

高温好気法処理における自動計測システムの構築及び数理モデルの作成

楊瑜芳*1、山口恭右*2、稲森悠平*3、原田茂樹*4、内藤正明*4

*1 茨城県科学技術振興財団

茨城県つくば市千現2丁目1番6

*2 長野県伊那建設事務所

長野県伊那市大字伊那 4387

*3 国立環境研究所

茨城県つくば市小野川 16-2

*4 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻

京都市左京区吉田本町

概要

新たな有機廃棄物処理法である高温好気法についての適正な設計・操作のためには、高温好気法反応の内部メカニズム、物質収支を捉えることが必須である。本研究では、高温好気反応過程において実験データ（温度、酸素濃度、重量など）を精度良く、的確に収集するための自動計測システムを構築し、回分反応実験を行った。その自動計測データにより、精密な物質・エネルギー収支解析を行い、反応過程のモデリングを試みた。

キーワード

高温好気法、自動計測、モデリング

1. はじめに

下水汚泥の減容化方法として、高温好気法処理が注目されている。その処理法の特徴は、微生物による有機物の分解によって放出される熱により、反応槽を 45~65℃に保ち、生物反応を進行させるものである。この高温好気法における下水汚泥処理には、投入有機分の9割以上がCO₂になることを既に報告した¹⁾。しかし、生物処理法である高温好気法の運転方法や制御系については不明な点が多く、合理的な運転管理を困難なものにしているが、このような生物反応プロセスを、適切に運転するためには、特にプロセスの状況を把握する連続計測が不可欠となる。そのため、本研究では、高温好気反応過程における自動計測システムを構築し、その自動計測データにより、できるだけ精密な物質・エネルギー収支解析を行い、それをを用いた反応過程のモデリングを試みたことを目的とした。

2. 実験装置および方法

図1に反応槽、計測機器、パソコン、シリコンチューブを組み合わせて作成した実験装置の全体図を示す。反応槽には耐熱性のプラスチック容器を用い、有効反応容積を1ℓとした。容器の底部に多孔板を付け、通気がなるべく均一になるようにした。通気量は有機物分解の酸素需給量と水分蒸発のための送気量を考慮し、300ℓ・min⁻¹・m⁻³に設定した。

本実験の処理対象物質は京都府相楽郡精華町祝園処理場の濃縮下水汚泥とした。濃縮下水汚泥の分析値の平均は含水率が95.9%、強熱減量が82.7%、pHが6.5~7.0、発熱量が $4500\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{ds}^{-1}$ であった。実験開始時には、反応槽内混合物の含水率を55%とし、またC/W(投入試料の総発熱量の理論値/投入試料に含まれる水の総蒸発熱の理論値)を1.2となるように熱源として廃食用油を添加した。廃食用油の発熱量は $9500\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{s}$ であった。実験のサイクルはほぼ2日に1回で、反応槽内の酸素消費量がほぼなくなったところでデータ計測を停止しサイクルの終了とした。

3. 計測システムの構築

図1に示すように反応槽は乾燥器内に設置され、反応系を断熱系とみなせるようにするため、保温部全体の温度はヒータをON-OFF制御し、反応槽内温度よりも常に 1°C 以内で低くなるようにした。これは有機物分解で得られたエネルギー収支をより精度高く計算するためである。同時に、反応槽の下部および中部には、温度センサーを横から差し入れ、通気温度と反応温度を測定した。酸素濃度の測定について、酸素センサーが温度と湿度に影響されるため、通気及び排気中水蒸気をシリカゲルで除去して室温で酸素濃度を測定した。しかし、温度センサー、酸素センサーはアナログ出力しか持っていないため、これらはデータロガー(横河電機 DA100)に接続し、AD変換を行って出力したものをコンピューターに1分毎に連続的に記録した。

また、反応過程における有機物、水分の物質収支を得るため、反応槽を重量計のフックを用いて吊り下げ、そのデジタル出力の重量計をコンピューターと接続し、連続的に重量を測った。

図2にはソフトウェアとして採用した「HP VEE」によって作成した計測、制御、通信プログラム全体のフローチャートを示す。ソフトウェア「HP VEE(Visual Engineering Environment)」はHewlett® Packard社によって開発された、言語によるプログラミング無しに自動計測・制御システムを構築でき、オブジェクト指向の総合化システム開発環境ソフトウェアである。このソフトウェアの採用によって、計測システムの

