

加熱攪拌水分調整による堆肥化処理の研究

有馬儀信 宇谷道弘 竹並敦子 小田正和¹⁾ 島田義久¹⁾ 田中 稔¹⁾

要約 高水分有機物の堆肥化処理に必要な水分調整を加熱乾燥で行う装置を試作し、堆肥化を行った。装置は直径2,000mm、長さ3,870mmの水平ドラム回転式の攪拌機に縦横各1,524mm、長さ3,870mmの鉄箱に灯油バーナーとシロッケンファンを装着した熱風発生器を結合して製作した。乳用牛の生ふんを堆肥化するための水分調整を、加熱乾燥し副資材を用いない区（①加熱乾燥区）、オガクズを混合し加熱は行わない区（②副資材区）、そしてオガクズを混合して水分率を75%にした後に加熱乾燥する区（③副資材+加熱乾燥区）、の3区分で行った。1回にふん約2,000kgの水分調整を行い、区分毎に2回反復後プールして堆積切返し方式で堆肥化した。①加熱乾燥区、②副資材区、そして③副資材+加熱乾燥区についてそれぞれ、ふん1,000kgに要したオガクズ量が0kg、358.2kg、174kg、加熱乾燥時間が2.20hr、0hr、1.23hr、電力量が15.5kwh、1.0kwh、10.5kwh、灯油量が115.0L、0L、65.9L、水分調整前のふんの水分率が83.0%、83.0%、81.8%、水分調整後の水分率が64.8%、70.7%、66.0%、堆肥化後の水分率が54.3%、62.9%、47.8%、ふん1,000kg当たりの水分調整後の重量が461kg、1,358kg、706kg、水分調整後の容積重が3区とも650kg/m³、堆肥化後の重量と容積重が183kgと400kg/m³、539kgと450kg/m³、223kgと350kg/m³、堆肥化日数が118日、193日、148日、堆肥化による総乾物分解率が48.5%、49.7%、51.4%であった。灯油1L当たりの水分蒸発量は①加熱乾燥区が4.61kg、③副資材+加熱乾燥区が6.30kgであった。①加熱乾燥区、②副資材区、そして③副資材+加熱乾燥区の水分調整ランニングコストはふん1,000kg当たり4,782円、1,086円、3,282円、1日当たり乳用経産牛1頭について239.1円、54.3円、164.1円、同1頭当たりの処理施設面積が4.0m²、11.2m²、6.1m²、水分調整装置を含む施設費の見積りは同1頭当たり31.2万円、33.9万円、37.6万円であった。

キーワード：バイオマス、乳用牛ふん、堆肥化、加熱攪拌、水分調整

「家畜排せつ物の管理の適正化と利用の促進に関する法律」の施行に伴い、畜産現場では家畜ふん尿の適正な処理施設を整備する必要に迫られている。処理の方法は畜種や処理物の内容により異なり、施設の設置費やランニングコストおよび水分調整の副資材費など処理コストも多様である。水分率が高い物を固液分離せず堆肥化処理する場合は、水分調整に大量の副資材を必要とし、增量した後で堆肥化するための大きな施設とそこで生産される堆肥を土壤還元するための広い農地を要する。こうしたことから、副資材を用いないで堆肥化ができるれば、副資材費の節約、施設規模の縮小、そして、最終処分する農地面積や労働費の節約など利点は大きい。

当場ではビニールハウス内で高水分の家畜排せつ物をトラクターで攪拌し発酵および乾燥を促すことで、副資材を用いず低コストで堆肥化する方法³⁾を開発したが、この方法では乳用牛1頭当たりに10m²のハウス面積と4m²の2次処理場兼保存庫を必要とする。ところが、畜産農家の中には農場の立地条件

から十分な敷地を確保できない場合も少なくなく、施設面積が小さい新たな処理方法が求められている。そこで、加熱攪拌し乾燥させることで水分調整する装置を開発し、堆肥化実験を行うことで、この効果や実用性を検討した。

