

メタン発酵を核とした鳥取県内で発生する 地域バイオマスからのエネルギー回収システム

戸 莉 丈 仁

1. はじめに

全国の地方自治体では、下水処理場、集落排水処理場および汚泥再生センター等の生活排水処理施設の維持管理や、そこから発生する汚泥の処理に多大な経費をかけている。特に中小規模の地方自治体においては、今後、人口減少が予想され、生活排水処理における類似処理施設の統廃合や処理の効率化の必要性が高まっている。そのような状況の中、下水処理場に地域で発生する様々なバイオマスを集約し、メタン発酵処理により混合処理する取り組みが注目を集めている。メタン発酵は嫌気性微生物により、有機分を分解し、メタンと二酸化炭素を主成分とするバイオガスを発生させる処理方式であり、発生汚泥量の低減および回収したメタンガスの熱エネルギー利用や発電利用が可能である。ただし、発生した消化汚泥の脱水ろ液の処理施設の設置が必要となるが、水処理施設を持つ下水処理場へ集約することで既存施設を利用して適切な排水処理も可能となる。加えて人口減少等の影響から、処理人口に対して処理能力の大きな下水処理場が増えており、全国の下水処理場における水処理施設の日平均汚水処理量/現有処理能力の値が0.6以下となる処理場の割合は69.5%¹⁾となっており、比較的余裕のある運転を行っている事例が多いため、処理余裕の有効利用という観点からも集約混合処理が望ましい。下水処理場に集約可能な地域バイオマスとしては、し尿、浄化槽汚泥、集落排水汚泥、家庭生ごみおよび食品工場廃棄物などの廃棄物系バイオマスや、稲わら、刈草、剪定枝などの草本系バイオマスなどが挙げられる。特に生ごみなどの食品系廃棄物はメタン発酵において優良な基質であり、投入固形物濃度 (TS) 5~12%において、強熱減量 (VS) ベースの分解率が73.5~80.5%との既往の報告²⁾がある。その組成にもよるが、一般に生ごみは、下水汚泥に比べて分解率も高く、バイオガス発生量も多い。一方で生ごみ単独でのメタン発酵処理には、メタン発酵に必要なニッケル、鉄、コバルトなどの微量栄養塩³⁾が不足するが、下水中にはそれらが含有されているため、混合処理することのメリットは大きい。現在、全国の下水処理場で地域バイオマスの集約・混合処理は9事例あり⁴⁾、今後も増加が予想される。石川県珠洲市では、珠洲市浄化センターに農業集落排水汚泥、浄化槽汚泥、し尿および事業系生ごみを集約し、混合メタン発酵を実施したところ、年間43,000千円程度のコスト縮減に成功し、加えて、年間239tの二酸化炭素排出量が縮減⁵⁾された。また、富山県黒部市では、下水処理場に隣接するコーヒー工場からの廃棄物 (コーヒー粕) を、兵庫県神戸市では木くずやお菓子工場が発生した廃棄物を集約して混合メタン発酵によりエネルギー回収を行っている⁴⁾。

本研究では、鳥取県で発生する様々な地域バイオマスのメタン生成ポテンシャルを調査し、下水処理場への集約、下水汚泥との混合処理により、地域で発生するバイオマスを地域内で処理し、エネルギーや資源の地域内循環の可能性を検討した。また、特に稲わらに着目し、長期間連続処理による影響を検証した。

2. 研究方法

2.1. 様々な地域バイオマスのメタン生成ポテンシャル

2.1.1. 対象地域バイオマス

本研究では、余剰汚泥、初沈汚泥（鳥取市秋里下水終末処理場）、OD脱水汚泥（郡家浄化センター）、農業集落排水汚泥（鳥取県内A町処理場）、浄化槽汚泥（鳥取県内個人宅より採取）、食品工場廃棄物（鳥取市内豆乳工場）、米ぬか（鳥取市内）、コーヒー粕（鳥取市内）、紙ごみ（鳥取市内）について性状調査およびメタン生成ポテンシャルを調査した。浄化槽汚泥は清掃後1年のものと清掃後半年のものに加えて、清掃後期間を特定しないものの3種を用いたが、清掃後の期間によりガス発生量の差異が見られたため、実用化を想定し、様々な条件の浄化槽からの汚泥が混合されている、清掃後期間を特定しないものを用いて実験を行った。調査対象としたバイオマスを図1に示す。

