尿素を用いたバーク堆肥中でのポリ乳酸 (PLA) の分解

中村健二 ¹⁾・伊東優介 ²⁾・新田見匡 ²⁾・松本幹治 ²⁾・中村一穂 ²⁾

1) 清水建設株式会社技術研究所 Institute of Technology, Shimizu Corporation
kenji-nakamura@shimz.co.jp

2) 横浜国立大学大学院工学研究院 Graduate School of Engineering, Yokohama
National University

摘要: ポリ乳酸 (以下, PLA) は植物由来のプラスチックであり, 生分解性を有する環境配慮型資材である。建設事業の緑化分野でも土嚢や防草シート等に使用されるが, その分解速度は遅く, 分解に寄与する微生物も限定される。そこで本研究では, 尿素を用いて PLA 布を緑化基盤材や肥料として使用されるバーク堆肥中で分解させる手法の基礎検討を実験室内で行い, 以下の結果を得た。1) バーク堆肥に尿素を添加すると, 尿素的加水分解から生じたアンモニアにより PLA の分解が可能なること。2) PLA の分解は温度とアンモニア濃度に依存性があり, アンモニア水溶液中で導出した分解予測式がバーク堆肥中でも使用可能なこと。3) 尿素添加量 5 wt% 以内であれば土壌微生物の増殖は認められたが, バーク堆肥のアルカリ化が生じた。

キーワード: 尿素, バーク堆肥, ポリ乳酸, 分解, 緑化資材

NAKAMURA, Kenji, ITO, Yusuke, NITTAMI, Tadashi, MATSUMOTO, Kanji and NAKAMURA, Kazuho : **Decomposition of polylactic acid in bark compost by using urea**

Abstract : The polylactic acid (PLA) is a polymer of plant origin, which having biodegradability for various usages as an environmentally friendly greening materials. PLA is used as a material for the sand bag and the mulching seat in the construction business. However, it is known that the bio-degradable speed of PLA is very slow, and only a few microorganisms can biodegrade it. Thus, the method to decompose PLA cloth in the bark compost was examined by using urea, and the following results were obtained: 1) PLA cloth in the bark compost was degraded by ammonia that was generated by hydrolysis of the additive urea 2) The formula to predict decomposition rates of PLA cloths in ammonia aqueous solutions could be applied for that in the bark compost. 3) The microbial growth in the bark compost was observed when the added amount of urea was less than 5 wt%, however, the alkalization of the bark compost, which would affect the microbial environment, occurred at the higher urea concentration.

Key words : urea, bark compost, polylactic acid (PLA), decomposition, greening materials

1. はじめに

ポリ乳酸 (以下, PLA) はトウモロコシ等から作られる植物由来のプラスチックである。化石資源由来のものとは異なり, 再生可能で二酸化炭素排出量も少ない。また生分解性を有することからゴミの減量化にも寄与する環境配慮型資材として注目を集めている¹⁵⁾。近年は食料不足問題への対応から, 生ゴミや農業残渣物等からの生産¹²⁾も検討されており, 今後ともその技術発展と活用が期待される資材である。

PLA は建設事業における緑化分野でも, 土嚢や防草シート^{18,23)}, 法面を保護する法枠等 (写真-1) に使用されている。土嚢や法枠に PLA を使用する目的は, これら資材が分解する

ことにより, 自然景観の回復や人工物残存による生物等への悪影響を回避することにある。しかしその生分解速度は非常に遅く^{5,14)}, また分解に寄与する微生物も限定される¹⁰⁾ことから, 使用場所によっては, ほとんど分解しない事例^{7,11,13,17)}も多く報告されている。

生分解性は, JIS K 6950, 6951, 6953 に定める方法にて, 「180 日以内に 60 % 以上が分解する」と規定されている。しかし建設事業で生分解性材料を使用する場合, 1 年から数年のより長い期間, 一定の性能を保持し, 不要となった任意の時点で分解することが求められる。その意味で, 分解速度が遅い PLA は, 建設事業で使用する生分解性材料としては適したものであり, これを任意の時点で回収等の作業なしに, 原

