

# B13 スマート構造の設計問題へのレジリエンス工学の適用に関する一考察

小木曾望 (大阪府立大学), 田中宏明 (防衛大学校)

Nozomu Kogiso (Osaka Prefecture University) and Hiroaki Tanaka (National Defense Academy of Japan)

## 1. はじめに

### 1.1 宇宙スマート構造システム

著者らは、宇宙空間で使用する高精度アンテナとして、スマート形状可変鏡を用いた高精度アンテナシステムを提案し、その開発研究を進めている<sup>(1)</sup>。そのスマート副鏡のプロトタイプを図1に示す。これは、主鏡に生じる熱変形などで生じる電波の位相誤差を、軌道上でアクティブに補正することで、要求される電波特性を達成することを目標としている。

このプロトタイプで用いられている鏡面調整用アクチュエータは、積層型の圧電アクチュエータ (ピエゾメカニクス社製 PSt 150/10/100 VS15) と変位拡大機構を組み合わせ、副鏡を変形させる。その変位拡大機構の初期プロトタイプにより、変位拡大機能が達成できることが確認できている<sup>(1,2)</sup>。

しかし、このプロトタイプは、多数の部材がネジ留めされていてガタによる精度低下の可能性が高い。これを避けるため、コンプライアント機構として一体化することを検討してきた。そこで、この問題を多目的設計問題として定式化し、図2に示すコンプライアント機構型の変位拡大機構の最適形状を求めた<sup>(3)</sup>。そして、これをワイヤー放電加工により試作し、試験を通して、変形機能要求および反力要求を満足できることを示すとともに、製造誤差が変形機能におよぼす影響について検討した<sup>(4)</sup>。このほか、副鏡へのアクチュエータ最適配置設計に関する研究<sup>(5)</sup>などを通して、スマート副鏡の機能要求が満足できることを示してきた。

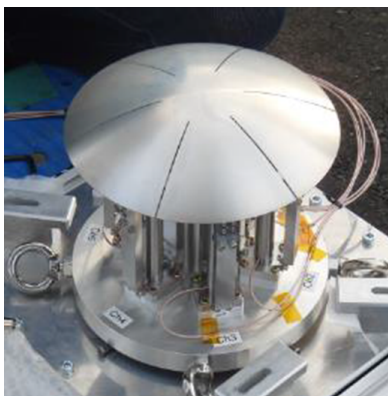


図1: 可変副鏡BBMモデル<sup>(1)</sup>

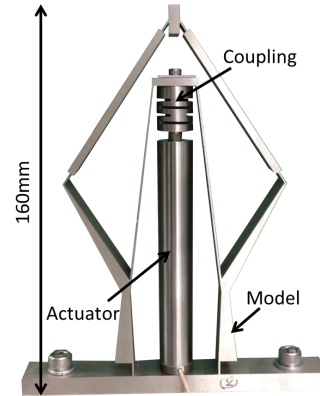


図2: コンプライアント機構化した変位拡大機構<sup>(3)</sup>

### 1.2 軌道上調整と地上検証

スマート副鏡システムには、まだ解決しなければならない問題もあるが、実現可能性を示す見通しが得られるようになった。次の段階として、宇宙システムとしての安全要求<sup>(6)</sup>を保証するための活動が必要となる。しかし、 $\mu\text{m}$  オーダーの形状精度を要求する高精度宇宙構造システムにとって、地上検証を原則とする開発プロセスに沿って、安全要求を保証することは困難である。

そこで、著者らの研究グループは、軌道上で調整できる機能をもつスマート構造システムにふさわしい検証プロセスとして、最終調整を軌道上で行う“Finishing Touch in SPACE”を提案している<sup>(7)</sup>。地上検証自体は、調整プロセス自体を検証することに緩和できる。これが実現できれば、要素単位での検証で可能となることから、特に、重力補償など地上特有の問題によって検証精度が低下する問題が解決できる。

