



循環型社会におけるライフサイクルアセスメント —ポピュレーションバランスモデル, ピンチ解析, LCAを統合化した評価ツール「SILT」の開発—

松野 泰也*・醍醐 市朗*・足立 芳寛*

Life Cycle Assessment for Assessing Open Cycle Recycling of Materials—Development of a New Tool “Strategic Integrated LCA Technology, SILT” that Integrates LCA with Population Balance Model and Pinch Technology

Yasunari MATSUNO, Ichiro DAIGO and Yoshihiro ADACHI

Synopsis : Life Cycle Assessment (LCA) is a useful tool to evaluate environmental impacts associated with products during their life cycle. However, it has been recognized that LCA has a limitation in assessing open cycle recycling of materials because of inevitable subjective judgments in setting system boundary. According with the enforcement of recycling laws, there has been a rapid increase in recycling ratio of materials at the end-of-life of products in Japan. So, materials' life cycle is getting more complicated, which makes it difficult to quantify the environmental impacts of materials used in a product in an appropriate way. This paper reviews this limitation of conventional LCA and suggests a new methodology for assessing open cycle recycling of materials. The new tool is called “Strategic Integrated LCA Technology for sustainable society, SILT”, in which LCA is integrated with population balance model and pinch technology. This tool deals with dynamic aspects of recycling materials and has macro point of view. One can assess the maximum recyclable ratio of the scrap materials and total environmental impacts caused by the material production in society in each year. In addition, reduction potential of environmental impacts by their introduction of new technology, such as DfE, can be quantified by this tool.

Key words: LCA, open cycle recycling, pinch technology; population balance model, steel

1. 緒言：循環型社会におけるライフサイクルアセスメント

ライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment : 以下, LCA) は, 資源の採掘から廃棄まで, 対象とする製品・サービスに係わる物質/技術の連鎖を一貫して捉え, 資源消費量や環境への排出物質を定量し, その環境への影響を評価する手法である¹⁻⁴⁾。国際標準化機構(International Organization for Standardization, ISO)によるLCAの国際規格発行の進捗とともに, 世界そしてわが国においてLCAが注目され, 多くの企業による実践が行われてきている。

一方, 我が国では, 2000年6月に循環型社会形成推進基本法が施行され, 循環型社会の形成について基本原則が定められた。また, 個別物品の特性に応じた規制として, 容器包装リサイクル法, 家電リサイクル法, 食品リサイクル法, 建設リサイクル法, 自動車リサイクル法が施行されている。今後, 我が国においては, 循環型社会の形成が推進され, 多くの使用済み製品がリサイクル工程へ回されることになる。そこでは, 使用済み製品が分解, 分別されるこ

とにより, 素材スクラップなどの有用物が発生し, 新たな製品に使用されることになる¹⁾。製品に使用される鋼材のライフサイクルは, 一貫製鉄所において鉄鉱石を還元して製錬されることに始まり, ある製品に使用された後, 回収され電炉鋼として再生され, 別の製品に使用され, そのサイクルを繰り返した後, 最終的に廃棄されることで終わる。このように, 循環型社会においては, 鋼材のライフサイクルは, 製品のライフサイクルとは一致せず, 複数の製品のライフサイクルにわたる長期のものとなる⁵⁾。

この, 製品のライフサイクルと鋼材のライフサイクルの不一致が, 製品のLCAを実施する際に, 鋼材により誘発される環境負荷を評価する上で, 主観の入り込む余地となる。既存のLCA研究では, リサイクル材の取り扱いに関して, 様々な方法が提案されている。リサイクル材の環境負荷をゼロとする方法, システム拡張により対応する方法^{6,7)}, 配分(アロケーション)により対応する方法⁸⁻¹⁰⁾などがあげられる。リサイクル材の環境負荷をゼロとする方法では, リサイクルの取り扱いそのものを無視することになり, 廃棄製品から素材のリサイクルによる環境負荷の低

平成16年4月30日受付 平成16年9月20日受理 (Received on Apr 30, 2004, Accepted on Sep 20, 2004)

* 東京大学大学院工学系研究科 (Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

† プラスチックに関しては, 他の製品の素材として再使用される (マテリアルリサイクル) 場合, ガス化などにより化学リサイクルされる場合, 焼却され熱エネルギーとして利用される場合がある。

