

堆肥の汚染対策技術の開発

黒澤良介¹⁾、木下強、福島正人²⁾、前田綾子

1) 現 県南家畜保健衛生所、2) 現 農業大学校

要 約

放射性セシウム(以下 Cs)により汚染された堆肥を簡易堆肥保管施設専用シートによる一時保管実証試験を実施した結果、試験期間中の3年間では大きな問題はなかった。しかし、施設から汚染堆肥を搬出する際は施設設置場所が汚染されない様に細心の注意を払う必要がある。

また、副資材により放射性 Cs 堆肥を調製する場合、一般的な理論式により調製後の放射性 Cs 濃度を推定する事が可能であるが、調製後の容積増加を考慮すると低濃度の放射性 Cs 堆肥を調製する場合のみに有効な手段である。

目 的

平成23年3月に発生した福島第一原子力発電所事故により、県内でも放射性Csにより汚染された自給飼料及び堆肥が多く発生した。堆肥における放射性Cs濃度の暫定許容値は、現物で400Bq/kg以下であり、また、放射性Cs濃度が現物で8,000Bq/kg以上の場合、指定廃棄物として国の管理下に置かれる。放射性Cs濃度が400Bq/kgから8,000Bq/kg未満の堆肥は、自己の自給飼料生産するほ場に散布することが可能である。しかし、それ以外の場合は、生産者が自己責任で一時保管するか、再調製するなどして放射性Cs濃度を暫定許容値まで下げる必要がある。

汚染堆肥を保管する場合、既存の堆肥舎を利用してしまると、今後発生する家畜糞尿の処理が滞るなどの問題が発生する。また、暫定許容値である400Bq/kg以下の堆肥でも、暫定許容値付近の堆肥では実際は販売・流通が困難であり、生産者によっては自己のほ場への利用にも躊躇してしまう場合もある。

これらの事から、本試験では以下の2つの試験を実施した。高濃度汚染堆肥を一時保管する簡易施設の有効性を実証する事を目的として、簡易保管施設の設置及び汚染堆肥の保管を実施し、施設のその後の経過を確認した。また、低濃度汚染堆肥の流通・利用促進を目的として、既存の副資材等を用いて汚染堆肥の再調製を実証した。

試験1

平成16年に北條らが実施した家畜ふん堆肥の簡易保管施設の設置方法¹⁾を参考にし、簡易保管施設を設置した。なお、今回保管する堆肥は原則として完熟堆肥であるので、保管期間における切り返しは実施しないものとする。よって、主な変更点としては、廃汁対策としての暗きょを設置しなかった点である。

また、高濃度な放射性Cs汚染堆肥を保管した場合、施設周辺への影響が懸念されるため、施設周辺における空間放射線量を1ヶ月毎に測定した。

簡易保管施設は平成24年3月～平成26年1月の約3年間設置した後、全て撤去した。

材料及び方法

1 供試材料

当センターの乳用牛ふん尿から生産された完熟堆肥を用いた。なお、保管直前の放射性Cs濃度は現物で1,921Bq/kgであり、堆肥の肥料成分は表1のとおりである。

また、施設に用いた保管シートは上下ともに市販の簡易堆肥保管施設専用シート(商品名:KHVたいひシート)を用いた。

2 簡易保管施設の設置方法

施設の設置にあたっては、以下の作業機及び資材を用いた。

作業機:トラクター1台、プラウ、
スキッドステアローダー1台

人 員:3名

資材:堆肥保管シート(上、下)、ビニルハウス用単管パイプ(φ20mm 2本)、単管パイプ固定部材(スクリュアアンカー22個)、園芸用マイカ線

施設は、当センター敷地内に設置したが、当センターは、れき質土壌であるため、直接ローダーによる掘削が困難であった。このため、土壌を一度プラウにより耕起した後、表土をローダーで掘削した。掘削面積は幅6m×奥行20mの120m²であり、深さ約30cmを掘削した。

掘削後の残土の一部は施設片側に寄せ、高さ約50cm土手を作った。掘削後、地面上にある大きな石れきを除去してならした後、ブルーシート、専用下しきシートの順に地面に敷き、四方を仮固定した。その後施設南側からローダーで進入し、北側から堆肥を保管し、専用上かけシートで全体を覆い、シート四方を掘削した残土により埋設した。また、防風対策のため側面にスクリュアアンカーを等間隔に設置し、その穴にビニルハウス用直管パイプを通した。両側の直管パイプを園芸用マイカ線により約1m間隔で結び、上掛けシートのめくれ対策とした(図1)。

