

堆肥発酵熱の抽出・蓄積に関する研究

第2報 循環通水方式による熱抽出・蓄熱過程の理論解析

関 平和・小森友明

(金沢大学工学部土木建設工学科)

A Study of Extraction and Accumulation of the Heat
Generated in Composting Process

Part 2. A Theoretical Analysis of Heat Extraction and
Accumulation Process by Water Circulation

Hirakazu SEKI and Tomoaki KOMORI

(Department of Civil Engineering, Faculty of Technology,
Kanazawa University, Kanazawa 920)

1. 緒 言

第1報(関・小森, 1985b)では、蓄熱そう内に投入された100lの水を、堆肥そう(積まれた混合堆肥素材の容積は0.245m³)内に埋設された円管内に断続的もしくは連続的に循環通水し、堆肥発酵熱を抽出しつつ蓄熱する実験を行った。そして、1)断続実験では、室温が10℃以上の場合、蓄熱そう内の水温を目標温度(30℃とした)に上昇させ得たが、室温が5℃以下では蓄熱そう壁からの熱損失が大きくなり不可能であったこと、2)連続的な循環通水により定常状態に達した際、蓄熱そう内水温は目標温度より低く、かつ堆肥そう内温度も高温菌生育下限温度(40℃)以下になったこと、3)発生熱量に対する抽出熱量の割合は断続実験では17~26%、定常操作実験では27~32%であったことなどの結果を得た。

以上の結果は、堆肥そう、蓄熱そうの規模、埋設管の配管密度、気象条件などによって変わり得るもので、必ずしも一般的なものとはいえない。従って、利用目的(土壌加温など)に要求される諸条件(必要な熱量、水温、装置規模の制約など)を満足するように本操作を計画するには、伝熱過程のシミュレーションモデルを開発し、設計・操作条件と堆肥そう内温度、蓄熱そう内水温の関係をはあくしておかなければならない。

本報では、最適な設計・操作条件の模索・決定に資するため、循環通水による熱抽出・蓄熱操作の熱移動過程

を理論的に解析し、第1報の実験結果と比較してその妥当性を検討した。なお、断続的な熱抽出・蓄熱過程の理論解析は別法(関・小森, 1985a)の手法に準じたものだが、そこでは通水管への流入水温を一定としたのに対し、この場合は循環通水による蓄熱そう内の水温変化に伴い通水管への流入水温が時間的に変化するため、解析モデルがその場合とは幾分異なる。

2. 熱抽出・蓄熱過程の理論解析

既述のごとく、第1報では堆肥そう内平均温度を40℃以下に下げないように断続的に循環通水を繰り返す非定常実験と定常状態に達するまで連続的に循環通水を持続する二種類の実験結果を報告した。ここでは、各場合における熱抽出・蓄熱過程を数学的に解析する。

2.1 断続的熱抽出・蓄熱過程

断続的な非定常熱抽出・蓄熱過程における堆肥そう内温度、蓄熱そう内水温の経時変化はFig.1のごとく模式化される。循環通水中は熱抽出が行われている(熱抽出期間)ので、堆肥そう内温度は徐々に降下し、蓄熱そう内水温は上昇する。通水停止後、そう内温度は徐々に回復する(温度回復期間)が、蓄熱そう内水温は壁を通して外界へ放熱する分だけ低下する。このような熱抽出・温度回復のサイクルを蓄熱そう内水温が目標温度に達するまで繰り返す。

この場合、熱抽出期間と堆肥そう内温度回復期間では伝熱機構が異なるので別々に解析を行う。

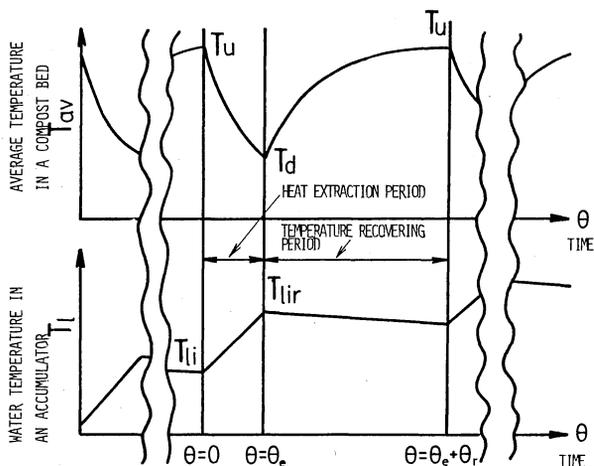


Fig. 1. Illustrative examples of changes in the average temperature in a compost bed and the water temperature in an accumulator with time for the heat extraction and accumulation process by intermittent water-circulation.