位置にて分解させる処理方法の検討は、建設事業へ生分解性材料を普及させる上で重要なものと考ええる。

これまで PLA の分解促進方法は、微生物酵素による生分解²⁾のほか、酸や塩基を利用した加水分解⁴⁾が報告されており、酸や塩基による加水分解は、その速度が速いこと³⁾も知られている。またアンモニア水を使用した PLA の化学分解処理方法⁹⁾も報告されている。そのほか PLA の土壌中での加水分解において分解速度を決定する因子には、温度、pH、含水率、微生物栄養素など¹⁵⁾が報告されている。

本研究では、PLA 製の法枠袋を、法面に吹付または植栽された植物の根で法面が保護される 2～5 年後に尿素を用いて現場で分解させることを目標とした。尿素は安価で窒素肥料として一般的に使用されており、土壌中の加水分解反応で容易にアンモニアとなり、PLA の加水分解に作用するものと考えた。

本研究では、基礎研究として法面緑化基盤材として頻繁に使用されるパーク堆肥を実験土壌とし、パーク堆肥への高濃度の尿素添加によって PLA 分解が加速するか、またその分解速度を予測できるかを検討するとともに、尿素添加による土壌微生物への影響等を検討することを目的とした。今回は単純化のため操作因子を主に温度とアンモニア濃度に絞り、PLA の分解実験を実験室の恒温槽内にて行った。分解実験はまずパーク堆肥よりも扱いやすい水溶液中で行い、使用した PLA のアンモニアによる分解特性を把握した後、パーク堆肥中で行った。以上の実験より得られた知見を以下に報告する。

2. 材料ならびに方法

2.1 実験材料

今回使用した PLA は、ネイチャーワークス LLC 社の PLA ペレット樹脂を溶融温度 220～230℃、吐出量 0.6 g/sec で紡糸し、冷却・延伸・開繊・捕集してヒートロールでエンボス加工した目付 120 g/m² のспанボンド不織布である。その仕様を表-1 に示す。

使用したパーク堆肥は、エコグリーンソイル（自然応用科学）で、その仕様を表-2 に示す。全国パーク堆肥工業会が定める品質基準で一級に該当する。

尿素は窒素分 46 wt% のもの（三井化学）を使用した。

2.2 アンモニア水溶液中での PLA 分解実験

塩基としてアンモニアを選定し、その濃度および温度と PLA 分解の関係について検討した。ビーカーに 0.5, 1, 2 wt% に調製したアンモニア水溶液および純水をそれぞれ 100 mL 入れ、各液に 3 枚の PLA シート（1 cm×9 cm）を浸漬したビーカーを各 6 個用意した。

同ビーカーを恒温（15, 25, 35℃）で振とうさせ、数日ごとに PLA シートを 1 枚ずつ取り出した。取り出したシートは水でよく洗った後、25℃で 48 時間乾燥させ、引張強度を測定した。

写真-1 PLA 製法枠の施工例

Photo 1 Example of slope protection of PLA

表-1 PLA の仕様

Table 1 Specification of PLA

主成分	ポリ乳酸（100 %）
比重	1,260 kg/m ³
熱変形温度	53℃
引張強度	7.30 N±0.30 N（精度±1.04 %）
分子量	71,000～77,000
結晶化度	73 %

表-2 パーク堆肥の仕様

Table 2 Specification of bark compost

主成分	パーク堆肥+ピートモス （体積比 7 : 1）
パークサイズ	15 mm 以下
水分	60.2 %
pH	5.9
窒素全量（N）	1.57 %
リン酸全量（P ₂ O ₅ ）	1.01 %
カリ全量（K ₂ O）	0.86 %
有機炭素（C）	39.39 %
有機物	83.25 %
C/N 比	25
陽イオン交換容量	82.0 me/100 g

