

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

バイオマス廃棄物のメタン発酵 (Vol.2)
ープロセスの合理化をめざしてー

平成27年3月

Methane Production from Biomass Wastes by Anaerobic
Fermentation (vol.2):

Reaction Engineering Approach towards the Rational Design

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2014-PP-08
(平成27年4月印刷版)

概要

廃水汚泥や食品残渣から嫌気性のメタン発酵処理によるバイオガス生成を行い、エネルギーとして利活用するプロセスの製造コストを検討した結果、3¥/MJ 以下にすることが不可欠であることがわかった。更なる普及のために、コストダウンを達成するためのプロセスの合理化などの技術課題とバイオマス廃棄物の効率的収集などの社会システム課題を提示する。また、技術課題の具体的な検討のため、バイオマスの嫌気性消化モデルを用いて、反応工学に基づく解析・検討を行い、コスト削減の可能性を検討する。

Abstracts

Reports on methane fermentation from the biomass waste based on the chemical reaction engineering methodology have been very few because of the complexity of reaction mechanism composed of parallel and consecutive reaction steps such as disintegration, hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis.

We have completed the first stage of the process simulation work by utilizing the Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1) proposed by IWA (International Water Association) in 2002 as well as the popular numerical solver and just started the 2nd stage by utilizing advanced numerical solver. This will realize more scientific approach of the process design rationalization in near future.

目次

概要

| | |
|-----------------------------|---|
| 1. バイオマスの嫌気性消化モデルと検討結果..... | 1 |
| 2. 合理化の検討内容と結果..... | 6 |
| 3. まとめ..... | 7 |
| 参考文献..... | 7 |

1. バイオマスの嫌気性消化モデルと検討結果

メタン発酵プロセスを検討するための基盤として、国際水協会 (International Water Association : IWA) が 2002 年に嫌気性消化モデル (Anaerobic Digestion Model No.1 : ADM1)^{1) 2)} をまとめた。図 1 に生物分解反応工程及び素反応速度式を示すが、反応は複雑な逐次・併発反応である。

