

乳牛ふん尿由来の高水分堆肥化物の発酵を改善する技術の検討

水木 剛

Examination of technology to manage high moisture composting pile made from dairy cows manure

Takeshi MIZUKI

要 約

堆肥化前に家畜排せつ物を高水分に調整したため、嫌気性発酵が進行してしまった堆肥化物を再処理する方法について検討した。

- 1 水分 80%の高水分で堆肥化を開始した乳牛ふんの嫌気発酵に伴う悪臭の発生を防ぐためには、季節を問わず堆肥化開始後 1 日以内に水分再調整を行う必要があることが示唆された。また、堆肥化開始後 11 時間以内に発酵温度が 20℃以上昇温しない場合は、水分再調整が必要であった。
- 2 冬季に水分 80%の高水分で嫌氣的に堆肥化した乳牛ふんの再処理方法について検討したところ、オガクズによる水分再調整時に堆肥化物の重量比 5%の米ぬかを発酵助材として追加混合することにより、その後の発酵温度の上昇と悪臭の抑制が確認された。

キーワード：水分調整、堆肥、乳牛ふん、発酵助材

緒 言

家畜排せつ物は、適切に処理すれば堆肥や液肥といった有機質肥料として有効に活用することができる。しかしながら、堆肥化前の水分調整に失敗するなどして嫌気性発酵が進行した堆肥化物からは大量の悪臭原因物質が発生し、悪臭苦情の原因となっている。また、適切に再処理されことなく農場内に放置されるとさらに嫌気化が進み、そのまま農地に施用されると作物の生育に対する悪影響も懸念される。

今日までに、適切な堆肥化を行うための試験研究は数多く行われ、様々な技術が普及している。しかしながら、堆肥化の過程で嫌気化した堆肥化物の再処理に関する知見はほとんどなく、一部の成書¹⁾において、水分などの初期条件を再調整すれば発酵を回復可能と記載されている程度である。

一方で、2020年に農林水産省から公表された野菜の衛生管理指針²⁾においては、55℃以上が3日間以上続いている(または雑草種子の死滅のために60℃以上の温度を保つ)ことを確認した堆肥を使用することが求められている。すなわち、耕種

農家が求める安全・安心な堆肥を生産するためには、これまで以上に発酵温度の管理が重要となる。

そこで、家畜排せつ物の適正な堆肥化処理と利用の促進を図ることを目的として、堆肥化の過程で嫌気化する条件を把握するとともに、そこから好気発酵へと回復させるための適切な再処理の方法を検討した。

材料及び方法

試験 1 水分再調整のタイムリミットの検討

高水分で堆肥化された乳牛ふんの嫌気化をオガクズによる水分再調整で防ぐことが可能なタイムリミットを把握するため、夏季条件と冬季条件で試験を行った。

なお、試験 1 では、発酵温度のピークと堆肥化中期までの悪臭の改善に重点を置いたため、試験期間を水分再調整後 2 週間までとした。

試験 1-1 夏季条件

(1) 材料

主原料となる乳牛ふんは、当研究所のフリーストール方式の搾乳ロボット牛舎から搬出されたス

ラリー状の新鮮ふん(水分 87.2%)を供試した。オガクズ(水分 45.1%)は外部から購入したものを供試した。

(2) 堆肥化試験

2019年9月10日～27日の18日間、岡山における8月の平均気温である28.3℃(気象庁による統計期間1981～2010年の平均気温)に温度管理された恒温室内で堆肥化試験を行った。

まず、予備試験により、当研究所の実験装置で確実に上記乳牛ふんを嫌気化できる条件が水分80%以上であることを確認した。その結果を基に、表1の試験区分により、乳牛ふんをオガクズで水分調整し、容積重0.5kg/L、通気量50L/m³/minの条件で、容積約10Lの小型堆肥化実験装置(かぐやひめ(畜試式)、富士平工業株式会社、東京)を用いて堆肥化を開始した。ただし、対照区以外については、水分再調整までの間、堆肥化物を厚さ0.1mmのビニール袋に入れて内部が通気されないようにした。その後、1、2または3日後にオガクズを追加混合して水分を70%に再調整して堆肥化を継続した。

表1 水分再調整のタイムリミットの検討(夏季)の試験区

	堆肥化前			水分再調整		
	乳牛ふん	オガクズ	(目標水分)	実施日	高水分堆肥化物	オガクズ
対照区	3.19	2.21	(70%)	—	—	—
day1区	4.48	0.92	(80%)	1日後	4.12	1.28
day2区				2日後	4.04	1.36
day3区				3日後	3.97	1.43

※各試験区とも原料の合計重量が5.4kgとなるように混合した。

切り返しは、対照区については試験開始から7日ごとに、対照区以外については水分再調整から7日ごとに行った。いずれの試験区についても、水分再調整時または切り返し時に分析用試料50gを採材した。

