

新規な余剰汚泥減容化システムの開発 (第2報)

食品環境科 環境スタッフ
カルト株式会社
特定非営利活動法人 炭化リサイクル研究会

岡本哲志
山本須美夫
戸塚好之

Development of New Reduction System for Excess Sludge (2nd Report)

Tetsuji Okamoto, Sumio Yamamoto and Yoshiyuki Totsuka

The rising disposal cost for excess sludge tasks economically business establishments which own waste water treatment facilities. In this study, we developed new reduction system for excess sludge by utilizing both gaseous ozone and thermophilic bacteria. First of all, we made experimentally the equipment which could solubilize high concentration (MLSS : more than 10,000mg/L) of excess sludge by circulating with ozone in closed system. Moreover, we found that 87% of excess sludge could be reduced by the tandem combination of the solubilization with ozone and the digestion with thermophile, and that phosphate phosphorus, which is available as fertilizer, was eluted (maximum 40% of phosphorus content in sludge) in supernatant of sludge solubilized by ozone.

1. はじめに

県内で産業廃棄物として排出された余剰（下水）汚泥は、平成15年度で142万トン（産業廃棄物の排出量全体の12%）に上り、4年前に比べて25万トンも増加した¹⁾。排水処理設備を持つ県内事業所では、余剰汚泥の処分（脱水後埋立）を、産廃業者に脱水重量1トン当たり約2～3万円で依頼しており、発生量の増加に伴う処分費用の高騰が県内企業の経済的負担となっている。

既存の減容化技術では、難分解性である汚泥（主として微生物）の細胞壁を溶かすことで生分解性を高める「可溶化」プロセスと、可溶化した汚泥を微生物に食べさせる「消化」プロセスの2段階を経る。この2段階プロセスによって、活性汚泥処理による「汚泥の発生」と可溶化及び消化処理による「汚泥の減容」を均衡させ、余剰汚泥発生量を大幅に減らそうとするものである。

このような減容化技術は、県内の事業所でも導入が進んでいる。しかし、導入事例（オゾンで可溶化→曝気槽で消化）では、曝気槽に過大な有機物負荷が掛かり、安定した排水処理ができないこともしばしば指摘されている。

そこで、本研究では、既存の技術が抱える課題を克服する新規な余剰汚泥減容化システム（図1）の開発を目的としている。具体的には、1）オゾンを利用した密閉循環型の汚泥可溶化装置を開発することにより、従来技術（開放型）に比べオゾンの利用効率を高める、2）汚泥減容化の各段階に最適な処理技術（可溶化：オゾン、消化：好熱菌）を配置することで全体の効率を高める（目標：余剰汚泥の70%削減）、3）余剰汚泥の減容化に留まらず、汚泥可溶化の過程で得られる上清から肥料として利用可能なリンを回収する、の3つの特徴を有する小型で

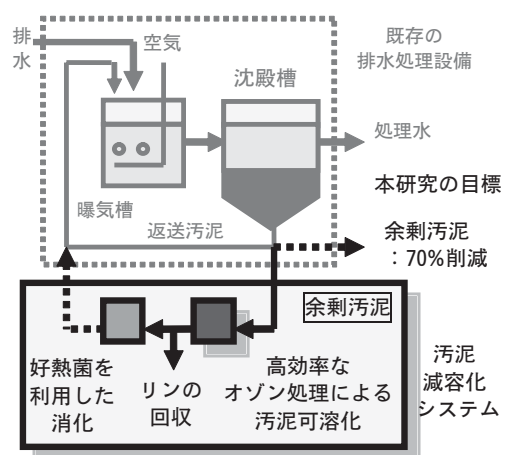


図1 本研究で開発する余剰汚泥減容化システム

【報告】

高効率な処理装置を目指した。

2. 実験方法

2.1 余剰汚泥の調製

余剰汚泥の性状は、流入する排水の性質や管理方法により変動するため、独自に活性汚泥処理系を構築することにした。また、人工的な排水の調製が容易であり、菌叢が安定していることから、単一炭素源で生育する活性汚泥を育種することにした。具体的には、化学系排水として高濃度（1,000mg/L）の微生物処理が可能であり、県内の化学系事業所でも実際に排水処理を行っているフェノール排水を対象にした。

