

微生物を活用した消化汚泥資源化技術

2021年12月2日

工学院大学 先進工学部 生命化学科

教授 藤井 克彦

新技術の概要

➤ 特徴 1

嫌気消化後の残渣である「消化汚泥」と水のみからなる培養液で生育し、消化汚泥からバイオガスを生産できる微生物菌叢

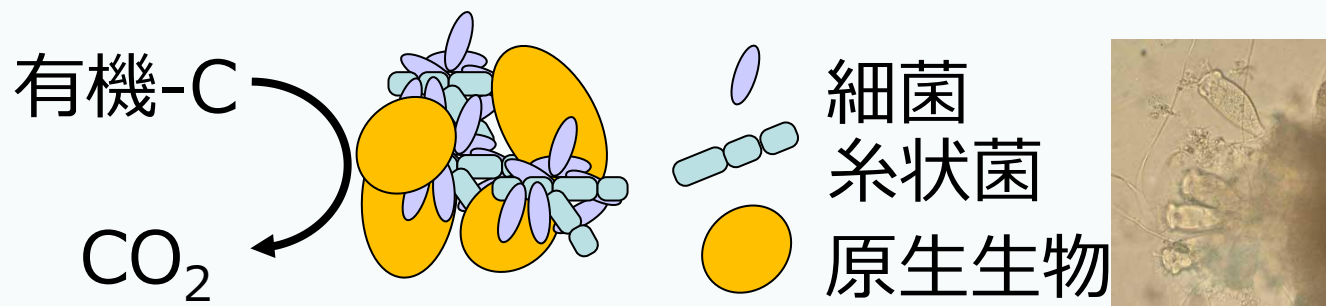
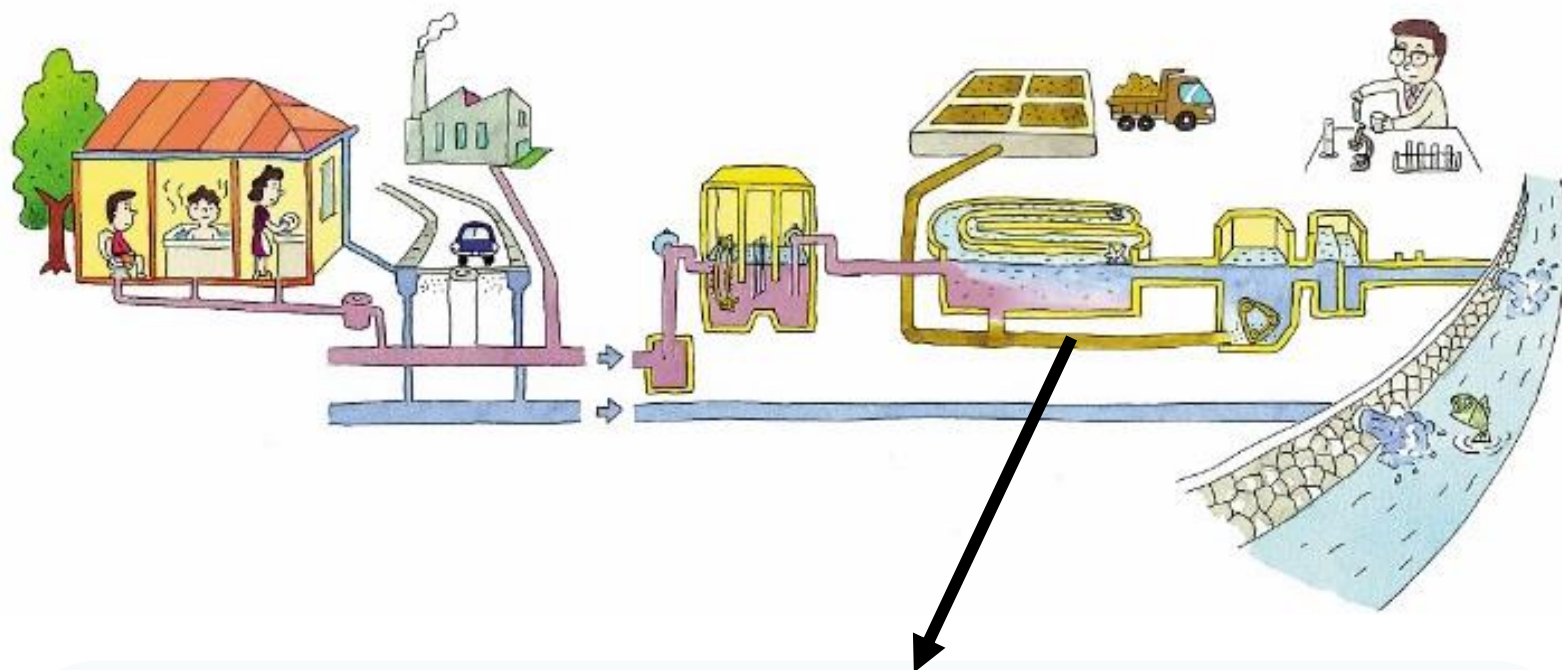
➤ 特徴 2

多様な微生物種から構成されており、消化汚泥のみならず、広範な基質の資源化が期待できる

➤ 特徴 3

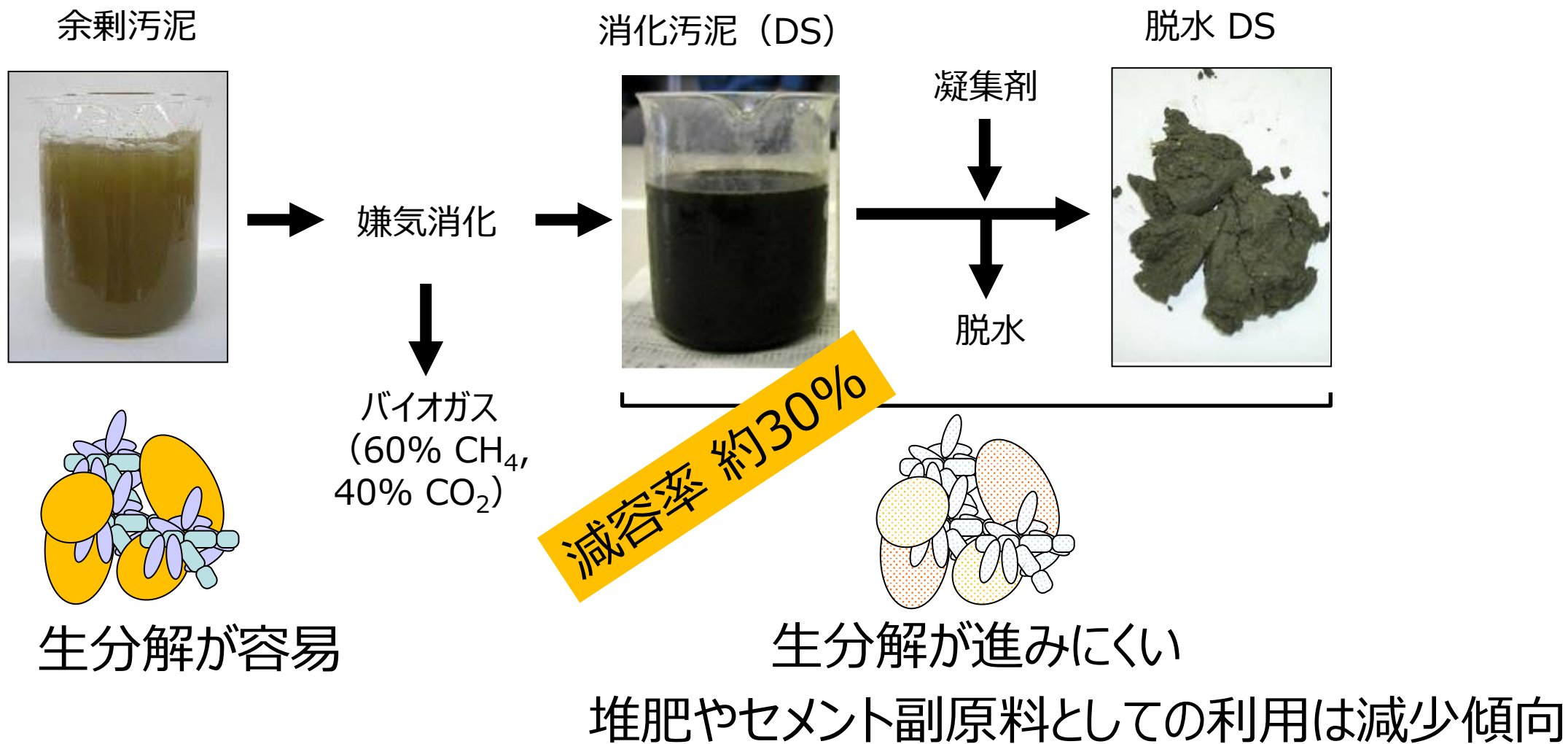
メタン生産アーキアを死滅させることで、水素ガス生産菌叢に転換することも可能

背景(1)



