

有機資源の循環利用に必要な環境保全型コンポスト製造技術の開発

Development of New Composting Technology Applicable To Recycling Use of Organic Resources and Prevention of Environmental Nuisance

山田 剛史¹, 宮内 啓介¹, 上田 裕一², 上田 英代², 遠藤 銀朗^{1*}

TAKESHI YAMADA, KEISUKE MIYAUCHI, YASUICHI UEDA, HIDEYO UEDA and GINRO ENDO

¹ 東北学院大学工学部 〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

² (有) 日本ライフセンター 〒905-0212 沖縄県国頭郡今帰仁村諸志 725

* TEL: 022-368-7493 FAX: 022-368-7070

* E-mail: gendo@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

¹ Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan

² Institute of Hyperthermophiles, Japan Life Center Co., Nakizin, Okinawa 905-0212, Japan

キーワード: コンポスト製造, 有機性廃棄物, 超高温前処理, 悪臭問題, アンモニアストリッピング

Key words: composting, organic wastes, hyperthermophilic pre-treatment, malodorous odor problem, ammonia stripping

(原稿受付 2007年10月19日/原稿受理 2007年11月2日)

1. はじめに

コンポスト製造技術は、畜産廃棄物、都市ゴミ廃棄物および下水汚泥のような有機性廃棄物を肥料や土壌改良材へと変換する微生物利用技術であり、環境にやさしく、経済的にもフィジビリティの高い技術であるといえる¹⁶⁾。有機性廃棄物の利用に関する研究が盛んに行われている昨今において、有機性廃棄物のコンポスト化は、資源循環による環境負荷の低減技術として重要なばかりではなく、持続的な農業生産活動とそれによる人口扶養やエネルギー・有機質原材料(バイオエタノール製造原料作物など)の確保に資する環境バイオテクノロジーとして、今後益々重要度が増すと考えられる。しかしながら、コンポスト化技術の適用に際して、それに関与する微生物の解明や有機物の腐敗などによる衛生学的危険性の出現、および悪臭や温暖化ガスの発生による環境質の低下といった科学的研究情報の集積は、未だ十分とはいえない。従って、コンポストの製造技術は、今後も基礎的研究や技術の開発が必要とされている有機性廃棄物の資源化技術であるといえる。畜産廃棄物、都市ゴミ廃棄物および下水汚泥のような有機性廃棄物を原材料としてコンポストを製造する際に、コンポスト製造過程において発生する悪臭によってもたらされるメンタルな悪影響事例がしばしば報告されている^{4,12,29)}。周辺住民にとって回避困難な悪臭問題は、コンポスト製造農家やコンポスト製造施設において解決すべき重要な課題となっている。

畜産廃棄物は、農作物生産に必要な必須元素をバランスよく含んでおり、良好な肥料や土壌改良材(コンポスト製品)として利用できる有機質資材の原料となること

が知られている。現在、畜産農家は、家畜糞尿などの廃棄物を用いてコンポストを作製し、耕種農家へと販売もしくは譲渡して農地に還元することを積極的に進めている。このような試みは、畜産廃棄物の処理にかかるコストを抑え、資源循環による環境負荷の低減に貢献しつつ、持続的な農業生産活動に貢献するという重要な役割を担っている。しかしながら、上記のようなコンポスト製造における悪臭問題(畜産由来の悪臭苦情件数の20-25%を占める)を抱えていることが知られている。畜産廃棄物を用いたコンポスト製造過程において発生する臭気成分としては、アンモニア、揮発性脂肪酸、インドール類、硫化化合物類およびアミン類などが挙げられる²³⁾。それら畜産廃棄物から発生する臭気としては、特に、アンモニアが主要な臭気成分を占めており^{4,13,26)}、その対策を講じることが悪臭問題を解決する上で重要となる。また、ヨーロッパ諸国では、畜産廃棄物の圃場還元、焼却やコンポスト化に伴って発生するアンモニアガスが、大気中のアンモニアガスの主要な供給源となっており⁶⁾、大気中に拡散したアンモニアガスが雨に含まれて降下することにより、土壤中で酸化されて酸性雨と同様の影響をもたらしたり、富栄養化問題を引き起こす事も報告されている³⁰⁾。従って、畜産廃棄物のコンポスト過程におけるアンモニアガス対策は、地球環境保全の観点からも解決すべき大きな課題となっており、周辺地域環境および地球環境に配慮した環境保全型コンポスト製造技術の開発が必要となってきた。そこで、我々の研究グループでは、畜産廃棄物からのコンポスト製造過程において最も懸念されるアンモニアの揮散防止を目的とした超高温前処理無臭堆肥化法の研究に取り組んだ。本稿では、畜産廃棄物のコンポスト製造過程で発生する

アンモニアガスの現行の飛散防止対策をレビューするとともに、我々の研究において開発している超高温前処理無臭堆肥化法の基本的な概念と最近の成果を紹介したい。

2. コンポスト製造過程で生じるアンモニアガスの飛散防止対策

畜産廃棄物を原材料としてコンポストを製造する際、その処理過程において様々な化合物が混合された複合臭気が発生する²³⁾。畜産廃棄物は、初期において低級脂肪酸を主体とする不快度の高い腐敗臭を発しているが、コンポスト処理される過程では、コンポスト化初期の高温期にアンモニアおよび硫黄化合物類が極めて高濃度で発生することが知られている^{13,21,26)}。一方、低級脂肪酸類は、アンモニアの発生と前後して低下する。従って、コンポスト過程の臭気対策としては、コンポスト処理前半の高温期におこる高濃度の臭気発生への対処が肝要である。

