

発酵熱を用いた効率的なバイオマス乾燥方法の検討

正木 祥太 久保田 洋 繁泉 恒河
松澤 大起 村上陽一郎

概 要

本研究では、下水汚泥の固形燃料化に向けた低炭素・低エネルギーな前処理技術として、縦型密閉発酵方式を模倣したバッチ式および連続式発酵試験を実施し、乾燥に適した通気量と断熱条件を検討した。

バッチ式発酵試験では、0.6、1.0vvmの通気条件で発酵熱により最高53℃まで昇温し、6日後に含水率が大きく低下した一方、1.7vvmでは発熱・乾燥効果とも限定的で、過剰通気が発酵や保温を阻害する可能性が示された。

連続式発酵試験では0.8vvmで安定した発酵熱が得られ、ヘッドスペースの保温により温度上昇と含水率低減が促進された。また、排気側温度と通気量が乾燥効率を左右する重要因子であることが示唆された。適切な通気制御と断熱性能の向上により、下水汚泥の含水率を約6日で最低43%まで低減でき、さらなる乾燥促進の可能性も確認された。

Study on an Efficient Biomass Drying Method Using Fermentation Heat

Abstract

In this study, with the aim of developing low-carbon pretreatment technologies for converting sewage sludge into solid fuel, we investigated the applicability of a drying acceleration technology that utilizes fermentation heat. We conducted batch and continuous tests modeled after a vertical closed-fermentation system to determine the appropriate aeration rate and insulation method.

The results of the batch tests showed that, at aeration rates of 0.6 and 1.0vvm, the temperature rose to a maximum of 43–53° C due to fermentation heat, and the moisture content had decreased significantly after 6 days. In contrast, no heat generation was observed at the 1.7vvm aeration rate, and the reduction in moisture content was limited; this suggests that excessive aeration inhibits either or both fermentation and heat retention.

In the continuous test, stable heat generation from fermentation was confirmed under an aeration rate of 0.8vvm; it was also found that maintaining the temperature in the headspace effectively increased the temperatures in both the headspace and the upper layer, thereby effectively reducing the moisture content. Furthermore, since the weight loss due to fermentation could be estimated from the saturated vapor pressure in the headspace and the upper layer temperature, it was suggested that the temperature on the exhaust side and the aeration rate are important for reducing the moisture content of the fermented dried material.

Based on the above, it was demonstrated that Bio drying can reduce the moisture content of sewage sludge to at least 43% within 6 days through appropriate control of the aeration rate and improvement of the fermentation tank's thermal insulation performance; furthermore, it was shown that drying could be further accelerated by maintaining the temperatures in the headspace and upper layer while increasing the aeration rate.

キーワード：発酵乾燥、バイオマス、下水汚泥、固形
燃料化

§1. はじめに

バイオマスは脱炭素への貢献が期待されている資源であり、下水汚泥や食品廃棄物などの高含水なバイオマスは、基本的にメタン発酵のような湿式での有効利用が選択されるが、ハンドリングや施設規模、後処理などの課題から利用率は依然として低い。特に下水汚泥中の有機物をエネルギー・緑農地利用した割合である下水道バイオマスリサイクルの利用率は2022年で37%と食品廃棄物の60%よりもさらに低い値となっている¹⁾。

下水汚泥のメタン発酵以外の有効活用技術としては、小規模な下水処理施設では固形燃料化や堆肥化が挙げられる。固形燃料化に必要な処理としては乾燥または炭化、造粒と比較的簡易であり、設備面積も小さいことから、実施施設は増加傾向にあるものの、乾燥に要するエネルギーコストが課題となっている。対して、堆肥化は有機物分解を目的とした通気による好気性発酵を行い、その際に発生する熱を乾燥に利用するため外部熱源を必要とせず、設置場所の制約が比較的小さいが、原料が下水汚泥の場合は特有の臭いや廃棄物としてのイメージから受け入れ先の確保が難しく需要が停滞している²⁾。

