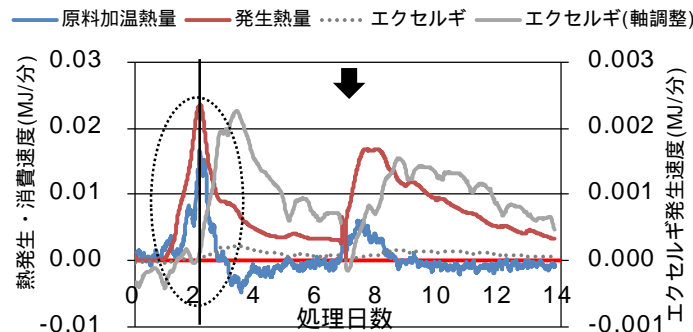


図 1 堆肥化過程における熱発生速度，熱消費速度および排気エクセルギ発生速度

2. 研究の目的

有機性廃棄物の堆肥化過程では発酵熱が発生する。本研究では、発酵熱が発生する堆肥化初期過程において、堆肥原料の生物化学的変化の観察から熱発生メカニズムを明らかにする。

堆肥化初期過程においては、熱発生が盛んな温度帯で排気中の二酸化炭素濃度が上昇しメタンの発生量が増加するなど部分的な嫌気状態の兆候が観察される。原料中の酸素状態により起こる生物的・化学的反応がその後の熱発生に及ぼす影響を明らかにする。本研究は、バイオマスエネルギーとしての堆肥化による発酵熱を利用技術を高度化するだけでなく、将来的に、他の好気性発酵過程を解明する為の基盤となるものである。

3. 研究の方法

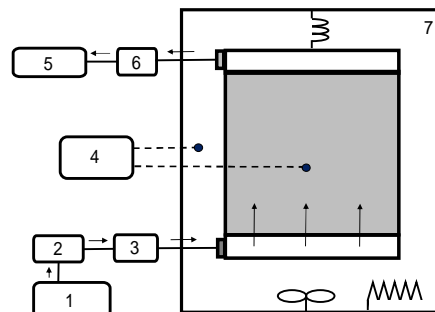
本研究では、特に堆肥化初期過程における熱発生・移動および堆肥系外への抽出過程を明らかにするため、主として以下の 2 点について研究を実施した。

(1) 堆肥化初期過程における酸化還元状態の解明

小規模の堆肥化装置を用いて、堆肥化初期過程における堆肥原料の酸化還元電位(ORP)を測定し、原料の酸化・還元状態の推移を明らかにすることを目的に実施した。

供試堆肥原料は、牛ふんとオガクズを混合し、含水率を 70%程度に調製したものであった。これを以下に示す堆肥化装置に充填し、堆肥化初期過程における温度上昇期である約 3 日間の堆肥化試験を行った。

堆肥化装置は、10L の堆肥発酵槽、温度制御可能な



1. コンプレッサー、2. 圧力調整器、3. 流量計、4. 温度コントローラー、5. ガス濃度測定器、6. トラップ、7. 恒温恒湿器

図 2 小規模堆肥化装置概略

恒温槽、圧力・流量が調整可能なコンプレッサーによる通気装置により構成されるものである(図2)。堆肥発酵槽には下部から空気を送り、上部から排気が排出される構造であり、発酵槽中心部に熱電対を設置して温度を測定するとともに、データロガーにより1分ごとに温度を取得した。恒温槽は堆肥原料温度に追従し、恒温槽内が堆肥原料温度 ± 1 以内の温度になるように制御した。そのため、堆肥原料温度からの放熱は無視できる程度に小さく、小規模であっても堆肥化内部の発酵状態を再現できる。この発酵槽に、堆肥原料を約5kg(容積:10L)投入した。この堆肥原料中心部にORPセンサー(CUSTOM製 IWC-6SD)を埋設することとし、センサーの埋設法を検討した。また、ORPおよび温度のデータから原料の酸化状態を検討することとした。

(2) 堆肥化過程における熱移動・抽出モデルの構築

堆肥化初期過程における堆肥温度の変化を解明するため、堆肥化過程における熱の移動・抽出モデルを構築することを目的とした。

モデルの対象としては、堆肥底部から空気を吸引して発酵を促進する吸引通気式堆肥化方式や密閉容器内で堆肥化を進展させる密閉縦型堆肥化装置など、堆肥化促進のために供給された空気が堆肥原料により加温され、外気で希釈されず排気として系外に排出される条件を設定した。堆肥化の進展により有機物が分解され、発酵熱が発生し、発生した熱の一部が通気により堆肥系外に抽出される過程を一連の熱交換過程とみなし、堆肥内部の発酵状態を推定するモデルを検討した。具体的には、堆肥の初期条件及び入気の状態及び排気の状態から、堆肥化過程におけるリアルタイムの原料温度等を推定するものである。

