特集「循環型社会のLCA」

解説

廃プラスチックのリサイクルとLCA

山田 悦

Recycling of Plastic Wastes and its Life Cycle Assessment

Etsu YAMADA

Synopsis: Nowadays, since plastics are used throughout our societies, the issues surrounding plastic wastes have become a typical and symbolic part of the discussion on waste treatment and recycling. Recycling of plastic wastes is classified into four methods such as reuse, material recycling, chemical recycling and thermal recycling (thermal recovery). The LCA is applied to the estimate of these recycling methods for the reproduction of PET resin. In comparison with the production of PET resin by chemical recycling and thermal recycling, the material recycling can reduce the environmental loading such as energy consumption and pollution. However, the quality of recycled PET and impurity in plastic wastes cannot be estimated by LCA. In comparison with the production of virgin PET resin from crude oil, the monomer recycling process can reduce the environmental loading such as energy consumption and pollution so that it seems to be usable as a practical method for the recycling of PET from bottle to bottle. The importance of appropriately combining sorted waste collections and recycling technologies is pointed out.

Key Words: recycling of plastic wastes, poly (ethylene terephthalate) (PET), life cycle assessment, recycling of PET from bottle to bottle

1. はじめに

わが国では、2000年を循環型社会元年と位置づけ、法的枠組みを整備するなど、21世紀の「持続可能な発展」を目標に掲げた取り組みを強化している。そのために政府は、ある産業から出るすべての廃棄物を新たに他の分野の原料として活用し、あらゆる廃棄物をゼロにすることをめざす「ゼロエミッション構想」をうちたてている。この考え方は、環境を守るうえでも重要な役割をはたすものである。このような大きな目標をかかげて、各産業とも、再生可能な原材料を優先的に使い、生産から流通までの行程を見直し、リデュース (Reduce)、リユース (Reuse)、リサイクル (Recycle) という三つのRへの取り組みを強化している。廃容器包装材、建設廃材、使用済み家電製品、自動車などのリサイクル手法の確立が急務となり、容器包装リサイクル法、建設リサイクル法、家電リサイクル法など相次いで個別のリサイクルに関する法律が制定され、施行されている。

2. プラスチックリサイクルについて

プラスチック業界も、このような取り組みに積極的に参加し、新たなリサイクル技術の開発やプラスチックの製品

開発やリサイクル事業を進めるときに欠かせない、環境への影響評価 (LCA = ライフサイクルアセスメント) の研究を進めている。

プラスチックリサイクルは、Figure 1に示すように4種類に大きく分けることができる¹⁻³⁾。最も単純な方法は、プラスチック製品のまま再利用するリユースである。レンズ付きフィルムの部品やリース後に回収されたコピー機の部品にも再利用されているものがある。これらは、分解、洗浄のような単純な作業だけで再度同じ機能を果たすことができるので、効率もよく環境負荷の削減効果も大きい。マテリアルリサイクルとは、廃プラスチックをプラスチックのまま原料にして新しい製品をつくる技術である。ケミカルリサイクルとは廃プラスチックに、熱や圧力を加え、もとのモノマーなど基礎化学原料に戻してから、再生利用することをいう。鉄鉱石とコークスから鉄を作り出している高炉において、コークスの代わりにプラスチックを利用する高炉原料化もそのひとつである。これは、プラスチックが還元剤としての機能をもつという化学的性質を利用している。サーマルリサイクルとは、廃プラスチックから熱エネルギーを回収して利用することである。

Figure 1. Recycling methods of waste plastics.