(3) 調査項目

各試験区の堆肥化の状況及び肥料成分等の変動を把握するため、次の項目を測定した。

1) 堆肥化の状況

発酵温度は、温度データロガー(おんどとり TR-71wf, 株式会社ティアンドデイ, 長野)により、1時間ごとに自動計測した。併せて、試験を行った室内の温度及び湿度を温湿度データロガー(おんどとり TR-72wf, 株式会社ティアンドデイ, 長野)により、同様に計測した。

アンモニアガス濃度及び硫化水素ガス濃度は、実験装置からの排気を北川式ガス検知管(光明理化学工業株式会社, 神奈川)で測定した。同様に、においの強さの指標である臭気指数相当値をポー

ダブル型畜環研式ニオイセンサ(XP-329ⅢR-LK, 春日工機株式会社, 東京)で測定した。さらに、堆肥化過程で発生するアンモニアの総量を把握するため、実験装置からの排気をガス洗浄瓶内の6N・硫酸100mlに通過させてアンモニアを捕集するとともに、実験装置内部の凝縮水を回収して、ケルダール法による窒素の分析を行った。

2) 肥料成分等

水分、有機物、灰分、pH(KCl)(試料と2M塩化カリウム溶液の比率は1:10)、電気伝導度(試料と蒸留水の比率は1:10)、窒素全量、アンモニア性窒素、硝酸性窒素、全炭素及び腐熟度を堆肥等有機物分析法(2010年版)³⁾に準じて行った。また、一般細菌及び糸状菌の生物多様度を、農業環境技術研究所⁴⁾の方法でPCR-DGGEを行い、シャノン・ウィナーの多様度指数により評価した。

試験1-2 冬季条件

(1) 材料

試験1-1と同様の乳牛ふん(水分86.6%)及びオガクズ(水分36.4%)を供試した。

(2) 堆肥化試験

2020年11月17日～12月4日の17日間、温度管理を行わない室内で、表2の試験区分により堆肥化試験を行った。それ以外の試験の方法については、試験1-1と同じ。

表2 水分再調整のタイムリミットの検討(冬季)の試験区

	堆肥化前			水分再調整		
	乳牛ふん	オガクズ	(目標水分)	実施日	高水分堆肥化物	オガクズ
対照区	3.62	1.78	(70%)	—	—	—
day1区	4.70	0.70	(80%)	1日後	4.26	1.14
day2区				2日後	4.29	1.11
day3区				3日後	4.14	1.26

※各試験区とも原料の合計重量が5.4kgとなるように混合した。

(3) 調査項目

試験1-1と同じ。

試験2 高水分堆肥化物の再処理技術の検討

嫌気化した乳牛ふん由来高水分堆肥化物の水分再調整後の発酵温度及び悪臭の改善を目的として、水分再調整時に発酵助材等を追加混合した場合の効果を検討した。

なお、予備試験において、夏季はオガクズによる水分再調整のみで60℃近い発酵温度のピークが得られることを確認したため、試験2は冬季のみ実施した。また、堆肥化中期までの発酵温度等の改善方法を検討することに重点を置いたため、試験2の試験期間は水分再調整後3週間までとした。

(1) 材料

乳牛ふん(水分 86.8%)及びオガクズ(堆肥化前の水分調整時の水分 48.2%、水分再調整時の水分 48.8%)については試験1-1と同様のものを供試した。また、発酵助材として、当研究所の開放直線型スクープ式堆肥化施設で乳牛ふん及び肉用牛ふんを混合して約45日間発酵させた堆肥化物(以下、戻し堆肥)(水分 60.8%)及び米ぬか(水分 11.1%)を供試した。

(2) 堆肥化試験

2021年1月12日～2月9日の28日間、温度管理を行わない室内で堆肥化試験を行った。

まず、乳牛ふんを試験1-1の対照区以外の試験区と同様の方法で7日間嫌氣的に堆肥化して高水分堆肥化物を作成した。それらにオガクズを混合して水分を70%に再調整する際、表3の試験区分に従って発酵助材を追加混合して堆肥化を継続した。

なお、切り返しは約7日ごとに行い、その都度分析用試料50gを採材した。

表3 高水分堆肥化物の再処理技術の検討の試験区

	堆肥化前		水分再調整		発酵助材等
	乳牛ふん	オガクズ(目標水分)	高水分堆肥化物	オガクズ(目標水分)	
対照区					-
オガクズ増量区	4.45	0.95 (80%)	3.67	1.73 (70%)	オガクズ 0.18
戻し堆肥区					戻し堆肥 0.18
米ぬか区					米ぬか 0.18

