

# 超小型人工衛星の技術成熟度向上施策策定のための海外事例調査および解析 Survey and Analysis for Improvement on LeanSat Technology Readiness Level

宮田 喜久子<sup>\*</sup>, 北澤 幸人<sup>†</sup>, 鶴田 佳宏<sup>‡</sup>, 趙 孟佑<sup>§ ¶</sup>

Kikuko MIYATA, Yukihiro KITAZAWA, Yoshihiro TSURUDA, Mengu CHO

## 概要

超小型人工衛星は、従来の宇宙機システムの設計思想とは異なるリスクを許容する開発・管理手法を用い、費用対効果の高いシステムを提供し、宇宙利用拡大を可能とするツールとして期待されている。しかし、現時点では一般的な超小型人工衛星の成功率は従来の宇宙機システムと比較すると格段に低い。我々はその原因を、従来型衛星では確立してきている信頼性確保の手法等の欠如と考え、その観点から様々な技術成熟度向上に向けた施策を実施してきている。本稿では、将来の活動の方向性について議論するために実施している海外の類似施策に対する調査分析の結果を示す。中でも特に、昨年度に現地調査を行った欧州の施策の調査・分析結果およびその結果を報告する。

## 1. 背景

近年、民間企業の宇宙活動が活発となり、既存の宇宙産業・各国の宇宙政策に大きな影響を与えている。その中でも特に、超小型人工衛星による宇宙利用の可能性の拡大は目覚ましい。世界的にみると、従来の宇宙機システムの設計思想とは異なるリスクを許容する開発・管理手法を用いることによって、これまでにないコスト低減を達成し、新技術実証機会が拡大し、技術更新期間の短縮・イノベーション機会創出が誘発されている。

しかし、需要の拡大に対し、ミッション成功率は一般的な宇宙機に比べて低い現状がある。図1に示

すように、CubeSat 級宇宙機は 1/4 強が Dead On Arrival (軌道放出後、地上局で電波を1度も受信できない)、1割強が初期喪失、当初の目的を達したものは3割に満たない。<sup>1)</sup>

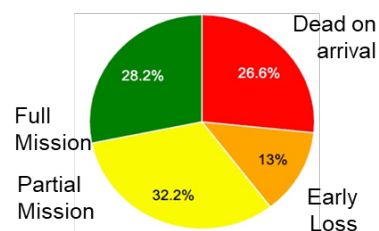


図1 1999~2019年打上のCubeSatの成功率

この要因として、従来の開発方法ではミッション保証(Mission Assurance: MA)活動の有用性が共通認識として存在し、信頼性確保の手法やガイドラインが確立・浸透しているが、超小型人工衛星に対しては、確立した手法やガイドラインがないことがあげられる。商業的な観点からの宇宙開発促進のみならず、人材育成の効果向上に対しても成功率の改善は必須となる。本課題は全世界的な課題であり、各国が危機感をもって対策に臨んでいる。我々、特定非営利活動法人大学宇宙工学コンソーシアムでも、宇宙航空研究開発機構の支援をうけつつ、成功率向上、つまり、技術成熟度向上のため、MAの基盤整備を進めている。活動内容は大きく現状把握、解析・対策案検討・整備4つの項目に分類される。<sup>2)</sup>

現状把握では、オンライン研究会や国内教育機関関連衛星関係者へのヒアリングによる成否状況の事例調査<sup>3)</sup>を継続的に実施している。解析では、事例調査で収集したデータを基に、成功事例・失敗事例を抽出、要因を分析、ミッション成功のために最低

<sup>\*</sup> 名城大学理工学部交通機械工学科 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501 e-mail: kmiyata@meijo-u.ac.jp

<sup>†</sup> 宇宙航空研究開発機構安全・信頼性推進部

<sup>‡</sup> 帝京大学理工学部航空宇宙工学科

<sup>§</sup> 九州工業大学工学研究院宇宙システム工学研究系

<sup>¶</sup> 千葉工業大学工学部機械電子創成工学科

本報文は審査を受けていない技術報告であり、将来、著者により拡張・修正等されたものが、学術雑誌等に掲載される可能性があります。  
This article is a technical report without peer review, and its polished or extended version may be published elsewhere.