廃プラスチックの内、私達の日常生活で最もよく知られているのがポリエチレンテレフタレート（PET）である。PETボトルは、1970年代後半にガラス瓶の破瓶問題から落としても割れない容器として登場し、全体の7割を清涼飲料用が占め、その他の幅広い用途に利用されている。しかし、現在その使用済容器が廃棄物増加の一因として社会問題化している。1995年6月の「容器包装に係わる分別収集及び再商品化の促進等に関する法律」（略称「容器リサイクル法」）によりPETボトルは1997年4月から自治体による分別収集が行われるようになったが、回収されたPETボトルがすべてリサイクルされているわけではない。このように、PETボトルの回収-再利用システムが効率よく働かない理由として、樹脂状態での再利用の制限やかさ高いPETボトルの運搬効率の低さなどが挙げられる。

PETボトルや発泡スチロールなどは日本では主にマテリアルリサイクルでリサイクルされている。PETボトルは、メタノール分解あるいは加アルカリ分解してもとの原料物質に戻し、それから再びPET樹脂を作るケミカルリサイクルも進んできている。

ドイツでは、1991年に法律で家庭から排出される使用済み容器包装材の収集・リサイクルがメーカーなどに義務づけられた。この頃はリサイクルと言えばマテリアルサ

イクルを意味していたが、その後ケミカルリサイクルが法的に認められ、リサイクルは多様化し始め、1996年にはサーマルリサイクルがリサイクル技術の一つと定義づけられた。今では「サーマルリサイクルやケミカルリサイクルを含めて初めてリサイクルシステムが成立する」という考え方が芽生え始めている。日本でもプラスチックの製造から使用、廃棄までのサイクルで環境負荷を評価し、できるだけ環境負荷の少ないリサイクル法を選ぶという流れになっている。

0.5リットルのPETボトル容器入り飲料が登場し、いまではガラスビンに代ってPETボトル容器が世に溢れている。容器リサイクル法が1997年4月に施行され、回収率は増加の傾向にあるが生産量も増加している（Table 1）。リサイクルがなかなかごみの減量化に結びついていない現状がある。資源と地球環境を大切にし、持続型社会を目指すわが国の姿勢は、環境先進国と呼ばれる欧州を手本にする一方で、自由経済主義の米国スタイルの呪縛をも振り切れず、現在でも独自の日本スタイルを打ち出せていない。しかし、高分子材料を製造するだけの化学技術や動脈・静脈産業の分けを超えて、資源循環型化学技術を生み出して資源枯渇を防止し、並行して一定資源量からの生産性向上を図ってゆかなければ、持続型未来社会は形成されないだろう。

Table 1. Recycling of PET container in Japan, U.S.A. and Europe

		Unit : 1000 ton						
		1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Japan ¹	Product	219	282	332	362	403	413	437
	Recovery					177	220	266
	(%)					44.00%	53.40%	61.00%
U.S.A. ²	Resin for container	1157	1364	1474	1397	1709	1818	1949
	Recovery (%)	27.10%	24.80%	23.70%	22.30%	22.10%	19.90%	19.60%
	Recycling	262	267	277	281	299	278	
	(%)	22.70%	19.60%	18.80%	17.60%	17.50%	15.30%	
Europe ³	Consumption	1071	1271	1516	1705	1660	1792	2040
	Recovery	116	180	230	283	344	449	
	(%)	10.80%	14.20%	15.20%	16.60%	20.70%	25.10%	30.00%

1: Convention for PET Container, 2: NAPCOR (The National Associate for PET Container Resources),

3: PETCORE (PET Container Recycling Europe)

3. PETリサイクルとLCA

3.1 PETリサイクルの現状

PETは、工業的には主に高純度テレフタル酸（PTA）とエチレングリコール（EG）のエステル重合によって製造されている。大半がポリエステル繊維とボトル向けに利用されているが、フィルムやシートとしてなど様々な用途にも利用されている。また、ボトル向け以外の一部のPETは、ジメチルテレフタレート（DMT）とEGを原料として製造されているものもある。2003年度にはボトル用のPET樹脂は47.1万t生産され、そのうち43.7万tがPETボトルとして利用された。このうち61%が回収され、PETボトルの回収率は、当初の10%未満から順調に回収が進んでいる。

