

# 農業廃棄物(稲わら)と下水汚泥の混合消化 について

○公立鳥取環境大学 戸苅 丈仁

## 1. 研究の背景

## 1. 研究の背景

### ○稲わらの処理状況

- ・発生量は年間852万t程度
- ・発生後に水田土壌にすき込みされる量は559万t程度

### ○稲わらの特徴

- ・年に1回(稲の収穫時), 大量に発生する
- ・生分解可能な有機分が含まれる
- ・稲わら中のケイ素はイネの生育に重要

### ○稲わらと下水汚泥の混合消化の効果

- ①エネルギー回収量の増加, ②高温発酵処理の安定化
- ③肥料性能の向上



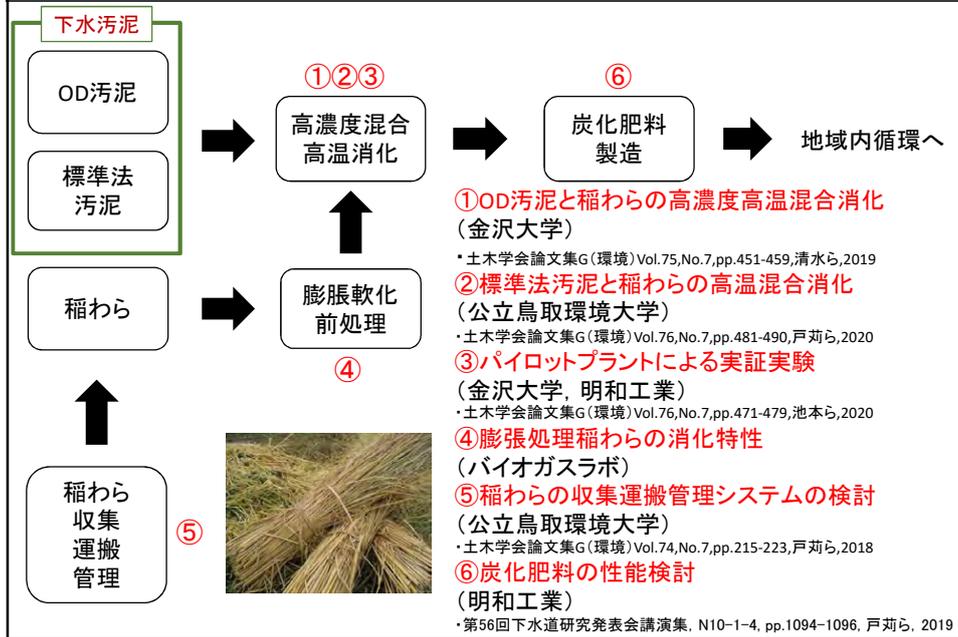
## 2. 提案システム

## 2. 想定システム



## 3. 研究方法

### 3. 研究方法



### 3. 研究方法

- ① OD汚泥と稲わらの高濃度高温混合消化
  - ・脱水汚泥ベースでの稲わらとの高濃度高温混合消化
  - ・回分式実験, 長期間連続式実験を実施
- ② 標準法汚泥と稲わらの高温混合消化
  - ・標準法汚泥(初沈汚泥, 余剰汚泥)との高温混合消化
  - ・回分式実験, 長期間連続式実験を実施
- ③パイロットプラントによる実証実験
  - ・1.5m<sup>3</sup>槽を用いた長期間連続式実験
  - ・攪拌性能やスケールアップの影響を確認
- ④膨脹処理稲わらの消化特性
  - ・膨脹軟化処理を行なった稲わらの消化特性の確認
- ⑤稲わらの収集運搬管理システムの検討
  - ・農家を対象にアンケート, ヒアリングを実施しシステムを検討
  - ・稲わら長期保管による影響を検討
- ⑥炭化肥料の性能検討
  - ・含有量試験, 溶出試験, 水稻栽培試験を実施