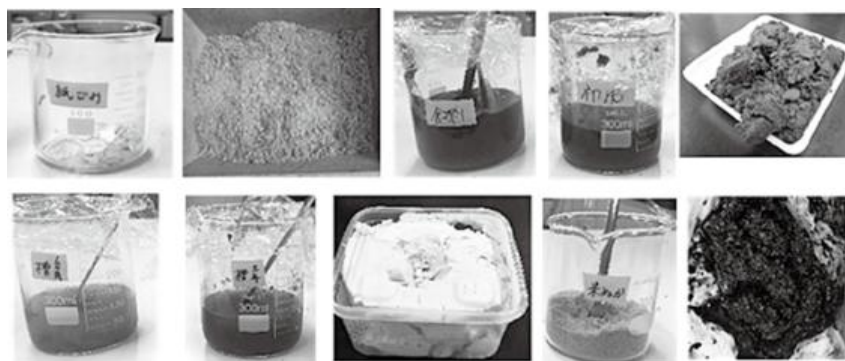


図1 対象地域バイオマス

上段左から、紙ごみ、稲わら、余剰汚泥、初沈汚泥、OD脱水汚泥

下段左から、浄化槽汚泥（清掃後半年）、浄化槽汚泥（清掃後1年）、食品工場廃棄物、米ぬか、コーヒー粕

2.1.2. 実験条件

本研究では、シリーズ1～7の回分式実験により各地域バイオマスのメタン生成ポテンシャルを求めた。回分式消化実験には100mLプラスチック製シリンジを用い、各地域バイオマスに鳥取市秋里下水終末処理場の高温消化槽から引き抜いた消化汚泥（種汚泥）30mLを加え、恒温振とう水槽で高温条件（55℃）、20日間程度150rpmで振とう培養し、ガラスシリンジでガスを引き抜きガス発生量およびメタン濃度を測定した。ブランクとして消化汚泥のみを投入した系も準備した。また、回分式実験に先立ち、各地域バイオマスの固形物濃度、強熱減量、COD_{Cr}を測定した。

2.2. 下水汚泥と稲わらの混合メタン発酵

2.2.1. 対象地域バイオマス

稲わらと下水汚泥（余剰汚泥、初沈汚泥）に着目し、長期間の混合処理における影響を検証した。実験には、鳥取市秋里下水終末処理場から発生した余剰汚泥、初沈汚泥を用いた。消化汚泥についても同様に鳥取市秋里下水終末処理場の高温消化槽から採取した汚泥を用いた。稲わらは、平成29年に刈り取った稲わらに対し膨張軟化処理装置で膨張軟化処理し、常温にて4か月保管した後に、乾燥したものをを用いた。

2.2.2. 実験条件

実験には、図2に示す有効容積2Lの消化槽を2系列用いた。消化槽は内部を55℃に制御し、攪拌羽形をもつ攪拌機により攪拌した。SRTを期間Ⅰでは60日、期間Ⅱでは30日、期間Ⅲ以降は15日になるように、1日1回槽内汚泥の引き抜きと基質の投入を行った。汚泥の引き抜き量は、汚泥水位が一定になるように調整して行った。RunAには下水汚泥のみを、RunBには下水汚泥に稲わらを混合したものを基質として投入した。下水汚泥は初沈汚泥と余剰汚泥を期間Ⅰと期間Ⅱは体積ベース1:1で混合し、期間Ⅲについては鳥取市秋里下水終末処理場での年間発生比率⁶⁾により体積ベース3:2の割合で混合して用いた。稲わらは下水汚泥の固形物に対し1:0.5の割合で混合し、投入した。また、投入基質のTS、VS、COD_{Cr}、NH₄-N濃度、および揮発性酸濃度は2週間に1回程度測定し、反応槽から引き抜いた消化汚泥については1週間に1回の頻度で測定を行った。発生したバイオガスはガスバックにより捕集し、メタン濃度はガスクロマトグラフ（SRI300）を用いて測定した。また、各基質のバイオガス生成ポテンシャルをサンプリングに合わせて測定し、連続式実験からのガス発生量との比較を行った。



図2 連続式実験機

3. 実験結果

3.1. 様々な地域バイオマスのメタン生成ポテンシャル

3.1.1. 各地域バイオマスの性状

各地域バイオマスの性状を表1に示す。それぞれのTS濃度は浄化槽汚泥が1.2%と最も小さく、紙ごみが94.3%と最も大きかった。投入バイオマスのTS濃度が大きいと槽内濃度、粘度などの上昇も想定されるため、留意が必要である。VS/TSについては、0.82～0.99との結果となった。