一方、スマート構造システムの調整プロセスの地上検証として、何をどう保証すべきかを定めるための方

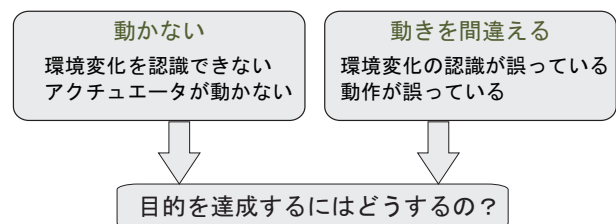


図3: スマート構造システムの信頼性に関する設計問題

法論が必要となる。つまり、図3に示すようなアクチュエータの故障や誤作動に対するシナリオを構築し、それに対して信頼度を確保する方針を決める必要がある。従来の信頼性の考え方では、システムの信頼性を確保するために、要素としてのアクチュエータの信頼度を高くすることや、冗長化などの方策が考えられる。これはコスト増大につながる上に、実現が困難である。一方で、アクチュエータの故障や誤作動で、スマート構造システムすべてが機能しなくなるわけではなく、生き残ったアクチュエータを用いれば、性能が低下したとしても、システムとして機能する可能性がある。つまり、従来の信頼性工学の考え方だけでは、スマート構造システムの調整プロセスを表現しきれない部分もある。

### 1.3 スマート構造システムとレジリエンス工学

そこで、本研究では、スマート構造システムの信頼性設計のために、従来の確率的なリスク論を包含するアプローチとして主に安全・防災の分野で発展してきたレジリエンス工学<sup>(8,9)</sup>に着目する。レジリエンスとは、外乱やシステム内部の変動がシステムの性能におよぼす影響をシステム自体が吸収し、システムの状態を平常に保つ能力や、想定を超える外乱に対しても機能を大きく損なわない能力、機能が損なわれたとしても早期に機能回復できるシステムの能力を意味する。

外乱の影響をシステムが吸収するというレジリエンス工学の考え方は、性能要求を満足するために、環境に適応して形状を変化させるスマート構造の考え方と似ている。そこで、本研究では、レジリエンス工学を用いたスマート構造の信頼性設計のアプローチについて、考察する。

## 2. 宇宙システムの信頼性要求とその考え方

### 2.1 信頼性要求

宇宙システムの信頼性プログラム<sup>(6,10)</sup>は、「要求される環境下で、ミッション終了まで、要求される機能・性能を満足する」こと、および「信頼性に関わる技術上・管理上のリスクがライフサイクル全般にわたって継続的に識別され、そのリスクが低減されている」ことを保証するために実施する。つまり、運用中に想定されるリスクを把握し、そのリスクの影響を定量的に評価し、そのリスクを許容可能なレベルまで低下できる低減策を策定する。その基本的な考えは、次の5項目からなる。

