

バイオディーゼル燃料製造時の副生成物（粗製グリセリン）の添加が 牛糞の堆肥化に及ぼす影響

石崎重信・岡崎好子

Effects of Bio Diesel Fuel By-Product (Crude Glycerin) Addition to
Composting of Dairy Cattle Excrement

Shigenobu ISHIZAKI and Yoshiko OKAZAKI

要 約

廃食油を原材料とするアルカリ触媒法によるバイオディーゼル燃料（BDF）製造時に発生するグリセリンを主体とする副生成物（粗製グリセリン、以下「BDF副生成物」）を、エネルギー源として牛糞に添加した場合の堆肥発酵に関する一連の試験を行った。

すなわち、

【試験1】BDF副生成物の添加量の影響

【試験2】BDF副生成物の添加上限の検討

【試験3】BDF副生成物を連続的に添加した場合の堆肥化発酵

その結果、以下のような結果を得た。

試験1では、水分を63～66%に調整した搾乳牛の糞尿にBDF副生成物を重量比で1.25、2.50、5.00%添加して堆積法により堆肥化したところ、BDF副生成物の添加水準が高いほど堆肥化初期の温度の立ち上がりは早くなるとともに最高温度も高くなり、水分蒸散が促進されて堆肥化の一次発酵期間が短縮された。堆肥化物中の有機物全体と糞中の難分解性有機物であるADFの分解も早まった。できた堆肥はコマツナやトウモロコシの発芽、コマツナの生育に悪影響を及ぼさなかったことから肥料成分に応じた施用量で作物に用いることができることが明らかとなった。

試験2では、BDF副生成物を添加した牛糞の通気抵抗を測定することで、BDF副生成物の添加上限を検討した。堆積法で堆肥化する場合におけるBDF副生成物の適切な添加量は、糞尿中の水分と「液体」であるBDF副生成物を合わせた「液体割合」が堆肥化物の通気性が確保できる水準（牛糞では68%）以内となるような量と考えられ、この添加水準にすることで堆肥化物の通気性が確保され、適宜切り返しを実施することで良好な発酵を継続させることができる。BDF副生成物は、水分65～67%の牛糞に重量比で3～6%添加する（液体割合を68%以下とする）のが実用的であると考えられた。

試験3では、BDF副生成物自体を家畜糞との混合堆肥化によって分解処理するという観点から、BDF副生成物を毎週または2～3週間毎に同一の堆肥化物に連続的に添加し、発酵状況とBDF副生成物成分の分解・蓄積状況を検討した。堆肥化物重量の5%以内を添加して毎週切り返しを実施するとともに適宜水分を補充することで、毎週添加しても発酵が継続され、BDF副生成物が分解されることが確認された。

以上、BDF副生成物は牛糞の堆肥化時に添加することで堆肥化を促進し、できた堆肥化物は通常の牛糞堆肥と同様に圃場に利用できることが明らかになった。しかし、BDF副生成物にはBDF製造時に触媒として添加されたアルカリが約3.5%含まれており、できた堆肥を圃場に多量に長期連用すると土壌のアルカリ化が心配される。特に、塩類が蓄積しやすい施設栽培では注意が必要である。

結 言

廃食油やナタネ油などをバイオディーゼル燃料（バイオマス由来のディーゼル燃料；以下「BDF」）に変換して化石燃料の代わりに利用する取り組みが注目されており、県内でも廃食油からのBDF製造が実用化されている。アルカリ触媒法によるBDF製造時には、グリセリンを40%程度含む粘稠性がやや高い液体の副生成物（粗製グリセリン、以下「BDF副生成物」）がBDF製造量の約20%発生する。BDF副生成物はグリセリンの他に粗脂肪、再エステル化触媒であるメタノールとアルカリ分、その他食品に由来する有機性不純物などを含むためグリセリンとしての精製利用が難しく、産業廃棄物として処分されるなど有効利用されていない。

一方、家畜糞のなかでも牛糞は、堆肥化の過程で分解される有機物含量が少なく発酵熱が得られにくいことから、一部の酪農家ではバイオマス系の発酵促進材として食用油精製で発生する「廃白土」（ろ過剤である珪藻土に植物抽出油中の不純物や油脂が混ざった物、油分を30%程度含む）を利用した堆肥化が行われており、縦型密閉堆肥化施設での糞尿に混合することで、発酵と水分蒸散の促進が可能となり¹⁾とされている。また、牛糞に廃食油を5%添加すると発酵が促進されると報告されている²⁾。

BDF副生成物に含まれている有機物のうち、脂肪類と食品由来の有機物は家畜糞に混合して堆肥化することで分解される³⁾ことが報告されている。また、グリセリンについては微生物から高等動物・植物まで多くの生物が分解酵素を持っている⁴⁾ことから、堆肥化に関わる好気性微生物により速やかに分解されることが予測される。BDF副生成物をバイオマス資源として利用した事例としては、刈り草の堆肥化促進剤（三重県藤原町）やメタン発電の原料（新潟県上越市）としての利用が報告⁵⁾されている。以上からBDF副生成物を家畜糞に添加することで、堆肥化において活動する微生物にエネルギーが供給されて発酵熱が増加し、堆肥化物の温度を上昇させて微生物の活性を高め、水分蒸散を促進するなど、堆肥化期間が短縮されることが期待できる。さらに、BDF副生成物が家畜糞の堆肥化で有効に利用できれば、廃食油からBDFを製造して利用する際の問題点であるBDF副生成物の処理が解消される。

そこで、本試験ではBDF副生成物の添加が牛糞の堆肥化発酵および堆肥性状に及ぼす影響を検討するとともに、調製された堆肥を土壤に施用した時の農作物に対する影響を明らかにするために一連の試験を実施した。すなわち、試験1では、牛糞へのBDF副生成物添加量の違いが堆肥化発酵に及ぼす影響を明らかにするため、無添加の対照区と3水準の添加量について検討するとともに、発芽試験およびコマツナ生育試験を行った。また、BDF副生成物は粘度がやや高い液体で糞尿に多量に添加すると通気性を低下させて好気性発酵である堆肥化を阻害することが予測されるため、試験2では牛糞へ添加した時の通気抵抗を測定して添加上限量を検討した。さらに、ほとんどのBDF副生成物は廃棄物として費用を投じて処理されていること

から、家畜糞の堆肥化促進に必要な量よりも多量のBDF副生成物を分解処理することができるかどうか検討するため、試験3では家畜糞堆肥化物にBDF副生成物を連続的に添加した時の発酵状況、BDF副生成物に含まれるグリセリン・メタノール・脂肪の分解・蓄積状況を検討した。

材料及び方法

1. BDF副生成物の組成

供試したBDF副生成物は、千葉三港運輸株式会社（千葉県市原市）において廃食油を原料にアルカリ触媒法によってBDFを製造した際に発生したもので、同社から提供されたものを用いた。アルカリ触媒としては水酸化ナトリウムを用いたもので製造時には粘性がやや高い液体であり、冬季の外気温程度に冷えるとゼラチン状に固化し、加温すると液体となるものであった。なお、水酸化カリウムを触媒に用いると冬季でも液体状態が保たれるBDF副生成物が得られることが千葉三港運輸株式会社で確認されている。

BDF副生成物の組成（千葉三港運輸が財団法人新日本検定協会において分析した値）を表1に示した。燃焼熱量を測定したところ5,706 cal/gであり（吉田製作所、熱量測定装置-H、熱研式）、熱量から脂肪分を27%程度含むことが推定された。

