



日本中央競馬会
特別振興資金助成事業

堆肥発酵熱の回収・利用技術の実例集



平成 25 年 3 月

財団法人 畜産環境整備機構

ま え が き

平成19年3月に策定された「家畜排せつ物利用の促進を図るための基本方針」において、家畜排せつ物の利用のひとつとして、家畜排せつ物のエネルギーとしての利用の推進が掲げられた。家畜排せつ物の処理・利用過程で発生するエネルギー利用の推進は、未利用資源の活用だけでなく廃棄されるエネルギーを逃さずに利用するエネルギー活用技術の観点からも重要です。

家畜排せつ物のエネルギー利用としては、メタン発酵処理過程でのメタン燃焼熱や堆肥発酵熱の利用が期待されます。前者には多くの事例がありますが、後者の効率的な回収・利用技術については未確立であります。近年、吸引通気式堆肥化方式や密閉縦型堆肥化装置などが畜産農家に普及しつつあり、効率的に排熱の回収ができるこれらの施設を使って熱回収を図り利用することによって、新たな熱利用の道が開けてくるものと思われます。

本課題では、堆肥化過程で今まで廃棄されていた高温多湿のガスをクロスパイル方式のガス／ガス熱交換器で外気と熱交換し、得られた高温の乾燥空気を戻し堆肥の乾燥に用いることができるか検討しました。また、ヒートポンプは、投入したエネルギーの三倍以上の熱量取り出すことができ、単に燃料を燃焼させて熱を取り出す方法にくらべて省エネで、二酸化炭素の発生も少なくなるといわれています。ここでは、熱交換器やヒートポンプを活用した、家畜排せつ物の堆肥発酵熱の回収や回収した熱の利用について検討した事例を紹介します。これらの事例が、家畜排せつ物のエネルギーとしての利用推進に結びつき、畜産環境問題の解決の一助になれば幸いです。

平成 25 年 3 月

財団法人 畜産環境整備機構
理事長 堤 英隆

目 次

第1章 吸引通気式堆肥化方式による排熱の温水利用

1. はじめに.....2
2. 吸引通気式堆肥化方式による発酵熱の回収.....2
3. 実証施設における堆肥発酵熱回収システムフロー.....4
4. 発酵排気を熱源とした水の加温.....6
5. 乳牛への温水給与の可能性.....8
6. 留意点とまとめ.....10

第2章 堆肥発酵熱による戻し堆肥の乾燥利用

1. はじめに.....11
2. 実証施設における堆肥発酵熱回収システムフロー.....12
3. 堆肥からの熱回収方式と能力試験.....14
 - (1) クロスパイル式熱交換器.....14
 - (2) ヒートポンプ.....17
 - (3) ガス／水熱交換器.....19
4. 回収した熱による戻し堆肥乾燥.....22
5. 各処理法によるコスト計算.....27
6. 凝縮水と結露水の利用.....30
7. 留意点とまとめ.....31

引用文献

第1章 吸引通気式堆肥化方式による 排熱の回収と温水利用

1. はじめに

家畜ふんの堆肥化過程で発生する発酵熱は、発生する“量”が多いものの、工業分野で発生する排熱に比べて温度が低く、エネルギーの“密度”が低いといった特徴があります。ここでは、悪臭の除去を目的に開発された吸引通気式堆肥化方式によって、この発酵熱を効率良く回収し、温水に変換して利用する技術について紹介します。

2. 吸引通気式堆肥化方式による発酵熱の回収

家畜ふんを堆肥化する際には、アンモニアを中心とする悪臭が発生します。この悪臭原因ガスを回収し、処理することを目的として吸引通気式堆肥化技術は開発されました。本方式では、通常おこなわれる、堆肥原料底部から空気を送る方式(圧送方式)とは異なり、堆肥の底部から空気を吸引することで、原料の表面から内部へと空気が供給されます。これにより、発生した悪臭原因ガスを大気中へ放出することなく、原料の底部から回収することができます(図1、文献1)。それだけではなく、本方式では、堆肥化過程で発生する熱についても、底部から空気を吸引することで、外気によって冷やされずに、発酵排気とともに直接回収することが可能です。

この吸引通気式堆肥化方式によって回収できる熱量は、使用する副資材や堆肥化する条件によって異なります。図2に、430L規模の吸引通気式堆肥化装置を使って、乳牛ふんのみ(乾燥ふん)もしくは副資材を所定の条件で混合し、28日間堆肥化した場合に回収できる期間全体の平均排気温度と排気熱量を示しました。条件によっては、発酵不良もしくは一次発酵が早期に終了したことによる平均排気温度の低下がみられましたが、良好に堆肥化が進行した条件では平

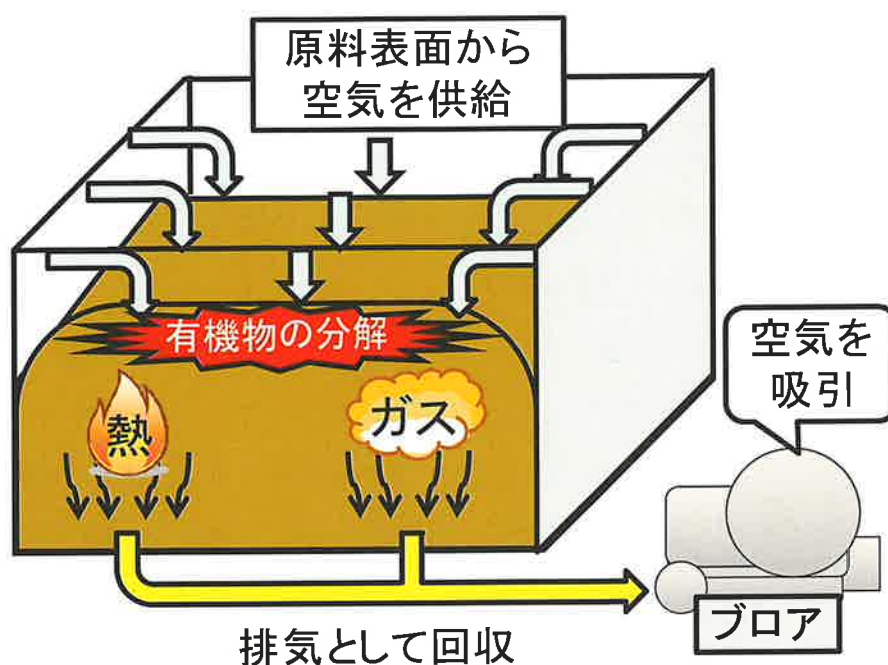


図1 吸引通気式堆肥化による排熱回収の模式図

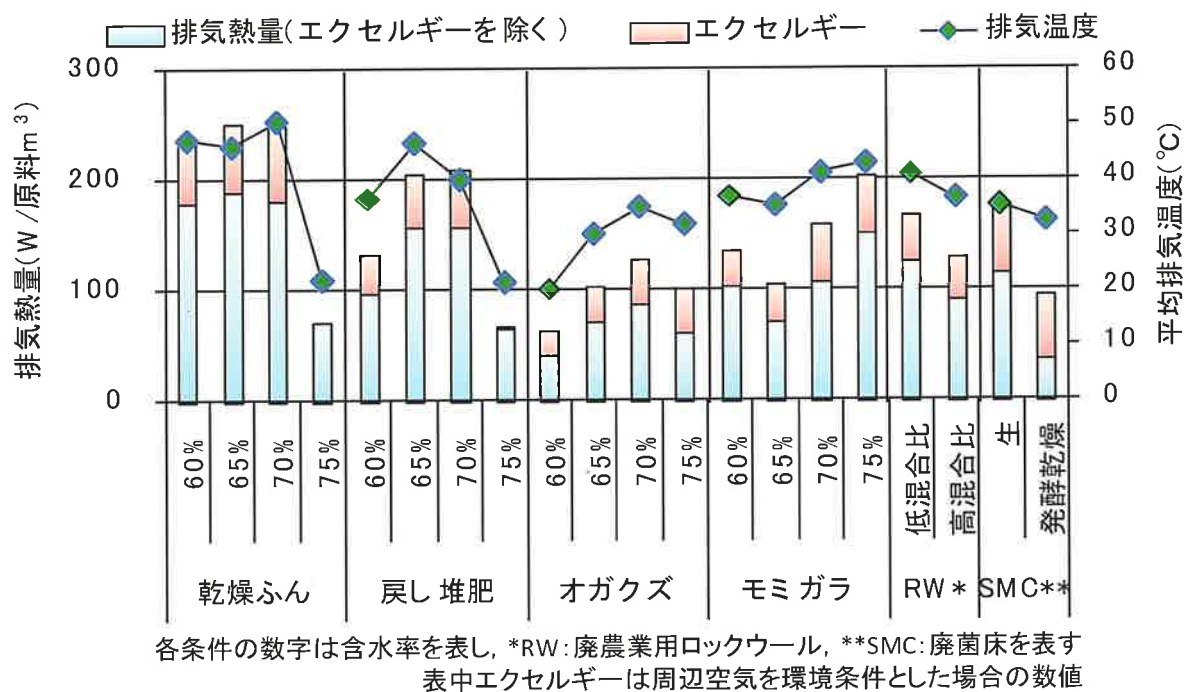


図2 堆肥化条件を変えた場合に排気として回収できる熱量

(文献2を参考)

均の排気温度は 30～50℃程度でした。吸引通気式堆肥化方式で回収した排気中の水蒸気はほぼ飽和した状態であり、排気の持つ熱量には、水が水蒸気になるために必要なエネルギー(蒸発潜熱)が含まれます。そのため、堆肥原料 1m³あたり 68～249W の熱量の排気が回収できました。ただし、回収した排気の熱量がすべて有効に使えるとは限りません。

ここで、排気の持つ熱量のうち、有効に利用できる熱量の指標として、「エクセルギー」という値を用いました。このエクセルギーは有効エネルギーとも呼ばれ、熱源が外部に働きかけることができる最大の仕事量、すなわち利用可能な最大のエネルギー量を表します。排気のエクセルギーは排気の全熱量のうち最大で 40%程度を占め、全ての条件の平均値は、原料 1m³あたり 40W 程度でしたが、平均の排気温度が 30℃を下回るような条件では、エクセルギーは非常に小さくなりました。つまり、一般的に発酵不良な堆肥からの実質的な熱回収は難しく、発酵熱を回収して利用する上では、いかに良好な発酵を促進し、排気を高い温度で回収できるかが重要だといえます。

以上のように、小規模の堆肥化装置を用いた試験の結果、①吸引通気式堆肥化方式では排気が外気で希釈されず高温のまま排出されるため、発酵熱を排気とともに直接回収できること、および②回収した排気のもつ利用可能なエネルギー量が示されました。次に、酪農家に設置した実証吸引通気式堆肥化施設を用いて、実際に堆肥化過程で出る排気を回収し、水の加温に利用するシステムについてご紹介します。

3. 実証施設における堆肥発酵熱回収システムフロー

図 3 に、栃木県那須塩原市の酪農家に設置した実証施設におけるシステムフローを示しました。この酪農家では搾乳牛 120 頭規模で、副資材としてオガクズ、バーク、戻し堆肥を混合した堆肥原料を 1 日あたり 15t 処理しています。実証施設では、堆肥クレーン方式による自動繰り返しと吸引通気式堆肥化方式を導入しており、吸引通気の対象発酵槽容積は 240m³です。一次発酵初期の原

料から吸引通気によって回収された排気は、まず、アンモニアスクラバーに通され、悪臭の原因物質である排気中のアンモニアガスを希硫酸やリン酸と反応させて回収します。ここで回収したアンモニアは、硫安やリン安として液肥利用が可能です。その後、スクラバー後段に設置した熱交換器に排気を導入し、農業用水と熱交換することで温水を得ます。こうして得られた温水は、牛の飲水として利用します。また、熱交換器を通過した後でも、排気には外気温よりわずかに高い程度の熱と、アンモニア以外の臭気が含まれますので、一次発酵後期の堆肥原料へ送気し、堆肥の有機物の分解が停滞した原料へ熱を供給することで、有機物の再分解を促すとともに、アンモニア以外の悪臭を堆肥脱臭により処理しています。

