下水汚泥と刈草の混合嫌気性消化特性

竹田 悠人¹・栗田 雄佑²・小松 俊哉³・姫野 修司³

¹学生会員 長岡技術科学大学大学院 環境システム工学専攻（〒940-2188新潟県長岡市上富岡町1603-1）

E-mail : takeda_y@stn.nagaokaut.ac.jp

²長岡技術科学大学大学院 環境システム工学専攻（〒940-2188新潟県長岡市上富岡町1603-1）

³正会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻（〒940-2188新潟県長岡市上富岡町1603-1）

河川敷の除草の際に排出される刈草に着目し、下水汚泥と刈草の混合嫌気性消化技術の開発を目的として大学内実験およびパイロットスケール実証実験を行った。回分実験結果より刈草は破砕のみの前処理で高い分解性を示した。次に、2か所の処理方式の異なる下水処理場の汚泥を用いて混合消化の連続実験を行った結果、刈草の消化特性は概ね等しかった。パイロットスケール実証実験は下水処理場内で行い、下水汚泥と刈草の固形分混合比を1:0.5の条件で投入した。刈草からの正味のガス発生量は384NL/kg-VSとなり、学内連続実験および過去の酵素水浸漬による前処理を行った稲わらと同等のガス発生量を示した。

Key Words : co-digestion, sewage sludge, grass, specific biogas production

1. はじめに

バイオマスの利活用は、特に小規模分散型のエネルギー利用技術として注目されており、下水道分野においては下水処理場内の消化槽に他のバイオマスを投入し消化ガス（バイオガス）量を増大させる混合嫌気性消化技術の実用化が進んでいる¹。本法は既設の設備を用いることで、事業のイニシャルコストを抑えることができ、また下水処理場の水処理設備を用いることで混合嫌気性消化による消化液脱離液の性状変化にも対応することが可能である。

本研究グループでは、新潟県において大量に発生する稲わらに着目し、混合嫌気性消化の研究を行ってきた²。³。稲わらは、パイロットスケール実験においても下水汚泥と同等の分解性を示し^{4,5}、下水汚泥との混合消化はエネルギーバランスによる評価においても有用であった⁶。本研究では、稲わらと同様ソフトセルロース系バイオマスであり、河川敷や公園等の除草の際に排出される刈草に着目した。刈草は河川敷や公園等の除草によって大量に発生し⁷、刈取りと同時に回収作業が行われることも多いことから、バイオマス利活用の際にしばしば問題となる収集・運搬の体系が多くで確立されているとい

う利点も有する。また、地域により発生するバイオマスの種類は大きく異なるが、刈草は全国の広い地域で使用可能なバイオマスである。さらに、稲わらのような強固な構造を有する場合、分解性の向上には酵素水浸漬^{2,5}や膨張軟化処理⁸などの前処理が必要であるが、刈草の場合は強固な構造を持つ比率が多くないと考えられるため、低コストで高いバイオガス発生量を示すことが期待できる。これまでの下水汚泥と刈草の混合消化に関する既往の研究として、実験室レベルの基礎実験において、刈草は粗破砕のみの前処理で混合消化に適用できる可能性が示されている⁹。また、パイロットスケール実証実験の運転例もあり、刈草投入によりガス発生量が確実に増加することが報告されているが¹⁰、消化特性が詳細には示されていない。

本研究では、下水汚泥と刈草の混合嫌気性消化による一括バイオガス化技術の開発を目的として、最初に大学内での回分実験により刈草のポテンシャルの把握を行った。また、刈草は全国的に使用できるバイオマスであるので、下水の排除方式が異なる2か所の下水処理場の下水汚泥を使用して大学内連続実験を行い、刈草を使用する混合嫌気性消化が多くの処理場で使用できる技術であ

るかを検討した。さらに、実用化に向けての諸元を得るため、実際の下水処理場にて500Lの消化槽を使用し、下水汚泥と刈草の投入量を固形分（TS）混合比1:0.5に設定してパイロットスケール実証実験を行った。各条件において消化特性を把握し、刈草のバイオガス化に及ぼす各種影響を明らかにした。