2.1.1 熱抽出期間

熱抽出期間とは、循環通水により堆肥そう内平均温度が上限値 T_u から下限値 T_d に低下するまでの期間である。熱抽出過程の厳密な解析は困難なので、数学的取り扱いの都合上、以下の仮定を設定する。

1) 堆肥そう内に保有される熱量は水との熱交換のみによって失われるものとし、堆肥そう側壁及び上・下端から外界への熱損失は抽出熱量に比して相対的に小さく、無視できるものとする。

2) 混合堆肥素材の熱的物性値は既知かつ一定である。

3) 通水管は堆肥そう内に等間隔 ($2r_2$) に配置されているが、隣接する通水管から等距離の位置 ($r=r_2$) では温度勾配が 0 である。

4) 通水管を取り巻く混合素材の形状は近似的に、内外半径 r_1, r_2 、長さ l_c (通水管全長) の中空円柱とみなす。

5) 熱抽出過程において、堆肥そう内熱伝導方程式中の発熱項は他項 (蓄熱項、熱伝導項) に比して小さく、無視できる (関・小森, 1985a)。

6) 循環通水開始前のそう内温度は均一とみなす。

7) 通水管内の水の流れは栓流 [ピストン・フロー, 押し流れ (例えば, 井本, 1972)] とみなせる。

8) 管内水温は管長方向に直線的に増加し [通水管の出入口水温差が小さい (前報の実験では $2\sim 3^\circ\text{C}$) ので、混合素材から管内水への熱流束は管長方向にほぼ均一とみなせるため]、管内平均水温は管の出入口水温の算術平均値で近似できる。

9) 堆肥そうと蓄熱そうをつなぐ配管系から外界への

熱損失は無視できる。

以上の仮定の下で、熱抽出期間の熱移動モデルは Fig. 2 のごとく示される。

この場合、別報 (関・小森, 1985a) で述べたごとく、管長方向に平均化された堆肥そう内熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \theta} = \kappa \left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \right) \quad (r_1 < r < r_2) \quad (1)$$

ただし、 $\tilde{T} = (1/l_c) \int_0^{l_c} T(r, z, \theta) dz$ を表す。

通水管外表面では総括伝熱係数を U として

$$K \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} = U (\tilde{T} - \tilde{T}_i) \quad (r=r_1) \quad (2)$$

ただし、 U は、既報 (関・小森, 1984) の式 (3) で表される。

仮定 3) より $r=r_2$ では熱移動がないと考えて

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} = 0 \quad (r=r_2) \quad (3)$$

そして、初期条件は、

$$\tilde{T} = T_u (= \text{const.}) \quad (\theta = 0) \quad (4)$$

一方、管内水の熱収支式は、

$$u \frac{T_{lou} - T_l}{l_c} = \frac{2r_1 U}{C_{pl} \rho_l r_1^2} (\tilde{T} - \tilde{T}_i) \quad (r=r_1) \quad (5)$$

蓄熱そう内の熱収支式は水の出入りによる正味のエンタルピー変化と蓄熱そう壁から外界への熱損失を考慮すれば、

$$\frac{\partial T_l}{\partial \theta} = \frac{\pi r_i^2 u}{V_v} (T_{lou} - T_l) - \frac{h_v S_v}{C_{pl} \rho_l V_v} (T_l - T_a) \quad (6)$$

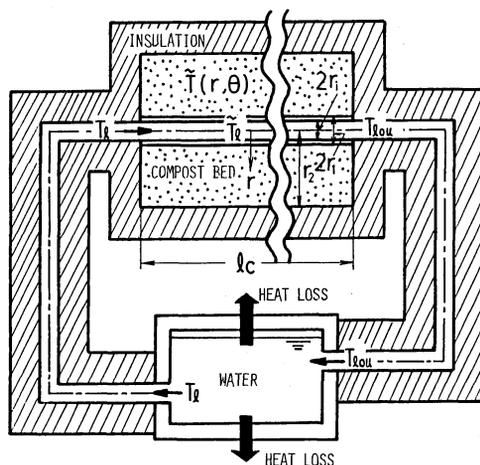


Fig. 2. Schematic representation of heat transfer for the heat extraction and accumulation process by intermittent water-circulation.

初期条件は、

$$T_l = T_{li} \quad (\theta = 0) \quad (7)$$

仮定7より管内平均水温 \tilde{T}_l を $(T_l + T_{lou})/2$ と置き、式(6)に代入して \tilde{T}_l , T_{lou} を \tilde{T} , T_l で表した後、解析を容易にするために温度変数 $\Phi (= \tilde{T} - T_u)$, $\Phi_l (= T_l - T_{li})$, 無次元時間 $\theta [= \kappa \theta / (r_2 - r_1)^2]$, 無次元距離 $\xi [= r / (r_2 - r_1)]$ を導入し、式(1)~(8)を書き換えると書き換えられた式中には五つの無次元数、 $\eta_2 (= r_2 / r_1)$, $B_i (= U(r_2 - r_1) / K)$, $N [= 2\pi r_1 l_c U / (C_{pl} \rho_l \pi r_i^2 u)]$, $\Theta_s (= \kappa \{V_v / (\pi r_i^2 u)\} / (r_2 - r_1)^2)$, $H_v [= h_v S_v / (C_{pl} \rho_l \pi r_i^2 u)]$ が含まれる。これらはそれぞれ配管密度、通水管壁から水への対流熱伝達による熱抵抗と混合素材内部の熱伝導による熱抵抗の比(ピオ数)、混合素材と管内水の熱交換の難易度(移動単位数)、蓄熱そう内の水の平均滞留時間の無次元数、蓄熱そう内の水の出入りによる交換熱量と壁からの損失熱量の比を表すパラメーターである。