一般的に用いられている物理化学的および生物学的なアンモニアの臭気低減対策として、コンポスト過程で揮散するアンモニアを酸性薬液によって洗浄する方法^{3, 22)}や、生物脱臭装置内の通気性のある充填材に高密度に硝化細菌などを担持させて処理させる方法^{3,5,15,24,28)}などがある。また、強制的に臭気を吸引・通気しながらコンポスト化を行うことにより、コンポスト製造過程で生じるアンモニアを捕集する吸引通気式堆肥化処理^{1,34)}なども研究されている。しかしながら、これらの技術はアンモニアの飛散防止対策として非常に有効ではあるが、脱臭のための特殊な装置や施設を必要とすることから設置や運転コストが高く、普遍的に用いられるには至っていないのが現状である。

一方、装置や施設を必要としない方法として、臭気低減微生物の堆肥山への直接添加法（バイオオーグメンテーション）がある。しかしながら、バイオオーグメンテーションによる臭気軽減の事例は、コンポスト過程で生じる揮発性脂肪酸由来の臭気を低減させることを目的とするものが大半を占めており^{11,19,25,36)}、アンモニアの飛散を軽減させるために用いられた事例はほとんどない。これは、コンポスト製造過程の高温期（60–80°C）においてアンモニアが遊離し揮散しやすく^{13,21,26)}、それを抑止する上で必要な高温性硝化細菌が存在しないかあるいは十分に活性を示さないことが主な理由とされている。そもそも、コンポスト製造過程において硝化反応を担う硝化細菌に関する知見はほとんど整備されていないのが現状である¹⁷⁾。唯一、高濃度アンモニア耐性でかつ高い窒素同化能力を持つ高温性の細菌 *Bacillus pallidus* TAT105 株（アンモニア低減細菌）を植種することにより、コンポスト過程のアンモニアの揮散が軽減されたという報告がなされている¹⁸⁾。コンポスト堆肥山に直接的に微生物資材を添加するバイオオーグメンテーション技術は、コストや取り扱いの容易さからも畜産農家などにとって好ましい技術であるが、その有効性や利用法についての研究が十分には行われておらず、信頼性の高い技術とはなり得ていない。今後、堆肥山への微生物資材としての直接添加に有効な新たな硝化細菌やアンモニア低減細菌の発見およびその効果的な利用法を確立することにより、バイオオーグメンテーションによって、コンポ

スト製造過程から揮散するアンモニアガスの低減技術とその臭気問題防止技術への適用が期待されている。

3. 超高温前処理無臭堆肥化法によるコンポスト製造プラントからのアンモニアガスの飛散防止法

3.1 超高温前処理無臭堆肥化法の概略

現在、様々なアンモニア臭気低減技術の試みがなされている一方、コンポスト内に適度なアンモニアを保持させることも良好なコンポストを作製する上で重要な要素である。従って、高濃度のアンモニアを含有する畜産廃棄物からコンポストを作製する場合、コンポスト製造過程のアンモニアの揮散を低減する環境保全に必要な方法を取り入れつつ、製造されたコンポストのアンモニアの濃度をコントロールする技術も必要となってくる。アンモニアストリッピング法は、畜産廃水などに含まれる高濃度のアンモニアを効率よく除去可能な方法として認知されており^{10,20,37)}、適切な pH、温度の調節および空気や蒸気の流入によって、ストリッピングするアンモニアの量を調節できる。そこで、我々は、弱アルカリに調整したコンポスト原材料を高温で熱処理することによってアンモニアをストリッピングし、その後のコンポスト化過程において生じる発酵熱によっても、アンモニアの揮散がおきない（化学的平衡が保たれる）程度まで、コンポスト原材料（主に畜産廃棄物）中のアンモニア濃度をあらかじめ調整することを考案した。これによって、後段の好気発酵に野積み法などの従来のコンポスト製造法を採用しても、アンモニア臭の発生のないコンポストの熟成が可能になると考えた。また、ストリッピングされたアンモニアは、硫酸溶液などの酸性薬液洗浄装置によってスクラッピングすることにより、硫酸等のアンモニウム塩として回収することを想定した（図 1）。本コンポスト化技術を実験的に実証するために、攪拌によるジュール熱を利用した加熱処理実験プラント試作し、アンモニアストリッピングと原材料の水分調整を可能にする密閉型超高温前処理反応器（<http://www.jplife.co.jp/re-cycle/e-reborn.htm>）を用いた実験を行った。さらに、この前段処理プロセスとコンポストの熟成化を目的とした野積み型後段処理を組み合わせた「超高温前処理無臭堆肥化法」を考案し³⁵⁾（図 1）、その実用化に向けた基礎的な研究を行った。ここでは、牛糞（80%）およびおがくず（20%）を主原料とした同一原材料を用いて超高温前処理無臭堆肥化法および単純野積み法を適用した際のコンポストサンプルの物理化学的および微生物学的解析から得られた結果を紹介し、超高温前処理無臭堆肥化法の特長について以下に解説する。

3.2 アンモニアガス揮散防止効果の検討

超高温前処理無臭堆肥化法がアンモニアストリッピング効果を示し、無臭に近いコンポスト製造を行うことが可能であるかどうかを評価するために、超高温前処理無臭堆肥化法および単純野積み法をそれぞれ適用した際のコンポストサンプルの物理化学的な変化を比較した。コンポスト内に適度なアンモニアが残留するように、原材料（弱アルカリ（pH 9.0）および水分量 51%）を調整した後、密閉型超高温前処理反応器にて処理を行った。

