研 究 論 文

マテリアルリサイクルの市場代替性に基づくライフサイクル評価：ペットボトルリサイクルのケーススタディ

中谷　隼・奥野　亜佐子・藤井　実・平尾　雅彦

Life-Cycle Assessment of Material Recycling based on Market Substitutability: A Case Study of PET Bottle Recycling

Jun NAKATANI, Asako OKUNO, Minoru FUJII and Masahiko HIRAO

Synopsis:

Background and Objective. Material recycling of waste plastics is generally categorized into "closed-loop recycling", where waste plastic products are recycled into resin material used for the same kind of products, and "open-loop recycling", where waste plastic products are recycled into resin material used for other kinds of products. When life-cycle assessment (LCA) is applied to evaluate material recycling of waste plastics, a crucial factor is what material is actually substituted by recycled material from the investigated products: (i) virgin material, (ii) recycled material from other kinds of products, or (iii) no material at all in case recycled material is used for functions that would otherwise not be generated. The mix of materials (i)-(iii) substituted by an increased outflow of recycled material depends on how the market reacts to it. In this study, the methodology of LCA for closed-loop and open-loop recycling of waste plastics was summarized according to the substituted materials (i)- (iii) in terms of simplified system boundaries, and then a framework of LCA for material recycling of waste plastics based on market substitutability were presented. The framework was applied to a case study of material recycling of post-consumer polyethylene terephthalate (PET) bottles.

Results and Discussion. The mixed share of substituted materials (i)-(iii) affected by an increased outflow of closed-loop or open-loop recycled material was formulated on the basis of the price elasticity of supply of and demand for recycled and virgin materials. The results of the case study showed that the share of open-loop recycled material which substitutes no material depended on the price elasticity of supply of and demand for non-bottle grade PET resin, and as a result, CO_2 emission and fossil resource consumption of open-loop recycling could be larger than those of closed-loop recycling and incineration of post-consumer PET bottles. In addition, the uncertainty regarding the final products of open-loop recycling for which recycled PET resin were used could be important for the results of LCA based on market substitutability.

Conclusions. The essential difference between closed-loop and open-loop recycling in the framework of LCA based on market substitutability lies in whether the demand for the whole material including recycled and virgin material is increased or not with an increase in the outflow of recycled material. If the demand for the material can be assumed to be constant against an increase in the outflow of closed-loop recycled material, closed-loop recycling which substitutes virgin material of the same kind has advantage over open-loop recycling which possibly substitutes no materials.

Keywords: Closed-loop Recycling; Market Substitutability; Open-loop Recycling; Post-consumer PET Bottle; Price Elasticity

中谷　隼・奥野　亜佐子・平尾　雅彦／東京大学／〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
藤井　実／国立環境研究所／〒 305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2
Jun NAKATANI, Asako OKUNO, Masahiko HIRAO / The University of Tokyo / 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-8656
Minoru FUJII / National Institute for Environmental Studies / 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506

1. はじめに

より、環境負荷排出や資源消費の少ない循環型社会の構築を目指して、廃プラスチックのリサイクルが推進されている。プラスチックリサイクルは、それによって得られる製品やサービスの用途によって、樹脂原料を用途とする「マテリアルリサイクル」、他の原料を用途とする「フィードストックリサイクル」、熱や電力を用途とする「エネルギー回収」に分類される。さらに、マテリアルリサイクル[脚注1)]は、元の用途の樹脂原料として再生利用される「水平リサイクル」と、他の用途の樹脂原料として再生利用される「カスケードリサイクル」に分類され、それぞれ「クローズドループ」「オープンループ」のリサイクルとも呼ばれる（以下では、それぞれ「クローズドリサイクル」「オープンリサイクル」と記す）。それらの環境負荷排出や資源消費の削減効果を測る役割が、ライフサイクル評価（LCA）に期待されている。（森口2005, 藤井他2008）

藤井他（2007, 2008）は、マテリアルリサイクルのLCAによる評価方法について、特に機能単位の一致に重点を置いて整理しており、同じ製品のクローズドリサイクルとオープンリサイクルの比較においては、クローズドリサイクルにおける繰り返しリサイクル回数によらず、それぞれリサイクル1回当たりの効果を比較すればよいことが示されている。オープンリサイクルの場合は、評価対象である製品のライフサイクルに加えて、そのリサイクルによって影響を受ける他の製品のライフサイクルを含むようにシステムを拡張する必要がある（Ekvall and Weidema 2004）[脚注2)]。これまでのシステム拡張による評価事例の多くでは、暗黙的に新規原料生産がリサイクルによって代替されるものと設定されてきたが、図1に示したように、マテリアルリサイクルによって代替されるのは、①新規原料の生産とは限らず、②他の製品からリサイクルされた再生原料を代替する場合もあり、オープンリサイクルについては、③そもそも需要が存在しなかった新たな機能が産出される可能性もある（Fletcher and Mackay 1996, Ekvall and Finnveden 2001, 藤井他2008）。実際にはマテリアルリサイクルによる影響は①～③の混合であり、その構成比は再生原料の生産量の増加に対する市場の反応に依存している（Ekvall and Finnveden 2001）。

マテリアルリサイクルをLCAによって評価する際には、それによって何が代替されるかが評価結果を決定付ける重要な要因であることは、これまでにも指摘されてきた（Ekvall and Finnveden 2001, Bjorklund and Finnveden 2005）。Ekvall（2000）は、再生原料の需要と供給の価格弾力性を用いて、市場ベースでリサイクルによって影響を受けるプロセス（代替される原料）を特定するconsequential LCAのモデルを提案しており、それを単純化した方法がEkvall and Weidema（2004）によって示されている。またFrees（2008）は、このモデルをアルミニウムリサイクルに適用し、この場合、代替されるのは新規アルミニウムであると特定している。Ekvall（2000）およびEkvall and Weidema（2004）のモデルでは、再生原料と新規原料を合わせた原料全体の需要量は一定と仮定し、再生原料は同種類の新規原料または再生原料のみを代替すると単純化しているため、上記の①～③のうち③の場合は考慮されていないが、このモデルを発展させることで、①～③の全ての場合を考慮したリサイクルの評価の枠組みとすることが可能である。

使用済ペットボトルのリサイクルには、フレーク化やペレット化[脚注3)]によって再生ポリエチレンテレフタレート（PET）樹脂を繊維製品やシート製品の原料として用いるオープンリサイクルに加えて、ポリエステル原料化[***]によって再生PET樹脂を食品用ペットボトルの原料とする「ボトルtoボトル」のクローズドリサイクルがある。ポストコンシューマ品のプラスチックでクローズドリサイクルが実用化されている数少ない事例であるものの、処理コストの高さから、近年は原料となる使用済ペットボトルの調達が困難となっており、クローズドリサイクルの先行きは不透明である（中谷2010）。また、クローズドリサイクルの方が「循環型社会」の理念に沿っているという主張がなされる一方で、LCAの評価事例（中谷他2008, Nakatani *et al.* 2010）は、プロセスへ投入されるエネルギーが少ないオープンリサイクルの方が、二酸化炭素（CO_2）排出や化石資源消費の観点でも有利であることを示している。ただし、この評価事例では、クローズドリサイクルおよびオープンリサイクルにおいて再生樹脂は同じ種類かつ同量の新規樹脂を代替するものと仮定しており、上記の②③の場合は検討されておらず、クローズドリサイクルとオープンリサイクルの再評価が求められている。他にも国内における使用済ペットボトルのマテリアルリサイクルをLCAによって評価した事例は多く（福島・平尾1998, Tokai and

