

This is "Advance Publication Article".

Category: Paper

Received date: 30 August 2019

Accepted date: 9 March 2020

J-STAGE Advance publication date: 15 April 2020

Publication date: \*\*\*\*\*

Corresponding author: Shuho YAMADA (E-mail address: s\_yamada@meiji.ac.jp)

DOI: 10.14953/jjsde.2019.2872

Copyright©2020 Japan Society for Design Engineering

## アップグレード製品サービスシステム設計のための更新計画構成手法の提案 (環境, 経済, 顧客不満度の時間変化を考慮した計画構成手法)

### Proposal of a Planning Method of Upgradable Product Service System Design (Planning Method Considering the Temporal Change of Environmental, Economic, and Consumer Dissatisfaction Perspectives)

山田 周歩<sup>\*1</sup>, 御屋敷 光平<sup>\*2</sup>, 山田 哲男<sup>\*3</sup>, 井上 全人<sup>\*4</sup>  
(Shuho YAMADA) (Kohei OYASHIKI) (Tetsuo YAMADA) (Masato INOUE)

#### Abstract

This paper proposes an upgrade planning method of Upgradable Product Service System: Up-PSS. The purpose of this study is to obtain upgrading cycle, number of necessary generations, profit rate, and available cost and environmental load amounts which can attain the lower environmental load, lower price, higher profit, and lower service receiver's dissatisfaction concurrently compared with existing business models. Previously proposed method derives upgrade plan from the viewpoint of functional improvement without considering environmental and economic aspects which strongly relate to sustainability. Therefore, this study aims to develop planning method and evaluation models of sustainability factors. In particular, this paper proposes evaluation models of cost, environmental load, and receiver's dissatisfaction which consider their temporal value change to obtain aforementioned design solution. This paper applies proposed method to design problem of packaged-rental business model as a case study. The result of case study which attains the lower environmental load, lower price, higher profit, and lower dissatisfaction compared with replacement case shows the availability of proposed method.

#### Key words

Upgradable Product Service System (Up-PSS), receiver's temporal dissatisfaction, upgrade planning, early design phase, uncertainty, decision support

\*1 正会員, 明治大学理工学部(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1), s\_yamada@meiji.ac.jp

\*2 非会員, 明治大学理工学部(同上), ee54100@meiji.ac.jp

\*3 非会員, 電気通信大学大学院情報理工学研究科(〒182-8585 調布市調布ヶ丘1丁目5-1), tyamada@uec.ac.jp

\*4 正会員, 明治大学理工学部(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1), m\_inoue@meiji.ac.jp

## 1 緒言

欧洲における循環経済(Circular Economy)<sup>1)</sup>や、日本における広域マルチバリュー循環(Multi-Value Circulation: MVC)<sup>2)</sup>のコンセプトで述べられるように、持続可能な社会システムを実現するためには、既存の資源を再循環させることや、今後新たに生産する製品を、再循環を想定して設計することが必要である。これまでに廃棄物の分別の厳格化が行われ、また、リユースやリサイクルを想定した製品<sup>3)</sup>や、アップグレードを想定した製品<sup>4)</sup>の設計や販売が行われてきた。一方で、たとえ予め再循環を前提とした製品や法規制が存在したとしても、その運用が適切に行われない限り予め考慮した再循環のためのアプローチや労力が無駄となる恐れがある。同時に、再循環を前提とした製品を開発、購入することが企業や消費者に対して不利益である場合においても、持続可能な社会の実現は困難である。すなわち、再循環を効率的に実現するためには、その循環の計画やその管理者が必要であり、さらに、その製品のマネジメントが企業に対して有益となると同時に、製品の購入が消費者に対して有益となることが必要である。ゆえに、持続可能な社会システムを実現するためには、そのステークホルダである環境、企業、顧客が利益を得ることが可能であるようなシステムの実現が必要である。そこで、本研究ではアップグレード製品サービスシステム(Upgradable Product Service System: Up-PSS)<sup>5)</sup>に焦点を当て、持続可能なシステム実現の支援を行う。

Up-PSSは、アップグレード可能な製品とそのアップグレード、保守のサービスを組み合わせた製品サービスシステム<sup>6)</sup>である。アップグレード製品<sup>7)</sup>は、製品を構成する一部の部品を交換、追加することで経時に陳腐化した製品価値を再向上させ、製品の価値寿命を延長させることを目的とした製品である。すなわち、従来物理的な劣化や故障が発生していくなくても、陳腐化によって廃棄してきた製品の寿命を延長させ、消費者の廃棄行動を抑制させることで、環境負荷の低減を目的とした製品である。これまでのアップグレード製品の設計手法の研究では、従来の買い替え型の製品と比較して低環境負荷、低価格、高利益を同時に実現可能であるような製品を設計する手法が提案されており、アップグレード製品が持続可能な社会システムの実現に際して有用であることが確認されている。一方で、その製品を効率的に展開するためには、上述したように製品をマネジメントすることが必要であるが、既存の設計手法では、更新計画が予め用意されているものと仮定したハードウェアの設計支援を目的とした手法で主あり、製品の効率的な展開、運用において必要不可欠であるサービスの設計、運用の支援を目的とした手法はほとんど存在しない。

そのため、本研究では、Up-PSSの設計における設計上流段階であるサービスの設計段階に含まれる製品の更新計画（更新の頻度やサービスの提供期間、更新回数）の設計に焦点を当て、それを支援する手法の構築を目的とする。Up-PSSの設計において一般的に、製品を更新する時期である将来のニーズやコストを予測し、その不確実な情報に対応する必要がある。本研究では、セットベース設計の概念<sup>8)</sup>を用いてその不確実性を考慮すると同時に、従来のアップグレード製品サービスシステムの研究において評価が不十分であった、サービスのレシーバ（顧客）の満足度（不満度）に関する視点を提案手法に統合する。提案手法は製品サービスを構成するサービスの構成要素が個々の製品であることを想定し、サービス構成要素の更新頻度（すなわち、1世代あたりの年数および開発リードタイム）、各更新時に利用可能なコストや、負荷可能な環境負荷、製品の世代数（すなわち、サービス構成要素である製品が有するべき物理寿命）の導出を行う。さらに、提案手法の有用性を確認するために、家具家電のパッケージレンタルの設計問題に本手法を適用し、低環境負荷、低価格、高利益に加え、低不満を実現する設計解の導出を行う。

## 2 アップグレード製品サービスシステム

### 2.1 アップグレード製品サービスシステムの関連研究

Up-PSS および、アップグレード製品設計に関する先行研究を記述する。下村ら<sup>9)</sup>が将来入手可能な製品構成部品のデータベースに基づいた更新計画の構成手法を提案している。下村らの手法では将来入手可能な部品とその仕様のデータベースを作成し、そのデータベースから製品が実現する仕様のロードマップを作成することで、将来消費者が必要とする仕様の予測や、現在顧客が所有する製品が陳腐化し、買い替えを検討する時期の予測を行うことで、アップグレード更新計画（更新時期、交換部品）の導出を行う。下村らの手法は製品の機能性に関する視点による計画構成手法であり、環境面、経済面の評価は行われていない。