ラプラス変換法(Carslaw・Jaeger, 1959)により、書き換えられた境界条件、初期条件を満たす Φ , Φ_l の解は次のごとく導かれる。

$$\Phi = B^* \sum_{n=1}^{\infty} f(\alpha_n, \xi) \{ \Theta_s (T_u - T_{li}) e^{-\alpha_n^2 \theta} + H_v (T_u - T_a) \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_n^2 \theta}}{\alpha_n^2} \} \quad (8)$$

$$\Phi_l = \frac{N^*}{\Theta_s} \int_0^{\theta} \Phi(\nu, \tau) e^{-\frac{\theta-\tau}{\Theta_s} (N^* + H_v)} d\tau + [N^* (T_u - T_{li}) - H_v (T_{li} - T_a)] \frac{1 - e^{-\frac{\theta}{\Theta_s} (N^* + H_v)}}{N^* + H_v} \quad (9)$$

ただし、 $\nu = 1 / (\eta_2 - 1)$, $N^* = N / (1 + N/2)$, $B^* = B_i / (1 + N/2)$ を表し、 $f(\alpha_n, \xi)$ は付録に示す通りである。式(8)より、堆肥そう内平均温度は次式で与えられる。

$$\Phi_{av} = \int_{\nu}^{\nu \eta_2} 2\pi \xi \Phi d\xi / \int_{\nu}^{\nu \eta_2} 2\pi \xi d\xi = B^* \sum_{n=1}^{\infty} g(\alpha_n) \{ \Theta_s (T_u - T_{li}) e^{-\alpha_n^2 \theta} + H_v (T_u - T_a) \cdot (1 - e^{-\alpha_n^2 \theta}) / \alpha_n^2 \} \quad (10)$$

ただし、 $g(\alpha_n)$ は、

$$g(\alpha_n) = \frac{-4Z_1(\alpha_n \nu) / \{ \nu(\eta_2^2 - 1) \}}{\alpha_n \{ \nu(N^* + H_v - \alpha_n^2 \Theta_s) - 2B^* \Theta_s \} Z_0(\alpha_n \nu) - \{ 2\Theta_s \alpha_n^2 + \nu B^* (H_v - \alpha_n^2 \Theta_s) \} Z_1(\alpha_n \nu) + \nu \eta_2 \alpha_n (N^* + H_v - \alpha_n^2 \Theta_s) B_1(\alpha_n \nu) + \nu \eta_2 B^* (H_v - \alpha_n^2 \Theta_s) B_0(\alpha_n \nu)} \quad (11)$$

又、堆肥そう内平均温度が $T_d (= \text{const.})$ に達するまでの所要時間を θ_e (無次元) とすれば、 θ_e は次式を満たす根として計算される。

$$T_d - T_u = B^* \sum_{n=1}^{\infty} g(\alpha_n) \{ \Theta_s (T_u - T_{li}) e^{-\alpha_n^2 \theta_e} + H_v (T_u - T_a) (1 - e^{-\alpha_n^2 \theta_e}) / \alpha_n^2 \} \quad (12)$$

2.1.2 堆肥そう内温度回復期間

通水停止時点では、堆肥そう内で r 方向に大きな温度こう配が生じている。しかし、ある程度時間が経過すると、堆肥そう内温度は半径方向にほぼ均一化し、次の熱抽出が可能な状態まではほぼ均一に温度が回復する。そこでここでは、温度回復に要する期間を、通水停止後そう内温度が管半径方向にほぼ均一化するまでの期間(そう内温度不均一期間)と、その後更にそう内温度が均一に上昇する期間(そう内温度均一期間)の二つの期間に分けてそう内温度の解析を行うことにする(Fig. 3)。

a) そう内温度不均一期間

この期間は比較的短い(実験的に約5hrと思われた)ので、堆肥そう内の熱移動(熱伝導)は主としてそう内温度の均一化に寄与するのみで、外界への熱損失が無視できるものと仮定すると、そう内温度変化の模式図はFig. 4のごとく示され、堆肥そう内熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \theta} = \kappa \left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \right) + \frac{G_0}{C_p \rho} \quad (r_1 < r < r_2) \quad (13)$$

管壁での境界条件は、総括熱係数を U_b とすれば、

$$K \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} = U_b (\tilde{T} - \tilde{T}_l) \quad (r = r_1) \quad (14)$$

