

種堆肥の混合が家畜ふん堆肥化の初期過程に及ぼす影響

— 温度上昇に関わる微生物活性と材料 pH の検討 —

宮竹史仁*¹・岩渕和則*²・阿部佳之*¹・本田善文*¹

要 旨

種堆肥混合が家畜ふん堆肥化の初期過程に及ぼす影響を検討した。この結果、初期材料の pH と微生物数が種堆肥混合により影響されることが明らかになった。低 pH 材料への種堆肥混合は、初期材料 pH を上昇させることで初期過程の温度上昇の遅延を防ぎ、堆肥化反応を促進させた。種堆肥の混合は初期微生物数を増加させ、広範囲の温度域で高い比増殖速度を示した。これは同時に熱発生速度の上昇に寄与し、約 50℃で見られる温度上昇の停滞を解消した。但し、これらの初期微生物数の増加による効果は初期反応全体を促進させるほどではないが、微生物活性を増強させスムーズな温度上昇をもたらす可能性が期待される。

[キーワード] 堆肥化, 種堆肥混合, 比増殖速度, 熱発生速度, pH, 初期微生物数

Effect of Seeding on the Early Stage of Animal Waste Composting

Fumihito MIYATAKE*¹, Kazunori IWABUCHI*², Yoshiyuki ABE*¹, Yoshifumi HONDA*¹

Abstract

The effect of seeding on the early stage of animal waste composting was investigated. Seeding affected the initial pH and the initial number of microorganisms in the manure. Seeding low pH manure increased initial pH, which prevented the lag phase. Seeding also increased the initial number of microorganisms, inducing that the specific growth rate of microorganisms was enhanced over a wide temperature range. This increase in specific growth rate was attributed to an increased rate of heat production at 50°C. Although the increase in microbial number had no significant effect on the acceleration of composting reaction, the enhancement of microbial activity produced a sharp increase in temperature during the early stage of composting.

[Keywords] composting, seeding, specific growth rate, heat production rate, pH, initial microbial number

I 緒 言

畜産農家等の堆肥生産現場では、種堆肥を堆肥材料に混合するいわゆる「戻し」によって「堆肥化の立ち上がり」が良くなる」と考えられている。しかしながら、多くの実験室規模による堆肥化研究では、種堆肥混合による堆肥化反応の促進効果は否定的に考えられている (Golueke, 1954 ; Finstein and Morris, 1975 ; Nakasaki et al., 1985 ;

Lei et al., 2000)。特に Nakasaki et al. (1985) は、下水汚泥の堆肥化において種堆肥の混合により高温性微生物数の増加はあるが、反応速度や有機物分解率は有意に上昇しなかったと指摘している。

理論的には、種堆肥の混合を行うことにより堆肥化に関与する微生物数が多くなるため初期反応は促進されると考えるのが自然である。これを裏付けるように、食品廃棄物を用いた堆肥化では種堆肥の混合が初期反応を促

*1 会員, Corresponding author, (独)農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所 (〒329-2793 那須塩原市千本松 768 TEL 0287-37-7814) National Institute of Livestock and Grassland Science, National Agriculture and Food Research Organization, Nasu-shiobara-shi, 329-2793, Japan ;

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

表1 実験条件
Table 1 Experimental design

	乳牛ふん (10:0)		乳牛ふん (10:2)		乳牛ふん (10:5)		豚ふん (10:0)		豚ふん (10:2)		豚ふん (10:5)	
	Run1	Run2	Run1	Run2	Run1	Run2	Run1	Run2	Run1	Run2	Run1	Run2
含水率, %w.b.	60.4	59.8	59.8	59.5	58.6	58.4	51.6	54.6	55.6	55.7	54.6	54.4
通気量, $L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{vm}^{-1}$	0.64	0.63	0.68	0.68	0.64	0.65	0.49	0.52	0.56	0.56	0.56	0.56
試料重量, g (wet basis)	275	275	255	255	255	255	280	280	270	270	260	260
揮発性有機物含有率, %	86.2	86.5	86.4	85.9	87.2	87.0	90.9	90.4	90.0	89.9	90.8	90.4
液相率, %	17.6	17.4	16.2	16.1	15.9	15.8	15.3	16.2	15.9	16.0	15.1	15.0
固相率, %	7.4	7.5	7.0	7.0	7.2	7.2	9.6	9.0	8.4	8.4	8.3	8.4
気相率, %	74.9	75.0	76.8	76.9	76.9	77.0	75.1	74.8	75.6	75.6	76.6	76.6

