

# 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

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 1. Experiments for Heat Extraction and  
Accumulation by Water Circulation)

Hirakazu SEKI and Tomoaki KOMORI

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

### 1. 緒 言

前報(関・小森, 1984b)では, 堆肥発酵熱の抽出方法の一例として埋設管内通水方式を取り上げ, 熱抽出過程における堆肥そう内温度, 管出口水温について実験的, 理論的に検討を行った。その結果, 比較的小型の堆肥そう(実験では $0.71\text{m}^3$ であった)を用い, そう内温度を $40^\circ\text{C}$ (高温菌生育下限温度)[例えば, 相田ら, 1974]以下に下げることなく通水管の出入口水温差をある程度大きくする( $10^\circ\text{C}$ 以上)には, 断続的に通水を繰り返す非定常熱抽出操作によらねばならないことを指摘した。しかし, 前報の実験は水が通水管内を一回しか通過しない場合を対象としたもので, 一たん出口から排出した水を堆肥そう内へ再循環させる場合についてのものではない。より高い水温を確保するためにも, 少量の水で経済的に熱抽出を行うためにも実用的には循環通水方式の方が有利であろうと想像される。循環通水方式については, 既に北陸三県農業試験場(石川・福井農試, 新潟園試, 1982)が実験的に検討しており, 例えば $8\text{m}^3$ の堆肥そうに長さ $4\text{m}$ の塩化ビニル管を埋設し,  $6^\circ\text{C}$ ,  $30\text{l}$ の水を $3\text{l}/\text{min}$ で連続的に循環通水し,  $30^\circ\text{C}$ 程度の温水を得たなどの結果を報告している。しかし, 利用目的に沿った堆肥そう, 蓄熱水そうの規模の設定や, 熱抽出後の堆肥そう内温度回復についての検討は不十分と思われる。

本研究では, 伝熱工学的見地からこの方式のより詳しい知見を得るため, 循環通水による熱抽出時の堆肥そう

内温度, 蓄熱そう内水温の時間的変化, 水温が目標値に達するまでの所要時間, 堆肥そう内の発生熱量と抽出熱量の比などを実験的に検討した。

### 2. 実験装置及び実験方法

#### 2.1 実験装置

実験装置の全体図をFig. 1に示す。実験装置は堆肥そう, 蓄熱水そう, 両者をつなぐ配管系, 温度測定用機器から成る。

堆肥そうは, 厚さ $10\text{mm}$ の塩化ビニル板で作成した容積 $0.28\text{m}^3$ ( $700\text{mm}\times 500\text{mm}\times 800\text{mm}$ )の箱型容器で, その側面に厚さ $200\text{mm}$ のスチロフォーム板で断熱を施したもので, 前報のものよりも規模は幾分か小さいが, 構造上はほぼ同一のものである。側壁部は混合素材の切返しと搬出の便宜を考え, 取りはずし可能とした。そう下部には空気室を設け, その側面に任意の間隔であけられた通気孔を介し空気の入出が自然に行われるようにした。そう内にはFig. 2(a)に示すように市販のさび止め塗料を薄く塗布した通水管[一本の長さが $750\text{mm}$ , 内径 $8\text{mm}$ , 外径 $10\text{mm}$ の鋼管(SUS304)]を7本, 千鳥型に配置し, 管内水の流れが直列となるよう, 一本一本を合成ゴム管で連結した。通水管のそう内埋設部分の全長は $4.9\text{m}$ である。そう内の温度測定を行うために銅-コンスタンタン熱電対を上, 中, 下部[Fig. 2(a)]に合計14個取り付けた。

実験に使用した堆肥素材は, 鶏ふん, 米ぬか, おがくずを素材とした有機性物質で, その配合割合は最適堆肥化条件[混合物のC/N比が約30, 含水率が約60%(久保

