

持続可能な社会の実現に向けたアップグレード製品 サービスシステム設計手法

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2019-07-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山田, 周歩 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/20249

明治大学大学院理工学研究科

2018年度

博士学位請求論文

持続可能な社会の実現に向けたアップグレード
製品サービスシステム設計手法

(Design Method of Upgradable Product
Service System for Sustainable Society)

学位請求者 機械工学専攻

山田 周歩

目次

1. 緒言	
1.1. 研究背景	P.1
1.2. 本論文の構成	P.4
2. 製品ライフサイクルと環境配慮設計	
2.1. 製品ライフサイクル	P.5
2.2. ライフサイクルオプションの種類と定義	P.7
3. セットベース設計手法	
3.1. ポイントベース設計とセットベース設計	P.8
3.2. Preference Set-based Design (PSD)手法	P.10
3.2.1. Set Representation (設計変数, 要求性能集合の表現)	P.11
3.2.2. Set Propagation (設計解集合の伝播)	P.12
3.2.3. Set Modification (設計変数, 要求性能集合の修正)	P.13
3.2.4. Set Narrowing (設計解集合の絞り込み)	P.14
4. アップグレード製品サービスシステム設計手法の提案	
4.1. アップグレード製品サービスシステムの概要	P.16
4.2. アップグレード製品サービスシステムの関連研究	
4.2.1. アップグレード設計支援システム	P.18
4.2.2. アップグレード計画構成手法	P.20
4.2.3. アップグレード設計支援 CAD システム	P.21
4.2.4. セットベース設計に基づくアップグレード製品設計手法	P.25
4.2.5. アップグレード可能性に関する調査研究	P.26
4.2.6. アップグレード製品の購入意欲に影響を与える因子	P.27
4.2.7. ライフサイクルオプションの適合性評価	P.28
4.2.8. ライフサイクルプランニング手法	P.29
4.2.9. トータルパフォーマンス分析	P.29
4.3. アップグレード製品サービスシステム設計における課題点	P.30
4.4. 本研究の目的, 提案手法の概要	
4.4.1. 既存手法の課題点	P.32
4.4.2. 提案手法の目的, 概要	P.33
4.5. 提案手法の構成	
4.5.1. 顧客ライフスタイルの調査, 想定	P.35
4.5.2. 提供サービスおよびサービス構成要素の設定	P.36
4.5.3. 提供サービス有用性の初期検証	P.37
4.5.4. サービス構成要素のライフサイクルオプションの設定	P.41
4.5.5. サービス提供期間および更新サイクルの決定	P.47

5. 適用事例	
5.1. 適用事例の概要, 目的	P.54
5.2. 事例 1: ノートパソコンのリースビジネス	
5.2.1. 顧客および提供サービスの決定 (事例 1)	P.56
5.2.2. サービスの有用性検証 (事例 1)	P.56
5.2.3. コンポーネントのライフサイクルオプション適合性評価	P.58
5.2.4. 更新頻度, サービス提供期間の妥当性検証 (事例 1)	P.63
5.3. 事例 2: 家具家電レンタルビジネス	
5.3.1. 顧客および提供サービスの決定 (事例 2)	P.68
5.3.2. サービスの有用性検証 (事例 2)	P.70
5.3.3. アップグレード方法の設定, サービス提供計画の導出と検証	P.74
5.4. 事例 3: 複合機のリースビジネス	
5.4.1. 顧客および提供サービスの決定 (事例 3)	P.82
5.4.2. 評価視点変数, シナリオの定義	P.85
5.4.3. 更新頻度の導出と妥当性の検証	P.90
6. 結言	
6.1. 結論	P.93
6.2. 今後の課題	P.95
謝辞	P.97
参考文献	P.98

1. 緒言

1.1. 研究背景

2015年の国連サミットにおいて、人間、地球および繁栄のための行動計画として持続可能な開発目標（SDGs: Sustainable Development Goals）が掲げられた(United Nations, 2015b). その中で17の目標の1つに持続可能な消費と生産のパターンの確保が述べられた. すなわち、旧来の大量生産、大量消費、大量廃棄型の社会から脱却し、持続可能な社会を達成することである. ゆえに、企業は省使用資源、省廃棄資源、低環境負荷を実現する製品やサービスの開発を行うと同時に、消費者も種々の環境問題を強く意識し、必要十分な消費活動を行うことが求められる(環境省, 2014). これに対して、欧州では、原材料に依存せずに、既存の製品や遊休資産の活用などによって価値創造の最大化を図る経済システムである循環経済（Circular Economy）のコンセプトが提唱され、政策パッケージとして公開されている(European Commission, 2017). 一方でこれらのコンセプトは、ものづくりの能力が相対的に低下してきたヨーロッパ内での製品再循環モデルに偏重することが懸念されており、そのため日本では、アジア等の新興国の生産能力を循環経済のシステム境界内に組み込み、さらに、従来機能停止によってその製品ライフサイクルが終了した製品に潜在する残存価値（ブランド価値、構成部品価値、部材価値、素材価値等）を引き出して世界規模で活用することを目的とした広域マルチバリュー循環のコンセプトが議論、提案されている(原田, 2018). これまでも例えば、1997年に採択された京都議定書では、目標期間を2008年から2012年に定め、温室効果ガス（CO₂、メタン、一酸化二窒素、HFC：Hydrofluorocarbon、PFC：Perfluorocarbon、SF₆：Sulfur hexafluoride）の1990年比の削減目標が定められ、日本では6%の削減、先進国全体で5%の削減目標が定められた(環境省, 2000). また、2015年に開催された気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）において新たな法的枠組みとなるパリ協定を含むCOP決定が採択された(United Nations, 2015a).

これらのコンセプトにおいて、資源問題解決や製品再循環に対するアプローチは主として省資源化と脱物質化の2つに大別される. 前者は使用および廃棄する資源を削減することを意味し、リユースやリマニュファクチャリング(Masui, 2009)、アップグレード設計(Yamada et al., 2016)を始めとする環境配慮設計がこれに属する. 後者は、モノではなくコトや機能を提供するアプローチを意味し、機能販売（サービスビジネス）や製品サービスシステム（Product Service System: PSS）(Mont, 2002)がこれに属し、過去の研究において、そのモデル化や設計手法が提案されてきた(下村他, 2005). 製品サービスシステムは、サービスを主体として製品を提供し、受容者に価値観やライフスタイルを提供するビジネスモデルであり、複合機メーカーやカーシェアリングを始めとする種々の企業が実践している(神田他, 2006). 持続可能なビジネスモデルを構築することが企業にとって必要不可欠であるが、そのためには、長期間に渡って顧客が使用し続けることを望む製品とサービスの設計が必要である. 先に述べた環境問題の観点を含めれば、サー

ビスに付属する製品は、消費者の要求を長期間満足させるのみではなく、低価格でありながらその機能を省使用資源かつ省廃棄資源で達成できることが必要不可欠である。しかし、消費者は新しい技術や機能を持つ新製品が登場すると、たとえ自身の持つ製品が故障していなくても、より良いユーザビリティを求めて新製品に買い替える場合がある (Pialot et al., 2014)。ゆえに、時間の経過とともに陳腐化した機能やサービスを更新し、それに対応可能な製品を提供し、その維持管理を行うビジネスモデルが求められており、必要最小限の製品構成要素を交換、追加することによって製品やサービスの陳腐化を予防し、長期間に渡って低使用、廃棄資源で消費者に先進の機能、ユーザビリティを提供するアップグレード製品サービスシステム (Upgradable Product Service System: Up-PSS) の考え方が提案されている (Pialot et al., 2017)。図 1.1 にアップグレードによる価値の再向上、価値寿命の延長の概略図を示す。先行研究によって、Up-PSS で提供されるアップグレード可能な製品 (アップグレード製品) は、従来の売り切り型の製品と比較して、高頻度の機能向上を実現しながら、製品ライフサイクル全体で低ライフサイクルコスト、低環境負荷、高利益を同時に達成可能であることが示されている (Inoue et al., 2016)。すなわち、Up-PSS は省資源化と脱物質化を融合した概念であり、自然環境に対して低負荷、製造企業に対して高利益、消費者に対して低価格を実現するため、これら 3 者の持続可能性に対して有用であることが示されている。

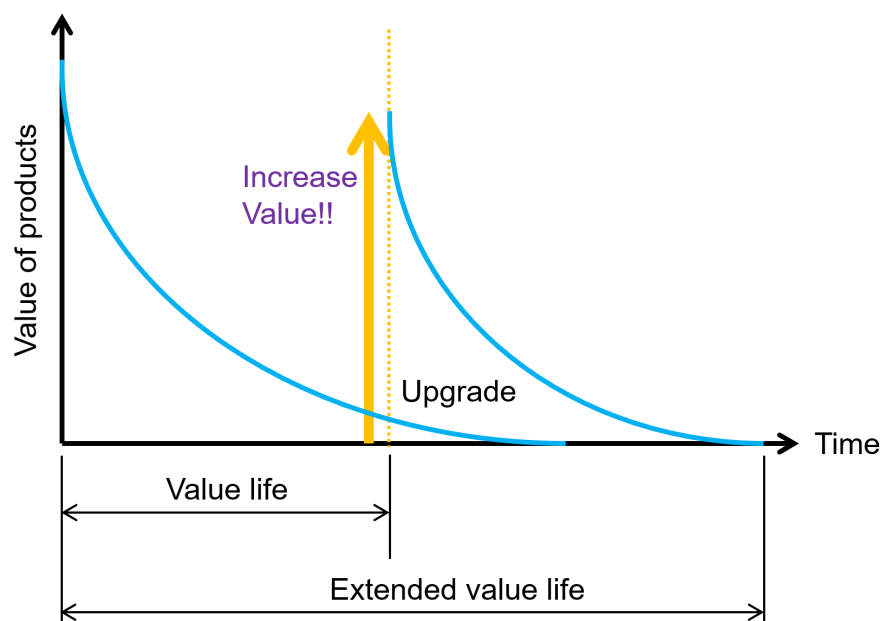


Fig. 1.1 Schematic illustration of the change in the product value with time (Bracke et al., 2014)

製品のアップグレードは、ソフトウェアによるアップグレードとハードウェアによるアップグレードの 2 種類に大別される。現状では、ソフトウェアによるアップグレードはパソコンやスマートフォンの OS やアプリケーションソフトウェア等を通して世間に十分浸透していると考えられる。例えば、株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメントが 2006 年に発売した PlayStation®3 では、2010 年に行われたシステムアップグレ

ードにてその前年に制定された Blu-ray 3D 規格に対応させた。また近年では、Microsoft が Windows 7 または Windows 8.1 がインストールされたパソコンを対象に Windows 10 の無償アップグレードを 2015 年 7 月から実施し、音声アシスト機能や新しいブラウザ等の新機能をユーザに提供し、半年ごとに大型のアップデートを配信することでユーザビリティの向上が行われている。ハードウェアによるアップグレードは現状では一般的ではないが、一部のメーカーがハードウェアのアップグレード設計を行った製品の販売を行っている。アイルランドの iameco Micropro Computers は、規格化されたマザーボードを使用することでアップグレードを可能としたノートパソコン d4r laptop を設計、販売している。この製品は、部品点数の削減、再生可能材、リサイクル材の使用等により、通常のノートパソコンと比較して生産時の温室効果ガス排出量を 30%、廃棄物質量を 70%、水資源使用量を 75%以上削減可能とした(Ospina et al., 2014)。さらに、リコーにおいては、一眼レフカメラの K-1 Mark II 発売時に期間限定で前機種である K-1 のアップグレードサービスを展開した。このサービスでは、K-1 の希望小売価格の 25%程度の出費で内部のロジックボードを交換し、K-1 Mark II と同等の機能へアップグレードを行うものであった。

本研究では、アップグレード製品サービスシステムの設計支援を目的とする。本研究で想定する設計手法は、①サービスの発案、②サービスの構成要素の決定、③提供サービス有用性の初期検証、④サービス構成要素の更新手段（ライフサイクルオプション）の決定、⑤更新頻度およびサポート期間の決定、およびその妥当性の検証、⑥更新を可能とするハードウェアの設計、⑦展開後のサービスのマネジメントの 7 つのプロセスで構成されるが、提案手法は、①サービスの発案から⑤更新頻度およびサポート期間の決定までの 5 つのプロセスにおける設計支援を目的とし、各プロセスで用いる発想支援手法や、意思決定支援手法、設計手法の提案を行う。また、持続可能な社会を実現するためには、環境のみならず、製品サービスの実践者である企業や、それを享受する消費者の 3 者の持続可能性を考慮する必要があるため、本研究では、低環境負荷量、高利益、低価格（低支出）を同時に実現することを目標として設計手法を提案する。また、アップグレード製品サービスを設計するためには、将来求められる多種多様な機能や、製品および部品のコストを予測する必要があるが、これらは不確実な設計情報を含むため、設計初期段階において正確に予測することは非常に困難である。ゆえに、本研究では不確実な設計情報を範囲値で表し、範囲を有する設計解を導出可能なセットベース設計手法(Sobek, et al. 1999)を拡張した PSD (Preference Set-based Design)手法(Inoue et al., 2013)を用いることで、不確実性を考慮し、低価格と高利益や、高利益と低環境負荷のようなトレードオフ関係にある環境、企業、消費者 3 者の持続可能性を満足させる設計解を導出する。アップグレード製品サービスが既存のビジネスモデルと比較して低環境負荷、高利益、低価格を実現できるように設計することが提案手法の理想像であり、これによって、企業の製品サービスの設計において、アップグレード製品の導入を促進させ、ユーザがアップグレード可能な製品を積極的に購入、使用するような社会システムの実現が本研究の最終的な目的である。

1.2. 本論文の構成

本論文は、全6章で構成される。第1章では、本研究の背景や、アップグレード製品サービスシステム設計の現状、本研究の目的について記述する。

第2章では、製品ライフサイクルや環境配慮設計、各種ライフサイクルオプションについて紹介し、本研究で用いるライフサイクルオプションの定義を記述する。

第3章では提案するアップグレード製品サービスシステム設計手法を実現させる上でキーコンセプトとなる PSD 手法の説明を、従来のポイントベース設計とセットベース設計の特徴と共に記述する。

第4章では、アップグレード製品サービスシステムに関連する先行研究の紹介、アップグレード製品サービスシステム設計における要件や課題点と共に、提案する設計手法のプロセスや詳細を記述する。

第5章では、提案手法を3つの事例（ノートパソコンのリースビジネス、家具家電のパッケージレンタル、複合機のリースビジネスの設計問題）に適用することで、提案手法の有効性を検証する。

第6章では、本論文で達成されたこと、今後本研究が取り組むべき課題点について記述する。

2. 製品ライフサイクルと環境配慮設計

2.1. 製品ライフサイクル

製品ライフサイクルとは、材料調達、材料製造から製品廃棄までの段階、期間を表す。環境配慮設計の中には、リサイクル、リユース、メンテナンス、リマニュファクチャリングなどの手法が存在するが、これらの手法は、製品のライフサイクルの各段階において、環境負荷削減や使用済み製品に潜在する価値の再循環の方法として検討される。製品ライフサイクルと残存価値の再循環の関係を図 2.1 に示す。リサイクル、部品リユース、リマニュファクチャリング、リファビッシュは消費者によって製品が廃棄された後に行われ、材料調達や部品製造、製品製造、流通の各ライフサイクル段階へ各々製品や部品、材料が戻される。一方で、製品リユースやリペアは製品の使用期間中に構成部品やモジュールの交換または追加、ソフトウェアの更新等を行うことにより、製品機能や製品価値を維持、向上させることで、ユーザによる廃棄行動自体を抑制し、製品に潜在する使用価値を循環させることで、消費者に製品の継続使用を促す。リマニュファクチャリングやリファビッシュは、製品を回収後、分解、破壊、洗浄、再組立て等を行う必要があるが、リユースやリペアの場合（特にアップグレードを伴う場合）は、回収を行わずに実施できる場合があり、その場合所有権が移転しない。すなわち、所有権が移転しないことから、これまでの使用者や使用状況、さらに製品の信頼性に対する不安感から、従来リユース品の購入、使用を避けてきた消費者を循環型製品サービスのシステム境界に参加させることが可能となる。さらに、リペアやリユースを行う際に製品をアップグレードさせてより高い価値を製品に付与することは、残存する製品の使用価値を向上させ、その循環をより促進させることが可能となる。そのため、アップグレード設計やその製品サービスの世間への浸透は、リサイクルプラント等への負担を低減できる可能性がある。また、廃棄費用が掛からないという理由で不法に処理されてきた産業廃棄物を低減できることや、中国のプラスチックごみの輸入規制に起因する廃棄物の滞留問題(渡邊, 2018)の様に、一部の国に依存した従来の廃棄スキームから脱却する上で、有用な消費と廃棄の枠組みとなる可能性がある。国連大学の報告によると、2014年に全世界で4100万トンの電子廃棄物が発生しており、その約15%である600万トンのみが適切にリサイクル等の処理がされた(Akbar, 2015)。以上から、アップグレードを伴う製品価値の再循環は、これまでの環境配慮設計手法により生産された製品よりも多くのユーザを獲得し、環境汚染の低減に大変有効であると考えられる。

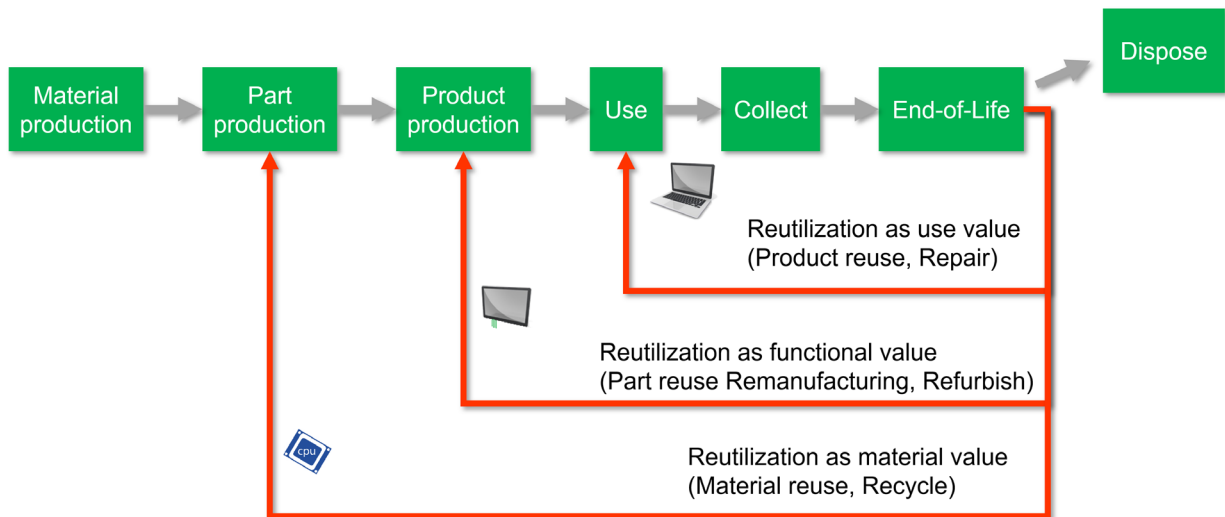


Fig. 2.1 Product lifecycle and residual value reutilization

2.2. ライフサイクルオプションの定義と種類

ライフサイクルオプションは、製品やその部品が製品ライフサイクルにおいて辿る循環経路を示し、リユースやリマニュファクチャリング等がこれに該当する。本研究では、サービス構成要素の更新手段として用いる。各種ライフサイクルオプションはこれまでに、様々な観点から定義、類型化が行われてきたが、厳密かつ一般的な定義が行われておらず、定義の明確化は国際社会が取り組むべき課題の1つである(Italian G7 Presidency, 2017)。G7 ボローニャ環境大臣会議では、リマニュファクチャリング、リファビッシュ、リペア、ダイレクトリユース (RRRDR: Remanufacturing, Refurbish, Repair, Direct Reuse) に対して、その定義の明確化と G7 が果たす役割の検討に関して議論が行われた。また、StEP Initiative はライフサイクルオプション適用時に要する分解の度合い、適用後の機能性の変化、構造やデザインの変化度合いの3つの観点から、リマニュファクチャリング、リファビッシュ、リペア、アップグレードの類型化を行った(StEP Initiative, 2009)。木村らは、3R の観点から上記のライフサイクルオプションのみならず、マテリアルリサイクルやサーマルリサイクルのように、より詳細なオプションへの分類を行っている(木村他, 2004)。本研究では、上記の分類を鑑みると同時に、実際にこれらのライフサイクルオプションが適用され、販売されている製品と、その再生プロセスを調査することで、再生プロセスの差異と適用後の機能性および信頼性(保証)に基づいたライフサイクルオプションの分類を行った。表 2.1 にその分類を示す。

Table 2.1 Differentiation of lifecycle options (山田他, 2018)

Lifecycle option	Disassembly (Inspection) depth	Output specification / reliability
Remanufacturing	Complete disassembly (Part level)	Original functionality and reliability
Remanufacturing with upgrade	Complete disassembly (Part level)	Improved functionality and original reliability
Refurbish	Complete disassembly (Module level)	Original or less functionality and not original reliability
Refurbish with upgrade	Complete disassembly (Module level)	Improved functionality and not original reliability
Repair (Maintenance)	Not complete, only to ensure required specification	Original or less functionality and not original reliability
Repair (Maintenance) with upgrade	Not complete, only to ensure required specification	Improved functionality and not original reliability
Direct Reuse	Not disassemble, Only clean and inspection	Original functionality and not reliability
Long life	Not disassemble, clean and inspection	No change

3. セットベース設計手法

3.1. ポイントベース設計とセットベース設計

本章では、アップグレード製品サービスシステムの設計において、更新の頻度やサポートの期間の設定を行う上でキーコンセプトとなるセットベース設計手法について、従来のポイントベース設計(南, 石川, 2005)との比較やアップグレード製品サービスシステム設計との親和性を踏まえて記述する。ポイントベース設計手法は、図 3.1 に示すように、設計初期段階で 1 つの設計案を決定し、その案を達成する性能を評価し、要求される性能を満たすまで設計案の修正を行う手法である。この手法は、従来の設計から生産へと一方向に順に作業を行っていく方式で適用されてきたが、目標の設計解を導くまでに繰り返し設計案の修正が必要となるため、設計が長期化してコストの増加を引き起こす恐れがある。また、設計案を導くことができても、設計の進行につれて導出した案が仕様変更等で不適切になり、決定した設計案を再び修正しなければならない場合も多い。アップグレード製品サービスシステムの設計においては当初設計段階で決定した 1 つの設計解が、必ず将来に要求される機能、性能を満たしているとは限らない。アップグレードする時期に想定していたアップグレード対象の機能やモジュール以外のアップグレードが必要になった際、ポイントベース設計手法を用いて設計されたアップグレード製品では、アップグレードが行えないだけでなく、アップグレードに対応させるための性能上の余裕（オーバースペック）なども無駄となり、新たに顧客要求に対応する製品構成部品の開発、製造を行えば、従来の製品よりも環境負荷量やコストの大きい製品となってしまう可能性もある。よってポイントベース設計手法では、ユーザビリティや環境負荷量、コストを同時に考慮し、将来の不確実性に柔軟に対応できるアップグレード製品の設計や更新時期の導出が不可能であると考えられる。ゆえに、アップグレード製品サービスシステム設計に適合する設計手法が必要となる。

図 3.1 に示すようにポイントベース設計手法が設計初期段階で 1 つの設計案を決定し、それを何度も評価、修正する手法である一方で、セットベース設計手法は、設計初期段階では取り得る限り幅を持たせたトレードオフの関係を含めた多目的満足解である設計案の集合を与え、設計プロセスが進むにつれて不適切な設計案の除去や新たな条件の付加を行い、最終的に適切な解に収束させる手法である。この手法では、ポイントベース設計手法が抱える問題点である設計案の修正を回避、低減できる可能性があり、最終的な設計案が求まるまでの時間を短縮することができる。セットベース設計はポイントベース設計と比べて、設計初期段階においては設計案集合の収束にある程度の時間を要するが、設計の後期段階では短時間で最適な解を求めることが可能である。図 3.2 にセットベース設計手法における設計解集合の導出の概略図を示す。

本研究では、ユーザ要求の将来予測に含まれる不確実性へ対応するため、更新時期やサポート期間の設定に関連する設計変数をポイント値ではなく範囲値として扱うことで、推定した変数値範囲内であればサービスプロバイダや環境、顧客の持続可能性を同

時に満足させる更新頻度や期間を設計者が設計初期段階で計画できる手法の提案を行う。そのために、顧客満足や環境負荷量、寿命、コストといったトレードオフの関係にある種々の設計変数を同時にかつ範囲値として扱うことが可能なセットベース設計手法(Inoue et al, 2013)を、アップグレード設計に適用する。

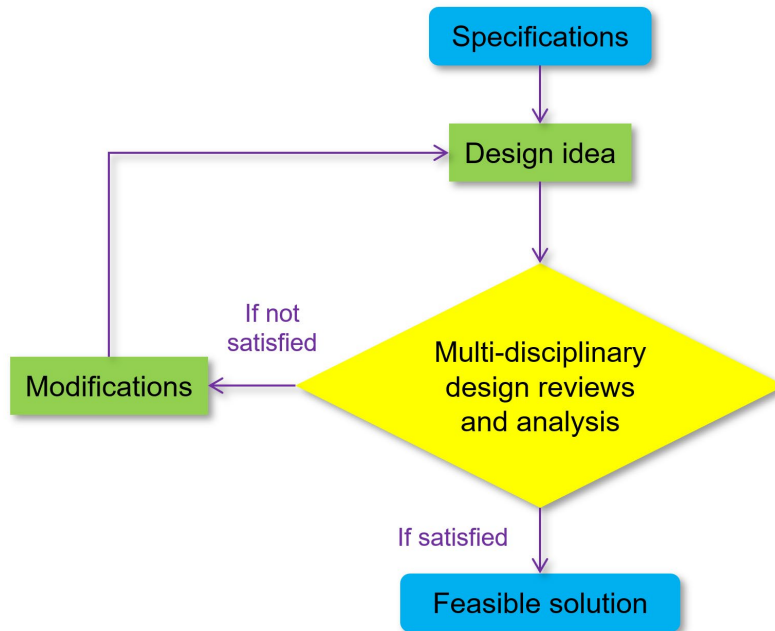


Fig. 3.1 Procedure for the point-based product design method (Murakami et al, 2011)

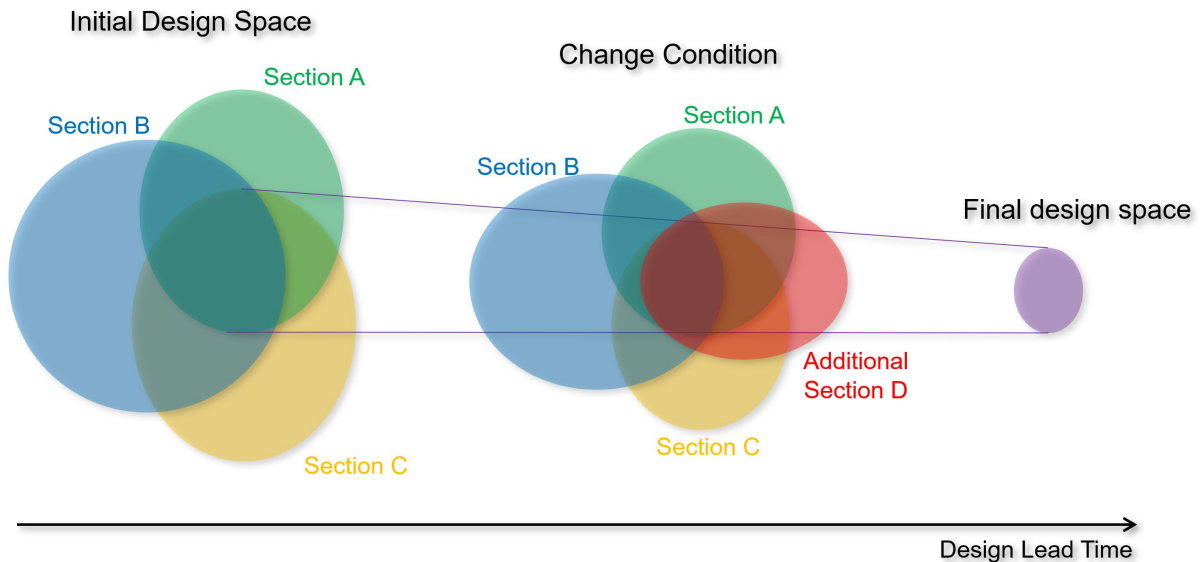


Fig. 3.2 Schematic illustration of set-based product design method (Murakami et al, 2011)

3.2. Preference Set-based Design (PSD)手法

本研究では、設計解を導出するために、初めに可能な限り幅広い解集合を想定し、最終的な解に向けて実行不可能な解を除去することにより、解の集合を徐々に狭めて収束させていくセットベースコンカレントエンジニアリング手法である Preference Set-based Design (PSD)手法(Inoue et al, 2010)を用いる。本手法は、セットベース設計手法を設計者の意図を反映させる選好度 (Preference) の概念を用いて拡張した手法である。PSD 手法は Set Representation, Set Propagation, Set Modification, Set Narrowing の 4 過程で構成される。図 3.3 に PSD 手法のフローを示すとともに、次項にて各過程の詳細を記述する。

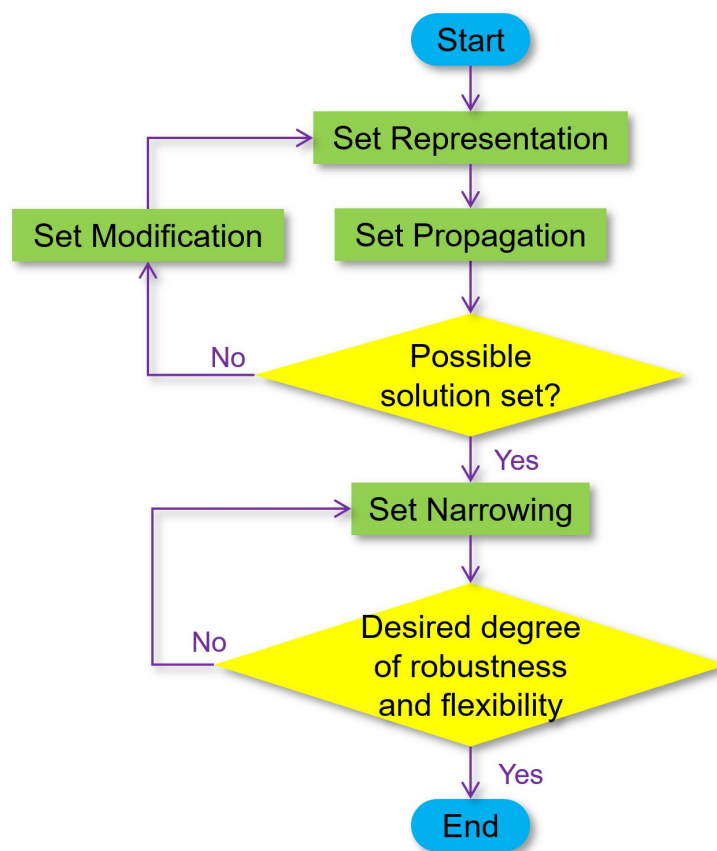


Fig. 3.3 Procedure for the preference set-based design method (Inoue et al, 2010)

3.2.1. Set Representation (設計変数, 要求性能集合の表現)

初めに設計者の意図を設計に反映させるため、設計変数と要求性能の選好度数(PN: Preference Number)を設定する。選好度数とは、集合のなかの好ましい値を示す指標であり、 $[0, 1]$ の値で表される。選好度0は設計者が最低限許容する値の範囲を表し、選好度1は設計者にとって最も好ましい範囲を表す。図 3.4 に要求性能、設計変数の選好度の例を示す。

図 3.4 において設計者は設計変数 X が許容する範囲値を $[X_L, X_U]$ と設定している。この場合 X_L 未満および X_U を超過した値は不適切な範囲であり、 X_a が最も好ましい変数値であることを意味する。一方、設計変数 Y では $[Y_a, Y_b]$ を最も好ましい設計変数範囲と設定し、 $[Y_L, Y_U]$ が許容する範囲であることを意味する。要求性能 A は A_U 以下であれば許容する性能値範囲であり、 A_a 以下であれば最も好ましいことを表している。選好度は設計者の意図によって設計変数 Z の様に複雑な形状に定義される。このように要求性能や設計変数の選好度を設計者は自由に設定することが可能である。

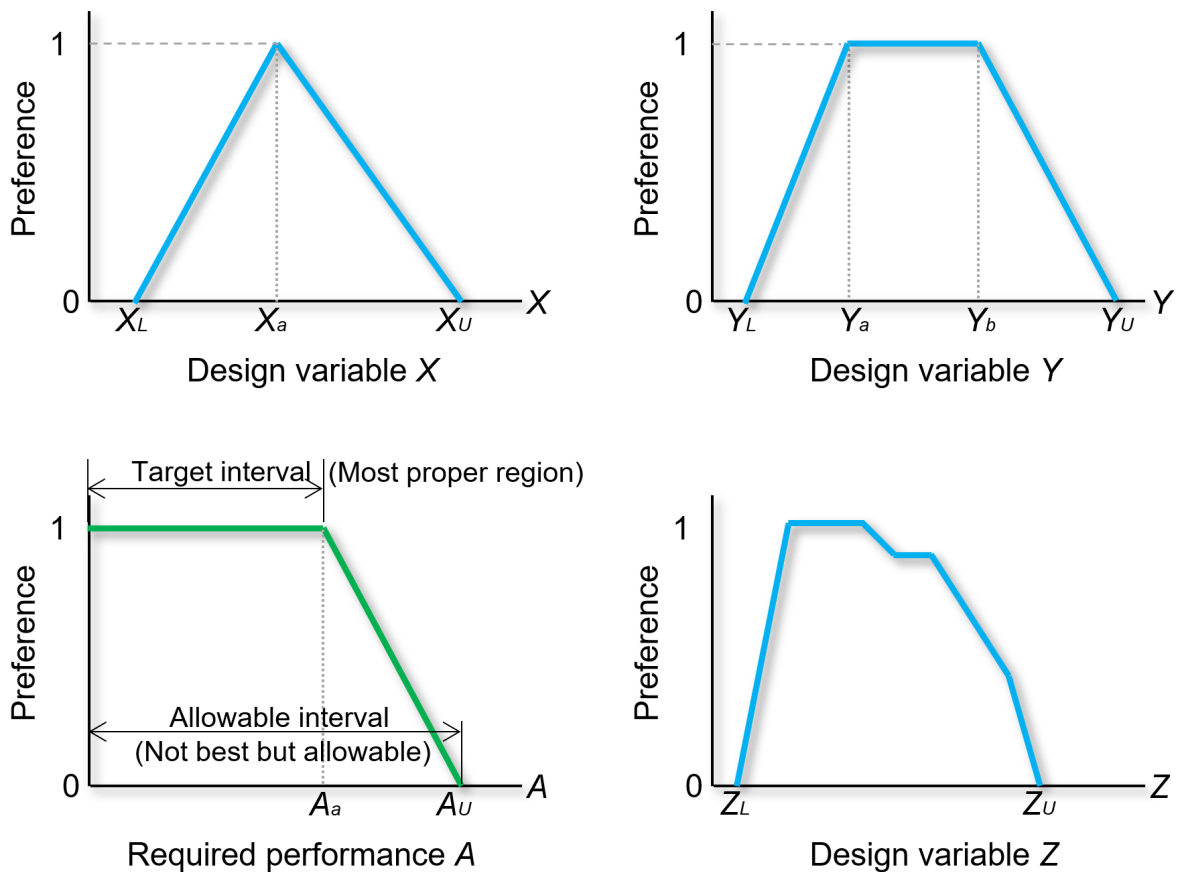


Fig. 3.4 Representation of design variables and required performance criterion

3.2.2. Set Propagation (設計解集合の伝播)

本項は 3.2.1 項で設定した設計変数，選好度の情報を基に，各設計変数の範囲と要求性能および設計変数間の関係式を用いて区間演算を行い，それらの範囲から実現可能な要求性能の可能性分布を算出する．入力である設計変数の値が集合で与えられているため，出力である可能性分布も集合として得られる．可能性分布は設計変数範囲の区間演算から出力される実現可能な性能値の範囲を意味する．図 3.5 に可能性分布の導出例を示す．

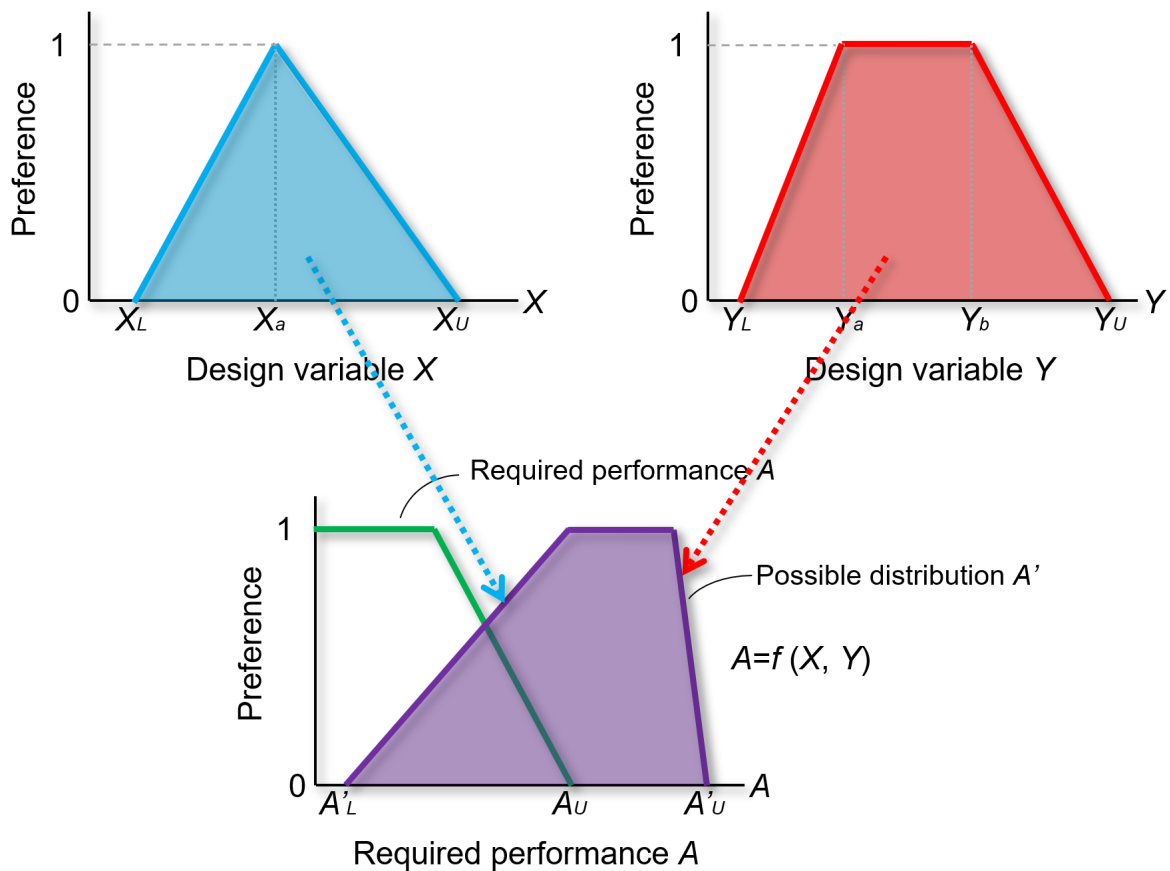


Fig. 3.5 Schematic illustration of the procedure for the set propagation

3.2.3. Set Modification (設計変数, 要求性能集合の修正)

本過程では, 3.2.1 項で設定した選好度や設計変数範囲の修正を行う. 3.2.2 項にて算出した可能性分布が 3.2.1 項で設定した要求性能範囲内に全く入っていない場合, 設定した設計変数範囲では要求性能を満たす解が存在しないことを示す. そのため, 設計者は設計変数範囲の修正を行う. Set Modification は設計変数の修正範囲を提示する過程であり, 図 3.6 にそのプロセスの概略図を示す.