表1 BDF副生成物の組成等

性 状	黒色の粘性の高い液体
液 性	アルカリ性
グリセリン	41.0%
灰 分	4.6%
有機性不純物	48.3%
砒素試験	2 ppm 以下
メタノール	10.2%
アルカリ分 (NaOH 換算)	3.5%

※ 財団法人新日本検定協会で分析

2. BDF副生成物の牛糞への添加試験

(1) 【試験1】BDF副生成物の添加水準の影響

ア. 供試材料・試験区

2004年4月に当センターの直線攪拌式乾燥ハウスで予備乾燥処理した牛糞1,300kg（水分70～74%）に、牛豚鶏糞を混合した完熟堆肥（水分14.5%）150kgを混合して水分含量を調整したもの（以下、「調整牛糞」）を用い、BDF副生成物を添加しない対照区、および、BDF副生成物を調整牛糞重量の1.25%（18.1kg）、2.5%（36.3kg）、5.0%（72.5kg）添加した3試験区（1.25%区、2.5%区、および5.0%区）を設定して、堆肥舎内のコンクリート床上に堆積し防水透湿性シート（サンデリシート、太洋興業㈱）で覆って60日間堆肥化処理した。なお、BDF副生成物を添加する前の調整牛糞の水分含量は、対照区62.8%、添加区66%であった。堆肥化2週目までは週に3回、以降40日まで週2回、その後60日まで週1回、フロントローダーを用いて切り返しを行った。

イ．調査項目と分析方法

堆積物の温度は、温度センサー（TR-1220, ㈱ティアンドデイ）を堆積物の中央鉛直線上で床面から 10 - 30 - 50 - 70cm の 4 点の高さに設置し、60 分毎に測定した（Thermo Recorder おんどとり TR-71S, ㈱ティアンドデイ）。

切り返し時には堆肥化物のサンプルを採取し、乾物割合（65°C で 3 日間、通風乾燥）を測定した。次いで乾燥サンプルを粉碎し、灰分（540°C で 6 時間）、酸性デタージェント繊維（ADF）⁶⁾（Fibertec System1010, フォス・ジャパン ㈱）を測定した。堆肥化処理開始時の堆肥化物全体の灰分含量と、各サンプル採取時の灰分含量から、次式によって有機物、乾物、ADF の分解率を推定した。

$$\text{有機物分解率}(\%) = 100 \times \left[1 - \left\{ \frac{\text{ash}_0 \times (100 - \text{ash}_n)}{\text{ash}_n \times (100 - \text{ash}_0)} \right\} \right]$$

$$\text{乾物分解率}(\%) = 100 \times (1 - \text{ash}_0 / \text{ash}_n)$$

ただし、 ash_0 : 堆肥化処理開始時の乾物中灰分%

ash_n : n 日間堆肥化後の乾物中灰分%

$$\text{ADF 分解率}(\%) = 100 - \left[(100 - \text{乾物分解率}_n) \times \text{ADF}_n / \text{ADF}_0 \right]$$

ただし、乾物分解率_n : n 日間堆肥化後の乾物分解率

ADF₀ : 堆肥化処理開始時の乾物中 ADF %

ADF_n : n 日間堆肥化後の乾物中 ADF %

5.0% 区の堆肥については、液体クロマトグラフィによる糖の分析例⁷⁾を参考にグリセリン濃度を測定した。乾燥処理した堆肥化物サンプル約 2g に 6% 過塩素酸溶液 12ml を加えて攪拌混合し、ガーゼでろ過して固形物を除去した後、10,000rpm で遠心分離し、表面の油膜層を取り除いてから抽出液を注射器で採取し 0.4 μm のミリポアフィルターで濾過し、液体クロマトグラフィで分析した。カラムは SCR-101N（島津製作所）、カラム温度は室温、溶離液は蒸留水、流量 1ml/分、検出器は RI モニター（655A-30、日立製作所）を用い、2.7% グリセリン希釈液（W/W、6% 過塩素酸に溶解）を標準液としてリテンションタイム（約 8 分）を確認し堆肥化物乾燥サンプル中のグリセリンを測定した。

発芽試験は、コマツナおよび飼料用トウモロコシの種子を用いて実施した。コマツナの発芽試験は、タネピタシート（富士平工業）を用いてコマツナ種子 50 粒をシートに貼り付けてシャーレに入れた。対照としての牛糞堆肥または各区の堆肥を原物で 80g を 500ml 容ポリ容器に取り蒸留水 240g を加えて 30 分間振とうし、2,500rpm で 5 分間遠心分離して得た上清の原液（シート 2 枚、種子 100 粒）を各シャーレに 10ml 加えて 30°C のふ卵器に入れ、4 日後に発芽種子数を計数した。供試した堆肥は堆肥化 50 日目のもので、その乾物割合は対照区（牛糞堆肥）：42.6%、1.25% 区：46.2%、2.5% 区：47.3%、5.0% 区：53.0%、抽出液の EC（mS/cm）は、それぞれ、11.7、12.6、13.3、14.7 であった。発芽試験では、抽出液の EC が 2mS/cm 以上の場合には濃度障害が起きるためこれ以下になるよう希釈して発芽試験に供する⁸⁾こととされているため、2 倍希釈液（シート 3 枚、種子 150 粒）

についても実施したが、堆肥量が多かったため 2 倍希釈しても 5.9 ~ 7.4mS/cm（原液の 1/2）と高い値であった。発芽した種子についてはろ紙で水分を取り除いてその総重量を測定し「一芽当りの重量」を計算した。

飼料用トウモロコシ種子の発芽率は、ペーパータオルを敷いたステンレスバットに種子 50 粒を並べ、堆肥原物 30g に蒸留水 300ml を加え 30 分振とう抽出して固形物をガーゼでろ過した液を 150ml 加えて、30°C のふ卵器に入れ 5 日後に発芽種子数と発芽したものの重量を測定した（反復無し）。なお、用いた堆肥は、堆肥化 61 日目のものであった。

コマツナの栽培試験は、赤土と飼料畑の黒ボク土を 1 : 1 で混合したものの 20kg に、堆肥化開始後 70 日目の各区の堆肥を 1kg、2kg、または 5kg 加えてよく混合した後、プランター（内寸は、長さ 61 × 幅 34cm = 0.2 m²）に詰め生育を比較した。プランター内側の培養土の表面積から、それぞれの堆肥量は、畑に施用する場合の 5 t、10 t、25 t / 10 a に相当する。なお、化成肥料は施用しなかった。また、堆肥を加えない土だけのプランター 2 器についても参考までにコマツナを栽培した。6 月下旬に、1 プランター当りコマツナ種子 55 粒（1 列 11 粒 × 5 列）を一定間隔で置き、細目土 1L で種子を被覆後に散水し、その後適宜散水して発芽率と 28 日間栽培した時の地上部の収量を比較した。

(2) 【試験 2】牛糞への BDF 副生成物の添加上限の検討

ア．供試材料と実験方法

図 1 の装置を用いて、乾燥牛糞（水分 35.9%）への BDF 副生成物添加量を増やしていった場合の通気抵抗を連続的に測定し、BDF 副生成物の添加上限（通気性が著しく低下する添加量）を検討した。アクリル管（内径 10cm × 長さ 100cm）の下部は T 字形ガラス管を付けたゴム栓で閉じ、空気噴出部が糞で塞がれないよう荒目の化学繊維不織布を敷いた。これに上部から BDF 副生成物を混合した牛糞を約 1L ずつ投入し、間隙ができないようにアクリル管を約 5cm 持ち上げて落下させる動作を 15 回繰り返して鎮圧しながらアクリル管に詰め、混合物の高さが 100cm のときの通気抵抗 [2 本の水柱の高さの差 (mmAq)] を測定した。