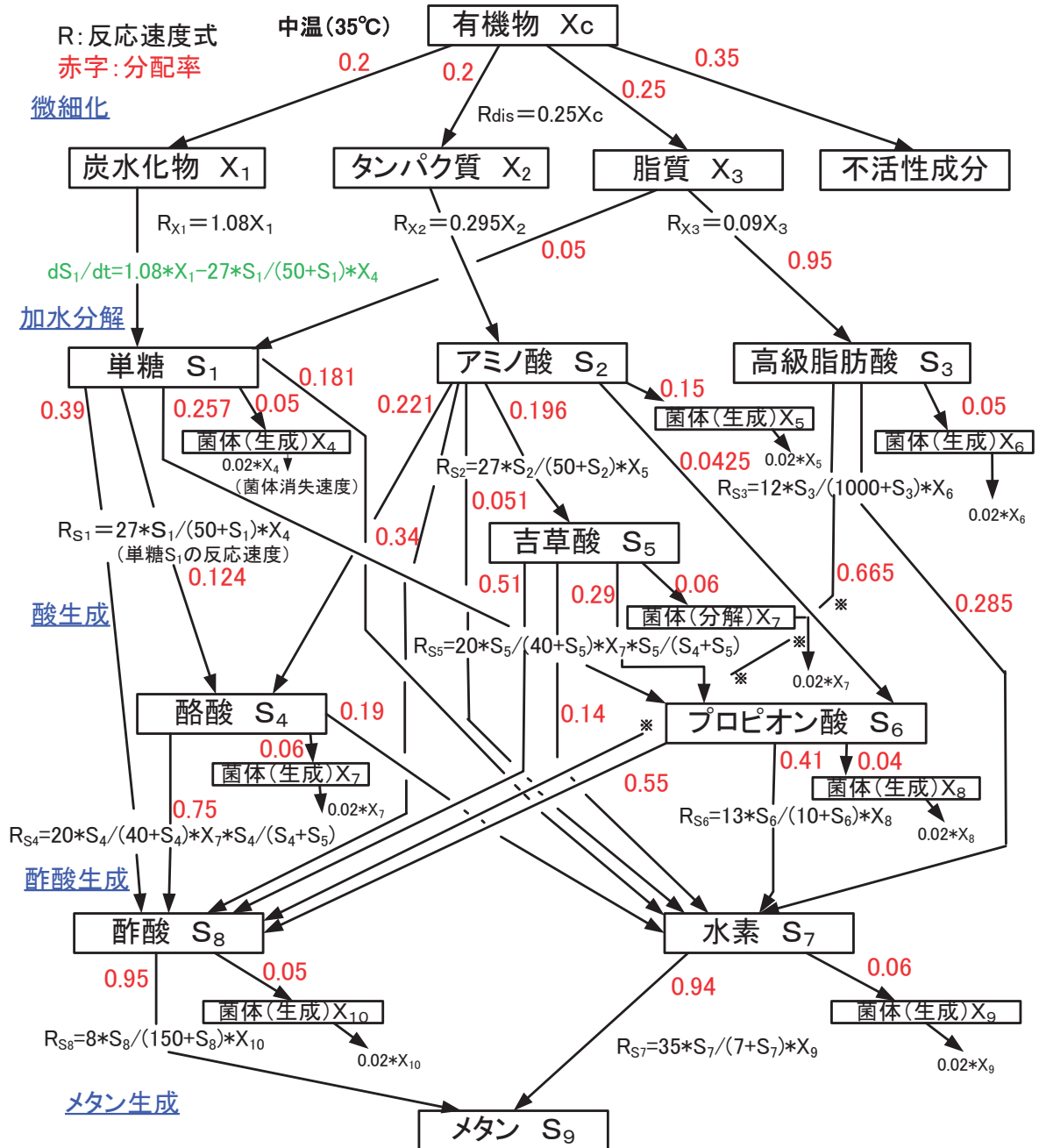


図 1 メタン発酵 生物分解反応工程及び素反応速度式 (中温 (35°C) 余剰活性汚泥)

反応は、①バイオマス廃棄物（有機物）がコロイド性・溶解性の炭水化物などの高分子成分になる微細化反応工程、②種々の細胞外酵素により炭水化物は単糖に、タンパク質はアミノ酸に、脂質は高級脂肪酸とトリグリセロールになる加水分解反応工程、③単糖（グルコース）、アミノ酸、高級脂肪酸は、細菌の増殖をともなう発酵により、酪酸、吉草酸、プロピオン酸、酢酸など有機酸になる酸生成反応工程、④酪酸、吉草酸、プロピオン酸が発酵により酢酸になる酢酸生成反応工程、最後に⑤酢酸がメタンになるメタン生成反応工程の 5 つの反応工程からなる。微細化反応の反応速度は有機物濃度の一次反応、加水分解反応は炭水化物、タンパク質、脂質の濃度の一次反応で近似する。酸生成反応、酢酸生成反応およびメタン生成反応は、基本的に発酵であり、反応速度 r は次式のような Monod 型の速度式で近似する。

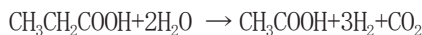
$$r = km \frac{S}{Ks + S} X \times I$$

Km : 最大比反応速度 (d^{-1})、 S : 基質濃度 (g-COD/L)、 Ks : 速度定数 (g-COD/L)、
 X : 微生物濃度 (g-COD/L)、 I : スイッチング関数 ($0 < I \ll 1$)

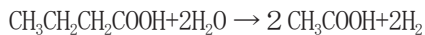
スイッチング関数 I は、液中の pH、水素濃度などの反応への影響を表す関数である。