※各試験区とも発酵助材等を除く原料の合計重量が5.4kgとなるように混合した。
発酵助材等は水分再調整時に使用した高水分堆肥化物の重量比5%を混合した。

(3) 調査項目

試験1-1と同じ(ただし、一般細菌及び糸状菌の解析は実施せず)。

結 果

試験1 水分再調整のタイムリミットの検討

試験1-1 夏季条件

水分70%への調整後の発酵温度のピークは、図1に示すとおり、いずれの試験区も56℃前後で大きな差はなかった。

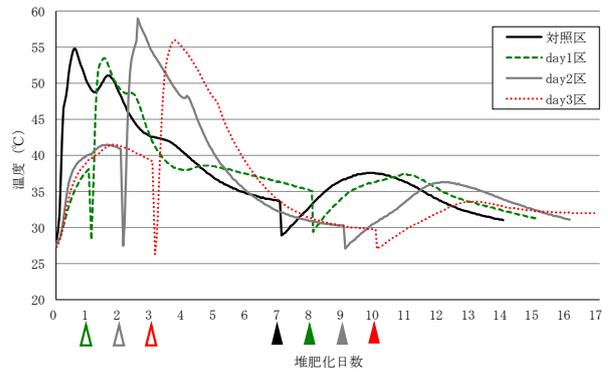


図1 発酵温度の推移(タイムリミット・夏季)

※図中の△は水分再調整を、▲は切り返しを行ったことを示す。

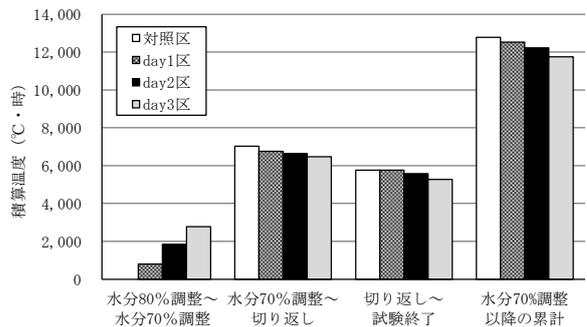


図2 時間あたり積算温度の推移(タイムリミット・夏季)

一方で、時間あたり積算温度は、図2に示すとおり、水分70%への調整が遅れるほど低くなった。なお、試験期間中の恒温室内の平均気温は、29.3℃(最低29.2℃、最高29.6℃)であった。

アンモニアガスの発生量は、図3に示すとおり、水分の再調整が遅れるほど高く推移する傾向にあったが、特にday1区とday2区の間に大きな差がみられた。

臭気指数相当値についても、図4に示すとおり、水分再調整後にday1区とday2区の間に差がみられた。なお、対照区の試験開始直後並びにday2区及びday3区の水分再調整翌日に臭気指数相当値が大きく上昇したのは、供試したオガクズの強いヒノキ臭の影響と考えられたが、day1区のみ上昇が小さかった原因は特定できなかった。

一方で、硫化水素ガスの濃度は、対照区以外の試験区で1日目に2.5～3.0ppmでピークとなったものの、水分再調整の2日目以降はいずれも検出限界値未満(<1.0ppm)で推移した(図表省略)。

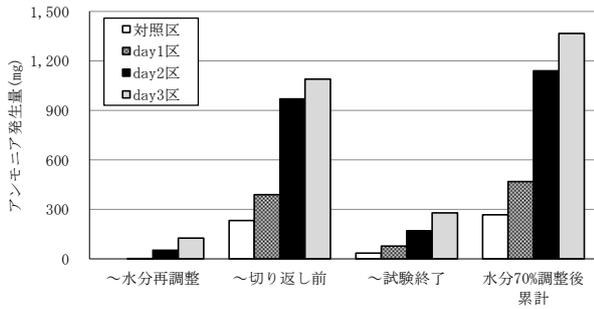


図3 アンモニアガス発生量の推移 (タイムリット・夏季)

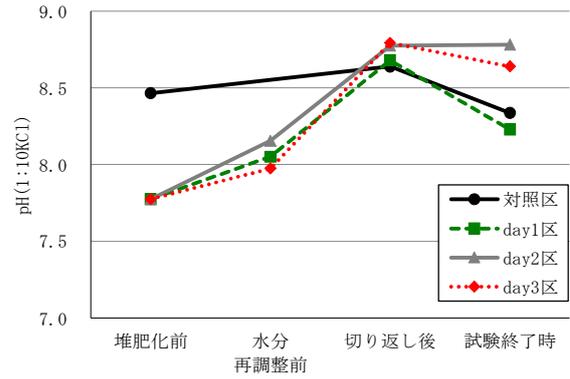


図5 pHの推移 (タイムリット・夏季)

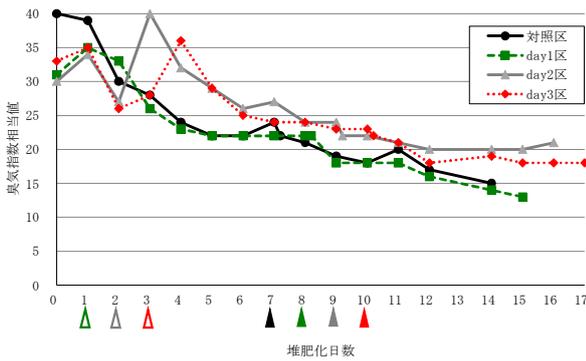


図4 臭気指数相当値の推移 (タイムリット・夏季)

