製品の論理構造を基にした製品要求のモデリング* (SysMLを利用した機械・回路・ソフト複合製品のモデル駆動型設計支援)

後 藤 禎^{*1}, 江 口 隆 夫^{*1}
古 賀 毅^{*2}, 青 山 和 浩^{*2}

Modeling for Product Requirements Based on Logical Structure of Product (Model-Driven Development Method for Mechanical/Electrical/Soft Integrated Products Using SysML)

Tadashi GOTOH^{*3}, Takao EGUCHI,
Tsuyoshi KOGA and Kazuhiro AOYAMA

^{*3} IBM Japan, Ltd.,
19-21 Nihonbashi Hakozaki-cho, Chuo-ku, Tokyo, 103-8510 Japan

For the development of high-functional and complex mechatronics products, it is becoming necessary to manage the design process considering multi-domains such as electrical, mechanical and software specialties. However, at present, in the process of embedded software development, the software developers often have to spend their time and efforts by wasteful and unnecessary design iterations because that they don't understand the original requirements and previous designing intentions exactly. The authors predict that the mechanical designers in previous processes, don't describe the reasons, how to analyze and why to adoption technologies insufficiently. In this paper, the authors propose that the requirement model should be introduced in development process, because all designers can understand "what to make" precisely. In reference of the studies of various requirement definitions, especially object-oriented approach, the authors studied that the procedure of description in the requirement model, which is suitable for the development of high-functional and complex mechatronics products. An intelligent crane system is designed as an example to examine the possibilities of description using SysML. In conclusion, proposed requirement model is confirmed that it can surely describe the product requirement of the mechatronics product.

Key Words: SysML, Design Process, Model-Driven Development, Requirement Engineering

1. 結 言

1・1 複合型の製品開発での要求定義の重要性

近年、自動車、事務機器、家電などの製品において、高機能化が進展している。これに伴い、機械、電子回路、ソフトなどが密接にかかわる複合型の製品（メカトロ製品、本稿では複合製品と呼ぶ）が増加している。この複合製品の特徴は、顧客の満足度を高めるために、繊細な動きや横断的な統合制御などを要求されることが多いことである。複合製品の設計品質を高めるためには、システムレベルの構想設計段階において設定された要求内容が、詳細設計に十分伝達されるとともに、設計の影響が及ぶ範囲・領域で、互いに連携しながら要求を実現する、という設計が求められる。

このような複合製品を開発する際には、お互いが異領域となる機械、電子回路、組込みソフトの設計において、特に上流の要求を正確に伝達し、反映させる必

要がある。現状では、領域間において情報が十分に伝達されないために、各工程の設計意図を把握することが困難となり、開発の後半やテストフェーズにおいて、手戻りが発生する要因となっている。また、設計変更においても、変更が及ぼす影響の範囲が不明確であるため、真に求められる変更ではなく、その場しのぎの対策を行ったり、思わぬ部位に影響が及び不具合の要因となったりする、といった問題が発生している。

今後ますます製品が高機能化し、複雑なシステムとなるに伴い、機械・電子回路・ソフトの設計を深く融合させた開発が必要不可欠となることが予測される。この対応としては、高機能化した製品に対する要求を、開発プロジェクトに参画するメンバー全員が正確に把握でき、要求から設計への展開と追跡を容易とする設計開発環境を提供することが重要である。

1・2 要求把握の現状と課題

高機能化された製品の要求を、的確に把握する課題に対して、これまで多くの研究が取り組まれ、その解決方法が提案されてきた。例えば、機械設計においては、製品を機能や仕様で捉えて展開する VE (Value Engineering) ⁽¹⁾⁽²⁾

* 原稿受付 2010年3月31日。

^{*1} 正員, 日本アイ・ピー・エム(株) (〒103-8510 東京都中央区日本橋箱崎町19-21)。

^{*2} 正員, 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。

E-mail: tgotoh@jp.ibm.com

や、顧客の声を技術の声に展開する QFD (Quality Function Deployment) ⁽⁹⁾⁽⁴⁾ が活用されている。また一方で、ソフトウェア開発においては、UML (Unified Modeling Language) ⁽⁵⁾ に代表されるように、オブジェクト指向分析技術を用い、オブジェクトの構造・機能・事態(事象と状態)をモデリングする手法が提案され、分析や設計に活用されている。しかしながら、機械設計では、このようなオブジェクト指向の分析設計アプローチは浸透していない。このため、複合製品の要求を明示的に記述する手法は、要望されているものの、実用化に至っていない状況にある。

