

# 堆肥化過程における熱移動(第2報)

関 平和・小森友明

(金沢大学工学部建設工学科)

## Heat Transfer in Composting Process (Part 2)

Hirakazu SEKI and Tomoaki KOMORI

(Department of Construction and Environmental Engineering,  
Faculty of Technology, Kanazawa University, Kanazawa 920)

### 1. 緒 言

関・小森(1983)(以下、前報と呼ぶ)は、堆肥化過程で発生する発酵熱を農業用補助エネルギー源として施設栽培へ利用しようとの北陸3県農業試験場(1982)の見解にかんがみ、伝熱工学的にその利用可能性を追求するための基礎研究として、断熱容器内に投入された農畜産廃棄物の堆肥化発熱実験を行った。そして堆肥そう内の熱移動機構を1次元熱伝導とみなして誘導されたそう内温度分布式を用いて見掛発熱量(真の(全)発熱量と水分蒸発に伴う潜熱損失量の差)を推算する方法を検討した。その結果、発熱は大気と接するそう上端から内部へ酸素の拡散が可能な位置までの好気性領域に限定され、その領域内の平均見掛発熱量は、そう1m<sup>3</sup>、1hrあたり約200kcalであった。

しかし、前報の実験は比較的高含水率(70~80%)条件下で行われたため、必ずしも良好な発熱条件が満足されたとは言えず、最高到達温度も約55℃と低かった。又、そう内の発熱量が比較的小さかったのに対して、堆肥化過程は長期間(2か月)持続したため、堆肥そう側壁及び底部壁を通しての熱損失が無視できず、正確には熱移動機構を3次元的に取り扱う必要があることも指摘された。

以上の点を踏まえて、本報では堆肥化過程における熱移動機構と発熱量について更に詳しく検討するため、実験室規模の小型堆肥そうを用いて、素材配合割合を変えた幾つかの堆肥化発熱実験を行った。そう内の見掛発熱量、真の(全)発熱量は3次元の熱流を考慮して得られた解析解に基づいて推算し前報の結果と比較検討した。更に、算出された真の(全)発熱量を混合素材中の炭素消費量から見積られた値とも対比して本推算方法の妥当性

を基質変化量と関連づけて検討した。そして、自然状態の堆肥化過程(本報及び前報のように外部から特別な発熱増進対策を施さない堆肥化過程を自然状態の堆肥化過程と呼ぶことにする)の特徴を温度、発熱量の面から総括的に考察した。

### 2. 堆肥そう内温度分布式の誘導と見掛発熱量推算法

#### 2.1 そう内温度分布式の誘導

前報の1次元の取り扱いを3次元に拡張すると、堆肥そう内熱移動モデルはFig.1のように示され、そう内見掛発熱量を $G(x, y, z, \theta)$ とすれば、そう内の熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial(C_p \rho T)}{\partial \theta} = \nabla \cdot (K \nabla T) + G(x, y, z, \theta) \quad (1)$$

式(1)は非線形微分方程式なので一般に解析は困難だが、前報の手法に準じて実験全期間を物性値の時間的変

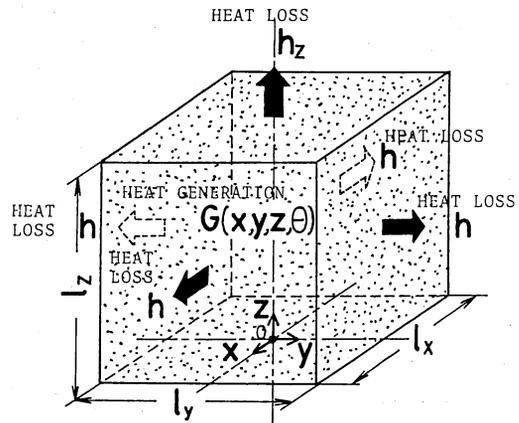


Fig. 1 Schematic representation of three dimensional heat transfer in a compost bed

化を無視し得る程度の短い時間区間に区切れば、各区内で問題を線形近似でき、解析が容易になる。ここではその時間区間を1日(24 hr)とし、任意1日間についての熱伝導問題を解析してその内温度分布式を導くことにする。差し当り、解析の便宜上、以下のような仮定を設定する。

- (1) 積み込まれた各素材、水分は一様にむらなく混合されているものとする。
- (2) 堆肥化過程中的任意の1日において、物性値は一定で変化しないものとする。
- (3) そう内時間平均見掛発熱量は、水平方向には分布せず、積み込み高さ方向  $z$  のみの関数で表される。
- (4) そう最下部での熱損失は無視できる。

以上の仮定の下に、堆肥化過程中的任意の1日間に於けるその内熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \kappa \nabla^2 T + \frac{G(z)}{C_p \rho} \quad (2)$$

そう側壁及び上端では外界へ熱損失があり、総括伝熱係数をそれぞれ  $h$ ,  $h_z$  とすれば、そこでの境界条件は、

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} = h[T - T_a(\theta)] \quad (x = l_x/2) \quad (3)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial y} = h[T - T_a(\theta)] \quad (y = l_y/2) \quad (4)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} = h_z[T - T_a(\theta)] \quad (z = l_z) \quad (5)$$

