

放射性セシウムに汚染された牧草等の 牛ふん堆肥化処理での副資材利用



農研機構 畜産研究部門

宮城県 登米市 産業経済部 農産園芸畜産課

2019年3月

はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、原発事故）に由来する放射性セシウム（以下、RCs）に汚染された牧草や堆肥（以下、汚染牧草等）の一部は、8年を経過した現在でも未だに一時保管されたままの状態にあり、地域によってはこれら汚染牧草等の取り扱いが問題として残されています。

汚染牧草等は、一時保管中に乾燥が進み含水率が低下したものも多く含まれており、牛ふん等の堆肥化処理で不足している水分調整用の副資材として有効利用できる可能性があります。一方で、汚染牧草等を副資材として利用した際の堆肥原料の腐熟化や仕上がった堆肥の品質を調査した事例は少なく、汚染牧草等の副資材利用については堆肥化試験などを通じてその有効性・安全性を確認する必要があります。

また、汚染牧草等の腐熟化過程では微生物による有機物分解や発酵熱による水分蒸発が進むため、減量によりRCsが濃縮されてその濃度が高まることが留意点として指摘されています。RCsを含む肥料や土壌改良資材、培土の暫定許容値は製品質量あたり400 Bq/kg以下とされていますので、汚染牧草等を副資材利用した堆肥のRCs濃度を400 Bq/kg以下に管理するための方法も必要です。

このような状況の中で、汚染牧草の副資材利用を検討している宮城県登米市が農研機構に技術支援を求めたことを契機にして、農研機構畜産研究部門（2018年7月の農研機構の組織改編のため、一部の課題担当者が中央農業研究センターへ異動）と宮城県登米市は、「農林業系汚染物の農業用資材としての再生利用方法の検討・開発」に関する協定研究を実施し、原発事故後から登米市で一時保管されている汚染牧草等を堆肥化副資材として利用する方法について検討してきました。

この度、協定研究で得られた研究成果について、汚染牧草等を家畜ふんの堆肥化副資材として有効利用することを検討している地方自治体等が参考にできるよう技術リポートとして取りまとめて公表することにいたしました。協定研究を分担した登米市に加え、同じ問題を抱える地域にとっても本研究成果が問題解決の一助となれば幸いです。

2019年3月

著者一同

放射性セシウムに汚染された牧草等の牛ふん堆肥化処理での副資材利用

目次

はじめに	1
第1章 小型堆肥化試験装置を使った汚染牧草等の副資材利用のための調査	4
1-1. 方法	
1-1-1. 堆肥化条件	4
1-1-2. 堆肥原料	5
1-1-3. 堆肥化試験装置	6
1-2. 結果と考察	
1-2-1. 堆肥化初期の温度変化	7
1-2-2. 調査前後の乾物分解率と放射性セシウム濃度の変化	8
1-3. 第1章のまとめ	8
第2章 堆肥化施設での汚染牧草等の副資材利用のための調査	9
2-1. 方法	
2-1-1. 堆肥化施設と堆肥化条件	9
2-1-2. 堆肥原料	10
2-1-3. 測定項目	11
2-2. 結果と考察	
2-2-1. 堆肥化過程の温度変化	12
2-2-2. 堆肥化過程での含水率の変化と乾物分解率	12
2-2-3. 堆肥化過程での質量と放射性セシウム濃度の変化	14
2-2-4. 仕上り堆肥の品質	15
2-3. 第2章のまとめ	16

第3章 汚染牧草等を副資材利用した場合の堆肥の生産管理	・ ・ ・ ・ ・	17
3-1. 堆肥化方法の概要	・ ・ ・ ・ ・	17
3-2. 堆肥原料の前処理		
3-2-1. 牛ふんと副資材の混合割合の計算	・ ・ ・ ・ ・	18
3-2-2. 汚染牧草の細断作業	・ ・ ・ ・ ・	19
3-2-3. 牛ふんと副資材の質量測定	・ ・ ・ ・ ・	20
3-2-4. 牛ふんと副資材の混合作業	・ ・ ・ ・ ・	20
3-3. 堆肥化過程の水管理	・ ・ ・ ・ ・	21
3-4. 堆肥化処理に伴う作業環境の評価	・ ・ ・ ・ ・	22
3-5. 第3章のまとめ	・ ・ ・ ・ ・	23
引用文献	・ ・ ・ ・ ・	24
堆肥のほ場施用に参考となる資料	・ ・ ・ ・ ・	24
粉じん対策に参考となる資料	・ ・ ・ ・ ・	24
おわりに	・ ・ ・ ・ ・	25
著者一覧	・ ・ ・ ・ ・	26

第1章 小型堆肥化試験装置を使った汚染牧草等の副資材利用のための調査

家畜ふんの堆肥化処理では、堆肥原料の通気性や含水率、C/N比や微生物相など家畜ふんの物理性、化学性、生物性を改善する目的でオガクズやモミガラ、戻し堆肥などが副資材として利用される。しかしながら、東京電力福島第一原子力発電所事故後から長期間保管されていた汚染牧草等を堆肥化副資材として利用するケースを想定し、副資材に求められるこのような機能を発揮できるか検討した事例は少ない。

また、堆肥化過程では微生物による有機物分解や発酵熱による水分蒸発が進むため、堆肥の質量が減少することで汚染牧草等に由来するRCsが濃縮されてその濃度が高まることが考えられることから、堆肥化過程によりRCsはどの程度変化するのか確認する必要がある。

そこで、汚染牧草等を副資材として利用した場合の堆肥化の可否や堆肥化前後のRCs濃度の変化を調査するため、登米市に一時保管されている汚染牧草等を牛ふんの堆肥化副資材として供した堆肥化試験を実施した。なお、堆肥化過程における堆肥の温度や質量、物性等の経時的な変化や堆肥の品質については第2章の実施設での堆肥化試験で検討することとして、ここでは、副資材の種類や外気温など様々な条件下での堆肥化反応を調べることを目的とした。

1-1. 方法

1-1-1. 堆肥化条件

試験区については、牛ふんにオガクズを混合した処理を対照区とし、①牛ふんに汚染牧草を混合、②牛ふんに汚染堆肥を混合、③牛ふんに汚染牧草と汚染堆肥を混合した3処理を設定した。対照区を含めたこの4試験区について、試験開始後4日間の堆肥化初期の発酵温度の立ち上がりを調査した。いずれも平均外気温が20℃以上の高温条件と6℃以下の低温条件で堆肥化試験を行った

また、乾物分解率を算出できた条件については、堆肥の温度変化の調査後も3~4日毎に堆肥原料の攪拌・均一化を行う繰り返し作業とコンプレッサによる強制通気を継続し、約10日後に堆肥化試験を終了して、堆肥の質量や含水率、粗灰分やRCs濃度を測定した。なお、乾物分解率については、後述の第2章の堆肥化試験と同様に調査前後で灰分量は不変と考えて式1により算出した。

$$\text{乾物分解率} : D_d (\%) = (1 - A_0/A_f) \times 100 \quad \dots \quad \text{式1}$$

ただし、 A_0 : 堆肥化前の粗灰分 (%DM)、 A_f : 堆肥化後の粗灰分 (%DM)

1-1-2. 堆肥原料

供試した堆肥原料は、農研機構那須塩原事業場（以下、事業場）の肉用繁殖牛舎から出された牛ふん、登米市で一時保管されている汚染牧草および汚染堆肥とした。汚染牧草はオーチャードグラスを主体にした牧草が長いままロール状に成型されていたことから、事業場にある飼料用カッターで5~10 cm長に細断してから試験に供した（表1、写真1）。

