

密閉縦型堆肥化装置の省エネ化技術
『スマートコンポスト』

密閉縦型堆肥化装置の省エネ化技術『スマートコンポスト』

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
畜産研究部門 中久保 亮

はじめに

ふん尿処理は畜産経営を続けていく上で避けては通れない課題である。畜産農家にとって、ふん尿処理は履行すべき環境対策である反面、直接的なメリットの少ない経営コストといえる。しかし一方で、ふん尿由来の悪臭苦情は養豚経営の存続に関わる問題であり、ふん尿処理をないがしろにすることはあり得ない。適切な堆肥化を行うためには水分調整、切返し、ブローによる強制通気等、労力・経費が必要であり、これは堆肥の販売では到底賄いきれないコストである。

そこで筆者らは、ふん尿処理を経営負担から経営メリットへと転換する画期的な堆肥化関連技術として、堆肥発酵熱を活用した高度堆肥化システム『スマートコンポスト』を提唱し、実用化に取り組んでいる。その研究成果の中から、密閉縦型堆肥化装置の安定化・省エネ化を可能とする堆肥化関連技術として、堆肥発酵熱量を発酵指標とした通気制御システムについて紹介したい。

密閉縦型堆肥化装置の特徴および課題

密閉縦型堆肥化装置（図 1）は「コンポ」、「縦コン」といった通称で知られており、中小家畜を中心に広く全国に普及する堆肥化施設である（図 1）。密閉した装置内でふん尿を機械的に攪拌・強制通気するもので、従来の堆肥化方式と比較して発酵期間を短縮できること、縦型に設置するため省スペースであること、切返しや水分調整の手間を必要としないこと、密閉式であるため悪臭処理が比較的容易であること、といったメリットがあり、全国で 6000 基の普及実績を有する強制通気式堆肥化施設である。

堆積式堆肥施設がバッチ式（回分式）の堆肥化システムであるのに対して、密閉縦型堆肥化装置は水分の高い発酵原料を発酵槽内の水分 30～40%程度の乾燥堆肥と混合させることにより、発酵槽内で戻し堆肥による水分調整をしつつ堆肥化処理を行う、連続式の堆肥化システムである。発酵槽は断熱材で被覆されており、発酵熱を効率的に活用して高速度での発酵・乾燥処理を行うことが可能である。

高い処理能力の一方で、密閉縦型堆肥化装置のオペレータには高い管理能力が求められる。発酵槽内の堆肥水分が上昇すると、発酵原料の水分調整が不十分になる。その結果、通気性の低下に伴い好気性発酵速度が低下し、発酵熱量の低下により水分蒸発量が減少するため、さらに堆肥原料水分が上昇する、という悪循環に陥り、最悪の場合には発酵が停止する。また、堆肥水分の上昇により、発酵槽内で直径 10cm 程度の堆肥塊が形成されると、発酵槽下部の堆肥排出口からの堆肥排出が物理的に困難になり、連続式堆肥化が破綻する（図 2）。