酸生成反応やメタン生成反応では、つぎのような反応が細菌の働きにより生じている。

1) プロピオン酸イオンの分解反応



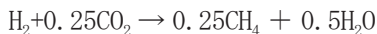
2) 酪酸イオンの分解反応



3) パルミチン酸の分解反応



4) 水素の消費



1), 2), 3) の反応では水素を生成し、4) の反応では水素を消費しながら反応が進む。このようにある細菌が水素を生成し、別の細菌が消費しながら一連の反応が進む現象を異種間水素伝達という。これは嫌気性微生物による共生的な反応でありメタン発酵プロセスの特徴である。またこれらの反応が進行するには、各々の反応での Gibbs エネルギー変化が負であることが必要である。1), 2), 3) の反応は水素分圧が低くなければ反応は進まない。また 4) の反応は水素分圧が低くなりすぎると反応は進まない。分解反応がメタンまで連続的に進行するには、水素濃度や酢酸イオン濃度がある一定の範囲である必要がある。ADM1 モデルではこの効果を水素濃度に関するスイッチング関数で表わしている。

また各反応工程での成分への分配率、各種反応係数は、バイオマス廃棄物の性状、反応温度範囲・反応条件により異なる。メタン生成速度や酸素吸収速度などの反応速度のダイナミックな応答を測定して、反応速度の各種パラメータが決められている。

本検討では、35°Cの中温での余剰活性汚泥を原料とした場合のパラメータを採用し、反応は単一槽におけるバッチ反応を想定し、差分法で連立方程式を解いた。時間刻み (Δt) は 0.05 日である。しかし ADM1 で与えられたパラメータでは計算が発散し、方程式を解くことはできなかった。そのため発散しないように速度定数 Ks を大きく、かつスイッチング関数を省略して近似計算をした。図 1 に採用したパラメータを赤字で示す。また表 1 に計算した連立微分方程式を示す。

表 1 メタン生成反応 連立微分方程式 (近似解)

| | |
|-----|---|
| 1) | $dXc/dt = -0.25 * Xc$ |
| 2) | $dX1/dt = -0.05 * dXc/dt - 1.08 * X1$ |
| 3) | $dX2/dt = -0.05 * dXc/dt - 0.295 * X2$ |
| 4) | $dX3/dt = -0.0625 * dXc/dt - 0.09 * X3$ |
| 5) | $dS1/dt = 1.08 * X1 + 0.00045 * X3 - 27 * S1 / (50 + S1) * X4$ |
| 6) | $dX4/dt = 0.05 * 27 * S1 / (50 + S1) * X4 - 0.02 * X4$ |
| 7) | $dS2/dt = 0.295 * X2 - 27 * S2 / (50 + S2) * X5$ |
| 8) | $dX5/dt = 0.15 * 27 * S2 / (50 + S2) * X5 - 0.02 * X5$ |
| 9) | $dS3/dt = 0.0855 * X3 - 12 * S3 / (1000 + S3) * X6$ |
| 10) | $dX6/dt = 0.05 * 12 * S3 / (1000 + S3) * X6 - 0.02 * X6$ |
| 11) | $dS4/dt = 0.124 * 27 * S1 / (50 + S1) * X4 + 0.221 * 27 * S2 / (50 + S2) * X5 - 20 * S4 / (40 + S4) * X7 * S4 / (S4 + S5)$ |
| 12) | $dX7/dt = 0.06 * 20 * S4 / (50 + S4) * X7 * S4 / (S4 + S5) + 0.06 * 20 * S5 / (40 + S5) * X7 * S5 / (S4 + S5) - 0.02 * X7$ |
| 13) | $dS5/dt = 0.196 * 27 * S2 / (50 + S2) * X5 - 20 * S5 / (40 + S5) * X7 * S5 / (S4 + S5)$ |
| 14) | $dS6/dt = 0.257 * 27 * S1 / (50 + S1) * X4 + 0.0425 * 27 * S2 / (50 + S2) * X5 + 0.29 * 20 * S5 / (40 + S5) * X7 * S5 / (S4 + S5) - 13 * S6 / (10 + S6) * X8$ |
| 15) | $dX8/dt = 0.04 * 13 * S6 / (10 + S6) * X8 - 0.02 * X8$ |
| 16) | $dS8/dt = 0.39 * 27 * S1 / (50 + S1) * X4 + 0.34 * 27 * S2 / (50 + S2) * X5 + 0.665 * 12 * S3 / (1000 + S3) * X6 + 0.75 * 20 * S4 / (40 + S4) * X7 * S4 / (S4 + S5) + 0.51 * 20 * S5 / (40 + S5) * X7 * S5 / (S4 + S5) + 0.55 * 13 * S6 / (10 + S6) * X8 - 8 * S8 / (150 + S8) * X10$ |
| 17) | $dX10/dt = 0.05 * 8 * S8 / (150 + S8) * X10 - 0.02 * X10$ |
| 18) | $dS7/dt = 0.181 * 27 * S1 / (50 + S1) * X4 + 0.051 * 27 * S2 / (50 + S2) * X5 + 0.285 * 12 * S3 / (1000 + S3) * X6 + 0.19 * 20 * S4 / (40 + S4) * X7 * S4 / (S4 + S5) + 0.14 * 20 * S5 / (40 + S5) * X7 * S5 / (S4 + S5) + 0.41 * 13 * S6 / (10 + S6) * X8 - 35 * S7 / (7 + S7) * X9$ |
| 19) | $dX9/dt = 0.06 * 35 * S7 / (7 + S7) * X9 - 0.02 * X9$ |
| 20) | $dS9/dt = 0.94 * 35 * S7 / (7 + S7) * X9 + 0.95 * 8 * S8 / (150 + S8) * X10$ |

