〈論 文〉

高温好気発酵法による豚舎廃棄物の処理特性

李 瓚 雨* 多 田 千 佳** 西 村 修*
山 田 一 裕* 須 藤 隆 一*

Treatment Characteristics of Swine Waste in Thermophilic Oxidic Process

Chan-Woo LEE*, Chika TADA**, Osamu NISHIMURA*
Kazuhiro YAMADA* and Ryuichi SUDO*

* Graduate School of Engineering, Tohoku University, 06 Aoba, Sendai 980-8579 Japan

** Graduate School of Agriculture, Tohoku University (Science and Technology Promotion Foundation of Ibaraki, A research worker in the present), Aoba, Sendai 981-0914 Japan

Abstract

Effective treatment of livestock feces and urine is necessary to prevent surface and ground water from being polluted. In this study, thermophilic oxic process (TOP) was applied to the treatment of swine waste. The proper environment condition for the thermophilic bacteria was investigated. The results were summarized as follows: It was impossible to treat swine waste by TOP. As for the reason, the calorie of swine waste lacked for the calorie of water evaporation and temperature rising. However, it could be treated by adding food oil as an assistant calorie source. When BOD_5 load was $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$, aeration rate was $100 \text{ l} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ and 120 ml of food oil was added, 86% of carbon was converted to CO_2 and 98% of water was evaporated in one cycle. ATP concentration and the number of thermophilic bacteria became the highest values under 55% of average water content in one cycle. And in this experiment 7 hours for the duration time of over 60°C in one cycle was suitable for maintaining 55% of average water content. The temperature condition of over 60°C was also very important to increase microbial activity.

Key words: swine waste, thermophilic oxic process, water content, thermal balance, ATP concentration,

1. はじめに

現在、日本における家畜ふん尿はすでに農地の受容能力の限界に達したと推定されており、家畜の飼養頭数には地域的な偏りがあることもあって、地域によっては家畜ふん尿由来の窒素が河川水中の硝酸態窒素濃度を $20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上に高める場合もあることが報告されている¹⁾。特に豚の場合は輸入飼料に依存した集約的大規模飼育がすすみ²⁾、ふん尿処理の問題はきわめて深刻になっている。豚ふん尿処理は、ふん量に比べ尿量が多い性状に鑑み、ふんと尿を分離してふんはコンポスト化、尿は活性汚泥法などを用いて処理することが基本とされている³⁾。しかし、不十分な固液分離によって多量の副資材や希釈水が必要となるなどの問題が発生する。また、コンポストを還元する圃場面積が十分確保できず、屋外に放置され新たな負荷源となることも多い⁴⁾。さらに豚舎管理から見るとふん尿を豚舎内で分離するシステムで

は省力化、省エネルギー化が困難である。また、悪臭およびハエの発生など環境問題につながりやすいという問題が挙げられる⁵⁾。一方、ふん尿混合で搬出して処理するシステムでは負荷が大きくなり、新たな固液分離装置の設置など污水处理施設の規模が大きくならざるを得ない。しかしながら、省力化、衛生管理の面から考えると、ふん尿混合水洗式が将来の方向性の一つとして重要であり、それに伴い豚舎から発生する高濃度排液を適切に処理する方法が強く求められている。このような高濃度排液の処理方法の一つとして高温好気発酵法が注目されている^{6,7)}。本法の原理は、コンポスト化と同様で反応槽に担体として充填した木材チップなどに高温好気微生物を付着させ、その微生物により投入した有機物を二酸化炭素まで分解する処理法である。特徴としては、反応槽への有機物投入速度は有機物分解速度と同程度とするためほぼ完全に分解し、汚泥発生量はきわめて低く抑えられること、有機物分解の際に発生する熱により排液中の水