2. 回分実験

(1) 回分実験概要

刈草の分解ポテンシャルを把握するために720mLバイアル瓶を用いて回分実験を行った。回分実験は計3回行い、1回目は本研究グループでこれまで多くの研究を行った稲わらとも比較した。2回目、3回目は、刈草の採取時期や性状による影響を検討するために、異なる時期に採取した刈草を基質とした。採取月は各々6月、8月、9月である。

(2) 回分実験方法

720mLバイアルに、刈草または稲わらと、種汚泥として150mLの下水処理場の中温消化汚泥（TS、VSは各々1.8%、1.4%程度、植物バイオマスには馴致されていない）を投入し、300mLになるまで蒸留水を投入した。刈草等の最終濃度は4g-TS/Lとした。その後バイアル内を窒素でパージし密閉した。ブランク系として消化汚泥のみの系も設定した。なお、本研究においては全てのバイオマスについて比重を1と見なして、条件等の設定を行っている。

消化は36℃の恒温槽にて行い、経時的に30日目までガス量をガラスシリンジで測定し、メタン含有率をTCDガスクロマトグラフで測定した。発生ガス量に関しては標準状態における値に換算した。また、30日目にバイアルを開封して消化汚泥の上澄み溶解性COD（孔径0.45μmのメンブレンフィルター通過）を測定した。

刈草は信濃川河川敷から採取し、乾燥等を行わずに直接稲わらの実証実験の際に用いた破砕機（西邦機工株式会社製ラブ・マシーンSRM-15、以下実証破砕機）により破砕した。1回目の回分実験では、刈草以外に、破砕処理のみの稲わら、破砕後に20日間の酵素浸漬処理⁹⁾を施した稲わらを試験した。用いた刈草のTS、VSは、1回目

図-1 破砕刈草の粒度分布

実験では40.4%、34.2%（VS/TS 85%）、2回目実験では35.5%、30.2%（VS/TS 85%）、3回目実験では25.8%、22.6%（VS/TS 87%）であった。一方、稲わらはロールで室内保存していたものを用いた（TS 90.4%、VS 69.0%、VS/TS 78%）。破砕条件は刈草と同じである。また、1回目の破砕刈草を試料として篩を用いて粒度分布を測定した。

各実験は、1回目に行った酵素処理稲わらのみは1連であるが、他は2連（1回目、3回目の刈草は3連）で実施した。

(3) 実験結果および考察

図-1に破砕刈草の粒度分布を示す。2~3mm程度を中心に広く分布していることが分かる。同じ条件で破砕した稲わら⁹⁾（破砕刃交換後の結果）と比較して、0.85mm以下の比率が多少低い⁹⁾が、全体的な分布状況は一致していた。したがって、実証破砕機は含水率の高い刈草の破砕にも有効であった。

2連以上の同系列の回分実験結果は、30日間の発生ガス量の差が最大でも約10%であるなど、再現性が取れていた。以下、実験結果はブランク系における値を差し引いた値の平均値で評価する。図-2に1回目実験における投入VS当たりのガス発生量を示す。刈草は、稲わらと比較して初期からガス発生が活発であり、30日目までのガス発生量も、破砕のみ稲わら、酵素処理稲わら、刈草でそれぞれ467、617、644（NmL/g-VS）であった。図-3に混合液のCOD基準でのメタン発生量を示す。30日目までに破砕のみ稲わら、酵素処理稲わら、刈草でそれぞれ2.26、2.65、3.09（gCOD/L）となった。本条件における

基質COD濃度は各々2.80, 2.82, 3.44 (gCOD/L) 程度であることから、酵素処理稲わらや刈草は有機分の大部分がメタンに転換したことが分かる。また、30日目に測定した溶解性CODの値は破碎のみ稲わら、酵素処理稲わら、刈草でそれぞれ0.40, 0.29, 0.30 (gCOD/L) であった。以上の消化特性より、刈草は破碎のみの前処理で酵素処理稲わら以上の分解性を示し、混合消化に用いるバイオマスとして有用であることが示唆された。