PET樹脂の再資源化方法は、エネルギー消費量の少ない順ならリターナブル商品に次いでマテリアルリサイクル、再生市場の大きい順ならモノマーリサイクル、という優先順位になる。いずれの方法も、つねに廃プラスチックからの燃焼エネルギー回収というサーマルリサイクルと比較されることが多く、これまで議論の対象となってきた。

熱エネルギー回収や高炉還元材としてのリサイクルにも、回収・分別・運搬など再利用資源を得るまでの段階で、樹脂再生ルートと同等かあるいは前処理段階を含めるとそれ以上のエネルギーが必要である。樹脂再生ルートがバージン樹脂の製造と同量のエネルギーを消費しても素材用の石油が節約できる。いいかえると、樹脂再生エネルギーは〔製造エネルギー相当の石油＋素材用の石油－燃焼エネルギー相当の石油〕まで許容できることになる。

廃プラスチック燃焼で得られる熱量は、そのプラスチック製造に要した石油量の半分にも達しない。それに対して再生循環ルートでは理論的には全樹脂量が再生される。実際にこれらの条件を満たす樹脂再生技術はいくつもあり、その代表例がPETのマテリアルリサイクルとモノマーリサイクル技術である。さらに、プラスチックのリサイクルシステムにおける最大の問題点は、化学的技術よりもむしろ材料と商品の設計方法や物流系、分別回収系にあると考えられるが、家電リサイクル法や自動車リサイクル法など種々のリサイクル法の施行により、リサイクルを考えた製品設計やLCAが急速に進んできている。

3.2 PETリサイクルのインベントリ分析⁴⁾

対象のリサイクル技術は、PETボトルのサーマルリサイクルと繊維製品へのマテリアルリサイクル、繊維原料へのケミカルリサイクルであるので、PETボトルの製造・消費・回収までと、そのリサイクル方法としてのサーマルリサイクル、マテリアルリサイクル及びケミカルリサイクルによって再利用されるポリエステル繊維製品としてのブラウスの製品ライフサイクルを含む。

使用済みPETボトルが各リサイクルルートに100%送られた場合のライフサイクルエネルギー使用量を示す。ボトル製造、ブラウス製造、リサイクル工程別に燃料と輸送とフィードストックのエネルギーの寄与である。全体としてブラウス製造にかかわる燃料の寄与率が高く、リサイクルの効果は小さく見える。一例として、サーマルリサイクルを基準シナリオとした場合のマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルを比較すると、消費エネルギーでは、マテリアルリサイクルもケミカルリサイクルも削減となり、二酸化炭素排出量では、ケミカルリサイクルは、サーマルリサイクルより少し不利となる。

PETボトルのリサイクルでは、石油資源から製造されるブラウス用のPET樹脂のフィードストックエネルギーと樹脂製造エネルギーを削減できる効果が大きいため、リサイクルによる消費エネルギー削減効果大きい。プラスチックは一般にフィードストックエネルギー及びモノマーまでの製造エネルギーが大きいので、リサイクルのためにエネルギーを消費しても、消費エネルギーの削減には有効なシステムとなることが多い。サーマルリサイクルで、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルと同等まで消費エネルギーを削減するためには、それぞれ発電効率を67%、25%にすることができれば同等になる。

一方、二酸化炭素排出では、同じ電力でも、公共電力は原子力発電を含み、リサイクルプロセスでは石炭燃料で火力発電を行っている場合は、削減効率が小さくなる。また、サーマルリサイクルの発電効率を10%としているが、この値によっても結果は変動する。このような代替するプロセス間の差は、窒素酸化物や硫黄酸化物のような排気や廃水に関するイベントリでも注意が必要である。