* 東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06

** 東北大学大学院農学研究科（現茨城県科学技術振興財団研究員） 〒981-0914 仙台市青葉区堤通雨宮町1-1

分を全て蒸発させること、中温菌と比べて基質摂取速度と自己分解速度が大きい高温菌を利用するので有機物分解が速いこと⁸⁾などが挙げられる。本法はSS濃度の高い高濃度有機排液である食品加工排液、醸造排液、濃縮余剰汚泥などに適用が可能であり、水分制御のために不足する熱源を加えることで処理ができることが明らかとなっている⁹⁻¹¹⁾。一方、豚ふん尿に対しても熱源を加えて処理できることが報告されている^{12,13)}。しかし、効率的な処理を行うためには、高温細菌の活性度を高い状態に保つための適切な環境条件を明らかにする必要がある。特に本法では好気発酵により発生する熱を利用して高温状態に保つこと、および水分を蒸発させることの2つの目的を同時に達成することが重要であるため熱収支を解析評価する必要がある。

そこで、ふん尿混合式で発生するものに近い含水率90%に調節した豚ふん尿を用いて、高温好気発酵法における補助熱源無添加系と添加系の二つの実験を行い、熱収支と微生物の活性度を解析し、高温細菌にとって適切な環境条件および環境条件創出手法を明らかにするための検討を行った。

Table 1 The characteristics of swine waste

Items	Concentration (mg · L ⁻¹)
BOD	40,000
COD	35,000
TOC	31,000
T-N	5,000
T-P	1,900
Calorie*	4,496
Water content**	90

* Calorie ; kcal · kg-solid⁻¹, ** Water content ; %

Table 2 The characteristics of food oil

Items	Concentration (g · L ⁻¹)
TOC	395
T-N	ND**
T-P	ND**
Calorie*	9,073

*Calorie ; kcal · kg⁻¹, **ND ; not detected

2. 実験方法

2.1 実験試料

豚ふん尿を採取した宮城県のA養豚場は平床式でふんと尿は分離されている。このふんの含水率は87%であった。そこで、供試豚ふん尿はふん尿混合処理を想定し、養豚場から豚ふんと尿を別々に採取して含水率が90%になるように調整後使用した。Table 1に調整済み豚ふん尿の性状を示す。豚ふん尿は4℃の低温室に保存して実験に供した。補助熱源としては市販の食用油を用いた。その性状はTable 2に示す。担体は市販のコンポスト化用杉チップの中から長さが2～5 mmのものを選別して使用した。

2.2 実験装置

実験には内径310mm、幅250mm、有効容量19lの円筒形の小型高温好気発酵実験装置を用いた。実験装置をFig. 1に示す。熱損失を少なくするために反応槽を保温マントルで覆った。熱電対を反応槽の中心に差し込み、自動的に温度を記録した。反応槽の下部に多孔性のアクリル板を設置して空気分散とドレイン水の排出を図り、供試豚ふん尿の漏出を防ぐため担体を充填した。また、反応槽を天秤の上に設置して混合物の重さを連続測定した。空気はコンプレッサーを用いて反応槽下部から24時間連続で送り、フローメータで通気量を調節した。

2.3 実験条件

実験に先立って反応槽に杉チップ（含水率は43%）を2.26kg充填し、そこに種菌として豚ふんで作製したコンポストを300g添加した。類似の処理法であるコンポスト化の適正含水率が50%～60%であることから¹⁴⁾、反応槽内の混合物の初期含水率が50%になるように水道水を用いて調節した。

2.3.1 有機物負荷および通気量を変えた連続実験（補助熱源無添加系）

1サイクルは24時間とし、24時間に1回の頻度で所定量の供試豚ふん尿を投入した後約10分間攪拌を行い、一定量の空気を連続で送った。供試豚ふん尿の1回の投入量をBOD₅負荷として1, 3, 5, 7 kg·m⁻³·day⁻¹まで、通気量を30, 50, 100, 200 l·m⁻³·min⁻¹まで変化させ、それぞれを組み合わせることで処理特性を検討した。

2.3.2 C/W比を変えた連続実験（補助熱源添加系）

供試豚ふん尿のBOD₅負荷を3 kg·m⁻³·day⁻¹にして補助熱源として食用油の添加量を0 ml, 60ml, 120ml, 180mlまで変化させたが、それぞれのC/W比は1.5,