ただし、温度回復時には管内水が静止しているので、その場合の伝熱係数 U_b は式(2)の U とは明らかに異なるはずだが、 U_b を 5~40 kcal/m² hr °C の範囲で変えて試行計算を行った結果、 U_b の変動が堆肥そう内平均温度に及ぼす影響がほとんどなかったため、後述の3.1の計算では U_b は U と同一の値を用いた。

2.1.1と同様、 $r = r_2$ で熱移動がないと仮定すれば、

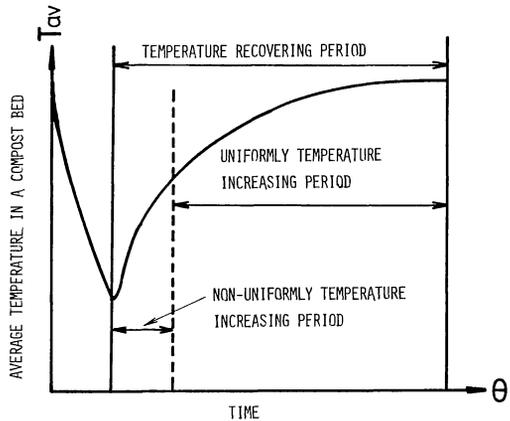


Fig. 3. Concept of temperature recovering pattern in a compost bed.

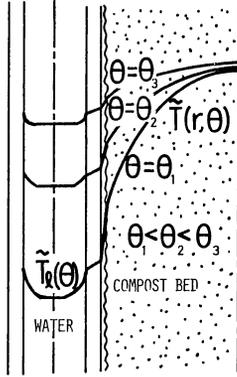


Fig. 4. Illustrative examples of change in the temperature profile in a compost bed with time.

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} = 0 \quad (r = r_2) \quad (15)$$

初期条件は、通水停止時の値に等しいから、

$$\tilde{T} = \Phi(\theta_e, \xi) + T_u \quad (\theta = 0) \quad (16)$$

一方、静止している管内水の熱収支式は、

$$\pi r_1^2 C_{pl} \rho_l \frac{d\tilde{T}_l}{d\theta} = 2\pi r_1 U_b (\tilde{T} - \tilde{T}_l) \quad (r = r_1) \quad (17)$$

初期条件は、

$$\begin{aligned} \tilde{T}_l = & (N^*/2) \{ \Phi(\theta_e, \nu) + T_u \} \\ & + (N^*/N) \{ \Phi_l(\theta_e) + T_{li} \} \end{aligned} \quad (18)$$

初期条件式(16)が複雑なので、この問題の解析解を得るのは困難だが、差分解法により数値解を求めることができる。

b) そう内温度均一上昇期間

そう内温度がほぼ均一化した後、そう内の発熱と外界への熱放散の影響を考えて堆肥そう内の熱収支式を組み立てると、

$$C_p \rho V \frac{dT_{av}}{d\theta} = G_0 V - hA(T_{av} - T_a) \quad (19)$$

初期条件は、

$$T_{av} = T_{ri} \quad (\theta = 0) \quad (20)$$

ただし、 T_{ri} は不均一期間終了時のそう内平均温度を表す。解は、

$$\begin{aligned} T_{av} = & (T_{ri} - T_a - \frac{G_0 V}{hA}) \exp(-\frac{hA}{C_p \rho V} \theta) \\ & + \frac{G_0 V}{hA} + T_a \end{aligned} \quad (21)$$

c) 蓄熱そう内水温

通水停止時から次回の通水開始時までの蓄熱そう内水温変化を支配する熱収支式は、壁から外界への熱損失を

考慮すれば、

$$C_{pl} \rho_l V_v \frac{dT_l}{d\theta} = -h_v S_v (T_l - T_a) \quad (22)$$

初期条件は通水停止時の値であり、式(9)より

$$T_l = \Phi_l(\theta_e) + T_{li} = T_{lir} \quad (\theta = 0) \quad (23)$$

解は、

$$T_l = (T_{lir} - T_a) \exp(-\frac{h_v S_v}{C_{pl} \rho_l V_v} \theta) + T_a \quad (24)$$

2.2 連続的熱抽出・蓄熱過程

次に、連続的通水により定常状態に達した場合を考え。定常状態では、堆肥そう内で発生する熱量が外界への放熱量と水による抽出熱量の和と釣り合う(Fig.5)ので、

$$G_0 V = hA(T_{av} - T_a) + Q_e \quad (25)$$

ここで、熱抽出に有効な部分 $[\pi r_1^2 (\eta_2^2 - 1) l_c]$ のみに着目し、その中の等価見掛け発熱量を G_1 とすれば、抽出熱量は次式で表される。

$$Q_e = G_1 \pi r_1^2 (\eta_2^2 - 1) l_c \quad (26)$$

式(25)、(26)より、 G_1 は、

$$G_1 = \frac{G_0 V - hA(T_{av} - T_a)}{\pi r_1^2 (\eta_2^2 - 1) l_c} \quad (27)$$

