

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：15401
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20H04364
研究課題名（和文）汚泥減容化とメタン生成促進を目指した超微細気泡に内包させたオゾンによるメタン発酵

研究課題名（英文）Methane fermentation of modified sludge with ozone contained in ultrafine bubbles to reduce sludge and promote methane production.

研究代表者
西嶋 渉（NISHIJIMA, WATARU）
広島大学・環境安全センター・教授

研究者番号：20243602
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：大規模下水処理施設では下水汚泥をメタン発酵し、最終処分する汚泥の減容化とメタンとしてエネルギーの回収を行っている。しかし、汚泥の減容化率は30～50%程度にとどまり、結果として汚泥が有する熱量を十分メタンに変換できていない。そこで本研究では、超微細気泡により供給されるオゾンを用いて汚泥を改質し、汚泥減容化率とメタン発生率の改善を目指した。メタン発酵に供される余剰汚泥と発酵槽内の消化汚泥のそれぞれをオゾン改質し、メタン発酵した結果、未処理汚泥と比較して、それぞれ1.9倍、3.3倍のバイオガスを発生させることができた。また、バイオガス発生量に応じた汚泥減容化率の向上が達成された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化石資源に依存したエネルギー生産からの脱却は喫緊の課題であり、下水汚泥からのエネルギー回収にも大きな期待がある。下水汚泥からのメタン回収が現在進められているが、下水汚泥が有する潜在的なエネルギーが十分回収されているとはいえず、その結果として、処分されている汚泥の量も膨大である。本研究の超微細気泡を使って効率的に汚泥をオゾン改質し、汚泥減容化とエネルギー回収を同時に進める技術は、社会的な意義が大きい。ここでは下水汚泥だけでなく、これまでの研究例が少ない消化汚泥のオゾン改質についても検討しており、下水汚泥と消化汚泥の両方を組み込んだシステム開発を目指す本研究は学術的な意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：In large-scale sewage treatment plants, sewage sludge is digested to reduce sludge volume for final disposal and recover energy as methane. However, the volume reduction rate of sludge is only around 30-50%, and energy recovery from the sludge is not sufficient. This study aimed to improve the sludge reduction rate and methane production by modifying the sludge using ozone supplied by ultrafine bubbles. The ozone modification followed by the digestion of sewage sludge and digested sludge in the digestion reactor was conducted, respectively. 1.9 and 3.3 times more biogas was produced by the digestion of sewage sludge and digested sludge compared to untreated sludge, respectively. In addition, an increase in the sludge reduction was achieved.

研究分野：環境工学

キーワード：下水汚泥 消化汚泥 メタン発酵 超微細気泡 オゾン 改質

1. 研究開始当初の背景

下水道では、微生物を用いて水を浄化している。この過程で有機汚濁物質は二酸化炭素にまで分解されるとともに微生物体に変換される。増殖した微生物(余剰汚泥)は処理前に除かれる固形物(初沈汚泥)とあわせて下水汚泥と呼ばれ、産業廃棄物として処分される。

下水汚泥量は我が国の産業廃棄物の20%にも達するため、廃棄物対策として下水汚泥の有効利用が強く求められている。一方で、下水汚泥は微生物等有機物からなり、そのエネルギーポテンシャルは総発熱量として43 PJに達する。また、下水処理の電力消費量は我が国の電力消費量の約0.7%にも達するほど大きい。下水汚泥のエネルギーポテンシャル43 PJは、下水処理の消費エネルギー25.4 PJを上回り、下水汚泥からエネルギーを回収できれば、下水処理施設はエネルギー消費施設から創エネルギー施設に転換できる。下水汚泥のエネルギー変換は、同時に下水汚泥の減容化をもたらし廃棄物問題をも解決する。しかしながら、現状の回収エネルギー量は0.83 PJであり、ポテンシャルの1.9%にすぎない。

下水汚泥の削減と下水汚泥からのエネルギー回収を行う技術が嫌気性消化(メタン発酵)処理である。下水汚泥は、嫌気性微生物によって分解され、メタンとなり、バイオガス発電に供される。嫌気性消化処理が大規模下水処理場でしか導入されていないことが下水汚泥のエネルギーポテンシャルが有効に利用できない最大の理由であるが、大規模施設で小規模施設の下水汚泥を集約処理するなどその解決の方策は存在する。一方で、嫌気性消化処理での30~50%とされる低い汚泥減容化率、その結果としての低いメタン生成率は依然大きな課題として残る。