異なる時期における刈草投入VS当たりのガス発生量については、1回目実験に比べて2回目、3回目は多少ガス発生量が少なく、30日目までのガス発生量は1回目の644 (NmL/g-VS) に対して、2回目、3回目はそれぞれ567, 579 (NmL/g-VS) という結果となった。しかし、最大でも12%の差であり、またメタン含有率も55~59%の範囲内にあったことから、破碎刈草は、採取時期や含水率等の影響により大きく消化性能が低下することはないと考えられる。他研究例で、回分実験による刈草からのガス発生量には、低負荷条件において510 (NmL/g-VS) ⁹⁾との報告値がある。本研究の方が高い値を示したのは、破碎径が細かく消化に有利であったことなどが影響したと考えられる。

図-2 投入VS当たりのガス発生量の推移

図-3 メタン生成量の推移

3. 連続実験による污泥性状の違いによる分解性の影響把握

(1) 連続実験概要

刈草は全国的に発生するバイオマスであることから、様々な下水処理場で本技術の適用が期待できる。しかし、処理場によって下水の排除方式や水処理方式、污泥の性状等が異なることから、刈草の分解性の違いが現れる可能性が考えられる。そこで、合流式下水道を採用しているA処理場の下水污泥、および分流式下水道を採用しているB下水処理場の下水污泥をそれぞれ使用して刈草の分解性への影響を連続実験により検討した。両処理場ともに標準活性污泥法を採用し、初沈污泥は重力濃縮、余剰污泥は機械濃縮が行われている点は共通するが、A処理場は合流式であることが主要因で濃縮污泥のTS濃度の変動が大きく、また固形分中の有機物比率 (VS/TS) が低いのが特徴である。一方、B処理場の濃縮污泥はTS濃度が安定しており、90%程度の高いVS/TS値を有している。

使用した下水污泥は混合濃縮污泥であり、6~8日に1回それぞれの処理場から採取し、以下に示す2日に1回の投入までは4℃で冷蔵保存を行った。刈草は、1回のみ信濃川河川敷から採取し、実証破碎機により破碎した状態で冷蔵保存をして実験期間中用いた。

(2) 連続実験方法

実験方法を図-4に、実験条件を表-1に示す。CODに関しては、下水污泥および刈草を試料として下水試験法により3回程度COD_Gの測定を行った結果に基づき、COD/VSが下水污泥では1.6、刈草では1.0で一定と仮定して濃度、負荷を算出している。

連続実験は混合液量2Lのガラス製反応槽で行い、下水污泥のみを投入した污泥単独系、および下水污泥とのTS混合比がおおよそ1:0.5になるように刈草を湿潤重量5%で投入した刈草投入系を運転した。用いた刈草のTS、VSは、33.0%、29.9% (VS/TS 90%) であった。運転温度は36℃とし、基質の投入と消化污泥の引き抜きを2日毎に行った。刈草投入系の種污泥は、事前に刈草を湿潤重量2%の低負荷投入で58日間運転することにより刈草

表-1 学内連続実験の運転条件

	A処理場汚泥使用		B処理場汚泥使用	
	汚泥単独系	刈草系	汚泥単独系	刈草系
投入TS(%)	3.08	4.51	3.69	5.09
投入VS(%)	2.18	3.50	3.21	4.48
投入COD(g/L)	34.9	47.5	51.4	63.2
滞留日数(日)	26.7	25.4	26.7	25.4
VS負荷 (g-VS/L・日)	0.82	1.38	1.20	1.76
COD負荷 (g-COD/L・日)	1.31	1.87	1.93	2.49

図-4 学内連続実験のフロー

に馴致させた消化汚泥を用いた。滞留日数は約26日で、56日間運転を行った。主な測定項目は、下水汚泥（基質）と消化汚泥のpH、TS、VS、消化汚泥の上澄み液（孔径0.45μmのメンブレンフィルター通過）では溶解性COD、アンモニア性窒素、消化ガスではガス量、メタン含有率である。測定頻度はpHと消化ガス量が2日に1回、TS、VS、溶解性COD、アンモニア性窒素、メタン含有率が6～8日に1回とした。TS、VSの測定方法は下水試験法に基づいた。溶解性COD、アンモニア性窒素は吸光光度計（DR2400, HACH）により測定した。

