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

楊 瑜 芳* 山 口 恭 右*
津 村 和 志* 内 藤 正 明*

Determination of Energy Balance in the Thermophilic Oxidic Process for the Treatment of Sewage Sludge

Yufang YANG*, Kyosuke YAMAGUCHI*,
Kazushi TSUMURA* and Masaaki NAITO*

* Div. of Global Environment Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501 Japan

Abstract

The purpose of this study is to assess the biodegradation rate from the energy balance in the thermophilic oxidic process, which is applied to treat the excess sludge, thickened sludge and dewatered sludge cake produced in the wastewater treatment plant. The readily degradable organic matter contained in the sludge was degraded firstly at the thermophilic oxidic process according to the temperature curve, on which the temperature rises quickly at the test of sewage sludge added with waste food oil. From the energy budget, about 55-63% of heat produced from bioreaction was used to evaporate water; around 23-30% of heat produced was used to prevent heat loss. The relationship between organic load and water content was certified, and the addition of energy source is important for the treatment of sewage sludge by the thermophilic oxidic process. From the rates of the heat produced from bioreaction to the total calories of organic matter added in these tests, which were varied from 1.02, 1.07 and 0.60, respectively, it is clear that the excess sludge and thickened sludge were degraded more efficiently than dewatered sludge cake. The determination of energy balance could be used to assess the biodegradation rate of organic matter in the thermophilic oxidic process.

Key Words: energy balance, thermophilic oxidic process, biodegradation rate, sewage sludge

1. はじめに

地域環境問題の中で、廃棄物問題は近年特に深刻さを深めつつある。大量に排出される生活排水処理汚泥についても例外ではない。下水汚泥の処分方法は全体の約6割が陸上・海洋埋立処分されているため、埋め立て処分地の残余容量は年々減少を続け、最終処分地の確保は、将来ますます困難になるものと考えられる。その一方で、処分地の長寿命化のための減量化として焼却処分率は、一般廃棄物で既に約77%(1993年)に達している¹⁾。また、下水汚泥は一般に含水率が高く、焼却処分には多量のエネルギーを必要とし、さらには将来的に発生量の増加も見込まれている。

筆者らは、地域特性に適した生物処理による下水汚泥の減量化を行うために高温好気処理法に注目した²⁾。高温好気処理法は高温菌を用いて有機物を“完全分解”処理することが可能である技術として注目されている。こ

の方法は本来、高濃度有機物含有排水の処理法として森らによって研究されてきた³⁾。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の有機廃棄物を投入、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行わせるものである。この方法は“生物燃焼法”と言われる例もある⁴⁾。

高温好気処理法は最初に製鉛排水の処理に適用され、BOD除去率90%以上という結果が報告された⁵⁾。また、Liuらは高温好気処理法を用いて焼酎排液のドレイン水を出さない処理にも成功している。その処理実験では、反応槽に加温した空気を送り込むことによって温め、投入水分のすべてを蒸発させることができた。加温をしない場合は反応槽内に水分が蓄積し、嫌氣的になって分解が十分に進行しなかった、と報告している⁶⁾。

さらに、Liuらは高温好気処理法における処理対象に不足するエネルギーを、高エネルギー物質である廃食用油の添加と、温風による加温という二つの方法で補って

豚糞尿の処理を行い⁷⁾、低コスト運転が可能である廃食用油添加法がすぐれているとの結論を得た。また、Cai らは廃食用油を添加することにより、下水濃縮汚泥の高温好気処理を行い、油の混合比、送気量の最適条件を検討してきた⁸⁾。

このほか、高温好気処理法のエネルギー源として廃食用油だけではなく、米糠の添加も行なわれてきた。Zhu らは杉チップを利用して過剰の際の捕捉有機物を高温好気処理し、エネルギー源として米糠を加えることにより85%のBOD除去率を達成している⁹⁾。

しかしこの処理法についての研究は、エネルギー源を添加した処理の有効性の検討が多く、エネルギー源の必要性および反応熱量変化の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、廃食用油のみと廃食用油を添加した汚泥を処理する二通りの実験を行った。高温好気処理法における下水汚泥の生物学的な酸化分解法としての位置づけを明確にするため、各実験の反応熱発生特性を調べ、熱収支の面から有機物分解率を確かめることにした。