※図中の△は水分再調整を、▲は切り返しを行ったことを示す。

試験終了時のpHは、図5に示すとおり、対照区に対してday2区及びday3区が高くなった。
また、図6に示すとおり、対照区及びday1区では、試験終了時に無機態窒素の硝化が確認された。

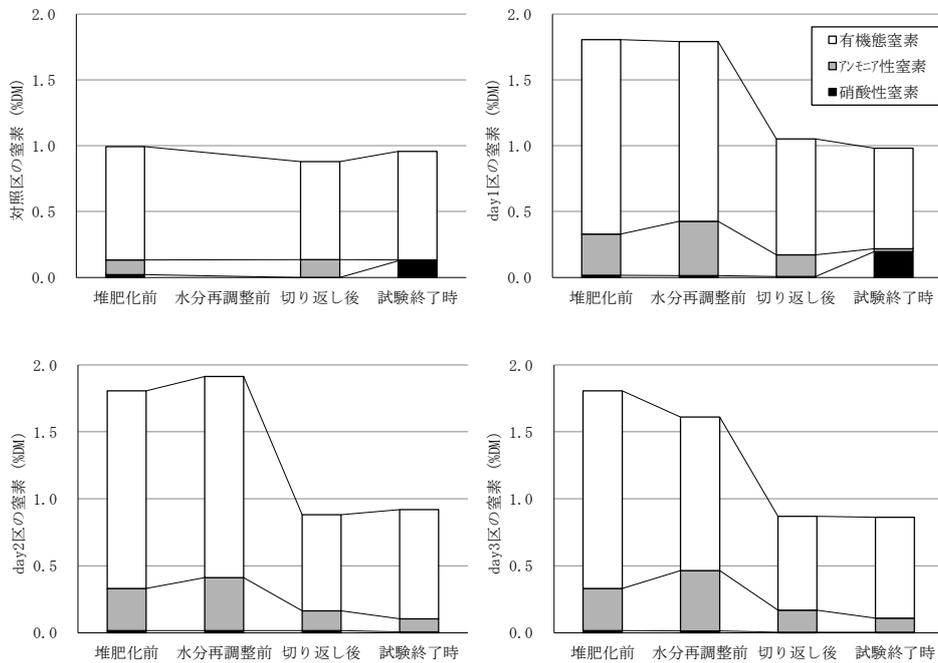


図6 窒素成分の推移 (タイムリット・夏季)

試験1-2 冬季条件

水分70%への調整後の発酵温度のピークは、図7に示すとおり、いずれの試験区も44℃前後で大きな差はなかった。一方で、時間あたり積算温度は、図8に示すとおり、水分70%への調整が遅れるほど低下する傾向にあった。

なお、試験期間中の実験室内の平均気温は、13.4℃(最低9.9℃、最高18.5℃)であった。

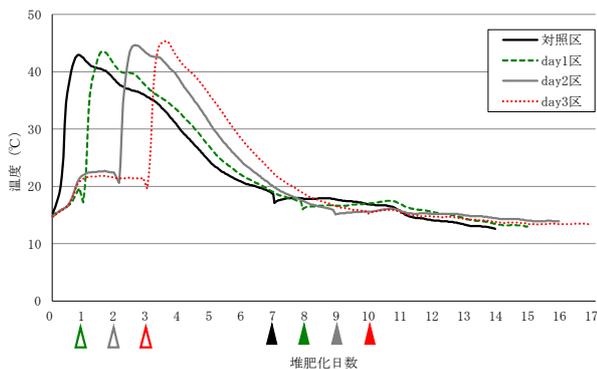


図7 発酵温度の推移(タイムリット・冬季)

※図中の△は水分再調整を、▲は切り返しを行ったことを示す。

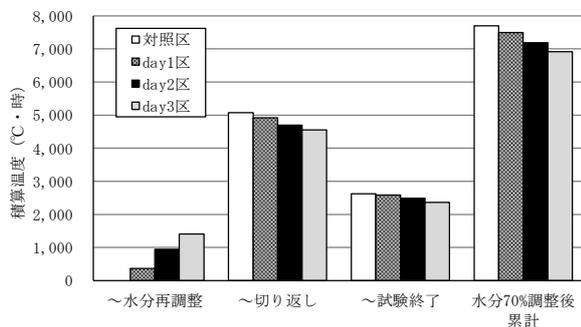


図8 時間あたり積算温度の推移(タイムリット・冬季)

アンモニアガスは、図9に示すとおり、水分70%への調整が遅れるほどピーク後の濃度が高く推移する傾向にあった。

また、臭気指数相当値についても、図10に示すとおり、同様の傾向がみられた。

なお、いずれも試験1-1の結果ほど明確ではなかったものの、day1区とday2区及びday3区に大きな差がみられた。

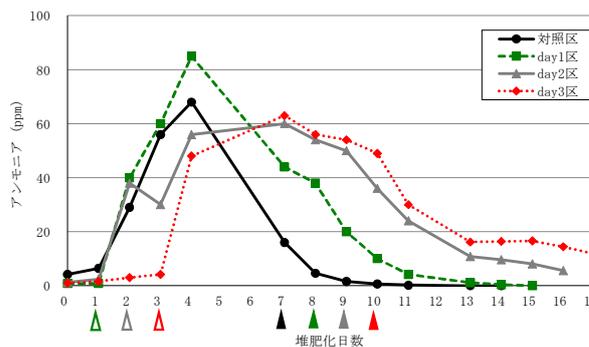


図9 アンモニアガス濃度の推移(タイムリット・冬季)