注) 記号は図1に対応している。

Xc; 有機物, X1; 炭水化物, X2; タンパク質, X4-X6; 菌体 (生成), X7; 菌体 (分解), X8-X10; 菌体 (生成)
 S1; 単糖, S2; アミノ酸, S3; 高級脂肪酸, S4; 酪酸, S5; 吉草酸, S6; プロピオン酸, S7; 水素, S8; 酢酸, S9; メタン

反応生成物の濃度変化を図 2、原料汚泥あたりのメタン発生量を図 3 に示す。尚、原料汚泥の COD 初濃度は、余剰汚泥を $C_5H_7O_2N$ で代表し、供給濃度を 5wt% として求め、有機物初濃度は 100g-COD/L、菌体初濃度は合計で 8g-COD/L として計算した。

中温でのメタン発酵処理の実績値は、滞留時間 20 ~ 30 日でメタン発生量は $10 \sim 13\text{Nm}^3/\text{m}^3$ -スラリー 程度であり、計算結果 (図 3) は滞留時間 30 日で $10\text{Nm}^3/\text{m}^3$ であり、若干小さいがほぼ再現している。

図 2 は、高級脂肪酸の分解が遅いことを示している。

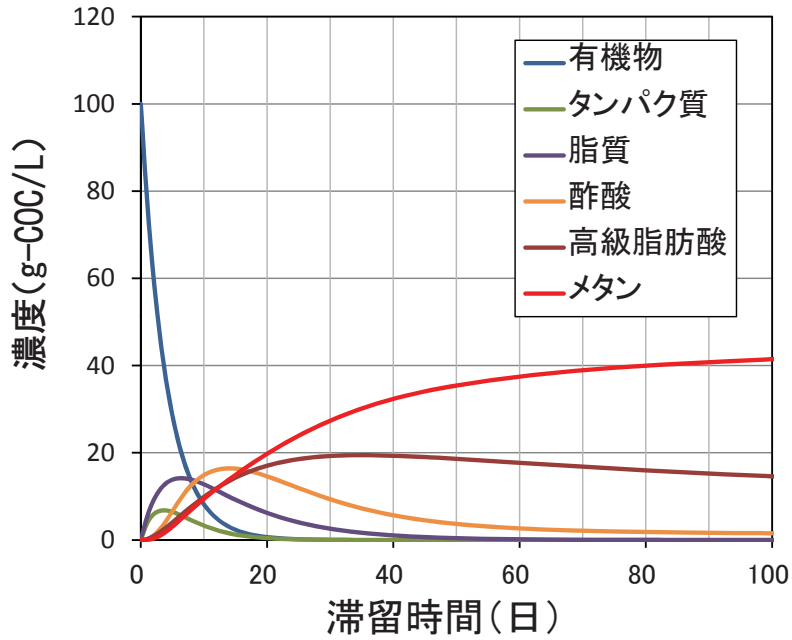


図 2 反応生物の濃度変化 (有機物初濃度 100g-COD/L)

