SDSI-Cubic 手法における製品システムモデリング手法の提案

河村 憲*, 村田 秀則*, 坂本 武志**, 佐藤 了平***, 岩田 剛治*, 荒井 栄司*, 岡本 和也****

Proposal of Product System Modeling Methodology in SDSI-Cubic Method

Ken KAWAMURA*, Hidenori MURATA*, Takeshi SAKAMOTO**, Ryohei SATOH***,
Yoshiharu IWATA*, Eiji ARAI*, and Kazuya OKAMOTO****

* 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

** 株式会社グローバルアシスト (〒278-0052 千葉県野田市春日町 20-26)

*** 大阪大学産学連携本部 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**** 山口大学大学院技術経営研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

* Graduate School of Engineering, Osaka University (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871)

** Global Assist Co., Ltd. (20-26 Kasuga-cho, Noda, Chiba 278-0052)

*** Osaka University Office for University-Industry Collaboration (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871)

**** Yamaguchi University Management of Technology Graduate School of Innovation and Technology Management (2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611)

概要 IoT 社会を支える製品システムの設計において、益々効率的なシステムデザインが求められている。これまで、最適設計手法 SDSI-Cubic を研究してきたが、システムモデルの再利用性が乏しいことが明らかになった。これに対し、システムデザインに必要な情報を 4 つの情報（製品システム、設計空間、設計アルゴリズム、設計環境）に分解・整理しモデル化することにより、システムモデルの再利用性と各種設計ツールの連携性を高めた。その結果、SDSI-Cubic で最適設計してきた放射線計測システムにおいてはシステムモデルの再利用性を確認でき、効率良く設計できる可能性を明らかにした。

Abstract

In the design of product systems that support the IoT society, more efficient system designs are required. Therefore, the optimization design method SDSI-Cubic has been studied. However, it has become clear that it is difficult to reuse the system model if the requirements are changed. In this paper, a new modeling methodology for system design is examined. It is discovered that the information for system designs can be separated into 4 components: product system, design space, design algorithm, and design environment. By modeling these components, the reusability of system models and the cooperation of various design tools are improved. Furthermore, the new modeling methodology is applied to a radiation measurement system which was designed using the SDSI-Cubic method. As the result, the reusability of the system model is confirmed in this applied case and the possibility of efficient design is clarified.

Key Words: Embedded System, System Design, SDSI-Cubic, SysML, Measurement System, Reusable System Model

1. 緒言

全てがデジタルで繋がり、大きな価値を創出する IoT イノベーションが進展している。これに伴い、製品システムも益々大規模化・複雑化しており、効率良く設計することが難しくなっている。この課題を解決するため、これまで著者らは、コンピュータ上で製品システム全体をモデリング（システムの特徴をとらえモデル化して記述）し最適設計する手法 SDSI-Cubic (System Design System Integration-Cubic)¹⁾ を研究・実用化し、放射線計測システムの設計に適用してきた²⁾。

ところが、社会環境の変化に伴って、時々刻々と変化する要求（より高感度化やより低コスト化など）に対応した最適設計を行う際に、現状の SDSI-Cubic 手法では、効率良く設計することが難しいことが明らかになった。SDSI-Cubic 手法では、SysML (Systems Modeling Language)^{3),4)} を

用いて製品システム全体を定義しモデリングするが、システムモデルを大幅に見直す必要がある。また、SysML を用いて、設計ツール連携を考慮した SLIM (Systems Lifecycle Management) 手法⁵⁾ や PDI (Product Data Integration) 手法⁶⁾ が提案されているが、同様の課題があることが明らかになった。いずれの手法においても、ツール固有のパラメータが製品システムの中に定義されているため、要求変更に伴う設計変更や設計ツール変更によって、製品システムモデルを大幅に再モデリングする必要がある。

そこで本研究では、この製品システムのモデリングにおいて、新たなモデリング手法を検討し、課題の解決を試みた。具体的には、システムデザインに必要な情報として、製品システムのアーキテクチャ（機能、方式やシステム構成といった基本的な設計思想）が変わらない場合の不変・可変の情報に分けてモデリングすることにより、システムモデルの再利用性を高めることを目的とした。

2. システムモデリング手法とそれを用いたシステムデザインの現状と課題

大規模・複雑なシステムを最適設計する手法である SDSI-Cubic 手法におけるモデリングの現状と課題について述べる。SDSI-Cubic 手法は、設計項目間の複雑な依存関係を解きほぐし、製品システムの最適な設計案を導出する手法であり、SysML を用いて製品システム全体をモデリングしている^{1),2)}。Fig. 1 は、本研究で対象とした放射線計測システムをモデリングした例の概要を示したものである。SysML の特徴は、製品システムの実現方法・方式（ハード・ソフト、物理・化学など）によらず、システムの特徴を以下のような構成で記述できるようにしたことである。SysML を用いたモデリングは、システムを統一的にコンピュータ上で設計する上で画期的であり、世界標準になりつつある^{3),4)}。