2. 実験方法

2.1 高温好気処理法原料

一般に汚泥に含まれる有機物を分解する時、汚泥の水分が低いほど処理設備容量は小さくてすむ。しかし、その一方で脱水後汚泥ケーキの結合水量が増すため¹⁰⁾、微生物への水分の供給と有機物分解熱による汚泥からの水分蒸発は困難になると思われる。そこで本実験では、原料の物理化学的性質の違い、特に含水率の異なる下水汚泥を用いて高温好気処理における実験を行った。下水汚泥は京都府H処理場において採取した。Fig. 1にH処理場の下水汚泥処理のフローを示す。この処理場は分流式下水道によって集められた下水を2槽式間欠曝気法で処理している。2槽式間欠曝気法とは2つの槽において生物学的な窒素リン同時除去を行う方法である¹¹⁾。

実験用の余剰汚泥は最終沈殿池からの返送汚泥を、濃縮汚泥は汚泥貯留槽から採取したものを、脱水ケーキは

Fig. 1 Process flow of the test plant

汚泥濃縮脱水機からケーキ貯留ホッパーへ運ぶ途中から採取したものをを用いた。Table 1には各汚泥性状の物理的、化学的性質を示す。含水率は余剰汚泥では99.2%、濃縮汚泥では95.4%、脱水ケーキでは77.6%である。汚泥の平均発熱量は $4,445\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{ds}$ である。余剰汚泥、濃縮汚泥のpH値は6.5~7.0、ほぼ中性である。脱水汚泥のpH値が4.8であり、これは脱水の過程において高分子凝集剤(KP-1207B、ポリアクリル酸エステル系)とポリ鉄(ポリ硫酸第二鉄溶液)を添加しているためと思われる。

高温好気法は、高い発熱量を持つ有機物を好気性微生物により生物反応させ、その際に発生する熱を利用して水分を蒸発させることに特徴がある¹²⁾。しかし下水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。Table 2に示すように廃食用油の発熱量は $9,487\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ である。

2.2 高温好気処理法装置

Fig. 2に実験反応槽の図を示す。市販される家庭用生ゴミ高温発酵容器、好気タンクKT100型(株式会社ワタクリエイト)を改造したものを反応槽として用いた。これはステンレス製の円筒型反応槽で、攪拌装置、通気用エアポンプ、排気ファンが付いている。実験用の装置容積が100l、有効容積は70lである。攪拌は1~12時間間隔、1

Table 1 Characteristics of sewage sludge for test

Items	Excess sludge	Thickened sludge	Dewatered sludge cake
Water content (%)	99.2	95.42	77.63
Volatile matter (%)	77.4	70.89	70.22
BOD ₅ (mg/l)	1200	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 (mg/l)	1800	422,000 (mg/kg-ds)	422,000 (mg/kg-ds)
T-N (mg/l)	530	84,200 (mg/kg-ds)	84,200 (mg/kg-ds)
P ₂ O ₅ (mg/l)	530	450 (mg/kg-wet)	450 (mg/kg-wet)
K ₂ O (mg/kg)	160	5000	5000

Table 2 Characteristics of waste food oil

BOD ₅ (mg/kg)	1,365,000
Calories (kcal/kg)	9487
TOC (mg/kg)	760,000

Fig. 2 Flow diagram of thermophilic oxic process for treatment of excess sewage sludge

Fig. 3 Schematic diagram of thermophilic oxic process

～3分間の自動設定が、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。また反応槽からの散熱を防ぐために、周りを発泡スチロールで覆った。

反応槽内の温度は中央部分に温度センサーを差し込んで測定した。さらに上蓋の排気ファン付近と反応槽の外部側面に酸素センサーを取り付け酸素濃度を、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。温度、酸素濃度、重量はコンピューターで1分毎経時記録した。

2.3 高温好気処理法操作方法

本研究では、投入物として廃食用油のみと廃食用油を添加した汚泥の二通りの実験を行った。実験の概念図を Fig. 3 に示す。実験開始時には担体である杉チップ、以前の実験で用い、種菌となる杉チップ一割、合わせて 70 l を反応槽内に投入し、一回目の投入では 0.32 kg 廃食用油に加えて 0.93 kg 米糠を投入した。その理由は、米糠は窒素、リンを多く含み、微生物の重要な栄養源となり、廃食用油の炭素を分解する過程において役立つと同時に、初期の菌体数増加にも有効であるためである。二回目からは廃食用油のみの場合、2日に1回を 0.62 kg 投入し、12時間毎に一回攪拌を行った。また、有機物分解熱により槽内温度が上昇し、担体の含水率が低下するので、水分量を調節するため蒸留水を補給した。下水汚泥処理の場合、汚泥と廃食用油を混合し、投入した。