Pialot ら<sup>5)</sup>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。さらに、Pialot ら<sup>10)</sup>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。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、アップグレードの提供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にレシーバが疑心を抱く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。

Michaud ら<sup>11)</sup>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。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、調査を行ったコードレス掃除機、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。また、この調査に関連した Lobasenko ら<sup>12)</sup>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。

アップグレードするべきサービスの構成要素（製品構成部品やパッケージリースにおける個々の製品など）の判断に関する研究では、Umeda ら<sup>13)</sup>が物理寿命と価値寿命の観点から製品構成部品のアップグレード、メンテナンス、リユースの意思決定を支援する手法を提案している。また、Kobayashi<sup>14)</sup>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。この手法は、設計上流段階で環境、コスト、品質の観点からアップグレード、メンテナンス、長寿命化（ロングライフ）、リユース、リサイクルの意思決定支援を行う。さらに著者ら<sup>15)</sup>は、Up-PSSのサービス構成要素（ハードウェアの要素）に対するライフサイクルオプションの適合性評価手法を提案した。提案手法では、評価を実施する時点である設計の初期段階における設計情報の不確実性を考慮し、コスト、環境負荷、顧客満足、物理寿命の観点からサービスを構成する個々のハードウェアや、その部品に対するライフサイクルオプションの適合性の評価が可能である。

### 2.2 更新サイクル計画における課題点

以上の先行研究から、Up-PSSの更新計画設計時において以下の事項の解消が必要であることが確認された。既存の更新計画構成手法では、将来入手可能であると予測された部品のデータベースに基づいて更新計画を構成するが、評価の観点は、製品性能の推移のみであり、環境負荷や、経済性に関連した視点を用いた評価は行われていない。ゆえに、性能向上のための更新計画は設計可能であるが、その更新計画が高利益や、低環境負荷、低価格を実現することは担保されない。また、将来入手可能であると予測した部品のデータベースに依存した手法であるため、データベースの情報量、正確さによって計画の品質が大きく影響を受ける

と同時に、高精度のデータベースを作成するためには、膨大なコストや人員を要する可能性が高く、資本や歴史のある企業でなければ実践できない可能性がある。ゆえに、データベースの精度に大きく依存せず、環境負荷、経済性を含めた多目的な評価を行なった上で、更新計画を構成する手法が必要である。さらに、既存手法は、アップグレードによる性能の向上が実現する顧客の満足度や不満の解消に関する評価は行われていない。そのため、その性能向上度合は製品を買い替える場合と比較してどの程度優れるのか、あるいは劣るのかの顧客満足の観点における評価が必要である。

Up-PSS の設計における一般的な課題として、将来のニーズや環境負荷、コスト等の発生量を予測して設計することに起因する不確実性への対応が挙げられる。すなわち、更新計画を設計する際は、その計画が評価に用いる視点の不確実性を考慮する必要がある。また、それらの評価視点の値は、時間経過とともに変化するため、時間変化を考慮した評価モデルの作成が必要である。

Pialot らの調査で示されたように、消費者は予め計画された更新サイクルが用意されている場合を好むことが確認されている。ゆえに、製品サービスの購入に際して消費者は、一世代あたりの価格を購入の判断基準に設けることが予測され、さらに、企業はサービス一世代あたりの利益や顧客満足を評価し、更新計画を導出することが必要である。すなわち、サービス一世代あたりの価格や利益、環境負荷や顧客満足を評価するためのモデルを作成することが必要である。

### 2.3 本論文の目的、提案手法の概要およびプロセス

本論文は、Up-PSS 設計のための更新計画（更新の頻度やサービスの提供期間）の構成手法を提案する。提案手法は、Up-PSS を構成するハードウェアを設計する上で必要となるコストや、利用（負荷）可能な環境負荷量、開発リードタイムとなる更新頻度や、必要な更新の回数を導出する。これらの情報の導出に際して、本研究では、経済や環境負荷の観点に加えて、2.2 節で述べたように先行研究で評価が不十分であった顧客満足の観点を新たに用いると同時に、設計時の不確実性を考慮するために、設計情報を範囲値で表し、セットベース設計手法を用いることで、上記の複数の観点における多目的満足解を導出する。特に、顧客満足の観点による評価を実現するために、本論文では顧客不満度の時間変化モデルを新たに提案し、更新計画構成手法に統合する。また、範囲値を用いることで、データベースの精度への依存を最小限にする。

図 1 に本研究で想定する Up-PSS の設計プロセスと本論文の提案手法の位置付けを示す。提案手法は、図 1 左部に示されるように、Up-PSS が提供する製品サービスシステムとその構成要素であるハードウェアおよびソフトウェアがプロセス 1 および 2 で決定され、ハードウェアのモジュール構成とそのライフサイクルオプション（アップグレードやメンテナンスの対象であるのか、あるいは、全世代を通してプラットフォームとして用いるのか）がプロセス 3 および 4 にて決定している場合を前提とし、プロセス 5 のハードウェアの更新頻度や更新の回数に関連するサービスの必要世代数、更新の実施手段と更新時に利用可能なコストや環境負荷を含む更新計画を導出する。導出された更新計画は、後半のプロセス 6 であるハードウェアの詳細な開発段階における開発リードタイムや、1 世代当たりに利用可能なコストや環境負荷の情報を含み、開発時の制約として利用される。また、図 1 右部に示される本論文の提案手法そのものの設計プロセスは、サービスの目的とハードウェアのライフサイクルオプションの情報から、プロセス 5a にて更新対象のハードウェアを特定し、プロセス 5b でそれらの更新実施手段を決定する。次に、プロセス 5c にてサービスの目的と更新対象のハードウェアの情報から、顧客不満を表す RSP (Receiver State Parameter) の構造化を行い、プロセス 5d にて更新するハードウェアにおいて、各ライフサイクルの段階で発生するコストや環境負荷の発生源の整理を行い、設計変数として定義する。さらに、プロセス 5e で設計する更新計画を評価する際の比較対象のビジネスモデルを設定後、更新計画導出における制約である要求仕様を設定する。最後に、プロセス 5f にて要求仕様と設計変数、これらの関係を表し、次節以降で示す評価モデル式を多目的満足化手法に適用することで、更新計画を導出する。

