

# 下水汚泥の高温好気法処理における 連続計測と解析

## Energy Analysis through Continuous Measurements on the Treatment of Sewage Sludge by Thermophilic Oxidic Process

楊 瑜芳\*、津村 和志\*、内藤 正明\*

Yufang YANG Kazushi TSUMURA Masaaki NAITO

\*京都大学工学部環境地球工学教室

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

Division of Global Environmental Engineering, Kyoto University

Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

### Abstract

The purpose of this study is to investigate the feasibility for treatment and disposal of sewage sludge by the thermophilic oxidic process. During the experiment of this biological treatment process, temperature, oxygen concentration and weight changes were continuously monitored. The characteristics of the biological reaction on different sludge with various water contents were identified by analyzing the energy balance.

The organic matter was actively degraded with the temperature maintained above 50°C during the whole period. By analyzing the oxygen uptake rate, the thickened sewage sludge was more efficiently decomposed than other kinds of sludge. From the energy budget, more than 50% of heat produced from bio-reaction was used to evaporate water contained in sludge; around 20% of heat produced were wasted as the heat loss of the reactor.

Effective utilization of heat produced from degradation is one of the key points for the efficient operation. It is important for the thermophilic oxidic process that keeps a substantial evaporation capacity from organic matter source and heat management of the device.

**Key words :** thermophilic oxidic process, sewage sludge, oxygen uptake rate, energy balance

## 1. はじめに

人口の増加、消費経済の進展、農業の省力化などによって、増加の一途をたどっている生ゴミ、下水汚泥、家畜糞尿などの有機廃棄物の排出は、その大部分が焼却や埋立によって処分されている。しかし、これらがダイオキシン問題などの二次公害を引き起こし、またCO<sub>2</sub>やN<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>などの排出によって地球環境にも負荷を与えていることが強く認識されるに至った。ところで、これ

らの有機廃棄物は本来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。

以上のような状況から、その再資源化に微生物を用いる方法が最適であると考えられ、コンポスト化がその一つとして注目されるようになった。そこで、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が、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貴重なデータを提供した<sup>1)</sup>。この後、岩瀬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<sup>2)</sup>。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、およびアンモニアガスの濃度の4項目について、実働の堆肥化プラントで試験を行いその計測法に関して検討したが、全体の発酵状態の推移を検討するには至らなかった<sup>3)</sup>。

ところで、水分が多い有機廃棄物はコンポスト化が困難であり、また、近年のコンポスト化による再資源化の動きが、却って堆肥の過剰をもたらすようになってきた。そこで、有機廃棄物をコンポスト化するのは別に、微生物の作用によって分解・減量化するプロセスとして高温好気法が注目され始めた。高温好気法は、反応槽内に木質材を充填し、それに高水分の有機廃棄物を投入、混合し、この中で好気性微生物によって有機物を分解し、その分解熱により水分を蒸発させるものである<sup>4)</sup>。したがって、この方法は従来の脱水・焼却のプロセスに比べてエネルギー的に有利で、また操作も簡便で低コストである。さらに環境負荷も少ない。また高温好気法とコンポスト化は、増殖する微生物種が異なるだけなので、同じ施設で操作条件を変えるだけで行えるため、堆肥の需要期に応じて切替可能である。このような特徴を持った新たな微生物処理法としての「コンポスト化/高温好気法」は、有機物循環を図るための単位操作として大いに適していると考えられる。

しかし、高温好気法についてのこれまでの研究は、処理法としての有効性を検証するための定性的解析が主であり、まだメカニズムの解明につながる定量的研究は少なかった。そこで本研究では、下水汚泥の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の基礎として、反応中の温度、酸素濃度、重量の連続計測データを収集し、その精度の高い熱収支解析により反応特性を明らかにする実験研究を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

Fig. 1に実験用の有効容積70ℓの円筒型反応槽を示す。反応槽内に微生物の住み家として木質材を充填し、それに試料を投入する。そして、攪拌装置による有機物と微生物との混合状態が均一になるため、攪拌は12時間に1回、3分間ずつに設定した。また反応槽内に常に好気状態を維持するため通気用エアポンプ、排気ファンが付い

