The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	ライフサイクルCADの構築に向けた製品ライフサイクルのモデル化手法に関する研究
Author(s)	國井, 英輔
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/34453
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

ライフサイクル CAD の構築に向けた
製品ライフサイクルのモデル化手法に関する研究

國井　英輔

2013 年 3 月

大阪大学大学院工学研究科

概　要

製品としての価値を損なうことなく，製品の一生に渡る環境負荷や資源消費量を低減するためには，製品ライフサイクル全体を考慮して製品を設計すること，すなわちライフサイクル設計が有効な手段である．ライフサイクル設計においては，製品の生産から回収・再資源化に至るまでの製品ライフサイクル全体において経済性や環境性などの製品ライフサイクルの性質を向上させるような資源循環の戦略，すなわちライフサイクル戦略を策定すると同時に，この戦略を反映させながら製品およびそのライフサイクル・フローを設計することが重要となる．製品ライフサイクルの性質は，製品とライフサイクル・フローの組み合わせによって決まる．例えば，寿命の短い部品を交換・メンテナンスすることによって製品の長寿命化を目指す場合でも，家庭でユーザーが交換することを想定したライフサイクル・フローと，一度工場に回収した上でエンジニアが交換することを想定したライフサイクル・フローでは，その実現に適した製品の形状や部品配置などは異なる．このライフサイクル設計の支援に向けて，ライフサイクル戦略の策定する段階においては，社会や市場の現状や製品の特性などの様々な情報に基づいて製品の循環戦略を策定する様々な手法が提案されている．またライフサイクル戦略に基づいて製品およびそのライフサイクル・フローを設計する段階においては，製造性やメンテナンス性，リサイクル性の向上といった製品ライフサイクルの特定の視点に着目した戦略に基づいて製品やライフサイクル・フローの設計を支援する手法として様々な要素設計技術が研究されている．したがって，ライフサイクル設計の個々の段階を支援する手法は成熟を見せつつあるが，これらをライフサイクル設計の一連の流れとして結びつけるための設計支援は不十分である．

本研究では，ライフサイクル設計を支援する計算機環境を「ライフサイクル CAD システム」と呼ぶことにし，このライフサイクル CAD システムを実現するための第 1 段階として，製品のライフサイクル全体を製品とライフサイクル・フローを用いて表現することができるようなモデリング方法を提案することを研究目的とし，以下の 2 つの手法を提案した．

(1) 製品とライフサイクル・フローをそれぞれ製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルとしてモデル化し，両モデルを対応付けることで製品ライフサイクルを表現する手法
(2) 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理する手法

これらの手法に基づいて，製品ライフサイクルの表現と整合性の管理を行う計算機環境としてライフサイクル・モデリング・システムを開発した．またこのライフサイクル・モデリング・システムでは，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いて製品ライフサイクルの経済性や環境性などの評価を可能とするために，ライフサイクル・シミュレータを統合した．

本研究で提案した手法を用いることで製品ライフサイクルの様々な側面の表現や整合性の評価が可能であることを検証するために，ライフサイクル．モデリング・システムを用いて携帯電話および液晶テレビを対象として例題検証を行った．例題検証を通して，本研究で提案した手法を用いるこ

とで，携帯電話や液晶テレビの製品ライフサイクルをトポロジーレベルにおいて不整合のないように表現することが可能であることが確認できた．また，製品ライフサイクルにおける様々な視点から製品の階層構造を表現することで，製品の各構成要素（モジュールや部品）とライフサイクル・プロセスの対応関係が明確となった．

本研究では，ライフサイクル CAD システムの実現に向けた第 1 段階として製品ライフサイクルをモデリングする手法を提案し，この手法に基づいてライフサイクル・モデリング・システムを開発した．このライフサイクル・モデリング・システムは，製品ライフサイクル全体の表現や製品とライフサイクル・フローの関係の評価が可能であり，さらに設計支援手法が接続可能であることから，今後ライフサイクル CAD システムを開発する上でその基礎的な設計環境として活用することができると期待される．

目 次

第 1 章　序論 1
1.1.　研究背景 3
1.2.　研究目的とアプローチ 4
1.3.　本論文の構成 4
第 2 章　ライフサイクル設計の支援に向けた 設計手法の研究 7
2.1.　製品設計 9
2.1.1.　設計とは 9
2.1.2.　一般的な設計プロセス 9
2.1.3.　製品設計の現状 10
2.2.　環境問題とその対応の現状 11
2.3.　製品ライフサイクル・システム構築の成功例 12
2.3.1.　レンズ付きフイルム（富士フイルム） 12
2.3.2.　複写機（富士ゼロックス） 13
2.4.　ライフサイクル設計 14
2.4.1.　ライフサイクル設計の概要 14
2.4.2.　ライフサイクル設計の支援 17
2.5.　ライフサイクル設計支援の関連研究 18
2.5.1.　ライフサイクル戦略の策定手法 18
2.5.2.　要素設計技術（Design for X） 19
2.5.3.　ライフサイクル評価手法 20
2.5.4.　製品ライフサイクルの管理手法 21
2.6.　ライフサイクル設計の支援に向けた課題 22
2.7.　ライフサイクル設計を支援するための製品ライフサイクルのモデル化のための課題 23
2.8.　第 2 章のまとめ 24
第 3 章　製品ライフサイクルのモデリング 27
3.1.　製品ライフサイクルのモデリング手法 29
3.1.1.　製品ライフサイクルのモデリング手法の基本コンセプト 29
3.1.2.　製品モデル 31
3.1.3.　ライフサイクル・フロー・モデル 35
3.1.4.　製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応付け 38
3.1.5.　製品ライフサイクルにおける製品の状態変化の表現 39
3.2.　製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理する手法 43
3.2.1.　製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性 43

3.2.2. トポロジーレベルの整合性管理手法 46
3.3. 考察 50
3.4. 第 3 章のまとめ 54
第 4 章 ライフサイクル・モデリング・システム 55
4.1. ライフサイクル・モデリング・システムの実現方法 57
4.2. ライフサイクル・モデリング・システムの基本構成 57
4.2.1. 製品ライフサイクルの表現 60
4.2.2. トポロジーレベルの整合性管理 64
4.2.3. ライフサイクル評価 66
4.3. 第 4 章のまとめ 67
第 5 章 例題検証 69
5.1. 例題検証の概要 71
5.2. 携帯電話の設計改善 71
5.2.1. 現状モデルの作成 72
5.2.2. ライフサイクル戦略の策定 89
5.2.3. 設計改善 92
5.2.4. 考察 106
5.3. 液晶テレビのリサイクル性設計 107
5.3.1. ライフサイクル・モデリング・システムの拡張 107
5.3.2. 例題検証の方針 111
5.3.3. 現状モデルの作成 111
5.3.4. リサイクル性の評価 124
5.3.5. 設計改善 128
5.3.6. 考察 134
第 6 章 考察 135
6.1. 手法の利点と課題 137
6.2. ライフサイクル・モデリング・システムの利点と課題 140
6.3. 提案手法によるライフサイクル設計支援への展開 141
第 7 章 結論 143
7.1. 本研究の結論 145
7.2. 今後の展望 146
謝辞 149
参考文献 151
発表論文 157

第1章

序論

第１章では，本研究の背景としてライフサイクル設計の重要性について述べ，本研究の目的とアプローチを明らかにする．また，本論文の構成を示す．

1.1. 研究背景

地球温暖化や資源枯渇などの環境問題は，その顕在化を受けて世の中では意識が高まっており，個人や企業に限らず誰もが避けて通ることのできない問題となっている．環境問題を解決するためには，資源やエネルギーを消費して人工物を製造，販売し，その後のことは面倒をみないような従来の製造業の在り方では不十分である．つまり，製品ライフサイクルの全体に対して責任を持ち，製品ライフサイクル全体として資源やエネルギー消費量，廃棄物，環境負荷を最小化するような製品ライフサイクル・システム（製品の構造，製品の循環経路，およびそのマネジメントシステム）を構築することが重要になる．このためのアプローチとして「インバース・マニュファクチャリング」が提案されている[1]．インバース・マニュファクチャリングの基本的な考え方は，(1)循環型の製品ライフサイクルの構築，(2)人工物の販売から人工物が発現する機能であるサービスの提供への価値の転換，を通して製品ライフサイクル・システムを実現するところにある．このインバース・マニュファクチャリングを実現する上で最も重要な課題のひとつとして，製品ライフサイクル全体を設計する，すなわち「ライフサイクル設計[2]」が挙げられる．ライフサイクル設計においては，経済性や製品としての質を維持しつつ環境への影響を最小化することができるように，製品そのものだけでなく，製品の生産から回収・再資源化に至るまでの製品のライフサイクル・フロー（製品ライフサイクルにおける処理を行うプロセスとそのネットワーク）についても設計することが不可欠である．これは，製品ライフサイクルの経済性や環境性，実現性などの性質が，製品とそのライフサイクル・フローによって決まるためである．例えば，寿命の短い部品を交換・メンテナンスすることによって製品の長寿命化を目指す場合でも，家庭でユーザーが交換することを想定したライフサイクル・フローと，一度工場に回収した上でエンジニアが交換することを想定したライフサイクル・フローでは，その実現に適した製品の形状や部品配置などは異なる．また，使用段階における省エネ性向上のための複合材料の使用がリサイクル段階における再利用性の著しい低下につながるといったように，製品ライフサイクルの各段階の間には様々なトレードオフが存在する．したがって，複数の段階における製品とライフサイクル・フローの関係に注意しながら，製品ライフサイクル全体としてその経済性や環境性などが向上するように製品ライフサイクルを設計することが，ライフサイクル設計においては必要不可欠となる．

このライフサイクル設計の支援に向けて，製品ライフサイクルの特定の段階に注目した分解性設計[3]やアップグレード設計[4]，リサイクル性設計[5]をはじめとした要素設計技術や，設計を行う際に注意すべき項目（例えば，再生利用の容易な材料を使用する）をまとめたチェックリスト[6]など，これまでに多くの設計支援手法が提案されている．しかしながら，これらは製品ライフサイクルの特定の段階に着目した手法（例えば，リサイクル段階に着目した易解体性設計手法）であり，製品ライフサイクルにおける複数の段階における製品とライフサイクル・フローの関係を考慮した設計支援には適さない．ライフサイクル設計を支援するためには，製品とそのライフサイクル・フローを統合的に管理することで，製品のライフサイクル全体を視野に入れながら上記のような設計支援手法をうまく選択・適用して製品ライフサイクルを設計できるような設計支援環境が必要である．

1.2. 研究目的とアプローチ

1.1 節において，ライフサイクル設計では，製品のライフサイクル全体を視野に入れながら製品とそのライフサイクル・フローをともに設計することが重要であると述べた．このライフサイクル設計を支援するためには，製品とライフサイクル・フローの両面から製品ライフサイクルを設計することができるような設計支援環境が必要不可欠である．本研究ではこのような設計支援環境を「ライフサイクル CAD システム」と呼ぶことにする．

本研究の目的は，このライフサイクル CAD システムを実現するための第 1 段階として，製品のライフサイクル全体を製品とライフサイクル・フローを用いて表現することができるような表現手法を提案することである．具体的には，以下の 2 つの手法を提案する．

(1) 製品のライフサイクル全体を表現可能とするために，製品ライフサイクルを製品とそのライフサイクル・フローを用いて表現する手法を提案する．具体的には，製品とライフサイクル・フローをそれぞれ製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルとしてモデル化し，これらモデルの間の対応関係を定義することで製品ライフサイクルを表現する手法を提案する．

(2) 製品ライフサイクルの様々な段階における製品とライフサイクル・フローの関係を表現するための手法の 1 つとして，上記の製品ライフサイクルの表現手法を用いて，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を評価する手法を提案する．具体的には，製品ライフサイクルの各プロセスの入出力の過不足に注目して，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係を用いて製品やその構成要素が過不足なくライフサイクル・フローを辿っているかどうかを管理する手法を提案する．

また本研究では，ライフサイクル CAD システムの第 1 段階として，製品ライフサイクルを表現することができる計算機環境として「ライフサイクル・モデリング・システム」を開発する．さらに，このシステムを用いて携帯電話および液晶テレビを対象として例題検証を行うことで，本研究で提案する手法を用いて製品ライフサイクルの様々な段階における製品とライフサイクル・フローの関係が表現可能となったことを検証すると同時に，残された課題を抽出する．

1.3. 本論文の構成

第 1 章では，本研究の背景について述べ，本研究の目的とアプローチを明らかにした．本論文の第 2 章以降の内容については，以下の通りである．

第 2 章では，製品設計の現状やライフサイクル設計の基本コンセプトを整理することで，ライフサイクル設計を支援するうえで重要な課題を整理する．そして，このライフサイクル設計の支援に関連する研究を調査することで，ライフサイクル設計の支援において残された課題を明らかにする．また，，ライフサイクル設計を支援するための計算機環境としてライフサイクル CAD システムのコンセプトを提案し，このシステムの実現に向けて本研究で提案する手法の位置づけを述べる．

第 3 章では，製品ライフサイクルを計算機上で設計可能とするために，製品とライフサイクル・フローをそれぞれ製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルとしてモデル化し，両モデルの対応関係を定義することで製品ライフサイクルを表現する手法を提案する．また，両モデル間の整合性管理手法として，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係の基本パターンを定義することで，ライフサイクル・プロセスの入出力関係において過不足が生じないように製品ライフサイクルが表現されているかどうかを管理する手法を提案する．

第 4 章では，ライフサイクル CAD システムの実現に向けた第1段階として，第 3 章で提案した手法をもとに，製品ライフサイクルのモデリングを行うライフサイクル・モデリング・システムを開発する．

第5章では，第3章で提案した手法を用いることによる利点や欠点を検証するために，携帯電話と液晶テレビの 2 つの製品の設計改善を対象として例題検証を実施する．

第 6 章では，第 5 章で示した例題検証の結果に基づいて，本研究で提案した表現手法や整合性管理手法の利点や欠点について考察を行い，課題を抽出する．

最後に第 7 章において，本研究の結論と今後の展望について述べる．

第2章

ライフサイクル設計の支援に向けた設計手法の研究

第 2 章では，環境に配慮した製品設計の現状やライフサイクル設計の基本コンセプトについて述べる．また，このライフサイクル設計の支援に関連する研究を調査することで，ライフサイクル設計を支援するために残された課題を明らかにする．さらに，ライフサイクル設計を支援するための計算機環境としてライフサイクル CAD システムのコンセプトを提案し，このシステムの実現に向けて本研究で提案する手法の位置づけを明らかにする．

2.1. 製品設計

2.1.1. 設計とは

環境に配慮した設計について議論する前に，まず一般的な製品設計について整理する．

一般設計学とは，設計に関する知識を，対象を離れて抽象化することにより理論として昇華させたものであり，そこでは設計を「人が概念として想定した要求機能を，それを充足する実体へと変換する行為である」と定義している[7][8]．一般設計学における設計過程では，設計者は設計仕様から要求概念を形成し，それを解概念に変換した上で図面などの形で設計解として抽出する．設計解は，設計仕様を満たしかつ製造に必要な全ての情報を持っており，現在の物理的法則に適合する手段で実体化可能な実体概念である．ここで実体概念とは，「世の中に存在する，もしくは存在するであろう実体に対して人が形成する概念」である．

2.1.2. 一般的な設計プロセス

2.1.1 項で述べた設計の概念を具体化した，一般的な製品設計の設計プロセスの概要を**図 2-1** に示す．ここでは，設計プロセスは(1)役割の明確化，(2)概念設計，(3)実体設計，(4)詳細設計の 4 つのフェーズから構成している[9]．

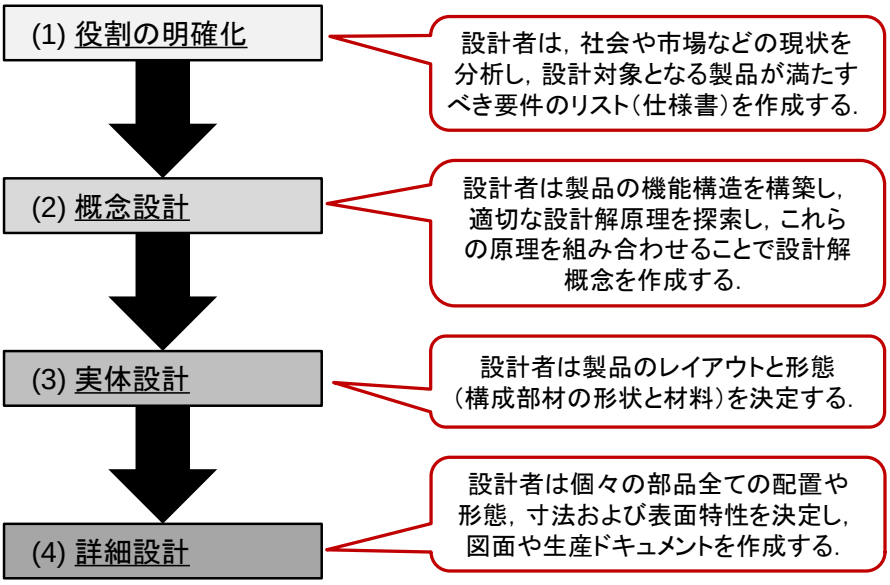


図 2-1 製品設計の設計プロセス

(1)の役割の明確化においては，市場や技術動向などの分析を通して製品のアイデアを創出し，設計対象となる製品が満たすべき要求機能や制約，すなわち仕様を決定する．(2)の概念設計においては，製品の機能構造を構築し，これらを実現しうる設計解原理を探索し組み合わせることで設計解概念を作成する．ここでは，設計解概念が定着したあるいは慣例にしたがったアイデアに影響されないように問題を抽象化あるいは一般化して考えることが重要となる．(3)の実体設計においては，製品を構成する各要素の形状や構成素材，レイアウト，製造工程などを設計することで製品の実体をあらかた明らかにする．そして(4)の詳細設計において，各構成要素の形状や寸法，表面特性などの詳細部分を仕上げ，設計解（すべての図面や生産ドキュメント）を完成させる．

これらの段階では，設計解が仕様に適合しているかどうかを，技術的・経済的基準に従って評価しながら設計を進めることが必要不可欠となる．

2.1.3. 製品設計の現状

最近の製品設計においては，図面の作成や性能の数値シミュレーションなどに計算機が多く用いられている．製品設計を支援する代表的な計算機環境として CAD（Computer Aided Design）システム[10]が挙げられる．CAD システムは，設計者がコンピュータと対話しながら設計作業を進めるためのシステムであり，設計・製図作業の無人化を図るものではなく，人間の想像力を活かすツールである．特に，3 次元座標空間に立体図形を作成する 3 次元 CAD システムは建築物や機械製品の設計に多く使用されており，機械設計用の CAD としては，ハイエンド CAD である Dassault Systems 社の CATIA[11]や PTC 社の Pro/ENGINEER[12]，ミッドレンジ CAD である SolidWorks 社の SolidWorks[13]や Autodesk 社の AutoCAD[14]などがある．これらの CAD システムは，実際の製品そのものの形状を自由な視点から確認できることから，設計・製造部門だけでなく，営業部門などにおいて新製品のプロモーションなどを行う際の素材としても広く利用されている．

実際の設計においては，2.1.2 項で述べたような設計の各工程を互いに関連付けながら同時に平行して進めるやり方である「コンカレント・エンジニアリング[15]」が製造業において広く取り入れられている．コンカレント・エンジニアリングの狙いは，開発・設計のプロセスに生産や購買，品質保証，営業，サービスなどの各部門，さらには社外の部品メーカーなどが参加することで全体的な品質向上やコストダウンを行うことにある．

コンカレント・エンジニアリングにおいても，前述した 3 次元 CAD のモデルが活用され始めている．3 次元 CAD を用いることで各部門間でのデータの共有が可能となり，例えば設計部門で 3 次元 CAD モデルを修正すると，連動して加工機で用いられる形状データも修正され，また生産スケジュールなども同時に見直すことができる．これは，各工程を順に行い不具合があればひとつ前の工程へ戻りやり直すという従来の作業方法に比べてリードタイムの短縮化や問題点の早期発見が可能となり，作業効率が向上するという利点がある．

2.2. 環境問題とその対応の現状

従来の製造業においては，製造の効率化や利益向上などの観点から，大量生産・大量消費・大量廃棄の産業形態がとられてきた．また，製品を設計する際には，前項でも述べたように製品の機能や製造工程などの製品ライフサイクルの順工程（つまり製造から使用まで）を主として考慮しており，リマニュファクチャリングやリサイクルといった製品を使用した後の廃棄・再利用については十分に考慮されていなかった．その結果として，資源の大量消費による資源枯渇の懸念や，有害物質の使用による環境汚染，大量に発生した廃棄物の処理問題など製品のライフサイクルにおける様々な環境問題が表面化することとなった．

このような問題に対応するために，いわゆる 3R（リデュース，リユース，リサイクル）の促進や化学汚染物質の使用規制，温室効果ガス（二酸化炭素など）の排出規制，廃棄物規制を目的として様々な法規制が制定されてきた．EU では電気電子機器廃棄物の回収やリサイクルに関する指令である WEEE 指令（Waste Electrical and Electronic Equipment）[16]や電気電子機器に係る特定有害物質の使用制限に関する指令である RoHS 指令（Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment）[17]，化学物質の登録・評価・認可・制限に関する規則である REACH 規則（Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals）[18]，エネルギー関連製品の環境配慮設計に関する指令である ErP 指令（establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for Energy-related Products）[19]などといった様々な法規制が制定されている．

日本においても様々な法規制が制定されている．循環型社会形成推進基本法[20]では，循環型社会を構築するにあたっての国民や事業者，市町村，政府の役割が既定されており，特にこの法律では，生産者が自ら生産する製品等についての使用後に廃棄物となった後まで一定の責任を負う「拡大生産者責任」の原則を明確にしている．また，家電リサイクル法（特定家庭用機器再商品化法）[21]では，エアコンやテレビ（ブラウン管テレビ，液晶テレビ，プラズマテレビを含む），冷蔵庫・冷凍庫，洗濯機（衣類乾燥機を含む）という 4 品目の大型家電を対象として，再商品化に関する消費者の費用負担や，製造業者に再商品化義務率を課している．

これらの法規制や資源リスクなどへの対応といった観点から，製品の生産者にとって「環境に配慮した製品設計」を行うことは避けて通ることのできない問題となっている．実際に，各企業はそれぞれ独自の環境戦略を立てることで，資源消費量や環境負荷の削減に向けた取り組みを行っている．具体的には，製造時の省資源化や使用時の省エネルギー化，有害物質の不使用，リサイクルが容易な材料選択などが挙げられる．しかしながら，これらは製品ライフサイクルの特定の段階に注目してその性能改善を目的とした設計改善が主であり，必ずしもライフサイクル全体の資源消費量や環境負荷が削減されているとは限らない．例えば，製造時の省資源化によって小型製品を開発しても，使用可能な期間が短くなっていたりリサイクルしにくい構造となっていたりした場合にはかえって資源消費量が増えている可能性がある．したがって，製品ライフサイクル全体における資源消費量や環境負荷をより効果的に低減するためには，製品ライフサイクル全体を考慮して，製品ライフサイクル・システムを構築することが必要不可欠となる．

2.3. 製品ライフサイクル・システム構築の成功例

本節では，製品ライフサイクルの設計事例として，レンズ付きフイルム（富士フイルム）と複写機（富士ゼロックス）の 2 つの事例を紹介する．

2.3.1. レンズ付きフイルム（富士フイルム）

レンズ付きフイルムは，「いつでも，どこでも，だれでも」簡単にきれいな写真を撮ることができる製品として富士フイルムが 1985 年に開発した．レンズ付きフイルムの製品ライフサイクルにおける最大の特徴は，機械を用いたフルオートメーションのリユース/リサイクル工程によって閉ループのリサイクル・システムを実現している点にある．レンズ付きフイルムは，「前面筐体」「後面筐体」「本体ユニット」「フラッシュユニット」「レンズユニット」「フイルム」などのモジュールから構成されており，「本体ユニット」や「フラッシュユニット」「レンズユニット」については検査を行ったうえでリユースを行い，「前カバー」と「裏カバー」については破砕した上でペレット化することで新しいカバーの材料としてリサイクルしている．レンズ付きフイルムの代表的な構造を図 2-2 に示す．レンズ付きフイルムは，機能部品ごとにモジュール化したうえで，一方向に積み上げるように組み立てるような構造を取っている．これによって，その逆方向に一方向から分解することができるようになり，機械を用いた自動的な分解作業が可能となる．また，モジュール間の締結を，ネジや接着などは一切使わずに全てスナップフィットを用いて実現していることも，分解作業の自動化に一役買っている．[2]

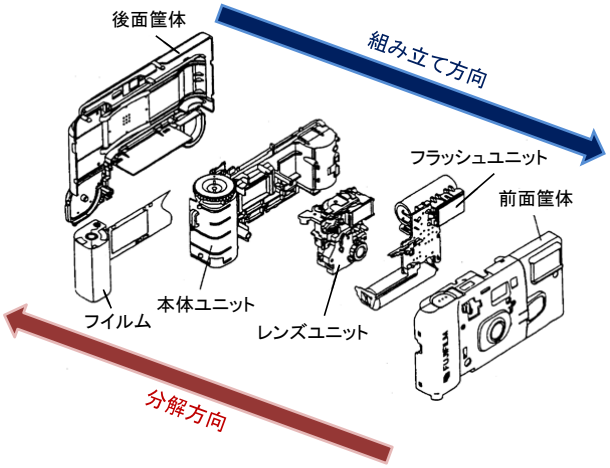


図 2-2 レンズ付きフイルムの構造の例[22]

製品ライフサイクルを設計するうえで重要な問題として「ユーザーからどのようにして製品を回収するか」という問題がある．レンズ付きフイルムの製品ライフサイクルにおいて有利な点は，ユーザーが撮影済みの製品を現像依頼するために現像所に持ってくるため，効率よく製品を回収するシステムが容易に構築できたという点にある．また，複数種類の製品間で共通機能部品を共有することで，生産システムにおけるリユース部品の使用用途を拡大している．

以上のように，レンズ付きフイルムは，リユースをコア・コンセプトとして製品の構造やそのライフサイクル・フローを設計することで，製品ライフサイクルの設計に成功した実例の 1 つである．

2.3.2. 複写機（富士ゼロックス）

複写機は主にオフィスで幅広く使用されており，また国際製品として国内はもとより海外各国で使用されている製品である．そのため，早い段階から各国の環境規制や安全に関する規制をクリアした環境に配慮した製品として，省資源や省エネルギー，リサイクルへの対応を行ってきている．複写機における製品ライフサイクルの特徴は，製品のリユースやリサイクルに加えて，メンテナンス・システムが確立している点にある．富士ゼロックスにおいては，部品リユースを重点として「富士ゼロックス　クローズド・ループ・システム」を構築しており，メンテナンスやリユースをより効率よく行うための様々な設計を実践している．例えば，複合機のキャスターでは，摩耗する車輪部のみを交換可能とするために，従来のカシメによる一体化した構造ではなく，E リングによる手で分解可能な構造を設計している（図 2-3 (a)）．また，プラスチック部品に別部品をネジで再度組み付ける場合，ネジの締め付けに不具合が生じることがあるため，あらかじめ予備穴を設けるといった冗長設計を施している（図 2-3 (b)）．さらに，寿命が短い部品をモジュール化することで，複合機全体を分解せずに摩耗した部品を交換することが可能な製品構造を設計している．[24][25]

(a) 分解性を考慮した設計　　(b) 冗長設計

図 2-3 複写機におけるリユース設計[23]

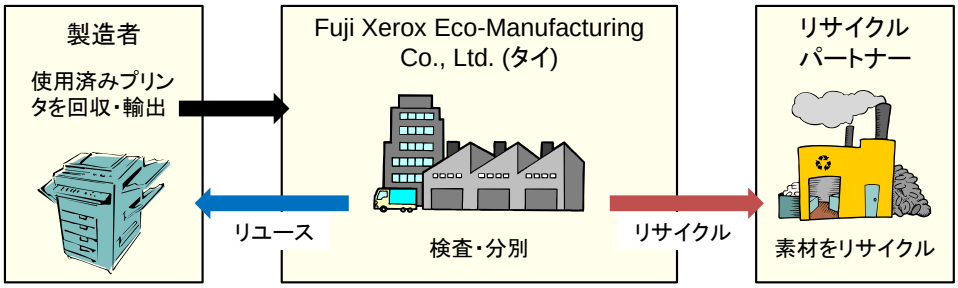


図 2-4 アジア地域における複写機のリサイクル・システム

また富士ゼロックスでは，タイにある子会社である Fuji Xerox Eco-Manufacturing Co., Ltd.を拠点として国際資源循環システムを構築している（図 2-4 参照）．アジア太平洋の 9 地域から自社回収した複写機を，トナーやカートリッジについては検査したうえでリユースし，その他の部品についても，鉄系，アルミ系，ガラス，銅系などの 74 カテゴリーに分解・分別しリサイクルを行っている．2009 年度には再資源化率が 99.8%を達成しており，限りなく廃棄ゼロに近い資源循環を達成している．

以上のように富士ゼロックスでは，製品構造の工夫に加えて国際資源循環システムを確立することで，効果の高い製品ライフサイクル・システムを実現している．

2.4. ライフサイクル設計

2.4.1. ライフサイクル設計の概要

2.3 節で挙げた事例からも分かるように，製品ライフサイクルにおける資源やエネルギーの消費量，廃棄物量，環境負荷を低減するためには，製品の機能や製造性だけでなく，メンテナンスやリマニュファクチャリング，リサイクルといった製品のライフサイクル全体を考慮して製品とそのライフサイクル・フローを設計することが必要不可欠である．このように，製品そのものだけでなく，そのライフサイクル・フローも含めて製品ライフサイクル全体を設計することで 2.2 節に示したような問題を解決するアプローチとして，ライフサイクル設計[2]が提案されている．

ライフサイクル設計の基本的なコンセプトは，製品だけでなくその生産から回収・再資源化に至るまでの製品のライフサイクル・フロー全体についても設計することにある．そのために重要なのは，物理的な寿命や価値寿命，使用方法といった製品のライフサイクル特性に適したライフサイクル戦略を策定することと，この戦略が実現するように製品とそのライフサイクル・フローを設計することの 2 点である．ライフサイクル設計の設計プロセスを図 2-5 に示す[2]．ライフサイクル設計は，大きく分けると「(1) 現状分析」「(2) ライフサイクル戦略の策定」「(3) 製品設計」「(4) ライフサイクル・フロー設計」「(5) ライフサイクル評価」の 5 つのフェーズから構成される．以下にそれぞれのフェーズの内容を述べる．

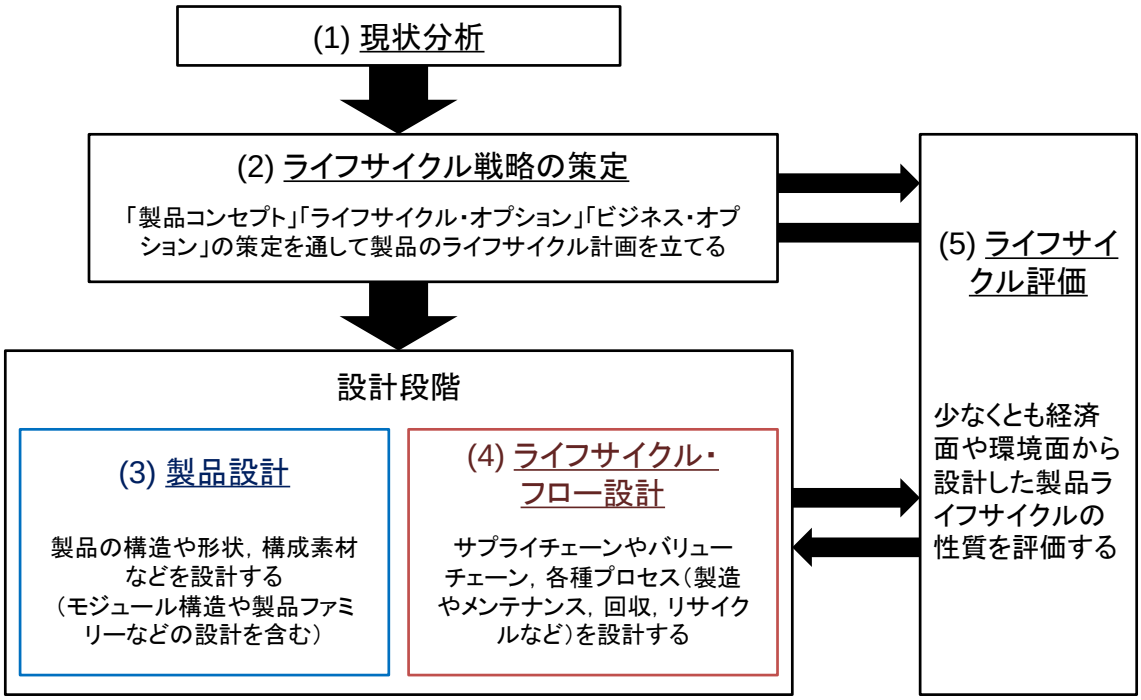


図 2-5 ライフサイクル設計の設計プロセス

(1) 現状分析

設計の対象とする製品を取り巻く社会情勢や各種法制度，顧客ニーズなどの市場状況，技術動向，会社の方針，既存製品やそのライフサイクル・フローの問題点などを分析することで，製品ライフサイクルの目標（例えば CO2 排出量を前世代製品比 20%減）を定める．

(2) ライフサイクル戦略の策定

現状分析の結果から設定した製品ライフサイクルの目標が達成するように，製品とそのライフサイクル・フローの両面から製品ライフサイクルの基本的なコンセプトを策定する．梅田ら[26]によると，ライフサイクル戦略は少なくとも「製品コンセプト」「ライフサイクル・オプション」「ビジネス・オプション」の 3 つを含む必要がある．

製品コンセプトとは，設計対象となる製品がユーザーに提供すべき価値やその製品の機能構造や設計解原理を指す．製品コンセプトの策定は，製品を設計するうえでその設計解概念を作成する重要なプロセスである．

ライフサイクル・オプションとは，製品やその構成要素が辿るライフサイクル・フローの選択肢（図 2-6 参照）である．ライフサイクル・オプションを策定する際には，製品のライフサイクル特性（製品の寿命や販売期間，使用方法，など）を十分に検討したうえで，製品およびそれを構成するモジュールや部品，素材に対してライフサイクル・オプションをうまく組み合わせて適用することで，製品ライフサイクル全体として経済性や環境性などの向上を目指す．

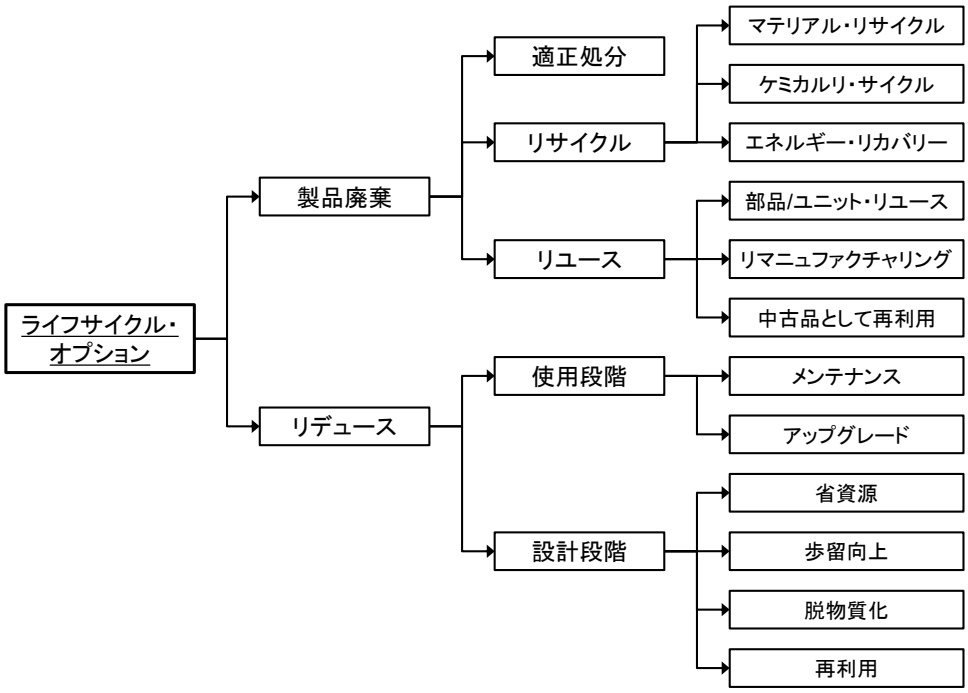


図 2-6 ライフサイクル・オプションの分類

ビジネス・オプションとは，製品の販売形態（例えば売り切りかリースか）やサプライチェーン，製品を取り巻くサービス形態などを指す．ビジネス・オプションは，資源をなるべく消費せずにユーザーの満足できるサービスを提供することができるような方法を検討した上で策定する．

ライフサイクル戦略の策定段階では，これら 3 つの項目の検討を通して，経済性や製品としての質を維持した上で，資源消費や環境影響を最小化することができるような製品の循環方法を検討することが大目標となる．

(3) 製品設計

策定したライフサイクル戦略が実現できるように，製品を構成する各部品の形状や配置，構成素材，部品間の接続方法などを設計する．ただし，この製品設計の段階はライフサイクル戦略を製品に反映させる段階であり，2.1 節で述べた一般的な製品設計のプロセス全体の中の一部にあたる．例えば，(1)役割の明確化や(2)概念設計はライフサイクル戦略の策定における製品コンセプトを決定する際にも行われる．この段階では，製品の機能や製造段階だけに限らず，メンテナンスやリサイクルといった製品の使用以降の段階についても考慮した上で製品の構造や形状を設計することが重要となる．

(4) ライフサイクル・フロー設計

製品設計とあわせて，ライフサイクル戦略を実現できるように，製造やメンテナンス，回収，リサイクルといった製品のライフサイクル・フローを設計する．具体的には，製品の構成部品の循環経路やサプライチェーン，バリューチェーン，各プロセスにおける処理内容や施設・設備などを設計する．

(5) ライフサイクル評価

ライフサイクル評価の段階では，ライフサイクル全体の利益や二酸化炭素排出量，リサイクル率といった資源循環に関わる様々な指標を用いて設計した製品ライフサイクルの評価を行う．ライフサイクル設計の各フェーズでは，このライフサイクル評価を通して設計したライフサイクル戦略や製品ライフサイクルがビジネスとして成り立つのか，また現状分析の結果から設定したライフサイクルの目標が達成されているかといった点を確認しながら設計を進めることが不可欠である．また，複数の設計案がある場合には，これらの評価を通して比較検討を行い，設計案を取捨選択していくことが重要となる．

2.4.2. ライフサイクル設計の支援

2.4.1 項で述べた(1)現状分析や(2)ライフサイクル戦略の策定の段階においては，製品の物理寿命や廃棄要因などのライフサイクル特性，技術や企業イメージなどの企業内部の要因，ユーザーのニーズや法規制などの企業外部の要因といった様々な情報を検討したうえで，ライフサイクル戦略を立てることが重要となる[27]．例えば，使用時の消費エネルギーの省エネ技術が継続的に改善されている製品に関しては，製品を長く使い続ける長寿命化の戦略を取るよりも，より省エネが進んだ製品を積極的に導入する戦略（いわゆる迅速循環[28]）が有効である．この段階を支援するためには，これらの情報を収集・分析するための支援手法，そしてこれらの情報をもとにライフサイクル戦略を立案・評価するための支援手法が必要となる．また，ライフサイクル戦略を評価するためには，経済性や環境性などの様々な側面から製品ライフサイクルを評価することができるような評価手法が必要不可欠である．

2.4.1 項で述べた(3)製品設計や(4)ライフサイクル・フロー設計の段階においては，第 1 章でも述べたように，製品ライフサイクルを製品とライフサイクル・フローという 2 つの視点から設計することが重要となる．例えば，製品設計において製品のライフサイクル・フローを考慮せずにやみくもに分解性設計を行うことは，不必要な設計を増やす原因となり，かえってコストや環境負荷の増大につながる可能性がある．一方でライフサイクル・フローの設計においても，製品の構造や形状などに基づいて製造工程やリサイクル工程などを設計しなければならない．さらに，例えば製品の製造性（例えば組み立てのしやすさ）だけを考慮して製品を設計すると，リサイクルにおける製品の分解や廃棄などが困難になる可能性があり，製品およびライフサイクル・フローは製品のライフサイクル全体という視点から設計する必要がある．したがって，製品とライフサイクル・フローの設計は，それぞれを個別に行うのではなく，上記のような製品とライフサイクル・フローの間の関係に注意しながら両者を同時並行的に設計することが重要となる．この段階を支援するためには，製品ライフサイクル全体の視点から製品とライフサイクル・フローの間の関係を明らかにすることで設計を支援する手法や，製品とライフサイクル・フローの情報を用いて経済性や環境性などの様々な側面から製品ライフサイクルを評価することができるような評価手法が必要不可欠である．

また，ライフサイクル設計全体の流れを円滑に進めるためには，これらの支援手法がライフサイクル設計の一連の流れとしてつながっている必要がある．このような設計支援手法を構築することで，経済性や製品としての質を維持した上でより環境影響の低減効果が高い製品ライフサイクル・システムを効率的に生み出せるように設計者の設計活動を支援することが，ライフサイクル設計を支援する上での最大の目標となる．

2.5. ライフサイクル設計支援の関連研究

環境に配慮した製品設計の実現に向けて，様々な設計方法論やその支援手法が研究されている．本節では，2.4 節で述べたライフサイクル設計の支援に関連する研究について調査することで，ライフサイクル設計を支援する上で残された課題を明らかにする．

2.5.1. ライフサイクル戦略の策定手法

ライフサイクル戦略の策定における基本的な課題は，設計対象となる製品のライフサイクル特性に合わせて，製品やその構成部品に対して 2.4 節に示したようなライフサイクル・オプションから適切なものを選択して組み合わせることである．このライフサイクル戦略の策定を支援する手法として，様々な手法が研究されている．梅田ら[29]は，設計対象となる製品の類似製品が廃棄される要因を，機能消費，外観，容量，故障，機能の陳腐化という 5 つの廃棄要因項目について廃棄要因分析表を用いて分析することで，その廃棄要因を削減または軽減することで製品や部品の長期使用を可能とするようなライフサイクル・オプションの選択を支援するような手法を提案している．小林[30]は，品質機能展開（QFD: Quality Function Deployment）とLCA（Life Cycle Assessment）[31]の評価結果を組み合わせて用いることで，部品レベルでのライフサイクル・オプションの選定を支援するライフサイクル・プランニング手法を提案している．Rao ら[32]は，製品のエンドオブライフに影響を与える分解コストやCO_2排出量などのパラメータ間の相関関係を，マトリクスを用いて評価することで，複数の製品の資源循環戦略の中から最適なものを選択する手法を提案している．また Kwak ら[33]は，Transition Matrix を用いて製品設計と資源循環フローとの間の関係を評価することで，利益最大化の観点から資源循環フローを最適化するような設計手法を提案している．

福重ら[34]は，ライフサイクル戦略の策定を試行錯誤的に支援する手法としてライフサイクル・シナリオ記述支援手法を提案している．ライフサイクル・シナリオとはライフサイクル戦略の一部である「製品にどのような一生を送らせるか」を表すライフサイクル・オプションを，以下に述べる 4 つの項目により表現する手法である．

- **ライフサイクルの目的**：ライフサイクル設計全体の意図を文章や具体的な数値で表現したもの．例えば，廃棄物量を 50%削減する，CO_2 排出量を前世代製品比 20%削減する，など．
- **ライフサイクル・コンセプト**：製品全体の循環方法を簡潔な文章で表現したもので，ライフサイクル・シナリオの基本方針となる．例えば，製品を長寿命化する，など．
- **ライフサイクル・オプション**：製品の各構成部品に対して 2.4 節に示したライフサイクル・オプションを選択・適用する．
- **ライフサイクル・フロー**：製品や部品などのモノやそれに付随した金銭や情報のやり取りをフロー図として表現したもの．

ライフサイクル・シナリオ記述支援手法は，このライフサイクル・シナリオを記述する際に各項目の代替案や設計根拠を管理することで，複数の案を同時並行的に試行錯誤しながら立案・比較検討できるライフサイクル・プランニング手法である．

2.5.2. 要素設計技術（Design for X）

製品ライフサイクルの特定の段階の特定の側面に注目して，その設計を支援する手法としては様々な研究が行われており，設計現場でも多く取り入れられるようになってきている[35][36]．要素設計技術の例を以下に示す．

- **組み立て性設計（Design for Assembly），製造性設計（Design for Manufacture）**

  Boothroyd ら[37][38]は，手作業の組み立てと自動組み立ての両方を対象として組み立て時の様々な動作（例：部品を掴んで挿入する）の難易度を評価することで，製品の組立時間や組み立てコストを見積もり，コスト最小化の観点から組立手順を最適化する手法を提案している．また芝池[39]は，単位環境負荷量あたりの製品の性能として環境調和性を定義し，この環境調和性とコストパフォーマンスを総合して材料選択の最適化を可能とする手法を提案している．

- **分解性設計（Design for Disassembly）**

  Boothroyd ら[37]は，製品の分解順序を指定し，どの部品が分解順序で他の部品の前に来るのかを表す分解優先順位を割り当てることで，分解順序をコスト面から最適化することができる手法を提案している．また大橋ら[40]は，リサイクルを行うための製品の分解を主眼として，部品の移動や工具の使用などの分解動作をスコアリングすることで，製品の分解時間を推定する手法を提案している．この手法では，設計図などの設計段階で入手可能な情報だけで分解時間を評価でき，また分解しやすさが分解性評点として 100 点満点で出力されるため設計の良否が判断しやすいというメリットがある．若松ら[41]は，製品を構成する各部品の配置や部品間の接続関係などから部品制約グラフおよびアクセスグラフを作成し，これらのグラフを用いることで部品を分解または破壊することによって対象部品（取り出したい部品）までより少ない工程数で到達することができる分解手順を生成する手法を提案している．Duflou[3]らは，実際に行われている分解性を考慮した設計事例として，機械による自動切断や電気や熱による変形を用いた自動分解手法を紹介している．

- **アップグレード設計（Design for Upgradability）**

  下村ら[4]は，将来の市場や技術の動向を定量的に予測することで製品のアップグレード計画を構成し，さらに予測の不確実性に起因する将来の予期せぬ事象に追従して柔軟にアップグレード計画を修正する方法を提案している．また Xing ら[42]は，製品のアップグレードに関する特性を Compatibility of generational variety (CGV)および Fitness for extended utilization (FEU)，Life-cycle oriented modularity (LOM)の 3 つの指標を用いて定量的に評価することで，アップグレードにおけるコストを最小化するように製品を設計する手法を提案している．

- **リサイクル性設計（Design for Recyclability）**

  Kuo ら[5]は，CAD モデルや企業資源計画（Enterprise Resource Planning），プロダクト・ライフサイクル・マネジメント（Product Life-cycle Management: PLM）を統合したモデルを提案することで，設計時においてリサイクルのための製品の分解工程の設計やリサイクル率およびリサイクル

におけるコストを評価することができる設計環境を開発している．また Perry ら[43]は，炭素繊維材料のリサイクルを例題として複合材料のリサイクルを対象とした設計手法を提案している．さらに水野ら[44]は，製品の End-of-Life シナリオを記述することで製品を構成する各部品の構成素材とリサイクルにおける分解・分別方法を明記し，それらの情報を用いて製品全体のリサイクル可能率を推定する手法を提案している．

- **その他**

設計時に検討すべき項目（例：なるべく同一種類のねじを用いて締結する）を羅列した様々な設計のガイドライン[45][46][47][48]やチェックリスト[6][49][50]が提案されている．

2.5.3. ライフサイクル評価手法

設計した製品ライフサイクルを評価する代表的な手法として LCA（Life Cycle Assessment）[31]がある．LCA とは，製品やサービスなどが環境に与える影響を，原料採取から設計，生産，流通，消費，廃棄に至るまでの各段階における資源・エネルギーの消費と環境負荷を定量的に分析し，総合評価する手法である．評価は(1)目的の設定と対象範囲の特定，(2)インベントリ分析，(3)影響評価，(4)解釈の 4 つのステップで行う[2]．特に，(3)の影響評価では，各排出物や資源利用が環境へ及ぼす影響を多方面から定量的に評価するために様々な環境影響統合手法が開発されており，例えば LIME（Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling）[54]では，人間の健康，社会資産，生物多様性，一次生産量の 4 つのカテゴリーに分けて，被害量を外部費用として合算して定量的に評価している．

また梅田ら[55]は，製品ライフサイクルを評価する手法としてライフサイクル・シミュレーション（Life Cycle Simulation: LCS）を提案している．ライフサイクル・シミュレーションは物質やお金，情報の流れを製品ライフサイクル全体にわたって離散事象シミュレーション技術を用いてシミュレーションするための手法であり，製品の生産数や市場におけるシェア，ストックなどの時間変化を考慮した動的なシミュレーションが可能である．また，製品や部品の状態に応じた循環経路の条件分岐を扱うことができるため，ループを含む複雑な製品ライフサイクルの評価も可能となる．LCA と比較すると，製品ライフサイクルをモデル化する際の自由度が高く，かつ経済性など環境面以外も評価できるという特徴がある．ライフサイクル・シミュレーションでは，製品ライフサイクルを製品とプロセスのネットワークの 2 つに分けてモデル化している．製品は，製品－モジュール－部品という 3 段階で表現しており，それぞれ以下のような情報を持つ．

- 製品：製品価格など製品固有のパラメータ，製品の構成部品のリストとそれらの部品間の接続関係
- モジュール：モジュール価格などのモジュール固有のパラメータ，モジュールの構成部品のリストとそれらの部品間の接続関係
- 部品：材料や重量などの部品固有のパラメータ

プロセスのネットワークは，製造や使用，リサイクルのようなプロセスとそれらのプロセス間のモノやお金，情報の流れをプロセスの間をリンクで結ぶことによって表現している．各プロセスは，定数パラメータ（Given parameter），入力パラメータ（Input parameter），出力パラメータ（Output parameter），計算手順（Procedure）の 4 つの情報を持っている．

- 定数パラメータ：単位時間当たりの人件費のようなプロセスの特性値を表す．特性値はそのプロセスの行為者や処理地域などによって決まる．
- 入力パラメータ：他のプロセスから入力する値を表す．
- 出力パラメータ：他のプロセスへと出力する値を表す．
- 計算手順：定数パラメータ，入力パラメータ，出力パラメータの 3 つのパラメータ間の関係を表現したもの．例：材料生成コスト＝単位重量あたりの生成コスト×素材重量

