

堆肥化過程におけるエネルギー変換構造

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
巻/号	483
掲載ページ	p. 225-235
発行年月	1992年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



堆肥化過程におけるエネルギー変換構造

関 平和・小森友明

(金沢大学工学部土木建設工学科)

Structure of Energy Conversion in Composting Process

Hirakazu SEKI and Tomoaki KOMORI

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

Mass, energy and exergy balance equations for a batch reactor of composting were derived with several assumptions, using various information on composting which had been obtained from previous investigations. In the batch reactor, temperature, moisture content and chemical composition were regarded to be homogeneous. According to the numerically calculated results under the practical operating conditions, a structure of energy conversion in composting process was quantitatively discussed. A ratio of the amount of heat accumulated within the reactor to the total amount of heat generated in the reactor, H_{acc}/H_{gen} , decreased with time, while a ratio of the amount of heat loss from the reactor to the total amount of heat generated in the reactor, H_{loss}/H_{gen} , increased with time. On the other hand, about 90% of the total amount of exergy generated in the reactor was occupied by the dissipated exergy because of irreversibility of the process. It was found out that there would be a remarkable qualitative degradation of energy in the energy conversion process of composting from chemical to thermal energy, and that an exergy efficiency of heat recovery would be at most 10% even by an ideal heat recovery system.

Key words: Composting, Dissipation, Energy conversion, Exergy, Heat recovery.

キーワード: エクセルギー, エネルギー変換, 散逸, 堆肥化, 熱回収

1. 緒 言

エネルギー工学的な観点に立てば, 堆肥化過程は燃料である堆肥材料の持つ化学エネルギーが微生物によって熱エネルギーに変換される過程とみなすことができる。これまで, 堆肥発酵熱の施設農業への有効利用を目的に, 主としてエネルギーの量的な側面に重点を置いて, 発熱量の推算, 抽出可能な熱量などを検討してきた(関, 1990)。しかし, 発酵熱の利用価値をより客観的に論ずるには, その質的評価も重要と考える。一般に, エネルギーの質的評価はエクセルギー解析によってできることが知られている(Haywood, 1974 a, 1974 b; Kotas,

1980 a, 1980 b)が, 堆肥化過程への応用については報告例がない。

本研究では, 堆肥槽内の温度, 水分, 化学組成が均一と仮定した完全混合モデル(藤田, 1980)を前提に, 槽内の物質収支式, エネルギー収支式を組立て, 既報の実験結果(関・小森, 1984)と比較してその妥当性を検討した後, エクセルギー収支式に基づき, 堆肥化過程で発生(遊離)する化学エクセルギーが堆肥化の進行に伴ってどのように分配されるかを考察した。

2. 完全混合モデルによる堆肥槽内の物質収支, エネルギー収支, エクセルギー収支

好气的条件を満足するよう適度に通気された堆肥槽内の収支式を導くに当たり, 藤田(1980)が提示した完全

混合モデルを前提として次のことを仮定した。

- 1) 堆肥槽内の温度, 水分, 化学成分は槽全体にわたって均一である。
- 2) 堆肥槽内を通過し, 槽外へ排出される湿り空気は飽和状態にある。

以上の仮定に基づき, 堆肥槽内の有機物の代表的化学成分である炭素と, 水分の物質収支式, エネルギー収支式, エクセルギー収支式は次のように導かれる。

2.1 物質収支式

槽内の炭素量 C_s は堆肥化による消失分のみ減少するためその消失速度を r_{cs} とすると, 炭素の物質収支式は,

$$\frac{dC_s}{dt} = -r_{cs} \quad (1)$$

藤田(1980)は, 堆肥槽内の水分は通気空気によって持ち去られる分のみ減少するとして水分収支式を導いた。しかし, 島田(1984)によれば, 堆肥化過程では CO_2 の発生と連動して水分も副産物として生成され, 槽内の水分低下を抑制することが指摘されている。ただし, この生成水分量については明確な測定方法, 測定値は報告されていない。従って, 現時点では正確な水分収支式を組み立てることは困難なので, θ_w の経時変化は経験的知見に基づいて計算することとした。すなわち, 第4章で述べるように著者ら(1984)の実験において質量基準の槽内含水比(槽内に含まれる固体質量に対する水分質量) w が堆肥化の前後でほとんど変わらなかったことに着目し, θ_w と w の間に成り立つ次式によって各時刻における θ_w の値を求めることにした。

$$\theta_w = \frac{w}{\rho_w} \rho_s \theta_s \quad (2)$$

ただし, $\rho_s \theta_s$ は槽単位容積当たりの固体全質量を表す。上式において, w は過程中不変であるが, 固体の一部は堆肥化により消失し, θ_s が変化するため, それに伴って θ_w も時間的に変化する。

2.2 エネルギー収支式

外気 (T_0, H_0, i_0) を基準とすれば, 堆肥槽単位容積当たりのエネルギー収支式は,

$$\begin{aligned} & \{C_{ps}\rho_s\theta_s + C_{pw}\rho_w\theta_w\} \frac{dT}{dt} \\ & = -\rho_a v \{i_s(T) - i_0\} - Ua(T - T_0) + G_t \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)で, 左辺は槽内の温度上昇に要する熱量, 右辺第1項は通気空気によって槽外へ持ち去られる熱量, 第2項は堆肥槽壁からの放散熱量, 第3項は堆肥材量の分解に伴う発熱量を表す。

2.3 エクセルギー収支式

ここで対象とする堆肥槽のような物質, エネルギーの

出入りを伴う開放系におけるエクセルギー e は, 次式:

$$e = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (4)$$

のように, 基準状態にある外界に対して系が持つエンタルピー(エネルギー) $h - h_0$ から, 系が外界と等しい状態にまで変化する際に仕事, あるいは他の形のエネルギーとして取り出すことのできない無効なエネルギー部分 $T_0(s - s_0)$ を差し引いた有効なエネルギー部分を表すものとして定義される(Haywood, 1974 b)。

外気を基準とした場合の堆肥槽単位容積当たりのエクセルギー収支式は,

$$\begin{aligned} & \{C_{ps}\rho_s\theta_s + C_{pw}\rho_w\theta_w\} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \frac{dT}{dt} \\ & = -\rho_a v \{C_H \{T - T_0 + T_0 \ln(T_0/T)\} \\ & \quad + RT_0 \left\{ \frac{H_s(T)}{18} \ln \left(\frac{H_0 + 0.62}{H_s(T) + 0.62} \frac{H_s(T)}{H_0} \right) \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{29} \ln \left(\frac{H_0 + 0.62}{H_s(T) + 0.62} \right) \right\} - \frac{Ua(T - T_0)^2}{T} \\ & \quad + G_x - T_0 \sigma \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, 左辺は槽内の温度上昇に伴う熱的エクセルギーの増加量, 右辺第1項は通気空気の持ち出すエクセルギー量, 第2項は堆肥槽壁からの熱放散により系外へ放出されるエクセルギー量, 第3項は堆肥材料の分解に伴って系内で発生(遊離)する化学エクセルギーの量, 第4項は現象の不可逆性によるエントロピー生成 σ に伴い消失すなわち散逸するエクセルギー量(Haywood, 1974 a)を表す。一般に, 複合有機物である堆肥原料の化学エクセルギーの測定は困難だが(Szargut *et al.*, 1964), 種々の有機物の化学エクセルギー(信次, 1980)と標準燃焼熱(標準状態下(1気圧, 25°C)での燃焼におけるエンタルピー変化)との関係をFig. 1のようにプロットすると, 全体的に両者にはほとんど数値的な差がない。このことから, 実際の計算に当たっては堆肥化過程で発生(遊離)する化学エクセルギー量 G_x は近似的に発熱量 G_t に等しいものと仮定した。

