

(3) 高温好気発酵法による豚舎廃棄物の長期運転時の処理特性

**Treatment characteristics of swine waste by thermophilic
oxic process in long-term operation**

李璦雨*, 多田千佳**, 西村修*, 山田一裕*, 須藤隆一*

Chan-Woo LEE*, Chika TADA**, Osamu NISHIMURA*, Kazuhiro YAMADA*, Ryuichi SUDO*

ABSTRACT : Effective treatment of livestock feces and urine is required to prevent surface and ground water from being polluted. In this study, thermophilic oxic process (TOP) was applied to the treatment of swine waste. The purpose of this study is to investigate the treatment characteristics of swine waste by TOP in long-term operation. The results were summarized as follows : Though swine waste could be treated effectively until 60th day, the treatment performance was gradually declined after 60th day. 87% of carbon was converted to CO₂ on 45th day. 41% of carbon was converted to CO₂ on 85th day. It was recovered by replacing half of cedar chip by new one on 86th day. Under suitable condition of TOP, 90% of total input swine waste (40kg) and food oil (2kg) was removed in 60 days. The number of thermophilic bacteria was maintained about 10¹¹ CFU · g⁻¹ during this period. The reason of the decline of treatment performance was considered that the activity of thermophilic bacteria come down due to the accumulation of some residue and deterioration of cedar chip.

KEYWORDS ; Swine waste, thermophilic oxic process, long-term operation, thermophilic bacteria, conductivity

1. はじめに

水域の環境保全および水質汚濁を防止する観点から家畜ふん尿の効率的な処理・処分が重要な課題となっている¹⁾。現在、家畜ふん尿の中でも豚ふん尿の処理では、乾燥・コンポスト化・焼却・浄化・貯留などのいずれか、または組み合わせにより処理されているが、ふん量に比べ尿量が多い性状に鑑み、ふんと尿を分離してふんはコンポスト化、尿は活性汚泥法などを用いて処理することが基本とされている²⁾。しかし、省力化、衛生管理面から考えるとふんと尿を分離せず処理する方法が強く求められ、このような高濃度有機排液の処理の一つとして近年開発された高温好気発酵法が注目されている^{3),4)}。本法の原理は、基本的にはコンポスト化と同様に反応槽に担体として充填した木材チップなどに高温好気微生物を付着させ、その微生物により投入した有機物を分解する処理法である。特徴としては、反応槽への有機物投入速度は有機物分解速度と同程度とするためほぼ完全に分解し、有機物分解の際に発生する熱により排液中の水分を全て蒸発させることなどが挙げられる。本法はSS濃度の高い高濃度有機排液である豚ふん尿、食品加工排液、醸造排液、濃縮余剰汚泥などに適用が可能であり、水分制御のために不足するカロリー源を加えることにより効率よく処理ができること、処理を司る高温細菌の活性が高くなる最適環境条件などが報告されている^{5)~10)}。しかし、1サイクルにおける最適運転条件を下にして長期間運転を行った場合、見かけ上1サイクルにおいては無視できた分解されない物質の長期間での蓄積、それによる微生物への影響、あるいは担体の劣化等を通じて処理性が悪化することも予測される。また、処理性が低下する場

* 東北大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tohoku University)

** 東北大学大学院農学研究科 (Graduate School of Agriculture, Tohoku University)

(現茨城県科学技術振興財団研究員)

合は回復方法についても明らかにしておく必要がある。

そこで、本研究ではふん尿混合式で発生するものに近い含水率 90% に調節した豚ふん尿を用いて、短期間の処理実験で求めた最適環境条件の下で長期運転を行い、担体の持続性を含めた処理特性および処理期間中の微生物の挙動について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験試料

豚ふん尿を採取した宮城県にある養豚場は平床式でふんと尿は分離されている。このふんの含水率は 87% であった。そこで、供試豚ふん尿はふん尿混合処理を想定し、養豚場から豚ふんと尿を別々に採取して含水率が 90% になるように調整後使用した。Table1 に調整済み豚ふん尿の性状を示す。豚ふん尿は 4℃ の低温室に保存して実験に供した。補助熱源としては市販の食用油を用いた。その性状は Table 2 に示す。担体は市販のコンポスト化用杉チップの中から長さが 2~5 mm のものを選別して使用した。

