

下水汚泥の高温好気法処理における連続計測と解析

楊瑜芳* 津村和志* 内藤正明*

*京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻
京都市左京区吉田本町

概要

本研究では、有機廃棄物の再資源化のため、高温好気法を利用した下水汚泥の処理について研究を行った。ここで、高温好気処理法における生物反応過程をより高度に制御するため、反応中の温度、酸素濃度、重量を連続的に計測し、その実測データから熱収支の解析により反応特性を明らかにした。

その結果、温度の連続計測値より10日間、ほぼ50℃以上の高温で持続し、酸素消費速度の経時変化により有機物の分解が活発に起っていたことが明らかになった。また、熱収支の解析から反応熱特性については、水分の蒸発熱量の割合が63%となり、装置の放熱量は全反応熱の23%になった。高温好気処理過程で反応熱が最も有効に利用されるには、有機物に応じた水分蒸発能力の制御と装置の熱管理が重要であると考えられる。

キーワード

高温好気法、濃縮汚泥、連続計測法、熱収支

1. はじめに

人口の増加、経済の発達、農業の近代化などによって、生ゴミ、下水汚泥、家畜糞尿などの有機廃棄物が多量に排出されており、これらの大部分は焼却や埋立によって処分されているが、ダイオキシン問題など二次の公害を引き起こし、人間の生存や地球環境が危機的な状態になってきている。これらの有機廃棄物は貴重なバイオマス資源であり、自然の循環系に基づく再資源化が望まれる。その再資源化方法は微生物を用いる方法が最適であると考えられる。その対策の一つとしてコンポスト化があげられる。木村らは小容積反応装置を用いた研究によってコンポスト化過程を解析した。特に反応中の乾物重量変化と水分重量変化をそれぞれ独立に計測した¹⁾。この後、岩渕らが試料熱物性を考慮した熱収支解析および酸素ガス収支解析のため、試料温度、入排気湿温度、酸素濃度を10分毎に測定し、コンポスト化反応の初期(温度上昇期)過程における特性を調べた²⁾。井上らは安全で高品質な堆肥を安定して製造するために堆肥の温度、発酵排気中の酸素、炭酸ガス、及びアンモニアガスの濃度の4項目を用いて、実働の堆肥化プラントで試験を行い計測法について検討したが、全体の発酵状態の推移を検討することはできなかった³⁾。

本研究では、地域特性に応じた有機物循環システム構築のため、そのシステムに柔軟性を持たせることが可能な技術として注目される高温好気法を利用した下水汚泥の処理について研究を行った。高温好気法は、反応槽内に木質材を充填し、それに下水汚泥と高カロリー有機廃棄物を投入、混合し、好気性微生物によって有機物の分解と水分の蒸発を誘発するものである⁴⁾。この方法は“生物燃焼法”とも言われる。この処理法についての研究は、処理法としての有効性の検討が多いが、メカニズムの解明についての研究は少ない。そこで本研究では、高温好気処理法における生物反応過程をより高度に制御するため、反応中の温度、酸素濃度、重量を連続的に計測し、熱収支の解析により反応特性を明らかにした。

2. 実験方法

(1) 実験装置

Fig.1 に実験用反応槽を示す。この有効容積 70L の円筒型反応槽で、攪拌装置、通気用エアポンプ、排気ファンが付いている。攪拌は 1~12 時間間隔、一回につき 1~3 分間の自動設定ができ、通気量は $0\sim 25 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ の範囲で、排気ファンの回転数を変えることにより吸引量が $0\sim 160 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ の範囲で調節が可能である。また反応槽からの放熱を防ぐために、周りを発泡スチロールで覆った。

(2) 計測方法

高温好気処理法においては、微生物による酸化反応熱によって、水分を蒸発させることになる。この際、有機物の分解量、温度の変化と水分の蒸発量を計測することが重要である。こ

こで有機物を微生物により分解するため、反応進行程度を計測する。そのため酸素計を用いて反応槽内の酸素濃度を測定した。反応槽内の温度は中央部分に三つ温度センサーを差し込んで連続的に測定した。さらに、反応槽全体は重量計に乗せ混合物の重量変化を測定した。酸素濃度、温度、重量はコンピューターで 1 分毎経時記録した。