また、このモデルの構築において、熱交換過程における総括伝熱係数の算定が必要になったことから、430Lの吸引通気式堆肥化装置を用いて牛ふんとオガクズの混合物を堆肥化したときの堆肥性状および温度変化から、総括伝熱係数を求めることとした。通常の熱交換過程における伝熱係数は、伝熱面積当たりで算出するが、堆肥原料においては原料内部の伝熱面積の算出が難しいことから、堆肥原料容積に、空隙率(Free Air Space; FAS)を乗じた伝熱体積を母数として伝熱係数を求めた。

4. 研究成果

(1) 堆肥化初期過程における酸化還元状態の解明

土壌用酸化還元電位のセンサー部をスポンジ様資材で覆うなどの条件を検討した結果、センサーを直接原料に埋設することによって測定可能であることが明らかになった。また、これにより、乳牛ふんを用いた一般的な堆肥化条件において、既往の研究で知られている37と55の微生物活性が高まる温度域において、酸化還元電位が上昇し、原料が酸化されることが確認された(図3)。このとき、37よりも低い25~30の温度域でORPが急上昇しており、微生物の活性が高まる前に原料の酸化が始まっていることが示唆された。また、堆肥化過程における熱発生速度を用いた既往の研究において、40~50の温度域で熱発生が停滞することが示されているが、本酸化還元電位測定手法では、当該温度域においても酸化還元電位の急上昇はみられないものの、37と同水準の酸化状態が観察された。さらに、堆肥原料温度が65のピークに達するとほぼ同時に、酸化還元電位もピークに達し、その後、温度及び酸化還元電位が低下した。つまり、65を超過すると活性が低下し、酸化状態が停滞もしくは緩和されることが示された。一方、通気開始直後、温度上昇が始まるまでに一時的な還元状態が観察され、局所的な嫌気条件になっている可能性が示唆された。残された課題として、センサー本体やセンサー内部の電解液が堆肥化による温度上昇によって不具合が起こることが明らかとなり、センサーの埋設法や保護方法についてさらなる検討が必要であることが判明した。

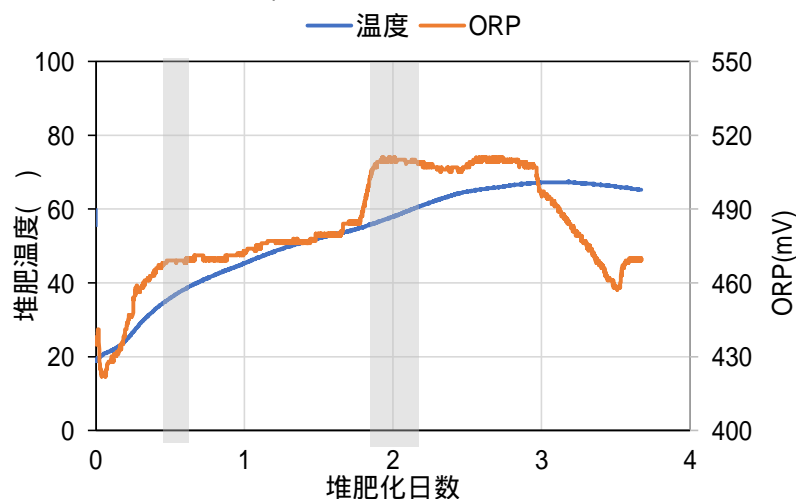


図3 堆肥化初期過程における堆肥温度とORPの推移

(2) 堆肥化過程における熱移動・抽出モデルの構築

図4に構築した堆肥化過程における熱移動モデルの概念を示した。堆肥化過程では、初期条件として入気温度、質量、容積などが与えられ、そこから熱容量や水分などが求められる。また、系外への出力としては、排気温度、堆肥水分などが与えられる。これらの関係から、初期条件として与えられる数値(変数)は、排気温度もしくは堆肥温度に収束することが明らかになった。通常、堆肥温度は温度計を刺すなど局所的な数値しか把握できないが、本モデルにより、初期条件である電力消費量、質量、容積、温度などが得られるセンサーを具備した自動堆肥化装置において、排気温度を測定することで堆肥全体の代表温度を求められる可能性が示された。ただし、排気温度から堆肥温度を求めるための係数を設定する必要があった。そのため、熱交換過程において、熱源である堆肥から低温流体である空気への熱移動を算出するために必要な総括伝熱係数について、実験的に求めることとした。

次に、430Lの吸引通気式堆肥化装置で乳牛ふんとオガクズの混合物を堆肥化した条件において発生熱量、空気授受熱量、堆肥授受熱量を求めて、堆肥-空気間の伝熱係数を算出した結果、堆肥化過程を通して伝熱係数が一定ではなく、発生した熱量が原料加温に用いられなくなると高くなること明らかになった(図5)。また、堆肥原料を通過して加温された空気の温度と伝熱係数の相関は有意($p < 0.01$)な二次関数で示されることが明らかになった。このとき、堆肥原料温度が60℃、排気温度が40℃程度で安定し、堆肥化による原料温度変化が小さい時期(定常状態)における伝熱係数は20~30W/(m³K)程度であった(図6)。