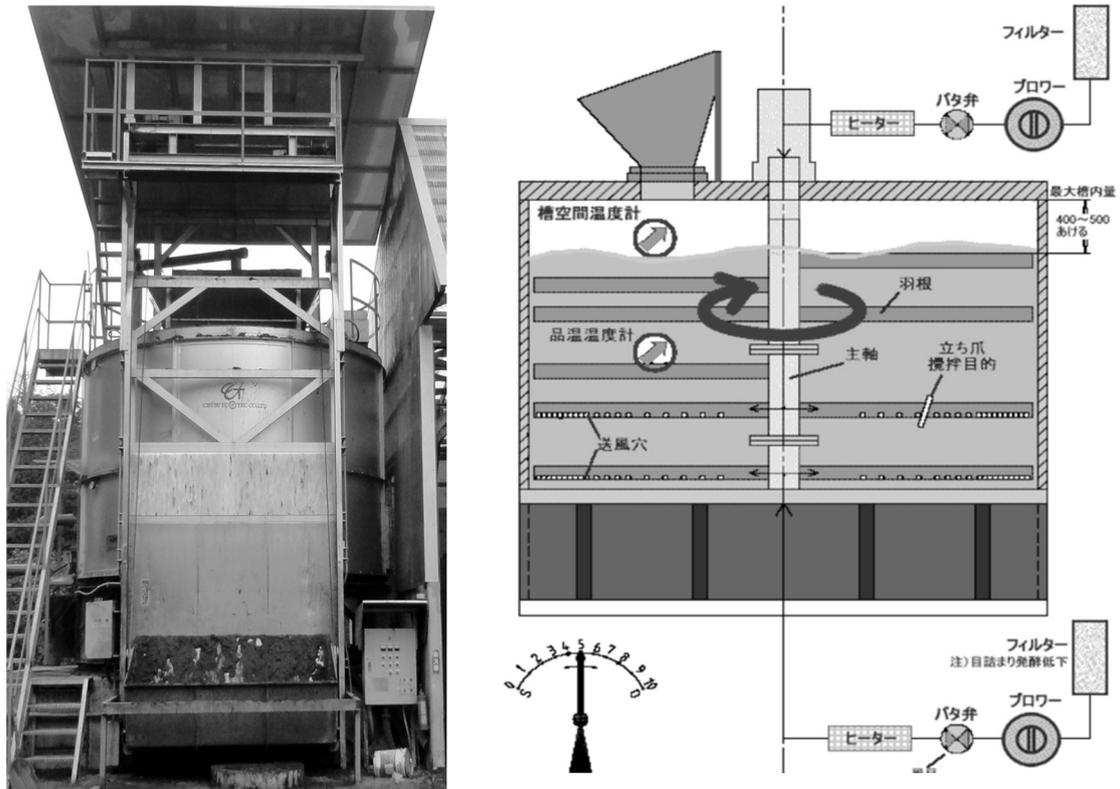


図 1 密閉縦型堆肥化装置の外観および構造（出典：中部エコテック株式会社 HP）



図 2 良好な発酵状態における排出堆肥（左図）
および発酵不良時に形成される堆肥塊（右図）

バッチ式の堆肥化では、発酵不良が次のバッチに悪影響を与えることはないが、連続式である密閉縦型堆肥化装置では、上述する悪循環から抜け出さなければ、一度発酵槽内の堆肥原料を全て排出し、再度発酵を立ち上げる必要があるが、オペレータの作業負担は非常に大きいことから、発酵不良を未然に防ぐ発酵管理が必要である。

一方で、良好な発酵状態においてもトラブルが発生する場合もみられる。発酵熱により発酵槽内の堆肥水分が一定以上に低下すると、過乾燥により堆肥粉塵が発生する可能性がある。発酵槽への通気により舞い上がった堆肥粉塵が、結露水により泥濁化して排気配管経路を閉塞し、通気不良により発酵状態を悪化させる（図3）。粉塵閉塞によるトラブルは、発酵状態の良好な密閉縦型堆肥化装置において、入気空気や堆肥原料の温度が高くなる夏季に散見される事象である。

このように、連続式堆肥化である密閉縦型堆肥化装置では、日々の発酵状態の変動を発酵槽温度や完成堆肥の状態から判断し、発酵状態に応じて発酵促進材である廃白土や堆肥原料の投入量を調整し、発酵槽内の堆肥水分を適切に調整することが重要となる。しかし、14日前後の滞留日数を有するため発酵状態の変動は緩慢であり、発酵不良の顕在化にはタイムラグが生じる。そのため、発酵制御はオペレーターの経験に依るところが大きく、不適切な発酵制御による発酵不良の発生が技術的な課題となってきた。



図3 排気配管経路内に設置したステンレスメッシュ製の簡易除塵フィルターに付着した泥濁化した堆肥粉塵

高い消費電力もまた、密閉縦型堆肥化装置の課題といえる。省スペース化や重力沈降を活用して発酵槽を攪拌する設計のため、縦長の発酵槽形状を有しており、同程度の処理能力を有する堆積式堆肥化施設と比較して、攪拌羽の駆動やブロワ通気に多くの電力が必要となる。筆者らの調査では、母豚 200 頭一貫経営農場において、密閉縦型堆肥化装置に年間 150 万円程度の電気料金を支払っていた。高い省スペース性や省労力性、水分調整剤の購入が不要であること、などのアドバンテージを考慮すれば、消費電力の高さは大きなデメリットとは言えないものの、改善すべき課題ではあるだろう。