3.3 PETボトルのモノマーリサイクルとLCA^{1, 3)}

ポリエステル製品は、現在全世界で約3,000万トン／年生産され、2010年頃には6,000万トン／年に拡大すると予想されている。一般にポリエステル製品のリサイクルには他素材との混合使用が多いこと、および加工剤・添加物を含有すること、および溶融再成型時加水分解しやすいことなどから、マテリアルリサイクルに大きな制約がある。一般廃棄物中の再生可能資源のうちPETボトルのみが比較的他素材のコンタミが少なく、品質が安定していることから、使用済みPETボトルを洗浄・粉碎・異物除去してフレークスあるいはペレットとしてマテリアルリサイクルされている。しかし異物の完全除去が難しいこと、および重合度のバラツキが避けられないことから再生製品の用途に一定の限界がある。

PETボトルのマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルを比較する場合、同じように繊維にリサイクルする状

況では、LCAではマテリアルリサイクルの方が環境負荷削減効果は大きい、マテリアルリサイクルでは、十分な洗浄を経た材料しか利用できない上、製造できる品質は必ずしも高くない。LCAでは、品質分布、不純物、着色などは評価されず、品質などを同等として評価するためマテリアルリサイクルの方がケミカルリサイクルより見かけ上よいと評価することになる。従って、LCAで良いと評価されたりリサイクル法が必ず最良とは言えず、注意が必要である。

今後一層のボトルの拡大・多様化に対応し、かつマテリアルリサイクルが困難なポリエステル繊維製品、フィルム製品に対して、原料（モノマー）リサイクルの必要性が高まっている。PET樹脂のモノマー化の方法は、1) 加水分解法、2) 加溶媒分解法、3) 加アルカリ分解法の三つに大別できる。1) は酸・アルカリ加水分解法そして超臨界水分解法であり、2) はアルコール、グリコール、アミン、ジアミンを用いる加溶媒分解法であり、3) 無水エチレングリコール（EG）中でアルカリを用いる方法である。

3.3.1 テレフタル酸ジメチル（DMT）法

帝人は、1962年から液相法メタノール分解（methanolysis）による高純度DMTの回収を実施してきた。この方法は、PET屑をメタノール加圧下で反応させて1段階でDMTを得るものであるが、高温高压のメタノール下での反応であり、反応釜攪拌機軸封等のメンテナンスおよびスケールアップに問題が多いことなどの理由から1971年に休止した。これに替る技術としてEG分解／加メタノール分解法よりなる2段階分解法を開発した。

このプロセスは、PET屑をまずEGで分解してテレフタル酸ビスヒドロキシエチル（BHET）に解重合し、このBHETを加メタノール分解法によりDMTとする方法である。このプロセスの特徴は、反応条件が穏和でほとんど圧力のかからない条件下で運転できるため、設備のメンテナンス、操作性に優れている。このプロセスは運転性に優れるが、他の液相、気相両加メタノール分解法と同様に、異種ポリマーおよび染料・顔料等添加物・加工剤の混入に充分対応できない問題があった。そこで使用済みペットボトルや繊維製品等の一般廃棄物が含有する不純物に対応できる技術開発を行った結果、改良EG分解／加メタノール分解法を2000年春に確立した。この新原料リサイクルのプロセスフローをFigure 2に示す。

使用済みPETボトルは、粉碎・洗浄工程を経てEGによる解重合工程にまわされる。EG解重合工程は、少量のアルカリ炭酸塩の存在下にEGの沸点以下の温度でBHETに解重合される。得られた粗BHETを分離したのち、メタノールによるエステル交換反応により粗DMTとする。粗

Figure 2. Recycling process of waste PET from bottle to bottle.