筆者らは、開発コンサルティングなどの業務を通じて、多忙な設計者が頭の中で検討したことを、明示化しないままに成果物となる図面やモデル・回路やソフトウェアを作成している、という状況も存在することを確認している。「何を作れば良いのか (What)」という要求情報と、「どの様に作るのか (How)」という手段の情報を、分離・整理しないまま設計を進めた場合には、設計根拠を正しく共有し、伝達するのは困難となる。製品機能が単純である場合や、関与する設計者が同じ専門領域である場合は、設計意図を識別することは比較的容易である。しかし、複合製品に代表されるような、多機能で複雑な製品システムが設計の対象である場合は、エレ/メカ/ソフトの異なる専門領域が存在することが多く、製品の設計意図を包括的に理解することは困難である、という問題が存在する。

1・3 研究の目的：要求モデルの提案 上記の問題点に対し筆者らは、設計の上流から下流まで、複雑な複合製品の開発管理を可能とするための、製品情報モデルの研究に取り組んでいる⁽⁶⁾。製品情報モデルは、要求の情報 (What) を管理する要求モデルと、手段の情報 (How) を管理する論理モデルから構成される。特に本研究では、複合製品に対する要求情報を表現することが可能な、要求モデルを提案する。全体構想を考える構想設計段階で「What」を明確にする要求モデルを作成することで、開発プロジェクトに参画するメンバーが本来の要求を知ることができ、さらにメカ/エレ/ソフトに分かれて具体的な設計を行う詳細設計段階において、要求が十分に伝達されることで、前工程の設計意図を正確に把握する上で役に立つことが期待される。

この要求モデルの備えるべき要件を、要求把握における課題と照らし合わせて論じ、その表現要素と記述方法を明確にする。本研究では、この表現要素を、オブジェクト指向の考え方を取り入れた四つの要素 (振舞、構造、制約/技術仕様、要求品質) で構成し、要求

モデルの階層化、展開、段階的詳細化を行い、要求モデルを構築することを提案する。最後にインテリジェント・クレーンのモデルを具体例として選定し、SysMLでの表記例を述べる。

2. 要求モデルに対する必要要件の整理

前章では、複合製品に対する要求を正確に把握し記述することは、非常に困難であると述べた。本章では、この要求把握の困難性に対する原因・問題を分析することで、以下1) - 5) に示す要求モデルに必要な要件として整理する。

要件1) 要求や設計意図を記述する体系的な方法 機械設計では、三次元 CAD や図面を活用して、正確に製品形状を表現し、伝達する方法が確立している。しかし、形状情報は設計の結果であり、製品に対する要求や設計意図は記述されていないといった課題が指摘される⁽⁷⁾。したがって、要求や設計意図を体系的に記述することができる方法が望まれる。ここで、同じ要求であれば同じ記述方法によって記述されることが必要であり、表現要素と対応する記述方法を、明確に定義することが肝要である。

要件2) 製品全体の記述の十分性 様々な技術資料として情報化されている内容は、その設計領域において重要な方式や実装方法に依存した形式で表現されている場合がある。このため、製品全体の振る舞いに関する情報などといったように、設計領域をまたぐ情報が欠落する場合がある。例えば、機械設計者は、電装 (回路・ソフト) 担当者に、その製品の動きに関する情報をポンチ絵やタイミングチャートなどで記述するが、共通の形式で表現しない場合もあり、網羅性が損なわれる場合もある。さらに、その製品を構成する部品・コンポーネントが何であり、設計対象は何か、等の記述も不十分である場合も存在する。

以上の現状の課題から、要求モデルは、製品全体を可能な限り十分に記述可能とするモデルであることが要望される。特に高機能化した複合製品では、要求モデルで表現すべき要素は多領域に跨るため、その記述を可能にするためのモデルの構造化や分類・整理方法が必要である。

要件3) 全工程で統一した要求の記述方法 機械設計で用いる要求の記述は、回路・ソフトウェア技術者に理解されにくい、という問題が存在する。例えば、機械設計では、機能表現を名詞もしくは目的語+動詞の簡潔な表現⁽⁸⁾にとどめ、仕様およびその仕様値を中心に説明する傾向が強い。一方、回路設計・ソフト設計者は、フローチャートのような、処理の流れに沿った

要求の記述を用いている。そのため、製品の状態やアクションなど振舞にかかわる要求の分析が必須となる。理解の相違の一因として、連続と離散の相違、つまり機械部品の設計・評価においては制約や技術仕様などの連続的な情報が必要とされるのに対し、ソフトウェアの実装・テストにおいては、状態や振舞といった離散的な情報が必要となる、という相違が考えられる。各領域で適した要求の表現方法に相違が存在することにより、コミュニケーションの障害を招き、各設計要素の関係付けが困難な状況を派生している。

