

早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科  
博士学位論文

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

2013 年 2月

早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科  
環境配慮デザイン研究

中嶋 崇史

## 目次

第1章 序論	
1.1 本研究の背景と必要性	1-1
1.1.1 環境配慮型社会とその構築に向けた社会動向	1-1
1.1.2 家電製品の DfE の動向と従来研究	1-3
1.1.3 家電製品のリサイクルシステムの動向と従来研究	1-12
1.2 本研究の目的	1-17
1.3 本論文の構成	1-19
第2章 DfE 定量評価データベースの構築とその解析	1
2.1 目的と従来研究	2-1
2.2 DfE 定量評価データベースの構成要素に関する検討	2-2
2.2.1 DfE の要点	2-2
2.2.2 DfE 定量評価データベースのコンセプト	2-3
2.2.3 分解性評価指数 DPI の活用	2-4
2.2.4 環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA の活用	2-8
2.2.5 DfE 定量評価データベースの構成要素	2-14
2.3 DfE 定量評価データベースの構築とその方法	2-16
2.3.1 製品設計段階の情報入手方法	2-16
2.3.2 製造段階の情報入手方法	2-17
2.3.3 使用段階の情報入手方法	2-17
2.3.4 DfE 定量評価データベースの構築	2-18
2.4 DfE 定量評価データベースの解析と活用	2-20
2.4.1 個別品目に着目した解析～携帯電話を例に～	2-20
2.4.2 複数品目に着目した解析	2-28
2.4.3 リサイクルプロセスへの活用	2-30
2.5 DfE 定量評価データベースの拡充に関する検討	2-39
2.5.1 クラスタ分析を活用した DfE 定量評価データベースの拡充方針	2-39
2.6 まとめ	2-42
第3章 家電製品の DfE の定量評価とその類型化による設計改善策の提案	1
3.1 目的と従来研究	3-1
3.2 DfE の定量評価とその類型化	3-2
3.2.1 家電製品の解体性評価	3-2
3.2.2 家電製品の環境負荷評価	3-6
3.2.3 製造時と使用時に着目した環境負荷評価	3-9
3.2.4 希少金属に着目した環境負荷評価	3-10
3.2.5 環境負荷評価による各種製品の類型化	3-11

3. 2. 6 リサイクル段階からみた家電製品の類型化 .....	3-12
3. 3 DfE 向上のための設計改善策の検討 ～希少金属の環境負荷が高デジタルカメラを例に～ .....	3-17
3. 3. 1 構成部品の再生資源強度と解体性の分析 .....	3-18
3. 3. 2 解体解析を活用した設計改善策の提案 .....	3-26
3. 4 まとめ .....	3-28
第4章 大型家電のリサイクルプロセスの環境性・経済性評価～使用済み冷蔵庫を中心として～ .....	1
4. 1 目的と従来研究 .....	4-1
4. 2 DfE 定量評価データベースを活用したリサイクルプロセスの効率化に向けた評価方法の概要 .....	4-2
4. 2. 1 事前に設定する事項 .....	4-2
4. 2. 2 評価する事項 .....	4-3
4. 3 冷蔵庫のリサイクルプロセスの概要と評価方法 .....	4-3
4. 3. 1 評価対象リサイクルプロセスの設定 .....	4-3
4. 3. 2 評価対象とする冷蔵庫の設定 .....	4-4
4. 3. 3 解体時間の算出方法 .....	4-10
4. 3. 4 資源価格とマテリアルリサイクル率の設定 .....	4-10
4. 3. 5 各 CASE の経済性評価 .....	4-12
4. 4 手解体工程を導入したリサイクルプロセスの環境性・経済性の比較 .....	4-16
4. 4. 1 リサイクルプロセスの課題抽出 .....	4-16
4. 4. 2 課題プロセスの影響度の評価 .....	4-19
4. 4. 3 リサイクルプロセスの改善策の提案 .....	4-21
4. 4. 4 改善案の効果の試算 .....	4-21
4. 4. 5 外部要因の影響度の評価 .....	4-22
4. 5 DfE 定量評価データベースを活用した大型家電の混合処理の評価 .....	4-23
4. 5. 1 DfE 定量評価データベースの活用方法 .....	4-23
4. 5. 2 大型家電の混合処理における評価の前提条件 .....	4-25
4. 5. 3 大型家電の混合処理における環境性・経済性評価 .....	4-27
4. 6 まとめ .....	4-28
第5章 小型家電のリサイクルプロセスの設計手法の構築とその評価 .....	5-1
5. 1 目的と従来研究 .....	5-1
5. 2 使用済み小型家電のリサイクルプロセスの実験とその評価 ～埼玉県をフィールドに～ .....	5-3
5. 2. 1 実験の目的と概要 .....	5-3
5. 2. 2 評価モデルの設定 .....	5-3
5. 2. 3 各評価モデルの実験結果の整理 .....	5-4
5. 2. 4 各評価モデルの環境性・経済性評価 .....	5-7
5. 3 投入物と回収物の関連性の検討と製品群の環境性・経済性評価 .....	5-11

5. 3. 1	ポテンシャル排出量を考慮した製品の環境性・経済性評価	5-11
5. 3. 2	リサイクルプロセスにおける投入物と回収物の関連性の検討	5-15
5. 3. 3	先進的事例における投入物と回収物の環境性・経済性の推定	5-19
5. 4	DfE 定量評価データベースを活用した回収品目の選定手法の構築	5-27
5. 4. 1	DfE 定量評価データベースを活用した回収品目の選定手法の構築	5-27
5. 4. 2	評価方法	5-27
5. 4. 3	回収品目の選定方法	5-27
5. 4. 4	環境性を考慮した回収品目の選定	5-27
5. 4. 5	経済性を考慮した回収品目の選定	5-30
5. 4. 6	環境性・経済性の両面を考慮した回収品目の選定	5-34
5. 5	まとめ	5-36
第 6 章	結論および今後の展望	1
6. 1	結論	6-1
6. 1. 1	DfE 定量評価データベースの構築とその解析	6-1
6. 1. 2	家電製品の DfE の定量評価とその類型化による設計改善策の提案	6-1
6. 1. 3	大型家電のリサイクルプロセスの環境性・経済性評価 ～使用済み冷蔵庫を中心として～	6-2
6. 1. 4	小型家電のリサイクルプロセスの設計手法の構築とその評価	6-3
6. 2	今後の展望	6-4
6. 2. 1	DfE 定量評価データベースの拡充について	6-4
6. 2. 2	DfE 定量評価データベースと DfE 評価結果の利用方法について	6-6
6. 2. 3	研究成果の社会システムへの適用について	6-10

参考文献

謝辞

Appendix

# 第 1 章

## 序 論

## 第1章 序論

1.1 本研究の背景と必要性 .....	1-1
1.1.1 環境配慮型社会とその構築に向けた社会動向 .....	1-1
1.1.2 家電製品の DfE の動向と従来研究 .....	1-3
1.1.3 家電製品のリサイクルシステムの動向と従来研究 .....	1-12
1.2 本研究の目的 .....	1-17
1.3 本論文の構成 .....	1-19

図 1.1 環境配慮デザインの必要性 .....	1-3
図 1.2 研究目的 .....	1-19

表 1.1 製品アセスメントガイドラインの評価項目と評価基準① .....	1-4
表 1.2 製品アセスメント評価項目と取組み内容 .....	1-9
表 1.3 取組み内容の具体的内容 .....	1-10
表 1.4 家電製品の DfE とそのデータベースにかかわる従来研究 .....	1-12
表 1.5 家電リサイクル法における関係者の役割 .....	1-14
表 1.6 家電製品のリサイクルシステムに関する従来研究 .....	1-16

## 第1章 序論

### 1. 1 本研究の背景と必要性

#### 1. 1. 1 環境配慮型社会とその構築に向けた社会動向

我が国をはじめとする先進諸国においては、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、廃棄物処理問題等が顕在化し、環境配慮型社会システムへの転換が喫緊の課題となっている。

1950年代から1980年代の高度経済成長期には、水俣病やイタイイタイ病に代表される公害問題が環境問題の中心となった<sup>1-1)</sup>。その原因は、工場からの汚染された排水や排ガスに起因するものであり、工場の排出口での汚染物質への対策が取られるようになった。また、同時期には廃棄物処理も重要な環境問題の一つとして捉えられるようになった。経済発展に伴い、1人当たりの排出量の増加による処理量の増加、ならびに都市ごみ中のプラスチック混入率の増加、粗大ごみの増加による質的多様化に対処する必要が生じ、焼却施設や粗大ごみ処理施設といった中間処理施設の設置による廃棄物の無害化・減容化が図られるようになる。このように、1980年代までは、環境汚染源の出口に対する環境技術、すなわち、End of Pipe Technology<sup>1-2)</sup>による対応が中心であった。一方で、End of Pipe Technologyについては、膨大な設備投資が必要であり、企業の負担だけでなく、国家予算、一次産業への影響など、社会的費用の増加をもたらした。そこで、環境汚染源の出口ではなく、その原因に遡って対策を取るというCleaner Production (CP)<sup>1-3)</sup>という考え方が生まれてきた。CPの例として、有害物質の使用量削減や有害な物質をプロセス内で回収再利用するといったことが挙げられる。

こういった背景を基に、我が国では、環境に関する各種法規制が導入されている。2000年に制定された循環型社会形成推進基本法<sup>1-4)</sup>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)の考え方が示され、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。一方で、大量生産・大量消費・大量廃棄の従来型社会システムは、廃棄物問題のみならず、エネルギーの使用に由来する二酸化炭素を代表とした温室効果ガスの排出によって引き起こされる地球温暖化問題も生じさせており、1999年には地球温暖化対策推進法が制定された<sup>1-5)</sup>。同法の中では、京都議定書で我が国に課せられた目標である温室効果ガスの1990年比6%の削減を達成するために、国、地方公共団体、事業者、国民の責務、役割が明記された。また、エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)<sup>1-6)</sup>は、社会情勢に合わせて改正され、規制対象の一つである「機械器具に係る措置」においては、エアコンやテレビといった23の指定機器を対象に、各指定機器の特性に応じて、現在商品化されている製品のうち、最も優れている機器の性能以上の「省エネ基準」を設ける「トップランナー制度」が導入されており、製造業者に使用時の省エネルギー化が義務化されている。さらに、環境配慮型製品の識別やリサイクル業者に有害物資の含有情報を提供することを目的に、

2006年には「資源有効利用促進法」<sup>1-7)</sup>が一部改正され、指定省資源化製品及び指定再利用促進製品に指定されている製品のうち、パーソナルコンピュータ等の製品を対象に、有害物質の含有量に関する表示が義務化された(J-MOSS)。化学物質については、2010年に改正された「化学物質排出把握管理促進法」に基づき、有害性のある多種多様な化学物質が、どのような発生源から、どれくらい環境に排出されたか、あるいは廃棄物に含まれて事業所の外に運び出されたかというデータを把握し、集計し、公表する仕組み、いわゆるPRTR制度における対象物質が拡充された。

一方で、海外においても、各種法規制が導入されている。2003年には、WEEE(Waste Electrical and Electronic Equipment)指令<sup>1-8)</sup>が発行され、廃電気・電子機器の不法な処理による自然環境汚染の防止を目的に、その回収・リサイクルシステムの構築を要求している。同年には、RoHS(Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment)指令<sup>1-8)</sup>が発行され、2006年7月1日以降に販売される電気・電子機器について、鉛、水銀、カドミウム、六価クロム、2種類の臭素系難燃剤(PBBおよびPBDE)の6種類の物質の含有の禁止を規定した。2005年に発行されたEuP指令(エネルギーを使用する製品に対するエコ・デザイン要求の設定の枠組みを設けることに関する欧州会議および理事会指令)<sup>1-9)</sup>では、製品を市場に投入する際に満たさなくてはならない要求事項を規定している。原材料の選択、製造、包装・輸送および流通、設置および保守、使用、エンド・オブ・ライフといったライフサイクル全般にわたって環境配慮設計のパラメータを明記している。さらに、消費者が製品に関わる環境側面を比較できるように、商品に付属した製品の環境特性やパフォーマンスに関する情報やエンド・オブ・ライフの段階において、解体、リサイクルあるいは処理・処分に関する情報を提供することを求めている点に特徴がある。電気・電子機器の設計段階における環境配慮のアプローチを規定する流れを示すものであるといえる。

2007年にはREACH規則(the Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals)<sup>1-10)</sup>が発行され、有害性のある多種多様な化学物質が、どのような発生源から、どれくらい環境に排出されたか、あるいは廃棄物に含まれて事業所の外に運び出されたかというデータを登録する必要がある。トリクロロベンゼン、トルエン、カドミウム、ベンゼン、アスベスト繊維、ポリ臭素化ビフェニル類の使用が禁止された。

このように、製造業者に対しては、製造プロセスから直接消費するエネルギー以外の環境負荷も含めて、使用段階、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環境への影響を配慮すること」の重要性が増しており、その概念を導入した「環境配慮デザイン(DfE)」<sup>1-11)</sup>の導入が強く求められるようになってきている(図1.1)。



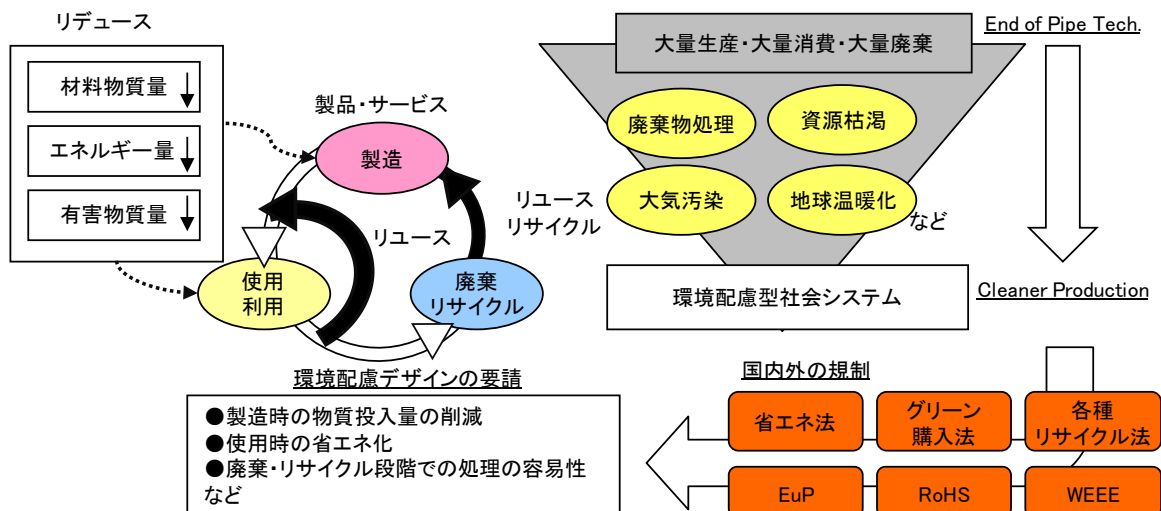


図 1.1 環境配慮デザインの必要性

### 1. 1. 2 家電製品の DfE の動向と従来研究

#### (1) 製品アセスメントと環境配慮デザインに関するガイドライン

DfE を広範に推進していくためには、これらの効果を確実に評価し、効率的なフィードバックを行うことが重要である。その代表的な手法として、製品アセスメントが挙げられる。家電製品では、「家電製品アセスメントマニュアル(財団法人家電製品協会)」<sup>1-11)</sup>が定められている。本マニュアルにおいては、環境配慮デザインに含まれる項目について表 1.1 に示す評価基準や評価方法が定められている。

表 1.1 製品アセスメントガイドラインの評価項目と評価基準

評価項目		評価基準		内容
1	減量化	1-1	製品の減量化・減容化	1-1-1 製品は減量化・減容化されているか
		1-2	主な原材料・部品の減量化・減容化	1-2-1 原材料は減量化されているか
				1-2-2 部品は減量化・減容化されているか
		1-3	希少原材料の減量化	1-3-1 希少原材料は減量化されているか
1-4	有害物質等の減量化	1-4-1 有害物質等，リサイクルの阻害要因となる原材料は減量化されているか		
2.	再生資源・再生部品の使用	2-1	再生資源の使用	2-1-1 再生資源を使用しているか
		2-2	再生部品の使用	2-2-1 再生部品を製品製造時に使用しているか
				2-2-2 再生部品を保守・修理時に使用可能か
3.	長期使用の促進	3-1	製品の耐久性向上	3-1-1 製品の耐久性向上が図られているか
		3-2	部品・材料の耐久性向上	3-2-1 耐久性の高い部品・材料を使用しているか
		3-3	保守・修理の可能性・容易性向上	3-3-1 保守・修理の必要性の高い部位を特定しているか
				3-3-2 保守・修理の必要性の高い部位について，部品等の共通化が図られているか
				3-3-3 保守・修理の必要性の高い部位にアクセスしやすい構造・組立方法となっているか
				3-3-4 保守・修理時の安全性に配慮しているか
4.	収集・運搬の容易化	4-1	収集・運搬時の作業性向上	4-1-1 前後・左右の質量バランスが適切で，安全かつ容易に収集・運搬が行えるか
				4-1-2 質量または容量の大きい製品の場合，把手や車輪が適切に配置されているか
		4-2	収集・運搬時の積載性向上	4-2-1 積載効率の向上が図りやすく，荷崩れを起こしにくい形状か
		4-3	事前に分解を要する場合の環境保全等への対応	4-3-1 分解時に環境負荷物質の漏出や作業上の危険はないか
5	再資源化の可能性の向上	5-1	再資源化可能な原材料・部品の使用	5-1-1 再生資源として利用可能な原材料が使用されているか
		5-2	再資源化可能率の向上	5-1-2 再生資源・再生部品として利用可能な部品が使用されているか
				5-2-1 製品全体として再資源化可能率は向上しているか

表 1.1 つづき 製品アセスメントガイドラインの評価項目と評価基準

評価項目		評価基準		内容
6	分離・分別処理の容易化	6-1	分離・分別対象物の明確化	6-1-1 分離・分別する部位を特定しているか
		6-2	材料・部品の種類及び点数の削減	6-2-1 材料の共通化は図られているか
				6-2-2 部品の共通化は図られているか
				6-2-3 部品の点数は削減されているか(ユニット化等含む)
		6-3	分離・分別のための表示	6-3-1 分離・分別すべき部位の識別は容易か
				6-3-2 合成樹脂製部品には材質が適切に表示されているか
				6-3-3 小型二次電池及び同使用製品等に係る表示等が適切になされているか
		6-4	材料・部品の分離・分別容易性	6-4-1 分離が容易な構造・組立方法となっているか
				6-4-2 複合材料の使用は削減されているか
				6-4-3 大型部品の材料の共通化は図られているか
				6-4-4 複合材料を使用している場合、素材ごとの分離は容易か
				6-4-5 小型二次電池を使用している場合、取り出しやすい構造か
7	破碎・選別処理の容易化	7-1	破碎の容易性	7-1-1 破碎機による破碎処理が容易か
				7-1-2 破碎機に投入可能な寸法か
				7-1-3 爆発性・有害性を有する物質は含まれていないか
				7-1-4 設備や再生資源を損傷、汚染する物質はないか
				7-1-5 破碎処理の阻害要因となる原材料・部品が含まれている場合、その分離は容易か
		7-2	選別の容易性	7-2-1 類似した物性を持つ異種原材料が併用されていないか

表 1.1 つづき 製品アセスメントガイドラインの評価項目と評価基準

評価項目		評価基準		内容	
8	包装	8-1	包装の減量化・減容化・簡素化	8-1-1	包装材は減量化・減容化・簡素化されているか
				8-1-2	使用済み包装の寸法を小さく、または小さく分割できないか
		8-2	再資源化の可能性の向上	8-2-1	複合材料の使用は削減されているか
				8-2-2	材料の共通化は図られているか
				8-2-3	複数材料が使用されている場合、素材ごとの分離は容易か
		8-3	有害性・有毒性	8-3-1	適正処理・リサイクルの障害となる物質が使用されていないか
		8-4	包装材の表示	8-4-1	包装材には法令等に基づく表示が適切になされているか
8-5	再生資源の使用	8-5-1	再生資源を利用した包装材が使用されているか		
9	安全性・環境保全性	9-1	製品に含まれる環境負荷物質の禁止・削減・管理	9-1-1	製品に含まれる環境負荷物質に関連する法令を遵守しているか
				9-1-2	製品に含まれる環境負荷物質に関連する業界または自社による自主基準を満たしているか
		9-2	製造工程で使用される環境負荷物質の禁止・削減・管理	9-2-1	製造工程で使用される環境負荷物質に関連する法令を遵守しているか
				9-2-2	業界または自社による自主的基準を満たしているか
		9-3	使用段階における安全性	9-3-1	使用段階における安全性に関連する法令を遵守しているか
				9-3-2	保守・修理時の安全性に配慮しているか
		9-4	リサイクル段階における安全性・環境保全性	9-4-1	リサイクル段階における安全性に配慮しているか
				9-4-2	リサイクル施設に悪影響を及ぼさないよう配慮しているか
				9-4-3	リサイクル及びそれ以降の段階で環境負荷の原因となりうる物質の削減は図られているか
		10	環境保全性	10-1	使用段階における省エネ性
10-1-2	待機時のエネルギー消費量は削減されているか				
10-2	消耗材の消費量削減			10-2-1	製品使用時の消耗材消費量は削減可能か

表 1.1 つづき 製品アセスメントガイドラインの評価項目と評価基準

評価項目		評価基準		内容	
11	情報の開示	11-1	情報提供対象者の明確化等(全般的事項)	11-1-1	情報を提供すべき対象者が明確に把握され、表示されているか
				11-1-2	情報提供の項目・内容・表現方法・表示方法(場所)等は適切か
		11-2	容器包装の分別排出・分別収集促進のための情報提供(販売店、運搬・据付業者、ユーザー向け)	11-2-1	関係法令、工業会ガイドライン等に基づく表示がなされているか
		11-3	長期使用のための情報提供(ユーザー、修理業者向け)	11-3-1	保守・修理など長期使用に役立つ情報について容易に知ることができるようになっているか
				11-3-2	故障診断とその処置、安全性等に関する情報を修理業者に提供できるか
		11-4	製品廃棄時の注意事項に係る情報提供(ユーザー向け)	11-4-1	ユーザーが製品を廃棄する際に、環境及び安全・衛生面で特に注意すべき事項について、取扱説明書等にわかりやすく記載されているか
		11-5	収集・運搬に係る情報提供(販売店、運搬・据付及び収集・運搬業者向け)	11-5-1	使用済み製品を収集・運搬する際の注意事項について容易に知ることができるようになっているか
		11-6	リサイクル・廃棄物処理に係る情報提供(ユーザー、リサイクル・廃棄物処理業者向け)	11-6-1	環境保全の促進、処理時の安全性確保のため特に注意すべき事項について、本体、付属品に記載されているか
11-6-2	リサイクルの促進及び環境保全の促進、処理時の安全性確保に資する情報を記載した資料(処理マニュアル類)が整備されているか				
12	LCA	12-1	製品のライフステージごとの環境負荷の把握	12-1-1	素材・製造・輸送・使用・廃棄の各段階の環境負荷が分かっているか
		12-2	環境負荷低減の可能性	12-2-1	環境負荷の低減ができるか
13	製造段階における環境負荷低減	13-1	有害性・有毒性	13-1-1	環境負荷物質の使用は削減されているか
				13-1-2	使用する場合、工場外への環境負荷は低減されているか
		13-2	廃棄物等	13-2-1	副産物(産業廃棄物等)の発生量は削減されているか
				13-2-2	副産物は適正処理・リサイクルされているか
		13-3	省エネ性	13-3-1	生産工程でのエネルギー消費量は削減されているか
13-4	その他環境負荷低減	13-4-1	大気・土壌・地下水の汚染等の公害防止に努めたか、		

表 1.1 つづき 製品アセスメントガイドラインの評価項目と評価基準

評価項目		評価基準		内容	
14	流通段階における環境負荷	14-1	製品及び包装材の減量化・減容化等	14-1-1	製品は減量化・減容化されているか
				14-1-2	包装材は減量化・減容化・簡素化されているか
	低減	14-2	輸送方法の工夫	14-2-1	輸送方法の工夫による省エネ, 環境負荷低減が図られているか

こうした中、事業者において DfE に関する取組みが進められている。家電製品協会では、その事例集を WEB 上で公開しており、テレビ、エアコン、冷蔵庫、洗濯機、電子レンジを中心として、187 事例が掲載されている<sup>1-12)</sup>。一例として、(株)東芝の液晶テレビを取り上げ、公開内容を示す。表 1.2 は製品アセスメントマニュアルの評価項目と取組み項目を示したものである。表 1.3 に取組み内容の具体的項目を挙げた。具体的な項目をみると、「再生資源・再生部品の使用」「環境保全性」については、内容のみの記載となっており、定量的に評価がされていない。また、「使用段階における省エネ・省資源等」、「減量化・減容化」、「包装」については、具体的数値が記載されており、その改善効果が定量的に把握されている一方で、あくまでも従来機種との比較に留まっていることから、異なる製品間や他社製品との比較をすることができない。つまり、環境配慮デザインの評価基準について、統一的な判断基準がないことや、対象品目が限定されているという課題が存在し、DfE が定量化されているとはいえない。特に、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極めて重要であり、広範な製品を対象に、統一的な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。

表 1.2 製品アセスメント評価項目と取組み内容

番号	評価項目	取組み
1	減量化・減容化	◎
2	再生資源・再生部品の使用	◎
3	再資源化の可能性の向上	○
4	長期使用の促進	○
5	収集・運搬の容易化	○
6	手解体・分別処理の容易化	○
7	破碎・選別処理の容易化	○
8	包装	◎
9	安全性	○
10	環境保全性	◎
11	使用段階における省エネ・省資源等	◎
12	情報の提供	○
13	製造段階における環境負荷低減	○
14	LCA(ライフサイクルアセスメント)	○

表 1.3 取組み内容の具体的内容

評価項目	具体的内容
対象製品	32BE3(2011年発売)
比較製品(従来機器)	32A2(2010年発売)
概要	<p>新開発半導体「ecoチップ」搭載により待機電力ゼロワット*1を実現し、32V型ハイビジョンLEDバックライト採用するなど、省エネに配慮した液晶テレビを商品化した。</p> <p>※1「エコ待機」モード設定時、約10時間以上待機状態が続くと大容量キャパシタを充電するために約3分間平均0.5W程度の電力を消費する。</p>
使用段階における省エネ・省資源等	リモコンの「電源」ボタンでオフにすると、大容量キャパシタに充電された電力で「ecoチップ」が動作し、AC電源を切断することによって、待機電力ゼロワットを実現した。リモコン操作だけでAC電源プラグを抜いたときと同等の待機電力ゼロワット効果が得られるとともに、待機電力ゼロワット時でも「ecoチップ」により、リモコン操作が可能となる。また、低消費電力のLEDバックライト液晶を採用したことなどにより、年間消費電力量で従来機種と比較して、27%(62→45kwh/年)の削減を行った。
減量化・減容化	機構部品の工夫などにより、従来機種と比較して、本体質量について5%(9.5→9.0kg)の削減を行った。
再生資源・再生部品の使用	テレビ本体側面のボタン部品に自己循環の再生プラスチックを使用した。
環境保全性	J-Mossに対応
包装	スタンドを本体から分離して同梱することにより、従来機種と比較して、包装質量を11%(13.5kg→12.0kg)削減し、包装容積を18%(966×560×138mm→912×544×124mm)削減した。

## (2) 家電製品の DfE とそのデータベースにかかわる従来研究

DfE の定量評価として、リユース・リサイクルへの対応である製品の解体性とライフサイクル全般にわたる環境影響が重要である。解体性の評価という点において、大西らは、家電製品を対象に結合方法を評点化（はめ込み：1点、ボルト・ネジ等：3点、溶接・接着：5点）する方法を提案している<sup>1-13</sup>。また、赤堀らは、リサイクル可能率と解体時間・コストの関係を算出できる REM というリサイクル性評価法を提案している。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、各接合の分離しやすさ、解体順序などの情報に基づき、解体性の向上効果を評価する方法を提案している<sup>1-14</sup>。一方、ライフサイクル全般にわたる環境負荷の評価という点において、フィンクベイナーが自動車産業を対象に資源枯渇性観点から評価を行っている<sup>1-15</sup>。

広範な製品を対象とした DfE の定量評価という点において、小林らは、産業関連表と各種統計表から環境負荷原単位データベースを構築し、それを搭載した「Easy-LCA」を開発している<sup>1-16</sup>。また、田原らは、産業関連表に基づき構築されているデータベースに PRTR データを導入することで、LCA の実施に必要なインベントリデータを拡充する方法を提案している<sup>1-17</sup>。さらに、山



末らは、ブラウン管テレビ、液晶テレビ、冷蔵庫、洗濯機、エアコン、電子レンジを対象に、リサイクル工場での分解・解体、破碎・選別、製錬工程を評価範囲として、そのリサイクル工程の TMR を算出している<sup>1-18)</sup>。以上に述べた易解体性評価に関する従来研究を表 1.4 に整理した。製品の環境負荷や解体性の評価に関する手法の開発や製品の評価、さらにはリサイクルシステムへの環境配慮デザインの影響が検討されているが、個別の製品に対するアプローチが中心となっている。また、幅広い製品の評価という点においては、その評価に必要なデータベースの構築が行われているが、統計データに基づくものが中心的であり、環境負荷評価そのものは可能であっても、製品設計へのフィードバックとしては効果的ではない。

表 1.4 家電製品の DfE とそのデータベースにかかわる従来研究

研究題名	研究者	年度	概要
家庭電化製品に対する分解性評価方法の検討	大西宏 (松下電器産業)	1995	全自動洗濯機を実際に分解した結果から、結合の解除に要した時間に対応して結合種類を分類できることを明らかにし、テレビなどを対象に、結合種類から試算される分解指数の合計と実際に結合解除に要した総時間が比例関係にあることを示した。
リサイクル性評価方法の家電製品への適用事例(プラズマのリサイクル率、リサイクルコストの評価)	赤堀友彦 (東京大学)	2008	リサイクル可能率と解体時間・コストの関係を算出できる REM というリサイクル性評価法を用い、プラズマテレビに適用することで、リサイクル可能率とリサイクルコストを算出した。
易解体設計の導入による環境負荷削減効果の評価手法の構築	醍醐市朗 (東京大学)	2010	製品に導入された解体性向上に関する環境配慮設計が製品のリサイクルシステムに与える環境性・経済性について評価可能な手法を開発し、電気ポット例にその評価手法を適用した。
Design for Resource Efficiency	Matthias Finkbeiner (Technische Universität Berlin)	2011	自動車産業を対象として、環境的視点から枯渇性資源の再利用に関する有効活用の可能性を定量化している。
産業関連分析に基づく温室効果ガス排出原単位の推計と製品 LCA への適用	小林由典 (東芝)	2003	産業連関表及び各種統計表から環境負荷原単位データベースを構築し、それを搭載した「Easy-LCA」を開発し、ノートパソコンとエアコンに適用することで、LCA を実施した。
PRTR データの既存インベントリデータの導入に関する検討	田原聖隆 (産業技術総合研究所)	2007	LCA の実施に必要なインベントリデータの拡充として、PRTR データの既存インベントリデータへ導入し、さまざまな製品へ利用されている石油製品等の環境負荷評価を行った。
使用済み家電製品からの素材リサイクルに伴う関与物質総量(都市鉱石 TMR)の推算と評価	山末英嗣 (京都大学)	2010	ブラウン管テレビ、液晶テレビ、冷蔵庫、洗濯機、エアコン、電子レンジを対象に、リサイクル工場での分解・解体、破碎・選別、製錬工程を評価範囲として、そのリサイクル工程の TMR を算出した。

### 1. 1. 3 家電製品のリサイクルシステムの動向と従来研究

#### (1) 大型家電製品のリサイクルシステムの動向

我が国では、1998年に「特定家庭用機器再商品化法」、いわゆる「家電リサイクル法」が制定された。同法は2009年に改正され、当初の指定品目であった、

ブラウン管テレビ，冷蔵庫・冷凍庫，エアコン，洗濯機に加えて，液晶テレビ・プラズマテレビ，衣類乾燥機が追加された<sup>1-19)</sup>。制定の背景には，「市町村による大型家電の適正処理困難性」と「一般廃棄物最終処分場容量の逼迫」が存在する。また，廃棄物処理問題以外にも，少資源国である我が国における資源の有効活用という点も制定の背景として存在する。同法の制定前の処理方法の中心は，直接埋め立てや鉄資源の回収を中心とした破碎処理であり，「資源の有効利用」ではなく「廃棄物処理」の観点を中心である。こうした中，同法においては，対象製品毎に再商品化率が法定義務として課され，「単なる処理から一層高度な水準のリサイクルへ」と舵が切られた。この中で，関係者の役割は表 1.5 に示す通りである。

表 1.5 家電リサイクル法における関係者の役割

関係者の区分	役割
製造業者及び輸入業者 (製造業者等)	<p>◆引取り義務</p> <p>製造業者等は、予め指定した引取場所において、自らが製造等した対象機器の廃棄物の引取りを求められたときは、それを引き取る。</p> <p>引取場所については、対象機器の廃棄物の再商品化等が能率的に行われ、小売業者・市町村からの円滑な引渡しが確保されるよう適正に配置する。</p> <p>◆再商品化等実施義務</p> <p>引き取った対象機器の廃棄物について、少なくとも基準(エアコン 60%以上、冷蔵庫 50%以上、テレビ 55%以上、洗濯機 50%以上)以上の再商品化等を実施する。</p> <p>製造業者等は、再商品化等の実施の際に、エアコンと冷蔵庫に含まれる冷媒用フロン・代替フロンを回収して、再利用又は破壊を行う。</p>
小売業者	<p>◆引取り義務</p> <p>次に掲げる場合において、対象機器の廃棄物を引き取る。</p> <p>①自らが過去に小売販売をした対象機器の廃棄物の引取りを求められたとき</p> <p>②対象機器の小売販売に際し、同種の対象機器の廃棄物の引取りを求められたとき</p> <p>◆引渡し義務</p> <p>対象機器の廃棄物を引き取ったときは、中古品として再利用する場合を除き、その対象機器の製造業者等(それが明らかでない時は指定法人)に引き渡す。</p>
消費者	<p>対象機器の廃棄物の再商品化等が確実に実施されるよう小売業者等に適切に引き渡し、収集・再商品化等に関する料金の支払いに応ずる等本法に定める措置に協力する。</p>
市町村	<p>その収集した対象機器の廃棄物を製造業者等(又は指定法人)に引き渡すことができる。(但し、自ら再商品化等を行うことも可能。)</p>

これまでに、家電リサイクル法は「最終処分場の延命化」や「資源の有効利用」などの点で成果を挙げている。

一方で、「リサイクル料金の低減」や「再商品化率の在り方」などの課題も指摘されている<sup>1-20)</sup>。家電リサイクル法では、その再商品化に関わる費用負担を消費者が担っており、この費用負担を低減することは「消費者の廃棄物の適正排出」や「不法投棄の削減」の観点から重要であるが、メーカーにおける再商品化費用については公表されていない現状が存在する。エアコンについては平成19年にリサイクル料金が引き下げられたものの、その他の製品については、同法の施行以来下がっていないのが実情である。また、再商品化率については、政令で定められた基準値を超える成果を上げているが、資源有効利用の観点からはより一層の向上が求められるとともに、その質の向上も必要である。

こうした課題を解決していくためには、「リサイクル料金の低減」と「再商品化率の向上」の両面から、効率的なりサイクルプロセスを設計する必要がある。家電リサイクル法においても、再商品化等料金の設定について、「再商品化等に必要な行為を能率的に実施した場合における適正な原価を上回るものであってはならない」(第20条第2項)と規定する一方、「排出者の適正な排出を妨げ

ることのないよう配慮しなければならない」と規定されている<sup>1-21)</sup>。

## (2) 小型家電製品のリサイクルシステムの動向

我が国では、2012年3月9日に「使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律」、いわゆる「小型家電リサイクル制度」が閣議決定され、国会での可決を待っている状況である<sup>1-22)</sup>。同制度の背景には、「資源セキュリティの向上」と「小型家電が家庭等から適切に排出されていないこと」が存在する。

1年間に使用済みとなる小型電子機器の重量は65.1万tと推計されている。また、有用金属の鉱種別含有量は、タンタル33.8t(国内需要量の9.4%)、金10.6t(同6.4%)、銀68.9t(同3.7%)、パラジウム4t(同3.1%)となっており、我が国が輸入に依存する金属類の一定の需要量を占めている。また、一般消費者においては、小型電子機器等の47.9%が排出される一方で、残りの52.1%は家庭内に退蔵しているとの調査結果も存在する。退蔵分の55.8%(全体の29.1%)がその後に排出されているものの、それでも全体の23.0%が退蔵していることになる。こうした中、先進的取り組みとして、自治体と民間のリサイクラーが連携した「使用済小型家電の回収モデル事業」<sup>1-23)</sup>が行われており、以下の課題が存在する。

- ① 収集コストの観点から広域的な収集運搬が不可欠であり、業の許可を不要とする制度や緩和措置を講ずべきであること(廃棄物処理法の適用を除外すること)。
- ② 自治体からの有価売却後のリサイクルが中心的であるが、市況変動の影響で有価取引が継続できなくなった場合に、リサイクルの取組がスムーズに行われなくなるおそれがあること。

このように、法的な制約に加えて、リサイクルシステムの継続性の問題が指摘されており、経済性の観点を考慮した収集回収品目の検討が必要である。

## (3) 家電製品のリサイクルシステムにかかわる従来研究

家電リサイクル法の経済性という点において、羽田らは、社会適用費用の削減という観点から、リサイクルシステムの採算性の分析を行っている<sup>1-24)</sup>。また、家電リサイクル法の導入効果について、物質収支という観点から、李らは、破碎選別施設で回収された資源を手選別で組成分析を行っている<sup>1-25)</sup>。さらに、再商品化物の性能という観点から、松尾らは、新規樹脂との機械的特性やロット間のばらつきについて評価している<sup>1-26)</sup>。

使用済み小型家電のリサイクルシステムについては、発生台数の観点から、小口らは、家庭・事業所を対象に保有状況のアンケート調査を行い、使用年数分布の推定と2003年度から2008年度の使用済み製品の発生台数の推計を行っている<sup>1-27)</sup>。また、狩野らは、人口の二次分布による比較や空間解析が可能なGISによる解析によって、回収BOX配置場所と人口分布から回収量の推定を行っている<sup>1-28)</sup>。さらに、相澤らは、ゲーム機器、携帯電話の8品目を対象に、日本における廃棄量および含有物質の潜在的な含有量の試算を行っている<sup>1-29)</sup>。村上らは、使用済み携帯電話のマテリアルフローについて、消費者へのアンケ

ート調査と統計情報を用いて推定するとともに、そこに含有する金属量を価格の観点から評価している<sup>1-30)</sup>。

以上に述べた家電製品のリサイクルシステムに関する従来研究を表 1.6 に整理した。大型家電のリサイクルシステムについては、採算性や資源化率、リサイクル材の特性評価などが行われているが、具体的なシステムの改善方法について製品設計の観点からアプローチしている事例はない。また、小型家電のリサイクルシステムについては、使用年数の推定に基づく発生台数の推計や、個別製品のマテリアル分析などが行われているが、小型家電全般を一体的に取り扱い、そのリサイクルシステムの設計手法を構築する研究はない。

表 1.6 家電製品のリサイクルシステムに関する従来研究

研究題名	実施主体・研究者	年度	概要
循環型産業システム構築と家電リサイクルシステム	羽田裕 (名古屋市立大学)	2004	家電リサイクル法対象品目を対象に、リサイクルにおける社会的費用の削減という観点から、家電リサイクルシステムの採算性の分析を行った。
家電リサイクル法施行前後における不燃・粗大ごみ資源化状況に関する研究	李博洋 (山口大学)	2008	家庭系不燃・粗大ごみ破碎選別施設を主対象として、破碎選別後の試料について手選別による組成分析を行い、家電リサイクル法施行前後の物質収支の状況を調査した。
使用済み家電混合プラスチックのマテリアルリサイクル技術	松尾雄一 (三菱電機)	2009	家電リサイクル法対象品目由来の混合プラスチックから選別回収した PP リサイクル材を用いて、機械的特性評価およびロット間のバラツキ評価を行い、新材 PP 樹脂と比較した。
電気・電子製品 23 品目の使用年数分布と使用済み台数の推計	小口正弘 (横浜国立大学)	2006	主要な電気・電子製品 23 品目について、家庭・事業所を対象に保有状況のアンケート調査を行い、使用年数分布の推定と 2003 年度から 2008 年度の使用済み製品の発生台数の推計を行った。
使用済み小型電気・電子機器の回収試験と回収量評価	狩野真吾 (DOWA エコシステム)	2009	秋田県における使用済み小型家電の回収モデル事業を通して、人口の二次分布による比較や空間解析が可能な GIS による解析によって、回収 BOX 配置場所と人口分布から回収量の推定を行った。
携帯電話のフローとそこに含まれる金属の資源性	村上進亮 (東京大学)	2009	使用済み携帯電話のマテリアルフローについて、消費者へのアンケート調査と統計情報を用いて推定するとともに、そこに含有する金属量を価格の観点から評価した。
日本における小型電気電子機器のリサイクル	相澤寛史 (環境省)	2009	ビデオテープレコーダー、DVD ビデオ、ビデオカメラ、デジタルカメラ、フラッシュメモリプレーヤー、HDD オーディオプレーヤー、ゲーム機器、携帯電話の 8 品目を対象に、日本における廃棄量および含有物質の潜在的な含有量の試算を行った。

## 1. 2 本研究の目的

廃棄物処理問題を始めとし、地球温暖化、資源セキュリティーへの対応といった諸問題を抱える我が国では、大量生産・大量消費・大量廃棄の社会システムから環境配慮型社会システムへの転換が必要である。こうした中、家電製品については、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）に基づき、製品の企画・設計段階に3Rと製品のライフサイクル全般にわたる環境負荷の削減への対応が求められている。特に、製品の企画・設計段階における環境配慮デザインの導入が重要であり、それを広範に推進していくためには、効果を確実に評価し、効率的なフィードバックを行うことが重要である。一方で、環境配慮デザインの評価基準について、統一的な判断基準がないことや、対象品目が限定されているという課題が存在する。特に、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極めて重要であり、広範な製品を対象に、統一的な客観的評価を実施していくこと、すなわち環境配慮デザインの定量評価が必要である。このとき、単に解体性や環境負荷を定量評価できるだけでなく、製品の企画・設計段階でそれらを定量化でき、かつ、それが製品設計へフィードバックできる点が重要である。従来の研究では、以下の通り、こういった点に対応できていない。

- ① 製品の環境負荷や解体性の評価に関する手法の開発や製品の評価、さらにはリサイクルシステムへの環境配慮デザインの影響が検討されているが、個別の製品に対するアプローチが中心となっている。
- ② 幅広い製品の評価という点においては、その評価に必要なデータベースの構築が行われているが、統計データに基づくものが中心的であり、評価そのものは可能であっても、製品設計へのフィードバックとしては効果的ではない。

製品の使用済み後、すなわち、廃棄・リサイクル段階においては、環境性・経済性の両面から効率的なリサイクルプロセスの構築が求められる。大型家電については、家電リサイクル法の枠組みの中で適正に処理されており、「最終処分場の延命化」や「資源の有効利用」などの点で成果を挙げている。一方で、「リサイクル料金の低減」などの課題も指摘されている。消費者が担っている再商品化に関わる費用負担を、この費用負担を低減することは「消費者の廃棄物の適正排出」や「不法投棄の削減」の観点から重要である。小型家電については、家電リサイクル法のように、個別製品ではなく、複数製品で構成される製品群としての対策が求められる。小型家電については、民間処理施設と自治体が連携したリサイクルプロセスが検討されており、その継続性の観点から、経済を考慮した収集回収品目の検討が必要である。すなわち、大型家電については、既存のリサイクルプロセスの効率改善、小型家電については、今後のリサイクルプロセスの設計に関して、特に環境性・経済性の観点から収集回収すべき製品群を明らかにしていくことが必要である。このとき、その受入先であ



る民間施設の処理フローによって、環境性・経済性が異なることが想定されるため、その特性も考慮した、設計手法の確立が求められる。従来の研究では、以下の通り、こういった点に対応できていない。

- ① 大型家電のリサイクルシステムについては、採算性や資源化率、リサイクル材の特性評価などが行われているが、具体的なシステムの改善方法について製品設計の観点からアプローチしている事例はない。
- ② 小型家電のリサイクルシステムについては、使用年数の推定に基づく発生台数の推計や、個別製品のマテリアル分析などが行われているが、小型家電全般を一体的に取り扱い、そのリサイクルシステムの設計手法を構築する研究はない。

本研究では、幅広い家電製品を対象に、環境配慮デザインを定量評価するための「DfE 定量評価データベース」の構築と、それを基に各種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「ライフサイクル全般の環境負荷」を定量評価するとともに、製品が使用済みとなった後のリサイクルプロセスの設計手法の確立・効率化を検討することで、家電製品の DfE 向上と効率的なリサイクルプロセスを提案することを目的とする。

まず、「DfE 定量評価データベース」については、各種家電製品を対象に、製品の企画・設計段階の情報を基に、製品の解体性と環境負荷を評価できる分解性評価指数 DPI (Disassembly Property Index) <sup>1-31)</sup>と環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA (Eco-Efficiency Potential Assessment) <sup>1-32)</sup>の活用を前提とし、その評価に必要な情報をデータベース化する。

また、そのデータベースを活用し、各種家電製品の DfE を定量化することで、製品を類型化し、製品群として求められる対策を提示する。「製造時と使用時への対応」、「希少金属への対応」「リサイクルプロセスへの対応」といった観点で類型化することで、各種製品に求められる DfE を明らかにする。

さらに、大型家電と小型家電を対象に、そのリサイクルプロセスの設計手法・効率化に関する検討を行う。特に大型家電では、既にリサイクルプロセスが確立されていることから、既存のリサイクルプロセスの効率化に関する検討を行う。一方、小型家電については、そのリサイクルプロセスに関して十分に検討がなされていないため、破碎処理プロセスの効率化の観点よりも、収集回収すべき品目について、環境性・経済性の観点から設計可能な手法の構築を重視する。

以上の検討により、家電製品の DfE 向上と効率的なリサイクルプロセスを提案することが本研究の目的とするところである (図 1.2)。



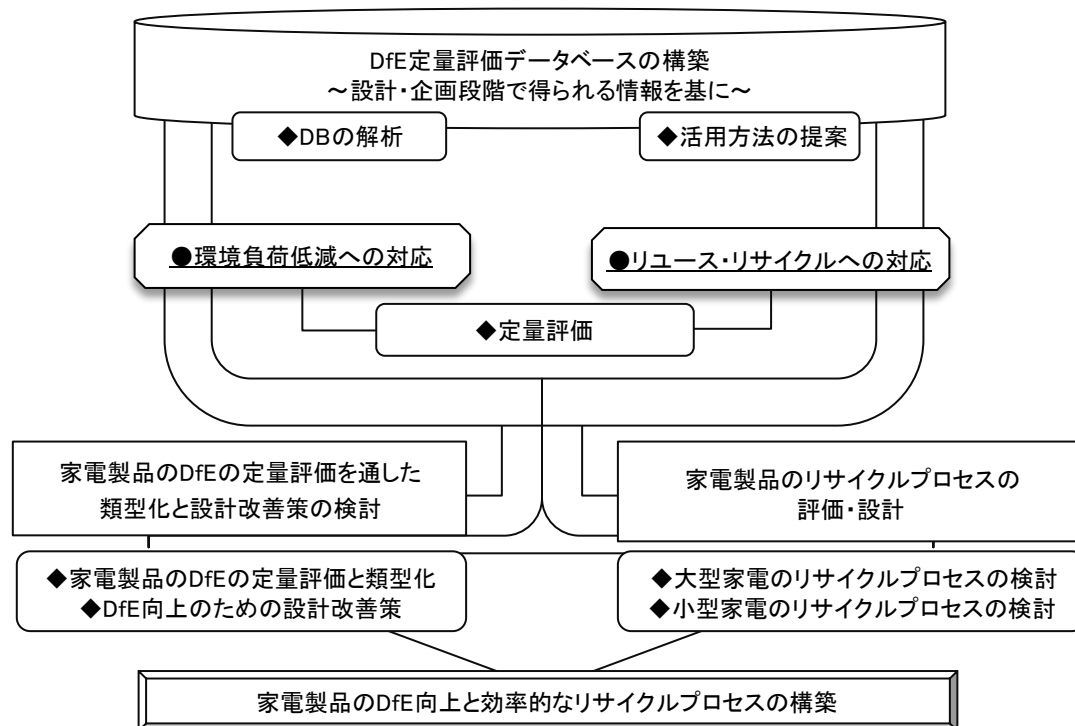


図 1.2 研究目的

### 1.3 本論文の構成

本論文は、6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的を明らかにするとともに、環境配慮デザインの定量評価やその評価に必要な製品情報のデータベースと大型家電・小型家電のリサイクルプロセスに関する従来研究を整理し、本研究の新規性・独自性・必要性を示した。さらに、家電製品のリサイクルプロセスについて、現状の法的枠組みを整理することで、個別製品から複数製品を対象としたリサイクルシステムが要求されることについて述べる。

第2章では、家電製品の環境配慮デザインの定量評価の基本情報となる DfE 定量評価データベースの構築とその解析について述べている。

環境配慮デザインの要点を整理し、製品の企画・設計段階で得られる情報を基に、環境配慮デザインとして求められる「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) の活用を前提とした「DfE 定量評価データベース」の構築を行った。本データベースは、型番・発売年度といった製品情報や素材構成、結合方法・点数などの7種類を97項目に分類している。特に、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は、実際に製品を手解体することで情報を入手している。このように、製品を分解して、評価に必要なデータ収集を行

うという点については、環境配慮デザインが製品の企画・設計段階で取り入れられる必要があるという考え方に基づいている。これまでに、89製品 300製品のデータを搭載した。

また、本データベースを解析し、家電製品の環境配慮デザインの特徴を示した。素材構成と発売年度という点から携帯電話を対象に解析することで、リサイクルの容易性の観点で重要である素材の単一化については、発売時期・タイプ別・メーカー別に大きな差は見られないことや合成樹脂、基板が全体を占める割合が高いことを示した。また、分解容易性という観点で各種家電製品の解体時に重要な情報である結合形式・使用工具について解析することで、ネジ類が多用されている製品群など、製品間で特徴があることを示した。さらに、データベースと DPI, E2-PA を組み合わせることで、リサイクルプロセスの環境性・経済性の簡易評価が可能な EXCEL ベースのソフトを構築し、データベースの活用方法を提示した。

一方で、データベースの高度化に向けて、搭載する製品数は今後も増やしていく必要がある。多種多様な家電製品を搭載していくことが望ましいが、製品を解体することで情報取得をしている現状に鑑みると、その拡張に当たっては、重点的に情報取得する家電製品を絞る必要がある。そこで、現状のデータベースに搭載されている製品を対象に、素材構成割合と製品重量を説明変数としたクラスター分析を行い、ポータブル MD プレイヤー・カセットプレイヤー、デジタルカメラに関する情報を優先的に収集することが効率的であることを示した。

第3章では、DfE 定量評価データベースを活用し、環境配慮デザインの評価を通して家電製品を類型化することで、設計改善策について述べている。

製品の環境配慮デザインにおいて、ライフサイクル全般の環境負荷を低減していくことは重要であるが、ライフサイクルのどの段階において特に取り組みが必要であるかを考慮しながら、効率的に改善していくことが求められる。まず、製品の製造時と使用時の環境負荷に着目し、家電製品を類型化した。大型家電と小型家電は使用時の環境負荷が多くを占めることから、省エネ設計や省エネに関する情報を積極的に公開することが求められる一方で、モバイル機器は製造時の環境負荷が多くを占め、3R へ配慮した設計や使用済み製品の回収システムの構築が求められることを示した。次に、資源セキュリティの観点から重要性が増している希少金属に着目し、家電製品を類型化した。希少金属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評価対象としている。希少資源による環境負荷が多く占める製品は回収ルートがある程度構築されている携帯電話、ノート・デスクトップパソコンと家庭に退蔵しているデジタルカメラ、旧型の音楽プレイヤーやゲーム機などの希少金属による環境負荷が高いこ

とから、それらの回収方法を構築する必要性を示した。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 向上とリサイクル施設における機器効率の向上の2点から、家電製品を類型化した。その結果、複合材や表示なしプラ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、複合材の減少や表示なしプラを表示化することが設計段階で有効であり、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がわかった。携帯電話やハンドクリーナー、ハンドマッサー、空気清浄機、アイロンといった製品は表示ありプラの割合が高く積極的に手回収することが有効であることを示した。この結果から、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、点在化している基板の偏在化といった設計改善策を提案した。

第4章では、大型家電の例として冷蔵庫を取り上げ、そのリサイクルプロセスの環境性・経済性について改善策を検討するとともに、大型家電の混合処理について述べている。

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モデルの環境性・経済性の評価を行った。その結果、手解体工程を最も多く導入するモデルは、他の2モデル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3倍程度に増加し、収益性が劣っており、環境性を維持しながら収益を向上させる必要があることがわかった。そこで、存在する複数の手解体工程を省略した際の、環境性・経済性評価を実施し、冷蔵庫本体切断工程前の手解体工程を省略することが有効であることを示した。このように、DPI を活用することで、リサイクルプロセスの設計改善を検討することが可能となる。

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、冷蔵庫に加えて洗濯機を同一プロセスで混合処理することを想定し、DfE 定量評価データベースを活用して、環境性・経済性の評価を行った。その結果、洗濯機を混合処理することで、環境性・経済性が向上することを示した。また、リサイクルプラントの冷蔵庫処理台数が減少するケースも想定し、同様の評価結果を得た。

第5章では、小型家電のリサイクルプロセスの設計手法の構築について述べている。小型家電の中には、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、現状では、効率的なリサイクルプロセスが構築されていない。一部、先進的な取り組みが行われているものの、こういった小型家電を回収することが、環境性・経済性の観点から効率的かという点については、十分な検討がなされていない。そこで、小型家電を対象にして、民間のリサイクルプロセスにおいてマテリアルバランスを把握するための実験を行うと

ともに、DfE 定量評価データベースを活用し、そのマテリアルバランスを推定することで、回収品目について環境性・経済性の両面から検討可能な設計手法を構築した。具体的には環境性・経済性両立指数を定義し、各家庭から排出される小型家電の量を設定することで、最適な回収品目を選定することができる手法である。この手法を活用することで、ある地域での小型家電のリサイクルプロセスを設計するにあたって、受入側であるリサイクルプラントが要求する処理規模とその周辺地域において想定される小型家電の排出量を考慮しながら、小型家電のリサイクルプロセスが設計できることを示した。

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、今後の研究展望について述べる。

## 第 2 章

### DfE 定量評価データベースの構築とその解析

第2章 DfE 定量評価データベースの構築とその解析	1
2.1 目的と従来研究	2-1
2.2 DfE 定量評価データベースの構成要素に関する検討	2-2
2.2.1 DfE の要点	2-2
2.2.2 DfE 定量評価データベースのコンセプト	2-3
2.2.3 分解性評価指数 DPI の活用	2-4
2.2.4 環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA の活用	2-8
2.2.5 DfE 定量評価データベースの構成要素	2-14
2.3 DfE 定量評価データベースの構築とその方法	2-16
2.3.1 製品設計段階の情報入手方法	2-16
2.3.2 製造段階の情報入手方法	2-17
2.3.3 使用段階の情報入手方法	2-17
2.3.4 DfE 定量評価データベースの構築	2-18
2.4 DfE 定量評価データベースの解析と活用	2-20
2.4.1 個別品目に着目した解析～携帯電話を例に～	2-20
2.4.2 複数品目に着目した解析	2-28
2.4.3 リサイクルプロセスへの活用	2-30
2.5 DfE 定量評価データベースの拡充に関する検討	2-39
2.5.1 クラスタ分析を活用した DfE 定量評価データベースの拡充方針	2-39
2.6 まとめ	2-42
図 2.1 DfE の要点	2-3
図 2.2 DfE 定量評価データベースのコンセプト	2-4
図 2.3 E2-PA の構成要素	2-10
図 2.4 解体フローの例	2-17
図 2.5 DfE 定量評価データベースの構造	2-18
図 2.6 結合点数のタイプ別比較	2-25
図 2.7 結合点数の発売時期別比較	2-26
図 2.8 結合点数と同一シリーズ間比較	2-26
図 2.9 部品素材内訳のタイプ別比較	2-27
図 2.10 携帯電話における素材構成の年代別推移	2-27
図 2.11 小型家電の各結合形式の結合点数割合	2-29
図 2.12 小型家電の合成樹脂の材質表示割合	2-29
図 2.13 小型家電の単一素材まで解体可能な部品の質量割合	2-30
図 2.14 ソフトの概略図	2-31
図 2.15 リサイクル収支算出ソフトの使用順序	2-32
図 2.16 リサイクル収支算出ソフト使用例	2-34
図 2.17 パターン解析結果	2-36
図 2.18 携帯電話のパターン解析結果	2-37
図 2.19 携帯電話の解体フロー図	2-39
図 2.20 クラスタ分析結果(デンドログラム)	2-41
図 2.21 クラスタ分析による製品の分類	2-42

表 2.1	結合解除指数	2-6
表 2.2	製品種類の各要素の偏回帰係数	2-7
表 2.3	製品種類の各要素の偏回帰係数	2-7
表 2.4	各統合化手法の代表事例	2-8
表 2.5	E2-PAの各資源強度の定義	2-12
表 2.6	主要資源の可採年数	2-12
表 2.7	DPIに算出に必要なデータの一覧	2-14
表 2.8	資源強度の算出に必要なデータの一覧	2-14
表 2.9	データベースの構成要素とその内容	2-15
表 2.10	素材構成・重量の具体的な項目内容	2-15
表 2.11	結合方法、使用工具の具体的な項目内容	2-16
表 2.12	データベースに登録されている製品名と製品数	2-19
表 2.13	評価対象製品①	2-22
表 2.14	評価対象製品	2-28
表 2.15	評価対象製品の概要	2-35
表 2.16	品目内に複数データが蓄積されている品目	2-40

## 第2章 DfE 定量評価データベースの構築とその解析

### 2.1 目的と従来研究

我が国では、2000年に循環型社会形成推進基本法が制定され、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）<sup>2-1)</sup>の考え方が導入され、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。一方で、エネルギーの使用に由来する二酸化炭素を代表とした温室効果ガスの排出によって引き起こされた地球温暖化問題への対応として、1999年には地球温暖化対策推進法が制定された<sup>2-2)</sup>。また、エネルギーの使用の合理化に関する法律（省エネ法）は、エアコンやテレビといった23の指定機器を対象に、各指定機器の特性に応じて、現在商品化されている製品のうち最も優れている機器の性能以上にする「省エネ基準」を設ける「トップランナー制度」が導入されており、製造業者に使用時の省エネルギー化が義務化されている<sup>2-3)</sup>。さらに、環境配慮型製品の識別やリサイクル業者に有害物資の含有情報を提供することを目的に、2006年には「資源有効利用促進法」が一部改正され、有害物質の含有量に関する表示が義務化された。化学物質については、2010年に改正された「化学物質排出把握管理促進法」に基づき、有害性化学物質投入・排出フローを把握・集計・公表するPRTR制度における対象物質が拡充された<sup>2-4)</sup>。

一方で、海外においても、各種法規制が導入されている。2003年には、電気・電子機器の回収・リサイクルシステムの構築を要求するWEEE (Waste Electrical and Electronic Equipmet)指令<sup>2-5)</sup>、鉛、水銀、カドミウム、六価クロム、種類の臭素系難燃剤（PBB および PBDE）の6種類の物質の含有の禁止を規定したRoHS(Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment) 指令<sup>2-5)</sup>が発行された。2005年には、それらを補完する位置づけで、製品への環境配慮デザインの導入を要求するEuP指令（エネルギーを使用する製品に対するエコ・デザイン要求の設定の枠組みを設けることに関する欧州会議および理事会指令）<sup>2-6)</sup>が発行された。

このように、製造業者に対しては、製造プロセスから直接消費するエネルギー以外の環境負荷も含めて、使用段階、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環境への影響を配慮すること」の重要性が増しており、その概念を導入した「環境配慮デザイン」の導入が強く求められるようになってきている。環境配慮設計を広範に推進していくためには、これらの効果を確実に評価し、効率的なフィードバックを行うことが重要である。その代表的な手法として、製品アセスメントが挙げられるが、以下の課題が存在する。

- ① 一部では定量評価がなされているものの、対象項目・品目が限定されている。
- ② 同一メーカー間の従来機種との比較が基本であり、異なる製品間や他社製品との比較をすることができない。
- ③ 環境配慮デザインの評価基準について、統一的な判断基準がないこ



とや、対象品目が限定されている。

そこで本研究では、環境配慮デザインの要点を整理し、幅広い製品へ適用可能であり、製品の企画・設計段階で得られる情報を基に、環境配慮デザインとして求められる「解体性」と「ライフサイクル全般にわたる環境負荷」を定量評価可能な分解性評価指数 DPI (Disassembly Property Index)<sup>2-7)</sup>と環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA (Eco-Efficiency Potential Assessment)<sup>2-8)</sup>の活用を前提とした「DfE 定量評価データベース」を構築することを目的とする。本データベースは、型番・発売年度といった製品情報や素材構成、結合方法・点数などの7種類を97項目に分類している。特に、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は、実際に製品を手解体することで情報を入手している。このように、製品を分解して、評価に必要なデータ収集を行うという点については、環境配慮デザインが製品の企画・設計段階で取り入れられる必要があるという考え方に基づいている。これまでに、89製品300製品のデータを搭載した。

また、本データベースを解析し、家電製品の環境配慮デザインの特徴を示した。素材構成と発売年度という点から携帯電話を対象に解析することで、リサイクルの容易性の観点で重要である素材の単一化については、発売時期・タイプ別・メーカー別に大きな差は見られないことや、合成樹脂、基板が全体を占める割合が高いことを示した。また、分解容易性という観点で各種家電製品の解体時に重要な情報である結合形式・使用工具について解析することで、ネジ類が多用されている製品群など、製品間で特徴があることを示した。さらに、データベースと DPI, E2-PA を組み合わせることで、リサイクルプロセスの環境性・経済性の簡易評価が可能な EXCEL ベースのソフトを構築し、データベースの活用方法を提示した。

一方で、データベースの高度化に向けて、搭載する製品数は今後も増やしていく必要がある。多種多様な家電製品を搭載していくことが望ましいが、製品を解体することで情報取得をしている現状に鑑みると、その拡張に当たっては、重点的に情報取得する家電製品を絞る必要がある。そこで、現状のデータベースに搭載されている製品を対象に、素材構成割合と製品重量を説明変数としたクラスター分析を行い、ポータブル MD プレイヤー・カセットプレイヤー、デジタルカメラに関する情報を優先的に収集することが効率的であることを示した。

## 2.2 DfE 定量評価データベースの構成要素に関する検討

### 2.2.1 DfE の要点

DfE の要点は図 2.1 のように整理できる。素材レベルでは、リデュースへの対応として、「使用物質の量を減らすこと」や「再生素材を使用すること」など、リユース・リサイクルへの対応として、「可能な限り同一の素材を用いること」や「製品内において同一素材部を偏在させること」などである。再生可能材料を使用することなどである。部品レベルでは、リデュースへの対応として、「長

寿命化」，リユース・リサイクルへの対応として，「再利用やリサイクル処理の容易性か」から「少数化（モジュール化）」，「規格化」，「標準化」や「できるだけ分離させやすい結合方法の採用」などである．さらには，部品レベルでのエネルギー消費量の削減，すなわち省エネ化である．製品レベルでは，リデュースへの対応として，新たな技術が出てきた際に，製品の一部を交換することによって長期使用を可能とする「アップグレード化」、リユース・リサイクルへの対応として、部品の統合によって再利用や再資源化が可能な部分を取り出しやすくするとともに，解体の方向性への配慮や使用工具の低減，接合箇所の減少やその方法の改善を通じて，できるだけ解体しやすくすることなど、省エネへの対応として、製品のエネルギー消費量の削減や運搬・輸送の容易化がある。

全体として、「統一可」、「統合化」、「簡素化」、「省エネ化」がポイントとなる。

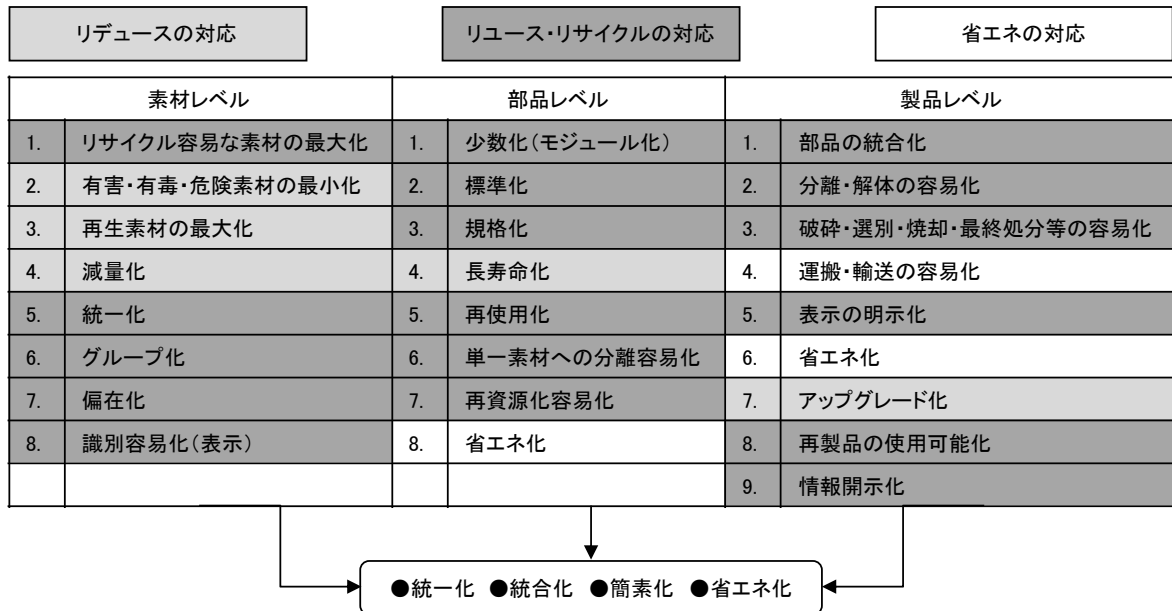


図 2.1 DfE の要点

### 2. 2. 2 DfE 定量評価データベースのコンセプト

こうした DfE は製品の企画・設計段階で取り入れられるべきものである．すなわち，企画・設計段階で環境配慮デザインの導入効果を定量的に把握できることが極めて重要である．そのため，環境配慮デザインを「企画・設計段階で入手可能な情報」に基づき定量化できることが望まれる．また，その製品の普及という点を考えれば，販売店における製品提案時に，その定量数値を活用できることが必要であり，製品の使用段階においても重要な情報の一つになり得る．例えば，販売店において「省エネラベル」のように環境配慮デザインの定量数値を活用した制度を導入することも可能となる<sup>2-9)</sup>．この他にも，利用段階において，その製品特性を考慮した利用方法を消費者に提案すること，また，消費者自身がその情報を留意しながら利用していくことも可能となる．さらに，廃棄・リサイクル段階においても，定量数値は重要となる．例えば，回収すべ

