



02

応
専

宇宙システムの開発プロセス — 「こうのとりの」を題材に—

白坂成功 (慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科)

宇宙システムと開発プロセス

ここでは、宇宙システムの開発プロセスについて、一般的なプロセスとその基本的な考え方を紹介する。その中で特に、失敗をしないためのリスクを考えるアプローチとして、技術成熟度について紹介する。その上で実際に宇宙ステーション補給機「こうのとりの」ではどのようなプロセスで開発が行われたかについて紹介する。

宇宙システムにおける一般的な開発プロセス

◆ システムライフサイクルとVモデル

もともと宇宙システム開発のアプローチは、システムズエンジニアリングのベースとなったものであるため、そのプロセスは基本的にはシステムズエンジニアリングプロセスに従ったものである。たとえば、システムズエンジニアリングプロセスの代表的な国際標準としては、ISO/IEC 15288 System Lifecycle Processes が挙げられる。これは、ソフトウェアエンジニアリングプロセスとして有名な ISO/IEC 12207 Software Lifecycle Processes のシステム版と考えてもらえばよい。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が作成した「システムズエンジ

ニアリングの基本的な考え方¹⁾ や、米国宇宙機関 (NASA) が作成した「NASA Systems Engineering Handbook」²⁾ や欧州宇宙機関 (ESA) が作成したシステムズエンジニアリングの標準である ECSS (European Cooperation for Space Standardization) の E-10 シリーズ³⁾ を、ISO/IEC-15288 と比較しても、そこに大きく異なるところは特に見当たらない。これはもともと、システムズエンジニアリングプロセス標準が、幅広いシステムに適用できるように作られているからにほかならない。

一方で、宇宙システムに特有な特徴も持っている。たとえば、ライフサイクルにおいて、2回のシステム全体のVモデルを実施するのが一般的である (図-1) (もちろん、部分的により多くのVモデルを繰り返す場合や、逆に1回のVモデルの場合もあるが、あくまでも一般的なものが2回であるという意味である)。宇宙システムでは、打ち上げ時の振動、衝撃などの環境条件や、宇宙空間における温度環境の条件に対して、ある一定の設計マージンを付与して設計を行うのが一般的である。このとき、最初のVモデルでは、この設計が妥当であるかを評価するための検証を行う。つまり、設計マージンを含めて検証を実施するのである。これを設計検証という。このときに開発するモデルをEM (Engineering Model) と呼ぶ。このときには、設計検証に合わせて、試験装置、試験手順の検証も実施される。次のVモデルでは、設計マージンを含まない環境条件で検証を実施する。すでに設計は検証済みであるので、作られたものがきちんとそのとおりに作られているかを確認し、実際に打ち上げることが目的となる、す

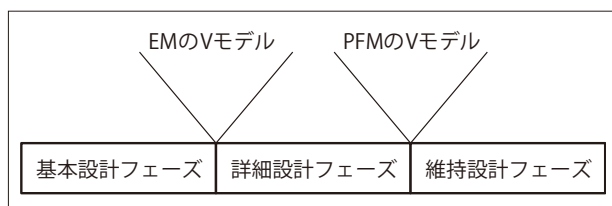


図-1 ライフサイクルとVモデル

レベル	内容
TRL9	実際のモデルの宇宙環境でのミッションの成功を通じた「フライトブルーボン」
TRL8	実際のモデルの地上ないし宇宙環境での試験ないし実証を通じた「フライト認定」
TRL7	フライトモデルの宇宙環境での実証
TRL6	プロトタイプモデルの地上ないし宇宙環境での実証
TRL5	エンジニアリングモデルの相当環境での検証
TRL4	ブラッドボードモデルの実験室環境での検証
TRL3	クリティカル機能や特性分析のおよび実験的コンセプト証明
TRL2	テクノロジーコンセプトやアプリケーションの明確化
TRL1	基本原理の観測と報告

表-1 TRLのレベルと対応する内容

に設計検証はEMで終了しているため、このモデルで行われる検証は、製造検証と呼ばれる。このときに開発するモデルをPFM（Proto Flight Model）と呼ぶ。このような理由により、一般的にライフサイクルにおいて2回のVモデルを実施する。日本では、1回目のVモデルの左側（つまり設計）までを基本設計フェーズ、2回目のVモデルの左側を詳細設計フェーズ、それ以降を維持設計フェーズと呼んでいる（図-1）。