そこで筆者らは、密閉縦型堆肥化装置の高い消費電力の主要因であるブロワによる強制通気に着目し、ブロワ通気量を低減することにより、安定化・省エネ化を可能とする通気制御システムの開発を試みた。

既往の通気制御システムの課題

堆肥温度は既往研究において最も一般的に使用されている発酵指標であり、堆肥温度を指標として通気量を制御する「堆肥製造方法および装置（特許第 5565773 号）」等の従来技術があり、普及事例も存在する。堆肥温度は堆肥化過程での有機物の分解に伴って発生する発酵熱を間接的に評価可能な発酵指標である。安価かつ簡便に測定が可能であり、発酵指標として広く一般に活用されている優れた発酵指標といえるだろう。

しかし、堆肥温度は入気熱量、排気熱量、発酵熱量、堆肥熱容量、発酵槽放熱量からの熱収支により決定されるものであるため、通気量の変化に伴う排気熱量の変動や原料水分の変化に伴う堆肥熱容量の変動などの不確定要素による影響を受けやすく、発酵状態を正確に把握することは難しい。例えば、通気量の低減により堆肥温度が上昇した場合において、通気量の最適化による微生物活性の増加によるものなのか、排気熱量の減少による発酵槽内への蓄熱によるものなのかを堆肥温度変化から判別することは不可能である。このため、原料投入毎に堆肥温度が大きく変動する密閉縦型堆肥化装置では、堆肥温度を発酵指標とした通気制御は困難だと考えられる。

また、堆肥化装置の排気中の二酸化炭素濃度を発酵指標として通気量を制御する「改良型堆肥化装置（特表 2000-500429）」等の通気制御システムも考案されている。微生物による有機物分解過程で発生する二酸化炭素は発酵状態を直接的に評価可能な発酵指標といえる。しかし、アンモニアや粉塵を含有する劣悪な空気環境である堆肥化装置の排気を測定する場合、センサ耐久性と測定精度との両立は困難であり、またセンサ価格も高額であることから、現場普及は進んでいない。

排気発酵熱量を発酵指標とした通気制御システムの開発

筆者らは、発酵状態を直接的に評価可能であり、かつ比較的容易に測定可能な発酵指標として排気発酵熱量に着目し、これを発酵指標とした通気制御シス

テムを考案した（特願 2018-069588）。

上述のように、連続式の堆肥化システムである密閉縦型堆肥化装置では、発酵槽内の堆肥水分を適切に保つことが良好な発酵状態を維持する上で重要である。密閉縦型堆肥化装置は文字通り密閉されており、水分は排気中の水蒸気として排気配管を経由して発酵槽が排出されるため、排出される水蒸気量は排気量と排気温度により決定される。密閉縦型堆肥化装置の排気中の水蒸気量は飽和状態であることから^{1), 2)}、排出される水蒸気量は、相対湿度 100%の排気空気の有する排気熱量に比例して増大する（図 4）。排気熱量は、入気熱量と排気発酵熱量との和であることから、排気発酵熱量を最大化する通気制御を行うことにより、発酵槽内の堆肥水分を効率的に低減し、発酵状態を良好に維持可能と考えた。排気発酵熱量は発酵による有機物分解により生じる発酵熱量と正の相関を有するため、排気堆肥温度と比較して、より直接的に好気性微生物の活性を表す発酵指標だといえる。