この場合、 Q_e は通水管を通し混合素材から水へ伝達される熱量 $2\pi r_1 U l_c \{ \tilde{T}_s - (T_{lou} + T_l) / 2 \}$ 、水が管内を通過する間に得る熱量 $C_{pl} \rho_l u \pi r_1^2 (T_{lou} - T_l)$ 、蓄熱そう壁から外界へ失われる熱量 $h_v S_v (T_l - T_a)$ に等しいはずである。すなわち、

$$\begin{aligned} G_1 \pi r_1^2 (\eta_2^2 - 1) l_c = & C_{pl} \rho_l u \pi r_1^2 (T_{lou} - T_l) \\ = & 2\pi r_1 l_c U \{ \tilde{T}_s - (T_{lou} + T_l) / 2 \} \\ = & h_v S_v (T_l - T_a) \end{aligned} \quad (28)$$

ただし、 \tilde{T}_s は混合素材内の温度を管壁まで外挿して得られる温度の z 方向平均値で、式(28)から T_l 、 T_{lou} を消去し、次式のごとく得られる。

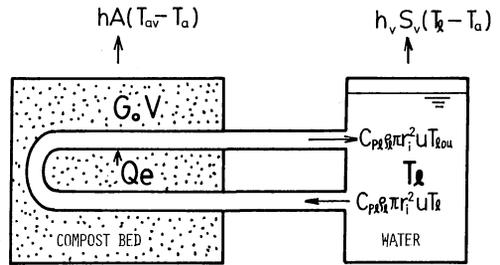


Fig. 5. Schematic representation of heat transfer for the heat extraction and accumulation process by continuous water-circulation.

$$\begin{aligned} \tilde{T}_s = G_1 \pi r_1^2 (\eta_2^2 - 1) l_c \\ \left[\frac{1}{2\pi r_1 U l_c} + \frac{1}{2C_{pl} \rho_l \pi r_1^2 u} + \frac{1}{h_v S_v} \right] + T_a \end{aligned} \quad (29)$$

この場合、堆肥そう内熱伝導方程式、境界条件は次のように与えられる。

$$\frac{d^2 \tilde{T}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\tilde{T}}{dr} + \frac{G_1}{K} = 0 \quad (r_1 < r < r_2) \quad (30)$$

$$\tilde{T} = \tilde{T}_s \quad (r = r_1) \quad (31)$$

$$\frac{d\tilde{T}}{dr} = 0 \quad (r = r_2) \quad (32)$$

式(31)、(32)を満たす式(30)の解は、

$$\tilde{T} = \tilde{T}_s + \frac{G_1 r_1^2 \eta_2^2}{2K} \ln \xi - \frac{G_1 r_1^2}{4K} (\xi^2 - 1) \quad (33)$$

従って、堆肥そう内平均温度は、

$$\begin{aligned} T_{av} &= \int_{r_1}^{r_2} \tilde{T} \cdot 2\pi r dr / \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr \\ &= \tilde{T}_s + \frac{G_1 r_1^2 \eta_2^2}{4K} \left(\frac{2\eta_2^2 \ln \eta_2^2}{\eta_2^2 - 1} - 1 \right) \\ &\quad - \frac{G_1 r_1^2}{8K} (\eta_2^2 - 1) \end{aligned} \quad (34)$$

一方、蓄熱そう内水温は式(28)より次式のごとく導かれる。

$$T_l = \frac{G_1 \pi r_1^2 (\eta_2^2 - 1) l_c}{h_v S_v} + T_a \quad (35)$$

3. 結果と考察

3.1 断続的熱抽出・蓄熱操作

Fig. 6に、前報(関・小森, 1985b)で述べた第1回目及び第3回目の断続実験について、堆肥そう内平均温度、蓄熱そう内水温の実験結果を実線で、2.で述べた解による計算結果を破線で示す。なお、計算に使用した物性値、操作条件はTable 1に示す通りである。この内、 K はKrischerの並列モデルに準拠した推算式(小森・関, 1981)、 C_p は含水率との相関実験式(関・小森, 1983)から求めた。又、 U は通水終了時のそう内温度分布を擬定常温度分布であるとみなして推算された通水管外壁近傍の境膜伝熱係数、管壁の熱伝導率、Colburnの式(内田, 1972)から求められた h_i を既報(関・小森, 1984)の式(3)に代入して算出した。又、 h 、 h_v はグラスウール、スチロフォーム板の熱伝導率とその厚さから算出した。

Table 2に、各サイクルにおける通水所要時間、堆肥そう内温度回復所要時間の平均値、並びに蓄熱そう内温度がほぼ目標温度(30℃)に到達するまでの全所要時間の実験結果と計算結果を対比して示す。