今回の実験では、超高温前処理反応器の加熱を簡便に行うために、モーターによる原材料の機械攪拌によって発生する摩擦熱を利用し、反応槽内部を100°Cまで加温した。反応器の人為的な温度制御は行わず、原材料の温度が100°Cに達した時点でそれを一定時間保持して攪拌を終了した。各温度に達した時点において、反応器からコンポストサンプルを採取し、無機窒素化合物（アンモニア、硝酸および亜硝酸）の測定と *amoA* 遺伝子（アンモニア酸化酵素をコードする遺伝子）を標的としたリアルタイムPCR法を行った³⁵⁾。その結果、原材料に含まれるアンモニアの53%は、反応槽内温度が50°Cに到達するまでに除去され、最終的なアンモニア除去率（反応槽内温度：100°C）が約80%に達するという結果を得た（図2-A）。反応器から採取したコンポストサンプルにおいて、硝酸および亜硝酸の蓄積や *amoA* 遺伝子のPCR増幅は確認されなかったことから、生物学的なアンモニア酸化は起きていないことが判明した³⁵⁾（図2-A）。また、密閉型超高温前処理反応器から放出される蒸気を水でトラップして解析したところ、その蒸気にはアンモニアが含まれており、本超高温前処理反応器において、アンモニアストリッピングが起きていることが確認できた。このことは、本反応器の後段にアンモニアガス回収型スクラバー（硫酸水などをシャワーとして利用）を導入することにより（図1）、反応器から放出される蒸気からアンモニアを硫酸などとして回収可能であることが示唆された。

上記の超高温前処理反応器によるアンモニアストリッピング効果を引き出すためには、コンポストの原材料を [1] 弱アルカリ性に調整し、 [2] 原材料を機械的に攪拌する工程および反応器自体を [3] 超高温環境（100°C）に加温する操作が必要である。今回は、実験方法を簡便に実施するために、機械的攪拌による摩擦熱で反応器内の温度を100°Cまで上昇させたが、水蒸気や熱水を通じて行われる内部熱交換や水蒸気の直接的な吹き込みなどによって超高温前処理反応器内の温度を上昇させるこ

とが、ランニングコストの点ではより現実的な加温方法であると考えられる。また、コンポスト原料を100°Cで熱処理することは、畜産廃棄物由来の原材料に含まれる害虫や病原性微生物等を駆除し、衛生学的に安全なコンポストを製造する上で有効であると考えられる。

コンポストの製造過程には多種類の微生物の関与が必要とされ、原材料はそれらの微生物の増殖と死滅を繰り返しながら良好なコンポストへと変換されると言われている。そのため、良好なコンポストを作製するためには、熟成までに一定の日数（数ヶ月程度）が必要とされる。一般に、コンポスト製造過程におけるアンモニアの揮散は、コンポスト過程の初期の高温期に生じる事がよく観察される^{13,21,26)}。この現象は、発酵熱によって高められた原材料の温度や原材料のpHが、原材料中のアンモニアとアンモニウム塩との間の化学的平衡が変化するために起こる。本研究においても、超好熱前処理無臭堆肥化法で使用した同一原材料を用いて単純野積み法でコンポスト化を行ったところ、原材料中に含まれていた78%のアンモニア性窒素が、コンポスト化過程において徐々に揮散し（図2-B）、アンモニア臭由来の悪臭が3週間に渡って続いた。一方、超高温前処理反応器から原材料を取り出し、野積み法によってコンポスト化を行ったところ、原材料中のアンモニア性窒素の濃度はコンポスト化が終了するまで変化がなく（図2-B）、アンモニアの飛散が起因となる臭気問題も起こらなかった。このことは、原材料中に含まれていた過剰のアンモニアを事前にストリッピングさせたことにより、原材料中のアンモニウム塩の濃度がコンポスト製造過程で生じる発酵熱やpHの変化に対して化学的平衡が保たれたためと推察できる。これらの結果は、超高温前処理無臭堆肥化法を適用することにより、畜産廃棄物などの高濃度アンモニアを含む原材料からアンモニアの揮散を軽減させつつ、コンポスト化が行えることを示唆するものである。また、アンモニアの揮散とコンポスト内への適度なアンモニウム塩の残留をコントロールするためには、本法の効率的

