

(4) 堀川底泥の高温・好気処理による高品質土壌化
TREATMENT AND EFFECTIVE USE OF SEDIMENTARY
MUD BY THERMOPHILIC OXIC PROCESS

朱 列平*・楊 瑜芳**・佐藤利夫***・吉田 勲*・森 忠洋****

Lieping ZHU*, Yufang YANG**, Tosio SATO***, Isao YOSIDA* and Tadahiro MORI****

ABSTRACT; Thermophilic oxic process was applied to treat the dredged sedimentary mud of lakes and river which contain approximately 15% of organic materials. Organic wastes such as waste food oil and rice bran were added as an energy source. Cedar chips were added as a media to adjust moisture content. Physical and chemical characteristics of mixture after the treatment of thermophilic oxic process indicate that it became a good soil conditioner for growth of the plants. Compared with conventional natural land drying and dumping disposal method, it can save space and time, prevents odor production, make no worrisome about secondary pollution to environments.

KEYWORDS; eutrophication, sedimentary mud, thermophilic oxic process, soil conditioner

1. はじめに

近年、高度経済成長に伴う都市化で、かなりの汚濁物質が未処理のまま湖沼内に流入し、富栄養化を促進した。これにより湖沼に植物プランクトンが異常発生し、有機物や栄養塩を多量に含むプランクトンは冬季には沈殿して湖沼の底部に堆積する。夏期の湖底は貧酸素の状態となり、リン等の溶出が促され湖沼水質は悪化する。また、底泥の嫌気化によって硫化物発生し、悪臭を放つこととなるほか、湖沼底部の生物が生息できなくなり自浄作用が損なわれていくこととなる。

湖沼浄化の対策としては、堆積しているこれらの底泥を除去することが有効であり、最近では底泥除去技術は高濃度、薄層浚渫が用いられている¹⁾。またこの他に、浮上分離法により有機物や栄養塩の含量が高い底泥は回収できる可能性は高い²⁾。しかし、この回収された底泥の二次処理が問題になることは明らかである。各湖沼には数千万立方メートルあるいは数百万立方メートルもの底泥が沈積していると言われている。毎年日本全国でおよそ200,000m³から600,000m³の浚渫底泥の脱水処理、固化処理あるいは安定化処理が必要になっている³⁾。

水域から除去された底泥は通常自然乾燥法により埋立処分するが、汚濁した底泥は臭気を発散する他、衛生学的にも問題がある。しかし、都市化と工業化により農地は減少し、さらに農地においても化学肥料と農薬の普及から有機物等を使用することが少なくなっている。環境を改善するためには、流入負荷の削減と同時に、これらの有機物を農地に還元するリサイクル系を再現しなければならない。すなわち、有機物の総合処理・資源化システムを構築することが有効と考えられる⁴⁾。そこで、その一つの方法として高温・好気処理法を導入し、底泥をコンポスト化して農地に還元する方法を検討した。

* 鳥取大学連合大学院

The United School of Agricultural Science, Tottori University

** 京都大学工学部

Faculty of Engineering, Kyoto University

*** 島根大学生物資源科学部

Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University

**** 緑土水の研究所

Institute of Green, Land and Water

2. 実験装置および方法

2.1 材料

底泥は島根県松江市の堀川から採取した。採取された底泥は4℃の低温室に保管した。Table 1に底泥の物理的、化学的特性を示す。底泥中には約25%の固形物(TS)が存在し、揮発性有機分は総固形物の約15%であった。また、生物学的酸素要求量(BOD)は4,100mg・kg⁻¹であり、この底泥のTSの熱量は1kg当たり540Kcalであった。この表から堀川の底泥は有機物と栄養分を多く含み、汚染されていることがわかった。

2.2 装置

Fig.1に実験装置を示す。20lのプラスチック容器の底に多孔性プラスチック板を敷き反応槽とし、外周を断熱のために厚さ20cmの発泡スチロールで囲んだ。この装置の反応槽の中に底泥を均一に保持するために大きさ1~3mmの杉チップ15lを投入した。底泥を投入し、よく攪拌した後、エアープンプを用いて下部から通気し反応を開始した。流量はフローメーターにより調節した。反応槽の中には反応の進行を確認するため熱電対を入れ、連続的に温度を測定し、また混合物の重さを測定するため、反応槽は台ばかり(20kg台秤)の上に乘せた。