---

脚注1）　本稿では、使用済ペットボトルの「ボトルtoボトル」のように「ケミカルリサイクル」と呼ばれるリサイクル手法を含め、プラスチックの原料として再生利用されるリサイクル手法を、広義の「マテリアルリサイクル」と定義し（森口2005）、検討の対象としている。

脚注2）　こうした、システムから出力される機能が及ぼす環境負荷や資源消費への影響（帰結）を評価する方法は、環境負荷や資源消費への寄与分を機能に帰属させる“attributional LCA”と区別して、“consequential LCA”と呼ばれており、システム拡張によってアロケーション（配分）が回避される（Ekvall and Weidema 2004, Thomassen *et al.* 2008）。

脚注3）　ペットボトルリサイクルに関しては、フレーク化やペレット化のみを指して「マテリアルリサイクル」と呼び、ポリエステル原料化を「ケミカルリサイクル」と呼ぶことが一般的であるが、前述したように、本稿では両者を含めて広義の「マテリアルリサイクル」としている。

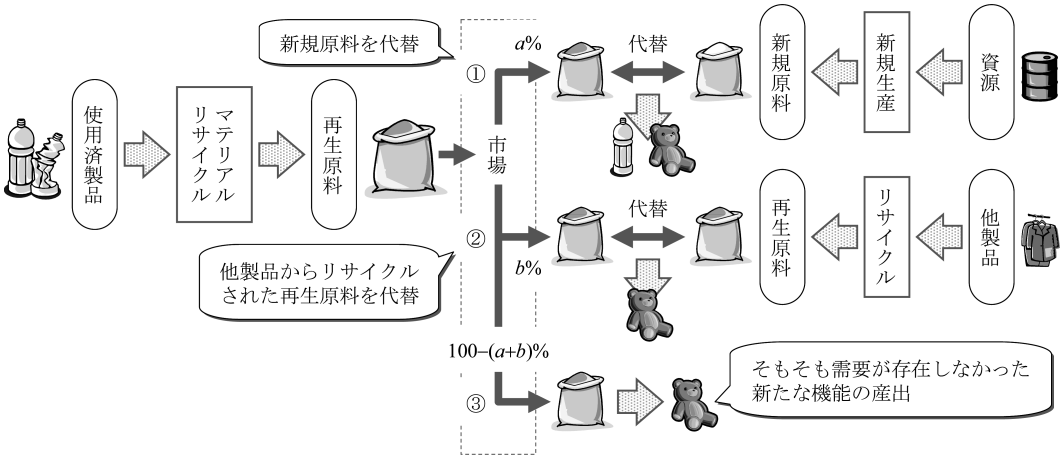


図1　マテリアルリサイクルによって代替される原料と新たに産出される機能

Furuichi 2000, 安田2001, 和田他2004, 平尾2005, 松田・久保田2008)、国外におけるペットボトルリサイクルの評価事例や（Arena *et al.* 2003, Perugini *et al.* 2005, Romero-Hernandez *et al.* 2009)、その他の廃プラスチックのマテリアルリサイクルの評価事例も存在するが（Molgaard 1995, Craighill and Powell 1996, Eriksson *et al.* 2005, Finnveden *et al.* 2005)、再生樹脂が木材を代替する場合を評価した事例（Molgaard 1995）を除き、いずれも再生樹脂が同じ種類の新規樹脂を代替する場合以外は検討されていない。

本稿では、まず廃プラスチックのクローズドリサイクルおよびオープンリサイクルのLCAによる評価方法を、簡潔なシステム境界の設定という観点から、リサイクルと新規生産の代替関係別に整理した。その上で、Ekvall(2000)によって提案されている市場ベースのconsequential LCAの概念モデルを基礎として、再生原料や新規原料の需要と供給の価格弾力性に基づいて、マテリアルリサイクルによる影響を上記の①～③の構成比として定式化し、リサイクルと新規生産の代替関係別のシステム境界と組み合わせて、マテリアルリサイクルの市場代替性に基づくLCAの枠組みを示した。さらに、この枠組みを使用済ペットボトルのリサイクルに関する評価事例（中谷他2008）に適用して、クローズドリサイクルおよびオープンリサイクルによるCO_2排出量および化石資源消費量を市場代替性に基づいて評価した。

2. マテリアルリサイクルの代替関係別のシステム境界

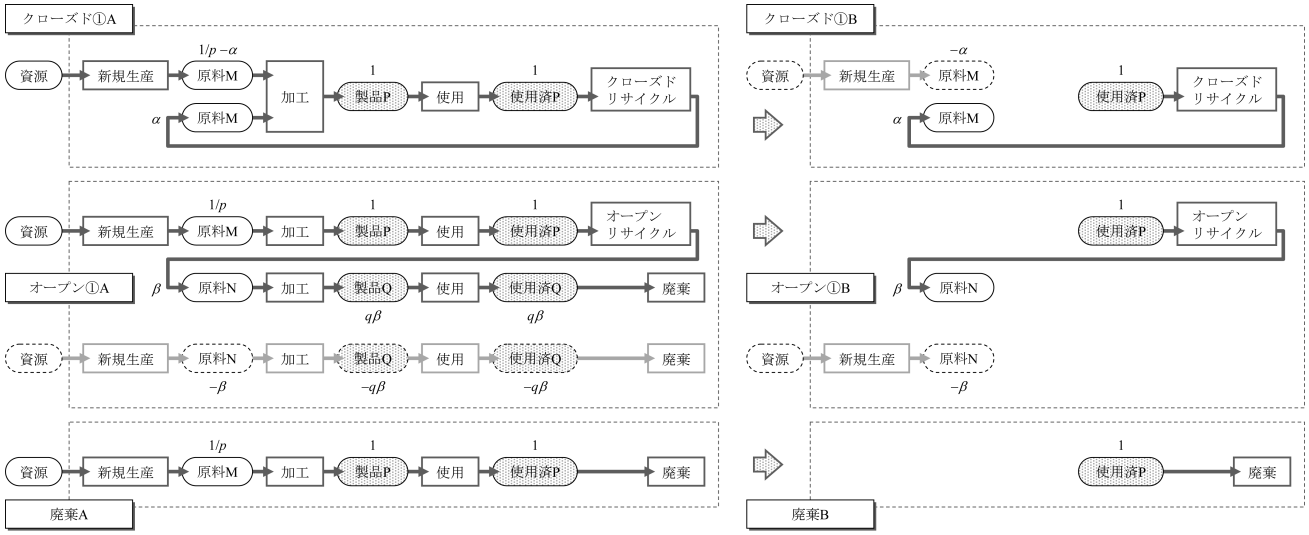
プラスチックのクローズドリサイクルでは、再生原料は元の製品と同じ用途の原料として利用されるのに対して、オープンリサイクルでは、再生原料は他の用途の原料として利用される。ここでは、評価対象である製品（以下では、「製品P」とする）と、そのリサイクルによって影響を受ける他の製品（同様に、「製品Q」とする）のライフサイクル全てを含んだシステム境界と、クローズドリサイクルおよびオープンリサイクルと廃棄の比較という観点から必要十分なプロセスのみを含んだシステム境界を示すことで、リサイクルの効果に焦点を当てた簡潔なシステム境界の設定という観点から、クローズドリサイクルとオープンリサイクルのLCAによる評価方法を、リサイクルと新規生産の代替関係別に整理する。

(1) マテリアルリサイクルが新規原料生産を代替する場合

まず、クローズドリサイクルおよびオープンリサイクルによる再生原料が、新規原料を代替する場合について述べる。それぞれの具体例としては、使用済ペットボトルのポリエステル原料化による再生PET樹脂がボトル用の新規PET樹脂を代替する場合、フレーク化による再生PET樹脂が繊維用の新規PET樹脂を代替する場合などが考えられる。