DMTをメタノール中で再結晶し、イソフタル酸ジメチル（DMI）などの異性体を除いたのち、さらにDMT蒸留工程を経て石油から得られるものと同等の99.99%の高純度DMTを得る。

帝人はこの「新原料リサイクル」技術を、徳山事業所においてPETボトル3万トン／年（500 ml PETボトル約10億本相当）の処理により高純度DMT 2.4万トン／年を得るプラントを2002年に建設し、またこのプラントに併設して、ポリエステル繊維製品等からのDMT回収のために、前処理ラインとして粉碎・減容処理設備の建設も進めている。このプロセスの強みは、効率的かつ経済的に異物を除去できることであり、LCAによる消費エネルギー解析結果から、石油から製造したDMTに比べると使用済みPETボトル3万トン／年規模で約7割のエネルギー使用量で高純度DMTが得られることが示された。さらに、ここで得られた高純度DMTを加水分解法によりTPAとするプロセスを新規に開発し、2003年11月より操業を開始した。このTPAを全量使用してボトル用PET樹脂を製造している。これにより回収PETボトルから高純度DMT、TPA化を経て、ボトル用PET樹脂を生産する一貫リサイクル体制が構築されたことになり、「ボトル to ボトルリサイクル」が実現した。PET樹脂製造までの消費エネルギーは、LCAの消費エネルギー解析結果、石油を原料とする従来法に比べて5万トン／年規模で約8割である。「ボトル to

ボトルリサイクル」の基となるこの分解法の処理能力は、2002年度の3万トンに対し、2004年度は約9万トンと3倍に増加している。しかし、2005年度は、使用済みPETボトルの中国向け輸出が増加し、原料の廃PETボトルが不足したため、生産を停止せざるを得ないという異常な状況となっている。

3.3.2 BHET法

使用済みPETボトルをEGにより解重合して、PET樹脂製造用原料のモノマーであるBHETに加グリコール分解し、このBHETから異物除去、着色物除去、精製等の工程を経て高純度BHETを得ると同時に、解重合工程で使用するEGを効率的に再生使用する製造技術、およびこれにより得られた高純度BHETを原料として熔融重合、固相重合を経て再度PETボトル用の樹脂を製造する循環型（ボトル to ボトル）リサイクル技術である。

3.3.3 その他の技術

1) 加アルカリ分解法⁵⁻⁸⁾

本法は、京都工芸繊維大学で山田が奥らと共に基礎的に研究開発した方法である（Figure 3）。アルカリを溶解した無水EG中でPET樹脂をTPA二アルカリ塩とEGに分解し、固体として析出したTPA二アルカリ塩をろ別すれば液状の不純物が除去できる。この固体を少量の水に溶解してろ別すれば固体状不純物が除去できる。このろ液を無機酸で酸晶析するとTPAが得られる。もう一つのモノマー原料であるEGは溶媒と同じであるから単蒸留で精製できる。このようにTPAの分離精製が容易で高純度のTPAが得られる。また解重合・精製装置が簡便型ですむのが特色であり、地域分散型モノマー回収システムとして適している。ただし酸晶析工程で無機アルカリ塩（一般に Na_2SO_4 ）が量論的に生成するので、その用途を確保しなければなら