材料および方法

期間

研究期間は平成14年8月から平成15年7月の1年間で、その行程を図1に示した。

項目	平成14年			平成15年		
	8月	10月	12月	2月	4月	6月
装置の設計・製作				↔		
装置の試運転・改良				↔		
加熱攪拌水分調整実験					↔	
堆肥化実験						↔

図1 加熱乾燥による堆肥化処理の研究行程

加熱搅拌装置

当研究で開発した加熱搅拌装置は搅拌機と熱風発生器をダクトで連結する構造とした(図2)。搅拌機は直径2,000mm、長さ3,870mmの水平ドラム回転式の搅拌機(C-モードC20、第一コンサルタント)を熱風発生器と結合できるように製作した(写真1)。熱風発生機は時間当たり灯油50リットル前後を燃焼し、200°Cの熱風を発生するよう縦横各1,524mm、長さ3,870mmの鉄箱に灯油バーナー(SP-50、小片鉄工、小千谷市)とシロッコファン(FY-15FDSCMG、松下電器、門真市)を装着した。内部は送風圧でバーナー炎が飛ばされないよう直径800mmの円筒形保護器を装着し、炎と送風が急速に混合するよう炎保護器の形状とシロッコファンの取り付け位置を試行を繰り返しながら改良した。用いた電力モーターは表1に示すように合計出力が10.4kwであった。

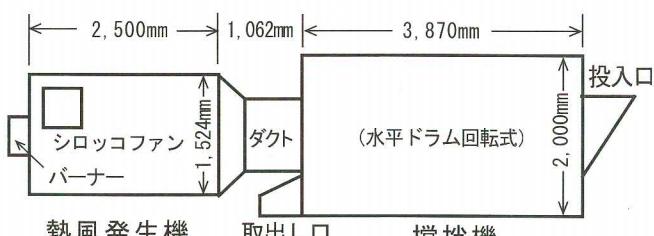


図2 加熱搅拌装置の側面簡略図



写真1 製作後の加熱搅拌装置

表1 使用した電力モーター

機器名	出力×台数
搅拌機	5.5kw×1
バーナー	0.4kw×1
送風機	3.7kw×1
取出しコンベア	0.8kw×1
合計	10.4kw

堆肥化試料

堆肥化試料は当場のフリーストール牛舎で飼養しているホルスタイン種から排せつされるふんとした。ふんは排せつから2日以内の生ふんを用い、1回の

水分調整処理量は2,000kgとし、副資材はオガクズとした。

水分調整方法

牛ふんを堆肥化する目的で、水分率70%を目標に異なる方法で水分調整を行った。水分調整方法による区分は、①加熱搅拌区、②副資材区、③副資材+加熱搅拌区の3区分とした(表2)。①加熱搅拌区は副資材を用いず、加熱乾燥で水分調整した。②副資材区は搅拌機にふんとオガクズを投入し、30分間搅拌機で混合するのみで加熱は行わなかった。③副資材+加熱搅拌区はふんにオガクズを加えて水分率を75%に調整し、その後に加熱して目標水分率に調整した。用いたふんおよびオガクズは実験当日に水分率を測定し、オガクズの混合量を決定した。加熱搅拌は30分毎に水分率を測定し、バーナーの停止を決定した。バーナー停止後、送風機と搅拌機の運転は30分間継続した(写真2)。調整後の試料はただちに搅拌機から取り出し、堆肥舎内に堆積した。各区とも水分調整実験を反復し、区分毎にプールして堆積した。



写真2 加熱搅拌装置の運転

堆肥化処理

水分調整後の試料は区分毎にプールし、コンクリート床堆肥舎内でコンクリート壁に寄りかかるように堆積した。切返しは堆積表面から30cm内部の温度が50°C以下に下降するか、または、下降しなくても堆積後あるいは切返し後2か月経過した時に行った。切返し後の温度が50°C以上に上昇しなくなった最後の切返しを行った日を堆肥化の終了と見なし、堆肥化に要した日数、切返し回数、成分の推移を調査した。堆肥熟度は堆肥熟度判定機(コンポテスター、富士平工業、東京都文京区)で、容積重は容量15リットル(L)のバケツを試料で満たして重量を測定することによって調査した。