比較の対象として、図2の左側に示す、製品のライフサイクル全てを含んだ3つのシステムを設定した。それぞれは、クローズド①A：製品Pのクローズドリサイクルによって製品Pが生産されるシステム、オープン①A：製品Pのオープンリサイクルによって製品Qが生産され、製品Qの新規生産が代替されるシステム、廃棄A：製品Pの新規生産の後、リサイクルせずに廃棄されるシステムである。オープン①Aのシステムにおいて新規生産される製品Qのライフサイクルを控除することによって、製品Pの使用量が1、製品Qの使用量が差し引き0となるようにして機能を一致させている。図中の記号の意味は、それぞれ以下のとおりである。

α：使用済製品Pから再生原料Mへのクローズドリサイクルの歩留（使用済製品の投入量に対する再生原料の産出量の比）



注）濃い灰色の線は，評価対象とする製品Pのライフサイクルを表し，薄い灰色の線は，評価対象とする製品のリサイクルによって影響を受ける他製品のライフサイクルを表す．破線で囲われた原料や製品は，その量が負の値であることを示す．

図2　クローズドリサイクルとオープンリサイクルのシステム境界（マテリアルリサイクルが新規原料生産を代替する場合）

β：使用済製品Pから再生原料Nへのオープンリサイクルの歩留

p：原料Mから製品Pへの加工の歩留（原料の投入量に対する製品の産出量の比）

q：原料Nから製品Qへの加工の歩留

次に、3つのシステムの比較のために必要十分なプロセスという観点から、システム境界の中で相殺し合うプロセスを削除するとともに、3つのシステムに共通する製品Pの単位量の新規生産・加工・使用のプロセスを各システムから控除すると、各システムはそれぞれクローズド①B、オープン①B、廃棄B（図2の右側）に書き換えられる。クローズド①Aのシステムにおいては、原料Mの新規生産量が$1/p-\alpha$であったところから、製品Pの単位量に相当する原料Mの$1/p$の新規生産を控除したため、クローズド①Bのシステムでは原料Mの新規生産量は$-\alpha$となっている。

クローズド①B、オープン①B、廃棄Bのシステムから分かるとおり、クローズドリサイクルについては使用済製品Pから再生原料Mの生産までのプロセスと原料Mの新規生産、オープンリサイクルについては使用済製品Pから再生原料Nの生産までのプロセスと、原料Nの新規生産を評価すれば、クローズドリサイクルおよびオープンリサイクルと廃棄の比較という観点からは必要十分であることが分かる。

ここで、オープンリサイクルによる再生原料が、他種類の原料を代替する場合（例えば、プラスチック製容器包装のリサイクルによる再生樹脂がパレットの原料として利用され、パレットの原料に用いられていた木材を代替する場合など）が考えられる。この場合は、原料の量的・質的な差異が製品の加工・使用・廃棄プロセスに影響を与える可能性があるため、これらのプロセスを控除せずに、使用済製品Pから再生原料Nを用いた製品Qの加工・使用・廃棄までのプロセスと、他種原料の新規生産から製品Qと同量の機能を持つ製品Q’の加工・使用・廃棄までのプロセスを評価する必要がある。

(2) マテリアルリサイクルが他製品のリサイクルを代替する場合

次に、クローズドリサイクルおよびオープンリサイクルによる再生原料が、他の製品からリサイクルされた同じ種類の再生原料を代替する場合について述べる。後者の具体例としては、使用済ペットボトルのフレーク化による再生PET樹脂が、ポリエステル繊維のリサイクルによる再生PET樹脂を代替する場合などが考えられる。前者の具体例としては、実用化はされていないものの、技術的には繊維のポリエステル原料化によるボトル用PET樹脂へのリサイクルも可能であり（平尾2005）、こうしたリサイクルが使用済ペットボトルのポリエステル原料化によるボトル用PET樹脂によって代替される場合などが考えられる。

比較の対象として、図3の左側に示す3つのシステムを設定した。それぞれは、クローズド②A：評価対象である製品Pのクローズドリサイクルによって製品Pが生産され、製品Rのリサイクルによる製品Pの生産が代替されるシステム、オープン②A：製品Pのオープンリサイクルによって製品Qが生産され、製品Rのリサイクルによる製品Qの生産が代替されるシステム、廃棄A：製品Pの新規生産の後、リサイクルせずに廃棄するシステム（図2と共通）である。図2と同様に、製品Pの使用量が1、製品Qおよび製品Rの使用量が差し引き0となるようにして機能を一致させている。ただし、製品Pのリサイクルによる影響で製品Rが製