エクセルギーは式(4)で定義されるが, 具体的に式(5)の右辺第1項でエクセルギーの求め方を補足的に例示しておく。

式(5)の右辺第1項は, 温度 T , 混合比 H の湿り空気を持つエクセルギーを求めることに帰着する。ただし, 系内外の圧力は大気圧 P_0 のまま一定である。湿り空気のエクセルギーは, それが初期状態(この場合には T, H, P_0)から基準状態(T_0, H_0, P_0)に変化したときに外部へ取り出し得る最大有効仕事である。湿り空気はFig. 2に示すような2段階の可逆的な過程を経て初期状態から基準状態に変化する。

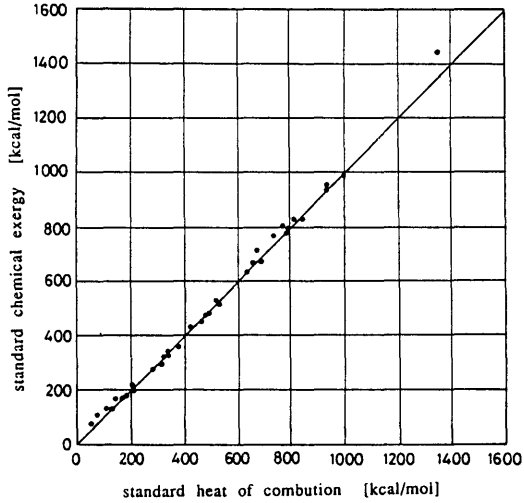


Fig. 1. Relation between chemical exergy and standard heat of combustion of organic materials.

a) 第一段階… (T, H, P_0) から (T_0, H, P_0) への変化

混合比 H を一定に保ったまま、温度を T から T_0 に変化させるとき、温度変化に伴って発生する乾き空気 1 kg 当たりの熱量は $C_H dT$ で与えられる。この内、仕事として取り出し得る最大値、すなわちエクセルギー e_1 はこの熱量にカルノー効率 $(T - T_0)/T$ を乗じ、 T_0 から T まで積分した値となる(押田, 1986)から、

$$e_1 = \int_{T_0}^T C_H \frac{T - T_0}{T} dT = C_H \{T - T_0 + T_0 \ln(T_0/T)\} \quad (6)$$

b) 第二段階… (T_0, H, P_0) から (T_0, H_0, P_0) への変化

更に、温度、圧力を T_0, P_0 に固定したまま混合比を H から H_0 に変化させるときには、空気と水蒸気の組成が変わることによる混合のエクセルギー(山崎, 1983 ;

押田, 1986) の変化が取り出し可能な最大仕事量となる。これを乾き空気 1 kg 当たりとすると次式となる。

$$e_2 = \frac{1}{29(1-x)} \left\{ xRT_0 \ln \frac{x}{x_0} + (1-x)RT_0 \ln \frac{1-x}{1-x_0} \right\} \quad (7)$$

x, x_0 を H, H_0 に変換すると、

$$e_2 = RT_0 \left\{ \frac{H}{18} \ln \left(\frac{H_0 + 0.62}{H + 0.62} \frac{H}{H_0} \right) + \frac{1}{29} \ln \left(\frac{H_0 + 0.62}{H + 0.62} \right) \right\} \quad (8)$$

仮定 2) より $H = H_s(T)$ とすれば、求める湿り空気のエクセルギーは、

$$e = e_1 + e_2 = C_H \{T - T_0 + T_0 \ln(T_0/T)\} + RT_0 \left\{ \frac{H_s(T)}{18} \ln \left(\frac{H_0 + 0.62}{H_s(T) + 0.62} \frac{H_s(T)}{H_0} \right) + \frac{1}{29} \ln \left(\frac{H_0 + 0.62}{H_s(T) + 0.62} \right) \right\} \quad (9)$$

上式に堆肥槽単位容積当たり単位時間に槽内を通過する乾き空気の質量 $\rho_a v$ を乗ずれば式(5)の右辺第1項が得られる。

2.4 配分されたエネルギー及びエクセルギーの積算式

式(3), (5)は、瞬時におけるエネルギー、エクセルギーの配分率を与えるが、堆肥化の開始から任意の時刻までに発生(遊離)した化学エネルギー、及び化学エクセルギーがどのような割合で配分されたかは、式(3), (5)を時間 t について積分することで求められる。

まず、式(3)を時間 t について積分すると、

$$H_{gen} = H_{acc} + H_{loss} \quad (10)$$

ここで、 H_{gen} は時間 $t = 0 \sim t$ の間に堆肥化によって槽内で発生(遊離)した化学エネルギー量すなわち発熱量、 H_{acc} はその間に槽内に貯えられた熱エネルギー量、 H_{loss} はその間に槽外へ放出された熱エネルギー量を表し、それぞれ次式で与えられる。

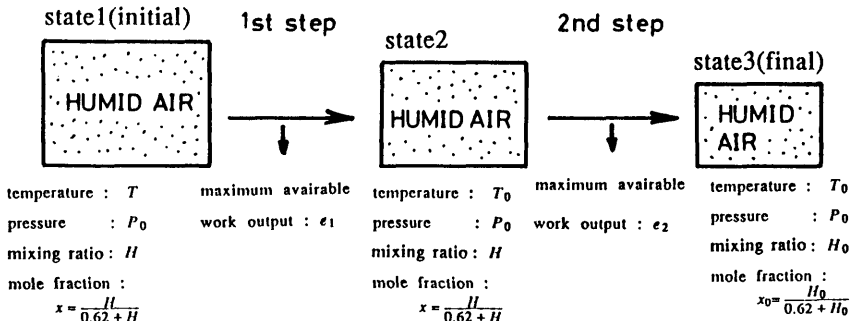


Fig. 2. Reversible process of two steps for estimating the exergy of moist air of which temperature is T , mixing ratio H , and pressure p_0 .

$$H_{gen} = \int_0^t G_t dt \quad (11)$$

$$H_{acc} = \int_0^t \{C_{ps}\rho_s\theta_s + C_{pw}\rho_w\theta_w\} \frac{dT}{dt} dt \quad (12)$$

$$H_{loss} = \int_0^t \{\rho_a v \{i_s(T) - i_0\} + Ua(T - T_0)\} dt \quad (13)$$