2.2 実験装置

実験には内径 310mm、幅 250mm、有効容量 19L の円筒形の小型高温好気発酵実験装置を用いた。実験装置を Fig. 1 に示す。熱損失を少なくするために反応槽を保温マントルで覆った。熱電対を反応槽の中心に差し込み、自動的に温度を記録した。反応槽の下部に多孔性のアクリル板を設置して空気の分散とドレイン水の排出を図り、供試豚ふん尿の漏出を防ぐため担体を充填した。また、反応槽を天秤の上に設置して混合物の重さを連続測定した。空気はコンプレッサーを用いて反応槽下部から 24 時間連続で送り、フローメータで通気量を調節した。

Table 1 The characteristics of swine waste

Items	Concentration (mg · L ⁻¹)
BOD	40,000
COD	35,000
TOC	31,000
T-N	5,000
T-P	1,900
Water content*	90

* Water content ; %

Table 2. The characteristics of food oil

Items	Concentration (g · L ⁻¹)
TOC	395
T-N	ND*
T-P	ND*

*ND ; not detected

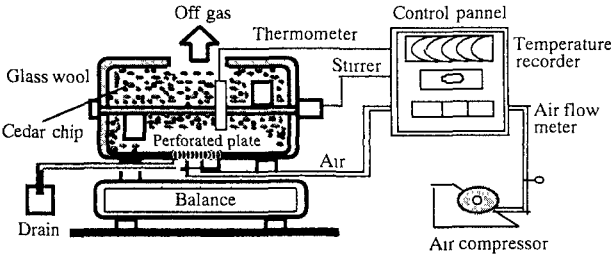


Fig. 1 Schematic diagram of the thermophilic oxic process

2.3 実験条件

実験に先立って反応槽に担体として杉チップ（含水率は 43%）を 2.26kg 充填し、そこに種菌として豚ふんで作製したコンポストを 300g 添加した。微生物の活性度を高めるための 1 サイクルにおける平均含水率は約 55% であることから¹⁰⁾、反応槽内の混合物の初期含水率としては 50%（1 サイクル平均としては 55%）になるように水道水を用いて調節した。そして、豚ふん尿 BOD₅ 負荷と補助熱源量（食用油）を変化させて求められた最適投入量から¹⁰⁾ BOD₅ 負荷 3kg · m⁻³ · day⁻¹、補助熱源量 120mL を 24 時間に 1 回の頻度（1 サイクルを 24 時間とする）で投入した後約 10 分間攪拌を行った。通気量は 100L · m⁻³ · min⁻¹ として連続で送り、その処理特性を検討した。

2.4 分析方法

豚ふん尿と食用油の性状分析（BOD、COD）は下水試験方法に準じた¹¹⁾。TOC の測定は TOC-5000（Shimadzu）を用いた。T-N と T-P の分析は Autoanalyzer（テクニコン）を用いた。反応槽内の混合物の含水率はサンプル約 3g を採取し、105℃ で約 3 時間乾燥して前後の重量差から求めた。処理期間中杉チップの電導率

は0.5gの乾燥サンプルを粉末状にし、100gの蒸留水に溶解させてから Digital Conduct meter (TOA, CM-15A) で測定した。排気ガスの採取はテドラーバッグを用いて1サイクル中2時間毎に行い、Gas chromatograph (Shimadzu, GC-8A) でCO₂ガス濃度を測定した。高温細菌数は Beffa らの方法¹²⁾を改変して以下に述べる方法を用いた。滅菌水1Lに乾燥ブイヨン8gとコンポスト抽出液を100mL入れ、pH7.2に調節し、ゲルライト8gを用い、ゲルライトの補助凝固剤としてCaCl₂・2H₂O 0.8gを添加し¹³⁾、121℃、15分間のオートクレーブ滅菌後平板培地を作成した。実験装置から採取した3gのサンプルを0.85%生理食塩水で10倍希釈して30分間振とう後、段階希釈し平板に塗抹し、60℃で1日間培養後計数した。コンポスト抽出液は種菌として用いたコンポストを0.85%生理食塩水で10倍希釈し、ガーゼで濾したものを遠心分離(3000rpm)し、上澄みを用いた。ATP濃度は実験装置から5gのサンプルを採取して100mLの滅菌水に入れ、1分間超音波をかけた後、光電子計数法でUDP-8000 (明電舎) を使用して測定した。