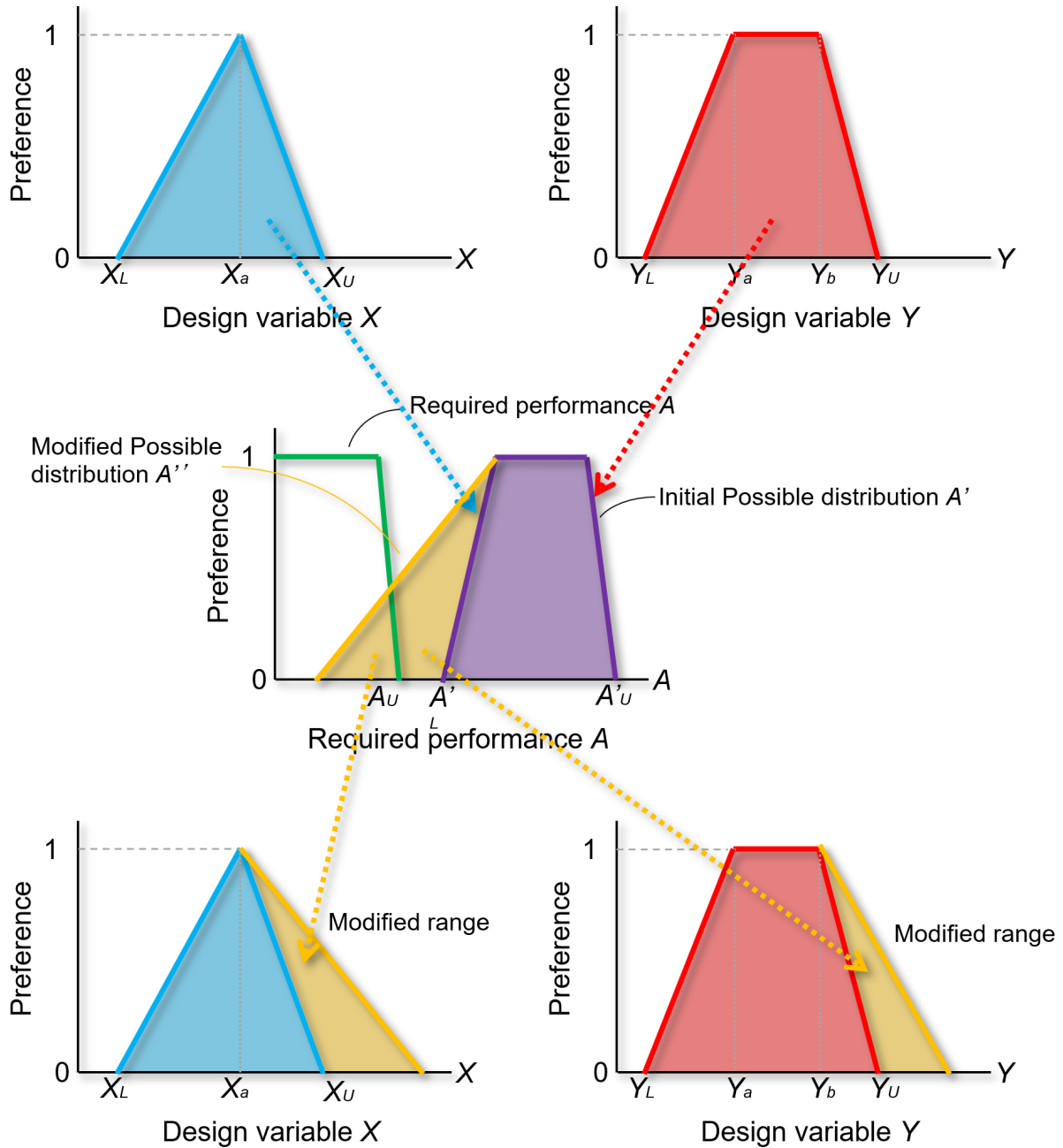


Fig. 3.6 Schematic illustration of the procedure for the set modification

3.2.4. Set Narrowing (設計解集合の絞り込み)

本項は 3.2.1 項で設定した各設計変数範囲から、要求性能を満たさない集合を除去していくことで、最終的な設計解へ収束させる。Set Propagation によって算出された可能性分布は、図 3.7 のように要求性能を満たさない非有効集合を含む場合がある。そのため、非有効集合を除去するために、3.2.1 項で設定した各設計変数範囲を等分割する。各設計変数範囲の分割した部分集合を組み合わせて、各々の可能性分布を算出する。導出された可能性分布を比較し、最も好ましい組合せを導出する。この操作を非有効集合がなくなるまで繰り返すことによって、最終的に要求性能を完全に満たす設計解集合を得ることが可能である。図 3.8 にこの操作の概略図を示す。

図 3.8 において、初めに設計変数 X_1 と設計変数 X_2 の範囲を等分割する。次に X_1 の左側の範囲と X_2 の左側の範囲を用いて Set Propagation を行い、可能性分布を導出する。黄緑色で表されているエリアが実際に求められた可能性分布であり、初期の可能性分布より範囲が狭められていることが確認できる。同様に X_1 の左側の範囲と X_2 の右側の範囲、 X_1 の右側の範囲と X_2 の左側の範囲、 X_1 の右側の範囲と X_2 の右側の範囲でも可能性分布を求める。得られた 4 つの可能性分布の中から最も評価の良い組合せについて、さらに Set Narrowing を行う。この操作を可能性分布の範囲が要求性能の範囲に完全に収まるまで繰り返す。図 3.8 の例では、可能性分布の範囲が要求性能の範囲に完全に収まっている設計変数範囲の組合せが存在するため、これ以上 Set Narrowing を行わない。絞り込まれた可能性分布の中で要求性能を完全に満たすと同時に、最も好ましい設計案が最終的な設計解となる。

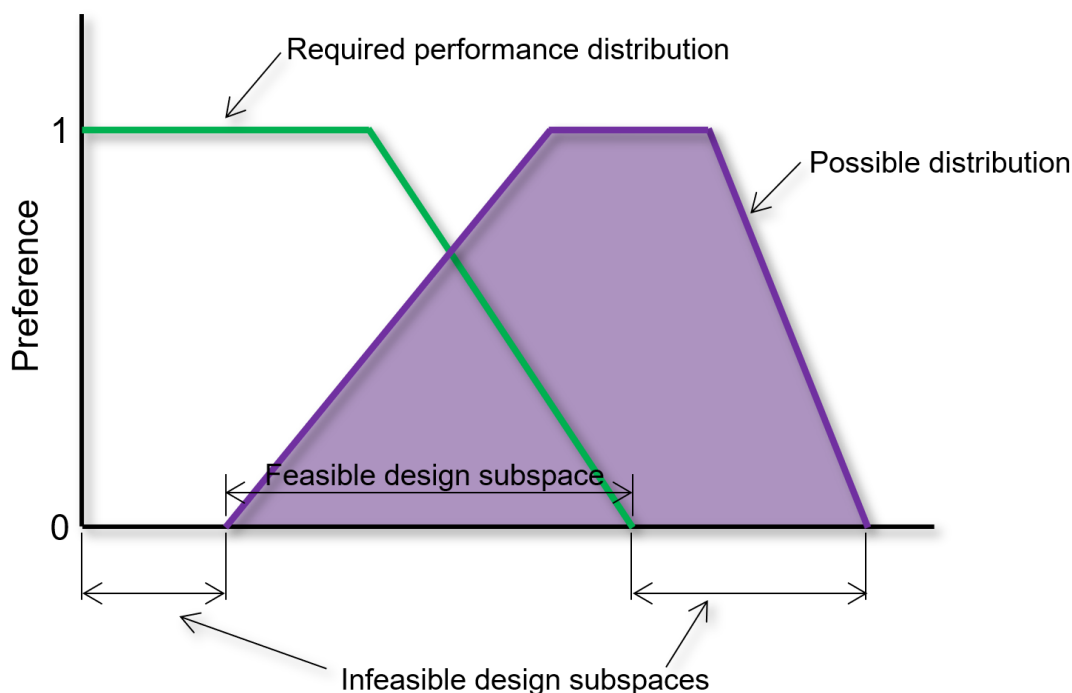


Fig. 3.7 Representation of the feasible and infeasible design subspace

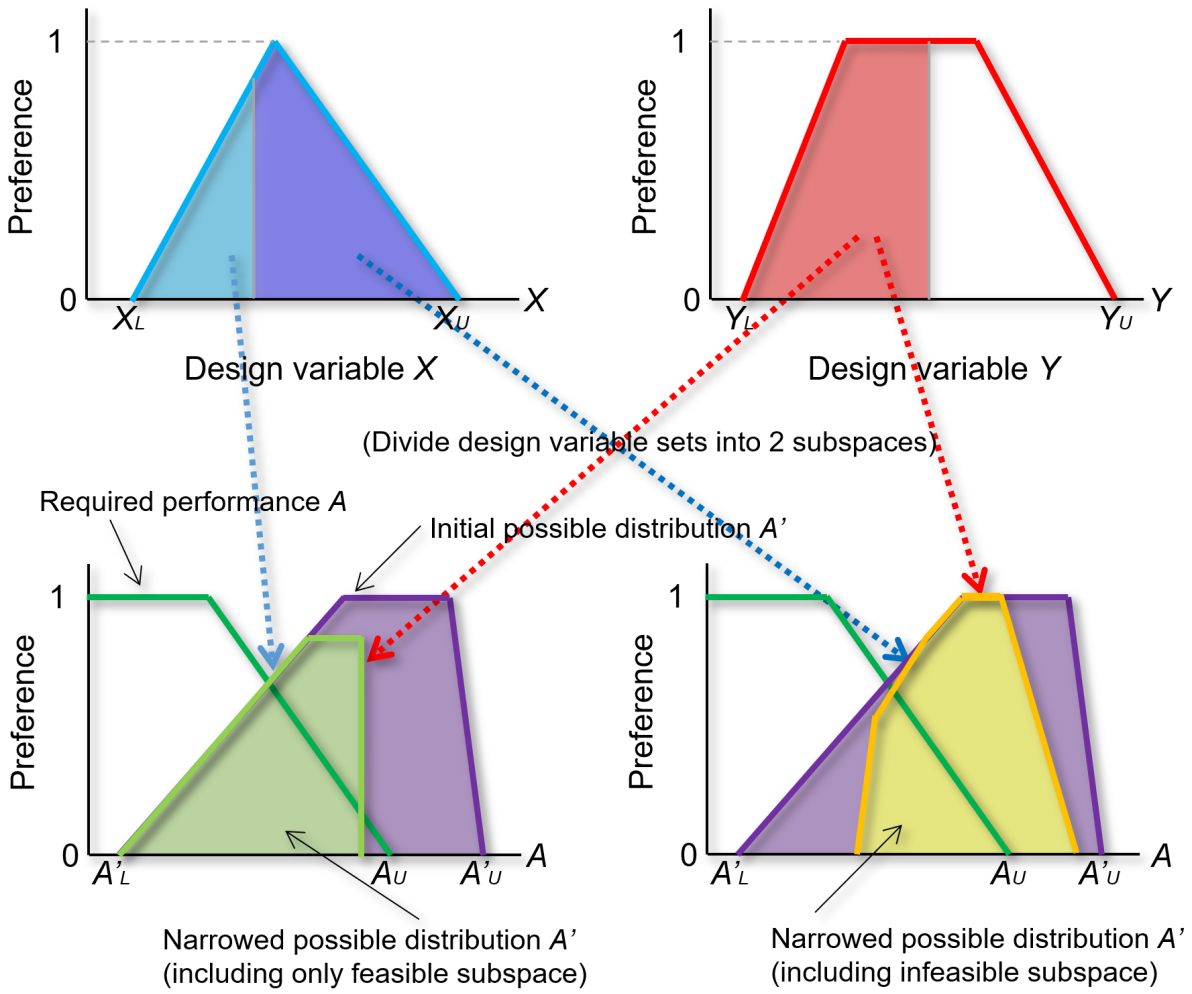


Fig. 3.8 Schematic illustration of the set narrowing process

4. アップグレード製品サービスシステム設計手法の提案

4.1. アップグレード製品サービスシステムの概要

通常、製品は購入から時間が経つにつれて、新製品、後継機種が登場等によって機能や、価値が陳腐化する。アップグレード製品サービスシステムで提供されるアップグレード製品は、主に製品やサービスの一部の構成要素のみを交換、追加することで経時的に陳腐化した製品価値を再向上させ、ユーザの製品廃棄行動を抑制させる、すなわち、製品の寿命を拡張させることを目的とした設計手法（DfLE: Design for Lifetime Extension）である(Ospina et al., 2014) (Kobayashi, 2005)。製品サービス全体ではなく、一部の交換、追加要素を製造、流通、廃棄するため、資源の使用量および廃棄量の双方を削減することが期待される。従来、アップグレード製品サービスシステム設計手法の研究では、製品の有する機能を向上させることを目的とした手法およびその支援システム(石上他, 2002)や、向上させる時期の設定および動的な修正を可能とする手法(下村他, 2006)が開発されてきた。これらは、製品機能の向上を目的とした手法であるが、筆者らの過去の一連の研究で、アップグレード製品設計手法は製品機能の向上のみならず、収益の改善や製品競争力の向上、信頼性の向上の可能性を有することが示された(Yamada et al., 2015)。図 4.1 にアップグレード製品サービスシステム設計が有する有用性、可能性を体系的に示す。

図 4.1 において、アップグレード製品は環境、収益性、機能性、信頼性、生産、品質の 6 つの視点において従来のアップグレードを行わない通常の製品と比較して有用性が存在する。例えば、環境に関する視点では、リユース、およびリデュースの促進が挙げられる。これらは、アップグレード製品が更新時期に一部の部品のみを交換、追加し、その他の部品（プラットフォーム）をそのまま使うため実現できる。プラットフォームとなる部品は同じユーザがそのまま使い続けことが可能であるため、製品がどのような環境で、かつどのようなユーザが用いてきたのかが不明確であるという理由で、従来リユース製品の利用を避けてきたユーザに対してもアップグレード製品はリユースの促進が可能である。

収益性、生産に関する視点では、アップグレード製品の交換、追加部品は原則サービスプロバイダが指定する製造者の部品を購入する必要があるという点から、プロバイダはユーザの困り込みを可能とするビジネスモデルが提案できる。さらに、製品の販売数、ユーザの情報を管理することにより、生産が必要な交換部品を把握することが可能であり、製造コストの削減、在庫管理費用の低減が期待できる。一方で、更新部品の要求仕様をサービスプロバイダが公開することで、複数の製造者の参入を促し、更新の選択肢を増やすことは、顧客のサービスに対する満足感を増加させることに有用であると同時に、複数企業の協業によるオープンイノベーションを促進させることが期待できる。

機能性に関する視点では、アップグレード製品は製品全体を買い替えることなく新しい機能を付加することや、交換部品が安価な場合は、買い替えと比較してより低価格、高頻度に性能値を向上させることが可能であり、最新機能、性能の維持が低価格で可能である。

信頼性、品質の視点では、交換部品の提供方法、頻度に依存するが製品の保守性が向上し、同時にアップグレード製品のビジネスモデルに対する信頼性が向上する。加えて、従来物理的な寿命を迎えていないにも関わらず製品の価値寿命により廃棄されてきたプラットフォームをより長い期間使用するため、無駄な耐用寿命および過剰な品質の低減が可能である。

上記のアップグレード製品サービスを設計するためには、更新可能なハードウェアの設計のみならず、提供するサービスの決定やサービスの更新頻度、サポートの期間を予め設定し、提示すること必要である。すなわち、サービスのプロバイダは、以下の事項を解決することが要求される。

- ① 提供するサービスの設定
- ② そのサービスを構成する要素の設定
- ③ 構成要素に将来適用するライフサイクルオプションの設定
- ④ アップグレードの実施方法の決定
- ⑤ サービス構成要素の更新頻度、サービス提供期間の設定

本論文では、これらの設定を支援するための手法を提案し、4.4 節にその詳細を記す。

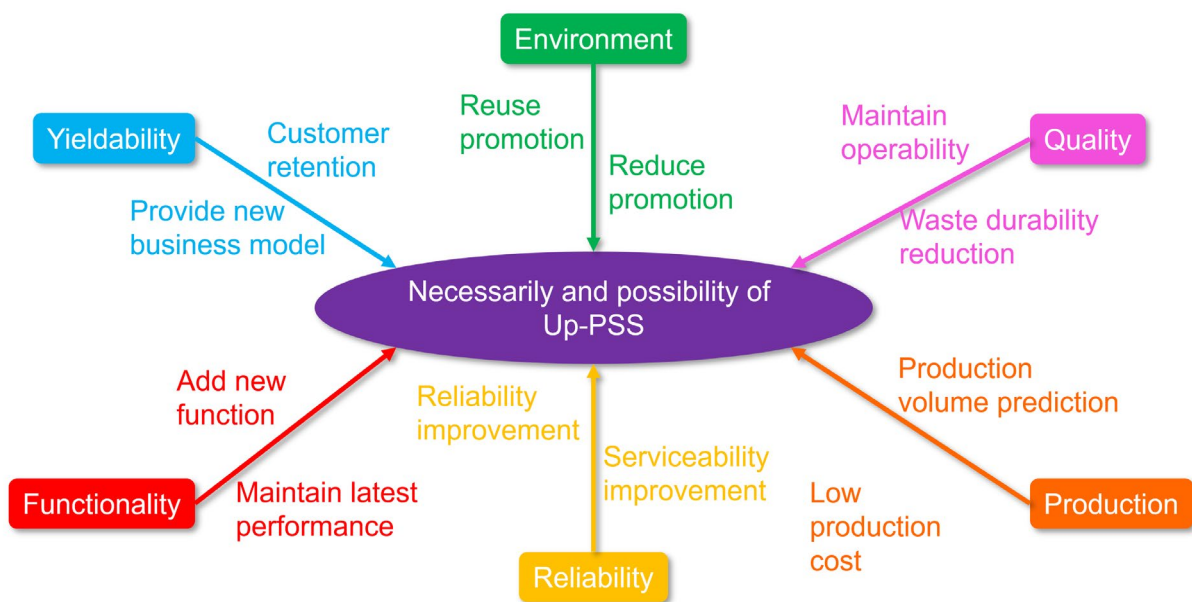


Fig. 4.1 Necessarily and possibility of upgradable product service system

4.2. アップグレード製品サービスシステムの関連研究

4.2.1. アップグレード設計支援システム

本節では、アップグレード製品サービスシステムの関連研究を紹介する。石上らは、アップグレード製品の設計支援システムとアップグレード設計解の導出アルゴリズムを提案した(石上他, 2002)。この手法では、不確実性を含むユーザの要求に対応するため、要求性能をレンジ形式(範囲値)で扱い、最終的な設計解としてその要求レンジを実現する製品構成部品群を予め用意した部品データベースから導出した。設計解を求めるために、機能パラメータ FP (Functional Parameter) と設計パラメータ DP (Design Parameter) の 2 つのパラメータを定義した。FP はアップグレードを行う上でユーザが要求する製品性能、機能を表すパラメータであり、DP は設計者が直接操作できる属性を表したパラメータである。この FP と DP の関係は図 4.2 に示すように、独立型 (I 型)、結合型 (C 型)、擬似独立型 (SI 型) の 3 種類に分類される。I 型は 1 つの DP が 1 つの FP に関連する場合であり、C 型は 1 つの DP が複数の FP に関連する場合である。C 型の場合、DP を変化させると複数の FP が変化するため、予期せぬ FP の変化を招く。その変化に対処するために、SI 型を定義する。SI 型は図 4.2 の FP5 と DP4 の関係である。DP4 は FP4、FP5 の双方を変化させるが、FP4 は DP3 によって操作可能である。ゆえに、FP5 と DP4 の関係は擬似的に独立であるとみなすことが可能である。石上らの手法では全ての FP は I 型または SI 型の設計パラメータのみを用いて操作する。

全ての FP を I 型または SI 型の設計パラメータのみで表現するために、因果関係行列を作成する。図 4.3 に示すように FP を行に、DP を列上に配置し、対応する FP-DP 間に関係があれば 1 をなければ 0 を記述する。記述後、次の操作を行い対角化する。

Operation 1. 列内に 1 つだけ 1 を含む i 列と、 i 列にて 1 である行に 1 を含む j 列から i 列を減ずる。

Operation 2. 行列の i 列と j 列を入れ替える。

対角化が完了したら、要求された FP レンジを満たす DP レンジを FP-DP 間の連立方程式、Set-Based Theory (Finch and Ward, 1995) を用いて導出する。将来の不確実性に対応するため、要求 FP はレンジ形式で表現される。導出された DP レンジを満たす製品構成部品群を部品データベースから選択し、表 4.1 に示すように設計解候補とする。部品群が複数存在する場合は各世代間の部品共有率などを考慮し 1 つの部品群に絞り込む。

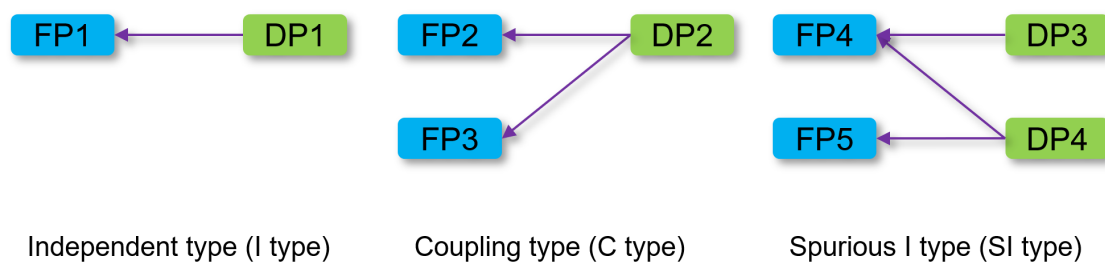


Fig. 4.2 Mapping type of parameters (石上他, 2002)

	DP1	DP2	DP3		DP2	DP1	DP3
FP1	0	1	1		1	0	0
FP2	1	1	1		0	1	0
FP3	0	0	1		0	0	1
	Initial Causal Matrix				Obtained Causal Matrix		

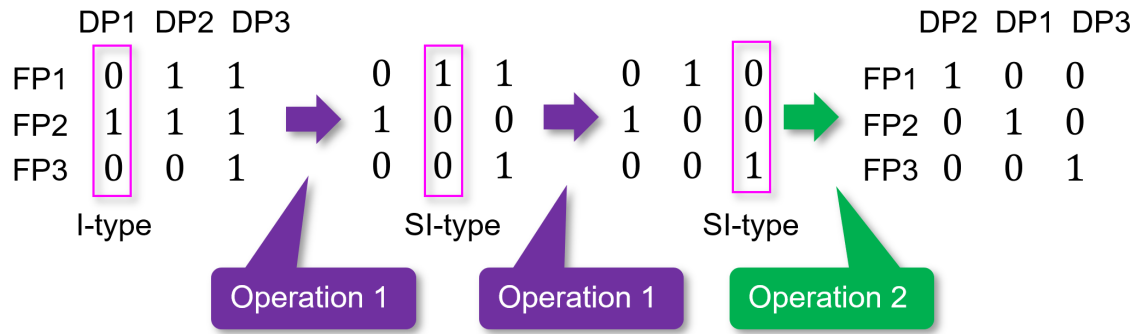


Fig. 4.3 Deriving process of DP (石上他, 2002)

Table 4.1 Design Solutions (石上他, 2002)

	1st Generation	2nd Generation	3rd Generation	Number of total parts
Design Solution 1	Turbin3	Turbin3	Turbin1	9
	Body1	Body3	Body3	
	Motor1	Motor7	Motor3	
	Filter3	Filter3	Filter4	
Design Solution 2	Turbin3	Turbin3	Turbin1	9
	Body1	Body3	Body3	
	Motor1	Motor7	Motor9	
	Filter3	Filter3	Filter4	
Design Solution 3	Turbin3	Turbin3	Turbin1	10
	Body1	Body3	Body4	
	Motor1	Motor7	Motor3	
	Filter3	Filter3	Filter4	
Design Solution 4	Turbin3	Turbin3	Turbin1	10
	Body1	Body3	Body4	
	Motor1	Motor7	Motor9	
	Filter3	Filter3	Filter4	

石上らの手法では、ユーザの要求をレンジ形式で表し、Set-Based Theory (Finch and Ward, 1995)を用いてその要求を満たす DP レンジを導出することで将来の不確実性への対応を可能としている。FP を操作するために、FP と DP の関係を I 型または SI 型に絞り込み単純化を行っているが、複数の DP を用いて FP を操作した場合の方が環境負荷やコストの面で優位な設計解を得られる可能性が存在する。そのため、複数の DP で FP を最適に操作する方法の実現が課題である。また、この手法では Set-Based Theory を用いて DP レンジを導出する際に FP-DP 間の関係を表す連立方程式は単調な関数でなければならないため、複雑な高次の関数を扱える方法の提案もまた課題である。

4.2.2.アップグレード計画構成手法

下村らは、多様なユーザ要求を考慮しつつ市場に投入される技術を予測し、それに基づいたアップグレード計画の構成方法とそのプロトタイプシステム、およびユーザ要求の変化に対する動的な修正方法を提案した(下村他, 2006)。下村らの手法では、石上らと同様に多様なユーザの不確実性を含むニーズに対応するため、ユーザ要求を範囲値で表し、加えてユーザをハイエンドやローエンドなどに定性的に分類した。部品データベースには現在入手可能な部品および、将来市場に現れると予測した部品の情報を登録し、ユーザの要求レンジを満たすような解を実現できる部品の組み合わせを求め、その時系列情報を設計計画と定義した。この設計計画を導出するために、評価パラメータ VP (Valuation Parameter)と設計パラメータ DP (Design Parameter)を定義した。VP はユーザが製品を評価する際に用いるパラメータであり、製品の機能、性能値を表す。一方、DP は設計者が製品構成要素の評価を行う際に用いるパラメータであり、製品構成要素の持つ設計変数を表している。予め用意した部品データベースに含まれる VP と DP の情報から、それらの時系列情報である VP, DP ロードマップを作成する。図 4.4 に CPU クロック周波数の VP ロードマップを示す。

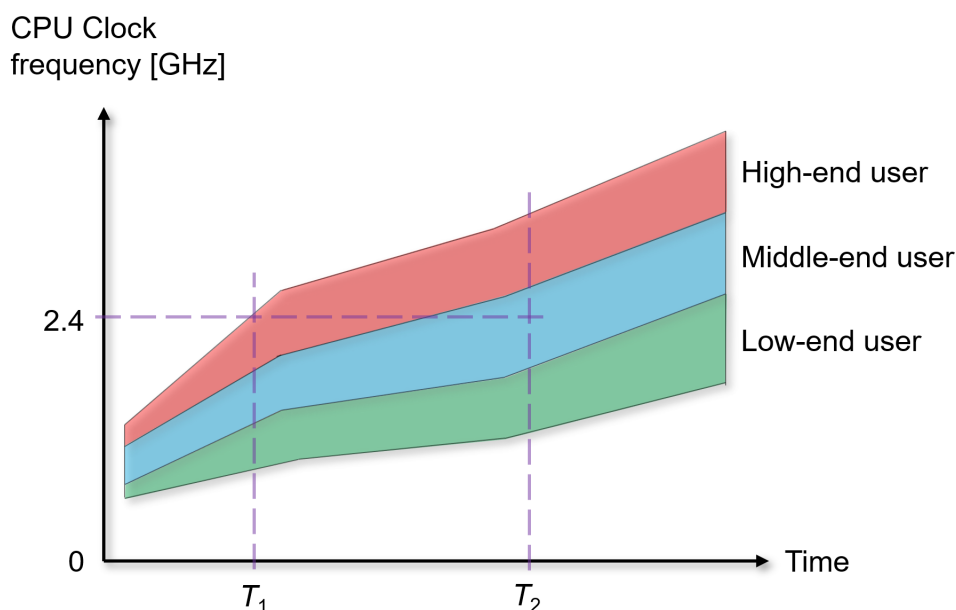


Fig. 4.4 Example of VP roadmap (下村他, 2006)

下村らは市場に出回る製品の性能がユーザ要求の形成に影響を与えると仮定した。その結果、ユーザが自身の要求を満たす製品を購入して一定時間が経過すると、市場製品が一新され、製品購入時と比較してより高性能、高品質な製品が市場に出現する。ユーザは所持製品と新たに出現した製品の性能を比較し、その差がある一定の閾値を超えた際にユーザは自身の要求を更新し、この要求を満たす製品に買い換える、またはアップグレードの要求を行うと仮定した。

提案されたアップグレード設計計画支援システムでは、対象製品の基本的な構造情報から関連する技術動向を含めて調査し、部品データベース上に登録する。部品データベース内に登録される個々の部品の DP 情報は、将来予測を含むため範囲値で示される。この DP 情報と該当部品の市場投入時期に関する情報から、DP ロードマップと呼ばれる DP の将来予測を含む時系列情報を作成する。DP ロードマップと VP-DP 間の連立方程式を適用することによって VP の将来予測を含む時系列情報である VP ロードマップを作成する。VP ロードマップをユーザ要求ごとに範囲の絞り込みを行い、要求された VP レンジを満たす DP のレンジを Set-Based Theory を用いて導出し、この DP レンジを満たす部品の組み合わせを各ユーザ要求、各アップグレード時期に対応して導出し、アップグレード計画案と定義した。

下村らの提案手法は、将来予測を含む不確実なユーザ要求を範囲値で表すことで、その不確実性への対応を可能にしている。しかし、環境負荷や経済面における優位性の議論が行われていない。また、ユーザ要求は市場に展開されるアップグレード対象製品の性能によって形成、更新されると仮定しているため、着目した市場製品以外の要因がユーザの要求形成にどのような影響を与えるのかを把握し、予測制度を高めることが必要である。最後に、この手法は複数の設計案を提示するが、最終的な案の選択は設計者の判断に委ねられる。ゆえに、この設計案の選択に関する指針、支援の充実が求められる。

4.2.3. アップグレード設計支援 CAD システム

福重らは、製品構成部品間の幾何拘束条件を満足させつつ、複数世代に渡るアップグレードを可能とする製品設計手法、および任意世代数のアップグレードを幾何的な側面から実現する製品モデルの作成支援 CAD (Computer Aided Design) システムを提案した(福重他, 2011)(Fukushige et al., 2012)。福重らの手法は、下村ら、石上らの手法を前提として、アップグレード計画策定後の設計段階においてアップグレード可能な製品の構造、形状を導くことを目的とした設計支援手法である。この手法における入力情報は以下の4つである。

- ・ 対象製品の形状モデル
- ・ 構成部品間の幾何的拘束関係
- ・ アップグレード計画
- ・ アップグレード計画に基づき決定されたアップグレードモジュールの候補

幾何的拘束関係とは部品間の接続関係や、位置関係に対する拘束条件を示し、製品が求められる機能を発現するために必要な条件を幾何形状の観点から設定されたもので

ある。例えば、図 4.5 に示す円筒と円柱は、幾何的拘束関係として「同心円の合致関係」を有する。この他にも、円筒面と平面の「正接関係」や平面同士の「平行関係」、「垂直関係」等の幾何的拘束関係が存在する。福重らの手法では、アップグレードに伴う新規部品の交換、追加によってこの条件が破綻しないことを前提に設計を行う。

アップグレード計画は、将来の市場や技術のトレンド、消費者のニーズ、製品の投入時期、アップグレードを行う世代数、アップグレードの対象機能が記述された情報であり、下村らの手法におけるアップグレード計画と同等のものである。

アップグレードモジュールの候補は、将来の各世代で追加、交換される部品、モジュールの候補であり、簡易形状モデルの形で表される。福重らの手法は、与えられた製品モデルに対して、アップグレード時にいずれのアップグレードモジュールの候補が選択され追加、交換されたとしても常に幾何拘束関係が満たされるように設計変更を行うことが目的である。

福重らの手法は、将来の各世代におけるアップグレードに逐次対応した設計変更を行うものであり、具体的には、最初のアップグレードによって追加、交換されるアップグレードモジュール候補に対応する設計変更を行った後に、2 回目のアップグレードに対応した設計変更を行う。このように、アップグレード計画に記載された最後の世代までこのプロセスを行うことによって、全世代のアップグレードに対応した製品形状モデルを作成する。この設計変更のプロセスは以下の 3 段階で構成される。

- (1) アップグレードモジュール候補の和集合部品の作成
- (2) 余裕付加モデルの作成
- (3) 候補部品への個別の対応

和集合部品は図 4.6 に示されるように、アップグレードモジュールの形状モデルを重ね合わせた和集合領域を 1 つの部品として見立てたものである。すなわち、アップグレードによる幾何的な不確実性の範囲は、和集合部品が占有する空間領域として定義される。余裕付加モデルは、和集合部品に合わせた設計変更を行い、部品の追加、交換によって発生する部品間の干渉、幾何拘束関係の破綻を全て回避した製品モデルである。この余裕付加モデルの作成後、個別のアップグレードモジュール候補に対する設計変更を行う。(2)、(3)のプロセスによって部品間の干渉や幾何拘束関係の破綻が発生する場合は、以下の 4 つの操作を製品モデルに対して行うことで回避する。

- ・ 配置変更
- ・ 形状変更
- ・ 部品の削除
- ・ 部品の追加、交換

この 4 つの変更操作は第 1 世代製品モデルに対する設計変更操作と、アップグレード時に行われる操作に大別される。前者は和集合部品の追加、交換による幾何的变化に対して、予め製品の構成部品の配置、形状を変更しておくことで対応することであり、アップグレードに対して不変な構造を有するプラットフォームを設計するための操作である。後者はアップグレードモジュールを追加、交換する際に他の部品の配置変更、形

状変更，交換，削除を行うことで変化に対応する操作である．これらの操作により，製品モデル内の部品は図 4.7 に示す 3 種類の部品に分類される．福重らはこれらの操作を 3 次元モデル上で設計変更の妥当性を確認し，複数世代のアップグレードに幾何的な側面から対応するため設計変更案を試行錯誤的に導出する設計支援システムを開発した．

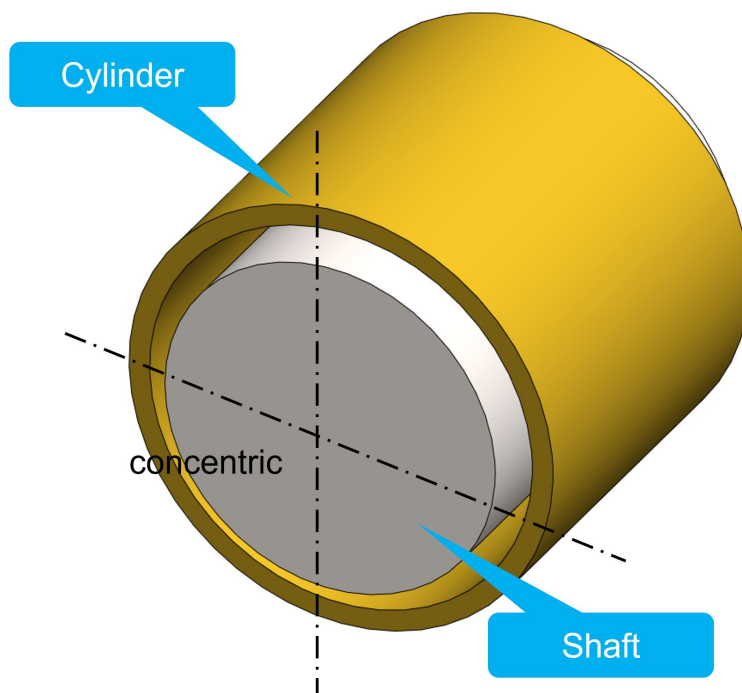


Fig. 4.5 Example of constraint between two components (concentric circle)

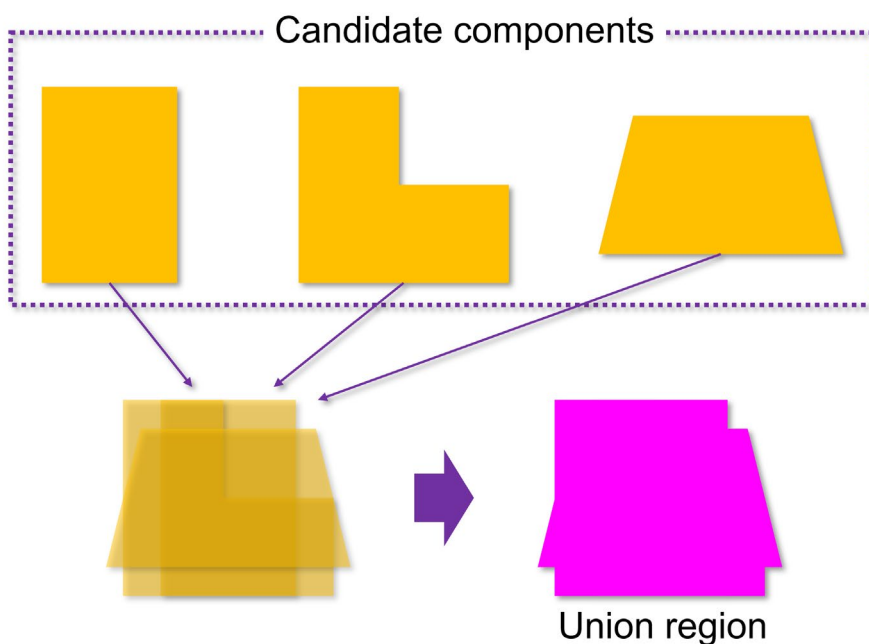


Fig. 4.6 Union region of candidate components (Fukushige et al., 2012)

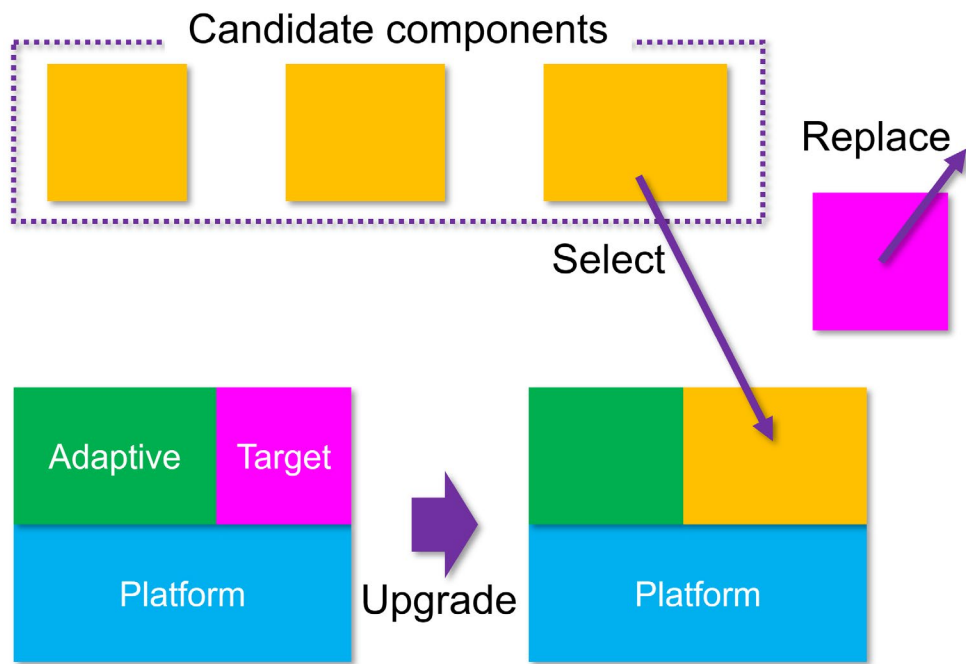


Fig. 4.7 Platform, target, adaptive, and candidate components (Fukushige et al., 2012)

4.2.4. セットベース設計に基づくアップグレード製品設計手法

Murakami らは、PSD 手法に基づいたアップグレード製品設計手法を提案した (Murakami et al., 2011)。この手法では、将来の技術動向を不確実な設計情報であるとみなし、その予測を範囲値で行い、範囲値を用いて設計解集合を導出する。Murakami らは、製品を構成する部品 (モジュール) をアップグレードするもとしないものに分類し、部品アップグレードがその他の部品に影響を与えることを推測するために図 4.8 に示す機能構造図を提案した。機能構造図は、製品構成部品とその部品間の入出力関係を表したものであり、ある部品を交換した際に影響を受ける部品を定性的に理解することが可能である。この部品アップグレードによる影響を吸収するために、Murakami らの手法では、影響を受ける部品に予めオーバースペックを付与する。一方で過度なオーバースペックの付与は環境負荷量の増加を招く恐れがあるため、この手法では、設計変数と性能間のみならず、性能とトレードオフ関係にある環境負荷量間の関係式を作成し、両者の要求仕様を両立する設計変数の範囲値を PSD 手法により導出する。Murakami らは、提案した手法をロボットアームの設計に適用し、性能と環境負荷の背反する要求仕様を両立した設計解集合を導出し、その有用性を示した。一方で、アップグレード製品設計による経済面の評価が行われていないため、その評価も考慮した設計解集合の導出が必要である。

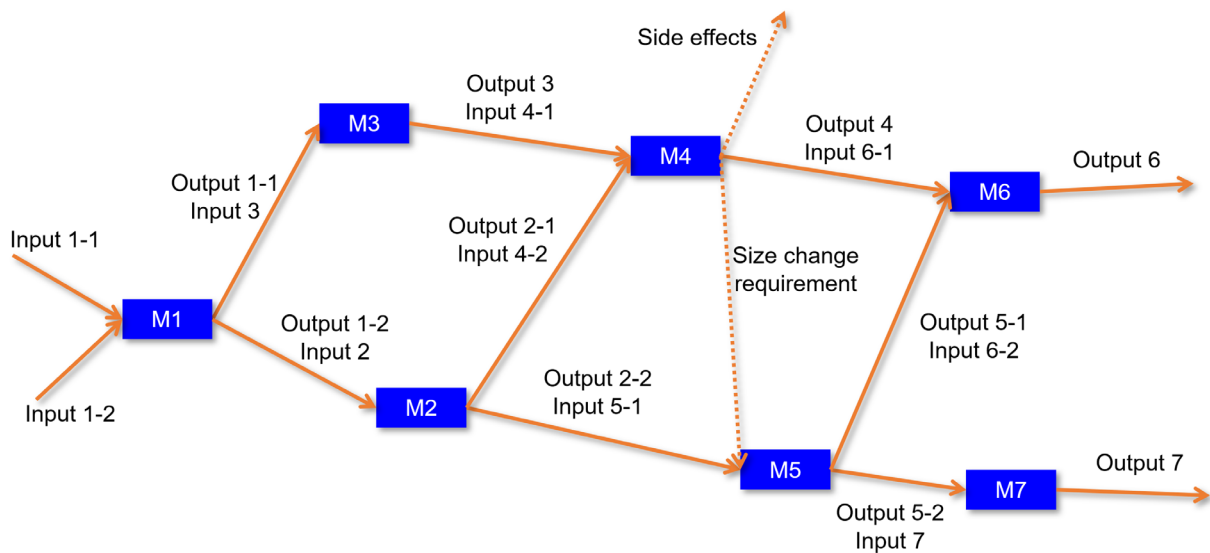


Fig. 4.8 Functional structure diagram

4.2.5.アップグレード可能性に関する調査研究

Pialot らは、アップグレード可能性に基づく新しい消費/生産モードの整理を行った (Pialot et al., 2017). Pialot らは、アップグレードへの潜在的なニーズを確認するために、特定の家電製品（掃除機およびエスプレッソマシン）において、その廃棄理由の調査をフランス、ドイツ、スペインの3か国で実施した(Pialot et al., 2014). その結果、50%以上の製品がまだ機能する状態であるのにも関わらず、買い替えられていることが確認され、その理由は不満の蓄積によるものであると同時に、機能的な改善がその不満解消に有用であることが確認された。さらに、アップグレードの実施時期や適切なビジネスモデルに関連した課題に対して、消費者と生産者とともに3つの実験を実施した。1つ目の実験であるアップグレードシナリオに関するワークショップでは、設計チームが適用すべきアップグレードと、それを短期、中期、長期的に適用すべきかどうかを判断するために行われ、2つ目の実験として、顧客の声を抽出するために、フォーカスグループインタビューが実施された。3つ目の実験として、アップグレード可能性が標準的なビジネスモデルに及ぼす影響を考慮するために、アップグレード可能性に関するビジネスモデルのワークショップを実施した。これらの実験により、Pialot らは、アップグレードのタイプを以下の6つに類型した。