牛ふんに事業場で使用しているオガクズを混ぜた対照区については、畜産現場で一般的に行われているように、牛ふん1に対し、オガクズ2（容積比）を混合して後述の反応槽に充填したところ、堆肥原料のかさ密度が0.3~0.4 kg/Lとなったことから、後述の3つの試験区についてもこのかさ密度を目安にして牛ふんと副資材を混合して反応槽に充填した。特に、乾いた状態の汚染牧草や汚染堆肥を供した試験区では含水率が低くなる傾向にあったことから、適正な発酵が見込まれる含水率50%以上になるよう適宜加水してから反応槽に充填したところ、対照区を除くすべての試験区で堆肥化前の含水率は50~66%となった（図1、表2）。

表1 供試した堆肥原料の性状

	含水率 %	有機物 %DM	粗灰分 %DM	¹³⁴ Cs *1 Bq/kg	¹³⁷ Cs*1 Bq/kg	RCs 濃度 *1 Bq/kg
牛ふん *2	81.9	81.2	18.8	1.7 (0.3)	11.9 (0.4)	13.6
牧草 *3	12.8	92.0	8.0	8.4 (1.4)	59.7 (1.5)	68.1
堆肥 *4	24.3	62.8	35.0	5.8 (1.2)	46.5 (1.2)	52.3
	59.7	65.0	37.2	46.6 (5.5)	329 (5.9)	376

*1 ゲルマニウム半導体検出器によって測定（同位体研究所に分析依頼）、濃度は2017/10/1へ減衰補正したもので、カッコ（）内は定量下限値 *2 那須塩原事業場の肉用繁殖牛舎で入手、*3 登米市の農家で一時保管されていたもの、*4 登米市の堆肥センターで一時保管されていたもの2か所から入手



現物比で牛ふん1に対し、副資材を1~3



均一に手で混合、必要に応じて加水、含水率は50~66%



かさ密度0.3~0.4 kg/Lを目安に反応槽（11 L）へ充填

写真1 堆肥原料の調整作業の手順

1-1-3. 堆肥化試験装置

供試した堆肥化試験装置は、11Lの反応槽に堆肥原料を充填する小型の装置であり、堆肥化試験中は常に堆肥1L当たり20L/分の強制通気を行った（写真2）。

一般的に、堆肥化装置が小型になるほど反応槽の比表面積が大きく放熱が過大となって有機物分解に伴う発酵温度を観察することは困難になる。しかし、この装置の場合は反応槽が温度調節庫内に設置され、しかも庫内の温度は堆肥原料の温度を追従するように制御されることから、堆肥原料から周囲への放熱を最小限に留めて実施での堆肥化処理による温度変化をよく再現できる。この堆肥化試験装置を用いて、汚染牧草等を副資材として利用する場合の初期の堆肥化過程を模擬的に再現した。

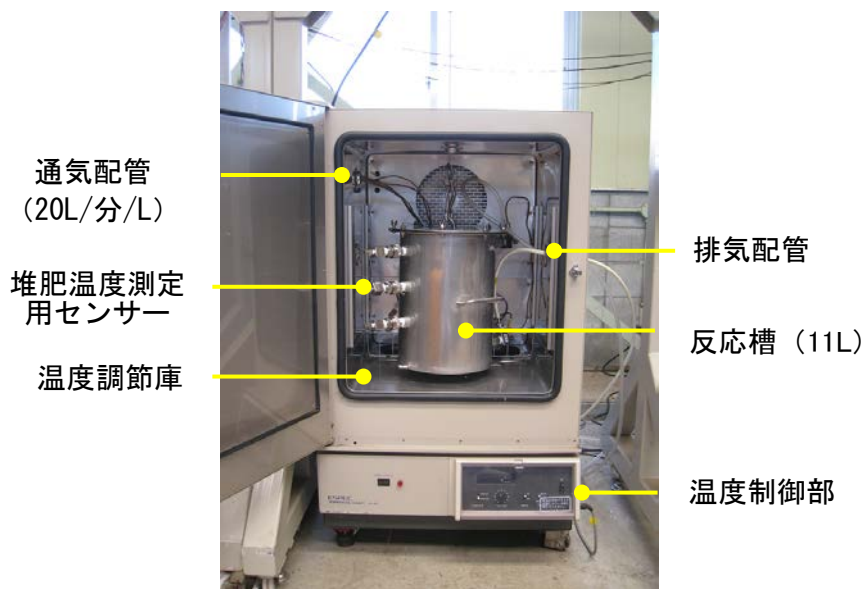


写真2 温度調節庫内に反応槽が設置された小型堆肥化試験装置

1-2. 結果と考察

1-2-1. 堆肥化初期の温度変化

図1に調査開始から3~4日間の堆肥温度を示した。高温条件では、いずれの副資材も発酵温度は速やかに立ち上がり、1~2日までにピークに達する一般的な堆肥化処理での温度変化¹⁾を示した(実線グラフ)。一方で、低温条件では、対照区も含めて緩慢な温度上昇となりピークに達しない試験区も見られた(破線グラフ)。低温条件下では対照区でも温度上昇は緩慢であったことから、これらの試験区で温度上昇に時間を要した原因は、副資材の影響というよりも外気温(通気温度)が低いことによる影響と思われる。

いずれにせよ、すべての試験区で発酵温度の目安とした雑草種子が不活化される60℃以上にまで昇温しており、発酵温度の面からは汚染牧草等は副資材として問題なく利用できると考えられた。

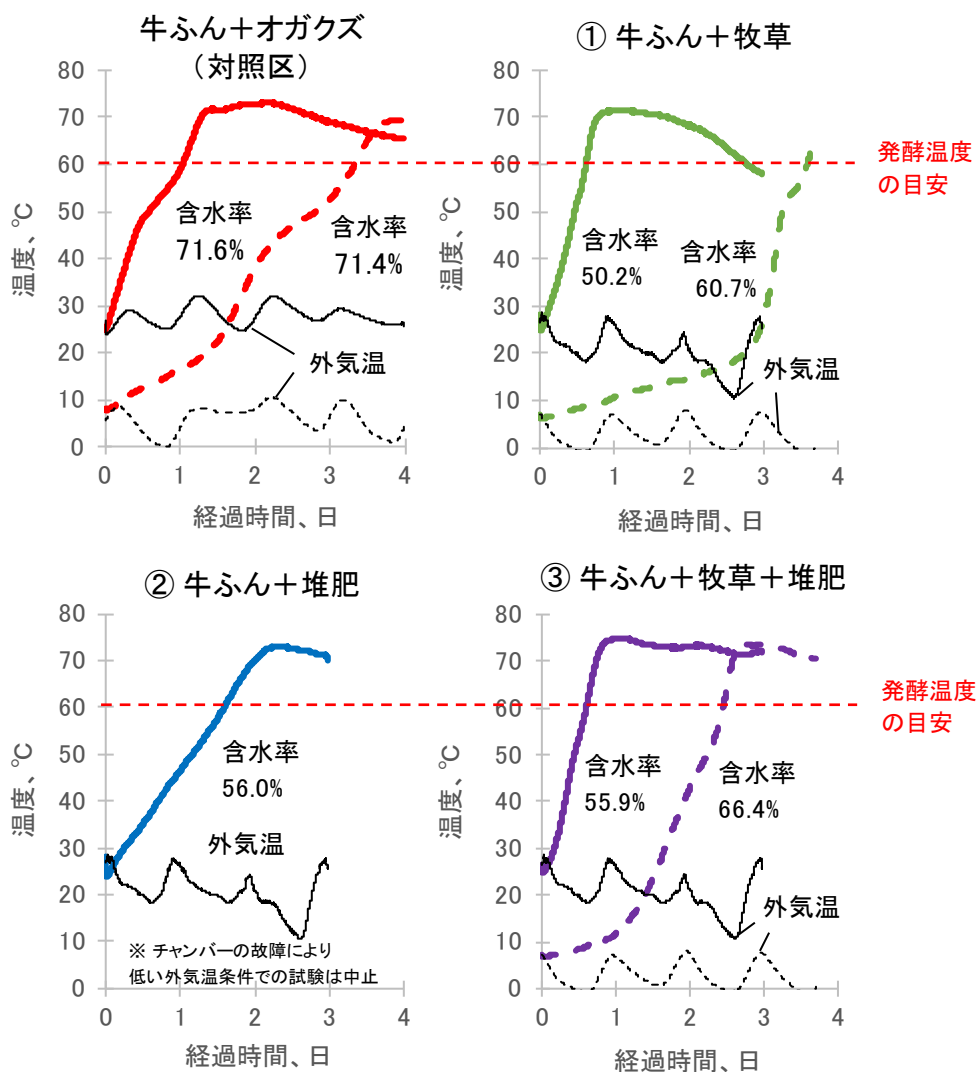


図1 堆肥化初期の発酵温度の立ち上がり状況

1-2-2. 調査前後の乾物分解率と放射性セシウム濃度の変化

表2に調査前後の堆肥の含水率等の物性や乾物分解率、RCs濃度を示した。堆肥の質量は水分蒸発や乾物分解によっていずれの試験区でも減少した。乾物分解率は約10日間で7~12%であり、指導書¹⁾にある一般的な乾物分解率(1日当たり0.8~1.2%程度)とほぼ同じであった。