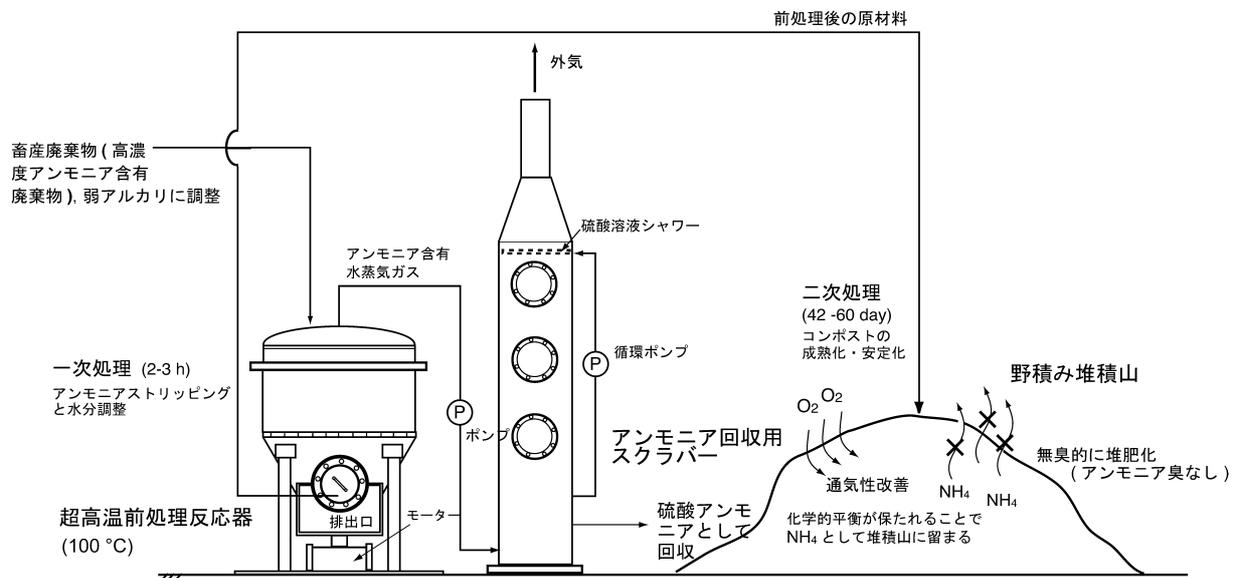


図1. 超高温前処理無臭堆肥化法のご概念図。

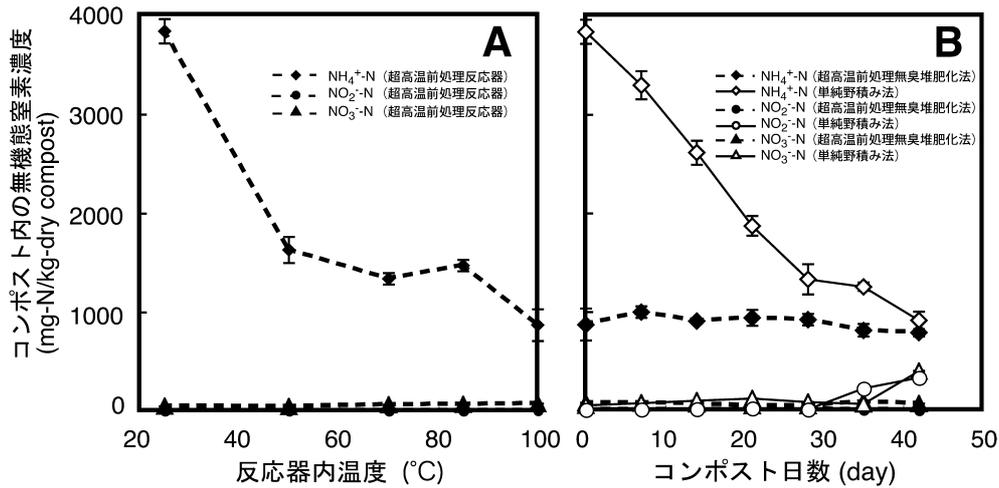


図2. 各コンポスト製造過程における無機窒素化合物の変化。A: 超高温前処理反応器。B: 超高温前処理無臭堆肥化法の野積み過程および単純野積み法 (文献 35 から転用)。

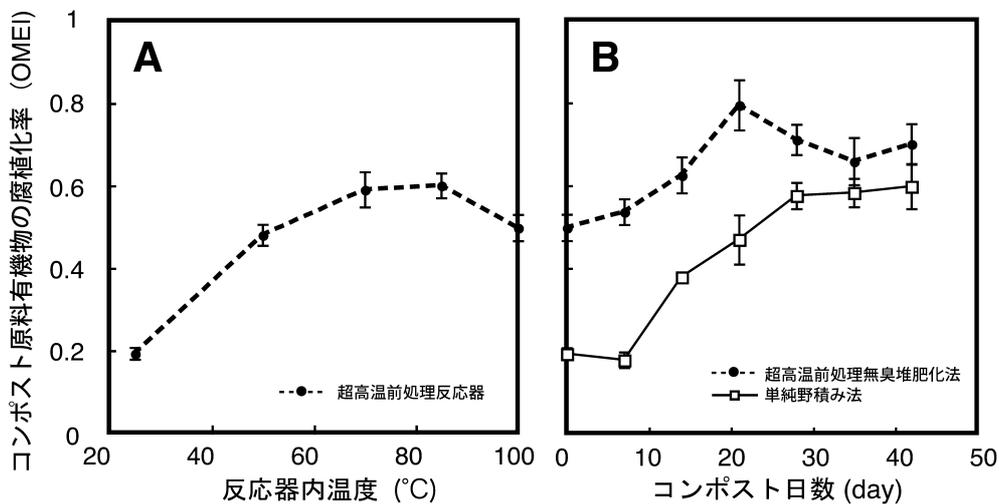


図3. OMEI 指標を基にした各コンポスト製造過程における腐植化率の変動。A: 超高温前処理反応器。B: 超高温前処理無臭堆肥化法の野積み過程および単純野積み法 (文献 35 から転用)。