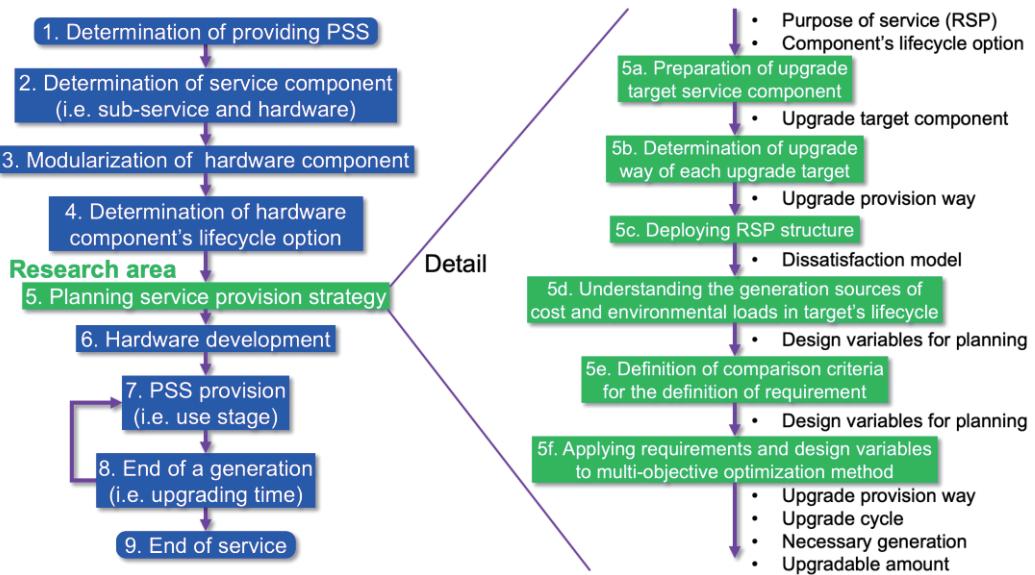


Fig. 1 Planning process of Upgradable PSS and positioning of this study

### 3 更新計画導出のための評価視点の経時変化モデル

#### 3.1 環境負荷、経済面の数式モデル

更新計画を導出するための評価視点変数である環境負荷、コスト（または、価格、利益）、顧客不満度は、その発生量の時間変化を考慮した評価モデルである必要がある。そのためには、製品サービスのライフサイクル全体と、その中で発生するイベントを明確にし、時間経過によってその発生量が変化する箇所を把握することが求められる。また、通常の製品と Up-PSS のライフサイクルにおける違いは、更新の有無である。すなわち、時間変化に加えて更新の回数（製品の世代数）も評価モデルに統合する必要がある。ゆえに、環境負荷やコストの評価モデル作成においては、使用段階の発生量が製品サービスの使用時間と更新回数に依存し、更新する部品やモジュールの製造および廃棄、輸送段階における発生量が更新回数に依存関係を持つ。以上より、本研究では、式（1）および式（2）に示す数式モデル<sup>16)</sup>を用いて上記の依存関係を考慮した単一世代あたりの環境負荷、コストの評価を行う。提案する数式モデルは製品サービスの単一世代あたりの発生量を導出するモデルであり、*UAR*は更新時に利用可能なコストや環境負荷のオリジナルに対する比率、*UGN*がアップグレード製品の利用世代数（すなわち、1 + 更新回数 *U*）を示し、*u*は更新対象のモジュール *i* の数を、各種 *EL* や *Ct* は第 1 世代製品や第 2 世代以降の各ライフサイクルの段階で発生する環境負荷やコストをそれぞれ示す。提案する数式モデルを用いることで、製品サービス全期間における単一世代当たりのコスト *CtTotal/Gen* や環境負荷 *ELTotal/Gen* を導出する。コストの評価式に関しては、利益率を適切に乗算することで価格や、企業の利益の算出が可能である。算出例は、4 章の適用事例に示す。

$$Ct_{Total/Gen.} = \frac{1}{UGN} \left\{ Ct_{1st\ Product} + UAR(UGN - 1) \sum_{i=1}^u (Ct_{i\ Manufacture} + Ct_{i\ Transport} + Ct_{i\ Recycle}) \right\} \quad (1)$$

$$EL_{Total/Gen.} = \frac{1}{UGN} \left\{ EL_{1st\ Product} + UAR(UGN - 1) \sum_{i=1}^u (EL_{i\ Manufacture} + EL_{i\ Transport} + EL_{i\ Recycle}) \right\} \quad (2)$$

### 3.2 顧客不満度の数式モデル

提案手法では、環境や経済に加えて顧客不満の観点から更新計画導出を行うため、新たに顧客不満度の経時変化モデルを提案する。本研究では、消費者は所持する製品に対する不満がある一定の閾値を超えた際に買い替えを行うものと仮定するため、満足度ではなく不満度を用いた評価を行う。提案手法では、サービス工学分野で用いられ、サービスレシーバの状態量を表す RSP (Receiver State Parameter)の考え方<sup>17)</sup>を応用して顧客の不満度モデルを作成する。RSP は図 2 に示すように、木構造で表される。本研究では、木構造の頂上を RSP と定義し、順に顧客の要求  $De_d$ 、製品サービスの機能  $Fu_f$ 、製品サービスの構成要素  $Co_c$  (製品を構成するモジュールや、複数の製品で構成された製品サービスの場合は個々の製品) の三階層に展開する。式 (3) に示すように、最下層にある製品サービスの構成要素  $c$  の RSP への寄与度  $Cn_c$  を導出する。さらに、この構成要素の不満度関数  $DS_c$  を定義し、式 (4) に示すように、それに寄与度  $Cn_c$  を乗算したものを加算することで RSP の不満度  $DS_{RSP}$  の経時変化モデルを導出する。式 (3) において、 $n_f$  は機能の個数、 $n_d$  は顧客要求の個数をそれぞれ示し、式 (4) において、 $n_u$  は、サービス構成要素の個数を示す。寄与度の導出においては、AHP (Analytic Hierarchy Process) やコンジョイント分析を用いて顧客の要求間の比較を行い重要度  $W_{Dd}$  導出し、その顧客要求に対する製品サービスの機能の重要度  $W_{DdFf}$  を同様にして導出する。さらに、同様にして機能に対する構成要素の重要度  $W_{FfCc}$  を導出する。これらの操作と、式 (3) および式 (4) により、RSP から製品サービス構成要素までの関係性をモデル化する。

