

# 堆肥化過程における熱移動

関 平和・小森友明

(金沢大学工学部建設工学科)

Heat Transfer in Composting Process

Hirakazu SEKI and Tomoaki KOMORI

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

## 1. 緒 論

近年、ハウス施設による作物栽培は規模も比較的大きくなり、そのために投入される暖房用燃料は特に積雪寒冷地では膨大な量に達する(例えば太田, 1980)。このため、北陸3県農業試験場(石川・福井農試, 新潟園試, 1982)では、農林水産省総合助成中核研究「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」において、重油に代わるエネルギー源として農畜産廃棄物主体の堆肥発酵熱に着目した。しかし、堆肥発酵熱の実用的熱源としての利用技術を確立するためには、冬季における施設内環境と作物の生理生態との関連等を含む栽培学的見地からの検討に加えて、堆肥化過程における熱移動機構のはあく、発生熱量の推算、熱抽出過程における伝熱量の定量的検討など、工学的手法の要求される問題も多いことから、筆者らは偶然にもこの問題に取り組む機会を得た(小森, 1981)。

本報は、このような動機のもとに進められた基礎研究の一部であり、混合堆肥素材が積込まれた堆肥そう内熱移動機構の理論的取り扱いと発生熱量の推算を試みたものである。又、その結果に基づいて、発熱域を酸素の拡散領域と関連づけて考察を行なった。

## 2. 堆肥そう内熱移動機構の解析

### 2.1 そう内温度分布式の誘導

堆肥そう内では、混合素材の中に含まれる有機物分解に伴う発酵熱が発生し、一部はそう内の温度上昇に使われ、残りはそう内を移動しながら系外へ放出される。一般に、堆肥化に伴う発熱量(発熱速度)は、混合素材の水分、組成、温度、通気性等によって異なる(久保田・細野, 1977)が、見掛け上はそう内の位置、時間によって変化

するとみなされる。このような堆肥そう内熱発生、熱移動機構は、堆肥化過程での水分、組成の変化に伴い、有効熱伝導率、比熱、密度等の熱的物性値も変化するので厳密には非線形問題となり、解析は困難である。しかし、完熟堆肥ができるまでには、通常2~3か月の長期間を要し、堆肥化現象が非常に遅いため、堆肥化実験の全期間を適当な時間間隔に区切って考えれば、各区間における物性値の変化はわずかであり、問題の線形近似が可能となる。そこでここでは、線形近似可能な時間区分を1日(24時間)とし、任意1日についての熱伝導問題を解析してそう内温度分布式を導くことにする。更に、解析の便宜上、以下のような仮定を設定する。

- (1) 積込まれた各素材、水分は一樣にむらなく混合されているものとする。
- (2) 堆肥そう側壁面及びそう底部下端での熱損失はそう上端に比して小さく無視できる。
- (3) 堆肥化過程中の任意の24時間において、物性値は一定で変化しないものとする。
- (4) そう内時間平均見掛け発熱量は、積み高さ方向  $z$  のみの関数で近似できる。

以上の仮定の下に、堆肥そう内温度モデルはFig. 1のように示され、そう内の時間平均見掛け発熱量(真の発熱量と水分蒸発に伴う潜熱損失熱量の差)を  $G(z)$  とすれ

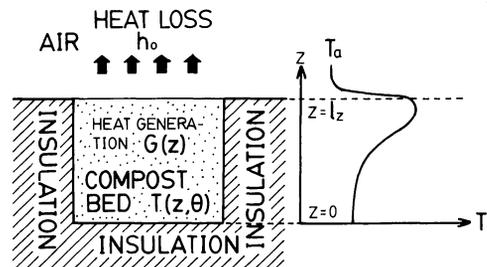


Fig. 1 Schematic representation for heat transfer in a compost bed

昭和58年4月7日 日本農業気象学会全国大会  
昭和58年5月11日 受理

ば、堆肥化過程中の任意1日についての熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{G(z)}{C_p \rho} \quad \begin{pmatrix} 0 < z < l_z \\ 0 < \theta < 24 \end{pmatrix} \quad (1)$$

大気と接するそう上端は、総括伝熱係数を  $h_0$  として次のような境界条件が与えられる。

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} = h_0 [T - T_a(\theta)] \quad (z = l_z) \quad (2)$$