(3) 実験条件

下水汚泥は京都府 H 処理場において濃縮汚泥を採取した。濃縮汚泥の含水率は 95.4%、 BOD_5 濃度は $100\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{ds}$ 、汚泥の発熱量は $4500\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{ds}$ である。この含水率が高い濃縮汚泥のみでは発熱量が不足しているため、より高い発熱量を持つ廃食用油を熱源として用いた。本実験では、家庭から回収した廃食用油を使用した。廃食用油の発熱量は $9487\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ である。実験については 2 日一回に濃縮汚泥と廃食用油を投入することにより、 BOD 負荷が $6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ 、投入後の反応槽内混合物の水分が 55% となるように操作した⁵⁾。

3. 実験結果

Fig.2 には余剰汚泥と廃食用油を 5 回投入した時の反応温度の経時変化を示す。槽内温度が 50°C 以上に続いており、高温状態を維持することができた。同じ高さで差し入れの長さによって三つの温度計測値があり、その中の中心温度がやや低くなった。これは反応槽の中心部に設置している攪拌機により、空気漏れがあるためだと分かった。また、12 時間ごと、グラフに不連続な点が見られるがこれは攪拌の影響である。

高温好気法処理における投入した有機物は担体に住み込む好気性微生物により分解され、その際に酸素を消費し、エネルギーを放出する。そのエネルギーにより反応槽内の温度は上昇するのである。また、高温好気法は完全酸化反応といえるため⁶⁾、酸素消費量による有機物分解程度を指摘していると考えられる。Fig.3 には反応中入排気酸素濃度の変化が示されている。外気の酸素濃度はほぼ 21% に維持している。槽内反応によって排気酸素濃度は変化し、その差は Fig.3 の第二縦軸に示している。これは、有機物を分解する時の酸素の消費量であると考えられる。

また、Fig.4 に装置全体の重量の経時変化を示す。これと酸素濃度の経時変化は同じ動きをしていることが見られる。これによって有機物を分解すると同時に、温度の上昇により余剰汚泥中の水分を蒸発させていることが分かる。

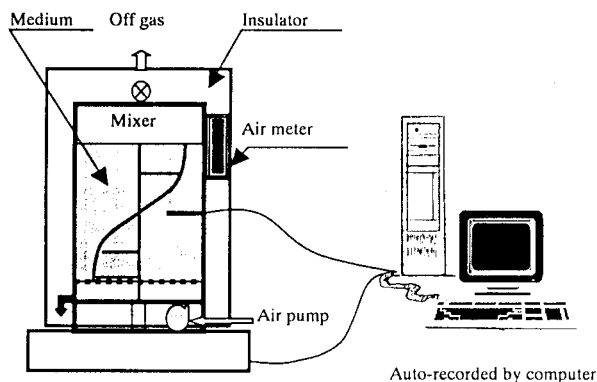


Fig.1 Flow diagram of thermophilic oxic process for treatment of excess sewage sludge