3.1.2. 各地域バイオマスのメタン生成ポテンシャル

回分式実験結果のとりまとめを表2に、各地域バイオマスのメタン生成ポテンシャルを図3に示す。VS1gあたりのバイオガス発生量は初沈汚泥が0.64NL/g-VSとなり最大であった。メタン濃度については、浄化槽汚泥が71%と最も高く、紙ごみが58%と最も小さい結果となった。これらは組成に起因すると考えられる。COD1gの分解によりメタン0.35Lが発生するとしてメタン転換率を算出すると、コーヒー粕が88%と最も大きな値となった。ガス発生速度について、ガス生成を一次反応と仮定し、速度定数を算出した結果、稲わらが0.31と最も小さい値となったが、これは複数回の回分式実験のうち、膨脹軟化処理の効果に差が生じており、ガス発生速度に影響したことが原因と考えられる。VS1gあたりのメタンガス発生量は初沈汚泥が0.42NL/g-VSと最も大きな値となった。下水処理場への集約を考えると、少なくとも余剰汚泥 (0.28NL/g-VS) やOD汚泥 (0.19NL/g-VS) よりも大きなメタン生成量であることが望ましく、余剰汚泥を対象とすると紙ごみ (0.31NL/g-VS)、コーヒー粕 (0.40NL/g-VS)、食品工場廃棄物 (0.40NL/g-VS)、稲わら (0.28NL/g-VS) などが、OD汚泥を対象とすると、さらに浄化槽汚泥 (0.19NL/g-VS) などが候補にあげられる。ただし、浄化槽汚泥、農業集落排水汚泥などは、混合処理により類似処理施設の統廃合が可能となる場合があり、その効果も含めて検討する必要がある。

表1 各地域バイオマスの性状

| バイオマス名 | TS(%) | VS(%) | VS/TS | COD _{Cr} (mg/L) | 備考 |
|---------|-------|-------|-------|--------------------------|------------|
| 初沈汚泥 | 3.1 | 2.6 | 0.84 | 39,700 | |
| 余剰汚泥 | 5.0 | 4.1 | 0.83 | 52,763 | |
| OD汚泥 | 15.2 | 13.6 | 0.89 | 108,050 | *CODはmg/kg |
| 食品工場廃棄物 | 19.8 | 19.1 | 0.96 | 399,145 | *CODはmg/kg |
| コーヒー粕 | 41.0 | 40.6 | 0.99 | 531,000 | *CODはmg/kg |
| 紙ごみ | 94.3 | 91.8 | 0.97 | 1,029,000 | *CODはmg/kg |
| 稲わら | 89.0 | 74.6 | 0.84 | 1,141,125 | *CODはmg/kg |
| 浄化槽汚泥 | 1.2 | 1.0 | 0.82 | 9,883 | |
| 米ぬか | 89.6 | 73.6 | 0.82 | - | |
| 農業集落排水 | 18.4 | 15.8 | 0.86 | - | |

表2 回分式実験の結果とりまとめ

| バイオマス名 | バイオガス発生量(NL/g-VS) | メタン濃度 | メタンガス発生量(NL/g-VS) | メタン転換率 | 速度定数(1/日) |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|-----------|
| 初沈汚泥 | 0.64 | 66 | 0.42 | 0.78 | 0.47 |
| 余剰汚泥 | 0.41 | 67 | 0.28 | 0.62 | 0.47 |
| OD汚泥 | 0.29 | 65 | 0.19 | 0.67 | 0.54 |
| 浄化槽汚泥 | 0.27 | 71 | 0.19 | 0.55 | 0.46 |
| 農業集落排水 | 0.16 | 65 ^(*) | 0.10 | - | 0.60 |
| 紙ごみ | 0.54 | 58 | 0.31 | - | 0.53 |
| コーヒー粕 | 0.59 | 68 | 0.40 | 0.88 | 0.40 |
| 食品工場廃棄物 | 0.63 | 64 | 0.40 | 0.55 | 0.54 |
| 米ぬか | 0.08 | 58 ^(*) | 0.05 | - | 0.60 |
| 稲わら | 0.45 | 62 | 0.28 | 0.54 | 0.31 |