減効果は全く考慮されなくなる。システム拡張には、代替プロセスを付加する方法と、実際のプロセスを付加する方法がある。前者の場合には、代替プロセスに何を選択するか主観が入り込み、後者の場合は、システム拡張に伴いシステムが提供する機能単位に変化が生じることがある。また、無限にシステム拡張をしなければならないケースも多く、実行が困難な場合も多い¹¹⁾。そこで、一次素材製造、廃棄、リサイクルプロセスから誘発される環境負荷を、一次素材と二次素材の間に配分（アロケーション）する方法が提案されている。配分方法は、一次素材と二次素材の間に均等に割り振る方法、経済価値で割り振る方法などがある。均等に割り振る方法は、実行は容易であるが、一次素材と二次素材の質を考慮せず、環境負荷を単純に均等割り振りをするため、リサイクル材の品質を高める努力が適正に評価されない。経済価値で割り振る方法は、リサイクル材の価格が品質を反映していると見なし環境負荷を割り振る方法であると位置づけられる。しかしながら、リサイクル材の価格は品質以外の要因にも依存すると考えられ、また価格の変動が激しい場合等には適正な評価ができない問題点も有している。

このように、既存のLCAでは、システム境界の設定やリサイクル材の取り扱い手法により結果が大きく変わることもあり、既存のLCAによる評価の限界とも認識される¹²⁾。

本報告では、既存のLCAによる評価の限界に関して、アルミニウム缶とスチール缶の例を取り上げ解説する。そして、循環型社会における素材リサイクルの評価においては、「Product to Product」の評価ではなく、質と量を考慮した「Material to Material」の評価が必要であることについて述べる。そして、ポピュレーションバランスモデル、ピンチ解析およびLCAを統合した評価ツール、「戦略的統合化ライフサイクルアセスメント手法 (Strategic Integrated Life cycle assessment Technology for sustainable society, SILT)」に

より、「Material to Material」のリサイクルにより代替されるバージン材の割合および素材の製造により社会全体で誘発される環境負荷量を評価できることについて述べる。「SILT」は、ポピュレーションバランスモデルにより将来発生するリサイクル材の質と量を把握した上で、ピンチ解析によりリサイクル材の最大利用可能量を把握し、さらにLCAにより素材の製造により社会全体で誘発される環境負荷を定量化する手法である。そして最後に、「SILT」による、素材リサイクルを容易にする新技術が導入された場合の環境負荷低減効果の評価方法について説明する。

2. 既存のLCAによる評価の限界：アルミ缶とスチール缶のLCA

本章では、既存のLCAによる評価の限界に関して、アルミニウム缶とスチール缶の例に基づき解説する。

2.1 アルミ缶

アルミニウム缶のボディには3000系合金(3004)が、蓋(エンド)には5000系合金(5182)が用いられており、添加元素およびその含有量は異なっている¹³⁾。マンガンを追加すると、アルミニウム合金の延伸性が良くなるためボディ材にはマンガンが添加されている。エンドは加工性が要求されるので、多量のマンガンは必要ない。使用済みアルミニウム缶は回収された後、電気炉で溶融され、3000系合金と5000系合金の混合物となる。アルミ缶溶融物には、3004由来のマンガンが多量に含まれているので、エンド材には用いずボディ材へと戻されている。Fig 1は、アルミ缶の製造、使用、廃棄、回収、リサイクルのマテリアルフローを示したものである。

Fig 1から分かるように、アルミ缶の回収率は高いとともに、59%程度がアルミ缶のボディ材に再利用されている¹²⁾。リサイクルにより発生した素材スクラップが、その

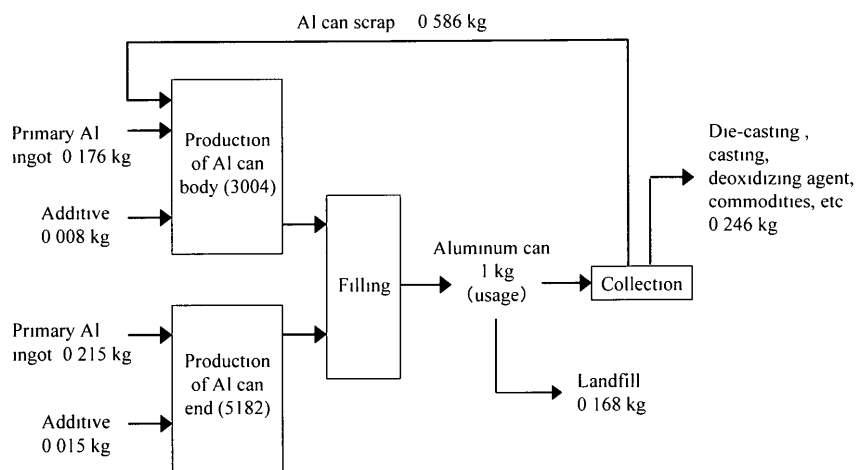


Fig 1. Material flow for aluminum can (Numeric values in the figure were based on the reported values by Japan Aluminum Can Recycling Association).