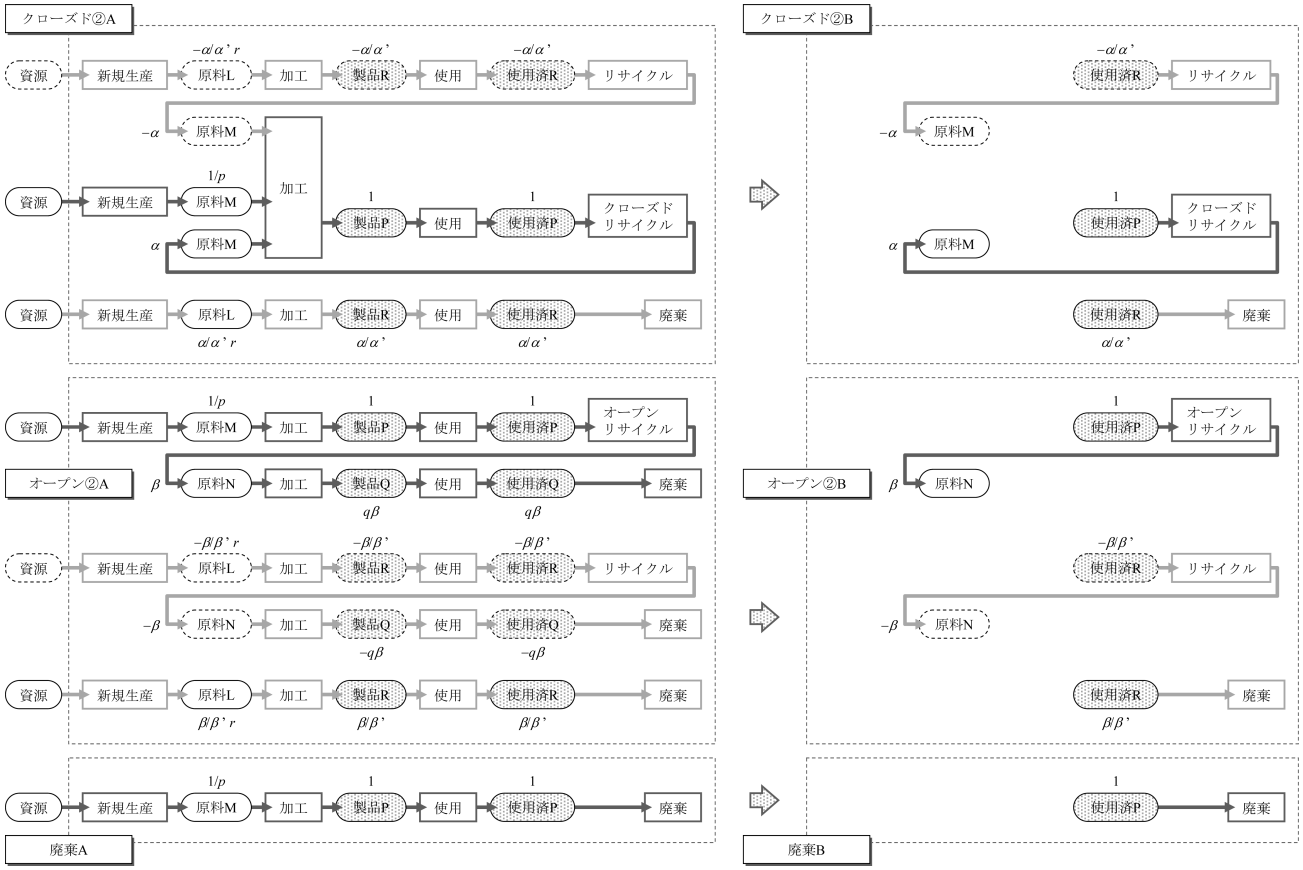


図3　クローズドリサイクルとオープンリサイクルのシステム境界（マテリアルリサイクルが他製品のリサイクルを代替する場合）

品Qにリサイクルされなくなったとき、その製品Rは廃棄されるものとした。図中の記号の意味は、それぞれ以下のとおりである。

α'：使用済製品Rから再生原料Mへのリサイクルの歩留

β'：使用済製品Rから再生原料Nへのリサイクルの歩留

r ：新規原料Lから製品Rへの加工の歩留

図2と同様に、相殺し合うプロセスを削除し、共通する製品Pの新規生産・加工・使用のプロセスを控除することで、各システムはそれぞれクローズド②B、オープン②B、廃棄B（図3の右側）に書き換えられる。クローズド②Bのシステムから分かるとおり、クローズドリサイクルの場合、使用済製品Pから再生原料Mの生産までのプロセスと、使用済製品Rから再生原料Mの生産までのプロセスに加え、使用済製品Rの廃棄プロセスを評価する必要がある。同様に、オープン②Bのシステムから分かるとおり、オープンリサイクルの場合、使用済製品Pから再生原料Nの生産までのプロセスと、使用済製品Rから再生原料Nの生産までのプロセスに加え、使用済製品Rの廃棄プロセスを評価する必要がある。

(3) オープンリサイクルが新たな機能を産出する場合

最後に、そもそも需要が存在しなかった新たな機能がオープンリサイクルによって産出された結果、原料の需要量が増加する場合について述べる。このとき、オープンリサイクルは何も代替していないと見なされる。具体例として、使用済ペットボトルのフレーク化による再生PET樹脂を原料としたポリエステル短繊維が生産・使用されたものの、元から存在していた短繊維の需要量には変化がなく、結果として再生樹脂を含む繊維用PET樹脂全体の需要量が増加する場合などが考えられる。

比較の対象として、図4の左側に示す3つのシステムを設定した。クローズド①Aおよび廃棄Aは図2と共通であり、オープン③Aのシステムでは、製品Pのオープンリサイクルによって製品Qが生産されているが、それによって影響を受けるプロセスはない。製品Pの使用量は1で一致しているが、オープン③Aのシステムでは製品Qも生産・使用されているため、他のシステムよりも機能が増加していることに注意が必要である。

図2と同様に、共通する製品Pの新規生産・加工・使用のプロセスを控除することで、各システムはそれぞれクローズド①B、オープン③B、廃棄B（図4の右側）に書き換えられる。新たな機能が産出される場合、オープン③Bのシステムから分かるとおり、使用済製品Pから再生原料Nを用いた製品Qの加工・使用・廃棄までのプロセスを控除せずに、これらのプロセスも評価する必要がある。

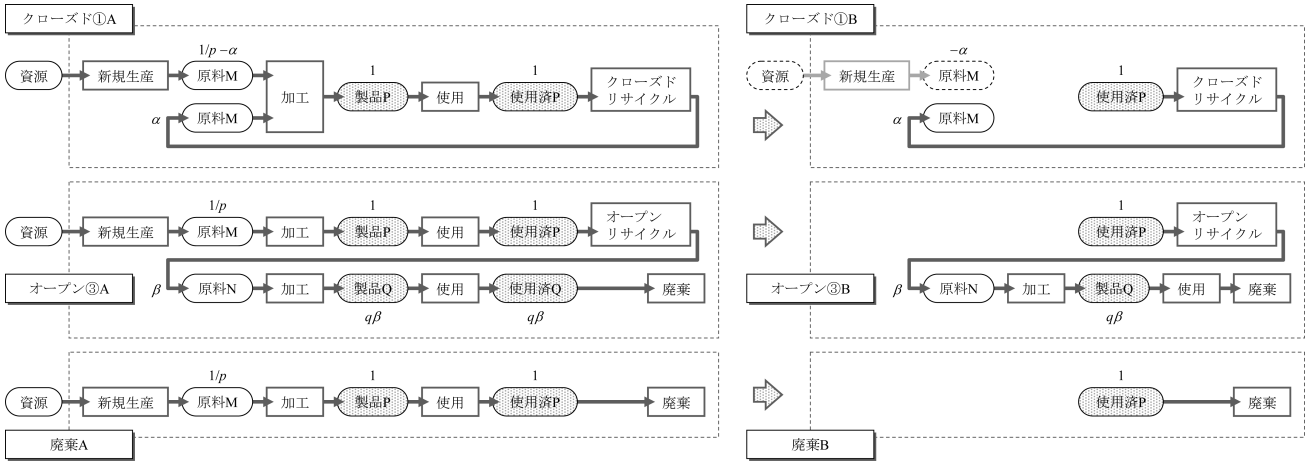


図4　クローズドリサイクルとオープンリサイクルのシステム境界（オープンリサイクルが新たな機能を産出する場合）

3. マテリアルリサイクルの市場代替性に基づく評価の枠組み

3.1 マテリアルリサイクルによる影響の構成比の定式化

ここでは、廃プラスチックのマテリアルリサイクルによる影響を、1. で述べた①～③の構成比として定式化する。すなわち、1 kgの廃プラスチックをマテリアルリサイクルしたときに、①新規原料の生産量が何kg減少して、②他製品のリサイクル目的の回収量が何kg減少して、③原料の需要量が何kg増加するか、再生原料や新規原料の需要と供給の価格弾力性に基づいて推定する。

評価対象である製品Pのクローズドリサイクルおよびオープンリサイクルについて、Ekvall（2000）によって提案された市場ベースのconsequential LCAの概念モデルを基礎として、図5に示したモデルを考える。図中の記号の意味は、以下のとおりである。

X：使用済製品Pのリサイクル目的の回収量

W：使用済製品Rのリサイクル目的の回収量

Y：原料Mにリサイクルされる使用済製品の量

Z：原料Nにリサイクルされる使用済製品の量

Y'：再生原料Mの供給量（$=\alpha Y$）

Z'：再生原料Nの供給量（$=\beta Z$）

α：使用済製品Pから再生原料Mへのクローズドリサイクルの歩留

β：使用済製品Pから再生原料Nへのオープンリサイクルの歩留

S, T：新規原料MおよびNの供給量

D, E：原料MおよびNの需要量

V：使用済製品の価格

V_M, V_N：原料MおよびNの価格

再生原料MまたはNへのリサイクル目的で回収された使用済製品Pは、同じくリサイクル目的で回収された他の使用済製品Rと競合しており、使用済製品のリサイクルに

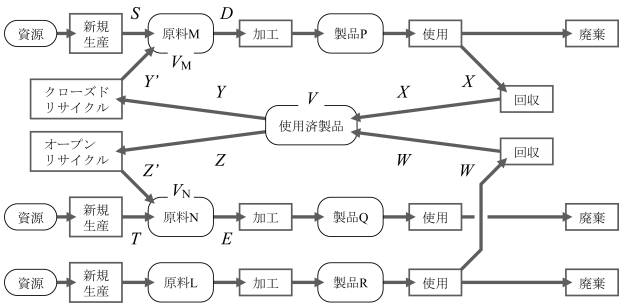


図5　クローズドリサイクルとオープンリサイクルのモデル

よる再生原料MおよびNは、それぞれ新規原料MおよびNと競合している。再生原料Nの供給量Z’が増加すると（$\Delta Z' > 0$）、原料Nの市場が十分に自由である場合、その価格が低下し（$\Delta Q < 0$）、それに刺激されて原料Nの需要量が増加するか（$\Delta E > 0$）、原料Nの生産の利益が下がって、新規原料Nの生産量が減少する（$\Delta T < 0$）。どのくらい需要量が増加して、どのくらい新規原料の生産量が減少するかは、原料の利用者や生産者の価格変化への反応に依存する。原料Mについても同様であるが、本稿においては、評価対象である製品Pの需要量は一定と考え、その原料Mの需要量Dも一定とする（$\Delta D = 0$）。