又、 $x=0$ ,  $y=0$  での温度分布対称性と仮定(4)より、

$$\partial T / \partial x = 0 \quad (x=0) \quad (6)$$

$$\partial T / \partial y = 0 \quad (y=0) \quad (7)$$

$$\partial T / \partial z = 0 \quad (z=0) \quad (8)$$

任意1日の初期温度分布は前日の最終状態における温度分布であり、高さ方向のみならず、側面からの熱損失によって水平方向にも分布する。しかし前報で検討したごとく、酸素の拡散( $z$ 方向のみ)に支配される発熱量は  $z$  のみの関数と考えられる[仮定(3)]ことと、後述の4.3の実験結果より、同一高さ面における側壁近傍の温度と中心軸上の温度には大差がなかった(最大4℃)ことから、1日ごとの初期温度分布は近似的に  $z$  のみの関数で表せると仮定した。すなわち、

$$T = f(z) \quad (\theta=0) \quad (9)$$

以上のように、熱伝導方程式、境界条件及び初期条件が与えられたが、解析に当り、 $G(z)$  及び  $f(z)$  は仮定(4)のその底部断熱条件と後述の温度測定点の数を考慮して、前報同様、次式のように4次及び6次の偶関数で近似する。

$$G(z)/C_p \rho = a_0 + a_2 z^2 + a_4 z^4 \quad (10)$$

$$f(z) = b_0 + b_2 z^2 + b_4 z^4 + b_6 z^6 \quad (11)$$

解析の手順は前報と同様なので詳細は割愛し、結果のみ示すと、

$$\begin{aligned} T = & \int_0^{l_x} \int_0^{l_y/2} \int_0^{l_z/2} u(x, y, z, x', y', z', \theta) Q(z') \\ & dx' dy' dz' \\ & + \kappa H \int_0^\theta \left[ \int_0^{l_x} \int_0^{l_y/2} u(x, y, z, l_x/2, y', z', \theta - \tau) \right. \\ & \left. P_1(z', \tau) dy' dz' \right] d\tau \\ & + \kappa H \int_0^\theta \left[ \int_0^{l_x} \int_0^{l_z/2} u(x, y, z, x', l_y/2, z', \theta - \tau) \right. \\ & \left. P_1(z', \tau) dx' dz' \right] d\tau \\ & + \kappa H_z \int_0^\theta \left[ \int_0^{l_y/2} \int_0^{l_x/2} u(x, y, z, x', y', l_z, \theta - \tau) \right. \\ & \left. P_2(\tau) dx' dy' \right] d\tau - \frac{1}{\kappa} \int_0^z \left[ \int_0^z \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right] dz \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 $H = h/K$ ,  $H_z = h_z/K$  を表し、Green 関数 (Carslaw・Jaeger, 1959)  $u(x, y, z, x', y', z', \theta - \tau)$  は、

$$\begin{aligned} u(x, y, z, x', y', z', \theta - \tau) = & 8 \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\alpha_i^2 + H^2) \cos(\alpha_i x')}{(l_x/2)(\alpha_i^2 + H^2) + H} \\ & \cdot \frac{(\beta_j^2 + H^2) \cos(\beta_j y')}{(l_y/2)(\beta_j^2 + H^2) + H} \cdot \frac{(r_k^2 + H_z^2) \cos(r_k z')}{l_z(r_k^2 + H_z^2) + H_z} \\ & \cdot \cos(\alpha_i x) \cos(\beta_j y) \cos(r_k z) \\ & \cdot e^{-\kappa(\alpha_i^2 + \beta_j^2 + r_k^2)(\theta - \tau)} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 $\alpha_i$ ,  $\beta_j$ ,  $r_k$  はそれぞれ次式の正根である。

$$\alpha_i \cdot \tan(\alpha_i l_x/2) = H \quad (14)$$

$$\beta_j \cdot \tan(\beta_j l_y/2) = H \quad (15)$$

$$r_k \cdot \tan(r_k l_z) = H_z \quad (16)$$

又、 $P_1(z, \theta)$ ,  $P_2(\theta)$ ,  $Q(z)$  は次のごとくである。

$$P_1(z, \theta) = \frac{1}{\kappa} \int_0^z \left[ \int_0^z \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right] dz + T_a(\theta) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_2(\theta) = & \frac{1}{\kappa} \left\{ \int_0^{l_z} \left[ \int_0^z \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right] dz + \frac{1}{H_z} \int_0^{l_z} \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right\} \\ & + T_a(\theta) \end{aligned} \quad (18)$$

$$Q(z) = f(z) + \frac{1}{\kappa} \int_0^z \left[ \int_0^z \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right] dz \quad (19)$$

## 2.2 見掛発熱量推算法

$G(z)$  の算出は前報と同様にして次の手順で行う。今、積み込み後  $n$  日目、時刻  $m$  時を  $\theta=0$  とし、その時刻におけるその内温度分布から  $b_0 \sim b_6$  を算出し、 $f(z)$  を決定する。次に、 $n+1$  日目、時刻  $m$  時のその内中心軸上高さ方向任意の三つの位置(後述のごとく、 $z=0.125$ ,  $0.250$ ,  $0.375$  m)の温度実測値を式(12)に代入し、各位置に対応した三つの式を得る。これらの式中には式(10)

の係数  $a_0, a_2, a_4$  が含まれるので、これらの3式を連立して  $a_0, a_2, a_4$  を算出すれば、 $n \sim n+1$  日間の1日平均見掛熱量  $G(z)$  が求められる。実験初日から終了日まで逐次この手順を繰り返すことにより各時間区間での  $G(z)$  を推算できる。ただし、前報では混合堆肥素材の物性値、積み高さ  $l_z$  は実験全期間を通じて一定としたが、本実験では後述のごとく、これらの値が経日的に変化したので、1日ごとに値を変えて計算を行った。

3. 実験装置及び実験方法

本実験に使用した堆肥そうは、Fig. 2 に示すような側壁厚さ 150 mm、底部の厚さ 300 mm のスチロフォーム板を直方体形に張り合わせた断熱容器であり、内容積は  $0.125 \text{ m}^3$  である。堆肥素材は、牛ふん、鶏ふん、米ぬか、のこずを最適堆肥化条件(久保田ら, 1977)に基づき、混合物の C/N 比が 25~30、含水率 60~70% となるように適当な割合で混合、加水して調整したものである。上記条件を満足する限りにおいて各素材の配合割合はある程度自由に設定できるが、ここでは Table 1 に示す 4 種類とした。