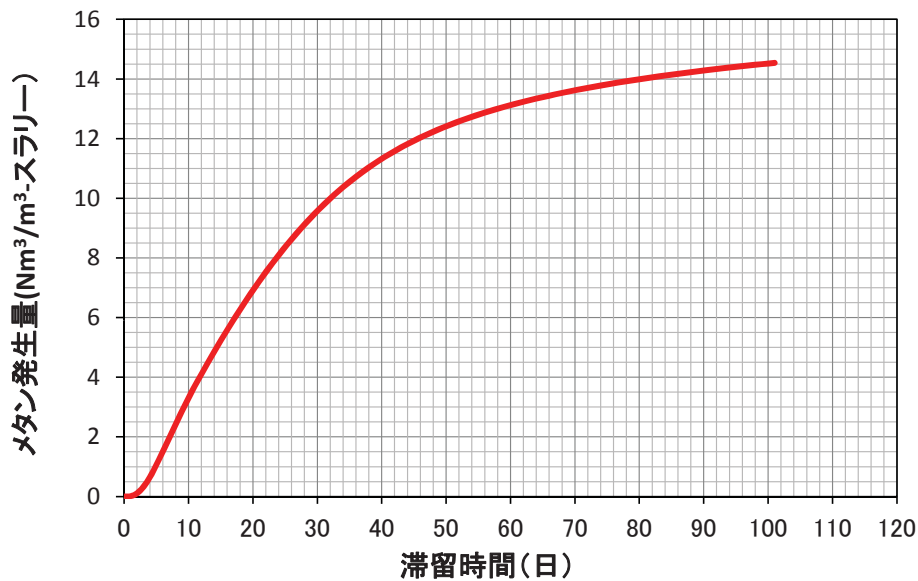


図 3 メタン発生量の推移

メタン発酵のように各成分の値が大きく異なる系では、時間刻み (Δt) を固定した、ルンゲクッタ法による解析では解が発散して簡単には解けない。そのため微分方程式と代数方程式を含む DAE (differential and algebraic equation) システムとなり、“DASPK” プログラムを用いて計算することを試みた。

DASPK を用いて得た解の例を図 4 に示す。DAE システムの時解は発散せずに行われることができるため、メタン発酵システムの解析や公理化検討に非常に有用であることが分かった。今後バイオマス廃棄物の原料組成や発酵条件などを検討し、パラメータを吟味するとともにプロセス解析を進め、合理化検討を進めていく。³⁾

