

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008－2009
 課題番号：20760571
 研究課題名 (和文) 耐久消費財の分離・解体におけるライフサイクルを考慮した最適化モデルの構築
 研究課題名 (英文) Optimization of end-of-life processing for electrical and electronic products considering disassembly and shredding.
 研究代表者
 醍醐市朗 (DAIGO ICHIRO)
 東京大学・大学院工学系研究科・特任講師
 研究者番号：20396774

研究成果の概要：

本研究では、手解体、機械破碎、リサイクル、最終処分を考慮して、製品の分離・解体における環境性ならびに経済性の尺度における最適解体手順を導出するモデルを構築した。これにより、易解体設計の導入による環境負荷削減効果を算出することが可能になった。1つの製品を評価対象とした上記モデルに対し、マクロな評価として、素材が単体で分離されなかったことによる素材サイクルでの影響も評価した。炭素鋼スクラップへの特殊鋼の混入を明らかにし、電炉鋼材におけるCr濃化の可能性を指摘した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：易解体設計、環境対応、機械要素、廃棄物再資源化、モデル化

1. 研究開始当初の背景

著者らは、鉄鋼材のマテリアルフロー分析[1-2]から、今後リサイクルが促進される場合、鉄スクラップ回収量が増える一方、スクラップ中の不純物が濃化し、質的な制約からリサイクルの促進に限界を生じる可能性を指摘した。また、アルミニウム素材[3-4]や銅素材[5]のマテリアルフロー分析から、異なる合金種が同一製品中に使用されているため、スクラップでは多様な合金種が混在し、ダウングレードリサイクルされている実態を定量的に明らかにした。さらに、マテリアルフロー分析を用いマクロな統計値から用

途ごとの回収率を同定することに成功した[6]。そこで、本提案では、マクロな視点でのマテリアルフロー分析とともに、ミクロな視点での使用済み耐久消費財の解体ならびに素材の分別回収の最適化に着目した。

使用済み耐久消費財の分離、解体に関する既往の研究には、大きく分けて手解体に関する研究と機械分離(シュレツダ)に関する研究がある。手分解に関しては、コスト最適な手解体手順の導出モデル[7]や、解体性の高い製品設計のためのツールとして手分解にかかる時間とリサイクル率との関係性を評価するツールの開発事例[8]がある。一方、機

機械分離に関しては、ベイジアンモデルを用いたシュレツダによる素材分離モデル[9]と、シュレツダの粒度と単一分離能の関係により機械分離を解析した研究[10-11]がある。しかし、既存研究は解体プロセスに特化しており、製品の設計、手や機械による分離・解体、回収素材の再資源化など、ライフサイクルを考慮した評価モデルの研究はなされてこなかった。実際の家電や自動車の中間処理業者では、ある程度手分解した後、シュレツダ処理することで、有益な回収物を得ている。EPR（拡大生産者責任）を適切に製造業者に反映するためには、現在の各種リサイクル法の整備だけでなく、本提案のような、ライフサイクルを通して実態をモデル化することにより、分離・解体時の素材回収率やそのコストを製品設計時や制度設計時に推計できることが望ましい。

2. 研究の目的

既存の研究において、使用済み製品の手解体や機械破碎による分離に関する検討は行われてきているものの、DfDの導入による解体プロセスの変化や、それにとまう環境負荷量の変化の定量評価に関する研究は不十分である。さらには、設計情報から想定される解体プロセスを可視化し、DfDの導入による環境負荷削減効果を定量評価することは、DfDの促進のためには有益であると考えられる。そこで、本研究では、ミクロな視点とマクロな視点から、製品設計による素材回収の可能性について評価するモデルを構築することを目的とする。特に、ミクロな視点では、DfDの導入による解体プロセスの変化を可視化し、解体・リサイクル時の環境負荷削減効果を評価する手法を構築する。また、マクロな評価として、鉄鋼材中のコンタミ元素であるCrに関して、素材が分離されないことによる影響を評価する。

3. 研究の方法

(1) 評価手法全体の模式的なフロー図を図1に示す。本評価手法では、製品に関する諸情報を入力情報とし、最適化ツールにより導出された経済最適な処理プロセスにおける環境性評価をおこなう。入力情報としての製品情報は、DfDによる変更をなるべく反映できるように、製品を構成する部品の素材種ならびに重量、部品間の接合、各接合の分離し易さ、解体順序の制約とした。DfDの導入による効果は、DfDの導入前後における製品の情報から、それぞれの分離・解体時の環境負荷量を導出し、その2つの結果の差として評価を行う。製品の分離・解体時のプロセスは、経済最適な処理プロセスが選択されるものとした。また、経済最適な処理プロセスとして導出された手順を可視化することとした。これにより、DfDによる最適プロセスの変化が分かり、評価対象としたDfDによる解体手

