

簡易型乾式メタン発酵による 養豚排水処理と発酵残さの有効利用

乾式メタン発酵と多収(飼料)米を利用した養豚排水処理
コベネフィットアプローチ
(水環境負荷軽減＋温暖化対策)

平成30年3月17日

日本水環境学会

東京農工大学
細見正明

東京農工大、ブタの尿からメタンガス 稲わら混ぜて発酵

2017/8/27 22:31 | 日本経済新聞 電子版

東京農工大学の細見正明教授らは、ブタの尿からエネルギー源として使えるメタンを簡単に作る技術を開発した。尿に稲わらを3割ほど混ぜることで、微生物の発酵を邪魔するアンモニアの濃度を下げ、メタンガスの生産を持続させる。現在は機械でかき混ぜる必要があり、装置の費用や電気代がかさんだ。小規模な畜産業者も導入しやすいとみている。

豚の尿からメタンガス

東京農工大 稲わら混ぜ発酵

東京農工大学の細見正明教授らは、ブタの尿からエネルギー源として使えるメタンを簡単に作る技術を開発した。尿に稲わらを3割ほど混ぜることで、微生物の発酵を邪魔するアンモニアの濃度を下げ、メタンガスの生

産を持続させる。現在は機械でかき混ぜる必要があり、装置の費用や電気代がかさんだ。小規模な畜産業者も導入しやすいとみている。畜産業から出る家畜の排せつ物は年間約8000万トあり、養豚業が4分の1を占める。堆肥などに再生利用されているが、悪臭への苦情は多い。メタンガスにすると臭気を抑えられる。ステンレス容器にブタの尿と刻んだ稲わら、微生物を含んだ汚泥を混ぜてセ氏55度に保った。微生物が稲わらや尿に含まれる有機物を分解してメタンガスができる。発酵に適した尿とわらの配合量と温度などの条件を突き止めた。

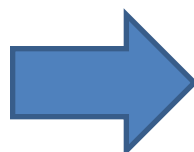
50リットの容器で2週間発酵させると、1立方メートルのメタンガスができ、実用水準に達しているという。国内で養豚場や牧場の隣接地に多数を並べて実証実験を手がける計画だ。

研究背景 養豚地域における水環境汚染

養豚排水

- 小規模・零細企業が多い
- 高濃度窒素を含む
- 経済的な処理法がない

畜産農家は排水処理管理を十分にしていない



- 畜産排水(尿污水等)の放流
- 尿污水の農地への過剰散布

硝酸性窒素等の暫定排水基準: **600 mgN/L** ← 一律基準 **100 mgN/L**

閉鎖性水域における窒素の暫定排水基準: **170 mgN/L** ← 一律基準 **120 mgN/L**

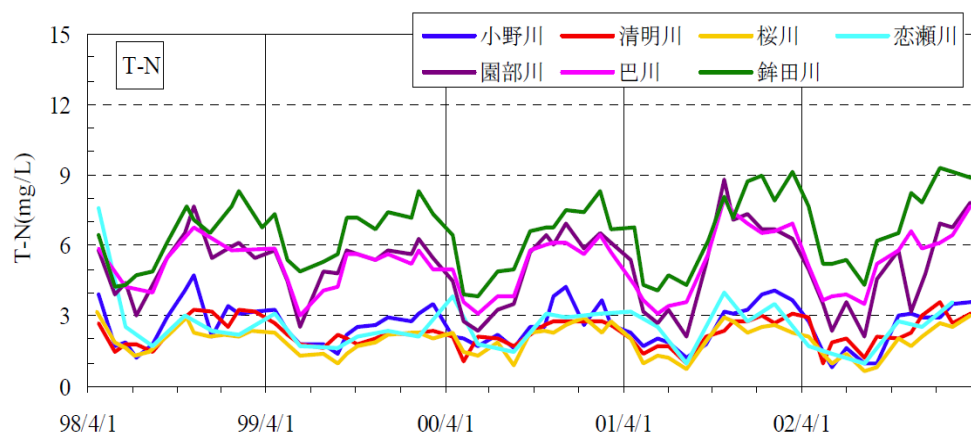
河川・湖沼・地下水の水質汚濁

湖沼: 窒素の環境基準値達成率

46% (平成19年)

地下水: 硝酸性窒素の環境基準

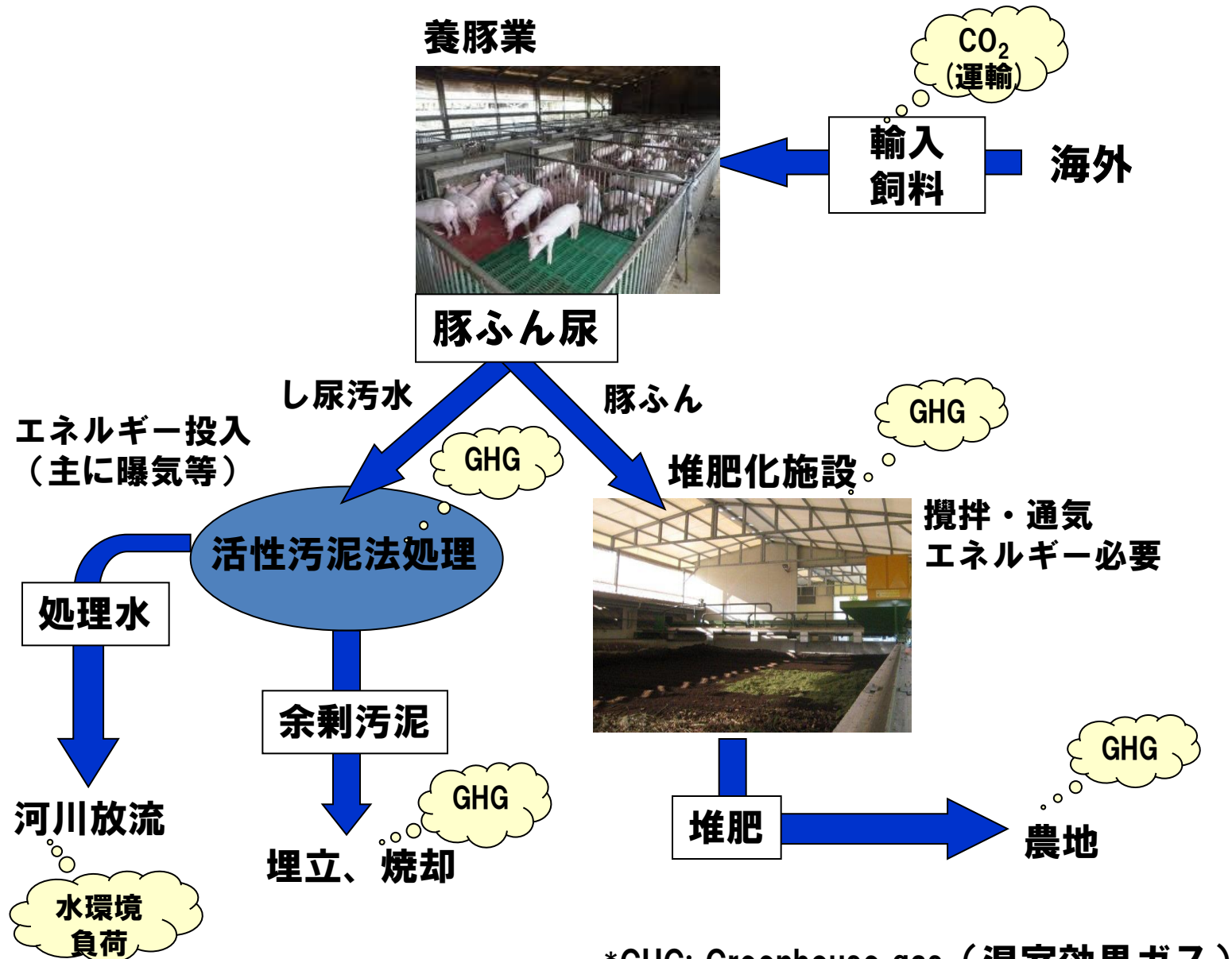
達成率が最も低い **3.6%** (H24)



養豚業の盛んな地域(茨城県)の河川TN濃度推移

規制強化・水環境保全のためにも、畜産排水の適切な処理が必要

養豚業従来型の環境対策：排水処理と堆肥化



次世代対応型環境対策：

コベネフィットアプローチ（水環境負荷軽減＋温暖化対策）

メタン回収
→温暖化対策

養豚業



CO₂
(運輸)

輸送燃料削減
→温暖化対策

削減

~~輸入飼料~~

海外

余剰電力

コジェネ
発電

電力・熱

豚ふん尿

国産飼料

玄米

バイオガス

乾式メタン発酵と
多収米を用いた
コベネフィットシステム

バイオマス生産量は
食用イネの1.5～2.0倍



乾式メタン発酵

稲ワラ・モミ殻

発酵残さ

肥料



水田(多収米)