製品の製造に使用される「閉ループリサイクル」つまり、「Can to Can」の閉ループリサイクルの割合が高い。一部、鋳物や脱酸素剤など、他の用途に開ループリサイクルされているものもあるが、その量は相対的に小さい。このような場合には、LCAにより、リサイクルによる環境負荷低減の解析が比較的容易である。なぜならば、回収されたアルミ缶が缶ボディ材に再利用されれば、当然、アルミ缶を製造するのに要するバージン材（アルミニウム一次地金）の投入量が減る。アルミニウム一次地金は、単位重量生産するのに要する消費電力量が大きいので、CO₂誘発量など環境負荷原単位が大きいことが知られている¹⁴⁾。つまり「Can to Can」リサイクル率を増大すれば、アルミニウム一次地金の生産を回避することができ、環境負荷低減に結びつくことは視覚的に分かりやすい。

2.2 スチール缶

スチール缶は、近年では、PET樹脂をラミネートした鋼板を用いて製缶した、ラミネート缶が大きくシェアを伸ばしている。3Pラミネート缶と2Pラミネート缶の2種類あるが、いずれにせよ開口部となる上蓋・エンド部分は、アルミニウムでできている。2ピースラミネート缶のマテリアルフローをFig. 2に示す。

スチール缶の回収率も高いが、アルミ缶の場合と異なり「Can to Can」の閉ループリサイクルが行われている割合は小さい。使用済みスチール缶の多くは、電炉へ供給され他の製品の鋼材となる率が高い。つまり素材スクラップが他の製品の製造に使用される「開ループリサイクル」が大半となっている。従って、スチール缶の回収・リサイクルが、バージン材の代替となっているようには見えない。また、近年では、自治体が処理しているスチール缶屑の売却価格が大幅に低下し、自治体によっては無償または逆有償のところも出てきている¹²⁾。従って、経済的な背景からスチー

ル缶に使用されている鋼材のライフサイクルを考える場合には、使用済みスチール缶の回収までがライフサイクルの終わりであり、開ループリサイクルの部分はシステム境界に含むべきではないとの主張がある。その場合、スチール缶の環境負荷の算出には、リサイクル率が高いにもかかわらず、リサイクルの効果が反映されない。

しかしながら、スチール缶のボディに用いる鋼材には添加元素も少なく、使用済みスチール缶は、バージン材とほぼ同等の材質となっている。鉄スクラップは電炉鋼の製造のみに利用されるのではなく、転炉にリサイクルし、再度スチール缶素材に戻すことも可能である。従って、鋼材の開ループリサイクルは閉ループリサイクルと同等の効果をもち、リサイクルの代替値はバージン材の100%と考えることができる、との主張がある¹⁵⁾。上記の開ループリサイクルの部分はシステム境界に含めるべきではない、とは逆の主張である。両者の主張は、システム境界の設定方法にあり、両者とも主観に基づいているので、コンセンサスを得るのは容易ではない。

重要なことは、開ループリサイクルであっても、素材のリサイクルにより環境負荷が低減されるかどうかを客観的に定量的に示すことである。別の言葉を用いるのなら、開ループリサイクルであっても、素材スクラップのリサイクルが、バージン材の代替となっていることを客観的に示すことである。その解析に当たり、鋼材のような開ループリサイクルが大半となっている素材に関しては、「Product to Product」の評価には限界があるので、鋼材全体の需要量、生産量、リサイクル量を考慮した、「Material to Material」の評価を行う必要がある。

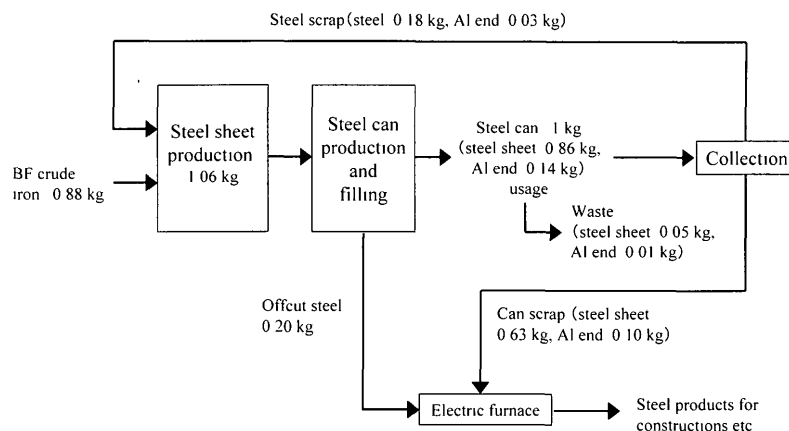


Fig. 2. Material flow for 2 piece laminate steel can.

