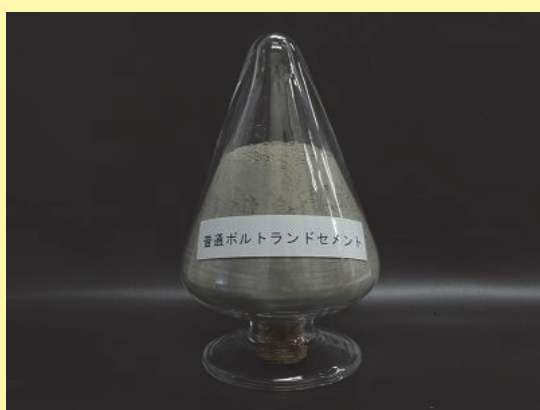


# セメント製造向けの 原燃料用家畜ふん堆肥の生産技術の開発

民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業 (2008 - 2011)  
「家畜糞のセメント製造用燃料化技術の開発」の成果



2012年3月

農研機構 畜産草地研究所



## 技術レポート 11号

### セメント製造向けの原燃料用家畜ふん堆肥の生産技術の開発 の刊行にあたって

「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」（家畜排せつ物法）が平成11年に制定されてから12年が経過した。以前は不適切な処理の象徴であった野積み状態のふん尿は、その多くが堆肥舎などで適切に管理されるようになり、畜産から発生するふん尿の約9割が堆肥化や液肥化されている。一方で、畜産が集中する地域においては、良質な堆肥を生産しても、耕種側の需要と畜産側の供給にミスマッチが生じて、堆肥が余る状況が見られるようになった。こういった余剰の堆肥の新たな利用先として、堆肥の炭化处理や焼却処理が注目されている。これらの施設では、家畜ふんを熱や電気といったエネルギーに変換できるメリットが得られる反面、施設費やその維持管理費が高額になり、炭化、焼却後の炭や焼却灰の利用が進まない場面もみられる。

このような状況の中で、（社）畜産技術協会による「民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業」の助成を受けて、住友大阪セメント株式会社と共同で「家畜糞のセメント製造用燃料化技術の開発」を平成20年から4年間実施してきた。本事業では、余剰となった家畜ふん堆肥をセメント製造用原燃料として利用することを目的にして、そのために堆肥が具備すべき物性や堆肥化处理方法を技術的な視点で整理し、問題点の改善を図ってきた。さらには、2つのセメント工場をモデルケースにして、家畜ふん堆肥を原燃料にしたセメントを製造し、経済性やセメントの品質への影響、あるいは、今後の事業化に向けた展開条件を明らかにしてきた。本レポートは、これら4年間の成果をまとめたものであり、バイオマス利活用の一助となることを願っている。

なお、畜産草地研究所は、2011年4月から始まった（独）農研機構の第3期中期計画期間において、大課題「国産バイオ燃料・マテリアル生産技術の開発とバイオマスの地域利用システムの構築」の中で、中課題「畜産廃棄系バイオマスの処理・利用技術と再生可能エネルギー活用技術の開発」を担当しており、畜産廃棄系バイオマスのより一層の利活用に向けた技術開発を推進している。

平成24年3月

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構  
畜産草地研究所 所長 松本 光人

# 目次

1. 民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業 「家畜糞のセメント製造用燃料化技術の開発」について	
1) 背景と目的	
(1) 畜産業とセメント業を取り巻く背景	1
(2) セメント工場の製造工程と原燃料のフロー	2
(3) セメント原燃料堆肥の仕様	3
2) 民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業の構成	4
3) 研究実施体制	5
2. 家畜ふん堆肥の現状調査とセメント原燃料化に向けた技術の方向性	
1) 豚ふん堆肥の特徴	6
(1) 豚ふん堆肥の分析結果	6
(2) 塩素濃度が低い農家の調査結果	7
2) 鶏ふん堆肥の特徴	8
3) 牛ふん堆肥の特徴	10
4) 堆肥化に伴う原料の変化	11
5) 2章まとめ	
(1) 豚ふん堆肥について	15
(2) 鶏ふん堆肥について	15
(3) 牛ふん堆肥について	16
(4) 堆肥化基礎試験からの知見	16

3. セメント原燃料堆肥を製造・利用するための要素技術の検討	
1) 固液分離機（スクリープレス）による水分除去、および塩素除去	
(1) 固液分離機の脱水性能と塩素除去性能	17
(2) 処理対象物の性状と処理性能	20
2) 堆積方式（通気型堆肥舎）でのセメント原燃料堆肥の生産	21
3) 開放型攪拌方式でのセメント原燃料堆肥の生産	24
4) 密閉縦型攪拌方式でのセメント原燃料堆肥の生産	26
5) 通風による仕上げ乾燥	29
6) 3章のまとめ	
(1) 含水率の低減化方法について	30
(2) 塩素濃度の低減化方法について	30
4. 豚ふん堆肥を利用したセメント原燃料化モデルとその検証	
1) 原燃料堆肥を空気搬送する場合（八戸セメントモデル）	
(1) 八戸セメントモデル	31
(2) 八戸セメントモデルでの石炭代替効果	32
(3) 八戸セメントモデルの経済性の評価	33
2) 原燃料堆肥を仮焼炉経由でキルンに投入する場合（栃木工場モデル）	
(1) 栃木工場モデル	34
(2) 栃木工場モデルでの石炭代替効果	35
(3) 栃木工場モデルの経済性の評価	36
5. 今後の課題	
1) 原燃料堆肥の供給体制の整備	37
2) 塩素の低減化対策	37
3) オフセットクレジット制度などの利用	39
要約	41
引用文献	42



## 1. 民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業「家畜糞のセメント製造用燃料化技術の開発」について

### 1) 背景と目的

#### (1) 畜産業とセメント業を取り巻く背景

政府の新たなバイオマス・ニッポン総合戦略<sup>1)</sup>によると、日本国内でのバイオマスの年間発生状況は、家畜ふん尿が8,900万t(43%)であり、下水汚泥の7,500万t(35%)を超える最大の発生量と推計されている。家畜ふん尿は、そのままでは水分が高く汚物感が残っているため、日本では堆肥化処理後に肥料として流通、利用するのが一般的である。しかしながら、せっかく堆肥を生産しても、畜産が集中する地域では堆肥が供給過剰となるケースが見られ、肥料用途のほかにも堆肥の新たな利用方法が検討されている<sup>2)</sup>。

他方、日本における年間のセメント生産量は、5,600万t/年とこちらも膨大であり<sup>3)</sup>、その製造工程では、製品の1/10に相当する約560万tの石炭が原燃料として利用されている(原燃料:石炭のように、燃料利用後の灰分がセメント原料としても利用できるもの)。従来、石炭の代替として廃プラスチックや木屑が原燃料利用されてきたが、最近はこれらの需給バランスが崩れ、需要が供給を大幅に上回って代替原燃料の品薄状態が続いている。また、石炭を燃焼する際の地球温暖化ガスの低減化対策もセメント業界に向けられた強い要望であり、新たな原燃料源の確保と原燃料の多様化が急務となっている。

そこで、本事業では、畜産とセメント業界との農工連携を強化して、家畜ふん堆肥をセメント製造時の原燃料として利用するための技術開発を目的とした。家畜ふん尿はセメント製造時の原燃料として十分な賦存量を有している。しかも、燃焼後の焼却灰はそのままセメントの一部となって廃棄物が発生しないことは、余剰堆肥の利用先として好適である。しかし、家畜ふん堆肥がセメント製造時の原燃料に適する条件を満たしているか、あるいはその条件を満たすにはどのような前処理が必要なのか、今のところそれらの知見は少ない。含水率や発熱量など原燃料としての適性や、セメント製造設備やセメント品質に悪影響をきたす塩素の低減化方法、あるいは原燃料堆肥の経済性の評価など、家畜ふん堆肥の原燃料利用に向けた事業化の視点から、課題の整理とその対策が必要である。

## (2) セメント工場の製造工程と原燃料のフロー

セメントの製造工程の概略を図1に示す。石灰石などのセメント原料は、まず所定の化学組成に調合されてから、縦型ミルなどで粉碎されて、余熱装置に送られる。その後、原料は焼成炉に投入されて、最大1,450℃という高温に曝されながら化学反応を起こし、最終的にクリンカーに焼成される。クリンカークーラーで急激に冷却された後は、クリンカーに石膏や混合材が加えられて、仕上げ粉碎や分級を経て、セメント製品に仕上げられる。

焼成炉はキルン方式(回転窯)であり、原燃料の投入方法は2つのタイプに大別される。一つ目は、キルンの出口側(バーナー付近)に空気搬送されて、焼成炉内に突出するノズルから原燃料を吹き込む方法である(図1中①の経路)。二つ目は、余熱装置の下部にある仮焼炉にいったん投入され、他の原料とともにキルンの入り口から投入される方法である。この場合、原燃料がバケットに直接投入されたあとは、ベルトコンベヤなどで仮焼炉に搬入される(図1中②の経路)。前者では、原燃料は空気搬送が可能な粒径で、しかも配管途中で詰まることがないように乾いた状態であることが要求されるが、原燃料の投入はブロワと搬送配管で構成されるシンプルな設備でよい。一方、後者の場合は、原燃料の形状や性状はそれほど厳格に制限されないが、投入のための搬送装置やダンパー設備を要する。

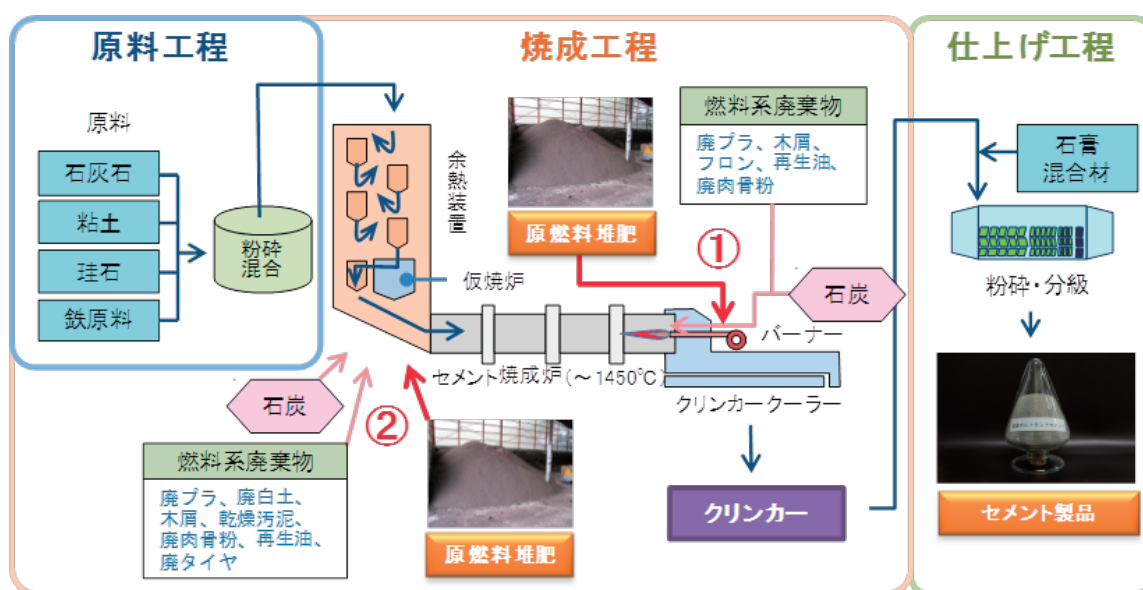


図1 セメント製造時の原燃料のフロー図



### (3) セメント原燃料堆肥の仕様

そこで、本事業では、焼成炉への投入方法によって二つの原燃料の仕様を設定した。

一つ目は、焼成炉のバーナー付近のノズルから堆肥を吹き込む場合であり、空気搬送のために堆肥はできるだけ細かい粒度で、しかも低い含水率である必要がある。堆肥化過程では、剪定枝など粗い副資材は混合できず、家畜ふんだけを原料にして、堆肥化過程で十分に含水率を低減することが重要である。

二つ目は、焼成炉の入り口から他の原料や原燃料とともに投入する場合であり、比較的含水率が高く、粒度が粗いものでも対応できるケースである。この場合、剪定枝のような副資材を混合して堆肥化を行い、その堆肥を原燃料として利用する。