処理水

余剰汚泥

河川放流

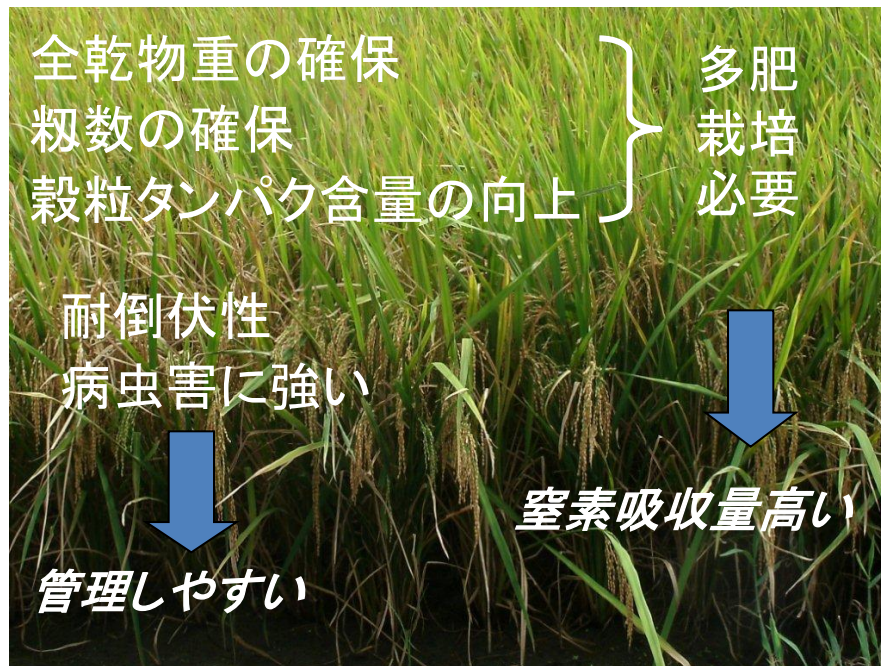
埋立、焼却

・水環境負荷軽減
・温室効果ガス削減

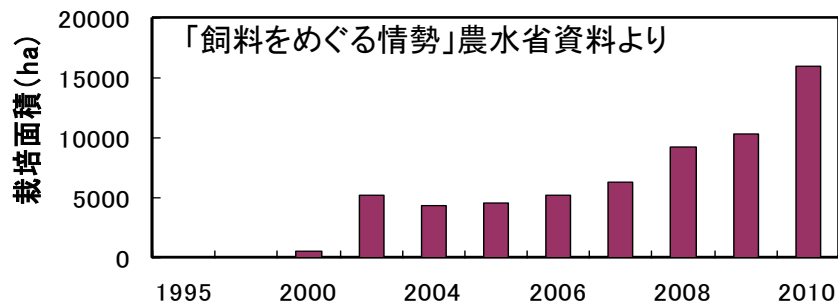
水田管理方法

- ・施肥量
- ・水管理
- ・栽培方法

なぜ多収(飼料)米？



- 畜産排水の除去・利用
- 休耕田の利用
- 飼料自給率の向上



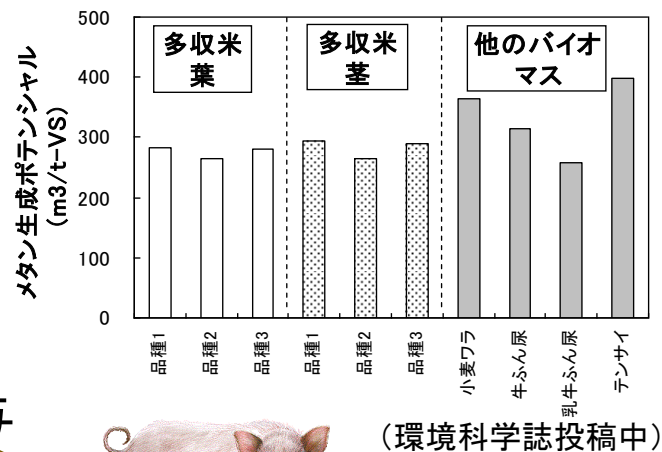
(ワラ)
メタン発酵



(モミ)
豚への給与



メタン発酵ポテンシャル



豚肉の高付加価値化

肥育後期に慣行飼料のトウモロコシの30%を飼料米で代替した飼料を給与した結果(n=8): 肥育豚の発育は良好、皮下脂肪のオレイン酸の割合が高くなり、リノール酸の割合が低くなる。

	飼料米配合	慣行飼料
オレイン酸	42.7*	41.3
リノール酸	9.1*	11.2

「2010飼料イネ・飼料米生産・利用技術フォーラム」資料より

飼料イネ栽培における家畜糞尿の施肥効果 (埼玉県農林総合研究センターとの協働)

