

牛ふん堆肥化反応に関わる微生物群の活性化温度*

— 比増殖速度の温度依存性 —

宮竹史仁*¹・岩渕和則*²・木村俊範*³

要 旨

堆肥化微生物群が最も活性化される温度を見出すために微生物の比増殖速度を計算し、この温度依存性を検討した。コンポスト化反応槽には1リットル容積の断熱型リアクタを用い、供試材料は大学付属農場より採取した新鮮牛ふんを風乾によって含水率60% w.b.に乾燥したものを堆肥化した。この堆肥化反応における酸素消費速度より比増殖速度を計算した。この結果、微生物増殖は約54°Cで最大になることが見いだされた。一般に60°Cで観測される反応速度の最大値は、増殖に最も適した54°Cで飛躍的に増加した菌数の効果によるものである。

[キーワード] 堆肥化, 牛ふん, 微生物, 活性化温度, 比増殖速度

Activated temperature of microorganisms contributing to cattle manure composting*

— Dependence of specific growth rate of microorganisms on temperature —

Fumihito MIYATAKE*¹, Kazunori IWABUCHI*², Toshinori KIMURA*³

Abstract

In order to find the most activated temperature of composting microorganisms, dependence of specific growth rate (μ) on temperature was investigated. The composting studies were carried out in an adiabatic reactor of one litre capacity with fresh cattle manure, which was corrected from a University farm. The manure was subjected to composting reaction after dehydrating to 60% w.b. by an electric fan. The μ was calculated from measured oxygen uptake rate of the manure. The results obtained that the maximum of μ was found to be at approximately 54°C. The maximum composting rate generally observed at 60°C are attributed to the maximum number of microorganisms which is a consequence of the drastic growth at the most suitable temperature of 54°C.

[Keywords] composting, cattle manure, microorganisms, activated temperature, specific growth rate

I 緒 言

堆肥化による有機物分解を最も促進する最適な温度に関しては既に多くの報告がなされており、その温度を集約するとおおよそ60°Cにあるとしているのが多く見受

けられる。代表的なものはNakasaki et al. (1985)の報告で、品温を50, 60, 70°C一定にして反応させ、その結果60°Cが最も有機物分解が進んだというものである。また、品温が一定でなく、強制的な温度制御を行わない場合でも同様の結果が示されている。例えば堆肥化初期

* 2001年4月 第60回農業機械学会年次大会(鳥取大学)にて一部講演

*1 岩手大学大学院連合農学研究科(配置大学:山形大学 〒997-8555 鶴岡市若葉町1-23)

The United Graduate School of Agricultural Science, Iwate University (Research campus: Yamagata University, Tsuruoka, 997-8555, Japan)

*2 宇都宮大学農学部(〒321-8505 宇都宮市峰350 TEL 028-649-5483) Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, Utsunomiya 321-8505, Japan

*3 筑波大学農林工学系(〒305-8572 つくば市天王台1-1-1 TEL 0298-53-4650)

Institute of Agricultural and Forest Engineering, Tsukuba University, Tsukuba 305-8572, Japan

の昇温過程における酸素消費速度を計測した結果、約60°Cでその最大値を取ることが知られている(Iwabuchi and Kimura, 1997)。中温域である43°C付近にも酸素消費速度の極大値があるが、家畜ふんの場合は高温域の60°Cの方が大きく、その傾向は材料水分が異なっても変わらない。

しかしながら堆肥化に関わる微生物の活性は55°Cを越えると著しく低下し、55°C以下の方がむしろ活性が高くなることも指摘されている(Mckinley and Vestal, 1985)。また著者らも約50°Cおよび60°C一定の堆肥化を行い、それぞれの呼吸量である総酸素消費量がほぼ同じという結果を得ている。これはNakasaki et al. (1985)が示した60°Cが最も有機物分解が進むという結果と一致しないし、岩淵ら(Iwabuchi and Kimura, 1997)の結果とも一致しない。

そこで著者らはMckinley and Vestal (1985)の指摘と60°Cでの反応速度が高いというNakasaki et al. (1985)の指摘とを同時に満足するメカニズムが存在しているのではないかと考え、以下のような仮説を立てた。それは「堆肥温度が昇温する際に、60°Cに到達する前の、より低い温度において堆肥化に関わる微生物が著しく増殖し、その大量に増えた菌体によって有機物分解が進行する。60°Cにおける反応速度が高く観測されるのは、必ずしもその温度で高活性という訳ではなく、増殖した菌体の数による効果による。」である。