そう下端では、仮定(2)より近似的に、

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (z = 0) \quad (3)$$

任意1日の初期において、

$$T = f(z) \quad (\theta = 0) \quad (4)$$

解析を進めるにあたり、 $G(z)$  及び初期温度分布  $f(z)$  は、仮定(2)のそう下端断熱条件より偶関数で表わされるとし、この内  $G(z)$  については実験初期におけるそう内温度履歴に基づく試算により高さ  $z$  の4次関数で近似し得ると思われた(小森・関, 1980)ので、式(5)のように表示した。又、 $f(z)$  については温度測定点の数を考慮して6次関数とした。

$$\frac{G(z)}{C_p \rho} = a_0 + a_2 z^2 + a_4 z^4 \quad (5)$$

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

ただし、素材積み込み時においては、式(6)の係数  $b_2 = b_4 = b_6 = 0$ 、 $b_0$  は一定の値となる。これら七つの係数は、微生物の有機物分解速度に関する諸因子を包含するパラメーターとみなされる。

そして、一般解を求めるにあたり、次のような温度変数  $\phi$  を導入し、式(1)~(4)を書き換えると、

$$\phi = T + \frac{1}{\kappa} \int_0^z \left[ \int_0^z \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right] dz \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \kappa \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad \begin{pmatrix} 0 < z < l_z \\ 0 < \theta < 24 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$- \frac{\partial \phi}{\partial z} = H_z [\phi - P(z, \theta)] \quad (z = l_z) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (z = 0) \quad (10)$$

$$\phi = Q(z) \quad (\theta = 0) \quad (11)$$

ただし、 $H_z = h_0/K$ 、 $P(z, \theta)$ 、 $Q(z)$  は次式で示される。

$$P(z, \theta) = \frac{1}{\kappa} \left\{ \int_0^z \left[ \int_0^z \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right] dz + \frac{1}{H_z} \int_0^z \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right\} + T_a(\theta) \quad (12)$$

$$Q(z) = f(z) + \frac{1}{\kappa} \int_0^z \left[ \int_0^z \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right] dz \quad (13)$$

この場合、Green関数  $u(z, z', \theta - \tau)$  (Carslaw・Jaeger, 1959) を用い、式(9)~(11)の条件を満たす

式(8)の解を求めると、

$$u(z, z', \theta - \tau) = 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(\alpha_i^2 + H_z^2) \cos(\alpha_i z')}{(\alpha_i^2 + H_z^2) l_z + H_z} \cdot \cos(\alpha_i z) \cdot e^{-\kappa \alpha_i^2 (\theta - \tau)} \quad (14)$$

$$\phi = \int_0^{l_z} u(z, z', \theta) Q(z') dz'$$

$$+ \kappa H_z \int_0^{\theta} u(z, l_z, \theta - \tau) P(l_z, \tau) d\tau \quad (15)$$

よって、 $T$  は、

$$T = \int_0^{l_z} u(z, z', \theta) Q(z') dz'$$

$$+ \kappa H_z \int_0^{\theta} u(z, l_z, \theta - \tau) P(l_z, \tau) d\tau$$

$$- \frac{1}{\kappa} \int_0^z \left[ \int_0^z \frac{G(z)}{C_p \rho} dz \right] dz \quad (16)$$

ただし、 $\alpha_i$  は次式の正根である。

$$\alpha_i \cdot \tan(\alpha_i l_z) = H_z \quad (17)$$

## 2.2 そう内見掛発熱量推算法

今、積み込み後  $n$  日目、時刻  $m$  時を  $\theta = 0$  とすれば、その時刻におけるそう内温度分布から  $b_0 \sim b_6$  を算出し、 $f(z)$  が決定される。次に、 $n+1$  日目、時刻  $m$  時のそう内高さ方向任意の三つの位置(後述のごとく、本実験では  $z = 0.2, 0.4, 0.6$  m とした)の温度実測値を式(16)に代入すれば、各位置に対応した三つの式が得られる。これらの式中には、 $G(z)$  すなわち式(5)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、 $n \sim n+1$  日間での時間平均見掛発熱量  $G(z)$  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。

## 3. 実験装置及び実験方法

### 3.1 素材配合割合と物性値

本実験に使用した堆肥素材は、牛ふん、鶏ふん、のこくず、裁断稲わらであり、Table 1 に示すような配合割合〔混合調整後のC/N比は約24であり、最適堆肥化条件とされている30(久保田・細野, 1977)に近い値である〕とした。又、予備実験で得られた混合素材の物性値、平均含水率をTable 2 に示す。比熱  $C_p$  は混合法による測定値を最小2乗法によって整理した含水率との相関実験式(18)から求め、

$$C_p = 0.308 + 0.692 (w/100) \quad (18)$$

有効熱伝導率  $K$  はKrischer(1963)による並列モデルに準拠した推算式(小森・関, 1981)より求めた。含水率  $w$  は堆肥化実験が長期にわたることから、その間の蒸発による低下を考慮して最適条件とされている40~60%