ている。通気量は0~25ℓ・min<sup>-1</sup>の範囲で調節し、吸引量は排気ファンの回転数を変えることにより通気量と同数値に調節が可能である。反応槽からの散熱を防ぐために、周りを発泡スチロールで断熱した。

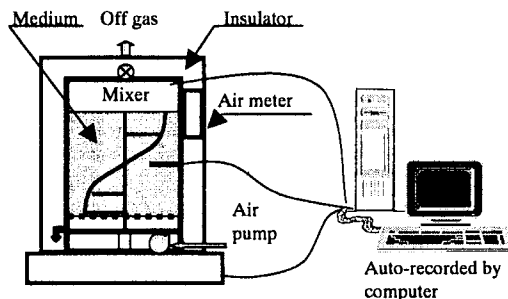


Fig. 1 Flow diagram of thermophilic oxic process for treatment of excess sewage sludge

### 2.2 計測方法

高温好気処理法においては、好熱性微生物による酸化反応熱によって水分を蒸発させつつ、温度は維持されねばならない。この際、有機物を分解する時の酸素消費量、温度の変化および水分の蒸発量を計測することが重要であると考えられる。そのため、反応進行過程の計測に酸素計を用いて槽内酸素濃度を連続測定した。ま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で1分毎経時記録した。

### 2.3 実験条件

京都府H処理場において「余剰汚泥、濃縮汚泥、脱水ケーキ」を採取した。Table 1にこれら三種の下水汚泥の性質を示している。それらの性質は実験使用時に若干の変化をするが、その変化幅は1%以下と、ごく微小なので、各測定値はそれぞれ2週間連続実験期間中1サイクル毎に採取・分析したデータの平均値を示したものである。ここで、1サイクルとは、投入した有機物がほぼ分解処理される期間であり、これでは後に示す実験データ (Fig. 2) から分かるように、ほぼ“2日”であった。そこで以降1サイクルを2日と設定した。

一般に、汚泥の含水率は高いので、汚泥の有機物分解で発生する熱量だけでは、水分蒸発に不足すると考えら

れる。そこで、本実験では、家庭から回収した廃食用油を熱源として使用した。廃食用油は $9487\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ の高発熱量を持っている。

好気性微生物の反応状態に対して、最適含水率は50%~60%であることが過去の文献<sup>8)</sup>に指摘されている。また、我々の実験から、最適有機物負荷は $6\text{kg BOD}_5 \cdot \text{m}^{-3}\text{day}^{-1}$ である<sup>5)</sup>ため、水分含有量と有機物含有量のそれぞれ異なる三種の汚泥を以下の手順で上記の最適条件に調整した。

水分の調整については、三種の汚泥はすべて60%の含水率を大きく上回っているため、その水分を55%にするには、予め装置内に充填した副資材(杉チップ)と混合する。すなわち、投入後の混合物の含水率 $X_{ws}$ (%)の計算式は、

$$X_{ws} = \frac{W_m \times X_m + W_s \times X_s}{W_m + W_s + W_o} = 55(\%) \quad (1)$$

である。ここで汚泥の投入量と含水率をそれぞれ $W_s$ (kg)、 $X_s$ (%)、廃食用油投入量を $w_o$ (kg)、投入前の副資材の重量と含水率をそれぞれ $W_m$ (kg)、 $X_m$ (%)とする。

また、反応初期に槽内混合物有機物負荷(L)を $6\text{kg BOD}_5 \cdot \text{m}^{-3}\text{day}^{-1}$ とするために、有機物含有量が $1365\text{g BOD}_5 \cdot \text{kg}^{-1}$ の廃食用油を加える計算式は次式に表す。

$$L \times V \times 10^{-3} \times 2 = W_s \times X_s + W_o \times 1365 \times 10^{-3} \quad (2)$$

ただし、反応槽の有効容積Vは70ℓとする。

上記2つの式を満たすように $W_s$ (kg)、 $W_o$ (kg)を試料投入ごとに決定した。その結果、各汚泥の有機物含有量に基づき廃食用油の平均重量添加率は余剰汚泥の場合が8.3%、濃縮汚泥の場合が5.9%、脱水ケーキの場合が5.1%となった。その有機物負荷に対して必要な酸素量より算定し、通気負荷は $300\text{ℓ} \cdot \text{m}^{-3}\text{min}^{-1}$ に設定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 連続計測による温度の変化