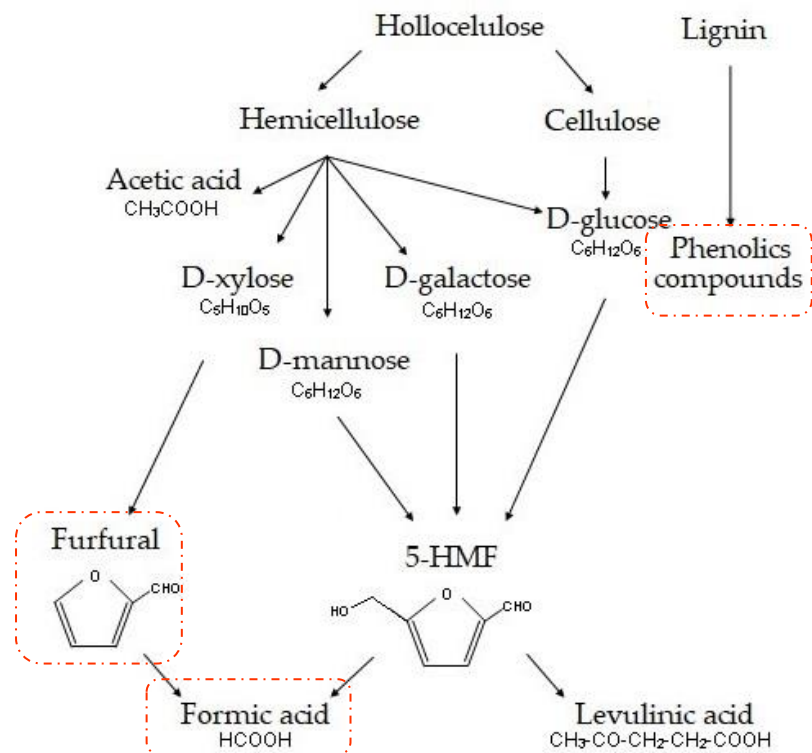
微生物増殖バイオマス
(余剰汚泥)

背景(2)

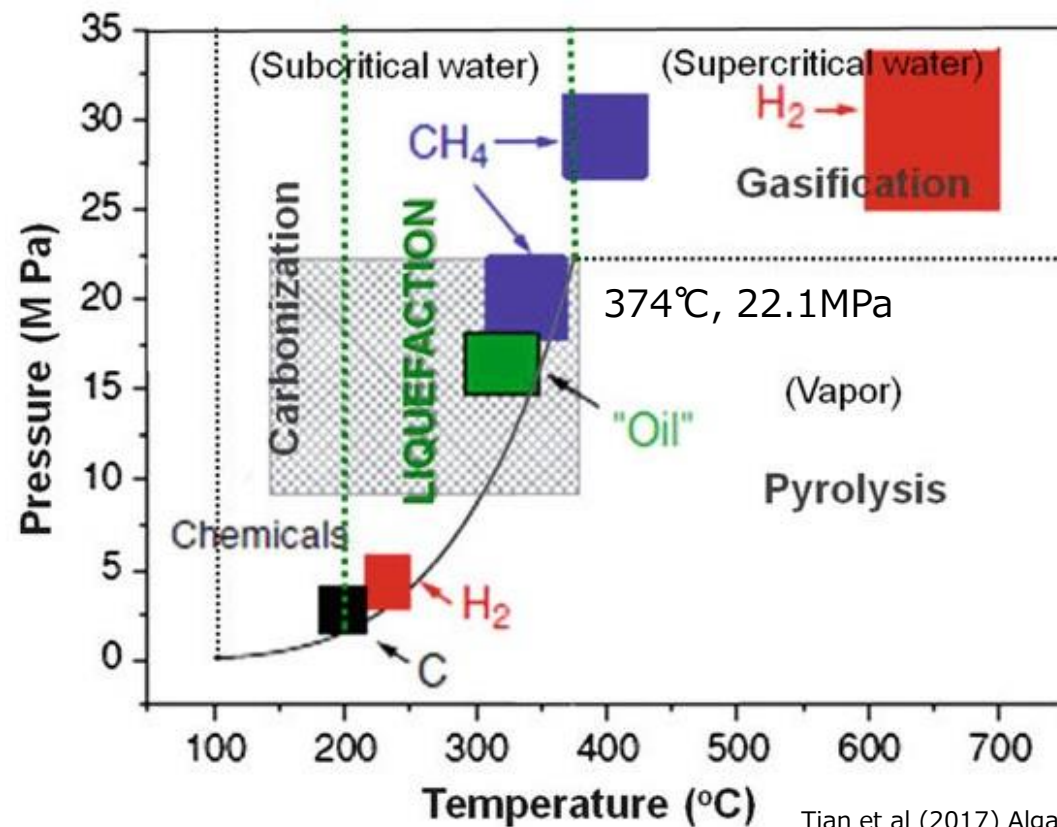


消化汚泥の新たな利用法を模索する必要がある

問題解決のための技術開発



Garcia Martin et al (2020) Processes 8(5) 511



Tian et al (2017) Algal Biofuel 361

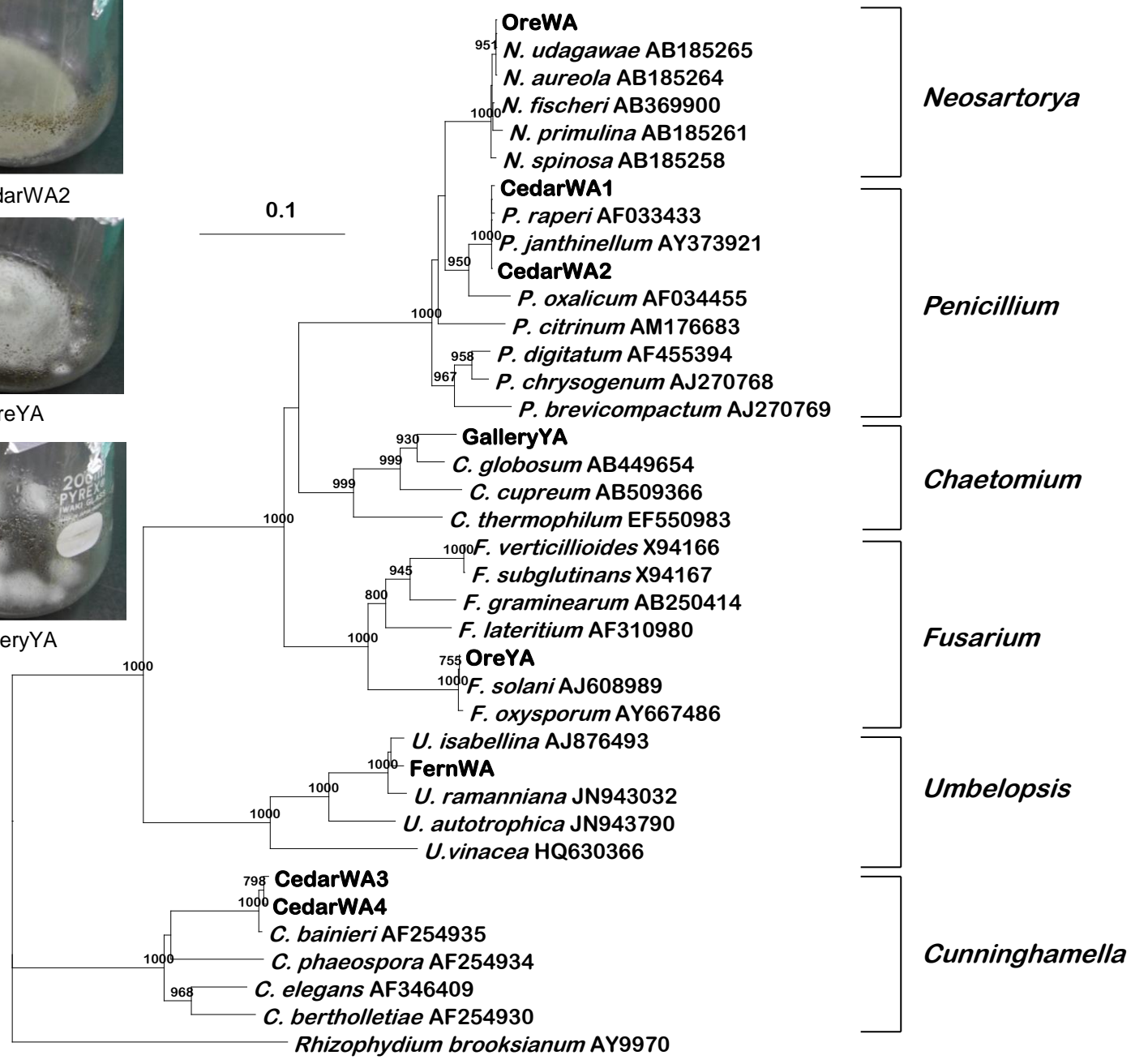
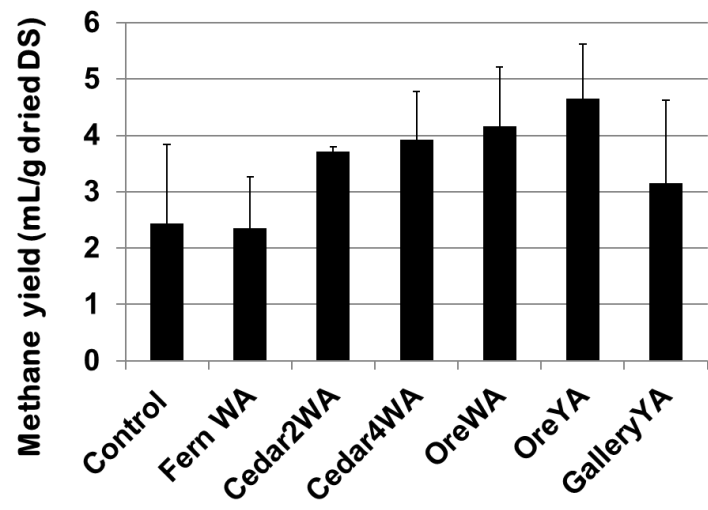
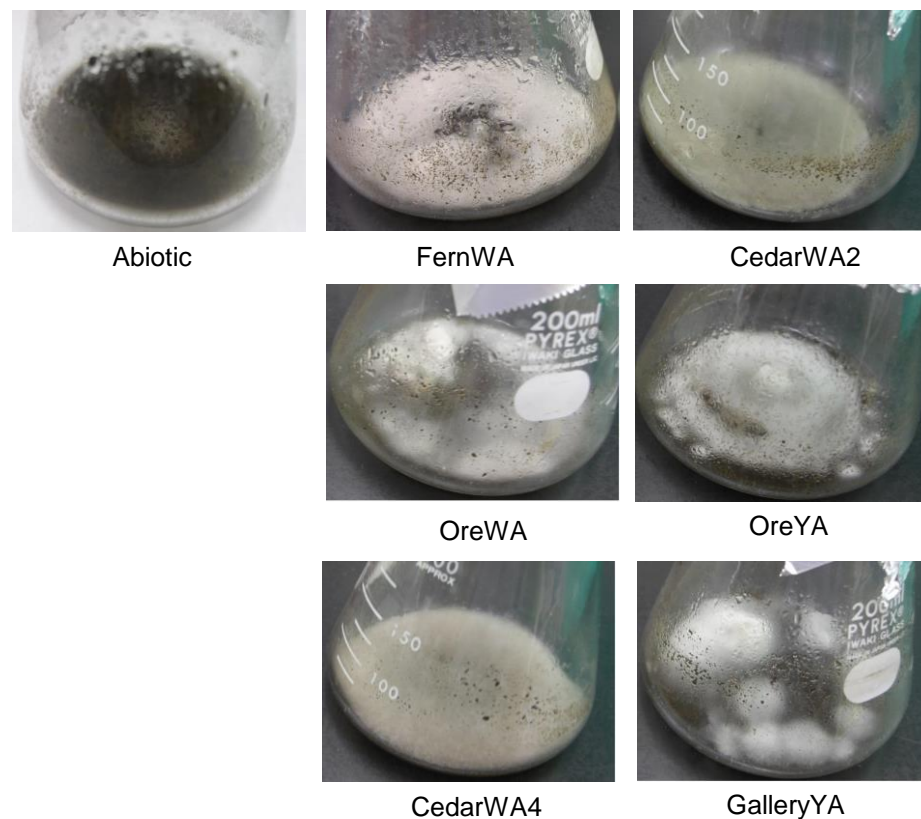
(例) 酸加水分解