**設計余裕の確保・故障リスクの最小化** 壊れない・壊れにくいロバストな設計を意味し、十分な設計余裕を確保することを要求している。

**故障許容設計** 故障の発生を見越して、故障が発生し

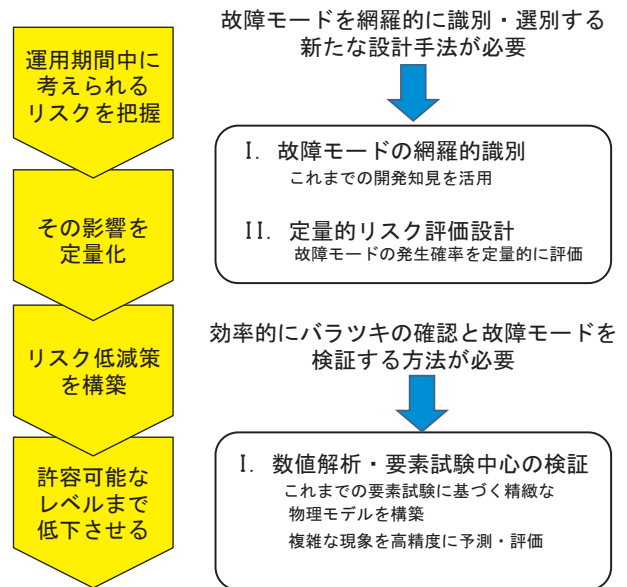


図4: 高信頼性開発プロセス<sup>(6)</sup>

てもシステムの機能を失わないことを要求している。冗長設計はその一例である。

**信頼性配分に基づく定量的予測と実証** 定量的信頼性評価に基づき、故障モードごとの信頼度を評価した上で、サブシステムや機器に適切な信頼度を配分し、設計の妥当性を定量的に評価することを要求している。

**運用環境適合性** システムがミッション期間中に遭遇するであろう運用環境を十分に踏まえることを要求している。

**単純化・標準化** この項目は、要求ではなく、信頼性向上のために推奨する項目である。単純化は部品点数を減らすことを意味し、標準化は実績のある設計を採用することを意味し、これらにより、信頼性向上が期待できる。

このために必要となる高信頼性開発プロセスの考え方を図4に示す。

### 2.2 背景にある考え方

運用環境内のシステムが入力を受けて動作する状況において、システムの実出力(挙動) $y$ は、システム的设计パラメータおよびシステムへの入力 $x$ と運用環境 $z$ の関数 $y = f(x, z)$ として表されるものとする。信頼性要求は、入力 $x$ 、環境 $z$ 、システム指標 $y$ の不確かさについて、以下の項目が成立つことが前提となっている。

- 運用環境 $z$ やシステムへの入力 $x$ の不確かさが確率分布も含め、すべて把握できている。もしくは、適切な安全余裕を設定することで、不確かさを包絡することが可能。

- システムの性能指標  $f$  に対する運用環境  $z$  の不確かさの影響が評価可能。

つまり、 $z$  や  $x$  に対する  $f$  の期待値や分散、最悪値などを評価でき、これを最小化したり、リスクに対する制約を満足できるようにシステムを設計する。ロバスト設計や信頼性に基づく最適設計は、このための数理的な設計法である。

### 2.3 課題

この信頼性要求の枠組は、パラメータや環境などの不確かさおよびそれらがシステム指標におよぼす影響が既知であるという前提が必要である。しかし、実際にはすべての変動を把握することが困難である。そこで、著者の一人は、サンプル数が不十分な場合にもその統計的な不確かさを信頼性に基づく最適設計に合理的に取り組む方法を提案している<sup>(11,12)</sup>。それでも、これらのパラメータの不確かさがシステム指標におよぼす影響を完全に把握することは困難である。そのためには、モデル化の不確かさを考慮することが必要となる。

もう一つの問題は、スマート構造システムへの故障シナリオの構築、つまり、「システムの機能を失わないこと」をどう定義するかにある。例えば、一部のアクチュエータが故障したとしても、残りのアクチュエータを工夫することで、システムとしては性能が低下するけれども許容可能なレベルを達成できるかもしれない。例えば、残存アクチュエータを本来とは異なる役割で使うことで、システムの性能をある程度、回復できるかもしれない。このようなスマート構造システム特有の状況に合わせたシナリオをいかに構築するべきかという課題がある。

## 3. レジリエンス工学

### 3.1 レジリエンス工学の概要

レジリエンス工学は、従来の確率的なリスク論を包含するアプローチとして災害によるシステムの損害からの回復や、想定外の事態に対処できる考え方として、主に安全・防災の分野で発展してきた。医療などの社会システムへも適用されるようになってきている<sup>(8,9)</sup>。ここで、レジリエンス(弾力性、回復力)は、常に不確かな変化が生じる環境で、不完全な情報しか得られていない状況にあるときに、なんらかの災害が生じたときに、システムの機能を早く回復させる能力」を意味する。システムおよびその運用がレジリエントであるために以下の4つの能力が必要とされる<sup>(9)</sup>。

**対処できる** 変動や外乱に適切に対処する能力。

**監視できる** 警戒すべき脅威を認識できる能力。

**予見できる** 「監視」の先の時間領域について、脅威ま



図5: Safety-IIの概念と位置づけ<sup>(9)</sup>

たは好機を予見する能力。これがあれば、対処・監視に事前に準備できる。

**学習できる** 上記3つの能力を向上させる能力。システム運用を対象とした考えではあるが、システムそのものにも適用できる。

従来のシステムでも、信頼性を議論する際には「監視」と「対処」の考え方は使われている。例えば、工学システムにおけるロバストネス(頑健性)やアジリティ(俊敏性)の概念はこれにあたる。これに対し、「予見」と「学習」は、従来の工学システムではあまり考えられていない。未知の外乱に対処しようとする際には必要となる重要な能力である。また、レジリエンスをレジスタンス(外界の擾乱に対して機能を維持する性質とリカバリ(システムが機能の一部を失った際にその障害から回復する能力)との組み合わせとして捉えることもできる<sup>(13)</sup>。