*1 OD法のためOD汚泥値を採用

*2 調理くず値を採用

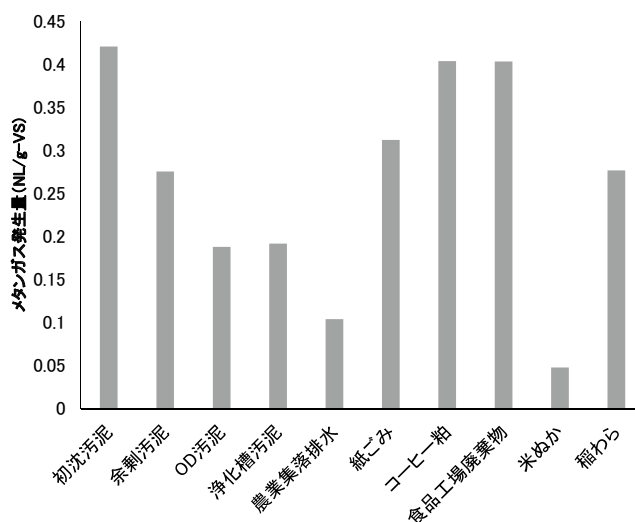


図3 メタン生成ポテンシャル

3.2. 下水汚泥と稲わらの混合メタン発酵処理

3.2.1. 稲わらおよび混合汚泥のバイオガス生成ポテンシャル

回分式実験の結果より、固形物 1gあたりの稲わらのバイオガス生成ポテンシャルは0.38NL/g-TS、初沈汚泥と余剰汚泥を3:2で混合した混合汚泥の固形物 1gあたりのバイオガス生成ポテンシャルは0.43NL/g-TSとなった。本研究では固形物ベースでの混合比を混合汚泥：稲わら=1:0.5としてメタン発酵槽に投入したので、混合投入基質 1gあたりのバイオガス生成量の計算値は0.41NL/g-TSとなった。

3.2.2. 長期間連続メタン発酵実験

①ガス発生量およびメタン濃度

ガス発生量（積算）の経日変化を図4に示す。また、連続実験結果とりまとめを表3に示す。立ち上げ期間を除いた期間3における固形物 1gあたりのガス発生率は、RunA（下水汚泥のみ）で0.41NL/g-TS、RunB（稲わら混合）で0.39NL/g-TSとなった。各基質のポテンシャルからの計算値では、RunAで0.43NL/g-TS、RunBで0.41NL/g-TSであり、投入基質が常に均質ではないため、あくまで参考ではあるが、ほぼ同等程度の値となり、発酵反応が順調に行われていたことが確認できた。平均メタン濃度はRunAが64%、RunBが62%となり、稲わら混合系であるRunBの方が低い結果となった。

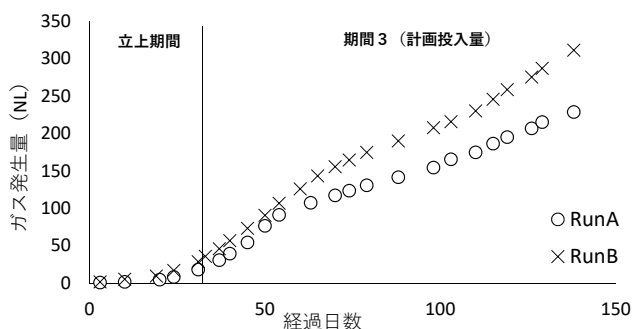


図4 ガス発生量の経日変化

発酵反応が順調に行われていたことが確認できた。平均メタン濃度はRunAが64%、RunBが62%となり、稲わら混合系であるRunBの方が低い結果となった。

②NH₄-N濃度

NH₄-N濃度についてRunAでは平均1,260mg/Lであり、期間中の最大値は1,560mg/Lであった。RunBでは平均1,140mg/Lであり、RunAよりも低い結果となった。期間Ⅰ～期間Ⅲを通じて下水汚泥単独系であるRunAよりも稲わら混合系であるRunBの方が低い傾向であった。RunBではRunAと同量の下水汚泥に対して稲わらを加えており、分解量はRunBの方が多いため、C/N比が高い稲わら混合の効果が表れたものと考えられる。また、RunAおよびRunBのいずれにおいても、高温条件で発酵阻害が生じる濃度には達しておらず、後述するとおり揮発性有機酸の顕著な蓄積も見られず、期間を通じて安定して反応が進行した。