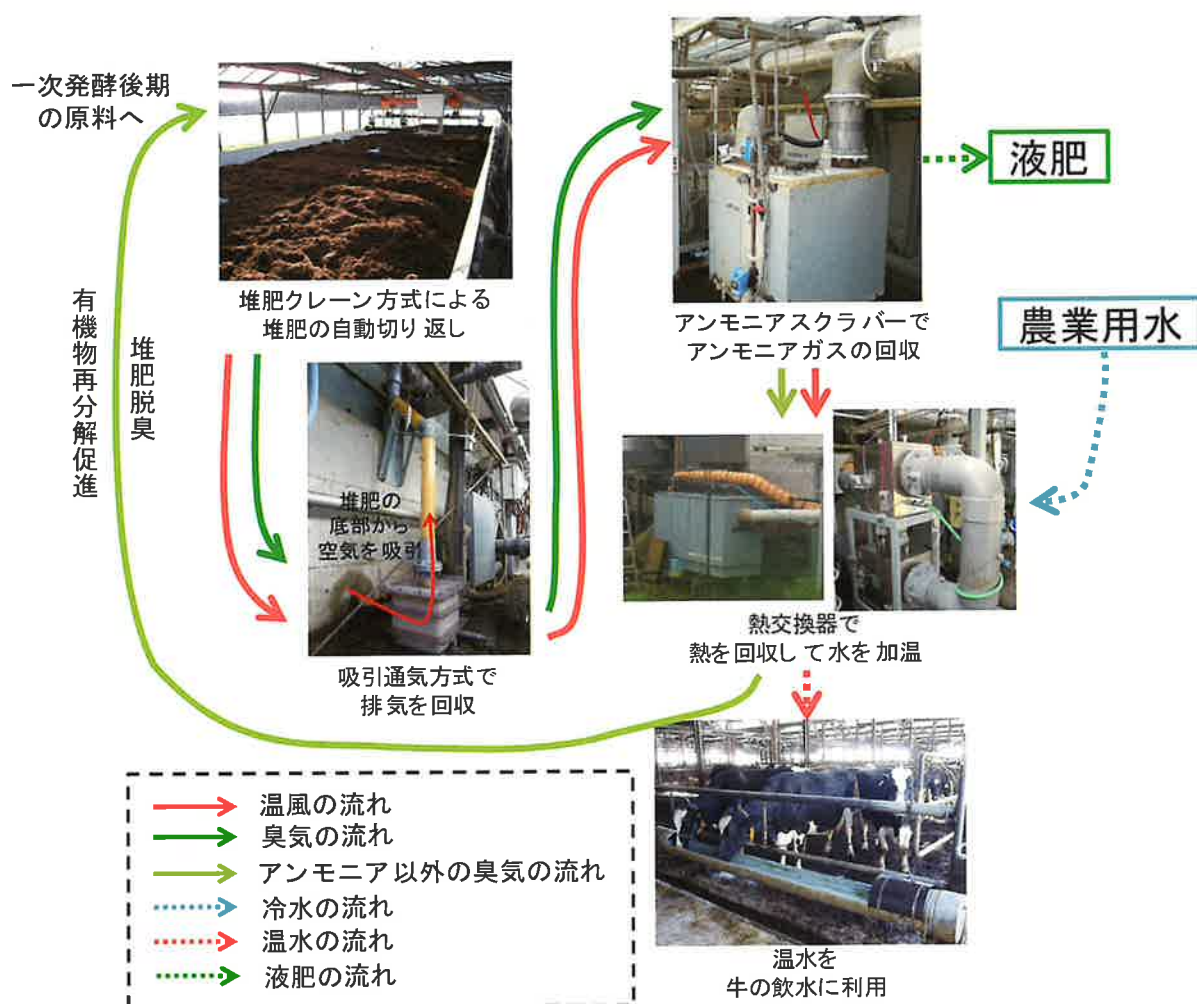


図3 実証施設におけるシステムフロー

4. 発酵排気を熱源とした水の加温

図 4 に、吸引通気式堆肥化施設で回収できる発酵熱量の例として、実証施設における 2012 年 3 月から 12 月までの期間の発酵排気の温度と熱量を示しました。この間、排気の温度は外気温にほとんど影響されず、40～50℃の間で推移しました。また、期間平均の排気量は 7.2m³/分であり、常時 20～50kW(≒80～200W/発酵槽容積 m³)の熱量の排気を回収できました。

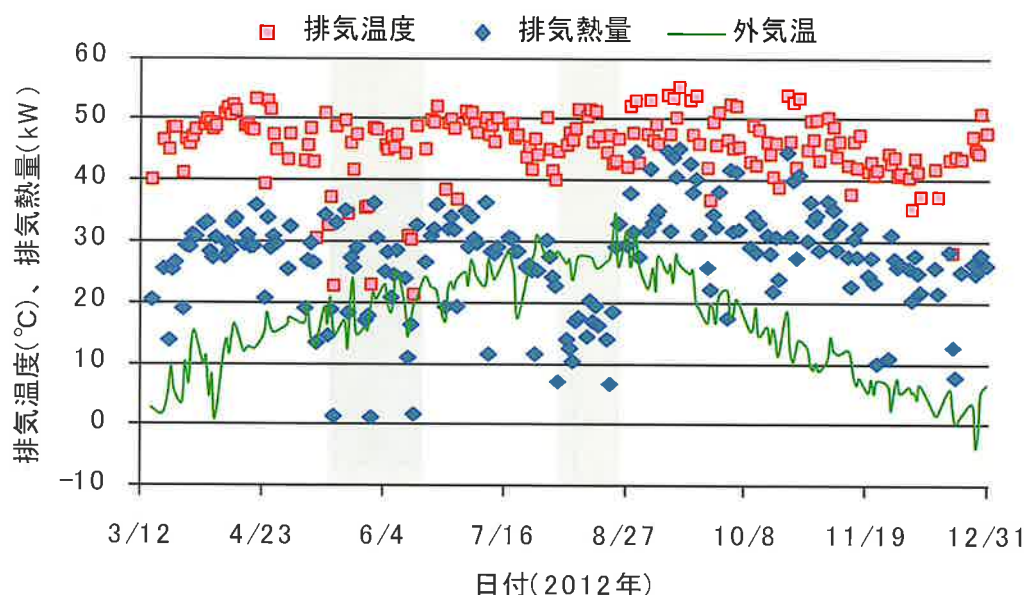


図4 実規模吸引通気式堆肥化施設で回収した排気の温度と熱量

こうして回収した発酵排気の温度は、工業系の排熱に比べて低いものの、水蒸気がほぼ飽和しているため、本施設では蒸発潜熱を回収できる熱交換器を使用しています。図 5 に、使用している熱交換器の概略を示しました。本施設では、この熱交換器(容量 75L、伝熱面密度 123m²/m³)を、排気と水の接触時間を長くするために、2 台直列に繋いで使用しており、排気(高温)と水(低温)を熱交換器内に導入することで、排気の持つ熱を水に移し、水を加温します。また、排気が熱を失う過程で水蒸気が結露し、1 日あたり数百 kg の結露水が発生するため、熱交換器には結露水の排出口を取り付けています。この結露水は、畜舎

内でのリサイクル利用や放流が可能です。ただし、排気中のアンモニアを事前に回収していても、結露水の発生状況に応じて結露水中の窒素濃度が変動するため、結露水を放流する場合には排水基準を満たしているかを確認する必要があります。

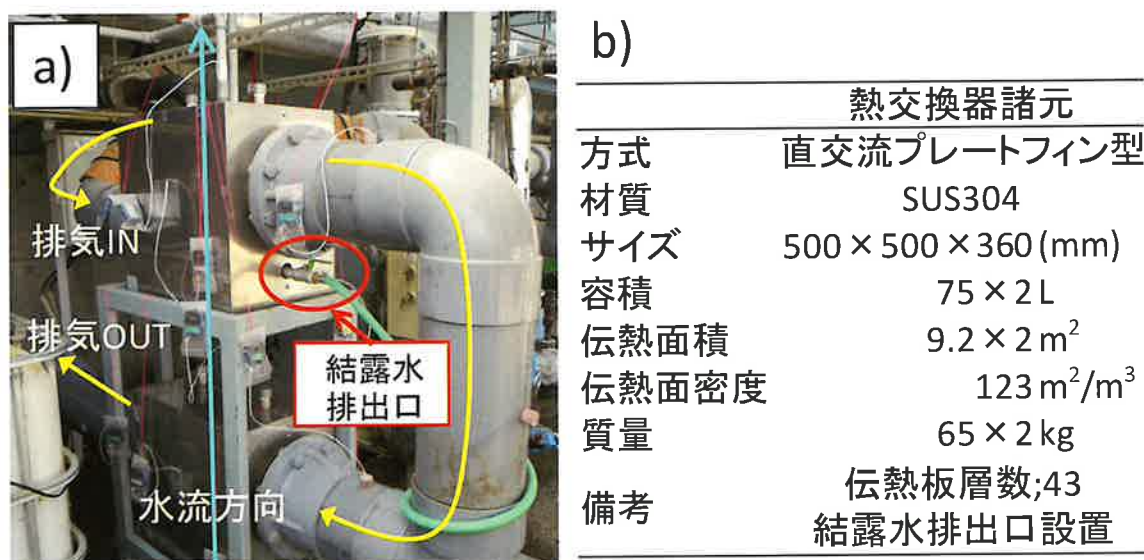


図5 熱交換器の概略 a) 熱交換器外観 b) 熱交換器諸元

この熱交換器を用いて、実際に回収した発酵排気と農業用水を熱交換し、農業用水の通水量を変えた場合に得られる温水の量と温度を図 6 に示しました。毎分 1～5L の通水量までは、通水量を増加させても温水温度はあまり低下しませんが、5L/分以上の通水量では、通水量が増加するにしたがって温水温度の低下幅が大きくなりました。こうしてできる温水は、例えばお風呂と同じ程度の水温 40℃であれば、一日あたり 11.5t、牛 1 頭あたり約 100kg/日得ることができます(通水量 8L/分)。また、これだけの水を加温するために必要な熱量は、一ヶ月あたり A 重油 1230L に相当し、A 重油の価格を 90 円/L とすると 11 万円/月の価値と見積もることができます。ただし、得られる温水の温度は、最高でも排気と同じ 50℃前後ですので、蓄熱して遠方に輸送するよりは、経営内で利用することが有効と考えます。例えば温水を、冬期の除雪や、畜舎暖房の熱源、

あるいはボイラーやヒートポンプと組み合わせて、殺菌・洗浄・消毒用途の、より高温の温水を得るための供給水や熱源に利用することで、経営内で消費する燃料を削減することが可能です。