Fig. 1 Schematic diagram of the thermophilic oxic process

Table 3 Experimental conditions in food oil added system

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4
Swine waste BOD ₅ load (kg · m ⁻³ · day ⁻¹)	3	3	3	3
Addition quantity of food oil (mL)	0	60	120	180
Total input calorie (kcal)	407	878	1349	1820
Calorie of vaporization of water in swine waste (kcal)	266	266	266	266
C/W ratio	1.5	3.3	5.1	6.8

Notice : The C/W ratios were calculated using the calorie data of swine waste and food oil. The latent heat of vaporization of water is 569.1 kcal · kg-H₂O⁻¹ at 50°C.

3.3, 5.1, 6.8となる。C/W比とは反応槽内に投入された排液中の有機物が持つ発熱量と投入された排液中の水の蒸発潜熱の比である⁹⁾。これらをRUN 1, 2, 3, 4とした。また、試料は24時間に1回の頻度で投入した後約10分間攪拌を行い、通気量はいずれも100 l · m⁻³ · min⁻¹として連続で送り、その処理特性を検討した。運転条件はTable 3に示す。

2.4 分析方法

豚ふん尿と食用油の性状分析 (BOD, COD) は下水試験方法に準じた¹⁵⁾。TOCの測定はTOC-5000 (Shimadzu)を用いた。豚ふん尿と食用油のカロリーはデジタルカロリーメータ (O.S.K.-200) で、T-NとT-PはAuto analyzer (テクニコン)を用いた。反応槽内の混合物の含水率はサンプル約3gを採取し、105°Cで約3時間乾燥して前後の重量差から求めた。排気ガスの採取はテドラバッグを用いて1サイクル中3時間毎に行い、Gas chromatograph (Shimadzu, GC-8 A)でCO₂ガス濃度を測定した。高温細菌数はBeffaらの方法¹⁶⁾を改変して以下に述べる方法を用いた。滅菌水1 lに乾燥ブイヨン8gと高温細菌の栄養としてコンポスト抽出液を100 ml入れ、pH7.2に調節し、ゲルライト8gを用い、ゲルライトの補助凝固剤としてCaCl₂ · 2 H₂O 0.8gを添加し¹⁷⁾、121°C、15分間のオートクレーブ滅菌後平板培地を作成した。実験装置から採取した3gのサンプルを0.85%生理食塩水で10倍希釈して30分間振とう後、段階希釈し平板に塗抹し、60°Cで1日間培養後計数した。コンポスト抽出液は種菌として用いたコンポストを0.85%生理食塩水で10倍希釈し、ガーゼで濾過したものを遠心分離 (3000rpm) し、上澄みを用いた。ATP濃度は実験装置から5gのサンプルを採取して100 mlの滅菌水に入れ、1分間超音波をかけた後、光電子計数法でUDP-8000 (明電舎) を使用して測定した。

2.5 物質収支

物質収支 (水収支、炭素収支) は温度、混合物の重さ

の変化が定常状態になった後、1サイクルの収支として求めた。水収支は以下のように計算した。水収支での総投入水量は反応槽内への蓄積量、蒸発量とドレイン水となる。有機物の分解に際して水分が発生することを考慮して総投入水分量は投入した供試豚ふん尿中の水分量と処理過程中発生する水分量の和とした。豚ふん尿の場合、有機物1kgが100%分解すると0.7kgの水分量が発生することを仮定した¹⁸⁾。補助熱源として用いた食用油の場合、主成分はリノール酸¹⁹⁾であり、理論値としてリノール酸1kgの分解に対して約1kgの水分が発生する。そこで、豚ふん尿と食用油それぞれの分解率は総炭素分解率 (炭素収支より求まる) と同じになると仮定して処理過程中発生する水分量を求めた。蓄積水分量は供試豚ふん尿の投入前後の混合物の含水率を測定し、混合物の重量に乗じることにより求めた。また、ドレイン量は直接計測しているの、総投入水分量から蓄積量、ドレイン量を引いて蒸発量を求めた。