き製品の選定や、リサイクルプロセスの効率化を検討する際に活用できる。このように、製品のライフサイクルにおいて下流になればなるほど、環境配慮デザインの定量数値は幅広い製品に適用できる必要がある。

そこで、本研究では、環境配慮デザインの中における、リユース・リサイクルへの対応として求められる製品の易解体性とライフサイクル全般の環境負荷を評価するために必要となる情報をデータベース化する「DfE 定量評価データベース」を開発する。なお、本データベースは次節以降で述べる分解性評価指数 DPI と環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA の活用を前提としたものである。以下に示すコンセプトに基づき開発を行った。

- ① 製品の企画・設計段階で DfE を定量評価できる手法の活用を念頭に、その段階で得られる情報がデータベース化されていること。
- ② データベース化された情報に基づき、製品の企画・設計段階にとどまらず、製品のライフサイクル全般に関わる関係主体向けに必要な情報である環境性・経済性評価に活用できる情報がデータベース化されていること。
- ③ 特定の製品に限定されず、異なるメーカー間、異なる製品間で共通化できる項目を設定すること。

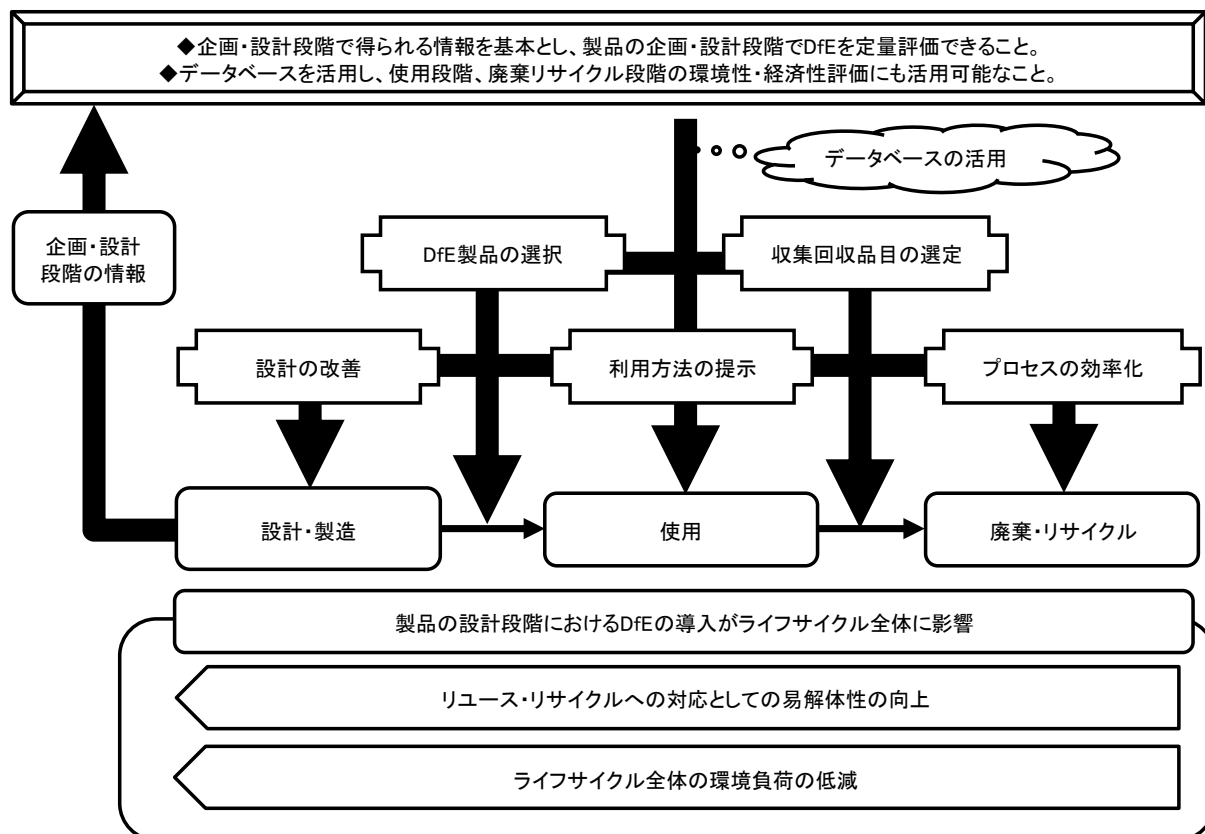


図 2.2 DfE 定量評価データベースのコンセプト

### 2. 2. 3 分解性評価指数 DPI の活用

家電製品に対して求められる環境配慮デザインの一つとして、リユース・リ

サイクルへの対応として「解体性の向上」が挙げられる。解体性に関する評価はこれまでにいくつかの評価方法が提案されている。

内藤らは、結合方法，使用工具，素材情報等を 10 段階（-5～+5，大きいほど良好）で点数化し，その合計点で評価する方法を，パーソナルコンピュータを対象に提案している<sup>2-10</sup>。

弘重らは，作業者の移動と結合方式の特徴を基本要素として整理し，製品の分解時間が推定可能な分解性評価法（DEM, Disassemblability Evaluation Method）を開発している<sup>2-11</sup>。

大西らも家電製品を対象に結合方法を評点化（はめ込み：1 点，ボルト・ネジ等：3 点，溶接・接着：5 点）する方法を提案している<sup>2-12</sup>。

早稲田大学永田研究室では，製品の設計段階で得られる情報を基に，実解体時間との相関を得ることで，製品の企画・設計段階において実際の解体時間に相当した定量的な評価が可能である分解性評価指数（DPI, Disassembly Property Index）を開発している。本研究では，製品の分解性評価においては，この分解性評価指数 DPI を導入する。分解性評価指数 DPI の算出方法の概略を以下に説明し，詳細についてはアペンディックスを参照する。

この手法においては，解体という作業内容が異なる複数の作業により行われていることに着目し，解体に要する総解体時間を大きく 3 種類の作業に要する時間に分けて表現している。この時間に対応する解体工程を結合解除工程，結合探索工程，部品取り出し工程，に分類し定義している。すなわち，結合箇所を探して結合の解除に必要な工具を取り付けるまでの時間（結合探索時間）と，工具を取り付けた後に結合の解除だけに必要な時間（結合解除時間）と，十分な結合が解除された後で製品から部品分離だけに必要な時間（部品取り出し時間）の合算値が解体時間に相当し，式（2.1）で表わすことができる。

$$T = T_d + T_s + T_p \quad (2.1)$$

ここで  $T$  : 総解体時間[s]

$T_d$  : 結合解除時間[s]

$T_s$  : 結合探索時間[s]

$T_p$  : 部品取り出し時間[s]

分解性評価指数 DPI では，先に定義した各工程で要する時間を指数化する手法を取る。それぞれの工程に相当する時間を設計段階の情報から求めることができるように，分解性評価指数の計算式を式（下の 2.2）に定めている。

$$D = D_d + D_s + D_p = \sum (m_i \times p_i) + m \times q + (n-1) \times r \quad (2.2)$$

ここで  $D$ : 分解性評価指数

$D_d$ : 結合解除に相当する分解性評価指数

$D_s$ : 結合探索に相当する分解性評価指数

$D_p$ : 部品取り出しに相当する分解性評価指数

$m_i$ : 結合種類ごとの結合点数[個]

$m$ : 結合点数[個]

$n$ : 部品点数[個]

$p_i$ : 結合種類ごとの平均結合解除時間に相当する指数[ / 個]  
(結合解除指数)

$q$ : 各製品の平均結合探索時間に相当する指数[ / 個]  
(結合探索指数)

$r$ : 各製品の平均部品取りだし時間に相当する指数[ / 個]  
(部品取り出し指数)

式(上の 2.2)における各指数  $p_i, q, r$  は次の通りに決定されている。

結合解除指数  $p_i$  は、結合種類をネジ類, はめ込み類, 接着類等に適宜分類し、実測した結合解除時間に応じて割り当てている。同じ結合種類でも、解除時間には多少の幅があるが、ここでは、各結合の平均結合解除時間に相当する値を結合解除指数と定義している。また、製品固有の特殊な結合など新たな結合が生じた場合には、解除時間を実測し、その値を新たに加えることになる。表に結合解除指数を示す。

表 2.1 結合解除指数

結合方法	使用工具	設計情報から得られる結合解除方法	結合解除指数 $p$
ネジ類	a+, b, i	十字穴ネジ, 素手で解除可能なネジ	10
	D	六角穴ネジ	14
	f, g, h	六角ボルト	30
	j, k, n	固いネジ	55
	O	電動工具	1.5
はめこみ	B	素手	2
	a-, c, e, i, j	工具	7.5
	L	ギアプラー	71
接着	B	素手	3
	C	切断	1.5
	a-, e	工具	13
コネクター	B	素手	2.5
	a-, c, e	工具	12
設置	B	素手	0
配線固定	B	素手	3.5

	E	工具	42
輪留め具	a-,m	工具	21.5

結合探索指数は、結合探索時間に影響を与えると考えられる製品データ（解体データを含む）を説明変量とし、実測した結合探索時間を目的変量として重回帰分析を行い、製品種類ごとに  $q$  を算出する回帰式を求めている。 $q$  の算出式を一般化したものを以下に示す。

$$q = a \times m + b \times n + c \times M + d \times V + e \quad (2.3)$$

ここで  $q$ : 結合探索指数[個]

$m$ : 結合点数[個]

$n$ : 部品点数[個]

$M$ : 製品質量[ kg ]

$V$ : 製品容量[  $m^3$  ]

$a, b, c, d, e$ : 各説明変量に対応偏回帰変数

製品種類ごとに決定された各要素の偏回帰係数は表 2.2 である。なお、各製品種類に該当する代表製品は表 2.3 の通りである。このように、製品種類ごとに類型化することで、設計・企画段階でさまざまな製品に適用可能となっている点に特徴がある。

表 2.2 製品種類の各要素の偏回帰係数

製品種類	結合点数 a	部品点数 b	質量 c	容積 d	e
OA 機器	3.06E-01	-7.55E-01	5.14E-01	-6.67E+02	1.77E+01
テレビ・モニター	5.57E-02	-9.60E-02	-2.21E-01	3.38E+01	1.76E+00
大型家電	3.65E-02	-6.07E-02	5.87E-02	-6.79E+00	2.75E+00
小型家電	-4.14E-02	5.47E-02	6.39E-01	-4.20E+01	3.97E+00
AV 機器	-7.12E-02	1.50E-01	-4.46E-01	2.45E+02	4.80E+00
ミシン	3.68E-02	1.68E-02	2.13E-01	7.46E+00	3.68E-01
福祉器具	-1.54E+01	8.83E+00	3.43E+01	5.26E+02	1.32E+03
家具	1.39E-01	3.49E-01	-9.23E-01	-1.02E+01	1.30E+01
汎用産業機器	8.84E-02	-1.24E-01	3.84E-02	-1.86E+01	7.67E-01
HEV バッテリー	-1.05E-02	5.45E-03	9.36E-02	6.62E+00	9.62E-01
かさ	-1.55E-01	1.94E-01	-1.21E+00	-1.10E+02	3.91E+00
自転車	-4.47E-02	-2.07E-01	4.14E-01	1.22E+00	3.97E+00

表 2.3 製品種類の各要素の偏回帰係数

製品種類	代表製品名
------	-------

OA 機器	PC 本体, スキャナー, FAX, コピー機
CRT 型モニター・テレビ	テレビ, テレビデオ, PC モニター
大型家電	冷蔵庫, 洗濯機, 乾燥機, エアコン
小型家電	加湿器, ハロゲンヒーター, トースター, ポット, 電子レンジ, 扇風機, 炊飯ジャー, 掃除機, アイロン, 照明機器,
AV 機器	CD ラジカセ, ゲーム機, ビデオデッキ,
	DVD プレーヤー, デジタルカメラ
家具	オフィスシーティング, イス,
	ラック, ベット, テーブル
汎用産業機器	送風機, 圧縮機, ポンプ
車載用バッテリー	ハイブリット車用バッテリー
傘	ビニール傘, 環境配慮型ビニール傘

## 2. 2. 4 環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA の活用

家電製品に対して求められる環境配慮デザインの一つとして、リユース・リサイクルへの対応として「解体性の向上」が挙げられる<sup>2-13)</sup>。解体性に関する評価はこれまでにいくつかの評価方法が提案されている。

解体性の評価は、環境配慮デザインにおける 3R を配慮した設計を考慮する上で、重要な要素であるが、それ以外にも、製品のライフサイクル全般を考慮した環境影響を評価し、改善していくことが求められる。ライフサイクル全般を考慮した環境影響の評価として、ライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment, 以下, LCA という) 手法が開発されており、これまでにいくつかの評価方法が提案されている。統合評価の方法は、大きく 3 つに分類される。すなわち、基準値換算法 (Distance to Target)<sup>2-14)</sup>、費用換算法 (Manetarization)<sup>2-15)</sup>およびアンケート法 (Panel Method)<sup>2-16)</sup>である。

基準値換算法とは、科学的あるいは政治的な環境上の目標に対する乖離度に応じて環境問題の優先順位を決定しようする方法である。費用換算法とは、環境影響として発生する全てのインパクトカテゴリーへの寄与を通貨単位で表現し、統合化を行うものである。支払い意思額による評価が一般的であるが、①対策の実施に最大いくら払うか (Willing to Pay)、対策が実施されなときいくらの保証が必要か (Willing to Accept) という観点から評価する。アンケート法は、環境への影響を改善する優先順位をアンケート調査を基に相対的に決定する手法である。各統合評価方法の代表事例を整理したものが表 2.4 である。

表 2.4 各統合化手法の代表事例

略称	EP	EPS	ELP
開発主体	スイス連邦環境森林景観庁 (BUWAL) 等	スウェーデン環境研究所 (IVL) 等	早稲田大学 (永田研究室)
開発目標	容器・包装材選択中心	汎用的な標準法	汎用的な標準法
統合化の程度	統合評価	統合評価	統合評価



評価統合法	基準値比較法	費用換算法	パネル法
単 位	EP	ELU	ELP
使 用 例	容器等の材料選択等	バンパー材料選択 等	各種製品, 各種焼却技術の比較, ライフスタイル等
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・包装自体の加工, 充填, 再使用は考慮せず.</li> <li>・エコファクターは次式, これに排出量等を積算し合点してエコポイントとする.</li> </ul> $EF = (1/FM) \times (F/FM) \times 1012$ <p>FM: 国内最大許容排出量 F: 国内実総排出量</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・3訂までである.</li> <li>・ELUで統合化.</li> <li>・ELUの算定に当たっては影響の範囲×強度×持続性×Willingness to payを考慮.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・種々の母集団にアンケートを実施し, カテゴリーの重み付け係数を設定.</li> <li>・特性解析の結果に, これを適用して統合化.</li> <li>・相対 ELP は規準なる製品や環境事象との比較に使用可能.</li> <li>・絶対 ELP は重み付けに日本の総投入・排出量を考慮.</li> </ul>

しかしながら, 従来の LCA 手法は, 以下のような問題点を有していることが指摘されており, 本研究の目的の一つとしている, 企画・設計段階での環境配慮デザインの定量化・改善のための, 標準性, 利便性を備えた支援ツールとして活用することができない。

- ・ 各種の環境負荷を統合化する際に, 主観的な重み付けを必要とするため, 客観性に乏しく, 評価実施者のバイアスがかかりやすい。
- ・ 評価に必要とされるデータが多岐にわたり, 非常に煩雑である。とりわけ, 製品等の廃棄後の環境負荷に関するデータや NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 等の排出物に関するデータ等, 企画・設計段階における入手が困難な情報が要求される場合が多く, 企画・開発を支援するツールとしては利便性が低い。
- ・ 製品やサービスのマイナスの側面である環境負荷を評価する手法にとどまっており, 企画・設計者のみならず, 製品やサービスを選択する消費者にとってのインセンティブになりにくい。

本研究では, 製品の環境負荷評価においては, こういった問題を解決することを目的に早稲田大学永田研究室で開発された, 環境効用ポテンシャル評価手法 (Eco-Efficiency Potential Assessment Method, 以下, E2-PA) を導入する。環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA の算出方法の概略を以下に説明し, 詳細についてはアペンディックスを参照する。

E2-PA の開発のねらいは, 以下のとおりである。

- ① 手法の合理性を理解した上で簡便に使用できること。
- ② 設計者・企画者等が環境配慮型の製品やサービスを提供するに当たってのインセンティブになるとともに, 使用者・消費者が選択するに当たっての



判断資料となること。

- ③ 製品やサービス等の総体とした環境負荷をライフサイクル全体にわたって評価できること。
- ④ 資源やエネルギーの消費を含め、各種の環境負荷を資源強度として統合化できること。

以上のねらいから、E2-PA では以下の考えを導入している。

- ① 製品やサービス等に起因する環境負荷を設計・企画時点で評価できるような「ポテンシャル」の概念を取り入れること。
- ② 従来の LCA の「機能単位」を消費者の視点から「効用」として把握し直し、評価すること。
- ③ 統合した資源強度以外に、評価結果を経済性等目的に応じたさまざまな表現に変換できるようにすること。

E2-PA の構成要素を図 2.3 に示す。ここで、MI, EI, HI はそれぞれ材料、エネルギー、有害物質の使用に伴う資源の環境負荷を表している。WI は廃棄物、PI は大気汚染物質や水質汚濁物質の発生について、RI は再資源化性（使用済み製品や部品のリユース、材料リサイクル、エネルギー回収等）、DI は製品の長期使用性、U は効用を表している。

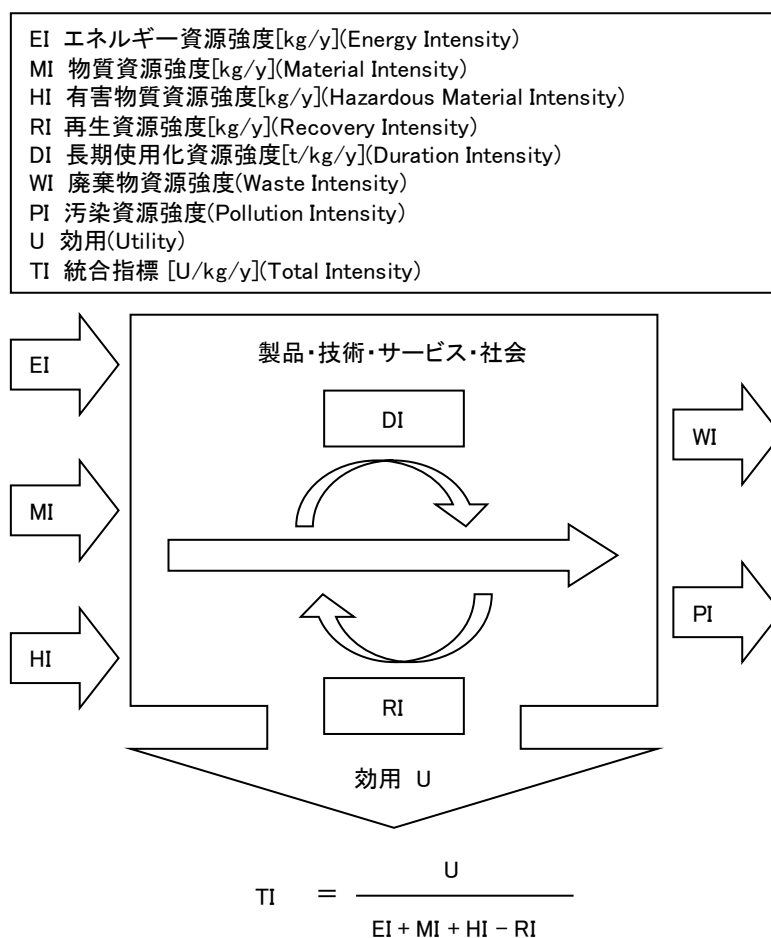


図 2.3 E2-PA の構成要素

表 2.5 は、各資源強度の評価対象となる環境負荷を示している。また、同表では、製品評価を例にターゲットとなるライフサイクルの段階を示している。これにより、ライフサイクル全体にわたっての環境負荷を把握することが可能となる。E2-PA では、ポテンシャル評価の概念から、基本的には入口側の要素による評価で全体の傾向を把握するので、出口側の要素である PI, WI は省略することを基本とする。また、DI は、製品の長期使用性と省資源化の両立を評価するときのみに用いる指標である。したがって、入口側の要素 MI, EI, RI, HI を評価に用いて、製品全体の環境パフォーマンスを示す統合指標 TI を求めることができる。

$$TI = \frac{U}{MI + EI + HI - RI} \quad (2.4)$$

表 2.5 E2-PA の各資源強度の定義

強度	一般定義	製品評価における定義	対象範囲		
			製造	使用	廃棄
EI エネルギー資源強度	エネルギー量を表す.	製品製造時(EI <sub>p</sub> ), 使用時(EI <sub>u</sub> )に投入されるエネルギーを表す資源強度	●	●	
MI 物質資源強度	物質量を表す.	製品製造時(MI <sub>p</sub> ), 使用時(MI <sub>u</sub> )に投入される材料物質を表す資源強度	●	●	
HI 有害物質資源強度	無害化に要する資源量を表す.	製品製造時(HI <sub>p</sub> ), 使用時(HI <sub>u</sub> )に投入される有害物質を表す資源強度	●	●	
RI 再生資源強度	3Rで回収された資源量を表す.	製品使用時(RI <sub>u</sub> ), 廃棄時(RI <sub>w</sub> )の3Rにおける回収資源量を表す資源強度	●	●	●
DI 長期使用化資源強度	※製品のみに適応.	製品の長期使用化と資源消費の抑制の両立(DI <sub>u</sub> )を評価する資源強度		●	
WI 廃棄物資源強度	廃棄物の処分量を表す.	製品使用時(WI <sub>u</sub> ), 廃棄時(WI <sub>w</sub> )において発生する廃棄物量を表す資源強度		●	
PI 汚染資源強度	人体, 生態系への影響を表す.	ライフサイクル(PI <sub>p</sub> , PI <sub>u</sub> , PI <sub>w</sub> )における人体, 生態系への影響を表す資源強度	●	●	●

本研究では、環境負荷として物質資源強度、エネルギー資源強度、再生資源強度の3点を評価対象とした。

環境負荷を統合化するには、資源の希少性、有害性、効率性等を考慮して重み付けを行う必要がある。E2-PAでは、いくつかの重み付けのバリエーションを有しているが、基本的には、表 2.6 に示す可採年数<sup>2-17)</sup>(あるいは擬似可採年数)による重み付けを行うことを基本としている。

表 2.6 主要資源の可採年数

主要資源	可採年数 年
原油	44.4
石炭	139.9
天然ガス	62.7
ウラン	93.4
鉄	273.7
銅	51.2
アルミニウム	247.2

ポテンシャルとは、投入された資源や設計時に設定された要素から、それぞれの環境負荷の上限を求める考え方である。各資源の投入量をそれぞれの可採年数によって重みづけを行い、その総和をとることによって得られる資源強度によって環境負荷は評価している。すなわち、ある物質  $x$  の 1kg あたりの資源強度を例にとると、その算出式は、次のように表現できる。

$$mi_x = \sum_i \left( \frac{m_{Mi}}{y_i} \right) + \sum_j \left( \frac{m_{Ej}}{y_j} \right) \quad (2.5)$$

ここで  $mi_x$  : 物質 x の資源強度換算原単位[kg/y/kg]

$m_{Mi}$  : 物質 を 1kg 製造するのに必要な物質 の投入量[kg/kg]

$y_i$  : 物質 の可採年数[y]

$m_{Ej}$  : 物質 x を 1kg 製造するのに必要なエネルギー j の投入量[kg/kg]

$y_j$  : エネルギー j の可採年数[y]

あるエネルギー資源 z のエネルギー資源強度換算原単位を  $ei_z$  とすると、これも同様の方法で算出できる。

再生資源強度は、使用済みとなった製品等のリユース、リサイクルによって、回収もしくは節約される資源強度と、その再生プロセスに投入される資源強度の収支として評価する。すなわち、リユースやリサイクルにより節約される資源の効果を表す資源強度であり、その値が大きいほど良好ということになる。その算出式は、次のように表現できる。

$$RI = I_R \times d - I_w \quad (2.6)$$

ここで  $RI$  : 再生資源強度 [kg/y]

$I_R$  : 再生対象物の資源強度[kg/y]

$d$  : 新規製造資源に対する価値の維持率

$I_w$  : 再生プロセスの投入資源強度[kg/y/]

E2-PA では、さまざまなリサイクル方法を体系化し、評価式が作成されている。使用済みの材料を再び同種の材料にリサイクルすることで節約される資源強度であるマテリアルリサイクル再生資源強度を例にすると、その算出式は次のように表現できる。

$$RI_{mr} = MI_{mr_p} \times d_{mr} - I_{mr_w} \quad (2.7)$$

$$d_{mr} = t_{mr} \times p_{mr} \quad (2.8)$$

ここで  $RI_{mr}$  : マテリアルリサイクル資源強度 [kg/y]

$MI_{mr_p}$  : マテリアルリサイクル対象となる物質の新規製造時の物質資源強度[kg/y]

$I_{mr_w}$  : マテリアルリサイクル工程の投入資源強度[kg/y/]

$d_{mr}$  : リサイクル材料の新規製造材料に対する価値の維持率

$t_{mr}$  : 材料活用期間率 (リサイクル材料の用途における活用期間と新規製造材料の活用期間比率; リサイクル材料活用期間の比率/設計耐用期間)

$p_{mr}$  : 性能維持率

## 2. 2. 5 DfE 定量評価データベースの構成要素

### (1) 解体性評価に必要なデータ

先に述べたとおり，解体性評価には分解性評価指数 DPI を用いる．表 2.7 は，DPI を算出するために必要となるデータを整理したものである．表中では各指数の算出に必要なデータ項目に該当するものに「●」をつけている．

表 2.7 DPI に算出に必要なデータの一覧

DPI 算出に必要なデータ	結合解除指数	結合探索指数	部品取出し指数
製品分類	●	●	
体積		●	
質量		●	●
結合種類・結合点数	●	●	
部品点数		●	●

### (2) 環境負荷評価に必要なデータ

先に述べたとおり，環境負荷評価には環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA を用いる．表 2.8 は，資源強度を算出するために必要となるデータを整理したものである．表中では各資源強度の算出に必要なデータ項目に該当するものに「●」をつけている．

表 2.8 資源強度の算出に必要なデータの一覧

データ項目	MI	EI <sub>p</sub>	EI <sub>u</sub>	RI <sub>i</sub>
製品の素材構成の種類と重量	●			●
製造時の投入エネルギー量		●		
製品寿命	●	●		
使用時の投入エネルギー量			●	

### (3) 製品間の環境配慮デザインの比較などに必要なデータ

DfE 定量評価データベースでは「データベース化された情報に基づき，製品の企画・設計段階にとどまらず，製品のライフサイクル全般に関わる関係主体向けに必要な情報である環境性・経済性評価に活用できる情報がデータベース化されていること」と「特定の製品に限定されず，異なるメーカー間，異なる製品間で共通化できる項目を設定すること」をコンセプトの一部として提示した．そこで，E2-PA と DPI の評価に必要なデータに加えて，「型番」，「メーカー」，「生産国」，「発売年度」，「製品区分」もデータベースの構成要素としている．

### (4) リサイクルプロセスの設計に必要なデータ

さらに，リサイクルプロセスの設計において，環境性・経済性は E2-PA，DPI を活用することが可能である．一方で，大型製品のように収集回収ルートが確

立されていない小型家電については，そもそもどういった製品を回収すべきかという点を検討することが必要である．その際，小型家電の受入先では，個々の製品ではなく，製品群としての資源的価値が重要であり，家庭等から排出される小型家電の発生量を考慮する必要がある．そのため，幅広い家電製品を対象とする本データベースにおいては，その発生量に関するデータも構成要素としている．なお，リサイクルプロセスに関する具体的な検討については，第4章，5章で述べる．

#### (5) データベースの項目

以上から，表 2.9 にデータベースの具体的な項目を整理した．素材構成・重量と結合方法・使用工具については表 2.10，2.11 に具体的な項目を示した．データの入手方法は次節で述べる．

表 2.9 データベースの構成要素とその内容

構成要素	項目数	内容
製品情報	4	型番，メーカー，生産国，発売年度
製品サイズ	4	縦，横，高さ，体積
素材構成・重量	49	鉄，アルミニウムなどの素材構成とその重量
結合方法・使用工具	35	ネジ類・+ドライバーなど
保有率	1	製品の世帯保有率
製品寿命	1	—
製造時のエネルギー投入量	1	電力，ガスなど
使用時のエネルギー投入量	1	電力，ガスなど
製品区分	3	大，中，小

表 2.10 素材構成・重量の具体的な項目内容

鉄	ステンレス	アルミニウム	銅
ニッケル	鉛	亜鉛	チタン
コバルト	マンガン	クロム	その他非鉄金属
LDPE	HDPE	PP	PS
EPS	PVC	B-PET	ABS
AS	PA6	PA66	POM
PC	PBT	ポリエステル樹脂	フェノール樹脂
エポキシ樹脂	ポリウレタン(軟質)	ポリウレタン(硬質)	表示なしプラ
合成ゴム	ガラス	再生ガラス	化学繊維
単一素材その他	—	—	—
金属複合材	合成樹複合材	金属樹脂複合材	基板
液晶	シート基板	モーター	HDD
マイク	スピーカー	ファン	複合素材その他

表 2.11 結合方法, 使用工具の具体的な項目内容

ネジ類	ドライバ(+)	はめ込み	ドライバ(-)
	ドライバ(-)		素手
	素手		ハサミ・ニツパ
	六角レンチ		ラジオペンチ
	スパナ		特殊ドライバ
	ラチェット		ハンマー
	モンキーレンチ		ギアプラー
	特殊ドライバ	接着類	ドライバ(-)
	ハンマー		素手
	アタックドライバ		ハサミ・ニツパ
	パイプレンチ		ラジオペンチ
	電動工具		ハンマー
	Y字ネジ	コネクタ	ドライバ(-)
星型ネジ	素手		
トルクスネジ	ハサミ・ニツパ		
設置	素手		ラジオペンチ
配線固定	素手	輪留め具	ドライバ(-)
	ハサミ・ニツパ		スナップリングプライヤ

## 2. 3 DfE 定量評価データベースの構築とその方法

### 2. 3. 1 製品設計段階の情報入手方法

#### (1) 入手するデータ

製品を手解体することで、製品設計段階の情報は入手する。具体的には、表 2.8 に示したデータベースの構成要素のうち、製品情報、製品サイズ、素材構成・重量、結合方法・使用工具のデータを取得する。

#### (2) 解体試験方法

本研究では、LCA (Life Cycle Assessment) により環境負荷の観点からの有効性が示されている Reuse への将来的な対応を考慮し、基本的に破碎を伴う解除は行わないことを解体試験の前提とした<sup>2-18)</sup>。ただし、基板などの分離に際し、配線を切断せざるをえない場合には破断する。この前提に基づき、可能な限り単一までの解体を行う。なお、リユース可能な部品については、それ以上の解体は行わない。

解体を開始する前に、製品もしくは製品の梱包に記載されている型番などから、型番、メーカー、生産国、発売年度などの情報を入手する。次に、メジャーを用いて、製品サイズの計測を行う。さらに、体重計等の秤を用いて、製品全体の重量を計測する。

製品の解体を行い、取り外した部品について、磁石などを活用してその素材

構成の判断を行い、重量を量る。また、このときに結合の種類と使用した工具を記録する。このとき、製品の設計改善策を検討するために必要となる、製品の解体フローを作成する。解体フローの例を図 2.4 に示す。

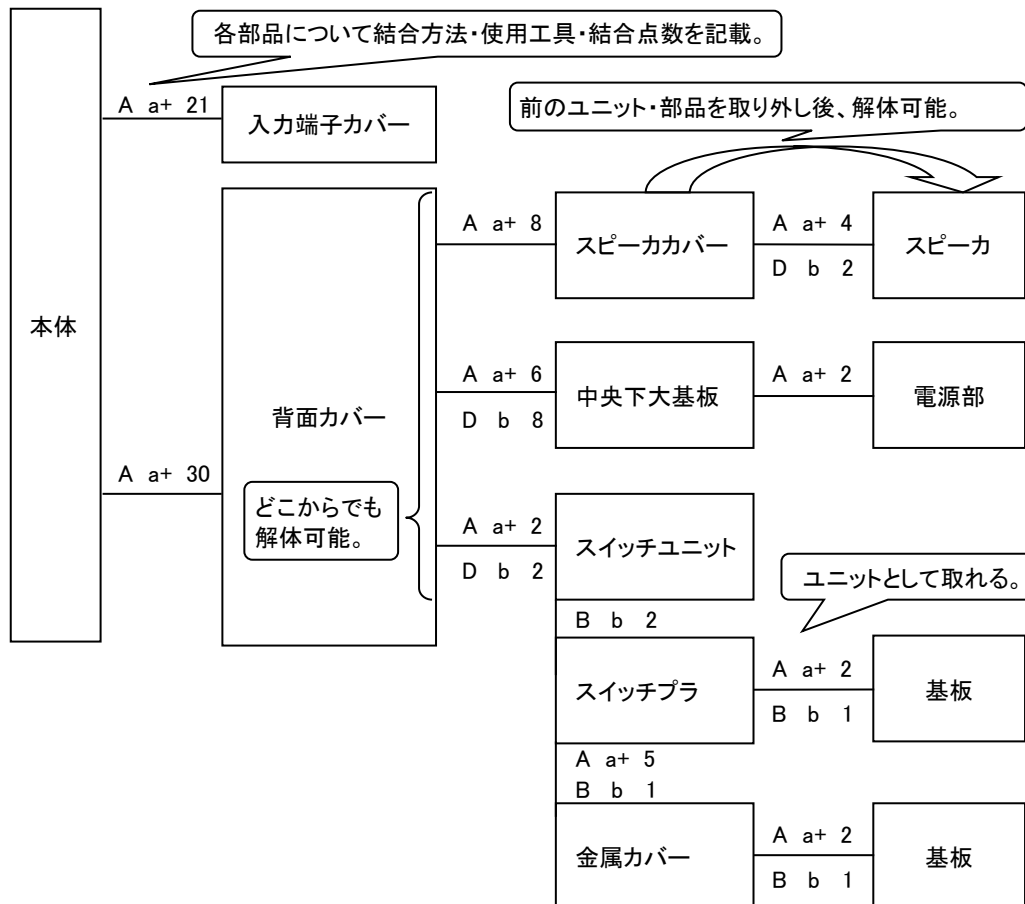


図 2.4 解体フローの例

### 2. 3. 2 製造段階の情報入手方法

#### (1) 製造時のエネルギー投入量

製品製造時に素材の他にどのようなエネルギー・資源を使用して製品を製造しているのかを把握するため、製品製造時に投入される資源量・エネルギー量を LCA データベース<sup>2-19)</sup>より引用した。

### 2. 3. 3 使用段階の情報入手方法

#### (1) 使用時のエネルギー投入量

製品使用時にどの程度のエネルギー（電力・水など）を消費して製品を使用しているのかを把握するため、製品仕様から製品使用時に投入されるエネルギー量に関する情報を入手する。

#### (2) 製品寿命

製品の機能を維持するために必要な部品の保有期間である「補修用性能部品の最低保有期間」<sup>2-20)</sup>を製品の寿命とした。



(3) 製品保有率

保有率は、省エネルギーセンターによる、平成20年度待機時消費電力調査報告書<sup>2-21)</sup>により設定し、未記載製品に関しては適宜その他資料<sup>2-22)</sup>より引用した。

2. 3. 4 DfE 定量評価データベースの構築

(1) データベースの構成

大	中	小	製品サイズ															
			型番	型番	メーカー	生産国	発売年	生産	解任年	重量 (g)	体積 (cc)	価格	リチウムイオン電池	アルミニウム	銅	ニッケル		
映像・音響家電	レコーダー	ビデオテープレコーダー	1	2					2011	0.025	0.12	0.025	0.000257	0	0.0030	0	0	
		MDレコーダー	2						2011	0.02	0.09	0.11	0.00076	0	0.0216	0	0	
		DVDレコーダー	3	TCM-48	SONY	中国	1996			2011	0.073	0.113	0.0466	0.000389	0	0.0005	0	0
		レコードプレーヤー	4	WM-EX1	SONY	日本	1994				0.02	0.075	0.11	0.000632	0	0	0	0
		DVDプレーヤー	5	RQ-SX41	Panasonic	日本	1995				0.018	0.109	0.075	0.000458	0	0.083	0	0
	プレーヤー	ポータブルカセットテーププレーヤー	6	WM-EX300	SONY	不明	1999				0.109	0.178	0.222	0.000197	0	0	0	0
		ポータブルCDプレーヤー	7	HE-PX550	aiwa	日本					0.02	0.108	0.077	0.000163	0	0	0.00225	0
		ポータブルMDプレーヤー	8	RQ-CW42	Panasonic	中国					0.083	0.325	0.116	0.000778	0	0	0	0
		ポータブルDVDプレーヤー	9	ND-PC-88	MARATHON	日本	不明				0.09	0.11	0.025	0.000245	0.0095	0	0.005	0
		ラジオ																
		ラジオカセット																
		ポータブルラジオ																
		ラジオライト																
		プロジェクター																
		映像拡張	液晶テレビ															
	ポータブルテレビ																	
	プラズマテレビ																	
	ブラウン管テレビ																	
	音響拡張	チューナー(BS・CS・地デジ)																
		スピーカー																
		ヘッドホン																
			マイク															

図 2.5 DfE 定量評価データベースの構造

品目ごとのシートに分けた製品データを平均し、その品目のデータとする。品目のデータは一つのシートにまとめることで様々な評価に対して必要なデータをすぐに取り出せる形式とした。

(2) 製品情報の搭載状況

表 2.12 は、現時点でデータベースに登録されている製品の一覧である。これまでに、早稲田大学永田研究室で解体してきた製品に加えて、第5章で述べる使用済み小型家電の実験を通して、新たに52製品を解体し、全300製品89品目のデータを蓄積した。

表 2.12 データベースに登録されている製品名と製品数

製品名	登録数	製品名	登録数	製品名	登録数
ビデオテープレコーダー	1	テレビドアホン	1	温水洗浄便座	1
MD レコーダー	1	トランシーバー	1	血圧計	1
DVD レコーダー	1	デジタルオーディオプレーヤー	2	体温計	1
レコードプレーヤー	1	ノートパソコン	2	体重計	1
DVD プレーヤー	1	ネットブックパソコン	1	懐中電灯	1
ポータブルカセットテーププレーヤー	9	PC サーバー	1	掃除機	1
ポータブル CD プレーヤー	11	プリンター	1	ハンドクリーナー	3
ポータブル MD プレーヤー	22	外付け DVD	1	布団乾燥機	1
ポータブル DVD プレーヤー	1	外付け HDD	1	アナログ時計	1
ラジオ	1	ルータ	1	換気扇	1
ラジカセ	3	LAN のハブ	1	洗濯機	30
ポータブルラジオ	2	マウス	1	アイロン	4
ラジオライト	1	キーボード	1	ミシン	1
プロジェクター	1	電子辞書	5	ドライヤー	8
液晶テレビ	2	卓上計算機	1	ヘアアイロン	1
ポータブルテレビ	1	テレビゲーム	1	シェーバー	10
プラズマテレビ	2	ポータブルゲーム	9	電子レンジ	1
ブラウン管テレビ	1	コントローラー	2	炊飯器	1
チューナー(BS・CS・地デジ)	1	カラオケセット	1	ホームベーカリー	1
スピーカー	1	扇風機	1	電気トースター	1
ヘッドホン	1	エアコン	27	IH・電磁調理器	2
マイク	1	空気清浄機	2	コーヒーメーカー	2
デジタルカメラ	16	加湿器	2	ミキサー	2
ビデオカメラ	1	除湿機	1	ホットプレート	1
電子楽器	1	こたつ	1	冷蔵庫	35
携帯電話	21	電気毛布	1	食器洗い機	1
スマートフォン	1	電気ストーブ	3	ポット	1
電話機	2	電気アンカ	2	リモコン	1
電話機(子機)	1	マッサージ機	2	シュレッダー	2
FAX	1	電動歯ブラシ	1		

## 2. 4 DfE 定量評価データベースの解析と活用

### 2. 4. 1 個別品目に着目した解析～携帯電話を例に～

個別製品として携帯電話を取り上げ、データベースに搭載された 21 台の携帯電話を対象に解析した。

#### (1) 評価対象製品の概要

表 2.13 は、評価を行った携帯電話の仕様を示したものである。メーカー別には、Docomo が 9 製品、au が 9 製品、Soft Bank が 3 製品である。タイプ別には、折りたたみ型が 9 機種、スライド型が 6 機種、ストレート型が 6 機種である。年代別には、2001 年製が 2 機種、2004 年製が 3 機種、2005 年製が 3 機種、2006 年製が 7 機種、2007 年製が 6 機種である。

表 2.13 評価対象製品①

キャリア	製造会社	製品名	タイプ	写真	質量 kg	サイズ	発売時期
au	三洋	W52SA	折りたたみ型		0.133	107×50×18.7	2007年7月
au	カシオ	W52CA	折りたたみ型		0.139	104×49×21	2007年7月
au	パナソニック	W52P	折りたたみ型		0.12	102×50×18.4	2007年7月
au	ソニー	W52S	スライド型		0.13	108×54×19.9	2007年7月
au	東芝	W52T	スライド型		0.152	111×51×22	2007年3月
au	日立	W22H	スライド型		0.142	115×51×27	2004年12月
au	京セラ	W52K	ストレート型		0.105	110×50×13.1	2007年3月

表 2.13 つづき 評価対象製品②

キャリア	製造会社	製品名	タイプ	写真	質量 kg	サイズ	発売時期
au	三洋	A5508SA	ストレート型		0.079	132×45×13	2004年12月
au	日立	C3001H	ストレート型		0.086	130×44×24	2001年12月
docomo	パナソニック	P902iS	折りたたみ型		0.114	106×49×22	2006年6月
docomo	富士通	F902iS	折りたたみ型		0.12	107×50×19.7	2006年6月
docomo	シャープ	SH901iS	折りたたみ型		0.15	112×52×25	2005年6月
docomo	三菱	D253i	スライド型		0.096	96×47×24	2004年12月
docomo	三菱	D901i	スライド型		0.136	106×50×26	2005年2月

表 2.13 つづき 評価対象製品③

キャリア	製造会社	製品名	タイプ	写真	質量 kg	サイズ	発売時期
docomo	三菱	D902i	スライド型		0.116	109×50×19.5	2006年6月
docomo	ソニー	SO506i	ストレート型		0.097	105×46×19.4	2005年2月
docomo	日本無線	R691i	ストレート型		0.099	130×48×20	2001年2月
docomo	三菱	D702i	ストレート型		0.099	130×47×16.8	2006年3月
softbank	東芝	810T	折りたたみ型		0.111	97×49×20	2006年11月
softbank	シャープ	911SH	折りたたみ型		0.138	106×50×22	2006年11月
softbank	パナソニック	705P	折りたたみ型		0.103	101×50×14.8	2006年11月

(2) 結合点数のタイプ別比較

図 2.6 は、結合点数について、結合種類と使用工具の内訳にも着目し、折りたたみ型、スライド型、ストレート型のタイプ別に比較したものである。グラフの横線は各々の結合点数の合計の平均値を示している。

折りたたみ型が 79、スライド型が 77、ストレート型が 45 となり、折りたたみ型、スライド型はストレート型に比べ約 1.7 倍の結合点数をとることがわかる。内訳に着目すると、全てにおいてははめ込みが結合点数の多くを占めている。また、折りたたみ型とスライド型は、ストレート型に比べてネジ類、コネクタが多くなっており、折りたたみ型は他の 2 種よりも、接着をマイナスイオンで解除する数が多くなっている。ネジの種類を見ると、プラスネジと Y 字穴ネジは多くのメーカーで使用され、六角ネジはパナソニックと三洋、星型ネジはシャープとソニー、トルクスネジは日立で、それぞれ使われていることがわかる。更に、結合点数が最大のもはスライド型の W52T で、90 点近く、逆に最小のものはストレート型の R691i、C3001H で、40 点弱である。このように、同じ携帯電話でも結合点数には大きな差があることがわかる。

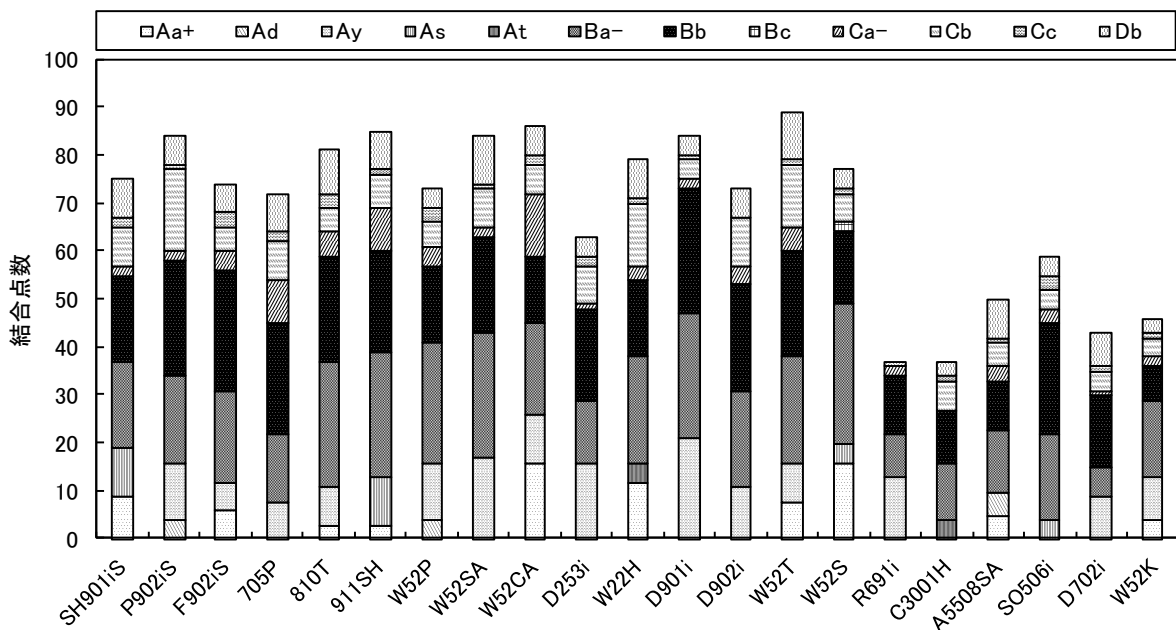


図 2.6 結合点数のタイプ別比較

(3) 結合点数の同年代別比較

図 2.7 は同時期に発売された製品を比較したものである。これより、ワンセグ（テレビ視聴）機能付きの携帯電話の結合点数が多いことがわかる。

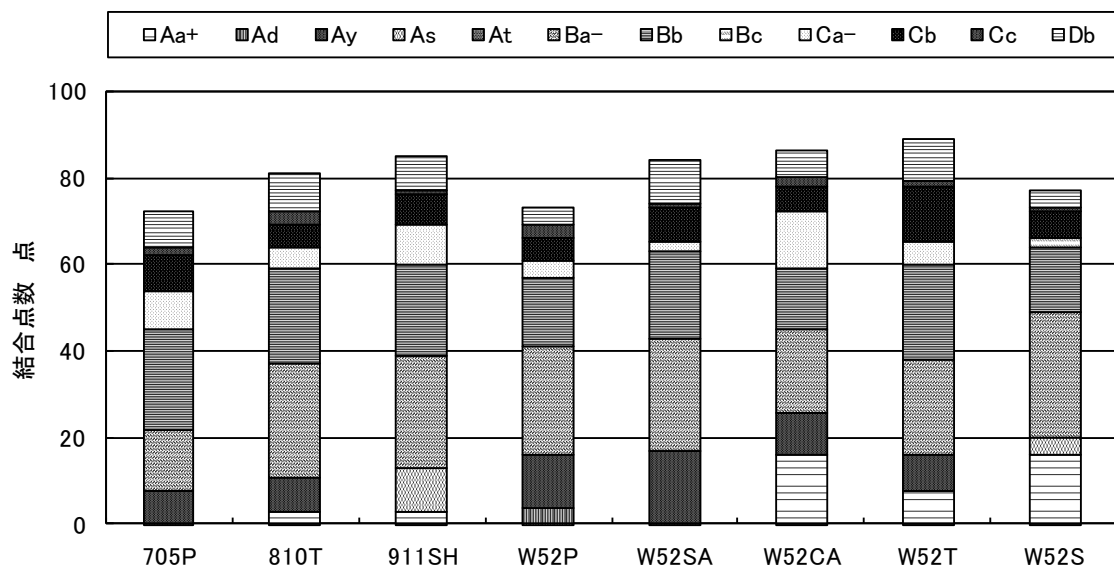


図 2.7 結合点数の発売時期別比較

(4) 結合点数の同一シリーズ比較

図 2.8 は同一メーカーの同一シリーズで比較したものである。シリーズが更新されることで、総結合点数が減少傾向にある。特にネジの結合点数が減少しており、逆に接着の点数が増加していることがわかる。

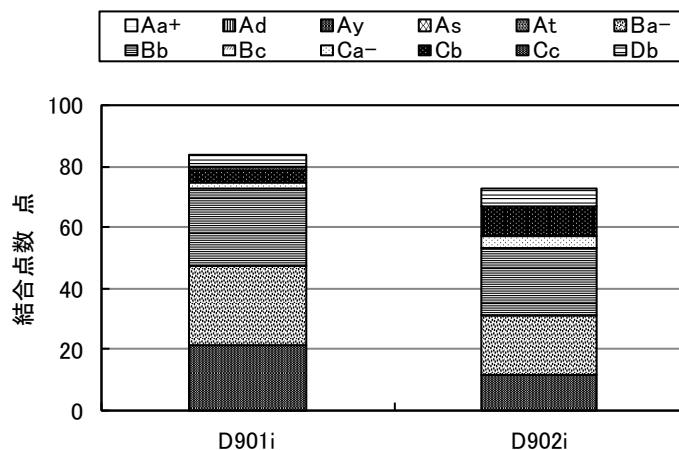


図 2.8 結合点数と同一シリーズ間比較

(5) 素材構成のタイプ別比較

図 2.9 は、部品の材質と部品点数の関係をタイプ別に比較したものである。先程と同様に、グラフの横線は各々の部品点数の合計の平均値を示している。結合点数と同様の傾向が得られる。ここで、全体的に合成樹脂が多くを占めており、スライド型における鉄の割合は、他の2種よりも大きくなっている。部品点数においても、最大値は70近くで、逆に最小値は30弱であり、大きな差が見られる。



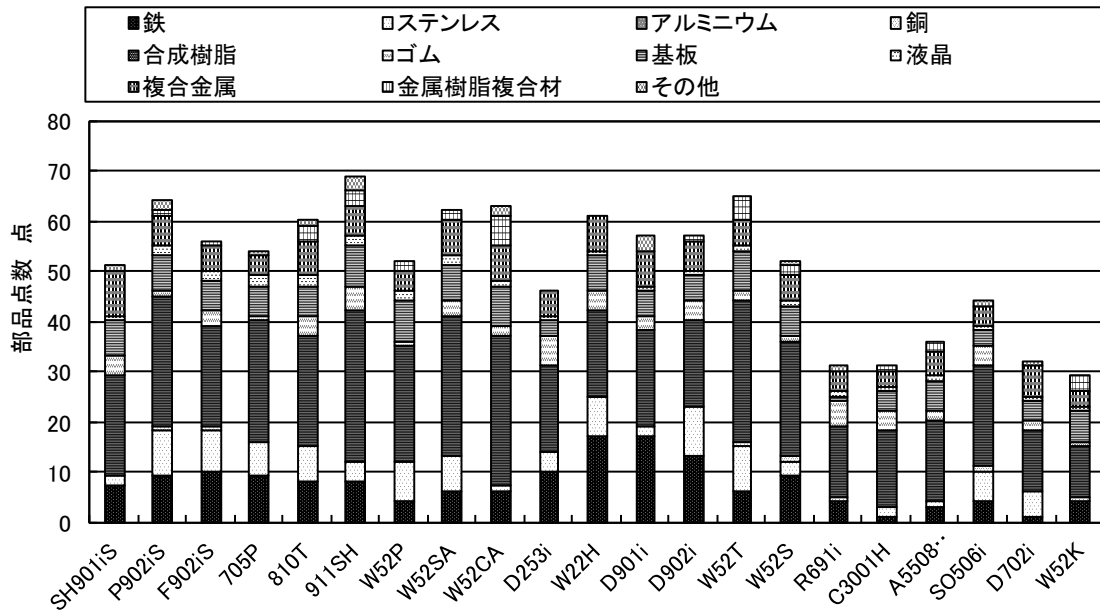


図 2.9 部品素材内訳のタイプ別比較

(6) 素材構成の年代別比較

図 2.10 は、携帯電話の素材構成を年代別に並べたものである。単一素材まで解体可能な部品の質量割合は、全体の 40～60%を占めており、発売時期やタイプ別、メーカー別にみても大きな違いは見られない。合成樹脂、基板が全体を占める割合が高い。内訳をみると、金属は 5～20%、基板は 20～30%であり、合成樹脂は 25～60%、複合金属は 5～25%、金属樹脂複合材は 0～20%と機種によって差があることがわかる。このように、データベースを分析することで、単一素材までの解体性など、DfE の動向を知ることができる。

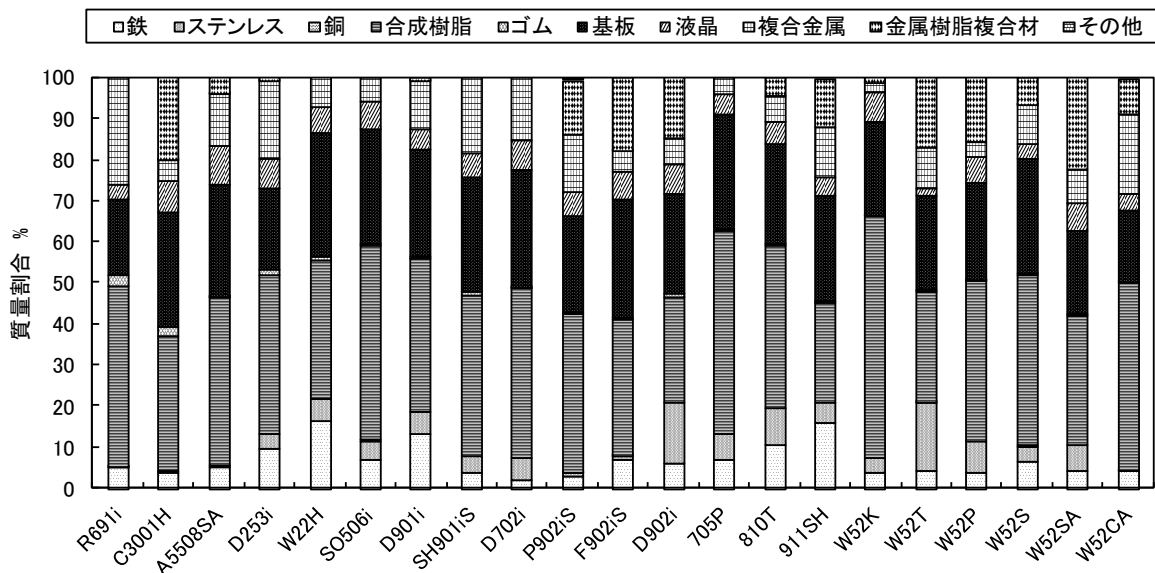


図 2.10 携帯電話における素材構成の年代別推移

2. 4. 2 複数品目に着目した解析

(1) 評価対象製品の概要

表 2.14 は、評価を行った複数品目の仕様を示したものである。9 品目 19 製品である。

表 2.14 評価対象製品

製品名	コーヒーメーカー		加湿器		ハロゲンヒーター		
概観							
製造会社	象印	東芝	タイガー	象印	三洋	アジア産業 開発	
生産国	中国	不明	不明	日本	日本	中国	
サンプル名	cm1	cm2	hf1	hf2	hh1	hh2	
製品名	ミキサー		ハンドクリーナー			ハンドマッサージャー	
概観							
製造会社	松下電器	三洋	東芝	松下電器	三洋	松下電器	オムロン
生産国	中国	中国	中国	中国	不明	中国	中国
サンプル名	mix1	mix2	hc1	hc2	hc3	hm1	hm2
製品名	ドライヤー		空気清浄機		アイロン		
概観							
製造会社	松下電器	テスコム	象印	松下電器	松下電器	東芝	
生産国	タイ	日本	中国	中国	中国	中国	
サンプル名	dry1	dry2	ac1	ac2	ir1	ir2	

(2) 結合形式の比較

図 2.11 は、結合形式の割合に着目し、製品を類型化したものである。ネジが多い製品、ネジとはめ込みが同程度の製品、はめ込みが多い製品、の3種に大別できる。ネジが最も多いのはハロゲンヒーター、はめ込みが最も多いのはハンドマッサージャーである。ドライヤーに関しては、接着の占める割合も高くなっている。また、どの製品も、ネジとはめ込みが全体に占める割合が高く、アイロンとハンドマッサージャーはほぼ全ての部品がネジとはめ込みである。

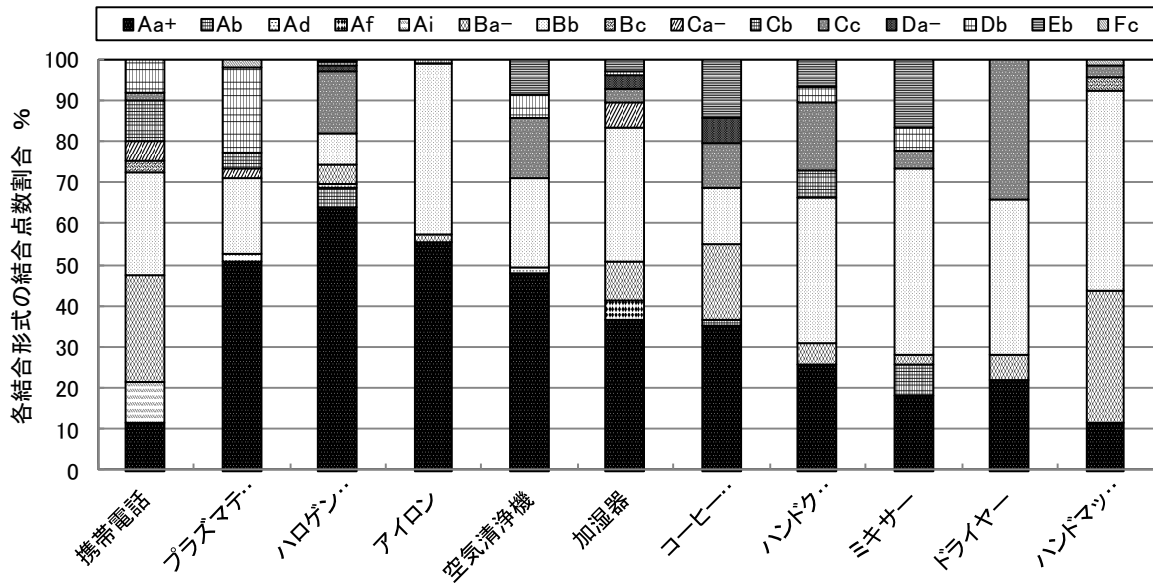


図 2.11 小型家電の各結合形式の結合点数割合

(3) 合成樹脂の材質表示割合

図 2.12 は、評価対象品における合成樹脂の材質表示割を示したものである。コーヒーメーカー、加湿器、ハロゲンヒーターといった、製品自体が熱をもつ製品には耐熱性に優れる PP が使用され、ハンドクリナー、ハンドマッサージャー、ドライヤーといった、手持ちで扱う製品には成形性に優れる ABS が主に使用されている。また、空気清浄機には PS が主に使用され、ミキサー、アイロンには 4 種類以上の合成樹脂が使用されている。

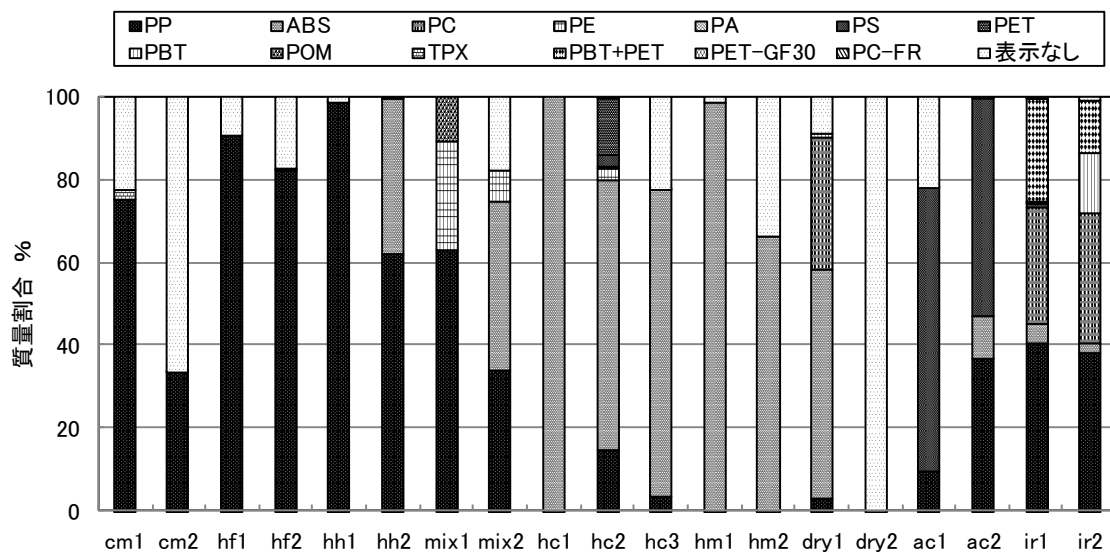


図 2.12 小型家電の合成樹脂の材質表示割合

(4) 素材構成割合の比較

図 2.13 は、素材構成全体に対する単一素材まで解体可能な部品の質量割合を示したものである。値は、製品ごとの平均値となっている。

単一素材まで解体可能な部品は 30～60% であり、環境配慮性に差がみられる。また、ミキサーは大半がガラスで、ハロゲンヒーターは鉄が多いが、それ以外の製品に関しては合成樹脂が多くを占めている。

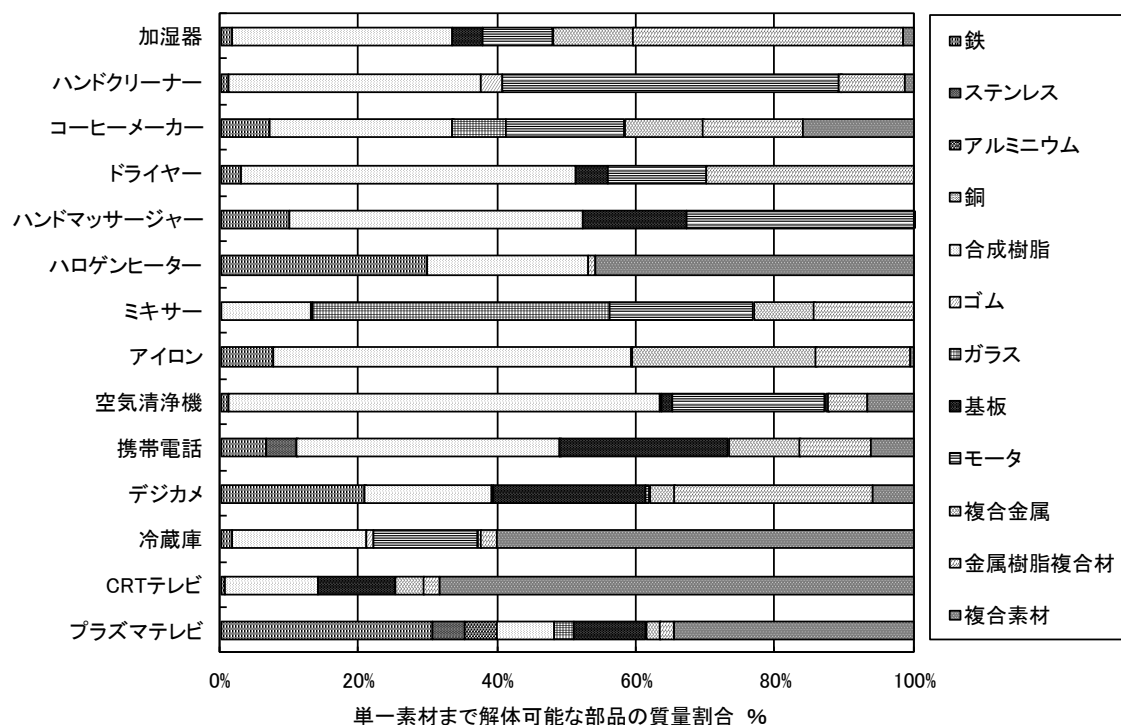


図 2.13 小型家電の単一素材まで解体可能な部品の質量割合

2. 4. 3 リサイクルプロセスへの活用

リサイクルプロセスにおいて、注目した部品を容易に取り出すことができれば収支の改善につながり、製品設計段階で、分解性の高い製品設計を取り入れることによって、収支を低下させることなくリサイクル率を向上させることができる。すなわち、製品設計段階とリサイクル段階の両面の改善により、リユース・リサイクルを促進することが可能である。

そこで、DfE 定量評価データベースを活用し、分解性評価指数 DPI と環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA を組み合わせることで、製品設計段階において、リサイクル段階で取り出す部品を指定した場合のリサイクル率、リサイクル収支をシミュレーションできるツールの開発を開発した。

図 2.14 は開発したソフトの概略図である。Excel のマクロ機能を用いることによって、解体フローから取出部品取り出しまでの DPI を自動計算し、取り出し目標部品、資源売却価格、機械破碎選別効率、人件費などの条件を手動入力することで RI 回収率、リサイクル収支を自動的に算出できる。

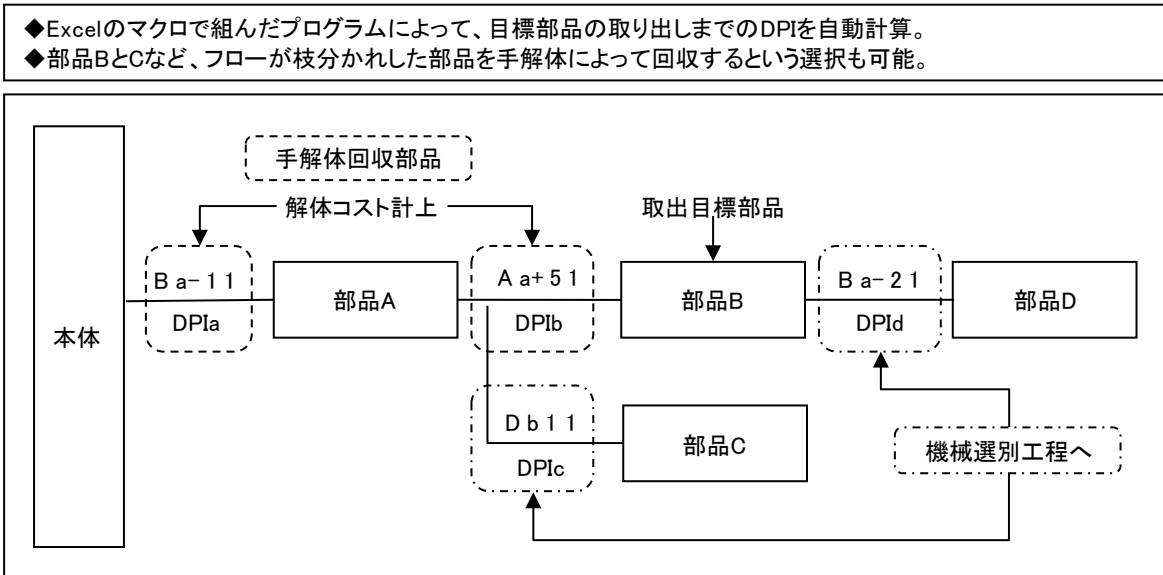


図 2.14 ソフトの概略図

手解体部品を指定したリサイクル収支算出ソフトの使用順序と使用例を図 2.15 と図 2.16 に示す。製品情報を入力し、解体フローの作成、部品の重量・素材の入力を行い、マクロを使用してプログラムを組み解体フローから各部品に対する DPI を算出することができる。自動的に各工程の DPI を算出させる。次に各行程における DPI を算出した後に手解体する部品を想定し、破碎機器にかけた部品に関する収益と手解体する部品に関する人件費と収益を算出することでリサイクル収支と RI 回収率を算出できる。このソフトは利用者の形態に合わせて資源売却益、機械破碎選別による資源回収率、人件費、処理能力を設定することができる。