Fig. 6及びTable 2によれば、第1回目の断続実験で

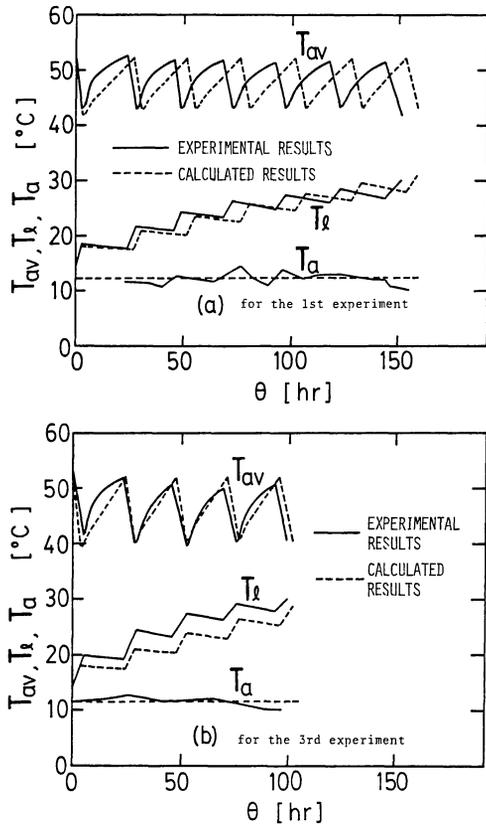


Fig. 6. Comparisons of the calculated results with the experimental results on the average temperature in a compost bed and the water temperature in an accumulator for the intermittent water-circulation [(a) for the 1st experiment, (b) for the 3rd experiment].

は、各サイクルの所要時間は実験値よりも計算値の方が若干大きく、全所要時間は約5%大きい。一方、第3回目の実験では、全所要時間は両者ではほぼ一致しているが、各サイクルの熱抽出所要時間は計算値の方が実測値よりも約1hr小さい。前報の実験では、堆肥そう内の環境条件がそう内の位置によって相当異なり、通水開始時に上、中、下部で5~10℃の温度差があった。又、通水の開始及び停止は自動記録計に記録された r 方向任意位置の温度実測値を読みつつ感覚的に制御したので、その際そう内平均温度を必ずしも的確にはあくできたとはいえない。従って、実測値と計算値の間のこの程度の差異は避けられないものと思われる。

又、温度回復期において、堆肥そう内温度の経時変化の傾向は実験値と計算値とで異なっている。すなわち、実験では上に凸の経時変化を示すのに反し、計算ではほ

Table 1. Physical properties and operating conditions used for calculation.

Experiment	Thermal conductivity of the compost bed K [kcal/mhr°C]	Heat Capacity of the compost bed C_p [kcal/kg°C]	Apparent density of the compost bed ρ [kg/m ³]	Heat capacity of water C_{pl} [kcal/kg°C]	Density of water ρ [kg/m ³]	Moisture content in the compost bed w [kg/kg]	Volume of the compost bed V [m ³]	Heat transfer coefficient h [kcal/m ² hr°C]
1st	0.66	0.65	690	1.0	1000	0.495	0.245	0.2
3rd	0.62	0.63	617	1.0	1000	0.465	0.243	0.2
Experiment	Surface area of the container for the compost A [m ²]	Volume of water in the accumulator V_v [m ³]	Heat transfer coefficient h_v [kcal/m ² hr°C]	Surface area of the accumulator S_v [m ²]	Inner radius of the buried pipe r_i [m]	Outer radius of the buried pipe r_o [m]	Effective radius of the buried pipe r_e [m]	Overall heat transfer coefficient U [kcal/m ² hr°C]
1st	2.38	0.1	0.35	1.3	0.004	0.005	0.075	40
3rd	2.38	0.1	0.35	1.3	0.004	0.005	0.075	40
Experiment	Total length of the buried pipes l_o [m]	Velocity of water in the buried pipe u [m/hr]	Apparent rate of heat generation G_o [kcal/m ³ hr]	Initial temperature of water in the accumulator T_{iiz} [°C]	Atmospheric temperature T_a [°C]	Temperature in the bed at time starting to supply water T_u [°C]	Temperature in the bed at time stopping to supply water T_d [°C]	
1st	4.9	1057	252	14.7	12.5	52.0	43.0	
3rd	4.9	1057	293	14.2	11.5	52.0	40.5	

Table 2. Comparisons of the calculated results with the experimental results on the average of the heat extraction period, the average of the temperature recovering period and the total period of the heat extraction and accumulation process.