- ・ 使用価値に影響を与えるアップグレード
- ・ 感覚的、美学的価値に影響を与えるアップグレード
- ・ 環境、倫理的価値に影響を与えるアップグレード
- ・ パラメトリックなアップグレード
- ・ 機能的なアップグレード
- ・ 理想的なアップグレード

さらに、アップグレードのシナリオにおいては、既定のアップグレードのサイクルを設けないことは、アップグレード実施の可視性が無いために好ましくないことが確認され、そのサイクルの長さは、開発期間や競争、顧客の関心の欠如に注意を払い、適切な期間を設ける必要があることが確認された。フォーカスグループインタビューでは、アップグレード製品サービスに対する顧客の懸念について明らかにした。最も影響力のある懸念事項は、長期間に渡って購入する保証されたアップグレードに対する依存である。例えば、ブランドや製造者の継続性である。また、顧客が将来の機能に関する認識を持ち、アップグレードによるコストを把握し、より多くのコストを要求するシステムに巻き込まれることを防止する必要性が確認された。ビジネスモデルのワークショップでは、アップグレード製品サービス（ある製品と時間経過とともに適用される更新、関連するサービスが含まれるシステム）は製品指向、使用指向あるいは結果指向のアップグレード製品サービスシステムとして提供される可能性があることが確認された。

4.2.6.アップグレード製品の購買意欲に影響を与える因子

Michaud らは、消費者のアップグレード製品購入意欲に影響を与える因子を特定するために、フォーカスグループインタビューによる離散選択実験を実施した(Michaud et al., 2017). 初めに、消費者が製品を購入する際に重要視する属性情報を調査するために、エンジニアによるアドバイスと消費者インタビューを実施し、アップグレードを技術の向上によるタイプ(物理寿命の延長を目的としたアップグレード)と機能の向上によるタイプ(価値寿命の延長を目的としたタイプ)に分類し、製品の属性情報は、例えば掃除機の場合、吸引力、騒音、ブランドなどが挙げられ、アップグレードに関連した属性情報は、コスト、配送手段、交換方法、廃棄方法、保証が重要視される属性情報であることが確認された。確認された属性情報に基づき離散選択実験の水準を設定し、コードレス掃除機、キャニスター型掃除機、ノートパソコン、洗濯機について実験を行った。これらの4つの製品の選択は、アップグレード製品に対する消費者の志向が製品の種類によって異なるという仮説に基づいており、各々の製品の特徴は以下の通りである。

- ・ コードレス掃除機：成長市場の新興製品
- ・ キャニスター型掃除機：成熟した耐久製品
- ・ ノートパソコン：頻繁に技術向上する製品
- ・ 洗濯機：長寿命製品

実験はオンラインアンケートの形式で158名からの回答を得ており、その結果は、消費者はアップグレード可能な製品に興味を持ち、またその購入意欲があることが確認され、アップグレードに要するコストの選好は、全ての製品において、製品販売価格の約25%~50%であることが確認された。また、アップグレードのサイクルに関しては、長い方が好まれ、アップグレードの方法に関しては、製品に依存することが確認された。すなわち、コードレス掃除機やノートパソコンに関しては、ユーザ自身が更新することを好むが、キャニスター型掃除機や洗濯機に関しては、エンジニアによる更新が好まれることが確認された。これは、ユーザが構造が単純あるいは、規格化された製品であると認識するほど、自身で更新することを好む傾向であることが把握できる。また、この調査に関連したLobasenkoらによる調査によると、更新内容や更新方法は、性別によってその志向が異なることが確認されている(Lobasenko and Llerena, 2017)。例えば、男性の方が機能性の向上を望むのに対して、女性は使用感や保証を重要視することが挙げられる。

4.2.7. ライフサイクルオプションの適合性評価

Umeda らは、製品および部品の物理寿命と価値寿命からライフサイクルオプションを決定する手法を提案した(Umeda, et al., 2005)(大門他, 2005). 寿命の推定に際しては、市場調査より対象製品の廃棄分布を取得し、ユーザ調査から得られた廃棄要因によって、物理要因の分布と価値要因の分布に分類した。得られた各々の分布より、製品の物理寿命と価値寿命の推定を行った。また部品では、製品の廃棄要因とそれに影響を与える部品の関係性を表す廃棄要因分析表を用いて、各寿命分布を部品ごとに割り付けを行うことで、部品の物理寿命と価値寿命を推定した。Umeda らの手法は、推定した物理寿命と価値寿命から式 (4.1) と式 (4.2) に各々示す寿命効率指数 lfe と相対寿命指数 lfr を導出し、図 1 に示す適用図によってライフサイクルオプションを決定する。式 (4.1) と式 (4.2) において、 c_i は部品、 vlt は価値寿命、 plt は物理寿命、 lt は部品寿命、 Alt は全部品の平均寿命を示す。この手法は、部品の物理寿命と価値寿命の 2 つの観点からリユース、メンテナンス (ロングライフ)、アップグレードの適合性の判断が可能であるが、コストや環境負荷をはじめとする寿命以外の視点は検討されていないため、持続可能なアップグレード製品サービスの設計に用いるためには、これらの考慮方法を検討する必要がある。

$$lfe(c_i) = \frac{vlt(c_i)}{plt(c_i)} \quad (4.1)$$

$$lfr(c_i) = \frac{lt(c_i)}{Alt} \quad (4.2)$$

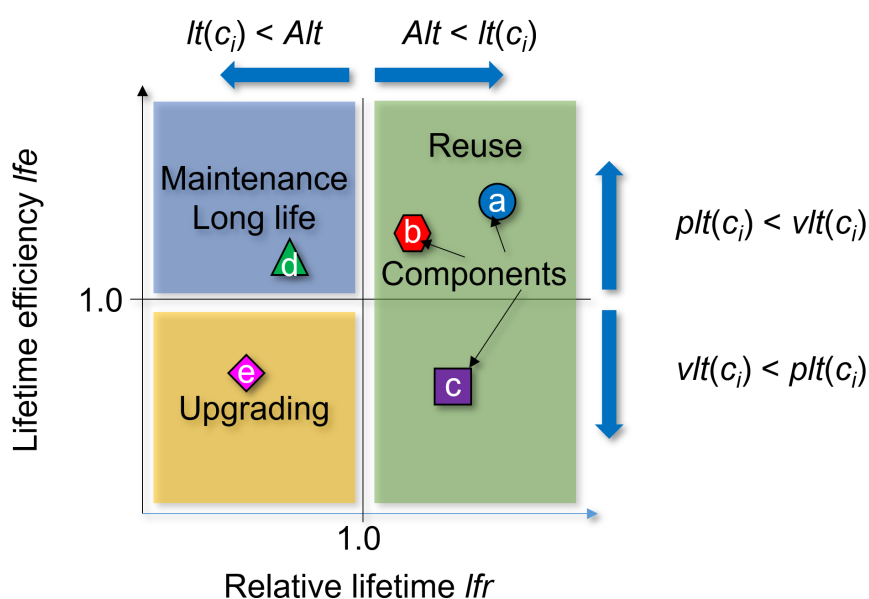


Fig. 4.9 Lifecycle option selection chart (Umeda et al., 2005)

4.2.8. ライフサイクルプランニング手法

Kobayashi は環境調和型設計の支援を目的としたライフサイクルプランニング手法を提案した(Kobayashi, 2005). この手法は設計上流段階で、環境、コスト、品質の観点を考慮した部品ライフサイクルオプションの選定を支援することを特徴としており、アップグレード、メンテナンス、長寿命化 (ロングライフ)、リユース、リサイクル (狭義) のライフサイクルオプションを対象としている。しかし、ライフサイクルオプションの評価においては、例えば、アップグレードやメンテナンスに関しては、コスト、物理寿命、価値寿命の観点で評価を行っているが、リユースやリサイクルに関しては、これらに加えて環境負荷も用いて評価を行っており、ライフサイクルオプションによって評価の視点が異なり、統一化されていない。さらに、これらのライフサイクルオプションが実際に製品に適用されるのは、評価を行う段階よりも後であり、その時のコストや環境負荷の情報の予測においては一般的に多くの不確実性含有するが、その不確実性への対応は検討されていない。

4.2.9. トータルパフォーマンス分析

近藤らは、製品ライフサイクル設計を効率的に支援することを目的として、製品の環境効率を評価する Total Performance Index: *TPI* を提案した(Kondoh, et al., 2009). 近藤らは既存の環境効率指標で検討が不十分であった、“製品がライフサイクル全体で生成する価値の評価”や、“製品の環境効率に最も影響を与える部品、機能を抽出し、設計者にフィードバックすること”に焦点を当てている。式 (4.3) に *TPI* の計算式を示す。トータルパフォーマンスは、(i) 価値生産効率 (*PP*): 製品ライフサイクル全体を通じて製品が生み出す価値が必要とするコストおよび環境負荷、(ii) 価値消費効率 (*CP*): 全価値と消費者によって消費された価値の比率の 2 つの観点から製品ライフサイクルを評価する。式 (4.3) において、*UV* は製品価値の時間積分、*LCE* はライフサイクル全体で発生する環境負荷量、*LCC* はライフサイクルコストを各々示す。近藤らの手法は、製品のトータルパフォーマンスをライフサイクル全体における製品機能の経時的な価値変化やコスト、環境負荷量を総合的に考慮して評価を行うことができる。一方、計算プロセスは複雑であり、トータルパフォーマンス評価の結果から判断される部品の推奨ライフサイクルオプションは、例えば、アップグレードの場合は、機能の陳腐化率が高い部品が推奨されることから、製品機能の価値の評価視点を主に判断される。

$$TPI = PP \times CP = \frac{UV}{\sqrt{LCE \times LCC}} \quad (4.3)$$

4.3. アップグレード製品サービスシステム設計における課題点

アップグレード製品サービスの設計は、設計の初期段階で複数世代の製品に対する市場や社会からの要求を満足させることが必要である。以下にアップグレード製品サービス設計手法を適用する際に設計者が特に考慮すべき課題点を示す。

- ・ 設計初期段階における不確実性の考慮

アップグレードされる機能やモジュールの決定、更新計画は設計初期段階で検討されるが、実際にアップグレードが行われるのは設計、製造段階よりも将来の使用段階である。そのため、設計者は消費者が将来要求する機能を予測する必要があるが、将来予測は常に不確実性を含み、正確に予測することは非常に困難である。ゆえに、アップグレード製品サービス設計は不確実な将来予測を考慮すると同時に、予測すなわち要求の変化に柔軟に対応できることが必要である。

- ・ 多様な顧客要求、セグメントの考慮

Michaud や Lobasenکو らの調査で示されたように、消費者は更新に対して異なる要求を持つ。一方で、サービスの向上に向けて製品やその部品をアップグレードする際に、サービス毎に異なる種類のアップグレード部品を設定した場合、更新の作業プロセスの設計、管理が複雑となる場合がある。すなわち、より少ない交換要素で多様な志向に対応可能であることが望まれ、その多様な要求や、消費者の規模を適切に表現し、交換要素の判断に統合することが必要である。ゆえに、複数の顧客セグメントを考慮して更新すべきサービスの要素を評価、判断することが必要である。

- ・ ステークホルダの持続可能性の検討

アップグレード製品サービスシステムの目的は持続可能なビジネスモデルや社会システムの構築である。持続可能性を考慮する上で、従来の手法のように環境のみを考慮するのではなく、サービスプロバイダである企業や、その顧客である消費者の持続可能性を同時に考慮することは必要不可欠である。すなわち、上記の3者の持続可能性に関係する因子を明確にし、それら全てを同時に実現する製品サービスシステムの構築と、その設計を支援する手法やフレームワークの開発が必要である。

- ・ 更新手段の検討とその意思決定支援

Lobasenکو らの調査で示されたように、製品によってユーザのそのアップグレードの方法に対する志向が異なることが確認されている。すなわち、ユーザが自身で更新できるとみなすほど、自身で更新することを好み、更新できないとみなすほど、認定エンジニアによる更新を好むことが示された。このユーザの志向以外にも更新においては、その更新作業に要求される技術（ユーザが認識していないものも含む）や、安全性を考慮することが必要であり、また、その作業環境への要求事項や輸送における制約、更新後に発生する廃棄物の適切な処理のような検討事項が多く存在する。ゆえに、これらの更新作業やそれに伴う輸送を考慮した意思決定の支援が必要である。

- ・ 更新サイクル、サービス提供期間の設定

Michaud らの調査により、一般に更新のサイクルは長い方が好まれることが確認され

ている。一方で、サービスプロバイダである企業においては、定期的かつ頻繁に消費者が更新を行い、自社の製品サービスに出費することを望む。また、環境の側面を考慮すると、頻繁な更新は資源使用や廃棄を促進させる恐れがあることも事実である。すなわち、更新のサイクルの決定においては、環境、企業、消費者のそれぞれの志向間でトレードオフ関係があることが確認できる。また、Pialot らの調査で示されたように、消費者は長期間に渡って、1つの製品サービスに依存することに対して不安感を抱くことが確認されているが、企業においては、一度獲得した顧客を長期間維持することを望む。ゆえに、サービス期間の設定においても、企業と消費者間でその志向にトレードオフ関係が存在するため、これらのトレードオフを同時に満足させる更新サイクル、サービス提供期間の設定とその支援技術が必要である。

以上より、本研究は、上記の課題点の解決を目的とし、これまで提案されていなかった、サービスの発案から更新頻度、サポート期間導出までの一貫したアップグレード製品サービスシステム設計の支援を実現する手法を提案する。

4.4. 本研究の目的, 提案手法の概要

4.4.1. 既存手法の課題点

4.2 節で示した関連研究で述べたように, アップグレード製品サービスシステムの更新計画の設定手法やライフサイクルオプションの適合性判断手法, オーバースペックを考慮したハードウェアの設計手法は課題点があるが既に提案されている。一方で, アップグレード製品サービスそのものの発想を支援する手法は提案されていない。また, サービス構成要素の更新方法や更新の有無を判断する手法においては, Umeda らや Kobayashi によって提案されているが, それらの手法は将来の不確実性を考慮し, コストや環境負荷, 顧客満足や寿命をはじめとする複数の視点から評価を行ってはいない。また, 更新サイクルの決定においては, 下村らや石上らによって提案されているが, データベースに依存した手法であり, そのデータベースの構築に要するコストや時間, 労力は検討されていない。また, その手法によって設計された更新計画は, 既存のビジネスモデルと比較した際の優位性は検証されていない。ハードウェアの設計手法に関しては, Fukushige らの手法や Murakami らの手法, さらに, 筆者がこれまでに提案した手法が存在し, 特に, 後者2つは不確実性やオーバースペックの付与や異なる消費者の要求(山田他, 2014a)(Yamada et al., 2015a)(Inoue et al. 2015)を考慮していると同時に, 既存の売り切り型のビジネスモデルと比較して, 性能, 環境, コスト, 利益の側面で優位性があることが掃除機(Yamada et al., 2014a)(Inoue et al., 2014)(山田他, 2014b), ノートパソコン(Yamada et al., 2014b)(山田他, 2015)(Inoue et al. 2016), 複合機(Yamada et al., 2015b)(Yamada et al., 2016)の事例適用で確認されている。一方で, 筆者がこれまでに提案した手法を用いてハードウェアの要件と更新計画に関する要件を同時に考慮した設計を行う場合, 設計解の収束に膨大な時間を要すること, 設計解が収束しない場合に, その原因がハードウェアの要件にあるのか, あるいは, 更新計画に関する要件によるものなのか判断することが非常に困難であることも確認されている。

4.4.2.提案手法の目的, 概要

本研究では、これまで提案されてこなかった、サービスの設計から更新サイクル、サポート期間の設定までを対象としたアップグレード製品サービスシステムの設計手法を提案する。提案手法は設計者のアップグレード製品サービスシステム立案、検証の支援を目的としており、旧来のサービス工学(下村他, 2005)、製品サービスシステムの設計(Shimomura et al., 2009)において用いられる既存事例データベースを軸とする手法ではなく、品質展開を用いる野末らの手法(野末他, 2017)のように、連想法などの発想支援手法に基づいたサービスの考案手法を提案すると同時に、上記を含むこれまでの手法で行われていないサービスの有用性検証を内包し、PSD 手法を用いたサービスの更新計画の立案、検証を包括する。また、将来の不確実性を考慮した、サービスの構成要素である製品や部品の更新方法(将来適用するライフサイクルオプション)を判断するための手法と、これまで検討されてこなかった、更新の実施者、実施場所を決定するための意思決定支援手法を新たに提案する。これらの新たに提案する手法により導出された結果の妥当性は、PSD 手法によって、持続可能性に関する制約を満足させる更新計画が導出されることで確認する。

図 4.10 に提案手法の設計プロセスと各プロセスで導出する設計情報の流れ、および本研究で取り扱う範囲を示す。本研究で想定するアップグレード製品サービスシステムの設計は、サービスの設計(サービスの発案、サービス構成要素の決定、提供サービス有用性の検証)、提供計画の構成(サービス構成要素の更新手段の決定、更新の実施方法や更新サイクルの決定とその検証)、提供するハードウェアの設計(更新可能なハードウェアの詳細設計)、サービス展開後のマネジメントの4つのステップによって構成されるが、提案手法では、サービスの立案と提供計画の構成のステップに焦点を当て、その設計支援を目的とする。

提案手法は、4.4.1 項で述べたように、ハードウェアの要件と更新計画に関する要件を同時に考慮した設計を実施する際の問題点を鑑みて、サービスおよびその提供計画の設計と、ハードウェアの設計を分離して実施する。さらに、アップグレード製品サービスシステムの目的がサービスの受給者に先進のユーザビリティ、ライフスタイルを提供することであるため、サービスの設計とその提供計画の設計をサービスの伝達手段であるハードウェアの設計よりも優先して実施する。そのため、ハードウェアの設計において必要となる情報を提案手法によって導出する。本研究では、ハードウェアの設計段階において必要となる情報を、提供サービスとその構成要素、サービス構成要素の1つである製品やその部品に適用するライフサイクルオプション(更新方法)、更新の実施手段、更新の頻度(ハードウェアの開発リードタイム)、ハードウェアの更新回数(必要な使用世代数)、各世代で利用可能なコストや、排出可能な環境負荷と定義し、提案手法を構成する各設計段階において、これらを導出するための設計手法や意思決定支援手法を整理、提案する。

サービスの設計とハードウェアの設計を分離して実施することは、技術革新が大きい

製品を組み合わせたサービスの設計においても優位性がある。アップグレード製品サービスシステムでは、通常の製品サービスと比較してより長期間に渡って顧客と係わる必要があり、そのサービスの提供期間において、イノベーションが発生し、当初の製品が急激に陳腐化する場合がある。サービスとハードウェアを同時に考慮した設計を行った場合、ハードウェアの置き換えは困難であると同時に、更新可能であるように設計したハードウェアが無駄となる可能性が高い。一方で、分離した設計においては、サービスの設計時にハードウェアの置き換えを想定し、その置き換えに対応できるような制約の元で利用可能なコストや環境負荷を導出することで、イノベーションが発生した際に、それに対応することが可能となる。すなわち、顧客ニーズの満足を最優先としたアップグレード製品サービスの設計において有用である。

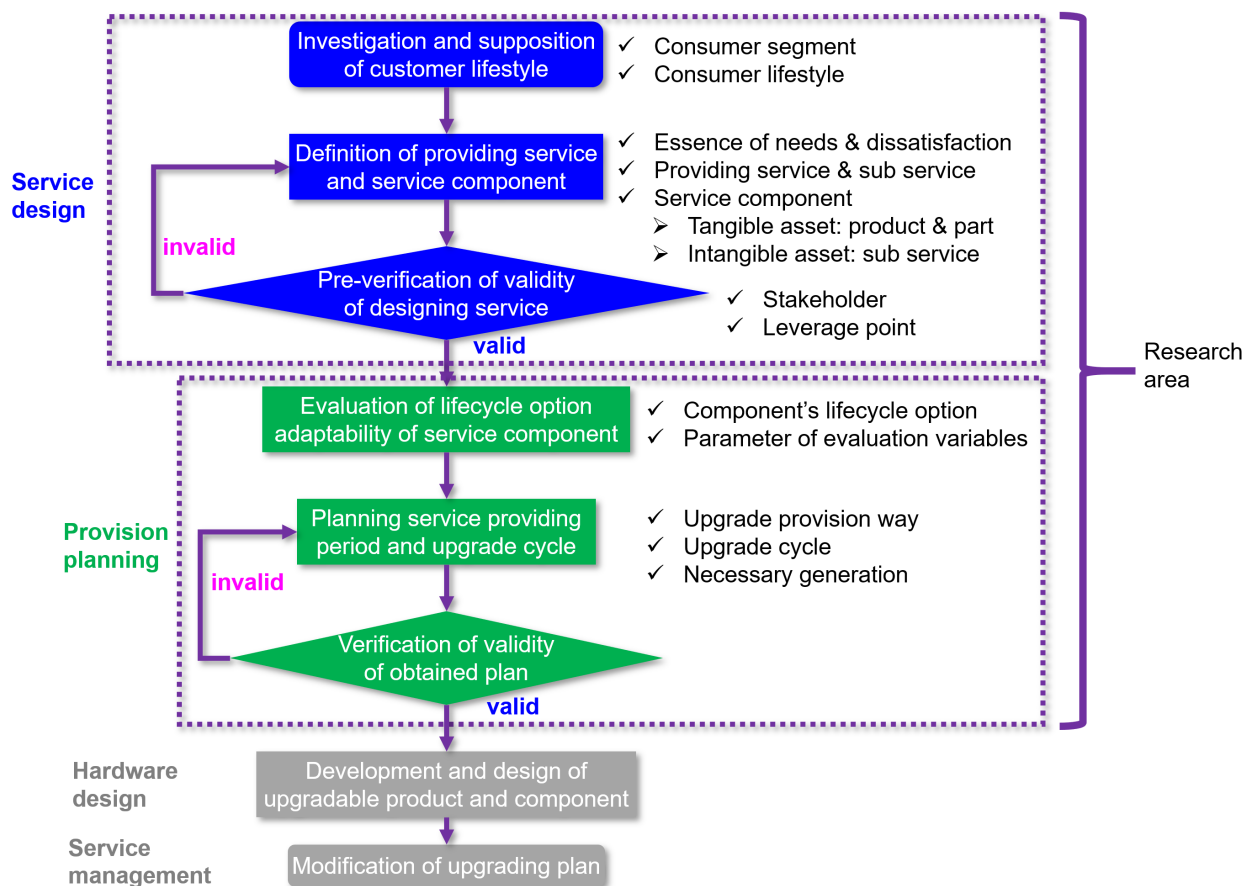


Fig 4.10 Design procedure of proposed upgradable product service system design

4.5. 提案手法の構成

4.5.1. 顧客ライフスタイルの調査, 想定

本節では、提案手法のプロセスを説明する。図 4.11 に「顧客ライフスタイルの調査, 想定」プロセスにおけるサブプロセスを示す。提案手法では、初めに提供するサービスの考案を行うが、アップグレード製品サービスシステムの目的を鑑みると、従来のビジネスモデルよりも長期間に渡って消費者（レシーバ）が受け入れたいと望むサービスであることが望まれる。そのためには、製品サービスがレシーバのライフスタイルに密接に連携し、その変化に対応しながらより快適にすることが必要である。すなわち、サービスの発案においては、レシーバのライフスタイルをアンケート等で調査、把握することが必要である。一方で、レシーバのライフスタイルは多種多様であるため、調査対象とするレシーバを絞り込むことが現実的なリードタイムで設計を行うために必要である。そのため、提案手法では提供サービスのテーマを予め想定し、そのテーマに従ってレシーバを設定する。サービステーマの設定においては、設計者はプロバイダが持つ設備やサプライヤ等のリソースや、既に展開している製品を把握することが必要である。例えば、スマートフォンのメーカーであれば、これまでの自社製品に関連したサービスを想定し、その使用者をサービスのレシーバとして想定することが可能であり、スマートフォンを使用する際のライフスタイルを調査する。製品によって、ライフスタイルで発生するイベントの頻度は異なるため、設計者は調査の粒度に注意を払う必要がある。また、レシーバの設定においては、マーケティング分野や、既存のサービス設計で用いられるペルソナモデルを使用することで、設計者間で共通したレシーバの具体的な人物像を形成、共有することが可能であると同時に、ユーザ視点の精度を向上させることが可能である。

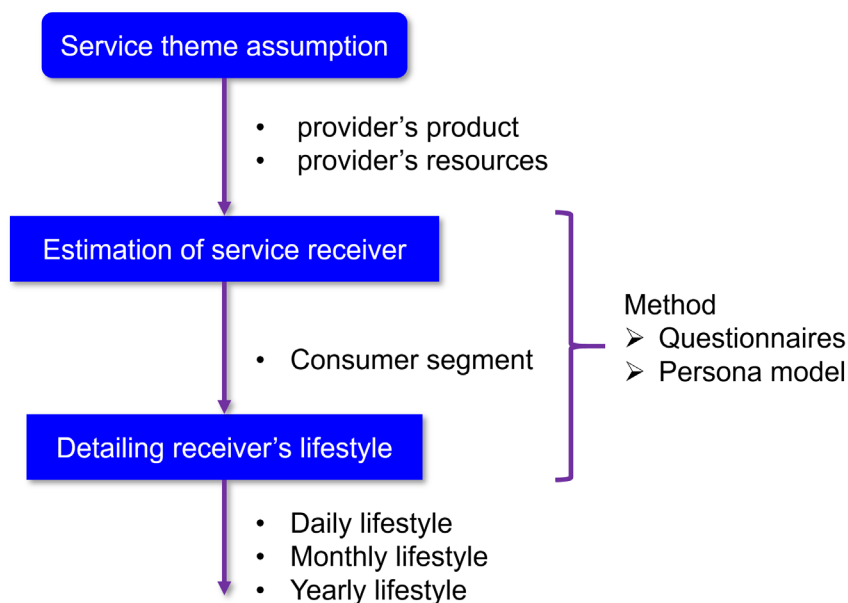


Fig. 4.11 Sub-process of "Investigation and supposition of customer lifestyle" stage

4.5.2.提供サービスおよびサービス構成要素の設定

図 4.12 に「提供サービスおよびサービス構成要素の設定」プロセスにおけるサブプロセスを示す。レシーバのライフスタイルの調査の実施後、その調査からレシーバが抱くニーズ、不満の抽出を行う。抽出の手法としてアンケートの実施や、KJ 法(川喜田, 1970), 評価グリッド法(土田他, 2009)が有用である。同時に、これらの手法を用いてレシーバのニーズや不満に内在するエッセンス（根本的要素）を抽出する。例えば、スマートフォンにおいて、「バッテリーの寿命（動作時間）が短い」という不満が存在した場合、この不満の本質は、長時間操作ができないことを示す。すなわち、「大容量のバッテリーを搭載する」こと以外にも、「端末全体の消費電力を削減する」ことや、「常に無線充電などによって端末を充電可能にする社会インフラの整備」といったアプローチで解消することも可能である。このエッセンスの抽出においては、評価グリッド法を用いて、ニーズや不満の上位概念をインタビューすることが有効な手法である。

ニーズや不満のエッセンスを抽出後、設計者間で提供するサービスの考案を行う。ブレインストーミング(Brown et al., 2002)に代表される自由連想法や、マトリクス法やオズボーンのチェックリスト(Felder, 1988)のような強制連想法, Pugh Concept Evaluation(Pugh, 1991)がサービスの発想支援, さらに、そのサービスを構成する詳細な無形のサブサービスの発想, 選択に有効な手法である。さらに、そのサービスに統合して提供される有形のサービスコンポーネントである製品やその部品の候補を上記の手法で発想し、階層分析法（Analytic Hierarchy Process: AHP）(Mathivathanan, 2017)や品質機能展開（Quality Functional Deployment: QFD）(Yazdani et al., 2017)を用いて絞り込みを実施し、提供するサービスコンポーネントを決定する。

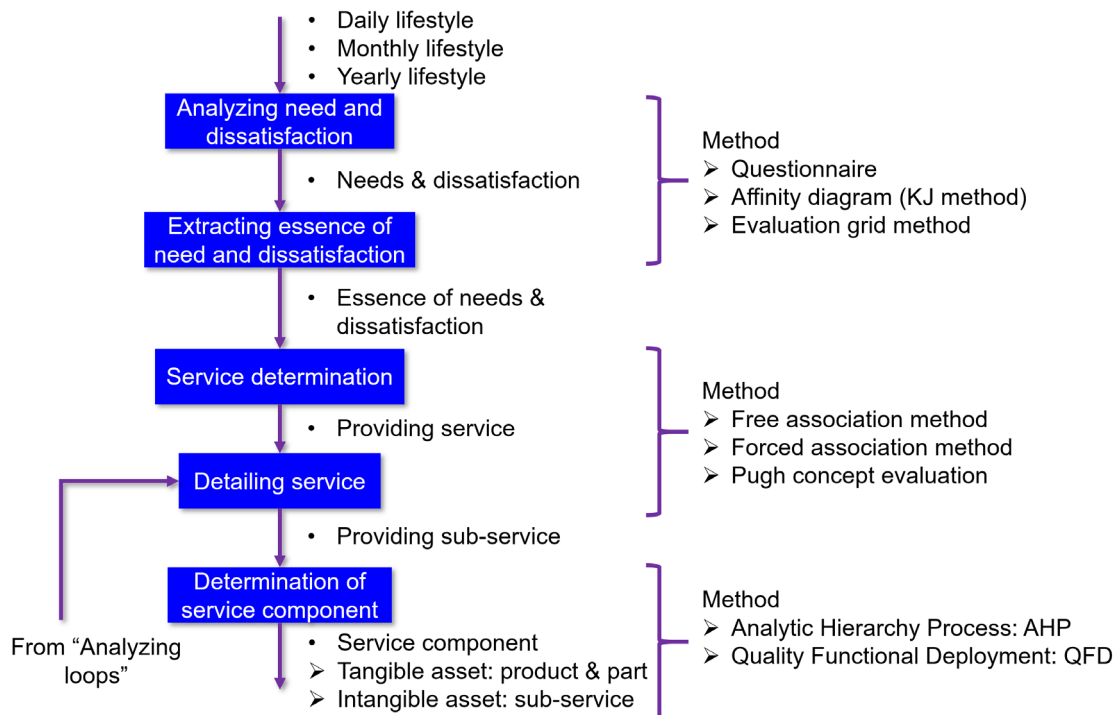


Fig. 4.12 Sub-process of “Definition of providing service and service component” stage

4.5.3.提供サービス有用性の初期検証

図 4.13 に「提供サービス有用性の初期検証」プロセスにおけるサブプロセスを示す。提供サービスや、サービスコンポーネントの決定後、そのサービスを展開する上で必要となるステークホルダの洗い出しを行う。ステークホルダは、サービスのプロバイダ、顧客であるレシーバ、製品や部品のメーカーや、修理やメンテナンス、アップグレードを行う業者、配送や設置を行う業者や、在庫管理や保険を扱う業者が存在しうる。これらのステークホルダ間における物質や価値、金銭の流れを把握するために、顧客価値連鎖分析 (Customer Value Chain Analysis: CVCA) を行う。CVCA はステークホルダ間の価値とその流れをネットワーク図で表現し、金銭や物品、クレームをそれぞれに対応した記号で表すことで識別する(Donaldson et al., 2006)。図 4.14 に更新可能なスマートフォンの製品サービスにおける CVCA の例を示す。図 4.14 において、ステークホルダは、サービスプロバイダである通信事業者 (Mobile Network Operator: MNO, あるいは Mobile Virtual Network Operator: MVNO)、顧客であるレシーバ、スマートフォンの製造者、そのパーツの製造者、更新業者、修理業者、保険会社で構成されており、それぞれのステークホルダ間で流通する金銭や各種状態のスマートフォン、サービス、部品、情報、クレームが描かれており、設計者はステークホルダ間のネットワークを俯瞰し、容易にその関係性を理解することが可能である。後述の因果ループ図(Sterman, 2000)の作成に際して、ループ図の作成数を可能な限り削減するために、一部のステークホルダの分類、集約を実施する。図 4.14 の例においては、スマートフォンの製造者とパーツの製造者を 1 次企業として分類し、更新業者と修理業者を 2 次企業として分類を行っている。

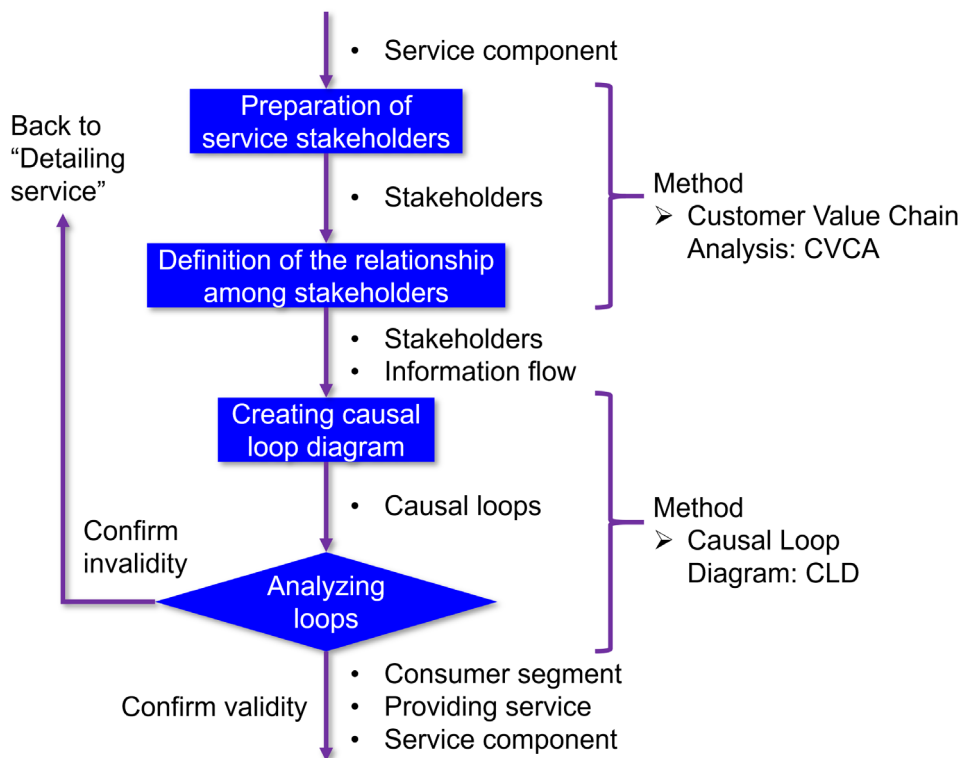


Fig. 4.13 Sub-process of “Pre-verification of validity of designing service” stage

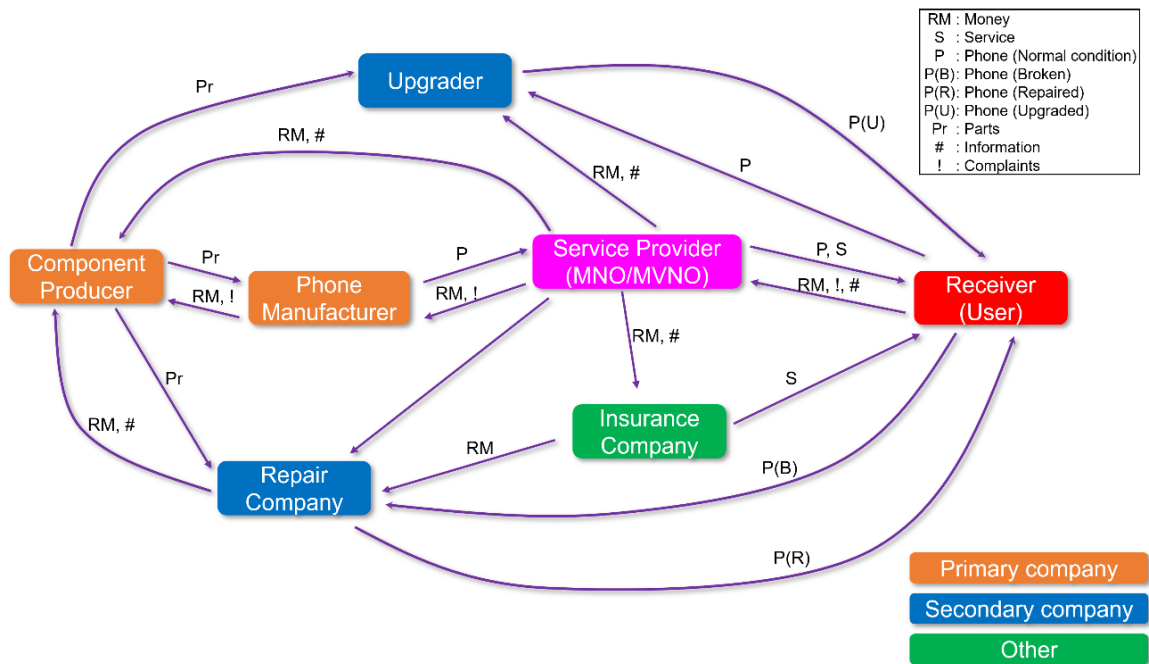


Fig. 4.14 Relationship among stakeholders in upgradable smartphone service

CVCAの実施後、設計する製品サービスの有用性、妥当性の定性的な検証、更新サイクルやサポート期間の設定における留意点を把握するために、各ステークホルダの視点における因果ループ図を作成する。因果ループ図は、分析対象を変数に分解し、変数間の因果の連鎖関係を明らかにすることで、システム内に含まれるフィードバック構造を分析するための、図式分析ツールである。因果関係を表現するリンクとフィードバック構造を表現するループによって表現され、リンクには、正の因果リンクと負の因果リンクが存在する。正の因果リンクとは、2つの変数間においてほかのあらゆる条件が同じであると仮定し、変数Aが増加した場合に変数Bも増加し、かつ、変数Aが減少した場合に変数Bも減少する関係を意味する。すなわち、変数Aと変数Bが同じ方向に動く関係性である。負の因果リンクとは、2つの変数間においてほかのあらゆる条件が同じであると仮定し、変数Aが増加した場合に変数Bが減少し、かつ、変数Aが減少した場合に変数Bは増加する関係を意味する。すなわち、変数Aと変数Bが逆方向に動く関係性である。各因果ループにおける負の因果リンクの総数を算出し、偶数であれば、自己強化型ループ (R: Reinforcing loop)、奇数であれば、バランス型ループ (B: Balancing loop) として分類を行うが、本研究では、持続可能性に関する視点である環境、価格、利益、顧客満足の観点から因果ループ図の変数を用意し、それらの因果関係、フィードバック構造を明らかにするために、各ステークホルダにおける因果ループ図を作成する。自己強化型ループが確認された場合、サービスの展開によってそのループがステークホルダにおいて好ましい方向 (環境負荷の低減や利益の増加等) に進展することを意味するため、設計するサービスがそのステークホルダに対して妥当であるものと判断する。一方で、バランス型ループが存在する場合は、その因果ループ内のレバレッジポイントを発見し、それを更新サイクルやサポート期間の設定における留意点として整理する。

仮に、そのレバレッジポイントの解消が更新サイクルやサポート期間の設定時に困難であると判断した場合は、サービスの構成やステークホルダの見直しを行い、再度因果ループ図による検証を行う。図 4.15 と図 4.16 に更新可能なスマートフォンの製品サービスにおけるサービスプロバイダの因果ループ図と保険会社の因果ループ図の例を各々示す。図 4.15 において、顧客満足と出費に関するループ、顧客満足とサービス品質に関するループ、顧客満足と利益に関するループの 3 つの因果ループが存在し、全て自己強化型ループであることが確認できる。すなわち、設計するサービスは、プロバイダの視点において有用である可能性が高いと判断可能である。一方で、図 4.16 の保険会社のループは、修理件数と保険会社の利益に関するループと、スマートフォンの品質と修理会社の利益に関するループの 2 つのバランス型ループが存在する。これは、スマートフォンの品質向上によって故障台数が減少し、故障件数の低下に伴う修理業者の利益低下の恐れがあることと、品質向上によって保険会社への契約数が減少し、保険会社の利益が減少する恐れがあることを示す。この場合、例えば故障した端末台数がレバレッジポイントとして判断可能であり、全体のサービスにおいて、端末の定期点検を設けることで修理業者の業務数を維持することや、サービスに保険を含有させることで、保険会社への契約数の維持を図るといったアプローチを用いる。