ライフサイクル・シミュレーションでは，あるプロセスの出力パラメータを次のプロセスの入力パラメータとして用いて，そのプロセスの定数パラメータと計算手順に従ってそのプロセスの出力パラメータを算出する（**図 2-7** 参照）．これを製品ライフサイクルにおける全てのプロセスについて実行することで，製品ライフサイクル全体の利益などの経済性や CO2 排出量などの環境性を評価することができる．

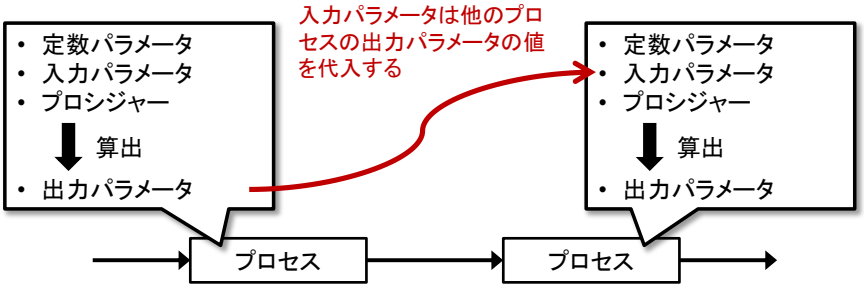


図 2-7 ライフサイクル・シミュレーションの評価手順

2.5.4. 製品ライフサイクルの管理手法

マーケティングから企画，製品設計，製造，販売，リサイクルに至るまでの製品開発の各プロセスにおいて，製品にまつわる情報を管理する手法を PLM（Product Lifecycle Management）[51][52]という．PLM は，製品開発の期間短縮や生産の効率化，顧客の求める製品の適時市場投入を目的として，企画や設計，製造といった製品開発に関わる各部門間で設計・開発データを管理することを目的としている．管理する情報には，顧客や環境基準，法規制，CAD 情報，電子図面，仕様情報，品質情報，価格情報などが含まれ，これらの正確な情報を製造業の各部門に一貫して提供することで，品質を維持しながら市場投入を迅速化することが可能となる．代表的な PLM ソフトウェアとして Siemens の Teamcenter [53]があり，市場や顧客のニーズの管理や法規制の管理，スケジュール管理，CAD/CAM/CAE システムで作成したエンジニアリング・データの管理，製造プロセスのプランニング，各種シミュレーション・データの管理などが可能になる．

2.6. ライフサイクル設計の支援に向けた課題

従来の製品設計においては，製品の機能や製造段階について考慮して製品を設計していたが，メンテナンスやリサイクルといった製品の使用以降の段階については十分に考慮されていなかった．例えば，2.1 節で挙げた CAD システムは，製図作業や重量計算などの種々の計算を支援することで，意匠や強度といった製品の特性を考慮して製品を設計・製図することは可能であるが，製品のライフサイクル・フローを明示的に設計することはできない．

そこで，製品ライフサイクル全体を考慮して製品を設計するアプローチとして，2.4 節においてライフサイクル設計を挙げた．そして，このライフサイクル設計の支援に関連する研究として，2.5 節において，「ライフサイクル戦略の策定」「要素設計技術（Design for X）」「ライフサイクル評価手法」「製品ライフサイクルの管理」の 4 項目について調査を行った．2.5.1 項で挙げたライフサイクル戦略の策定支援手法は，様々な情報を考慮しながら製品のライフサイクル戦略を策定するには効果的な手法である．また，2.5.2 項で述べた要素設計技術は，製品ライフサイクルの特定の段階（例えば，製造段階における組立性やリサイクル段階における易解体性）に注目した設計支援手法であり，その側面における経済性や環境性などを向上させるように製品やライフサイクル・フローを設計するには有効な手法である．さらに 2.5.3 節で挙げたライフサイクル評価手法は，経済性（例えば利益やコスト）や環境性（例えば CO2 排出量）など製品ライフサイクルを様々な側面から評価する上で有効な手段である．また，これら設計・評価の情報を製品ライフサイクルの各段階で管理する手法として 2.5.4 項で挙げた PLM が提案されている．

以上のように，2.4 節で述べたライフサイクル設計の各段階を支援する手法としては様々な手法が提案されており，それらは成熟を見せつつあるといえる．しかしながら一方で，ライフサイクル設計を一連の流れとして支援するためには，以下の 2 点が不足している．

(1) ライフサイクル戦略の策定段階と製品とライフサイクル・フローを設計する段階，ライフサイクル評価を行う段階がうまく結びついていない

製品やライフサイクル・フローはライフサイクル戦略に基づいて設計するが，同時に製品やライフサイクル・フローの設計の進展に応じてライフサイクル戦略の策定段階に立ち返ってその戦略を修正することも考えられる．2.5.1 項で挙げたようにライフサイクル戦略を実現するために製品やライフサイクル・フローが満たすべき項目を抽出するような手法は存在するが，ライフサイクル戦略と製品やライフサイクル・フローとの間の関係を明確にすることでライフサイクル戦略の策定段階と製品とそのライフサイクル・フローを設計する段階をシームレスにつなぐような設計支援手法はまだ提案されていない．また，ライフサイクル評価を行うためには，製品やライフサイクル・フローの情報（例えば製品の構造や分解手順）が必要であり，またその評価結果を製品やライフサイクル・フローに反映させなければならない．2.5.3 節で挙げたライフサイクル評価手法は，設計した製品ライフサイクルの経済性（例えば利益やコスト）や環境性（例えば CO2 排出量）を評価する上では有効な手段ではあるが，評価のために製品やライフサイクル・フローのモデルを作成しなければならず，またその結果をライフサイクル戦略の策定や製品設計，ライフサイクル・フロー設計に反映する仕組みがない．

(2) 製品ライフサイクル全体の視点から製品とライフサイクル・フローの設計を支援できていない

2.4 節で述べたように，ライフサイクル設計においては，製品のライフサイクル全体という視点から製品とそのライフサイクル・フローの関係に注意して両者を同時並行的に設計することが重要となる．2.5.2 項で挙げた要素設計技術は，製品ライフサイクルの特定の段階の特定の側面に注目して製品やライフサイクル・フローを設計する上では有効な手法であるが，製品ライフサイクル全体という視点が欠けている．製品の軽量化や省エネルギー化，リサイクル率の向上など製品ライフサイクル全体を通じた様々な段階における製品とライフサイクル・フローの関係を評価・管理できるような設計支援手法はまだ提案されていない．

2.7. ライフサイクル設計を支援するための製品ライフサイクルのモデル化のための課題

2.6 節で述べたように，ライフサイクル設計を支援するためには，ライフサイクル設計の一連の流れを支援する計算機環境が必要不可欠である．本研究では，このような計算機環境を「ライフサイクル CAD システム」と呼ぶことにする．ただし，ライフサイクル CAD システムは，ライフサイクル設計の無人化を図るものではなく，人間の設計活動を補助するツールを目指す．本研究ではその第一歩として，ライフサイクル CAD システム構築のために必要不可欠な，製品ライフサイクルのモデリング方法に注目する．

ライフサイクル設計においては，2.4 節で述べたように，常に製品とライフサイクル・フローという 2 つの視点から製品ライフサイクルの全体を設計することが重要になる．したがって，製品ライフサイクルのモデリング方法においては，設計対象である製品の情報（製品の形状や構成素材など）およびライフサイクル・フローの情報（プロセスとその間のモノやお金，情報の流れなど）が表現できているだけでなく，以下のような点に注意する必要がある．

(1) 製品とライフサイクル・フローの関係が表現可能である

製品ライフサイクルを設計する際には，製造段階における製品とライフサイクル・フローの関係や，リサイクル段階における製品とライフサイクル・フローの関係を同時に表現可能とすることで，製品の製造性や易解体性など製品ライフサイクルにおける様々な側面からの設計を可能とすることが必要不可欠である．これを可能とするためには，製品やその構成要素がどのような状態（例：故障の有無）でライフサイクル・フローのどのプロセスを辿るのかといった製品とライフサイクル・フローの対応関係が表現されている必要がある．

(2) 製品とライフサイクル・フローの情報を用いたライフサイクル評価が可能である

ライフサイクル評価を通して製品ライフサイクルの経済性や環境性などを評価するためには，製品とライフサイクル・フローの両方の情報が必要である．例えば，製品をリサイクルする際の経済性を評価するためには，処理コストを算出するためにリサイクル・プロセスの情報が必要であるし，リサイクルよる利益を算出するために製品の構成素材の情報が必要となる．したがって，ライフサイクル設計の各段階において製品とライフサイクル・フローの様々な情報が常に対応付いた状態で管理されているようなモデリング方法が必要不可欠である．

(3) 製品とライフサイクル・フローの関係が適したものとなっているか評価可能である

製品とライフサイクル・フローの「適した」関係とは，ひとことで言うと「その製品ライフサイクルが容易に実行できる」ということである．例えば，ユーザーが消耗部品を交換するライフサイクル・フローに対して，製品を完全にバラバラにしないとその交換部品が取り出せないような製品が設計されている場合にはその製品とライフサイクル・フローの関係は適しているとは言えない．製品とライフサイクル・フローの関係が不適切であるのは，(i)実行が不可能である場合と，(ii)実行不可能ではないが困難である場合，の 2 つのレベルに分けて考えることができる．(i)の実行が不可能な場合とは，例えばリサイクルする部品にリサイクルが不可能な素材が含まれているといったように，現状（もしくは近い将来）の技術レベルや物理法則において製品ライフサイクルが実行不可能である場合を指す．本研究では，このような製品とライフサイクル・フローの関係を製品とライフサイクル・フローの間の「整合性」と呼ぶことにする．このレベルの製品とライフサイクル・フローの関係を評価するためには，製品とライフサイクル・フローの間の整合関係を定義することで，この整合性を管理することができるような手法が必要である．一方で，(ii)のような実行が困難である場合は，処理に大きなエネルギーが必要であったり多大な処理時間が必要であったりといった理由から経済性や環境性などが著しく低いなどの理由でその実行が困難となる場合を指す．このレベルの製品とライフサイクル・フローの関係を評価するためには，製品ライフサイクルにおける処理時間や経済性，環境性などを評価することができる手法が必要となる．

上記の点に基づいて本研究では，ライフサイクル設計の設計対象である製品とライフサイクル・フローの 2 つをそれぞれ製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルとしてモデル化し，これらのモデルを対応付けることで製品ライフサイクルを表現する手法を提案する．また，製品とライフサイクル・フローの関係が適したものとなっているかの評価の第 1 段階として，“(i) 実行が不可能である場合”に注目して，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いて両モデル間の整合性を評価する手法を提案する．

2.8. 第 2 章のまとめ

本章では，製品設計および環境問題の現状を整理することで，製品設計における現状の課題として製品ライフサイクル全体を考慮した設計が必要であることを明らかにした．また，製品ライフサイクル・システムの構築に成功した例としてレンズ付きフイルム（富士フイルム）と複写機（富士ゼロックス）を挙げた．

また本章では，製品設計の現状の課題を解決する一つのアプローチとして，製品ライフサイクル全体を設計するライフサイクル設計について述べ，ライフサイクル設計を支援するためには(i)様々な情報を収集・分析することでライフサイクル戦略を立案・評価するための支援手法，(ii)製品ライフサイクル全体の視点から製品とライフサイクル・フローの間の関係に注意しながら両者を設計・評価するための支援手法，(iii)これらの手法がライフサイクル設計の一連の設計の流れとしてつなが

っていることが必要であると述べた．このライフサイクル設計の支援に関する既存研究として「ライフサイクル戦略の策定」「要素設計技術（Design for X）」「ライフサイクル評価手法」「製品ライフサイクルの管理」について調査を行った．その結果として，ライフサイクル戦略の策定や製品のライフサイクル・フローの特定の側面に注目した個々の要素設計技術，ライフサイクル評価の手法などライフサイクル設計を支援するための個々の手法は成熟を見せつつあるといえるが，これらを 2.4 節で述べたライフサイクル設計の一連の流れとして結びつけるための設計支援が不十分であることを明らかにした．

さらに，ライフサイクル設計の一連の設計プロセスを支援する計算機環境であるライフサイクル CAD システムの実現に向けた第 1 段階として，製品ライフサイクルのモデリング手法に注目する．特に，(i)製品ライフサイクルを表現する手法，(ii)製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理する手法，の 2 つの手法を提案することを述べた．

本論文では第 3 章で，製品ライフサイクルのモデリング手法を提案する．また，この製品ライフサイクルの表現手法を用いて，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理する手法を提案する．そして第 4 章において，これらの手法に基づいて開発した計算機環境である「ライフサイクル・モデリング・システム」について述べる．

第3章

製品ライフサイクルのモデリング

第 3 章では，製品ライフサイクルをモデリングする手法について述べ，さらにその手法を用いて製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理する手法を提案する．具体的には，まず製品ライフサイクルを表現するために必要な項目を整理する．その上で，製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを定義する．そして，これらのモデルを対応付けることで製品ライフサイクルを表現する手法について述べる．またその際には，この表現手法上で製品ライフサイクルにおける様々な製品状態が表現できていることを示す．さらに，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの整合性管理手法として，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係の基本パターンを定義することで，ライフサイクル・プロセスの入出力に過不足が生じないように製品ライフサイクルが表現されているかどうかを管理する手法を提案する．

3.1. 製品ライフサイクルのモデリング手法

3.1.1. 製品ライフサイクルのモデリング手法の基本コンセプト

本研究では製品ライフサイクルを製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いて表現する．製品ライフサイクルの例を**図 3-1** に示す．この図に示すように，製品ライフサイクルには様々なプロセスがあり，製品はそのプロセスにおいて様々な処理をされる．例えば，「部品製造」プロセスにおいては鉄板のプレス加工や樹脂の射出成型により部品が製造され，「破砕・選別」プロセスにおいては，リサイクルを行うために破砕され，素材ごとに選別される．

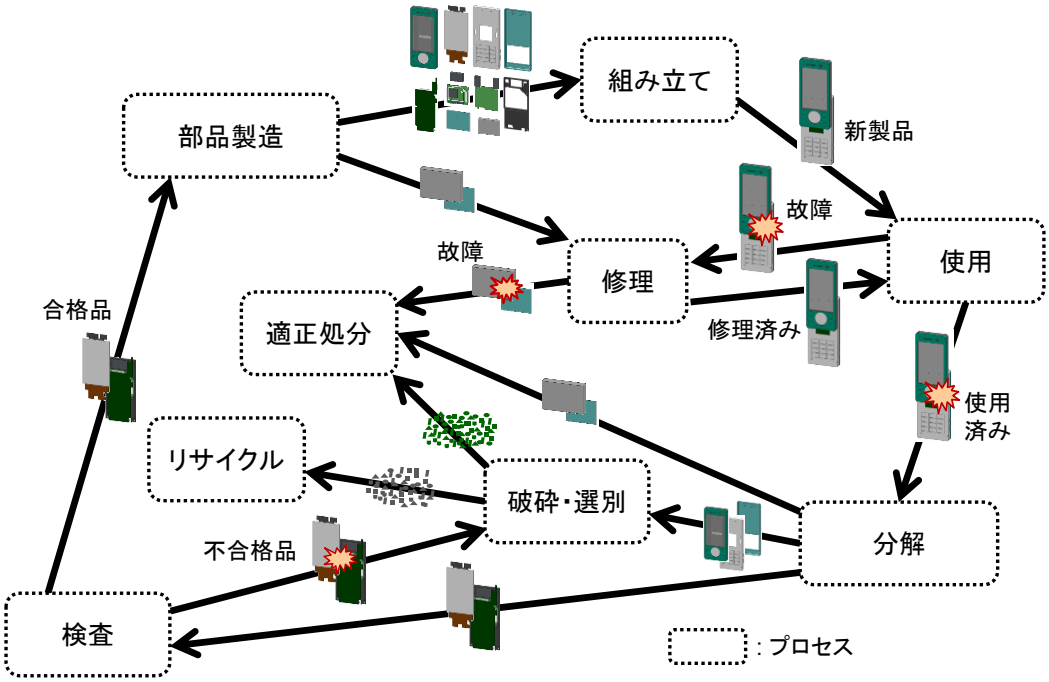


図 3-1 製品ライフサイクルにおける様々な処理工程

この製品ライフサイクルを表現するためには，以下の 2 点に注意する必要がある．

(1) 製品を構成する部品ごとに辿るライフサイクル・フローが異なる．

例えば第 2 章で挙げたレンズ付きフイルムでは，「フイルム」と「レンズユニット」は別の工程で製造され，「フイルム」は現像所で回収されて現像作業が行われるのに対して，「レンズユニット」は工場に運ばれて検査，洗浄を経て再びレンズ付きフイルムに再利用される．したがって，「フイルム」は現像所で現像作業がしやすいように設計しなければならないのに対して，「レンズユニット」は工場で機械による分解や検査をしやすいように設計しなければならない．また，部品はその部品単体としてライフサイクル・フローを辿るだけではなく，部品を組み立てたり製品を分解したりすることでいくつかの部品のアセンブリ（本研究ではこれをモジュールと呼ぶ）としてライフサイクル・フローを辿ることがある．部品やモジュールとそれらが辿るプロセスの組み合わせが適したものとなるように両者を設計できるようにするためには，各部品やモジュールがどのようなプロセスを辿るのかを表現することが必要不可欠である．

(2) 部品やモジュール，製品は製品ライフサイクルを通じてその状態が変化する．

例えば，鉄板をプレス加工することで部品を製造するプロセスでは「鉄板⇒部品」のように状態が変化しており，リサイクルのためにモジュールを破砕するプロセスでは「モジュール⇒破砕片」のように状態が変化している．また，使用前の新品の製品や故障した製品，アップグレードを行った製品などといったように同じ製品でも様々な状態を取る．したがって，製品ライフサイクルを表現する際には以下の 2 点に注意しなければならない．

- 製品ライフサイクルにおいて現れる部品に加工する前の鉄鉱石や鉄板，リサイクルにおける破砕片やペレットなどは，製品やそれを構成するモジュールや部品とは異なる物質である．しかしながら，例えばリサイクル・プロセスを設計する際には破砕片の大きさが重要となるなど，製品ライフサイクルを設計する際には製品やそれを構成するモジュールや部品以外の物質についても検討することが必要不可欠である．したがって製品ライフサイクルを表現する際には，製品やその構成要素であるモジュール，部品に限らず，製品ライフサイクルを通じて現れる様々な物質を表現可能とする必要がある．
- 製品やモジュール，部品はその状態によって扱いが異なる．例えばリユースのために製品を検査するプロセスでは，製品が故障しているかどうかでその後でリユースするかどうかが決まる．したがって製品ライフサイクルを表現する際には，製品ライフサイクルのあるプロセスを流れている製品やモジュール，部品はどのような状態であるかを表現可能とする必要がある．

上記の(1)を実現するために，本研究では製品ライフサイクルにおける様々なプロセスの情報（行為者や処理地域など）とその間の物質のやり取りをライフサイクル・フロー・モデルとして，プロセスの間でやり取りされている物質の情報（形状や重量，構成素材など）を製品モデルとして表現し，両モデルを対応付けることで，製品とモジュール，部品がどのようなプロセスを辿るのかを表現する．また上記の(2)を実現するために，製品モデルにおいて，製品やそれを構成するモジュールや部品だけでなく，製品を生産，使用，再生処理する際に現れる鉱石や鉄板，スクラップのような製品ライフサイクルにおける各プロセスの間でやり取りされている様々な物質を，その物質の形状や構成素材，価値といった特性を定義することで表現する．その際に，各物質間の関係を定義することで製品ライフサイクルを通じた製品やモジュール，部品の状態変化を表現する．

以上から，各モデルはそれぞれ以下に示すような方針でモデル化する．

- 製品モデル

製品モデルでは，製品ライフサイクルにおける各プロセスの間でやり取りされている様々な物質を，その物質の特性を定義することで表現する．その際には，製品とモジュール，部品の間の関係を定義することで，製品の階層構造を表現するだけでなく，製品の構成要素（製品，モジュール，部品）とそれらを取り巻く物質の間の関係についても表現することで，製品ライフサイクルを通じて現れる様々な物質を 1 つの製品モデルとして表現する．

- ライフサイクル・フロー・モデル

  製品ライフサイクルにおける様々なプロセスを，どこで，誰が，どのような処理を行うのかを定義することで表現する．また，どのプロセスからどのプロセスに対してモノ，情報，お金が流れているかを表現することで，ライフサイクル・フローをプロセスのネットワークとして表現する．

以下，3.1.2 項において製品モデルを，3.1.3 項においてライフサイクル・フロー・モデルを定義する．そして，3.1.4 項においてこれら 2 つのモデルを用いて製品ライフサイクルを表現する手法について述べ，また 3.1.5 項においてこの製品ライフサイクルの表現手法において様々な製品の状態が表現可能であることを示す．

3.1.2. 製品モデル

3.1.1 項において，本研究では製品モデルを以下の 3 つの方針でモデル化すると述べた．それぞれの項目を表現する手法について，以下に順を追って述べる．

(i) 製品ライフサイクルを通じて現れる様々な物質をその物質の形状や構成素材，価値といった特性を定義することで表現する
(ii) 製品とモジュール，部品の間の関係を定義することで製品の構造を表現する
(iii) 製品の構成要素（製品，モジュール，部品）とそれらを取り巻く物質の間の関係を表現する

(i) 製品ライフサイクルを通じて現れる様々な物質の表現

製品ライフサイクルを通じて現れる様々な物質をその物質の形状や構成素材，価値といった特性を定義することで表現するために，製品ライフサイクルを通じて現れる様々な物質を，吉川の設計学[8]に基づいて，以下のように「実体」として定義する．

<u>実体</u>（Entity）

世の中に存在する，もしくは存在するであろう物質のまとまり（例えば部品やスクラップ，燃料）で，実体の集合（モジュールおよび製品）もまた実体である．

本研究では，この実体は「製品」「モジュール」「部品」または「その他の物質」のいずれかに分類する．また，この実体が持つその実体の物理的，化学的，または経済的な性質を表す項目を「属性」，その値を「属性値」として定義する．各実体の持ちうる属性項目の例を**表 3-1** に示す．

各実体は，これらの属性項目に対して属性値を 1 つないし複数持つ．例えば，形状や構成素材，重量などの属性値は使用段階で劣化・変質することで使用プロセスの前後で異なる値を持ち，時間によってその値が変化する．また，価値はその販売地域によってもその値が異なる．ただし，全ての実体が**表 3-1** に示した属性項目に対して属性値を持つとは限らない．例えば，ガソリンや水素のような燃料は明確な形状を持たないし，鉄鉱石やスクラップのような実体はその物理寿命が定義できない．

表 3-1 実体の持つ属性の例 [2][56]

属性	説明
形状	実体の形（寸法，公差，角，表面）
構成素材	実体を構成する素材のリスト
質量	実体全体の質量 または素材毎の質量
体積	実体が占める空間の大きさ
有害性	実体が発がん性や急性毒性，水生環境有害性などを有しているかどうか
物理寿命	実体が劣化や故障などにより物理的に使用できなくなるまでの使用期間
価値	実体の価格（売値，買値）
価値寿命	実体の外観や機能がユーザーを満足させなくなり廃棄されるまでの使用期間

製品モデルでは，この実体を「実体ノード」として表現し，全ての実体ノードは表 3-1 に示したような属性項目の値を数値や文字列として持つ．ただし，属性項目の中でも特に形状（各部の寸法や稜線・面の形状，公差，角，表面粗さなどを含む）についてはソリッドモデル[10]を用いて表現する．ソリッドモデルとして扱うことで，実体の形状を視覚的に把握でき，またそのモデルを用いて実体の体積や重量，重心などの計算が可能となるという利点がある．

(ii) 製品の構造の表現

製品の構造を表現するために製品とモジュール，部品の間の関係を定義する．製品の構造としては，(i)製品はどのようなモジュールで構成されておりまたそのモジュールはどのような部品で構成されているのかといった製品の階層構造，(ii)モジュールや部品の間にはどのような拘束関係があるのかといった製品の接続構造，の 2 つを表現する．これは，製品は部品やモジュールを組み立てることで生成され，逆に製品を分解することでモジュールや部品が生成されるため，どの部品（もしくはモジュール）同士を締結することで製品を組み立てるのか，逆にどの部品（もしくはモジュール）同士の締結を解除することで製品を分解することができるのかを表現可能とするためである．(i)の階層構造および(ii)の接続構造を表現可能とするために，本研究では実体間の相互関係として以下の 2 つの関係を定義する．

<u>階層関係</u>（Hierarchical relation）

実体間の包含関係を表し，一方が構成要素を表し，他方がその集合を表す．

例：「エンジン」と「ミッション」「スイングアーム」からなる「エンジンモジュール」の場合，「エンジンモジュール」と「エンジン」「ミッション」「スイングアーム」との間の関係

<u>接続関係</u>（Connection relation）

2 つの実体の間に拘束関係があることを表す.

本研究では，以下に示すような 2 つの拘束関係を定義する.

「固定（完全拘束）」

実体間の拘束によって両者の配置関係が完全に固定されている状態.

例：ねじや溶接によって締結されている部品同士の関係

「運動拘束（一部拘束）」

実体間の拘束によって一方または両者の自由度が一部制限されている状態.

例：ガイドレールとそのレール上を稼働する部品の間の関係

製品モデルでは，これらの関係をそれぞれ「階層リンク」および「接続リンク」を用いて相互関係のある実体ノード同士を結ぶことで，製品の階層構造および接続構造を表現する.

<u>階層リンク</u>（Hierarchy link）

実体間の階層関係を，実線矢印（図 3-2 参照）を用いて実体ノードを 1 対 1 で結ぶことで表現する. 階層リンクは，その始点にあたる実体ノードと終点にあたる実体ノードの名前を情報として持つ.

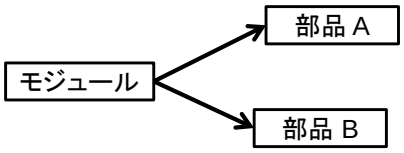


図 3-2 階層リンクの例

<u>接続リンク</u>（Connectivity link）

実体間の接続関係を，点線（図 3-3 参照）を用いて実体ノードを 1 対 1 で結ぶことで表現する. 接続リンクは，接続関係にある 2 つの実体ノードの名前と，「固定（完全拘束）」もしくは「運動拘束（一部拘束）」のいずれかの接続タイプを情報として持つ. 本研究では，図 3-3 に示すように，ねじや導線のような接続部品も 1 つの実体として実体ノードを用いて表現し，接続リンクを結ぶこととする. 図 3-3 の例では，「スイッチ」と「導線」，「モーター」，「歯車 1」の間には接続タイプが固定（完全拘束）である接続関係があり，「歯車 1」と「歯車 2」の間には接続タイプが運動拘束（一部拘束）である接続関係があることを表している.

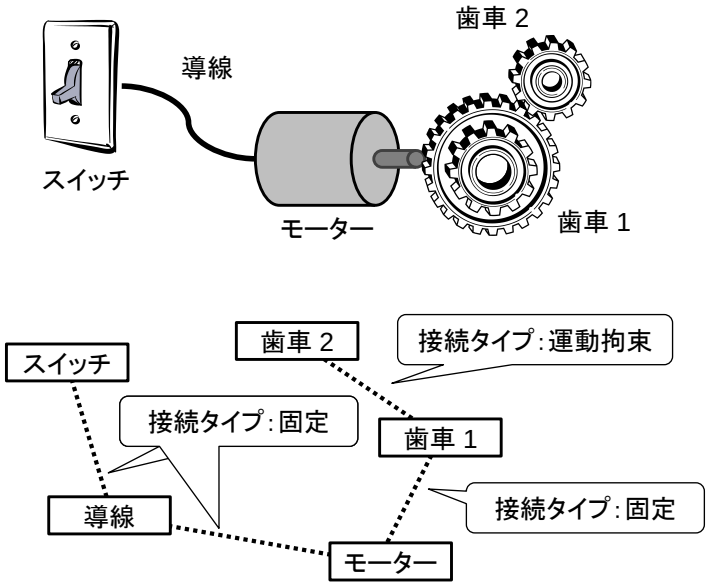


図 3-3 接続リンクの例

(iii) 製品とそれらを取り巻く物質の間の関係の表現

例えば，鉄板をプレス加工することによって部品を生成したり，モジュールを破砕することで破砕片にしたりと，製品やモジュール，部品を表す実体は何らかの処理を経ることでそれ以外の実体となり，逆にそれ以外の実体が何らかの処理を経ることで製品やモジュール，部品となっている．本研究では，このような関係を以下のように定義する．

<u>変換関係</u>（Transformation relation）

ある実体が異なる別の実体に変換する際の前後関係を表す．

例:「鉄板」をプレス加工して「部品」へと成形した際の「鉄板」と「部品」の間の関係

「部品」を破砕して「破砕片」にした際の「部品」と「破砕片」の間の関係

製品モデルでは，この関係を「変換リンク」を用いて変換関係のある実体ノード同士を結ぶことで，製品とそれらを取り巻く物質の間の関係を表現する．

<u>変換リンク</u>（Transformation link）

実体間の変換関係を，二重線矢印（図 3-4 参照）を用いて実体ノードを 1 対 1 で結ぶことで表現する．変換リンクは，その始点にあたる変換元となる実体ノードと，終点にあたる変換先となる実体ノードの名前を情報として持つ．

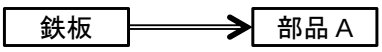


図 3-4 変換リンクの例

以上の表現手法を用いて作成した製品モデルの例を**図 3-5** に示す．ここでは，ドライヤ（部品点数 13 個）を例題として製品モデルを作成した．**図 3-5** の例では，「ドライヤ」が「筐体（右）」「筐体（左）」「ノズル」「後方カバー」「ねじ 1」からなる『本体モジュール』と「モーター」「電熱線」「羽根」「モーターカバー」からなる『ファンモジュール』，「取っ手（右）」「取っ手（左）」「スイッチ」「ねじ 2」からなる『取っ手モジュール』の 3 つのモジュールから構成されていることを表している．製品である「ドライヤ」とモジュールを表す 3 つのモジュール，そして 13 個の部品間の階層関係を，階層リンクを用いて表現し，またモジュール間や部品間の接続関係を，接続リンクを用いて表現している．また**図 3-5** では，「取っ手モジュール」を破砕した場合の金属片やプラスチック片が混在した「破砕片」やそれらを選別した「金属片」と「プラスチック片」を表す実体ノードを作成し，これらの実体ノードを変換リンクで結ぶことで破砕や選別によって現れる実体を表現している．「破砕片」と「金属片」または「プラスチック片」の間の関係においては，「金属片」と「プラスチック片」が「破砕片」の構成要素となっている（「破砕片」を選別すると「金属片」と「プラスチック片」に分かれる）おりこれらの実体間には階層関係があると考えることもできるが，本研究では階層関係は製品およびモジュール，部品を表す実体ノードの間だけに限定し，それ以外の実体の間の関係は全て変換関係であるとする．

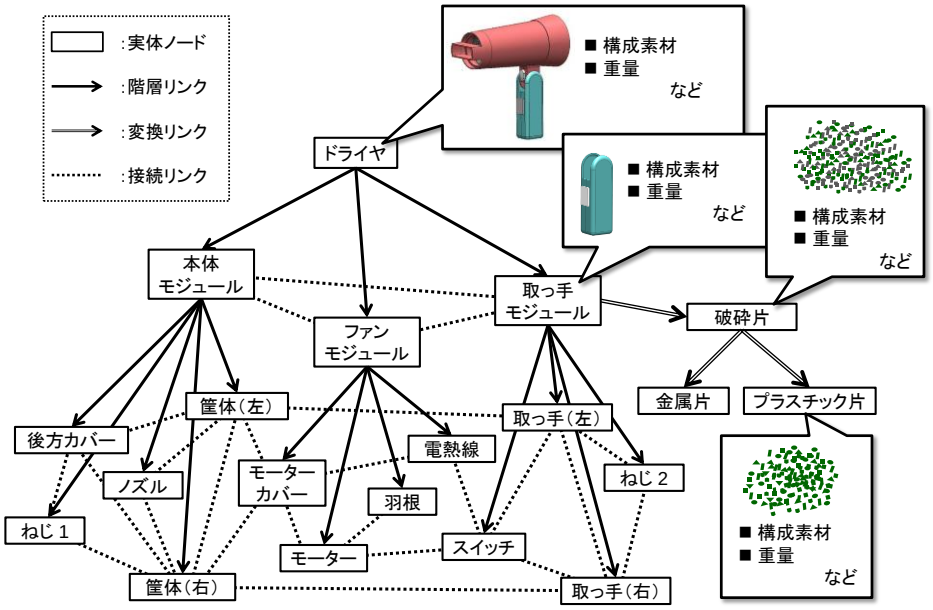


図 3-5 製品モデル

3.1.3. ライフサイクル・フロー・モデル

3.1.1 項で述べたように，本研究では製品ライフサイクルにおける各プロセスの内容とプロセス間の物質の流れを表現することで，プロセスのネットワークとしてライフサイクル・フロー・モデルを表現する．本研究では，製品ライフサイクルにおけるプロセスを「ライフサイクル・プロセス」と呼ぶことにし，以下のように定義する．

ライフサイクル・プロセス（Life cycle process）

製品ライフサイクルのある時点において，「どこで」「誰が」「何に対して」「何をするのか」を表現したもの．

このライフサイクル・プロセスが持つ「どこで」「誰が」「何に対して」「何をするのか」を表す情報を，本研究では「シチュエーション」と呼ぶことにする．このシチュエーションは，**表 3-2** に示す項目から構成する．ここで，ライフサイクル・プロセスに「入力する物質」や「出力する物質」は，始めのプロセスや最後のプロセスではその一方のみを持つことが考えられるが，ライフサイクル・プロセスの性質上少なくとも一方の値は持つこととする．

表 3-2 シチュエーションの項目

項目	説明
入力する物質	ライフサイクル・プロセスに入力する物質名
出力する物質	ライフサイクル・プロセスを出力する物質名
処理地域	ライフイサイクル・プロセスの処理を行う地域名
行為者	ライフサイクル・プロセスの処理を行う ステークホルダーの名前
処理内容	ライフサイクル・プロセスで行う処理の内容や 入力する物質と出力する物質の関係

また，このライフサイクル・プロセス間には，あるライフサイクル・プロセス A において生み出された物質が別のライフサイクル・プロセス B で用いられるといったような関係がある．本研究では，このような関係をライフサイクル・プロセス間の「入出力関係」と呼ぶことにし，以下のように定義する．

入出力関係（Input-output relation）

ライフサイクル・プロセス A において生み出された物質をライフサイクル・プロセス B で用いる場合，ライフサイクル・プロセス A と B の間には入出力関係がある．

ライフサイクル・フロー・モデルでは，ライフサイクル・プロセスを「ライフサイクル・プロセス・ノード」として表現する．また，ライフサイクル・プロセス・ノードはそのライフサイクル・プロセスのシチュエーションを情報として持つ．またライフサイクル・プロセス・ノード間の入出力関係を，「フローリンク」を用いて相互関係のあるライフサイクル・プロセス・ノード同士を結ぶことで表現する．

フローリンク（Flow link）

ライフサイクル・プロセス間の入出力関係を，矢印（**図 3-6** 参照）を用いてライフサイクル・プロセス・ノードを 1 対 1 で結ぶことで表現する．フローリンクは，その始点にあたるライフサイクル・プロセス・ノードと終点にあたるライフサイクル・プロセス・ノードの名前，そしてそのフローリンクを流れる物質の名前を情報として持つ．

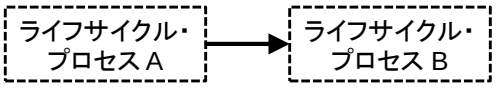


図 3-6 フローリンクの例（2 つの物質が流れる場合）

ここでフローリンクは2つのライフサイクル・プロセス・ノード間の入出力関係を表しているので，本研究ではフローリンク上で実体の状態が変化したりライフサイクル・プロセス・ノードを経ずにフローが分岐・合流したりしてはならず，部品の組み立てや分解，破砕・選別といった実体の状態変化は必ずライフサイクル・プロセス・ノードとして表現しなければならないとする．したがって，フローリンクで結んだ 2 つのライフサイクル・プロセス・ノードを出力する物質と入力する物質は等しくなければならない．例えば図 3-6 の例でいうと，ライフサイクル・プロセス A を出力する物質のうち少なくとも 1 つの項目と，ライフサイクル・プロセスBに入力する物質のうち少なくとも 1 つの項目は同一のものでなければならない．

以上の表現手法を用いて作成したライフサイクル・フロー・モデルの例を図 3-7 に示す．ここでは，図 3-5 に示したドライヤを対象として，そのライフサイクル・フロー・モデルを作成した．図 3-7 の例では，「本体モジュール」と「ファンモジュール」，「取っ手モジュール」の 3 つのモジュールを組み立てることで「ドライヤ」を製造し，使用後に 3 つのモジュールに分解して，「本体モジュール」は廃棄，「ファンモジュール」は検査した上でリユース，「取っ手モジュール」はリサイクルを行うライフサイクル・フローを想定している．

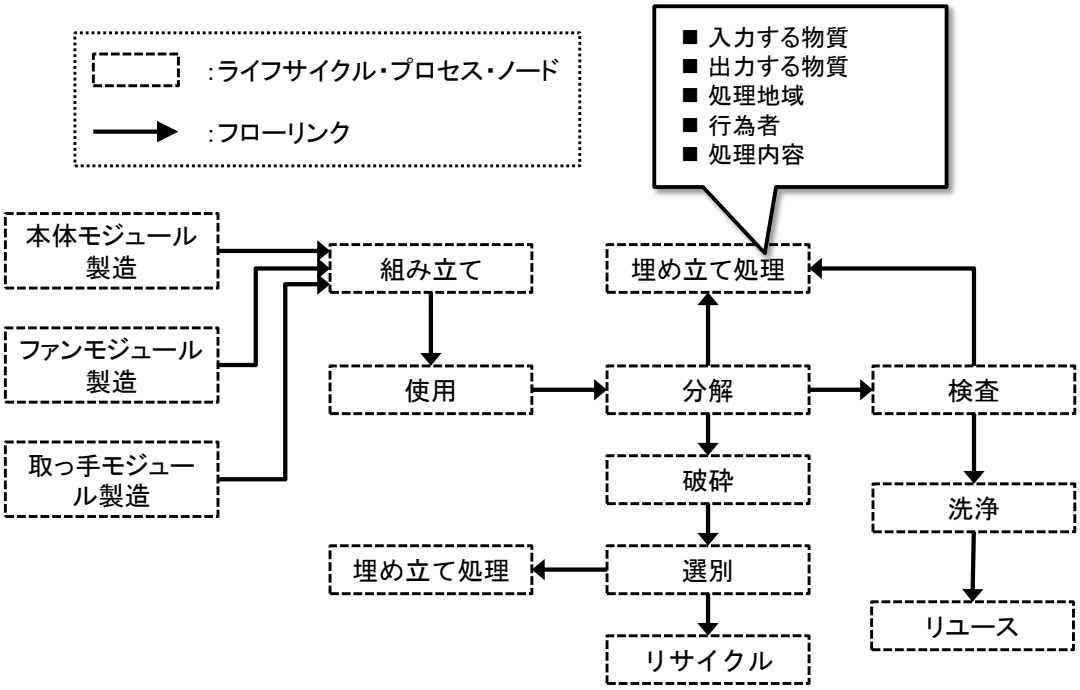


図 3-7 ライフサイクル・フロー・モデル

3.1.4. 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応付け

本研究では，3.1.1 項で述べたように，製品ライフサイクルにおける様々なプロセスの情報（行為者や処理地域など）とその間の物質のやり取りを 3.1.3 項で定義したライフサイクル・フロー・モデルとして表現し，プロセスの間でやり取りされている物質の情報（形状や重量，構成素材など）を 3.1.2 項で定義した製品モデルとして表現した．3.1.3 項で述べたように，ライフサイクル・フロー・モデルでは，ライフサイクル・プロセス間でやり取りされている物質を，1 種類の物質に対して 1 本のフローリンクを用いることで表現した．そこで製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いて製品ライフサイクルを表現するために，本研究では，ライフサイクル・フロー・モデル上のフローリンクと，製品モデル上の実体ノードとを対応付けることで表現する．具体的には，このような対応関係を以下に定義する「対応リンク」を用いて表現する．

<u>対応リンク</u>（Inter model link）

製品モデル上の実体ノードとライフサイクル・フロー・モデル上のフローリンクとの間の対応関係を，**図 3-8** に示す様な両方向矢印で結ぶことで表現する．対応リンクは一方が実体ノード，他方がフローリンクに結びつき，対応リンクで結んでいる実体ノードが表す「実体」とフローリンクが移動を表す「物質」が同一であることを表現する．**図 3-8** の例では，ライフサイクル・プロセス A からライフサイクル・プロセス B へと流れる物質が，製品モデル上の実体 D であることを表現している．

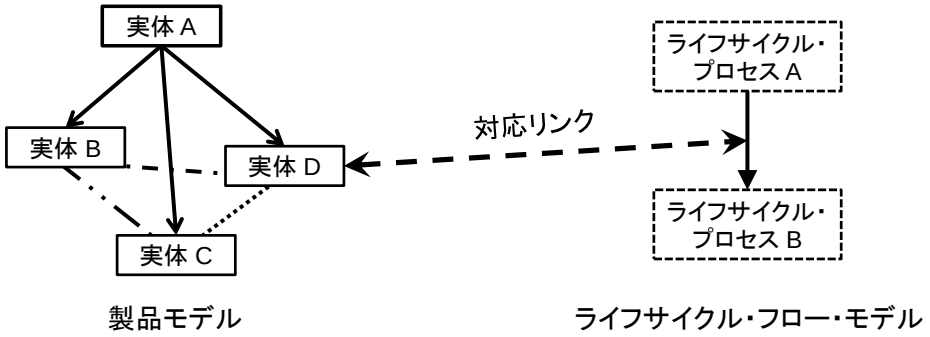


図 3-8 階層リンク

対応リンクを用いて製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを対応付けた例を**図 3-9** に示す．ここでは，**図 3-5** および**図 3-7** で示したドライヤの製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを対応付けている．ただし，紙面の制約上両図ともにその一部を表示している．**図 3-9** では，「分解プロセス」で分解する実体が「ドライヤ」であり，その後「埋め立てプロセス」へと流れる実体が「本体モジュール」，「検査プロセス」へと流れる実体が「ファンモジュール」，「破砕プロセス」へと流れる実体が「取っ手モジュール」であることを表現している．また，「破砕プロセス」によって「取っ手モジュール」は「混合破砕片」へと実体が変化し，「選別プロセス」によって「金属片」と「プラスチック片」という 2 つの実体に分離されていることを表現している．このように対応リンクを用いて製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを対応付けることで，製品ライフサイクルを通じてどのようなプロセス

があり，部品やそのアセンブリ状態であるモジュールおよび製品がどのプロセスを辿るのかを表現することが可能となる．

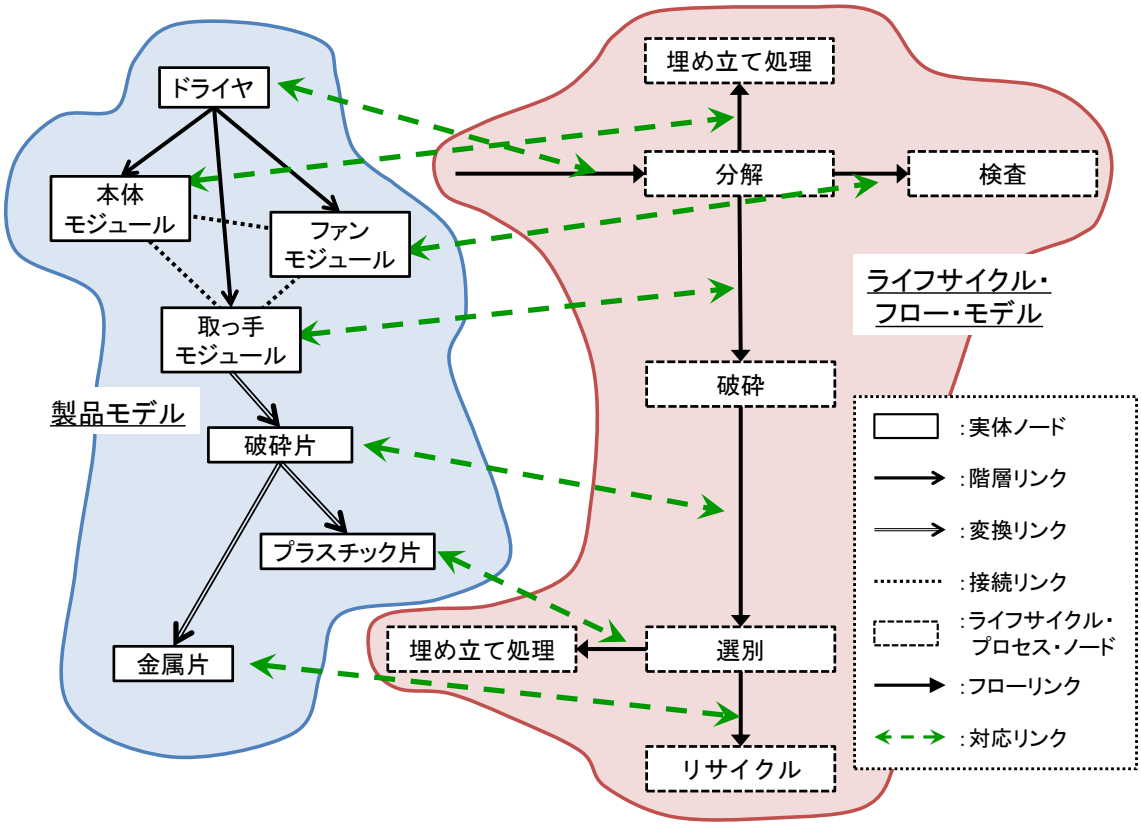


図 3-9 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応付け

3.1.5. 製品ライフサイクルにおける製品の状態変化の表現

3.1.1 項で述べたように製品ライフサイクルの表現手法においては，部品やそのアセンブリ状態であるモジュールおよび製品がどのようなプロセスを辿るのかを明確にすると同時に，製品ライフサイクルを通じてそれらの状態がどのように変化しているのかを表現することが重要となる．そこで本研究では，製品ライフサイクルにおける製品の状態変化が表現可能なように，製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデル，3.1.4 項で述べた対応リンクを作成する方法を示す．

ここでは，ライフサイクル・プロセス・ノードに入力する物質の流れを表しているフローリンクをそのライフサイクル・プロセス・ノードの入力フローリンクと呼び，ライフサイクル・プロセス・ノードから出力する物質の流れを表しているフローリンクをそのライフサイクル・プロセス・ノードの出力フローリンクと呼ぶことにする（図 3-10 参照）．本研究では，ライフサイクル・プロセスの処理前の製品状態を表す実体ノードをそのライフサイクル・プロセス・ノードの入力フローリンクに，処理後の製品状態を表す実体ノードをそのライフサイクル・プロセス・ノードの出力フローリンクにそれぞれ 3.1.4 項で述べた対応リンクを用いて対応付けることで，各ライフサイクル・プロセスの前後における製品状態の変化を表現する．

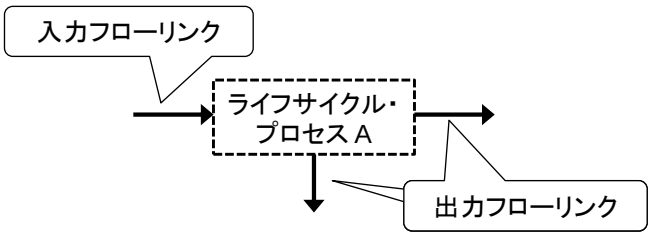


図 3-10 入力フローリンクと出力フローリンク

本研究では，製品ライフサイクルを通じて現れる様々な物質を，実体を定義し，その実体に属性値を持たせることで表現した．したがって，ライフサイクル・プロセスの前後における製品の状態変化は(1)実体の属性値が変化する，(2)実体そのものが変化する，のいずれかで表現できる．

(1) 実体の属性値が変化する場合

使用プロセスにおける製品の劣化や摩耗，輸送による製品価値の変動のような製品状態の変化は，第 2 章で定義したその実体の実体概念は変化しないが，その実体の持つ形状や構成素材，価値といった属性値が変化していると捉えることができる．そこで本研究では，実体概念が同じ実体は 1 つの実体ノードとして表現し，その属性値が異なる場合は実体ノードに複数の属性値を持たせることで表現することとする．したがって実体の属性値が変化する場合は，図 3-11 に示すように，入力フローリンクおよび出力フローリンクには同一の実体ノードを対応付け，その実体ノードの属性値を変化させることで表現する．

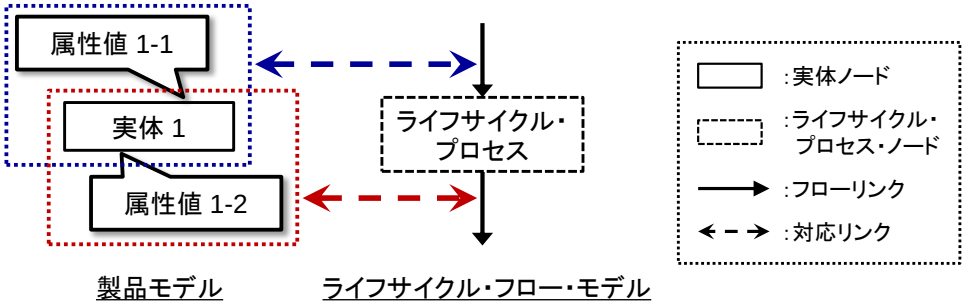


図 3-11 実体の属性値の変化の表現

(2) 実体そのものが変化する場合

部品製造プロセスにおける鉄板から部品への状態変化や分解プロセスにおいて製品がいくつかのモジュールに分かれる状態変化，さらにはメンテナンス・プロセスにおいて故障した部品を同一の新品部品に交換するような状態変化は，実体概念の異なる別の実体へと変化している．前述したように，実体概念が異なる実体は別の実体ノードで表現する．そこで実体そのものが変化する製品の状態変化は，入力フローリンクと出力フローリンクに異なる実体ノードを対応付けることで表現する．具体的には，入力フローリンクを流れている製品状態に相当する実体ノ