そこで本研究では、固形燃料化の課題である乾燥工程に着目し、下水汚泥を対象にした固形燃料化のための低炭素・低エネルギーな前処理技術の開発を目的として発酵熱を利用した乾燥促進技術（以下、発酵乾燥）の検討を行った。システムの構築にあたり、既往の堆肥化技術を基盤として技術の開発を進めた。

堆肥化は大きく堆積方式と攪拌方式に分類される。堆積方式は設備が簡易である一方、処理期間が長くなり、これに対し攪拌方式は設備構成が比較的複雑となるものの、短期間で処理できる利点を有する³⁾。そこで、処理期間の短縮による処理コストおよび設置面積の低減を考慮して、本研究では縦型密閉発酵方式を選択した。

また、発酵乾燥では水分蒸発のための発酵熱の効率的な利用に加えて、水分の速やかな系外排出が重要である。一般的な堆肥化では、通気量は堆肥 1 m³当

り100 L/min程度に対して³⁾、本研究では、通常の堆肥化よりも5-10倍の通気量を設定するとともに、断熱性能の向上を図ることで、発酵熱と通風による乾燥効果の最大化を試みた。処理後の含水率については、生ごみ堆肥で35.9%⁴⁾、家畜ふん堆肥で45.3%（平均）³⁾の報告があることから、固形燃料化の前処理としての目標含水率を40%と設定した。従来の堆肥化ではこの含水率に達するには約2週間を要するが、本研究の発酵乾燥では6日で達成することを目指した。

§2. 実験資材および方法

2.1 供試試料

原料の下水汚泥は2つの施設からそれぞれ複数回採取した。スクリープレスで脱水している施設Aから採取した下水汚泥A、遠心分離で脱水している施設Bから採取した下水汚泥Bのいずれも未消化汚泥である。副資材としてはpH調整用の消石灰、改質材としてもみ殻、種菌として牛糞堆肥（熟成1月以上2か月未満の未熟堆肥）を使用した。消石灰以外の含水率及び全炭素量（TC）分析結果を表1に示す。含水率は環整95号別紙2に準拠した。TCは固体全有機炭素分析（Soli TOC Cube、Elementar）により、供試試料を酸素雰囲気下の900℃で燃焼し、発生した燃焼ガス中のCO₂を検出することで得られた炭素量とした。

2.2 試験方法

1) バッチ式発酵試験

図1に試験で使用した装置を示す。容積2 Lのステンレスデュワー瓶と発泡樹脂製の蓋で構成することで断熱性能を高めた装置を用いてバッチ式試験を実施した。湿潤重量で560 g（1.3-1.4 L）の下水汚泥Aに消石灰を0.5 wt%添加した資材を充填し、エアストーンを用いて底面から6日間の通気を行った。通気開始前および終了後には装置全体の重量を測定し、通気による減少重量を測定した。通気量について0.5、1.0、1.5 L/minの3つの処理区を設け、発酵乾燥に適切な流量の

表1 供試試料の含水率と TC

供試材料	含水率 [wt%]	TC [%dry]
下水汚泥A	70.3-74.0	42.4-43.1
下水汚泥B	69.4-71.4	45.6-45.9
もみ殻	10.5	33.0
牛糞堆肥	49.0-64.5	18.7-31.5