活性汚泥（以下、汚泥）は、静岡市内にある食品加工関連の事業所から譲り受けた。容量3Lのビーカーに、2.5Lの汚泥（MLSS（活性汚泥浮遊物質）²⁾ 濃度：約7,000mg/L）及びフェノール排水（調製法：フェノールを所定の濃度で水道水に溶かし、COD（化学的酸素要求量）：N：P = 100：5：1となるよう硝酸塩及びリン酸塩を添加）を添加し、エアポンプで曝気（1 L/min）することで馴養を行った。フェノールの初発濃度を100mg/Lとし、1日毎に汚泥上清のフェノール濃度を高速液体クロマトグラフ（8010型、東ソー）で定量し、フェノール濃度が1 mg/L以下になった時点で新たな排水を添加するという操作を繰り返した。所定濃度のフェノールが1日以内で分解できる様になった段階で初発濃度を2倍に高め、最終的に1,000mg/Lのフェノールを1日以内で分解可能な汚泥を獲得した。

2.2 開放系オゾン処理による基礎試験

最初に、既存の可溶化技術である開放系のオゾン処理を検証した。2.1で獲得した余剰汚泥（MLSS濃度：9,850mg/L）100mLをガラス管（30mm(φ) x 600mm(L)）に添加し、発生装置（カルト株）でオゾンガスを吹き込む基礎試験（処理時間：10, 20, 30, 40, 60分）を行った（図2）。100mLの蒸留水にオゾンガス（0.1L /min）を吹き込んだ時のオゾン濃度の経時変化を図3に示す。この条件では、10分程で3 mg/Lの飽和溶解濃度が得られた。汚泥の可溶化効率はMLSS濃度²⁾の減少で評価した。また、汚泥中の有機成分及び無機成分（灰分）の可溶化効

率を、それぞれMLVSS（活性汚泥有機性浮遊物質）濃度²⁾及び強熱残留物濃度²⁾の減少で評価した。尚、本研究では、遠心分離（TM-305型、トミー精工）の条件を10,000rpm、10分間（25℃）に固定した。さらに、汚泥の可溶化に伴い、上清に溶出する有機物濃度を全有機体炭素（TOC）濃度としてTOC分析計（TOC-500型、島津製作所）で定量すると共に、上清のpHをpHメータ（D-53型、堀場製作所）で測定した。

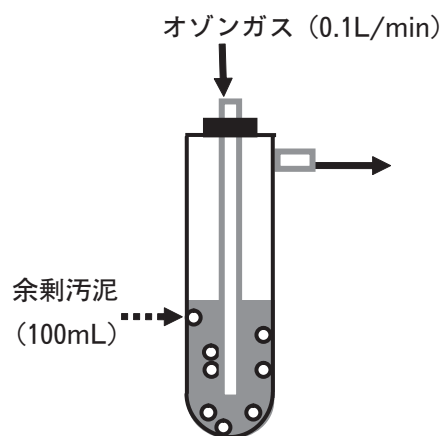


図2 開放系汚泥可溶化試験装置

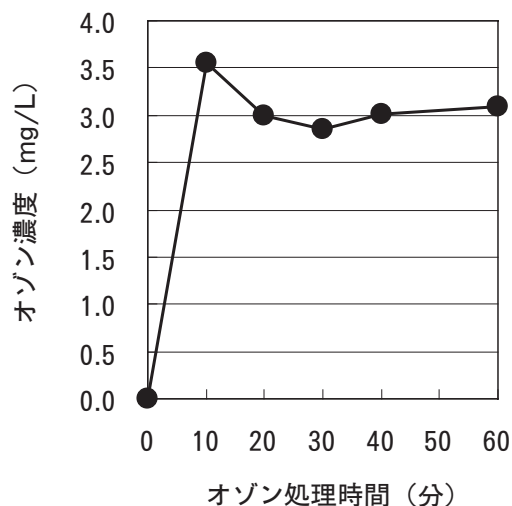


図3 水中のオゾン濃度の経時変化

2.3 可溶化汚泥からのリン回収の検討

本研究では、オゾンによる余剰汚泥の可溶化と同時に上清からリンを回収することを検討している。そこで、2.2で調製した各処理時間（10, 20, 30, 40, 60分）の可溶化汚泥上清中のリン（全リン及びリン酸態リン）濃度、及び元の汚泥に含まれるリン（全リン）濃度に対する溶出率を調べた。