- 3 簡易保管施設周辺の空間放射線量の測定
 施設周辺の空間放射線量は日立アロカメディカル社製シンチレーションサーベイメーターを用いて、1

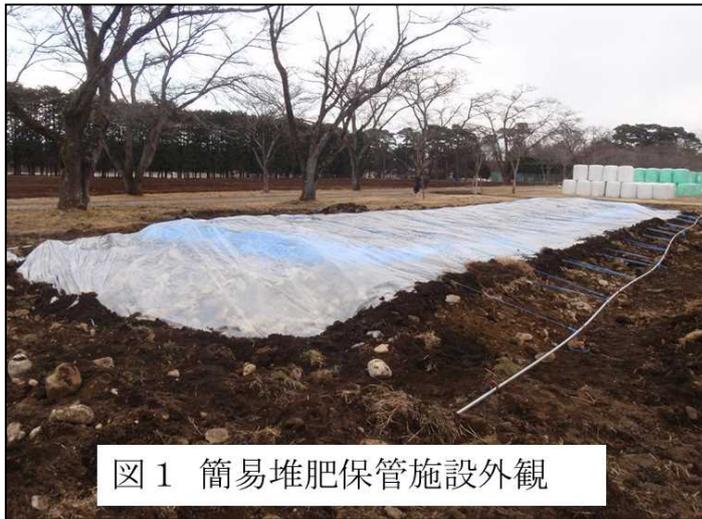


図1 簡易堆肥保管施設外観

ヶ月毎に実施した。空間放射線量の測定は施設上、施設から1m地点、及び2m地点における地上10cm及び1mの高さで実施した(図2)。

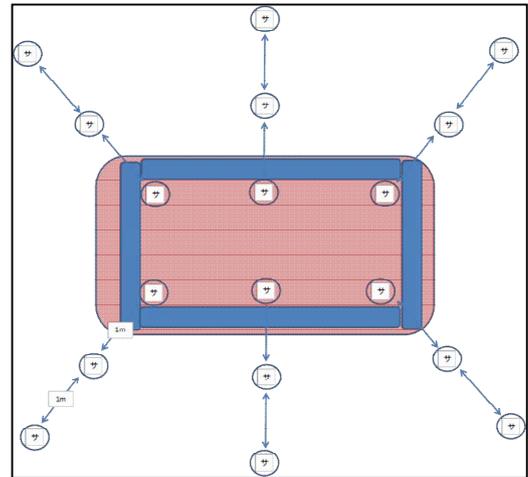


図2 空間線量測定場所

4 堆肥及び土壌の成分分析

堆肥は、設置直後から3ヶ月毎、及び撤去時にサンプリングをし、以下のア〜ケの方法により成分分析及び放射性Cs濃度の測定を行った。

- ア 水分²⁾：乾熱法により測定した。試料を105℃で5時間以上熱風乾燥し、その減重量から求めた。
- イ 灰分²⁾：アの乾物試料を粉砕し、るつぽに適量を取り、マッフルで徐々に温度を上げ450℃で8時間加熱し減重量から求めた。
- ウ C/N比²⁾：乾式燃焼法により求めた。アで得られた乾物試料を粉砕し、C/Nコーダーにより測定した。
- エ 全窒素²⁾：ケルダール法により測定した。アの乾物試料を粉砕し、これを加熱した濃硫酸中で窒素成分を硫酸アンモニウムにした。これを塩基性にして水蒸気蒸留によりアンモニアを回収し、既知濃度の硫酸で滴定して濃度を測定した。
- オ リン酸²⁾：バナドモリブデン酸比色法により測定した。イの灰化した試料に塩酸(1+2)を入れ沸騰させてから放冷し、ろ過をして分析試料を得た。これにバナドモリブデン酸試薬を入れ420nmの吸光度から濃度を測定した。
- カ 加里、石灰、苦土、ナトリウム²⁾：原子吸光度法により測定した。オで得られた分析試料に化学的干渉を抑えるため塩化ストロンチウムを加えた後、それぞれ766.5nm、422.7nm、285.2nm及び589.6nmの吸光度から濃度を測定した。
- キ pH及びEC²⁾：ガラス電極法及び電気伝導率計により測定した。堆肥の乾物重量「1」に

