

## 0.1 はじめに

現在、コマンドとテレメトリを用いた衛星の故障箇所の特定を支援する手法を検討している。以下の章では、まず研究背景として地上試験におけるリスク分析の不十分さ及び、不具合原因仮説の検証を支援する研究が十分に行われていないことを述べ、次にそれを踏まえた研究目的に関して述べる。また、提案手法の章では、不具合分析のアルゴリズム、使用するモデルに関して述べ、そのモデルを用いた仮説検証のためのコマンド及び確認事項の探索方法、人がコマンド選択をする際に必要な評価指標に関して説明する。最後に、簡易衛星モデルを用いた実践例を示し、今後の方針について述べる。

## 0.2 研究背景

### 0.2.1 超小型衛星の信頼性の低さ

超小型衛星の開発が大学や小企業の中で盛んになってきている。これまでは教育目的が主であったが、商用利用や革新的なミッションへの応用も増えてきている [?]. 一方で現状の超小型衛星は中・大型衛星と比較して軌道上での不具合の確率は高く、2002 から 2016 の間に打ち上がった 270 の Cubesat のうち、139 のミッションが失敗している [?].

これらの不具合は、大学衛星が宇宙環境での使用を保証されていない民生部品を使用すること多いため、軌道上での部品の故障によって発生すると考えられてきた。しかし、実際には多くが設計や製造過程に起因する不具合であることが知られている [?]. 軌道上での不具合の根本原因に対する調査 (Figure 1) では、民生部品の品質の不確定性が原因であったものはわずか 17 % であり、それ以外の多くが設計や、地上試験の不足に起因するものである [?].

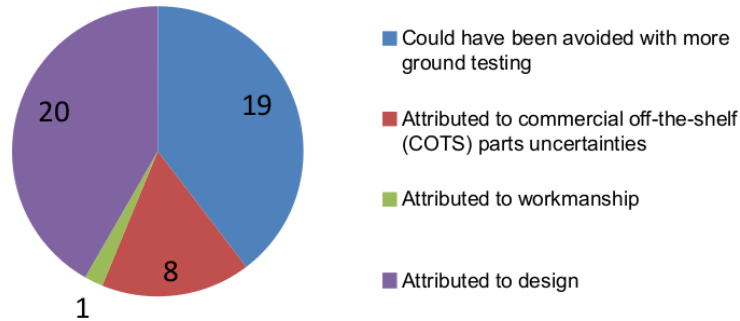


Figure 1: 故障原因に関するインタビュー結果 [?]

また、大学衛星が商用利用や革新的なミッションに挑戦するためには、超小型衛星のメリットであるコストの低さを十分に確保しながら、ほどよい信頼性を実現することが、重要であると考えられている [?]. 故障に設計や製造の不良が含まれていることを考えると、超小型衛星の「ほどよい信頼性」の評価を行うためには、従来用いられてきた各コンポーネントごとの信頼度の組み合わせでは不十分である。そこで、設計・製造・運用における信頼度を加味した評価手法が提案されている [?]. 式 (1) が示すように、この評価手法では製造時の信頼性も重要な要素であると捉えられている。

$$R_{sat} = R_{des} \times R_{fab} \times R_{comp} \times R_{op} \quad (1)$$

$R_{sat}$	衛星の真の信頼度
$R_{des}$	設計における信頼度
$R_{fab}$	製造における信頼度
$R_{comp}$	衛星の信頼度（従来の信頼度）
$R_{op}$	運用における信頼度

## 0.2.2 地上試験における問題

以上で示したように、不具合の多くが設計、製造などに起因しているという問題がある。一方で、これは超小型衛星開発のみに限られたことではなく、中・大型衛星においても大きな問題となっている。軌道上故障データを分析した結果 [?](Figure 2) によると、軌道上で偶発的に発生した故障はわずか 11 %であり、それ以外は設計、製造などの開発活動に起因するものであることがわかっている。

また、軌道上で発生した不具合が地上試験で発現しなかった、または発見できなかった原因が以下の Figure 3 のように知られている。試験設備の不足によるものや、故障発見までの時間が長く試験で発見することが現実的で無いものに関しては、コストとリソースの面から試験による対策では限界がある。一方で、試験モードの不備や、発現していたのにもかかわらず発見できなかった不具合に関しては試験に対する習熟度が不足していること、不具合・リスクの分析が不十分であることが推測される [?].

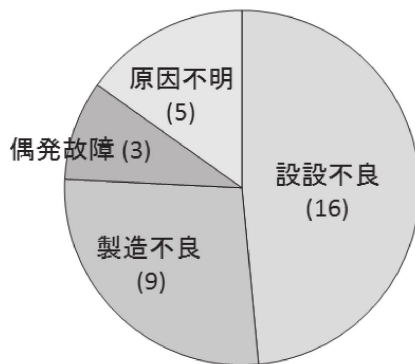


Figure 2: 軌道上故障の原因類型の分布 [?]

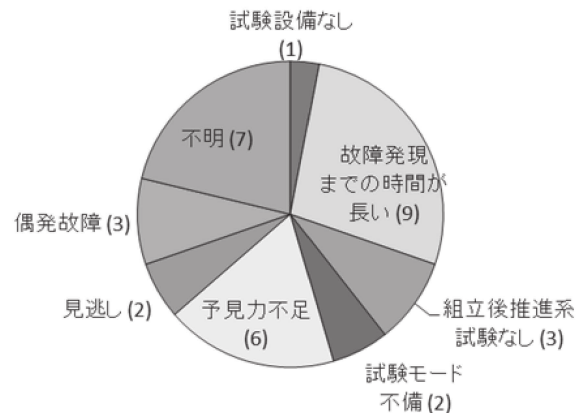


Figure 3: 軌道上故障の要因を地上で発見できなかった原因類型の分布 [?]