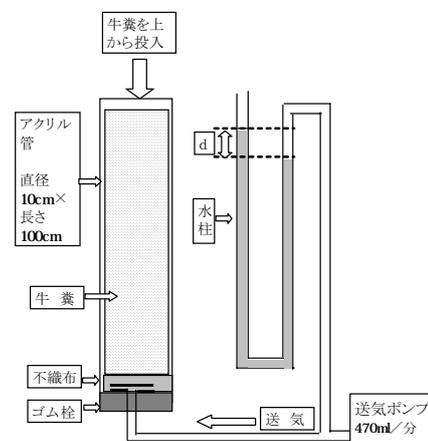


図 1 BDF 副生成物添加牛ふんの通気抵抗を測定するための装置
2 本の水柱の高さの差 (d, mm) を通気抵抗とした

通気量は、強制通気発酵における適正通気量 $60L/m^2 \cdot \text{分}^{9)}$ を基準に、試験装置の断面積から $470ml/\text{分}$ とした。

また、上記とは別に、異なる液体割合における通気性の確保状況を検討するため、水分55%に調整した牛糞にBDF副生成物を19%添加(糞中の水分とBDF副生成物を合わせた液体割合が62.3%)、または23%添加(液体割合63.4%)、水分60%の牛糞にBDF副生成物を11%添加(液体割合64.7%)、水分65%の牛糞にBDF副生成物を3.8%添加(液体割合68.5%)して、牛糞柱の各高さにおける通気抵抗を測定した。

(3) 【試験3】 BDF副生成物を連続的に添加した場合の堆肥化発酵

ア. 供試材料・実験方法・試験区分

当センターの直線攪拌式ハウス乾燥施設で予備乾燥させたモミガラ入り搾乳牛糞尿に、乾燥した完熟堆肥を混合して水分調製した供試材料550L(重量275kg、容積重 $0.5kg/L$ 、水分58.4%)に、BDF副生成物を添加しない対照区、堆肥化物重量の5%量13.75kgのBDF副生成物を毎週添加する「毎週5%区」、堆肥化開始時と堆肥温度が低下する堆肥化開始後の3、5週目に5%量を添加する「適宜5%区」、10%量27.5kgを毎週添加する「毎週10%区」、堆肥化開始時と堆肥温度が低下する堆肥化開始後の3、5週目に10%量を添加する「適宜10%区」の5試験区を設定し、堆肥舎内で試験を実施した。調製物をコンパネで作った堆積箱(80cm×80cm×高さ90cm、上部開放)に詰め込み、毎週堆積箱から取り出してフロントローダーで切り返した後、堆積箱に戻して61日間堆肥化処理を実施した。

イ. 調査項目と分析方法

堆肥化物の温度は、底板上の10-30-50-70cm位置について測定した。切り返し時には、見た目では乾燥している場合には適宜水を加えて堆肥化が継続されるようにした。また、堆肥化物のサンプルを採取し、グリセリン、メタノール(以上、液体クロマトグラフ)、粗脂肪(ソックスレー抽出器)を分析し、それらの分解・集積状況を確認した。また、水分と灰分を測定し、発酵分解状況を確認した。

メタノールの分析は前述したグリセリンの分析と同時に定量できることが確認できたので、グリセリンは2.5%、メタノールは0.6%の3%過塩素酸希釈液(W/W)を標準液として分析した(リテンションタイムは、グリセリン=8.2分、メタノール=9.4分)。なお、堆肥サンプルはメタノールの揮発を防ぐため、堆肥原物を用い、堆肥100gに1.5%過塩素酸400mlを加えて30分間振とう抽出し、ガーゼろ過液10mlに4.5%過塩素酸10mlを加えて過塩素酸濃度を3%として保存後、分析に供した。

結果及び考察

1. 【試験1】 BDF副生成物の牛糞への添加水準の影響

(1) 堆肥の温度

各試験区について4測定点の平均温度の推移を図2に示

した。堆肥化初期の2週間程度は、対照区に比べてBDF副生成物添加量が多いほど温度が高くなった。2~3週目に各区とも温度がピークに達し、その後は各区の温度差は小さくなった。5.0%区は堆肥化40日以降、切り返し後の温度上昇が見られなくなったが、これは堆肥化初期にBDF副生成物中のグリセリンや脂肪類が速やかに分解されてしまいエネルギー源が枯渇したためと思われる。また、後述のように5.0%区では水分含量が47%以下となったために、発酵に必要な水分が不足して発酵が停滞したことも一因と考えられた。

なお、堆肥化期間中の最高温度は対照区では55℃以下であったが、BDF副生成物を添加することで数日間60℃以上と高くなった。家畜糞中の病原菌の殺菌については50~60℃、雑草種子の死滅については60℃2日以上が必要¹⁰⁾であることから、病原菌や雑草種子を死滅させる目的でBDF副生成物を利用することも有効であることが示唆された。

また、BDF副生成物を添加した堆肥化物では、堆肥温度が上昇した直後から通常の家畜糞堆肥ではあまり観察されない「白い菌体」がしばしば観察されたが、その詳細については検討しなかったため不明である。

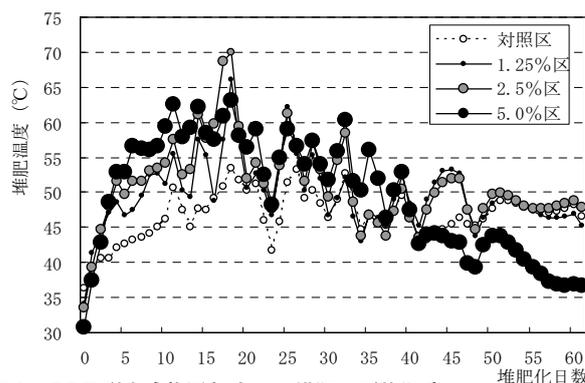


図2 BDF副生成物添加牛ふん堆肥の平均温度

(2) 堆肥の乾物割合

堆肥の乾物割合の推移を図3に示した。BDF副生成物の添加量が多いほど堆肥の乾物割合が早く高くなる傾向を示したが、これはBDF副生成物添加量が多いほど発熱量が多くなったため水分蒸散が促進された結果と考えられる。

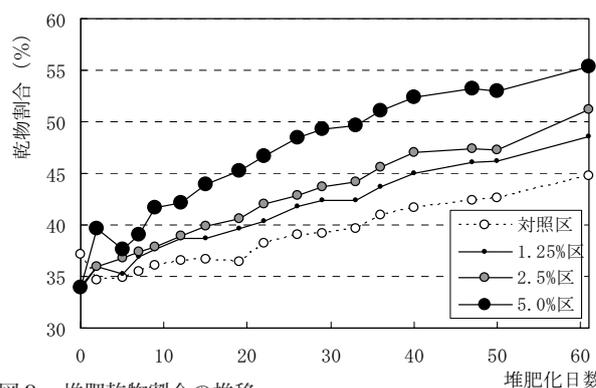


図3 堆肥乾物割合の推移

(3) 有機物の分解率

BDF副生成物には灰分が5%程度含まれ、残りの95%はグリセリン、メタノール、脂肪等で、これらの有機物は堆肥化過程で分解されると考えられる。BDF副生成物を添加した試験区では、牛糞中の有機物にBDF副生成物由来の有機物が上乘せされたことになるが、無添加の対照区に比べてときの有機物含量の増加割合は、1.25%区で3.5%、2.5%区で6.8%、5.0%区で12.7%と推計される。図4に有機物分解率の推移を示したが、これは堆肥化開始時の各区の有機物含量に対する分解率を示したものであり、BDF副生成物を添加した各試験区では有機物含量が高くなっていった。添加したBDF副生成物由来の有機物が100%分解されると仮定すると、堆肥化終了時点における有機物分解率は、対照区の30%に比べて、1.25%区で33.3%、2.5%区で36.4%、5.0%区で41.8%となるのが推定される（牛糞の乾物中有機物割合を73%、その分解率を30%としたとき）。