また、安全性に対する概念を“Safety-II”として拡張している(図5参照)。従来の安全性(“Safety-I”と呼ぶ)は「うまくいかないこと」に着目し、その原因を排除することで安全を確保するという考え方であった。これに対し、“Safety-II”は、安全性を「変化する環境に対応できる能力」と肯定形で定義することに特徴がある。大きな外乱に対して破局的な状況を回避するために、「うまくいっていること」を利用しようという考え方である。つまり、従来の安全性の考え方では取り扱えないようなインフラ等の大規模なシステムの破局的を避けるための考え方である。なお、宇宙に目を向けてみると、「アポロ13号」の帰還。「はやぶさ」のイオンエンジン運用、「あかつき」の火星再投入は、それを意図して設計されていないにも関わらず、運用の工夫で破局を避けることができた“Safety-II”の実例とも言える。

### 3.2 宇宙工学問題への適用例

レジリエンス工学が主に防災面や人間の組織運営に絡めて発達してきたため、宇宙システムへの適用に対する研究は始まったばかりである。ここでは、最近、

発表された事例を紹介する。

高橋らは、宇宙輸送における機体喪失率の抜本的な向上のために、Safety-IIの考え方を適用している<sup>(14)</sup>。推進系を複数機装備して冗長度が増せば推進系の安全性が向上するけれども、推進系が爆発系を有する限り、故障時に指令破壊をせざるを得ず、機体喪失率に対する本質的な解決とはならない。そこで、爆発性を有しない推進系であるハイブリッドロケットが必要であることを提案している。

野本らは、HTVの姿勢制御スラスタの冗長設計にレジリエンス工学の考え方を適用している<sup>(15,16)</sup>。冗長系は一般的に信頼性を向上させる手段ではある。しかし、切り替えメカニズムの誤動作による不具合など、冗長設計によって逆に安全性が低下することもある。そこで、野本らはレジリエンス工学に基づいた冗長設計アーキテクチャを提案している。バックアップ、完全同一設計、切り替えを排除することで、従来は32基のスラスタが必要であったところを、24基のスラスタで同程度の信頼性を確保できることを示している。

このように、レジリエンス工学により、従来の信頼性工学の枠組では考慮できなかった問題への問題提起や解決策の提示ができる。

#### 4. スマート構造システムの信頼性

スマート構造システムは、環境の変化を計測するセンサー、形状を変化させるアクチュエータおよびそれらの動きを司るプロセッサから構成される。これらの一部の機能が喪失すると、スマート構造システムの性能は低下したとしても、すべての機能を失うわけではない。このような考えのもとで、信頼性を確保することを考える。

先に紹介したHTVの姿勢制御スラスタ<sup>(15,16)</sup>では次の考え方を採用している。

- バックアップ冗長系を採用せず、すべての要素を使う。これにより、「待機」のムダをなくすことができる。
- 完全同一設計ではなく、要素ごとに異なる機能を持たせる。そして、使用する要素の組合せを変えることで実現する機能も変える。
- 切り替えを採用しない。これにより、切り替えリスクをなくすことができる。要素が故障したら機能が低下する。故障要素数の増加により、機能は緩やかに低下する。

宇宙機の姿勢制御は、宇宙機が置かれた環境と現在の姿勢を認識し、規定の時間内に理想の姿勢に変化させるよう推進機を制御するためのものであり、概念とし

てはスマート構造システムと同等である。そのため、スマート構造システムに拡張すること可能性が高い。

ただし、我々が考えているスマート副鏡においては、現在はすべて同じアクチュエータを同じ方向で使用する前提で研究を進めている。この考え方によれば、個々のアクチュエータの機能を変化させることが適当かもしれない。もちろん、機能を達成することを考えると、そのまま適用することがよいかどうかは検討の余地がある。また、この推進系の場合は推力低下が生じた場合に理想状態に達するまでの時間は長くなるとしても、目的とする姿勢に達することはできるであろう。一方、スマート構造システムの場合はアクチュエータの故障により、理想状態へ変化させることができなくなる可能性もある。

