

博士論文審査報告書

論文題目

家電製品の環境配慮デザインとリサイクルシステムに関する研究

A study on DfE (Design for Environment) and the material recovery system
of home appliances

申請者

中嶋	崇史
Takafumi	NAKAJIMA

2013年 2月

わが国をはじめとする先進諸国においては、これまでの「大量生産・大量消費・大量廃棄」の社会システムにより経済発展を遂げる一方で、廃棄物処理や地球温暖化などさまざまな環境問題が顕在化してきた。こうしたなか、1990年代から循環型社会への転換を目指して、わが国では資源有効利用促進法の制定等、多くの施策を打ち出している。2000年に制定された循環型社会形成推進基本法では、生産者が製品の生産・使用段階だけでなく、廃棄・リサイクル段階までの責任を負うという考え方である拡大生産者責任(Extend Producer Responsibility: EPR)が導入され、各種製造業者では、3R(Reduce、Reuse、Recycle)に対応した設計手法の導入が求められている。このように、製造プロセスで直接消費するエネルギー以外の環境負荷も含めて、使用ならびに廃棄・リサイクルを含む製品のライフサイクルの全般にわたっての環境への影響に配慮することの重要性が増しており、その概念を表現する「DfE(Design for Environment)」の導入が強く求められるようになっている。

DfEを推進していくためには、その効果を評価し、製品設計へとフィードバックすることが重要であるが、統一的な判断基準がなく、また対象品目が限定されている等の課題が存在する。とくに、環境配慮型社会を構築していくには、製造業者のみならず製品のライフサイクルに関わる主体間での情報共有が重要であり、広範な製品を対象に、統一的かつ客観的評価を実施していくこと、すなわちDfEの定量評価が必要である。

これらを踏まえ、本論文ではまず、幅広い家電製品を対象にDfE定量評価データベース(以下、DB)の構築を行っている。また、それを活用して家電製品のリユース・リサイクルへの対応としての「解体性」と「ライフサイクルでの環境負荷」を評価することで、DfEの向上策について提案している。さらに、製品が使用済みとなった後のリサイクル段階の高度化に対してもDBを活用して、リサイクルプロセスの効率化に関する検討を行っている。以上をもって、環境配慮型社会の構築に資する製品設計の改善策と効率的なリサイクルプロセスの在り方を提案することを目的としている。

第1章は、序章であり、研究の背景や目的を述べている。家電製品のDfEやリサイクルシステムに関する既往の研究や取り組みを調査・分析し、今後の方向性や解決すべき課題を整理している。

第2章では、まず家電製品のDfEの定量評価に必要な基本情報を搭載したDBについて、そのコンセプトを明確にしたうえで構築し、その解析から家電製品のDfEの特徴を明らかにするとともに、効率的なDBの拡充方針を示している。

DfEは製品の企画・設計段階で導入されるべきものであり、その段階において定量評価できることが極めて重要である。そこで、DfE定量評価DBの構築では、製品の企画・設計段階の情報を基に、「解体性」と「ライフサイクル全般にわたる環境負荷」を定量評価可能な、永田研究室で開発された分解性評価指数DPI(Disassembly Property Index)と環境効用ポテンシャル評価手法E2-PA(Eco-Efficiency Potential Assessment)の活用を前提とする。

DfE定量評価DBでは、上記両手法を活用した評価に必要な項目を中心に、型番・発売年度などの製品基礎情報や素材構成、結合方法・結合点数などの7種類98項目の属性で分類・構築している。とくに、製品の素材構成と各素材・部品の結合方法や解体に使用する工具等の情報は、実際に製品を手解体することで入手した点に最大の特徴があり、DBには89品目300製品の膨大なデータが搭載されている。

このDBを活用し、各種製品のDfEに関する提案を行っている。なかでも携帯電話を中心とした分析では、素材構成や結合方式に着目し、DfEの時系列での動向や製品間の差異を明らかにしている。さらに、DB搭載されている品目のうち、製品点数が5以上あるものを対象に、素材構成割合を説明変数としたクラス

ター分析を行い、その結果として8つのグループと3つのクラスターに分類できることを示している。同一のクラスターに製品が多く分類される品目は素材構成が類似しており、一方異なるクラスター間に製品が分布する、ポータブル CD プレーヤー、ポータブル MD プレーヤー、携帯電話などは、モデルの違いなどによって素材構成が異なる製品であり、これらの品目の情報蓄積を優先することが効率的であるとしている。

第3章では、上記の DB を活用して各製品の DfE を定量評価するとともに、その結果から要求される DfE の要素ごとに類型化を図っている。さらに、デジタルカメラを取り上げて DB 搭載の解体フローを利用することで具体的な設計改善策を提示するとともに、その導入効果を定量評価している。

まず、製品の製造時と使用時の資源強度に着目した環境負荷評価を実施し、大型家電と生活家電系の小型家電は使用時の資源強度が、またデジタル家電系の小型家電では製造時の資源強度が高いことを明らかにしている。

