

有機廃物循環システム形成を目指した微生物発酵プロセスの最適選択と操作

Optical Selection and Operation of Microbial Fermentation Process for the Formation of Organic Wastes Recycling System

楊 瑜芳* ・ 津村和志* ・ 内藤正明*

Yufang YANG, Kazushi TSUMURA, Masaaki NAITO

ABSTRACT; The purpose of this study is to establish a organic wastes recycling system of environment low mode. The first stage to realize this circulation system, is to suggest the recycling and utilization of organic wastes from food production processes. The aerobic fermentation method such as composting and thermophilic oxic process are considered as important technologies, which effectiveness and operation were certified under series experiment. Based on the result of the tests, a suggestion of organic wastes recycling system and its design and operation is offered. Also, the stability analysis of microbial fermentation process was conducted by determining the relationship between temperature and calories production rate.

KEYWORDS; Microbial Fermentation Process, Compost, Thermophilic oxic process, Recycling system

1.はじめに

今日の大規模工業社会における、物質は「生産→流通→消費→廃棄」という一過型の流れを形成し、自然生態系の「分解」、「再生」に相当するプロセスを欠き、廃棄から生産や流通へもどる経路が欠落している。そのため、多大の資源消費と環境負荷を生ずることが避けがたい状況にある。このような資源消費と環境負荷の増大を回避する鍵となる手段が循環であるといえる¹⁾。本研究は循環社会を実現するための第一歩として、特に食品由来の有機廃物を対象にその循環系再生のあり方を提案しようとするものである。そのためにここではまず、重要な要素技術として好気微生物の発酵法として「コンポスト化/高温好気法」に着目し、その適用条件と適正操作の方法を、各種の原材料特性に関する実験に基づいて見出した。次いで、その結果を踏まえて、これら発酵法を組み込んだ有機物循環システムのあり方と、その設計・操作に関して新たな提案を行った。

2.有機物循環システムの考え方とキーテクノロジー

2.1 環境調和型有機物循環システム

食品系の有機物の流れも、かつては自然界の土壌、水、大気間において自然生態系の循環メカニズムに沿って適切に回っていたが、いまではそれは完全に崩れている。その原因は様々であるが、国際貿易による安価な飼・肥料の流入がその第一である。さらに大都市への人口集中により発生源が大量集中し、その廃物

*:京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻

Div. of Global Environment Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

This work has been supported by the CREST (Core Research for Evolutional Science and Technology) of Japan Science and Technology Corporation (JST).

を受け入れる農畜部門が遠隔化したことも大きな要因である。それ故、改めて地域における物質循環の再生をめざすには社会システムを総体として再生することが前提となるだろう。

