

嫌気性消化反応モデルの検討

㈱東芝重電技術研究所 ○中山 隆 柴崎 和夫

1. はじめに

現在、消化槽の運転管理は、消化槽投入汚泥量および引抜き汚泥量の制御および消化槽温度の制御によって行なわれている。各運転操作を適正に行うことによって、消化槽は安定かつ効率のよい処理が可能となると考えられる。このため、消化槽の管理指標である汚泥濃度、PH、アルカリ度、脂肪酸濃度、ガス発生量などを定期的に測定して、経験的な判断により必要な操作を決定している。この、適正な運転操作方法についてはさらに検討を加え、体系化を図り、1つの技術として確立したものにしておくことが望まれる。しかし嫌気性消化工程は汚泥の滞留時間を20日～30日間と長期間必要とすることや、検討すべき因子が多いので、プロセスの解明やソフト技術の開発をすべてプラント実験で行おうとすると多大な時間、労力、コストがかかると思われる。

このような場合、モデルを使ったシミュレーションによる検討が有効であり、また測定不可能な変数を指標として自動制御を行わなければならない場合にも、モデル計算によって値を得ることができる。

以上により、消化槽の主要指標間の生物化学的反應プロセスを記述するモデルの開発が重要となる。今回、消化槽嫌気性消化工程の数式モデル化を試み、実験データと比較を行った。その結果について述べる。

2. 実験

モデルの作成および検証に必要となるデータを収集するための実験は以下のように行った。実験装置は図1に記す。

- 反応容器 …………… 10ℓポリ容器使用。
- 汚泥の投入／引抜き …… 1日1回定時に
SRT = 15日の条件で行う。
- 投入汚泥および引抜き …… 汚泥の濃度と脂肪酸濃度に関して1週間に2回行う。
- 汚泥の秤量と分析 …… 汚泥の濃度と脂肪酸濃度に関して1週間に2回行う。
- 発生ガス流量の測定 …… 1時間1回ガスマーターでの測定値を印字する。
- ガスのメタン含有率 …… 1週間に2回行うの分析
- 温度条件 …………… 30℃一定に保つ。

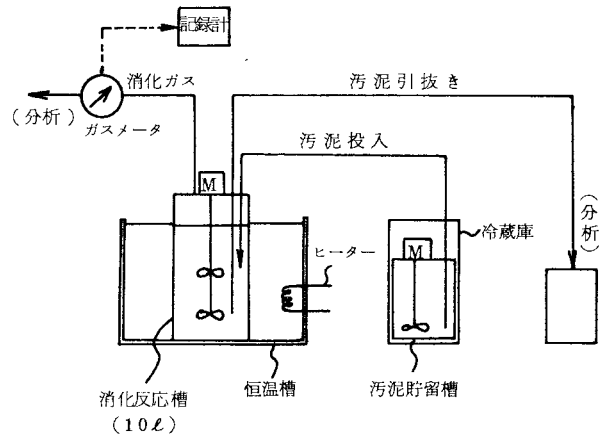


図1. 実験装置

3. 数式モデル

(1) 加水分解過程

消化槽の投入汚泥のうち、可分解性(可溶解性)のものは、それ自身の濃度に比例して溶解していくものといわれている。バッチテストによって汚泥の現存量と分解速度をプロットすると図2の如くになった。(ただしこ

のテストは生汚泥と消化汚泥の比が45:55で、通常の条件と異っているので今回の連続プロセスについての定量的知見を得る用途には使用しない。)従って、汚泥の一部は分解しないあるいは分解速度の非常に遅いものと考えられ、このため消化槽における汚泥濃度変化式は、汚泥全体のものおよび難溶性のもの両方について立てる必要があると考えられる。

$$\frac{dS_s}{dt} = \frac{F}{V} (S_{si} - S_s) - K_h (S_s - S_I) \quad \dots(1)$$

$$\frac{dS_I}{dt} = \frac{F}{V} \left\{ (1 - \alpha) S_{si} - S_I \right\} \quad \dots(2)$$

ここに、 K_h は加水分解速度定数[1/h]、 α は投入汚泥中に占める可溶性汚泥の割合、 S_s, S_I は全汚泥および難溶性汚泥の濃度[g/l]、 F は投入汚泥流量[l/h]、 V は反応槽の容積(汚泥部分)[l]である。また、添字*i*は投入時の値である。