それでは、次項で、得られた温水の利用方法の例として、実証施設でおこなわれている、乳牛への温水給与の取り組みについてご紹介します。

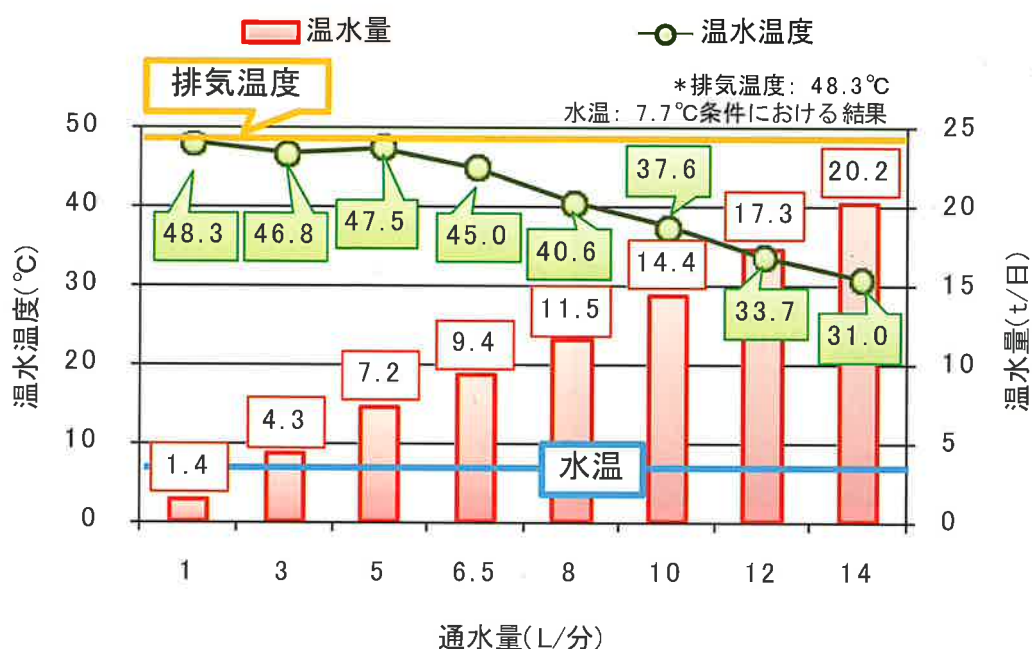


図6 通水量を変えた場合に得られる温水の温度と1日に得られる温水量

5. 乳牛への温水給与の可能性

実証施設がある栃木県那須塩原市は、関東のほぼ最北に位置し、冬期の平均気温は 5℃以下、最低気温は氷点下になります。そのため、冬場に牛は 10℃以下、場合によっては凍る寸前の温度の水を飲まなくてはなりません。牛は寒さには強い動物ですが、寒冷期に冷水を給与すると飲水量が減少するという報告があります(文献 3)。しかし、牛の飲水量は 1 日・牛 1 頭あたり 100kg にもなり(文献 4)、燃料を使って飲水を全量加温することはコスト的に難しいと考えられます。そこで、牛の健康を増進することを目的に、冬季に飲水量を制限するこ

となく、場合によっては自由飲水が乳量の増産に寄与しないか検討するために、本施設では、排気との熱交換で得られた温水を牛に給与しています。

図7に、温水(平均温度 27℃)もしくは冷水(平均温度 6℃)を給与したときの牛の飲水量、および泌乳量の変化を示しました。温水および冷水の給与は、50 頭 1 群を対象に 4 日を 1 サイクルとして、2～3 サイクルの間隔で転換しました。そうすると、転換直後の各パラメーターに差はないものの、時間が経つにつれ、図中の矢印で示したような傾向が見られました。つまり、温水から冷水に転換すると泌乳量は減少傾向になり、反対に、冷水から温水に転換すると増加傾向になります。調査期間が短かったため今後のさらなる検討が必要ですが、各温度の水を給与した期間の後期における平均乳量を比較すると、温水を給与した期間では冷水を給与した期間より、数%増加しました。仮に温水を給与することで冬期間(12～3 月)に 2%乳量が増加するのであれば、100 頭規模の酪農家で、平均乳量を 32kg/(頭・日)、乳価 90 円/L とすると、1 ヶ月あたり 17.3 万円、期間全体では約 70 万円の増産となります。そのため、現在は実証施設で温水を給与することと平行して、実験農場における精密試験で、乳牛への温水給与の詳細な影響を検証しています。

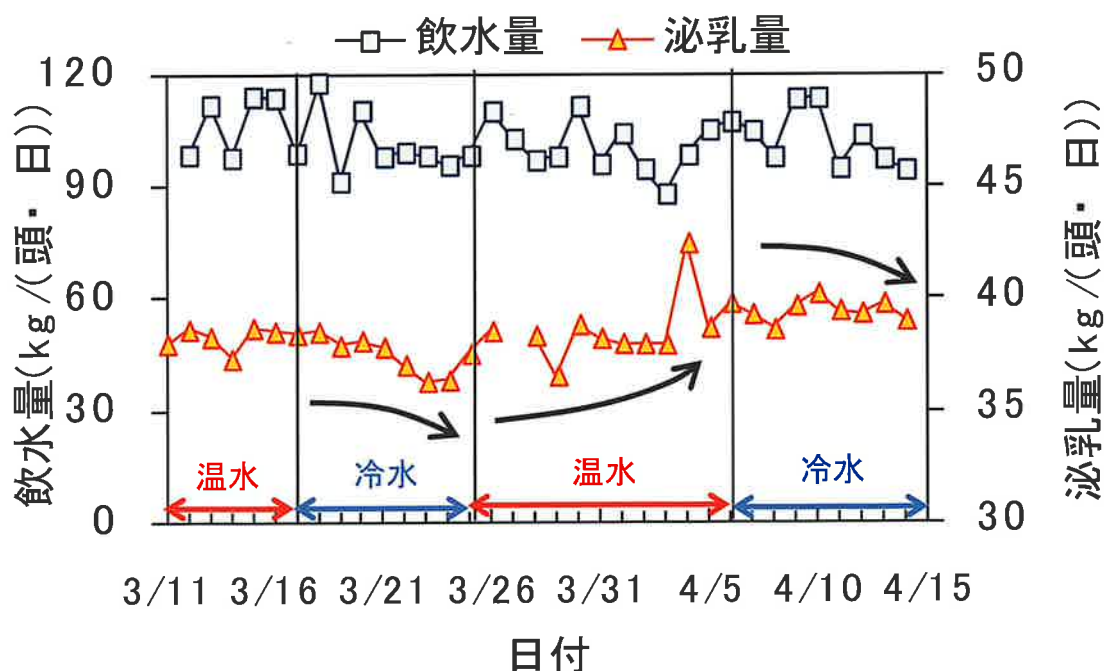


図7 温水もしくは冷水を給与したときの牛の飲水量および泌乳量

6. 留意点とまとめ

以上のように、吸引通気式堆肥化方式により発酵熱を回収し、温水へ変換するシステムについてご紹介しました。ただし、本システムを導入した場合でも、一般的に発酵不良な堆肥からは十分に熱を回収することはできませんし、熱交換器によって得られる温水の温度は、最高でも排気と同じ温度であることに留意する必要があります。また、窒素を環境中へ過剰に放出しないために、排気中のアンモニアを薬液等で事前に回収し、有効に利用することが求められます。つまり、堆肥原料の含水率や通気量などを調整することで、適正に堆肥化を管理し、それにより得られた熱や液肥を経営全体で利用していくことが、本システムを運用していく上で重要だと考えます。そうすることで、経営内で使用する燃料の消費量削減や、生産効率の向上により利益につなげることができ、省エネルギー的な畜産経営の実践に寄与することが可能となります。

第2章 堆肥発酵熱による 戻し堆肥の乾燥利用

1. はじめに

多くの畜産農家で堆肥化处理の際に通気性改善材として利用している副資材（オガクズ、ワラ類、もみ殻、バーク等）は、バイオマスエネルギー利用における需要などにより、入手困難や価格高騰を招いています。そこで堆肥発酵熱を、堆肥調整時に利用する戻し堆肥の乾燥に利用し、副資材の削減を検討しました（図8）。戻し堆肥とは、堆肥化が終了して含水率が低下したものを、堆肥原料と混合して含水率を下げるための副資材として用いる堆肥のことです。今回検討した堆肥発酵熱回収技術は、吸引式堆肥化装置や密閉縦型堆肥化装置などの排気がまとまって排出される施設に適用できるものです。ここでは、酪農家に設置した吸引通気式堆肥化方式（第一章の堆肥化施設と同じ）からの発酵熱を効率良く回収し、回収した熱源を堆肥の乾燥等に利用した実証事例を紹介します。

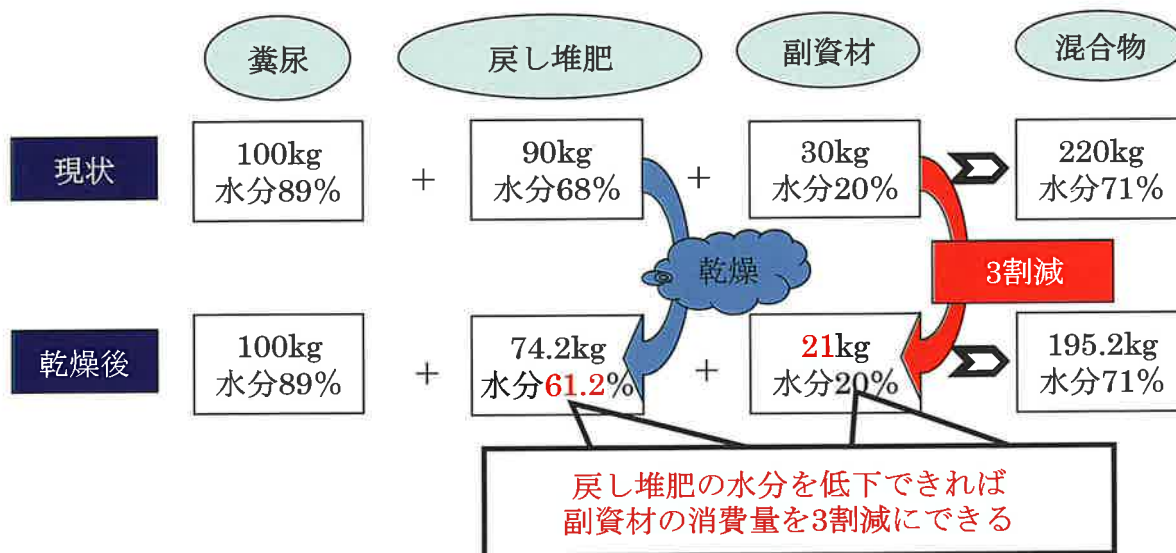


図8 戻し堆肥の乾燥によると副資材使用量削減効果の例

2. 堆肥発酵熱による戻し堆肥乾燥のシステムフロー

堆肥発酵槽からの排気の熱を回収し、堆肥乾燥に利用するシステムのフロー図を図9に示しました。排気は水蒸気を含んでおり、これの凝縮熱が回収する主要な熱源です。凝縮した水が熱交換器内に多くあると、圧損が生じたり熱交換効率を下げたりする可能性があります。そこで、この発酵槽からの排気は、最初に部分的に管径を太くした気液分離管にて一旦風速を落とすことで、過剰な水を分離します（図10）。気液分離管下部には排水管を設け、過剰な水は貯留槽に溜まる構造になっています。配水管は、排水側に上向きに約50cmの返しをつけることで水封とし、堆肥舎からの排ガスが漏れ出さないようになっています。過剰な水は、1日35Lほど溜まり、アンモニア濃度が、1,220～3,420mg/L、pHが8.64～9.40でした（2011年3月～2012年11月）。このガスを、クロスパイル式のガス／ガス熱交換器に導入し、外気と熱交換することで温風を得ます。温められた外気は、戻し堆肥の乾燥に用いられます。熱交換器通過後のガスに含まれているアンモニアガスは、アンモニア除去装置（スクラバー）にて、硫酸やリン酸と反応させて回収します。その後、アンモニアガスを含まない40℃程度まで低下したガスを、ヒートポンプユニットの室外機に導入し、農業用水を加温して温水（約85℃）を作ります。この温水は、ガス／水熱交換器に通過させて外気を温め、戻し堆肥の乾燥に用います。