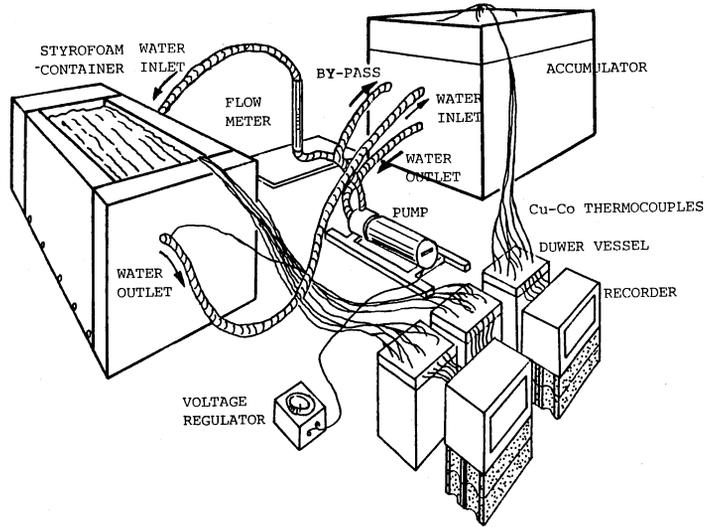


Fig. 1 Survey view of the experimental apparatus

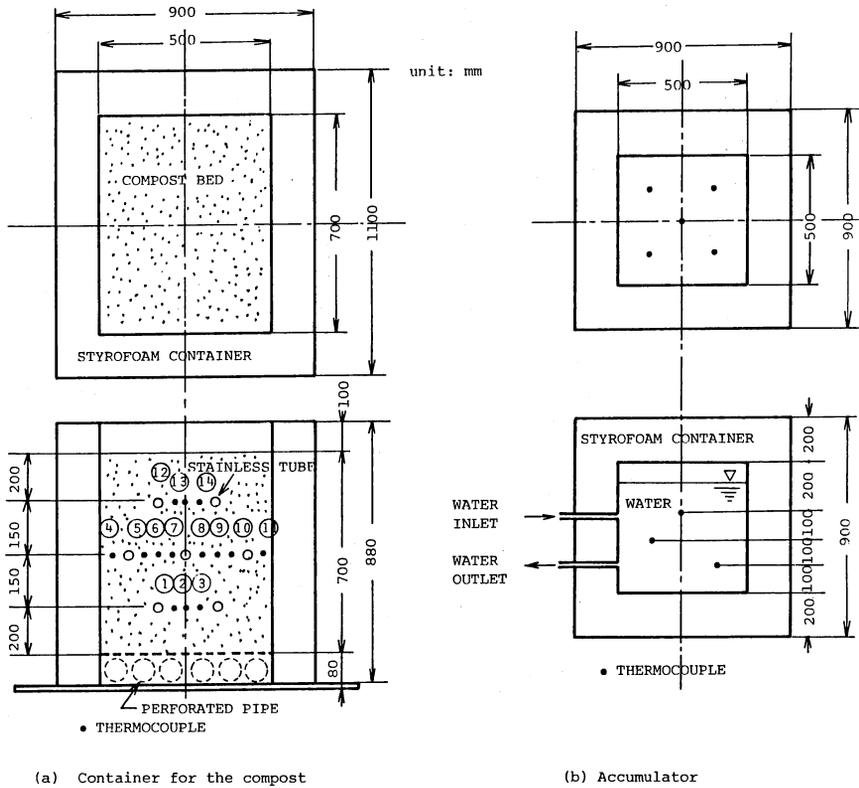


Fig. 2 Details of the experimental apparatus

田ら, 1977))に基づき, 乾物重量比で鶏ふん23%, 米ぬか24%, おがくず53%とした。混合調整された堆肥素材は堆肥そう底面から0.7mの高さまで投入し, 積み込み容積は $0.245\text{m}^3$ とした。混合素材投入後, 堆肥そう上部は熱損失の抑止と通気性保持の二つの効果を考慮してロックウール(厚さ約150mm)を敷いた。

蓄熱そうは, 厚さ10mmの塩化ビニル板で作成した容積 $0.125\text{m}^3$ ( $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 500\text{mm}$ )の箱型容器で, 厚さ200mmのスチロフォーム板で側面及び上・下部に断熱を施したものである。蓄熱そう内水温測定用の熱電対(銅-コンスタンタン熱電対)は, Fig. 2(b)に示す位置に合計5個設置した。なお, 投入水量は100lとした。

蓄熱そうと堆肥そう内埋設管は合成ゴム管で連結した。配管系の途中に送水用の小型ポンプと浮子式流量計を設置した。又, 循環通水時の配管系からの熱損失抑止のため合成ゴム管の周囲を約30mmの厚さのグラスウールで被覆した。

## 2.2 実験方法

実験は金沢大学工学部風洞実験室(敷地面積約 $200\text{m}^2$ )内の一角で行った。混合素材の堆肥そう内への積み込みは1984年11月14日に行い, 混合素材の一次発酵がほぼ終了し, 堆肥そう内温度が著しく低下した時点(1985年1月25日)で混合素材をそう外へ取り出した。その期間(72日間)中, 以下の二通りの方法で熱抽出・蓄熱実験を行った。