ードを入力フローリンクに，出力フローリンクを流れている製品状態に相当する実体ノードを出力フローリンクにそれぞれ対応づける．ライフサイクル・プロセス．ノードの入出力フローリンクに対応付く実体ノードの間には 3.1.2 項で定義した「変換関係」もしくは「階層関係」のいずれかの相互関係がある．部品製造プロセスにおける鉄板から部品への状態変化やメンテナンス・プロセスにおいて故障した部品を同一の新品部品に交換する状態変化の場合は実体ノードの間に変換関係があり，**図 3-12** に示すように入力フローリンクに対応づく実体ノードと出力フローリンクに対応付く実体ノードの間を変換リンクで結ぶ．一方で，組み立てプロセスで部品同士を組み立ててモジュールとしたり，分解プロセスで製品をいくつかのモジュールに分けたりする状態変化の場合は実体ノード間に階層関係があり，**図 3-13** に示すように入力フローリンクに対応づく実体ノードと出力フローリンクに対応付く実体ノードの間を階層リンクで結ぶ．

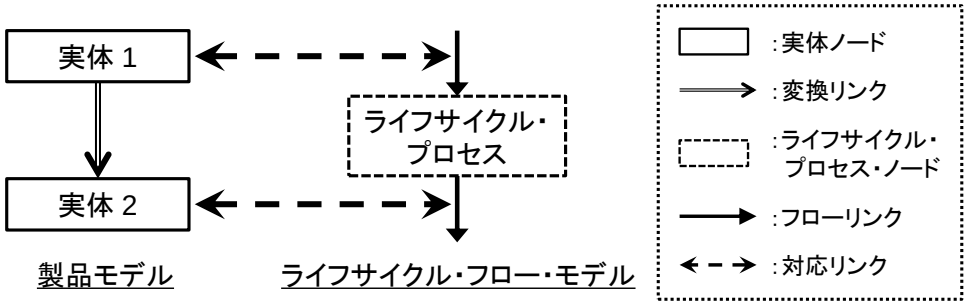


図 3-12 実体概念の変化の表現

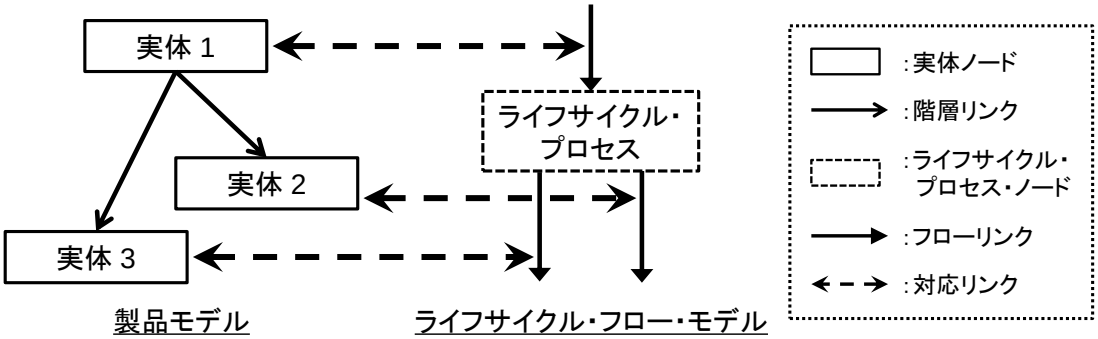


図 3-13 実体間の相互関係の変化の表現

上記で示したライフサイクル・プロセスにおける製品の状態変化の表現は，同時にそのライフサイクル・プロセスの行為者が製品の階層構造に対して持つ認識を表している．例えば，**図 3-13** に示したライフサイクル・プロセスにおける行為者は，実体 1 を実体 2 および実体 3 の 2 つの実体から構成されていると認識しており，**図 3-11** の例のように入力フローリンクにも出力フローリンクにも同じ実体ノードが対応づくライフサイクル・プロセスの行為者は実体 1 という 1 つの実体を認識している．本研究ではこのようなライフサイクル・プロセスの行為者が製品の階層構造に対して持つ認識をその行為者の「視点」であると定義する．

一般的に，行為者が処理を行うライフサイクル・プロセスは複数あることが考えられる．例えば図 3-7 で示したライフサイクル・フローでは，リサイクルを行う行為者であるリサイクルラーは「破砕」「選別」「リサイクル」の複数のライフサイクル・プロセスにおいて処理を行っている．そこで本研究では，複数のライフサイクル・プロセスにおいて処理を行う行為者の認識する階層構造についても表現する方法を示す．具体的には，上記の 1 つのライフサイクル・プロセスにおける行為者の視点を重ね合わせることで表現する．例えば，図 3-14 に示すように，行為者がモジュール B と部品 b を組み立ててモジュール A を製造するライフサイクル・プロセスと，モジュール A と部品 a を組み立てて製品を製造するライフサイクル・プロセスの 2 つにおいて処理を行っている場合は，それぞれのライフサイクル・プロセスにおける行為者の視点を重ね合わせて，図 3-14 の左図に示すような階層構造をこの行為者の視点として表現する．この行為者は，製品は部品 a とモジュール A から構成され，このモジュール A は部品 b とモジュール B から構成されると認識している．

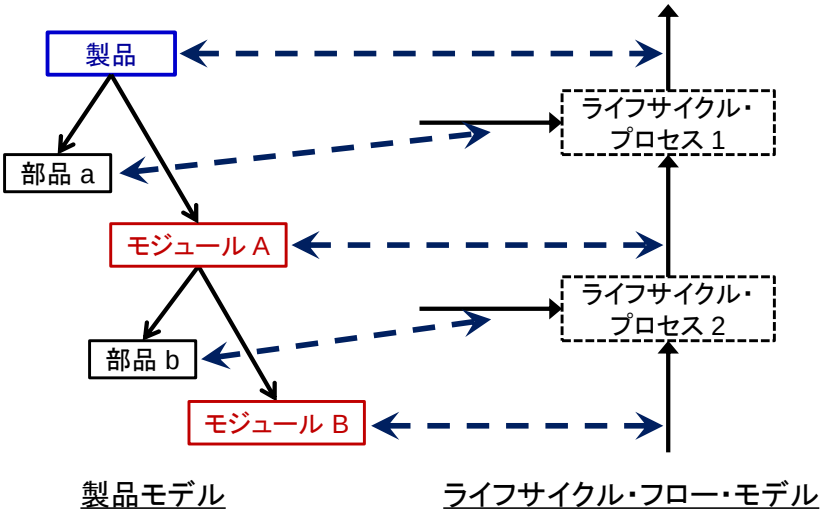


図 3-14 複数のライフサイクル・プロセスにおいて処理を行う行為者の視点の表現

ここで重要な点は，製品ライフサイクルにおける様々な行為者が認識する階層構造は必ずしも一致しないという点である．例えば，製品の製造を行う行為者である「メーカー」が製品の階層構造を，生産性を認識した組み立て構造として認識しているのに対して，製品のリサイクルを行う行為者である「リサイクラー」が貴金属を含む部品のみを取り出してリサイクルを行っている場合にはメーカーとは異なった階層構造が認識される（図 3-15 参照）．これは，行為者ごとに製品を扱う目的が異なるためで，図 3-15 の例では，メーカーは製品を製造するための階層構造を認識するのに対して，リサイクラーは製品をリサイクルするための階層構造を認識している．

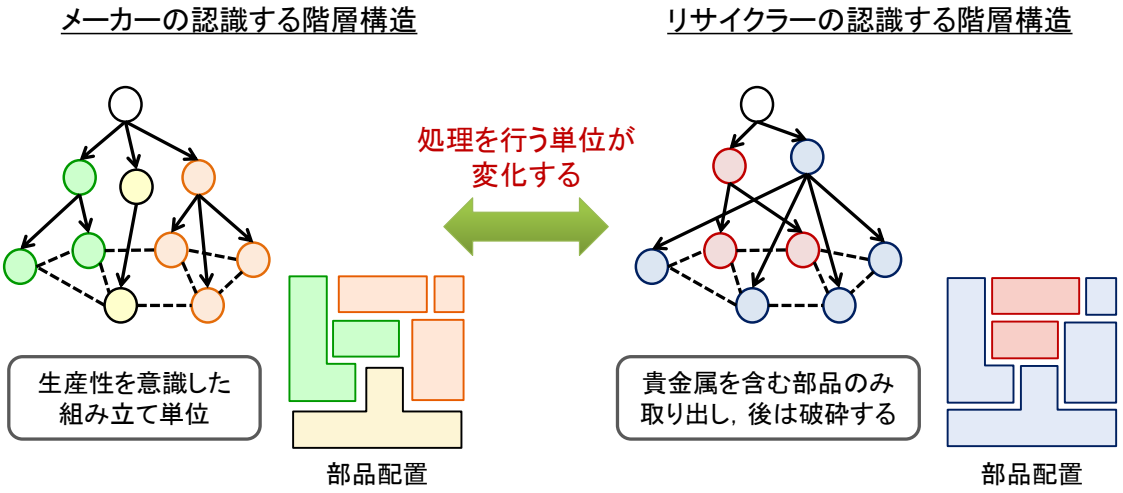


図 3-15 製品の階層構造の変化

製品の階層構造が異なるということは，行為者ごとに製品を扱う単位が異なるということである．階層構造はその製品に対する“認識”を表しているので製品は複数の階層構造を同時に持ち得るが，最終的に設計する製品は1つなので，その製品の形状や部品配置，構成素材などは1つに定めなければならない．図 3-15 に示した例で言うと，製造プロセスにおいて 3 つのモジュールを組み立てることで製品が製造できるように製品の形状や配置，モジュール間の締結方法などを設計すると同時に，リサイクル・プロセスにおいて貴金属を含む部品群を1つのモジュールとして優先的に取り出すことができるように製品の形状や配置，部品間の締結方法などを設計しなければならない．一般的には一つの階層構造，特に製造時の階層構造に基づいて製品が設計されることが多く，例えばリサイクル・プロセスでは必要のない余分な部品まで分解しなければならないなどリサイクラーの望む階層構造で製品を扱えないことが多い．本研究では，図 3-11～図 3-14 に示したように 1 つのライフサイクル・プロセスや複数のライフサイクル・プロセスにおける行為者が認識する製品の階層構造を表現することができる．これによって，製品ライフサイクルの様々な行為者が製品をどんな目的でどのような単位で扱うかを階層構造として表現することができ，設計者はこれらの階層構造を比較検討しながら製品の形状や配置，締結方法などを設計することができるようになる．

3.2. 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理する手法

3.2.1. 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性

本研究では，3.1 節で述べたように，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを，対応リンクを用いて対応付けることで製品ライフサイクルを表現する手法を提案した．したがって，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係に矛盾が生じる可能性がある．例えば，構成要素が実体 2, 3, 4 であるモジュール「実体 1」を分解するプロセスを表すライフサイクル・プロセス・ノードにおいて，図 3-16 に示すように，入力フローリンクに実体 1 の実体ノードが対応付いているのに対して

出力フローリンクに実体 2 と 3 の実体ノードのみが対応づいており実体 4 の実体ノードが対応付いていない場合は，ライフサイクル・プロセスの入出力に実体の過不足があり，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係において矛盾がある．それ以外にも，例えばリサイクルできない素材で構成された部品を表す実体ノードがリサイクルを表すライフサイクル・プロセス・ノードの入力フローリンクに対応付いている場合も実現が不可能な製品ライフサイクルとなっており，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係において矛盾があるといえる．これらの矛盾の発生を避けるためには，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理することで，これらの矛盾を検出することができるような手法が必要である．そこで本研究では，製品とライフサイクル・フローの関係を評価する第 1 段階として，3.1 節で提案した製品ライフサイクルの表現手法を用いて製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理する手法を提案する．

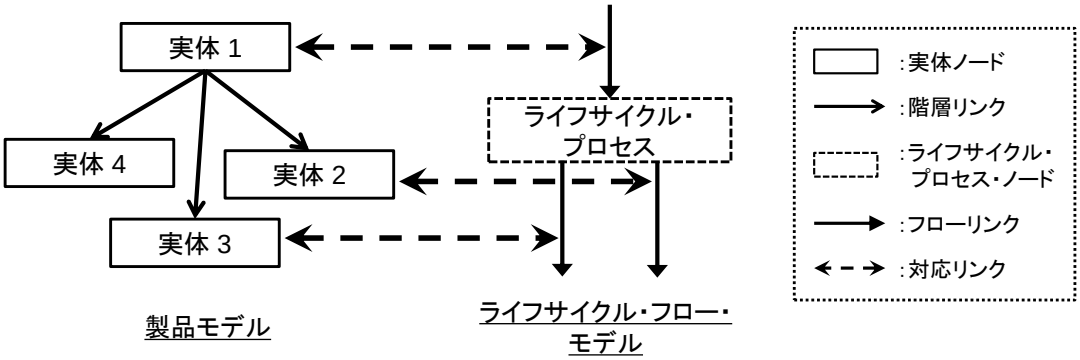


図 3-16 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係が不正確な例

まず，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの整合性として注意すべき項目を明確にする．製品とライフサイクル・フローの間の「整合性」とは，第 2 章において，「製品とライフサイクル・フローを組み合わせた製品ライフサイクルが現状（もしくは近い将来）の技術レベルや物理法則において実行可能であるかどうか」であると定義した．製品ライフサイクルには様々なプロセスがあり，そのプロセスを経て製品は状態が変化している．例えば，鉄板をプレス加工することで部品を製造するプロセスでは「鉄板⇒部品」のように状態が変化しており，製品をいくつかのモジュールに分解するプロセスでは「製品⇒モジュール」のように状態が変化している．したがって，製品ライフサイクルが実行可能であるかどうかの管理は，各プロセスにおける状態変化が実行可能（例えば，鉄板を部品に変形できる，製品を所定のモジュール単位に分解できる，など）であるかどうかを管理することで実現できると考えることができる．

本研究では，この方針に基づいて製品とライフサイクル・フローの整合性を製品ライフサイクルの表現手法を用いて管理することを考える．3.1 節において，製品ライフサイクルにおける部品の組み立てや分解，破砕・選別といったプロセスにおける実体の状態変化は，ライフサイクル・プロセス・ノードの入出力フローリンクの対応リンクを用いて実体ノードとその間の階層関係や変換関係を用い

て表現した．したがって，ライフサイクル・フロー・モデルにおける各ライフサイクル・プロセスにおける状態変化が実行可能であるかどうかは，そのライフサイクル・プロセス・ノードが持つ誰がどんな手順で処理を行うのかといった「シチュエーション」と，そのライフサイクル・プロセス・ノードの入出力フローリンクに対応付いている製品モデル上の実体が持つ形状や構成素材などの「属性値」を比較評価することで管理することができる（**図 3-17** 参照）．

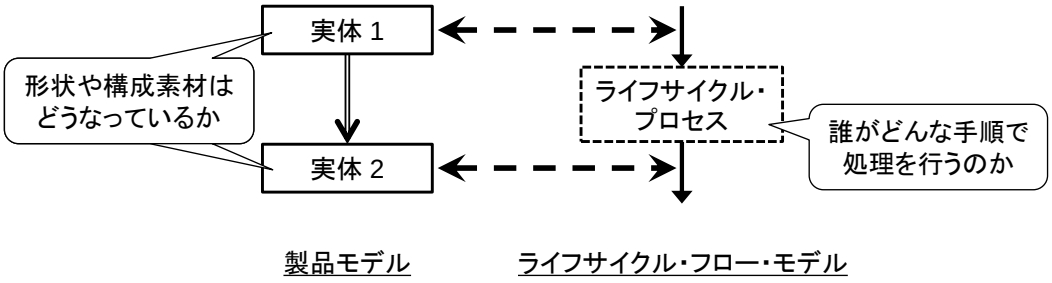


図 3-17 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの整合性管理

本研究では，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性管理は大きく分けて(1)プロセスの入出力の過不足に注目した「トポロジーレベル」，(2) 製品やその構成部品の形状・配置が物理的に実行可能かどうかに注目した「ジオメトリレベル」，(3) 形状・配置以外の側面において技術的に実行可能かどうかに注目した「テクノロジーレベル」の 3 つのレベルに分けて考える．(2)や(3)のレベルの整合性を管理するためには，実体の属性値やライフサイクル・プロセスのシチュエーションを確認すると同時に，この製品の状態変化を実現する技術としてどのようなものがあるかを確認しなければならない．例えば，リサイクルを行うライフサイクル・プロセスにおける整合性は，そのライフサイクル・プロセス・ノードの入力フローリンクに対応付いている実体ノードの構成素材をリサイクルする技術があるかどうかに左右される．しかも，設計開発から実際に製品が製造されるまでにはタイムラグがあり，ましてや使用後に回収された製品がリユースやリサイクルされるのはさらに数年から数十年も先となる．したがって，このような技術を考慮する際には，現状存在する技術だけでなく将来的な技術動向についても調査する必要があり，整合性を管理するのは困難である．

そこで本研究では製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの整合性管理手法の実現に向けた第 1 段階として，製品モデルで定義した階層関係と変換関係を用いて(1)のトポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案する．3.1 節で述べたように，ライフサイクル・プロセスの前後における製品状態の変化は「同じ実体ノードが対応付く」「変換関係のある異なる実体ノードが対応付く」「階層関係のある異なる実体ノードが対応付く」のいずれかによって表現することができる．そこで，各ライフサイクル・プロセス・ノードの入出力フローリンクに対応付いている実体ノードの過不足を管理することで，トポロジーレベルの整合性管理を可能とする．例えば，**図 3-18** に示す様に変換関係のない実体ノードがライフサイクル・プロセス・ノードの入出力フローリンクに対応付いている場合は少なくとも変換関係のある実体ノードが入出力フローリンクに対応付くようにモデルを修正する必要があり，トポロジーレベルにおいて不整合であるとする．

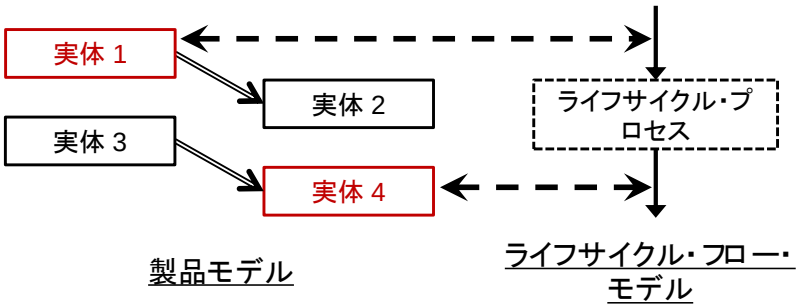


図 3-18 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルが不整合な例

3.2.2. トポロジーレベルの整合性管理手法

前項で述べたトポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案するために，本研究ではライフサイクル・プロセスの入出力関係において過不足が生じないような基本パターンを定義する．そのために，まずライフサイクル・プロセスをそのライフサイクル・プロセスに入出力する実体の関係に基づいて分類する（図 3-19 参照）．まず，ライフサイクル・プロセスは入出力する実体の有無で「入力のみを持っている（パターン(a)とする）」「出力のみを持っている（パターン(b)とする）」「入出力ともに持っている」の 3 つに分類することができる．また「入出力ともに持っている」ライフサイクル・プロセスは，ライフサイクル・プロセスの前後における製品状態の変化に注目すると，入力する実体と出力する実体の関係から「同一の実体が入出力している（パターン(c)とする）」「入出力する実体間に変換関係がある（パターン(d)とする）」「入出力する実体間に階層関係がある」の 3 つに分類することができる．さらに，「入出力する実体間に階層関係がある」場合は，その変化を「上層への変化（パターン(e)とする）」と「下層への変化（パターン(f)とする）」の 2 つに分類することができる．

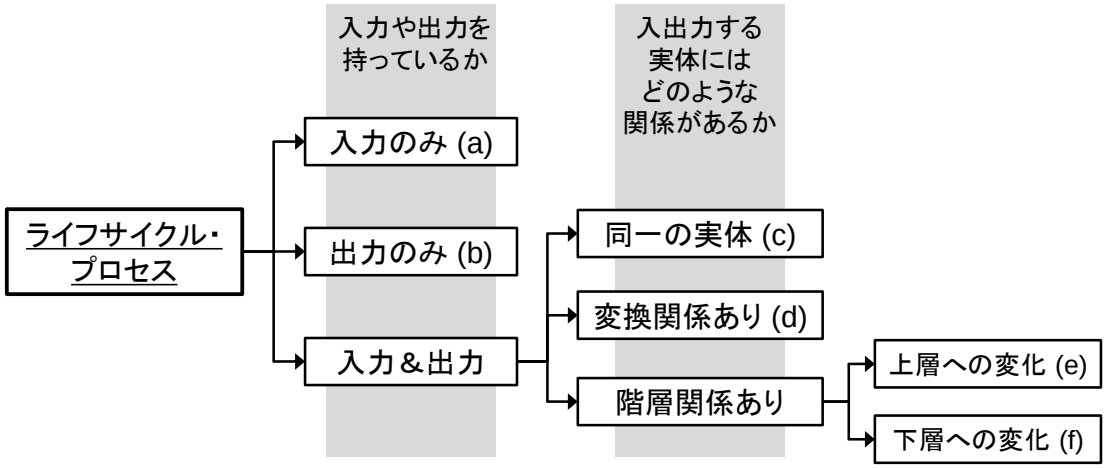


図 3-19 ライフサイクル・プロセスの分類

本研究ではこれらをライフサイクル・プロセスの入出力関係において過不足が生じないような基本パターンとして定義し，それぞれ(a)終了，(b)開始，(c)通過，(d)変換，(e)結合，(f)分離，と呼ぶことにする（図 3-20 参照）．

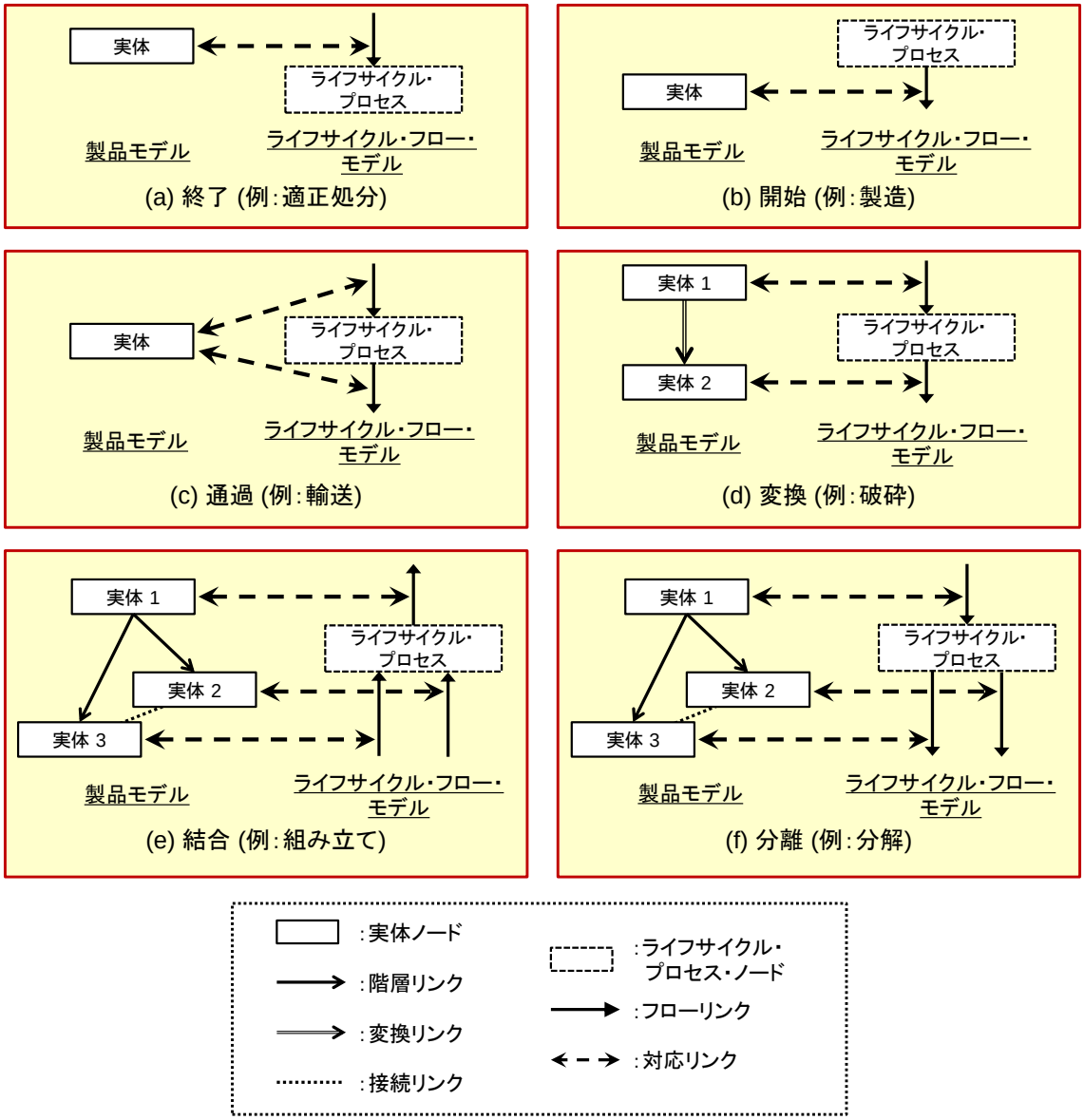


図 3-20 ライフサイクル・プロセスの入出力関係における基本パターン

(a) 終了

終了は，製品ライフサイクルにおける終点となるライフサイクル・プロセスで，埋め立て処分を行うライフサイクル・プロセスや部品をサーマル・リサイクルするライフサイクル・プロセスなどがこれにあたる．このパターンのライフサイクル・プロセスは入力フローリンクのみを持ち，出力フローリンクは持たない．

(b) 開始

開始は，製品ライフサイクルにおける始点となるライフサイクル・プロセスで，鉄鉱石の採掘を行うライフサイクル・プロセスなどがこれにあたる．このパターンのライフサイクル・プロセスは出力フローリンクのみを持ち，入力フローリンクは持たない．

(c) 通過

通過は，全ての入出力フローリンクに同じ実体ノードが対応付いているライフサイクル・プロセスで，製品の保管のような実体の属性値の変化を伴わないライフサイクル・プロセスや，製品の使用のような実体の属性値の変化を伴うライフサイクル・プロセスがこれにあたる．

(d) 変換

変換は，ある実体を別の実体へと変化させるライフサイクル・プロセスで，入力フローリンクに対応付いている実体ノードと出力フローリンクに対応付いていう実体ノードの間に変換関係のあるライフサイクル・プロセスである．例えば，鉄板をプレス加工して部品を製造するライフサイクル・プロセスや，モジュールを破砕して破砕片にするライフサイクル・プロセスなどがこれにあたる．ただし，異なる 2 つの薬品を混合することで別の薬品を生成する場合や水を電気分解によって水素分子と酸素分子に化学分解する場合のような複数種類の実体が同時に変換する場合も変換に含まれるものとする（図 3-21 参照）．

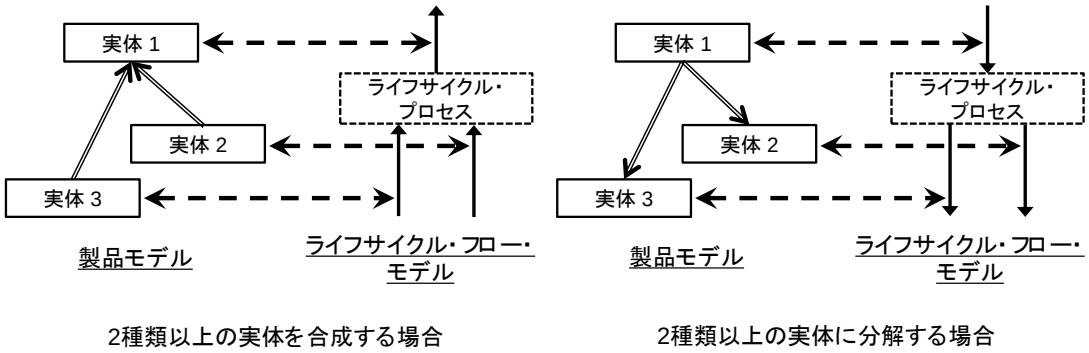


図 3-21 複数の種類の実体が同時に変換する場合

(e) 結合

結合は，複数の実体を結合することで1つの実体を生成するライフサイクル・プロセスで，部品を組み立てることでモジュールを生成したり，モジュールを組み立てることで製品を生成したりするライフサイクル・プロセスがこれにあたる．入出力フローリンクに対応付く実体ノードの間には階層関係があり，入力フローリンクに対応付いている実体ノードが出力フローリンクに対応付いているいずれかの実体ノードの構成要素となる．

(f)　分離

分離は，実体を複数の実体に分離するライフサイクル・プロセスで，製品をいくつかのモジュールや部品に分解するライフサイクル・プロセスや，複数の素材が混在した破砕片を素材ごとに選別するライフサイクル・プロセスなどがこれにあたる．結合の場合と同じく入出力フローリンクに対応付く実体ノードの間には階層関係があり，出力フローリンクに対応付く実体ノードが入力フローリンクに対応付いているいずれかの実体ノードの構成要素となる．

トポロジーレベルの整合性がとれるように製品ライフサイクルを設計するためには，製品ライフサイクルにおける全ての製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応リンクが上記の 6 つの基本パターンから構成されるように製品ライフサイクルを設計する必要がある．つまり，製品ライフサイクルに上記の 6 つの基本パターン以外の入出力関係が作成されていた場合は，それを不整合として検出する．不整合の例を図 3-22 に示す．

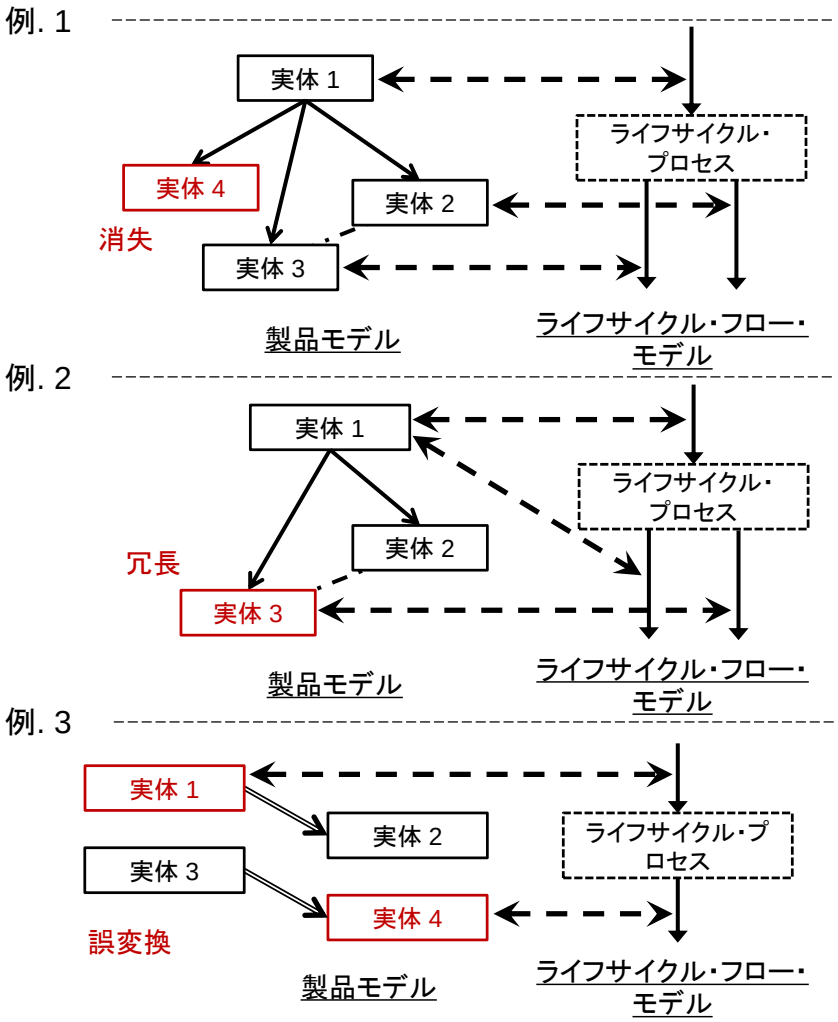


図 3-22　トポロジーレベルの不整合の例

1 つ目の例は，製品やモジュールを分解するライフサイクル・プロセス・ノードにおいて，入力フローリンクに対応付く実体ノードの構成要素となる実体ノードが全て出力フローリンクに対応づいておらず，実体 4 が消失してしまっている．例 2 では，入力フローリンクに実体 1 が対応付いているのに対して出力フローリンクに実体 1 とその構成要素の 1 つである実体 3 が対応づいており入出力における実体 3 の数が等しくない．この場合は，実体 1 と対応付いている出力フローリンクを実体 2 と対応づけ直すか，実体 3 が対応付いている出力フローリンクを削除することで，この不整合を解決することができる．例 3 では，変換関係のない実体ノードがライフサイクル・プロセス・ノードの入出力フローリンクに対応付いてしまっている．これらの不整合な製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係を検出することで，製品ライフサイクルがトポロジーレベルにおいて整合性が取れているかを管理する．

3.3. 考察

本章で提案する表現手法を用いることで，製品ライフサイクルを製品とライフサイクル・フローという 2 つの設計対象の組み合わせとして表現することが可能となった．また，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応付けのルールを定義することで，トポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案した．

本研究で提案した製品ライフサイクルの表現手法では，製品が辿りうる様々な製品ライフサイクルが表現可能である．例えば**図 3-7** の例では，製品をリユースするために検査を行うプロセスがあり，合格したものは洗浄した後にリユースを行い，不合格品は廃棄するようなライフサイクル・フローを作成している．また，回収した製品の中から一部の製品についてはリユースを行い，残りの製品についてはリサイクルを行うようなライフサイクル・フローも考えられる（**図 3-23** 参照）．1 つの製品に注目すると，**図 3-7** の例ではその製品の検査の結果は合格または不合格のいずれかであり，また**図 3-23** の例ではリユースかリサイクルで取られる処理がどちらか一方のみで，どちらにも流れるということはありえない．しかしながら，もし設計対象となる製品がリユースもリサイクルもされうるのであれば，リユースとリサイクルのどちらにも適した“柔軟”な製品を設計することが重要となる．本研究で提案する表現手法では製品が辿りうる全てのライフサイクル・フローをライフサイクル・フロー・モデルとして表現可能とすることで，循環経路を一つに限定せずに，様々な循環経路を同一の製品で辿ることができるような製品の設計を検討することができるような表現手法になっている．

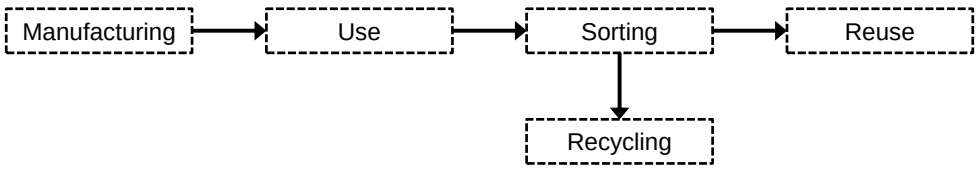


図 3-23 分岐を含むライフサイクル・フロー・モデルの例

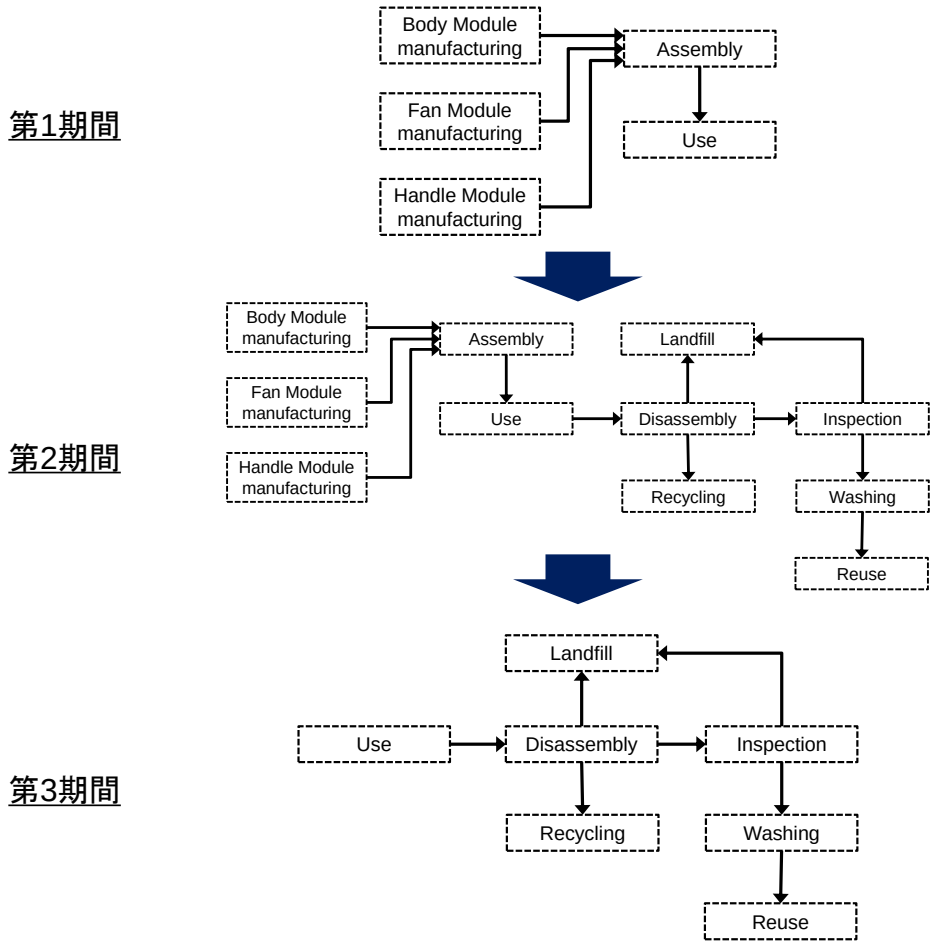


図 3-24 ライフサイクル・フロー・モデルの時系列

また，本研究で提案したライフサイクル・フロー・モデルは，静的なモデルを表している．実際の製品ライフサイクルには時間軸が存在し，例えば製品の製造や使用においては一定の時間が経過する．したがって製品のライフサイクル・フローを事業単位でみると，初期段階では製品の製造から使用が中心となり，ある期間を過ぎると使用後の製品が回収されるようになり，一定期間が過ぎると製造が終了して使用後の製品の回収・再生処理のみが行われるようになる．つまり，製品のライフサイクル・フローをある時点で区切ると，図 3-24 に示すように製品のライフサイクル・フローは動的に変化する．それに対して本研究のライフサイクル・フロー・モデルは，その製品が一生のうちで辿りうるライフサイクル・フローを全て表現している．本研究の主眼である製品ライフサイクル全体を考慮した製品設計やライフサイクル・フロー設計を支援する際には，時系列によらず全てのライフサイクル・フローを同時に表現する本研究で提案するモデルが有効である．また，本研究で提案した表現手法において，ライフサイクル・フロー・モデル上の各ライフサイクル・プロセス・ノードに各時点でそのプロセスに存在している実体の数を割り当て，その数値が動的に変化するような仕組みにより，動的なライフサイクル・フローを表現することが可能である．この点は，次章で述べるライフサイクル・シミュレーションにより実現している．

本章で提案した製品ライフサイクルの表現手法では，製品ライフサイクルにおける様々な製品の状態変化が表現可能であることを示した．本研究で定義した製品モデルの実体やライフサイクル・フロー・モデルのライフサイクル・プロセスは設計者が必要に応じて任意の粒度で作成することが可能なので，本研究で提案した製品ライフサイクルの表現手法は製品の状態変化を様々な粒度で表現することが可能であるという利点がある．例えば，鉄鉱石から鉄板を生成するプロセスにおける製品の状態変化は，**図 3-25** の例(1)のように 1 つのライフサイクル・プロセスで表現すると鉄鉱石から鉄板にいきなり変化するような粗い粒度の製品の状態変化として表現することができ，例(2)のように溶融，鋳造，圧延と詳細にライフサイクル・プロセスを記述すると「鉄鉱石→溶銑→スラブ→鉄板」という詳細な粒度の製品の状態変化として表現することができる．

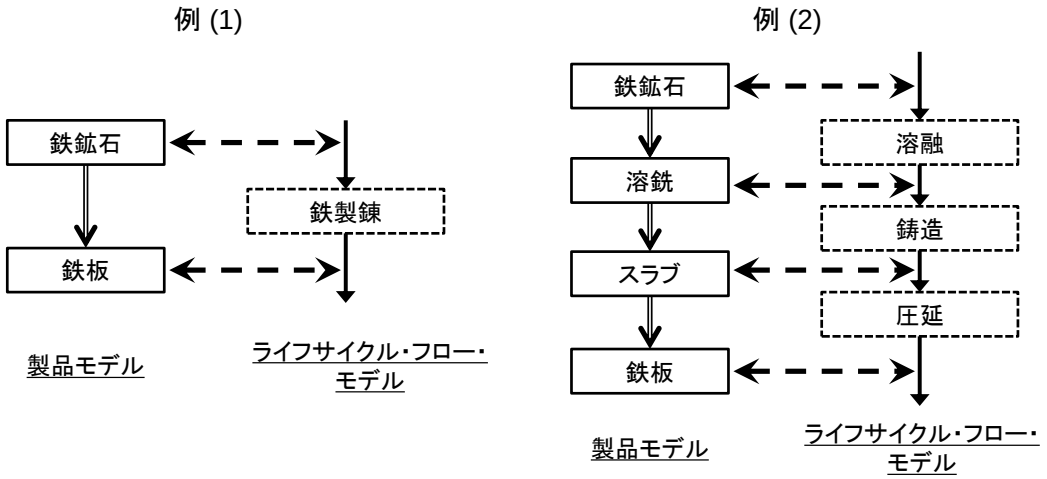


図 3-25 ライフサイクル・フロー・モデルと製品状態の変化の粒度

本章では，ライフサイクル・プロセス・ノードの入出力関係において過不足が生じないような基本パターンとして 6 つの基本パターンを定義した．これらの基本パターンは，3.1 節で述べた 3 つの製品状態の変化のうち 1 つの変化を表すライフサイクル・プロセス・ノードに対して定義している．しかしながら上記で述べたように，製品モデルやライフサイクル・フロー・モデルは任意の粒度で作成することができるので，複数の製品状態の変化の組み合わせとなるようなライフサイクル・プロセス・ノードも作成することができる．そこで，このような複数の製品状態の変化の組み合わせとなるようなライフサイクル・プロセス・ノードを作成した場合のトポロジーレベルの整合性について考察する．

モジュール A を 2 つの部品 a, b に分解し，部品 a を破砕して破砕片へと変化させるような処理を行う場合を例として挙げる．分解と破砕をそれぞれ別のライフサイクル・プロセス・ノードとして表現すると，**図 3-26** に示すように，3.2 節で定義した基本パターンを用いて表現することができる．この例では 3.2 節で定義した基本パターンのうちで(f)分離と(d)変換の 2 つの基本パターンを用いて作成している．次に，分解と破砕を 1 つのライフサイクル・プロセス・ノードとして表現した場合を考える．すると，**図 3-27** に示す様に，3.2 節で定義した基本パターンのどの基本パターンにも当てはまらない製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係となっているものの，分解を表すライフサイクル・プロセス・ノードの入出力関係としては矛盾のないものとなっている．これは，**図 3-27** に

示す製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係が，3.2 節で定義した基本パターンの組み合わせとして表現できているためであり，この場合は(f)分離と(d)変換の 2 つの基本パターンを組み合わせた形になっている．したがって，3.2 節で定義した 6 つの基本パターンだけでなく，それらの組み合わせとして表現することができる製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係についても，整合性の取れた関係である可能性がある．本研究で定義した 6 つの基本パターンは，トポロジーレベルにおいて整合性のとれたライフサイクル・プロセス・ノードの基本的な入出力関係を表している．これらの基本パターンを用いて製品ライフサイクルを表現すれば，全体としてトポロジーレベルの整合性が取れた製品ライフサイクルが記述可能であるが，一方で，上記で述べたような製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの記述の粒度を制限してしまうという側面を持っている．様々な粒度でトポロジーレベルにおいて整合性のとれた製品ライフサイクルを作成可能とするためには，これら基本パターンの組み合わせによる整合性を検討することが有効であると考えられる．

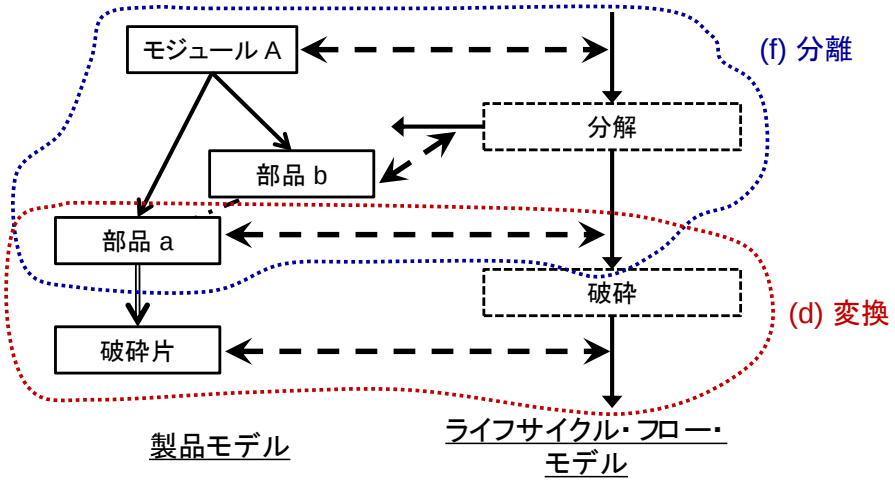


図 3-26 分解と破砕を表すライフサイクル・プロセス・ノードを別々に作成した場合

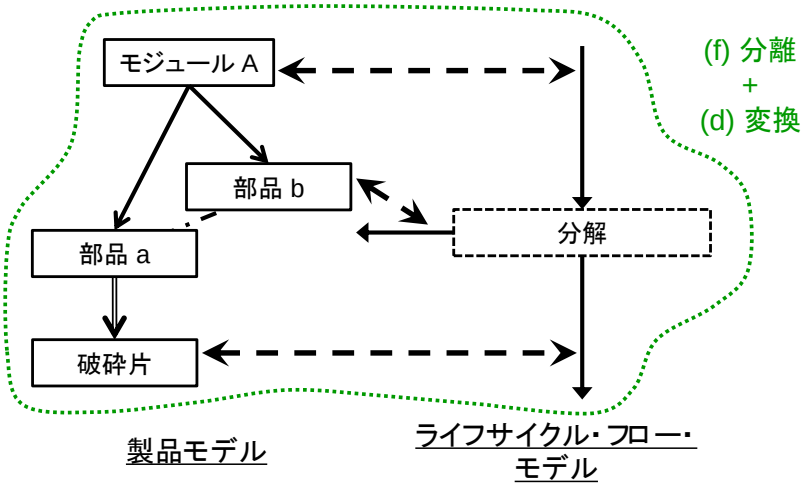


図 3-27 分解と破砕を表すライフサイクル・プロセス・ノードを 1 つのノードで表現した場合

3.4. 第 3 章のまとめ

本章では，製品ライフサイクルを製品とライフサイクル・フローという 2 つのモデルを用いて表現する手法を提案した．具体的には，製品とライフサイクル・フローを表現する手法として製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを定義し，さらにそれら 2 つのモデルの間の対応関係を定義することで製品ライフサイクルを表現するというアプローチをとった．これによって，部品やそのアセンブリ状態であるモジュールおよび製品がどのようなプロセスを辿るのかと同時に，製品ライフサイクルを通じてそれらの状態がどのように変化しているのかを表現することが可能となった．

また本章では，製品とライフサイクル・フローの整合性を評価する方法として，製品ライフサイクルの表現手法を用いてトポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案した．具体的には，ライフサイクル・プロセスの入出力関係において過不足が生じないような基本パターンとして6つのパターンを定義し，製品ライフサイクルにおける全ての製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係がこの 6 つの基本パターンから構成されているかどうかを判定することで，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルのトポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案した．これによって，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いて製品ライフサイクルを表現する際に，トポロジーレベルの不整合のないように設計者がモデルを作成するのを支援することが可能となる．

第4章

ライフサイクル・モデリング・システム

第 4 章では，ライフサイクル CAD システムの実現に向けた第1段階として，第 3 章で提案した製品ライフサイクルの表現手法と製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理する手法に基づいて，製品ライフサイクルの表現と整合性の管理を行うライフサイクル・モデリング・システムを開発する.