また、これらの測定値を基に投入VS当たりのガス発生量、COD基準でのメタン転換率などを算出した。さらに、刈草投入系における下水汚泥に起因するガス生成量やメタン転換率は汚泥単独系の結果と等しいと仮定し、両者の差から刈草からの正味のガス生成量等を算出し評価を行った。正味のガス生成量の算出方法を次式に示す。

$$\text{正味のガス発生量 [NmL/g - 投入VS]} = \frac{(\text{刈草系ガス発生量} - \text{汚泥単独系ガス発生量})[\text{NmL/2 days}]}{\text{刈草の投入VS量 [g/2 days]}}$$

(3) 実験結果と考察

連続運転初期から、汚泥単独系では、A処理場の系列、B処理場の系列ともに、安定したガス発生量の推移を示した。また、刈草投入系においても、刈草に馴致させた消化汚泥を用いたことが一因と考えられるが、ともに初

期から汚泥単独系のガス発生量を上回った。汚泥単独系との発生ガス量の差は、運転期間中多少の変動はあったものの、増加あるいは低下の傾向はみられなかった。以上から、運転期間全体を評価期間とすることとし、各評価項目の平均値を表-2に示す。

一般に下水汚泥の中温消化が順調に行われている場合、消化率（VS分解率）は50%程度、投入VS当りのガス発生量は500～600NmL/kg-VS程度を示す¹¹⁾ことから、それぞれの汚泥単独系での運転結果は良好であったと言え、対照系として用いるのに適切であると考えられる。以下、刈草投入系での正味の値を中心に刈草投入の影響を考察する。汚泥VS濃度の違いにより、B処理場系の方が高いガス発生量を示したが、刈草正味の値は、A処理場汚泥使用系では370NmL/g-VS、B処理場汚泥使用系では343NmL/g-VSとなり、近い値であった。メタン含有率は、刈草投入系で若干低下する傾向があった。しかし、刈草のメタン転換率（COD基準）はどちらの系も下水汚泥よりは若干下回ったものの、それぞれ58%、54%であった。また、発生ガス量とも整合性が取れていた。一方、正味のVS分解率はA処理場汚泥使用系で50%、B処理場汚泥使用系では32%程度と差が見られた。刈草投入系ではサンプルのばらつきが大きく誤差が生じやすく、特にB処理場では分解率が過小評価された可能性がある。

溶解性CODは刈草投入することで上昇したが、20～30%程度の上昇であった。アンモニア性窒素については、同レベル、もしくは若干の低下がみられた。以上の消化特性は、稲わらを投入した場合にみられた傾向²⁴⁾と同じであり、分解能や影響レベルにも大きな違いはなかった。

本研究において刈草からのメタン生成量は、刈草正味

表-2 学内連続実験における消化特性

			A処理場汚泥使用		B処理場汚泥使用		
			汚泥単独系	刈草系	汚泥単独系	刈草系	
pH			-	7.35	7.42	7.47	7.40
TS・VS	TS	%	1.86	2.69	1.31	2.46	
	VS	%	1.03	1.69	0.95	1.88	
分解率	TS	%	40	40	65	52	
	VS	%	53	52	70	58	
正味の分解率	TS	%	-	41	-	23	
	VS	%	-	50	-	32	
溶解性COD			g/L	0.56	0.69	0.87	1.17
アンモニア性窒素			g/L	0.66	0.66	1.00	0.88
ガス発生量			NmL/2 days	1880	2710	2900	3670
投入VSあたりの ガス発生量			NmL/g・VS	575	492	602	520
投入VSあたりの 正味のガス発生量			NmL/g・VS	-	370	-	343
メタン含有率			%	61.5	59.5	60.1	59.2
メタン転換率			%	63	62	65	62
正味のメタン転換率			%	-	58	-	54

