

## 堆肥化施設の苦悩と現場ニーズに対応したシステム開発 System Development Corresponding to the Problem of Composting Facilities

宮 竹 史 仁\*  
FUMIHITO MIYATAKE\*

帯広畜産大学地域環境学研究部門 〒080-8555 北海道帯広市稲田町西2線11番地

\* TEL: 0155-49-5516 FAX: 0155-49-5516

\* E-mail: miyaf@obihiro.ac.jp

Department of Agro-Environmental Science, Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine,  
Nishi 2 sen 11 banchi, Inada-cho, Obihiro, Hokkaido 080-8555, Japan

キーワード：コンポスト化, 省エネルギー化, 温室効果ガス

Key words: composting, energy saving, Greenhouse gases

(原稿受付 2015年7月6日/原稿受理 2015年7月13日)

### 1. はじめに

堆肥化(コンポスト化)とは「生物系廃棄物があるコントロールされた条件下で, 取り扱い易く, 貯蔵性が良く, 環境に害を及ぼすことなく安全に土壌還元可能な状態まで微生物分解すること」<sup>9)</sup>と定義されている。つまり, 家畜排せつ物や汚泥, 生ごみなどの有機性廃棄物を好気性微生物によって分解・安定化させ, 堆肥(コンポスト)を製造する技術である。適切な条件下で製造された堆肥は土壌を健全に保つための有機物であり, 土づくりには欠かせない農業資材となる。堆肥などの有機質資材を土壌に還元することは農業として基本的なことであるが, 日本の戦後農業は堆肥に代表される有機肥料よりも速効性のある化学肥料に極度に依存した効率的な農業に重きを置いてきた。その結果, 化学肥料へのあまりに過度な依存が土壌を劣化させ, 持続的な農業生産環境の悪化を招いている。このような状況が農業生産現場でも認識されつつあり, また化学肥料の価格高騰・高止まりも相伴って堆肥への再認識や利活用が一層進みつつある。

堆肥化自体は, 古来より経験的に実践されてきた伝統的技術であり, 決して新しい技術ではない。元々堆肥は各農家が数年かけてじっくりと有機物を分解させてつくるものであった。しかしながら, 農家の大規模化, 市町村や工場からの膨大な生ごみ等の排出, 堆肥センターによる集積管理などにより, 家畜ふん尿や食品廃棄物, 汚泥といった生物系廃棄物が大量かつ集中した地域で排出されるようになった。それ故, このような状況に対応するために, 短時間で堆肥を製造できる強制通気式などの高速堆肥化法が発展し一般的に普及している。この技術では大量の生物系廃棄物を適切に管理すれば, 早く簡単に分解・安定化させ良質な堆肥を作ることができるため, 国内各地の堆肥センターや畜産農家などで浸透し,

施設や機械も日々進歩している。そのような状況にも関わらず「堆肥化がうまくいかない」, 「良質な堆肥が製造されていない」, 「堆肥の生産コストが高い」といった様々な悩みを堆肥生産者は抱えている。これは, 長い歴史上前例がないほどの大量の生物系廃棄物が集中した地域に排出されることから, 古来より伝統的に培ってきた経験的知識だけでは現状の堆肥化に対処することが難しくなっているからである。これを解決するためには, 経験的知識に加えて, 大規模でも対応し得る科学的な堆肥化技術の知識を兼ね備えた人材の育成やそれらを支援する技術の開発が不可欠であり, また現代の生産現場のニーズに則した効率的な施設管理システムの開発が必要となっている。

本報では, このように堆肥生産現場が抱えている課題を明確にし, その打開策の一端を担う現場管理技術「通気量自動制御堆肥化システム」の開発経緯等を紹介しながら, 現場ニーズに対応した技術開発の取り組みやその難しさ, ならびに施設工学的な観点から次世代の堆肥化施設の未来像を議論したいと思う。

### 2. 堆肥化施設が抱える悩みとは?

堆肥化施設は作物生産に必要な農業資材(堆肥や土壌改良材)の供給を担っているが, その現場では大きく分けて5つの問題を抱えていると思われる。

1つ目は, 堆肥の生産コストの問題である。堆肥化は好気性微生物による有機物分解反応であることから, 堆肥材料へ効率的に空気を供給することで堆肥化微生物を活性化させ, 堆肥化の促進とそれによる発酵期間の短縮ならびに堆肥品質の向上を図ることができる。そのため, 送風機を使用して積極的に堆積物内部へ空気を供給する強制通気式の堆肥化施設が増えてきている。このような堆肥化施設では発酵槽の底部にコンクリート溝があ