まず、原料Mの供給量の変化と需要量の変化の関係は（1）式、原料Nの供給量の変化と需要量の変化の関係は（2）式のように定式化される。Yの変化に対するSの変化量、Zの変化に対するT、Eの変化量は、新規原料Nの供給の価格弾力性 η_T（価格の変化割合に対する供給量の変化割合の比）、原料Nの需要の価格弾力性 η_E（価格の変化割合に対する需要量の変化割合の比）を用いて、付録に示した（12）～（16）式のように定式化される。

$$\Delta Y' + \Delta S = \alpha \Delta Y + \Delta S = \Delta D \quad (1)$$

$$\Delta Z' + \Delta T = \beta \Delta Z + \Delta T = \Delta E \quad (2)$$

以下では、使用済製品Pの回収量の変化分ΔXを、（1）

クローズドリサイクルした場合、(2) オープンリサイクルした場合について、新規原料MおよびNの供給量、原料Nの需要量、他の使用済製品Rの回収量、それぞれの変化をΔXによって定式化する。

(1) クローズドリサイクルした場合

使用済製品PをΔXだけ再生原料Mへクローズドリサイクルした場合、使用済製品のリサイクル目的の回収量とリサイクルされる量の関係は、再生原料Nへのリサイクルへの影響が無視できる（$\Delta Z \approx 0$）と仮定すると、次式のように定式化される。ここで、使用済製品Pおよび使用済製品Rから再生原料Mへのリサイクルの歩留α, α'（図3参照）の比として、補正係数$e(=\alpha'/\alpha)$を置いた。

$$\Delta X + e\Delta W = \Delta Y \tag{3}$$

このとき、W、Yの変化量、新規原料Mの供給量の変化ΔSは、それぞれ付録に示した（19）～（21）式のように定式化される。以上より、使用済製品Pの回収量の変化分ΔXのうち、クローズドリサイクルの①と②の構成比は、リサイクルの歩留a や補正係数eによって新規原料や他製品の量を使用済製品Pの量に換算することで、以下のように定式化される（これらを加えるとΔXになる）。

① 新規原料生産を代替するクローズドリサイクル：

$$-\frac{\Delta S}{\alpha} \approx \frac{Y\eta_Y}{Y\eta_Y - eW\eta_W} \cdot \Delta X \tag{4}$$

② 他製品のリサイクルを代替するクローズドリサイクル：

$$-e\Delta W \approx -\frac{eW\eta_W}{Y\eta_Y - eW\eta_W} \cdot \Delta X \tag{5}$$

(2) オープンリサイクルした場合

同様に、使用済製品PをΔXだけ再生原料Nへオープンリサイクルした場合、使用済製品のリサイクル目的の回収量とリサイクルされる量の関係は、再生原料Mへのリサイクルへの影響が無視できる（$\Delta Y \approx 0$）と仮定すると、次式のように定式化される。ここで、使用済製品Pおよび使用済製品Rから再生原料Nへのリサイクルの歩留β, β'（図3参照）の比として、補正係数$e(=\beta'/\beta)$を置いた。

$$\Delta X + e\Delta W = \Delta Z \tag{6}$$

このとき、W、Zの変化量、新規原料Nの供給量の変化ΔTおよび原料Nの需要量の変化ΔEは、それぞれ付録に示した（24）～（26）式のように定式化される。以上より、使用済製品Pの回収量の変化分ΔXのうち、オープンリサイクルの①～③の構成比は、リサイクルの歩留βや補正係数eによって新規原料や他製品の量を使用済製品Pの量に換算することで、以下のように定式化される（これらを全て加えるとΔXになる）。

① 新規原料生産を代替するオープンリサイクル：

$$-\frac{\Delta T}{\beta} \approx -\frac{T\eta_T \cdot Z\eta_Z}{(E\eta_E - T\eta_T)(Z\eta_Z - eW\eta_W)} \cdot \Delta X \tag{7}$$

② 他製品のリサイクルを代替するオープンリサイクル：

$$-e\Delta W \approx -\frac{eW\eta_W}{Z\eta_Z - eW\eta_W} \cdot \Delta X \tag{8}$$

③ 新たな機能を産出するオープンリサイクル：

$$\frac{\Delta E}{\beta} \approx \frac{E\eta_E \cdot Z\eta_Z}{(E\eta_E - T\eta_T)(Z\eta_Z - eW\eta_W)} \cdot \Delta X \tag{9}$$

3.2 代替関係別のシステム境界と影響の構成比を用いた評価方法

ここでは、2. で設定したリサイクルと新規生産の代替関係別のシステム境界と、3.1. で定式化したマテリアルリサイクルによる影響の構成比を用いたLCAの方法を提示する。

前述したように、クローズド①B、②B、オープン①B、②B、③B、廃棄Bの各システム（図2～図4の右側）は、いずれも機能単位は使用済製品Pの単位量のリサイクルまたは廃棄となっている。ただし、オープン③Bでは製品Qが生産・使用されていることから、他のシステムよりも機能が増加していることに注意が必要である。

クローズド①B、②Bとオープン①B、②B、③Bの各システムは、それぞれクローズドリサイクルの①②とオープンリサイクルの①～③に対応している。それぞれの構成比を用いて各システムのLCAの評価結果の加重平均をとることで、使用済製品PをΔXだけ（1）クローズドリサイクルした場合、(2) オープンリサイクルした場合の環境負荷排出や資源消費が、それぞれ以下のように計算される。

(1) クローズドリサイクルした場合：

[クローズド①B]×(4)式＋[クローズド②B]×(5)式 (10)

(2) オープンリサイクルした場合：

[オープン①B]×(7)式＋[オープン②B]×(8)式＋[オープン③B]×(9)式 (11)

これらを、廃棄Bのシステムの評価結果（使用済製品PのΔXの廃棄による環境負荷排出や資源消費）と比較することで、マテリアルリサイクルによる環境負荷排出や資源消費の削減効果を、市場代替性に基づいて測ることができる。

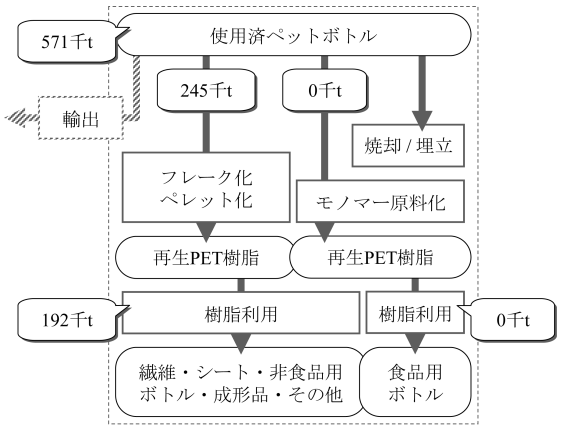
4. ペットボトルリサイクルのケーススタディ

以上で示した、マテリアルリサイクルの市場代替性に基づくLCAの枠組みを、使用済ペットボトルのリサイクルに関する評価事例（中谷他2008）に適用して、クローズドリサイクルおよびオープンリサイクルによるCO_2排出量および化石資源消費量を評価する。