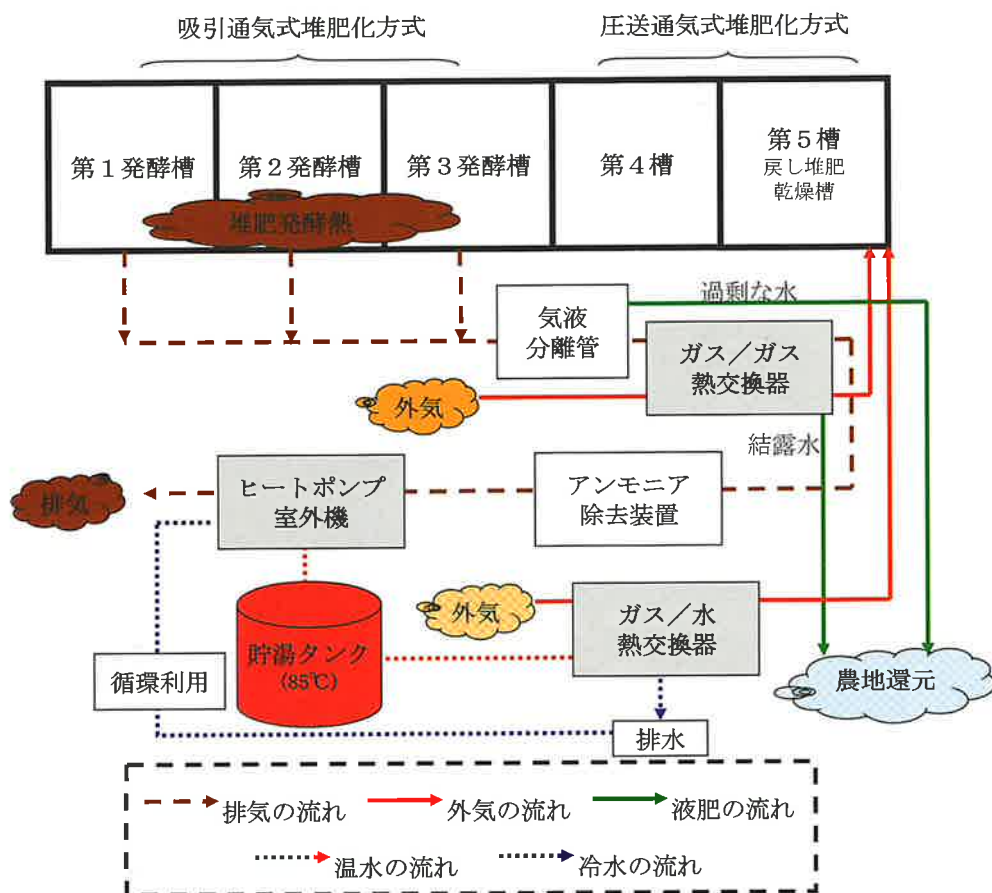


図9 堆肥発酵槽からの排熱を戻し堆肥乾燥に利用するシステムのフロー図

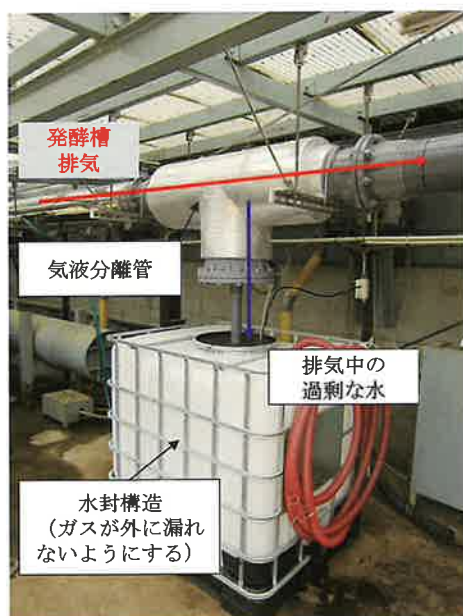


図10 気液分離管と貯留槽の外観

3. 堆肥からの熱回収方式と能力試験

(1) クロスパイル式熱交換器

クロスパイル式熱交換器（CP250、縦 500×横 500×高さ 360mm、重量 65kg、伝熱面積 9.20m²、(株)セキサーマル社製）とは、伝熱板を重ね合わせた薄板・積層構造の熱交換器で、熱交換量あたりのサイズが小さく、軽量である特徴があります（図 11）。本来、中小サイズ加熱装置の排ガス（600℃程度）に用いられており、乾燥したガス間の熱交換を想定した装置です。これを、堆肥発酵の湿熱ガスの主に蒸発潜熱を回収する熱交換器として使用しました。この熱交換器は通常、水平直行で使用されますが、このシステムでは、凝縮した水が伝熱板に付着すると熱交換効率を下げることから、水滴が除去され易くするように湿熱ガス側をダウンフローとし、加温する外気は水平方向に直行させました（図 12）。また、結露水を回収するため、熱交換器下部に、流路を太くすることで結露水とガスを分離する気液分離槽を取り付けています（図 12）。この結露水は、1 日 100L ほど溜まり、アンモニア濃度が、1,318～3,720mg/L、pH が 8.91～9.38 でした（2011 年 3 月～2012 年 11 月）。

クロスパイル式熱交換器の能力試験を行った結果を図 13 に示します。外気の風量を変えてガス／ガスの熱交換器能力試験（1 台あたり）を行った結果、外気の風量を 15.1m³/分まで増加させるほど、回収できる空気の熱量は高まり、熱交換後の温風の温度が高くなりました。風量が 15.1m³/分の時、回収熱量は 28.0MJ/時でした。近似直線から、風量をより高めても回収できる熱量および熱交換後の空気の温度には、まだ限界に達していないことが予測されます。風量が 34.1m³/分の時、堆肥の発酵温度、外気温度及び湿度などの条件は異なりますが、回収熱量は 26.6MJ/時でしたので、この装置の熱回収量の上限は 28.0MJ/時程度と考えられました。この熱量は、1 ヶ月で 20.2GJ となり、A 重油 516L に相当します。A 重油の価格を 90 円/L とすると約 4.6 万円/月の価値を見積もることができます。

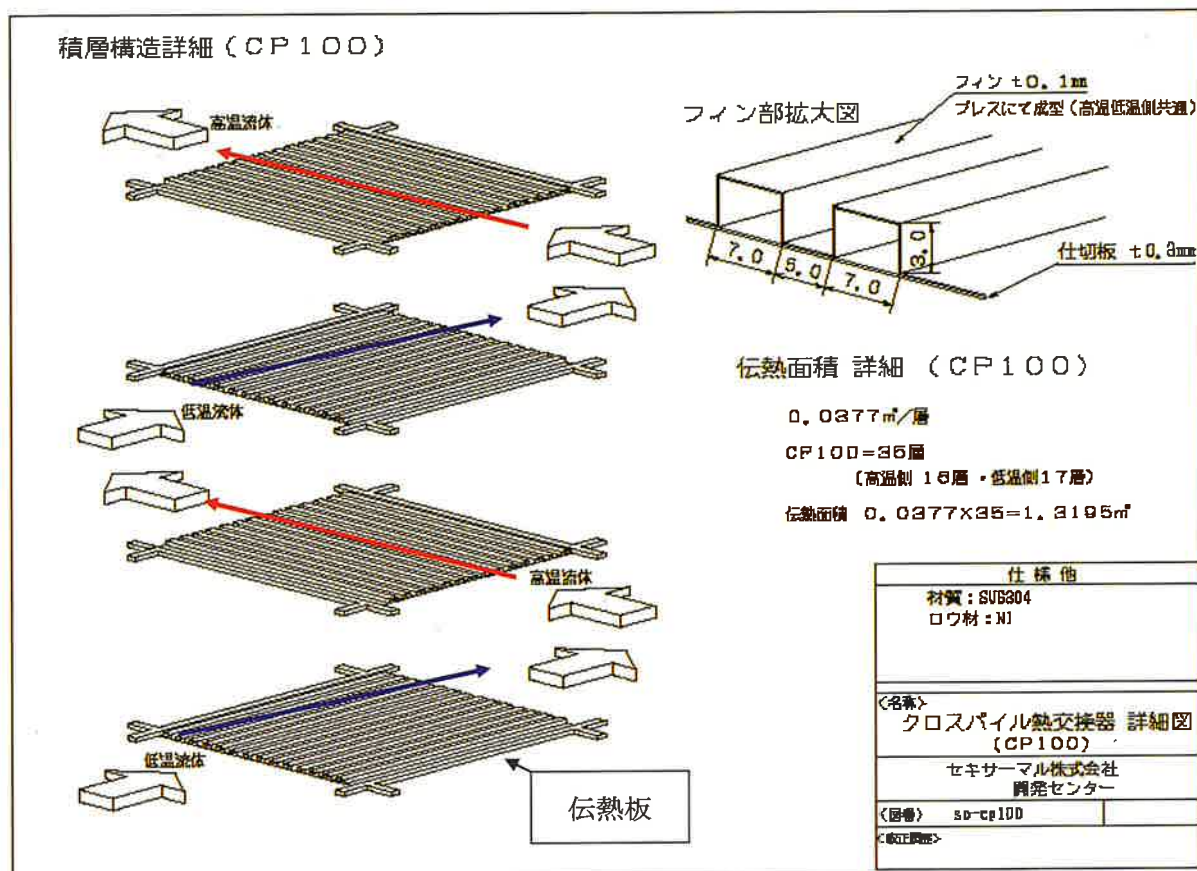


図11 クロスパイル式熱交換器の構造図 (伝熱板をはさんで、低温流体と高温流体が交互に直交して流れる)



図12 クロスパイプ式熱交換器の外観

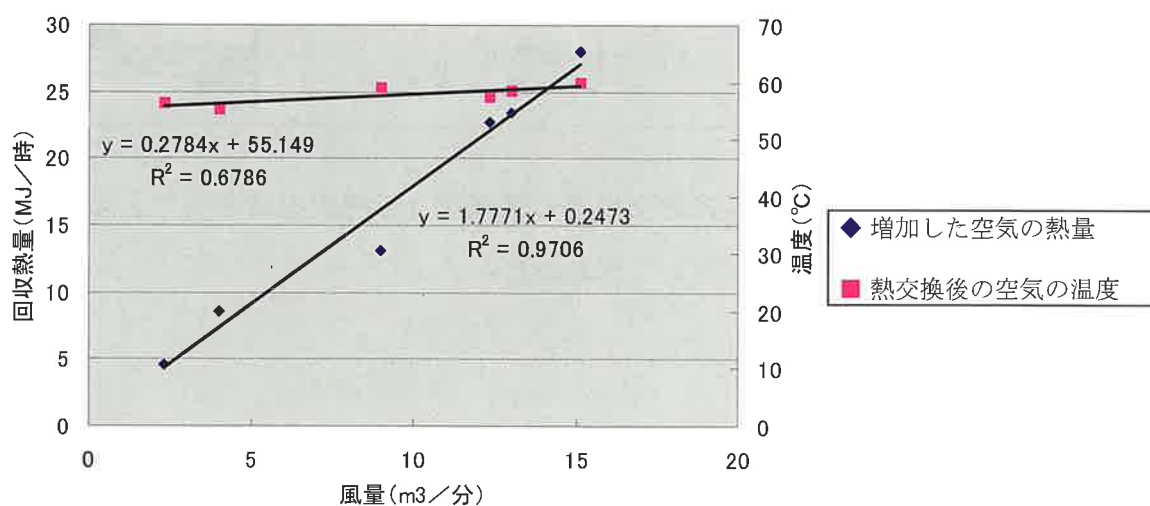


図13 ガス/ガス熱交換器における風量、交換した熱量および温風温度の関係

(2) ヒートポンプ

ヒートポンプは、少ない投入エネルギーで、温度の低いところから高いところへと熱を移動させることで大きな熱エネルギーを利用できる技術です。最近、身の回りに普及しているエアコンやヒートポンプ式の給湯器（エコキュート）などがこの技術を利用しています。ヒートポンプは、使用条件にもよりますが、投入した電力エネルギーの3倍程度の熱量を利用できる省エネルギーな技術です。農業分野では、園芸などの施設暖房にヒートポンプが用いられ、効率的な利用方法や重油機器とのハイブリット使用の研究が行われています（引用文献 5, 6）。また、酪農現場では、ヒートポンプを利用して、牛乳熱で給湯したり（引用文献 7）、生乳を冷却するアイスビルダ（氷蓄熱槽）の廃熱で給湯したりする技術の開発が行われています（引用文献 8, 9）。このヒートポンプ技術を用いて、堆肥発酵熱の回収を試みました。図 14 に、堆肥発酵熱を利用したヒートポンプ給湯システムのフローを、図 15 に装置の外観を示しました。一般に販売されている民生機器（ヒートポンプ給湯器、SRT-HPK37ND5、三菱）を用いたところ、室外機（ヒートポンプユニット）に入れる外気の上限が 42℃で、室外機の材質にアルミと銅が多用されているため、堆肥発酵槽からの排気は、温度が高すぎであり、アンモニアガスがアルミと銅を腐食するため、直接室外機に入れることはできませんでした。このため、堆肥発酵槽からの排気をクロスパイル熱交換器で熱を回収して温度を下げ、アンモニアスクラバーを通過させてアンモニアを十分に除去し、排気熱のカスケード利用の末端としました。ヒートポンプは一般に外気から熱を回収しているため、気温が低い冬季に効率が低下する問題があります。カスケード利用の末端の低温排気熱でも、冬季ならば消費電力低減効果が得られると考えられます。