【報告】

最初に汚泥中の全リン濃度を定量した。乾燥汚泥 50mg に対し硝酸 5 mL を添加し、マイクロウェーブ分解装置 (Multiwave、パーキンエルマー) を用いて加圧酸分解することで、試料中の有機物を酸化分解し水溶液化した。純水で 25mL にメスアップしたものを供試試料とし、ICP 発光分光分析装置 (Optima 3300DV、パーキンエルマー) でリン由来の発光 (213.6nm) の強度を測定することで、リン濃度を定量した。

次に、可溶化汚泥上清中の全リン濃度を ICP 発光分光分析で定量した。試料の水溶液化で、上清 1 mL に硝酸 4 mL を添加した以外は、乾燥汚泥における手順に従った。得られた測定値を、汚泥中の全リン濃度と共に、汚泥 100mL に含まれるリン含有量に換算し、リン溶出率を求めた。

さらに可溶化汚泥上清中のリン酸態リン濃度をイオンクロマトグラフ (DX-320型、日本ダイオネクス) で定量した。測定に先立ち、試料中のリン酸イオン濃度が標準溶液 (陰イオン混合標準液 IV、関東化学) のリン酸イオン濃度 (30mg/L) 以下になるように純水で希釈した。得られた測定値から、全リンと同様にリン溶出率を求めた。

2.4 密閉循環型汚泥可溶化装置の性能評価

前回の報告³⁾では、従来技術 (開放型) に比べオ



図4 密閉循環型汚泥可溶化装置 (改良機)

ゾンの利用効率が高く、高濃度 (MLSS濃度: 10,000mg/L以上) の余剰汚泥を短時間で処理できる密閉循環型の汚泥可溶化装置を試作・評価した。この密閉系と開放系 (2.2) の2つの処理条件の間で相関を取ることにした。具体的には、前回に比べ可溶化槽を 20 L に大容量化した改良機 (図4) を使用し、次項の好熱菌による汚泥消化で、効率が最も高くなる可溶化汚泥を与える処理条件を検討した。

2.5 好熱菌による汚泥消化技術の開発

オゾン処理を極限まで効率化しても、MLSS濃度が 0 mg/L になるまで行うのはコスト的に見合わない。オゾン処理後の可溶化汚泥は、細胞壁が破砕され細胞質が溶出しているため、糖類、タンパク質等の生分解性の高い有機物を豊富に含んでいる。従って、可溶化汚泥の処理には生物処理が適しているが、本研究では好熱菌による消化を検討した。分離源としては、可溶化前の余剰汚泥を採用した。これは、種菌 (分離菌株) を用いず汚泥が発生する現場に常在する菌から選抜する方が、結果として菌が優占化し安定した処理ができると考えたからである。最初に、2.2 で得られた各処理時間の可溶化汚泥を炭素源として好熱菌の馴養を行った。具体的には、容量 100mL のマイヤーフラスコに余剰汚泥 25mL と可溶化汚泥 (処理時間: 10, 20, 30, 40, 60分) 25mL を添加し、シリコ栓を装着後 60°C で 3 日間巡回振とう (150rpm) した。得られた馴養汚泥 25mL に新たに可溶化汚泥 25mL を添加し、同様に培養する操作を 1 ヶ月間継続した (図5)。

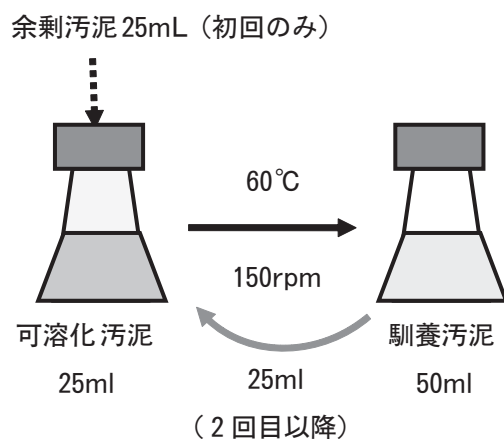


図5 可溶化汚泥を炭素源とした馴養

得られた馴養汚泥に対し可溶化汚泥の消化試験を行い、その結果から、オゾン処理の最適条件を検討した。試験方法は馴養と同様に行った。処理性能はMLSS濃度の残存率で評価したが、その際、試験後のMLSS濃度から馴養汚泥のMLSS初発濃度を引き、可溶化汚泥のMLSS初発濃度を基準に残存率を求めた。