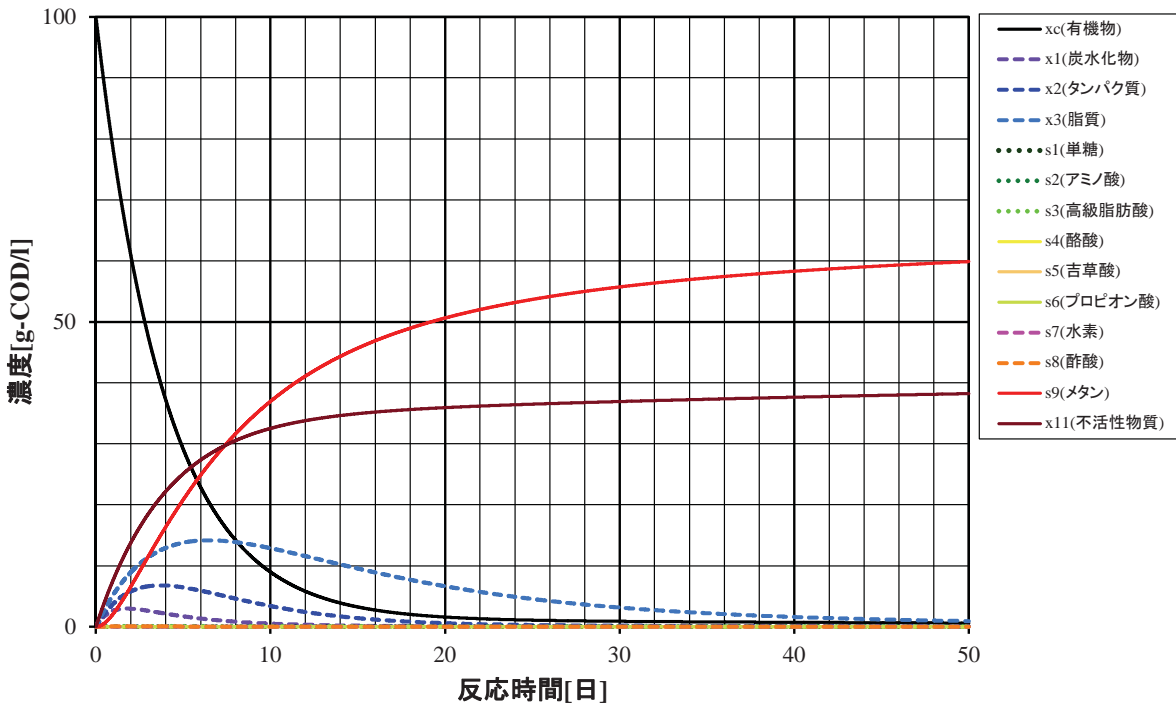


図 4 反応生成物濃度変化 (DAE システム)

2. 合理化の検討内容と結果⁴⁾

各種菌体の初濃度の影響と有機物から炭水化物・タンパク質・脂質に物理的に可溶化する微細化工程の反応速度係数の影響を検討した。

図 5-1 に菌体初濃度の効果、図 5-2 に微細化速度の効果（各々滞留時間 25 日の場合）を示す。これは、例えばメタン発酵後の汚泥（消化汚泥）の一部のリサイクル菌体の初濃度を調整する効果⁴⁾と原料バイオマス廃棄物の微細化や食品残渣を混入して微細化反応速度係数を大きくするなどの効果に関連する。図 5-1, 2 では、菌の初濃度を 2 倍、また微細化速度を 10 倍にすると、メタン発生量は 20% 増加する。同一滞留時間でメタン発生量が 20% 増加すれば製造コストは約 17% 削減する。