4.1. ライフサイクル・モデリング・システムの実現方法

本研究では，ライフサイクル CAD システムの実現に向けた第 1 段階として，第 3 章において製品ライフサイクルを表現する手法および製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルのトポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案した．本章では，製品ライフサイクルを表現しトポロジーレベルの整合性を管理することができる計算機環境としてライフサイクル・モデリング・システムを開発する．また，このライフサイクル・モデリング・システムでは，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いて製品ライフサイクルの経済性や環境性の評価を可能とする．したがって，ライフサイクル・モデリング・システムの要求機能としては以下の 3 つの項目を挙げる．

(1) 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いて製品ライフサイクルを表現する．
(2) 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルのトポロジーレベルの整合性を管理する．
(3) 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いたライフサイクル評価を可能とする．

ライフサイクル・モデリング・システムを開発するにあたって，開発言語には Visual C#を用いる．また，製品モデルにおけるソリッドモデルを編集するツールとして，第 2 章で挙げた SolidWorks 社の SolidWorks[13]を用いる．ライフサイクル・モデリング・システムでは，この SolidWorks の API (Application Programming Interface)を用いて SolidWorks を操作する．また，(3)の機能を実現するために，本研究ではライフサイクル・シミュレーションを採用する．これを実現するために，ライフサイクル・モデリング・システムにおいては，ライフサイクル・シミュレーションを実行する環境として梅田らが開発したライフサイクル・シミュレータ[55]を用いる．

4.2. ライフサイクル・モデリング・システムの基本構成

ライフサイクル・モデリング・システムの全体構成を**図 4-1** に示す．ライフサイクル・モデリング・システムは，「製品モデラ」と「ライフサイクル・フロー・モデラ」，「統合マネジャ」，「ライフサイクル・シミュレータ」の 4 つのサブシステムから構成される．設計者は「製品モデラ」および「ライフサイクル・フロー・モデラ」を用いて製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを作成・編集することで，統合マネジャを用いたトポロジーレベルの整合性管理やライフサイクル・シミュレータを用いたライフサイクル評価が可能となる．

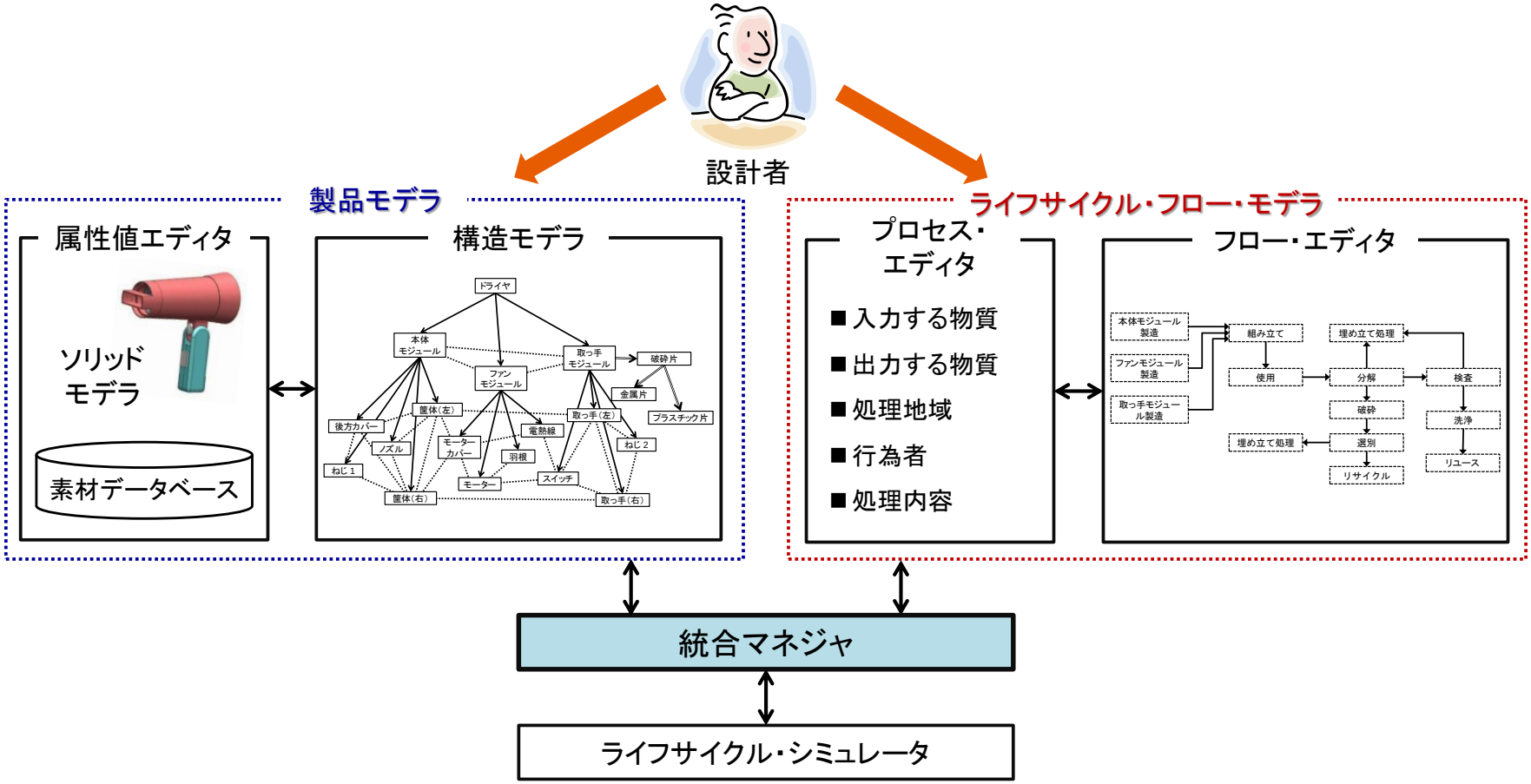


図 4-1 ライフサイクル・モデリング・システムの全体構成

各サブシステムの持つ機能は以下の通りである.

- 製品モデラ

製品モデラは図 4-2 に示すように構造モデラ, ソリッドモデラ, 素材データベースの 3 つから構成され, 構造モデラで実体ノードや属性値(形状に関するものを除く), 各種リンクの作成・編集を支援し, ソリッドモデラは実体属性値の中でも形状(各部の寸法や稜線・面の形状, 公差, 角, 表面粗さなどを含む)の作成・編集を支援する. また素材データベースでは, 実体の属性値で用いる様々な素材の比重や可燃性, 価格などの性質を編集管理することができる.

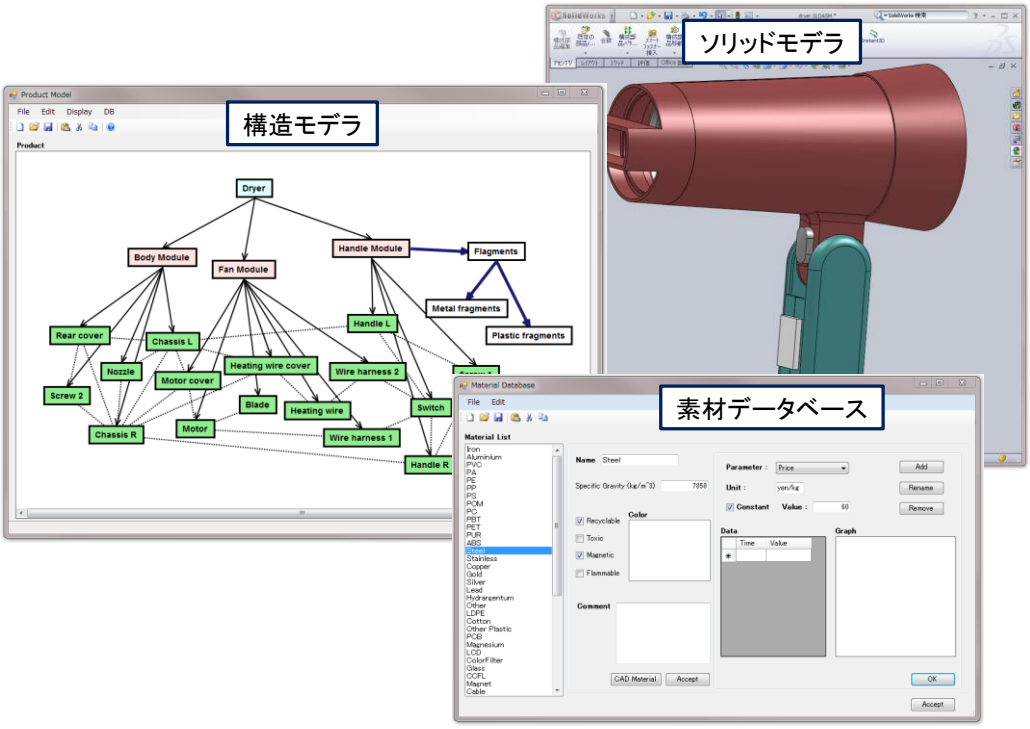


図 4-2 製品モデラ

- ライフサイクル・フロー・モデラ

ライフサイクル・フロー・モデラは図 4-3 に示すようにフロー・エディタとプロセス・エディタの 2 つで構成され, フロー・エディタではライフサイクル・プロセスとフローリンクの作成・編集を支援し, プロセス・エディタではライフサイクル・プロセスの持つシチュエーションの編集を支援する.

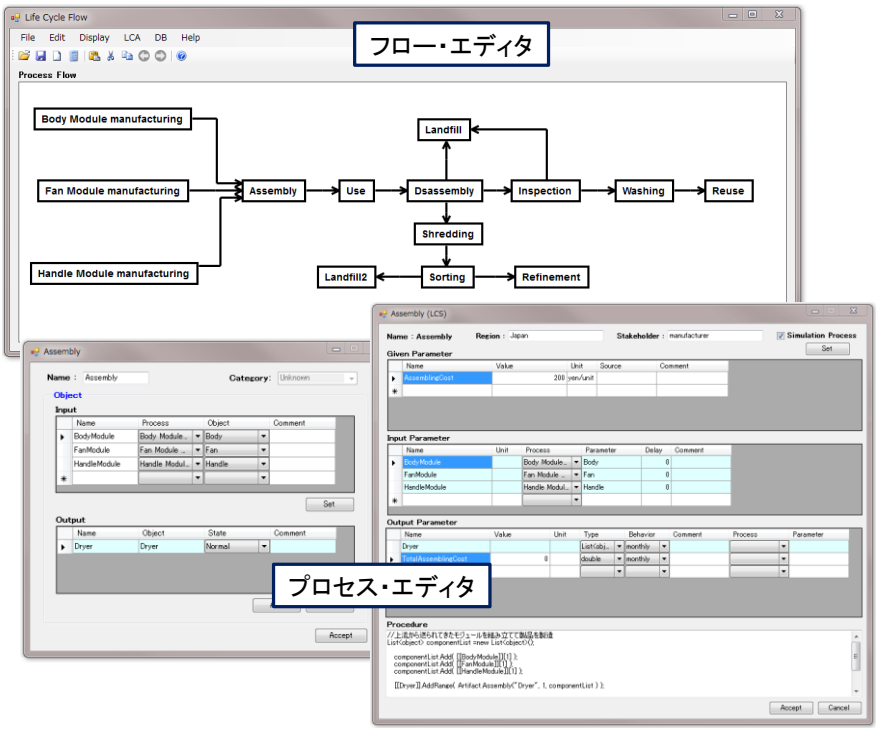


図 4-3 ライフサイクル・フロー・モデラ

- 統合マネジャ

  製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係を管理する．また，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルのトポロジーレベルの整合性を管理する．

- ライフサイクル・シミュレータ

  製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの情報を用いて，製品ライフサイクルの経済性や環境性を評価する．

以上のサブシステムを用いて 4.1 節で述べた各機能を実現する方法について以下に述べる．

4.2.1. 製品ライフサイクルの表現

製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを作成することで製品ライフサイクルを表現する手順について述べる．製品ライフサイクルの表現は，(1)製品モデラを用いて製品モデルを作成，(2)ライフサイクル・フロー・モデラを用いてライフサイクル・フロー・モデルを作成すると同時に製品モデルとの間の対応リンクを作成する，の 2 つのフェーズで行う．

(1) 製品モデルの作成

製品モデラを用いて製品モデルを作成する．製品モデルの各項目は**表 4-1** に示すようなデータを持つ．製品モデルは以下の 3 つのステップで作成する．

(i) 構造モデラにおいて実体の名前および実体の種類を指定することで実体ノードを作成する．その際に実体の ID が自動的に実体ノードに割り当てられる．

(ii) 実体ノードの構成素材や重量などの属性値を編集する．素材の比重や可燃性，価格などの性質の情報は素材データベースで管理しており，このリストから素材を選択することで実体ノードに構成素材情報を持たせる．また形状情報を属性値として持たせる場合は，ソリッドモデラ上でその実体のソリッドモデルを作成した上で，その部品ファイル（もしくはアセンブリファイル）への参照パスを実体ノードに持たせる．

(iii) 各種リンク（階層リンクおよび変換リンク，接続リンク）を作成する．構造モデラ上で最初にリンクの種類（階層，変換または接続）を選択し，次に始点にあたる実体ノードと終点にあたる実体ノードを選択することでリンクが始点と終点の実体ノードの ID を保持し，リンクが作成される．また，接続リンクに関しては，「固定（完全拘束）」「運動拘束（一部拘束）」のいずれかを選択することでリンクが接続タイプの情報を保持する．

表 4-1 製品モデルの各項目が持つデータ

項目	データ	内容
実体ノード	ID	実体固有の ID.
	名前	実体の名称.
	実体の種類	「製品」「モジュール」「部品」「その他」のいずれかの値を持つ.
	ソリッドモデルのパス	実体の形状を表すソリッドモデルの部品ファイル（もしくはアセンブリファイル）への参照パス.
	属性値	構成素材や重量に加えて価格や物理寿命など任意の項目を作成して，数値もしくは文字情報を持たせることができる.
階層リンク 変換リンク 接続リンク	リンクの種類	階層，変換，接続のいずれのリンクかを表す.
	始点の実体	リンクの始点にあたる実体ノードの ID.
	終点の実体	リンクの終点にあたる実体ノードの ID.
	接続タイプ	「固定（完全拘束）」「運動拘束（一部拘束）」のいずれかの接続タイプを情報として持つ．接続リンクのみこの情報を持つ.

(2) ライフサイクル・フロー・モデルの作成

ライフサイクル・フロー・モデルを作成すると同時に製品モデルとの間の対応リンクを作成する．ライフサイクル・フロー・モデルおよび統合マネジャはそれぞれ表 4-2 および

表 4-3 に示すようなデータを持つ．ライフサイクル・フロー・モデルおよび製品モデルとの間の対応リンクは以下の 2 つのステップで作成する．

(i) フロー・エディタにおいてライフサイクル・プロセスの名前を指定することでライフサイクル・プ

ロセス・ノードを作成する．その際に，ライフサイクル・プロセスの ID が自動的にライフサイクル・プロセス・ノードに割り当てられる．

(ii) プロセス・エディタにおいてライフサイクル・プロセスの持つデータを編集する．処理地域や行為者はその名前を入力し，処理内容については後述するようにライフサイクル・シミュレーションの記述形式に基づいて記述する．また，ライフサイクル・プロセスを入出力する物質については，第 3 章で述べたように，あるライフサイクル・プロセス・ノードを出力する物質と次のライフサイクル・プロセス・ノードに入力する物質は一致しなければならない．そこで本研究では，ライフサイクル・プロセス・ノードの持つ「出力する物質」の項目を基準として，「入力する物質」は他のライフサイクル・プロセス・ノードの「出力する物質」の項目から選択することで記述することとする（図 4-4 参照）．具体的には，そのライフサイクル・プロセスは，出力する物質を製品モデラ上の実体ノードから選択し，その実体ノードの ID と実体の名前を情報として保持する．入力する物質は，他のライフサイクル・プロセスの出力する物質から選択することで，そのライフサイクル・プロセスの ID と実体ノードの ID，実体の名前を情報として保持する．このようにして入出力関係が設定されたライフサイクル・プロセス・ノードの間にフローリンクを作成し，フローリンクに ID が自動的に割り当てられると同時に，始点のプロセスとして物質が出力するライフサイクル・プロセスの ID を，終点のプロセスとして現在編集しているライフサイクル・プロセスの ID を，そのフローリンクを流れる物質としてその物質を表す実体ノードの ID をそれぞれ保持する．ただし，1 本のフローリンクは 1 種類の物質の流れを表すものとし，複数種類の物質が同時に同じライフサイクル・プロセス・ノードを流れている場合は，その種類数だけフローリンクを作成する．図 4-4 では，ライフサイクル・プロセス A と B の間を 2 種類の物質が流れている例を表している．さらに，これに基づいてシステムが対応リンクを自動的に作成する．具体的には，このフローリンクの ID とフローリンクが持つ実体ノードの ID を保持する対応リンクを生成し，統合マネジャが保持する．

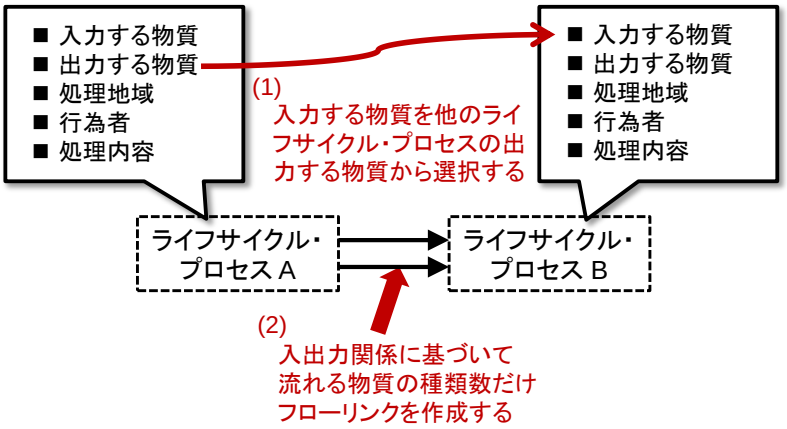


図 4-4 フローリンクの作成手順

表 4-2 ライフサイクル・フロー・モデルの各項目が持つデータ

項目	データ	内容
ライフサイクルプロセスノード	ID	ライフサイクル・プロセス固有の ID.
	名前	ライフサイクル・プロセスの名称.
	整合性	「終了」「開始」「通過」「変換」「結合」「分離」のいずれかの基本パターン，もしくは「不整合」を情報として持つ.（これらはシステムが自動的に判断する.）
	入力する物質	ライフサイクル・プロセスに入力する物質の情報. その実体が出力したライフサイクル・プロセス・ノードの ID とその物質を表す実体ノードの ID と実体の名前を保持する.
	出力する物質	ライフサイクル・プロセスを出力する物質の情報. この物質に相当する実体ノードの ID および名前を保持する.
	処理地域	ライフイサイクル・プロセスの処理を行う地域名.
	行為者	ライフサイクル・プロセスの処理を行うステークホルダーの名前.
	処理内容	ライフサイクル・プロセスで行う処理の内容や入力する物質と出力する物質の関係.
フローリンク	ID	フローリンク固有の ID.
	始点のプロセス	リンクの始点にあたるライフサイクル・プロセス・ノードの ID.
	終点のプロセス	リンクの終点にあたるライフサイクル・プロセス・ノードの ID.
	流れる物質	フローリンクを流れている物質を表す実体ノードの ID.

表 4-3 統合マネジャが持つデータ

項目	データ	内容
対応リンク	ID	対応リンク固有の ID.
	対応するフローリンク	対応リンクが対応関係を表すフローリンクの ID.
	対応する実体ノード	対応リンクが対応関係を表す実体ノードの ID.
基本パターンのリスト		製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルのトポロジーレベルの整合性の基本パターンのリスト.

4.2.2. トポロジーレベルの整合性管理

トポロジーレベルの整合性は，第 3 章で述べたように，製品ライフサイクルにおける全ての製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応リンクが 6 つの基本パターンのいずれかで構成されているかどうかを判定することで管理する．この整合性の判定は，**図 4-5** に示すように 7 つのステップで行う．

(i) ライフサイクル・フロー・モデラが保持するライフサイクル・プロセス・ノードを 1 つ選択する．

(ii) そのライフサイクル・プロセス・ノードが持つデータから，そのライフサイクル・プロセス・ノードに入力する実体ノードと出力する実体ノードの ID をそれぞれ抽出し，入力する実体ノードリストおよび出力する実体ノードリストを作成する．

(iii) 抽出結果をもとに，このライフサイクル・プロセス・ノードが入力と出力の両方を持っているかどうかを判定する．具体的には，入力する実体ノードリストおよび出力する実体ノードリストが空集合であるかどうかを判定する．

(iv) 入力と出力の両方を持っていない場合は，入力のみを持っている場合は「終了」，出力のみを持っている場合は「開始」，どちらも持っていない場合は「不整合」として判定し，ライフサイクル・プロセス・ノードの「整合性」項目にその値を持たせる．

(v) 入力と出力の両方を持っている場合は，この入力する実体ノードと出力する実体ノードの間に階層リンクおよび変換リンクがあるかどうかを探索する．

(vi) (v)の探索結果に基づいて，入出力する実体ノードが全て同一である場合は「通過」，全ての入力する実体ノードと出力する実体ノードの間に変換リンクがある場合は「変換」，全ての入力する実体ノードと出力する実体ノードの間に階層リンクがあり入力する実体ノードが階層リンクの終点にあたる実体ノードである場合は「組立」，全ての入力する実体ノードと出力する実体ノードの間に階層リンクがあり入力する実体ノードが階層リンクの始点にあたる実体ノードである場合は「分解」，上記のどれにも当てはまらない場合は「不整合」として判定し，ライフサイクル・プロセス・ノードの「整合性」項目にその値を持たせる．

(vii) ライフサイクル・フロー・モデラが保持する全てのライフサイクル・プロセス・ノードについて判定が終わったかどうかを確認し，まだ判定していないライフサイクル・プロセス・ノードがある場合は(i)に戻って上記のステップを行う．全てのライフサイクル・プロセス・ノードについて判定が終わっている場合は整合性の判定を終了する．

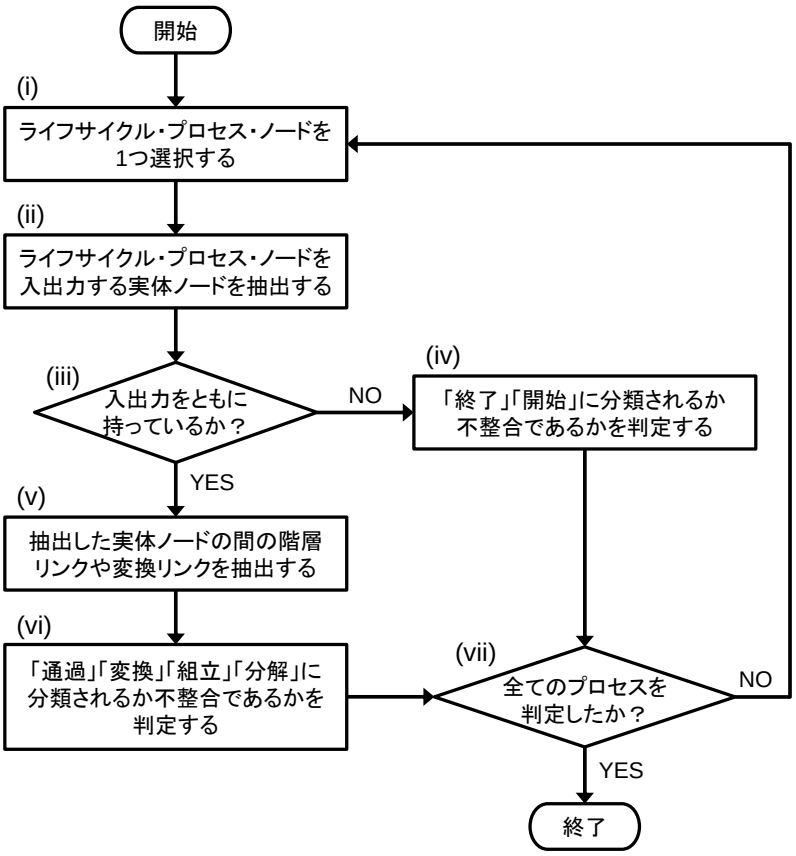


図 4-5 整合性管理のアルゴリズム

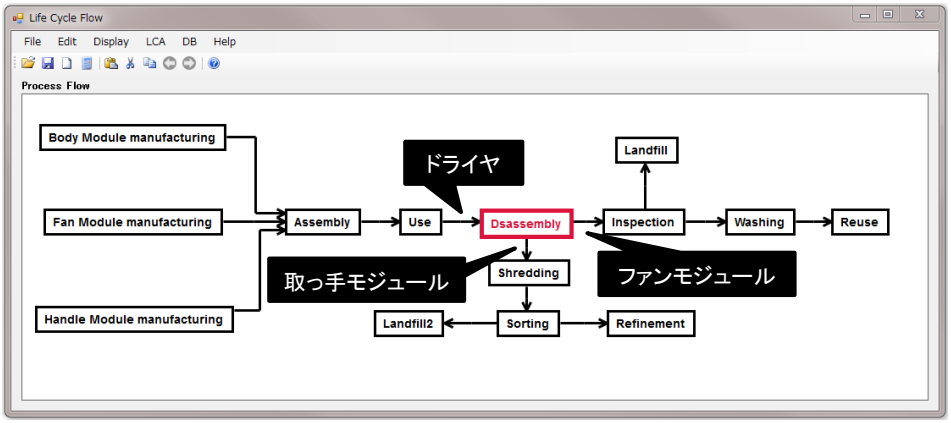


図 4-6 不整合がある場合の表示

整合性を判定した結果としてもし不整合がある場合は，そのライフサイクル・プロセス・ノードを赤で表示することで設計者にトポロジーレベルの不整合があることを知らせる．図 4-6 は第 3 章で示したドライヤのライフサイクル・フロー・モデルを表しており，分解を行う「Dissassembly」プロセスに「ドライヤ」が入力しているのに対して，それを構成するモジュールの 1 つである「本体モジュール」が出力していないので不整合となっている．

4.2.3. ライフサイクル評価

ライフサイクル・モデリング・システムでは，ライフサイクル・シミュレータを用いることで製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いたライフサイクル評価を可能とする．第 2 章で述べたように，ライフサイクル・シミュレーションを用いてライフサイクル評価を行うためには，製品とライフサイクル・フローの情報が必要であり，特にライフサイクル・フローの各プロセスは「定数パラメータ」「入力パラメータ」「出力パラメータ」「計算手順」の 4 つの情報を持っている必要がある．

そこで本研究では，ライフサイクル・プロセスのシチュエーション項目の 1 つである処理内容をこのライフサイクル・シミュレーションの表現形式に従って「定数パラメータ」「入力パラメータ」「出力パラメータ」「計算手順」の 4 つを用いて以下のような情報を記述する．

- 定数パラメータ

  ライフサイクル・プロセスにおける単位時間当たりの人件費や CO2 の排出原単位のような，ライフサイクル評価を行う際に必要なそのプロセス特有のパラメータを記述する．

- 入力パラメータ

  ライフサイクル・プロセスに入力する物質の情報を記入する．ここでは，シチュエーション項目の 1 つである「入力する物質」が持つその物質を表す実体ノードの ID を持たせる．また，ライフサイクル・プロセスに入力する製品の台数など他のプロセスの出力パラメータの中で評価に必要なパラメータについてもここに記述する．

- 出力パラメータ

  ライフサイクル・プロセスから出力するパラメータを記述する．ここでは主に，ライフサイクル・プロセスにおけるコストや CO2 排出量などの評価結果が出力される．

- 計算手順

  定数パラメータ，入力パラメータ，出力パラメータの 3 つのパラメータ間の関係を記述する．例えば，製錬プロセスにおいて「製錬コスト（出力パラメータ）＝単位重量当たりの製錬コスト（定数パラメータ）×処理する重量（入力パラメータ）」と記述することで，製錬プロセスの製錬コストを計算することができ，その結果が出力パラメータとして記述される．

ライフサイクル・モデリング・システムにおいては，入力パラメータとして実体ノードの ID を記述できるようにすることで，そのプロセスに入力する実体の属性値（重量や構成素材など）を参照することを可能としている．例えば，上記のように「処理する重量」が情報として必要である場合は，入力パラメータの持つ実体ノードの ID を用いてその実体ノードが持つ属性値を参照することでその重量の値を取得することができる．以上のように入力パラメータを通して製品モデルの情報とライフサイクル・フロー・の情報をつなぐことで，両モデルの情報を用いたライフサイクル評価が可能となる．

4.3. 第 4 章のまとめ

本章では，ライフサイクル CAD システムの実現に向けた第 1 段階として，製品ライフサイクルを表現しトポロジーレベルの整合性を管理することができる計算機環境としてライフサイクル・モデリング・システムを開発した．ライフサイクル・モデリング・システムでは，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルのモデル化を可能とすることで，両モデルを用いた製品ライフサイクルの表現を可能とすると同時に，第 3 章で定義した 6 つの基本パターンを持たせることで両モデルを用いたトポロジーレベルの整合性管理を可能とした．さらに，ライフサイクル・シミュレータを統合することで，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの情報を用いて経済性や環境性などのライフサイクル評価が可能となった．

第5章

例題検証

第 5 章では，第 3 章で提案した製品ライフサイクルの表現手法および製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間のトポロジーレベルの整合性を管理する手法を用いて，製品ライフサイクルの様々な側面の表現や整合性の評価が可能であることを検証するために，第 4 章で述べたライフサイクル．モデリング・システムを用いて携帯電話と液晶テレビの 2 つの製品の設計改善を対象として例題検証を実施する．

5.1. 例題検証の概要

本研究では，携帯電話および液晶テレビの設計改善を対象として 2 つの例題検証を実施する．これらの例題検証を通して，設計過程において製品ライフサイクルの表現やトポロジーレベルの整合性管理が可能であることを確認する．

携帯電話の例題検証においては，携帯電話のライフサイクル戦略を変更する設計変更を実施する．具体的には，リサイクル中心である現状の携帯電話のライフサイクル・フローに，リユース戦略を取り入れる．そのために，現状の携帯電話の製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを作成し，ライフサイクル戦略の変更に合わせてライフサイクル・フロー・モデルおよび製品モデルを設計変更する．

液晶テレビの例題検証においては，液晶テレビのリサイクル性を向上させる設計改善を実施する．本例題検証では対象地域として日本と EU の 2 地域を設定し，それぞれの地域の実情（市場や法制度）に即したリサイクル性設計を行う．ここでは，第 2 章で挙げたリサイクル性設計手法の 1 つである水野らが提案するリサイクル性評価手法[44]をライフサイクル・モデリング・システムに接続して用いる．これによって，ライフサイクル CAD システムにおける環境配慮設計手法の統合可能性の第 1 段階として，本研究で開発したライフサイクル・モデリング・システムにおける環境配慮設計手法の接続性を確認する．

5.2. 携帯電話の設計改善

携帯電話の設計改善を対象として例題検証を実施する．携帯電話を設計対象として採用した理由としては，(i)世の中に広く出回っている製品であること，(ii)使用後の処理はリサイクル中心であること，の 2 点が挙げられる．(i)に関しては，**表 5-1** に示すように，その数は減少傾向にあるものの，毎年 3,000 万台以上の高い水準を保っている．

表 5-1 移動電話の年間国内出荷台数[57]

年	2008	2009	2010	2011
出荷台数 [1,000 台]	35,853	31,426	32,192	30,825

また(ii)に関しては，消耗部品を交換することでメンテナンスしたり，まだ使用可能な部品をリユースしたりするような新たなライフサイクル戦略策定の可能性がある．

例題検証は，以下の 3 つのステップで実施する．

(1) 携帯電話の分解実験によってその構成部品や構造を調査すると同時に，携帯電話の一般的な製品ライフサイクルについても調査することで，現状の製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを作成する．

(2) 携帯電話の現状分析を行い，その結果より新しいライフサイクル戦略を策定する．

(3) 新たなライフサイクル戦略をもとに製品とそのライフサイクル・フローを設計改善する．設計結果に基づいて両モデルを修正し，またライフサイクル・シミュレーションを用いてライフサイクル評価を行う．

以下，5.1 節で述べた例題検証のステップを，順を追って述べる．

5.2.1. 現状モデルの作成

(1) 携帯電話の構造

本例題検証で対象とした携帯電話は，三菱電機製の「D903i」で，スライド式の携帯電話である（**図 5-1** 参照）．まず，対象製品である携帯電話の分解実験を行うことで，携帯電話の部品リストと構造，構成素材，重量を調査した．対象製品である携帯電話の分解時の写真を**図 5-2**～**図 5-12** に示す．また，携帯電話の部品リストと，各部品の構成素材，重量，物理寿命を**表 5-2** に示す．各部品の物理寿命については，構成素材や形状をもとに良好な使用条件で使用された場合を想定した上で設定した．またその際には，一般的な器具の耐用年数表[58][59]や各種器具の寿命データ[60]を参照した．

図 5-1 対象製品の携帯電話

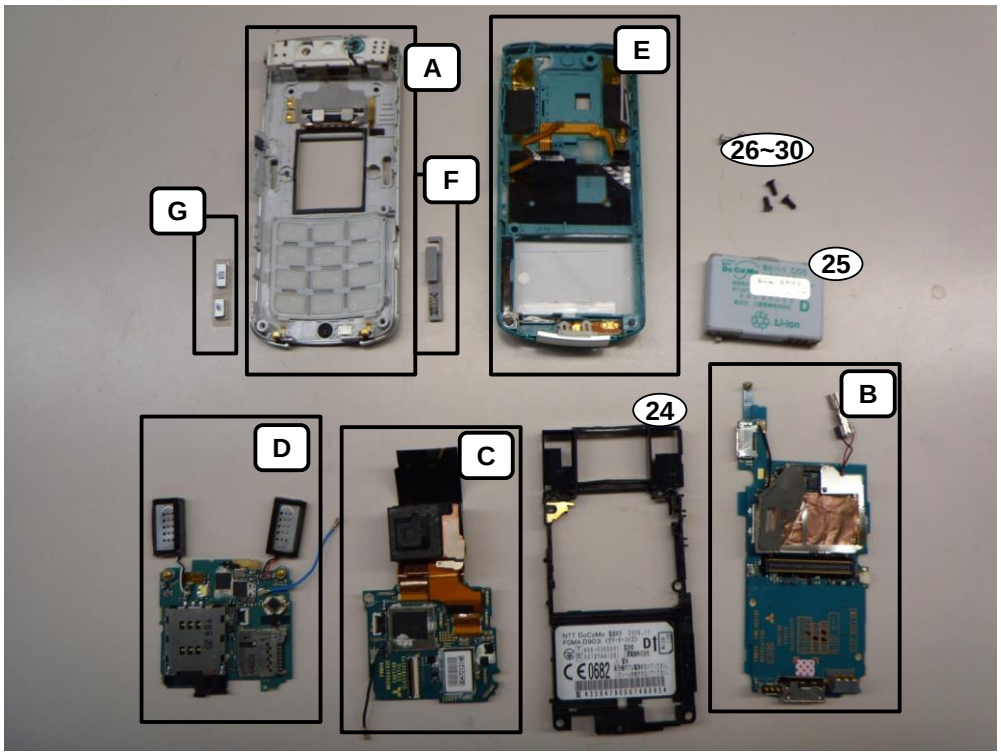


図 5-2 携帯電話の分解図（全体-1）

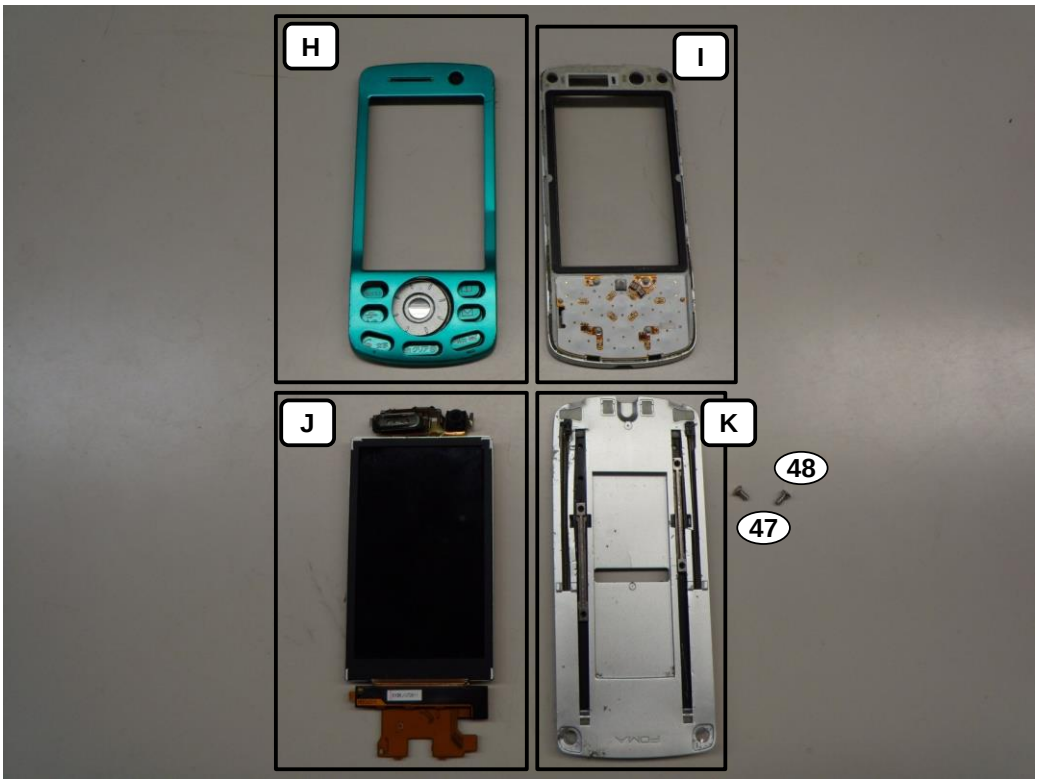


図 5-3 携帯電話の分解図（全体-2）

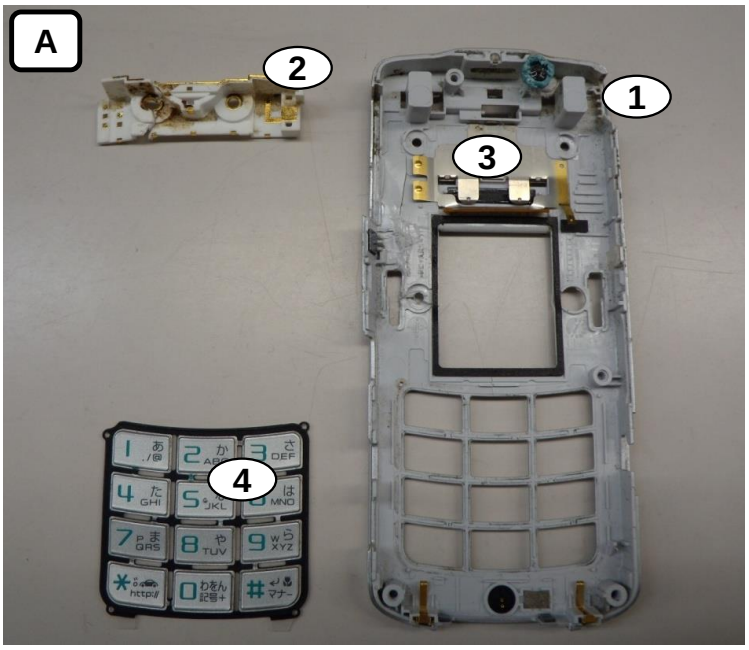


図 5-4 携帯電話の分解図（部分-A）

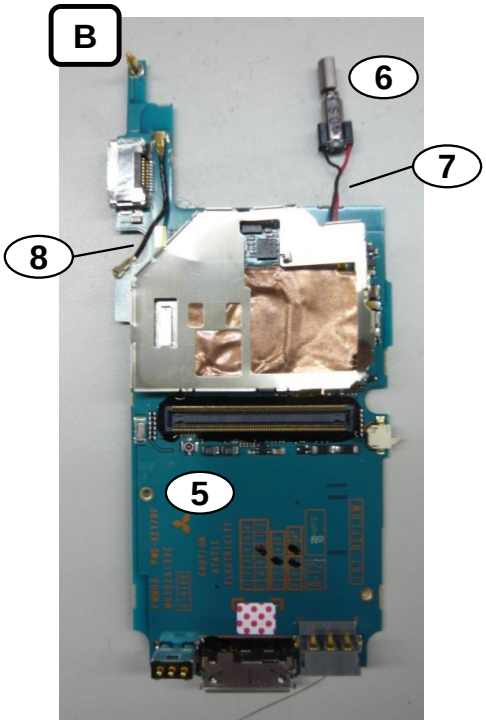


図 5-5 携帯電話の分解図（部分-B）

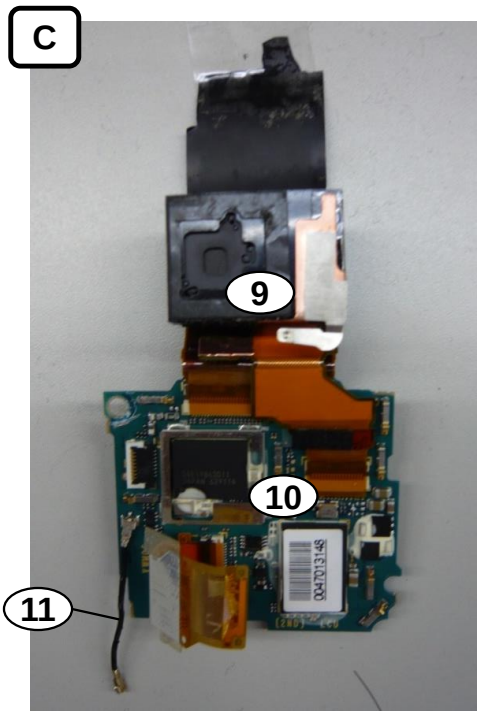


図 5-6 携帯電話の分解図（部分-C）

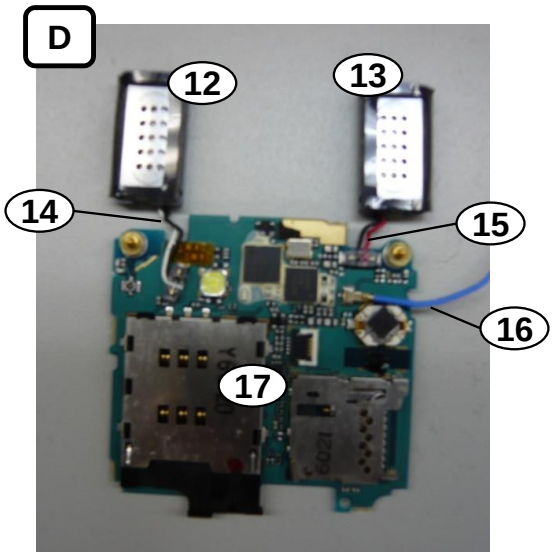


図 5-7 携帯電話の分解図（部分-D）

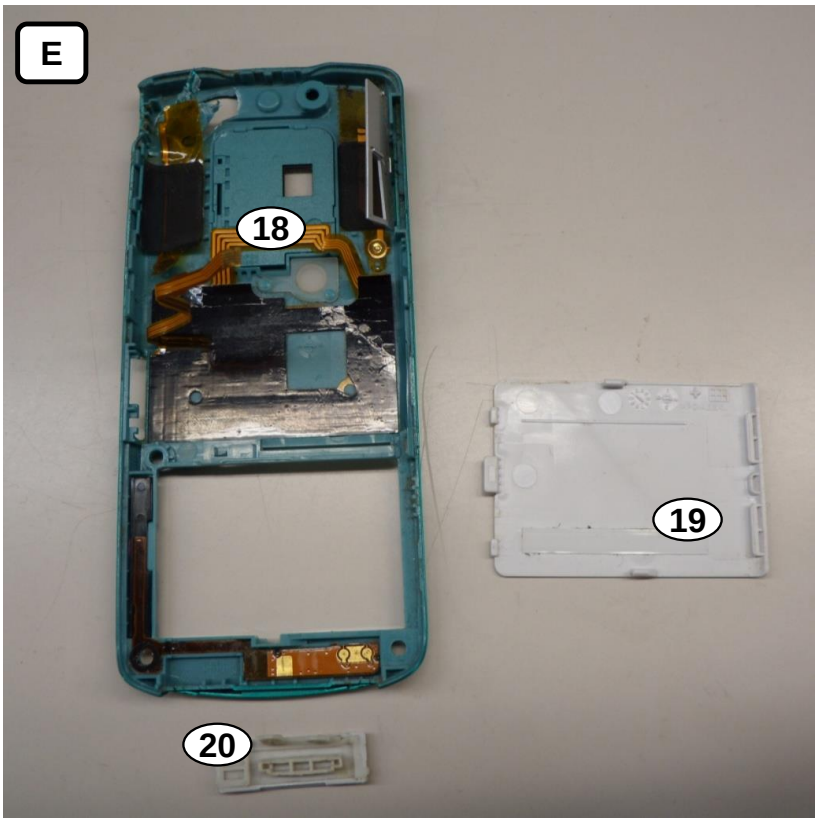


図 5-8 携帯電話の分解図（部分-E）

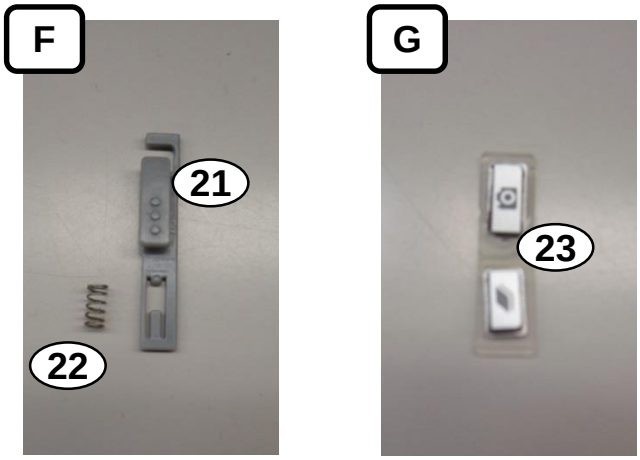


図 5-9 携帯電話の分解図（部分-F, G）

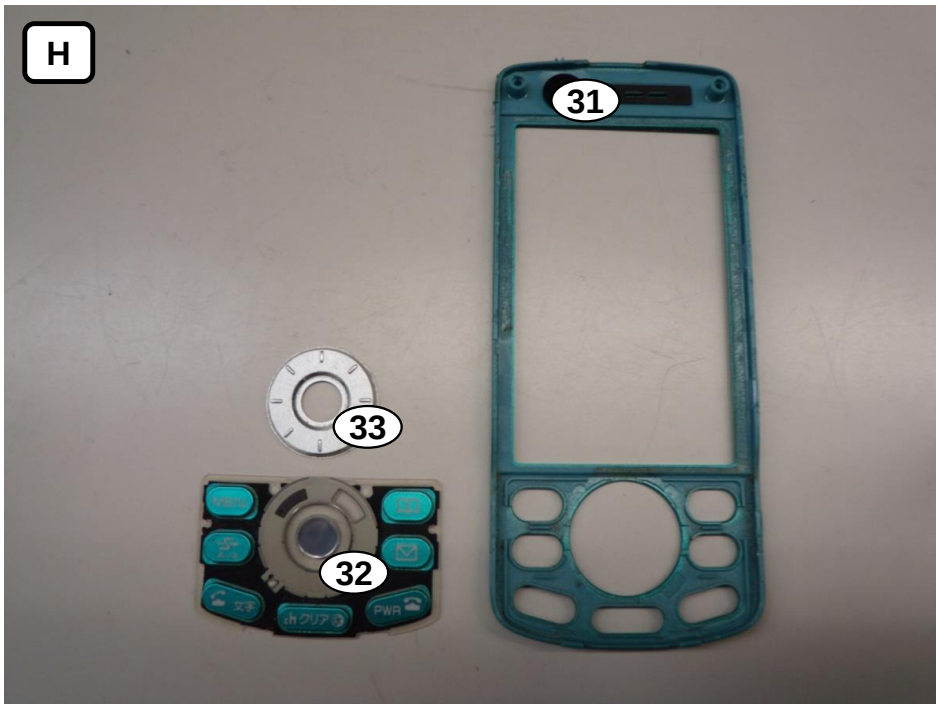


図 5-10 携帯電話の分解図（部分-H）

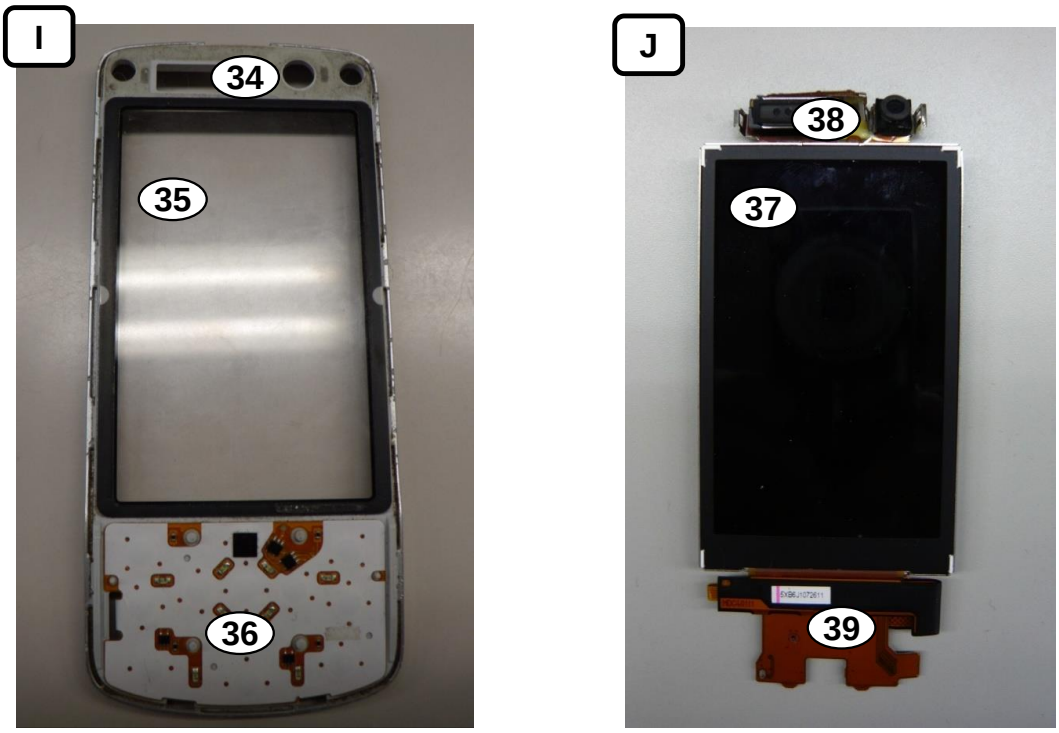


図 5-11 携帯電話の分解図（部分-I, J）

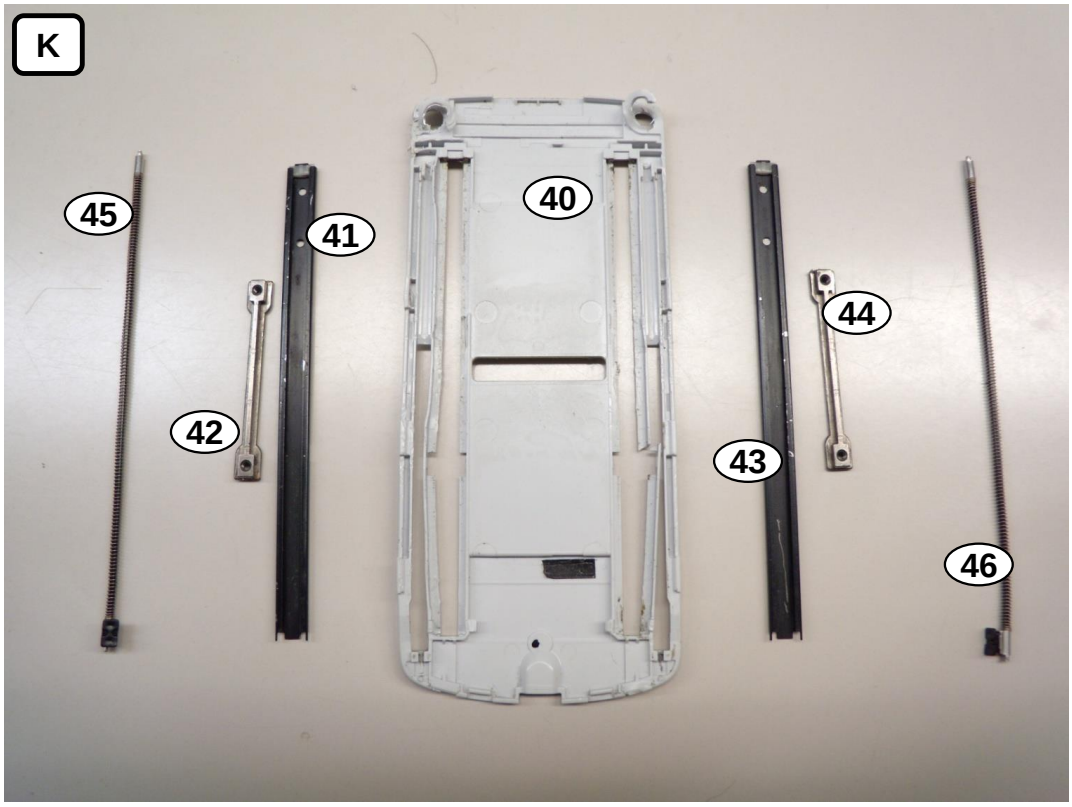


図 5-12 携帯電話の分解図（部分-K）

表 5-2 携帯電話の構成部品

	部品名	構成素材	重量 [g]	物理寿命 [年]
1	Front Case	ABS (gray)	7.41	5.0
2	Front Case Part 1	ABS (white)	0.71	5.0
3	Front Case Part 2	Aluminum	0.10	5.0
4	Number Button	PC (gray)	0.51	4.0
		Silicon Rubber	0.80	
			1.31	
5	Main Board	Epoxy Resin	6.59	4.0
		Copper	0.88	
		Gold	0.001	
		Silver	0.12	
			7.59	