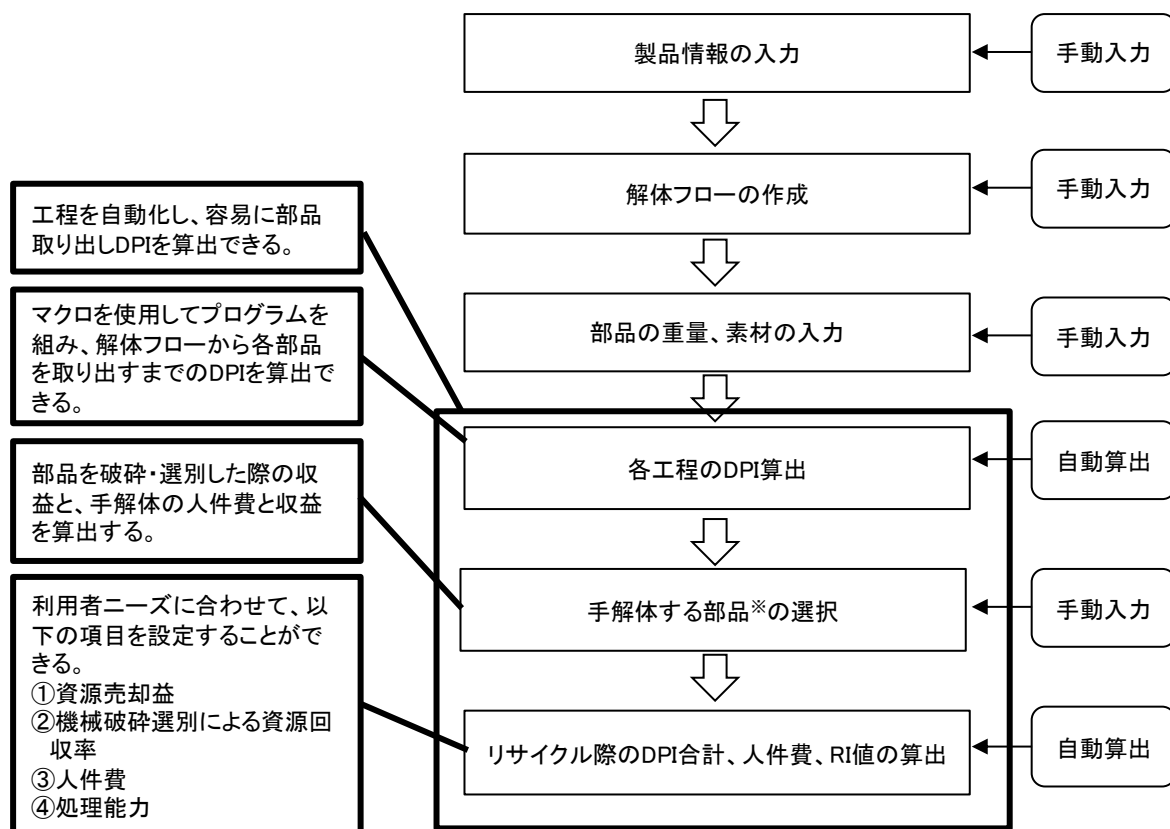


図 2.15 リサイクル収支算出ソフトの使用順序

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		記入者情報								
3		作業日	2010/12/11							
4		登録番号	1X07B159-8							
5		氏名	荻村 英治							
6										
7		製品情報								
8		製品分類	小家電等							
9		製品名	クロスカオシュレッダー							
10		型番	B-01							
11		Serial Number								
12		メーカー	Asmix							
13		生産国								
14		販売年度	年							
15		高さ	m	0.162	※	製品が入るBOXをイメージしてサイズを計算してください。				
16		幅	m	0.358	※	製品が入るBOXをイメージしてサイズを計算してください。				
17		奥行	m	0.077	※	製品が入るBOXをイメージしてサイズを計算してください。				
18		体積	m <sup>3</sup>	0.00442827						
19		質量	kg	1.7						
20		参考HP	http://www.asmix.co.jp/product/shredder/sd01/b-01.html							
21										
22		機能情報								
23		消費電力	15W(50/60Hz)							
24		使用電源	付属の専用ACアダプター							
25		定格回転数	A4コピ用紙6枚、官製はがき1枚							
26		細断寸法	4.0×2.0mm(2口スリット)							
27		ゴミボックスの容積	約2.0ℓ(A4コピ用紙約18枚)							
28		細断速度	約1.7m/分(A4コピ用紙1枚時・60Hz)							
29		定格使用時間	3分間							
30		制御機能	温度プルーガー 過電流保護機構							
31		操作機能	マニュアルスタート&ストップスイッチ 自動停止安全スイッチ・送紙スイッチ							
32		給紙口幅	220mm							
33										
34										

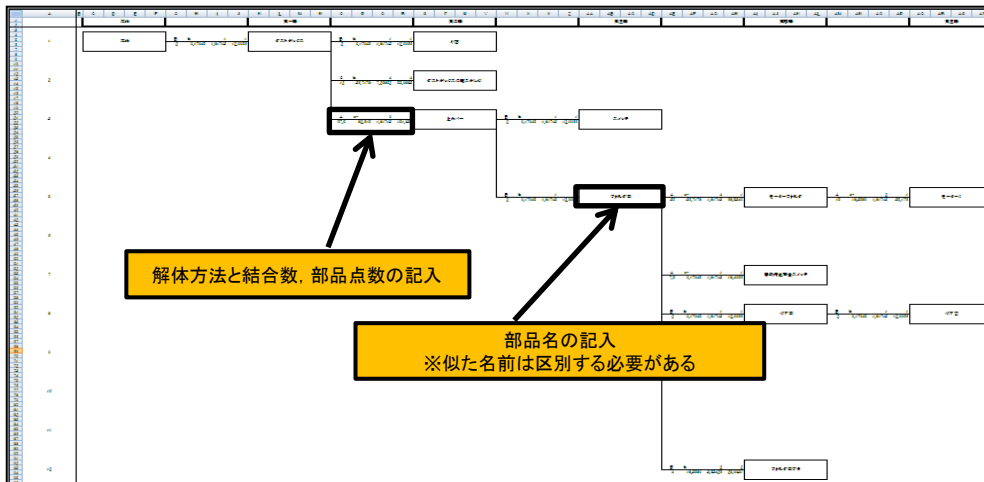
製品情報の入力

製品の写真を

①解体を行う製品の種類をリストより選択

②解体を行う電とモバイル機器のどちらに該当するかを製品例から把握する。

(a) 製品情報入力例



(b) 解体フロー記入例

部品名	部品点数	1個あたりの部品質量	部品質量合計	単一素材への分解可能	材質または材質表示	機械部品	回収率	素材収益(円)	素材収益(円)	稼働時間(分)	稼働時間(分)
ダストボックス	1	271.9	0.0713	○	表示なし		0.4	2	0.5420	-25.0	-0.94423
小蓋	1	2.4	0.0024	○	表示なし		0.4	2	0.0048	-25.0	-0.08144
ダストボックスの底スポンジ	4	0.2	0.0008	○	合成樹脂(ポリイソブレン)		0.8	2	0.0016	-7.2	-0.00278
上カバー	1	197.3	0.1973	○	ABS		0.4	35	6.8055	-12.4	-2.44852
スイッチ	1	8.6	0.0086	○	ABS		0.4	35	0.301	-12.4	-0.10864
フォルダ	1	8.8	0.0088	○	表示なし		0.4	2	0.0176	-25.0	-0.22523
モーターフォルダ	1	88.6	0.0886	○	表示なし		0.4	2	0.1772	-25.0	-2.28810
モーター	1	15.2	0.0152	×	モーター		0.8	30	0.456	15.2	0.23104
自動停止安全スイッチ	1	3.7	0.0037	○	表示なし		0.4	2	0.0074	-25.0	-0.09473
ギア	1	3.8	0.0038	×	金属(鋼)		0.8	21	0.0798	9	0.0304
ギア	1	7.7	0.0077	○	表示なし		0.4	2	0.0154	-25.0	-0.19712
ギア	1	2.5	0.0025	○	鉄		0.8	22	0.085	15.4	0.0388
ギア	1	17.6	0.0176	○	鉄		0.8	22	0.3872	15.4	0.27104
シャフト小	1	2	0.002	○	鉄		0.8	22	0.044	15.4	0.0308
シャフト中	1	3.7	0.0037	○	鉄		0.8	22	0.0814	15.4	0.05688
シャフト大	1	0.4	0.0004	○	鉄		0.8	22	0.0088	15.4	0.00616
ギア	1	0.09	0.0009	○	鉄		0.8	22	0.44	15.4	0.3157
ギア	2	4.7	0.0094	○	鉄		0.8	22	0.2088	15.4	0.14478
フォルダ	1	15.6	0.0156	○	表示なし		0.4	2	0.0312	-25.0	-0.39938
シャフト大	1	105.2	0.1052	○	鉄		0.8	22	0.0000	0	0
フォルダ	1	0.4	0.0004	○	鉄		0.8	22	0.0000	0	0
刃固定ブラ	27	0.3	0.0081	○	表示なし		0.4	2	0.0162	-25.0	-0.20738
刃	54	5.2	0.0208	○	鉄		0.8	22	6.1776	15.4	4.32432
フォルダ	1	0.4	0.0004	○	鉄		0.8	22	0.0088	15.4	0.00616
シャフト中	1	105.2	0.1052	○	鉄		0.8	22	0.0000	0	0
フォルダ	1	0.4	0.0004	○	鉄		0.8	22	0.0088	15.4	0.00616
刃固定ブラ	27	0.3	0.0081	○	表示なし		0.4	2	0.0162	-25.0	-0.20738
刃	54	5.2	0.0208	○	鉄		0.8	22	6.1776	15.4	4.32432
フォルダ	1	0.4	0.0004	○	鉄		0.8	22	0.0088	15.4	0.00616
フォルダ	2	0.7	0.0014	○	表示なし		0.4	2	0.0028	-25.0	-0.03584
フォルダ	2	0.7	0.0014	○	表示なし		0.4	2	0.0028	-25.0	-0.03584
本体残存部	1	146.7	0.1467	○	ABS		0.4	35	5.1345	-12.4	-1.81903
		0	0	0			0	0	0	0	0

(c) 部品の重量・素材の入力例

No.	部品名	重量	質量	材質	回収率	素材収益	稼働時間
1	ダストボックス	271.900	0.07130	ABS	0.4	0.54200	-25.0
2	小蓋	2.400	0.00240	ABS	0.4	0.00480	-25.0
3	ダストボックスの底スポンジ	68.96287	0.55170	合成樹脂(ポリイソブレン)	0.8	0.00160	-7.2
4	上カバー	164.9287	151.9321	ABS	0.4	6.80550	-12.4
5	スイッチ	177.9253	12.9965	ABS	0.4	0.30100	-12.4
6	フォルダ	246.4602	68.5349	表示なし	0.4	0.01760	-25.0
7	モーターフォルダ	281.6362	35.1760	表示なし	0.4	0.08860	-25.0
8	モーター	195.8219	18.4855	モーター	0.8	0.45600	15.2
9	自動停止安全スイッチ	203.9184	12.9965	表示なし	0.4	0.00740	-25.0
10	ギア	216.915	12.9965	表示なし	0.4	0.00250	-25.0
11	ギア	239.9116	12.9965	表示なし	0.4	0.01760	-25.0
12	ギア	242.9082	12.9965	表示なし	0.4	0.00250	-25.0
13	シャフト小	294.7636	51.8854	表示なし	0.4	0.00200	-25.0
14	シャフト中	313.2802	18.4855	表示なし	0.4	0.00370	-25.0
15	シャフト大	326.2566	12.9965	表示なし	0.4	0.00040	-25.0
16	ギア	365.2465	25.9931	表示なし	0.4	0.00940	-25.0
17	フォルダ	378.5431	12.9965	表示なし	0.4	0.00140	-25.0
18	フォルダ	395.7396	18.4855	表示なし	0.4	0.00040	-25.0
19	刃固定ブラ	693.6472	295.9078	表示なし	0.4	0.00810	-25.0
20	刃	1039.617	345.91	鉄	0.8	6.17760	15.4
21	フォルダ	1068.114	18.4855	表示なし	0.4	0.00040	-25.0
22	フォルダ	178.5431	12.9965	表示なし	0.4	0.00040	-25.0
23	フォルダ	391.2396	25.9931	表示なし	0.4	0.00140	-25.0
24	フォルダ	203.9184	25.9931	表示なし	0.4	0.00140	-25.0
25	本体残存部	0	0		0	0	0

(d) 各工程の DPI 算出例

	AI	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	
1													
2	手解体する部品	ギア	フォルダ	刃固定ブラ			破砕部品が否	破砕(人件費込)	手解体による素材収益	手解体時	破砕PI	選別解体PI	
3	ギア	0	0	0	0	0	0	-7.11126134	0	0.0002385	9.539E-06	9.53917E-05	
4	フォルダ	0	0	0	0	0	0	-0.06290832	0	0.211E-06	8.439E-07	8.43864E-07	
5	刃固定ブラ	0	0	0	0	0	0	-0.00624644	0	7.032E-07	5.629E-07	5.62579E-07	
6	手解体する部品	0	0	0	0	0	0	-2.56722314	0	0.0000469	0.0312133	0.031213348	
7	ギア	0	0	0	0	0	0	-0.11190148	0	0.0001328	5.311E-06	5.31059E-06	
8	フォルダ	0	0	0	0	0	0	-0.23066384	0	0.779E-06	3.094E-06	3.09417E-06	
9	刃固定ブラ	0	0	0	0	0	0	-2.32236548	0	0.7788E-06	3.115E-06	3.11526E-06	
10	手解体する部品	0	0	0	0	0	0	0.22174064	0	0.0007126	0.0006701	0.000670074	
11	ギア	0	0	0	0	0	0	-0.09698366	0	0.2252E-06	1.301E-06	1.30096E-06	
12	フォルダ	0	0	0	0	0	0	0.03807519	0	0.9891E-06	7.905E-06	7.90486E-06	
13	刃固定ブラ	0	0	0	0	0	0	-0.23193086	0	0.7699E-06	2.707E-06	2.7074E-06	
14	手解体収益	-362.5417561	0	0	0	0	0	0.0389706	0	0.3872	0.0001019	9.175E-06	0.000101943
15	破砕収益	0	0	0	0	0	0	0	0.044	1.158E-06	1.043E-06	1.15846E-06	
16	総収益	-362.5417561	0	0	0	0	0	0	0.0814	2.143E-06	1.929E-06	2.14313E-06	
17	すべて手解体のPI	0	0	0	0	0	0	0	0.0088	2.317E-06	2.085E-06	2.31689E-06	
18	手解体する部品	1	1	1	0	0	1	0	0.491	0.0001187	0.0001069	0.000118741	
19	ギア	1	1	1	0	0	1	0	0.2068	5.446E-06	4.9E-06	5.4447E-06	
20	フォルダ	1	1	1	0	0	1	0	0.0312	1.371E-06	5.485E-06	1.37128E-06	
21	刃固定ブラ	1	1	1	0	0	1	0	0.0000693	0.0000484	0.000048408	0.000048408	
22	手解体する部品	0	0	0	0	0	0	0	0.2317E-06	2.085E-06	2.0852E-06	2.0852E-06	
23	ギア	0	0	0	0	0	0	0	0.2317E-06	2.085E-06	2.0852E-06	2.0852E-06	
24	フォルダ	0	0	0	0	0	0	0	7.12E-06	2.848E-06	2.84804E-06	2.84804E-06	
25	刃固定ブラ	0	0	0	0	0	0	0	0.00016265	0.00014638	0.0001463813	0.0001463813	
26	手解体する部品	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2317E-06	2.085E-06	2.0852E-06	
27	ギア	0	0	0	0	0	0	0	2.3144	0.0000693	0.0000484	0.000069343	
28	フォルダ	0	0	0	0	0	0	0	0.0088	2.317E-06	2.085E-06	2.31689E-06	
29	刃固定ブラ	0	0	0	0	0	0	0	0.0162	7.12E-06	2.848E-06	7.1201E-06	
30	手解体する部品	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00016265	0.00014638	0.0001463813	
31	ギア	0	0	0	0	0	0	0	0.00691528	0.2317E-06	2.085E-06	2.0852E-06	
32	フォルダ	0	0	0	0	0	0	0	-0.03669652	0.1231E-06	4.923E-07	4.92254E-07	
33	刃固定ブラ	0	0	0	0	0	0	0	-0.03669652	0.1231E-06	4.923E-07	4.92254E-07	
34	手解体する部品	0	0	0	0	0	0	0	-1.90883106	0.00022647	0.0000069	0.000006888	
35	ギア	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
36	フォルダ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
37	刃固定ブラ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
38	手解体する部品	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
39	ギア	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
40	フォルダ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

(e) 手解体部品選択とリサイクル収支, RI 値の算出例

図 2.16 リサイクル収支算出ソフト使用例

ソフトの利用事例として、携帯電話の解体データを基に、リサイクル収支算出ソフトで分析を行った。表 2.15 に示す携帯電話を対象に、そこから 4 部品を選択し、手解体するという条件でパターン解析を行った。



表 2.15 評価対象製品の概要

略称	折りたたみ型
製品写真	
製品名	Softbank 705P
メーカー	PANASONIC
生産国	中国
発売年度 年	2006
高さ m	0.101
幅 m	0.05
奥行 m	0.0148
体積 m <sup>3</sup>	7.474E-05
質量 kg	0.103

図 2.17 はソフトを用いて解析した結果である。4つの部品を取り出すパターンは、約 30 万通りあり、それぞれのリサイクル収支と RI 回収率が算出される。算出された結果からリサイクル収支が高く RI 回収率の高い選択する手解体の部品パターンを選択することで、手解体取り出し部品の易解体性向上による製品設計における高度化と解体レベルの設定したリサイクルプロセスの高度化を提案する事ができる。そこで携帯電話における具体的な製品設計高度化、リサイクルプロセス高度化への改善を検討する。

第2章 DfE 定量評価データベースの構築とその解析

4部品選択の組合せ  
(約30万パターン of 部品選択が行われた。)

選択によるリサイクル収支とRI

No.	部品解体組み合わせ					ボタン 1		ボタン 2		総収益	RI比率
	A	B	C	D	E	破碎収	手解体収	DPI	RI		
130	ボタン部	ボタン保護	ボタン接続	電池A		5.260683	-23.3049	44.16764	0.001079	-18.0442	67.78351
927	ボタン部	画面カバー	赤外線ブラ	電池A		5.306984	-28.0537	53.16764	0.00108	-22.7467	67.83651
354	ボタン部	ボタン保護	画面カバー	電池A		5.319828	-28.5805	54.16764	0.00108	-23.2606	67.85274
341	ボタン部	ボタン保護	画面カバー	赤外線ブラ		5.3063	-28.5805	54.16764	0.00108	-23.2742	67.85307
793	ボタン部	ボタン保護	赤外線ブラ	電池A		5.32009	-32.6929	61.95955	0.00108	-27.3728	67.85307
3010	ボタン保護	画面カバー	赤外線ブラ	電池A		5.32009	-32.6929	61.95955	0.00108	-27.3728	67.85307
104	ボタン部	ボタン保護	ボタン接続	画面カバー		5.304559	-29.1061	55.16764	0.00108	-23.8015	67.85638
388	ボタン部	ボタン接続	画面カバー	電池A		5.318349	-33.2185	62.95955	0.00108	-27.9001	67.85638
2470	ボタン保護	ボタン接続	画面カバー	電池A		5.318349	-33.2185	62.95955	0.00108	-27.9001	67.85638
116	ボタン部	ボタン保護	ボタン接続	赤外線ブラ		5.304821	-33.2184	62.95955	0.00108	-27.9136	67.85671
387	ボタン部	ボタン接続	画面カバー	赤外線ブラ		5.304821	-33.2184	62.95955	0.00108	-27.9136	67.85671
2469	ボタン保護	ボタン接続	画面カバー	赤外線ブラ		5.304821	-33.2184	62.95955	0.00108	-27.9136	67.85671
432	ボタン部	ボタン接続	赤外線ブラ	電池A		5.318611	-37.3308	70.75146	0.00108	-32.0122	67.85671
2514	ボタン保護	ボタン接続	赤外線ブラ	電池A		5.318611	-37.3308	70.75146	0.00108	-32.0122	67.85671
8542	ボタン接続	画面カバー	赤外線ブラ	電池A		5.318611	-37.3308	70.75146	0.00108	-32.0122	67.85671
33	ボタン部	ボタン保護	ボタン基盤	電池A		4.962397	-22.9171	44.16764	0.001091	-17.9547	68.5454
	ボタン部	ボタン保護	ボタン基盤	接続端子A		4.91541	-22.8791	44.16764	0.001091	-17.9637	68.5478
82	ボタン部	ボタン保護	接続端子A	電池A		4.9292	-26.9915	51.95955	0.001091	-22.0623	68.5478
1307	ボタン部	ボタン基盤	接続端子A	電池A		4.9292	-26.9915	51.95955	0.001091	-22.0623	68.5478
2213	ボタン保護	ボタン基盤	接続端子A	電池A		4.9292	-26.9915	51.95955	0.001091	-22.0623	68.5478
53	ボタン部	ボタン保護	接続端子A	スポンジA		4.915856	-32.7975	62.95955	0.001091	-27.8816	68.5478
4	ボタン部	ボタン保護	ボタン基盤	スポンジA		4.915856	-32.7975	62.95955	0.001091	-27.8816	68.5478
1279	ボタン部	ボタン基盤	接続端子A	スポンジA		4.915856	-32.7975	62.95955	0.001091	-27.8816	68.5478
2210	ボタン保護	ボタン基盤	接続端子A	スポンジA		4.915856	-32.7975	62.95955	0.001091	-27.8816	68.5478
223	ボタン部	ボタン保護	スポンジA	電池A		4.929646	-36.9099	70.75146	0.001091	-31.9802	68.5478
1446	ボタン部	ボタン基盤	スポンジA	電池A		4.929646	-36.9099	70.75146	0.001091	-31.9802	68.5478
2624	ボタン部	接続端子A	スポンジA	電池A		4.929646	-36.9099	70.75146	0.001091	-31.9802	68.5478

図 2.17 パターン解析結果

図 2.18 は、携帯電話のパターン解析の結果を、縦軸にリサイクル収支、横軸に RI 回収率を取り、RI 回収率を 1% 毎に区切ったときのリサイクル収支の最大最小値を示したものである。

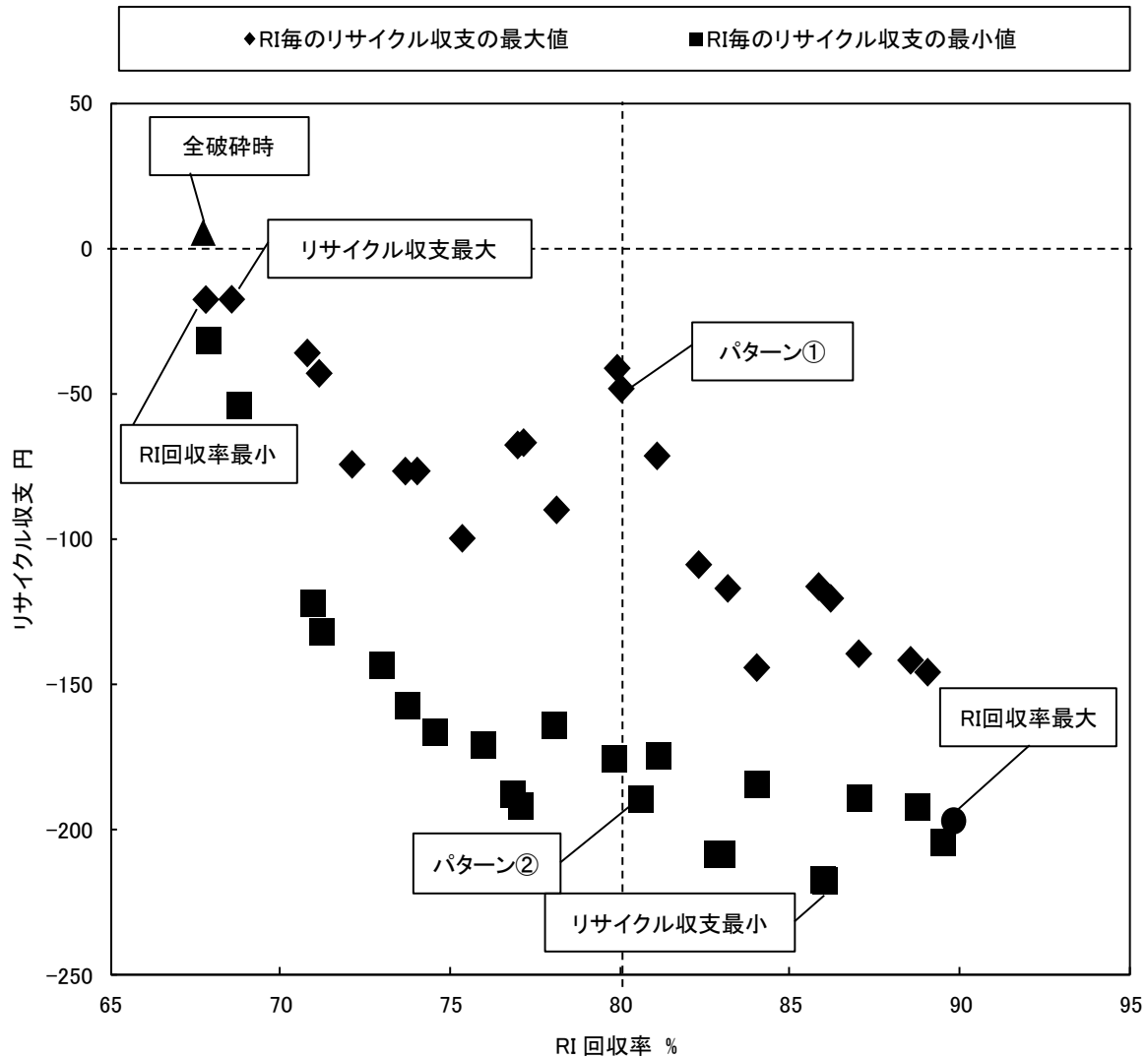


図 2.18 携帯電話のパターン解析結果

その結果、全体的に右下に下がって行く傾向が分かった。リサイクル収支の最大値は-17.95円、リサイクル収支の最小は-218.23円となった。また、RI回収率の最大値は89.83%、RI回収率の最小値は67.78%となり、全破碎したときのRI回収率は67.72%リサイクル収支は5.20円となった。このグラフからRI回収率が目標である80%周辺のラインにおけるリサイクル収支の最高値と最小値の点を取り、パターン分けをした。最も効率の良いラインを表示することによって、リサイクル業者は、目標としたRI回収率に向けて、最適な解体ラインを選択することができるようになり、リサイクル収益を下げずに、リサイクル率を向上させることができるようになる。よって、高度に手解体を導入し、資源をよりよく回収できるツールとして、今後このソフトを活用していくことができる。

図 2.19 に示した解体パターン①、②もRI回収率は同じだが、リサイクル収支に大きく差が出ているのでその変化の違いを図 10.6.3 に示した解体フローから検討する。

パターン①は画面カバー・液晶背面カバー・赤外線基盤・液晶基板を選択し手解体し、パターン②はスポンジ・スピーカー②・マイク・磁石を選択し手解体した。パターン①②両手方とも基盤を手解体しているが、液晶基盤は 15.5g と外部用基盤 4.6g よりも質量が大きく、DPI が半分以下となっているのでパターン①の方が、効率が高い。また、パターン②は広域に渡って手解体しているのに対し、パターン①は狭い区域に集中しているため解体 DPI も低くなっている。以上のフローの解析から、リサイクル収支と RI 回収率の向上させる設計の方法を提案する、設計段階で基盤類を液晶基板と近いフェーズに持っていき、狭い区域に集中させることで DPI を抑えながら RI 回収率を高めることができると考えられる。実際、外部用基板を液晶基板の後ろに設置し、パターン①を改善させると RI 回収率が 2.7% 上昇し、リサイクル収支が 24.33 円減少する。この改善の結果、同じレベルの RI 回収率の中では最も高いリサイクル収支を得ることができるパターンとなることがわかった。このような改善によってリサイクル収支が下がるが RI 回収率を格段に上げることができる可能性を示した。このソフトは、最適な解体ラインの選択から、より易解体性を高めた製品設計へと展開する際に有効なソフトであり、改善点の発見からその改善効果の算出までとその用途は多岐にわたるため、製品設計の場面で活用されることが期待される。

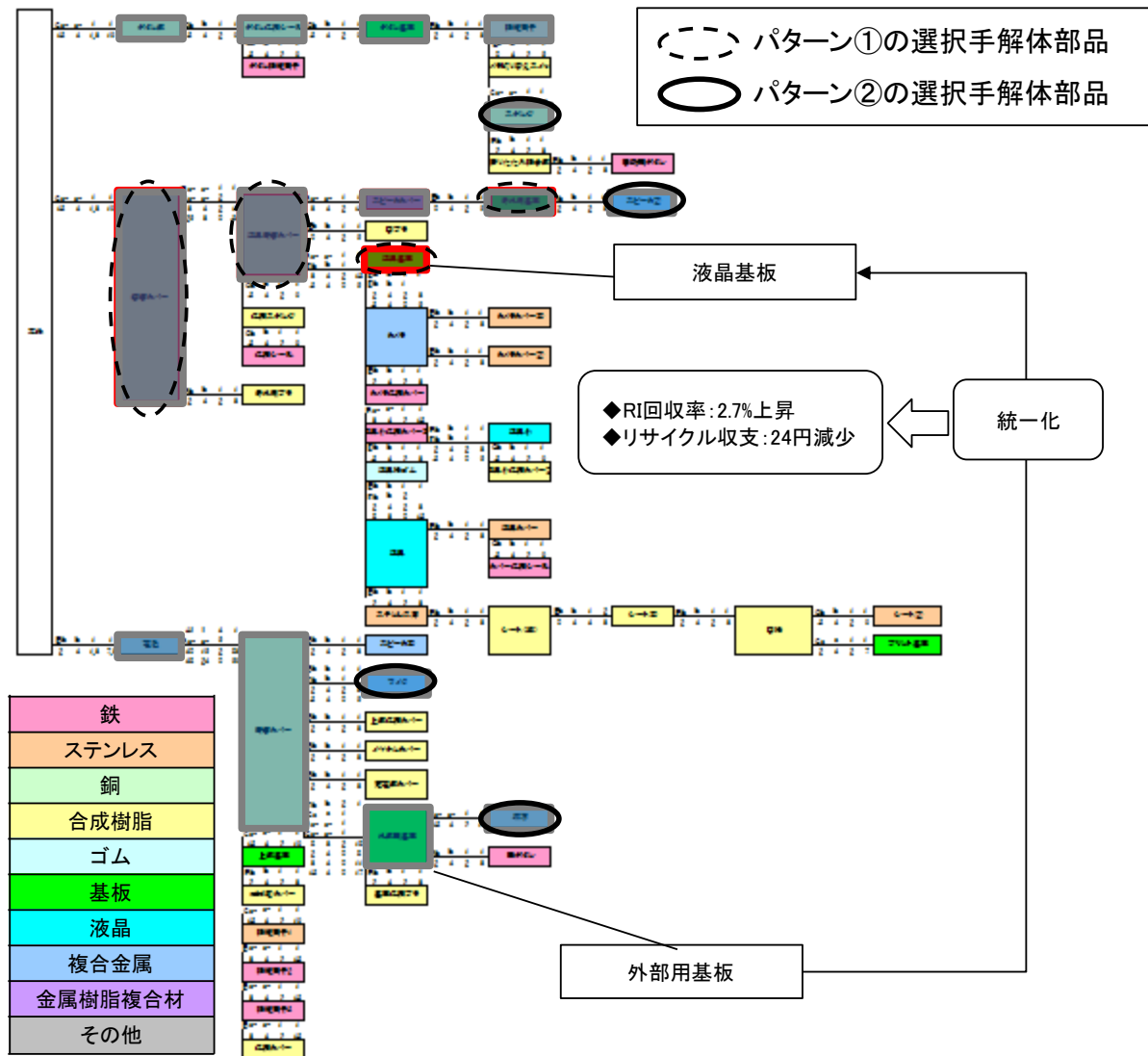


図 2.19 携帯電話の解体フロー図

## 2. 5 DfE 定量評価データベースの拡充に関する検討

### 2. 5. 1 クラスター分析を活用した DfE 定量評価データベースの拡充方針

89 品目 300 製品のデータ蓄積を行った。その中で、同一品目に対して複数データ（データ数が 5 以上）が蓄積されている品目を対象に、クラスター分析により製品素材構成割合による分類を試みた。

表 2.16 品目内に複数データが蓄積されている品目

品目名	データ数
カセットプレーヤー	9
ポータブル CD プレーヤー	12
ポータブル MD プレーヤー	23
ラジカセ	5
コンパクトデジタルカメラ	20
携帯電話	21
電子辞書	8
卓上計算機	5
ポータブルゲーム	15
ドライヤー	8
アイロン	5
シェーバー	11

上記各製品の素材構成割合（鉄，ステンレス，アルミニウム，銅，ニッケル，鉛，その他非鉄金属，プラ，合成ゴム，ガラス，金属複合材，金属樹脂複合材）を算出し，その素材構成割合を要素とするクラスター分析を実施した結果を図 2.20 に示す。

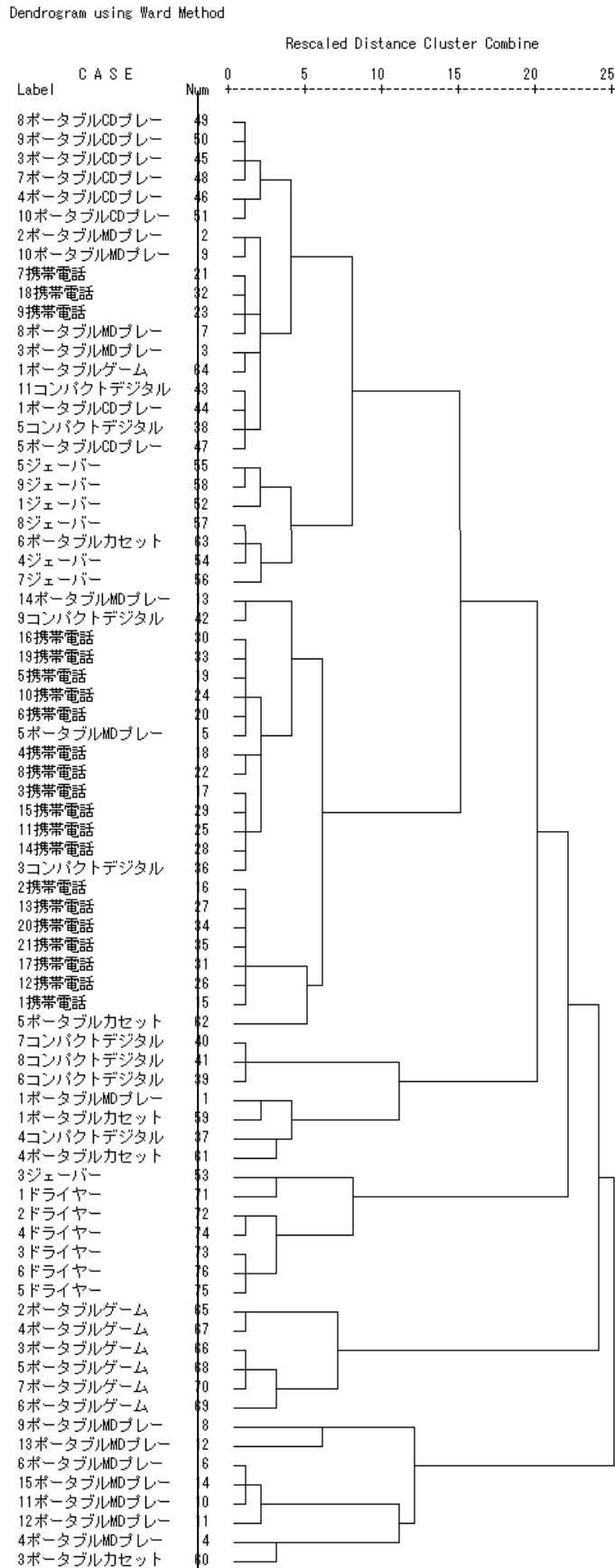


図 2.20 クラスター分析結果(デンドログラム)

クラスター分析によってユークリッド距離 8 でグループを切り分け、同類の素材構成割合を持つグループを作った。その結果、7つのグループに分類でき、品目に対する各グループに属する製品数を表したものを図 2.21 に示す。

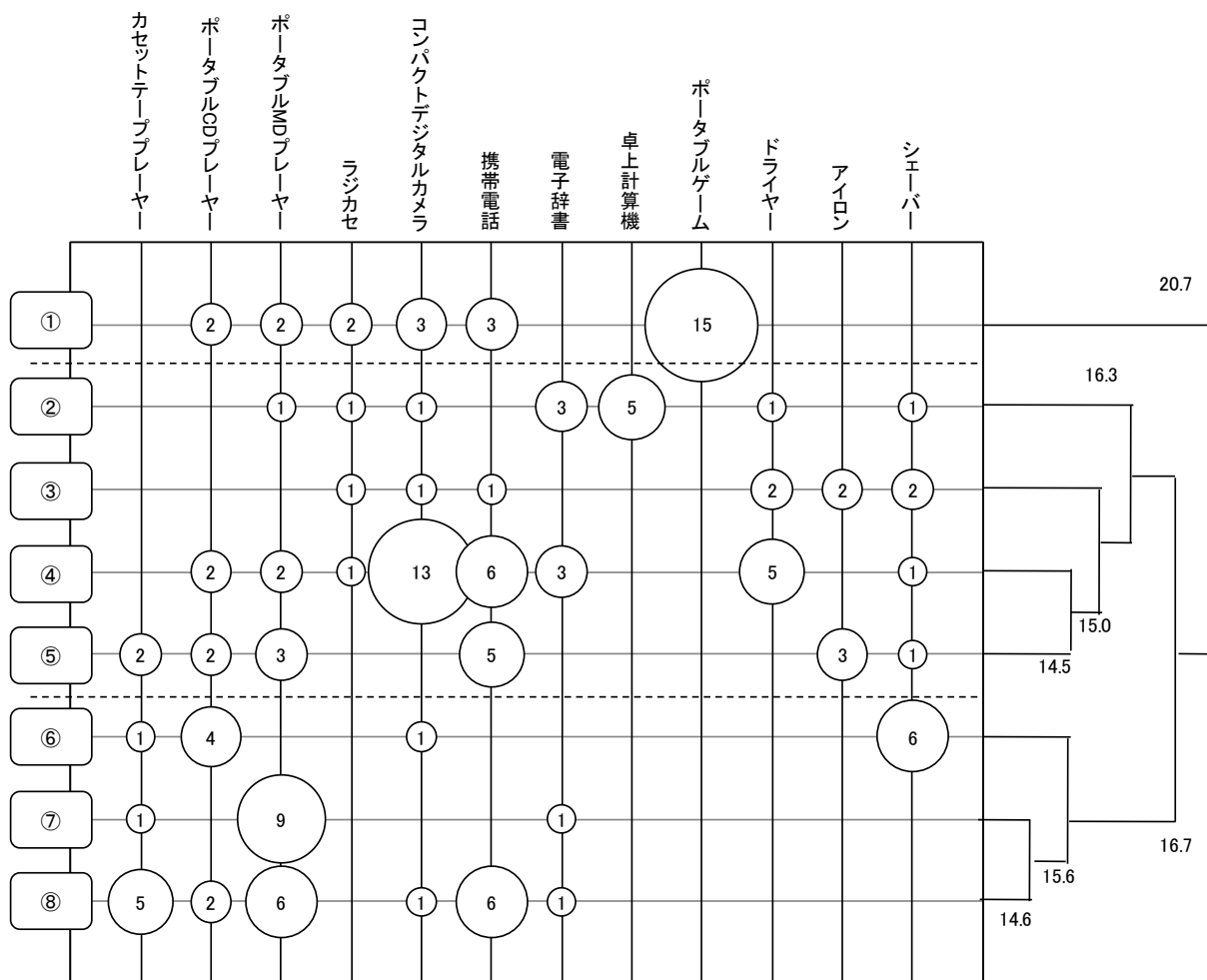


図 2.21 クラスター分析による製品の分類

グループ①は携帯電話やポータブル CD プレーヤー等 5 品目が属しており、グループに属する製品の平均の素材構成割合を算出したところ、プラスチックの割合が多いという特徴を有したグループであることが分かった。また、携帯電話やシェーバー、ドライヤーといった品目に関してはほぼ同一のグループに属しているが、ポータブル MD プレーヤーやコンパクトデジタルカメラ等といった品目に関しては品目内で分布を有していることがわかる。このことから、より詳細に評価するためにはこれらの分布を有している品目に関してさらにデータを蓄積することが必要であるといえ、分布のある品目を中心に DB の拡充を行っていくことが重要です。

## 2.6 まとめ

環境配慮デザインの定量評価に必要となる「DfE 定量評価データベース」のコンセプトを提示し、家電製品の解体を中心とした情報収集によりデータベー



スを構築するとともに、その解析及び活用方法を示した。以下に得られた結果を示す。

- 環境配慮デザインの中における、リユース・リサイクルへの対応として求められる製品の易解体性とライフサイクル全般の環境負荷を評価するために必要となる情報をデータベース化する「DfE 定量評価データベース」のコンセプトを提示した。
- 分解性評価指数 DPI と環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA の考え方を導入し、企画・設計段階で入手可能な情報で構成された DfE 定量評価データベースを構築した。各家電製品を手解体することで情報を入手し、89 品目、300 製品のデータを搭載した。
- 家電製品を構成する素材構成や部品の結合方法などに着目した DfE 定量評価データベースの解析を行い、各種家電製品の DfE の動向や特徴を示した。
- DfE 定量評価データベースの活用方法として、家電製品の解体フローと連携したリサイクルプロセスの設計への応用事例を示した。
- 構築したデータベースに搭載された家電製品の素材構成に着目したクラスター分析を行い、今後のデータベースの拡充方針を示した。
- データベースの拡充方法として、研究室で従来から行っている各種家電製品の解体に加えて、自治体の小型家電のリサイクルプロセスからのデータ取得を提案し、今後の展望を示した。

## 第 3 章

### 家電製品の DfE の定量評価とその類型化による 設計改善策の提案

第3章 家電製品の DfE の定量評価とその類型化による設計改善策の提案 .....	1
3. 1 目的と従来研究 .....	3-1
3. 2 DfE の定量評価とその類型化 .....	3-2
3. 2. 1 家電製品の解体性評価 .....	3-2
3. 2. 2 家電製品の環境負荷評価 .....	3-6
3. 2. 3 製造時と使用時に着目した環境負荷評価 .....	3-9
3. 2. 4 希少金属に着目した環境負荷評価 .....	3-10
3. 2. 5 環境負荷評価による各種製品の類型化 .....	3-11
3. 2. 6 リサイクル段階からみた家電製品の類型化 .....	3-12
3. 3 DfE 向上のための設計改善策の検討 ～希少金属の環境負荷が高デジタルカメラを例に～ .....	3-18
3. 3. 1 構成部品の再生資源強度と解体性の分析 .....	3-18
3. 3. 2 解体解析を活用した設計改善策の提案 .....	3-26
3. 4 まとめ .....	3-28
図 3.1 DfE データベースからのデータ抽出(結合点数の参照) .....	3-3
図 3.2 デジタルカメラの DPI .....	3-5
図 3.3 各種製品の DPI .....	3-6
図 3.4 デジタルカメラの評価範囲 .....	3-7
図 3.5 デジタルカメラの環境負荷評価結果 .....	3-9
図 3.6 製造時と使用時の資源強度の関係 .....	3-10
図 3.7 製品全体と希少金属の TMR の関係 .....	3-11
図 3.8 環境負荷評価に基づく類型化 .....	3-12
図 3.9 デジタルカメラのマテリアルバランス .....	3-13
図 3.10 デジタルカメラの各 CASE における再生資源強度 .....	3-14
図 3.11 デジタルカメラのメーカー側の対応による RI 向上策の効果 .....	3-16
図 3.12 デジタルカメラのリサイクラー側の対応による RI 向上策の効果 .....	3-16
図 3.13 各種製品のメーカー側の対応による RI 向上策の効果 .....	3-17
図 3.14 各種製品のリサイクラー側の対応による RI 向上策の効果 .....	3-17
図 3.15 SONY CyberShot の単一素材の DPI と RI の関係 .....	3-19
図 3.16 Canon IXY320 の単一素材の DPI と RI の関係 .....	3-19
図 3.17 Panasonic Lumix の単一素材の DPI と RI の関係 .....	3-20
図 3.18 FUJIFILM FinePix の単一素材の DPI と RI の関係 .....	3-20
図 3.19 SONY CyberShot の複合素材の DPI と RI の関係 .....	3-21
図 3.20 Canon IXY320 の複合素材の DPI と RI の関係 .....	3-21
図 3.21 Panasonic Lumix の複合素材の DPI と RI の関係 .....	3-22
図 3.22 FUJIFILM FinePix の複合素材の DPI と RI の関係 .....	3-22
図 3.23 CASIO EXILIM の単一素材の DPI と RI の関係 .....	3-23
図 3.24 KYOCERA Finecam の単一素材の DPI と RI の関係 .....	3-23
図 3.25 FUJIFILM FinePix の単一素材の DPI と RI の関係 .....	3-24
図 3.26 CASIO EXILIM の複合素材の DPI と RI の関係 .....	3-25
図 3.27 KYOCERA Finecam の複合素材の DPI と RI の関係 .....	3-25
図 3.28 FUJIFILM FinePix の複合素材の DPI と RI の関係 .....	3-26
図 3.29 デジタルカメラの筐体部分に不可逆的に結合する部品 .....	3-27

図 3.30	SONY Cybershot(2001年)の解体フロー	3-27
図 3.31	Panasonic Lumix(2004年)の解体フロー	3-28
表 3.1	DPIに算出に必要なデータの一覧	3-2
表 3.2	デジタルカメラの仕様(その1)	3-4
表 3.3	資源強度の算出に必要なデータの一覧	3-6
表 3.4	リサイクル・廃棄条件	3-8
表 3.5	基板の素材内訳	3-8
表 3.6	設定するケースにおける素材別の回収方法	3-13
表 3.7	各素材のリサイクル率の設定	3-13
表 3.8	基板の材料バランス	3-12
表 3.9	モーターの材料バランス	3-12
表 3.10	液晶の材料バランス	3-12
表 3.11	金属樹脂複合材の材料バランス	3-12
表 3.12	金属複合材の材料バランス	3-12
表 3.13	合成樹脂複合材の材料バランス	3-13
表 3.14	プラスチックの材質表示化の評価条件	3-15
表 3.15	複合材の単一化の評価条件	3-15
表 3.16	単一部品の機器効率の向上	3-15
表 3.17	破碎機の機器効率の向上	3-15

## 第3章 家電製品の DfE の定量評価とその類型化による設計改善策の提案

### 3.1 目的と従来研究

先に述べた通り、DfE を製品に導入することが求められており、その定量評価に基づき、設計改善をしていく必要がある。しかし、その定量評価については、事例が少なく、定量的に把握されていても、従来機種との比較に留まっていることから、異なる製品間や他社製品との比較をすることができない。つまり、DfE の評価基準について、統一的な判断基準がないことや、対象品目が限定されているという課題が存在する。特に、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極めて重要であり、広範な製品を対象に、統一的な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。

DfE の定量評価として、リユース・リサイクルへの対応として、製品の解体性とライフサイクル全般にわたる環境影響が重要である。解体性の評価という点において、大西らは、家電製品を対象に結合方法を評点化（はめ込み：1点、ボルト・ネジ等：3点、溶接・接着：5点）する方法を提案している<sup>3-1</sup>。また、赤堀らは、リサイクル可能率と解体時間・コストの関係を算出できる REM というリサイクル性評価法を提案している<sup>3-2</sup>。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、各接合の分離しやすさ、解体順序などの情報に基づき、解体性の向上効果を評価する方法を提案している。一方、ライフサイクル全般にわたる環境負荷の評価という点において、フィンクベイナーが自動車産業を対象に資源枯渇性観点から評価を行っている<sup>3-3</sup>。

広範な製品を対象とした DfE の定量評価という点において、小林らは、産業連関表と各種統計表から環境負荷原単位データベースを構築し、それを搭載した「Easy-LCA」を開発している<sup>3-4</sup>。また、田原らは、産業連関表に基づき構築されているデータベースに PRTR データを導入することで、LCA の実施に必要なインベントリデータを拡充する方法を提案している<sup>3-5</sup>。さらに、山末らは、ブラウン管テレビ、液晶テレビ、冷蔵庫、洗濯機、エアコン、電子レンジを対象に、リサイクル工場での分解・解体、破碎・選別、製錬工程を評価範囲として、そのリサイクル工程の TMR を算出している<sup>3-6</sup>。このように、製品の環境負荷や解体性の評価に関する手法の開発や製品の評価、さらにはリサイクルシステムへの DfE の影響が検討されているが、個別の製品に対するアプローチが中心となっている。また、幅広い製品の評価という点においては、その評価に必要なデータベースの構築が行われているが、統計データに基づくものが中心的であり、評価そのものは可能であっても、製品設計へのフィードバックとしては効果的ではない。

そこで本研究では、第2章で示した DfE 定量評価データベースと E2-PA, DPI を活用して、各種製品の DfE を定量化するとともに、効率的に DfE の向上に向けて、製品を類型化し、設計改善策を提案することを目的とする。製品の DfE

において、ライフサイクル全般の環境負荷を低減していくことは重要であるが、ライフサイクルのどの段階において特に取組みが必要であるかを考慮しながら、効率的に改善していくことが求められる。

まず、製品の製造時と使用時の環境負荷に着目し、省エネ設計や省エネに関する情報を積極的に公開することが求められる製品群、3R へ配慮した設計や使用済み製品の回収システムの構築が求められること製品群に類型化した。

次に、資源セキュリティの観点から重要性が増している希少金属に着目し<sup>3-7)</sup>、資源回収に向けて、特に収集回収方法を構築する必要がある製品群を示した。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 向上とリサイクル施設における機器効率の向上の2点から、リサイクル段階からみた DfE の向上策に関する有効性の観点で、製品を類型化した。

最後に、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、点在化している基板の偏在化といった設計改善策を提案した。

### 3. 2 DfE の定量評価とその類型化

#### 3. 2. 1 家電製品の解体性評価

##### (1) 解体性の評価方法

##### a. 解体性評価に必要なデータ

第2章で述べたように、本研究では、分解性評価指数 DPI を活用して解体性の評価を行う。その評価に必要なデータは表 3.1 に示すものである。DfE 定量評価データベースには製品ごとに、DPI 算出に必要なデータが整備されている。データベースに搭載されていない製品を新たに評価する場合には、製品を解体することで、評価に必要な情報を取得する。

表 3.1 DPI に算出に必要なデータの一覧

DPI 算出に必要なデータ	結合解除指数	結合探索指数	部品取出し指数
製品分類	●	●	
体積		●	
質量		●	●
結合種類・結合点数	●	●	
部品点数		●	●

##### b. 評価対象製品の選択

評価対象製品を DfE 定量評価データベースより選択する。ここでは、例としてデジタルカメラを取り上げて説明する。データベースの大分類から「映像・音響家電」を選択し、さらに中分類から「デジタルカメラ」を選択すると、小分類にデジタルカメラが表示される。デジタルカメラを選択すると、搭載されているデジタルカメラの各製品のデータが表示される。すると、DPI の算出に必要なデータが用意されている。例えば、データベースからあるデジタルカメ

ラを選択すると、図 3.1 のように DPI 算出に必要なデータを抽出することができる。

音響拡張	スピーカー
	ヘッドホン
	マイク
デジタルカメラ	コンパクトデジタルカメラ
ビデオカメラ	ビデオカメラ
その他	電子楽器
情報通信機	携帯電話
	スマートフォン
	電話機
	電話機(子機)
	FAX
	テレビドアホン

No	製品	メーカー	生産国	発売年度	年	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	E
						a+	a-	b	d	f	g	h	i	i	k	n	o	v	s	t	a-	b	c	e	i	i	l	e-	b	c	e	i	a-	b
1	CyberShot	SONY	生産国	2001	42														72						29	2					7			
2	EXILIM	CASIO		2002	5														29						12	3					4			
3	IXY	Canon		2002	66														53						16	14					7			
4	Finepix	FLUJIFILM		2003	26													4							2	2					5		16	
5	Finepix	KYOCERA		2003	23															18						6					7			
6	Coolpix	NKON		2004	65														0						20	10					3		34	
7	Lumix	Panasonic		2004	31														0						1	52	4					7		27
8	Finepix	FLUJIFILM		2004	27														6							12	6					6		17
9	Finepix	FLUJIFILM		2005	27														5							12	8					6		22

図 3.1 DfE データベースからのデータ抽出(結合点数の参照)

c. DPI の算出

表 3.1 に示したデータが抽出できれば、DPI の算出が可能である。具体的には、次式で示す DPI の算出式において、各指数が事前に用意されているため、四則演算のみで実解体時間に相当する値が算出できる。

$$\begin{aligned}
 D &= D_d + D_s + D_p \\
 &= \sum (m_i \times p_i) + m \times q + (n-1) \times r
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

ここで D: 分解性評価指数

$D_d$ : 結合解除に相当する分解性評価指数

$D_s$ : 結合探索に相当する分解性評価指数

$D_p$ : 部品取り出しに相当する分解性評価指数

$m_i$ : 結合種類ごとの結合点数[個]

$m$ : 結合点数[個]

$n$ : 部品点数[個]

$p_i$ : 結合種類ごとの平均結合解除時間に相当する指数[ / 個]  
(結合解除指数)

$q$ : 各製品の平均結合探索時間に相当する指数[ / 個]  
(結合探索指数)

$r$ : 各製品の平均部品取りだし時間に相当する指数[ / 個]  
(部品取り出し指数)

(2) 各種家電製品の解体性評価結果

a. 同一品目間における解体性の比較

図 3.2 は、表 3.2 に示したデジタルカメラの DPI 算出結果である。

表 3.2 デジタルカメラの仕様(その1)

タイプ	メーカー	製品名	型番	発売年度	高さ×幅×奥行き mm	質量 kg
レンズ稼動タイプ	SONY	CybeyShot	DSC-P5	2001/10/1	112.5×53.8×36.2	0.185
レンズ稼動タイプ	CANON	IXY	IXY320	2002/10/1	87×57×26.7	0.180
レンズ稼動タイプ	PANASONIC	Lumix	DMC-FX7	2004/8/1	50×91.4×24.2	0.131
レンズ稼動タイプ	FUJIFILM	Finepix	F455	2004/11/1	56.4×92.6×21.9	0.139
レンズ非稼動タイプ	CASIO	EXILIM	EX-S2	2002/9/1	88×55×11.3	0.0880
レンズ非稼動タイプ	KYOCERA	Finecam	SL300R	2003/10/1	62.5×100×15	0.123
レンズ非稼動タイプ	FUJIFILM	Finepix	Z1	2005/5/1	55×90×18.6	0.129
乾電池タイプ	FUJIFILM	Finepix	A310	2003/4/1	63×97×33	0.148
乾電池タイプ	NIKON	Coolpix	E4100	2004/7/1	65×88×38	0.141

比較対象として、同様のプロセスで算出した携帯電話の DPI も掲載した。レンズ稼動タイプの平均 DPI は 1393.2、レンズ非稼動タイプの平均 DPI は 834.0、乾電池タイプは 1249.4 となった。レンズ非稼動タイプにおいて FinePix Z1 に関しては、筐体の外側がスライド機構を有していることから、他のレンズ非稼動タイプに比べて DPI が高くなったと考えられる。また、デジタルカメラの平均 DPI は 1174.9 となり、携帯電話の平均 DPI である 880.0 と比べて約 1.3 倍高くなることが判明した。

このように、DfE 定量評価データベースから、容易に製品の解体性を評価することができる。



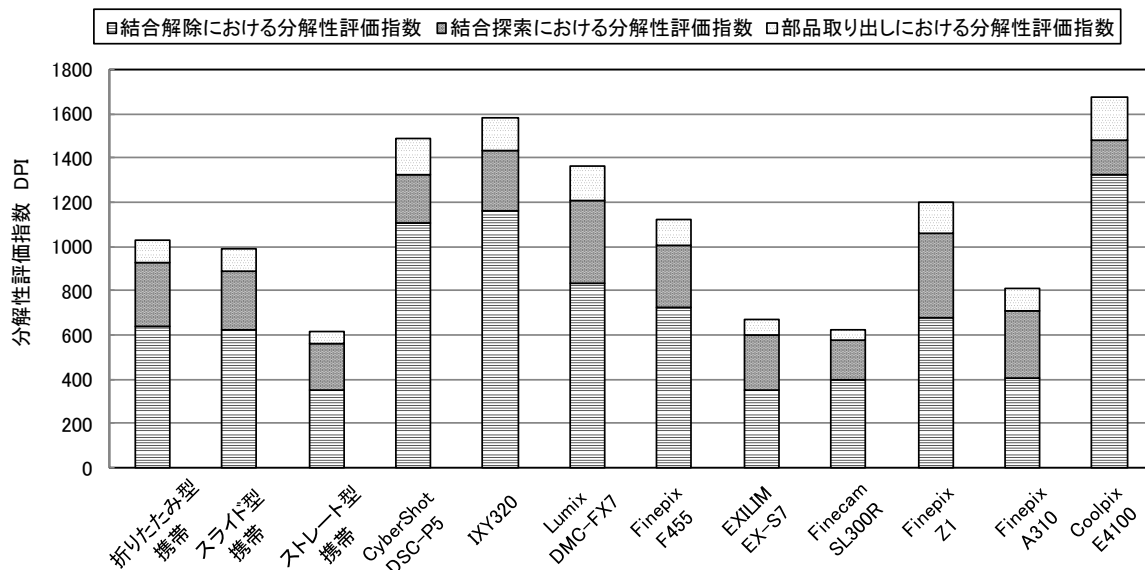


図 3.2 デジタルカメラの DPI

b. 複数品目間における解体性の比較

携帯電話の分解性評価指数と、これまで永田研で解体を行ってきた製品の分解性評価指数を比較したものを、図 3.3 に示す。各製品の分解性評価指数は、破壊なしの最大解体レベルの平均値をとっている。

小型家電については、ハロゲンヒーター、加湿器、コーヒーマーカー、ミキサー、ハンドクリーナー、ハンドマッサージャーの平均値をとっている。これより、ストレート型の携帯電話は小型家電と同程度の解体時間、スライド型、折りたたみ型の携帯電話はエアコン、冷蔵庫と同程度の解体時間であることが予想される。スライド型、折りたたみ型の分解性評価指数は、洗濯機の約 2 分の 1、デスクトップ PC の約 3 分の 1、プラズマテレビの約 5 分の 1 である。また、ストレート型の分解性評価指数は、洗濯機の約 4 分の 1、デスクトップ PC の約 5 分の 1、プラズマテレビの約 8 分の 1 である。また、折りたたみ型・スライド型の携帯電話は、ストレート型の携帯電話の約 1.6 倍の解体時間がかかると考えられる。また、ミキサーは CRT テレビと同程度、小型家電は平均をとるとストレート型の携帯電話と同程度、プラズマテレビは折りたたみ型の携帯電話の約 5 倍となる。

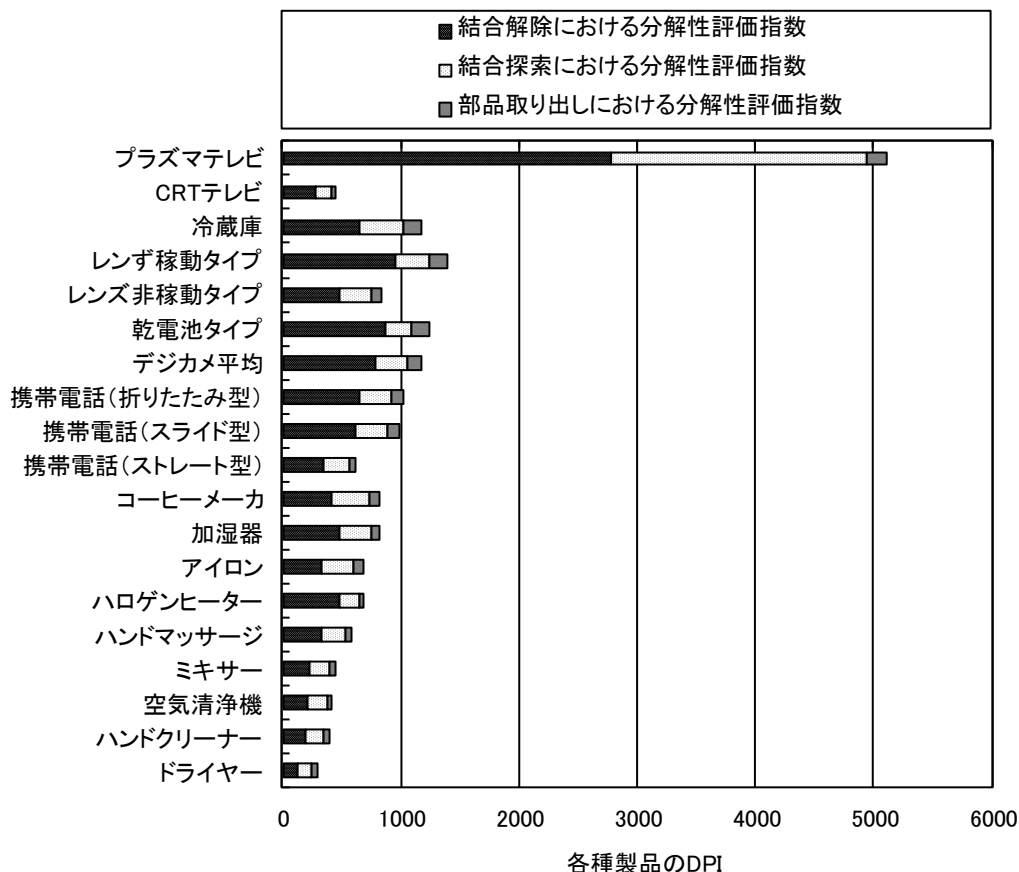


図 3.3 各種製品の DPI

### 3. 2. 2 家電製品の環境負荷評価

#### (1) 環境負荷の評価方法

##### a. 環境負荷評価に必要なデータ

第2章で述べたように、本研究では、環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA を活用して環境負荷の評価を行う。その評価に必要なデータは表 3.3 に示すものである。DfE 定量評価データベースには製品ごとに、資源強度の算出に必要なデータが整備されている。データベースに搭載されていない製品を新たに評価する場合には、製品を解体することで、評価に必要な情報を取得する。

表 3.3 資源強度の算出に必要なとなるデータの一覧

データ項目	MI	EI <sub>p</sub>	EI <sub>u</sub>	RI <sub>i</sub>
製品の素材構成の種類と重量	●			●
製造時の投入エネルギー量		●		
製品寿命	●	●		
使用時の投入エネルギー量			●	

##### b. 評価対象製品の選択

前項と同様に、評価対象製品を DfE 定量評価データベースより選択する。

c. 評価範囲の設定

次に、環境負荷の評価範囲を設定する。評価範囲は、環境負荷を評価する目的に応じて設定する。例として、前項と同様に表 3.2 に示すデジタルカメラを取り上げて説明する。例えば、デジタルカメラが製造され、実際に消費が利用し、使用済みとなった後に、リサイクルするというライフサイクルを評価する場合を想定すると、評価範囲は図 3.4 の通りとなる。今回の場合、評価の目的は、流通・処理・リサイクルなど社会システム全般を対象に、複数のデジタルカメラ間の環境負荷を比較することが挙げられる。このように、環境負荷評価の目的に応じて評価範囲が決まれば、DfE 定量評価データベースから、その評価範囲において必要となるデータを抽出すればよい。なお、輸送については、製品に依存するものではないため、DfE 定量評価データベースには掲載していない。そのため、評価の度に設定する必要がある。今回は、製造工場から販売店までの輸送距離を 500km、消費者→小売店→指定取引場所→リサイクル工場までの輸送距離 100km とした。また、リサイクル・廃棄段階においても、リサイクル率を設定する必要がある。これは、リサイクル・廃棄段階で活用する施設によって、リサイクル率が異なることなどを理由としている。今回は、表 3.4 のように、単一金属、材質表示がある合成樹脂はリサイクル率を 100%、材質表示なしの合成樹脂はサーマルリサイクル、複合金属は 70%、基板は 64%、金属樹脂複合材は 30%、液晶は部品リユース、ゴム、スピーカ、カメラは残渣処理とする。基板は表 3.5 に示す内訳中の金属分（鉄、銅、アルミ、鉛、ニッケル、金、銀）を回収したと仮定した。

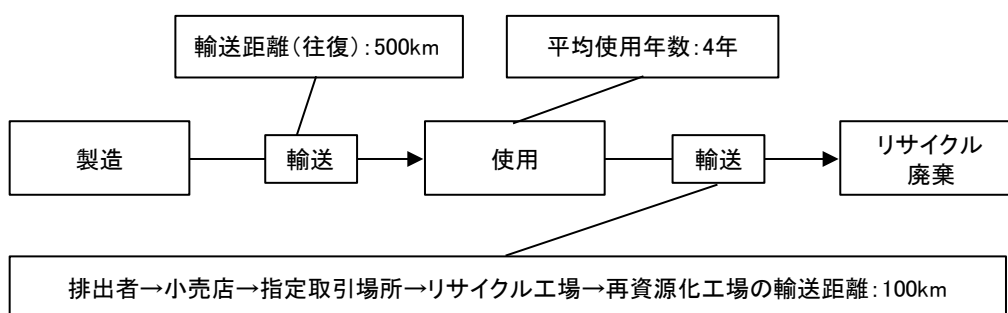


図 3.4 デジタルカメラの評価範囲

表 3.4 リサイクル・廃棄条件

素材名	解体後の処理方法	リサイクル率 %
単一金属	精錬所にて MR	100
合成樹脂(材質表示あり)	合成樹脂製品メーカーにて MR	100
合成樹脂(材質表示なし)	SR	100
複合金属	破碎・選別⇒非鉄精錬所にて MR	70
基盤	非鉄精錬所にて MR	64
金属樹脂複合材	非鉄精錬所にて MR	30
液晶	部品リユース	100
ゴム	残渣処理	0
スピーカ	残渣処理	0
カメラ	残渣処理	0