本研究で提案するシステムは、図1に示すような「生活系」―「食品製造業」―「畜産業」―「農業」間を全体として繋ぐような有機物循環である²⁾。

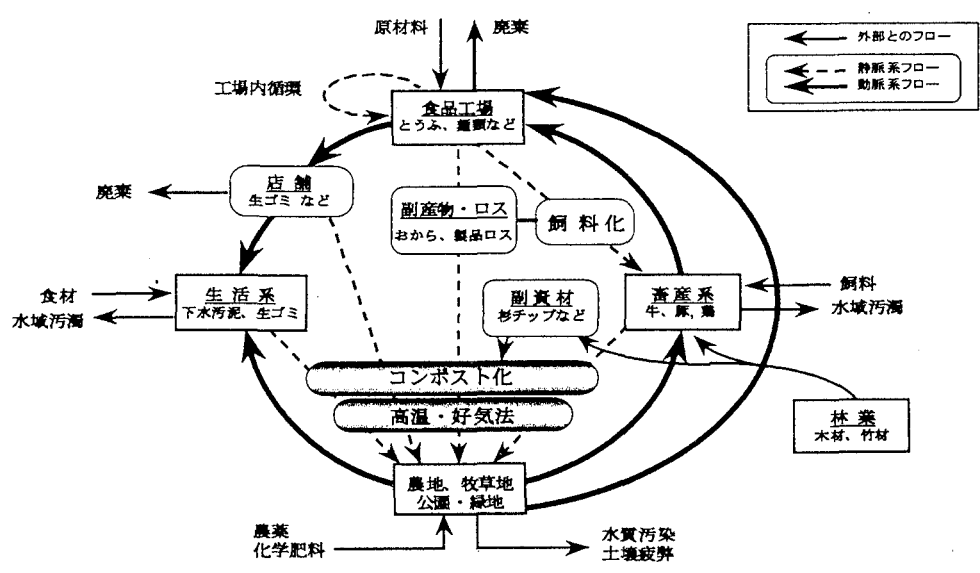


図1 有機性物質循環システム

2.2 新たな要素技術(キーテクノロジー)の意義

以上のような循環システムが適正に計画されるためには、発生する各有機物を最も有効に「分解」、「再生」することのできるの要素技術の開発と、これを組み込んだ最適なシステム構成を見出すことである。そのような環境調和型システム形成のためには要素技術の中核(キーテクノロジー)として、「微生物プロセス(特にここではコンポスト化と高温好気法)」が不可欠であると考えられる。その場合、この分解・再生プロセスの特性に最も適するように、生活系や食品産業からの多種多様な有機物を組み合わせ、これを適正配分することが重要な設計・操作要因となる。

「コンポスト化法」は、家畜糞尿や生ごみのような生物系の有機性固体廃棄物を対象物として、農業を取り込んだ地域循環システムを想定した場合、その中核技術として位置付けられる。コンポストとは堆肥のことであり、昔から農家でつくられていた。食品系廃棄物および下水汚泥の中には、易分解性有機物質が多い。これらをそのまま多量に緑農地に施用すると急速に分解され、土壌中の酸素の欠乏をまねく。これは発芽や根ぐされの原因となるので、コンポスト化により不安定な性状の有機物をあらかじめ分解、除去して安定化させる。しかし、肥料の需要量は季節に応じて変動するため、コンポスト施設の休止・稼働率低下による生産コストの上昇が予想される。また有機廃棄物の再利用ルートが恒に安定的に確保されるとは限らない。そこでこれを補完するもう一つの要素技術として、「高温好気法」に注目し、コンポストの非需要期はこれによる有機物の分解・減容を行う。そして、その処理後混合物を高品質土壌改良材として資源化する技術の必

要性が認められる。

「高温好気法」の原理は微生物により有機物を分解することであり、このプロセス自体はコンポスト化法と同様であるため、コンポスト化の処理施設がそのまま利用できる。筆者らはすでに高温好気法による下水汚泥の処理を行い³⁾、その実験結果より、高温好気法処理では有機廃棄物中のカロリーと水分との比率が、非常に重要なファクターであることを見出した。すなわち、高濃度有機物を好熱性細菌により完全分解し、同時に廃棄物中の水を全部蒸発させるためには、装置内に投入されたものの有機分が持つエネルギーと、それが含有する水の蒸発潜熱のバランスが反応持続の必須条件であるということである。

3.「コンポスト化／高温好気法」の反応モデル

図1のような循環システムにおいて有機性物質の物性、形状、成分に対応した適正な処理・再利用技術を選択するためには、それぞれのプロセスの数理モデルが必要である。

前述のコンポスト化および高温好気法は生物反応であり、その両者の反応過程の著しい特徴は熱の発生である。この熱は原料中の有機物の分解によって発生するものであり、実はこの発熱量と放熱・吸熱量のバランスにより決まる反応温度がコンポスト化状態か高温好気反応状態かの発酵条件を支配する因子である。したがってここでは、原料の Hs/Hw 比(カロリー/水の蒸発熱)を、コンポスト化あるいは高温好気法の特性を表す主要な操作変数として採用する。

コンポスト化および高温好気法におけるバッチ式の熱収支解析に必要な基礎式を次表に示す。

	計算式
(a)有機物の分解熱(kcal)	$\Delta Q_r = h_s \cdot \Delta S$
(b)温度上昇に要する熱量(kcal)	$\Delta Q_m = C_m \cdot M \cdot \Delta T$
(c)細胞を合成する熱量(kcal)	$\Delta Q_x = h_s \cdot \Delta X$
(d)水の蒸発潜熱(kcal)	$\Delta Q_{wl} = h_w \cdot \Delta W$
(e)水が持ち出す熱量(kcal)	$\Delta Q_s = C_w \cdot (T - T_a) \cdot \Delta W$
(f)空気が持ち出す熱量(kcal)	$\Delta Q_a = q \cdot C_a \cdot (T - T_a) \cdot \Delta t$
(g)発酵槽からの放散熱(kcal)	$\Delta Q_l = K \cdot F \cdot (T - T_a) \cdot \Delta t$