6	Motor	Copper	0.17	8.0
		Steel	0.76	
			0.93	
7	Wire Harness 1	Copper	0.20	5.0
		PVC (red)	0.30	
			0.50	
8	Wire Harness 2	Copper	0.20	5.0
		PVC (black)	0.30	
			0.50	
9	Main Camera	Copper	0.32	5.0
		ABS (black)	1.78	
			2.10	
10	Camera Board	Epoxy Resin	1.46	4.0
		Copper	0.56	
		Gold	0.001	
		Silver	0.11	
			2.13	
11	Wire Harness 3	Copper	0.20	5.0
		PVC (black)	0.30	
			0.50	
12	Speaker L	Copper	0.64	7.0
		Steel	5.03	
			5.67	
13	Speaker R	Copper	0.64	7.0
		Steel	5.03	
			5.67	
14	Wire Harness 4	Copper	0.20	5.0
		PVC (white)	0.30	
			0.50	
15	Wire Harness 5	Copper	0.20	5.0
		PVC (red)	0.30	
			0.50	
16	Wire Harness 6	Copper	0.20	5.0
		PVC (blue)	0.30	
			0.50	

17	Speaker Board	Epoxy Resin	1.84	4.0
		Copper	1.23	
		Gold	0.001	
		Silver	0.20	
			3.27	
18	Rear Case	ABS (Blue)	6.90	5.0
19	Battery Cover	ABS (Blue)	0.70	5.0
20	Power Connect Cover	PC (gray)	0.14	4.0
21	Lock Button	ABS (gray)	0.12	5.0
22	Spring	Steel	0.07	6.0
23	Side Button	Silicon Rubber	0.15	4.0
		PC (transparency)	0.08	
			0.23	
24	Frame	ABS (black)	4.77	5.0
25	Battery	Lithium	4.67	3.0
		Cobalt	2.41	
		Copper	1.66	
		ABS	7.98	
			16.72	
26	Screw (Black) 1	Steel	0.12	10.0
27	Screw (Black) 2	Steel	0.12	10.0
28	Screw (Black) 3	Steel	0.12	10.0
29	Screw (Black) 4	Steel	0.12	10.0
30	Screw (Black) 5	Steel	0.12	10.0
31	Front Display Case	ABS (blue)	0.85	5.0
		PE (black)	0.01	
			0.86	
32	Display Button	PC (blue)	0.66	4.0
		Silicon Rubber	1.32	
			1.98	
33	Display Center Button	PC (gray)	0.55	4.0
34	Display Frame	PA (white)	2.76	5.0
35	Display Film	PE (transparency)	1.31	4.5
36	Display Board 1	Epoxy Resin	0.12	4.0
		Copper	0.08	

		Gold	0.001	
		Silver	0.01	
			0.21	
37	LC Display	Indium	0.18	4.5
		Glass	12.99	
		Copper	0.54	
		Iron	2.24	
			15.95	
38	Sub Camera	Steel	1.62	5.0
		ABS	0.12	
			1.74	
39	Display Board 2	Epoxy Resin	1.89	4.0
		Copper	1.54	
		Gold	0.001	
		Silver	0.17	
			3.60	
40	Rear Display Case	ABS (white)	1.85	5.0
41	Track L 1	Aluminum	0.41	8.0
42	Track L 2	Aluminum	0.34	8.0
43	Track R 1	Aluminum	0.41	8.0
44	Track R 2	Aluminum	0.34	8.0
45	Spring L	Steel	0.50	6.0
		Aluminum	0.02	
			0.52	
46	Spring R	Steel	0.50	6.0
		Aluminum	0.02	
			0.52	
47	Screw (silver) 1	steel	0.09	10.0
48	Screw (silver) 2	steel	0.09	10.0
Cellular Phone			103.67	3.0

(2) 携帯電話の製品ライフサイクル

現状の携帯電話は，使用後にリサイクルされるのが一般的であり，鉄やアルミニウム，マグネシウム，金，銀，銅などの金属は素材に戻して再利用し，製錬の過程で発生するスラグについても路盤材や湾岸施設（テトラポット中込材）などに利用されている[61]．また，金属以外の素材（プラスチックやガラスなど）についても，ハンガーなどの日用品やプラスチック収納容器，玩具などに利用されている．ただし，上記でも述べたように携帯電話は価値寿命が短いために製品の入れ替わりが早い一方で，個人情報などのデータの保存や，長年使用することで愛着が湧きコレクションとして保持するなどの理由から携帯電話の回収率は 30[%]程度と決して高くはない[62][63]．なお，回収されなかった携帯電話については，自宅に保管されることが想定されるが，最終的にはゴミとして埋め立て処分されるものと仮定する．

(3) 携帯電話の製品モデルとライフサイクル・フロー・モデル

携帯電話の分解調査や製品ライフサイクルの調査結果より，ライフサイクル・モデリング・システムを用いて現状の製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを作成する．その結果を，それぞれ**図 5-13**，**図 5-14** および**図 5-15** に示す．

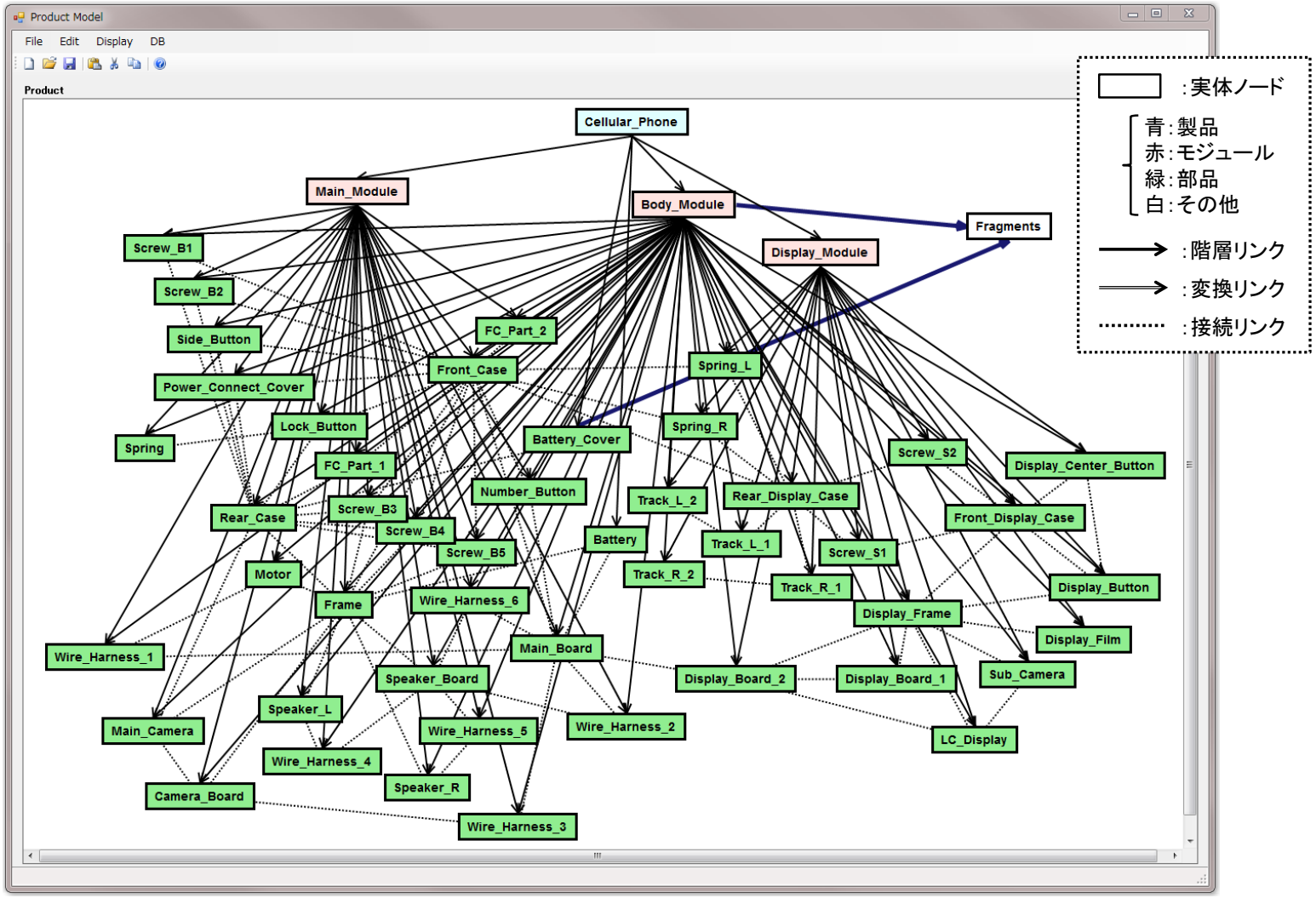


図 5-13 現状の製品モデル(1/2)

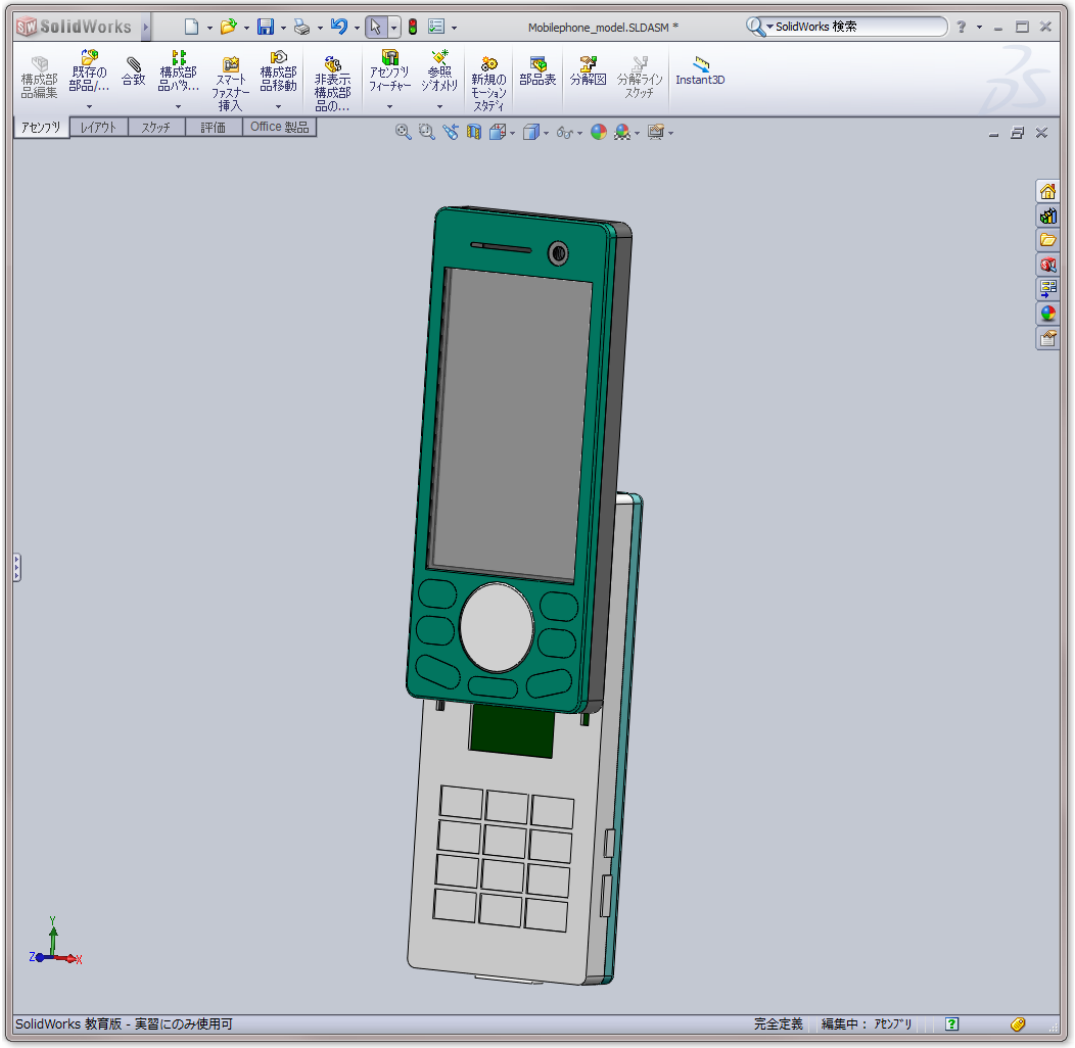


図 5-14 現状の製品モデル(2/2)

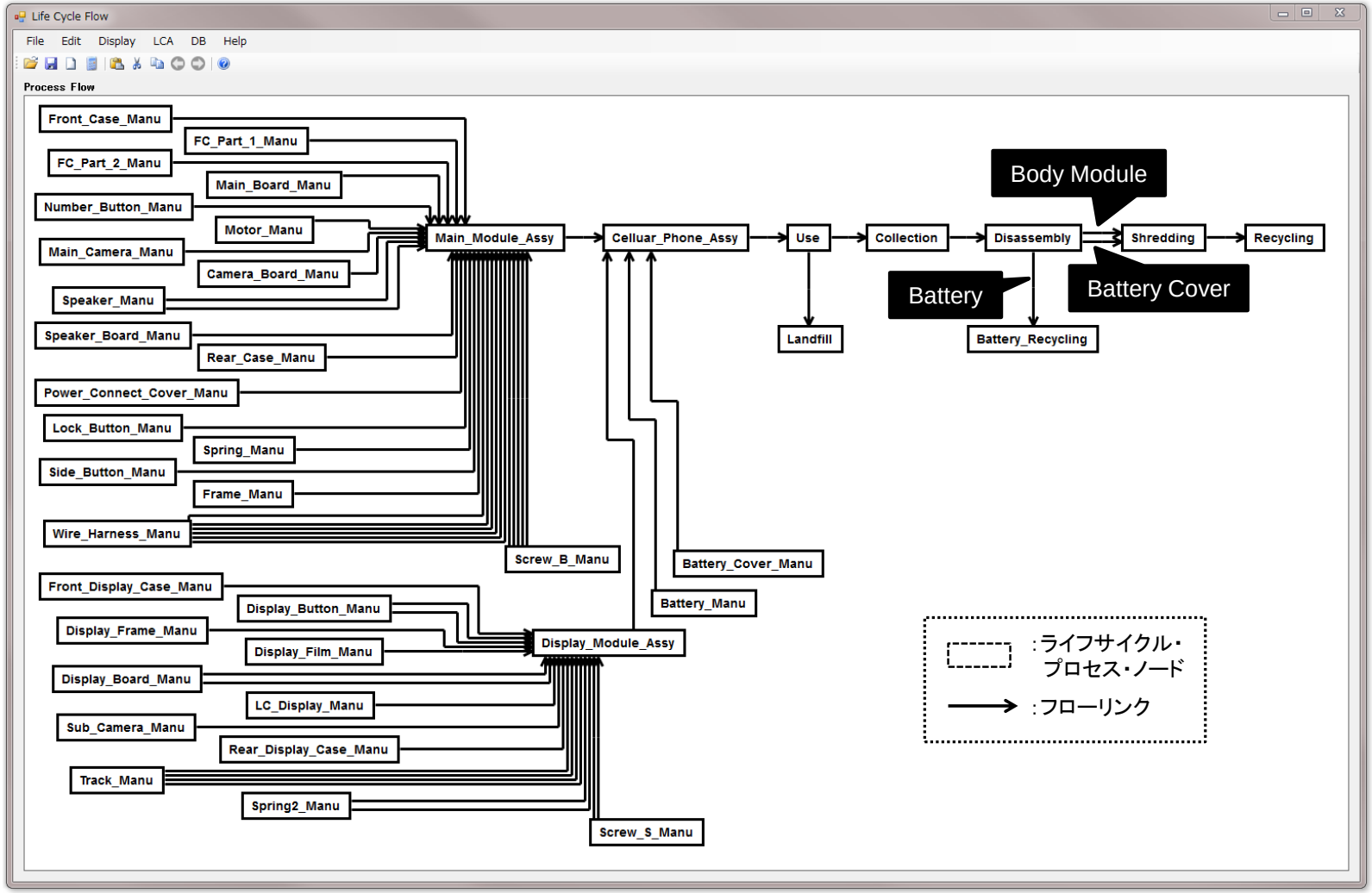


図 5-15 現状のライフサイクル・フロー・モデル

製品モデルでは**表 5-2** に示す 48 個の部品を実体ノードとして作成すると同時に，ライフサイクル・フロー・モデルと製品モデルを対応付けるために，製品モデル上に「携帯電話（Cellular Phone）」，「ディスプレイ・モジュール（Display Module）」，「メイン・モジュール（Main Module）」，「本体モジュール（Body Module）」，そしてリサイクルするための「本体モジュール（Body Module）」と「バッテリー・カバー（Battery Cover）」を破砕した「破砕片（Fragments）」を表す実体ノードを作成した．また分解実験の結果より各部品の形状を測定した上で，SolidWorks を用いてソリッドモデルを作成した．**図 5-13** が構造モデラで携帯電話の実体ノードやその間の階層関係，接続関係，変換関係を表現し，**図 5-14** がソリッドモデラで携帯電話のソリッドモデルを表現している．

ライフサイクル・フロー・モデルは現状の携帯電話の製品ライフサイクルの調査結果をもとに作成した（**図 5-15** 参照）．具体的には，携帯電話は「ディスプレイ・モジュール」と「メイン・モジュール」，「バッテリー」，「バッテリー・カバー」の 4 つを組み立てることで製造される．また，使用プロセスでは回収した携帯電話と回収できなかった携帯電話に分かれ，回収できたものは手分解でリサイクルできない「バッテリー」を取り出し残りの「バッテリー・カバー」および「本体モジュール」についてはまとめて破砕することでリサイクルを行い，回収できなかったものはゴミとして埋め立て処分される．

図 5-13 に示すように製品の構造を実体ノードとそれらの間の相互関係を用いて作成することで，実体ノード間の接続関係から，「前筐体（Front Case）」，「後筐体（Rear Case）」，「フレーム（Frame）」，「前画面筐体（Front Display Case）」，「後画面筐体（Rear Display Case）」，そして「画面フレーム（Display Frame）」の 6 つの部品を中心として各部品が接続されていることがわかる．さらに，第 3 章で述べたように，本研究で提案した表現手法では製品ライフサイクルにおける複数の階層構造を表現することができ，ここでは製造時における階層構造（**図 5-16** 参照）およびリサイクル時の階層構造（**図 5-17** 参照）の 2 つの階層構造を表現できている．なお，**図 5-13** の製品モデルではこれらを同時に表示しているため，複雑な階層構造となっている．これによって，製造時にはどのような単位で部品の組み立てが行われており，一方でリサイクルを行う場合にはどのような単位で分解が行われているか，そしてそれらの間にはどのような違いがあるのかが明確になる．

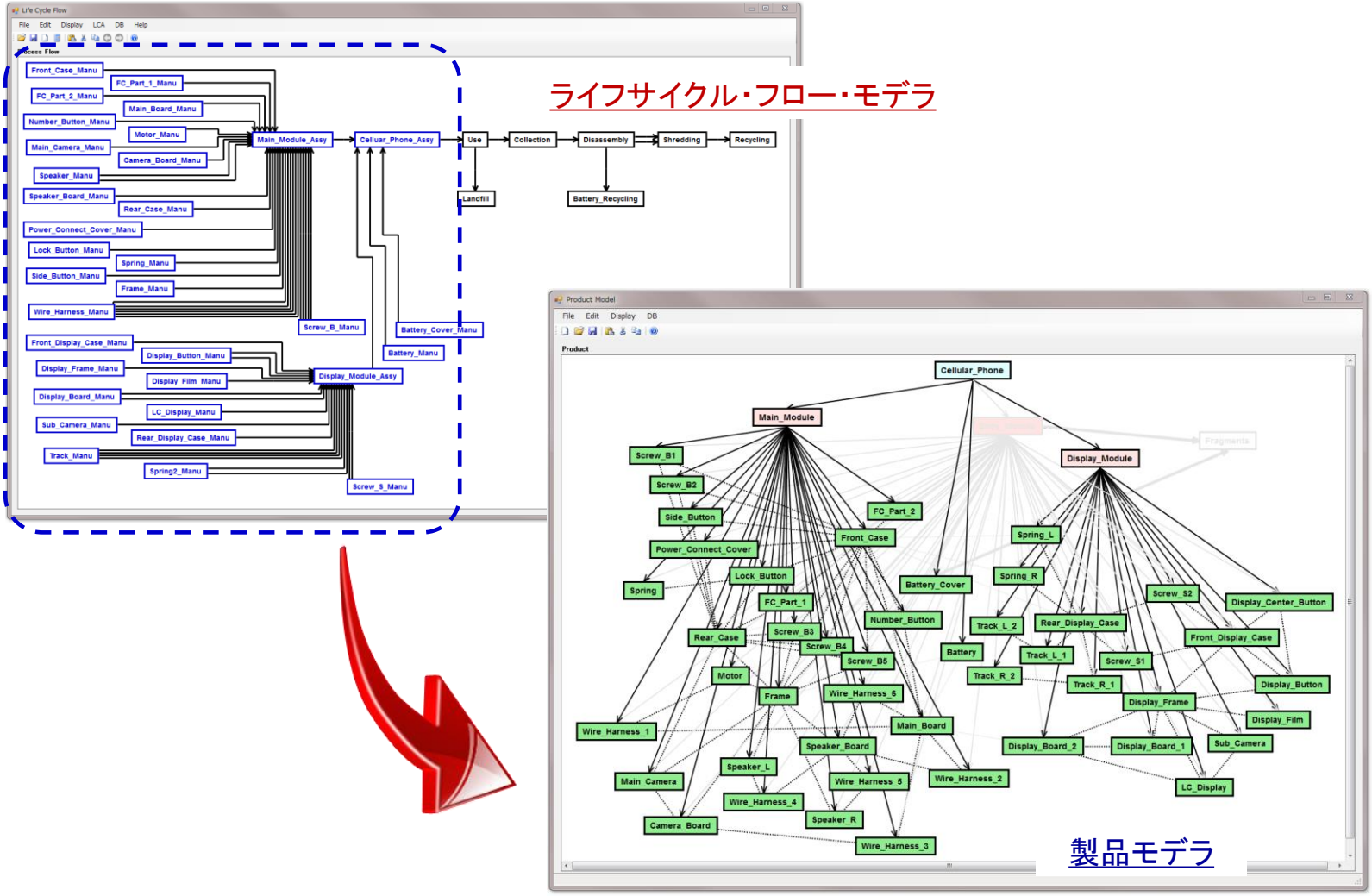


図 5-16 製造時の携帯電話の階層構造

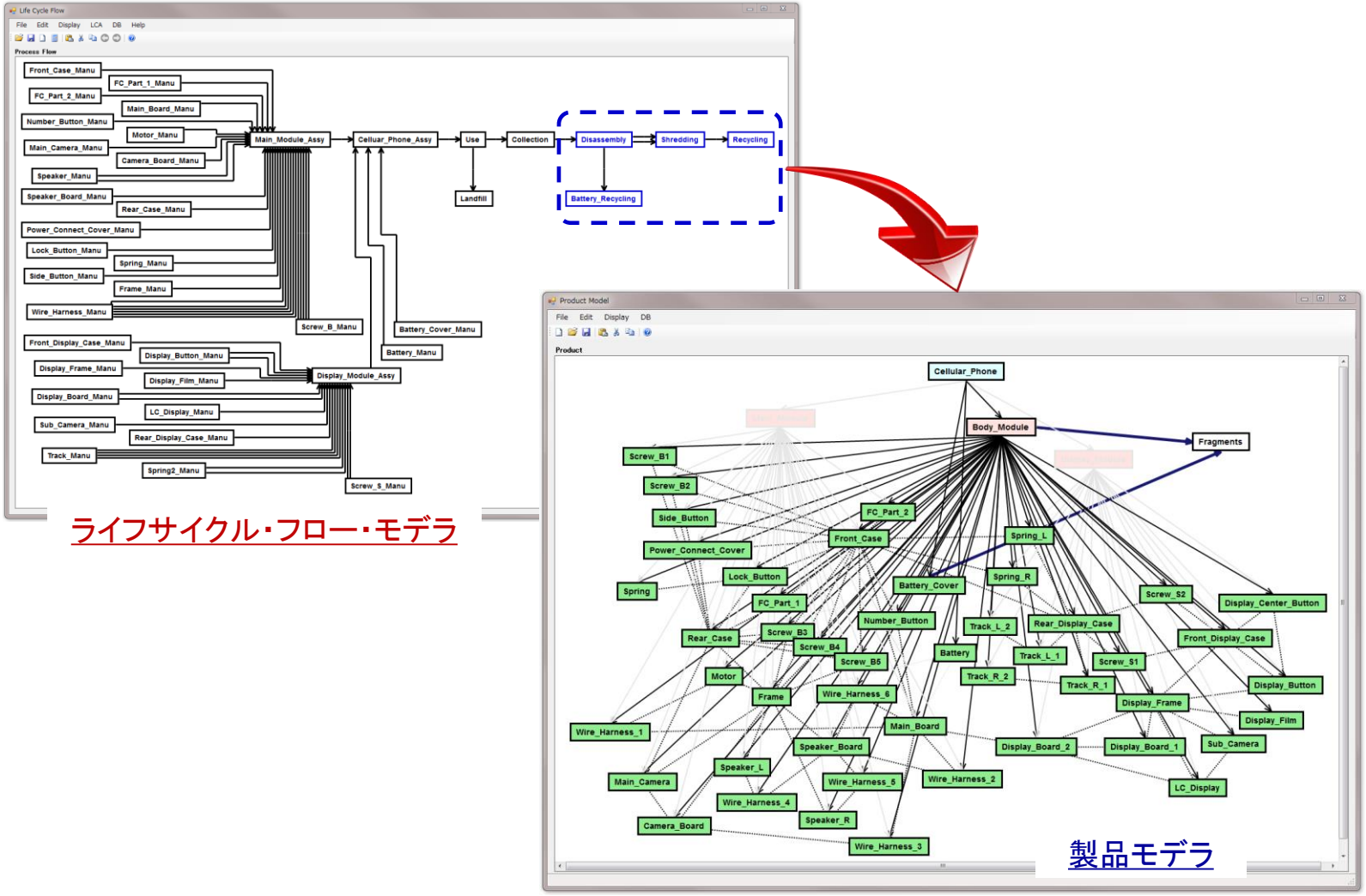


図 5-17 リサイクル時の携帯電話の階層構造

またこの時点で，ライフサイクル・モデリング・システムを用いてトポロジーレベルの整合性チェックを行うと不整合は検出されず，各プロセスは**表 5-3** に示す様に自動的に分類される．

表 5-3 現状のライフサイクル・プロセスの基本パターン

基本パターン	ライフサイクル・プロセスの名前
(a) 終了	[Landfill], [Battery Recycling], [Recycling]
(b) 開始	[Front Case Manu], [FC Part 1 Manu], [FC Part 2 Manu], [Main Board Manu], [Number Button Manu], [Motor Manu], [Main Camera Manu], [Camera Board Manu], [Speaker Manu], [Speaker Board Manu], [Rear Case Manu], [Power Connect Cover Manu], [Lock Button Manu], [Spring Manu], [Side Button Manu], [Frame Manu], [Wire Harness Manu], [Screw B Manu], [Front Display Case Manu], [Display Button Manu], [Display Frame Manu], [Display Film Manu], [Display Board Manu], [LC Display Manu], [Sub Camera Manu], [Rear Display Case Manu], [Track Manu], [Spring2 Manu], [Screw S Manu], [Battery Cover Manu], [Battery Manu]
(c) 通過	[Use], [Collection]
(d) 変換	[Shredding]
(e) 結合	[Main Module Assy], [Display Module Assy], [Cellular Phone Assy]
(f) 分離	[Disassembly]

5.2.2. ライフサイクル戦略の策定

内閣府経済社会総合研究所の統計資料[64]によると，2003 年～2012 年に携帯電話を買い替えた世帯における携帯電話の平均使用年数は**表 5-4** のようであり，おおよそ 3 年前後である．携帯電話の機能向上の鈍化や不景気による買い控えなどの理由から徐々に使用年数は伸びているものの，買い替え理由を見てみるとまだまだ「上位品目への移行」が 40[%]前後と高く，多くの人が物理寿命は残っているものの価値寿命が切れてしまったことによって携帯電話を買い換えていることがわかる．携帯電話の機種によってバラツキがあることが想定されるが，**表 5-4** より買い替え理由の「上位品目への移行」の割合が高い年の平均使用年数の方が短いことから，携帯電話の価値寿命はおよそ 2-3[年]であると推定することができる．なお，本研究で対象とする携帯電話の物理寿命は**表 5-2** に示したように 3[年]であり，「バッテリー」がその原因となっている．

表 5-4 主要耐久消費財の買い替え状況（一般世帯） [64]

年	平均使用年数 [年]	買い替え理由 [%]		
		故障	上位品目への移行	その他
2003	2.2	32.2	45.7	22.1
2004	2.3	27.6	52.0	20.4
2005	2.4	31.2	49.7	19.1
2006	2.6	34.7	44.2	21.1
2007	2.7	30.5	43.7	25.8
2008	2.9	33.6	42.5	23.9
2009	3.2	34.4	40.7	24.9
2010	3.4	34.0	37.3	28.7
2011	3.6	33.0	39.4	27.6
2012	3.5	32.2	42.8	25.0

上記でも述べたように，携帯電話は製品としての物理寿命が来る前に新しい携帯電話へと買い換えられることが多い．携帯電話が 2 年で廃棄されたとすると，**表 5-2** に示すように物理寿命の短い「バッテリー」を除くと 2 年以上の物理寿命が残っている．そこで本例題検証では，これらの物理寿命が残っている部品をリユースするライフサイクル戦略を設定することで製品ライフサイクル全体の資源投入量の削減を目指す．

具体的には，物理寿命の短い「バッテリー」に加えて，「前筐体（Front Case）」，「後筐体（Rear Case）」，「前画面筐体（Front Display Case）」，「後画面筐体（Rear Display Case）」，「画面フレーム（Display Frame）」，「バッテリー・カバー（Battery Cover）」の筐体と「数字ボタン（Number Button）」，「画面ボタン（Display Button）」，「中心ボタン（Display Center Button）」「横面ボタン（Side Button）」などのボタン類についてはユーザーが直接触れる部分であり，汚れや傷の付着が考えられるためともにリユースが困難な部品であるとする．また，「ねじ」や「レール（Track）」のような筐体部品に付随する部品についてもリユースは行わずリサイクルすることとする．以上を考慮して決定した，**表 5-2** に示した各部品のライフサイクル・オプションを**表 5-5** に示す．ただし，リユースを行う部品についても，故障等でリユースできなかった場合，もしくはリユース後には全てリサイクルするものとする．

表 5-5 各部品のライフサイクル・オプション

リユース かつ リサイクル	(5)Main Board, (6)Motor, (7)Wire Harness 1, (8)Wire Harness 2, (9)Main Camera, (10)Camera Board, (11)Wire Harness 3, (12)Speaker L, (13)Speaker R, (14)Wire Harness 4, (15)Wire Harness 5, (16)Wire Harness 6, (17)Speaker Board, (24)Frame, (37)LC Display, (38)Sub Camera, (39)Display Board 2
リサイクルのみ	(1)Front Case, (2)Front Case Part 1, (3)Front Case Part 2, (4)Number Button, (18)Rear Case, (19)Battery Cover, (20)Power Connect Cover, (21)Lock Button, (22)Spring, (23)Side Button, (25)Battery, (26)~(30)Screw (black), (31)Front Display Case, (32)Display Button, (33)Display Center Button, (34)Display Frame, (35)Display Film, (36)Display Board 1, (40)Rear Display Case, (41)Track L1, (42)Track L2, (43)Track R1, (44)Track R2, (45)Spring L, (46)Spring R, (47)~(48)Screw (silver)

本例題検証では，リユース戦略として以下のような条件を設定した．

- 使用後の製品の回収率は 5.2.1 項で示した回収率のデータより生産量の 30[%]であるとする．
- 回収した携帯電話のうちで**表 5-5** に示したリユース部品がリユース可能である割合（良品率）は 80[%]であるとする．
- リユースを行う前に，リユースを行う部品とそうでない部品を手作業で分解する．その上で，リユースを行う部品については動作確認やX線によるキズ点検を行うことでリユースの可否を検査する．
- リユース品を販売する際には，中古部品が含まれるため新品製品の 6 割の値段で販売することとする．
- リユースを行うのは 1 度のみで，**表 5-5** に示したリユースを行う部品が 1 度リユースされている場合はリユースせずにリサイクルを行う．1 度使用しているかどうかはリユースを行うための検査によって判断する．
- 設計改善に際して，製品ライフサイクル全体の利益は現状を維持した上で，資源消費量および CO2 排出量の削減を目指す．

5.2.3. 設計改善

まず，**表 5-5** に示した部品のリユースを行うように，ライフサイクル・フロー・モデルを修正する．ライフサイクル・フロー・モデルの修正においては，以下の 3 つの点に注意する．

- 使用した携帯電話の 30[%]は回収され，残りの 70[%]は廃棄される．
- **表 5-5** に示したリユースを行う部品の 80[%]は検査工程で合格となりリユースを行い，残りの 20[%]は故障などの理由で不合格となり，破砕を経てリサイクルを行う．

上記の方針に基づいて，ライフサイクル・モデリング・システムを用いてライフサイクル・フロー・モデルを修正する．修正したライフサイクル・フロー・モデルを**図 5-18** に示す．青色で示したライフサイクル・プロセス・ノードおよびフローリンクは，修正した際に**図 5-15** に示した現状のライフサイクル・フロー・モデルに対して追加したものである．具体的には，まず検査を行うライフサイクル・プロセス（検査プロセス：Inspection）と洗浄や再組立を行うライフサイクル・プロセス（再製造プロセス：Remanufacturing）の 2 つのライフサイクル・プロセスを追加した．さらに，検査プロセスに入力するフローリンクに対して**表 5-5** に示したリユースを行う部品をそれぞれ対応づけ，出力するフローリンクに対しても**表 5-5** に示したリユースを行う部品をそれぞれ対応付けた．再製造プロセスの入力フローリンクに対しては，リユースを行う部品に加えてリユースを行わず交換する消耗部品を，それぞれの製造プロセスからフローリンクを作成することで対応付け，出力するフローリンクには再製造した携帯電話を対応付けた．

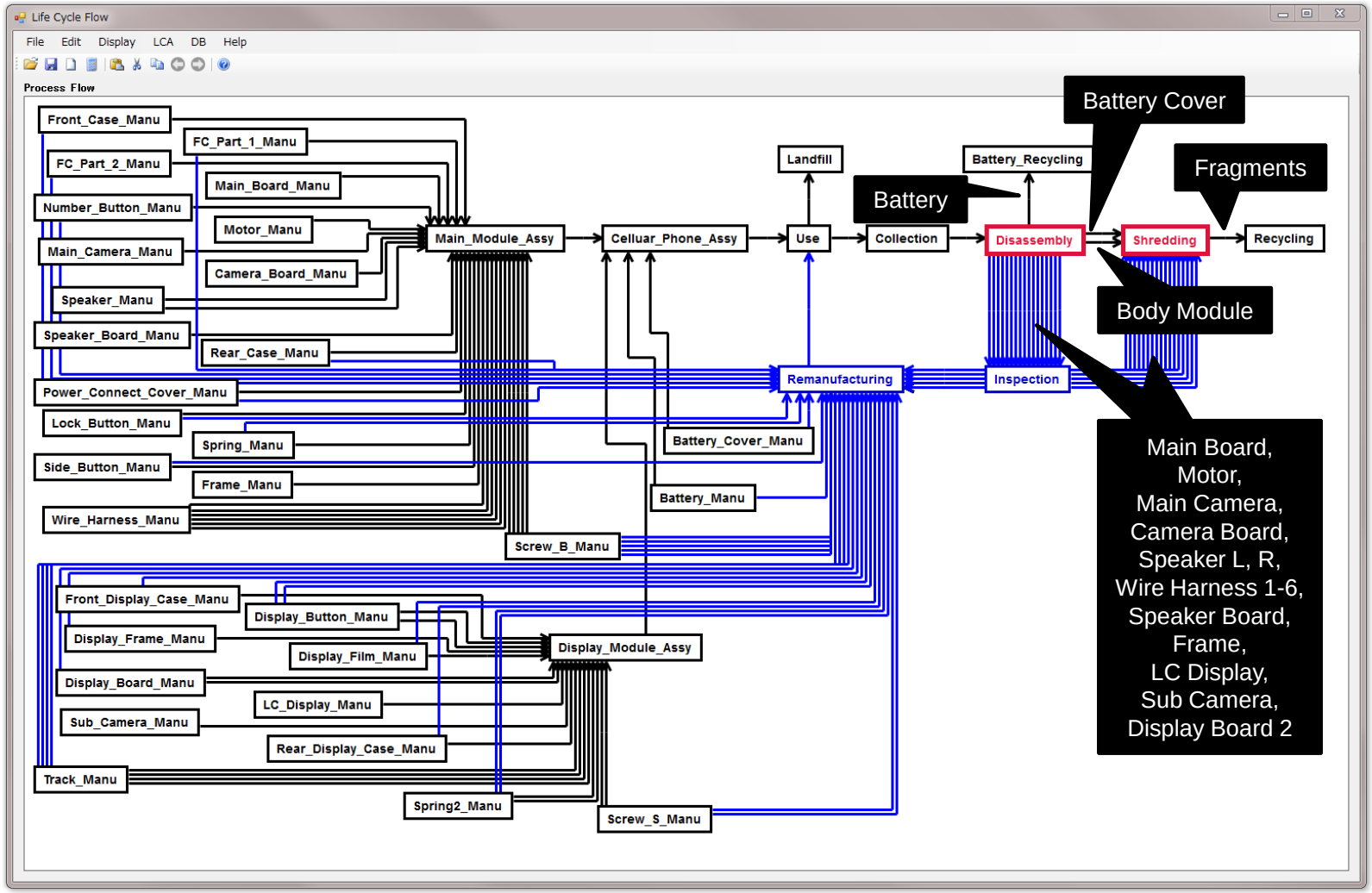


図 5-18 修正したライフサイクル・フロー・モデル

図 5-18 に示すように，修正したライフサイクル・フロー・モデルにおいては，携帯電話を分解するライフサイクル・プロセス（分解プロセス：Disassembly）およびリサイクルのために破砕を行うプロセス（破砕プロセス：Shredding）の 2 つのライフサイクル・プロセスが第 3 章で示したどの基本パターンにも分類されず不整合が検出される．これらのライフサイクル・プロセスは，それぞれ以下の理由によって不整合となっている．

- 分解プロセス：Disassembly

  分解プロセスでは，「携帯電話（Cellular Phone）」が回収プロセス（Collection）から入力し，「バッテリー（Battery）」がバッテリーをリサイクルするプロセス（バッテリー・リサイクル・プロセス：Battery Recycling）へ，「バッテリー・カバー（Battery Cover）」と「本体モジュール（Body Module）」が破砕プロセス（Shredding）へ，「主基板（Main Board）」をはじめとする**表 5-5** に示したリユースを行う部品がリユースを行うために検査を行うプロセス（検査プロセス：Inspection）へそれぞれ出力している．ここで注意しなければならない点は，**図 5-13** の製品モデルに示すように，検査プロセスへと出力している**表 5-5** に示したリユースを行う部品群は同時に破砕プロセスへと出力している「本体モジュール（Body Module）」にも含まれているという点である．つまり，現状の分解プロセスではこれらのリユースを行う部品群を含む「本体モジュール（Body Module）」として分解すると同時に，これらの部品群を各部品レベルまで分解しようとしているため，実現が不可能なライフサイクル・プロセスとなってしまっており，不整合が検出されている．

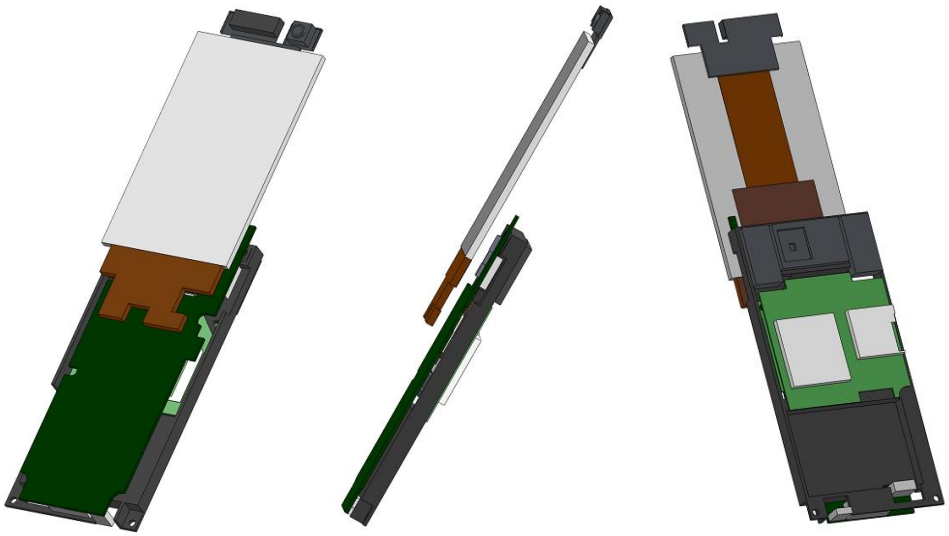
- 破砕プロセス：Shredding

  破砕プロセスでは，「バッテリー・カバー（Battery Cover）」および「本体モジュール（Body Module）」が分解プロセスから入力し，「主基板（Main Board）」をはじめとする**表 5-5** に示したリユースを行う部品のうちでリユースできなかったものが検査プロセスから入力している．一方で，「破砕片（Fragments）」がリサイクルを行うプロセス（リサイクル・プロセス：Recycling）へと出力している．このように，破砕プロセスはモジュールや部品を破砕して破砕片へと製品状態を変化させるプロセスであるが，**図 5-13** の製品モデルに示すように，変換リンクが「バッテリー・カバー（Battery Cover）」および「本体モジュール（Body Module）」と「破砕片（Fragments）」の間にのみ作成されていて，リユースを行う部品群と「破砕片（Fragments）」の間にはそれがない．それゆえに，このライフサイクル・プロセスの入出力に過不足があり不整合であると判定されている．

以上の 2 点の不整合を解消するために，製品モデルを修正する．まず，分解プロセスの不整合を解決するために，分解プロセスにおける携帯電話の階層構造を変更する．現状の製品モデルでは，分解時の階層構造は**図 5-17** に示すように「バッテリー（Battery）」，「バッテリー・カバー（Battery Cover）」および「本体モジュール（Body Module）」の 3 つから構成される．リユースを行う部品はこの中の「本体モジュール（Body Module）」に含まれるので，このモジュールをさらに細分化することを考える．

図 5-18 に示したライフサイクル・フロー・モデルにおいては，リユースを行う部品を全て個々の部品まで分解した上で検査・再製造を行っている．しかしながら，個々の部品まで分解すると分解時間が長くなりコストがかかるため，いくつかのモジュールとして分解することができれば分解コストの削減につながる．そこで，リユースを行う部品のモジュール化の可能性についてライフサイクル・モデリング・システムを用いて検討する．

ライフサイクル・モデリング・システムを用いることで，**図 5-18** の検査プロセスに入力する部品のソリッドモデルおよび携帯電話の構成部品と接続リンクを表示することができる．その結果を**図 5-19** および**図 5-20** に示す．**図 5-19** より，リユースを行う部品はそれらの配置から大きく 2 つの塊に分かれていることが分かる．また，これらの部品を表す実体ノード（**図 5-20** において青枠で示した実体ノード）の間には接続リンクがあるので，これらはモジュールとして扱うことが可能であると考えられる．したがって，本例題検証では，リユースを行う部品を**表 5-6** に示す 2 つのモジュールとして扱うこととする．一方で，リユースを行わない残りの部品は，リユースを行う部品を取り囲む筐体やボタン，それらを締結するねじであるため，リユースを行う部品を取り出すために全ての部品を分解する必要がある．したがって，リユースを行わない残りの部品については全て分解するものとする．



前面　　側面　　後面

図 5-19 リユースを行う部品のソリッドモデル

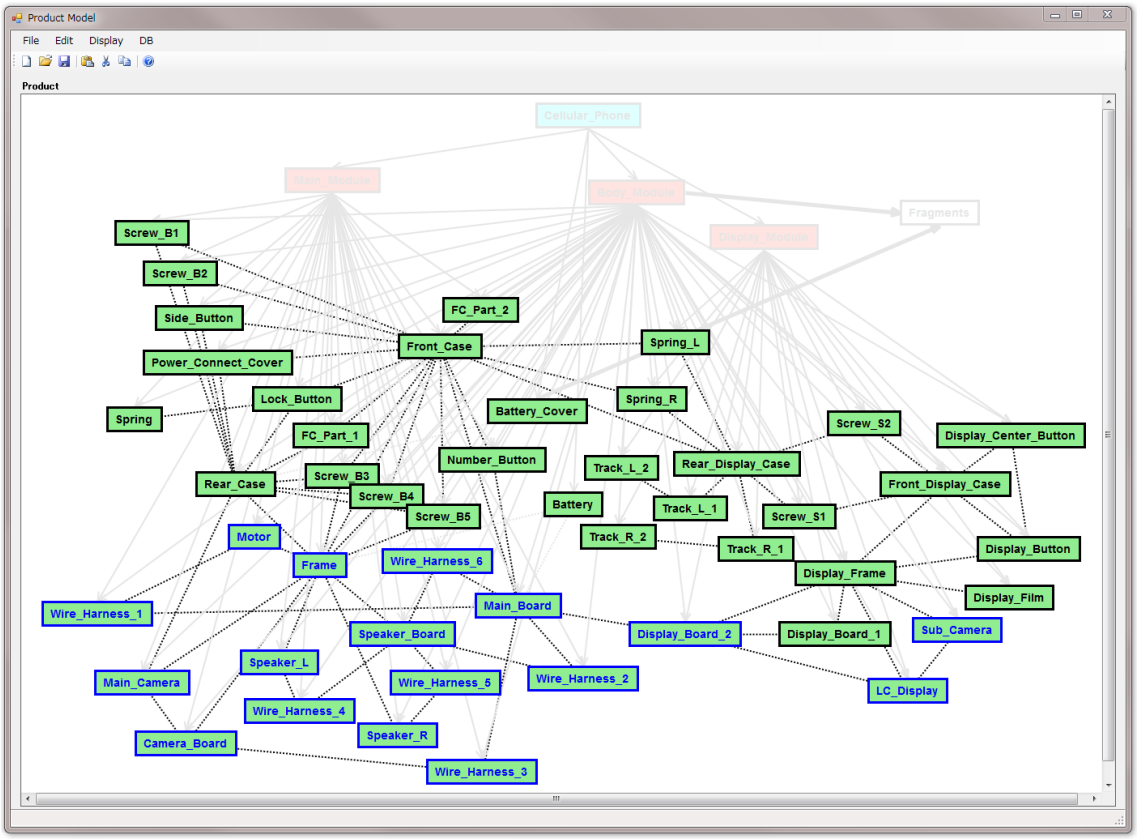


図 5-20 携帯電話の構成部品と接続リンク

表 5-6 リユースを行う 2 つのモジュール

モジュール	構成部品
Board Module	(5)Main Board, (6)Motor, (7)Wire Harness 1, (8)Wire Harness 2, (9)Main Camera, (10)Camera Board, (11)Wire Harness 3, (12)Speaker L, (13)Speaker R, (14)Wire Harness 4, (15)Wire Harness 5, (16)Wire Harness 6, (17)Speaker Board, (24)Frame
LC Display Module	(37)LC Display, (38)Sub Camera, (39)Display Board 2

以上より，分解時の階層構造において，製品モデルの「本体モジュール（Body Module）」を，「基板モジュール（Board Module）」と「ディスプレイ・モジュール（Display Module）」，そして残りの部品から構成されるようにモジュール構造を変更する．

また，破砕プロセスにおける不整合を解消するために，製品モデルにおいて「基板モジュール（Board Module）」と「ディスプレイ・モジュール（Display Module）」の 2 つのモジュールを表す実体ノード，「バッテリー（Battery）」および「バッテリー・カバー（Battery Cover）」を除く全てのリユースを行わない部品を表す実体ノードと「破砕片（Fragments）」の実体ノードとの間に変換リンクを作成する．