冬季に室外機へ、外気（対照区）または堆肥発酵排気（試験区）を送り、温湯（85℃）を作るための電気代を比較しました。その結果、対照区の平均消費電力は 10.17kWh で、170.9 円（東北電力 従量電灯 B16.8 円/kWh）、76.3 円（東北電力 深夜電力 7.5 円/kWh）と試算され、試験区の平均消費電力は 6.11kWh で、各 102.6 円、45.8 円と試算され、40%の低減効果が見られました（表 1）。

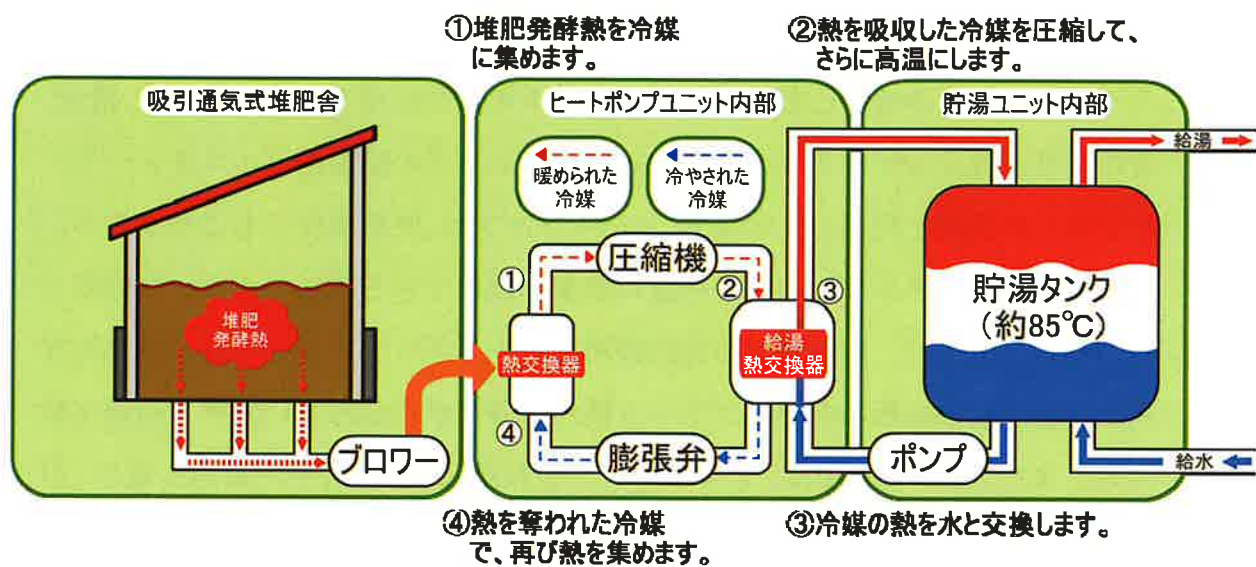


図14 堆肥発酵熱を利用したヒートポンプ給湯システムのフロー



図15 ヒートポンプ給湯システムの外観

表1 ヒートポンプへの堆肥発酵熱の利用が電気代に及ぼす影響

試験区分	単位	外気 (対照区)	堆肥発酵熱 (試験区)
実験期間		平成23年10月20日～11月1日	
ヒートポンプユニット入気温度	℃	12.2	39.1
ヒートポンプユニット排気温度	℃	5.46	20.1
平均消費電力±標準偏差 (SD) *1	kWh	10.17±2.12	6.11±1.58
電気代 (16.8 円/kWh) *2	円	170.9	102.6
電気代 (7.5 円/kWh) *3	円	76.3	45.8

*1 水温約85℃まで上げるのに要した消費電力で、各5回測定の平均

*2 東北電力 従量電灯Bの場合

*3 東北電力 深夜電力の場合

(3) ガス／水の熱交換器

ガス／水の熱交換器として、自動車用ラジエター(Calsonic 社、縦 535×横 385×厚さ 50mm)を利用し、ヒートポンプで作ри出したお湯で外気を加温する装置を製作しました(図16)。外気の接触時間を長くするために、3器直列に繋いで使用しています。

外気の風量を変えてガス／水の熱交換器能力試験を行った結果、外気の風量を増加させるほど、回収できる空気の熱量は高まりましたが、熱交換後の温風の温度が低下しました(図17と表2)。熱回収率は、66L／時の給湯量で水25℃から76.3℃まで増加した熱量あたりの、ガス／水の熱交換器で上昇させられた空気の熱量から算出しました。その熱回収率は、風量上がるほど高くなり、最も風量を高くした13.6m³/分の時で、お湯の熱エネルギーの約41.3%を利用でき、温風がもった熱量は6.4MJ／時でした(表2)。ヒートポンプで作リ出したお湯の熱を低下させずに、ガス／水熱交換装置に導入し、配管での温度ロスをより少なくすれば、熱交換する空気の熱量をより上げられると考えられました。

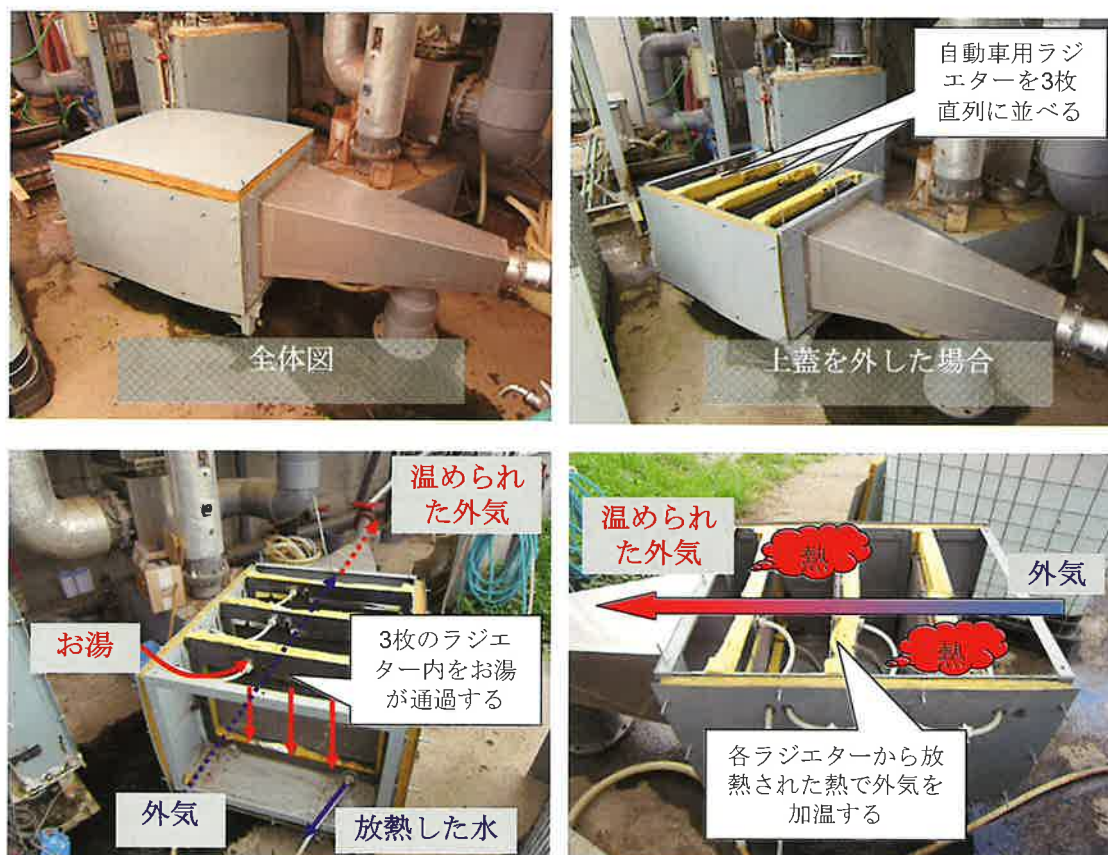


図16 温湯から温風を作るガス／水熱交換装置の外観

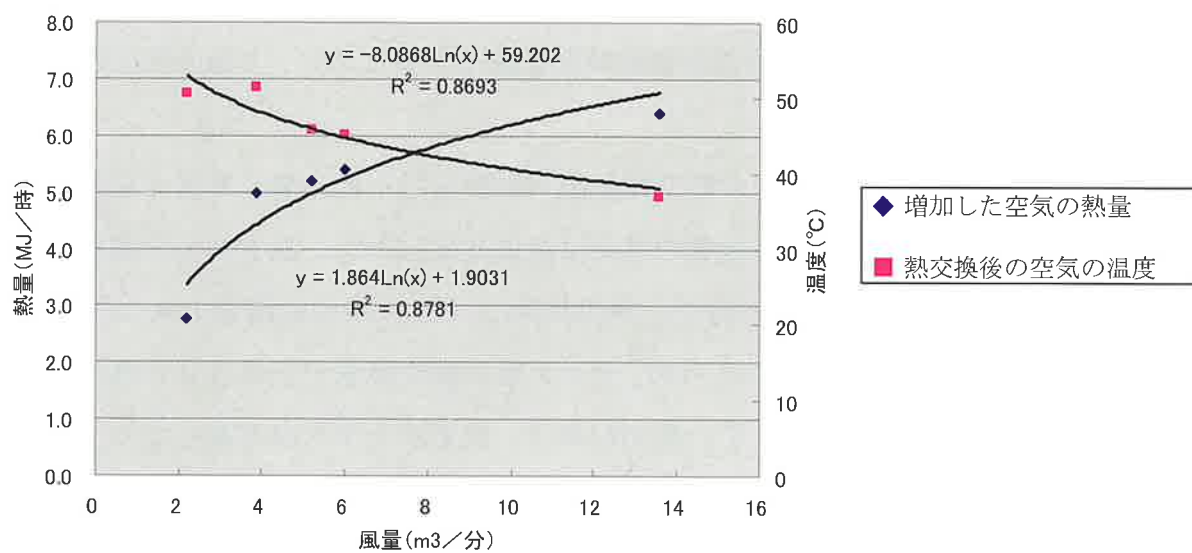


図17 ガス／水熱交換器における風量、交換した熱量および温風温度の関係

表2 各風量におけるガス／水熱交換実験装置の能力

風量	給湯量	熱交換器 流入水温	熱交換器 排出水温	水温低下幅	上昇した 水温の熱 量	熱交換器 流入空気 温度 ^{*1}	熱交換器 排出空気 温度	空気上 昇幅温 度	上昇した 空気 ² の熱 量	熱回 収率 ^{*2}
m ³ /分	L/分	℃	℃	℃	MJ/時	℃	℃	℃	MJ/時	%
2.2	1.1	76.3	59.7	16.6	4.7	26.8	50.5	23.7	2.8	19.8
3.9	1.1	76.3	54.9	21.4	6.0	26.8	51.4	24.6	5.0	35.3
5.2	1.1	76.3	52.4	23.9	6.7	26.8	45.7	18.9	5.2	36.7
6.0	1.1	76.3	49.5	26.8	7.5	26.8	45.2	18.4	5.4	38.1
13.6	1.1	76.3	40.9	35.4	9.9	26.8	36.9	10.1	6.4	45.2

