

令和元年5月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06552

研究課題名(和文) 小規模下水処理システムからのエネルギー生産技術の開発

研究課題名(英文) Development of energy production technology from small scale wastewater treatment systems

研究代表者

日高 平 (HIDAKA, Taira)

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号：30346093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：規模が小さな下水処理施設で発生する汚泥を対象とした嫌気性消化実験を行った。得られた嫌気性消化汚泥の液肥利用を想定した肥料効果を、栽培試験で検証した。脱水汚泥と嫌気性消化汚泥を比較すると、嫌気性消化汚泥で生育がよく、市販の有機液肥と同等の性能であった。液肥利用によるエネルギー生産として、草本作物の栽培を試みた。下水汚泥と草本作物の混合嫌気性消化を行い、下水処理場での嫌気性消化と草本作物栽培を組み合わせたシステムの実現可能性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

下水汚泥の嫌気性消化は固形燃料化とならび有力なエネルギー回収手段として着目されている。ただし、規模が小さな下水処理施設において、エネルギー回収技術としての嫌気性消化は、効率が悪いことから現状あまり普及していない。本研究の成果により、他の処理施設で発生する汚泥の集約による効率化、消化汚泥の液肥利用や草本作物栽培への活用などによる導入促進の可能性が示された。地域内の資源エネルギー循環の確立や地球温暖化対策などへの貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：Applicability of dewatered sewage sludge from small scale wastewater treatment plants to anaerobic digestion was investigated. A cultural test confirmed that the digested sludge can be used as a fertilizer. Applicability of anaerobic co-digestion of sewage sludge and grass cultivated using the digested sludge as liquid fertilizer is experimentally evaluated. Increase in biogas production by the cultivated grass addition and required cultivation area are within a feasible range. These results show that energy production by grass cultivation using digested sludge can be acceptable.

研究分野：水環境工学

キーワード：メタン発酵 小規模生活排水処理施設 脱水汚泥 好気性消化 液肥 草本作物

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

平成 26 年 7 月に発表された新下水道ビジョンでは、長期ビジョンの一つの柱として、水・資源・エネルギーの集約・自立・供給拠点化が掲げられており、下水汚泥の有効利用の促進を目指すこととされている。平成 27 年 5 月に公布された改正下水道法では、下水道管理者に対する下水汚泥のエネルギー利用の努力義務が規定されている。新下水道ビジョンでは、下水汚泥エネルギー化率が低水準に留まっている原因として、規模が小さくスケールメリットが働かない処理場が多くあることなどが挙げられている。このような背景の下、下水処理場を拠点とした下水汚泥やその他の廃棄物系バイオマスのエネルギー利用が注目されつつある。

複数の小規模下水処理場で発生する脱水汚泥やし尿・浄化槽汚泥、食品廃棄物などを含めて、拠点となる下水処理場に集約し、混合嫌気性消化により汚泥を有効活用する取り組みについて、石川県中能登町で事業化が進められている。ここでは、小規模下水処理場向けの水処理法であるオキシデーションディッチ (OD) 法からの脱水汚泥が主となっており、消化後の肥料利用も計画されている。脱水汚泥は、一般的な嫌気性消化と比較して高濃度となるものの、運搬効率の点で有利である。我が国の下水処理場約二千カ所のうち晴天時日平均下水量が 1,000 m<sup>3</sup>/d 以下の処理場は約千カ所で、水処理方式は主として OD 法が採用されており、嫌気性消化はほとんど行われていない。同様の事業の全国展開が今後の課題であるものの、特に我が国の OD 法からの脱水汚泥の嫌気性消化特性についての報告例は、限られている。