ない。現在、技術的な開発研究は中小企業事業団の助成を受けた（株）三星化学で、また単独では東洋製罐（株）で実証実験中である。

LCAでは、機能単位はPETボトル1 kgとした。PETボトル（廃PET）1 kgに NaOH 0.417 kg、EG 5.5 kgを加え、 180°C で15分間加熱する。析出したテレフタル酸塩を直ちにろ過してEGと分離する。EGはPETボトルの加アルカリ分解の溶媒として繰り返し使用する。反応で生成したEGは蒸留により回収できる。テレフタル酸塩に付着しているEGを除去した後、水を加えてテレフタル酸塩を溶解し、 H_2SO_4 0.510 kgを添加するとTPAが沈殿する。TPAを 70°C でろ過して Na_2SO_4 を完全に除去し、精製する。このプロセスでTPAが0.86 kg、EG 0.32 kgが回収でき、ろ液から Na_2SO_4 0.739 kgが回収できる。ここでの数値はすべて理論値で示したが、実際はTPAの回収率が約95%、EGの回収率は約80%となる。廃PETの加アルカリ分解による資源消費（試薬）は、 NaOH 0.417 gと H_2SO_4 0.510 kgで、EGは循環使用する。エネルギー消費（電力）は、廃PETの加アルカリ分解、TPAの精製およびEGの蒸留という3つのプロセスでの電力消費である。環境負荷の指標としては、資源消費（試薬）、エネルギー消費（電力）及び排ガス（ CO_2 、 NO_x 、 SO_x ）の排出量を取りあげて、各プロセスでの数値を計算した。PET樹脂製造段階においては、PET 1 kgを製造するための資源であるTPAを0.896 kg、EGを0.464 kg消費し、この過程に必要なエネルギーは電力0.299 kwh、重油0.058 kgおよび蒸気1.03 kgである。排ガス（ CO_2 、 NO_x 、 SO_x ）排出量は1 kcal当たり発生する CO_2 量が0.046 g、 NO_x 量が0.00012 g、 SO_x 量が0.0001 gから算出した⁹⁾。

経済的な観点から考えると、 NaOH 35円/kg、 H_2SO_4 20円/kgとした場合の解重合コストは、これらの試薬だけで $\text{NaOH} : 0.417 \times 35 = 14.6$ 円、 $\text{H}_2\text{SO}_4 : 0.510 \times 20 = 10.2$ 円

Figure 3. Flow chart of monomer recycling for waste PET with alkali decomposition.

で計24.8円となり、その他のコスト（洗浄メタノール、溶媒EG、水など）も含めて考えると現在のところこのモノマリーサイクル法は経済的には安価とは言えない。ただ、副生成物の Na_2SO_4 が0.739 kg生成し、これがガラスやパルプの製造、染料の希釈剤、乾燥剤、界面活性剤及び医薬品など工業的用途を持つとされているので、これをTPA（取引価格推定50～75円/kg）と併せて商品化することができればトータルコスト削減につながると考えられる。

本法による廃PETのモノマリーサイクルについてLCAによる評価を行った結果、原油（ナフサ）からPET樹脂を製造する場合と比較するとエネルギー消費量、排ガス排出量などが少なく環境負荷は小さいので、この方法による廃PETの再資源化は有効な方法と言える。また、原油からPET樹脂を製造する場合は、輸送及びPET樹脂製造などのエネルギーに加えて原材料の石油を消費することになるが、リサイクルの場合は材料資源が廃PETのため石油を使う必要がない。遠くない将来の石油資源の枯渇問題を考えると、石油化学製品を再生産可能な資源（原油と同等のもの）に転換できるモノマリーサイクル法は非常に有用である。

2) 超臨界水分解法

超臨界水分解法は、酸やアルカリを使用しないでTPAが得られるという優れた特色があるが、超高压と超高温水を必要とする装置的、規模的、エネルギー的な問題点やTPAの分解など、大量処理法としては解決すべき問題点がある。

3) 加ジアミン分解法

加溶媒分解の一法でありPETからTPAのポリアミドとEGが得られる。またTPAやPETに代わる新種の高分子が生成するので用途的な興味と同時に制約もあると思われる。

4) オリゴマー法

PET樹脂表面をオリゴマー段階へ解重合し、この段階を樹脂の洗浄精製に利用したあと再び固相重合を行って樹脂再生を行う方法が、ホソカワミクロングループで実施されている。また、回収PET樹脂を数種類のポリカルボン酸やポリオールと混合してエステル交換反応を行うことで、塗料用に適した新たな縮合系樹脂を作ること日本ペイントで行われている。

4. プラスチックリサイクルの展望と予測

プラスチック容器としては、ペットボトル以外に食品トレーなどがあるが、年々 Table 1に示したように回収し再生される原料の量が増加し、その需要確保が大変になっている。回収したプラスチックは主に他の製品を作る原料として使われるが、これを元と同じ製品に再生できれば需要