12 アルミニウムリサイクル協会では、「Can to Canリサイクル率」の定義を、「アルミ缶に使用された缶スクラップ／回収された缶スクラップ」で定義している。アルミニウムリサイクル協会の定義に従えば、この場合のCan to Canリサイクル率は、67.7%となるが、LCA実施の観点からは「Can to Canリサイクル率」の定義を、「アルミ缶に使用された缶スクラップ／製造されたアルミ缶」とした方が良いと判断する。

3. 循環型社会における素材リサイクルによる環境負荷低減量の評価方法

3.1 考慮すべき点

このように循環型社会における素材リサイクルによる環境負荷低減量の評価に関しては、「Material to Material」の観点に基づく環境負荷低減量の適正な把握方法が必要になってきている。その場合には、開ループリサイクルによるスクラップのリサイクルがバージン材を代替するという考えが果たして正しいのか、という疑問に答えなければならない。

一般に、天然資源から生産されるバージン材は純度が高く、不純物質はほとんど含有さない。それに対して、リサイクル材では、リサイクル工程において不純物質が混入される可能性があり、不純物の除去が困難な場合には、不純物質の含有濃度は相対的に高くなる。それが、バージン材に対して、リサイクル材の「質が劣化する」と言われる所以となっている。

鋼材のリサイクルを事例に取り上げる。家電製品や自動車などの各部品には、各種鋼材が用いられている。また、銅線やモータ等に銅が用いられている。それら使用済み製品をリサイクルし、鉄スクラップを回収する際には、銅が不純物質として混入する。銅のみならず、錫、アンチモン、ビスマスなどの元素は、工業的に行われている精錬によって抜き取ることはできないトランプエレメントと呼ばれる不純物質であり、熱間加工性や焼戻脆性に悪影響を及ぼすために問題となる^{16) 17)}。したがって、鋼材のリサイクルでは、スクラップ中に含有されるトランプエレメント濃度を、質の劣化指標として用いることができると考えられる¹³⁾。鋼材毎にトランプエレメント含有の許容濃度が決まっているので、鋼材スクラップ中のトランプエレメントがある濃度を越えると、そのスクラップのみでは再利用できなくなる。その場合、トランプエレメント含有量が相対的に小さい他のスクラップや銑鉄を用い、トランプエレメントを希釈する必要がある。

対象とする地域において発生するスクラップの量と含有されるトランプエレメントの濃度は、経年的に変化する。循環型社会の形成により鋼材のリサイクルが促進するにつれ、スクラップ中に含有されるトランプエレメント濃度は増大する。また、スクラップを使用して生産される鋼材の需要量も経年的に変化する。対象とする地域の各年における、スクラップの供給量と質、再生（電炉）鋼材の需要量と要求される質から、最大限利用できるスクラップ量が求まる。この考え方は、鋼材のリサイクルを、量と質を考慮した「Steel to Steel」のリサイクルで評価するものであり、各年において利用できるスクラップ量がバージン材を代替する量と考えることができる。

対象とする地域において発生するスクラップの量と含有されるトランプエレメント濃度の経年変化の解析には、ポピュレーションバランスモデルを利用することができる。また、スクラップの供給量と質、再生（電炉）鋼材の需要量と質から、最大限利用できるスクラップ量を求めるには、ピンチ解析が利用できる。次節で、両ツールの概略を解説する。

3.2 ポピュレーションバランスモデル(Population Balance Model: PBM)

ポピュレーションバランスモデル (Population Balance Model: PBM) とは、一言で言えば、「外部座標と内部座標を持つ空間内において、物質分布の収支を求める手法」である^{18) 19)}。ここでは、社会における製品群の投入、蓄積および廃棄の収支に対してPBMを適用することを考える。

Fig. 3に、製品がある年に社会において新規に製造・投入され、その後、使用され、廃棄に至るまでの数量バランスの概念図を示す。製品には社会における各年の需要があり、その分だけ新規に製造され社会に投入される。その時点での、使用年数は0年である。投入された製品群は使用年数が増大するについて、徐々に廃棄されていく。その割合（廃棄年分布と呼べる）は、Fig. 3の右側の図に示すように、通常、平均使用年数をピークとした左右対称の山形で近似できる。

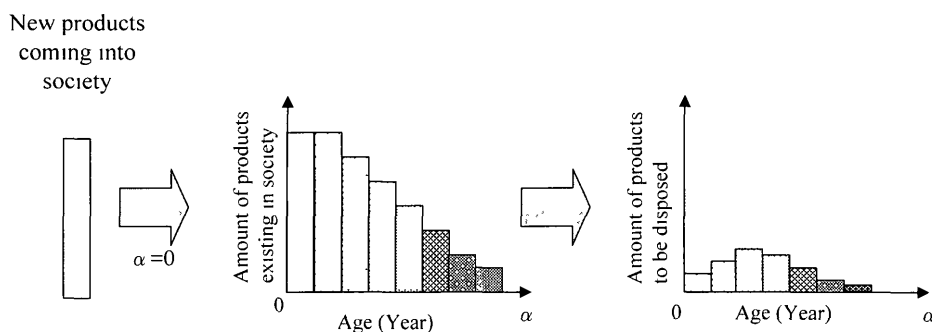


Fig. 3 Amount of products existing in a society (left figure) and their life time distribution (right figure).