一方、式(5)を時間 $t=0 \sim t$ の範囲で積分すると、

$$E_{gen} = E_{acc} + E_{loss} + E_{dis} \quad (14)$$

ただし、 E_{gen} は $t=0 \sim t$ の間に堆肥化によって槽内に発生(遊離)した化学エクセルギーの量、 E_{acc} はその間に槽内に貯えられた熱的エクセルギー量、 E_{loss} はその間に槽外へ放出されたエクセルギー量、 E_{dis} はその間に現象の不可逆性により散逸したエクセルギー量を表し、それぞれ次式で与えられる。

$$E_{gen} = \int_0^t G_x dt = \int_0^t G_t dt \quad (15)$$

$$E_{acc} = \int_0^t \{C_{ps}\rho_s\theta_s + C_{pw}\rho_w\theta_w\} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \frac{dT}{dt} dt \quad (16)$$

$$E_{loss} = \int_0^t \rho_a v \{C_H \{T - T_0 + T_0 \ln(T_0/T)\} + RT \left\{ \frac{H_s(T)}{18} \ln \left(\frac{H_0 + 0.62}{H_s(T) + 0.62} \frac{H_s(T)}{H_0} \right) + \frac{1}{29} \ln \left(\frac{H_0 + 0.62}{H_s(T) + 0.62} \right) \right\} \} dt + \int_0^t \frac{Ua(T - T_0)^2}{T} dt \quad (17)$$

$$E_{dis} = \int_0^t T_0 \sigma dt \quad (18)$$

3. 堆肥化速度と発熱量

前章に示した収支式(1)、(2)、(3)により C_s 、 θ_w 、 T の時間的変化を計算するには、これらの式中の r_{cs} 、 G_t を的確に把握しておかなければならない。そこで、本章では、酵素反応速度論(例えば、Aiba, 1973)に立脚した堆肥化速度のモデル化により、 r_{cs} 、 G_t の近似的な推算式を導いた。

3.1 堆肥化速度

堆肥化の総括反応速度は、分解可能な有機物の消失速度 r_{OM} で与えることができる。多くの場合、有機物分解過程での有機物中の炭素含有率 β はほぼ一定と考えることができる(例えば、熊田, 1981)ので、 r_{OM} は有機物中の炭素量 C_s の消失速度 r_{cs} に帰着することができる。すなわち r_{OM} と r_{cs} の間には次の関係を仮定できる。

$$r_{cs} = \beta r_{OM} \quad (19)$$

堆肥化は微生物の触媒的作用による有機物分解反応であることから(Mckinley *et al.*, 1985 a), その反応速度は酵素反応と同様の取扱いが可能で、 r_{cs} は Michaelis-Menten 式(例えば、Aiba *et al.*, 1973) で表すことができ、式(20)となる。

$$r_{cs} = k \frac{C_s^*}{K_s + C_s^*} \quad (20)$$

ただし、 C_s^* は有機物中の全炭素量の内、堆肥化初期の易分解性及び可分解性物質の分解期間、すなわち一次発酵期間(三木・森, 1979) で分解可能な炭素量 $C_s - C_{sD}$ を表す。本論文の堆肥化とは一次発酵期間とした。 k は C_s^* が大量に存在するときに呈する最大反応速度を表す反応速度定数、 K_s は飽和定数と呼ばれる平衡定数で反応速度が最大値の 1/2 になるときの炭素量を表す。

また、堆肥化速度は著しい温度依存性を示し、反応速度定数 k は温度の関数であることが明確化される。すなわち、低温側(20~40℃)では温度とともに増大し、高温側(60~70℃)では微生物が熱変性を起こして活性を失うため逆に温度とともに減少する(Mckinley and Vestal, 1984; Jeris and Regan, 1973)。

ここで、 k の温度依存性を定量化するため、式(20)を

$$r_{cs} = \frac{1}{(1/k)} \frac{C_s^*}{K_s + C_s^*} \quad (21)$$

のように変形し、無次元炭素濃度 $C_s^*/(K_s + C_s^*)$ を反応の駆動力と考えると、 $1/k$ は反応の全抵抗を表すことになる。上述の知見に基づき全抵抗 $1/k$ が次式:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (22)$$

のように、温度の上昇とともに反応速度を増大させる、すなわち、温度とともに減少する抵抗 $1/k_1$ と、微生物の熱変性に伴って反応速度を減少させる、すなわち、温度とともに増大する抵抗 $1/k_2$ の合成抵抗で表せるものと仮定すると、低温側では熱変性がほとんど起こらず $1/k_1 \gg 1/k_2$ なので $k \approx k_1$ となり、高温側では熱変性が支配的で $1/k_1 \ll 1/k_2$ なので $k \approx k_2$ となることから、 k_1 、 k_2 はそれぞれ低温側、高温側において観測される反応速度定数を表すことになる。ここで、 k_1 、 k_2 を Arrhenius の式(例えば、大竹, 1963) $k_1 = a_1 e^{-b_1/T}$ 、 $k_2 = a_2 e^{b_2/T}$ (ただし、 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 は総て正の定数)で表し、これらを式(22)に代入すれば、 k は

$$k = \frac{1}{(1/a_1) e^{b_1/T} + (1/a_2) e^{-b_2/T}} \quad (23)$$

上式を次式

$$k = \frac{a_1 e^{-b_1/T}}{1 + (a_1/a_2) e^{-(b_1+b_2)/T}} \quad (24)$$

のように変形すると、この式はウレタンの酵素活性に対して温度による失活過程を考慮して理論的に導かれた Koffler (1947) の式：

$$k = \frac{c_1 T e^{-d_1/T}}{1 + c_2 e^{-d_2/T}} \quad (c_1, c_2, d_1, d_2: \text{constants}) \quad (25)$$

微生物の比増殖速度の温度依存性を表す Johnson-Lewin 式(山根, 1980)：

$$k = \frac{c_3 T e^{-d_3/T}}{1 + c_4 e^{-d_4/T}} \quad (c_1, c_2, d_1, d_2: \text{constants}) \quad (26)$$

など、酵素もしくは微生物反応系の反応速度定数を与える式と類似した形となる。ただし、式(25)、(26)によれば、厳密には式(24)右辺の分子の係数 a_1 を $a_0 T$ (a_0 は定数) とすべきである。しかし、堆肥化の通常の温度範囲 30~70°C ($T=303\sim 343\text{K}$) では $303 a_0 < a_1 (= a_0 T) < 343 a_0$ で、 a_1 は平均温度 50°C ($T=323\text{K}$) における値 $323 a_0$ に対して $\pm 6\%$ の範囲内で変化するに過ぎない。従って、近似的に a_1 を一定とみなしても差し支えないものと考えられる。

以上のことから、式(23)は k の温度依存性を表す近似式として適当と思われる。

r_{cs} は、式(23)、(20)より、 C_s^* と T の関数として次式で求められる。

$$r_{cs} = \frac{1}{(1/a_1) e^{b_1/T} + (1/a_2) e^{-b_2/T}} \frac{C_s^*}{K_s + C_s^*} \quad (27)$$