### 2.2.1 断続的な熱抽出・蓄熱実験

堆肥そう内平均温度(Fig. 2(a))の上部測定点12, 14, 中央部測定点4, 5, 7, 8, 10, 11, 下部測定点1, 3の値の平均値とした。この値は通水管近傍で熱抽出に有効な混合素材内温度の平均的な値を与えるものと思われる)が約 $50^\circ\text{C}$ まで上昇した時点で通水を開始する。通水量は送水ポンプへの加電圧を変圧器で調整し,  $1\text{l}/\text{min}$ とした。これはこの値以下の流量制御が困難なことと, あまり過大な流量では管の出入口水温差を観測するのが困難なことから経験的に設定したものである。堆肥そう内平均温度が約 $40^\circ\text{C}$ まで低下したとき, 一たん通水を停止する。その後, 堆肥そう内平均温度が約 $50^\circ\text{C}$ まで回復した後, 通水を再開する。以上のサイクルを繰り返し, 蓄熱そう内水温が目標温度, 約 $30^\circ\text{C}$ に達した時点で第一回目の実験を終了する。ここでは堆肥そう内の下限温度を $40^\circ\text{C}$ としたので, この方法で循環通水を繰り返せば蓄熱そう内水温は最大 $40^\circ\text{C}$ 近くまで上昇させ得るはずである。しかし, 蓄熱そう内水温が高くなるにつれて堆肥そう内平均温度との差が小さくな

るので, 通水を繰り返すたびに通水継続時間は徐々に長くなる。特に, 水温が $40^\circ\text{C}$ 近くになると通水継続時間と温度回復所要時間を含めた1サイクルの所要時間は膨大になるものと予想される。その場合はその間の外界への損失熱量も相対的に大きくなるので効果的な熱抽出が期待できないものと考えられる。従って, ここでは目標温度を $30^\circ\text{C}$ とすることにした。その後, 蓄熱そう内の水を入れ替え, 再度この実験を繰り返す。

### 2.2.2 連続的な熱抽出・蓄熱実験

堆肥そう内平均温度が約 $50^\circ\text{C}$ に達した時点で循環通水を開始する。通水を継続し, 蓄熱そう内水温, 堆肥そう内温度がほぼ一定となり, 定常状態に達したとみなされたとき通水を停止する。その後, 堆肥そう内平均温度が約 $50^\circ\text{C}$ まで回復した時点で再度同様の実験を繰り返す。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 混合堆肥素材の含水率, 炭素含有量, 比熱, 見掛け密度

積み込み時, 切返し時, 搬出時の混合堆肥素材の含水率, 炭素含有量, 比熱, 見掛け密度をTable 1に示す。炭素含有量は炭素・窒素同時定量装置(柳本製CNコーダMT500)で測定し, 比熱は含水率との相関実験式(関・小森, 1983)から算出した。又, 見掛け密度, 含水率は経日的な測定が困難なのでTable 1の結果に基づき, 積み込み時から切返し時まで, 切返し時から搬出時までのそれぞれの期間において経日的に直線的に変化するものとみなした。

### 3.2 堆肥そう内平均温度, 蓄熱そう内水温, 室温の経日変化

実験全期間中の堆肥そう内平均温度, 蓄熱そう内水温, 室温の経日変化をFig. 3に示す。ここではまず実験の経過をこれらの温度測定結果の経日変化と関連させつつ記述する。

積み込み後5日目(11月19日)から第一回目の断続実験を開始した。熱抽出とそう内温度回復の1サイクルは概ね1日と考えられた。蓄熱そう内水温は1サイクルごとに階段状に上昇し, 第一回目の実験では合計7サイクル

Table 1 Moisture content, carbon content, heat capacity and apparent density of a compost bed

	moisture content $w$ [%]	carbon content [%]	heat capacity $C_p$ [kcal/kg $^\circ\text{C}$ ]	apparent density $\rho$ [kg/m $^3$ ]
initial	53.4	36.6	0.678	690
at turning	44.6	—	0.617	629
final	56.4	35.5	0.698	554

