

廃棄乳の堆肥化技術の確立

福島正人、阿久津充¹⁾、木下強、小池則義²⁾、田澤倫子、神辺佳弘³⁾

1) 現 塩谷南那須農業振興事務所、2) 現 農業大学校、3) 現 畜産振興課

要 約

産業廃棄物である廃棄乳は、水分調整することで堆肥化が可能である。堆肥化により抗生物質を不活化し、植物の生育に悪影響を与えない。また、廃棄乳と乳牛ふん尿を混合することで堆肥化がおり、大腸菌群などを抑制できる。

目 的

栃木県は、北海道に次いで乳用牛の飼養頭数(H23、53,000頭)は全国2位の一大酪農県であり、1戸当たりの飼養頭数も平成23年度で55.8頭/戸(H17は50.7頭/戸)と年々規模拡大が進んでいる¹⁾。一方で、乳牛の特徴的な生産病の一つとして乳房炎²⁾があり、酪農家の経営に大きな打撃を与えている。乳房炎に罹患した乳牛は、抗生物質など薬剤を投与され治療するが、この治療中に生産された生乳は出荷できない、いわゆる廃棄乳となる。また、分娩直後に生産される初乳も出荷することができないため、場合によっては廃棄乳になる可能性もある。

規模が小さい酪農家であれば、発生する廃棄乳量は少ないため尿だめ等へ入れ、必要に応じて畑に散布することが可能だが、規模が拡大している現在は、この処理が難しい酪農家が多いと考えられる。また、廃棄乳は、産業廃棄物であるため³⁾、酪農家が自ら適正に処理をしなければならず、不適切に処理をした場合は罰則を受ける恐れもある。

そこで、酪農家が容易に使える技術である堆肥化により廃棄乳を適正に処理ができるかを検討した。

試験 1

廃棄乳の堆肥化技術は、廃棄乳に酢を添加し分離されたカゼインに靱ガラを加えて堆肥化した場合、水分を60%にすることで、温度が60℃を上回り良好な堆肥化がみられた⁴⁾とされているが、一般的な酪農家が毎日発生する廃棄乳に酢を加えて固形分だけを堆肥化することは手間やコストがかかり難しいと考えられる。また、残ったホエーの処理方法も行わなければならない⁴⁾。

そこで本試験では、廃棄乳に戻し堆肥を加えて水分調整し、廃棄乳の堆肥化特性について試験を行った。

材料及び方法

1 試験資材

試験に用いた廃棄乳は、場内で飼養している搾乳牛(ホルスタイン種)に乳房炎の治療を目的としてオキシテトラサイクリン製剤を取扱説明書に準じて投与し、すなわち、1日に1~2回を1分房当たり1容器(オキシテトラサイクリン450mg(力価))を投与した。投与翌日~3日目までの併せて3日間分の廃棄乳を得て、試験に供試した。

副資材として用いた戻し堆肥は、栃木県畜産試験場(現、栃木県畜産酪農研究センター芳賀分場)で慣行的に生産されている方法で行った⁵⁾。すなわち、場内に設置してある強制発酵施設(エンドレス型、ロータリー式)に生ふん(肉牛、豚、鶏の混合物)を投入し、1回/日の割合で切り返しを行って約2か月間堆肥化させた後、この一次堆肥を堆肥舎へ運び高さを約2mに積み上げて、1回/月の割合で切り返しを行い、約6か月間二次発酵させた。なお、この水分は49.6%だった。

2 堆肥化の条件設定

廃棄乳の水分は、ホルスタイン種の生乳水分である87.7%¹⁰⁾と設定した。

廃棄乳と戻し堆肥を混合し、堆肥化開始の水分は、60%とした。これは、混合割合を決めるための予備試験を行ったところ、水分が60%以上だと、廃棄乳と堆肥を混合した時に廃汁が流れ出てくるためである。

3 堆肥化方法

廃棄乳約110kgと戻し堆肥約295kgを混合した。混合方法は、あらかじめバケットに堆肥を適量入れておき、ここへ廃棄乳を流し入れ、約20分してから堆肥舎で攪拌・混合した。なお、バケットに廃棄乳を入れてから直ちに攪拌しなかったのは、酪農家の搾乳作業を考慮すると、搾乳作業中に廃棄乳をバケットに入れることはできても、これを堆肥舎や強制発酵施設にその都度運ぶことは不可能と考えられたためである。

切り返しは毎月1回行い、堆肥化は約6ヶ月間行った(2009年11月2日~2010年5月6日)。

4 分析項目

(1) 堆肥化中

ア 温度

イ 臭気(堆肥化開始後2週間)

臭気は堆肥から約30cm離れた部分から採取した。

(ア) ニオイセンサによる臭気指数相当値

(イ) 検知管法による臭気分析(アンモニア、硫化水素、酢酸、アミン類、メチルメルカプタン、メルカプタン類)

(2) 切り返し時の堆肥分析

ア 水分⁶⁾: 乾熱法により測定した。すなわち、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⁶⁾：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⁶⁾：乾式燃焼法により求めた。すなわち、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⁶⁾：ケルダール法により測定した。すなわち、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⁶⁾：バナドモリブデン酸比色法により測定した。すなわち、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⁶⁾：原子吸光度法により測定した。すなわち、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 大腸菌群数⁷⁾：デソキシコール酸塩酸培地法により測定した。すなわち、堆肥 20g をリン酸緩衝滅菌生理食塩水 180ml に入れ 30 分攪拌したものを 10 倍希釈液とし、その後 10 段階希釈により試験試料とした。
当該試料 1ml をデソキシコーレイト培地(ニッスイ)に混釈し、36℃で 20 時間培養した。培養後、赤～深紅色の定型的集落数を計測した。
- ク pH 及び EC⁶⁾：ガラス電極法及び電気伝導率計により測定した。すなわち、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。
- ケ オキシテトラサイクリン(以下、抗生物質とする)⁸⁾：畜水産食品中の残留抗生物質簡易検査法により測定した。すなわち、試験菌として *Bacillus mycooides* ATCC 11778 を 30℃で 10 日間培養し、芽胞原液を作成した。一方で堆肥 5g にクエン酸・アセトン緩衝液を 20ml 入れ振とうし、遠心分離して上澄みを試験液とした。適当な濃度に希釈した芽胞原液を培地に播種し、ここへペーパーディスクを置いて堆肥の試験液を摂取させ、30℃で 18 時間培養し、阻止円の大きさを測定した。また、あらかじめオキシテトラサイクリン標準液を用い、5、2.5、1、0.5 及び 0.25 μ g/ml の標準液を作成し、阻止円の大きさを測定し検量線を作成して、残留抗生