3. 結果及び考察

3.1 開放系オゾン処理による基礎試験

図6より、処理時間の経過と共に、細胞壁の破碎による汚泥の減容、及び細胞質成分の溶出による上清の濁度の増加が観察された。より定量的には、汚泥の減容はMLSS濃度の減少（30分以上で50%減少、図7）から、上清の濁度の増加はTOC濃度の増加（図8）からそれぞれ明らかとなった。また、（MLSS濃度の減少分）/（TOC濃度の増加分）は、処理時間10分を除いて2.4～2.6の範囲にあったことから、MLSS成分の可溶化とTOC成分の無機化に消費されるオゾンガスの割合は一定であることがわかった。更に、上清のpHは処理時間の経過と共に低下したが、これはTOC成分がオゾン酸化され、有機酸が生成したためと考えられた（図8）。一方、MLSSはMLVSSと灰分からなり、図7ではこの変化も示した。本図より、MLVSS濃度の減少割合はMLSS濃度のそれと同程度であったが、灰分濃度の減少割合（40分以上で70%減少）はMLSS濃度のそれ以上

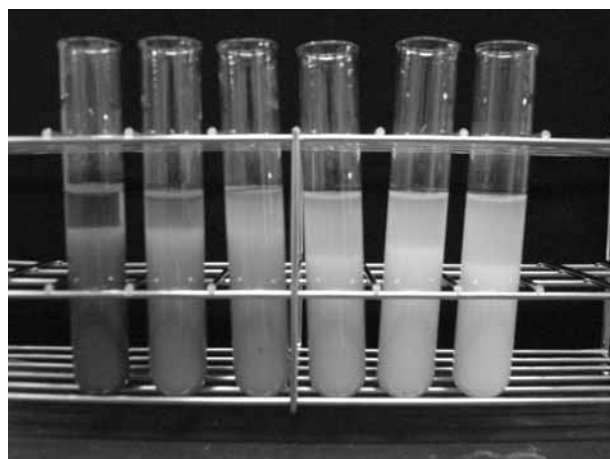


図6 開放系オゾン処理における汚泥性状の経時変化（攪拌後2時間経過）

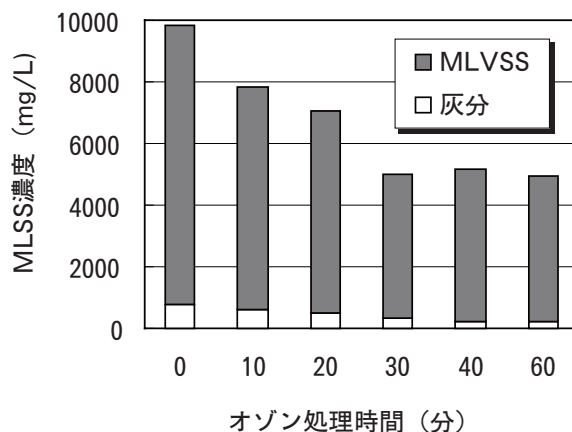


図7 開放系オゾン処理におけるMLSS（MLVSS+灰分）濃度の経時変化

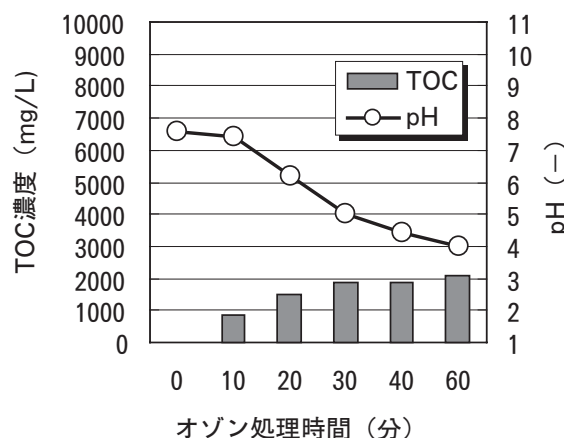


図8 開放系オゾン処理におけるpH及び上清のTOC濃度の経時変化

であった。従って、汚泥の可溶化により汚泥中の無機成分も溶出していることがわかった。これは、3.2で検討するリンの回収において、大いに期待させる結果であった。

しかし、その反面、このような開放系のオゾン処理では、汚泥が泡化し処理の操作性が悪化すると共に、汚泥とオゾンガスとの接触効率も低下することがわかった。従って、オゾンの利用効率を高め、より高濃度の余剰汚泥を大量に可溶化するために、密閉系での処理を検討することとした。