混合素材の堆肥そうへの投入に際しては、そう内の通気性を考慮して混合直後の状態のまま軽く積み込む程度と

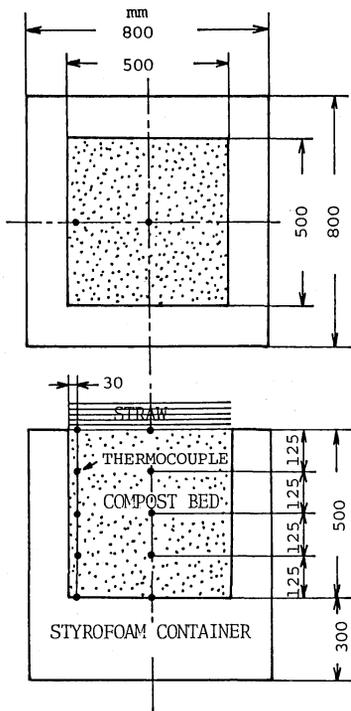


Fig. 2 Experimental apparatus

Table 1 Components of sample materials (dry-based Wt%)

Run	Cattle feces	Chicken manure	Rice bran	Sawdust
1	59.1	5.8	5.8	29.3
2	41.7	14.1	14.1	30.1
3	30.6	19.4	19.4	30.6
4	20.0	24.4	24.4	31.2

した。実験中のそう内温度測定は Fig. 2 に示すごとく、鉛直中心軸 ( $x=0, y=0$ ) 上及び側壁から約 30 mm 内側の位置に等間隔 (125 mm) に 5 点ずつ、合計 10 点の銅-コンスタンタン熱電対を設置して自記記録計により連続的に行った。素材積み込み後、上部からのふく射熱侵入防止と保温のため、そう上部に約 100 mm の厚さに稲わらを敷きつめた後、実験を開始した。なお、堆肥そうは敷地面積約  $400 \text{ m}^2$  のガラスハウス内の土の上にそのまま設置し、実験期間は 10 月初旬以降の 50 日間とした。

4. 実験結果と考察

4.1 実験前後の混合素材の見掛密度、体積、乾燥密度、含水率及び炭素、窒素含有量

実験前後の見掛密度(仮比重)  $\rho$ 、体積  $V$ 、乾燥密度  $\rho_d$ 、含水率  $w$  及び C、N 含有量を Table 2 に示す。 $\rho$  は Run 1 では  $660 \text{ kg/m}^3$  のままほぼ一定に保たれたが、それ以外では  $400 \sim 530 \text{ kg/m}^3$  まで減少した。 $w$  は実験開始前は 65~68% であったが、終了時には Run 1 を除いて 37~53% と相当低い値となった。 $V$  は水分蒸発に伴う乾燥収縮により終了時には開始前の 15~20% も減少した。Run 1 において、 $\rho, w$  がほとんど変化しなかったのは、 $V$  が偶然、水分蒸発量と釣り合いを保ちながら減少したためであろう。又、 $V$  の減少によって、終了時の  $\rho_d$  は開始前よりも 8~12% 大きくなった。そして、C、N 含有量は表に示すごとく減少した。

4.2 物性値

$\rho, w$  を測定するために実験中にサンプリングを行うとそう内の状態を乱すので、ここでは実測は行わず、これらの値が実験開始時から終了時まで直線的に減少するものとみなした。又、 $C_p$  は前報に示した  $w$  との相関実験式、 $K$  は Krischer (1963) の並列モデルに準拠した推算式(小森・関, 1981)から算出した。

4.3 そう内温度履歴

そう内中心軸上の温度履歴(日平均温度の変化)実測結果の例を Fig. 3 に示した。図には示さなかったが、同一高さ面における側壁近傍の温度は、熱損失の影響で 20 日目以降、中心軸上の温度よりも幾分低い値となったが、その差は最大  $4^\circ\text{C}$  であり、高さ方向の変化(最大  $30^\circ\text{C}$ )に

Table 2 Apparent density ( $\rho$ ), dry density ( $\rho_d$ ), volume ( $V$ ), moisture content ( $w$ ), carbon and nitrogen contents ( $C, N$ ) of a compost bed at the initial and final conditions of the experiments

	Run	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$C$ [kg-C]	$N$ [kg-N]
initial	1	660	0.125	214	67.6	11.26	0.401
	2	660	0.125	215	67.5	11.15	0.427
	3	660	0.125	236	64.2	12.75	0.510
	4	660	0.125	231	65.0	12.75	0.512
final	1	660	0.105	232	64.8	9.26	0.381
	2	510	0.100	241	52.7	7.95	0.388
	3	530	0.100	258	51.4	9.03	0.465
	4	402	0.095	253	37.1	7.69	0.439

比べて小さかった。前報の実験と同様、この場合も水平方向にはほとんど発熱量の分布がなかったと推測されること、混合素材の熱伝導率 $K$ (0.5~0.7 kcal/mhr°C)が側壁(スチロフォーム板)の熱伝導率(0.035 kcal/mhr°C)に比べて10倍以上も大きかったことから、熱損失があったにもかかわらず、そう内の水平方向温度こう配が側壁内部の温度こう配の1/10以下になったためと考えられる。

発熱による温度上昇は、上部から下部へと逐次進行し、ここで行われた全実験についてはほぼ同様の傾向を示した。これは発熱域の移動によるものだが、このことについては4.5で後述する。最高到達温度はRuns 1~4の順に、55°C, 64°C, 61°C, 69°Cであり、前報の結果を上回った。これは、 $w$ を小さくしたのでそう内の体積熱容量 $C_p\rho$ が前報よりも小さくなり、温度上昇効果が大きかったことが一因と考えられる。50°C以上の高温持続期間は同様な順番で、約10日、15日、20日、30日であり、そ