(2) 酸生成過程

この過程は、溶解した有機物が低級脂肪酸に分解される過程で、酸生成菌が関与しているため、通例では菌体と溶解した有機物(基質)との生物化学反応で数式モデルが表わされることが多い。しかし、例えばMonod形のモデルを用いる場合にも、そのパラメタ値は文献により異なる値が与えられており、²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾ 確定的なものではないため、対象に応じてパラメタを定める必要があるであろう。現在、酸生成菌、溶解有機物ともに測定が困難であるため、溶解有機物の前段階である汚泥および溶解有機物の後の段階の脂肪酸濃度の測定結果よりパラメタ推定を行わなければならない。しかし、通常の消化反応では酸生成段階の反応はガス化段階にくらべて早く、槽の滞留時間は十分にあると考えられるので、槽内に溶解有機物の蓄積は起こらず、即座に揮発性脂肪酸にまで分解されるものと仮定することによって、モデル式は次式のように簡略化して扱いを容易にすることとした。

$$R_{AC} = \beta K_h (S_s - S_I) \quad \dots(3)$$

ここに、 β は比例定数[$mmol/g$]、 R_{AC} は揮発性脂肪酸(酢酸基準)[$mmol/l$]生成速度である。すなわち揮発性脂肪酸の生成速度は汚泥の溶解速度に比例する、とおいた。

(3) メタンガス発生過程

この過程ではメタン生成菌が作用しており、生物化学反応の過程は液化段階にくらべてゆっくりと進むため、メタンガス発生量の時々刻々の検出を行うことができ、従ってモデルもより詳細に微生物化学反応に立脚したものととした。

メタンガス発生速度はメタン生成菌の増殖速度の関数である。メタン生成菌と基質である揮発性脂肪酸との生物化学反応にもMonod形^{*)}やAndrews形^{**)}のモデルでの取扱いが考えられるが、基質、微生物ともに多数の種類で構成され、パラメタ値が不安定であり文献上も統一がとれていない現状において、またメタン生成菌の測定が困難である状況下においては、モデルを無理のない定性的記述の可能な範囲で簡略化し、パラメタの探索とその後の修正を容易にしておくほうが実用上有利と考えられる。ここでは増殖式を次式で表す。

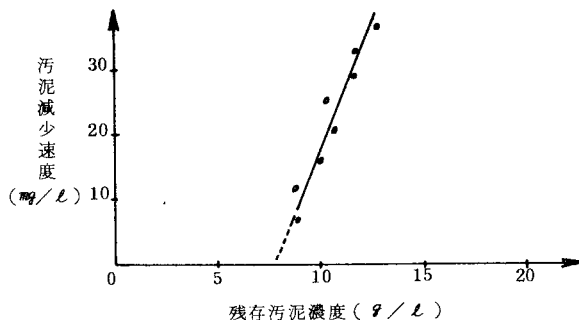


図2. 汚泥残存量と減少速度との関係

$$\frac{dAc}{dt} = \frac{F}{V} (Ac_i - Ac) + R_{Ac} - \frac{1}{Y_m} \cdot \gamma \cdot X \cdot Ac \quad \left(\begin{array}{l} \text{脂肪酸の变化} \\ \text{速度式} \end{array} \right) \dots (4)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{F}{V} \cdot (-X) + \gamma \cdot X \cdot Ac \quad \left(\begin{array}{l} \text{メタン生成菌} \\ \text{の变化速度式} \end{array} \right) \dots (5)$$

ここに、 γ は定数 [$1/\text{mmol} \cdot \text{h}$]、 Ac および X は脂肪酸とメタン生成菌の濃度 [mmol/L]、 Y_m はメタン菌の収率ある。比増殖速度、飽和定数、自己酸化率等はすべて定数 γ に吸収させて考えることとする。文献¹⁾²⁾³⁾によれば飽和定数の値は平均して $300[\text{mg}/\text{L}]$ 程度である。今回測定された酢酸濃度は約 $30[\text{mg}/\text{L}]$ であり、この飽和定数に比し小さい値であるので上記簡略化が可能と考えられる。

メタンガスの発生速度は増殖速度に比例すると考えられる⁶⁾ので次のようにおく。

$$Q_{CH} = D \cdot V \cdot Y_{CH} \cdot \gamma \cdot X \cdot Ac \quad \dots (6)$$

ここに、 D はガス 1 mmol の体積 [L/mmol]、 Q_{CH} はメタンガス発生速度 [L/h] である。

以上の(1)~(6)の数式モデルを用いてシミュレーションを行い実験データと比較した結果を図3-a, b, cに示す。

4. 結果および考察

汚泥濃度およびメタンガス発生速度についてのシミュレーション結果は実測値と比較的良好一致が得られた。一方揮発性脂肪酸の濃度に関してはシミュレーション値と実測値とに十分な一致が得られなかった。この原因については、(1)今回のモデルでは、脂肪酸濃度が大きい場合でも Monod 形のようにメタン生成菌増殖速度の飽和現象を考慮しなかったこと、(2)脂肪酸濃度の測定値が少なかったことによる値のばらつき、が考えられる。ここに、(1)が原因ならば、汚泥投入によって脂肪酸濃度が大きくなってもメタン発生速度は変化しないものと考えられるが、実験結果では、汚泥投入にあわせてその発生量の変化が見られた。従って揮発性脂肪酸についてのシミュ