3.2 発熱量

一般に、複合酵素反応である堆肥化の反応方程式は明確でなく、熱化学的方法(例えば、藤田ら, 1984)による厳密な発熱量の計算は困難である。しかし、好氣的な有機物分解過程においては酸素消費速度 r_{O_2} と発熱量 G_t との間にほぼ比例関係が成立することが知られており(永井, 1978)、ここで対象とするように好氣的条件下で堆肥化が起こる場合には次式により r_{O_2} から G_t が近似的に求められる。

$$G_t = \Delta H_c r_{O_2} \quad (28)$$

ただし、比例係数 ΔH_c は堆肥化において O_2 1 kg 消費当たりに発生する熱量を表し、藤田ら(1984)により $\pm 6\%$ の範囲内で 3300 kcal/kg- O_2 になることが示されている。

一方、堆肥化における O_2 消費モル数に対する CO_2 発生モル数の比、すなわち呼吸商を RQ とすれば、反応による CO_2 発生速度 r_{CO_2} は

$$r_{CO_2} = RQ \frac{44}{32} r_{O_2} \quad (29)$$

微生物中の炭素含有量も C_s に含めるものとすれば、槽内の C_s の消失量は、総て好氣的代謝における炭素源の最終代謝産物である CO_2 として槽外へ放出されることになる。従って r_{CO_2} は次のように表すことができる。

$$r_{CO_2} = \frac{44}{12} r_{cs} \quad (30)$$

式(29)、(30)を式(28)へ代入すれば、 G_t は r_{cs} の関数として次のように表される。

$$G_t = \frac{\Delta H_c}{RQ} \frac{32}{12} r_{cs} \quad (31)$$

著者ら(1984)は、堆肥槽出口における排気空気中の CO_2 と O_2 の濃度をそれぞれオールザット・ルンゲ・ガス分析装置(測定精度 $\pm 0.5\%$)、ガルバニ電池式酸素濃度計(測定精度 $\pm 0.5\%$)によって実測した結果から RQ を算出したところ、0.97~0.98 であった。堆肥材料は炭水化物のみならず蛋白質、脂肪等も含むため 1 より小さくなったものと思われる。しかし、 RQ は極めて 1 に近いので、 $RQ=1$ と近似すると、

$$G_t = \Delta H_c \frac{32}{12} r_{cs} \quad (32)$$

式(27)を式(32)に代入すれば、 G_t は次のように表される。

$$G_t = \Delta H_c \frac{32}{12} \frac{C_s^*}{K_s + C_s^*} \frac{1}{(1/a_1) e^{b_1/T} + (1/a_2) e^{-b_2/T}} \quad (33)$$

4. 収支式の妥当性

エネルギー変換構造を数値的に論ずる前に、第2章に示した堆肥槽内の物質収支式(1)、(2)、エネルギー収支式(3)の妥当性を検証しておく必要がある。それは、これらの収支式に基づく C_s 、 θ_w 、 T 、 G_t の計算値を実験結果と比較することによりなされる。ここでは、これらの計算結果を著者ら(1984)の実験結果と比較する。

4.1 測定方法と操作条件

著者ら(1984)が実験に使用した混合堆肥材料は含水比 w が 15 kg-water/kg-dry stock で、組成は Table 1 に示す通りである。堆肥槽内の水分は Fig. 3 に示すようにそのほとんどが固相内に浸透しその中に保持された状態で存在していた。槽内に含まれる水分の全量は堆肥化に伴って減少したが、堆肥材料の収縮はほとんど起こらず、その容積はほぼ一定に保たれた。これは、堆肥槽の側壁から水平に挿入・固定した 12 本の熱電対プローブが支えとなって堆肥材料の沈下を抑えたためと思われる。また、実験終了時において槽下部の w は上部に比べて約 15% 小さかったが、槽全体の w の平均値は実験前後でほとんど変わらなかった。このことは、この実験では堆肥

Table 1 Components of compost materials (dry-based wt%)

Chicken manure	Rice bran	Sawdust
13.2	26.3	60.5

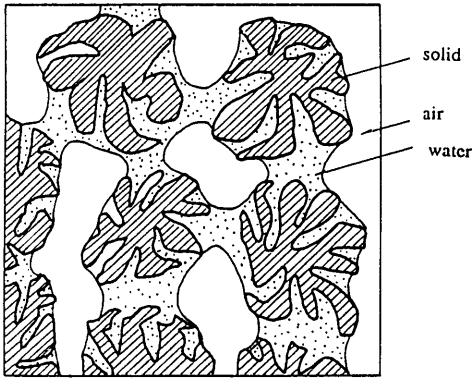


Fig. 3. Sketch of solid-water-air geometry in a small element of compost container.

化による槽単位容積当たりの固体部分の変化量 $\rho_s (\theta_{si} - \theta_{sf})$ に対する、通気に伴う水蒸気の槽外への放出と堆肥化に伴う水分生成による槽内水分の正味の変化量 $\rho_w (\theta_{wi} - \theta_{wf})$ の比が、槽内含水比 w にほぼ等しかったことを意味している。混合堆肥材料の物性値、操作条件を Table 2 に示した。強熱減量の測定結果によればこの実験と同一組成の混合堆肥材料は、固相の大部分 (約 93%) が有機物であった (田中, 1990)。そこで、混合堆肥材料の固相の真密度 ρ_s は有機物の真密度 (仲谷 (1981) によれば約 1500 kg/m^3) に等しいとみなした。初期固相率 θ_{si} は実験開始時の混合堆肥材料の乾燥密度 (240 kg/m^3) を ρ_s で除して求めた。固相の真比熱 C_{ps} は関 (1990) による測定値 (誤差範囲 $\pm 25\%$) である。 β は炭素窒素同時定量装置 (柳本製 MT-500) によって得られた混合堆肥材料の炭素含有量が固相全質量に占める比率とした。 U は実験終了後、槽内を空にし槽底部を閉じて約 60°C の温水を満たし、槽上下端を断熱して、温水温度の時間的変化率 dT_l/dt を測定した結果を温水の熱収支式 (34) に代入して求めた。

$$C_{pl}\rho_l \frac{dT_l}{dt} = -Ua(T_l - T_0) \quad (34)$$

r_{cs} の温度依存性を表す式 (27) のパラメーター a_1, a_2, b_1, b_2 は著者ら (1984) と Viel ら (1987) の実験結果から得られた。