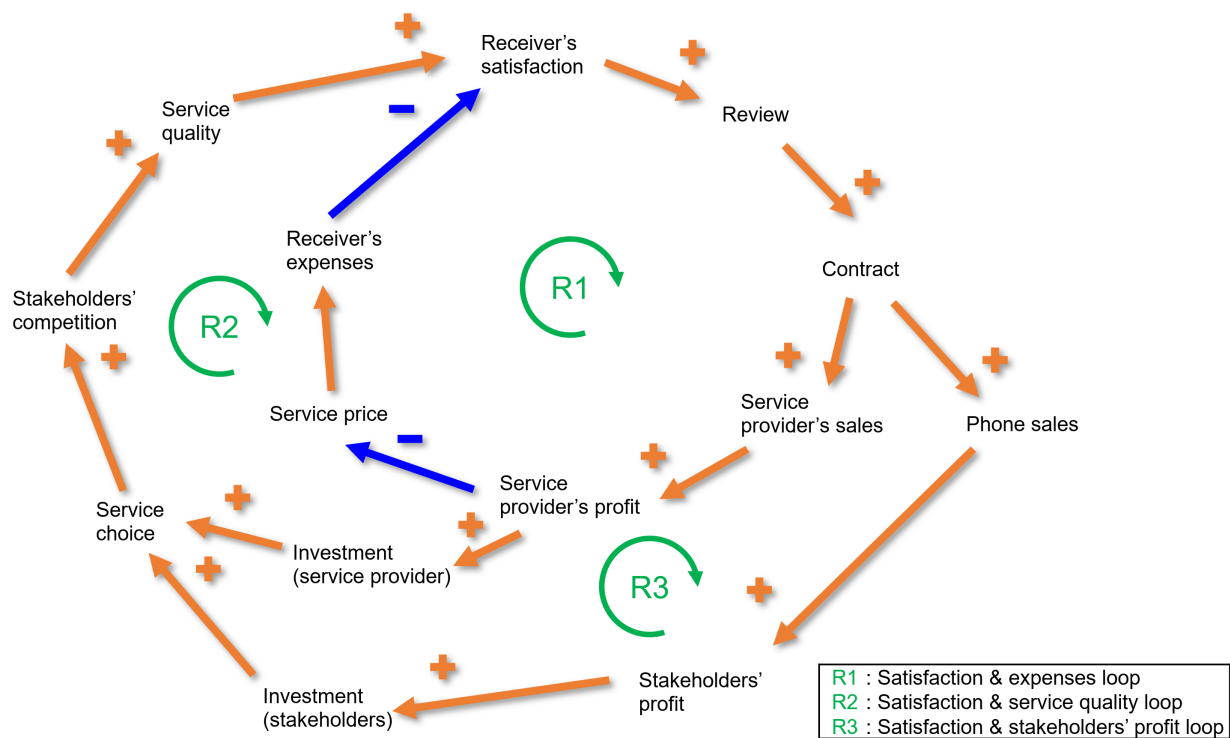


Fig. 4.15 Service provider's CLD in upgradable smartphone service

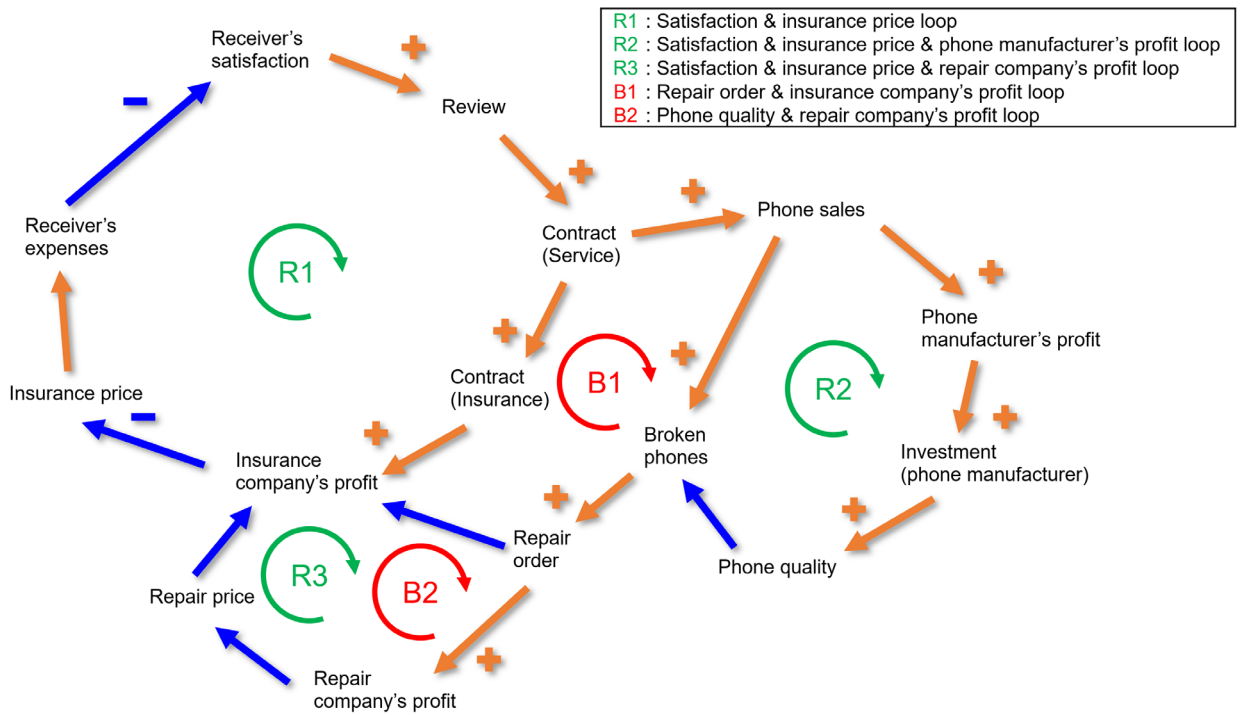


Fig. 4.16 Insurance company's CLD in upgradable smartphone service

4.5.4. サービス構成要素のライフサイクルオプションの設定

ライフサイクルオプションの評価手法は4.2節で示した先行研究で提案されているが、以下の4つの課題点に対応した評価方法の実現が必要である。1つ目は複数の視点を総合的に用いた評価であり、その評価に必要な視点の洗い出しと利用方法の確立である。2つ目は将来予測に由来する不確実性への対応である。ライフサイクルオプションは、アップグレード製品の第1世代使用が終了後に初めて適用されるが、評価自体は第1世代の設計時に行う必要がある。すなわち、将来の調達コストなどの不確実な情報のもとであっても評価を行うことができるロバスト性が必要とされる。3つ目は多様な顧客の要求や志向に対応したライフサイクルオプションの決定である。サービスの向上に向けて製品やその部品をアップグレードする際に、サービス毎に異なる種類のアップグレード部品を設定した場合、更新の作業プロセスの設計、管理が複雑となる場合がある。すなわち、1種類の交換部品で多様な志向に対応可能であることが望まれ、その要求を表現可能であることが要求される。4つ目は、評価方法の簡便さである。例えば、アップグレードの候補の部品を予め設定し、それぞれのライフサイクルオプションを適用した際のシナリオから、評価視点の数値を導出する方法(柴田他, 2017)を用いた場合、評価の精度が向上する可能性はあるが、評価に要する時間は、候補の部品やライフサイクルオプションの数に比例して増大し、評価者の負担となる可能性がある。また、複雑な評価プロセスの実施は、評価実施による開発リードタイムの増加等により、サービスプロバイダ等の導入意欲を削ぐ可能性があるため、一般的な表計算ソフト等で利用可能な、簡便な計算で評価可能であることが好ましい。そこで、本研究では、新しい評価手法を提案し、アップグレード製品サービスシステムの設計手法に統合する。提案する評価手法は、各種ライフサイクルオプションの適合性を評価するライフサイクルオプション適合性評価指標 (Lifecycle option Adaptability evaluation Indicator: *LAI*) (山田他, 2017)を複数の顧客セグメントの志向に対応できるように拡張した、補正ライフサイクルオプション適合性評価指標 (Revised Lifecycle Option Adaptability Evaluation Indicator: $^R LAI$) とその指標値から導出されるライフサイクルオプション適合度 (Lifecycle Option Adaptability: *LOA*) によって構成される。

一方で、サービスの発案段階において、更新やメンテナンスを行う製品や部品が明確に定義された場合は、提案指標を実施する必要はなく、次のプロセスであるサービス提供期間と更新サイクルの設定を行うことが可能である。

・ 提案指標の目的および特徴

本項では、複数の顧客志向を想定したライフサイクルオプション適合性評価指標と、その評価実施手法を記述する。提案指標は上述の *LAI* を拡張するものであり、その各評価視点に重み付けを行うことで、異なる消費者の志向の表現を行う。また、将来予測に伴う不確実性に対応するため、評価に用いる変数値を範囲値で予測および表現を行い、範囲値を用いて評価を行う。評価結果は、提供するアップグレード製品サービスを実現する上で、更新するべき部品やプラットフォームとするべき部品を判断するものである。

・ 補正ライフサイクルオプション適合性評価指標

式 (4.4) に提案する補正ライフサイクルオプション適合性評価指標 (${}^R LAI$: Revised Lifecycle Option Adaptability Evaluation Indicator) を示す. 式 (4.4) において, i はサービスコンポーネント (製品やその部品, モジュール) を示し, l はライフサイクルオプションを示す. さらに, s は対象とする顧客セグメントを意味する. ${}^R LAI$ はその基本式であるライフサイクルオプション適合性評価指標 (LAI : Lifecycle Option Adaptability Evaluation Indicator) に対して, 値域調整指数 (RAE : Range Adjustment Exponent) を累乗した値として定義される. LAI と RAE を式 (4.5) および式 (4.6) にそれぞれ示す. 式 (4.5) において, j は望大特性変数 (LBV : Larger-is-Better Variable) の数, k は望小特性変数 (SBV : Smaller-is-Better Variable) の数, p_s は, セグメント s における評価視点変数 j や k に対する重要度を示し, 評価視点変数である LBV と SBV は 0 より大きい値として定義する. 本手法では, この重要度 p_s を変化せることで, 異なる顧客セグメントの志向を表現する. また, RAE は, 底が算出された LAI の最大値であり, 真数を 2 と定義した冪指数である.

$${}^R LAI_{ils} = LAI_{ils}^{RAE_l} \quad (4.4)$$

$$LAI_{ils} = \frac{\prod_{j=1}^n LBV_{ij}^{p_{sj}}}{\prod_{k=1}^m SBV_{ik}^{p_{sk}}} \quad (4.5)$$

$$RAE_l = \log_{\text{Max}(LAI_{ils})} 2 \quad (4.6)$$

提案指標では, 評価の基準値を設定するために, 用意した評価視点の変数値の標準化を行う. 得られた変数の範囲値の中央値を算出し, 式 (4.7) を用いて全サービスコンポーネントの評価視点変数の範囲値の中央値の平均値を 1 とするように, 各サービスコンポーネントの範囲値を標準化する. 式 (4.7) において, NEV_i はサービスコンポーネント i の標準化された評価視点の変数, EV_i はサービスコンポーネント i の評価視点の変数, c はサービスコンポーネントの総数を各々示す. また, 図 4.17 に標準化の概略図を示す. この標準化は, 評価視点の変数がライフサイクルオプションによってその選好 (変数値が望大特性か望小特性か) が異なるため, その変数値の全モジュールの平均値を基準として 1 にする. 例えば, あるモジュールの標準化した評価視点の変数値が全て 1 の場合, 全てのライフサイクルオプション適合性の評価値は 1 となり, そのモジュールは, どのライフサイクルオプションにも適合できるニュートラルな状態であることを示す.

$$NEV_i = EV_i \times \left\{ \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \text{Median}(EV_i) \right\}^{-1} \quad (4.7)$$

式 (4.7) を用いた標準化は, 全てのサービスコンポーネントの評価視点変数値から, それらの中央値を抽出し, その中央値が 1 となるように標準化する. この手法では, 評

評価対象のサービスコンポーネント間で相対的な優越を表現可能であるが、ソフトウェアのように製造時の環境負荷量の導出が困難な無形の要素や、パソコンや家電の消費電力のように、一部の部品に集中して発生する物理量に関しては、変換が困難である。例えば、家電の外装部品は使用時に環境負荷量を発生することではなく、その値は 0 となる。すなわち、使用時の環境負荷量が望小特性の変数として分類された場合、 LAI や rLAI の値は無限となり、その評価値は不適切であると考えられる。ゆえに、このような変数を用いて評価を行う場合は、標準化は実施せずに、その部品、モジュールによって発生する数値の変化率を用いる。すなわち、評価対象の部品、モジュールによって生じる第 2 世代の発生量を予め予測し、その発生量と第 1 世代の発生量との比を用いることで、変数値の変換を行う。前述の外装部品の場合は、第 1 世代、第 2 世代双方の発生量は同量であるため、変化比は 1 として定義できる。

評価視点変数の標準化の実施後、各ライフサイクルオプションに対して各々望大特性と望小特性の変数に分類し、望大特性変数値は式 (4.5) の分子に、望小特性変数値は分母に代入して適合性を算出する。また、 LAI の値は評価視点変数値の補正を行うことで、評価の基準値が 1 と定義され、0 より大きく 1 未満の場合は適合性が低く、1 より大きい場合は適合性が高い状態を意味するが、これは低適合性と高適合性を示す評価値の値域が異なることを意味する。そのため、 RAE を LAI に累乗することで、それぞれのライフサイクルオプションにおいて、高い適合性を示す指標値の最大値を 2 に補正して双方の値域の差を 1 に補正する。図 4.18 に RAE による LAI の値域変化の概略図を示す。

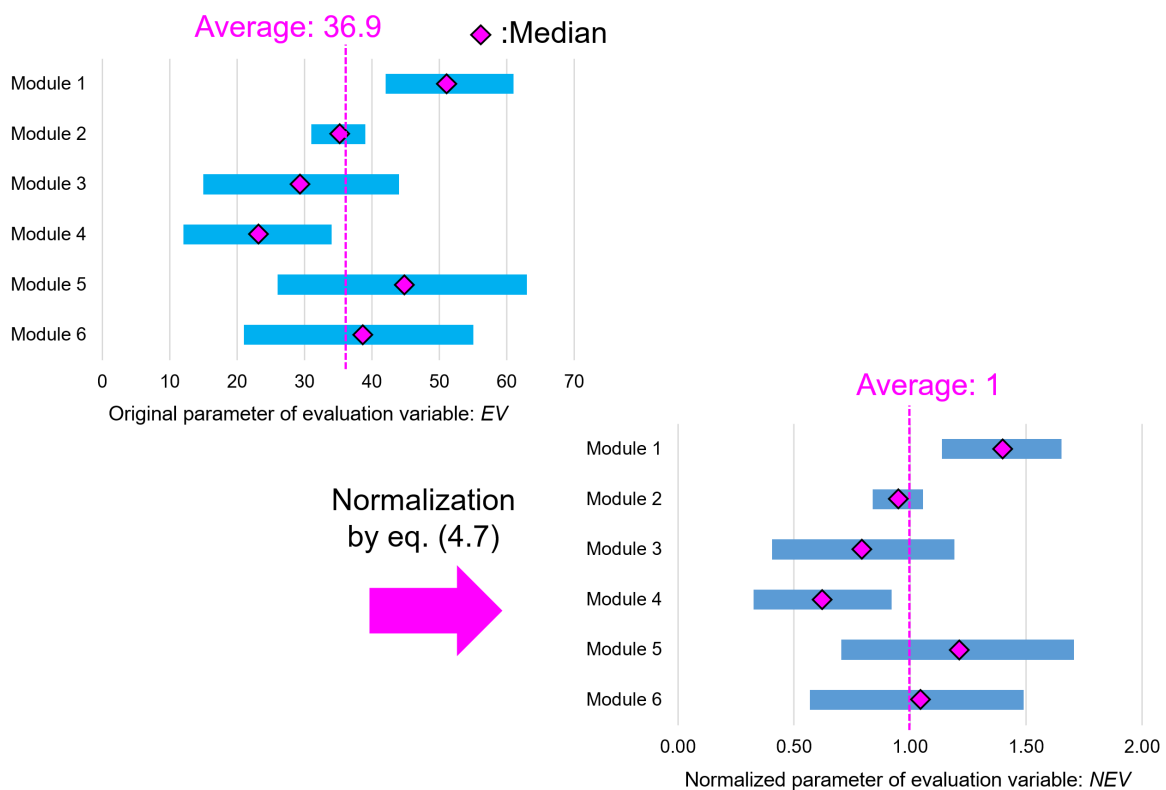


Fig. 4.17 Schematic of the parameter normalization process of evaluation variable

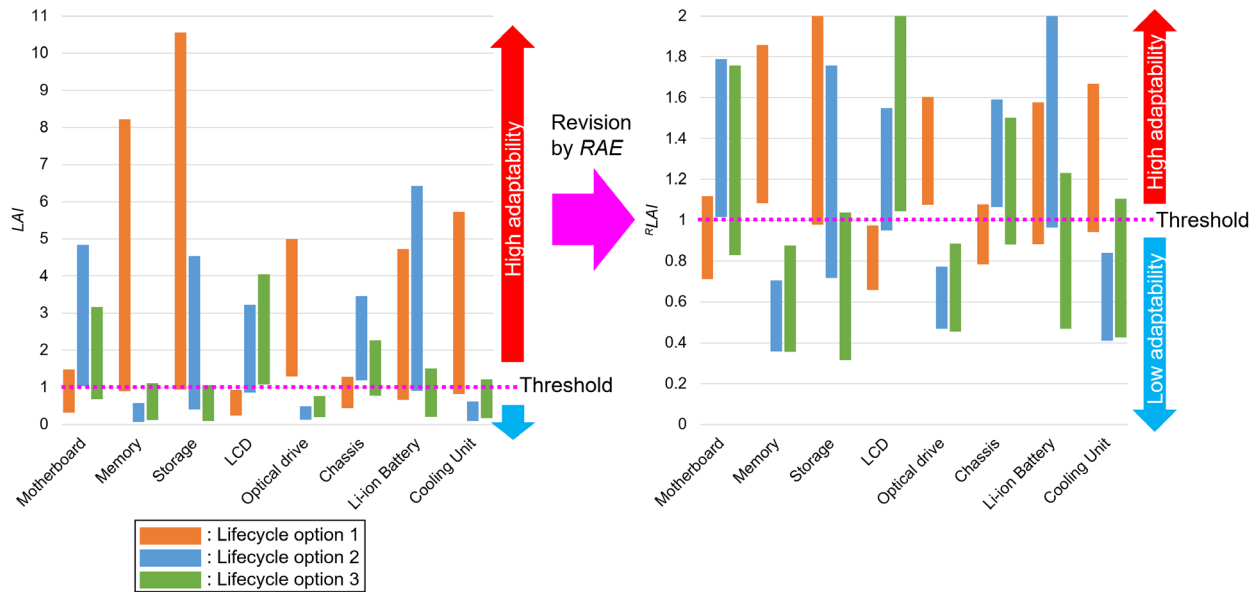


Fig. 4.18 Schematic of the parameter revision in *LAI* (Laptop module case)

・ 提案指標を用いた評価プロセス：ライフサイクルオプションの選択

提案指標を用いた評価プロセスを図 4.19 に示す。本評価手法は、設計する製品サービスの有用性の検証後に実施し、4.5.2 項で設定したサービスコンポーネント（製品やその部品、モジュール）に対して実施される。初めに、評価の対象とするライフサイクルオプションを設定する。これは、サービスのプロバイダがそのシステム境界に有する再生設備に依存する。例えば、プロバイダやステークホルダが強力な再生設備を有する場合は、リマニュファクチャリングの実施が可能であるが、設備が強力ではない場合は、リファビッシュやリペアを想定した評価を行うことが好ましい。

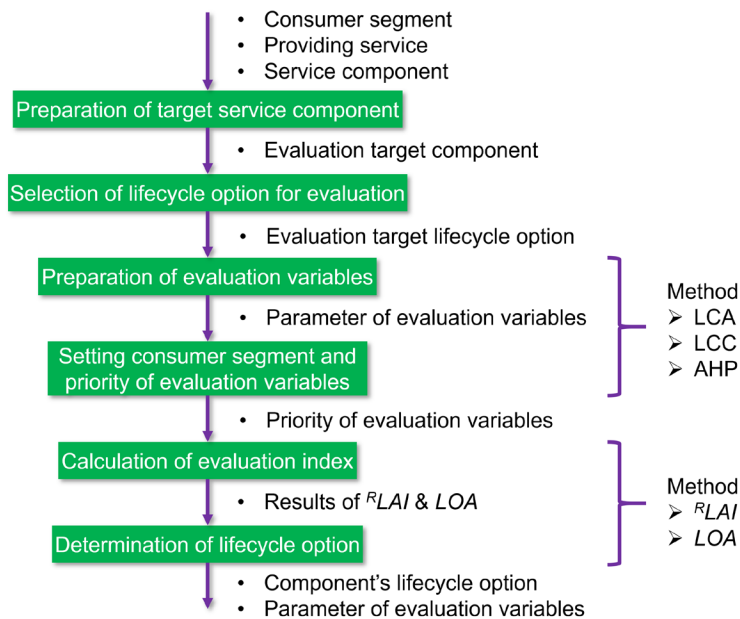


Fig. 4.19 Sub-process of “Evaluation of lifecycle option adaptability of service component”

stage

- ・ 提案指標を用いた評価プロセス：評価視点変数の準備

評価対象のライフサイクルオプションの決定後は、評価視点の準備を行う。先行研究において、評価視点は製造時の環境負荷量やコスト、部品やモジュールの物理寿命や価値寿命などが用いられている。これらの評価視点に加えて、サービスコンポーネントの使用時や廃棄時の環境負荷量やコスト、さらに、提供サービスに対するサービスコンポーネントの貢献度等が評価の視点として用いることが可能である。すなわち、評価視点変数は、主として環境、経済、信頼性、顧客満足の4つの観点に大別される。設計者はこれらの評価視点より、提供する製品サービスの目的に従って適切に選択し、評価対象のサービスコンポーネント毎に各評価視点変数の範囲値を用意する。評価視点の範囲値の設定においては、過去の数値の変動や推移を考慮して設定を行う必要があるが、既存のデータが存在しない場合は、類似するコンポーネントの情報から推測し、設定を行う。

さらに、その評価視点変数の望大特性、望小特性の決定を行うが、その決定は、提供する製品サービスのシナリオに依存する。例えば、部品のリマニュファクチャリングを想定する場合、その部品を再生する際の再生資源投入量の割合によって、環境負荷量の望大望小特性が変化する。すなわち、再生資源投入量が少ない場合は、新品資源投入が多くなるため、その部品の製造時の環境負荷量は望小特性となるが、逆の場合は、製造時に新品資源を多く必要とする部品がリマニュファクチャリングされるべきであると考えられるため、望大特性となる。ゆえに、提供シナリオの設定は評価をより適切に行うために注意を払って行う必要がある。

- ・ 提案指標を用いた評価プロセス：顧客セグメントの設定、評価視点の重み付け

4.5.2 項で対象としたレシーバの情報から、設計するサービスの顧客セグメントとその規模を設定し、セグメント毎に各評価変数の重要度を設定する。セグメントの設定においては、クラスター分析が有用な手法である。評価視点の重要度は、セグメント毎に設定し、その設定においては、AHP で用いられる一対比較が有用な手法である。その後、評価の基準を設定するために、評価視点変数の標準化を行う。

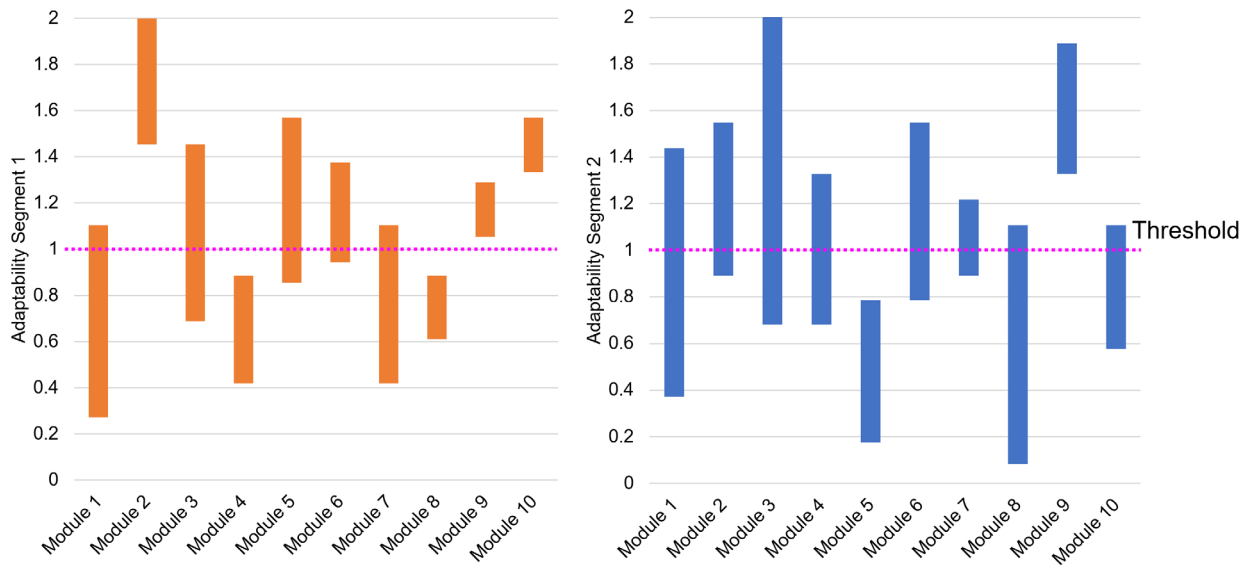
- ・ 提案指標を用いた評価プロセス：適合度の導出、ライフサイクルオプションの決定

標準化の実施後に各種サービスコンポーネントに対してライフサイクルオプション毎の ${}^R L A I$ の算出する。設計者はこの評価を設定したセグメント全てに対して行う。図 4.20 に評価結果の例を示す。 ${}^R L A I$ の結果から、各モジュールのライフサイクルオプション毎の適合度 ($L O A$: Lifecycle Option Adaptability) を算出する。式 (4.8) に適合度 $L O A$ の算出式を示す。 $L O A$ は、 ${}^R L A I$ の全値域における基準値 1 以上の値域の割合を意味する。ただし、 ${}^R L A I$ の最小値が基準値 1 よりも大きい場合、 $L O A$ の値は適合度の最大値である 1 となり、 ${}^R L A I$ の値が 1 未満であるときは、適合度は 0 と定義する。最終的な適合度 $L O A_{T o t a l}$ の算出は、セグメントの規模に応じた重み $S c$ を各セグメントの $L O A$ に積算し、それらを加算して導出する。式 (4.9) にその算出式を示す。また、図 4.20 下部に 2 つのセグメントの ${}^R L A I$ の結果から最終的な $L O A_{T o t a l}$ を導出する際のプロセスの概略図を示す。さらに、ライフサイクルオプションの決定においては、最も高い $L O A_{T o t a l}$ を示したライフサイクルオプションを選択することや、 $L O A_{T o t a l}$ の下限値を設定してを行う。

例えば図 4.20 下部において、 LOA_{Total} の下限値を 0.70 と設定した場合、モジュール 2, 6, 9, 10 の 4 つが推奨されるものとして判断する。

$$LOA_{ils} = \begin{cases} \frac{Max(LAI_{ils}) - 1}{Max(LAI_{ils}) - Min(LAI_{ils})} & \left. \begin{array}{l} Max(LAI_{ils}) \geq 1, Min(LAI_{ils}) \leq 1 \\ Min(LAI_{ils}) > 1 \\ Max(LAI_{ils}) < 1 \end{array} \right\} \\ 1 \\ 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

$$LOA_{Total} = \sum S_{C_S} \times LOA_S \quad (4.9)$$



	Modules									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
$LOA_{Seg.1}$ (70% of Receiver)	0.12	1.00	0.59	0.00	0.80	0.87	0.15	0.00	1.00	1.00
$LOA_{Seg.2}$ (30% of Receiver)	0.41	0.84	0.76	0.51	0.00	0.72	0.67	0.11	1.00	0.20
LOA_{Total} ($0.7 \times LOA_{Seg.1} + 0.3 \times LOA_{Seg.2}$)	0.21	0.95	0.64	0.15	0.56	0.83	0.31	0.03	1.00	0.76

Fig. 4.20 Derivation process of LOA_{Total} from ${}^R LAI$

4.5.5. サービス提供期間および更新サイクルの決定

ライフサイクルオプションの適合性指標^R*LAI*と適合度*LOA*から判断された各サービスコンポーネントのライフサイクルオプションの決定後にサービス提供期間と更新サイクルの計画を行う。この計画プロセスは、5つのサブプロセスで構成されており、図4.21に「サービス提供期間と更新サイクルの計画」プロセスにおけるサブプロセスを示す。

初めに、4.5.4項で決定したサービスコンポーネントのライフサイクルオプションの情報を基に、更新対象のコンポーネントの整理、準備を行う。ここで、更新対象のライフサイクルオプションは機能の向上を目的としたアップグレード付きのライフサイクルオプションのみならず、リマニュファクチャリングやリファビッシュ、リペア（メンテナンス）も含む。すなわち、表2.1に示したライフサイクルオプションの内、リユースとロングライフ以外が検討の対象となる。

2番目に、それぞれのサービスコンポーネントの更新実施手段を決定する。従来研究において、その手段を判断する手法は提案されていないため、本研究では、設計者の更新手段の意思決定を支援するための手法としてアップグレード方法決定マトリクス（Upgrade Way Decision Matrix: Up-WDM）（Yamada et al., 2018）を提案する。Up-WDMの詳細は後述する。

3番目に、各種サービスコンポーネントのライフサイクルシナリオを想定し、コストや環境負荷量の発生源を整理する。本研究では、環境、企業、消費者の3者の持続可能性を考慮するため、低環境負荷、高利益、低価格（低出費）を同時に実現するサービス提供期間、更新サイクルを決定するため、これらの情報を整理、把握する。

4番目に計画構成における要求仕様を設定するために、比較対象のビジネスモデルの設定を行う。このビジネスモデルの設定においては、提供するサービスコンポーネントの既存の販売形態を調査する。例えば、ターゲットとなるコンポーネントがリースとして広く販売されている場合、設計するアップグレード製品サービスは、このリースのビジネスモデルと比較してより、低環境負荷、高利益、低価格（低出費）を同時に実現できるように計画、設計される必要があり、これが実現できるような要求仕様を設定する。

最後に、設計者は設定した要求仕様を多目的満足化手法に適用することで、提供計画の設計解を導出する。利益と環境負荷量、利益と価格の間にトレードオフ関係が存在するため、多目的満足化手法が必要となる。本研究では、3章で示したPSD手法を使用する。本プロセスにおいて、提供計画の設計解は将来取り得るであろうと予測した設計変数の情報を用いて導出される。すなわち、将来予測に起因する不確実性が多く含まれるため、この設計段階において「最適な設計解」を判断することが不可能である。実際の最適な設計解は、設計したサービスが終了して初めて確認可能である。そのため、提案手法では、予測される設計情報において、制約条件を「満足する設計解」を導出する。

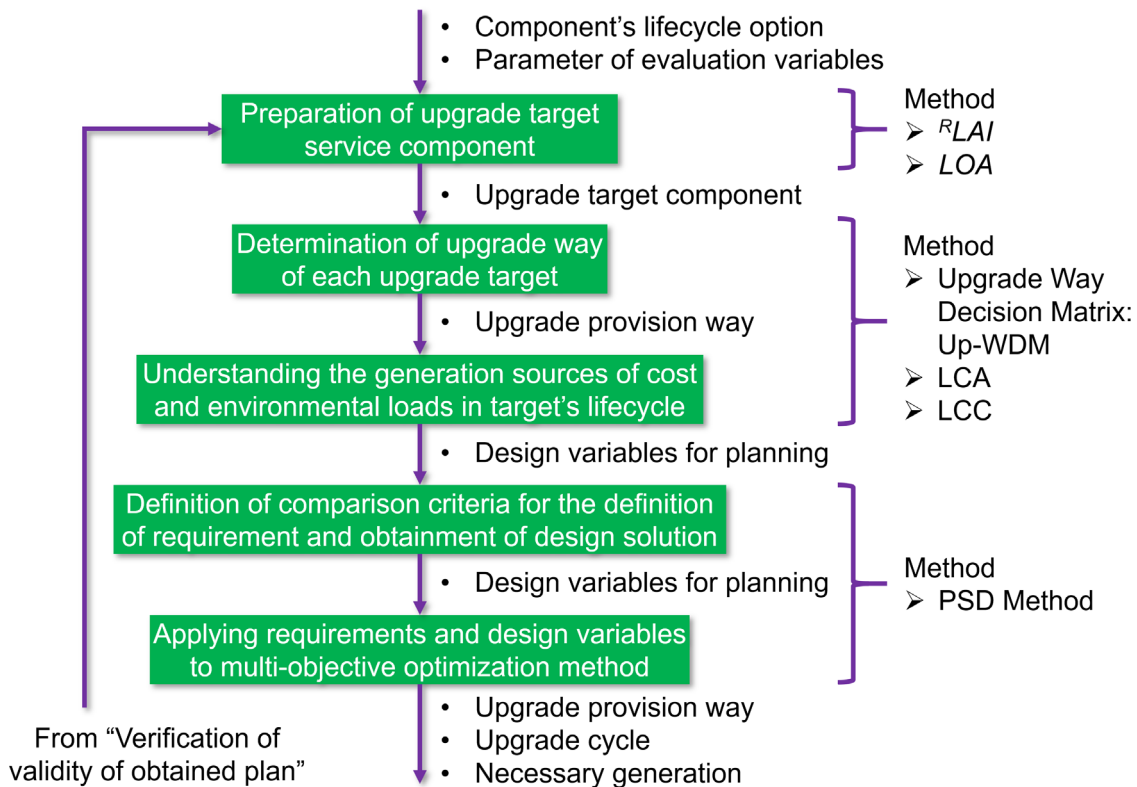


Fig. 4.21 Sub-process of "Planning service providing period and upgrade cycle" stage

・ アップグレード方法の決定

本研究では、以下の4つのアップグレード方法を想定し、その決定を支援するためのサポートツールとして Up-WDM を提案する。

- i. Send-back upgrade
- ii. User-s upgrade
- iii. User-b upgrade
- iv. Serviceman upgrade

これら4つのアップグレード方法におけるアップグレード時の製品および交換部品のフローの概略図を図4.22に示す。Send-back upgradeは、アップグレードする製品、部品をメーカーの元にそのまま送り、メーカーのエンジニアがアップグレード作業を行う場合を示す。この場合、コストは、送料、部品代、作業費、処分費が各々発生し、環境負荷は部品生産時、輸送時、処分時、作業時に各々発生する。

User upgradeは、ユーザ（サービスレシーバ）自らアップグレード作業を行う場合を示す。コストは、送料、部品代、処分費が発生し、作業費はユーザ自ら行うため発生しない。環境負荷はSend-back upgradeと同様に、部品生産時、輸送時、処分時、作業時に発生する。一方で、User upgradeは交換部品の廃棄方法によって、User-s upgradeとUser-b upgradeに分類する。User-s upgradeは、廃棄する部品をユーザ自身が自治体等のサービスで廃棄できる場合を表し、User-b upgradeは、ユーザが交換した部品をメーカーに返し、メーカーが廃棄処理する場合を意味する。

Serviceman upgrade は、ユーザのもとに、メーカーから派遣されたサービスマンや認定エンジニアが行き、アップグレード作業を行う場合を示す。コストは、部品代、作業費、処分費に加え、サービスマンやエンジニアの移動費が発生する。環境負荷は部品生産時、移動時、処分時、作業時に発生する。

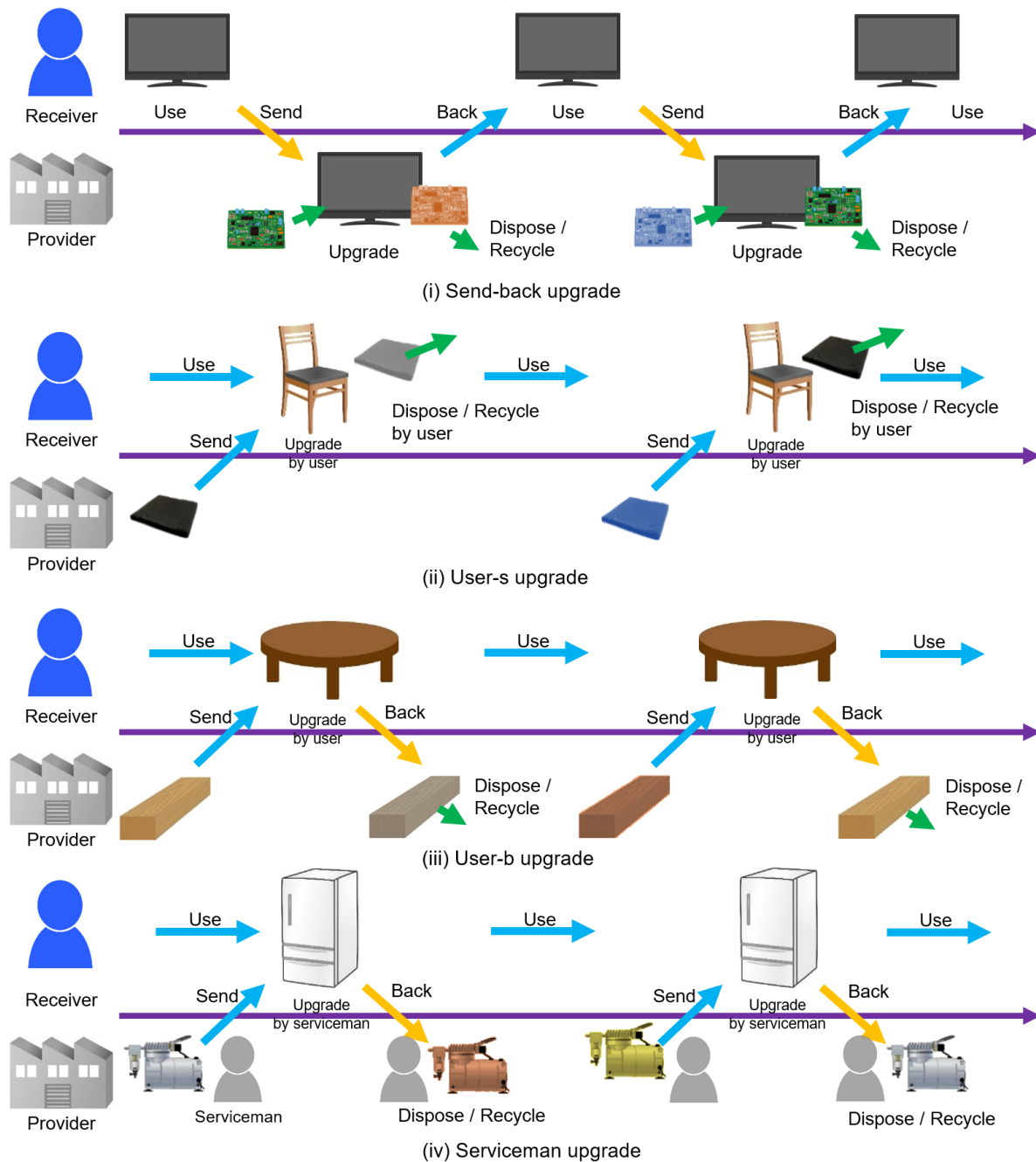


Fig. 4.22 Service component (product and part) flow in each upgrade way

前述のアップグレード方法決定のサポートツールである Up-WDM を表 4.2 に示す。Up-WDM は、アップグレード作業に関連した項目であるアップグレード特性項目と、各種アップグレード方法において、適用する際に推奨される状態を表す。本研究では、4つのアップグレード方法から、①アップグレード作業に要する技術、②アップグレード作業時間がレシーバの生活、社会活動に与える影響、③製品全体の重量、④更新対象部品の重量、⑤製品全体のサイズ、⑥更新対象部品のサイズ、⑦交換部品の再利用性、⑧交換部品廃棄におけるコストの発生、⑨交換部品に含有する有害物質の有無の9つの特性項目を設定した。

Up-WDM は更新対象のサービスコンポーネント 1 つ 1 つに対して、上記の 9 項目の状態を定性的に整理し、各々のコンポーネントを -1, 0, 1 の 3 段階でスコアリングを行う。初めに、各更新対象のコンポーネントに対し、アップグレード方法に対応した 4 成分のベクトルを定義し、全ての成分に 0 を代入する。次に表 4.2 のマトリクスを参照し、各成分に上記の 3 段階の得点を加算する。例えば、アップグレード作業に要する技術が High の場合、表 4.2 より (Send-back, User-s, User-b, Serviceman) = (High, Low, Low, Middle) であるため、更新対象コンポーネントのベクトルに (1, -1, -1, 0) を加算する。一方で、要求される技術が中程度の場合、更新対象コンポーネントのベクトルに (0, 0, 0, 1) を加算する。この得点付けを 9 項目行い、最も点数が高い成分に該当するアップグレード方法を抽出する。図 4.23 に Up-WDM を用いたスコアリングの例を示す。この場合、最も高い成分は Send-back であるため、Send-back upgrade が選択される。