このような課題から要求モデルは、各工程で理解されやすい表現が可能なモデルであることが要望される。具体的には、機械設計者に理解されやすい制約・技術仕様の記述、回路・ソフトウェア設計者に理解されやすい振舞の記述などが、統合的に扱われるモデルであることが要望される。

要件4) 定義した要求情報の利用価値の向上 機械設計において明確に要求が定義されることは、その後工程となる回路・ソフトウェア設計において有効である。しかしながら、機械設計者にとっては、要求に関する情報の再利用性が低い場合がある。機械設計者は、要求を定義する手間の増加に懸念を抱き、要求の定義の必要性に対して疑問視することも少なくない。

このような課題の認識から、要求モデルは、新しい製品設計での要求の再利用が可能であったり、設計変更時において要求の部分的な修正が容易であったりなど、再利用性が高いモデルであることが要望される。

要件5) 要求分析結果を管理・共有する環境 機械設計者は各ユニットの仕様や性能を表計算ソフトなどを用いて記述することも多いが、その結果を管理する環境が統一されておらず、十分に共有することができない。また、変更があった場合にその変更履歴を残す手段がなく、更新を忘れてしまうことも少なくない。このような課題から、要求モデルは、計算機内部で管理できる表現形式を有するモデルであることが要望される。開発プロジェクト内のメンバー間での共有や変更履歴を残す仕組みが必要であり、期待される。

3. 要求モデルにおける表現要素の定義

本研究では、前章で整理した要求モデルに対する要件を基に、要求を表現する要素として四つの要素:「振舞、構造、制約・技術仕様、および要求品質」と、それらの要素間に関連付ける関係によって要求モデルを表現することを提案する。表現要素を四つに分類・整理することにより、機械設計・回路設計・ソフトウェア設計者が理解し易い体系的な記述方法とすることを狙う。要求モデルの全体構成を、図1に示す。図1を用いて、要求モデルの各要素と、全体構成の対応を説明する。

3・1 振舞：製品機能の表現 製品に要求される機能を、振舞として定義する。要求モデルでの振舞は、状態とその遷移、および各状態に関連するアクションによって表現する。

Fig.1 Overview of Modeling Flow using SysML

(1) **機能の振舞表現** オブジェクト指向においては、オブジェクトの状態とその遷移を状態遷移図で記述する。機械設計においても、状態および状態遷移によって製品の機能を表現するモデルが提案されている。例えば、機械設計での機能表現には主観が混じってしまうという問題が存在するが、FBS モデルはその機能表現の主観性を除くために、機械製品の機能を振舞と状態として展開することによって客観性を向上させることを提案している⁽⁹⁾。さらに青山らは、製品の挙動をペトリネットの **Place** と **Transition** に対応させ、段階的詳細化に基づく機械システムの振舞の設計支援手法を提案している⁽¹⁰⁾。

本研究で提案する要求モデルでは、これらの表現方法に基づき、機械システムの挙動を状態とアクションの組合せで表現することを提案する。図1において、状態は **ST**、アクションは **AC** に該当する。

(2) **状態の構造化** 本研究では、想定する製品システムの挙動は、状態をシステムの状態から各コンポーネントの状態へと構造化することによって、要求を正確に表現できると考える。そのコンポーネントの状態は、その状態であるか、もしくはその補集合の状態であるかどうかである。状態を構造化することによって、要求モデルを用いた設計作業を状態別に進め、検討範囲の網羅性を高めることができる。図1において、状態 **ST** をコンポーネント **CP** に割り当てる操作が該当する。

3・2 構造：製品の構成情報の表現 要求される製品の内部構造を、階層化し表現する。また、その構造間を流れるもしくは共有される情報を表現する。

(1) **構造の表現方法** マイケル・ジャクソンは、記述モデル（分析モデル）ではなく、類似の特質を持った別の実体としてのモデルである類推モデルが、問題定義の領域には欠かせないと主張している⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。本研究では、要求モデルの定義に、ジャクソンの類推モデルを採用し、問題領域を表す全ての構造の要素（コンポーネントと呼ぶ）を階層化することを提案する。図1において、上位階層のコンポーネント **CP** を下位の **CP** に割り当てる操作が該当する。

(2) **構造がもつ属性情報の表現** 各コンポーネントには所属する、あるいは共有する情報が存在する。オブジェクト指向分析手法では、その情報を各コンポーネント、あるいは、そのコンポーネントに共通な上位コンポーネントの属性として定義を行う⁽⁶⁾。要求モデルに、この属性の表現方法を採用することによって、設計変更や機能向上に伴った新しい情報の流れの追加・更新が容易性を高めることが可能となる。図1に