順の変化だけでなく、さらなるDfD化に向けて有用な情報となると考えられる(図1)。

最適化ツールについては、製品構造のモデル化、解体手順の列挙、最適手順の探索の大きく3つの部分から構成されている。製品構造のモデル化に関しては、解体プロセスごとに関連する部品情報を整理したjoint-part matrixを用い、解体手順の制約に関する情報ならびに解体にかかる時間も同表中に保持した。また、別途各単体部品の構成素材ならびに質量を部品情報として保持した。解体手順の列挙については、AND/ORグラフによって表現した。Joint-part matrixからAND/ORグラフを一意に作成するアルゴリズムを開発した。最適手順の探索には、AND/ORグラフを有効に活用するため、盲目的探索法による最適経路探索を適用した。なお、探索にあたっては、別途本研究において調査した機械破碎・分離・選別における素材の単体分離可能性(表1)を用いた。また、それにより発見された最適経路をAND/ORグラフ上で表現することができ、設計改善を提案する際の基礎情報となることがわかった。

最適な解体手順を探索する際、製品情報のほかに社会的な情報として、回収物の価値、人件費、機械破碎・分離の費用、最終処分費用などが必要となる。さらに、環境性評価においては、分離・解体プロセスにかかる環境負荷誘発量、回収物のマテリアルリサイクルによる環境負荷回避効果、最終処分の環境負荷誘発量などの社会情報が必要となる。

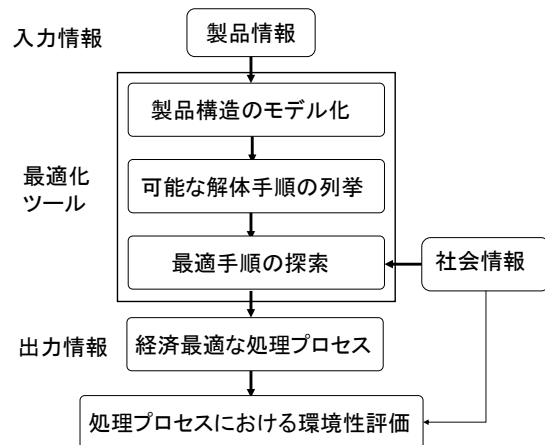


図1 製品の解体性評価ツールの概念図

表1 機械破碎における各素材の単体分離率

素材	単体分離率
鉄鋼材	95.2%
銅系素材	9.0%
アルミニウム素材	38.6%
プラスチック	94.7%

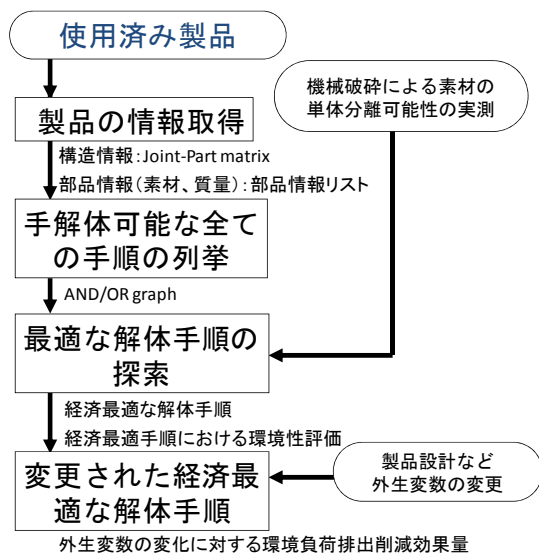


図2 構築したモデルのアルゴリズム

経済性、環境性の定量評価のために、各評価関数を設定する必要があることから、はじめに、評価対象システムを設定し、対象として含まれるすべての要素を評価関数に反映させた。本研究の評価対象システムは、使用済み製品が解体・処理プラントに搬入されてから、分離・解体されたものが最終処分されるか、マテリアルリサイクルされるまでとした。プラント内の処理プロセスは、使用済み製品の現状における主な処理プロセスである手解体と機械破碎・分離（シュレッダ）を考慮した。分離・解体されたもののうち、分離回収された各素材はマテリアルリサイクルされ、分離されなかった混合物は最終処分されるものとした。なお、マテリアルリサイクルに関して、経済性においては、回収された素材の売却益を、環境性においては回収された素材の原料としての利用による天然資源削減効果を計上することとした。これ以外の輸送プロセス、単純焼却、熱回収等のプロセスは考慮しなかった。4つの異なるプロセスを対象としたことから、評価にはそれぞれのプロセスの経済性あるいは環境性が反映されるよう、経済性と環境性の評価関数ともに、回収物の売却による収益あるいはリサイクル原料の回収による環境負荷回避効果、手解体にかかるコストと環境負荷誘発量、機械破碎・分離にかかるコストと環境負荷誘発量、最終処分にかかるコストと環境負荷誘発量の総和を評価関数とした。また、最適化にあたっては、この評価関数を目的関数とし、その制約条件は、「解体可能な手順であること」である。