- 1) 設計対象のシステムとその外部は何かというシステム範囲定義 (Fig. 1 の Context Diagram)、システムが何を要求されているのかという要件定義 (ユースケース図, 要求図 (Fig. 1 の Requirement Diagram))
- 2) どのような動きをするのかという振舞い定義 (アクティビティ図, シーケンス図, ステートマシン図)
- 3) どのような構造なのかという構造定義 (パッケージ図, ブロック定義図 (Fig. 1 の Block Definition Diagram), 内部ブロック図)
- 4) 各要素がどのような関係にあるのかという制約定義 (パラメトリック図 (Fig. 1 の Parametric Diagram))

一方、システムには相反する設計項目が多数存在するため、それらを考慮した最適な設計が必須である。そこで SDSI-Cubic 手法では、最適化を行うために、SysML の中

に、最適化問題の情報 (Fig. 1 の Optimization Diagram) を追加記述し、最適化の自動実行を可能としている。また、CAD (Computer Aided Design) や CAE (Computer Aided Engineering)⁷⁾ などとツール連携を行う場合は、これまでの研究におけるシステムデザイン手法 (SLIM 手法や PDI 手法) と同様に、CAD/CAE のツール情報 (Fig. 1 の CAD/CAE Diagram) を追加記述できるように拡張している。このようにコンピュータ上でシステムデザインをするため、SysML を用いた SDSI-Cubic におけるモデリングでは、次のような特徴を持っている。最適化やツール連携を考慮した製品システムの特徴を全て定義し、かつシステムデザインに必要な情報を設計者が自由に追加記述できるということである。そして、現状ではこれらの情報が一つの製品システムモデルとしてモデリングされている。ところが、この自由度が効率的なシステムデザインを行う上で、新たな問題をひきおこしている。

すなわち、SDSI-Cubic 手法のような全ての情報を一つにまとめた製品システムモデリングでは、要求の変化に対応した最適設計を行う際に、製品システムのアーキテクチャが変わっていないにも関わらず、再モデリングする必要があることが明らかになってきた。例えば、放射線計測システムは、放射線を検知するセンサとその信号を処理し表示するといったアーキテクチャであり、要求 (感度やコストなど) によって、センサのサイズや材料、処理装置の性能などを最適化設計している。ここで、感度やコストといった目的関数そのもの (もしくは上限・下限といったそれらの制約条件) が変更された場合、本来であれば最適化問題だけを変更すればよいはずである。しかし、Fig. 1 に示すこれまでのモデリング手法では、感度などの目的関数を表

Fig. 1 SysML overview

す要素やセンササイズなどの設計変数を表す要素など、最適化に関係する要素を製品システムモデル内から探索・特定し、さらにそれらの各要素内に持つ制約条件などを変更する必要がある。また要求変更により、目的関数や設計変数そのものが変更された場合、関連するパラメータや制約式も特定し、変更する必要がある。このように、設計の操作によって、製品システムモデル内にある要素が変更されてしまうため、製品システムモデルをそのまま再利用することができない。

つまり、従来の SDSI-Cubic 手法や SLIM/PDI 手法におけるモデリングでは、システムデザインに必要な情報、かつ要求変化に対する不変・可変の情報が明確に定義、モデリングできていないという課題がある。そのため、製品システムモデルを、設計の操作に合わせて大幅に見直し再モデリングする必要があり、効率良く設計することが難しい。

そこで、この課題を解決し、時々刻々と変化する要求に対応する効率の良い製品システムモデリング手法の検討を行った。

3. 製品システムモデリング手法の提案

3.1 新モデリング手法の考案

製品システムのアーキテクチャが変更されるような場合は、新たな製品システムとなり、新たにモデリングを行う必要がある。そのため、本論文では、アーキテクチャが変わらない範囲でのモデルの再利用性を高める製品システムモデリング手法を検討する。

まずシステムデザインに必要な情報を整理すると、システムをデザインすることから、“システム”と“デザイン”に関する情報に整理できるのではないかと考えた。“システム”は、要求からアーキテクチャまで密接に繋がった情報

で、対象システムの根幹を成す製品システムそのものの情報であると考えられる。“デザイン”は、その対象のシステムをどのような設計意図や設計根拠、設計条件で設計するのか、どのような手段でどのような順番で設計するのかという情報であると考えられる。つまり、製品システムのアーキテクチャが変更されない範囲では、“システム”の情報は不変の情報、“デザイン”の情報は可変の情報である。モデルの再利用性を高めるためには、不変・可変の情報を分けてモデリングする必要がある。