製品サービス構成要素  $c$  の不満度である  $DS_c$  は、図 3 左部に示すように製品サービスの提供が開始される時点を 0 と定義し、時間変化に伴って増加するものと定義する。この不満度関数は図 3 右部に示すような過去の製品の廃棄データから、廃棄要因分析<sup>18)</sup>等のプロセスを経て価値劣化の要因による廃棄と故障による廃棄の分布に分割し、価値劣化による廃棄の分布を個々の部品に割り当て、時間積分することで導出する。製

$$Cn_c = \sum_f^{n_f} \sum_d^{n_d} w_{FfCc} w_{DdFf} w_{Dd} \quad (3)$$

$$DS_{RSP} = \sum_c^{n_u} (Cn_c \times DS_c) \quad (4)$$

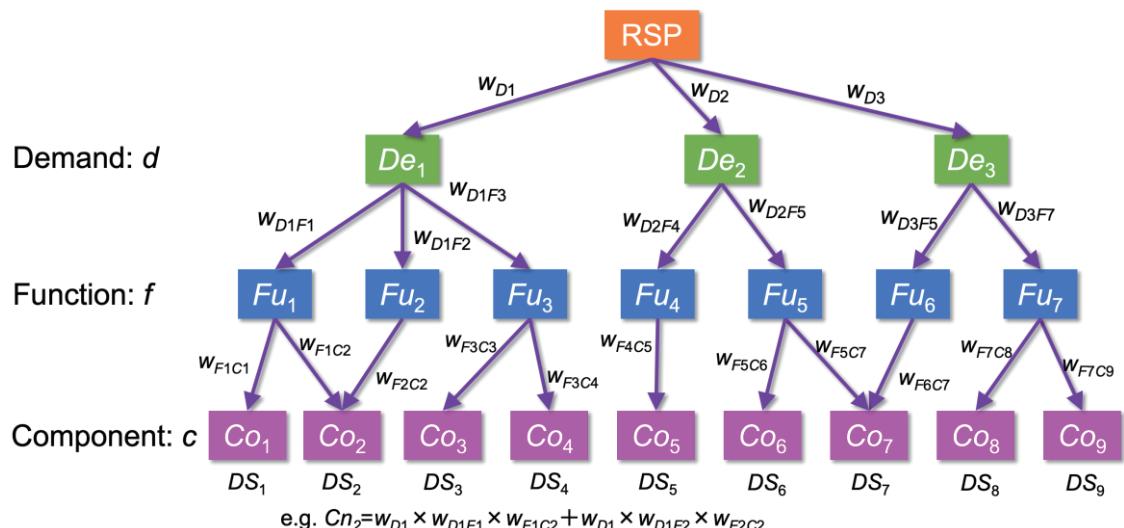


Fig. 2 A structure of a receiver state parameter: RSP in this study

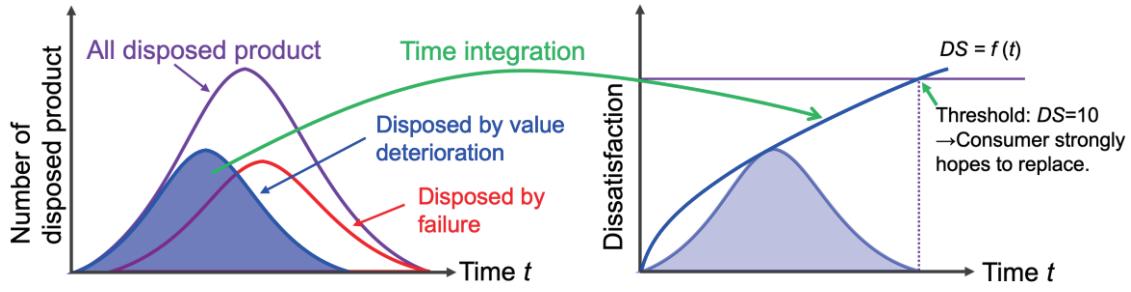


Fig. 3 Temporal change model of receiver's dissatisfaction

品サービスの構成要素が製品そのものである場合は、個々の製品の廃棄データを利用する。本研究では、不満度値 10 はサービスのレシーバが買い替えを強く希望する程度に不満が発生している状態であり、価値劣化に起因する廃棄が全て行われた時点と定義する。また、製品によって得られたデータにおける製造数、廃棄数が異なる場合があるため、価値劣化に起因する廃棄が全て行われた時点の不満度の値を 10 と統一する。

RSP の不満度を更新計画導出時の評価視点として用いる場合は、利用者が製品サービス利用期間に受ける累積不満度  $CDS_{RSP}$  を用いる。累積不満度は予め導出した RSP の不満度を製品サービスの利用期間で定積分することで得る。本研究では、環境負荷やコストと同様にサービスを提供する全期間内における単一世代当たりの発生量を用いて評価を行うため、式 (5) に示すモデルを用いる。式 (5) は、第 1 世代の製品サービスによってレシーバが抱く累積不満度に、更新毎の累積不満度を加算し、利用世代数で割り算を行うことで単一世代当たりの累積不満度を導出する。また、更新後の累積不満度に関しては、製品を更新せずにそのまま利用した際にレシーバが受ける累積不満度が、アップグレード可能量率  $UAR$  分減少したものが発生するものと仮定する。式 (5) において、 $UT$  は更新頻度 (1 世代当たりの時間) を示す。

$$CDS_{RSP} = \frac{1}{UGN} \left\{ \int_0^{UT} DS_{RSP} dt + \sum_{U=1}^{UGN-1} (1 - UAR)^U \int_{UT \times U}^{UT \times (U+1)} DS_{RSP} dt \right\} \quad (5)$$

### 3.3 製品サービス更新計画の導出

本研究は、予めサービスの構成要素のライフサイクルオプションが決定されていることを前提としており、提案手法はそれらの更新計画導出支援を目的とする。更新計画の導出では、更新対象のサービス構成要素の整理と更新手段の決定 (プロセス 5a および 5b)、不満度の構造化とコスト、環境負荷、不満度のライフサイクルにおける発生源の整理 (プロセス 5c および 5d)、更新計画導出のための比較対象、要求仕様の設定 (プロセス 5e)、要求仕様、多目的満足化手法を用いた更新計画の導出 (プロセス 5f) の順に行う。はじめに、サービス構成要素の更新実施手段の決定では、先行研究で提案されたアップグレード方法決定マトリクス (Upgrade Way Decision Matrix: Up-WDM)<sup>16)</sup>を用いる。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た表であり、更新対象のサービス構成要素一つ一つに対して、アップグレード特性項目の状態を定性的に整理し、各々サービス構成要素を -1, 0, 1 の 3 段階でスコアリングを行うことで推奨される更新実施手段を得る手法である。更新実施手段は、Send-back upgrade, User upgrade, Serviceman upgrade に大別される。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、処分リサイクル費が各々発生し、環境負荷は部品生産時、輸送時、処分リサイクル時、作業時に各々発生する。User upgrade は、ユーザ (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、処分リサイクル費が発生し、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、処分リサイクル時、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送し、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出向き、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、処分リサイクル費に加え、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、処分リサイクル時、作業時に発生する。