の期間を最も長く持続できたのはRun 4であった。しかし、本実験ではそう容積(0.125m<sup>3</sup>)が前報(2.23m<sup>3</sup>)よりも小さいので、投入された混合素材1m<sup>3</sup>当りの側壁面積が8m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>(前報では2.4m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)と大きく、側壁からの熱損失の割合が相対的に大きかったこと、体積熱容量が小さかったことにより、実験後半の温度低下は前報よりも著しく、高温持続期間は相対的に短かった。特に、Runs

1, 2ではそれぞれ30日目、35日目からそう内温度が著しく低下した。

各実験での温度履歴の差異は以下のような理由によるものと考えられる。本実験に使用した牛ふん、鶏ふん及び米ぬかのC/N比はそれぞれ19.0, 10.7, 14.0であったが、一般にC/N比の大きい素材は分解されにくく、小さい素材は分解されやすい(農文協, 1974 a)ので、牛ふんに比べてC/N比の小さい鶏ふん、米ぬかを多く含むRun 4では、初めに分解されると考えられる鶏ふん、米ぬかの分解[本実験のごとく、積み込み時から1~2か月の堆肥化過程は一次発酵であり、分解基質は主に易分解性(三木・森, 1979)と考えられる。本文中の「基質」は主に易分解性基質を表す]期間が相対的に長く、その間に中温菌から高温菌への菌種交代も順調に進行したと思われる。このため、代謝反応が途切れることなく牛ふんの分解も始まり、高温状態が長続きたものと考えられる。一方、米ぬか、鶏ふんの少ないRuns 1, 2では、

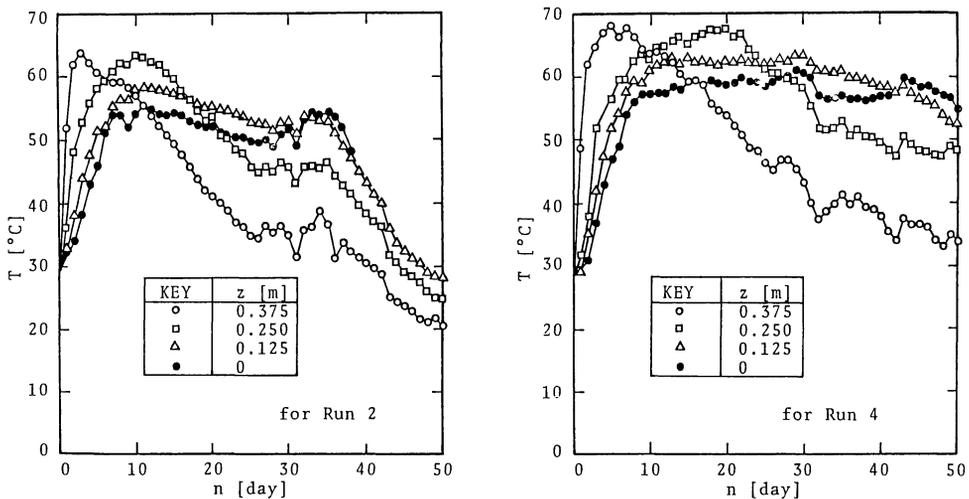


Fig. 3 Daily change of temperature at the several heights on the center of a compost bed

これらの分解期間が比較的短く、高温を長期間維持できなかったため、菌種交代が不十分となり、引き続いて起こるはずの牛ふんの分解が順調に進まず、発熱が停滞し始めたため、基質が十分に分解され尽くさない内にそう内温度の早期低下をきたしたと思われる。すなわち、農文協(1974 b)が指摘するごとく、助熱材として作用する鶏ふん、米ぬかの存在割合の差異が発熱反応の良悪に影響したためと推測される。

#### 4.4 近似的取り扱いの妥当性

次に、ここでの近似的取り扱いの妥当性を検討するため、堆肥そう上端、側壁部及び底部での損失熱量[稲わら、スチロフォーム板の熱伝導率とその厚さから  $h$ ,  $h_z$  を算出し ( $h=0.233 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ ,  $h_z=2.1 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ ), 外界との平均温度差, 伝熱面積を乗じて算出した]を比較すると、上端の値を1とした場合、側壁部の値は52.4%, 底部の値は6.2%となる。上端及び側壁部での熱損失に比して底部でのそれは極めて小さく、仮定(4)は妥当である。又、既述のごとく、水平方向温度こう配は高さ方向のそれに比して小さかったので、初期温度分布を  $z$  のみの関数  $f(z)$  とみなすことにも問題は無いと思われる。更に、実験の前、中、後期における代表的な任意1日について推算された  $G(z)$  をもとに式(12)によって1日間のそう内温度分布を計算し、24 hr 経過後のそう中央の高さ方向温度分布を実測値(翌日の初期温度分布)並びにそれを6次関数で近似した値と比較した図を Fig. 4 に示す。三者は比較的よく一致し、 $f(z)$  を式(11)のように6次関数でよく近似し得ることもわかる。又、実

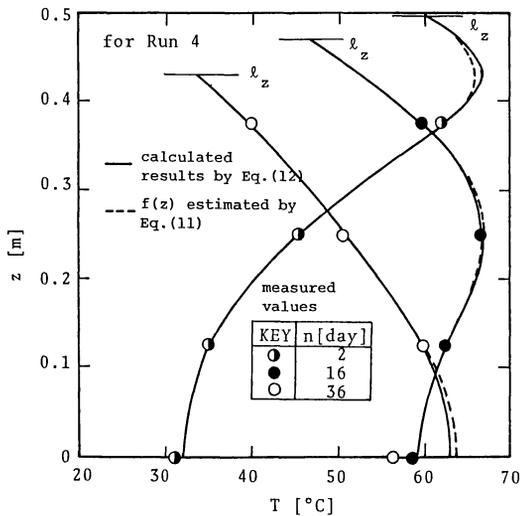


Fig. 4 Comparison of the calculated temperature profile with the measured values denoted by circles and with the approximation by Eq. (11)