これらを考慮し、SDSI-Cubic 手法で扱う情報を検討し、整理してみた。SDSI-Cubic 手法は、Fig. 2 の (a) に示すように、製品システムの情報に設計空間（最適化問題の定義）の情報を加えた製品システムモデル（Fig. 1 の SysML モデル）を記述し、そのモデルを基に設計アルゴリズムを実行する。アルゴリズムは、設計タスク抽出、評価手法構築、設計ワークフロー構築、最適化実行という機能と、それらを連携するための各機能の入出力情報と実行手順で構成されている^{1),8)}。またそれらを実装した実行環境として、Fig. 2 の (b) に示すようなツールチェーンを構築し、最適化の自動実行を可能としている。これらは全てシステムデザインに必要な情報である。ところが、SDSI-Cubic 手法のモデリングを、“システム”という不変の情報と“デザイン”という可変の情報でとらえると、情報が混在し、不足している。すなわち、“システム”の情報に当てはまる製品システムという不変の情報と、“デザイン”の情報に当てはまる設計空間（最適化問題）という可変の情報が混在している（Fig. 2 の (a) のモデリング部分）。製品システムモデルの再利用性を高めるためには、これら不変・可変の情報を分ける必要がある。また、“デザイン”の情報に当てはまる実行するためのアルゴリズムやツールに関する可変の情報が、

Fig. 2 Summarization of information for system design

SDSI-Cubic 手法のモデリングでは不足している。したがって、これらの情報を追加する必要がある。

以上より、システムモデリングするための情報は、Fig. 2 の(c)に示すように、設計対象である製品システムの情報①と、設計空間・アルゴリズムの情報②（設計空間の情報②-1 と設計を実行するためのアルゴリズム②-2 との情報から成る）と、設計環境の情報③（設計を実行するためのツールに関する情報）の三つに分類・整理できる。

そこで、システムデザインを行うための新たなシステムモデリング手法として、製品システムの情報①、設計空間・アルゴリズムの情報②、設計環境の情報③に整理しモデリングする、製品システムモデリング手法を提案した。そこでまず各情報の詳細について、以下に述べる。

- 1) 製品システムの情報は、次の関心事をとらえる。要求、機能・振る舞い（論理アーキテクチャ）、それらを実現する方式やシステム構成（物理アーキテクチャ）である。これらは、再利用が可能な情報としてとらえることができる。方式やシステム構成の変更を伴わない改良設計においては変化しない不変の情報と考えられるためである。
- 2) 設計空間・アルゴリズムの情報は、設計手法の関係情報に集約される。その中で、設計空間の情報は、次の関心事をとらえる。設計空間に係る要求（設計目的や設計意図の根拠）、それらの要求から詳細化した具体的なシステム構造（形状や材料などの情報も含む）、具体的なシステム構造に関する制約関係、最適化問題である。アルゴリズムの情報は、次の関心事をとらえる。評価・最適化アルゴリズム（評価、最適化を行うツールの構成や実行順序）である。これらは、いつでも取り換えられるよう（汎用的）にすることが必要である。その時々設計に応じて変化する可変の情報と考えられるためである。
- 3) 設計環境の情報は、次の関心事をとらえる。各種の設計環境用の（モデリング、最適化や評価といった設計を実行する CAD や CAE など合った）システム構造、設計環境用のシステム構造に関するパラメータ・制約関係である。これらも、いつでも取り換えられる汎用性を持たせることが必要である。その時々設計を行うための設計環境に応じて変化する可変の情報と考えられるためである。

次に、これらの情報に基づいて、Fig. 3 に示したシステ

ムモデリングするためのモデル構造を提案した。すなわち、前述の四つの情報に対応して、製品システムモデル、設計空間・アルゴリズムモデル、設計環境モデルから成る新たなモデル構造である。定義した各モデルについて以下に述べる。これらのモデルは、SysML を用いて表現する。また SysML を用いることで、各モデル間の関連情報を明確に定義することが可能である。

- 1) 製品システムモデルは、不変の製品システムの情報を記述したモデルである。要求、機能・振る舞い、システム構成、システム構成に関する制約関係を記述する。
- 2) 設計空間・アルゴリズムモデルは、可変の設計空間・アルゴリズムの情報を記述したモデルである。設計空間に依存する情報を記述した設計空間モデルと、設計を実行するアルゴリズムに依存する情報を記述したアルゴリズムモデルから成る。設計空間モデルは、設計目的や設計意図の根拠となる設計空間に係る要求、それらの要求から詳細化された形状や材料などの情報を含む具体的なシステム構造、具体的なシステム構造に関する制約関係、最適化問題を記述する。アルゴリズムモデルは、ツールの構成や実行順序といったアルゴリズムを記述する。
- 3) 設計環境モデルは、可変の設計環境の情報を記述したモデルである。ツール用のシステム構造やそれらに関するパラメータ、制約関係を記述する。

本提案のシステムモデリング手法は、独立した三つのモデルで定義するため、各モデルの変更を独立して、自由自在に変えることができる。つまり、再利用性や汎用性を確保することが可能である。このように新たなモデリング手法を提案できたので、次に各モデルを SysML でどのように記述すれば実行可能かについて検討を行ったので以下に述べる。