2.3 土壌（パーク堆肥）中での PLA 分解実験

ビーカーにパーク堆肥 300 g を入れ、パーク堆肥に対して尿素を 3～30 wt% 添加して十分に混合し、PLA シート（1 cm×9 cm）を 3 枚埋設したビーカーを各 6 個用意した。

同ビーカーを恒温（15, 35℃）で静置し、経時的に以下に示す各種測定を行った。

2.3.1 パーク堆肥中の NH₄⁺濃度の測定

尿素はウレアーゼ存在下で、式（1）の加水分解を起こすことが知られている¹⁹⁾。

アンモニア濃度測定においては、パーク堆肥と 2 N の塩化カリウム溶液を重量比 1 : 10 で混合し、1 時間激しく振とうさせ試料を静置して上澄み液を採取した。この上澄み液を超純水で 1,000 倍に希釈することで、アンモニウムイオンとカリウムイオンのピークを分離した。イオンクロマトグラフ（島津製作所）によりこの希釈液の NH_4^+ 濃度を測定し²⁰⁾、 NH_3 濃度に換算した。イオンクロマトグラフのカラムには、IC-C3（島津製作所）を使用し、移動相は 2 mM のシュウ酸 2 水和物を 1.2 mL/min で流した。

2.3.2 PLA の引張強度測定

引張試験機 R-840（オリエンテック）に、2.2 と同様の手順で乾燥させた PLA シートの両端 15 mm をはさみ、下端を 20 mm/min の速度で引いた際の引張強度 T_s を求めた。

2.3.3 パーク堆肥中の pH と ATP 量の測定

尿素添加によるパーク堆肥中の微生物への影響を確認するため、35℃におけるパーク堆肥中の pH と ATP 量を測定した。測定はまずパーク堆肥 10 g に 25 mL の純水を加えて攪拌し、30 分間静置した後、5A のろ紙（ADVANTEC）でろ過した。

このろ液の pH をガラス電極式水素イオン濃度指示計 WM-22EP（東亜ディーケーケー）を使用して測定した。

また、ろ液を 25 倍に希釈した試料溶液 1.0 mL 中の ATP を、ATP 測定キット（ルシフェール HS、キッコーマン）を用いて発光させ、発光量測定器（ルミテスター、キッコーマン）で発光量を測定した。ATP 量はこの発光量（RLU:Relative Light Unit）で表した。

3. 結果および考察

3.1 アンモニア水溶液中での PLA 分解

3.1.1 分解速度定数 K_{TS} のアンモニア濃度依存性

15 °C の濃度の異なるアンモニア水溶液中への浸漬実験における PLA シートの引張強度の経時変化を図-1 に示す。これよりアンモニア濃度が高いほど、引張強度の低下が速いことが分かった。なお純水における引張強度の低下は確認されなかった。

既往の研究において、PLA 等のエステル加水分解は、分子量の一次反応として進行する事が報告⁸⁾されており、他の文献では分子量は引張強度に比例するという報告¹⁹⁾もある。そこで初期の引張強度に対し、 t 時間加水分解させた後の引張強度は、以下の式（2）で表されること²²⁾が予想される。

$$\ln(T_{S(t)}/T_{S(0)}) = -K_{TS} \cdot t \quad (2)$$

($T_{S(0)}$: t 時間後の引張強度, $T_{S(0)}$: 初期の引張強度,
 K_{TS} : 分解速度定数, t : 時間(day))

本研究においても、図-1 の結果を式(2)で整理するため、引張強度変化の対数を軸とした図-2 を作成した。この傾きより求めた引張強度低下速度定数(以下は分解速度定数と呼ぶ)