2.5 物質収支

炭素収支は1サイクルの収支として求めた。総投入炭素量は反応槽での蓄積量、ガス転換量、ドレイン量とバランスする。炭素収支の計算は、投入炭素量は供試廃棄物の全有機炭素(TOC)を測定し、投入量に乘じて求めた。排出炭素量は排気ガス中のCO₂ガス濃度を測定し、それを通気量に乘じて求めた。ドレイン水中炭素量はドレイン水の全有機炭素を測定し、ドレイン量に乘じて求めた。また、蓄積量は総投入炭素量からガス転換量、ドレイン水中炭素量を引いて求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 豚ふん尿の処理特性

高温好気発酵法は有機物の生分解により熱が発生するため、処理期間中発生する熱から処理進行度合の把握ができる。Fig. 2に処理期間中での温度変化を示す。豚ふん尿と食用油を24時間に1回投入(1サイクル)したため、ピークを持つ一つの曲線が1サイクルでの温度変化である。運転開始から4日目からは、1サイクルでの最高温度が約60℃まで上昇した。その後の温度変化は、最低約30℃から最高約75℃まで規則的に変化した。規則的な温度変化は投入した有機物の分解が定常状態になったことを意味する。しかし、運転開始から約60日目から最高温度が下がり、85日目には最高温度が約48℃まで下がった。そこで、本研究では運転開始から86日目に充填された杉チップの50%を新しい杉チップに入れ換えることにした。これにより、温度が回復し、100日目まで最低約30℃から最高約75℃まで規則的に変化した。Fig. 3に処理期間中の含水率の変化と1サイクルにおけ

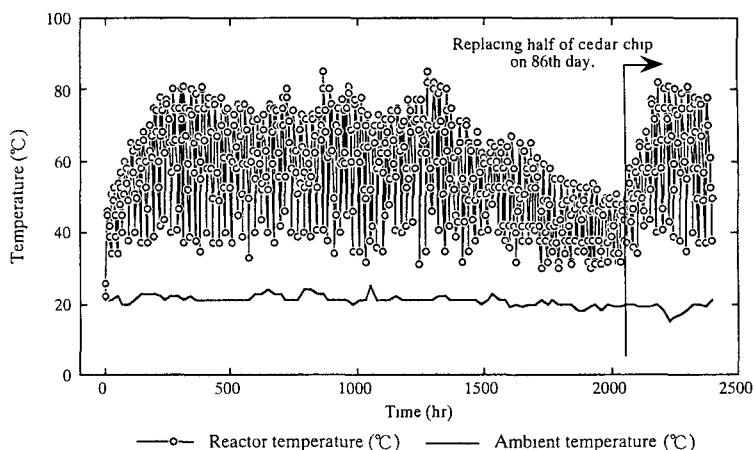


Fig. 2 Changes in temperatures

る重量の減少率を示す。運転開始から約 70 日目までの含水率は運転開始の初期含水率である 50% に維持されたが、それ以降は含水率が上がり、85 日目には約 65% になった。また、1 サイクルにおける重量の減少率は運転開始 8 日目から約 100% の減少率、つまり完全分解の状態に達したが、約 60 日目から減少率は低下し、86 日目には約 47% になった。しかし、86 日目に反応槽の杉チップを 50% 入れ換えることにより含水率は約 50%、重量の減少率は約 100% に維持することができた。

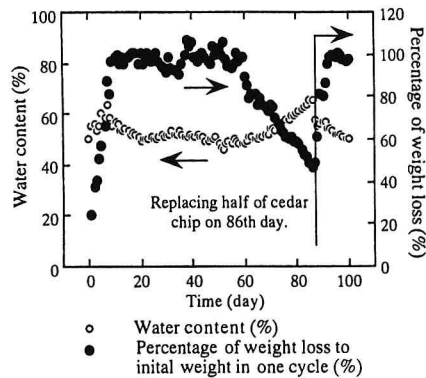


Fig. 3 Changes in water content and percentage of weight loss to initial weight in one cycle