以上の方針に沿って，ライフサイクル・モデリング・システムを用いて製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを修正する．その結果をそれぞれ図 5-21 および図 5-22 に示す．図 5-21 に示す製品モデルにおいては，(i) 「本体モジュール（Body Module）」を表す実体ノードを削除し「基板モジュール（Board Module）」と「ディスプレイ・モジュール（Display Module）」を表す実体ノードを新しく作成，(ii)実体ノード間の階層リンクと変換リンクを修正，の 2 つの修正を行った．図 5-22 に示すライフサイクル・フロー・モデルにおいては，青色で示すライフサイクル・プロセス・ノードの入出力関係を修正し，それに付随してそれらのライフサイクル・プロセス・ノード間のフローリンクを修正した．これによって，整合性チェックを行っても不整合は検出されず，分解プロセス（Disassembly）は(b) Separate に，破砕プロセス（Shredding）は(d) Transformation にそれぞれ分類された．以上のモデルの修正を通して，本研究では図 5-23 に示すようなリユースにおける携帯電話の階層構造を追加した．

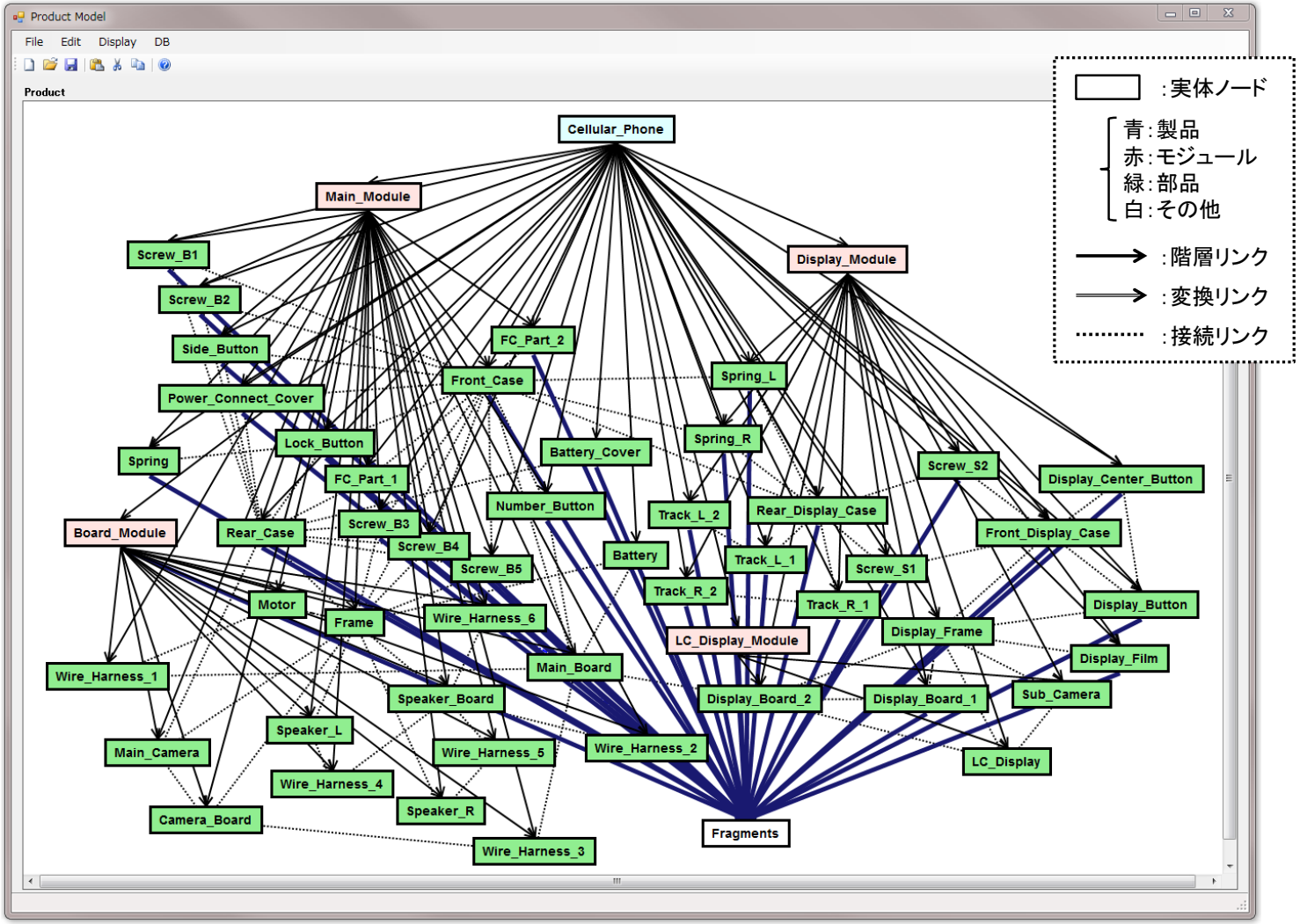


図 5-21 修正後の製品モデル(ソリッドモデルを除く)

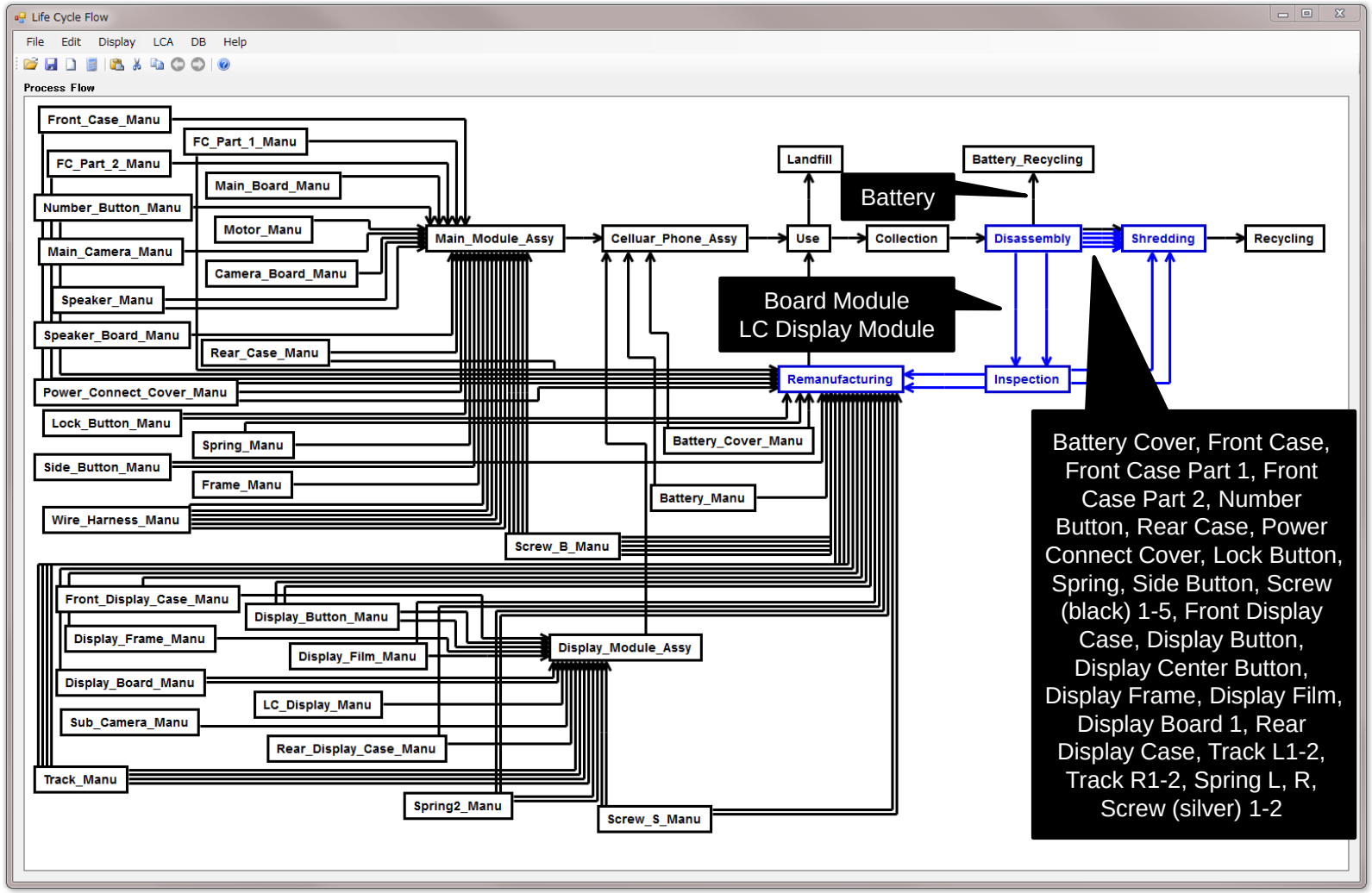


図 5-22 修正後のライフサイクル・フロー・モデル

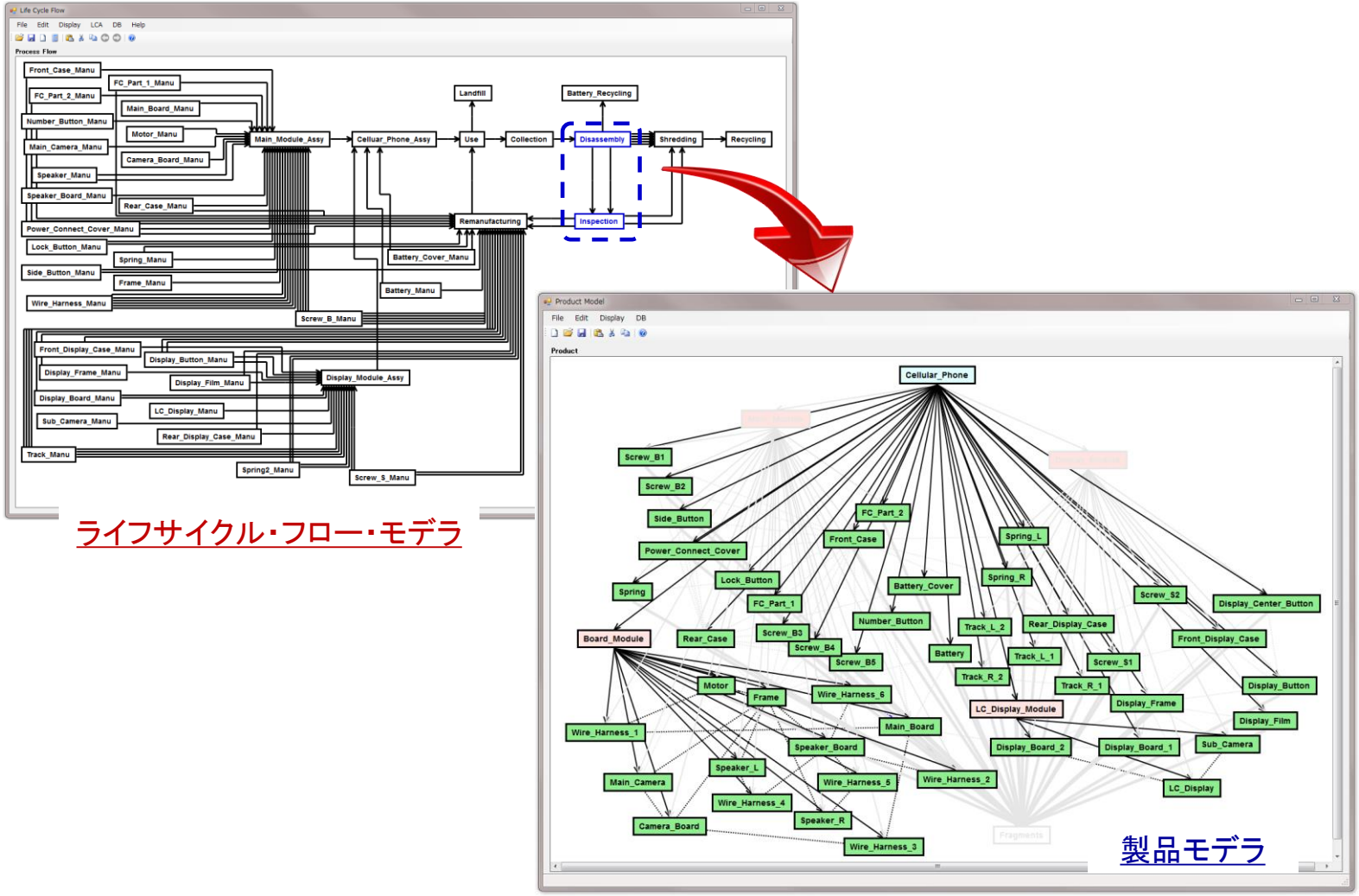


図 5-23 リユース時の携帯電話の階層構造

上記の設計変更において，リユースを行う部品を「基板モジュール（Board Module）」と「ディスプレイ・モジュール（Display Module）」という 2 つのモジュールとして検査・再利用を行うこととした．そこで，検査プロセスにおいてこれらのモジュールが現状の属性値や配置関係で実現可能であるかどうかを確認する．検査プロセスでは，動作確認やX線によるキズ点検を行うことと仮定したので，検査を行う全ての部品が他の部品に隠れていない必要がある．そこで，検査プロセス（Inspection）に入力する「基板モジュール（Board Module）」と「ディスプレイ・モジュール（Display Module）」のそれぞれの状態を，ライフサイクル・モデリング・システムを用いて確認する．ここでは特に，ソリッドモデルを用いて各モジュールの形状や配置に注目する．

それぞれのモジュールのソリッドモデルを表示したものを**図 5-24** に示す．なお，「基板モジュール（Board Module）」を構成する各部品は見やすいように色分けをして表示しており，緑色が主基板（Main Board），青色がモーター（Motor），桃色がメインカメラ（Main Camera），赤色がカメラ基板（Camera Board），黄色がスピーカー（Speaker），水色がスピーカー基板（Speaker Board），灰色がフレーム（Frame）を表している．ただし，ここでは配線（Wire Harness）は表示していない．**図 5-24** に示すように，「ディスプレイ・モジュール（Display Module）」を構成する部品は全て外部に露出しており，検査が可能である．一方で，「基板モジュール（Board Module）」は「カメラ基板（Camera Board）」が隠れてしまっており，このままでは検査を行うことができない．

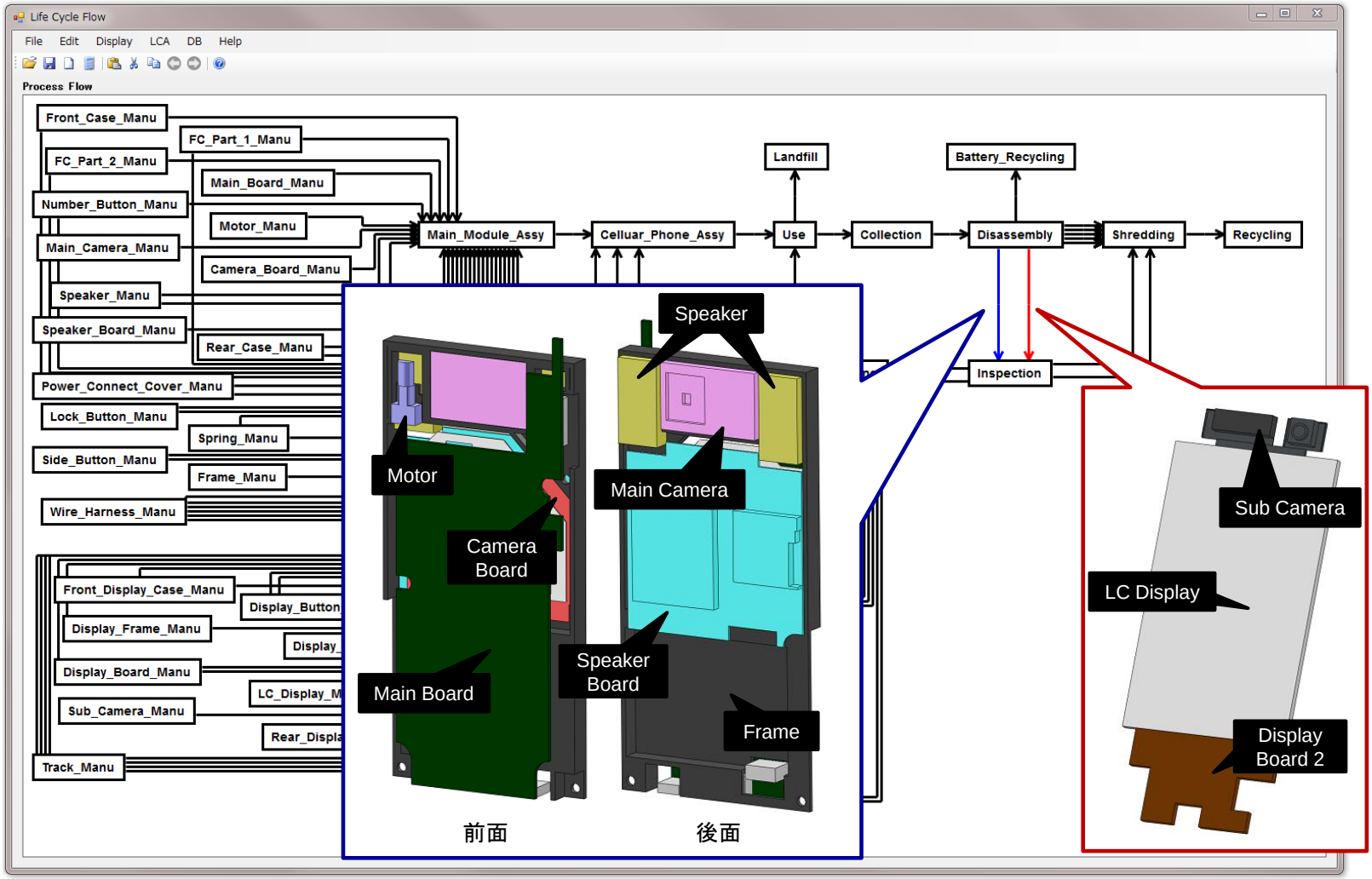
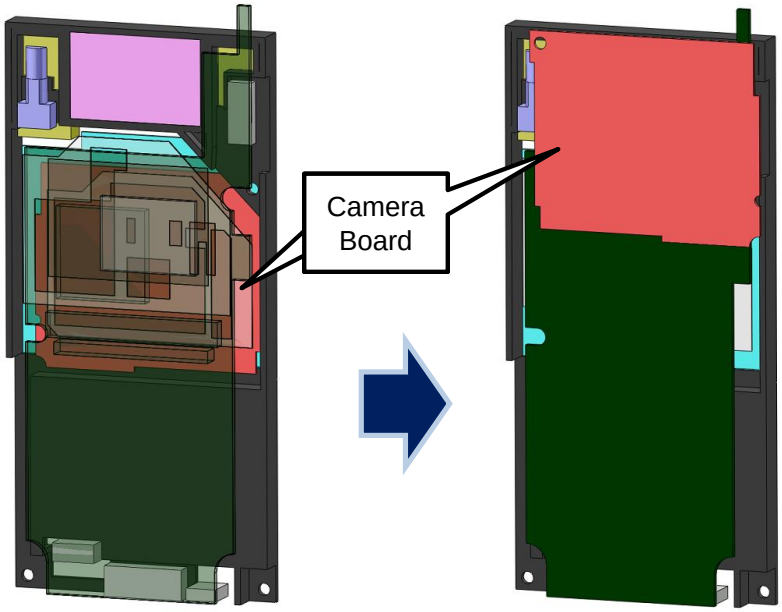


図 5-24 検査プロセスに入力する各モジュールの状態

「基板モジュール（Board Module）」を検査可能とするために，ライフサイクル・モデリング・システムを用いて「カメラ基板（Camera Board）」の配置を図 5-25 に示すように変更した．赤で示した部品が「カメラ基板（Camera Board）」を表しており，「主基板（Main Board）」の前面にくるように配置を変更した．これによって，「基板モジュール（Board Module）」を構成する全ての部品が全て外部に露出するようになり，検査が可能となった．



現状の構造　　設計変更後の構造

図 5-25 カメラモジュール（Camera Module）の位置変更

最後に，以上の設計変更を通して，ライフサイクル戦略を策定する段階で設定した(i)利益の現状維持，(ii)資源消費量と CO2 排出量の削減，の 2 つの目標を達成できているかを，ライフサイクル・シミュレーションを用いて評価する．評価条件は以下の通りとした．

- シミュレーション期間は 4 年間とし，初年度に 1,000 台，3 年目に 1,000 台の合計 2,000 台の携帯電話を製造・販売することとする．
- 販売した携帯電話は販売量の 30[%]が回収され，残りの 70[%]はユーザーが保持したあとでゴミとして埋め立て処分される．
- 携帯電話の価値寿命は 4 年間であるとし，最初の 2 年目までに回収された 30[%]の携帯電話のうちで 80[%]がリユース可能であるとする（3 年目以降に回収された携帯電話は価値寿命が残っていないためリユースは行わない）．
- 3 年目にはリユースできた分の部品は新たに製造せず，1,000 台の携帯電話を製造するのに足りない分だけ製造することとする．

- 経済性の評価に際しては，収入として携帯電話の販売収入とリサイクル材の販売収入の 2 つを考慮し，コストとして製造費用，分解費用，検査費用，破砕費用，リサイクル費用を考慮する．使用時における諸費用や携帯電話の通話収入，その他施設等の固定費用は考慮しない．
- 環境性の評価に際しては，携帯電話の製造における資源投入量を資源消費量として評価し，CO2 排出量としては携帯電話の製造による CO2 排出量を考慮し，使用や分解，検査，破砕，リサイクルによる CO2 排出量はここでは考慮しない．

ライフサイクル評価を行うために設定した携帯電話を構成する各部品の製造コストや製造による CO2 排出量を**表 5-7** に，ライフサイクル・フロー・モデルの各プロセスに設定した定数パラメータの値を**表 5-8** に示す．原価比率の高い携帯電話の特性を考慮して携帯電話の販売価格の約 70[%] が原価であると仮定し，各部品の製造コストについては重量比で概算した．また，製造時の CO2 排出量については，類似製品の LCA データや素材のインベントリデータから推定した．ライフサイクル・フロー・モデルの各プロセスに設定した定数パラメータの値については，各種参考文献の値を参考に推定した．

表 5-7 部品ごとのパラメータ[65][66][67][68]

部品名	製造費用 [円/台]	製造による CO2 排出量 [gCO2/台]
Front Case	1500	23.4
Front Case Part 1	145	2.2
Front Case Part 2	20	1.3
Number Button	265	21.1
Main Board	1,540	388.0
Motor	190	2.0
Wire Harness	100	0.7
Main Camera	425	6.1
Camera Board	430	108.9
Speaker	1150	12.5
Speaker Board	660	167.2
Rear Case	1400	21.8
Battery Cover	140	2.2
Power Connect Cover	30	0.9
Lock Button	25	0.4
Spring	15	0.2

Side Button	50	3.9
Frame	950	15.1
Battery	2,700	230.0
Screw	25	4.0
Front Display Case	175	2.7
Display Button	400	33.7
Display Center Button	110	3.6
Display Frame	560	10.7
Display Film	265	1.7
Display Board 1	45	10.7
LC Display	3230	1473.0
Sub Camera	350	4.1
Display Board 2	725	184.0
Rear Display Case	375	5.8
Track 1	85	5.3
Track 2	70	4.4
Spring	105	1.4

表 5-8 ライフサイクル評価のためのパラメータ[69][70][71][72]

パラメータ	値
new product price [yen/product]	30,000
remanufactured product price [yen/product]	18,000
labor cost [yen/h]	1,800
Disassembling time [sec/component]	5
inspection cost [yen/product]	60
shredding cost [yen/kg]	3
recycling cost [yen/kg]	20
recycled steel price [yen/kg]	25
recycled aluminum price [yen/kg]	140
recycled copper price [yen/kg]	200
recycled plastic price [yen/kg]	0
recycled glass price [yen/kg]	1.2
recycled gold price [yen/g]	2,600
recycled silver price [yen/g]	90

ライフサイクル評価の結果を**表 5-9** に示す．**表 5-9** の値は，現状の製品ライフサイクルにおける経済性や環境性の値を 1.00 とした場合の，新しく設計した製品ライフサイクルにおける経済性や環境性の割合を示している．**表 5-9** の結果より，今回の設計改善では利益を維持した上で資源消費量と CO2 排出量を 10[%]削減することができた．特に経済性においては，中古携帯電話の販売価格が新品の 6 割であると設定したため収入が減少しているが，一方でリユースを行うことで製造コストを削減することができたためにライフサイクル全体のコストが削減できており，利益を現状維持した上での資源消費量や CO2 排出量を削減することができた．

表 5-9 ライフサイクル評価結果

経済性			環境性	
利益	収入	コスト	資源消費量	CO2 排出量
1.01	0.95	0.93	0.93	0.90

5.2.4. 考察

本例題検証では，使用後の携帯電話を回収してリユースを行うライフサイクル戦略を想定し，その戦略に基づいて携帯電話の製品ライフサイクルを設計改善した．しかしながら，実際に携帯電話を回収する際には内部に保存・蓄積された電話帳やメール，写真等の個人情報が漏れるのを防ぐために回収時にユーザーの目の前で破砕処理し物理的に使用できなくする処置を行っている場合がある[73]．物理的に破壊してしまうと本例題検証で想定したリユースの実現は困難となってしまうので，物理的な破壊を伴わずにユーザーの個人情報を保護する仕組みが必要であると考えられる．

また，ライフサイクル評価の結果より資源消費量や CO2 排出量を削減することができたが，10[%]程度にとどまった．この原因の 1 つとして，本例題検証で設定した携帯電話の回収率の値が 30[%]と低い値であったことが挙げられる．すなわち，回収できている携帯電話の台数が少ないため，それをリユースすることによる効果が十分に表れていない．もし，携帯電話の回収率が 60[%]を達成できたとすると，その経済性や環境性の値は**表 5-10** に示すようになり，資源消費量や CO2 排出量を約 20[%]削減することが可能となる．ただし，中古携帯電話の販売額が小さいため，利益が若干ながら減少してしまう点に注意が必要である．

表 5-10 ライフサイクル評価結果（回収率が 50[%]の場合）

経済性			環境性	
利益	収入	コスト	資源消費量	CO2 排出量
0.99	0.90	0.86	0.87	0.80

5.3. 液晶テレビのリサイクル性設計

液晶テレビのリサイクル性設計改善を対象として例題検証を実施する．ライフサイクル CAD システムのコンセプトとして，第 2 章で述べた様々な設計支援手法を援用しながらライフサイクル設計を行うことができる設計環境であることを挙げた．本研究ではこの第 1 段階として，本研究で開発したライフサイクル・モデリング・システムにリサイクル性評価手法を接続して液晶テレビのリサイクル性設計改善を行う．液晶テレビのリサイクル性評価手法を例題として選択した理由は，液晶テレビは 2009 年に家電リサイクル法の対象機器として追加され[74]，リサイクルを考慮した設計の必要性が高まりつつある製品の 1 つだからである．

5.3.1. ライフサイクル・モデリング・システムの拡張

本例題検証では，環境配慮設計手法の 1 例として第 2 章で挙げたリサイクル性設計手法の 1 つである水野らが提案するリサイクル性評価手法[44]を用いる．本項では，リサイクル性評価手法の概要を述べた後，ライフサイクル・モデリング・システムとこの手法を接続する方法を述べる．

(1) リサイクル性評価手法

水野ら[44]が提案するリサイクル性評価手法を接続するにあたり，まずその概要を述べる．本手法は，大きく分けて(i)製品のリサイクル可能率の算出と(ii)感度分析の実施の 2 つから成る．

(i) リサイクル可能率の算出

本手法では，リサイクル可能率を製品全体の重量に対するリサイクル材として取り出すことができる素材重量の割合として算出する．製品をリサイクルする場合，同じ素材構成の部品であったとしても，その部品を手分解で取り出した場合と機械による破砕・選別を経て取り出した場合では，リサイクル材として取り出される量は変化する．本手法では，製品を構成する部品をリサイクルにおける処理工程の違い（手分解か機械選別か）から以下の 3 つの回収タイプに分類する．また，それぞれの回収タイプにおいて対象製品を構成する部品や素材を取り出すことができる重量割合をリサイクル率として定義する．これらを用いて対象製品のリサイクル可能率を算出する．

Type 1. 手分解で取り出され，選択的な処理が必要な部品
Type 2. 手分解で取り出され，単一素材で構成される部品
Type 3. 機械による破砕・選別を経て取り出される部品

ここで選択的な処理が必要な部品とは，基板や液晶ディスプレイのように複数素材で構成されておりリサイクルを行うためにはさらなる分別処理が必要な部品や，冷蔵庫に含まれるフロンガスや蛍光管に含まれる水銀のような特殊な処理が必要な素材から構成される部品が含まれる．この選択的な処理が必要な部品については，その部品のリサイクル工程に投入した重量に対するリサイクル材として取り出された素材重量の割合の一般的な値を用い，回収タイプ 2 と 3 に分類される部品については，その回収タイプを経てリサイクル処理される場合のその部品を構成する素材のリサイクル工程に投入した重量に対するリサイクル材として取り出された素材重量の割合の一般的な値を用いてリサイクル可能率の計算を行う．

上記の 3 つの回収タイプに分類してリサイクル可能率を算出するために，製品の End-of-Life（EoL）シナリオを作成する．EoL シナリオは，少なくとも以下の情報を含む．

- 対象製品の部品構成および各部品の素材構成と重量
  対象製品を構成する全ての部品とその素材構成，重量が必要である．

- 対象製品のリサイクル工程を表すライフサイクル・フロー
  ライフサイクル・フローにおいては，対象製品の各部品が「手分解で取り出されるのか機械選別を経て取り出されるのか」と「最終的にリサイクルされるのか廃棄されるのか」が明示されている必要がある．

- 対象製品を構成する部品や素材のリサイクル率のデータベース
  選択的な処理が必要な部品については，その部品のリサイクル率の値を記入し，回収タイプ 2 と 3 については，製品を構成する素材ごとにリサイクル率の値を記入する（**表 5-11** 参照）．タイプ 2, 3 については，同じ素材であってもそのその回収タイプによってリサイクル率が異なる異なるため同じ素材が含まれる．また，後で述べる感度分析で使用するために，対象製品には含まれていなくても素材の設計変更候補として考えられる素材のリサイクル率は準備しておくことが望ましい．

表 5-11 リサイクル率のデータベースの例

回収タイプ	部品または素材名	リサイクル率 [%]
1	Printed Circuit Board	35
	Wire Harness	40
	…	…
2	Steel	100
	ABS	100
	…	…
3	Steel	90
	ABS	76
	…	…

以上で述べた EoL シナリオを用いて，対象製品のリサイクル可能率（ReCyclability Rate: RCR）を下式で算出する．

$$RCR[\%] = \frac{\sum_i \left(m_i \times r_{ij} \times t_i \right)}{M} \times 100 \tag{1}$$

ここで，M は対象製品の全体重量，m_i は部品 i の重量，r_{ij} は部品 i または部品 i を構成する素材の

EoL シナリオで設定された回収タイプにおけるリサイクル率である．また，t_i は部品 i の最終処理を表す係数であり，リサイクルを行う場合は 1，廃棄する場合は 0 の値をとる．

(ii) 感度分析

本手法で算出するリサイクル可能率は対象製品の各構成部品の「重量」と「構成素材」，「回収タイプ」の 3 つのパラメータに依存している．したがって，上記の 3 つのパラメータのいずれかを変化させることができれば，本手法で定義した対象製品のリサイクル可能率の値を改善することができる．本手法では，「重量」が 10[%]増加した場合，「構成素材」が変化した場合，「回収タイプ」が 3 から 2 に変化した（つまり，機械による破砕・選別から手分解で取り出すようにリサイクル工程を変更した）場合の 3 つの場合について対象製品のリサイクル可能率に与える影響を感度分析することができ，リサイクル可能率を改善するための設計改善の指針とすることができる．ただし，回収タイプ 1 に分類される選択的な処理が必要な部品についてはその特性上，素材変更や回収タイプの変更は行わず，重量変更のみを感度分析の対象としている．また「構成素材」を変化させる感度分析においては，体積一定で行うことを想定しており，素材が変わればその比重が変化するので「構成素材」を変化させる感度分析においてはその部品の重量も同時に変化する．なお，「構成素材」の変更による感度分析で変更の候補となる素材は**表 5-11** に示したリサイクル率のデータベースに格納されている項目に限られる．

(2) リサイクル性評価手法の接続

(1)項で述べたリサイクル性評価手法を用いて液晶テレビのリサイクル性向上を目的とした設計改善を実施するために，第 4 章で述べたライフサイクル・モデリング・システムにリサイクル性評価手法を接続する．ライフサイクル・モデリング・システムとリサイクル性評価手法を接続したシステムの基本構成を**図 5-26** に示す．ライフサイクル・モデリング・システムを用いることで，リサイクル性評価手法の EoL シナリオにおける対象製品の部品および各部品の構成素材と材料は製品モデラを用いることで，対象製品のライフサイクル・フローはライフサイクル・フロー・モデラを用いることで記述が可能となる．そこで本研究では，リサイクル可能率の評価や感度分析を行う「リサイクル性評価ツール（Recyclability evaluation tool）」と対象製品の構成部品や素材のリサイクル率の値を格納する「リサイクル率データベース（Recycling rate Database）」を，統合マネジャを用いてライフサイクル・モデリング・システムと接続する．本統合システムでは，製品モデラおよびライフサイクル・フロー・モデラを用いることでリサイクル性評価手法における各構成部品の回収タイプを自動的に判定することができ，この回収タイプと製品モデラ上の各構成部品の属性値（構成素材とその重量），さらに「リサイクル率データベース（Recycling rate Database）」を用いることで，「リサイクル性評価ツール（Recyclability evaluation tool）」によって対象製品のリサイクル可能率の算出や感度分析が可能となる．

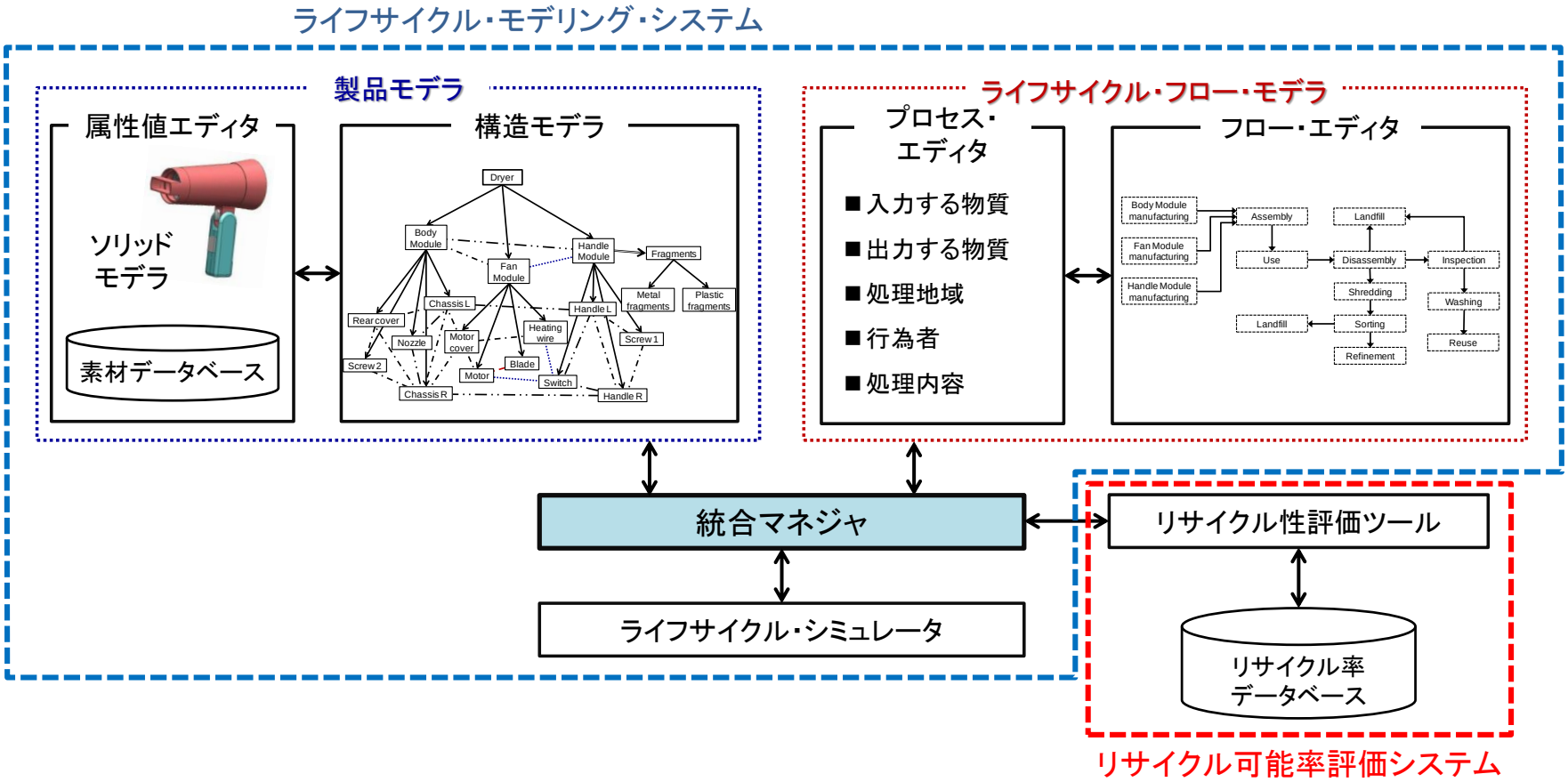


図 5-26 リサイクル可能率評価手法を接続したライフサイクル・モデリング・システムのアーキテクチャ

5.3.2. 例題検証の方針

(2)項で述べたリサイクル性評価手法を接続したライフサイクル・モデリング・システムを用いて，液晶テレビのリサイクル性を向上させる設計改善を対象として例題検証を実施する．本例題検証では，液晶テレビを販売・リサイクルする地域として日本とEUの2地域を設定し，どちらの地域でも販売・リサイクルが可能な液晶テレビの設計を行う．具体的には，以下のステップで液晶テレビの例題検証を実施する．

Step 1. 分解実験を行うことで液晶テレビの構成部品や構造を調査する．また，日本および EU における液晶テレビの一般的なリサイクル・プロセスについて調査することで，現状の製品モデルと日本および EU におけるライフサイクル・フロー・モデルを作成する．

Step 2. ライフサイクル・モデリング・システムと統合したリサイクル性評価手法を用いて現状の日本および EU におけるリサイクル性を評価し，その結果をもとに液晶テレビの日本および EU におけるリサイクル性を向上させるための設計改善の方針を立てる．

Step 3. Step 2 で策定した設計改善方針をもとに，製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを変更する．また，ライフサイクル・シミュレーションを用いてライフサイクル評価を行うことで，設計結果を経済性や環境性の面からも評価を行う．

5.3.3. 現状モデルの作成

(1) 液晶テレビの構造

5.2 節で述べた携帯電話の例題検証と同様に，まずは分解実験によって液晶テレビの構成部品や構造を調査する．本例題検証では，**図 5-27** に示すようなシャープ製の「AQUOS LC-32GH3（32 型）」を対象とする．対象製品である液晶テレビの分解時の写真を**図 5-28**～**図 5-32** に示す．ここで，**図 5-28**～**図 5-32** において，丸数字は部品番号を表している．また，液晶テレビの部品リストと，各部品の構成素材，重量，物理寿命を**表 5-12** に示す．なお，本例題検証では，簡単のために締結部品であるねじは除外する．本研究で対象とする液晶テレビには，以下のような特徴がある．

- バックライトに冷陰極管（いわゆる蛍光管）を用いている
- 前面筐体には意匠上の理由から塗装が施されている
- 後面筐体の素材には安全上の理由（テレビが燃えないようにする）から非臭素リン系の難燃剤を含むプラスチックが用いられている

図 5-27 対象製品の液晶テレビ

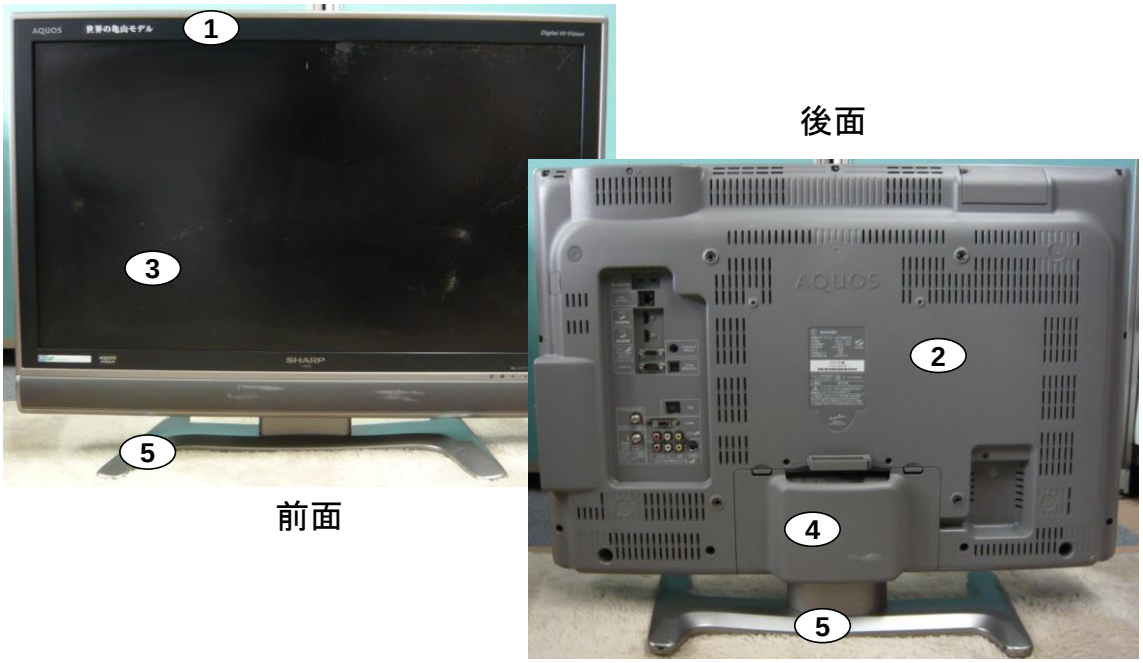


図 5-28 液晶テレビの分解図（外見）

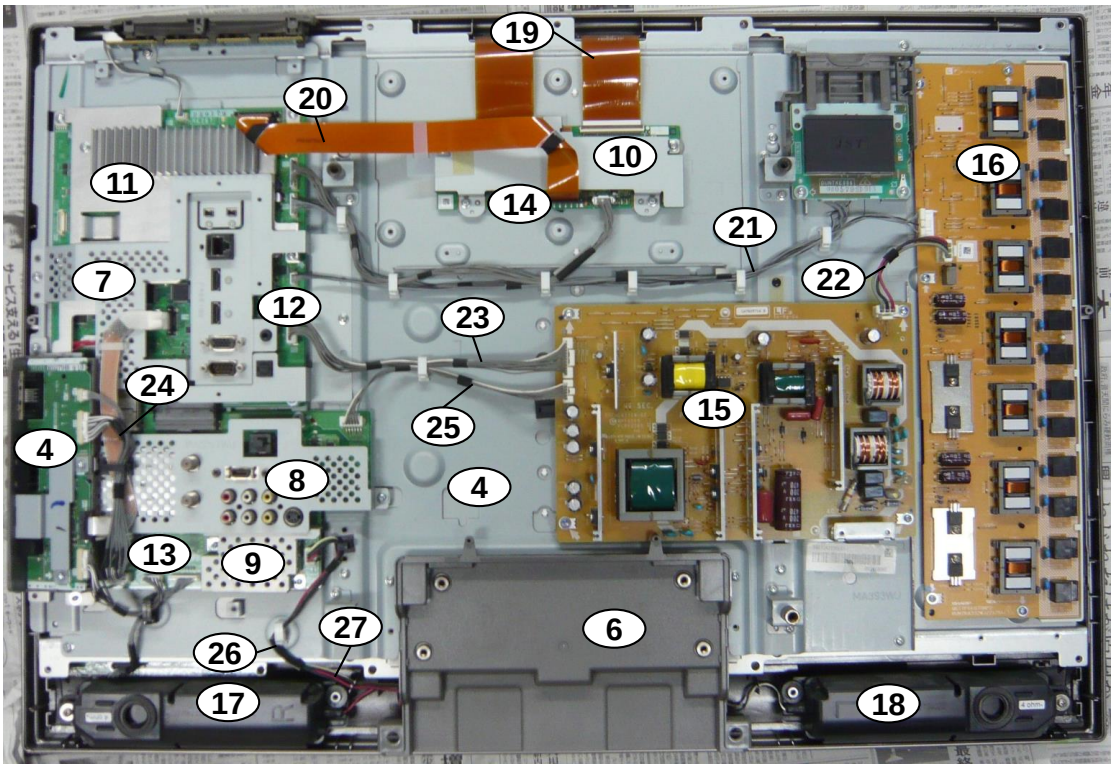


図 5-29 液晶テレビの分解図（内部 1）

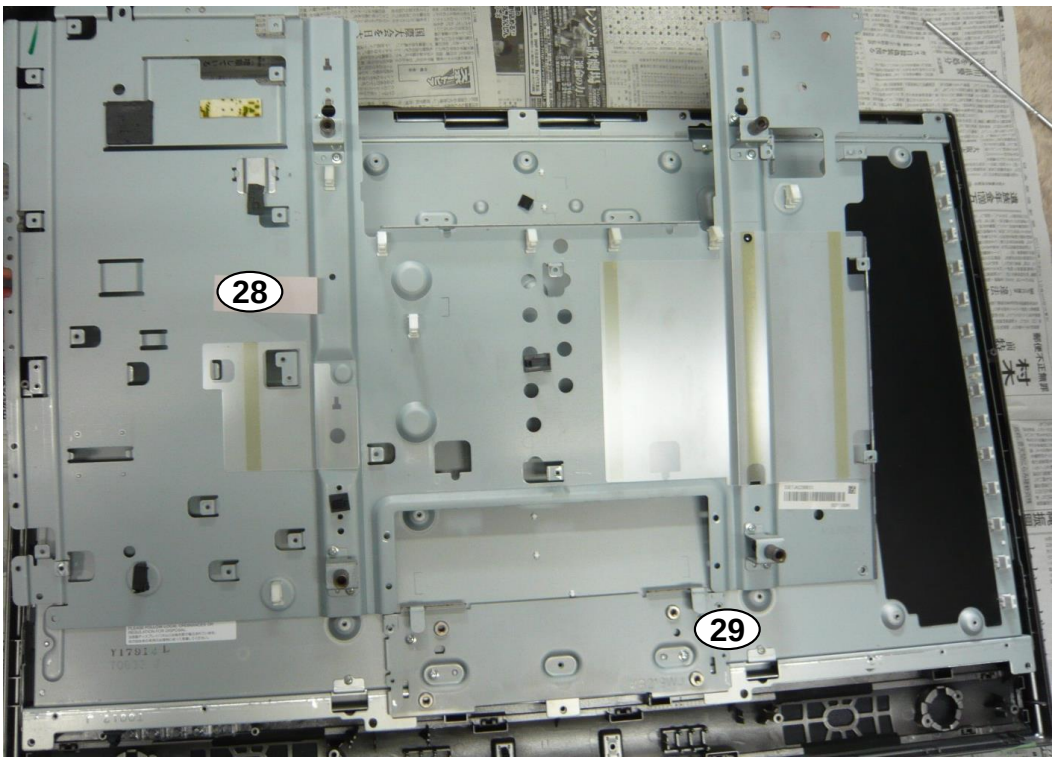


図 5-30 液晶テレビの分解図（内部 2）

図 5-31 液晶テレビの分解図（内部 3）

図 5-32 液晶テレビの分解図（内部 4）

表 5-12 液晶テレビの構成部品

	部品名	構成素材	重量 [g]
1	Front Cabinet	PS/PPE	922
2	Back Cabinet	PC/ABS	1536
3	LCD Panel	Indium	1
		Glass	365
		Copper	4
		Steel	446
		Polymer Material	364
			1180
4	Stand Cover	ABS	122
5	Stand	Steel	1362
		ABS	342
			1704
6	Stand Panel	PS	125
7	Board Cover 1	Steel	62
8	Board Cover 2	Steel	49
9	Board Cover 3	Steel	20
10	Board Cover 4	Steel	50
11	Heat Sink	Aluminum	148
12	Signal Processing Board	Epoxy Resin	229
		Copper	30
		Gold	0.03
		Silver	4
			263
13	Control Board	Epoxy Resin	191
		Copper	26
		Gold	0.03
		Silver	3
			220
14	IC Board	Epoxy Resin	41
		Copper	5
		Gold	0.01
		Silver	1
			47

15	Power Board	Epoxy Resin	1127
		Copper	150
		Silver	21
			1298
16	Inverter Circuit Board	Epoxy Resin	342
		Copper	40
		Silver	6
			348
17	Speaker L	Copper	23
		PS	244
			267
18	Speaker R	Copper	23
		PS	244
			267
19 ~ 27	Wire Harness 1 - 9	Copper	6
		PVC	9
			15
28	Board Chassis	Steel	1500
		ABS	204
			1704
29	Main Chassis	Steel	2376
30	LCD Panel Frame	Steel	1584
31	Optical Sheets	PET	300
32	Fluorescent Tubes	hydrargyrum	2
		Glass	87
		molybdenum steel	23
			112
33	Reflection Board	PC	766
LCD TV			15620

(2) 液晶テレビの製品ライフサイクル

本例題検証では，日本と EU の 2 つの販売地域を対象として液晶テレビのリサイクル性を考慮した設計改善を実施する．そこでまず，日本および EU における液晶テレビのリサイクルの現状について調査した．

日本では，2009 年に家電リサイクル法の対象品目に液晶テレビおよびプラズマテレビの薄型テレビが追加され，リサイクルプラントでも薄型テレビのリサイクルが行われるようになった．しかしながら，まだまだ回収される薄型テレビの台数は少なく，大規模な処理ラインは構築せずに手作業で薄型テレビを分解・分別した上でリサイクルを行っている[75][76]．日本における液晶テレビのリサイクルには以下のような特徴がある．

- 液晶テレビにはバックライトに冷陰極管を用いたものと LED を用いたものがあり，冷陰極管は有害な水銀を含むためまとめて破砕することができず，手分解によって冷陰極管を取り出す必要がある．しかしながら，外見からはバックライトが冷陰極管であるか LED であるかの判断がつかない場合が多く，またバックライトは液晶テレビの構造上もっとも奥に位置しているため，どちらのバックライトの場合もほぼ全ての部品を手で分解している．
- 液晶テレビを構成するほとんどの部品はリサイクルが行われているが，液晶パネルおよび前面筐体についてはリサイクルされていない．
- 液晶パネルは逆有償によって廃棄物処理施設に引き取られた後で，プラスチックを多量に含むシュレッダーダストと共に埋め立て処理あるいは焼却処理されている[77]．液晶パネルには希少金属の 1 つであるインジウムが含まれておりそのリサイクル技術の確立が期待されている．シャープがそのリサイクル技術の実現の一定の目処を立てているものの，まだ実用化には至っていない[78][79]．
- 前面筐体は意匠上の理由から塗装されていることが多く，塗装されたプラスチックのリサイクルはその素材の品位を大きく下げることとなるため，リサイクルされない場合が多い．
- 冷陰極管は専門のリサイクルプラントにおいて水銀を抽出した後で，ガラスについてはリサイクルが行われている．

一方 EU では，WEEE 指令[16]において廃電気電子製品のリサイクルが義務付けられており，液晶テレビについても例外ではない．EU における液晶テレビのリサイクルには以下のような特徴がある．

- EU における使用済み電気電子製品のリサイクルでは「粗破砕」と呼ばれる製品やその構成部品の大まかな破砕を行った上で選別する場合が多い．また，シュレッダーダストの埋め立てを禁止している国が多く，多くの地域でシュレッダーダストは焼却されている[80]．
- 液晶テレビのバックライトで使用されている冷陰極管に含まれる水銀は WEEE 指令において破砕機に投入してはならないと規定されているため液晶テレビはまるごと粗破砕することはができない．したがって液晶テレビのリサイクルにおいては，手分解によって冷陰極管を取り出した上で残りの部品については粗破砕を経てリサイクルしている．

- 粗破砕工程を経た後に，ハーネスや大型金属片は手作業で回収され，残りの破砕片については磁力選別，比重選別等の選別工程を経て各素材の種類ごとに選別される[81].
- 難燃剤の入ったプラスチックはリサイクルされない.