ここで、 h_s ：有機物単位乾燥質量当たりの発生熱量(kcal/kg)； C_m ：反応物の比熱 [cal/(kg・℃)]； C_w ：水の比熱 [kcal/(kg・℃)]； h_w ：水の蒸発潜熱(kcal/kg)； C_a ：空気の比熱 [kcal/(m³・℃)]； C_w ：水の比熱 [cal/(kg・℃)]； S ：有機物の質量(kg)； M ：反応物の質量(kg)； X ：微生物の質量(kg)； W ：反応物中水分量(kg)； T ：反応槽内の温度(℃)； T_a ：外気の温度(℃)； q ：供給空気の通気量(m³/h)； K ：反応槽の総括熱貫流係数 [kcal/(m²・h・℃)]； F ：反応槽の総表面積(m²)； t ：反応時間(h)。

系全体の熱収支は

$$\Delta Q_r = \Delta Q_m + \Delta Q_x + \Delta Q_{wl} + \Delta Q_s + \Delta Q_a + \Delta Q_l \quad (1)$$

である。

また、反応過程において菌体収率を Y とする。

$$\Delta X = -Y \Delta S \quad (2)$$

反応槽内にある全質量は全有機質量、全微生物量、全水分量および全非堆肥化物量の和とする。

$$M = S + X + W + U \quad (3)$$

これらの基礎式はコンポスト化および高温好気法反応過程に共通であり、コンポスト化と高温好気法それぞれの差異を与えるのは、次の様な仮定である。

(i)コンポスト化について

$$(\text{仮定 1}) \text{ 初期菌体量はほとんどゼロである。 } X_0 = 0 \quad (4)$$

(仮定 2) 1 サイクル反応後、有機物をすべて燃料として使いきってしまう。S=0 (5)

(仮定 3) 原料が持つ発熱量と反応した発生熱量はほぼ等しい。

以上の仮定の下に式(2)～(5)を式(1)に代入して積分すると、(1)式から、Hs/Hw 比が次のように導かれる。

$$\frac{Hs}{Hw} = \frac{hsS}{hwW} = \frac{hs(1+R)}{hwWm} \cdot \frac{(1-Wt)\{Cc(T-T_0)+H'\} + (Wi-Wt)\{Cw(T-Ta)+hw\}}{(1-Y)\{Hs(1-Wt)-HwWt-Cw(T-Ta)Wt\}} \quad (6)$$

$$\text{ここに、} H' = (Qa + Ql) / Mi \quad (7)$$

で示される。

ここで、返送比 $R = \frac{w_m - w_i}{w_i - w_t}$ であり、Wm, Wi, Wt はそれぞれ投入原料の含水率、槽内反応開始時の含水率、および製品の含水率である。

(2)高温好気法について

(仮定 1) 1 サイクルの余剰汚泥の発生量が極めて少ないため、 $\Delta X=0$ とする。

(仮定 2) 有機物をすべて燃料として使いきってしまう。

以上の仮定の下に、反応槽内に投入された原料が持つ発熱量と原料中の水蒸発潜熱の Hs/Hw 比は

$$\frac{Hs}{Hw} = \frac{hsS}{hwW} = \frac{rCc\Delta T + Wm\{Cw(T-Ta)+hw\} + (Qa + Ql) / Mm}{hwWm} \quad (8)$$

で示される。

ここで、投入比 $r = \frac{Mi}{Mm}$ であり、Mm は投入原料の質量、Mi は反応開始時の総質量である。

4.実験データとその解析

4.1 反応の3領域の同定

コンポスト化および高温好気法処理の実験データを用いて、式(6)および式(8)を計算した結果を図 2 に示す。この図から、

①コンポスト化の場合、反応が適切に進行し、製品含水率が 30% になるためには、原料含水率 60% では原料の Hs/Hw 比を少なくとも 1.5 以上、原料含水率 70% では原料の Hs/Hw 比を 1.8 以上にすることが分かる。

②高温好気法における原料の有機物が十分に分解し、原料の水分が十分に蒸発するための原料の Hs/Hw 比は 2.2 以上に必要があるが、原料含水率が 80% 以上になると、原料の Hs/Hw 比は 1.7 以上でも可