いずれの仕様においても、セメントの品質基準から塩素濃度は低いほど好ましいが、セメント工場が受け入れる他の原料や原燃料の塩素濃度によって堆肥に許容される塩素濃度に違いが生じる。ちなみに、空気搬送によって原燃料の投入が可能な八戸セメント株式会社（以下、八戸セメント）では、塩素濃度の余裕により許容値は比較的高く設定されて 0.3%DM（DM：乾物ベース）以下である。一方、住友大阪セメント株式会社栃木工場（以下、栃木工場）では、仮焼炉経由でキルン入り口から原燃料堆肥の投入が可能であるが、すでに塩素濃度が高い原料や原燃料を多く受け入れているため、求められる塩素濃度は 0.1%DM 以下とされている。いずれも石炭の代替原燃料としては、総発熱量が石炭の半分程度、木屑と同等以上とし、それぞれの工場をモデルケースにして、表 1、2 の通り堆肥の仕様を設定した。

表 1 空気搬送可能な堆肥の条件設定(八戸セメントモデル)

項目	目標値	理由
含水率	25%以下	・有効な発熱量の確保
塩素濃度 (乾物ベース)	0.3%DM 以下	・セメント塩素濃度は JIS で 350ppm 以下と規定 ・セメント製造設備の操業維持のため (余熱装置での低融点化合物の析出を防止) (高温酸性ガスの発生による設備の腐食を防止)
総発熱量 (乾物ベース)	15MJ/kgDM 以上 (3,500kcal/kgDM)	・石炭(25~30MJ/kg)の半分程度 ・木屑(15MJ/kg)と同等以上
備考	工場は港の近隣で、石炭やほかの原燃料が比較的安価に入手可能	

表 2 仮焼炉からキルンに投入する堆肥の条件設定(栃木工場モデル)

項目	目標値	理由
含水率	30%以下	・有効な発熱量の確保
塩素濃度 (乾物ベース)	0.1%DM 以下	・セメント塩素濃度は JIS で 350ppm 以下と規定 ・セメント製造設備の操業維持のため ・工場の受入スペックに準拠
総発熱量 (乾物ベース)	15MJ/kgDM 以上 (3,500kcal/kgDM)	・石炭(25~30MJ/kg)の半分程度 ・木屑(15MJ/kg)と同等以上
備考	工場は内陸部に位置し、石炭の入手には比較的長距離の運搬が必要	

## 2) 民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業の構成

4年間にわたる本事業においては、表3の細部事業を計画し、最終的に二つのセメント工場をモデルにして、家畜ふん堆肥を原燃料に使用してセメント製品を製造した。

表 3 民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業の研究実施計画

細部事業名	細部事業内容	実施期間			
		08	09	10	11
1. 豚糞の堆肥化システムの現状把握研究開発事業	豚糞堆肥化施設の調査、中間品、最終品の物性評価	■			
2. 燃料化システム構築のための燃料製造要素研究開発事業	溶解、脱水工程や乾燥工程に関する調査実験	■	■		
3. 燃料化システム構築のための燃料利用要素研究開発事業	運搬コスト低減化や粉砕、貯蔵に関する調査実験	■	■		
4. 鶏糞、牛糞の燃料化システム適用の検討研究開発事業	堆肥化の現状把握、乾燥工程、粉砕、貯蔵に関する調査		■	■	
5. 豚糞燃料化システム構築のためのモデル実証研究開発事業	製造、利用モデルの実証と事業化モデルの検討		■	■	
6. 豚糞燃料化システムの実用化事業	構築した豚糞燃料化システムを事業ベースで評価				■

### 3) 研究実施体制

表4の体制で本事業を実施した。

表4 民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業の研究実施体制

事業実施主体： 畜産草地研究所	実施期間				備考
	08	09	10	11	
澤村 篤	◎	◎	△		2010年に近中四農研へ異動
阿部 佳之		△	◎	◎	
小島 陽一郎			△	△	
天羽 弘一				△	
共同研究分担先： 住友大阪セメント株式会社					
齊藤 兼広	○				2009年に退職
林 幹夫	△	○	○	○	
君田 美智雄		△	△	△	

“◎”は研究責任者、“○”は研究分担責任者、“△”は研究者

## 2. 家畜ふん堆肥の現状調査とセメント原燃料化に向けた技術の方向性

### 1) 豚ふん堆肥の特徴

#### 【調査方法】

茨城県では、過剰な施肥や家畜ふん尿のほ場還元を原因とする周辺水域の汚染防止、例えば、霞ヶ浦周辺地域での水質改善などを目的として「畜産バイオマス燃料化検討会」を立上げ、この中で特に豚ふん堆肥の農業外利用を推進している。そこで、豚ふん堆肥の現状調査については、茨城県の「畜産バイオマス燃料化検討会」の協力を得て実施することとした。

まず、調査を開始するにあたっては、茨城県畜産センターが保管する県下の農家で生産された豚ふん堆肥 40 検体の含水率と塩素濃度を分析した。次に、40 検体のうち、塩素濃度が比較的 low、原燃料堆肥の候補となる堆肥の生産農家 11 戸を訪問して、その生産方法を調査した。また、これら 11 戸の農家については、堆肥の含水率と塩素濃度に加え、総発熱量を分析した。なお、分析項目とその方法については表 5 に示す。

表 5 分析項目と方法

分析項目	分析方法
含水率、%	JIS Z 7302-3
塩素濃度、%DM ただし、液状原料は ppm	燃焼ーイオンクロマトグラフ法
総発熱量、MJ/kgDM	JIS Z 7302-2
灰分、%DM	JIS Z 7302-4

#### 【結果と考察】

##### (1) 豚ふん堆肥の分析結果

茨城県下 40 戸の堆肥サンプルの含水率と塩素濃度を図 2 に示す。半数以上の 21 戸の農家は含水率が 30%以下の堆肥を生産しており、平均で 31%であった。開放型攪拌方式や密閉縦型攪拌方式など、攪拌装置を装備する堆肥化施設で生産された堆肥の含水率は低い傾向にあり、逆に堆積方式で生産される堆肥の含水率は高くなる傾向が見られた。塩素濃度は半数以上の農家の堆肥が 1.0%DM を超過しており、平均で 1.2%DM と当初の想定を上回った。

## (2) 塩素濃度が低い農家の調査結果

(1) の調査結果を受けて、40 戸の中で比較的含水率、あるいは塩素濃度が低い堆肥を生産する農家を訪問し、堆肥化前の脱水処理工程の有無を調査するとともに、堆肥の成分について再度分析を行った。調査の結果を表 6 に示す。

訪問した 11 戸のうち、5 戸は脱水処理を行っており、このうち 3 戸の堆肥については調査農家 40 戸の中で最も塩素濃度が低く、塩素濃度の低減化には脱水工程が有効であることが示された。

総発熱量についてはほかの分析項目に比べて農家間の変動は小さく、平均で 16MJ/kgDM であった。

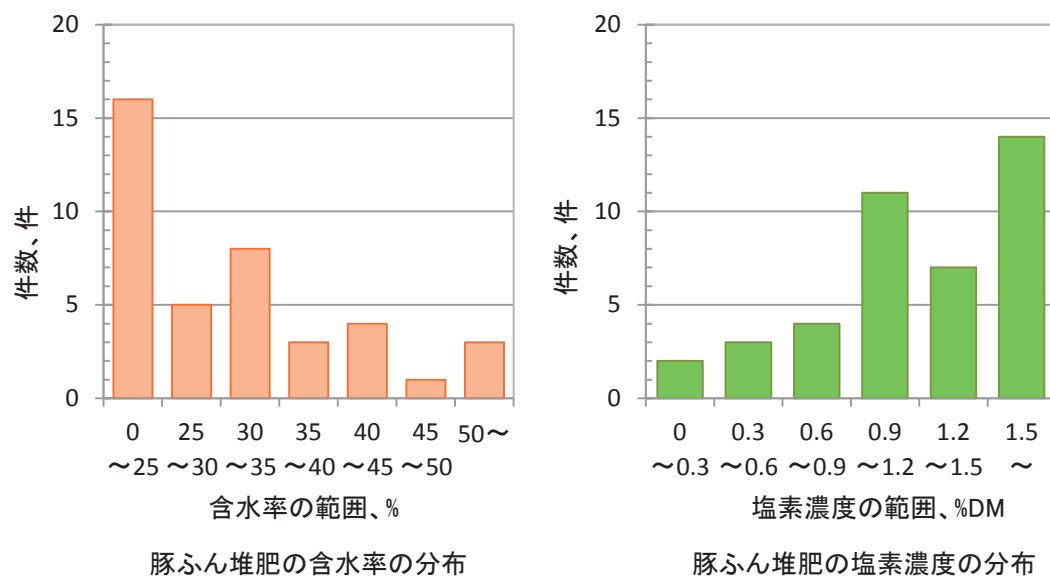


図 2 豚ふん堆肥の含水率と塩素濃度の分析結果

表 6 塩素濃度が比較的低い 11 戸の農家の調査結果

農場	含水率 %	塩素 %DM	総発熱量 MJ/kgDM	灰分 %DM	脱水機 の有無
A	35.8	0.57	14.2	29.6	無
B	42.2	0.20	13.2	35.0	有
C	41.7	0.29	15.4	28.7	有
D	22.7	0.66	17.2	17.2	無
E	55.5	0.62	17.9	17.4	有
F	31.0	0.92	17.2	18.3	無
G	22.6	0.47	16.7	20.0	無
H	22.9	0.34	17.9	23.9	有
I	9.2	0.91	10.5	46.9	無
J	30.8	0.90	15.4	25.0	無
K	31.8	0.91	16.9	16.7	有
平均	31.5	0.62	15.7	25.3	—

## 2) 鶏ふん堆肥の特徴

### 【調査方法】

八戸セメントがある青森県八戸市の周辺で、立ち入りが可能であった養鶏場の鶏ふん堆肥を採取したほか、市販の乾燥鶏ふんや鶏ふんペレットを取り寄せて、前項と同様に含水率と塩素濃度、総発熱量を分析した。なお、堆肥を水で洗浄した後に脱水して、試験的に塩素を減らす試みについても今回の分析対象とした。

### 【結果と考察】

調査結果を表 7 に示す。鶏ふん堆肥は、鶏舎から出された生に近い状態のものも含まれるなど変動があったものの、平均で 45%と低い含水率であった。これらの一部に加水して脱水したものが“洗浄・脱水”であるが、加水することで含水率が高くなったものの、脱水処理によって 50%程度に留まった。乾燥鶏ふんの平均含水率は 24%であり、市販品は十分に乾燥されていた。

堆肥の塩素濃度は、採取場所によって 0.42~0.82%DM と変動が大きく、その平均値は 0.63%DM と高かった。乾燥鶏ふんの塩素濃度は平均値で 0.55%DM であり、堆肥よりもやや低かったが、原燃料堆肥という点では高い塩素濃度であった。一方で、堆肥を洗浄す

ることで塩素濃度が大きく低減されることも確認され、豚ふん堆肥の調査で脱水処理が有効であることと同様に、ここでもその有効性が示された。

表 7 鶏ふん堆肥の調査結果

農場 *	性状	含水率 %	塩素 %DM	総発熱量 MJ/kgDM	灰分 %DM
A	堆肥	56.1	0.76	18.3	13.4
B		35.7	0.82	15.8	14.2
C		44.9	0.50	17.3	12.4
D		42.9	0.42	15.7	13.0
堆肥平均		44.9	0.63	16.8	13.2
B	洗浄・脱水	35.7	0.06	16.8	10.3
C		59.0	0.03	17.5	12.1
D		55.1	0.07	16.9	10.6
洗浄・脱水平均		49.9	0.05	17.1	11.0
E	乾燥ふん	40.9	0.50	17.3	13.7
F		21.3	0.50	17.2	13.9
G		9.9	0.64	8.87	36.1
乾燥ふん平均		24.0	0.55	14.5	21.2
H	鶏ふんペレット	9.3	0.40	15.9	15.8
I		9.8	0.07	17.5	11.8
鶏ふんペレット平均		9.5	0.23	16.7	13.8
A	焼却灰	0.4	7.84	-	94.1

\* 同じアルファベットは同じ採取場所を示す

### 3) 牛ふん堆肥の特徴

#### 【調査方法】

7か所（東北2件、関東3件、中国四国2件）の牧場を訪問して堆肥化処理施設を調査するとともに、堆肥原料や堆肥を採取して前項同様に含水率と塩素濃度、総発熱量を分析した。このうち3牧場については、固液分離機（スクリュープレス）による脱水工程を採用していたことから、固液分離後の固分の分析も行った。

#### 【結果と考察】

調査結果を表8に示す。堆肥原料は生ふんに副資材が混合されたものがほとんどであり、副資材の種類や混合量によって堆肥原料の含水率は59～79%と大きく変動し、平均で66%であった。固液分離機で脱水された固分は含水率が平均で76%と高かったものの、3つのサンプル間の変動は小さかった。堆肥の含水率の平均は49%と堆肥原料に比べて大きく低下したが、豚ふんや鶏ふんを原料にした堆肥に比較すると高い含水率であり、このままでは原燃料としての利用は困難であった。