Table 4.2 Upgrade way decision matrix: Up-WDM

Criterion \ Upgrade way	Send-back	User-s	User-b	Serviceman
Necessary technique	High	Low	Low	Middle
Influence on receiver's life or work by upgrade-operation time	Low	Middle	Middle	High
Weight of entire product	Light	Heavy	Heavy	Middle
Weight of target part	Middle	Light	Light	Heavy
Size of entire product	Small	Large	Large	Large
Size of target part	Large	Small	Small	Middle
Reusability of exchanged part	High	Low	High	High
Disposal cost occurrence of exchanged part	Yes	No	Yes	Yes
Inclusion of hazardous substance in exchanged part	Yes	No	No	Yes

Evaluation Criterion	Characteristics		Send-back	User-s	User-b	Serviceman
• Necessary technique	High	Scoring ➔	1	-1	-1	0
• Influence on receiver's life or work by upgrade-operation time	Low		1	0	0	-1
• Weight of entire product	Middle		0	0	0	1
• Weight of target part	Light		1	0	0	0
• Size of entire product	Small		1	-1	-1	-1
• Size of target part	Middle		0	0	0	1
• Reusability of exchanged part	High		1	-1	1	1
• Disposal cost occurrence of exchanged part	Yes		1	-1	1	1
• Inclusion of hazardous substance in exchanged part	No		-1	1	1	-1
			Result	5	-3	1

Recommended upgrade way

Fig. 4.23 Scoring by Up-WDM and decision process of upgrade way

• コスト，環境負荷の発生源の把握

Up-WDM を用いたアップグレード方法の設定後，設計者は，各アップグレード方法に対して図 4.22 に示すようなライフサイクルシナリオを想定し，物質や金銭のフローを整理，把握する．ライフサイクル全体で発生するコストや環境負荷量は，製造時，輸送時，アップグレード作業時，廃棄時の発生量の合計であるため，それぞれのサービスコンポーネントにおけるこれらの発生量を整理する．特に輸送時と更新作業時の発生量は，アップグレード方法に強く依存するため，輸送手段やステークホルダ間の距離に注意する必要がある．さらに，これらの発生量は，将来発生するものが含まれるため，不確実性に対応するために，範囲値で用意する．最後に，設計者はサービスのライフサイクル全体の価格や利益，環境負荷量を全ての発生源の総計として定式化する．

• 既存ビジネスモデルの調査，要求仕様の設定

コストや環境負荷量の発生量，定式化が完了したら，設計者は，既存のビジネスモデルを調査し，そのビジネスモデルにおける価格や利益，環境負荷量の情報を調査する．調査結果は，PSD 手法適用における要求仕様として用いられ，アップグレード製品サービスが既存のビジネスモデルと比較して環境，経済の側面で優位性を持つための更新頻度やサポート期間の導出を行う際の基準となる．また，予め更新頻度やサポート期間を設定し，その妥当性の検証を行う場合は，製品に付与する利益率や，必要使用世代数を導出する際の基準となる．アップグレード製品サービスが既存のビジネスモデルと比較して低価格（低コスト），高利益を同時に実現する際の影響を図 4.24 に示す．アップグレード製品サービスにおいて，第 1 世代の製品に設定する価格は，従来製品と同等であるが，第 2 世代以降は，更新時に部品のコストを有する．すなわち，第 2 世代以降に従来製品と比較してより低価格であることを維持すると同時に，より多くの利益（率）を付与することで，サービスの提供期間トータルで低価格，高利益を実現する．環境負荷量においては，更新可能な設計を行うために必要な追加の環境負荷量（例えば，部品間を接続するインターフェース部品に起因する環境負荷の増加分）を適切に第 1 世代に付与することで，低環境負荷を実現する．図 4.25 に環境負荷量に関するアップグレード

製品サービスと従来製品の比較を示す。

・ 設計解の導出

要求仕様の設定が完了したら、各種発生量や設計変数の範囲値、要求仕様、ライフサイクル全体の価格や利益、環境負荷量の算出式を PSD 手法に適用し、範囲解を導出する。PSD 手法に適用する設計変数は、更新回数や 1 世代当たりの年数、利益率等の初期範囲値情報が含まれ、これらの実現可能な範囲値を導出することで、更新頻度、サポート期間の導出や、その妥当性を検証する。導出された更新頻度やサポート期間は、設計者がハードウェアを設計する際に、そのハードウェアが有すべき物理寿命の設定や、各更新のサイクルにおける開発リードタイムとして用いられる。図 4.26 に PSD 手法を用いた範囲解導出プロセスの概略図を示す。設計解が導出できない場合は、PSD 手法に入力情報として適用した設計変数の初期範囲値の情報の修正を行い、再度 PSD 手法に適用することで、要求仕様を満足させる設計解の探索を行う。

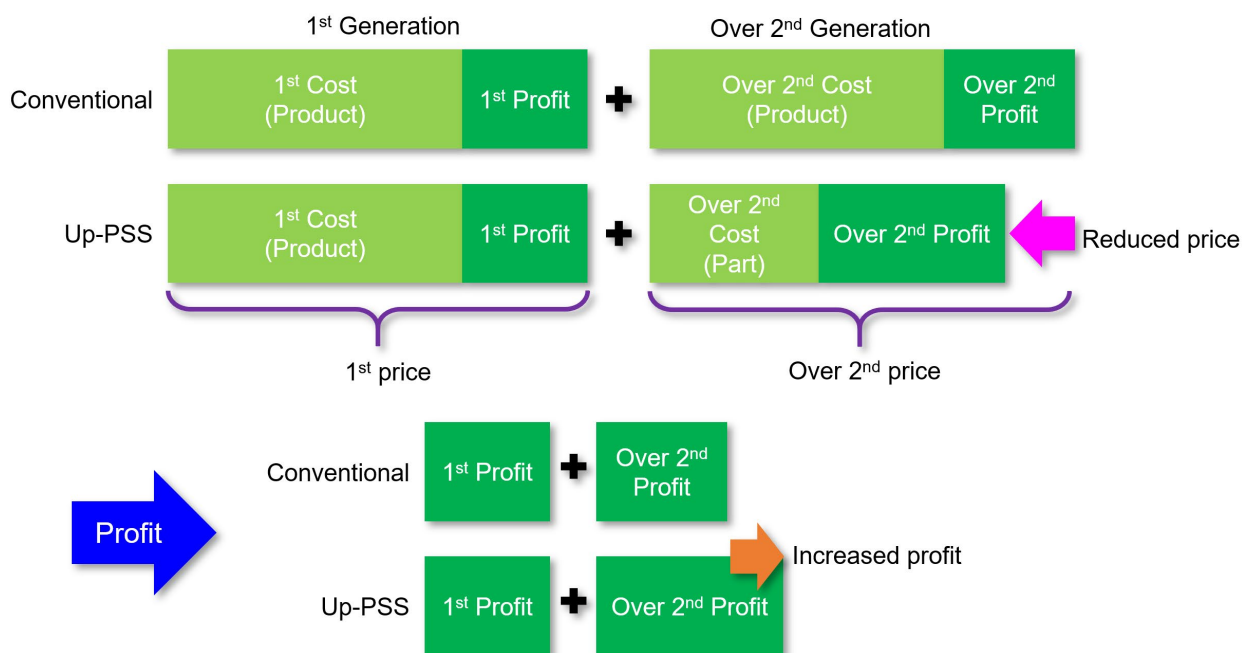


Fig. 4.24 Ideal relationship between product price, cost, and profit (Yamada et al., 2016)

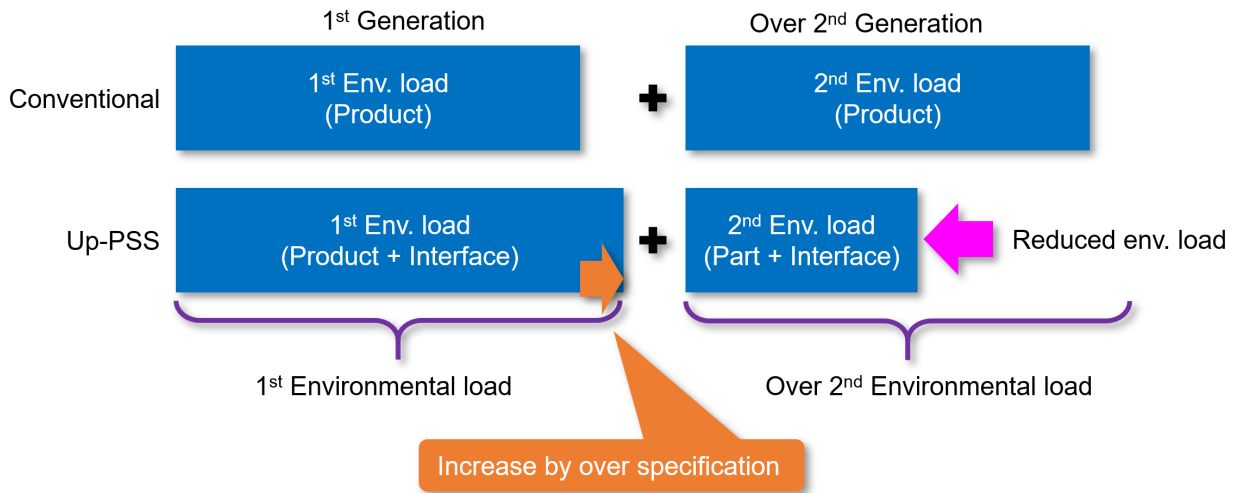


Fig. 4.25 Ideal relationship in environmental load

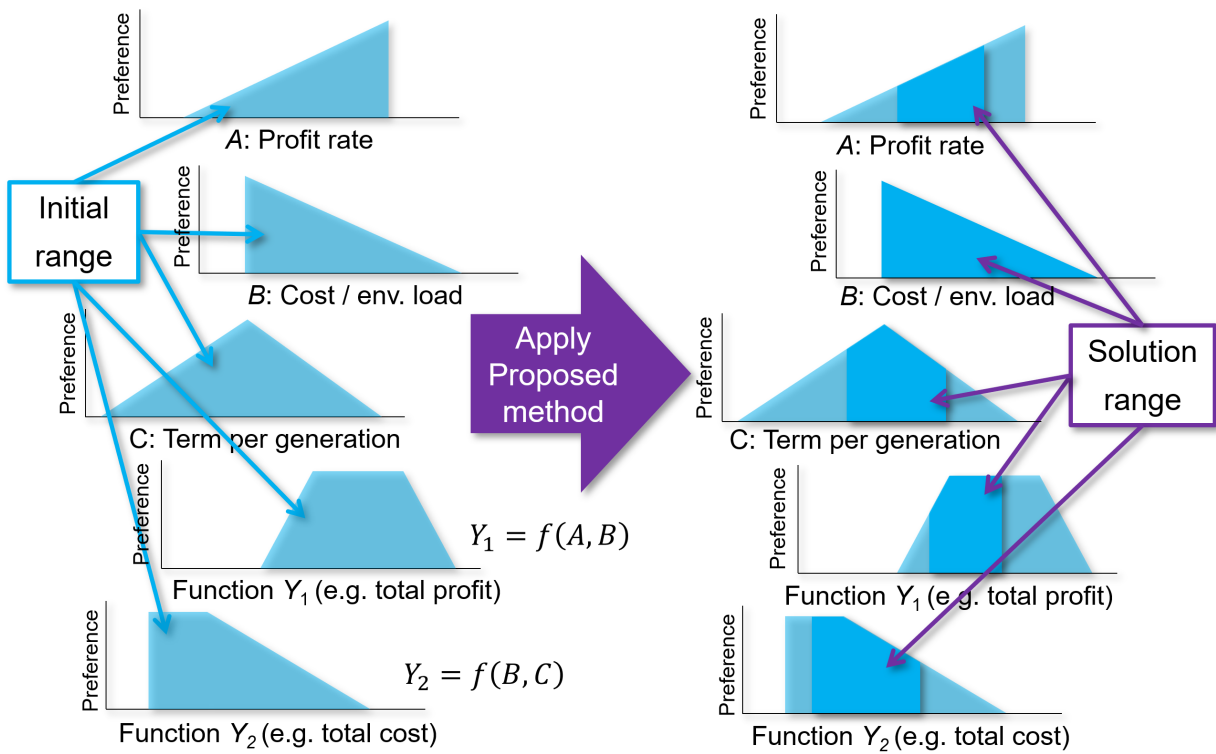


Fig. 4.26 Schematic of ranged design solution obtainment

5. 適用事例

5.1. 適用事例の概要, 目的

本章では提案するアップグレード製品サービスシステム設計手法をノートパソコンのリースビジネス, 家具家電のパッケージレンタルビジネス, 複合機のリースビジネスの設計に適用した例を示す。ノートパソコンや複合機のリースビジネスでは, 更新対象のサービスコンポーネントがマザーボードやメモリ等の製品であるノートパソコンのモジュールであるが, パッケージレンタルでは各家電パッケージを1つの製品として捉え, それを構成する製品であるテーブルやテレビなどの製品がサービスコンポーネントとして扱われる。また, 更新提供計画の導出において, ノートパソコン, 家具家電レンタルの事例では, 予め設定したサービスの更新頻度, サポート期間の妥当性を PSD 手法により検証するが, 複合機の事例では, 予め設定したサポート期間において, 最も低環境負荷, 高利益, 低価格を同時に実現する更新頻度を PSD 手法に適用して導出する。

適用事例の選択理由に関しては, ノートパソコンのリースビジネスは, 企業や学校に対してパソコンのメーカーや, リース会社によって広く行われており, 一部のメーカーは, 個人の顧客に対してもビジネスを展開している。ノートパソコンは一般的に技術の進歩が速い製品として認識され, 通常のリースの場合, ユーザビリティの向上を目的として3~5年のサイクル(国税庁, 2008a)で端末全てを更新する。しかしながら共用のPCとしてリースされる場合, 使用者は, そのPCに対して所有することよりも, 使用することに対する価値を重要視する。すなわち, 操作性に関連する部品のみを更新すれば良く, 筐体のような関連しない部品に関しては, そのまま更新せずに使用可能である。ゆえに, アップグレード設計をリースに統合し, アップグレード製品サービスとして, アップグレード可能なノートパソコンのリースビジネスは需要があると考えられるため, 本研究の適用事例として選択した。本事例では, 提案するライフサイクルオプション適合性評価手法によって導出した各モジュールのライフサイクルオプションの結果において, 持続可能な更新提供計画の導出が可能であることを確認する。

家具家電のパッケージレンタルに関しては, 家具や家電の購入は大きな初期投資が必要となり, その費用の捻出が困難な若年層や新興国からの労働者に対して需要があると考えられる。また, 近年の我が国における単身世帯数の増加や, 少子高齢化に伴う労働者不足に対して, 政府の外国人労働者の受け入れ拡大を図る政策(磯山, 2018)もあり, 今後需要が増える可能性がある。また, 家具家電のレンタルにアップグレードを統合することは, 家電が経時的に陳腐化することを予防できると同時に, 家具に関しては, 適切なメンテナンスが実施され, 経時的にその価値が成長する可能性を秘めている。また, 家具家電付きの社宅を持つ企業や賃貸物件のオーナーにおいては, 定期的に最新性能の家具家電が物件に備わることになり, 物件のアピールポイントとすることが可能であると同時に, その家具家電の維持, 管理を外注できるメリットも存在する。ゆえに, アップグレード製品サービスとの親和性が高いと判断したため, 適用事例に選択した。本事

例では、提案するアップグレード製品サービスシステム設計手法が、複数製品によって構成されるアップグレード製品サービスシステムの設計において、持続可能性に関する制約を満足させながら、提案手法実施後に行うハードウェアの詳細設計段階における要件の導出が可能であることを確認する。

複合機のリースビジネスに関しては、近年のペーパーレス化により複合機の市場規模が縮小傾向にある(矢野経済研究所, 2017)ため、メーカーにおいて、獲得した顧客を長期間に渡って維持する必要性が存在する。そのためには、単なる複合機の販売やリースではなく、機能更新を付属し、顧客に対して付加価値の高い製品サービスの提供が必要である。また、近年では、印刷コスト削減のために、従来の企業向け複合機にて採用されてきたレーザー方式から、インクジェット方式が注目されている。これは、時間変化によって、顧客の要求が変化したことを意味する。さらに、パソコンのOSに依存せず、OSごとに特別なドライバーを必要としないクラウドプリントの出現のようなドキュメント管理、印刷における新しいサービスの出現、印刷速度の向上による生産性の向上等、複合機の更新による顧客のメリットは、複数存在する。一方で、従来の複合機はアップグレードが不可能であり、新しいサービスや機能の向上は不可能であった。そのため、本研究では、複合機はアップグレード製品サービスの提供は、顧客や製造企業において多くのメリットが存在するものと判断し、適用事例に用いた。本事例では、提案手法が予め設定したサポート期間において、低環境負荷、高利益、低価格を同時に実現すると同時に、より高い更新頻度で先進のサービスを設計、提供可能であることを確認する。

5.2. 事例 1：ノートパソコンのリースビジネス

5.2.1. 顧客および提供サービスの決定（事例 1）

本適用事例では、サービスのプロバイダをノートパソコンのメーカーと仮定し、そのメーカーがサービスの設計を行うことを想定する。初めに、サービスのレシーバを企業や学校などの事業者と設定し、その事業者のノートパソコンに関するライフスタイルを調査する。本事例では、5.1 節で述べたように、事務作業用のパソコンは 3~5 年のリース期間ごとに更新されることに焦点を当て、ノートパソコンのユーザビリティの向上を目的としたアップグレード製品サービスを提供するサービスとして設計する。事務作業用ノートパソコンは主に据え置きで使用され、移動は社内の短距離のみ行うもの仮定する。そのため、本体の構造に比較的余裕があり、さらにディスプレイの視認性が良い 15.6 インチの液晶を搭載したモデルを想定する。

また、サービスのコンポーネントに関しては、ノートパソコン構成部品のモジュール化、規格化が進んでいることを鑑みて、既存の製品の構成モジュールであり、多くの製品において、ドライバーのみで組立、分解が可能である、マザーボード (CPU を含む)、メモリモジュール、ストレージ、液晶モジュール、光学ドライブ、筐体、バッテリー、冷却ユニット (ヒートシンクとファン) の 8 つをサービスコンポーネントとして設定した。

5.2.2. サービスの有用性検証（事例 1）

5.2.1 項で述べた条件に基づいて、CVCA を行う。設計するアップグレード製品サービスのステークホルダは、サービスのプロバイダであるノートパソコンのメーカー、ノートパソコン構成モジュールのサプライヤ、レシーバの 3 者を想定し、アップグレードに関しては、メーカー自身で行うものと仮定する。以上の条件で作成した CVCA の結果を図 5.1 に示す。図 5.1 に示すように、サービスプロバイダであるノートパソコンのメーカーは、レシーバから金銭、使用済みのノートパソコンとそれに対する意見を受け取り、レシーバに対してノートパソコン (第 1 世代と更新後の双方) とサービスに関する情報を授与する。また、サプライヤに対しては、金銭、意見、サービスの情報を授与し、サプライヤからはモジュールを受け取る。

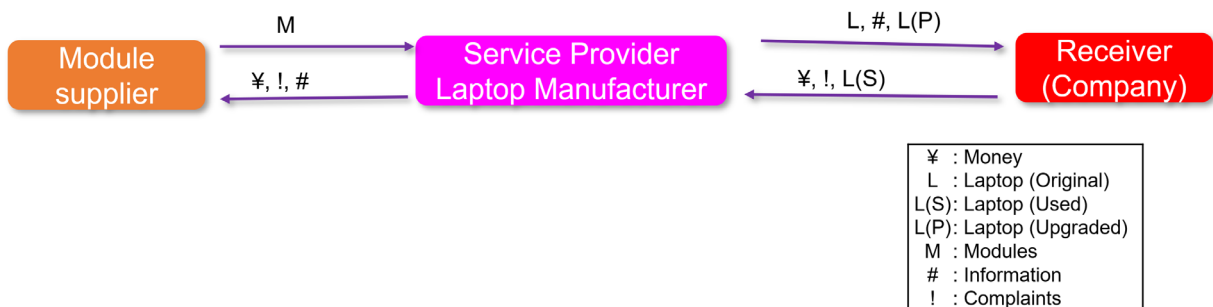


Fig. 5.1 CVCA of upgradable laptop leasing

図 5.1 に示す CVCA の結果に基づき、サービスプロバイダとサプライヤの因果ループ図の作成を行った。その結果を図 5.2 と図 5.3 にそれぞれ示す。因果ループ図の作成においては、顧客の満足を第 1 と考え、顧客満足を起点に、コストや利益、環境に関する因果ループが発生するように作図した。これらの因果ループ図において、サービスのプロバイダとサプライヤの双方が製造者であるため、同等形状のループが作成され、どちらにおいても全て自己強化型のループのみが確認されたため、設計するサービスの有用性が高いと判断した。

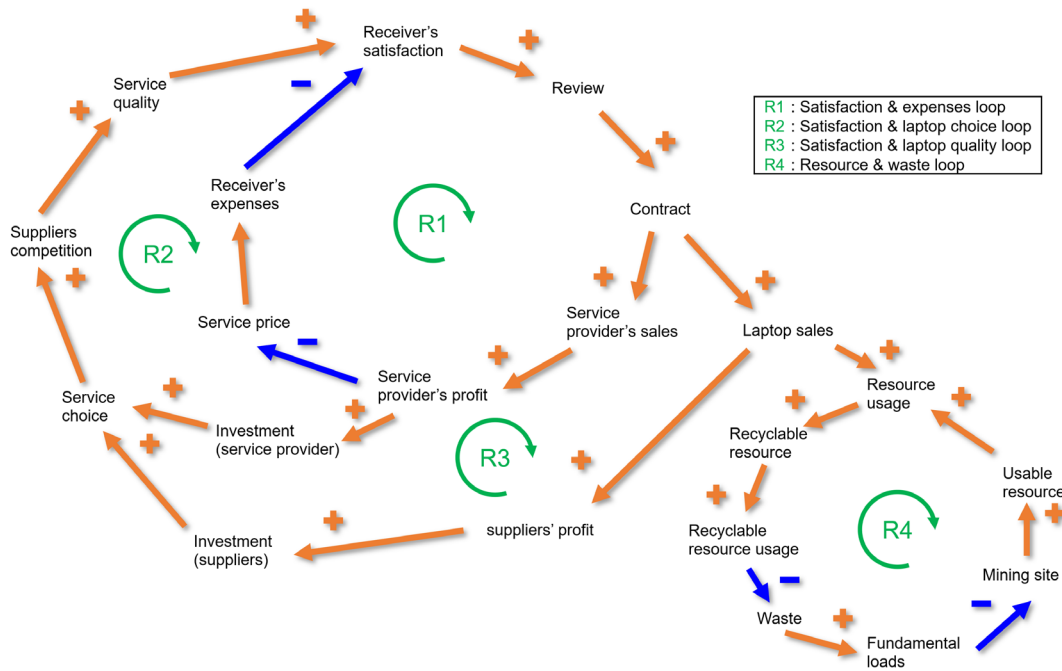


Fig. 5.2 CLD of upgradable laptop service provider

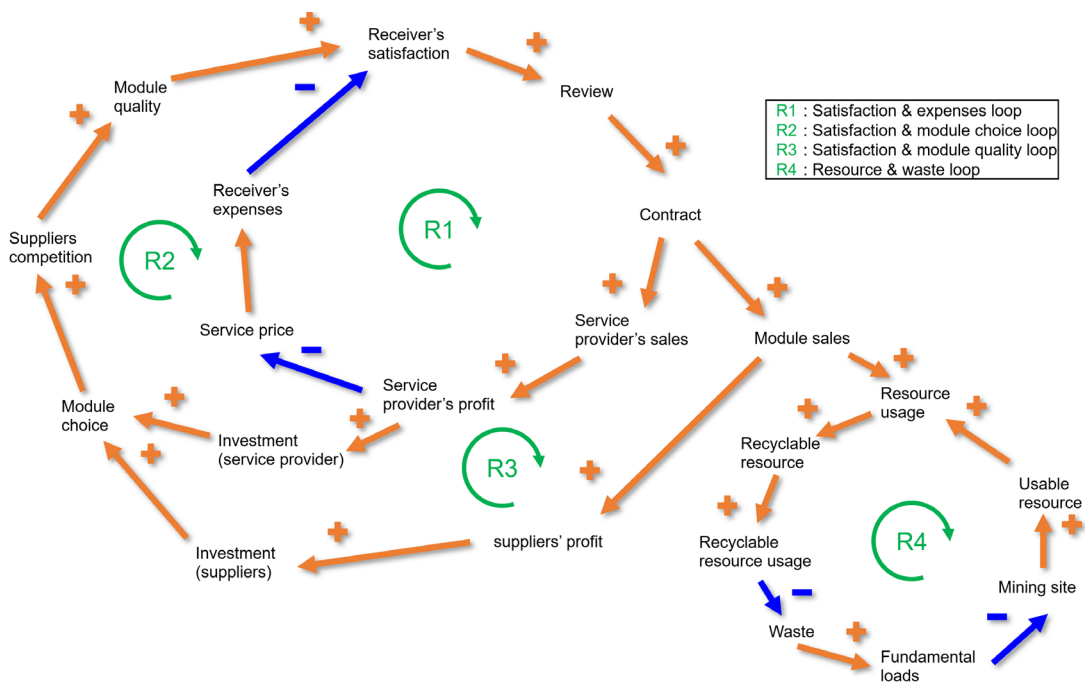


Fig. 5.3 CLD of upgradable laptop service supplier

5.2.3.コンポーネントのライフサイクルオプション適合性評価

5.2.1 項で述べたサービスの目的、モジュール構成に基づいて、評価対象サービスコンポーネントのライフサイクルオプション適合性の評価を行う。ライフサイクルオプションに関しては、アップグレードを伴うリファビッシュ (RF_{Up})、アップグレードを伴わないリマニュファクチャリング (RM)、ロングライフ (LL) の3つを扱う。また、RF_{Up}とRMにおいて、前者は新品資源使用の割合が、再生資源使用の割合よりも大きいものと仮定し、後者はその逆であるものと仮定する。評価の視点においては、ユーザビリティに対する構成部品の寄与率： C_n 、製造時の環境負荷量： EL 、製造コスト： C_t 、物理寿命： DL の4つを用いる。顧客のセグメントに関しては、バランスを重視するセグメント： S_b と動作速度を重視するセグメント： S_p を仮定し、それぞれのレーバの規模は同等と仮定する。上記の4つの評価視点に対して、それらの重要度 p_s を一対比較により導出した。ただし、セグメント S_b においては、全ての変数の重要度を1と定義した。表5.1にライフサイクルオプション毎の各評価視点の望大特性および望小特性、さらに、セグメント毎の評価視点の重要度を適用した評価に用いる判断指標を示す。

評価に際して、ベースとなる第1世代ノートパソコンの仕様を設定し、さらに、将来入手するモジュールの情報を予測して設定した。この情報の設定に関しては、アップグレードを行う時期をノートパソコンの法定耐用年数に基づき第1世代製品販売開始から4年後程度と仮定し、将来入手可能なモジュールの機能やその製造コストに関する情報を収集、予測した。モジュールの製造コストは、電子商取引サイトから入手した部品価格を使用し、環境負荷量に関しては、実在の4製品を著者らで分解して重量や素材を調査し、CO₂排出量原単位を用いてモジュール毎の製造時の環境負荷量を算出し、4製品間のばらつきに基づき将来入手できる範囲を設定した。ユーザビリティに対する構成モジュールの貢献度は、ノートパソコンへの要求を調査し、AHPを用いてその要求のユーザビリティへの寄与度を導出した。さらにノートパソコンの機能を仮定し、QFDを用いて要求の寄与度を機能の寄与度に変換し、同様にして、機能の寄与度をモジュールの寄与度に変換することで、モジュールのユーザビリティに対する貢献度を導出した。図5.4に要求のAHPの結果を、図5.5に要求の寄与度を機能の寄与度に変換した際のQFDを、図5.6に機能の寄与度をモジュールの寄与度に変換した際のQFDの結果をそれぞれ示す。物理寿命に関しては、各モジュールの物理寿命を製造企業の公称値や一般的な経験則に基づく値を基準に仮定して値を設定した。表5.2に本事例で用いる評価対象のモジュールと評価視点変数の範囲値を示す。加えて、表5.1および表5.2の条件を基に算出した、ノートパソコン構成モジュールの適合性評価の結果を図5.7に示す。

Table 5.1 Characteristics of evaluation variables and evaluation indicators

Lifecycle option	Higher is better	Lower is better	Indicator Segment S_b	Indicator Segment S_p
RF _{Up}	Contribution	Env. Load Cost Durable life	$LAI_{RFUpS_{bi}} = \frac{Cn_i^1}{EL_i^1 \times Ct_i^1 \times DL_i^1}$	$LAI_{RFUpS_{pi}} = \frac{Cn_i^{1.73}}{EL_i^{0.76} \times Ct_i^{0.76} \times DL_i^1}$
RM	Env. Load Cost	Contribution Durable life	$LAI_{RMS_{bi}} = \frac{EL_i^1 \times Ct_i^1}{Cn_i^1 \times DL_i^1}$	$LAI_{RMS_{pi}} = \frac{EL_i^{0.76} \times Ct_i^{0.76}}{Cn_i^{1.73} \times DL_i^1}$
LL	Env. Load Cost Durable life	Contribution	$LAI_{LLS_{bi}} = \frac{EL_i^1 \times Ct_i^1 \times DL_i^1}{Cn_i^1}$	$LAI_{LLS_{pi}} = \frac{EL_i^{0.76} \times Ct_i^{0.76} \times DL_i^1}{Cn_i^{1.73}}$

	Fast Activation	Record many data	Visibility of LCD	Fast Behavior	Energy saving	Highly portability	User-friendliness	Tough	Low heat generation	Contribution
Fast Activation	1	[0.3, 3]	[0.2, 1]	[0.1, 0.3]	[0.1, 9]	[0.2, 7]	[0.1, 5]	[0.2, 7]	[1, 3]	[0.3, 2.4]
Record many data	[0.3, 3]	1	[0.3, 3]	[0.1, 0.3]	[0.2, 9]	[0.2, 5]	[0.2, 1]	[1, 3]	[1, 7]	[0.5, 1.7]
Visibility of LCD	[1, 5]	[0.3, 3]	1	[0.2, 1]	[0.3, 1]	[3, 7]	[1, 3]	[1, 3]	[3, 5]	[1.3, 1.7]
Fast Behavior	[3, 9]	[3, 7]	[1, 5]	1	[1, 9]	[3, 9]	[0.3, 7]	[3, 5]	[5, 7]	[2.2, 4.9]
Energy saving	[0.1, 9]	[0.1, 5]	[1, 3]	[0.1, 1]	1	[3, 5]	[0.1, 7]	[0.3, 5]	[3, 5]	[0.5, 3]
Highly portability	[0.1, 5]	[0.2, 5]	[0.1, 0.3]	[0.1, 0.3]	[0.2, 0.3]	1	[0.2, 5]	[0.2, 3]	[1, 5]	[0.3, 1.4]
User-friendliness	[0.2, 7]	[1, 5]	[0.3, 1]	[0.1, 3]	[0.1, 7]	[0.2, 5]	1	[0.3, 3]	[3, 7]	[0.8, 1.7]
Tough	[0.1, 5]	[0.3, 1]	[0.3, 1]	[0.2, 0.3]	[0.2, 3]	[0.3, 5]	[0.3, 3]	1	[1, 3]	[0.5, 1.4]
Low heat generation	[0.3, 1]	[0.1, 1]	[0.2, 0.3]	[0.1, 0.2]	[0.2, 0.3]	[0.2, 1]	[0.1, 0.3]	[0.3, 1]	1	[0.3, 0.5]

Fig. 5.4 AHP result of user demand's contribution for laptop's usability

		Product Function										
		Start-up time	Storage capacity	Memory capacity	Data access speed	LCD Resolution	Processing speed	Power consumption	Weight	Operability	Amount of heat generation	Dimension
User Demand	Fast Activation [0.3, 2.4]	9		3	9		9			3		
	Record many data [0.5, 1.7]		9						3			
	Visibility of LCD [1.3, 1.7]					9						3
	Fast Behavior [2.2, 4.9]	9		3	9		9	1		1	1	
	Energy saving [0.5, 3.0]				1	3	3	9			3	
	Highly portability [0.3, 1.4]								9	1	1	9
	User-friendliness [0.8, 1.7]	9	3	1	3	9	9	1	3	3	1	3
	Tough [0.5, 1.4]								9		3	1
Low heat generation [0.3, 0.5]					1	3	9	3		9	1	
Contribution (Function)		[37.2, 77.9]	[6.9, 19.9]	[9.0, 23.1]	[29.5, 70.0]	[28.1, 37.6]	[46.5, 82.1]	[11.7, 33.0]	[12.4, 23.8]	[10.8, 22.0]	[12.7, 20.6]	[11.9, 20.2]

Fig. 5.5 Translation of contribution for laptop's usability from user demand's to product function

		Module							
		Motherboard	Memory	Storage	LCD	Optical drive	Chassis	Li-Ion Battery	Cooling Unit
Product Function	Start-up time [37.2, 77.9]	9	1	9					
	Storage capacity [6.9, 19.9]			9			1		
	Memory capacity [9.0, 23.1]	3	9				1		
	Data access speed [29.5, 70.0]	3	3	9					
	LCD Resolution [28.1, 37.6]	3			9		1		
	Processing speed [46.5, 82.1]	9	1						
	Power consumption [11.7, 33.0]	9		1	9			9	
	Weight [12.4, 23.8]	9			9	1	9	3	
	Operability [10.8, 22.0]	9		1	3	3	9	1	
	Amount of heat generation [12.7, 20.6]	9		3	3		3	3	1
Dimension [11.9, 20.2]	3		1	9	3	9	1	1	
Contribution (Module)		[0.73, 1.00]	[0.11, 0.24]	[0.35, 0.67]	[0.29, 0.43]	[0.05, 0.05]	[0.22, 0.25]	[0.09, 0.19]	[0.01, 0.02]

Fig. 5.6 Translation of contribution for laptop's usability from product function to module

Table 5.2 Parameter ranges of evaluation variables in upgradable laptop leasing

Module	Contribution	Durable life [Year]	Production cost [Yen]	Environmental Load (Production) [kg-CO ₂ e]
Motherboard	[0.76, 1.00]	[5, 10]	[30000, 40000]	[13.60, 17.04]
Memory	[0.11, 0.24]	[10, 15]	[6500, 11000]	[1.38, 1.48]
Storage	[0.36, 0.68]	[3, 6]	[6000, 15000]	[10.69, 12.35]
LCD	[0.30, 0.45]	[8, 12]	[9000, 15000]	[19.49, 19.49]
Optical drive	[0.05, 0.05]	[10, 12]	[3000, 7000]	[0.97, 1.33]
Chassis	[0.23, 0.26]	[5, 10]	[10000, 12000]	[11.68, 12.62]
Battery	[0.09, 0.20]	[3, 6]	[6000, 10000]	[6.74, 6.87]
Cooling unit	[0.01, 0.02]	[10, 15]	[3000, 4000]	[0.30, 0.63]

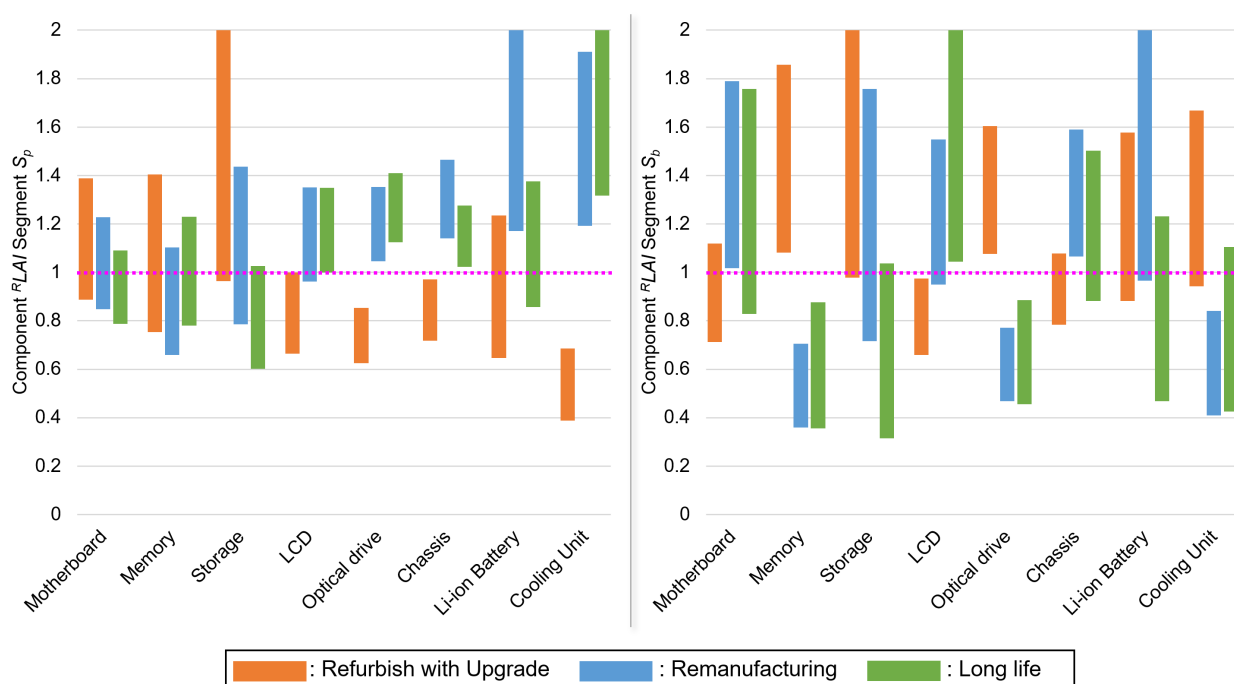


Fig. 5.7 Evaluation results of ^{R}LAI value range of segment S_p and S_b

図 5.7 に示す結果から、導出した各セグメント S_b と S_p の LOA の値と、それらを統合した値 LOA_{Total} と各セグメントの適切なライフサイクルオプションの結果を表 5.3 に示す。表 5.3 より、セグメント S_b および、 S_p 双方の志向を反映させた、モジュール毎の各ライフサイクルオプションの適合度 LOA と適切なライフサイクルオプションを導出し、さらに、それらを総合した結果を導出した。結果より、提供サービスの目的であるユーザビリティの向上に関しては、 RF_{Up} が推奨されるメモリモジュール、ストレージの更新によって実現し、 RM が推奨されるモジュールであるマザーボード、筐体、バッテリーに関しては、機能向上をさせる必要はないが、ユーザビリティを損ねることが無いように、更新時期に必要なに応じて同等の再生品に交換するアプローチを取ることが解釈可能である。LL の推奨度が高い液晶モジュールと冷却ユニットは、更新や交換を一切行わないため、予めサービスのサポート期間や陳腐化に耐えうるように高耐久、高性能であるものを搭載するべきであると解釈できる。すべての推奨度が同等であった光学ドライブに関しては、本評価ではどのライフサイクルオプションを適用しても良いと解釈される。最終的なライフサイクルオプション決定においては、設計者の志向や、市場のトレンドに応じて決定するが、本事例では、LL を採用し、以降の更新頻度、サポート期間の導出を行う。

Table 5.3 Evaluation results of LOA of segment S_b , S_p , and total

		Mother-board	Memory	Storage	LCD	Optical drive	Chassis	Li-ion Battery	Cooling Unit
$LOA_{Segment\ S_b}$	RF_U	0.29	1.00	0.98	0.00	1.00	0.27	0.83	0.92
	RM	1.00	0.00	0.73	0.92	0.00	1.00	0.97	0.00
	LL	0.82	0.00	0.05	1.00	0.00	0.81	0.30	0.15
Appropriate Lifecycle option									
	RM	RF_{Up}	RF_{Up}	LL	RF_{Up}	RM	RM	RF_{Up}	
$LOA_{Segment\ S_p}$	RF_U	0.78	0.62	0.97	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00
	RM	0.60	0.23	0.67	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00
	LL	0.30	0.51	0.06	1.00	1.00	1.00	0.72	1.00
Appropriate Lifecycle option									
	RF_{Up}	RF_{Up}	RF_{Up}	LL	RM / LL	RM / LL	RM	RM / LL	
LOA_{Total}	RF_U	0.53	0.81	0.97	0.00	0.50	0.13	0.61	0.46
	RM	0.80	0.12	0.70	0.91	0.50	1.00	0.98	0.50
	LL	0.56	0.26	0.06	1.00	0.50	0.90	0.51	0.58
Appropriate Lifecycle option									
	RM	RF_{Up}	RF_{Up}	LL	$RF_{Up} / RM / LL$	RM	RM	LL	

5.2.4.更新頻度，サービス提供期間の妥当性検証（事例1）

5.2.3 項より，アップグレード対象のサービスコンポーネントはメモリモジュールとストレージが選択された。本項では，アップグレードの方法，更新頻度，サポート期間の導出とその実現性の検証を行う。初めにアップグレード方法を決定するために，ノートパソコンに対して Up-WDM を適用した。その結果を図 5.8 に示す。Up-WDM の結果から，本事例では User-b アップグレードを採択し，製品サービスの価格，売り上げ，利益，環境負荷量算出のための関係式の作成を行う。本事例では，2つのセグメント S_b と S_p を想定しており，セグメントに応じて，更新のサイクルが異なる場合が存在する。そのため，更新のサイクルを予めリース期間に基づいて 2~5 年の間と定め，サービス提供期間は，2 世代分の期間と設定する。また，必ずしもレシーバがアップグレードを行うとは限らないため，アップグレードの実施率 UR を 0.8 から 0.9 と仮定し，上記の更新サイクル，実施率であっても低価格，高利益を実現できる利益率 Pr_2 の範囲の導出を行い，その際の環境負荷削減量も導出する。