Table 2 Physical properties of compost bed and operating conditions used for calculation

symbol	dimension	value
ρ_s	$[\text{kg/m}^3]$	1500
ρ_w	$[\text{kg/m}^3]$	1000
ρ_a	$[\text{kg/m}^3]$	1.19
θ_{si}	$[-]$	0.16
θ_{wi}	$[-]$	0.36
C_{ps}	$[\text{kcal}/(\text{kg}^\circ\text{C})]$	0.308
C_{pw}	$[\text{kcal}/(\text{kg}^\circ\text{C})]$	1.0
R	$[\text{kcal}/(\text{kmol}^\circ\text{K})]$	1.987
ΔH_c	$[\text{kcal}/\text{kg-O}_2]$	3300
RQ	$[-]$	1
β	$[-]$	0.4
T_0	$[\text{K}]$	290.1
H_0	$[\text{kg-H}_2\text{O}/\text{kg-dry air}]$	0.0058
i_0	$[\text{kcal}/\text{kg-dry air}]$	7.6
v	$[\text{m}^3\text{-dry air}/(\text{m}^3\text{ hr})]$	12
U	$[\text{kcal}/(\text{m}^2\text{ hr}^\circ\text{C})]$	2.5
a	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$	20
C_{si}	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	97.34
C_{sd}	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	62.69
C_{si}^*	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	34.65
K_s	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	20
a_1	$[\text{kg}/(\text{m}^3\text{ hr})]$	7.142×10^9
a_2	$[\text{kg}/(\text{m}^3\text{ hr})]$	3.632×10^{-34}
b_1	$[\text{K}^{-1}]$	7.270×10^8
b_2	$[\text{K}^{-1}]$	2.601×10^4

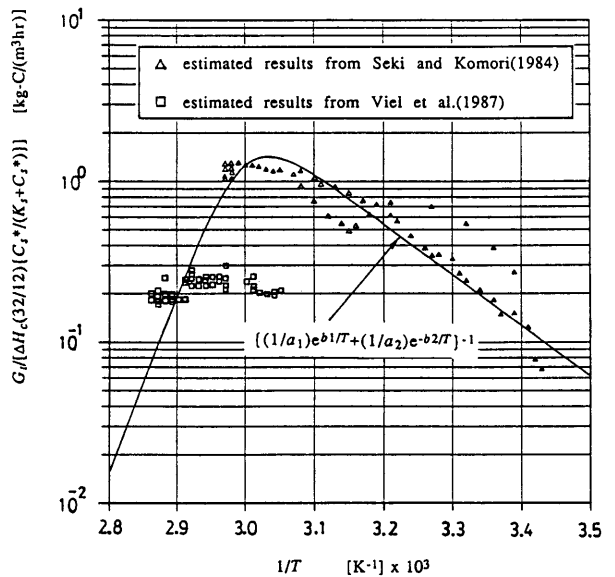


Fig. 4. Relation between $G_t / [\Delta H_c (32/12) \{C_s^*/(K_s + C_s^*)\}]$ and $1/T$.

$$G_t / [\Delta H_c (32/12) \{C_s^*/(K_s + C_s^*)\}]$$

の値を Fig. 4 のごとく絶対温度の逆数に対して片対数紙にプロットし、カーブ・フィッティングにより求めた値である。また、 K_s は完全混合槽型堆肥槽の解析に関する藤田 (1979) の報告に基づいて設定した。

4.2 既報の実験結果と計算結果の比較

式(1), (3)を微小時間増分 Δt について差分化し, 初期状態から微小時間経過ごとの C_s, T, θ_w, G_t を逐次計算した。なお, $\Delta t = 0.25$ hr とした。Fig. 5 に C_s, T, θ_w, G_t の計算結果と著者ら(1984)の実験結果を対比したものの一例を示した。ただし, C_s, θ_w の経時変化は直接測定できなかったため, C_s については r_{CO_2} の実測値に基づき時刻 0 から任意時刻 t までの CO_2 発生量の積分値 $\int_0^t r_{CO_2} dt$ を数値積分によって求め, 次式:

$$C_s = C_{si} - \frac{12}{44} \int_0^t r_{CO_2} dt \quad (35)$$

により任意時刻 t における C_s の値を算出して実験値とし, θ_w については r_{CO_2} の実測値から次式:

$$\rho_s \theta_s = \rho_s \theta_{si} - \frac{1}{\beta} \frac{12}{44} \int_0^t r_{CO_2} dt \quad (36)$$

によって $\rho_s \theta_s$ を求め, 式(2)に代入して得られた値を実験値とした。 C_s, θ_w については CO_2 発生量から得られた実験値と本モデルの計算結果は極めてよく一致している。 T, G_t の実験値と計算値には最高温度への到達時間や発熱量最大値の出現回数, 出現時間などに差異がある。これは G_t を表す式(33)には温度による菌種交代(農文協, 1974)が考慮されていないこと, 実験において槽の上下方向の 12 点における測定値の内, 上方の温度の方が下方の温度よりも高く, 高さ方向に均一とはみなせなかったことが原因と考えられる。しかし, 全体的な時間的な変化の傾向は両者が類似している。

以上のことから, 第 2 章に示した収支式(1), (2), (3)は多くの仮定を含んでいるにもかかわらず, 堆肥化過程の近似的な予測モデルとしてほぼ妥当であると考えられる。

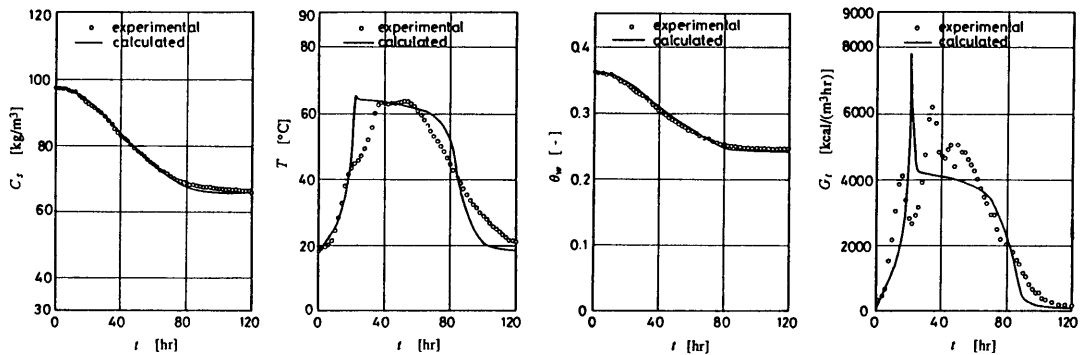


Fig. 5. Comparison of the calculated results of C_s, T, θ_w and G_t with those of the experimental results.

5. 数値計算例とその考察

5.1 計算条件

収支式の検証に用いた著者ら(1984)の実験結果は実験室規模の小型堆肥槽(約 $0.02 m^3$) についてのものであった。ここでは, より実用規模に近い堆肥槽として Fig. 6 に示すような容積 $1 m^3$ の立方体形の槽を想定してモデル・シミュレーションを行い, エネルギー変換構造を検討する。なお, 槽側壁は保温性をより良くするため厚さ

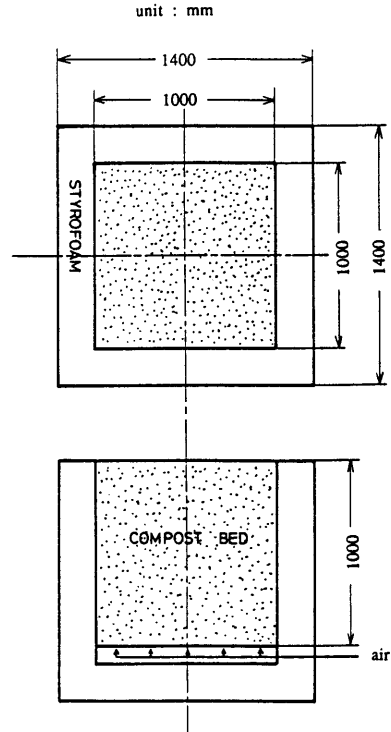


Fig. 6. Assumed configuration of compost bed for simulating the energy conversion process with composting.