下水汚泥処理には、2日に1回汚泥と廃食用油を投入する。平均投入量は、余剰汚泥の実験では余剰汚泥 7.36 kg と廃食用油 0.61 kg 、濃縮汚泥の実験では濃縮汚泥 9.75 kg と廃食用油 0.51 kg 、脱水ケーキの実験では脱水ケーキ 8.97 kg と廃食用油 0.33 kg である。高温好気処理法は生物反応法であり、微生物に対して最適環境を作るのが重要である。高温好気処理法の文献によると試料の有機物負荷は $\text{BOD 負荷 } 6 \sim 8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ の範囲で、含水率が $50 \sim 60\%$ の範囲になる時反応の最適条件であると言われるため⁷⁾、いずれの実験についても投入物の BOD 負荷 が $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 、投入後の反応槽内混合物の水分が 55% となるように決定した。また、すべての実験を通して通気量は単位容積 1 m^3 あたり $300 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ とした。吸

Fig. 4 Temperature variation curve in the test of heat emission

引量は排気ファンの回転数を変えることにより調節できるので、ほぼ $300 \text{ l} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ となる回転数に設定した。

2.4 高温好気処理法装置の散熱実験

高温好気処理法においては、微生物による酸化反応の反応熱によって、反応に必要な担体温度を維持し、さらには、この反応熱を有効に使って、水分を蒸発させることになる。この際、装置からの散熱量は熱収支計算で重要な要因であり、散熱を可能な限り少なくすることが加温の必要性をなくすために重要である。本実験装置は 10 cm 厚さの発泡スチロールで周囲を囲んでいる。ここで、反応過程における装置の散熱量を計算するため散熱実験を行った。

この実験では、まず反応槽と同容量のビニール袋を装置内に入れる。そして 70°C の水を有効容積の 70 l まで入れ込んだ。水の温度変化と気温変化を一分間隔で2日連続測定した。実験結果を Fig. 4 に示す。水の温度 T は 70°C から 37°C までに下がった。平均気温 T_a は 23°C であった。装置の散熱量は $\text{KF}(T-T_a)$ 式で積分から計算することにした¹³⁾。ここに、 K は反応槽の総括熱貫流係数

(kcal/(m²h°C)), F は反応槽の総表面積 (m²) である。実際には, K と F との積 KF を計算することになるため, 散熱実験値を用いて積分を求めると, この実験装置の KF は 1.18kcal/(h°C) になった。

2.5 分析方法

汚泥についての含水率, 強熱減量の測定方法は, 下水汚泥分析方法¹⁴⁾に準拠した。BOD₅は, TAITEC BOD Tester を用いた「水マノメーター方式 (PAT No961843)」により行った。余剰汚泥の pH, EC については採取した試料をそのまま測定した。濃縮汚泥, 脱水ケーキの pH, EC に関しては下水汚泥分析方法¹⁴⁾に準拠し, 採取した試料 10g にイオン交換水 100g を加え, 30分攪拌したものについて測定を行った。発熱量は, 下水試験方法¹⁵⁾に準拠し, 乾燥重量当たりの発熱量として各汚泥性状について測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 反応槽内の温度変化特性