性状の異なる三種の下水汚泥をサンプルとし、それぞれについて2週間長期反応実験を行った。ただし、余剰汚泥のみについては、計測上のトラブルのため、前半一週間のデータしか採取できなかった。その余剰汚泥の反応温度の経時変化をFig. 2に示す。Fig. 3は濃縮汚泥と廃食用油について2週間長期実験の結果、同様にFig. 4は、脱水ケーキと廃食用油の結果を示す。

余剰汚泥および濃縮汚泥の実験について、反応温度はそれぞれFig. 2、Fig. 3に示すように50℃以上に保たれており、高温状態を維持することができた。また、同じ高さで差し入れの温度センサの位置によって温度が異なり、中心温度がやや低いことが認められた。これは反応槽の中心部に設置している攪拌機の回転により、中心軸の周りにわずかの空隙が出来て空気が漏れているためと分かった。脱水ケーキ実験の場合、Fig. 4に示すように1サイクルについて最高温度が高く、その上昇速度も速いことが示された。各サイクル全ての終了温度が低いのは外気温の影響であると考えられる。また、12時間ごとに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。

#### 3.2 酸素消費量の計測による反応特性の比較

高温好気法処理では、投入した有機物は担体に住みついた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。また、高温好気法は完全酸化反応といえるため<sup>6)</sup>、酸素消費量は有機物分解度の指標になっていると考えられる。Fig. 5~Fig. 7には各実験に

Table 1 Characteristics of sewage sludge fortest (n=6)

Items	Excess sludge	Thickened sludge	Dewatered sludge cake
Moisture content (%)	99.2	95.42	77.63
Volatile matter (%)	77.4	70.89	70.22
BOD <sub>5</sub>	1200 (mg/l)	100,000 (mg/kg-ds)	93,000 (mg/kg-ds)
PH	6.5~6.8	6.5~7.0	4.8
Calories (kcal/kg-ds)	4460	4500	4375
TOC	1800 (mg/l)	422,000 (mg/kg-ds)	422,000 (mg/kg-ds)
T-N	530 (mg/l)	84,200 (mg/kg-ds)	84,200 (mg/kg-ds)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	530 (mg/l)	450 (mg/kg-wet)	450 (mg/kg-wet)
K <sub>2</sub> O (mg/kg)	160	5000	5000

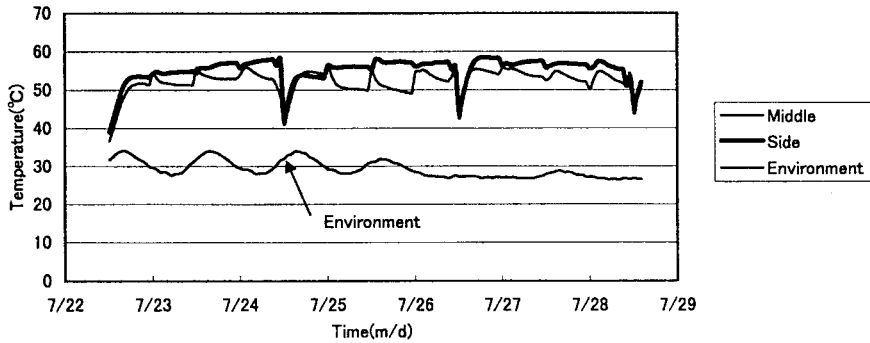


Fig. 2 Time course of temperature in the thermophilic oxidation process for the treatment of excess sludge

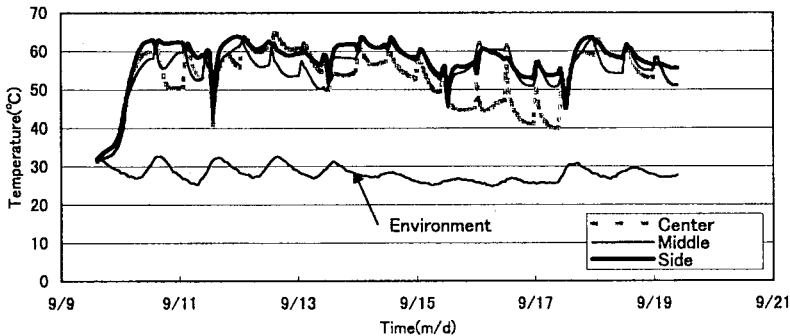


Fig. 3 Time course of temperature in the thermophilic oxidation process for the treatment of thickened sludge