200 mm のスチロフォーム板 (熱伝導率 0.035 kcal / (mhr°C)) を用いるものと想定した。槽側壁を通しての放熱の総括熱抵抗は、槽壁内表面、壁材、槽壁外表面の熱抵抗の直列抵抗で与えられる。槽壁内外表面の熱抵抗は壁材の熱抵抗の 1% 以下と極めて小さいので、総括熱抵抗の逆数である総括伝熱係数 U は、壁材の熱伝導率をその厚さで除した値とした。又、基準的な操作条件として外気は 20°C の飽和空気とし、 C_{si} 、 C_{si}^* などは Table 2 の値を四捨五入した値を用いた。これらの値を Table 3 に示す。なお、その他の操作条件は Table 2 と同一値とした。

Table 3 Operating conditions used for calculation

symbol	dimension	value
T_0	[K]	293
H_0	[kg-H ₂ O/kg-dry air]	0.00872
t_0	[kcal/kg-dry air]	10.07
U	[kcal/(m ² hr°C)]	0.175
a	[m ² /m ³]	4
C_{si}	[kg/m ³]	100
C_{sd}	[kg/m ³]	60
C_{si}^*	[kg/m ³]	40

5.2 槽内の炭素量、温度、体積含水率、発熱量の経時的变化

Table 2, 3 の条件に基づき、式(1)、(3)を微小時間増分 Δt (0.25 hr とした) について差分化し、初期状態から逐次計算によって求めた C_s 、 T 、 θ_w 、 G_t を時間に対して図示したものを Fig. 7 に示す。

C_s は $t=5\sim 140$ hr においてほぼ直線的に減少し、 $t > 140$ hr では徐々に変化がゆるやかになり $C_{sD}=60$ kg-C/m³ hr) に漸近する。 T は $t=0\sim 10$ hr の間に 20°C から 69°C まで急上昇し、その後は $t=140$ hr まで 68~64°C のほぼ一定の値に維持された後、 $t > 160$ hr で一次発酵で分解可能な炭素の消失による発熱量の急減に伴い急降下している。 θ_w は槽内含水比 w を一定と仮定して式

(2) から求めたが、 C_s の変化とはほぼ同様の傾向を示している。 G_t は $t=10$ hr において瞬間的に大きな値をとるものの、その後は $t=120$ hr まで 2300~1900 kcal/m³ hr のほぼ一定の値に保たれる。このことは、この期間中の炭素量の時間的变化が直線的で、槽内温度がほぼ一定であることも関係し、この期間中槽内がほぼ定常状態に保たれることを意味している。そして、 $t > 120$ hr では徐々に減少し始め、 $t > 160$ hr では分解可能な炭素の消失とともに急減する。

これらの計算結果の妥当性を直接比較するための実験結果はないが、堆肥化に関して概括的にまとめた Izawa (1989) の報告によれば、通気を施しつつ堆積発酵させた場合、 C_s は堆肥化操作開始時から 360~480 hr までにはほぼ直線的に急速に低下するが、その後ほとんど変化せず、一方、 T は初期の 48 hr までに最高値 70°C に達した後、ほぼ一定の高温状態が約 240 hr 持続したことを示す実験結果が例示されている。その報告例では本モデルの計算値よりも C_s 、 T の変化が 20~30 hr 遅れている。堆肥化の進行が本モデル計算においていくぶん速い結果を与えたのは、槽内の微生物が初期から活性化された状態にあることを前提に、誘導期(相田ら, 1974)に相当する時間遅れを考慮していないことによるものと考えられる。しかし、この点を除けば、本モデルの C_s 、 T の計算結果は Izawa (1989) によって例示された実験結果とは類似した傾向を示している。一方、Izawa (1989) 論文には w の変化が示されていないが、Finstein ら(1983) によれば、ここで得られた計算例のように槽内温度が微生物活動の最適温度 (55~60°C) を越えた高温状態 (65~70°C) に保たれる場合には w の変化がほとんど見られないことが指摘されている。従って、 w を一定と仮定し、式(2)によって求めた θ_w の計算結果はこの場合ほぼ妥当であると思われる。以上のことから、ここで得られた諸量の算出結果は堆肥化におけるエネルギー変換構造を論ずるための題材として適切であると判断した。

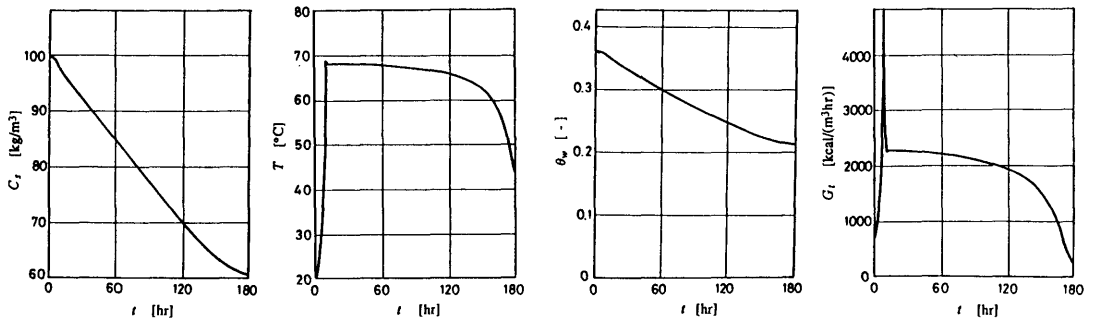


Fig. 7. Changes of carbon content C_s , temperature T , volumetric moisture content θ_w and the rate of heat generation G_t in compost bed with time.