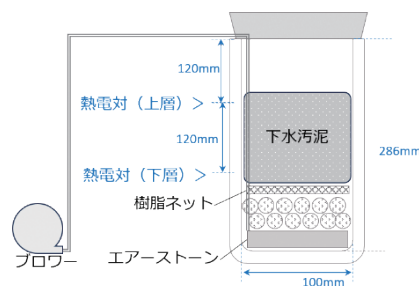


図1 バッチ式発酵装置

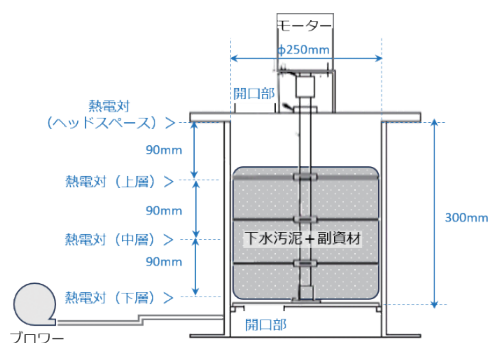


図2 連続式発酵装置

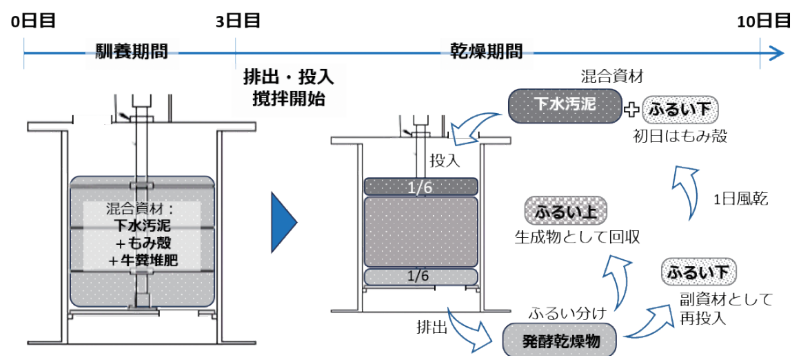


図3 連続式発酵試験のフロー

確認を行った。通気期間中、K熱電対を図1の位置に差し込み発酵時の下水汚泥の上層と下層の温度を測定した。通気後、下水汚泥の最下層を0 cmとして高さ2 cmごとに採取し、それぞれ含水率と2.1と同様にTCを測定した。

2) 連続式発酵試験

図2に縦型密閉発酵槽を模して作製した連続式発酵装置を示す。容積14Lの円筒状の亚克力製の発酵槽の外周を断熱材で覆っており、槽内はパンチホールと排出口付きの床板、攪拌羽根で構成されている。槽の上面と底面には、資材の投入と排出を行うための開閉可能な開口部を設けた。発酵乾燥を実施するうえで重要な断熱について検討するために、1回目は側面のみ、2回目は側面+上面蓋を断熱材で覆って実験を実施した。図3に試験手順のフローを示す。原料には下水汚泥Bを用い、副資材として原料に対し牛糞堆肥50wt%、もみ殻を15wt%、消石灰0.5wt%の割合で添加・混練し、合計で3,600g(約10L)の混合資材を作成した。発酵槽へ充填後に通気を開始し、槽内の温度が上昇・安定するまで3日間は通気のための馴養を行い、4日目から10日目までの7日間は資材の排出、投入および攪拌を実施した。乾燥期間を6日と設定し、発酵槽内の1日あたり排出量が資材の1/6程度の体積となるように行った。槽の底面から1日に350-450g程度の発酵乾燥物を排出し、目開き3.5mmの篩でふるい分けを行った。ふるい上は固形燃料に利用する想定で目標含水率40%を目指し、ふるい下は1日風乾した後に副資材として再利用した。資材の投入は槽の上面から行い、4日目は開始時と同様の組成の資材を投入し、5-10日目は風乾後のふるい下を新たに投入する下水汚泥Bに15wt%混練し、排出と同様、槽内資材の1/6程度の体積になるよう1日860gずつ投入した。その際に排出・投入前後の装置全体重量を毎日測定し、発酵による1日の重量減少量を記録した。発酵乾燥物のふるい分け前後および風乾後のふるい下について、

2.1と同様に含水率と全炭素量(TC)を測定した。通気中の槽内の温度は図2に示した測定資材が充填されていない槽上部の空間(ヘッドスペース)および資材の上層、中層、下層を図の各位置にK熱電対を設置して測定した。