物質濃度の推定を行った。

- コ 発芽試験：脇阪ら⁹⁾の方法に準じて行った。すなわち、堆肥の乾物重量「1」に対して 60℃の蒸留水を「10」添加し、60 日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。

結果及び考察

表 1 は、原料となる戻し堆肥の成分を示した。6 ヶ月間堆肥化したのに対し灰分は低いことから有機物量が多いことが示唆されるが、C/N 比も低く堆肥化が進んでおり、いわゆる完熟した堆肥に近いと考えられる。

図 1 には堆肥化に伴う水分と灰分の変化を示した。水分は堆肥化が進むにつれて低下し、6 ヶ月目には 23.6% に至った。また灰分も、堆肥化が進むにつれて上昇したことから、堆肥化に伴い有機物が分解されていることが示唆された。

図 2 には、堆肥化中の温度変化及び気温の変化を示した。堆肥化中の温度変化は、堆肥化直後に 60℃を超え良好な堆肥化が起こったが、その後切り返しを行っても温度が上昇することはなかった。本試験で用いた廃棄乳は 110kg より、生乳の含有量¹⁰⁾及びその発熱量¹¹⁾はそれぞれ、炭水化物は 4.8%及び 4,150kcal/kg、タンパク質は 3.3%及び 5,600kcal/kg、脂質は 3.8%及び 9,400kcal/kg となる。これより、廃棄乳中のエネルギー量は、 $110 \times (4.8\% \times 4,150 + 3.3\% \times 5,600 + 3.8\% \times 9,400)$ より 81,532kcal を含んでいる。一方で、乳牛ふん 110kg の発熱量を考えた場合、水分を 85%とすると乾物は 15%となり発熱量は 4,500kcal/kg(乾物)より¹²⁾74,250kcal となり、廃棄乳自体の熱量は十分にあることが考えられる。それでも最初の切り返し後に温度が上がらなかったことを考えると、本試験で用いた堆肥化資材は全部で 405kg と少量だったため、堆積規模が小さければ放熱が多くなり堆肥の品温が高くないこと¹³⁾が要因と考えられた。

図 3 には堆肥化開始後 14 日間に発生した臭気の変化を示した。検知管による臭気は確認できなかった。臭気指数相当値は検知される場合もあったが、最高でも 5 と低かったことから、温度上昇の観点から見ても良好に堆肥化が進んでいることが示唆された。ただし、ニオイセンサーには反応しなかったものの、人の鼻の感覚では堆肥化後数日間はいわゆる牛乳の腐るような生臭さを感じた。

図 4 には全窒素、リン酸、加里、石灰、苦土及びナトリウムの変化を示した。全体的な変化としては、堆肥化が進むにつれてわずかながらに上昇する傾向がみられたが、全体的には変化が少なくほぼ変わらないと考えら

れた。

一般的に牛乳はカルシウムを摂取する非常に有効な食品といわれているが、生乳中のカルシウム濃度は約0.11%¹⁰⁾と低く、本試験で投入した廃棄乳からカルシウム量を求めると、0.121kg/110kgと非常に少ない。このため、堆肥中のカルシウム濃度はほとんど上昇しなかったと考えられる。

図5には、大腸菌群数の変化を示した。堆肥化中の温度変化は、図2の通り60℃を上回っていることから、この温度にさらされた堆肥中心部分に存在した大腸菌群数は不活化したことが考えられる。しかし、堆肥の表面は温度が上昇しないこと、その後の堆肥中の温度が上がらなかったことから、本試験の堆肥化規模が小さく堆肥化の際に発生した発酵熱が、放冷されてしまったことで大腸菌群が生き残り、再度増殖したことが考えられた。

図6には、pH及びECの変化を示した。pHは、堆肥化直後は8.3と弱塩基性だったが、堆肥化が進むにつれてpHは低下し、堆肥化6ヶ月目には7.8と中性に進んだ。ECは、堆肥化が進むにつれて上昇する傾向がみられた。これは、堆肥化が進むことで有機物は分解されるが、加里などのミネラルは分解されず残るため、見かけ上の濃度が上昇することからECが上昇したと考えられる。

図7には、堆肥及び戻し堆肥と廃棄乳において検出された抗生物質の阻止円の大きさを示した。戻し堆肥からは抗生物質が検出されなかったが、原料の廃棄乳は阻止円の直径が21.2cmと、食品分析において抗生物質の含有が陽性と判定される12cmを超えていた。堆肥化開始後は、11.2cmと食品検査で陽性と判定されない程度だが、抗生物質は検出された。しかし、堆肥化1ヶ月目からは抗生物質は検出されなかった。

図8には、既知濃度の抗生物質と阻止円の関係を示した。このグラフから近似式を作成し、上記の阻止円の直径から濃度を推定したところ、原料の廃棄乳は1.94 µg/ml、堆肥化開始後は0.136 µg/mlと推定された。本試験での抗生物質は、原料の廃棄乳中には多量に含まれていたが、堆肥化開始直後は戻し堆肥と混合し希釈され