表 3.5 基板の素材内訳

素材	割合 %
鉄	38.2
銅	23.3
アルミ	0.1
鉛	1.3
ニッケル	0.3
金	0.009
銀	0.06
ガラス	15.0
合成樹脂	21.8

d. 資源強度の算出

このように、データベースから抽出したデータと個別に設定した条件を決めれば、資源強度の算出が可能である。次式には、物質資源強度の算出式を示すが、各物質投入量がデータベースからわかり、各物質投入量における資源強度換算原単位各指数が事前に用意されているため、四則演算のみで資源強度の算出が可能である。

$$mi_x = \sum_i \left( \frac{m_{Mi}}{y_i} \right) + \sum_j \left( \frac{m_{Ej}}{y_j} \right) \quad (3.2)$$

ここで  $mi_x$  : 物質  $x$  の資源強度換算原単位[kg/y/kg]

$m_{Mi}$  : 物質  $x$  を 1kg 製造するのに必要な物質  $i$  の投入量[kg/kg]

$y_i$  : 物質  $i$  の可採年数[y]

$m_{Ej}$  : 物質  $x$  を 1kg 製造するのに必要なエネルギー  $j$  の投入量[kg/kg]

$y_j$  : エネルギー  $j$  の可採年数 [y]

図 3.5 は、デジタルカメラの環境負荷評価結果である。比較対象として、同様に算出した携帯電話の評価結果も掲載している。図中の、上部括弧内は、下部の括弧内に示す RI を引く前の値である。グラフ中の横線は、デジタルカメラの資源強度の平均値を表しており、その平均値は  $1.08E-3$  となった。これより、2003 年以降の製品においては環境負荷の値が同程度になっていることがわかる。また、デジタルカメラの環境負荷は携帯電話の 60% 程度になっていることがわかるが、これは、携帯電話の平均使用年数が 1.5 年<sup>3-8)</sup>なのに対して、デジタルカメラは 4 年<sup>3-8)</sup>であるためと考えられる。

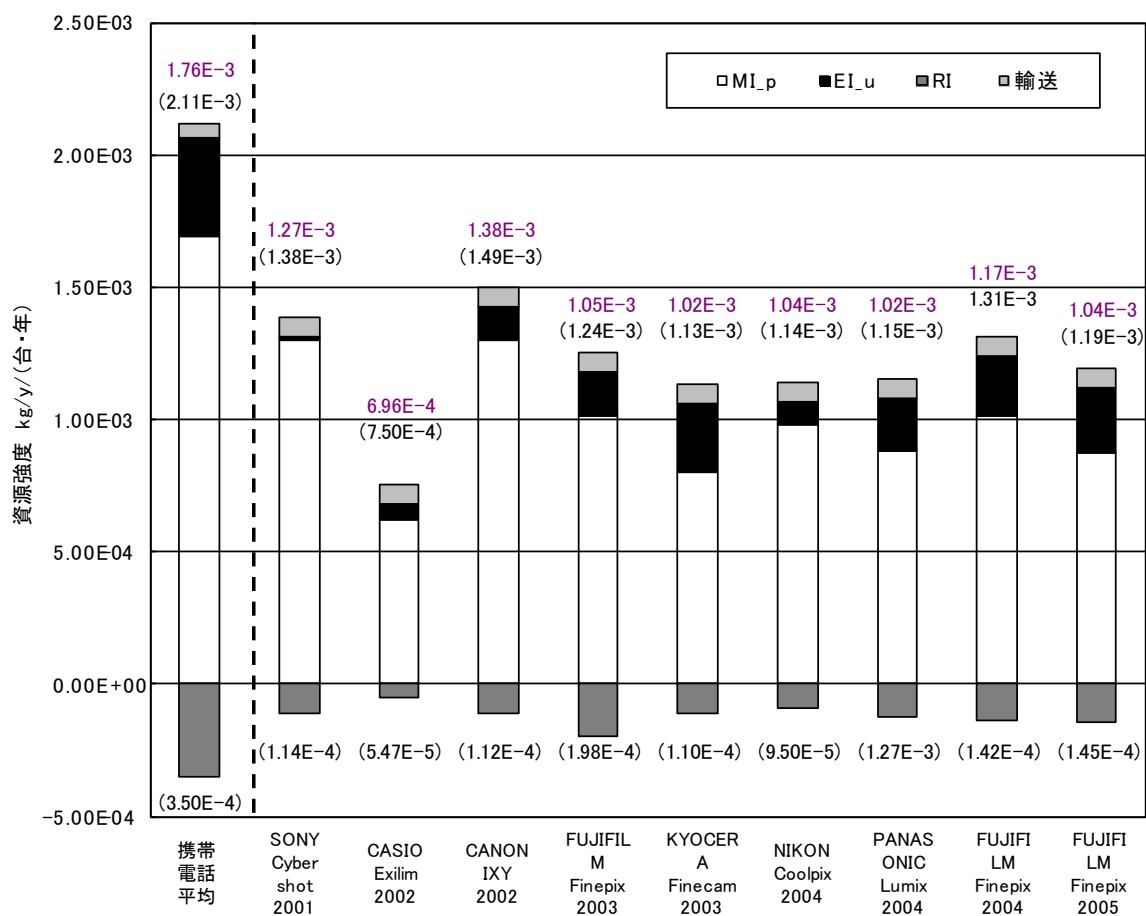


図 3.5 デジタルカメラの環境負荷評価結果

### 3. 2. 3 製造時と使用時に着目した環境負荷評価

ここで、製品設計において、製造時と使用時のどちらの環境負荷を下げるのが優先されるのかを明らかにすることを目的として、各種家電製品の環境負荷評価を行った。目的に鑑み、評価範囲は製造時と使用時のみとしている。図 3.6 は、縦軸に製造時の資源強度を、横軸に使用時の資源強度をとった分布図である。実線はそれぞれ使用時のエネルギー資源強度が全体を占める割合が 10%、30%、50%、70%、90%の線となる。これより、使用時の資源強度が全

体の 90%以上を占める製品はエアコン，乾燥機，ガスファンヒーター，食器洗い乾燥機，炊飯器，掃除機，加湿器，ハロゲンヒーター，空気清浄機，アイロン，ドライヤーとなった．また，80%以上を占める製品は冷蔵庫，プラズマテレビ，液晶テレビ，CRT テレビ，コーヒーメーカーであり，70%以上を占める製品はハンドクリーナー，60%以上を占める製品はデスクトップ PC，髭そり，ファクシミリである．

逆に，製造時の資源強度が全体の 90%以上を占める製品はデジタルカメラ，携帯電話，CD プレーヤー，MD プレーヤー，MP3 プレーヤー，ビデオカメラ，Nintendo DS，電子手帳，電子辞書，自動電子血圧計となった．また，80%以上を占める製品はミキサー，ハンドマッサージャー，カセットプレーヤー，70%以上を占める製品はゲーム機，60%以上を占める製品は洗濯機，50%以上を占める製品はオーブンレンジ，扇風機である．

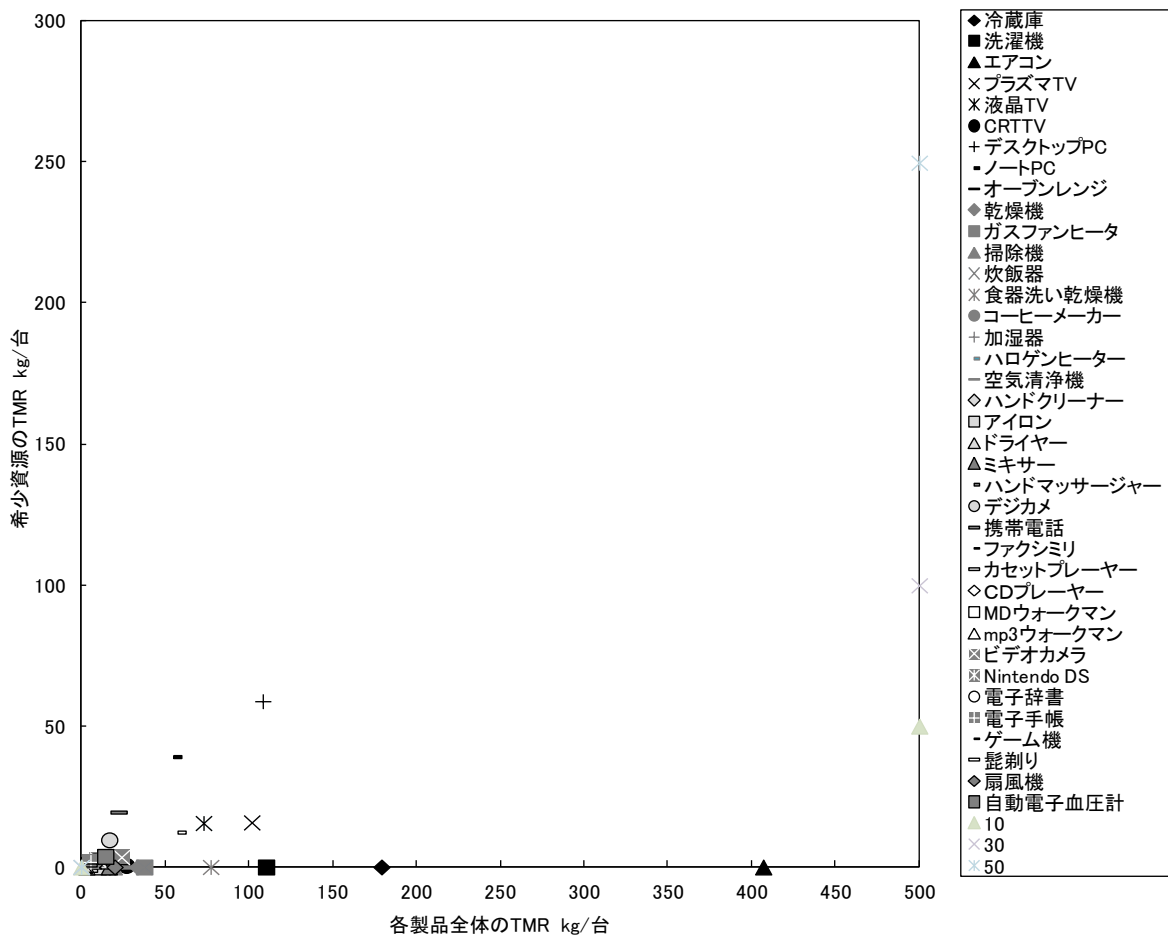


図 3.6 製造時と使用時の資源強度の関係

### 3. 2. 4 希少金属に着目した環境負荷評価

次に，資源セキュリティの観点から重要性が増している希少金属に着目し，対策が求められる製品群を明らかにすることを目的に，各種家電製品の環境負荷評価を行った．目的に鑑み，評価範囲は製造時に投入された物質の資源強度のみとしている．希少性を評価するために，MIPS 法の原因単位を用いて，関与

物質総量 TMR を用いた。図 3.7 は、縦軸に製品の製造時の TMR，横軸に希少金属の TMR をとった分布図である。希少金属については、実装基板に含まれる金、銀と液晶パネルのインジウムを評価している。

これより、希少金属の割合が 50%以上の製品はデスクトップ PC，ノート PC，デジタルカメラ，携帯電話となった。この他に 10%以上を占める製品はプラズマテレビ，液晶テレビ，カセットプレーヤー，CD プレーヤー，MD プレーヤー，MP3 プレーヤー，ビデオカメラ，Nintendo DS，電子手帳，電子辞書，ゲーム機，髭そり，自動電子血圧計である。

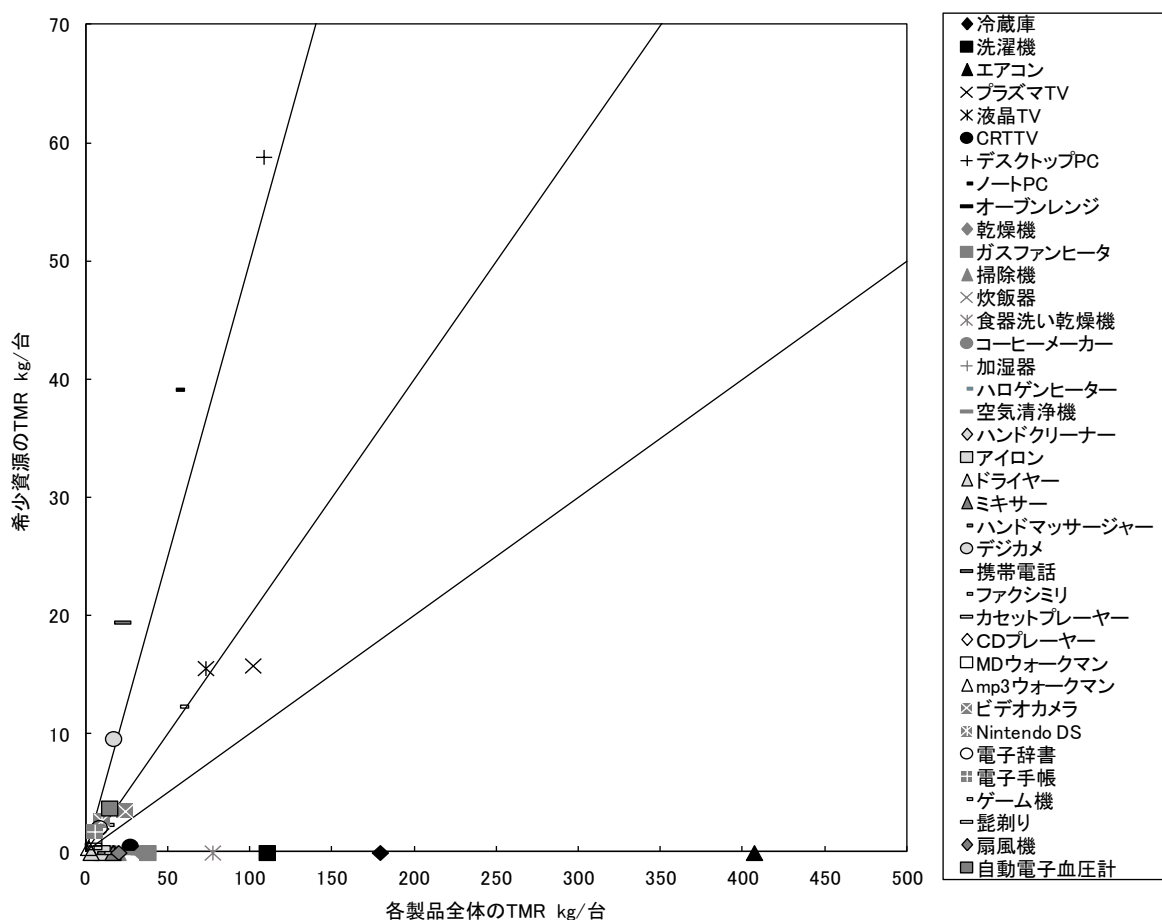


図 3.7 製品全体と希少金属の TMR の関係

### 3. 2. 5 環境負荷評価による各種製品の類型化

図 3.8 はここまでの評価結果をまとめたものである。使用時の資源強度が高い製品は、省エネ設計や積極的な省エネに関する情報提供が求められる「省エネ要求型」製品に類型化できる。一方、製造時の資源強度が高い製品は、こうした製品は、製造時の物質投入量の削減に加えて、使用済み後の積極的な回収や解体性の向上が求められる「リユース・リサイクル要求型」製品に類型化できる。また、希少金属の環境負荷が高い製品は、リサイクルプロセスでの資源回収が求められる「希少金属型」に類型化できる。この希少金属型はリユース・リサイクル要求型における希少金属に特化した分類である。

このように、データベースを活用することで、さまざまな製品を類型化でき、製品群として求められる対策を明らかにすることができる。

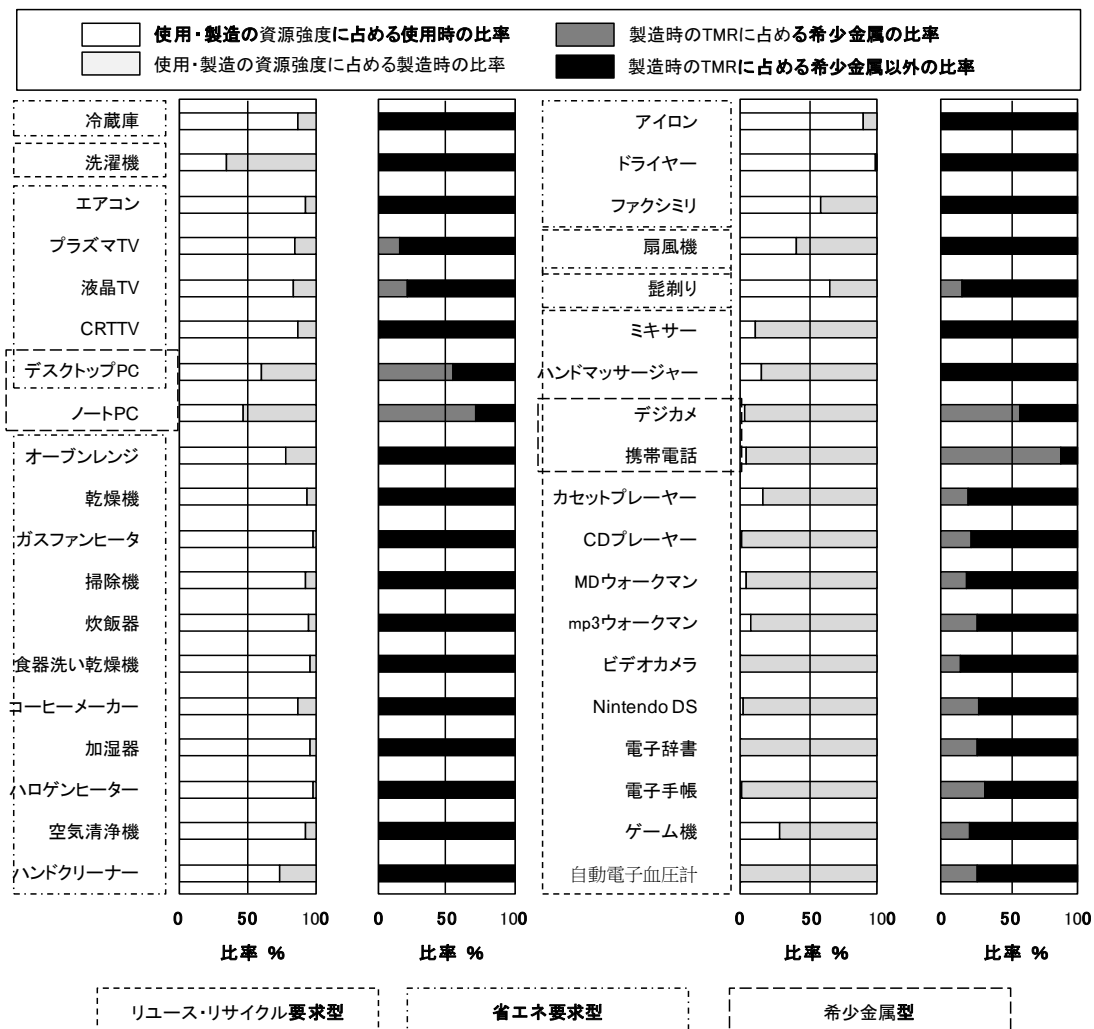


図 3.8 環境負荷評価に基づく類型化

### 3. 2. 6 リサイクル段階からみた家電製品の類型化

さらに、DfE として求められるリユース・リサイクルへの対応について、その効果の有効性を把握することを目的に、各種家電製品の環境負荷評価を行った。目的に鑑み、評価範囲は廃棄・リサイクル段階のみとしている。すなわち、リユース・リサイクルの資源節約効果を表す再生資源強度 RI に着目する。ここでは、デジタルカメラを取り上げ、リサイクラーにおける手解体レベルを設定することで、手解体レベルに応じた資源節約効果の現状を評価する。その評価結果に基づき、メーカーとリサイクラーにおける資源節約効果の向上策の導入効果を定量化する。さらに、小型家電類に評価範囲を広げ、リサイクル段階において資源節約効果を向上させるために必要な対応策に基づき製品を類型化する。

#### (1) デジタルカメラの資源節約効果の評価

##### a. 評価対象製品の選択



DfE 定量評価データベースから表 3.2 と同じ製品を選択した。

b. リサイクラーにおける手解体レベルの設定

資源節約効果は、リサイクラーにおける資源回収方法によって異なる。そこで、手解体レベルを表 3.6 の通り設定した。ここでは、デジタルカメラを構成する部品・素材を全てマテリアルリサイクルできる場合を資源節約効果の最大値として捉え、CASE1 とした。CASE2 は、単一素材と基板や液晶などの単一部品を手解体により回収し、残りを破砕機にかけた場合、CASE3 は単一素材のみを手回収し、残りを破砕機にかけた場合、CASE4 は何も手回収せずに破砕機にかけた場合とした。

表 3.6 設定するケースにおける素材別の回収方法

CASE	素材・部品区分		
	単一素材	単一部品	複合材
1	各素材を 100%MR したときの値		
2	手回収	手回収	破砕機
3	手回収	破砕機	破砕機
4	破砕機	破砕機	破砕機

c. 各素材のリサイクル率の設定

資源節約効果を評価するためには、手解体と破砕機による資源回収におけるリサイクル率を設定する必要がある。ここでは、表 3.7 に示す通り、各素材の回収方法ごとのリサイクル率を設定した。

表 3.7 各素材のリサイクル率の設定

素材		手回収	破砕機
単一素材	金属	100%MR	70%MR
	表示あり合成樹脂	100%MR	60%TR
	表示なし合成樹脂	60%TR	60%TR
単一部品	基板	金属 64%MR	プラのみ 60%TR
	液晶	ガラス 64%MR	0%
	モーター	金属 64%MR	金属 70%MR プラ 60%TR
複合材	金属	—	70%MR
	プラスチック	—	60%TR

また、各部品のマテリアルバランスを表 3.8～3.13 に示す。基板とモーター液晶については、2007 年度のリーテムのヒアリング値を用いる。また、金属樹脂複合材については、その他金属と表示なしプラの質量比 0.5 対 0.5 とした。

表 3.8 基板の材料バランス

素材	質量割合 %
鉄	38.2
銅	23.3
アルミ	0.1
鉛	1.3
ニッケル	0.3
ガラス	15
表示なしプラ	21.8
合計	100

表 3.9 モーターの材料バランス

素材	質量割合 %
鉄	77.7
銅	4.9
アルミ	13.5
表示なしプラ	3.7
ニッケル	0.2
合計	10

表 3.10 液晶の材料バランス

素材	質量割合 %
ガラス	100
合計	100

表 3.11 金属樹脂複合材の材料バランス

素材		質量割合 %
金属複合材	その他非鉄金属	50
	表示なしプラ	50
合計		100

表 3.12 金属複合材の材料バランス

素材		質量割合 %
金属複合材	その他非鉄金属	100
合計		100

表 3.13 合成樹脂複合材のマテリアルバランス

素材		質量割合 %
合成樹脂複合材	表示なしプラ	100
合計		100

d. 資源節約効果の評価結果

図 3.10 に製品のマテリアルバランス（上）と各ケースの RI（下）を示す。先に述べた通り、デジタルカメラを構成する部品・素材を全てマテリアルリサイクルできる場合を資源節約効果の最大値として捉え、CASE1 を 100%としている。また、デジタルカメラ 9 台の平均値を右に示す。平均値をみると、デジタルカメラが本来持つ資源節約効果に対して、CASE2 では 38.8%，CASE3 では 31.6%，CASE4 では 22.7%となっている。このように、デジタルカメラは設定したリサイクル条件では、本来製品が資源節約効果に対して 30%前後しか回収できていないことがわかる。

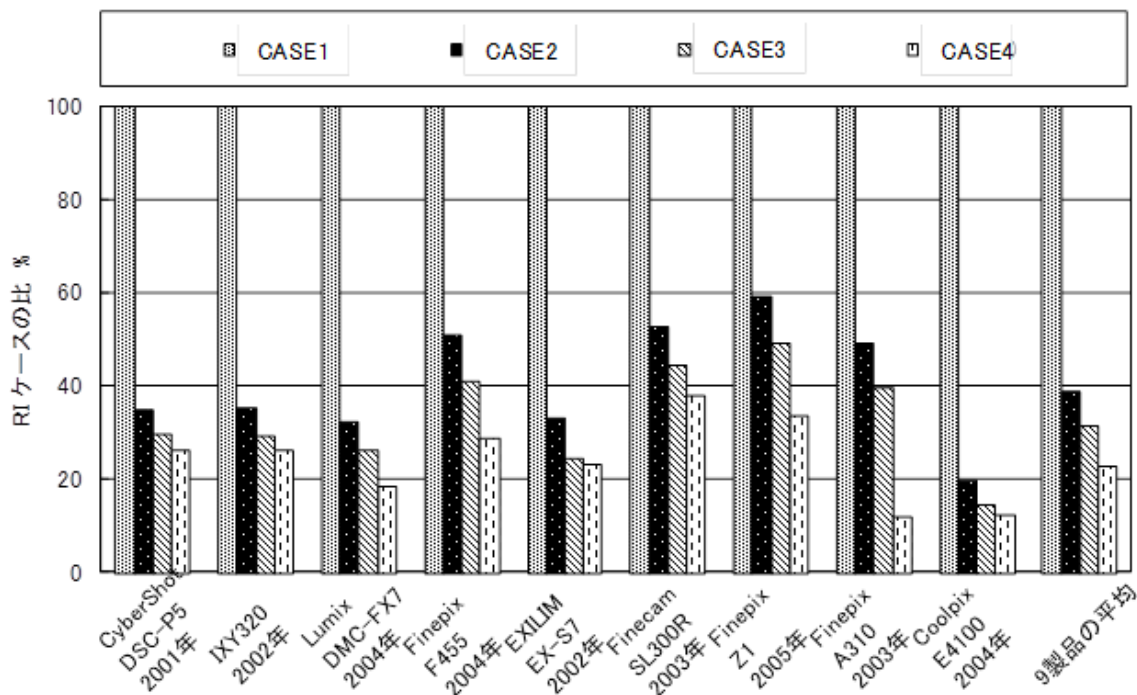


図 3.9 デジタルカメラのマテリアルバランス

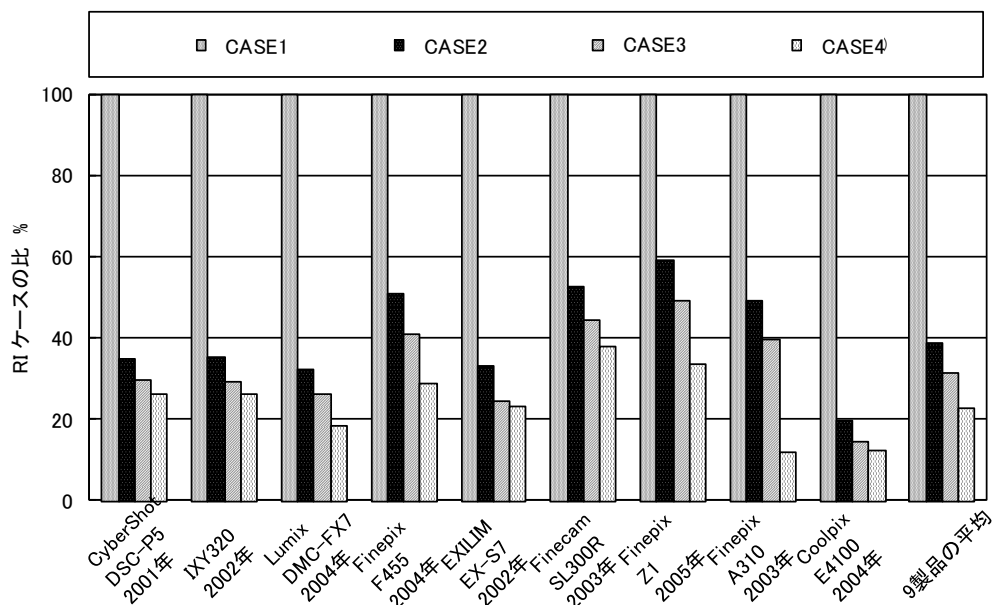


図 3.10 デジタルカメラの各 CASE における再生資源強度

e. 資源節約効果の向上策の導入効果

先にも述べたとおり，再生資源強度 RI の算出には，製品の素材構成と各素材の原単位とその回収方法が影響する．すなわち，メーカーサイドの取組みとリサイクラーの取組みが，廃棄リサイクル段階で得られる資源節約効果に影響を与える．そこで，製品アセスメントの中で<sup>3-9)</sup>，資源節約効果の向上に資する対策が定量化可能なものを実行したときの効果を評価する．具体的には，①プラスチックの材質表示化，②複合材の単一化，③単一部品における機器効率の向上，④破砕機の機器効率の向上を設定する．また，素材構成と原単位に関するものはメーカーの設計時の対応にあたり，回収方法に関するものは，既に出ている製品への対応や今後集める予定の家電の処理方法といったリサイクラーの対応に位置づけられる．表 3.14～3.17 は，資源節約効果の向上策の評価条件である．①プラスチックの材質表示化では，表示なしプラスチックが 60%サーマルリサイクルされているのを材質表示化されることで 100%マテリアルリサイクルできるとする．②複合材の単一化では，破砕機にまわされていた複合材を金属とプラスチックの単一素材を 100%マテリアルリサイクルできると設定する．③単一部品の機器効率の向上では，単一部品において金属を 64%マテリアルリサイクルしているものを 100%マテリアルリサイクルできると設定する．④破砕機の機器効率の向上では，プラスチックの 60%サーマルリサイクルが種類別に分別されて 100%マテリアルリサイクルできると設定する．

表 3.14 プラスチックの材質表示化の評価条件

素材		手回収	破砕機
単一素材	金属	100%MR	70%MR
	表示ありプラスチック	100%MR	60%TR
	表示なしプラスチック	60%TR⇒100%MR	60%TR

表 3.15 複合材の単一化の評価条件

素材		手回収	破砕機
複合材	金属	—⇒100%MR	70%MR
	プラスチック	—⇒100%MR	60%TR

表 3.16 単一部品の機器効率の向上

素材		手回収	破砕機
単一部品	基板	金属 64%MR⇒100%MR	プラのみ 60%TR
	液晶	64%MR⇒100%MR	0%
	モーター	金属 64%MR⇒100%MR	金属 70%MR, プラ 60%TR

表 3.17 破砕機の機器効率の向上

素材		手回収	破砕機
単一素材	表示ありプラ	100%MR	60%TR⇒80%MR
	表示なしプラ	60%TR	60%TR⇒80%MR
単一部品	基板	金属 64%MR	プラのみ 60%TR⇒80%MR
	モーター	金属 64%MR	金属 70%MR, プラ 60%TR⇒80%MR
複合材	プラスチック	—	60%TR⇒80%MR

図 3.11 は、各デジタルカメラのメーカー側の資源節約効果の向上策、図 3.12 は、リサイクラー側の対応（下）の算出結果である。上図におけるデジタルカメラの平均値をみると、もともとケース②では、資源節約効果として得られる最大値に対して 38.8%の効果であったのに対して、プラスチックの材質表示化を行うことで 56.3%、複合材の単一化を行うことで 60.5%となることがわかる。下図より、デジタルカメラの平均値をみると、ケース②では、資源節約効果として得られる最大値に対して 38.8%であったのに対して、単一部品の回収効率を向上させることで 43.4%となり、さらにプラの破砕選別の回収効率を向上させると 66.4%となることがわかる。これは、複合材の割合が高いためである。

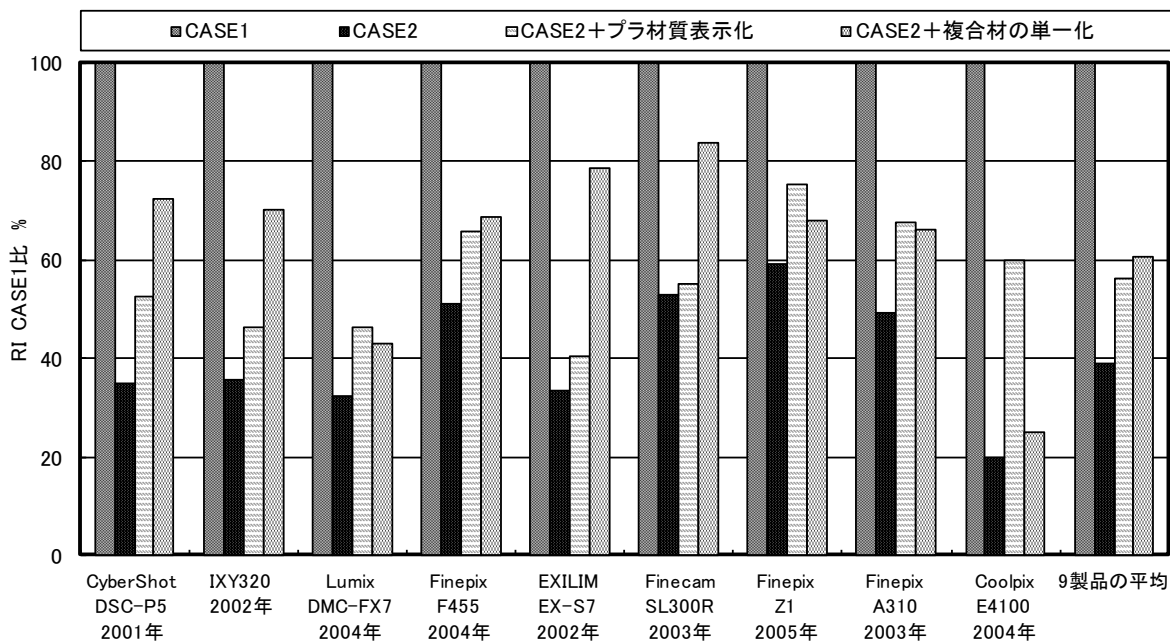


図 3.11 デジタルカメラのメーカー側の対応による RI 向上策の効果

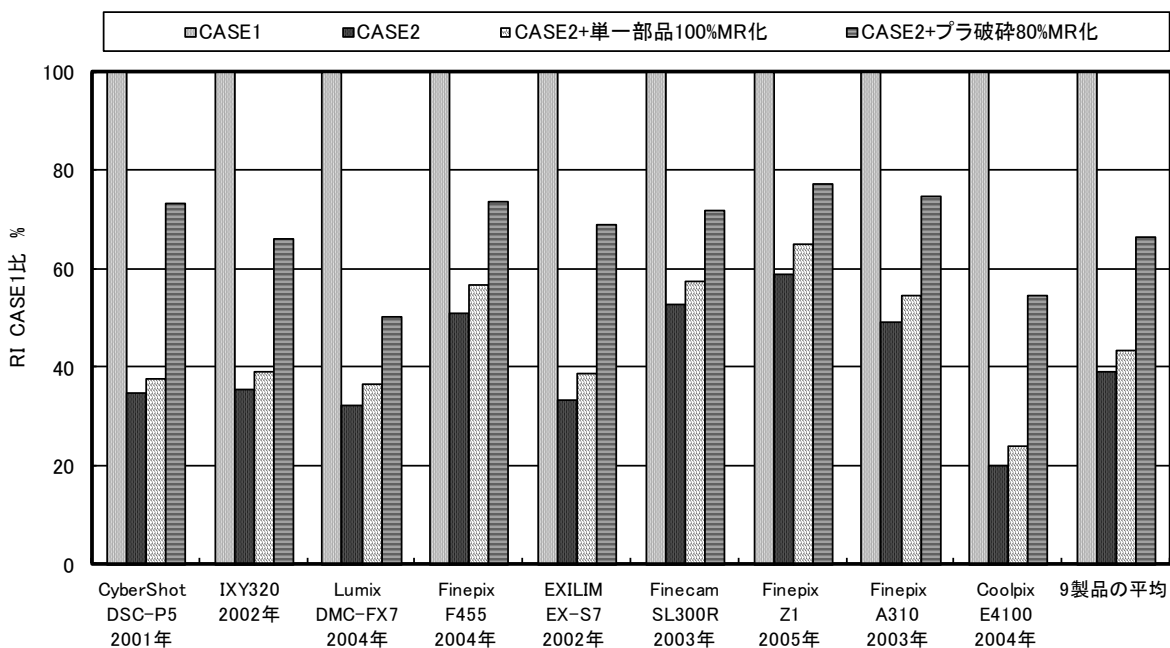


図 3.12 デジタルカメラのリサイクラー側の対応による RI 向上策の効果

(2) 各種家電製品の資源節約効果の評価

図 3.13, 3.14 は、デジタルカメラに加えて、各種家電の CASE1~4 の再生資源強度 RI の算出結果である。評価対象製品となる小型家電は、DfE データベースからコーヒーマーカー (2 台), 加湿器 (2 台), ハロゲンヒーター (2 台), ミキサー (2 台), ハンドクリーナー (3 台), ハンドマッサージャー (2 台), ドライヤー (2 台), 空気清浄機 (2 台), アイロン (2 台), プラズマテレビ (1 台) と冷蔵庫 (1 台) を選択した。CASE1 と CASE2 の差分の大きいデジタル

カメラや冷蔵庫といった製品は、プラスチックのサーマル損失が高い製品であり、メーカーによる複合材の減少や表示なしプラスチックを表示化することが積極的に望まれる製品である。CASE2 と CASE3 の差が大きいデジタルカメラや携帯、プラズマテレビなどは、基板やモーターなどの割合が高い製品であり、CASE3 と CASE4 の差が大きい空気清浄機などの小型家電は表示ありプラスチックの割合が高い製品であり、これらの差分の大きい製品はリサイクラーによる積極的な回収が望まれる製品であるといえる。

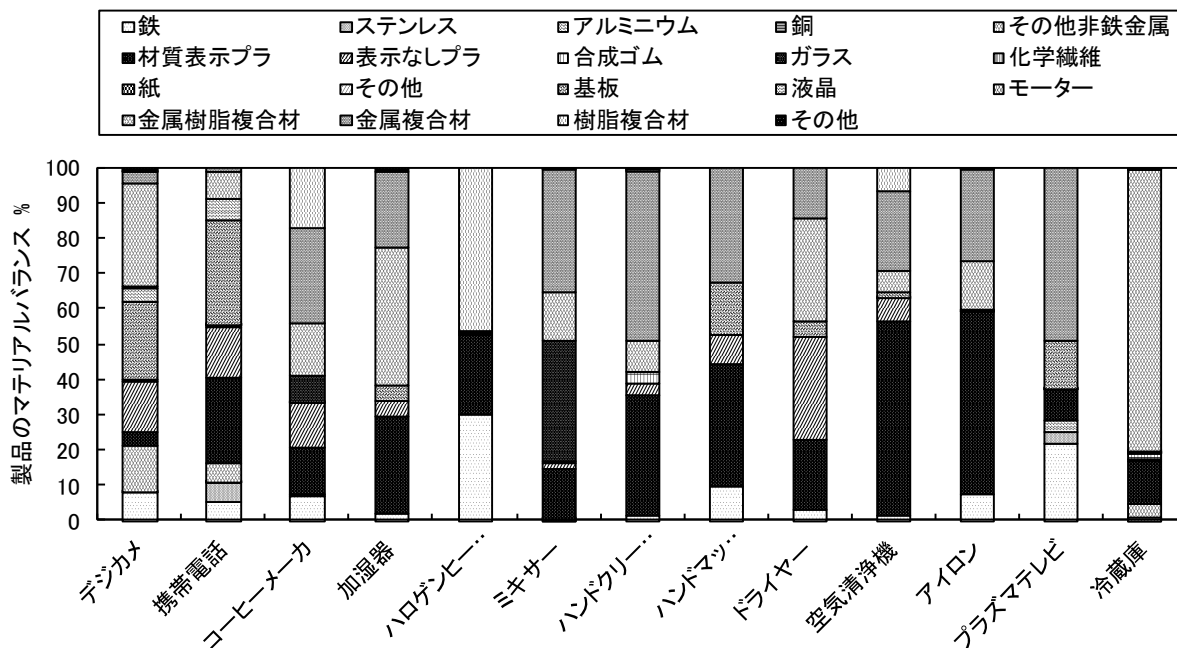


図 3.13 各種製品のメーカー側の対応による RI 向上策の効果

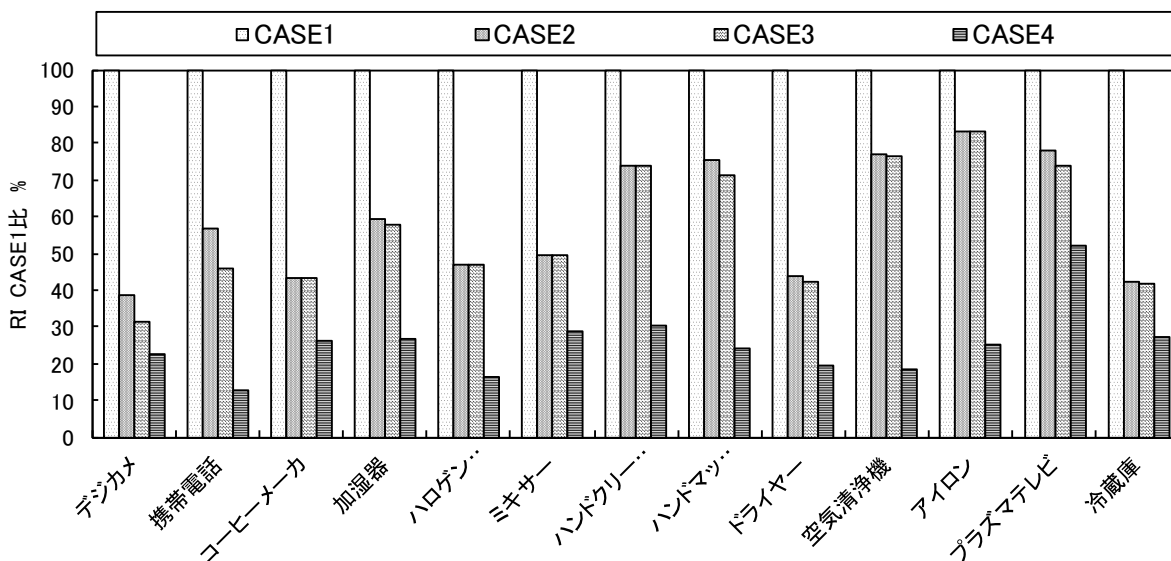


図 3.14 各種製品のリサイクラー側の対応による RI 向上策の効果

### 3.3 DfE 向上のための設計改善策の検討

～希少金属の環境負荷が高デジタルカメラを例に～

#### 3.3.1 構成部品の再生資源強度と解体性の分析

再生資源強度 RI は、リユースやリサイクルによる資源の節約効果を表しており、この値が高い部品は、より早い段階での積極的な回収が望まれる。ここでは、デジタルカメラを例に、再生資源強度を解体性の分析を行う。デジタルカメラを取り上げた理由は以下の通りである。

- ① 希少金属に着目した類型化の結果、物質資源強度に占める希少金属の環境負荷が高く、設計段階の解体性の向上とリサイクル段階の積極的な素材回収が求められること。
- ② リサイクル段階から類型化の結果、基板やモーターなどの単一部品の積極的な回収が求められること。

#### (1) レンズ稼働タイプの DPI と RI

##### a. 単一素材・単一部品の DPI と RI

図 3.15～3.18 は、レンズ稼働タイプのデジタルカメラの単一素材・単一部品の DPI を横軸に、再生資源強度 RI を縦軸にとったものである。これより、各製品について、以下の特徴が挙げられる。

- ① SONY CyberShot (2001 年) では、メイン基板の再生資源強度が最も高く、解体時間も最も長い。次に、背面カバーの再生資源強度が高く、解体時間は短い。
- ② Canon IXY320 (2002 年) では、メイン基板の再生資源強度が最も高く、解体時間は短い。
- ③ Panasonic Lumix (2004 年) では、個々のメイン基板の再生資源強度は他と比べ特段高くなっていないが、3 つに基板がわかれていることで、解体時間が合計で長くなる。
- ④ FUJIFILM FinePix (2004 年) では、メイン基板の再生資源強度が最も高く、解体時間は短い。



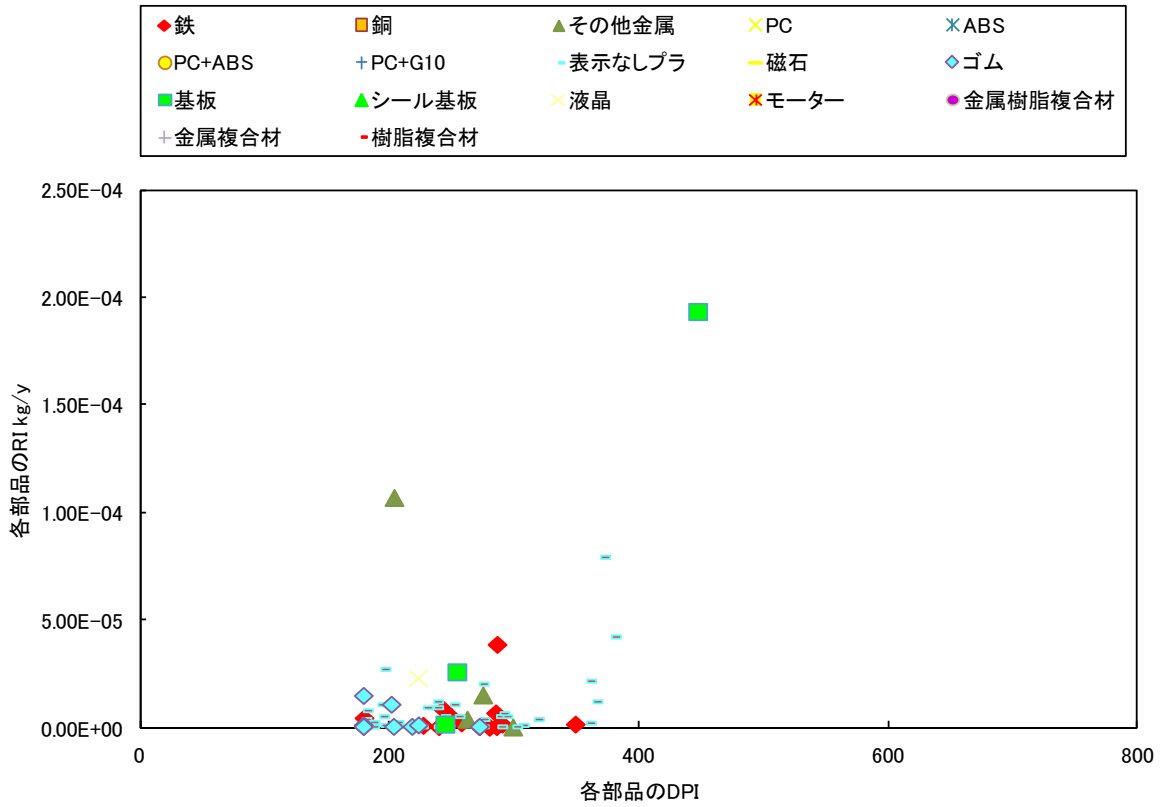


図 3.15 SONY CyberShot の単一素材の DPI と RI の関係

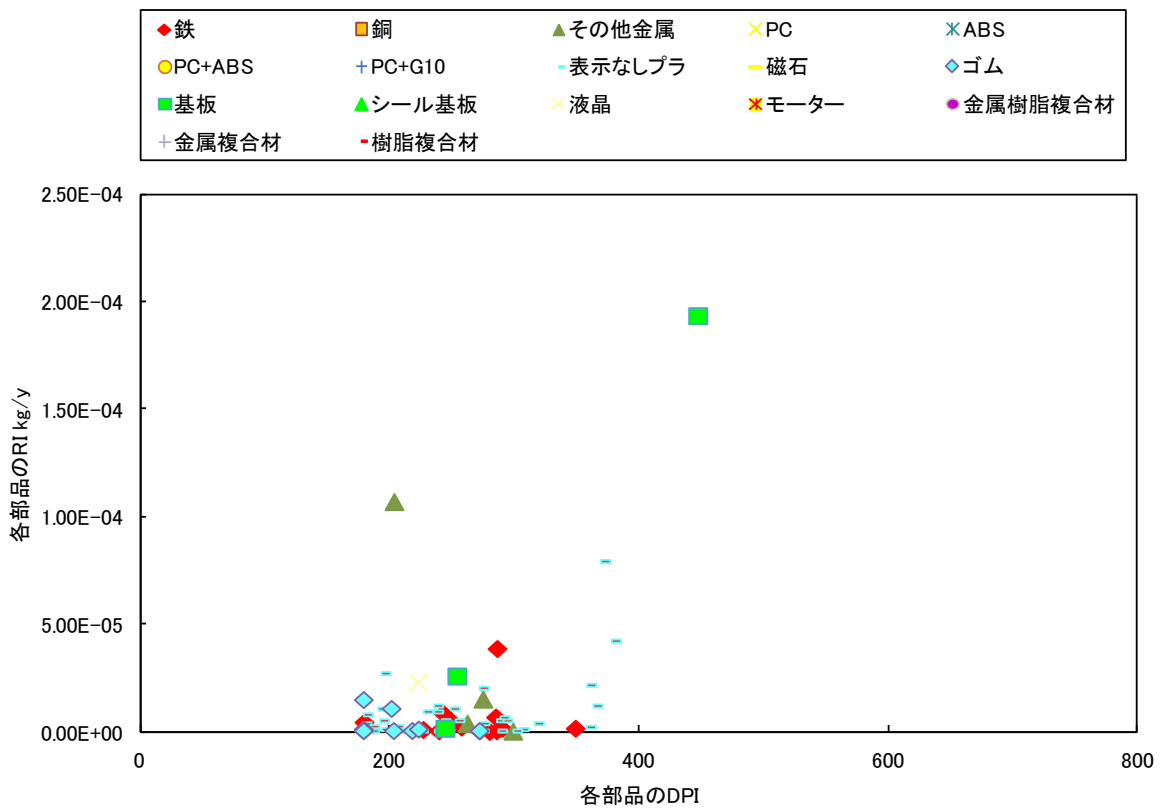


図 3.16 Canon IXY320 の単一素材の DPI と RI の関係

レンズ稼動タイプの単一素材の DPI と RI(その1)

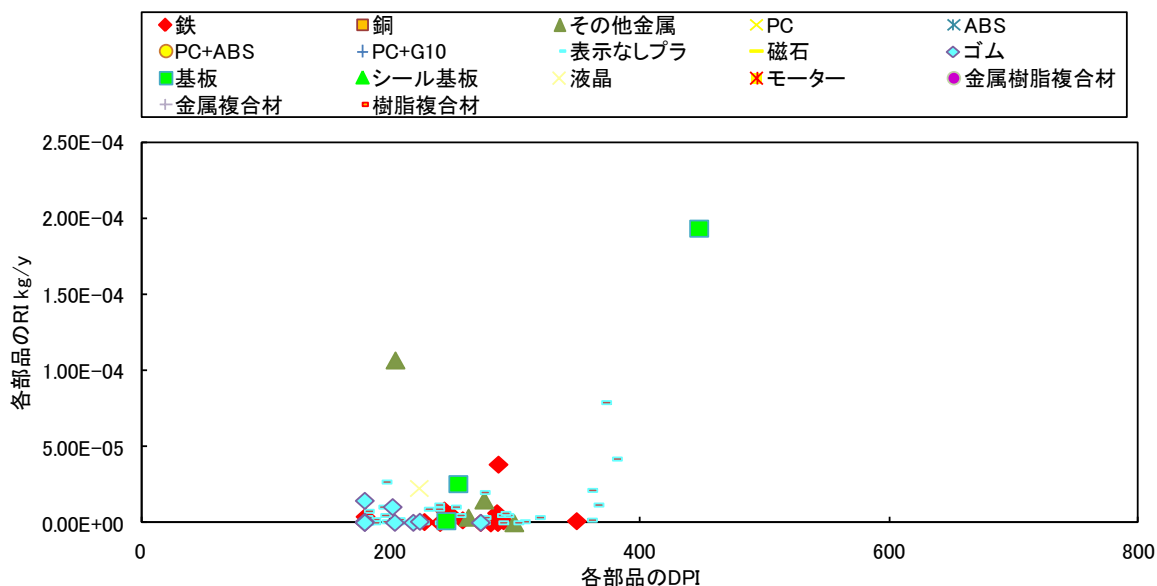


図 3.17 Panasonic Lumix の単一素材の DPI と RI の関係

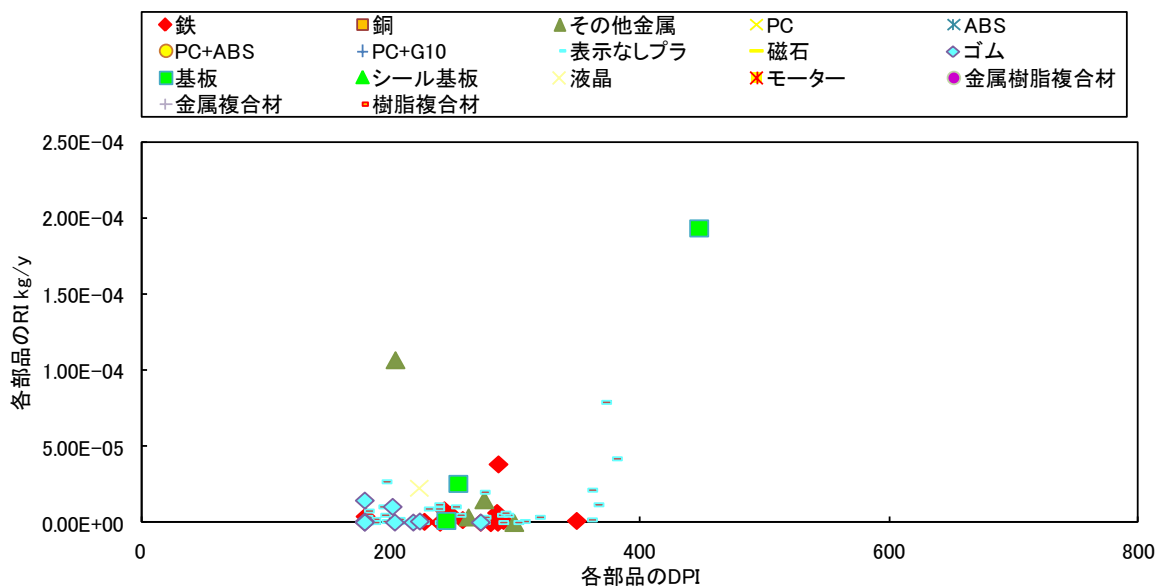


図 3.18 FUJIFILM FinePix の単一素材の DPI と RI の関係  
 レンズ稼動タイプの単一素材の DPI と RI(その2)

b. 複合素材の DPI と RI

図 3.19～図 3.22 は、レンズ稼動タイプのデジタルカメラの複合素材の DPI を横軸に、再生資源強度 RI を縦軸にとったものである。これより、各製品について、以下の特徴が挙げられる。

- ① SONY CyberShot (2001 年) では、前面カバーの再生資源強度が最も高く、解体時間も長い。

- ② Canon IXY320 (2002 年) では、前面カバー、背面カバーの再生資源強度が高く、解体時間は短い。また、比較的再生資源強度が高いコンデンサーは解体時間が長い。
- ③ Panasonic Lumix (2004 年) では、レンズユニットの再生資源強度が最も高く、解体時間も長い。また、
- ④ FUJIFILM FinePix (2004 年) では、メイン基板の再生資源強度が最も高く、解体時間は短い。また、前面カバーの再生資源強度が高く、解体時間は短い

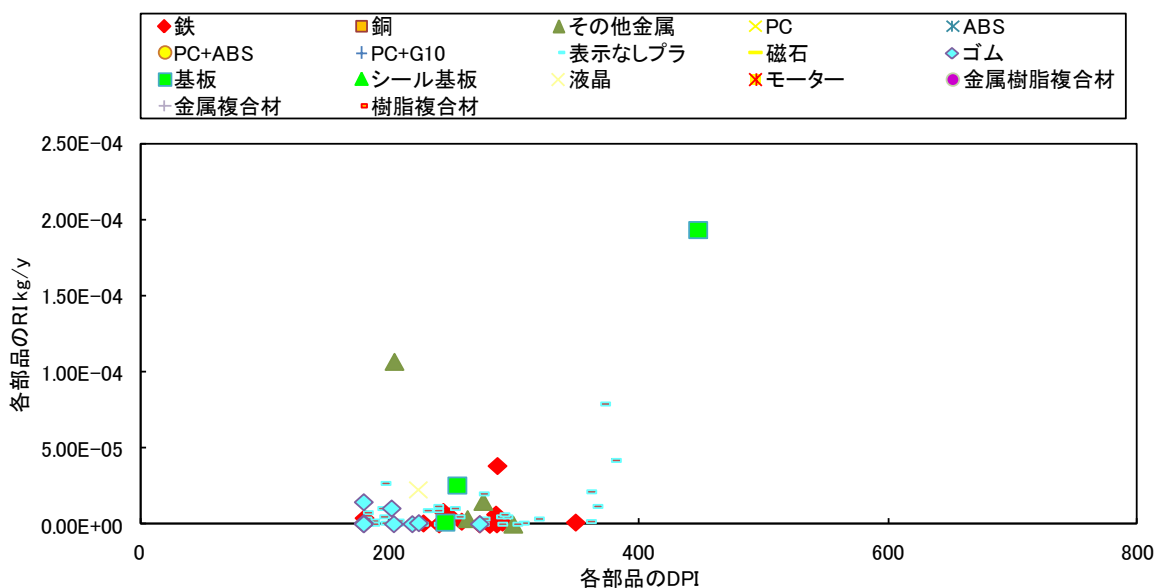


図 3.19 SONY CyberShot の複合素材の DPI と RI の関係

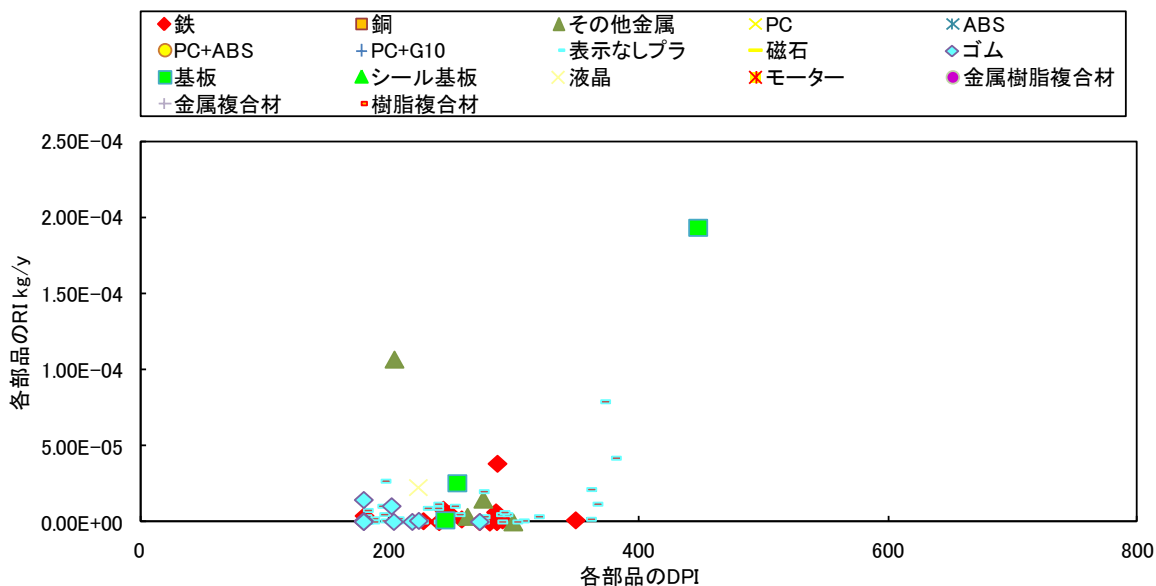


図 3.20 Canon IXY320 の複合素材の DPI と RI の関係  
レンズ稼動タイプの複合素材の DPI と RI(その1)

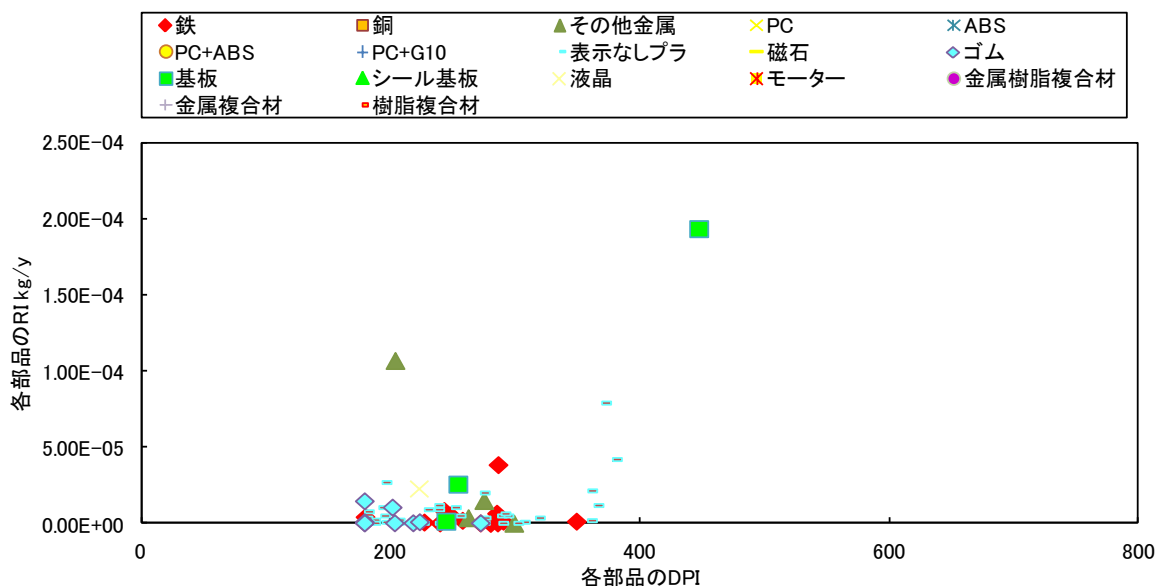


図 3.21 Panasonic Lumix の複合素材の DPI と RI の関係

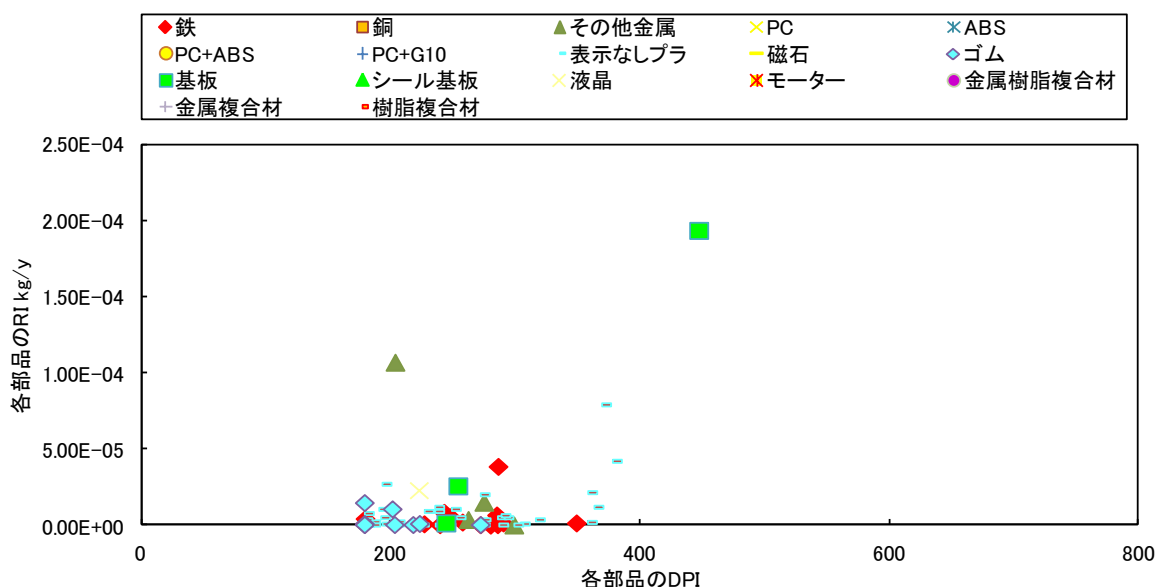


図 3.22 FUJIFILM FinePix の複合素材の DPI と RI の関係  
レンズ稼働タイプの複合素材の DPI と RI (その2)

(2) レンズ非稼働タイプの DPI と RI

a. 単一素材・単一部品の DPI と RI

図 3.23～3.25 は、レンズ非稼働タイプのデジタルカメラの単一素材・単一部品の DPI を横軸に、再生資源強度 RI を縦軸にとったものである。これより、各製品について、以下の特徴が挙げられる。

- ① CASIO EXILIM (2002 年) では、個々のメイン基板の再生資源強度は他と比べ特段高くなっていないが、3つに基板がわかれていることで、解体時間が合計で長くなる。
- ② KYOCERA Finecam (2004 年) では、メイン基板の再生資源強度が最も高く、解体時間も長い。
- ③ FUJIFILM FinePix (2005 年) では、メイン基板の再生資源強度が最も高く、解体時間も長い。また、前面カバー、背面カバーの再生資源強度も高く、解体時間も長い。

