

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360404

研究課題名(和文) 素材間連関を考慮した物質循環評価のためのマテリアルフローモデルの構築

研究課題名(英文) Material flow model for the evaluation of recycling considering relations between different materials

研究代表者

平尾 雅彦 (HIRAO, Masahiko)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80282573

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,700,000円、(間接経費) 1,710,000円

研究成果の概要(和文)：我が国における循環型社会の構築を支援するために、プラスチックおよび紙の「結合」、「競争」、「交差」、「共有」という関係で表される素材間連関を含む統合マテリアルフローモデルを構築し、物質循環の環境影響評価を可能にした。素材の生産、使用、処分・リサイクルについて、関与するステークホルダーによるシステムの設計、改善を支援することを目的として様々なシナリオ分析を実施した。その結果、循環型社会構築における素材間連関の重要性が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We developed integrated material flow models for establishing the recycling-based society in Japan. The models include relations between different materials such as connection, competition, crossing and sharing. Various scenario analyses about materials production, use and recycling were carried out to support systems design and improvement by stakeholders. As a result, we found that the relations between different materials are significant factors for the recycling-based society.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：マテリアルフロー LCA 物質循環 シナリオ分析 リサイクル プラスチック 容器包装 素材間連関

1. 研究開始当初の背景

- (1) プラスチックや紙、金属などの素材は様々な製品で同時に使用されているため、素材循環システムは個別の素材だけで設計することはできず、素材間連関を考慮しなければならない。
- (2) 素材間連関を考慮するためには、素材間の「結合」、「競合」、「交差」、「共有」という関係を表現できるマテリアルフローモデルの構築が必要である。
- (3) マテリアルフローモデルによって様々な素材循環システムのシナリオ分析を行い、関与するステイクホルダーの協働による循環型社会の構築が求められている。

2. 研究の目的

我が国におけるプラスチックおよび紙の統合マテリアルフローモデルを構築し、そのライフサイクルにおいて、関与するステイクホルダーによるプロセスやシステムの設計、改善を目的とした環境影響評価などのシナリオ分析を可能とする。異なる素材を統合的に評価するために素材間の連関として、異素材の「結合」、「競合」、「交差」、「共有」という類型に整理し、モデルに組み込む。マテリアルフローからライフサイクルアセスメント手法によって環境影響を評価し、これを適切にステイクホルダーに提示することを可能にする。

3. 研究の方法

本研究では、次の6項目のサブテーマに分けて研究を遂行した。

- (1) プラスチックのマテリアルフローモデルの設計と構築
- (2) 紙のマテリアルフローモデルの設計と構築
- (3) プラスチックと紙の素材間連関を含む統合モデルの構築
- (4) マテリアルフローから環境影響等を評価する評価モデルの構築
- (5) ステイクホルダー別の検討シナリオの作成
- (6) シナリオ分析の実施

素材としては、プラスチックと紙を対象とし、各素材の特徴に留意しながら、個別のマテリアルフローモデルを構築し、それらの素材間の連関を類型化し、組み込むことによって統合化されたマテリアルフローモデルを構築した。モデルの構築のために、各種統計資料や文献調査の他、現場調査を実施し、実態を反映したモデル構築を行った。構築したモデルに対して、いくつかのシナリオを適用することによって、各素材のマテリアルフローをその環境影響評価を行った。

例えば異素材を含む食品容器について、廃棄リサイクル時の分別手法やリサイクル手法についてシナリオを作成し、ライフサイクルアセスメント手法によって、全体での環境影響を評価した。

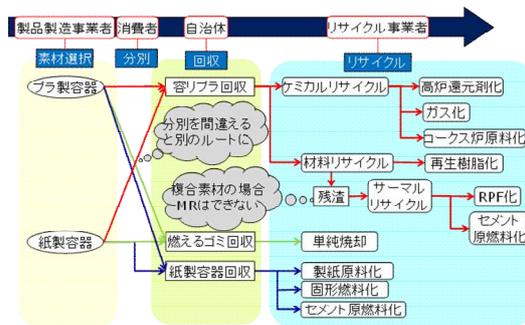


図1 容器包装のマテリアルフローモデル

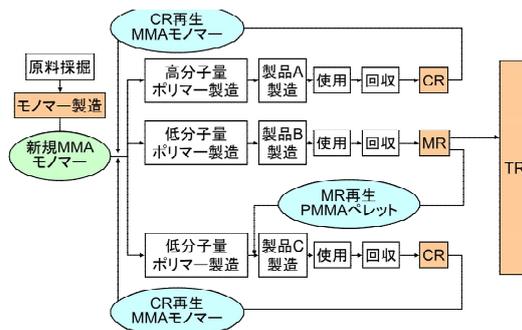


図2 PMMAのマテリアルフローモデル

4. 研究成果

(1) プラスチックのマテリアルフローモデルの設計と構築

図1のように、紙との「競合」を含むプラスチック製容器包装のマテリアルフローモデルを構築した。フローに係わるステイクホルダー別のシナリオ分析を想定したモデルとなっている。

また、透明度の高い高機能性プラスチック素材として液晶ディスプレイの導光板や水槽・看板に利用され、生産や需要が増加しているポリメタクリル酸メチル(PMMA)のマテリアルフローモデルを図2のように構築した。液晶テレビの部材として、他のプラスチックや金属と「結合」して利用されている。また、ガラスやポリカーボネートと「競合」する素材でもある。生産量、用途別使用量、特性に合わせたリサイクル手法、液晶テレビなどの利用製品別需要量、将来の需要量も推定しながら生産可能量やリサイクル可能量、要求品質などを制約として設定してフロー量を算定できるモデルとした。

(2) 紙のマテリアルフローモデルの設計と構築

図3に示すように、日本で生産・利用される紙全般の品種別生産量や使用量、リサイクル状況を調査し、マテリアルフローモデルを構築した。ここでもステイクホルダーが明示されている。

(3) プラスチックと紙の素材間連関を含む統合モデルの構築

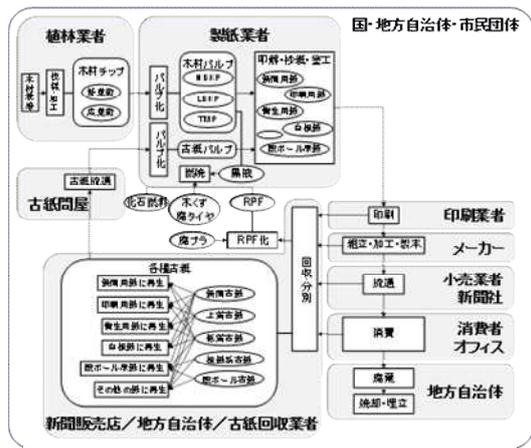


図3 紙のマテリアルフローモデル

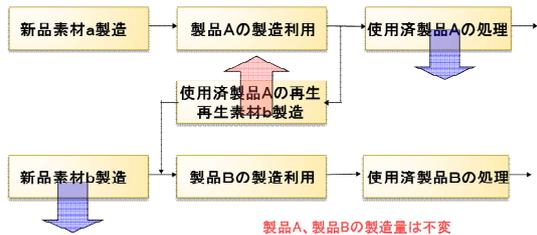


図4 リサイクルを含むフローのLCA

廃プラスチックと古紙を原料とする廃棄物固形燃料（RPF）を対象に、素材フロー間での「結合」について現場調査を行い、品質や量の要求事項を整理した。図3に、廃棄後のRPF化において、「結合」がモデル化されている。

また、プラスチックと紙、あるいは異なるプラスチックという異素材を含む食品容器について、その機能を調査した。これらが定量的に表現できるようなモデルの設計を行った。図1では、この「競合」がモデル化されている。

(4) マテリアルフローから環境影響等を評価する評価モデルの構築

リサイクルを含む素材のフローについて、その環境影響は、ライフサイクルアセスメント手法によって評価できる。ほとんどの素材は、異なる製品に再利用されるため、図4に示す考え方で評価モデルを構築した。

環境影響評価対象としては、地球温暖化を取り上げ温室効果ガスの排出量を算出した。また、対象素材やシナリオによっては、火星資源消費量や木材資源消費量も評価対象とした。

(5) ステイクホルダー別の検討シナリオの作成

プラスチック製容器包装のステイクホルダー別のシナリオ検討のために、リサイクル事業者、容器包装メーカー、小売事業者とい

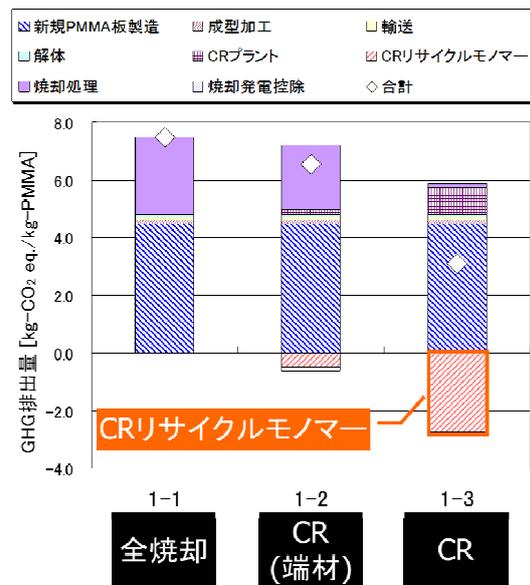


図5 PMMA リサイクルの評価

った様々な利害関係者を対象としてヒアリング調査を実施した。各ステイクホルダーの意思決定項目を整理するとともに、問題解決の方向性を示すシナリオを設定し、ライフサイクルアセスメントに基づく提言を実際にステイクホルダーにフィードバックし、実行可能性についてヒアリング調査を行った。

紙についても、理論的な解析に基づくステイクホルダー関係の整理を目指した。紙循環利用システムにおけるステイクホルダーの役割に基づき、ステイクホルダー間の情報の流れを明らかにし、システムにおいて発生している問題の因果関係を整理した情報の連関を分析するモデルを構築した。モデリングにおいては統一モデリング言語（UML）において用いられるクラス図の文法を参考とすることで、規格化された表現方法で記述することに成功した。

(6) シナリオ分析の実施

① PMMA「結合」製品のリサイクル

液晶テレビのリサイクルで、「結合」して使用されているPMMA板の処理を比較することを目的として、三菱レイヨンが開発したPMMAモノマーリサイクルプロセスと従来の焼却処理の比較シナリオを分析した。

結果を図5に示した。PMMAの熱分解によるモノマーリサイクルは石油由来の新規モノマーの製造に比べて優位であること、PMMAを含んだ製品から分離回収し、モノマーにリサイクルすることが、環境負荷の削減になることがわかった。

② RPF化によるプラスチックと紙の「結合」

表1 古紙利用のシナリオ

シナリオ	代替される紙・古紙	代替量[10 <sup>4</sup> t/y]	代替先
S0		(現状シナリオ)	
S1	紙ごみ	1,000	印刷用紙
S2	段ボール原紙用古紙	1,000	向け古紙
S3	新聞用紙用古紙	1,000	
S4	紙ごみ	92	RPF (200,000t/y)

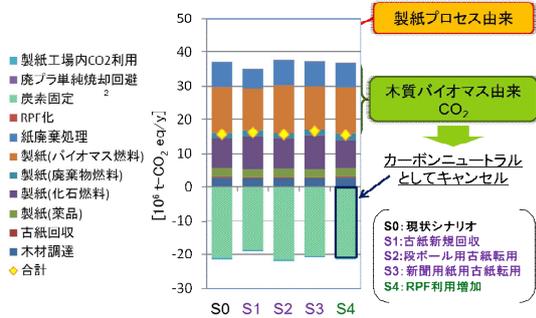


図6 古紙利用シナリオ分析結果の例

古紙の利用増加、およびPRFの利用増加を想定し、表1のようなシナリオを設定し、図3のフローモデルによって評価を行った。温室効果ガス排出量の評価結果を図6に示した。古紙を再生紙原料として使う場合と、RPFとして廃プラスチックと「結合」して燃料原料として使う場合で、結果に大きな差は無い。しかし、ここでは示していないが、化石資源消費や森林資源消費では、利用方法によってトレードオフが発生することがわかった。

③ 紙製とプラスチック製容器の「競合」

紙と発泡ポリスチレンの両方が「競合」して利用されているカップ麺容器を例として、消費者の分別とその後のリサイクル手法についてのシナリオを作成し、分析した。

結果を図7に示す。消費者の分別行動やリサイクル手法による差は大きい。しかし、紙製容器はどのようなシナリオでもリサイクルによる環境負荷削減は達成できないが、プラスチック製容器では適切な分別とリサイクル手法の選択によって環境負荷を削減できることがわかった。

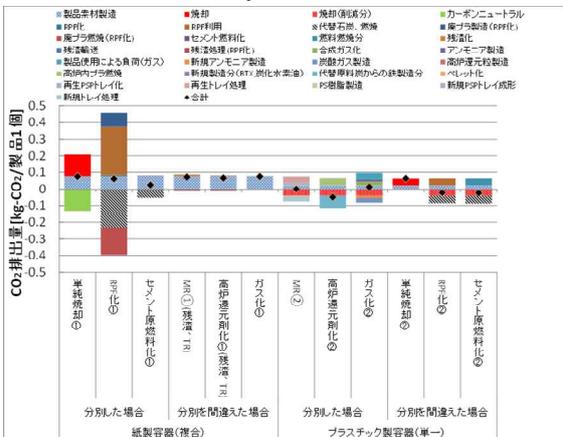


図7 紙容器とプラスチック容器のシナリオ分析結果

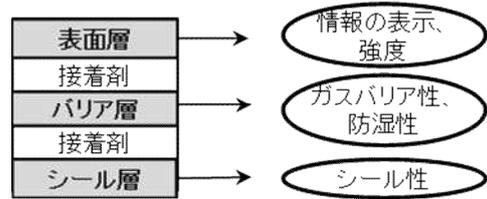


図8 包装材における機能と異種プラスチックの「結合」による多層化

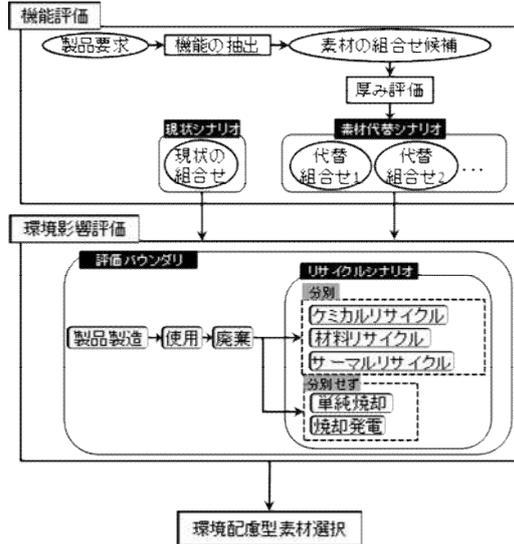


図9 多層プラスチック包装のシナリオ分析

表2 素材代替シナリオ

現状	厚み[μm]	代替1	厚み[μm]	代替2	厚み[μm]	代替3	厚み[μm]
表面 OPP	20	表面 PET	18.18	表面 PET	18.18	表面 PET	18.18
バリア EVOH	12	バリア EVOH	12	バリア EVA	50	バリア EVA	50
シール LLDPE	50	シール OPP	55.68	シール OPP	50	シール LLDPE	50
表面 OPP	27.18	表面 バリア	18.18	表面 バリア	18.18	表面 PET	18.18
バリア EVOH	12	シールの高層 PET	50	シールの高層 PET	50	シールの高層 PET	50
シール EVA	50	表面 バリア	18.18	表面 バリア	18.18	表面 PET	18.18
表面 DNY	18.82	シール OPP	50	シール OPP	50	表面 PET	18.18
バリア EVOH	12	表面 バリア	18.18	表面 バリア	18.18	バリア シール	50
シール OPP	55.78	シールの高層 PET	50	シールの高層 PET	50	表面 PET	18.18

④ 包装材の異種プラスチックの「結合」

食品等の包装では、内容物保護やシール工程等の機能実現ために図8のような多層化が行われており、異種プラスチックが結合している。中間のバリア層ではアルミが使用される場合も多く、金属が結合する場合もある。このように包装材に要求される機能とその機能を実現するための異素材の選択と結合、その結果としてのリサイクル手法による環境負荷は異なる。一方で、包装材製造者、製品製造者、分別する消費者、リサイクル事業者は、個別に意思決定を行っている。この機能と環境影響の関係を図9のような流れでシナリオ分析した。

例として鯉節パックをあげ、防湿などの必須要求機能から、表2のような素材代替シナリオを作成し、環境影響を評価した。使用後の包装が、分別の結果マテリアルリサイクルルートに流れた場合の温室効果ガス排出量の評価結果を図10に示す。複合素材では、