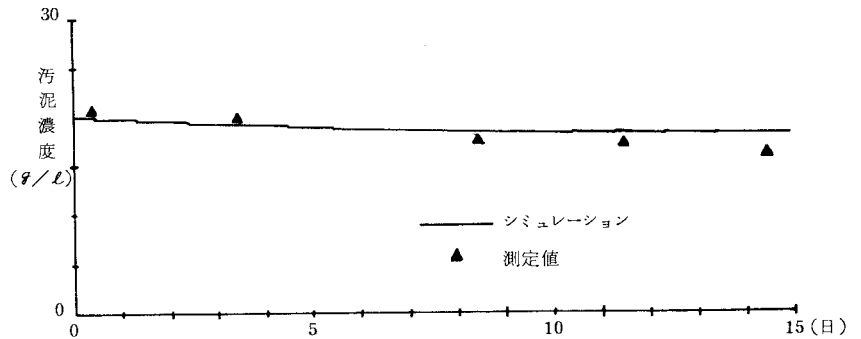


図3-a. 汚泥濃度シミュレーション結果

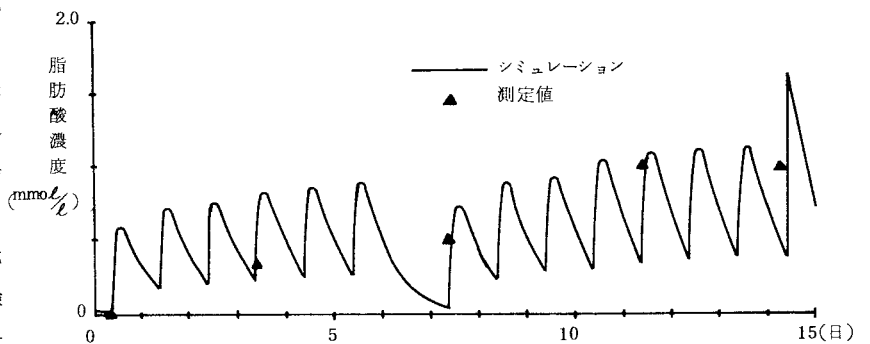


図3-b. 脂肪酸(酢酸)濃度シミュレーション結果

レーション値と測定値とに十分な一致が得られなかったのは主に(2)の原因によると考えられる。

5. まとめ

消化槽における嫌気性反応プロセスを数式モデル化し、実験により得られたデータとモデルシミュレーション結果との比較を行った。プロセス指標は汚泥濃度、脂肪酸(酢酸)濃度、メタンガス発生速度の3つとした。汚泥濃度とメタンガス発生速度については良好な適合性が得られた。

今後、さらに多くの測定を行い、他のデータによるモデルの検証や改良、さらには他の指標(PH等)の数式モデルの開発を進め、モデルのより向上と発展を図る予定である。

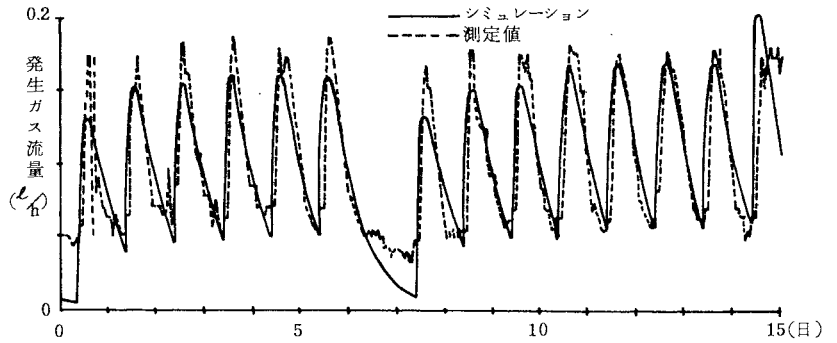


図3-c. メタンガス発生速度

6. 参考文献

- 1) 張ら, 「嫌気性消化のメタン生成相に及ぼす基質負荷および滞留時間の影響について」, 土木学会第35回年講(1980)
- 2) Lawrence, A.W. et al., 「Unified Basis for Biological Treatment Design and Operation」, Proc. A.S.C.E. SA3, 757(1970)
- 3) S. Ghosh et al., 「Kinetics of substrate assimilation and product formation in anaerobic digestion」, J. WPCF, 46, 4, p748(1974)
- 4) Massey, A.L. et al., 「Phase separation of anaerobic stabilization by Kinetic controls」, J. WPCF 50, p2204(1974)
- 5) 松本ら, 「二相嫌気性消化法における酸産生過程の最適滞留時間に関する研究」, 衛生工学討論会講演論文集, 14, p30(1978)
- 6) Stephen P. Graef et al., 「Mathematical Modeling and Control of anaerobic digestion」, AIChE SYMPOSIUM SERIES, WATER-1973, p101

7. 注*) Monod-Heukelkian 形増殖式
$$\frac{dx}{dt} = \frac{\hat{\mu}S}{K_s + S} X - bX, \quad \frac{ds}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{\hat{\mu}S}{K_s + S} X$$

***) Andrews 形増殖式
$$\frac{dx}{dt} = \frac{\hat{\mu}}{1 + K_s/S + S/K_I} X, \quad \frac{ds}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{dx}{dt}$$