対して蒸留水を「10」添加し、攪拌後にガラス電極によりpHを、電気伝導率計によりECを測定した。

- ク 発芽試験：脇阪ら⁹⁾の方法に準じて行った。堆肥の乾物重量「1」に対して60℃の蒸留水を「10」添加し、60分間浸透させた後にろ液を得た。たねびた(富士平工業株製)を用いて、シャーレ内にコマツナの種を50粒播種し、上記のろ液を10ml入れ、さいばいくん(富士平工業株製)内で25℃、12時間を昼間、12時間を夜間の条件で約6日間栽培した。また同じ栽培条件で、蒸留水の対照区も行い、対照区に対する発芽の割合を求めた。
- ケ 放射性Cs濃度：ゲルマニウム半導体γ線スペクトロメトリーにより分析した。試料現物を専用マリネリ容器1Lに充填し、1,000秒間分析した。

5 施設の撤去

簡易保管施設の撤去にあたっては、以下の作業機を用いて実施した。

作業機：トラクター2台、スキッドステアローダー(ボブキャット)1台、マニアスプレッダー2台

人員：7名

撤去は、マイカー線及び上掛けシートを撤去した後、ローダーで堆肥をマニアスプレッダーに乗せて搬出した。搬出した堆肥は、トラックスケールにより重量測定した。また、堆肥の採材は中央3カ所の上部、中部、下部の3カ所で行った。

堆肥撤去後、下敷きシート2枚を撤去し、シート下の6点から土壌を採材した。

結果及び考察

簡易保管施設の設置には、1～4名の従事者により延べ555時間を要した(表1)。投入した堆肥は23.6tであり、容積にすると59立米であった。設置に要した費用は、120cm²の規模で79,298円であり、その約7割を堆肥保管シート代が占めている(表2)。

施設周辺の空間線量(図3、4)は、設置直後では0.61～0.77μSv/hr(平均0.69μSv/hr)と高めであったが、その後漸減し、2年後には0.3μSv/hr以下で安定して推移していた。なお、地上10cmと1mとでは1mの方が若干高い傾向にあったが、概ね同様の数値で推移した。また、施設上、施設から1m地点、及び2m地点における空間線量の差もほとんど無かった。

保管堆肥の成分分析を表3に示した。保管期間の経過とともに水分含量が増加し、一方で加里が減少していたが、その他の成分には大きな差は見られなかった。また、発芽試験の成績についても設置から撤去まで良好な結果であった。水分含量の増加及び加里の増加については、上掛けシートの一部に破損箇所があったため、そこからの雨水の流入があった事が原因として考えられた。

放射性Cs濃度の推移を図5に示した。設置直後1,921Bq/kgあった放射性Cs濃度は、経時的に減少し最終的には558Bq/kgになった。

施設への保管から約3年を経過した平成26年2月末に施設から汚染堆肥を搬出した。撤去に要した

作業時間は2時間30分であり、作業は熟練した作業者が丁寧に実施したが、撤去時に下敷きシートにローダーバケットがひっかかるなどしてシートが破損した。撤去時の堆肥の水分含量は3カ所及び上中下での差は特になく、平均で78%であった。また、放射性Cs濃度も1,100Bq/kgから4,046Bq/kgと幅があり、採材場所による明確な差は見られなかった。

施設撤去後の土壌における放射性Cs濃度は6カ所のうち1箇所で非常に高い箇所があったが、他は低濃度であった。非常に高かった箇所は、撤去時にシートが破損した箇所であった事、及び、設置場所の地質ががれき質土壌であるため、表土表面のみサンプリングとなってしまったが原因と考えられた。

以上のことから、堆肥簡易保管施設は、高濃度汚染堆肥を一時保管する事が可能ではあるが、保管時に利用する上掛けシートは日光の紫外線や風雨にさらされ、破損し雨水が浸入するため、適宜交換が必要であると考えられた。今回の試験では上掛けシート上に月1回放射線量を測定し、また、3ヶ月に1回サンプリングのためにシートを一時的にはがすなどしたが、一般的には、撤去時のみはがすという事になるため、シートの劣化による交換の頻度はそれ程ではない可能性がある。重機による汚染堆肥の搬出は細心の注意を払って実施する必要がある、もし、下敷きシートが破損した際は場合によってはその周囲の土壌の撤去も検討する必要があると思われる。