表2 水分調整実験日、室温、試料とその水分率

区分	実施 月/日	室温 (°C)	ふん		オガクズ	
			重量 (kg)	水分率 (%)	重量 (kg)	水分率 (%)
①加熱攪拌	1回目	2/24	5	2,160	83.4	
	2回目	2/25	7	2,160	82.5	
	計(平均)		(6)	4,320	(83.0)	
②副資材	1回目	2/26	5	2,020	83.0	740 37.3
	2回目	2/27	6	2,000	83.0	700 34.6
	計(平均)		(6)	4,020	(83.0)	1,440 (36.0)
③副資材+加熱攪拌	1回目	2/28	3	2,020	82.4	330 38.6
	2回目	3/3	9	2,060	81.3	380 34.4
	計(平均)		(6)	4,080	(81.8)	710 (36.4)

結 果

水分調整に要した時間および調整後の水分率

水分調整後の水分率は①加熱攪拌区が64.8%、②副資材区が70.7%、③副資材と加熱攪拌区が66.1%であった(表3)。水分調整の作業時間は反復合計で、各区とも材料を攪拌機へ投入および取り出しに1.0時間(hr)を要し、加えて混合や加熱攪拌のための装置の運転時間が①加熱攪拌区は9.5hr、③副資材+加熱攪拌区は5.0hrであった(表4)。

水分調整に要した電力および灯油量

加熱攪拌に要した時間、電力量および灯油量を表4に示した。ふん1,000kg当たりの電力量は①加熱攪拌区が15.5kw、②副資材区が1.0kw、③副資材+加熱攪拌区が10.5kwであった。ふん1,000kg当たり

に要した加熱攪拌時間は①加熱攪拌区が2.20hr、③副資材+加熱攪拌区が1.23hrであった。これに要した灯油量は①加熱攪拌区が115.0L、③副資材+加熱攪拌区が65.9Lであった。1時間当たりの水分蒸発量は①加熱攪拌区が241.3kg、③副資材+加熱攪拌区が338.8kgであった。また、消費灯油1L当たりでの水分蒸発量は①加熱攪拌区が4.61kg、③副資材+加熱攪拌区が6.30kgであった(表5)。

堆肥化

水分調整後の試料は堆積・切返し方式により堆肥化を行った。堆積表面から30cm内部の温度の推移と切返しの関係を図3に示した。堆肥化に要した期間は①加熱攪拌区が118日、②副資材区が193日、③副資材+加熱攪拌区が148日であり、切返し回数は

表3 水分調整実験の反復した合計の結果

区分	加熱攪拌前		加熱攪拌後	
	重量(kg)	水分率(%)	重量(kg)	水分率(%)
①加熱攪拌	4,320	83.0	1,990	64.8
②副資材	5,460	70.7		
③副資材+加熱攪拌	4,790	75.1	2,880	66.1

表4 水分調整に用いたオガクズ、時間、電力および灯油の量(2反復を合計)

区分	水分調整時間 (hr)	加熱攪拌時間 (hr)	電力消費量 (kwh)	灯油消費量 (L)	ふん1,000kg当たり		
					オガクズ量 (kg)	加熱攪拌時間 (hr)	電力消費量 (kwh)
①加熱攪拌	10.5 ^{注1}	9.5	67	497		2.20	15.5
②副資材		2.0 ^{注2}		4	358.2		1.0
③副資材+加熱攪拌	6.0 ^{注1}	5.0	43	269	174.0	1.23	10.5
							115.0
							65.9

注1：搬入出時間1.0hr+加熱攪拌時間

注2：搬入出時間1.0hr+攪拌時間1.0hr

表5 加熱攪拌の水分蒸発の効率(反復の合計)

区分	水分蒸発量 (kg)	水分蒸発速度 (kg/hr)	灯油1L当たりの 水分蒸発量(kg)	
			①加熱攪拌	③副資材+加熱攪拌
①加熱攪拌	2,292	241.3		4.61
③副資材+加熱攪拌	1,694	338.8		6.30