3.2 新モデリング手法の SysML 記述方法

本研究のシステムデザインは、SysML を用いたシステムデザイン手法をベースに検討してきたため、従来の SysML で記述できる部分はその記述方法に準じている。さらに SysML には、必要に応じてモデルの意味や表現を拡張するための機能が備わっている⁴⁾。これは、新たにプロファイルというものを定義することで、SysML に新たな概念を加え、拡張することができるものである。プロファイルとは、SysML のどの要素を拡張し、どのような意味を加える

Fig. 3 Proposal model

かといったモデルの概念をまとめ、記述したものである。本研究のモデリングでは、製品システムモデルは従来の SysML の記述方法に準じ、設計空間（最適化問題）モデル、設計環境 (CAD) モデルについては、それぞれ新たにプロファイルおよび記述方法を定義している。従来の SysML には、最適化問題や CAD の意味を持つ記述方法がないためである。また、アルゴリズムモデルについては、SDSI-Cubic 手法のアルゴリズムおよびそのモデル^{1),8)}を利用可能であることから、その詳細は割愛する。

3.2.1 製品システムモデルの記述方法

製品システムモデルは、製品システムの要求から論理・物理アーキテクチャを記述するものであり、従来の SysML の記述方法で記述が可能である。すなわち、Fig. 1 に示すような、要求は要求図、機能・振る舞いはユースケース図・アクティビティ図など、システム構成はブロック定義図、制約関係はパラメトリック図などを用いて記述する。これにより、要求を実現するための、機能・振る舞い（論理アーキテクチャ）、それらを実現する方式やシステム構成（物理アーキテクチャ）を記述でき、製品システムのアーキテクチャ、つまり製品システムモデルを記述することがで

きる。具体例は4章で述べるが、製品システムのアーキテクチャが変更されない場合は、これらを記述し直す必要はなく、製品システムモデルは不変のモデルとして再利用が可能である。これまでとの大きな違いは、可変の情報となる拡張部分 (Fig. 1 の Extension 部分) のような記述をしないことである。

3.2.2 設計空間モデルの記述方法

従来の SysML では、設計空間モデルを明確に記述することはできない。そこで、設計空間モデルである最適化問題を記述するために、最適化問題の構成要素の意味を追加する新たなプロファイルを定義し、記述できるようにした。Fig. 4 は、SysML の拡張機能である記述方法に基づいて、新たに定義したプロファイル結果 (class Optimization) である。以下に詳細を述べる。

SysML でプロファイルを定義するためには、最適化問題の構成要素を抽象化し、それら各構成要素間の関係を明確にする必要がある。一般的に最適化問題とは、目的関数、設計変数、制約条件から構成される⁹⁾ため、これらを表現するための要素 (SysML ではステレオタイプと表現) を定義していく。目的関数は、最大化や最小化といった最適化

Fig. 4 A profile for the design space model

の方向や目標値を持つため、最適化の評価基準を示す目的関数パラメータ (Fig. 4 の (a) ObjFuncParam) という要素を定義する。また「関数」は何らかのパラメータを持つため、一般的な要素として初期値を示すパラメータ (Fig. 4 の (b) Parameter) を定義する。さらに制約条件を持つパラメータである設計変数 (Fig. 4 の (c) DesignVariable) を定義する。制約条件は、関数や設計変数を構成し、上下限值や離散値を示す要素 (Fig. 4 の (d) ConstraintCondition) を定義する。このように、最適化に必要な構成要素とそれらの関係を定義することで、SysML で最適化問題を記述できるようになる。

そこで、放射線計測システムにおける最適化問題を例に、Fig. 4 のプロファイルを用いて具体的な提案モデルである設計空間モデルを記述した例を Fig. 5 (右側) に示す。Fig. 5 (左側) は製品システムモデルで、この最適化問題に関係する部位のみを抽出して示している。また、モデルの要素間の関係を記述し、モデル間を汎用的に繋ぐプラグインの部分 (Fig. 5 の Plug-in part) も示している。さらに、Fig. 4 の (a)~(d) のステレオタイプを用いている様子を、Fig. 5 の各モデル要素にそれぞれ (a)~(d) を付与し示している。放射線計測システムには、多数の相反する設計項目があり、その中でも計測センサ部分の設計がシステムの支配的な相反問題となる。そのため、センサに求められる高感度で低コストを実現するための最適化問題をここでは記述している。具体的には、目的関数を記述するために、目的関数パラメータ (Fig. 4 の (a) ObjFuncParam) というステレオタイプを用いて、Fig. 5 の (a) SDSI-C_param を定義している。これにより Fig. 5 の (a) SDSI-C_param というモデル要素は、最適化問題の目的関数パラメータであるという意

味を持ち、かつ目的関数パラメータに必要な評価基準などを記述することが可能である。同様に、Fig. 4 の (b)~(d) のステレオタイプを用いて、放射線計測システムの最適化問題に関係するモデル要素を記述できる。