表1 簡易施設設置に要した時間

作業工程	作業時間
プラウ耕	1時間20分
掘削、下敷きシート敷き	2時間25分
堆肥投入	4時間15分
上掛けシート敷き	1時間15分
合計	9時間15分

表2 設置資材等コスト一覧

資材名	経費(税込)
保管シート(6m×20m)	53,550円
ブルーシート	14,500円
ハウス用パイプ	6,000円
マイカ線等	8,000円
合計	82,050円

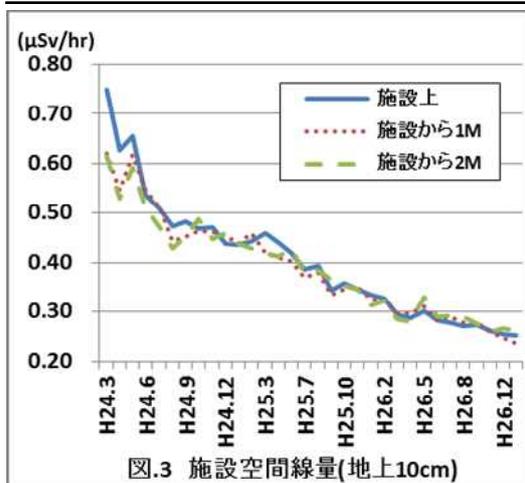


図.3 施設空間線量(地上10cm)

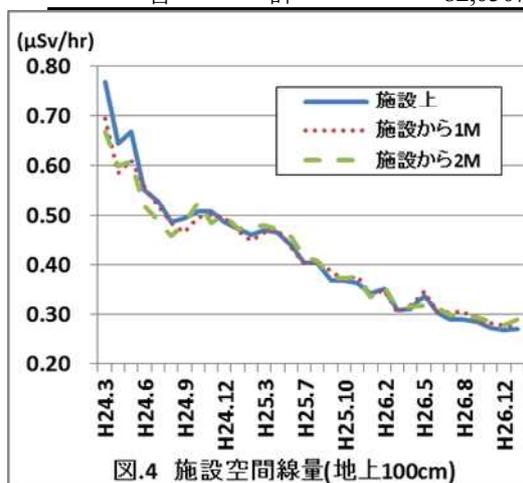
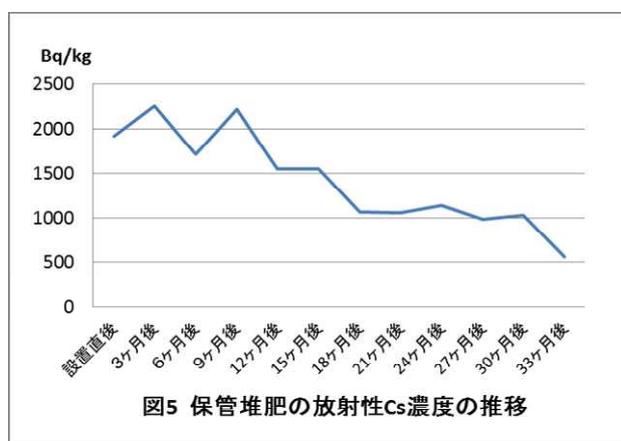


図.4 施設空間線量(地上100cm)