濃度は低下したが、分析により検出された。しかしその後は、堆肥化1ヶ月目には検出されなくなった。オキシテトラサイクリンは、堆肥化過程の高温時に分解されることから¹⁴⁾、本試験では戻し堆肥との混合による希釈+堆肥化による分解によりオキシテトラサイクリンが検出されなくなったと考えられる。また、スルファジメトキシシン、ベンジルペニシリン、ストレプトマイシン、カナマイシン及びオキシテトラサイクリンは乳牛ふん堆肥(n=90)から検出されなかったという報告もあることから¹⁵⁾、適切な堆肥化を行うことで抗生物質は分解されることが考えられた。

図9には、発芽指数の変化を示した。戻し堆肥の発芽指数は図中には示していないが、110%だった。堆肥化直後は86.7%と対照区に比べて低い傾向を示したが、堆肥化が進むにつれて改善し、堆肥化4ヶ月目には発芽指数は100%を超えた。これより、廃棄乳の堆肥化についても家畜ふんの堆肥化と同様に、いわゆる未熟な堆肥だと植物への生育に悪影響を及ぼすことが示唆された。

以上から、廃棄乳は堆肥化が可能であることが示された。また、廃棄乳の堆肥化特性は家畜ふんのそれに類似しており、堆肥化によって抗生物質も分解されることが示唆された。しかし、本試験では大腸菌群が生存しており、これは本試験の堆肥化規模が小さかったことが要因として考えられた。また、本試験では廃棄乳のみを堆肥化しようと計画して実施した試験であるが、酪農家ではこのように廃棄乳のみを堆肥化することは無い。従って、酪農家のように、さらに規模が大きくふん尿と廃棄乳を混合して堆肥化する試験を行う必要がある。

表1 戻し堆肥の成分値

水分 (%)	pH	EC (S/dm)	灰分 (%)	全窒素 (%)	リン酸 (%)	加里 (%)	石灰 (%)	苦土 (%)	ナトリウム (%)	C/N比
49.4	7.7	5.66	18.35	2.89	1.36	2.41	2.13	0.89	0.23	14.52

※水分は現物当たり、その他は乾物当たり

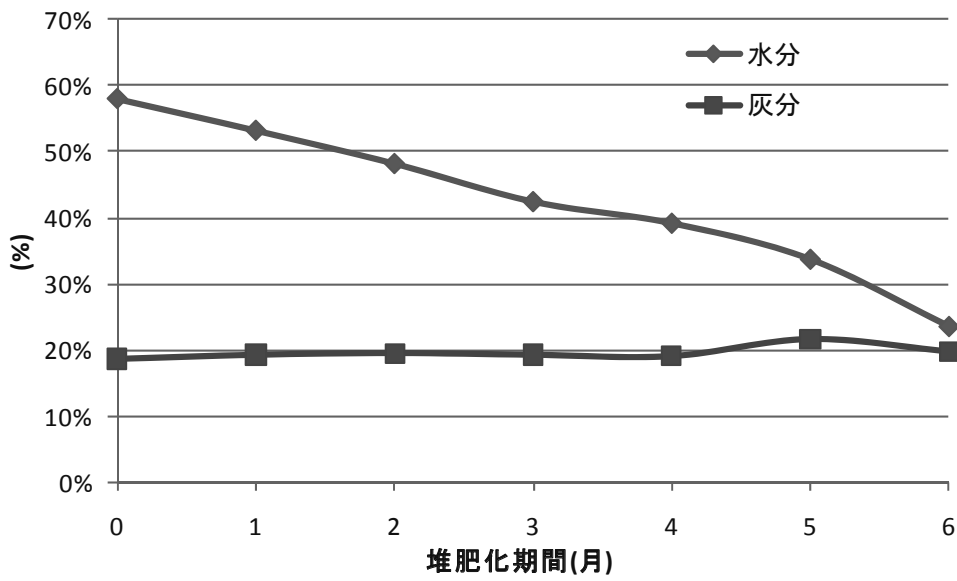
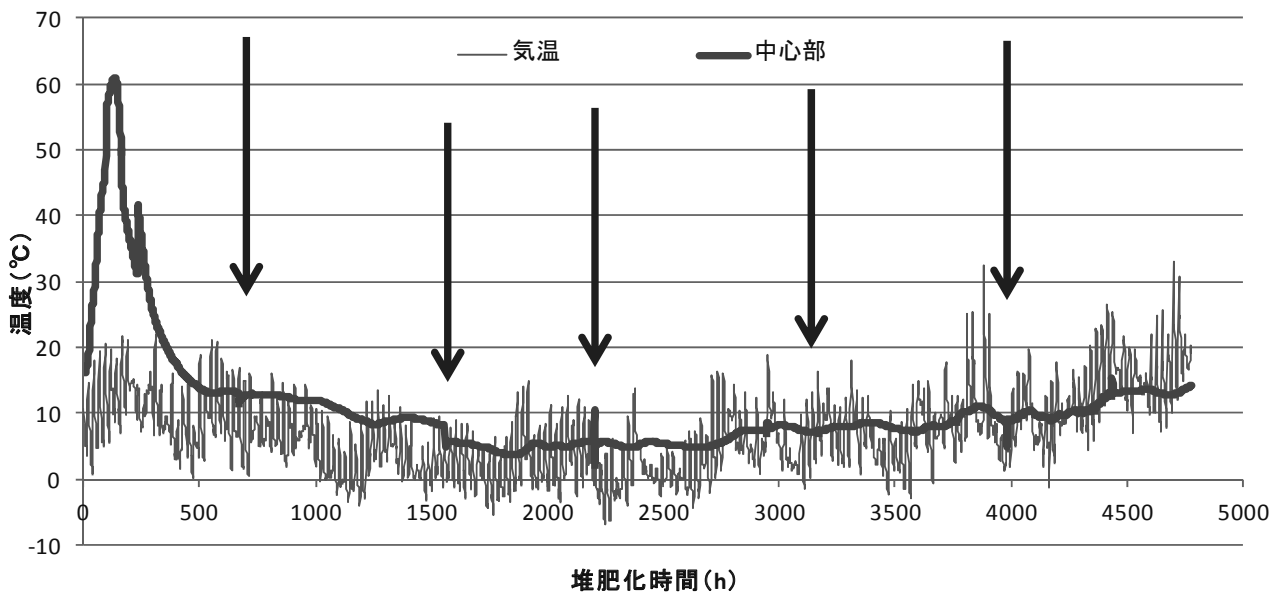