BDF副生成物添加区における有機物分解率は堆肥化10日目以内の早い時点から対照区に比べて5~15%程度高く推移したが、これはBDF副生成物が堆肥化開始後速やかに分解されたためと考えられ、堆肥化初期の発酵温度が添加によって速やかに上昇したことと一致した。また、10日目以降も添加区が5~15%程度高く推移したが、堆肥化60日目では各添加区の差は小さくなり、対照区との差は10%以下に縮小した。1.25%と2.5%区については前述のBDF副生成物添加による有機物の増加をほぼ反映した結果となり、良好な発酵が行われた場合には、BDF副生成物の添加は糞由来の有機物の分解を妨げないことが示唆された。一方、5.0%区では対照区との差が期待値である11.8% (41.8 - 30) よりも小さく、堆肥化の後半に水分が不足して発酵が停滞したことが推察された。

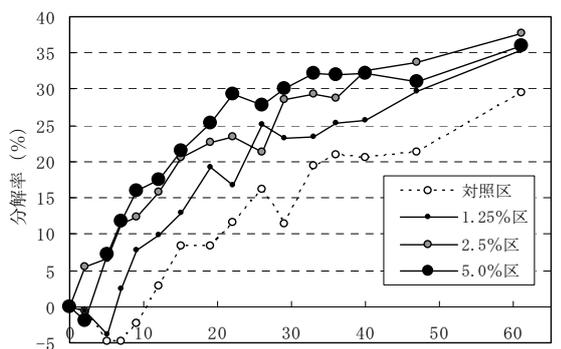


図4 有機物分解率の推移

(4) 糞中のADF分解率

糞由来有機物の分解状況を推定するため、BDF副生成物には含まれず糞中に多く含まれる有機物であるADF（分解されにくい有機物）に着目し、その分解率を推定した。堆肥化物乾物中のADF割合を図5に示したが、38~43%の範囲で概ね一定の割合で推移した。BDF副生成物の添加がADFの分解を抑制する場合には、堆肥化物中のADF含量が高くなっていくはずであるが、上昇傾向は確認されなかったことから、ADFは前述の「有機物」全体の分解速度とほぼ同程度で分解されたことが推察された。

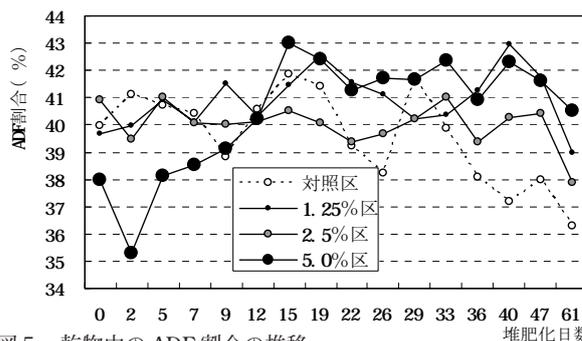


図5 乾物中のADF割合の推移

ADF分解率の推移を図6に示した。対照区に比べて堆肥化3週間目までは添加区、特に2.5%区と5.0%区で分解が早く進んだことから、BDF副生成物の添加は、堆肥化の初期において微生物発酵を促進し、牛糞中の分解されにくい繊維成分の分解も促進したことが示唆された。

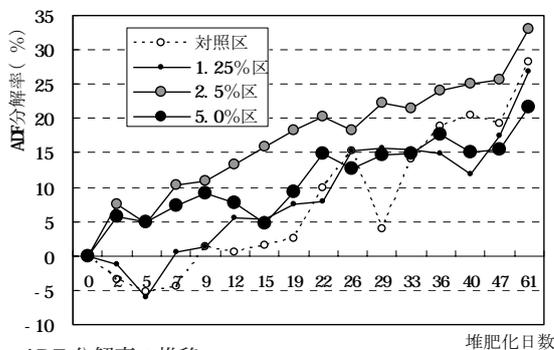


図6 ADF分解率の推移

(5) 堆肥の減量

表2に堆肥化期間中の重量減少とその内訳の計算値を示した。BDF副生成物は速やかに分解されたと考えられるが、BDF副生成物の添加量以上に「堆肥の重量減少」は多くなった。堆肥化40日目における減量の内訳を見ると、BDF副生成物の添加水準に応じて有機物の分解量も増加し、水分の蒸散も同様に促進されたことがわかる。水分蒸

表2 堆肥化中の重量減少とその内訳の計算値

項目試験区	堆肥化開始時の重量 糞+堆肥+BDF副生成物	22日目		40日目		40日目減量内訳		1kg添加あたりの水分蒸散量
		堆肥重	減量	堆肥重	減量	有機物	水分	
対照区	1,300+150+0 = 1,450	1,074	376 (0)	875	575 (0)	71 (0)	410 (0)	
1.25%区	1,300+150+18 = 1,468	1,006	462 (86)	826	642 (67)	95 (24)	472 (62)	3.5
2.5%区	1,300+150+36 = 1,486	981	505 (129)	808	678 (103)	126 (55)	501 (91)	2.5
5.0%区	1,300+150+73 = 1,523	909	614 (238)	739	784 (209)	134 (63)	582 (172)	2.4

「減量」、「40日目減量内訳」欄の括弧内は、対照区との差

散量は410kg(対照区)~582kg(5.0%区)であり、BDF副生成物1kg添加当りの水分蒸散量は2.4kg(5.0%区)~3.5kg(1.25%区)であった。我々が測定したBDF副生成物の燃焼熱量は5,706 cal/gであり、堆肥化により有機物が100%分解されると仮定したときの期待水分蒸散量はBDF副生成物1kg当り約6kg(5,706 ÷ 900¹¹⁾)であるが、実際にはこれの約1/2の蒸散量であった。

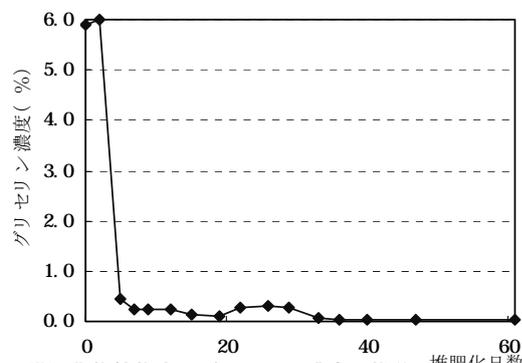


図7 堆肥化物乾物中のグリセリン濃度の推移

(6) 堆肥化によるグリセリン分解

5.0%区の堆肥化物乾物中のグリセリン含量の推移を図7

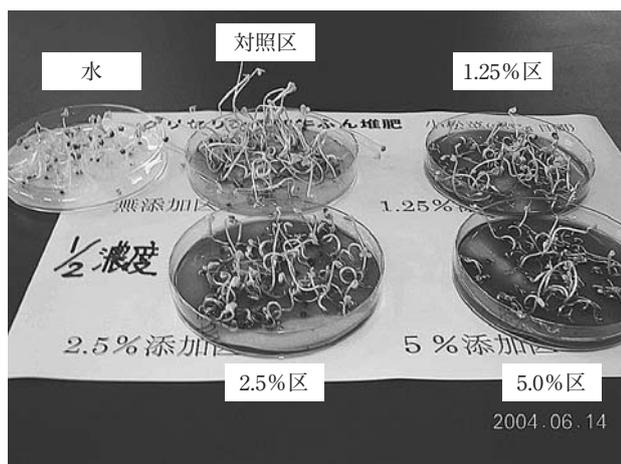


図8 コマツナの発芽試験 (1/2 希釈液)