表3 放射性Cs汚染堆肥の成分値の経時的推移

採材時期	pH	EC	水分	灰分	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	C/N比	発芽率
		mS/cm	現物%	乾物%	乾物%	乾物%	乾物%	乾物%	乾物%		%
設置直後 (H24.3)	7.53	3.78	41.58	22.31	2.26	1.38	2.37	1.21	0.92	20.56	88.6
3ヶ月後 (H24.6)	7.34	5.22	52.11	27.00	2.20	1.64	1.86	1.54	1.08	15.89	100
6ヶ月後 (H24.9)	7.40	2.69	33.02	31.80	2.42	1.80	2.09	3.72	1.19	13.80	121.9
9ヶ月後 (H24.12)	7.12	3.97	42.98	33.40	2.44	1.51	2.63	2.86	0.95	8.64	86.4
12ヶ月後 (H25.3)	7.27	3.57	64.80	35.80	2.38	1.96	1.84	3.36	1.32	16.64	100.7
15ヶ月後 (H25.6)	6.99	2.12	67.60	28.00	2.12	1.40	0.95	3.20	1.05	14.51	105.8
18ヶ月後 (H25.9)	6.81	2.44	72.50	37.30	2.51	1.94	1.01	3.74	1.27	15.29	99.3
21ヶ月後 (H25.12)	7.20	1.16	73.60	36.60	2.44	1.68	0.79	3.62	1.07	13.52	97.3
24ヶ月後 (H26.3)	7.15	0.90	74.70	34.90	2.43	1.90	0.58	4.04	1.11	13.77	99.3
27ヶ月後 (H26.6)	7.38	0.43	51.86	34.50	2.62	1.76	0.40	4.03	1.09	13.25	99.3
30ヶ月後 (H26.9)	7.24	0.45	65.89	35.80	2.40	1.65	0.74	3.70	0.98	12.71	101.4
33ヶ月後 (H26.12)	7.47	0.45	76.19	34.00	2.41	1.70	0.43	4.16	1.13	13.67	98
平均値	7.24	2.26	59.74	32.62	2.39	1.69	1.31	3.27	1.10	14.35	99.83
±S. D.	0.20	1.62	14.83	4.56	0.13	0.19	0.80	0.96	0.12	2.79	8.75



実験2

放射性Cs濃度の暫定許容値である400Bq/kgよりも濃度の高い汚染堆肥は放射性セシウム濃度が低い副資材と混合し、再調製することで暫定許容値以下となる。調製後堆肥の放射性Cs濃度は、堆肥及び対象副資材の放射性Cs濃度及び重量が明らかであれば、計算式により調製後の濃度を推定する事ができる。しかし、汚染堆肥を保有する生産者の中には、計算上の放射性Cs濃度だけでは不安を感じ、実行をためらう生産者も少なからずいる。そこで、本試験では計算上の放射性Cs濃度と実測した放射性Cs濃度とを比較し、その有効性を実証する事を目的とした。

1 供試材料

試験の目的としては汚染の程度が低い堆肥の流通・利用促進であるが、より試験結果を明確にするため放射性Cs濃度の高い汚染堆肥を試験に用いた。なお、供した堆肥は乳用牛糞尿から生産された完熟堆肥である。

また、汚染堆肥を再調製する副資材等としては完熟堆肥、オガクズ、もみ殻、及び土壌を用いた。

汚染堆肥とそれぞれの副資材は重量比で10:1、2:1、2:3、1:5、1:10の割合になるように混合し、放射性Cs濃度を測定するサンプルとした。なお、それぞれの副資材における試験区分及び放射性Cs濃度は表4のとおりである。

表4 汚染堆肥及び副資材の放射性Cs濃度並びに試験区の概要について

試験区名	汚染堆肥		副資材等		混合割合 (汚染堆肥：副資材等)
	名称	放射性Cs (Bq/kg)	名称	放射性Cs (Bq/kg)	
低濃度堆肥区	乳牛ふん堆肥 1	2,098	低濃度Cs堆肥	36	各々の試験区において の割合を設定
オガクズ区			おがくず	188	
もみ殻区	乳牛ふん堆肥 2	3,170	もみ殻	8	
土壌区			土壌	34	

2 放射性Cs 汚染堆肥の成分分析

放射性Cs 汚染堆肥を以下のア～カの方法により成分分析を行った。

また、副資材と調製した汚染堆肥については、クの発芽試験のみ実施した。

- ア 水分²⁾：乾熱法により測定した。試料を105℃で5時間以上熱風乾燥し、その減重量から求めた。
- イ 灰分²⁾：アの乾物試料を粉碎し、ろつばに適量を取り、マッフルで徐々に温度を上げ450℃で8時間加熱し減重量から求めた。
- ウ C/N比²⁾：乾式燃焼法により求めた。アで得られた乾物試料を粉碎し、C/Nコーダーにより測定した。
- エ 全窒素²⁾：ケルダール法により測定した。アの乾物試料を粉碎し、これを加熱した濃硫酸中で窒素成分を硫酸アンモニウムにした。これを塩基性にして水蒸気蒸留によりアンモニアを回収し、既知濃度の硫酸で滴定して濃度を測定した。
- オ リン酸²⁾：バナドモリブデン酸比色法により測定した。イの灰化した試料に塩酸(1+2)を入れ沸騰させてから放冷し、ろ過をして分析試料を得た。これにバナドモリブデン酸試薬を入れ420nmの吸光度から濃度を測定した。
- カ 加里、石灰、苦土、ナトリウム²⁾：原子吸光度法により測定した。オで得られた分析試