## 0.2.3 不具合原因特定の難しさ

以上のように、衛星の不具合及びリスク分析を、地上試験で十分に行うことができていないという現状がある。

その原因を具体的に示すため、以下に人間による不具合原因分析の大まかな流れを示す。

- 1) 不具合が起きた際の衛星の状態を保存し記録に残す。
- 2) テレメトリから考えられる故障原因の候補を洗い出す。
- 3) それらの故障の中でテレメトリから分かる情報を元に候補を棄却していく。
- 4) 更に切り分けが必要な場合はコマンドを送り、それに対するテレメトリの挙動によって判断するという作業を繰り返す。

5) 判断できない場合は、コンポーネントを取り出し直接確認を行う。

上の流れを元に分析が不十分になっている原因を考える。まず、2) の故障原因の候補の洗い出しを網羅的に行うことの難しさがある。組み上げ状態の衛星から得られる情報はテレメトリのみである。この際、衛星の内部状態を理解し、テレメトリから現在の衛星の状態を想像することができなければ、十分に不具合原因の候補を洗い出すことはできない。

本研究の過去プロジェクト (PRISM) を対象にした研究では、事前に想定していた故障モードの粒度は、山口ら [?] がモデルを用いて洗い出したものと比較して、不十分であるという結果も出ている。このように、人による故障モードの洗い出しは思いつきによるものなので、考えが及んでいないことが多い。

また、分析が不十分になっているもう一つの原因として、3), 4) の故障原因の切り分け作業の難しさもある。超小型衛星は内部状態が複雑に絡み合っており、一つの不具合に対して非常に多くの故障候補が洗い出されることが想像できる。そのため、多くの故障候補の中から切り分けを行い、最終的な故障を特定するという作業は多くの知識と労力を必要とする作業である。また、実ミッションで使用するコマンドとテレメトリは膨大な数であるため、その中から切り分けを行うための情報を選択し、仮説の検証を行う作業は無駄やヒューマンエラーを生むきっかけとなる。検証作業の際、未熟な運用者が不具合原因特定のために誤ったコマンドを送信してしまうと、衛星の生存を脅かす可能性がある。このため、不具合原因特定を行う際にはそのコマンドが”安全”なのかという点も非常に重要となる。

#### 0.2.4 不具合分析関連研究

上述のように、不具合原因の洗い出しが網羅的にできていないこと、コマンドとテレメトリを用いて原因特定を行う過程が知識依存になっていることが、不具合分析が不十分になっている原因の一つであった。これらの課題に対して、古くから不具合分析システムの研究が盛んに行われている。以下の Table 1 に、モデルベースで機械などを対象にした不具合分析、故障診断を行う手法に関してまとめた。

Table 1: 不具合分析手法の比較		
手法	故障網羅性	手法の目的
GDE	低	故障仮説生成
GDE+[?]	中	故障仮説生成
網状故障解析 [?]	中	異常モード洗い出し
故障オントロジー [?]	高	故障仮説生成
本手法	中	故障箇所特定

故障仮説生成の研究に関しては、機器の正常時のモデルだけでなく、故障時モデルを組み込んだもの [?] や、オントロジーを用いてプロセスのつながりまでモデル化したもの [?], 異常伝播事象までモデル化して階層的な推論を行うもの [?] などがあり、網羅的に故障候補を洗い出すために広く取り組まれている。一方で、来村ら [?] が効率の良い検証方法に関しては今後の課題として言及しているように、故障仮説の検証に取り組んだものは少ない。

### 0.3 本研究での目的

以上を踏まえると、不具合発生時に故障候補を洗い出し、その中から原因を特定していく過程に、高い知識と経験が必要であることが、衛星の不具合やリスクの分析が不十分になっている原因の一つであると推察される。また、故障候補の網羅的な洗い出しに関しては広く取り組まれている一方で、仮説の検証作業の支援に関して取り組んだ研究は行われていない。

そこで本研究では、経験が浅く、衛星に関する知識の乏しいエンジニアであっても、不具合事象から故障箇所の特定を行えるような不具合分析支援手法の提案を目的とする。また、以下では不具合発生から故障箇所の特定を行う過程を「不具合分析」と表現している。

具体的には、本手法はコマンドとテレメトリをベースにして行う不具合分析を対象にしており、不具合発生時に故障箇所を特定するために、確認すべきテレメトリ、打つべきコマンドを選択肢として提示することで、人間の判断の支援を行う。

また、不具合原因特定のための過程を対象の制約モデルを用いて行うことは、対象とするモデルの粒度に非常に高い忠実度が求められるため、複雑に物理現象が絡み合う衛星では難しい。むしろ、人間を対話的にサポートすることによってシステムに求められるモデル化のコストを下げつつ、不具合分析の過程を体系化することで、経験の少ないエンジニアの支援ができると考えられる。そのため、システムが提示した選択肢を用いて人間が実機での検証を行い、その結果をシステムにフィードバックすることで、対話的に故障箇所の特定を行っていく構成になっている。

以上の機能を満たすために、本手法は下記の3つの要素で構成されている。

- 衛星内部のコンポーネント間接続関係モデル及び、情報伝達経路モデル
- 故障箇所の特定を行うために必要なコマンド及びテレメトリの探索
- 人間の判断を支援するコマンドの評価指標の提案