3. 実験結果

3.1 発酵乾燥に適切な通気量

バッチ式発酵試験における通気中の下水汚泥の温度の経時変化を図4に示す。設定通気量0.5、1.0、1.5L/minは充填した下水汚泥の容積に対して0.6、1.0、1.7vvmとなる。金子らの報告⁴⁾と同様に、通気量の増加に伴ってピーク時の温度が低下する傾向がみられた。通気量が0.5、1.0L/minでは発熱を確認し、それぞれピーク時は上層で53、43℃、下層は46、35℃を示し、いずれも気流に直接曝されない上層のほうが高い温度を示した。発熱温度が最も高くなった時間は1.2、2.5時間であり、0.5L/minのほうが高い発熱温度で、発熱温度のピークまでの時間も早かった。1.5L/minでは発熱は認められず、室温より10℃ほど低い温度を維持しており、上層と下層で差はほとんど見られなかった。

次にバッチ式発酵試験のTCおよび含水率の測定結果を図5、図6に示す。図5より、TCは初期が42-43% dry、通気後が41-43% dryとほとんど変化がなく、発熱の有無にかかわらずほとんど同じ値であった。

図6より、含水率はいずれも最下層0-2cmは乾燥が進んでおり、通気開始前試料であるInitialの70-74%に対して、発酵後は43-54%と20-30%ほど低減された。一方で2-4cm、4-6cmでは通気量で差がみられ、0.5、1.0L/minは60%程度まで低減された。1.5L/minではいずれもほとんど低減されず、69-72%とInitialと近い値であった。また全体重量についても0.5L/minおよび1.0L/minでは6日間でそれぞれ23%、20%減少したが、1.5L/minでは半分の9%の減少であった。

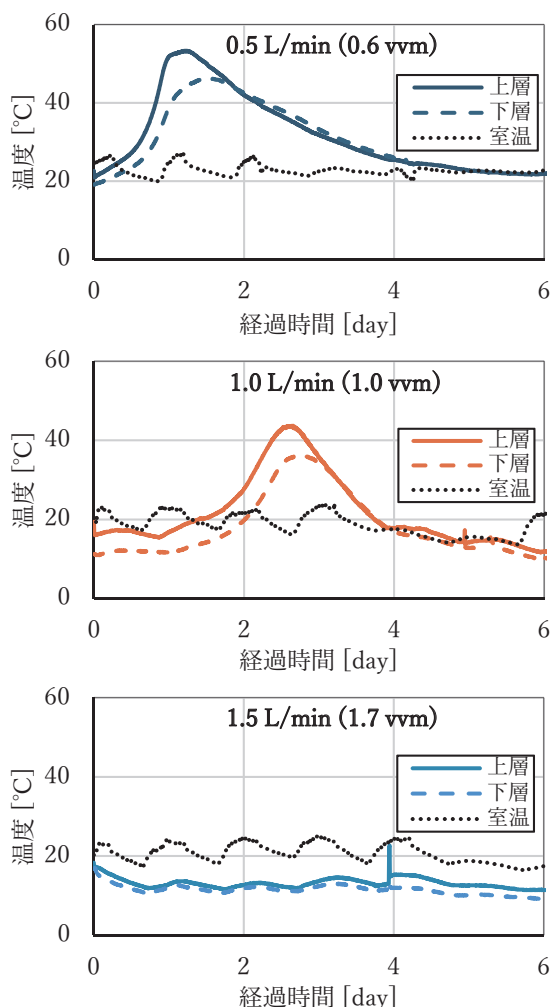


図4 各通気量における下水汚泥の発酵時の温度

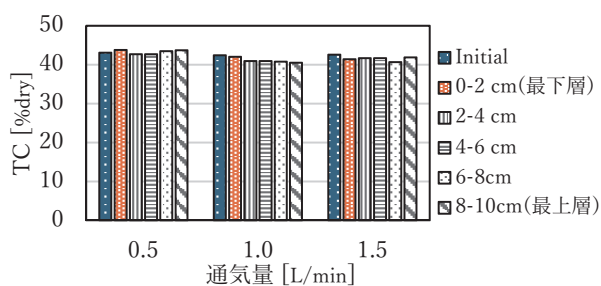


図5 下水汚泥の発酵前後の各層の全炭素量 (TC)