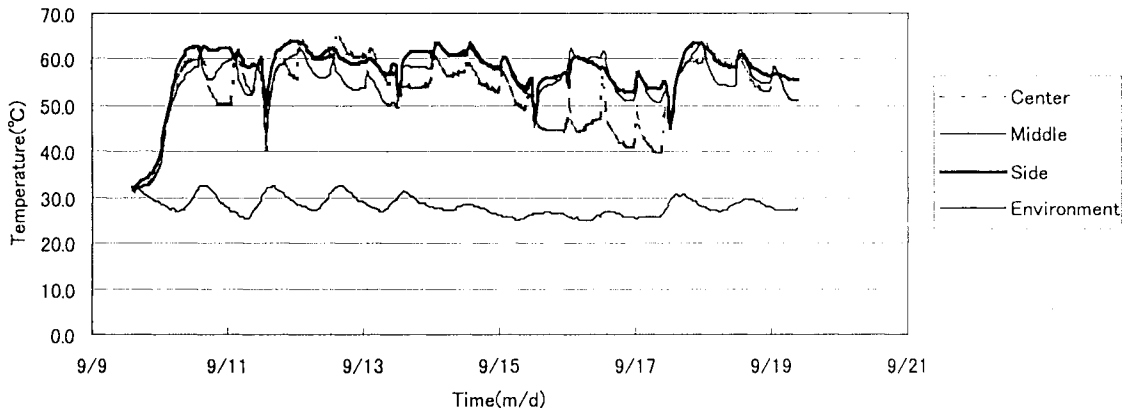


Fig.2 Time course of temperature in the thermophilic oxic process

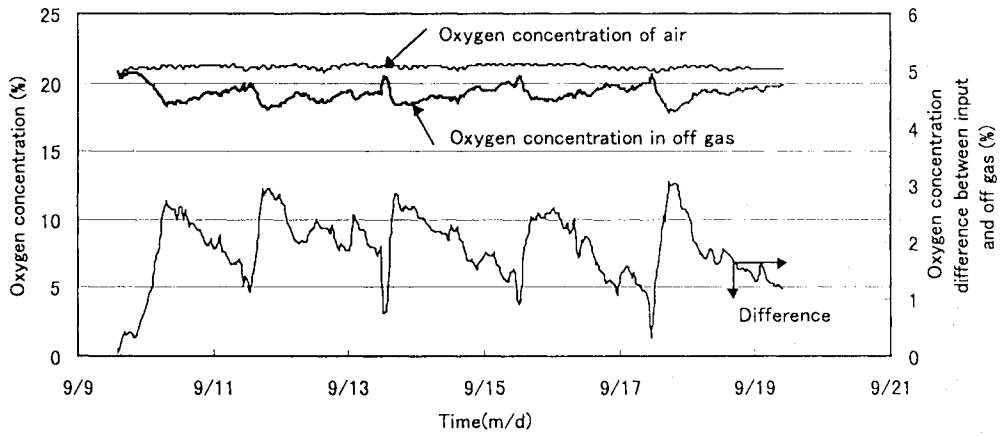


Fig.3 Time course of oxygen concentration in the thermophilic oxic process

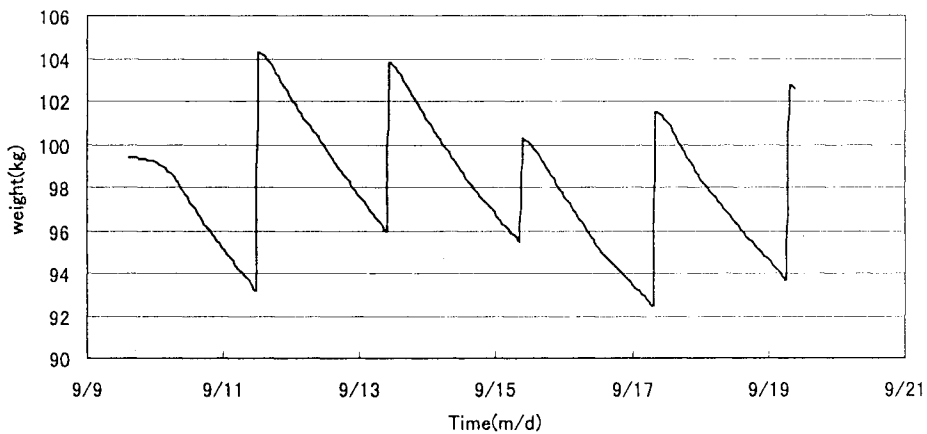


Fig.4 Time course of total weight(device+mixture) in the thermophilic oxic process

4. 考察

以上の連続的に計測した温度、酸素濃度、重量の実測値を解析し、1サイクルの反応温度と酸素消費速度、重量減少速度の経時変化を Fig.5 に示す。

その中の酸素消費速度は
$$Ro_2 = \frac{f}{W_{VS}} (C_{O_2in} - C_{O_2out})$$

重量減少速度は
$$\frac{dW}{dt} = -\frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1}$$

によって求めた。

Fig.5 に示すように濃縮汚泥と廃食用油の混合物を投入した約4時間経過後には反応槽内の温度は50℃以上になり、この温度は次回混合物投入時まで持続した。さらに、酸素消費速度・重量減少速度の経時変化グラフの起伏は同調しており、高温好気法における微生物の代謝により有機物が分解され、発生した熱による下水汚泥の含有水分の蒸発が起ったことを指摘できる。

高温好気法における1サイクルの熱収支解析に必要な基礎式を次表に示す。

	計算式
反応による発熱量	$\Delta Q_r = hs \cdot dS/dt$
乾燥担体顕熱量	$\Delta Q_m = C_m \cdot W_o \cdot dT/dt$
水分顕熱量	$\Delta Q_w = C_w \cdot W \cdot dT/dt$
水蒸気潜熱	$\Delta Q_{wl} = h \cdot dW/dt$
水蒸気顕熱量	$\Delta Q_s = C_w \cdot (T - T_a) \cdot dW/dt$
空気顕熱量	$\Delta Q_a = q \cdot C_a \cdot (T - T_a)$
装置の熱損失量	$\Delta Q_l = K \cdot F \cdot (T - T_a)$