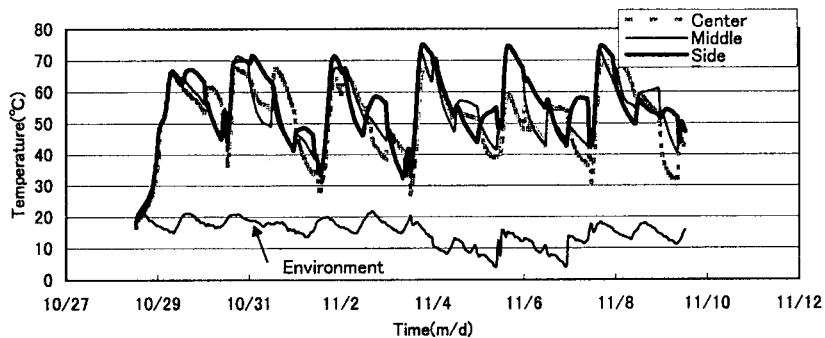


Fig. 4 Time course of temperature in the thermophilic oxidation process for the treatment of dewatered sludge cake

ついて反応中の吸排酸素濃度の変化を示す。外気の酸素濃度はほぼ21%であるが、槽内反応によって排気酸素濃度が減少し、その差が右縦軸に示す消費量となる。

実験操作についてはいずれの実験でも投入物の BOD 負荷を  $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ 、投入後の反応槽内混合物の水分を55%、通気量は  $300 \text{ l} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$  となるように条件設定した。余剰汚泥の実験では余剰汚泥の平均投入量は  $6.78 \text{ kg}$ 、添加した食用廃油は  $0.61 \text{ kg}$ 、濃縮汚泥の実験では濃縮汚泥の平均投入量は  $9.03 \text{ kg}$ 、添加した食用廃油は

$0.56 \text{ kg}$ 、脱水ケーキの実験では脱水ケーキの平均投入量は  $8.97 \text{ kg}$ 、添加した食用廃油は  $0.48 \text{ kg}$  である。なお、酸素消費速度を反応速度の指標と考えて<sup>7)</sup>、本研究では酸素消費速度の相違によって反応特性を比較した。Fig. 8 には、各実験の第3サイクルを代表サイクルとし、その酸素消費速度の経時変化を示している。同じ実験条件下での濃縮汚泥実験の場合は、反応初期に酸素消費速度変化が速く、また他の実験より酸素消費速度自体も大きかったため、濃縮汚泥は他の汚泥より効率的に分解され

るものと考えられる。一方、脱水ケーキ実験においては、反応終期に酸素消費速度が下降している。これは脱水ケーキには高分子凝集剤を含むため、微生物と脱水ケー

キの接触が妨げられ栄養摂取が困難となり、微生物の活性に影響を与えていると考えられる。その事実はいままでの他の研究でも観察されている。

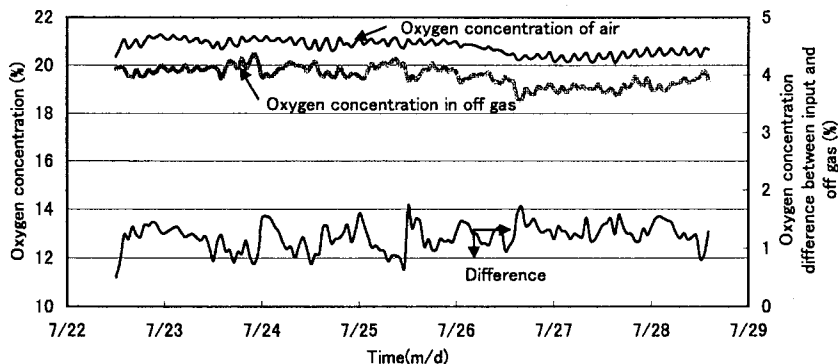


Fig. 5 Time course of oxygen concentration in the thermophilic oxic process for the treatment of excess sludge