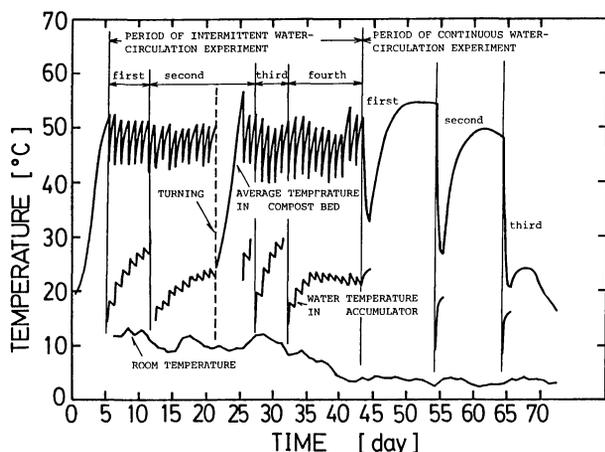


Fig. 3 Time courses of average temperature in the compost bed, water temperature in accumulator and room temperature

(7日間)で蓄熱そう内水温が29.7°Cに達した。蓄熱そうの水を入れ替えた後、第二回目の断続実験を積み込み後12日目から開始した。積み込み後19日目頃から水温上昇が小さくなったので、9サイクル目が終了した時点(積み込み後21日目)で一たん実験を中止し、切返しを行った。そして、そう内温度が57°Cまで回復した積み込み後25日目から蓄熱そう内水温を中止時の値と同一値に調整した後、実験を再開した。切返しの効果により残り2サイクル(10, 11サイクル)で29.6°Cに達した。再び蓄熱そう内の水を入れ替えて第三回目の断続実験を積み込み後28日目から開始した。第三回目の実験では水温上昇率が大きく、4サイクル目で29.9°Cまで水温を上昇させることができた。第四回目の実験では11サイクル目の終了時点でも蓄熱そう内水温を23°C程度にしか上昇させることができなかった。これは、後半からの室温の低下が著しく(5°C以下)、蓄熱そう壁からの放熱量が大きくなったためと思われる。なお、断続実験の各サイクルにおける通水継続時間、そう内温度回復所要時間は後述のTable 2に詳細に示してある。

連続実験は、積み込み後43日目、54日目、64日目の三回行ったが、いずれも定常状態に達するまでの所要時間は24hr程度であった。既述のごとく連続実験は一次発酵の中期以降に行ったので、実験を行うごとに3.3で述べるごとく見掛け発熱量が減少し、堆肥そう内温度、蓄熱そう内水温の定常値は徐々に小さい値になった。

### 3.3 堆肥そう内見掛け発熱量

#### 3.3.1 見掛け発熱量の推算方法とその妥当性

そう内見掛け発熱量の推算は、積み込み時から5日目までの温度上昇期間、切返し後4日間の温度上昇期間、連続実験終了後の温度回復期間については次の方法で行っ

た。これらの期間において堆肥そう内温度を均一と仮定すると、堆肥そう内の熱収支式は、

$$C_p \rho V \frac{dT_{av}}{dt} = G_0 V - hS(T_{av} - T_a) \quad (1)$$

これらの期間は4~10日間と長いので、ここでは幾つかの区間(1日ごと)に分けることにする。区間  $\theta = \theta_i \sim \theta_{i+1}$  で  $T_{av}$  を  $a\theta + b$  なる一次関数で近似し、式(1)を積分すればその区間内の見掛け発熱量の平均値  $G_{0i, i+1}$  は次式で与えられる。

$$G_{0i, i+1} = a C_p \rho \left\{ \frac{a}{2} (\theta_{i+1} + \theta_i) + (b - T_a) \right\} / V \quad (2)$$

一方、断続実験実施期間の見掛け発熱量は次の方法で算出した。断続実験では通水停止時のそう内温度は管近傍で相当低く、管から離れるに従って高い値(通水管壁面温度と隣接通水管から等距離の位置でのそう内温度の差は約15°C)になるため、その時点ではそう内温度を均一とみなすことはできない。しかし、そう内各部分の温度がほぼ均一とみなせる時点(通水停止から5hr後)から更に5hr経過後までの温度が近似的に  $\alpha\theta + \beta$  ( $\alpha, \beta$  は定数)で表せるものとし、その間の外界への熱損失を考慮すれば、式(2)と類似した次式によって  $G_0$  が求められる。