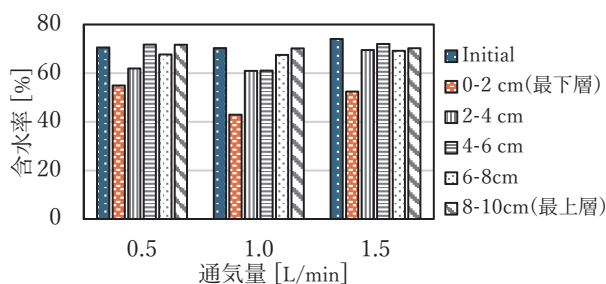


図6 下水汚泥の発酵前後の各層の含水率

表2 通気中の槽内の各位置における平均温度

	1回目 [°C]	2回目 [°C]
ヘッドスペース	34.3	39.7
上層	37.2	41.2
中層	32.3	34.9
下層	28.8	29.6
室温	28.8	29.9

1.5 L/minでは、図4より各層温度の上昇もみられなかったことから、通気量が大きすぎたため、熱が保持されず温度が上がらなかった、もしくは発酵自体が進まなかった可能性が考えられる。これらを踏まえて、6日間での発酵乾燥に適切な通気量は温度上昇と含水率の低減がみられた0.5-1.0 L/min、資材の単位容積あたりで0.6-1.0 vvmとした。

3.2 発酵乾燥に適切な断熱方法

連続式発酵試験では3.1で検討した適切な通気量0.6-1.0 vvmより、0.8 vvmに設定し通気を行った。1回目(断熱:側面)と2回目(断熱:側面+上面)の温度の測定結果の平均値を表2に示す。上層の平均温度は40℃前後、中層は30℃、下層は室温と同程度で、バッチ式と同様に上層が高い値をした。ヘッドスペースおよび上層の温度は1回目と2回目で4-5℃程度の差があり、中層以下は大きな差はなかった。またヘッドスペースと上層の温度の差分は1回目が2.9℃、2回目は1.5℃と上面に断熱材がある2回目が小さかった。

次に通気中における発酵層内温度の経時変化を図7に示す。横軸は図3における排出投入開始(4日目)

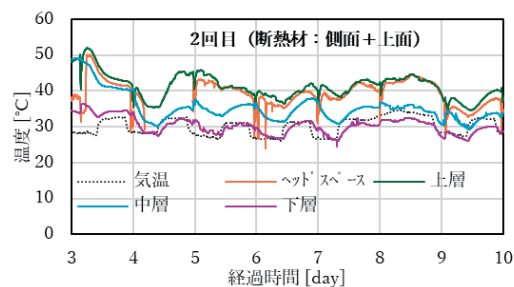
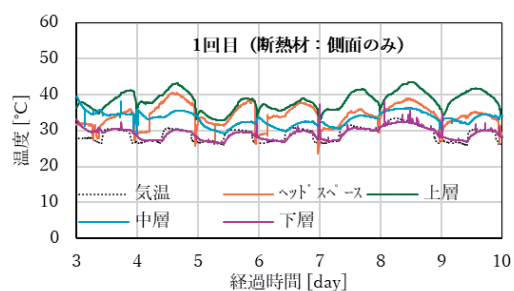


図7 連続式発酵試験における発酵槽内温度の経時変化

から10日目を示している。24時間毎の排出・投入時に温度が急激に低下し、その後2-3時間で投入前の温度付近まで上昇するサイクルが確認できた。

各位置の温度は、1回目はヘッドスペースと上層の温度が開いた状態で推移しており、最大で6℃の差があった。上面断熱を追加した2回目では両者はほぼ同じ温度で推移し、最大でも2℃の差であった。発酵層内の位置が下がるにつれて温度は低下し、1、2回目ともに中層は気温と上層の中間の値、下層は気温とほぼ同じ値で推移していた。