料に化学的干渉を抑えるため塩化ストロンチウムを加えた後、それぞれ766.5nm、422.7nm、285.2nm及び589.6nmの吸光度から濃度を測定した。

- キ pH及びEC²⁾：ガラス電極法及び電気伝導率計により測定した。堆肥の乾物重量「1」に対して蒸留水を「10」添加し、攪拌後にガラス電極によりpHを、電気伝導率計によりECを測定した。
- ク 発芽試験：脇阪ら³⁾の方法に準じて行った。堆肥の乾物重量「1」に対して60℃の蒸留水を「10」添加し、60分間浸透させた後にろ液を得た。たねびた(富士平工業株製)を用いて、シャーレ内にコマツナの種を50粒播種し、上記のろ液を10ml入れ、さいばいくん(富士平工業株製)内で25℃、12時間を昼間、12時間を夜間の条件で約6日間栽培した。また同じ栽培条件で、蒸留水の対照区も行い、対照区に対する発芽の割合を求めた。

3 調製した汚染堆肥の放射性Cs濃度の測定

調製した堆肥は、ゲルマニウム半導体γ線スペクトロメトリーにより分析した。試料現物を専用マリネリ容器2Lに充填し、1,000秒間分析した。

また、調製後の汚染堆肥の放射性Cs濃度を、図〇の理論式により計算し、実測値との相関性を確認した。

$$\text{調製後の汚染堆肥の放射性Cs濃度(Bq/kg)} = \frac{(\text{汚染堆肥の放射性Cs濃度(Bq/kg)} \times \text{汚染堆肥の重量(kg)}) + (\text{対象副資材の放射性Cs濃度(Bq/kg)} \times \text{対象副資材の重量(kg)})}{\text{調製後の汚染堆肥の総重量(kg)}}$$

図6 調製後の汚染堆肥の放射性Cs濃度の理論式

結果及び考察

表5に汚染堆肥の成分分析結果を示した。成分についてはECが高い傾向にあったが、それ以外は一般的な成分値であった。発芽率は18.5%と非常に低い値であったが、これはECが高い事が一因と思われる。

それぞれの副資材で調製した汚染堆肥の放射性Cs濃度の実測値と理論式から算出された推定値との相関を表6に示した。全ての副資材においてかなり高い相関(寄与率R²=0.99以上)を示していることから、放射性Cs濃度を推定する一般的な理論式は、

現場での放射性Cs汚染堆肥の調製に非常に有効な手段であると言える。また、それぞれの副資材により調製した後の容積重を、表7に示した。土壌以外の副資材では、調製後の容積重が小さくなっている。表8ではそれぞれの副資材により調製した後の水分含量を示した。オガクズ及びもみ殻で調製した場合、副資材の割合が多くなるにつれて水分含量が低くなる。よって、これらの副資材により汚染堆肥を調製すると、調製後の堆肥の容量が大きくなってしまふ。

また、表8にそれぞれの副資材で調製した汚染堆肥の発芽率を示した。もみ殻以外の副資材では比較的良好な発芽率を示していた。もみ殻のみの発芽率は水分含量が低く抽出液が確保できなかったため、もみ殻のみの発芽率を測定する事はできなかったが、もみ殻の割合が多くなるにつれて発芽率が低下していることから、もみ殻の影響で発芽率が低下してい

る事が示唆された。

以上のことから、放射性Cs堆肥を副資材により調製すれば放射性Cs濃度の低減が図れる事が明らかになった。しかし、一方で重量比での調製になるため、容積重の小さい副資材では放射性Cs濃度の高い堆肥を調製するとかなりの容積を必要としてしまふ。また、今回の試験では土壌も副資材の一つとして調査したが、堆肥の副資材として土壌を用いた場合は普通肥料として配付する事はできない。このため、副資材により放射性Cs濃度の低減を図る場合は、汚染されていない堆肥を用いるか、副資材として一般的なオガクズもしくはもみ殻を用いるべきである。また、調製後の保存場所を考慮すると、対象となる汚染堆肥の放射性Cs濃度が低い堆肥でないと現実的ではない