おいて、コンポーネント **CP** が属性 **VL** を所有する、ということが該当する。

3・3 制約・技術仕様の表現 設計で満たすべき制約および技術仕様を、要求モデル上で陽に表現する。本研究では、設計において考慮が必要な制約式（不等号の関係）や、設計パラメータの論理式・計算式を、要求モデルにおける制約と定義する。技術仕様は、要求もしくは設計上必要な仕様や設計パラメータの名前とその仕様値で表される。制約において、この技術仕様と各コンポーネントがもつ属性の関係を定義する。これらの定義により、設計者が考慮する仕様値や、諸元の制約関係を、統一的な記述方法で表現することが可能になる。図1において、技術仕様は **ES**、制約は **Constraint Block** に該当する。

3・4 要求品質の表現 要求の中には、例えば「なめらかに」「重厚な」といったような、前述の振舞・構造および制約や技術仕様で表現できない品質的な要求も存在する。本研究では、その要求を要求品質と呼び、前述の制約とは別に、要求モデルの表現要素として定義する。要求品質は、**QFD** の要求品質⁽⁴⁾と同様に、副詞や形容詞を用いた品質的な要求として扱う。エレ・メカ・ソフトの要求品質は、モデル内で詳細化もしくは方式が決定される段階で、構造・振舞、制約もしくは技術仕様に対し、階層的に展開するものとする。階層記述によって、要求品質の展開の経緯を残し、その設計の意図を表現する。

3・5 各要素間の依存関係・対応関係の表現 上述の四つの要素は独立ではなく、相互に依存しあう情報である。このため、要求モデル内において関連付けを行い、エレ・メカ・ソフト設計間で関係性を認知する必要がある。要素間の対応関係や、設計意図により要素を展開する過程を表現するために、以下(1)(2)に示す二種類の関連付けを定義する。

(1) **表現要素間の構造・振舞・流れの関係** 表現要素同士の関係を定義する関係である。各表現要素間の関係は、上位・下位の階層関係（構造）と順序（振舞）、若しくは、情報の流れ等に定義され、表現要素間を結ぶ関係が何であるかを形式的に表現する。図1において、情報の流れは **OF** に該当する。

(2) **設計意図を基にした関係** 各表現要素が設計意図を基に展開されたことを、関連付けを用いて表現する関係である。表現形式としては、表現要素間、表現要素から上記(1)の関連付け、若しくは、表現要素と表現要素のネットワークなど、様々な組み合わせに対応した関連付けによって表現する。図1において、**ST** と **Activity Diagram** の関係が該当する。

Fig.2 Modeling Flow of Requirement Model

4. 要求モデル構造化のための各要素の記述方法

4・1 要求モデルの記述手順

前節では要求モデルの表現要素を纏めたが、その表現要素を用いて、要求モデルは大きく三つの手順で記述される。図2に概略手順を示し、次節に情報処理の詳細を述べる。

・**手順1：要求モデルの階層化 (Define Structure)** 製品システムを理解するための基盤となる階層を定義する。この階層は、エレ/メカ/ソフト設計者が専門領域および部門を超えて、理解できる階層を設定する。

・**手順2：要求文書等から要求モデルへの展開 (Deploy requirements)** 要求文書など、元の要求から四つの表現要素に整理・分類・展開しながら、階層化された適正なレイヤにそれぞれの要素を配置し記述する。このような一連の操作を伴った、元の要求から要求モデルへ記述することを、要求モデル展開と呼ぶことにする。

・**手順3：段階的詳細化 (Breakdown the elements)** 階層を基に、各表現要素を詳細化する。各階層で段階的に詳細化を行うことにより、製品全体の要求が要求モデルとして表現され、精緻化して記述される。

次節において、以上の三つの手順を詳細に論ずる。

4・2 要求モデルの階層化

単純な製品であれ

ば、その製品の要求は数も少ないため、対象とする部位を比較的簡単に把握することができる。しかし、自動車や高機能な電気製品など、多くの専門家および組織を横断し、ソフトウェア・アプリケーションが製品全体に価値を与えるような開発の場合は、要求は多数となり、対象部分が不明確になり把握することが困難になることが多い。

本研究では、周辺環境も含め、製品構造の階層を定義し、その階層にあわせて表現要素を展開していくことを提案する。この階層をコンポーネントレベルとよび、対象製品と周辺環境を表現する L0 からシステムの方式を前提にしたシステム要素を表現する L3 までの四つの階層に分け、各層の意味付けを行うことによって要求の構造を明確にする。この階層化の観点を表1に整理する。