炭素収支での総投入炭素量は反応槽内への蓄積量、ガス転換量とドレイン水中の炭素量となる。炭素収支の計算は、投入炭素量は供試豚ふん尿と補助熱源の全有機炭素 (TOC) を測定し、投入量に乗じて求めた。ガス転換量は排気ガス中のCO₂ガス濃度を測定し、それを通気量に乗じて求めた。ドレイン水中炭素量はドレイン水の全有機炭素を測定し、ドレイン量に乗じて求めた。また、蓄積量は総投入炭素量からガス転換量、ドレイン水中炭素量を引いて求めた。

3. 実験結果

3.1 処理特性に及ぼす有機物負荷および通気量の影響 (補助熱源無添加系)

豚ふん尿を効果的に処理するためには発熱量と熱損失量がバランスしながら高温状態で反応が進行する条件を見出すことが重要である。発熱量は有機物負荷および通気量に大きく左右されることから、豚ふん尿のBOD₅負荷を1から7 kg · m⁻³ · day⁻¹まで、通気量は30から200 l · m⁻³ · min⁻¹まで変化させ、それぞれの条件を組み合わせた場合の処理期間中での温度を検討した。その結果はFig. 2に示す。いずれの条件でも1サイクルでの最高温

Fig. 2 The relation among aeration rate, BOD₅ load and maximum temperature

Fig. 3 The changes in temperature and water content; BOD_5 load is $3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ and aeration rate is $50\text{l}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min}^{-1}$

度は 60°C 以上には上がらなかったが、 BOD_5 負荷 $3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ 、通気量 $50\text{l}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min}^{-1}$ の場合に約 50°C まで上がり、最も高い温度を示した。この条件での温度と含水率の経日変化を Fig. 3 に示す。ピークを持つ一つの曲線が1サイクルでの温度変化である。運転開始から4日目までは1サイクル中の最高温度がほぼ 50°C に達していたが、それ以後は温度上昇が小さくなり、最高温度が下がる傾向が見られた。10日目には最高温度も 30°C を下回り、処理ができなくなった。その時の含水率は約80%であり、運転開始前の初期含水率50%と比べて非常に高い値であった。

3.2 処理特性に及ぼす C/W 比の影響 (補助熱源添加系)

補助熱源として食用油を用いて C/W 比を変化させた場合の処理特性について検討を行った。Fig. 4 に各 RUN での1サイクルにおける温度変化を示す。RUN 1 は運転開始から10日目に処理ができなくなったため運転開始から6日目、RUN 2, 3, 4 は運転開始から16日目の温度変化である。C/W 比が高くなると温度が上がる傾向が見られたが、 80°C 以上には上がらなかった。コンポスト化における最適な温度条件は 60°C とされているが¹⁴⁾、C/W 比が高くなると 60°C 以上の高温を維持する時間が長い傾向が見られ、RUN 1 は0時間、RUN 2 は約4時間、RUN 3 は約7時間、RUN 4 は約12時間であった。各 RUN での1サイクルにおける重量減少率の経日変化を Fig. 5 に示す。重量減少率は1サイクル前の反応槽内の混合物の重量に対して1サイクル後の重量の減少分から求めた。定常状態になった4日目からの重量減少率は、RUN 1 は平均約18%、RUN 2 は平均約61%、RUN 3 は平均約90%、RUN 4 は平均約83%になった。このときの、1サイクルにおける炭素および水の収支を Fig. 6, 7 に示す。RUN 1 は運転開始から6日目、RUN 2, 3, 4 は運転開始から16日目の収支である。RUN 1 は総投入炭素量 (18.6g) の約78% (14.6g) が分解、ガス化した。その時発生する熱により総投入水量 (750.4g) の約63% (473.9g) が蒸発した。RUN 2 は総投入炭

The data are from RUN 1 after day 6 and RUN 2,3,4 after day 16

Fig. 4 The changes in temperature during one cycle

Fig. 5 The changes in percentage of weight loss to initial weight in one cycle

■ Accumulation (g) □ Gasification (g) ■ Drain (g)