の発生ガス中のメタン含有率が55%程度であることから、195NmL/g-VS程度となる。この値は、類似の条件下で下水汚泥との混合消化を行った他研究の90NmL/g-VS程度⁹⁾と比べて大幅に高い値であり、生草よりも分解が有利となる雑草サイレージ（6mm以下に裁断）を単独で消化日数50日で運転した場合の260NmL/g-VS¹²⁾に近いレベルであった。一方、雑草サイレージのメタン発生ポテンシャル値に関しては、350～493mL/g-VS（37℃）との報告値がある¹³⁾。

以上の結果より、本投与負荷条件において汚泥の違いによる刈草の消化特性への影響は殆どなく、分解性も良好であったことから、刈草を用いる混合嫌気性消化技術は消化槽を有する多くの処理場で適用可能と考えられる。

4. パイロットスケール実証実験

(1) パイロットスケール実験概要

信濃川下流流域下水道長岡浄化センター敷地内にパイロットスケールの実証実験装置を設置して実証実験を行った。長岡浄化センターは分流式の下水処理場であり、汚水の処理方式は標準活性汚泥法を採用している。実験フローを図-5に示す。刈草は破碎後に直接消化槽に投入した。以前の稲わらを用いたパイロットスケール実証実験では前処理槽を設けたが⁴⁾、その点を除いて同様の装置と方法である。消化槽はステンレス製の円筒縦型の反応器である。有効容量は1槽当たり500Lとし、37℃で運転を行った。

消化槽は1槽を対照系として下水汚泥のみを投入する汚泥単独系とし、1槽を刈草投入系とした。投入する下水汚泥は、重力濃縮の初沈汚泥と機械濃縮の余剰汚泥を2:1で混合したものを使用した。種汚泥は、稲わらによる実証実験終了時の汚泥単独系および稲わら投入系（水浸漬のみの系）の消化汚泥を、各々今回の汚泥単独系、刈草投入系の消化槽に使用した。

(2) 実験方法

基質の投入・消化汚泥の引き抜きは週6回（通常は月曜～土曜）行った。刈草は1週間に1回、信濃川河川敷から採取を行い、学内連続実験と同様の方法で破碎した後

図-5 パイロットスケール実験のフロー

図中の重量(kg)は1日当たりの投入・引抜き量を示している

に冷蔵保存を行った。消化槽への投入基質は、汚泥単独系では下水汚泥20kg/dayであり、刈草系では下水汚泥20kg/dayに加えて、毎週採取した刈草に対してTS測定を行い、下水汚泥とのTS混合比が1:0.5となるように刈草の投入量を調節した。その際、下水汚泥のTSは3.6%と仮定した。実験期間中の刈草の平均投入量は1.42kg/日となった。

下水汚泥の投入は1日2回、午前と午後10kgずつに分けた。刈草については、1日1回、午前のみ投入を行った。消化汚泥の引き抜きも午前、午後に分けて行った。運転日数は84日間（12週間）である。実験期間中の下水汚泥のTS、VSの推移を図-6に示し、刈草のTS、VSの推移を図-7に示す。下水汚泥のTS、VSは安定していたことが分かる。また、刈草のTSは、週によって最小19%から最大32%の間で推移したが、VS/TSの値は比較的安定しており平均88%であった。

基質性状および消化条件を表-3に示す。投入した下水汚泥のTSは設定値である3.6%と同等であったため、実際のTS混合比も設定値と同様1:0.5程度となった。

主な測定項目は、下水汚泥（基質）と消化汚泥のpH、TS、VS、消化汚泥の上澄み液（孔径0.45μmのメンブレンフィルター通過）では溶解性COD、アンモニア性窒素およびリン酸態リン、消化ガスではガス量、メタン含有率である。ガス量はガスメータを用いて測定した。リン酸態リンの測定には吸光光度計（DR2400, HACH）を