液肥散布風景



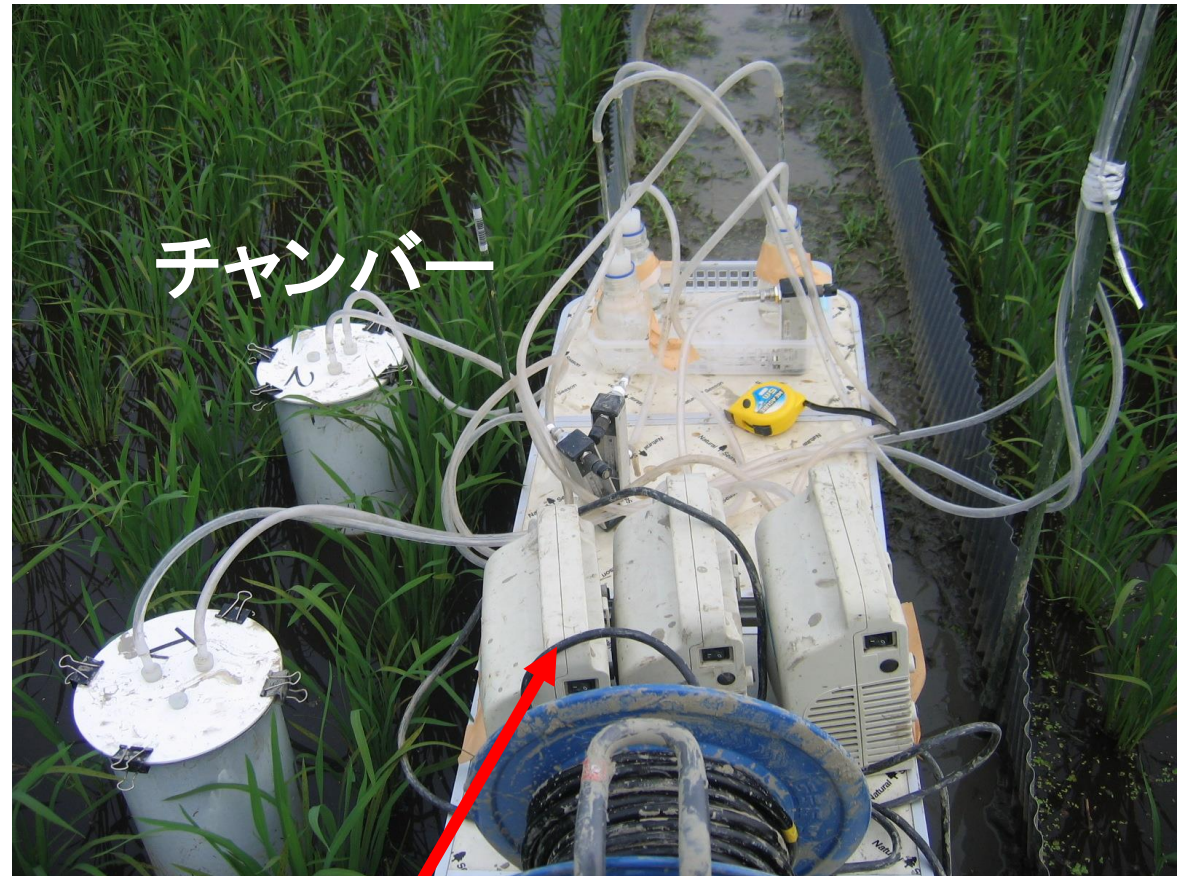
工学部の学生が液肥(要するに牛の糞尿)を撒いている！



無事に生育



実験装置



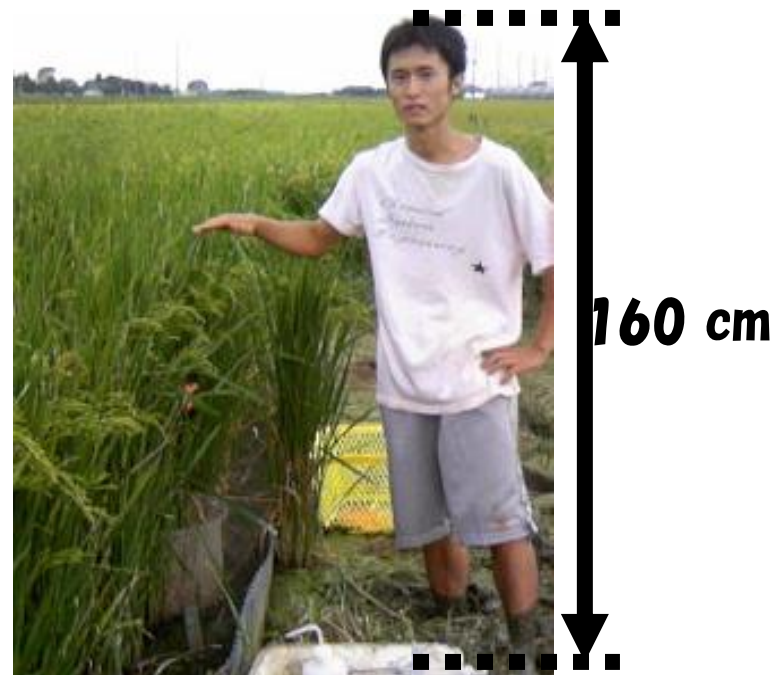
三品種の比較



リーフスター
140cm



クサホナミ
120cm

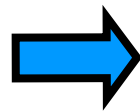


ハマサリ
100cm



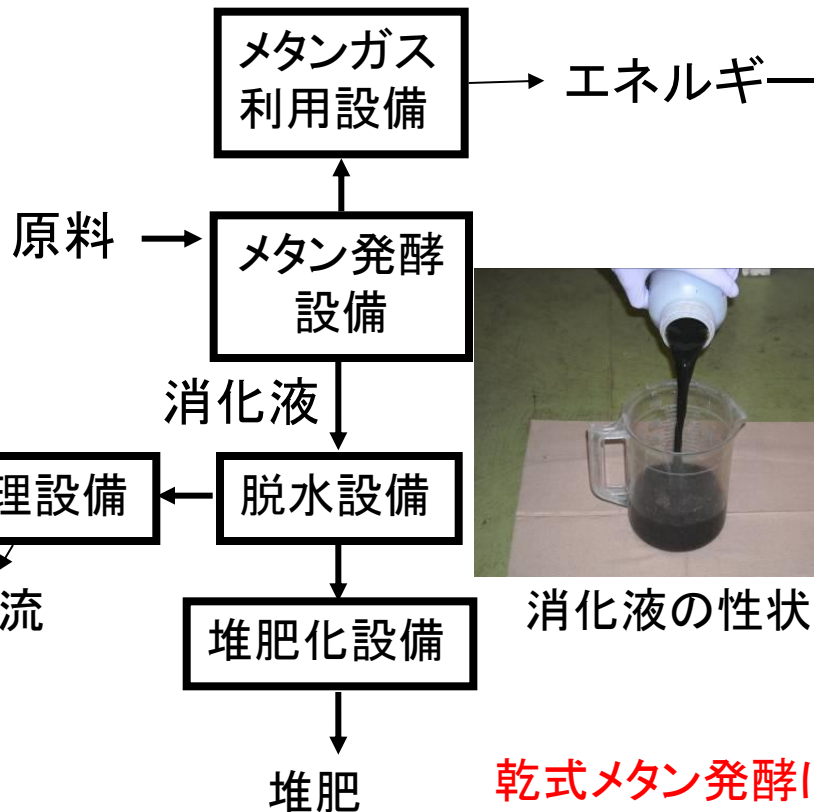
なぜ乾式メタン発酵？

従来（湿式）は含水率95%程度で行うのに対し含水率80%程度で行う方法

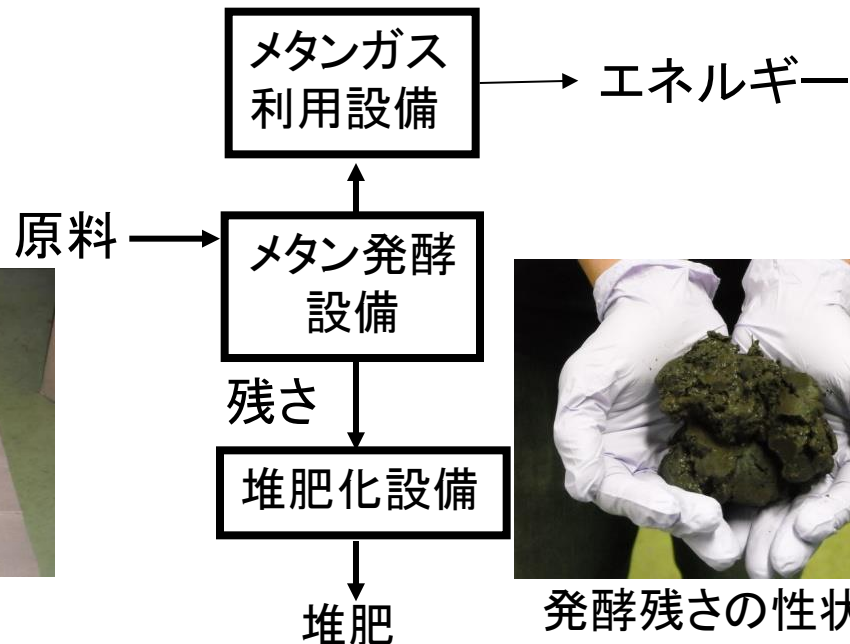


排水処理が不要
エネルギーロスが少ない

湿式メタン発酵法



乾式メタン発酵法



乾式メタン発酵に係わる課題

アンモニアによる阻害
炭素・窒素収支が不明
発酵残さの生産性が不明

稲ワラと豚ふん尿の乾式メタン発酵

実験系 (SRT 1Cycleあたり)

C/N比 [-]	種汚泥 [kg]	豚ふん尿 [kg]	稲ワラ [kg]	水 [kg]	含水率 [%]	稲ワラ混合率 [稲ワラ/豚ふん尿]
8	10	10	0	0	90	0.00
20	10	8.16	1.84	0	73	0.24
30	10	4.04	2.40	3.56	73	0.59



種汚泥



20 Lリアクター



豚ふん尿

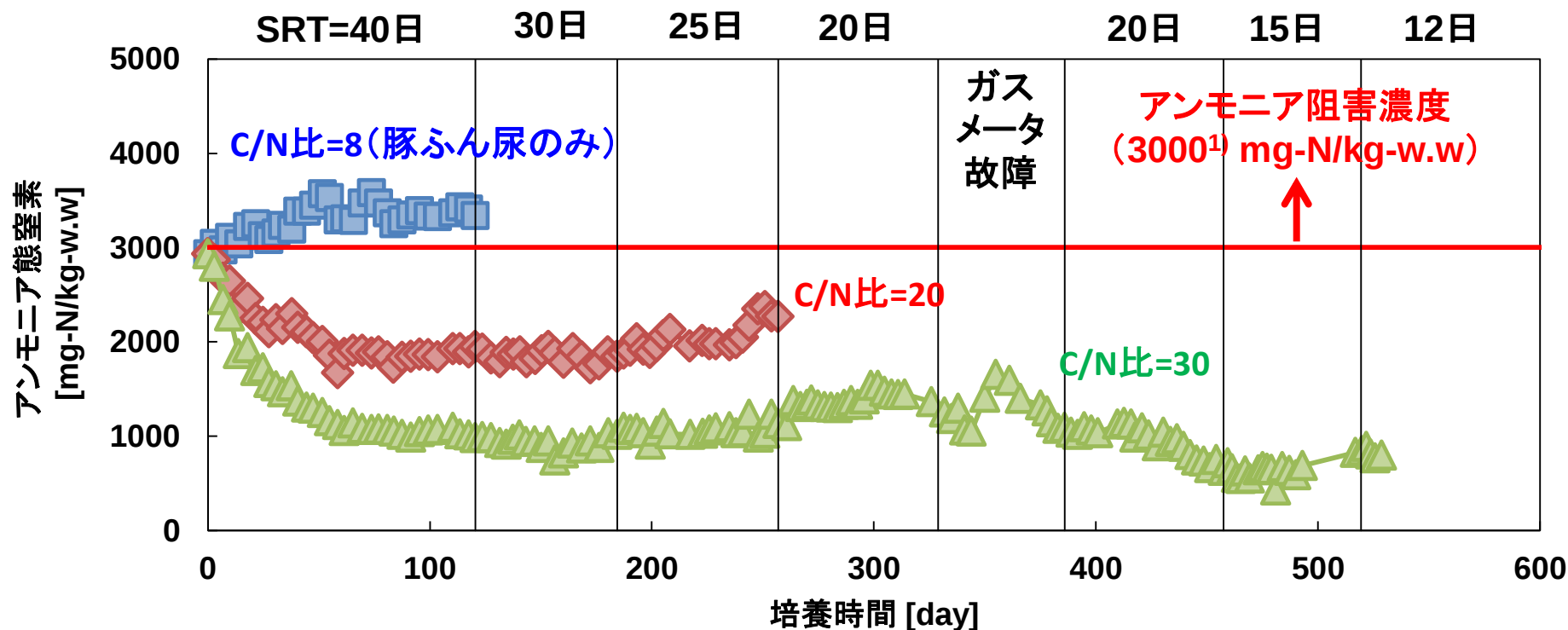


稲ワラ(約5 cm)



最適なC/N比および有機物負荷(汚泥滞留時間)の検討

アンモニア態窒素濃度



C/N比=8 (豚ふん尿のみ)