*1 湿度 67.2%

*2 (上昇した空気²の熱量／お湯の総熱量 ((76.3℃-25℃) × 1.1L/分 × 60)) × 100

4. 回収した熱による戻し堆肥の乾燥

クロスパイル式熱交換器からの温風を小型堆肥乾燥試験装置（縦 1,000×横 500×高さ 500mm、有効容積 0.15m³）（図 18）に入れて、戻し堆肥乾燥試験を行いました。夏（平成 23 年 7 月 4 日～8 月 26 日）と冬期（平成 24 年 2 月 21 日～2 月 23 日）に、風量を変えて小型堆肥乾燥試験装置を用いて行った戻し堆肥乾燥試験結果を図 19、20、表 3 に示します。夏季と冬季ともに、外気を直接戻し堆肥乾燥に用いたのに比べて、温風を用いた方が乾燥が速くなることが分かりました。また、温風を用いた場合は、風量を変えても、1m³あたりの温風が堆肥から持ち出す水分量に大きな差はありませんでした。また、夏季と冬季ともに風量が大きいのほど乾燥時間が早くなりました。

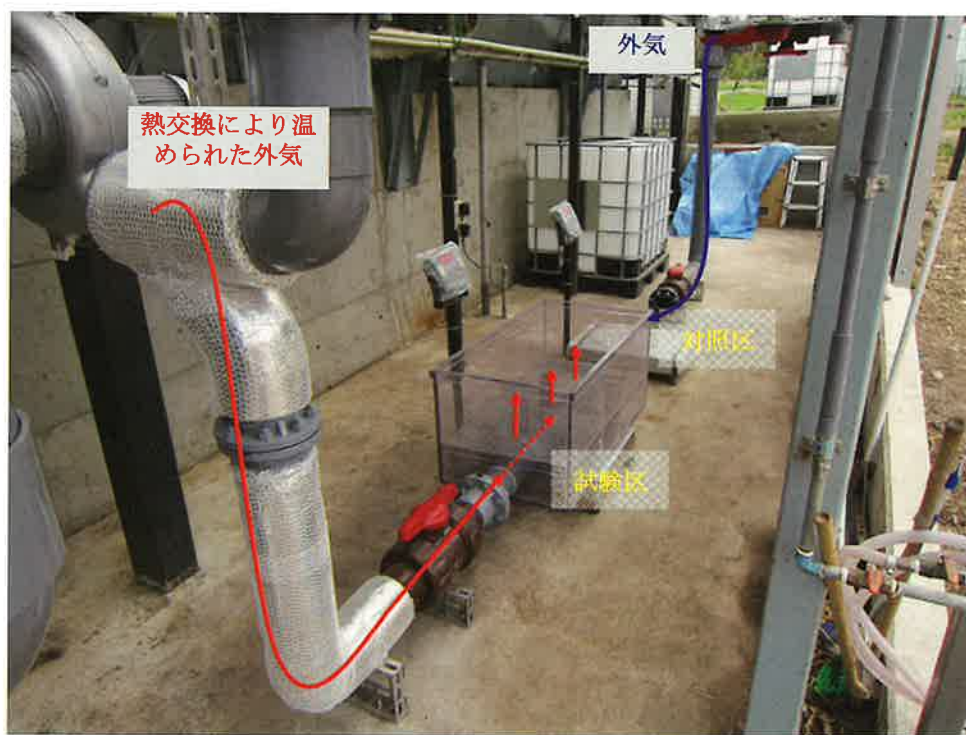


図18 小型堆肥乾燥装置の外観

（写真では、試験区のみ乾燥箱を設置してあります。）

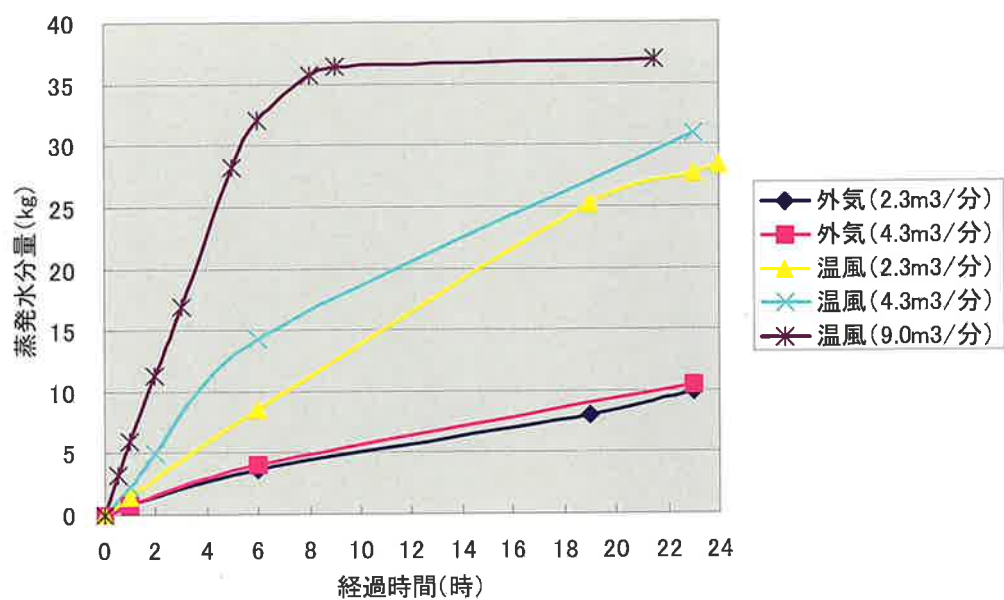


図19 夏期の堆肥乾燥試験における風量と蒸発水分量の影響

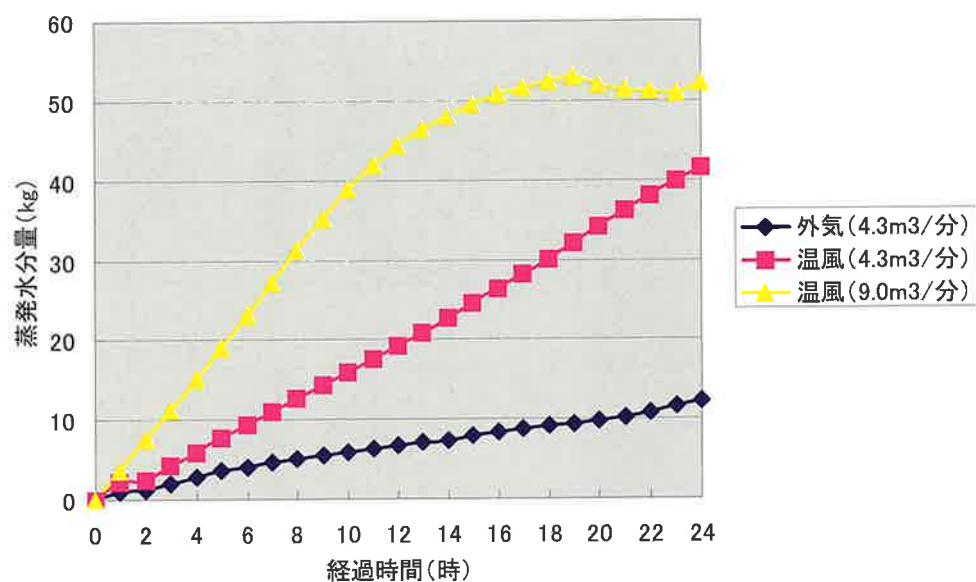


図20 冬期の堆肥乾燥試験における風量と蒸発水分量の影響

表3 小型堆肥乾燥装置による堆肥乾燥能力の各種条件間の比較

季節	試験開始時の風量 ($\text{m}^3/\text{分}$)	温風平均温度 (最大-最小)	温風平均湿度	戻し堆肥水分含量が68.0%から61.2%になるまでの乾燥時間 (時)	空気 1m^3 あたりの水分 蒸発量 (g/m^3)
夏 (温風)	9.0	59.1°C(60.4°C-51.4°C)	12.7%	2.56	10.5
	4.3	55.2°C(60.4°C-54.5°C)	15.2%	6.06	9.3
	2.3	56.3°C(59.2°C-50.4°C)	13.8%	14.5	10.4
夏 (外気)	4.3	26.8°C(34.0°C-22.0°C)	68.7%	22.9	2.4
	2.3	27.2°C(34.7°C-20.4°C)	64.2%	21.4	4.9
冬 (温風)	9.0	34.2°C(35.8°C-34.0°C)	8.1%	3.73	7.2
	4.3	28.4°C(34.2°C-22.4°C)	11.3%	14.6	6.1
冬 (外気)	4.3	5.4°C(11.4°C-1.0°C)	48.5%	22.6	2.5

次に、実規模堆肥乾燥設備（図 21、図 22）にて試験した結果を図 23 に示しました。

第 5 発酵槽に下部から温風を通気させない区（対照区）と温風を通気させる区（試験区）を設け（サンプリング地点は、図 21 参照）、風量 $34.1 \text{ m}^3/\text{分}$ 、熱交換後外気平均温度 37.8°C の条件にて 72 時間（実験農家が 3 日に一度堆肥を切り返す為、72 時間とした）乾燥後に堆肥の床からの高さ別に含水率を測定しました。その結果、対照区⑥地点の堆肥含水率は、0cm で 70.0%、30cm で 65.9%、60cm で 67.1%、90cm で 67.8%、120cm で 68.2%、全体の平均は 67.8% でした。試験区①～⑤地点を平均した堆肥含水率は、0cm（平均 20.9%）、30cm（平均 40.4%）、60cm（平均 57.8%）、90cm（平均 61.9%）、120cm（平均 62.3%）で、全体の平均は 48.7% でした。この乾燥設備の有効容積は 4.8 m^3 として、68.0% の戻し堆肥（2640kg、容積重 $550 \text{ kg}/\text{m}^3$ ）を 48.7%（1647kg、容積重 $343 \text{ kg}/\text{m}^3$ ）にできたので、3 日間で約 993kg の水を蒸発できたことになります。