下水汚泥は初沈汚泥と余剰汚泥からなり、初沈汚泥の減容化率が70~80%であるのに対して余剰汚泥の減容化率は低い。余剰汚泥の主成分は水処理に関与した微生物であるが、これらは通性嫌気性微生物(酸素の有無に寄らず生育が可能)が主体であり、必ずしも嫌気性消化処理中の嫌気状態に晒されたからといって迅速に死滅・分解するとは限らない。また、死滅したとしても細胞壁を構成するペプチドグリカンをはじめ容易に生物分解しない成分が残存する。従って、嫌気性消化処理における低い減容化率と低いメタン生成率を抜本的に改善するには、余剰汚泥をターゲットとした生分解性の改善と嫌気性消化処理中に発生・蓄積する嫌気性微生物と難分解性固形物の分解を図ることが必要である。

2. 研究の目的

余剰汚泥の改質に関しては、オゾンを用いた改質技術が実用化されている。基本原理は、オゾンの強い酸化力によって余剰汚泥を構成する細菌を殺菌、構成成分を酸化改質するというものである。しかし、汚泥は直径数十 μm ~数mmの集塊(フロック)を形成しており、同サイズの気泡を介してオゾン进行供給しても、反応性が高いオゾンは溶液中の有機物等に消費され、フロック表面で消費されるため、効果的にフロック内部の細菌の殺菌、改質を行うことは難しい。研究代表者らは、超微細気泡であるウルトラファインバブル(UFB、気泡径1 μm 未満)をオゾンキャリアーとして用い、散気管やエジェクターを用いてオゾン进行供給する従来の改質技術と比較し、3~4割のオゾン量で同程度の改質を達成できる技術開発に成功している。そこで本研究では、超微細気泡によるオゾン処理をブレイクスルー技術として、高い減容化率とメタン発生率を有する下水汚泥の嫌気性消化処理法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、嫌気性消化槽に投入される余剰汚泥(活性汚泥)と消化汚泥を研究の対象とし、以下の3つの課題に取り組んだ。

(1) オゾン消費の抑制手法開発

余剰汚泥に関しては、濃縮によってオゾンスカベンジャーとなるバルク水中の有機物量に対する汚泥量の割合を高め、バルク水中有機物によるオゾン消費を抑制することを試みた。消化汚泥に関しては、予め空気曝気することで還元性物質によるオゾン消費を抑制することを試みた。汚泥の改質は、細菌の死滅率で評価した。

(2) 改質汚泥の減容化率とメタン発生率評価

オゾン消費の抑制手法開発では細菌死滅率を指標としたが、この評価法は減容化、メタン発生量を直接示すものではない。そこで、UFBオゾン処理した汚泥について、メタン発酵実験を行い、減容化率とメタン発生量を評価した。メタン発酵実験は中温条件(35 $^{\circ}\text{C}$)において、1か月程度の馴致運転後、1~2か月程度の回分実験により実施した。

(3) 嫌気性消化処理のシステム評価

オゾン処理を組み込んだ嫌気性消化処理の数値モデルを作成し、プロセス評価を行う。

4. 研究成果

(1) オゾン消費の抑制手法開発

図1に汚泥を形成する細菌を50%死滅させるために必要なオゾン量を示す。汚泥濃度を高めることで必要なオゾン量を大きく低減できることが示された。汚泥の濃縮では、バルク水中の有機物濃度は変化しないため、濃縮はバルク水中の有機物量に対する汚泥量を高めることになる。その結果、バルク水中有機物によるオゾン消費を低減でき、汚泥に対するオゾン処理効率を高めることになったと考察される。