図-1 15 °Cでの引張強度の経時変化（アンモニア水）

Fig. 1 Time course of change in tensile strength at 15 °C

図-2 15 °Cでの $\ln(T_{S(t)}/T_{S(0)})$ と分解時間の関係（アンモニア水）

Fig. 2 Relation between $\ln(T_{S(t)}/T_{S(0)})$ and degradation time at 15 °C

表-3 15 °Cでのアンモニア濃度と分解速度定数の関係（アンモニア水）

Table 3 Relation between ammonia concentration and degradable rate constant at 15 °C

アンモニア濃度 (wt%)	K_{TS} (1/day)
0.5	0.16
1.0	0.46
2.0	0.82

K_{TS} (1/day)を表-3 に示す。

表-3 より、 K_{TS} にはアンモニア濃度依存性があることがわかった。そこで K_{TS} は式（3）のようにアンモニア濃度 C_{NH_3} (g/kg)に比例すると仮定して、その比例係数 kc を求めた。

$$K_{TS} = kc C_{\text{NH}_3} \quad kc = 0.042 \text{ kg/(g} \cdot \text{day)} \quad (3)$$

同様に 25 °C, 35 °C でも kc の算出を行い、それぞれ

0.14, 0.24 を得た。

3.1.2 k_C の温度依存性

3.1.1 で算出した各温度における k_C を Arrhenius プロットすることにより、活性化エネルギー E_a および頻度因子 A を求め、それぞれ 64.3 kJ/mol, 2.09×10^{10} を得た。式 (4) に濃度依存性、温度依存性を考慮した K_{TS} を示した。

$$\begin{aligned} K_{TS} &= \{A \exp(-E_a/RT)\} \cdot C_{NH_3} \\ &= \{2.09 \times 10^{10} \cdot \exp(-6.43 \times 10^4/RT)\} \cdot C_{NH_3} \quad (4) \\ (R: \text{気体定数 } 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}, T: \text{温度 K}) \end{aligned}$$

式 (4) を式 (2) に代入することで、アンモニア濃度と温度から PLA の引張強度を算出する式 (5) を求めた。

$$T_{S(t)} = \exp\{-2.09 \times 10^{10} \cdot \exp(-6.43 \times 10^4/RT) \cdot C_{NH_3} \cdot t\} \cdot T_{S(0)} \quad (5)$$

この式より PLA の引張強度の変化を求め、15 °C の実験値と比較した結果を図-3 に示す。25 °C, 35 °C のグラフは割愛したが、アンモニア濃度が高いほど、また温度が高いほど引張強度の低下時間が短いことが確認された。

また各温度における実験値と予測値の関係を表-4 に示す。式 (5) による計算値と実験値には、いずれの温度、アンモニア濃度においても良い相関が得られた。PLA の加水分解には、温度とアンモニア濃度が大きな因子となっていることが確認された。

3.2 バーク堆肥中での PLA 分解

3.2.1 尿素添加系バーク堆肥中における PLA 分解の予測式

15, 35 °C での分解実験における堆肥中の NH_3 濃度の変化を図-4, 5 に示す。尿素の添加量が多いほど、また尿素 10 wt% での各温度を比較すると温度が高いほど、短時間でより多くのアンモニアが発生することが確認された。

これは温度が高いことで微生物の活動が活発になり、より

図-3 15 °C での引張強度予測値と実験値の比較 (アンモニア水)

Fig. 3 Comparison between experimental value and predicted value of tensile strength of PLA cloth at 15 °C

表-4 引張強度実験値と予測値の関係 (アンモニア水)

Table 4 Relation between experimental value and predicted value of tensile strength of PLA cloth

温度	実験条件	直線回帰 の傾き	相関係数
	アンモニア濃度		
15 °C	0.5 wt%	0.826	0.954
	1.0 wt%	0.856	0.960
	2.0 wt%	1.033	0.988
25 °C	0.5 wt%	0.849	0.969
	1.0 wt%	0.843	0.964
	2.0 wt%	0.998	1.000
35 °C	0.5 wt%	0.786	0.904
	1.0 wt%	0.855	0.971
	2.0 wt%	0.981	0.997