- 作業員や作業環境に対する安全性に懸念がある
- 反応後の中和および副生物の除去が必要

(例) 水熱処理

- 装置の大型化に課題が残る
- 反応を進めるための投入エネルギーが大きい

問題解決のための技術開発





消化汚泥の処理（水洗、乾燥、粉末化）

- 市内公園土壌（A, B, C）
- 河川底泥（A, B）
- 動物新鮮糞（カンガルー, ヤギ, ヒツジ, ウサギ, ウマ, モルモット, カメ）

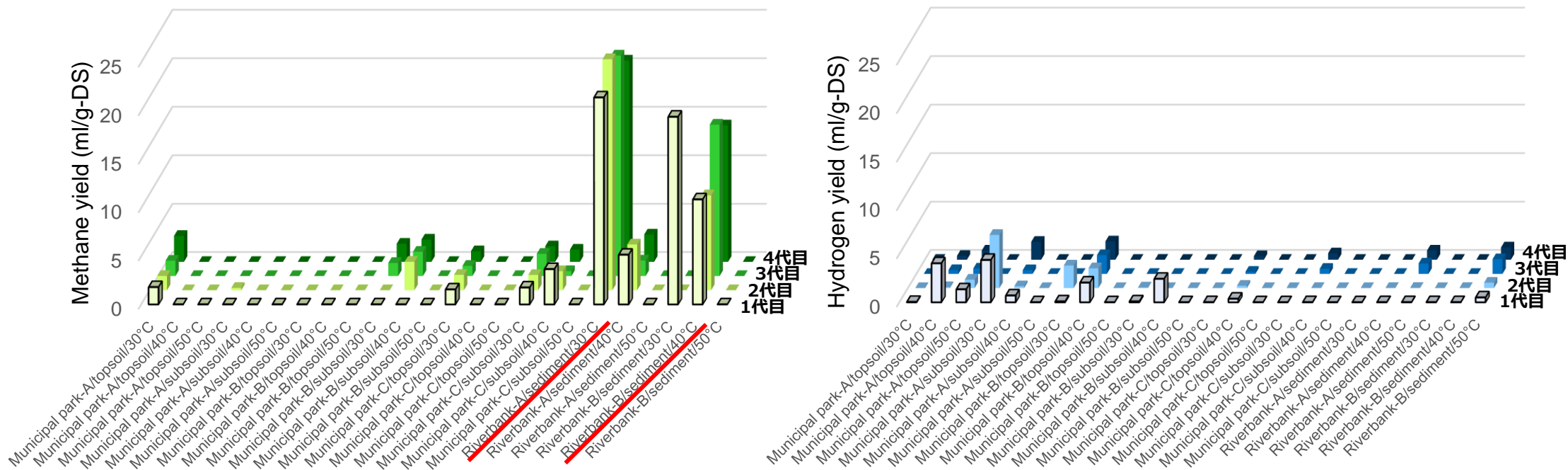


消化汚泥発酵試験



GC-TCDによる
発酵ガス分析

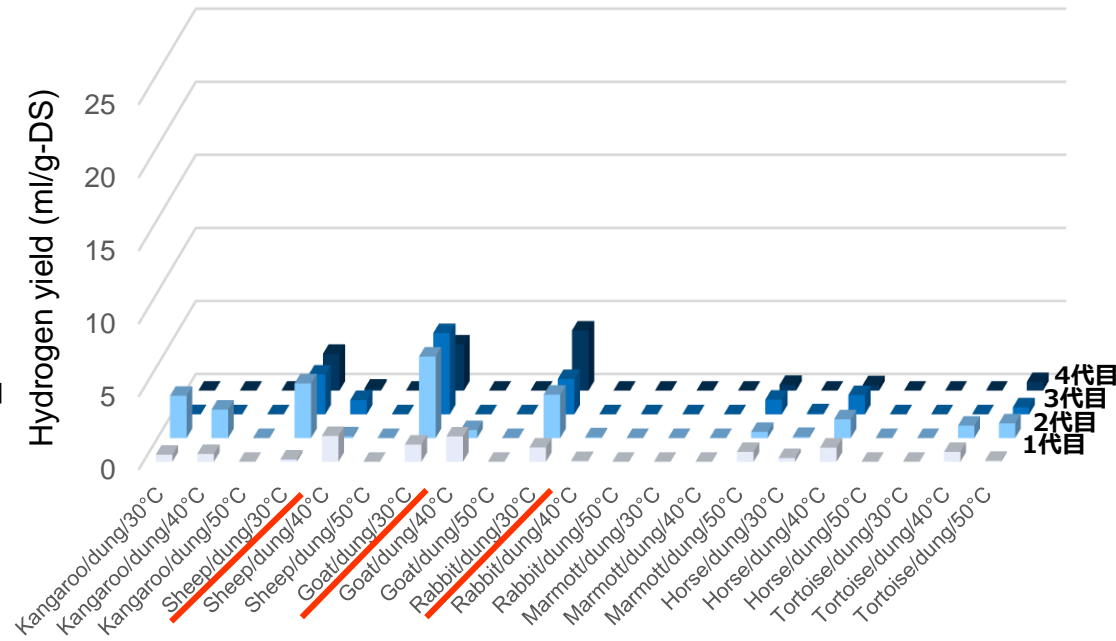
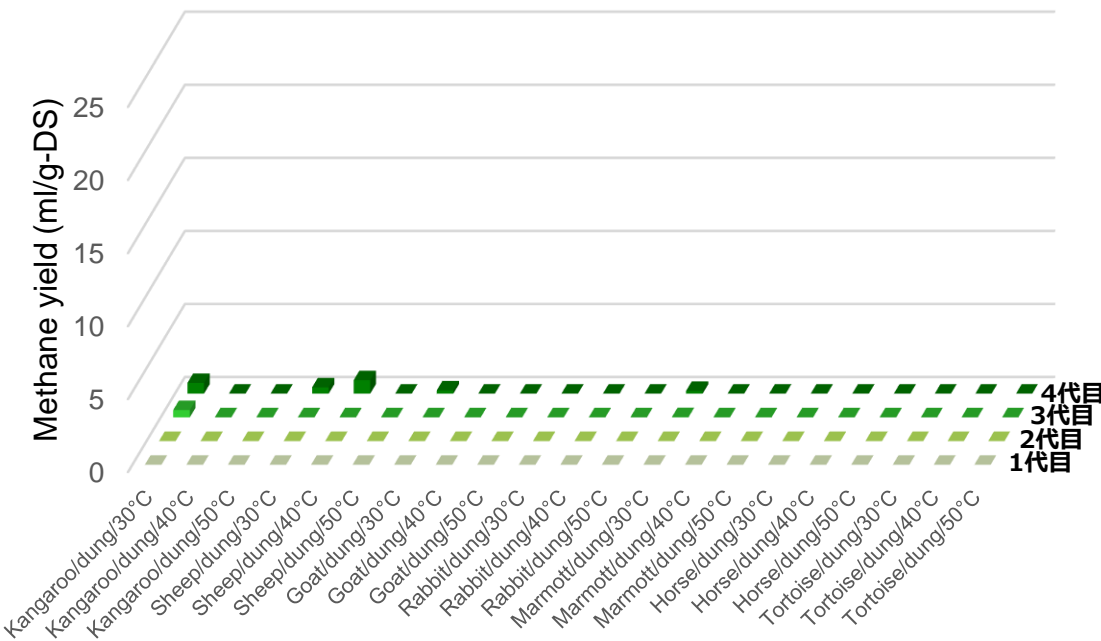
提案する新技術