各サービス構成要素の更新実施方法が決定したら、更新計画導出時の評価視点変数であるコスト、環境負荷の発生源を整理する。本研究では、環境、企業、消費者の三者の持続可能性を考慮し、低環境負荷、高利益、低価格（低出費）、低不満度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。さらに、不満度の評価を行うために、各サービス構成要素の不満度関数の作成を行い、それを RSP の構造から RSP の累積不満度関数を作成する。これらの情報は将来予測を必要とし、不確実な設計情報であるため、その数値は範囲値で用意する。具体的には、寄与度  $C_n$  の調査および導出を異なる時点で行い、その結果を範囲値で定義することや、廃棄分布を複数の時代の製品で取得し、不満度関数の係数を範囲値で定義すること、アップグレード可能量率  $UAR$  や、更新頻度  $UT$  を範囲値で入力し、不満の増加程度に範囲を持たせることで対応する。

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、提供する製品サービスの既存の販売形態や利用形態を調査する。例えば、ターゲットとなるサービス構成要素がリースとして広く販売されている場合、設計する Up-PSS 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）、低不満度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。不満度と環境負荷、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、セットベース設計手法を拡張した PSD (Preference Set-based Design) 手法<sup>19)</sup>を使用することで多目的満足解を導出する。PSD 手法は、設計変数の初期範囲値、要求性能の範囲値、設計変数と性能間の関係式（本研究におけるコスト、環境負荷、累積不満度のモデル式）を入力情報として与えることで、その要求性能の範囲値の中で実現可能な性能の範囲値、それを実現する設計変数の範囲値を出力する手法である。本研究において、更新計画の設計解は将来取り得ると予測した設計変数の情報を用いて導出される。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。

## 4 適用事例：家具家電パッケージレンタルの設計

### 4.1 事例設定

提案する更新計画構成手法を家具家電のパッケージレンタルの設計に適用する。本事例では、製品サービスのプロバイダをレンタル会社と想定して設計を行う。**表 1** に示す家具家電を一つのパッケージとしてレンタルすることを想定し、RSP を居住快適性と設定し、**図 4** に示すようにその構造を展開した。**図 4** に示す RSP と階層間の重みは、著者らが一人暮らしで安価な家具家電を使用する 20 代男子学生 1 名と、実家暮らしで中～高価な家具家電を使用する 20 代男子学生 1 名に聞き取りを実施し、各自が階層内の項目の一対比較を行い、その結果を平均して設定したものである。製品サービスの構成要素である個々の家具は予め手入れが可能なものの（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。テレビでは、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おいては、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。これらの製品サービス構成要素はミドルエンドの家具家電であることを想定する。更新サイクル  $UT$  を 4 年毎と設定し、1 ユーザ当たりのサービスの提供期間を 8 年間に設定した。この期間は、リサーバの累積不満度を評価する際に用いる。これは、日本の賃貸物件利用者の 70% が 4 年以内に引越しを行う調査結果から、2 物件分に相当する期間を示す。

本事例は、提案する更新計画構成手法とその評価モデルが、任意に設定した比較対象のビジネスモデルモデルと比較して低環境負荷、低価格、高利益、低不満度を実現する制約を満足させるサービス提供計画の設計範囲解が導出可能であることを確認することを目的としており、手法に入力する設計情報は情報の入手性の観点から不確実な情報が含まれる。

聞き取りを行った学生らが所有する各種家具家電のサイズ、重量を調査し、アップグレード実施方法を Up-WDM によって決定した。この結果を表 1 左部に示す。比較対象のビジネスモデルは、安価な家具家電を買い替える場合を想定し、Up-PSS と、安価な家具家電の買い替えの場合における価格、利益率、環境負荷を調査、算出した。家具家電の価格や、利益率に関しては、実際の販売価格や株式情報等を参照し、Up-PSS の場合は範囲値で定義し、環境負荷量は表 1 左部に示す重量から環境負荷原単位を用いて算出した。Up-PSS の家具家電の製造時の環境負荷量に関しては、将来の不確実性として 10% 分を調査した値に加算し、範囲値で定義した。さらに、表 1 右部に示す各々の家具家電の不満度関数に関しては、価格帯による個々の家具家電の廃棄分布の公開情報が存在しないため、聞き取りを行った学生 2 名が 1 年度ごとの自身の家具家電に対する不満を 10 段階で点数化し、10 年間分のデータを用いて近似式を作成することで定義した。これらの結果を元に、Up-PSS の RSP の累積不満度  $CDS_{up}$  および買い替えの RSP の累積不満度  $CDS_{re}$  を作成した。不満度に加えて、製品および部品製造時、処分リサイクル時、輸送時の環境負荷量を扱い、製品および部品製造時、設置作業時、処分リサイクル時、輸送時のコストを扱う。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、製造時の値は、前述の調査結果を用い、処分リサイクル時や、輸送時、設置作業時の値は、自治体の粗大ゴミ廃棄料金や処理方法、運送会社の運賃表や輸送手段を参照し、それぞれのコストや環境負荷量、利益率を定義した。

