

下水汚泥と稲わらの一括バイオガス化技術の実用化に向けた混合嫌気性消化に関する研究

資源エネルギー循環研究室 10503388 高松 量

指導教員 小松 俊哉 姫野 修司

1. 研究背景

新潟県では例年 65 万トンの稲わらが発生し、そのほとんどが鋤き込まれている。排水不良田での稲わらの鋤きこみにより根腐れによる生育阻害や土中にて稲わらが嫌気分解されることにより大気中にメタンが放出し、地球温暖化を促進させることが懸念されている。近年、稲わらはバイオマスとして注目されており、他バイオマスと比べ食糧と競合しないことや秋口に一括回収できるため収集運搬が容易である。

本研究では嫌気性消化法によるバイオガス化に注目した。嫌気性消化は創エネルギー分野であると同時に消化槽の加温や攪拌などエネルギーを大きく消費するシステムであるため、バイオガス生産量の増大が求められている。昨今、バイオマスを利用した混合嫌気性消化法によって、バイオガス発生量を増大させる試みがある。

本研究グループでは、稲わらが混合消化に適したバイオマスであり、組織が強固である稲わらの前処理法として酵素溶液に浸漬させる酵素処理法が有効であることを基礎実験で明らかにした¹⁾²⁾³⁾。本研究では稲作地域において、稲わらを下水汚泥とともに嫌気性消化を行ないバイオガス化し、地産地消の再生可能エネルギーとして回収を行なうシステムの実装を目的としており、学内にて実機を想定した混合嫌気性消化の回分実験を行い、実機での運用に適した嫌気性消化法の条件を設定し、それを踏まえて下水処理場にてパイロットスケールでの連続式の実証実験から、消化特性を把握し稲わらが混合嫌気性消化に適したバイオマスであることの実証を行ない、混合嫌気性消化技術の確立を目指した。

2. 回分実験について

2. 1 実験方法

回分実験の方法は次の通りである。5mm 程度に破碎した稲わらと酵素溶液または蒸留水を固液比 1:10 でガラスバイアルに投入し 10 日間~20 日間の浸漬を行った。その後、混合液量が 300mL となるように稲わらと種汚泥である中温消化汚泥を 720mL のバイアルに投入密閉し、中温 37°C の条件で 1 日 1 回攪拌し、最大 40 日間反応させ、発生ガス、余剰汚泥の性状から消化成績を評価した。

2. 2 実験結果

以下の検討実験を行ない、得られた知見を示す。

- 1) 酵素添加量の検討
- 2) 可溶化日数の検討
- 3) 酵素の種類の見直し
- 4) 稲わらの粒径が及ぼす影響の検討
- 5) 連続式可溶化槽による稲わらへの影響の検討
- 6) 下水汚泥と稲わらの混合消化の検討
- 7) 稲わらの保存方法が及ぼす影響の検討
- 8) 稲わらの保存期間が及ぼす影響の検討

これらの検討から得られた知見により、実証実験では条件を次のように設定した。3 種の酵素のうち最もメタン活性の高い酵素を使用することとし添加量を 0.025g/g-稲わら、可溶化浸漬日数は 20 日とする。

また、粒径が 1mm 程度になる実証破碎機でも Lab の破碎機と同程度のメタン生成を得ることができ、実証実験の可溶化槽でも回分浸漬を行った稲わらと同等であった。下水汚泥と稲わらを混合することにより、C/N 比が調整され、消化が有利になることを確認した。実証施設で稲わらを保存する際、稲わらの屋内保存とラッピングした屋外保存では、屋内保存の稲わらのメタン転換率が 20%程高かった。また 1 年間の保存によりメタン活性は約 15%減少させる

知見を得た。

3. パイロットスケールにおける実証実験

3. 1 実験概要

本研究では信濃川下流流域下水道長岡浄化センターにて実証実験を行った。図-1 に本実験のプロセスを示す。

可溶化槽は 120L であり、全 2 系列で運転した。稲わら系では破碎した稲わらと処理水を 1:10 で投入、攪拌している。酵素稲わら系では 0.025g/g-稲わら での酵素量で、セルラーゼ系酵素”JB-001”を使用した酵素溶液に稲わらを混合した。週 6 回、2 つの可溶化槽から投入稲わらと処理水と同量の可溶化稲わらを引き抜き、それぞれ消化槽へ投入している。

消化槽は 500L であり、全 3 系列で運転した。コントロールとして下水汚泥（初沈汚泥:余剰汚泥=2:1）のみを投入した汚泥単独系、下水汚泥と可溶化稲わらを投入した稲わら系、下水汚泥と酵素処理を行った可溶化稲わらを投入した系を酵素稲わら系とした。本実験では消化槽の 2 つの運転条件を設定した。実験条件 1（以下、条件 1）は滞留日数約 30 日、稲わら系と酵素稲わら系において投入する下水汚泥と稲わらの TS 比率を 1:0.25 として、それぞれ下水汚泥を 20L、可溶化槽から引き抜いた可溶化稲わらをそれぞれ 1.8L 投入する。実験条件 2（以下、条件 2）では滞留日数は条件 1 とほぼ等しく、稲わら系と酵素稲わら系において下水汚泥と稲わらの TS 比率を 1:0.5 として、それぞれ下水汚泥を 20L、可溶化稲わら 3.6L を投入する。運転温度は条件 1、条件 2 ともに可溶化槽、消化槽は 37℃であり、週 6 日（日曜日以外）運転している。運転期間について条件 1 は 9 週間、条件 2 は 6 週間である。

消化汚泥の固形物量 TS・有機物量 VS は週 3 回、消化汚泥の pH・発生ガス量は週 6 回、発生ガスのメタン濃度・消化汚泥の溶解性 COD、アンモニア性窒素は週 1 回測定している。汚泥単独系と比

較した稲わら投入の影響および酵素処理の効果を中心にプロセス評価を行った。なお、条件 1、条件 2 ともに期間を 2 つずつに分けて評価を行った。

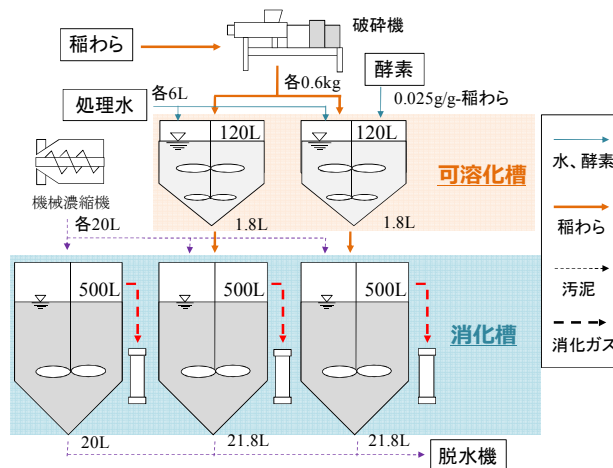


図-1 実証実験プロセス

3. 2 条件 1 における実験結果

条件 1 における消化槽の条件と投入基質の性状を表-1 に示す。

表-1 実験条件 1 の消化槽条件と投入基質の性状

| | | 汚泥単独系 | 稲わら系 | 酵素稲わら系 | |
|-----|-------|------------------------|-----------|--------|------|
| 期間1 | 滞留日数 | 日 | 29.2 | 26.8 | 26.8 |
| | 投入TS | % | 4.92±0.68 | 5.34 | 5.34 |
| | 投入VS | % | 4.33±0.64 | 4.60 | 4.60 |
| | 投入COD | g/L | 58.4 | 58.9 | 59.1 |
| | VS負荷 | kg-VS/日・m ³ | 1.48 | 1.72 | 1.72 |
| 期間2 | 滞留日数 | 日 | 29.2 | 26.8 | 26.8 |
| | 投入TS | % | 4.55±0.85 | 5.00 | 5.00 |
| | 投入VS | % | 3.97±0.74 | 4.28 | 4.28 |
| | 投入COD | g/L | 53.6 | 54.5 | 54.6 |
| | VS負荷 | kg-VS/日・m ³ | 1.36 | 1.60 | 1.60 |

滞留日数は稲わらの投入により稲わら系が若干短くなっている。また運転中の下水汚泥は全量機械濃縮されていたため高濃度であった。

条件 1 での週別の発生バイオガス量の推移を図-2 に示す。連続実験開始後、稲わら系が汚泥単独系より発生バイオガス量が低い傾向が見られた。これは、初期の投入した種汚泥である消化汚泥の活性が劣っていたためと考えられる。その後、稲わら系、酵素稲わら系の稲わら投入を停止し、発生バイオガス量が安定を確認し、一週間後再開した。その後の経過から安定した発生バイオガス量

が得られたため、実験開始から 4~6 週間を期間 1、7~9 週間を期間 2 として評価を行なう。

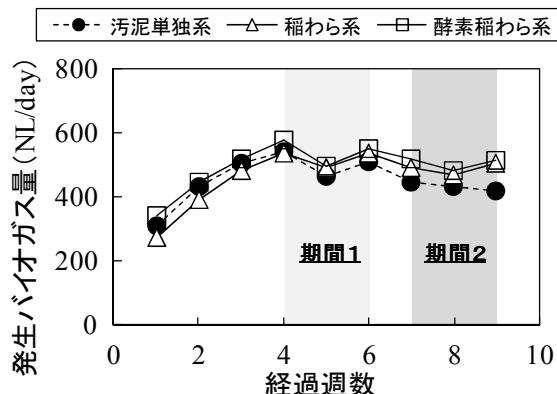


図-2 条件 1 での週別発生バイオガス量

条件 1 の発生ガス量、消化汚泥の性状、メタン生成能を表-2 に示す。

表-2 実験条件 1 の結果

| 系列 | 期間 | 汚泥単独系 | | 稲わら系 | | 酵素稲わら系 | | |
|-------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | |
| pH | - | 7.63 | 7.59 | 7.58 | 7.64 | 7.62 | 7.63 | |
| TS | % | 2.27 | 2.31 | 2.37 | 2.47 | 2.37 | 2.48 | |
| VS | % | 1.68 | 1.72 | 1.73 | 1.80 | 1.77 | 1.80 | |
| VS/TS | - | 0.74 | 0.74 | 0.73 | 0.73 | 0.75 | 0.73 | |
| 分解率 | TS | % | 54.1 | 49.2 | 55.9 | 50.5 | 56.1 | 50.4 |
| | VS | % | 61.2 | 56.3 | 62.7 | 57.8 | 62.1 | 57.9 |
| 溶解性COD | g/L | 1.06 | 1.32 | 1.23 | 1.37 | 1.06 | 1.92 | |
| アンモニア性窒素 | g/L | 1.42 | 1.40 | 1.39 | 1.23 | 1.40 | 1.26 | |
| 発生バイオガス量 | NL/day | 504 | 432 | 520 | 487 | 541 | 504 | |
| メタン含有率 | % | 55.2 | 54.4 | 54.1 | 53.5 | 54.7 | 53.7 | |
| メタン転換率 | % | 67.9 | 62.7 | 62.3 | 62.7 | 65.7 | 64.9 | |
| 投入VSあたりのガス量 | Nm ³ /kg-VS | 0.581 | 0.545 | 0.516 | 0.523 | 0.539 | 0.541 | |
| 除去VSあたりのガス量 | Nm ³ /kg-VS | 0.949 | 1.003 | 0.823 | 0.906 | 0.921 | 0.935 | |
| 稲わらのメタン転換率 | % | - | - | 7.0 | 62.8 | 44.3 | 85.7 | |

pH は 7.6 程度であった。VS 分解率が処理場の消化率約 60%と同等程度であるため、消化は順調であると考えられる。TS 分解率は稲わら系、酵素稲わら系が汚泥単独系よりも高かった。ガス量は、稲わら酵素系が最も高く、次いで稲わら系、汚泥単独系であり、有意差(p<0.05)もあったことから、酵素の効果稲わらのガス量増大に繋がることを示している。メタン含有率は稲わらを投入することにより減少しているが、これはセルロース系バイオマスの稲わらを投入したことによる特徴である。COD 基準のメタン転換率は 60%以上であり、稲わらの正味のメタン転換率(COD 基準、酵素 COD も考慮)は酵素稲わ

ら系では最大 85.7%となった。また、稲わら投入によって溶解性 COD は若干上昇、アンモニア性窒素は若干低下する結果が得られた。これは過去の実験でも同様の傾向が得られている³⁾。

稲わらのメタン転換率は、Lab の連続実験で稲わら系 87.2%、酵素稲わら系 91.4%であった結果¹⁾には及ばないが、パイロットスケールにおいても酵素処理によって下水汚泥以上のメタン転換率が得られることを実証できた。

3. 2. 2 条件 2 における実験結果

条件 2 における消化槽の条件と投入基質の性状を表-3 に示す。

表-3 実験条件 2 の消化槽条件と投入基質の性状

| | | 汚泥単独系 | 稲わら系 | 酵素稲わら系 | |
|-----|---------|------------------------|-----------|--------|------|
| 期間3 | 滞留日数 | 日 | 29.2 | 24.7 | 24.7 |
| | 投入TS | % | 3.64±0.17 | 4.17 | 4.17 |
| | 投入VS | % | 3.34±0.13 | 3.70 | 3.70 |
| | 投入VS/TS | - | 0.92 | 0.89 | 0.89 |
| | 投入COD | g/L | 45.1 | 48.2 | 48.4 |
| | VS負荷 | kg-VS/日・m ³ | 1.15 | 1.76 | 1.76 |
| 期間4 | 滞留日数 | 日 | 29.2 | 24.7 | 24.7 |
| | 投入TS | % | 3.43±0.23 | 3.98 | 3.98 |
| | 投入VS | % | 3.13±0.18 | 3.51 | 3.51 |
| | 投入VS/TS | - | 0.91 | 0.88 | 0.88 |
| | 投入COD | g/L | 42.3 | 45.8 | 46.0 |
| | VS負荷 | kg-VS/日・m ³ | 1.07 | 1.68 | 1.68 |

滞留日数は稲わらの投入により稲わら系が若干短くなっている。

条件 2 での週別の発生バイオガス量の推移を図-3 に示す。投入開始後、連続実験開始後、1~3 週間を期間 3、開始 4~6 週間を期間 4 として評価を行なう。

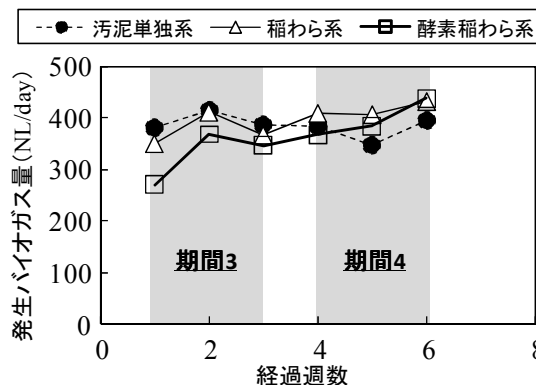


図-3 条件 2 での週別発生バイオガス量

表-2 実験条件 2 の結果

| 系列 期間 | | 汚泥単独系 | | 稲わら系 | | 酵素稲わら系 | | |
|-------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|
| | | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | |
| pH | - | 7.44 | 7.37 | 7.41 | 7.32 | 7.40 | 7.30 | |
| TS | % | 1.97 | 1.80 | 2.10 | 2.12 | 2.08 | 2.12 | |
| VS | % | 1.45 | 1.49 | 1.50 | 1.49 | 1.49 | 1.52 | |
| VS/TS | - | 0.74 | 0.83 | 0.71 | 0.70 | 0.72 | 0.72 | |
| 分解率 | TS | % | 45.9 | 47.5 | 49.5 | 46.6 | 49.8 | 46.5 |
| | VS | % | 56.6 | 59.0 | 59.4 | 57.5 | 59.6 | 56.6 |
| 溶解性COD | g/L | 0.88 | 0.93 | 1.17 | 1.20 | 1.19 | 1.54 | |
| アンモニア性窒素 | g/L | 1.14 | 0.46 | 1.01 | 0.84 | 0.98 | 0.78 | |
| 発生バイオガス量 | NL/day | 395 | 376 | 376 | 416 | 329 | 398 | |
| メタン含有率 | % | 53.0 | 56.2 | 53.1 | 56.0 | 52.3 | 55.7 | |
| メタン転換率 | % | 64.0 | 73.0 | 46.7 | 60.5 | 35.4 | 54.0 | |
| 投入VSあたりのガス量 | Nm ³ /kg-VS | 0.591 | 0.600 | 0.432 | 0.502 | 0.380 | 0.480 | |
| 除去VSあたりのガス量 | Nm ³ /kg-VS | 1.045 | 1.067 | 0.728 | 0.873 | 0.638 | 0.849 | |
| 稲わらのメタン転換率 | % | - | - | N.A | 26.3 | N.A | 10.4 | |

pH は 7.4 前後で条件 1 と比べてやや低い。TS 分解率、VS 分解率については消化が順調に行われているといえるが、発生バイオガス量が期間 3 においては汚泥単独系が稲わら系、酵素稲わら系よりも高く、稲わら投入の効果が見られなかった。開始後 1 滞留日数以上経過した期間 4 においては汚泥単独系よりも稲わら系、酵素稲わら系が高かったが、酵素の効果は確認できず、稲わら系より稲わらのメタン転換率が低かった。条件 1 と同様にアンモニア性窒素は若干減少し、溶解性 COD は若干上昇している。なお、開始 6 週目では酵素稲わら系が稲わら系より発生ガス量が増加し、メタン転換率が稲わら系が 26%、酵素稲わら系が 32%であった。その後の経過でも酵素稲わら系の発生バイオガス量が増加している傾向を示しており、条件 2 では条件 1 よりも長い日数がかかるが、酵素の効果は期待できる。

4. まとめ

- 1) 回分実験より得た知見より実証実験の条件を設定した。さらに、下水汚泥と稲わらの混合がメタン活性上昇に繋がること、実証に際して稲わらの保管は屋内が有効なこと、1 年の保管により稲わらのメタン活性が減少することなどがわかった。
- 2) 信濃川下流域下水道長岡浄化センターにてパイロットスケールの実証実験を行った。結果、条件 1 では pH も至適範囲内であり、酵素稲わら系が高いメタン転換率だったことから、実規模

の実験でも稲わらは混合消化に適したバイオマスであることと、酵素による可溶化前処理により稲わらのメタン転換率を向上させることを確認した。一方、条件 2 では定常状態には達していないが、徐々に酵素稲わら系の発生バイオガス量が増加している傾向がみられている。

参考文献

- 1) 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 2007 年 vol.44 No.531 pp.139-150
- 2) 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 2010 年 vol.47 No.567 pp.130-139
- 3) 小松俊哉、江口淳、姫野修司：「高効率エネルギー回収を目的とした高濃度下水汚泥と稲わらの混合嫌気性消化に関する研究」下水道協会誌 2011 年 vol.48 No.588 pp.127-135