表3 連続実験結果とりまとめ

| 期間3 平均 | RunA | RunB |
|------------------------------|-------|-----------|
| | 初沈+余剰 | 初沈+余剰+稲わら |
| 日数 | 108 | 108 |
| 投入TS(%) | 4.2 | 6.3 |
| 投入VS(%) | 3.5 | 5.3 |
| メタン濃度 | 64 | 62 |
| バイオガス発生率(NL/g-TS) | 0.41 | 0.39 |
| バイオガス発生率(NL/g-VS) | 0.49 | 0.46 |
| メタン発生率(NL/g-TS) | 0.26 | 0.24 |
| メタン発生率(NL/g-VS) | 0.31 | 0.29 |
| VS除去率(%) | 55 | 57 |
| COD _{Cr} 除去率(%) | 52 | 49 |
| pH | 7.4 | 7.3 |
| アンモニア性窒素濃度(mg/L) | 1,260 | 1,140 |
| 有機酸濃度(mg/L) | 1,400 | 1,420 |
| COD _{Cr} ベースのメタン転換率 | 0.56 | 0.52 |

③揮発性有機酸濃度およびpH

RunAでは平均1,400mg-酢酸/Lであり、RunBでは平均1,420mg-酢酸/Lとなった。pHはRunAで7.4、RunBで7.3と安定していた。本研究で揮発性有機酸の測定に用いたエステル化法は、GC法や蒸留法に比べて大きな値が出る事が報告されており⁷⁾、pHやアンモニア性窒素濃度を考慮しても反応は順調に進行していたと考えられる。

④VS除去率、COD_{Cr}除去率およびメタン転換率

期間3でのVS除去率はRunAが55%、RunBが57%であった。また、同様にCOD_{Cr}除去率はそれぞれRunAで52%、RunBで49%であった。メタンガス0.35LでCOD_{Cr}1gが分解したと考え、メタン転換率を算出すると、RunAで0.56、RunBで0.52となった。

4. まとめ

本研究の結果により以下の3点が確認された。

- ・様々な地域バイオマスのメタン発酵回分実験より、稲わらや食品工場廃棄物のメタン生成量は余剰汚泥やOD汚泥と比べて大きく、安定的な発生も期待できることから、下水処理場への集約可能性が示された。
- ・下水汚泥と稲わらの混合メタン発酵連続式実験の結果から、稲わら混合により、メタン発酵反応の阻害要因であるアンモニア性窒素濃度低下することが確認された。
- ・長期間の連続投入においても、固形物ベースで1:0.5の混合比率であれば、阻害もなく安定的に反応が進行することが確認された。

鳥取市で下水処理場に稲わらを集約し、下水汚泥に対して固形物ベースで1:0.5の割合で混合すると想定し、メタン発熱量を35.8MJ/m³、発電効率を32%として計算すると、稲わら由来の発生バイオガス量は757千Nm³/年、稲わら由来の発電量は1,494千kwh/年となる。また、同様に豆乳工場からの食品工場廃棄物の発生量を16t/日として、下水処理場に集約すると食品廃棄物由来の発生バイオガス量は704千Nm³/年、食品廃棄物由来の発電量は1,389千kwh/年となる。設備投資コストや既存処理との調整、法律・制度との整合など、様々な課題はあるが、地域で発生するバイオマスを下水処理場に集約し、メタン発酵処理によりエネルギー回収を行うことが循環型社会の構築に寄与できると考えられる。

5. 謝辞

本研究の実施にあたり、鳥取市環境下水道部下水道管理室および（公財）鳥取市環境事業公社の皆様には下水汚泥試料の提供等において多大なるご理解とご協力を賜りました。また、本研究の一部は公立鳥取環境大学特別研究費および国土技術総合政策研究所の委託研究（下水道革新的技術実証事業：B-DASHプロジェクト）により実施いたしました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 日本下水道協会：下水道統計H25、2016
- [2] 李玉友、佐々木宏、関廣二、上垣内郁夫：生ごみの高温メタン発酵に及ぼす投入濃度の影響、環境工学研究論文集、Vol.35、pp29-39、1998
- [3] Speece,R.E.、監訳、松井三郎、高島正信：産業排水処理のための嫌気性バイオテクノロジー、技報堂出版、2005
- [4] 国土交通省水管理国土保全局下水道部：下水処理場でまとめてエネルギーに、2018
- [5] 石川県珠洲市、財団法人下水道新技術推進機構：バイオマスメタン発酵に関する性能評価研究、2009.
- [6] 日本下水道協会：下水道統計H26、2017
- [7] 生村隆司、高木康二、稲葉英樹、岡庭良安：揮発性有機酸の簡易定量方法について、第6回衛生工学シンポジウム、1998