5.3 槽内で発生(遊離)したエネルギー, エクセルギーの配分

式(10)から分かるように, 任意時間 t までに堆肥化によって槽内で発生(遊離)した化学エネルギーすなわち発熱量 H_{gen} は, その一部 (H_{acc}) が槽内に熱エネルギーとして貯えられ, 残り (H_{loss}) が槽外へ放出される。式(10)に基づいて, H_{gen} , H_{acc} , H_{loss} を計算し, 発生量に対する蓄積量, 放出量の割合 H_{acc}/H_{gen} , H_{loss}/H_{gen} が時間的にどのように変化するかを示したのが Fig. 8 である。Fig. 8 によれば, $t=0\sim 10$ hr においては発熱量のほとんどが槽内の温度上昇に使われるためにその 80% 以上が槽内に貯えられる。しかし, $t=10$ hr 以降槽内温度がほぼ安定な一定値 ($68\sim 64^{\circ}\text{C}$) になり, dH_{acc}/dt がほぼ 0 になると, 発熱量のほとんどが槽外へ放出されて H_{loss}/H_{gen} が徐々に大きくなり, 逆に H_{acc}/H_{gen} は徐々に小さくなる傾向を示す。そして, 時間の経過とともに H_{acc}/H_{gen} は少しずつ 0 に漸近していく。

一方, 式(14)によれば, 任意時間 t までに堆肥化によって槽内で発生(遊離)した化学エクセルギー E_{gen} は, 槽内に熱的エクセルギーとして貯えられる部分 (E_{acc}), 槽外へ放出される部分 (E_{loss}) のほかに現象の不可逆性に伴って散逸する部分 (E_{dis}) の3つの部分に分配される。 E_{gen} の内, 熱交換器によって取り出し可能なエクセルギーの最大値は $E_{acc} + E_{loss}$ である。式(14)に基づいて E_{gen} , E_{acc} , E_{loss} , E_{dis} を算出し, 発生量に対する蓄積量, 放出量, 散逸量の割合 E_{acc}/E_{gen} , E_{loss}/E_{gen} , E_{dis}/E_{gen} が時間的にどのように変化するかを Fig. 9 に示した。Fig. 9 によれば, 槽内蓄積エクセルギーへの分配率 E_{acc}/E_{gen} は $t=10$ hr で最高値 5% を示すが, それ以降は徐々に減少していく。これに対応して損失エクセルギーの割合 E_{loss}/E_{gen} が徐々に増加してくる。一方, 散逸エクセルギーの割合 E_{dis}/E_{gen} は全過程を通じて約 90% と極めて大きいため, 取り出し可能なエクセルギー ($E_{acc} + E_{loss}$) は E_{gen} の最大約 10% にすぎず, 堆肥化による化学エネルギーから熱エネルギーへの変換過程におけるエネルギーの質的低下が著しいことが分かる。

6. 結 言

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

1) 藤田(1980)による完全混合モデルを前提に堆肥槽内の物質収支式, エネルギー収支式, エクセルギー収支式を求めた。

2) 物質収支式及びエネルギー収支式に基づいて算出された堆肥槽内の炭素量, 温度, 発熱量の経時変化は以前に行った著者ら(1984)の実験結果とほぼ同様の傾

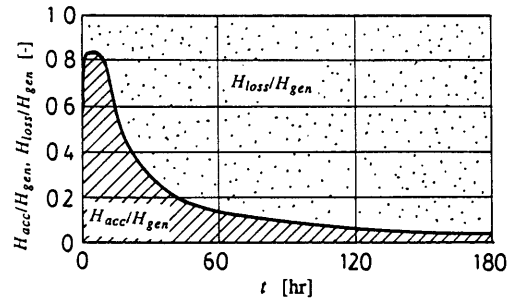


Fig. 8. Changes of the ratio of thermal energy accumulated in compost bed to total energy generated in compost bed (H_{acc}/H_{gen}) and the ratio of energy lost from compost bed to atmosphere to total energy generated in compost bed (H_{loss}/H_{gen}) with time.

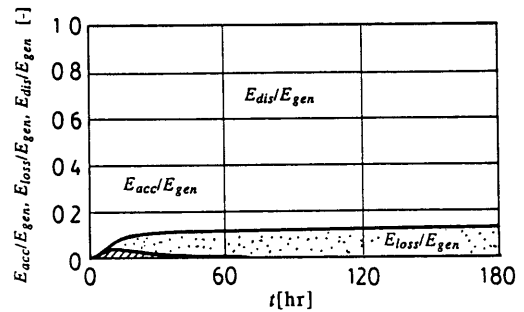


Fig. 9. Changes of the ratio of thermal exergy accumulated in compost bed to total exergy generated in compost bed (E_{acc}/E_{gen}), the ratio of exergy lost from compost bed to atmosphere to total exergy generated in compost bed (E_{loss}/E_{gen}), and the ratio of exergy dissipated to total exergy generated in compost bed (E_{dis}/E_{gen}) with time.

向を示し, 収支式の妥当性が確かめられた。

3) 容積 1 m^3 の堆肥槽を想定し, 堆肥化によって発生(遊離)する全熱量 H_{gen} の内, 槽内に蓄積される熱量 H_{acc} , 槽外へ放出される熱量 H_{loss} をエネルギー収支式に基づいて計算したところ, H_{acc}/H_{gen} は時間の極めて初期 ($0\sim 10$ hr) を除き時間と共に徐々に減少すること, 逆に, H_{loss}/H_{gen} は時間と共に徐々に増大することが明らかになった。

4) エクセルギー収支式に基づき, 堆肥化によって槽内で発生(遊離)する化学エクセルギー E_{gen} の内, 槽内に蓄積される部分 E_{acc} , 槽外へ放出される部分 E_{loss} , 不可逆過程に伴って散逸する部分 E_{dis} の時間的変化を計算した。その結果, E_{dis} が E_{gen} の約 90% を占め, 化学エネルギーから熱エネルギーへの変換過程におけるエネ

ルギーの質的低下が著しくなることを明らかにした。このことは、ここで想定した操作条件下では理論的に取り出し可能なエクセルギー ($E_{acc} + E_{loss}$) を対象として理想的な熱回収を行ったとしても熱回収のエクセルギー効率 は最大約 10% にしなければならないことを意味する。

5) 上記 3), 4) の結果は、エネルギーの質的低下をできるだけ抑え得るような効果的な熱回収システムを検討するための理論的基礎を与えるだろう。

使用記号

a	堆肥槽単位容積当たりの放熱面積	[m^2/m^3]
C_H	乾き空気 1kg を基準とした湿り空気の定圧比熱	[$kcal/(kg-dry\ air\ ^\circ C)$]
C_{ps}	混合堆肥素材の固体部分の比熱	[$kcal/(kg^\circ C)$]
C_{pw}	水の比熱	[$kcal/(kg^\circ C)$]
C_s	堆肥槽単位容積当たりの炭素含有量	[kg/m^3]
C_{sD}	一次発酵で分解不可能な炭素量	[kg/m^3]
E_{acc}	任意時刻 t までに槽内に蓄積された熱的エクセルギー量	[$kcal/m^3$]
E_{dis}	任意時刻 t までの散逸エクセルギー量	[$kcal/m^3$]
E_{gen}	任意時刻 t までに槽内で発生したエクセルギー量	[$kcal/m^3$]
E_{loss}	任意時刻 t までに槽外へ放出されたエクセルギー量	[$kcal/m^3$]
e	湿り空気のエクセルギー	[$kcal/kg-dry\ air$]
G_t	堆肥槽内発熱量	[$kcal/(m^3\ hr)$]
G_x	堆肥槽内で発生(遊離)する化学エクセルギー量	[$kcal/(m^3\ hr)$]
H_{acc}	任意時刻 t までに槽内に蓄積された熱量	[$kcal/m^3$]
H_{gen}	任意時刻 t までに槽内で発生熱量	[$kcal/m^3$]
H_{loss}	任意時刻 t までに槽外へ放出された熱量	[$kcal/m^3$]
H_s	飽和状態における混合比	[$kg-H_2O/kg-dry\ air$]
H_0	外気の混合比	[$kg-H_2O/kg-dry\ air$]
ΔH_c	酸素 1kg 消費当たりの発熱量	[$kcal/kg$]
h	単位質量当たりのエンタルピー	[$kcal/kg$]
h_0	基準状態におけるエンタルピー	[$kcal/kg$]
i_s	飽和空気のエンタルピー	[$kcal/kg-dry\ air$]
i_0	外気のエンタルピー	[$kcal/kg-dry\ air$]
K_s	飽和定数	[kg/m^3]
k	反応速度定数	[$kg/(m^3\ hr)$]
R	気体定数	[$kcal/(kmol\ K)$]
RQ	呼吸商	[$-$]