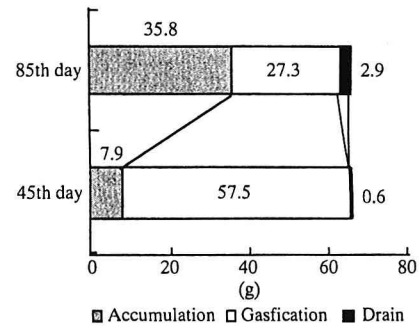


Fig. 4 Carbon balance

運転開始から約 60 日目から処理性が低下することから、処理性が安定した 45 日目と処理性が低下した 85 日目の 1 サイクルにおける炭素収支を求め、Fig. 4 に示した。45 日目には投入炭素量 (66g) の約 87% (57.5g) が分解、ガス化して約 12% (7.9g) が蓄積したが、85 日目には投入炭素量 (66g) の約 41.4% (27.3g) が分解、ガス化して約 54.2% (35.8g) が蓄積した。また、Fig. 5 に 45 日目と 85 日目の CO_2 ガス生成速度と温度の相関関係を示す。 CO_2 ガス生成速度は 1 サイクルにおける発生する CO_2 ガス濃度から求めた。45 日目と 85 日目の両者において CO_2 ガス生成速度と温度の関係は指数関係で表され、温度の上昇と共に CO_2 ガス生成速度が増加したが、45 日目のほうが 85 日目より高いことが確認された。また、60 日目と 80 日目の 1 サイクル終了時の杉チップを Photo. 1 に示す。60 日目の杉チ

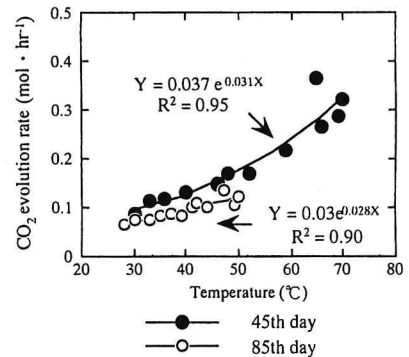
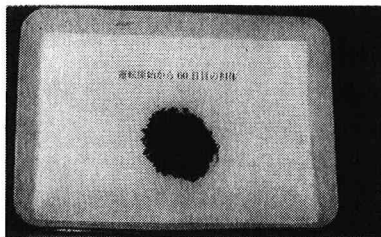


Fig. 5 Relationship between temperature and CO_2 evolution rate



(a) 60th day



(b) 80th day

Photo. 1 Shape of cedar chip

チップはさらさらな分散状態であるが、80 日目の杉チップは粘度のある状態で団粒化しており、新たに投入される豚ふん尿と杉チップとの混合がうまく行われず、団粒構造の内部は嫌気的狀態になっているものと思われる。また、80 日目の杉チップの形状は最初と比べて大きく変わっており、杉チップの劣化が団粒化に影響を及ぼしていると考えられる。

本研究では約 60 日目から温度の低下が見られたので 60 日間処理した豚ふん尿と食用油の量を計算した。その結果は Fig. 6 に示す。60 日間投入量 42kg（豚ふん尿は 40kg、食用油は 2kg）は、約 90%（37.8kg）がガスに転換し、約 1.6%（0.7kg）がドレインされ、約 8.3%（3.5kg）が反応槽に蓄積された。高温好気発酵法は発生する熱により投入された豚ふん尿に含まれている水分を全量蒸発させるので、含水率は一定に保たれる。また、有機物を分解し、水分を蒸発除去することによって反応槽の混合物の重量は増加せず運転開始時とほぼ同じ状態で 1 サイクルの処理が進行する。つまり、完全分解による持続的な処理を目指しているが、見かけ上完全分解が進行している約 60 日目までの物質収支からも何らかの物質が蓄積していることがわかる。また杉チップの劣化も生じることから長期間の運転においては杉チップの入れ換えが必要であり、担体の耐久性と使用済み担体の利用可能性についての検討も運転管理上重要であることが分かる。