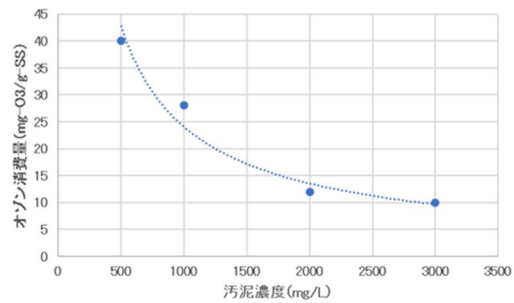


図1 汚泥濃度とオゾン消費量の関係

活性汚泥と消化汚泥におけるオゾンによる処理性の違いを明らかにするために、それぞれの汚泥に対してオゾン処理した結果を図2に示す。また、消化汚泥は嫌気性菌であるため、好気的な環境にするだけで死滅する可能性もあるため、オゾンの代わりに空気処理した結果も同時に示す。両汚泥の濃度は約3500 mg/Lに調整した後使用した。使用した消化汚泥のORPは-150mV程度であった。30分間の処理で消化汚泥は空気曝気によって20%程度まで細菌の死滅が進んだ。オゾン処理でも死滅率は40%程度にとどまった。一方で活性汚泥の死滅率は90%程度と高く、消化汚泥は活性汚泥と比較してオゾン処理の効果が低いことが示された。消化汚泥には硫化物等の還元性物質が含まれていると同時に100 mgC/Lを上回る溶存有機物(活性汚泥の場合溶存有機物濃度10 mgC/L以下)が含まれており、オゾンスカベンジャー量が多いことがオゾン処理効果を低くしていると推定される。そこで、消化汚泥に対して24時間空気曝気を行い、還元性物質を酸化したのち、オゾン処理を行った。その結果、細菌死滅に必要なオゾン量は2/3程度まで低減できることを確認した。

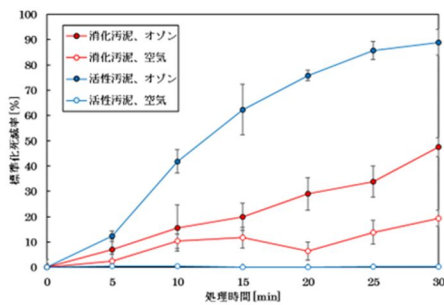


図2 活性汚泥及び消化汚泥のオゾン処理

実用的には難しいが、消化汚泥のバルク水を脱塩素水道水で置換した消化汚泥に対するオゾン処理実験も行った。オゾンスカベンジャーであるバルク水中の有機物を除去したことによる効果は明らかで、この方法でも大きく必要オゾン量を低減できることを確認した。

(2) 改質汚泥の減容化率とメタン発生率評価

図3にオゾン改質した活性汚泥をメタン発酵した結果を示す。実験では、オゾン処理時間(オゾン供給量)を変えて、死滅率が異なる改質汚泥に関して評価した。バイオガス中のメタンガスの比率は、68%~71%であり、オゾン供給量による違いはなかった。オゾン供給量が高くなるに従い、バイオガス、メタンガスの発生量は高まり、最大で未処理汚泥の約1.9倍となった。バイオガス発生量から計算された炭素ベースの汚泥減容化率は、未処理汚泥では40.3%であったが、53.2 mg-O₃/g-SSのオゾン処理条件では75.1%となり、汚泥減容化率も大きく改善された。

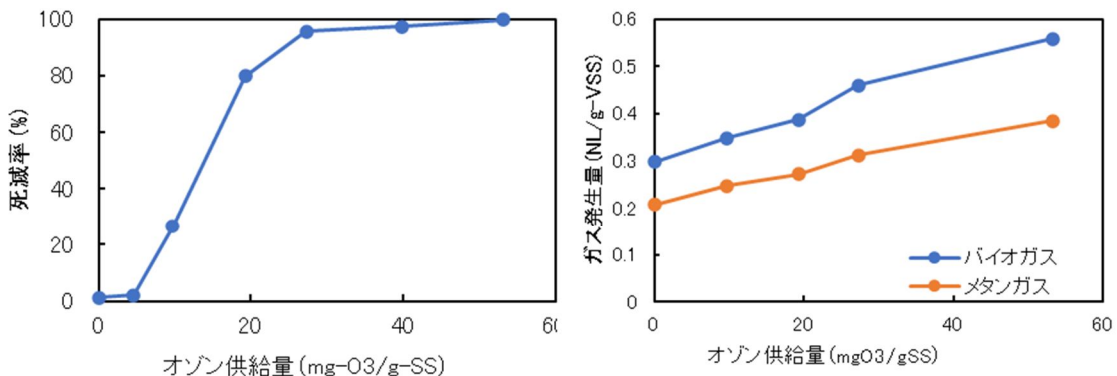


図3 オゾン改質した活性汚泥のメタン発酵

図4にオゾン改質した消化汚泥をメタン発酵した結果を示す。消化汚泥はオゾン処理前に24時間空気曝気して、還元性物質を酸化した。オゾン処理なしの消化汚泥のバイオガス発生量は活性汚泥を対象とした場合の1/5程度となった。また、オゾン処理なしの消化汚泥のバイオガス中メタンの比率は58%と低かった。消化汚泥には分解性の有機物は含まれているものすでに消化が進んでいる汚泥であり、この結果は妥当と考えられる。

オゾン処理の改質によってバイオガス発生量は大きくなり、最大で3.3倍となった。バイオガス中のメタンガスの比率は、オゾン供給量が7 mg-O₃/g-SSと低い処理条件では66%であった

が、それ以上では 69%～70%となり、オゾン供給量による違いはなかった。バイオガス発生量から計算された炭素ベースの汚泥減容化率は、未処理汚泥の 6.8%であったが、88 mg-O₃/g-SS