限実施しておくべき項目の抽出を進めている。4) 対策検討では、事例調査の分析結果と国外の技術成熟度の高い大学や各国の宇宙機関が自国の教育機関等に実施している支援事例を調査・分析した結果に基づいた対策案も検討している。実装においては、検討した対策案を、自発的な学習や開発プロセスにおける意識改革等を促す対策と、外部支援を充実させる対策に大きく分類し、整備計画を検討している。また、対策を適用するにあたり、目標とする技術成熟度とマイルストーンを実行可能な適用ミッションと対応付ける形での整理(Mission Classification)も開始している。2)

2024 年現在、自助努力促進のためには、目的/目標としたミッションを成功させるために最低限実施すべき必要事項をまとめた「ミッションアシュアランスハンドブック」(MA ハンドブック)の公開や、関連情報をまとめた情報共有 Web サイトの整備、外部支援の充実に対しては、衛星開発に関する万事相談所である CubeSat サロンの整備など、一部の対策の運用が開始され、様々なフィードバックを収集しつつ、より良い施策の検討と実装を進めている。

本稿では海外の宇宙機関の支援調査事例の調査・分析の一例として、ESA/ESTEC で当該活動に寄与する部署および ESA プロジェクトに参画経験のある新興企業の現地調査と各種文献調査に基づいた欧州の事例調査の結果を報告する。

## 2. 欧州事例調査

ESA では、小型衛星に主に関わる専門のシステム・マネジメント部門を有する。小型衛星による高頻度な技術実証での最先端技術の深化、技術力・システムの成熟度の底上げを行い、業界全体の世界的な競争力強化を行う動きが日本以上に加速している。

### 2.1 各種技術文書の整備

技術文書としては、ECSS (European Cooperation for Space Standardization) のテーラリングを行い、頻繁に改定を加えている。5) ECSS 標準の適用内容・テーラリング状況や ESA からの監視の削減や COTS 品(民生部品)使用による失敗リスク増加などへの対応として、プロジェクト制約内でのリスク管理や試験による検証、過去事例の経験を重視する対応を提示している。機能性と経験則を重視し ECSS 技術文書内容を大幅に調整し、要求文書制約を簡易化している。「リスク低減」に焦点をおいたアプローチであり、

求めるミッション成功率によって適用文書を調節するという思想の基本方針は我々の現在の施策方針と合致する。

中でも大きな位置を占める品質保証(Quality)項目については、分野の専門家にもテーラリング思想を浸透させ、組織的に適切な技術標準を整備していく体制が構築されていた。ECSS は参照のみにとどめ、最低限の内容として 3 点の ISO (ISO 17770, ISO 14620-1, ISO 24113 Space systems) を抽出し、そのうえで制約条件を整理した積み上げを検討していた。

制約条件としては、新興企業では投資家対応もあり、短期低コストでの開発が必須となっておりコスト制約やミッション期間を加味しプロジェクトとして許容可能なミッション達成度の設定が必要となる。コスト制約を加味すると電子部品は COTS 品の使用が基本となり、汎用品の有無や代替品の自由度の高さなどが重要視される。宇宙機システムとしては単純となりリスク管理は容易となることが多いが、投資収益率(ROI)が優先されるため設計や機器の検証が不十分となることや、開発とフライト品開発が並行して行われることも多い。また、新興企業が多いと ESA の技術移転が必須となるケースが多く、リスクコントロールの観点から委任範囲の設定にはトレードオフが発生する。

このような制約条件・市場のコスト納期要求に対する信頼性要求の調整を実施した際のリスク低減アプローチとして ECSS を簡易化する 1) 宇宙開発ミッション・クラス付けによる整理 2) CubeSat Guidelines の設定 3) TRL (Technology readiness level) Calculator 導入という 3 つの方策を提示している。

宇宙開発ミッション・クラス<sup>6, 7)</sup>は NASA のものを基準として下記の 5 つに制定され、図 2 の Mission Classification 計算用テーブルを用いて算出される。

- I - Critical safety issue
- II - Performances should be met whatever it takes
- III - Finding the best compromise between risk and cost to deliver the mission
- IV - Mission is designed according to a hard cost limit
- V - Almost full delegation to industry