- 多くの土壌微生物にとって、消化汚泥を唯一の栄養基質として生育し、バイオガスを生産することは困難であった
- 河川底泥A-30°C、河川底泥B-40°Cで汚泥1 gあたり約20 mLのメタンが生産され、植継ぎ培養を繰り返しても、メタン生産能が維持された

The digested sludge-assimilating and biogas-yielding soil microflora (DABYS)

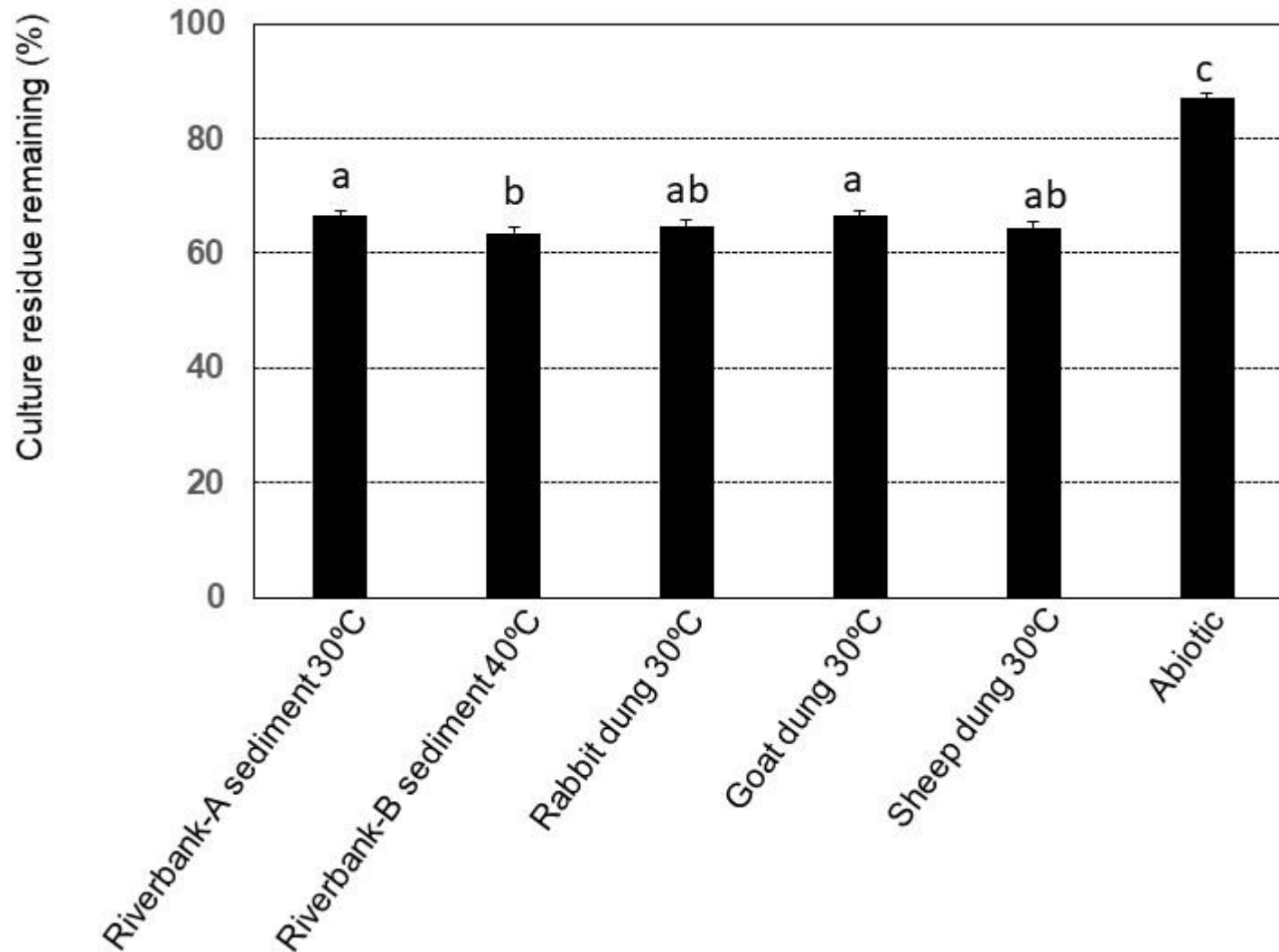
提案する新技術



- 多くの動物糞腸内細菌にとって、消化汚泥を唯一の栄養基質として生育し、バイオガスを生産することは困難であった
- ヒツジ糞菌叢30°C、ヤギ糞菌叢30°C、ウサギ糞菌叢30°Cで汚泥1 gあたり約4 mLの水素が生産され、植継ぎ培養を繰り返しても、生産能が維持された

The digested sludge-assimilating and biogas-yielding enteric microflora (DABYE)

バイオガス発生にともなう汚泥の分解



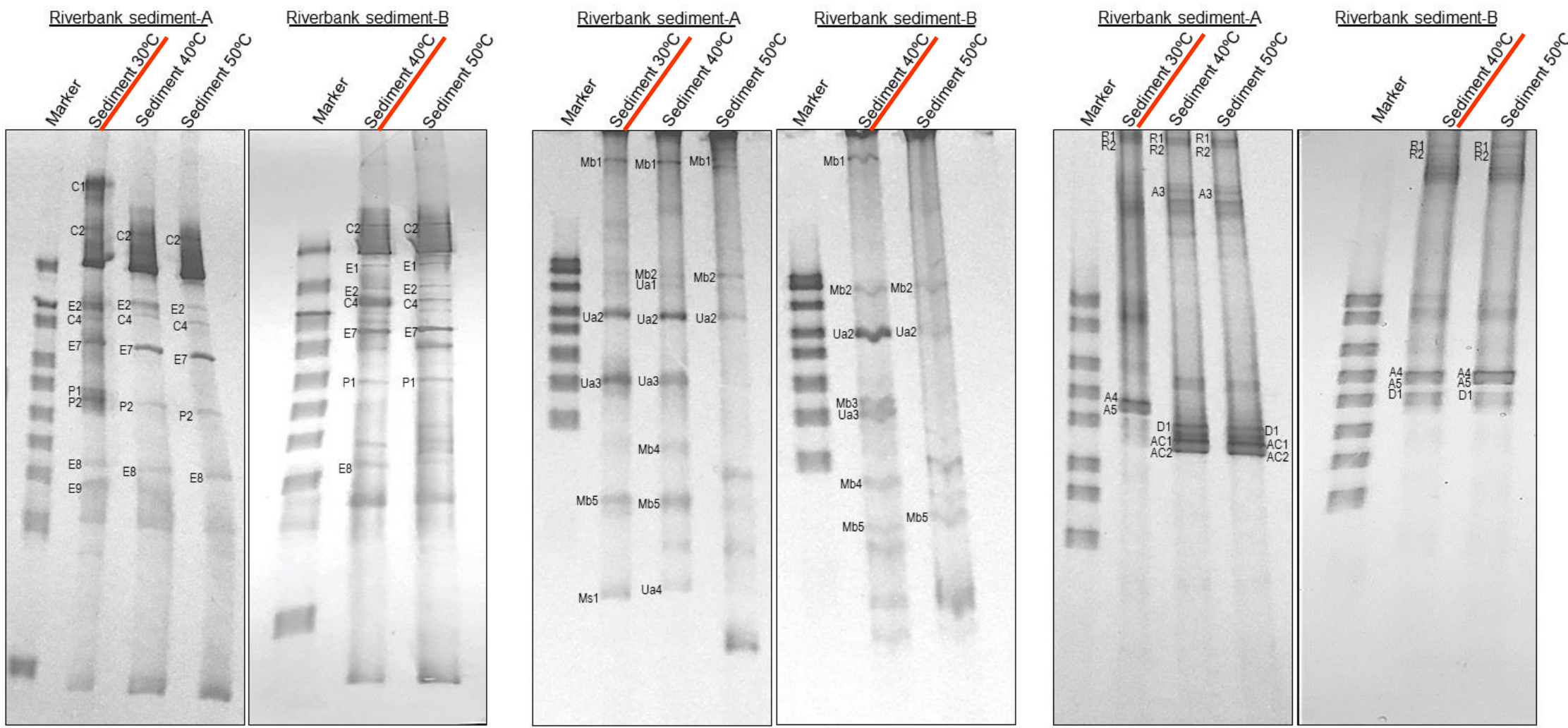
分解速度は遅いが、微生物添加により消化汚泥の生分解は起きている重量は、分解途上の消化汚泥と増殖菌体の合計（両者の分離は困難）