各下水汚泥を用いて, 実験は 2 週間連続で行い, いずれの実験でも投入有機物負荷 (BOD 負荷) と投入後混合物の含水率は一定になるように操作した。このため, 同じ汚泥の各サイクルについて反応槽内の温度および全体重量の変化パターンはほぼ同じになっていた。Fig. 5 に各汚泥性状による 1 サイクルの反応温度の経時変化を示す。ブランク実験として行った廃食用油のみについては, 実験開始 10 時間後槽内温度が 58.6°C に達した。余剰汚泥では, 反応開始から 7 時間を過ぎると, 槽内温度が 58.5°C になっている。濃縮汚泥では, 槽内温度 58.5°C に達する時間が 4 時間である。また, 脱水ケーキを投入すると, 反応開始から 3 時間後槽内温度が 70°C 以上に達した。これらの温度変化を見ると, 温度上昇の速度においては, 脱水ケーキ > 濃縮汚泥 > 余剰汚泥 > 廃食用油であり, 初期反応において同じ操作条件でも下水汚泥性状によって高温に達した時間が違うことがわかった。また, 脱水ケーキの実験では, 外気温が低いにもかかわらず, 反応初期にの温度上昇速度が速いことから, 環境の影響が少ないことを示している。これは, 高温好気処理過程では有機物分解による熱発生で温度が変化することから, 廃食用油と汚泥では有機物分解特性に差異があったためだと考えられる。すなわち, 下水汚泥に廃食用油を加えた有機物反応は廃食用油のみの有機物反応より速いことが示され, 下水汚泥のほうがより易分解であることが分かる。

Fig. 5 Time course changes of temperature during each test depending on the characteristics of sludge

さらに, 同じ有機負荷 (BOD₅負荷) と含水率で実験したにもかかわらず, 汚泥の占める割合の多い脱水ケーキでの実験では, 初期に急速に反応が進んでいる。

また, 実験が 7 月から 11 月の間にかけて行われたが, 実験順序については①廃食用油, ②余剰汚泥, ③濃縮汚

Fig. 6 Time course changes on calories consumed during the thermophilic oxic process

泥、④脱水ケーキであった。**Fig. 5**に示すように脱水ケーキ実験で最終温度が他の実験より低下しているのは、低い外気温のために散熱量が多くなったと考えられる。

3.2 熱発生特性

前述の槽内温度変化により反応状態を巨視的に理解できると思われる。しかし微生物活性や生物増殖の環境として適当であるかどうかは、槽内温度変化の大小だけから単純に論じることではできないと考えられる。それは、高温好気反応槽における、担体比熱と通気量の違いによる排気損失熱量に差があれば、単位時間あたりの温度上昇率にも違いが現れることになるからである。本研究では、反応槽内の現象をできるだけ定量化して把握するため、熱収支の面から反応熱の各形式の特徴を検討した。

まず、高温好気処理法における1サイクルの熱収支計算に必要な基礎式を示す。ただし使用記号については、一括して巻末に示した。

系全体の熱収支は

$$Q_r = Q_m + Q_w + Q_{w1} + Q_s + Q_a + Q_l$$

である。ここに、

反応による発熱量： $\Delta Q_r = h_s \cdot dS/dt$

乾燥担体顕熱量変化： $\Delta Q_m = C_m \cdot W_o \cdot dT/dt$

水分顕熱量変化： $\Delta Q_w = C_w \cdot W \cdot dT/dt$

水蒸気潜熱変化： $\Delta Q_{w1} = h \cdot dW/dt$

水蒸気顕熱量変化： $\Delta Q_s = C_w \cdot (T - T_a) \cdot dW/dt$

空気顕熱量変化： $\Delta Q_a = q \cdot C_a \cdot (T - T_a)$

装置の熱損失： $\Delta Q_l = K \cdot F \cdot (T - T_a)$

として算定した。

Fig. 6に各実験における反応熱の経時変化を示す。また、**Fig. 7**に投入試料ごとに整理した1サイクル反応当たりの各熱の収支も示す。

まず、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。その水分の蒸発熱 (Q_{w1}) については、経時変化曲線パターンが温度の変化とよく一致している。全反応熱に対する水分の蒸発熱の割合は、廃食用油の場合 (Test 1) が59%、余剰汚泥の場合 (Test 2) が59%、濃縮汚泥の場合 (Test 3) が63%、脱水ケーキの場合 (Test

4) が55%であった。各実験で水分の蒸発熱が全反応熱の半分以上を占めることが分かった。

Fig. 7に示すように装置からの散熱量 (Q_l) については、廃食用油、余剰汚泥、および濃縮汚泥実験においてはほぼ同等の散熱量である。しかし脱水ケーキ実験では散熱量が若干多くなっている。これは実験期間中の外気温の影響を受けたため、装置の散熱量は全反応熱の30%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物によって必要であることが示された。