進させるとい報告 (Nakasaka et al., 1988) も存在する。加えて、種堆肥は一般に pH が高く、その pH 調整効果により初期反応が促進される可能性が極めて大きいと考えられる。

そこで堆肥化微生物の活性を詳細に分析することで、種堆肥混合が「堆肥化の立ち上がり」、すなわち温度上昇に如何なる変化をもたらすのかを検討し、加えてその効果が顕れる条件についても検討した。なお評価指標として、比増殖速度および熱発生速度の2つの微生物活性を計算して用いた。

II 材料および方法

1. 実験材料

材料には宇都宮大学附属農場ならびに栃木県畜産試験場の畜舎から採取した乳牛ふんならびに豚ふんを使用した。また、これらを実験室で堆肥化を2日間以上(自己発熱で60℃以上を36時間以上)経過し、堆肥化微生物に収束したものを種堆肥とした。乳牛ふん種堆肥および豚ふん種堆肥の pH は約8.7および8.6であった。実験材料は、原材料と種堆肥を10:5(乾燥質量)に混合したもの、10:2に混合したものおよび種堆肥を含まないもの(10:0)とした。これらの実験材料の含水率は乳牛ふんで約58~60%w.b.、豚ふんで約51~56%w.b.に調整した。これらを28℃で約15時間静置した後、堆肥化実験に供した。

2. 実験装置

既報 (Miyatake and Iwabuchi, 2006) と同様の小型堆肥化装置で堆肥化を行った(図1)。コンプレッサ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、反応槽の底部より圧送通気を行った。堆肥材料を通過した排気は、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、ガルバニ電池式酸素センサ(OS-3SD, 新コスモス電機株式会社)で酸素濃度を測定した。入排気温湿度、試料中心温度、チャンバ内温度はT型熱電対で測定した。反応槽には1Lの断熱性の高いステンレス容器を使用し、温度制御可能なチャンバ内に設置した。チャンバ内温度は、堆肥材料温度よりも常に1℃以内の低い温度で追従するように制御された。

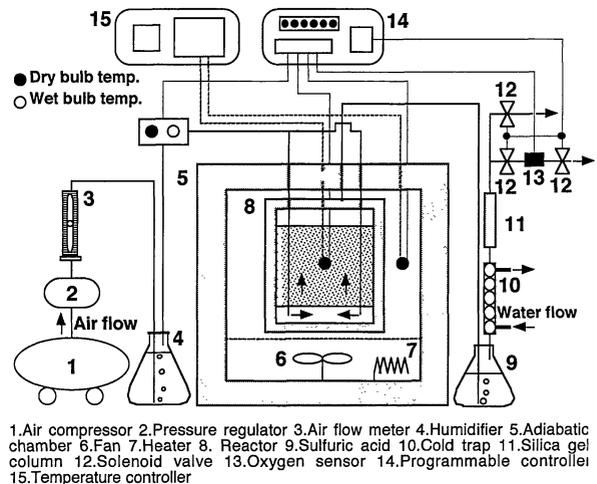


図1 堆肥化実験装置の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of laboratory-scale adiabatic composting device