(4) 液晶テレビの製品モデルとライフサイクル・フロー・モデル

液晶テレビの分解調査や製品ライフサイクルの調査結果より，本例題検証ではライフサイクル・モデリング・システムを用いて現状の液晶テレビの製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを作成した．その結果を，それぞれ**図 5-33**，**図 5-34**，**図 5-35**，および**図 5-36** に示す．本例題検証では日本と EU で液晶テレビの構造は同一であると仮定しているので，日本と EU で共通の製品モデルを作成した．また，ライフサイクル・フロー・モデルは製品ライフサイクルの調査結果に基づいて異なるモデルを作成しており，**図 5-35** が日本のライフサイクル・フロー・モデルを，**図 5-36** が EU のライフサイクル・フロー・モデルを表している．ただし，製造地域は共に日本として EU のライフサイクル・フロー・モデルでは「輸送プロセス（Transportation）」において EU まで輸出しており，「液晶テレビ製造プロセス（LCD TV Assy）」までは共通であるとした.

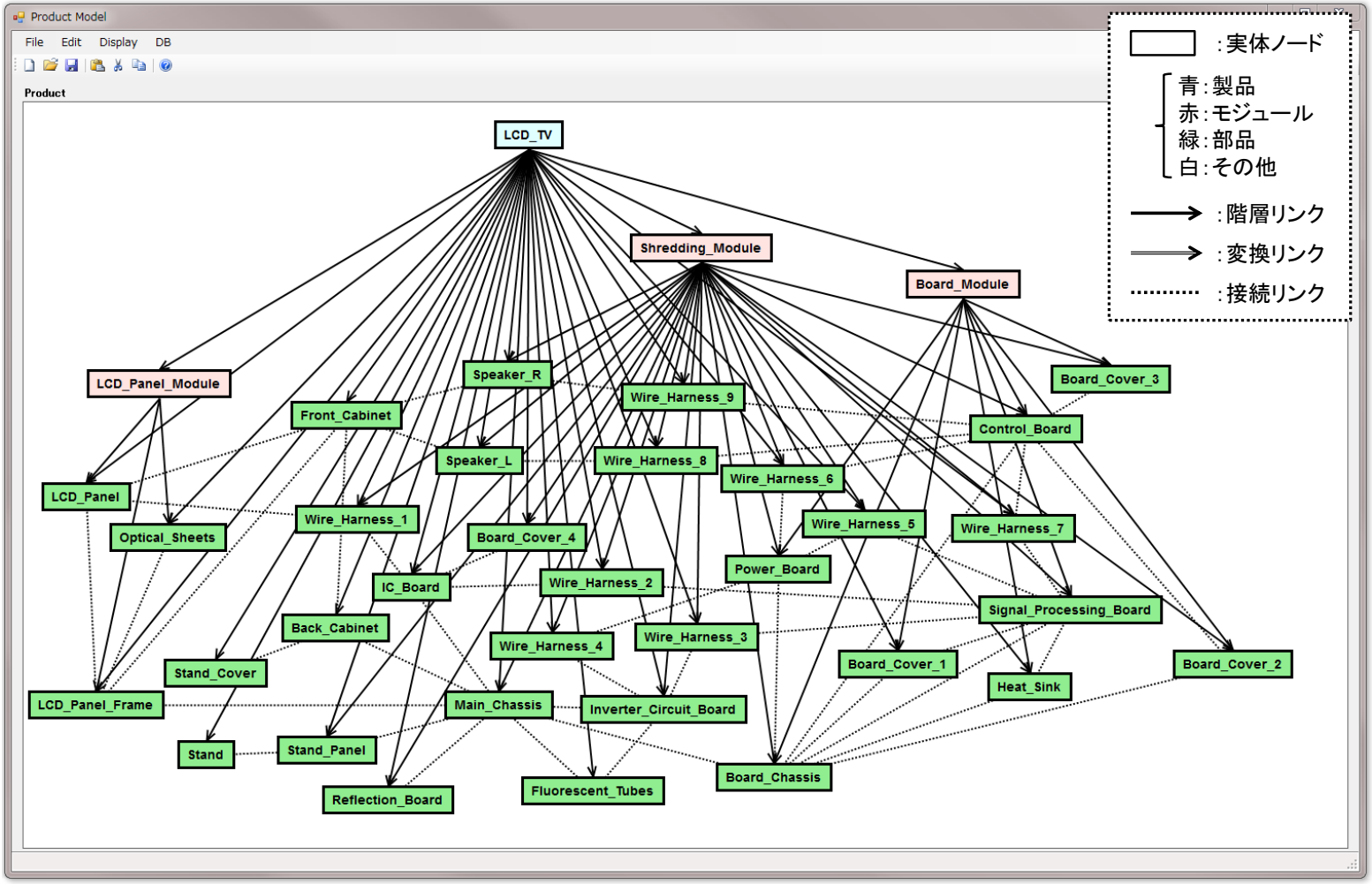


図 5-33 現状の製品モデル 1/2

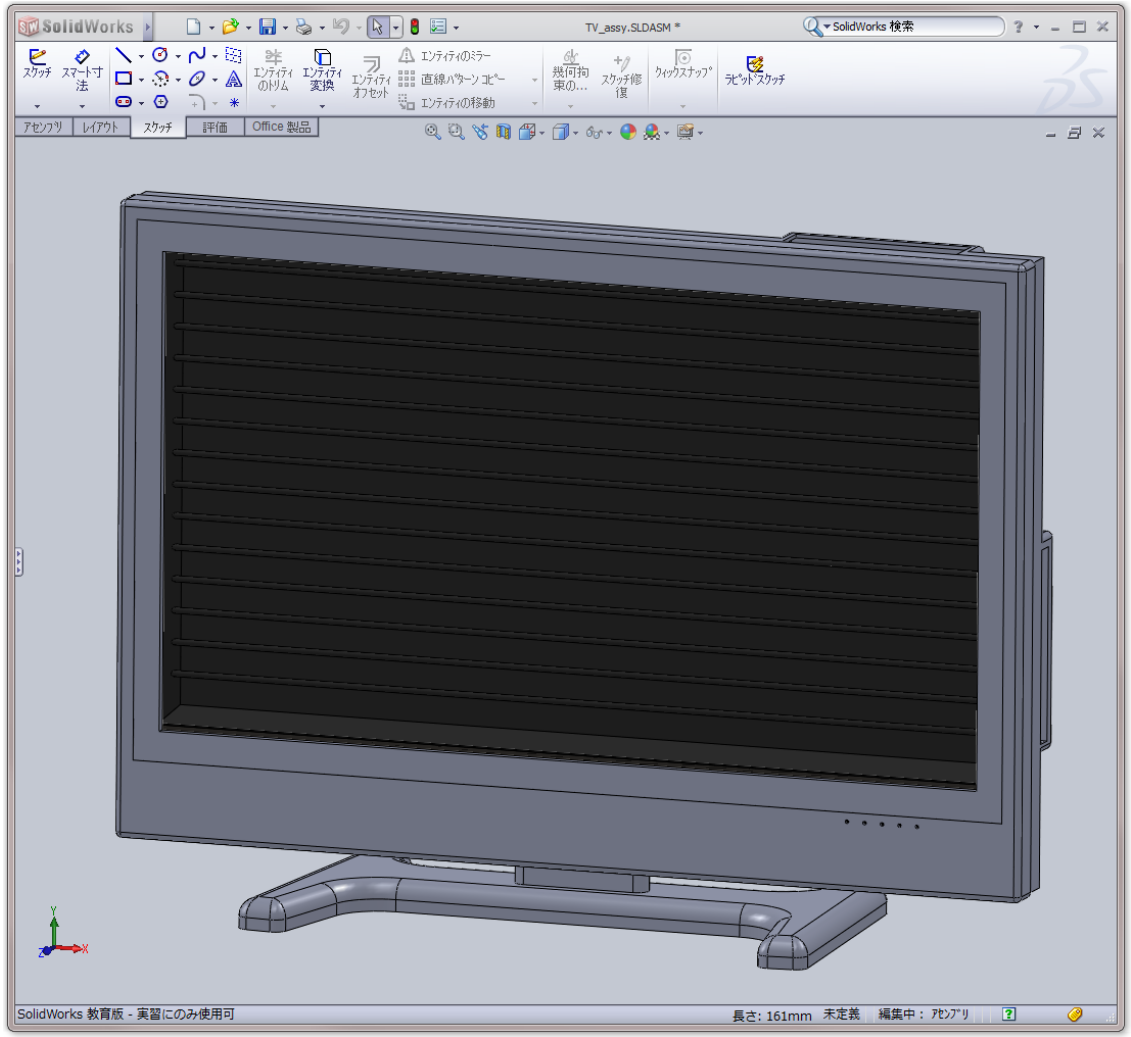


図 5-34 現状の製品モデル 2/2

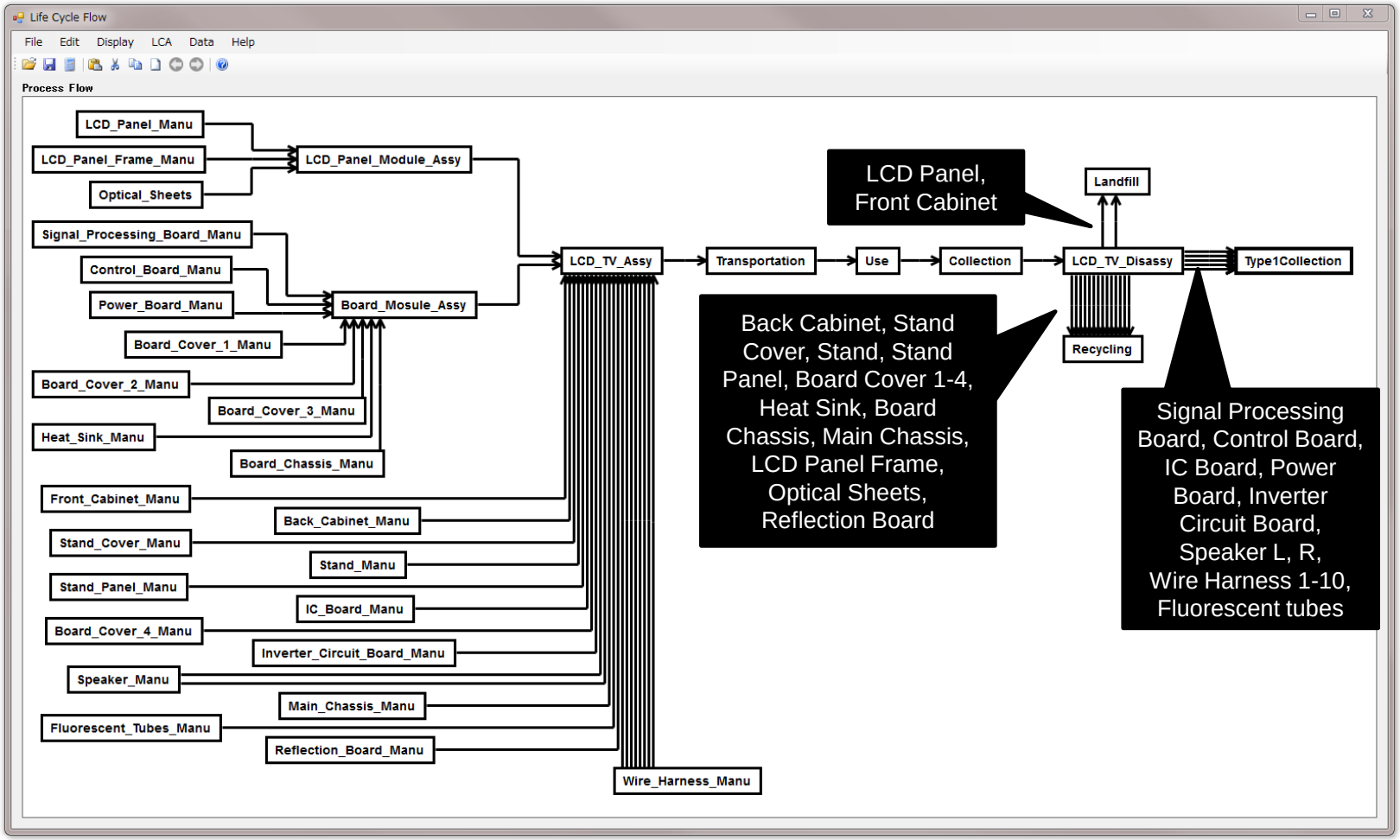


図 5-35 現状のライフサイクル・フロー・モデル（日本）

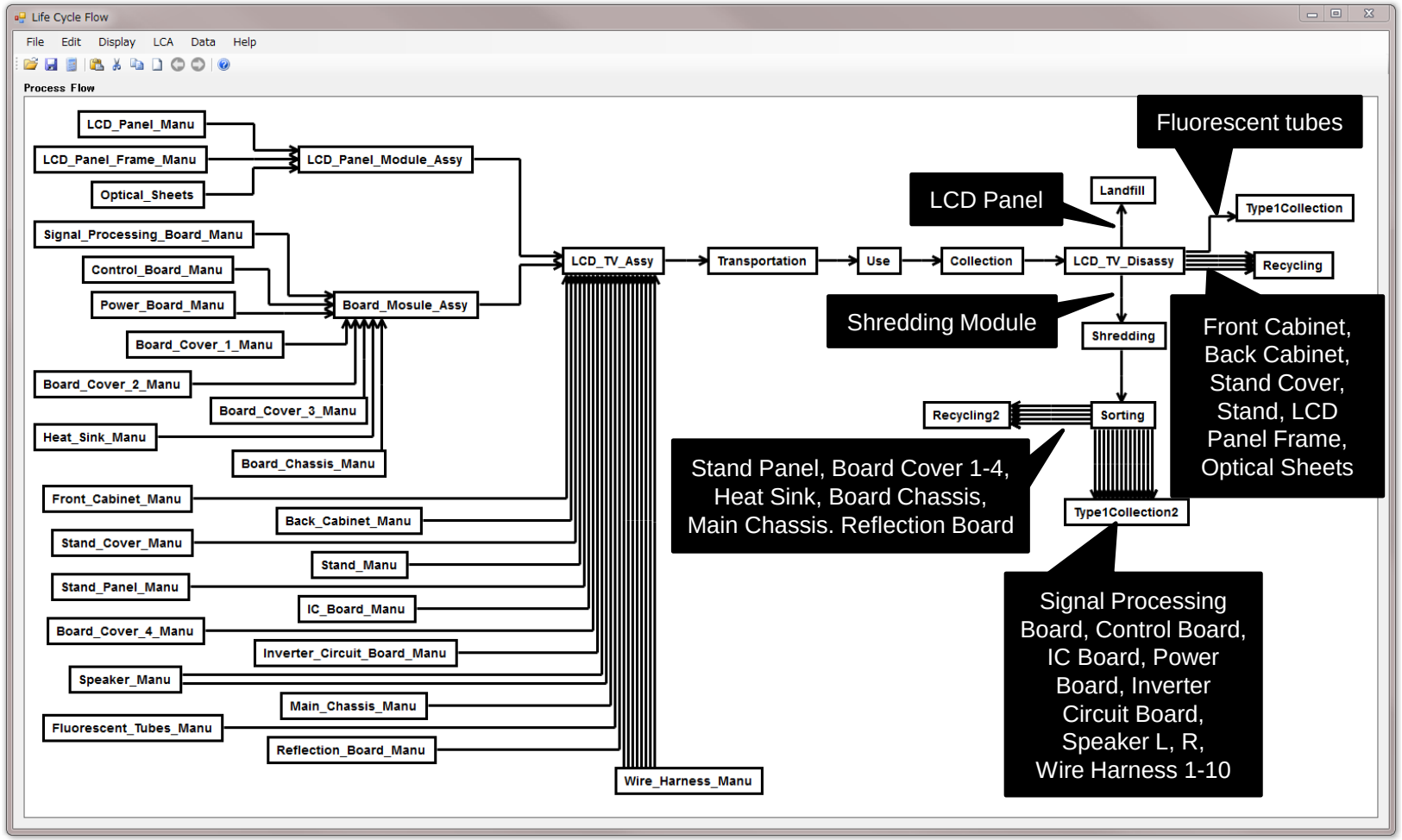


図 5-36 現状のライフサイクル・フロー・モデル（EU）

本研究で対象とする液晶テレビは，「前面筐体（Front Cabinet）」と「後面筐体（Back Cabinet）」によって「スタンド（Stand）」および「スタンド・カバー（Stand Cover）」を除く残りの部品を挟み込むような構造になっており，「メイン・シャーシ（Main Chassis）」の後面に取り付けられている各種基板やそのカバー，配線などを取り除かなくても，「前面筐体（Front Cabinet）」および「後面筐体（Back Cabinet）」を取り除いた後で，前面から「液晶パネル（LCD Panel）」，「液晶パネル・フレーム（LCD Panel Frame）」，「光学シート類（Optical Sheets）」を取り除くことで「冷陰極管（Fluorescent Tubes）」を取り出すことが可能である（**図** 5-37 参照）．EU のリサイクル・プロセスにおける手分解では「液晶パネル（LCD Panel）」および「冷陰極管（Fluorescent Tubes）」を取り出すことを主眼としている．そこでEUのライフサイクル・フロー・モデルにおいては，これら2つの部品を取り出すために分解しなければならない「前面筐体（Front Cabinet）」と「後面筐体（Back Cabinet）」，「スタンド（Stand）」，「スタンド・カバー（Stand Cover）」，「液晶パネル・フレーム（LCD Panel Frame）」，および「光学シート類（Optical Sheets）」については手分解で取り出しリサイクルを行い，「メイン・シャーシ（Main Chassis）」の後面に取り付けられている各種基板やそのカバー，配線などは「破砕モジュール（Shredding Module）」として取り出した上で破砕・選別を経てリサイクルを行うようなモデルを作成した．なお，日本およびEUのライフサイクル・フロー・モデルにおける「タイプ1回収プロセス（Type1Collection）」は，本例題検証で用いたリサイクル性評価手法において回収タイプ1に分類される部品をライフサイクル・フロー・モデル上で判定可能とするために便宜的に作成したプロセスである．

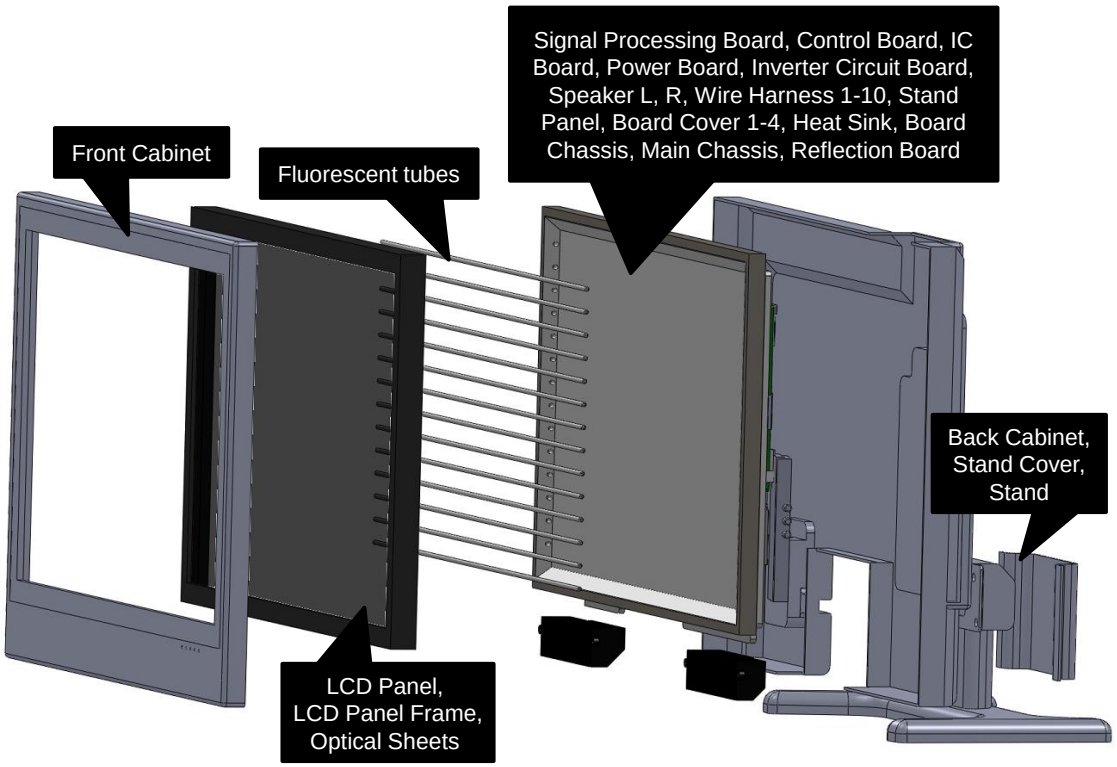


図 5-37 液晶テレビの分解図

5.3.4. リサイクル性の評価

5.3.3 項で示したモデルを用いて，現状の液晶テレビのリサイクル性を評価する．リサイクル性評価において用いたリサイクル率のデータを表 5-13，表 5-14，および表 5-15 に示す．これらのデータは，それぞれ日本または EU におけるリサイクル技術に関する各種参考文献の統計データを参考にして設定した．

表 5-13 リサイクル率データ（回収タイプ 1）[82][83][84][85][86][87]

部品または素材名	リサイクル率 [%]	
	日本	EU
Wire Harness	33	29
PCB (Printed Circuit Board)	35	16
Fluorescent Tubes (CCFL)	98	80
LCD Panel	0	0
Speaker	30	30

表 5-14 リサイクル率データ（回収タイプ 2）[86][88]

部品または素材名	リサイクル率 [%]	
	日本	EU
ABS	100	94
PP (Polypropylene)	100	94
PC (Polycarbonate)	100	94
PET (Polyethylene Terephthalate)	100	94
PS (Polystyrene resin)	100	94
Other plastic	0	5
Steel	100	95
Aluminum	100	95
Copper	100	95

表 5-15 リサイクル率データ（回収タイプ 3）[86][88][89][90][91]

部品または素材名	リサイクル率 [%]	
	日本	EU
ABS	76	74
PP (Polypropylene)	82	90
PC (Polycarbonate)	94	0
PET (Polyethylene Terephthalate)	60	90
PS (Polystyrene resin)	83	83
Other plastic	0	5
Steel	90	94
Aluminum	95	91
Copper	95	85

上表の値を用いて液晶テレビのリサイクル可能率を算出した．なお，塗装を含む「前面筐体（Front Cabinet）」と難燃剤を含む「後面筐体（Back Cabinet）」の素材は，上表の「その他プラスチック（Other plastic）」として計算した．計算結果を表 5-16 に示す．

表 5-16 リサイクル可能率算出結果

	日本	EU
リサイクル可能率 [%]	64.6	53.2

Peeters ら[92]によると，日本と EU におけるリサイクル率の実測値はそれぞれ 64.6[%]と 51.9[%]であるとされており，表 5-16 に示した結果は実測値に近い値を算出できている．

日本では，液晶テレビのリサイクル可能率は 50[%]以上の達成が家電リサイクル法によって義務付けられており，将来的には 60[%]以上の達成が義務付けられる可能性がある[88]．表 5-16 の結果より，日本のリサイクル可能率は 60[%]以上の値を示しているので，その目標は達成できている．一方で EU においては，WEEE 指令によって液晶テレビは 65[%]以上のリサイクル率の達成が義務付けられている[93]．しかしながら表 5-16 の結果に示すように EU でのリサイクル可能率は 65[%]を大きく下回っており，目標を達成できていない．そこで本例題検証では，設計改善の方針として「日本でのリサイクル可能率 60[%]以上を維持しつつ，EU でのリサイクル可能率 65[%]以上を達成すること」を設定する．

EU におけるリサイクル可能率を向上させるために，EU のライフサイクル・フロー・モデルを対象に感度分析を実施する．ここでは，感度分析の項目の中で「素材」と「回収タイプ」の 2 つを対象として感度分析を実施した．感度分析の結果として，リサイクル可能率に対する感度の大きい上位 8 項目を「素材」および「回収タイプ」についてそれぞれ**表 5-17** および**表 5-18** に示す．なお，感度分析の結果は「素材」もしくは「回収タイプ」の変更による製品全体のリサイクル可能率の変化幅を示しており，例えば「後面筐体（Back Cabinet）」の素材を PC/ABS から鉄に変えた場合にリサイクル可能率が 53.2[%]→75.1[%]と変化した場合は，その感度を「+21.9[%]」と表示する．また，5.3.1 項で述べたように，回収タイプ 1 に分類される部品（例えば基盤類や配線）はその特性上「素材」や「回収タイプ」を変更することが困難であるので，感度分析の対象外としている．

表 5-17 部品の構成素材の変更に対する感度分析

部品名	変更した素材	リサイクル可能率への感度 [%]
Back Cabinet	Steel	+ 21.9
Back Cabinet	Copper	+ 21.4
Front Cabinet	Steel	+ 15.7
Front Cabinet	Copper	+ 15.2
Back Cabinet	Aluminum	+ 13.5
Reflection Board	Steel	+ 12.4
Back Cabinet	PET	+ 10.0
Reflection Board	Copper	+ 9.8

表 5-18 部品の回収タイプの変更（3→2 もしくは 2→3）に対する感度分析

部品名	回収タイプの変更	リサイクル可能率への感度 [%]
Reflection Board	3 → 2	+ 4.6
Board Chassis	3 → 2	+ 0.3
Main Chassis	3 → 2	+ 0.2
Stand Panel	3 → 2	+ 0.09
Heat Sink	3 → 2	+ 0.04
Board Cover 1	3 → 2	+ 0.004
Board Cover 4	3 → 2	+ 0.003
Board Cover 2	3 → 2	+ 0.003

表 5-17 の結果より，素材を変更する場合は，重量が大きい上にリサイクル率の低い素材が使用されていた「前面筐体（Front Cabinet）」と「後面筐体（Back Cabinet）」が上位を占めた．一方で，回収タイプを変更する場合は，同一素材では回収タイプ 3 よりも回収タイプ 2 のリサイクル率の方が高くなるため，回収タイプが 3 である部品を回収タイプ 2 に変える項目が上位を占めた．ただし，回収タイプ 3 と回収タイプ 2 ではリサイクル率の差異が小さいため，素材の変更に比べて感度が小さいという結果となった．これらの結果より，本研究では以下の設計改善を行うこととした．

- 「前面筐体（Front Cabinet）」および「後面筐体（Back Cabinet）」の素材をアルミニウムにする

  感度分析の結果では鉄や銅がアルミニウムよりも上位占めたが，鉄は比重が大きいため筐体の重量，ひいては液晶テレビの重量が大きくなりすぎる点，銅はその素材の特性上液晶テレビの筐体には向いていない点から除外した．一方でアルミニウムは鉄に比べてその比重も小さく，またアップル社[94]でパソコンの筐体にアルミニウムが用いられているように筐体として用いられている事例があるため使用が可能であると判断した．また，上位 8 項目には入っていないものの「前面筐体（Front Cabinet）」についても素材をアルミニウムに変更すると 8.6[%]の感度があったため，ここでは「後面筐体（Back Cabinet）」と同様に「前面筐体（Front Cabinet）」についてもアルミニウムに変更することとした．**表 5-17** に表れている「反射板（Reflection Board）」については，その部品の機能上素材を鉄や銅に変更することが困難であると判断したためここでは素材変更の対象としなかった．

- 「反射板（Reflection Board）」を手分解で取り出す（EU の製品ライフサイクル）

  「反射板（Reflection Board）」は感度分析において最も感度が大きく，また**図 5-32** に示す「冷陰極管（Fluorescent Tubes）」の下部にある白色の板であり「冷陰極管（Fluorescent Tubes）」を手分解によって取り出す際に露出しているため他の部品を分解せずに手分解で取り出すことが可能である．一方で，次に感度の大きい「基板シャーシ（Board Chassis）」や「メイン・シャーシ（Main Chassis）」を取り出すためにはその上部に取り付けられている基盤類を取り外さなければならず分解コストが大幅に増大することが考えられる．そこで本例題検証では，「反射板（Reflection Board）」のみを回収タイプ変更の対象とした．

- 「前面筐体（Front Cabinet）」をリサイクルする（日本の製品ライフサイクル）

  日本シナリオにおいては，「前面筐体（Front Cabinet）」は塗装されていることからリサイクルせずに廃棄することとしていた．しかしながら，上記のように「前面筐体（Front Cabinet）」の素材をアルミニウムに変更することでリサイクルが可能となる．そこで，日本の製品ライフサイクルにおいて「前面筐体（Front Cabinet）」をリサイクルこととする．

5.3.5. 設計改善

5.3.4 項で述べた設計改善の方針に従って，ライフサイクル・モデリング・システムを用いて製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを変更する．まず，EU のライフサイクル・フロー・モデルにおいて「反射板（Reflection Board）」を手分解で取り出してリサイクルするようにモデルを修正するために，「手分解プロセス（LCD TV Disassy）」と「リサイクル・プロセス（Recycling）」の間にフローリンクを作成し（図 5-38 の青線で示したフローリンク），「反射板（Reflection Board）」を表す実体ノードを対応付けた．また，日本のライフサイクル・フロー・モデルにおいても，廃棄していた「前面筐体（Front Cabinet）」をリサイクルするようにモデルを修正した（図 5-39 に青線で示したフローリンクを追加）．ここで，日本および EU の製品ライフサイクルにおけるトポロジーレベルの整合性を確認したところ，図 5-38 に示すように，EU のライフサイクル・フロー・モデルの「手分解プロセス（LCD TV Disassy）」においてトポロジーレベルの不整合が検出された．これは，新たにフローリンクを作成して対応付けた「手分解プロセス（LCD TV Disassy）」が「破砕プロセス（Shredding）」へと出力しているフローリンクに対応付いている「破砕モジュール（Shredding Module）」にも含まれているために実現不可能なプロセスとなっているためである．そこで，図 5-40 に示すように製品モデルにおける階層構造を修正した．さらに，「前面筐体（Front Cabinet）」および「後面筐体（Back Cabinet）」の構成素材をアルミニウムに変更した．本例題検証で用いたリサイクル性評価手法では，素材の変更の際には等積で変更することを仮定しているので，ここでも体積は一定のままとしてアルミニウムの比重を考慮して部品の重量を設定した．

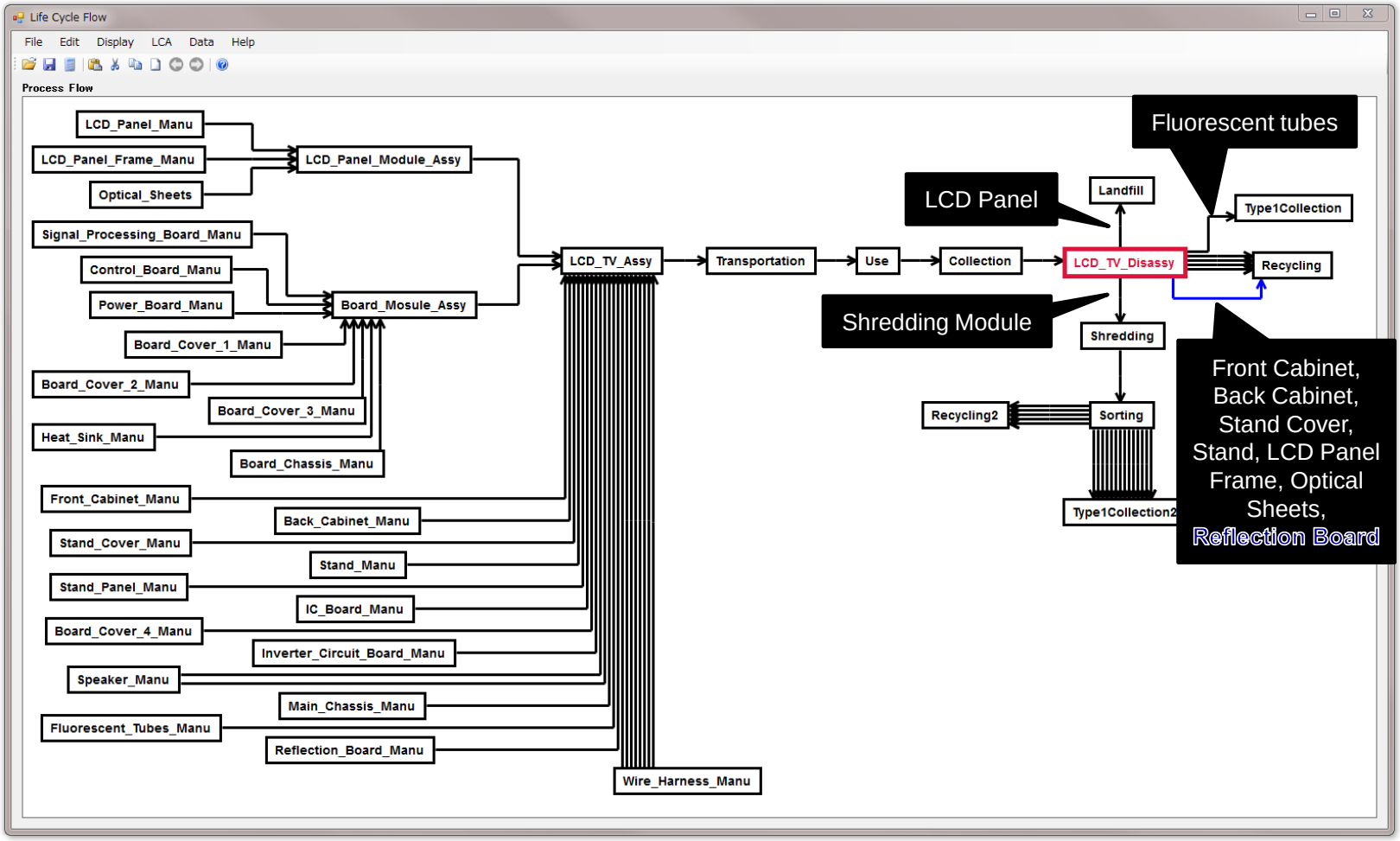


図 5-38 修正したライフサイクル・フロー・モデル（EU）

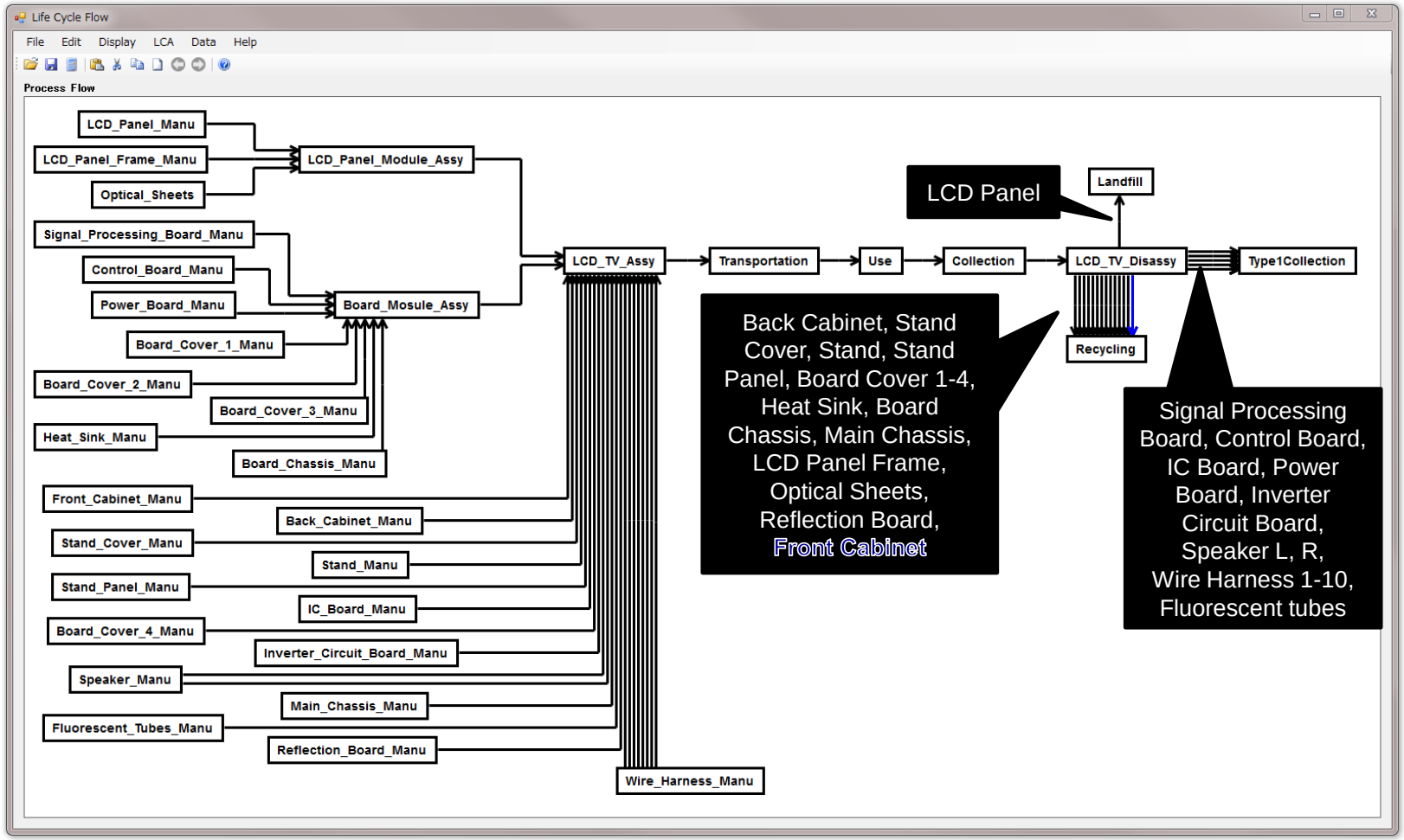


図 5-39 修正したライフサイクル・フロー・モデル（日本）

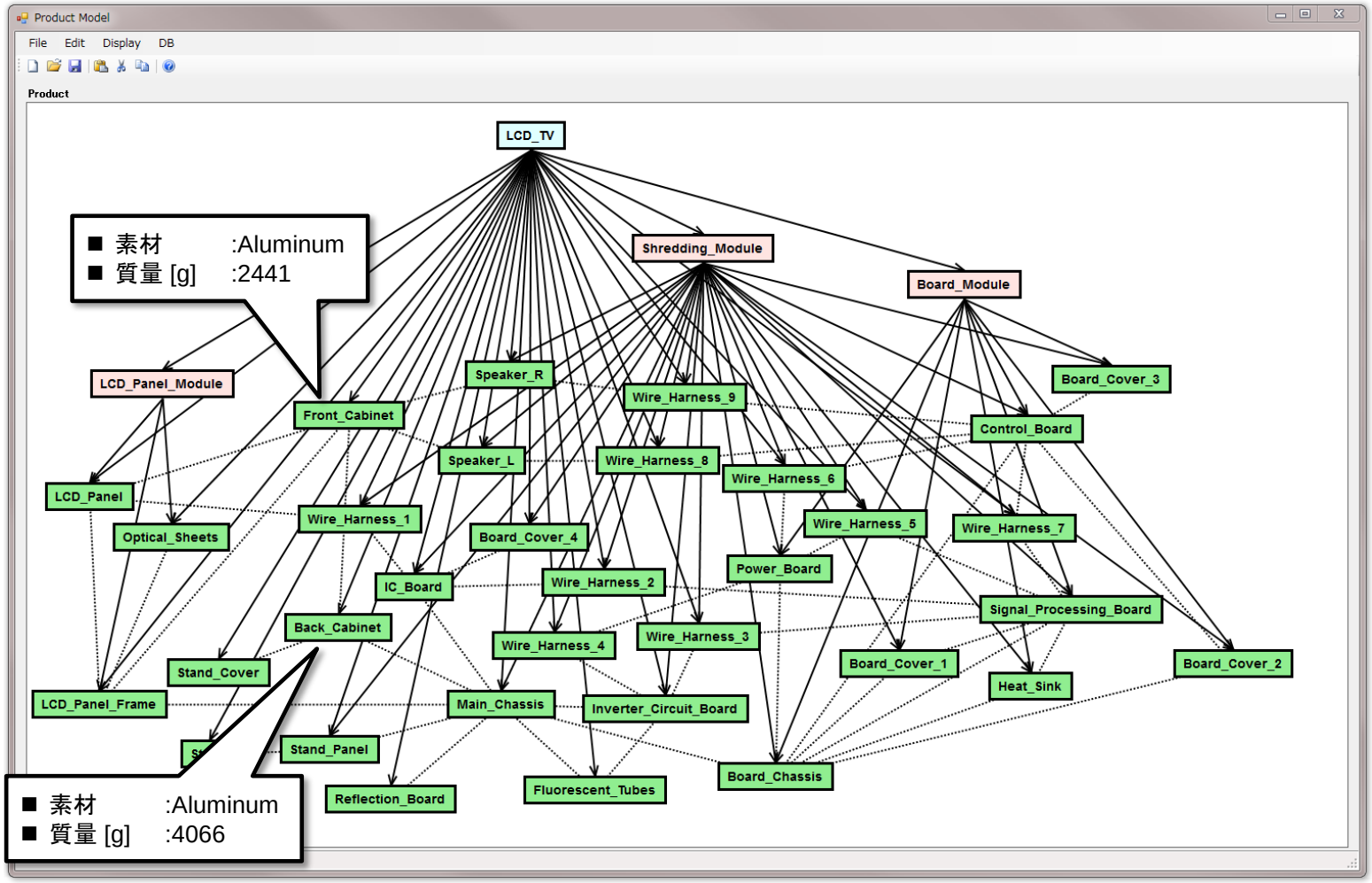


図 5-40 修正後の製品モデル（ソリッドモデルを除く）

修正した製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルを用いて液晶テレビのリサイクル可能率を算出した結果を**表 5-16** に示す. **表 5-16** に示すように, 設計改善を行うことで日本と EU のリサイクル可能率はともに上昇し, それぞれの目標を達成できた.

表 5-19 設計改善後のリサイクル可能率算出結果

	日本	EU
リサイクル可能率 [%]	84.4	76.8

本例題検証では, リサイクル性を向上するための設計改善として,「前面筐体(Front Cabinet)」および「後面筐体(Back Cabinet)」の素材をアルミニウムに変更した. 最後に, この設計変更によって液晶テレビの製品ライフサイクル全体における CO2 排出量がどのように変動したかを, ライフサイクル・モデリング・システムを用いてライフサイクル評価を行うことで確認し, 本例題検証における設計改善の環境性を多角的に評価する. 評価条件は以下の通りとした.

- 製品 1 台あたりの CO2 排出量を評価して比較する.
- 製品ライフサイクル全体における CO2 排出量を評価するにあたって, ここでは液晶テレビの製造による CO2 排出量を評価の対象とし, 製品の使用やリサイクル処理にかかわる CO2 排出量は考慮しない.

ライフサイクル評価を行うために設定した液晶テレビを製造する際の CO2 排出量の原単位のデータを**表 5-20** および**表 5-21** に示す. **表 5-20** は本研究で対象とした液晶テレビの一部の構成部品の単位製造量あたりの CO2 排出量を表しており, 参考文献[95][96]の値を元に重量比で換算した値を用いている. また, この表にない部品についてはその部品の素材構成をもとに**表 5-21** 示す材料ごとの製造における CO2 排出量の原単位[54][66]を用いてその製造における CO2 排出量を推定した.