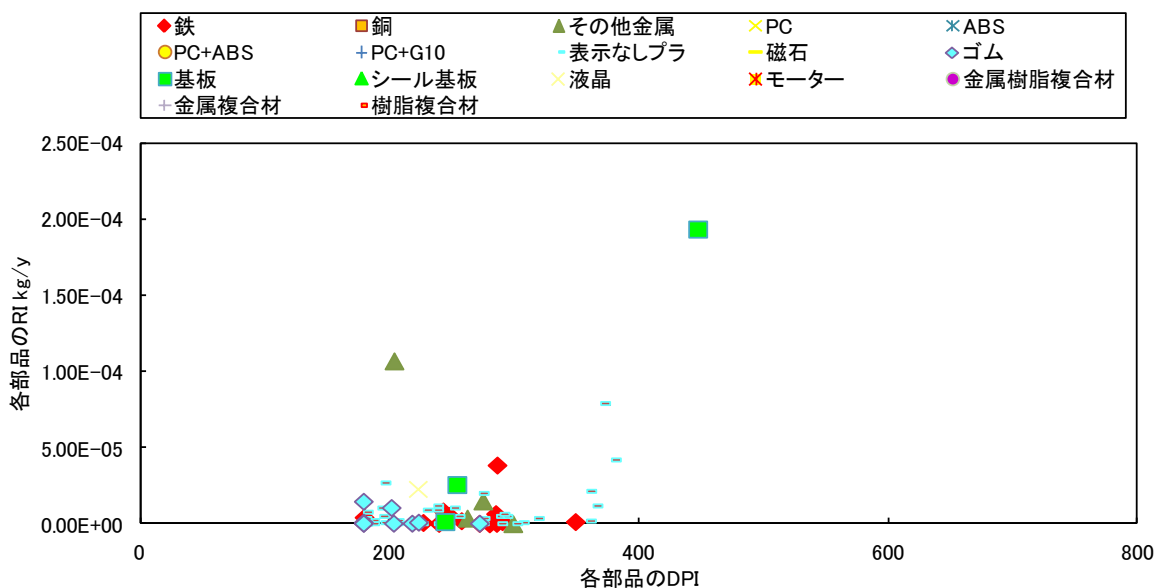


図 3.23 CASIO EXILIM の単一素材の DPI と RI の関係

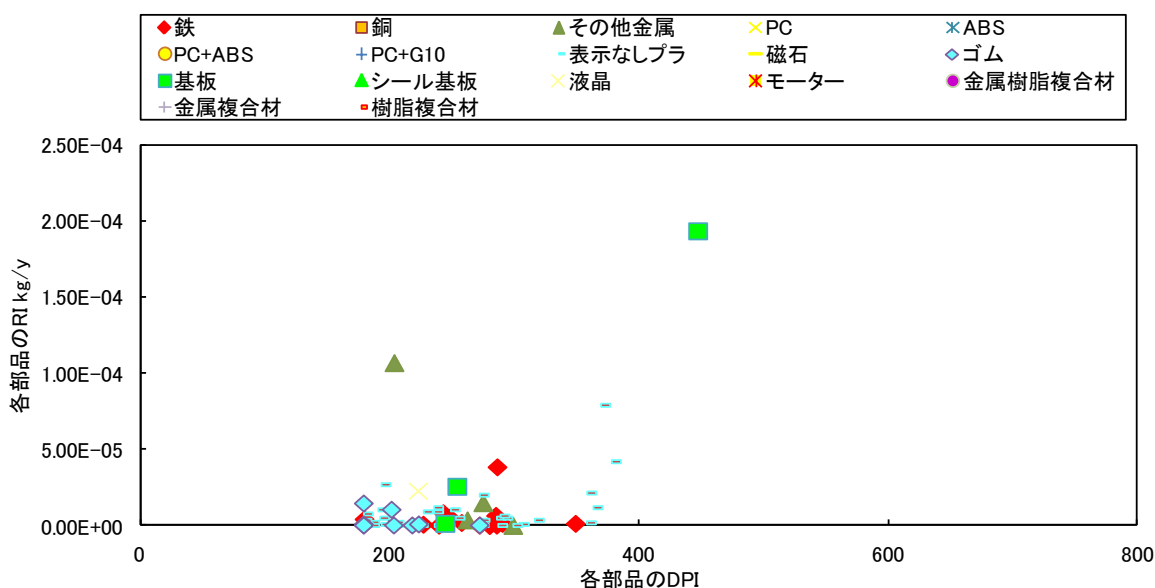


図 3.24 KYOCERA Finecam の単一素材の DPI と RI の関係  
レンズ非稼動タイプの単一素材の DPI と RI の関係(その1)

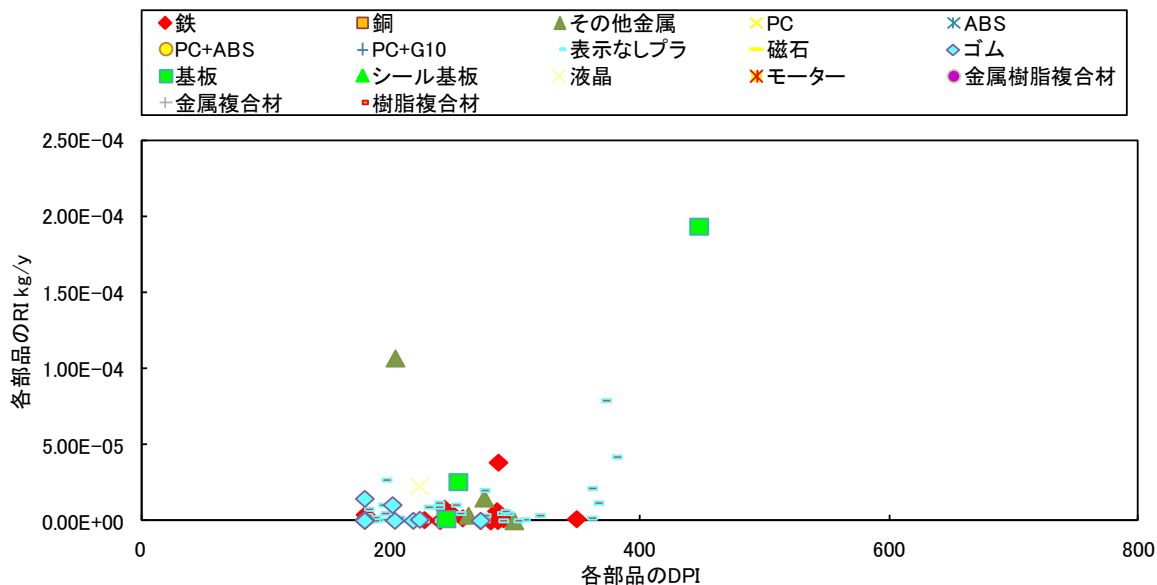


図 3.25 FUJIFILM FinePix の単一素材の DPI と RI の関係  
 レンズ非稼働タイプの単一素材の DPI と RI の関係(その2)

b. 複合素材の DPI と RI

図 3.26~3.28 は、レンズ非稼働タイプのデジタルカメラの複合素材の DPI を横軸に、再生資源強度 RI を縦軸にとったものである。これより、各製品について、以下の特徴が挙げられる。

- ① CASIO EXILIM (2002 年) では、背面カバー、前面カバーの再生資源強度が高い。
- ② KYOCERA Finecam (2004 年) では、前面カバーの再生資源強度が高い。
- ③ FUJIFILM FinePix (2005 年) では、前面カバー、背面カバーが単一素材であるため、特に特徴はない。

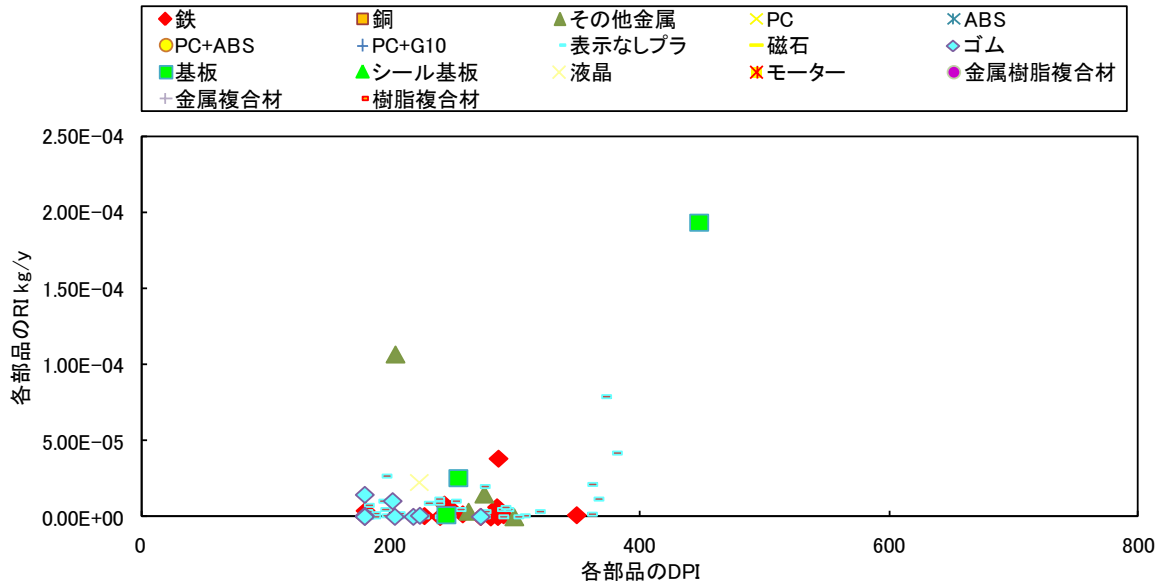


図 3.26 CASIO EXILIM の複合素材の DPI と RI の関係  
レンズ非稼動タイプの複合素材の DPI と RI の関係(その1)

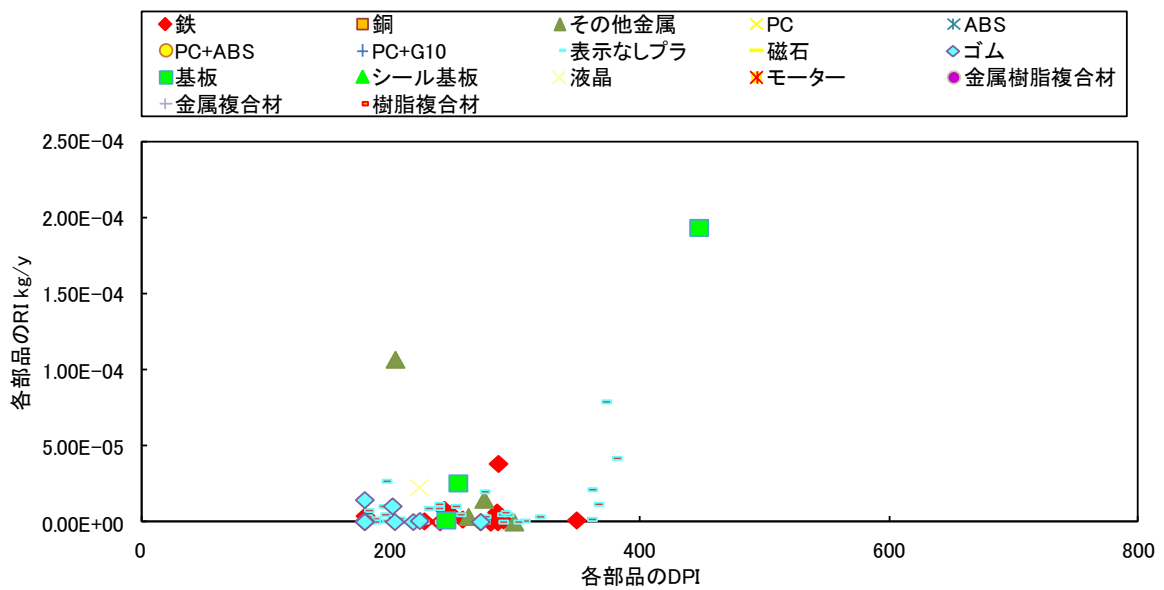


図 3.27 KYOCERA Finecam の複合素材の DPI と RI の関係

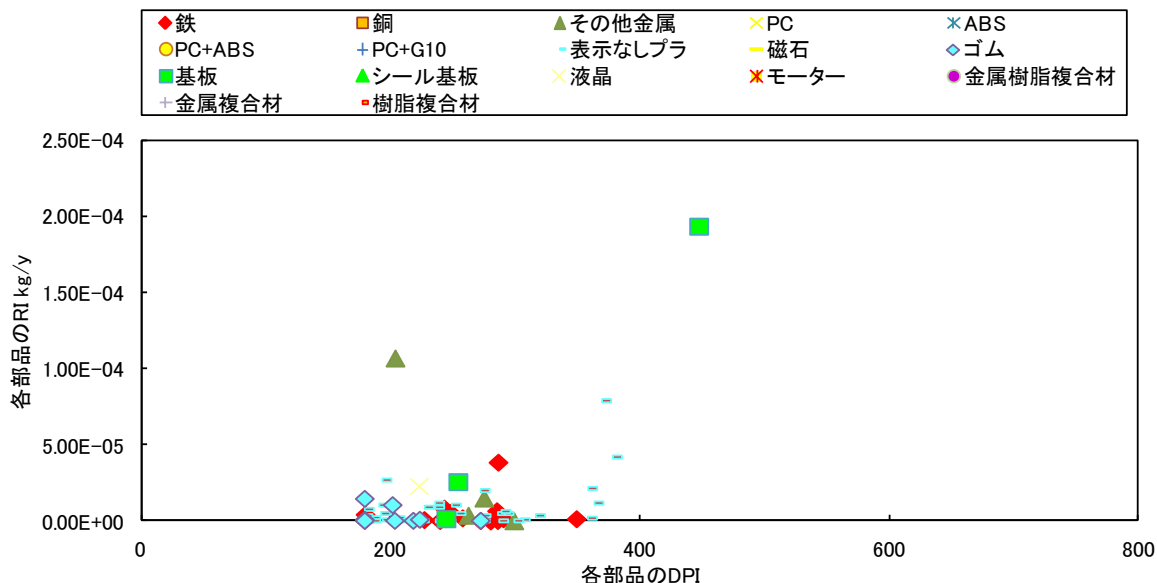


図 3.28 FUJIFILM FinePix の複合素材の DPI と RI の関係  
 レンズ非稼動タイプの複合素材の DPI と RI の関係(その2)

### 3. 3. 2 解体解析を活用した設計改善策の提案

#### (1) 求められる設計改善策の概要

各デジタルカメラでは、タイプに関係なく、筐体とメイン基板の資源強度が高い。筐体は、解体時間は基板と比較して長くないが、複合素材で構成されているものが多い。そのため、解体性の向上よりも、単一素材化が求められる。図 3.29 に示すように、ボタンなどのプラスチックや金属が不可逆的に結合していることが多く、これらの部品を解体可能にすることで単一素材を多く回収することが可能となる。

これより、レンズ稼動タイプのどの製品においてもメイン基板や筐体の RI が高いことがわかった。



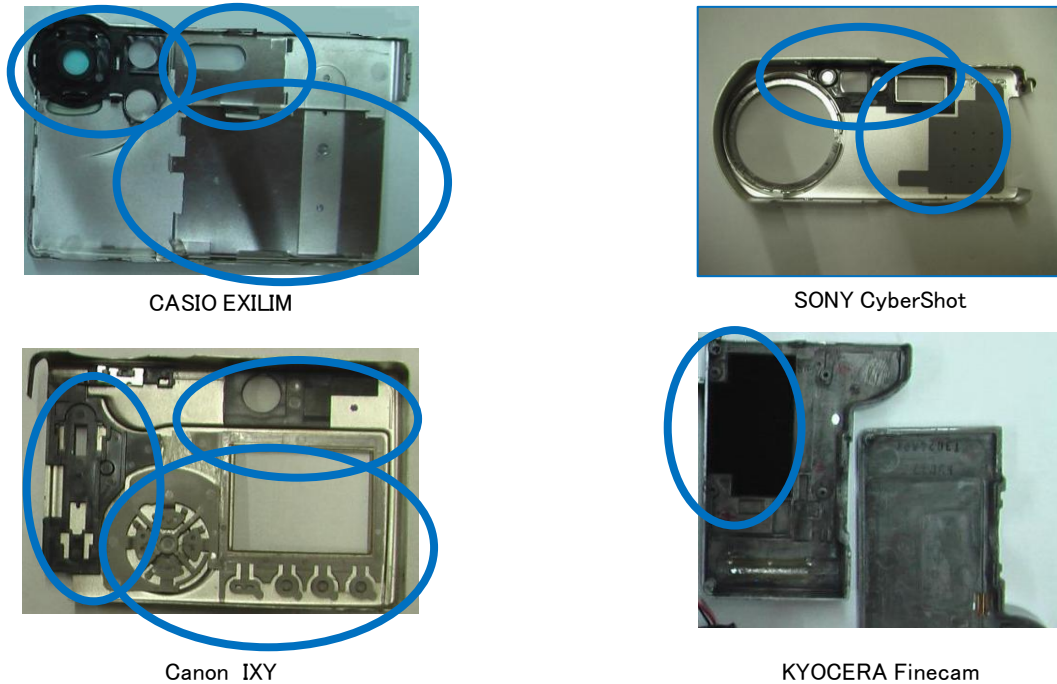


図 3.29 デジタルカメラの筐体部分に不可逆的に結合する部品

一方で、基板は資源強度が高いだけでなく、解体時間が長い傾向にある。そのため、解体性の向上が求められる。

(2) 解体フローを活用した設計改善策の提案

そこで、解体フローを活用することで、解体性の向上に関する提案を行う。図 3.30 は SONY Cybershot (2001 年) の解体フローである。基板をベースとして 19 の部品やユニットを取り外さないと基板が取り外せない設計となっており、ユニット数を減らすことや基板が単独で取れる設計改善が挙げられる。

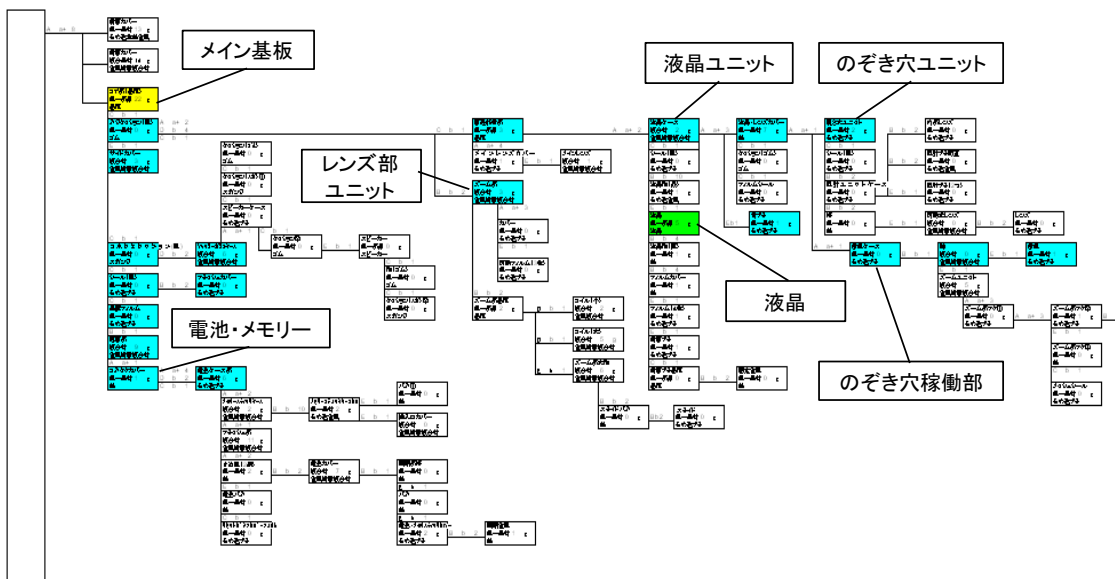


図 3.30 SONY Cybershot(2001 年)の解体フロー

また、図 3.31 は Panasonic Lumix (2004 年) の解体フローである。基板は 3 つに分かれており、1 つ 1 つの基板の回収に時間がかかってしまうため、基板を 1 つにまとめる設計改善が挙げられる。

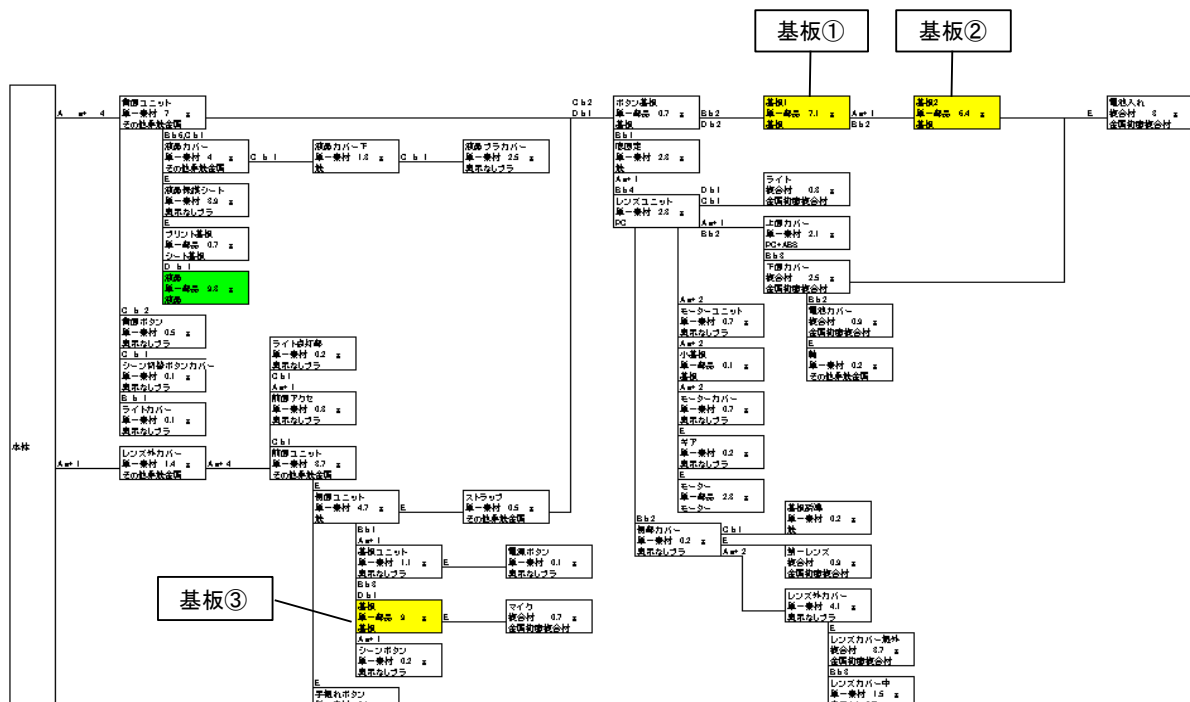


図 3.31 Panasonic Lumix (2004 年) の解体フロー

### 3. 4 まとめ

家電製品の DfE の定量評価を通して、家電製品を類型化するとともに、デジタルカメラを例にした DfE 向上のための設計改善策を提案した。以下に得られた結果を示す。

- ・ 製造時と使用時の環境負荷に着目し、大型家電と小型家電(生活家電系)は使用時の環境負荷が多くを占めることから、「省エネ設計や省エネに関する積極的な情報公開が望まれる製品群」であり、また、小型家電(デジタル機器)は製造時の環境負荷が多くを占めることから、「3R へ配慮した設計や使用済み製品の積極的回収が望まれる製品群」であることを示した。
- ・ 製造時の物質投入における希少金属の環境負荷に着目し、希少資源の占める割合が高い「PC や薄型テレビ」は易解体性の向上が特に必要であることを示した。さらに、「家に保管されていることの多い旧型のモバイル機器」も希少資源の割合がある程度高いことから、収集回収の仕組み作りが必要な製品群であることを示した。
- ・ DfE がリサイクルプロセスに与える影響に着目し、デジタルカメラ、ドライヤー、冷蔵庫は、複合材の減少や表示なしプラを表示化することが

設計段階で有効であることを示した。また、デジタルカメラ、携帯、プラズマテレビは基盤などを回収すべき製品群であることを示した。さらに「携帯電話やハンドクリーナー、ハンドマッサージャー、空気清浄機、アイロン」といった製品群は表示ありプラの割合が高く積極的に手回収することが有効であることを示した。

- 希少金属の環境負荷が高いデジタルカメラを例に取り上げ、各部品を取り出すまでの時間と再生資源強度の関係について分析を行うとともに、その解体フローから点在している基盤の偏在化の設計改善策を提案した。

## 第 4 章

### 大型家電のリサイクルプロセスの 環境性・経済性評価

～使用済み冷蔵庫を中心として～

第 4 章 大型家電のリサイクルプロセスの環境性・経済性評価～使用済み冷蔵庫を中心として～	1
4. 1 目的と従来研究	4-1
4. 2 DfE 定量評価データベースを活用したリサイクルプロセスの効率化に向けた評価方法の概要	4-2
4. 2. 1 事前に設定する事項	4-2
4. 2. 2 評価する事項	4-3
4. 3 冷蔵庫のリサイクルプロセスの概要と評価方法	4-3
4. 3. 1 評価対象リサイクルプロセスの設定	4-3
4. 3. 2 評価対象とする冷蔵庫の設定	4-4
4. 3. 3 解体時間の算出方法	4-10
4. 3. 4 資源価格とマテリアルリサイクル率の設定	4-10
4. 3. 5 各 CASE の経済性評価	4-12
4. 4 手解体工程を導入したリサイクルプロセスの環境性・経済性の比較	4-16
4. 4. 1 リサイクルプロセスの課題抽出	4-16
4. 4. 2 課題プロセスの影響度の評価	4-19
4. 4. 3 リサイクルプロセスの改善策の提案	4-21
4. 4. 4 改善案の効果の試算	4-21
4. 4. 5 外部要因の影響度の評価	4-22
4. 5 DfE 定量評価データベースを活用した大型家電の混合処理の評価	4-23
4. 5. 1 DfE 定量評価データベースの活用方法	4-23
4. 5. 2 大型家電の混合処理における評価の前提条件	4-25
4. 5. 3 大型家電の混合処理における環境性・経済性評価	4-27
4. 6 まとめ	4-28
図 4.1 リサイクルプロセスの環境性・経済性評価の概要	4-2
図 4.2 設定したリサイクルプロセスの概要	4-4
図 4.3 リサイクルプロセスにおける各工程の設定	4-8
図 4.4 冷蔵庫の解体フローと各工程で回収する部品	4-9
図 4.5 各工程における解体時間の設定	4-10
図 4.6 各ケースの推定解体時間	4-14
図 4.7 各ケースの手解体工程における回収した各素材の質量	4-14
図 4.8 各ケースの手解体工程における回収した各素材の金額	4-15
図 4.9 各ケースの破碎工程における回収した各素材の質量	4-15
図 4.10 各ケースの破碎工程における回収した各素材の金額	4-15
図 4.11 各工程における単位時間あたりの生産性	4-16
図 4.12 すべての手解体工程時間を変化させたときの各値	4-17
図 4.13 DPI で算出した範囲の手解体工程時間を変化させたときの各値	4-18
図 4.14 コンブ底板類取外し工程の手解体時間を変化させたときの各値	4-18
図 4.15 コンブの解体工程時間を変化させたときの各値	4-19
図 4.16 本体切断機後手解体工程時間を変化させたときの各値	4-19
図 4.17 各工程を省略したときの各値	4-21
図 4.18 回収するプラを変化させたときの最終損益	4-22
図 4.19 資源価格が変動したときの感度解析	4-23

図 4.20	冷蔵庫と洗濯機の処理フロー	4-24
図 4.21	冷蔵庫の処理量を維持した場合の混合処理の環境性・経済性評価結果	4-27
図 4.22	冷蔵庫の処理量が減少した場合の混合処理の環境性・経済性評価結果	4-28
表 4.1	モデル機種として選定した冷蔵庫の仕様	4-5
表 4.2	モデル機種の材料バランス	4-6
表 4.3	配線の材料バランス	4-6
表 4.4	圧縮機の材料バランス	4-6
表 4.5	ファンの材料バランス	4-6
表 4.6	モーターの材料バランス	4-7
表 4.7	底板冷却版ユニットの材料バランス	4-7
表 4.8	蒸発器の材料バランス	4-7
表 4.9	資源売却価格と材料リサイクル率の設定	4-12
表 4.10	評価対象とした冷蔵庫の仕様	4-25
表 4.11	評価対象とした洗濯機の仕様	4-26
表 4.12	洗濯機の材料バランス	4-26
表 4.13	破砕機に投入される洗濯機由来の素材	4-26
表 4.14	設定したCASEの概要	4-27

## 第4章 大型家電のリサイクルプロセスの環境性・経済性評価 ～使用済み冷蔵庫を中心として～

### 4.1 目的と従来研究

我が国では、1998年に「特定家庭用機器再商品化法」、いわゆる「家電リサイクル法」が制定された。同法は2009年に改正され、当初の指定品目であった、ブラウン管テレビ、冷蔵庫・冷凍庫、エアコン、洗濯機に加えて、液晶テレビ・プラズマテレビ、衣類乾燥機が追加された<sup>3-1)</sup>。制定の背景には、「市町村による大型家電の適正処理困難性」と「一般廃棄物最終処分場容量の逼迫」が存在する。また、廃棄物処理問題以外にも、少資源国である我が国における資源の有効活用という点も制定の背景として存在する。同法の制定前の処理方法の中心は、直接埋め立てや鉄資源の回収を中心とした破碎処理であり、「資源の有効利用」ではなく「廃棄物処理」の観点を中心である<sup>3-2)</sup>。こうした中、同法においては、対象製品毎に再商品化率が法定義務として課され、「単なる処理から一層高度な水準のリサイクルへ」と舵が切られた。このように、家電リサイクル法は「最終処分場の延命化」や「資源の有効利用」などの点で成果を挙げている<sup>3-3)</sup>。

一方で、「リサイクル料金の低減」や「再商品化率の在り方」などの課題も指摘されている。家電リサイクル法では、その再商品化に関わる費用負担を消費者が担っており、この費用負担を低減することは「消費者の廃棄物の適正排出」や「不法投棄の削減」の観点から重要であるが、メーカーにおける再商品化費用については公表されていない現状が存在する<sup>3-4)</sup>。エアコンについては平成19年にリサイクル料金が引き下げられたものの、その他の製品については、同法の施行以来下がっていないのが実情である<sup>3-5)</sup>。また、再商品化率については、政令で定められた基準値を超える成果を上げているが、資源有効利用の観点からはより一層の向上が求められるとともに、その質の向上も必要である。

こうした課題を解決していくためには、「リサイクル料金の低減」と「再商品化率の向上」の両面から、効率的なリサイクルプロセスを設計する必要がある。家電リサイクル法においても、再商品化等料金の設定について、「再商品化等に必要な行為を能率的に実施した場合における適正な原価を上回るものであってはならない」(第20条第2項)と規定する一方、「排出者の適正な排出を妨げることをしないよう配慮しなければならない」と規定されている<sup>3-6)</sup>。

そこで本研究では、第2章で示した分解性評価指数DPIを活用し、大型家電のリサイクルプロセスを環境性・経済性の両面から評価し、その効率化に関する提案することを目的とする。DPIを導入することで、「資源の有効利用」に寄与すると想定される手解体・選別を評価できる点とメーカーの環境配慮設計の導入効果によるリサイクルプロセスの効率化に対する影響も評価できる点に特徴がある。すなわち、製品使用済み後のリサイクルプロセスのみならず、環境配慮デザインの促進も評価できる。

具体的には、リサイクル料金が最も高い冷蔵庫を対象に、手解体工程を積極導入した場合の環境性・経済性を評価し、その両面から最適な手解体工程の導入レベルを提示する。また、現状では、各製品が個別に処理されているが、より効率的なリサイクルプロセスを設計していくために、複数製品を混合処理した場合の環境性・経済性を、DfE 定量評価データベースを活用して評価した。

#### 4. 2 DfE 定量評価データベースを活用したリサイクルプロセスの効率化に向けた評価方法の概要

大型家電のリサイクルプロセスの効率化を、環境性・経済性の両面から検討するにあたっての評価方法の概要を図 4.1 に示す。

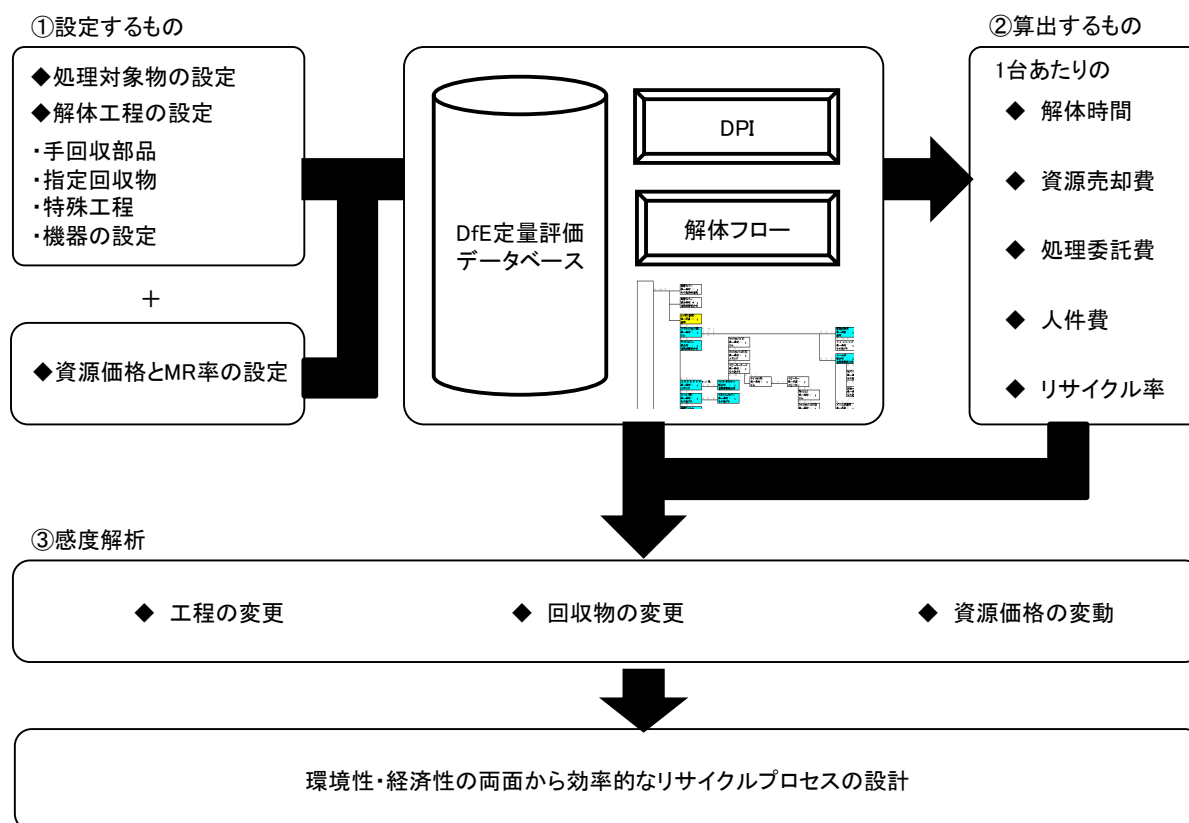


図 4.1 リサイクルプロセスの環境性・経済性評価の概要

##### 4. 2. 1 事前に設定する事項

###### (1) 処理対象物の設定

処理対象物と想定するモデル機種を選定し、そのマテリアルバランスや解体フローを定義する。このとき、マテリアルバランスについては、DfE 定量評価データベースに搭載されたデータを活用することを前提とする。また、解体フローは、DfE 定量評価データベースを構築する際に、作成するものである。

###### (2) リサイクルプロセスの設定

工場における解体方法としてマテリアルフローと解体フローを定義する。つまり、モデル機種の解体フローによって得られた部品や結合解除を工場のラインにあてはめて考える。その際、フロン、パッキン、蛍光灯の指定回収物の設



定や本体切断機などの特殊工程を含んでいる場合は、それについても設定する。

### (3) 資源売却価格とマテリアルリサイクル率の設定

処理物やリユース部品，再資源化された物質などの価格やそれらのマテリアルリサイクル率を設定する。

## 4. 2. 2 評価する事項

冷蔵庫1台あたりの解体時間，資源売却費，処理委託費，人件費，リサイクル率を算出する。

### (1) 解体時間

解体時間は実際の解体時間に相当する指数であるDPIを用いて算出する。設定したリサイクルプロセスにおける手解体工程で回収される部品を解体フローと照らし合わせることで，特定部品の解体時間が算出可能である。

### (2) 資源売却益

設定したリサイクルプロセスの手解体工程で回収された資源と破碎・選別工程から回収される品目のうち，有価物として取引される資源に，設定した資源売却価格を乗じることで算出する。

### (3) 処理委託費

設定したリサイクルプロセスで回収されるシュレッダーダストやフロンなどの逆有償で取引される品目の回収量に設定した処理委託単価を乗じることで算出する。

### (4) 再資源化率

設定したリサイクルプロセスで回収された有価物をリサイクルプロセスに投入された製品質量で除することで算出する。

## 4. 3 冷蔵庫のリサイクルプロセスの概要と評価方法

### 4. 3. 1 評価対象リサイクルプロセスの設定

まず，大型家電の代表例として冷蔵庫を取り上げ，そのリサイクルプロセスの効率化に関して評価を行う。

#### (1) 冷蔵庫のリサイクルプロセスの概要

家電リサイクル法では，製造業者等に対し，「生活環境の保全に資するもので再商品化等と一体的に行うことが特に必要かつ適切であるものを，再商品化等を行う際に同時に行わなければならないこととされている(1)」。その具体的内容は政令で定められており，冷蔵庫では，冷媒として使用されているフロン類の回収と，回収されたフロン類の再利用又は破壊が義務付けられている。

そのため，冷蔵庫のリサイクルプロセスにおいて，冷媒フロンの回収の前工程において「パッキン類」「冷媒フロン」「冷凍機油」「コンプレッサー」が手解体で回収されるのが一般的である<sup>3-7)</sup>。また，蛍光灯は，**産業廃棄物に分類されることから**，確実に回収が行われる<sup>3-8)</sup>。このように回収が義務化されている構成部品以外は，各リサイクル事業者の判断で手解体が行われている。例えば，庫内のプラスチック部品の手回収(2)といった初歩的なレベルから，扉の解体や本体を切断後に部品を回収するといった高度なレベルにわたる。このとき，

積極的な手解体による資源回収は、環境性の面からは有効であるが、一方で経済性の観点からは人件費の増加を招くことが予想される。実際にリサイクル事業者に行ったヒアリング結果からも、どこまで手解体工程を導入するのが最適なのがわからないといった意見を確認している。

(2) 評価対象とするリサイクルプロセスの設定

冷蔵庫のリサイクルプロセスの評価を行うにあたって、リサイクルプロセスを設定する必要がある。ここでは、**図 4.2** に示す3つのケースを設定した。

CASE1 は、手回収品目を最低限にした場合で、パッキン類、冷媒フロン、冷凍機油、コンプレッサーのみの回収を想定する。

CASE2 は、CASE1 に加えて、庫内部品を追加で回収することを想定する。

CASE3 は、積極的に手解体工程が導入された場合を想定する。他の 2CASE と異なり、扉の解体や本体の切断工程が追加されている。

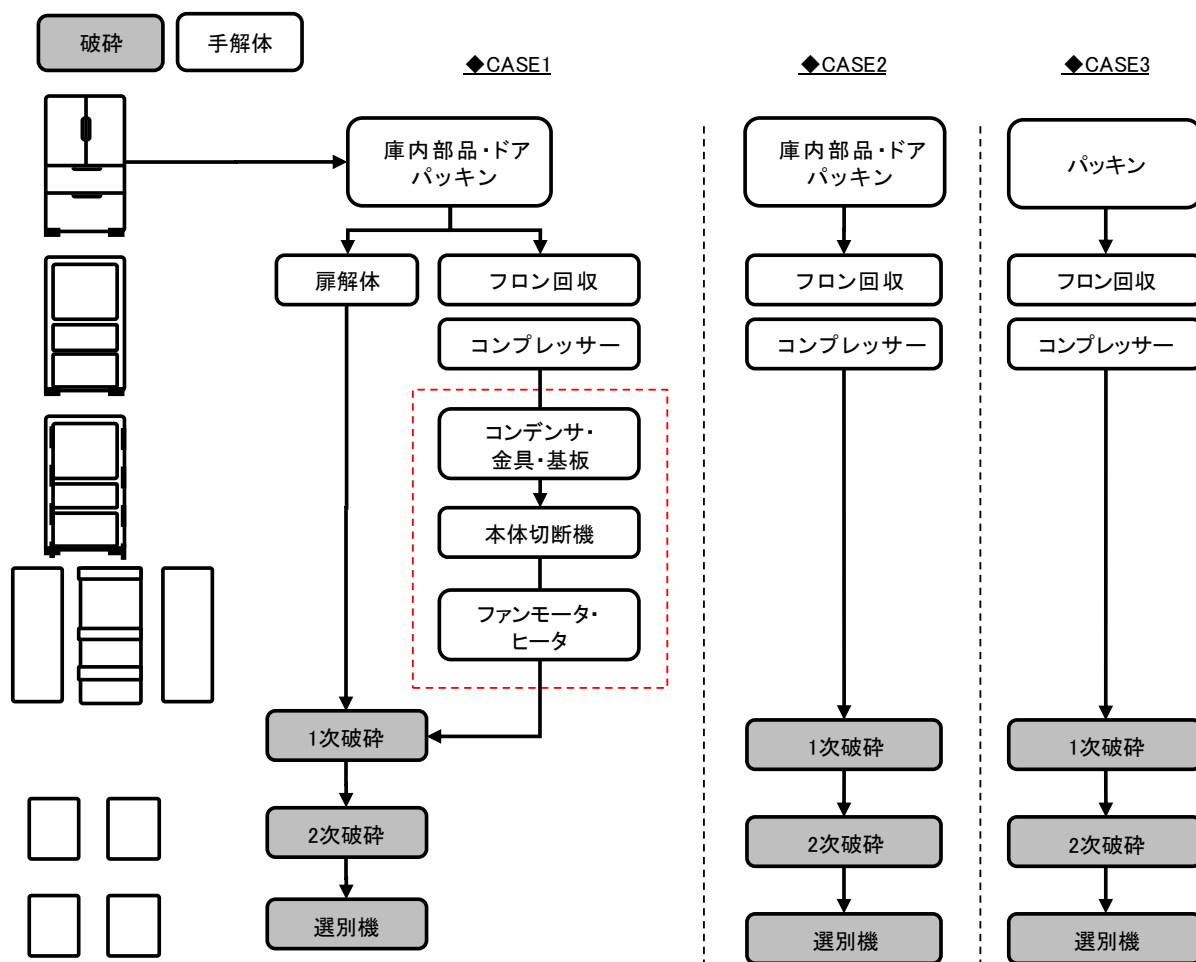


図 4.2 設定したリサイクルプロセスの概要


4. 3. 2 評価対象とする冷蔵庫の設定

a. モデル機種の設定

解体を想定する冷蔵庫のモデル機種の設定を行った。解体時間は DPI を用い

て算出する。DPIの算出には、その冷蔵庫の解体フロー図や結合点数、部品点数などのデータが必要になるため、過去に早稲田大学永田研究室において解体した冷蔵庫の中から適当なものを選出する。日本電機工業会<sup>3-9)</sup>より、80kg(400L)クラスの冷蔵庫が80%の代表性をもつことから、DfE定量評価データベースの中から、それに該当し、詳細な解体フローが作成されている冷蔵庫を選択した。その仕様を表4.1に示す。

表 4.1 モデル機種として選定した冷蔵庫の仕様

項目	内容
メーカー名	SANYO
型番	SR-H401G(S)
容量 L	404
質量 kg	80
サイズ w×h×d mm	635×1798×650
製造年度 年	2004
外観	

b. モデル機種のマテリアルバランス

また、この冷蔵庫のマテリアルバランスをLCAデータベース<sup>3-10)</sup>より、質量按分して算出した値を表4.2に示す。さらに、モデル機種の複合素材の部品のマテリアルバランスについても表4.3～4.8の通り設定した。複合素材のマテリアルバランスにおいて、圧縮機と配線と底板冷却版ユニットについてはLCAデータベースより算出し、モーターについてはリサイクル業者へのヒアリングから得た値を用いた。ファンと蒸発器については、データが得られなかったため、表の通り、独自に設定した。

表 4.2 モデル機種のマテリアルバランス

素材名	質量 kg	質量比 %
鉄	39.76	49.70
銅	2.47	3.09
アルミ	1.35	1.69
樹脂	26.95	33.69
ウレタン	7.64	9.55
ゴム	0.14	0.18
断熱材発泡剤	0.82	1.02
基板	0.50	0.63
冷凍機油	0.18	0.23
冷媒	0.18	0.23
合計	80.00	100.00

表 4.3 配線のマテリアルバランス

素材	質量 kg	質量比 %
銅	0.633	69.7
樹脂(PVC)	0.276	30.3
合計	0.909	100

表 4.4 圧縮機のマテリアルバランス

素材	質量 kg	質量比 %
鉄	6.98	85.7
銅	0.562	6.90
アルミ	0.215	2.63
樹脂(PET)	0.204	2.51
冷凍機油	0.184	2.26
合計	8.14	100

表 4.5 ファンのマテリアルバランス

素材	質量 kg	質量比 %
鉄	0.0511	20
樹脂	0.204	80
合計	0.255	100

表 4.6 モーターの材料バランス

素材	質量 kg	質量比 %
鉄	0.141	80
樹脂	0.0353	20
合計	0.176	100

表 4.7 底板冷却版ユニットの材料バランス

素材	質量 kg	質量比 %
鉄	0.562	26.2
アルミ	0.618	28.8
銅	0.865	40.3
樹脂	0.102	4.76
合計	2.147	100

表 4.8 蒸発器の材料バランス

素材	質量 kg	質量比 %
鉄	0.204	40
銅	0.204	40
アルミ	0.102	20
合計	0.511	100

c. リサイクルプロセスにおける手解体工程と回収物

モデル機種を解体するにあたって、CASE3における冷蔵庫の解体ラインを図4.3のように設定する。同図より、手解体工程として、大きく、庫内部品回収工程、扉解体工程、冷却装置解体工程、本体切断機前手解体工程、本体切断機後手解体工程を設定し、機器を用いた工程として、プラスチック破砕機、本体切断機、破砕機を用いた各工程を設定している。この各工程において回収する部品については、図4.4に示す。

第4章 大型家電のリサイクルプロセスの環境性・経済性評価  
 ～使用済み冷蔵庫を中心として～

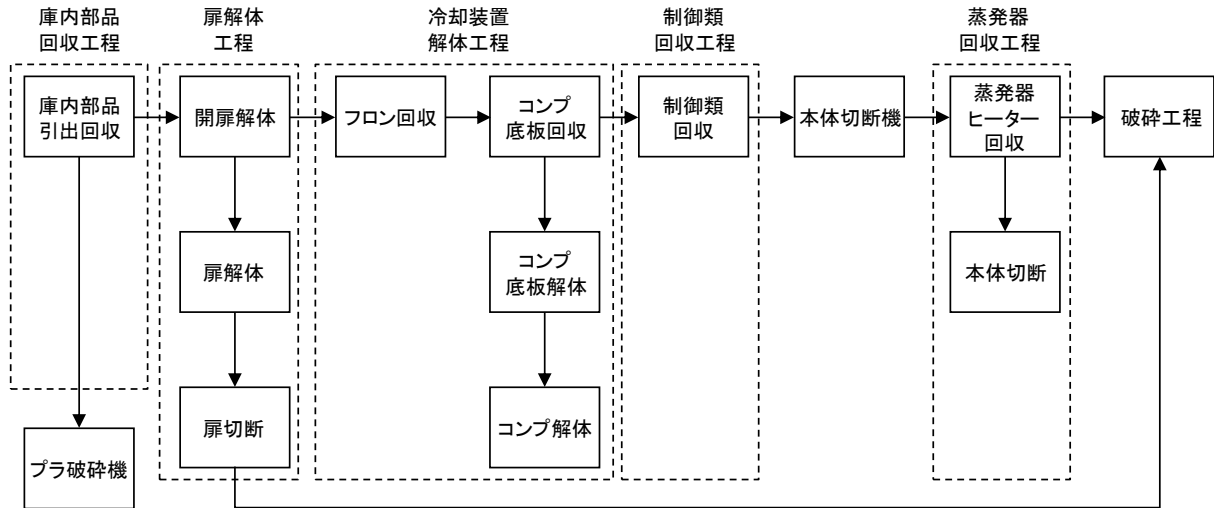


図 4.3 リサイクルプロセスにおける各工程の設定



### 4. 3. 3 解体時間の算出方法

解体時間の算出方法について図 4.5 に示す. 図 4.4 の庫内部品引出回収工程, 開扉解体工程, 扉解体工程, コンブ底板回収工程, 制御類回収工程の 5 つの工程については, DPI を用いて算出する. また, 扉切断工程, フロン回収工程, コンブ底板解体工程, コンブ解体工程, 蒸発器・ヒーター回収工程と本体切断工程の 5 つ工程については実測値を用いて算出する. 実測値は, 現場での実測 3 回の平均値をとったものであり, 同図の下表に示す. また, 機器を用いた工程に関しては, ヒアリングにより, プラ破砕機 6s/kg, 破砕機 3.4s/kg として設定している. 本体切断機については, 本体切断機を用いて切断する時間は本体切断機後手解体工程より短いという前提条件のもとに, 本体切断機後手解体工程において冷蔵庫 1 台分の作業後に本体切断機より出しているため, 本体切断機後手解体工程と同じ時間がかかると設定した.

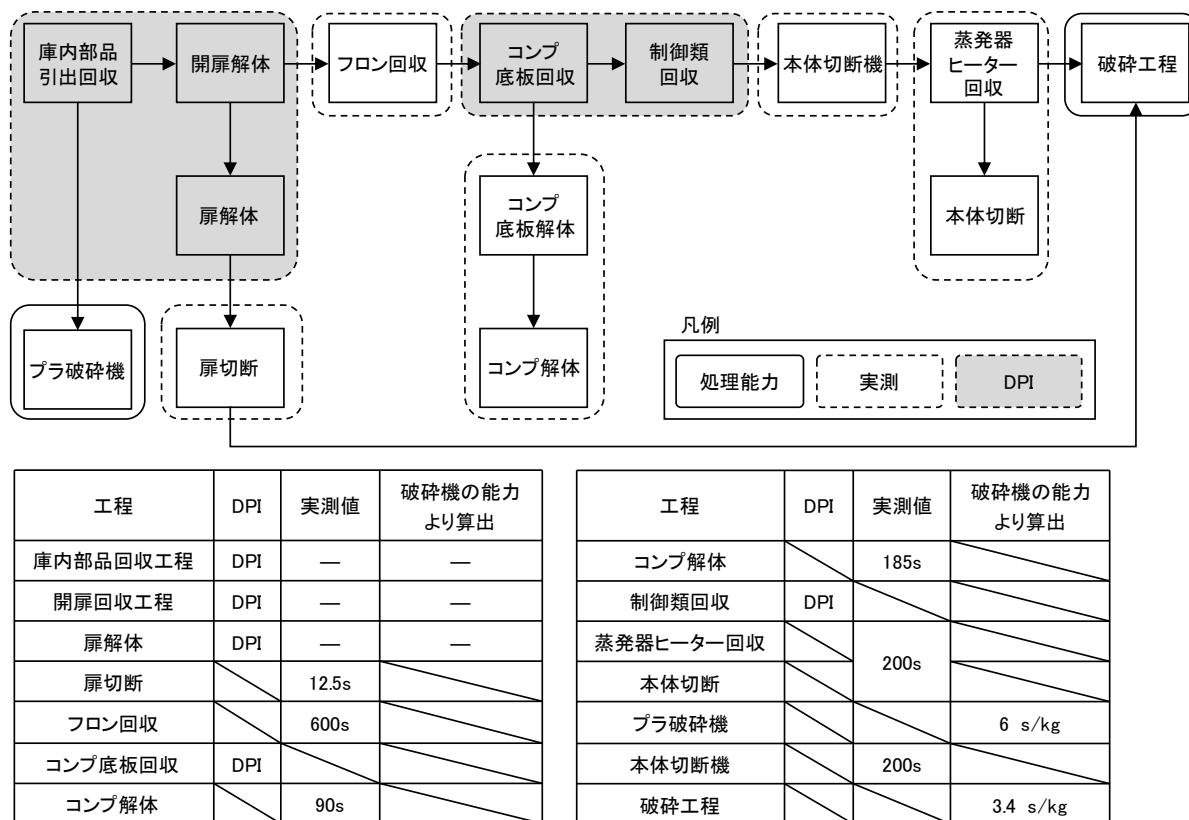


図 4.5 各工程における解体時間の設定

### 4. 3. 4 資源価格とマテリアルリサイクル率の設定

資源価格と MR 率を表 4.10 のように設定する. 資源の分類として, 手解体により回収した売却資源, 手解体により回収した委託処理される資源, 破砕工程を経て回収される売却資源, 回収が義務付けられている資源の 4 つに分類している. 資源価格の設定では, 蒸発器, 凝縮器, 配線については, その質量比より按分して算出しており, ファンは表示なしプラとして, 塩ビはゴムとして仮定してその価格を設定した. フロンについては表の備考に示すサイトより設定し



3-11), 断熱フロンについてもフロンと同じと設定している。冷凍機油は 10 円/kg として設定している。また基板とモーターについては、他社のヒアリング値を用いて設定した。それ以外に示す資源価格については、テルムのヒアリング値を設定している。ただし、破碎工程における鉄の価格は、純度が下がることから、価格も手解体の 80%として設定している。MR 率については、他社のヒアリング値をもとに設定している。ただし、破碎工程における鉄については 95%、ミックスメタルについては 90%として仮定して設定している。

表 4.9 資源売却価格とマテリアルリサイクル率の設定

工程	素材	単価 円/kg	MR 率 %	備考
手解体資 源売却	鉄	22	100	
	銅	500	100	
	ステンレス	190	100	
	アルミ	175	100	
	蒸発器	243.8	100	質量比から按分
	凝縮器	257.7	100	質量比から按分
	金属樹脂複合材	21	50	
	ABS	35	100	
	PS	35	100	
	HIPS	35	100	
	PP	24	100	
	PC	35	100	
	表示なしプラ	2	0	
	ファン	2	50	表示なしプラと設定
	配線	30	67	質量比より算出
	基板	3	30	
	モーター	30	70	
冷凍機油	10	100		
手解体処 理委託	ガラス	-35	100	
	コンデンサ	-35	70	
	ゴム	-44	70	
	その他	-44	30	
破碎工程	鉄	17.6	95	鉄の 80%と仮定, 純度 95%と仮定
	ミックス メタル	21	90	純度 90%と仮定
	混合プラ	2	30	
	ウレタン	-49	0	
指定回収物	蛍光灯	-60	0	
	塩ビ	-44	0	ゴムと同等と仮定
	断熱フロン	-600	0	フロンと仮定
	フロン <sup>3)</sup>	-600	0	<a href="http://www.kankyosoken.co.jp/html/sys_eco.htm">http://www.kankyosoken.co.jp/html/sys_eco.htm</a>

#### 4. 3. 5 各 CASE の経済性評価

これまでに設定した条件のもので、表 4.11 に示す 3 パターンのケースにおける経済性評価を行った。

解体時間の試算結果について図 4.7 に示す。同図より、CASE3 においては、推定手解体工程時間が 3745s、推定破碎工程時間が 411s の合計推定解体時間が 4156s と最も高い値となった。CASE2 では、推定手解体工程時間が 1392s、推定破碎工程時間が 243s の合計推定解体時間が 1635s と CASE3 の約 1/3 程度の値となった。CASE1 では、推定手解体工程時間が 716s、推定破碎工程時間が 238s の合計推定解体時間が 954 と最も低い値をとった。各ケースの合計推定解体時間に占める推定手解体時間は、CASE3 が 90.1%、CASE2 が 85.1%、CASE1 が 75.1%となった。テルムの特徴である本体切断機と本体切断機後手解体工程の合計時間は 400s と全体の 9.6%である。

次に、手解体工程にて回収された部品の素材別の質量を図 4.8 に、その金額を図 4.9 に示す。図 4.8 より質量では 3 ケースとも庫内トレー類の PS とコンプレッサーの鉄の割合が非常に高くなっていることがわかる。また、その合計質量を比較すると、CASE3 では 30.8kg、CASE2 では 20.1kg、CASE1 では 9.79kg と CASE3 の質量とその種類も多いことがわかる。また、図 4.9 より 3 ケースともコンプレッサーの鉄と銅の効果が大きく、処理委託費としてはフロンの効果が大きいことがわかる。また、CASE3 と CASE2 では庫内部品の PS の効果が高いことがわかる。さらに、CASE3 においては、蒸発器、凝縮器・底板類の回収による効果が高いこともわかる。合計金額をみると CASE3 では 1239 円/台と最も高く、CASE2 では 418 円/台、CASE1 では 67.5 円/台と最も低い値をとる。

同様に、破碎工程にて回収された部品の素材別の質量を図 4.10 に、金額を図 4.11 に示す。図 4.10 より合計の質量は CASE3 では 49.2kg、CASE2 では 59.8kg、CASE1 では 78.1kg となっていることがわかる。その内訳をみると、3 ケースとも鉄と混合プラの割合が高いことがわかる。鉄の回収量の占める割合が高いのは冷蔵庫の本体部分に使われている鉄であると考えられる。CASE3 では、凝縮器・蒸発器を手解体工程で回収しているためミックスメタルの量が少なくなっていることがわかる。また、図 4.11 より、合計金額は CASE3 では -358 円、CASE2 では -252 円、CASE1 では -104 円となった。その内訳をみると、3 ケースとも共通して、売却費としてはほとんどが鉄であるが、処理委託費のウレタンと断熱フロンの合計処理委託費が売却費を超えて高いことがわかる。

次に、資源売却費と処理委託費と人件費を合計したものをその解体時間で除した各工程における単位時間当たりの生産性をみたものを図 4.12 に示す。DPI を用いて算出した範囲の手解体工程では、CASE3 が -0.111 円/sec、CASE2 が -0.0499 円/sec、CASE1 が -1.030 円/sec となった。この工程において、CASE3 では回収部品も多いがその分人件費がかかり結果として、CASE2 の 1/2 程度の実産性となっている。コンプレッサー類解体工程では CASE3 のみ凝縮器を回収しており、その解体時間も短いことから、5.33 円/sec となり、他のケースの -0.5278 円/sec よりも生産性が高いことがわかる。また、切断機後手解体工程は CASE3 にのみ存在しているが、0.0836 円/sec とそれほど高い生産性ではない。これは、本体切断機後手解体工程で蒸発器を回収しているものの、その解体時間が大きいためその解体時間の短縮が有効であるといえる。さらに、破碎工程では断熱フロンとウレタンの処理費が高いため 3 ケースともマイナスの値となっている。

この工程では、回収している資源量に応じてその生産性が変化している。

最後に、冷蔵庫1台あたりの再資源化率と資源売却収入、処理費用、人件費を図4.13に示す。ただし、今回の評価では設備の減価償却とランニングコストについては評価に入れていないことに留意されたい。同図より、最も利益が出ているのはCASE2の-366円/台となり、CASE3の-923円と1台あたりで約600円の差が出ている。これは、CASE3の資源売却費は1176円とCASE2の350円より800円程度上回っているが、人件費ではCASE3が1976円、CASE2では734円と1200円も多くかかっているためであると考えられる。

以上のようにCASE3では手解体工程で多くの資源となる部品を回収しているが、その分人件費がかさんでいるという特徴をもつことがわかる。また、破碎工程による資源売却費は、CASE3では476円、CASE2では612円、CASE1では634円となった。

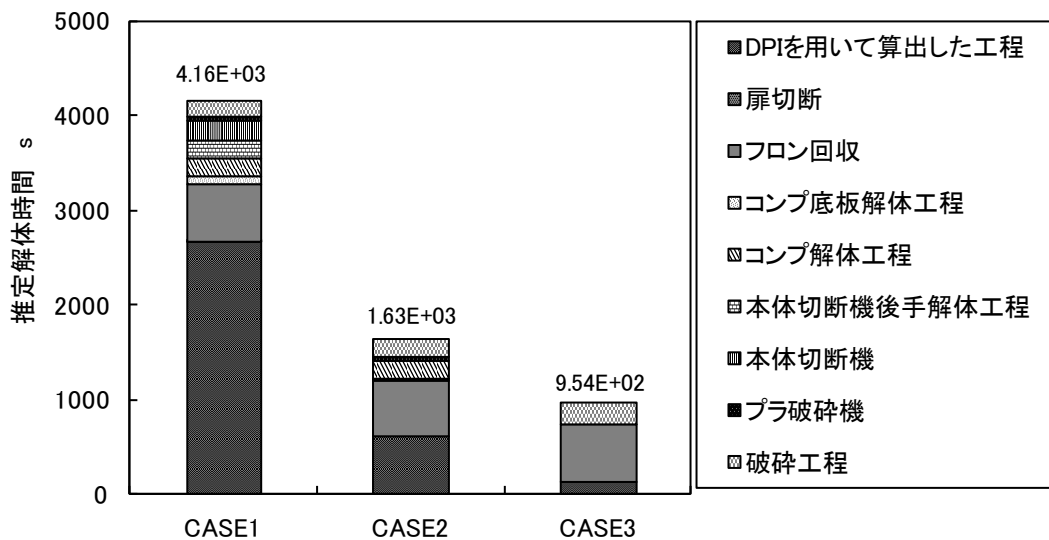


図 4.6 各ケースの推定解体時間

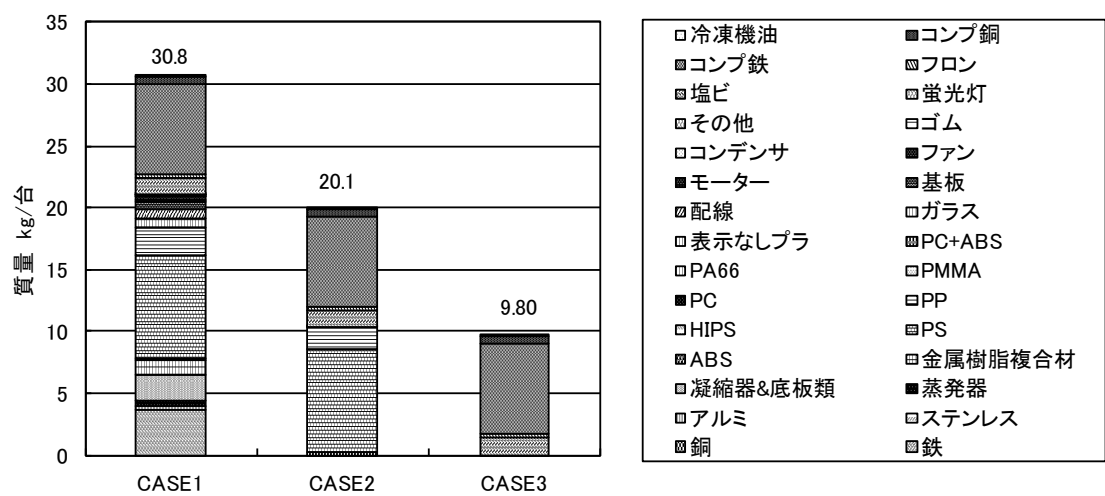


図 4.7 各ケースの手解体工程における回収した各素材の質量

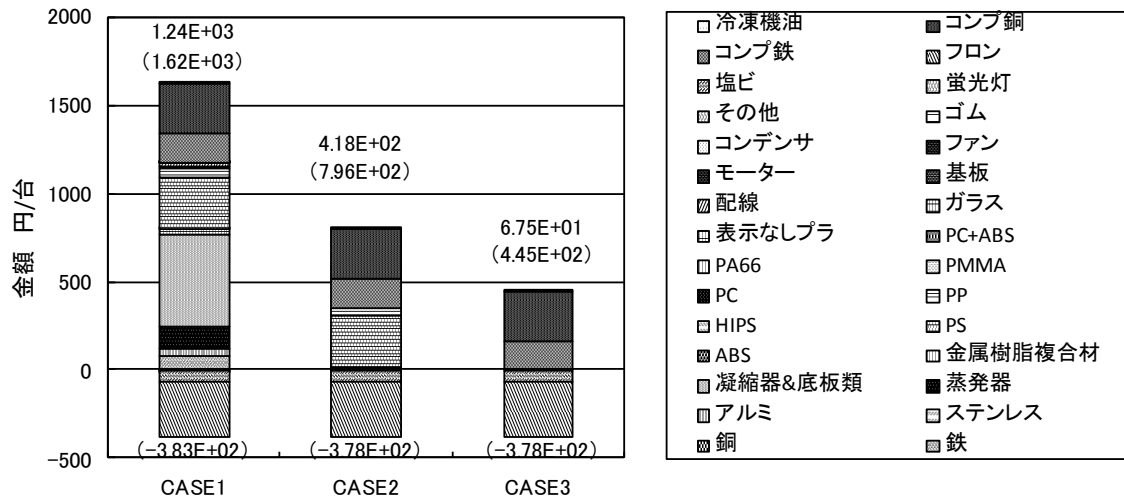


図 4.8 各ケースの手解体工程における回収した各素材の金額

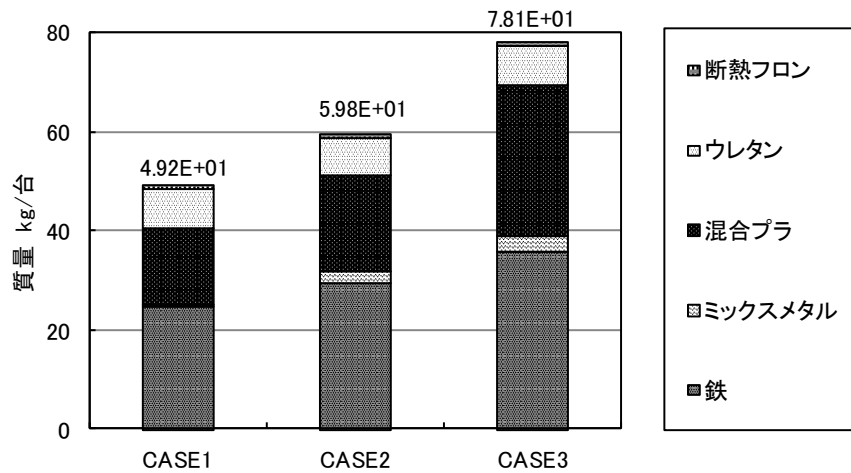


図 4.9 各ケースの破碎工程における回収した各素材の質量

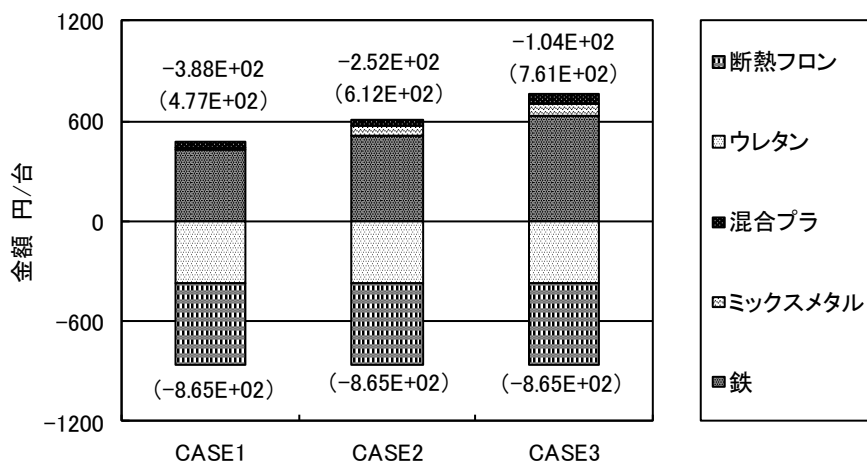


図 4.10 各ケースの破碎工程における回収した各素材の金額

※ 人件費を含む

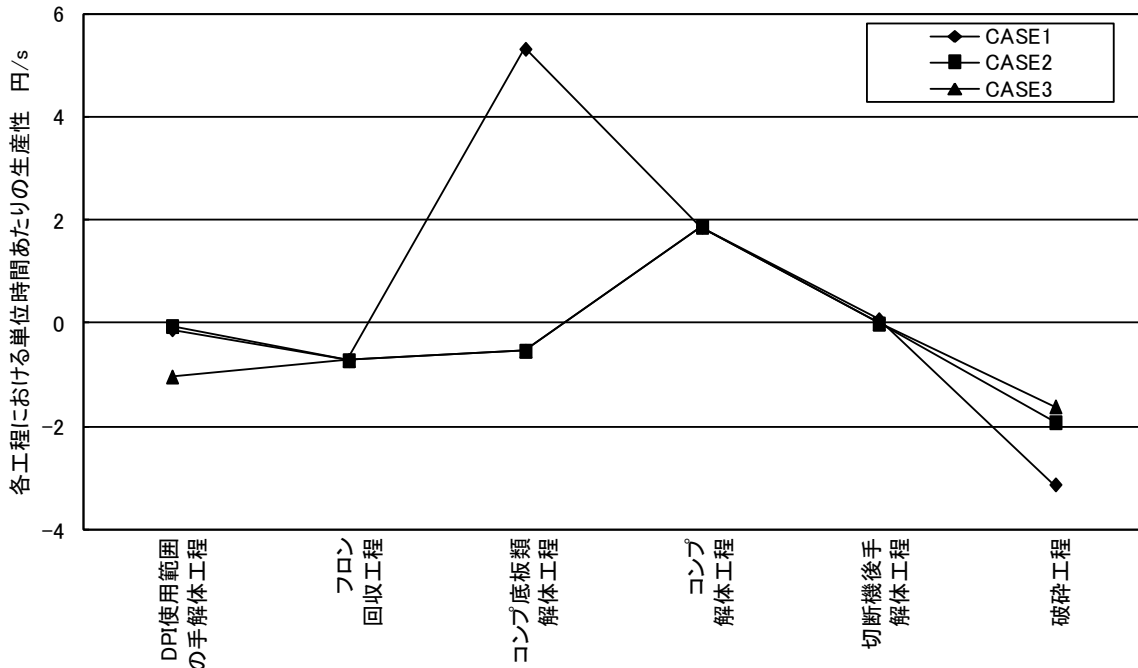


図 4.11 各工程における単位時間あたりの生産性

#### 4. 4 手解体工程を導入したリサイクルプロセスの環境性・経済性の比較

##### 4. 4. 1 リサイクルプロセスの課題抽出

図 4.13 に示すようにテルムの場合、多くの部品を手解体しており他社と比較して資源売却費が高い分、人件費が多くかかっている特徴がある。人件費は、解体時間によって決まってくるため、現状の部品を回収しながら解体時間を短縮していくことが有効な手段の1つであるといえる。そこで、工程ごとに解体時間を変化させた場合の最終損益などの各値を算出した。解体時間を変化させる工程として、すべての手解体工程、DPIで算出した範囲の手解体工程、コンプ底板解体工程、コンプ解体工程、本体切断機あと手解体工程の5つの工程とした。それらの手解体工程時間を0.75倍、0.5倍、0.25倍させたときの再資源化率とコストと売上を試算したものを図 4.14～4.18 に示す。ここで、DPIで算出した範囲の手解体工程とは、庫内部品取外し工程、扉解体工程、底板回収工程、本体切断機前手解体工程の4つの工程を含んでいることに留意する必要がある。DPIを算出する式では、庫内部品取外し工程のみを0.75倍するといったことが不可能であるため、DPIで算出した範囲を1つの工程として設定している。