表3 コマツナの発芽試験の結果

	堆肥の乾物割合 (%)	EC mS/cm	抽出液 原液※1		2倍希釈液※2	
			発芽率%	1芽重 mg	発芽率%	1芽重 mg
水						
対照区	42.6	11.7	95.0	20.7	99.3	31.9
1.25%区	46.2	12.6	87.0	14.7	100.0	53.2
2.5%区	47.3	13.3	92.0	9.5	98.0	35.1
5.0%区	53.0	14.7	79.0	8.0	97.3	32.3

※1：堆肥の原物80gに蒸留水240gを加えて抽出

※2：原液は、シート2枚、2倍希釈液はシート3枚の成績の平均

※3：発芽率と1芽重は、4日後に測定した

表4 飼料用トウモロコシの発芽試験の結果

	pH	EC mS/cm	浸透圧 Osm	抽出液 原液※1		2倍希釈液	
				発芽率%	1芽重 g	発芽率%	1芽重 g
水	6.97	1.8		65	1.15		
対照区	8.97	4.8	0.16	44	1.02	66	1.08
1.25%区	9.05	5.1	0.16	48	0.94	50	1.03
2.5%区	9.20	5.4	0.17	54	0.92	54	1.08
5.0%区	9.35	5.8	0.18	36	0.88	36	1.02

※1：堆肥の原物30gに蒸留水300gを加えて抽出

※2：抽出液原液、2倍希釈液とも50粒の成績(反復無し)

※3：浸透圧は、osmometer OM801 (VOGEL、朝日ライフサイエンス)を用いて測定した。

に示した。牛糞に添加したBDF副生成物中のグリセリンは5日以内で90%以上分解されることが明らかとなった。

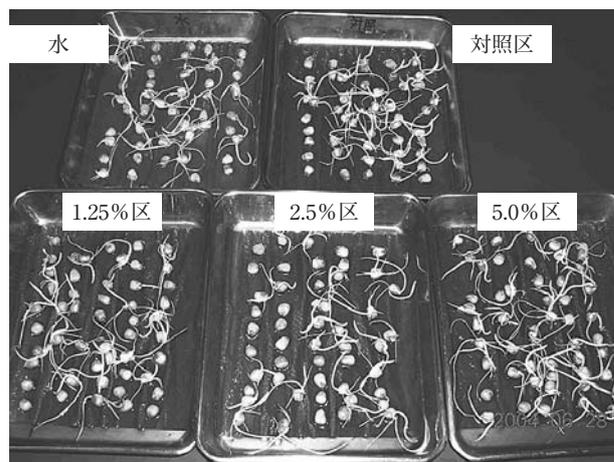


図9 飼料用トウモロコシの発芽試験

(7) 発芽試験と栽培試験の結果

表3、図8にコマツナの発芽試験の結果を、表4、図9に飼料用トウモロコシの発芽試験の結果を示した。コマツナ、飼料用トウモロコシのどちらの発芽試験においても、BDF副生成物の添加水準が高まるにつれて堆肥抽出液のECが上昇する傾向がみられ、トウモロコシ発芽試験で測定したpHと浸透圧についても同様な傾向であったが、これはBDF副生成物中のアルカリ分(ナトリウム)の影響と考えられる。

コマツナの発芽率は、抽出液原液では5.0%区でやや低下したが、2倍希釈液では発芽率に影響しなかった。「一芽当たりの重量」は、特に抽出液原液では添加水準に比例して低下し幼植物の成長が阻害された結果であった。しかし、通常の発芽試験は、風乾した堆肥化物5gに対して抽出水100mlの比率であり¹²⁾、今回のコマツナ発芽試験の抽出水は通常の4倍濃かった。2倍希釈しても通常の2倍の濃さであったが発芽率は悪影響を受けなかったことから、BD

表5 コマツナの収量 (g / コンテナ)

試験区	施用量	堆肥 1kg (5t / 10a)	堆肥 2kg (10t / 10a)	堆肥 5kg (25t / 10a)	平均
対照区		621	880	726	742
1.25% 区		803	607	765	725
2.5% 区		626	786	827	746
5.0% 区		650	785	650	695
平均		675	765	742	728

堆肥なしでは、340g と 199g (虫の食害強い: 図10 手前左)

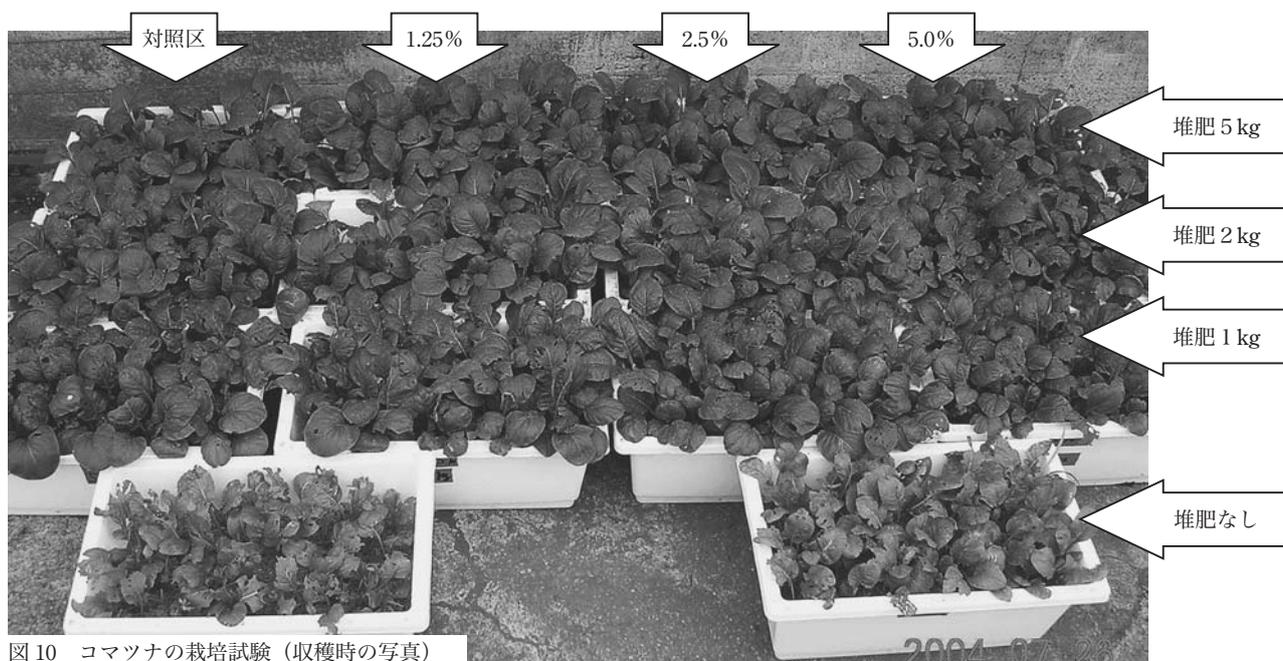


図10 コマツナの栽培試験 (収穫時の写真)