Table 1 Components of sample materials

Component	Cattle feces	Chicken manure	Sawdust	Straw
dry-based wt %	52.8	18.7	24.7	3.8

Table 2 Physical properties and moisture content of sample materials

Sample materials	Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Heat capacity $C_p$ [kcal/kg °C]	Thermal conductivity $K$ [kcal/m hr °C]	Moisture percentage $w$ [%]
A	900	0.86	0.61	80
B	860	0.81	0.65	72.5

(久保田・細野, 1977)よりも高い値に調整した。

なお、ここで行なった二つの実験では、実験期間60日の間に、平均含水率はそれぞれ80%から72%、72.5%から60.5%へと減少したが、熱伝導率にはほとんど変化がなく、見掛密度、比熱も約10%減少した程度だったので、実験全期間を通じて物性値は一定であるとした。

### 3.2 堆肥そう

実験に使用した堆肥そうは、Fig. 2に示すごとく、厚さ150mmのスチロフォーム板を直方体形に張り合わせた内容積2.23 m<sup>3</sup>の断熱容器である。素材投入後、大気と接するそう上端は水分蒸発抑制とふく射熱侵入防止を兼ねた保温のため、100~150mmの厚さに稲わらを敷き積めた。

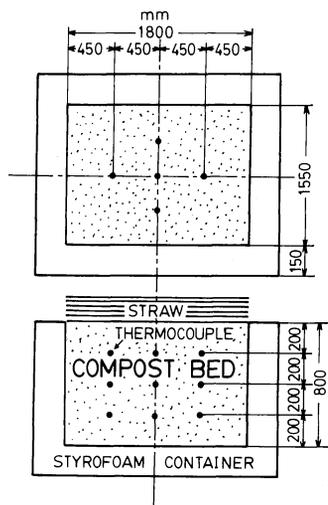


Fig. 2 Experimental apparatus

なお、堆肥そうは敷地面積約400 m<sup>2</sup>のガラスハウス内の土の上にそのまま設置した。

### 3.3 実験方法

農業気象の都合上、施設栽培は10~3月の6か月間に行なわれることが多い。そこで、本実験は実例への適用を考慮して9月末以降の秋冷期から開始した。堆肥そう

内には高さ方向に約200 mmの間隔で同一高さ面に5点ずつ、合計15点の銅-コンスタンタン熱電対をそう入し、実験中の各点の温度を自記記録計により実測した。測定点の数は多いほどよいが、実際には素材混合にある程度むらがあり、発熱量の小さいこの実験では高さ方向の温度分布に実験誤差によるバラツキが生ずることを考えて測定点間隔を200 mmと広くした。なお、本実験は既述のごとく、ガラスハウス内で行なったが、外の気象条件の推移に伴い、昼夜の室温は周期的に変化しつつ経日的に降下した。任意1日間における室温の最高最低温度差は最大10°Cにも達したが、その変化に対するそう内温度変動の追随は、 $z=0.6$  mの位置で約 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ と小さかったので、昼夜の平均室温を日数に対してFig. 3のように図示し、直線近似式を用いて算出した平均室温を $T_a(\theta)$ とした。

## 4. 実験結果とその考察

### 4.1 そう内温度履歴

Fig. 3に堆肥そう内温度履歴測定結果の一例を示した。この場合、同一高さ面の5点の温度実測値には大差がなかった(最大 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ )ので平均値を図示した。この図から、堆肥化過程で発生する発熱量は大きくはないが、発熱期間は相当長いことがわかる。又、発熱による温度上昇は上部から下部へと移行する。そう内の最高温度は約55°Cで、 $z=0.6$  mでは約15日で最高温度に達したが、 $z \leq 0.4$  mの領域では47~52°Cまでしか上昇しなかった。結果的には3.1で述べた理由によって含水率を相当高い値に調整したために通気性が低下し、後述のごとく上部か