アンモニア阻害濃度超過

アンモニアによる発酵阻害

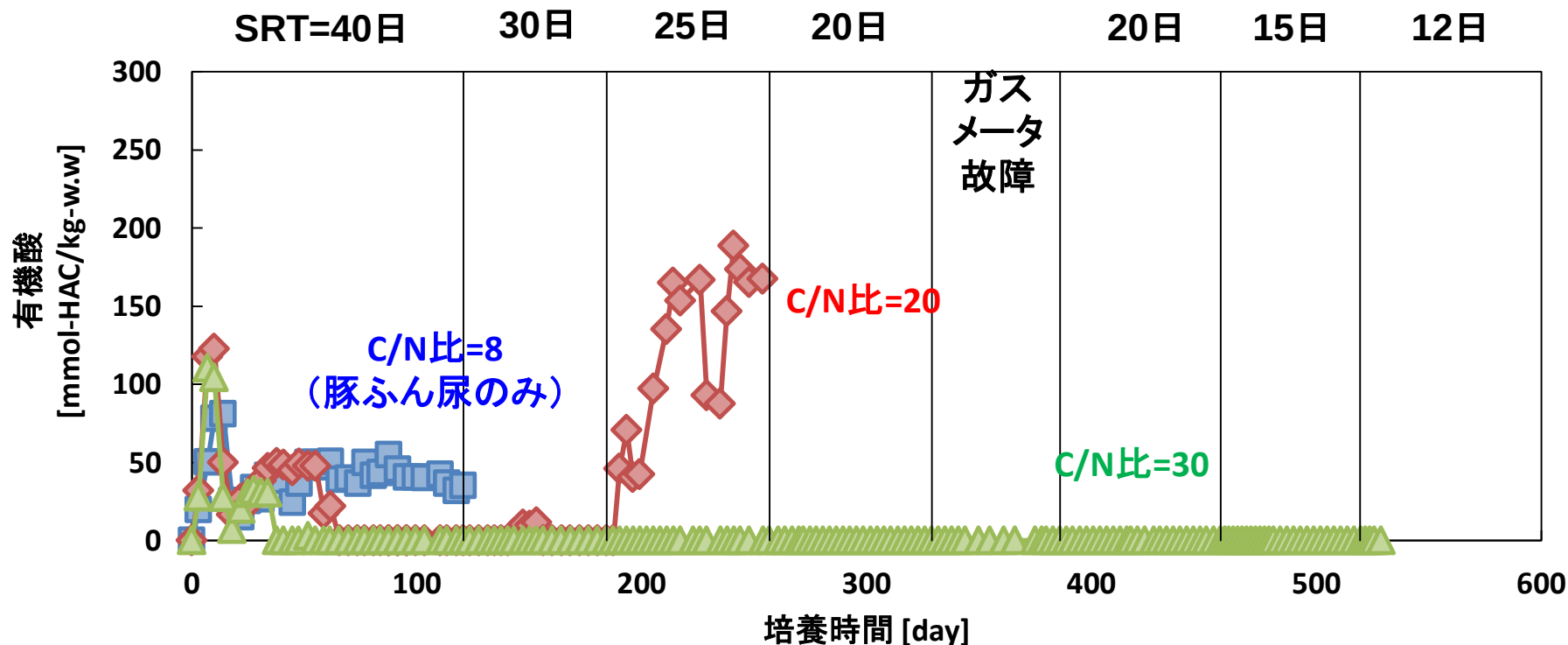
C/N比=20およびC/N比=30

アンモニア阻害濃度以下

C/N比調整 (稲ワラ混合) により
アンモニア阻害回避可能

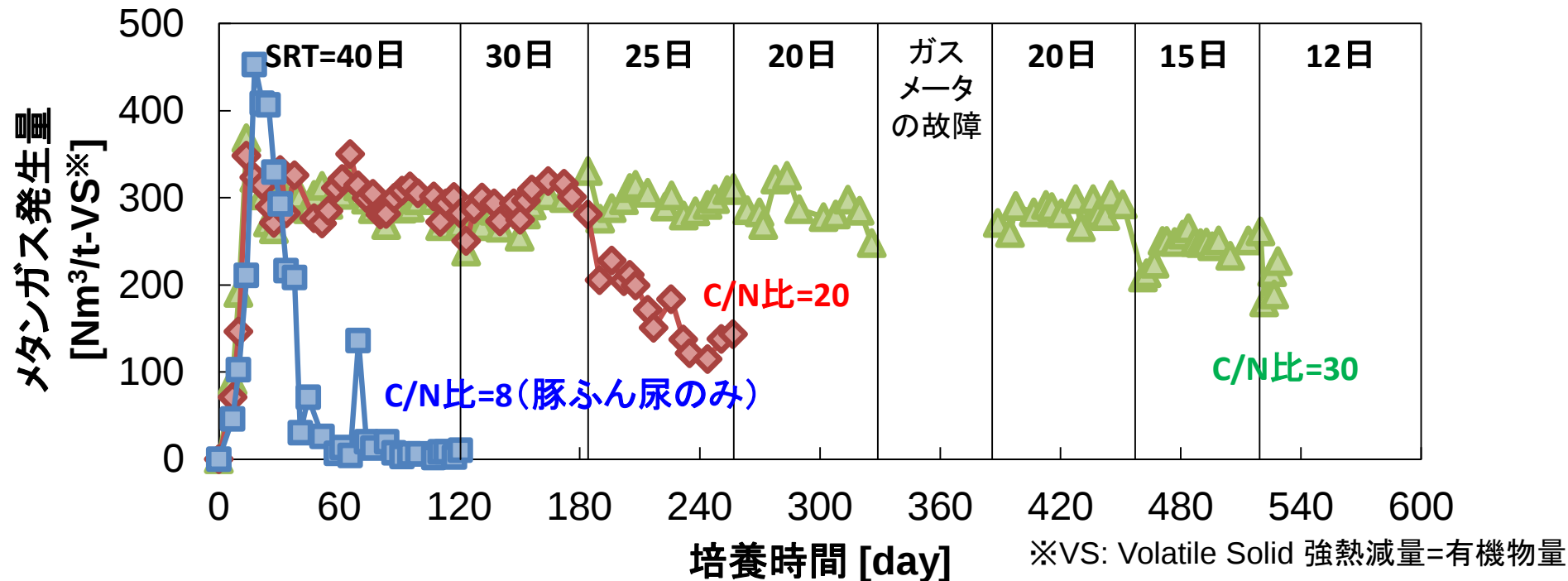


有機酸濃度



**C/N比=8および20では
有機酸分解(酢酸生成・メタン生成段階)が律則となる**

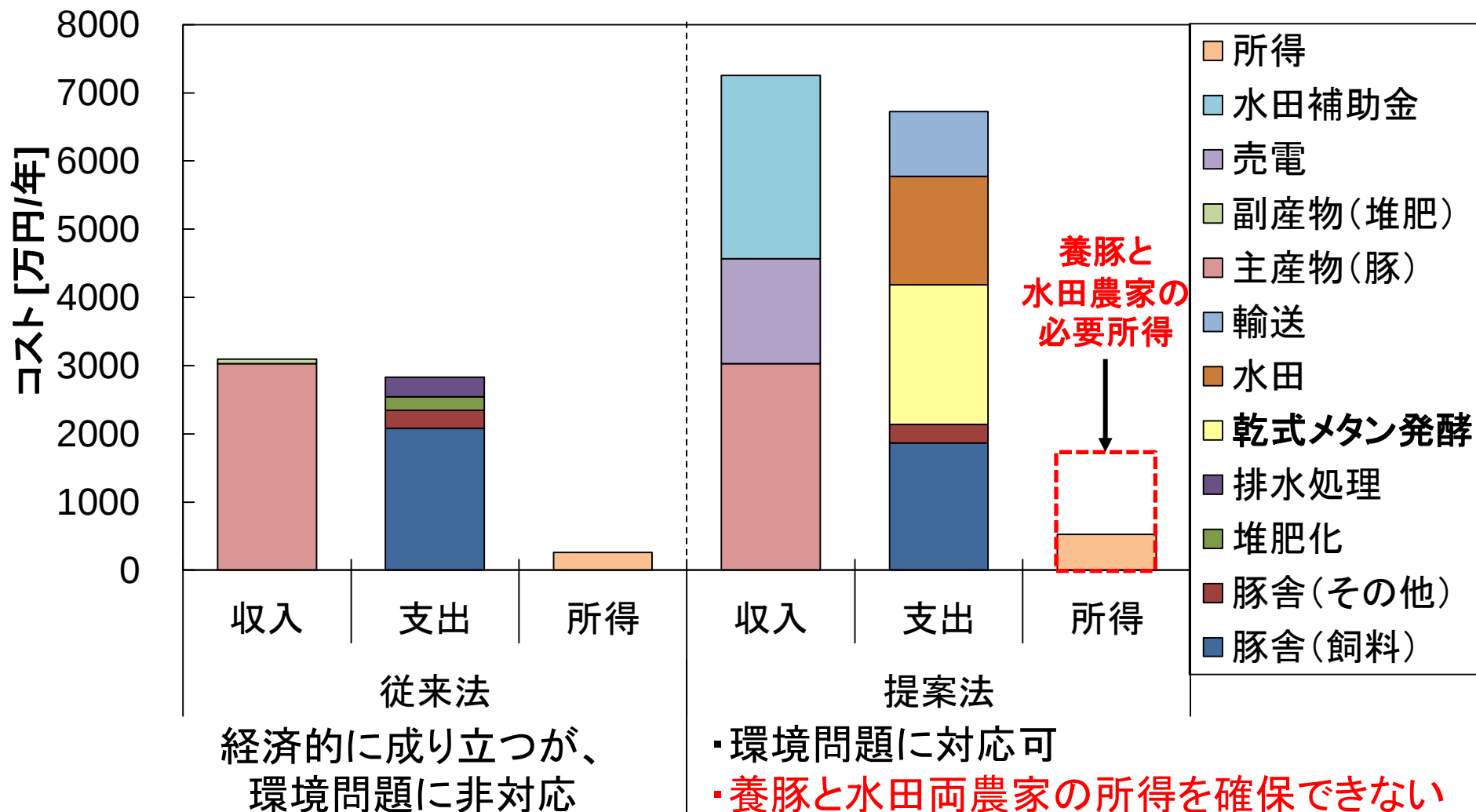
乾式メタン発酵の連続運転可能性



- C/N=8: アンモニア阻害により急激な低下
- C/N=20: SRT=30日で連続培養可能
- C/N=30: SRT=20日で連続培養可能

C/N比毎で最適なSRT(汚泥滞留時間)を解明

これまでの成果：経済性の比較（H23-H25 推進費）



経済的に成り立つためには乾式メタン発酵のコスト低減が必要

乾式メタン発酵システム実用化に向けた課題

①乾式メタン発酵装置の低コスト化

- 乾式メタンは基質と種菌の接触効率が重要
- 実機では高価な装置が必要

縦型発酵槽((株)栗田工業)



基質・返送残渣混合物の
投入装置(海外特注品)が必要

水平型発酵槽((株)タクマ)