F 副生成物添加堆肥にはコマツナ種子の発芽に悪影響を及ぼす因子がないことが確認された。

飼料用のトウモロコシの発芽率は、5.0%区でやや低くなったが、その他の試験区では大きな差はなかった。しかし、「一芽当たりの重量」は、2倍希釈液に比べて抽出液原液で、また、BDF副生成物の添加水準が高まるにつれて軽くなった。土壤に水溶性塩類が集積すると土壤溶液の浸透圧が上昇して根の吸水阻害を起し、これが作物の生育障害の原因¹³⁾とされていることから、BDF副生成物中のアルカリ塩類による濃度障害と考えられた。

コマツナの栽培試験結果を表5と図10に示した。各区とも播種した55粒全てが発芽した。28日間栽培したときの地上部の収穫量(表5)は、堆肥を加えない区に比べると各区とも収量が増加したが、BDF副生成物の添加水準や堆肥施用量の影響は明確ではなかったことから、5t / 10a程度の通常の施用量では作物への悪影響が無いことが確認できた。堆肥5kg区は10a当りの施用量では25tに相当するので、通常の施用量の場合は5回連続施用しても悪影響は無いことが示唆された。

しかし、BDF副生成物にはBDF製造時に添加した触媒である水酸化ナトリウム(NaOH)、もしくは、水酸化カリウム(KOH)が3.5%程度含まれており、乳牛50頭規模の糞尿(約3t)に3%添加(90kg)すると、NaOHの場合Naが1.8kg、KOHの場合Kが2.2kg堆肥に加わることになる。堆肥化により糞尿量が1/3に減少したとすると

アルカリの濃度は濃縮されるので、BDF副生成物3%添加の場合にはNaまたはKが0.6%上昇する計算となる。この堆肥を圃場に5t / 10a施用すると、BDF副生成物由来のNaまたはKの施用量は12kg / 10aとなるため、長期連用すると土壤のアルカリ化が心配される。特に、施設栽培では塩類集積を防止するため長期の施用は避けるなどの注意が必要である。

2. 【試験2】牛糞へのBDF副生成物の添加上限の検討
乾燥牛糞(水分35.9%)にBDF副生成物を適宜添加して添加総量を増やしていった場合の液体割合(糞中水分+BDF副生成物)と通気抵抗(mmAq)の測定結果を図11に示した。良好な堆肥発酵が継続されるためには、堆肥に十分空気が浸透で

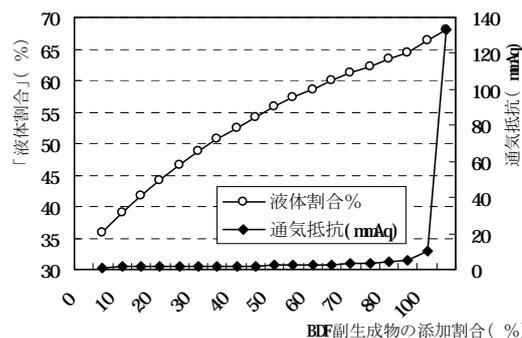


図11 BDF副生成物添加割合と通気抵抗
水分35.9%の乾燥牛ふんにBDF副生成物を添加したときの液体割合と通気抵抗

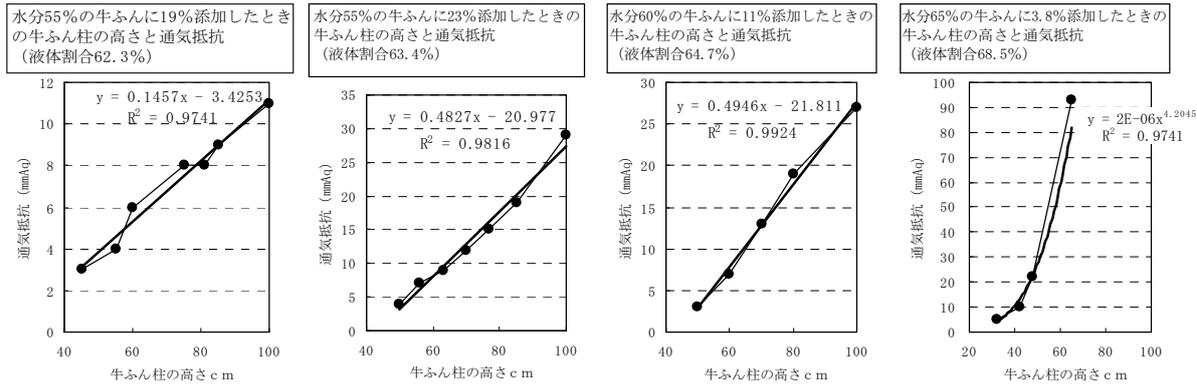


図12 水分割合の異なる牛ふんにBDF副生成物を添加したときの通気抵抗

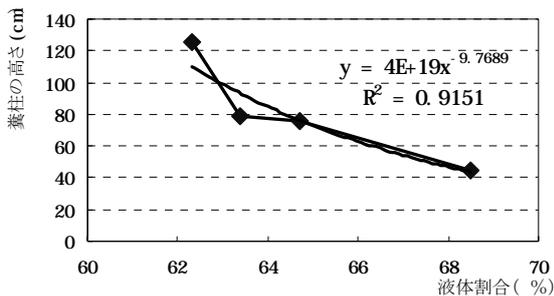


図13 通気抵抗が16mmAqとなる糞柱の高さ

きる必要があり、本試験と同様な装置を用いて検討した報告によると、牛糞の場合には堆積高さが1mのときの通気抵抗が16mmAqを超えると良好な発酵が期待できない^{9, 14)}といわれている。液体割合が66.3%までは通気抵抗は10mmAq以下で通気性が確保されていたが、液体割合が68.0%では133mmAqと通気性は著しく低下した。この結果から、液体割合が68%となるところが、BDF副生成物の添加上限と考えられた。なお、この試験に用いた牛糞は連続攪拌方式のハウス乾燥施設で予備乾燥したもので、直径数mmの粒状形のものが多く、BDF副生成物を添加しても粒状構造は維持されていたことから、通気性が確保されやすい形状であったと考えられた。一方、BDF副生成物の添加割合は100%を超える多量であったため、粘性の高さが通気性を阻害したことも考えられた。

異なる液体割合における通気性の確保状況を検討した結果を

図12に示した。水分55%の牛糞にBDF副生成物を19%添加した場合(液体割合62.3%)には牛糞柱の高さが100cmで通気抵抗は11mmAqであり、堆肥の通気性が十分確保された(回帰式から、通気抵抗が16mmAqとなる牛糞柱の高さを計算すると133cm)。水分65%の牛糞にBDF副生成物を23%添加した場合(液体割合63.4%)と水分60%の牛糞に11%添加した場合(液体割合64.7%)の通気抵抗は、ほぼ同様な結果であり、堆積の高さが約75cmを超えると通気抵抗が16mmAqを超えた。また、水分65%の牛糞に3.8%添加した場合(液体割合68.5%)には、堆積高さ45cm程度で通気抵抗が16mmAqとなった。この結果を用いて液体割合と通気抵抗が16mmAqとなる牛糞柱の高さの関係を図13に示した。この図から、液体割合が70%では牛糞柱の高さが40cm弱、68%では45cm、66%では63cm、64%では88cm程度までは通気性が確保されることが示唆された。