塩素濃度は堆肥原料を固液分離することで大きく減少でき、サンプルによっては0.05%DMまで低減できていたが、堆肥原料並みの0.69%DMという固分もあり、今回の調査の平均値をもって評価することはできなかった。また、堆肥化することで堆肥の塩素濃度が上昇する傾向にあった。

総発熱量はサンプルの性状や牧場間での変動が小さく、豚ふんや鶏ふんの調査と同様に、原燃料用途を満たす値であった。



表 8 牛ふん堆肥の調査結果

農場 *	性状	含水率 %	塩素 %DM	総発熱量 MJ/kgDM	灰分 %DM
A1	堆肥原料	63.9	0.45	18.4	7.3
A2		66.5	0.24	18.1	8.3
B1		59.1	0.34	15.7	23.5
B2		64.8	0.34	14.1	30.2
D		70.5	1.00	16.3	16.2
E		79.1	1.43	16.5	11.3
G		60.6	0.40	13.9	—
堆肥原料平均		66.3	0.60	16.1	16.1
B	固液分離 固分	78.5	0.05	17.8	8.5
C		74.5	0.69	17.2	14.3
E		74.9	0.38	16.6	13.4
固液分離固分平均		76.0	0.37	17.2	12.0
A	堆肥	18.1	0.71	17.1	13.1
C1		69.4	0.83	16.2	16.8
C2		68.7	0.99	16.4	18.0
D1		59.7	1.01	16.3	16.2
D2		48.0	0.99	16.5	15.6
E		50.1	0.65	16.1	17.6
F		25.0	0.78	9.9	61.9
G		52.5	0.92	15.4	—
堆肥平均		48.9	0.86	15.5	22.7

\*同じアルファベットは同じ農場を示し、添え字は同じ敷地内にある異なる施設で採取したことを示す

#### 4) 堆肥化に伴う原料の変化

##### 【調査方法】

家畜ふんの堆肥化過程での含水率や塩素濃度、総発熱量の変化を調査するため、畜産草地研究所（那須拠点）の牛群管理実験棟で発生した牛ふんに対し、副資材を混合しない乾燥ふん、あるいは戻し堆肥、オガクズ、モミガラを副資材として混合した4条件、さらにそれぞれの条件で含水率を60%と70%の2段階に調整して、計8条件の堆肥化基

礎試験を行った。

堆肥化試験用の発酵槽は 430L のもの 2 台であり（写真 1、2）、4 週間にわたる堆肥化期間中には 1 週毎に切り返しを行って堆肥原料をサンプリングした。堆肥原料の温度変化を測定するとともに、堆肥の含水率、塩素濃度、総発熱量を分析した。



写真 1 堆肥原料の投入、切り返し風景



写真 2 堆肥原料は送風機で通気される

### 【結果と考察】

堆肥原料の温度変化を図 3 に示す。オガクズを混合した条件ではやや温度が低くなる傾向にあったが、いずれの条件でも最大温度は 68℃以上に達して一般的な堆肥化の温度変化が見られた。つまり、切り返し毎に温度ピークが生じて、切り返し数が増す毎にピーク温度が低下する温度変化が観察された。

含水率の変化を図 4 に示す。含水率 60%、70%条件ともに、副資材を用いない条件（乾燥ふん）で含水率の低下が顕著であったが、ほかの多くの条件では 50%以上で高止まりした。副資材を用いない場合には、ふん由来の易分解性有機物が多く分解されて、その結果、発酵熱による水分蒸発が活発であったと考えられる。ただし、いずれの条件でも含水率が 30%を下回ることとはなく、堆肥化处理単独では原燃料堆肥の仕様を満たす含水率まで低減されなかった。

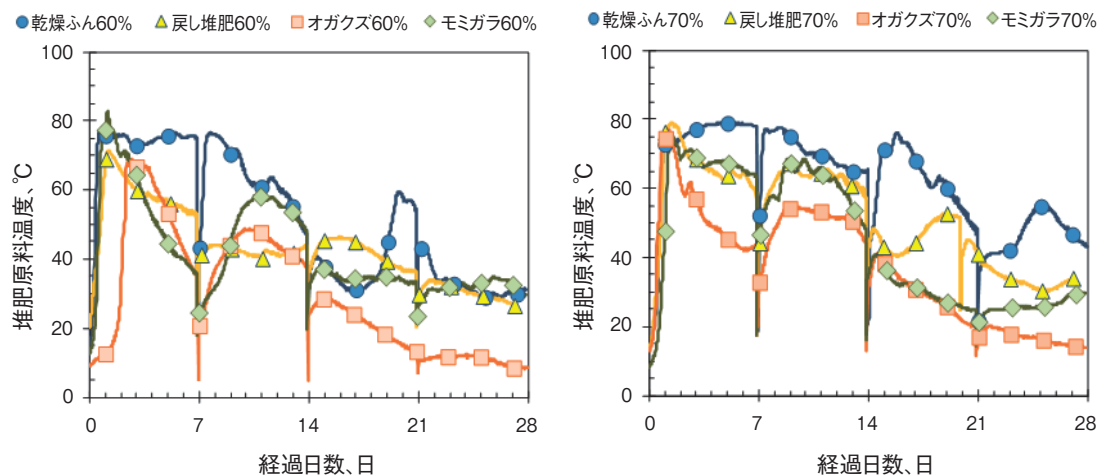


図3 堆肥化過程の温度変化(左:含水率 60%、右:含水率 70%)

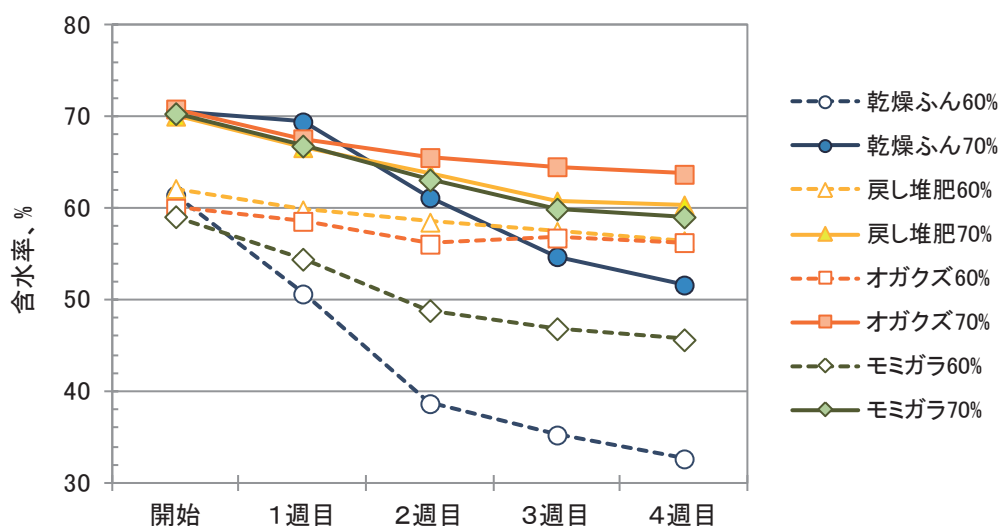


図4 堆肥化過程の含水率の変化

塩素濃度の変化を図5に示す。オガクズやモミガラを混合した含水率60%条件では、堆肥化開始時から塩素濃度が低く保たれ、堆肥化後も高くなることはなかった。これらの条件は塩素濃度が低い副資材を多く混合した条件であり、副資材の混合は塩素を希釈する効果があるものと思われる。

一方で、同じ副資材であっても戻し堆肥の場合は、堆肥化を繰り返すことで戻し堆肥中の塩素が濃縮されて、高い塩素濃度であったと推測される。その結果、戻し堆肥を副

資材にした条件では、他の条件に比べて堆肥化開始時から高い塩素濃度になったものと思われる。酪農業や一部の養豚業では、畜舎の敷料資材として戻し堆肥を利用するケースがあることから、原燃料堆肥の生産においては、家畜の飼養管理面の確認も必要である。

総発熱量の変化を図6に示す。いずれの条件も堆肥化が進むにつれて総発熱量がわずかに減少した。これは、堆肥化に伴って原料の熱量が消費されたためであり、減少分の一部は原料の昇温（顕熱）や水分蒸発（潜熱）に使われたものと思われる。ただし、開始時の総発熱量に対する4週間後の総発熱量の減少率は、含水率60%条件の場合に4.2～5.5%、70%条件では3.6～8.0%といずれの含水率条件でも低く、90%以上の熱量は堆肥化過程で消費されずに残存した。オガクズを混合した場合は、他の条件に比較して堆肥の総発熱量が大きく、一方で総発熱量の減少率は低い傾向にあったが、これはオガクズに含まれる分解されにくいセルロースやリグニンが混合され、堆肥化過程でも分解されずにそのまま堆肥に残存したためと考えられる。

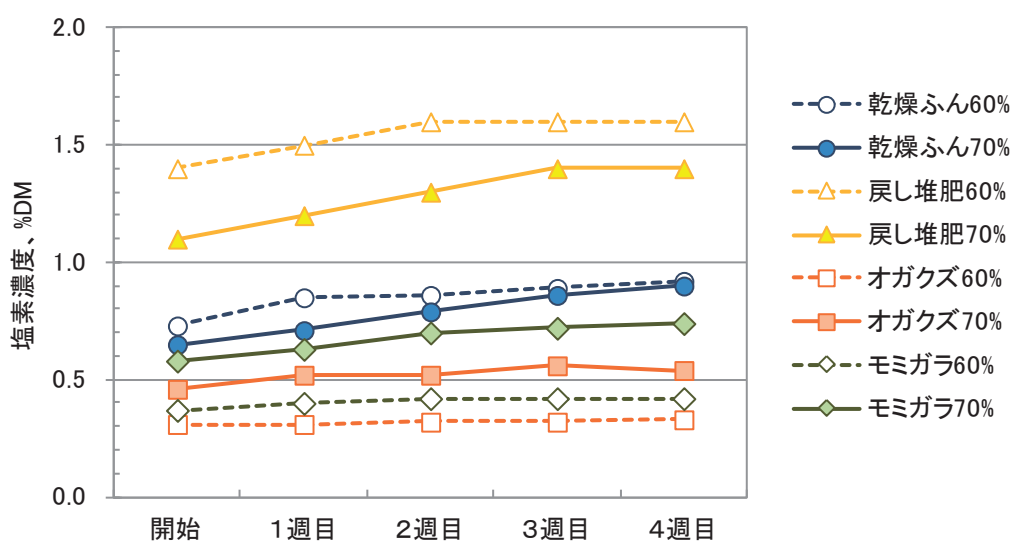


図5 堆肥化過程の塩素濃度の変化

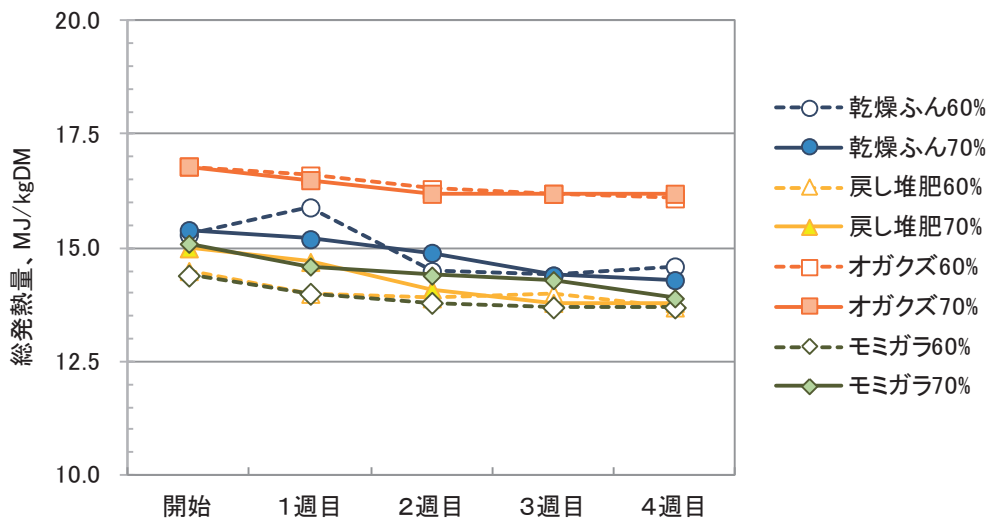


図6 堆肥化過程の総発熱量の変化

## 5) 2章まとめ

畜産現場における調査と堆肥化基礎試験により以下のことが考えられる。

### (1) 豚ふん堆肥について

豚ふん尿をセメント製造時の原燃料として使用するためには、そのままでは含水率と塩素濃度が高く、ふん尿の段階での前処理が必要であった。ふん尿を固液分離することで含水率と塩素濃度の低減が可能であり、分離された固分を堆肥化すれば、豚ふんを原燃料用途まで乾燥できる可能性が見い出された。