系全体の熱収支は

$$Q_r = Q_m + Q_w + Q_{wl} + Q_s + Q_a + Q_l$$

である。

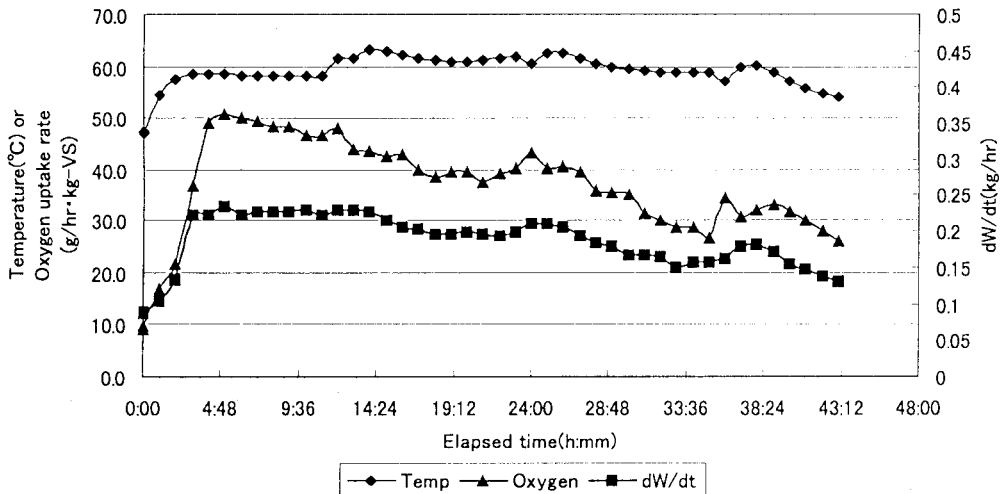


Fig.5 Time course of temperature, oxygen uptake rate and weight decrease rate in the thermophilic oxic process

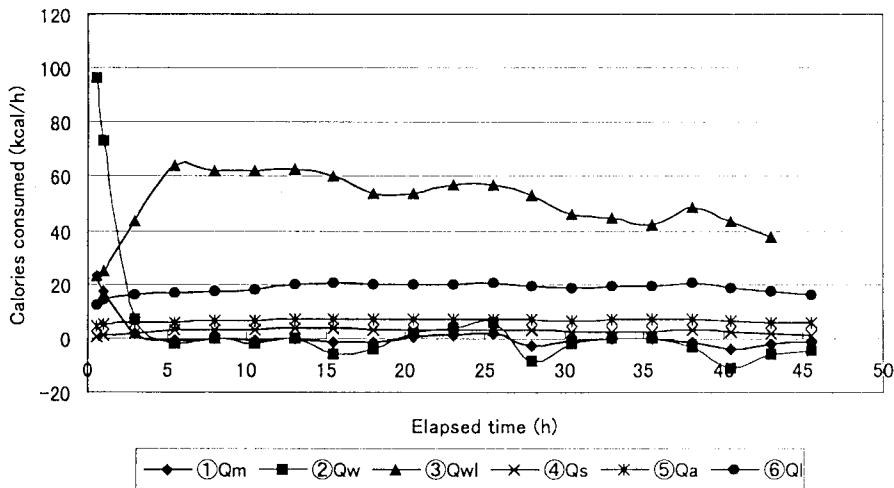


Fig.6 Time course changes on calories consumed during the thermophilic oxic process by addition of thickened sewage sludge and waste food oil

Fig.6 に高温好気法における反応熱の解析結果を示す。反応開始直後は、有機物分解による発生熱は担体中水分の顕熱上昇としてあらわれるが、担体温度の上昇に伴い、反応熱のかなりの部分が水分の蒸発に使われている。全反応熱に対する水分の蒸発熱量(Q_{wl})の割合は 63%であった。このことから、高温好気法実験条件として廃食用油を添加し熱源としたことと、担体(杉チップ)がサイクル全体を通じて有効な水分供給源として機能していることが実証された。

そして、装置の散熱量は全反応熱の 23%になることが分かった。高温好気処理では反応熱の有効利用のため装置の保温を強化することが有機源によっては必要であることが示された。

また、通気による空気顕熱(Q_a)は全反応熱の 8%となり、排気による水蒸気顕熱(Q_s)は 3%となることを示した。乾燥担体の顕熱(Q_m)と担体中水分の顕熱(Q_w)が各々わずか 0.4%、2.5%程度となり、反応過程で熱変化に与える影響は極めて少ないことが示される。