嫌気性消化の導入に際しては、消化汚泥の処理も課題となる。小規模施設周辺の農地で消化汚泥の液肥利用を行えば、消化汚泥の地域内循環が可能となる。下水の消化汚泥の肥料利用としては、好気コンポストや乾燥による肥料化などが導入されているものの、液肥としての利用例は限られている。肥料としての利用を考える上では、植物にとって養分としての効果があるかだけでなく、植物生育に対する有害性がないことも確認する必要がある。そのためには、肥料取締法に基づくコマツナを用いた幼植物試験が、植物の生育を実際に確認できるという点で有効な方法のひとつである。ただし、OD 法からの脱水汚泥についての検討例はほとんど報告されていない。また肥料としての利用方法として、牧草などの草本作物は、耕作放棄地などを活用して比較的寒冷な地域でも栽培可能であり、エネルギー作物としての活用が考えられる。

### 2. 研究の目的

小規模施設での嫌気性消化は、これまでエネルギー回収効率の悪さからほとんど注目されていなかったものの、市町村の合併により類似施設を複数抱える地方公共団体の施設更新にあわせて、バイオマス拠点施設への集約による効率化が期待されている。そこで本研究では、小規模処理施設を主なターゲットとし、下水汚泥に加えて生ごみなどの地域の廃棄物系バイオマスを含めた集約混合嫌気性消化導入検討に資する知見を集積するために、小規模施設での集約が想定される OD 法からの脱水汚泥および模擬生ごみを用いた連続式および回分式の嫌気性消化実験を行った。バイオガス生成や液肥としての評価の観点から、嫌気性消化特性の把握および混合効果の検証を試みた。

下水汚泥由来のエネルギー回収量を増加させる方法として、嫌気性消化汚泥を肥料として用いて栽培した牧草の嫌気性消化特性の把握も試みた。そのために OD 法からの脱水汚泥を対象として、嫌気性消化汚泥を用いて牧草を栽培しその牧草の性状を分析するとともに、汚泥と牧草の混合嫌気性消化実験を、超高温可溶化処理を含めて行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) 嫌気性消化実験

OD 法からの脱水汚泥は、処理場 A および B で採取した (それぞれ脱水汚泥 A および B)。中温 (35°C) 条件を基本とした連続式嫌気性消化実験では、嫌気性消化反応器にガラス瓶 (1 L) を用いた。反応器は、恒温水槽に設置して温度を制御した。本研究開始以前から実験室内で中温にて培養していた下水汚泥由来の嫌気性消化汚泥を種汚泥として、運転を開始した。小規模下水処理場での脱水操作は例えば週 1 回まとめて行う場合もあり、集約分も含めて投入回数を減らすことで操作の簡易化につながることを想定して、基質投入は週 2 回に設定した。反応速度の詳細などを解析するために、回分式実験も行った。

#### (2) 好気性消化実験

嫌気性消化で分解されにくい有機性成分の挙動を比較することを目的に、脱水汚泥 B を対象に回分式で好気性消化実験を行った。脱水汚泥由来の成分のみで分解特性を把握するために、コンポスト化で一般的なおがくずなどの添加は行わなかった。脱水汚泥の状態を通気すると水蒸気を含ませた場合でも乾燥する傾向が見られたので、確実に好気処理を行うために蒸留水にて固形物 (TS) 3%程度まで希釈して、有効容積 1 L の反応器を用いて連続的に約 1 L/min で曝気した。設定温度は 30°Cとした。水分が蒸発したので、適宜イオン交換水を追加して汚泥量を一定に保った。

#### (3) 肥料利用に関する実験

肥料効果の検証は、肥料取締法に基づく栽培試験に準じた方法で行い、各種汚泥は液肥として利用することを想定した試験設計とした。連続式実験で得た嫌気性消化汚泥および消化前の脱

水汚泥を用いた。いずれも窒素濃度が 1 gN/L となるように蒸留水で希釈し、施用される窒素量が合計で 10 kgN/10 a (ポットあたり 100 mgN) となるように液肥として施用した。また対照として、無施用区のほか、硝酸アンモニウム(硝安)および有機液肥を施用する区も設定した。反復は 3 反復とした。