結果として、すべての解体時間の占める解体時間の長い工程の順に影響が最終損益が良くなることは明白であるが、工程別に解体時間を変化させたときの最終損益などの各値を出せることは、ラインの経済性を評価する上では重要なことであり、DPIの有効性を示すことができる1つの手段であるといえる。

図 4.14～4.18 のグラフにおいて、再資源化率、総解体時間、資源売却費、処理委託費、人件費については、現状テルムを1として相対化している。売上から、人件費と処理委託費を引いたものを最終損益と定義し、最終損益について

は、第2軸に絶対値で示している。図4.14は、すべての手解体工程時間を変化させたときの各値である。これより、すべての手解体工程時間を0.75倍することで、最終損益が-430円/台となり、他社と同程度の最終損益を出すことができるといえる。図4.15は、DPIを用いて算出した上記の4つの工程時間を変化させたときの各値である。これより、DPI範囲の手解体工程を0.75倍することで最終損益が-575円/台となる。図4.16は、コンプ底板解体工程時間を変化させたときの各値である。これより、コンプ底板解体工程を0.75倍することで、最終損益が-911円/台となることがわかる。図4.17では、コンプ解体工程時間を変化させたときの各値である。これより、コンプ解体工程時間を0.75倍することで、最終損益が-850円/台となることがわかる。最後に図4.18は、本体切断機後手解体工程時間を変化させたときの各値である。これより、本体切断機前手解体工程時間を0.75倍することで、最終損益が-923円/台となることがわかる。

解体時間を0.5倍、0.25倍することは現実的に不可能である可能性が高いため、以上より、DPIで算出した範囲の手解体工程、コンプ解体工程、コンプ底板回収工程、本体切断機前手解体工程の順に解体時間を短縮することが有効であるといえる。つまり、以上の順にすべての解体時間に占める割合が高いことを意味している。

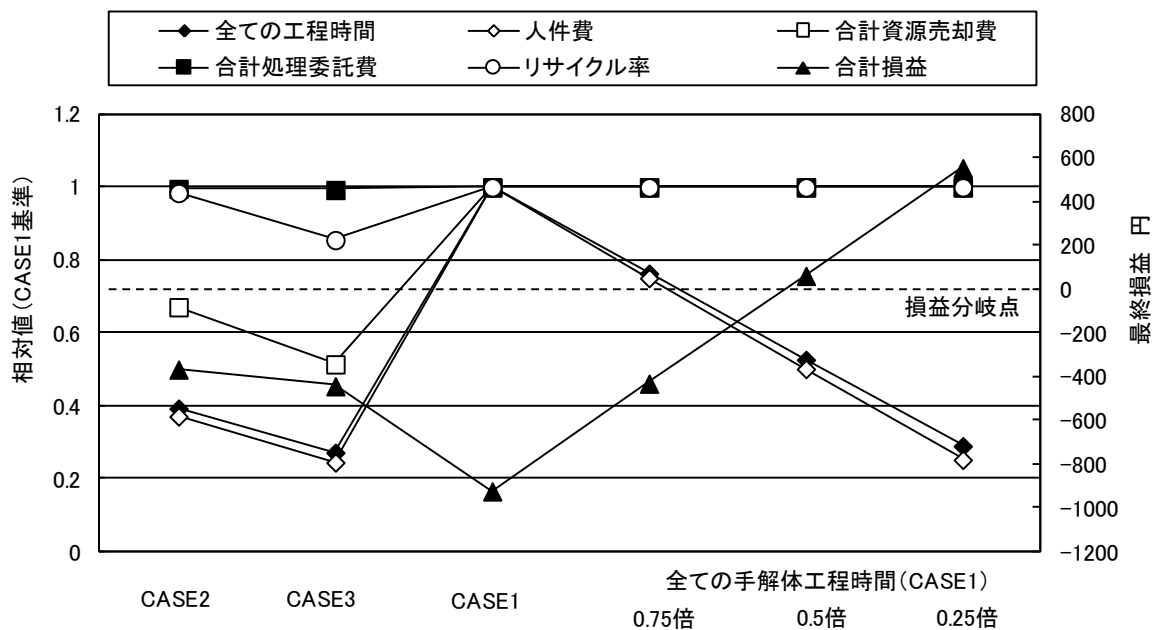


図 4.12 すべての手解体工程時間を変化させたときの各値

第4章 大型家電のリサイクルプロセスの環境性・経済性評価  
 ～使用済み冷蔵庫を中心として～

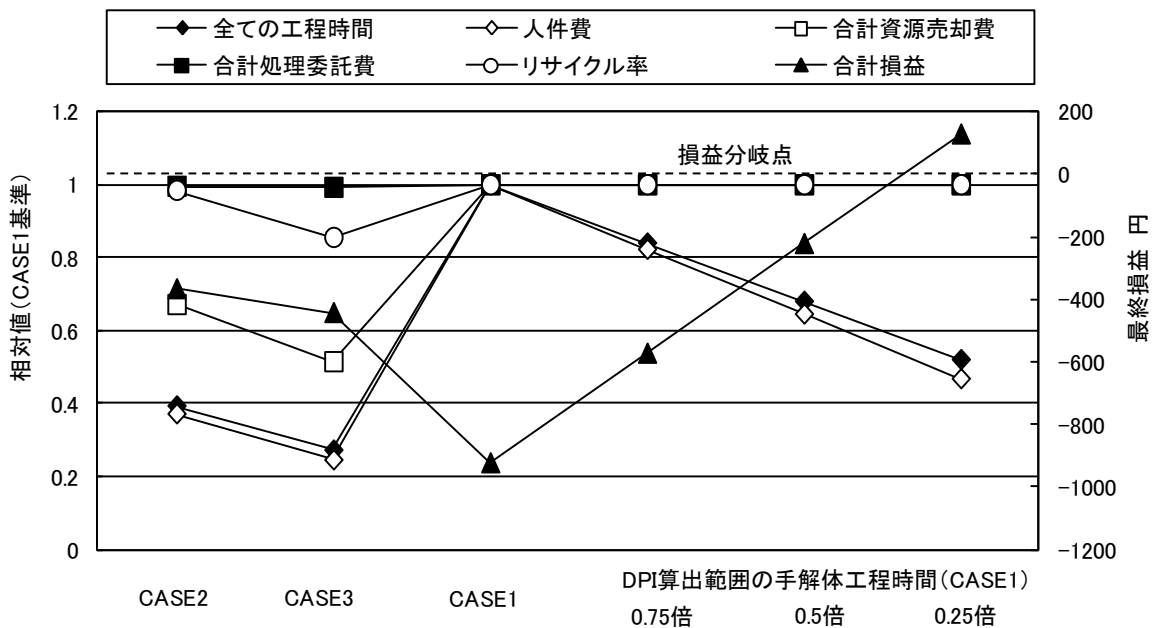


図 4.13 DPI で算出した範囲の手解体工程時間を変化させたときの各値

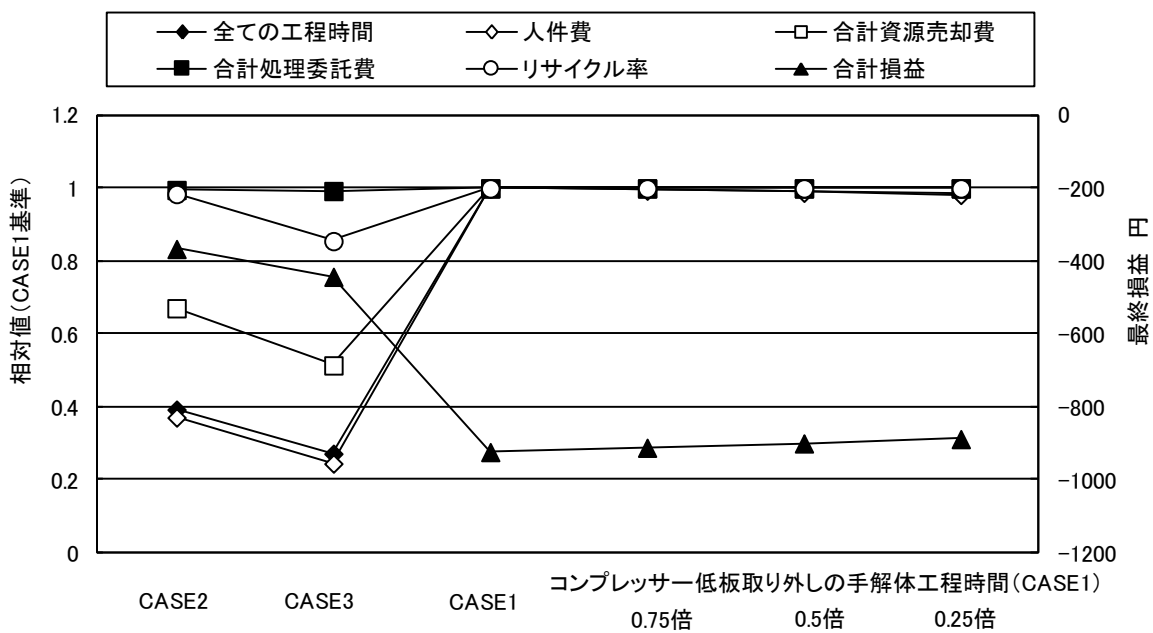


図 4.14 コンプレッサ底板類取外し工程の手解体時間を変化させたときの各値



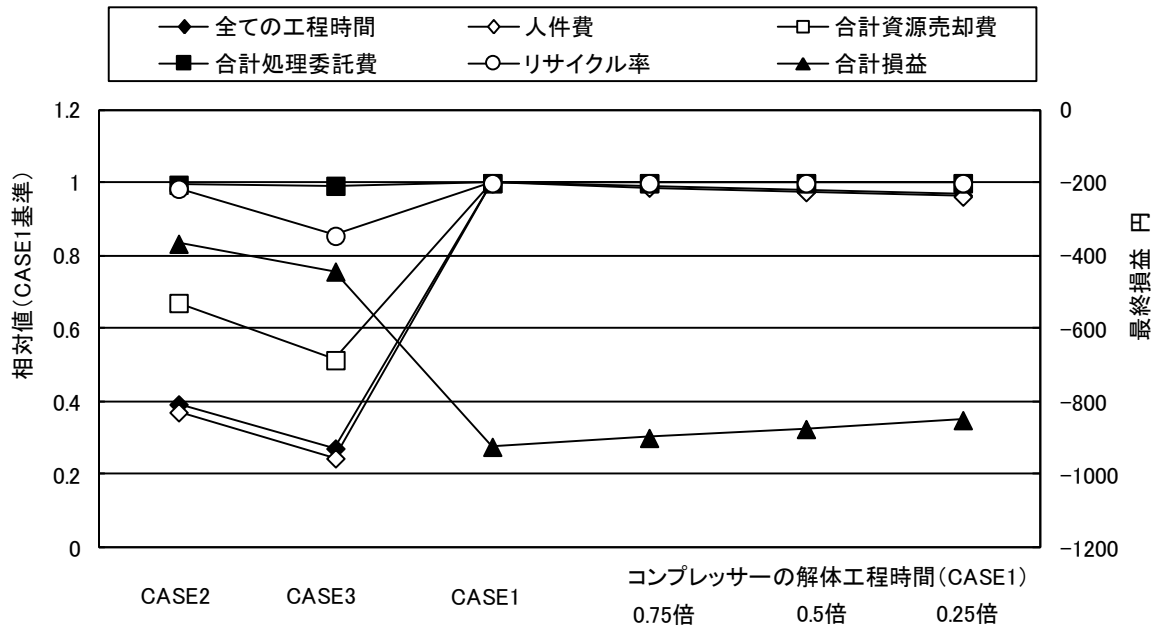


図 4.15 コンプの解体工程時間を変化させたときの各値

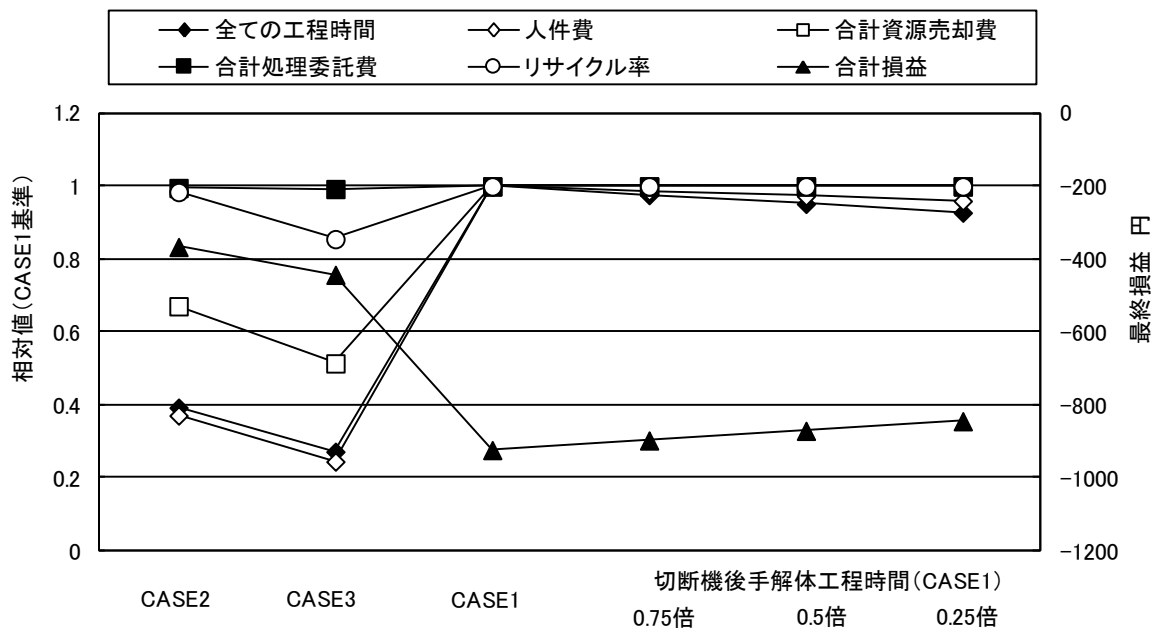


図 4.16 本体切断機後手解体工程時間を変化させたときの各値

#### 4. 4. 2 課題プロセスの影響度の評価

DPIを用いて算出した庫内部品回収工程, 扉解体工程, コンプ底板回収工程, 本体切断機前手解体工程の4つの工程別の解体時間の影響を把握できないため, それらの工程を省略した場合, つまり各工程において何も回収しないと設定した場合に加えて, 本体切断機後手解体工程と扉回収工程を省略した場合の最終損益などの各値を算出し, どの工程がどの程度影響を与えているか考察する. 図 4.19 に工程を省略した場合の各値を示す. グラフは前章と同様の見方とする.

同図において、省略した工程を横軸の水色に示し、現状と他社、指定回収物のみの場合を黄色に、さらに前章のすべての手解体工程を0.75倍したときの場合を緑色で示している。グラフは、最終損益を示すピンクのプロットが高くなるほど右になるように設置している。

同図より、本体切断機前手解体工程、手解体時間0.75倍、扉解体工程、本体切断機後手解体工程の順に省略すると最終損益が現状より良くなることがわかる。逆に、コンプ底板解体工程や庫内部品回収工程を省略すると現状よりも最終損益が下がってくることをわかる。本体切断機前手解体工程を省略すると、最終損益が他社をも超える-363円/台となり、扉解体工程を省略すると-527円/台、本体切断機後手解体工程を省略すると-921円/台、扉回収工程を省略することで-980円/台、コンプ底板回収工程を省略することで-1275円/台となることがわかる。

本体切断機前手解体工程の最終損益が最も高くなった理由として、資源売却できる回収部品の質量が小さく、その数も多いことで人件費が多くかかっていると考えられる。次いで扉解体工程では、解体時間の全体に占める割合は低いものの、直接資源売却につながる解体作業ではないためであると考えられる。本体切断機後手解体工程では、蒸発器を回収しているが、その工程において、本体を切断する工程が存在し、その工程に時間がかかっているためであると考えられる。

逆に、庫内部品回収工程では、庫内の部品は容易に回収できる上に、部品が用意に取り外せるために、工程を省略すると現状より最終損益が下がったといえる。さらに、コンプ底板回収工程では、凝縮器やコンプレッサーといった金属類に加えて、質量の高い蒸発皿といったプラが存在しているためであると考えられる。

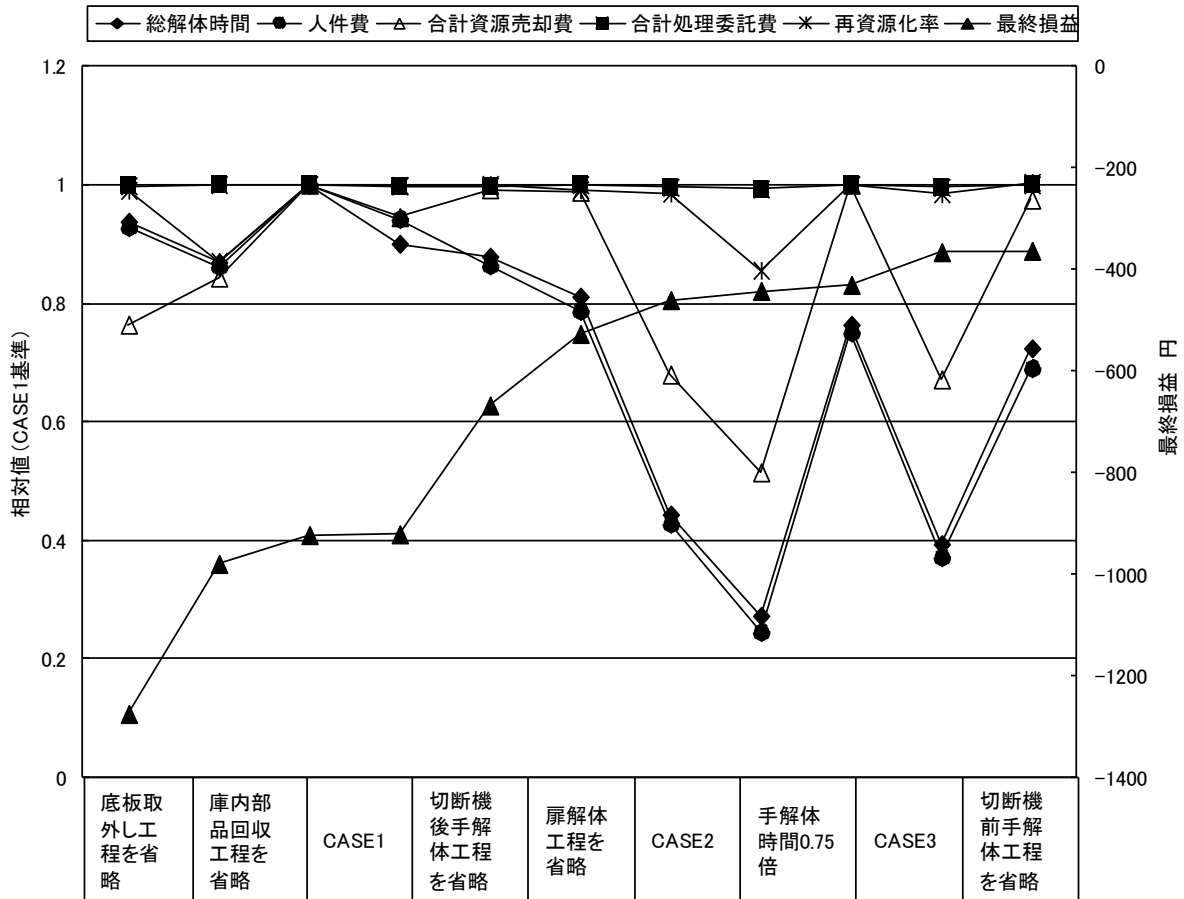


図 4.17 各工程を省略したときの各値

#### 4. 4. 3 リサイクルプロセスの改善策の提案

これまでの検討から、本体切断機前手解体工程の効率が悪いことが判明した。効率が悪い原因としては、その解体工程における回収物の質量と素材に問題があると考えられる。素材の観点からいえば、鉄や銅といった素材は、手回収しないとしても破碎機を通した場合、磁選別機などにおいてかなりの回収率をもっている。しかし、プラスチックに関しては、手回収によるマテリアルリサイクルされるものと破碎機を通してミックスプラスチックにされサーマルリサイクルされる場合では、その資源価格が約 30 円/kg から約 2 円/kg と下がるため、できるだけ手回収した方が利益が高くなるといえる。加えて、質量に関しても、その単位時間当たりの質量が高いほど利益が高くなる。以上より、改善案として特にプラスチックの回収する質量を変化させた場合の損益を試算する。

また、外部要因として、資源価格の変動が挙げられ、近年希少金属の枯渇の観点からその価値が高まっている。そこで、資源価格を変動させた場合の損益の試算についても検討する。

#### 4. 4. 4 改善案の効果の試算

プラスチックは、金属に比べて庫内部品を除けば冷蔵庫の各値に点在し、質量も様々であるため、プラスチックを 100g ごとに回収する部品を変化させたと

きのプラスチックの質量と損益を図 4.20 に示す。損益をみると、プラ部品約 500g 以上を回収するとしたときを頂点とするプロットになることがわかる。これは、約 300g 以下の細かいプラを回収すると人件費の方が上回るため損益が低くなり、一方で約 700g 以上のプラのみを回収するとプラの取引価格が悪いため、損益が下がってくると考えられる。冷蔵庫の製品の特徴として、比較的質量の高いプラは、結合解除の容易な位置に存在し、質量の小さいプラは、各部に点在している上に、結合が難しいといえる。以上より、庫内部品の平均質量が約 380g であることから、庫内部品以外では 300g 以上のプラスチックのみ回収することが有効であるといえる。

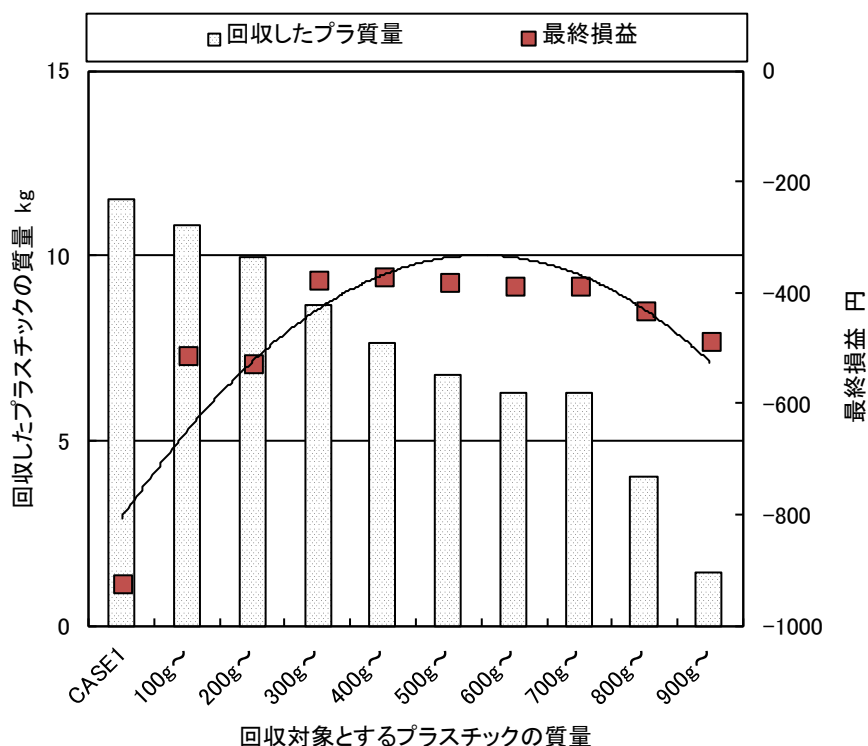


図 4.18 回収するプラを変化させたときの最終損益

#### 4. 4. 5 外部要因の影響度の評価

最終損益に対して、外部から受ける要因として資源価格が挙げられる。現在、各種資源の価格が高騰していることから、この議論は有効であると考えられる。

資源価格が変動したときの損益を図 4.21 に示す。横軸に資源価格の現状値からの倍率を設定し、赤と黄色のラインは現状から全ての資源価格が高騰したとき、青と緑は現状から銅とアルミの資源価格が高騰したときを示している。同図より、すべて高騰した場合では現状から約 1.8 倍になったときに最終損益が他社を上回る。また、銅とアルミのみ高騰した場合では現状から約 1.82414 倍となったときに最終損益が他社を上回る。

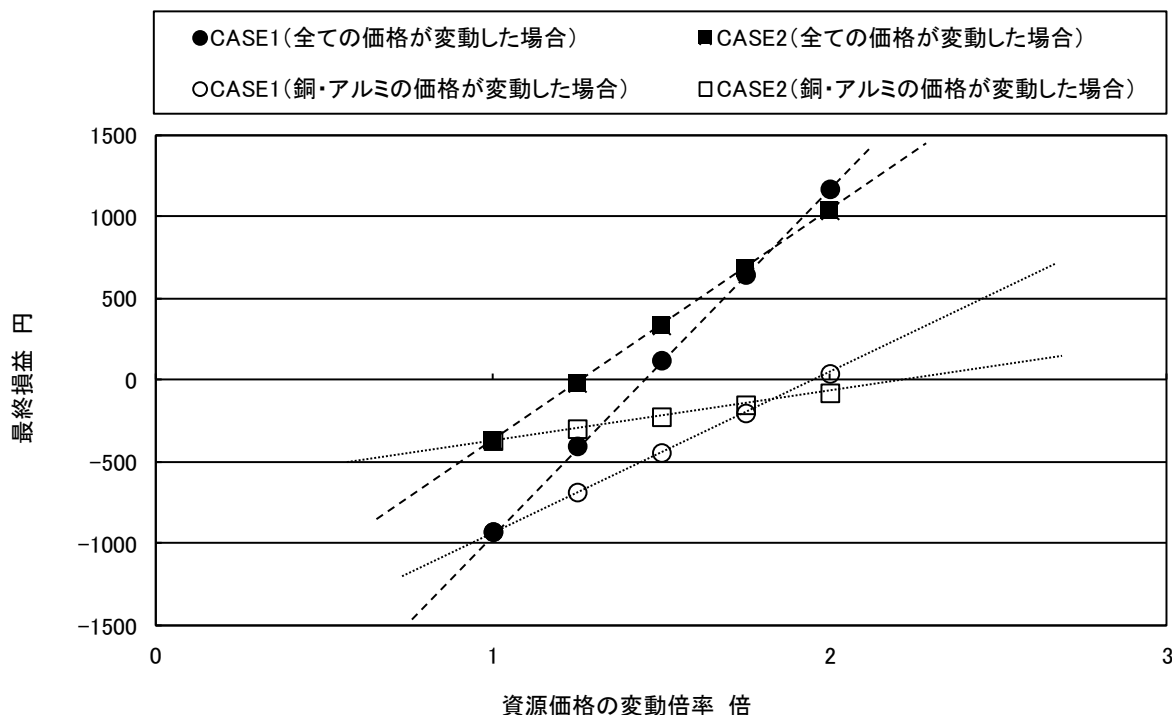


図 4.19 資源価格が変動したときの感度解析

#### 4. 5 DfE 定量評価データベースを活用した大型家電の混合処理の評価

##### 4. 5. 1 DfE 定量評価データベースの活用方法

先に示した CASE3 の冷蔵庫単体のリサイクルプロセスは、実際に民間事業者が保有している施設の実例である。この事業者では約 250 台を 1 日に処理しており、破碎機の処理能力は 2000kg/h である。仮に 1 日の稼働時間を 8 時間とすると、その処理能力は 16,000kg/d となる。今回、先に示した評価で活用した冷蔵庫を考えると、破碎機で処理される量は、冷蔵庫 1 台あたり 49.2kg である。1 日の処理量を 250 台とすると、破碎機の稼働率は 77% となり、まだ余裕があることがわかる。

ここで、図 4.20 に冷蔵庫と洗濯機の一般的な処理フローを示す<sup>3-12)</sup>。ここからわかるように、事前の手解体工程に違いがあるものの、破碎処理プロセス以降は同一プロセスである。すなわち、破碎処理工程以降のプロセスは一本化し、混合処理できる。

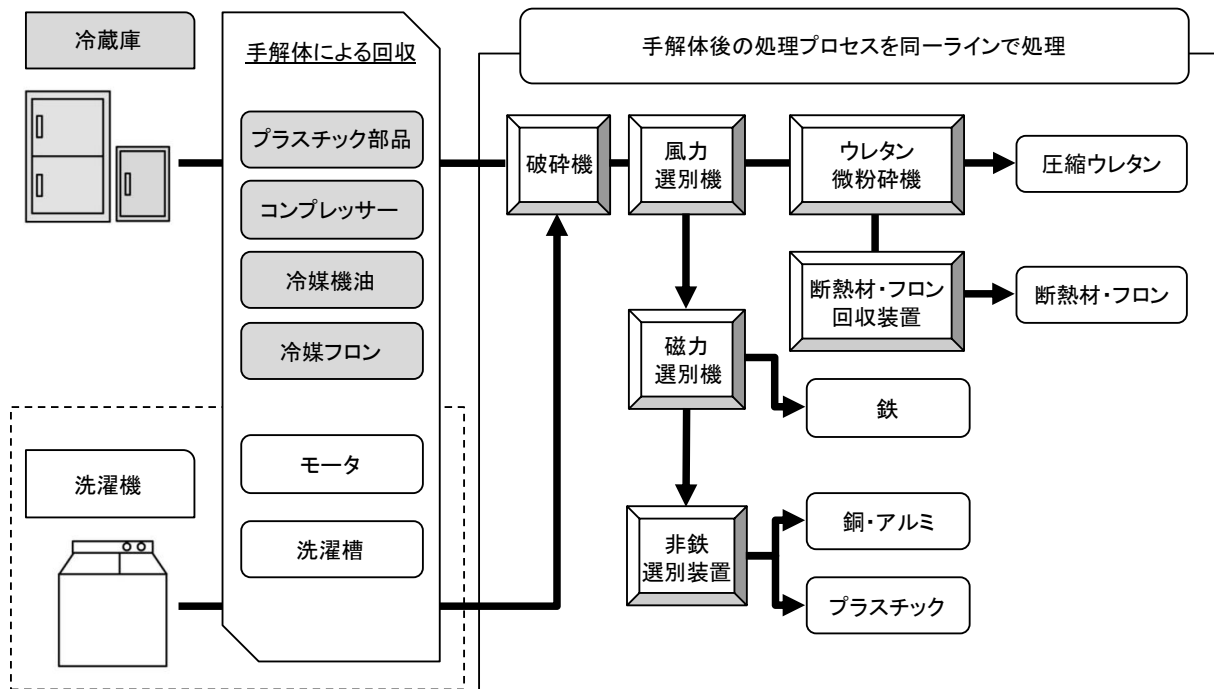


図 4.20 冷蔵庫と洗濯機の処理フロー

ここで、図 4.20 に冷蔵庫と洗濯機の一般的な処理フローを示す。ここからわかるように、事前の手解体工程に違いがあるものの、破砕処理プロセス以降は同一プロセスである。すなわち、破砕処理工程以降のプロセスを一本化し、混合処理できる可能性を有している。

こういった検討を行うにあたって、実際の処理プロセスを活用して実験を行うことも可能であるが、以下の課題が存在する。

- ① 家電リサイクル法では、対象となる製品を混合処理することが許されていないため、法的制約が存在する。
- ② 実験として行うことで、法的制約がクリアできたとしても、製品の設計・企画段階で、リサイクルプロセスを検討することができない。
- ③ 同一品目であっても、市場には大量の製品が流通しているために、それら実際のラインで処理して実験することは事実上困難である。

そこで、DfE データベースを活用して、大型家電を対象に、複数の製品を混合処理した場合の環境性・経済性を評価する。DfE データベースでは、幅広い家電製品を対象に、解体情報などがデータベース化されているため、リサイクルプロセスの評価に必要なデータを抽出することが可能である。すなわち、実際の処理プロセスを活用しなくても、リサイクルプロセスの設計・評価が可能であり、先に示した課題を解決することが可能である。さらに、データベースを構築する上で作成する解体フローを用いることで、各製品によって異なる指定回収品目を取り除いた上で、破砕機で処理するといったことが検討可能である。ここでは、冷蔵庫のリサイクルプロセスを活用して、洗濯機を混合処理した場合の環境性・経済性評価を行う。

#### 4. 5. 2 大型家電の混合処理における評価の前提条件

##### (1) 評価対象プロセスの設定

##### a. 破砕処理工程前までのプロセス

破砕処理工程前までのプロセスは以下の通り設定する。

- ① 冷蔵庫については、CASE3と同様にする。すなわち、パッキン類，冷媒フロン，冷凍機油，コンプレッサー，庫内部品の手回収，扉の解体や本体の切断工程を有する。
- ② 洗濯機については，モーター，洗濯槽を手回収する。

##### b. 破砕処理工程後までのプロセス

破砕処理工程後は，CASE3と同様にする。

##### c. 評価対象プロセス

本評価では，既存の冷蔵庫のリサイクルプロセスの破砕機能力を生かしながら，洗濯機の混合処理を検討する。このとき，洗濯機の事前手回収工程は，既存のプロセスと変更がなく，環境性・経済性に影響しない。そのため，評価範囲は次の通りとする。


- ① 冷蔵庫の事前手解体工程
- ② 破砕以降の工程

##### (2) 処理対象物の設定

##### a. 冷蔵庫

表 4.10 に示す，先の冷蔵庫のリサイクルプロセスの評価で設定したモデル機種と同様とする。

表 4.10 評価対象とした冷蔵庫の仕様

項目	内容
メーカー名	SANYO
型番	SR-H401G(S)
容量 L	404
質量 kg	80
サイズ w×h×d mm	635×1798×650
製造年度 年	2004
外観	

b. 洗濯機

洗濯機は DfE データベースから、表 4.11 に示す洗濯機を選択した。また、複合材のマテリアルバランスを考慮したマテリアルバランスを表 4.12 に示す。

表 4.11 評価対象とした洗濯機の仕様


項目	内容
メーカー名	SANYO
型番	SR-H401G(S)
容量 L	404
質量 kg	80
サイズ w×h×d mm	635×1798×650
製造年度 年	2004
外観	

表 4.12 洗濯機のマテリアルバランス

素材名	質量 kg	質量比 %
ステンレス槽	15.8	41.6
モーター	5	13.2
鉄	1.3	3.4
銅	0.76	2.0
アルミ	0.76	2.0
樹脂+その他	14.38	37.8
合計	38	100

今回の評価範囲では、事前に手回収される「モーター」と「ステンレス槽」は、破碎工程に無関係である。表 4.13 は、破碎機に投入される洗濯機由来の素材を示している。

表 4.13 破碎機に投入される洗濯機由来の素材

素材名	質量 kg	質量比 %
鉄	1.3	7.6
銅	0.76	4.4
アルミ	0.76	4.4
樹脂+その他	14.38	83.6
合計	17.2	100



(3) 資源売却価格とマテリアルリサイクル率の設定

資源売却価格とマテリアルリサイクル率は、前項と同様にする。

(4) 評価モデルの設定

評価モデルは表 4.14 に示す 2CASE を設定する。

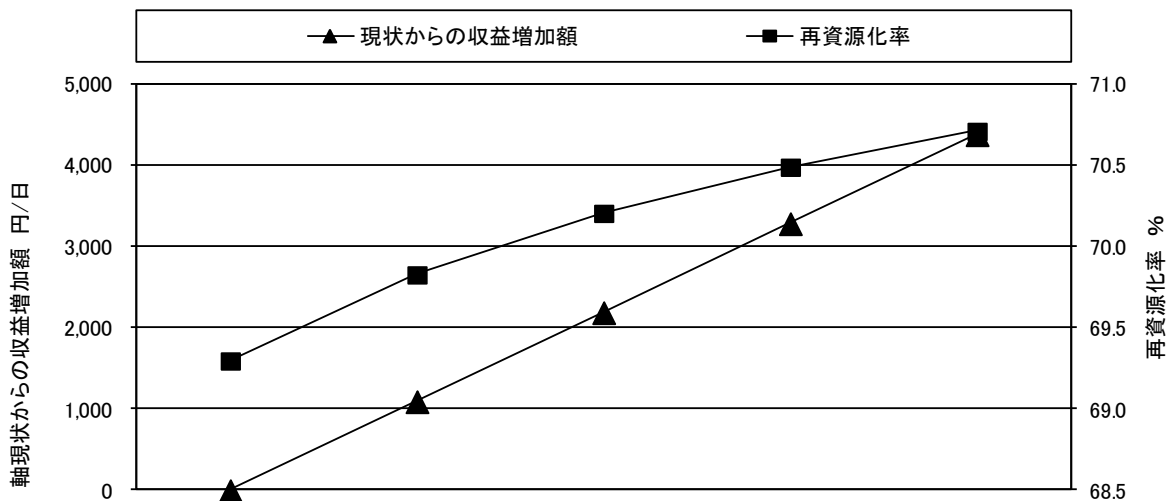
表 4.14 設定した CASE の概要

CASE	内容
1	冷蔵庫の処理量を維持した CASE
2	冷蔵庫の処理量が減少した CASE

4. 5. 3 大型家電の混合処理における環境性・経済性評価

(1) 冷蔵庫の処理量を維持した CASE

図 4.21 に、1 日当たりの冷蔵庫の処理台数が維持された場合を想定し、洗濯機を混合処理した際の環境性・経済性の評価結果を示す。洗濯機の処理量は 50 台ずつ増加させ、稼働率が 100%以下となるように、200 台まで混合処理した場合を想定した。これより、再資源化率と収益は共に増加し、混合処理が環境性・経済性の観点から有効であることがわかる。例えば、洗濯機を 100 台混合処理した場合は、混合処理しない場合と比較して、再資源化率は約 1%、1 日当たりの収益は約 2200 円増加している。



冷蔵庫 台	250	250	250	250	250
洗濯機 台	0	50	100	150	200
稼働率 %	77	82	88	93	98

図 4.21 冷蔵庫の処理量を維持した場合の混合処理の環境性・経済性評価結果

(2) 冷蔵庫の処理量が減少した CASE

図 4.22 に、1 日当たりの冷蔵庫の処理台数が 50 台減少した場合を想定し、洗濯機を混合処理した際の環境性・経済性の評価結果を示す。洗濯機の処理量は 200 台から 350 台まで 50 台ずつ増加させ、稼働率が 100% 以下となるように、混合処理した。これより、再資源化率と収益は共に増加し、混合処理が環境性・経済性の観点から有効であることがわかる。例えば、洗濯機を 250 台混合処理した場合は、混合処理しない場合と比較して、再資源化率は約 2%、1 日当たりの収益は約 61600 円増加している。

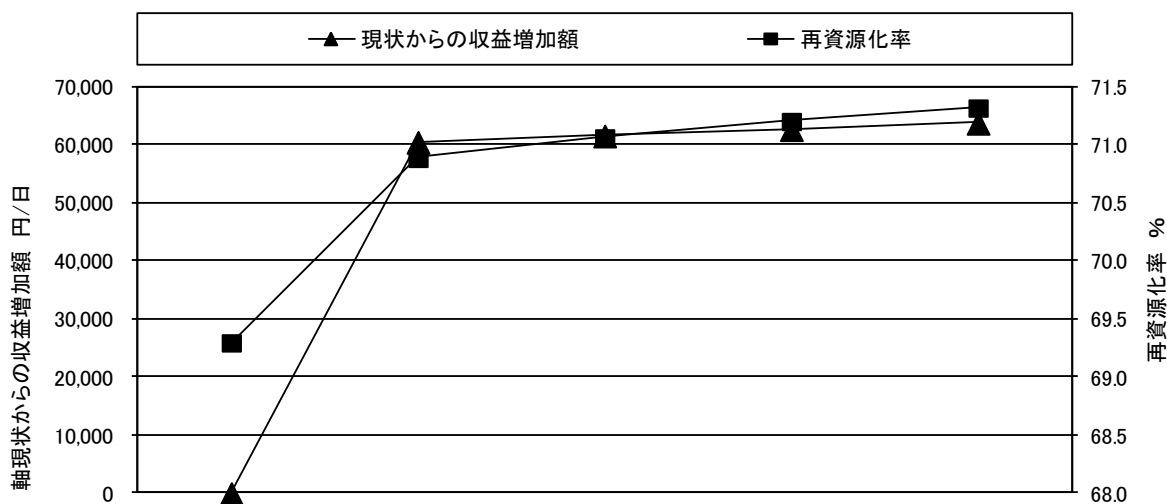


図 4.22 冷蔵庫の処理量が減少した場合の混合処理の環境性・経済性評価結果

このように、DfE 定量評価データベースを活用することで、実際に破碎・選別試験を行わなくても、事前にリサイクルプロセスの設計を行うことが可能であることを示した。

4. 6 まとめ

収集回収ルートが確立されている大型家電のリサイクルプロセスの設計の検討にあたり、冷蔵庫を取り上げて、その環境性・経済性の評価を行った。また、DfE 定量評価データベースを活用し、大型家電を混合処理するリサイクルプロセスの環境性・経済性評価を行った。以下に得られた結果を示す。

- ・ 冷蔵庫のリサイクルプロセスを対象に、手解体プロセスを積極導入した場合と指定回収物の回収を中心とした場合のケーススタディを行い、環境性・経済性を定量的に評価した。その結果、手解体プロセスを積極導入する場合、指定回収物の回収を中心とした場合と比べ、資源売却収入が 3 倍程度になるが、人件費も 3 倍程度かかることから、結果的には冷

蔵庫1台あたりの収益が約600円程度低いことがわかった。

- DPIを応用することでリサイクルプロセスの設計改善策を検討した。本体切断機前手解体工程、扉解体工程、本体切断機後手解体工程の順に工程を省略することが有効であることを示した。特に本体切断機後手解体工程を省略すると損益が他のリサイクルプロセスを上回る試算結果となった。一方で、扉回収工程とコンプ底板回収工程を省略すると経済性が悪化することを示した。
- 冷蔵庫ではプラスチックが点在していることが特徴として挙げられることから、手回収するプラスチックの質量を100gずつ増やしたときの損益を評価し、庫内部品の平均質量に相当する約400g程度のプラのみを回収することが経済性が最も高くなることを示した。また、資源価格の変動を考慮した経済性評価を実施し、現状より1.8倍以上になると手解体プロセスの積極導入が有利となることを示した。
- DfE 定量評価データベースを活用することで、冷蔵庫と洗濯機を同一プロセスで処理した場合の環境性・経済性評価を実施し、混合処理によって冷蔵庫の個別処理よりも環境性・経済性がともに向上することを示した。

## 第 5 章

### 小型家電のリサイクルプロセスの設計手法の 構築とその評価

## 第5章 小型家電のリサイクルプロセスの設計手法の構築とその評価

5.1 目的と従来研究	5-1
5.2 使用済み小型家電のリサイクルプロセスの実験とその評価 ～埼玉県をフィールドに～	5-3
5.2.1 実験の目的と概要	5-3
5.2.2 評価モデルの設定	5-3
5.2.3 各評価モデルの実験結果の整理	5-4
5.2.4 各評価モデルの環境性・経済性評価	5-7
5.3 投入物と回収物の関連性の検討と製品群の環境性・経済性評価	5-11
5.3.1 ポテンシャル排出量を考慮した製品の環境性・経済性評価	5-11
5.3.2 リサイクルプロセスにおける投入物と回収物の関連性の検討	5-15
5.3.3 先進的事例における投入物と回収物の環境性・経済性の推定	5-19
5.4 DfE 定量評価データベースを活用した回収品目の選定手法の構築	5-27
5.4.1 DfE 定量評価データベースを活用した回収品目の選定手法の構築	5-27
5.4.2 評価方法	5-27
5.4.3 回収品目の選定方法	5-27
5.4.4 環境性を考慮した回収品目の選定	5-27
5.4.5 経済性を考慮した回収品目の選定	5-30
5.4.6 環境性・経済性の両面を考慮した回収品目の選定	5-34
5.5 まとめ	5-36
図 5.1 大里広域クリーンセンターで発生している破碎残渣の性状	5-2
図 5.2 施設 A の処理フロー	5-4
図 5.3 施設 B・C の処理フロー	5-4
図 5.4 重ダスト(MS)の写真	5-7
図 5.5 15mm アンダーの写真	5-7
図 5.6 各 CASE の環境性・経済性評価結果	5-11
図 5.7 世帯・年間あたりの素材売却価格と再生資源強度	5-15
図 5.8 回収品目の素材構成算出結果	5-18
図 5.9 投入物の素材構成算出結果	5-18
図 5.10 各自治体における投入製品群の素材構成割合	5-23
図 5.11 各自治体における投入物の素材売却価格密度および再生資源強度密度	5-23
図 5.12 各自治体における回収物の素材売却価格密度および再生資源強度密度	5-25
図 5.13	5-26
図 5.14	5-26
図 5.15 環境性を考慮した回収品目選定時の環境性・経済性評価	5-30
図 5.16 経済性を考慮した回収品目選定時の環境性・経済性評価	5-33
図 5.17 環境性・経済性の両面を考慮した回収品目の環境性・経済性評価	5-36

表 5.1	施設の経過年数	5-1
表 5.2	CASE1 のマテリアルバランス	5-5
表 5.3	CASE2 のマテリアルバランス	5-6
表 5.4	追加で設定した評価モデル	5-7
表 5.5	CASE1 において有価取引が可能な回収品目の一覧	5-8
表 5.6	CASE2 において有価取引が可能な回収品目の一覧	5-8
表 5.7	各 CASE の再資源化率	5-9
表 5.8	各回収品目の取引単価の一覧	5-10
表 5.9	各 CASE の資源売却益	5-10
表 5.10	各素材の売却単価	5-14
表 5.11	主要製品の一覧	5-15
表 5.12	投入製品のカウント結果	5-16
表 5.13	CASE1-1 のマテリアルバランス	5-17
表 5.14	軽ダストの素材構成	5-17
表 5.15	投入物の回収割合	5-19
表 5.16	自治体の回収品目調査結果①	5-20
表 5.17	環境性を考慮した回収品目の選定	5-29
表 5.18	経済性を考慮した回収品目の選定	5-32
表 5.19	環境性・経済性の両面を考慮した回収品目の選定	5-35
表 5.20	ポテンシャル排出量 3kg/y/世帯で優先的に収集すべき製品群	5-36

## 第5章 小型家電のリサイクルプロセスの設計手法の構築とその評価

### 5.1 目的と従来研究

我が国では、2012年3月9日に「使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律」、いわゆる「小型家電リサイクル制度」が閣議決定され、国会での可決を待っている状況である<sup>5-1)</sup>。

第2章で示したように、小型電子機器は、製造時の環境負荷が高く、かつ、希少金属の環境負荷も高いことから、積極的資源回収が望まれる。1年間に使用済みとなる小型電子機器の重量は65.1万tと推計されている。また、有用金属の鉱種別含有量は、タンタル33.8t(国内需要量の9.4%)、金10.6t(同6.4%)、銀68.9t(同3.7%)、パラジウム4t(同3.1%)となっており、我が国が輸入に依存する金属類の一定の需要量を占めていることから、「都市鉱山」<sup>5-2)</sup>とも呼ばれる。一方で、一般消費者においては、小型電子機器等の47.9%が排出される一方で、残りの52.1%は家庭内に退蔵しているとの調査結果も存在する。退蔵分の55.8%(全体の29.1%)がその後に排出されているものの、それでも全体の23.0%が退蔵していることになり、その回収スキームの構築が求められている。

こうした小型電子機器は、「可燃ごみへの混入」「不燃・粗大ごみ、金属ごみ」不燃ごみや粗大ごみとして、自治体の一般廃棄物として収集回収され、破碎・選別による金属類の回収、直接埋立されているのが現状である<sup>5-3)</sup>。破碎・選別工程において、一部の鉄、アルミなどが回収、リサイクルされているものの、小型家電等に含有されている貴金属等の有用金属の回収には特定の施設や技術が必要となるため、現状の自治体の廃棄物処理システムで回収できる資源は限定される。

ここで、自治体が保有する粗大ごみ処理施設について、統計データを調査した<sup>5-4)</sup>。調査は、後述の使用済み小型家電からの資源回収の実験との関係から、埼玉県を対象地域とした。施設建設時点から現在までの経過年数を表5.1に示す。このように、施設更新の目安となる20年以上の経過年数となっている施設は全体の69%も占めている。さらに、30年以上の経過年数となっている施設も、全体の19%と高い。このことから、施設の老朽化から、資源の回収率が落ちていることが予想される。

表 5.1 施設の経過年数

経過年数	施設数	比率 %	合計処理能力 t/日
10年未満	7	14	337
10年以上	30	59	635
20年以上	12	24	253
30年以上	2	4	30

実際に自治体にヒアリングを実施した。大里広域クリーンセンターでは、施設経過年数が30年を超えており、破碎機・選別機が老朽化している。そのため、

資源回収率が落ち、残差に金属類が混じっている。図 5.1 は、実際の破碎残差の写真である。その結果、自前の焼却処理施設で処理できない残渣が発生し、民間の熔融処理施設に処理委託を行っており、財政を圧迫する原因となっている。また、和光市では、破碎機で起きた爆発事故以降、修理費用が捻出できずに、受け入れた不燃ごみをそのまま民間に処理委託している。このように、自治体の破碎処理施設では、老朽化とともに資源回収率が減少している実態が見られる。また、一方で、民間へ処理委託している事例も存在し、自治体の保有施設と比較して、高度な選別技術が導入されている民間処理施設との連携可能性を確認することができる。



図 5.1 大里広域クリーンセンターで発生している破碎残渣の性状

こうした中、先進的取り組みとして、自治体と民間のリサイクラーが連携した「使用済小型家電の回収モデル事業」が行われており、以下の課題が存在する<sup>5-5)</sup>。

① 収集コストの観点から広域的な収集運搬が不可欠であり、業の許可を不要とする制度や緩和措置を講ずべきであること（廃棄物処理法の適用を除外すること）。

② 自治体からの有価売却後のリサイクルが中心的であるが、市況変動の影響で有価取引が継続できなくなった場合に、リサイクルの取組がスムーズに行われなくなるおそれがあること。

このように、法的な制約に加えて、リサイクルシステムの継続性の問題が指摘されており、経済性の観点を考慮した収集回収品目の検討が必要である。

使用済み小型家電のリサイクルシステムについては、発生台数の観点から、



小口らは、家庭・事業所を対象に保有状況のアンケート調査を行い、使用年数分布の推定と2003年度から2008年度の使用済み製品の発生台数の推計を行っている<sup>5-6)</sup>。また、狩野らは、人口の二次分布による比較や空間解析が可能なGISによる解析によって、回収BOX配置場所と人口分布から回収量の推定を行っている。さらに、相澤らは、ゲーム機器、携帯電話の8品目を対象に、日本における廃棄量および含有物質の潜在的な含有量の試算を行っている<sup>5-7)</sup>。村上らは、使用済み携帯電話のマテリアルフローについて、消費者へのアンケート調査と統計情報を用いて推定するとともに、そこに含有する金属量を価格の観点から評価している<sup>5-8)</sup>。このように、小型家電のリサイクルシステムについては、使用年数の推定に基づく発生台数の推計や、個別製品のマテリアル分析などが行われているが、小型家電全般を一体的に取り扱い、そのリサイクルシステムの設計手法を構築する研究はない。

そこで、型家電を対象にして、民間のリサイクルプロセスを活用した際のマテリアルバランスを把握するための実験を行うとともに、DfE 定量評価データベースを活用し、そのマテリアルバランスを推定することで、回収品目について環境性・経済性の両面から検討可能な設計手法を構築した。具体的には環境性・経済性両立指数を定義し、各家庭から排出される小型家電の量を設定することで、最適な回収品目を選定することができる手法である。この手法を活用することで、ある地域での小型家電のリサイクルプロセスを設計するにあたって、受入側であるリサイクルプラントが要求する処理規模とその周辺地域において想定される小型家電の排出量を考慮しながら、小型家電のリサイクルプロセスが設計できることを示した。

## 5. 2 使用済み小型家電のリサイクルプロセスの実験とその評価

～埼玉県をフィールドに～

### 5. 2. 1 実験の目的と概要

第3章でモデル化した資源回収システムについて、その環境性・経済性を検討する必要がある。そこで、民間処理施設として本研究の協力先である(株)スズトクHDの破碎処理施設を活用した実証試験を通して、使用済み小型家電等を処理した際のレアメタルを含むマテリアルバランスの調査を行った。そのデータを基に、再資源化率や資源売却益の検討を行い、モデル化した資源回収システムの評価を行った。

### 5. 2. 2 評価モデルの設定

#### (1) 乾式選別モデル (CASE1)

乾式選別モデルとして、鈴徳児玉工場(施設A)を活用したモデルを設定した。施設Aの破碎・選別フローは図4-1に示す通りである。特長として、通常は逆有償で処理されている重ダストを、再度メタルソータを用いて選別している点が挙げられる。

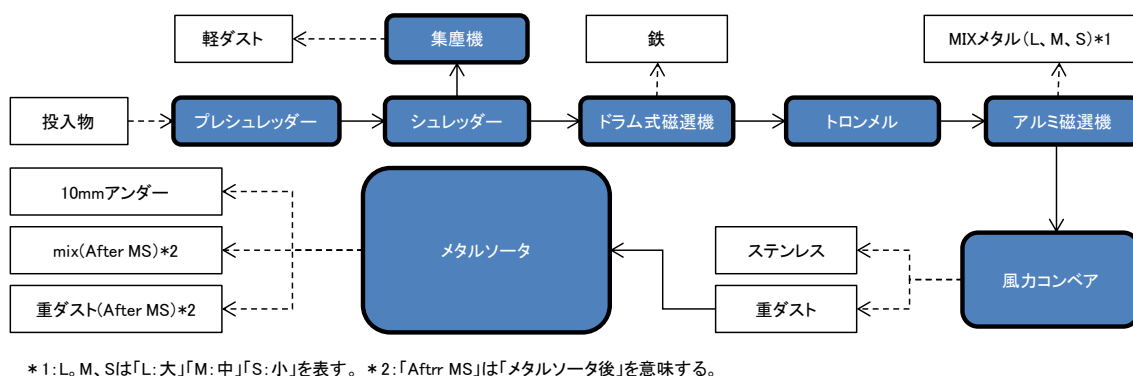


図 5.2 施設 A の処理フロー

(2) 湿式選別モデル (CASE2)

湿式選別モデルとして、中田屋加須工場（施設 B）と NNY 那須工場（施設 C）を活用したモデルを設定した。施設 B と C の破碎・選別フローは図 4-2 に示す通りである。特長として、施設 B から発生する MIX メタルを施設 C の重液選別で再度資源回収を行う点にある。

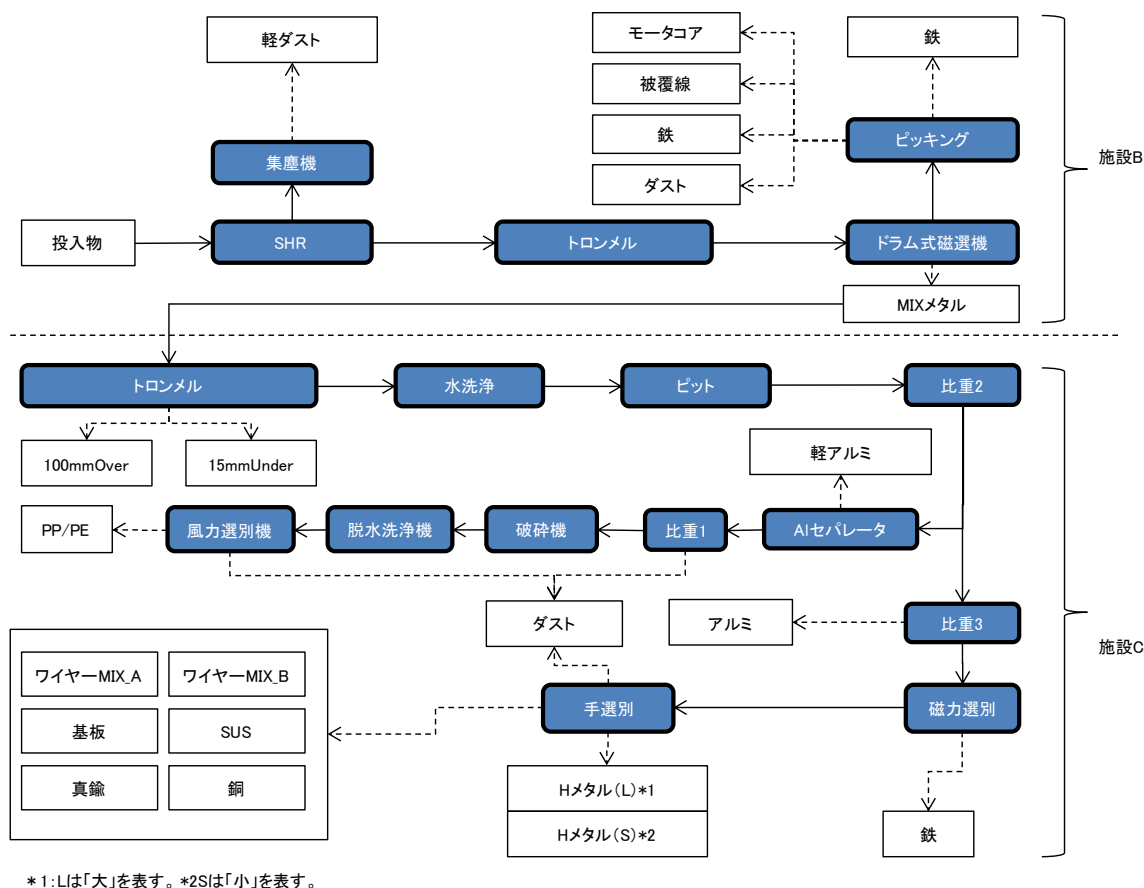


図 5.3 施設 B・C の処理フロー

5. 2. 3 各評価モデルの実験結果の整理

(1) 各 CASE で取得したマテリアルバランスの整理

a. CASE1 で取得したマテリアルバランス

CASE1 では、小型家電 1960kg をリサイクルプロセスに投入し、破碎処理試験を行った。取得したマテリアルバランスは表 5.2 の通りである。

表 5.2 CASE1 のマテリアルバランス

回収品目	回収量 kg	回収比率 %
軽ダスト	120	6.1
鉄	830	42.3
MIX メタル(L)	20	1
MIX メタル(M)	30	1.5
MIX メタル(S)	40	2
ステンレス	10	0.5
重ダスト	860	43.9
10mm アンダー	130	6.6
MIX メタル(After MS)	110	5.6
重ダスト(After MS)	620	31.6
不明分	50	2.6
合計	1960	100

b. CASE2 で取得したマテリアルバランス

CASE2 では、小型家電 9980kg をリサイクルプロセスに投入し、破碎処理試験を行った。取得したマテリアルバランスは表 5.3 の通りである。

表 5.3 CASE2 のマテリアルバランス

施設名	回収品目	投入・回収量 kg	投入・回収比率 %
施設 B	鉄	3780	37.9
	モータコア(手選)	185	1.9
	被覆線(手選)	53	0.5
	鉄(手選)	84	0.8
	ダスト(手選)	14	0.1
	ダスト	3583	35.9
	不明分	129	1.3
施設 C	Hメタル(L)	63	0.6
	Hメタル(S)	82	0.8
	アルミ	117	1.2
	ワイヤーMIX_A	29	0.3
	ワイヤーMIX_B	78	0.8
	軽アルミ	8	0.1
	鉄付き	52	0.5
	100mmOver	21	0.2
	ステンレス	4	0
	真鍮	4	0
	銅	2	0
	15mmUnder	644	6.5
	基盤	7	0.1
	PP・PE 混	165	1.7
	ダスト	877	8.8
合計	9980	100	

## (2) 回収物の性状に着目した評価モデルの追加

ここで回収物の性状について検討が必要な項目について説明する。

まず、施設 A で回収された重ダスト (MS) は、通常、リサイクル事業者が料金を支払い外部に処理委託している。一方で、図 5.4 に示した今回の実験で回収された重ダスト (MS) の性状は、目視で確認する限り、PP・PE 中心で構成されていた。そのため、重ダスト (MS) を有価物として売却できる可能性を有している。実際に、実験期間中にプラスチック再生事業者を確認したところ、有価での取引が可能であることを確認している。

また、図 5.5 に示した施設 C で回収された 15mm アンダーには、同様に目視で確認する限り、銅を通常の場合よりも多く含んでいる。リサイクル事業者へのヒアリングによれば 5%程度の含有率である。15mm アンダーから銅を選別するには、リサイクルプロセスの設定調整や機器の追加が必要であるが、対応次第では銅をより多く回収できる可能性を有している。

そこで、表 5.4 に示す通り、先に設定した各 CASE において、重ダスト (MS)

を有価売却できる CASE と 15mm アンダーから銅を 5%回収できる CASE を設定し、環境性・経済性の評価を実施する。



図 5.4 重ダスト(MS)の写真



図 5.5 15mm アンダーの写真

表 5.4 追加で設定した評価モデル

CASE	活用した施設名	内容
1-1	施設 A	回収された重ダスト(MS)を逆有償で評価(現状)
1-2	施設 A	回収された重ダスト(MS)を有価で評価
2-1	施設 B・C	回収された 15mm アンダーに含まれる銅を選別せずに評価(現状)
2-2	施設 B・C	回収された 15mm アンダーに 5%銅が含まれていると仮定し、その銅を選別して評価

#### 5. 2. 4 各評価モデルの環境性・経済性評価

##### (1) 環境性の評価結果

実験から得たマテリアルバランスを基に環境性を再資源化率で評価する。再資源化率は、投入量に対して有価で売却できる回収品目の割合と定義する。

表 5.5, 5.6 は、各 CASE の回収品目について有価で売却可能な品目を「○」、逆有償で取引される品目を「×」で表現したものである。

表 5.5 CASE1 において有価取引が可能な回収品目の一覧

回収品目	CASE1-1	CASE1-2	回収比率 %
軽ダスト	×	×	8.7
鉄	○	○	42.3
MIX メタル(L)	○	○	1
MIX メタル(M)	○	○	1.5
MIX メタル(S)	○	○	2
ステンレス	○	○	0.5
重ダスト	—	—	43.9
10mm アンダー	○	○	6.6
MIX メタル(After MS)	○	○	5.6
重ダスト(After MS)	×	○	31.6
合計	—	—	100

表 5.6 CASE2 において有価取引が可能な回収品目の一覧

施設名	回収品目	CASE2-1	CASE2-2	回収比率 %
施設 B	鉄	○	○	37.9
	モータコア(手選)	○	○	1.9
	被覆線(手選)	○	○	0.5
	鉄(手選)	○	○	0.8
	ダスト(手選)	×	×	0.1
	ダスト	×	×	35.9
	不明分	—	—	1.3
施設 C	H メタル(L)	○	○	0.6
	H メタル(S)	○	○	0.8
	アルミ	○	○	1.2
	ワイヤーMIX_A	○	○	0.3
	ワイヤーMIX_B	○	○	0.8
	軽アルミ	○	○	0.1
	鉄付き	○	○	0.5
	100mmOver	○	○	0.2
	ステンレス	○	○	0
	真鍮	○	○	0
	銅	○	○	0
	15mmUnder	○	○	6.5
	基盤	○	○	0.1
	PP・PE 混	○	○	1.7
ダスト	×	×	8.8	
合計	—	—	100	

以上から、各 CASE の再資源化率は表 5.7 の通り整理できる。これより、CASE1 の回収品目である重ダスト (MS) が有価売却可能か否かに関わらず、CASE2 と比較して CASE1 の環境性が高いことがわかる。

表 5.7 各 CASE の再資源化率

CASE	再資源化率 %
1-1	59.7
1-2	91.3
2-1	55.2
2-2	55.2

## (2) 経済性の評価結果

次に、各 CASE の経済評価を資源売却益で評価する。資源売却益は、有価物の売却金額の合計から逆有償で処理委託される廃棄物処理費用の合計を差し引いた金額と定義する。

表 5.8 は各回収品目の取引単価である。表中の「○」は本実験に協力頂いたスズトクホールディングスからのヒアリング値である。また「△」は、早稲田大学永田研究室で過去に事業者ヒアリングした値を指す。なお、施設 A で回収される重ダスト (MS) が有価取引可能な場合の単価は、施設 C から回収される PP・PE 混合の取引単価を適用する。

表 5.8 各回収品目の取引単価の一覧

回収項目	売却価格 円/kg	施設 A	施設 B	施設 C
ヘビーメタル大	178			●
ヘビーメタル小	232			●
アルミ	140			●
ワイヤーMix	30			●
ワイヤーMixB	5			●
軽アルミ	30			●
鉄付き	22	●	●	●
100mm オーバー	7			●
ステンレス	155	●		●
真鍮	376			●
銅	580			●
15mm アンダー	0.5			●
基盤	200			●
PP・PE 混	1			●
ダスト	-25	●	●	●
モータ	30		△	
被覆線	195		△	
mix メタル(ダスト混合)	10		△	
mix メタル(ダスト非混合)	20	△		
10mm アンダー	0.5	△		
重ダスト(MS)	1	△		

※●：実際値                      △：調査・推定値

以上から、各 CASE における回収品目の重量に取引単価を乗じ、経済性を評価すると表 5.9 の通りとなる。これより、CASE1 の回収品目である重ダスト(MS)が有価売却可能か否かで、CASE1 と CASE2 の優位性に大きく影響を与えることがわかる。