## ① OD汚泥と稲わらの高濃度高温混合消化

### ① OD汚泥と稲わらの高濃度高温混合消化(金沢大学)

#### ○連続式消化実験

- ・有効容積3Lの実験機を用いた
- ・Run1をOD汚泥単独系, Run2をOD汚泥+稲わらの混合系とした
- ・稲わらはTSベースで40%-50%を混合
- ・稲わらは石川県内で発生したものを膨張軟化処理



|       | 運転期間                           | 期間0<br>(1-17) | 期間1<br>(18-57) | 期間2<br>(58-142) | 期間3<br>(143-219) | 期間4<br>(220-280) |
|-------|--------------------------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Run 1 | 投入TS濃度 (g/L)                   | 40            | 60             | 60              | 60               | 60               |
|       | TS負荷(kgTS/m <sup>3</sup> .day) | 4.0           | 6.0            | 4.0             | 4.0              | 4.0              |
| Run 2 | 投入TS濃度 (g/L)                   | 56            | 84             | 90              | 90               | 90               |
|       | 汚泥 (g/L)                       | 40            | 60             | 60              | 60               | 60               |
|       | 稲わら (g/L)                      | 16            | 24             | 30              | 30               | 30               |
|       | 稲わら種類                          | 28-1          | 28-1           | 28-1            | 28-2             | 29-1             |
|       | TS負荷(kgTS/m <sup>3</sup> .day) | 5.6           | 8.4            | 6.0             | 6.0              | 6.0              |
|       | SRT(day)                       | 10            | 10             | 15              | 15               | 15               |

オキシデーションディッチ汚泥の高濃度高温消化に及ぼす稲わらの添加効果, 清水ら, 土木学会論文集G(環境), Vol.75, No.7, III\_451-III\_459, 2019 より

## ① OD汚泥と稲わらの高濃度高温混合消化(金沢大学)

### ○連続式消化実験

- ・OD汚泥6%に稲わら3%を混合した条件においても, 安定した消化反応の進行を確認
- ・菌叢解析の結果, 両系列のバクテリア, アーキアに大きな違いを確認

|       |                                     | 期間1  |      | 期間2  |      | 期間3   |      | 期間4  |      |
|-------|-------------------------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
|       |                                     | Run1 | Run2 | Run1 | Run2 | Run1  | Run2 | Run1 | Run2 |
| バイオガス | 1日平均バイオガス発生量(NL/day)                | 1.71 | 4.29 | 1.71 | 4.29 | 1.31  | 2.66 | 1.08 | 3.31 |
|       | バイオガス収率(NL/g-TS)                    | 0.14 | 0.24 | 0.14 | 0.24 | 0.11  | 0.15 | 0.09 | 0.18 |
|       | バイオガス収率(NL/g-VS)                    | 0.16 | 0.27 | 0.16 | 0.27 | -0.12 | 0.16 | 0.10 | 0.20 |
|       | 平均メタン濃度(%)                          | 68.0 | 58.2 | 68.0 | 58.2 | 68.0  | 65.3 | 68.8 | 63.8 |
| メタンガス | 1日平均メタンガス発生量(NL/day)                | 1.16 | 2.49 | 1.16 | 2.49 | 0.89  | 1.74 | 0.74 | 2.11 |
|       | メタンガス収率(NL/g-TS)                    | 0.10 | 0.14 | 0.10 | 0.14 | 0.07  | 0.10 | 0.06 | 0.12 |
|       | メタンガス収率(NL/g-VS)                    | 0.11 | 0.16 | 0.11 | 0.16 | 0.08  | 0.11 | 0.07 | 0.13 |
|       | 稲わらのメタンガス収率(NL/g-TS)                | -    | 0.22 | -    | 0.22 | -     | 0.14 | -    | 0.18 |
|       | 稲わらのメタンガス収率(NL/g-VS)                | -    | 0.25 | -    | 0.25 | -     | 0.16 | -    | 0.21 |
| 汚泥    | 平均TS濃度(g/L)                         | 44   | 60   | 46   | 65   | 47    | 69   | 48   | 65   |
|       | 平均VS濃度(g/L)                         | 27   | 50   | 24   | 54   | 26    | 56   | 22   | 52   |
|       | 平均COD <sub>Cr</sub> 濃度(g/L)         | 47   | 50   | 56   | 69   | 52    | 67   | 63   | 74   |
|       | TS除去率                               | 0.26 | 0.27 | 0.23 | 0.28 | 0.22  | 0.24 | 0.20 | 0.28 |
|       | VS除去率                               | 0.29 | 0.37 | 0.40 | 0.35 | 0.39  | 0.32 | 0.41 | 0.37 |
| 転換率   | COD <sub>Cr</sub> 除去率               | -    | -    | 0.19 | 0.32 | 0.19  | 0.32 | 0.12 | 0.31 |
|       | メタンガス転換率(COD <sub>Cr</sub> ベース)     | -    | -    | 0.23 | 0.34 | 0.18  | 0.23 | 0.15 | 0.28 |
|       | 稲わらのメタンガス転換率(COD <sub>Cr</sub> ベース) | -    | -    | -    | 0.56 | -     | 0.36 | -    | 0.46 |

オキシデーションディッチ汚泥の高濃度高温消化に及ぼす稲わらの添加効果, 清水ら, 土木学会論文集G(環境), Vol.75, No.7, III 451-III 459, 2019 より

## ②標準法汚泥と稲わらの高温混合消化

## ②標準法汚泥と稲わらの高温混合消化(公立鳥取環境大学)

### ○連続式消化実験

- ・有効容積2Lの実験機を用いた
- ・Run1を下水汚泥単独系, Run2を下水汚泥 + 稲わらの混合系とした
- ・稲わらはTSベースで25%-100%を混合
- ・稲わらは石川県内で発生したものを膨張軟化処理



|     | 日数<br>(日) | SRT<br>(日) | 稲わら<br>混合比<br>(TSベース) | 投入基質平均TS    |             |            |            | 投入基質平均VS    |             |            |            | 平均有機物負荷<br>(kg-VS/m <sup>3</sup> /day) |
|-----|-----------|------------|-----------------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|--|
|     |           |            |                       | 初沈汚泥<br>(%) | 余剰汚泥<br>(%) | 稲わら<br>(%) | 混合物<br>(%) | 初沈汚泥<br>(%) | 余剰汚泥<br>(%) | 稲わら<br>(%) | 混合物<br>(%) |  |
| 期間1 | Run 1     | 79         | 15                    | -           | 2.8         | 4.9        | 3.6        | 2.4         | 4.1         | -          | 3.1        | 2.0                                    |
|     | Run 2     |            |                       | 1:0.5       |             |            | 87.9       |             |             | 5.5        | 75.7       |  |
| 期間2 | Run 1     | 103        | 15                    | -           | 4.1         | 5.0        | 4.5        | 3.4         | 4.0         | -          | 3.7        | 2.4                                    |
|     | Run 2     |            |                       | 1:1.0       |             |            | 86.8       |             |             | 8.4        | 73.8       |  |
| 期間3 | Run 1     | 72         | 15                    | -           | 2.9         | 5.0        | 3.8        | 2.4         | 4.2         | -          | 3.1        | 2.1                                    |
|     | Run 2     |            |                       | 1:0.25      |             |            | 89.6       |             |             | 4.7        | 75.9       |  |

下水汚泥と稲わらの高温混合メタン発酵によるエネルギー回収と残渣の水田への利用可能性, 戸苅ら, 土木学会論文集G(環境), Vol.76, No.7, III\_481-III\_490, 2020 より

## ②標準法汚泥と稲わらの高温混合消化(公立鳥取環境大学)

### ○連続式消化実験

- ・混合比率1:0.5(TSベース)まで安定的な消化反応を確認
- ・菌叢解析の結果, 両系列のバクテリア, アーキアに大きな違い
- ・消化汚泥灰分の分析結果より, SiO<sub>2</sub>含有率がRun1 **19.9%**に対し Run2 **51.9%** (期間2)

| 項目                               | Run 1     |           |           | Run 2     |           |           |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                  | 期間1       | 期間2       | 期間3       | 期間1       | 期間2       | 期間3       |
| 稲わら混合比率 (TSベース)                  | -         | -         | -         | 1:0.5     | 1:1.0     | 1:0.25    |
| 平均有機物負荷 (g-VS/L/day)             | 2.05      | 2.45      | 2.08      | 3.10      | 4.67      | 2.61      |
| 投入VS1gあたりメタンガス発生量 (NL/g-VS)      | 0.34      | 0.30      | 0.27      | 0.31      | 0.25      | 0.27      |
| メタン濃度 (%)                        | 64.8      | 62.6      | 61.8      | 62.8      | 58.8      | 66.9      |
| VS分解率 (%)                        | 54.7±6.8  | 50.1±4.5  | 58.6±5.3  | 54.7±2.0  | 41.9±5.1  | 62.1±4.9  |
| COD <sub>Cr</sub> ベースのメタン転換率 (%) | 66.0      | 54.3      | 54.8      | 65.6      | 54.2      | 57.0      |
| 稲わらのメタン転換率 (%)                   | -         | -         | -         | 64.6      | 49.2      | 59.2      |
| NH <sub>4</sub> -N濃度 (g/L)       | 1.25±0.08 | 1.14±0.07 | 1.09±0.27 | 1.09±0.16 | 1.03±0.09 | 1.00±0.19 |
| 揮発性酸濃度(酢酸換算) (g/L)               | 1.32±0.10 | 0.83±0.25 | 0.62±0.14 | 1.56±0.14 | 1.17±0.16 | 0.95±0.17 |

\*Run2の237~271日はガス漏れのためバイオガス発生量未計測

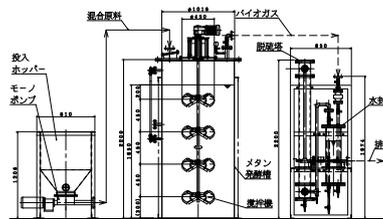
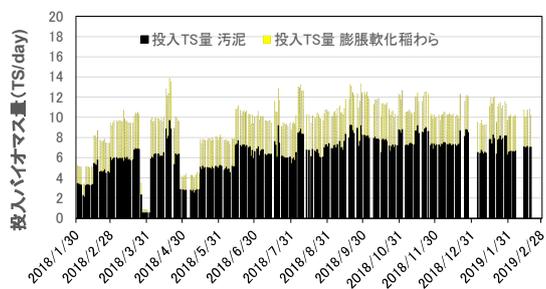
下水汚泥と稲わらの高温混合メタン発酵によるエネルギー回収と残渣の水田への利用可能性, 戸苅ら, 土木学会論文集G(環境), Vol.76, No.7, III\_481-III\_490, 2020 より

### ③パイロットプラントによる実証実験

#### ③パイロットプラントによる実証実験 (金沢大学, 明和工業)

##### ○連続式消化実験

- ・有効容積1.5m<sup>3</sup>の実験機を用いた
- ・OD汚泥と稲わらを混合, 混合比率はTSベースで1:0.5
- ・基質投入は1日3回, 消化汚泥引き抜きは1日1回, SRTは15日とした



オキシデーションディッチ汚泥と稲わらの高濃度高温混合消化-パイロットプラントによる実証-, 池本ら, 土木学会論文集G(環境), Vol.76, No.7, III\_471-III\_479, 2020 より

### ③パイロットプラントによる実証実験(金沢大学, 明和工業)

#### ○連続式消化実験

- ・定常運転以降は, 安定してガスが発生  
顕著な有機酸やアンモニアの蓄積はみられなかった
- ・1週間程度の投入中止があったが, 投入再開後は順調にガスが発生した
- ・メタンガス収率は, 回分式実験で求めた各基質のポテンシャルからの計算値とほぼ同等の値となった
- ・菌叢解析の結果では室内連続実験と同様の傾向が確認された

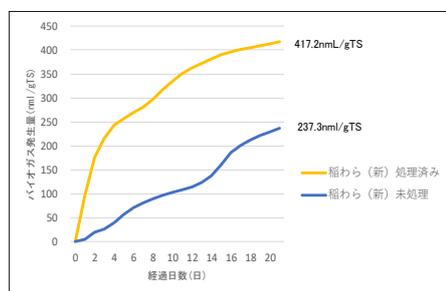


|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 投入TS(%)                        | 9.0%  |
| 投入VS(%)                        | 7.8%  |
| 消化汚泥TS(%)                      | 6.0%  |
| 消化汚泥VS(%)                      | 4.8%  |
| TS除去率                          | 0.34  |
| VS除去率                          | 0.38  |
| COD除去率                         | 0.43  |
| バイオガス収率(Nm <sup>3</sup> /kgTS) | 0.267 |
| バイオガス収率(Nm <sup>3</sup> /kgVS) | 0.307 |
| メタン濃度                          | 60.2% |
| メタンガス収率(Nm <sup>3</sup> /kgTS) | 0.162 |
| メタンガス収率(Nm <sup>3</sup> /kgVS) | 0.186 |
| 投入COD当たりメタン転換率                 | 0.352 |

オキシデーションディッチ汚泥と稲わらの高濃度高温混合消化-パイロットプラントによる実証-, 池本ら, 土木学会論文集G(環境), Vol.76, No.7, III\_471-III\_479, 2020 より

### ④膨張処理稲わらの消化特性

#### ④膨張処理稲わらの消化特性(バイオガスラボ)



未処理稲わらと膨張軟化処理稲わらの  
ガス発生量経時変化



#### ○膨張軟化稲わらによる回分式消化実験

- ・室内回分実験により膨張軟化処理により稲わらからのガス発生量が約70%増
- ・膨張軟化処理により、稲わらの吸水性・沈降速度が増加



#### ⑤稲わらの収集運搬管理システムの検討

### ⑤ 稲わらの収集運搬管理システムの検討(公立鳥取環境大)

#### ○ 稲わらの長期保管による性状変化

- ・ 収集後約1年間、稲わらの性状とバイオガス生成ポテンシャルを測定した。その結果、大きな変化は確認されなかった

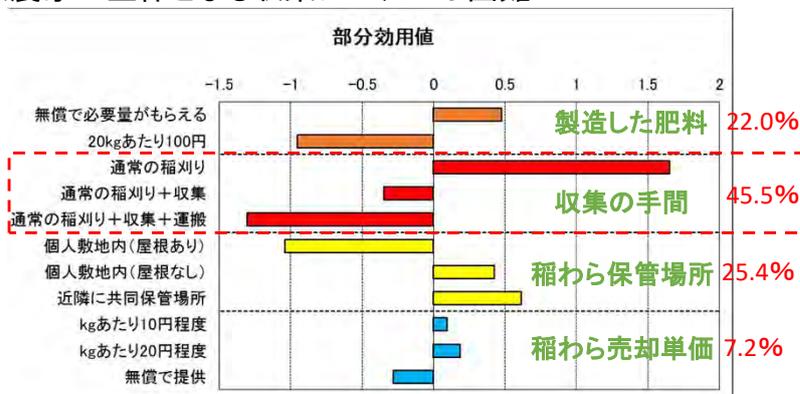
| 項目                           | 稲わら        |
|------------------------------|------------|
| TS(%)                        | 87.5 ± 3.5 |
| VS(%)                        | 74.4 ± 3.5 |
| COD <sub>Cr</sub> (mg/kg)    | 911 ± 59   |
| C/N比                         | 58.4 ± 8.0 |
| TS1gあたりバイオガス発生量<br>(NL/g-TS) | 0.41       |
| VS1gあたりバイオガス発生量<br>(NL/g-VS) | 0.49       |

下水汚泥と稲わらの高温混合メタン発酵によるエネルギー回収と残渣の水田への利用可能性, 戸茱ら, 土木学会論文集G(環境), Vol.76, No.7, III\_481-III\_490, 2020 より

### ⑤ 稲わらの収集運搬管理システムの検討(公立鳥取環境大)

#### ○ 稲わらの収集システムに関するアンケート

- ・ 収集に関する手間の増加が最も影響が大きい
- ・ 下水汚泥肥料の利用については、コストによっては使用しても良いとの回答が多かった
- ・ 個人農家が主体となる収集システムは困難

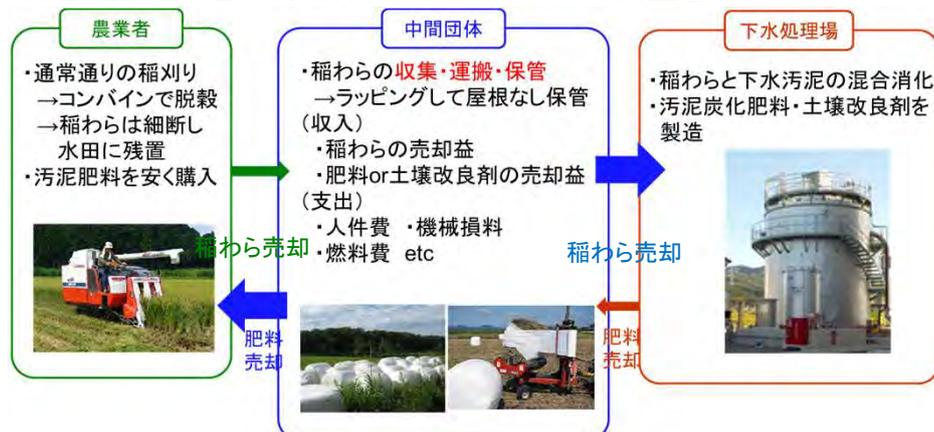


下水汚泥と稲わらの混合メタン発酵による地域内資源循環システムに関する検討, 戸茱ら, 土木学会論文集G(環境), Vol.74, No.7, III\_215-III\_223, 2018 より

## ⑤ 稲わらの収集運搬管理システムの検討(公立鳥取環境大)

### ○ 想定システム

- ・ 収集および運搬を担う中間団体が必要
- ・ 中間団体の候補として大規模農業法人, 地元建設会社, 下水道維持管理会社, 地方自治体に対してヒアリング調査を実施



稲わらと下水汚泥の高温混合消化を核とした地域内循環システム, 戸荻ら, 第56回下水道研究発表会講演集, N10-1-4, pp.1094-III 1096, 2019 より

