

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 超小型衛星の信頼性の低さ

近年，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 [?]．

大学衛星は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，このような超小型衛星で頻発している不具合は，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故障分析を通じて知られている [?]．軌道上での不具合の根本原因に対する調査 (図 1.1) 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ことが分かっている [?]．

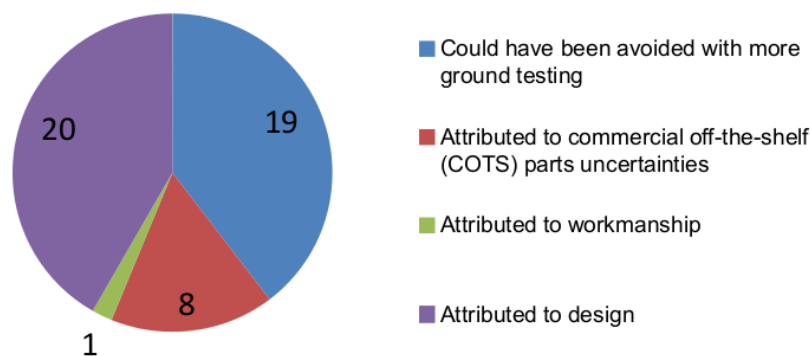


図 1.1 故障原因に関するインタビュー結果 [?]

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，ほどほどの信頼性を実現する「ほどよし」の考え方が重要であると

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，超小型衛星のほどほどの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 (1.1) が示すように，この評価手法では設計や製造時の信頼性も重要な要素であると捉えられている .

超小型衛星のコストの低さを考慮すると，信頼性の高いコンポーネントを使用することによってそれぞれのコンポーネントの信頼性 R_{comp} を高めるより，設計や製造過程における信頼性を高めることが超小型衛星の信頼性の向上につながる . また上述したように，超小型衛星の信頼性の低さの根本原因である設計不良や地上試験の不足を改善していくことが，信頼性向上には不可欠である .

$$R_{sat} = R_{des} \times R_{fab} \times R_{comp} \times R_{op} \quad (1.1)$$

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

1.1.2 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 [?](図 1.2) 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分かっている .

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」が以下の図 1.3 のように知られている . 試験設備の不足によって確認できなかったものや，故障発見までの時間が長く地上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，地上試験で発現していた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 [?] .

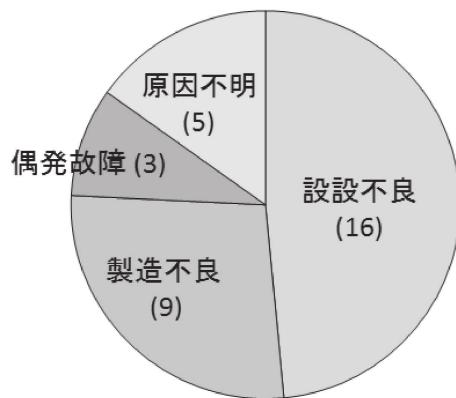


図 1.2 軌道上故障の原因類型の分布 [?]

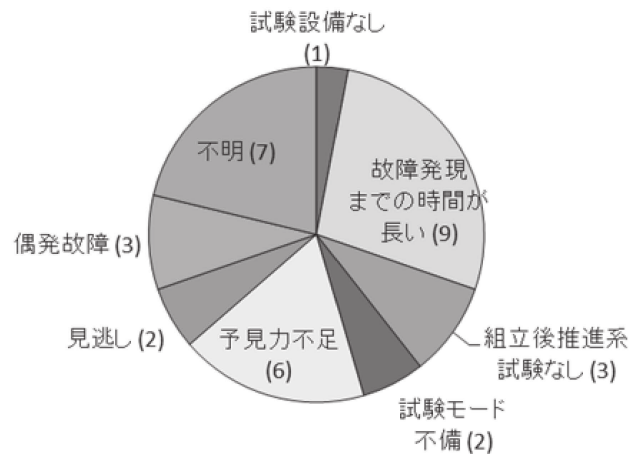


図 1.3 軌道上故障の要因を地上で発見できなかった原因類型の分布 [?]

1.1.3 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の分析を，地上試験で十分に行えていないことが，超小型衛星の信頼性の低さの原因の一つである．

そこで，地上試験で衛星の不具合及びリスク分析が十分に行えていない原因を具体的に示すため，以下に人間による不具合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．

まず，地上試験において十分に不具合分析が行えていない原因の 1 つとして，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主に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類推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．また，衛星のように内部の機器が複雑に絡み合ったシステムでは，人間が想定していないつながりが多数存在するため，不具合事象から全ての故障可能性を洗い出すことは難しい．本研究室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 [?] が構築したシステムを用いて洗い出した故障モードと比較して，不足しているという結果も出ている．このように，人間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，人の知識や経験に依存し，考えが及んでいないことで見逃している故障モードが多く存在する．

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

がある．

上述したように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．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．不具合発生時は衛星の状態を十分に把握できていない状況であるため，故障仮説を検証する際，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，意図しなかった動作を起こし衛星の生存を脅かす危険性がある．このため不具合原因特定を行う際には，不具合分析に用いるコマンドが「安全」なのか，という点が非常に重要となる．

1.1.4 不具合分析に関する先行研究

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に関する研究が盛んに行われている．以下の表 1.1 に，モデルに基づいて行う機械などを対象にした不具合分析，故障診断手法に関してまとめた．

表 1.1 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	故障箇所特定支援

まず，GDE はモデルを元に行う不具合分析手法として一般的なもので機器の正常時の制約モデルを元にして故障仮説の生成を行う．GDE に対して，故障時モデルを組み込んだものが GDE+[?] と呼ばれる手法であり，入出力の観測結果から正常時との不整合を検知し，その不整合を説明するための仮説を洗い出すことを行っている．

また，山口ら [?] は，衛星内部の機器の接続関係だけでなく，衛星が起こすアクションや状態などのつながりをモデル化し想定していた機器間の接続関係からだけでは見えていなかった波及効果を洗い出すことを可能にしている．

また，来村ら [?] は故障を事象としてだけでなく，時間経過や伝搬過程を含めて捉えるために必要となる概念を故障オントロジー [?] として定義し，故障箇所に対する仮説だけでなく，より遡った故障原因に対する仮説を網羅的に生成する手法を提案している．

以上のように故障仮説生成の研究に関しては，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．また，故障候補の洗い出しを十分に行うことができたとしても，特定を行うことができれば地上試験

によって設計や製造における不備を除くことができない。

1.2 研究概要

1.2.1 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以下の機能を満たす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。

- 故障候補を確認するためのコマンド及びテレメトリを提案する。
- コマンドの選択肢を選ぶ際の判断の指標を定量的に提示する。

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。

- 衛星内部機器の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アルゴリズム
- コマンドの安全性、及び故障候補切り分け能力を示す指標

1.2.2 本論文の構成

本論文は次のような構成となっている。第 2 章では、本研究で提案する不具合分析手法で使用する衛星のモデルと不具合分析のアルゴリズム、探索された結果を選択する際に必要となる指標に関して、安全性と故障候補の切り分け能力の観点から述べている。また、第 3 章では提案手法を実践した結果に関してまとめており、本手法によって故障箇所特定のプロセスを体系化できたこと、指標に関する考察を述べる。