従来の SDSI-Cubic 手法では、最適化問題の意味や情報を持つモデルが製品システムモデル内に混在していた。これに対し、新たなプロファイルを用いて、設計空間モデル内に最適化問題に必要な情報を明確に可視化して記述でき、製品システムモデルと設計空間モデルとを独立して記述できている。具体的には、パラメータの関係および制約式は製品システムモデル内に、最適化をするためのパラメータ情報は設計空間モデル内に記述できている。つまり、最適化条件を変更する場合には、右側の設計空間モデルを変更するのみである。したがって、最適化問題の変更に合わせて製品システムモデルを変更する必要はなく、製品システムモデルを再利用することが可能である。

3.2.3 設計環境モデルの記述方法

同様にして、CAD などの設計ツールを用いるための設計環境モデルの記述方法について検討した。ここでは、設計環境モデルの記述例を示し、概略のみを述べる。設計空間モデルと同様で、従来の SysML では CAD や CAE といった設計ツールに合ったモデルをそのまま記述することはできないため、新しいプロファイルを定義する必要がある。本研究では、放射線計測システムの設計に適したオープンソースの CAD ツール (Geant4)¹⁰⁾ を用いるための新たなプロファイルを定義した。そのプロファイルを用いて、設計環境モデルである CAD モデルを記述したものが Fig. 6 の右側である。また、これに関係する製品システムモデル (Fig. 6 左側) と設計空間モデル (Fig. 6 中央) も示している。

Fig. 5 Example of describing proposal model

Fig. 6 Example of describing proposal model

設計環境モデルは、設計を実行するためのツールに合った情報を記述するモデルである。これは、製品システムモデル、またその具体的な設計案を記述した設計空間モデルの情報と関係する。Fig. 6では、Detectorの部分を示しているが、製品システムモデル (Fig. 6左側) には、Detectorというシステムの構成要素が記述される。設計空間モデルは、どのような形状で実現するかといった設計案 (直方体や円柱といった一般的な形状) を記述するため、設計環境によらない形状に関する情報が記述される。Detectorという製品システムモデルに対し、設計空間モデル (Fig. 6中央) には、縦 (DetectorHeight)、横 (DetectorWidth)、奥行 (DetectorDepth) というパラメータを持つ箱型 (Box shape) を記述し、具体的な設計案の形状を記述している。設計空間モデルで記述された形状情報は、設計環境によらない記述であり、そのままの情報ではCADツールでモデル化することができない。そのため、設計環境に適したCADモデルの定義情報に変換する必要がある。そこで、設計環境モデル (Fig. 6右側) に、本研究で定義したプロファイルを用いて、各モデル要素にCADにおける寸法情報といった意味を持たせ、CADツール (Geant4) に適した情報を記述している。

このように、製品システムモデル、設計空間モデルが独立して記述できたのと同様に、設計環境モデルも独立して

記述することが可能である。設計環境が変更された場合、設計環境モデルだけを変更すればよいため、製品システムモデルおよび設計空間モデルには影響が及ばず、再利用性を保つことができる。

以上により、製品システムモデルの再利用性と最適化を行うための各種ツール連携性を高める新しいモデリング手法を構築した。これを放射線計測システムに適用し有効性を確認したので、以下に述べる。

4. 放射線計測システムへの適用

これまで、従来のモデリング手法を用いて Fig. 1のようにシステム定義した放射線計測システムを対象として、高感度・低コストで持ち運び可能な放射線計測システムの最適なシステムデザインを実施してきた²⁾。ところが、ユーザの要求が変更となった際、製品システムモデルへの変更が各所に波及し、場合によっては製品システムモデリングをやり直す必要が生じる。すなわち、本研究で示した課題が浮き彫りになり、本モデリング手法を研究するきっかけの一つになったものである。そこで、ここではこの要求変更に伴う再利用性の問題に適用して、本提案のモデリング手法と従来手法の結果を比較しながら、有効性の検討を試みた。

Table 1は、新しい放射線計測システムに対して、従来シ

Table 1. Requirement comparison of Ver. 1 and 2

	Radiation measurement system	Ambient dose measurement	Radioactivity concentration measurement	High sensitivity	Low detection limit	High energy resolution	Low cost	Light-weight	Small size	Short measurement time
Ver. 1	Conventional system	✓	✓	✓	≤50 Bq/kg	≤10%	≤200,000 yen	≤10 kg	✓	≤60 min
Ver. 2	New system	—	✓	—	≤50 Bq/kg	≤10%	≤187,000 yen	≤10 kg	✓	≤30 min

Fig. 7 Comparing example of the models (ver. 1/2) using a conventional modeling

システムとの要求比較の一例を示したものである。主要な違いは、空間放射線量 ($\mu\text{Sv/h}$)、放射能濃度 (Bq/kg) の両方が計測できるシステムに対して、放射能濃度のみを短時間で計測でき、かつ低コストなシステムにすることである。この単純な要求変更に対しても、最適なシステムデザインを行うためには、ほとんど全ての構成要素が関わってくる。そのため、これまでのモデリング手法では、設計対象が変わらなくても製品システムモデルを変更する必要がある。新しいモデリング手法では、この変更をしなくてもシステムデザインができるはずであり、以下その検討を行った。