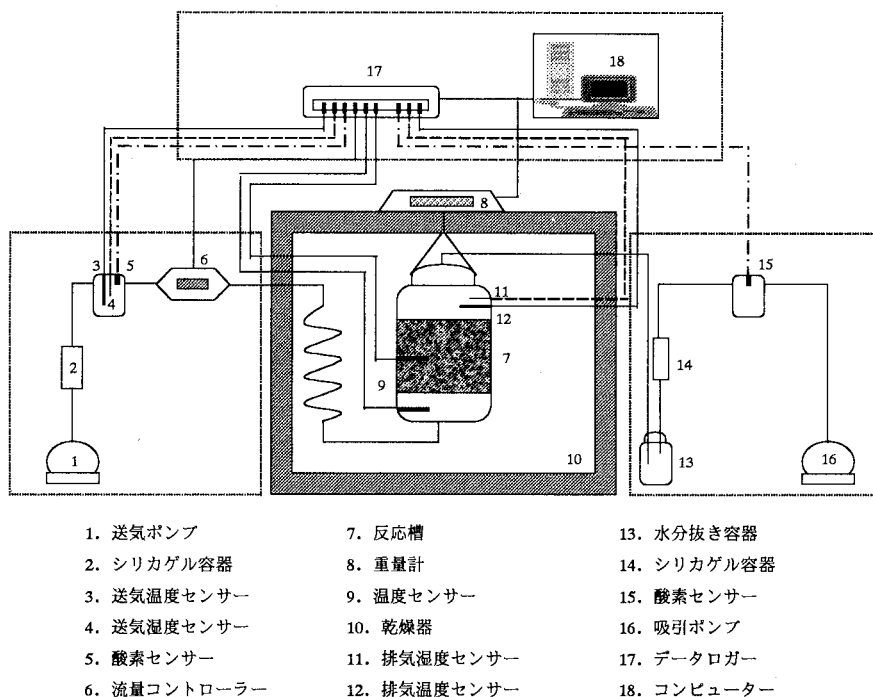


図1 実験装置

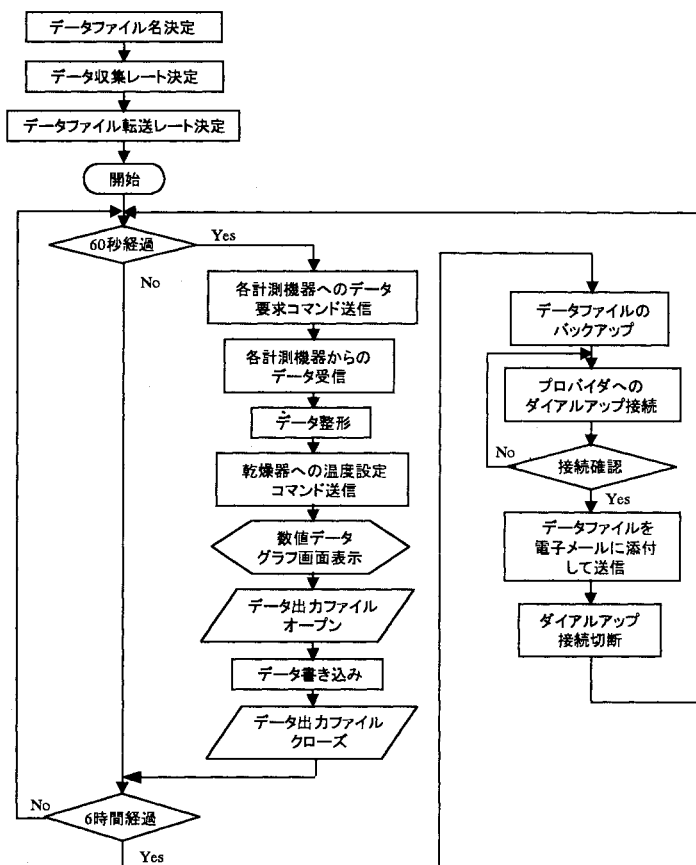


図2 計測、制御、通信プログラム全体のフローチャート

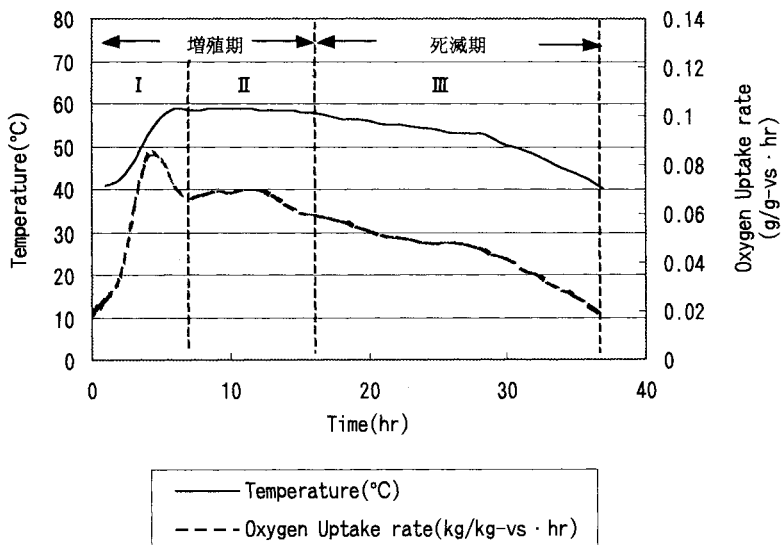


図3 反応過程における温度、酸素消費速度との経時変化

開発時間が短縮されたうえ、テストを重ねることで安定して作動させることができた。特に、電子メールを利用したデータ通信方法を確立したことにより、遠隔地におけるデータ収集、監視が可能となった。

4. 実験の結果

図3に反応温度と酸素消費速度の経時変化を示す。反応初期の酸素消費速度は速やかに上昇し、反応温度が50℃以上に達した後大きくなり、活発な有機物分解が起こっている。さらに分解が進むと、原料中の易分解性有機物が分解消失して、酸素消費速度は低下し始める。基質である易分解性有機物の減少により発生熱量よりも排気による損失熱量が上回るようになり、温度が次第に低下するという経過を示している。これらによれば、反応過程はI温度上昇期、II温度安定期、III温度減衰期の三つの段階に分けることができると想定される。

5. 高温好気反応モデリング

5.1 モデルの構築

上述の結果から得られた高温好気反応の現象は、微生物反応を伴う熱・物質同時移動現象であり、また高温好気反応の場合、投入した試料は高濃度有機物であるため、槽内有機負荷が高く、微生物の増殖速度は有機物濃度に関係なく、微生物量に比例する²⁾と考えられる。したがって反応モデルとしては、一次反応式が適合すると思われる。ここで、数学的取り扱いの都合上、以下の仮定を設ける。

- 1) 有機物質は槽内の担体に均一に分散している。
- 2) 空気は槽底部から均一に送入され、槽内任意空間で好気状態になる。
- 3) 反応は槽内の担体で均一に起こる。
- 4) 反応過程で発生するガスはCO₂、H₂Oのみである。