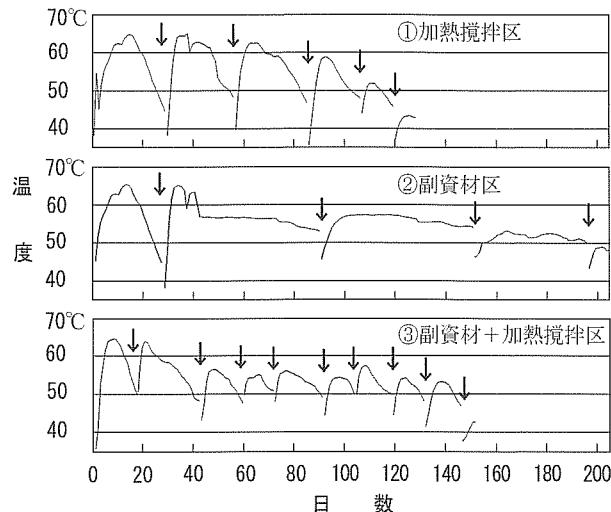
図3 堆肥化中の堆積表面から30cm内部の温度の推移
(↓は切返しを示す)

表6 堆肥化終了までの日数と切返し回数

区分	堆肥化日数	切返し回数
①加熱攪拌	118	4
②副資材	193	3
③副資材+加熱攪拌	148	8

それぞれ4回、3回、8回であった(表6)。

成分の推移

堆肥化による重量、水分率および乾物量の変化を表7に示した。乾物量の減率(総乾物分解率)は①加熱攪拌区が48.5%、②副資材区が49.7%、③副資材+加熱攪拌区が51.4%であった。水分調整前、水分調整後および堆肥化後の成分含率の変化を表8に示した。堆肥化後の炭素対窒素の比率(C/N比)は①加熱攪拌区が21.4%、②副資材区が17.7%、③副資材+加熱攪拌区が20.0%であった。堆肥化後の堆肥熟度判定結果は全て完熟(熟度1)であった。

堆肥化による物理的変化

堆肥化に伴う容積重の変化および堆肥中の団粒の割合を表9に示した。堆肥化前(水分調整直後)の容積重は全区650kg/m³であったが、堆肥化後は①加熱攪拌区が400kg/m³、②副資材区が450kg/m³、③副資材+加熱攪拌区が350kg/m³であった。堆肥の物理的な状態は団粒の割合が①加熱攪拌区が47%、②副資材区が29%、③副資材+加熱攪拌区が26%であった。

表7 堆肥化による重量、水分率および乾物量の減少(下段はふん1,000kgについて)

区分	水分調整後			堆肥化後			減率 ^{注1}		
	重量(kg)	水分率(%)	乾物量(kg)	重量(kg)	水分率(%)	乾物量(kg)	重量(kg)	水分率(%)	乾物量 ^{注2} (kg)
①加熱攪拌	1,990	64.8	701	790	54.3	361	60.3	16.2	48.5
	461		162	183		84			
②副資材	5,460	70.7	1,601	2,170	62.9	805	60.2	11.0	49.7
	1,358		398	539		200			
③副資材+加熱攪拌	2,880	66.0	978	910	47.8	475	68.4	27.6	51.4
	706		240	223		116			

注1：((水分調整後の数値-堆肥化後の数値)÷水分調整後の数値)×100

注2：総乾物分解率

表8 堆肥化処理過程での成分の推移(水分以外は乾物割合)