な運転条件を今後詳細に検討する必要がある。

3.3 超高温前処理無臭堆肥化法における有機物の腐植化の微生物学的特徴

アンモニア除去の他に、コンポストの腐植化を示す指標の一つである OMEI (organic matter evolution index)^{2,35)} を測定することにより、超高温前処理無臭堆肥化法によるコンポスト化は、単純野積み法と比べてコンポストの腐植化を促進させることも分かった (図 3)。超高温前処理無臭堆肥化法を適用した原材料の腐植化が促進される理由を微生物のポピュレーション変動から推察するために、本研究では、真正細菌の 16S rRNA 遺伝子および真菌 - 原生動物の 18S rRNA 遺伝子を標的とした定量的リアルタイム PCR 法を用いて、超高温前処理無臭堆肥化法 (野積み過程) および単純野積み過程における各微生物群の遷移の違いを調査した (図 4)。単純野積み法を適用した場合、コンポスト過程の真正細菌の遷移は、超高温前処理無臭堆肥化法を適用したコンポスト内の真

正細菌の遷移と異なり、概ね 10^8 – 10^9 コピー (乾燥コンポスト 1 g あたり各遺伝子のコピー数) を推移していた。超高温前処理反応器では、原材料中に存在していた真正細菌および真菌 - 原生動物由来の各遺伝子のコピー数は、反応器添加前と比べて約 1% まで低下した (図 4-A)。その後、反応器から取り出した原材料をコンポスト化すると、原材料中の真正細菌および真菌 - 原生動物由来の遺伝子のコピー数は、コンポスト化 14 日目までにはほぼ初期のコピー数 (真正細菌: 10^9 コピーおよび真菌 - 原生動物: 10^6 コピー) まで回復することを観察した (図 4-A)。

培養法^{8,32)} や分子生態学的手法を用いた解析^{7,14)} により、非常に多様な真菌や原生動物がコンポスト化に関与していることが明らかとなってきている。特に、真菌は、コンポスト内に含まれる易分解性有機物の分解だけでなく、コンポスト内の腐植質の形成にも非常に重要であることが知られている。例えば、リグノセルロースを分解する真菌や真正細菌のコンポスト原材料への添加は、腐

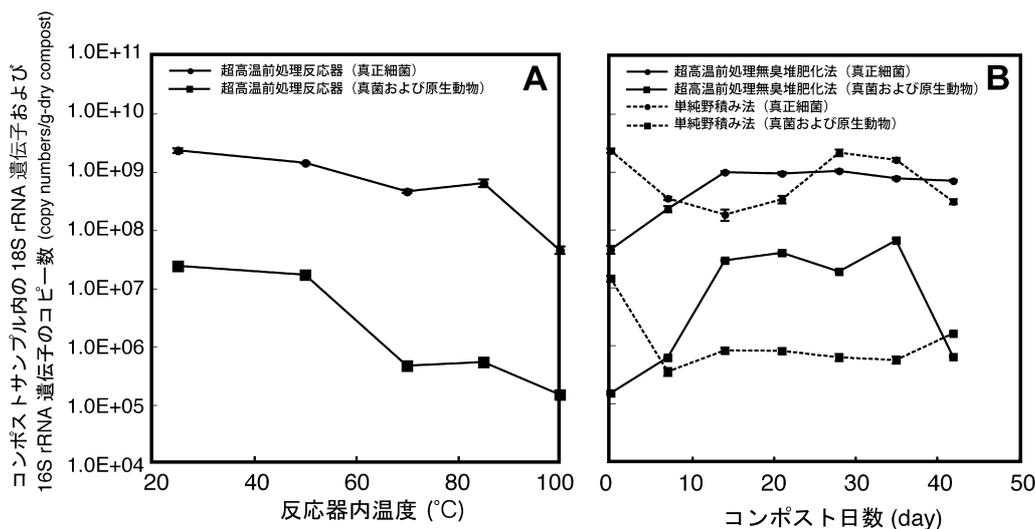


図4. リアルタイムPCR法によって評価した各コンポスト製造過程における真正細菌および真菌・原生動物の遷移。A: 超高温前処理反応器。B: 超高温前処理無臭堆肥化法の野積み過程および単純野積み法。

植質に富んだ良質コンポストの製造を行えることが報告されている^{27,33)}。また、ラッカーゼ酵素は、フェノールオキシダーゼやペロオキシダーゼと共にリグノセルロースから腐植物質を生成する重要な酵素として考えられており³¹⁾、真菌由来の細胞外ラッカーゼが、都市ゴミ由来のコンポストからも実際に抽出されている⁹⁾。さらに、コンポスト過程においてラッカーゼを生成する真菌として、高温性の真菌 *Chaetomium thermophilum* が、都市ゴミコンポストから分離されてもいる⁸⁾。これらの報告からも、コンポスト内に腐植物質を形成する上で、真菌は非常に重要な役割を担っていることが推察される。本研究において、超高温前処理無臭堆肥化法を適用したコンポスト内の真菌・原生動物由来 18S rRNA 遺伝子のコピー数は、単純野積み法を適用した場合（コンポスト化14-35日目）と比較して約30-50倍程度と高く（図4-B）、超高温前処理無臭堆肥化コンポストが高い OMEI 値を示したことと密接な関係があることが示唆された。