3. 実験方法

種堆肥の混合による微生物活性への影響を検討するために、堆肥化の初期過程の温度および酸素濃度を測定し、熱発生速度、比増殖速度を計算した。表1に各実験の初期条件を示す。堆肥材料255~280g(湿潤質量)を固相率が乳牛ふんで約7~8%vol.、豚ふんで約8~9%vol.になるように反応槽に充填した。乳牛ふんで0.6~0.7 $L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{vm}^{-1}$ 、豚ふんで0.5~0.6 $L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{vm}^{-1}$ に通気量を設定し24時間以上、自己発熱による堆肥化を行った。なお通気量は微生物の活動に反映する単位揮発性有機物量(vm)を基準とし、単位時間当たりの通気量($L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{vm}^{-1}$)で表した。種堆肥混合率が異なる各実験は、それぞれ異なる時期において同様の条件下で2反復試験を行った。熱発生速度の計算は、Iwabuchi and Kimura (1994)の方法に準じた。また比増殖速度は排気酸素濃度データに基づき計算された(Miyatake et al., 2003)。

4. 初期材料の微生物数および pH の測定

実験材料中の初期微生物数の測定はIwabuchi and Miyatake (2001)の方法に準じた。試料1gを滅菌水9

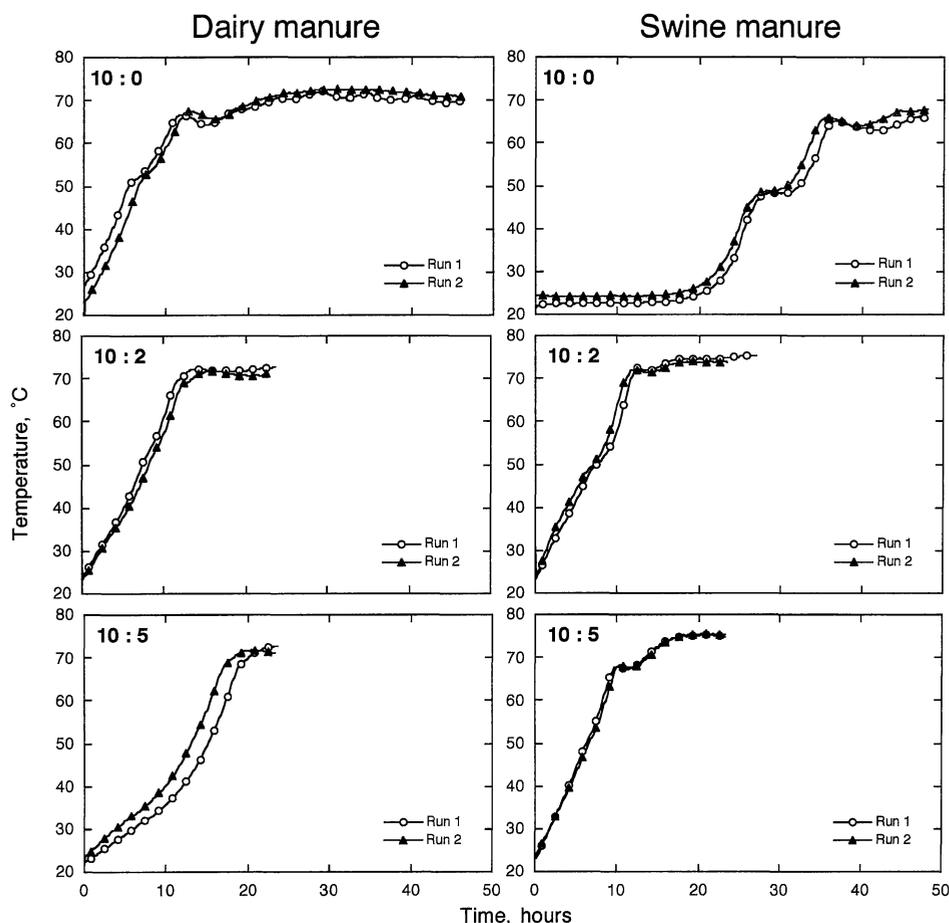


図 2 異なる種堆肥混合率による堆肥化初期過程の温度変化

Fig. 2 Temperature profiles during the early stage of animal wastes composting at different seeding ratio

ml で混合し連続希釈を行った後、この菌液をトリプチケース・ソイ寒天培地（日本ベクトン・ディッキンソン株式会社）に接種し塗末培養した。培養温度および培養時間は 30°C および 45°C 培養で 48 時間、50°C および 60°C 培養で 24 時間とした。また pH は蒸留水（pH 約 6.3）：初期材料を 10 : 1（湿潤質量）に懸濁したものを pH メータ（B-212 [精度±0.1 pH], 株式会社堀場製作所）で測定した。