※図中の△は水分再調整を、▲は切り返しを行ったことを示す。

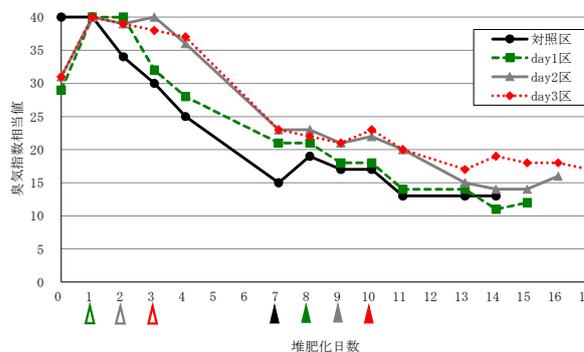


図10 臭気指数相当値の推移(タイムリット・冬季)

※図中の△は水分再調整を、▲は切り返しを行ったことを示す。

試験終了時のpHは、図11に示すとおり、対照区及びday1区に対してday2区及びday3区が高くなった。

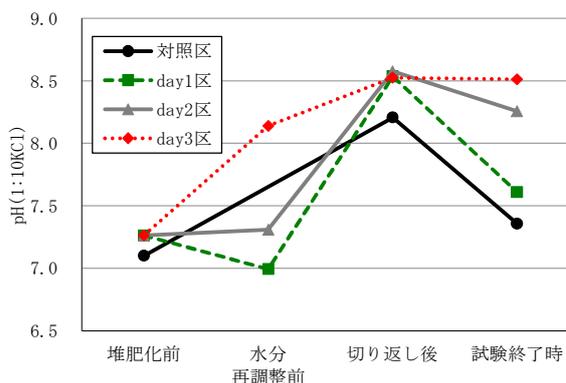


図11 pHの推移(タイムリット・冬季)

また、図12に示すとおり、対照区及びday1区では、試験終了時の無機態窒素の硝化が他の2区よりも進行していた。なお、対照区以外の試験区において、水分再調整前の窒素成分が堆肥化前よりも大幅に高くなった原因については特定できなかった。

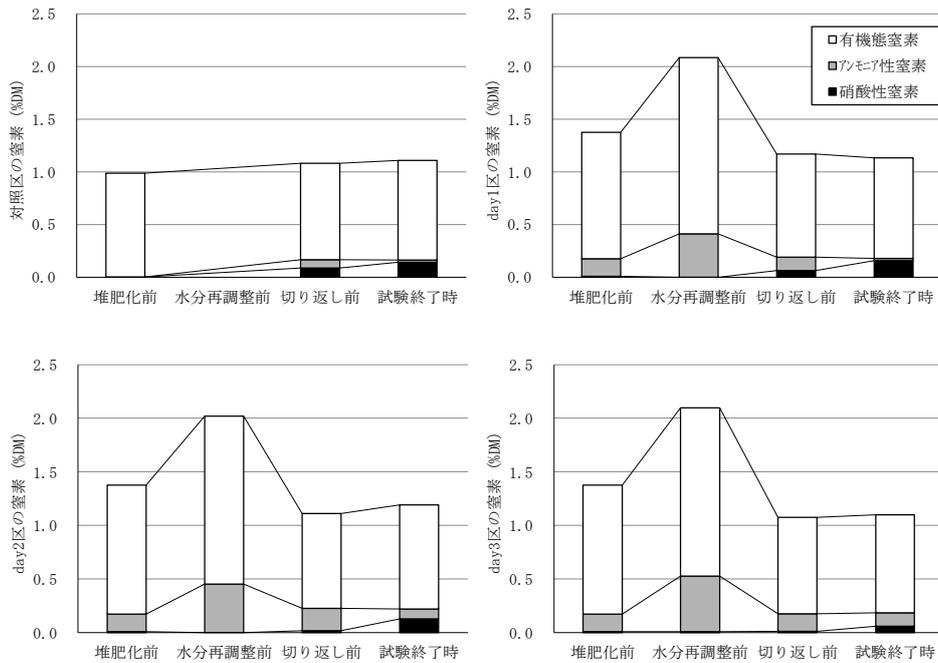


図 12 窒素成分の推移(タイムリミット・冬季)

試験 2 高水分堆肥化物の再処理技術の検討

図 13 及び図 14 に示すとおり、米ぬか区の発酵温度は水分再調整後から 25 日目まで最も高く推移し、時間あたり積算温度も最も高かった。また、オガクズ増量区及び戻し堆肥区の発酵温度は、水分再調整から 1 回目の切り返しまでの間、対照区より高く推移した。