調査前の堆肥原料のRCs濃度は暫定許容値(400 Bq/kg)以下であり、10日間程度の堆肥化試験ではRCs濃度の変化は小さく調査後のRCs濃度についてもいずれの試験区も暫定許容値以下に収まった。ただし、②と③については、堆肥の質量が減少することでRCsが濃縮されて、堆肥化後のRCs濃度が高まる傾向がみられた。

表2 調査前後の性状変化

試験区		質量	含水率	有機物	粗灰分	乾物分解率	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	RCs濃度
		kg	%	%DM	%DM	%	*1 Bq/kg	*1 Bq/kg	Bq/kg
対照 *2	堆肥化前	4.01	71.6	92.8	7.2	8.1	2.7 (0.6)	15.2 (0.7)	18.0
	堆肥化後	3.45	69.5	92.2	7.8		2.2 (0.7)	14.9 (0.7)	17.2
① *2	堆肥化前	2.19	60.7	92.9	7.1	7.6	8.1 (1.0)	54.1 (1.3)	62.2
	堆肥化後	1.84	52.9	92.4	7.6		7.9 (1.8)	53.8 (1.7)	61.7
② *2	堆肥化前	4.95	56.0	67.9	32.1	7.3	16.4 (2.4)	113 (2.7)	129
	堆肥化後	4.44	50.8	66.2	33.8		18.6 (3.2)	145 (3.3)	164
③ *2	堆肥化前	3.59	66.4	76.6	23.4	11.5	9.5 (2.7)	59.7 (2.3)	69.2
	堆肥化後	3.02	62.4	74.3	25.7		9.1 (2.1)	70.0 (1.8)	79.1

*1 ゲルマニウム半導体検出器によって測定(同位体研究所による分析)、濃度は2017/10/1へ減衰補正したもので、カッコ()内は定量下限値 *2 対照と②(牛ふんに汚染堆肥を混合)は図1の高温条件、①(牛ふんに汚染牧草を混合)と③(牛ふんに汚染牧草と汚染堆肥を混合)は低温条件の測定値

1-3. 第1章のまとめ

登米市に一時保管中の汚染牧草や汚染堆肥を牛ふんの堆肥化副資材に用いた場合、堆肥化初期の発酵温度は60℃以上に達し、約10日間の堆肥化により腐熟が進んで堆肥中の乾物が一般的な堆肥化と同等に分解されたことから、汚染牧草等は堆肥化副資材として有効と考えられた。一方で、堆肥化過程での質量減少によりRCs濃度が高まる試験区がみられた。

第2章 堆肥化施設での汚染牧草等の副資材利用のための調査

汚染牧草等を堆肥化副資材に利用した場合の堆肥化の可否や堆肥化過程でのRCs濃度の変化を再確認するため、実施設における堆肥化試験を通じて、発酵温度や物性の経時変化を調査するとともに、仕上がった堆肥の品質を評価した。

2-1. 方法

2-1-1. 堆肥化施設と堆肥化条件

本章で利用した堆肥センターの概要を図2に示した。本堆肥センターには長さ60 m×幅約7 mの2つの切り返しレーンそれぞれにロータリー式攪拌装置が1機ずつ備えられており、約2 mの堆積高さまで攪拌できる。切り返しレーンの土間コンクリートには攪拌装置の進行方向に直行して通気配管の溝が複数切られ、この溝に埋設した多孔管から1レーン当たり6台の送風機で強制通気（1時間毎の間欠通気）が行われる。

図2中に青色で示した2か所に堆肥原料を高さ約2 mに堆積して通気区と無通気区の2試験区を設置し、通気区では、ロータリー式攪拌装置で概ね週に6回の切り返しを行い、堆肥1 m³あたり約100 L/分の強制通気を行った。また、途中で堆肥原料の過乾燥が見込まれたことから、3週目の途中に含水率の変化からそれまでに水分蒸発したと推定された2 tの散水を行った。無通気区についても通気区と同日に切り返しを行ったが、強制通気は行わず、過乾燥も見られなかったことから散水も行わなかった。

2つの試験区の間、または一般管理の堆肥との間は互いに混ざらないよう10 m弱の十分な距離を設けた。また、攪拌後は試験区の堆積形状が崩れて徐々にすそ野が広がったため、1週間に1回のサンプリングを行った後にホイールローダーで各試験区を積み直した。

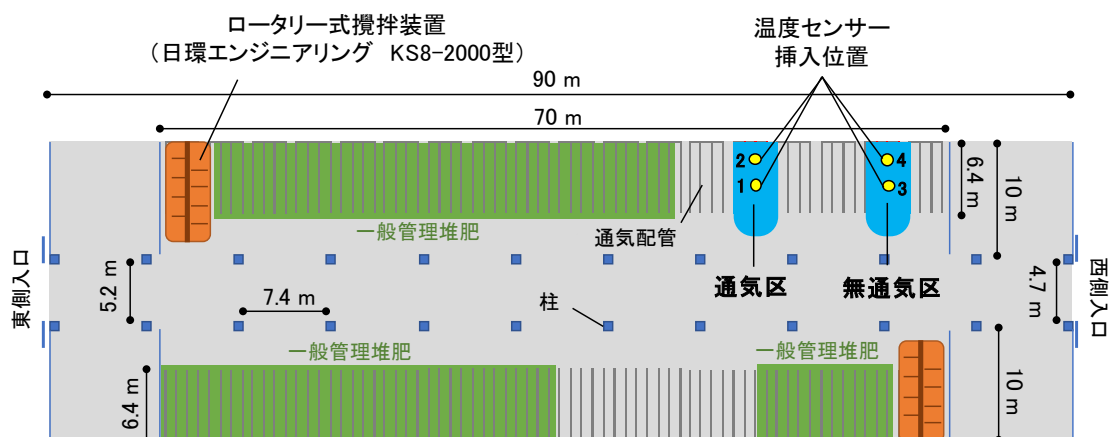


図2 堆肥センターの1次発酵棟の概要

2-1-2. 堆肥原料

供試した堆肥原料は、本堆肥センターで取り扱う乳牛ふんと、登米市内の畜産農家で一時保管している汚染牧草および堆肥センターで一時保管している汚染堆肥とした（表3）。

乳牛ふんは堆肥センター組合員が搬入したもので、牛舎では堆肥センター産の戻し堆肥が敷料として多量に使われているため、乳牛ふんの含水率は第1章の事業場の牛ふんよりも低かった。汚染牧草は第1章で供した牧草と同様に牧草が長いままロール状に成型されていたことから、ベールカッターで細断したものを試験に供した。写真3に混合前の牛ふん、汚染牧草、汚染堆肥の状態を示した。