図1 堆肥化における水分及び灰分の変化



堆肥化中の温度変化

図2 堆肥化における温度の変化(矢印は切り返しを示す)

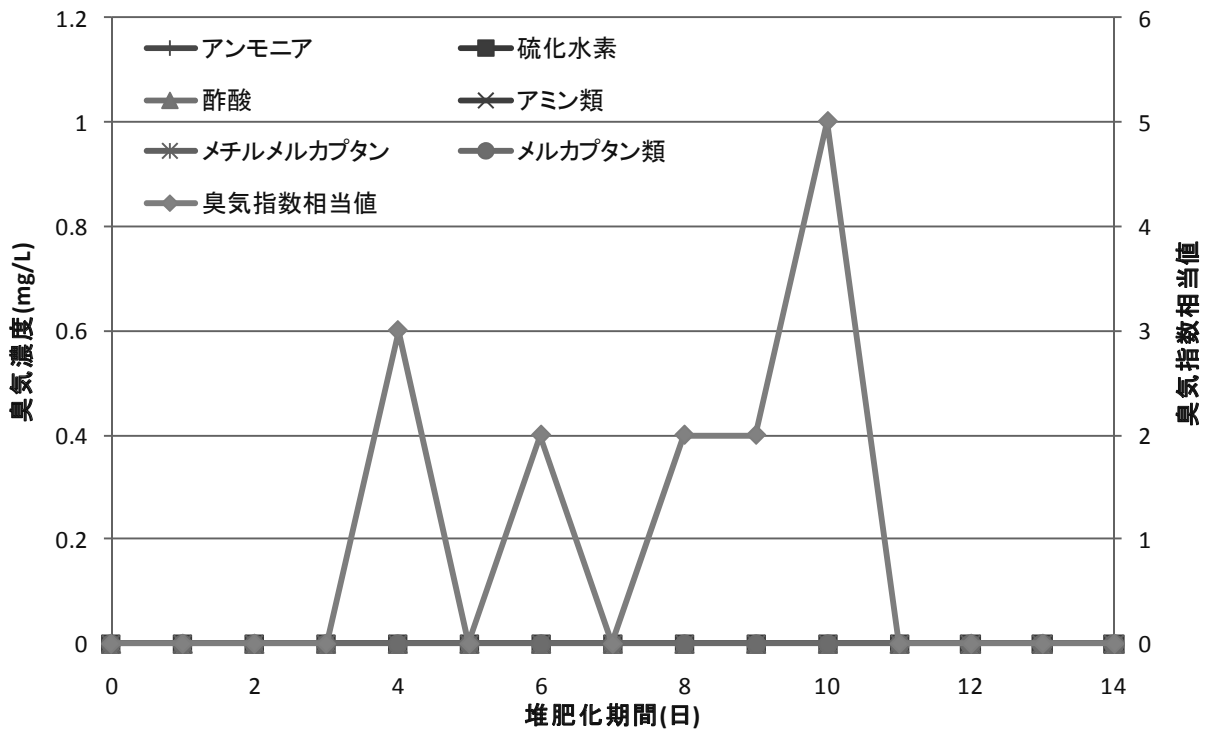


図3 堆肥化における臭気の変化

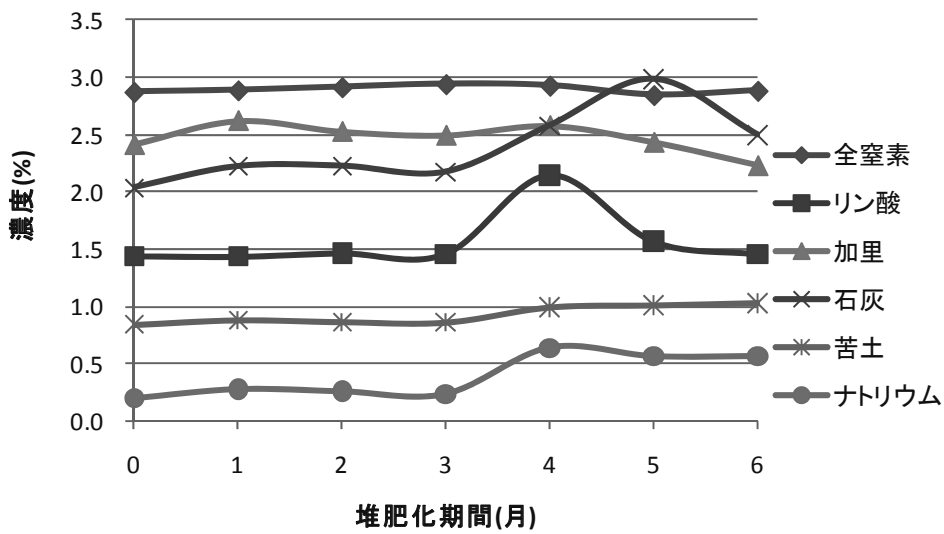


図4 堆肥化における全窒素、リン酸、加里、石灰、苦土及びナトリウムの変化

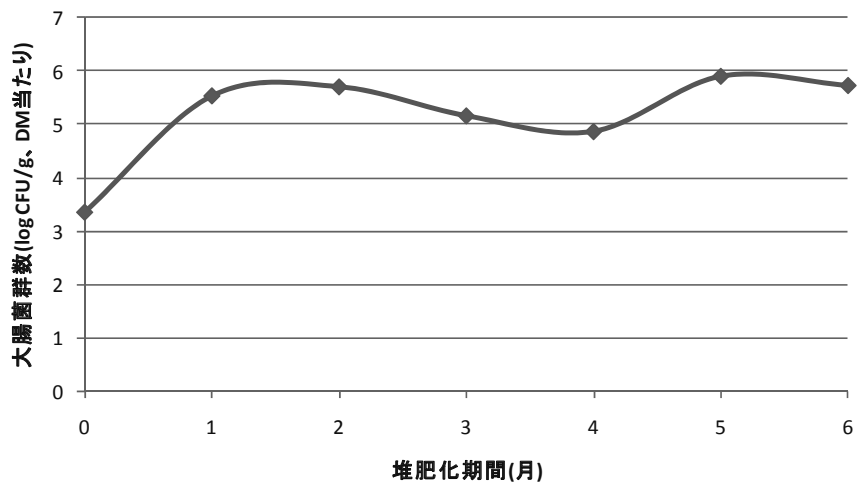


図5 堆肥化における大腸菌群数の変化

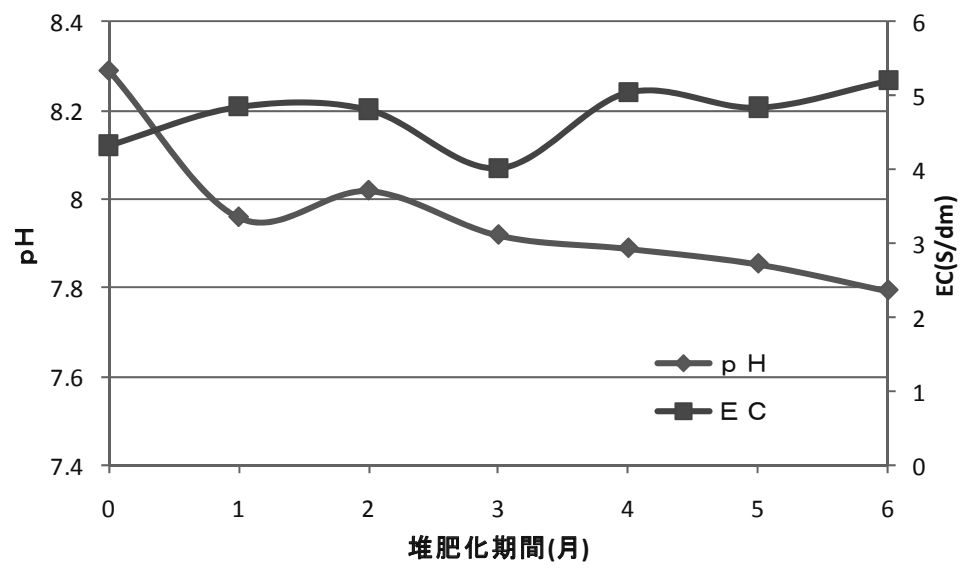


図6 堆肥化におけるpH及びECの変化

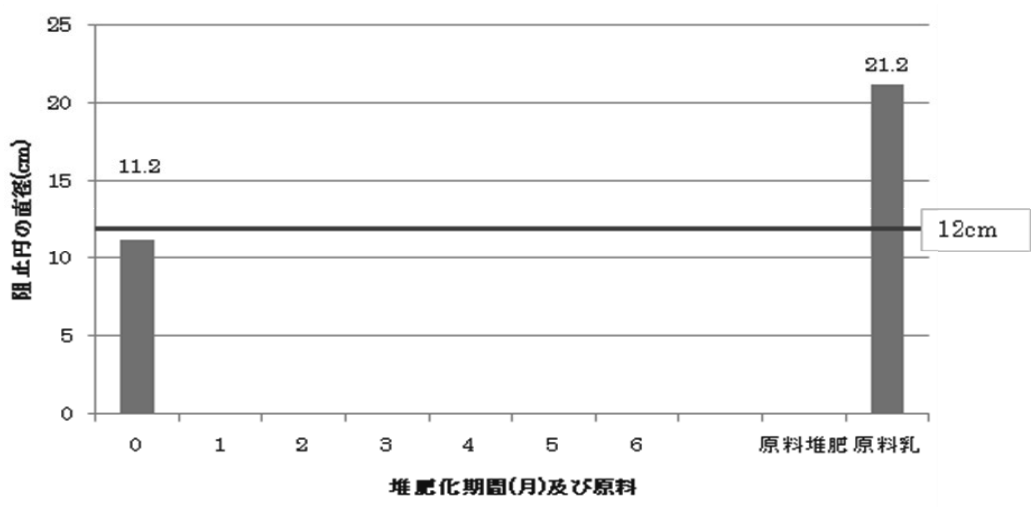


図7 堆肥化及び原料における阻止円の直径

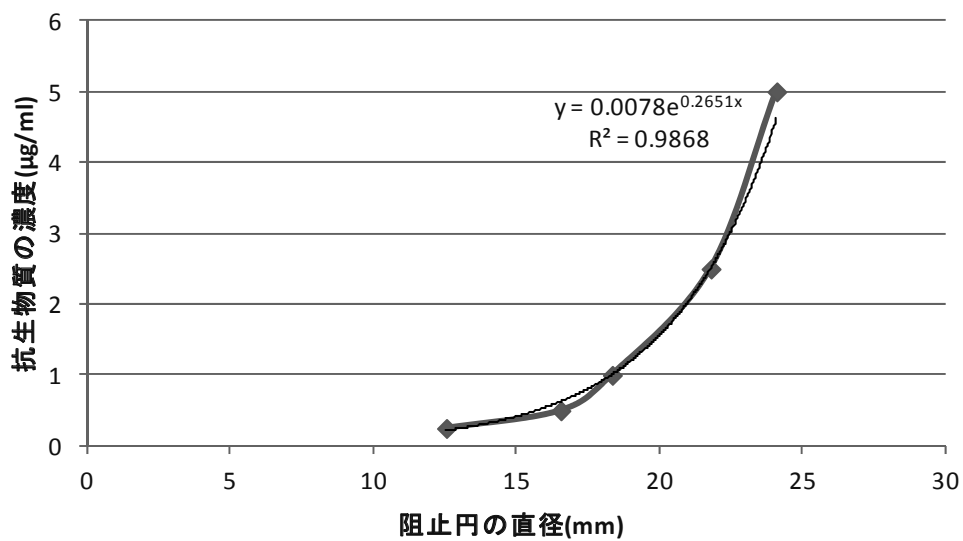


図8 既知濃度のオキシテトラサイクリンと阻止円の関係

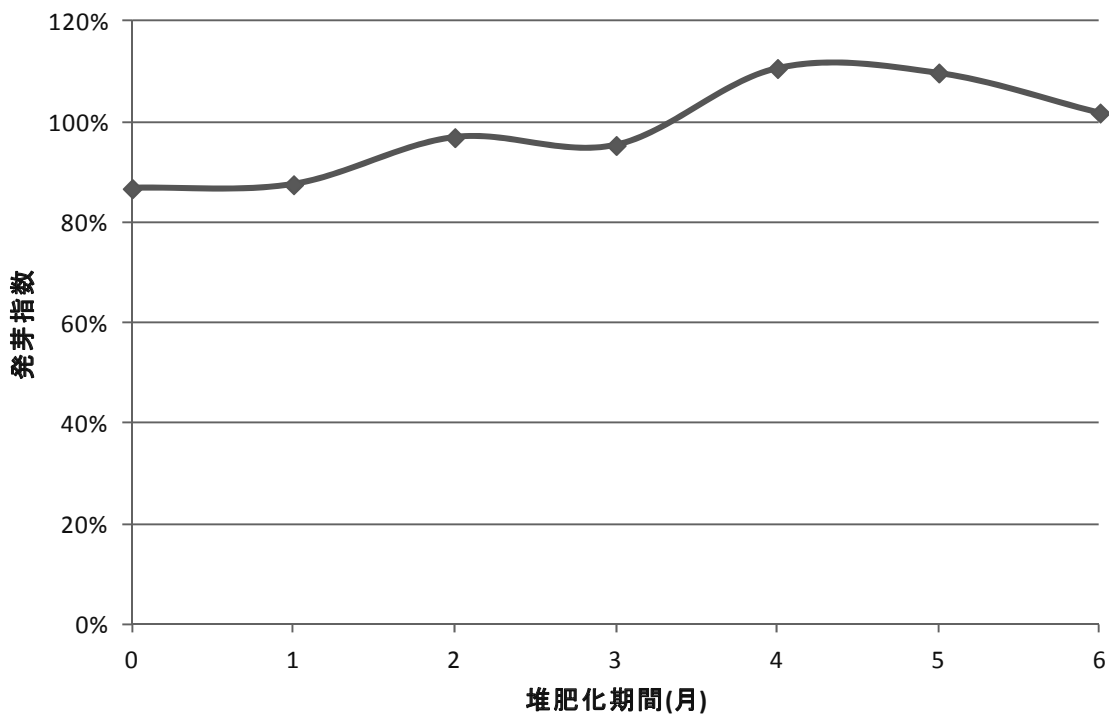


図9 堆肥化における対照区に対する発芽指数の変化

試験2