図-4 15 °C での NH_3 濃度の経時変化 (バーク堆肥)

Fig. 4 Time course of change in NH_3 concentration at 15 °C

図-5 35 °C での NH_3 濃度の経時変化 (バーク堆肥)

Fig. 5 Time course of change in NH_3 concentration at 35 °C

多くのウレアーゼ酵素が発生し、より多くの尿素をアンモニアへ分解したものと考えられる。

また分解実験における PLA 引張強度の変化の実測値をそれぞれ図-6, 7 にプロットで示す。35 ℃の実験において、バーク堆肥に尿素を添加することで尿素 10 wt%では約 6 日、尿素 3 wt%でも約 15 日間で、15 ℃の実験においては、尿素 20 および 30 wt%濃度にて、約 30 日間で PLA の引張強度がほとんど 0 になることを確認した。

35 ℃において尿素を添加したバーク堆肥の ATP 量と pH の経時変化を表-5, 6 に示す。pH の経時変化は尿素的添加量によらず、ほぼ同様であったが、尿素的添加量が多いほど引張強度は速く低下した。これは PLA の分解が pH よりもアンモニア濃度に依存していたことを示唆するものであった。

大澤ら⁴⁾は pH のほぼ等しい炭酸塩緩衝液およびアンモニア緩衝液中で、PLA の分解実験を行っている。結果はアンモニア緩衝液に浸した PLA の方が、破断強度の低下が速いというものであった。大澤ら⁴⁾はその理由として、PLA の加水分解における塩基の触媒効果は、pH よりも塩基の化学種に強く依存するのではないかと考察している。本研究は PLA の分解機構を調べるものではないため、その詳細は明らかではないが、大澤ら⁴⁾の報告と同様、アンモニアが pH 変化だけでなく、化学種として PLA の加水分解を促進したものと考えられる。

なお図-6, 7 に示した尿素 10 wt%を比較すると、PLA の分解速度はアンモニア水の場合と同様に、温度の高い 35 ℃の方が速いことがわかる。これは図-4, 5 に示した尿素添加量 10 wt%におけるアンモニア濃度は、35 ℃の方が短時間で高濃度になることから確認される。

また図-4, 5 の NH₃ 濃度の分解時間依存性を示す実験値より求めた近似曲線とその近似式を図に記す。この近似式より求めた NH₃ 濃度を 3.1.2 で導出した PLA 分解速度の予測式 (5) に代入した結果を図-6, 7 に実線で記した。

35 ℃では、PLA 分解速度の式 (5) で求めた予測値と実測値はほぼ一致した。また 15 ℃でも一部ズレはあるものの、全体の傾向は一致した。これよりバーク堆肥中における PLA の分解速度（引張強度の変化）は、アンモニア水溶液で求めた式 (5) で推算できることがわかった。よって尿素添加系バーク堆肥中における PLA の分解は、尿素から発生したアンモニアによる分解であったと考えられる。

3.2.2 尿素添加による土壌微生物への影響

表-5 に示した ATP 量は、尿素的添加量を 10 wt%とした実験では、1 日後に 130.6 から 29.1 へ、15 日後には 1.9 wt%にまで大きく減少した。一方、尿素的添加量を 3, 5 wt%とした実験では、逆に ATP 量が 15 日間でそれぞれ 3, 4 倍に増加した。しかし表-6 より、pH は尿素的添加量によらず 1 日後には 5.88 から約 8.7 へ、3 日後には 9 を越え、バーク堆肥がアルカリ化したことが確認された。

よって堆肥への尿素的添加は、量が過剰（10 wt%以上）の場合は微生物の増殖を抑制し、少量（5 wt%以下）の場合はアルカリ性を好む微生物の増殖を促進する効果があるものと

図-6 15 ℃での PLA 分解予測式と実験値（バーク堆肥）

Fig. 6 Comparison of experimental value and predictive value of tensile strength of PLA cloth at 15 ℃