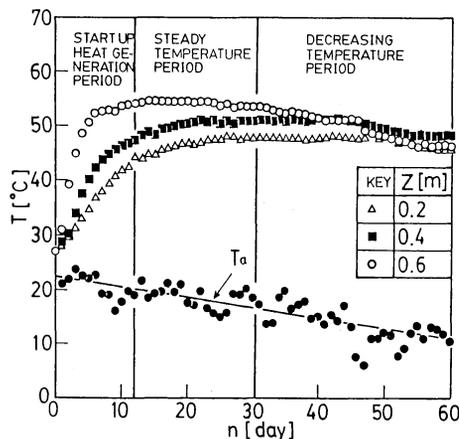


Fig. 3 Temperature history for Run A

らの酸素の拡散が妨げられたためである。

#### 4.2 発熱量推算方法の妥当性

比較法による実測結果によれば、ここで使用した堆肥そう側壁及び底部(スチロフォーム板)の熱伝導率は、 $0.035 \text{ kcal/m hr } ^\circ\text{C}$ 、稲わらのそれは  $0.21 \text{ kcal/m hr } ^\circ\text{C}$  であった。これらの値とその厚さから熱抵抗を計算し、側壁面積と上部の面積を考慮して損失熱量を比較すると、側壁部でのそれは上部の値の約21%と比較的大きく、正確には3次元的取り扱いが必要なことを意味する。又、そう底部では、壁を通して地中へ非定常熱伝導により熱損失が起こる。一般に、ハウス内地表面での熱授受の機構は複雑なので、土壌内温度分布の推定やそう下端からの損失熱量の厳密な算定は困難だが、通常、地温の日変化は0.5mの深さになると消失するとされており(内嶋, 1980), 堆肥そうと接する土壌表面から下方0.5mの位置では近似的に日平均室温に等しい地温が維持されると考えられる。又、後述の発熱量算出結果より堆肥そう下部ではほとんど見掛け上の発熱がないこと、堆肥化実験が長いので堆肥そう下部、スチロフォーム板、堆肥そう直下の土壌内の温度は擬定常的な分布を示すとして、 $z=0 \sim 0.2\text{m}$  までの堆肥そう内熱伝導方程式(発熱項を削除)、底部スチロフォーム板内の熱伝導方程式、土壌内の熱伝導方程式を解析し、得られた定常解から底部での損失熱量を概算すると上部の値の約10%となる。ただし、土壌の熱伝導率は岡田(1980)より  $1.0 \text{ kcal/m hr } ^\circ\text{C}$  とした。

そこで、側壁及び底部からの熱損失がここで述べた1次元的取り扱いにより推算された  $G(z)$  に及ぼす影響を検討するため、実験全期間におけるそう内平均温度と平均室温の差(Run Aでは  $31.5^\circ\text{C}$ 、Run Bでは  $37.4^\circ\text{C}$ )に基づいて側壁からの損失熱量を算出すると同時に、上述の方法で底部からの損失熱量を算出してその和を堆肥そう容積で除し、それに相当する発熱量を推算するとRun Aでは  $243 \text{ kcal/m}^3 \text{ hr}$ 、Run Bでは  $292 \text{ kcal/m}^3 \text{ hr}$  となる。後述のごとく、推算された  $G(z)$  は、発熱域においてはこれらの値に比して十分大きいので、側壁及び底部からの熱損失の影響は小さく、これらの値を単に補正值として  $G(z)$  に加算すれば、おおむね妥当な推算値が得られるものと考えられる。

又、ここでは近似解の成立時間区分を24hrとしたが、本実験において特に温度変化の著しい初めの5日間について、時間区分を6hr、12hrとして  $G(z)$  を試算した結果、24hrの場合に比べて数%の相違があった程度で大差はなかった。したがって、ここで取り上げた見掛け発熱量推算法は、上述の補正值を考慮すればほぼ妥当である。

