

論文の内容の要旨

論文題目 循環型社会における素材の環境負荷適正評価手法
と素材リサイクル最適化モデルの構築

氏 名 山田 宏之

1. 緒言

我が国では、循環型社会形成推進基本法および各種製品に対するリサイクル法の施行により、使用済み素材のリサイクルが促進されてきている。本研究は、循環型社会において適切な環境負荷評価を実現する手法と素材リサイクル最適化モデルの構築を行うことを目的とする。具体的には、以下の解析手法、モデルを構築するとともに、それぞれにおいてケーススタディを行った。

- (1) 循環型社会の複雑なマテリアルフローであっても評価可能な、素材の環境負荷評価指標の開発。
木材パルプを対象としたケーススタディを行う。
- (2) 素材のマテリアルフローを動的に拡張した素材の社会蓄積量評価、将来における使用済み素材の排出量解析モデルの構築。とくに、外的要因による製品の寿命分布の変化を考慮するモデルの構築。
アナログ放送停波により製品寿命が大きく変化することが予測されるカラーテレビを対象としたケーススタディを行う。
- (3) トランプエレメントを複数考慮した素材リサイクルの最適化モデルの構築。
アルミニウムを対象としたケーススタディを行う。

2. 素材のライフサイクル機能量解析

素材がそのライフサイクルの間に使用される（機能する）量を「ライフサイクル機能量」と定義し、マルコフ連鎖モデルを適用した素材のライフサイクル機能量の解析モデルを開発した。

素材の状態推移のプロセスが一定であれば、ある状態から次の状態になる確率は、その状態により一意に決定される。このような構造はマルコフ性と呼ばれ、マルコフ連鎖モデルにより解析できる。本解析モデルは、社会における素材の状態とマテリアルフローをモデル化し、その素材がたどる経路を確率論で解析することにより、素材の社会におけるライフサイクル機能量を求めるものである。

ケーススタディとして、紙製品の原料である木材パルプにマルコフ連鎖モデルを適用し、木材パルプのライフサイクル機能量解析を行った。また、紙製品における古紙使用量に対する木材パルプのライフサイクル機能量の感度解析と、各製品における原料の木材パルプの使用回数別構成割合を解析した。

2003年における木材パルプの日本国内における平均使用回数は、3.01回となった。

ここで、印刷・情報用紙の古紙使用量を22.3%から40.0%に増加すると、平均使用回数は3.61回に向上した。

また、各製品の使用するパルプの使用回数別構成割合を解析した結果、ダンボール原紙では、使用5回目以上のパルプが60%を超えるのに対し、晒系印刷用紙等では5%に満たないこと、衛生用紙では、再生パルプの使用量が減少する傾向にあることが示された。

3. 素材の動的マテリアルフロー解析（外的要因による製品の寿命分布の変化を考慮した使用済み素材の排出量解析モデルの構築）

素材リサイクルを評価するにあたり、素材が社会に蓄積されている量を把握し、将来にリサイクル材として社会に再投入される量を把握するため、マテリアルフローを動的に評価することが重要となる。

使用済み素材の排出量は、使用済み製品の排出量と当該製品における素材の使用比率により求めることができる。本研究では、出荷量と寿命分布から使用済み製品の排出量を推測するが、ある期間に製品代替を進める施策により寿命分布が変化することを想定し、「施策により影響を受けない寿命分布」と「施策の影響を受ける複数の寿命分布」からなる混合分布で寿命分布を表現するモデルを構築した。

ある期間に製品代替を進める施策がとられた場合の使用年数分布の変化を考える。施策の開始時と、施策の目標とする製品代替期限を T_2 とすると、寿命分布は、 T_1 以前、 T_1 から T_2 の間、 T_2 以降で異なる分布をとると考えられる。

地上アナログ放送停波を考慮せずに、過去の平均使用年数で排出が進む場合、地上波アナログ放送停波を予定している 2011 年 7 月末時点のアナログチューナテレビ社会存在量は 47.6 百万台となったが、これらのアナログチューナテレビは、地上アナログ放送停波の影響により通常とは異なる寿命分布によって廃棄されるものと考えられる。本研究では、以下の 2 つの分布で排出されると想定して解析を行った。

(1) 2006 年 1 月からアナログ放送停波までの間に、デジタルチューナテレビに買い替える寿命分布、 P_1 。（ワイブル分布）

(2) アナログ停波時に一斉集中廃棄（買い替え）する寿命分布、 P_2 。（正規分布）

なお、消費動向調査のカラーテレビの買い替え理由に関する調査結果から、「試聴できなくなるまで使用される（地上アナログ放送停波まで使用する）」が 70%、残りの 30%が地上アナログ放送停波より十分前に行われるものと考え、47.6 百万台のアナログチューナテレビのうち P_1 の分布（事前買い替えする分布）で廃棄される割合 r を 0.3 として解析を行った。また、 r や P_2 の分布計上を変化させる感度分析も行った。

その結果、 $r=0.3$ で事前の買い替えが行われ、停波時前後の 7 ヶ月間に残りのアナログチューナテレビが一斉に廃棄される場合、最大で一月に 10 百万台以上の廃棄が発生する可能性が示された。

4. トランプエレメントを複数考慮した素材リサイクルの最適化モデルの構築

素材のリサイクル促進の制約として、リサイクル過程を経ても除去されない元素（トランプエレメント）の存在に焦点をあて、複数のトランプエレメントを考慮した素材リサイクルの最適化モデルを開発した。これは、国内における素材のリサイクルフローの最適化に線形計画法を適用するものである。線形計画法の制約条件としては、以下の条件を設定した。

(1) 「供給量」 \geq 「需要側での材料使用量」

(2) 「生産量」 \geq 「需要量」

(3) 「生産材のトランプエレメント濃度」 \leq 「需要側のトランプエレメント許容濃度」

また、ケーススタディとして、当該モデルを日本国内におけるアルミニウムのリサイクルフローに適用した。

アルミニウムは、広くリサイクルが行われている金属材料の一つであるが、除去困難な元素が（トランプエレメント）も複数存在することが知られている。本研究では、我が国のアルミニウムのリサイクルフローに線形計画法を適用し、バージン材（新地金）投入量の削減可能性を検討した。

アルミニウムのマテリアルフローは、供給材を 23 種、需要を 16 種に分類し、トランプエレメントは、Si, Fe, Cu, Mn の 4 元素として解析した。新地金は、トランプエレメント濃度を 0 とし、他の供給材の供給量、トランプエレメント濃度については、既報の値を用いた。需要側のトランプエレメント許容量は、JIS に規格される化学成分の上限値とし、需要量は 2003 年度の統計値を用いた。目的関数は、新地金使用量の最小化とした。

また、日本国内における現在のアルミニウムの需給構造は、需要が再生地金の供給量を大きく上回っているため、再生地金の余剰は生じていない。そこで、シナリオ解析を行い、国内のリサイクルフローの許容し得る将来の需給構造の変化の範囲を考察した。また、感度解析も行った。

(1) 再生地金による新地金代替可能性の検討

廃自動車や建築廃材からのアルミニウム回収量の増加等を想定したシナリオ解析を行った。

廃自動車鋳物の回収量を増やす、あるいは同等の成分を有する再生材の輸入を増やした場合、2003 年度の新地金使用量は、約 68% まで削減可能という結果を得た。また、廃建材のみで代替した場合は、新地金使用量を 35% まで削減可能であるという結果を得た。

供給を増やす再生材のトランプエレメント濃度に関する感度解析を行ったところ、廃自動車鋳物で代替した場合は、廃自動車鋳物における銅の感度が高く、廃建材で代替する場合は、廃建材における Mn の感度が高いことがわかった。

(2) 鋳物、ダイカストの国内需要縮小

現在のアルミニウムの需給構造では、トランプエレメントは、鋳物、ダイカスト製品に含有され海外に輸出されている。そこで、生産拠点の海外移転等による鋳物、ダイカストの国内需要縮小があった場合の新地金必要量を考察した。

具体的には、鋳物、ダイカストの需要を縮小（総需要も縮小）させ、利用できないスクラップが発生する限界点を求めた。

その結果、鋳物ダイカストの国内需要が 50% まで縮小しても、リサイクル不可能なスクラップ材は発生せず、鋳物、ダイカストの許容するトランプエレメント濃度には、十分余裕があることが確認できた。

5. 統合モデルの構築

製品の環境負荷誘発量算出にあたり、次式を提案した。ライフサイクル機能量 N を用い、バージン材、リサイクル材に係る環境負荷を配分している。この手法によれば、異なる製品間で行われるリサイクルであっても、素材の環境負荷誘発量を製品間で公平に配分することが可能である。

$$LCI = (1/N) \cdot LCIV + ((N-1)/N) \cdot LCIR$$

LCI : 素材の環境負荷原単位

LCIV : バージン材製造プロセスで誘発される環境負荷原単位

LCIR : リサイクル材製造プロセスで誘発される環境負荷原単位

N : 素材のライフサイクル機能量

6. まとめ

本研究では、循環型社会構築における素材の環境負荷適正評価手法の開発と素材リサイクルの最適化モデルの構築を目的として、素材のライフサイクル機能量を用いた素材の環境負荷適正評価手法、外的要因による製品の寿命分布の変化を考慮した使用済み素材の排出量解析モデル、複数のトランプエレメントを考慮した素材リサイクルの最適化モデルを開発した。また、これらを統合して、最適な素材利用に向けた、製品設計あるいは循環型社会の設計に資する指標を提案した。循環型社会における素材の適正な環境負荷評価指標として、意義あるものと考えられる。