(2) 五十嵐ら[12]、醍醐ら[13]によると、非磁性のステンレス鋼スクラップの循環性が高い一方、磁性を有するステンレス鋼は、分離プロセスにおいて炭素鋼と区別されるこ

となく、炭素鋼スクラップして回収されるものが多いと指摘されている。そのため、マクロ的視点として、分離されなかった場合の素材サイクルに与える影響を評価することが望まれる。そこで、特殊鋼と炭素鋼を含むすべての鋼材のフローに関わるCrのフローを明確にし、炭素鋼中でのCr濃化の可能性について分析した。分析においては、鉄スクラップの回収、消費における挙動の違いから、鉄鋼材サイクルを大きく3つに区分し、特殊鋼サイクル、転炉普通鋼サイクル、電炉普通鋼サイクルを別々に考慮した。成分は、代表的な鋼種8のJIS規格を参照し、ステンレス鋼メーカーへのヒアリングに基づき値を設定した。本研究では、統計値に基づいた動的分析により推計された特殊鋼の老廃スクラップ回収量と加工スクラップ発生量の合計から、統計から得られる特殊鋼スクラップの市中からの購入量の差分が、普通鋼スクラップとして回収された特殊鋼の量であるとして推計した。

4. 研究成果

(1) ミクロ評価では、易解体設計の導入による解体プロセスの変化をAND/ORグラフにより可視化し、解体・リサイクル時の環境負荷削減効果を評価するアルゴリズムならびに分析手法を開発し、モデルとした。経済性において最適な解体プロセスを想定し、易解体設計の導入前後における経済最適プロセスの違いを導出し、それらのプロセスにおける環境性を評価することで、易解体設計による環境負荷削減効果量を評価する手法を提案した(図2)。構築した評価手法を用い、電気ポットをケーススタディとして評価した。経済最適なプロセスは、最も高い収益部品を単体分離するプロセスであった(図3)。電気ポットにDfDの導入を想定した結果、環境負荷削減効果が定量的に評価できた。

(2) マクロ評価において、特殊鋼だけでなく、普通鋼まで含めた国内のCrの物質フローが把握された。これにより、特殊鋼サイクルから電炉普通鋼サイクルへ流出したあと、電炉普通鋼としての物質ストック量ならびに電炉普通鋼のスラグとしての環境排出量についても推計し、Crが環境圏に排出されるまでのフローとストックを把握できた。また、磁性を持つ特殊鋼では、加工スクラップと老廃スクラップの約70%が普通鋼スクラップとして混入して回収されていることがわかった。同様に、Cr系ステンレス鋼の普通鋼スクラップへの混入は40%程度と推計された。さらに、現在の生産と回収の状況が続いた場合、電炉普通鋼サイクルに流入するCr量は、今後増加することが予想された(図4)。この推計結果は、過去の数年おきの実測値とも良く合致し、本研究で推計した手法が妥当で

あることが確かめられた。これより、Crの物質循環性の向上のためには、磁性を持つ特殊鋼の特殊鋼としての回収が期待される。特に、炭素鋼への混入が生じている製品の分離、解体プロセスにおける単体分離性の向上が望まれるため、様々な製品において、分離が容易になる製品の設計を解体せ評価ツールを用いて導入することが期待される。

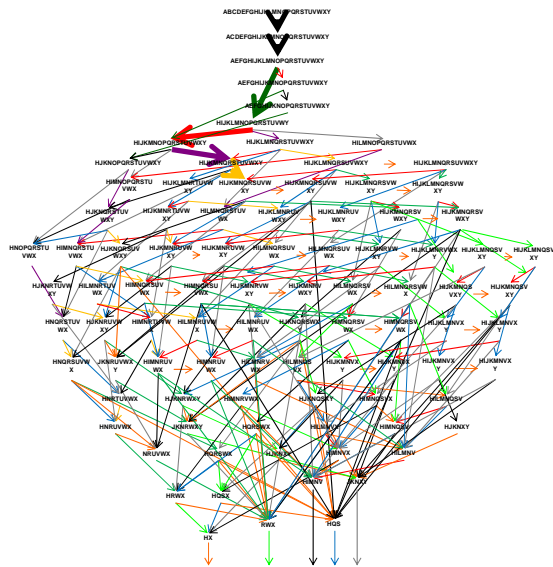
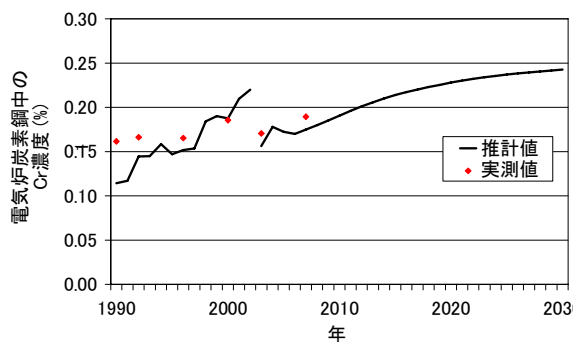