2.3 実験条件および方法

(1) 実験条件

高温・好気法はもともと高濃度有機物の処理に適用されていたものである。適切なBOD容量負荷は3~6 kgm⁻³d⁻¹の範囲にあり、底泥のみを投入した場合、反応槽内の有機物含量が低いため、有機物の分解が十分に行われず、その結果、温度は上昇せずに水分が反応槽内に残存することになる。従って、十分な分解を行うためには、他の熱源を加える必要がある⁵⁾。そこで熱源として食品廃棄物である廃油および農村

からの廃棄物である米糠を利用した。廃油の発熱量は9,400 kcal/kg、BODは1,400,000 mg/kgであり、米糠の発熱量は5,200 kcal/kg、BODは500 mg/gである。高温・好気処理装置に投入する試料はBOD容量負荷を指標として有機物量を調節した。なお、BOD容量負荷は底泥と熱源とする廃棄物とを合計した値である。実験では最適運転条件を調べるために、Table 2に示すBOD負荷と通気量が異なる種々の条件下における温度変化および重量変化等を測定して比較し、適正なBOD負荷と通気量の組み合わせを求めた。底泥と熱源の投入は2日に一回行った。実験開始時にあたって底泥1.0 kgを反応槽に

Table 1 Characteristics of sedimentary mud

Water content (%)	75
pH	6.7
VSS (%)	15
BOD (mg/g-ds)	4.1
Water extract TOC (mg/g)	11
T-N (mg/g-ds)	1.5
T-P (mg/g)	1.4
Heat producing capacity (kcal/kg-ds)	540
Conductivity (dSm ⁻¹)	0.7

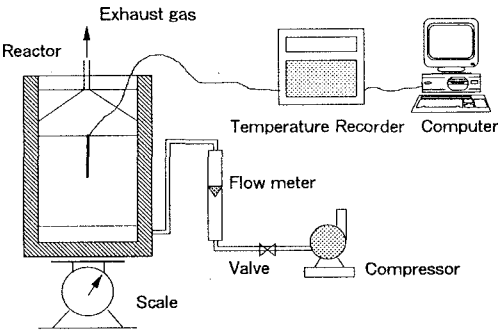


Fig.1 Flowchart of Thermophilic Oxidation Process

Table 2 Operational conditions for treatment of sedimentary mud by thermophilic oxidation process

Reactor No.	No.1	No.2	No.3
Addition of oil (ml)	30	130	230
Addition of rice bran (g)	200	200	200
BOD load (kg m ⁻³ d ⁻¹)	3.5	7	10.5
Aeration rate (l m ⁻³ min ⁻¹)	50	100	200
3 steps	100	200	300
	200	300	400

入れ、さらにTable 2に示す米糠、廃油を添加し、これらの混合物の含水率が50%程度になるように水を加えて調整した。二回目からは反応における混合物の減少量に相当する底泥を投入し反応を続けた。生物分解を促進するために毎日1回攪拌を行った。底泥の総固形物の約85%は無機分であるので、反応を正常に維持するために一定量の混合物を定期的に装置から出す必要がある。

(2) 分析

底泥の含水率、VSS、BOD等の分析は下水試験方法に準じた⁶⁾。TOCの測定には全有機炭素分析計(TOC-5000、島津製作所)を用いた。装置中の試料の含水率は、毎回投入の前後に5g程度の混合物を採取し、それを105℃で約12時間乾燥した後重量変化を測定して求めた。重金属の測定は誘導結合プラズマ光度計(ICPS-2000、島津製作所)を用いた。反応後、混合物の物理性の測定は土の分析標準方法を準じた⁷⁾。反応物の発熱量は改良型燃料形式断熱熱量計(吉田製作所)を用いて測定した。また、有機炭素の分解により発生する二酸化炭素濃度の測定は2時間毎に行い、供給空気量を乗じて生成した二酸化炭素量を求めた。排気ガス中のCO₂成分の分析には検知管(GAS TECK社)を用いた。