したがって、この論文は上記仮説を検証するため、微生物増殖速度の大きさを示す比増殖速度(μ)の変化を反応経過とともに追跡し、その最大値が示される温度を見だし、その温度が60°Cよりも低い温度なのかどうかを検討する。また、比増殖速度の最大値を示す温度が60°Cよりも低い場合は、この温度と60°Cではどちらが高い有機物分解率を実現できるのかについても検討する。

II 比増殖速度の計算方法

比増殖速度(μ)は、菌体濃度(X)と菌体数増加速度(dX/dt)の関係式における比例係数に相当し、(1)式のように表される。

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (1)$$

μ の大小は菌体数増加速度の大小を直接表すことになり、かつ初期菌体数の影響が除去できるため、比増殖速度は至適条件の指標として好都合である。また微生物の増殖を伴う反応では微生物の比増殖速度(μ)の大小によって微生物活性が直接評価できる。

菌体数増加速度と基質である酸素消費速度(dS/dt)との間には

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (2)$$

が成立するので、(1)式を代入して

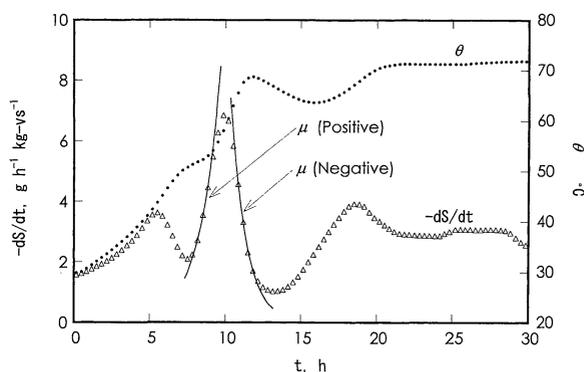


図1 反応速度から計算される正、負の比増殖速度
Fig. 1 Positive or negative value of μ that is calculated from reaction rate

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y} \cdot \mu X \quad (3)$$

が得られる。また初期条件を $X = X_0$ ($t = 0$) として(1)式を積分すると

$$X = X_0 \exp(\mu t) \quad (4)$$

となり、(4)式を(3)式に代入して

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{\mu X_0}{Y} \cdot \exp(\mu t) \quad (5)$$

となる。

ここでは10分毎30分間の酸素消費速度一時刻のデータを指数回帰し、(5)式との係数比較により瞬間比増殖速度 μ が求められ、

$$\mu = f(t) \quad (6)$$

の関係を示す離散データが得られる。同時に堆肥温度の時間変動

$$\theta = g(t) \quad (7)$$

の離散データが実測されているので、同時刻における μ と θ から、

$$\mu = f(g^{-1}(\theta)) \quad (8)$$

のように μ の温度依存性を示すグラフが描けることになる。

一般に比増殖速度は対数増殖期においてのみ適用されるが、これを拡張し、反応過程全体に適用することにより広い温度範囲での増殖活性と菌体活性の協同現象を捉えることが可能になる。図1に堆肥温度、酸素消費速度の変化の一例を示し、その酸素消費速度の変化から求められる瞬間比増殖速度 μ が正、負になる場合の例を示した。特に菌数維持がなされていても活性が低下している場合は比増殖速度が小さくなるもしくは負として表され、微生物活性がより明確に表れ易くなる。

III 材料および方法

1. 材料

材料は牛舎より採取した新鮮な乳牛ふんおよび肉牛ふんの2種類を使用した。これらは約20°Cの環境下で風乾によって約60% w.b.に水分調整し、28°Cで12時間

静置した後反応に供した。

2. 実験装置

前報 (Iwabuchi and Kimura, 1994) と同様の装置で堆肥化を行った。コンプレッサーより送られた空気はレギュレータを介して整流し、微小流量計によって流量調整した後、反応槽 (内容積 1 リットル) の底部より上向流で行った。排気は反応槽上部より行なわれ、アンモニア除去用の硫酸溶液や水蒸気除去用の冷却管およびシリカゲルカラム中を通過させた後、酸素センサーによって排気酸素濃度が測定された。入排気温湿度、試料温度、ウォーターバス内水温度は T 熱電対で、また排気酸素濃度はガルバニ電池式酸素センサーによって測定された。

反応槽には底面と側面が真空断熱されているステンレス容器 (以下断熱容器と称す) および断熱が施されていないステンレス容器 (以下伝熱容器と称す) の二種類を目的に応じて使用した。断熱容器は反応による内部発熱の伝熱損失を極力抑えることによって自己発熱のみによる昇温過程を速やかに得るために用いられた。さらにこの反応槽は全体を水中に設置され堆肥温度に対して常にウォーターバス内水温度が 1°C 以内で低く追従するように水温を制御し断熱容器上蓋からの伝熱損失をも抑えた。一方、伝熱容器は堆肥と周囲との熱交換を促進させ一定温度での堆肥化反応を行う場合に用い、ウォーターバス内水温度を一定にし伝熱容器をこの中に沈めた。