#### 4.3 発熱量推算結果についての考察

Figs. 4, 5に既述の手順で推算された  $G(z)$  を堆積日数

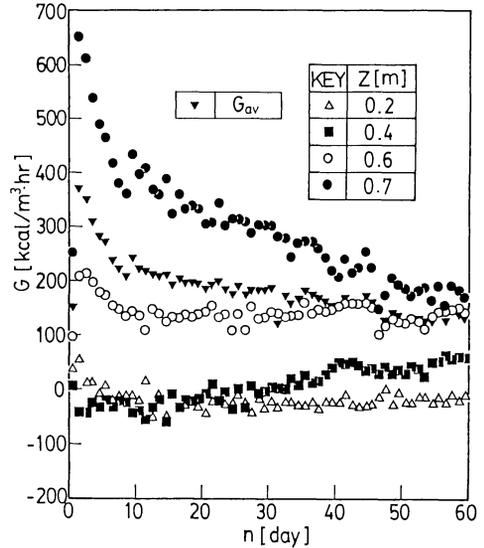


Fig. 4 Calculated results of the apparent rate of heat generation for Run A

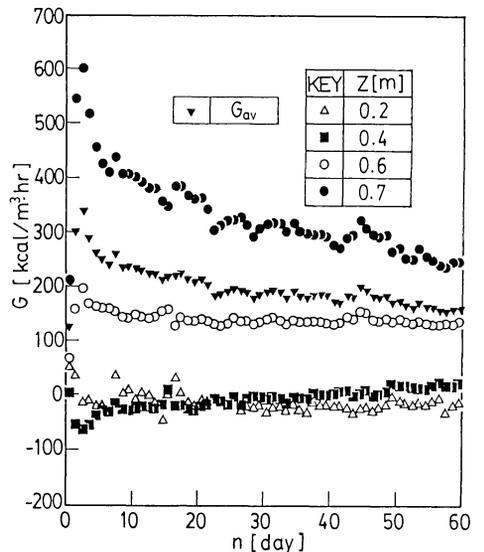


Fig. 5 Calculated results of the apparent rate of heat generation for Run B

に対して図示した。ここで得られた二つの計算値はよく似た傾向を示す。発熱は主に  $z=0.4\text{m}$  以上の上部で起こり、それ以下の下部では見掛け上発熱が起こっていない。これは、大気に近い上部では酸素が拡散し、好気性発酵が支配的であったのに対し、無酸素状態に近い中、下部では嫌気性状態となり発熱量が小さかったためである。このため、 $z \leq 0.4\text{m}$  では計算上は無視したが、側壁、底部での熱損失が見掛け発熱量を上回り、特に積込み後30日までは  $G(z) < 0$  となって算出される日が多くなったと考えられる。しかし、中間部においても上部からの乾燥の

逐次進行による通気性の増大と熱伝導によって徐々に高温状態に達した後、発熱量がしたいに上昇する。このことは  $z=0.4\text{m}$  での  $G(z)$  が、30日以降少しずつ上昇している事実によって示唆される。

上述のごとく、本実験では、発熱はおおむね大気開放部から  $0.4\text{m}$  の範囲でしか起こらなかったため、 $G(z)$  の場所的平均値として発熱域 ( $z=0.4\sim 0.8\text{m}$ ) に限定して算出した値  $G_{av}$  を Figs. 4, 5 に同時に図示した。 $G_{av}$  は積込み後 2, 3 日目に最大値に達した後徐々に減少したが、経日的変化は比較的小さく、全期間を通じての  $G_{av}$  の平均値は Run A については  $185\text{ kcal/m}^3\text{ hr}$ 、Run B については  $200\text{ kcal/m}^3\text{ hr}$  であった。この値に前述の補正値を加算すると、Run A については  $209\text{ kcal/m}^3\text{ hr}$ 、Run B については  $229\text{ kcal/m}^3\text{ hr}$  となる。

一方、実験前後の水分減少量から水分蒸発による潜熱損失量を概算すると、Runs A, B ともに約  $100\text{ kcal/m}^3\text{ hr}$  であったことから、発熱域での真の発熱量はそれぞれ、 $309\text{ kcal/m}^3\text{ hr}$ 、 $329\text{ kcal/m}^3\text{ hr}$  であったと推測される。

#### 4.4 そう内気相中酸素濃度分布と気相率の関係

既述のごとく、発熱域は酸素の拡散領域に等しいが、そう内気相中の酸素濃度分布を概算して気相率との関係を検討する。この場合、実験全期間を通じて発熱域が大きく変化しないので、酸素濃度はほぼ定常的な分布を示すと考えられる。又、微生物(菌体)は、湿潤状態の堆肥素材中に溶け込んだ分子状酸素を摂取して代謝反応を行なうが、2.1 の仮定(1)のごとく、堆肥素材がそう内に均一に分散しているとし、更に簡単のため、近似的に菌体の生物学的活性が素材の単位乾燥重量あたりについて一定であると考え、菌体数が乾燥密度  $\rho_d$  に比例するとみなせば、酸素摂取速度は、菌糸ペレット内の呼吸 (Aiba et al., 1973) の取り扱いと同様、乾燥密度と呼吸能(乾燥固体  $1\text{ kg}$  あたりの酸素摂取速度)の積で表わされる。又、本実験では、強制的な通気を施しておらず、酸素摂取速度は空気と湿潤堆肥素材の界面での酸素移動が律速になると考えられるため、呼吸能は気相中酸素濃度に比例するとみなせる。この場合、拡散方程式、境界条件は次式で与えられる。