さらに、現地調査からは、養豚業ではふん尿の一部、あるいは全量を液状で処理する浄化施設を併設するケースが多く、固液分離後の液分の処理も比較的容易であり、原燃料堆肥の生産には最も有利と考えられる。

豚ふん堆肥の総発熱量は目標値をほぼ満たしており、農家間や処理施設による変動も含水率や塩素濃度に比べて小さく、安定的であった。

### (2) 鶏ふん堆肥について

鶏ふんはそのままでは塩素濃度が高く、含水率も原燃料用途としてはやや高かったことから、豚ふん尿と同様に前処理、あるいは堆肥化後の後処理が必要であった。鶏ふん堆肥を水で洗浄し、脱水処理を行うことで塩素濃度を低減できる知見は得られたものの、養鶏場に浄化施設が設置されることは極めて稀であることから、洗浄水の処理が課題として残された。採取した鶏ふん等のサンプルの総発熱量は目標値を十分に満たした。

### (3) 牛ふん堆肥について

牛ふんの堆肥原料は、そのままでは含水率と塩素濃度が高く、他の畜種と同様に原燃料化のための前処理が必要であった。また、固液分離した固分を含む堆肥原料の含水率が高いために、堆肥の含水率も高止まりする傾向にあり、堆肥化後に堆肥の含水率を下げる方法を検討する必要があった。

牛ふん尿の堆肥化処理では、生ふんに副資材を混合してから、後述の堆肥舎や開放型攪拌方式による堆肥化施設を使う場合が多く、固液分離機を備える牧場は養豚場に比べてまだ少ない。さらには、固液分離機による固分が得られたとしても、固分を堆肥化したものは土壌改良材として耕種農家のニーズが高く、今後も原燃料化に仕向ける十分量を確保できるかが課題である。このように、固液分離機による脱水工程で塩素が除去された堆肥の入手は困難が予想されることから、むしろ副資材の混合割合を調整して、塩素濃度を希釈した堆肥の利用が有効と考えられる。

総発熱量については他の畜種と同様に、一部のサンプルを除いて16~17MJ/kgDMで安定であり、原燃料の仕様をほぼ満たした。

### (4) 堆肥化基礎試験からの知見

堆肥化処理では、原料の有機物分解に伴う発酵熱によって水分が蒸発するため、含水率の低減効果が期待できる。一方で、有機物の分解は乾物の減少にもなり、塩素が濃縮されて塩素濃度が高くなることが確認された。その増加は開始時の堆肥原料の乾物濃度に対して1.1~1.3倍であった。塩素の総量に変化はないものの、セメント工場では塩素濃度を一つの基準に原燃料の品質を評価していることから、この堆肥化処理過程での塩素濃度の変化も念頭に置く必要がある。

また、総発熱量は有機物分解に伴って減少することが確認され、その減少率は原料に含まれていた総発熱量の3.6~8.0%であった。しかし、堆肥化過程で含水率が大きく低下することや、製品堆肥は木屑と同等の総発熱量を残存したことから、堆肥化に伴う総発熱量の減少は許容の範囲と考えられる。

### 3. セメント原燃料堆肥を生産・利用するための要素技術の検討

#### 1) 固液分離機（スクリープレス）による水分除去、および塩素除去

##### (1) 固液分離機の脱水性能と塩素除去性能

###### 【調査方法】

家畜ふん尿中の塩素を除去するとともに、その後の家畜ふんの発酵を促進する前処理方法を確定するために、固液分離機による脱水処理工程を調査した。栃木県那須烏山市のS牧場から材料や場所の提供を得て、固液分離機のメーカー立ち合いのもとで調査は実施された（写真3、4）。固液分離機のスクリー回転数を操作することで処理速度を1～7rpmの範囲で5段階に変えて、表9の条件に従って固液分離機の処理速度や乾物回収率、塩素除去率、あるいは得られた固液分離固分の性状を評価した。



写真3 供試した可搬式の固液分離機



写真4 調査現場でのサンプリング風景

表9 固液分離機の脱水性能調査の条件

調査場所	S牧場(栃木県那須烏山市)、2009.11.17～20	
供試原料	凝集剤を所定量添加し、濃縮器でろ液を除去した豚ふん尿スラリー	
	塩素濃度、ppm	870～930
	含水率、%	91.8～93.9
供試装置	F社製 SHX-200型 1.5ML(スクリープレス・ツインタイプ)	
	スクリー (テフロン被覆)	SPNo36(汎用タイプ) SPNo45(圧縮比が大きいタイプ)
	運転条件	・スクリーの回転数を1～7rpmに変化 ・スクリー内部を還流する蒸気で原料を加熱する条件下でも脱水処理を実施
分析項目	表5と同様	

## 【結果と考察】

### ①スクリー回転数と処理性能 (図 7, 8)

スクリー回転数が大きくなるほど直線的に処理速度が増加して、7rpm の処理速度は 1rpm の場合の 3.9 倍であった。それとともに、負荷電流値も直線的に増加したが、7rpm の負荷電流値は 2 倍に留まった。

原料を加熱することで処理速度にやや改善が見られたが、スクリーに原料の付着が確認されたことから、長時間の処理にあたっては処理速度の低下が考えられる。原料の加熱やスクリーの圧縮比の違いによる付加電流値への影響はあまり見られなかった。

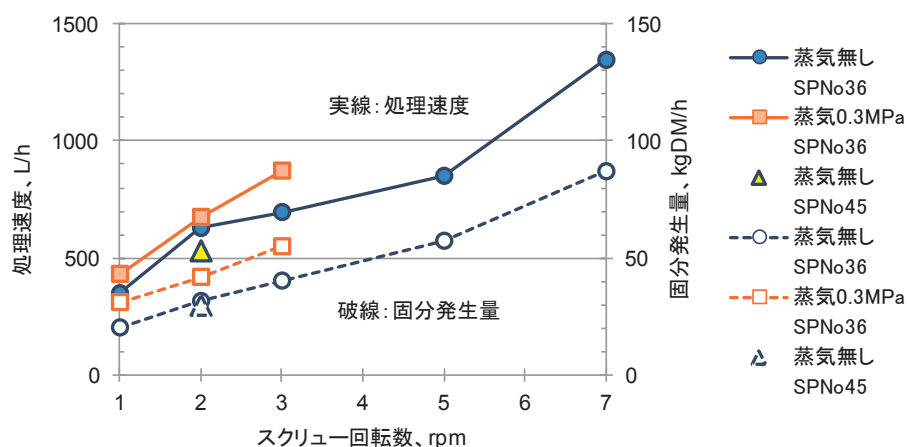


図 7 スクリュー回転数と処理速度の関係

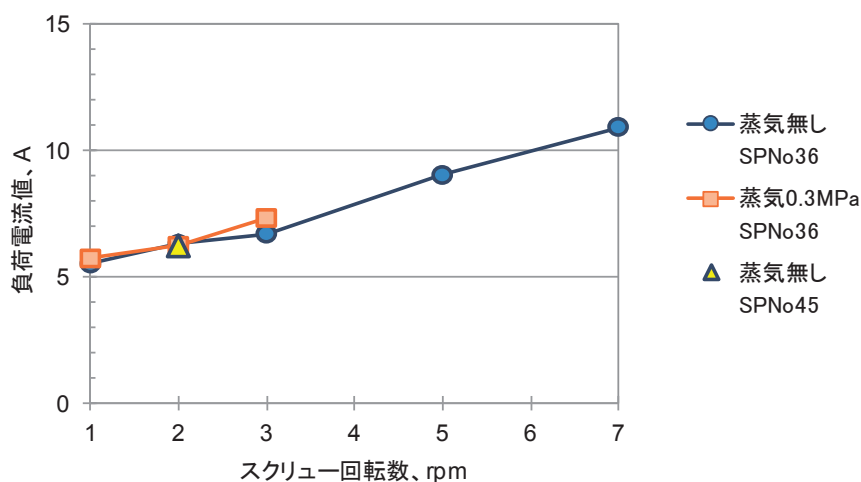


図 8 スクリュー回転数と付加電流値の関係



## ②スクリー回転数と乾物回収率および塩素除去率（図9）

調査開始時の原料に含まれていた塩素に対し、脱水処理によって分離液とともに取り除かれた塩素の割合を塩素除去率（%）とすると、スクリーの回転数が1rpm時では塩素除去率が90%近くに達し、良好な塩素の除去が確認された。しかし、スクリーの回転数を上げて処理速度を高めると、塩素除去率は5rpm時には84%にまで低下した。原料の加熱やスクリー圧縮比の増加はむしろ塩素除去率を低くする影響があった。

調査開始時の原料に含まれていた乾物に対し、分離後の固分として回収できた乾物の割合を乾物回収率（%）とすると、原料を加熱しない場合の乾物回収率は1rpm時で最も高く87%であり、処理速度が高まると7rpmの81%まで直線的に減少した。原料を加熱することで乾物回収率が改善されたが、スクリー回転数が3rpmでは違いがみられず、その効果はスクリー回転数が小さな場合に限定された。

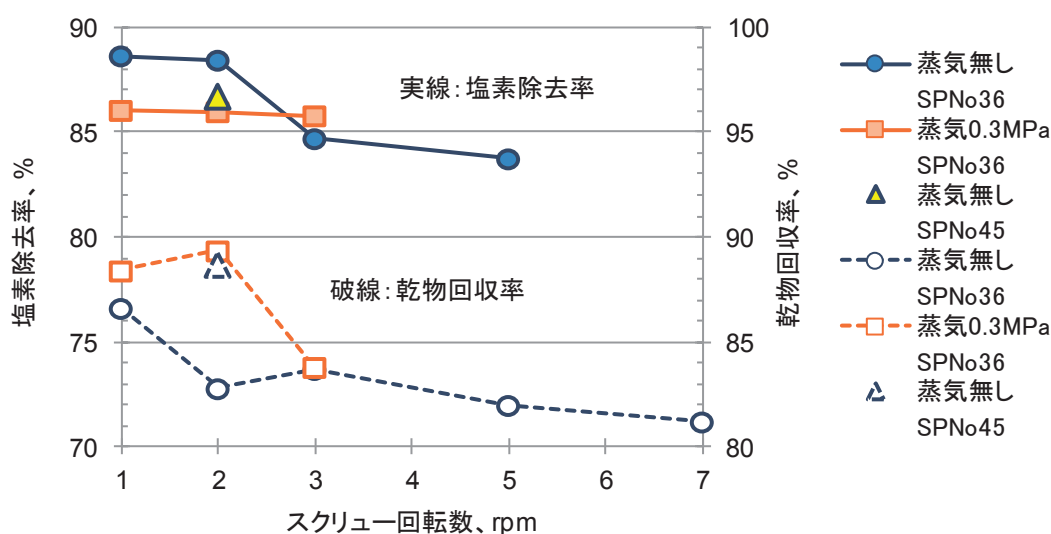


図9 スクリュー回転数と処理速度の関係

## ③スクリー回転数と固分の含水率、塩素濃度、総発熱量（図10）

供試原料の含水率は90%強であったが、脱水処理後の固分の含水率は、1rpmの場合で71%にまで減少した。処理速度が3rpmより大きくなると、固分の含水率は75%を超えて高くなる傾向にあった。原料の加熱やスクリーの圧縮比の増加の効果は明確には見られなかった。75%を超える固分では、通気性が悪く、後段の堆肥化処理に悪影響を与え

ることが考えられる。

固分中の塩素濃度についても含水率と同様の傾向がみられた。つまり、スクリー回転数が 3rpm 以上では塩素濃度が 0.2%DM を超えて高くなり、原料の加熱やスクリーの圧縮比を大きくする効果は明らかではなかった。