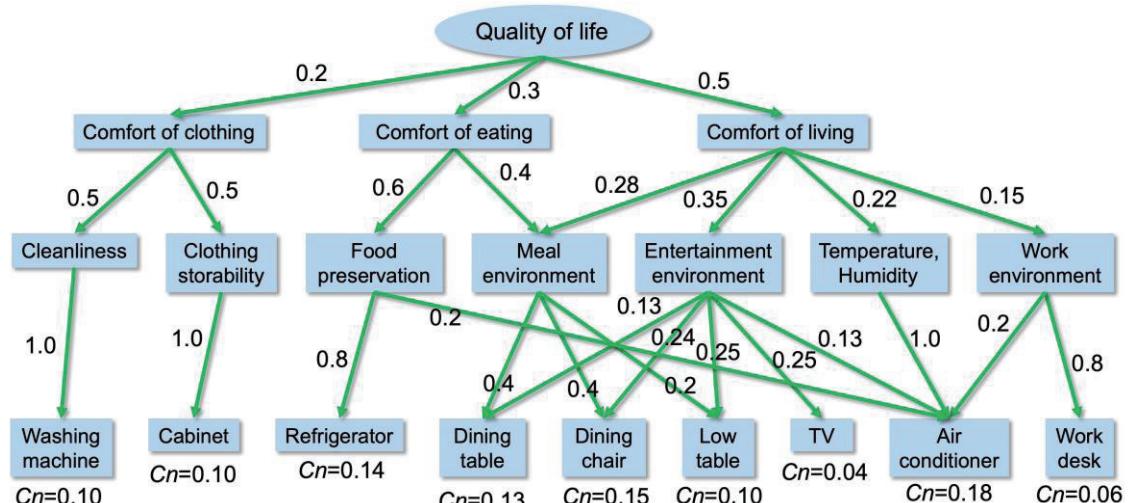


Fig. 4 RSP Structure of the Quality of Life in Case Study

**Table 1 Upgrade target product and its upgrade way and dissatisfaction model**

Upgrade target	Size (W, D, H) [mm]	Weight [kg]	Upgrade way	Upgradable (Middle-end-class)	Dissatisfaction
					Replace (Low-end-class)
Dining chair	460, 460, 800	4.0	User-s	$DS_{DC_{up}} = -0.0482t^2 + 0.8901t$	$DS_{DC_{re}} = -0.1279t^2 + 2.2624t$
Dining table	1800, 900, 700	42.5	Serviceman	$DS_{DT_{up}} = -0.0076t^3 + 0.0976t^2 + 0.1043t$	$DS_{DT_{re}} = 0.0156t^3 - 0.3168t^2 + 2.019t$
Low table	1000, 750, 350	24.0	User-b	$DS_{LT_{up}} = 0.0138t^3 - 0.2146t^2 + 1.3155t$	$DS_{LT_{re}} = -0.0561t^2 + 0.998t$
Cabinets	890, 590, 1870	77.0	Serviceman	$DS_{Ca_{up}} = 0.25t$	$DS_{Ca_{re}} = 0.3t$
Work desk	1000, 550, 730	71.9	Serviceman	$DS_{WD_{up}} = 0.0062t^3 - 0.1334t^2 + 1.1144t$	$DS_{WD_{re}} = 0.0152t^3 - 0.3078t^2 + 1.9712t$
Television	900, 190, 570	11.0	Send-back	$DS_{TV_{up}} = 0.0439t^2 + 0.108t$	$DS_{TV_{re}} = 0.0165t^3 + 0.2282t^2 - 0.14t$
Air conditioner	800, 150, 250	8.0	Serviceman	$DS_{AC_{up}} = 0.0124t^2 + 0.2519t$	$DS_{AC_{re}} = -0.1037t^2 + 1.8193t$
Refrigerator	600, 700, 1820	79.0	Serviceman	$DS_{Re_{up}} = -0.0134t^2 + 0.392t$	$DS_{Re_{re}} = -0.01t^3 + 0.1337t^2 - 0.0466t$
Washing machine	600, 610, 1000	40.0	Serviceman	$DS_{WM_{up}} = -0.0037t^2 + 0.4138t$	$DS_{WM_{re}} = -0.057t^2 + 0.8485t$

更新頻度  $UT$ , 製品に必要とされる世代数  $UGN$ , アップグレード可能量率  $UAR$  を導出するための評価変数として, 1 世代当たりのサービス提供による環境負荷発生量  $ELpG$ , 1 世代当たりのサービス価格  $PipG$ , 1 世代当たりのサービス提供による利益  $PopG$ , およびサービス提供期間中の累積不満度  $CDS_{up}$  の 4 変数を用いる. 式 (6) から式 (9) にそれぞれの算出式を示す. 事例の簡略化, 計算機への負荷低減のため, 式 (6) は式 (1) の輸送および廃棄リサイクル時の発生量 1 世代分を定数化し, 第 1 世代と第 2 世代以降の製造時の発生量を同一の範囲値と定義して変形したものである. 式 (7) においては, 式 (6) と同様に式 (2) の作業, 輸送および廃棄リサイクル時の値 1 世代分を定数化し, 第 1 世代と第 2 世代以降の製造時の発生量を同一の範囲値と定義して変形したものに, 利益率  $PR$  を用いて製造コストを製品価格に変換したものである. 同様に, 式 (8) は式 (2) を変形し, 利益率  $PR$  を用いて製造コストを利益に変換したものである.

これらの評価変数を構成する設計変数として, 家具の利益率  $PR_{fu}$ , 白物家電の利益率  $PR_{ha}$ , テレビの利益率  $PR_{tv}$  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  $EL_{Pfu}$ , 白物家電の製造時環境負荷量  $EL_{Pha}$ , テレビの製造時環境負荷量  $EL_{Ptv}$ , 家具の製造コスト  $Ct_{Pfu}$ , 白物家電の製造コスト  $Ct_{Pha}$ , テレビの製造コスト  $Ct_{Ptv}$  を定義した. さらに, 定数項として, 輸送, 廃棄 (リサイクル) 時の環境負荷量と輸送, 廃棄, 作業時に要するコストの単一世代当たり発生量を算出し, 定義した. **表 2** にこれらの変数の Up-PSS における初期範囲と比較対象である従来の買い替えの場合の数値を示す. 式 (6) から式 (9) および**表 2** の条件から, 買い替えよりも低環境負荷, 低価格, 高利益, 低不満度を同時に実現するために必要な利益率, 世代数, アップグレード可能量率を導出する.

$$ELpG = \{1 + UAR(UGN - 1)\} \times \frac{(EL_{Pfu} + EL_{Pha} + EL_{Ptv})}{UGN} + EL_T + EL_R \quad (6)$$

$$PipG = \frac{1 + UAR(UGN - 1)}{UGN} \left( \frac{Ct_{Pfu}}{1 - PR_{fu}} + \frac{Ct_{Pha}}{1 - PR_{ha}} + \frac{Ct_{Ptv}}{1 - PR_{tv}} \right) + Ct_T + Ct_R + Ct_W \quad (7)$$

$$PopG = \frac{1 + UAR(UGN - 1)}{UGN} \left( \frac{Ct_{Pfu} \cdot PR_{fu}}{1 - PR_{fu}} + \frac{Ct_{Pha} \cdot PR_{ha}}{1 - PR_{ha}} + \frac{Ct_{Ptv} \cdot PR_{tv}}{1 - PR_{tv}} \right) \quad (8)$$

$$CDS_{up} = \frac{2}{UGN} \left\{ \int_0^{UT} DS_{RSP} dt + \sum_{U=1}^{UGN-1} (1 - UAR)^U \int_{UT \times U}^{UT \times (U+1)} DS_{RSP} dt \right\} \quad (9)$$