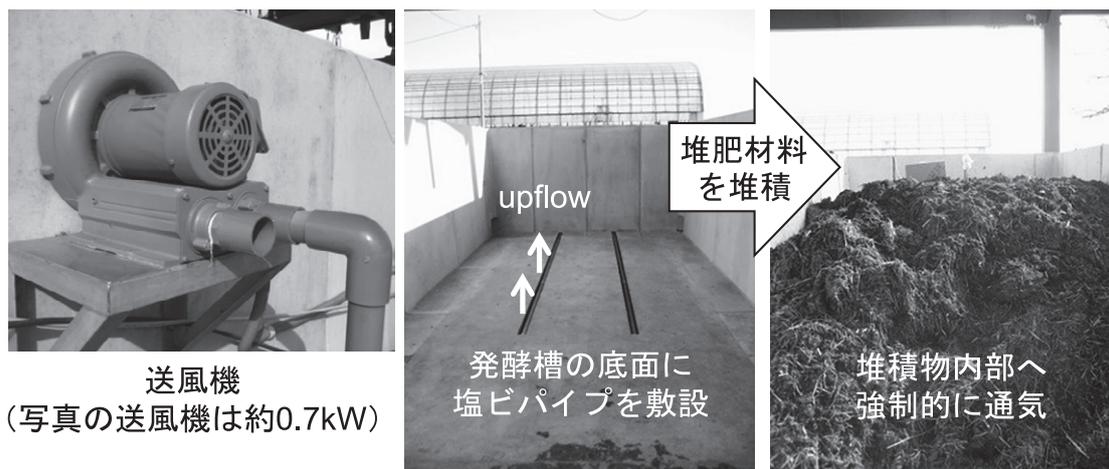


図1. 強制通気式堆肥化施設の発酵槽

り、そこへ穴の空いた塩ビ管パイプを敷設し、その上に堆肥材料を堆積する。送風機から送られる空気はその塩ビ管パイプを通して堆肥材料の内部へ通気される仕組みとなっている(図1)。しかしながら、この送風機に掛かる消費電力量が膨大であり、施設管理費の大半をこの電気料金が占めている現状がある。例えば、堆肥化施設では5.0～6.0kW程度の送風機を用いる場合が多く、この送風機1台を稼働させた場合の1ヶ月当たりの電気料金は約6万円程度となる。堆肥化施設には、通常複数の堆肥化の発酵槽があり、この発酵槽1槽に付き送風機が1台付随しているのが基本となる。そのため発酵槽の数だけ送風機が必要となり、それに掛かる電力コストも当然高くなる。実際に、数多くの発酵槽を有している国内の堆肥化施設では、年間の電気使用料金が2,000万円を超えている現場もある。このような送風機の電気料金が堆肥の製造コストの上昇を招いている現状があり、さらに昨今の電気料金の値上げがそれに追い打ちをかけている。

また本報では取り上げないが、堆肥生産コストを上昇させているもう一つの理由として、堆肥原料の含水率を適切に調整させるために使用する水分調整材(副資材; オガクズや木質チップ、稲ワラ、モミ殻など)の価格の高騰・高止まりも原因となっていることを付け加えておく。

2つ目は、温室効果ガス排出の問題である。堆肥化施設から発生する温室効果ガスの排出源は2種類あり、1つは堆肥化過程の微生物反応によって直接生じる亜酸化窒素( $N_2O$ )やメタン( $CH_4$ )である。そしてもう1つは施設で使用される電力や燃料等の消費による間接的二酸化炭素( $CO_2$ )の排出である。堆肥化過程で堆積物内部から直接排出される $N_2O$ は、硝化菌や脱窒菌による硝化・脱窒過程の副産物として発生することが知られており、特に堆肥温度が $40^{\circ}C$ 以下にまで低下した後の後熟期<sup>10)</sup>や堆肥の切り返し時<sup>7)</sup>ならびに堆肥化開始直後<sup>4,5,8,9)</sup>に集中して発生すると言われている。 $CH_4$ は、メタン菌により堆肥材料中の有機物が嫌氣的状況下で分解されることにより発生する。これは、上手に管理された堆肥化施設であっても堆肥化の過程では材料や通気のムラの発生、自重による圧密などによって部分的な嫌気

状況が発生し<sup>11)</sup>、さらに堆肥材料の水分が多いほど $CH_4$ の生成は多くなる<sup>10)</sup>。一方、 $CO_2$ 排出に関しては、堆肥化施設で使用される送風機や自動攪拌機などの電力消費やホイールローダなどの重機の燃料消費に伴うものが排出源である。なお、堆肥化過程の微生物反応によって排出される $CO_2$ はカーボンニュートラルとして位置づけられている。以上のように、堆肥の製造時には2種類の温室効果ガス排出源があり、とりわけ堆肥化過程の微生物反応から直接生成される温室効果ガスの排出量抑制を試みる研究が多く進められている。しかしながら、研究者にとって堆肥化過程からの温室効果ガスの排出抑制は地球温暖化対策として極めて重要な課題ではあるが、堆肥生産現場のニーズとは必ずしも一致しないことが多い。つまり、堆肥化から生成される温室効果ガスを抑制したとしても、堆肥生産者にとっては期待し得る実益が望めないからである。これは現場と科学者の認識のズレが生じているところでもあり、また現在の温室効果ガス対策の制度上の問題も含むところかも知れない。しかし、堆肥生産現場にとっては生産コストを下げながら高品質の堆肥を製造することが商業的な命題である。これは、十分な実利を上げながら温室効果ガス排出量の抑制などの環境性も向上させるような技術や仕組みを考案しなければならないことを意味する。つまり、研究者は現場のニーズを十分に満足させながら、その副次的な効果等として温室効果ガスの排出抑制を実現させる技術を創造しなければ、現実問題として堆肥生産現場への持続的な普及は難しいものとなる。

3つ目は、経験則に依存する堆肥化施設の現状である。堆肥化は農業の伝統的手法であり、その製造技法はいわば経験や継承に依存するところも多い。このように当たり前に行ってきた堆肥化であるが、「堆肥化が上手くない」という事例は、日本中至るところで見受けられる。これは伝統的に培った経験だけでは現状の堆肥製造に対応できていないということである。それに加えて、堆肥の製造方法に関する知識が生産現場において不足していることも主な原因である。農業にとって堆肥を作ることは特別なことではないし、古来日常的に行われてきたことである。しかしながら、私の経験ではあるが明らかに現場での堆肥生産者の知識不足が散見される。農家

であれば数世代前まではごく当たり前で作られていた堆肥に関する知識が、現時代には継承されていないのである。恐らくは、あまりに過度に化学肥料に依存し、堆肥の利用を放棄した農業を進めてきた結果、世代間による知識や技術の断絶が各農家において起こったのかも知れない。その一方で、良質な堆肥を製造するための学術的研究は国内外問わず多数報告されている。それにも関わらず、生産現場での良質な堆肥生産管理に反映されていないことが極めて多い。つまり、学術的研究成果の蓄積が実際の堆肥生産現場に有機的に繋がっていないことが多いのも事実なのである。「科学に裏打ちされた」堆肥化技術の知識の継承と人材の育成は、堆肥生産現場にとっては切実な問題である。