脱水汚泥 B 由来の嫌気性消化汚泥を液肥として利用し、草本作物を栽培した。草本作物には家畜飼料として代表的な牧草であるイネ科のイタリアンライグラス (*Lolium multiflorum* Lam., タキイ種苗)を用いた。夏季約 2 か月間の栽培期間中、生育に合わせて適量灌水した。汚泥の施用は、現場で定期的に汚泥が生成することを想定して、播種してから 23 日目および 50 日目の 2 回行い、それぞれ全窒素量として 5 kgN/10 a となる容量を施用した(計 10 kg/10 a)。収穫時には、地上部を刈り取り、プランター毎に新鮮重を測定した。

このほか、草本を嫌気性消化した後の汚泥を用いて同様の幼植物試験を行った。また景観作物として、花き作物(パンジー)の栽培実証も行った。

#### 4. 研究成果

##### (1)嫌気性消化実験

連続式嫌気性消化実験で、TS 濃度の影響を比較したところ、脱水汚泥 B の投入 TS 濃度 10% (B35) および 5% (B35L) いずれの場合も、投入有機物(VS)あたりのバイオガス発生率は 0.3 NL/gVS-added 程度と同等であった(図 1)。ただし粘度は 10%の場合が 10 倍以上高く、かくはん効率への影響が懸念された。回分式実験から算出した、基質投入から 14 日間での一次反応速度定数は 0.15 (1/d)であった。

脱水汚泥 B 由来の嫌気性消化汚泥を用いて栽培した牧草と脱水汚泥の混合嫌気性消化実験での牧草のバイオガス発生率は、混合消化による相乗や阻害効果がないと仮定して、脱水汚泥のみの場合と脱水汚泥と牧草を混合消化した場合のバイオガス発生量の差を牧草由来とみなして算出した(図 2)。脱水汚泥のバイオガス発生率は 0.3 ~ 0.4 NL/gVS-added 程度であった。牧草からのバイオガス発生率は、前処理を行わなかった期間で 0.5 NL/gVS-added 程度、前処理を行った期間で 0.6 NL/gVS-added 程度であり、前処理により増加していた。

##### (2)好気性消化実験

脱水汚泥 B を対象に、嫌気性消化で分解されにくい汚泥中の有機性成分の挙動を比較することを目的に行った。回分式好気性消化実験での VS/TS 比を図 3 に示す。a が 1 回目、b が 2 回目の結果を示す。消化汚泥の VS/TS 比は、嫌気性消化の連続式実験で 0.7 程度だったのに対して、好気性消化では 400 日目まで 0.6 程度まで低下した。VS 分解率は、嫌気性消化で 0.4 程度であったのに対して、好気性消化で 0.6 以上に達した。いずれも好気処理開始の最初の 100 日程度までで分解が一段落し、その後の分解速度は遅かった。可溶化処理などを組み込まない限り、これ以上の生物学的分解は難しいと考えられた。

##### (3)肥料利用に関する実験

栽培試験における生育状況について、表 1 に示す。A1 は脱水汚泥 A 由来の消化汚泥、A3 は脱水汚泥 A および模擬生ごみの混合消化汚泥、B1 は脱水汚泥 B 由来の消化汚泥である。肥料が