攪拌装置および廃液処理が必要

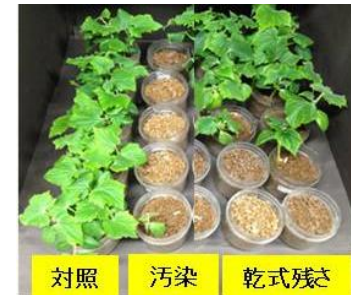
②乾式メタン発酵残さ利用の多様性

- 近隣に休耕田がない
- 発酵残さの余剰

養豚地域に合った残さ利用法が必要

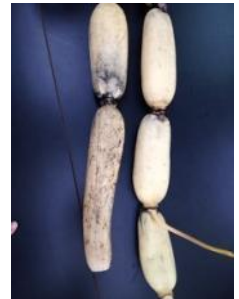
- 残さの土壤消毒効果

**畑の連作障害
抑制が期待**



- 茨城県ではレンコンの
センチュウ被害が問題

残さによる抑制が可能？



- 発酵残さの炭化物

土壤改良材として利用

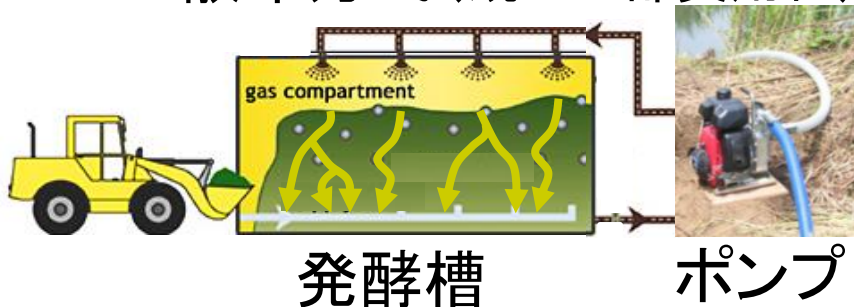


簡易な混合による低コスト化および残さ利用方法の検討が必要

浸出液循環による簡易型乾式メタン発酵

豚尿と浸出液の循環により基質と菌体の接触を効率化

散布方式（既に一部実用化）



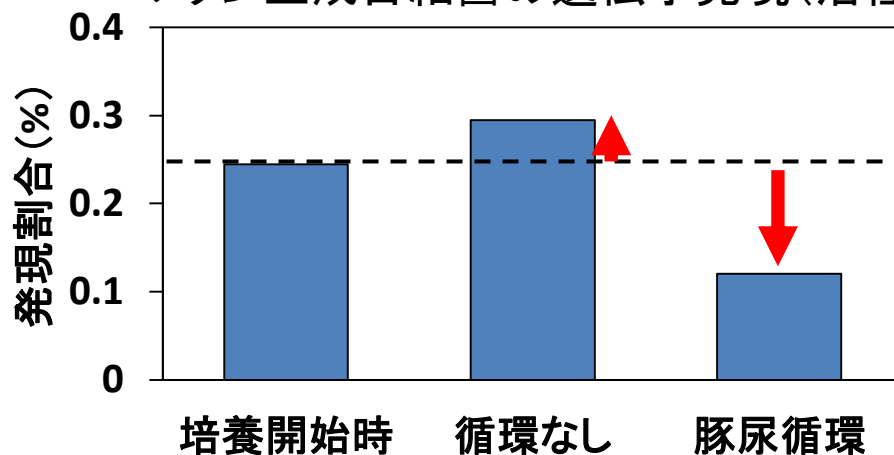
浸漬方式



特徴

- 豚尿を循環液として利用
- 基質と菌体の接触向上
- 安価なポンプで循環可能

メタン生成古細菌の遺伝子発現（活性）



豚尿循環はメタン生成活性を低下

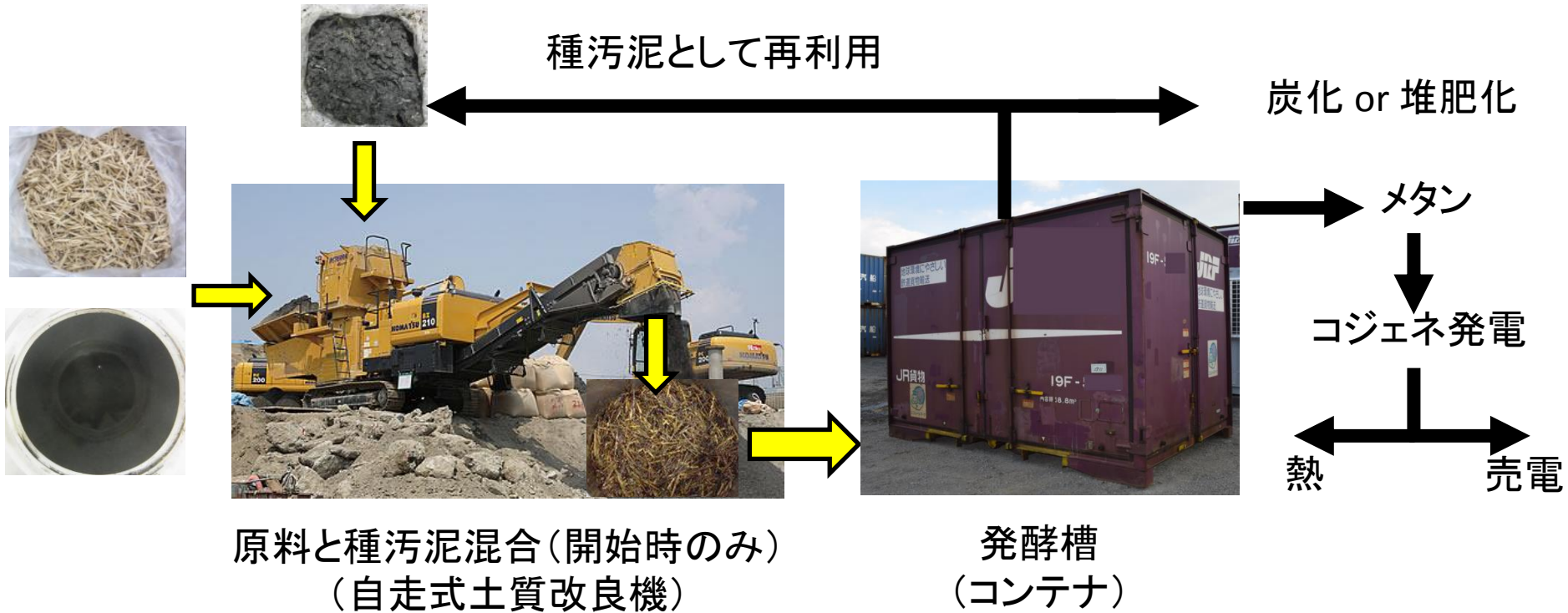
液循環方式はメタン生成に難あり



別の方式を検討

簡易型乾式メタン発酵法の提案

中古のコンテナと土質改良機を活用した簡易型メタン発酵法

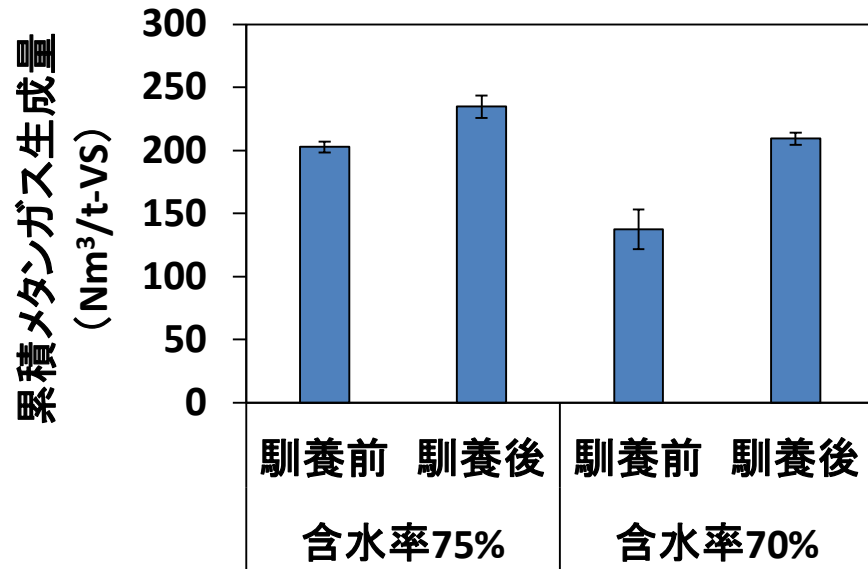


ポイント

- 発酵開始時のみ攪拌⇒槽内の攪拌機省略
- 低含水率で発酵⇒残渣の乾燥(炭化・堆肥化の前処理)省略
- 中古品の使用による低コスト化

低含水率 & 無攪拌回分乾式メタン発酵

○含水率の影響

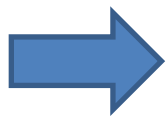


・低含水率化



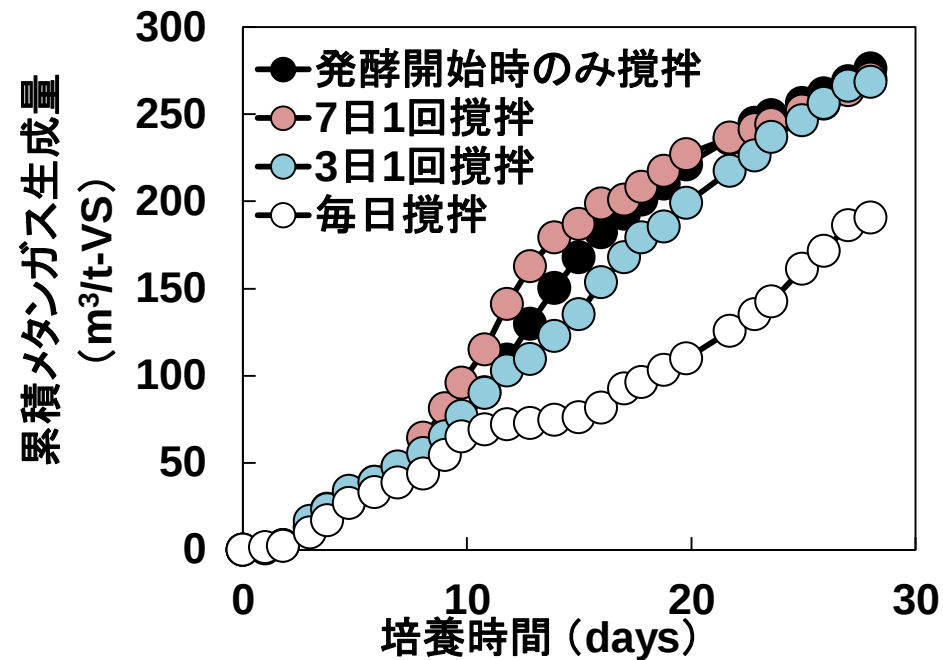
メタン生成低下

・馴養

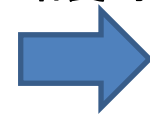


メタン生成向上

○攪拌の影響



・攪拌頻度多



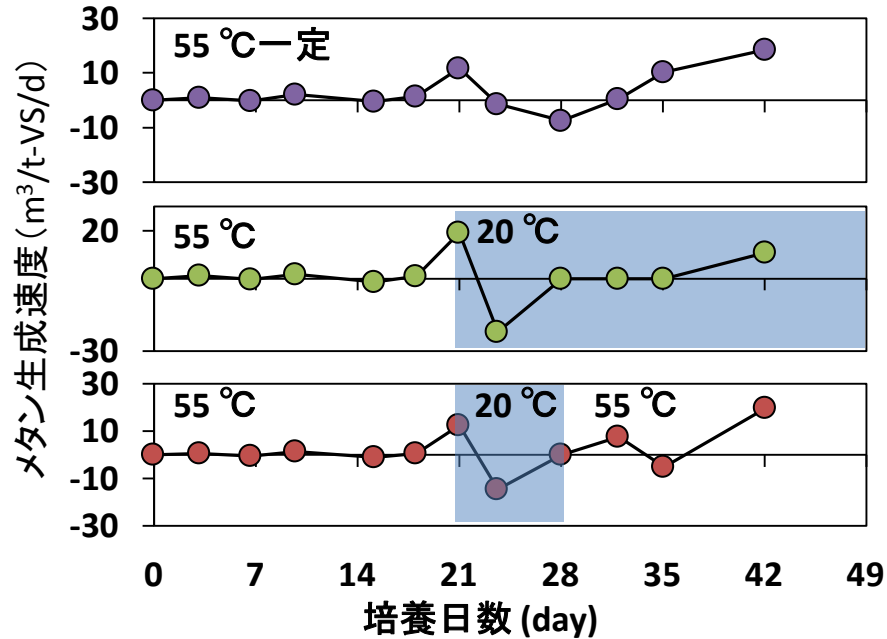
メタン生成減少

発酵槽内の攪拌は不要

種汚泥の馴養と発酵開始時のみの攪拌で