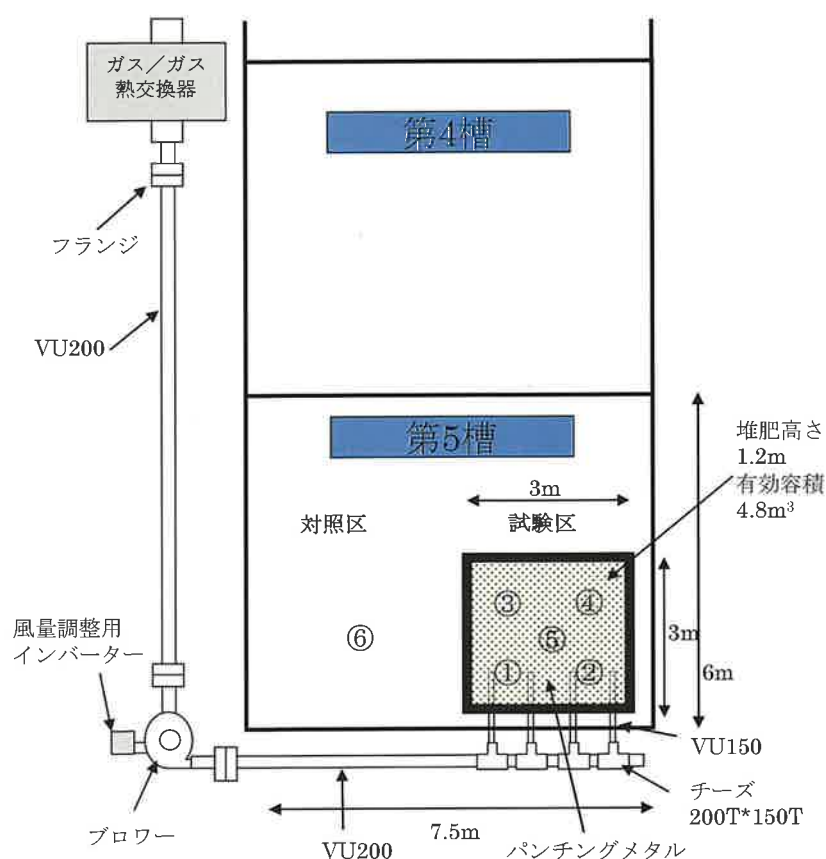


図21 実規模堆肥乾燥装置の平面図とサンプル採取地点（①～⑥）

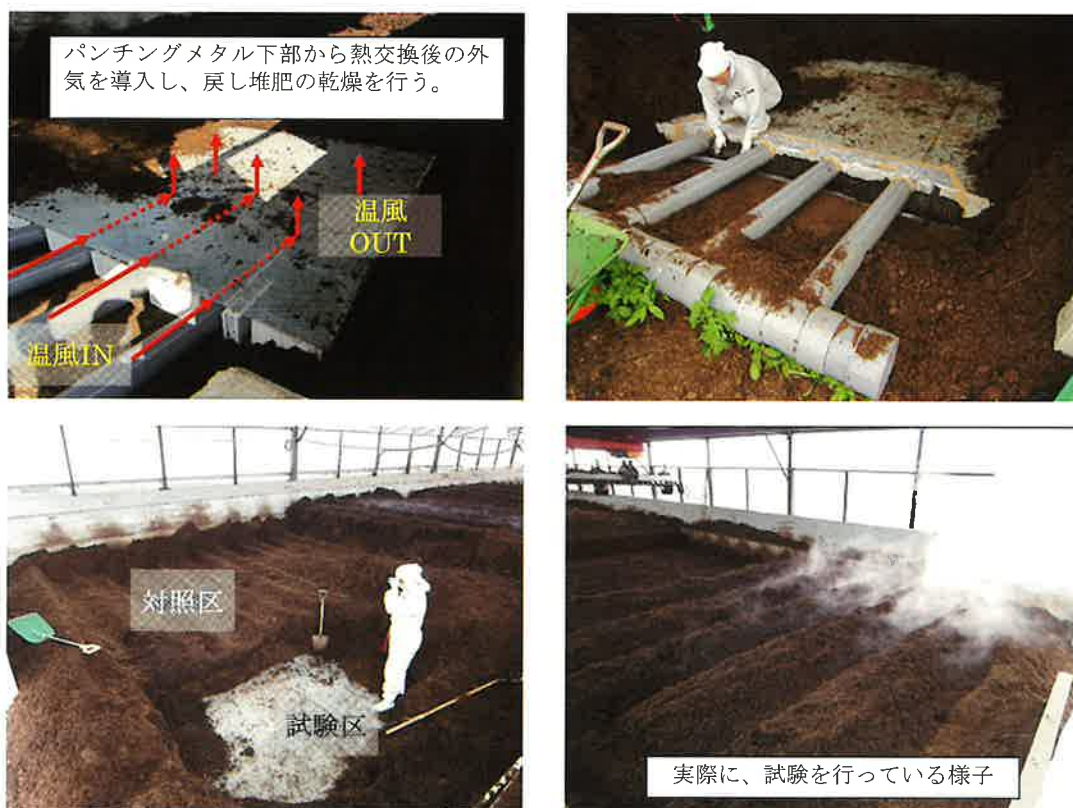


図22 第5発酵槽に設置した実規模堆肥乾燥設備

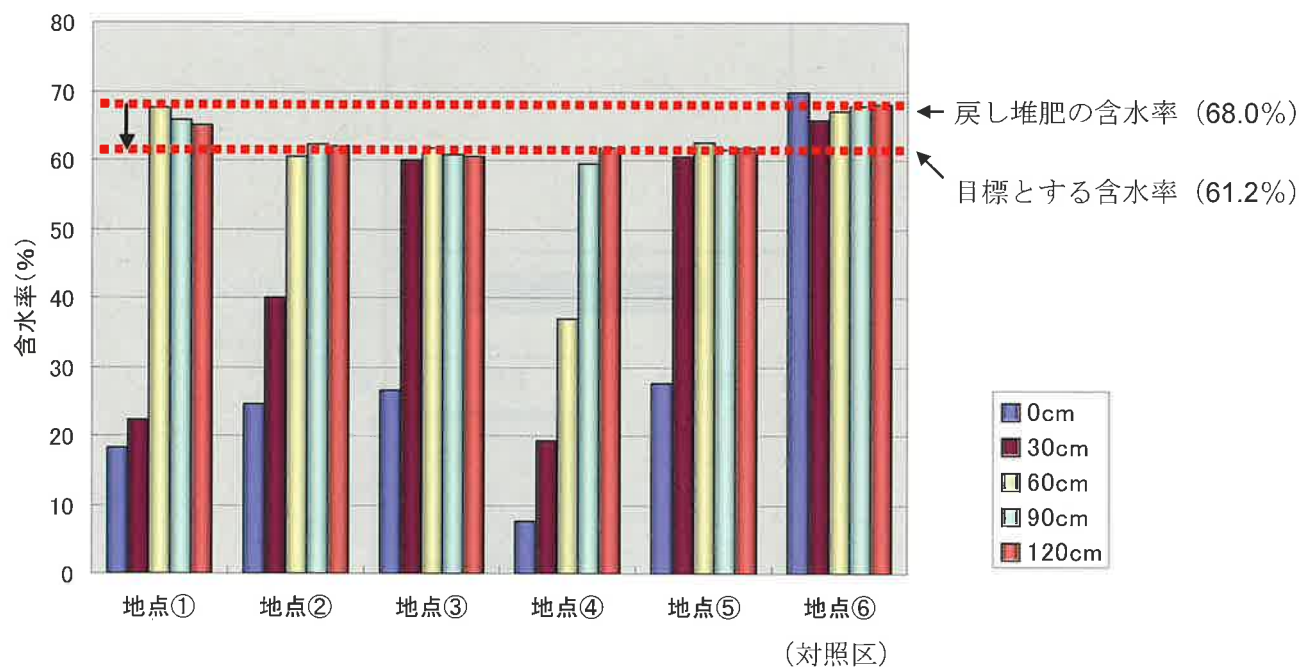


図23 実規模堆肥乾燥装置の各地点（図21）の堆積高さ別の含水率

5. 各処理法によるコスト計算

本試験を行った農場を想定して、処理費用を試算しました（表4）。この農場の飼養頭数は約120頭（搾乳牛と育成牛）で、一日あたりの糞尿の処理量は約7000kgです。糞尿貯留槽で3日分ごとに戻し堆肥と副資材が混合され、発酵槽に投入します。一日あたり、含水率68.0%の戻し堆肥6,300kg（11.5 m³、容積重550kg/m³）と含水率20.0%の副資材2,100kg（10.5 m³、容積重200kg/m³）を混合して、堆肥化を行っています。副資材1 m³あたり1,500円として5,748,750円／年の経費がかかっています。

ガス／ガス熱交換方法を導入して、副資材の消費量を30%減少させて1470kg（7.35m³/日）とした場合、48.7%まで含水率を低減した戻し堆肥1,829kg（5.33m³、容積重343kg/m³）と含水率68%の戻し堆肥3,363kg（6.11m³）を混合すれば、現行の堆肥化と同等の水分になります（図8参照）。実規模堆肥乾燥試験では、床面積4.0m²、堆肥積み上げ高さは1.2m（有効容積4.8 m³）の設備に34.1 m³/分の温風を3日間通気して堆肥乾燥を行いました。実際の堆肥化には3日間で16 m³の戻し堆肥（5.33m³/日）を乾燥させるので、必要な床面積は13.3m²（堆肥高さ1.2m）の乾燥設備と必要な風量が113.6 m³/分と見積もられました。外気を温めるのに要する熱量は13.1kJ/m³なので、必要な熱量は、113.6 m³/分×13.1kJ/m³×60=89.3MJ/時となり、必要なクロスパイル式熱交換器の必要台数は、（89.3MJ/時）／クロスパイル式熱交換器能力（26.8MJ/時）=3.3台となりました（イニシャルコストは4台で計算）。また、クロスパイル式熱交換器を2台連結させた時（図12）の吸引圧力は、風量34m³/分、外気温19.7℃の条件の時に約2,700Paでした。メーカーの聞き取り値から、この条件の時の推定圧力損失が約500Paとなるため、2台連結で約1,000Paとなります。また、

吸引側には6箇所の配管の曲がり（図12の外気吸引側参照）のうち4箇所の曲がりをなくすことで1,120Pa（1,700Pa/6箇所×4箇所）の圧力損失を低減できることが考えられました。この曲がりをなくし、圧力損失を2,700Paから1,120Paに低減した場合は、吸引ブロワの消費電力量を約40%低減できるとしました。その結果、減価償却を含めた経費は、現行の堆肥化を行っていた方法にくらべて、11.5%低減となり年間663,806円の経費削減になりました。

また、排気熱のカスケード利用の末端としてガス／水熱交換方法をガス／ガス熱交換方法に追加した場合、クロスパイル式熱交換器が2.7台あれば足りります（イニシャルコストは3台で計算）。その結果、減価償却を含めた経費は、現行の堆肥化を行っていた方法にくらべて、10.4%低減となり年間597,574円経費が低くなりました。ヒートポンプは、クロスパイル式熱交換器よりもコスト高になりました。ヒートポンプは、堆肥発酵熱よりも高い湯が作れるので、他の用途に適していると考えられました。

表4 試験牧場の各種処理による費用の試算結果

項目	値	単位	備考
諸原値			
飼養頭数（搾乳牛＋育成牛）	120	頭	
糞尿	58	kg／頭	
糞尿処理量	7,000	kg／日	
戻し堆肥（含水率68.0%）容積重	550	kg/m ³	
戻し堆肥（含水率61.2%）容積重	454	kg/m ³	
戻し堆肥（含水率48.7%）容積重	343	kg/m ³	
副資材量容積重	200	kg/m ³	
副資材単価	1,500	円／m ³	
電気料金単価	11.74	円／kWh	東北電力 低圧電力
現行の処理方法			
副資材重量	2,100	kg	
副資材容積	10.5	m ³ ／日	
副資材購入費	5,748,750	円／年	
戻し堆肥重量（含水率68.0%）	6,300	kg	

(表4の続き)

戻し堆肥容積(含水率 68.0%)	11.5	m³	
経費合計	5,748,750	円／年	
ガス／ガス熱交換			
副資材重量	1,470	kg	現行の処理方法の3割減
副資材容積	7.35	m³／日	
副資材購入費	4,024,125	円／年	
戻し堆肥(含水率 48.7%)重	1,829	kg／日	1,829kg (48.7%) +3,363kg (68.0%) →5192kg (61.0%)
戻し堆肥(含水率 48.7%)容積	5.33	m³／日	
戻し堆肥(含水率 68.0%)重	3,363	kg／日	
戻し堆肥(含水率 68.0%)容積	6.11	m³／日	
クロスパイル式熱交換器能力	26.8	MJ／時／台	堆肥の積み上げ高さは1.2mとする 戻し堆肥 5.33m³×3日分を乾燥できる床面積 13.3×15.1／4.0 外気(温度 23.9℃、湿度 23.9%、熱量 64.8kJ／m³) →温められた外気(温度 37.8℃、湿度 29.8%、熱量 77.9kJ／m³) 必要熱量 13.1×39.5×60/1000 イニシャルコストは、4台で計算
実規模堆肥乾燥試験装置の床面積	4.0	m²	
実規模堆肥乾燥試験の風量	34.1	m³／分	
必要な堆肥乾燥装置の床面積	13.3	m²	
必要な風量	113.6	m³／分	
温められた外気の熱量	13.1	kJ／m³	
必要熱量	89.3	MJ／時	
クロスパイル式熱交換器必要台数	3.3	台	
クロスパイル式熱交換器	345,000	円／台	
ガス／ガス熱交換器類	2,580,000	円／一式	
実規模堆肥乾燥設備	1,060,000	円／一式	クロスパイル式熱交換器2台、配管支持材(SUS)、気液分離槽含む ブロワ4台(2.2kW(KSB-H22、昭和電気))、パンチングメタル、塩ビ配管含む 機器設置費総額／6年
減価償却費	606,667	円／年	
乾燥用ブロワ電気消費量	33.12	kWh／日	34.1m³/分の時の消費電力(2.3kWh) →配管の曲げをなくすことで40%低減
1台あたりの電気料金	141,923	円／年	必要台数は3.3台の所、4台にすることで乾燥時間が早まる為、約20%低減
電気料金合計	454,152	円／年／4台	
経費合計	5,084,944	円／年	
ガス／ガス熱交換と排熱のカスケード利用としてガス／水熱交換を併せて利用			
副資材購入費	4,024,125	円／年	現行の処理方法の3割減。堆肥の調整法は、ガス／ガス熱交換器を用いた場合と同等
クロスパイル式熱交換器能力	26.8	MJ／時／台	堆肥の積み上げ高さは1.2mとする 戻し堆肥 5.33m³×3日分を乾燥できる床面積 13.3×15.1／4.0 外気(温度 23.9℃、湿度 23.9%、熱量 64.8kJ／m³) →温められた外気(温度 37.8℃、湿度
ガス／水熱交換器能力	6.2	MJ／時／台	
実規模堆肥乾燥試験装置の床面積	4.0	m²	
実規模堆肥乾燥試験の風量	34.1	m³／分	
必要な堆肥乾燥装置の床面積	13.3	m²	
必要な風量	113.6	m³／分	
温められた外気の熱量	13.1	kJ／m³	