4つ目と5つ目は、堆肥から発生する「悪臭」問題と生産した堆肥の「販路拡大」である。本報ではこのことについて詳しくは記述しないが、悪臭に関しては既に多くの方々のご存知の状況であり、近隣住民からの苦情は度々報道機関で話題になるほどの大問題である。施設からの悪臭は「完全に」防ぐことは難しいが、堆肥化の方法や脱臭技術で軽減することは可能である。しかしながら、管理コストが高い、または近隣住民との交渉の積み重ねで生じた軋轢の修復が上手くいかないなど非常に難しい面も存在する。また、市町村の堆肥センターや民間企業の経営ベースで堆肥を生産している施設にとっては堆肥の販路拡大も経営上、重要な課題である。通常は堆肥原料が多く排出される地域に堆肥化施設が立地しているが、必ずしも堆肥の需要が高い地域であるとは限らない。つまり、堆肥原料が排出される地域も堆肥を使用する地域も偏在している状況が日本中の至るところで見受けられる。そのため、新たな堆肥需要が見込める地域を開拓しなければならなかったり、広域流通に掛かる輸送コストが高くなったりと経営上の課題も抱えている。

以上のように、現在の堆肥化施設は様々な問題を抱えている状況にある。このような現場のニーズ（現場の実益）に十分に答えることができ、且つ、現実的に施設へ導入しやすい技術開発が求められている。次章からは、現場ニーズの高い「電気代削減」と研究者の関心が高い「温室効果ガス排出問題」の課題を取り上げ、その解決を試みた技術開発の経緯について触れてみたい。

### 3. 現場ニーズに対応したシステム開発—省エネ化と温室効果ガス削減を目指して—

#### 3.1 堆肥化施設の送風機の電気代はなぜ高いのか？

堆肥化は好気性微生物による有機物分解反応の故、堆肥堆積物の内部へ通気を施すことで堆肥化反応は促進される。そのため、堆肥化の最適な通気量を明らかにしようとする学術研究例は数多い。例えば、牛ふんを主原料とする堆肥化では概ね  $0.5 \sim 0.6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{dm}^{-1}$  (dm; dry matter) が最適通気量として報告されている<sup>1,3)</sup>。このような研究では堆肥中の好気性微生物が最も活発に活動できるように（堆肥化が最も促進されるように）、それら微生物の活性の指標である酸素消費速度や二酸化炭素排出速度などから最適な通気量を導き出される。このように判断された最適通気量の適正範囲値は、実際の堆肥化施設でも適用されており、この通気量情報にもとづいて

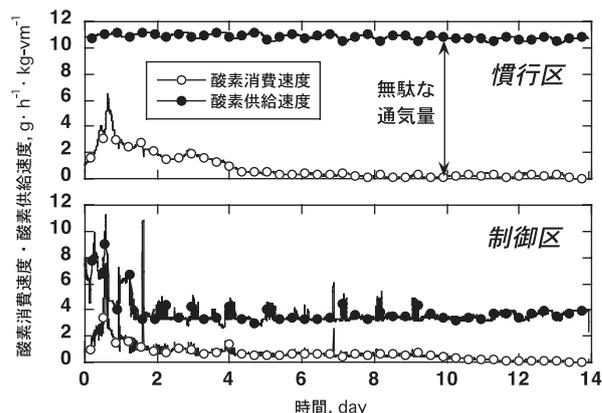


図2. 堆肥製造過程における酸素消費速度と酸素供給速度の一例

送風機の選定も行われる。なお参考までに、実際の堆肥化施設では  $50 \sim 300 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$  (単位に注意：原材料によっても異なる) の通気量が推奨されている<sup>2)</sup>。ここで、ごく一般的な堆肥化過程における酸素の供給速度と堆肥中の微生物が消費する酸素の消費速度の関係をご覧頂きたい(図2)。図2上(慣行区)のグラフは、精密小型堆肥化試験装置を用いて得られた実測値であり、堆肥化微生物の活性(酸素消費速度)と実際に堆肥材料へ最適な通気を施している場合の酸素供給速度の変化を示したものである。堆肥化は微生物反応が故に酸素消費速度は常に変化し、とりわけ堆肥化の初期過程や  $45 \sim 60^\circ\text{C}$  付近の温度および堆肥の切り直し直後などでは酸素消費速度は上昇する。この酸素消費速度が急激に上昇しても、十分な酸素を供給できるように常に一定量の通気を施しているのが慣行の通気方法である。しかしながら、反対に微生物活性が低下した状態にあっては、過剰な酸素量を供給する結果ともなり、これが無駄な通気量として電気代を高くさせている原因になっている。ただし堆肥生産現場では、堆肥化過程の微生物活性がいかなる状況にあっても嫌気性反応にならないように安全に堆肥化できること(嫌気性反応になると発酵阻害や悪臭問題が生じる)、また水蒸気の揮散を促して堆肥の乾燥効率を高めるためにも、この過剰な通気は仕方がないことと諦めているのが現状である。また、少しでも電気代を安くしたいと考えている堆肥化施設では間欠通気(送風機を一定時間の間隔で ON-OFF する方法)を採用している施設もあり、消費電力量を抑えることは堆肥化施設にとって生産コストに直結する切実な問題なのである。