使用済ペットボトルのリサイクルは、フレーク化やペレット化による再生PET樹脂を繊維製品やシート製品の

原料として用いるオープンリサイクルに加えて、ポリエステル原料化による再生PET樹脂を食品用ペットボトルの原料とする「ボトルtoボトル」のクローズドリサイクルが実用化されている（PETボトルリサイクル推進協議会2009）。2008年度において、容器包装リサイクル法の指定ペットボトル（清涼飲料、酒類、醤油、乳飲料等）の販売量571千tのうち、国内でリサイクルされる使用済ペットボトルの回収量は245千tであり、2008年度はクローズドリサイクルによる再生樹脂の利用はなく、オープンリサイクルについては192千tと推計されている（図6）。

中谷他（2008）は、使用済ペットボトルの国内および日中間リサイクルと廃棄について10シナリオを設定し、CO_2排出量および化石資源消費量をLCAによって評価している。これらの評価シナリオの中には、ポリエステル原料化によるボトル用PET樹脂へのクローズドリサイクルと、フレーク化によるポリエステル短繊維または衣料へのオープンリサイクルが含まれている。機能単位は使用済ペットボトル1kgのリサイクルまたは廃棄であり、リサイクルによって得られた再生原料または再生製品が新規原料または新規製品を代替したと見なせるまでを評価範囲としている。ただし、クローズドリサイクルおよびオープンリサイクルにおいて再生樹脂は、①新規樹脂を代替するものと仮定されており、②他製品からリサイクルされた再生原料を代替する場合、③新たな機能を産出する場合については検討されていない。



注）数値は，PETボトルリサイクル推進協議会（2009）に基づいて推定した.

図6　使用済ペットボトルのリサイクルフロー（2008年度）

中谷他（2008）の10シナリオの中から、クローズドリサイクルについて1シナリオ（国内CRシナリオA）、オープンリサイクルについて2シナリオ（国内MRシナリオA・C）、廃棄について1シナリオ（焼却発電シナリオ）を抽出した。

- 国内CRシナリオA：ポリエステル原料化によってPTAからボトル用PET樹脂にリサイクル
- 国内MRシナリオA：フレーク化を経てポリエステル短繊維にリサイクル
- 国内MRシナリオC：フレーク化を経てリサイクルされた短繊維からポリエステル製の衣料を製造
- 焼却発電シナリオ：可燃ごみとして混合収集して発電効率10%の条件下で焼却処理

各シナリオにおける使用済ペットボトル1kg当たりのCO_2排出量および化石資源消費量の評価結果は、表1に示したとおりである。国内CRシナリオAの「再生樹脂・製品製造＋新規樹脂・製品製造」の評価範囲は、図2のクローズド①Bのシステムと一致している。同様に、国内MRシナリオA・Cの「再生樹脂・製品製造＋新規樹脂・製品製造」はオープン①Bのシステム、焼却発電シナリオの「廃棄」は廃棄Bのシステムに一致している。また、製品の使用によるCO_2排出量や化石資源消費量はないものとして、製品の廃棄によるCO_2排出量を製品の燃焼によるCO_2排出量で代用すると、国内MRシナリオA・Cの「再生樹脂・製品製造＋再生製品燃焼」の評価範囲は、図4のオープン③Bのシステムに一致する。国内MRシナリオAと国内MRシナリオCの差異は、再生PET樹脂の最終用途が、短繊維を紡績せずに利用する中綿のような用途か、短繊維を衣料まで加工するかの違いである。

表1　使用済ペットボトルのリサイクルと廃棄によるCO_2排出量および化石資源消費量

	CO_2排出量［kg/kg-使用済ボトル］				化石資源消費量［MJ/kg-使用済ボトル］			
	国内MR A	国内MR C	国内CR A	焼却発電	国内MR A	国内MR C	国内CR A	焼却発電
再生樹脂・製品製造	0.81	9.65	2.35	-	10.5	129.3	26.3	-
再生製品燃焼	1.61	1.1	1.77	-	-	-	-	-
廃棄	-	-	-	1.96	-	-	-	-3.1
新規樹脂・製品製造	-1.75	-10.58	-1.56	-	-45.9	-164.7	-52.3	-
新規製品燃焼	-1.61	-1.1	-1.77	-	-	-	-	-
計	-0.94	-0.94	0.79	1.96	-35.4	-35.4	-26	-3.1

出典）中谷他（2008）.

ここで、国内におけるオープンリサイクルによる再生PET樹脂の用途は、2008年度において繊維製品が約46%、シート製品が約50%、成形品などが約4%とされているが（PETボトルリサイクル推進協議会2009）、あらゆる最終用途について評価するためのデータが現時点では十分でない。そこで、最終用途が短繊維（国内MRシナリオA）のときを、加工の程度が最も低く「再生樹脂・製品製造＋再生製品燃焼」のCO_2排出量および化石資源消費量が最も小さいオープンリサイクルの下限、最終用途が衣料（国内MRシナリオC）のときを、加工の程度が最も高く「再生樹脂・製品製造＋再生製品燃焼」のCO_2排出量および化石資源消費量が最も大きいオープンリサイクルの上限と仮定して、オープンリサイクルした場合のCO_2排出量および化石資源消費量は、これらの間の範囲に存在するものと考えた。

次に、図5のモデル中に示された物量を、図6およびPETボトルリサイクル推進協議会（2009）をもとに、2008年度の値として表2のように設定した。ただし、国外へ輸出されている使用済ペットボトルについては、評価が煩雑になることを避けるため、国内リサイクルの市場への影響は及ぼさないものと仮定して、本稿では検討の対象外とした。また、リサイクル目的で回収された使用済ペットボトルと競合する使用済製品はないものとして（$W=0$）、②の場合は考慮しないこととした。

以上の前提条件のもとで、マテリアルリサイクルによる影響①と③の構成比の推定に必要となる価格弾力性の値を仮定して、使用済ペットボトル1 kgをクローズドリサイクルした場合と、オープンリサイクルした場合のCO_2排出量および化石資源消費量を、それぞれ（10）（11）式によって評価する。オープンリサイクルの①と③の構成比を推定するために必要となる値は、$W=0$と仮定していることを考慮すれば、その他（ボトル用以外）のPET樹脂の供給および需要の価格弾力性η_T、η_Eのみであり、両者の比によって①と③の構成比は決定される。一般に、需要の価格弾力性は負の値、供給の価格弾力性は正の値となるが、個々のケースごとに価格弾力性を推定することは困難であり、Ekvall and Weidema（2004）は以下のような単純化したアプローチを提示している。

a）価格弾力性のデフォルト値を文献から引用する。
b）需要と供給の価格弾力性の絶対値が等しい（$-\eta_E=\eta_T$）と仮定する。
c）需要が完全に非弾力的（$\eta_E=0$）と仮定する。
d）供給が完全に非弾力的（$\eta_T=0$）と仮定する。
e）上記の仮定をもとに複数のシナリオを設定する。

本稿では、日本におけるPET樹脂の価格弾力性についての推計値を得られなかったことから、e）のアプローチを採用することとし、$-\eta_E$とη_Tの比に対するCO_2排出量および化石資源消費量の変動性を評価した（図7）[脚注4)]。図中の横軸の値が0.0の場合がc）、横軸の値が1.0の場合がb）に対応する。