†3 一部の鋼材には 意図的に銅を投入し製錬されるものもあり、全ての鋼材に関して銅の濃化がトランプエレメントとして問題となっているわけではない。

ある年に社会中に新規に投入された製品群は、廃棄年分布に従って徐々に廃棄され、残存する製品群は時間の経過につれて使用年数は長くなる。その翌年以降の各年においても同様に、製品は需要に従い、新規に製造・投入され、その後、使用され廃棄される。製品に使用される素材に関しては、各種製品の製造に伴い生産・投入された後、社会中に存在する製品に「蓄積」されて存在する。そして、製品の廃棄に伴い、廃棄される、またはリサイクル工程にかけられ素材スクラップを産出することになる。

従って、現時点および将来の各年における素材スクラップの発生量の経年変化を解析するには、まずは対象とする素材が過去の各年に社会においてどれだけ生産され、各種製品に投入されたかを把握する。また、将来の各年においても各種製品の需要に伴い生産・投入される量を予測する。その後、製品が時間の経過とともに廃棄年分布に基づいてどれだけ廃棄されるかを把握し、それに伴い発生する素材スクラップの回収率を掛け合わせると、素材スクラップの回収量が求まる。また、廃棄される製品から素材がリサイクルされる際に、不純物質（トランプエレメント）がどれだけ混入されるかを把握すれば、素材スクラップ中の不純物質含有濃度を把握することが可能になる。

このように、対象とする系（社会）における物質収支を求める手法が、ポピュレーションバランスモデルである。

3・3 ピンチ解析法

1) ピンチ解析法の概念

ピンチ解析法は、1970年後半に、英国マンチェスター理工科大学のBodo Linnhoff教授の研究グループを中心に開発が始まった。当初は、プラントの熱回収システムの解析および設計手法として開発され、実用的な省エネ手法として適用されてきたものである。対象とするプラントにおいて、与熱流体と受熱流体間の熱交換を最適に設計することにより、どこまで省エネが達成可能かを最適化設計する手法である。その詳細については、他誌を参照されたい²⁰⁾。

ピンチ解析法の対象は、熱の回収のみにとどまらず、1990年代初頭頃より、水、水素の物質にも適用され発展していった²⁰⁾。その基本的な原理は、検討する系内における対象とする物質の、「供給と受入」の「量と質」のバランスの検討にある。工場における水を例に説明する。

工場では、ボイラー、冷却塔、洗浄機などのプロセスで、水が使われる。各プロセスにおいて使用された水は、役目を果たした後、排出される。排出された水を回収し再利用すれば、工場に供給する新水および工場からの排水の量を削減することができる。しかしながら、各プロセス排出された水には不純物質が混入し、プロセスに流入する前と比べて「質（純度）」が落ちる場合も多い。そこで、工場において各プロセスが排出する水の量と純度、各プロセスが使用する水量と受入可能な純度を把握し、縦軸に水の純度、

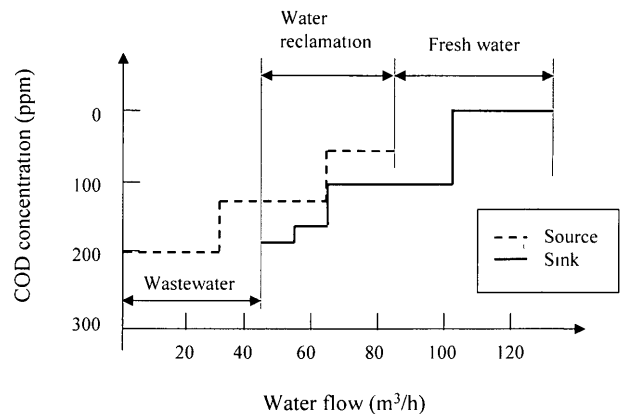


Fig. 4. Diagram of source & sink curves for pinch analysis of water use in a factory

横軸に水量をとった線図（これを「Source & Sink」線図とよぶ）を描くことにより、再利用可能な水量の最大量を容易に検討することができる。Fig. 4に示す。