## ⑤ 稲わらの収集運搬管理システムの検討(公立鳥取環境大)

### ○ 想定システム

稲わらを収集時に, ロールにしてラッピングし, そのまま保管する  
保管場所は下水処理場の余裕敷地 or 圃場



## ⑤ 稲わらの収集運搬管理システムの検討(公立鳥取環境大)

|                 | 農業者(大規模)   | 地元建設会社  | 維持管理会社   | 地方自治体  |
|-----------------|--|---|--|--|
| 下水汚泥肥料の使用について   | <ul style="list-style-type: none"> <li>性能さえ良ければ問題ない</li> <li>土壌改良材として使いたい</li> <li>元肥が少なくなると良い</li> </ul>  |   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>使ってくれそうな農家は意外と多い</li> <li>無償配布でも良い</li> </ul> |
| 汚泥肥料の形状         | <ul style="list-style-type: none"> <li>ペレットが望ましい</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>運搬に適した形状</li> </ul>                            |  |  |
| 稲わら保管について       | <ul style="list-style-type: none"> <li>ロールにして青空保管で問題ない</li> <li>圃場保管のデメリットは小さいが、土おこしの邪魔にならなければ</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>バックホウやトラックはあるので積み込み運搬は可能</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>バックホウ、トラックの手配が必要</li> </ul>                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>処理場用地に余裕があれば稲わらを置いても良い</li> </ul>             |
| 稲わら収集について(中間団体) | <ul style="list-style-type: none"> <li>同様のシステムを経験済み</li> <li>細断して集めるのは可能</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>個人農家一件ずつに交渉はできない</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>会社としてメリットを感じない</li> <li>FITなどのスキームがあれば</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>トータルコストでメリットがあれば中間団体になっても良い</li> </ul>        |
| コストについて         | <ul style="list-style-type: none"> <li>機械導入の費用が問題</li> <li>稲わらの売却で儲けるというよりは、システムに参加することでコメに付加価値をつけたい</li> <li>売上2000万のうち500万を肥料に使っている、減らしたい</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>利益は100万もあれば良い</li> <li>社会的にアピールできれば</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>積極的に収集を行う理由がない</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>トータルコストにメリットがあれば、システムにトライする価値はある</li> </ul>   |
| その他             | <ul style="list-style-type: none"> <li>肥料は現場での実証が必要</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>あくまで建設業がメインで時期によっては人が足りない</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>FITなどと上手く組み合わせると良いのでは</li> </ul>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>稲わらだけでなく他のバイオマスも集約したい</li> </ul>              |
|                 | 肥料性能確保<br>付加価値の向上  | 人手不足<br>メリット小   | メリット小  | トータルコスト<br>による   |

## ⑥ 炭化肥料の性能検討

## ⑥炭化肥料の性能検討(明和工業)



### ○成分分析, 溶出量試験

- ・含有量試験および溶出試験の結果基準値以下を確認

| 項目    | 判定基準(%) | 測定値(中温炭化汚泥) |
|-------|---------|-------------|
| 砒素    | 0.005   | 0.000599    |
| カドミウム | 0.0005  | 0.000218    |
| 水銀    | 0.0002  | 0.00002未満   |
| ニッケル  | 0.03    | 0.00242     |
| クロム   | 0.05    | 0.0018      |
| 鉛     | 0.01    | 0.00132     |

### ○水稲栽培試験(圃場, ポット)

- ・水稲栽培の結果, 圃場試験では乾燥汚泥と炭化汚泥で同等程度の効果が確認された

| 成分      | 化学肥料のみ | 下水汚泥 (kg/m <sup>2</sup> ) |           |           |           |
|---------|--------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
|         |        | 乾燥汚泥+化学肥料                 | 低温炭化+化学肥料 | 中温炭化+化学肥料 | 高温炭化+化学肥料 |
| 収量(ポット) | 543    | 904                       | 607       | 607       | 513       |
| 収量(圃場)  | 389    | 364                       | -         | 406       | -         |

稲わらと下水汚泥の高温混合消化を核とした地域内循環システム, 戸荻ら, 第56回下水道研究発表会講演集, N10-1-4, pp.1094-III 1096, 2019 より

## ま と め

## まとめ

- ・室内回分式実験, 室内連続式実験, パイロット実験により, 稲わらと下水汚泥(OD汚泥, 標準法汚泥)の**高温混合消化の消化特性**を確認できた
  - 混合比率, 菌叢構造の変化, メタン生成量
- ・膨張軟化稲わらを用いた実験より, **膨張軟化処理効果**を確認
- ・稲わら収集システムに関する調査では, **個人農家を主体とする収集システムの構築は困難**であることが示された。
- ・大規模農業法人等では, 下水汚泥肥料の性能, システムの中で清生産された農作物の付加価値の向上などが見込まれる場合は**積極的に参加したい**との回答があった。
- ・肥料性能の検討結果より, **土壌改良材や肥料としての利用可能性**が示された
  - 更なる能力評価は必要