図-7 35 ℃での PLA 分解予測式と実験値（バーク堆肥）

Fig.7 Comparison between experimental value and predicted value of tensile strength of PLA cloth at 35 ℃

表-5 35 ℃における ATP 量（RLU）の経時変化（バーク堆肥）

Table 5 Sequential change of ATP at 35 ℃

尿素濃度	添加前	1 日後	3 日後	5 日後	10 日後	15 日後
3 wt%	130.6	71.7	250.5	586.9	597.5	361.3
5 wt%	130.6	204.3	248.6	217.8	209.9	490.2
10 wt%	130.6	29.1	80.7	7.8	24.2	1.9
ブランク	130.6	132.5	126.7	165.6	118.5	122.1

表-6 35 ℃における pH の経時変化（バーク堆肥）

Table 6 Sequential change of pH at 35 ℃

尿素濃度	添加前	1 日後	3 日後	5 日後	10 日後	15 日後
3 wt%	5.88	8.74	9.05	9.01	8.95	8.84
5 wt%	5.88	8.69	9.08	9.07	9.03	9.01
10 wt%	5.88	8.76	9.06	9.08	9.14	9.06
ブランク	5.88	5.88	5.87	6.09	7.17	6.95

思われる。

しかし尿素 3, 5 wt% の pH は, 15 日後でも 8.84, 9.01 と高い状態であり, 酸性および中性を好む微生物への悪影響が予想される。また高 pH 条件下では, アンモニアが遊離体 (NH_3) として存在する割合が高くなり, 硝化細菌群の活性を阻害することも報告されている¹⁾。よって尿素添加による土壌環境への影響を判断するには, より長期的な pH および微生物群集の変化を確認する必要があると考える。

また尿素 10 wt% では, 微生物の増殖が抑制され, pH が 9 前後と高いにも関わらず, 尿素 3, 5 wt% よりも PLA の分解は速くなった。これは既に生成されたウレアーゼ酵素により尿素からアンモニアへの分解が進んだためと考えられる。自然環境中の河川や土壌中では, 至適 pH が中性から弱アルカリ性であるヘリコバクター・ピロリ⁹⁾由来のウレアーゼの存在²¹⁾が報告されている。今回使用したバーク堆肥中にも, 同様のウレアーゼが存在したため, 高 pH 条件化においても尿素的加水分解が機能したと考えられる。

4. まとめ

PLA のアンモニア水溶液およびバーク堆肥に添加した尿素による分解試験を実験室内で行った結果, 下記のことが確認された。

- 1) 尿素有添加することにより, バーク堆肥中の PLA の分解が促進された。
- 2) PLA の加水分解速度は, 温度とアンモニア濃度への依存性が高かった。またアンモニア水溶液中での分解実験より導出した温度とアンモニア濃度を関数とした PLA の分解予測式は, バーク堆肥中での PLA の分解実験においても, 分解期間の予測が可能であった。
- 3) 尿素添加量が 5 wt% 以内であれば, バーク堆肥中の微生物の増殖阻害は認められなかったが, 微生物相に影響を及ぼす可能性があるバーク堆肥のアルカリ化が生じた。

なお, 尿素有添加を野外で実施する場合には, バーク堆肥のアルカリ化による土壌微生物への影響の他, 発生したアンモニアの大気への拡散や雨水による土壌への流出など周辺環境への悪影響が考えられる。そのため, 本分解法の実用化には周辺環境へ悪影響を及ぼさない適正な施用量と効率的な尿素的施用方法等 (例えば, 徐々にアンモニアが供給されるように, 遅効性肥料のようなコーティングを施した尿素による PLA 分解) の検討が重要となる。

引用文献

- 1) Anthonisen, A. C. (1976) "Inhibition nitrification by ammonia and nitrous acid", J. Water Pollut. Control Fed., 48(5): 835-852.
- 2) 大澤敏, 西川武志, 小川俊夫 (1999) 有用微生物群によるポリ乳酸の分解促進効果, マテリアルライフ学会誌, 11(3):

118-123.