一方で、固分の総発熱量は処理速度に影響を受けず、常に 20~22MJ/kgDM であった。

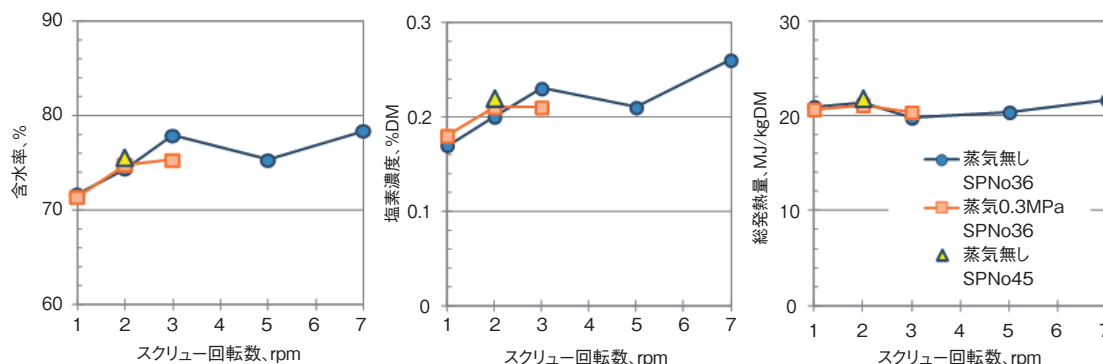


図 10 スクリュー回転数と固分中の成分との関係

## (2) 処理対象物の性状と処理性能

### 【調査方法】

前項と同じ目的で、固液分離機による脱水処理を検討した。具体的には、牧場のふん尿処理施設から出される固形物、すなわち、豚ふん尿スラリーや余剰汚泥に凝集剤を添加したものや、豚ふんを原料にして、脱水処理後に得られる固分の性状を評価した。なお、調査方法は表 9 とほぼ同様であるが、供試原料の調達の関係から、調査場所を HL 牧場（青森県三戸町）に変更した。また、調査にあたっては、予備試験の結果から固液分離機のスクリー回転数を 0.5rpm に落として一定とし、原料の加熱は行わなかった。供試原料は、調査結果とともに表 10 に示す。

### 【結果と考察】

豚ふん尿スラリーや豚ふんは、固液分離機での脱水処理が可能であり、含水率が 70% を下回る固分が回収できた。しかし、余剰汚泥は効果的な脱水ができず、固分の含水率は 85% と高かった。スクリープレス方式では、固分中に適量の繊維成分が必要とされ

る場合があり、余剰汚泥の場合は繊維成分が不足して固液分離機的能力を十分に引き出せなかったものと考えられる。

塩素濃度は、豚ふん尿スラリーを固液分離した固分が 0.08%DM と最も低くなった。余剰汚泥と豚ふんの脱水処理後の固分には、それぞれ 0.26%と 0.24%が含まれ、これらは、前項で調査した豚ふん尿スラリーの場合と同程度であった。

総発熱量は、いずれの供試原料の脱水処理後の固分も同様の値を示し、19～20MJ/kgDM であった。

表 10 HL 牧場のふん尿処理施設から出される原料の固液分離後の固分の性状

供試原料	供試原料		固液分離固分	
豚ふん尿 スラリー	MLSS	9,800 ppm	含水率	64.8 %
	塩素濃度	570 ppm	塩素濃度	0.08 %DM
	総発熱量	20.8 MJ/kgDM	総発熱量	20.0 MJ/kgDM
余剰汚泥	MLSS	9,700 ppm	含水率	84.6 %
	塩素濃度	580 ppm	塩素濃度	0.26 %DM
	総発熱量	18.1 MJ/kgDM	総発熱量	19.0 MJ/kgDM
豚ふん	含水率	80.9 %	含水率	69.2 %
	塩素濃度	0.52 %DM	塩素濃度	0.24 %DM
	総発熱量	18.5 MJ/kgDM	総発熱量	18.8 MJ/kgDM

## 2) 堆積方式（通気型堆肥舎）でのセメント原燃料堆肥の生産

### 【調査方法】

強制通気を行う堆積方式の堆肥舎を供して原燃料堆肥の試作を行うとともに、堆肥の生産、利用に向けた技術的な検討を行った。堆肥の試作は茨城県鹿行地域にある H 養豚場で実施した。H 養豚場では、豚ふん尿スラリーを堆肥化する前段で、スラリーに凝集剤を添加して脱水性を改善し、高さ数 10cm ほどに堆積したモミガラをフィルターにしてスラリーを脱水する点で独自の前処理方法が採られている（図 11、写真 5、6）。この前処理以外については、通気型堆肥舎で堆肥原料（脱水後のスラリーとモミガラが混合されたもの）の腐熟を促進し、約 1 週間に 1 度の割合でローダーで切り返しを行う一般的な堆肥化処理が採用されている。

今回の調査では原燃料堆肥を試作するために、堆肥原料に剪定枝（粉碎品）をさらに

混合して初発の原料の含水率を下げるとともに、剪定枝の希釈効果で塩素濃度を低減できるか調査を行った。なお、調査概要や供試した堆肥原料を表 11 に示す。

表 11 H 養豚場における調査概要

調査場所	H 養豚場 (茨城県鹿行地域)、2010.9.6~11.1			
供試原料	凝集剤を所定量添加し、モミガラで脱水・水分調整した豚ふん尿スラリーと、堆肥化副資材として豚ふん尿+モミガラと同容量の剪定枝			
	含水率 (%)	塩素濃度 (%DM)	総発熱量 (MJ/kgDM)	灰分 (%DM)
豚ふんスラリー	86.1	0.40	21.9	21.4
モミガラ	12.1	0.06	14.3	25.5
剪定枝(粉碎品)	38.9	0.02	15.7	1.9
混合物	75.1	0.23	18.3	21.2
堆肥化方法	間口約 3m×奥行き約 4m×6 槽の強制通気型の堆肥舎を用いてホイルローダーで約 1 週間ごとに切り返し、およびサンプリング			
分析項目	表 5 と同様			

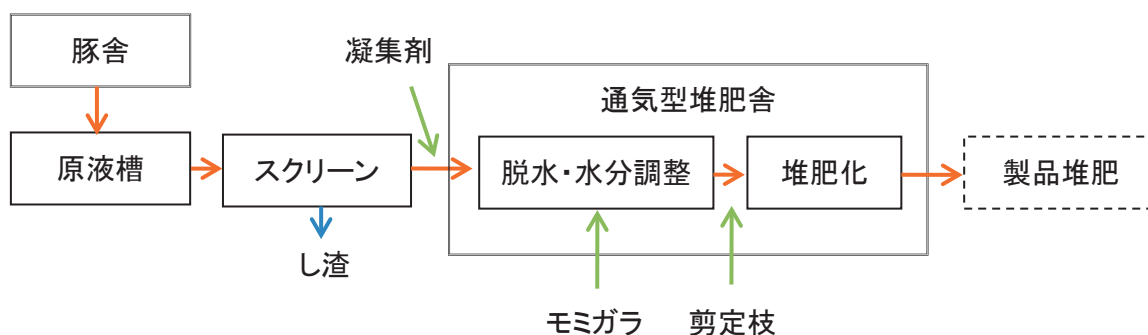


図 11 H 養豚場での原燃料堆肥生産フロー図



写真 5 モミガラによる脱水処理と水分調整



写真 6 供試した剪定枝(粉碎品)

### 【結果と考察】

図 12 に堆肥化過程における堆肥原料の含水率と塩素濃度、総発熱量の変化を示す。含水率は当初 75%であったものが 5 週目には 20%を下回り、この間ほぼ直線的に低下した。一方で、塩素濃度はサンプリングの誤差が原因と思われる変動があったものの、総発熱量とともに、堆肥化開始時に比べて大きな変化は見られなかった。

5 週間という時間が必要であったものの、一般的な堆肥化処理を行うことで目標値の含水率まで乾燥できた。原料の総発熱量が堆肥化過程で減少しなかったことから、含水率の低下は有機物分解に伴う発酵熱の他に、強制通気の影響も大きかったと考えられる。

塩素濃度は原料の豚ふん尿スラリーが 0.4%DM であったのに対し、塩素濃度の低いモミガラや剪定枝を混合することで、相対的に塩素濃度を 0.23%DM まで低減することができた。堆肥化に伴って塩素に大きな変化は見られなかったことから、前処理の段階で塩素濃度を調整する必要性が再確認された。

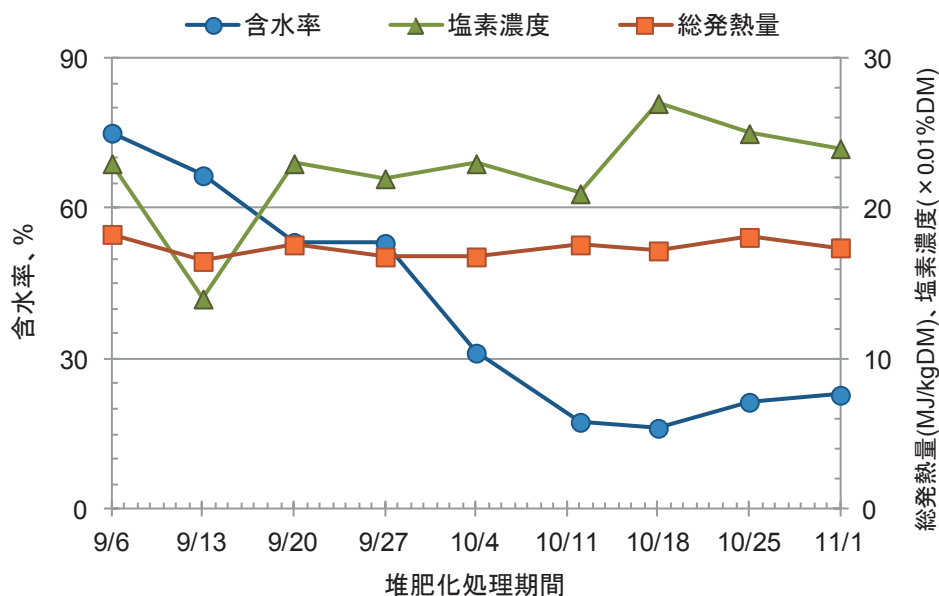


図 12 堆積方式による堆肥の変化

### 3) 開放型攪拌方式でのセメント原燃料堆肥の生産

#### 【調査方法】

開放型攪拌方式の堆肥化施設において、原燃料堆肥を連続して試作するとともに、堆肥の生産、利用に向けた技術的な検討を行った。堆肥の試作は栃木県那須烏山市にある S 牧場で実施した。S 牧場では豚舎からふん尿混合状態で見られるため、ふん尿はいったんベルトプレス式の脱水機にかけられて、分離された固分だけが堆肥化処理される。固分には前項の剪定枝破砕品と同じものが容積比で固分 1 に対し剪定枝 4 の割合で混合され、その後、ホイールローダーで堆肥化施設に投入される (図 13)。堆肥化施設は、ロータリー式の攪拌装置と送風機による強制通気の設備が備わっており、堆肥は連続的に生産される (写真 7、8)。

表 12 に S 牧場で供した堆肥原料の成分を示す。これらの原料を 53m<sup>3</sup>/日の割合で 15 日間連続的に投入して、製品堆肥の成分を調査した。

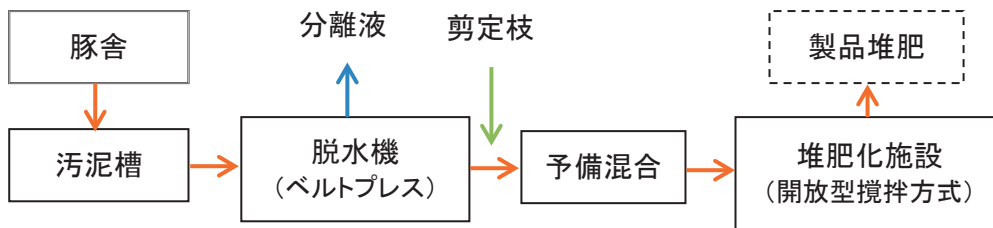


図 13 S 牧場での原燃料堆肥生産のフロー図



写真 7 S 牧場の堆肥化施設(開放型攪拌方式)



写真 8 堆肥化施設の内部

表 12 S 牧場での供試原料、および仕上がり堆肥

供試原料	含水率 %	塩素濃度 %DM	総発熱量 MJ/kgDM
豚ふん	79	0.14	21.3
剪定枝(粉碎品)	42	0.07	13.8
試作した堆肥	33	0.22	15.9

## 【結果と考察】

従来はS牧場の堆肥の含水率は55%程度であったが、副資材に剪定枝を多く用いることで含水率を低減することができた。ただし、表12にある堆肥試作品の含水率33%まで低減するためには、堆肥化施設での水分蒸発の他に、堆肥舎で約30日の通風乾燥が必要になり、後述の仕上げ乾燥の調査が必要となった。豚ふん尿を堆肥化処理の前段でベルトプレス方式で脱水処理しているものの、スクリュープレスほどの脱水能力が得られず、堆肥化前の豚ふんの含水率が高かったことが原因の一つと考えられる。

なお、試験に先立って、すでに堆肥化施設に投入されていた一般管理の堆肥原料と5m程度の距離を確保して今回の調査を開始したが、原燃料堆肥を取り出すときには両者が接触しており、境界が判別できない状態であった。このため、豚ふんの塩素濃度が堆肥化前で0.14%DMであったのに対し、一般管理の堆肥が製品堆肥に混ざった分だけ、試作した堆肥の塩素濃度が0.22%DMと高くなったものと考えられる。