なお、試験期間中の実験室内の平均気温は、8.2℃(最低 3.6℃、最高 12.6℃)であった。

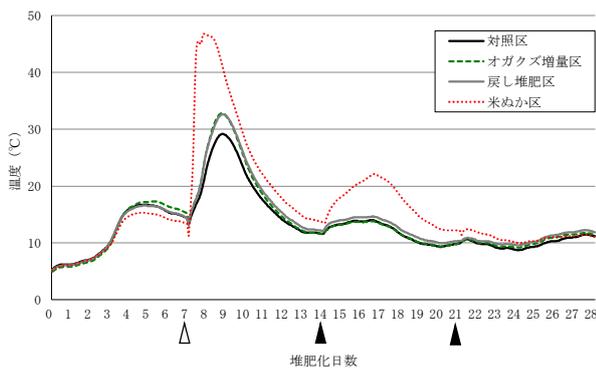


図 13 発酵温度の推移(再処理)

※図中の△は水分再調整を、▲は切り返しを行ったことを示す。

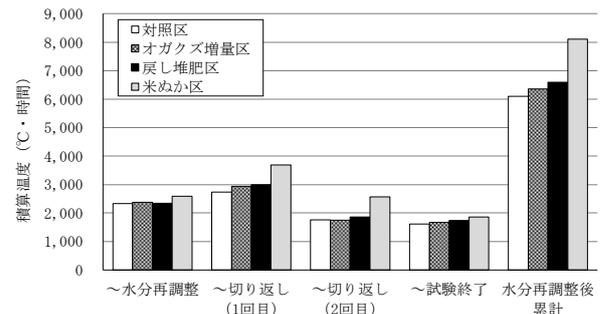


図 14 時間あたり積算温度の推移(再処理)

図 15 及び図 16 に示すとおり、米ぬか区は水分再調整の翌日からアンモニアガス濃度が低く抑えられ、アンモニアガスの発生量が最も低かった。オガクズ増量区及び戻し堆肥区は 1 回目の切り返しの前後にアンモニアガス濃度が対照区より高くなったものの、その後は対照区より低い濃度で推移した。

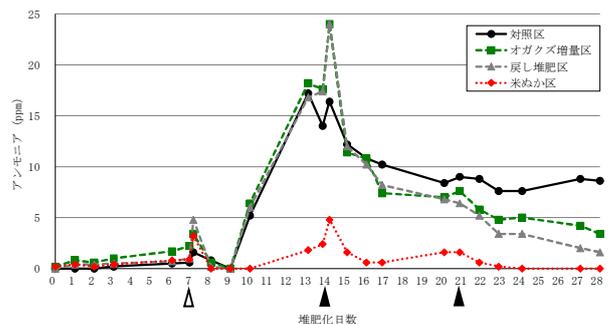


図 15 アンモニアガス濃度の推移(再処理)

※図中の△は水分再調整を、▲は切り返しを行ったことを示す。

一方で、硫化水素ガス濃度及び臭気指数相当値は、試験区間でほとんど差がなかった(図表省略)。

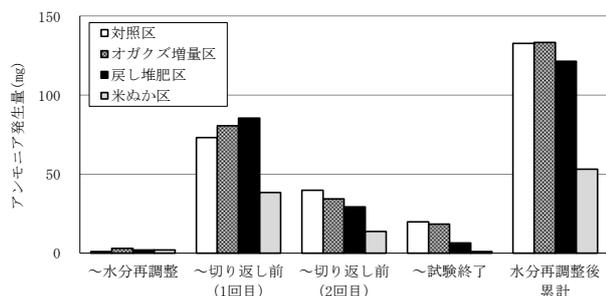


図 16 アンモニアガス発生量の推移(再処理)