サービスのレシーバの視点から，全世代製品価格 TPP を算出し，プロバイダの視点として全世代売上 TPS ，全世代利益 TPR を算出する。以下の式(5.1)から式(5.8)に算出に用いた関係式記載する。また，式(5.1)から式(5.8)内の定数，変数の詳細は表 5.4 に示す。比較対象のビジネスモデルはアップグレードを行わない通常製品の販売と設定し，価格は，第 1 世代および第 2 世代価格を 100,000Yen と仮定し，利益率を 10%と仮定した。

・全世代製品価格 TPP [Yen]

$$TPP[\text{Yen}] = PP_1 + PP_2 \quad (5.1)$$

ただし，第 2 世代製品価格 PP_2

$$PP_2[\text{Yen}] = \frac{CC_2 + SP}{1 - Pr_2} \quad (5.2)$$

Evaluation Criterion	Characteristics		Send-back	User-s	User-b	Serviceman	
• Necessary technique	High	Scoring 	Score	1	-1	-1	0
• Influence on receiver's life or work by upgrade-operation time	Middle		0	1	1	0	
• Weight of entire product	Light		1	0	0	-1	
• Weight of target part	Light		0	1	1	-1	
• Size of entire product	Small		1	-1	-1	-1	
• Size of target part	Small		-1	1	1	0	
• Reusability of exchanged part	High		1	-1	1	1	
• Disposal cost occurrence of exchanged part	Yes		1	-1	1	1	
• Inclusion of hazardous substance in exchanged part	No		-1	1	1	-1	
			Result	3	0	4	-2

Recommended upgrade way

Fig. 5.7 Up-WDM result of an upgradable laptop

・全世代売上 TPS [Yen]

$$TPS[\text{Yen}] = PS_1 + PS_2 \quad (5.3)$$

ただし，第1世代売上 PS_1

$$PS_1[\text{Yen}] = NSP_1 + PP_1 \quad (5.4)$$

第2世代売上 PS_2

$$PS_2[\text{Yen}] = NSP_2 + PP_2 \quad (5.4)$$

・第1世代販売台数 NSP_1 および第2世代販売台数 NSP_2 は以下の式(5.5)に示す関係を持つ

$$NSP_2 = NSP_1 \times UR \quad (5.5)$$

・全世代利益 TPR [Yen]

$$TPR[\text{Yen}] = PPr_1 + PPr_2 \quad (5.6)$$

ただし，第1世代利益 PPr_1

$$PPr_1[\text{Yen}] = NSP_1 \times 10000 \quad (5.7)$$

・第2世代利益 PPr_2

$$PPr_2[\text{Yen}] = NSP_2 \times (CC_2 + SP) \times \frac{Pr_2}{1 - Pr_2} \quad (5.8)$$

Table 5.4 Details of variables and constants in formula 5.1 to 5.8

Variable	Detail	Value, unit
PP_1	1 st product price	100,000 [Yen]
CC_2	Upgradable components cost (include Maintenance)	Variable [Yen]
SP	Upgrade support fee	30,000 [Yen]
Pr_2	Profit rate of upgradable component	Variable
NSP_1	Number of 1st gen sales volume	10,000
UR	Upgrade rate	Variable

本事例における環境負荷量（CO₂ 排出量）の算出は、図 5.8 に示すアップグレードシナリオに基づいて製品 1 台当たりの排出量を算出した。材料調達から廃棄まで排出量を図 5.9 に示す境界条件に基づいて算出した。廃棄時の CO₂ 排出量は構成部品を全て埋め立てるものと仮定して算出した。使用時の CO₂ 排出量 EL_{use} は以下の式(5.9)を用いて算出したが、消費電力 E を 20W と仮定し、使用時間 T を図 5.9 に示す通り 24~60 か月に設定し算出した。また、 C は換算 CO₂ 排出原単位を示し、0.55 [kg-CO₂/kWh]である。

$$EL_{use}[\text{kg-CO}_2] = E[\text{kW}] \times T[\text{h}] \times C[\text{kg-CO}_2/\text{kWh}] \quad (5.9)$$

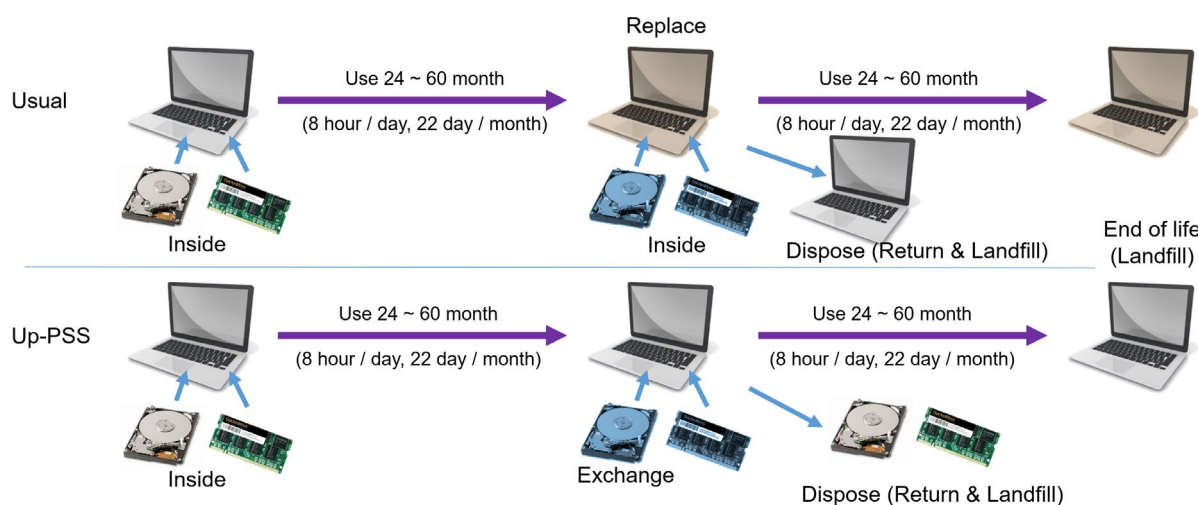


Fig. 5.9 Upgrading scenario in case study 1

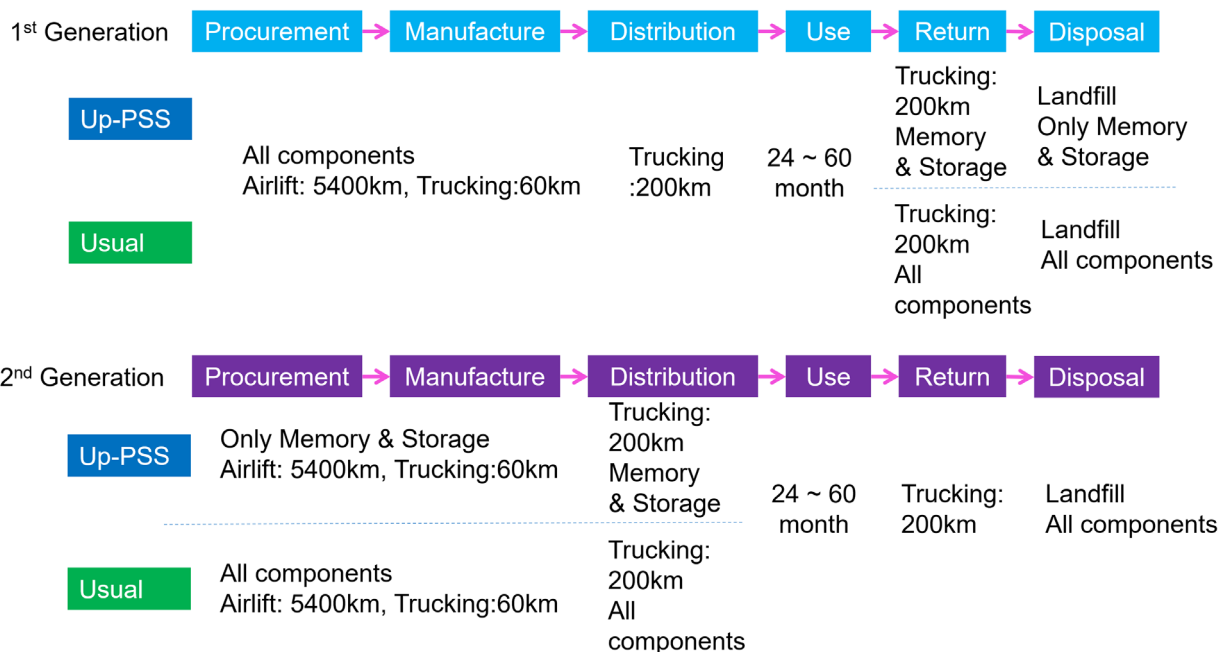


Fig. 5.10 Product lifecycle and boundary condition in case study 1

以上の条件を基に PSD 手法に適用した。図 5.11 に導出されたコストや利益率に関する設計範囲解と要求範囲，アップグレード率等の設定した設計条件を示す。さらに，図 5.12 と図 5.13 にアップグレード製品と通常製品の全世代価格 TPP の比較，全世代売り上げと全世代利益の比較を各々示す。図 5.12 に示す通り，アップグレード製品は通常の製品と比較して-21.7%から-10.0%の価格低減が実現できることが確認された。また，図 5.13 より，アップグレード製品の全世代製品の売上額 TPS は，製品価格の低下に伴い-27.3%から-14.0%低下するが，全世代利益 TPR は+6.7%から+58.0%増加することが確認された。

図 5.14 に製品ライフサイクル全体における CO_2 排出量および，その増減度を示す。図 5.14 より，アップグレード製品は，第 2 世代調達段階および製造段階の CO_2 排出量削減により，ライフサイクル全体で，-23.4%から-14.9%の排出量削減が可能であることが確認された。以上より，提案手法により導出したライフサイクルオプション，更新サイクルやサポート期間，アップグレードの実行率の条件下において，アップグレード製品は製品が及ぼす環境負荷量，製品の価格を低下させ，高い利益の確保が同時に実現できることが確認され，提案手法の有効性を確認した。

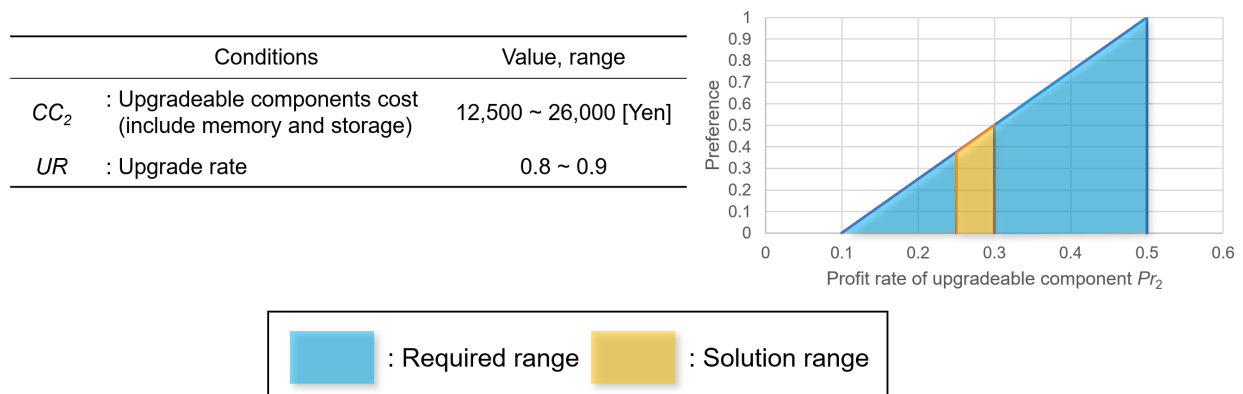


Fig. 5.11 Obtained ranged design solutions and estimated conditions

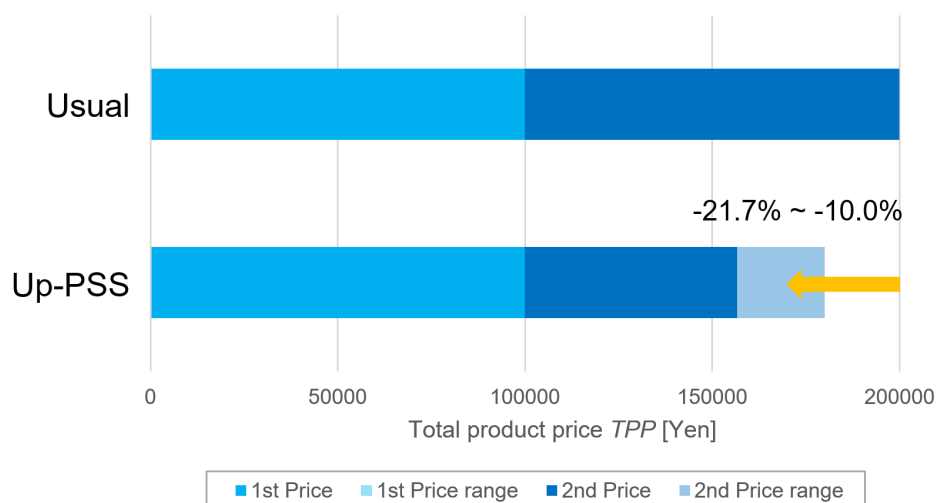


Fig. 5.12 Solution ranges of the total product prices of usual and Up-PSS products

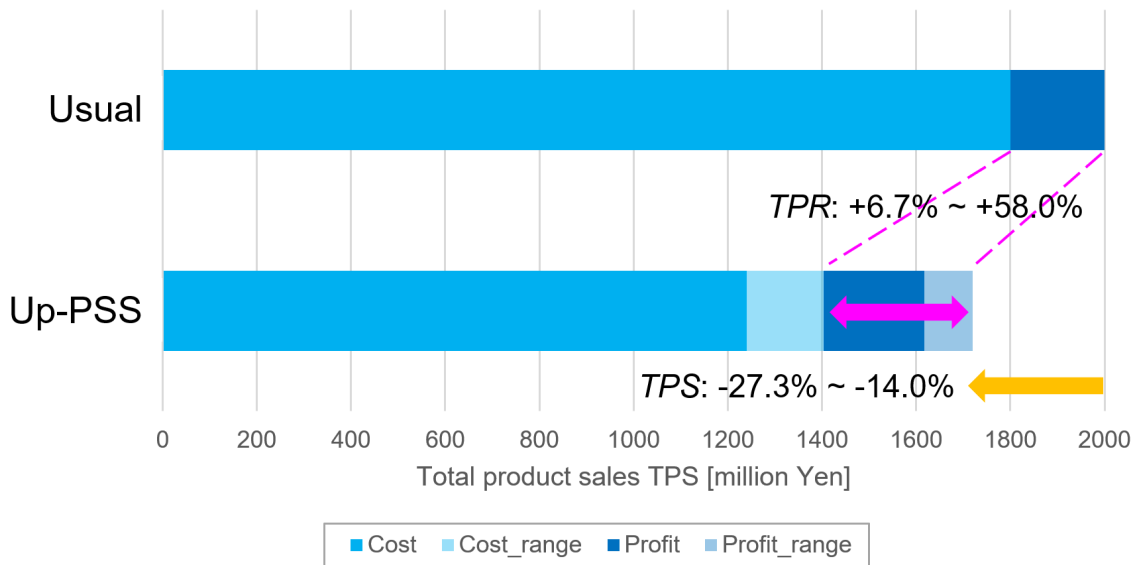


Fig. 5.13 Solution ranges of the total product sales and profits of usual and Up-PSS products

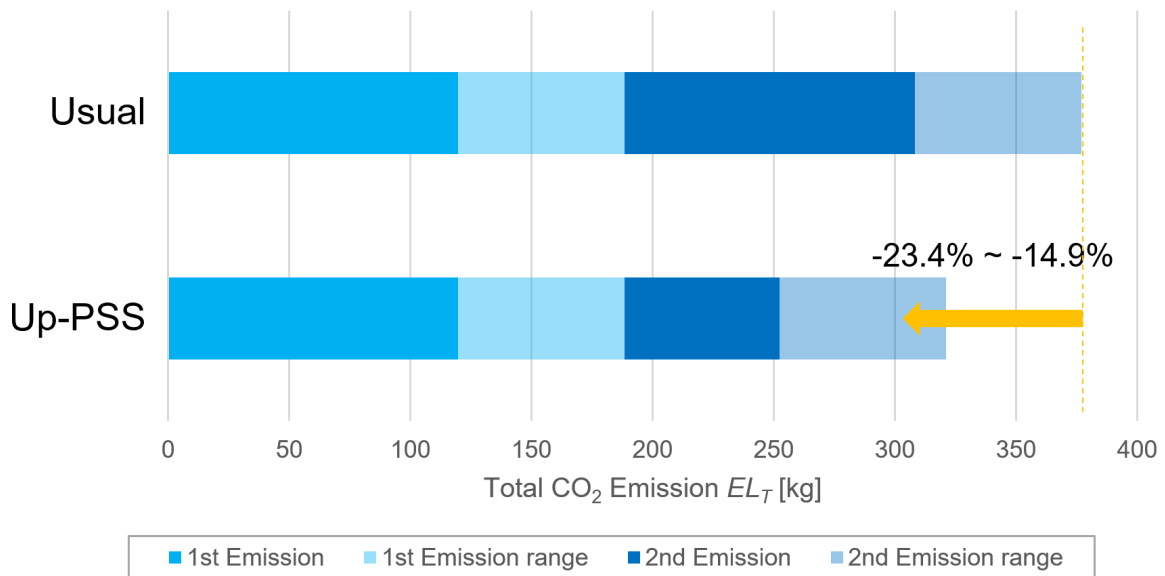


Fig. 5.14 Comparison of the CO₂ emissions entire laptop lifecycle stages

5.3. 事例 2 : 家具家電のパッケージレンタルビジネス

5.3.1. 顧客および提供サービスの決定 (事例 2)

本項では、提案する Up-PSS の設計プロセスに従って適用事例である家具、家電のパッケージレンタルサービスの設計プロセスを示す。本事例では、サービスプロバイダをレンタル会社兼在庫管理者と想定して設計を行う。また、このサービスプロバイダは、B to C の顧客との長期間に渡るコネクションの確保を望むものと仮定し、居住に関連したサービスの設計を念頭に置いているものとする。初めに、レシーバとそのライフスタイルの設定プロセスを述べる。レシーバは一人暮らしを始める大学生や新社会人を想定し、そのライフスタイルで発生するイベントの調査を実施した。調査の結果、入学や、就労までに、住所を確保、家具家電の準備、書類等の準備を行うことを確認し、また、入学、就労後は、1日当たりのライフスタイルは、通勤、通学、業務、講義の受講、遊行が挙げられ、学生の場合は、4~6年で卒業による引っ越し、社会人においては、転勤や結婚等による引っ越しが発生し、その際に家具や家電の買い替えや廃棄を行うことを確認、整理した。

そこで、レシーバに居住に関するニーズや不満のインタビューを行い、そのエッセンスの抽出を行った。実際には、筆者が所属する研究室の学生および卒業生4名にインタビューを行っており、その結果を表 5.5 に示す。表 5.5 に示すニーズや不満から、評価グリッドを用いて抽出したエッセンスは以下の通りである。

- ・ より安価であること
- ・ 質感や品質が良いこと
- ・ 使用感、機能が良いこと
- ・ 家具家電をただ使用したいこと

Table 5.5 Need and dissatisfaction regarding habitation

Classification	Detail
Need	Good design furniture
	Useful household appliance
	Reasonable price furniture and household appliance
	High quality furniture and household appliance
Dissatisfaction	Bad design furniture and household appliance in furnished apartment
	Hard work (assembly and disposal of furniture and household appliance)
	Bad texture (cheaper furniture and household appliance)
	Burdensome maintenance of furniture

これらのエッセンスから、家具家電のパッケージレンタルを提供するサービスとして設定し、そのサービスを構成するサービスコンポーネントを自由連想法によって発想した。以下にサービスコンポーネントの内、無形のものを示す。

- ・ 配送，設置サービス
- ・ 家電の定期的な機能性更新サービス
- ・ 家具，家電のメンテナンスサービス
- ・ ミドルエンド以上の質感，品質を持つ家具家電の利用
- ・ 使用料に応じた料金徴収

有形のサービスコンポーネントにおいては、レンタルしたい家具や家電のインタビューと強制連想法を行うことで、表 5.6 に示す家具家電を導出した。また、上記の無形のサービスコンポーネントの内容から、それぞれの更新時の実施内容を設定した結果も表 5.6 に示す。ただし、本事例で扱うサービスコンポーネントは、ノートパソコンと異なり、1つの製品が1つあるいは少数の機能のみを有する。また、その機能は一部の部品に依存するため、^RLAI を適用せずに、無形のサービスコンポーネントの情報を鑑みてそのライフサイクルオプションを設定した。すなわち、家具においては、機能向上を伴わないリペア（メンテナンス）を適用し、家電製品に関しては、機能向上を伴うリファビッシュを適用する。

更新時の実施内容に関して、家具においては、予め手入れが可能なもの（例えば、パーティクルボードではなく、無垢材を使用した家具）を用意し、使用や経年劣化による傷や凹み、塗装の劣化の修理、メンテナンスを更新時期に行う。テレビにおいては、機能性の向上のための更新を想定し、交換する部品はロジックボードあるいは液晶パネルを想定する。エアコンや冷蔵庫に関しては、冷却性能や加温性能の向上、高効率化を目的としたアップグレードのために、冷媒やヒートポンプ、コンプレッサの更新を想定する。洗濯機に関しては、選択メニューの追加のためのボード交換や、モータの保守を想定する。

Table 5.6 Tangible service components and their treatment in upgrade time

Tangible service component	Treatment in upgrade time
Dining chair	: Repair and maintenance deterioration (e.g. dent, scratch, and painting)
Dining table	: Repair and maintenance deterioration (e.g. dent, scratch, and painting)
Low table	: Repair and maintenance deterioration (e.g. dent, scratch, and painting)
Cabinets	: Repair and maintenance deterioration (e.g. dent, scratch, and painting)
Work desk	: Repair and maintenance deterioration (e.g. dent, scratch, and painting)
Television	: Upgrading functionality (logic board and/or LCD panel upgrading)
Air conditioner	: Upgrading functionality (refrigerant and/or heat pump upgrading)
Refrigerator	: Upgrading functionality (refrigerant and/or compressor upgrading)
Washing machine	: Upgrading functionality (adding wash menu and motor maintenance)

5.3.2.サービスの有用性検証（事例2）

5.3.1 項で設定したサービスとサービスコンポーネントから、製品サービスシステムのステークホルダの洗い出しを行った結果、サービスプロバイダ、レシーバの他に、家具のメーカ、家電のメーカ、運送および設置業者、家具の修理メンテナンス業者、家電のアップグレード業者をステークホルダとして定義し、これらの間で行われる金銭、情報および物質の流れを明確化するために、顧客価値連鎖分析（CVCA）を実施した。その結果を図 5.15 に示す。図 5.15 において、レシーバは金銭や情報のやり取りをサービスプロバイダのみと行い、サービスプロバイダが仲介して各ステークホルダにその金銭や情報が伝達する。また、家具家電に関しては、家具家電の製品は、それぞれのメーカからサービスプロバイダが必要に応じて入手、在庫の管理を行い、配送設置業者を通してレシーバに渡される。使用済みの家具家電に関しては、サービスプロバイダを経由してレシーバから受け取った情報をアップグレード業者や修理メンテナンス業者、配送設置業者が受け取り、家具家電の授受をレシーバ、配送設置業者、アップグレード業者、修理メンテナンス業者間で行う。ただし、サービスマンによるアップグレードや修理を行う場合は、アップグレード業者や修理メンテナンス業者から、直接サービスマンとメーカから得た部品がレシーバのもとに移動する。

設計する製品サービスの有用性、妥当性の検証を行うために、因果ループ図（CLD）を作成するが、CVCA の結果から、情報のやり取りが類似する家電メーカと家具メーカを 1 次企業としてまとめ、また同様の理由で、アップグレード業者と修理メンテナンス業者を 2 次企業としてまとめることで、作成するループ図の数を削減する。図 5.16 から 5.19 に 1 次企業、2 次企業、サービスプロバイダ、配送設置業者の因果ループ図をそれぞれ示す。

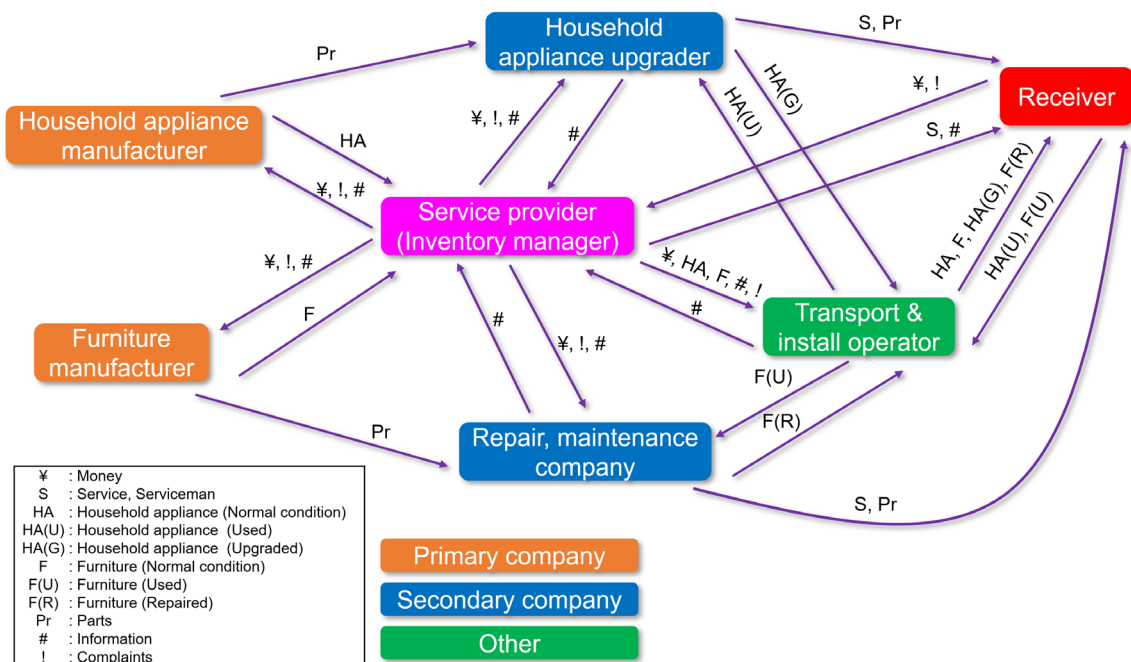


Fig. 5.15 CVCA result of furniture and household appliance packaged leasing case

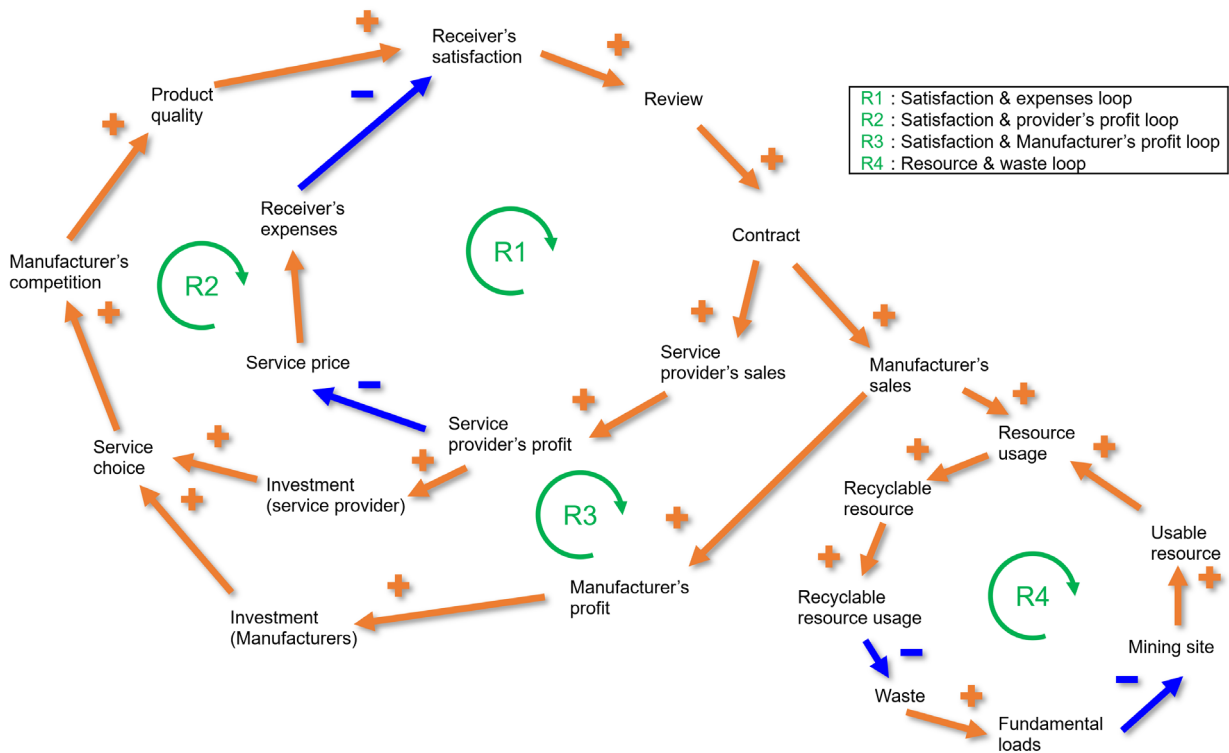


Fig. 5.16 CLD of Primary companies (furniture and household appliance manufacturers)

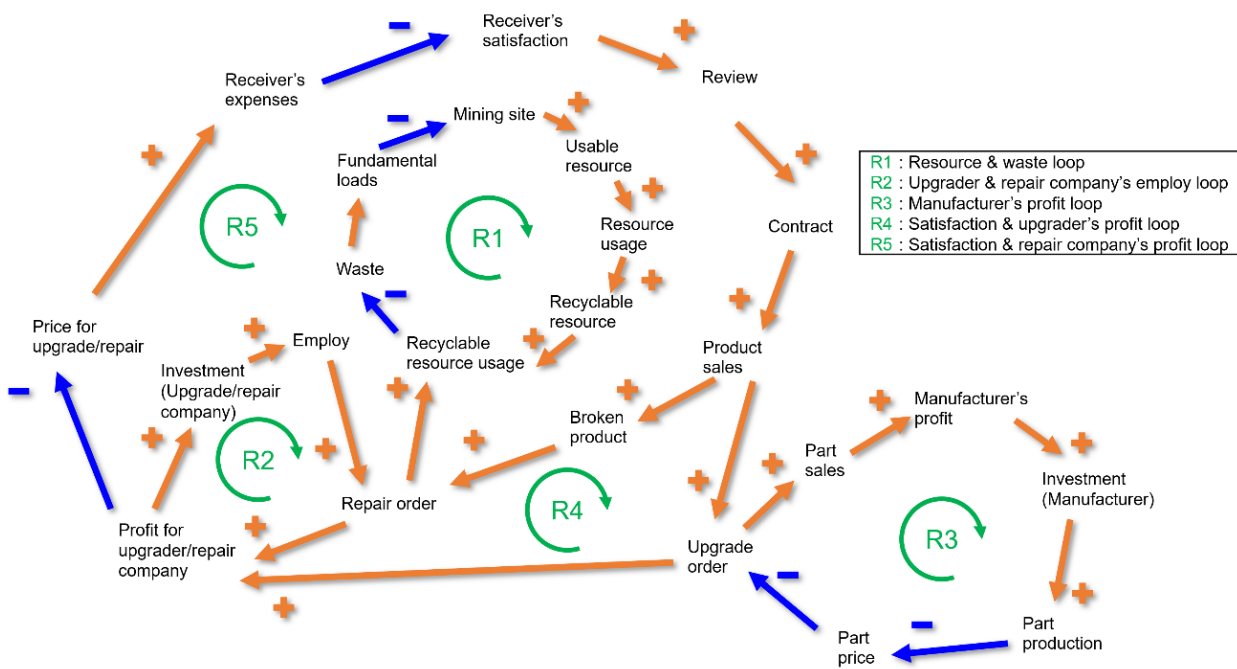


Fig. 5.17 CLD of Secondary companies (upgrader and repair & maintenance company)

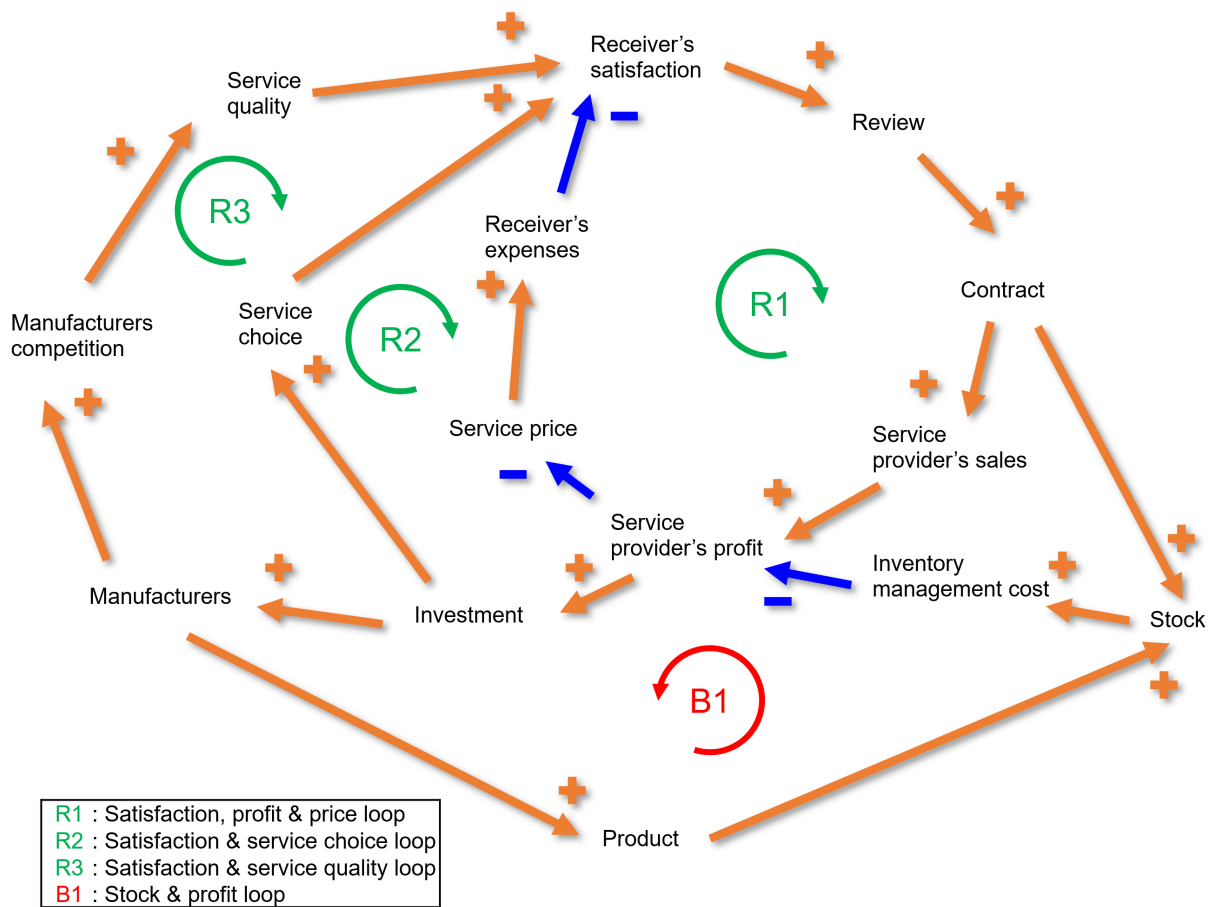


Fig. 5.18 CLD of Service provider

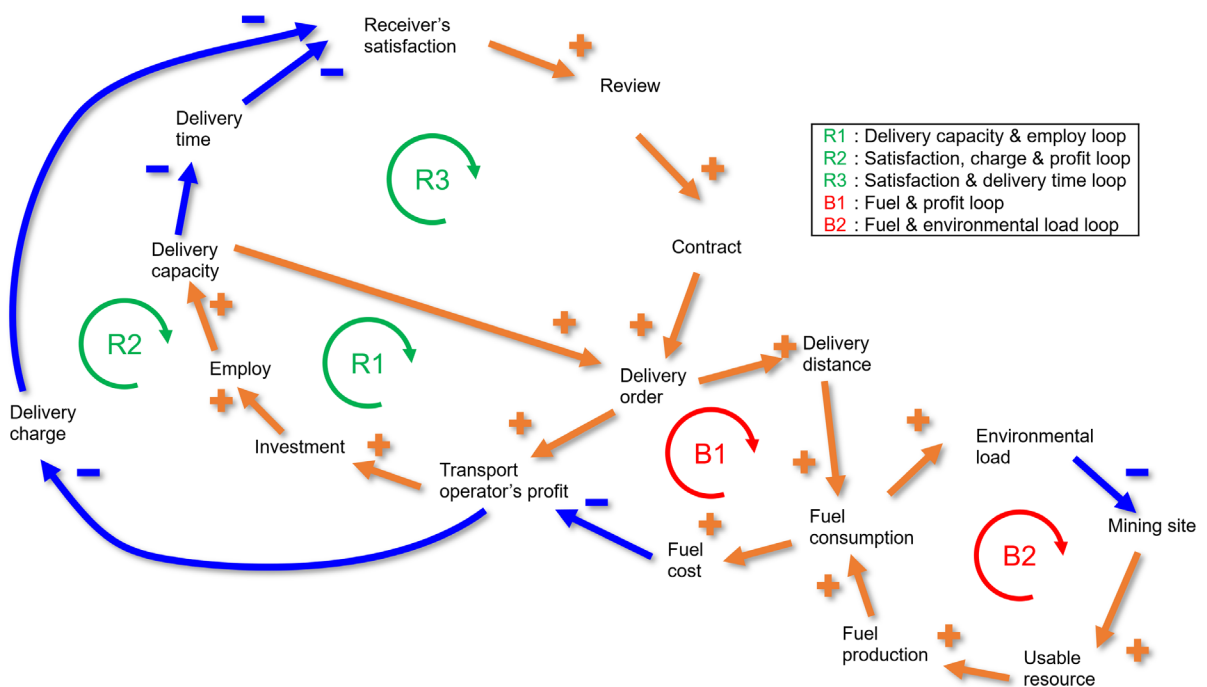


Fig. 5.19 CLD of transport & install operator

図 5.16 に示す 1 次企業のループ図では、「顧客の満足度と家具家電メーカーの利益に関するループ」、「環境に関するループ」、「顧客の満足度と家具家電の選択肢に関するループ」、「顧客の満足度とサービスプロバイダの利益に関するループ」の 4 つのループが確認され、全てのループが自己強化型ループである。ゆえに、設計する製品サービスの展開は 1 次物生産者に対して有用であることが考察可能である。

図 5.17 に示す 2 次企業のループ図においても、「顧客の満足度と家具家電メーカーの利益に関するループ」、「顧客の満足度とアップグレード業者の利益に関するループ」、「顧客の満足度と修理メンテナンス業者の利益に関するループ」、「アップグレード業者あるいは、修理メンテナンス業者の雇用に関するループ」と「環境に関するループ」の 5 つのループが確認され、全てのループが自己強化型ループである。ゆえに、設計する製品サービスの展開は 2 次企業に対して有用であることが確認された。

図 5.18 に示すサービスプロバイダの因果ループ図においては、「顧客満足とサービスの価格、利益に関するループ」、「顧客の満足度とサービスの選択肢に関するループ」、「顧客の満足度とサービスの品質に関するループ」、「在庫とサービスプロバイダの利益に関するループ」の 4 つのループが確認されたが、最後の「在庫とサービスプロバイダの利益に関するループ」においては、バランス型ループであることが確認された。これは、契約数の増加によってプロバイダが抱えておく在庫が多くなり、利益を圧迫する恐れがあることを示している。そのため、プロバイダは在庫管理費の増加に対応できるように利益を設定することや、在庫管理の最適化を行い、利益の圧迫を最小限にする必要があることが確認された。一方で、価格と利益に関するループや、サービスの選択肢、品質に関するループは全て自己強化型のループであるため、設計する製品サービスがサービスプロバイダに対しても有用である可能性が高いことが確認された。

図 5.19 に示す配送設置業者のループ図においては、「配送能力と雇用に関するループ」、「顧客満足と料金、利益に関するループ」、「顧客満足と配送時間に関するループ」、「燃料と利益」に関するループ、「燃料と環境負荷に関するループ」の 5 つのループが確認された。前 3 つのループは自己強化型ループであるが、後 2 つのループはバランス型ループであることが確認され、それぞれにおいて、契約数の増加による燃料費の上昇とその利益への影響、燃料使用量の増加による環境負荷の増加の恐れを意味する。これら 2 つのバランス型因果ループに関係する変数は、「燃料消費量」であるため、配送設置業者に対して有用な製品サービスであるためには、より燃料消費量の少ない輸送手段の採用や、輸送経路やスケジュールの最適化によって消費量を少なくする必要があることが解釈された。

以上より、設計する製品サービスの妥当性は高いものと判断し、これまでのサービスコンポーネントの種類、それに適用するライフサイクルオプション、ステークホルダの CVCA と因果ループ図の条件に基づいて、アップグレード方法や、サービスの更新頻度等の導出を行う。