このような状況があり、筆者の研究室では送風機に掛かる消費電力コストを大幅に削減させるためのシステム開発に取り組んできた。このシステムの基本原理は、微生物活性に応じて適切に酸素供給量を変動させることができれば、無駄な通気が削減されて電気代も安くなるという極々単純な仮説に基づいている。これを顕したものが図2下(制御区)のグラフ(実測値)である。微生物活性である酸素消費速度の変化に応じて酸素供給速度が常に変化しているのが分かると思う。つまり、好気性条件を維持できるように一定の安全率を確保しながら微生物活性が高い時は通気量を増加させ、低い場合はそれに応じて通気量も減少させるとというのが本システムの原

理である。これに依って過剰な通気量を抑えて送風機に掛かる電気代を削減させることが可能となる。このように基本原理は単純明快ではあり、実験室内ではいとも簡単にできる事だが、これを実際の堆肥生産現場に適用できるようなシステムに具現化するためには、幾つものハードルを超えなければならなかった。次節では、現場ニーズを満足させる製品として仕上がるまでの「通気量自動制御堆肥化システム」の開発経緯を紹介したいと思う。

### 3.2 通気量自動制御堆肥化システムの開発までの道のり

筆者らの研究室では、この通気量自動制御堆肥化システムを製品として開発・販売するまでに、以下の3つの経緯を踏まえてきた。1つ目は、ラボを中心とした基礎試験によるデータの蓄積と解析（システムのソフトウェアにあたる基本部分の開発）、2つ目は、プロトタイプシステムの試作開発とその効果検証および特許の申請・取得（アイデアの具現化と製品化を見据えた対応）、そして3つ目は、民間企業との協働による製品版としてのシステム改良と現場検証による不具合の修正および販売対応（ニーズ対応と現場適応性および販売戦略）の3つステップである。

1つ目のステップのラボ基礎試験では、通気量自動制御堆肥化システムを制御するために不可欠な制御設定値を判断するためのデータ解析を実施した。当該システムは堆肥の発酵状況に応じて酸素供給量が変化するが（図2下）、その発酵状況を把握して酸素供給量をフィードバックするためには、それらの微生物の活性量とそれに相応しい通気の制御量を明らかにすることが最重要であった。幸い当研究室では10年以上に亘るラボ基礎試験データの蓄積があり、それを分析して制御に携わるソフトウェア部分を開発した。この開発で苦労したのは、ラボ基礎試験でのデータをそのまま実際の堆肥生産現場に応用することが出来ないという点である。上述の微生物活性量やそれに適応する通気量を把握するために、ラボ基礎試験では酸素センサを用いて比較的簡単にモニタリングすることができる。酸素センサが使用できれば、

それに関わるフィードバック制御は容易い。しかしながら、実際の生産現場ではそう簡単には行かない。なぜならば、堆肥生産現場は高濃度のアンモニアガス等が充満しているため、酸素センサが腐食したり、耐久性が低下したりするからである。また、堆肥堆積物は通常オープンエアと接しているため、堆肥内部の酸素濃度を的確に測定することが難しい。加えて、酸素センサの価格が高いため現場で消耗品として使用するには現実的では無いといった問題がある。実際、生産現場で連続的に測定が可能なのは堆肥温度ぐらいなのが実状である。そのため、ラボ基礎試験データをさらに解析し、堆肥温度から微生物が必要とする酸素量やその際の酸素供給量を判断するための制御方法を開発しなければならなかった。このように実験室内では簡単に出来ることでも、実際の現場では技術的・経済的に対応困難な場合も多い。

2つ目のステップでは、アイデアを実際に具現化するためにプロトタイプの通気量自動制御堆肥化システムを試作すること、また、そのプロトタイプシステムを使用して実際に様々な規模の堆肥化試験を行い効果の有無を検証すること、が目的であった。なお、図3にプロトタイプの通気量自動制御堆肥化システムの概略図を示した。システムの基本構造は、①堆肥に挿入された温度センサ（熱電対）の電気信号が風量決定装置（インバータ制御装置）に入力される。②その風量決定装置内部に組み込まれているプログラム（ステップ1で開発された制御方法）に従って、その発酵状況に必要な通気量が決定される。③その通気量となるようにインバータ（周波数を変化させ電圧の大きさを制御する装置）へ制御信号が送られて、必要通気量となるようにインバータの周波数が自動で可変する。④その可変した周波数に応じて送風機の出力量が変化して必要となる送風量となり堆肥内に供給される、という仕組みである。このプロトタイプシステムを使用して実験室内で0.7 m<sup>3</sup>の小規模な発酵槽から堆肥化試験を開始し、次いで学内の試験用堆肥舎（1槽 50 m<sup>3</sup>）、民間企業の堆肥化センター（1槽 150 m<sup>3</sup>）と施設規模を拡大しながらその効果の有無を検証していき、それに応じて風量決定装置も逐次改良を重ねた（図