(1) レベル0 (L0)：対象製品と周辺環境

L0 は、設計対象製品とその周辺環境を表現する階層である。高機能化製品では、周辺環境を意識した設計を行う必要性が増加している。例えば自動車開発においては、パーキング・アシスト機能やアダプティブ・クルーズコントロール機能などの運転支援機能は、運転者・同乗者・路面状況等のみならず、駐車位置や先行車などといった周辺環境を考慮する必要がある。

このように、設計で考慮すべき周辺環境の要素は、増加し多様化している。製品の要求を考える上で、どのような周辺環境の考慮対象が存在するかをレベル0において明らかにする。

(2) レベル1 (L1)：製品の主要機能と横断機能

L1 は、製品のもつ主要機能と横断機能を表現するレベルである。主要機能とは、対象製品に要求される本来の大きな機能の区分を意味する。この機能区分は、製品戦略・マーケティング・開発組織の構造から区分されたものであり、製品アーキテクチャを基にした管理や責任分担と一致させている場合が多い。

例えば、自動車会社では、シャシ系・ボディ系・エンジン系・ミッション系・電装系等という組織区分が存在するが、このような機能型組織は、自動車の主要機能を反映したものである。横断機能とは、これらの主要機能を横断するアプリケーション機能である。例えば、自動車の運転支援アプリケーションや事故防止アプリケーションは、先行車や車間距離など周辺環境にあわせて、操舵やギアチェンジおよびブレーキなど横断的に制御する。つまり自動車の主要機能を統合的に活用した横断機能である。このように L1 では、主要機能・横断機能によって、製品に要求される大きな機能区分を表現する。

Table 1 Structure of Requirement Model

	Component level	Definition	Example of vehicle
L0	Product and environments	Product itself and actors related high functional application	Vehicle, Driver, oncoming car pedestrian, and so on
L1	Functions and applications	fundamental "functions" and high valued "application"	Engine, Transmission, Driving support application, safety application, and so on
L2	Control system	Control system without owned components	ACC, STC, ABS, EPS and so on
L3	Components of system	Control system with owned and related components	Control unit, sensor, actuator, and so on

(3) レベル2, 3 (L2, L3) : システムとその構成要素 L2およびL3は, 製品のシステムとその構成要素を表現するレベルである。L1で表現された各主要機能・横断機能は, 複数のシステムから構成される。L2では, L1を構成するサブ・システムを, コンポーネントとして表現する。L3では, 要求機能を明確にするために, そのシステムの実現する方式を基に, 構成要素を記述する。

本研究では, L2およびL3における構成要素は, エレ・メカ・ソフトを分離しない形式で表現することを提案する。またL3で表現される実現方式は, そのシステムの要求を表現するための大きな区分の実現方式で記述することを提案する。例として, とあるシーケンス制御の機械において, 以前はリレー回路と電源回路の制御でシーケンス制御を行っていたが, 現在はラダー図を基にしたPLC制御を行う, という方式の変更を考える。本例の場合は, 要求モデルにおいて, 大きな方式を無視したシステム要素 (L2) のみで要求を表現しても, 要求の実現構造の相違が表現できないため, 正確な要求は記述できないと言える。ラダー制御を基にしたシステムの構成要素 (L3) で定義し, その構成要素を基にした要求を記述することが, 正確な要求モデルの定義には必要である。

4・3 要求文書等から要求モデルへの展開 開発の初期段階では, 多くの場合, 文書などで要求情報の記述を行っている。そこで, 要求文書等の各記述を出発点とし, 要求モデルに展開し定義する過程を, 定義された階層を基に, (1) - (4) に示す要素ごとに示す。

(1) 要求機能等から振舞への展開 通常, 設計者は, 要求文書に指定された要求機能を, 「どのようなとき」に「どういうことを実現する」という振舞分析から設計を行っていると推察される。そこで, 要求文書に記述されている要求機能を, 要求モデルの振舞へと展開することで, 要求モデルに記述する。本研究では, この要求機能を「状態」として分類定義することを提案する。

製品全体をシステムとして, 要求機能を整理するためには, 積極的に状態を設定し, その状態に振舞を定義することで, 分かり易い要求モデルにすることができる。例えば, エンジンの制御では, リーン制御, EGR制御に代表されるように, 主な機能を「制御」という名前前で表現している。この制御は, エンジンの状態と理解すれば, 機能を状態で表現することが可能であると言える。各状態で振舞を定義・記述することにより, 理解しやすい機能の分類が可能となる。なお, 状態に

配置された「どのようなことを実現する」という動的な振舞のことを, 「アクション」と定義する。アクションは, 図1に示すACに対応する。

(2) 機構等から構造への展開 一般的に, 要求文書には, 機構等の情報が記述されている場合が多い。この機構の情報を読み取り, 要求モデルにコンポーネントとその構造を記述する。コンポーネントは, 各文書に付表として添付されている場合も多い。要求ではなく技術文書という形で, コンポーネントが書かれている場合も散見される。

