

学位論文題名

乳牛糞の堆肥化過程における熱
および物質移動に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、7章で構成され、図66、表9、写真9、引用文献75を含む142頁の和文論文である。

コンポストプラント等で採用されている堆肥化法は高速堆肥化法とよばれ、厚層に充填された材料に強制的に通気を行っている。このため材料中の微生物への酸素供給が連続的に行われ、材料温度を60~70℃まで素早く上昇させることができる。この結果、有機物の分解速度が速くなり、短期間で易分解性有機物を分解することができる。また、高い温度のため材料中に存在している病原菌、害虫卵、その幼虫等を死滅させることができ、安全に土壌還元できるようになる。さらに堆肥化の過程で副生的に得られる熱エネルギーは寒冷地栽培やビニルハウス内暖房用熱源に利用できる有用、安全かつ無公害なエネルギーである。

本研究は、堆肥化をただ単に有機質肥料を作成する過程としてとらえるのではなく、熱エネルギー発生過程として位置づけ、この反応を効果的に促進させるための基礎研究である。堆肥化は固体反応であるため、溶液中の反応と異なり、材料水分や密度によって材料物性が大きく変化する。この材料物性はさらに反応を律する可能性があると考えられ、有機廃棄物の材料物性値（熱、水分物性値等）を整理し、これをもとに解析することが堆肥化過程の理解につながるものと考えている。すなわち乳牛糞を主な原料とした材料物性の把握、堆肥化過程における物理的現象の解明そして堆肥化過程を制御可能にしようとする充填層における堆肥化過程のモデリングを試みたものである。

第1章では、研究の背景、堆肥化に関する研究の概略、研究の目的が述べられている。

第2、3、4章では供試材料の物性を明らかにすることを目的としている。

第2章では、供試材料の基礎物性である真比重、比表面積、および供試材料を厚層に充填した場合の三相分布を明らかにしている。充填層における三相分布については、充填層上端から下端までほとんど変化が観察されず、長期間経過後の自重による沈下によっても三相分布は大きな変化がないことを明らかにしている。これらの物性は材料の最も基礎的な物理特性であり、第3章および第4章で述べ

る熱および水分物性と同様、材料物性から堆肥化現象を考察するためには必要不可欠なものである。

第3章では、材料の熱物性について明らかにしている。まず、堆肥化の材料のような含水・多孔体物質の熱物性値（有効熱伝導率、熱拡散係数、体積比熱）を迅速かつ同時に算出する2点測温式ダブルプローブセンサを考案している。次に、この考案した方法によって供試材料の熱物性値を明らかにしている。特に有効熱伝導率については有効熱伝導率推定モデルを構築している。結果を要約すると、（1）有効熱伝導率は常温付近では、体積含水率に対してほぼ直線的に増加する。特に体積含水率が低いときには断熱材の熱伝導率に近い値になる。（2）材料温度が高くなると水蒸気潜熱輸送のため有効熱伝導率は大きくなるのが、モデルから推定されている。（3）熱拡散係数は体積含水率が変化してもほとんど変わらない。（4）体積比熱は体積含水率に対して直線比例関係にある。以上のことを見いだしている。

第4章では、材料の水分移動物性を明らかにしている。まず、吸引法、加圧法、蒸気圧法を用いて水分特性曲線を作成している。次に、水分拡散係数を測定している。測定には、乾燥材料をカラムに充填し、これに蒸留水を供給する水平浸潤法を採用している。結果を要約すると、水分拡散係数は体積含水率の増加とともに大きくなり、固相率の増加とともに減少することを明らかにしている。ただし、体積含水比（液相体積/固相体積）で整理することにより、水分拡散係数は一義的に求めることが可能であるとしている。

第5章では堆肥化過程における反応特性を熱発生速度および酸素消費速度の2つの反応速度を指標として検討を行っている。従来までは堆肥化材料の物性データが乏しく、物性を考慮した解析が行われていないのが現状である。材料物性が未知の場合は、定量的な比較検討が不可能なことや、観測される見かけの現象は反応速度そのものの影響なのか、物性や他の要因が影響を及ぼしているのかの判断が不可能である等の問題が生じる。本章では前述の豊富な物性データをもとに、容積約1リットルの小容積反応槽を用いて反応特性を検討している。結果を要約すると、（1）温度変化速度の違いは、材料比熱や排気損失熱量の差といった材料物性や操作条件の影響を大きく受けた結果、生じることがあり、必ずしも反応速度差によるものではない。（2）反応速度のピークが特定の温度域に明確に存在する。（3）材料粒子の周囲に存在する水膜の厚さは反応速度に対し、大きな影響を与える。（4）通気量の違いによって最高到達温度に違いが生じる。さらに通気量が過大になると、排気熱損失が大きくなり、ある一定温度以上には上昇しないことが数値実験で確認されている。（5）通気量が異なると、反応速度が同じでも、排気中の酸素濃度に見かけ上大きな差が生じ、活発な反応が進行しているように見受けられる場合があることが数値実験で確認されている。以上のことを見いだしている。