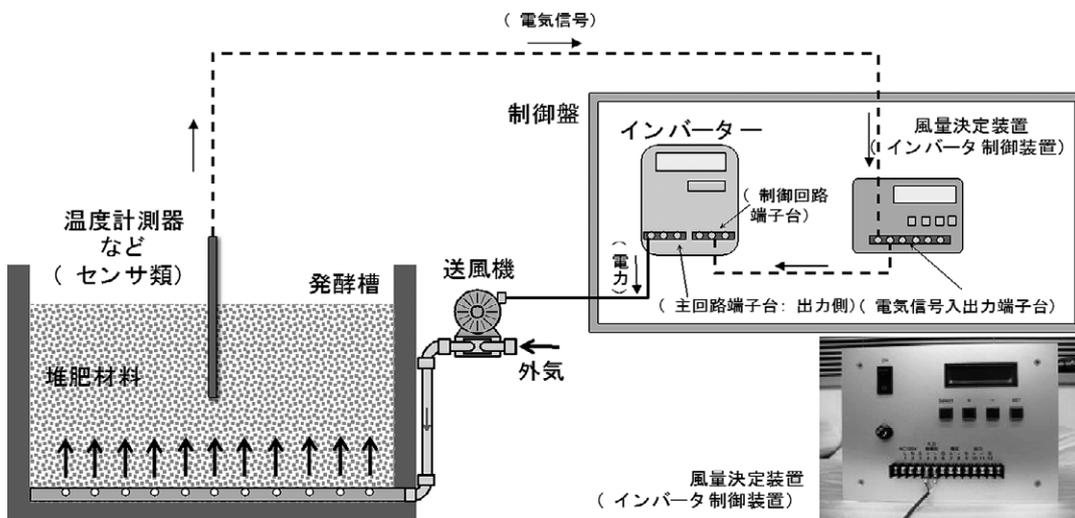


図3. プロトタイプの通気量自動制御堆肥化システムの概略図

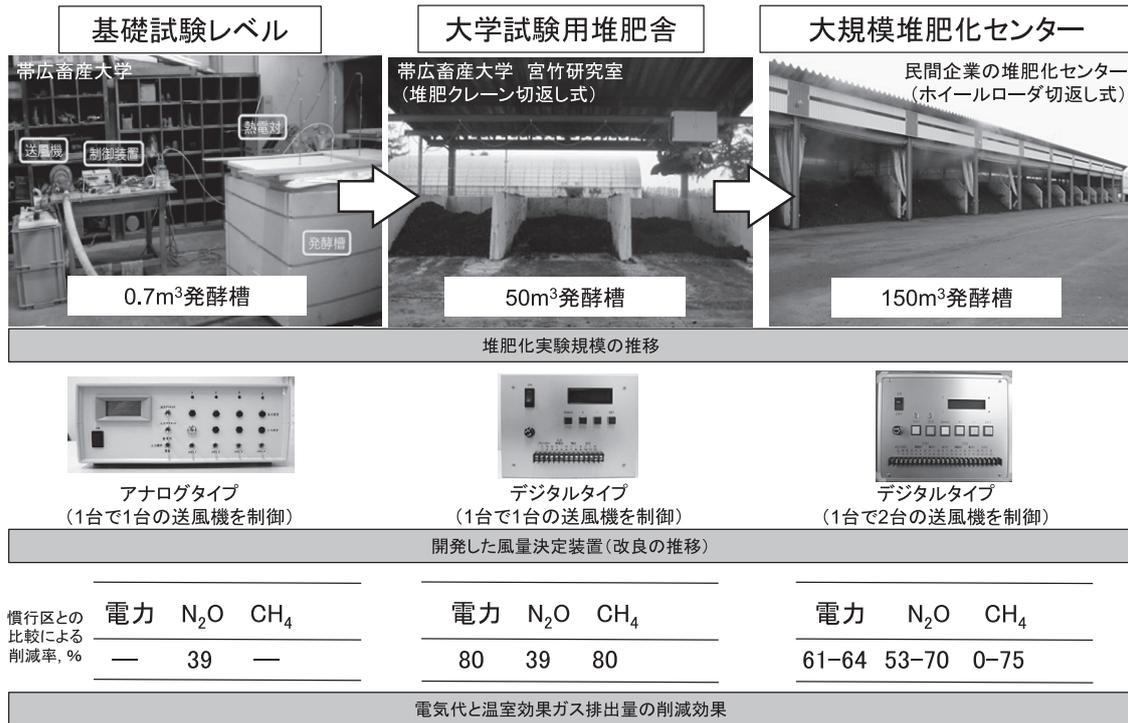


図4. プロトタイプ通気量自動制御堆肥化システムの試験開発の推移とその効果

4)。また、幾度もの実証試験や長期試験を重ねながら、電力消費量と堆肥化から直接排出される温室効果ガス排出量の削減に明らかな効果があることに確証を持つことができた(図4)。さらに堆肥化発酵の促進効果や慣行区と変わらない乾燥効率も確認され、製造される堆肥品質も良好であることが確認された。なお、本システムの使用による堆肥化からのN<sub>2</sub>O排出削減のメカニズムについては、その原理は未だによく分かっていない。発酵状況に応じた通気量変化によって、堆肥への通気圧や通気速度が堆肥内の酸素濃度や亜酸化窒素還元酵素の挙動に影響しているものと推測しているが、詳細は調査中である。また、CH<sub>4</sub>の削減効果は通気圧および通気速度とそれに伴う通気路の形成が影響しており、それは発酵槽への堆肥材料投入時のムラや自重による圧密も関与していると推測している。そのため、材料の均一性が高く、通気性も優れている場合は、慣行区とシステム導入区ではCH<sub>4</sub>排出量は同程度に低いレベルで抑えられている。一方、材料ムラが大きい場合(一般的に現場ではこちらが多い)などは、システムを導入することで高いCH<sub>4</sub>排出削減効果が得られる結果となっている。このような幾度にも亘る実証試験を通して、様々な堆肥生産現場での使用を想定し、使い勝手やコストパフォーマンスの向上性、新たに付加すべきシステムなど、堆肥生産現場からの要望や改善すべき問題点を抽出した。このステップ2であるが、通気量自動制御システムを開発するまでの道のりの中で、最も時間が要したところである。システムの試作と効果検証は当然ながら時間の掛かることではあるが、実はそれ以外に製品化を見据えた特許の申請および取得(特許5565773:堆肥製造方法および装置、帯広畜産大学による単独保有)ならびに製品版を共に作り上げ、それを販売してくれるための民間企業との交渉や