本放射線計測システムの最適なシステムデザインを行うにあたり、その目的関数 $SDSI_C$ は下式で表され、多目的最適解を求めることになる。

$$SDSI_C = \frac{1}{DL \cdot ER \cdot C \cdot W \cdot S \cdot MT} \quad (1)$$

ここで、 $SDSI_C$ は評価値で、最大化の方向である。また、 DL は検出限界値、 ER はエネルギー分解能値、 C はコスト値、 W は重量値、 S は筐体サイズ値、 MT は計測時間値であり、前報²⁾ のシステムデザインで定義した項目（複雑な関数を含む）と同じである。

要求変更した新しい放射線計測システムに対して、最適なシステムデザインを実行するため、これまでのモデリング方法で製品システムモデルを SysML で記述したのが Fig. 7 である。ここでは全てを示すことが難しいため、検出限界 (DetectionLimit)、すなわちどこまで微量な放射能を検出できるのかに注目した部分のみを示している。最適化問題の定義部分において、検出限界 (DetectionLimit) に着目すると、感度や計測時間などが関わってくるため、これに関する全ての記述変更を行う必要がある (Fig. 7 の灰色の円で示した部分が各変更箇所)。例えば、短時間計測のために計

測時間の最大値を 60 分から 30 分に変更が必要であり, Fig. 7 の (a) MeasurementTime 要素内を持つ最大値“60”という情報を特定し, Fig. 7 の (a') MeasurementTime 要素内の情報のように最大値“30”に変更している。また低コスト化のためにコストの最大値を 200,000 円から 187,000 円に変更が必要であり, Fig. 7 の (b) Cost 要素内の情報(最大値“200000”)を特定し, Fig. 7 の (b') 要素内の情報(最大値“187000”)のように変更している。さらに, 感度は目的関数ではなくなったため, Fig. 7 の (c) Sensitivity という目的関数の要素から, Fig. 7 の (c') Sensitivity という初期値をもつ一般的なパラメータの要素に変更している。

Fig. 7 では要素内の情報を見えやすく出しているが, これらは要素の中に格納されている情報であり, 中身を調べてわかる情報である。この例でもわかるように, 単純な要

求変更に対しても, 製品システムモデル内の各要素が持つ最適化問題の定義情報を探索, 変更箇所を特定する必要がある。しかし, 要素内を持つ情報は一目で理解しにくく, 一つ一つ特定と変更を行うことは, 非常に複雑で困難である。また, 最適化問題の変更で, 製品システムモデルの要素や要素が持つ情報を変更するということは, 製品システムモデルそのものが変更されてしまっているということである。

これに対して, 本モデリング手法で同じ放射線計測システムを定義し, 記述したのが Fig. 8 である。製品システムモデル, 設計空間(最適化問題)モデル, 設計環境モデルを独立して定義, 記述できている。また, 各モデルで記述する情報を明確に定義したことで, モデル間を繋ぐプラグインの部分 (Fig. 8 の Plug-in part) を介して, 各モデル内

Fig. 8 Comparing example of the models (ver. 1/2) using the proposal modeling

の要素と他のモデル内の要素との関連 (Fig. 8 では、製品システムモデル内の要素と設計空間モデル内の要素との関連) を記述することができている。つまり、各モデルを独立かつ関連付けて記述することができている。Fig. 7 で示したのと同じ内容の設計変更であるが、Fig. 8 に示すように、製品システムモデルはそのまま同じモデルを再利用し、設計空間モデルのみを変更できている (Fig. 8 の灰色の円で示した部分が各変更箇所)。具体的には、Fig. 8 の (a) から (a'), (b) から (b') で示した箇所のように、設計空間モデル内の要素が持つ情報のみを変更できている。従来手法と比べてその情報が可視化されているため、特定と変更が容易である。また、パラメータに記述すべき項目はプロファイルで定義できているため、Fig. 8 の (c) から (c') で示した箇所 (目的関数からパラメータに要素を変更) のように、要素そのものを変更する場合も容易である。加えて、設計空間モデル内の要素そのものが変更されても、その要素から製品システムモデル内のプラグイン部分 (Fig. 8 の Plug-in part) の要素への関連付けをし直すだけであり、製品システムモデル内の要素は変更されない。

このように、本システムモデリング手法を用いることで、要求変更に対して、設計空間モデルに記述された最適化問題の定義情報の変更箇所を、容易に特定、変更できた。そして、設計空間モデルのみを変更し、製品システムモデルはそのまま再利用できた。

そこで、再利用性を確保した新しいシステムモデリングで、システムデザインを実行し、最適解を求めた。実行のアルゴリズムは SDSI-Cubic 手法と同じものを用いているので、従来と同様に最適解が導出できることを確認した。得