試験1では、廃棄乳だけを堆肥化した。酪農家での現状を考えた場合、例えば100頭の搾乳牛でそのうち10%(10頭)が乳房炎等で出荷できない場合、発生するふんの量は50kg/日・頭とすると、 $100(\text{頭}) \times 50(\text{kg/日} \cdot \text{頭}) = 5,000(\text{kg/日})$ となる。発生する廃棄乳の量を考えると、栃木県の経産牛1頭当たりの乳量が8,070kg/305日より¹⁾、26.5kg/頭・日となるが、計算の便宜上、泌乳量を25(kg/頭・日)とすると $100 \text{頭} \times 10\% \times 25(\text{kg/日} \cdot \text{頭}) = 250(\text{kg/日})$ となる。すなわち、実際の酪農家における家畜ふんと廃棄乳の割合は $5,000 : 250 = 20 : 1$ 付近になることが想定される。なお、乾乳牛や育成牛などは考慮していない。

従って、本試験では上記の割合で混合することで廃棄乳を堆肥化処理できるのか検討した。

材料及び方法

1 試験資材

試験に用いた廃棄乳は、場内で飼養している搾乳牛(ホルスタイン種)に乳房炎の治療を目的としてセフェム系製剤を取扱説明書に準じて投与し、これらの牛から生産された生乳を試験に供試した。