契約など、純粋なシステム開発とは異なる労力と時間を注ぎ込んだステップでもあった。

最終ステップでは、プロトタイプの通気量自動制御堆肥化システムを製品版として完成させることが目的であった。そのためには、現場ニーズも反映して以下5点を改良する必要があった。1点目は、センサ等の通信において無線化技術を開発し、有線センサによる作業性の悪さやネズミ等による通信ケーブルの咬害を防ぐこと(プロトタイプは有線温度センサ)。2点目は、送風機のステップ制御数を任意に多段階できるようにすること(プロトタイプは4ステップに固定)。3点目は、1台の制御装置で複数台の送風機を制御させること(プロトタイプは制御装置1台につき送風機1または2台を制御)。4点目は、エラーやトラブルが生じた際に自動でそれらに対処するための基本動作を制御装置に組み込むこと(プロトタイプは未実装)。5点目は、堆肥温度や消費電力といった情報をインターネット通信網で一括管理し利便性を向上させること(プロトタイプは未実装)である。これらを満足させるシステムを作製するためには民間企業と共同で製品版のシステムを開発することが不可欠であった。なお、図5に製品版の通気量自動制御堆肥化システムの概略図と写真を示した。各発酵槽に設置される各々の温度センサの情報は、無線(Wi-Fi)で制御装置に送信されるように改良された。さらにその情報は1台の制御装置(PLC; プログラマブルロジックコントローラ)に集積され、それぞれの発酵槽の通気量を決定し、インバータを介して最大30台程度の送風機を一度に制御できるシステムとした。また、無線の通信エラーや停電の復帰後などのトラブルが生じても堆肥への通気が停止することの無いように、自動的に対処する基本動作を制御装置に実装させた。加えて、ICT(情報通信技

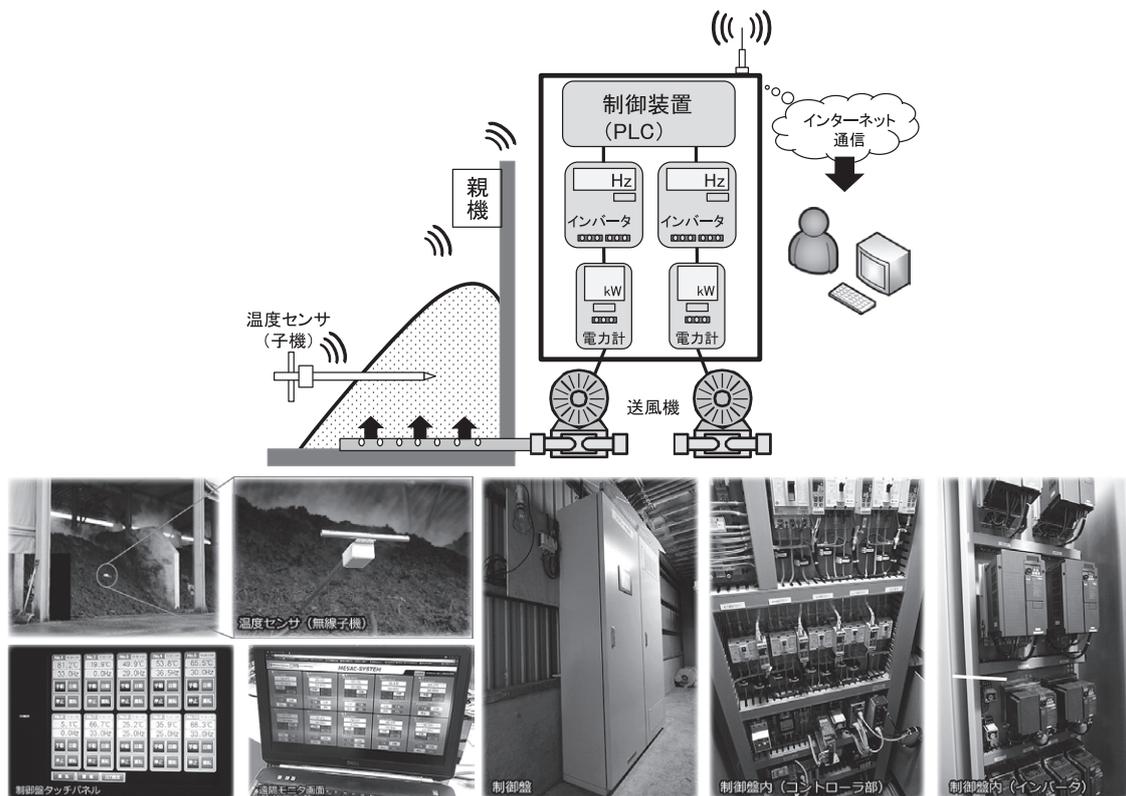


図 5. 製品版の通気量自動制御堆肥化システムの概略図と写真

術)を利用して堆肥の温度情報や送風機の消費電力量の情報がインターネット通信網を利用して、パソコンやスマートフォン、タブレット端末でいつでもどこからでも確認、管理ができるように機能を拡充させた。このように製品版として開発されたシステムは、1台の制御盤にまとめて、堆肥生産現場へ素早く簡単に導入できるパッケージ商品とした。製品版システムの完成時には、民間企業が運営している大規模堆肥化センターに実際に設置し、その動作確認を検証した。導入当初はやはり様々なシステム不具合も生じたが、それらを1つずつ解決し、市場に投入しても何ら問題の無い製品を作り上げた。

以上のように、3つの開発段階を踏まえながら製品化へと実現させていった。現在では、既に販売も行っている。堆肥化施設の電気代で困っている現場は非常に多く、そのようなところから問い合わせも頂いている。もちろん製品化したからといって、本システム開発がこれで終わりではないし、さらなるバージョンアップも必要であろう。ある意味、持続的に生産現場へ普及させていくためには、これからが本当のスタートなのかも知れない。そのためには現場投入への経済効果を明確にし、民間企業とともに販売戦略を立てることが重要である。次節では、この製品版を導入した際の経済的試算について触れたいと思う。