- 3) 大澤敏, 鹿野幸一, 小川俊夫 (2002) コンポスト中に生成した酸・塩基がポリ乳酸の分解に及ぼす影響, マテリアルライフ学会誌, 14(3): 148-153.
- 4) 大澤敏, 水野克美, 小川俊夫 (2004) ポリ乳酸およびポリカプロラク톤の分解に及ぼす酸・塩基・酵素の影響, 材料技術, 22(2): 15-22.
- 5) 北川和男 (2002) 生分解性プラスチックの土壌分解性について, 材料, 51(6): 707-708.
- 6) 熊谷俊子, 太田浩良, 太田君枝 (2001) *Hericobacter pylori* 感染経路, 化学療法の領域, 17(3): 19-25.
- 7) 黒木泰至, 鳥越清, 福地哲郎, 小玉義和 (2001) 生分解性プラスチックのフィールドテスト第 1 報, 宮崎県工業技術センター・宮崎県食品開発センター研究報告, 44: 51-54.
- 8) 玄丞然 (1998) ポリ乳酸繊維の加水分解に伴う形態変化, 繊維と工業, 54(10): 527-531.
- 9) 齊藤奈々子, 安田信彦, 附木貴行, 脇坂港, 白井義人, 西田治男 (2006) ポリ乳酸製食器のアンモニアによるケミカルリサイクル, プラスチック化学リサイクル研究会第 9 回 討論会論文集: 88-89.
- 10) 酒井清文, 森芳邦彦, 中山敦好, 山野尚子 (2003) 自然環境中における生分解性プラスチック分解菌の分布, 高分子学会予稿集, 52(5): 979.
- 11) 佐野正, 林成美, 天城裕子, 佐藤亨 (2001) 生分解性プラスチックのフィールドテスト, 新潟県工業技術総合研究所工業技術研究報告書, 30: 55-58.
- 12) 白井義人 (2005) 都市のゼロエミッションによる生ゴミからポリ乳酸の生産, 生物工学会誌, 83(5): 238-241.
- 13) 田村克浩, 金子亜由美 (2002) 生分解性プラスチックの土壌分解性フィールドテスト, 静岡県静岡工業技術センター研究報告, 47: 21-25.
- 14) Tsuji, H., Mizuno, A. and Ikeda, Y. (1998) "Blends of Aliphatic Polyesters. III, Biodegradation of Solution-Cast Blends from Poly(L-lactide) and Poly(ϵ -caprolactone)", J. Appl. Polym. Sci., 70: 2259-2268.
- 15) 辻秀人 (2008) ポリ乳酸, 米田出版, pp.2-11, 76-92.
- 16) 土壌微生物研究会 (1992) 土壌微生物実験法, 養賢堂, pp.372-373.
- 17) 中井猛夫, 野村賀寿雄, 三橋正典, 西村敬一 (2002) 生分解性プラスチックのフィールドテスト・暴露試験, 奈良県工業技術センター研究報告, 28: 13-18.
- 18) 中村健二 (2003) 赤土流亡対策用土嚢袋の生分解性に関する研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会論文集 VII: 139-140.
- 19) 西原舞, 村瀬繁 (2003) ポリ乳酸繊維の加水分解速度, 繊維学会誌, 59(9): 371-374.
- 20) 日本土壌肥料化学会 (1986) 土壌標準分析・測定法, 博友社, pp.105-107.
- 21) Mobley HLT, Island MD, Hausinger RP (1995) "Molecular biology of microbial ureases", Microbiol Rev 59: 451-480.
- 22) 橋本健治 (1979) 反応工学, 培風館, pp.29-31.
- 23) 山本孝, 木水貢, 森大介, 新保善正 (2000) 環境調和型産業資材の実証化 生分解性繊維の実用化, 石川県工業試験場研究報告, 49: 25-30.

(2009. 7. 30 受理)