Experiment	Average of the heat extraction period [hr]		Average of the temperature recovering period [hr]		Total period of the heat extraction and accumulation process [hr]	
	Experimental	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental	Calculated
1st	4.5	4.1	20.0	21.7	152	159
3rd	5.7	4.6	17.8	20.0	99	102

ば直線的に増大する。これは、この期間中に見掛け発熱量が時間的、場所的に変化した可能性があること、外界への熱損失を表す伝熱係数 h が小さ目に見積られたことなどが原因と考えられる。

しかし、全体的に計算値は実験値と比較的よく一致しており、理論的取り扱いはほぼ妥当であると思われる。

3.2 連続的熱抽出・蓄熱操作

Table 3 に前報で述べた連続的熱抽出・蓄熱実験において定常状態に達したときの堆肥そう内平均温度 T_{av} 、蓄熱そう内水温 T_l を、2 で述べた式 (34)、(35) による計算結果と対比して示した。ところで、式 (27) から計算さ

れた G_1 は G_0 の約 1.2 倍になり、当初この値をそのまま式 (34)、(35) に代入して T_{av} 、 T_l を算出したが実測値よりも 8~12°C 程度高い値になった。これは 3.1 で指摘されたごとく、 h が幾分過小に見積られたことにより G_1 が若干大きく算出されたためと思われる。このように、実際の G_1 は式 (27) から計算された値よりも小さいと思われるので、Table 3 に示した結果は G_1 を G_0 と同一値とみなし T_{av} 、 T_l を再計算したものである。

このようにして得られた T_{av} の計算値は実験値よりも 0.7~2.4°C 高いもののほぼそれに近い値である。一方、 T_l の計算値は実験値よりも 3.1~7°C 高く、両者の差が比

Table 3. Comparisons of the calculated results with the experimental results on the average temperature in a compost bed and the water temperature in an accumulator at the steady state in the continuous water-circulation.

Experiment	Average temperature in a compost bed		Water temperature in an accumulator	
	T_{av} [°C]		T_w [°C]	
	Experimental	Calculated	Experimental	Calculated
1st	32.7	35.1	24.4	31.4
2nd	26.6	27.6	19.0	24.8
3rd	20.7	21.4	16.2	19.4

較的大きい。この原因の一つは、連続実験を行った際、外気温が5°C以下と低く、堆肥そうと蓄熱そうをつなぐ配管系からの熱損失が無視できなかったためと思われる。すなわち、堆肥そう内で抽出された熱量がすべて蓄熱そうへ運ばれたわけではなく、配管系を通過する間にその一部が放散したためと考えられる。このことは、計算で得られた T_{av} と T_1 の差が2~3.7°Cであるのに対し、実験による両者の差が4.5~8.3°Cと2倍以上にもなっていることから示唆される。

4. 結 言

循環通水による堆肥発酵熱の抽出・蓄熱操作の理論解析を行い、以前に行った実験結果と比較し、以下の結果を得た。

1) 断続的な熱抽出・蓄熱操作の理論解析による計算結果は、通水停止後の堆肥そう内温度回復の傾向において実測値と若干の差異が認められたものの、そう内温度、蓄熱そう内水温は実験結果と比較的よく一致し、理論的取り扱いの妥当性が示された。

2) 連続的熱抽出・蓄熱操作の理論解析では、堆肥そう内平均温度は実測値とほぼ一致したが、蓄熱そう内水温の計算値は堆肥そうと蓄熱そうをつなぐ配管系からの熱損失を考慮に入れなかったため、実測値よりも幾分高めの値となった。その影響を考慮し、理論的取り扱いを若干修正する必要があると思われる。

付 録

式(8)中の $f(\alpha_n, \xi)$ は、

$$f(\alpha_n, \xi) = \frac{2\alpha_n \{J_0(\alpha_n \xi) Y_1(\alpha_n \nu \eta_2) - Y_0(\alpha_n \xi) J_1(\alpha_n \nu \eta_2)\}}{\alpha_n \left\{ \nu(N^* + H_v - \alpha_n^2 \Theta_s) - 2B^* \Theta_s \right\} Z_0(\alpha_n \nu) - \{2\Theta_s \alpha_n^2 + \nu B^* (H_v - \alpha_n^2 \Theta_s)\} Z_1(\alpha_n \nu) + \nu \eta_2 \alpha_n (N^* + H_v - \alpha_n^2 \Theta_s) B_1(\alpha_n \nu) + \nu \eta_2 B^* (H_v - \alpha_n^2 \Theta_s) B_0(\alpha_n \nu) \right\}} \quad (A-1)$$

ただし、上式中の $Z_m(x)$ 、 $B_m(x)$ はそれぞれ次式で表され、

$$Z_m(x) = J_m(x) Y_1(x \eta_2) - Y_m(x) J_1(x \eta_2) \quad (A-2)$$

$$B_m(x) = J_m(x) Y_0(x \eta_2) - Y_m(x) J_0(x \eta_2) \quad (A-3)$$

これらは中空円柱の熱伝導問題にしばしば現れる関数(例えば、川下, 1971; 城塚ら, 1966)である。

又、 α_n は次式を満たす n 番目の正根である。

$$\alpha_n (N^* + H_v - \alpha_n^2 \Theta_s) Z_1(\alpha_n \nu) + B^* (H_v - \alpha_n^2 \Theta_s) Z_0(\alpha_n \nu) = 0 \quad (A-4)$$