$$\rho_a(\Psi - \Psi_w) \frac{D_{O_2}}{\mu} \frac{d^2 X}{dz^2} - \beta \rho_a X \rho_d = 0 \quad (19)$$

$$\frac{dX}{dz} = 0 \quad (z=0) \quad (20)$$

$$X = X_0 \quad (z=l_z) \quad (21)$$

ただし、 $\Psi - \Psi_w$  は混合素材の気相率を表わすが、間隙率  $\Psi$  は  $1 - \rho_d/\rho_s$ 、体積含水率  $\Psi_w$  は  $(\rho_d/\rho_w)\{w/(100-w)\}$  で表わされるので、 $\Psi - \Psi_w$  は  $1 - \rho_d/\rho_s - (\rho_d/\rho_w)$

$\{w/(100-w)\}$  に等しい。式(20)、(21)を満たす式(19)の解は、

$$X = X_0 \cosh\left(z \sqrt{\frac{\beta \rho_d}{\Psi - \Psi_w} \cdot \frac{\mu}{D_{O_2}}}\right) / \cosh\left(l_z \sqrt{\frac{\beta \rho_d}{\Psi - \Psi_w} \cdot \frac{\mu}{D_{O_2}}}\right) \quad (22)$$

計算あたり、拡散係数  $D_{O_2}$  は空気-酸素の2成分系について Hirschfelder の推算式(化学工学便覧, 1978)を用い、屈曲度  $1/\mu$  は近似的に土壌における値、 $0.66$  (Penmann, 1940)を用いた。又、 $\Psi - \Psi_w$  は乾燥固体の真密度  $\rho_s$  を  $1500\text{ kg/m}^3$  (小森・関, 1981)、水の密度  $\rho_w$  を  $1000\text{ kg/m}^3$  として算出した。なお、 $\beta$  は菌体の活性に関する定数であるが、その値は発熱域での平均発熱量(発熱速度)が約  $300\text{ kcal/m}^3\text{ hr}$  であることと、好気性発酵における発熱量が消費酸素  $1\text{ kg}$  あたり約  $3600\text{ kcal}$  (山根, 1980)であることから次式を満たす根として決定した。

$$\frac{\rho_a \beta \rho_d}{0.4} \int_{0.4}^{0.8} X dz = \frac{300}{3600} \quad (23)$$

Run B における酸素濃度分布の計算結果を Fig. 6 に示す。 $z=0.4\text{m}$  において  $X=0.012\text{ kg-O}_2/\text{kg-dryair}$  ( $=X_{cri}$ ) であり、この値以上であれば好気的条件が満たされると推測される。

次に、気相率と酸素濃度分布の関係を検討するため、想定された幾つかの  $\rho_d$  に対して、 $\Psi - \Psi_w$  をパラメーターとして式(22)より酸素濃度分布を推算した結果を Fig. 7 に示す。なお、図中には対応する  $\Psi_w$  の値も併記した。 $\Psi - \Psi_w$  が大きいほど ( $\Psi_w$  が小さいほど)、又、 $\rho_d$  が小さいほど ( $\Psi$  が大きいほど) 酸素の拡散領域が拡大することがわかる。又、この図から好気的条件を満たす ( $X \geq X_{cri}$ ) 積込み有効高さを推定することもできる。本実験では  $\rho_d$  が約  $200\text{ kg/m}^3$  (Run A では  $180\text{ kg/m}^3$ 、Run B では