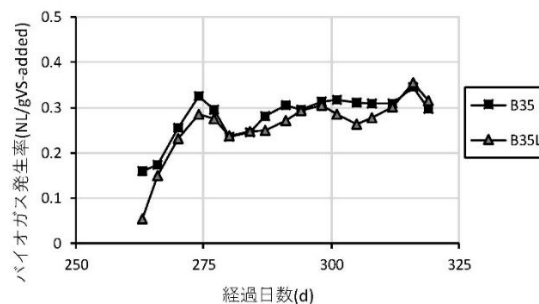


図 1 嫌気性消化実験での投入 TS 濃度の影響比較

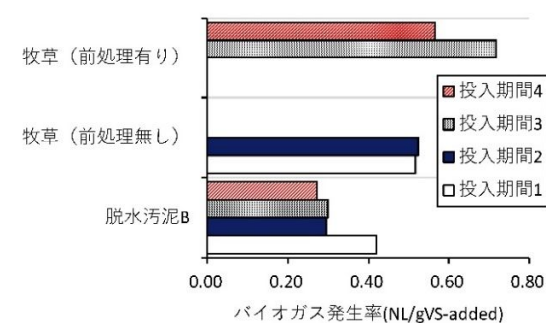


図 2 牧草および脱水汚泥からのバイオガス発生率

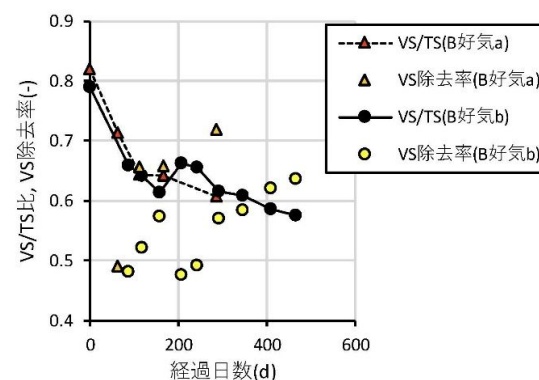


図 3 好気性消化実験での VS/TS 比の変化

7日間施用された2週間後では、硝安区の株径が最大で、各種汚泥区は硝安区の70～80%程度であった。無施用区よりは生育がみられたほか、有機液肥と同等の生育を示したことから、速効性の養分として一定の効果があることが明らかとなった。また、葉の変色や変形など目立った生育障害が見られなかったことから、植物の生育に対する有害性はないものと判断された。なお今回は液肥としての利用を考慮して、根が活着する発芽7日後からの施用としたので、種子の発芽に対する有害性について今後改めて検討する必要がある。3週間後の生育状況について、株径、最大葉長、および株あたり新鮮重では硝安区が最大になり、2週間後と同様に、各種汚泥区は硝安区の70～80%程度であり、有機肥料区と同等の生育であった。一方、窒素の吸収を反映する葉色では、硝安区よりも高い値を示したことから、硝安区より窒素を効率よく吸収している可能性が示唆された。これらの結果から、今回供試した汚泥は液肥として活用することが可能であり、肥料効果も速効性であると判断された。今後各種元素の吸収量などから長期的な養分バランスを評価するとともに、汚泥性状の影響を調査することで、継続的な利用法の確立につながると考えられる。

表1 栽培試験における生育状況

試験区名	株径(mm) 2週間後	株径(mm) 3週間後	最大葉長 (mm)	葉色 SPAD	新鮮重 (mg/株)
無施用	18.0 ± 0.7	19.8 ± 1.1	11.1 ± 0.4	n.d	53 ± 3
A1	25.1 ± 1.7	50.8 ± 3.1	38.3 ± 2.7	42 ± 2	274 ± 33
A3	27.0 ± 1.0	60.2 ± 1.3	44.6 ± 1.6	44 ± 1	361 ± 8
B1	27.6 ± 0.9	58.3 ± 1.3	44.4 ± 2.4	46 ± 1	329 ± 42
脱水汚泥B	25.8 ± 0.6	53.9 ± 2.0	38.4 ± 1.6	45 ± 2	286 ± 29
硝安	34.7 ± 1.5	76.1 ± 3.8	52.9 ± 2.4	39 ± 0	614 ± 6
有機液肥	23.3 ± 4.0	55.6 ± 7.3	41.7 ± 6.2	47 ± 2	356 ± 105

