

植物廃材のコンポスト化における温熱管理

広島工業大学工学部 正会員 二神 種弘
株式会社ウエスコ 正会員 ○小泉 典弘

1. はじめに

都市・地域空間から大量の植物系廃材（剪定枝葉・落ち葉、廃紙など）が発生している。従来、これらの植物系廃材は主として、焼却処分あるいは埋め立てが行われてきた。しかし、焼却は熱と地球温暖化効果ガスの CO_2 を発生させるとともに、焼却時の煤煙や悪臭により環境を劣悪化している。また、これらの廃材を塩化ビニールや塩素含有の漂白紙と混合焼却すると廃材が塩素と反応し、ダイオキシンなどの有害物質を発生させるなど環境に大きな悪影響を及ぼしている。さらに埋め立てに関しては埋め立てスペース減少化という大きな問題を抱えている。このようなことから植物系廃材の有効利用に関する研究が社会的に要求されている。

そこで本研究は、植物系廃材のバイオコンバージョン（bioconversion）による有効利用法の一つであるコンポスト化（発酵堆肥化）における温熱管理に関する基礎的な解析および実験研究を行うもので、コンポスト化における発酵発熱負荷と材料の熱伝導に関する物理定数を、実験結果に合致するように試行計算を行うことにより、同定するものである。

2. 有限要素法による熱伝導解析

2. 1 基礎微分方程式系

有限要素法を用いて、熱の貫流のある境界条件を有する次のような2次元非常数の基礎微分方程式系の解析を行う。

基礎微分方程式系

(1) 熱伝導方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - k\phi + Q_F + Q_L \quad (\text{in } \Omega) \quad (1)$$

(2) 初期条件

$$\phi = \Phi^0 \quad (\text{at } t = 0) \quad (2)$$

(3) 境界条件（熱貫流有り）

$$q = D_x \frac{\partial \phi}{\partial x} l_x + D_y \frac{\partial \phi}{\partial y} l_y = -\alpha(\phi - \Phi_c) \quad (\text{on } \Gamma) \quad (3)$$

ここで、

ϕ : 温度 (K), D_x, D_y : 熱拡散係数 (m^2/s)
 k : 減衰係数 (1/s), Q_F : 発酵発熱負荷 (K/s)
 Q_L : 電球発熱負荷 (K/s), α : 境界での熱貫流率 (m/s)

2. 2 有限要素法による定式化

上の基礎微分方程式系に重みつき残査法 (weighted residual method) に基づく Galerkin の有限要素法を適用すると、

$$[A]\{\phi_n^r\} + [C]\left\{\frac{\partial \phi}{\partial t}\right\}_n = \{Q_n^r\} \quad (4)$$

となる。ここで、時間微分を後退差分

$$\left\{\frac{\partial \phi}{\partial t}\right\}_n = \frac{1}{\Delta t}(\{\phi_n^r\} - \{\phi_n^{r-1}\}) \quad (5)$$

を用いて離散化すると、次式が得られる。

$$[A]\{\phi_n^r\} + \frac{[C]}{\Delta t}(\{\phi_n^r\} - \{\phi_n^{r-1}\}) = \{Q_n^r\} \quad (6)$$

ここで、

$$[A] \leftarrow [A] + \frac{[C]}{\Delta t}, \quad [C] \leftarrow -\frac{[C]}{\Delta t} \quad (7)$$

と書き直すと、温熱拡散剛性方程式が次のように得られる。

$$[A]\{\phi_n^r\} + [C]\{\phi_n^{r-1}\} = \{Q_n^r\} \quad (\tau = 1 \sim T) \quad (8)$$

2. 3 解析例

次章で述べる、3つの実験モデルに相当する3つの解析モデルに対して試行計算を行い、実験値（温度測定値）に合致する発酵発熱負荷 Q_F 、物理定数（拡散係数 D_x, D_y 、減衰係数 k 、熱貫流率 α ）の同定を試みる。

(1) 解析モデル I（熱源有り、実験室内（平均温度 290.5K）放置）

初期温度 $\Phi^0 = 286$ (K)

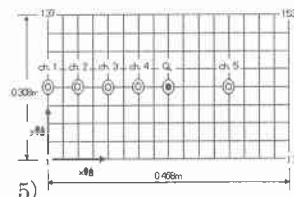
周囲温度 $\Phi_c = 286$ (K)

境界条件 $q = -\alpha(\phi - \Phi_c)$

◎温度測定点 (ch. 1~ch. 5)

●電球発熱負荷発生点 $Q_L = 0.00256$ ($\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{s}$)

図 2.1 解析モデル I（熱源有り、実験室内（290.5K）放置）



(2) 解析モデルⅡ (熱源無し、実験室内 (平均温度 290.5K) 放置)

初期温度 $\Phi^0 = 286$ (K)

周囲温度 $\Phi_c = 286$ (K)

境界条件 $q = -\alpha(\phi - \Phi_c)$

◎温度測定点 (ch. 1~ch. 6)

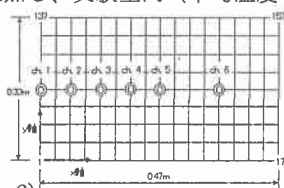


図 2.2 解析モデルⅡ (熱源無し、実験室内 (290.5K) 放置)