なお本研究は, 要求モデルにおけるコンポーネントは, 方式を含まない論理的なコンポーネントであると定義する。なぜなら要求が同じであっても, 実現方式は状況に応じて変更される場合があるからである。そこで要求文書にあるコンポーネント名をそのまま要求モデルに記述せず, 実現技術方式を分離した名称で記述する, という検討が必要である。例えば, 磁気式回転角センサーは, その要求モデルとしては「回転角を検知するコンポーネント」として表現し, 「磁気式回転角センサー」とは表現しないものとする。

(3) 仕様・諸元・技術仕様や制約式・計算式の展開

要求文書にある製品仕様・諸元・性能要件は, 技術仕様として記述する。また, 技術文書などに記述されている制約式や計算式の情報を抜き出し, 要求モデルに記述する。各パラメータは, 各コンポーネントの属性として定義する。例えば, 車体速度は自動車 (L0) に所属する。ただし, ECUで車体速度を車輪速センサーの情報から計算している場合は, ECU (L3) の属性として定義する。技術仕様が所属するレベルは, 関連する属性の所属するレベルなどの情報に基づいて, 検討し決定する。

(4) 要求機能等から要求品質への展開 要求文書等に記述されている, 品質的な表現の要求は, 要求品質として要求モデルへ記述する。品質的な表現とは, 「正確に」や「安定性」に代表されるように, 数値では定義されにくい顧客要求に影響を及ぼす項目のことである。設計意図を明確にするために, どの要求品質がどのレイヤの具体的な技術仕様や構造もしくは振舞と関連するかを, 要求モデルに記述する。

4・4 段階的詳細化 要求モデルに展開された各設計要素は, 各階層にあわせて段階的に詳細化される。図1に示す L_i の表現要素は, L_{i+1} の表現要素に係付けを保持しながら展開され, より精緻な情報として定義される。以下(1) - (4)では, 要求モデルに定義された各表現要素の詳細化の方法に関して論ずる。

(1) 振舞と構造の段階的詳細化 青山らは、製品の挙動と構造の段階的詳細化を行うことによって、機能設計支援を行う手法を提案した⁽¹⁰⁾。本研究でも同様に、振舞と構造の段階的詳細化によって、要求情報を詳細化し、精緻化することを提案する。展開した結果を階層構造に合わせてレベルダウンを行うことによって、コンポーネントレベルにあわせて整理することが可能になる。

階層で要求モデルを表現することは、複合製品のようなコンポーネント数の多い製品には、従来のソフトウェアのモデル定義であるネットワーク型モデルよりも適した記述方法である、と考えられる。表1に示す要求モデルの層を用いれば、詳細化により要求情報を精緻化する情報処理の手順を、以下のように提案することができる。

Step1: 詳細化対象の L_i コンポーネントとその下層 L_{i+1} の構造を記述する。

Step2: 詳細化対象の L_i コンポーネントの状態を記述する。

Step3: その状態に所属するアクションを詳細のアクションに展開し、 L_{i+1} のコンポーネントに割り付ける。この手順を L_i コンポーネントの全ての状態で繰返す。

Step4: L_{i+1} のコンポーネント間のインターフェースを定義し、そのインターフェースを介して共有もしくは伝達する情報を明らかにする。

以上の手順を $L_0 \sim L_3$ の各階層で行うことで、要求情報を詳細化し、各層に定義する。

(2) 技術仕様・属性の詳細化と制約関係の表現 上記の Step4 で明らかにされた情報は、 $L_0 \sim L_3$ のコンポーネントの属性として定義される。定義された属性や技術仕様に対して、制約式を定義する。 L_0 から L_3 の階層の中で、各属性および技術仕様は制約式を介して、レベルを縦断する形で、若しくは、そのレベル内において、技術仕様・属性の拘束関係を表現する。

(3) 要求品質の詳細化 要求品質は、関連する要素が該当するレベルに配置して記述する。同じレベルもしくはその下層など、適切なレベルで構造・振舞・制約に展開され、詳細化される。

例えば、要求品質に「安全な位置で停止する」という要求があった場合、3m 以内の制動距離（最大制動距離）で停止する（技術仕様へ展開）、二重にリミットスイッチを配置する（構造へ展開）ことにより要求品質を満たすことになる。本研究で提案する要求モデルを用いれば、上流で定義した要求品質が、技術仕様や構造・振舞要素へと展開することで実現したことを、関連付けによって表現することができる。この関連は、