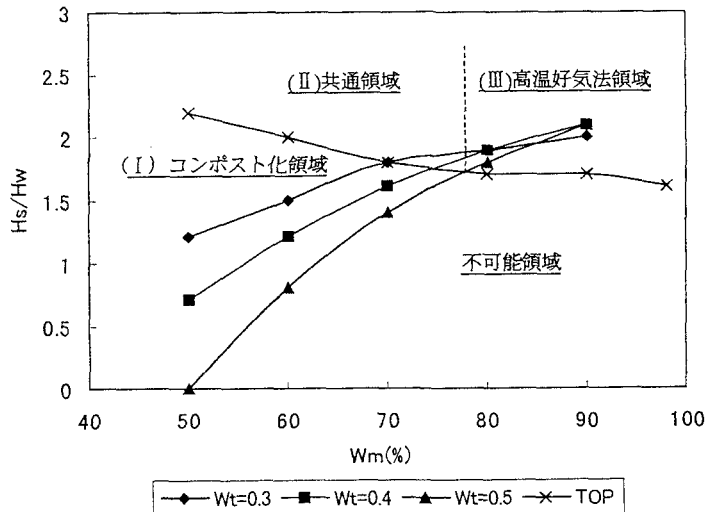


図2 コンポスト化および高温好気法における Hs/Hw 比と原料含水率との関係

能であることが分かる。

ところが図3では次の三つの領域が示唆される。

- ①含水率 50%~70%の原料については、 H_s/H_w 比がⅠの範囲に含まれると、コンポスト化が可能で、高温好気法は困難である。
- ②原料含水率が 50%~78%、 H_s/H_w 比が 1.9 以上になるⅡの領域では、コンポスト化も高温好気法処理も可能である。
- ③Ⅲの領域で含水率 80%の高水分原料については、コンポスト化の発酵条件の限界を超え、反応ができないと言われる⁴⁾。この場合は高温好気法が適正な処理方法であることが分かる。

4.2 安定性の解析

以上のような三つの領域が形成されることの意味を、反応プロセスの安定性解析によって考察してみよう。コンポスト化および高温好気法の反応過程では、微生物の働きによってバイオマスの有機物が分解され、この際発熱する。したがって、試料の温度上昇が微生物反応の進行速度に比例する。そこで、温度上昇と反応速度の関係に着目し、反応の安定性を検討する。

まず反応速度の温度依存性については、岩渕らが家畜糞尿を試料にコンポスト化実験した結果、反応温度の上昇とともに、熱発生速度に2峰性があることを明らかにしている⁵⁾。その結果から、45℃まで温度を上昇

させる微生物群と、65℃まで温度を上昇させる微生物群の二種が存在することを指摘している。

一方、装置内温度は上記の反応発熱(a)と、装置放熱(b~g)のバランスによって決まるので、前述の熱収支計算式より、発熱量(a)と放熱量(b~g)を求めると、図3のように両者の交点 h, k が存在する可能性がある。この2点はいずれの交差の条件より、“安定平衡点”である。つまり、温度範囲によって二つの異なる安定条件が存在するが、まずhのところでは、中温性微生物が有機物を分解した発熱量は温度上昇とともに放熱量と等しくなる。しかし、それ以上の温度になると中温性微生物から高温性微生物へ変遷し、一層発熱が高まって 60℃近辺の温度まで微生物種類と量によって反応状態が変化していくことになる。また、木村らには有機物減少速度の極大値がそれぞれ 45℃~50℃および 60℃~65℃の温度範囲にあることを報告している⁶⁾ので、h, k の安定状態はそれぞれ“中温性微生物”、“高温性微生物”によって引き起こされていると予想される。この二種の安定平衡点が存在するため、初期条件の設定によって、h か k のいずれかの平衡点に到達させることが可能である。この初期条件が本実験で示した H_s/H_w 比によって決まるので、結局上述のⅠ、Ⅱ、Ⅲ領域が、図2のⅠ、Ⅱ、Ⅲに対応すると考えられる。したがって、反応槽を人為的にコントロールせず、試料自ら発生する熱量(即ち初期 H_s/H_w)によって熱バランスを取り、コンポスト化および高温好気法処理の選択し、かつ自己制御が可能であると考えられる。