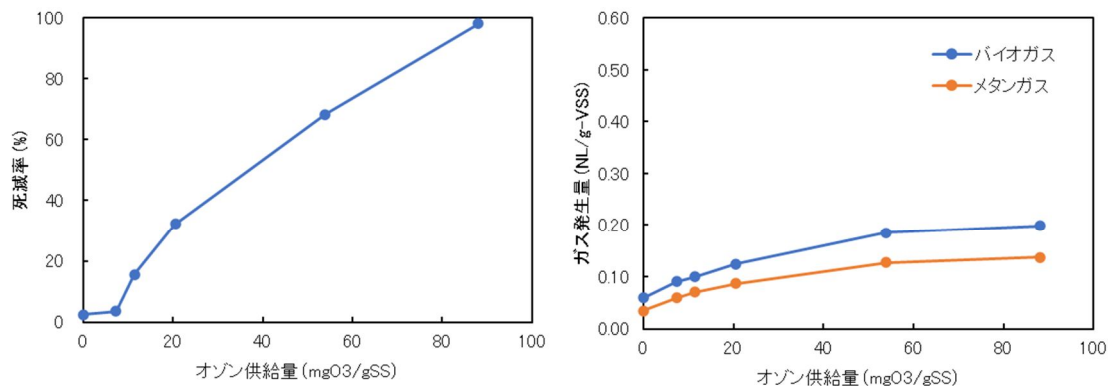


図4 オゾン改質した消化汚泥のメタン発酵

のオゾン処理条件では 29.6%となり、汚泥減容化率も大きく改善された。

以上の結果から、消化槽に投入される余剰汚泥は投入前に UFB によって効率的にオゾン処理することが可能であり、その結果投入余剰汚泥の消化槽内での分解性を高め、バイオガス発生量を 2 倍程度に増加可能であることを示すことができた。さらに余剰汚泥の消化残渣および嫌気性消化に関する微生物およびその代謝産物である消化汚泥もオゾンによる改質が可能であり、消化槽内で発生する消化汚泥をオゾン改質することで汚泥からのエネルギー回収が進み、最終的に処分される汚泥量の低減が期待される。

(3) 嫌気性消化処理のシステム評価

オゾン処理を組み込んだ嫌気性消化処理の数値モデルを作成した。今回の実験においては、オゾン改質した余剰汚泥、消化汚泥個別のメタン発酵特性を把握することができたが、ここで使用した消化汚泥は、オゾン改質していない余剰汚泥を処理する実施設から入手した汚泥である。オゾン改質していない余剰汚泥を処理して発生した消化汚泥とオゾン改質した汚泥を処理した消化汚泥では、消化汚泥中に残存する残渣の性質も異なることが予想される。そのためオゾン改質した余剰汚泥を連続的に投入して作成された消化汚泥を使ったオゾン改質、改質汚泥のメタン発酵特性の評価がシステム評価においては必要となる。本研究期間では、そこまで研究を進められなかったため、開発モデルによるシステム評価までには至らなかった。今後のシステム評価に必要なデータを取得し、オゾン改質におけるエネルギー収支、物質収支等を行い、実用性の評価を行っていく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kurumi Hashimoto, Narumi Kubota, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima, Hiroshi Motoshige	4. 巻 274
2. 論文標題 Reduction of ozone dosage by using ozone in ultrafine bubbles to reduce sludge volume	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemosphere	6. 最初と最後の頁 129922
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.chemosphere.2021.129922	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 橋本くるみ, 西嶋渉	4. 巻 50
2. 論文標題 オゾンウルトラファインバブルを用いた環境技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 環境技術	6. 最初と最後の頁 49-53
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中島昌義, 橋本くるみ, 梅原亮, 中井智司, 西嶋渉, 日高平, 西村文武
2. 発表標題 オゾンウルトラファインバブルを用いた下水汚泥のメタン発酵促進
3. 学会等名 化学工学会87年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本くるみ, 中井智司, 西嶋渉, 友村圭祐
2. 発表標題 オゾンUFBを用いた余剰汚泥処理におけるオゾン処理条件の影響
3. 学会等名 第30回オゾン協会年次研究講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	日高 平 (HIDAKA TAIRA) (30346093)	京都大学・工学研究科・講師 (14301)	
研究分担者	橋本 くるみ (HASHIMOTO KURUMI) (40821012)	福岡大学・工学部・助教 (37111)	
研究分担者	西村 文武 (NISHIMURA FUMITAKE) (60283636)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------