確保の問題は解決すると考えられる。元の製品と同じものを再生することを「水平リサイクル」というが、プラスチック容器の水平リサイクルに道を開いたのは、食品トレーメーカーのエフピコで、1992年、自主回収した使用済みポリスチレンペーパー（PSP）トレーを原料とした再生トレー（エコトレー）を開発し、販売を始めた。エフピコのエコトレーは、スーパーや自治体との協働による自主回収ルート構築によって排出ルールの徹底に努め、かつ芯に再生原料を用い、食品に触れる外側に新原料から作ったPSPフィルムをラミネートし、食品衛生法の規格基準をクリアしている。このエコピコ・トレーは、あくまでポリスチレンとしてのリサイクルであり、マテリアリサイクルにあたるが、帝人グループによる「ボトル to ボトルリサイクル」技術の実用化は、ケミカルリサイクルになり、再生原料の需要確保に道を開いた点で画期的なことといえる。

しかし、ペットボトルリサイクルには、使用済みボトルの回収という負担をほとんど自治体が担っているという大きな問題がある。自治体はボトル収集・処理に1キロ当たり150～200円程度かけている。自治体は回収した使用済みボトルの再生処理を、日本容器包装リサイクル協会に依頼するが、2005年度は17万7千トンと、2004年度の19万1千トンと比べ7.3%の減少である。ボトルの生産・回収は増加しているが、リサイクル原料の需要が増えている中国に高値で売れるようになり、自治体は少しでも財政負担を減らそうと、協会への無償引き渡しをやめて独自に業者に売却する自治体が増えているためである。このことは、日本国内で確立しつつあるリサイクルシステムに水を差すだけでなく、輸出先の中国で環境汚染問題を起こしている。

LCAにより、廃PETなどプラスチックのリサイクルを原油から製造する場合のエネルギー消費量や環境負荷と比較しての評価はある程度できるが、他のリサイクル法と比較することは、関連するデータの報告が少なく、その出処も明確ではないため、困難である。また、LCAでは品質などの評価ができないことへの対応及び処理プロセスや処理量の違いの評価法など、今後リサイクル法の良否を決める評価法としてLCAの適用を考えるのであれば、課題は多いと言える。

引用文献

- 1) Oku A.: Waste Management Research, Vol.13, (2002), pp.91-98, (奥彬：廃棄物学会誌, Vol.13, (2002), pp.91-98 [in Japanese]).
- 2) Nishitani Y., Toshima M.: Waste Management Research, Vol.16, (2005), pp.265-275, (西谷吉憲, 豊島元敬：廃棄物学会誌, Vol.16, (2005), pp.265-275[in Japanese]).
- 3) 左巻健男, 金谷健編 “ごみ問題100の知識,” 東京書籍,

東京 (2004).

- 4) 社団法人産業環境管理協会 “LCAの実務,” 丸善, 東京 (2005).
- 5) Oku A., Hu L.-C., Yamada E.: J. Appl. Polym. Sci., Vol.63, (1997), pp.595-601.
- 6) Hu L.-C., Oku A., Yamada E., Tomari K.: Polymer Journal, Vol.29, (1997), pp.708-712.
- 7) Hu L.-C., Yamada E., Oku A.: Polymer, Vol.39, (1998), pp.3841-3845.
- 8) Yamada E., Matsui K., Fuse Y., Oku A. : Waste Management Research, Vol.13, (2002), pp.201-208, (山田悦, 松井言永, 布施泰朗, 奥彬 : 廃棄物学会誌, Vol.13, (2002), pp.201-208 [in Japanese]).
- 9) Terazono J., Yamabe H., Sakai S., Takatsuki H.: Abstract of 7th Meeting for Waste Management Research, (1996), pp.115-117, (寺園淳, 山辺浩, 酒井伸一, 高月紘 : 第7回廃棄物学会研究発表会, (1996), pp.115-117 [in Japanese]).