III 結果および考察

1. 温度履歴と初期材料 pH

図 2 に種堆肥混合率が異なる乳牛ふんおよび豚ふん材料の堆肥化初期過程における温度変化を示した。なお図には各々 2 反復の結果を記した。乳牛ふんによる堆肥化ではいずれの混合率試験区も実験開始直後に温度が上昇し、24 時間以内に 70°C 以上に昇温した。とくに 10 : 2 試験区では他試験区と比べて最も速く昇温し、約 13 時間で 70°C に到達した。豚ふんによる堆肥化では 10 : 2 および 10 : 5 試験区において迅速な温度上昇が見られ、とくに 10 : 2 試験区で最も速く 70°C に達した。乳牛ふん、

豚ふん共に 10 : 2 試験区で他の試験区と比較して昇温速度が速いことから、本研究においては 10 : 2 の種堆肥混合率が堆肥化初期の温度上昇の促進に適していると示唆される。

一方、種堆肥を混合していない豚ふん 10 : 0 試験区では約 20 時間の温度上昇の遅延が生じた（図 2）。堆肥化反応の初期過程で観測される温度上昇の遅延は、堆肥材料の pH が低いことに起因すると考えられており、食品廃棄物等の低 pH 材料による堆肥化においてしばしば観測される（Lei et al., 2000）。本研究では豚ふん 10 : 0 試験区の初期材料 pH は 6.5 と他試験区と比べても低く（図 3）、この低 pH が堆肥化の初期過程で温度上昇を抑制したと考えられる。加えて、低 pH 材料の豚ふん 10 : 0 試験区では 48 時間以内に 70°C に到達しなかったが、豚ふん種堆肥を添加した 10 : 2 および 10 : 5 試験区では、順調な温度上昇が観測され 70°C 以上の温度まで上昇した（図 2）。このとき豚ふん 10 : 2 および 10 : 5 試験区の初期材料 pH 8 前後とアルカリ性を示していた（図 3）。Lei et al. (2000) は低 pH 材料への pH 調整は堆肥の最高温度を上昇させると報告している。本研究において

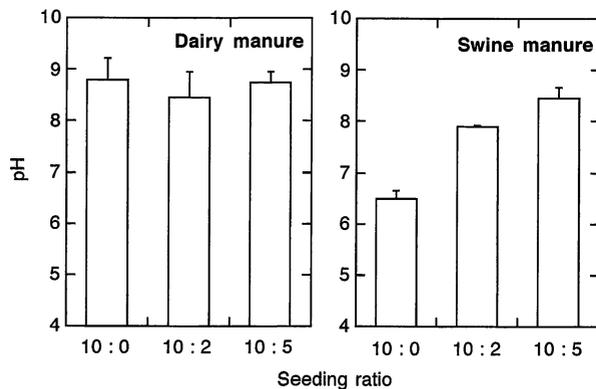


図3 異なる種堆肥混合率による初期材料 pH
Fig. 3 Initial pH of animal wastes at different seeding ratio. Data are expressed with means and standard deviations