験全期間中にそう内で発生する見掛発熱量の全量は実験前後のそう内保有エンタルピーの増加量とそう上端及び側壁からの総損失熱量の和としても概略計算されるが、本報で得られた  $G(z)$  から求めた実験全期間中の見掛発熱量の総量  $[=\sum_{n=0}^{60} (l_x l_y \int_0^z G(z) dz \times 24)_n]$  はその結果

と9~16%の差はあったものの比較的よく一致した。

以上から、堆肥そう内熱移動機構についてのここでの近似的扱いは妥当であり、推算された  $G(z)$  もおおむね正確な値であると考えられる。

#### 4.5 そう内見掛発熱量

##### 4.5.1 $G(z)$ の経日的、高さ別変化

推算されたそう内各高さの  $G(z)$  を堆積日数に対して示した例を Fig. 5 に示す。  $G(z)$  は温度履歴同様、各実験によって差があったが、そう内各高さでの経日的変化は全実験についてはほぼ同様の傾向を示した。すなわち、実験初期には上部 ( $z=0.375\text{m}$ ) の値が大きいが、10~15日目には著しく低下し始め、20~30日目には負値となった。次いで中間部 ( $z=0.250\text{m}$ ) の値が大きくなり、Runs 1, 2 では約10日目、Runs 3, 4 では約20日目に最高値 (Run 1... 300 kcal/m<sup>3</sup>hr, Run 2... 700 kcal/m<sup>3</sup>hr, Run 3... 800 kcal/m<sup>3</sup>hr, Run 4... 1,100 kcal/m<sup>3</sup>hr) に達した。しかし、その状態は長続きせず、急速に減少した後、下部 ( $z=0.125\text{m}$ ) の値が徐々に大きくなった。一方、最下部 ( $z=0\text{m}$ ) の値は中間部と相反する傾向を示し、中間部の値の増減に対応して負の方向にその絶対値が増減したが、20~30日目に正値に転じた後、下部の値とほぼ等しい値を保つようになった。

本実験では、 $G(z)$  の経日的、高さ別変化は前報に比べて極めて著しかったが、このような変化を示した理由の一つは、側壁からの熱損失が発熱反応に関係するそう内温度履歴に及ぼす影響が前報よりも大きかったことと、もう一つは発熱域の移動と関連づけて以下のごとく推察される。

本実験では、 $\rho$ ,  $w$  を前報の値よりも小さくしたので、実験初期においてもそう内の気相率は0.41~0.42と前報の初期値(0.16~0.22)よりも大きく、酸素の拡散速度が大きかった。このため、上部の反応が比較的速く進行し、温度の上昇とともに水分の蒸発が促進され、ある程度日数が経過すると上部の含水率は菌体の生育代謝に必要な最低値(約40% (久保田ら, 1977))以下にまで減少し、潜熱損失量が発熱量を上回るようになると  $G(z)$  が負値に転ずる。発熱の停滞によって上部でほとんど摂取されなくなった酸素は、含水率の減少による気相率の増大と相まって更に下方へ拡散し、発熱域が中間部へ移動する。この時点では酸素がほとんど中間部で消費され尽く

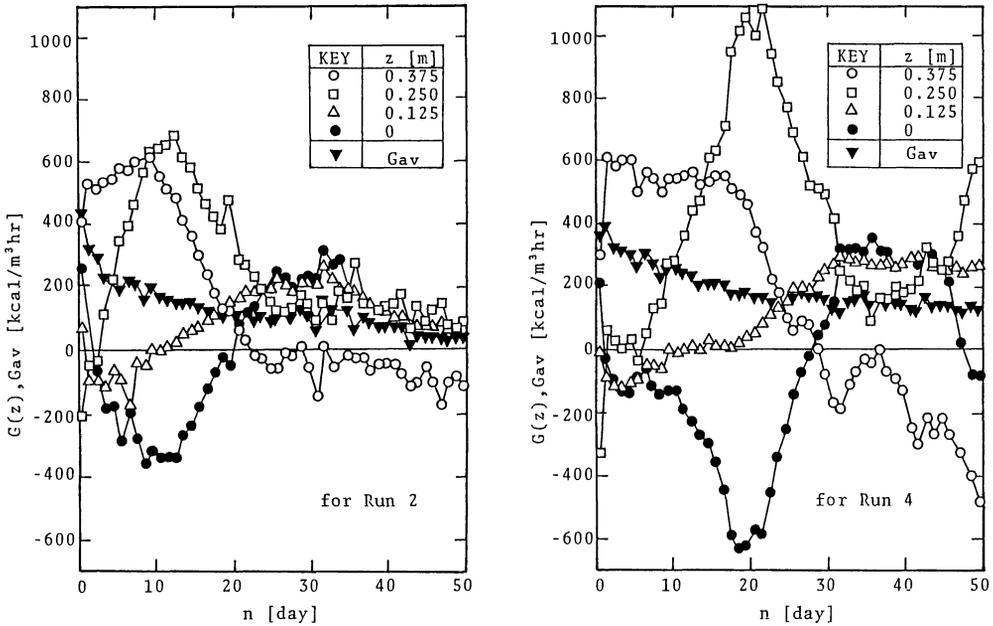


Fig. 5 Daily change of the apparent rate of heat generation at each height  $G(z)$  and its mean in a whole bed ( $G_{av}$ )