Fig.3 Relationships Between Described Elements

逆に、技術仕様や構造に対する設計根拠を表すことにもなる。

(4) 表現要素間の関連付け 各レベルに展開・配置された表現要素間に、関連付けを行う。詳細化を各レベルで行うことにより、要求文書等に記述した要求機能・諸元値・ユニット仕様は、各コンポーネントレベルに配置し、その関係を表現する。

要求モデルでは、表現要素同士の意味的な関係と、設計の進行に伴う詳細化・精緻化による関係を、区別して記述する。この関連付けの例を、構造と技術仕様・制約の関係を基に図3に示す。

5. SysML を利用した要求モデルの構築例

オブジェクト指向アプローチによって、ソフトウェアとハードウェアの機能や構造をモデリングすることを目的とした言語として、SysML⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾が提案され、計算機システムとして実装されている。本章では、インテリジェント・天井クレーンを具体的な設計例として、SysML を用いて提案した要求モデルの記述の可能性を論ずる。

5・1 SysML での要求モデルの表現 SysML は、OMG が標準化をおこなった UML の拡張言語とし

Table 2 Applied SysML Diagrams for Described Elements

Type	Description	Diagram
Behavior	State and transition	State Machine Diagram
	Actions which perform the function	Activity Diagram
Components	Structure of whole product	Block Definition Diagram
	Interface between components	Internal Block Diagram
Constraints	Engineering specs	Requirement Diagram
	Constraints	Requirement Diagram
	Constraints relation	Parametric Diagram
Required quality	Quality requirement which cannot be deployed other elements	Requirement Diagram
Relationship	Relation between elements	Various relationships
	The result of design process	Allocation

て位置づけられ、ハードウェアシステムを記述するため、UMLを一部拡張し、新しい2つのDiagramを追加した言語である。表2に、本研究で提案した要求モデルの表現要素と、SysMLのDiagramとの対応を示す。前節まで論じてきた表現要素の要件を基に、SysMLで要求モデルを記述する過程は、以下のように表される。

- L0~L3のコンポーネントレベル (5.2節)
- 振舞と構造での詳細化 (5.3節)
- 技術仕様・属性と関連付く制約 (5.4節)
- 要求品質から展開された表現要素への関連付け

5・2 L0~L3のコンポーネントレベルの定義

例題では、製品組立工場内のクレーンの開発を想定している。生産力向上のために、クレーン操作を手動から自動化するために制御システムを追加する、という設計変更を想定する。要求モデルのL0に製品組立工場を設定し、L1に組立工程や最終製品倉庫などのコンポーネントを設定した。L1と並列にインテリジェント天井クレーンを設定した。また、今回の開発の対象範囲である制御システムは天井クレーンシステムの下層L2に配置し、天井クレーンの巻上・走行・横行装置(システム)と同じレベルに配置した。制御システムはPLC制御方式を採用し、その制御方式のシステム構成要素である、PLC・入力ポート・出力ポート・制御盤をL3のコンポーネントとなる。この階層関係のDiagramを図4に示す。

図4の中で、制御システムが今回開発の部分であると想定した場合、横行装置等との関係が要求モデル上で明確になる。また天井クレーンシステムが協調して動作する必要があるシステムは、搬送システムや組み

立て工程であることが明示されている。

5・3 振舞と構造での詳細化

図1で説明した要求モデルの全体構造と、設計例の手順の対応を示す。SysMLの各ダイアグラム：Block Definition Diagram, State Machine Diagram, Activity Diagram, Internal Block Diagramの順に展開される順番を示す。

Step-A: L2の制御システムとL3のコンポーネントを構造として表現する。SysMLのBlock Definition Diagramに該当する。図4では、天井クレーンシステム以下が相当する。

Step-B: 制御システムの状態を設定する。各要求機能をその状態にアクションとして配置する。これはSysMLのState Machine Diagramに該当する。図5にState Machine Diagramの例を示す。

Step-C: アクションを詳細な処理(L_{n+1} のアクション)に展開する。各処理を担当する L_{n+1} コンポーネントを配置する。これは、SysMLのActivity Diagramに該当する。各アクションのコンポーネントへの割り当てはSwim Laneで表現できる。その記述例を図6に示す。

Step-D: アクティビティ図から各 L_{n+1} のコンポーネント間のインターフェースと共有する情報を属性として定義する。SysMLのInternal Block Diagramに該当する。

図5によって、制御システムはマニュアル制御モードとステップ実行モードを有し、マニュアル制御モードでは、クレーンがレディー、アクティブ、操作不可の状態が表現されている。その機能を実現するためにさらに、図6において制御装置、入力ポート、PLCアプリケーションという順に制御データの処理がされていることが表現されている。このように、各制御モー