次に、超高温前処理無臭堆肥化法（野積み過程）および単純野積み法を適用したコンポストサンプル（コンポスト化：21日目）の主要な真正細菌群を 16S rRNA 遺伝子に基づくクローンライブラリー解析によって調査したところ、単純野積み法を適用したコンポスト内には絶対嫌気性の細菌グループに近縁な細菌由来のクローンが検出されたのに対し、超高温前処理無臭堆肥化法を適用したサンプルでは絶対嫌気性細菌に近縁なクローンは全く検出されなかった（表1）。この結果は、超高温前処理無臭堆肥化法を適用した場合、単純野積み法と比較して好気的な環境が堆積山に構築されていることを示すものである。超高温前処理反応器によって原材料を熱処理することは、原材料中の含水率を低下させることによって通気性を高め、容易に好気的な発酵環境をつくる効果があるだけでなく³⁵⁾、原材料の物質の組成を真菌などが利用しやすいものへと変化させる効果があると考えられる。それらことが、真菌・原生動物が生育しやすい環境を堆積山に構築し、コンポストの腐植化が促進されたものと考えられる。今後の研究においては、超高温前処理

無臭堆肥化プロセス内の真正細菌、真菌および原生動物の系統や生理を詳細に調べ、超高温前処理無臭堆肥化に関わる微生物の機能や役割を十分に理解することが必要と考えられる。

4. おわりに

地球環境や周辺地域環境へ配慮する気運が高まっている今日において、畜産廃棄物の管理と有機資源としての有効利用への取り組みは、今後一段とその必要性が叫ばれるようになると思われる。コンポストの製造は、資源循環を達成する上で有用な技術であることは周知のとおりであるが、そのために必要な環境保全型コンポスト製造技術の開発は未だ十分であるとは言えない。そのため、我々は、環境保全型コンポスト製造技術の開発と活用を指向し、その一つとしてアンモニア揮散低減による悪臭防止技術に焦点を当てて研究を行ってきた。

本稿では、超高温前処理無臭堆肥化法が、上述した現在のアンモニア揮散低減技術に加えて、コンポスト化過程でのアンモニアの揮散による悪臭公害および地球環境保全の有力な対策技術となることについて紹介した。しかしながら、本技術の適用可能対象やより経済的な加温方法、そして様々な原材料を対象とした実証実験における微生物学的多様性の変化などについては、今後の更なる研究が必要であることについても言及しておきたい。

謝 辞

本研究は、生物系産業創出のための異分野融合研究支援事業「温室ガス抑止のための窒素バイオマス再生・浄化システムの構築」の助成を受けて行われた事を記し感謝の意を表します。また、本研究の実施にあたり、リアルタイムPCR解析を担当してくれた東北学院大学菅原宏幸氏（当時大学院生）および中居行宏氏（当時大学生）に感謝致します。

表 1. 超高温前処理無臭堆肥化法 (HTPRT) および単純野積み法 (SWC) を適用したコンポスト製造サンブル (野積み発酵 21 日目) の優占真正細菌由来のクローン。

Composting method	Composting term (day)	OTUs ^a	No. of clones in total 100 clones	Clone library (more than 2 clones in 100 clones for each library)		Affiliation of the clones (phyla to genera)	Aerobe or Anaerobe
				Closest relative species	% Sequence similarity to the closest relative species		
Hyperthermophilic pre-treatment composting	42	HTPRT-1	6	<i>Alcaligenes faecalis</i>	92	<i>Proteobacteria</i> ; <i>Betaproteobacteria</i> ; <i>Burkholderiales</i> ; <i>Alcaligenaceae</i> ; <i>Alcaligenes</i>	Aerobe
		HTPRT-2	4	<i>Ochrobactrum shiyianus</i>	96	<i>Proteobacteria</i> ; <i>Alphaproteobacteria</i> ; <i>Rhizobiales</i> ; <i>Brucellaceae</i> ; <i>Ochrobactrum</i>	Aerobe
		HTPRT-3	4	<i>Flavobacterium</i> sp.	92	<i>Bacteroidetes</i> ; <i>Flavobacteriales</i> ; <i>Flavobacteriaceae</i> ; <i>Flavobacterium</i>	Aerobe
		HTPRT-4	3	<i>Glycomyces arizonensis</i>	97	<i>Actinobacteria</i> ; <i>Actinobacteridae</i> ; <i>Actinomycetales</i> ; <i>Glycomyces</i> ; <i>Glycomycetaceae</i> ; <i>Glycomyces</i>	Aerobe