第6章では、前述の結果をもとに充填層内部温度および酸素濃度分布の予測シミュレーションモデルを構築し、実験結果との比較検討を行っている。また、シ

ミュレーションモデルを用い、通気量や材料物性が充填層内部温度および酸素濃度分布に及ぼす影響を数値実験により検討している。結果を要約すると、(1) 作成したモデルは充填層内部における温度、酸素濃度の予測モデルとして妥当なものである。(2) 充填層内部の反応速度は酸素濃度に影響を受けるため、通気量のコントロールが必要である。大きな通気量は充填層内部の酸素環境を良好に保つことが可能であるが、一方で排気熱損失の増大につながり、材料温度を下げる原因になるため通気量にも上限界がある。また、過小な通気量は充填層内部の酸素欠乏を引き起こすため、通気量の下限界や充填層高さに制限があることを指摘している。(3) 材料の初期含水率が比較的高い場合は、含水率が低い試料に比べて、温度、酸素濃度変化はゆるやかである。この原因は材料比熱の差が大きく影響を及ぼしたためであるが、充填層においては層内部の酸素透過性の難易とも関連すると指摘している。(4) 充填層周囲からの熱損失が大きい場合、充填層内部の温度変化速度が遅くなるが、このことが原因となり充填層上部において長時間にわたって酸素欠乏状態になることを指摘している。これは通気量が小さい場合にも同様にあてはまる現象であり、良質なコンポストの作製上留意すべきことである。以上のことを見いだしている。

第7章では、第2章から第6章までの各章ごとの要約が述べられている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 藤 和 彦
副 査 教 授 寺 尾 日 出 男
副 査 教 授 梅 田 安 治
副 査 助 教 授 松 田 従 三

学 位 論 文 題 名

乳牛糞の堆肥化過程における熱 および物質移動に関する研究

本論文は、7章で構成され、図75、表9、引用文献75を含む142頁の和文論文で、別に参考論文13編が添えられている。

堆肥製造施設で採用されている堆肥化法は高速堆肥化法とよばれ、材料に強制的に空気を供給し、好気性発酵を行っている。諸条件が整えば材料温度を短時間に60～70℃まで上昇させることが可能である。この結果、易分解性有機物は短時間に分解され、高温のため材料中に存在している病原菌、害虫卵、その幼虫、雑草種子等を死滅させることができ、良質な堆肥として安全に土壌へ還元することが可能になる。堆肥化の過程で副生的に得られる熱エネルギーは、安全かつ無公害な有用エネルギーとして利用することができる。

本研究は、堆肥化過程をエネルギー発生過程として位置づけ、この反応を効果的に促進させるための基礎研究をまとめたものである。

第1章では、研究の背景、堆肥化に関する研究の概略、研究の目的が述べられている。

第2章では、供試材料の基礎物性である真比重、比表面積、および供試材料を厚層に充填した場合の三相（固、液、気）分布を明らかにしている。

第3章では、材料の熱物性について明らかにしている。まず、熱物性値を迅速かつ同時に算出する2点測温式ダブルプローブセンサを考案している。この方法によって供試材料の熱物性値を測定し、次の結果を得ている。①有効熱伝導率は常温付近では、体積含水率に対してほぼ直線的に増加する。②材料温度が高くなると水蒸気潜熱輸送が起

き、有効熱伝導率は大きくなる。③熱拡散係数は体積含水率が変化してもほとんど変わらない。④体積比熱は体積含水率に対して直線比例関係にある。

第4章では、材料の水分移動物性を明らかにしている。先ず、吸引法、加圧法、蒸気圧法を用いて水分特性曲線を作成し、水分拡散係数を測定している。結果を要約すると、水分拡散係数は体積含水率の増加とともに大きくなり、固相率の増加とともに減少することを明らかにしている。ただし、体積含水比で整理することにより、水分拡散係数は一義的に求めることが可能であるとしている。

第5章では堆肥化過程における反応特性を反応速度を指標として検討し次の結果を得ている。①温度変化速度の違いは材料物性や操作条件の影響を大きく受け必ずしも反応速度差によるものではない。②反応速度のピークが特定の温度域に明確に存在する。③材料粒子の周囲に存在する水膜の厚さは反応速度に対し大きな影響を与える。④通気量の違いによって最高到達温度に違いが生じ、さらに通気量が過大になると、ある一定温度以上には上昇しない。⑤通気量が異なると、反応速度が同じでも排気中の酸素濃度に見かけ上大きな差が生じ、活発な反応が進行しているように見受けられる場合がある。

第6章では、充填層内部温度および酸素濃度分布の予測シミュレーションモデルを構築し、その妥当性を確認している。またシミュレーションモデルを用い数値実験を行っており、大きな通気量は充填層内部の酸素環境を良好にするが、排気熱損失の増大につながり材料温度を下げる原因になるため通気量に限界があることを示している。一方、過小な通気量は充填層内部の酸素欠乏を引き起こすため、通気量、充填層高さに制限があることを明らかにしている。材料の初期含水率が比較的高い場合は、温度と酸素濃度の変化はゆるやかであり、この原因は材料比熱の差および充填層内部の酸素透過性の難易差によるとしている。充填層周囲からの熱損失が大きい場合、充填層内部の温度変化速度が遅くなり、これによって充填層上部において長時間にわたって酸素欠乏状態になることを明らかにしている。

以上のように、本論文は乳牛糞の堆肥化過程における熱および物質移動に関する研究の結果を示したもので、その成果は学術的に高い評価を得たとともに、特に基礎的および実用的に貢献するところ大である。

よって審査員一同は、別に行なった学力確認試験の結果と合わせて、本論文の提出者 岩淵和則は博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。