られた多目的最適のパレート解を示したのが Fig. 9 である。ここでは、検出限界、コスト、計測時間を軸に示したパレート解と目的関数 $SDSI_C$ 評価値との関係を示している。 $SDSI_C$ 評価値が最大となる解 ($SDSI_C$ Max) は、検出限界：約 49 Bq/kg、エネルギー分解能：約 8%，コスト：約 176,000 円、重量：約 9.5 kg、筐体サイズ：約 4,700 cm³、計測時間：約 12 分であった。その時の設計変数の値は、シンチレータサイズ：41 mm × 52 mm × 20 mm、遮蔽材 Pb 厚さ：9 mm、試料容器サイズ：120 mmφ × 32 mm であり、従来と比較して妥当な解を得ることができた。

以上、放射線計測システムに対し、本論文で提案したモデリング手法を適用した結果、製品システムモデルと設計空間モデルを分割して記述することができた。すなわち、設計空間、ここでは最適化問題の情報が混在していない製品システムモデルを記述することができた。さらに、本適用例においても、従来のモデリング手法では製品システムモデルを再利用できないことは明らかである。この課題に対して、本提案のモデリング手法を適用することで、今回の設計問題を定義すると同時に、以前行ったシステムデザインの製品システムモデルを完全に再利用でき、再利用性が向上したと言える。

本報告の適用例では、放射線計測システムの改良設計という点に着目した。製品システムモデルと設計空間モデルの変更、再利用性の比較および有効性を示したが、アルゴリズムモデル、設計環境モデルも同様に独立して変更が可能である。すなわち、不変・可変の情報を分けてモデリングでき、製品システムモデルの再利用性の確保と各種ツール連携を可能とする、効率良くシステムデザインができる可能性を明らかにしたものである。このようにして、新たなシステムモデリング手法を用いることで、再利用性とツール連携の課題を解決し、益々複雑化する製品システムを、コンピュータ上で効率良く設計することが可能であると思われる。

5. 結 言

複雑かつ要求が変化する製品システムを効率良く設計するため、製品システムモデルの再利用性と各種設計ツールの連携性を高めることを目的に、新たな製品システムモデリング手法を提案した。これを放射線計測システムに適用し、システムデザインを行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 従来の SDSI-Cubic 手法のモデリングでは、システムデザインに必要な不変・可変の情報が明確に定義できていないことを明らかにした。
- (2) 製品システムモデルの再利用と各種ツール連携を可能とするシステムデザインに必要な情報は、以下のように分解・整理できることを見出した。ただし、製品システムのアーキテクチャ (機能、方式やシス

Fig. 9 Optimization results

テム構成といった基本的な設計思想)が変わらない場合である。

(ア) 設計対象となる製品システムの不変の情報

(製品システムのモデル)

(イ) どのような意図や条件で設計するのかという可変の情報

(設計空間と設計アルゴリズムのモデル)

(ウ) 設計を実行するための各種ツール(最適化やCAD/CAEなど)の可変の情報

(設計環境のモデル)

- (3) この分解情報を、製品システムモデル、設計空間モデル、アルゴリズムモデル、設計環境モデルというモデルで表現し、モデル毎に定義した各プロファイルを用いて記述することとした。すなわち、これらのモデルを独立かつ関連付けて記述するという一貫した思想に基づく新たなモデリング手法を提案した。
- (4) 提案したモデリング手法を放射線計測システムのシステムデザインに適用した。その結果、製品システムモデルを再利用することができた。また、新たな最適設計解を導出することができ、本手法の適用性を明らかにすることができた。

本研究は、放射線計測システムの例で、かつ限られた問題に対しての適用性を明らかにしたものである。今後、各種の製品システムに展開して本システムモデリング手法の汎用性を明らかにし、広く社会に貢献していく所存である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、日本学術振興会177委員会、新日本電工株式会社および浜松ホトニクス株式会社の方々に御協力頂きましたことを、ここに深く御礼申し上げます。また、本研究の一部は、科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発事業の助成を受けて行ったものであり、関係者の方々に深く御礼申し上げます。

(2017.8.20-受理)

文 献

- 1) 村田秀則, 岩田剛治, 多屋淳志, 佐藤了平, 森永英二, 岡本和也, 工藤啓治, 青山和浩, 古賀 毅: “システムデザイン手法SDSI-Cubicを用いたシステムLSIの適性設計,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **17**, No. 7, pp. 529–541, 2014
- 2) K. Kawamura, H. Murata, Y. Iwata, R. Satoh, and K. Okamoto:

“Practical Optimization Flow using a New System Design Methodology,” Journal of Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. **8**, No. 1, pp. 118–126, 2015