も豚ふん 10:2, 10:5 試験区では種堆肥混合により初期材料 pH が上昇し, 堆肥化過程では豚ふん 10:0 試験区と比べて最高温度が上昇した。これは Lei et al. (2000) の結果と一致する。なお乳牛ふんではいずれの試験区でも初期材料 pH が 8 以上であり種堆肥混合による材料 pH の変化は観測されなかった (図3)。本研究では, 乳牛ふん種堆肥および豚ふん種堆肥の初期 pH は約 8.7 および 8.6 とアルカリ性を示していた。家畜ふん材料がアルカリ性の場合, このようなアルカリ性種堆肥の混合は材料 pH に影響せず, 堆肥化の立ち上がり方には顕著な差を示さなかった。一方, 家畜ふん材料が中性から弱酸性の場合, アルカリ性種堆肥の混合は初期材料 pH をアルカリ性へと移行させ, 低 pH による温度上昇の遅延を解消したと考えられる。これらの結果から判断すると, 低 pH 材料へのアルカリ性種堆肥の混合が, 初期反応を促進させる効果は極めて大きいと考えられる。

2. 初期微生物数と微生物活性

図4に種堆肥混合率が異なる家畜ふん材料の初期微生物数を示した。調査した培養温度全てで種堆肥の混合率が高くなるほど初期微生物数は増加した。これは種堆肥混合による微生物接種の効果であり, 「種堆肥混合が初期微生物数を増加させる」という理論的見解や Nakasaki et al. (1988) の報告とも一致する。

次に, 初期材料中の微生物数が増加するのであれば堆肥化の立ち上がり時における微生物活性の上昇が期待できることになる。これを裏付けるために種堆肥混合率が異なる乳牛ふんおよび豚ふん堆肥化初期過程における比増殖速度の温度依存性を測定した (図5)。比増殖速度は通常, 常温から約 44°C の範囲と 50~60°C の範囲に中温性と高温性微生物の増殖により上昇し (Miyatake and Iwabuchi, 2006), 本研究の 10:0 試験区でも同様の傾向が示された。一方, 双方の家畜ふん材料による堆肥化とも種堆肥混合率が高くなるほど 40~50°C 間の比増殖速

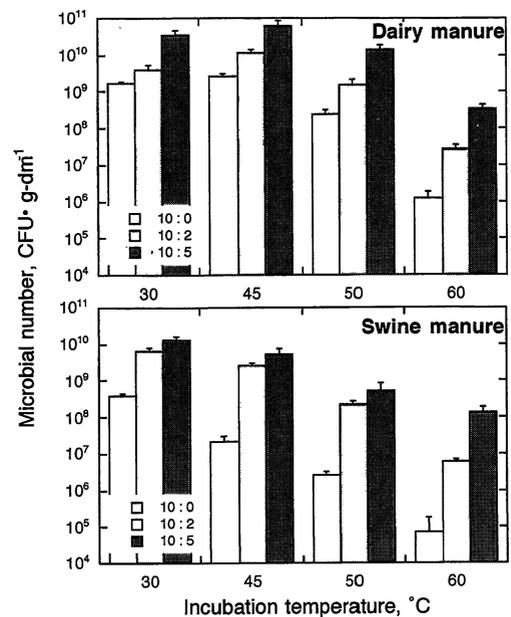


図4 異なる種堆肥混合率による家畜ふんの初期微生物数
Fig. 4 Initial microbial number in animal wastes at different seeding ratio. dm : dry matter. Data are expressed with means and standard deviations

度は増加した (図5; 矢印参照)。約 40°C 以上で微生物叢は中温性から高温性に遷移することから (Poincelot, 1975), これらの中~高温性微生物叢の移行期にあたる菌叢の増殖活性が, 種堆肥混合により著しく上昇したことになる。このことから, 通常の家畜ふん堆肥化では特定の温度域でのみ高い微生物増殖活性が見られていたが, 種堆肥混合による堆肥化ではより広範囲の温度域で同程度の高い微生物増殖活性の発現が可能であると考えられる。

また, 図6に種堆肥混合率が異なる乳牛ふんおよび豚ふん堆肥化初期過程における熱発生速度の温度依存性を示した。熱発生速度は通常約 40°C と 60°C に中温性および高温性微生物の活性による極大値が観測され (Iwabuchi and Kimura, 1994), 本研究の 10:0 試験区でも同様の傾向を示した。一方, 双方の家畜ふん材料による堆肥化とも種堆肥の混合率が高くなるほど, 約 50°C で見られる熱発生速度の極小値が上昇した (図6; 矢印参照)。これは中温性から高温性微生物叢への移行期に当たる菌叢の増殖活性が高くなった結果 (図5), この温度域における微生物の代謝熱の発生量が増加し, 熱発生速度の上昇を導いたと考えられる。