低含水率、無攪拌乾式メタン発酵可能

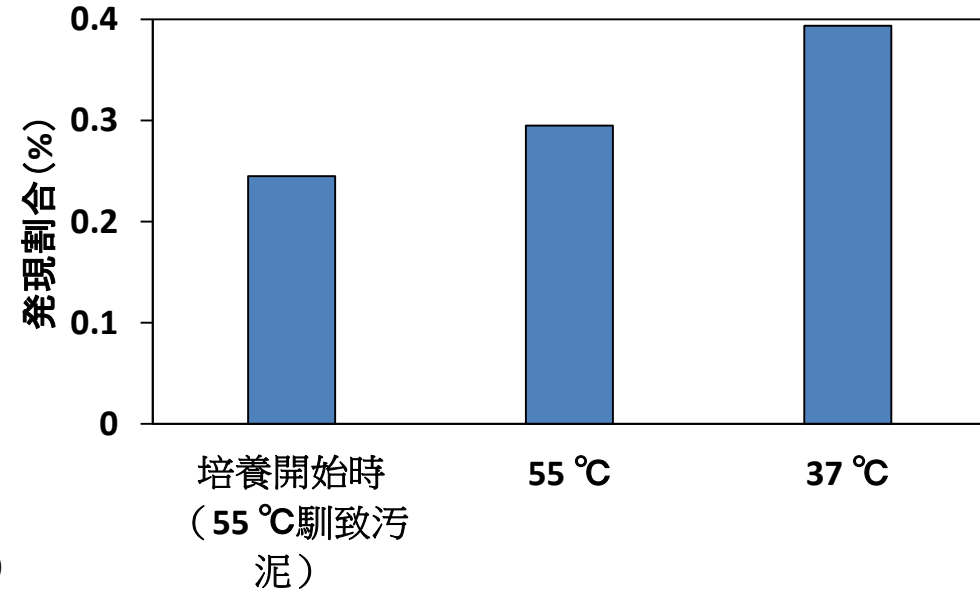
乾式メタン発酵の温度に対する安定性

温度変化とメタン生成速度



温度低下後も活性回復

メタン生成酵素の遺伝子発現

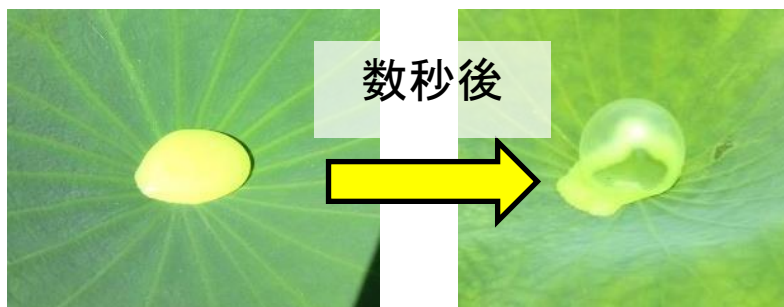


55°Cより低温でも活性を維持

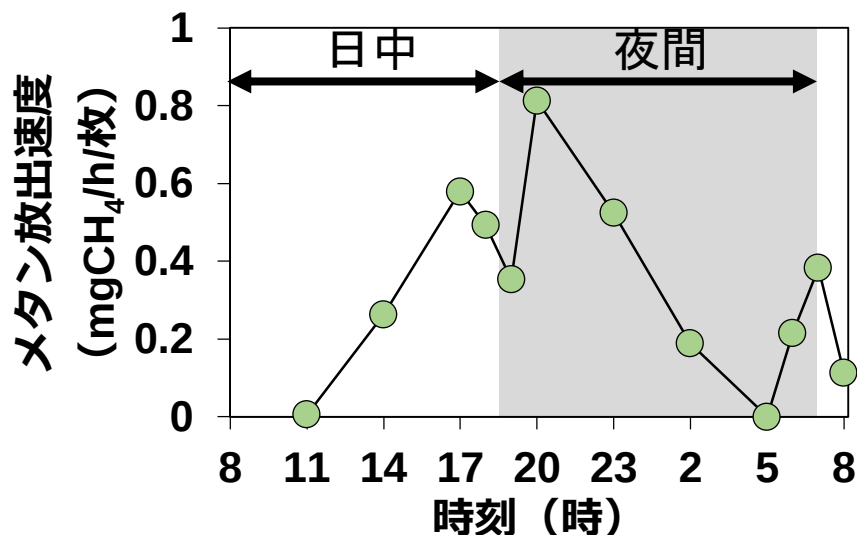
乾式汚泥は広い温度域で活性を維持可能

ハスからの温室効果ガス放出

○葉の”へソ”からのガス放出

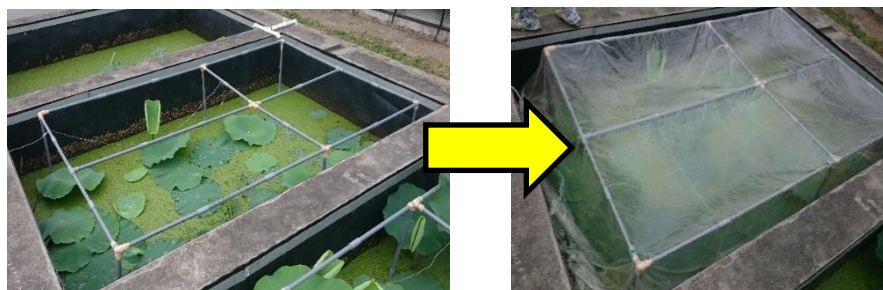


葉の中央よりガス放出を確認

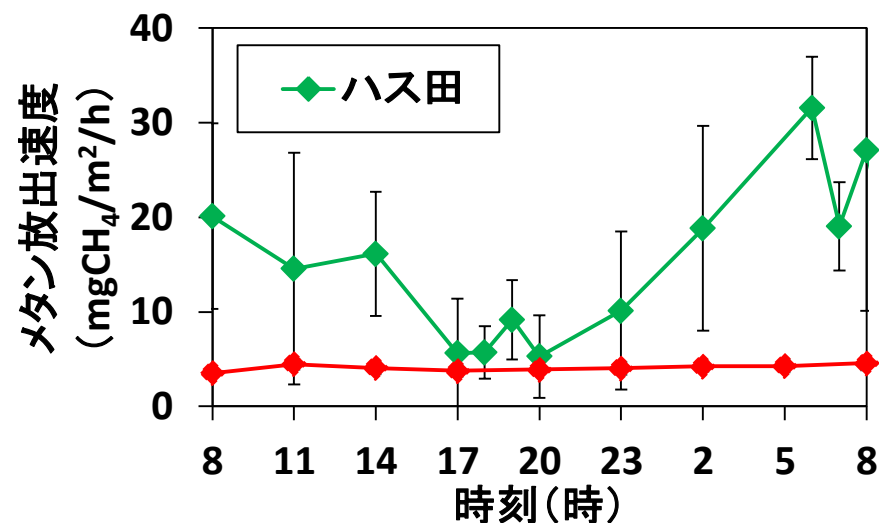


大気の1000倍の濃度のメタン放出

○ハス田からのメタン放出



ビニルチャンバーによる観測



メタン放出源の水稲よりも高いメタン放出

レンコン栽培はメタン放出のソースとなりうる

乾式メタン発酵残渣によるハス栽培@土浦

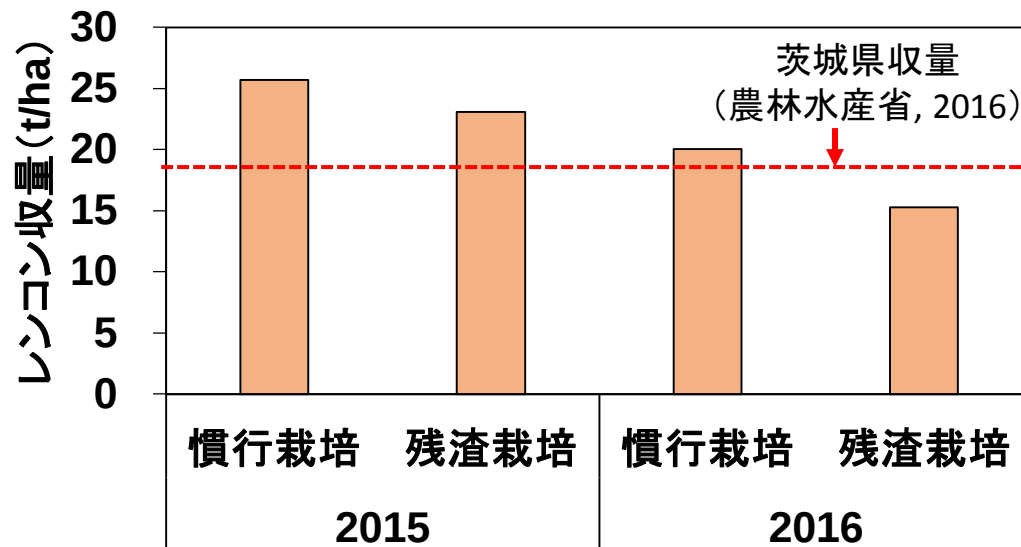
23



化肥栽培(8月)



残渣栽培(8月)



残渣を基肥として連用



慣行栽培(化学肥料)
よりも収量低下

新循環型システム

24



利点

排水処理の不要

施肥時の臭害を抑制

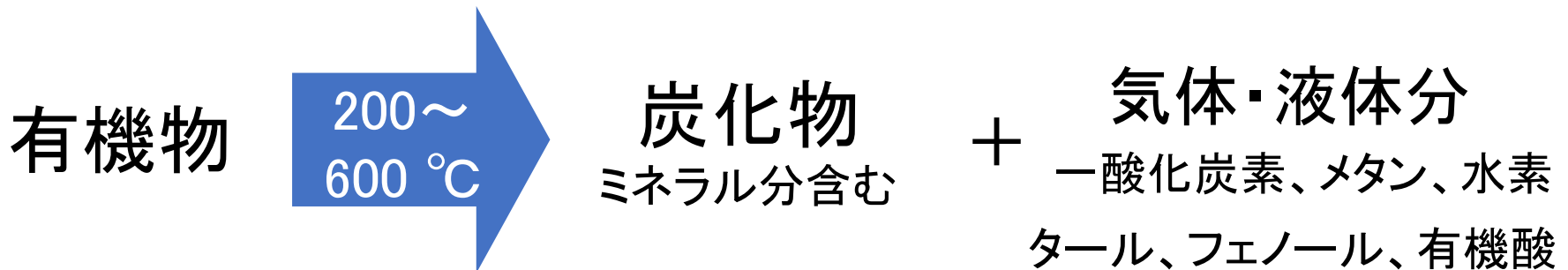
再生可能エネルギーの利用

自給飼料の生産

炭化処理とは？

炭化

無酸素条件下で有機物を熱分解させ、炭を発生させる



燃焼との違い：炭素が完全に二酸化炭素になるかどうか



炭化物の利用

- ・土壌改良剤
- ・脱臭剤
- ・燃料
- ・融雪剤

近年の着目点
炭素貯留効果

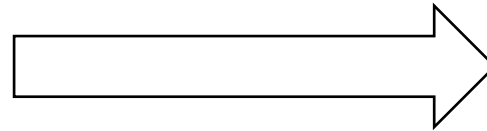
炭化温度の性状への影響

1. 発酵残渣の作成



稲藁 & 豚尿

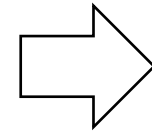
乾式メタン発酵



55 °C, 2 ヶ月

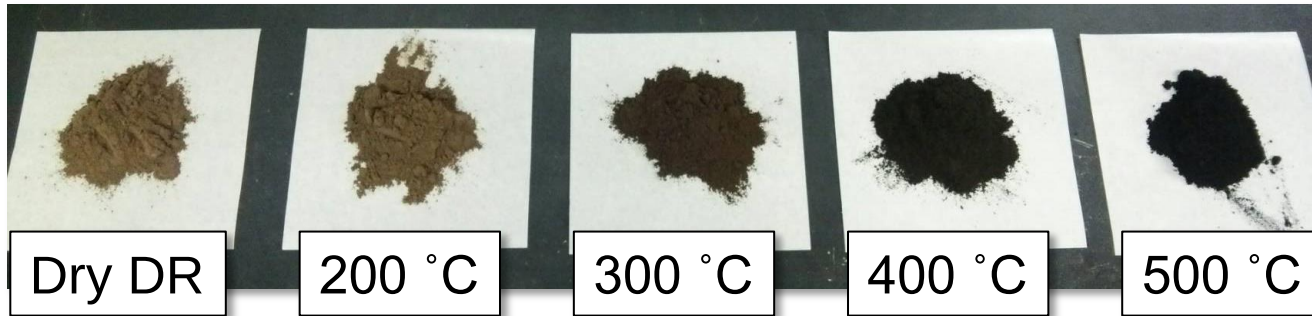


発酵残渣



乾燥
粉碎

2. 炭化(各1時間)