r_{cs}	槽内有機物中の炭素の消失速度	[$kg/(m^3\ hr)$]
r_{OM}	槽内有機物の消失速度	[$kg/(m^3\ hr)$]
r_{CO_2}	槽内 CO_2 発生速度	[$kg/(m^3\ hr)$]
r_{O_2}	槽内 O_2 消費速度	[$kg/(m^3\ hr)$]
s	単位質量当たりのエントロピー	[$kcal/(kgK)$]
s_0	基準状態におけるエントロピー	[$kcal/(kgK)$]
T	堆肥槽内温度	[K] or [$^\circ C$]
T_0	外気温	[K] or [$^\circ C$]
T_l	水温	[$^\circ C$]
t	時間	[hr]
U	堆肥槽側壁からの放熱の程度を表す総括伝熱係数	[$kcal/(m^2\ hr\ ^\circ C)$]
v	堆肥槽単位容積当たりの通気量	[hr^{-1}]
w	混合堆肥素材の含水比 (槽内に含まれる固体質量に対する水分質量)	[$-$]
x	空気中の水蒸気のモル分率	[$-$]
β	有機物中の炭素含有率	[$-$]
θ_w	体積含水率 (槽内単位容積当たりの水分量)	[$-$]
θ_{wi}	初期体積含水率	[$-$]
θ_{wf}	θ_w の最終値	[$-$]
θ_s	固相率	[$-$]
θ_{si}	θ_s の初期値	[$-$]
θ_{sf}	θ_s の最終値	[$-$]
ρ_a	通気空気の乾燥空気密度	[kg/m^3]
ρ_s	固相の真密度	[kg/m^3]
ρ_w	水の密度	[kg/m^3]
σ	エントロピー生成速度	[$kcal/(m^3\ hr\ K)$]

引用文献

Aiba, S., Humphrey, A. E. and Millis, N. F. (永谷正治訳), 1973: 生物化学工学 第2版, 東京大学出版会, 105.

相田 浩・高尾彰一・柄倉辰六郎・斉藤日向・高橋 甫, 1974: 応用微生物学 1, 改訂版, 朝倉書店, 115-123.

Finstein, M. S., Miller, F. C., Strom, P. F., MacGregor, S. T. and Psarianos, K. M., 1983: Composting Ecosystem Management for Waste Treatment, *Biotechnology*, **1**, 347-353.

藤田賢二, 1979: 好気性連続コンポスト発酵槽の解析 (完全混合槽の場合), 都市と廃棄物, **94**, 23-36.

藤田賢二, 1980: 回分式コンポスト発酵槽の解析「廃棄物の処理・処分技術」, 環境産業新聞社, 462-475.

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.

Haywood, R. W., 1974a: A Critical Review of the Theorems of Thermodynamic Availability, with Concise Formulations, Part 1. Availability, *J. Mech. Eng. Sci.*, **16** (3), 160-173.

Haywood, R. W., 1974b: A Critical Review of the

- Theorems of Thermodynamic Availability, with Concise Formulations, Part 2. Irreversibility, *J. Mech. Eng. Sci.*, **16** (4), 258-267.
- Izawa, T., 1989: Composting. In Biomass Handbook (ed. by O. Kitani and C. W. Hall). Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 302-306.
- Jeris, J. S. and Regan, R. W., 1973: Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting, *Compost Science*, Jan-Feb., 10-15.
- Koffler, H., Johnson, F. H. and Wilson, P. W., 1947: Combined infuence of temperature and urethane on the respiration of *Rhizobium*, *J. Am. Chem. Soc.*, **69**, 1113-1117.
- Kotas, T. J., 1980a: Exergy Concepts for Thermal Plant, *IJHFF*, **2** (3), 105-114.
- Kotas, T. J., 1980b: Exergy Criteria of Performance for Thermal Plant, *IJHFF*, **2** (4), 147-163.
- 熊田恭一, 1981: 土壤有機物の化学 第2版, 学会出版センター, 249-276.
- McKinley, V. L. and Vestal, J. R., 1984: Biokinetic Analysis of Adaptation and Succession: Microbial Activity in Composting Municipal Sewage Sludge, *Applied and Environmental Microbiology*, 933-941.
- Mckinley, V. L., Vestal, J. R. and Eralp, A. E., 1985: Microbial Activity in Composting Part 1, *Biocycle*, **26** (6), 39-43.
- 三木伸夫・森 忠洋, 1977: 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, 27-30.
- 永井史郎, 1978: 増殖収率と代謝熱の理論とその計算, *発酵工学*, **56** (5), 553-564.
- 仲谷紀男, 1981: 有機物が関与する土壤の水分特性について, *農技研報B*, **32**, 1-74.
- 信沢寅男, 1980: エネルギー工学のためのエクセルギー入門, オーム社, 54.
- 農文協編, 1974: 堆肥づくりの原理「有機質肥料のつくり方使い方」, *農文協*, 40-54.
- 大竹伝雄, 1963: 化学工学3, 岩波全書, 18.
- 押田勇雄, 1986: エクセルギー講義, 太陽エネルギー研究所, 1-194.
- 関 平和・小森友明, 1984: 強制通気時の堆肥化反応速度と熱・物質同時移動, *土木学会論文集* **351/II-2**, 213-222.
- 関 平和, 1990: 堆肥発酵熱の施設農業への有効利用に関する研究, 東京大学博士論文, 1-216.
- 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.
- Szargut, J. and Styrylska, T., 1964: Anenaherte Bestimmung der Exergie von Brennstoffen, *Brennst. Warme Kraft*, **16** (12), 589-596.
- 田中 徹, 1990: サーモウェル型熱交換器による堆肥発酵熱抽出に関する研究, 金沢大学修士論文, 1-176.
- Viel, M., Sayage, D., Peyre, A. and Andre, L., 1987: Optimization of In-Vessel Co-Composting through Heat Recovery, *Biological Wastes*, **20**, 167-185.
- 山崎泰雄, 1983: エネルギー管理のための熱工学と省エネルギー対策, 日本工業出版, 1-231.
- 山根恒夫, 1980: 生物反応工学, 産業図書, 97-232.