### 3.3 通気量自動制御堆肥化システムは堆肥生産現場にとって得な商品か？

製品版システムを導入した民間企業の堆肥化センターでの試験結果を用いて、現場導入における効果を紹介したいと思う。導入先の堆肥化施設は、送風機の総出力が

31.6 kW、年間の堆肥製造量は7,200 t/年であり、150 m<sup>3</sup>の発酵槽が全10槽ある。その施設全体に当該製品版システムを導入した結果、従来の堆肥生産(慣行区)による電気使用量504 kWh/日(183.8 MWh/年)からシステム導入後には190 kWh/日(63.2 MWh/年)となり、消費電力は62%減少、電気料金も年間191万円の削減効果が得られた(図6上)。加えて、堆肥製造過程と送風機の消費電力による総CO<sub>2</sub>排出量は製品版システムの導入により88 tの削減が可能であった(図6下)。なお余談ではあるが、当該施設の年間の温室効果ガス排出の内訳(CO<sub>2</sub>換算)を見ると、送風機使用による間接的CO<sub>2</sub>排出量が圧倒的に多い。つまり、堆肥化産業においては、堆肥化から直接排出される温室効果ガスの削減は必要だが、それ以上に消費電力を抑えることが、地球温暖化対策にとってより重要であると理解できる。

また、製品版システムは既に商品化されているため、その販売価格からも経済的效果を見てみたい。例えば、モデルケースとして、堆肥化施設の送風機の出力合計が40 kWで既存送風機を使用する場合の導入費用を参考に挙げてみたい。システムの導入を一括購入した場合は約350万円程度であり、5年リースで購入した場合は約400万円程度となる(実際の販売には、これに月々の保守サービス料金が必要)。上記の条件でシステムを一括購入した場合、保守サービス料を含めてもシステム導入直後の1年目から年間約200万円の経費節減となり、従来よりも32%の削減率が得られる(リース契約の場合は20%の削減率)。この販売価格からも、システム償還が早く導入メリットは大きいと理解いただけると思う。なお、上記は補助金の利用が無い場合である。補助

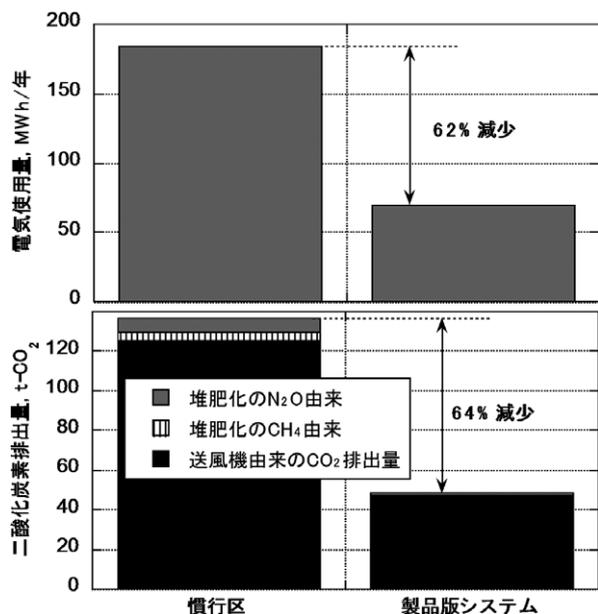


図6. 慣行区とシステム導入区の年間の電気使用量と温室効果ガス排出量

金の種類によっては利用できるものもあり、その導入効果はさらに高くなる。しかしながら、補助金の利用が無くても十分な経済効果が得られるというのがこのシステムの特徴でもある（そもそも補助金がなければ成立しないような製品は、持続的な普及・販売は難しいと私自身は思っている）。

製品版システムの導入のメリットは電気代削減だけではない。製品版システムではICT技術が付加されており、コンピュータ（PLC）とクラウドサービスの連携で、堆肥発酵中の温度や消費電力をスマートフォンやタブレット端末・パソコンから、いつでもどこでも簡単に見ることが可能である。それ故、施設管理者が遠隔地から堆肥の発酵状況を把握し、現場の機械・施設オペレータに指示を出すことも可能である。また、複数の堆肥化施設を運営している民間企業等では、一箇所のオフィスで情報を集中管理することもできるため、効率的な施設運営管理を可能にする。これは生産現場にとって「見える化」を実現するもので画期的な技術だと思われる。

以上のように、自分自身が開発に携わり鼻息にはあるが、堆肥生産現場にとっては、かなり有効な技術になり得るものと自負している。

#### 4. 次世代の堆肥化施設のに向けた展開は？

「通気量自動制御堆肥化システム」は、堆肥化施設の課題である①生産コストの低減と②温室効果ガスの削減の2つの問題解決の一助となり得る技術であろう。今後、筆者らの研究室では、残された課題である③科学に裏打ちされた堆肥化施設の管理技術の確立が不可欠と考えている。施設の管理技術を向上させるためには、人材育成が欠かせない。筆者は企業の堆肥化センター等の人材育成も行っているが、それにはそれ相応の労力と時間が必要であり、堆肥センターを十分に任せられるようになるまでにはやはり2～3年は掛かってしまう。まして

や、ただでさえ日本の職場環境はどこも人手不足で困っている中、堆肥センターのような「きつい」「汚い」「臭い」といった3K職場での人材確保が難しくなっている。現場とのフェイス・トゥ・フェイスで堆肥化の科学的知識を向上させて技術を磨いてもらうことは、当然のことながら大事なことである。しかしながら、現実問題として教える方、教わる方の双方にはマン・パワーの限界がある。それ故、科学に裏打ちされた堆肥化技術を修得するための人材育成対応型システムの開発が、次世代の堆肥化施設には不可欠ではないかと考えている。