3.2 可溶化汚泥からのリン回収の検討

ICP発光分光分析の結果、汚泥から調製した供試試料のリン濃度は23.1mg/Lであった。この値を3.2で使用した余剰汚泥（MLSS濃度：9,850mg/L）100mLに含まれるリン含有量に換算すると

13.8mgであり、乾燥汚泥（985mg）の1.4%に相当した。通常の活性汚泥法で発生する余剰汚泥中のリン含有比率は1～3%であり、本分析結果はこの範囲に含まれた。また、余剰汚泥の灰分（79mg）に占めるリンの割合は17%だった。汚泥からのリン回収技術において、最近汚泥の焼却灰が注目されているのは、乾燥汚泥に比べて焼却灰に含まれるリン含有比率が高いことにある⁴⁾。しかし、この場合、リン回収コストの削減分と汚泥の焼却に必要な熱エネルギーコストの上昇分とのトレードオフになる。

図9から、オゾン処理時間の経過と共に、リン（全リン及びリン酸態リン）の溶出率が高まることがわかった。3.2で余剰汚泥の灰分も可溶化と共に溶出してくることがわかったが、その溶出割合は、25%（処理時間10分）、37%（同20分）、59%（同30分）、71%（同40分）、71%（同60分）であった。この結果と全リンの溶出率を比較すると、処理時間40分を除き、全リンの溶出率は灰分の溶出割合の85～88%に相当し、全リンの溶出は灰分の溶出に依存することがわかった。一方、リン酸態リンの溶出率は、処理時間20分を除き、全リンの溶出率の54～64%に相当し、上清に溶出した全リンの約6割をリン酸態リンが占めていた。

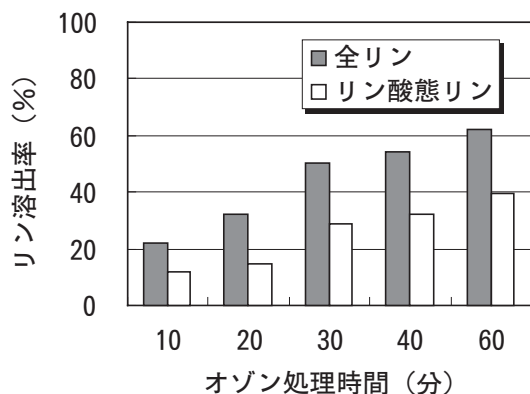


図9 可溶化汚泥上清からの全リン (T-P) 及びリン酸態リン (PO₄-P) の溶出率

3.3 密閉型汚泥可溶化装置の試作及び評価

既報³⁾の結果で、3.2の開放系試験（処理時間：40, 60分）と同程度のMLSS残存率が得られたRun①（オゾン量：2.4g、供試汚泥量4.0L）について追試を行った。今回使用した装置は、前回に比べ可溶

【報告】

化槽の容量が2倍であったため、オゾン量、供試汚泥量共に2倍にした。その結果、処理時間40分の開放系試験で得られたものと同じ性状（MLSS濃度、汚泥上清のTOC濃度、及びpH）の可溶化汚泥（次項の好熱菌による消化で最適条件を与える）が、同装置ではわずか5分で得られた。

3.4 好熱菌による汚泥消化技術の開発

図10より、消化試験開始1日後では、オゾン処理30分以上の可溶化汚泥でMLSS濃度の残存率が50%まで低下した。さらに同試験開始3日後では、同処理40分以上の可溶化汚泥で残存率が25%前後まで低下した。本結果より、開放系のオゾン処理を40分間（3.3の追試条件に相当）行った可溶化汚泥が後段の好熱菌処理に最適であることがわかった。

以上の結果から、オゾン処理による可溶化（MLSS濃度の残存率：51%）及び好熱菌による消化（MLSS濃度の残存率：24%）を組み合わせることで、余剰汚泥を87%減容化（MLSS濃度の残存率：13%）できることがわかった。