DABYSの微生物メンバー解析 (抜粋)

真正細菌

アーキア

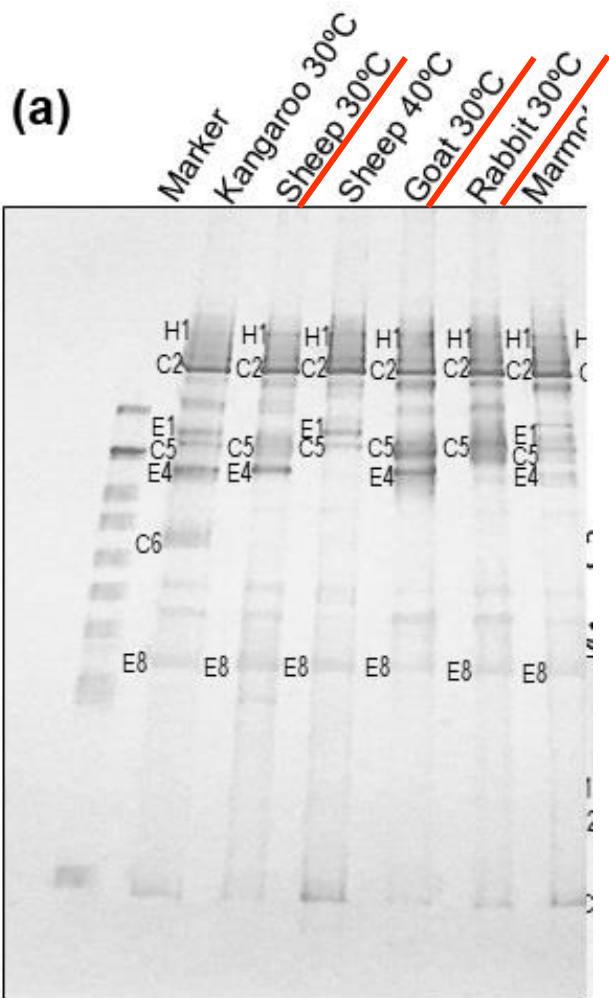
真核微生物



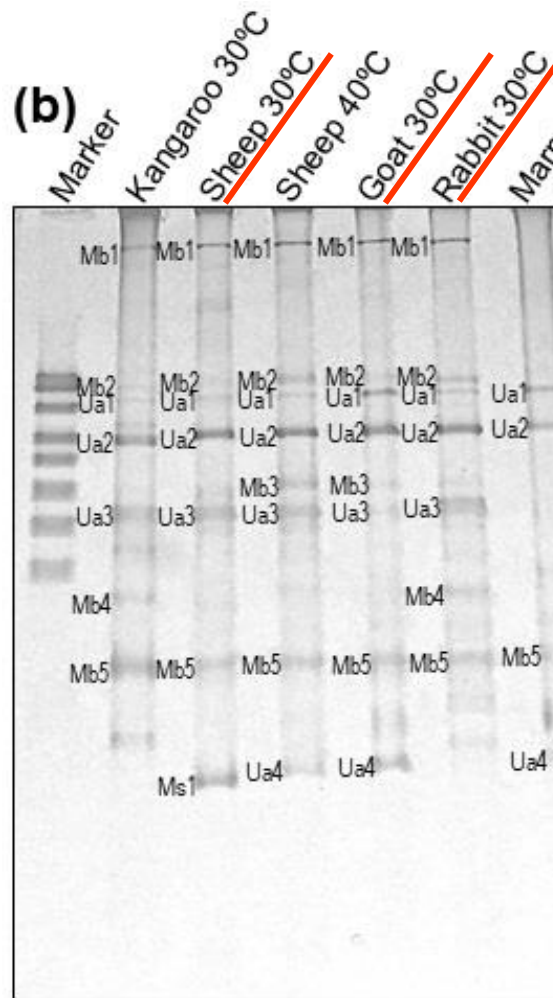
PCR-DGGE解析より、菌叢は多様な真正細菌、アーキア、真核微生物から構成されていることがわかった

DABYEの微生物メンバー解析 (抜粋)

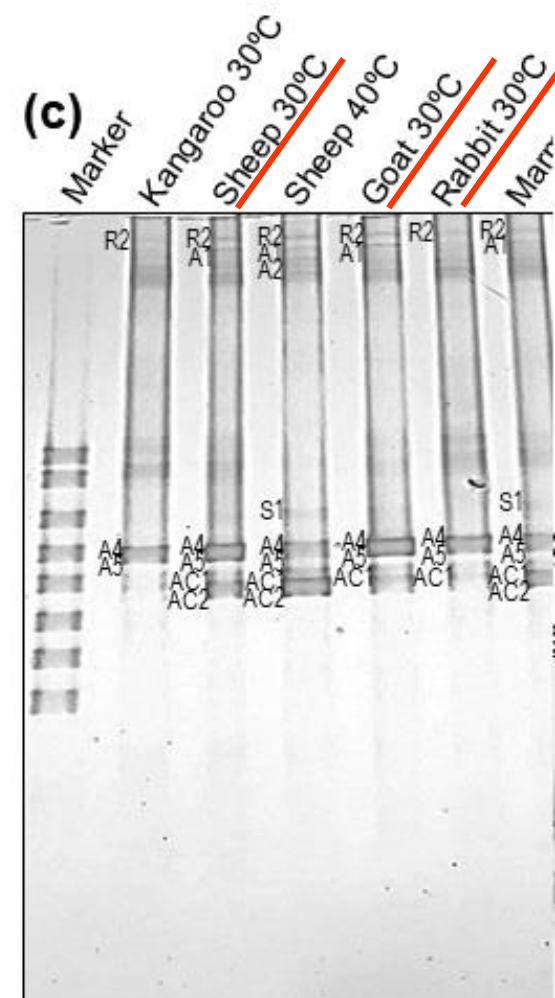
真正細菌



アーキア

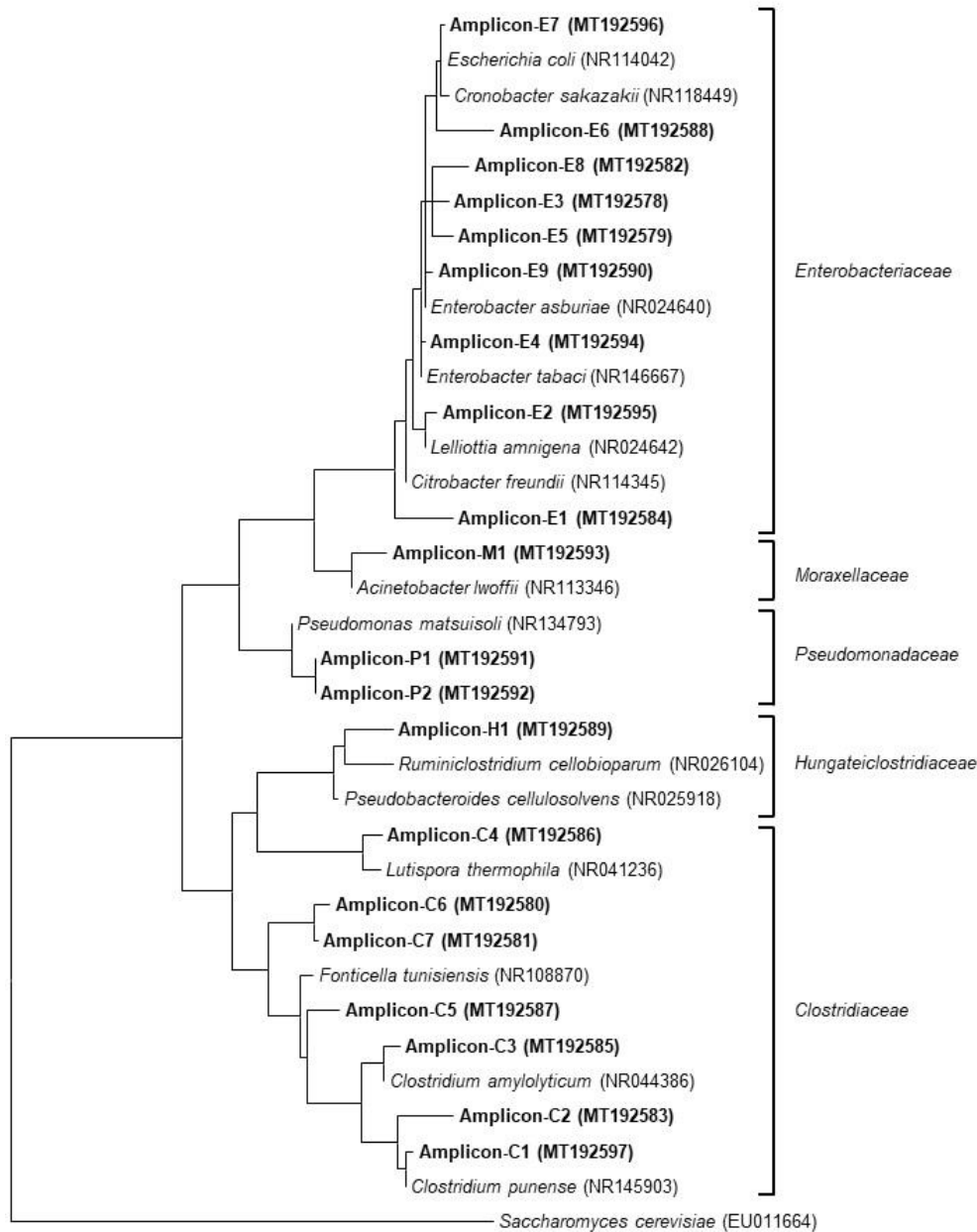


真核微生物



PCR-DGGE解析より、菌叢は多様な真正細菌、アーキア、真核微生物から構成されていることがわかった

真正細菌 (加水分解 & 酸生成)