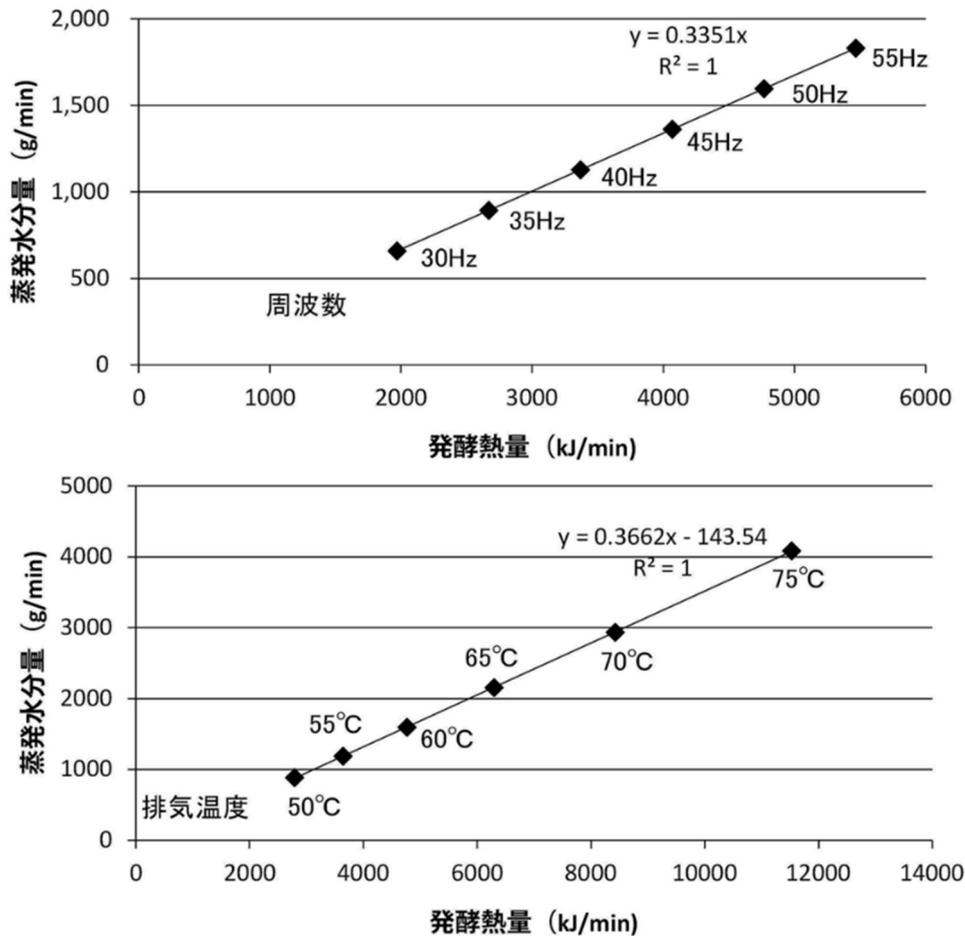


図 4 排気温度 60°Cにおいて周波数が変動（排気空気量変動）した場合の発酵熱量と蒸発水分量との関係（上図）、および周波数 50Hzにおいて排気温度が変動した場合の発酵熱量と蒸発水分量との関係（下図）
（実証農場に導入した伊藤鐵工所製ルーツブロワ IRS-125Rによる理論値）

そこで、図 5 に示した通気制御ロジックにより、ブロワ周波数を制御し、排気発酵熱量を最大化させるシンプルな通気性制御システムを考案した。

なお、排気発酵熱量は、既往の報告に基づく計算式により算出した^{2), 3)}。

①排気発酵熱量 H の算出

排気発酵熱量 H (kJ/min) を、ブロア周波数 R (Hz) (排気量はブロア回転数に比例)、排気温度 T_{out} および入気温度 T_{in} との関数として算出

②排気発酵熱量の現在値 $H(t)$ と過去値 $H(t-1)$ とを比較し、周波数変更幅 X を加減

$H(t)-H(t-1) > 0$ の場合は $R(t+1)=R(t)+X$ 通気量増加

$H(t)-H(t-1) < 0$ の場合は $R(t+1)=R(t)-X$ 通気量減少



図 5 排気発酵熱量を発酵指標とした通気制御ロジックの概要

排気発酵熱量を発酵指標とした通気制御システムの実証

考案した排気発酵熱量を発酵指標とする通気制御システムの実証試験を実施した。

【実験方法】

福島県の母豚 200 頭一貫経営の養豚場に既設の密閉縦型堆肥化装置（中部エコテック（株）S36 型）を使用した。通常時と同様の堆肥化条件で試験を実施し、発酵槽容積 39m³ に対して、豚ふんおよび浄化槽汚泥をそれぞれ 3 m³/day および 1 m³/day 投入した。