3. 結果および考察

3.1 温度の変化および装置重量の増加

高温好気法処理の運転上の重要なポイントは、有機物の供給、水分調節、通気性改良等である。底泥のみを処理する場合は、底泥が有する熱量に対する蒸発潜熱の比率はわずか0.32であった。そのまま高温好気法で処理すれば、反応装置の温度が上がらず、担体の含水率は投入された水分の蓄積によって上昇し、処理ができなくなると考えられる。そのため、Table 2に示すように、補助熱源食用廃油と米糠を用いてBOD負荷と通気量が異なる種々の条件下における温度変化および重量変化等を測定して比較し、適正なBOD負荷と通気量の組み合わせを求めた。その中の一つの条件下における反応槽の温度、担体の含水率および重量変化をFig.2に示す。2日に1回添加した廃油および米糠の量はそれぞれ30ml、200gとした。投入した有機物の分解熱量と水分の蒸発潜熱との比率(C/W)が2.5で、BOD負荷は3.5 kgm⁻³d⁻¹で、通気量は100 lm³min⁻¹であった。反応装置の最高温度は常に50℃を越え、混合物の含水率は投入時の50%程度から、反応後には40%前後になった。しかし、連続処理を行っているので、混合物の重さは投入した底泥の無機分よりも大きくなった。正常な反応を維持するために2日目と8日目の二回にわたり約1.8kgの混合物を装置から搬出したが、それでも全体の重量は増加した。このことから、定期的に混合物を装置から取り除去することが必要である。

Fig.3にBOD負荷と通気量を変えた時の反応槽中の最高温度および底泥処理量の変化を調べた結果を示す。BOD負荷を変化させた実験では、Run 1ではBOD負荷を3.5 kgm⁻³d⁻¹、Run 2では7.0

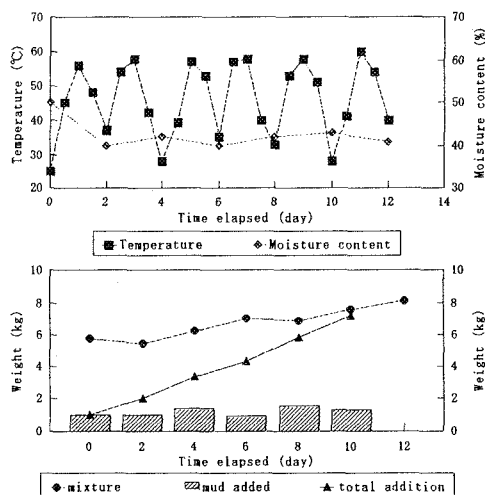


Fig. 2 Change of temperature, moisture content and weight during decomposition of sedimentary mud by thermophilic oxic process on the conditions of: oil addition 30 ml; rice bran addition 0.2 kg; BOD load 3.5 kgm⁻³d⁻¹ and aeration rate of 100 lm³min⁻¹.

$\text{kgm}^{-3}\text{d}^{-1}$ 、Run 3では $10.5 \text{ kgm}^{-3}\text{d}^{-1}$ に設定したが、いずれの実験でも通気量を少なくすると、底泥の処理量が低下し、また通気量が過剰な場合、冷却作用や乾燥作用によって微生物の活動が抑制され、温度が上昇せず、底泥処理量も低下した。また、BOD 負荷が $10.5 \text{ kgm}^{-3}\text{d}^{-1}$ の場合、有機物の分解が不十分、かつ水分が完全に蒸発できず、有機物と水分が残留した。この結果から運転条件としてはBOD負荷 $7.0 \text{ kgm}^{-3}\text{d}^{-1}$ 、通気量 $200 \text{ l m}^{-3}\text{min}^{-1}$ が適していると考えられる。

3.2 長期間運転

ここでは、上述の最適運転条件で連続処理を行った場合について検討する。底泥と米糠と廃油を $2.6 \text{ kg} : 0.2 \text{ kg} : 130 \text{ ml}$ の比率で混合し、この混合物を2日に1回、BOD 負荷は $7.0 \text{ kgm}^{-3}\text{d}^{-1}$ 、含水率50%程度となるよう投入し、次の投入前に、 2.2 kg の混合物を取り出しながら、通気量 $200 \text{ l m}^{-3}\text{min}^{-1}$ の条件で約1ヶ月間、連続処理を行った。また、搬出があるので、担体を補充するため毎回 0.3 kg の杉チップが底泥と混合し投入した。この結果をFig.4に示す。この図の上図に示すように、温度の経日変化がほぼ安定し、平均最高温度は 60°C を越え、含水率は投入した底泥により高くなり、また生物反応熱により減少したり、ほぼ40%から50%の間で変動した。また、反応槽に投入した混合物の重量変化および累積底泥の投入量、累積混合物の搬出量をFig.4の下図に示した。この図から明らかのように1ヶ月間の連続実験において累積投入量と搬出量は徐々に増加するが、装置内混合物