クローズドリサイクルおよび廃棄（焼却発電）については、η_Tやη_Eの値によらず、CO_2排出量および化石資源消費量は一定である。オープンリサイクルについては、PET樹脂の需要の価格弾力性がゼロ（$\eta_E=0$）の場合、（9）式から分かるように、③新たな機能を産出する（何も代替しない）オープンリサイクルの構成比はゼロであり、全て新規樹脂生産を代替することになるため、横軸の値が0.0のとき、中谷他（2008）の評価結果と一致する。横軸の値が増えるに従って、③新たな機能を産出するオープンリサイクルの構成比が上昇し（η_Tと$-\eta_E$の比が1.0のとき54.1%）、オープンリサイクルによるCO_2排出量および化石資源消費量が増加する。

オープンリサイクルの最終用途が、仮に全て短繊維であれば、η_Tと$-\eta_E$の比が1.0までの範囲ではCO_2排出量および化石資源消費量が焼却発電よりも大きくなることはないが、CO_2排出量についてはη_Tと$-\eta_E$の比が1.0程度、化石資源消費量については0.2程度を超えると、クローズドリサイクルよりも大きくなる。オープンリサイクルの最終用途が、仮に全て衣料であれば、η_Tと$-\eta_E$の比が0.2 ～ 0.3程度を超えると焼却発電よりも大きくなる。これは、短繊維から衣料への紡績・製織・染色・縫製プロセスに投入されるエネルギーが相対的に大きく、③新たな機能を産出するオープンリサイクルの構成比の上昇によるCO_2排出量および化石資源消費量の増加が著しいためである。

表2　使用済ペットボトルの回収・リサイクル量と再生PET樹脂の供給・需要量

		［千t］
X	リサイクル目的の回収量	245
Y	ボトル用PET樹脂にリサイクルされる量	0
Z	その他のPET樹脂にリサイクルされる量	245
Y'	ボトル用再生PET樹脂の供給量	0
Z'	その他の再生PET樹脂の供給量	192
S	ボトル用新規PET樹脂の供給量	557
T	その他の新規PET樹脂の供給量	1,082
D	ボトル用PET樹脂の需要量	557
E	その他のPET樹脂の需要量	1,274

脚注4）　ポリエチレン（PE）樹脂に関しては、産業連関表に基づく1985年の価格弾力性を推計した事例が存在する（佐々波他1996）。その推計結果では、国産品需要の自財価格弾力性は–0.147、国産品供給の価格弾力性は0.271であり、この場合の と の比は0.54となる。

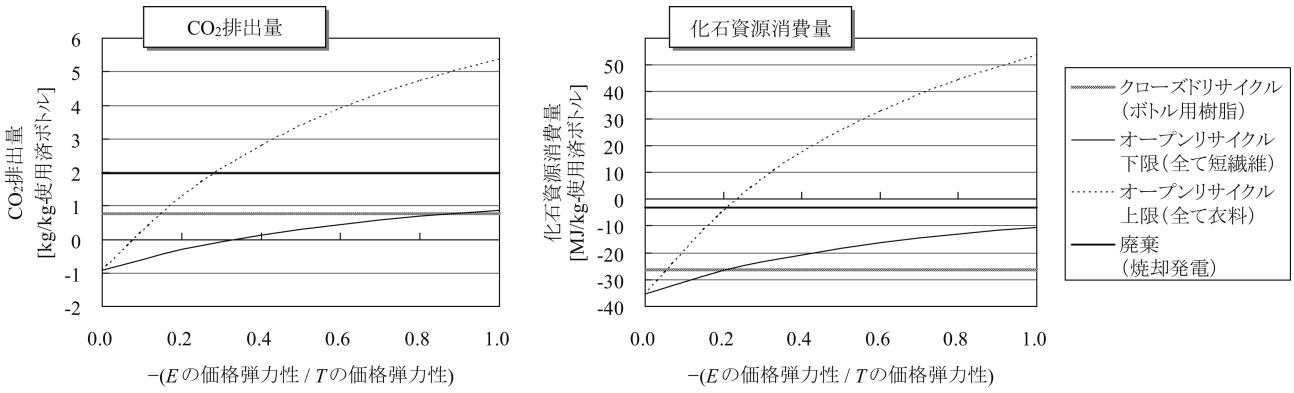


図7　使用済ペットボトルのクローズドリサイクルとオープンリサイクルによる市場代替性に基づいたCO_2排出量および化石資源消費量

前述した仮定のもとでは、オープンリサイクルした場合のCO_2排出量および化石資源消費量は、図7の「オープンリサイクル下限」と「オープンリサイクル上限」の間の範囲に存在し、その範囲の中での位置は、ボトル用以外のPET樹脂の需要と供給の価格弾力性と、再生樹脂の供給量Z’がどういった割合で最終用途に利用されたかに依存する。言い換えれば、オープンリサイクルした場合のCO_2排出量や化石資源消費量は、ボトル用以外のPET樹脂が、価格の変化に対して需要量が変化しないような用途に利用されている場合には、クローズドリサイクルや焼却発電よりも小さいと言える。一方で、価格の低下（上昇）に対して大きく需要量が増加（減少）するような用途に利用される割合が高ければ、③新たな機能を産出するオープンリサイクルの構成比が上昇して、オープンリサイクルした場合のCO_2排出量や化石資源消費量が増加するとともに、その下限と上限の差が広がるため、その最終用途の割合を特定しなければ、市場代替性に基づくLCAの評価結果は大きな不確実性を伴うものとなる。

5. まとめ

本稿では、廃プラスチックのクローズドリサイクルおよびオープンリサイクルのLCAによる評価方法を、簡潔なシステム境界の設定という観点から、リサイクルと新規生産の代替関係別に整理した上で、マテリアルリサイクルの市場代替性に基づくLCAの枠組みを示した。マテリアルリサイクルによる影響は、再生原料や新規原料の需要と供給の価格弾力性に基づいて、①新規原料生産を代替するクローズドリサイクルおよびオープンリサイクル、②他製品のリサイクルを代替するクローズドリサイクルおよびオープンリサイクル、および③新たな機能を産出する（何も代替しない）オープンリサイクルの構成比として定式化された。これまでのシステム拡張による評価事例では、暗黙的にマテリアルリサイクルは新規原料生産を代替するものとされていたが、本稿で示した枠組みによって、②③の場合も考慮した評価が可能になった。この枠組みを使用済ペットボトルのリサイクルに関する評価事例に適用して、クローズドリサイクルおよびオープンリサイクルによるCO_2排出量および化石資源消費量を評価した。その結果、ボトル用以外のPET樹脂の需要と供給の価格弾力性に依存して、③新たな機能を産出するオープンリサイクルの構成比が上昇して、オープンリサイクルがクローズドリサイクルや廃棄よりもCO_2排出量および化石資源消費量が大きくなる可能性があることが分かった。また、再生樹脂の最終用途の割合を特定しなければ、市場代替性に基づくLCAの評価結果は大きな不確実性を伴うものとなることも示された。

一般に、LCAにおける不確実性や変動性は、パラメータ、シナリオ、モデルによるものに分類される（Lloyd and Ries 2007）。これまでのシステム拡張によるマテリアルリサイクルのLCAにおいては、何が代替されるか（何も代替されないのか）の設定に伴う評価結果の不確実性は、シナリオの不確実性に含まれるものであり、その低減のための課題も明確にされていなかった。本稿における市場代替性に基づくLCAの枠組みは、それを需要と供給の価格弾力性というパラメータの不確実性に帰着させることによって、今後のマテリアルリサイクルのLCAにおける課題、すなわち個々のケースごとに価格弾力性を推定するための方法論の必要性を明確にしたものと言える。