排気発酵熱量の算出には排気温度および排気量を測定する必要がある。しかし、堆肥粉塵を含有する排気量をリアルタイムに測定することは、実用上困難であるため、入気空気量と排気温度から、排気量を理論的に算出することとした。また、容易に入気空気量を算出するため、既往のリングブロワから回転数と入気空気量とに線形関係がなりたつルーツブロワ（伊藤鐵工所製ルーツブロワ IRS-125R）に送風機を変更し、ブロワ回転数を制御するためのインバータを導入した。PLC に上述の排気発酵熱量を発酵指標とした通気制御ロジックを実装し、消費電力量あたり排気発酵熱量で定義される堆肥化効率により、その効果を検証した。

ルーツブロワの周波数変更インターバル（排気発酵熱量の演算間隔）およびブロワ周波数変更幅の異なる 3 試験区を設定し（表 1）、通気制御システムによる安定化・省エネ化を評価した。

表 1 通気制御システムの実証試験におけるパラメータ設定

	対象区 (38Hz 固定)	通気制御区 1	通気制御区 2	通気制御区 3
周波数 (Hz)	38 (制御なし)	30～50	34～38	34～42
周波数変更 インターバル (min)	なし	3	2	2
周波数 変更幅 (Hz)	なし	1 (0.25m ³)	0.42 (0.1 m ³)	0.1Hz (0.025 m ³)

【結果と考察】

通気制御区 1 および 2 においては、発酵状態に追従した通気制御を行うことができず、周波数変更幅が不適切であると考えられた。それに対して、周波数変更インターバルを 2 分、ブロワ周波数変更幅を 0.1Hz に設定した通気制御区 3 では、発酵状態に追従して通気を制御可能であることが確認され（図 6）、また、堆肥化効率（排気発酵熱量／消費電力量）において、対象区と比較して約 8% の増加効果がみられ、開発した通気制御システムにより、密閉縦型堆肥化装置の発酵の効率化および省エネ化が可能であることが確認できた。また、ルーツブロワ換装前のリングブロワによる通気時の堆肥化効率との比較では、堆肥化効率は約 48% 増加した。既往のリングブロワによる通気には省エネ化の余地が大きく、開発された通気制御システムを導入することにより、発酵効率を大幅に改善可能であることが示唆された。

原料未投入時においては、設定された下限通気量近辺で通気制御されていることが確認された（図 7）。発酵熱量の減少に伴い適切に通気量が調整されたと考えられることから、粉塵発生の要因と考えられる過剰通気による過乾燥を未然に防ぐ上で、通気制御システムは有効である可能性が示唆された。

なお、本通気制御システムを導入した 2017 年以降、当該実証農場では密閉縦型堆肥化装置の不良発酵は発生しておらず、安定して稼働を続けている。

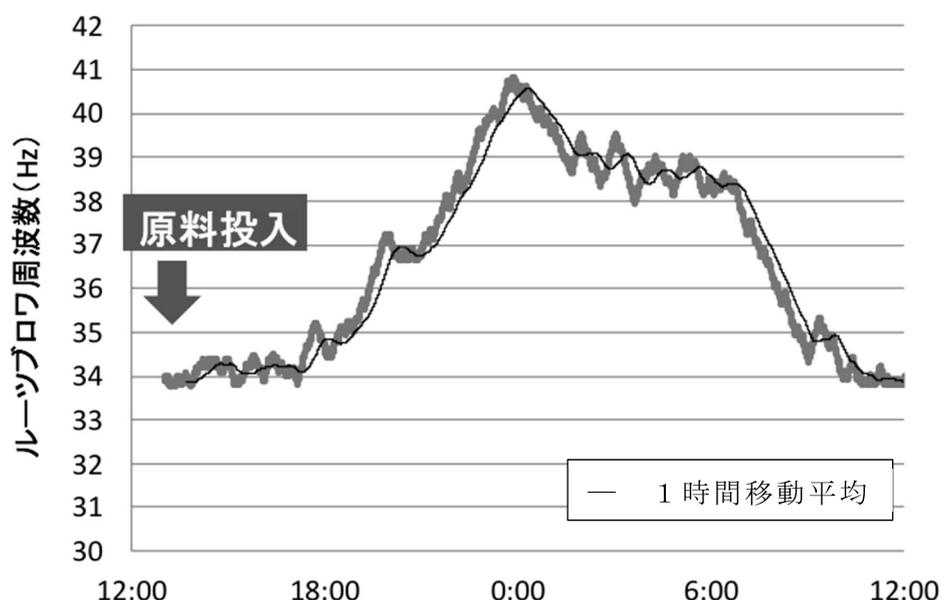


図 6 通気制御区 3 におけるブロワ周波数変化の実例
 (周波数変更インターバル 2 分、ブロワ周波数変更幅 0.1Hz)

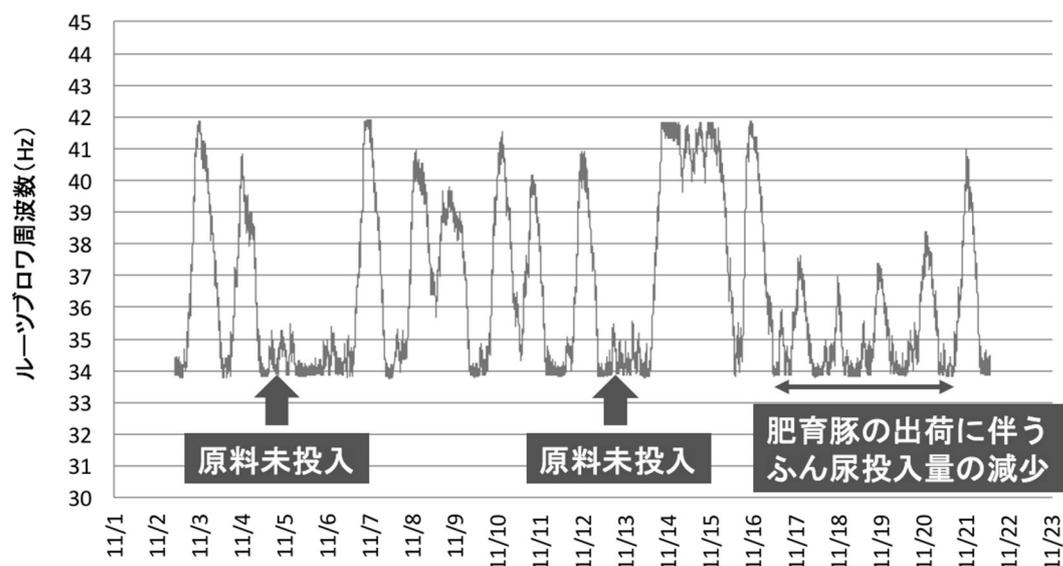


図 7 通気制御区 3 における原料未投入時および
ふん尿投入量減少時のブロー周波数変化の実例

今後の展望

現在、中部エコテック株式会社と共同で通気制御システムの商品化を目指して研究開発を進めている。今後、周波数変更インターバルやブロー周波数変更幅等の各種パラメータ設定をさらに詳細に検討することにより、通気制御システムの性能向上を図る計画である。

謝辞

堆肥発酵熱床暖房についての研究は、「イノベーション創出強化研究推進事業」による助成により実施されました（課題番号 28025C「畜産経営基盤強化に資する高度堆肥化システム（スマートコンポスト）の実証」）。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小島陽一郎、阿部佳之. 2011. 吸引通気式堆肥化処理による発酵熱の回収と利用-異なる副資材の混合が熱の回収量および利用量に与える影響. 農業施設農業施設 42(2), 51-58.
- 2) 川村英輔、高田陽、小島陽一郎. 2016. 密閉縦型発酵装置の発酵熱と回収可能熱量. 日本養豚学会誌 53(2), 21-31.
- 3) 岩渕和則、木村俊範. 1994. 家畜糞の好気性分解反応特性第 1 報. 農業機械学会誌 56, 67-73.

本資料より転載・複製する場合は国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構の許可を得てください。

畜産研究部門 平 30- 1 資料

平成 30 年度家畜ふん尿処理利用研究会資料

編集・発行 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 畜産研究部門
企画管理部企画連携室

Tel.029-838-8593、 Fax.029-838-8606

〒305-0901 茨城県つくば市池の台 2

発行日 平成 30 年 11 月 8 日

印刷所