資源セキュリティーの観点から重要性が増している希少金属に着目した環境負荷評価も実施し、希少性の評価には実装基板に含まれる金、銀と液晶パネルのインジウムを対象として関与物質総量 TMR の考え方を適用している。希少金属の環境負荷が多く占める製品としては携帯電話、ノート・デスクトップパソコン、デジタルカメラ、旧型の音楽プレーヤーやゲーム機などであり、そのうち使用時の資源強度が高い製品を「省エネ要求型」、製造時の資源強度が高い製品を「リユース・リサイクル要求型」、希少金属の関与物質総量の高い製品を「希少金属型」に類型化して、取るべき対応策を示している。

さらに、リサイクル段階で回収される素材の資源節約効果に着目し、製品の DfE とリサイクル施設における機器効率の向上の両面から、家電製品の類型化を試みている。複合材や表示なしプラスチックの質量割合が高いデジタルカメラやドライヤー、冷蔵庫などは、複合材の減少やプラスチックの表示化することが有効であり、デジタルカメラ、携帯電話、プラズマテレビなどは、積極的に基板などを回収すべき製品であることを示している。

以上の結果から、基板の積極的な回収が望まれるデジタルカメラを取り上げ、その解体性を評価することで、点在している基板の集中化といった設計改善策を提案している。

第4章では、大型家電の例として冷蔵庫を取り上げ、第2章で構築した DB と DPI とを活用することで、資源性・経済性の観点からのリサイクルプロセスの改善策を提示している。

大型家電は家電リサイクル法の枠組みで処理されており、リサイクル料金の低減に加え、再資源化率の向上も求められている。後者は、手解体を導入することでその改善が図れるが、一方で前者とはトレードオフの関係になることが多く、どの程度手解体を導入するべきかが問題である。

冷蔵庫のリサイクルプロセスを対象に、実際の解体時間に相当する指数である DPI を活用することで、手解体工程の導入レベルに応じて設定した3方式の資源性・経済性の評価を行っている。その結果、手解体工程を最も多く導入する方式は、他の方式と比較して資源売却益が3倍程度増加する一方で、人件費も同程度増加し、収益性は劣ることを示している。その対策として、いくつかの手解体工程を省略した際の資源性・経済性評価を実施し、本体切断前の制御類手回収工程を省略することが有効であることを明らかにしている。

また、評価対象とした冷蔵庫のリサイクルプロセスでは、破砕機の処理能力に余裕があることから、洗濯機を同一プロセスで混合処理することを想定し、DB を活用した資源性・経済性の評価を行っている。洗濯機を混合処理することで、現状よりも資源性・経済性が向上することを示している。

以上から、本研究で構築した DB と DPI を活用することで、製品の企画・設計段階の情報を基本とし、事前

にリサイクルプロセスの効率的な設計や対応が可能であることを明らかにしている。

第5章では、小型家電からの資源回収実験を実施し、その結果とDBの素材構成との関連を分析することで小型家電のリサイクルプロセスの設計手法を構築している。

第3章で示された類型化の結果からも分かるように、小型家電には希少金属の割合が高い製品が含まれており、資源回収が望まれるが、効率的なリサイクルプロセスが構築されていないのが現状である。

まず、埼玉県の自治体ならびに民間処理施設と連携することで、小型家電を破碎・選別した際のマテリアルバランスを把握するための実験を展開している。このなかでは、小型家電特有の結果として一般的には逆有償で処理される重ダストの性状がプラスチック中心であるために有価売却できることなどを明らかにしている。

次に、上記の実験から得られた破碎・選別後の回収品目とDB記載の製品の素材構成の情報を比較し、関連性を検討したうえで、投入した製品の素材構成からの破碎・選別後の回収品目への配分比率を明らかにしている。これによりDBの情報をを用いて破碎・選別後の資源性・経済性を推定できることを確認している。

さらに、家庭から排出される家電製品量を、DB記載の製品寿命と普及率に基づき、ポテンシャル排出量として算出し、これと先に検討した破碎・選別後の資源性・経済性の推定方法を組み合わせることで、DBの情報から回収すべき製品群の選定手法を構築している。この手法を用いて資源性あるいは経済性のいずれかを優先した場合に選定される製品群を分析し、いずれを優先しても選定結果に大きな差違のないことを確認している。

本章で構築した設計手法は、今後自治体が小型家電の回収・リサイクルプロセスを構築に当たって参照できるものであり、評価できる。

第6章では、本論文のまとめとして本研究で得られた成果を要約するとともに、今後の研究の展望について述べている。

本論文では、多くの家電製品について素材構成や解体フロー等の設計・リサイクル情報を含むDBを構築し、その解析からDfEに対する重要な指針を提供している。また、実施設での家電製品のリサイクル実験と構築したDBから、今後のリサイクルプロセスの向上に資する貴重な情報を提示している。

以上、要するに本論文は膨大で多大の労力を費やした家電製品のDBを構築し、それと実証実験との相関性を基に家電製品のDfEやリサイクルに多くの示唆を与えており、今後の環境配慮製品の開発やリサイクルの進展に多大の貢献が期待されるものである。よって、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2013年2月

(主査)早稲田大学教授

永田 勝也

早稲田大学教授

工学博士(早稲田大学)

関谷 弘志

早稲田大学准教授

博士(工学) 早稲田大学

小野田 弘士