この人材育成型システムの重要な開発点は、堆肥化の発酵状況の「見える化」と「診断」である。堆肥化施設の現場では、一般的に堆肥堆積物に差し込まれているバイメタル温度計の表示を見て経験的に発酵状況を判断している。科学的知識を兼ね備えていれば、その情報から読み取れることも多い。しかしながら、「堆肥化が上手くいかない」といった施設が日本中かなり多く見受けられるのが現実であり、バイメタル温度計の情報から発酵状況を判断できる堆肥生産者は限られるだろう。そこで筆者らの研究室では、堆肥化の発酵状況のモニタリングによる「見える化」を構築し、その情報に基づいて自動で発酵状況を「診断」できるシステムの開発に取り組み始めている。本報で紹介してきた製品版の通気量自動制御堆肥化システムでは、ICTに対応し、堆肥化施設の温度状況や消費電力などの「見える化」が実現できるようになった。今後はこのICTシステムに、現在開発に取り組んでいる「堆肥化の発酵診断プログラム」を実装することを想定している。発酵診断プログラムとは、通気量自動制御堆肥化システムで得られる情報から、堆肥化発酵が適切かどうか、発酵不良の場合は何が原因なのかを自動的に判断するためのシステムであり、現在開発を進めている。この診断システムは当然ながら、これまで得られた科学的データや研究報告をベースにして開発しており、研究者たちが積み重ねた学術的研究の成果を堆肥生産現場に橋渡しするシステムである。この発酵診断プログラムが完成できれば、ICTを利用して管理者のパソコンやスマートフォン、タブレット端末に発酵状況の良し悪しや対処方法（例えば、水分調整や切り返しなど）を指示することも可能となる。経験不足の堆肥生産者でも、このシステムを利用することで、学びながら堆肥化施設を管理することも可能となる。このように過度な経験則依存から脱却し、科学に裏打ちされた情報に基づいた堆肥化施設が次世代に展開されるのではないかと期待している。

#### 5. おわりに

通気量自動制御堆肥化システムを本格的に開発し始めて製品となるまで、およそ7～8年の年月を費やした。システムの試作や効果の検証も十分に時間を掛けて行ってきた。これは研究者としては当然と言えば当然である。しかし、これと同様に時間が掛かったのは、実は民間企業との交渉や紆余曲折、また現場への普及活動（販路開拓）や現場ニーズ調査などである。現在、このシステムはある民間企業と帯広畜産大学が実施契約を締結して販売を行っている。もちろんこのシステム開発が進め

られてきたのは私一人の力では無く、民間企業とともにタグを組んできた成果であり、研究者・民間企業がともにこのシステムを育ててきた思いがある。私はこれが極めて重要だと思っている。研究者は何かしらの技術を開発した場合、使ってくれる企業があれば丸投げしてしまうところがある（これまでの自省も含めて）。しかし、民間企業にしてみると自社で開発している訳でもないし、企業の営業マンもそれほどの愛着を感じないのが事実だと思う。とりわけ、革新的な技術開発で、それが多大な利益を生むものであれば企業側も対応が異なるであろう。研究者として、研究以外にどこまで製品開発に関与すれば良いのかという葛藤はもちろんある。しかしながら、堆肥化のような「ニッチ市場」では、研究者が本当の意味での「現場普及」というところまで踏み込まなければ、現場ニーズに答えられる製品開発は難しいのではないかと思う。

## 文 献

- 1) 木村俊範, 清水 浩. 1989. 家畜ふんの堆肥化に関する基礎的研究 (第3報). 農業機械学会誌. 51(1): 63-70.
- 2) 中央畜産会. 2007. 堆肥化設計マニュアル. pp. 10-11. 中央畜産会.
- 3) 宮竹史仁, 阿部佳之, 本田善文, 岩渕和則. 2008. 吸引通気式堆肥化の初期反応特性. 農業施設. 39(1): 33-40.
- 4) 宮竹史仁, 久保田峻野, 谷 昌幸, 加藤 拓, 岩渕和則, 前田武己, 前田高輝. 2011. 乳牛ふんの含水率が堆肥化初期過程の一酸化二窒素およびメタンの排出速度に及ぼす影響. 農業施設. 42(1): 8-17.
- 5) 宮竹史仁, 鈴木康浩, 谷 昌幸, 加藤 拓, 前田高輝, 前田武己, 岩渕和則. 2012. 戻し堆肥の混合が堆肥化初期過程の一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) 排出速度に及ぼす影響. 農業施設. 43(1, 2): 41-48.
- 6) Golueke, G.C. 1977. Biological reclamation of solid wastes. p. 2. Rodale Press, Emmaus, PA, USA.
- 7) Hao, X., C. Chang, F.J. Larney, and G.R. Travis. 2001. Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting. J. Environ. Qual. 30: 376-386.
- 8) He, Y., Y. Inamori, M. Mizuochi, H. Kong, N. Iwami, and T. Sun. 2000. Measurements of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from the aerated composting of food waste. Sci. Total Environ. 254: 65-74.
- 9) Kader, N.A.E., P. Robin, J.M. Paillat, and P. Leterme. 2007. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. Bioresour. Technol. 98: 2619-2628.
- 10) Kebreab, E., K. Clark, C. Wagner-Riddle, and J. France. 2006. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: a review. Can. J. Anim. Sci. 86: 135-158.
- 11) Sanchez-Monedero, M.A, N. Serramia, C.G.O. Civantos, A. Fernandez-Hernandez, and A. Roig. 2010. Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products. Chemosphere. 81: 18-25.