製品堆肥の総発熱量は、堆積方式とほぼ同程度の16MJ/kgDMであった。

## 4) 密閉縦型攪拌方式でのセメント原燃料堆肥の生産

### 【調査方法】

密閉縦型攪拌方式の堆肥化施設において、原燃料堆肥を連続して試作するとともに、原燃料堆肥の生産、利用に向けた技術的な検討を行った。堆肥の試作は青森県三戸町にあるHL牧場で行った。HL牧場での堆肥化処理フローを図14に示す。HL牧場では豚舎からふん尿混合のまま出されるため、ふん尿はスクリーンで粗ゴミが除かれた後に、スクリュープレスで固液分離され(写真9)、固分は密閉縦型堆肥化装置に投入される(写真10)。他に、スクリーンからの粗ゴミや分離液を処理する曝気槽からの余剰汚泥もこの密閉縦型堆肥化装置で固分といっしょに堆肥化処理される。

約5ヵ月間にわたって調査を実施し、約1週間ごとに供試原料を堆肥化装置に投入した(図15)。原料の投入時、あるいは製品の取り出し作業時にはサンプルを採取して、表5に準じて含水率、塩素濃度、総発熱量の分析を行うとともに、堆肥化装置内部の温度を測定して堆肥化過程も調査した。



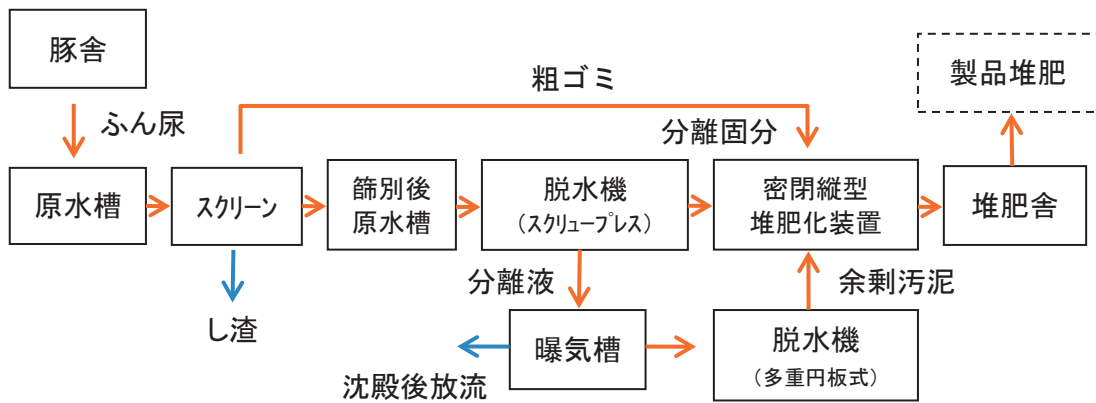


図 14 HL 牧場での原燃料堆肥生産のフロー図



写真 9 HL 牧場の固液分離機



写真 10 HL 牧場の密閉縦型堆肥化装置

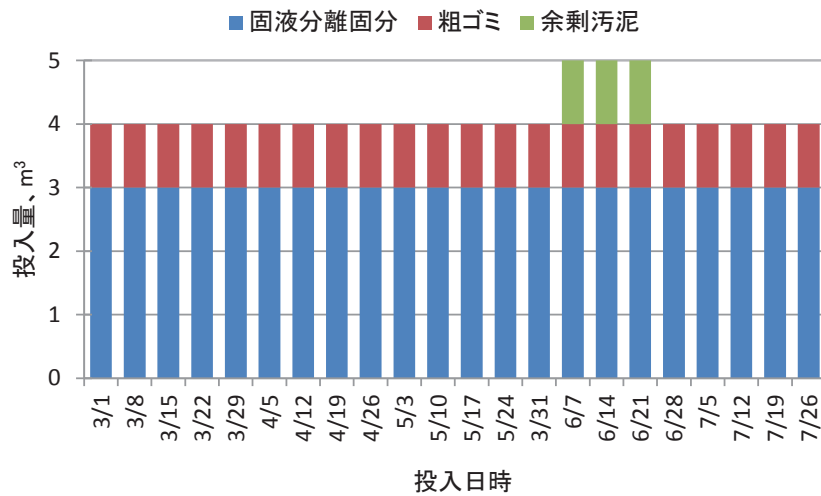


図 15 HL 牧場での堆肥原料の投入履歴

## 【結果と考察】

調査期間中の堆肥原料の温度変化を図 16 に示す。一般的に、密閉縦型堆肥化装置では、厩白土など熱量が高く分解しやすい副資材をふん尿に混ぜることで、発酵温度を 60～70℃に維持するケースが多い。HL 牧場では副資材を使っていないため、あるいは調査の開始時期が寒い時期であったことから、原料の温度はやや低く 40～60℃で推移した。原料は堆肥化装置上部のホッパーから投入されて、仕上がった堆肥は堆肥化装置底部から取り出されるが、投入されて間もない堆肥化装置上部の原料の温度が高くなる傾向があり、取り出し前の底部では温度が低くなる傾向がみられた。

堆肥原料のほか、仕上がった堆肥の性状変化を図 17 に示す。固液分離固分など原料の含水率は 69～88%と高い状態で投入されたが、約 1 週間の堆肥化過程を経た製品堆肥の含水率は 30%弱にまで低下した。

余剰汚泥を除く原料の塩素濃度は 0.13～0.17%DM であったが、製品堆肥の場合は若干高くなる傾向があり、0.19～0.21%DM で推移した。これは前章でも考察したように、堆肥化過程で乾物が分解されるために、乾物あたりの塩素が相対的に高まった結果と考えられる。余剰汚泥の塩素濃度は 0.43%DM と高いものであったが、投入量がわずかであったことから、仕上がり堆肥の塩素濃度に与える影響は限定的であった。

この間、総発熱量は 17～19MJ/kgDM とほぼ一定であった。

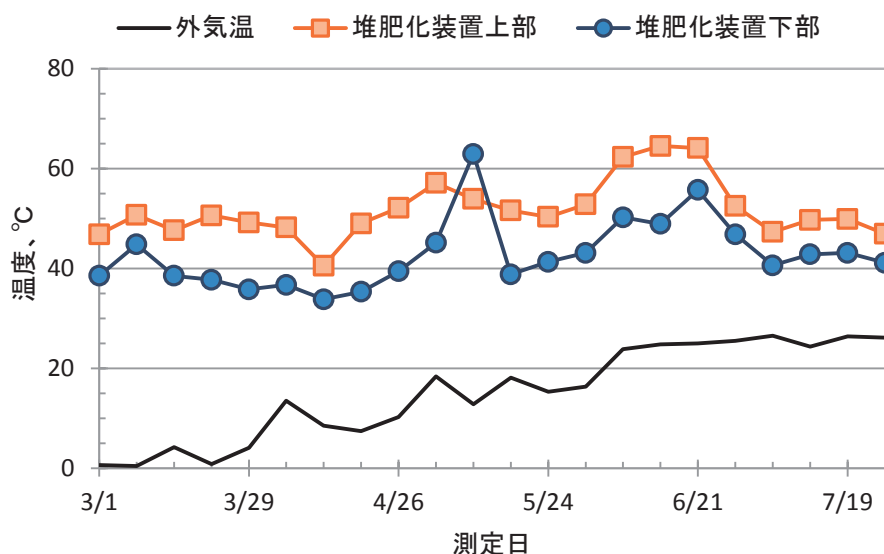


図 16 密閉縦型堆肥化装置で堆肥化した際の原料の温度変化

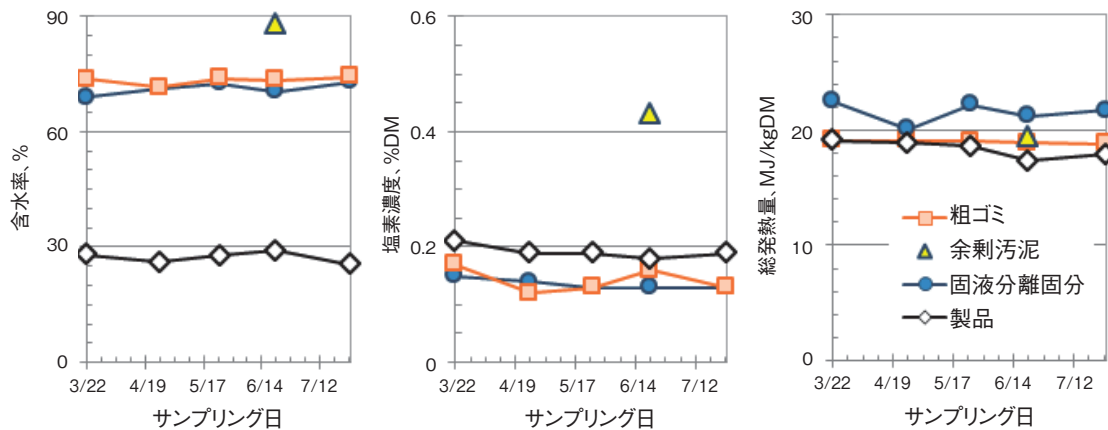


図 17 密閉縦型堆肥化装置による堆肥の性状

## 5) 通風による仕上げ乾燥

### 【調査方法】

堆肥化施設での処理を終えた原燃料堆肥について、堆肥化過程で十分に含水率が低下しないケースがみられたことから、堆肥化後の原燃料堆肥の含水率を低くする方法を検討した。具体的には、牧場で所有する通気型堆肥舎を利用して、通風による仕上げ乾燥を調査した。

仕上げ乾燥の調査内容は表 13 の通りであり、密閉縦型堆肥化装置で原燃料堆肥を試作した青森県三戸市にある HL 牧場の堆肥舎を利用した。送風機は堆肥化処理の通気用途で一般に使われる送風機よりも大容量の機種を選定し、夏季と冬季に分けて堆肥の乾燥程度に加え、乾燥に要する時間と費用を調査した。

### 【結果と考察】

調査期間中の外気温度は、夏季と冬季とでそれぞれ 25~30℃、14~16℃であったが、前者の含水率は約 4 日間で 29%から 23%に、後者は約 7 日間で 33%から 25%にまで低下した。この仕上げ乾燥に要する送風機の消費電力量は堆肥 1t 当たり夏季で 18kWh/t、冬季で 30kWh/t となった。原燃料堆肥の生産にあたっては、一般的な堆肥化処理コストに加えて、必要に応じて仕上げ乾燥のコスト、つまり夏季で 300 円/t、冬季で 500 円/t 程度の追加費用を考慮する必要がある。

表 13 通風による堆肥の仕上げ乾燥のための調査内容と結果

供試送風機	H社製 VB-060E (最大出力 4kW)	
実施場所	HL 牧場 (青森県三戸町)	
供試堆肥	密閉縦型堆肥化装置からの豚ふん堆肥 15t	
試験日時	夏季試験 2009. 8. 7～	冬季試験 2010. 10. 28～
乾燥前堆肥含水率、%	29	33
乾燥後堆肥含水率、%	23	25
乾燥時間	約 4 日	約 7 日
消費電力量、kWh/t	18	30
乾燥費用、円/ t	288	480

※電力料は 16 円/kWh で計算

## 6) 3章のまとめ

### (1) 含水率の低減化方法について

実機を使用した本章の調査では、前章の基礎試験以上に含水率の低下がみられ、堆積型、あるいは密閉縦型堆肥化装置において含水率が 30%以下の堆肥が試作できた。送風機を使った仕上げ乾燥によって、冬季でもさらに含水率を下げる事が可能であった。

ただし、原燃料堆肥を供出する畜産側としては、できるだけ堆肥化の基本に沿った方法で安価に発酵乾燥を進め、冬季の乾燥が不利な時期などに限って仕上げ乾燥を行うことが得策である。また、堆積型のケースでは、従来法の副資材(本章2項ではモミガラ)の他に、堆肥原料と同容量の剪定枝の混合を要するため、堆肥化処理に従来の2倍近くのスペースが必要になる点にも留意が必要である。

### (2) 塩素濃度の低減化方法について

堆肥化過程では、塩素は水分と同時に除去されることはないため、堆肥化前に原料中の塩素濃度を低くすることが重要であった。その点で、畜産で広く利用されるスクリープレスは効果的な塩素除去が可能であり、塩素が90%以上除去された条件も見られた。

ただし、固液分離機を利用できるケースは、浄化施設を併設する経営や、固液分離された液分のは場散布が可能な経営など、今のところ養豚業や酪農業の一部に限られる。液分の管理ができない場合は、剪定枝などの比較的低コストな副資材をふん尿に混合することで、堆肥化開始の時点で塩素濃度がすでに低減されている必要がある。