試験に用いた乳牛ふん尿は、場内で飼養している搾乳牛が排出したものを試験に供試した。

戻し堆肥は、試験1と同様のものを用いた。

2 堆肥化の条件及び堆肥化方法

廃棄乳の水分は、試験1と同様に87.7%¹⁰⁾、乳牛ふん尿は86%¹²⁾と設定した。これらをそれぞれ約15kgと300kg、これに堆肥化開始時の水分が60%になるように試験1と同じ戻し堆肥を約1,700kg混合した。これを堆積させて毎月切り返し、6ヶ月間堆肥化させた(2010年7月21日~2011年1月18日)。

3 分析項目

前試験では、堆肥化が進んでも大腸菌群が検出されたことから、大腸菌群に影響があると考えられる以下の項目について分析した。なお、分析方法は試験1と同様である。

- (1) 堆肥化中の温度変化
- (2) 大腸菌群数
- (3) 水分
- (4) 灰分
- (5) pH

結果及び考察

図10には、堆肥化中の温度変化を示した。この図から、堆肥化開始直後に温度が上昇し、50℃を上回ったが、それ以上は上昇しなかった。この要因は、堆肥化設定の水分が低かったことが考えられた。すなわち、副資材である戻し堆肥が多いことから、単位当たりの有機物量が少なくなり、有機物が分解し堆肥化が進んで発酵熱が発生しても、その単位当たりの容積を十分に加熱できない