一般的に家畜ふんによる堆肥化の立ち上がり時には, 約 50°C にステップ状温度変化が現れることが指摘されている (Kimura and Shimizu, 1981)。本研究でも 10:0 試験区ではその温度変化は観測されたが, 種堆肥の混合率が高くなるほどこのステップ状温度変化は解消される傾向にあった (図2)。これは堆肥化の立ち上がり時

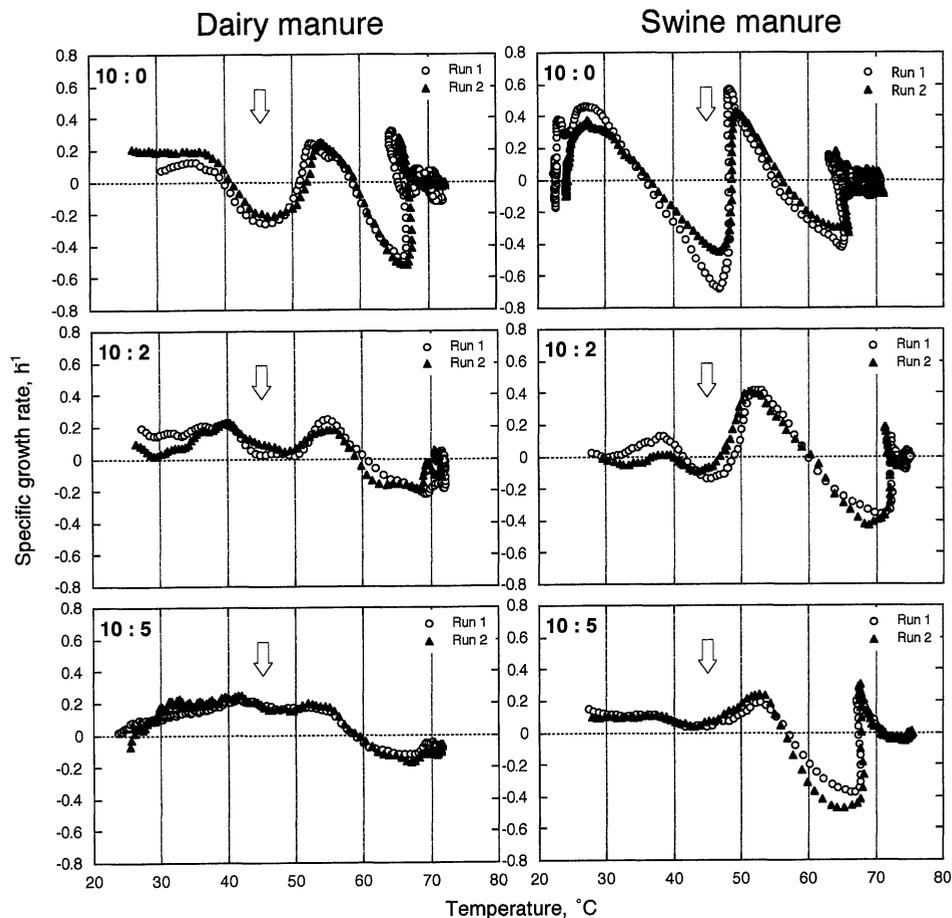


図5 異なる種堆肥混合率による家畜ふん堆肥化における比増殖速度の温度依存性
 Fig. 5 Dependence of specific growth rate on temperature during animal wastes composting at different seeding ratio

に、広範囲の温度域で微生物増殖が活発となり代謝熱による発熱量も増加した結果、約50°Cで生ずる温度上昇の停滞を改善させたと考えられる。種堆肥混合によるこうした効果は初期反応全体を促進させるほどではないものの、微生物活性を上昇させスムーズな温度上昇をもたらすという点で効果があると理解できる。