5.3.3.アップグレード方法の設定，サービス提供計画の導出と検証

5.3.1 項および 5.3.2 項に示した条件に基づいて，表 5.6 に示した家具家電の更新頻度，サービス提供期間の導出，妥当性の検証を行う．初めにそれぞれのアップグレード方法を設定するために，表 5.6 に示した家具家電のサイズや重量を調査し，それぞれに対して Up-WDM を適用した．その結果を表 5.7 に示す．Up-WDM の結果より，それぞれの家具家電のライフサイクルシナリオを作成し，そこでコストや環境負荷量の発生源の整理を行った．家具家電のライフサイクルシナリオを図 5.20 に示す．5.3.1 節で述べた無形のサービスコンポーネントより，この製品サービスの目的はより高いクラスの家具や家電を継続的にレンタル形式で提供し，低いクラスの家具や家電を購入するよりも，低価格，高利益，低環境負荷でそれを実現することである．そのため，環境負荷量と価格，利益の算出を行うが，算出する環境負荷量は以下の 3 つの段階で発生するもの考慮する．

- ① 製品，部品生産時
- ② 処分時
- ③ 輸送時

また，コストに関しては，以下の 4 つの段階を考慮する．

- ① 製品，製造コスト
- ② 作業コスト
- ③ 処分，リサイクル費
- ⑥ 送料（出張費を含む）

Table 5.6 Design information of upgrade target household appliance and furniture

Upgrade target service component	Size (W, D, H) [mm]	Weight [kg]	Up-WDM score				Determined upgrade way
			Send-back	User-s	User-b	Serviceman	
Dining chair	460, 460, 800	4.0	1	3	2	-3	User-s
Dining table	1800, 900, 700	42.5	-1	-1	0	3	Serviceman
Low table	1000, 750, 350	24.0	0	2	3	-2	User-b
Cabinets	890, 590, 1870	77.0	-1	-3	-2	3	Serviceman
Work desk	1000, 550, 730	71.9	1	-5	-4	3	Serviceman
Television	900, 190, 570	11.0	6	-2	3	2	Send-back
Air conditioner	800, 150, 250	8.0	5	-7	-2	7	Serviceman
Refrigerator	600, 700, 1820	79.0	3	-7	-2	7	Serviceman
Washing machine	600, 610, 1000	40.0	4	-6	-1	6	Serviceman

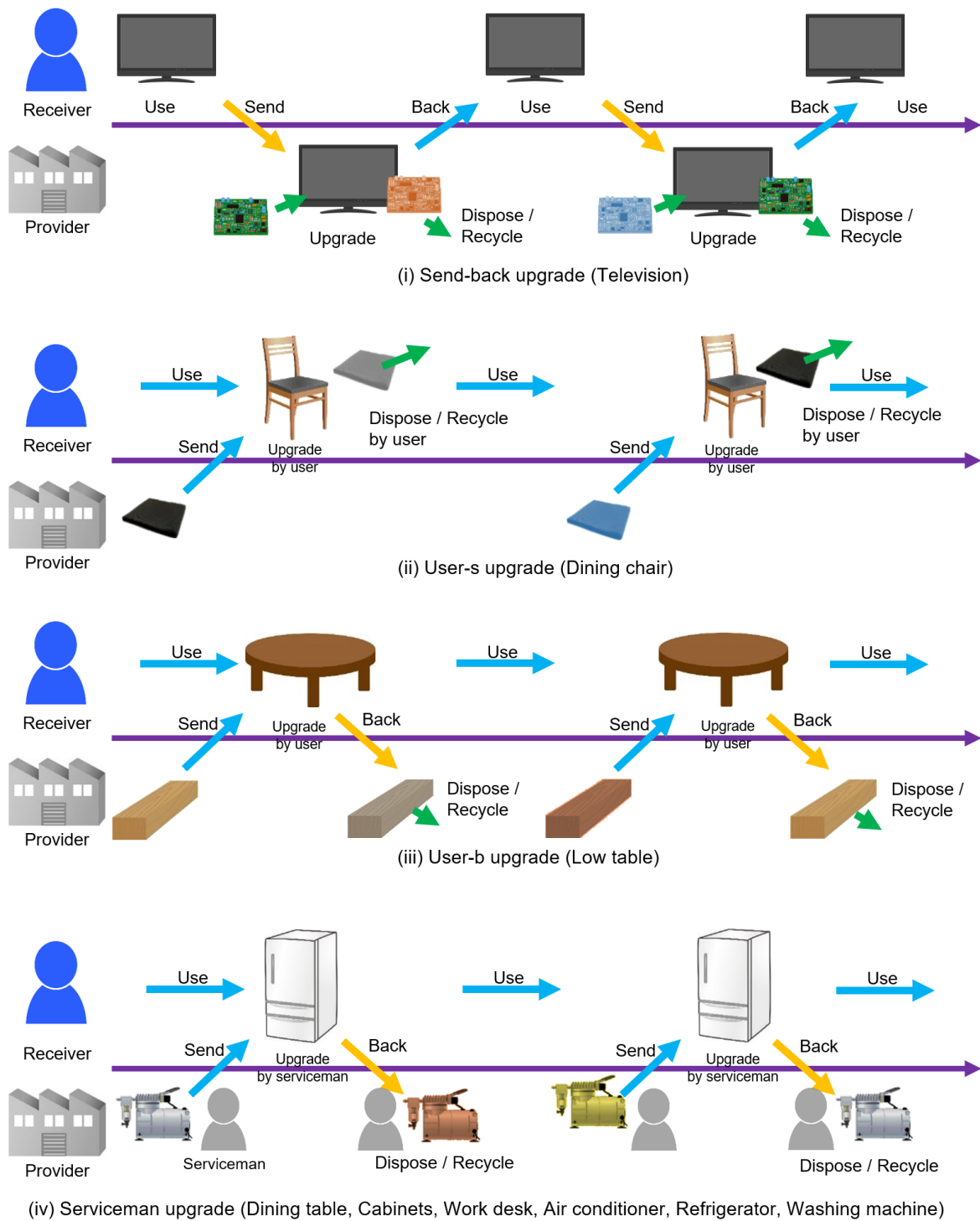


Fig.5.20 Product and part flow in case study 2

さらに、事例設定の単純化のために、製品を家具、テレビ、白物家電（テレビ以外の家電）の3種類に分け、それぞれのコストや環境負荷量、利益率の設定を行う。さらに、輸送、廃棄、更新作業において発生するコストや環境負荷量を、自治体や配送設置業者の料金データを用いて、それぞれの製品において調査し、それぞれの合計を、輸送時の

環境負荷量 TEL ，廃棄りサイクル時の環境負荷量 REL ，輸送コスト TC ，廃棄りサイクルコスト RC ，作業コスト WC の 5 つの定数として用意した。また，更新のサイクルを 4 年毎に設定し，サービスの提供期間を 8 年間に設定した。これは，日本の賃貸物件利用者の 70% が 4 年以内に引っ越しを行う現状を鑑みて，2 物件分に相当する期間を設定した。更新サイクル，サポート期間の妥当性に関しては，1 世代当たりの価格や利益，環境負荷量を導出することで評価する。さらに，前述の低価格，高利益，低環境負荷を実現するために必要な 1 製品の要求使用年数（物理寿命）を導出する。例えば，製品の使用世代数が 5~6 年と導出された場合，1 世代の年数が 4 年間であるため，その製品は 4 年毎のアップグレードや修理メンテナンスを行いながら，20~24 年の物理寿命を持つことが求められることを意味し，その寿命を実現することができれば，低価格，高利益，低環境負荷が実現されることを示す。

以上の条件より，本事例では，更新頻度，サポート期間の妥当性を評価する評価変数として，1 世代当たりのサービス提供による環境負荷発生量 $SELpG$ ，1 世代当たりのサービス価格 $SPpG$ ，1 世代当たりのサービス提供による利益 $SRpG$ の 3 つを用いる。式 (5.10) から式 (5.12) にそれぞれの算出式を示す。これらの評価変数を構成する設計変数として，製品の使用世代数を表す，アップグレード世代数 UGN ，製品全体に対して，アップグレードに利用可能なコストや原料（環境負荷）の割合を示す，アップグレード可能量率 UAR ，家具の利益率 $UpPRfu$ ，白物家電の利益率 $UpPRha$ ，テレビの利益率 $UpPRtv$ を定義し，さらに，設計上の制約条件（PSD 手法の適用に際して，範囲値の絞り込みを行わない設計変数）として，家具の製造時環境負荷量 $PELfu$ ，白物家電の製造時環境負荷量 $PELha$ ，テレビの製造時環境負荷量 $PELtv$ ，家具の製造コスト $PCfu$ ，白物家電の製造コスト $PCha$ ，テレビの製造コスト $PCtv$ を定義した。これらの定数，評価変数，設計変数，制約条件の値を表 5.7 に示す。これらの値は，実製品の価格や，メーカーの IR レポートによる利益率の調査，表 5.6 に示したサイズおよび重量から，環境負荷原単位（経済産業省，2012）を用いて導出した。

式 (5.10) から式 (5.12)，表 5.7 に示す変数の初期範囲の条件に基づいて PSD 手法に適用した導出した，設計変数の結果を図 5.21 に，評価変数の結果を図 5.22 にそれぞれ示す。評価変数の初期範囲は，既存の買い替えの場合の値を用いており，それらよりも低価格，高利益，低環境負荷が実現されるように要求される範囲を設定した。

$$SELpG = \{1 + UAR(UGN - 1)\} \times \frac{(PELtv + PELfu + PELha)}{UGN} + REL + TEL \quad (5.10)$$

$$SPpG = \frac{1 + UAR(UGN - 1)}{UGN} \left(\frac{PCtv}{1 - UpPRtv} + \frac{PCfu}{1 - UpPRfu} + \frac{PCha}{1 - UpPRha} \right) + WC + RC + TC \quad (5.11)$$

$$SRpG = \frac{1 + UAR(UGN - 1)}{UGN} \left(\frac{PCtv \cdot UpPRtv}{1 - UpPRtv} + \frac{PCfu \cdot UpPRfu}{1 - UpPRfu} + \frac{PCha \cdot UpPRha}{1 - UpPRha} \right) \quad (5.12)$$

Table 5.7 Initial value ranges of Up-PSS and conventional sellout case

	Constant	Up-PSS	Conventional
<i>TEL</i>	Environmental load of transportation phase [kg-CO ₂]	300	190
<i>REL</i>	Environmental load of recycling phase [kg-CO ₂]	7.0	32
<i>TC</i>	Transportation cost [Yen]	60000	55000
<i>RC</i>	Recycling cost [Yen]	6300	16000
<i>WC</i>	Working cost [Yen]	38000	38000
Constraint of design variable			
<i>PEL_{fu}</i>	Environmental load of furniture production phase [kg-CO ₂]	[36.2, 39.8]	36.2
<i>PEL_{ha}</i>	Environmental load of household appliance production phase [kg-CO ₂]	[522.7, 575.0]	522.7
<i>PEL_{tv}</i>	Environmental load of television production phase [kg-CO ₂]	[50.0, 55.0]	50.0
<i>PC_{fu}</i>	Production cost of furniture production phase [Yen]	[96000, 225000]	9600
<i>PCh_a</i>	Production cost of household appliance production phase [Yen]	[161500, 209000]	161500
<i>PC_{tv}</i>	Production cost of television production phase [Yen]	[45000, 63000]	45000
Design variable			
<i>UpPR_{fu}</i>	Profit rate of furniture	[0.4, 0.6]	0.20
<i>UpPR_{ha}</i>	Profit rate of household appliance	[0.05, 0.1]	0.05
<i>UpPR_{tv}</i>	Profit rate of television	[0.1, 0.15]	0.10
<i>UAR</i>	Rate of upgradable amount	[0.35, 0.50]	-
<i>UGN</i>	Upgrade generation	[2, 6]	-
Evaluation variable		Requirement	
<i>SEL_{pG}</i>	Environmental load emission by service provision per generation [kg-CO ₂]	[360, 719]	719
<i>SP_{pG}</i>	Price of service provision per generation [Yen]	[220000, 449000]	449000
<i>SR_{pG}</i>	Profit by service provision per generation [Yen]	[37500, 75000]	37500

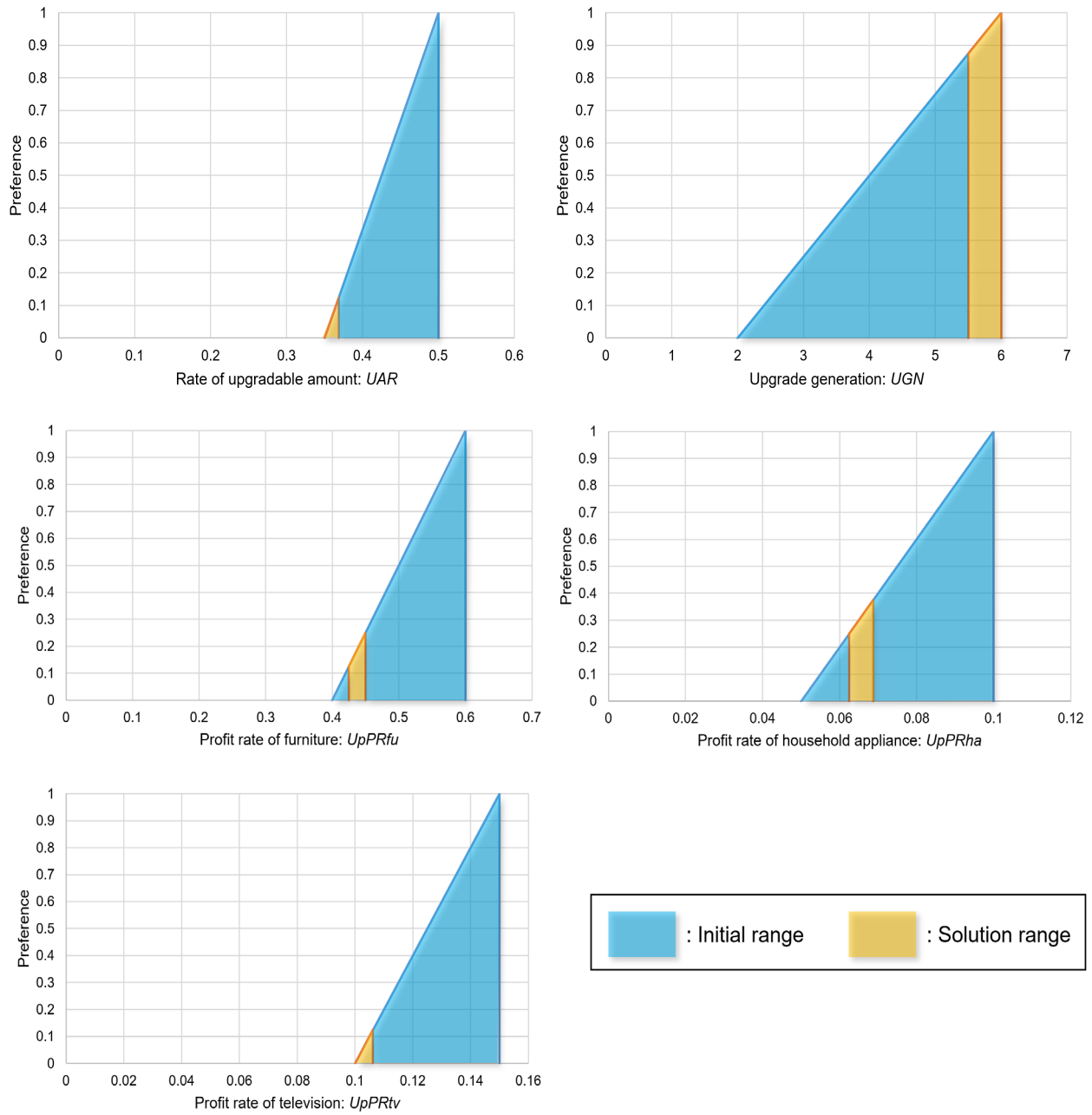


Fig. 5.21 Initial range and solution range of design variables

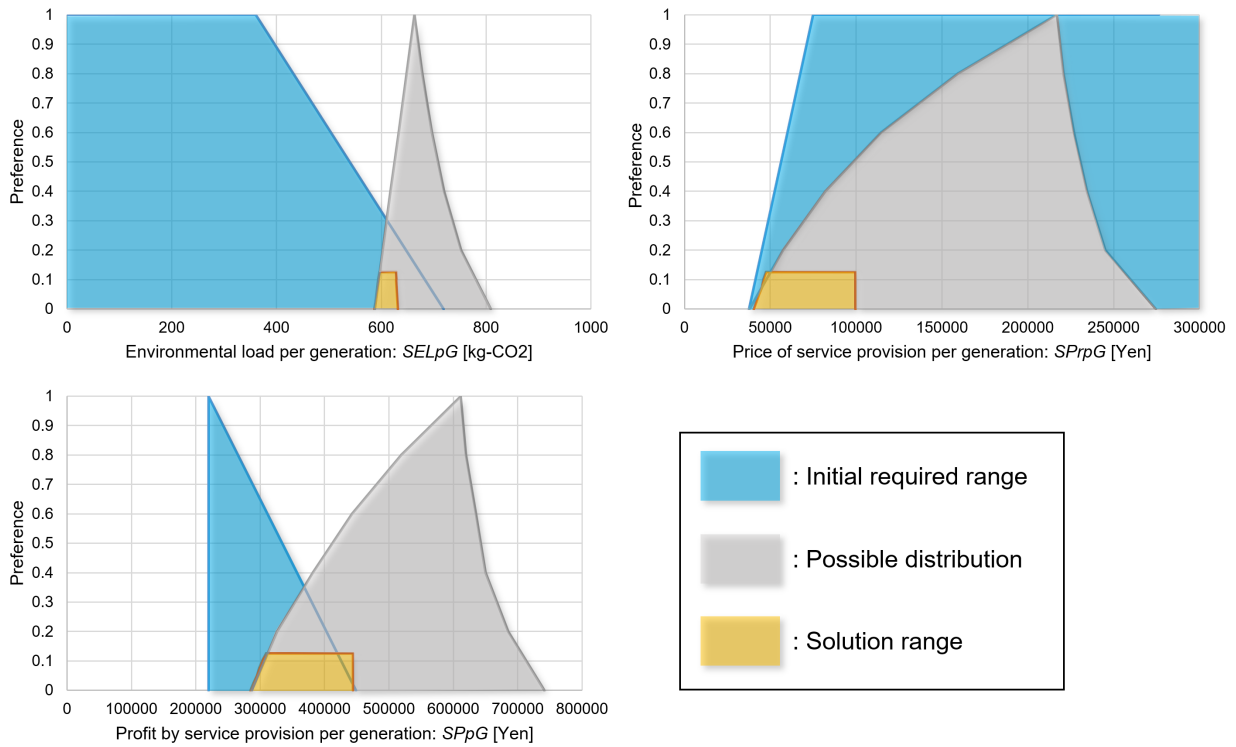


Fig. 5.22 Initial range and solution range of evaluation variables

図 5.21 および図 2.22 より，設計する製品サービスは，要求された範囲を満足させる設計解が導出されることが確認された．また，比較対象の低いクラスの家具や家電を購入する場合との比較を行った結果を図 5.23 および図 5.24 に示す．

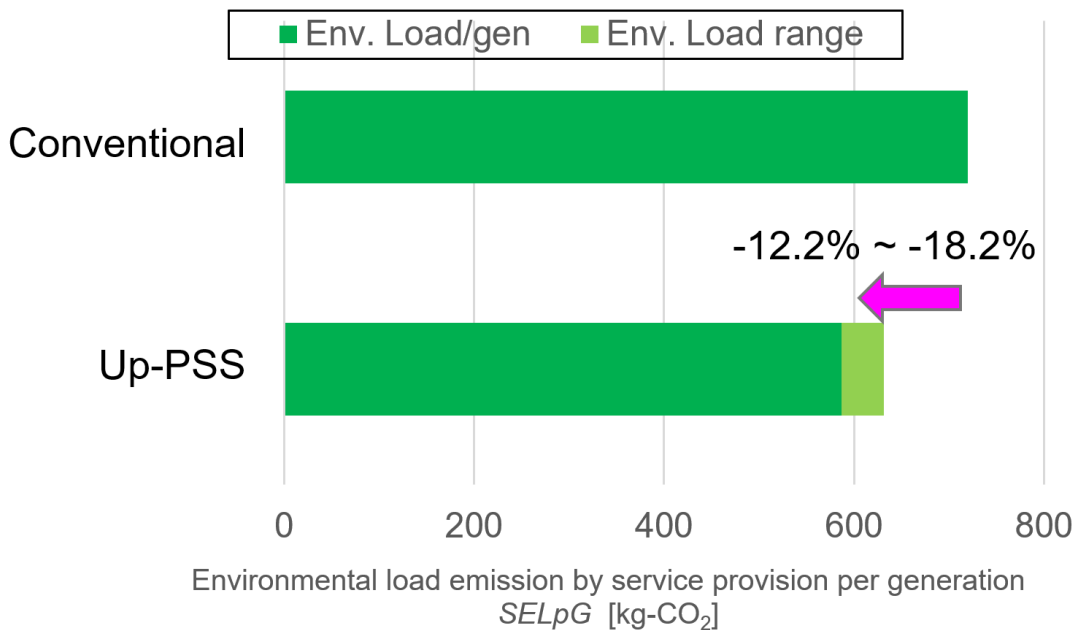


Fig. 5.23 Comparison of the environmental load per service generation

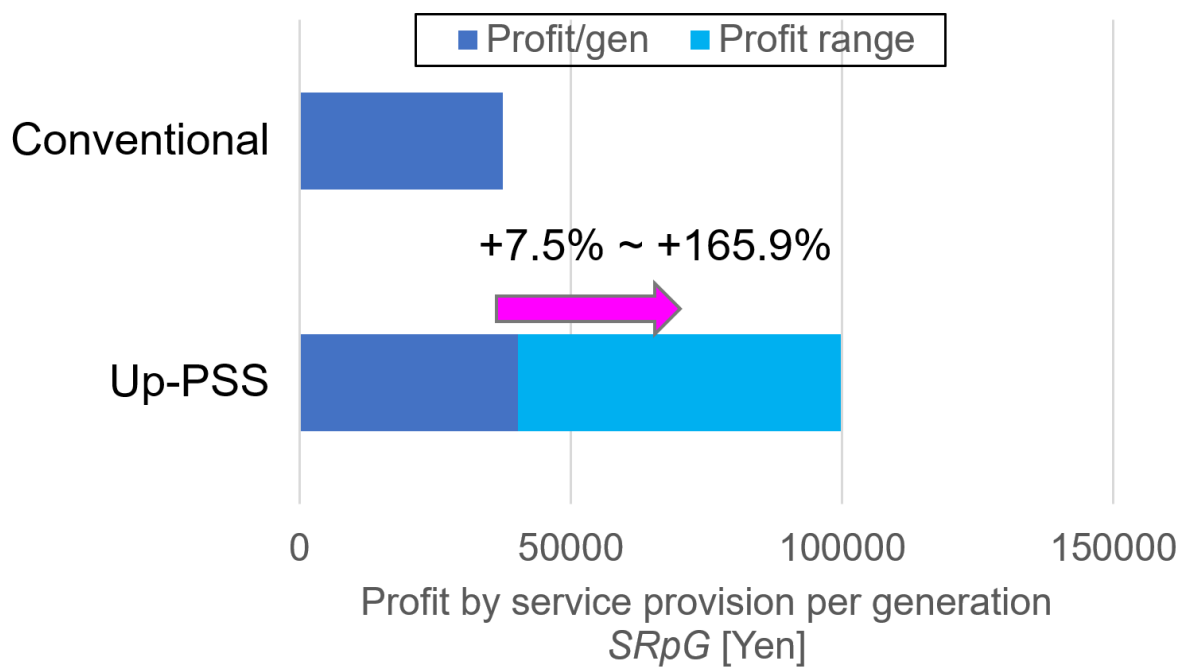
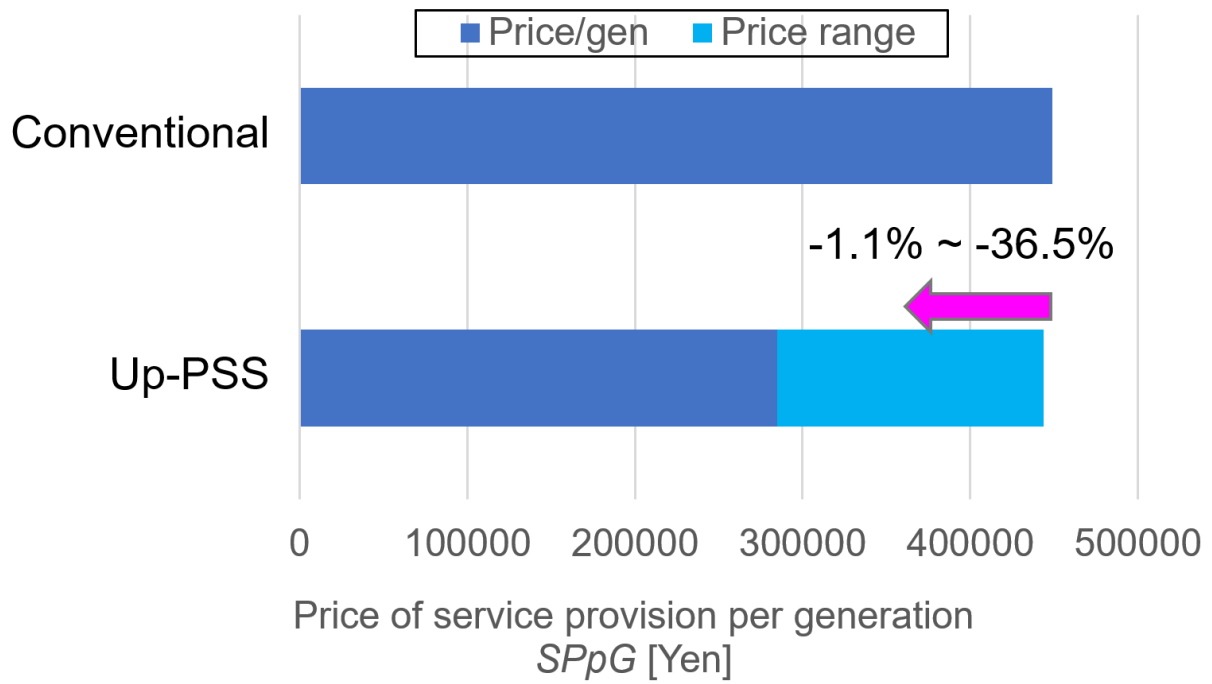


Fig. 5.24 Comparison of the price and profit per service generation

図 5.21 より、アップグレード可能量率 UAR は 0.35%~36.875%、アップグレード世代数 UGN は 5.5~6 世代、家具の利益率 $UpPRfu$ は 42.5%~45%、白物家電の利益率 $UpPRha$ は 6.25%~6.875%、テレビの利益率 $UpPRtv$ は 10%~10.625%の範囲で設定可能であることが確認され、また、図 5.23 および図 5.24 より、この設計変数の範囲を用いた場合は、低いクラスの家具や家電を購入する場合よりもサービス 1 世代あたりの環境負荷量 $SElpG$ は-12.2%~18.2%の削減が可能であり、サービス 1 世代あたりの価格は、-1.1%~-36.5%の削減が可能であることが確認された。また、サービス 1 世代あたりの利益は、+7.5%~+165.9%の増加が実現できることが確認された。予め設定した更新頻度、サポート期間の妥当性が示された。また、更新世代数より、設計するアップグレード製品サービスで提供される家具家電は、4 年毎のアップグレードや修理メンテナンスを行いながら、22~24 年の物理寿命を実現できるように設計を行う必要があることが確認された。

以上より、提案するアップグレード製品サービスシステム設計手法により、サービスの発案からサービス提供計画の作成、後半のハードウェア設計に対する要件の導出が可能であることが示され、提案手法の有効性が確認された。

5.4. 事例 3 : 複合機のリースビジネス

5.4.1. 顧客および提供サービスの決定 (事例 3)

本適用事例は、製品機能面、環境面、経済面の視点からアップグレード製品サービス設計を実施、評価したものである。本事例では特に、アップグレードの頻度について焦点を当て、低環境負荷、高利益、低価格を実現する更新頻度の導出を行った。環境負荷量や製品価格を最大限発生させずに可能な限り頻繁に機能のアップグレードを行い、より多くの利益をもたらす製品の設計を行うことが本事例の目的である。今回は、複合機を設計対象に選択し、サービスのプロバイダが複合機のメーカー、顧客を企業と仮定して上記の目的を実現させる設計を行った。

・ ユーザ要求および製品構造の設定

従来の複合機に対する要求や、構造の調査を行い、ユーザ要求のランク付けや複合機の構造を決定した。図 5.25 に一対比較によって設定したユーザ要求とその重要度を付ける際に使用した一対比較表を示す。一対比較は著者が行った結果である。また、複合機の構造に関しては、既存の製品構造を調査し、印刷ユニット、スキャナユニット、情報処理ユニット、操作パネル、ペーパーフィーダーの5つのユニットから構成されるものを設計対象として設定した。同時に、複合機が有する機能を調査し、図 5.25 に示した要求の重要度を、QFD を用いて機能に転写した。その結果を図 5.26 に示し、さらに、機能の重要度を、製品構成ユニットの重要度に転写した結果を図 5.27 に示す。

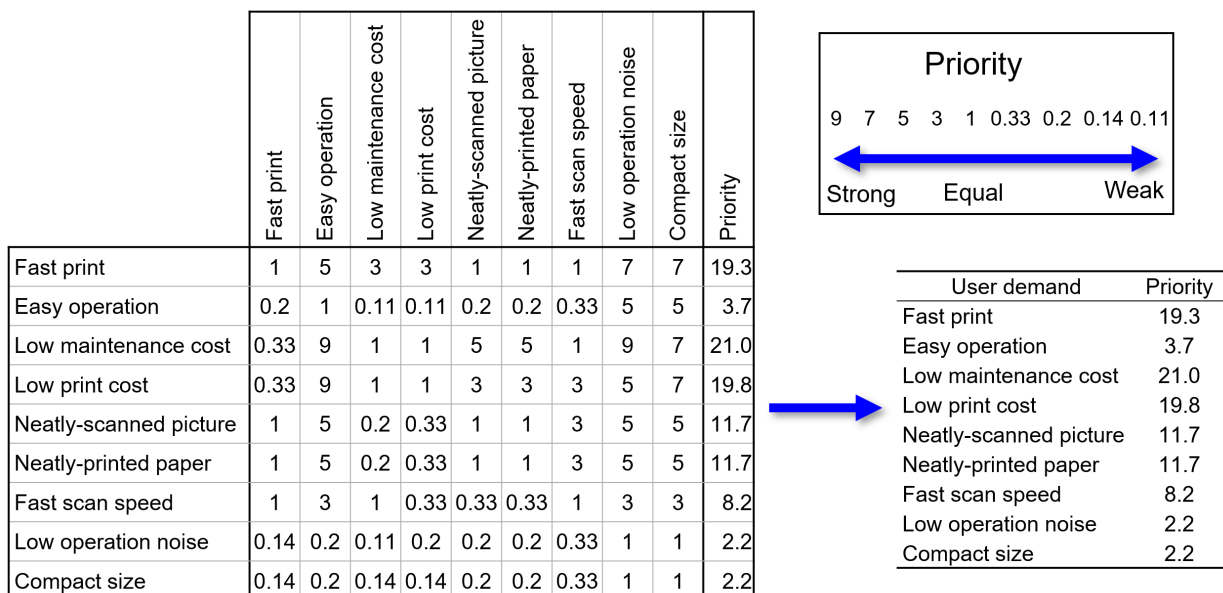


Fig. 5.25 Result of user demands' priorities in a multi-function printer

9: Strong relationship
3: Moderate relationship
1: Weak relationship

		Function												
		Priority	Print speed	Operability	Paper stock capacity	Toner capacity	Running cost	Power consumption	Scan resolution	Print resolution	Scan speed	Operation noise	Dimension	Weight
User demand	Fast print	19.3	9	1	3	1				3	1			
	Easy operation	3.7		9	3	1					3			
	Low maintenance cost	21.0					9	9						
	Low print cost	19.8				9	9	3						
	Neatly-scanned picture	11.7		3					9		3		1	
	Neatly-printed paper	11.7	3				1		3	9				
	Fast scan speed	8.2		3					3		9			
	Low operation noise	2.2	9								3	9		
	Compact size	2.2		3	9	9							9	9
	Priority		405	367	289	386	367	232	289	232	309	232	193	174

Fig. 5.26 QFD result between user needs and product functions in a multi-function printer

9: Strong relationship
3: Moderate relationship
1: Weak relationship

		Product unit					
		Priority	Print Unit	Scan Unit	Computer Unit	Operating panel	Paper feeding unit
Function	Print speed	11.7	9		3	3	3
	Operability	10.6	3	3	9	9	3
	Paper stock capacity	8.3					9
	Toner capacity	11.1	9				
	Running cost	10.6	9		3		
	Power consumption	6.7	9	3	3	1	
	Scan resolution	8.3		9		1	
	Print resolution	6.7	9			1	
	Scan speed	8.9		9	3	3	
	Operation noise	6.7	3	3			
	Dimension	5.6	3	9	1		9
	Weight	5.0	9	3	1		9
	Priority		533	292	219	178	237

Fig. 5.27 QFD result between product functions and product units in a multi-function printer

図 5.26 および、図 5.27 に示した QFD の結果、印刷速度の向上がアップグレード対象の機能として選択され、印刷機能向上による生産性の向上がアップグレード製品サービスの提供目的として設定され、そのために、印刷ユニットのアップグレードが必要であることが導出された。本事例では、さらに更新する部品の粒度を細かくするために、印刷ユニットを構成するサブユニットを定義し、製品機能の重要度を印刷ユニットのサブユニットに QFD を用いて転写した。その結果を図 5.28 に示す。図 5.28 より、印刷速度向上のために、印刷ユニット内に存在するドラムユニットが交換対象の部品として定義された。以上の条件を用いて、更新頻度の導出を行う。

9: Strong relationship
3: Moderate relationship
1: Weak relationship

		Priority	Print unit sub-unit					
			Chassis	Toner container	Drum unit	Control board	Mechanical parts	Waste toner container
Function	Print speed	11.7		1	9	3	3	1
	Operability	10.6	1			3		3
	Toner capacity	11.1	3	9	1			3
	Running cost	10.6		9	3	1		
	Power consumption	6.7			3	9	3	
	Print resolution	6.7		3	9	3	3	
	Operation noise	6.7	3		3		9	
	Dimension	5.6	9	3	3		9	3
	Weight	5.0	9	3	3		9	1
Priority			292	327	397	222	420	128

Fig. 5.28 QFD result between product functions and print unit's sub-units

5.4.2. 評価視点変数, シナリオの定義

・ 経済面の評価

本事例で用いた関係式を記載する。これまでの事例と同様に、経済面と環境面からアップグレード設計の評価を行う。経済面においては、ユーザ視点からの評価として、全世代製品価格 PP_T を算出し、企業視点の評価として全世代売上 PS_T 、全世代利益 PR_T を算出する。以下の式 (5.13) から式 (5.22) に算出に用いた関係式記載する。また、式 (5.13) から式 (5.22) 内の定数、変数の詳細は表 5.8 に示す。アップグレードを行わない通常製品の価格は、第 1 世代および第 2 世代価格を 420,000Yen と仮定し、利益率を 5% と仮定した。

・ 全世代製品価格 PP_T [Yen]

$$PP_T[\text{Yen}] = PP_1 + PP_2 \quad (5.13)$$

ただし、第 1 世代製品価格 PP_1

$$PP_1[\text{Yen}] = 420000 \quad (5.14)$$

第 2 世代以降製品価格 PP_2

$$PP_2[\text{Yen}] = \frac{120}{Tu} \times \frac{DC}{1 - DPR_2} \quad (5.15)$$

・ 全世代売上 PS_T [Yen]

$$PS_T[\text{Yen}] = PS_1 + PS_2 \quad (5.16)$$

ただし、第 1 世代売上 PS_1

$$PS_1[\text{Yen}] = NSP_1 \times PP_1 \quad (5.17)$$

第 2 世代以降売上

$$PS_2[\text{Yen}] = NSP_2 \times PP_2 \quad (5.18)$$

第 1 世代販売台数 NSP_1 および第 2 世代以降販売台数 NSP_2 の関係を式(5.14)に示す

$$NSP_2 = NSP_1 \times UR \quad (5.19)$$

・ 全世代利益 PR_T [Yen]

$$PR_T[\text{Yen}] = PPr_1 + PPr_2 \quad (5.20)$$

ただし、第 1 世代利益 PPr_1

$$PPr_1[\text{Yen}] = NSP_1 \times PP_1 \times DPR_1 \quad (5.21)$$

第 2 世代以降利益 PPr_2

$$PPr_2[\text{Yen}] = NSP_2 \times PP_2 \times DPR_2 \quad (5.22)$$

Table 5.8 Details of variables and constants in formula 5.13 to 5.22

Variable	Detail	Value, unit
Tu	Upgrade time	Variable [month]
DC	Drum unit cost	Variable [Yen]
DPR_2	Over 2 nd gen drum unit profit rate	Variable
NSP_1	Number of 1 st gen sales volume	10000
UR	Upgrade rate	Variable

・ 環境面の評価

環境負荷量（CO₂排出量）の算出は、図 5.29 に示す更新のシナリオに基づいて製品 1 台当たりの排出量を算出する。複合機 1 台を簡易的に分解し、過去の LCI データ(富士総合研究所環境資源エネルギー研究部, 2001)や、原単位情報(経済産業省, 2012)を用いて材料調達から廃棄まで排出量を図 5.30 に示す境界条件に基づいて算出した。アップグレードはメーカーが交換部品をユーザに送付し、ユーザ自身が部品交換を行い、旧世代の部品をユーザがメーカーにユーザ返却する User-b upgrade を想定した。これは、既存の製品において、一般的に複合機のドラムユニットが部品販売されたおり、ユーザ自身が簡単に交換できるためである。また、表 5.9 に分解した複合機の重量, 材料, 加工方法の調査データを示す。

廃棄時の CO₂ 排出量は構成部品全ての埋め立てを行う仮定して算出した。使用時の CO₂ 排出量は式 (5.9) を用いて算出したが、消費電力 E の代わりにエネルギー消費効率 (:273kWh/year) を用いて、サービスのサポート期間を図 5.29 に示す通り、複合機の法定耐用年数の 2 倍である 120 カ月と設定し算出した。ただし、アップグレードによるエネルギー変換効率の変化は起こらないと仮定した。本事例では、上記事項に追加して、更新対象の部品である転写ユニットの第 2 世代以降製造時の環境負荷量に不確実性が存在すると仮定し、範囲値で CO₂ 排出量 EL_{D2} を設定した。

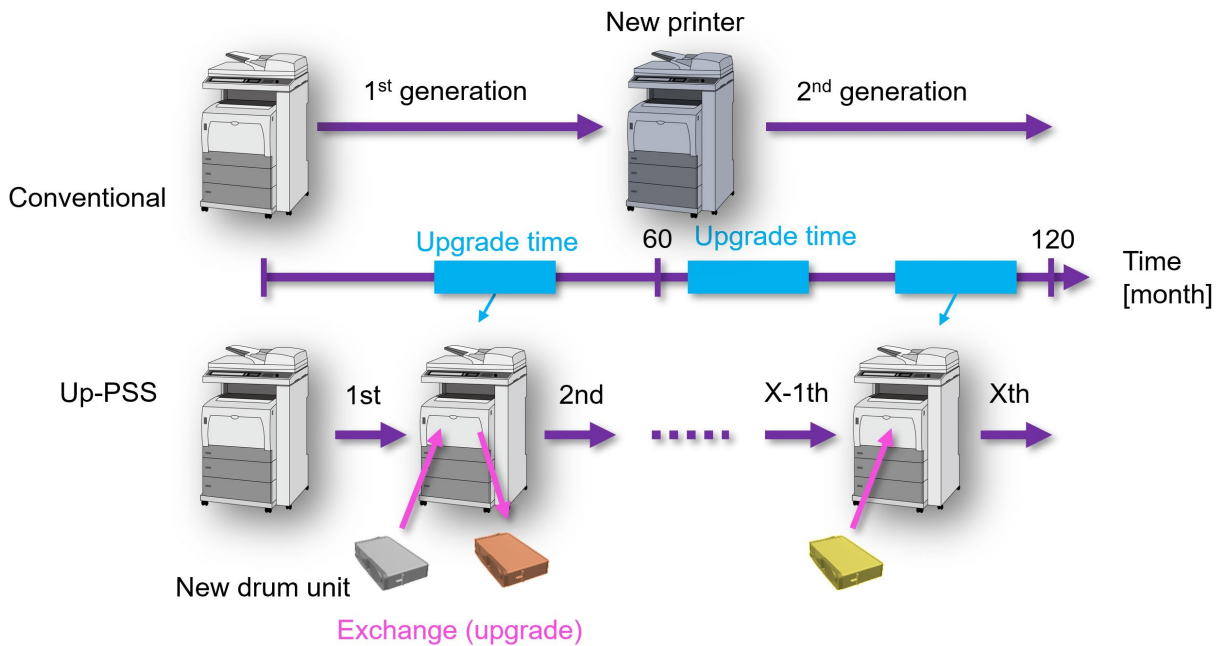


Fig. 5.29 Upgrading scenario in case study 3 (Yamada et al., 2016)