表 5.9 各 CASE の資源売却益

CASE	資源売却益 円/kg-投入量
1-1	2.7
1-2	11.0
2-1	3.0
2-2	7.4

### (3) 環境性と経済性の関係

以上の結果を、縦軸に資源売却益、横軸に再資源化率を取りグラフ化したものが、図 5.6 である。これより、環境性の面からは CASE1 の優位性が高く、



済性の面からは、現状評価である CASE1-1, CASE2-1 では CASE2-1 の方が若干優位性があるが、CASE1-2 が実体として有価取引が可能である点を考慮すると、総合して CASE1 の優位性が高いといえる。

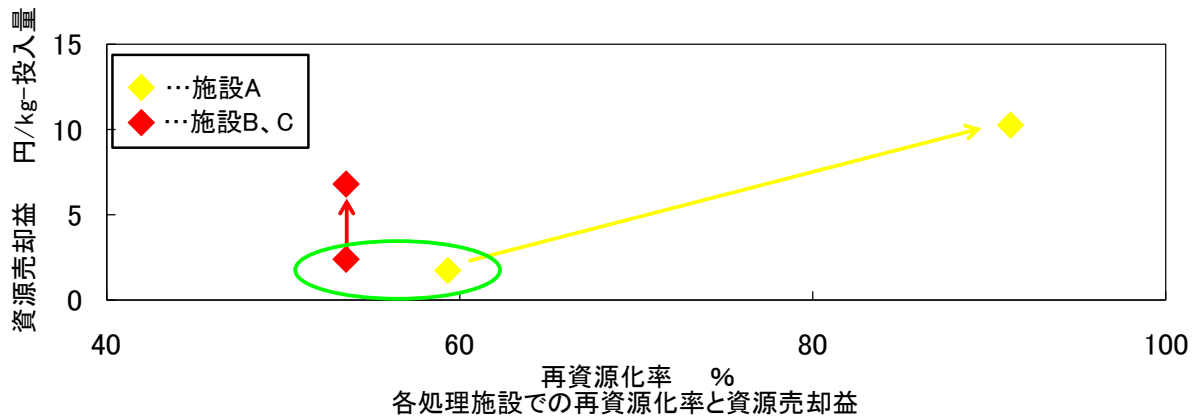


図 5.6 各 CASE の環境性・経済性評価結果

### 5. 3 投入物と回収物の関連性の検討と製品群の環境性・経済性評価

このように、民間処理施設を活用することで、環境性を向上させつつ、経済的に自立可能なモデルを構築できる可能性がある。その一方で、資源価格の変動を考慮すると、経済的に自立的でない、すなわち、民間処理施設から見て、逆有償となる場合も想定される。さらに、先の評価は、使用済み小型家電を処理した場合の一事例にすぎない。今後、各地で使用済み小型家電の回収が始まることが想定されるが、その際には、幅広い製品の中から、どういった製品を回収すべきかという点を検討する必要がある。この検討方法として、以下の2点が考えられる。

- ① さまざまな小型家電を対象とした破碎・選別試験を繰り返すことで環境性・経済性を評価すること。
- ② 事前に得られる情報から環境性・経済性を推定すること。

①のように、データを積み上げていくことは可能であるが、回収される小型家電全てを対象に実証試験を行うことは現実的ではないこと、また、実際に収集された小型家電を投入することが必要であり、自治体の収集区分の事前検討には有効ではない。②のように事前に得られる情報を基に推定することが可能となれば、民間事業者のみならず、自治体の計画段階でも使える手法となり得る。そこで、本研究では、DfE 定量評価データベースを活用し、事前に得られる情報で、環境性・経済性の両面から回収品目を検討する手法を構築する。

#### 5. 3. 1 ポテンシャル排出量を考慮した製品の環境性・経済性評価

まず、DfE 定量評価データベースに搭載されている製品を対象に、その素材構成のデータを活用して、環境性・経済性評価を行う。

##### (1) 評価方法

##### a. ポテンシャル排出量の定義と算出方法

使用済み小型家電の回収品目を検討するにあたり、環境性・経済性を評価し、

回収品目を選定していくことができたとしても、実際にその製品が家庭から排出されるかという点、すなわち、各資源の発生量は重要な要素の一つとなる。その排出可能性については、以下の点が影響する。

- ① 製品がどの程度家庭に普及しているのか（普及率）。
- ② 製品が使用済みとなるまでの期間がどの程度なのか（使用期間）。
- ③ 使用済みとなった後に、消費者がその製品を排出するのか（排出容易性）。

DfE 定量評価データベースでは、製品の企画・設計段階で得られる情報を基本としていることから、上記①、②について、普及率と製品寿命のデータを搭載している。一方で、③については、自治体の収集回収区分などによって影響を受けるため、企画・設計段階で得られる情報ではないことから、考慮していない。そこで、本研究では、普及した製品が使用済みとなった後に速やかに排出されることを前提とした排出量を「ポテンシャル排出量」と定義する。すなわち、ポテンシャル排出量は次式で表わすことができる。

$$Exi = Mxi \times \frac{APx}{SLx} \quad (5.1)$$

ここで、 $Exi$ :ある製品 X を構成する素材 i のポテンシャル排出量 [kg/世帯/y]

$Mxi$ :ある製品 X を構成する素材 i の質量 [kg/台]

$APx$ :ある製品 X の保有台数 [台/世帯]

$SLx$ :ある製品 X の製品寿命 [y]

#### b. 環境性の評価方法

環境性は、ポテンシャル排出量を考慮した各素材の質量にそれぞれの再生資源強度原単位を掛け合わせることで算出した、リサイクルによる資源の節約効果で評価する。マテリアルリサイクルの再生資源強度  $RI_{mr}$  は式 5.2 で表される。

$$RI_{mr} = MI_{mr\_p} - I_{mr\_w} \quad (5.2)$$

ここで、 $RI_{mr}$ :マテリアルリサイクル資源強度 [kg/y]

$MI_{mr\_p}$ :マテリアルリサイクルの対象となる物質の新規製造時の物質資源強度 [kg/y]

$I_{mr\_w}$ :マテリアルリサイクル工程の投入資源強度 [kg/y]

以上から、ある製品 X のポテンシャル排出量を考慮したマテリアルリサイクル再生資源強度  $RI_{px}$  は式 5.3 で表される。

$$RI_{px} = \sum_i RI_{xi} \times Exi \quad (5.3)$$

ここで、 $RI_{px}$ :ある製品 X のポテンシャル排出量を考慮したマテリアルリサイクル再生資源強度 [kg/y]

$Rlxi$ :ある製品 X を構成する素材 i のマテリアルリサイクル再生資源強度 [kg/y]

c. 経済性の評価方法

経済性は、ポテンシャル排出量を考慮した各素材の質量にそれぞれの売却単価を掛け合わせることで算出した、素材の売却価格で評価する。ある製品 X のポテンシャル排出量を考慮したポテンシャル排出量を考慮した資源売却価格  $P_{px}$  は式 5.4 で表される。

$$P_{px} = \sum_i P_{xi} \times Exi \quad (5.4)$$

ここで、 $P_{px}$ :ある製品 X のポテンシャル排出量を考慮した資源売却価格

$P_{xi}$ :ある製品 X を構成する素材 i の資源売却単価

$Exi$ :ある製品 X を構成する素材 i のポテンシャル排出量 [kg/世帯/y]

(2) 評価の前提条件

a. 評価対象製品

DfE 定量評価データベースに搭載された全製品（89 品目 300 製品）を評価対象製品としている。

b. 各素材の売却単価の設定

表 5.10 は、設定した各素材の売却単価の一覧である。売却単価はリサイクラーへのヒアリングにより設定した値である。

表 5.10 各素材の売却単価

鉄	22	PBT	32
ステンレス	190	ポリエステル樹脂	35
アルミニウム	175	フェノール樹脂	35
銅	500	エポキシ樹脂	35
ニッケル	21	ポリウレタン(軟質)	35
鉛	21	ポリウレタン(硬質)	35
亜鉛	21	表示なしプラ	2
チタン	21	合成ゴム	-44
コバルト	21	ガラス	-35
マンガン	21	再生ガラス	-35
クロム	21	化学繊維	-44
その他非鉄金属	21	その他	-44
LDPE	32	金属複合材	21
HDPE	32	合成樹脂複合材	2
PP	24	金属樹脂複合材	21
PS	35	基板	300
EPS	35	液晶	-20
PVC	32	シート基板	300
B-PET	32	モーター	30
ABS	35	HDD	93
AS	32	マイク	-20
PA6	35	スピーカー	-20
PA66	35	ファン	2
POM	32	その他	-44
PC	35	—	

c. 再生資源強度原単位の設定

Appendix に活用した原単位は掲載している。

(3) 環境性・経済性の評価結果

図 5.7 は、DfE 定量評価データベースに搭載されている全製品を対象に、ポテンシャル排出量を考慮し、世帯・年間あたりに排出される素材売却価格と再生資源強度の評価結果である。これより、評価対象とした品目の約 30% で全製品における世帯・年間あたりに排出される素材売却価格合計と再生資源強度合計のそれぞれ 8 割以上を占めていることから、優先的に回収・再資源化していくことが求められる。これより、今回の評価結果では、これらの製品を「主要製品」として、評価対象製品とする。表 5.11 は、主要製品の一覧である。

なお、ポテンシャル排出量は製品素材の質量に保有率と製品寿命を乗じたものであり、製品寿命に関しては製品間で大きな差はないため、製品質量が大きく、保

有率の高い製品（電子レンジや炊飯器,食器洗い機）の影響力が高くなる傾向になっている。

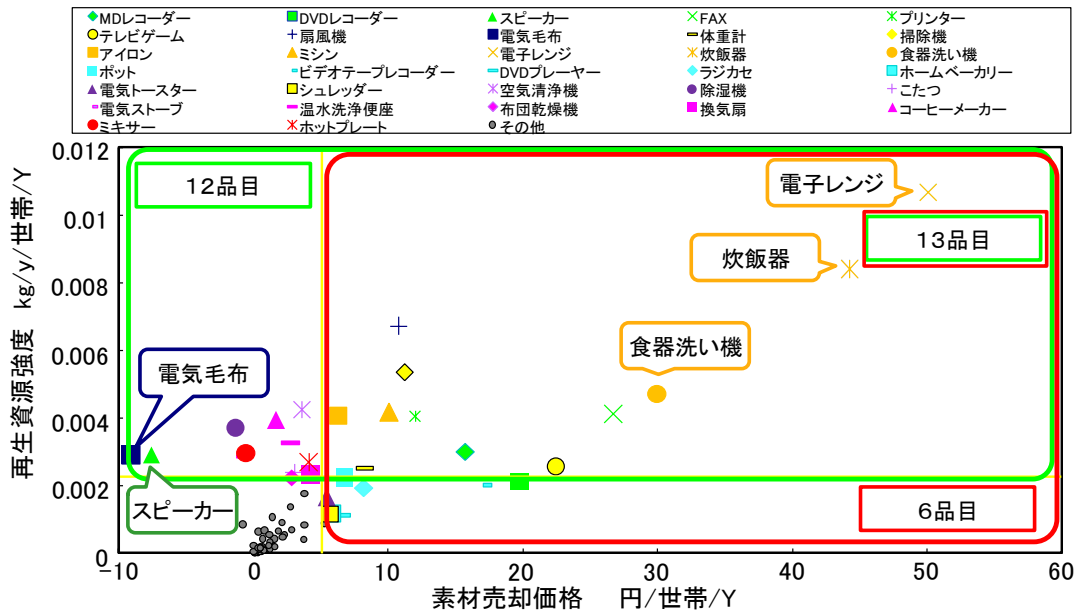


図 5.7 世帯・年間あたりの素材売却価格と再生資源強度

表 5.11 主要製品の一覧

MD レコーダー	ビデオテープレコーダー
DVD レコーダー	DVD プレーヤー
スピーカー	ラジカセ
FAX	ホームベーカリー
プリンター	電気トースター
テレビゲーム	シュレッダー
扇風機	空気清浄機
電気毛布	除湿機
体重計	こたつ
掃除機	電気ストーブ
アイロン	温水洗浄便座
ミシン	布団乾燥機
電子レンジ	換気扇
炊飯器	コーヒーメーカー
食器洗い機	ミキサー
ポット	ホットプレート

### 5. 3. 2 リサイクルプロセスにおける投入物と回収物の関連性の検討

ここまでの検討は、データベースを活用し、製品の素材構成を基に各種製品の評価を行ったものである。しかし、実際には、回収された製品は破碎処理施

設において破碎・選別されることになる。このとき、製品の素材構成を基に実施した評価によって選定される製品が環境性・経済性に優れるとは限らない。そこで、施設 A を活用し、破碎処理施設の投入物の素材構成を把握するとともに、それらを破碎・選別した際に回収される各資源の素材構成の関係性について調査を実施した。

小型家電の破碎選別試験に当たり、投入物の素材構成を把握することを目的として、投入物に含まれている製品種類とその個数についてカウントを行った。その結果を表 5.12 に示す。試験では 997 個 75 種類の製品が投入されていることがわかり、総重量 1960kg の製品を今回の再資源化工程に投入した。

表 5.12 投入製品のカウント結果

品目	個数 個	品目	個数 個	品目	個数 個
リモコン	110	マイク	9	テレビ	3
掃除機	75	CD プレーヤー	8	電子レンジ	3
ドライヤー	63	キーボード	8	パン焼き機	3
扇風機	47	こたつ	8	モデム	3
ポット	41	レコードプレーヤー	8	ルーター	3
炊飯器	39	DVD デッキ	7	アンプ	2
ライト	33	加湿器	7	懐中電灯	2
ラジカセ	35	カセットプレーヤー	7	血圧計	2
電気ヒーター	34	換気扇	6	データロガー	2
ビデオデッキ	33	携帯ゲーム機	7	デジタルカメラ	2
シェーバー	27	工具	7	電子辞書	2
電話機(子機)	24	コーヒーマーカー	7	電子ピアノ	2
コントローラー	23	チューナー	7	トランシーバー	2
電話機	21	電気調理器	6	便座	2
アイロン	18	パソコン	5	ポータブル DVD プレーヤー	2
スピーカー	17	ワープロ	5	ポータブル TV	2
ミキサー	17	空気清浄機	4	マウス	2
ラジオ	17	シュレッダー	4	ミシン	2
マッサージ機	14	トースター	4	湯沸かし器	2
ゲーム機	12	布団乾燥機	4	カメラ	1
DVD プレーヤー	10	カセットデッキ	3	食器洗機	1
プリンター	10	カラオケセット	3	ビデオカメラ	1
ヘッドホン	10	計算機	3	その他	46
FAX	9	食器乾燥機	3		
時計	9	精米機	3		
ヘアアイロン	9	体重計	3	合計	998

表 5.12 に記載した家電製品を施設 A に投入し、破碎・選別処理を行った結果、表 5.13 の通りとなる。なお、本結果は、先の施設 A を活用した実験結果における CASE1-1 と同様である。

表 5.13 CASE1-1 のマテリアルバランス

項目	回収量	
	kg	比率 %
軽ダスト	120	6.1
鉄	830	42.3
MIX メタル(L)	20	1.0
MIX メタル(M)	30	1.5
MIX メタル(S)	40	2.0
ステンレス	10	0.5
10mm アンダー	130	6.6
MIX メタル(After MS)	110	5.6
重ダスト(After MS)	620	31.6
合計	1910	100

ここで、施設 A における各回収品目について、素材構成の調査を行った。調査は、各回収物の一部をサンプルとして収集し、そのサンプルに含まれる素材を手選別で分類し質量を量ることで、サンプルの量に対する素材の割合を測定した。なお、軽ダストは性状により分類が困難であったことから、表 5.14 の通り素材構成を設定した。算出結果を図 5.8 に示す。

表 5.14 軽ダストの素材構成

項目	重量 kg
その他非鉄金属	10
ガラス	10
その他単一素材	50
化学繊維	50
合計	120

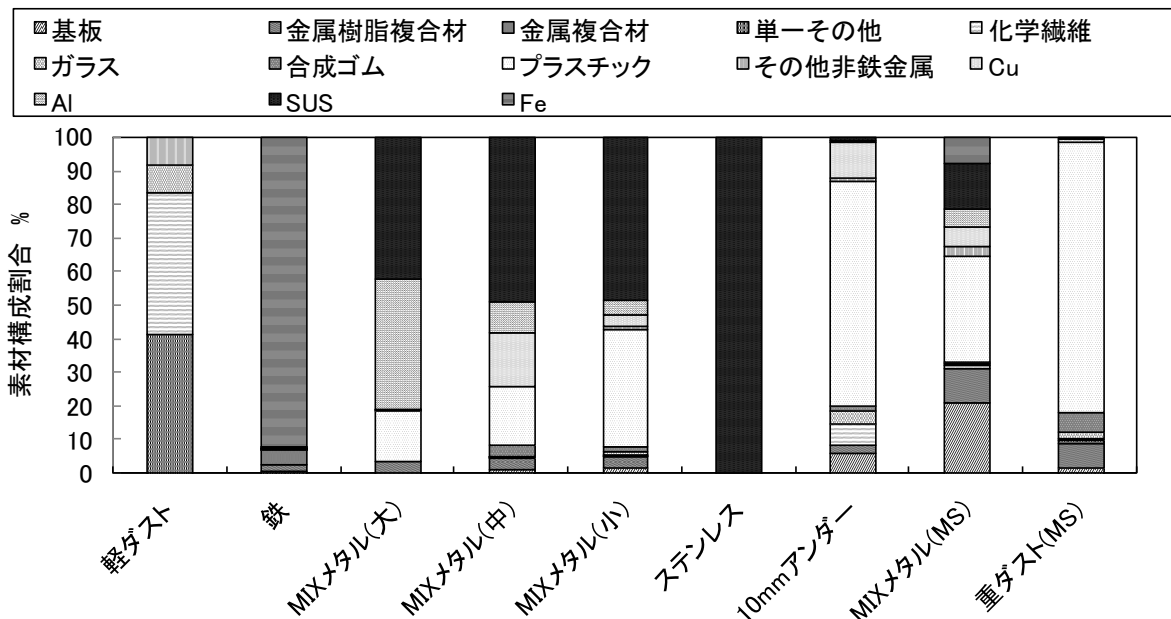


図 5.8 回収品目の素材構成算出結果

投入した製品群と回収物の中で再資源化工程における素材質量が変化しないと仮定し、投入した製品素材構成を推定した。具体的には図 5.9 の素材構成質量と表 5.13 の回収物質質量を乗ずることで、再資源化工程に投入された各素材の質量を把握した。投入した素材毎の質量の算出結果を図 5.9 に示す。

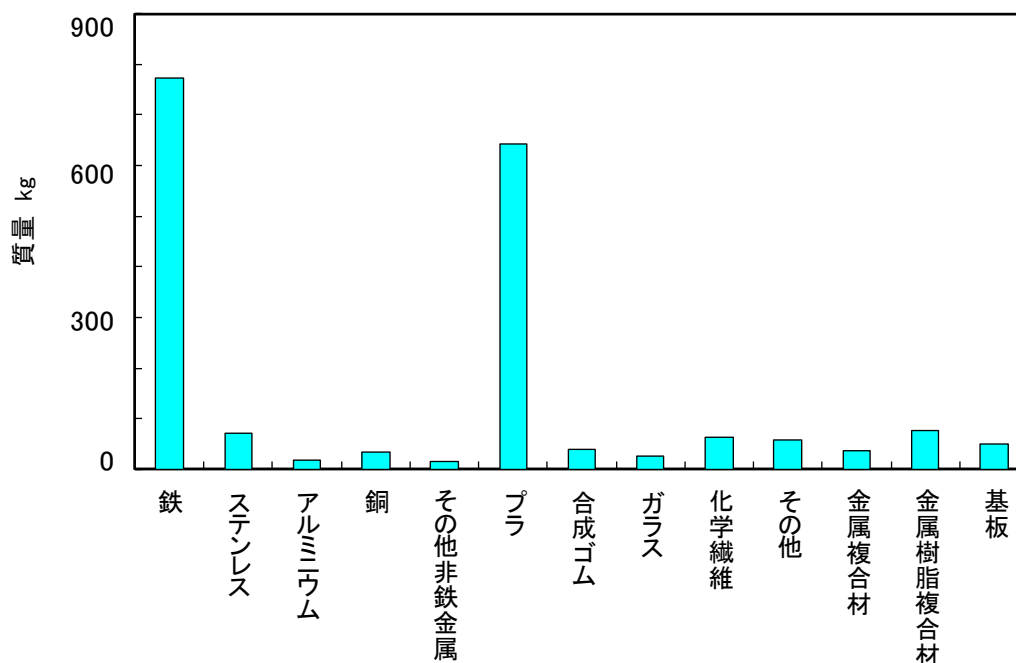


図 5.9 投入物の素材構成算出結果

以上から、投入物と回収物の関連性をまとめると表 5.15 の通りとなる。このように、回収品目に含まれる投入物の素材構成が関連付けられることで、投



入される製品から、破碎処理後に回収される各品目の発生量を推定することが可能となる。

表 5.15 投入物の回収割合

回収項目	投入物の回収割合 %												
	Fe	SUS	Al	Cu	その他 非鉄	プラ	合成ゴム	ガラス	化学 繊維	単一素材 その他	金属 複合材	金属樹脂 複合材	基板
軽ダスト	-	-	-	-	64.7	-	-	36.1	78.4	85.1	-	-	-
鉄	98.9	-	-	3.6	-	0.2	1.6	-	0.7	7.4	100	19.7	12.3
MIX メタル (L)	-	11.7	42.1	0.1	-	0.5	-	-	-	-	-	0.9	
MIX メタル (M)	-	20.5	14.9	14.0	-	0.8	2.4	-	0.2	0.0	-	1.5	0.7
MIX メタル (S)	-	27.0	10.0	3.9	2.2	2.2	1.4	1.6	0.1	0.1	-	1.8	1.5
ステンレス	-	14.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10mm アンダー	-	2.0	0.8	41.4	10.1	13.5	5.4	18.0	12.6	-	-	3.7	16.3
MIX メタル (After MS)	1.1	20.9	32.2	17.6	23.0	5.4	1.4	1.6	1.7	-	-	14.6	46.2
重ダスト (After MS)	-	3.8	-	19.5	-	77.5	87.9	42.6	6.4	7.3	-	57.9	23.0
合計	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

### 5. 3. 3 先進的事例における投入物と回収物の環境性・経済性の推定

ここで、DfE 定量評価データベースの素材項目と施設 A における回収品目と関連付けた結果を、具体的な収集回収品目に適用し、環境性・経済性の評価を行う。具体的には、先進的事例として、各地で取組まれている使用済み小型家電からの資源回収モデル事業において、収集回収されている品目を対象にする。

#### (1) 先進的事例における回収品目

各地で行われている先進的事例を調査し、回収品目を表 5-11 の通りまとめた。その中から、代表的な 7 都市として、輪島市、刈谷知立環境組合、名護市、半田市、豊田市、調布市、石狩市を取り上げ、評価対象とする。なお、比較対象として、DfE 定量評価データベースに搭載されている全製品と主要製品を取り上げる。

表 5.16 自治体の回収品目調査結果①

製品名	輪島市	刈谷知 立環境 組合	名護市	半田市	豊田市	調布市	石狩市
ビデオテープレコーダー	●		●	●	●	●	
MD レコーダー	●		●	●		●	
DVD レコーダー	●		●	●	●	●	
レコードプレーヤー	●		●	●			
DVD プレーヤー	●		●	●	●	●	
ポータブルカセットテーププレーヤー	●			●			
ポータブル CD プレーヤー	●			●			
ポータブル MD プレーヤー	●			●			
ポータブル DVD プレーヤー	●			●			●
ラジオ	●			●			●
ラジカセ	●		●	●			
ポータブルラジオ	●			●			●
ラジオライト	●			●			
プロジェクター	●		●	●			●
ポータブルテレビ	●			●			●
チューナー(BS・CS・地デジ)	●			●			
スピーカー				●			●
ヘッドホン	●			●			
マイク	●			●	●		●
コンパクトデジタルカメラ	●			●			
ビデオカメラ	●			●			●
電子楽器	●	●				●	
携帯電話				●			●
スマートフォン				●			●
電話機	●		●	●			
電話機(子機)	●		●	●			
FAX	●		●	●			●
テレビドアホン	●			●			●
トランシーバー	●	●		●		●	
デジタルオーディオプレーヤー	●			●			
プリンター	●		●	●		●	
外付け DVD	●			●	●		●
外付け HDD	●			●			●
ルーター	●			●			

表 5.16 つづき 自治体の回収品目調査結果②

LAN のハブ	●			●			
マウス	●			●			
キーボード	●			●		●	
電子辞書	●			●			
卓上計算機	●			●			
テレビゲーム	●		●	●			
ポータブルゲーム	●			●			
コントローラー	●			●			
カラオケセット	●	●	●	●		●	
扇風機	●	●	●			●	
空気清浄機	●	●	●	●		●	
加湿器	●		●	●			
除湿機	●	●	●	●		●	
こたつ			●	●	●		
電気毛布		●	●			●	
電気ストーブ	●	●	●	●		●	
電気アンカ	●			●	●		
マッサージ機	●		●	●		●	
電動歯ブラシ	●			●			
温水洗浄便座	●	●	●	●		●	
血圧計	●		●	●			
体温計	●			●			
体重計	●			●	●		
懐中電灯	●			●			
掃除機	●		●	●			
ハンドクリナー	●		●	●			
布団乾燥機	●		●	●			
アナログ時計	●			●			
換気扇	●			●			
アイロン	●		●	●			
ミシン	●	●	●	●			
ドライヤー	●		●	●			
ヘアアイロン	●		●	●			
シェーバー	●			●			
電子レンジ	●	●	●	●	●		
炊飯器	●		●	●			
ホームベーカリー	●	●	●	●	●		
電気トースター	●		●	●	●		

表 5.16 つづき 自治体の回収品目調査結果③

IH・電磁調理器	●		●	●			●
コーヒーメーカー	●		●	●			
ミキサー	●		●	●			
ホットプレート	●		●	●	●	●	
食器洗い機	●	●	●	●		●	
ポット	●	●	●	●			
リモコン	●			●			
シュレッダー	●		●	●			

(2) 投入製品の素材構成と環境性・経済性のポテンシャル評価

a. ポテンシャル排出量を考慮した投入製品の素材構成割合の算出

表 5.11 に示した各自治体が収集する製品群および主要家電におけるポテンシャル排出量を考慮した素材構成割合を DfE 定量評価データベースから得られる情報（各品目の製品素材構成，製品寿命，保有率）を用いて，式 (5.5) から算出した．その素材構成割合算出結果を図 5.8 に示す

$$\sum Exi = E_{yi} \tag{5.5}$$

ここで， $Exi$ :ある製品 X を構成する素材 i のポテンシャル排出量 [kg/世帯/y]

$E_{yi}$ :ある製品群 Y を構成する素材 i の質量 [kg/台]

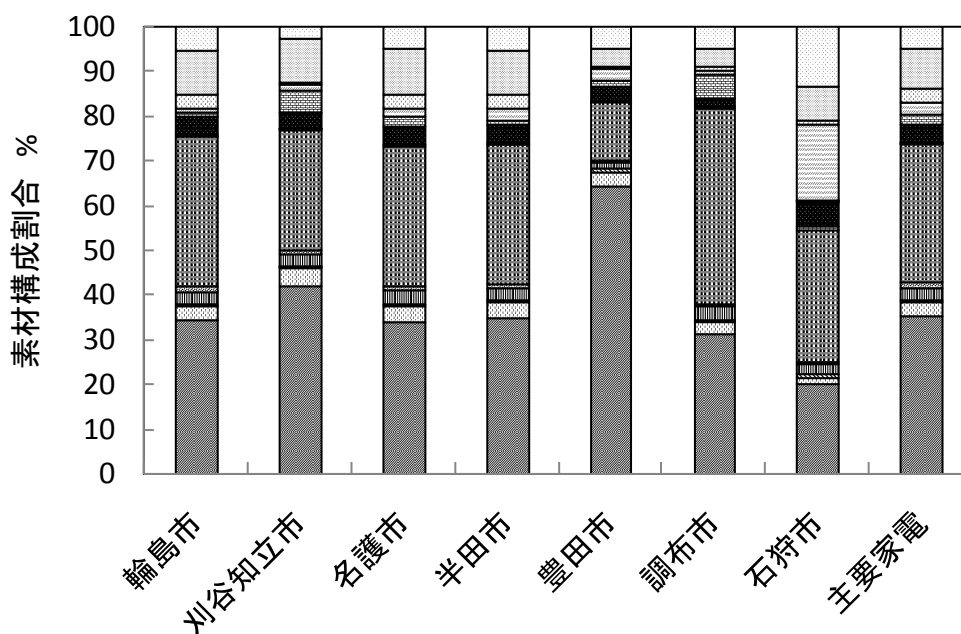
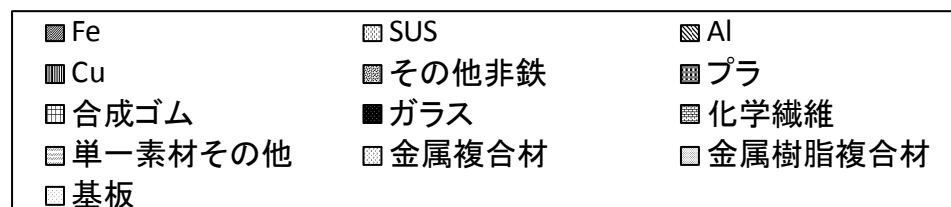


図 5.10 各自治体における投入製品群の素材構成割合

b. 投入製品の素材売却価格密度・再生資源強度密度の算出

投入製品群の素材構成割合から自治体が単位質量当たりを収集した際の製品群の素材売却価格密度・再生資源強度密度を式 (5.6) (5.7) により算出した。図 5.9 のグラフが得られた。ここで基板の素材構成割合が比較的高い石狩市の素材売却価格密度・再生資源強度密度が高い傾向となっていることがわかる。

$$DRI = E_{yi} \times RI_i \quad (5.6)$$

$$DP = E_{yi} \times P_i \quad (5.7)$$

ここで、 $DRI$ :ある製品群  $Y$  における再生資源強度密度 [kg/y/kg]

$RI_i$ :素材  $i$  の再生資源強度原単位[kg/y/kg]

$DP$ :ある製品群  $Y$  における素材売却価格密度 [円/kg]

$P_i$ :素材  $i$  の素材売却単価 [円/kg]

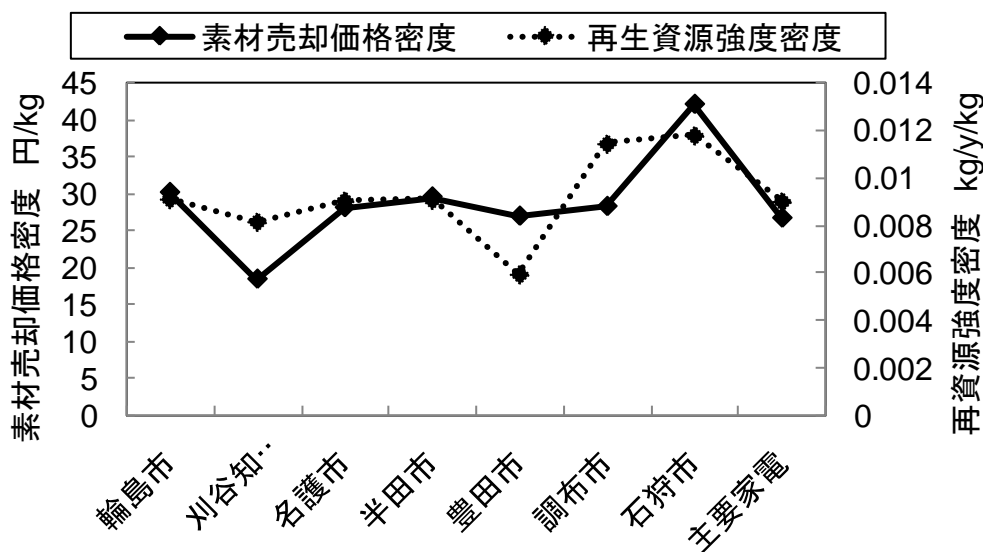


図 5.11 各自治体における投入物の素材売却価格密度および再生資源強度密度

(3) 回収品目の環境性・経済性の評価

a. ポテンシャル排出量を考慮した回収品目割合の算出

各自治体が収集する製品群を施設 A の再資源化工程に投入した後の回収品目について検討する。上記で算出した投入製品のポテンシャル排出量を考慮した素材構成割合 (図 5.8) と投入物の回収割合 (表 5.10) から各自治体におけるポテンシャル排出量を考慮した回収品目割合は式 (5.8) で算出される。その結果を図 5.10 に示す。

$$Mv_j = \sum (E_{yi} \times L_{ij}) \quad (5.8)$$

ここで、 $Mv_j$ :ある製品群 Y を投入した際に得られる回収品目 (有価物) j の質量 [kg]  
 $Lij$ :投入素材 i から回収される回収素材 j の割合

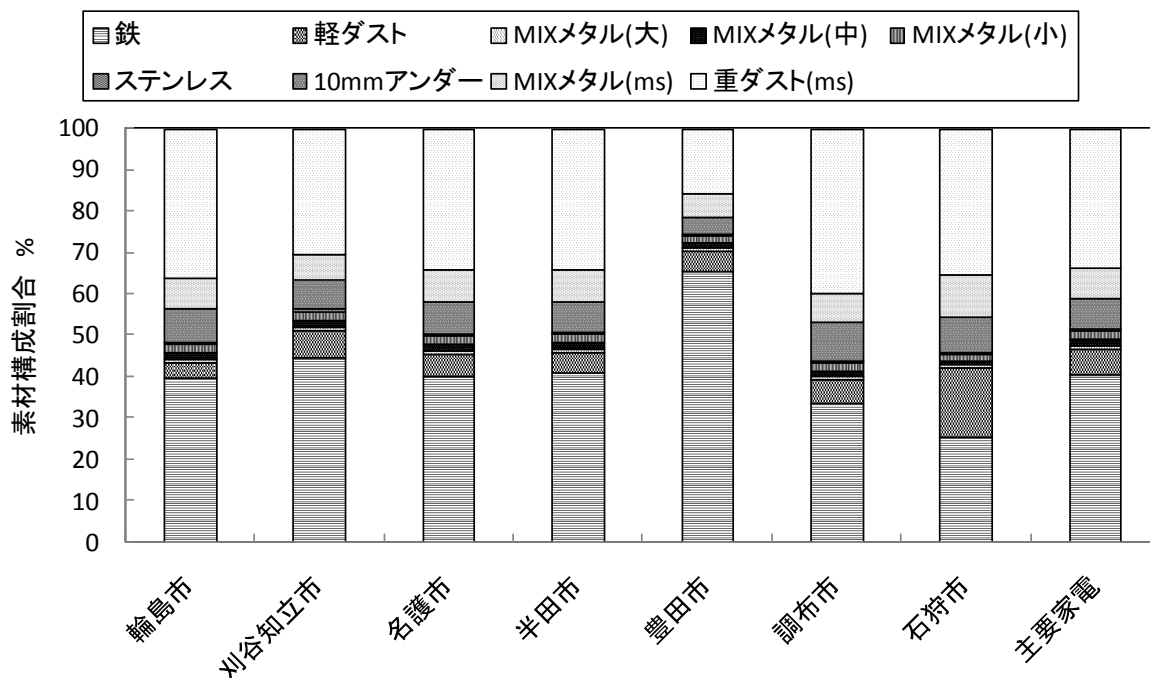


図 5.12 各自治体における回収品目の素材構成割合

b. ポテンシャル排出量を考慮した回収品目割合の算出

算出した回収品目割合から、回収品目群の素材売却価格密度・再生資源強度密度を式 ( ) により算出し、結果を図 5.11 に示す。ここで鉄の回収品目割合が大きい豊田市では素材売却価格密度が高くなる傾向にあることがわかる。

$$DRI_{after} = \sum (Mv_j \times RI_j) / Mv_{all} \quad (5.9)$$

ここで、 $DRI_{after}$ :回収品目群の再生資源強度密度 [kg/y/kg]

$RI_j$ :回収素材 j の再生資源強度原単位 [kg/y/kg]

$Mv_{all}$ :回収品目の合計質量[kg]

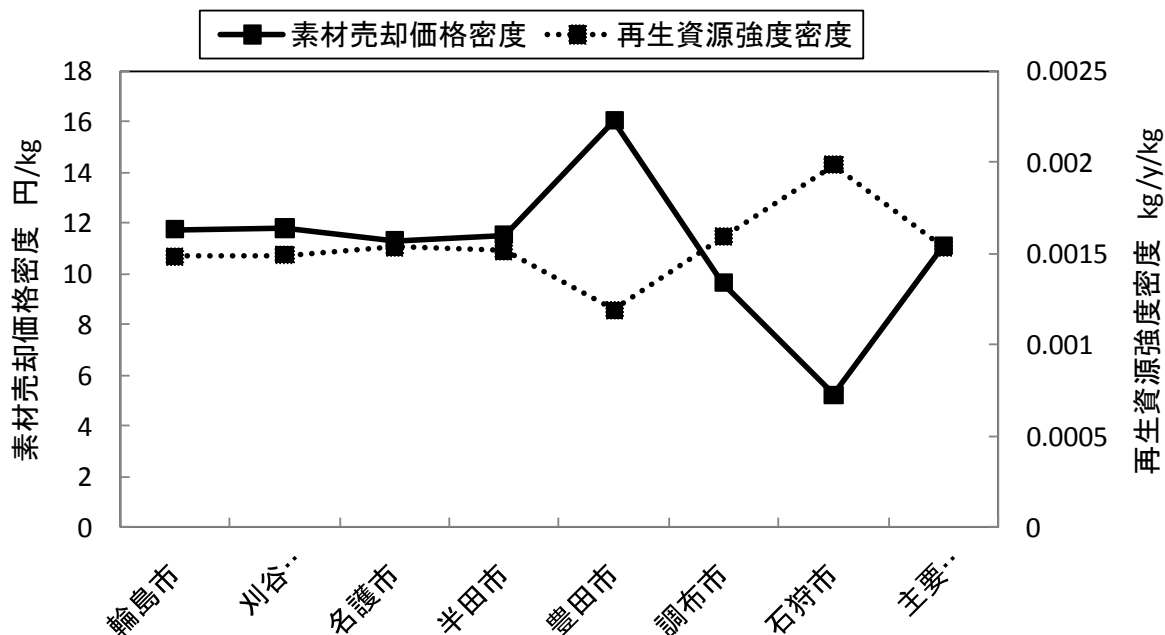


図 5.12 各自治体における回収物の素材売却価格密度および再生資源強度密度

(4) 投入物と回収物の環境性・経済性の比較

以上より、各自治体における投入製品群および回収品目の再生資源強度密度・売却価格密度から環境性・経済性の比較を行った。投入製品群に対する再資源化工程後の再生資源強度密度・売却価格密度の比を回収率として環境性・経済性を比較評価した結果をそれぞれ図 5.12, 5.13 に示す。

売却価格に関しては、製品群の違いによりポテンシャルに対する回収率が大きく変動しており、鉄の割合が高い製品群その割合が高い傾向にあり、一方、基板の割合が高い製品群に関しては低い傾向にある。これは、A 工場での処理フローにおいて、基板の回収が少なく、ポテンシャルとして価値の高い基板がその他の素材に混入してしまうためである。

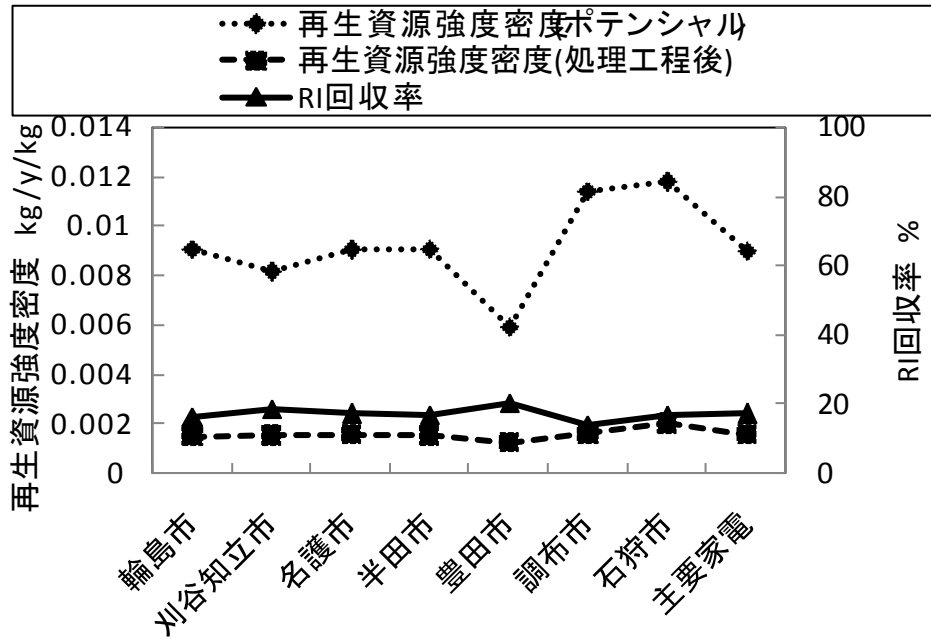


図 5.13

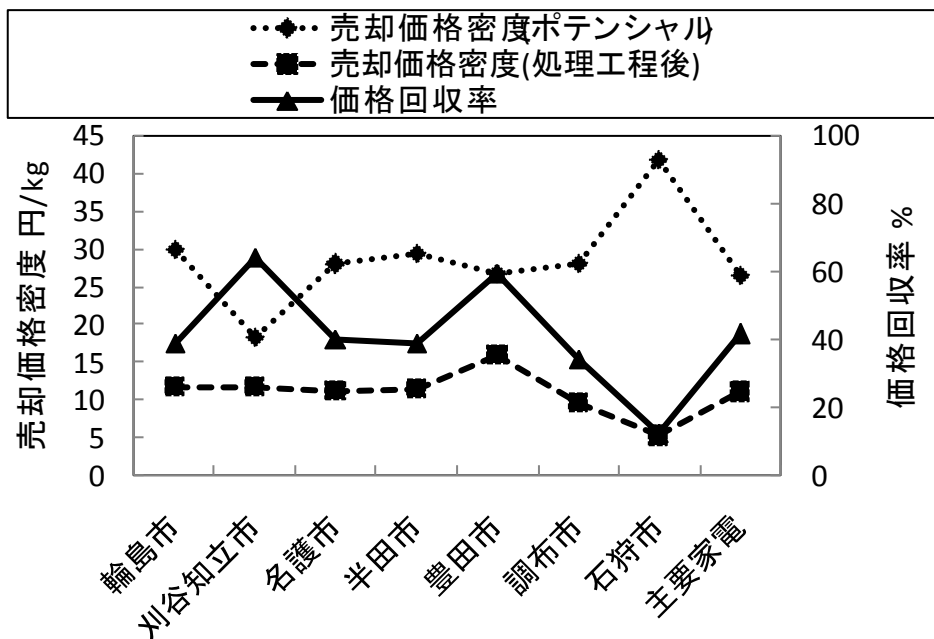


図 5.14

(5) 資源価格の変動を考慮した投入物と回収物の経済性評価

本研究で対象としている資源回収システムは、既存インフラとして民間処理施設を取り上げている。第3章に記載した通り、自治体へのヒアリング結果から、民間施設を活用する場合、その仕組みの継続性が懸念として挙げられる。実際に、民間処理施設を活用した資源回収システムを構築した場合、経済性が悪いためにその仕組みが継続できなくなるといったことは避けなければならない。そこで、破碎選別後に回収される各回収品目の売却価格を変動させ、収益



性の変化を検討した。図 5-10 は 2009 年度を基準とした過去 20 年間の鉄，アルミ，銅の資源価格の変化を示したものである。これより，これらの金属は 50% 程度増減していることがわかる。また，その変動傾向は類似している。そこで，回収品目のその他の品目についても，同様に変動すると仮定し，破碎処理施設の経済性評価を実施した。なお，破碎処理施設の稼働に必要な加工費は 15 円/kg として評価している。図 5-11 に売却価格を変動させた場合の収支を示す。これより，評価対象とした製品群の中では豊田市の製品群が価格変動に対し最も強い製品群であることがわかる。

#### 5. 4 DfE 定量評価データベースを活用した回収品目の選定手法の構築

##### 5. 4. 1 DfE 定量評価データベースを活用した回収品目の選定手法の構築

このように，投入する製品によって，価格変動に対する売却益が大きく変動する。今後新たに資源回収システムを検討していくにあたり，価格変動に対する売却益の変動が小さく，収益性の高い製品群を選定することが，永続的な仕組みを構築する上で重要である。

##### 5. 4. 2 評価方法

###### (1) 評価対象製品の設定

表に示す，主要品目を評価対象製品とする。

###### (2) 環境性の評価方法

DfE 定量評価データベースに搭載された各製品について，ポテンシャル排出量を考慮し，処理施設 A で処理されたとした場合の，各回収品目について，再生資源強度を算出する。

###### (3) 経済性の評価方法

DfE 定量評価データベースに搭載された各製品について，ポテンシャル排出量を考慮し，処理施設 A で処理されたとした場合の，各回収品目について，資源売却益を算出する。

##### 5. 4. 3 回収品目の選定方法

一次式で表される制約条件下で，一次式で表される目的関数を最大または最小にする値を求める LP 分析を使用し，回収品目を選定する。

例えば，変数  $x$  に関して LP 分析の制約条件関数を以下式 (5.10) のように設定し，目的関数式 (5.11) の最大値を算出する。

$$A \times x + B \leq C \quad (5.10)$$

$$D \times x \quad (5.11)$$

つまり，この条件における LP 分析は  $x \leq (C - B)/A$  の条件下で式 (5.11) が最大値となる変数  $x$  を検索する感度分析である。

##### 5. 4. 4 環境性を考慮した回収品目の選定

###### (1) 分析方法

環境性に優れた製品群を選定するため，一次式で表される制約条件下で，一

次式で表される目的関数を最大または最小にする値を求める LP 分析を使用して、ポテンシャル排出量を制約条件下とした際の回収品目選定における再生資源強度密度の最大値を算出した。

具体的には、今回の制約条件式は主要製品 32 品目におけるポテンシャル排出量の合計が目的ポテンシャル排出量以下という条件下とした。以下に式を示す。

$$\sum_{i=1}^{32}(P_{ei} \times x_i) \leq P_{e目的} \quad (5.12)$$

ここで  $P_{ei}$  : 主要製品 32 品目内におけるある製品のポテンシャル排出量[kg/y/]

$x_i$  : 主要製品 32 品目内におけるある製品選定の有無

$P_{e目的}$  : 製品群のポテンシャル排出量の制限 (今回は 1~10kg で設定)

また、目的関数は以下式 (5.13) から算出される再生資源強度密度が最大値となるように  $x_i$  (製品群の選択の有無) の組み合わせを変化させて試行・検索する。

$$\sum_{i=1}^{32}(RI_i \times x_i) \leq RI_{all} \quad (5.13)$$

ここで  $RI_i$  : 主要製品 32 品目内におけるある製品の再資源強度 [kg/y/kg]

$RI_{all}$  : 選択した製品群の再資源強度 [kg/y/kg]

以上の条件に当てはまる  $x_i$  の組み合わせを検索することで制限されたポテンシャル排出量での環境面から優位な製品選定が可能となる。

## (2) 環境性を考慮した回収品目の選定

上述により、制限されたポテンシャル排出量での環境面から優位な製品選定を実施した。ここで制限された各ポテンシャル排出量における製品選定結果を表 5.17 に示す。

表 5.17 環境性を考慮した回収品目の選定

ポテンシャル排出量制限 kg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ビデオテープレコーダー									●	●
MDレコーダー					●	●	●	●	●	●
DVDレコーダー							●	●	●	●
DVDプレーヤー										●
ラジカセ					●	●	●	●	●	●
スピーカー	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
FAX							●	●	●	●
プリンター		●		●	●	●	●	●	●	●
テレビゲーム				●	●	●	●	●	●	●
扇風機				●	●	●	●	●	●	●
空気清浄機			●			●	●	●	●	●
除湿機										●
こたつ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
電気毛布	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
電気ストーブ										●
温水洗浄便座		●	●	●	●	●	●	●	●	●
体重計										
掃除機						●	●	●	●	●
布団乾燥機				●	●	●	●	●	●	●
換気扇	●		●		●	●	●	●	●	●
アイロン							●		●	●
ミシン					●	●	●	●	●	●
電子レンジ								●	●	●
炊飯器		●	●	●	●	●	●	●	●	●
ホームベーカリー						●	●	●	●	●
電気トースター										
コーヒーメーカー									●	●
ミキサー			●	●	●	●	●	●	●	●
ホットプレート										●
食器洗い機			●	●	●	●	●	●	●	●
ポット	●			●	●	●	●	●	●	●
シュレッダー						●	●		●	●

(3) 環境性を考慮した回収品目選定時の環境性・経済性評価

制限された各ポテンシャル排出量における環境性に優れた製品群選定時の再資源強度密度・素材売却価格密度の算出結果を図 5.16 に示す。

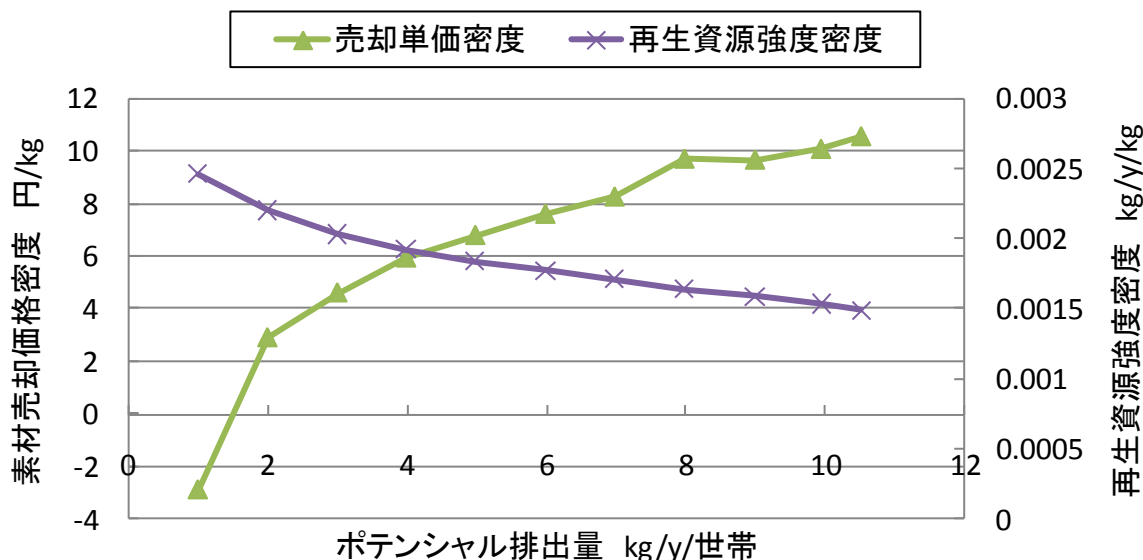


図 5.15 環境性を考慮した回収品目選定時の環境性・経済性評価

5. 4. 5 経済性を考慮した回収品目の選定

(1) 分析方法

経済性に優れた製品群を選定するため、一次式で表される制約条件下で、一次式で表される目的関数を最大または最小にする値を求める LP 分析を使用して、ポテンシャル排出量を制約条件下とした際の回収品目選定における素材売却価格の最大値を算出した。

具体的には、今回の制約条件式は主要製品 32 品目におけるポテンシャル排出量の合計が目的ポテンシャル排出量以下という条件下とした。以下に式を示す。

$$\sum_{i=1}^{32}(P_{ei} \times x_i) \leq P_{e目的} \quad (5.12)$$

ここで  $P_{ei}$  : 主要製品 32 品目内におけるある製品のポテンシャル排出量[kg/y/]

$x_i$  : 主要製品 32 品目内におけるある製品選定の有無

$P_{e目的}$  : 製品群のポテンシャル排出量の制限 (今回は 1~10kg で設定)

また、目的関数は以下式 (5.14) から算出される売却価格密度が最大値となるように  $x_i$  (製品群の選択の有無) の組み合わせを変化させて試行・検索する。

$$\sum_{i=1}^{32}(P_i \times x_i) \leq P_{all} \quad (5.14)$$

ここで  $P_i$  : 主要製品 32 品目内におけるある製品の素材売却価格密度 [円/kg]

$P_{all}$  : 選択した製品群の素材売却価格密度 [円/kg]

以上の条件に当てはまる  $x_i$  の組み合わせを検索することで制限されたポテンシャル排出量での経済面から優位な製品選定が可能となる。

(2) 経済性を考慮した回収品目の選定

上述により，制限されたポテンシャル排出量での経済面から優位な製品選定を実施した．ここで制限された各ポテンシャル排出量における製品選定結果を表 5.18 に示す．

表 5.18 経済性を考慮した回収品目の選定

ポテンシャル排出量制限 kg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ビデオテープレコーダー			●	●	●	●	●	●	●	●
MDレコーダー						●	●	●	●	●
DVDレコーダー	●		●	●	●	●	●	●	●	●
DVDプレーヤー		●	●	●	●	●	●	●	●	●
ラジカセ								●	●	●
スピーカー										
FAX						●	●	●	●	●
プリンター									●	●
テレビゲーム						●	●	●	●	●
扇風機							●	●	●	●
空気清浄機									●	●
除湿機					●	●	●	●	●	●
こたつ									●	●
電気毛布										
電気ストーブ				●	●	●	●	●	●	●
温水洗浄便座										●
体重計	●		●	●	●	●	●	●	●	●
掃除機				●	●	●	●	●	●	●
布団乾燥機			●			●	●	●	●	●
換気扇										●
アイロン							●	●	●	●
ミシン					●	●	●	●	●	●
電子レンジ		●	●	●	●	●	●	●	●	●
炊飯器								●	●	●
ホームベーカリー	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
電気トースター	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
コーヒーメーカー										●
ミキサー										
ホットプレート					●	●	●	●	●	●
食器洗い機				●	●	●	●	●	●	●
ポット									●	●
シュレッダー							●	●	●	●

(3) 経済性を考慮した回収品目選定時の環境性・経済性評価

制限された各ポテンシャル排出量における経済性に優れた製品群選定時の再資源強度密度・素材売却価格密度の算出結果を図 5.17 に示す。

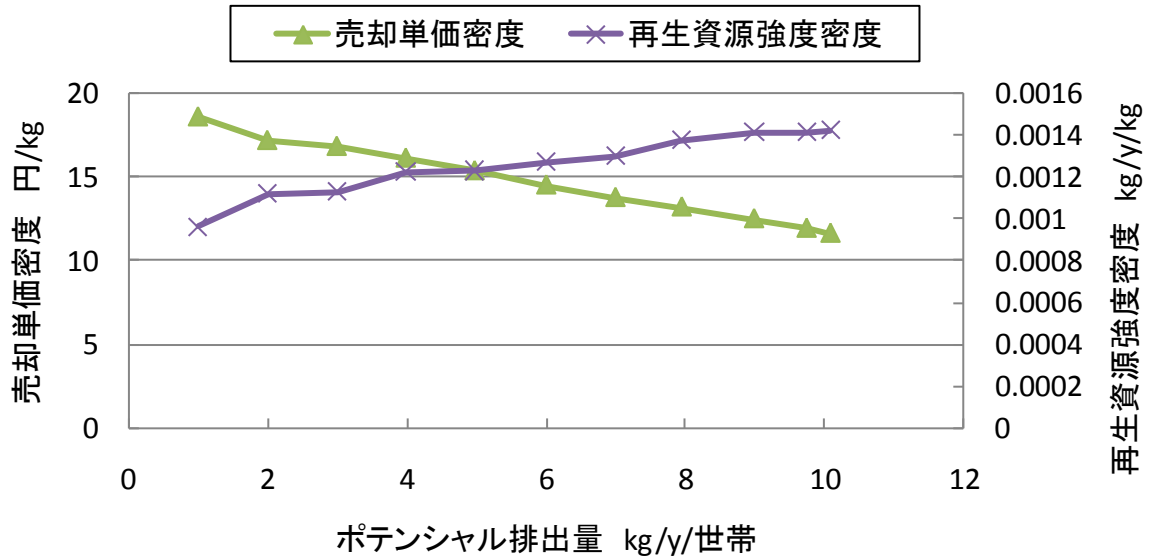


図 5.16 経済性を考慮した回収品目選定時の環境性・経済性評価

#### 5. 4. 6 環境性・経済性の両面を考慮した回収品目の選定

##### (1) 分析方法

環境性・経済性に優れた製品群を選定するため、一次式で表される制約条件下で、一次式で表される目的関数を最大または最小にする値を求める LP 分析を使用した。

具体的には、今回の制約条件式は主要製品 32 品目におけるポテンシャル排出量の合計が目的ポテンシャル排出量以下という条件下とした。以下に式を示す。

$$\sum_{i=1}^{32}(P_{ei} \times x_i) \leq P_{e目的} \quad (5.12)$$

ここで  $P_{ei}$  : 主要製品 32 品目内におけるある製品のポテンシャル排出量[kg/y/]

$x_i$  : 主要製品 32 品目内におけるある製品選定の有無

$P_{e目的}$  : 製品群のポテンシャル排出量の制限 (今回は 1~10kg で設定)

また、環境性・経済性の優位性を示す指標として両立性指数を式 (5.15) に示す。

$$IP_x = \frac{DP_x}{DP_{all}} \quad (5.15)$$

ここで、 $IP_x$ : ある製品群 X の売却価格指数

$DP_x$ : ある製品群 X の売却価格密度 [円/kg]

$DP_{all}$ : 主要製品群の売却価格密度 [円/kg]

$$IRI_x = \frac{DRI_x}{DRI_{all}} \quad (5.16)$$

ここで、 $IRI_x$ : ある製品群 X の再生資源強度指数

$DRI_x$ : ある製品群 X の再生資源強度密度 [kg/y/kg]

$DRI_{all}$ : 主要製品群の再生資源強度密度 [kg/y/kg]

$$C_x = IP_x \times IRI_x \quad (5.17)$$

ここで、 $C_x$ : ある製品群 X の環境性・経済性両立性指数

今回は環境性・経済性の両面から優れた製品群を選定したいので式 5.17 を目的関数として LP 分析を実施し、条件に当てはまる  $x_i$  の組み合わせの感度分析を行った。

##### (2) 環境性・経済性の両面を考慮した回収品目の選定

上述により、制限されたポテンシャル排出量での環境性・経済性の両面において優位な製品選定を実施した。ここで制限された各ポテンシャル排出量における製品選定結果を表 5.19 に示す。



表 5.19 環境性・経済性の両面を考慮した回収品目の選定

ポテンシャル排出量制限 kg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ビデオテープレコーダー			●	●	●	●	●	●	●	●
MDレコーダー						●	●	●	●	●
DVDレコーダー	●		●	●	●	●	●	●	●	●
DVDプレーヤー		●	●	●	●	●	●	●	●	●
ラジカセ								●	●	●
スピーカー										
FAX						●	●	●	●	●
プリンター									●	●
テレビゲーム						●	●	●	●	●
扇風機							●	●	●	●
空気清浄機									●	●
除湿機					●	●	●	●	●	●
こたつ									●	●
電気毛布										
電気ストーブ				●	●	●	●	●	●	●
温水洗浄便座										●
体重計	●		●	●	●	●	●	●	●	●
掃除機				●	●	●	●	●	●	●
布団乾燥機			●			●	●	●	●	●
換気扇										●
アイロン							●	●	●	●
ミシン					●	●	●	●	●	●
電子レンジ		●	●	●	●	●	●	●	●	●
炊飯器								●	●	●
ホームベーカリー	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
電気トースター	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
コーヒーメーカー										●
ミキサー										
ホットプレート					●	●	●	●	●	●
食器洗い機				●	●	●	●	●	●	●
ポット									●	●
シュレッダー							●	●	●	●

(3) 環境性・経済性の両面を考慮した回収品目選定時の環境性・経済性評価  
 制限された各ポテンシャル排出量における環境性・経済性の両面に優れた製品群選定時の再資源強度指数・売却価格指数の算出結果を図 5.18 に示す。ここで例えば、自治体が 3kg/y/世帯の量が収集可能であると仮定したとき、環境性・経済性の両面を考慮に入れた製品選定は表 5.20 の項目となる。このように事前に得られる情報から、環境性・経済性の両面から優先的に回収すべき製品群を検討することが可能となる。

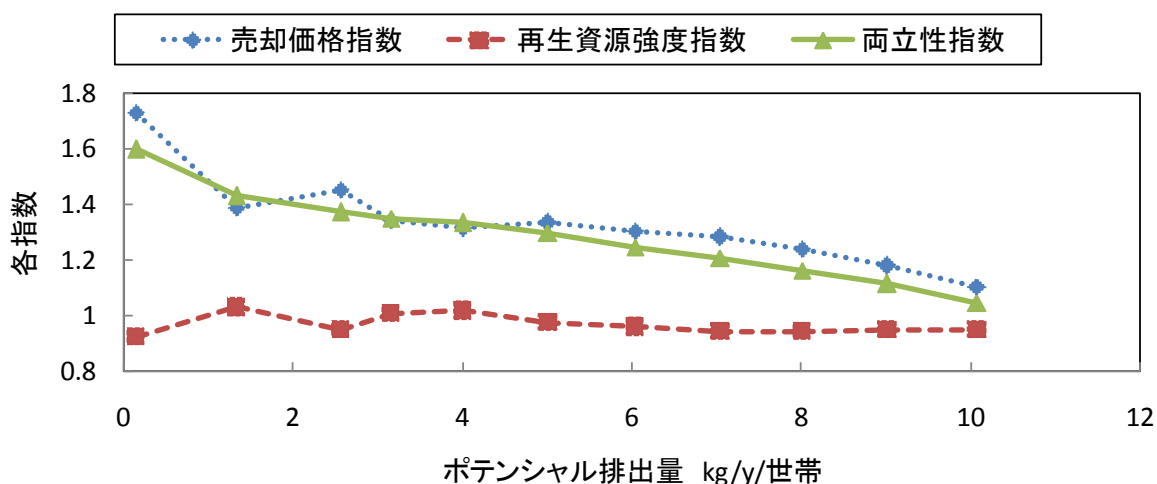


図 5.17 環境性・経済性の両面を考慮した回収品目の環境性・経済性評価

表 5.20 ポテンシャル排出量 3kg/y/世帯で優先的に収集すべき製品群

ビデオテープレコーダー	布団乾燥機
DVD レコーダー	電子レンジ
DVD プレーヤー	ホームベーカリー
体重計	電気トースター

### 5. 5 まとめ

埼玉県における使用済み小型家電の実証試験を通して、そのリサイクルプロセスの設計手法の構築を行った。以下に得られた結果を示す。

- ・ 埼玉県下の複数の自治体で回収された小型家電を対象に、高度なりサイクルプロセスを有する民間施設で再資源化処理を行った結果、乾式選別施設で処理する方法が有効であることを示した。
- ・ DfE 定量評価データベースとリサイクルプロセスを経て回収される資源との関連性を分析し、DfE 定量評価データベースに搭載されている情報から、収集回収品目を検討可能な設計手法の構築を行った。
- ・ 処理プロセス後における各製品の素材売却価格と再生資源強度を算出し、MD レコーダーのようにポテンシャルに対して大きく減少する製品や、

ホームベーカリーのように減少が少ない製品等，製品間で傾向の違いがあることがわかった．

- 資源価格変動に対する収支の関係を考察し，想定量として家庭から排出される量を条件として設定し，価格両立性指数の最大値を算出することで，価格変動に強い製品群の選定手法を構築した．
- 処理コストに対する収支の関係を分析し，全製品を対象に処理した場合，利益を得るためには約 26%の処理コスト削減が必要であることを示した．
- 回収した資源の経済性を表す売却価格と環境性を表す再生資源強度を考慮した環境性・経済性両立指数について，想定量として家庭から排出される量を条件として設定し，その最大値を算出することで，環境性・経済性を両立させる製品群の選定手法を構築した．
- DfE 定量評価データベースを活用した回収品目の選定手法について，使用済み小型電子機器再資源化促進法における自治体での活用方法を示した．

## 第 6 章

### 結論および今後の展望

第 6 章 結論および今後の展望.....	1
6. 1 結 論.....	6-1
6. 1. 1 DfE 定量評価データベースの構築とその解析.....	6-1
6. 1. 2 家電製品の DfE の定量評価とその類型化による設計改善策の提案.....	6-1
6. 1. 3 大型家電のリサイクルプロセスの環境性・経済性評価 ～使用済み冷蔵庫を中心として～.....	6-2
6. 1. 4 小型家電のリサイクルプロセスの設計手法の構築とその評価.....	6-3
6. 2 今後の展望.....	6-4
6. 2. 1 DfE 定量評価データベースの拡充について.....	6-4
6. 2. 2 DfE 定量評価データベースと DfE 評価結果の利用方法について.....	6-6
6. 2. 3 研究成果の社会システムへの適用について.....	6-10
図 6.1 八潮市の処理プロセス.....	6-5
図 6.2 データベースの高度利用に向けた今後の展開.....	6-6
図 6.3 社会システムへの還元.....	6-8
図 6.4 グリーンポイントシステム.....	6-9
図 6.5 社会システムと環境情報連携.....	6-9
図 6.6 研究成果の社会システムの適用イメージ.....	6-10

## 第 6 章 結論および今後の展望

### 6. 1 結 論

本研究はまず、幅広い家電製品の DfE を評価するために、DfE 定量評価データベースのコンセプトを明確にし、その構築を行った。また、そのデータベースを活用した家電製品の DfE の定量評価によって、製品を類型化することで、取るべき対策を明らかにした。さらに、大型家電と小型家電を対象に、そのリサイクルプロセスを環境性・経済性の両面から設計できる手法の開発を行った。大型家電では、既存のリサイクルプロセスの効率化の検討を中心に、大型家電の混合処理についても検討した。一方、小型家電では、製品回収ルートが構築されていないことから、埼玉県における資源回収実験の結果とデータベースを組みわせることで、回収品目の選定手法を提示した。

以下に本研究で得られた知見を整理する。

#### 6. 1. 1 DfE 定量評価データベースの構築とその解析

環境配慮デザインの定量評価に必要となる「DfE 定量評価データベース」のコンセプトを提示し、家電製品の解体を中心とした情報収集によりデータベースを構築するとともに、その解析及び活用方法を示した。以下に得られた結果を示す。

- ・ 環境配慮デザインの中における、リユース・リサイクルへの対応として求められる製品の易解体性とライフサイクル全般の環境負荷を評価するために必要となる情報をデータベース化する「DfE 定量評価データベース」のコンセプトを提示した。
- ・ 分解性評価指数 DPI と環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA の考え方を導入し、企画・設計段階で入手可能な情報で構成された DfE 定量評価データベースを構築した。各家電製品を手解体することで情報を入手し、89 品目、300 製品のデータを搭載した。
- ・ 家電製品を構成する素材構成や部品の結合方法などに着目した DfE 定量評価データベースの解析を行い、各種家電製品の DfE の動向や特徴を示した。
- ・ DfE 定量評価データベースの活用方法として、家電製品の解体フローと連携したリサイクルプロセスの設計への応用事例を示した。
- ・ 構築したデータベースに搭載された家電製品の素材構成に着目したクラスター分析を行い、今後のデータベースの拡充方針を示した。
- ・ データベースの拡充方法として、研究室で従来から行っている各種家電製品の解体に加えて、自治体の小型家電のリサイクルプロセスからのデータ取得を提案し、今後の展望を示した。