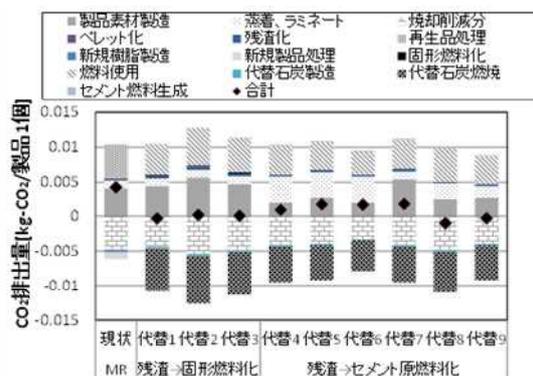


図 10 多層プラスチック包装の素材選択シナリオ分析結果

マテリアルリサイクルルートに流れてもリサイクル不適合で残渣となってしまう場合があり、素材の選択による環境負荷の違いが大きかった。残渣は燃料利用されるが、残渣となる方が環境負荷を下げる事ができる場合があることもわかった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Y. Kikuchi, M. Hirao, H. Sugiyama, S. Papadokonstantakis, K. Hungerbuehler, T. Ookubo, A. Sasaki, Design of recycling system for poly(methyl methacrylate) (PMMA). Part 2: process hazards and material flow analysis, *Int. J. LCA*, 19, 2014, 307-319  
DOI: 10.1007/s11367-013-0625-x
- ② Y. Kikuchi, M. Hirao, T. Ookubo, A. Sasaki, Design of recycling system for poly(methyl methacrylate) (PMMA). Part 1: recycling scenario analysis, *Int. J. LCA*, 19, 2014, 120-129  
DOI: 10.1007/s11367-013-0624-y
- ③ 中野勝行、平尾雅彦、ものづくりとライフサイクルアセスメント、日本情報経営学会誌、査読有、33、2012、85-93
- ④ 中谷隼、鈴木香菜、平尾雅彦、ライフサイクル評価に基づくプラスチック製容器包装リサイクルの利害関係者間の問題解決支援、廃棄物資源循環学会論文誌、査読有、22、2011、210-224  
DOI: 10.3985/jjmscmw.22.210

[学会発表] (計 10 件)

- ① 平尾雅彦、統合化学としての社会システム設計、化学工学会第 79 年会、2014 年 3 月 19 日、岐阜大学(岐阜)
- ② 永井孝敏、上原恵美、平尾雅彦、容器包装シナリオ分析による素材選択支援、日本 LCA 学会第 9 回研究発表会、2014 年 3 月 5 日、芝浦工業大学(東京)
- ③ 上原恵美、中谷隼、平尾雅彦、消費者のライフサイクル思考支援のためのシナリオ分析ツールの開発、日本 LCA 学会第 9

回研究発表会、2014 年 3 月 5 日、芝浦工業大学(東京)

- ④ Maghfuri Baharuddin, 杉山弘和、菊池康紀、平尾雅彦、石油精製への影響を考慮したバイオマス利活用システム設計、化学工学会第 45 回秋季大会、2013 年 9 月 16 日、岡山大学(岡山)
- ⑤ T. Nguyen, Y. Kikuchi, M. Noda, M. Hirao, A Multi-Criteria Framework for Design and Assessment of Bio-Based Chemical Process, *Process Systems Engineering Asia 2013*, 2013 年 6 月 25 日、クアラルンプール
- ⑥ 西村知、上原恵美、平尾雅彦、ライフサイクルを考慮した容器包装の素材選択支援、日本 LCA 学会第 8 回研究発表会、2013 年 3 月 7 日、立命館大学(草津)
- ⑦ 田中沙由理、上原恵美、菊池康紀、平尾雅彦、トレードオフ解析に基づく印刷業務プロセスの改善支援、日本 LCA 学会第 8 回研究発表会、2013 年 3 月 7 日、立命館大学(草津)
- ⑧ 石川晴菜、中谷隼、菊池康紀、平尾雅彦、変動に対する頑健性・柔軟性を考慮したリサイクルシステム設計、日本 LCA 学会第 8 回研究発表会、2013 年 3 月 7 日、立命館大学(草津)
- ⑨ 宮田尚史、菊池康紀、平尾雅彦、紙循環利用システムのシナリオ開発、日本 LCA 学会第 7 回研究発表会、2012 年 3 月 8 日、東京理科大学(野田)
- ⑩ 石川晴菜、中谷隼、菊池康紀、平尾雅彦、変動リスクに対する柔軟性を考慮した容器包装リサイクルシステムの設計、日本 LCA 学会第 7 回研究発表会、2012 年 3 月 7 日、東京理科大学(野田)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平尾 雅彦 (HIRAO, Masahiko)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：80282573

### (2) 連携研究者

中谷 隼 (NAKATANI, Jun)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号：40436522

菊池 康紀 (KIKUCHI, Yasunori)  
東京大学・総括プロジェクト機構・講師  
研究者番号：70545649

杉山 弘和 (SUGIYAMA, Hirokazu)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号：70701340

上原(菊地) 恵美 (KIKUCHI-UEHARA, Emi)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号：10648132