の重量は反応および搬出によりほぼ一定値を示した。次にサイクル毎の重量変化を見る。一回の混合物投入量は 3.2 kg である。この混合物は含水率75%の底泥 2.6 kg 、 0.3 kg の杉チップおよび 0.3 kg の米糠と廃油からなっている。2日後には反応槽内混合物は高温・好気処理により 1.0 kg 減少し、含水率は約40%に低下した。サイクル終了時に、槽内混合物の 2.2 kg を搬出し、その後、次の投入 (3.2 kg)を行って実験を繰り返した。この結果から底泥の処理量を計算すると1立米反応槽当たり約 130 kg/日 の底泥を処理できることが分かる。長期運転の結果を見ると反応後の混合物の累積搬出量が底泥の累積投入重量よりもはるかに低く、かつ含水率も低いことから、高温・好気処理によって効率よく底泥が減容化されていることが分かる。

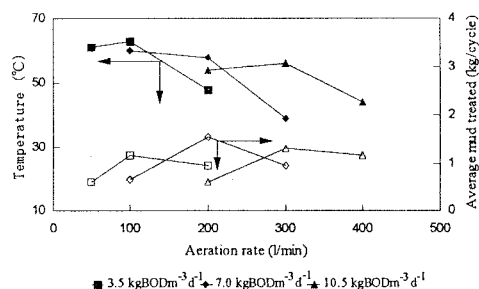


Fig.3 Influence of BOD load and aeration rate on temperature and average treated mud per cycle during the decomposition of mud by thermophilic oxic process

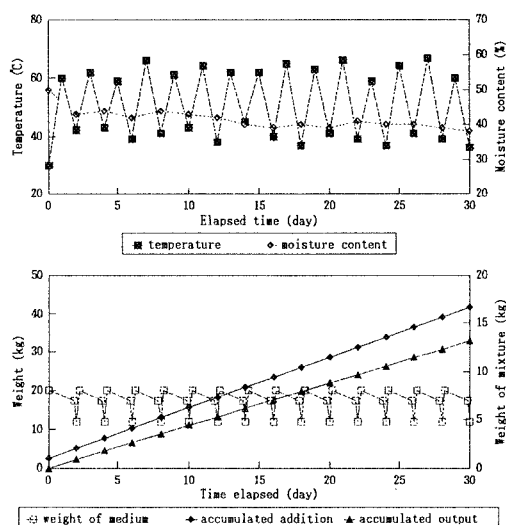


Fig.4 Changes in weight, temperature and moisture content of medium, cumulative addition and output during decomposition of sedimentary mud by thermophilic oxic process for 1 month.

Operational conditions: oil addition of 130 ml ; rice bran of 0.2 kg ; BOD load of $7.0 \text{ kgm}^{-3}\text{d}^{-1}$ and aeration rate of $200 \text{ l m}^{-3}\text{min}^{-1}$.

Fig.5に1回投入した後反応槽内混合物の温度および二酸化炭素濃度の経時変化を示す。底泥と米糠と廃油の混合物を投入し、反応を開始してから、約2時間で反応槽内の温度が上昇ははじめ、6～8時間経過後には反応槽内の温度は50℃以上になり、この温度は次回の混合物投入前に約30時間を持続した。同時にCO₂は投入直後から急速に上昇し、3時間後には2%程度になった。40時間後には1.0%まで低下した。これは有機物の分解が活発に起っていることを示している。炭素収支を計算すると、投入した底泥、廃油と米糠の中に含まれる総炭素量は350gであるのに対して、約298gの有機炭素が二酸化炭素に変換され、85%以上有機炭素がCO₂に分解され、有機物が効率良く分解されていることが分かる。

3.3 反応後混合物の性質

Table 3は高温・好気法による処理後の混合物の性質を示したものである。この表から明らかなように処理後の混合物には窒素、リンおよびカリウムがかなり含まれており、これは米糠に由来すると推測されるが、これらの無機成分が多いことは高品質な土壌改良材として利用できる可能性を示さしており、リサイクルする上で有利な結果である。反応後、混合物のBOD値は底泥より少し高くなった。その理由は添加した熱源の有機物の分解が不十分であったか、あるいは搬出した混合物の実反応時間2日は、理論値の反応槽内平均滞留時間の6日よりも短かったことに起因すると考えられる。有機物の分解率の向上、特に残存油分の減少を図るためには、反応時間を延ばすか、あるいは中温域で高い油脂分解能力を持つ油脂資化性微生物を増殖することにより解決できると考えられる⁸⁾。

一方、高品質土壌改良材は、地力を高めるといわれている。地力としては、保水性、保肥力、通気性などの向上が望まれている。保水性については、水が土壌に吸引保持されている力を表す水分張力(pF)という指標がある。Fig.6に処理後の混合物の水分保持力を表す水分特性曲線を示す。これは試料を飽和状態からサクションを加えて徐々に脱水して