(表4の続き)

必要熱量	89.3	MJ/時	29.8%、熱量 77.9kJ/m ³
クロスパイル式熱交換器必要台数	2.7	台	13.1×39.5×60/1000 イニシャルコストは、3台で計算
クロスパイル式熱交換器	345,000	円/台	クロスパイル式熱交換器2台、配管支持材(SUS)、気液分離槽含む 370L貯湯タンク込み 自動車用ラジエター、送液ポンプ、材料(鉄板、アングル、架台)、制作費含む ブロワ3台(2.2kW(KSB-H22、昭和電気))、 ブロワ1台(1.0kW(EP-125HT、昭和電気)) パンチングメタル、塩ビ配管含む 機器設置費総額/6年
ガス/ガス熱交換器類	1,935,000	円/一式	
ヒートポンプ	735,000	円/台	
ガス/水熱交換器類	482,750	円/台	
実規模堆肥乾燥設備	1,120,000	円/一式	
減価償却費	712,125	円/年	機器設置費総額/6年
乾燥用ブロワ電気消費量 (ガス/ガス熱交換器用)	21.60	kWh/日	34.1m ³ /分の時の消費電力(1.5kWh)→配管の 曲げをなくすことで40%低減
乾燥用ブロワ電気消費量 (ガス/水熱交換器用)	12.00	kWh/日	15.1m ³ /分の時の消費電力(0.5kWh)
電気料金 (ガス/ガス熱交換器用)	249,907	円/年/3台	必要台数は2.7台の所、3台にすることで乾燥 時間が早まる為、約10%低減
電気料金(ガス/水熱交換器用)	138,837	円/年/1台	
乾燥用電気料金合計	388,744	円/年/4台	
ヒートポンプ電気消費量	6.11	kWh/日	堆肥発酵熱をカスケード利用したときの電気 消費量(冬季のデータ)
ヒートポンプ電気料金合計	26,182	円/年	
経費合計	5,151,176	円/年	

6. 凝縮水と結露水の利用

熱交換器通過後のガスに含まれているアンモニアガスを、アンモニア除去装置(スクラバー)にて、硫酸やリン酸と反応させて回収した液体については、一次発酵が終了した堆肥へ添加し、肥料成分濃度に与える影響について研究されています(引用文献10)。今回試験したシステムでは、凝縮水と結露水があわせて135L/日回収されており、平均するとアンモニア濃度が2,470mg/L(アンモニア態窒素濃度1,920mg/L)ありました。窒素肥料成分としては0.2%程度と低いため、広域流通には適しておらず、濃縮等の操作が必要と考えられました。例えば、堆肥舎の周辺に栽培施設を設置

し、堆肥発熱で加温しながら速効性の窒素分の多い凝縮水で作物栽培するといった用途が考えられます。

7. 留意点とまとめ

以上のように、吸引通気式堆肥化方式により発酵熱を回収し、温風へ変換して戻し堆肥を乾燥するシステムについて紹介しました。これらのシステムを利用して、戻し堆肥の含水率を低下させ、現行の堆肥化に係るコストを低減できることを示しました。

発酵不良な堆肥では十分な熱量の回収ができません。また、堆肥生産の際に戻し堆肥の量が極端に多くなると、原料が発酵しない恐れがあります。戻し堆肥の使用を繰り返すと、堆肥の分解が進み微細になっていきます。その為、副資材を用いたときのように大きな空隙ができずに、通気性が悪くなるので十分な注意が必要です。

本試験では、ガス／ガス熱交換器を、アンモニア除去装置の前段に設置しましたが、結露水を極力低減するためにはアンモニア除去装置の後段に設置の方が望ましいことが考えられました。また、密閉縦型堆肥化装置に応用する場合は、粉塵の量が多く配管が詰まるので脱臭装置や粉塵除去装置を設置し、その後段に熱交換器を設置する事が望ましいと思われます。堆肥発酵由来のアンモニアガスや悪臭物質の濃度は、堆肥の発酵状態により左右されます。ヒートポンプへの発酵熱利用を考えた場合の問題点として、それらアンモニアなどの悪臭物質がスクラバー等で完全に取りきれない場合、ヒートポンプユニットの室外機に使われている銅やアルミなどが腐食を引き起こし、耐用年数が著しく低下することがあるため、実際の畜産現場での使用には注意が必要です。これらを防止するために、畜産環境に特化したヒートポンプユニットの開

発が望まれます（例えば、室外機にステンレスを多用することや、制御盤に銅の使用を減らし、外気に極力触れさせない構造など）。また、熱交換して温められた外気の温度を低下させないため、管の全長を短くしたり断熱材で覆ったりすることや、配管の曲がりを少なくし圧力損失を少なくして吸引ブロワの電気代をできるだけ少なくすることが重要である。

今後の展望として、この熱交換器は熱交換効率が高く、堆肥の発酵温度とほぼ同じ温度まで、外気を加温することができるので、戻し堆肥の乾燥だけでなく、冬期間の畜舎補助暖房や寒冷地等の堆肥発酵用の補助外気、販売堆肥の仕上げ乾燥など様々な用途が考えられます。ヒートポンプを用いれば、堆肥発酵熱よりも高い湯温を生産できるので、さらに用途が広がります。こういった新技術が、堆肥のもつ資源としての利用をさらに広めていくことになると考えられます。

引用文献

(文献 1) 吸引通気式堆肥化処理技術の開発(第 3 報). 阿部佳之・伊吹俊彦・宮竹史仁・本田善文、農業施設、38(4) : 249-262、2007.

(文献 2) 吸引通気式堆肥化処理による発酵熱の回収と利用. 小島陽一郎・阿部佳之、農業施設、42(2) : 51-58、2011.

(文献 3) 寒冷時の牛の飲水行動および飲料水温の影響. 鈴木省三・左 久・宮崎敏男、帯広畜産大学学術研究報、9 : 527-532、1975.

(文献 4) 乳牛の飲水量と飲水量に影響を及ぼす要因. 堂腰顕、酪農ジャーナル、62(7) : 12-14、2009.

(文献 5) 空気熱源式ヒートポンプを利用したハイブリッド暖房方式による投入エネルギーおよび CO₂ 排出量の削減効果. 川嶋浩樹・高市益行・馬場勝・安井清登・中野有加、野菜茶業研究所研究報告、7 : 27-36、2008.

(文献 6) ヒートポンプ暖房温室における暖房法の比較. 佐瀬勘紀・奥島里美・石井雅久・高倉直・林真紀夫、農業施設、40(3) : 177-184、2009.

(文献 7) III. ヒートポンプ・氷蓄熱システムを利用した低コスト・省エネ技術. 石田三佳、畜産技術、662 : 11-14、2010.

(文献 8) バルククーラの廃熱で給湯ができる CO₂ 冷媒ヒートポンプシステムの紹介. 向山洋・大竹雅久・山口賢太郎・石田三佳・四十万谷吉郎・長谷川三喜、冷凍、23-29、2007.

(文献 9) 牛乳熱利用ヒートポンプ給湯システムの開発. 保科秀夫、農業電化、2009 別冊特集号 : 2-6、2009.

(文献 10) 窒素の添加が二次発酵堆肥化過程の肥料成分濃度に及ぼす影響-吸引通気式堆肥化システムで回収されるアンモニアの添加方法-. 宮竹史仁・阿部佳之・本田善文、農業施設、41(2) : 79-86、2010.

本事例集は、家畜排せつ物の低コストエネルギー・副産物利用技術開発普及事業推進委員会の監修により作成されました。

【推進委員会名簿】

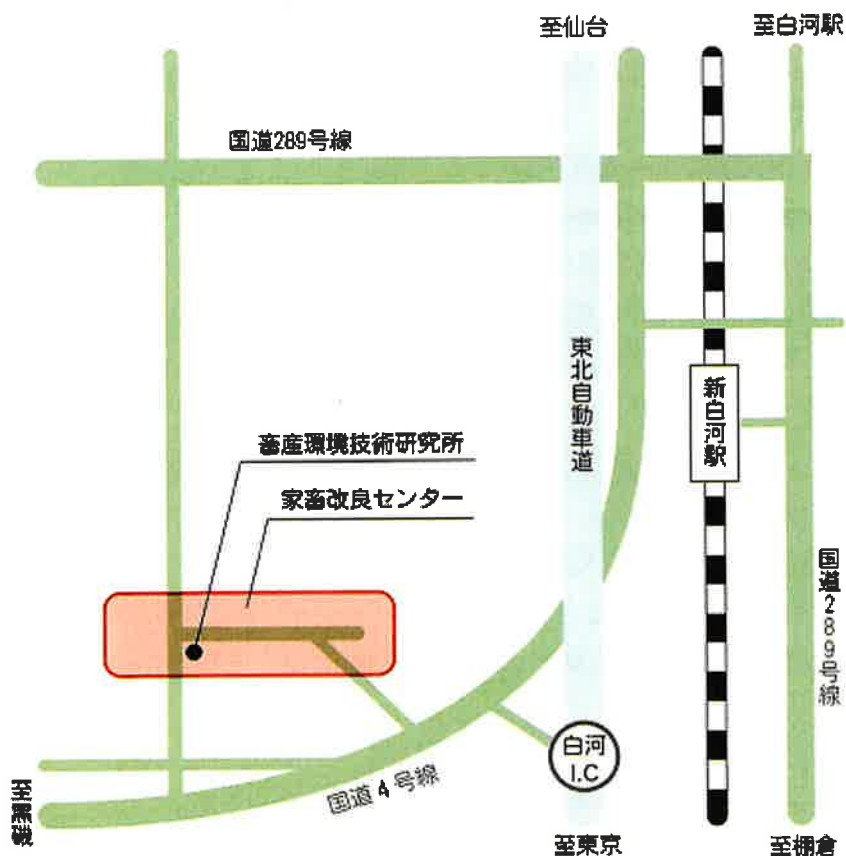
(敬称略、あいうえお順、◎は委員会座長)

梅津一孝 帯広畜産大学大学院 畜産衛生学専攻 教授
亀岡俊則 NPO 法人 バイオガスシステム研究会 理事長
東城清秀 東京農工大学大学院 農業環境工学部門 教授
本田善文 (独) 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター
◎柚山義人 (独) 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所
資源循環工学研究領域 資源循環システム 上席研究員
企画管理部 業務推進室 室長
薬師堂謙一 (独) 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター
バイオマスエネルギープロジェクトチーム プロジェクトリーダー

【執筆者名簿】

第1章 小島陽一郎 (独) 農業・食品産業技術総合研究機構
畜産草地研究所 家畜飼養技術研究領域
畜産バイオマス利用技術プロジェクト 研究員
第2章 小堤悠平 (財) 畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所 研究員
長峰孝文 (財) 畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所 主任研究員

畜産環境技術研究所 所在地



堆肥発酵熱の回収・利用技術の実例集

平成 25 年 3 月 5 日発行

発行：財団法人 畜産環境整備機構

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 5-12-1 (ワイコービル 2 階)

TEL 03-3459-6300 / FAX 03-3459-6315

編集および連絡先：財団法人 畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所

〒961-8061 福島県西白河郡西郷村大字小田倉字小田倉原 1

TEL 0248-25-7777 (代) / FAX 0248-25-7540

メールアドレス：ilet@chikusan-kankyo.jp

ホームページ：http://www.chikusan-kankyo.jp