#### 4. 豚ふん堆肥を利用したセメント原燃料化モデルとその検証

##### 1) 原燃料堆肥を空気搬送する場合（八戸セメントモデル）

###### (1) 八戸セメントモデル

すでに1章の図1で示したように、セメント製造時には2つの系統で原燃料が投入される。つまり、空気搬送された原燃料が焼成炉内に突出したノズルから吹き込まれる場合と、仮焼炉を介して焼成炉の入り口から他の原料や原燃料とともに投入される場合である。本項では、まず前者の投入方法を検討した。その原燃料供給経路を図18に示す。なお、本モデルを検証するに当たっては、3章-4)のHL牧場で試作した豚ふん堆肥（表14）を原燃料堆肥として八戸セメントに供給し、工場内の実機を使ってセメントを製造した。

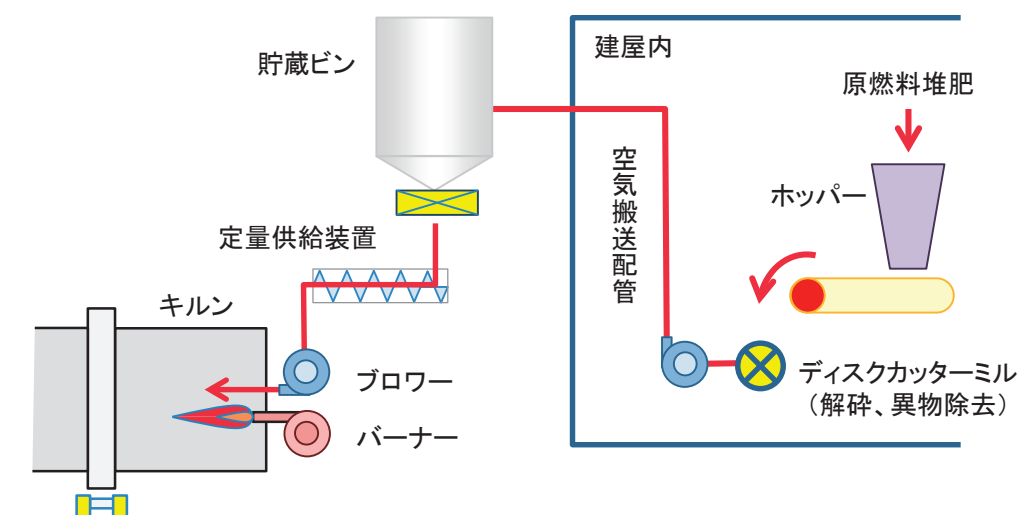


図18 八戸セメントモデルでの原燃料堆肥の供給方法

表 14 HL 牧場で試作した原燃料堆肥

ロット No	含水率 %	塩素濃度 %DM	総発熱量 MJ/kgDM
①	21	0.25	15.4
②	23	0.27	15.4
③	23	0.25	16.0
④	27	0.18	16.5
⑤	29	0.24	15.8
⑥	28	0.26	16.0
⑦	26	0.27	15.1
⑧	27	0.24	15.1
⑨	20	0.27	16.4
⑩	20	0.22	16.1
⑪	23	0.22	16.4
平均	24	0.24	15.8

## (2) 八戸セメントモデルでの石炭代替効果

表 15 にセメント製造時の燃焼状況を示す。合計で 11 回、189t を焼成炉に投入した結果、粉じんや異物の混入、あるいは悪臭の発生など、堆肥のハンドリングについて大きな問題は生じなかった。一部に目標値を超過する含水率の堆肥も見られたが、空気搬送工程では経路の詰まりは確認されず、スムーズな供給が可能であった。

原燃料堆肥の投入量は 11 回の平均で 2.6t/h であったのに対し、石炭の削減量は 0.9t/h であったことから、堆肥水分に伴う潜熱損失や燃焼効率などを考慮した正味の堆肥の原燃料価値は石炭のおよそ 1/3 程度と考えられる。また、原燃料堆肥の投入時には塩素濃度が最大で 18ppm 高くなることもあったが、JIS の上限値である 350ppm に比較すれば、原燃料堆肥の投入に伴う上昇は十分に小さかった。

ちなみに、八戸セメントでは年間 150 万 t のセメントを生産する能力を有し、その製造工程で消費する石炭は 15 万 t である。今回のモデル検証から、投入された堆肥の総量を 189t、石炭代替率を 0.36 とすると、 $189 \times 0.36 / 15 \text{ 万 t} = 0.05\%$  の石炭代替量となる。仮に今回の調査においてロット間で最大の投入量となった 56.5t が毎日利用されたとすると、年間で 2.1 万 t となり、現在使用する石炭の約 5% を代替できる規模となる。

表 15 セメント工場における堆肥の燃焼状況(八戸セメントモデル)

ロット No	堆肥の投入状況				石炭の削減効果		クリンカー
	利用日	投入 時間 h	総堆肥 投入量 t	堆肥 投入量 t/h	石炭 削減量 t/h	石炭 代替率	塩素濃度 の変化 ppm
①	2008/ 9/ 8	3.5	9.1	2.6	1.0	0.38	+ 4
②	2008/10/29	4.0	13.7	3.4	1.1	0.32	
③	2008/11/ 6	3.4	10.3	3.0	0.8	0.27	
④	2008/11/28	4.1	10.7	2.6	1.2	0.46	± 0
⑤	2009/ 1/30	4.8	10.8	2.2	0.8	0.36	
⑥	2009/ 2/ 9	5.3	10.5	2.0	0.6	0.30	
⑦	2009/ 4/27	4.5	11.1	2.5	0.8	0.32	
⑧	2009/ 5/22	8.0	19.6	2.5	0.8	0.33	+18
⑨	2009/ 6/30	4.7	10.6	2.3	1.0	0.44	
⑩	2009/ 8/ 5	10.0	26.3	2.6	1.0	0.38	
⑪	2009/12/15	23.5	56.5	2.4	0.9	0.37	+10
			合計 189	平均 2.6	平均 0.9	平均 0.36	平均 + 8

### (3) 八戸セメントモデルの経済性の評価

本モデルの原燃料堆肥の生産は、すでに HL 牧場で稼働する施設や設備を使用しており、原燃料堆肥の生産作業も通常業務の範囲で可能であったことから、原燃料堆肥を生産するための経費に多くの上積みはないと考えられる。ただし、冬季のある時期には堆肥の含水率が高くなることもあり、その場合は堆肥舎での仕上げ乾燥が必要であった。これらモデルの検証結果を踏まえて、表 16 に原燃料堆肥の生産コストを示す。

一般的に、セメント工場では、主原燃料の石炭のほか、木屑や再生油、廃プラスチックや廃白土など多様な代替原燃料をすでに使用している。これら代替原燃料との比較も考慮すると、原燃料堆肥の価値は 2,000 円/t 程度と位置付けられる。セメント工場側が代替原燃料との比較にて通年の受入れを可能と判断すれば、本モデルは牧場側に多くの負担を強いることなく経済的に成立すると考えられる。

ただし、今回は運搬費用を実費計上したが、HL 牧場と八戸セメントの距離は 60km であり、これを超える距離の運搬が必要な場合には、運搬費用がさらに必要となることに留意が必要である。

表 16 原燃料用途のための堆肥生産コストの上乗せ分（八戸セメントモデル）

	内容	仕上げ乾燥無 円/t	仕上げ乾燥要 円/t	備考
必要経費	原燃料用途のための上乗せ分	なし	500	送風用のための電力料金（30kWh/t）
	運搬費	2,000	2,000	トラック1台の実績（20,000円/10t）
経費合計		2,000	2,500	堆肥の原燃料価値は2,000円/t

## 2) 原燃料堆肥を仮焼炉経由でキルンに投入する場合（栃木工場モデル）

### (1) 栃木工場モデル

本モデルは、仮焼炉を介して焼成炉に原燃料堆肥を投入する方式であり、ホッパーに供給された原燃料堆肥はベルトコンベヤなどでいったん仮焼炉に搬送されてからキルンに投入される（図 19）。なお、本モデルを検証するに当たっては、3章-3)のS牧場で試作した原燃料堆肥を栃木工場に供給し、工場内の実機を使ってセメントを製造した。

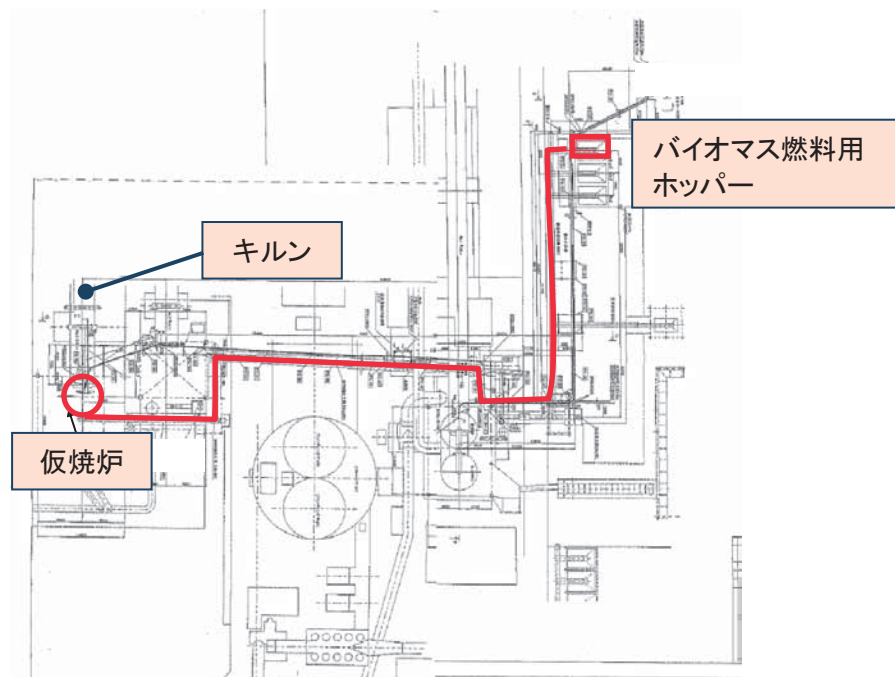


図 19 栃木工場モデルでの原燃料堆肥の供給ライン



## (2) 栃木工場モデルでの石炭代替効果

表 17 に供試した原燃料堆肥の成分とセメント製造時の燃焼状況を示す。3章で調査したように、S 牧場では通常、ベルトプレス式の脱水機で堆肥原料の含水率を低減してから、開放型攪拌方式の堆肥化施設で堆肥が生産される。原燃料堆肥については、脱水処理された豚ふんの容量1に対し副資材として剪定枝を4混合して含水率と塩素濃度の低減を図った。剪定枝は安価なものを選定した結果、外寸が 40mm と粗い形状であったが、堆肥化過程では問題なく発酵が進み、堆肥はほぼ目標値の含水率まで低下した。

原燃料堆肥のセメント工場への搬送は 10t ダンプで行ったが、荷受けホッパーへ堆肥を投入する際にやや粉塵が生じたものの、悪臭の発生はほとんどなく、ベルトコンベヤによる仮焼炉への搬送は問題なく行うことができた。

原燃料堆肥の総投入量は 8.9t であり、これを 3.2 時間かけて行った。この結果、時間当たりの堆肥の投入量は 2.8t/h であったのに対し、石炭の削減量は 1.2t/h であったことから、堆肥水分に伴う潜熱損失や燃焼効率などを考慮した正味の堆肥の原燃料価値は石炭のおよそ 4 割程度と考えられる。

堆肥の投入量 (t/h) は八戸セメントモデルとほぼ同様であったが、石炭の削減量は八戸セメントモデルで 0.9t/h であったのに対し、栃木工場モデルでは 1.2t/h と高くなった。しかし、投入時間が短く、変動も大きかったことから、引き続き長時間の連続投入による検証が必要である。

表 17 セメント工場における堆肥の燃焼状況 (栃木工場モデル)

原燃料堆肥	生産場所	S 牧場 (栃木県那須烏山市)
	原料	豚ふんおよび剪定枝
	含水率、%	31.0
	塩素濃度、%DM	0.22
	総発熱量、MJ/kgDM	17.2
堆肥の投入条件	場所	住友大阪セメント栃木工場
	日時	2008/8/28
	投入時間、h	3.2
	堆肥総投入量、t	8.9
	堆肥投入量、t/h	2.8
石炭の削減効果	石炭削減量、t/h	1.2
	石炭代替率	0.41

### (3) 栃木工場モデルの経済性の評価

本モデルの原燃料堆肥の試作は、すでにS牧場で稼働する施設や設備を使用しており、堆肥の生産作業も通常業務の範囲内で可能であった。したがって、原燃料堆肥を生産するための経費の上積みは副資材の増量以外はないものと考えられる。これらのモデル検証の結果を踏まえて表18に原燃料堆肥の生産コストを示す。