Fig 4では、水の質として、水質汚濁の指標の一つであるCOD（Chemical Oxygen Demand、化学的酸素要求量）を縦軸にとり、水量を横軸にとった場合の、プロセスから排出される水（Source線）とプロセスに受入可能な水（Sink線）を示したものである。この2本の線がSource線を上にして最大限重なり合った部分の横幅が、水の再利用が可能な水量に相当する。重なり合った部分の右側に開いた部分は、工業用水（新水）受入量の最小値を、また左側の部分は排水量の最小値を示す。但し、水利用の場合は、水のブレンドが可能であるため、配管の変更が自由に可能である場合には、水の再利用率をさらに上げることも可能である。

このように物質に適用するピンチ解析法は、検討する系内における対象とする物質の供給(Source)と受入(Sink)の最適化を検討する手法である²⁰⁾。工場内および工場群、地域等、ある系内において発生し消費される物質に着目する。発生する物質の量のみならず質（純度や不純物質含有量など）を把握し、Source線を作成する。その一方で、対象とする物質を消費する側の需要量および要求される質について把握しSink線を作成すれば、利用可能な物質質量、その系に対して新たに生産し供給しなければならない物質質量、そして廃棄される物質質量を解析することができる。

上記の概念を基に、著者らは、ピンチ解析法を、我が国で発生する鉄スクラップとそれを用いて生産する鋼材に適用することを試みた。以下、説明する。

2) 鉄スクラップリサイクルへのピンチ解析法の適用

ピンチ解析法を、対象とする地域において各年に回収される鉄スクラップとスクラップを使用して生産されるリサイクル材（電炉材）の間において適用し、リサイクル可能なスクラップ量を解析する。ここでは「質」の尺度として、不純物質含有率（トランプエレメント濃度）を用いること

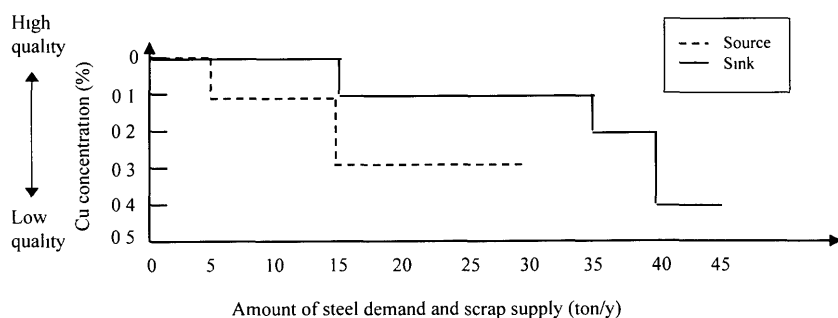


Fig. 5. Diagram of source & sink curves for pinch analysis of scrap recycle.

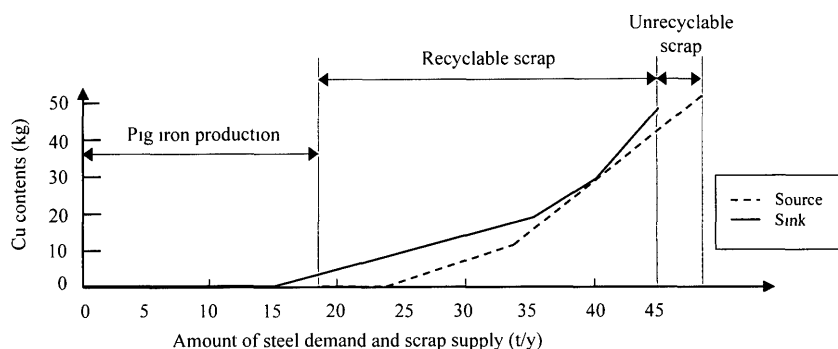


Fig. 6. Diagram of limiting curves for pinch analysis of scrap recycle

ができる。対象とする地域内のある年における、鉄スクラップの発生量と不純物質含有量、およびスクラップを使用して生産されるリサイクル材の需要量と要求される質が把握できれば、Source & Sink線図を描くことができる。Fig. 5に、不純物質としてCuを例に取ったSource & Sink線図の概念図を示す。

Source & Sink線図において、供給側の線（Source線：鉄スクラップ）が需要側の線（Sink線：鋼材）より低質にある部分が生じても、逆に高質にある部分があれば、スクラップを混ぜ合わせることで不純物質を希釈できるため、生産されるリサイクル材に要求される質を満たすことが可能になる。このようなブレンドによる希釈が可能な場合、リサイクル利用可能なスクラップ量は、Source & Sink線図の縦軸を不純物質含有量に変換した「Limiting Curve」を用いて解析を行う。Fig. 6に示す。このLimiting Curveは、Fig. 5のCu含有濃度と鋼材／スクラップ重量から積分値（Cu含有重量）を算出したものである。これによりスクラップのリサイクル利用の最大可能性を検討することができる。Limiting Curveでは、供給側の線と需要側の線が重ならないように、かつ需要側の線が供給側の線よりも常に上にこなければならない。その上で、リサイクル可能なスクラップ量が最大となり、廃棄されるスクラップ量が最小となるような状態を、Limiting Curveより求める。Fig. 6では、横軸が40 t/yにおいて両線が接しており、この状態がリサイクル可能なスクラップが最大となる状態を示している。この場合、必要なバージン材（銑鉄）生産量は