The data are from RUN 1 after day 6 and RUN 2,3,4 after day 16

Fig. 6 Carbon balance

素量 (42.3g) の約66% (27.8g) が分解し、総投入水量 (741.1g) の約93% (690.8g) が蒸発した。RUN 3 は総投入炭素量 (66g) の約86% (56.7g) が分解し、総投入水量 (868.8g) の約98% (848.7g) が蒸発した。RUN 4 は総投入炭素量 (89.6g) の約75% (67.3g) が分解したが、総投入水量 (856.3g) の約103% (879.3g) が蒸発し、反応槽内の混合物の乾燥が進行した。以上の結果より、

Fig. 7 Water balance

Fig. 8 The changes in water content and temperature in RUN 3

本実験では RUN 3 (C/W 比 5.1) が適切な運転条件になることが分かった。Fig. 8 に RUN 3 での処理期間中の温度と含水率の経日変化を示す。運転期間中、温度変化は最低約 25°C から最高約 75°C の範囲での規則的な変化を繰り返し、含水率は 20 日間処理が続いた後も平均 55% で安定していた。

3.3 微生物活性に及ぼす C/W 比の影響

Fig. 9 に各 RUN での高温細菌数の経日変化を示す。初期の高温細菌数は約 $10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ で各 RUN とほぼ同じであったが、時間とともに増加し、RUN 1 は 5 日後に約 $10^6 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 、RUN 2 は 10 日後約 $10^9 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 、RUN 3, 4 は 10 日後約 $10^{11} \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ で一定となった。C/W 比が高くなると高温細菌数が増える傾向にあったが、RUN 3 と 4 には差がなく $10^{12} \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上には増加しなかった。Fig. 10 に各 RUN での高温細菌数と ATP 濃度を示す。RUN 1 は運転開始から 6 日目、RUN 2, 3, 4 は運転開始から 16 日目の値である。高温細菌数の多い系ほど ATP 濃度が高い傾向が明らかであり、RUN 3 において他より高い高温細菌数と ATP 濃度が認められた。

Fig. 9 The changes in number of thermophilic bacteria

The data are from RUN 1 after day 6 and RUN 2,3,4 after day 16

Fig. 10 The relationship between number of thermophilic bacteria and ATP concentration

4. 考 察

4.1 高温好気発酵法の熱収支

高温好気発酵法は有機物の生分解で発生する熱を利用するため処理期間中の熱収支を解析することが重要である。ここでは補助熱源無添加系で処理が良好であった条件 (豚ふん尿の BOD_5 負荷が $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ 、通気量が $50 \text{ l} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ 、C/W 比 1.5) と補助熱源添加系で処理が良好であった条件 (豚ふん尿の BOD_5 負荷が $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ 、通気量が $100 \text{ l} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ 、食用油添加量 120 ml、C/W 比 5.1) での熱収支を求めた。解析には補助熱源無添加系 (コントロール系) は高温好気発酵が良好な状態であった運転開始から 4 日目、また補助熱源添加系は運転開始から 16 日目の時点でのデータを用いた。1 サイクルにおいて総投入理論熱量 (E_i) は水分蒸発に必要な熱量 (E_w)、反応槽内の混合物の温度を上昇させるための熱量 (E_s)、未反応熱量 (E_n)、反応槽と排気から失われる熱量 (E_l) で消費される²⁰⁾。

$$E_i = E_w + E_s + E_n + E_l \quad (1)$$

E_w = Latent heat removed by evaporation of water ($569.1 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{H}_2\text{O}^{-1}$)

$$\begin{aligned} & \times \text{Evaporated water (kg)} \quad (2) \\ E_s &= [\text{Amount of water in reactor (kg)} \times \text{Specific} \\ & \text{heat of water} \\ & (0.999 \text{kcal} \cdot \text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1}) + \text{Amount of} \\ & \text{cedar chip in reactor (kg)} \\ & \times \text{Specific heat of cedar chip (0.6kcal} \cdot \text{kg} \\ & \cdot \text{cedar chip}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1})] \times \Delta T^\circ\text{C} \quad (3) \\ E_n &= E_i (\text{kcal}) \times [1 - (\text{CO}_2 \text{ gas conversion rate} \\ & (\%) / 100)] \quad (4) \end{aligned}$$