IV 結 論

本報は種堆肥の混合が家畜ふん堆肥化の初期過程に及ぼす影響を検討し、温度上昇に関係する初期材料のpHと微生物数に関して以下二点の知見を得た。一点目は、低pH材料に対する初期pHの上昇効果である。初期材料pHが中性から弱酸性の場合、種堆肥の混合は材料pHをアルカリ性へと上昇させ、低pH材料で観測される温度上昇を防ぎ、初期反応を促進させる効果が期待できる。但し初期材料pHがアルカリ性の場合、種堆肥混

合による材料pHへの影響は観測されず、堆肥化反応に対する特段の促進効果は期待できない。二点目は初期微生物数の増加による微生物活性の上昇効果である。種堆肥の混合は初期微生物数の増加に伴い、堆肥化の立ち上がり時に40~50°C間で比増殖速度の上昇を示し、広範囲の温度域で高い増殖活性を発現させる。これは熱発生速度の上昇も導き、約50°Cで見られる温度停滞の解消に効果がある。但し、これらの効果は初期反応全体を促進させるほどではないが、微生物活性を増強させスムーズな温度上昇をもたらすという点で有効である。

謝 辞

本研究の供試材料である豚ふんの提供は栃木県畜産試験場の協坂浩氏(現栃木県畜産振興課)の御協力を得た。また研究補助として宮竹久氏にお手伝い頂いた。ここに、感謝申し上げる。