堆積法による家畜糞の堆肥化処理では、経験的に堆積物の表面から30~50cmの深さまでは好氣的発酵が行われると考えられ、切り返しを行って新しい表面を作ることを繰り返して全体の堆肥化発酵が進行される。したがって、堆積法による堆肥化処理では、液体割合が最大で70%程度となるようBDF副生成物を添加すれば、堆積物の表面から40cm程度の深さまでは通気性が確保されてその部分では好気性発酵が行われるため、適宜切り返しを行うことで最終的には良好な堆肥が得られると考えられた。

表6 BDF副生成物の添加限界(%)の計算値

牛ふん:100kg 液体率上限68%*1				豚ふん:100kg 液体率上限55%*1				鶏ふん:100kg 液体率上限52%*1			
糞の水分%	添加限界量(kg)*2	分解後水分%*3	水分55%に必要な水量(kg)*4	糞の水分%	添加限界量(kg)*2	分解後水分%*3	水分50%に必要な水量(kg)*4	糞の水分%	添加限界量(kg)*2	分解後水分%*3	水分48%に必要な水量(kg)*4
67	3	54	1	54	2	25	26	51	2	16	31
66	6	43	14	53	4	10	36	50	4	0	39
65	9	26	26	52	7	0以下	45	49	6	0以下	48
64	13	0以下	38	51	9		54	48	8		57
63	16		50	50	11		63	47	10		66
62	19		62	49	13		73	46	13		74
61	22		74	48	16		82	45	15		83
60	25		87	47	18		91				

通気性のある液体(糞中水分+BDF副生成物)割合までBDF副生成物を添加できるとして計算

*1: 通気性が確保できる液体割合上限を、牛ふん68%、豚ふん55%、鶏ふん52%と仮定した

*2: 糞の水分割合ごと、液体率上限まで添加できるBDF副生成物量(kg/糞100kg)を計算した

*3: 添加したBDF副生成物が分解されたときに期待される発熱量から水分蒸散量を計算し、堆肥化物の水分割合を計算した

*4: 発酵が継続できると考えられる水分割合とするのに要する水の添加量を計算した

BDF副生成物を牛糞に添加する場合の添加上限については上記の試験で推定できたが、畜種によって糞中の繊維含量等が異なるために通気性が異なることが知られている。良好な堆肥発酵を促すための水分含量の上限は、牛糞で水分65～68%、鶏糞で50～52%、両者の中間的な豚糞で55%程度といわれている^{9, 14}。このため、BDF副生成物を「液体」と考え、添加前の水分割合ごとに各畜種における液体割合上限（上記の水分含量の上限）に達するまで添加できるBDF副生成物の量（糞重に対する割合）を計算すると、表6のように添加上限量が推定できる。また、BDF副生成物が発酵されて生じる熱量（燃烧熱量とする）から水分蒸散量が計算され、BDF副生成物分解後の堆肥化水分が計算され、発酵が継続される最低限の水分含量を維持するのに必要な水添加量が計算できる。

例えば、水分65%の牛糞100kgの場合、BDF副生成物を9kg添加すると液体割合が68%となり、通気性が確保されるので発酵が継続されるが、BDF副生成物が分解されたあとでは堆肥化物の水分割合が26%になってしまうので途中で発酵が停止してしまうことが予測され、適宜水（26kg）を添加して水分割合を発酵が継続できる55%程度に維持する必要があることが予測される。水分含量が低い糞の場合には、BDF副生成物を多く添加できるが、途中で多くの水の補給が必要であり実用的ではない。また、豚糞や鶏糞では、発酵に適した水分含量が55～52%と低く、分解性有機物も多く含み、BDF副生成物を添加すると乾きすぎて発酵が停止してしまうことが予測される。以上のことから、堆積法で堆肥化を行う場合には、水分含量65～67%程度の牛糞にBDF副生成物を3～5%程度添加する（液体割合が68%以下）のが実用的であると考えられた。

3. 【試験3】BDF副生成物を連続的に添加した場合の堆肥化発酵と分解状況

BDF副生成物を同一の牛糞堆肥に連続的に添加したときの堆肥化物の温度（床面上10～30～50～70cmの平均値）推移を図14に示した。対照区では堆肥化10日目から70°C程度となり17日目以降低下して37日目では36°C程度と発酵が終息する傾向となった。適宜5%区、適宜10%区では堆肥化35日目までは70°C前後の良好な発酵が継続された。毎週5%区は適宜添加区に比べるとやや低く推移したが対照区に比べると高い温度が続いた。一方、毎週10%区では添加するごとに堆肥温度が低下し、発酵が停滞したことが示唆され、堆肥化物表面には通常の家畜糞堆肥では見られない黄色の微生物が発生し、メタノール臭も強くなった。

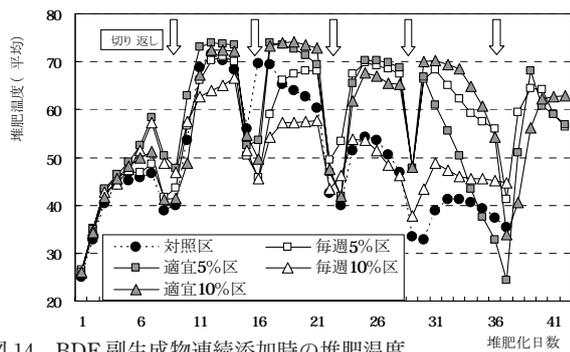


図14 BDF副生成物連続添加時の堆肥温度

図15に堆肥の水分割合を示した。毎週10%区以外では発酵が良好に継続されて水分が蒸散したが適宜水を加えたので水分割合は40～62%の範囲となった。30日以降、毎週5%区と適宜10%区では、水分割合が45%を下回ったが、堆肥温度および後述のグリセリンや脂肪の分解状況から、水分不足により発酵が阻害されたことはなかったと思われる。

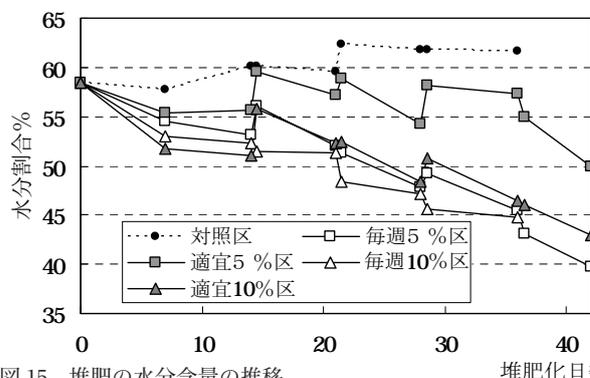


図15 堆肥の水分含量の推移

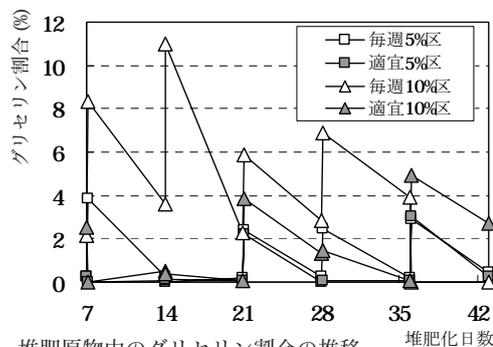


図16 堆肥原物中のグリセリン割合の推移

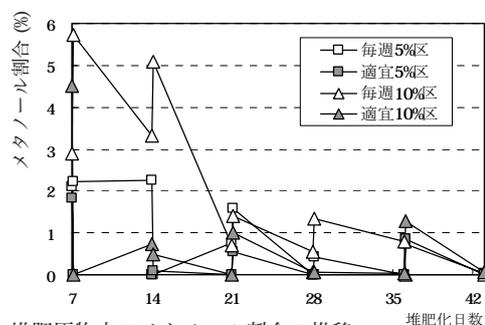


図17 堆肥原物中のメタノール割合の推移

図16に堆肥原物中のグリセリン割合（重量%）を、図17にメタノール割合（重量%）を示した。なお、試験開始時（第一回目の添加）には堆肥化物サンプルを採取しなかったため、7日目からの数値を図示した。添加量が5%の場合にはグリセリンは添加後1週間ではほぼ分解され、次の添加により2～3%上昇したが再び速やかに分解された。添加量が10%の場合には一回の添加で3～7%グリセリン濃度が上昇し、適宜10%区の結果から10%量のグリセリン分解に2週間程度を要することが窺われ、発酵がおおむね終息したことを確認してから添加すれば発酵が継続されてグリセリンも分解されるが、毎週添加するとグリセリンが残存した。