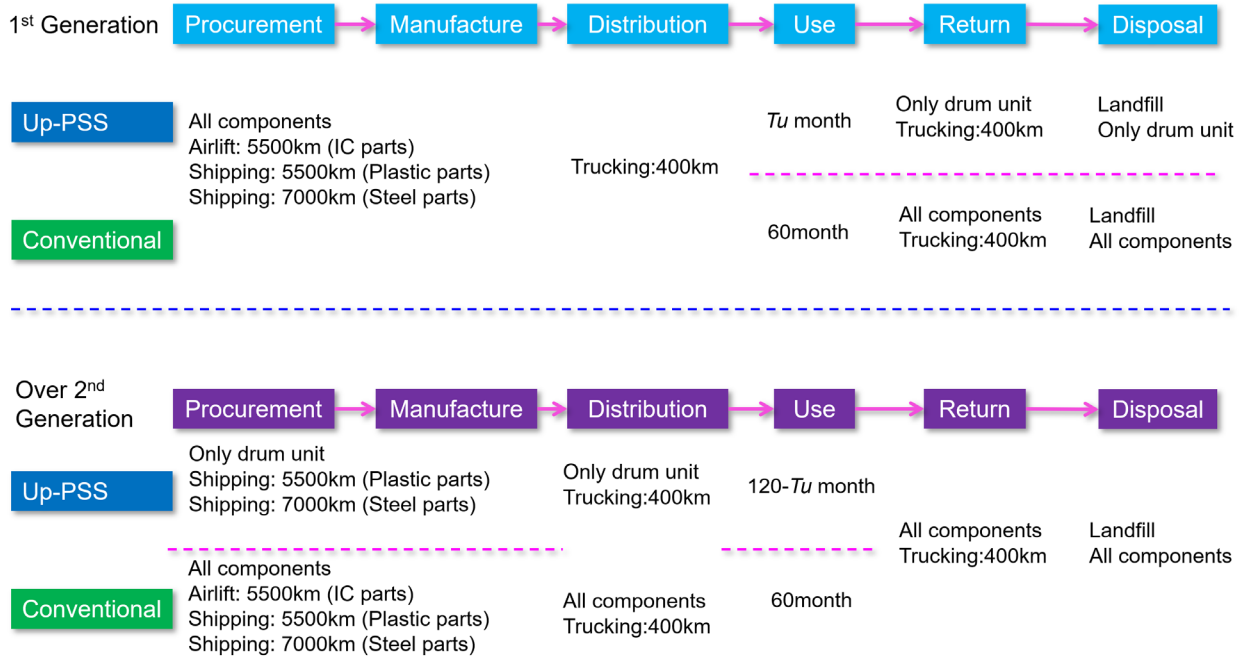


Fig. 5.30 Product lifecycle and boundary condition in case study 6

Table 5.9 Investigation data of a multi-function printer component, material, weight, and processing method

Unit	Sub-Unit	Material	Weight [kg]	Processing method
Print Unit	Drum Unit	PE Film	0.068	Filming
		ABS	2.992	Injection
		Carbon steel	0.34	Press
	Toner box	ABS	0.131	Injection
		Toner	0.62	Complex
	Chassis	PC+ABS	8.17	Injection
		PPE	8.17	Injection
Zinc-coated steel plate		24.5	Press	
Scan Unit	Censor Unit	PPE	1	Injection
		Carbon steel	1	Press
		Acrylic	0.4	Injection
	Board	Epoxy + Glass fiber	0.4	Complex
	Drive parts	ABS	0.7	Injection
		Carbon steel	1	Press
	ADF	PC+ABS	4	Injection
		ABS	1.6	Injection
		Carbon steel	1	Press
	Chassis	PC+ABS	6	Injection
Zinc-coated steel plate		6	Press	
Paper Feeder	Zinc-coated steel plate	7	Press	
	PC+ABS	4	Injection	
	ABS	2.5	Injection	
Computer Unit	Mother board	Epoxy + Glass fiber	1	Complex
	Chassis	Zinc-coated steel plate	6.8	Press
Control Panel	Chassis	PC+ABS	0.8	Injection
	Mother board	Epoxy + Glass fiber	0.1	Complex
	LCD	Complex	0.1	Complex
Base Unit	Carbon steel	3.1	Press	
	Zinc-coated steel plate	20	Press	
Total			204	

5.4.3.更新頻度の導出と妥当性の検証

複合機の法定耐用年数およびリース期間の算出法から、アップグレード時期 T_u を第 1 世代発売の 36 カ月から 84 カ月後の間と定義し、全世代製品価格や環境負荷量の上昇が許容できる範囲である限り、図 5.29 に示したアップグレードシナリオの通り、頻繁にアップグレードを行うものと仮定する。アップグレード対象の機能である印刷速度は、各アップグレード時期における最速の値を実現させると仮定し、ドラムユニットを交換することでそれを実現する。

PSD 手法を用いて全世代製品価格 PP_T 、全世代 CO_2 排出量 EL_T の上昇を最小限に抑えつつ、可能な限り全世代利益 PR_T を増加させることが可能なアップグレード時期 T_u (アップグレード頻度)、第 2 世代以降転写ユニット利益率 DPR_2 を導出する。なお、アップグレード製品および、通常製品の第 1 世代販売台数を 10000 台、アップグレード率は 70%から 80%であると仮定した。図 5.31 に導出された製品機能に関する設計範囲解と要求範囲、アップグレード率等の設定した設計条件を示す。

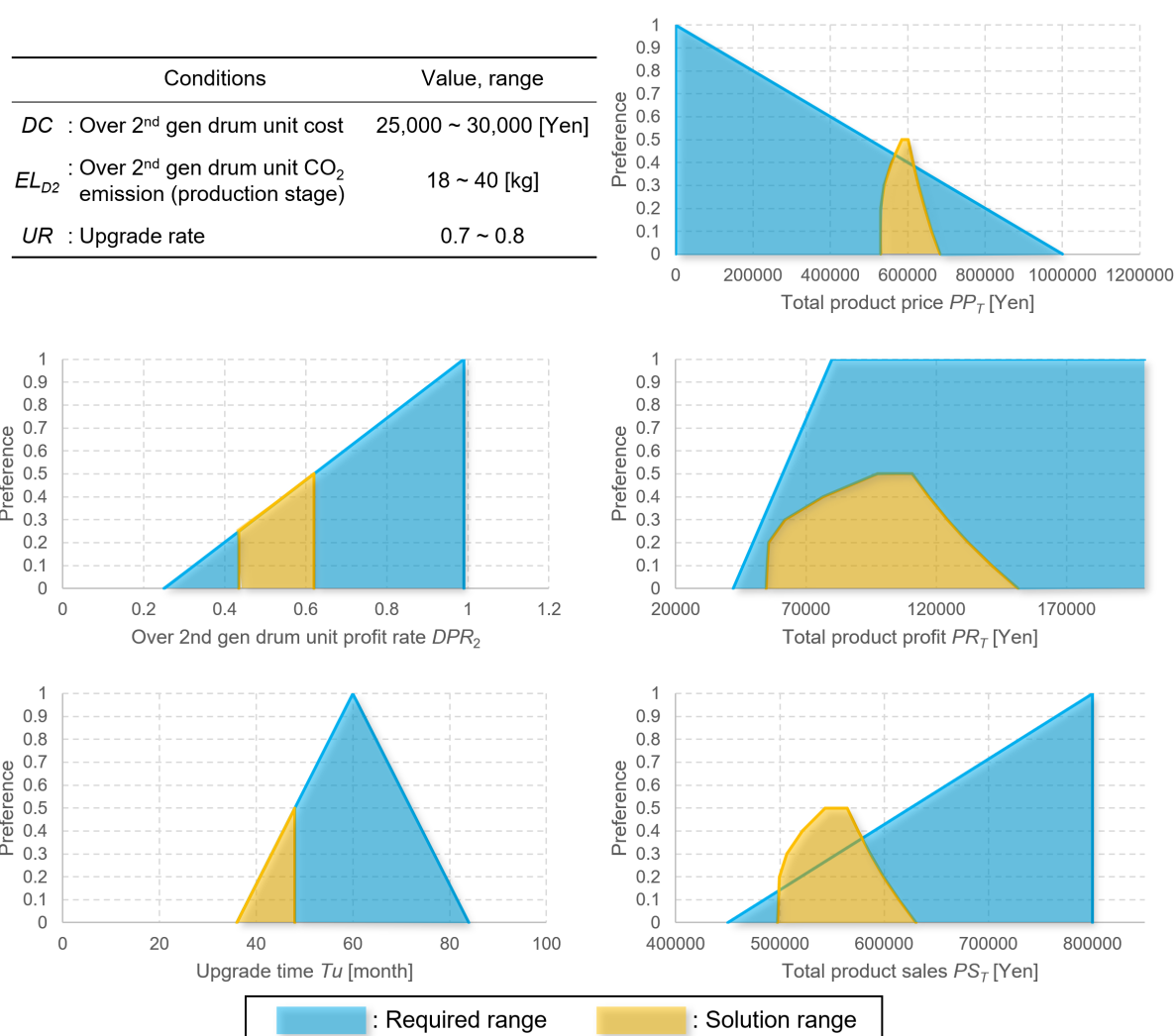


Fig. 5.31 Obtained ranged design solutions and estimated conditions

図 5.31 より，機能に関する設計範囲解が予め設定された設計条件の範囲で導出可能なことが確認された．本頁では，機能向上の頻度，環境面，経済面に関する結果，考察を記載する．図 5.31 より，アップグレード製品は評価期間の 120 ケ月の間に 2 回または 3 回機能のアップグレードが可能であることが示された．これにより，アップグレード製品は通常製品と比較して 2 から 3 倍頻繁に機能の向上が可能であり，製品価値の保持が可能であることが示された．

図 5.32 と図 5.33 にアップグレード製品と通常製品の全世代価格 PP_T の比較，全世代売り上げ PS_T と全世代利益 PR_T の比較を各々示す．図 5.32 に示す通り，アップグレード製品は通常の製品と比較して全世代合計で-36.8%から-18.7%の価格低減が実現できることが確認された．また，図 5.33 より，アップグレード製品の全世代製品の売上額 PS_T は，製品価格の低下に伴い-30.3%から-16.6%低下するが，全世代利益 PR_T は+53.2%から+324.4%の大幅な向上が実現可能であることが確認された．これらの結果は，アップグレード部品である転写ユニットのコストが製品全体のコストと比較して 10%未満と非常に小さい割合であるため，アップグレード製品を販売する場合はより多くの利益の付加が可能であるためである．

図 5.34 に製品ライフサイクル全体における CO_2 排出量および，増減度を示す．図 5.34 より，アップグレード製品はライフサイクル全体で，約 20%程度の排出量削減が可能であることが確認された．使用時を除いたライフサイクル全体における排出量は-47.1%から-40.6%と大幅に削減可能であり，これは，転写ユニットの重量が複合機全体の重量の約 1.7%程度と非常に軽量であり，この重量に付随して製品製造時や輸送，廃棄時の CO_2 排出量が低減されたためであると考えられる．

以上より，アップグレード製品サービスは通常製品と比較して，製品機能の頻繁な向上（最新性能の維持），が実現できると同時に，製品が及ぼす環境負荷量，製品の価格を低下させ，高い利益を確保できる製品の設計が可能であることが確認された．

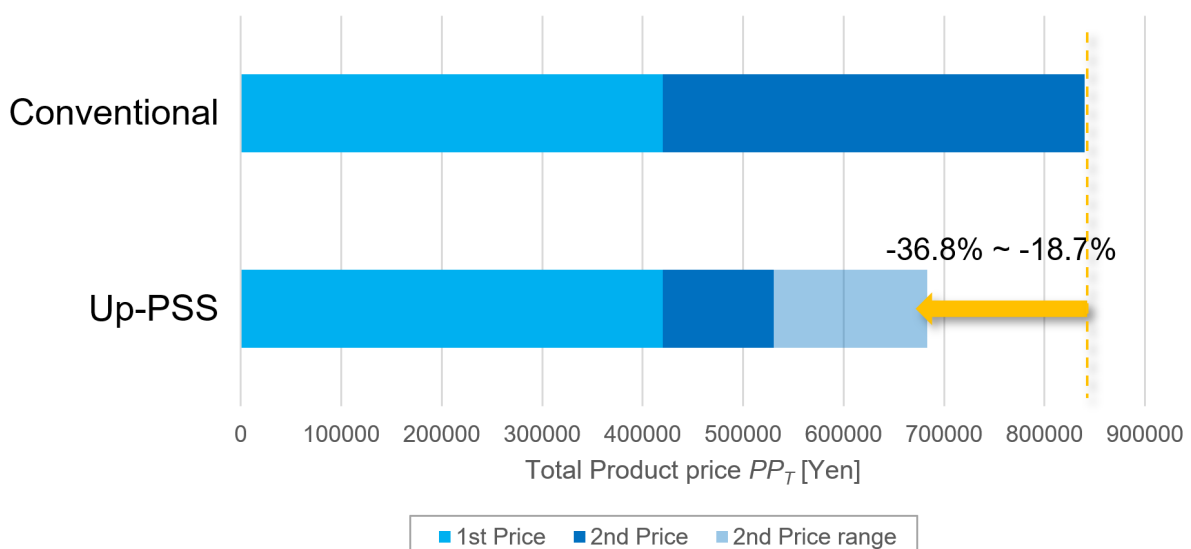


Fig. 5.32 Solution ranges of the total product prices of conventional product and Up-PSS

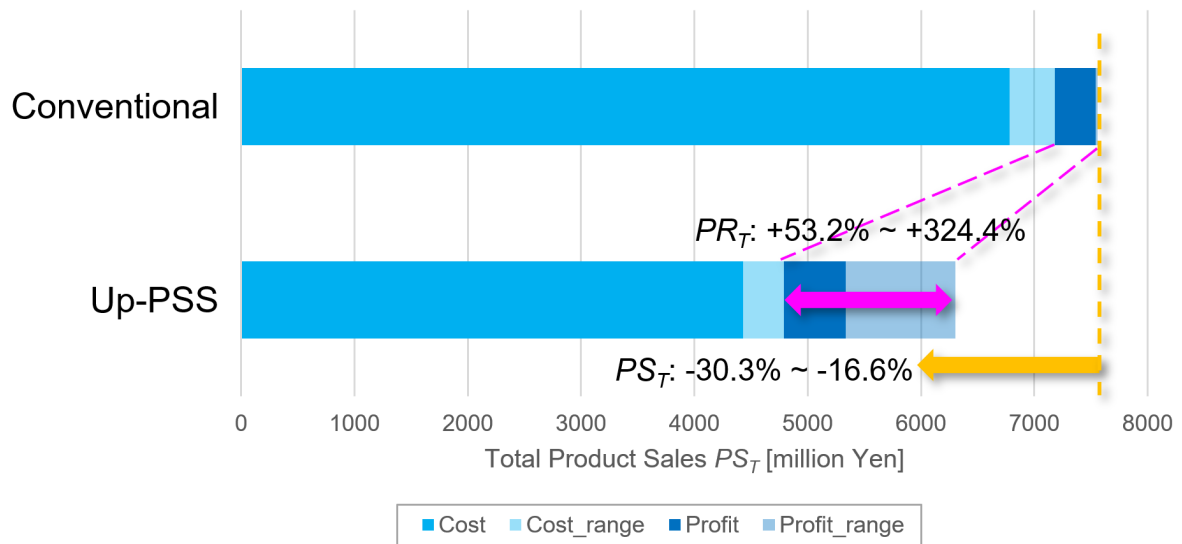


Fig. 5.33 Solution ranges of the total product sales and profits of conventional product and Up-PSS

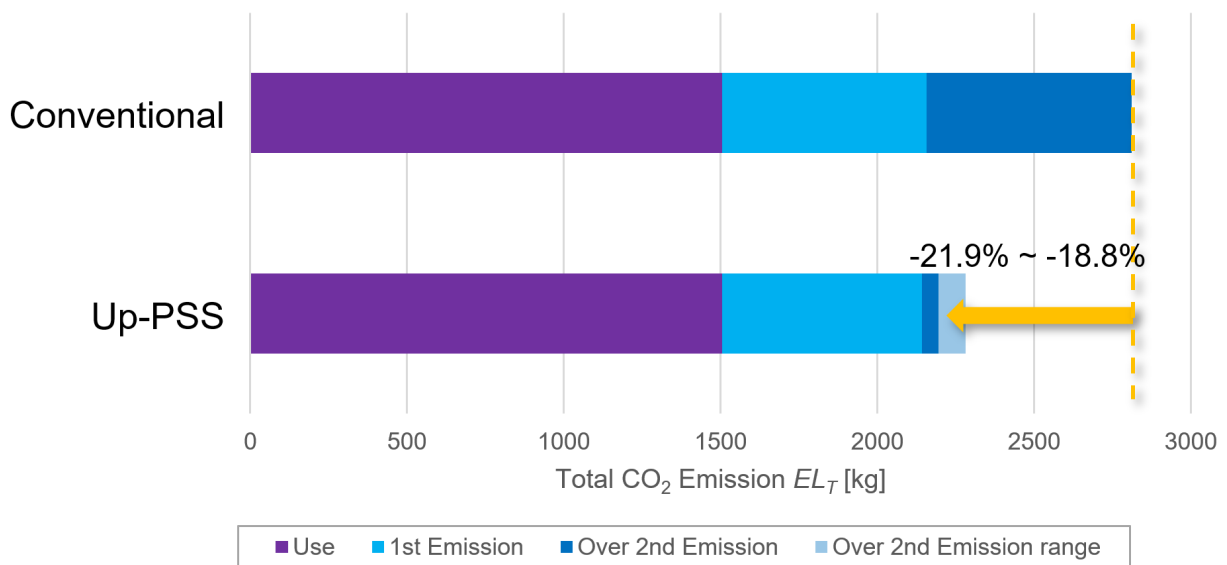


Fig. 5.34 Comparison of the CO₂ emissions entire multi-function printer lifecycle stages

6. 結言

6.1. 結論

本論文では、アップグレード製品サービスシステムの設計支援を目的とし、サービスの発案から、アップグレードの頻度、サービスのサポート期間の計画までの一貫した設計を支援するための設計手法を提案した。提案手法は、①サービスの発案、②サービスの構成要素の決定、③提供サービス有用性の初期検証、④サービス構成要素の更新手段（ライフサイクルオプション）の決定、⑤更新頻度およびサポート期間の決定とその妥当性の検証の5つのプロセスで構成され、各プロセスにおける入出力情報の整理や、それらを導出する際に用いる発想支援手法や、意思決定支援手法の整理、体系化や、意思決定支援手法の提案を行った。

提案手法は、持続可能な社会の実現を支援することを目的とした手法であるため、環境、製品サービスの実践者である企業、さらに、そのサービス享受する消費者の3者の持続可能性を考慮するために、本研究では、低環境負荷量、高利益、低価格（低支出）を同時に実現するアップグレード製品サービスの設計を目指し、トレードオフ関係にある低環境負荷や高利益、高利益や低価格を同時に満足させるために、セットベース手法を拡張させた多目的満足化手法である PSD 手法を提案手法に統合した。

同時に、PSD 手法を用いることにより、アップグレード製品サービスを設計する上で必要となる、将来求められる多種多様な機能や、製品および部品のコストを始めとする不確実な設計情報を範囲値で表現し、その範囲値を用いた評価を行うことで、不確実な設計条件下におけるサービスの提供計画の導出とその妥当性の評価を実現した。

個々の手法においては、サービスの発案、構成要素の決定プロセスにおいては、アップグレード製品サービスが、従来の製品サービスと比較してより長期間顧客と係わることに考慮し、顧客のライフスタイルに着目すると同時に、発想支援法や連想法を組み合わせた手法を提案し、旧来の既存事例データベースに依存しない手法を提案した。これにより、既存事例のデータを持つ企業のみならず、このようなデータを有しないスタートアップ企業においても、利用可能な手法を実現した。さらに、サービスの設計において、因果ループ図による検証を統合することで、設計段階のサービスの有用性、妥当性の確認を行い、より後半の設計プロセスに進行する前にサービスの修正を行うことを確認した。

サービス構成要素のライフサイクルオプションの決定においては、従来の手法では検討されていなかった将来の不確実性や、持続可能性に関連する環境負荷や経済性等の複数の評価視点を用いた総合評価、複数の顧客セグメントが存在する際の検討に焦点を当て、新たな評価手法を提案した。新たな評価手法は、ライフサイクルオプションの適合性評価を行う指標^RLAIと、その指標から導出する適合度LOAの導出によって構成され、上記の3つの未検討事項を同時に扱う手法であり、サービス構成要素（製品）の最も適切なライフサイクルオプションを提示可能である。

アップグレード方法の決定においては、その意思決定を目的とした手法として、アップグレード方法決定マトリクス Up-WDM を新たに提案した。Up-WDM はアップグレード作業に関連した項目であるアップグレード特性項目と、各種アップグレード方法において、適用する際に推奨される状態を表し、設計者は特性項目と評価対象の特性を照らし合わせ、スコアリングを行うことで、容易に適切なアップグレード方法を判断することが可能である。

事例適用を行った結果、提案手法によって設計されたアップグレード製品サービスシステムは、既存のビジネスモデルと比較して、持続可能性に関する要件（低環境負荷量、高利益、低価格）を同時に満足させながら、後半のハードウェア設計において必要となる情報（提供サービスとその構成要素、サービス構成要素の1つである製品やその部品に適用するライフサイクルオプション、更新の実施手段、更新の頻度、ハードウェアの更新回数、各世代で利用可能なコストや環境負荷）が導出可能であることが示された。次節に本研究が今後検討すべき課題を示す。

6.2. 今後の課題

・ 既存のビジネスモデルからの移行の考慮

アップグレード製品サービスシステムの展開において、企業は現在実践している既存のビジネスモデルから移行に必要な要件の整理や準備を行う必要がある。また、新しいビジネスモデルで展開される製品やサービスを、既存の消費者がすぐに受け入れられるとは考えられず、広く受け入れられるようにするためには、市場を新たに開拓し、消費者からアップグレード製品サービスへの理解を得る必要がある。すなわち、ビジネスモデル移行の過渡期において発生しうる事象や検討事項の整理を行い、それらに対応した製品サービスの設計を支援する理論やツールが必要であり、さらに、その理論やツールは本論文で提案した手法にスムーズに移行、適用可能であることが要求される。

・ ライフサイクルオプション適合性評価の妥当性検証

本研究では、ライフサイクルオプションの適合性評価手法を新たに提案し、その結果を用いてサービスコンポーネントのライフサイクルオプションを決定し、それを用いて持続可能性に関する制約を満足させる更新計画が導出されることや、更新頻度やサポート期間の妥当性を確認することで、適合性評価手法の結果の妥当性を判断した。一方で、適合性評価のみの結果に着目すると、その結果の妥当性の評価は行われていない。そのため、トータルパフォーマンス分析や、ライフサイクルシミュレーション技術(高本他, 2014)などを用いて複数の事例適用を行い、その評価指標の結果の妥当性を確認する必要がある。

提案したライフサイクルオプションの適合性評価手法は、評価視点変数が確率分布として入手される場合を想定していないため、用意した評価視点変数の範囲値の最大値と最小値を用いて評価を行っている。一方で、確率密度を考慮した適合性評価を可能とすることで、アップグレード製品サービスシステムの設計のみならず、既存の製品が廃棄される際に適用されるべき再生方法の判断に用いることが可能となり、手法の汎用性を向上させることができる。そのため、種々の分布形状に対応可能な適合性評価指標と、適合度の導出方法を検討することも課題の1つである。

また、アップグレード製品サービスにおいて、製品機能やサービスをアップグレードするためには、製品を分解し、対象のモジュールを交換する必要がある。そのため、適合性の評価結果から部品配置、製品構造を後半のハードウェアの設計プロセスにおいて、設計することが必要であるが、一方で製品の分解性を考慮したうえで適合性を判断することも必要である。今後は、適合性評価時に分解性やその他追加すべき視点の検討を行い、評価視点変数としてモデル化する手法を検討する必要がある。同時に、評価視点が増大した際は、それらの使い分け方の指針の検討が必要である。また、その場合、ライフサイクルオプションの適合性評価実施プロセスの前に、更新を考慮した製品アーキテクチャを検討する必要があるため、製品アーキテクチャ設計手法(宮島他, 2018)を提案手法に統合する方法を検討する必要がある。

- ・ アップグレード方法決定マトリクスの拡充

本論文にて提案したアップグレード方法決定マトリクス (Up-WDM) は、評価に用いる項目である 9 つのアップグレード特性項目によって構成されている。この特性項目は、アップグレードの作業や、製品や部品の輸送の観点から作成されているが、それ以外にも CE や FCC 等の認証の取得や、作業における安全性の観点も追加する必要がある。例えば、交換時に、人体に深刻な影響や危険が生じる場合は、優先してその解消に取り組む必要がある。ゆえに、アップグレード方法の検討におけるフローチャートを新たに作成し、Up-WDM と組み合わせることで、安全性や法規制等の優先事項を適切に考慮し、Up-WDM によるスコアリングを行う手法の検討が必要である。

また、Up-WDM のアップグレード特性項目の内容充実のために、より多くの製品におけるアップグレード方法を検討、整理を行うことが必要である。

- ・ サービスレシーバの満足度、不満足度のモデル化

提案手法では、環境と経済性の側面から更新頻度やサポート期間の導出、妥当性の検証を行っているが、サービスレシーバの満足度が最大化するようにこれらの導出を行うことも必要である。そのためには、サービスレシーバの満足度を、時間変化を考慮してモデル化する必要があるが、レシーバの満足感や要求は System of Systems (Kobayashi et al., 2018) の構造をしている可能性が高い。ゆえに、満足度のモデル化においては、設計するアップグレード製品サービスに影響を与えうる別の製品やサービスの洗い出しが必要であり、また、時間変化を考慮するためには、その変化の種類を調査し、その変化が起きる根拠を明確にすることが必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始にわたって多大なるご指導を頂きました明治大学理工学部機械情報工学科 井上全人准教授に心より感謝の意を示し、厚く御礼申し上げます。

本論文の執筆に際し、多くの貴重なご指導、ご助言を頂きました明治大学理工学部機械情報工学科 館野寿丈教授、同大理工学部機械工学科 宮城善一教授に心より御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり経済面や信頼性、環境面の視点から貴重なご指導、ご助言を頂きました電気通信大学情報理工学部総合情報学科 山田哲男准教授、ドイツ Bergische Universität Wuppertal, Prof. Stefan Bracke、一般社団法人産業環境管理協会 中野勝行様に心より御礼申し上げます。

筆者のドイツ、ベルギー、スウェーデンへの研究滞在に際し、多大なるご支援を頂きました井上裕子様心より御礼申し上げます。

筆者の研究生活に必要な生活環境を提供して頂いた両親に感謝を申し上げます。

最後に、本論文の作成に当たり、サービス設計手法の考案に協力して頂いた堀田佳歩様、Mr. Muhammad Naquib Akmal bin Salehuddin、アーキテクチャ設計手法に関する調査、考案に協力して頂いた宮島尚吾様、石井克英様、ライフサイクルオプション適合性評価手法の考案に協力して頂いた柴田知世様、ライフサイクルオプションの事例調査に協力して頂いた金田郁可様、更新サイクル導出手法の考案に協力して頂いた杉浦拓実様、御屋敷光平様、適用事例作成に協力して頂いた飯島駿輔様、年間を通して共に研究に励んだ院生、学部生の皆様にも改めて御礼申し上げます。

2019年2月

山田 周歩

・ 参考文献

- Akbar, J., “Where your computer goes to die: Shocking pictures of the toxic 'electronic graveyards' in Africa where the West dumps its old PCs, laptops, microwaves, fridges and phones”, Daily Mail, (2015), <https://www.dailymail.co.uk/news/article-3049457/Where-computer-goes-die-Shocking-pictures-toxic-electronic-graveyards-Africa-West-dumps-old-PCs-laptops-microwaves-fridges-phones.html> (accessed on 18 Nov. 2018).
- Bracke, S., Michalski, J., Inoue, M. and Yamada, T., “CDMF-RELSUS Concept: Reliable Products are Sustainable Products - Influences on Product Design, Manufacturing and Use Phase”, International Journal of Sustainable Manufacturing, Inderscience Publishers, Vol. 3, No. 1, (2014), pp. 57-73.
- Brown, V.R. and Paulus, P.B., “Making Group Brainstorming More Effective: Recommendations From an Associative Memory Perspective”, Current Directions in Psychological Science, SAGE Publishing, Vol. 11, No. 6, (2002), pp. 208-212.
- 大門隆之, 近藤伸亮, 梅田靖, “物理寿命, 価値寿命による製品ライフサイクル戦略決定手法の提案”, 2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005), pp. 251-252.
- Donaldson, K.M., Ishii, K. and Sheppard, S.D., “Customer Value Chain Analysis”, Research in Engineering Design, Vol. 16, (2006), pp. 174-183.
- European Commission, “Circular Economy Implementation of the Circular Economy Action Plan”, (2017), available from <http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm>, (accessed on 18 Jan. 2018).
- Felder, R.M., “Creativity in engineering education”, Chemical Engineering Education, Vol. 22, No. 3, (1988), pp. 120-125.
- Finch W.W. and Ward, A.C., “Generalized set propagation operations over relation of more than three variables”, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Cambridge University Press, Vol.9, (1995), pp. 231-242.
- 富士総合研究所環境資源エネルギー研究部, “企業のための LCA ガイドブック”, 日刊工業新聞社, (2001).
- 福重真一, 有野雅規, 梅田靖, “部品間の幾何拘束関係に着目したアップグレード製品設計支援手法”, 日本機学会第 21 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, (2011), pp.428-431.
- Fukushige, S., Arino, M. and Umeda, Y., “Computer-aided Design for Product Upgradability under Geometric Constraints”, Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society, Springer, (2012), pp.828-831.
- 原田幸明, “広域マルチバリュー循環”, 第 13 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, (2018), pp. 156-157.
- Inoue, M., Nahm, Y.E., Tanaka, K. and Ishikawa, H., “Collaborative Engineering among Designers with Different Preferences: Application of the Preference Set-Based Design to the Design Problem of an Automotive Front-Side Frame”, Concurrent Engineering: Research and Applications, SAGE

- Publications, Vol. 21, Issue 4, (2013), pp. 252-267.
- Inoue, M., Nahm, Y.E., Okawa, S. and Ishikawa, H., “Design Support System by Combination of 3D-CAD and CAE with Preference Set-based Design Method”, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, SAGE Publications, Vol. 18, No. 1, (2010), pp.41-53.
- Inoue, M., Yamada, S., Yamada T. and Bracke, S., “An Upgradable Product Design Method for Improving Performance, CO₂ Savings, and Production Cost Reduction: Vacuum Cleaner Case Study”, *International Journal of Supply Chain Management*, ExcelingTech Publishers, Vol. 3, No. 4, (2014), pp. 100-106.
- Inoue, M., Yamada, S., Yamada T. and Bracke, S., “A Design Method for Product Upgradability with Different Customer Demands”, *Product Lifecycle Management for Global Market*, Springer, Vol. 442, (2015), pp. 91-100.
- Inoue, M., Yamada, S., Yamada T. and Bracke, S., “Product Upgradability for Satisfying Future Performance, Low Price and Environmental Loads, and Manufacturer Profitability Throughout the Product Lifecycle”, *Procedia CIRP*, Elsevier, Vol. 48, (2016), pp. 40-44.
- 石上佳照, 近藤伸亮, 梅田靖, 下村芳樹, 吉岡真治, “インバースマニュファクチャリングのためのアップグレード設計支援システムの開発”, *日本機学会第 12 回設計工学・システム部門講演会講演論文集*, (2002), pp.56-59.
- 磯山友幸, “外国人の「単純労働者」を受け入れへ”, *日経ビジネス ONLINE*, (2018), <<https://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/16/021900010/053100068/>>, (accessed on 18 August, 2018).
- Italian G7 Presidency 2017, “G7 Bologna Environment Ministers’ Meeting Communiqué”, (2017), <<http://www.g7italy.it/sites/default/files/documents/Communiqu%C3%A9%20G7%20Environment%20-%20Bologna.pdf>>, (accessed on 18 August, 2018).
- 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～”, *IGES Kansai Research Centre Discussion Paper*, Institute for Global Environmental Strategies (IGES), (2006), pp. 1-22.
- 環境省, “京都議定書の概要”, (2000), <https://www.env.go.jp/earth/cop6/3-2.html>, (accessed on 26 Dec. 2015).
- 環境省, “平成 26 年度版 環境・循環型社会・生物多様性白書”, (2014).
- 川喜田二郎, “続・発想法—KJ 法の展開と応用”, 中央公論社, (1970).
- 経済産業省, “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. 4.0 (国内データ)”, (2012), <https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/pdf/CO2kansanryo_db_ver4_jp_20120330.pdf>, (accessed on 26 Nov. 2018).
- 木村文彦, 高橋慎治, 田中信寿, 梅田靖, 永田勝也, “インバース・マニュファクチャリングハンドブック—ポストリサイクルの循環型ものづくり”, 丸善, (2004).
- Kobayashi, H., “Strategic evolution of eco-products: a product life cycle planning methodology”, *Research in Engineering Design*, Springer, Vol. 16, (2005), pp. 1-16. DOI 10.1007/s00163-005-0001-3

- Kobayashi, H., Matsumoto, T. and Fukushige, S., “Strategic evolution of eco-products: a product life cycle planning methodology”, *Advanced Engineering Informatics*, Elsevier, Vol. 36, (2018), pp. 101-111.
- 国税庁, “所有権移転外リース取引”, (2008a), <http://www.nikkei.com/article/DGXNASDD300J3_X01C11A0000000/>, (accessed on 13 May. 2015).
- 高本仁志, 近藤伸亮, 増井慶次郎, “製品のライフサイクルシミュレーション”, *シミュレーション*, Vol. 33, No.3, (2014), pp.191-196.
- Lobasenko, V. and Llerena, D., “Elicitation of willingness to pay for upgradeable products with calibrated auction-conjoint method”, *Journal of Environmental Planning and Management*, Taylor & Francis, Vol. 60, Issue 11, (2017).
- Masui, K., “Current status of environmentally conscious design among Japanese manufacturers”, *International Journal of Automation Technology*, Fuji Technology Press, Vol.3, No.1 (2009), pp.19-25.
- Mathivathanan, D., Govindan, K. and Haq, A.N. “Exploring the impact of dynamic capabilities on sustainable supply chain firm's performance using Grey-Analytical Hierarchy Process”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 147, (2017), pp. 637-653.
- Michaud, C., Joly, I., Llerena, D. and Lobasenko, V., “Consumers' willingness to pay for sustainable and innovative products: a choice experiment with upgradeable products”, *International Journal of Sustainable Development*, Inderscience, Vol. 20, Issue 1-2, (2017).
- 宮島尚吾, 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, “多世代使用を考慮したアップグレード製品のアーキテクチャ設計手法”, *日本機械学会 第 28 回 設計工学・システム部門講演会講演論文集*, (2018).
- Mont, O.K., “Clarifying the Concept of Product-Service System”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol.10, Issue 3 (2002), pp. 237-245.
- Murakami, T., Inoue, M., Nahm, Y.E. and Ishikawa, H., “Upgrade Design Method for Environmental Issues Based on the Concept of Set-Based Design”, *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society*, Springer, (2011), pp. 500-505.
- 南允議, 石川晴雄, “初期設計段階におけるセットベース多目的設計最適化(第1報)－理論－”, *自動車技術会論文集*, Vol. 36, No. 6, (2005), pp. 157-162.
- 野末卓, 荒川雅裕, “製品の価値向上を目的とするサービス設計法の研究 (QFD の要求品質展開利用による設計法の提案)”, *日本機械学会論文集*, Vol. 83, No. 848, (2017), DOI: 10.1299/transjsme.16-00347.
- Ospina, J., Maher, P., Fitzpatrick, C., Hickey, S., Schischke, K., Vidorreta, I., Garatea, J., Yang, M., Obersteiner, M., den Boer, E., and Williams, I.D., “The D4R laptop computer—from prototype to market leader,” *Proceedings of CARE INNOVATION 2014*, November 2014.
- Pialot, O. and Millet, D., “Why upgradability should be considered for rationalizing materials?”, *Procedia CIRP*, Elsevier, Vol.15 (2014), pp.379-384.
- Pialot, O., Millet, D., and Bisiaux, J., “Upgradable PSS: Clarifying a new concept of sustainable

- consumption/production based on upgradability”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol.141 (2017), pp.538-550.
- Pugh, S., “Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering”, Addison-Wesley, (1991).
- 柴田知世, 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, “製品のアップグレード設計への適合性評価 (ノートパソコンの設計問題への適用)”, *日本機械学会論文集*, Vol. 83, No. 851, (2017), DOI: 10.1299/transjsme.17-00082.
- 下村芳樹, 原辰徳, 渡辺健太郎, 坂尾知彦, 新井民夫, 富山哲男, サービス工学の提案 (第1報, サービス工学のためのサービスのモデル化技法), *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.71, No.702 (2005), pp.669-676.
- 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, (2006), pp. 282-289.
- Shimomura, Y., Hara, T. and Arai, T., “A unified representation scheme for effective PSS development”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Elsevier, Vol. 58, (2009), pp. 379-382.
- Sobek, D.K., Ward, A.C. and Liker, J.K., “Toyota’s Principles of Set-Based Concurrent Engineering”, *Sloan Management Review*, Vol. 40, No. 2, (1999), pp. 67-83.
- StEP Initiative, “One global understanding of re-use – common definitions (White Paper)”, (2009), <http://www.step-initiative.org/files/step/_documents/StEP_TF3_WPCommonDefinitions.pdf>, (accessed on 26 Aug. 2018).
- Sterman, J.D., “Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World”, McGraw-Hill Education, (2000).
- 土田義郎, 川崎寧史, 下川雄一, “評価グリッド法を用いた俯瞰眺望景観に対する心理的評価の傾向分析”, *日本建築学会環境系論文集*, Vol. 74, No. 642, (2009), pp. 907-913.
- Umeda, Y., Daimon, T. and Kondoh, S., “Proposal of Decision Support Method for Life Cycle Strategy by Estimating Value and Physical Lifetimes –Case Study–”, *Proceedings of EcoDesign 2005* (2005), pp.606–613.
- United Nations, “ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT”, (2015a), <<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>>, (accessed on 6 Jan. 2016).
- United Nations, “Goal 12: Ensure sustainable consumption and production patterns”, (2015b) available from <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/>>, (accessed on 15 Dec. 2018).
- 渡邊敬士, “東南アジアでも廃プラスチックの輸入禁止へ”, *日本貿易振興機構(JETRO)*, (2018), <<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2018/87f587bf7c717578.html>>
- 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, “異なるユーザ要求を考慮したアップグレード製品設計方法の提案”, *日本設計工学会 2014 年度春季研究発表講演会*, (2014a), pp. 59-62.
- 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, “生産時の環境負荷削減に向けたアップグレード製品設計手法”, *日本機械学会 第 24 回 設計工学・システム部門講演会講演論文集*, (2014b).
- 山田周歩, 中川淳, 山田哲男, 中野勝行, 井上全人, “企業の収益性と環境活動を両立するアップグレード製品設計手法ーリースパソコンへの事例適用”, *日本機械学会 第 25 回 設計*

- 工学・システム部門講演会講演論文集, (2015).
- 山田周歩, 柴田知世, 山田哲男, 井上全人, “多世代製品の部品ライフサイクルオプション適合性評価手法の提案 (顧客要求, 製造コスト, 環境負荷量, 物理寿命による総合評価)”, 日本機械学会 第 27 回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2017).
- 山田周歩, 山田哲男, 井上全人, “複数の顧客セグメントを想定したライフサイクルオプション適合性判断指標の提案”, 日本機械学会 第 28 回 設計工学・システム部門講演会講演論文集, (2018).
- Yamada, S., Yamada, T., Bracke, S. and Inoue, M., “An Upgrade Product Design Method for Satisfying Performance Criteria, Environment Load and Cost”, Proceedings of The 3rd International Conference on Design Engineering and Science (ICDES2014), (2014a), pp. 174-179.
- Yamada, S., Yamada, T., Nakano, K., Bracke, S. and Inoue, M., “An Environmental Conscious Product Design Method for Sustainability of the Product's Value”, Proceedings of Going Green - CARE INNOVATION 2014, (2014b).
- Yamada, S., Yamada, T., Bracke, S. and Inoue, M., “Upgradable Design for Reduction of Production Cost and CO₂ Emission - Case Study of a Laptop Computer”, Applied Mechanics & Materials, Trans Tech Publications, Vol. 761, (2015a), pp. 589-593.
- Yamada, S., Yamada, T., Bracke, S. and Inoue, M., “Satisficing Design Method for Sustainable Performance, Profitability for Manufacturer and Reduction of Environmental Loads”, Proceedings of EcoDesign 2015 International Symposium, (2015b), pp. 392-396.
- Yamada, S., Yamada, T., Bracke, S., and Inoue, M., “Upgradable Design for Sustainable Manufacturer Performance and Profitability and Reduction of Environmental Load”, International Journal of Automation Technology, Fuji Technology Press, Vol.10, No.5 (2016), pp.690-698.
- Yamada, S., Sugiura, T., Yamada, T., Bracke, S. and Inoue, M., “A Strategy of Providing Upgradable Product Service System for Economic and Environmental Balance”, Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4.0, IOS Press, (2018), pp. 1155-1164.
- 矢野経済研究所, “プリンタ世界市場に関する調査を実施 (2017 年)”, (2017), available from <https://www.yanoict.com/summary/show/id/477?gclid=Cj0KCQiA8_PfBRC3ARIsAOzJ2uofP6ecGgKeroaWCjtoQ9ki9GmzZ5TKLndoUZY7q8QEUVYSdccU1OUaAjeZEALw_wcB>, (accessed on 28 Nov. 2018).
- Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E.K. and Zolfani, S.H., “Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection”, Journal of Cleaner Production, Elsevier, Vol.142 (2017), pp.3728-3740.