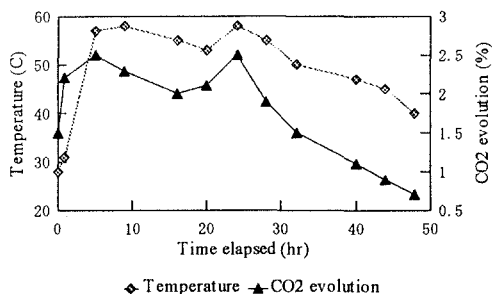


Fig.5 Changes in temperature and CO₂ evolution concentration during one period of decomposition of sedimentary mud by thermophilic oxic process on the conditions of: oil addition 130 ml; rice bran 0.2 kg; BOD load load 7.0 kgm⁻³d⁻¹ and aeration rate 200 l m⁻³ min⁻¹.

Table 3 Characteristics of products treated by thermophilic oxic process

Items	Measurements
Water content (%)	30-40
pH	6.8
BOD (mg/g-ds)	15-20
Water extract TOC (mg/g)	6-10
T-N (mg/g-ds)	3-5
P ₂ O ₅ (mg/g-ds)	13-18
K ₂ O (mg/g-ds)	0.9
Conductivity (dS/m)	2
Density	1.5
Permeability (cm/s)	9 x 10 ⁻³

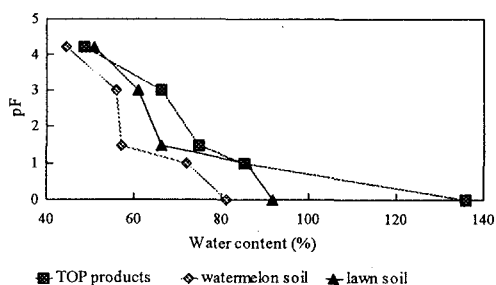


Fig.6 pF-water content curve of mixture after the treatment of sedimentary mud by thermophilic oxic process

いく乾燥過程の水分保持曲線である。混合物の水分特性曲線をみると、これは鳥取県大栄町スйка畑や芝畑の土の水分特性曲線とよく似ており⁹⁾、混合物はpF 1.5～4.2で、かなりの有効水分を保持しており、作物はこの水を徐々に利用することができる。これが高温好気法で用いられる杉チップの特徴であり、50 μ m程度の仮導管がハチの巣構造をした杉チップが水分を毛細管現象によって吸収し、水分調節と通気の役目をしていると考えられる¹⁰⁾。混合物の飽和透水係数(水温15℃)は0.009 cm/sであり、これは鳥取県東伯郡大栄町のスйка畑のクロボク土の飽和透水係数(水温15℃)の0.020 cm/sと芝畑の飽和透水係数(水温15℃)の0.006 cm/sの間にある。また実験用試料の固相率は43%、液相率は35%、気相率は22%であったので、高温・好気法による底泥の処理後の混合物は高品質な土壤改良材に適している。

また、高品質土壤材を利用する場合、最も問題となるのが重金属濃度である。日本国内ではコンポスト中の重金属濃度について、Table 4のように規制値およびガイドラインがある。また農用地における土壤中の重金属等の蓄積については、土壤(乾土)1 kgにつき Zn 120 mg以下というガイドラインがある¹¹⁾。高温・好気法による処理後の混合物の重金属濃度をTable 4に示す。Znの濃度は他の重金属に比べ少し高い値を示すが、規制値以下である。その他の重金属含量も規制値よりやや低い値となっている。

以上の結果から、底泥及び有機廃棄物を高温好気法により処理できることは明らかである。この方法を導入すれば、底泥の二次処理だけではなく、熱源として有機廃棄物を利用できることから、流入負荷の削減につながり、さらに処理物が土壤改良材として再利用できることから、水環境の改善を行う技術の一つとして、また水環境の保全を考えた有機廃棄物の総合処理・資源化システムを構築する技術の一つとして、本法は非常に適した技術と言える。また、高温・好気装置は非常に簡単な構造をしており、微生物の分解能力を利用しているので、エネルギーも少なく済み、直接浄化により排出される底泥を含め、地域に発生するすべての有機物を一個所に収集し、高温・好気法などを利用して、これらを組み合わせることで処理することにより再利用できる形に変換することができる。すなわち、高温・好気法による底泥の処理において例示したように底泥、下水汚泥、生ゴミ、廃油などの都市からの有機廃棄物と廃材チップ、米糠、モミガラなどの農山村からの有機廃棄物を組み合わせ、高温・好気法のように環境にやさしい処理技術による資源化システムの構築が水環境の改善と保全のために重要であると考えられる。