質量測定については、トラックにバラ積みされた乳牛ふんをトラックスケールで、ロールベールあるいはフレキシブルコンテナに梱包された汚染牧草と汚染堆肥を吊りはかりでそれぞれ測定し、第1章の条件に従い含水率が50～66%の範囲に収まるようにそれぞれ25.2 t、6.4 t、5.7 tを用意した。それぞれの堆肥原料の容積比は概ね2:2:1であったことから、ホイルローダーのバケットでそれぞれ2、2、1杯ずつを掬い取り、これを7回繰り返すことで通気区を堆積した。無通気区についても同様の方法で堆積した。

表3 堆肥センターで実施した堆肥化試験の堆肥原料の供試量と物性

	質量 t	含水率 %	有機物 %DM	¹³⁴ Cs *1 Bq/kg	¹³⁷ Cs *1 Bq/kg	RCs 濃度 Bq/kg
乳牛ふん	25.2	68.3	70.2	ND (0.6)	2.3 (0.7)	2.9 *2
汚染牧草	6.4	42.2	88.1	57 (26.5)	525 (18.7)	582
汚染堆肥	5.7	26.2	65.5	55 (31.5)	502 (26.0)	557
堆肥原料の計算値	37.3	57.4	73.1	-	-	187
通気区	18.0 *3	57.9	72.8	15 (9.7)	170 (9.5)	185
無通気区	17.7 *3	57.9	74.3	16 (13.6)	193 (11.7)	209

*1 ゲルマニウム半導体検出器によって測定（同位体研究所による分析）、濃度は2018/8/25へ減衰補正したもので、カッコ（ ）内は定量下限値 *2 ¹³⁷CsにRCsの定量下限値を足した値 *3 堆肥化前後で灰分量は不変と考えて式2より堆肥化後の質量から推定したもの



写真3 堆肥センターでの堆肥化試験で供した堆肥原料

2-1-3. 測定項目

堆肥化試験は2018年8月25日から9月21日の約4週間実施し、概ね1週間ごとにサンプルを採取した。また、試験終了後から約3週間は通気や攪拌をせずに堆肥をそのまま静置して一時保管し、堆肥化開始から52日目に質量測定とサンプリングを行ったうえで堆肥をフレキシブルコンテナに詰め込んで搬出した。堆肥のサンプリング方法については、農林水産省で公表している「肥料中の放射性セシウム測定のための検査計画及び検査方法(平成24年7月11日一部改正)」に準じ、堆肥の表面10か所から2Lずつ採材して約5Lに縮分した。

採取したサンプルからは、堆肥原料の含水率、粗灰分、RCs濃度を測定し、堆肥化過程では灰分量は不変と考えて式1と式2より乾物分解率と堆肥原料の質量をそれぞれ求めた。また、試験終了時のサンプルについては、堆肥の品質に係る肥料成分や腐熟度に関する分析を行った。

堆肥温度については、2m長のステンレス製の杭に底部から35cm、70cm、90cmの3か所に測温部を設けた温度センサー4本を作成して、2つの試験区のそれぞれ中央と壁際に挿入し、データロガーで1時間毎に温度データを記録した。

$$\text{堆肥原料質量} : M_n = (A \times 100 / A_n) \times 100 / (100 - W_n) \quad \dots \dots \text{式 2}$$

ただし、 A : 堆肥化後の灰分量 (t)、 A_n : n 週目サンプリング時の粗灰分 (%DM)、 W_n : n 週目サンプリング時の含水率 (%)

2-2. 結果と考察

2-2-1. 堆肥化過程の温度変化

図 3 に試験期間中に堆肥の中央部で測定した堆肥温度を示した。通気区では繰り返し毎の変化に加えて、1 時間毎に小刻みに変化しているが、これは間欠通気の影響である。試験期間の前半 2 週間では攪拌ごとに高い時で 70 °C 以上のスパイク状の温度ピークがみられ、堆肥原料の高い位置ほど温度が高くなる傾向にあった。試験期間の後半は週を経るごとに温度ピークが低下した。

一方、無通気区では、通気を行わなかったため 1 時間毎の小刻みな温度変化は見られず、また、試験期間全般にわたり繰り返し毎に堆積上部で 60~70 °C、中底部で 50~60 °C にまで昇温してピークに達する前に切り返される変化を繰り返した。また、通気区と同様に、高い位置ほど温度が高くなる傾向にあった。

このように強制通気の有無によって温度変化のパターンに違いがみられたものの、いずれの試験区でも堆積高さ 2 m のうち、少なくとも 90 cm 以上の位置では、雑草種子が不活化するとされる 60 °C 以上の温度に繰り返し曝すことができた。

2-2-2. 堆肥化過程での含水率の変化と乾物分解率

堆肥原料の含水率の変化について図 4 に示した。通気区の前半 2 週間では、堆肥温度の上昇と強制通気による相互作用で水分蒸発が促進されて含水率が 45% にまで急激に低下した。そのままでは 40 % を下回って過乾燥による発酵の停滞が生じるため²⁾、3 週目の途中で散水したところ、この週の含水率は 50 % に戻り、最終的に 4 週目では 45 % となった。

一方、無通気区の含水率も経時的に減少したが、強制通気による水分の持ち出しがない分だけ通気区に比べて変化の勾配は小さく、試験開始からほぼ直線的に低下して、4 週目には通気区と同じ水準の 46 % となった。

図 5 に示した乾物分解率は、いずれの試験区もほぼ直線的に高まり、最終的に通気区では 21 % (0.8 %/日)、無通気区では 25 % (0.9 %/日) となって第 1 章の結果と同様に指導書¹⁾の範囲内に収まった。通気区は無通気区に比べてやや低く推移したが、これは通気区の堆肥化前半に堆肥原料の含水率が急激に低下して過乾燥になりかけたことが原因と思われる。