3. N、P、Kの評価

全窒素

アンモニア態窒素

硝酸態窒素

全リン酸

可給態リン酸

水溶性リン酸

全カリ

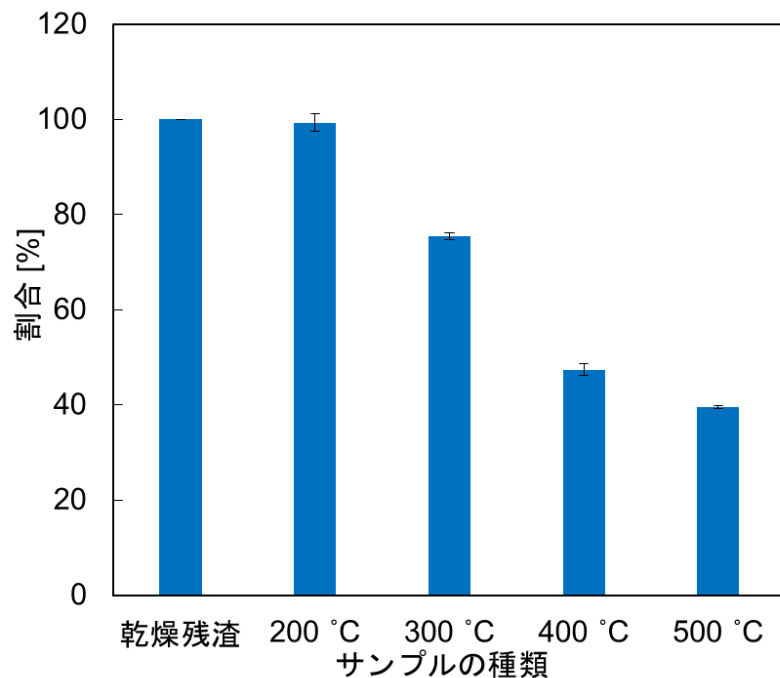
可給態カリ

水溶性カリ

窒素の挙動

乾燥残渣の窒素含有量を基準とした
含有窒素量の割合

- ・アンモニア態窒素：検出されず
- ・硝酸態窒素：わずか



既往の知見

炭化物中の窒素

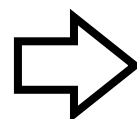
安定した芳香族化合物、
複素環式化合物に変化

(Taherymoosavi *et al.*, 2017)

窒素の行方

揮発

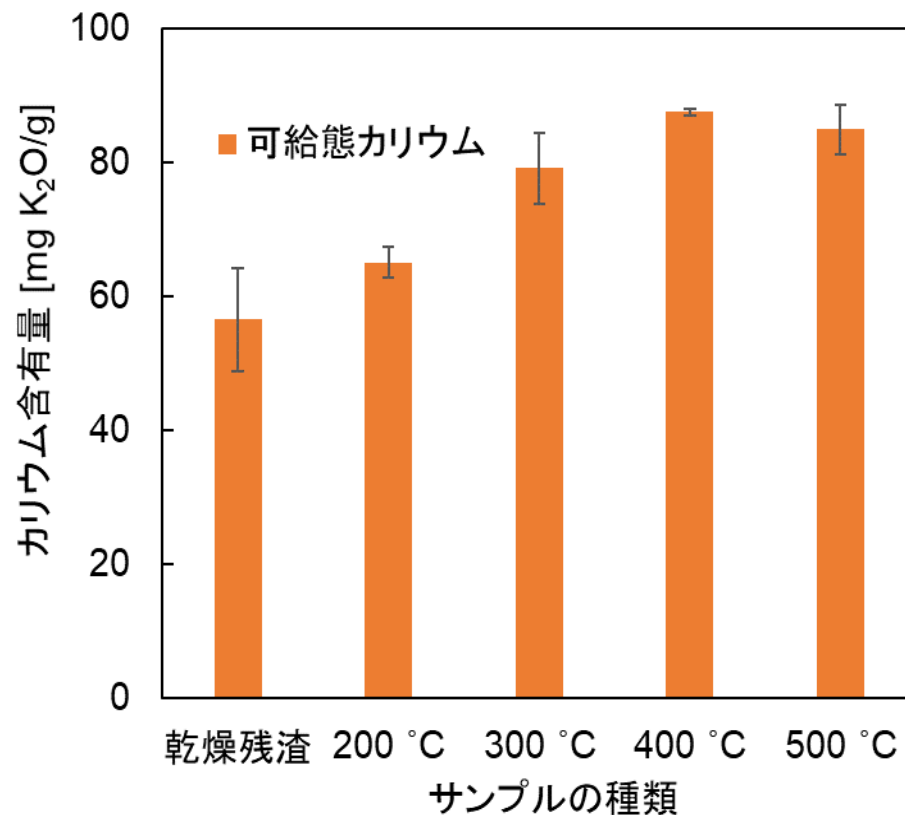
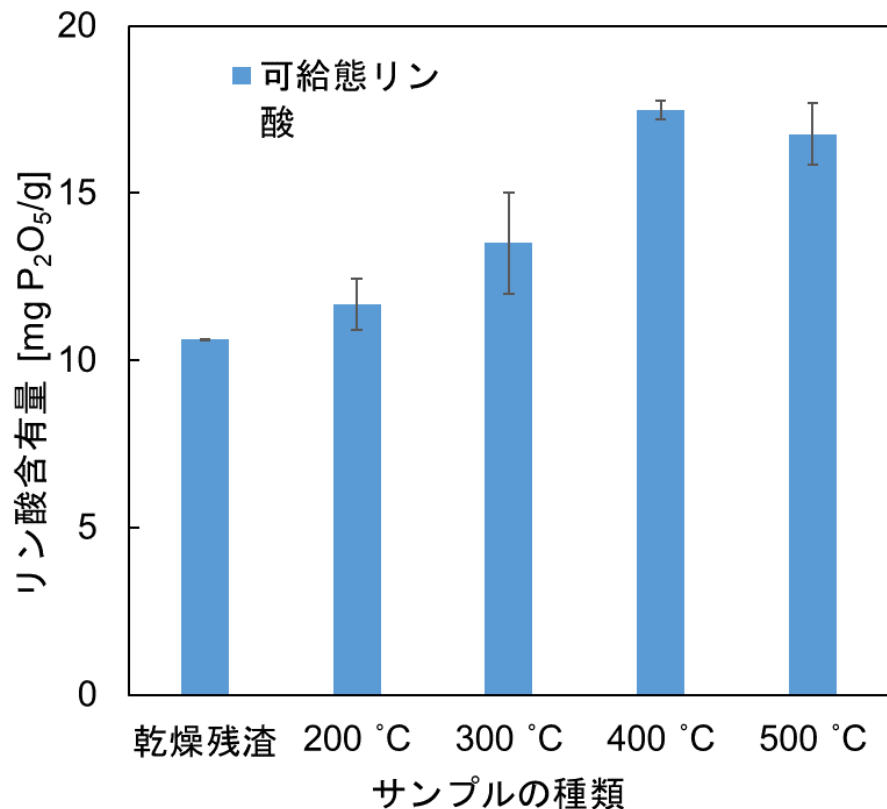
難分解性・不可給態窒素



炭化物の農地施用時

環境への窒素負荷抑制

可給態リン酸及びカリウム



炭化温度上昇 ➡ 可給態成分濃縮

含有量は400 °Cの炭化物で最大

他の炭化物との比較

400 °Cの炭化物と肥効が認められた炭化物との成分比較

炭化基質	可給態リン酸 [mg P ₂ O ₅ /g]	可給態カリウム [mg K ₂ O/g]	参照
「豚尿、稲藁」 乾式メタン発酵残渣	17.5	87.6	本研究
「豚糞, 古紙, 生ごみ」 乾式メタン発酵残渣	8.75	8.26	赤城ら, 2005
「牛糞尿, 野菜残渣」 湿式メタン発酵 消化液脱水ケーキ	40.9	9.4	岩佐ら, 2014
下水汚泥	58.4	-	矢内ら, 2014
豚糞堆肥	120	44	佐野ら, 2014
牛糞	28	74	真行寺ら, 2009
バレイショ	7.5	42	大津ら, 2011

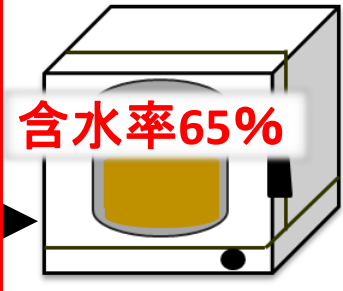
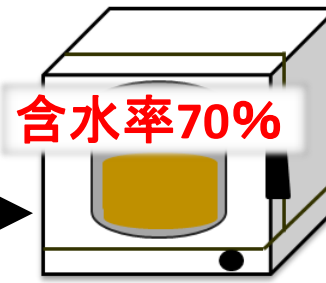
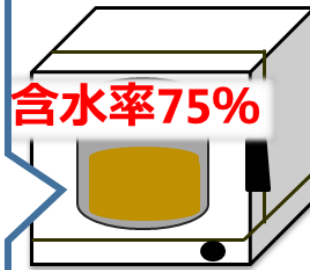
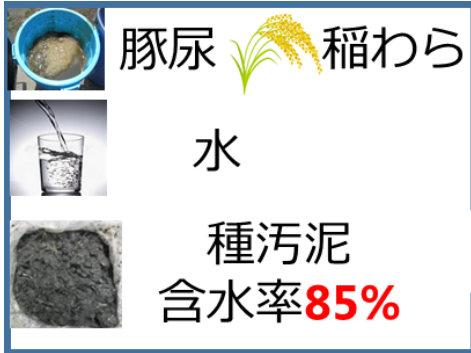
カリウム肥料としての利用が考えられた