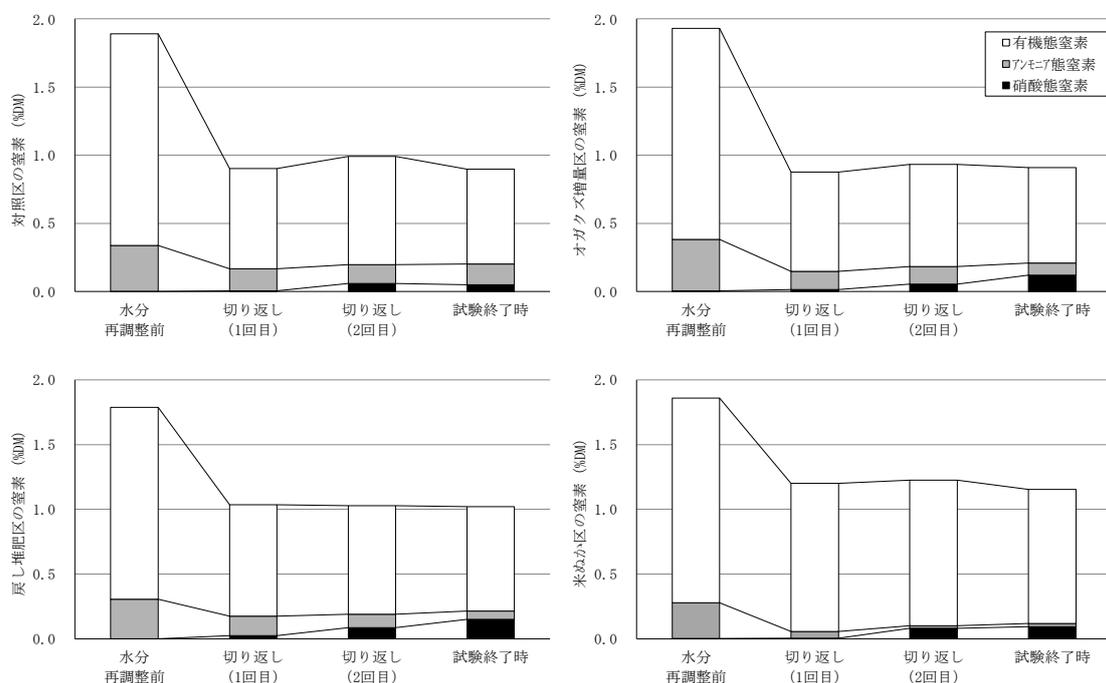


図 17 窒素成分の推移 (再処理)

考 察

試験 1 の結果、水分 80%の高水分で堆肥化を開始した場合であっても 3 日以内に水分再調整を行えば、堆肥化前に適切な水分調整が行われていた場合と遜色のない発酵温度のピークが得られることが確認された。ただし、時間あたりの積算温度は水分再調整が遅れるほど低下した。

また、水分再調整後に発生するアンモニアガス及び臭気指数相当値の上昇を抑えるためのタイムリミットは、季節を問わず堆肥化開始後 1 日以内であることが示唆された。

ただし、冬季における悪臭の改善効果は、夏季よりも小さいことも示唆された。

図 17 に示すとおり、対照区以外の試験区では、試験終了時に対照区よりも窒素成分の硝化が進行した。なお、戻し堆肥区及び米ぬか区の全窒素の増加は、追加混合した発酵助材の窒素量と概ね一致していた。

窒素成分を除く肥料成分等は、対照区と比較して米ぬか区及び戻し堆肥区の pH が低くなったほかは、試験区間で大きな差はなかった(図表省略)。

なお、試験 1 に準じて水分再調整を 7、14 または 21 日目に行った試験(以下、長期試験)でも水分再調整後の発酵温度のピークは堆肥化前に適切な水分調整が行われていた場合と遜色がなかった。ただし、水分再調整後に発生するアンモニアガスの濃度及び臭気指数相当値は、いずれも対照区より高くなった。

藤田⁵⁾は堆肥化に影響をおよぼす因子として、有機物含有率、水分、pH、C/N 比、粒度、酸素濃度、発酵温度及び種付け(微生物)をあげている。乳牛ふんを主原料とする堆肥化では有機物含有量及び C/N 比が堆肥化の阻害要因となることはないと考えられるため、試験 1 では、水分を 80%に設定した上で、pH、発酵温度及び微生物の多様度の変化が嫌気化進行の目安にならないか検討した。

pH について、藤田⁵⁾は、嫌気性発酵の進行により有機酸が生成・蓄積されて pH が 5 以下になることで堆肥化がほぼ停止するとしているが、本試験では、予備試験や長期試験も含めて pH が 6.9 を下回る試験区はなかった。窒素含有量が多いため C/N 比が比較的低い家畜排せつ物は、堆肥化の進行に伴ってアンモニアが生成されるため、嫌気化が始まっても pH が下がりにくかったのではないかと推察された。

また、一般細菌相及び糸状菌相のシャノン・ウィナー多様度指数に試験区間で大きな差は認められず、電気泳動像にも嫌気化に特徴的なバンドの発現は確認できなかった(図表省略)。

一方で、試験 1 での発酵温度の昇温到達時間に着目すると、表 4 及び表 5 に示すとおり、70% に水分調整された堆肥化物は 11 時間以内に発酵温度が 20℃以上昇温し、その後も 24 時間以上昇温が持続することが確認された。このことは、予備試験及び長期試験でも同様であった。ただし、試験 2 で見られたように、冬季の気温が低い時期に堆肥化物の温度が 10℃を下回るような状況では、70%に水分調整しても 20℃以上の昇温に至らない場合もある。

すなわち、厳冬期以外の期間であれば、各堆肥化施設ごとに堆肥化開始後決まった時間までに一定の温度まで昇温しなければ嫌気化する危険性が高いという指標を作ることにより、日常の発酵温度の確認のみで嫌気化を未然に防ぐことができることが示唆された。

表 4 発酵温度の昇温到達時間
(タイムリット・夏季)