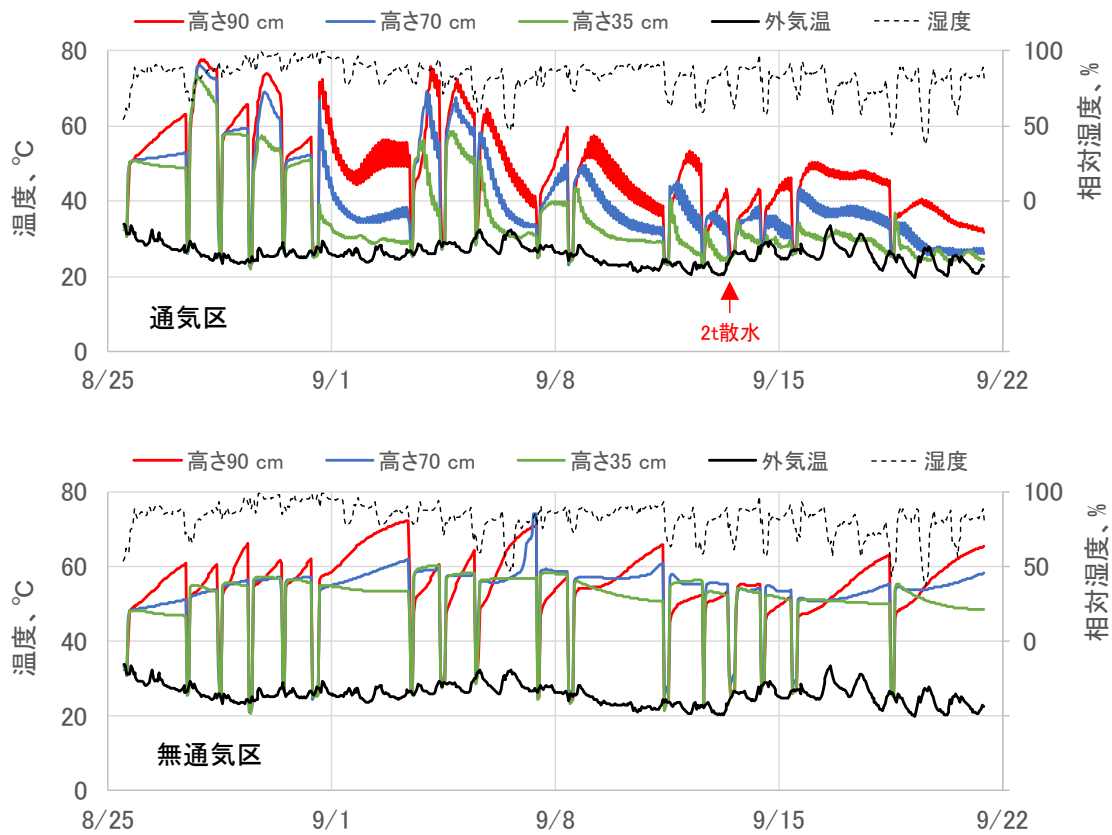


図3 堆肥化過程での堆肥温度の変化

上図が通気区で下図が無通気区。凡例の「高さ」は土間からの堆積高さ。中央の温度変化だけ示しているが、壁際の温度変化も高い位置ほど温度が高くなる同じ傾向を示した。

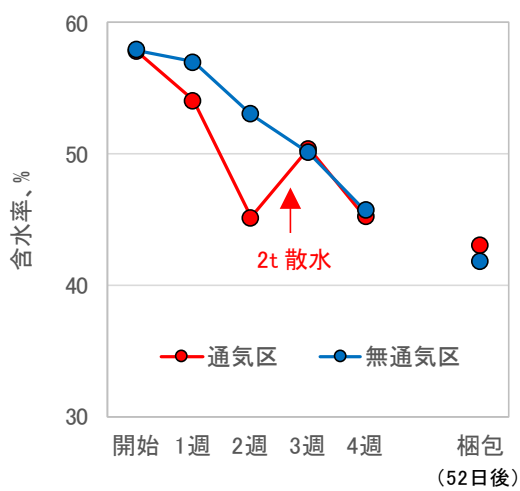


図4 堆肥化期間中の含水率の変化

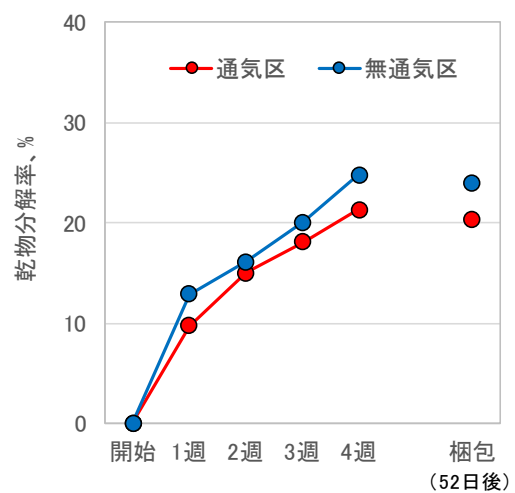


図5 堆肥化期間中の乾物分解率の変化

2-2-3. 堆肥化過程での質量と放射性セシウム濃度の変化

式2により推定した堆肥原料の質量の変化を図6に示した。図4、5で確認した水分蒸発や乾物分解に伴い、通気区では散水により一時的に質量が増加したものの、いずれの試験区でも18 tあった堆肥の質量は4週間で10~11 tとなって4割が減少した。

RCs濃度の変化を図7に示した。通気区では試験開始時に185 Bq/kgであったものが2週目までRCs濃度が上昇し、3週目に散水した後のRCs濃度はほぼ横ばいに推移した。無通気区では当初209 Bq/kgであったものが1週目に原因不明の一時的な低下がみられたものの、2週目以降はほぼ直線的に高まった。試験終了の4週目には通気区と無通気区でそれぞれ243、254 Bq/kgとなり試験開始時に比べて1.3、1.2倍、また、52日後のフレキシブルコンテナでの堆肥出荷時には294、261 Bq/kgとなり1.6、1.3倍に高まったものの、暫定許容値以下に留まった。

これらRCs濃度の高まりは、乾物の分解や水分蒸発による堆肥原料の質量減少のためにRCsが濃縮した結果と考えられた。ただし、乾物分解率や水分蒸発が指導書¹⁾²⁾の範囲内で過度な質量減少が生じなければ、RCs濃度の高まりは暫定許容値以下に留まり限定的であったことから、第3章図9などで示すように前処理の段階で牛ふんと汚染牧草等の混合割合を適切に管理することが重要と考えられた。

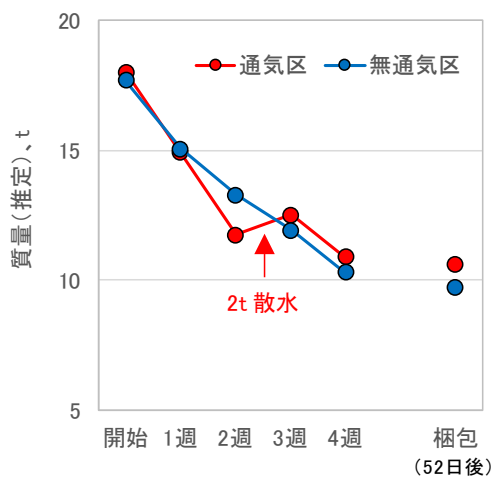


図6 堆肥化期間中の質量（推定）の変化

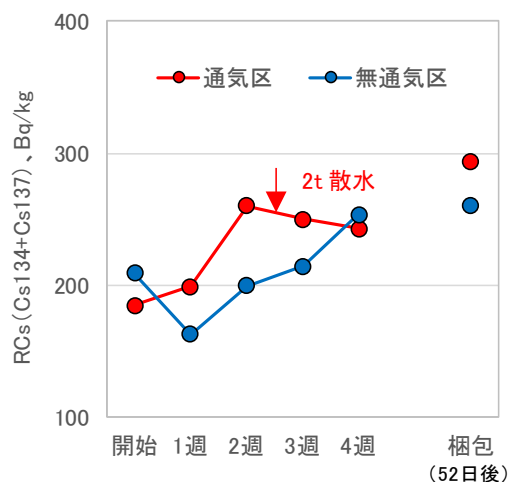


図7 堆肥化期間中のRCsの変化

2-2-4. 仕上り堆肥の品質

いずれの試験区についても堆肥化を始める際には細断した牧草が目立ちふん尿臭が強かったものが、4週後の試験終了時には牧草の質感やふん尿の臭気はほぼ消失し、無通気区ではわずかにアンモニア臭が残ったものの、通気区では土壌臭がする腐熟の進んだ堆肥に仕上がった（写真5）

また、表4に示した堆肥の肥料成分等の分析結果からも、いずれの試験区もC/N比は適正な範囲にあり、コマツナによる植害試験での発芽率が高いことや酸素消費量が低いことなど腐熟の進んだ堆肥に仕上がった。EC やカリが高かったが、これは供した牛ふんに戻し堆肥が入っていたためと思われる。