ためと考えられた。

図11には堆肥化中の大腸菌群数の変化、図12には水分及び灰分の変化及び図13にはpHの変化を示した。水分及び灰分は、堆肥化が進むにつれて水分は減少し逆に灰分は上昇していることから、堆肥化中の温度上昇も考慮すると、堆肥化が進んでいることが示唆された。

大腸菌群数は、堆肥化が進むにつれて減少し、6ヶ月目には検出されなくなった。しかし、堆肥化における大腸菌群を抑制する大きな要因の一つには、堆肥化中の温度があり、60℃以上の温度を1週間程度継続させることが重要と言われている¹⁶⁾が、本試験は60℃に達しておらずに大腸菌群が減少した。この要因の一つには、堆肥中の様々な微生物によるものが考えられた。堆肥中には様々な微生物が存在しており、微生物は他の微生物の増殖を抑えたり、殺滅したりする物質(抗生物質やバクテリオシン)を生産するといわれていることから¹⁷⁾、これらの影響も考えられる。また、福島らによると⁵⁾、二次発酵が進んだ堆肥は、大腸菌群を自然に抑制できる自浄作用があると報告していることから、本試験の堆肥も、堆肥化が進むことで大腸菌群を抑制し、6ヶ月目には検出されなくなったことが考えられた。なお、本試験では、堆肥化中に大腸菌群を抑制できる60℃を上回らなかったが、試験1では廃棄乳を水分調整することで60℃を上回ることで、一般的に乳牛ふん尿を適正に水分調整することで、60℃を上回ることから、実際の酪農家では本試験で示した技術で堆肥化できることが示唆された。

堆肥中のpHは、8以下の中性域で変化していたことから、pHが大腸菌群に効果はないことが考えられた。

以上から、廃棄乳は乳牛ふんと混合し水分調整することで堆肥化が起こり、その堆肥化を適正に行うことで、不適切な堆肥化により生じる悪影響を除去することができ、引いては産業廃棄物である廃棄乳を安価で容易な方法である堆肥化により適正に処理することが可能である。

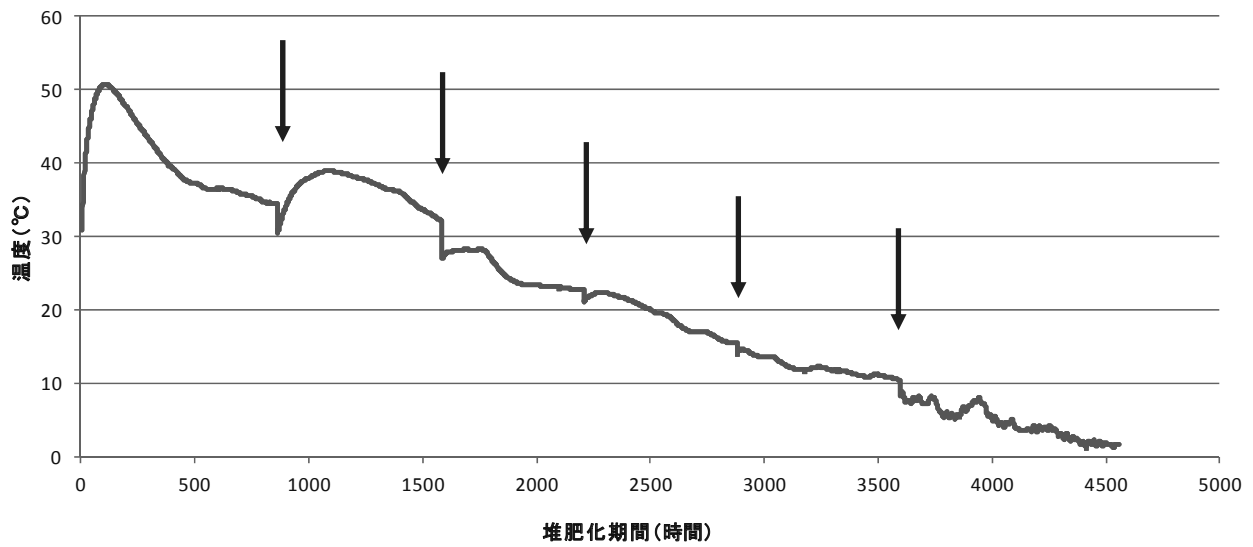


図10 堆肥化中の温度変化(矢印は切り返しを示す)