表 5-20 部品ごとの製造における CO2 排出量

部品	製造における CO2 排出量 [gCO2/台]
LCD Panel	504
Fluorescent Tubes	2572
Wire Harness	28
Signal Processing Board	16306
Control Board	13640
IC Board	2914
Power Board	80476
Inverter Circuit Board	21576

表 5-21 各材料の製造における CO2 排出量の原単位

材料	製造における CO2 排出量 [gCO2/g]
Steel	2.29
Aluminum	12.98
Copper	1.53
Gold	0.91
Silver	0.45
other non-ferrous metal	2.17
ABS	3.16
PC/ABS	3.50
PS/PPE	11.90
PC	6.48
PS	1.93
PVC	1.46
PET	1.59
Epoxy Resin	6.30

ライフサイクル評価の結果を**表 5-9** に示す．なお，日本と EU において製造プロセスは同一であると仮定しているので，評価結果は日本と EU で区別していない．**表 5-9** の値は，現状の液晶テレビの製品ライフサイクルにおける CO2 排出量の値および設計改善した液晶テレビの製品ライフサイクルにおける CO2 排出量の値，そしてそれらの割合を表している．**表 5-9** より，今回の設計改善によって製品ライフサイクルにおける CO2 排出量が約 30[%]増加する結果となった．

表 5-22 ライフサイクル評価結果

	現状 [kgCO2]	設計改善後 [kgCO2]	設計改善後/現状
CO2 排出量	231.25	299.36	1.30

5.3.6. 考察

本例題検証では，日本と EU の 2 地域で販売・リサイクルを行うことを想定して，液晶テレビの設計改善を実施した．設計改善の結果として日本と EU の両地域でリサイクル可能率を大きく向上させることができたが，一方で CO2 排出量を大きく増大させる結果となった．この原因は「前面筐体（Front Cabinet）」および「後面筐体（Back Cabinet）」の素材をアルミニウムに変えたためであると考えられる．具体的には，**表 5-21** に示す様に「前面筐体（Front Cabinet）」および「後面筐体（Back Cabinet）」のもとの素材である PS/PPE や PC/ABS に比べてアルミニウムを製造する際の CO2 排出量原単位が大きいこと，また体積一定で素材変更を行ったためにそれぞれ重量が大幅に増加していること，の 2 点が原因として挙げられる．同時に，筐体重量の増加はスタンドが液晶テレビを支えられなくなるなどの機能面の欠陥や製造コストの増加を引き起こす可能性もある．この問題を解決する方針としては，アルミニウムはもとのプラスチック素材よりも素材強度が高いため，薄肉化などの減量化を行うことで CO2 排出量の増加を低減することができると考えられる．例えば，「前面筐体（Front Cabinet）」および「後面筐体（Back Cabinet）」の重量を 40[%]減量してそれぞれ 1465[g]および 2440[g]にできたとすると，**表 5-23** に示すように，リサイクル可能率は若干減少するものの目標を達成できており，かつ製造時の CO2 排出量の増加を半減することができ，減量化は CO2 排出量の増加を抑える上で有効な手段であることがわかる．

表 5-23 筐体類を軽量化した場合のリサイクル可能率および CO2 排出量

リサイクル可能率 [%]	日本	82.1
	EU	74.0
CO2 排出量	現状	231.25
	設計改善後	265.59
	設計改善後/現状	1.15

第6章

考察

第 6 章では，第 5 章で示した例題検証の結果に基づいて，本研究で提案した表現手法および整合性管理手法，さらにそれらに基づいて開発したライフサイクル・モデリング・システムを用いることによる利点や課題について考察を行う．

6.1. 手法の利点と課題

本研究では，ライフサイクル CAD システムの実現に向けた第 1 段階として，その重要な機能として以下の 2 つの手法を提案した．

(1) 製品とライフサイクル・フローをそれぞれ製品モデルおよびライフサイクル・フロー・モデルとしてモデル化し，両モデルを対応付けることで製品ライフサイクルを表現する手法

(2) 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間のトポロジーレベルの整合性を両モデルの対応関係の基本パターンを定義することで管理する手法

本研究で提案した上記の 2 つの手法の利点と課題についてそれぞれ検証する．

(1) 製品ライフサイクルの表現手法

本研究では，製品とライフサイクル・フローという 2 つの設計対象をそれぞれ製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルという 2 つのモデルで表現し，それらを対応付けることで製品ライフサイクルを表現する手法を提案した．この表現手法を用いることで，製品ライフサイクルの様々な行為者が持つ製品に対する視点を，階層構造を用いて表現した．例えば，第 5 章に示した携帯電話の例題検証では，(1) 製造者の階層構造，(2) リサイクラーの階層構造，(3) 使用者の階層構造，(4) リユースを行う行為者の階層構造を表現することができた（図 6-1 参照）．

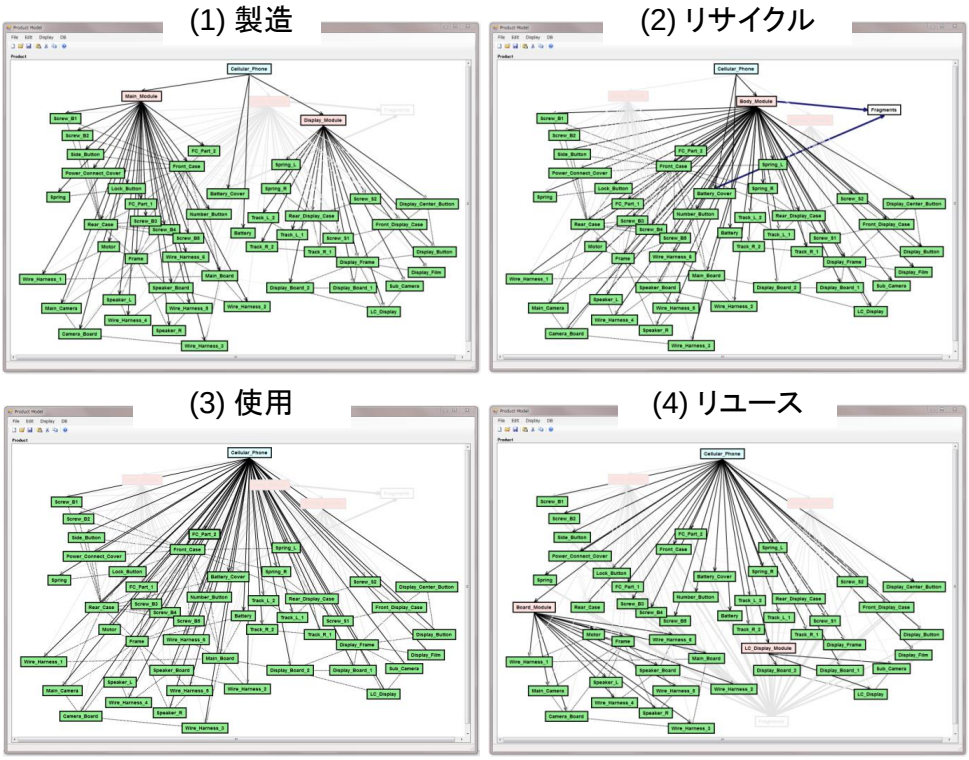


図 6-1 携帯電話の例題検証における複数の階層構造

このように複数の視点を階層構造として表現する利点としては，以下の 2 点が考えられる．

1 点目は，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを対応付けることで，製品モデル上で作成されているモジュールを扱う目的が明確になるという点である．製品モデルにおけるモジュールを表す実体ノードには，それを部品単体でも製品全体でもなくその中間的な部品のアセンブリとして扱う意図がある．例えば，第 5 章の携帯電話の例題においてリサイクラーの階層構造におけるモジュールは，まとめて破砕・選別するモジュールであるため「まとめて破砕・選別可能な素材の組合せである部品の塊」を表しており，リユースの階層構造における 2 つのモジュールはともに「寿命が近くリユース可能な部品の塊」を表している．これらの意図は，そのモジュールを表す実体ノードが対応付いているライフサイクル・フロー・モデルのライフサイクル・プロセス・ノードによって判断することが可能である．例えば，**図 6-2** に示すようにリサイクラーの階層構造においてあるモジュールがまとめて破砕・リサイクルするような「リサイクル・プロセス（Recycling）」の入力フローリンクに対応づいていれば，このモジュールはリサイクルするモジュールであり，まとめてリサイクルできるよう単一の素材で構成されていなければならないことが判断できる．ただし現状の手法では，ライフサイクル・フローにシチュエーションとしてどのような処理を行うのかを記述することはできる（例えば選別プロセスであれば何をどうやってのように破砕するのか）が，モジュールを扱う意図やそのための設計要求項目は設計者が判断しなければならない．したがって，本研究で提案した手法に加えて製品からライフサイクル・フロー，またはライフサイクル・フローから製品への設計要求の受け渡しを支援するような仕組みを構築することで，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの対応関係から上記のような意図を考慮した製品の設計を支援することが可能となる．

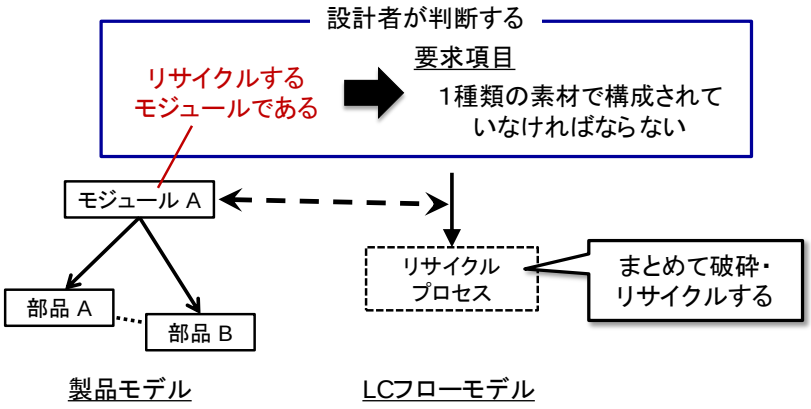


図 6-2 モジュールを扱う意図の判断

2 点目は，階層構造を用いて表現することで各部品がどのモジュールに属するかが明確となり，部品が満たすべき設計要求項目が把握しやすいという点である．例えば，**図 6-3** に示すように製造時の視点とメンテナンス時の視点を表す階層構造が作成されていた場合，部品 B は製造時にはモジュール A，メンテナンス時にはモジュール C に属しているので，これらモジュール A, C が持つ要求項目を満たすように設計されなければならない．一方で，部品 C は製造時にはモジュール B,

メンテナンス時にはモジュールCに属しているので，これらモジュールB, Cが持つ要求項目を満たすように設計されなければならない．このように，製品ライフサイクルの様々な行為者が持つ製品に対する視点を階層構造によって表現することで，ある部品が各視点においてどのモジュールに属しているかが明確となり，製品ライフサイクル全体を通してその部品がどのような設計要求項目を満たさなければならないかを判断することが容易になる．

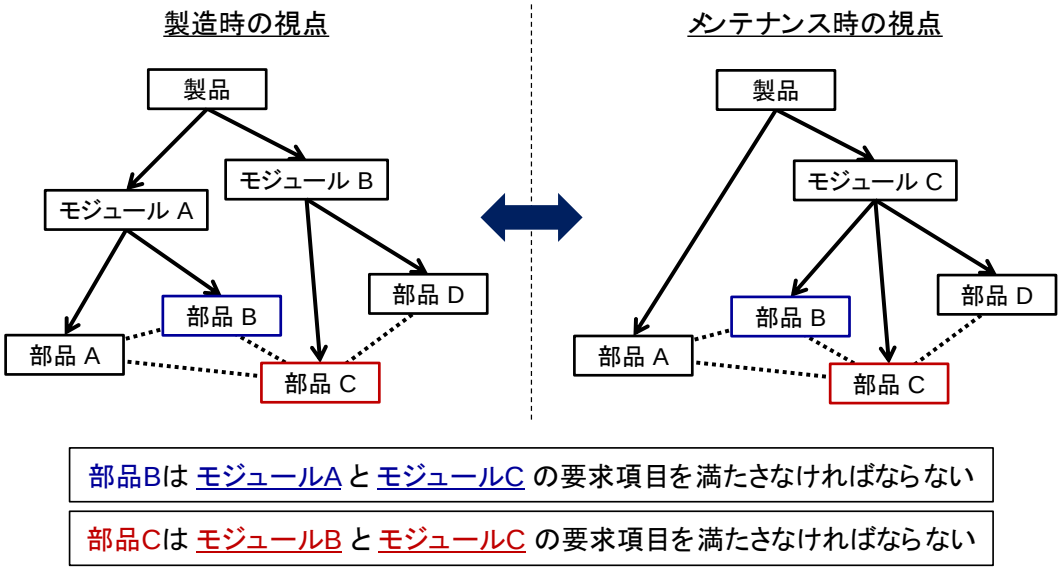


図 6-3 部品の要求項目の把握

一方で，製品ライフサイクルにおける複数の階層構造を考慮して製品設計を行う場合には，それぞれの階層構造の意図に合った製品の構造（属性値や配置，接続関係など）の間に様々なトレードオフが生じることが考えられる．例えば，製造段階における階層構造が意図する部品配置とメンテナンスにおける階層構造が意図する部品配置が矛盾していたり，使用段階における階層構造が意図する省エネ性向上のための材料選択がリサイクル段階における階層構造が意図するリサイクル率向上のための材料選択と矛盾していたりといったことが挙げられる．したがって，本研究で提案したモデリング方法に加えて上記のようなトレードオフを明示的に表現・管理する手法を構築することで，製品ライフサイクルにおける複数の階層構造を考慮した製品設計のさらなる支援とすることが可能である．

また，第5章に示した液晶テレビの例題検証では，日本で販売・リサイクルするライフサイクル・フローと EU で販売・リサイクルするライフサイクル・フローの両者に適用可能な液晶テレビの設計を行うために，1 つの製品モデルに対して複数のライフサイクル・フロー・モデルを対応付けることで設計を行った．この結果より，本研究で提案した表現手法は1つの製品モデルに対して複数のライフサイクル・フロー・モデルを対応付けることができ，複数のライフサイクル・フローに対応した製品設計を支援可能であることが示された．一般的に，同一の製品であってもその販売地域や使用時のメンテナンス，使用後の処理などが異なる様々なライフサイクル・フローを辿る可能性があり，複

数のライフサイクル・フローに対応した製品を設計する上で，本研究で提案したモデリング方法は有用である．これに加えて，複数のライフサイクル・フローの間の関係（例えば，一方のライフサイクル・フローのリサイクル性を上げるための素材選択が他方のライフサイクル・フローのリサイクル性を低下させてしまう）を表現可能とすることができれば，複数のライフサイクル・フローに対応した製品設計のさらなる支援となると考えられる．

(2) 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性管理手法

本研究では，製品とライフサイクル・フローの関係を評価する第1段階として，製品ライフサイクルの表現手法を用いて製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルのトポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案した．第 5 章の例題検証では，このトポロジーレベルの整合性が管理できていることが示された．特に，例題検証を通して，トポロジーレベルの整合性を管理することで，(i)ある設計変更に合わせて修正すべき箇所，(ii)設計変更すべき箇所が残っていること，の 2 点が明確になることがわかった．例えば第 5 章の携帯電話の例題においては，ある部品をリユースするようにライフサイクル・フロー・モデルを修正するとそれに伴って製品モデルの階層関係や変換関係を修正する必要があることが，トポロジーレベルの整合性を管理することで判断しやすくなった．またこのような修正すべき箇所が生じた場合にそれをすぐに修正するとは限らず，例えばあるライフサイクル・プロセスの変更によって製品構造に修正の必要が生じた際に他のライフサイクル・プロセスについても設計を行った上でまとめて製品構造を修正することも考えられる．トポロジーレベルの整合性を管理することで不整合が残っている箇所が明確になるので，このように設計問題を残して先に進んだ場合も，どのような設計問題が残っていたのかがわかりやすいといえる．

また，本研究では製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いて整合性管理を行ったので，不整合が生じたライフサイクル・プロセス・ノードの入出力フローリンクに対応付く実体ノードの属性や実体ノード間の階層リンクや変換リンクを確認することができることで，不整合を解消する際の支援となっていると考えられる．ただし，本研究で提案したトポロジーレベルの整合性管理手法は基本パターンに適合しないプロセスを抽出するだけにとどまっており，なぜどの基本パターンにも分類できないのか，不整合を解消するためにはどこをどのように修正すればいいのかは設計者が不整合の生じているライフサイクル・プロセスのシチュエーションを確認したりそのライフサイクル・プロセスに対応付いている製品モデル上の実体ノードとそれらの間の相互関係を確認したりすることで判断する必要がある．

6.2. ライフサイクル・モデリング・システムの利点と課題

本研究で開発したライフサイクル・モデリング・システムを用いることで，第 5 章の例題検証で示したように製品の形状や構造と製品のライフサイクル・フロー，そしてライフサイクル・フローの各時点における製品の状態が視覚的に表現することができた．これは，製品ライフサイクル全体を考慮して製品の構成素材やモジュール構造などの設計支援の一助となると考えられる．また，ライフサイ

クル・シミュレータを接続することで，5.2 節で述べた携帯電話を対象とした例題検証における動的なシミュレーションから 5.3 節で述べた液晶テレビを対象とした例題検証における LCA レベルの評価までさまざまなレベルのライフサイクル評価を製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルで作成した情報を用いることで容易に評価可能となることが確認できた．

ライフサイクル CAD システムのコンセプトは，ライフサイクル戦略の策定支援手法や製品やそのライフサイクル・フローの要素設計技術，ライフサイクル評価手法を接続可能とすることで様々な設計支援手法を援用しながらライフサイクル設計を行うことができる設計環境であると第 2 章で述べた．本研究ではこの第 1 段階として，第 5 章の液晶テレビの例において，本研究で開発したライフサイクル・モデリング・システムにリサイクル性評価手法を接続してリサイクルを考慮した設計を行った．ライフサイクル・モデリング・システムに設計支援手法のツールを接続するためには，(i)接続のための API（Application Program Interface）を準備する，(ii)ライフサイクル・モデリング・システムと接続できるようにそのツールを構築する，という 2 つの方法が考えられる．第 5 章の液晶テレビの例は後者が可能であることをライフサイクル・モデリング・システム上で確認することができた．

以上から，本研究で開発したライフサイクル・モデリング・システムは，(i)製品ライフサイクルのモデル化とトポロジーレベルの整合性管理，(ii)ライフサイクル・シミュレータを用いたライフサイクル評価，(iii)ライフサイクル・モデリング・システムと接続できるようにツールを開発することによる設計支援手法の接続，が可能となった．ライフサイクル・モデリング・システムの拡張としては，(i)よく用いる部品やライフサイクル・プロセスの情報を管理して他の設計でも使い回せるようにデータベースを拡充すること，(ii)ユーザーインターフェースを改良して製品モデルやライフサイクル・フロー・モデルにおける実体ノードもしくはライフサイクル・プロセス．ノード間の関係の視認性を向上させることで，より大規模な製品やより長期間の製品ライフサイクルを対象とした場合でも，その製品モデルやライフサイクル・フロー・モデルの作成や視覚的な把握を支援することが可能となると考えられる．また，様々な設計支援手法を接続するための API を準備して設計支援手法の接続可能性を検証することで，ライフサイクル・モデリング・システムの拡張性を向上させることができると考えられる．

6.3. 提案手法によるライフサイクル設計支援への展開

本研究では，ライフサイクル CAD システムの実現に向けて製品ライフサイクルを表現する手法およびトポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案した．また，これらの手法をライフサイクル・モデリング・システムとして実装した．これによって，製品ライフサイクルの全体を任意の粒度でそれもトポロジーレベルにおいて不整合のないように表現することが可能となった．一方で，ライフサイクル・モデリング・システム自体は何らかの設計パラメータを最適化したり設計解を提示したりすることはなく，ただその時点での設計情報を提示するおとなしい設計環境である．例えば，6.1 節で述べたように，製品とライフサイクル・フローの間の設計要求の抽出や受け渡し，複数の視点間のトレードオフおよびトポロジーレベルの不整合の解消などは設計者が自ら判断した上で設計・修正を行わなければならない．この問題を解決するためには，例えば，各視点に適した製品構造やライフサ

イクル・プロセスの条件（例えばリユースを行う部品に含まれる部品の寿命が満たすべき条件）を製品モデルまたはライフサイクル・フロー・モデルに明示的に記述し，ライフサイクル・モデリング・システム上で評価・管理することができるような仕組みが必要である．しかしながら，例えば「モジュールに含まれる部品の寿命が〇年以上」のような数値目標として記述できる条件については評価が容易であるが，「工具を使用せずに手で分解可能である」といった抽象的なレベルの条件が記述されることも考えられるため，条件を記述・評価する手法を開発する際には注意が必要である．

上記のような課題は残されているものの，本研究ではライフサイクル CAD システムを構築する上で基礎となる重要なモデリング手法を提案することができた．

第7章

結論

第 7 章では, 本研究の結論と今後の展望について述べる.

7.1. 本研究の結論

本研究では，ライフサイクル設計の一連の流れを支援する計算機環境として「ライフサイクル CAD システム」のコンセプトを提案した．また，ライフサイクル CAD システムの実現に向けた第 1 段階として，その重要な機能として以下の 2 つの手法を提案した．

(1) 製品ライフサイクルを表現する手法

設計対象である製品とライフサイクル・フローをそれぞれ製品モデル，ライフサイクル・フロー・モデルとしてモデル化し，両モデルを対応付けることで製品ライフサイクルを表現する手法を提案した．製品とライフサイクル・フロー・モデルを個別にモデル化して対応づけることで，製品ライフサイクルにおける様々な製品状態の変化や複数の階層構造の表現が可能となった．

(2) 製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの間の整合性を管理する手法

製品とライフサイクル・フローの関係を評価する第 1 段階として，製品ライフサイクルの表現手法を用いて製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルのトポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案した．具体的には，ライフサイクル・プロセスの入出力において過不足が生じないような基本パターンを定義することで整合性を管理する手法を提案した．これによって，ある設計変更に伴って修正すべき箇所の判断が容易となった．

また，以上の手法に基づいて製品ライフサイクルを表現・管理する計算機環境としてライフサイクル・モデリング・システムを開発した．ライフサイクル・モデリング・システムでは，その形状や配置を表現する環境としてソリッドモデラの 1 つである SolidWorks を用いた．また製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルを用いたライフサイクル評価を可能とするために，ライフサイクル・モデリング・システムにライフサイクル・シミュレータを統合した．ライフサイクル・モデリング・システムでは，製品ライフサイクルの全体を任意の粒度でそれもトポロジーレベルにおいて不整合のないように表現することが可能となった．

7.2. 今後の展望

本研究で提案したライフサイクル・モデリング・システムは，製品ライフサイクル全体の表現が可能であり，また設計支援手法の接続可能性を秘めているという点から，今後ライフサイクル CAD システムを開発する上でその基礎的な設計環境として活用することができると考えられる．このシステムをベースとしてライフサイクル CAD システムを構築していくためには，以下のような課題が考えられる．

- トポロジーレベル以外の整合性管理手法を提案する

  本研究では，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの整合性管理手法の実現に向けた第 1 段階として，トポロジーレベルの整合性を管理する手法を提案した．第 3 章で述べたように，製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルの整合性を管理するためには現状存在する技術に加えて将来的な技術動向についても考慮しなければならない．本研究で提案した製品ライフサイクルの表現手法を用いることでライフサイクル・プロセスにおける処理内容やそのライフサイクル・プロセスを通過する実体の属性値を確認することができるので，利用可能な技術のデータベースを容易したり，将来的な技術動向を予測する仕組みを構築したりすることで製品モデルとライフサイクル・フロー・モデルのトポロジーレベル以外の整合性管理が可能となる．

- 設計要求項目の抽出や評価，管理を行う手法を提案する

  本研究で提案した手法では，製品やモジュール，それを構成する部品の設計要求項目の抽出や達成できているかどうかの判断は設計者の判断に委ねられている．また，第 2 章で述べたライフサイクル戦略の策定段階において製品およびライフサイクル・フローへの初期段階の設計要求項目が抽出されるが，これらの評価・管理もできていない．したがって，ライフサイクル戦略の策定から製品およびライフサイクル・フローの設計までの各段階において，設計要求項目の抽出や評価，管理を行う手法が必要不可欠である．

- ライフサイクル CAD システムを用いた設計プロセスを明確にする

ライフサイクル設計における設計対象は製品およびライフサイクル・フロー2 つであるが，第 2 章で述べたように，それぞれの設計を個別に行うのではなく，両者を同時並行的に設計することが重要となる．これは，製品の設計結果がライフサイクル・フローの設計要求となる一方で，ライフサイクル・フローの設計結果が製品の設計要求となるためである．したがって，第 2 章に示したライフサイクル設計の 5 つのフェーズの間の関係を整理することで，ライフサイクル CAD システムを用いて製品とライフサイクル・フローの設計を行う手順を明確にする必要がある．

また，上記のような課題を通してライフサイクル CAD システムが構築できれば，さらに以下の点について機能を拡張していくことが考えられる．

- 多世代・多品種の製品設計に応用する

  多世代の製品や多品種の製品の設計を考える際には，いわゆるプラットフォームのような共

通の部分と変更やバージョンアップを行う部分を分けて設計しなければならない．例えば，あるモジュールをリユースして次の世代に組み込んで用いる場合には，このモジュールが長期間使用できるように長寿命な設計を行うのに加えて，現状の製品だけでなく次世代の製品にもこのモジュールが組み込めるようにこのモジュールやまわりの部品を設計しなければならない．本研究で提案した手法は，1 種類の製品を対象としており，複数の製品間の上記のような関係は表現できていない．また，多世代・多品種の製品を設計する際には，各製品のライフサイクル・フローは独立ではなく，複数の製品で共通のライフサイクル・プロセスが存在することが考えられる．したがって，本研究で提案した製品ライフサイクルの表現手法を多世代・多品種の製品設計にも適用可能とするためには，複数の製品の製品モデルやライフサイクル・フロー・モデルの間でどのような関係があるのかを表現・管理することができるような手法を提案する必要があると考えられる．

- サービスの設計を支援する

第 1 章で述べたインバース・マニュファクチャリングを実現する上で重要な要素の 1 つとして「人工物の販売から人工物が発現する機能であるサービスの提供へと価値を転換する」ことが挙げられ，製品サービスシステム（Product-Service Systems: PSS）[97]などのコンセプトが提案されている．これを実現するためには，製品とそれに付随するサービスを同時に検討しながら設計することが不可欠で，製品ライフサイクルにおいて生産者や消費者，さらには政策決定者がどのように関係しあっているかを明確にしながら製品ライフサイクルを設計することが重要となる．しかしながら，本研究で提案した表現手法は，製品およびそれを構成する部品や素材などを実体として定義しその実体の流れのみをライフサイクル・フローとして表現する手法であった．したがって，様々なステークホルダー間の情報の流れやサービス活動を表現できるような手法を提案することで，製品に付随するサービスについても同時に設計することができるような設計支援環境の実現が必要不可欠である．

- 社会情勢の変動を考慮した設計支援

製品ライフサイクルは製品の開発から製造，使用，そして後処理までの一連の流れであり，製品によって差はあるが数年から数十年と長いスパンでその有効性を検討する必要がある．つまり，例えば製品を開発する段階と後処理を行う段階では市場などの社会状況が大きく変わっている可能性があり，長期的に社会状況を分析した上で事業戦略を策定し，それに基づいて製品ライフサイクルを設計することが必要不可欠となる．したがって，設計する製品の背景となる社会情勢の中長期的な予測を例えばシナリオのような形で記述し，それと関係づけながら製品ライフサイクルが設計できるような設計支援環境を実現することができれば，様々な社会情勢に即した製品ライフサイクルの設計が可能となると考えられる．

本研究で提案した手法は，1 種類の製品の製品ライフサイクルにおけるモノの流れを表現する手法であった．以上で挙げた課題を解決してライフサイクル・モデリング・システムを拡張することで，

多種類の製品とそのライフサイクル・フローやビジネス，さらには社会情勢の変動を考慮することが可能となり，より多角的な面から製品とライフサイクル・フローの設計支援が可能となると考えられる．これは，「現状分析」から「ライフサイクル評価」までのライフサイクル設計の一連の設計プロセスを支援する大きな一歩となると考えられる．

謝辞

本論文は，多くの方々のお力添えに支えられて完成させることができました．

指導教員であり，本論文の主査も務めていただいた梅田靖教授には，大阪大学工学部の 4 回生の時から修士課程，博士課程と 6 年間の長きに渡り研究を指導していただきました．本研究を進めるにあたっては，本質的な課題が何であるかを念頭に置きつつ私が間違えた方向に進まないように時に厳しく指導していただきました．また，研究がうまくいかず悩んでいるときも，私の悩みを真摯に受け止め，親身に相談に乗ってくださいました．さらに，研究の内容以外にも，研究に取り組む姿勢や論理的な考え方，論文の書き方など多くのことを学ばせていただきました．深く感謝申し上げます．

福重真一准教授には，本研究を進める上で多くの有益なアドバイスをいただきました．特に，本研究の具体的な方向付けや研究目的を実現するためのアイデア出しにおいて，多大なるご協力をたまわりました．福重准教授の豊富な知識と斬新なアイデアには，幾度となく助けられました．この場を借りて感謝申し上げます．

本論文の査読を担当していただきました藤田喜久雄教授（機械工学専攻），荒井栄司教授（マテリアル生産科学専攻）には，有益なコメントをいただき心から感謝いたします．

梅田研究室のメンバーにも，研究活動をはじめとして公私ともに大変お世話になりました．特に，同輩である川田康毅氏は，本研究で開発したライフサイクル CAD システムの基本コンセプトを構築する上で力を貸していただきました．また，同じ研究グループとして研究を行った松浦剛氏，松山祐樹氏，鹿田憲吾氏，長原耕太郎氏，松野智彦氏には，様々なディスカッションやライフサイクル・モデリング・システムの開発作業において力を貸していただきました．ここに感謝いたします．

研究室での活動を支えていただきました事務補佐員の山下佳子さん，元事務補佐員の津田奈津美さんに感謝いたします．

最後に，本論文を完成させる上で普段の生活を経済面・精神面から支えてくれた家族に感謝の意を示してこの論文の締めとさせていただきます．

参考文献

[1] 吉川弘之, IM 研究会，逆工場　見えてきた製造業これからの 10 年，日刊工業新聞社, 1999.

[2] 木村文彦，梅田靖，高橋愼治，田中信壽，永田勝也，藤本淳，松橋隆治，三橋規宏，インバース・マニュファクチャリングハンドブック，丸善株式会社, 2004.

[3] Duflou, J R., Seliger, G., Kara, S., Umeda, Y., Ometto, A., Willems, B., “Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study,” *Annals of the CIRP*, Vol. 57, No. 2, pp.583–600, 2008.

[4] 下村芳樹，近藤伸亮，梅田靖，“アップグレード製品設計のためのアップグレード計画構成手法の提案,” 日本機械学会論文集（C 編）, Vol.72, No.713, pp.282-289, 2006.

[5] Tsai Chi Kuo, “The construction of a collaborative-design platform to support waste electrical and electronic equipment recycling,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 26, No. 1, pp.100-108, 2010.

[6] 財団法人家電製品協会，家電製品の製品アセスメント，http://www.aeha.or.jp/assessment, 2010.

[7] 吉川弘之，冨山哲男, “設計学 –ものづくりの理論-,” 放送大学教育振興会, 2000.

[8] 吉川弘之, “一般設計学,” 機械の研究, Vol.37, No.1, pp.108-116, 1985.

[9] G. Pahl, W. Beitz, “工学設計　体系的アプローチ,” 培風館, 1995.

[10] 大高敏男, “3 次元 CAD で学ぶ機械設計の基礎技術,” 日刊工業新聞社, 2009.

[11] Dassault Systems HP, http://www.3ds.com/jp/.

[12] PTC HP, http://www.ptc.com/.

[13] SolidWorks HP, http://www.solidworks.co.jp/.

[14] Autodesk HP, http://www.autodesk.co.jp/.

[15] G. Sohlenius, “Concurrent Engineering,” *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol.41, No.2, pp.645-655, 1992.

[16] “Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE),” *Official Journal of the European Union*, Vol.55, pp.38-71, 2012.

[17] “Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment,” *Official Journal of the European Union*, Vol.31, pp.19-23, 2003.

[18] “Corrigendum to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and

Restriction of Chemicals (REACH)," *Official Journal of the European Union*, pp.3-280, 2007.

[19] "Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products," *Official Journal of the European Union*, pp.10-35, 2009.

[20] 3R 政策 「循環型社会形成推進基本法」, 経済産業省(METI)ホームページ, http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/admin_info/law/01/index.html.

[21] 家電リサイクル法(特定家庭用機器再商品化法, (指定法人)財団法人家電製品協会, http://www.meti.go.jp/policy/kaden_recycle/ekade00j.html.

[22] 梅田靖, "インバースマニュファクチャリング ライフサイクル戦略への挑戦," 工業調査会, 1998.

[23] 江波戸普, 上村恭徳, "複写機における部品リユース活動およびリユース技術," 富士ゼロックス テクニカルレポート, No.17, 2007.

[24] Fuji Xerox, Sustainability Report 2006.

[25] Fuji Xerox, Sustainability Report 2011.

[26] Yasushi Umeda, Shozo Takata, Fumihiko Kimura, Tetsuo Tomiyama, John W. Sutherland, Sami Kara, Christoph Herrmann, and Joost R. Duflou, "Toward integrated product and process life cycle planning – An environmental perspective," *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol.61, No.2, pp.681-702, 2012.

[27] 国連環境計画(UNEP), "ECODESIGN エコデザイン 持続可能な生産と消費のための将来性あるアプローチ," ミクニヤ環境システム研究所株式会社, 2001.

[28] 財団法人 製造科学技術センター, "平成 13 年度 インバース・マニュファクチャリングフォーラム調査研究報告書," http://www.mstc.or.jp/activity_report/report/docs/h13_im.pdf, 2002.

[29] 梅田靖, 比地原邦彦, 大野雅史, 小川康暢, 小林英樹, 服部光郎, 増井慶次郎, 深野彰, "廃棄要因分析表を用いたライフサイクル戦略決定支援手法の提案," *精密工学会誌*, Vol.69, No.9, pp.1270-1276, 2003.

[30] Kobayashi Hideki, "A Method of Life Cycle Planning for Product Eco-improvement," *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, No.8, pp.27-37, 2000.

[31] 日本工業規格(JIS), "JIS 14040 環境マネジメントーライフサイクルアセスメントー原則及び枠組み," 2006.

[32] Ravipudi Venkata Rao, and K.K. Padmanabhan, "Selection of best product end-of-life scenario using digraph and matrix methods," Journal of Engineering Design, Vol.21, No.4, pp.455-472, 2010.

[33] Kwak M, Harrison M. Kim, "Evaluating End-of-Life Recovery Profit by a Simultaneous Consideration of Product Design and Recovery Network Design," *Journal of Mechanical Design, ASME*, Vol.132, 2010.

[34] Shinichi Fukushige, Eisuke Kunii, Kazuhiro Yamamoto, and Yasushi Umeda, “A Design Support System for Scenario-based Lifecycle Design,” *Proc. of ASME 2011 IDETC/CIE 2011: 14th DFMLC*, Washington DC, USA, DETC2011-47447 (CD-ROM), 2011.

[35] Keijiro Masui, “Current Status of Environmentally Conscious Design among Japanese Manufacturers,” *International Journal of Automation Technology*, Vol.3, No.1, 2009.

[36] Tsai-C. Kuo, Samuel H. Huang, Hong-C. Zhang, “Design for manufacture and design for ‘X’: concepts, applications, and perspectives,” *Computers & Industrial Engineering*, Vol.41, pp.241-260, 2001.

[37] Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston Knight, “改訂版 生産コスト削減のための製品設計 –Boothroyd の DFMA-,” 日経 BP 社, 1998.

[38] Boothroyd, G., and Radovanovic, P., “Estimating the cost of machined components during the conceptual design of a product,” *Annals of the CIRP*, Vol.38, No.1, 1989.

[39] 芝池成人, “環境を考慮した製品の材料選択,” *日本金属学会誌*, Vol.65, No.7, pp.548-556, 2001.

[40] 大橋敏二郎, 弘重雄三, “分解性評価法,” *精密工学会誌*, Vol.64, No.4, pp.503-507, 1998.

[41] Hidefumi Wakamatsu, Minoru Matsuishi, Eiji Morinaga, and Eiji Arai, “Disassembly Support System for Used Products Considering Destruction of Their Parts,” *Service Robotics and Mechatronics*, pp.37-42, 2010.

[42] Ke Xing, and Martin Belusko, “Design for Upgradability Algorithm: Configuring Durable Products for Competitive Reutilization,” Journal of Mechanical Design, Vol.130, pp.111102-1-111102-14, 2008.

[43] N. Perry, A. Bernard, F. Laroche, and S. Pompidou, “Improving design for recycling – Application to composites,” *Annals of the CIRP*, Vol.61, pp.151-154, 2012.

[44] Takahiro Mizuno, Eisuke Kunii, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, “Recyclability Evaluation of LCD TVs Based on End-of-Life Scenarios,” *Proc. of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, Berkeley, USA, pp.179-183, 2012.

[45] E. Masanet, R. Auer, D. Tsuda, T. Barillot, and A. Baynes, “An assessment and prioritization of “design for recycling” guidelines for plastic components,” *Proc. of 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp.5-10, 2002.

[46] C. Telenko, Carolyn C. Seepersad, and Michael E. Webber, “A Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines,” *Proc. of IDETC/CIE 2008 ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2008/49651, 2008.

[47] C. Telenko, Carolyn C. Seepersad, and Michael E Webber, “A Method for Developing Design for Environment Guidelines for Future Product Design,” *Proc. of IDETC/CIE 2009 ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in*

Engineering Conference, DETC2009-87389, 2009.

[48] K. L. Edwards, “Towards more strategic product design for manufacture and assembly: priorities for concurrent engineering,” *Materials and Design*, Vol.23, pp.651-656, 2002.

[49] 財団法人日本環境協会, エコマーク商品類型（認定基準）, http://www.ecomark.jp, 2010.

[50] Carlo Vezzoli, and Dalia Sciama, “Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 12, pp.1319-1325, 2006.

[51] 澤村淑郎, “実践 PLM 構築,” 工業調査会, 2006.

[52] 久次昌彦, “図解でわかる PLM システムの構築と導入,” 日本実業出版社, 2007.

[53] Siemens HP, http://www.plm.automation.siemens.com/ja_jp/products/teamcenter/ index.shtml.

[54] ライフサイクルアセスメント研究センター，テーマ別研究：LIME，産業技術総合研究所，http://unit.aist.go.jp/lca-center/ci/activity/project/lime/index.html, 2005.

[55] Yasushi Umeda, Akira Nonomura, and Tetsuo Tomiyama, “Study on Life-cycle Design for the Post Mass Production Paradigm,” *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol.14, No.2, pp.149-161, 2000.

[56] 畑村洋太郎, “実際の設計　機械設計の考え方と方法,” 日刊工業新聞社, 1988.

[57] 移動電話国内出荷台数実績，一般社団法人 電子情報技術産業協会（JEITA）HP, http://www.jeita.or.jp/japanese/.

[58] 主な減価償却資産の耐用年数（器具・備品），国税庁 HP, https://www.keisan.nta.go.jp/survey/publish/30930/faq/30975/faq_32960.php.

[59] 減価償却資産の耐用年数表，横浜市 HP, http://www.city.yokohama.lg.jp/zaisei/citytax/shizei/pdf/beppyou1-8kigu-bihin.pdf.

[60] 寿命について，オリエンタルモーター 技術資料, http://www.orientalmotor.co.jp/knowledge/technical/pdf/Jumyou_Motor_Tech.pdf.

[61] 社団法人 電気通信事業者協会（TCA） HP, プレリリース（平成 23 年度携帯電話・PHS におけるリサイクルの取り組み状況について）, http://www.tca.or.jp/, 2012.

[62] 中島謙一，山本圭介，中野加都子，黒田光太郎，原田幸明，長坂徹也，“関与物質総量（TMR）に基づく使用済み携帯電話リサイクルフロー解析,” *Journal of Life Cycle Assessment*, Vo.2, No.4, pp.341-346, 2006.

[63] 社団法人 電気通信事業者協会（TCA）, “携帯電話・PHS のリサイクルについて,” http://www.env.go.jp/council/03haiki/y0324-04/mat07.pdf.

[64] 内閣府経済社会総合研究所 景気統計部, “消費動向調査 調査結果.”

[65] JPF グループ環境報告書 2009, CO2 排出量の表示, http://www.jpf-net.co.jp/pdf/kan091013.pdf.

[66] Carbon Footprint of Products, “カーボンフットプリント制度試行事業 CO2 換算量共通原単位

データベース ver. 4.01,”
http://www.cms-cfp-japan.jp/calculate/verify/pdf/kokai-co2kasanryou-db20110331.pdf.
[67] 竹嶋厚美, 藤波岳史, 山田妃佐子, “携帯電話の LCA 分析,”
http://www.yc.tcu.ac.jp/~itsubo-lab/research/pdf/casestudy/cs2005-c.pdf, 2005.
[68] 中村亮, 大内昇輔, 湯龍龍, 伊坪徳宏, “携帯電話用リチウムイオン電池の LCA 分析,”
http://www.yc.tcu.ac.jp/~itsubo-lab/research/pdf/graduate/slide2006-11.pdf.
[69] 総務省 統計局, 統計データ 日本の統計, http://www.stat.go.jp/data/nihon/index.htm.
[70] TOKAI 産業用本部 HP, 工業炉総合案内, http://www.tokai.or.jp/tokai/kog/index.html.
[71] IT media Mobile ニュース記事, “大画面スライドの「D903i」店頭に並ぶ－新規は 3 万円台前半,” http://www.itmedia.co.jp/mobile/articles/0611/14/news048.html.
[72] 田中貴金属工業, 貴金属相場情報, http://gold.tanaka.co.jp/index.php.
[73] モバイル・リサイクル・ネットワーク, “個人情報消去に関する方針,” 社団法人 電気通信事業者協会 HP, http://www.mobile-recycle.net/index.html.
[74] 政府広報オンライン お役立ち情報, “家電リサイクル法の対象機器が追加されます,”
http://www.gov-online.go.jp/useful/article/200903/3.html.
[75] パナソニック・エコロジーセンター（PETEC）にてインタビュー, 2010.
[76] 関西リサイクルシステムズにてインタビュー, 2010.
[77] 環境省 中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会 特定家庭用機器の再商品化・適正処理に関する専門委員会, “追加品目に含まれる有害物質の取り扱いについて,”
http://www.env.go.jp/council/03haiki/y0319-07/mat03.pdf.
[78] 特許「蛍光管回収容器およびそれを用いた蛍光管の回収方法、液晶表示装置の再資源化方法」, 公開番号 特開 2009－113871 (P2009－113871A), シャープ株式会社.
[79] 日本経済新聞 2012 年 12 月 26 日朝刊, “シャープ 液晶 TV 完全再利用 パネルを水質浄化剤,” 2012.
[80] 八木 淳一, 熊澤 孝明, 中谷 隼, 根本 武, 馬場 研二, 弘重 雄三, 梅田 靖, 高田 祥三, “平成 19 年度グローバル製品の資源循環における低環境負荷・易資源循環製品設計技術に関する調査研究報告書,” 日本機械工業連合会, 2008.
[81] recycling lives HP, http://www.recyclinglives.com/.
[82] 井上洋一郎, 新貝雅紀, 藤田淳司, 宮武宏彰, 木下裕介, “中国市場向け配電線用リサイクル設備のプロダクトデザイン,” *日本機械学会 第19 回設計工学・システム部門講演会講演論文集*, 2105, 2009.
[83] 経済産業省（METI）, “使用済小型家電の回収モデル事業の報告（レアメタル回収・環境管理）総括,” 資料 3-2, pp.9.
[84] 中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会特定家庭用機器の再商品化・適正処理に関する専門委員会 議事次第資料, 環境省（MoE）, 2008.
[85] 大阪府リサイクル社会推進会議, “蛍光管回収等に関する実体,”

http://www.epcc.pref.osaka.jp/warec/report/16/16_4_1.pdf.

[86] CODDE, “エンドオブライフ回収に配慮した電気電子機器の設計（Eco’DEEE）,” http://www.codde.fr/files/Eco_DEEE_Rapport_final_sept09_codde_bv.pdf, 2008,（フランス語）.

[87] Maine Department of Environmental Protection, Maine Public Utilities Commission, “REPORT REGARDING THE RECYCLING OF FLUORESCENT LAMPS AND CONSUMER EDUCATION EFFORTS,” http://www.efficiencymaine.com/docs/depcflreport.pdf, 2008.

[88] 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・電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における品目追加等検討会, “特定家庭用機器の品目追加・再商品化等基準に関する報告書,” 環境省（MoE）, http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=12151&hou_id=10201, 2008.

[89] 早田輝信, “家電シュレッダープラスチック選別の最新動向,” 廃棄物循環資源学会・企画セッション, http://jsmcwm.or.jp/recycle/hayata090918.pdf, 2009.

[90] 朝日新聞 2008 年 11 月 18 日朝刊, “パナソニックエコテクノロジーセンター選別技術,” 2008.

[91] 財団法人 家電製品協会, “家電リサイクル 年次報告書 平成 22 年度版（第 10 期）,” http://www.aeha.or.jp/recycling_report/pdf/kadennenji22.pdf, 2011.

[92] J. R. Peeters, J. R. Duflou, et al, “Effect of boundary conditions on the end of life treatment of LCD TVs,” CIRP Annals Manufacturing Technology, vol. 1, 2013.

[93] 日本貿易振興機構（JETRO）, “「電気・電子機器廃棄物」（WEEE）指令及び「電気・電子機器における特定有害物質の使用制限」（RoHS）指令（EU）,” JETRO ユーロトレンド Report 5, 2003.

[94] アップル HP, https://www.apple.com/jp/.

[95] 三洋株式電気会社, “2008 年度 SANYO 製品におけるライフサイクルアセスメント評価結果,” 2008.

[96] LCA 日本フォーラム, JLCA-LCA データベース 2004 年度 2 版.

[97] 神田泰宏, 中神保秀, “製品サービスシステム（PSS）とは何か ～PSS 研究及び関連政策に関する考察～,” 財団法人地球環境戦略研究機関 産業と持続可能社会プロジェクト（IGES）Kansai Research Centre Discussion Paper, 2006.

発表論文

（注）本学位論文と関連のある発表論文に*印を付した.

原著論文（査読付）

1. Yusuke Kishita, Eisuke Kunii, Shinichi Fukushige, Yasushi Umeda, and Jun Fujimoto, “Scenario Analysis of Global Resource Circulation with Traceability Index Targeting Sustainable Manufacturing,” *Int. J. Automation Technology (IJAT)*, Fuji Technology Press, Vol.3, No.1, pp.3-10, 2009.

2*. 福重真一, 松浦剛, 國井英輔, 梅田靖, “ライフサイクルシナリオに基づく製品設計のための統合支援環境の提案,” *精密工学会誌*, 精密工学会, Vol.78, No.2, pp.143-148, 2012.

3*. Yasushi Umeda, Shinichi Fukushige, Eisuke Kunii, and Yuki Matsuyama, “LC-CAD: A CAD system for life cycle design,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, CIRP The International Academy for Production Engineering, Vol.61, pp.175-178, 2012.

4*. Eisuke Kunii, Takeshi Matsuura, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, “Proposal of Consistency Management Method Between Product and its Life Cycle for Supporting Life Cycle Design,” *Int. J. of Automation Technology (IJAT)*, Fuji Technology Press, Vol.6, No.3, pp.272-278, 2012.

国際学会講演論文（フルペーパー査読付）

1*. Eisuke Kunii, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, “Development of CAD System for Life Cycle Scenario-Based Product Design,” *Proc. of 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2011)*, pp.118-123, Braunschweig, Germany, May.2-4, 2011.

2. Shinichi Fukushige, Eisuke Kunii, Kazuhiro Yamamoto, and Yasushi Umeda, “Design Support System for Scenario-Based Lifecycle Design,” *ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2011-47447, Washington, DC, USA, Aug.28-31, 2011.

3. Takahiro Mizuno, Eisuke Kunii, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, “Recyclability Evaluation of LCD TVs Based on End-of-Life Scenarios,” *Proc. of 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2012)*, pp.179-183, Berkeley, USA, May.23-25, 2012.

4*. Shinichi Fukushige, Yuki Matsuyama, Eisuke Kunii, and Yasushi Umeda, “A Computational Design Environment for Product Lifecycle,” *Proc. of 2012 Asian Conference on Design and*

Digital Engineering, *Niseko*, Hokkaido, Japan, Paper No. 100097, 2012.

5. Yuki Matsuyama, Eisuke Kunii, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, "Proposal of Life Cycle Planning Support Method for Life Cycle CAD," *Proc. of 2012 Asian Conference on Design and Digital Engineering*, Niseko, Hokkaido, Japan, Paper No. 100085, 2012.
6. Shinichi Fukushige, Takahiro Mizuno, Yuki Matsuyama, Eisuke Kunii, and Yasushi Umeda, "Quantitative Design Modification for the Recyclability of Products," *Proc. of 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE2013)*, Singapore, 2013. (accepted)

国際学会講演論文（採択審査のみ）

1. Eisuke Kunii, Yusuke Kishita, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, "Approach for Describing Long-term Scenarios toward Sustainable Resource Circulation in Asia," *The 10th* International *Symposium on East Asian Resources Recycling Technology (EARTH 2009)*, pp.38-41, Jejudo, Korea, Nov.2-6, 2009.
2. Eisuke Kunii, Yusuke Kishita, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, "A Trial for Describing Long-term Scenarios toward Sustainable Resource Circulation," *Sixth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, pp.945-950, Sapporo, Japan, Dec.7-9, 2009.

3*. Eisuke Kunii, Takeshi Matsuura, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, "Development of a Consistency Management System between Product and Life Cycle Flow in Life Cycle CAD," *Seventh* International *Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, pp.831-836, Kyoto, Japan, Nov.30-Dec.2, 2011.

4. Yuki Matsuyama, Eisuke Kunii, Kazuhiro Yamamoto, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, "Proposal of Design Environment for Life Cycle Scenario," *Seventh* International *Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, pp.821-826, Kyoto, Japan, Nov.30-Dec.2, 2011.

5*. Yuki Matsuyama, Eisuke Kunii, Shinichi Fukushige, and Yasushi Umeda, "A CAD System for Product Life Cycle Design," *Proceedings of 10th International Conference on EcoBalance 2012*, Yokohama, Japan, D1-02, 2012.

国内学会講演論文（査読無し）

1. 國井英輔，木下裕介，福重真一，梅田靖，"持続可能なグローバル循環に向けたシナリオ分析とトレーサビリティ評価，" *精密工学会2008 年度秋季大会学術講演論文集*, pp.621-622，宮城, 2008 年 9 月.
2. 國井英輔，木下裕介，福重真一，梅田靖，"持続可能なグローバル循環構築のためのトレーサビリティ評価指標の開発，" *エコデザイン2008 ジャパンシンポジウム*, B23-1，東京, 2008 年 12 月.

3*. 國井英輔, 福重真一, 梅田靖, “ライフサイクル戦略の策定とその製品設計への展開を支援するCADシステムの開発（第1報） ライフサイクル戦略に基づいた製品設計のための計算機支援,” *精密工学会 2010 年度秋季大会学術講演論文集*, pp.163-164, 愛知, 2010 年 9 月.

4*. 福重真一, 國井英輔, 梅田靖, 川田康毅 “ライフサイクルシナリオに基づく製品設計のための計算機環境の開発（第 1 報 シナリオとの連携による製品モデルの段階的詳細化）,” *日本機械学会 第20 回設計工学・システム部門講演会論文集*, 2410, 東京, 2010 年 10 月.

5*. 福重真一, 國井英輔, 川田康毅, 梅田 靖, “資源循環戦略と製品構造の連携による統合型ライフサイクル設計手法,” *Design シンポジウム 2010 講演論文集*, 東京, dss10-0031, USB storage, 2010 年 11 月.

6*. 國井英輔, 福重真一, 梅田靖, “製品のライフサイクル戦略に基づいた製品設計支援環境の構築,” *エコデザイン 2010 ジャパンシンポジウム*, 3-7, 東京, 2010 年 12 月.

7*. 松浦剛, 國井英輔, 福重真一, 梅田靖, “ライフサイクル戦略の策定とその製品設計への展開を支援するCADシステムの開発（第2報） ライフサイクルシナリオと連携した製品設計支援システムの構築,” *精密工学会 2011 年度春季大会学術講演論文集*, pp.689-690, 東京, 2011 年 3 月.

8*. 松山祐樹, 國井英輔, 福重真一, 梅田靖, “ライフサイクル戦略の策定とその製品設計への展開を支援する CAD システムの開発（第 3 報） ライフサイクルフロー設計プロセスの提案,” *精密工学会 2011 年度秋季大会学術講演論文集*, pp735-736, 石川, 2011 年 9 月.

9*. 國井英輔, 松浦剛, 福重真一, 梅田靖 “ライフサイクルシナリオに基づく製品設計のための計算機環境の開発（第2報 製品とライフサイクルフローの間の整合性管理）,” *日本機械学会 第21 回設計工学・システム部門講演会論文集*, pp.565-570, 山形, 2011 年 10 月.

10*. 國井英輔, 鹿田憲吾, 福重真一, 梅田靖, “ライフサイクル戦略の策定とその製品設計への展開を支援するCADシステムの開発（第4報） ライフサイクルを通じて変化する製品状態の表現,” *精密工学会 2012 年度春季大会学術講演論文集*, pp.929-930, 東京, 2012 年 3 月.

11. 水野貴広, 谷野敏樹, 國井英輔, 福重真一, 梅田靖, “End-of-Life に基づいたリサイクル性評価に関する研究,” *精密工学会 2012 年度春季大会学術講演論文集*, pp.919-920, 東京, 2012 年 3 月.

12*. 國井英輔, 福重真一, 梅田靖, “ライフサイクル戦略の策定とその製品設計への展開を支援するCADシステムの開発（第4報） ライフサイクル CAD システムを用いた設計プロセスの提案,” *精密工学会 2012 年度秋季大会学術講演論文集*, pp.141-142, 福岡, 2012 年 9 月.

13. 福重真一, 谷野敏樹, 水野貴広, 松山祐樹, 國井英輔, 梅田 靖, “製品のリサイクル可能率に基づくリサイクル性設計手法,” *精密工学会 2012 年度秋季大会学術講演会講演論文集*, pp.131-132, 福岡, 2012.

14*. 松山祐樹, 國井英輔, 鹿田憲吾, 福重真一, 梅田靖, “ライフサイクルシナリオに基づく製品設計のための計算機環境の開発 （第 3 報 ライフサイクルを通して変化する製品の表現手法の提案）,” *日本機械学会 第22 回設計工学・システム部門講演会論文集*, 1102, 広島, 2012

年 9 月.

15*. 水野貴広, 谷野敏樹, 國井英輔, 福重真一, 梅田靖, “ライフサイクルシナリオに基づく製品設計のための計算機環境の開発（第 4 報 液晶 TV を対象にしたリサイクル性設計への適用）,” *日本機械学会 第22 回設計工学・システム部門講演会論文集*, 1103, 広島, 2012 年 9 月.

16*. 福重真一, 國井英輔, 松山祐樹, 梅田靖, “製品とライフサイクルの設計を統合するCAD システム,” *Design シンポジウム 2012 講演論文集*, 京都, 2012 年 10 月.