八戸セメントモデルと同様に、ここでも主原燃料の石炭のほか、木屑や再生油、廃プラスチックや廃白土など多様な代替原燃料をすでに使用しており、代替原燃料の比較を加味した原燃料堆肥は3,000円/t程度の価値と位置付けられる。八戸セメントモデルの場合よりも価値が高いのは、工場の立地条件によって代替原燃料の種類や調達価格が異なるためである。塩素濃度やコスト面など課題は残されているものの、含水率や総発熱量では原燃料堆肥が他の代替原燃料とともに利用できる可能性があると考えられる。

表18 原燃料用途のための堆肥生産コストの上乗せ分（栃木工場モデル）

	内容	上乗せ費用 円/t	備考
必要経費	副資材費	2,000	豚ふんに剪定枝を追加混合
	運搬費	2,000	40m <sup>3</sup> 車(12t)
経費合計		4,000	堆肥の原燃料価値は3,000円/t

## 5. 今後の課題

### 1) 原燃料堆肥の供給体制の整備

本事業の成果として、原燃料堆肥に求められる含水率や塩素濃度、総発熱量をもとに、堆肥化処理方法やその前処理方法が整理された。また、原燃料堆肥の試作を行ってセメント工場のモデル検証を行った。その結果、家畜ふん堆肥がセメント製造時の原燃料利用に可能なことが明らかとなった。今後は、求められる仕様を満たす大ロットの原燃料堆肥を供給可能とするシステムの構築段階に入るものと思われる。

例えば、八戸セメントモデルでは9～57t規模で堆肥を燃焼したが、これは1日あたり最低10tの原燃料堆肥の供給が必要であったためである。つまり、10tに満たない原燃料堆肥では、工場設備が過剰となる一方で、その原燃料としての効果が微小となって、堆肥を利用するメリットが見い出せない。これだけの量を毎日安定的に供給するためには、堆肥センターなど、原燃料堆肥の流通上のバッファー機能が必要であり、個別の農家がそれぞれの判断でセメント工場に持ち込むということはある程度得ない。この量の堆肥を管理するためには、県や市町村、あるいは農協などを司令塔にした地域システム化が不可欠である。また、工場と畜産農家、あるいは堆肥センターの立地条件に応じたシステムの最適化も残された課題である。

### 2) 塩素の低減化対策

本事業の中で取り組まれた家畜ふん尿に含まれる塩素濃度の低減化方法、つまり、固液分離機による塩素除去、あるいは副資材を混合することによる塩素の希釈が有効であった。しかし、この方法が採用できるケースは浄化施設を併設する養豚業や酪農業の一部か、あるいは剪定枝などが安価で通年安定的に供給される立地条件で、しかも、副資材を混合した堆肥原料を切り返し、あるいは攪拌処理できる施設がすでに整備されている場合に限定される。

塩素の存在は、セメント製造設備のみならず、製紙業界や鉄鋼業界、あるいはバイオマスボイラー分野などバイオマス燃料の需要がある工場設備にとっても大きな問題であり、できるだけ少ないほうが望ましい。バイオマス資源としての家畜ふんに対する昨今の期待の高まりからも、塩素濃度の低減対策はより重要な課題になるものと思われる。そういった視点に立てば、ふん尿が発生した段階ですでに塩素濃度が十分に低いことが理想的であり、家畜の栄養管理の段階から塩素フローに注意を払うことも重要である。

表 19 畜種別に見た塩素の要求量

畜種	区分	備考
乳牛 *	0.15%DM(育成期)、0.28%DM(泌乳期)	日本飼養標準・乳牛(2006年版) <sup>4)</sup>
豚 **	0.11~0.25%(子豚)、0.08%(肥育豚) 0.12~0.16%(繁殖)	日本飼養標準・豚(2005年版) <sup>5)</sup>
採卵鶏 **	0.15%(育成期)、0.12%(採卵期、種鶏)	日本飼養標準・家禽(2004年版) <sup>6)</sup>
肉鶏 **	0.20%(前期)、0.15%(後期)	日本飼養標準・家禽(2004年版) <sup>6)</sup>

\* 乾物あたりの食塩(NaCl)要求量から換算

\*\* 風乾飼料現物(含水率 13%)の単位重量当たりの量

表 19 に日本飼養標準の中で示されている塩素の要求量を示す。今回の調査では、生の牛ふん（副資材混合原料含む）に含まれた塩素濃度が 0.60%DM（0.24~1.43%DM）であり、要求量に対してその数倍が含まれていたことになる。また、表 20 に示すように、餌に含まれる塩素濃度は、変動が大きいものの高濃度のものも散見され、塩素の多くが餌として畜産系内に持ち込まれている可能性が示唆される。しかも、給餌メニューや給餌量の設計は畜産農家それぞれで行う場合が多く、生ふんや堆肥の塩素濃度が農家によって大きく変動したことと関係はないか、今後の調査が必要である。いずれにせよ、家畜飼養の早い段階から塩素フローを制御できれば、家畜ふん堆肥の原燃料利用に向けた抜本的な問題解決が図られるが、さらなる腰を据えた検討が必要である。

表 20 主な飼料中の塩素濃度<sup>7)</sup>

飼料分類	平均値、%DM (最少～最大)	備考
生草	0.94 (0.03～1.85)	0.18～1.28 牧草類 0.90～1.85 青刈飼料作物 0.03～1.80 根菜類、果菜類 1.60～1.80 作物副産茎葉類
サイレージ	0.91 (0.22～1.78)	0.26～1.30 牧草類 0.22～1.78 青刈飼料作物 1.44 作物副産茎葉類
乾草	0.62 (0.15～1.24)	0.38～1.24 牧草類 0.15～0.52 青刈飼料作物 0.29～0.81 作物副産茎葉類 0.79 輸入乾草
穀類、マメ類、イモ類等	0.25 (0.03～0.92)	0.25 大麦 0.03 大豆 0.92 パン屑
ヌカ類および製造粕類	0.21* (0.01～0.75)*	0.05 ビール粕(生) 0.05 ビートパルプ(生) 4.53 醤油粕
植物性油粕類および植物性タンパク質類	0.17 (0.02～0.91)	0.03 大豆粕 0.05 アマニ粕 0.91 ヤシ粕
動物性飼料	1.60 (0.02～5.78)	0.57～0.71 魚粉 5.78 エビ殻ミール 1.21 脱脂粉乳

\* 醤油粕は含まない

### 3) オフセットクレジット制度などの利用

2011年6月に環境省から公示されたオフセットクレジット（J-Ver）制度の方法論 NoE025 は、セメント製造工程でのバイオマス利用を推進し、二酸化炭素の発生抑制を目的とした方法論である<sup>8)</sup>。これによれば、石炭使用に由来する二酸化炭素の削減量に応じて、プロジェクト実施者にクレジットが発行される。畜産が集中する地域など堆肥の過剰地域にあって堆肥を肥料利用できない、あるいは採算が合わず流通できない畜産農家の追い風になるとともに、セメント工場としても国内で安定的にバイオマスエネルギーが確保できる大きな可能性が秘められている。

ちなみに、表 21 は、3年間に供した原燃料堆肥をもとに、石炭とそれに由来する二

酸化炭素の削減量を方法論 NoE025 に従って試算したものである。まだ調査段階であり、原燃料堆肥の使用量はわずかであるが、石炭や二酸化炭素の削減に対する指標や支援の枠組みができたことは大きな前進である。先にも述べたように、今後はセメント工場を中心にした地域システム化にステップアップする段階にあるが、J-Ver や他の排出権取引制度などの利用がシステム参加者のインセンティブになることが期待される。

表 21 堆肥の原燃料利用による石炭使用と CO<sub>2</sub> の削減効果

	2008 年	2009 年	2010 年
堆肥の使用量、t	43.8	145.4	339.8
石炭の削減量、t	15	49	113
CO <sub>2</sub> 削減量、tCO <sub>2</sub>	44	145	338
<CO <sub>2</sub> 削減量の計算式>「石炭から未利用のバイオマスへのセメントキルン燃料代替」(025) <sup>8)</sup> $BE_{材,化,y} = BFC_{肥,y} * (1 - WCF_{肥,y}) * GCV_{肥,y} * CEF_{化,y}$			
BE <sub>材,化,y</sub> …ベースライン排出量 = CO <sub>2</sub> 削減量 (t-CO <sub>2</sub> ) BFC <sub>肥,y</sub> …堆肥化物使用量 (t) WCF <sub>肥,y</sub> …堆肥化物含水率 = 0.25% GCV <sub>肥,y</sub> …堆肥化物全乾時単位発熱量 = 14.65(GJ/dry-ton) CEF <sub>化,y</sub> …代替された石炭の CO <sub>2</sub> 排出係数 = 0.0906 (t-CO <sub>2</sub> /GJ)			

## 要約

1章では、家畜ふん堆肥の原燃料化と原燃料利用について、畜産側とセメント業界側の背景を整理し、原燃料用の家畜ふん堆肥に求められる含水率、塩素濃度、総発熱量に関する目標値を設定した。

2章では、豚ふん堆肥は含水率や総発熱量が目標値に合致するが、塩素濃度が高いために塩素を除去する必要があるとあり、固液分離処理の有効性が示された。また、鶏ふんも同様に、塩素濃度が高く固液分離後の液分処理が難しいこと、牛ふんは塩素濃度とともに含水率が高いことが明らかになった。また、堆肥化基礎試験からは、堆肥化過程では塩素濃度が1.1～1.3倍に濃縮され、しかも、戻し堆肥を使用する場合は堆肥化当初から塩素濃度が高くなることが示された。

3章では、畜産で多く採用される堆積方式、開放型攪拌方式、密閉縦型攪拌方式による堆肥化施設を供して、これらで生産できる原燃料堆肥の特徴が明らかとなった。また、スクリーンプレス方式による固液分離処理が塩素除去に有効であることや、堆肥化処理で十分に乾燥が進まない場合は、強制通気型の堆肥舎を利用した通風乾燥が有効であることなど、原燃料堆肥を生産するための要素技術が整理された。

4章では、セメント工場の原燃料投入方式、あるいは、立地条件を参考に二つの原燃料堆肥生産・利用のモデルケースを設定して、その技術的、経済的な評価を行った。その結果、いくつか改善点は残されたものの、豚ふん堆肥を原燃料利用することは技術的に可能であることが示された。

5章では、原燃料堆肥の供給体制の整備や、家畜の栄養管理から始まる塩素の低減化対策の視点、あるいは地球温暖化など環境対策補助制度の利用の必要性を取り上げ、本成果の事業化に向けた方向性を述べた。

## 【引用文献】

- 1) 農林水産省(2006):バイオマスの利用状況、<http://www.maff.go.jp/j/biomass/>
- 2) 農林水産省(2011):畜産環境をめぐる情勢、  
<http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/>
- 3) (社)セメント協会:<http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jc5.html>
- 4) (独)農研機構(2007):日本飼養標準・乳牛(2006年版)、(社)中央畜産会、41
- 5) (独)農研機構(2005):日本飼養標準・豚(2005年版)、(社)中央畜産会、18-19
- 6) (独)農研機構(2004):日本飼養標準・家禽(2004年版)、12-13
- 7) (独)農研機構(2010):日本標準飼料成分表(2009年版)、(社)中央畜産会、136-161
- 8) 気候変動対策認証センター:[http://www.4cj.org/jver/system\\_doc/methodology.html](http://www.4cj.org/jver/system_doc/methodology.html)



## 謝辞

この技術リポートは、(社)畜産技術協会の「民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業」(課題名:家畜糞のセメント製造用燃料化技術の開発、2008~2011年)の助成を受けて実施した研究開発の成果であり、本事業の関係者各位に謝意を表します。

また、本事業を推進するに当たっては、八戸セメント株式会社(担当者:大坂弘二氏)の全面的な支援を受けました。ほかに、調査にご協力いただいた牧場関係者の皆様、茨城県の畜産バイオマス燃料化検討会の皆様、本事業の事務や会計を担当した畜産草地研究所業務推進室の皆様はじめ、関係者各位に対し、心からお礼申し上げます。

最後に、住友大阪セメント株式会社の林幹夫氏は、事業開始から一貫して本開発業務に従事され、年次計画の立案からその実施、現地との調整や報告会での資料作成など、大きな貢献を賜った。不幸にも最終年次に体調を崩されて、現在も病氣療養中である。早期の回復を心よりお祈り申し上げます。



本技術レポートから転載・複製を行う場合は、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所の許可を得て下さい。

技術レポート 11 号

## セメント製造向けの原燃料用家畜ふん堆肥の生産技術の開発

発行日 2012年3月31日

発行 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構

畜産草地研究所

〒305-0901 茨城県つくば市池の台2

Tel 029-838-8600 (代表)

著者 阿部佳之 (畜産草地研究所・家畜飼養技術研究領域)

澤村 篤 (近畿中国四国農業研究センター)

君田美智雄 (住友大阪セメント株式会社)