区分 処理段階	水分 (%)	pH	EC (mS/cm)	発芽率 ^{注1} (%)	灰分 (%)	有機物 (%)	硝酸態窒 素(ppm)	全窒素 (%)	リン酸 (%)	カリ (%)	炭素 (%)	C/N比 (%)
①加熱攪拌												
加熱攪拌前	82.9	7.8	6.0	10.0	14.0	86.0	0.5	1.67	1.29	3.62	41.2	24.7
加熱攪拌後	64.8	8.1	5.7	13.0	13.6	86.4	0.1	1.56	1.26	3.08	43.0	27.5
堆肥化後	54.3	8.1	8.1	94.0	22.7	77.3	19.5	1.70	2.03	5.17	36.5	21.4
②副資材												
オガクズ混入前	83.0	7.4	5.5	0.0	15.4	84.6	0.1	1.69	1.26	3.07	41.6	24.6
オガクズ混入後	70.7	7.5	2.9	59.0	8.1	91.9	0.04	0.88	0.62	1.59	44.1	50.4
堆肥化後	62.9	8.5	4.2	100.0	15.9	84.1	4.4	2.05	1.20	3.07	36.4	17.7
③副資材+加熱攪拌												
オガクズ混入前	81.9	7.7	6.0	6.0	16.1	83.9	0.1	1.57	1.20	3.21	41.6	26.5
オガクズ混入後	75.1	8.0	4.1	34.0	13.0	87.0	0.5	1.26	0.95	2.64	43.1	34.2
加熱攪拌後	66.0	8.0	3.8	37.0	11.9	88.1	0.4	1.23	0.87	2.15	42.7	34.8
堆肥化後	47.8	8.0	5.4	98.0	21.5	78.5	3.8	1.97	1.57	3.97	39.3	20.0

注1：コマツナ種子を用いた熱水抽出液による発芽試験⁴⁾

表9 堆肥化後の容積重と団粒構造

区分	容積重 ¹ (kg/m ³)	団粒の直径と割合(%) ²				計	粉状
		1 cm以下	1 ~ 3 cm	3 cm以上			
①加熱攪拌	400	24	18	5	47	53	
②副資材	450	9	15	5	29	71	
③副資材+加熱攪拌	350	9	15	2	26	74	

注1：水分調整直後の容積重は全区とも650kg/m³であった。

注2：水分調整直後の団粒割合は全区ともほぼ100%であった。

考 察

加熱攪拌で水分調整を行い、処理施設の規模や処理コストを副資材による水分調整と比較検討した。実験ではふん1,000kg当たりの水分調整ランニングコストは、副資材費と電力費そして灯油費を合計して、①加熱攪拌区が4,782円、②副資材区が1,086円、③副資材+加熱攪拌区が3,282円であった（表10）。1日当たり乳用経産牛1頭について①加熱攪拌区が239.1円、②副資材区が54.3円、③副資材+加熱攪拌区が164.1円であった。加熱攪拌方式は副資材方式に比較して3~4倍高くなかった。

水を10°Cから60°Cに暖め蒸発すれば、1kgの蒸發に613kcal（1 cal=4.186J）を要することから、灯油の燃焼熱8,859kcal/L¹⁾で水14.5kgが蒸発すれば熱効率100%になる。これに比較して、実験で得られた蒸発量と熱効率は、①加熱攪拌区が4.61kg/Lと

31.8%、③副資材+加熱攪拌区が6.30kg/Lと43.4%であった。①加熱攪拌区でこれらが低い原因是、投入したふんが液状に近く、回転ドラム内スクリーンのすくい上げ機能が発揮できず、ふんがドラム底辺に停滞して熱風にさらされる表面積が少なかったからと考えられた。液状のふんはある程度固形化して加熱攪拌する③副資材+加熱攪拌区の方法が望ましいと思われた。加熱攪拌水分調整後に堆肥化した堆肥水分率が50%前後（表7）と低かったことから、これを戻し堆肥として副資材の代利用すれば、副資材費の削減が可能と思われた。

加熱攪拌装置は実験用に試作したことから、熱効率が低くかった。改善方法として断熱材を装着したり、攪拌機のドラムを細長い形状にする等の工夫が必要と思われた。

実験に用いた水分調整装置で1回に2,000kgのふ

表10 ふん1,000kg（乳用経産牛20頭分）の水分調整ランニングコスト(円)