◆ 技術成熟度

ただし、これらはあくまでも一般的な話である。実際には、プロジェクトごとの特徴に合わせてさらに変更が加えられる。このプロジェクトごとの特徴を捉えるための仕組みとして、技術成熟度（TRL：Technology Readiness Level）というものが活用される（表-1）⁴⁾。この技術成熟度は、特定の技術がどれほど成熟しているかを評価するための指標である。宇宙システムは、一度宇宙に持っていくと、そのあとにメンテナンスを実施することが大変難しい。そこで、宇宙に持って行って適切に作動しないリスクをなるべく小さくしたい。どの技術が適切に作動しないリスクが小さいのかを評価するためにつけられているのが技術成熟度である。技術成熟度は、レベル1からレベル9まで設定されており、レベル1は基本原理が分かったレベルで、まだまだ宇宙に持っていくにはリスクが大きすぎる。一方で、レベル9は、すでにその技術が宇宙で利用されて、さらに要

求された機能・性能が実現されたことがあるものであり、リスクが小さいものと識別されている。実際の開発では、レベルが低い技術は、地上において宇宙環境を模擬した試験をするなどしてレベルをなるべく高くすることで、宇宙で動かなくなる可能性を小さくする。このため、その部分だけ個別に作成することなどが行われる。この場合には、その部分のみVモデルの回数が増えるということとなる。このように現実の開発では、そのシステムに合わせてVモデルの範囲や回数は変更される。これは開発プロセスの設計であり、一般的な開発プロセスは存在するが、それに固執するのではなく、開発対象に合わせて適切に設計することが重要となる。

これはVモデルの中でもいえる。一般的に、人工衛星は、システム、サブシステム、コンポーネントの3レベルで開発が進められる。これは大規模なシステムを分野ごとのサブシステムに分解し、それぞれのサブシステムをさらにコンポーネントに分解する。それぞれのコンポーネントを開発したあとは、それらをインテグレーションすることで、システムとする。しかし、現在のESAのECSSによると、このシステム―サブシステム―コンポーネントの3段階の開発は、伝統的アプローチ（Traditional Approach）と呼ばれており、標準的な開発にシステム―コンポーネントの2段階のアプローチを採用している。これは、人工衛星システムが巨大で開発がチャレンジングであった時代には、その複雑性を制御するために3段階のアプローチが適切であったが、

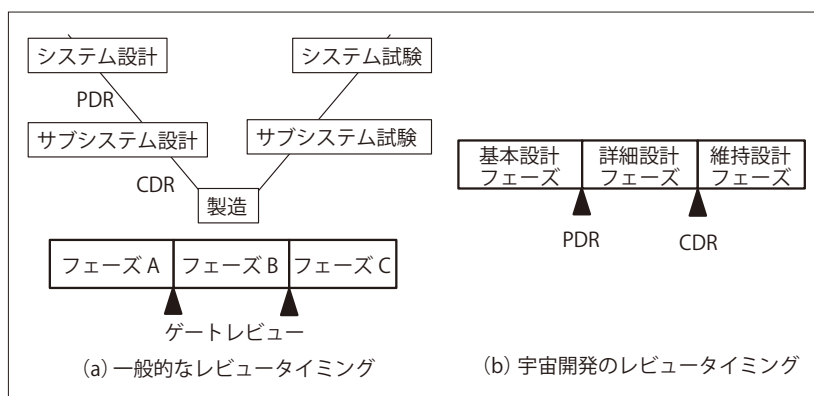


図-2 レビュータイミング

すでに多くの人工衛星を開発し、理解も進んだ結果として、3段階でなくとも開発できるようになったため、よりオーバヘッドの少ない2段階での開発を行うようになったといえる。このように、開発プロセスの在り方とは、必ずしも固定的ではない。

◆ レビューの考え方

開発プロセスを通じて品質を高めるために、チェックポイントを用意する。大きく分けて、ライフサイクルのステージをまたがるときに確認する Decision Gate といわれるものと、Vモデルで定義されるレビューとがある。システムズエンジニアリングの標準では、これらは明確に別のもので書かれている⁵⁾が、実際にはこれらを合わせて全体として品質を上げるためにどのようにするかを決める。たとえば、Vモデルで定義されるレビューとして、PDR (Preliminary Design Review) や CDR (Critical Design Review) がある。システムズエンジニアリングの標準的な考え方によると、システム設計の結果をサブシステム要求として確定するなど、上位のレベルから下位のレベルに要求を出すときに行うレビューを PDR と呼び、"Design to" のレビューという (図-2 (a))。また、製造の前に行うレビューを CDR と呼び、"Build to" のレビューという。宇宙システムの開発では、明示的には Decision Gate を用意せず、この PDR と CDR を活用する。ただし、位置づけが少し異なる。

上述したとおり、宇宙システム開発の多くの場合が V モデルを 2 回実施する。一般的な定義に基

づく、それぞれの V モデルに対して PDR と CDR が存在することとなる。しかし、宇宙システムでは、多くの場合に、EM 製造前のレビューとして PDR、PFM の製造前のレビューとして CDR を実施する。つまり、本来の PDR の位置づけとなるレビューはなく、それぞれの V モデルにおいて CDR としての位置づけで行われる場合が多い (図-2 (b))。ただし、これもあくまでも一般的な例であり、個別のプロジェクトによって、その特徴に合わせて決められる。