次に1日ごとに投入または排出した資材について、TCを図8、含水率を図9にそれぞれ結果を示す。ここでのInitialは図3の0日目に作成した混合資材を指す。図8より、TCについては1回目と2回目で大きな差はみられなかった。原料の下水汚泥46%に対して、発酵前の混合資材は40%程度、発酵乾燥物は35%から徐々に増加して10日目には混合資材に近い値40%程度を示した。表1より、副資材のもみ殻および牛糞堆肥は19-33%と、下水汚泥単体よりも小さい値のため、副資材の割合の多いInitialが最も小さい。試験の経過でふるい下の循環が進み、槽内の副資材の割合が減少することで下水汚泥の割合が増えてTCも増加したと

考えられる。

図9の含水率は、発酵乾燥物は1回目が41-53%、2回目が31-45%と、共に投入時の混合資材よりも低い値を示し、乾燥が進んでいることが確認された。4-10日目の平均値は、1回目は発酵乾燥物49%、ふるい上57%に対して、2回目はそれぞれ40%、49%と、2回目のほうが10%程度低い含水率まで乾燥していた。1回目は日数の経過により含水率が上昇し、ふるい上の含水率は60%付近で推移していた。一方の2回目の発酵乾燥物は減少傾向にあり、ふるい上は最も低いもので43%と目標含水率近くまで低減された。

図7より、上面の断熱材を加えた2回目のヘッドスペースおよび上層の温度が顕著に上昇していたことから、空气の飽和水蒸気量が大きくなることで槽外へ排気される水分が増加し、排出される発酵乾燥物の含水率もより低下したことが示唆された。

3.3 発酵乾燥による水分蒸発量と槽内温度の関係

3.1の結果より、下水汚泥のTCの発酵による減少は2%程度であることから、金子らの報告⁵⁾と同様に槽内の資材の重量減少は水分の蒸発によるものとし、槽内の温度に対する水分蒸発量の試算モデルを検討し