	HTPRT-5	3	<i>Thermoactinomyces intermedius</i>	89	<i>Firmicutes</i> ; <i>Bacillales</i> ; <i>Thermoactinomycetaceae</i> ; <i>Thermoactinomycetes</i>	Aerobe	
	HTPRT-6	3	<i>Sphingobacterium compostus</i>	91	<i>Bacteroidetes</i> ; <i>Sphingobacteria</i> ; <i>Sphingobacteriales</i> ; <i>Sphingobacteriaceae</i> ; <i>Sphingobacterium</i>	Aerobe	
	HTPRT-7	2	<i>Porphyrobacter tepidarius</i>	95	<i>Proteobacteria</i> ; <i>Alphaproteobacteria</i> ; <i>Sphingomonadales</i> ; <i>Erythrobacteraceae</i> ; <i>Porphyrobacter</i>	Aerobe	
	HTPRT-8	2	<i>Rhodovibrio</i> sp.	90	<i>Proteobacteria</i> ; <i>Alphaproteobacteria</i> ; <i>Rhodospirillales</i> ; <i>Rhodospirillaceae</i> ; <i>Rhodovibrio</i>	Aerobe	
	HTPRT-9	2	<i>Chondromyces pediculus</i>	92	<i>Proteobacteria</i> ; <i>Deltaproteobacteria</i> ; <i>Myxococcales</i> ; <i>Polyangiaceae</i> ; <i>Chondromyces</i>	Aerobe	
	SWC-1	18	<i>Pelotomaculum thermopropionicum</i>	97	<i>Firmicutes</i> ; <i>Clostridia</i> ; <i>Clostridiales</i> ; <i>Peptococcaceae</i> ; <i>Pelotomaculum</i>	Anaerobe	
SWC-2	5	<i>Bacillus infernus</i>	98	<i>Firmicutes</i> ; <i>Bacillales</i> ; <i>Bacillaceae</i> ; <i>Bacillus</i>	Aerobe		
SWC-3	5	<i>Rhodovibrio</i> sp.	91	<i>Proteobacteria</i> ; <i>Alphaproteobacteria</i> ; <i>Rhodospirillales</i> ; <i>Rhodospirillaceae</i> ; <i>Rhodovibrio</i>	Aerobe		
SWC-4	4	<i>Paenibacillus macerans</i>	86	<i>Firmicutes</i> ; <i>Bacillales</i> ; <i>Paenibacillaceae</i> ; <i>Paenibacillus</i>	Aerobe		
SWC-5	4	<i>Pseudoxanthomonas mexicana</i>	94	<i>Proteobacteria</i> ; <i>Gammaproteobacteria</i> ; <i>Xanthomonadales</i> ; <i>Xanthomonadaceae</i> ; <i>Pseudoxanthomonas</i>	Aerobe		
SWC-6	3	<i>Ureibacillus thermosphaericus</i>	96	<i>Firmicutes</i> ; <i>Bacillales</i> ; <i>Bacillaceae</i> ; <i>Ureibacillus</i>	Aerobe		
SWC-7	2	<i>Halocella cellulolilytica</i>	90	<i>Firmicutes</i> ; <i>Clostridia</i> ; <i>Halanaerobiales</i> ; <i>Halanaerobiaceae</i> ; <i>Halocella</i>	Anaerobe		
SWC-8	2	<i>Thermaerobacter</i> sp.	94	<i>Firmicutes</i> ; <i>Clostridia</i> ; <i>Clostridiales</i> ; <i>Syntrophomonadaceae</i> ; <i>Thermaerobacter</i>	Aerobe		
SWC-9	2	<i>Azospirillum</i> sp.	91	<i>Proteobacteria</i> ; <i>Alphaproteobacteria</i> ; <i>Rhodospirillales</i> ; <i>Rhodospirillaceae</i> ; <i>Azospirillum</i>	Aerobe		
SWC-10	2	<i>Tepidimicrobium quinonicus</i>	84	<i>Firmicutes</i> ; <i>Clostridia</i> ; <i>Clostridiales</i> ; <i>Tepidimicrobium</i>	Anaerobe		