4. まとめ

底泥を高温・好気処理することによって次の結果が得られた。

(1)高温・好気法により易分解性有機物を加えて底泥を処理したところ、有機物を十分に分解し、効率的な減容化が可能であった。

(2)易分解性有機物として周辺農村からの有機廃棄物である米糠および生活有機廃棄物である廃油を用いた。その際の最適運転条件は、底泥と米糠と廃油の添加率は2.6kg:0.2kg:130ml、含水率は50%、BOD負荷は7.0 kgm⁻³d⁻¹、通気量は200 lm⁻³min⁻¹、底泥処理量は130 kgm⁻³d⁻¹であった。

Table 4 Heavy metal in products treated by thermophilic oxic process (unit: mg kg⁻¹)

Items	mixture	standards
Hg	N.D.	2
As	N.D.	50
Cd	2.2	5
Cr	12	200*
Zn	132	120
Pb	30.2	300*
Cu	32.1	125

* The regulating standard for Cr and Pb was referred that of England¹²⁾

(3)高温・好気法により処理した後の混合物は大山クロボク土（鳥取県東伯郡大栄町スйка畑や芝畑の土壌）と似た物理的性質を持ち、窒素、リンおよびカリウムがかなり多量に含まれ、高品質土壌改良材として使用できる可能性が高い。

(4)実験に供した底泥は松江堀川で採取したものであり、その強熱減量は15%であった。霞ヶ浦のような汚染された湖沼の底泥は含水率70%以上で、ヘドロの強熱減量は21%を越える¹³⁾。従って、霞ヶ浦の底泥の有機物含有量は松江堀川の底泥よりも高いことから、高温・好気処理法に、より適するものと考えられる。これらの結果から、高温・好気法は地域内で発生するあらゆる有機物を一個所に収集して、可能な限りリサイクルする総合処理・資源化システムを構築する技術の一つとして有用であることがわかった。

5. 参考文献

- 1) Nakamura M.: Recent Dredging Techniques for Bottom Sediments, Proceeding of 6th international Conference on the Conservation and Management of Lakes-Kasumigaura'95. Vol. I, pp.572-575 (1995)
- 2) 森 忠洋、永島 昌治、楊 瑜芳、中村 幹雄：湖沼浄化のための環境生態工学(1) 直接浄化によるベントス復活の試み、日本水環境学会年会講演集、Vol.29, pp.182, (1995)
- 3) Ogawa N., Akimoto K., Akuba T., Okada M. & Seino K.: Treatment and Effective Use of Dredged Sludge. Proceeding of 6th international Conference on the Conservation and Management of Lakes-Kasumigaura'95. Vol. I, S2-6, 450-453 (1995)
- 4) 森 忠洋、蔡 恵良、梁在景：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、廃棄物学会誌、Vol.6, No.4, pp.330-336, (1995)
- 5) 梁在景、清水由紀子、趙 敬淑、森 忠洋：高濃度有機排水の高温・好気処理におけるカロリー／水(C/W)比の重要性、水環境学会誌、Vol.18, No.7, pp.583-588, (1995)
- 6) (社)日本下水道協会：下水試験方法 (1984)
- 7) 土質工学会編：土質試験の方法と解説、(1990)
- 8) 住口 和子：高温好気法において油脂分解に関わる微生物に関する研究。島根大学修士論文 (1996)
- 9) 川田 昇平：畑地における土壌水分の動態と測定法に関する研究 東伯地方を対象として、島根大学卒業論文(1996)
- 10) Zhu L.P. & Mori T.: Direct Filtration of Raw Sewage and Decomposition of Captured Organic Materials by Thermophilic Oxidic Process. Proc. of Environ. Eng. Res. vol.32, 69-78 (1995)
- 11) 環境庁水質保全局通達「農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準について」(1984)
- 12) Gies, G.: Regulating Compost Quality in Ontario, Biocycle, Vol.33, No.2, pp.60-61 (1992)
- 13) Fukushima T., Terazono K., Kamijo K. & Tahara S.: Recycling of Dredging Sediment Out of Lake Kasumigaura. Proceeding of 6th international Conference on the Conservation and Management of Lakes-Kasumigaura'95. Vol. I, S2-6, 434-437 (1995)