これらの測定およびウォーターバス内水温度制御はすべてプログラマブルデータロガー (21X, Campbell Scientific, Inc., USA) によって行なわれた。

3. 堆肥化方法

1) 増殖速度を検討する堆肥化方法

比増殖速度を検討するための堆肥化は断熱容器で行った。材料の充填固相率は牛ふんが約 7% vol., 厨芥は約 14% vol. であり通常の堆肥化で実現される約 10% vol. に近い充填状態であった。通気量は約 $0.6 \text{ Lmin}^{-1} \text{ kg-vs}^{-1}$ とし、この条件で反応を行った結果すべて反応開始より 24 時間以内に品温が 70°C を越えた。計測は入排気温湿度、堆肥温度、ウォーターバス内水温度そして排気酸素濃度を 10 分毎に行われ、これをもとに酸素消費速度、熱発生速度および比増殖速度も 10 分毎に計算された。酸素消費速度、熱発生速度は前報 (Iwabuchi and Kimura, 1994) と同様の計算式で計算した。なおここでの目的は常温から 70°C 程度までの温度範囲で比増殖速度を計測することが目的であるため、反応期間は約 120 時間で終了させた。

2) 有機物分解率を比較検討する堆肥化方法

堆肥温度一定で 16 日間反応させる実験を 2 反復行った。ただし反応初期の約 2 日間は材料内部を堆肥化に寄与する菌相にさせるため自己発熱のみで約 70°C に到達させることに費やされた。また試料水分が約 60% w.b. を常に維持するように定期的に水分調整を行い、同時に試料内に反応むらが生じないように入念に攪拌を行っ

た。

4. 有機物分解率

有機物分解率 (R_{VM}) は灰分との相対有機物量を比較する方法で、(9)式によって計算される。105°C-24 時間で材料を絶乾して得た乾物の質量を求め、この乾物に対して 600°C-2 時間の強熱による減量を揮発性有機物量 (VM) とし、その強熱残量を灰分量 (Ash) とした。

$$R_{VM} = \left(1 - \frac{VM_1}{Ash_1} \cdot \frac{Ash_0}{VM_0}\right) \times 100 \quad (9)$$

5. 熱発生速度および酸素消費速度

熱発生速度および酸素消費速度は前報 (Iwabuchi and Kimura, 1994) と同様の計算方法で求めた。

IV 結果および考察

図 2, 3 にそれぞれ乳牛ふんおよび肉牛ふんを堆肥化した場合の比増殖速度と堆肥温度との関係を示した。各材料について実験を 3 反復行い材料毎の傾向が同じであることを確認しており、ここではそれぞれの代表的な例を示した。

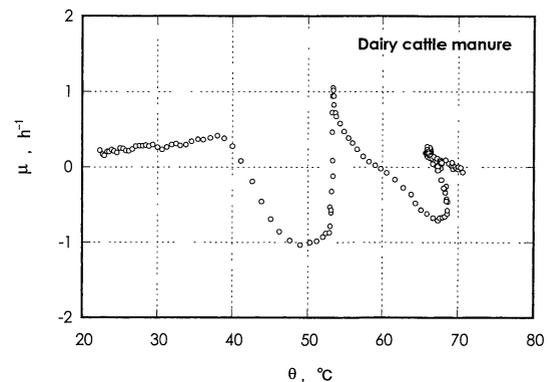


図 2 乳牛ふんの堆肥化における比増殖速度の温度依存性
Fig. 2 Dependence of specific growth rate on temperature during dairy cattle manure composting

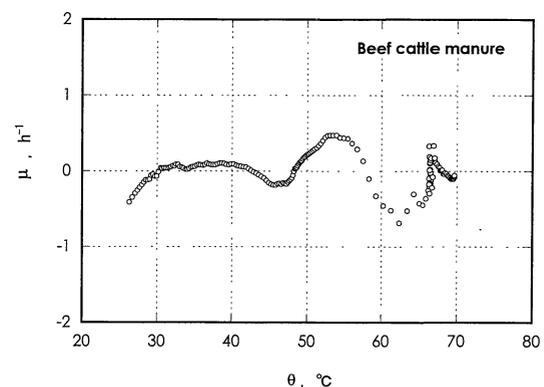


図 3 肉牛ふんの堆肥化における比増殖速度の温度依存性
Fig. 3 Dependence of specific growth rate on temperature during beef cattle manure composting