また、いずれの実験でも通気による空気顕熱 (Q_a) は全反応熱の8%~10%の範囲となり、排気による水蒸気顕熱 (Q_s) は3%程度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0.5%、2.5%程度となり、反応過程中熱変化に与える影響は極めて少ないことを示している。

3.3 高温好気処理法における有機物の分解性

有機物の生物分解性を評価するためには分解に伴う発熱量で評価する方法がある¹⁰⁾。**Fig. 8**は各試料の反応熱量と理論発生熱量との関係を示す。ここで反応熱量とは、高温好気処理過程において前述の熱収支式を用いて算定した様々な熱発生量の総和値である。理論発生熱量とは、前述の分析方法より測定した各試料の発熱量から計算したものである。この結果を見ると、廃食用油、余剰汚泥、および濃縮汚泥実験の反応熱は発生熱量とよい一致を示し、脱水ケーキ実験の反応熱が発生熱量より40%程度小さい値を示している。すなわち、廃食用油 (Test 1)、余剰汚泥 (Test 2)、および濃縮汚泥 (Test 3) 実験においては、投入した有機物が完全に分解され、有機物分解による発生熱量と反応過程の総熱量がほぼ同等となったものと考えられる。しかし、脱水ケーキ実験 (Test 4) においては反応した有機物の発熱量は投入した有機物が持つ発生熱量の60%を占めるにすぎず、有機物が完全に分解されなかったことを示している。この原因は脱水ケーキが高分子凝集剤を含み、この高分子凝集剤のために汚泥は団塊の形状になり、脱水ケーキと菌体との混合がうまくできず、有機物および酸素の供給が不十分となり、微生物の活性が落ちたためと考えられる。また脱水ケーキ実験では攪拌する時、ある程度ケーキの形状を改善することによって温度が上昇するが、全体的な分解率が低いことが明らかとなった。

Fig. 7 Composition of calories budget in each test

Fig. 8 Relation between calories produced and the retical calories in each test

以上の熱収支の結果より、下水汚泥の高温好気処理法における余剰汚泥の反応熱量と理論発生熱量との比率は1.02であり、濃縮汚泥の反応熱量と理論発生熱量との比率は1.07である。余剰汚泥と濃縮汚泥の有機物分解性が高く、最適操作条件で反応したものと考えられる。しかし、脱水ケーキの反応熱量と理論発生熱量との比率は0.60であり、有機物が完全に分解できなかったことが分かる。以上議論したように、下水汚泥の高温好気処理法では有機物分解に伴う発生熱量により有機物の分解率を評価できることが明らかになった。

4. ま と め

本研究では、下水処理場から発生した余剰汚泥、濃縮汚泥と脱水ケーキを高温好気処理法における好気性微生物によって分解し、各熱発生特性を考察し、熱収支により有機物分解性を検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

1) 反応槽内の温度変化から、下水汚泥に廃食用油を加えた有機物反応は廃食用油のみの有機物反応より立上りが早いことが示された。これは下水汚泥の分解が廃食用油より速いことを示す。

2) 反応熱の各熱への分配特性については、水分の蒸発熱量の割合が、廃食用油の場合59%、余剰汚泥の場合59%、濃縮汚泥の場合63%、脱水ケーキの場合55%となった。各実験で水分の蒸発熱量が全反応熱の半分以上を占めることが分かった。また、装置からの散熱量は全反応熱の23~30%になった。その二つを合わせ、全反応熱に対する85%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、有機物源に応じた装置の熱管理することと水分をより効率的にとばすことが重要であると分かった。

3) いずれの実験でも通気による空気顕熱は全反応熱の8%~10%の範囲となり、排気による水蒸気顕熱は3%程度となることを示した。乾燥担体の顕熱と担体中水分の顕熱が各々わずか0.5%、2.5%程度となり、反応過程中空気顕熱、水蒸気顕熱、乾燥担体の顕熱と担体中水分の顕熱は熱変化に与える影響が極めて少ないことを示している。

4) 熱収支の結果より、下水汚泥の高温好気処理法における熱分解率は余剰汚泥では1.02であり、濃縮汚泥では1.07である。余剰汚泥と濃縮汚泥の有機物分解率は高く、最適操作条件で反応が進行したものと考えられる。しかし、脱水ケーキの反応熱量と理論発生熱量との比率は0.60であり、有機物が完全に分解できなかったことが分かる。脱水ケーキは焼却あるいは埋立が前提でプロセスが組まれているが、高温好気処理を後続プロセスとするときには、脱水方式についての検討が必要である。