得られた嫌気性消化汚泥の液肥利用によるエネルギー生産として、草本作物の栽培を試みた。牧草栽培では、栽培期間中に生育障害は特に観察されなかったことから、今回用いた消化汚泥は牧草栽培の液肥として利用可能であると考えられた。収量の平均値±標準偏差は新鮮物ベースで0.85±0.08 t/10 a、乾燥ベースで0.23±0.04 kg/m<sup>2</sup>であった。同様の作付を1年間通して行うとして同程度の収穫量を仮定すると、年間生産量は新鮮物ベースで約5.1 t/10 a、乾物ベースでは約1.4 kg/m<sup>2</sup>と試算される。刈り取り混合嫌気性消化に用いる地上部の炭素固定量は、約2か月間の栽培期間の平均値±標準偏差で87.3±15.8 kg/10 aであり、年間では536 kg/10 aと試算された。栽培した草本作物の性状を分析したところ、有機物含有率の指標であるVS/TS比は0.85、Dry Solids (DS)に対する元素含有率は、炭素が37%、水素が5.3%、窒素が1.0%、リンが0.7%、硫黄が0.7%で、高位発熱量は16.6 kJ/gDSであった。過去に行われた河川や道路などの公共緑地で採取した草木バイオマスの成分調査結果と比較して、概ねばらつきの範囲内に収まっていた。草本作物の下水汚泥との混合嫌気性消化特性を議論する上で、刈草の嫌気性消化で蓄積しているこれまでの知見が活用できると考えられた。

草本を嫌気消化した後の汚泥も、通常の嫌気消化汚泥と同様に、葉の変色や変形など目立った生育障害は見られなかった。また生育も通常の嫌気消化汚泥とほぼ同等であり、液肥として利用可能であることが示された。花き作物(パンジー)の栽培において開花数などを調べたところ、品種による違いも見られたものの、市販の液肥と比べて大きな違いはないと判断された。

これらの成果により、小規模施設でも集約混合嫌気性消化により、メタンエネルギーの回収や消化汚泥の肥料利用が可能であることが示された。そして、牧草により増加するバイオガス量および牧草栽培に必要な施肥面積の観点で、提案システムの実現可能性を確認した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

1) Shogo Tamaki, Taira Hidaka, Tadao Mizuno, Yasunari Kusuda, Fumitake Nishimura: Anaerobic digestion of oxidation ditch sludge at low temperatures with hyperthermophilic pretreatment, Journal of Water and Environment Technology, Volume 17, Issue 2, pp.67-75, 2019. 査読あり。

DOI:10.2965/jwet.18-041

2) 日高平, 佐野修司, 吉田弦, 西村文武: 混合嫌気性消化および草本作物栽培による下水汚泥由来のエネルギー生産, 土木学会論文集 G (環境), Vol.74, No. 7, pp.III\_205-III\_214, 2018. 査読あり。

DOI:10.2208/jscej.74.III\_205

3) 日高平, 中村真人, 折立文字子, 西村文武: オキシデーションディッチ法からの脱水汚泥の嫌気性および好気性消化特性比較, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 73, No. 7, pp.III\_79-III\_88, 2017. 査読あり。

DOI:10.2208/jscej.73.III\_79

〔学会発表〕(計 11 件)

- 1) 佐野修司, 吉田弦, 金剛穂波, 日高平: 嫌気性消化下水汚泥残渣を用いたエネルギー作物としての草本作物生産, 日本土壌肥料学会講演要旨集第 64 集, pp.7-1-17, 2018.
- 2) Taira Hidaka, Shuji Sano, Masato Fujiwara, Fumitake Nishimura: High solid anaerobic digestion of sewage sludge from oxidation ditch processes under various temperature conditions, The 15th IWA World Conference on Anaerobic Digestion, Conference Proceedings, 17-20 October, Beijing, China, pp.321-324, 2017.
- 3) 日高平, 西村文武, 佐野修司: 下水脱水汚泥の嫌気性消化および好気性消化の比較, 第 19 回日本水環境学会シンポジウム講演集, p.13, 2016.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 西村 文武

ローマ字氏名: Fumitake NISHIMURA

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 60283636

研究分担者氏名: 佐野 修司

ローマ字氏名: Shuji SANO

所属研究機関名: 地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所

部局名: 環境研究部

職名: 主任研究員

研究者番号(8桁): 00443523

※ 科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。