E_i は熱量計を用いて求めた豚ふん尿と食用油の熱量から計算した。 E_w , E_s , E_n は上記の式(2)~(4)を用いて計算した。 E_s の計算には混合物の中で杉チップとそれに吸収された水分を考慮した。杉チップの比熱は Yang らの値⁹⁾を用いた。ここで、 ΔT は 1 サイクルにおける最初の温度から最後の温度までの温度変化の値とした。 E_i は式(1)を用いて求めた。その結果を Fig. 11 に示す。補助熱源無添加系の熱収支を見ると、 E_i は Table 3 により 407 kcal である。4 日目の CO_2 ガス転換率が約 78% になるため、 E_n は式(4)により 90 kcal になる。 E_w , E_s , E_i は上記の式を用いて計算した結果、それぞれ 270 kcal, 25 kcal, 22 kcal になる。 E_s の計算では、4 日目の反応槽内の温度変化は初めに 31°C から 50°C まで上がった後 36°C まで下がったので、熱収支を 1 サイクルで考えると、 ΔT は 5°C になる。つまり、実験装置内の温度が 50°C までの上昇に使われる熱量は 95.8 kcal になるが、36°C までの温度下降により熱が失われ、1 サイクルから見ると 25 kcal が温度上昇に使われる。発生した熱量 ($E_i - E_n$) 317 kcal は投入された水分量と処理過程中発生する水分量の和 750.4 g の蒸発に必要な理論熱量 427 kcal に不足し、しかも水分蒸発以外に失われる熱量 E_s と E_i に 47 kcal が使われ、実際に水分蒸発には 270 kcal しか使われなかった。その結果、1 サイクルでの水分の蓄積が起これ、温度上昇が不十分になるため処理が継続できなくなる。補助熱源添加系の熱収支を見ると、 E_i は Table 3 により 1349 kcal

E_w = Calorie used for the evaporation (kcal)
 E_s = Calorie used to increase the temperature of mixture (cedar chip and water) (kcal)
 E_i = Loss calorie from the wall of the reactor and aeration (kcal)
 E_n = No reaction calorie (kcal)

Fig. 11 Thermal balance

で 16 日目の CO_2 ガス転換率が約 86% になるため、 E_n は 189 kcal になる。 E_w , E_s , E_i はそれぞれ 483 kcal, 14 kcal, 663 kcal となる。 E_s の計算では、16 日目の反応槽内の温度変化は初めに 28°C から 70°C まで上がった後 32°C まで下がり、 ΔT は 4°C になる。実験装置内の温度が 70°C までの上昇に使われる熱量は 142 kcal になる。発生した熱量 ($E_i - E_n$) は 1160 kcal になる。 E_w には 483 kcal が使われたが、これは投入された水分量と処理過程中発生する水分量の和 868.8 g の蒸発に必要な理論熱量 494 kcal の約 98% に相当し、蒸発および一部ドレインにより水が排除され、ほぼ全量の水分が除去されていると推定される。しかし、 E_i は 663 kcal と多く、発生する熱量の約 57% に相当する。これは補助熱源無添加系で発生した熱量の約 7% が損失したのに比べると非常に大きな値である。本実験では、豚ふん尿そのものでは高温好気発酵法に適切な環境条件を得ることができず、補助熱源として食用油を添加することで良好な処理を行うことができた。しかし、高温になるほど熱損失が大きくなるため、熱損失の大きな実験装置では食用油の添加が非常に多くなってしまう。また、食用油を添加した系での未反応熱量が増加したことから添加した食用油が未反応のまま蓄積し反応に影響を及ぼすことも懸念される。したがって、熱損失を抑制した実験装置の開発および未反応のまま蓄積する有機物を極力少なくする運転操作条件の最適化が重要であると考えられる。また、処理に供する豚ふん尿側の条件として本実験で求めた C/W 比 5.1 は実験装置の熱損失の効率によって大きく異なる。Yang ら⁹⁾が運転指標として提案した C/W 比は、あくまでもある実験装置における運転指標であり、水分蒸発以外に使われる熱の損失を考慮した一般的な運転指標が必要である。