謝 辞

本研究は住宅・都市整備公団関西文化学術研究都市事業本部、並びに日本総合住生活株式会社の援助を受けた。また、実験を行うにあたり祝園処理場の皆様には多大なご協力を頂いた。ここに謝意を表します。

(原稿受付 1998年7月16日)

(原稿受理 1998年11月9日)

- Q_r : 有機物分解による発生熱量 (kcal)
- Q_m : 乾燥担体顕熱 (kcal)
- Q_w : 担体中水分温度変化による顕熱 (kcal)
- Q_{w1} : 水蒸発潜熱 (kcal)
- Q_s : 水蒸気の排気による顕熱 (kcal)
- Q_a : 供給空気の顕熱 (kcal)
- Q_l : 装置の熱損失 (kcal)
- h_s : 有機物単位乾燥質量あたりの発生熱量 (kcal/kg)
- C_m : 担体の比熱 [kcal/(kg·°C)]
- C_w : 水の比熱 [kcal/(kg·°C)]
- h : 水の蒸発潜熱 (kcal/kg)
- C_a : 空気の比熱 [kcal/(m³·°C)]
- S : 有機物の質量 (kg)
- W_o : 乾燥担体の質量 (kg)
- W : 担体中水分量 (kg)
- T : 反応槽内の温度 (°C)
- T_a : 外気の温度 (°C)
- Q : 供給空気の通気量 (m³/h)
- K : 反応槽の総括熱貫流係数 [kcal/(m²·h·°C)]
- F : 反応槽の総表面積 (m²)
- T : 反応時間 (h)

参 考 文 献

- 1) 建設省都市局下水道部, 日本下水事業団 (1993) 下水汚泥の農地などへの利用の適正管理に関する調査
- 2) 楊瑜芳, 津村和志, 内藤正明 (1998) 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
- 3) 森忠洋, 劉宝鋼, 趙敬淑 (1993) 高温好気法による高濃度有機排水処理—有機物の完全酸化と蒸発—, 化学工業, 11, 52-58
- 4) 森忠洋, 蔡惠良, 藤原昇, 田極春夫, 石 操 (1995) まちとむらを結ぶ有機物の総合処理・資源化システムの構築(3)汚泥の生物燃焼法, 第32回下水道研究発表会講演集, 793-795
- 5) Liu, B. G., Noda, S. and Mori, T. (1992) Complete Decomposition of Organic Matter in High BOD Wastewater by Thermophilic Oxidic Process, Proc. of Environmental Engineering Research, 26, 77-84
- 6) Liu, B. G. and Mori, T. (1993) Complete Treatment of Shochu Processed Wastewater by Thermophilic Oxidic Process, Proc. of Environmental Engineering Research, 30, 165-174
- 7) 劉宝鋼, 蔡惠良, 森忠洋 (1994) 高温好気法による豚ふん尿の完全処理, 環境工学研究論文集, 31, 209-214
- 8) Cai, H. L. and Mori, T. (1995) Treatment of Thickened Excess Sewage Sludge by Thermophilic Oxidic Process. Proc. of Environmental Engineering Research, 32, 371-378
- 9) Zhu, L. P. and Mori, T. (1995) Direct Filtration of Raw Sewage and Decomposition of Captured Organic Materials by Thermophilic Oxidic Process, Proc. of Environmental Engineering Research, 32, 69-78
- 10) 坂本克彦 (1988) 下水汚泥の脱水・乾燥特性に関する基礎的研究, 京都大学修士論文
- 11) 山本康次, 津村和志, 中野仁 (1992) 2槽式間欠ばっ気法による窒素・リン除去, 水環境学会誌, 15(8), 541-553
- 12) 楊瑜芳, 林里香, 津村和志, 内藤正明 (1997) 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
- 13) 藤田賢二 (1993) コンポスト化技術, 技報堂
- 14) 下水汚泥資源利用協議会 (1996) 「下水汚泥分析方法 改訂増補版—1996年—」
- 15) 日本下水道協会 (1994) 「下水試験方法 1994年度版」
- 16) 藤田賢二, 北脇秀敏 (1984) コンポスト原料の発生熱量, 都市と廃棄物 14(1), 19-24