Fig.4 Structural Definition in Design Example of Intelligent Crane

ことを示唆している。

5・5 要求品質から展開された要素への関連付け

第4章で説明したように、要求品質は、適正なレベルで構造や振舞に展開される。SysMLを使用することにより、その展開の様子が **Allocation** という関連付けを用いて、明示することができる。図8は、「安全に停止する」という要求が、「最大制動距離」と「二重のリミットスイッチ」に展開されていることを表す。図8は、機械設計でのリミットスイッチの要求とソフトウェアの制御仕様値である最大値が、同じ要求から要請されていることを、表現できることを示している。

6. 結 論

本研究では、機械、電子回路、ソフトなどが密接にかかわる複合型の製品の開発における要求把握の問題点を整理し、解決手段として要求モデルの導入の提案を行った。インテリジェント・天井クレーンの設計を題材に、SysMLを実装したシステムを用いて、提案する要求モデルを適用し、記述の可能性について検証を行った。

Fig.7 Parametric Diagram (Intelligent Crane System)

設計例への適用の結果、提案する要求モデルによって、天井クレーンシステムに対する要件を、十分に記述できることを確認した。得られた結果は、本研究で提案した各記述方法を実際に表現することが可能であり、計算機上のアプリケーションを利用した運用が可能であることを示唆していると考えられる。本研究によって得られた知見として、提案する要求モデルを開発に適用することにより、次に整理する効果(1)(2)が期待できることが示された。

(1) 設計意図の理解容易性

(2) 専門領域間の設計者のコミュニケーション向上

さらに、提案する要求モデルに記述された依存関係を用いることによって、設計の変更の影響範囲の把握が容易となり、以下の(3)に貢献できると言える。

(3) 実現方式の変更容易性と再利用性向上

本研究では、要求モデルでの記述可能性を中心に論じてきた。実際の設計現場で必要な How の記述である論理モデルとどの様に連携するべきかについては、今後の課題として研究を進める予定である。

文 献

- (1) R. Anderson and R. Sturges: A Case Study in Extended Value Engineering, Proc. of the ASME IDETC/CIE (2002).
- (2) Del L. Younker: Value Engineering: Analysis and Methodology, Marcel Dekker Inc., ISBN-13: 978-0824706968 (2003).
- (3) Shun Takai and Kosuke Ishii: Integrating Target Costing Into Perception-Based Concept Evaluation of Complex and Large-Scale Systems Using Simultaneously Decomposed QFD, Journal of Mechanical Design, 128, 6 (2006), 1186-1195.
- (4) Yoji Akao: QFD: Quality Function Deployment, Productivity Press, ISBN-13: 978-1563273131 (2004).
- (5) Jacobson Ivar, Grady Booch, and James Rumbaugh: The Unified Software Development Process, Addison Wesley Longman, ISBN 0-201-57169-2, (1998).

<<Requirement>> Stopping Safety	
ID = R01-2201	
Stopping in safety	
Allocated To	
Limiter1	
Limiter2	
Max breaking distance	

Fig.8 Allocation to blocks and engineering specification

- (6) Tsuyoshi Koga and Kazuhiro Aoyama: Product Information Model for Management of Design and Development (1st Report, Design Process Model to Manage Topological Structure and Internal Dependencies), Journal of Japan Society of Design Engineering, 45, 5 (2010), 233-242.
- (7) TSUMAYA Akira, WAKAMATSU Hidefumi, ARAI Eiji: Integrated Description of Design Information and Designers' Intention, Journal of Japan Society for Design Engineering, 43, 4 (2008), 194-202 (in Japanese).
- (8) Nam P. Suh.: The Principles of Design, Oxford University Press, ISBN13: 9780195043457 (1990).
- (9) UMEDA Yasushi, TOMIYAMA Tetsuo, YOSHIKAWA Hiroyuki: Proposal of Function - Behavior - State Modeling to Support Function Design, Journal of The Japan Society for Precision Engineering, 63, 6 (1997), 795-800.
- (10) Koga, T. and Aoyama, K.: 'PRODUCT BEHAVIOR AND TOPOLOGICAL STRUCTURE DESIGN SYSTEM BY STEP-BY-STEP DECOMPOSITION', Proc. of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC2004/DTM-57513 (CD-ROM), Salt Lake City, Utah September, (2004).
- (11) Michael A. Jackson, Problem Frames: Analysing and Structuring Software Development Problems, ISBN 0-201-59627-X (2001).
- (12) Ackoff, Russell L.: Scientific method: optimizing applied research decisions, New York: J. Wiley, (1962).
- (13) SysML specification OMG:
<http://www.omg-sysml.org/>
- (14) INCOSE SysML Tutorial:
<http://www.omg-sysml.org/>