4. まとめ

本研究から以下のことがわかった。

- 1) 従来技術（開放型）に比べオゾンの利用効率が高く、高濃度（MLSS濃度：1%以上）の余剰汚泥を短時間（5分）で処理できる密閉循環型の汚泥可溶化装置を試作・評価した。
- 2) オゾン処理による可溶化（MLSS残存率：51%）及び好熱菌による消化（MLSS残存率：24%）を組み合わせることで、余剰汚泥を87%減容化（MLSS残存率：13%）できた。
- 3) 汚泥の可溶化処理で発生する上清中に、肥料として利用可能なリン酸態リンが、汚泥中に含有するリンの内最大40%溶出した。

謝辞

本研究は、静岡市の「平成20年度地域課題に係る産学共同研究委託事業」として行った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 静岡県環境森林部（現：県民部環境局）：平成16年度静岡県廃棄物実態調査報告書，pp.32（2005）
- 2) ㈱日本下水道協会：下水試験方法（上巻）－1997年版－，pp.269-271（MLSS），pp.271（MLVSS），pp.297（強熱残留物）（1997）
- 3) 岡本哲志、松本豊、山本須美夫：新規な余剰汚泥減容化システムの開発（第1報），静岡県工業技術研究所研究報告第1号，pp.39-40（2008）
- 4) 守屋由介：焼却灰からの『下水リン鉱石』製造システムについて，第46回下水道新技術セミナー講演要旨集，㈱下水道新技術推進機構，2009.2.20.

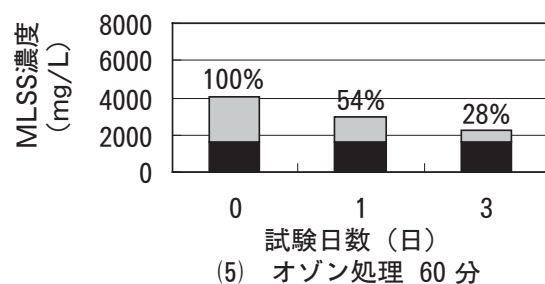
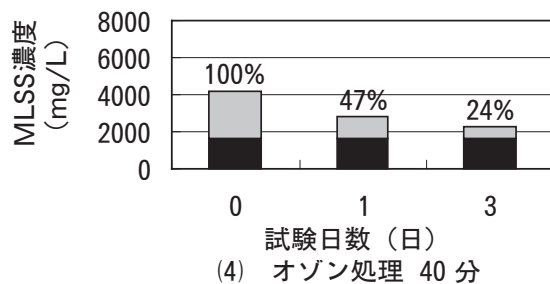
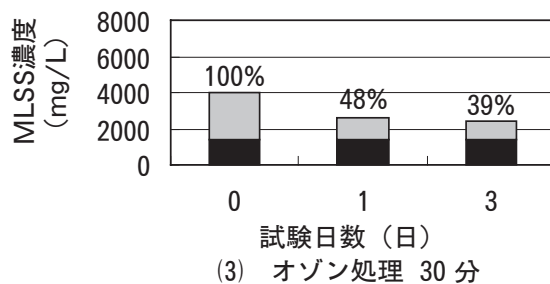
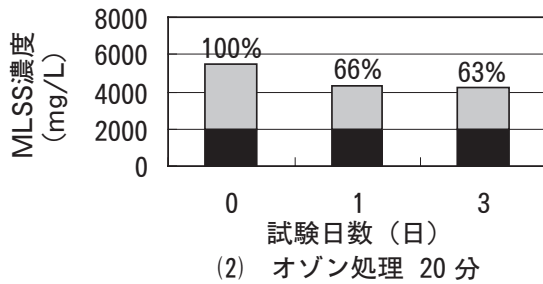
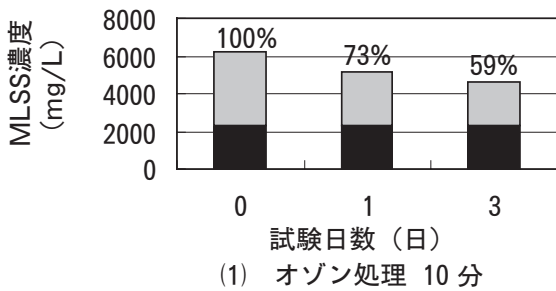


図10 馴養汚泥によるオゾン処理汚泥の消化試験

数値は、可溶化汚泥のMLSS濃度の残存率 (%)
 ■ は、馴養汚泥のMLSS濃度初発濃度