**Table 2 Initial value ranges of Up-PSS and conventional replace case**

	Constant	Up-PSS (Initial range)	Conventional
$EL_T$	Environmental load of transportation phase [kg-CO <sub>2</sub> e]	300	190
$EL_R$	Environmental load of recycling phase [kg-CO <sub>2</sub> e]	7.0	32
$Ct_T$	Transportation cost [Yen]	60000	55000
$Ct_R$	Recycling cost [Yen]	6300	16000
$Ct_W$	Working cost [Yen]	38000	38000
Constraint of design variable			
$EL_{Pfu}$	Environmental load of furniture production phase [kg-CO <sub>2</sub> e]	[36.2, 39.8]	36.2
$EL_{Pha}$	Environmental load of household appliance production phase [kg-CO <sub>2</sub> e]	[522.7, 575.0]	522.7
$EL_{Ptv}$	Environmental load of television production phase [kg-CO <sub>2</sub> e]	[50.0, 55.0]	50.0
$Ct_{Pfu}$	Production cost of furniture production phase [Yen]	[96000, 225000]	9600
$Ct_{Pha}$	Production cost of household appliance production phase [Yen]	[161500, 209000]	161500
$Ct_{Ptv}$	Production cost of television production phase [Yen]	[45000, 63000]	45000
Design variable			
$PR_{fu}$	Profit rate of furniture	[0.4, 0.6]	0.20
$PR_{ha}$	Profit rate of household appliance	[0.05, 0.10]	0.05
$PR_{tv}$	Profit rate of television	[0.10, 0.15]	0.10
$UAR$	Rate of upgradable amount	[0.35, 0.50]	-
$UGN$	Upgrade generation	[2, 6]	-
Evaluation variable			
$ELpG$	Environmental load emission by service provision per generation [kg-CO <sub>2</sub> e]	[360, 719]	719
$PipG$	Price of service provision per generation [Yen]	[220000, 449000]	449000
$PopG$	Profit by service provision per generation [Yen]	[37500, 75000]	37500
$CDS$	Cumulative Dissatisfaction within 2 generation	[0, 16.54]	16.54

## 4.2 適合性評価結果と考察

4.1 節に示した変数の初期範囲の条件に基づいて PSD 手法に適用し、設計解を導出した。設計変数の範囲解を図 5 に、評価変数の範囲解と買い替えの場合との比較結果を図 6 にそれぞれ示す。評価変数の初期範囲は、買い替えの場合の値を基準とし、それよりも低環境負荷、低価格、高利益、低不満度が同時に実現されるように要求される範囲を設定した。図 5 より、アップグレード可能量率  $UAR$  は 0.35 ~ 0.37、アップグレード世代数  $UGN$  は 5.5 ~ 6 世代、家具の利益率  $PR_{fu}$  は 0.40 ~ 0.43、白物家電の利益率  $PR_{ha}$  は 0.056 ~ 0.063、テレビの利益率  $PR_{tv}$  は 0.113 ~ 0.119 の範囲で設定可能であることが確認された。また、図 6 より、この設計変数の範囲を用いた場合は、安価な家具家電を買い替える場合よりもサービス 1 世代あたりの環境負荷量  $ELpG$  は -17.6% ~ 11.1% の削減が可能であり、サービス 1 世代あたりの価格  $PipG$  は、-36.5% ~ -1.2% の削減が可能であることが確認された。サービス 1 世代あたりの利益  $PopG$  は、+0.9% ~ +148.4% の増加が実現できることが確認され、1 ユーザ当たりのサービスの提供期間における累積不満度は、-40.6% ~ -39.5% の削減が可能であることが確認された。ゆえに、予め設定した更新頻度、1 ユーザ当たりのサービス提供期間において、安価な家具家電を買い替えよりも持続可能な設計解が導出可能であることが示された。また、更新世代数の結果より、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、製品全体として 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 Up-PSS の更新計画構成手法と評価モデルを用いることで、既存の買い替えと比較して、低環境負荷、低価格、高利益に加え、低不満度を同時に実現するサービス提供計画の設計変数の範囲解が導出されることが確認された。また、これらの結果は、環境負荷や価格および不満の低減度合いや、利益の向上度合いを定量的に示すことができるため、設計チーム内の合意形成や、経営者の製品展開への意思決定を支援することが可能である。さらに、設計解は後半のハードウェアの詳細な設計段階における制約を示すものであるため、設計者は、製品が実際に有するべき寿命と、その寿命を実現させるためのアップグレードや保守のサイクル、利用可能なコストや環境負荷を定量的に得ることが可能である。以上より、提案手法とその評価モデルが、Up-PSS のサービス提供計画の設計の支援において有効であることが確認された。