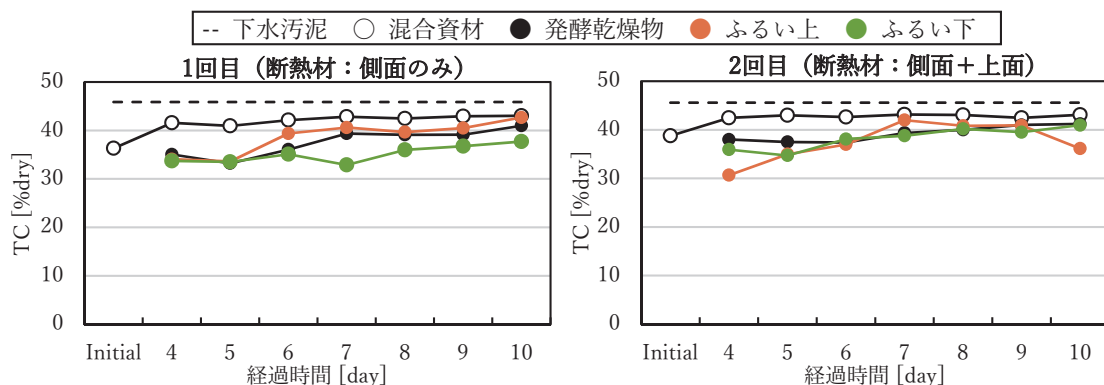


図8 連続式発酵試験におけるTCの推移

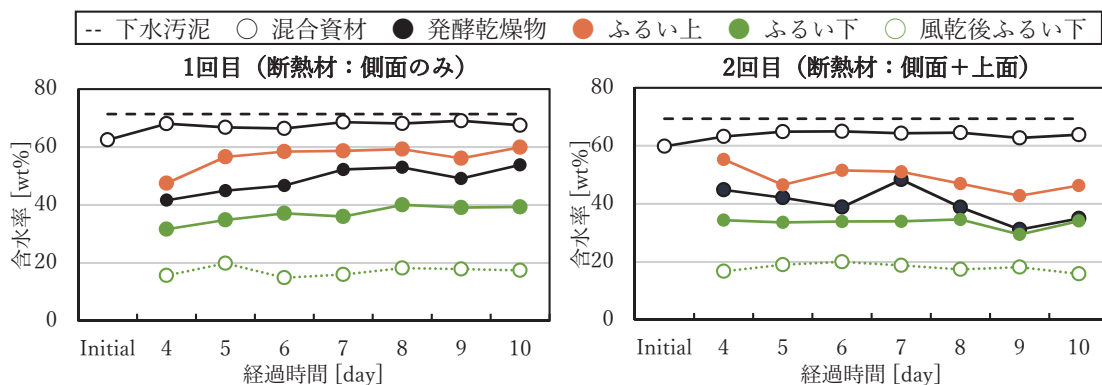


図9 連続式発酵試験における含水率の推移

た。まず、特定の温度における飽和水蒸気量は藤田のモデル（式①）⁶⁾を用いて求めた。

$$j = \frac{18}{22.4} \times \frac{p_s}{p_0 - p_s} \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{p_s}{p_0} = \exp\left(A - \frac{B}{T+D}\right)$$

j : 飽和水蒸気量 [g/m³]

p_s : 飽和蒸気圧 [Pa]

p_0 : 大気圧 [Pa]

T : 資材温度 [°C]

$A = 11.961$

$B = 3993.7$

$D = 233.9$

次に資材からの水分蒸発量は飽和水蒸気量と絶対湿度の差分に等しいと仮定すると、式②のように表せる。

$$J_{\text{day}} = \sum_i^n [(j_i - V_i)q \times t_{\text{interval}}] \quad \dots \textcircled{2}$$

J_{day} : 24時間水分蒸発量 [g/day]

j : 飽和水蒸気量 [g/m³]

V : 絶対湿度 [g/m³]

q : 通気量 [m³/min]

t_{interval} : 計測間隔 [min]

式①、②より、試験槽各位置の温度測定結果から1日ごとの水分蒸発量を計算し、縦軸にその計算値、横軸に測定した減少重量を実測値として図10に示す。図中の破線に収束しているほど計算値の適合性が高いことを表している。1回目および2回目のいずれにおいても、上層温度を用いた場合がよく収束しており、2回目はヘッドスペース温度においても同様の傾向がみられた。

次に、実測値に対する計算値の相対誤差を求めた。

相対誤差は実測値に対する誤差の割合を表し、式③により算出した。

$$\text{相対誤差 [\%]} = \frac{|\text{実測値[g/day]} - \text{計算値[g/day]}|}{\text{実測値[g/day]}} \times 100 \quad \dots \textcircled{3}$$

1回目、2回目のいずれも上層の相対誤差の平均は13、11%、ヘッドスペースは33、12%と、上層と2回目のヘッドスペースにおいて10%程度の誤差を示した。一方、その他の位置の温度を用いた場合は35-64%であり、実測値の減少重量とは大きな誤差があった。

これらのことから、槽内の資材重量の減少は上層温度から試算された水分蒸発量から推定できるとともに、ヘッドスペースおよび上層の温度を高く保つことが発酵乾燥物の含水率低下に大きく寄与することが示唆された。

§4. まとめ

本研究では、下水汚泥を対象とした固形燃料化のための低炭素・低エネルギーな前処理技術の開発を目的として、発酵熱を利用した乾燥促進技術（発酵乾燥）の適用性について検討した。バッチ式試験および連続式試験を実施し、通気条件ならびに断熱条件が発酵乾燥性能に及ぼす影響を評価した。