DABYS: 河川底泥A & B
Clostridium, *Enterobacter*,
Pseudomonas



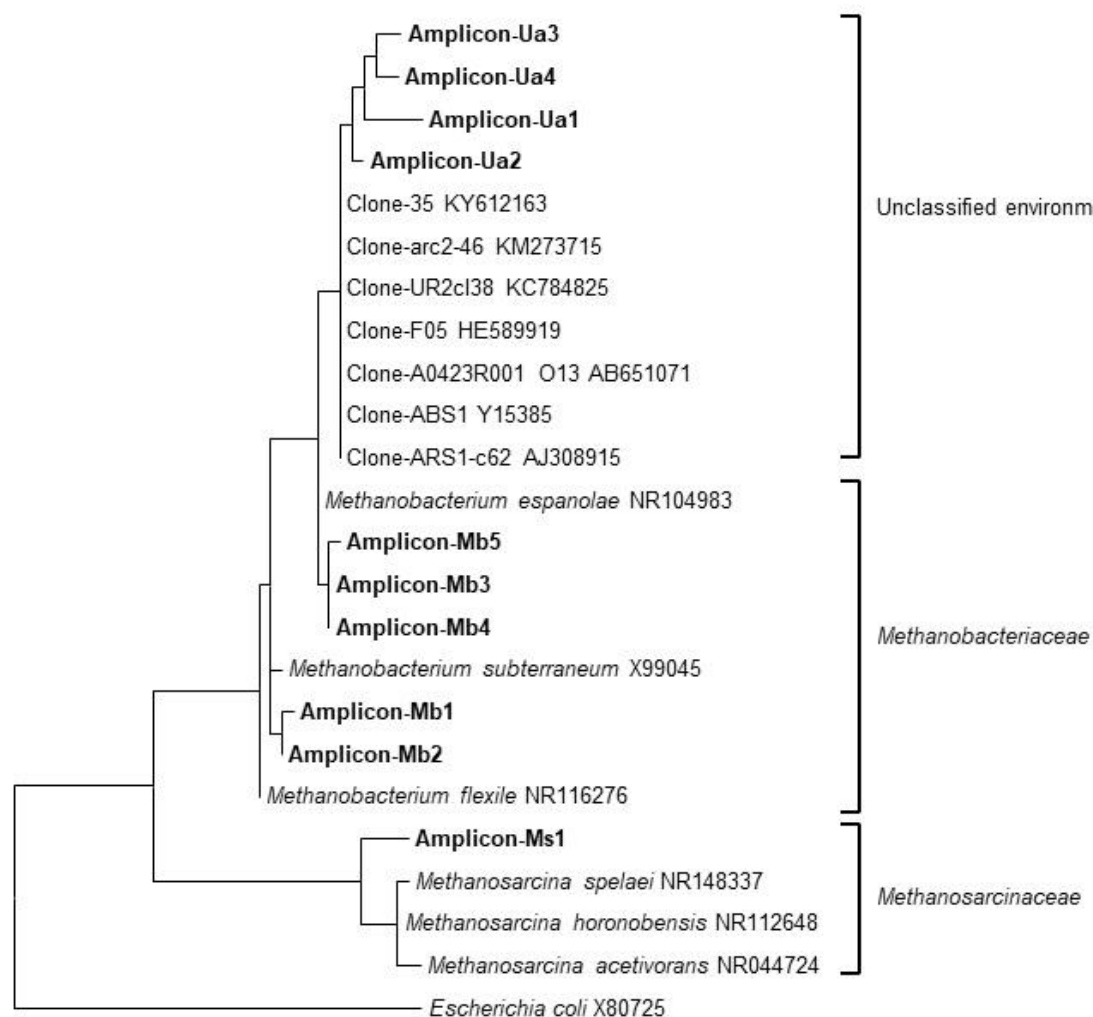
好気性細菌、メタン生成菌と共生し、
脂肪酸過剰蓄積（メタン生産に悪影
響）を防ぐ役割？

DABYE: ヒツジ、ヤギ、ウサギ糞
Clostridium, *Enterobacter*,
Ruminiclostridium



一般に反芻動物ルーメンに生息、有機
酸や水素を生産する

アーキア (メタン生成)



DABYS: 河川底泥A & B

Methanobacterium,
Methanosarcina,

Unclassified methanogens*

DABYE: ヒツジ、ヤギ、ウサギ糞

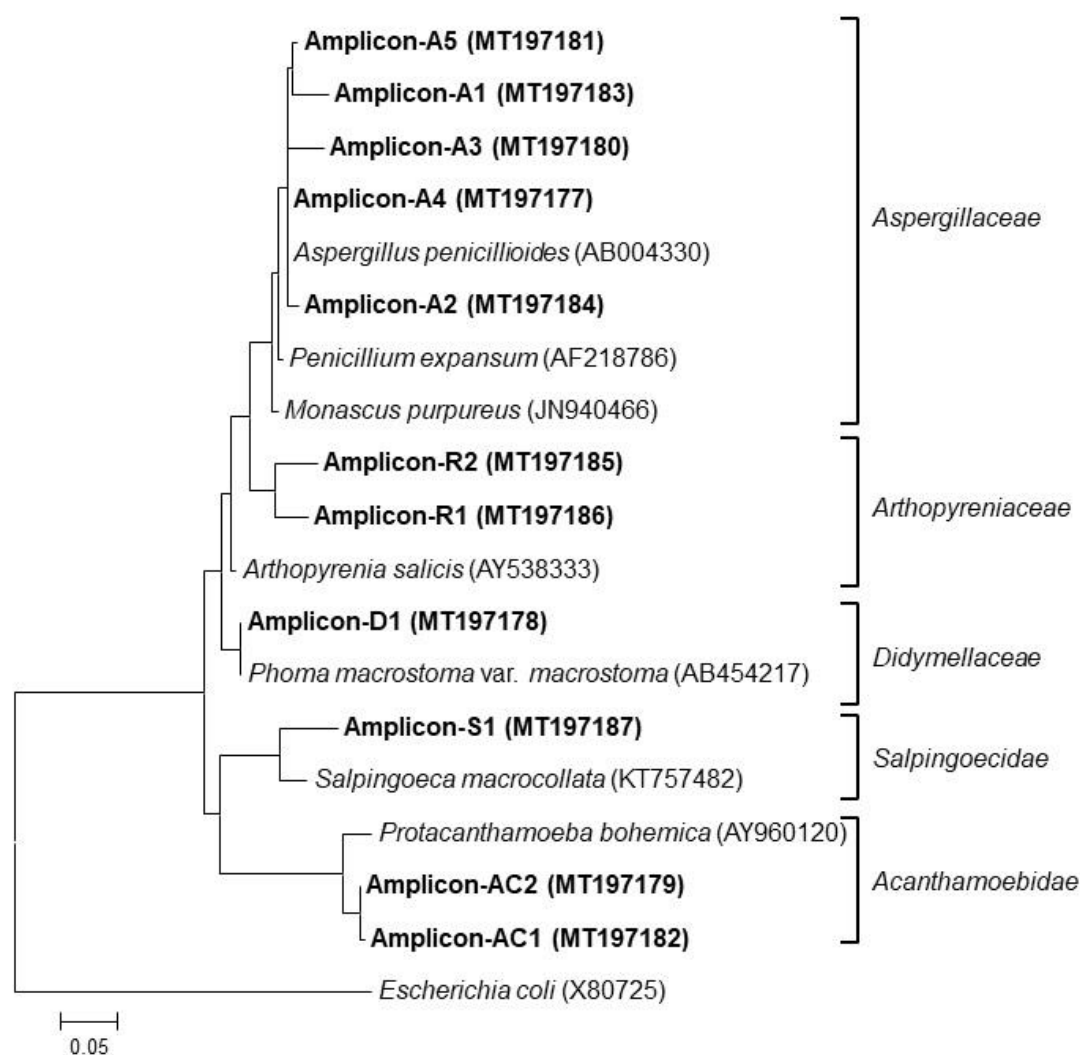
Methanobacterium

Unclassified methanogens*

* 土壌DNAから遺伝子のみ検出された培養困難種であり、機能未知

メタン生産がないDABYEでもメタン菌は生残している。*Pseudomonas*不在により機能抑制？

真核微生物 (プレデター & 酸素消費?)