「こうのとりの」における開発プロセス

◆ 「こうのとりの」の特徴

上述したライフサイクルや V モデルについて、実際に宇宙ステーション補給機「こうのとりの」(HTV: H-II Transfer Vehicle) ではどうだったかを取り上げながら説明する。

「こうのとりの」は、その規模がこれまでの宇宙機にない大規模であり、さらに、対有人システム (宇宙飛行士が滞在する宇宙ステーションへ向かう宇宙機システム) であるという特徴がある。

◆ フライトセグメントとグランドセグメント

「こうのとりの」は、宇宙空間にあるフライトセグメントと、フライトセグメントを運用するために地上にあるグランドセグメントから構成される。

フライトセグメント、特に「こうのとりの」本体は、初号機の開発では、システム全体としては V モデ

ルを2回実施した。ただし、一部、開発要素の高い（TRLが低い）機器については、その前にBBM（Breadboard Model）をつくることでリスク低減を実施した。ここで、初号機の開発に限定したのは、「こうのとりの」はいわゆる量産機のため、開発要素がなく、設計の検証が十分にできたと判断できた段階で検証項目を順次減らしてきているためである。

一方で、グランドセグメントは、いわゆるウォーターフォールモデルといわれる、開発のライフサイクルを通じて1回のVモデルで開発が行われた。ただし、唯一、訓練系のサブシステムの一部である分散シミュレーション設備だけは、Vモデルを7回繰り返すスパイラルモデルで開発を行った。この分散シミュレーションは、ヒューストンにあるNASAの宇宙ステーションのシミュレータと筑波にあるJAXAの「こうのとりの」のシミュレータをリアルタイムに接続して、運用の訓練を実施するためのものである。開発開始当初、技術的な実現性も分からなかったため、実現性の評価、高いリスク要素の開発を繰り返し、7回のスパイラルで完成し、グランドセグメント全体のシステムに統合するという開発プロセスをとった。

また、「こうのとりの」は規模が大きいいため、「こうのとりの」本体だけでも、Vモデルは通常の3段階モデルではなく、4段階モデルを採用している。具体的には、システム—モジュール—サブシステム—コンポーネントの4段階となっている。

◆ 安全審査

「こうのとりの」は、宇宙ステーションプログラムであったため、NASAの安全要求に従い安全審査を受ける必要があった。このため、上述したようなPDR、CDRだけでなく、開発の進捗に合わせて安全に関するレビューを受ける必要があった。具体的には、NASAの要求文書である“SSP30309 Safety Analysis and Risk Assessment Requirement Document”において安全審査を要求している。「こうのとりの」ではこの要求に従い、FTA（Fault Tree Analysis）とハザードコントロールの設計を基本設計フェーズに実

施し、PDR終了時にNASAの安全審査を受けた。次に、ハザードコントロールの詳細とそれをどのように検証するかを詳細設計フェーズに実施し、CDR終了時に同じく安全審査を受けた。最後に、打ち上げ1年前に検証がすべて完了していることでの安全審査を受けた。実際には、安全審査において、一部設計が認められず、再設計をする必要などもあった。通常の宇宙機でも、打ち上げ前および打ち上げ時の安全審査を実施するが、宇宙空間に行ったあと（軌道上）についての安全を要求しているものは、現状宇宙ステーションプログラムしかない。

活用のポイント

宇宙システムの開発プロセスについて、一般的なアプローチと、実際に宇宙ステーション補給機「こうのとりの」ではどのように適用されたかについて紹介した。開発プロセスは、標準とされるものが用意されているのが普通であるが、あくまでも標準であり、具体例から分かる通り、技術的な特徴だけではなく、マネジメント的な特徴も考慮して開発プロセスそのものはデザインされる必要がある。このとき、TRLという概念を活用することは、技術リスクを持つ開発において汎用的に活用できる考え方であり、宇宙開発以外の分野でも活用が始まってきている。読者の開発プロセスの検討の際に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) システムズエンジニアリングの基本的な考え方, JAXA.
- 2) NASA Systems Engineering Handbook, NASA.
- 3) ECSS E-10 Systems Engineering, ESA.
- 4) JAXA 技術成熟度 (TRL) 運用ガイドライン, JAXA.
- 5) INCOSE Systems Engineering Handbook ver.3.
(2015年5月27日受付)

白坂成功 (正会員) ■ shirasaka@sdm.keio.ac.jp

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科准教授。東京大学大学院修士課程修了（航空宇宙工学）後、電機メーカーにて宇宙開発に従事。慶應義塾大学後期博士課程修了（システムエンジニアリング学）。