(3) 解析モデルⅢ

(恒温室内 (323.0K) 放置)

初期温度 $\Phi^0 = 286$ (K)

周囲温度 $\Phi_c = 323$ (K)

境界条件 $q = -\alpha(\phi - \Phi_c)$

◎温度測定点 (ch. 1~ch. 6)

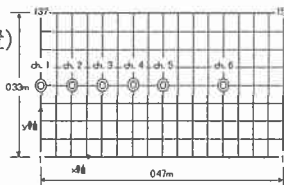


図 2.3 解析モデルⅢ (恒温室内 (323.0K) 放置)

3. コンポスト化温熱実験

3. 1 実験目的

コンポスト化をスムーズに行うために最も重要なことは、微生物の活動しやすい温熱環境を作ることである。そのための基礎的データを得るために次のような実験を行い、温度測定を行う。

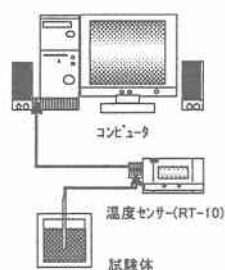


図 3.1 温熱実験システム

3. 2 実験概要

桜の枯れ葉を採取、3.5 日間水に浸し水分を十分含ませる。容器は発泡スチロールを使用し、(A) 種菌 (竹林の腐葉土の土着微生物群を米糠で増殖したもの) + 畑の土の混合物と (B) 米糠+腐葉土+枯れ葉+水の混合物を交互にサンドイッチ状に積み重ねる (図 3.2 参照)。φ6×h300 (mm) の内部温度測定用鉛筆状温度センサーを使用し、2 時間毎に 2 週間の温度測定を行う。本研究では、以下のように 3 つの解析モデルに相当する実験モデルを作製し、実験を行った。

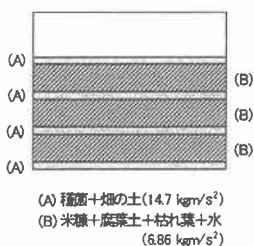


図 3.2 実験材料の積み重ね

(4) 実験モデルⅠ (熱源有り、実験室内 (平均温度 290.5K) 放置)

熱源として、0.05m×0.05m×0.2m のブリキの筒に電球 (GC110V 40W) を入れたものを材料中心に設置し、コンポスト化材料を詰めたものを実験室内に放置して実験を行った。

(2) 実験モデルⅡ (熱源無し、実験室内 (平均温度 290.5K) 放置)

熱源無しのままコンポスト化材料を詰めた発泡スチロールの箱を実験室内に放置して実験を行った。

(3) 実験モデルⅢ (恒温室内 (323.0K) 放置)

恒温室内 (323.0K) にコンポスト化材料を詰めた発泡スチロールの箱を放置して実験を行った。

4. 総合的考察

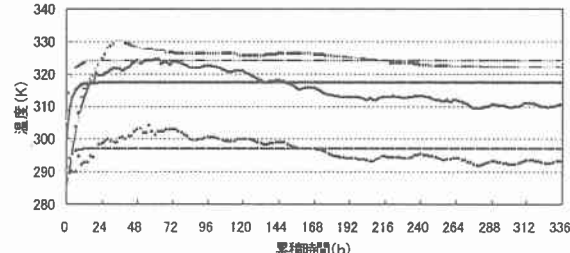


図 4.1 温度推移比較

発酵発熱負荷 Q_F を解析領域全体で場所的にも時間的にも一定として計算したため、初めは実験値の方が計算値より下回っている。これは徐々に微生物発酵していることが考えられる。また、最高温度付近では、微生物がフルに活動しているので、実験値が計算値より上回っている。時間の経過とともに、実験値が計算値より下がる傾向にあるのは、微生物の栄養源の減少とバランスのくずれ、切り替えしを行っていないための O_2 の減少による好気性微生物の不活性化が考えられる。

5. 結語

本研究の結果、熱拡散係数 $D_x = D_y = 5.0 \times 10^{-5}$ (m²/s)、減衰係数 $k = 1.0 \times 10^{-6}$ (1/s)、熱貫流率 $\alpha = 2.0 \times 10^{-7}$ (m/s)、発酵発熱負荷 $Q_{F1} = 2.5 \times 10^{-2}$ (K·m²/s)、 $Q_{FII} = 4.0 \times 10^{-2}$ (K·m²/s)、 $Q_{FIII} = 4.36 \times 10^{-2}$ (K·m²/s) となった。 Q_{F1} が一番小さいのは、熱源の周り 1/3 の部分の温度が 373 (K) を超えるために、微生物にとって好適環境とは言えない。また、 Q_{FIII} が一番高いことから、3 つの中では最も適した環境であるといえる。

今後の課題として、深さ方向は一様でないため、3 次元解析を試み、また、逆問題解析法を用いて発酵発熱負荷、物理定数を同定する研究を行う必要がある。

【参考文献】

藤田賢二：「コンポスト化技術」，技報堂出版，1993。

日本機械学会編：「伝熱工学資料」，丸善，1986。

Rao: The Finite Element Method in Engineering, Pergamon, 1982.