4.2 微生物の活性を高めるための環境条件

含水率が 90% の豚ふん尿を高温好気発酵法で処理するためには水分蒸発潜熱が不足し、本実験では補助熱源を加えることによって処理が可能となった。しかし、適切な補助熱源添加量は豚ふん尿の性状や熱損失に影響を及ぼす実験装置の構造によって異なるため、最適運転操作を行うためには高温細菌にとって適切な環境条件を明らかにする必要がある。Fig. 12 に補助熱源添加系での各

Fig. 12 The relation among average water content, duration time of over 60°C and ATP concentration in one cycle

RUN での1サイクルにおける平均含水率、60°C以上維持時間とATP濃度の関係を示す。補助熱源添加量が多くなると1サイクルにおいて60°C以上の高温を維持する時間が長くなり、含水率は低下する傾向が見られた。また、平均含水率が約55%でATP濃度は一番高かった。含水率の条件としては水分が多いほど細菌の活動には有利ということになるが¹⁸⁾、類似の処理法である好気反応を利用したコンポスト化過程では水分が多くなると空隙が減少し、酸素が十分に供給されなくなるため反応阻害を起こす^{21,22)}。一方、水分が少なれば細菌の活動には不利となるが、温度条件として高温細菌の活性に有利と思われるRUN 4のATP濃度がRUN 3より低くなる。このことから考えると平均含水率55%は本法において微生物の活性を高める最適な環境条件と考えられる。この結果はコンポスト化の過程で微生物の活性に適当な含水率は約50%~60%であると言われている¹⁴⁾ことと一致した。また、本法では温度条件と含水率条件が連動するため、平均含水率55%を維持するためには本実験では60°C以上を約7時間維持する必要があった。これは1サイクルを24時間として、つまり1日1回の豚ふん尿の投入において高温好気発酵法に適切な温度条件と含水率条件の両者を満たす条件と考えられる。また、RUN 3とRUN 4で含水率条件の違いにもかかわらず、ATP濃度が大きな差を見せないのは、やはり60°C以上の高温状態が長く維持されることが高温細菌の活性を保つ温度条件と考えられる。

5. ま と め

本研究では、高温好気発酵法を用いて含水率90%の豚ふん尿を効率的に処理するための適切な環境条件について検討を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。

1) 含水率90%の豚ふん尿の高温好気発酵法による処理はできなかった。その原因は豚ふん尿の持つ熱量が水分蒸発に必要な熱量と熱損失を考慮した反応槽内の温度を高温に保つための熱量に不足したためである。

2) 本実験では豚ふん尿のBOD₅負荷 3 kg・m⁻³・day⁻¹、通気量100 l・m⁻³・min⁻¹の条件で補助熱源として食用油120mlを添加することで、1サイクルにおいて約86%の炭素、98%の水分が除去され、20日間処理を継続することが可能であった。しかし、本法に適した高温状態になるほど実験装置からの熱損失が大きくなるため、多量の補助熱源の添加によりC/W比を高くする必要があった。

3) 微生物の活性度を高める環境条件としては平均含水率55%が最適であり、この条件でATP濃度、高温菌数が最高になることが明らかになった。また、温度条件としては60°C以上を維持することの重要性が示唆された。なお、本法では温度条件と含水率条件が連動するため、平均含水率を55%に維持するためには、24時間に1回の豚ふん尿投入を行う条件において、60°C以上の時間を7時間維持する必要があった。

謝 辞

本研究を進めるに当たって御指導いただいた国立環境研究所稲森悠平博士、水落元之氏、岩見徳雄氏、東北大学大学院千葉信男氏に深甚なる謝意を表す。

(原稿受付 1998年5月13日)