#### 6. 1. 2 家電製品の DfE の定量評価とその類型化による設計改善策の提案

家電製品の DfE の定量評価を通して、家電製品を類型化するとともに、デジ

タルカメラを例にした DfE 向上のための設計改善策を提案した。以下に得られた結果を示す。

- ・ 製造時と使用時の環境負荷に着目し、大型家電と小型家電(生活家電系)は使用時の環境負荷が多くを占めることから、「省エネ設計や省エネに関する積極的な情報公開が望まれる製品群」であり、また、小型家電(デジタル機器)は製造時の環境負荷が多くを占めることから、「3R へ配慮した設計や使用済み製品の積極的回収が望まれる製品群」であることを示した。
- ・ 製造時の物質投入における希少金属の環境負荷に着目し、希少資源の占める割合が高い「PC や薄型テレビ」は易解体性の向上が特に必要であることを示した。さらに、「家に保管されていることの多い旧型のモバイル機器」も希少資源の割合がある程度高いことから、収集回収の仕組み作りが必要な製品群であることを示した。
- ・ DfE がリサイクルプロセスに与える影響に着目し、デジカメ、ドライヤー、冷蔵庫は、複合材の減少や表示なしプラを表示化することが設計段階で有効であることを示した。また、デジカメ、携帯、プラズマテレビは基盤などを回収すべき製品群であることを示した。さらに「携帯電話やハンドクリーナー、ハンドマッサージャー、空気清浄機、アイロン」といった製品群は表示ありプラの割合が高く積極的に手回収することが有効であることを示した。
- ・ 希少金属の環境負荷が高いデジタルカメラを例に取り上げ、各部品を取り出すまでの時間と再生資源強度の関係について分析を行うとともに、その解体フローから点在している基盤の偏在化の設計改善策を提案した。

### 6. 1. 3 大型家電のリサイクルプロセスの環境性・経済性評価

#### ～使用済み冷蔵庫を中心として～

収集回収ルートが確立されている大型家電のリサイクルプロセスの設計の検討にあたり、冷蔵庫を取り上げて、その環境性・経済性の評価を行った。また、DfE 定量評価データベースを活用し、大型家電を混合処理するリサイクルプロセスの環境性・経済性評価を行った。以下に得られた結果を示す。

- ・ 冷蔵庫のリサイクルプロセスを対象に、手解体プロセスを積極導入した場合と指定回収物の回収を中心とした場合のケーススタディを行い、環境性・経済性を定量的に評価した。その結果、手解体プロセスを積極導入する場合、指定回収物の回収を中心とした場合と比べ、資源売却収入が3倍程度になるが、人件費も3倍程度かかることから、結果的には冷蔵庫1台あたりの収益が約600円程度低いことがわかった。
- ・ DPI を応用することでリサイクルプロセスの設計改善策を検討した。本体切断機前手解体工程、扉解体工程、本体切断機後手解体工程の順に工程を省略することが有効であることを示した。特に本体切断機後手解体

工程を省略すると損益が他のリサイクルプロセスを上回る試算結果となった。一方で、扉回収工程とコンプ底板回収工程を省略すると経済性が悪化することを示した。

- ・ 冷蔵庫ではプラスチックが点在していることが特徴として挙げられることから、手回収するプラスチックの質量を 100g ずつ増やしたときの損益を評価し、庫内部品の平均質量に相当する約 400g 程度のプラのみを回収することが経済性が最も高くなることを示した。また、資源価格の変動を考慮した経済性評価を実施し、現状より 1.8 倍以上になると手解体プロセスの積極導入が有利となることを示した。
- ・ DfE 定量評価データベースを活用することで、冷蔵庫と洗濯機を同一プロセスで処理した場合の環境性・経済性評価を実施し、混合処理によって冷蔵庫の個別処理よりも環境性・経済性がともに向上することを示した。

#### 6. 1. 4 小型家電のリサイクルプロセスの設計手法の構築とその評価

埼玉県における使用済み小型家電の実証試験を通して、そのリサイクルプロセスの設計手法の構築を行った。以下に得られた結果を示す。

- ・ 埼玉県下の複数の自治体で回収された小型家電を対象に、高度なりサイクルプロセスを有する民間施設で再資源化処理を行った結果、乾式選別施設で処理する方法が有効であることを示した。
- ・ DfE 定量評価データベースとリサイクルプロセスを経て回収される資源との関連性を分析し、DfE 定量評価データベースに搭載されている情報から、収集回収品目を検討可能な設計手法の構築を行った。
- ・ 処理プロセス後における各製品の素材売却価格と再生資源強度を算出し、MD レコーダーのようにポテンシャルに対して大きく減少する製品や、ホームベーカリーのように減少が少ない製品等、製品間で傾向の違いがあることがわかった。
- ・ 資源価格変動に対する収支の関係を考察し、想定量として家庭から排出される量を条件として設定し、価格両立性指数の最大値を算出することで、価格変動に強い製品群の選定手法を構築した。
- ・ 処理コストに対する収支の関係を分析し、全製品を対象に処理した場合、利益を得るためには約 26% の処理コスト削減が必要であることを示した。
- ・ 回収した資源の経済性を表す売却価格と環境性を表す再生資源強度を考慮した環境性・経済性両立指数について、想定量として家庭から排出される量を条件として設定し、その最大値を算出することで、環境性・経済性を両立させる製品群の選定手法を構築した。
- ・ DfE 定量評価データベースを活用した回収品目の選定手法について、使用済み小型電子機器再資源化促進法における自治体での活用方法を示した。



## 6. 2 今後の展望

### 6. 2. 1 DfE 定量評価データベースの拡充について

本研究で構築した「DfE 定量評価データベース」は、幅広い家電製品を対象に、設計・企画段階で得られる情報で DfE の定量評価が可能な分解性評価指数 DPI と環境効用ポテンシャル評価手法 E2-PA の活用を前提に、その評価に必要な情報がデータベース化されている点に特徴がある。すなわち、特定の製品やメーカーに限定されず、異なる製品間、異なるメーカー間という横断的な視点で、環境配慮デザインの定量評価が可能である。現時点で、89 品目 300 製品のデータが搭載されているが、高度利用に向けて今後も拡充を行う。製品の設計情報の収集は、自治体との連携と研究室での継続的なデータ収集を行なう。

自治体に処理施設の見学を通して、その可能性について検討した。その結果、埼玉県八潮市の破碎処理施設との連携は可能性があることがわかった。以下、八潮市の破碎処理施設における、家電製品の処理について述べる。

図 6.1 は八潮市の破碎処理施設における家電製品の処理フローを示したものである。金属類、せともの類、小型電気製品（1m 四方以下もしくは 10kg 以下）は不燃ごみとして収集回収され、破碎処理施設に搬入される。その後、手選別工程において、小型電気製品とそれ以外に選別される。選別された個が電気製品は、直接破碎されずに、手解体工程へと移る。なお、このとき、製品としてそのまま有価で売却できる、携帯電話、デジタルカメラ、ビデオカメラ、携帯ゲーム機、電卓等のデジタル小型家電は、手解体されず、直接業者へ売却される。これ以外の小型電気製品は手解体され、表 6.1 に分別される具体的な製品部品を示す。このとき、DfE 定量評価データベースの項目と類似性がある点に注目する必要がある。すなわち、自治体の破碎処理施設において、データベースへの搭載に必要な項目の一部を取得できるという点である。一方で、この情報以外にも、データベースへ搭載するにあたっては必要である。特に、製品解体から史取得すべき情報として、「製品情報」「結合方式・使用工具」があげられる。現場の作業員にこの情報を取得してもらうことも、一つの方法としては考えられるが、オペレーションを考慮すると、作業負荷が高まることから、現実的ではない。そこで、処理工程にカメラを設置し、製品ラベルの撮影や解体方法の取得を行うことが想定される。

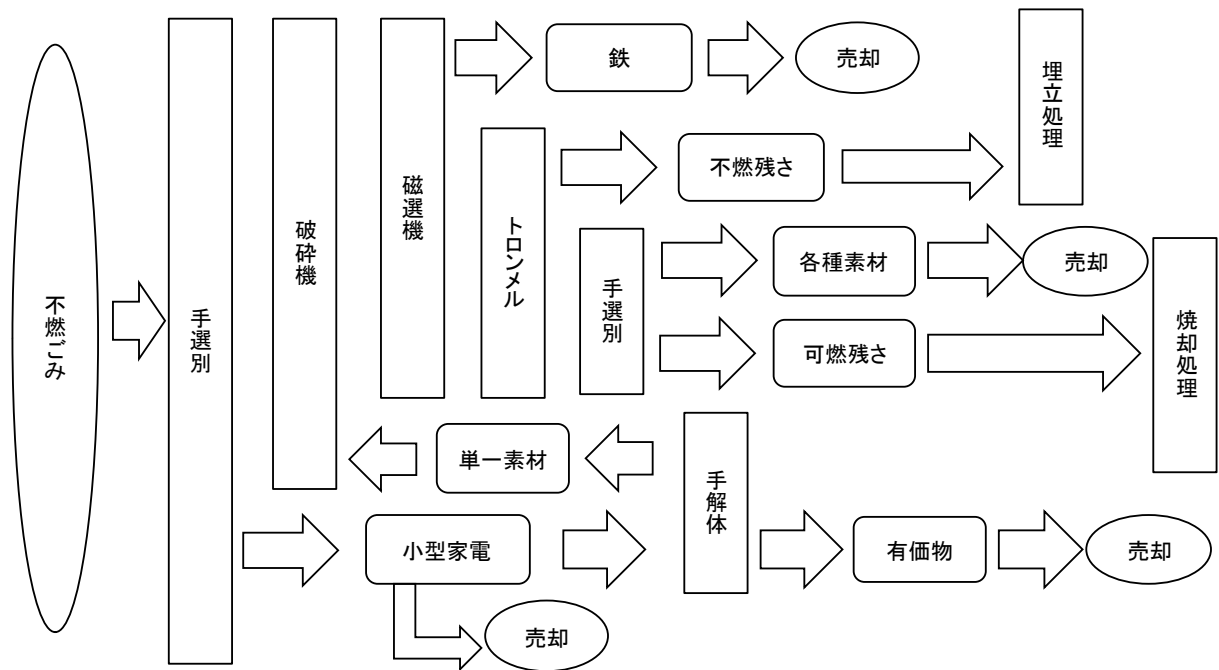


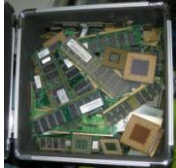







図 6.1 八潮市の処理プロセス

表 6.1 八潮市処理フローから分別される製品部品具体例

名称	HDD	基板	CPU	真鍮
写真				
名称	コイル	モーター	熱交換器	ACアダプター
写真				

また、第5章で示した小型家電の回収製品の検討において、施設での投入・回収物の関連性を示しているが、それについては、今後も継続的なデータ収集を行い、さらに、新たな破碎選別技術についても情報取得していくことで、リサイクルプロセスの設計支援を高度化できることから、実験を展開していく。

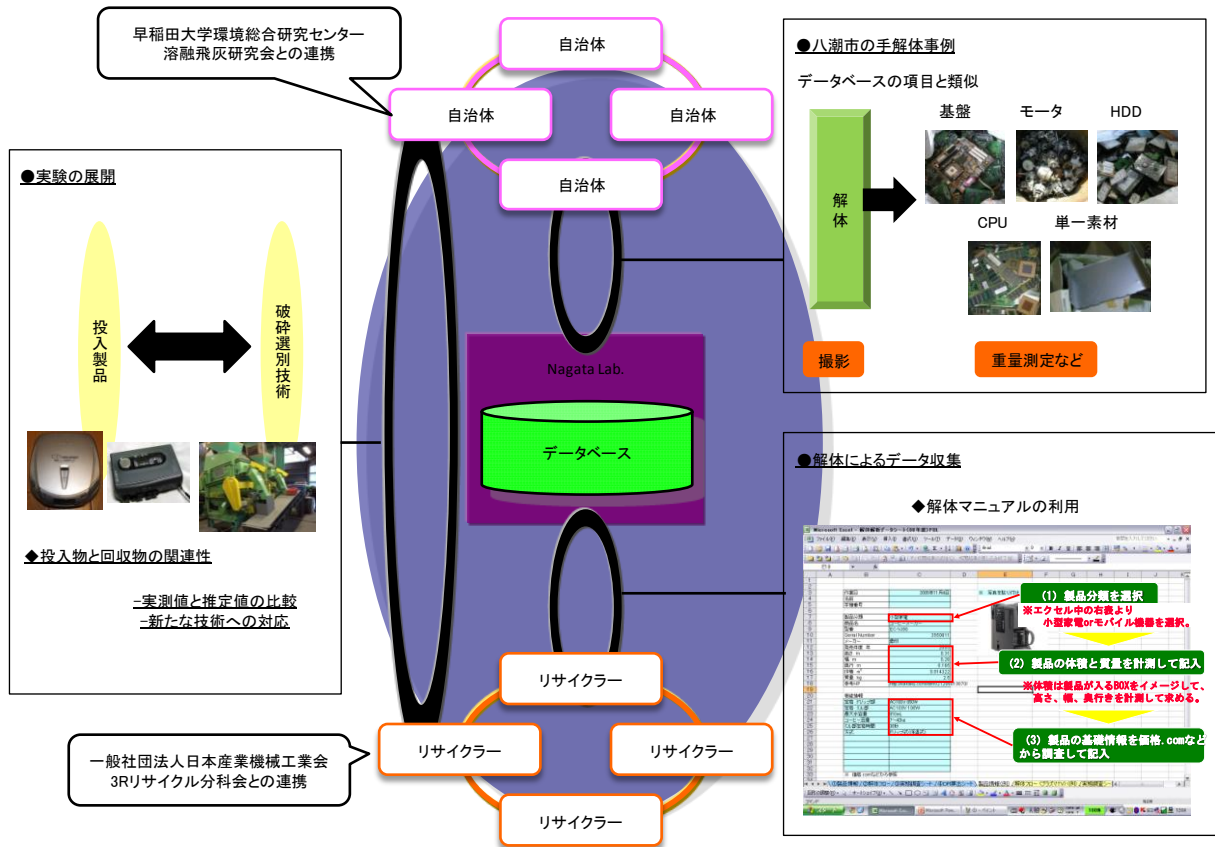


図 6.2 データベースの高度利用に向けた今後の展開

## 6. 2. 2 DfE 定量評価データベースと DfE 評価結果の利用方法について

### (1) メーカーとしての利用方法

先に述べた通り、DfE 定量評価データベースは製品の企画・設計段階の情報をデータベース化したものであり、製品の企画・設計段階において、開発した製品の環境配慮デザインを定量的に評価し、製品設計へフィードバックしていくことが望まれる。このとき、DfE 定量評価データベースには、開発しようとする同一品目の他社データ・自社データが搭載されており、開発のベンチマークとして利用できる。このように、自社製品を客観的に評価する活用方法が考えられる。

### (2) 販売店としての利用方法

メーカーにおいて、環境配慮デザインが取り入れられた製品の開発を促進していくには、環境配慮型製品を普及させていく必要がある。このとき、消費者と直接接する販売店が担う役割は大きい。すなわち、環境配慮が製品に関する情報提供を消費者に行うという役割である。既存の例としては、環境配慮デザインの一要素である「省エネルギー設計」について、省エネラベル等で情報提供が行われている。幅広い製品を対象に構築している DfE 定量評価データベースを販売店が利用することで、店舗に展示されている製品に導入された環境配慮デザインの効果を比較表として提供することが可能であり、消費者の製品選択時の判断基準の一つとして情報提供していくことが望まれる。

また、第 2 章では、DfE の定量評価を通じた類型化によって、各種製品に求

められる DfE の特徴について述べた。消費者が製品購入後に留意すべき点を情報提供することも可能である。例えば、使用時と製造時の環境負荷に着目した類型化からは、省エネルギーを意識した利用方法が求められる製品群と使用済みとなった後の適切な廃棄・排出が求められる製品群を明らかにしている。こういった情報を、製品の購入時に情報提供することで、消費者において、製品に導入された環境配慮デザインの効果を引き上げていくことが期待される。

### (3) 消費者としての利用方法

消費者においては、(2) で述べたように、製品の特性を理解した、製品の利用方法や適切な廃棄・排出への対応を取ることが可能である。一方で、消費者においては、製品の利用方法がそれぞれ異なるという点に注意が必要である。DfE 定量評価データベースでは、「データベース化された情報に基づき、製品の企画・設計段階にとどまらず、製品のライフサイクル全般に関わる関係主体向けに必要な情報である環境性・経済性評価に活用できる情報がデータベース化されていること。」をコンセプトの一つとしている。しかし、各種製品に求められる環境配慮デザインを定量化していく際には、利用段階の情報、すなわち使用時間等は「一般化」された数値を用いている。逆に言えば、この利用段階の情報をパラメータとして捉えれば、消費者それぞれに対応した評価を行うことができる。今後、WEB 等、消費者がアクセスしやすいツールを準備することで、消費者自身の製品の利用方法を反映した評価が可能となる。すなわち、利用者自身がその時々によって利用シーンを想定した最適な利用方法を考えていくことができる。さらに、近年のネットワーク技術の向上に伴い、製品単体ではなく、それらを組み合わせた「製品システム」として利用形態へと変化してきている。ペーパーレス会議などはその典型的な事例である。こういった、製品システムの評価への対応も上記ツールには求められていくこととなる。

現状の「DfE 定量評価データベース」は、製品単体の環境配慮デザインを定量評価することを前提に構築されているが、今後は利用シーンを想定した環境配慮デザインを定量評価できる方向へと進化させていく必要がある。

### (4) リサイクラーとしての利用方法

リサイクラーには、資源回収率の向上という環境性と、リサイクル費用の低減という経済性の両側面からのリサイクルプロセスの効率化が求められる。特に、環境性という観点で事前手解体工程の導入が有効であるが、一方で、人件費の上昇など、経済性の側面ではマイナスに働きやすい。第 4 章で示した冷蔵庫のリサイクルプロセスの効率化に関する検討では、DfE 定量評価データベースを用いて、手解体工程の導入による環境性・経済性に関する検討を行った。この結果、過剰な手解体工程の導入は、経済性でマイナスに働く一方で、ある程度の手解体工程の導入は、経済性を向上させることもわかった。このように、DfE 定量評価データベースを用いることで、リサイクルプロセスの改善が可能であることから、その活用が期待される。さらに、リサイクルプロセスの設計の自由度が高い段階、すなわち、設備の設計や更新段階での活用が効果的である。

### (5) 社会システムにおける利用方法

本研究で対象とした製品の DfE 向上はメーカーに求められる事項である。一方で、積極的に DfE が製品に取り入れられたとしても、その情報が適切に社会システムに取り入れられなければ、その効果を十分に発揮することはできない。例えば、省エネルギー製品が開発されても、それを販売者が理解していなければ消費者に情報が十分にいきわたらず、結果としてその普及を促進することができない。また、解体性を向上した製品が開発されても、リサイクラーにその情報が共有化されなければ、これまで通りに直接破碎され、解体性向上の取り組みは無駄に終わる。このように、本研究で展開してきた定量的評価は、メーカーだけでなく、社会システムを構成する関係主体間で共有されることでその効果が増大する。

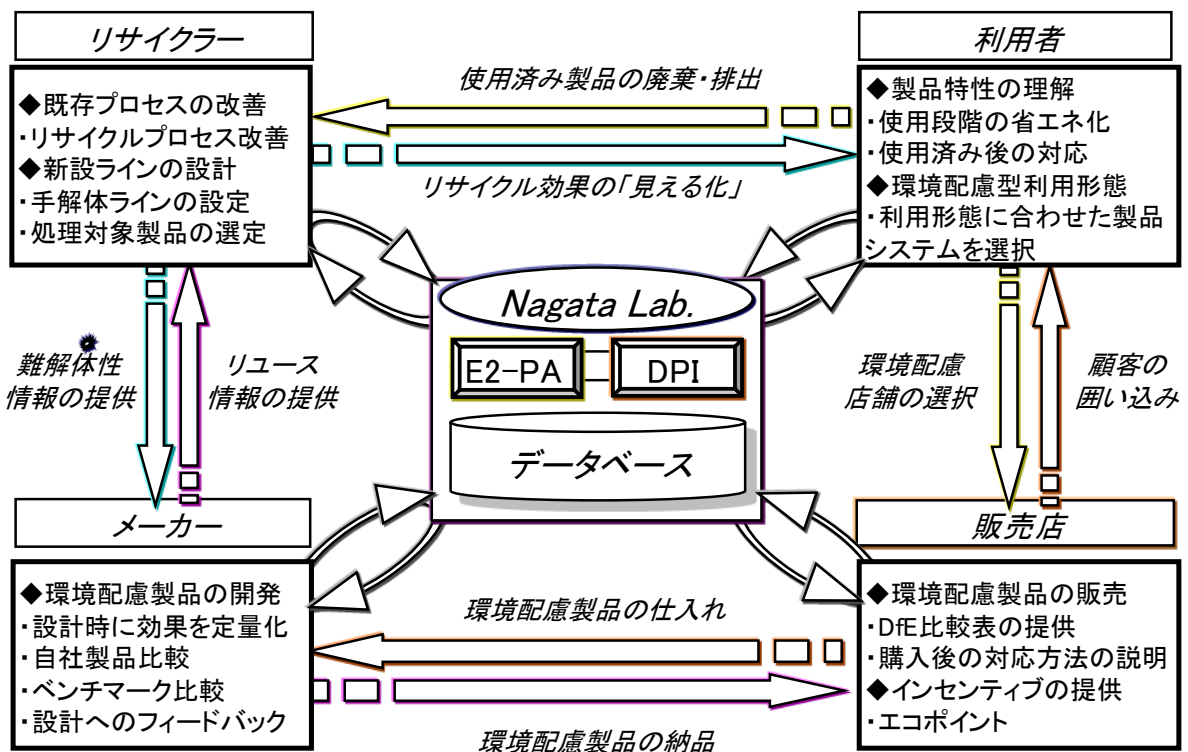


図 6.3 社会システムへの還元

ここで、早稲田大学永田研究室で構築された自動車リサイクル部品の CO2 削減効果をデータベース化し、同研究室を母体として出発した大学発ベンチャー企業である株式会社早稲田環境研究所がシステムの運営を行っている、自動車リサイクル部品 CO2 削減効果情報提供システム「グリーンポイントシステム」について述べる。グリーンポイントシステムは、自動車リサイクル部品として提供されている 475 品目、自動車アフターマーケットに流通している車輛のほぼ全車種に対応して、その CO2 削減効果を情報提供可能なシステムである。現時点で、約 400 の解体業者が本システムを利用しており、既存の自動車リサイクル部品流通システムを連携している。このように、社会システムとして存在する流通システムと連携することで、解体業者のみならず、自動車リサイクル

部品に関連する事業者との連携まで発展が期待されており，実証実験まで展開している．



図 6.4 グリーンポイントシステム

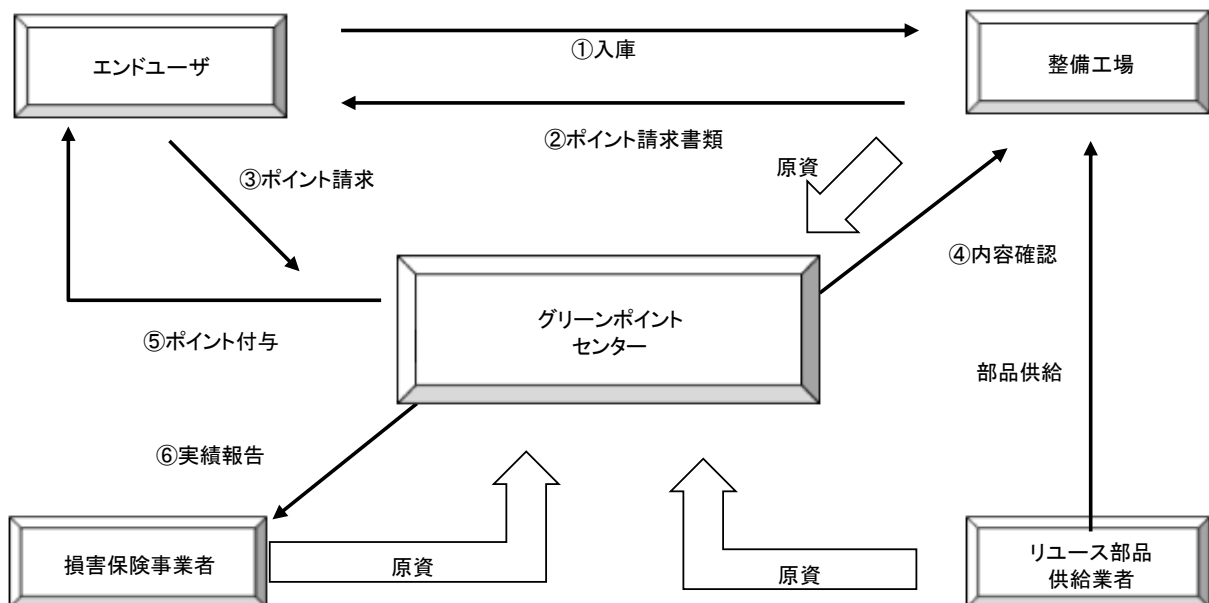


図 6.5 社会システムと環境情報連携



### 6. 2. 3 研究成果の社会システムへの適用について

前述の通り、DfE の定量評価情報などは、関係者間での情報共有が重要であるが、そのためには、既存の経済システムなどに、データベースの情報が組み込まれていくなど、既存の社会システムへの適応を通じて、その高度化を図っていくことが必要であり、その役割を担う機関が求められる。

筆者は早稲田大学発ベンチャー企業の経営者であり、本研究成果を社会システムに適用する役割を担っていると認識しており、それが経営の根底にある。本研究の成果、また、それ以外をも含めて、社会システムへの研究成果の適用、すなわち社会システムへの環境情報の融合を果たしていく。

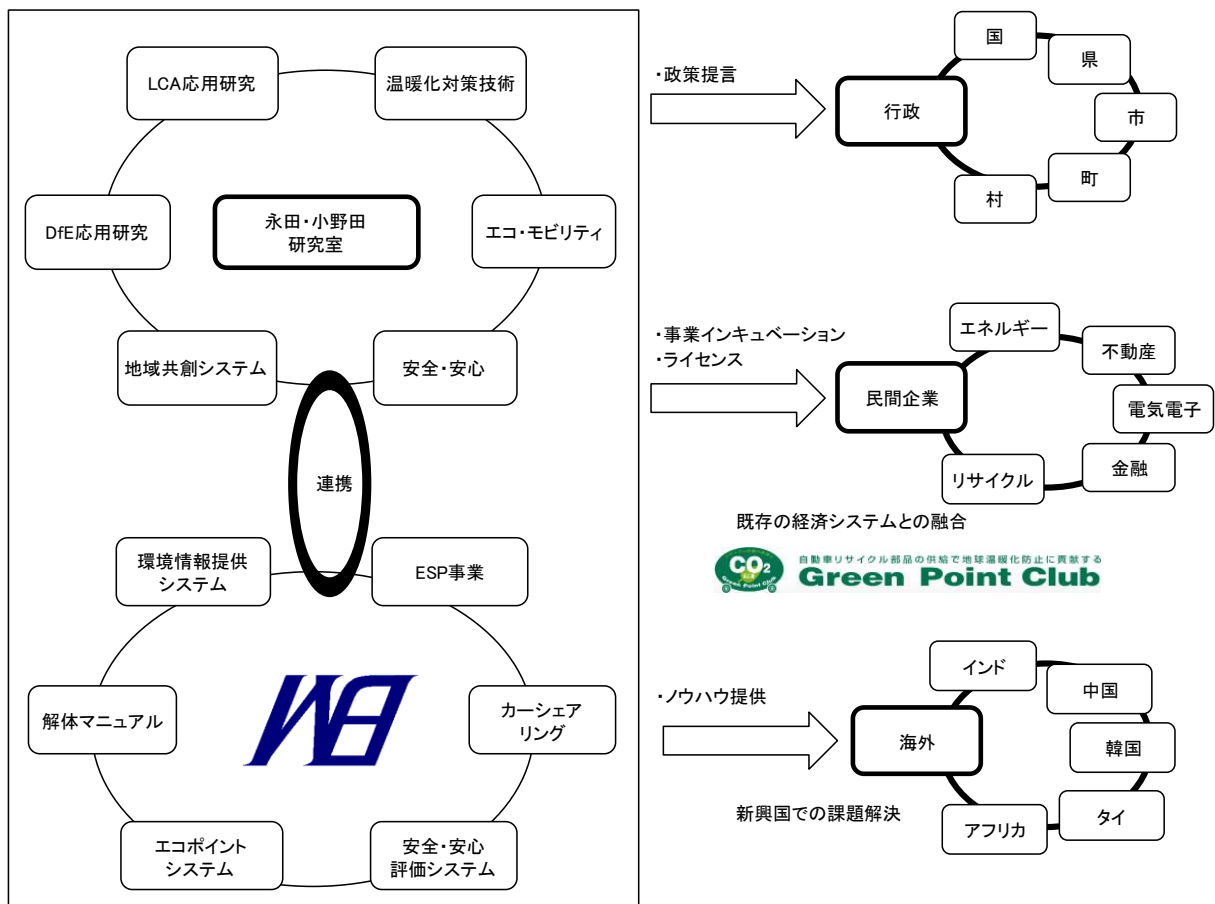


図 6.6 研究成果の社会システムの適用イメージ

## 参考文献

- 1-1) 厚生省、公害白書、昭和 46 年版
- 1-2) 功刀昭志、地球環境と企業活動、JEITA 講演資料
- 1-3) 環境省：循環型社会形成推進基本法の概要、  
<http://www.env.go.jp/recycle/circul/kihonho/gaiyo.html>、アクセス日 2012 年 9 月 19 日
- 1-4) 経済産業省資源エネルギー庁、省エネ性能カタログ、2012、5-6
- 1-5) 財団法人クリーン・ジャパン・センター、早わかり資源有効利用促進法、2001、26-29
- 1-6) JETRO、欧州製品環境規制（WEEE、RoHS）に対する各国の取り組み状況、2010、3-4
- 1-7) JETRO、エコデザイン（EuP）指令実施措置の現状、2009、2-4
- 1-8) 社団法人産業環境管理協会、欧州の新たな化学品規制（REACH 規制）に関する解説書、2008、2-5
- 1-9) 永田勝也、元田欽也、環境適合製品設計の手びき、(1998)、オーム社
- 1-10) 財団法人家電製品協会、家電製品アセスメントマニュアル概要版、平成 15 年、7-8
- 1-11) 大西宏、寺田貴彦、家庭電化製品に対する分解性評価方法の検討、National Technical Report, Vol.41-No.3, (1995), 285-289
- 1-12) 赤堀友彦、リサイクル性評価法の家電製品への適用事例、2008
- 1-13) Mark Goedkoop, Renilde Spriensma, The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Report (1999), Pre Consultants B.V.
- 1-14) 小林由典、産業関連分析に基づく温室効果ガス排出原単位の推計と製品 LCA への適用、2003
- 1-15) 田原聖隆、PRTR データの既存インベントリデータへの導入に関する検討、2007
- 1-16) 山末英嗣、使用済み家電製品からの素材リサイクルに伴う関与物質総量（都市功績 TMR）の推算と評価、2010
- 1-17) 産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会電気・子機器リサイクルワーキンググループ、家電リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書、2008
- 1-18) 財団法人家電製品協会、リサイクル料金一覧平成 24 年 4 月版
- 1-19) 天池恭子、小型家電のリサイクル促進に向けて、立法と調査、2012、58-62
- 1-20) みずほ情報総研株式会社、平成 23 年度我が国情報経済社会における基盤整備（小型家電のリサイクルに係る先進的取組事例の研究）調査報告書、2011、4-20
- 1-21) 羽田
- 1-22) 李博洋、家電リサイクル法施行前後における不燃・粗大ごみ資源化状況



## 参考文献

- に関する研究
- 1-23) 松尾雄一，使用済み家電混合プラスチックの狩野真吾，使用済み小型電気・電子機器の回収試験と回収マテリアルリサイクル技術，2009
  - 1-24) 小口正弘，製品特性に関する数量化分析を用いた電気・電子製品の平均使用年数の推定，2007
  - 1-25) 量評価，2009
  - 1-26) 相澤寛史、平井康宏、酒井伸一、日本における小型電気電子機器のリサイクル、廃棄物資源循環学会論文誌 Vol. 20 No. 6、2009、371- 382
  - 1-27) 村上進亮，携帯電話のフローとそこに含まれる金属の資源性，2009
  - 1-28) 永田勝也，分解性評価指数の開発，第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集、2004、439-442
  - 1-29) 永田勝也，小野田弘士，小野田哲也，高松優介，愛澤政仁，“環境効用ポテンシャル評価手法の開発とその応用”，第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集、2004、121-124
- 
- 2-1) 環境省：循環型社会形成推進基本法の概要、  
<http://www.env.go.jp/recycle/circul/kihonho/gaiyo.html>、アクセス日 2012 年 9 月 19 日
  - 2-2) 環境省：循環型社会形成推進基本法の概要、
  - 2-3) <http://www.env.go.jp/recycle/circul/kihonho/gaiyo.html>、アクセス日 2012 年 9 月 19 日地球温暖化対策推進法
  - 2-4) 経済産業省資源エネルギー庁、省エネ性能カタログ、2012、5-6
  - 2-5) Mark Goedkoop, Renilde Spriensma, The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Report (1999), Pre Consultants B.V.
  - 2-6) JETRO、欧州製品環境規制（WEEE、RoHS）に対する各国の取り組み状況、2010、3-4
  - 2-7) JETRO、エコデザイン（EuP）指令実施措置の現状、2009、2-4
  - 2-8) 永田勝也，分解性評価指数の開発，第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集、2004、439-442
  - 2-9) 永田勝也，小野田弘士，小野田哲也，高松優介，愛澤政仁，“環境効用ポテンシャル評価手法の開発とその応用”，第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集、2004、121-124
  - 2-10) 内藤博，坂本茂實，製品開発における環境影響評価（Ⅱ）（リサイクルリングに対する検討）製品廃棄物処理現場からみたパソコン製品設計の問題点，第 2 回廃棄物学会研究発表講演論文集，(1991)，113-116
  - 2-11) 弘重雄三，大橋敏二郎，有本象治，分解性評価法の開発，日本機械学会第 5 回環境工学総合シンポジウム講演論文集，(1995)，159-162
  - 2-12) 大西宏，寺田貴彦，家庭電化製品に対する分解性評価方法の検討，National Technical Report, Vol.41-No.3, (1995), 285-289
  - 2-13) Mark Goedkoop, Renilde Spriensma, The Eco-indicator 99 A damage oriented

- method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Report (1999), Pre Consultants B.V..
- 2-14) A. Braunschweig, Method For Ecobalance (Methodik Fur Oekobilanzen), (1998), Buwal Schriftenreihe Umwelt Nr 297.
- 2-15) Bengt Steen, A systematic approach to environmental strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics, (1999), CPM report
- 3-1) 大西宏, 家庭電化製品に対する分解性評価方法の検討, 1995
- 3-2) 赤堀友彦, リサイクル性評価法の家電製品への適用事例, 2008
- 3-3) フィンクベイナ
- 3-4) 小林由典, 産業関連分析に基づく温室効果ガス排出原単位の推計と製品 LCA への適用, 2003
- 3-5) 田原聖隆, PRTR データの既存インベントリデータへの導入に関する検討, 2007
- 4-1) 家電リサイクル法
- 4-2) 産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会電気・子機器リサイクルワーキンググループ、家電リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書、2008
- 4-3) 財団法人家電製品協会、リサイクル料金一覧平成 24 年 4 月版
- 4-4) 経済産業省、環境省：家電リサイクル法の概要、  
[http://www.meti.go.jp/policy/kaden\\_recycle/case2/case2\\_01.html](http://www.meti.go.jp/policy/kaden_recycle/case2/case2_01.html)、アクセス日 2012 年 9 月 10 日
- 4-5) 社団法人日本電球工業会、蛍光ランプ及び使用済み蛍光ランプに関する Q&A、2011、7
- 5-1) 天池恭子、小型家電のリサイクル促進に向けて、立法と調査、2012、58-62
- 5-2) 都市鉱山
- 5-3) みずほ情報総研株式会社、平成 23 年度我が国情報経済社会における基盤整備（小型家電のリサイクルに係る先進的取組事例の研究）調査報告書、2011、4-20
- 5-4) 独立行政法人天然石油ガス・金属鉱物資源機構、JOGMEC、レアメタルのリサイクルシステムの確立に向けて都市鉱山～廃棄物の山を資源に変えられるか？、JOGMEC NEWSvol.16、2009

## Appendix

## ＜分解性評価指数 DPI の概要＞

## 1. 分解性評価指数の定義

解体という作業は内容が異なる複数の作業により行われていることに着目し、解体工程を大きく4種類の作業に要する時間に分けて表現している。これに対応した分解性評価指数を式1に示す。

$$DPI = Dp + Dq + Dr + Ds \quad (1)$$

DPI : Disassembly Property Index (分解性評価指数)

Dp : 結合解除における分解性評価指数

Dq : 結合探索における分解性評価指数

Dr : 部品取り出しにおける分解性評価指数

Ds : 前準備における分解性評価指数

$$Dp = \sum p_i$$

$$Dq = m \times q$$

$$Dr = (n - 1) \times r$$

$$Ds = o \times s$$

m : 結合点数 [個]

n : 部品点数 [個]

o : 前準備点数 [個]

p : 各製品の平均結合解除時間に相当する指数 [/個]

q : 各製品の平均結合探索時間に相当する指数 [/個]

r : 各製品の平均部品取り出し時間に相当する指数 [/個]

s : 各製品の平均前準備時間に相当する指数 [/個]

各種製品の易解体性定量評価手法として分解性評価指数を提案しており。分解性評価指数の概要を以下に述べる。まず、分解性評価指数は、製品の易解体性を表す定量的データとして解体時間を取り上げ、その総解体時間が前準備時間・結合探索時間・結合解除時間・部品取り出し時間の4工程から成ると考え、それぞれの時間を指数化する手法を取る。それぞれの工程について詳しく述べると、1つの部品を解除するには、解体に取り掛かる前に準備を整え、その部品を結合している箇所を見つけ、それを解除する、という工程を繰り返し行い、その部品の結合がすべて解除されたらその部品を取り出す、という計4工程をその製品の全ての部品に対して繰り返し行うことで解体作業が完了するとしたものである。それぞれの工程に相当する時間を設計段階の情報から求めることができるように、分解性評価指数の計算式を式3.4.1に定めた。前準備における分解性評価指数Dsは解体に取り掛かる前の1動作を「前準備工程数：1」とカウントし、これに平均前準備時間に相当する前準備指数を乗じて算出する。結合探索における分解性評価指数Dqは、各製品における平均結合探索時間に相当する指数（結合探索指数q）に結合点数を乗じて算出する。結

## Appendix

合解除における分解性評価指数  $D_p$  は、各結合種類に定められる平均結合解除時間に相当する指数（結合解除指数  $p$ ）を結合点数分加算して算出する。部品取り出しにおける分解性評価指数  $D_r$  は、各製品における平均部品取り出し時間に相当する指数（部品取り出し指数  $r$ ）に[部品点数-1]を乗じて算出する。これら 4 つの値を合計することで、実解体時間を設計段階の情報から概算することができる。また、部品点数・結合点数・結合種類の変更が及ぼす解体時間への影響を例え相対的にし、定量的に評価することもこの分解性評価指数の目的である。

### 2. 用語の定義

分解性評価指数の定義に用いる用語の定義について整理する。

#### (1) 結合点数

例をいくつか挙げる。ネジが 1 本固定されている場合、スナップフィットが一つある場合、それを解除したときの結合点数を「1」とカウントする。設置の場合は結合箇所がないので、結合点数は「0」とカウントする。

結合点数は結合解除指数と結合探索指数と掛け合わせて分解性評価指数を算出する。結合探索指数の算出式の作成に利用する。

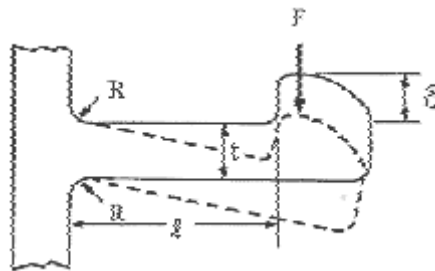


図 1 スナップフィットの例

#### (2) 部品点数

製品を部品あるいは素材別に分離するまでを解体と定義しており、ここでの部品点数のカウント方法は解体して部品あるいは素材別に分離した状態をいう。区別すべきことは、例えばプリント基板に加工された細かな電子部品を部品点数とカウントしないことである。具体的な部品を例に挙げると、モータは基本的にステータとロータからなるが、これらが圧着され手解体できない場合は部品点数「1」とし、ネジを外して分離可能な場合は部品点数がステータとロータで「2」とカウントしている。

部品点数は質量で割ると平均部品質量となり、平均部品取り出し時間と関係する。平均部品質量は部品取り出し指数と掛け合わせて分解性評価指数を算出する。また、部品点数は結合探索指数の算出式の作成に利用する。具体的には重回帰分析の際の説明変量とする。

#### (3) 質量

質量とは、製品の重量のことをいう。製品の仕様にある重量かまたは電子天秤で計測する。部品 1 つの質量も計測し 3R 配慮性に関する調査に用いる。

質量は平均部品質量を算出し、平均部品取り出し時間と関係する。平均部品質量は部品取り出し指数と掛け合わせて分解性評価指数を算出する。また、質量は結合探索指数の算出式の作成に利用する。具体的には重回帰分析の際の説明変量とする。

#### (4) 容積

容積は製品の外形寸法のことをいう。製品の仕様にある外形寸法かまたは製品がすっぽり覆われるような立方体を想定し、長さを計測して算出する。

質量は結合探索指数の算出式の作成に利用する。具体的には重回帰分析の際の説明変量とする。

#### (5) 平均結合解除時間

1つの工程の結合解除時間の平均のことをいう。具体的には、ネジにドライバと取り付けてからまわし、取り外すまでの時間の平均値である。

使用工具と結合種類の組み合わせにより分類する。例えば、はめ込みでも素手と工具があり、その平均結合解除時間が異なる。このような時間による分類を行い、結合解除指数の開発に用いる。

#### (6) 平均結合探索時間

製品全体の結合探索時間を結合点数で叙したものである。結合探索指数の算出式の作成に用いる。具体的には重回帰分析の際の目的変量とする。式の作成には製品種類ごとの平均結合探索時間を用いる。

#### (7) 平均部品取り出し時間

製品全体の部品取り出し時間を部品点数で叙したものである。平均部品質量との関係から、部品取り出し指数の算出式に用いる。

#### (8) 結合方法

結合を大きく7種類に分類する。ネジ類、はめ込み、接着、コネクタ、設置、配線固定、輪留め具である。表1に記号と結合方法の分類をまとめる。

表1 結合方法の分類

記号	結合方法の分類	説明
A	ネジ類	プラスドライバ、ボルト、ナットなど
B	はめ込み	スナップフィット、かぎ爪など
C	接着類	接着テープ、接着剤など、 半田付けされた配線の切断
D	コネクタ	プラグ端子など
E	設置	(例) 冷蔵庫の製氷機・卵受け皿 掃除機の内部フィルタ

F	配線固定	-
G	輪留め具	-

### 3. 結合解除指数

表 2 に示す工具のように、以前はネジ類、はめ込み類、接着類などのように結合方法に基づいて対応する指数を決定していたが、結合解除時間は、同じ結合方法でも使用する工具によって大きく異なることから、使用する工具によっても分類可能であるような指数化の方法を検討した。対象を拡張していくことによって、分類数は増えていくものと予想されるが、解体試験の経験上、現段階で分類が必要と思われる結合方法及び使用工具は、表 3.4.3 に示すとおりである。

この 31 種類すべてに結合解除指数を定めると、例えばネジだけで 10 種類になってしまう。これでは、汎用性が失われるので、ここからさらにある程度のグループ分けを行うことが望ましいといえる。例えば、どの製品にも頻繁に使われている組み合わせの結合であれば単独で結合解除指数を持ってもよいが、滅多に使われない結合に 1 つ 1 つ結合解除指数を与えるのは、やはり汎用性の面で問題であろう。したがって、頻出の結合種類にはそれぞれ結合解除指数を与え、そうではない結合種類はある程度まとめて指数を与える方法を取ることとする。

結合解除指数  $p_i$  は、同表の結合方法と使用工具を組み合わせ、グループ化し、そのグループごとに対応する平均結合解除時間を割り当てることによって行う。当然ながら、同表における結合方法と使用工具の全ての組み合わせが存在するわけではなく、現段階で判明している組み合わせは、表 3.4.4 に示す 18 通りである。ここに定義した各結合種類の平均結合解除時間が、結合解除指数  $p_i$  となる。従来は、最長結合解除時間の 1/2 の値を結合解除指数としたが、利便性・簡便性を考慮し、平均結合解除時間を  $p_i$  と定義した。

結合方法のクリップ (B、p、結合解除指数：1.5) は第 9 章の HEV バッテリーの一次解体より定義した。

表 2 結合方法と使用工具

記号	結合方法	記号	使用工具	記号	使用工具
A	ネジ類	a	ドライバ (+、-)	i	特殊ドライバ
B	はめ込み	b	素手	j	ハンマ
C	接着類	c	ハサミ・ニッパ	k	アタックドライバ
D	コネクタ	d	六角レンチ	l	ギアプラ
E	設置	e	ラジオペンチ	m	スナップリングプライヤ
F	配線固定	f	スパナ	n	パイプレンチ
G	輪留め具	g	ラチェット	o	電動工具
		h	モンキレンチ	p	クリップ

表 3 結合方法と使用工具の組み合わせ

結合方法		使用工具
A	ネジ類	a+, b, c, d, f, g, h, i, j, k, n, o
B	はめ込み	a-, b, c, e, i, j, l, p
C	接着類	a-, b, c, e, j
D	コネクタ	a-, b, c, e
E	設置	b
F	配線固定	b, e
G	輪留め具	a-, m

表 4 設計情報による結合解除指数の割り当て

結合方法	使用工具	設計情報から得られる 結合解除方法	結合解除指数
ネジ	A, +b, i	十字穴ネジ、 素手で解除可能なネジ	10
	d	六角穴ネジ	14
	f, g, h	六角ボルト	30
	j, k, n	固いネジ	55
	o	電動工具	1.5
はめ込み	b	素手	2
	a-, c, e, i, j	工具	7.5
	l	ギアブラ	71
	p	クリップ	1.5
接着類	b	素手	3
	c	切断	1.5
	a-, e	工具	13
コネクタ	b	素手	2.5
	a-, c, e	工具	12
設置	b	素手	0
配線固定	b	素手	3.5
	e	工具	42
輪留め具	a-, m	工具	21.5

## (1) 結合に時間要した箇所の定義

結合解除指数の定義を行ったが、解体試験の経験からこの定義では実解体時間を反映しきれない結合箇所も少なからず存在する。そこで、そのような結合をすべて集計し、結合種類と時間のかかった原因により分類を行い、それぞれの分類の中での平均結合解除時間を求めて結合解除指数を表 3.4.5 に定義した。

表 5 結合に時間要した箇所の定義

結合方法	使用工具	定義した結合解除指数	要因
ネジ類	十字穴ネジ	40	ネジの錆び付き 安全を考慮した 高い締め付けトルク
	六角穴ネジ	84	
	六角ボルト	90	
はめ込み	素手	60	視認性の悪さ
	工具	75	
接着	素手	63	掴み代がない、 接着面積：20 cm <sup>2</sup> 以上 接着長さ：10 cm 以上
	工具	65	
コネクタ	素手	60	40 芯 IDE ケーブル 内蔵ドライブ用電源コネクタ ATX メイン電源コネクタ
輪留め具	工具	64.5	適当な工具がない

## (2) 同一の結合方法・使用工具、結合方向の定義

ナットを電動工具で複数解除する場合（第 9 章 HEV バッテリーの二次解体）を考察する。この様子を図 3.4.2 に示す。このように結合方法・使用工具が同じで結合方向も同じ場合の分解性評価指数の算出方法を定義する。対象となる結合方法は「ネジ類・電動工具」「はめ込み・素手」「はめ込み・工具」「はめ込み・クリップ」の 4 種類である。それぞれの定義を表 6、7 に示す。また、そのイメージを図 2 に示す。

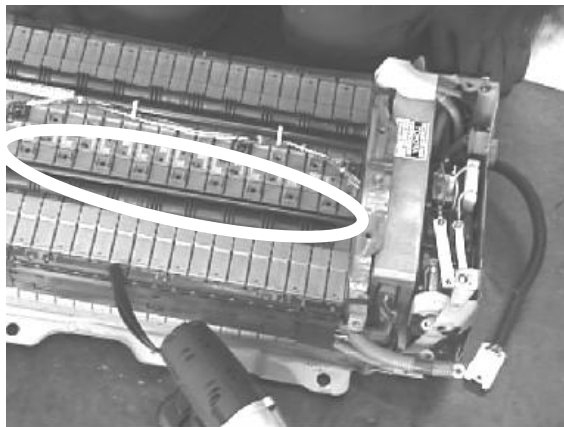


図 2 電動工具によるナットの取り外し（HEV バッテリーの二次解体）

表 6 連続した同一結合解除の定義

結合方法	使用工具	定義した結合解除指数	要因
はめ込み	素手	1.0	連続した結合解除が結合方法と使用工具、 結合方法が同一の条件のとき
	工具	2.5	



表7 一動作の同一結合解除の定義

結合方法	使用工具	分解性評価指数の算出方法	要因
はめ込み	素手	(例) 結合点数 : 5⇒1	連続した結合解除が結合方法と使用工具、結合方法が同一の条件のとき
	クリップ	結合解除指数 : $p_i \times 5 \Rightarrow p_i \times 1$ 結合探索指数 : $q \times 5 \Rightarrow q \times 1$	

結合解除指数の今後について考察する。

ネジ径やネジ下長さにより結合解除時間が多少異なる(2004年度リユース設計班より)。今年度クリップの結合解除指数を定義したように、結合解除時間をより分解性評価指数に反映させるため定義していくことが望まれる。一方で汎用性も求められるので、定義とグループ分けをバランスよく考えて高度化していくとよい。

結合を時間に要した箇所の結合解除指数は結合解除に含まれるかどうか、今後も議論になると思われる。どの部分に含まれるかを分析し整理することが今後の課題である。

#### 4. 結合探索指数

結合探索時間は、作業者の熟練性や解体対象製品に関する知識の有無に左右され、変動が大きい値である。しかしながら、本研究では、結合探索に要する時間は、製品の構造上の特徴と関連性があるとの観点から、その定量化を試みてきた。結合探索時間に影響を与えると考えられる製品データ(解体データを含む)を説明変量とし、実測した結合探索時間を目的変量として重回帰分析を行い、製品種類ごとに $q$ を算出する回帰式を求めている。 $q$ の算出式を一般化したものを以下に示す。

$$q = a \times m + b \times n + c \times M + d \times V + e \quad (2)$$

$q$  : 結合探索指数 [ /個 ]

$m$  : 結合点数 [ 個 ]       $n$  : 部品点数 [ 個 ]

$M$  : 製品質量 [ kg ]       $V$  : 製品容積 [  $m^3$  ]

$a, b, c, d, e$  : 各説明変量に対応する偏回帰変数

すなわち、結合探索時間は、結合や部品の点集及び質量、容積によって異なってくることを意味する。例えば、結合が集中していれば、探索に要する時間は少なくなるであろう。また、製品が大型であると結合部の探索に多くの時間を要するということである。これらの説明変量は、逐次法による検定と解体試験上の経験から必要であると考えられる要素を取り込むことにより決定した。逐次法は、説明変量の選択方法のひとつであり、目的変量との単相関が最大の変数を選び、選ばれた変数に対する偏回帰係数が0であるという仮説の検証を行う。この仮説が、棄却されなければどの変数も重回帰式に含めず、棄却されれば、この変数を取り込んで次の説明変量に関して同様の検討を行うことによって、説明変量を絞り込む方法である。説明変量を絞り込んだ結果、得られた変数は、結合点数 $m$ 及び部品点数 $n$ の2つだったが、上述のように、製品の質量 $M$ 及び容積 $V$ も結合探索時間に与える影響が大きいことから、変量として取り込むこととした。

## Appendix

さらに、製品の種類によっても各説明変量の影響度合いが異なることが判明しているため、現段階では表 3.4.8 に示すように電子・事務機器や家電製品など製品種類ごとに分類し、各々に対し、偏回帰係数を割り当てることとしている。製品種類ごとの偏回帰係数は表 8 に示すとおりである。

表 8 製品種類の各要素の偏回帰係数

製品種類	結合点数 a	部品点数 b	質量 c	容積 d	e
OA 機器	3.06E-01	-7.55E-01	5.14E-01	-6.67E+02	1.77E+01
テレビ・モニター	5.57E-02	-9.60E-02	-2.21E-01	3.38E+01	1.76E+00
大型家電	3.65E-02	-6.07E-02	5.87E-02	-6.79E+00	2.75E+00
小型家電	-4.14E-02	5.47E-02	6.39E-01	-4.20E+01	3.97E+00
AV 機器	-7.12E-02	1.50E-01	-4.46E-01	2.45E+02	4.80E+00
ミシン	3.68E-02	1.68E-02	2.13E-01	7.46E+00	3.68E-01
福祉器具	-1.54E+01	8.83E+00	3.43E+01	5.26E+02	1.32E+03
家具	1.39E-01	3.49E-01	-9.23E-01	-1.02+E01	1.30E+01
汎用産業機器	8.84E-02	-1.24E-01	3.84E-02	-1.86E+01	7.67E-01
HEV バッテリー	-1.05E-02	5.45E-03	9.36E-02	6.62E+00	9.62E-01
かさ	-1.55E-01	1.94E-01	-1.21E+00	-1.10E+02	3.91E+00
自転車	-4.47E-02	-2.07E-01	4.14E-01	1.22E+00	3.97E+00

### 5. 部品取り出し指数

部品取り出し指数  $r$  も結合探索指数  $q$  と同様の考え方にに基づき、算出式を作成した。しかし、部品取り出し時間に関しては、図 3 に示すように、結合探索時間とは異なり、製品種類による明確な違いが見られなかったため、一律に次式により算出することとしている。

$$r = 0.822 \times Mp + 1.81 = 0.822 \times (M/n) + 1.81 \quad (3)$$

$r$  : 部品取り出し指数 [個]

$Mp$  : 平均部品質量 [kg/個]

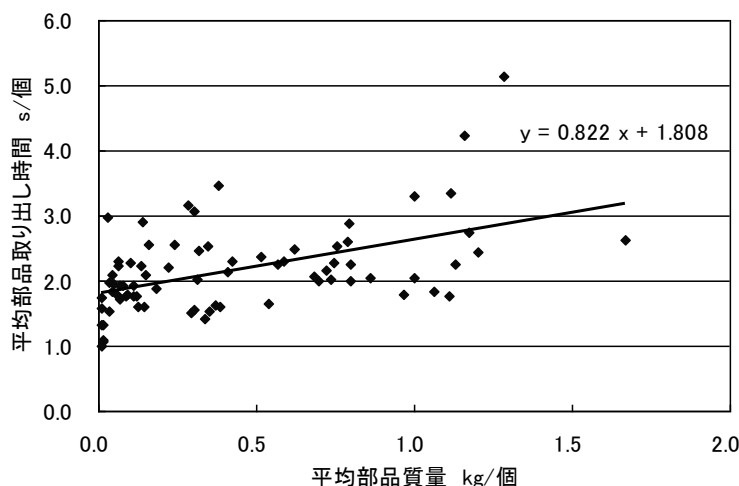


図3 平均部品質量と平均部品取り出し時間の関係

## 6. 前準備指数

結合解除指数、結合探索指数、部品取り出し指数、事前安全確認指数（2004年度リユース設計班）と定義してきたが、その他の工程（ドア開、移動、シート、工具等）について、新しく定義する。事前安全確認と以下に示す工程を合わせて『前準備工程』とする。事前安全確認と合わせる理由は、工程を細分化するより算出の利便性を優先していききたいためである。ただし、前準備工程で説明できない場合が出てきたときは、新しく定義するか、工程を細分化することを再検討する。トヨタ自動車提供のデータ（工程と時間）よりその具体的な作業工程を表に示す。個々では「ドア開」「移動、ドア開」「移動」を示す。「移動、ドア開」とは、解体作業に取り掛かる前にドアの部位に移動して、ドアを開けて作業に取り掛かるまでのことをいう。絶縁で”3箇所”などと記載されているのは「絶縁した3箇所はとも同じ時間である」ことを表している。また、採用する「絶縁」データは実測データ（トヨタ自動車・PEVの実際の処理工程の測定データ）で統一する。つまり、永田研の解体試験のデータを含まず前準備工程として定義する。

作業工程の各平均時間より前準備工程を「5」とし、次の工程に取り掛かるための準備に要する工程と定義する。

適用可能な工程は今回定義に用いた「結合箇所の正面に作業者が移動する」「解体に必要な工具を取り出す」「作業者の安全を確保するため絶縁する」「ドアを開ける」「シートを移動する」である。

$$s = 5 \quad (4)$$

s : 前準備指数 [ /個 ]

## 7. 分解性評価指数の有効性の確認

以上により、製品の解体データにより、分解性評価指数を算出することが可能となる。図 3.4.5 に各種工業製品の分解性評価指数と実解体時間の関係を示す。同図では、分解性評価指数と実解体時間が 1:1 となる直線を図示している。また、参考として誤差の範囲が

## Appendix

20%であることを意味する直線をあわせて示した。このように分解性評価指数は、実解体時間とおおよそ比例関係にあると確認され、実解体時間に相当する指数として有効性が示されたといえる。

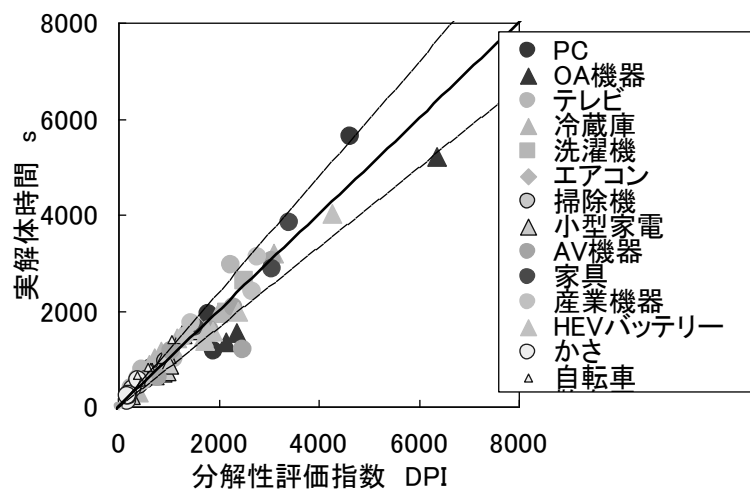


図4 分解性評価指数と実解体時間の相関関係

## 謝 辞

本研究を進めるにあたって終始ご指導賜りました早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科永田勝也教授に厚く御礼申し上げます。本論文をまとめるにあたり、適切なご助言・ご指導いただきました早稲田大学環境総合研究センター小野田弘士准教授に深謝致します。また、本論文を審査していただきました永田勝也教授、小野田弘士准教授、関谷弘志教授に深く感謝の意を表します。

本研究の一部は、平成 23 年度環境省環境研究総合推進費研究事業「既存インフラを活用した使用済み小型家電等からの資源回収システムの設計・評価」の補助、および、グリーン IT 推進協議会との共同研究である「電気・電子製品における省エネ効果の貢献度の定量評価手法の開発に関する調査研究」を受けて実施したものです。ご協力いただきました関係各位に厚く御礼申し上げます。

また、本研究の遂行にあたり、多くの民間業者の皆様にも多大なご協力・ご指導を賜りました。特に、株式会社スズクホールディングスの各事業の皆様には、ご多忙にも関わらず、実証試験にご協力頂きました。深く御礼申し上げます。

最後に、研究をともにしてきた早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科永田・小野田研究室の在学生・卒業生の皆様の多大なるご協力、長年にわたり支えて下さった両親・兄弟・友人の方々、無理な業務スケジュールをこなして頂いた株式会社早稲田環境研究所の社員一同に感謝申し上げます。

## 研究業績

分 類	著者(申請者含む), 題名, 発行掲載誌名/発表場所・巻号・頁, 発行/発表年月
査読論文	<p>中嶋崇史, 壺内良太, 小野田弘士, 永田勝也, 環境負荷評価による家電・ICT機器の体系化と環境負荷削減に向けた検討, 日本機械学会論文集 B 編, pp131-135, 2012</p> <p>Takafumi NAKAJIMA, Hiroshi ONODA, Katsuya NAGATA, Development of provision of environmental information system on the method of E2-PA: Take an automotive recycle-parts as an example. Proceedings of EcoDesign2011, pp295-300, 2011</p> <p>Takafumi NAKAJIMA, Hiroshi ONODA, Katsuya NAGATA, A study on the development of the evaluation method of supplier's contributions to the Green IT. Proceedings of EcoDesign2011, 301-306, 2011</p>
口頭発表	<p>Takafumi NAKAJIMA, Katsuya NAGATA, Hiroshi ONODA, Environmental impact assessment in consideration of utilization form of products: An Example of a paperless meeting, Eco Balance2010, pp229-232, 2010</p> <p>○中嶋崇史, 関悠一郎, 小野田弘士, 永田勝也, 民間施設を活用した使用済み小型家電の効率的なリサイクルシステムの構築とその評価, 第 22 回環境工学総合シンポジウム 2012 講演論文集, pp163-166, 2012</p> <p>○中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, 2R 解体度から見た製品の体系化と改善案の提案, 第 20 回環境工学総合シンポジウム 2010 講演論文集, pp159-162, 2010</p> <p>○中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, ノートパソコンとその周辺機器の解体解析, 第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会, pp179-180, 2010</p> <p>○Takafumi NAKAJIMA, Ryota TSUBOUCHI, Hiroshi ONODA, Katsuya NAGATA, Disassembly Analysis and Environmental Load Assessment of Domestic Appliances(SDA), International Workshop on Environment &amp; Engineering 2009, pp71-72, 2009</p> <p>○中嶋崇史, 壺内良太, 小野田弘士, 永田勝也, 小型家電・ICT機器の解体解析 (RI から見た製品の類型化), 第 28 回エネルギー・資源学会研究発表会講演文集, pp65, 2009</p> <p>○中嶋崇史, 壺内良太, 永田勝也, 小野田弘士, 切川卓也, ICT 機器・小型家電の解体解析と環境負荷評価について, 第 19 回環境工学総合シンポジウム 2009 講演論文集, pp186-189, 2009</p> <p>○中嶋崇史, 壺内良太, 石野卓也, 小野田弘士, 永田勝也, 環境効用ポテンシャル評価手法の</p>

開発,社団法人環境科学会 2009 年会, pp99-91, 2009

関悠一郎, 中嶋崇史, 若林英佑, 小野田弘士, 永田勝也, 分解性評価指数 DPI を活用した小型家電の資源回収性, 経済性の検討, 第 21 回環境工学総合シンポジウム 2011 講演論文集, pp329-332, 2011

関悠一郎, 若林英佑, 中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, 消費者選好の効用と製品の利用形態を考慮した環境効率, 社団法人環境科学会 2011 年会プログラム, pp21, 2011

関悠一郎, 中嶋崇史, 若林英佑, 小野田弘士, 永田勝也, 希少資源性に着目した小型家電の環境負荷評価, 第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 2011, pp165-166, 2011

久保田和樹, 永田勝也, 小野田弘士, 中嶋崇史, 小型家電・ICT 機器における環境負荷評価, 第 29 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp247-250, 2010

中嶋崇史, 久保田和樹, 小野田弘士, 永田勝也, IT サービスを含めた製品の利用形態を考慮した環境負荷評価, 社団法人環境科学会 2010 年会プログラム, pp67, 2010

若林英佑, 関悠一郎, 中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, 家電製品データベースの構築とそれを活用した使用済み小型家電のリサイクルシステムの提案, 第 31 回エネルギー資源学会研究発表会講演論文集, pp241-244, 2012

若林英佑, 中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, 使用済み小型家電の素材構成からみたポテンシャル価格と破碎選別後の資源的価値との比較評価, 第 22 回環境工学総合シンポジウム 2012 講演論文集, pp174-177, 2012

若林英佑, 中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, 実施における破碎選別プロセス前後の使用済み小型家電製品等の資源的価値の評価, 第 23 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, pp115-116, 2012,

平松信人, 黒岩翔, 宇津木隼, 中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, 自動車リサイクル部品の活用促進を目的とした環境貢献ポイントシステムの高度化, 第 23 回廃棄物資源循環学会研究発表会, pp221-222, 2012

平松信人, 黒岩翔, 宇津木隼, 中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, 次世代自動車の環境配慮設計の定量評価, 第 31 回エネルギー・資源学会研究発表会, pp187-190, 2012

平松信人, 黒岩翔, 宇津木隼, 中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, 自動車の環境配慮設計の定量評価, 第 22 回環境工学総合シンポジウム, pp170-173, 2012,

<p>その他</p>	<p>平松信人,黒岩翔,宇津木隼, 中嶋崇史, 小野田弘士,永田勝也, 自動車の実解体試験に基づく環境配慮設計(DfE: Design for Environment)の定量化の試み,第23回廃棄物資源循環学会研究発表会,pp219-220,2012</p> <p>桑原健嘉, 中嶋崇史, 小野田弘士, 永田勝也, 飲料用自販機の運用高度化システムの構築に関する検討, 2012 年度日本冷凍空調学会年次大会論文集, pp469-472, 2012</p> <p>平松信人,黒岩翔,宇津木隼, 中嶋崇史,小野田弘士,永田勝也, 地域に密着した事故・ヒヤリハットマップシステムの構築,社団法人環境科学会 2012 年会,pp50,2012</p> <p>胡浩,小野田弘士,小清水勇, 中嶋崇史, 大和田秀二,永田勝也,中嶋賢一, トレーサビリティを確保した国際資源循環ネットワークの構築に向けた検討,第 27 回エネルギー資源学会研究発表会講演論文集,pp21-25,2008</p> <p>小沢俊明,小清水勇,中嶋崇史,小野田弘士,永田勝也, 広域灰溶融処理システムにおける BAS の提案と評価結果の活用, 第 19 回廃棄物資源循環学会研究発表会, pp209-211, 2008</p> <p>中嶋崇史, 小清水勇,小野田弘士,永田勝也, 環境負荷と経済性を考慮した一般廃棄物処理システムに関するソフトウェアの開発について,環境・経済政策学会 2008 年大会,pp101-102,2008</p> <p>中嶋崇史, 小清水勇,小野田弘士,永田勝也, 一般廃棄物処理システムにおける BAS の提案と評価結果の活用, 第 19 回廃棄物資源循環学会研究発表会, pp159-161, 2008</p> <p>中嶋崇史, 永田勝也,小野田弘士,小清水勇,長田守弘, 資源循環システムのライフサイクルアセスメントに関する検討(資源循環型の高度化に向けての BAS 評価ソフトの改良と自治体への適用), 第 18 回環境工学総合シンポジウム 2008 講演論文集, pp259-262, 2008</p> <p>中村拓哉,荻野大介, 桑原健嘉,永田勝也,小野田弘士, 中嶋崇史, 本庄スマートエネルギータウンにおける分散型エネルギーシステムの設計と再生可能エネルギー導入シミュレーション, 2012 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集,pp461-464,2012</p>
------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------