図3 対象製品(電気ポット)の最適解体手順
* 矢印の色が同じものは同じ解体プロセスを示し、太い矢印が最適解体手順における手解体プロセスを示す。

図4 炭素鋼中のCr濃度変化予測



引用文献

- [1] Y.Igarashi; I.Daigo; Y.Matsuno; Y.Adachi, ISIJ international, 47(5), 753-757, (2007)
 [2] 醍醐市朗; 藤巻大輔; 松野泰也; 足立芳寛, 鉄と鋼, 91(1), pp.179-183, (2005)
 [3] 畑山博樹; 山田宏之; 醍醐市朗; 松野泰也; 足立芳寛, 日本金属学会誌, 70(12), (2006) 975-980
 [4] 山田宏之; 畑山博樹; 醍醐市朗; 松野泰也; 足立芳寛, 日本金属学会誌, 70(12), (2006) 995-1001
 [5] 醍醐市朗; 橋本晋; 松野泰也; 足立芳寛, 日本金属学会 71(7), 563-569(2007)

- [6] I.Daigo; Y.Matsuno; Y.Adachi, Materials Transactions, 48(3), 574-578, (2007)
 [7] A.J.D. Lambert, Computers & Operations Research 34 (2007) 536-551
 [8] Katsumi Fujisaki, EcoDesign2006 Asia Pacific Symposium, Tokyo, Japan, Dec11-13, 2006
 [9] T.Gutowski, J.Dahmus, D.Albino, M.Branham, IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, Orlando, Florida, USA, May 7-10, 2007, 233-238
 [10] A. van Schaik, M.A. Reuter, K. Heiskanen, Minerals Engineering 17 (2004) 331-347
 [11] M.A. Reuter, K.Heiskanen, U.Boin, A. van Schaik, E.Verhoef, Y.Yang, G.Georgalli, Netherland (2005) pp.706
 [12] Igarashi Y, Daigo I, Matsuno Y and Adachi Y, ISIJ international, 47(5), 758-763, (2007)
 [13] Daigo I, Matsumoto Y, Matsuno Y and Adachi Y, Tetsu-to-Hagane, 95(6) 506-514 (2009)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文] (計 1件)
 - 小田隆史, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 日本における鉄鋼材の循環利用に伴うクロムの物質フロー. 鉄と鋼 95(10) 720-729 (2009)
 [学会発表] (計 6件)
 - M.Sasaki, I.Daigo, Y.Matsuno, Y.Adachi: Optimization of end-of-life processing for electric and electrical products from economical and environmental view points. 5th SETAC World Congress, Sydney, Australia, 3-7 August 2008, 46 (2008)
 - M. Sasaki, K. Fujisaki, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi. Optimization of end-of-life processing for electrical and electronic products considering disassembly and shredding. The Eighth International Conference on EcoBalance, December 10-12, 2008, Tokyo, Japan, 02-01
 - 佐々木正憲, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 手解体と機械選別を考慮した廃電気電

子機器処理プロセスの最適化モデルの構築. 日本 LCA 学会第 4 回研究発表会, 2009.Mar.5-7. 北九州. pp.218-219.

- I. Daigo, M. Sasaki, Y. Matsuno, Y. Adachi: Dismantle or shred? Analytical tool for design for disassembly in electrical and electronic equipments. LCM2009, Cape town, South Africa, 6-9 Sep 2009. OR73.
- 村田忠夫、醍醐市朗、松野泰也、足立芳寛: 易解体設計評価ツールを用いた資源価格による最適解体手順の変化の分析. 日本 LCA 学会第5回研究発表会, 2010.Mar.4-6. 横浜. pp.202-203
- 川原健吾、醍醐市朗、松野泰也、足立芳寛: 銅価格を考慮した国内鉄スクラップ中の銅混入率推計モデルの構築. 日本鉄鋼協会 2010年春季講演大会, March 28-30 2010, つくば, 19

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

醍醐市朗 (DAIGO ICHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・特任講師

研究者番号 : 20396774

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし