

# PSS 設計を支援する要求依存関係分析手法

首都大学東京 ○中田竹彦, 三竹祐矢, 根本裕太郎, ◎下村芳樹

## 要旨

製品サービスシステム (PSS) の設計では、複数の利害関係者の要求間に潜在する矛盾や制約などの複雑な相関を考慮し、その構造に反映する必要がある。しかし、質的に抽出される要求の曖昧さや多様な利害関係者の関与に起因する複雑性が、それらの関係の分析、把握を困難にしている。本稿では、PSS の要求-機能-実現構造の相関分析により、多様な要求間の潜在的な依存関係の把握を容易化し、可視化する手法を提案する。

## 1. 序論

近年、先進国における製造業は、新興国の急速な技術力向上や製品のコモディティ化などにより国際競争力を失いつつある。その背景のもと、製造業が競争力を高め、且つそのビジネスアクティビティに伴う環境負荷の低減を実現する手段として、製品とサービスを高度に統合し提供する製品サービスシステム (PSS: Product-Service Systems) が注目を集めている<sup>[1]</sup>。PSSとは、製品やサービス、及びその統合物の供給/受給に関わる複数の利害関係者が十分な価値を享受することを可能とするビジネスモデルの総称である<sup>[2]</sup>。このようなPSSの設計においては、関わる複数の利害関係者の要求を横断的に充足することが求められるが、そのためには多様な要求間に潜在する矛盾や制約などの複雑な相関を考慮し、それらを反映する必要がある。

しかし、現実のPSSの開発において、往々にして質的にのみ抽出される要求の曖昧さや多様な利害関係者の関与がもたらす複雑性が、上記で言う多様な要求の関係性を分析、把握することを困難にしている。そして、これら要求間の関係を不明瞭なままPSSを設計した結果、各利害関係者が受け取る価値に不均衡が生じ、結果的に各主体が十分な価値を享受できず、ビジネスが失敗に終わる事例が頻発している。本研究は、複数の利害関係者の多様な要求を横断的に充足する良価値バランスなPSSの設計を可能とすることを目的として、抽出された各要求間の潜在的な依存関係の把握を可能とする手法を提案する。

## 2. 先行研究と本研究のアプローチ

### 2.1. システム構成要素間の依存関係分析手法

複雑なシステムの要素間の関係性を表わす手法の一つに Multi Domain Matrix (MDM) がある。MDMは、同一領域要素間の依存関係を表現する Design Structure Matrix (DSM) と、異なる領域要素間の依存関係を表現する Domain Mapping Matrix (DMM) の統合により、システムに対して異なった領域の情報間の依存関係を構造化し、システムを分析することを可能とする<sup>[3]</sup>。

また、ある領域の依存関係を推論する手法として Domain Mapping Logic (DML) がある。DMLは、ある領域の DSM を、他の領域の依存関係を表現した DSM、その2つの領域間に対応関係を表現した DMM を用いた計算により導出する<sup>[4]</sup>。

### 2.2. PSSの構造分析に関する先行研究

叶らは、水質浄化装置をコア製品とする PSS 事例に関与する各利害関係者の Life Cycle Cost (LCC) を俯瞰した改善設計の支援を目的として、PSSの要求-物理機能-実現構造の3者間の対応関係を MDM の構築により明らかにする手法を提案した<sup>[5]</sup>。そして実現構造と LCC を関連付け、要求実現に必要な実体を特定し、改善候補案が LCC に与える影響の分析を可能とした。

同手法は、まず PSS の要求、物理機能、実現構造の情報を抽出し、それらの対応付けを行う。次に、その対応関係を DSM、DMM により表現し、MDM として統合することにより要求実現のために必要な実体を特定することを可能としている。

### 2.3. 先行研究における課題

先行研究での PSS の要求-機能-実現構造の相関分析結果を用いて、多様な要求間の潜在的な依存関係を把握可能とするためには、以下の2つの問題点を解決する必要がある。

第一に、DSMの構築においては、分析領域を、同一粒度の構成要素に分解し、それらの各要素間の対応関係を分析することが必要である。しかし先行研究では、MDMで抽出した各要素の粒度が統一されておらず、正確な対応関係が記述できていない。例えば、「装置をメンテナンスする」と「動作を確認する」、「メンテナンススタッフを派遣する」という本来は上位下位に位置する機能が同じ粒度として記述されている。

第二に、先行研究では、MDMにおける依存関係の記述を要素

間の入出力関係により設定するが、その関係を分析者の主観的判断により設定していたため、分析者の違いにより構成する MDM と現実の PSS との整合性が著しく変動する場合がある。

### 2.4. 本研究でのアプローチ

本研究では、PSS設計を支援するために、要求の依存関係を分析する手法の提案を目的とし、上記の問題点を解決する MDM を構築したうえで、抽出された各要求間に潜在する依存関係を明らかにする。本手法では、まず実際に本 PSS 設計者へのヒアリングにより得られた情報を基に MDM を再構築する。その際に、システム機能間の関係をモデル化可能とする手法である IDEF0<sup>[6]</sup>の記法に則り、機能の入出力関係を段階的に表現することで、MDMへ記載する各要素の粒度の設定を支援する。また要求-機能-実体の依存関係を、上記のヒアリング結果を基に構築することで、現実の PSS を忠実に反映した MDM の構築を可能にする。この時、要求間の依存関係は、その潜在性からヒアリングだけでは十分に把握ができない場合があるため、DMLを用いた推論により不足する情報を補間する。そして、Interpretive Structural Modeling (ISM) 法<sup>[7]</sup>を用いて要求間の関係を可視化することにより、PSS設計の際に考慮すべき要求間の関係を分析可能とする。

## 3. 提案内容

### 3.1. 要求依存関係の分析手順

提案手法では、PSSの要求-機能-実現構造の相関分析により、各要求間の潜在的な依存関係の把握を容易化し、それらの関係を以下の手順により可視化する。

**Step1:** 各利害関係者の要求と PSS の機能、実体情報の明確化

まず、PSS 設計者に対するヒアリングにより PSS の要求、機能、実体の情報を抽出し、それらの関係を IDEF0 により明確化する。本手法は、図1に示すように、ボックス内に機能、矢印にそれらの機能の相互作用である入力、制約条件、出力、資源を記述する。また、IDEF0は、複雑なシステムを段階的に表現するダイアグラム構造により、構成要素へと分解する。この構造を用いて、抽出した要求、実体との関係性を相対的に分析し、適切な機能の粒度の入出力関係を設定する。ここでは、設計者との議論を通して、MDM上に設定するべき適切な粒度の機能を選定する。

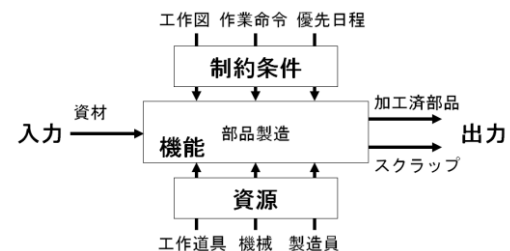


図1 機能「部品製造」の IDEF0 記述例 ([6]を基に作成)

### Step2: 要求間の依存関係の導出

Step1 で得られた結果を基に、機能、実体の各領域要素の依存関係を DSM で、要求、機能、実体の要素間の対応関係を DMM により表現する。これらの要素の依存関係は、Step1 の結果を用いて、以下の観点に基づき設定する。

- 機能間：IDEF0 に示される入出力関係
- 実体間：エネルギーの受渡しや物理的な接続関係
- 要求-機能間：IDEF0 に示される制約条件
- 機能-実体間：IDEF0 に示される資源

さらに DML を適用することにより、機能 DSM、要求-機能 DMM から、要求 DSM を推論し、MDM を構築する。

### Step3: 要求間の依存関係の可視化

最後に、Step2で設定した要求間の依存関係を、ISM法を用いて可視化する。本手法は、対象領域の全体構造の把握を目的とした構造解析手法であり、複雑なシステム構造を階層表現により可視化できる。本研究では、要求間の依存関係を階層表現するにあたり、ネットワーク分析ソフトウェア Cytoscape<sup>6)</sup>を利用した。

#### 4. 事例適用

##### 4.1. 事例概要

水質浄化装置を中核製品とする PSS 事例に対して、提案手法を適用し、その有用性を検証した。本 PSS には、装置製造会社や設計会社、代理店、顧客など複数の利害関係者が関与しており、それらの要求間に潜在する複雑な相関関係の分析が求められている事例である。以下にて適用結果の詳細を説明する。

##### 4.2. 適用結果

###### Step1: 各利害関係者の要求と PSS の機能、実体情報の明確化

PSS 設計者へのヒアリングにより抽出した要求、機能、実体情報に基づき、IDEFOを用いて PSS の実現構造を表現した。この結果により、例えば、「装置の検査をする」という機能は、顧客がもつ「川の水質基準を達成したい」などの要求制約のもと、「装置を製造する」という機能からの入力を受け、「装置を出荷する」などの機能へ出力していることが確認された。また、その機能を構成する「検査員」などの実体も明らかにされた。

###### Step2: 要求間の依存関係の導出

Step1の結果を用いて、機能、実体 DSM、要求-機能、機能-実体 DMM を作成し、DMLを用いた推論により、要求要素間の依存関係の有無を明らかにした(図2)。その結果、例えば、顧客の「15: 川の水質基準を達成したい」という要求と、装置製造会社と設計会社の「5: 設計コストを下げたい」という要求間に潜在していた依存関係が明らかにされた。

DSM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1 営業コストを下げたい	x	x	x	x																			
2 ニーズをつかみたい																							
3 信頼性の高い装置を採用したい	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4 運転コストを下げたい	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5 設計コストを下げたい	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6 メンテコストを下げたい	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7 事業パートナーを作りたい																							
8 仲介手数料を抑えたい																							
9 顧客が管理しやすい製品にしたい																							
10 保管コストを下げたい																							
11 韓国製の部品を使って欲しい	x	x	x	x																			
12 安い部品を使ってほしい	x	x	x	x																			
13 知っている部品を使いたい	x	x	x	x																			
14 安い装置を選定したい	x	x	x	x																			
15 川の水質基準を達成したい					x																		
16 輸送コストを下げたい																							
17 設置コストを下げたい																							
18 無償資料作成を減らしたい																							
19 水の中に入りたくない																							
20 川の臭いを軽減したい																							
21 景観を自然にしたい																							
22 川の見た目を綺麗にしたい																							
23 佐原にアピールしたい																							

図2 導出した要求間の依存関係

###### Step3: 要求間の依存関係の可視化

上記の結果をISM法に適用することで、要求間の依存関係を階層表現により可視化した(図3)。ノードの大きさは、他の要素との入力関係の多さを表している。本可視化により、要求要素間の関係性を容易に把握することが可能になった。例えば、装置製造会社、代理店、顧客がもつ「3: 信頼性の高い装置を採用したい」等の要求の下位に位置する要求は、装置製造会社と設計会社の「5: 設計コストを下げたい」等の上位の要求に出力を提供している。これは、下位の要求が充足されることで、その出力を受けている要求も、その相関から充足されるという関係性を説明している。このように、要求間の潜在的な因果関係を表現することで、ある要求の充足に際して考慮すべき他の要求を特定可能とした。

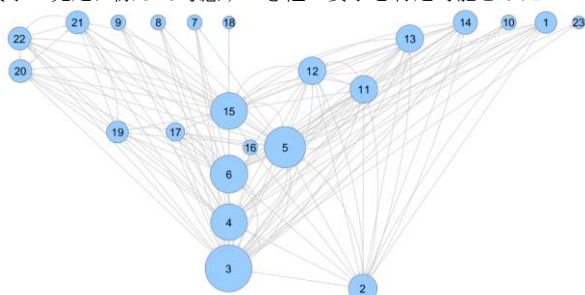


図3 要求依存関係の階層表現

#### 5. 考察

本稿では、提案手法を PSS の実事例に適用し、PSS の要求-機能-実現構造の相関分析により、提案手法が多様な要求間の潜在的な依存関係の把握を容易化可能であることを示した。PSS 設計者は提案手法を用いることにより、設計変更が影響を及ぼす要求間の関係性をより容易に分析、把握することが期待できる。