すので、最下部ではまだ発熱が起っていないが、熱伝導によって最下部まで到達した熱の大部分は水分蒸発に使われるため、最下部の  $G(z)$  は負値になったものと考えられる。このことは、Fig. 3においてRun 2では8日目から16日目、Run 4では8日目から28日目まで最下部の温度がほぼ一定に保たれたまま上昇しなかったことから示唆される。又、下部領域で蒸発した水蒸気は中間部から上部へと逐次拡散するものと考えられるが、混合素材それ自身が水蒸気拡散の抵抗となるので、中間部では上部ほどには顕著な含水率の低下は起こらず、良好な発熱条件が満たされたと考えられる。従って、そこでは基質分解速度が比較的大きく、 $G(z)$  は最高値に達したが、基質の減少も速いので、発熱量は急速に減少した。中間部で発熱が停滞し始めると酸素は更に下方へ拡散し、そこでの発熱量も徐々に大きくなったが、酸素濃度は上部、中間部を通過する間に幾分代謝反応に消費されつつ減少するので、下部においては上部、中間部に比べてその絶対値は小さかったものと考えられる。

又、Runs 3, 4では35日目以降中間部での  $G(z)$  が再び増大する傾向を示したが、Fig. 3から分かるように、この時期においても中間部では約50℃の高温状態が続いており、それまでに分解され得なかったセルロースなどの分解が始まった(久保田ら, 1977)ためと思われる。

#### 4.5.2 発熱域における平均見掛発熱量 $G_{av}$

このように、本実験では発熱域は逐次下方へ移動した

が、最下部での  $G(z)$  が前半は負、後半は正であったことから、実験全期間を通じて発熱域は平均的にそう最下部までとみなしてよいであろう。そこで、発熱域における各実験の見掛発熱量を概略比較するために、Fig. 5にはそう内全体にわたっての平均見掛発熱量  $G_{av}$  も1日ごとに示した。 $G(z)$  の変化が著しかったのに対して  $G_{av}$  の経日的変化は比較的小さく、各実験についてもその傾向に大きな差異はみられなかった。

$G_{av}$  は実験開始直後の300~400 kcal/m<sup>3</sup>·hrから経日的に逐次減少した。ただし、Runs 1, 2については4.3で推測された理由によって実験後期の菌体代謝活動が不十分となるため、Run 1では約30日目にほとんど0となり、Run 2でも35日目以降値の低下が著しかった。一方、Runs 3, 4では実験終了時においても100~200 kcal/m<sup>3</sup>·hr程度の値が得られており、長期間発熱が持続したことが分かる。実験全期間を通じての  $G_{av}$  の平均値  $\overline{G_{av}}$  は、97 kcal/m<sup>3</sup>·hr (Run 1), 129 kcal/m<sup>3</sup>·hr (Run 2), 155 kcal/m<sup>3</sup>·hr (Run 3), 190 kcal/m<sup>3</sup>·hr (Run 4)であった。Run 4の値はRun 1の約2倍にも達し、助熱材(鶏ふん, 米ぬか)混入量の差異の影響は明らかである。

しかし、Runs 1, 2についても発熱が持続した期間 (Run 1...30日, Run 2...35日)のみに限定して  $\overline{G_{av}}$  を求めると、それぞれ149 kcal/m<sup>3</sup>·hr, 159 kcal/m<sup>3</sup>·hrであり、Run 3の値とほぼ等しくRun 4の値とも大差が

なかった。すなわち、発熱期間内に限定すれば配合割合の違いによる  $\overline{G_{av}}$  の差は小さかった。この理由は Fig. 5 から分かるように発熱量が局部的に増大して温度上昇を促すとその内の他の部分で水分蒸発量が同時に増大するためと考えられる。又、発熱期間内の  $\overline{G_{av}}$  (150~190 kcal/m<sup>3</sup>hr) は前報の値(約 200 kcal/m<sup>3</sup>hr(側壁, 底部への3次元的な熱損失の影響を考慮して補正した値は 209~229 kcal/m<sup>3</sup>hr)) よりも幾分小さいとも考えられるが大差はなく、自然状態の堆肥化過程では発熱の可能な最大領域内の平均見掛発熱量は 150~200 kcal/m<sup>3</sup>hr 程度であると推測される。

以上の考察から、助熱材の混入量を大きくすることは、発熱持続期間を延長させる効果があるが、必ずしも各日における  $G_{av}$  を増大させ得るものではないこと、又、 $w$  を小さくし、気相率を大きくすることは、既述のごとく  $C_p \rho$  が小さくなるのでその内温度の増大には効果的だが、 $G_{av}$  の増大にはほとんど効果がないことが、前報との比較において明らかになった。

4.6 真の(全)発熱量

4.6.1 真の(全)発熱量と炭素消失量の関係

前節で算出された  $\overline{G_{av}}$  に潜熱損失量  $\Delta H_l$  (実験前後の  $w, \rho, V$  から見積った) を加えれば真の(全)発熱量の平均値  $\overline{G_{av}} + \Delta H_l$  が推算される。一方、堆肥化過程では炭素消失量から発熱量を算出することもできる。そこで、本項ではこの両者がどの程度一致するかを検討する。

今、混合素材中の炭素消失速度を  $dC/d\theta$  とし、好気性発酵のみを対象として呼吸商を 1 と仮定すれば、堆肥化過程での酸素摂取速度は  $-(32/12) \cdot dC/d\theta$  と表される。好気性発酵においては消費酸素 1 kg あたりの発熱量は約 3,600 kcal (山根, 1980) とされているから、その内発熱量(発熱速度)は  $-3,600 \cdot (32/12) \cdot dC/d\theta$  となる。実験全期間の長さを  $\theta_t$ 、その間の炭素消失量を  $\Delta C$ 、実験前後の平均体積を  $V_{av}$  とすれば、全期間を通じての真の(全)発熱量の平均値  $G_t$  は次式で与えられる。

$$G_t = 3,600 \cdot \frac{32}{12} \cdot \frac{\Delta C}{\theta_t} \cdot \frac{1}{V_{av}} \quad (20)$$