CubeSat や新興企業の衛星などは主に Class IV/V を中心に一部振興企業のもは III にも及ぶと説明があり、2021 年度時点でクラス V の教育用 CubeSat のソフトウェアに対するもの以外に対しては PA 要求文書がそれぞれのクラスに対して整備されていた。

| Class type  | I                          | II               | III                | IV              | V                    |
|---|----------------------------|------------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| Mission Criteria and Marking  |                            |                  |                    |                 |                      |
| Criticality to Agency strategy (Flagship mission, International cooperation, Impact on ESA strategic goals and image) | Extremely high Criticality | High Criticality | Medium Criticality | Low Criticality | Educational purposes |
| Marking   |                            |                  |                    |                 |                      |
| Mission Objectives (Directorate priority and purpose, e.g. in orbit demonstration, educational)                       | Extremely high Priority    | High Priority    | Medium Priority    | Low Priority    | Educational purposes |
| Marking   |                            |                  |                    |                 |                      |
| Cost (Cost at Completion, Including Phase E1)   | >700 M€                    | 200 - 700M€      | 50 - 200M€         | 1- 50M€         | < 1M€                |
| Marking   |                            |                  |                    |                 |                      |
| Mission Lifetime (Nominal mission life duration)  | > 10 years                 | 5-10 years       | 2-5 years          | 1-2 years       | 1 year               |
| Marking   |                            |                  |                    |                 |                      |
| Mission Complexity (Design interfaces unique payloads, New technology development)                                    | High                       | High to Medium   | Medium             | Medium to Low   | Low                  |
| Marking   |                            |                  |                    |                 |                      |

図2 Mission Classification 計算用テーブル

クラス IV/V に対する要求は、ECSS の全適用に比べ低減がみられた。しかし、要求の記載は変更点・低減策としてなっており、全情報を理解しなければ適用が難しい。COTS 品の適用については、別出しの利用ガイドラインや試験情報共有などの整備が実施されている。放射線試験などの各種環境試験などについても Mission Classification と Mission Risk を考慮した上での要求が整理され、Mission Classification に応じた ECSS 基準の設定が進んでいる。

CubeSat Guidelines については、方策案<sup>8)</sup>や適用 ECSS リスト<sup>9)</sup>が整備されている。大まかにプロジェクト管理、システム信頼性、製造モデル方針、電子部品や放射線耐性、材料・プロセス、ソフトウェアに対する方針が示されている。ECSS 適用リストは多岐にわたり、100 以上の項目および適用文書に対するテーラリング状況などと併せて提示されている。

TRL Calculator<sup>10)</sup>では、設計、製造・試験・検証、品質保証、材料・加工、電子部品、ソフトウェア、安全性・信頼性、プロジェクト管理の各項目における技術成熟度に対する客観評価を実施できる会員登録制オンライン・ツールである。開発検証のライフサイクル全体にわたって、すべての工学および PA/QA 分野の活動の進捗状況を監視可能である。提供サイトにおいては使用マニュアルや TRL guidelines, Report フォーマットなども提供されており、必要な情報を集約できている。目標 TRL を達成するために提供すべき情報がサポートされ、ECSS 標準そのものではなく TRL レベル毎、プロジェクトステージ毎に必要な情報の文書化を狙うもので、宇宙ビジネスにおける必要事項の教育にも役立つとしている。

## 2.2 新規プレイヤーへの教育体制

小型衛星専門のシステム・マネジメント部門が関わる ESA プロジェクトでは積極的に新規プレイヤーの増強策をとっている。例えば 2-3 個の開発事例であっても開発体制に参加が許可されている。これは

様々な知識経験レベルの知見を収集する意図がある可能性もある。また、このような方針の結果、サブライヤ企業候補も複数育っている。技術サポートの内容やレベル感は一律ではなく採択先のレベルや要望に応じて変更し、新興企業などが使用しやすい専用の試験設備も整備し、新規参入に対するハードルを下げる試みがなされている。

大学などに対しては、Education Office による Fly Your Satellite! プロジェクトや各種教育プログラムが継続して実施されている。プロジェクトに対する専任指導員のアサインや各種資金・打ち上げ支援、教育プロジェクト専用の試験設備の整備なども継続実施されている。新規に定義される規格にも迅速に対応したレギュレーションを整備している。

振興企業に対しては、CubeSat Industry Days での公開を目指したガイドライン<sup>11)</sup>などの整備を実施中であり、既知の技術的な課題の排除・低減のための作業に対するガイドを提供する。要求整理、設計、検査、分析、テスト、検証のエンジニアリング分野ごとに章分けされ(システムエンジニアリング, AIT, 地上設備なども含む)、各種事例から抽出された改善事項も含む。コンセプトとしては我々の整備している MA ハンドブックと共通しているが、文書のページ数から見るボリュームとしては 10 倍以上である。