$$G_0 = C_p \rho \alpha + hS(2.5\alpha + \beta - T_a) / V \quad (3)$$

このようにして推算されたそう内平均見掛け発熱量の実験全期間にわたる平均値は188kcal/m<sup>3</sup>hrであった。

上述の推算結果の妥当性は実験前後の炭素含有量の変化量から好気性発酵の代謝反応熱を計算することにより確かめられる。藤田ら(1984)によれば、酸素消費量1kg当たりの有機物の発熱量は3300kcal/kg(106kcal/kg-mol)程度とされている。別報(関・小森, 1984a)で述べた方法に従い、実験期間中の真の(全)発熱量の平均値  $G_t$  を次式によって求めると258kcal/m<sup>3</sup>hrであった。

$$G_t = (3300)(32/12)(\Delta C / \theta_t) / V_{av} \quad (4)$$

又、実験前後の水分減少量は乾燥密度と含水率の変化量から算出すると27.15kgであった。この値に代謝反応で生成される水分量(厳密には明らかでないが、ここでは島田(1982)の取り扱いに準じ、炭素消費量と等モルの水分が生成されるものとみなして見積った)を加え、実験中の全蒸発水分量を見積ると44.9kgとなる。従って、潜熱損失量(速度)は、 $H_L = 44.9 \times L / (\theta_t \cdot V_{av}) = 63.4$  kcal/m<sup>3</sup>hrとなり、そう内見掛け発熱量の全実験期間中の平均値は  $\bar{G}_0 = G_t - H_L = 195$  kcal/m<sup>3</sup>hrと計算される。この結果は上述の推算値(188kcal/m<sup>3</sup>hr)とそれほど差異がなく、上述の推算方法の妥当性が明らかである。

### 3.3.2 見掛け発熱量の経日変化

Fig. 4 に推算された  $G_0$  の経日変化を示す。第一回目の断続実験期間中は  $200\sim 250\text{kcal/m}^3\text{hr}$  であったが、第二回目の断続実験期間では切返しを行うまで約  $200\text{kcal/m}^3\text{hr}$  と若干小さくなった。既に報告したように切返しなどの発熱増進対策を施さない自然状態の堆肥化過程では、見掛け発熱量は経日的にわずかずつ減少するのだが、本実験では切返し後4日目に  $300\text{kcal/m}^3\text{hr}$  程度に達し、その状態が20日間余り維持された。又、合計4回の断続実験実施期間中において見掛け発熱量の著しい低下はなく、除熱による代謝反応の阻害はほとんどないと思われた。しかし、12月27日(43日目)以降は徐々に低下し始め、特に連続実験実施期間中は通水停止直後に発熱量が一時的に増大( $350\text{kcal/m}^3\text{hr}$ )したもののその後の減少が著しかった。これは、既に指摘したごとく連続実験を開始した時期には混合素材の一次発酵が次第に終了に近づいていたことと、通水の断続により堆肥そう内温度が  $40^\circ\text{C}$  を大きく下回る値にまで低下した(一回目…  $32.7^\circ\text{C}$ , 二回目…  $26.6^\circ\text{C}$ , 三回目…  $20.7^\circ\text{C}$ ) ために、高温菌の活動が阻害され、発熱量の減少をきたしたためと考えられる。

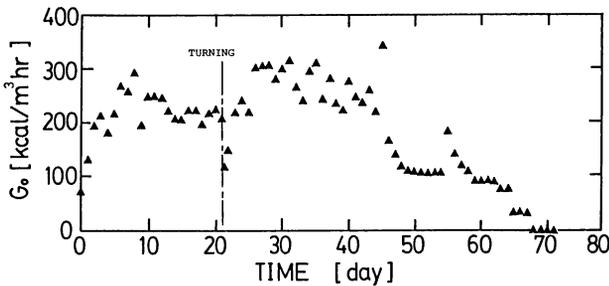


Fig. 4 Time course of the apparent rate of heat generation  $G_0$

### 3.4 蓄熱そう内水温上昇に及ぼす見掛け発熱量の影響

Table 2 に各断続実験における通水継続時間  $\theta_{ext}$  と堆肥そう内の温度回復所要時間  $\theta_{rec}$  を示す。目標水温に到達した第一、二、三回目の断続実験結果を比較すると目標水温に達するまでの所要時間(サイクル数)は見掛け発熱量の大きい順に短かった(第三回目 < 第一回目 < 第二回目)。以前に指摘した(関・小森, 1984b)ように、断続的熱抽出では一回一回の熱抽出時間(通水継続時間)は短いので(本実験では  $3\sim 10\text{hr}$ )、熱抽出速度を増大させる要因は堆肥そう内と管内水の温度差のみで発熱量はほとんど寄与しない。しかし、発熱量が大きい場合は通水継続時間を幾分長くし、1サイクル当たりの抽出熱量を増加させても短時間で再び熱抽出の可能な状態にまで回