その他、連続式堆肥化施設で起こる新規の原料投入による短時間の発酵停滞状態を故意に再現するための堆肥化装置の選定をおこなったが、上記の試験において堆肥化初期において有機物の分解による熱発生よりも通気による原料加温が示唆された。そのため、現有の堆肥化装置に入気を加温する構造を付与する構造として、さらにモデルの検討を重ねることとした。

<引用文献>

Goluke C., Composting, Biological Reclamation of solid wastes, Rodale Press, 1977, 1-3.
 小島陽一郎、阿部佳之、吸引通気式堆肥化処理による発酵熱の回収と利用：異なる副資材の混合が熱の回収量および利用量に与える影響、農業施設、42(2)、2011、51-58。
 小島陽一郎、阿部佳之、天羽弘一、吸引通気式堆肥化施設で回収した発酵熱による水の加温：加温特性と実規模施設における乳牛への温水供給、農業施設、45(3)、2014 99-107。
 Kojima Y., Itaka Y., Nishi Y., Nakanishi M., Amaha K., Abe Y., Endo S., Binary power generation using composting fermentation heat as heat source, 農業施設, 48(4), 2017, 225-233.

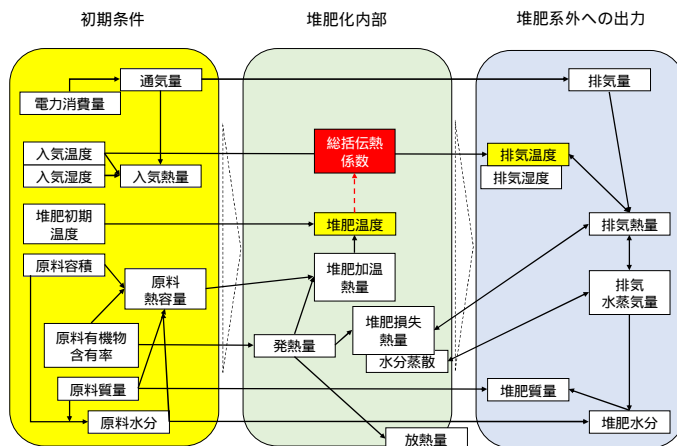


図4 堆肥化過程における熱移動モデルの概念

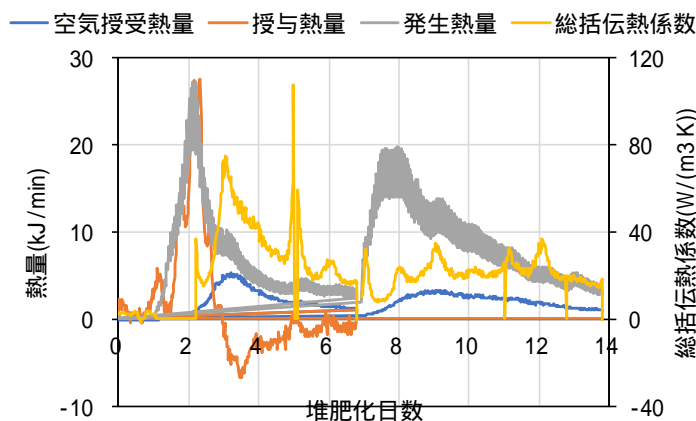


図5 堆肥化過程における熱量と総括伝熱係数の推移

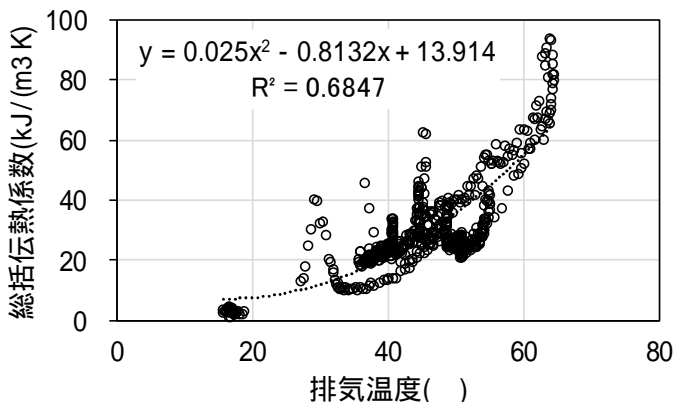


図6 排気温度と総括伝熱係数の相関

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

阿部佳之, 小島陽一郎(2018)アンモニアと熱を利用する吸引通気式堆肥化システム, 養牛の友, (505): 32-36. (査読無)

Kojima Y. et al., (7人中1番目)(2018)Binary Power Generation Using Composting Fermentation Heat as Heat Source, 農業施設, 48(4): 225-233. (査読有)

〔学会発表〕(計3件)

小島陽一郎 畜産でエネルギーを回収する, 農業施設学会 2018年度出前セミナー「農学と工学～未来像とキャリアパス」, 2018年

小島陽一郎 堆肥発酵熱の回収と利用, 平成30年度九州沖縄農業試験研究推進会議 畜産・草地推進部会 畜産環境研究会, 2018年

小島陽一郎 熱力学基礎-農業施設と熱力学の活用-, 農業施設学会出前セミナーシリーズ Part3, 2017年

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。