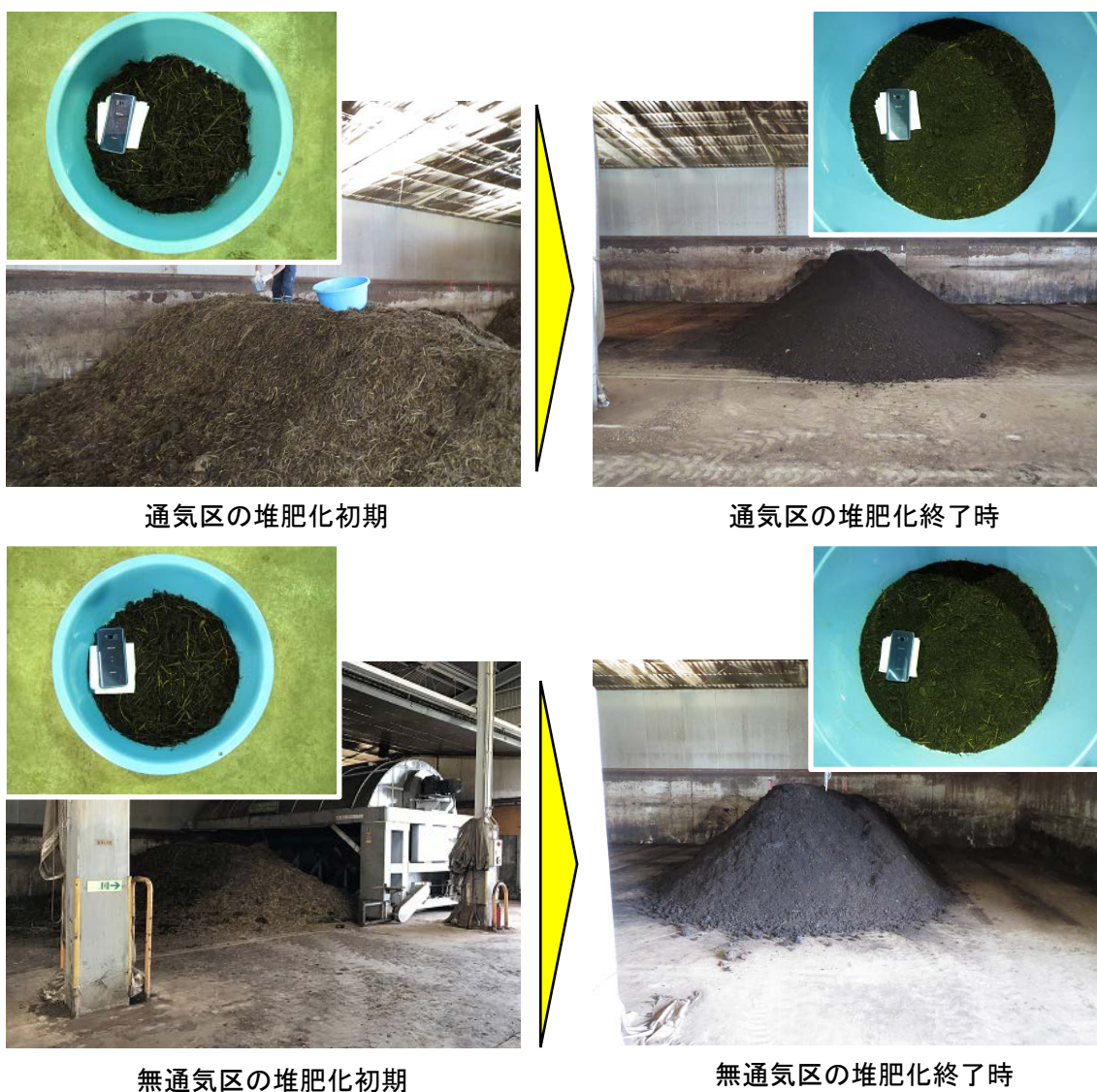


写真5 試験開始時の堆肥原料（左）と見た目の仕上り堆肥（右）

表4 仕上り堆肥の肥料成分等 *1

調査項目		通気区	無通気区	全国平均値 *2
含水率	%	46.7	47.8	52.3±14.0
pH		8.4	8.7	8.6±0.6
EC	mS/cm	7.7	7.2	2.4±1.2
N	% DM	2.4	2.3	2.2±0.7
P ₂ O ₅	% DM	3.3	3.2	1.8±1.1
K ₂ O	% DM	4.5	4.4	2.8±1.2
CaO	% DM	2.8	2.7	4.4±2.2
MgO	% DM	1.6	1.6	1.5±0.8
C/N 比		15.0	15.7	17.6±5.2
発芽率	%	98	98	97±6.5
酸素消費量 *3	μg/g/分	1.3	1.3	1.7±1.3

*1 いずれの項目も(一社)畜産環境整備機構畜産環境技術研究所による分析結果、*2 全国の堆肥センターで生産された乳牛ふん堆肥の成分平均値±標準偏差³⁾、*3 値が 3 以下の堆肥は施用後に土壤中で急激な有機物の分解が起きることはないとする

2-3. 第2章のまとめ

実施設を使用した堆肥化試験を通じて、汚染牧草等を堆肥化副資材に利用しても発酵温度は 60 °C 以上に達し、約 4 週間の堆肥化期間で一般的な牛ふんの堆肥化処理と同等の乾物分解率がみられた。これらのことから、汚染牧草等を副資材に利用しても堆肥化は可能であり、仕上がった堆肥の品質も含めて汚染牧草等の堆肥化副資材利用は問題なかった。

RCs 濃度が堆肥化過程で高くなる現象については、第 1 章と同様にここでも確認され、乾物分解や水分蒸発に伴う堆肥原料の質量減少により堆肥化開始時の RCs 濃度に比べて 4 週後の試験終了時には通気区と無通気区でそれぞれ 1.3、1.2 倍に、フレキシブルコンテナでの堆肥出荷時には 1.6、1.3 倍に高まった。ただし、いずれの試験区も暫定許容値以下であった。

第3章 汚染牧草等を副資材利用した場合の堆肥の生産管理

第2章で取り扱った設備・機械の運用方法や堆肥原料のハンドリングのほか、牛ふんと副資材の混合割合を決定する計算方法など、汚染牧草等を堆肥化副資材利用した場合に必要な知見や参考情報をとりまとめた。

3-1. 堆肥の生産管理の概要

第2章で実施した汚染牧草等を堆肥化副資材に利用した堆肥化方法の概要を図8に示した。堆肥原料を堆肥化可能な状態にする前処理、堆肥の腐熟を促進する堆肥化過程、堆肥の流通・利用の3工程に整理して、それぞれの工程でRCs濃度が暫定許容値以下であることを確認することを除けば、ここで示した堆肥の生産管理方法は現行の指導書¹⁾²⁾で示されている堆肥化方法と変わらない。

具体的には、①前処理では、堆肥原料の含水率のほか、副資材からのRCsの混入も考慮して牛ふんと副資材の混合割合を決定した。②堆肥化過程では、特に夏場の過乾燥により腐熟の停滞を招かないための水分管理(含水率目標値40~50%)を徹底することで、RCsが過度に濃縮することを防止した。③堆肥の流通・利用では、出荷前に堆肥中のRCs濃度が暫定許容値以下であることを最終確認した。