試験区 (設定水分)		(単位:時間)			
		10℃ 昇温	20℃ 昇温	30℃ 昇温	20℃以上の昇温 持続時間
対照区	堆肥化開始後 (70%)	4	8	—	40
day1区	堆肥化開始後 (80%)	23	—	—	—
	水分再調整後 (70%)	2	4	—	30
day2区	堆肥化開始後 (80%)	12	—	—	—
	水分再調整後 (70%)	3	4	11	47
day3区	堆肥化開始後 (80%)	16	—	—	—
	水分再調整後 (70%)	3	6	—	43

表 5 発酵温度の昇温到達時間
(タイムリット・冬季)

試験区 (設定水分)		(単位:時間)			
		10℃ 昇温	20℃ 昇温	30℃ 昇温	20℃以上の昇温 持続時間
対照区	堆肥化開始後 (70%)	9	11	—	63
day1区	堆肥化開始後 (80%)	—	—	—	—
	水分再調整後 (70%)	3	6	—	43
day2区	堆肥化開始後 (80%)	—	—	—	—
	水分再調整後 (70%)	3	6	—	33
day3区	堆肥化開始後 (80%)	—	—	—	—
	水分再調整後 (70%)	4	6	—	29

試験 2 の結果、冬季における水分再調整時の米ぬかの追加混合により、その後の発酵温度の上昇と少なくとも 3 週間はアンモニアガス濃度が抑制されることが示唆された。また、米ぬかよりも効果は小さかったものの、オガクズの増量または戻し堆肥の追加混合による発酵温度の改善も示唆された。

発酵助材の追加混合には、発酵のエネルギー源となる有機物の追加、通気性の改善、微生物の追加等の効果が期待される。試験 2 の結果から、高水分堆肥化物の適切な再処理を行うためには、夏季であれば通気性の改善のみで十分であること、冬季であれば通気性の改善に加えて易分解性の有機物の追加も必要であることが示唆された。

鶏ふん等の表面に米ぬかを散布してアンモニアの吸着能力を評価した高橋ら⁶⁾の報告によると、米ぬかは散布 1 時間後から 6 日目の試験終了までアンモニアの発生を大きく抑制した。本試験においても、米ぬかの追加混合後しばらくはアンモニアガスの吸着が起きたと思われるが、一般的に吸着には物理的な限界があるため、その効果は短期間と推察された。乳牛ふん堆肥化時のアンモニア揮散の要因について検討した前田ら⁷⁾は、材料中のアンモニア性窒素量がアンモニア揮散量の増加に大きな影響をおよぼしていたと報告している。本試験では、米ぬかの追加混合により硝化が促進され、アンモニア性窒素量が早々に低位安定化したため、長期間にわたってアンモニアガスの発生が抑制されたと推察された。

微生物の追加による発酵促進効果を期待した戻し堆肥区は、オガクズ増量区と比較して若干アンモニアの発生量が低下したものの、そのほかの調査項目に大きな差は認められなかった。

福本⁸⁾は亜硝酸酸化細菌を含む豚ふん由来の完熟堆肥を同堆肥化物に追加混合することにより一酸化二窒素の発生を大きく抑制できることを報告しており、微生物の追加により堆肥化の改善を図ることは可能と考えられる。現状では、微生物の追加混合による高水分堆肥化物の再処理について公表されている知見がないことから、今後もさらなる情報の収集と検討が必要と思われる。

本試験において、堆肥化前の水分調整の失敗による堆肥化物の嫌気化は、日々の発酵温度の確認で把握することが可能であり、堆肥化開始後の水分再調整及び発酵助材の追加混合によりある程度まで好気発酵を回復できることが示唆

された。しかしながら、水分再調整後に悪臭が高まるリスクがあることも示唆されており、あくまでも堆肥化前に適切な水分調整を確実に行うことが基本である。

文 献

- 1) 古谷修・伊澤俊彦・本多勝男・長峰孝文(2007) : 家畜ふん堆肥の基礎から販売まで～100問100答～.
- 2) 農林水産省(2021) : 生鮮野菜を衛生的に保つために -栽培から出荷までの野菜の衛生管理指針-(第2版).
- 3) 財団法人 日本土壌協会(2010) : 堆肥等有機物分析法(2010年版).
- 4) 農業環境技術研究所(2010) : PCR-DGGEによる土壌細菌・糸状菌相解析法 Ver. 3.3.
- 5) 藤田賢二(1993) : コンポスト化技術 -廃棄物有効利用のテクノロジー-.
- 6) 高橋俊夫・中村謙昭・古本史(2003) : 米ぬか等を利用した家畜ふんと堆肥の脱臭, 広島畜技セ研報, 第13号, 72-76.
- 7) 前田武己、松田従三(1998) : 家畜糞の堆肥化におけるアンモニア揮散(第1報)-アンモニア揮散の要因の検討-, 農業機械学会誌, 60(6), 63-70.
- 8) 福本泰之(2008) : 亜硝酸酸化細菌の添加による家畜ふん堆肥化処理過程での N_2O の発生制御, 畜産技術, 平成20年7月号(第638号), 23-26.