区分	副資材費 ¹	電力費 ²	灯油費 ³	計	1頭当たり
①加熱攪拌	0	180	4,602	4,782	239.1
②副資材	1,075	12		1,086	54.3
③副資材+加熱攪拌	522	122	2,637	3,282	164.1

注1：オガクズ購入代金は1,000kg当たり3,000円とした。

注2：低圧電力料金は税込みでkw当たり11.62円とした。

注3：灯油購入代金は税込みでL当たり40円とした。

表11 経産牛80頭の乳用牛群¹の処理施設の面積 (m²)

区分	堆肥舎 ²	水分調整場 ³	副資材倉庫 ⁴	計
①加熱攪拌	220.0	100.0		320.0
②副資材	850.7		43.0	893.7
③副資材+加熱攪拌	369.7	100.0	20.9	490.6

注1：経産牛80頭の乳用牛群（搾乳牛69頭でふん量(kg/頭/日)は50、乾乳牛11頭でふん量は25、育成牛20頭でふん量は16）で総ふん量は約4,000kg/日とした²⁾。

注2：堆肥舎面積は堆肥化日数に在庫期間90日を加えた期間で算出し、高さ2m、四方垂直に堆積するとした。

注3：水分調整場は加熱攪拌水分調整装置とその作業場を含む100m²とした。

注4：15日分の使用量を高さ2m四方垂直に堆積するとした。

表12 経産牛80頭の乳用牛群（処理ふん量4,000kg）の堆肥化施設費試算（万円）

区分	施設面積 1頭当たり	建物費 ¹		水分調整装置費 ²		群	1頭
		群	1頭	群	1頭		
①加熱攪拌	4.0m ²	960	12.0	1,500	18.8	2,460	31.2
②副資材	11.2m ²	2,681	33.5			2,681	33.9
③副資材+加熱攪拌	6.1m ²	1,472	18.4	1,500	18.8	2,972	37.6

注1：鉄骨構造で30,000円/m²とした。

注2：水分調整装置一式の設置費を1,500万円とした。

んを1日2回処理するとして、4,000kg前後のふんを排せつする経産牛80頭規模の乳用牛群をモデルに、施設規模とその設置費を見積もった（表11、12）。施設の必要面積は①加熱攪拌区が 320.0m^2 、②副資材区が 893.7m^2 、③副資材+加熱攪拌区が 490.6m^2 であった。鉄骨構造で建築費を3万円/ m^2 とすると、①加熱攪拌区が960万円、②副資材区が2,681万円、③副資材+加熱攪拌区が1,472万円の初期投資が必要とされる。これに加熱攪拌装置の設置費を1,500万円として加えると、経産牛1頭当たりの負担は①加熱攪拌区が31万2千円、②副資材区が33万9千円、そして③副資材+加熱攪拌区が37万6千円となり、いずれの区も施設費に大差はなかった。

以上の結果をまとめて、次の結論を得た。

- 1) 堆肥化施設の大幅な縮小は、水分調整を加熱攪拌で行うことで可能である。
- 2) 水分調整コストは加熱攪拌が副資材より3～4倍高かった。
- 3) 水分調整を加熱攪拌で行った場合、副資材に比べて、堆肥化期間が $2/3$ 、堆肥生産量および施設面積が $1/3$ に縮小したが施設費に大差はなかった。

- 4) 水分含率が高く液状に近いふんは副資材で固形物にして加熱攪拌した方が熱効率が高かった。
- 5) 敷地不足や堆肥の散布先の少ない畜産農家の選択肢一つとして加熱攪拌方式は有望である。

謝 詞

当研究の堆肥熟度判定を快く受託された、富士平工業株式会社畜産機器部富塙茂次長および社員に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 理科年表. 丸善. 東京都中央区. 2001.
- 2) 財団法人畜産環境整備機構. 畜産排泄物処理施設の設計計算と畜産環境保全に関するQ&A. 東京都港区. 2002.
- 3) 有馬儀信ら. 島根県立畜産試験場報告, 36: 61～65. 2003.
- 4) 農林水産技術会議事務局, 農業・生物系特定産業技術研究機構. 家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル. 2004.