DABYS、DABYEともに、嫌気菌叢であるにも関わらず、**好気性糸状菌**と**原生生物**が存在していた

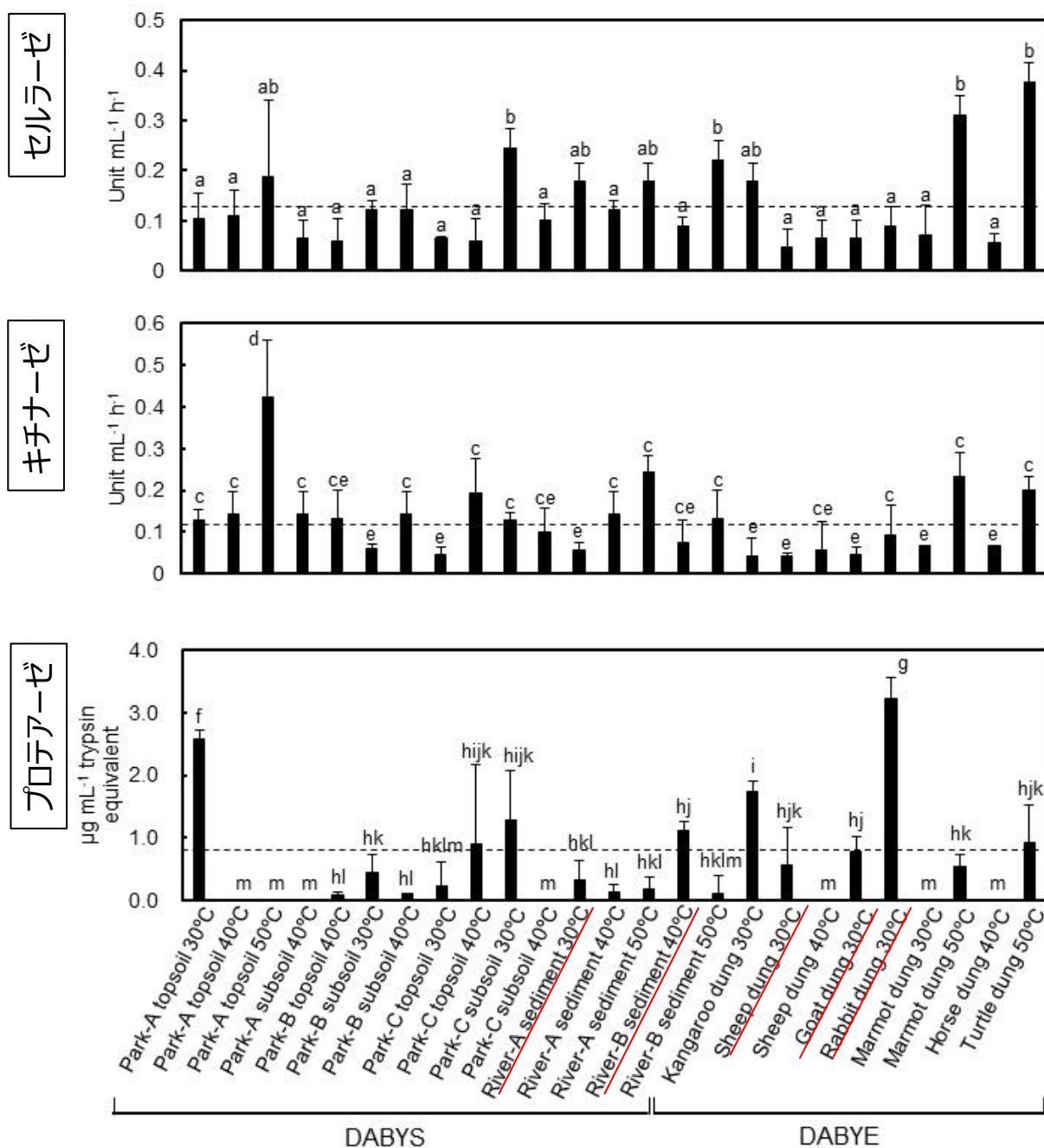
糸状菌の役割

- 無酸素条件下で硝酸呼吸により生残し、汚泥分解に関与?
- 硝酸呼吸で硝酸がアンモニアに変化、菌叢の嫌気化にも貢献?

原生生物 (嫌気性) の役割

- 細菌・糸状菌の捕食者?

菌叢の酵素活性



余剰汚泥 = 下水処理で増殖した活性汚泥微生物



消化汚泥

生分解しやすい
可溶成分
(細胞質)

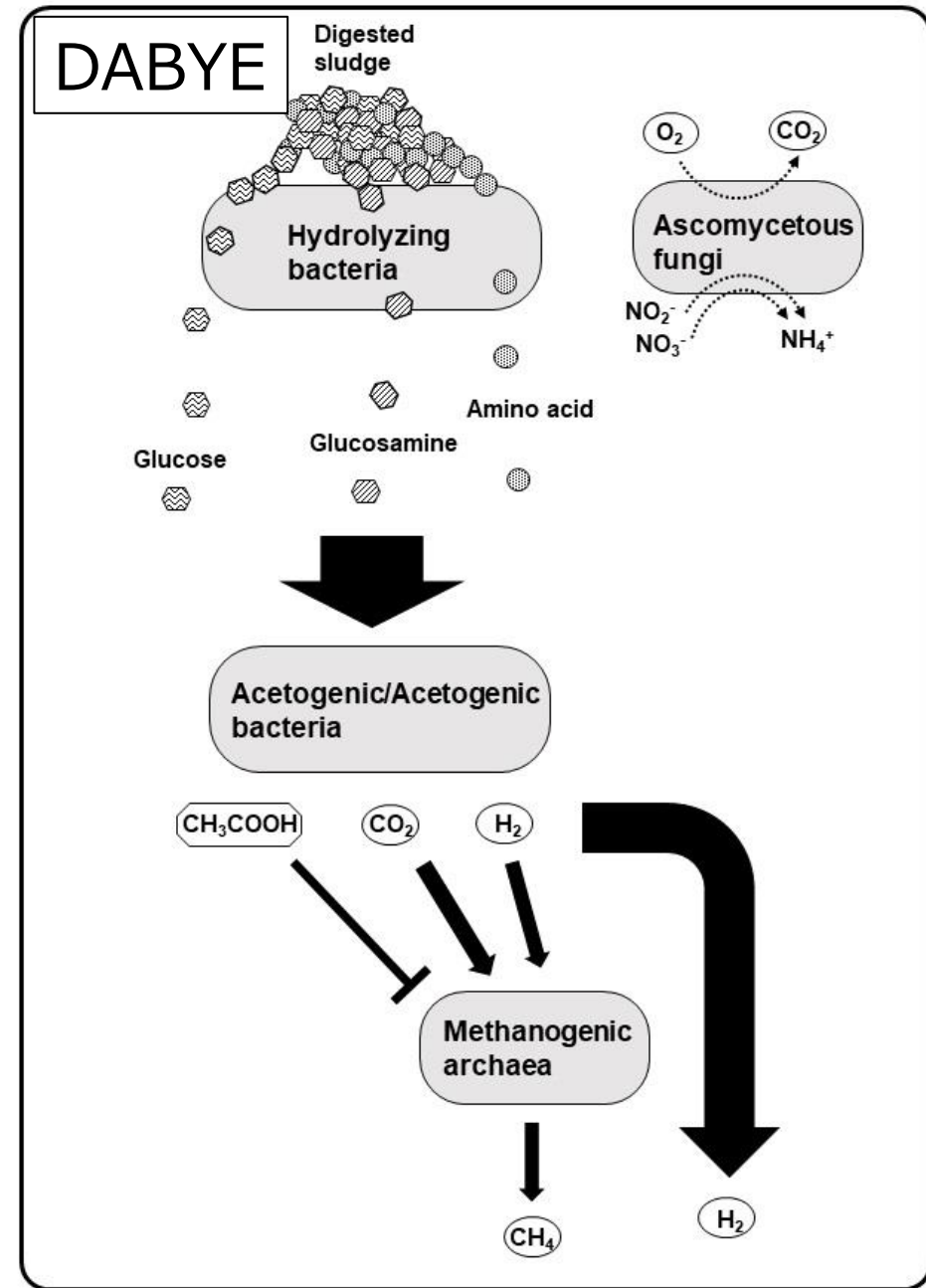
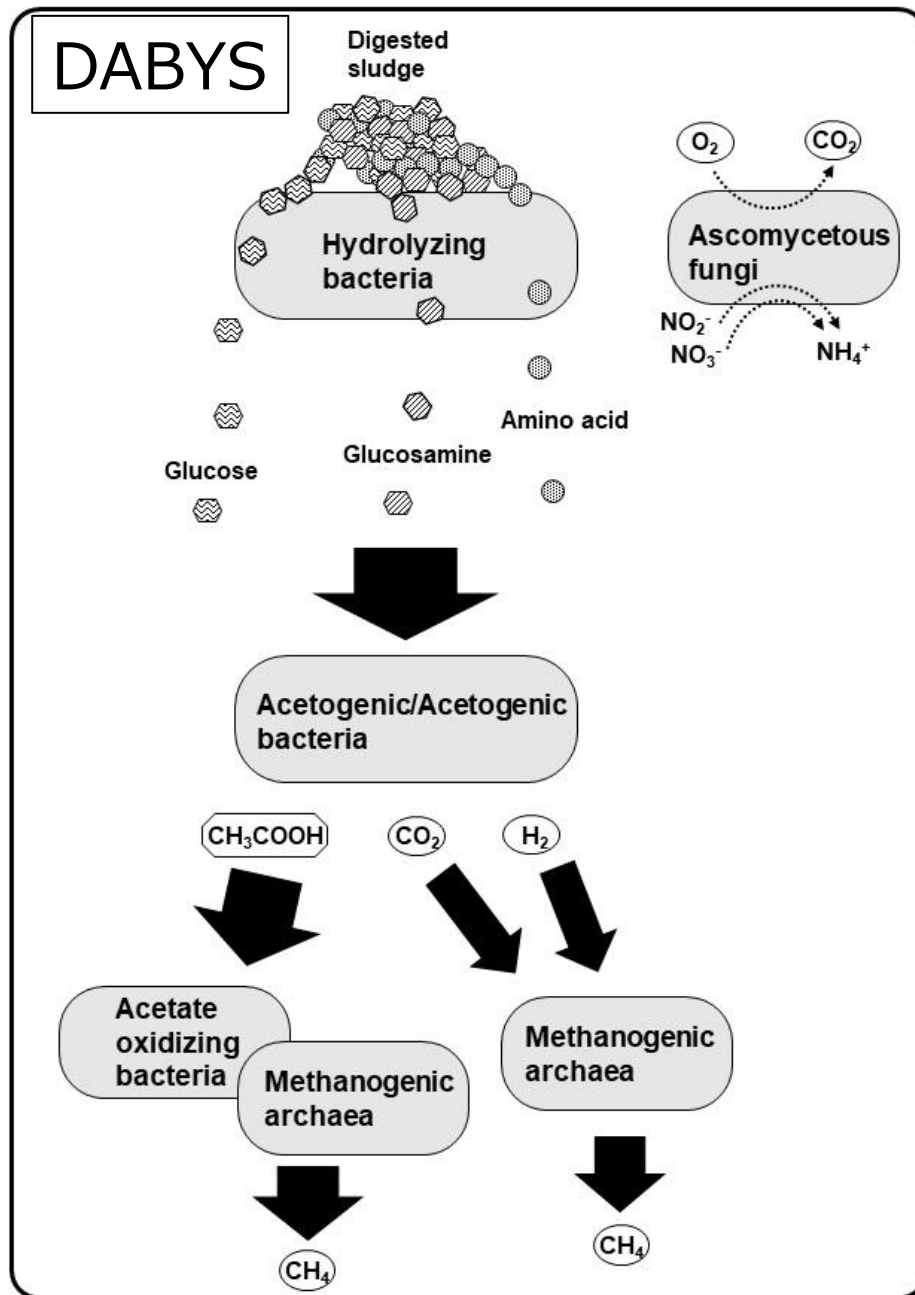
生分解しにくい
不溶成分
(細胞壁)