図-6 下水汚泥のTS、VSの推移

図-7 刈草のTS、VSの推移

表-3 パイロットスケール実験の運転条件

	汚泥単独系	刈草系
投入TS(%)	3.61	5.08
投入VS(%)	3.18	4.49
投入COD(g/L)	50.9	62.8
滞留日数(日)	29.2	27.3
VS負荷(kg-VS/m ³ ・日)	1.09	1.65
COD負荷(kg-COD/m ³ ・日)	1.74	2.30

使用した。測定頻度はpH、消化ガス量が週6回、TS、VSが週2回、上澄み液の水質項目とメタン含有率が週に1回（前者は運転後半のみ測定）である。さらに、運転終盤に引き抜いた消化汚泥を用いて、肥料取締法に規定されている6つの有害成分（ヒ素、カドミウム、水銀、ニッケル、クロム、鉛）の含有量測定を下水試験方法に基づいて行い、刈草投入の影響および肥料として用いる場合の安全性を評価した。

(3) 実験結果および考察

図-8 に実証実験でのガス発生量推移を示し、図-9 に汚泥単独系消化汚泥の TS、VS 推移、図-10 に刈草系消化汚泥の TS、VS 推移を示す。ガス発生量は、初期から汚泥単独系よりも刈草系が上回る結果となり、運転期間を通して安定した傾向を示した（両系ともに周期的にガ

ス量の増大日が見られるのは週に1回基質投入・消化汚泥引き抜きを行っていないためである）。消化汚泥の TS、VS は、運転経過とともに多少増加する傾向が見られているが、両系ともに概ね安定していた。また、VS/TS も運転期間を通してほぼ変化はなかった。

1 週間単位でガス発生量を整理した結果、運転開始から3週間を過ぎてから刈草系と汚泥単独系のガス発生量の差が一定レベル（1 週間における両者の差が 640NL）以上になったため、4 週目以降の9 週間を消化特性の評価期間とすることとした。評価期間中の各評価項目の平均値と標準偏差を表-4 に示す。

汚泥単独系において、VS 分解率は 59%、投入 VS 当りのガス発生量は 603NL/kg-VS の結果が得られた。学内連続実験と同様、消化は順調であったと言える。そこで、同様に刈草投入系での正味の値を中心に刈草投入の影響を評価していくこととする。

pH は汚泥単独系と同程度であった。刈草の正味の VS 分解率は今回の下水汚泥よりは低かったが 50%を示した。一方、刈草を投入することで、溶解性 COD は増加し、アンモニア性窒素とリン酸態リンは減少した。さらに、消化ガス中のメタン含有率も低下した。しかし、いずれも大きくは変わらないレベルであり、また、その影響程度は以前の稲わらを用いたパイロットスケール実験と同程度であった。アンモニア性窒素が若干低下した原因として、基質 CN 比が影響したことが考えられる。刈草と下水汚泥の CN 比を測定した結果（YANACO C/N Corder MT-700B）、刈草では 44.8、下水汚泥では 7.9 と測定された。刈草の CN 比は、約 50⁹⁾という報告例があり、また全国的データでは 29-46⁷⁾であることから、本研究で用いた刈草の CN 比も標準的な値であり下水汚泥の値を大きく上回っていた。

ガス発生量は汚泥単独系よりも 32%増加し、同じ TS 混合比 1:0.5 の条件での稲わらを用いたパイロットスケール実験の 26%増加（酵素水浸漬系）⁵⁾を上回った。刈草正味の投入 VS 当たりのガス発生量は 384NL/kg-VS（メタン発生量 211NL/kg-VS）、メタン転換率 55%となった。これを前述の学内連続実験（TS 混合比が同程度）と比較すると投入 VS 当たりのガス発生量、メタン転換率ともにほぼ同等の結果を示したことが分かる。以