$G_t$  の算出結果を  $\overline{G_{av}} + \Delta H_l$  と対比して Table 3 に示す。両者の差は最大 10% 程度であり、比較よく一致している。従って、ここで推算された  $\overline{G_{av}} + \Delta H_l$  は物質消失量との関連ではほぼ妥当であると考えられる。

4.6.2 前報との比較検討

実験終了時まで発熱が持続した Runs 3, 4 では、 $\overline{G_{av}} + \Delta H_l$  は 264 kcal/m<sup>3</sup>hr (Run 3), 360 kcal/m<sup>3</sup>hr (Run 4) であった (Table 3)。両者の差は助熱材混入量の差異によるものと思われるが、前報の値, 309~329 kcal/m<sup>3</sup>hr (側壁, 底部への熱損失の影響を考慮して補正した値) と比較すると約 ±15% の差があったものの  $w$  を小さくしたことの効果は特に認められなかった。又、平均呼吸能(乾燥固体 1 kg あたりの酸素摂取速度 =  $(1/\rho_d) \{(\overline{G_{av}} + \Delta H_l)/3,600\}$ ) を計算すると  $2.97 \times 10^{-4}$  kg-O<sub>2</sub>/kg-dry solid hr (Run 3),  $4.13 \times 10^{-4}$  kg-O<sub>2</sub>/kg-dry solid hr (Run 4) となり、これらの値を前報の結果について求めた値,  $3.86 \sim 4.77 \times 10^{-4}$  kg-O<sub>2</sub>/kg-dry solid hr と比較すると Run 3 の値は幾分小さく、Run 4 の値はほぼ同値であったが、いずれも前報の値を上回るものではない。

以上のことから、自然状態の堆肥化過程では、通常の場合の含水率範囲(40~80%)において、本実験のごとく  $w$  を小さくする(気相率を増大させる)と菌体の活性が局部的、一時的には増大する( $G(z)$  の経日的、高さ別変化が著しかった)が、発熱域全体にわたって平均的に増大することではなく、平均呼吸能は  $w$  の大小(気相率の大小)とは無関係のようである。そして、その値は Runs 3, 4 で値が幾分異なったように助熱材混入量の大小により多少の差は認められたが、おおよそ一定範囲の値(本実験及び前報では  $3.0 \sim 4.5 \times 10^{-4}$  kg-O<sub>2</sub>/kg-dry solid hr) を示すものと思われる。このことは、 $\rho_d$  が同一値の場合、発熱が起り得る最大領域内の発熱量の平均値がほぼ一定値を示

Table 3 Comparison of the calculated true (or total) rate of heat generation in a compost bed with the rate estimated from the carbon consumption rate

Run	Amount of carbon consumption $\Delta C$ [kg-C]	Average volume of a compost bed $V_{av}$ [m <sup>3</sup> ]	Amount of latent heat loss $\Delta H_l$ [kcal/m <sup>3</sup> hr]	True rate of heat generation estimated from carbon consumption rate $G_t$ [kcal/m <sup>3</sup> hr]	Calculated true rate of heat generation $\overline{G_{av}} + \Delta H_l$ [kcal/m <sup>3</sup> hr]
1	2.00	0.115	44.6	139	141
2	3.20	0.113	121.4	227	250
3	3.72	0.113	108.5	263	264
4	4.55	0.110	170.2	331	360

すことを意味している。このことは又、前報においてそう内気相中酸素濃度分布を概算する際に、菌体の活性が素材の単位乾燥重量に対して一定で菌体数が $\rho_d$ に比例するという便宜的な仮定を設けたが、その仮定が発熱域内の平均値としてとらえられる限り、近似的に妥当であったことをも意味するものである。

又、ここではその深さを0.5mとしたが、Run 4では実験後期でも最下部の $G(z)$ が200~300 kcal/m<sup>3</sup>hrにも達しており(Fig. 5)、深さを増せば酸素が更に下方へ拡散することが予想される。しかし、その場合でも、既述のごとく実験後期には上部の発熱がほとんど停止し、発熱域が帯状に下方へ移動するにすぎず、実質的に発熱域が拡大するとは考えにくい。

従って、堆肥化が自然状態で行われる限り、 $w$ を小さくすることはそう内の真の(全)発熱量の平均的な上昇に対しても見掛発熱量に対してと同様、それほどの効果を期待できないものと思われる。

## 5. 結 言

小型堆肥そう内で農畜産廃棄物の堆肥化発熱実験を行い、そう内の熱移動機構を3次元に拡張して見掛発熱量、真の(全)発熱量を推算した結果、以下の知見を得た。

1) 本実験では、含水率を小さくし、気相率を増大させたことにより、実験初期の温度上昇速度、最高到達温度は前報の結果を上回ったが、側壁からの熱損失が原因となって実験後期の温度低下は著しかった。高温状態を長く持続させるには堆肥そうの側面断熱壁を更に厚くするか、前報のごとく底面積を広くすべきである。

2) 本実験から推算されたそう内見掛発熱量の経日的、場所的变化は前報に比べ極めて著しかったが、その理由が発熱域の移動過程と関連づけて説明された。

3) ここで行われた4つの実験の内、助熱材として作用する鶏ふん、米ぬかの混入量が大きいものほど高温持続期間が長く、かつ、局所的な最高発熱量も大きかったが、発熱域内の平均見掛発熱量は発熱期間内に限定すれば150~190 kcal/m<sup>3</sup>hrと大差がなかった。

4) 発熱域内の平均見掛発熱量は前報の値(約200 kcal/m<sup>3</sup>hr)にも近く、自然状態の堆肥化過程では含水率の大小にかかわらず、150~200 kcal/m<sup>3</sup>hr程度であると思われた。