バイオガス

- セルロース
- キチン
- タンパク質

DABYS、DABYEいずれの菌叢も、セルロース、キチン、タンパク質に対する分解酵素を分泌し、消化汚泥を可溶化していることが示唆された

汚泥分解・バイオガス生産のプロセス



- 消化汚泥分解からバイオガス生産までを担う菌叢としては、初めての報告例

Environmental Technology >
Latest Articles

Submit an article Journal homepage

Enter keywords, autho

65 Views

0 CrossRef citations to date

1 Altmetric

Research Article

Microflora communities which can convert digested sludge to biogas

Ayaka Kon, Shunsuke Omata, Yuhei Hayakawa, Nobuhiro Aburai & Katsuhiko Fujii

Received 18 Aug 2020, Accepted 13 Jan 2021, Accepted author version posted online: 21 Jan 2021, Published online: 03 Feb 2021

Download citation <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1880489> Check for updates

- 培養温度が30-40℃であり、従来の嫌気消化法のような加温が不要
- 物理化学的手法と比較して、専用の装置が不要。反応コストも安価

想定される用途

例えば . . .

- 減容率の高い嫌気消化技術（廃棄物削減）
- 都市ガスの代替ガス
- 他種未利用バイオマスの資源化

実用化に向けた課題

反応効率の改善：基質のさらなる微細化 コスト的に大丈夫な物理化学的前処理

Table 2

Methane yields of municipal solid wastes and sewage

Feedstock	Methane yield m ³ per kg volatile solids (SD in parentheses)
Municipal solid waste	
Cooked meat	0.482
Cellulose	0.356
Boiled rice	0.294
Cabbage	0.277
Mixed food waste	0.472
Mechanically sorted (fresh)	0.222 (0.014)
Mechanically sorted (dried)	0.215 (0.013)
Hand sorted	0.205 (0.011)
Yard waste (grass)	0.209 (0.005)
Yard waste (leaves)	0.123 (0.005)
Yard waste (branches)	0.134 (0.006)
Yard waste (blend)	0.143 (0.004)
Paper (office)	0.369 (0.014)
Paper (corrugated)	0.278 (0.012)
Paper (printed newspaper)	0.100 (0.003)
MSW and corn silage	0.11
MSW and cattle manure	0.03
MSW and digested sludge	0.29
Sewage	
Primary sludge	0.590

Table 3

Methane yields of biomass varieties

Feedstock	Methane yield m ³ per kg volatile solids (SD in parentheses)
Winter rye	0.36
Oilseed rape	0.42
Faba bean straw	0.441
Maize (whole crop silage)	0.390
Winter wheat straw	0.189
Summer barley straw	0.189
Sugar beet leaves	0.210
Sunflower (whole crop silage)	0.300
Maize (Tonale, early harvest)	0.334 (0.0057)
Maize (Tonale, mid harvest)	0.283 (0.0049)
Maize (Tonale, late harvest)	0.280 (0.0114)
Maize (LZM 600, early harvest)	0.313 (0.0214)
Maize (LZM 600, mid harvest)	0.326 (0.0161)
Maize (LZM 600, late harvest)	0.287 (0.0078)
Maize (PR34G13, early harvest)	0.366 (0.0262)
Maize (PR34G13, mid harvest)	0.302 (0.0070)
Maize (PR34G13, late harvest)	0.268 (0.0042)

Table 4

Ultimate methane yields of fruit and vegetable wastes

Feedstock	Methane yield m ³ per kg volatile solids (SD in parentheses)
Fruit and vegetable waste	
Banana peel (Robusta variety)	0.277 (0.007)
Mango (Neelum variety)	0.373 (0.012)
Lemon pressings	0.473 (0.011)
Rotten tomato (mean of varieties)	0.298 (0.012)
Onion outer peel	0.400 (0.014)
Cauliflower leaves	0.190 (0.009)
Cauliflower stem	0.331 (0.013)
Potato peel	0.267 (0.017)
Turnip leaves	0.314 (0.010)
Radish shoots (pale pink variety)	0.304 (0.012)
Garden pea pods (seeds removed)	0.390 (0.013)
Carrot (leaves)	0.241 (0.008)
Carrot (petiole)	0.309 (0.010)
Garden beet (leaves)	0.231 (0.008)
Manure	
Pig	0.356
Sow	0.275
Dairy cattle	0.148
Beef cattle	0.328

Ward et al (2008) Bioresource Technology 90, pp. 7928-7940

生分解しやすい基質では、数百 mL CH₄/g-基質でメタンを生産できる

実用化に向けた課題

反応効率の改善：基質のさらなる微細化 コスト的に大丈夫な物理化学的前処理

Table 2 – Effect of different pretreatment methods on fermentative hydrogen production.

Inoculum	Pretreatment method studied	Substrate	Maximum hydrogen yield	Optimal pretreatment method	References
Digested sludge	Acid, base, heat-shock, aeration and Chloroform	Glucose	1.8 mol/mol glucose	Heat-shock	[47]
Cattle manure sludge	Freezing and thawing, acid, heat-shock and sodium-2-bromoethanesulfonate	Glucose	1.0 mol/mol glucose	Acid	[49]
Digested waste water sludge	Heat-shock, aeration, acid, base, 2-bromoethanesulfonic acid and iodopropane	Sucrose	6.12 mol/mol sucrose	Base	[50]
Anaerobic Sludge	Sodium-2-bromoethanesulfonate, acid, heat-shock	Dairy waste water	0.0317 mmol/g COD	Sodium-2-bromoethan sulfonate	[51]
Anaerobic Sludge	–	Glucose	0.8–1.0 mol/mol glucose	Acid Treated	[52]
Anaerobic Sludge	–	Glucose	1.75 mol/mol glucose	Heat-conditioned	[53]
Methanogenic granules	Acid, heat-shock and Chloroform	Glucose	1.2 mol/mol glucose	Chloroform	[54]

Sinha & Pandey (2011) International Journal of Hydrogen Energy 36, pp. 7460-7478

種菌

基質

22.2 L-H₂ /180 g-glc
= 123 mL-H₂ /g-glc

生分解しやすい基質では、数百 mL H₂/g-基質で水素を生産できる

企業への期待

微生物による加水分解反応（酵素反応）は、低コストである反面、一般に反応速度が遅い

酵素反応が進みやすくなるような汚泥前処理法をアドバイス頂きたい or 共同研究

(例) 微粉化
水蒸気爆砕
⋮

反応コストは？

本研究室では
実施困難・・・



他機関との連携の経歴

本案件について、企業との共同研究実績はない

知的財産権

- **名称** : 微生物混合物、メタン産生用組成物、
及びメタン産生方法
- **出願人** : 学校法人工学院大学
- **発明者** : 藤井 克彦
- **出願番号** : 2020-100457

お問い合わせ先

工学院大学

総合企画部 産学連携室

e-mail : sangaku@sc.kogakuin.ac.jp

T E L : 03-3340-0398(新宿)、042-628-4928(八王子)

F A X : 03-3342-5304(新宿)、042-626-6726(八王子)