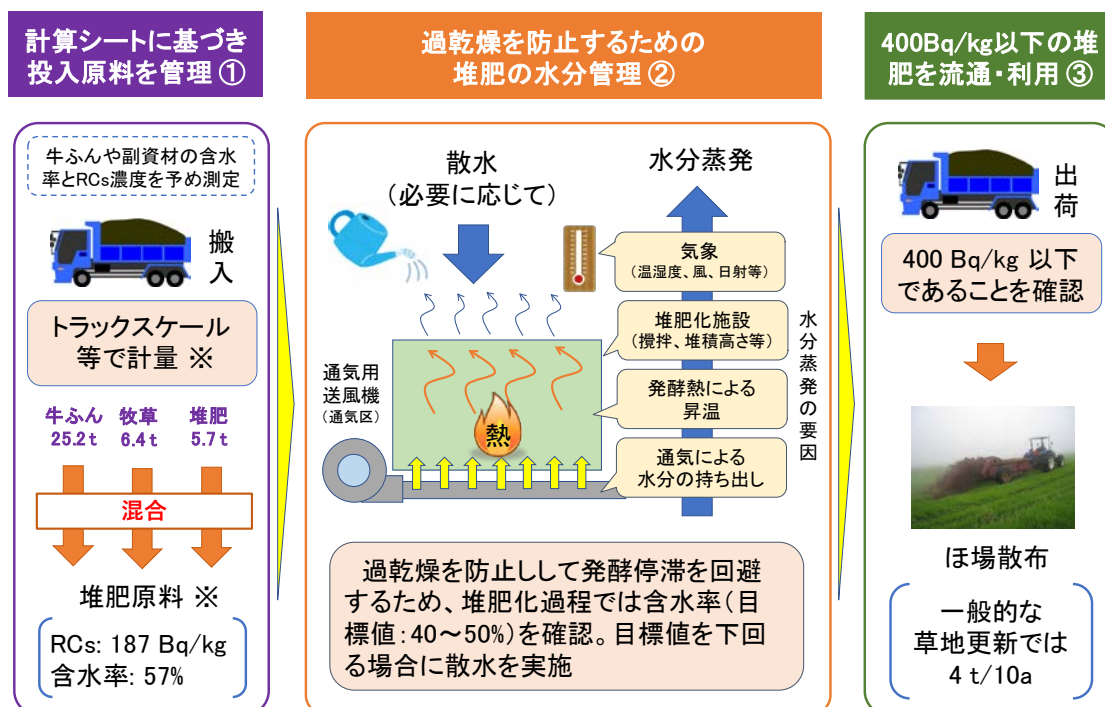


図8 第2章での汚染牧草等を堆肥化副資材に利用した堆肥化処理の流れ

※ 第2章の堆肥化試験のデータをもとに図9の計算シートで求めた値を例示したものであり、実用場面では使用する牛ふんや副資材等によって変化

3-2. 堆肥原料の前処理

3-2-1. 牛ふんと副資材の混合割合の計算

汚染牧草のような草本系の資材を堆肥化副資材として利用するケースが最近では少ないため、第1章で堆肥化可能な含水率は50~66%であることを予備的に調査して、第2章の堆肥センターでの堆肥化試験で確認した。

堆肥原料の含水率は、混合する牛ふんや副資材のそれぞれの含水率と投入量から計算で求められるが、汚染牧草等を利用する場合にはさらにRCs濃度も考慮して混合割合を求める必要があり計算が複雑になる。そこで、第2章では図9に示す計算シートと手順に従って堆肥原料の混合割合を求めた。参考までに、希望者が利用できるようエクセルによる計算シートを巻末に別添した。

計算や確認の手順は図9中の①~⑥に示した通りであり、堆肥化に適する堆肥原料の含水率のほか、目標とする堆肥の含水率や処理方式等に応じた乾物分解率は指導書¹⁾や経験から適切な値を設定することになる。各都道府県や畜産が関連する部署がある農協には畜産環境アドバイザーがいるので、これらの設定項目については必要に応じて専門的な助言を受けることができる。

計算例	質量 t	含水率 %	RCs濃度 Bq/kg
牛ふん(新鮮品)	25.2	68.3	3
オガクズ(新鮮品)		15.0	0
牧草(汚染物)	6.4	42.2	582
堆肥(汚染物)	5.7	26.2	557
堆肥原料の設計値	37.3	57.4	187
目標とする仕上り堆肥 (乾物分解率: 25%)	20.9	43.0	334
① 施設等に応じた安全率を見込んで乾物分解率を設定・入力します			
② 堆肥の原料となる牛ふんや汚染牧草等の測定値を入力します			
③ 堆肥化に適した含水率となる投入量を逐次入力します			
④ 堆肥化に適した含水率か、RCs濃度は暫定許容値以下か計算結果を逐次確認します			
⑤ 目標とする仕上り堆肥の含水率を入力します			
⑥ 自動計算される仕上り堆肥のRCs濃度の試算値が暫定許容値以下か確認します			

← 堆肥化に適する含水率は55-70%¹⁾

← 取扱い性のよい堆肥の含水率は40-50%²⁾

図9 堆肥化処理に適する含水率やRCs濃度を確認するための計算シートとその利用手順
作業手順番号①~⑥の色と同じ色の塗りつぶしたセルは対応関係。③での入力数値は第2章で得られたデータ

3-2-2. 汚染牧草の細断作業

登米市で一時保管している汚染牧草の多くはオーチャードグラスなどの牧草が長いままロールベール状に成型されたものであり、第2章ではこのハンドリングにベールグラブやロールベール用クランプを利用し（写真6）、ベールカッターを用いて汚染牧草を細断した（写真7）。

今回利用したベールカッターの汚染牧草細断時の作業能率は、雑草などの夾雑物も含まれていたことから1.1 t/時（5.5 ロール/時）と最低レベルにとどまり、ホイルローダーを使った堆肥原料の混合・堆積作業（17 t/時）に比べて作業能率が低く、前処理作業の制限要因となった。そのため、予め時間に余裕をもって作業を行う、あるいは、大型の機種や後述のカッティングミキサーなどの作業能率の高い機種を利用することで作業性を改善できると思われる。



写真6 ホイルローダーのアタッチメントとして多用されるベールグラブとフォークリフト作業にも対応可能なロールベール用クランプ



写真7 第2章の堆肥化試験に供したベールカッター（STAR FRBC-120）



写真8 堆肥センターに設置されているトラックスケール

3-2-3. 牛ふんと副資材の質量測定

堆肥原料を適切な含水率に調整するためには、牛ふんや副資材の質量を把握しておくことが基本であり、汚染牧草等からの RCs の混入量を予め把握するためにも不可欠である。

堆肥センターでは牛ふんの荷受け時や堆肥の出荷時など日常的に質量を測定する必要があり、ほとんどの堆肥センターにはトラックスケールが設置されている（写真8）。前出の写真6のクレーンスケールは数tのレンジであればトラックスケールに比べて安価に購入することができ、可搬式なのでフレキシブルコンテナやロールベールの荷姿のままその場で副資材を計量するのに便利である。

3-2-4. 牛ふんと副資材の混合作業

今回はホイルローダーで牛ふんと汚染牧草等をサンドイッチ状に積み上げたうえで、ロータリー式の攪拌装置によりほぼ毎日攪拌することで概ね均一に短期間で腐熟を促進できた。一方で、ホイルローダーで切り返しを行う堆積方式の堆肥化施設では堆肥原料の均一な混合が難しい。その場合、給餌用のカッティングミキサーを使って汚染牧草や枝葉等を細断する事例⁴⁾が参考になり、堆肥原料の均一な混合に加えて汚染牧草の細断作業の効率化も期待できる。



写真9 けん引式のカッティングミキサーの外観(左)と混合・細断時の内部の様子(右)
ロールベールに巻かれた麻ひもは細断されて、オーガへの絡みつきは確認されなかった

3-3. 堆肥化過程の水管理

第2章のように、特に夏場の高温時の堆肥化処理では水分蒸発が盛んになるため、堆肥原料が過乾燥になって腐熟が停滞することがないよう指導書²⁾に従って水管理を適切に行う必要がある。過乾燥になると腐熟が停滞して堆肥の品質が低下するばかりか、作業時に粉じんが発生して作業環境にも影響をきたす。さらには、RCs濃度が過度に濃縮されて、暫定許容値を超過する可能性が高まることにも注意が必要である。

第2章の堆肥化試験では、堆肥原料の含水率を正確にモニタリングするため、小型の定温乾燥器を登米市役所に持ち込んでサンプルの含水率を105℃-24時間法で測定した。また、前処理のように現場ですぐに含水率を知りたい場合には、赤外線水分計を作業現場に持ち込んで30分~1時間ほどで含水率を簡易的に測定し(写真10)、図9の手順に従って牛ふんや汚染牧草等の混合割合を計画した。これらの機材は10~30万円ほどで入手可能である。

堆肥化過程での含水率のモニタリングが可能になれば、堆肥原料が過乾燥になることを予見できて散水等による水管理が可能となる。ただし、散水作業は時間や労力、装備に相応の負担が必要であったため(写真11)、第2章の無通気区のように、少し時間を要するが定期的な攪拌や切り返しだけで堆肥の腐熟が促進される条件であれば、省エネを図る点からも強制通気を行わない堆肥化方法も考えられる。