上の結果から、TS 混合比 1:0.5 において良好な消化が行えることをパイロットスケール実験でも確認できた。

稲わらを用いたパイロットスケール実験では、水浸漬稲わらの投入 VS 当たりのガス発生量は 342NL/kg-VS (メタン発生量 188NL/kg-VS)，メタン転換率は 58%，酵素水浸漬稲わらは各々 377NL/kg-VS (メタン発生量 207NL/kg-VS)，メタン転換率は 63%であった。したがって、刈草は破碎のみの前処理で、破碎後に前処理槽の運転が必要な稲わらと同等の分解性を示したことから、混合消化に有利なバイオマスであると考えられる。

消化汚泥の有害成分の含有量測定結果を表-5 に示す。含有量は消化汚泥の固形分重量あたりに換算している。汚泥単独系の消化汚泥は、6 成分ともに肥料取締法における許容最大値を大幅に下回り（許容最大値の 6~20% 程度），肥料として用いる場合の安全性に問題がないことが分かる。なお、各含有量を同浄化センターの脱水汚泥の測定実績値¹⁰⁾と比べると、鉛については今回の測定値が数倍高かったが、他の 5 成分は同程度であった。一方、刈草系の消化汚泥では、汚泥単独系の消化汚泥と比べて、2 成分が高く、1 成分が同程度、3 成分が低いという結果となった。しかし、増加した 2 成分も 20% 程度の増加に留まった。以上より、本運転で使用した下水汚泥および刈草は、運転後の消化残渣を最終的に肥料として用いることも可能であることが示された。

図-8 ガス発生量の推移

図-9 汚泥単独系消化汚泥のTS, VS推移

図-10 刈草系消化汚泥のTS, VS推移

表-4 パイロットスケール実験における消化特性

			汚泥単独系	刈草系	測定回数
pH			7.04	7.00	54
TS・VS	TS	%	1.68±0.11	2.54±0.24	18
	VS	%	1.30±0.09	1.98±0.22	18
分解率	TS	%	53	50	-
	VS	%	59	56	-
正味の分解率	TS	%	-	43	-
	VS	%	-	50	-
溶解性COD	g/L		0.96±0.03	1.20±0.06	6
アンモニア性窒素	g/L		0.94±0.06	0.82±0.05	6
リン酸態リン	g/L		0.29±0.01	0.21±0.01	6
ガス発生量	NL/day		384±77	509±107	54
投入VSあたりのガス発生量	NL/kg-VS		603	529	-
投入VSあたりの正味のガス発生量	NL/kg-VS		-	384	-
メタン含有率	%		57.2	55.5	9
メタン転換率 (刈草系は正味)	%		62	55	-

表-5 消化汚泥の有害成分測定結果 (mg/kgTS)

	汚泥単独系	刈草系	許容最大値
ひ素	5.6	4.2	50
カドミウム	1.1	1.4	5
水銀	0.3	0.3	2
ニッケル	19	22	300
クロム	34	30	500
鉛	18	13	100

5. 結論

下水汚泥と刈草の混合嫌気性消化技術の開発を目的として大学内実験およびパイロットスケール実証実験を行った。本研究の主な結論を以下に示す。

- 1) 回分実験により刈草は破碎のみの前処理で酵素処理稲わら以上の分解性を示すことが確認された。また、採取時期や含水率等の影響により消化性能が大きく低下することはないと考えられた。
- 2) 下水の排除方式が異なる処理場の下水汚泥を使用して大学内連続実験結果を行った結果、刈草の分解性に大きな違いは見られず、本技術は広い地域で適用可能と考えられた。
- 3) TS混合比1:0.5の条件でのパイロットスケール運転では、刈草投入により汚泥単独消化と比較して32%のガス発生量の増加を確認し、消化自体

も安定していた。投入VS当たりの正味のガス発生量は384NL/kg-VSであり、学内連続実験および過去の酵素水浸漬による前処理を行った稲わらと同等の分解性を示した。