表5 汚染堆肥の肥料成分等

pH	EC mS/cm	水分 現物%	灰分 乾物%	T-N 乾物%	P ₂ O ₅ 乾物%	K ₂ O 乾物%	CaO 乾物%	MgO 乾物%	C/N比	発芽率 %
9.71	9.04	50.50	24.40	2.05	3.08	2.02	3.62	1.54	17.69	18.5

表6 高濃度Cs堆肥と副資材等とを調製した後の放射性Csの実測値と理論値の関係

試験区名		混合割合(汚染堆肥：副資材等)						相関 係数	
		10：1	2：1	1：1	2：3	1：2	1：5		1：10
低濃度堆肥区	実測値	1,980	1,389	1,105	734	648	310	138	0.99
	推定値	1,911	1,411	1,067	861	723	380	224	
オガクズ区	実測値	2,960	2,301	1,684	1,468	1,193	711	494	1.00
	推定値	2,899	2,176	1,679	1,381	1,182	685	459	
もみ殻区	実測値	2,920	1,937	1,615	1,345	1,148	566	332	0.99
	推定値	2,883	2,116	1,589	1,273	1,062	535	296	
土壌区	実測値	2,880	2,110	1,582	1,257	1,098	569	323	1.00
	推定値	2,885	2,125	1,602	1,289	1,079	557	319	

表7 高濃度Cs堆肥と副資材等との調製後の容積重(kg/m³)

試験区名	混合割合(汚染堆肥：副資材等)								
	0：1	1：0	10：1	2：1	1：1	2：3	1：2	1：5	1：10
低濃度堆肥区*	255	315	319	298	293	273	271	256	278
オガクズ区	262		265	263	278	288	298	315	345
もみ殻区	135	399	316	201	192	173	167	159	154
土壌区	816		401	486	539	584	593	694	743

*：低濃度堆肥区の汚染堆肥のみ他の区と異なる堆肥を使用している。

表8 高濃度Cs堆肥と副資材等との調製後堆肥の水分含量(%)

試験区名	混合割合(汚染堆肥：副資材等)								
	0:1	1:0	10:1	2:1	1:1	2:3	1:2	1:5	1:10
低濃度堆肥区*	52.9	74.2	54.0	59.0	63.1	66.4	66.1	70.9	72.0
オガクズ区	44.0		44.9	44.7	46.2	46.8	47.3	48.9	50.2
もみ殻区	11.3	50.5	45.8	33.1	29.1	25.8	22.3	13.8	11.5
土壌区	52.0		51.7	49.3	49.1	50.7	50.9	51.7	51.0

*：低濃度堆肥区の汚染堆肥のみ他の区と異なる堆肥を使用している。

表9 高濃度Cs堆肥と副資材等との調製後堆肥の発芽率(%)

試験区名	混合割合(汚染堆肥：副資材等)								
	0:1	1:0	10:1	2:1	1:1	2:3	1:2	1:5	1:10
低濃度堆肥区*	120.0	107.4	119.1	141.5	122.3	133.0	124.5	111.7	131.9
オガクズ区	88.7		16.9	73.0	92.0	95.0	108.0	102.0	108.0
もみ殻区	-**	18.5	34.3	47.1	52.9	50.0	21.4	-**	-**
土壌区	52.0		517.0	49.3	49.1	50.7	50.9	51.7	51.0

*：低濃度堆肥区の汚染堆肥のみ他の区と異なる堆肥を使用している。

**：サンプルの水分が低く抽出液が確保できなかったため、測定不可能であった。

文 献

- 1) 北條ら 家畜排せつ物の簡易堆肥化保管技術の確立 栃木酪試研報 21:15-22(2005)
- 2) 堆肥等有機物分析法 (財) 日本土壌協会
- 3) 脇阪ら(2001) 家畜ふん堆肥の品質因子に関する研究 -1. 家畜ふん堆肥品質評価基準の策定- 栃木畜試研報 17:16-29