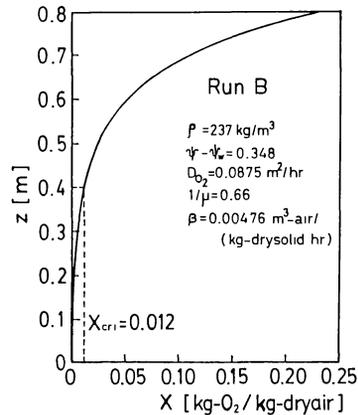


Fig. 6 Oxygen concentration distribution within a compost bed for Run B

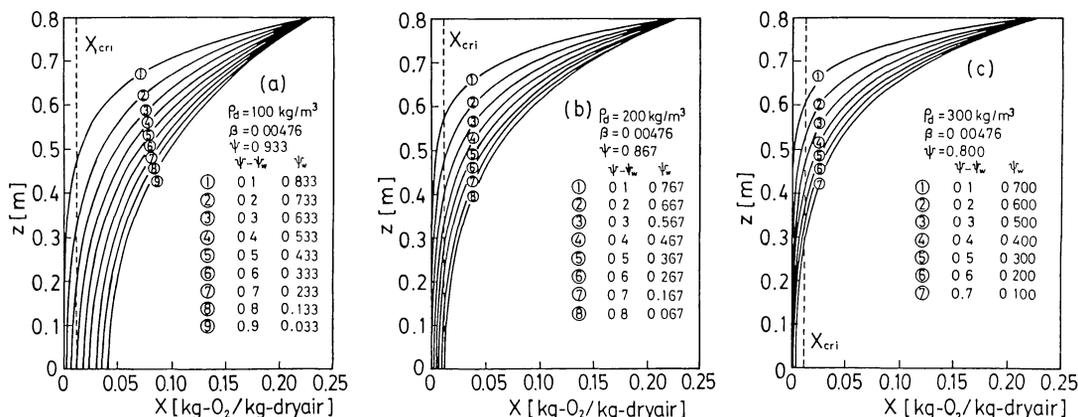


Fig. 7 Relationship between oxygen concentration distribution and  $\Psi - \Psi_w$  [(a) - at  $\rho_a = 100 \text{ kg/m}^3$ , (b) - at  $\rho_a = 200 \text{ kg/m}^3$ , (c) - at  $\rho_a = 300 \text{ kg/m}^3$ ]

237  $\text{kg/m}^3$ )であったが、そう底部まで好氣的に保つには  $\Psi - \Psi_w \geq 0.8$  ( $\Psi_w \leq 0.067$ ) にしなければならないことになり、これを  $w$  に換算すると  $w \leq 25\%$  であり、この程度の含水率では堆肥化反応は起こりにくいと考えられる。一方、 $\rho_a = 100 \text{ kg/m}^3$  の場合には  $\Psi_w$  が 0.533、すなわち  $w$  が 84% であってもそう底部まで好氣的になるが、 $\rho_a = 300 \text{ kg/m}^3$  にもなるとそう底部まで好氣的環境に保つのは不可能なことがわかる。以上の結果は推定値ではあるが、本実験のように高密度、高水分条件の場合にそう内全体を好氣的環境に保つには、積み高さやこの場合よりも小さくするか、あるいはそう底部も大気開放とし、上下両面から酸素の拡散を行なわせる必要があると思われる。

### 5. 結 論

農畜産廃棄物の堆肥化発熱実験により、堆肥そう内温度変化過程の実測並びに発熱量の推算を行なった結果、以下のような知見を得た。

1) ここで提示された堆肥そう内発熱量推算法は、堆肥化過程におけるそう内熱移動機構を物理的にはあくするのに便利な方法である。

2) 発熱域は乾燥密度(間隙率)や気相率(体積含水率)によっても異なるが、本実験では大気開放部より0.4mまでの好氣的領域に限定され、その領域での場所平均見掛け発熱量は約  $200 \text{ kcal/m}^3 \text{ hr}$ 、真の発熱量は約  $300 \text{ kcal/m}^3 \text{ hr}$  であると推測された。

3) 発熱域での平均発熱量を  $300 \text{ kcal/m}^3 \text{ hr}$  としてそう内気相酸素濃度分布を概算し、乾燥密度(間隙率)、気相率(体積含水率)によって好氣的領域がどのように変わるかが試算された。