- 5) 微生物の主要な栄養源は炭素である。微生物反応過程では、通常、菌体の増殖、死滅が同時に起こるが、反応初期では基質量が十分豊富であることによって菌体増殖量が優勢となるため増殖期であり、反応終期では細菌の死滅量が優勢となるため死滅期である。

以上の仮定のもとに、槽内の基質（炭素）、水分の物質収支式、熱収支式は以下のごとく示される。

a) 微生物量の収支について

$$\text{増殖期} \quad \frac{dX}{dt} = \mu X \quad (1)$$

$$\text{死滅期} \quad = -k_d X \quad (2)$$

ただし、X：微生物濃度 [kg-C/kg-ds]、 μ ：比増殖速度 [h⁻¹]、t：反応時間 [h]、

k_d ：死滅係数[h⁻¹] である。

b) 基質（炭素）量の収支について

$$\text{増殖期} \quad \frac{dS}{dt} = -\frac{\mu}{Y} X \quad (3)$$

$$\text{死滅期} \quad = -k_m X + k_d X \quad (4)$$

ただし、 S : 基質濃度 [kg-C/kg-ds]、 Y : 菌体収率 [kg-C/kgC]、 k_m : 維持係数[h⁻¹]である。

c) 水分物質収支について

$$\frac{dW}{dt} + \beta \frac{dS}{dt} = \frac{M_w}{22.4} q (H_{out} - H_{in}) \quad (5)$$

ただし、 W : 含有水分量[kg/kg] q : 供給乾燥空気流量[m³/hr]

β : 単位基質消失当りの生成水質量 0.56 [-]³⁾

H_{in} : 送気中湿度[kg-H₂O/kg-air] H_{out} : 排気中湿度[kg-H₂O/kg-air]

M_w : 水の分子量 [kg/kg-mol]である。

d) 反応槽全体の熱収支について

基質の分解による発生熱量 = 排気などによる放熱量

$$Q_r = Q_y + Q_m + Q_w + Q_{wl} + Q_s + Q_a + Q_l \quad (6)$$

ここに、 Q_r : 反応による発熱量変化 ($h_s dS/dt$) (7)