メタノールは、毎週10%区以外では添加後1週間では概ね分解もしくは蒸発したが、毎週10%区でも堆肥化14日目以降では濃度の減少が認められた。これは、メタノールを分解する微生物

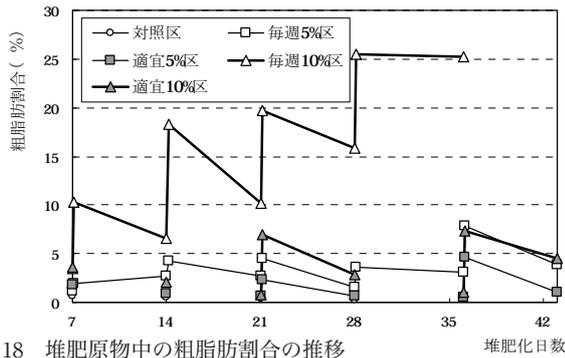


図18 堆肥原物中の粗脂肪割合の推移

物が適応的に増加したことによると推察される。なお、堆肥化当初は予想以上に高い濃度であったが、第一回目に添加したBDF副生成物のメタノール濃度(メタノール濃度は未分析)が高かったことが考えられた。

図18に堆肥原物中の粗脂肪割合の推移を示した。BDF副生成物には粗脂肪が2.7%程度含まれていると考えられる(未分析、燃焼熱量から推定)が、毎週5%区、適宜5%区、および、適宜10%区では脂肪の蓄積が見られず、1~数週間で分解されていた。しかし、毎週10%区では脂肪の一部は分解されるものの残存する部分が多いために蓄積していき、堆肥化物が黒光りして油分を多く含むことが外見からも推察される状態となり、これが堆肥化物の通気性を低下させ発酵を阻害したことが推察された。

表6 堆肥化物の容積重(kg/L)の推移

	14日後	21日後	28日後
対照区	0.63	0.63	0.69
毎週5%区	0.92	0.63	0.67
適宜5%区	0.66	0.70	0.75
毎週10%区	0.86	0.79	0.89
適宜10%区	0.64	0.77	0.66

BDF副生成物を添加後に測定
1.0L容器に堆肥を詰めて重量を測定

表6に堆肥化物の容積重の推移を示した。毎週10%区の堆肥化28日目には0.89kg/Lに達し通気性が悪化した。その他の区では0.64~0.77kg/Lの範囲で、通気性は概ね確保されていたことが推察された。

BDF副生成物の連続添加についての以上の結果から、BDF副生成物自体を同一の堆肥化物に連続的に添加して分解処理する場合には、堆肥化物重量の5%程度の量を毎週添加して切り返しを実施することで、BDF副生成物中のグリセリン・メタノール・脂肪などが蓄積せずに分解され、適宜水を補給することで良好な堆肥化発酵を継続できることが明らかとなった。なお、BDF副生成物には水酸化ナトリウム、もしくは、水酸化カリウムが3.5%程度含まれており、乳牛50頭規模の糞尿(約3t)に3%添加(90kg)すると、堆肥化物中のNaまたはKが0.6%上昇する計算となる。この堆肥を圃場に長期連用すると土壌のアルカリ化が心配され、特に、施設栽培では注意が必要である。

本報告では詳しく記述しなかったが、酪農家の直線連続攪拌式ハウス乾燥施設におけるBDF副生成物の添加実証を、糞尿の温度が低くなり、水分蒸散量が減少する冬季に試みた。堆積厚15cmの生牛糞尿へBDF副生成物を3%程度添加し一日に

15回程度攪拌した事例では、温度上昇は見られなかったもののグリセリンは概ね分解されたことから、水分蒸散が促進されたことが示唆された。戻し堆肥やウッドチップ等で水分含量を75%程度に調整した堆積厚35cmの牛糞にBDF副生成物を3%添加し1日に6回程度攪拌した事例では、添加前には発酵による温度上昇や水蒸気の発生が認められなかったのに対して、添加後は明らかに温度が上昇し水分蒸散が増加した(水蒸気を目視)ことが確認できた。このように、一日に多回数攪拌する方式の乾燥施設においては、水分含量が前述した適正な値よりも若干高い牛糞であっても、BDF副生成物を添加することが有効であることが確認された。

謝 辞

本試験は、平成16~17年度に実施した千葉三港運輸株式会社と千葉県畜産総合研究センターの共同研究「バイオディーゼル燃料(BDF)副生成物利用による家畜ふん尿堆肥化技術の確立」のうち、当センターが担当した試験結果をとりまとめたものである。試験実施に当って千葉三港運輸株式会社にはBDF副生成物の提供をはじめ諸事にわたり全面的なご協力いただいたのでここに深謝します。

引用文献

- 1) 神奈川県、研究成果情報(1995年)、「低水分、高エネルギー源添加による乳牛糞の連続発酵堆肥化処理」
- 2) 石川県、研究成果情報(2002年)、「牛糞堆肥の有機物分解率を低下させない廃食油添加技術」
- 3) 生化学辞典(1986年)、第一版6刷、東京化学同人:364
- 4) 押田敏雄、柿市徳英、羽賀清典(1998)、畜産環境保全論、(株)養賢堂:42
- 5) 三重県環境部循環システム推進チーム(2004年)、「地域循環ネットワークモデル事業報告書」:33-36 (<http://eco.pref.mie.jp/data-syu/pamfh/network/pdf/p2.pdf>)
- 6) 阿部 亮(1988)、炭水化物成分を中心とした飼料分析法とその飼料栄養価評価法への応用、畜産試験場研究資料2:1-34
- 7) 島津高速液体クロマトグラフ 応用データ集改訂版:2
- 8) 家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル(2003)、農林水産技術会議事務局:22-23
- 9) 柴田るり子・大泉長治・岡田光弘・高山文雄(1985)、千葉畜産研報9号:57-62
- 10) 中央畜産会(2001)、堆肥化施設設計マニュアル:15
- 11) 中央畜産会(2001)、堆肥化施設設計マニュアル:14
- 12) 千葉県農林技術会議(2005)、標準技術体系土壌肥料No.5、土壌、水質及び作物分析診断、86-87
- 13) 財団法人畜産環境整備機構(2002)、畜産環境アドバイザーテキスト【堆肥化施設の設計・審査技術】:11-12
- 14) 岡田光弘、栗原勇、遠藤 篤、大泉長治、中村丹美、萩田恒男(1983)、千葉畜産研報7号:55-61