a: Operational taxonomic unit. (clone name)

文 献

- 1) Abe, Y., N. Fukujyuu, N. Ito, and M. Kamo. 2003. Development of a composting system with vacuum-type aeration (part 1)-characterization of composting using vacuum-type aeration-. *J. Agri. Sci (in Japanese)* 33: 255-261.
- 2) Adani, F., P.L. Genevini, F. Gasperi, and G. Zorzi. 1997. Organic matter evolution index (OMEI) as a measure of composting efficiency. *Comp. Sci. & Util.* 5: 53-62.
- 3) Amirhor, P., J.D. Gould, F.D. Arnold, and H.J. Gracia. 1997. Innovative biofilter controls odors. *Biocycle* 38: 69-76.
- 4) Beach, J.R., J. Raven, C. Ingram, M. Bailey, and D. Johns. 1997. The effects on asthmatics of exposure to a conventional water-based and a volatile organic compound-free paint. *Eur. Respir. J.* 10: 563-566.
- 5) Boyette, R.A. 1998. Getting down to (biofilter) basics. *Biocycle* 39: 58-62.
- 6) Buijsman, E., H.F.M. Mass, and W.A.H. Asman. 1987. Anthropogenic NH₃ emissions in Europe. *Atmos. Environ.* 21: 1009-1022.
- 7) Cahyani, V.R., K. Matsuya, S. Asakawa, and M. Kimura. 2004. Succession and phylogenetic profile of eukaryotic communities in the composting process of rice straw estimated by PCR-DGGE analysis. *Bio. Feril. Soils* 40: 334-344.
- 8) Chefetz, B., Y. Chen, and Y. Hadar. 1998. Purification and characterization of laccase from *Chaetomium thermophilum* and its role in humidification. *Appl. Environ. Microbiol.* 64: 3175-3179.
- 9) Chefetz, B., Z. Keren, Y. Chen, and Y. Hadar. 1997. Isolation and partial characterization of laccase from a thermophilic composted municipal solid waste. *Soil. Biol. Biochem.* 30: 1091-1098.
- 10) Choi, E., and Y. Eum. 2002. Strategy for nitrogen removal from piggery waste. *Wat. Sci. Tech.* 46: 347-354.
- 11) Coates, J.D., K.A. Cole, U. Michaelidou, J. Patrick, M.J. McInerney, and L.A. Achenbach. 2005. Biological control of hog waste odor through stimulated microbial Fe (III) reduction. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 4728-4735.
- 12) Dalton, P. 2003. How people sense, perceive and react to odors? *Biocycle* 44: 26-29.
- 13) Fukumoto, Y., T. Osada, D. Hanajima, and K. Haga. 2003. Patterns and quantities of NH₃, N₂O and CH₄ emissions during swine manure composting without forced aeration—effect of compost pile scale. *Bioresour. Technol.* 89: 109-114.
- 14) Hansgate, A.M., P.D. Schloss, A.G. Hay, and L.P. Walker. 2005. Molecular characterization of fungal community dynamics in the initial stages of composting. *FEMS Microbiol. Ecol.* 51: 209-214.
- 15) Hong, J.H., and K.J. Park. 2005. Compost biofiltration of ammonia gas from bin composting. *Bioresour. Technol.* 96: 741-745.
- 16) Huang, G.F., Q.T. Wu, J.W.C. Wong, and B.B. Nagar. 2006. Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. *Bioresour. Technol.* 97: 1834-1842.
- 17) Kowaichuk, G.A., Z.S. Naoumenko, P.J.L. Derikx, A. Felske, J.R. Stephen, and I.A. Arkhipchenko. 1999. Molecular analysis of ammonia-oxidizing bacteria of the β subdivision of the class *Proteobacteria* in compost and composted materials. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 396-403.
- 18) Kuroda, K., D. Hanajima, Y. Fukumoto, and K. Suzuki. 2004. Isolation of thermophilic ammonium-tolerant bacterium and Its application to reduce ammonia emission during composting of animal wastes. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 68: 286-292.
- 19) Lee, M.G., and M. Kobayashi. 1992. Deodorization of swine sewage by addition of a phototrophic bacterium, *Rhodospseudomonas capsulata*. *Soil. Sci. Plant Nutr.* 38: 747-770.
- 20) Liao, P.H., A. Chen, and K.V. Lo. 1995. Removal of nitrogen from swine manure wastewaters by ammonia stripping. *Bioresour. Technol.* 54: 17-20.
- 21) Mahimairaja, S., N.S. Bolan, M.J. Hedley, and A.N. Macgregor. 1994. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment. *Bioresour. Technol.* 47: 265-273.
- 22) Mao, I.F., C.I. Tsai, S.H. Shen, T.F. Lin, W.K. Chen, and M.L. Chen. 2006. Critical components of odors in evaluating the performance of food waste composting plants. *Sci. Total Environ.* 370: 323-329.
- 23) Miller, F.C., and B.J. Macauley. 1988. Odours arising from mushroom composting: a review. *Aust. J. Experiment. Agri.* 28: 553-560.
- 24) Nicolai, R.E., and K.A. Janni. 2001. Biofilter media mixture ratio of wood chips and compost treating swine odors. *Wat. Sci. Tech.* 44: 261-267.
- 25) Ohta, Y., and Y. Kuwada. 1988. Rapid deodorization of cattle feces by microorganisms. *Biologic. Wastes* 24: 227-240.
- 26) Osada, T., and Y. Fukumoto. 2001. Development of a new dynamic chamber system for measuring harmful gas emissions from composting livestock waste. *Wat. Sci. Tech.* 44: 79-86.
- 27) Requena, N., R. Azcón, and M.T. Baca. 1996. Chemical changes in humic substances from compost due to incubation with ligno-cellulotic microorganisms and effects on lettuce growth. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 45: 857-863.
- 28) Rosenfeld, P.E., and C.L. Henry. 2000. Wood Ash control of odor from biosolids application. *J. Environ. Qual.* 29: 1662-1668.
- 29) Schifman, S.S., J.M. Walker, P. Dalton, T.S. Lorig, J.H. Reyrmer, D. Shusterman, and C.M. Williams. 2000. Potential health effects of odor from animal operations, wastewater treatment, and recycling of byproducts. *J. Agromed.* 7: 7-81.
- 30) Schulze, E.D., W. de Vries, M. Hauks, K. Rosén, L. Rasmussen, S.O. Tamm, and J. Nilsson. 1989. Critical loads for nitrogen deposition on forest ecosystems. *Water Air Soil Pollut.* 48: 451-456.
- 31) Stevenson, F.J. 1994. Humus chemistry. John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y.
- 32) Straatsma, G., R.A. Samson, T.W. Olijnsma, H.J.M.O.D. Camp, J.P.G. Greeits, and L.J.L.D. v. Griensven. 1994. Ecology of thermophilic fungi in mushroom compost, with emphasis on *Scytalidium thermophilum* and growth stimulation of *Agaricus bisporus* mycelium. *Appl. Environ. Microbiol.* 60: 454-458.
- 33) Wei, Z., B. Xi, Y. Zhao, S. Wang, H. Liu, and Y. Jiang. 2007. Effect of inoculation microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid. *Chemosphere* 68: 368-374.
- 34) Willson, G.B. 1983. Forced aeration composting. *Wat. Sci. Technol.* 15: 169-180.
- 35) Yamada, T., K. Miyauchi, H. Ueda, Y. Ueda, H. Sugawara, Y. Nakai, and G. Endo. 2007. Composting cattle dung wastes by using a hyperthermophilic pre-treatment process: characterization by physicochemical and molecular biological analysis. *J. Biosci. Bioeng.* 104: 408-415.
- 36) Yun, S., and Y. Ohta. 1997. Some physiological properties of microorganisms capable of deodorizing farm animal feces. *Bioresour. Technol.* 60: 21-26.
- 37) Zeng, L., C. Mangan, and X. Li. 2006. Ammonia recovery from anaerobically digested cattle manure by steam stripping. *Wat. Sci. Tech.* 54: 137-145.