Q_y : 菌体合成による熱量変化 ($h_s dX/dt$) (8)

Q_m : 乾燥担体顕熱量変化 ($C_m M_0 dT/dt$) (9)

Q_w : 水分顕熱量変化 ($C_w W dT/dt$) (10)

Q_{wl} : 水蒸気潜熱変化 ($h dW/dt$) (11)

Q_s : 水蒸気顕熱量変化 ($C_w (T - T_a) dW/dt$) (12)

Q_a : 空気顕熱量変化 ($q C_a (T - T_a)$) (13)

Q_l : 装置の熱損失 ($KF(T - T_a)$) (14)

である。ただし、式(7)～式(14)中の記号は

h_s : 有機物単位乾燥質量当たりの発生熱量 (kcal/kg)、 dS : 有機物の変化量(kg)、 h : 水の蒸発潜熱 (569kcal/kg)、 C_m : 担体の比熱 [0.33kcal/(kg·°C)]、 C_w : 水の比熱 [1.00kcal/(kg·°C)]、 C_a : 空気の比熱 [0.33kcal/(m³·°C)]、 q : 通気量(m³/h)、 M_0 : 乾燥担体の質量(kg)、 dW : 担体中水分変化量(kg)、 dT : 反応槽内の温度変化(°C)、 T : 平均反応温度(°C)、 T_a : 外気の平均温度(°C)、 K : 反応槽の総括熱貫流係数 [kcal/(m²·h·°C)]、 F : 反応槽の総表面積(m²)である。

5.2 反応温度計算値と実測値の比較

高温好気法においては、含水率が最適な値に設定された場合、反応速度に最も影響を与える因子は温度である。温度は適当な初期値を用いて開始し、増殖期と死滅期におけるそれぞれの計算式を用いて実施した。その結果は図4に示すが、実線が計算値を、プロットは実験値を示している。作成したモデルによ

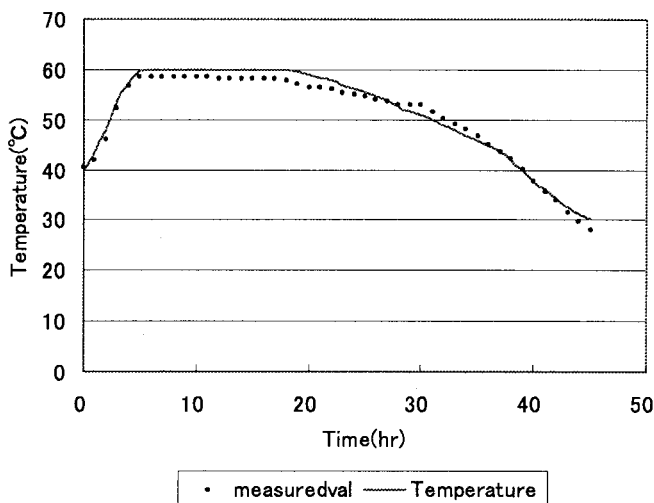


図4 温度の実測値とシミュレーション値の比較

る反応温度変化のシミュレーション結果は実測値とよく適合することがわかる。計算した反応温度と実測値との比較により、諸制御因子と反応条件の定量的把握、例えば高温状態に維持するための制御因子の探索案が可能になると考えられる。

6. まとめ

本研究では、高温好気反応過程において実験データを精度良く、的確に収集するための自動計測システムを構築し、それを用いて回分反応実験を行い、次の結果が得られた。

- (1) 連続計測可能なように設計した反応装置系と「HP VEE」によって作成した計測、制御システムにより、温度、酸素濃度、重量を連続的に遠隔計測することができた。
- (2) 小規模実験反応槽における保温部全体の温度はヒータを ON-OFF 制御し、反応槽内温度よりも常に1°C以内で低くすることにより、熱収支をより精度高く求めることができた。
- (3) 反応過程は増殖期、死滅期に分けられ、それぞれの反応モデルを構築することが有効であることがわかった。
- (4) 増殖期と死滅期の二過程からなる反応モデルにより反応温度を計算した結果は、実測値とよく適合することがわかった。

参考文献

- 1) 楊瑜芳、山口恭右、津村和志、内藤正明、下水汚泥の高温好気処理法における熱収支に関する研究、水環境学会誌 Vol.22, No.5, 383-388(1999)
- 2) 高林宏成、金谷利憲、辛島邦彦、コンポスト発酵槽の理論解析(1)、環境技術 Vol.11, No.2, 94-100(1982)
- 3) 久保田宏、コンポスト化反応の熱収支、環境技術 Vol.9, No.3, 200-206(1980)