バッチ式試験の結果、通気量0.5-1.0L/min（0.6-1.0vvm）の条件では発酵熱による温度上昇が確認され、最高温度は上層で43-53°Cに達した。一方、1.5L/min（1.7vvm）では発熱が認められず、過剰な通気量により系内の熱保持および微生物活性が阻害されたと考えられた。含水率についても、0.5-1.0L/minでは顕著な低下が確認されたのに対し、1.5L/minでは低減効果は限定的であった。

連続式試験では、0.8vvmの通気条件下において安定した発酵熱の発生が確認され、ヘッドスペースの保温は、槽内上層の温度が向上し、含水率の低減に有効

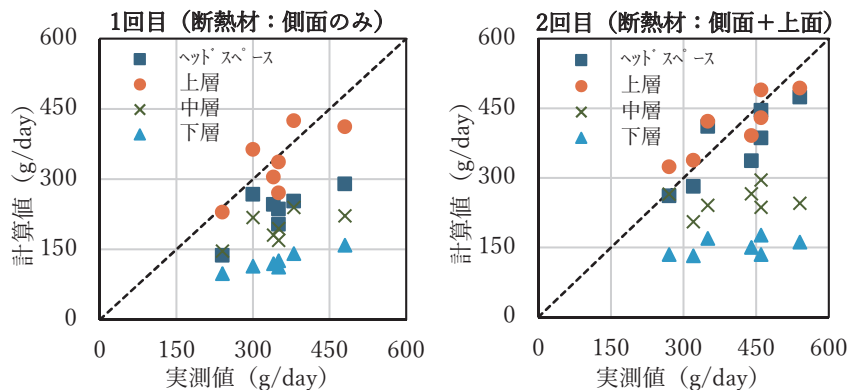


図10 連続式発酵槽における減少重量の実測値と水分蒸発量の計算値の関係

であることが明らかとなった。また、ヘッドスペースおよび上層の温度における飽和水蒸気量から減少重量を推定できたことから、発酵乾燥物の含水率低減には排気側の温度と通気量が重要であることが示唆された。

以上より、本研究で行った発酵乾燥では、適切な通気量制御および発酵槽上部の断熱性能の向上により、下水汚泥の含水率を6日間で平均49%（最低43%）まで低減することができ、目標値に近い結果を得た。加えて、本研究の結果から、ヘッドスペースおよび上層の温度を維持して通気量を増加できれば、乾燥をさらに促進できる可能性が示された。

今後は、外気温の影響や複数施設由来の下水汚泥での再現性の検証を進め、本研究で得られた断熱方法や通気制御条件の知見を縦型密閉発酵槽の装置設計へ反映することで、実用規模へ向けての展開が期待される。

参 考 文 献

- 1) 農林水産省、バイオマス種類別の利用率の推移（令和7年7月）、https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/230908_8.html、閲覧日2026.8.5
- 2) 国土交通省、脱炭素化／資源・エネルギー利用下水道分野における温室効果ガス排出とポテンシャル、https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000124.html、閲覧日2026.8.5
- 3) 一般社団法人 畜産環境整備機構、堆肥化施設設計マニュアル、令和4年3月31日
- 4) 山本勝彦 他、家庭用生ごみ処理容器内堆肥の含水率低下方法に関する実験的研究、廃棄物学会論文誌、Vol. 10、No.4、pp. 224-231、1999
- 5) 金子栄廣 他、好気微生物反応を利用した生物系廃棄物の乾燥、廃棄物資源循環学会論文誌、Vol. 27、pp.1-6、2016
- 6) 藤田賢二、コンポスト化技術-廃棄物有効活用のテクノロジー-、技報堂出版株式会社、1993年

ひとこと



正木 祥太

活用が進んでいないウェットバイオマスを対象に、発酵を用いて低炭素・低エネルギーな乾燥技術を検討しました。今後も脱炭素社会に貢献可能な技術の開発・普及を進めて参ります。