復するため、目標水温に達するまでの所要時間が短かったものと考えられる。例えば、切返し後発熱量が上昇した第二回目の後半2サイクルと第三回目では  $\theta_{ext}$  が他の場合と比べて長いにもかかわらず、 $\theta_{rec}$  が相対的に小さかった。

### 3.5 断続実験における熱抽出率

熱抽出の効率を把握することは、装置設計に際しても、別の方法を検討する場合においても重要と思われる。本節では、断続実験における抽出熱量の総量をその期間中に堆肥そう内で発生した見掛けの発熱量の総量で除した値を「熱抽出率」と定義し、その値を算出してみる。見掛け発熱量の総量は見掛け発熱量をその期間にわたり台形公式などで数値積分したものに混合素材の容積を乗じて得られる。抽出熱量の総量は通水時の埋設管の出入口水温差と通水量から瞬時の熱抽出速度を求め、通水継続時間にわたり数値積分したものを全サイクルについて積算した値として得られる。

上述の方法で求めた熱抽出率を各断続実験について Table 3 に示した。第四回目の値が小さいのは、一次発酵の最盛期を過ぎ、混合素材の収縮、沈下に伴い混合素材と通水管との接触状態が幾分不良となり、総伝熱係

数が小さくなったことが一因と考えられる。このことは蓄熱そう内の水温が約  $20^\circ\text{C}$  のときの熱抽出速度が第一、二回目では約  $420\text{kcal/m}^3\text{hr}$  であったのに対し、第四回目では約  $290\text{kcal/m}^3\text{hr}$  程度にしかならなかったことから示唆される。ここで熱抽出速度とは堆肥そう  $1\text{m}^3$  当たり、1hr に抽出される熱量のことである。

以上のごとく、ここで行われた断続実験の熱抽出率は  $17\sim 26\%$  であった。しかし、本実験では積込まれた混合素材全体の容積は  $0.245\text{m}^3$  であったにもかかわらず、熱抽出に有効な通水管まわりの混合素材の容積  $(=\pi(0.075^2 - 0.005^2) \times 4.9 \text{ Fig. 2(a)})$  に示したごとく、本実験では埋設管のピッチを  $15\text{cm}$  とした。従って各管が熱抽出に寄与する堆肥そう内の有効領域は、近似的に管中心から  $7.5\text{cm}$  の位置までと考えられる)は  $0.086\text{m}^3$  と小さく、熱抽出によって混合素材に加えられる熱負荷はそれほど大きくなかったものと思われる。混合素材全容積に対して熱抽出に有効な容積をどの程度の割合にすべきかは必ずしも明らかではないが、本実験において、もし堆肥そう内上・下部に更に数本多く配管したならばこの割合が大きくなり、より高い熱抽出率が得られたものと推測される。

### 3.6 定常状態における熱回収率

連続的に通水を継続し、定常状態に達すると、堆肥そう内で抽出される熱量と蓄熱そうから外界へ放散する熱

Table 2 Period of heat extraction  $\theta_{ext}$ , period of temperature recovery in the compost bed  $\theta_{rec}$ , total period of each cycle  $\theta_{tot}(=\theta_{ext} + \theta_{rec})$  and the average temperature in the compost bed  $T_{av}$  at the start and the end of water-circulation in the intermittent water-circulation experiments