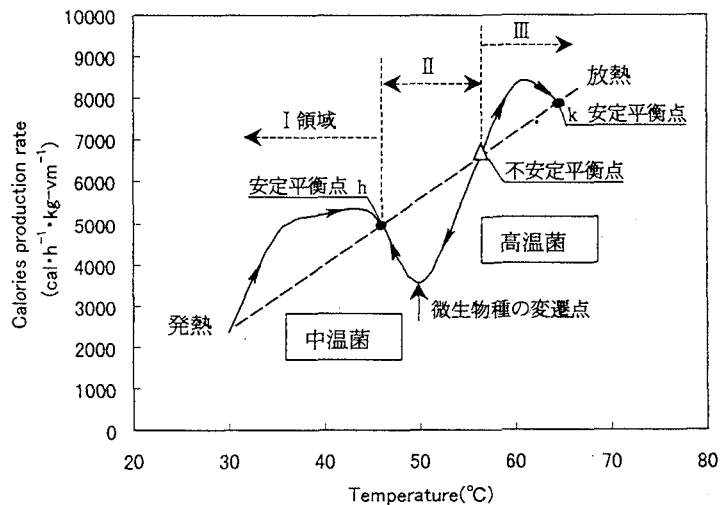


図3 反応槽内温度によって熱の変化過程

5. 代表的な有機物質に対する「コンポスト化／高温好気法」の選択

循環系において様々な有機物があり、これらは堆肥にするか、完全に分解して残渣を土壌改良材として使うかの選択が必要である。ここでは代表的な物質を実対象として二つのキーテクノロジーの選択を検討する。

食品工場からの主要廃物としておからの成分の乾物含量は、タンパク質 25%、脂質 19%、炭水化物 51%、灰分 4%であり、栄養分は豊かであり、かつは食品として、また家畜の飼料、作物の肥料として有効に使われていた。しかし、おからの需要が減少したため、その処理・再利用プロセスの導入が必要となっている。おからの水分は 81.1%であり、コンポスト化の原料として困難であるため、副資材を添加するか、あるいは乾燥させることが必要である。また、タンパク質が多く窒素含量が高いため、炭素率の高い素材と組み合わせることも有効である。そうすると、原料の含水率が 80%以下、Hs/Hw 比が 1.9 以上になり、図 2 のⅡの領域に入ることが分かる。さらに、水分含量の高いおからは、容易に腐敗するため貯蔵が難しく、また生産者は零細企業が多く、生産されたものを直ちに処理・処分するのは困難である。このような状況から見て、高温好気法装置を用いた各生産工場毎でのオンサイト処理が大いに有効であると考えられる。

6. 結論と今後の展開に向けて

地域において発生する有機物の質、量に応じて、「コンポスト化」または「高温好気処理法」を選択するためには、そのメカニズムを解明し、モデル化を行う必要がある。本研究では、その第一歩として重要な設計因子として有機物の「Hs/Hw 比」を同定し、これを操作変数として処理プロセスの選択が可能であることを示した。なお、新たな技術である高温好気処理法はコンポストの非需要期に有機物の分解法として極めて簡便で、低コストの方法であるため、このような要素技術の特性把握と、これを組み込んだ循環系の形成は有意義であると考えられる。

ただし、有機物循環システムは処理能力だけで考えるのではなく、次の段階では処理コストおよびエネルギーの消費量、さらにはいまや CO₂ 発生量などの評価も必要であるが、これらは今後の課題にしたい。また、循環技術要素としても、コンポスト化および高温好気処理法のプロセスに加えて、次のように他の微生物処理法（高温嫌気法など）、エネルギー回収法（メタン発酵法など）の多様なプロセスを組み入れてシステムの多様性を拡げることも必要と考えられる。

最終的には、食品産業、流通工程、農業、畜産業、林業など多分野からの副産物を相互に有効利用しうる、完全な地域資源循環システムが形成されてはじめて、自然生態系に準拠した真の循環社会が実現することになる。本研究はこのような最終目標への第一歩と位置づけている。

参考文献

- 1) 内藤正明：環境調和型社会の実現に向けて、技術と経済、No. 376, 13-19 (1998. 6)
- 2) 楊 瑜芳、林 里香、津村和志、内藤正明：環境調和型有機物循環システムに関する研究、第 6 回地球環境シンポジウム講演論文集、155-160 (1998. 7)
- 3) 楊 瑜芳、林 里香、津村和志、内藤正明：竹チップを担体とする下水汚泥の高温好気処理法の適用研究、第 8 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、237-239 (1997)
- 4) 藤田賢二：コンポスト化技術、技報堂出版 (1995)
- 5) 岩渕和則、木村俊範：家畜糞の好気性分解反応特性 (第 1 報)、農業機械学会誌、Vol. 56, No. 2, 67-74 (1994)

追記:

本報告の著者の一人「津村和志」は原稿完成の直後に急逝いたしました。最後の業績となる本報にそれを記して追悼に代えさせていただきます。(内藤正明、楊 瑜芳)