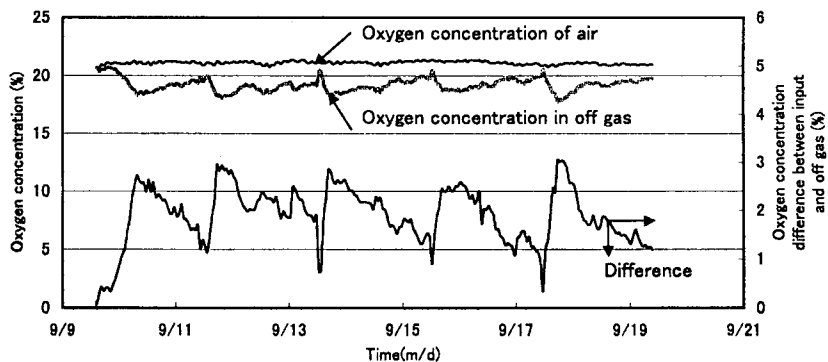


Fig. 6 Time course of oxygen concentration in the thermophilic oxic process for the treatment of thickened sludge

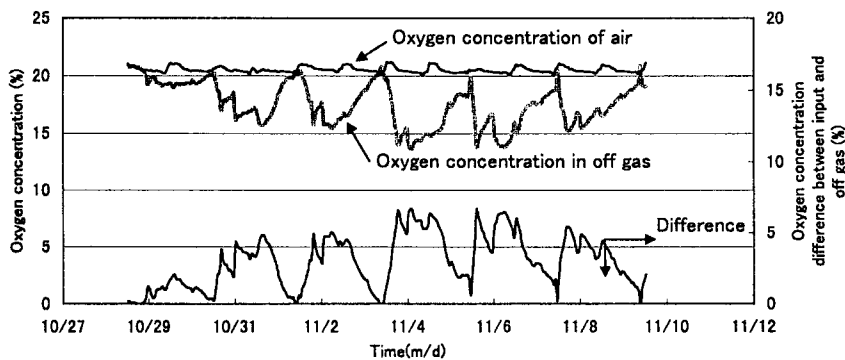


Fig. 7 Time course of oxygen concentration in the thermophilic oxic process for the treatment of dewatered sludge cake

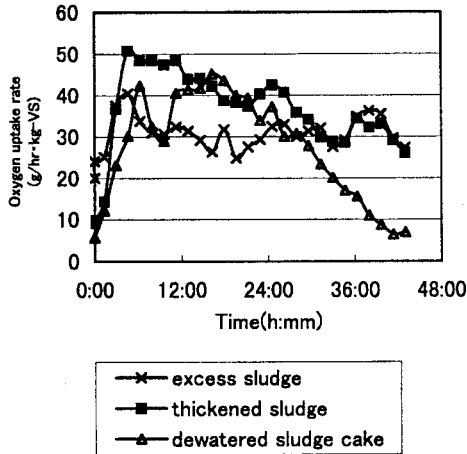


Fig. 8 Time course changes of oxygen uptake rate depending on the characteristics of each sludge

### 3.3 反応熱の解析

高温好気法処理過程における上述の槽内温度、排気中酸素温度の変化を伴う一連の現象は、工学的には反応を伴う熱・物質同時移動現象である。ここで、下記の反応式が槽内の各位置について成立することを前提として1サイクルの熱移動現象の解析を行った。

熱収支式は、発熱項、蓄熱項、液体水移動に伴う顕熱項、水分蒸発による反応による潜熱、顕熱損失項、空気に持ち出される顕熱項、周壁への熱損失項を考慮すると、以下のように書ける。

$$\Delta Q_r = \Delta Q_m + \Delta Q_w + \Delta Q_{wi} + \Delta Q_s + \Delta Q_a + \Delta Q_i \quad (3)$$

ここに、反応による発熱量： $\Delta Q_r = h_s \cdot \frac{ds}{dt}$  (4)

乾燥担体顕熱量変化： $\Delta Q_m = C_m \cdot W_o \cdot \frac{dT}{dt}$  (5)

水分顕熱量変化： $\Delta Q_w = C_w \cdot W \cdot \frac{dT}{dt}$  (6)

水蒸気潜熱変化： $\Delta Q_{wi} = h \cdot \frac{dW}{dt}$  (7)