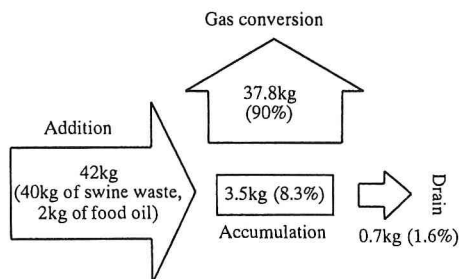


Fig. 6 Weight balance in 60 days

3.2 処理期間中の微生物の挙動

未使用杉チップと 45 日目の杉チップの電子顕微鏡写真を Photo. 2 に示す。使用前の杉チップでは大小の孔が観察されたが、45 日目の杉チップでは表面が大きく変わって桿菌と思われる細菌の集積・付着が確認された。高温好気発酵法において対象排液の処理は 60℃以上で行われるため、有機物分解には高温細菌が貢献することになる¹⁴⁾。Fig. 7 に処理期間中の高温細菌の変化を示す。運転開始から約 15 日目から高温細菌数は約 10^{11} CFU・g⁻¹ で安定し、本法においては良好な処理の行われている間は高温細菌数が 10^{11} CFU・g⁻¹ 程度であることが分かった。一方、約 60 日目からは高温細菌数が激減し、86 日目に杉チップを入れ換えることで高温細菌数は再び増加した。高温好気発酵法において高温細菌に適切な環境条件としては 1 サイクルの含水率が

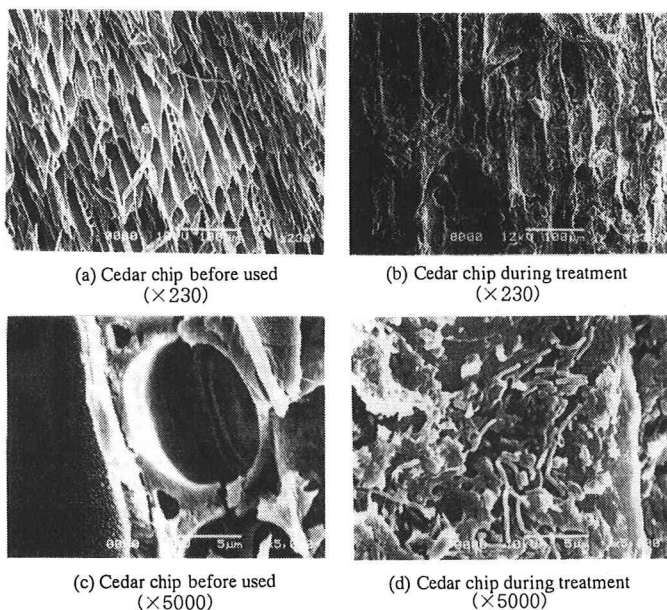


Photo. 2 SEM of cedar chip

が 55%、60℃が維持される時間が長いことが明らかになっている¹⁰⁾。本実験の場合、60 日目の環境条件としては Fig. 3 から分かるように含水率条件は適切である。従って、細菌数の減少からも推察されるように温度低下は高温細菌の活性の低下による発生熱量の低下によって生じたと考えられる。

Fig. 8に高温細菌数、ATP濃度と杉チップの電導率の関係を示す。電導率が増加すると共に高温細菌数とATP濃度は上昇したが、電導率約 $355\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以上になると高温細菌数とATP濃度は減少した。電導率が約 $355\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ は運転開始から約60日目の時点であった。この結果から、分解できないイオン性残留物質等の蓄積が高温細菌に何らかの影響を与え約60日目から温度の下降が起こり、 CO_2 生成速度が低下すると考えられる。しかし、運転開始から80日目の電導率は $414\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ まで上昇したが、担体を入れ換えた後90日目の電導率は $272\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ までに低下、高温細菌の増加や温度の上昇が見られ、処理機能が回復された。つまり、本法は長期間運転

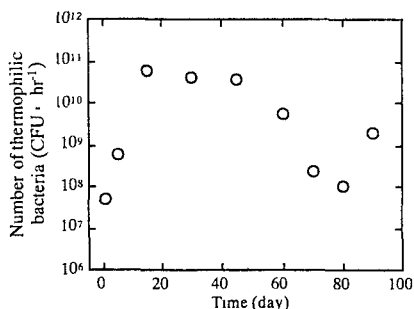


Fig. 7 Changes in number of thermophilic bacteria

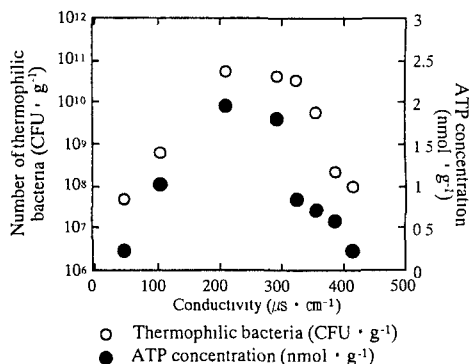


Fig. 8 Relationship among number of thermophilic bacteria, ATP concentration and conductivity