18.3 t/y、廃棄されるスクラップ量は3.3 t/yとなっている。ある年において、廃棄されるスクラップ量の値が「0」の場合は、スクラップが全量使用可能なことを示し、スクラップがバージン材を100%代替すると言える。

ここで、ある製品のリサイクル率を増大させ、回収されるスクラップ量を増大させた場合に、バージン材生産必要量の減少量を求めれば、スクラップがバージン材を代替する割合が求まる。2・2節で述べたスチール缶のリサイクルに関しては、スチール缶スクラップに故意的にCuを含んだ廃棄物が混入されない限り、スチール缶スクラップ中のCu濃度はほぼ0であるので、ピンチ解析を行えば、スチール缶スクラップはバージン材をほぼ100%代替する結果となる。その他のスクラップに関しても、スクラップ中のCu濃度に依存して、バージン材を代替する割合が求まる。但し、スクラップがバージン材を代替する割合は、経年変化することに留意する必要がある。

また、上記は、あくまでもCuのみに着目して、ピンチ解析を行ったにすぎない。考慮しなければならない不純物質（トランプエレメント）が複数あり同時に扱う場合は、Fig. 6のような図解法によってスクラップの最大利用可能性を求めることができないので、数学的な解法が必要になる。また、スクラップの使用には、実際には不十分物質の濃度のみならず、コストや輸送による利用可能の制約もあり、それらを制約関数として取り入れたピンチ解析が必要になる¹³⁾。

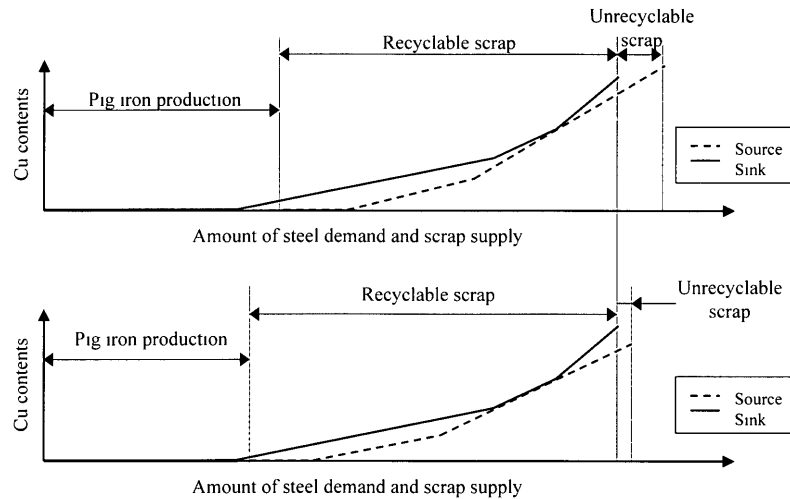


Fig. 7. Diagrams of limiting curves for pinch analysis of scrap recycle.

4. PBM, ピンチ解析法, LCAを統合化した評価ツール(SILT)の構築

4.1 PBM, ピンチ解析法, LCAの統合化による素材による環境負荷誘発量の解析

前章で述べたように、PBMおよびピンチ解析法を用いることで、鉄スクラップのリサイクルを、質と量を考慮し「Material to Material」の観点から解析することができる。開ループリサイクルにおいても、スクラップがバージン材を代替する割合を求めることができる。そして、スクラップの最大利用可能量のみならず、バージン材（鉄鉄）生産量とスクラップ廃棄量も同時に求まる。そこで、各年において対象とする地域全体での粗鋼生産（および廃棄）により誘発される環境負荷を、LCAにより解析する。そうすることで、鋼材生産（および廃棄）により誘発される環境負荷を最小化させるスクラップの利用形態を検討することができる。この場合、対象とする地域全体での粗鋼生産により誘発される環境負荷は、鉄鉄からの粗鋼生産および冷鉄源（スクラップ）からの粗鋼生産により誘発される環境負荷の総和となる。それぞれの生産量に、LCAにより求めた環境負荷誘発原単位を掛け合わせ、合算することで求めることができる。

このようにして、PBM, ピンチ解析, LCAを統合した評価ツール（戦略的統合化LCA (Strategic Integrated Life cycle assessment for sustainable society, SILT)と呼んでいる）により、対象とする地域全体での鋼材の生産および廃棄による環境負荷誘発量を最小化させるスクラップ利用形態を求めることができる。この評価ツールを用いることで、リサイクルを支援する新技術の導入による環境負荷低減効果を定量的に求めることが可能である。