[使用記号]

- A 堆肥そうの壁表面積(m²)
- B_i ビオ数(-)
- C_p 混合堆肥素材の比熱(kcal/kg °C)
- C_{pl} 水の比熱(kcal/kg °C)
- G_0 堆肥そう内見掛け発熱量(kcal/m³ hr)
- G_1 堆肥そう内有効見掛け発熱量(kcal/m³ hr)
- H_v 無次元数(-)
- h 堆肥そう壁からの熱損失を表す伝熱係数(kcal/m² hr °C)
- h_i 通水管内境膜伝熱係数(kcal/m² hr °C)
- h_s 通水管外境膜伝熱係数(kcal/m² hr °C)
- h_v 蓄熱そうからの熱損失を表す伝熱係数(kcal/m² hr °C)
- K 混合堆肥素材の有効熱伝導率(kcal/m² hr °C)
- l_c 通水管全長(m)
- N 移動単位数(-)

Q_e	水による熱抽出速度(kcal/hr)	Θ_s	蓄熱そう内の平均滞留時間の無次元数(-)
r	通水管半径方向距離(m)	θ	時 間(hr)
r_i	通水管内半径(m)	κ	混合堆肥素材の有効熱拡散率(m ² /hr)
r_1	通水管外半径(m)	ρ	混合堆肥素材の見掛け密度(kg/m ³)
r_2	混合堆肥素材の有効半径(m)	ρ_l	水密度(kg/m ³)
S_v	蓄熱そうの壁表面積(m ²)	γ_s	配管密度を表す無次元数(-)
T_a	室 温(°C)	ξ	無次元距離(-)
T_{av}	堆肥そう内平均温度(°C)		
T_d	堆肥そう内の下限温度(°C)		
T_l	蓄熱そう内水温(°C)		
T_{li}	蓄熱そう内初期水温(°C)		
T_{lou}	通水管出口水温(°C)		
T_{lrr}	通水停止時点の蓄熱そう内水温(°C)		
T_{ri}	不均一上昇期間終了時の堆肥そう内平均温度(°C)		
T_u	堆肥そう内の上限温度(°C)		
\widetilde{T}	堆肥そう内温度の管長方向平均値(°C)		
\widetilde{T}_l	管内水温の管長方向平均値(°C)		
U	管外径基準の総括伝熱係数(kcal/m ² hr°C)		
U_b	管内水静止時の U (kcal/m ² hr°C)		
u	管内水の流速(m/hr)		
V	混合堆肥素材の容積(m ³)		
V_v	蓄熱そう容積(m ³)		
z	通水管長方向距離(m)		
Φ	温度変数(°C)		
Φ_l	温度変数(°C)		
Θ	無次元時間(-)		
Θ_e	熱抽出時間の無次元数(-)		

引用文献

- Carlsaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959: *Conduction of Heat in Solids, 2nd ed.*, Clarendon Press, Oxford, 327-352.
- 井本立也, 1972: 反応工学, 日刊工業新聞社, 69.
- 川下研介, 1971: 熱伝導論(第2版), オーム社, 251.
- 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.
- 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.
- 関 平和・小森友明, 1984: 埋設管内通水方式による堆肥発酵熱抽出の試み, 農業気象, **40**(3), 219-228.
- 関 平和・小森友明, 1985a: 埋設管内通水方式による堆肥発酵熱抽出の試み(第2報 近似解法と操作条件の検討), 農業気象, **41**(1), 57-61.
- 関 平和・小森友明, 1985b: 堆肥発酵熱の抽出・蓄積に関する研究(第1報 循環通水方式による熱抽出・蓄熱実験), **41**(3), 257-264.
- 城塚 正・平田 彰・村上昭彦, 1966: 化学技術者のための移動速度論, オーム社, 77-78.
- 内田秀雄, 1972: 大学演習伝熱工学, 裳華房, 95-146.

Summary

A theoretical analysis of an operation of extraction and accumulation of the heat generated in composting process by water circulation was made. The calculated results of the average temperature in a compost bed and the water temperature in an accumulator were compared with the experimental results obtained previously.

1) For the case of the intermittent water-circulation, there were slight differences between the calculated results and the experimental results of the average temperature in the bed during temperature recovering periods after the end of water-circulation. However, the calculated results of the water temperature in the accumulator, the available time for heat extraction and the recovery time of temperature in the bed agreed relatively well with the experimental results. The theoretical model was fairly fit for this case.

2) For the case of the continuous water-circulation, the calculated results of the average temperature in the bed were in fair agreement with the experimental results. The calculated results of the water temperature in the accumulator were however 3 to 7 degrees higher than the experimental results. It could be due to the heat loss through the pipes connecting the container for the compost with the accumulator, which was not allowed for in the theoretical model. It is necessary to modify the analytical model by taking account of this kind of heat loss.