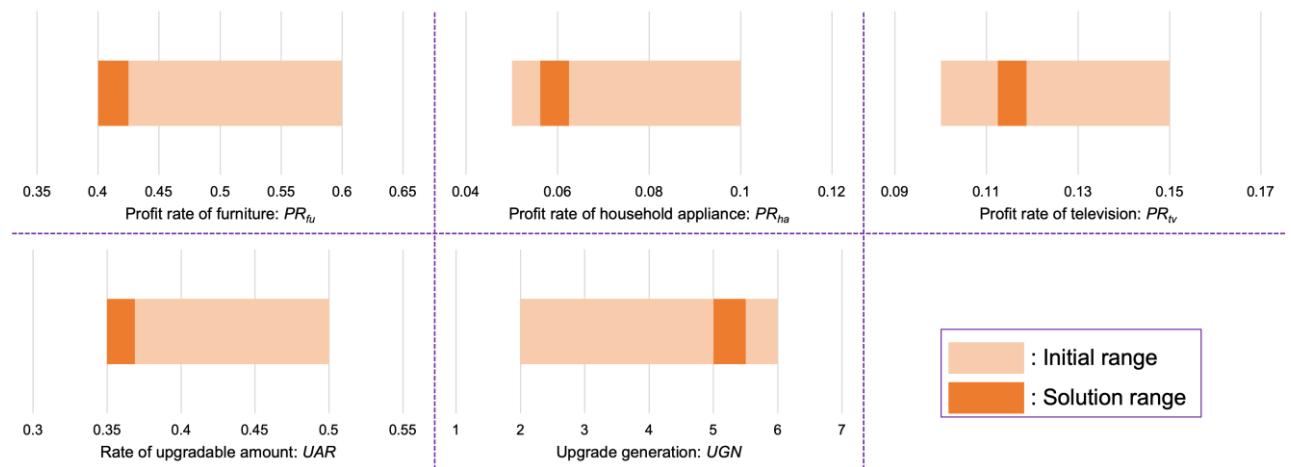


Fig. 5 Solution ranges of design variables

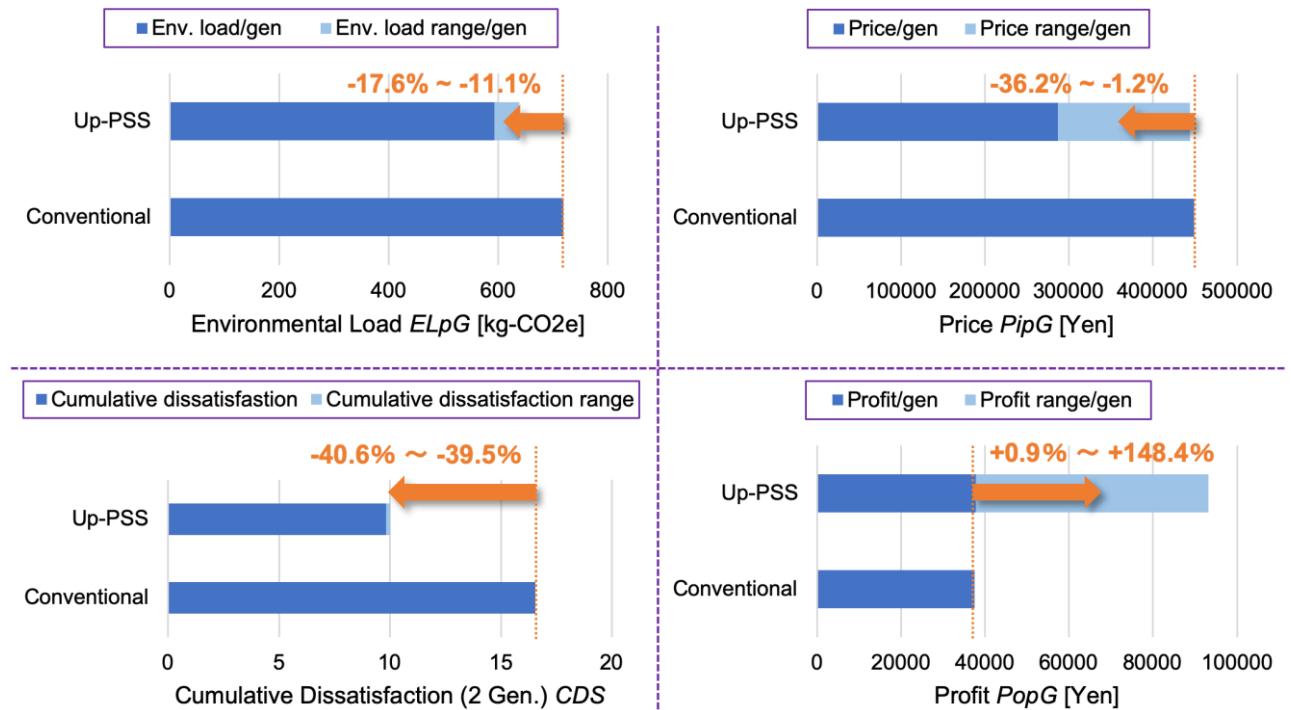


Fig. 6 Solution ranges of evaluation variables

## 5 結言

本稿では、アップグレード製品サービスシステムの設計において、製品の更新計画の設計支援手法を提案した。提案手法は製品サービスの更新計画を行う上で必要な更新の頻度や回数、更新時に利用可能なコストや環境負荷量の割合、付加可能な利益率を導出し、より後半のハードウェアの設計において必要な情報の導出を支援することを目的とした。さらに、更新計画導出に必要なこれらの設計変数の不確実性に対して、それらを範囲値で表し、セットベース設計の概念に基づく PSD 手法を用いることで範囲解を導出し、不確実性に対応した。更新計画を導出するための評価視点変数では、更新および時間変化によるその値の変化を考慮した環境負荷およびコストに加えて、先行研究で評価が不十分であった顧客不満度の評価モデルを新たに提案し、そのモデルは製品サービスの 1 世代当りの発生量を算出することが可能である。提案手法を家具家電のパッケージレンタルの設計問題に適用し、安価な家具家電の買い替えの場合と比較して低環境負荷、低価格、高利益、低不満度を同時に実現する設計変数（製品サービスの世代数、利益率、更新時に利用可能なコストや環境負荷量の割合）の導出が可能であることを示し、提案手法の有用性を確認した。

本研究で提案したコストや、環境負荷、不満度のモデルは、製品サービスを構成する製品そのものを更新することを前提としており、全く新しい製品が展開された際に、その新しい製品への入れ替えに対応することが不可能となる可能性がある。ゆえに、今後は製品の入れ替えを考慮した評価モデルの提案が本研究の課題である。特に RSP の不満度に関しては、製品の入れ替えを実施した際の RSP 構造の変化を考慮することが必要である。ゆえに、全く新しい製品が登場することを想定した事例に対して提案手法を適用することで、提案手法および評価モデルの改善を行うことが本研究の課題である。さらに、不満度の関数の作成に関しては、製品の廃棄分布を用いて行うことを想定しているが、消費者が廃棄せずに退蔵した製品に関しては、不満の蓄積を観測することが困難となる。そのため、IoT 技術を組み合わせることで使用状況を観測し、消費者が蓄積する不満を予測する手法を開発することも本研究の課題である。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究 (C) 17K01273 および基盤研究 (A) 18H03824 の助成を受けたもので、感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) European Commission: Circular Economy Implementation of the Circular Economy Action Plan, (online), available from <[http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm)>, (accessed 2018-01-18).
- 2) 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), 156.
- 3) Masui, K.: Current status of environmentally conscious design among Japanese manufacturers, International Journal of Automation Technology, 3, 1 (2009), 19.
- 4) 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, (2014).
- 5) Pialot, O., Millet, D. and Bisiaux, J.: Upgradable PSS: Clarifying a new concept of sustainable consumption/production based on upgradability, Journal of Cleaner Production, 141 (2017), 538.
- 6) Shimomura, Y., Hara, T. and Arai, T.: A unified representation scheme for effective PSS development,

CIRP Annals – Manufacturing Technology, 58 (2009), 379.

- 7) 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, 10, 5 (2016), 690.
- 8) Sobek, D.K., Ward, A.C. and Liker, J.K.: Toyota's Principles of Set-Based Concurrent Engineering, Sloan Management Review, 40, 2 (1999), 67.
- 9) 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, 72, 713 (2006), 282.
- 10) Pialot, O. and Millet, D.: Why upgradability should be considered for rationalizing materials?, Procedia CIRP, 15 (2014), 379.
- 11) 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, 20, 1-2 (2017).
- 12) Lobasenko, V. and Llerena, D.: Elicitation of willingness to pay for upgradeable products with calibrated auction-conjoint method, Journal of Environmental Planning and Management, 60, 11 (2017).
- 13) 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), 606.
- 14) Kobayashi, H.: Strategic evolution of eco-products: a product life cycle planning methodology, Research in Engineering Design, 16 (2005), 1.
- 15) 山田周歩, 金田郁可, 山田哲男, 井上全人: アップグレード製品・サービスシステム設計のためのライフサイクルオプション適合性評価手法の提案, 設計工学, 54, 9 (2019), 595.
- 16) 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, (2018), 1155.
- 17) 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, 71, 702 (2005), 669.
- 18) 梅田靖, 比地原邦彦, 大野雅史, 小川康暢, 小林英樹, 服部光郎, 増井慶次郎, 深野彰: 廃棄要因分析表を用いたライフサイクル戦略決定支援手法の提案, 精密工学会誌, 69, 9 (2003), 1270.
- 19) 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, 21, 4 (2013), 252.