(原稿受理 1998年8月5日)

参 考 文 献

- 1) 志村もと子, 田淵俊雄 (1997) 畜産ふん尿の処理方法と河川の窒素濃度の関係, 用水と廃水, 39(5), 21-26.
- 2) 徐開欽, 全恵玉, 須藤隆一 (1997) 畜産排水の性状と原単位, 用水と廃水, 39(12), 13-21.
- 3) 農文協 (1995) 畜産環境対策大事典, 61-69.
- 4) 熊澤喜久雄 (1995) 農山村地域における環境保全のあり方, 用水と廃水, 37(1), 7-11.
- 5) 農文協 (1995) 畜産環境対策大事典, 41-50, 519-524.
- 6) T. Mori, B.G. Liu and K.S. Cho (1993) The treatment of highly concentrated organic wastewater by thermophilic oxic process—complete oxidation of organic matter and evaporation—, *Jpn. J. Chem. Indust.*, 44(11), 924-930.
- 7) 稲森悠平, 林紀男, 山海敏弘, 須藤隆一 (1995) 水環境改善技術開発のための最新展望, *JETI*, 43(4), 104-109.
- 8) D. Couillard, S. Gariepy and F.T. Tran (1989) Slaughterhouse effluent treatment by thermophilic aerobic process, *Wat. Res.*, 23(5), 573-579.
- 9) J.K. Yang, Y. Shimizu, K.S. Cho and T. Mori (1995) Significance of Calorie/Water (C/W) ratio in the treatment of highly concentrated organic matter by thermophilic oxic process, *Jpn. J. Society on Wat. Environ.*, 18(7), 583-588.
- 10) H. Cai and T. Mori (1997) Treatment of thickened excess sewage sludge by thermophilic oxic process, *Jpn. J. Proc. of Environ. Engin. Res.*, 32, 371-378.
- 11) B.G. Lin, S. Noda, I. Yoshida and T. Mori (1997) Evaluation and selection of a medium for the thermophilic oxic process, *Jpn. J. Wat. Treat. Biol.*, 33(4), 187-198.
- 12) 稲森悠平, 岩見徳雄, S.J. Yu, 近山憲幸 (1995) 農産村地域における有機廃棄物の高温好気発酵法による資源循環高度処理, 用水と廃水, 37(1), 50-56.
- 13) B.G. Liu, H. Cai and T. Mori (1994) Complete decomposition of swine waste by thermophilic oxic process, *Jpn. J. Proc. of Environ. Engin. Res.*, 31, 209-214.
- 14) 藤田賢二 (1993) コンポスト化技術—廃棄物有効利用のテクノロジー, 技報堂出版, 59-77.
- 15) 日本下水道協会 (1997) 下水試験方法.
- 16) T. Beffa, M. Blance, P.F. Lyon, G. Vogt, M. Marchiani, J.L. Fischer and M. Aragno (1996) Isolation of *Thermus* strains from hot composts (60 to 80°C), *Appl. Environ. Microbiol.*, 62(5), 1723-1727.
- 17) C.C. Lin and L.E. Casida (1984) GELRITE as a gelling agent in media for the growth of thermophilic microorganisms, *Appl. Environ. Microbiol.*, 47(2), 427-429.
- 18) 須藤隆一 (1992) 環境浄化のための微生物学, 講談社, 154-161.
- 19) 岩波書店 (1993) 岩波理化学辞典第4版, 1345.
- 20) P.D. Bach, K. Nakasaki, M. Shoda and H. Kubota (1987) Thermal balance in Composting Operation, *J. Ferment. Technol.*, 65(2), 199-209.
- 21) 金子栄廣, 藤田賢二 (1986) 堆肥化反応における水分に限界に関する研究, 土木学会論文集, 第369号/II-5, 303-309.
- 22) P.D. Bach, M. Shoda and H. Kubota (1984) Rate of composting of dewatered sewage sludge in continuously mixed isothermal reactor, *J. Ferment. Technol.*, 66, 285-292.