最後に、3.1. での定式化から分かるとおり、クローズドリサイクルとオープンリサイクルの本質的な差異は、再生原料と新規原料を合わせた原料全体の需要量がリサイクルによって増加するかどうかにある。本稿において仮定したように、クローズドリサイクルの場合に原料の需要量が一定と見なすことができれば、オープンリサイクルが新たな機能を産出することで環境負荷排出や資源消費を増加させる可能性があるのに対して、クローズドリサイクルの方が環境負荷排出や資源消費を確実に削減できるという意味で利点があると言える。ただし、新たな機能の産出の肯定的な側面も考慮する必要があり、環境負荷排出や資源消費の

増加とのトレードオフの解釈については、マテリアルリサイクルの評価という枠組みを越えて、さらなる検討が必要である。

（平成22年7月22日受付、平成22年12月7日採択）

参照文献

Arena U., Mastellone M.L., Perugini, F. (2003): International Journal of LCA, 8(2), 92-98

Bjorklund A., Finnveden G. (2005): Resources, Conservation and Recycling, 44(4), 309-317

Craighill A.L., Powell J.C. (1996): Conservation and Recycling, 17(2), 75-96

Ekvall T. (2000): Resources, Conservation and Recycling, 29(1-2), 91-109

Ekvall T., Finnveden G. (2001): Journal of Cleaner Production, 9(3), 197-208

Ekvall T., Weidema B.P. (2004): International Journal of LCA, 9(3), 161-171

Erikkson O., Carlsson Reich M., Frostell B., Bjorklund A., Assefa G., Sundqvist J.O., Granath J., Baky A., Thyselius L. (2005): Journal of Cleaner Production, 13(3), 241-252

Finnveden G., Johansson J., Lind P., Moberg A. (2005): Journal of Cleaner Production, 13(3), 213-229

Fletcher B.L., Mackay M.E. (1996): Resources, Conservation and Recycling, 17(2), 141-151

Frees N. (2008): International Journal of LCA, 13 (3), 212-218

藤井実, 橋本征二, 南斉規介, 村上進亮, 稲葉陸太, 森口祐一 (2008)：日本LCA学会誌, 4(1), 78-88

藤井実, 橋本征二, 南斉規介, 村上進亮, 稲葉陸太, 森口祐一 (2007)：土木学会論文集G, 63(2), 128-137

福島康裕, 平尾雅彦 (1998)：電気学会論文誌C, 118 (9), 1250-1256

平尾雅彦 (2005)："PETリサイクルのLCI分析", LCAの実務, 産業環境管理協会, 1-14

Lloyd S.M., Ries R. (2007): Journal of Industrial Ecology, 11(1), 161-179

松田智, 久保田宏 (2008)：日本LCA学会論文誌, 4 (1), 67-77

Molgaard C. (1995): Resources, Conservation and Recycling, 15(1), 51-63

森口祐一 (2005)：廃棄物学会誌, 16(5), 243-252

中谷隼 (2010)：日本エネルギー学会誌, 89(6), 537-544

中谷隼, 藤井実, 森口祐一, 平尾雅彦 (2008)：日本LCA学会誌, 4(4), 324-333

Nakatani J., Fujii M., Moriguchi Y., Hirao M. (2010): International Journal of LCA, 15(6), 590-597

Perugini F., Mastellone M.L., Arena U. (2005): Environmental Progress, 24(2), 137-154

PETボトルリサイクル推進協議会 (2009)：PETボトルリサイクル年次報告書 (2009年度版), 21pp.

Romero-Hernandez O., Romero-Hernandez S., Munoz D., Detta-Silveira E., Palacios-Brun A., Laguna A. (2009): International Journal of LCA, 14(2), 107-113

佐々波楊子, 浦田秀次郎, 河井啓希 (1996)：内外価格差の経済学, 東洋経済新報社

Sugiyama H., Hirao M., Mendivil R., Fischer U., Hungerbuhler K. (2006): Process Safety and Environmental Protection, 84(B1), 63-74

Thomassen M.A., Dalgaard R., Heijungs R., Boer I. (2008): International Journal of LCA, 13(4), 339-349

Tokai A., Furuichi T. (2000): Journal of Material Cycles and Waste Management, 2(2), 70-79

和田安彦, 中野加都子, 尾崎平, 岩本綾乃 (2004)：土木学会論文集, 769 / VII-32, 43-54

安田八十五 (2001)：廃棄物学会論文誌, 12(5), 229-234

付録

原料Mの供給量の変化と需要量の変化に関して、Yの変化に対するSの変化量は、以下のように定式化される。

$$\Delta S = \Delta D - \alpha \Delta Y = -\alpha \Delta Y \tag{12}$$

原料Nの供給量の変化と需要量の変化に関して、Zの変化に対するT、Eの変化量は、新規原料Nの供給の価格弾力性η_T、原料Nの需要の価格弾力性η_Eを用いて、以下のように定式化される。

$$\eta_T = \frac{\Delta T/T}{\Delta V_{\mathrm{N}}/V_{\mathrm{N}}} \geq 0 \tag{13}$$

$$\eta_E = \frac{\Delta E/E}{\Delta V_{\mathrm{N}}/V_{\mathrm{N}}} \leq 0 \tag{14}$$

$$\Delta T = \frac{\beta \cdot T\eta_T}{E\eta_E - T\eta_T} \cdot \Delta Z \tag{15}$$

$$\Delta E = \frac{\beta \cdot E\eta_E}{E\eta_E - T\eta_T} \cdot \Delta Z \tag{16}$$

使用済製品Pの回収量の変化分ΔXをクローズドリサイクルした場合について、W、Yの変化量は、それぞれの価格弾力性η_W、η_Yを用いて、それぞれ（19）（20）式のように定式化される。（12）式に（20）式を代入することによって、使用済製品Pをクローズドリサイクルした場合の新規原料Mの供給量の変化ΔSが、ΔXによって（21）式のように定式化される。

$$\eta_W = \frac{\Delta W/W}{\Delta V/V} \geq 0 \tag{17}$$

$$\eta_Y = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta V/V} \leq 0 \tag{18}$$

$$\Delta W \approx \frac{W\eta_W}{Y\eta_Y - eW\eta_W} \cdot \Delta X \tag{19}$$

$$\Delta Y \approx \frac{Y\eta_Y}{Y\eta_Y - eW\eta_W} \cdot \Delta X \tag{20}$$

$$\Delta S \approx -\frac{\alpha \cdot Y\eta_Y}{Y\eta_Y - eW\eta_W} \cdot \Delta X \tag{21}$$

使用済製品Pの回収量の変化分ΔXをオープンリサイクルした場合について、W、Zの変化量は、それぞれの価格弾力性η_W、η_Zを用いて、それぞれ（23）（24）式のように定式化される。（15）（16）式に（24）式を代入することによって、使用済製品Pをオープンリサイクルした場合の新規原料Nの供給量の変化ΔTおよび原料Nの需要量の変化ΔEが、ΔXによって（25）（26）式のように定式化される。

$$\eta_Z = \frac{\Delta Z/Z}{\Delta V/V} \leq 0 \tag{22}$$

$$\Delta W \approx \frac{W\eta_W}{Z\eta_Z - eW\eta_W} \cdot \Delta X \tag{23}$$

$$\Delta Z \approx \frac{Z\eta_Z}{Z\eta_Z - eW\eta_W} \cdot \Delta X \tag{24}$$

$$\Delta T \approx \frac{\beta \cdot T\eta_T \cdot Z\eta_Z}{(E\eta_E - T\eta_T)(Z\eta_Z - eW\eta_W)} \cdot \Delta X \tag{25}$$

$$\Delta E \approx \frac{\beta \cdot E\eta_E \cdot Z\eta_Z}{(E\eta_E - T\eta_T)(Z\eta_Z - eW\eta_W)} \cdot \Delta X \tag{26}$$