を行った場合、分解できないイオン性残留物質等の適切なコントロールが必要であり、具体的には杉チップを入れ換えることで機能回復を図る必要がある。また、電導率は担体として用いた杉チップの交換時期の一つの指標になると考えられ、本実験では60日目の電導率である $355\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ を指標として杉チップを交換することで、高温細菌数の活性を維持できると思われる。

4. まとめ

本研究では、高温好気発酵法による含水率90%の豚ふん尿の処理における長期運転時の処理特性の検討を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 運転開始から60日目までは効率よく処理できたが、それ以降は処理性が低下し、86日目に充填した50%の杉チップを入れ換えることによって処理性が回復した。
- 2) 45日目における1サイクルの収支から投入された炭素の約87%除去されたが、85日目においては投入された炭素の約41%が除去されるにとどまることが分かった。また、処理が良好であった60日間での総処理量は、総投入量42kg（豚ふん尿は40kg、食用油は2kg）の約90%がガスとして除去されるが、この間においても物質の蓄積（3.5kg）が認められた。
- 3) 処理期間中の杉チップには桿菌と思われる細菌が集積・付着していた。また、適切な処理が行われている間は高温細菌数が $10^{11}\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ 程度に維持されることが分かった。
- 4) 処理性低下の原因としては、分解できないイオン性残留物質等の蓄積が高温細菌の活性度に影響を与えること、杉チップの劣化が起こること等が推察された。

5. 参考文献

- 1) 築城幹理、原田靖生：家畜の窒素排泄量の推定プログラム、畜産の研究、第48巻第7号、pp 33-36、1994
- 2) 農文協：畜産環境対策大事典、pp. 61-69、1995.
- 3) T.Mori, B.G. Liu and K.S. Cho : The treatment of highly concentrated organic wastewater by thermophilic oxic process complete oxidation of organic matter and evaporation, *Jpn. J. Chem. Indust.*, 44(11), pp

924-930, 1993.

- 4) 稲森悠平、林紀男、山海敏弘、須藤隆一：水環境改善技術開発のための最新展望、*JETI*, 43(4)、pp. 104-109, 1995.
- 5) J.K. Yang, Y. Shimizu, K.S. Cho and T. Mori : Significance of Calorie/ Water (C/W) ratio in the treatment of highly concentrated organic matter by thermophilic oxic process, *Jpn. J. Society on Wat. Environ.*, 18(7), pp. 583-588, 1995
- 6) H. Cai and T. Mori : Treatment of thickened excess sewage sludge by thermophilic oxic process, *Jpn. J. Proc. of Environ. Engin. Res.*, 32, pp. 371-378, 1997.
- 7) B.G. Lin, S. Noda, I. Yoshida and T. Mori : Evaluation and selection of a medium for the thermophilic oxic process, *Jpn. J. Wat. Treat. Biol.*, 33(4), pp. 187-198, 1997
- 8) 稲森悠平、岩見徳雄、S.J. Yu、近山憲幸：農産物地域における有機廃棄物の高温好気発酵法による資源循環高度処理、用水と廃水、37(1)、pp. 50-56, 1995.
- 9) B.G. Liu, H. Cai and T. Mori : Complete decomposition of swine waste by thermophilic oxic process, *Jpn. J. Proc. of Environ. Engin. Res.*, 31, pp. 209-214, 1994.
- 10) 李瓊雨、多田千佳、西村修、山田一裕、須藤隆一：高温好気発酵法による豚舎廃棄物の処理特性、水環境学会印刷中
- 11) 日本下水道協会：下水試験方法、1997.
- 12) T. Beffa, M. Blance, P. F. Lyon, G. Vogt, M. Marchiani, J. L. Fischer and M. Aragno : Isolation of *Thermus* strains from hot composts (60 to 80°C), *Appl. Environ. Microbiol.*, 62(5), pp. 1723-1727, 1996.
- 13) C. C. Lin and L. E. Casida : GELRITE as a gelling agent in media for the growth of thermophilic microorganisms, *Appl. Environ. Microbiol.*, 47(2), pp. 427-429, 1984
- 14) 須藤隆一：環境浄化のための微生物学、講談社、pp. 154-161, 1992.