一例として、水質浄化装置の構成要素の一つである「サクシオンカバー」と呼ばれる構成要素を廃止する設計変更を仮定する。構築した MDM を用いて、この実体が担う機能、その機能が影響する要求の特定を行うと、この設計案は、「15: 川の水質基準を達成したい」、「20: 川の臭いを軽減したい」、「21: 景観を自然にしたい」、「22: 川の見た目を綺麗にしたい」など4つの要求に影響を与えることが確認できた。これらは全て顧客の要求であり、本設計変更の実施は、顧客の享受する価値の低下を招く恐れがある。

また、図3から、これら4つの要求は中位以上に位置しており、より下位に位置する多くの要求から出力を受けていることが確認できる。すなわち、顧客要求の充足のためには、顧客の直接的な要求のみならず、それと因果関係を有する、装置製造会社、代理店、顧客がもつ「3: 信頼性の高い装置を採用したい」などの下位階層の要求を同時に考慮することが必要である。

このように、本手法により可視化された結果を用いて、設計案が影響する要求と、それら要求の充足に際して考慮すべき他の要求・利害関係者を分析可能であることを確認できた。

さらに本稿では、構築した PSS の要求-機能-実現構造の相関関係が、一定の妥当性を担保し現実のシステムを表現していることを示した。例示に用いた「サクシオンカバー」は、当該水質浄化装置が送水や排水を行うために用いられる部品であり、水の循環や流路に関する機能と対応する。それらの機能は、記述した IDEFO により、「アオコの発生抑制」という上位機能を持ち、この機能はさらに川の水質状態に関する要求と対応関係を持つ。この対応関係は、サクシオンカバーにより水を循環させることが、アオコの発生抑制と、河川の水質改善に寄与することを意味しており、提案手法が現実の PSS の構造を一定の妥当性をもって表現可能であることを示している。

一方で本稿における提案内容は、設計案が影響する要求の把握、分析に留まっており、その後の設計案に対する意思決定を行う際の支援には至っていない。設計案に対して意思決定を行う際には、各要求が影響する LCC を分析するし、それを踏まえた価値バランスを考慮する必要がある。今後は、実体と LCC の関連付けにより、各要求が担う PSS の LCC を把握し、価値バランスを考慮した意識決定を支援する手法とツールの構築を目指す。

#### 6. 結論

本稿では、PSS の構造分析により、各要求間の潜在的な相関関係を把握、可視化する手法を提案した。そして、事例適用により、本提案手法の PSS 設計における有効性を確認した。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 16K12667 の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] Shimomura Y., Hara T., Arai T., A unified representation scheme for effective PSS development. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 5(1), pp.379-382, 2009.
- [2] Tukker A., Eight types of product-service system, Eight ways to sustainability? Experiences from suspronet. Bus Strateg Environ, 13, pp.246-260, 2004.
- [3] 澤井伽奈, 馬場崇斗, 野間口大, 藤田喜久雄, 産業用機器における顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係の明確化とモジュール化設計. Design シンポジウム講演論文集, pp.16-43, 2016.
- [4] Maurer M., Lindemann U., Structural Awareness in Complex Product Design – The Multiple-Domain Matrix, Proc 9th Int. DSM Conf 2007, pp.87-97, 2007.
- [5] 叶兵, 湯浅健人, 三竹裕矢, 細野繁, 下村芳樹, ライフサイクルコストモデルを用いた製品サービスシステム改善設計手法. 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp.227-228, CD-ROM, 2018.
- [6] Systems Engineering Fundamentals. Defense Acquisition University Press, 2001.
- [7] 池田将明, システムズアプローチによる問題解決の方法. 森北出版株式会社, pp.50-58, 2013.
- [8] 「Cytoscape」. <https://cytoscape.org/>, (参照 2019-01-24).