experiments	Run	$\theta_{ext}$ [hr]	$\theta_{rec}$ [hr]	$\theta_{tot}$ [hr]	$T_{av}$ [°C]	
					at the start of water- circulation	at the end of water-circu- lation
first	1	3.00	21.00	24.00	52.5	43.5
	2	3.87	18.07	21.94	52.6	43.1
	3	4.08	18.50	22.58	51.8	42.9
	4	4.38	20.12	24.50	51.6	43.1
	5	4.67	20.38	25.05	51.5	43.2
	6	4.90	21.00	25.90	51.5	43.8
	7	7.68	21.87	29.55	51.4	41.7
second	1	2.50	20.32	22.82	50.6	42.6
	2	1.78	20.07	21.85	50.3	44.0
	3	3.33	19.00	22.33	50.7	42.1
	4	2.42	20.25	22.67	49.6	42.8
	5	2.48	20.35	22.83	50.1	43.2
	6	2.45	21.92	24.37	50.0	43.2
	7	2.50	20.63	23.13	50.6	43.7
	8	3.33	20.50	23.83	50.8	42.9
	9	2.72	—	turning	50.2	43.5
	10	10.02	11.00	21.02	57.0	43.6
	11	9.02	14.35	23.37	52.5	42.8
third	1	4.85	18.45	23.30	52.9	41.6
	2	6.17	17.08	23.25	51.9	40.2
	3	6.95	14.23	24.18	50.5	39.5
	4	5.88	18.32	24.20	50.0	40.3
	5	5.38	18.79	24.17	50.8	41.5
fourth	1	3.23	20.29	23.52	51.7	41.5
	2	3.72	22.03	25.75	52.1	40.5
	3	3.08	22.54	25.62	52.0	41.3
	4	3.70	19.73	23.43	51.4	40.6
	5	2.48	20.85	23.33	50.4	42.0
	6	3.07	20.11	23.18	51.7	42.4
	7	3.03	21.82	24.85	51.6	42.2
	8	2.42	21.70	24.12	52.2	43.8
	9	2.25	21.55	23.80	53.0	44.7
	10	3.48	20.24	23.72	54.4	43.9
	11	3.25	—	—	52.5	43.0

Table 3 Efficiency of heat extraction in the experiments of intermittent water-circulation

experiments	period [hr]	total amount of the apparent gener- ated heat [kcal]	total amount of the heat extracted [kcal]	efficiency of heat extraction [%]
first	174	10103	2348	23.2
second	261	14527	2919	20.1
third	119	8340	2193	26.3
fourth	264	16305	2782	17.1

Table 4 Efficiency of heat collection at the steady state in the experiments of continuous water-circulation

experiments	apparent rate of heat generation [kcal/hr]	rate of heat loss from an accumulator [kcal/hr]	efficiency of heat collection [%]
first	33.1	9.24	27.9
second	24.4	6.73	27.6
third	17.4	5.55	31.8

量が等しくなり、堆肥そう内温度、蓄熱そう内水温は一定値に保たれる。この場合、堆肥そう内の見掛け発熱量に対する抽出熱量の割合は時間に無関係に常に一定で、瞬間値の比をとっても、定常状態のある一定期間内の積算値の比をとっても同一の値となる。ここでは、この値を「熱回収率」と定義する。既述の断続実験(非定常状態)における熱抽出率は積算値の比としてしか意味をもたないので熱回収率とは意味が異なる。熱回収率は次式で計算される。

$$\text{熱回収率} = \frac{h_v S_v (T_l - T_a)}{G_0 V} \quad (4)$$

ここで行った三回の連続実験の熱回収率を Table 4 に示す。熱回収率は 27~32% で、断続実験に対する熱抽出率よりも若干大きい。しかし、本実験では温度変化が小さくなり定常状態に達したとみなされた時点で通水を停止したが、いずれの場合も堆肥そう内平均温度は 40℃ を下回っているので代謝活動を維持し得るとは考えられず、そのまま通水を継続すれば、そう内温度、蓄熱そう内水温は徐々に低下するものと思われた。定常操作においても操作中に堆肥そう内平均温度を少くとも 40℃ 以上の高温に保つ必要があるのでより大きな堆肥そうが必要になるものと思われる。ただし、どの程度の容積が実際必要となるのかについては理論解析に基づくシミュレーションを行った上で判断されなければならない。

#### 4. 結 言

堆肥そう内に埋設した管内へ蓄熱そう内の水を循環通水し、堆肥発酵熱を抽出・蓄熱する実験を行い、以下の結果を得た。

1) 全実験期間(72日間)の内、約60日間そう内温度が50℃以上の高温状態に維持された。その間、断続的熱抽出・蓄熱実験と連続的熱抽出・蓄熱実験を行った。断続実験において蓄熱そう内水温を目標温度(30℃)に上昇させることができたのは室温が10℃以上の場合で、室温が5℃以下では目標水温を得られなかった。又、連続実験では発熱量が小さかったことと室温が低かったことにより定常状態で16~24℃程度の水温しか得られなかった。

2) 混合素材積み込み後21日目に切返しを行った結果、見掛け発熱量は約40日間200~300kcal/m<sup>3</sup>hrの値に維持された。又、堆肥そう内平均温度が40~50℃の範囲では断続的な熱抽出によって微生物の代謝反応が阻害されることはなかった。