- 3) L. Balmelli: “An Overview of the Systems Modeling Language for Products and Systems Development,” Journal of Object Technology, Vol. **6**, No. 6, pp. 149–177, 2007
- 4) 西村秀和 監訳: “システムズモデリング言語 SysML,” 東京電機大学出版局, 2012
- 5) M. Bajaj, D. Zwemer, R. Peak, A. Phung, A. Scott, and M. Wilson: “Satellites to Supply Chains, Energy to Finance – SLIM for Model-Based Systems Engineering,” INCOSE International Symposium, Vol. **21**, No. 1, pp. 368–394, 2011
- 6) A. Reichwein: “Application-specific UML Profiles for Multidisciplinary Product Data Integration,” Institute of Statics and Dynamics of Aerospace Structures, Universität Stuttgart, 2011
- 7) C. W. Dankwort, R. Weidlich, B. Guenther, and J. E. Blaurock: “Engineers’ CAX education - it’s not only CAD,” Computer-Aided Design, Vol. **36**, No. 14, pp. 1439–1450, 2004
- 8) 村田秀則, 岩田剛治, 佐藤了平, 森永英二, 岡本和也, 青山和浩, 古賀 毅: “システム定義手法を用いたシステムデザインにおける自動最適化アルゴリズムに関する研究,” スマートプロセス学会誌, Vol. **3**, No. 1, pp. 67–75, 2014
- 9) 天谷賢治: “工学のための最適化手法入門,” 数理工学社, 2008
- 10) J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce Dubois, M. Asai, G. Barrand, R. Capra, S. Chauvie, R. Chytrcek, G. A. P. Cirrone, G. Cooperman, G. Cosmo, G. Cuttone, G. G. Daquino, M. Donszelmann, M. Dressel, G. Folger, F. Foppiano, J. Generowicz, V. Grichine, S. Guatelli, P. Gumplinger, A. Heikkinen, I. Hrivnacova, A. Howard, S. Incerti, V. Ivanchenko, T. Johnson, F. Jones, T. Koi, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, V. Lara, S. Larsson, F. Lei, O. Link, F. Longo, M. Maire, A. Mantero, B. Mascialino, I. McLaren, P. Mendez Lorenzo, K. Minamimoto, K. Murakami, P. Nieminen, L. Pandola, S. Parlati, L. Peralta, J. Perl, A. Pfeiffer, M. G. Pia, A. Ribon, P. Rodrigues, G. Russo, S. Sadilov, G. Santin, T. Sasaki, D. Smith, N. Starkov, S. Tanaka, E. Tcherniaev, B. Tome, A. Trindade, P. Truscott, L. Urban, M. Verderi, A. Walkden, J. P. Wellisch, D. C. Williams, D. Wright, and H. Yoshida: “Geant4 Developments and Applications,” IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. **53**, No. 1, pp. 270–278, 2006

河村 憲 (かわむら けん)

2014年 大阪大学・工学研究科・博士前期課程修了, 2017年 大阪大学・工学研究科・博士後期課程単位取得退学。放射線計測システムの開発・製品化, 製品システムのモデリング・システムデザイン手法の研究に従事。2017年よりダッソー・システムズ(株)にて, MBSE/MBD領域のコンサルティング・ソフト販売に従事。

村田秀則 (むらた ひでのり)

2015年 大阪大学・工学研究科・博士後期課程修了。大規模システムのシステムデザイン手法の研究に従事。2017年より同大工学研究科助教。ライフサイクル工学とシステムデザインを融合した研究に従事。

坂本武志 (さかもと たけし)

1994年千葉大学大学院工学研究科修了。産業用ロボットメーカー, 医療系ソフトウェア開発会社などを経て, 2011年に(株)グローバルアシストを設立。現在に至る。組込分野における開発方法論策定, アーキテクチャのモデリングや各種開発ツールの開発に従事。芝浦工業大学非常勤講師, 名城大学非常勤講師, OMG Robotics DTFのメンバー。

佐藤了平 (さとう りょうへい)

1973年 北大・工院修了。1988年 工博(北大)。1973年 (株)日立入社, 大型計算機用高密度実装技術, プラズマディスプレイ研究開発・事業化に従事。2001年 大阪大学教授。システムデザイン, ナノエレクトロニクス関連の教育と研究に従事。2013年 大阪大学名誉教授・特任教授, 京都工芸繊維大学非常勤講師。

岩田剛治 (いわた よしはる)

1994年大阪大学・工・博士後期課程了。1994年より大阪大学工学研究科生産科学助手。2002年より同大先端科学イノベーションセンター助手。2007年より同センター准教授。2011年より同大工学研究科准教授。現在電子システムのシステムデザイン・インテグレーションの研究に従事。

荒井栄司 (あらい えいじ)

1975年 東京大学工学部精密機械工学科卒業。1977年 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専門課程修士課程修了。1980年 同博士課程修了。工学博士。同年 神戸大学助手。1984年 静岡大学助教授。1992年 東京都立大学助教授。1995年 大阪大学工学部教授。現在, 同大学院工学研究科教授。機械設計の次世代CAD/CAMの研究に従事。

岡本和也 (おかもと かずや)

1982年東京大学大学院了, (株)ニコン入社。同社開発部門長として, 先端半導体の要素技術開発および製造・計測装置の製品開発に従事。米ハーバード大学経営大学院了。2005年大阪大学客員教授, 2015年大阪大学招聘教授, 東京大学非常勤講師, 2016年山口大学大学院技術経営研究科教授, 2017年同 副研究科長・教授。エレクトロニクス実装学会 ME フェロー。工博(東大)。