含水率を少しずつ下げて汚泥を馴養する

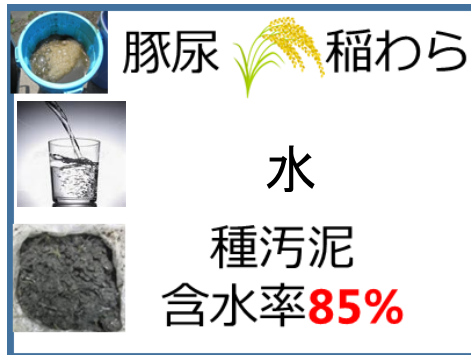
30

含水率漸減馴養

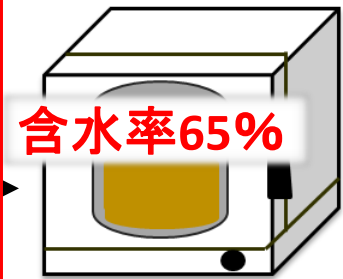
馴養系



非馴養系



非馴養



* 基質と菌体の比を一定

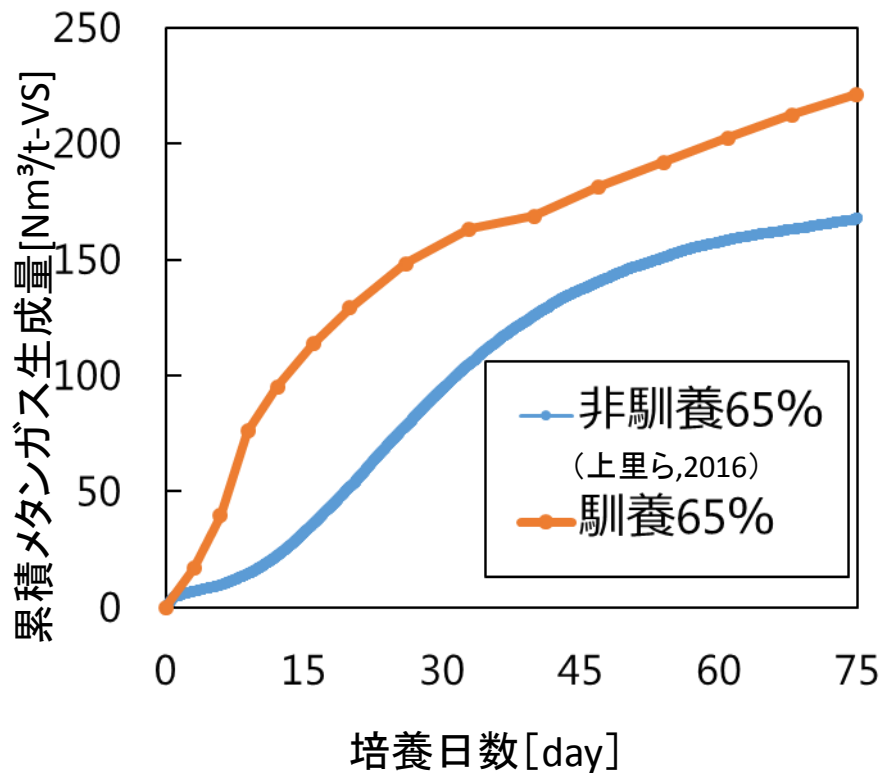
馴養と非馴養の種汚泥を
含水率65%でメタン発酵



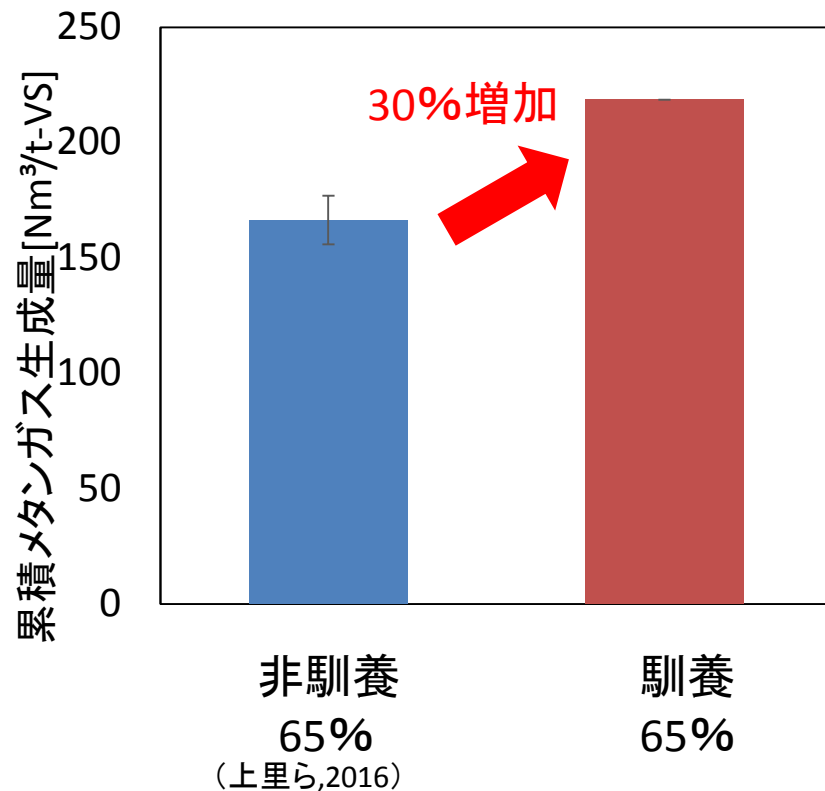
含水率65%での
馴養の効果の確認

含水率65%メタン発酵

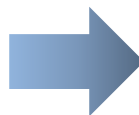
含水率65%での馴養系と非馴養系の
メタン生成量の経時変化



含水率65%での馴養系と非馴養系の
累積メタン生成量(培養73日)



含水率65%で
馴養の効果を確認

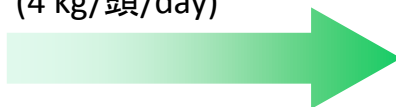


含水率60%での高活性な
メタン発酵の可能性

豚尿と稲わらの乾式メタン発酵発電



尿：年間1460 t
(4 kg/頭/day)



養豚(1000頭規模)



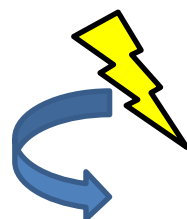
尿とわらの
混合物1 tから
54.1 Nm³のCH₄

乾式メタン

わら：年間429 t



発電：年間329 MWh



売電：年間1283 万円

(再エネ買取価格39 円/kWh)

(資源エネルギー庁, 2017)

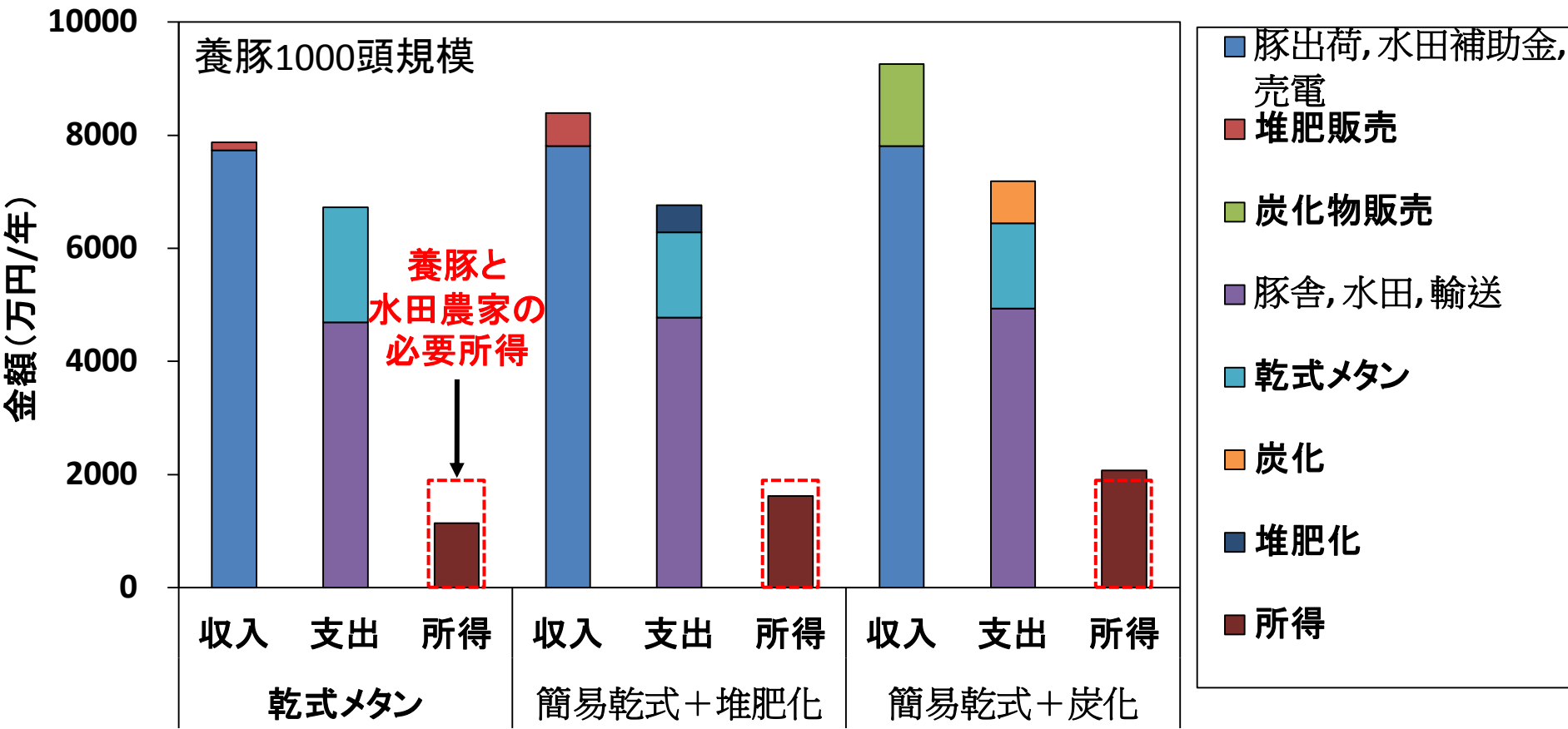
(参考:1000頭規模粗収益 3032万円)

(農林水産省)



水田

経営に関わる水田と養豚農家は経済的に自立可能？



乾式メタンの低コスト化と炭化物(6万円/t)販売により
経済的に自立可能

乾式メタン発酵と多収(飼料)米を利用した養豚排水処理:まとめ

- 飼料イネは重要なメタンガスの炭素源。C/N比を調節することで乾式メタン法におけるアンモニア阻害をクリア。課題は、どのように収集するか？収穫時期が限定。
- 河川バイオマスや剪定枝は飼料イネの代替可能。年間を通じた炭素源の確保。
- 乾式メタンの発酵残さの有効利用:炭化処理が有望。窒素、リン、カリウムの挙動を明らかに。
- 乾式メタン法の実規模での実証試験が必要。

豚ふん尿と稲わらの乾式メタン発酵発電



ふん尿: 年間1971 t
(5.4 kg/頭/day)



養豚(1000頭規模)



尿とわらの
混合物1 tから
56.0 Nm³のCH₄

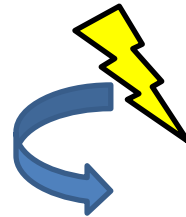
乾式メタン



わら: 年間445 t



発電: 年間435 MWh



売電: 年間1698 万円

(再エネ買取価格39 円/kWh)

(資源エネルギー庁, 2017)

(参考:1000頭規模粗収益 3032万円)

(農林水産省)



水田