なお、そう内の発熱量は基質(主に炭素源)消失量から

も推定されると思われるので、今後、この方面からの検討も行ない、組成変化量との関連において本法の妥当性を更に詳しく検討する予定である。

謝辞：本研究を行なうにあたり、実験用施設の使用並びに実験用資材の提供等、多大の御援助を賜った石川県農業試験場の関係各位に感謝の意を表する。

### 〔使用記号〕

- $C_p$  混合堆肥素材の比熱 ( $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ )
- $D_{O_2}$  空気中の酸素拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{hr}$ )
- $f(z)$  堆肥そう内初期温度分布 ( $^\circ\text{C}$ )
- $G(z)$  堆肥そう内見掛け発熱量 ( $\text{kcal/m}^3 \text{ hr}$ )
- $h_0$  総括伝熱係数 ( $\text{kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$ )
- $K$  混合堆肥素材の有効熱伝導率 ( $\text{kcal/m hr}^\circ\text{C}$ )
- $l_z$  混合堆肥素材の積み高さ (m)
- $n$  堆積経過日数 (day)
- $T$  堆肥そう内温度 ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_a$  ハウス内気温 ( $^\circ\text{C}$ )
- $w$  混合堆肥素材の含水率 (%)
- $X$  気相中酸素濃度 ( $\text{kg-O}_2/\text{kg-dryair}$ )
- $X_0$  堆肥そう上端の酸素濃度 ( $\text{kg-O}_2/\text{kg-dryair}$ )
- $X_{\text{cri}}$  臨界酸素濃度 ( $\text{kg-O}_2/\text{kg-dryair}$ )
- $z$  積み高さ方向距離 (m)
- $\beta$  定数 ( $\text{m}^3 - \text{air}/\text{kg-drysolid hr}$ )
- $\theta$  時間 (hr)
- $\kappa$  混合堆肥素材の有効熱拡散率 ( $\text{m}^2/\text{hr}$ )
- $\rho$  混合堆肥素材の見掛け密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_a$  空気密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_d$  混合堆肥素材の乾燥密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_s$  乾燥固体の真密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_w$  水の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

- $\mu$  屈曲度の逆数(-)  
 $\Psi$  混合堆肥素材の間隙率(-)  
 $\Psi_w$  混合堆肥素材の体積含水率(-)

#### 引用文献

- 1) Aiba, S., Humphrey, A. E. and Millis, N. F., 1973: *Biochemical engineering, 2nd ed.*, Tokyo Univ. Press, Tokyo, 167-171
- 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) 内嶋善兵衛, 1980: 耕地における太陽エネルギーの配分「施設農業への新エネルギー利用(太陽・風編)», 高倉他編], フジテクノシステム, 74-87
- 4) 太田成美, 1980: 施設園芸におけるエネルギー需給「施設農業への新エネルギー利用(太陽・風編)», 高倉他編], フジテクノシステム, 15-21
- 5) 岡田益己, 1980: 伝熱, 「温室設計の基礎と実際(三原義秋編著)」, 養賢堂, 30-39
- 6) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959: *Conduction of Heat in Solids, 2nd ed.* Clarendon Press, Oxford, 353-361
- 7) 久保田 宏・細野恭生, 1977: コンポスティング-有機質固体廃棄物の土壌還元, 化学工学, **41**, 364-368
- 8) Krischer, O., 1963: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 2 Aufl.*, Springer Verlag, 268-277
- 9) 小森友明, 1981: 農業利用エネルギー雑感, 北信越工業教育協会, **29**, 9-12
- 10) 小森友明・関 平和, 1980: 有機質資材の発熱特性に関する研究, 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 511-513
- 11) 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
- 12) Penmann, H. L., 1940: Gas and vapour movements in the soil (II), *Journal of Agri. Sci.*, **30**, 570-581
- 13) 山根恒夫, 1980: 生物反応工学, 産業図書, 132-133
- 14) 頼実正弘ら, 1978: 物性定数, 化学工学便覧, 改訂4版, 丸善, 67

#### Summary

For the purpose of utilization of heat generated in composting process to the protected cultivation as a supplementary energy source for agriculture, the mechanism of heat transfer in composting process of mixed organic materials mainly consist of livestock wastes and farmyard wastes was investigated and the rate of heat generation within a compost bed was estimated based on the experimental results of composting process performed in a styrofoam container. Main results obtained in this paper were as follows.

1) The method for estimation of the rate of heat generation presented here would be convenient to investigate physically the mechanism of heat transfer in a compost bed.

2) In these experiments, it has become known that heat was generated almost in the aerobic region between the surface of the compost bed contacting to the atmosphere and the position 0.4m below the surface, and that the average value of the apparent rate of heat generation in the above region would be about 200 kcal/m<sup>3</sup>hr and the true value of the rate of heat generation would be 300 kcal/m<sup>3</sup>hr.

3) Oxygen concentration distributions in the gaseous phase of the compost bed were estimated, and it was shown that the aerobic region would be varied with the dry density (or the porosity) and the volumetric air content (or the volumetric moisture content) of the compost bed.

Hereafter, it will be needed to investigate the availability of the above stated method in detail by relating to the amount of consumption of the substrate.