その他教育素材としては、技術文書の公開サイト<sup>12)</sup>や教育用教材提示サイト<sup>13)</sup>などオンラインの情報共有サイト等の整備例も確認されている。目的に応じた検索もしやすく、検索後の画面も見やすい。教育イベントや関連情報へのリンクも充実している。

## 2.3 ESA による方針に対する新興企業側の意見

個別プロジェクトで ECSS 各項目の適用可否を 1 点ずつ検討しながら取捨選択することが基本となる ECSS のテーラリング方針では、ECSS のポリシーや全容の適切な理解が求められる。実際の適用にも熟練した知識が必要となり負荷が高いとのことであった。また、過去プロジェクトの知見に基づいた要求整理により、小型衛星用に試験検証要求が策定されている分野もあるが、新興企業自体が独自でとる方針に比べて過剰と感じるようである。また、ESA 規格の文書化要求はまだ負荷が高く過剰と感じられるとのことであった。

## 3. まとめ

ESA では ECSS のテーラリングを起点とした超小

型人工衛星に適した開発ガイドラインの構築を目指している。よって、ESAプロジェクトであっても ECSS の内容の順守は求めず、個別事例・項目に応じ適用要否が判断可能となっている。それらの成功・失敗事例の情報を集約し、事例の積み上げによる「リスク低減」に焦点をおいたテーラリングを行っていく方向性が見えており、事例を増やして集合知として確立できるように新規プレイヤーの増強・教育をESAとして積極的にシステムティックに実施している。Product Assuranceなどの専門部門もこれら活動に積極的に参画し、とりまとめも専門部門があることからESAとして超小型人工衛星の施策に力を入れていることが見受けられる。

#### 4. 今後の方針について

欧州の調査から、MAハンドブックと類似したCubeSat Engineering Guideline や Mission Classification に応じた要求整理の整備など、現在の施策との大まかな方針の妥当性が確認できた。日本とESAとの大きな差分としては集合知形成のための方針の欠如である。サンプル数増加のためのプロジェクト立ち上げ、資金や技術・管理方法支援方針、情報収集に向けたシステム作りは今後の日本の課題である。また、ESAとしての支援の充実とプロジェクトを任せるための敷居を下げている点からも様々なレベルのサンプル情報を集約したうえでのテーラリングの効果を確認する意思も感じる。情報管理等の方針確立においてもプロジェクトへ積極的に関与するESAの方針は参考になる。

しかし、ECSSテーラリングには問題点がみられる。重要で優先度が高くコスト制限も緩やかな衛星(クラスI, II)に適用される内容を起点とするため、超小型衛星の事例分析を参考にしても保守的な内容に留まり、本来軽減出来る要求に対しても過重さが残る。一方、日本の方策では従来型衛星の設計指針やガイドラインと独立した形で事例調査とユーザーからの要求を基盤とした情報整理から発信したMAハンドブックを基盤とし、純粋な積み上げによる情報整理を行っている。必要最低限の項目の抽出という観点からは、我々の現在の方向性の利点が大いと思われる。

#### 参考文献

- [1] M. Swartwout, CubeSat Database, <https://sites.google.com/a/sl.u.edu/swartwout/cubesat-database>
- [2] 宮田喜久子,他(2023): 国内超小型人工衛星の成功率向上に向けたロードマップ案の提案, 第67回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2023-40103 .
- [3] 大学宇宙工学コンソーシアム(UNISEC) (2023) : 超小型衛星ミッションサクセスのためのLessons Learned 事例分析:2021年度事例集, JAXA-CR-21-002, ISSN 2433-2240
- [4] 大学宇宙工学コンソーシアム(UNISEC) (2022): 超小型衛星ミッションアッシュアランス・ハンドブック, UNISEC外第21-21号
- [5] Tailored ECSS Engineering Standards for In-Orbit Demonstration CubeSat Projects
- [6] ESA-TECQM-HO-2023-002920 Is. 1.4 “Product Assurance Approach to New Space and Lean Sats Missions”
- [7] ESA Mission Classification and project adoption of new microelectronics development
- [8] Product and Quality Assurance Requirements for In-Orbit Demonstration CubeSat Projects
- [9] Tailored ECSS Engineering Standards for In-Orbit Demonstration CubeSat Projects
- [10] Technical Note: Document Requirement List for Technology Readiness Level
- [11] CubeSat Engineering Guidelines
- [12] ECSS検索サイト <https://ecss.nl/>
- [13] ESA Learning Hub <https://learninghub.esa.int/>

(みやた きくこ/名城大学)