水蒸気顕熱量変化： $\Delta Q_s = C_w \cdot (T - T_o) \cdot \frac{dW}{dt}$  (8)

空気顕熱量変化： $\Delta Q_a = f \cdot C_a \cdot (T - T_o)$  (9)

装置の熱損失： $\Delta Q_i = K \cdot F \cdot (T - T_o)$  (10)

本実験では総重量と酸素消費量が経時的に連続測定できる。そこで、その酸素消費量の変化から有機物の分解量を推計し、これを総重量の減少値から差引くことで、水分の経時変化も推定することができる。なお、計算に

使用した物性値を Table 2 に示す。これらと温度の連続計測の結果から、高温好気法における1サイクル2日間に対して30分間隔で上記の反応熱の解析を行った。

Fig. 9 ~ Fig. 11 に各実験の代表サイクル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(Qw)の割合は、余剰汚泥実験では59%、濃縮汚泥実験で63%、脱水ケーキ実験で55%であったため、各実験とも全反応熱の半分以上が水分蒸発に使われたことが分かる。

装置からの放熱量は、余剰汚泥と濃縮汚泥では全反応熱の23%、脱水ケーキでは30%になった。脱水ケーキの放熱量がやや多いのは、外気温が僅かに低かったためである。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必要であることが認められた。

また、いずれの実験でも通気による空気顕熱(Qa)は全反応熱の8%程度となり、排気による水蒸気顕熱(Qs)は3%程度となった。乾燥担体の顕熱(Qm)と担体中水分の顕熱(Qw)が各々わずか0.4%、2.5%程度となり、反応過程の熱変化に与える影響は少ないことを示している。

Table 2 Physical properties used for calculation

symbol	dimension	value
Cm	kcal/(kg·°C)	0.33
Cw	kcal/(kg·°C)	1.00
h	kcal/kg	569
Ca	kcal/(m <sup>3</sup> ·°C)	0.33
KF	kcal/(h·°C)	1.18

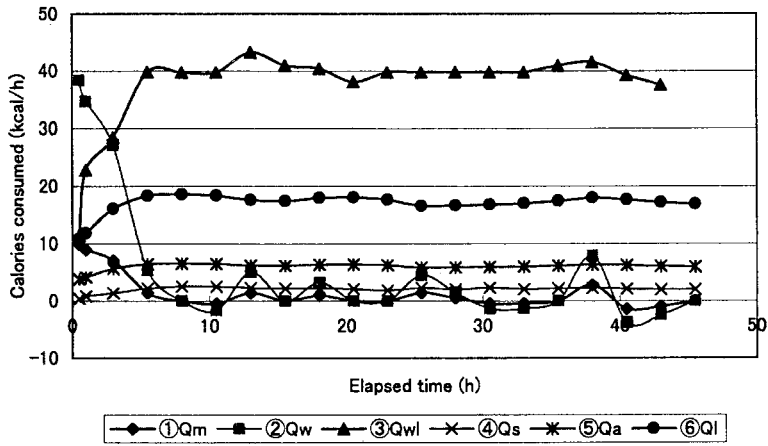


Fig. 9 Time course changes on calories consumed during the thermophilic oxic process by addition of excess sewage sludge and waste food oil

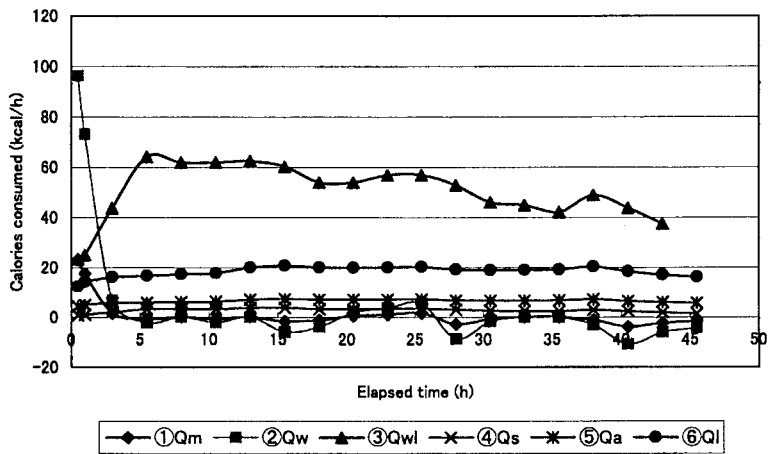


Fig. 10 Time course changes on calories consumed during the thermophilic oxic process by addition of thickened sewage sludge and waste food oil