写真10 堆肥生産現場で簡易測定可能な赤外線水分計



写真11 第2章で行った堆肥原料への散水作業

3-4. 堆肥化処理に伴う作業環境の評価

第2章の堆肥化試験では、牧草の細断、堆肥原料の混合、攪拌装置による切り返しのそれぞれの作業時に粉じんの発生量を調査するとともに、捕集した粉じんによる内部および外部被曝のリスクを検討した（写真12、13）。

表5～7に示したように、いずれの作業でも粉じんを吸い込むことによる内部被曝や粉じんが浮遊することによる外部被曝への影響は確認されなかった。ただし、汚染堆肥をホイールローダーで混合する際などに多量の粉じんが発生したため、マスクやゴーグルの着用など作業環境上の対策が必要と考えられた。

表5 ベールカッターでの汚染牧草細断作業中の作業環境測定結果

測定対象	作業中 粉じん濃度 *1 mgDM/m ³	作業中 粉じん由来 RCs 濃度 *2 Bq/m ³	空間線量率 *3	
			作業前 μSv/h	作業中 μSv/h
作業員 1 *4	0.6	ND	0.04	0.04
作業員 2 *5	0.2	ND	-	0.04
敷地境界 1 *6	0.0	ND	0.06	0.05
敷地境界 2 *7	0.1	ND	0.05	0.05

*1 ハイボリュームエアサンプラ（SHIBATA HV-50）とガラスろ紙（Advantec GB-100R）で捕集した乾物濃度、*2 NDは検出限界（0.01～0.03 Bq/m³）未満、*3 ALOKA TCS-172で測定、*4 ベールカッターまで1.3 m、*5 *4と逆方向でベールカッターまで1.4 m、*6 堆肥化施設西側入口まで25 m、西風1.3～3.1 m/秒、*7 堆肥化施設東側入り口まで6.4 m、南風2.7～3.1 m/秒

表6 牛ふん、汚染された汚染牧草、汚染堆肥の混合作業中の作業環境測定結果

測定対象	作業中 粉じん濃度 *1 mgDM/m ³	作業中 粉じん由来 RCs 濃度 *2 Bq/m ³	空間線量率 *3	
			作業前 μSv/h	作業中 μSv/h
ローダー外	8.3	ND	0.04	0.04
ローダー キャビン内	1.1	ND	0.02	0.02
作業員 1 *4	0.8	ND	0.02	0.04
敷地境界 1 *5	0.1	ND	0.06	0.06
敷地境界 2 *6	0.0	ND	0.05	0.05

*1 表5と同様、*2 NDは検出限界（0.01～0.02 Bq/m³）未満、*3 表5と同様、*4 図2中の無通気区の堆積場所から約10 m、*5 堆肥化施設西側入口まで11.5 m、南東風1.8～4.0 m/秒、*6 堆肥化施設東側入り口まで6.4 m、南風3.6～6.5 m/秒

表 7 堆肥原料の攪拌作業中の作業環境測定結果

測定対象	作業中 粉じん濃度 *1 mgDM/m ³	作業中 粉じん由来 RCs 濃度 *2 Bq/m ³	空間線量率 *3	
			作業前 μ Sv/h	作業中 μ Sv/h
作業者 1 *4	0.7	ND	0.04	0.04
作業者 2 *5	0.7	ND	0.05	0.04
敷地境界 1 *6	0.0	ND	0.06	0.05
敷地境界 2 *7	0.2	ND	0.05	0.05

*1 表 5 と同様、*2 ND は検出限界 (0.01~0.02 Bq/m³) 未満、*3 表 5 と同様、*4 攪拌装置まで約 5 m、*5 攪拌装置まで約 20 m、*6 堆肥化施設西側入口まで 11.5 m、北西風 2.7-3.1 m/秒、*7 堆肥化施設東側入り口まで 6.4 m、西風 0.4-1.8 m/秒



写真12 汚染牧草の細断作業中の粉じんと空間線量率の測定



写真13 敷地境界での各種作業中の空間線量率の測定

3-5. 第3章のまとめ

第2章の堆肥化試験を行うにあたり必要であった牛ふんと副資材の混合割合等の作業計画や汚染牧草の細断作業・混合作業等の堆肥原料の前処理、実際に利用した設備や機械に必要な機能、仕様、堆肥原料の水分の測定方法など、汚染牧草等を堆肥化副資材利用する際に必要となる知見や参考情報を最後にとりまとめた。これらの情報の多くは指導書等により知られていることであり、各県の試験研究機関や普及指導機関、家畜ふんの堆肥化処理に詳しい畜産環境アドバイザーからも必要に応じて専門的な助言や支援を受けることができる。

引用文献

- 1) 畜産環境アドバイザー養成研修会資料、畜産環境整備機構、2002
- 2) 堆肥生産についての基礎知識、畜産環境整備機構、<http://www.chikusan-kankyo.jp/>
- 3) 堆肥の品質実態調査報告書、畜産環境整備機構、2005
- 4) 竹倉憲弘、植物系除染廃棄物の減容化設備、農業食料工学会誌 76 (1) : 29-31、2014

堆肥のほ場施用に参考となる資料

- 1) 堆肥の継続的な施用は飼料用トウモロコシの放射性セシウム低減に有効である
http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2011/a00a0_01_74.html
- 2) 放射性セシウム含有堆肥施用に伴う飼料用トウモロコシへの放射性セシウム移行
http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2012/510b0_02_04.html
- 3) 放射性セシウム汚染サイレージの圃場還元作業と飼料作物への移行程度
http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2012/510a0_01_01.html
- 4) 堆肥施用による被災地の畑地・水田の地力回復等効果の持続性追跡調査事業成果報告書、畜産環境整備機構、2018
<http://www.chikusan-kankyo.jp/housyanou/houkokusho.html>

粉じん対策に参考となる資料

- 1) 農業機械を使用する除染関連作業の粉じん対策
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/narc_funjin.pdf

おわりに

本技術リポートは、農研機構と宮城県登米市の協定研究「農林業系汚染物の農業用資材としての再生利用方法の検討・開発」の研究成果を取りまとめたものです。

第2章での堆肥化試験において、堆肥のやり直しや温度測定等の日常管理については堆肥センター職員のみなさまに、前処理作業に加えサンプリング作業等については宮城県東部家畜保健衛生所 指導班長の佐藤氏や農研機構の井上主任研究員にたいへんお世話になりました。また、本技術リポートの技術的内容については農研機構 九州沖縄農業研究センターの田中主席研究員と中央農業研究センターの小島主任研究員に貴重なご意見、ご指摘をいただきました。協定研究の推進にご尽力いただいたみなさまに対し、最後に厚くお礼申し上げます。

著者一覧

阿部 佳之（農研機構 中央農業研究センター グループ長）

梶村 恭子（同 畜産研究部門 ユニット長）

上山 泰史（同 畜産研究部門 飼料連携調整役）

伊吹 俊彦（同 中央農業研究センター）

高橋 一紀（宮城県 登米市 産業経済部 次長）

千葉 清記（同 農産園芸畜産課 課長）

千葉 一雄（同 主査）

当サイトでは付録の「堆肥原料混合用の計算シート」（Microsoft® Excel®）もダウンロードできます。

この技術レポートの掲載内容を転載、複製する場合は、農研機構畜産研究部門の許可を得てください。

農研機構畜産研究部門 技術レポート 20 号

「放射性セシウムに汚染された牧草等の牛ふん堆肥化処理での副資材利用」
2019 年 3 月発行

技術内容の問い合わせ先

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

畜産研究部門 企画管理部企画連携室

電話：029-838-8292

メールフォーム：<https://pursue.dc.affrc.go.jp/form/fm/naro001/tech>

技術導入や運用に関する問い合わせ先

宮城県 登米市 産業経済部 農産園芸畜産課

電話：0220-34-2713

eMail：nouenchiku@city.tome.miyagi.jp