以上の熱解析結果と他の文献により⁷⁾、投入した下水汚泥と廃食用油の反応特性について下水汚泥の分解が廃食用油より速いため、高温好気法における有機物によって酸素の供給および投入頻度の管理が重要であると考えられる。また、有機物分解熱による蒸発した水分については下水汚泥中の結合水が利用されにくいいため、自由水の確保できる水分の管理が必要である。

5.まとめ

高温好気反応過程における温度、酸素濃度、重量を連続的に計測し、その実測データから熱収支の解析により反応特性をまとめると次の通りである。

- ①温度の連続計測値より 10 日間にはほぼ 50℃以上高温で持続した。さらに、酸素消費速度・重量減少速度の経時変化グラフの起伏は同調しており、高温好気法における微生物の代謝により有機物が分解され、発生した熱による下水汚泥の含有水分の蒸発が起ったことを指摘できる。
- ②熱収支の解析から反応熱の各熱への分配特性については、水分の蒸発熱量(Q_{wl})の割合が 63%となり、全反応熱の半分以上を占めることが分かった。また、装置からの放熱量は全反応熱の 23%になった。その二つを合わせると全反応熱に対する 86%を占め、高温好気処理過程で反応熱が最も有効に利用されるためには、有機物源に応じた水分蒸発能力の制御と装置の熱管理が重要であると分かった。

使用記号

CO_{2in} : 外気中の酸素濃度 (g/m^3)	C_m : 担体の比熱 [$kcal/(kg \cdot ^\circ C)$]
CO_{2out} : 反応槽内の酸素濃度 (g/m^3)	C_w : 水の比熱 [$kcal/(kg \cdot ^\circ C)$]
f : 通気量 (m^3/h)	H : 水の蒸発潜熱 ($kcal/kg$)
W_{vs} : 初期有機物量 ($kg-VS$)	C_a : 空気の比熱 [$kcal/(m^3 \cdot ^\circ C)$]
W_1 : 時間 T_1 の時の装置全体重量 (kg)	S : 有機物の質量 (kg)
W_2 : 時間 T_2 の時の装置全体重量 (kg)	W_o : 乾燥担体の質量 (kg)
Q_r : 有機物分解による発生熱量 ($kcal$)	W : 担体中水分量 (kg)
Q_m : 乾燥担体顕熱量 ($kcal$)	T : 反応槽内の温度 ($^\circ C$)
Q_w : 担体中水分温度変化による顕熱量 ($kcal$)	T_a : 外気の温度 ($^\circ C$)
Q_{wl} : 水蒸発潜熱量 ($kcal$)	Q : 供給空気の通気量 (m^3/h)
Q_s : 水蒸気の排気による顕熱量 ($kcal$)	K : 反応槽の総括熱貫流係数 [$kcal/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$]
Q_a : 供給空気の顕熱量 ($kcal$)	F : 反応槽の総表面積 (m^2)
Q_l : 装置の熱損失 ($kcal$)	T : 反応時間 (h)
H_s : 有機物単位乾燥質量当たりの発生熱量 ($kcal/kg$)	

参考文献

- 1) 木村俊範、清水 浩：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、Vol. 51, No. 1, 63-70 (1989)
- 2) 岩渕和則、木村俊範：家畜糞の好気性分解反応特性（第1報）、農業機械学会誌、Vol. 56, No. 2, 67-74 (1994)
- 3) 井上洋一郎、平岡幸子、鈴木隆之、二田穂積：コンポスト製造における計測情報、学会誌「EICA」Vol. 1, No. 2, 242-245 (1996)
- 4) 楊 瑜芳、津村和志、内藤正明：環境調和型有機物循環システムに関する研究、第6回地球環境シンポジウム講演論文集、155-160 (1998)
- 5) 楊 瑜芳、林 里香、津村和志、内藤正明：竹チップを担体とする下水汚泥の高温好気処理法の適用研究、第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集、237-239 (1997)
- 6) Zhu L. P., Kozaki Y., Agari Y., Sato T., Yosita And Mori T.: Decomposition of Algae Sludge by Thermophilic Oxidic Proccr. Jap. Jour. Of Wat. Treat. Biology. Vol. 32, No. 4, 221-234 (1996)
- 7) 楊瑜芳、山口恭右、津村和志、内藤正明：下水汚泥の高温好気処理法における熱収支に関する研究、水環境学会誌論文投稿中