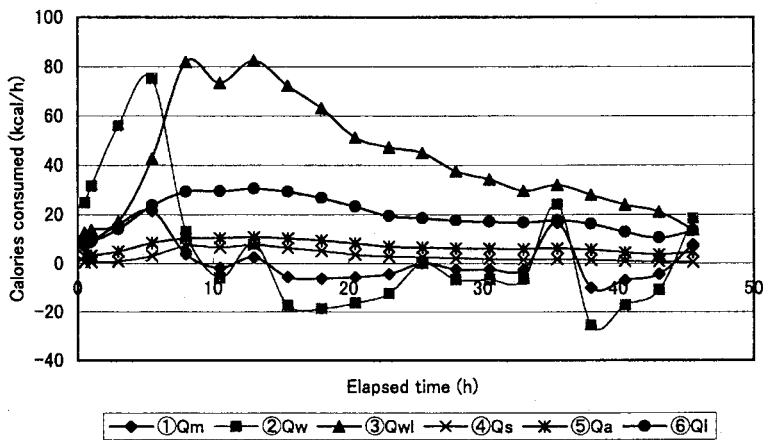


Fig. 11 Time course changes on calories consumed during the thermophilic oxic process by addition of dewatered sludge cake and waste food oil

#### 4. 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、その実測データの反応熱解析から導かれた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日間の反応期間中には50℃以上の高温が持続され、有機物の分解が継続して活発に起っていることが認められた。さらに、酸素消費速度データに基づき反応特性を検討した結果、濃縮汚泥の場合は他の汚泥より速やかに分解されていたこ

とが推定された。

- ② 反応熱の解析からその消費内訳は、水分蒸発のための潜熱量(Qwl)の割合が全反応熱の半分以上を占め、また装置からの散熱量は全反応熱の23%~30%になることが分かった。このことから、高温好気処理過程で反応熱が有効に利用され、反応が効率的に進むためには、装置の熱管理が重要であることが分かった。  
(なお、本研究の一部は「科学技術振興調整費・重点基礎研究・循環複合体の形成(盛岡代表)」の支援によったものである)。

#### 使用記号

$Co_{2in}$ : 外気中の酸素濃度 (g/m <sup>3</sup> )	$C_w$ : 水の比熱 [kcal/(kg·°C)]
$Co_{2out}$ : 反応槽内の酸素濃度 (g/m <sup>3</sup> )	$H$ : 水の蒸発潜熱(kcal/kg)
$f$ : 通気量 (m <sup>3</sup> /h)	$H_s$ : 有機物単位乾燥質量当たりの発生熱量 (kcal/kg)
$W_{vs}$ : 初期有機物量 (kg-VS)	$Ca$ : 空気の比熱 [kcal/(m <sup>3</sup> ·°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(°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(°C)
$Q_{wl}$ : 水蒸発潜熱量(kcal)	$K$ : 反応槽の総括熱貫流係数[kcal/(m <sup>2</sup> ·h·°C)]
$Q_s$ : 水蒸気の排気による顕熱量(kcal)	$F$ : 反応槽の総表面積(m <sup>2</sup> )
$Q_a$ : 供給空気の顕熱量(kcal)	$T$ : 反応時間(h)
$Q_l$ : 装置の熱損失(kcal)	
$C_m$ : 担体の比熱 [kcal/(kg·°C)]	

#### 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) 岩淵和則、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 Proccrns. Jap. Jour. Of Wat. Treat. Biology. Vol. 32, No.4, 221-234(1996)
- 7) 金子栄廣、藤田賢二、堆肥化反応における水分の限界に関する研究、土木学会論文集、No369/II-5, 303-309(1986.5)
- 8) 藤田賢二：コンポスト化技術、技報堂出版

#### 追記：

本論文の著者の一人「津村和志」は原稿完成の直後に急逝いたしました。最後の業績となる本報にそれを記して追悼に代えさせていただきます。(内藤正明、楊 瑜芳)

(受付 1998. 12. 1)

(受理 1999. 2. 23)