- 4) 肥料取締法で基準が定められている有害物質も基準値を十分に下回り、また刈草投入により大きく増加する成分もなかった。

謝辞：新潟県下流域下水道長岡浄化センターにおけるパイロットスケール実験の遂行にあたり、公益財団法人新潟県下水道公社の皆様には多大なるご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 野池達也：震災復興に貢献するメタン発酵、再生と利用, Vol.36, No.135, pp.6-19, 2012.
- 2) 小松俊哉, 工藤恭平, 姫野修司：酵素可溶化処理を施した稲わらの下水汚泥との混合嫌気性消化に関する研究, 下水道協会誌, Vol.44, No.531, pp.139-150, 2007.
- 3) 小松俊哉, 井上義康, 姫野修司：下水汚泥と稲わらの中温および高温混合消化の処理特性比較とエネルギー評価, 下水道協会誌, Vol.47, No.567, pp.130-139, 2010.
- 4) 小松俊哉, 高松量, 姫野修司, 澤原大道, 石川進：下水汚泥と稲わらの混合嫌気性消化技術の実用化に向けたパイロットスケール実験, 下水道協会誌, Vol.50, No.604, pp.109-117, 2013.
- 5) 井上明大, 栗田雄佑, 小松俊哉, 姫野修司, 石川進, 澤原大道：パイロットスケール実証実験による下水汚泥と稲わらの混合嫌気性消化特性の把握, 土木学会論文集G(環境), Vol.70, No.7, pp.III_441-III_448, 2014.
- 6) 渋川洋, 姫野修司, 小松俊哉：下水汚泥と稲わらの混合嫌気性消化がエネルギー収支および温室効果ガス排出に及ぼす影響：エネルギー・資源, Vol. 34, No. 4, pp.227 (要旨), <http://www.jsce.gr.jp/> (全文8ページ), 2013.
- 7) 岡本誠一郎, 桜井健介, 尾崎正明, 落修一：公共緑地・樹木の管理に由来する草木系バイオマスデータ集, 土木研究所資料第4145号, 2009.
- 8) 神足康人, 渡部春樹, 末次康隆, 池本良子, 西田裕之：下水汚泥と稲わらの混合消化による脱水性向上効果, 第50回下水道研究発表会講演集, pp.946-947, 2013.
- 9) T. Hidaka, S. Arai, S. Okamoto, T. Uchida：Anaerobic co-digestion of sewage sludge with shredded grass from public green spaces, *Bioresour. Technology*, Vol.130, pp.667-672, 2013.
- 10) 山本茂浩：下水汚泥と刈り草等の混合消化実証実験, 第51回下水道研究発表会講演集, pp.937-939, 2014.
- 11) 下水道施設計画・設計指針と解説 後編-2009年版-：社団法人日本下水道協会, pp.345-359, 2009.
- 12) K. Koch, M. Wichem, M. Lübken, H. Horn：Mono fermentation of grass silage by means of loop reactors, *Bioresour. Technology*, Vol. 100, pp.5934-5940, 2009.
- 13) A.S. Nizami, A. Orozco, E. Groom, B. Dieterich and J.D. Murphy：How much gas can we get from grass?, *Applied Energy*, Vol. 92, pp.783-790, 2012.
- 14) 平成25年度新潟県流域下水道維持管理年報：公益財団法人新潟県下水道公社, pp.247, 2014.

(2015. 5. 22受付)

ANAEROBIC CO-DIGESTION OF SEWAGE SLUDGE AND GROUND GRASS

Yuto TAKEDA, Yusuke KURITA, Toshiya KOMATSU, Shuji HIMENO

Anaerobic co-digestion of sewage sludge and ground grass from a riverbed was investigated. We conducted experiments using laboratory-scale and pilot-scale digesters.

Laboratory-scale experiment was conducted under the condition that the mixture ratio of sewage sludge and grass was 1:0.5 based on TS. The grass was ground to about 2-3 mm in length in pretreatment. This pretreatment got methane conversion efficiency of grass to be almost parallel to that of the sewage sludge. Degradability of grass co-digested with sewage sludge was the same level between those of other two wastewater treatment plants.

Pilot-scale experiment was conducted in 500L digesters under the same condition of the mixture ratio. The operation was satisfactory and the specific biogas production (SBP) of the grass was 384 NL/kg-VS. This value of SBP was the same level to that of previous study for rice straw pretreated by grinding plus soaking in an enzyme solution.