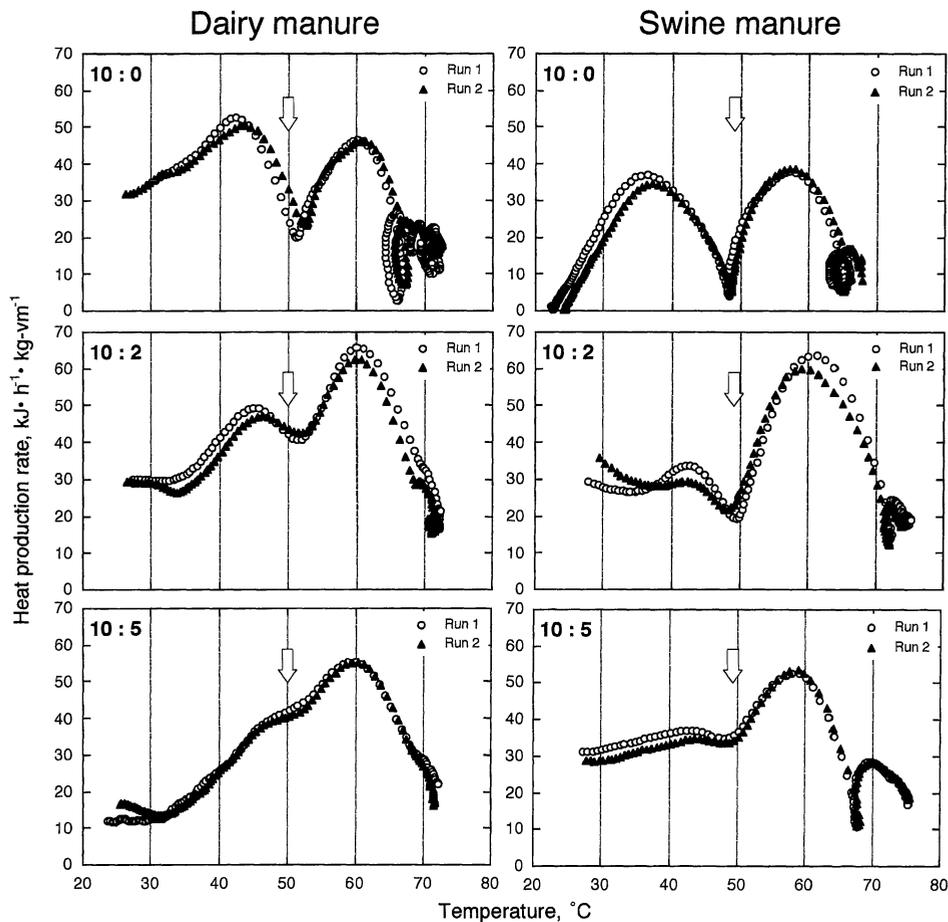


図 6 異なる種堆肥混合率による家畜ふん堆肥化における熱発生速度の温度依存性
 Fig. 6 Dependence of heat production rate on temperature during animal wastes at different seeding ratio

References

- Finstein, M.S., Morris M.L., 1975. Microbiology of municipal solid waste composting. *Adv. Appl. Microbiol.* 19, 113-151.
- Golueke C.G., Card, B.J., McGauhey, P.H., 1954. A critical evaluation of inoculums in composting. *Appl. Microbiol.* 2, 45-53.
- Iwabuchi, K., Kimura, T., 1994. Aerobic biodegradation of dairy cattle feces (Part 1). *Journal of JSAM*, 56 (2), 67-74.
- Iwabuchi, K., Miyatake, F., 2001. Culture conditions for determining microbial population size contributing to high rate composting of dairy manure by using the dilution agar-plate method. *Journal of JSAM*, 63 (6), 85-89.
- Kimura, T., Shimizu, H., 1981. Basic studies on composting of animal wastes (Part 1). *Journal of JSAM*. 43 (2), 221-227.
- Lei F., VanderGheynst, J.S., 2000. The effect of microbial inoculation and pH on microbial community structure changes during composting. *Process Biochem.* 35, 923-929.
- Miyatake, F., Iwabuchi, K., Kimura, T., 2003. Activated temperature of microorganisms contributing to cattle manure composting. *Journal of JSAM*. 65 (2), 101-105.
- Miyatake, F., Iwabuchi, K., 2006. Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresour. Technol.* 97, 961-965.
- Nakasaki, K., Sasaki, M., Shoda, M., Kubota, H., 1985. Effect of seeding during thermophilic composting of sewage sludge. *Appl. Environ. Microbiol.* 49, 724-726.
- Nakasaki, K., Akiyama, T., 1988. Effects of seeding on thermophilic composting of household organic waste. *J. Ferment. Technol.*, 66 (1), 37-42.
- Poincelot, R.P., 1975. The biochemistry and methodology of composting. *The Connecticut Agricultural Experiment Station Bulletin*, 754.

(原稿受理: 2007年5月17日・質問期限: 2008年5月31日)

コ メ ン ト

[読者のコメント]

種堆肥の混合技術は現場では広く利用されている手法であり、その効果の是非を科学的に解明することは学会として必要な研究です。種堆肥は戻す堆肥の状態にもよりますが比較的高温菌が多く含まれている可能性が高く、初期段階では中温菌の活性が必要となりますので当然戻し堆肥の適切な範囲があるのではないのでしょうか。また、C/N比や好気と嫌気に関与するORPの変化などについてはどのようにお考えでしょうか。

[コメントに対する著者の見解]

種堆肥とする適切な範囲や混合すべき量はあると考えられます。スタータとしての役割を果たす中温菌の活性を高めることは、スムーズな温度上昇に繋がります。このような中温菌の適切な増加量を把握できれば、適切な種堆肥の時期や混合量を定義することも可能と考えられます。ただし易分解性有機物が分解されている種堆肥の過剰な混合は、微生物数の増加をもたらす反面、堆肥材料の有機物量を相対的に減少させ、堆肥化初期過程の微生物増殖を制限させる可能性があります。これは初期材料中の微生物の基質となる窒素量（C/N比）とも密接に関連し、著しいC/N比の上昇は微生物増殖に影響する可能性があります。ORPは本報のように強制通気を行っている場合は変化が少ないと思われませんが、堆肥化研究でORPを検討した例は少なく今後の検討課題になるかと思えます。