表1 恒温堆肥化による有機物分解率

Table 1 Volatile solids reduction with isothermal composting

Temp., °C	Reduction, %
50	34.6
54	42.1
60	39.1

比増殖速度の温度依存性は材料によって明らかに特徴的な傾向を示すものの、いずれの材料でも比増殖速度が正になる活性の高い温度域が3領域あり、常温から約40°Cまでの範囲、54°C付近をピークとする50~60°Cまでの範囲、そして66°C付近である。また比増殖速度が最大になるのは54°C付近であることも見いだされた。この特徴が最も良く表れているのが乳牛ふんにおける比増殖速度(図2)で、約54°Cの極めて狭い温度範囲で鋭敏な比増殖速度のピークが生じており、この温度で特異的に反応する菌相が存在し、それが高温域での反応を担っていることが理解される。また60°Cは有機物分解や酸素消費速度が最も大きな温度とされていたが、比増殖速度は負になる温度であり微生物活性としては下降しつつある温度であることがわかる。これは著者らの仮説である60°Cよりも低い温度で最も菌体増殖が活発になることが実験的に確認されたことになる。

次に、54°C付近で増殖した菌体の数が有機物分解に大きく寄与するのであれば54°Cでも60°Cと同程度、もしくはそれ以上の有機物分解が期待できることになる。これを裏付けるため54および60°C一定条件下で16日間堆肥化させ反応前後の有機物分解率を測定した(表1)。なお比較のため50°C一定条件における有機物分解率も併せて示しており、これらの分解率は2反復実験の平均値である。54°Cおよび60°Cでの有機物分解率は明らかに50°Cにおける有機物分解率よりも大きくなっており、54°Cにおける微生物活性の効果が現れている。また54°Cにおける有機物分解率が最も大きい、60°Cにおける有機物分解率とほぼ同じである。したがって54°Cでも60°Cと同程度、もしくはそれ以上の有機物分解率

が得られることが明らかになった。

以上をまとめると微生物増殖は60°Cよりも低温度である約54°Cで最大になり、ここで菌数も飛躍的に増加し、温度も上昇する。60°Cまでは飛躍的に増加した菌数の効果により有機物分解が進むが、これ以上の温度になると微生物活性の低下により反応速度も低下することになる。この解釈は微生物活性が55°Cを越えると著しく低下するというMckinley and Vestal (1985)の指摘と60°Cでの反応速度が高いというNakasaki et al. (1985)の指摘とを同時に満足するもので、矛盾がなく、著者らの仮説が正しいことが確認された。

記号

Ash	: 灰分量	g
dS/dt	: 酸素消費速度	$\text{g}\cdot\text{o}_2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{vs}^{-1}$
R_{VM}	: 有機物分解率	%
t	: 時間	h
VM	: 揮発性有機物量	g
X	: 菌体濃度	$\text{g}\cdot\text{cell}\cdot\text{kg}\cdot\text{vs}^{-1}$
Y	: 酸素に対する増殖収率定数	$\text{g}\cdot\text{cell}\cdot\text{g}\cdot\text{o}_2^{-1}$
μ	: 比増殖速度	h^{-1}
μ	: 堆肥温度	°C

Subscripts

0	: 堆肥化前
1	: 堆肥化後

参考文献

- Iwabuchi, K., Kimura, T., 1994, Aerobic biodegradation of dairy cattle feces (Part 1), *Journal of JSAM*, 56(2), 67-74.
 Iwabuchi, K., Kimura, T., 1997, Aerobic biodegradation of dairy cattle feces (Part 2), *Journal of JSAM*, 59(5), 29-35.
 Mckinley, V. L., Vestal, J. R., 1985, Physical and chemical correlates of microbial activity and biomass in composting municipal sewage sludge, *Appl. Environ. Microbiol.*, 50(6), 1395-1403.
 Nakasaki, K., Shoda, M., Kubota, H., 1985, Effect of temperature on composting of sewage sludge, *Appl. Environ. Microbiol.*, 50(6), 1526-1530.

(原稿受理: 2002年9月6日・質問期限: 2003年5月31日)

コ メ ン ト

[読者のコメント]

本論文において堆肥化過程における有機物分解が最も進行しやすい温度域が示された。堆肥化において雑草の種子、病原菌などの死滅温度である 60°C を確保することも含め、効率的かつ良質堆肥生産に向けた堆肥作りに寄与するものと思われる。

[コメントに対する著者の見解]

堆肥化微生物が最も増殖する温度が明確に示されたことは有機物分解のみならず、ご指摘のような雑草の種子、病原菌などの死滅等の多様な機能を保持したコンポスト化反応の温度管理を行う上で貴重であると考えます。今後は高温度域のみならず、より温度管理が容易な低温度域での機能にも注目して行きたいと考えております。