3) 断続実験において、見掛け発熱量の総量に対する抽出熱量の総量の比(熱抽出率)は17~26%、定常操作のそれ(熱回収率)は27~32%であった。ただ、これらの値は積込まれた混合素材の全容積に対し、実際に熱抽出に有効な混合素材の容積の割合を許容範囲内でできるだけ大きくするように、通水管配置、配管本数を工夫すれば更に増大させ得るものと思われた。

4) 今後は、上記実験結果を踏まえて本操作の熱移動過程の理論解析を行い、利用目的(土壌加温など)に沿った最適な堆肥そう、蓄熱そう容積の模索を行う必要がある。

謝辞：本研究を行うに当たり、実験用堆肥素材を準備して頂い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〕

$C_p$	混合堆肥素材の比熱(kcal/kg℃)
$G_0$	堆肥そう内見掛け発熱量(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)
$H_L$	水分蒸発による潜熱損失量(kcal/m <sup>3</sup> hr)
$h$	堆肥そう壁からの熱損失を表す伝熱係数(kcal/m <sup>2</sup> hr℃)
$h_v$	蓄熱そう壁からの熱損失を表す伝熱係数(kcal/m <sup>2</sup> hr℃)
$L$	水の蒸発潜熱(kcal/kg)
$S$	堆肥そう壁の表面積(m <sup>2</sup> )
$S_v$	蓄熱そう壁の表面積(m <sup>2</sup> )
$T_a$	室温(℃)
$T_{av}$	堆肥そう内平均温度(℃)
$T_l$	蓄熱そう内水温(℃)
$V$	混合堆肥素材の容積(m <sup>3</sup> )
$V_{av}$	$V$ の実験全期間の平均値(m <sup>3</sup> )
$w$	混合堆肥素材の含水率(%)

$\rho$  混合堆肥素材の見掛け密度(kg/m<sup>3</sup>)  
 $\theta$  時間(hr)  
 $\theta_t$  全実験期間(hr)  
 $\theta_{ext}$  通水継続時間(hr)  
 $\theta_{rec}$  堆肥そう内温度回復所要時間(hr)  
 $\Delta C$  混合素材中の炭素含有量の変化量(kg)

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, 44-45.  
 久保田 宏・細野恭生, 1977: コンポスティンガー有機質固体廃棄物の土壌還元, 化学工学, **41**, 364-368.  
 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 a: 堆肥化過程における熱移動(第2報), **40**(1), 37-45.  
 関 平和・小森友明, 1984 b: 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.  
 島田 修, 1982: 東京都の都市ごみコンポスト化処理実験報告, 都市と廃棄物, **12**(3), 29-43.

### 引用文献

相田 浩・高尾彰一・枡倉辰六郎・斎藤日向・高橋 甫, 1974: 応用微生物学 I, 訂正版, 朝倉書店, 123-124.  
 藤田賢二・北脇秀敏, 1984: コンポスト原料の発生熱量, 都市と廃棄物, **14**(1), 19-25.

### Summary

Experiments for extraction and accumulation of the heat generated in composting process were performed using a buried-tube-type heat exchanger and an accumulator. Water was circulated between the heat exchanger and the accumulator as a heat transfer medium. The following results were obtained.

1) The compost bed maintained its average temperature at 50°C or higher for about 60 days of the whole period of composting reaction in the first stage (72 days). During this high temperature period, the experiments for heat extraction and accumulation were made by circulating water intermittently or continuously. In the case of the intermittent water-circulation, the water temperature of the accumulator attained to a designed temperature, 30°C, when the room temperature was higher than 10°C, but never did the water temperature when the room temperature was lower than 5°C. With the continuous water-circulation, the water temperature at the steady state condition was in average of 16 through 24°C.

2) The apparent rate of heat generation in the compost bed was 200 through 300 kcal/m<sup>3</sup>hr during an early period of about 40 days, which included a turning of the compost bed. The composting reaction was therefore not likely to be inhibited by extracting heat from the bed during the period of intermittent water-circulation experiments.

3) The efficiency of heat extraction was 17-26% in the intermittent water-circulation, while the efficiency of heat collection at the steady state condition was 27-32% in the continuous water-circulation. These efficiencies could increase by the well designed arrangement and the increased number of the buried tubes.

4) It is necessary to investigate the method for deciding the optimum scale or size of the container for the compost and the heat accumulator on the basis of the theoretical analysis of heat transfer processes.