4.2 SILTにより評価できる新技術導入による環境負荷削減効果

SILTを適用することで、新技術導入による環境負荷削減

効果を評価する一例を示す。

廃棄製品のリサイクル時に、製品に使用されていた各素材の分別が容易になり、発生するスクラップ中への不純物質の混入が極力低減することができる新技術が、ある年にある製品に導入されたとする。この新技術の導入は、リサイクル工程でのエネルギー消費を低減し、それに伴い誘発される環境負荷を低減するだけでなく、スクラップ中への不純物質の混入を低減するため、バージン材の生産により誘発される環境負荷を低減させる効果も有している。

製品に新技術を導入する場合と導入しない場合では、将来のある年に発生するスクラップと鋼材に対してLimiting Curveを作成した場合、Fig. 7に示すような違いが生じると考えられる。新技術の導入により、スクラップ中への不純物質の混入が低減されるため、利用可能なスクラップ量が増大し、バージン材の生産量とスクラップの廃棄量が減少する。あとは、LCAにより、粗鋼の生産により誘発される環境負荷総量の経年変化を求め、新技術が導入されない場合と比較すれば、新技術の導入による環境負荷の低減量を求めることができる。

6. 結論

循環型社会においては、素材のライフサイクルは複数の製品のライフサイクルにわたるものとなる。既存のLCAでは素材の開ループリサイクルによる環境負荷低減効果を定量的に示すことが困難であった。

それに対して、PBM, ピンチ解析, LCAを統合した評価ツール(SILT)では、素材のリサイクルを、質と量を考慮し「Material to Material」の観点から解析するものである。開ループリサイクルにおいても、スクラップがバージン材を代替する割合を求めることができる。そして、対象とする地域全体での素材生産により誘発される環境負荷の経年変化を解析することができるようになり、環境負荷最小化

のための素材スクラップの最適利用形態を検討することが可能となる。さらには、易解体設計など素材リサイクルを容易にする新技術が導入された場合の環境負荷低減効果を、客観的に定量的に評価することが可能となる。

リサイクルを促進する上で、各種素材の分別の徹底が重要であることは、長年指摘されていることであるが、分別回収の環境負荷低減効果を定量的に評価できるのが SILT の大きな特長である。

文 献

- 1) ISO Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principle and Framework, Reference number ISO 14040, (1997)
- 2) ISO ISO/FDIS 14041 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Goal and Scope Definition and Inventory Analysis, (1998)
- 3) ISO ISO/FDIS 14042 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Life Cycle Impact Assessment, (1999)
- 4) ISO ISO/FDIS 14043 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Life Cycle Interpretation, (1999)
- 5) I Daigo, K Ishihara, Y Matsuno and Y Adachi *Tetsu-to-Hagane*, **91** (2005), 159
- 6) S Kim and B Dale *Int J Life Cycle Assess*, **7** (2002), 237
- 7) C Cederberg and M Stadig *Int J Life Cycle Assess*, **8** (2003), 350
- 8) F Werner and K Richter *Int J Life Cycle Assess*, **5** (2000), 79
- 9) M Borg, J Paulsen and W Trinius *Int J Life Cycle Assess*, **6** (2001), 219
- 10) J Guinee, R Heijungs and G Huppes *Int J Life Cycle Assess*, **9**, (2004), 23
- 11) 中島謙一：LCA手法におけるシステム境界の設定とリサイクルへの適用に関する研究，筑波大学工学系研究科博士論文，(2004)
- 12) 足立芳寛，松野泰也，醍醐市朗，瀧口博明：環境システム工学，東京大学出版会，東京，(2004)，109
- 13) T Onoye and M Ootani Proc of 5th Int Conf on Ecobalance, The Society of Non-Traditional Technology, Tokyo, (2002), 135
- 14) Y Matsuno, A Inaba and M Schuckert *J Jpn Inst Energy*, **77** (1998), 1070
- 15) 森 正晃：素材リサイクルとLCA，日本鉄鋼協会，東京，(2003)，78
- 16) M Hatano, K Kunishige and Y Komizo *Tetsu-to-Hagane*, **88** (2002), 142
- 17) K Shibata, K Kunishige and M Hatano *Bull Iron Steel Inst Jpn*, **7** (2002), No 4, 252
- 18) K Kakudate, Y Adachi and T Suzuki *Sci Technol Adv Mater*, **1** (2000), 105
- 19) K Yokota, Y Matsuno, M Yamashita and Y Adachi *Int J Life Cycle Assess*, **8** (2003), 129
- 20) 巽 浩之，松田一夫：ピンチテクノロジー 省エネルギー解析の手法と実際，(財)省エネルギーセンター，東京，(2002)，1