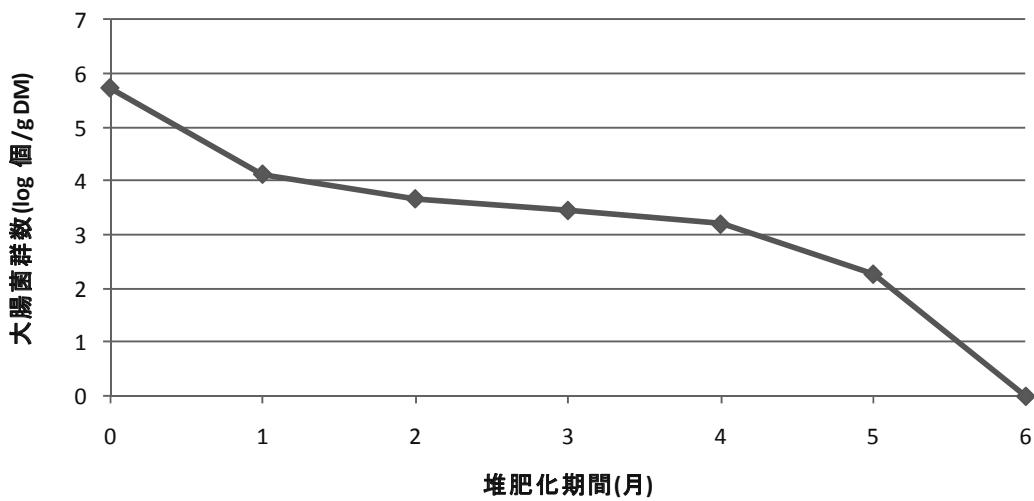


図11 堆肥化中の大腸菌群数の変化

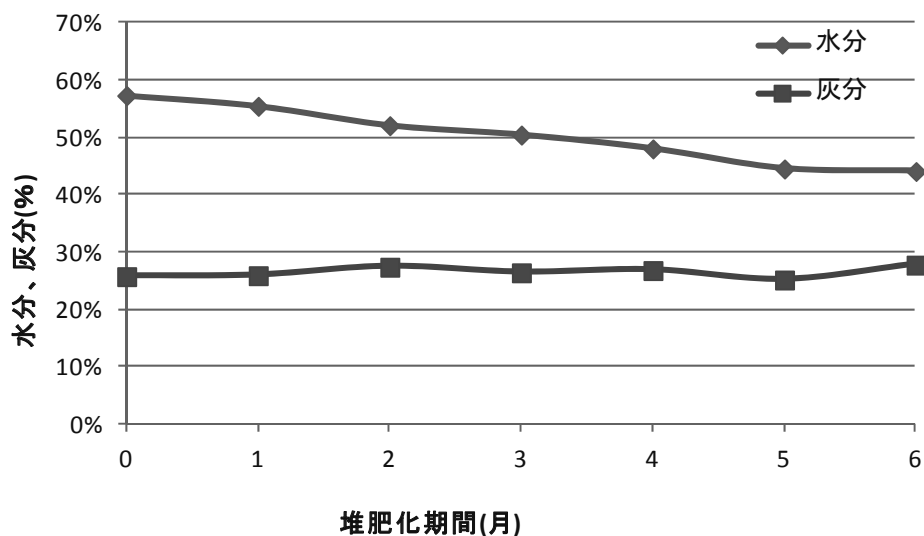


図 12 堆肥化中の水分及び灰分の変化

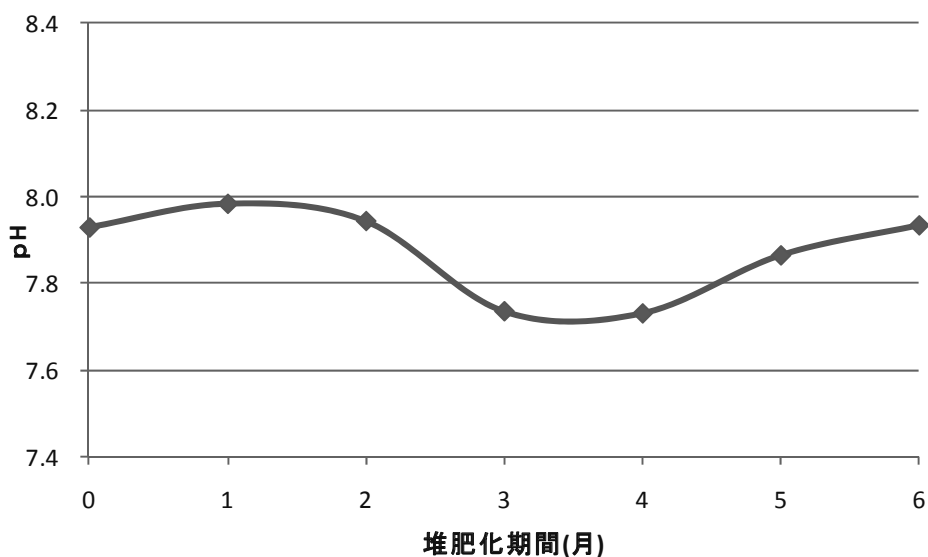


図 13 堆肥化中の pH の変化

謝 辞

本試験を進めるにあたり、宇都宮大学農学部岩淵教授から、堆肥化についての技術指導をいただき感謝申し上げます。

抗生物質の分析方法の教授をいただきました、栃木県保健環境センター食品薬品部に感謝申し上げます。

参考文献

- 1)とちぎの畜産 2011 栃木県(2011)
- 2)新編畜産ハンドブック 講談社
- 3)NORTH CREATE「パーラー排水処理施設の将来像」(2007) エスシーエー北海道
- 4)鈴木ら(2005) 酪農における廃棄物の堆肥化処理の検討 愛知農総試研報 37:185-192
- 5)福島ら(2010) 安全堆肥生産技術の確立 栃木酪試研報 130:37-43
- 6)堆肥等有機物分析法 (財)日本土壌協会
- 7)下水試験方法 (社)日本下水道協会

- 8) 畜水産食品中の残留抗生物質簡易検査法 厚生労働省 平成6年7月1日衛乳大107号
- 9) 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
- 10) 五訂増補日本食品標準成分表 文部科学省
- 11) 藤田(1993) コンポスト化技術 技報堂出版
- 12) 畜産環境アドバイザー養成研修会【堆肥化処理・利用技術研修】(2005) (財)畜産環境整備機構
- 13) 藤原俊六郎 堆肥のつくり方・使い方 農文協
- 14) 青木(2004) 動物用医薬品の堆肥化過程での消長および植物体への移行・残留 酪農ジャーナル 27(3):23-28
- 15) 畜産環境技術研究所年報(2003) (財)畜産環境整備機構 7
- 16) 家畜ふん尿処理施設・機械選定ガイドブック(堆肥化処理施設編)(2005) (財)畜産環境整備機構
- 17) 中井(2004) 微生物資材とコンポスト化過程の微生物群衆 畜産の研究 58(11)1186-1192

Establishment of composting technique of waste milk

Waste milk is industrial waste, that is able to compost by moisture adjustment. By composting, antibiotic is inactivation, and it is not effect to plant growth. Waste milk and cattle feces can compost to mix them, and it is able to inhibit of coliform.