

MBSE を用いた超小型衛星のコマンド・データ処理系の設計・開発

Design and Development of the C&DH subsystem for Nanosatellites using MBSE

○内藤正樹¹, 山崎政彦²*Masaki Naito¹, Masahiko Yamazaki²

A joint project between Nihon University and the University of Shizuoka is developing a W6U satellite called PRELUDE. It will detect precursors of earthquakes in the ionosphere. The C&DH subsystem is responsible for executing commands and monitoring the health of the satellite. This requires a high degree of responsibility. PRELUDE's software has a layered architecture, where each layer is compatible with the ARCADIA MBSE language, which has a layered approach. This allows you to make the software MECE based on mission requirements. Also, the layered software architecture, which is compatible with the ARCADIA layer, has the advantage of visually understanding the software constructs.

1. はじめに

日本大学, 静岡県立大学が主体となって, 統計的有意性が報告されている地震先行電離圏現象の物理機構解明のため W6U サイズ (約 10cm×20cm×30cm) の超小型人工衛星 PRELUDE を開発している^[1]. PRELUDE は, C&DH (コマンド・データ処理系), COM (通信系), EPS (電源系), ADCS (姿勢決定制御系), STR (構造系), TCS (熱制御系), MIS (ミッション系) のサブシステムからなる. 中でも C&DH 系は他の系への指令や衛星の健康状態の把握などを担う最上位のサブシステムである. C&DH 系のソフトウェアについては, オープンソースソフトウェアとして C2A^[2]が知られている. C2A は人工衛星向けのソフトウェア・アーキテクチャであり, 様々な衛星に共通するコマンド処理機能・モード管理機能・イベント処理機能などを提供するフレームワークである. 一方で, 各衛星に固有のアプリケーションの開発方法については言及されていない. ミッション要求からアプリケーション作成までの体系的な開発手法が提案できれば, 抜け漏れや手戻りを低減することにより, 開発期間の短縮やミッション成功率の向上が見込める.

そこで本研究では, システムへの要求のモデリングから始めて, 各コンポーネントへの要求までシームレスにモデリングを行う階層化モデリング手法の ARCADIA を用いた衛星全体のモデルと, それに対応したソフトウェア階層化を用いる手法を提案する.

まず 2 章では, ARCADIA の利点を整理し, 3 章ではソフトウェア階層化と MBSE 言語 ARCADIA 用いた開発の実例について議論し, 4 章で結論を述べる.

2. MBSE 言語 ARCADIA

MBSE (Model Based Systems Engineering) とは, 対象とするシステムの構造や振る舞いをモデル図を用いて表現する手法である. 図にアウトプットすることで, 複雑で大規模なシステムでも容易に考えられるようになり, 抜け漏れを無くし, 最適なシステム設計につなげることができる. 本研究においては, ARCADIA (ARChitecture Analysis and Design Integrated Approach) を採用している MBSE ツール Capella を使用する. ARCADIA では Table1 のようにシステムを階層化してアプローチする特徴があり, ユーザーのニーズを分析するブラックボックスアプローチから, システムの要求を分析するホワイトボックスアプローチまで段階を踏んでモデル化していく. 上位のレイヤで作成した情報を下位のレイヤに移行することができるため, システム全体への要求から各コンポーネントに求められる機能までを洗い出すトップダウンのアプローチが可能である.

Table 1. ARCADIA method layers^[3]

| Analysis Layer | Objective |
|----------------------|--|
| Operational Analysis | What system users must achieve. |
| System Analysis | What the system must achieve for the users. |
| Logical Analysis | How the system will work to meet expectations. |
| Physical Analysis | How the system will be built. |

3. ソフトウェア・アーキテクチャと MBSE

Figure1 に PRELUDE のソフトウェア・アーキテクチャと MBSE 言語 ARCADIA のレイヤの対応関係を示す. ソフトウェアのレイヤは, ソフトウェアの目的を達成する Application レイヤ, 各コンポーネントの動作を行う Driver レイヤ, マイクロコントローラーごとの依存性を吸収する HAL (Hardware Abstraction Layer),

1: 日大理工・学部・航宇 2: 日大理工・教員・航宇

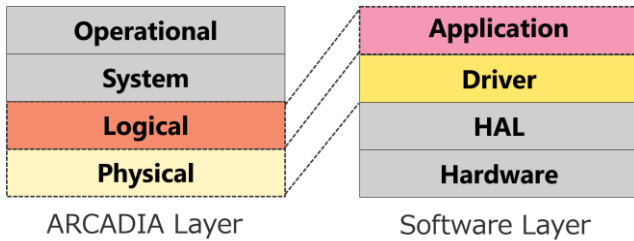


Figure1. Relationship between the software architecture of PRELUDE and ARCADIA

そして実際の素子や基板の **Hardware** レイヤとなっている。このように、ソフトウェアを階層化して抽象化することにより、下位のレイヤのハードウェアが変わったとしても上位のレイヤを変える必要がなくなり、再利用性が高まるという利点がある。

ARCADIA の **Logical** レイヤはシステムに要求される機能を明らかにするのに対し、ソフトウェアの **Application** レイヤはマイクロコントローラに期待する動作を記述する。いずれも **What** (何を行うか) のレイヤである。また、ARCADIA の **Physical** レイヤは機能がどのように実装されるのかを明らかにし、ソフトウェアの **Driver** レイヤはコンポートの動作に必要なハードウェア処理などを記載する。いずれも **How** (どのように行うか) のレイヤである。ソフトウェアの開発時には、**Application** レイヤと **Logical** レイヤ、**Driver** レイヤと **Physical** レイヤが対応するように設計している。明確にレイヤ同士が対応することで、ソフトウェアの開発時に必要な機能・要素が可視的に把握できる。

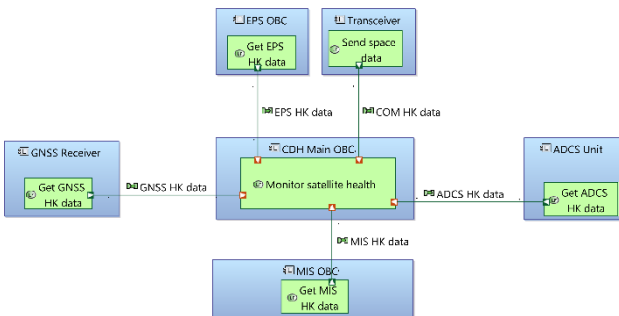


Figure2. The ARCADIA model of obtaining HK data

ここで、具体例として C&DH の OBC (On Board Computer) が衛星の健康情報である HK (ハウスキーピング) データを取得する際の **Logical** レイヤのモデルを Figure2 に示す。ただし、本図では簡略化のために HK データ収集以外の機能は省略して描いている。モデル図における緑色の枠は”Function”と呼ばれ、青色枠のコンポーネントが果たす役割を示している。このように、

どのコンポーネントにどのような機能が割り当てられているのかを明確にし、また C&DH サブシステム以外の系との関わりをモデル図で表現した。衛星の振り舞いは C&DH のソフトウェアだけで決まるのではなく、他のサブシステム・ハードウェアとの関わりがある。ソフトウェアの設計だけモデル化するのではなく、衛星のシステムをモデル化し、その中で C&DH の OBC が果たすべき役割を抽出して **Application** レイヤのソフトウェアを設計した。ソフトウェアのコーディングの際には、モデルで表現した”Function”と同等の名称・機能を持つ関数を作成している。

このように、ソフトウェアとモデル図のトレーサビリティを確保することで、ソフトウェアの知識を有しない人でもソフトウェア実装に対する理解と議論が行えるというメリットがある。また、ソフトウェア開発者自身も、大規模なソフトウェアになると全貌を頭の中で描くことは容易ではなく、特に新規に開発に参加した人が理解するまでには相当の時間を要する。その点においてモデルがソフトウェアと対応していれば、時間短縮の効果が得られる。

4. 結論

本稿では MBSE 言語 ARCADIA を用いた階層化システム分析と超小型人工衛星ソフトウェアの階層化アーキテクチャの対応づけた開発方法について述べた。この試みにより、ソフトウェア開発時に衛星システム全体を俯瞰し、サブシステム同士の関わりまで考慮したソフトウェア設計が行える。現在はまだ開発段階であり、モデルとソフトウェアの対応づけを進めている。

5. 謝辞

本研究は、東京大学地震研究所共同利用 (2024-KOBO31)、並びに WNI 気象文化創造センター 2024 年度国内助成からの助成を受けたものです。

6. 参考文献

- [1] 山崎政彦 他: 「地震先行電磁気現象検知衛星 PRELUDE の概要」, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 3B05, 2023
- [2] 滝澤潤一: 博士論文 再利用性と軌道上再構成能力に優れた衛星ソフトウェア・アーキテクチャに関する研究, <https://ci.nii.ac.jp/naid/500000978501>, 2015 年
- [3] Helder Castro: MBSE with Arcadia method step-by-step, <https://www.linkedin.com/pulse/mbse-arcadia-method-step-by-step-helder-castro/>, accessed 2024/09/26