嫌気性消化モデルによる反応工学に基づく解析・検討で、合理化検討が可能である。

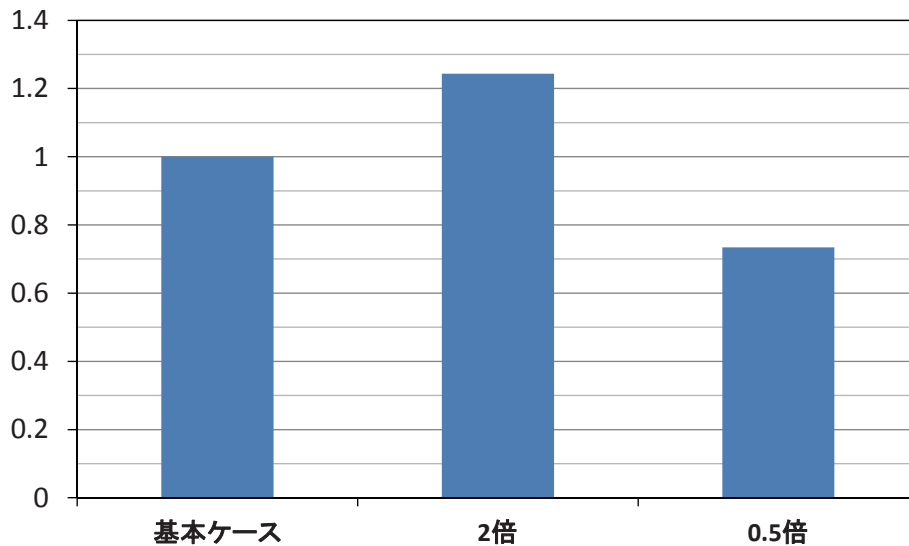


図 5-1 メタン発生量への菌初濃度の効果

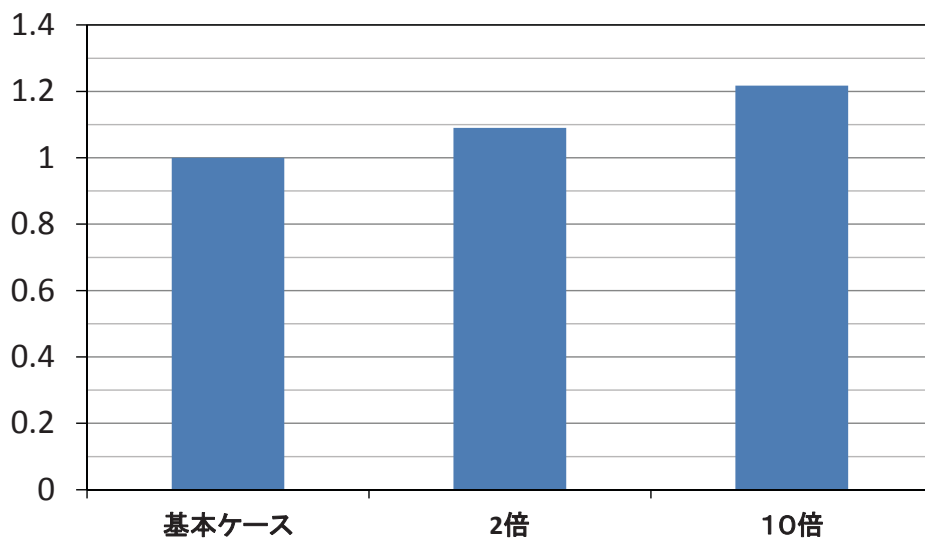


図 5-2 メタン発生量への微細化速度の効果

3. まとめ

メタン発酵に関する嫌気性消化モデル (ADM1) を、DAE システムを用いて解を求めることができた。メタン発酵処理は複雑な反応のため、主として実験による検討で合理化検討など実施されていたが、今後この反応モデルを利用した詳細計算で、発酵槽モデルの検討が容易に行えるようになった。今後バイオマス廃棄物の原料組成や発酵条件などを検討し、パラメータを吟味し、発酵槽の操業条件、発酵システム、反応器様式など化学システムとして検討し、合理化要素、課題、効果を評価しコスト削減の可能性を詳細に検討する。

参考文献

- 1) Anaerobic Digestion Model No.1. Scientific and Technical Report No.13, 2002.
- 2) 野池達也編. メタン発酵. 技報堂出版, 2009, p283.
- 3) 安井他. 状態変数分類による最初沈殿汚泥のメタン発酵プロセスモデル. 土木学会論文集. 2008, Vol.64 (2), p132-143.
- 4) 下水汚泥嫌気性消化のシステム評価およびプロセスの高効率化. 水, 50 (9), 2008, p20-34.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

バイオマス廃棄物のメタン発酵 (Vol. 2)
ープロセスの合理化をめざしてー

平成 27 年 3 月

Methane Production from Biomass Wastes by Anaerobic Fermentation (vol.2):

Reaction Engineering Approach towards the Rational Design

Strategy for Technology Development,

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action

toward Low Carbon Societies,

Center for Low Carbon Society Strategy,

Japan Science and Technology Agency,

2015.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

(平成 27 年 4 月印刷版)

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 上席研究員 三森 輝夫 (Teruo MITSUMORI)
上席研究員 岩崎 博 (Hiroshi IWASAKI)
研究員 加藤 大輔 (Daisuke KATO)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2015 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