5) 見掛発熱量と水分蒸発による潜熱損失量の和として推算された真の(全)発熱量の平均値は実験前後の炭素消失量から算出された値と最大誤差10%の範囲で一致し、本推算方法の妥当性が基質消失量との関連で認められた。

6) 真の(全)発熱量の平均値も前報の値(約300 kcal/m<sup>3</sup>hr)と大差がなく、自然状態の堆肥化過程では含水率を小さくしてもその平均的な上昇に対して大きな効果はないと思われた。従って、発熱量を上昇させるには強制通気、切り返し等の発熱増進対策によらねばならないものと思われる。

謝辞：本研究を行うに当たり、実験用堆肥素材の提供と成分分析に御協力を賜った石川県農業試験場の関係各位に感謝の意を表します。

〔使用記号〕

$C$	混合堆肥素材中の炭素含量(kg-C)
$\Delta C$	実験前後のCの変化量(kg-C)
$C_p$	混合堆肥素材の比熱(kcal/kg°C)
$f(z)$	堆肥そう内初期温度分布(°C)
$G(x, y, z, \theta)$	堆肥そう内見掛発熱量(kcal/m <sup>3</sup> hr)
$G(z)$	堆肥そう内見掛発熱量(1日平均) (kcal/m <sup>3</sup> hr)
$G_{av}$	発熱域内平均見掛発熱量(kcal/m <sup>3</sup> hr)
$G_t$	堆肥そう内の真の(全)発熱量(kcal/m <sup>3</sup> hr)
$h, h_z$	総括伝熱係数(kcal/m <sup>2</sup> hr°C)
$\Delta H_l$	水分蒸発による潜熱損失量(kcal/m <sup>3</sup> hr)
$K$	混合堆肥素材の有効熱伝導率(kcal/mhr°C)
$l_x, l_y$	堆肥そうの水平方向の長さ(m)
$l_z$	混合堆肥素材の積込み高さ(m)
$N$	混合堆肥素材中の窒素含量(kg-N)
$n$	堆積経過日数(day)
$T$	堆肥そう内温度(°C)
$T_a$	そう外気温(°C)
$V$	混合堆肥素材の体積(m <sup>3</sup> )
$w$	混合堆肥素材の含水率(%)
$x, y, z$	距離(m)
$\theta$	時間(hr)
$\kappa$	混合堆肥素材の有効熱拡散率(m <sup>2</sup> /hr)
$\rho$	混合堆肥素材の見掛密度(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_d$	混合堆肥素材の乾燥密度(kg/m <sup>3</sup> )

## 引用文献

- 1) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959: *Conduction of Heat in Solids, 2nd ed.* Clarendon Press, Oxford, 353-361.
- 2) 石川農試・福井農試・新潟園試, 1982: 北陸地域における冬季無加温による施設の融雪方法および軟弱野菜の栽培技術, 総合助成試験事業(中核)研究成果, 1-146.
- 3) 小森友明・関 平和, 1981: 混合有機質資材の有効熱伝導率, 第15回化学工学秋季大会講演要旨集II, 193-194.

- 4) Krischer, O., 1963: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungs technik, 2 Aufl.*, Springer Verlag, 268-277.
- 5) 久保田 宏・細野恭生, 1977: コンポストイング—有機質固体廃棄物の土壌還元, *化学工学*, **41**, 364-368.
- 6) 三木伸夫・森 忠洋, 1979: 堆肥化技術, 「下水汚泥の堆肥化実例集(熊沢喜久雄監修)」, アイピーシー, 27-29.
- 7) 農文協編, 1974 a: 速成堆肥のつくり方, 「有機質肥料のつくり方」, 農文協, 72-84.
- 8) 農文協編, 1974 b: 発酵剤利用の堆肥つくり, 「有機質肥料のつくり方使い方」, 農文協, 103-127.
- 9) 関 平和・小森友明, 1983: 堆肥化過程における熱移動, *農業気象*, **39**(3), 173-179.
- 10) 山根恒夫, 1980: 生物反応工学, 産業図書, 132-133.

### Summary

Several experiments for heat generation in composting process with livestock and farmyard wastes had been made by using a compost container in laboratory scale. Following the previously proposed procedure for estimation, the apparent rate of heat generation was calculated by applying the observed value of temperature in a compost bed to the analytical solution of temperature derived from a three dimensional model for heat conduction problem. The true (or total) rate of heat generation was also calculated by adding the latent heat loss due to vaporization of water to the apparent rate of heat generation. The following results were obtained.

1) Since the initial moisture content was relatively small, the increasing rate of temperature became large and the attainable maximum temperature was high in the early stage of the composting process. Because of the leakage of heat from the side walls of the compost container to the atmosphere, however, temperature decreased within a comparatively short period.

2) During the composting process, the effective region of heat generation moved gradually downward from the surface of the compost bed, so that the apparent rate of heat generation was varied remarkably with both the time and the vertical location in the compost bed.

3) As for some results of the experiments used relatively large contents of rice bran and chicken manure (Runs 3, 4), the steady high-temperature period became longer and the local maximum value of the apparent rate of heat generation was larger than the results of the other experiments (Runs 1, 2). Even in the latter experiments, in the limited region of the effective duration of heat generation, the average value of the apparent rate of heat generation in the compost bed was approximately  $150 \text{ kcal/m}^3 \text{ hr}$ , and this value was not so different from the results of the former experiments.

4) The above-mentioned results on the average value of the apparent rate of heat generation were also similar to the results of the previous experiments under the considerably larger moisture conditions. As for a natural composting process, the average of the apparent rate of heat generation in the effective region of heat generation seemed to be almost independent of the moisture content and to fall within the range from 150 to  $200 \text{ kcal/m}^3 \text{ hr}$ .

5) The calculated results of the true (or total) rate of heat generation agreed well with the values estimated from the consumption rate of carbon in the compost bed, and were almost equal to the results which had been obtained previously.