そのためには、受容可能なシステムの性能劣化の範囲およびスマート構造の故障シナリオを詳細に考える必要がある。しかしながら、従来の信頼性の考え方ではアクチュエータの故障がシステムの故障と考えざるを得なかったことと比べると、アクチュエータが故障したとしてもシステムが運用できる可能性が残る分、柔軟な運用が可能となるであろう。

また、スマート構造システムに対しては、いつも暴走した場合の対処が問題となる。レジリエンス工学は、もともと損害を被ったシステムを素早く回復させるための考え方である。そのため、スマート構造システムの暴走に対する対処へも適用することができると思われる。

ここまででわかるように、複雑な故障シナリオを重複・漏れがないように構築することが必要となる。そのためには、南部が提案している安全性に関わる議論を構造化・可視化し、体系化する方法<sup>(17)</sup>が必要となる。

#### 5. おわりに

本研究では、著者らが進めているスマート構造システムを宇宙構造システムとして実現するための信頼性確保に対する課題を概説するとともに、レジリエンス工学の適用可能性を考察した。

スマート構造システムは、本来、環境の変化に対応して臨機応変に形状を変え、機能を発揮するためのものである。そのために、環境の変化を計測するセンサー、形状を変化させるアクチュエータおよびそれらの動きを司るプロセッサから構成される。この臨機応変に対処できるという機能自体は、レジリエンス工学との親和性が高く、信頼性を確保するためにレジリエンス工学の考え方をを用いるというのが、合理性が高いと考えられる。

今後は、信頼性を確保するためのシナリオ構築へと

進めていく予定である。そのシナリオ構築にあたっては、南部が提案した安全性に関わる議論を構造化・可視化し、体系化する方法<sup>(17)</sup>が必要となる。また、モデル化で表現できない「残余のリスク」<sup>(18)</sup>に対する議論も必要であり、さらなる考察を進める必要がある。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたって、JAXA 宇宙科学研究所「戦略的開発研究費」およびJSPS 科研費 26249131 の助成をいただいた。

#### 参考文献

- (1) H. Tanaka, et al.: Development of a smart reconfigurable reflector prototype for an extremely high-frequency antenna, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(6), (2016), pp. 764-773.
- (2) 田中宏明, 他: スマート形状可変鏡 スリット入り鏡面モデルの開発・評価, 第58回宇宙科学技術連合講演会, (2014), 3B02.
- (3) 古谷直也, 他: 多目的最適設計法を利用した変位拡大機構のトレードオフ解析, 第60回宇宙科学技術連合講演会, (2016), 3H08.
- (4) 古谷直也, 他: スマート副鏡のための変位拡大機構の性能検証, 第32回宇宙構造・材料シンポジウム, (2016), A09.
- (5) 関 優大, 他: スマート副鏡のアクチュエータ最適配置と主鏡取り付け誤差モードに関する考察, 第61回宇宙科学技術連合講演会, (2016), 3S13.
- (6) 宇宙航空研究開発機構「宇宙システムの安全・ミッション保証」編集委員会: 宇宙システムの安全・ミッション保証, 日科技連, (2016)
- (7) 石村康生, 他: 高精度大型宇宙構造システム - Finishing Touch in SPACE -, 第61回宇宙科学技術連合講演会, (2016), 3S05.
- (8) E. Hollnagel, D. D. Woods, N. Leveson 編著, 北村正晴 監訳, レジリエンスエンジニアリング, 概念と指針, 日科技連, (2012).
- (9) 北村正晴: 現場の実践知を生かすレジリエンスのデザイン, 計測と制御, 54(7), (2015), pp. 470-478.
- (10) 宇宙航空研究開発機構, 信頼性プログラム標準 JMR-004C, (2012).
- (11) M. Ito et al.: Conservative reliability index for epistemic uncertainty in reliability-based design optimization, *Struct. Multidiscip. Opt.*, (accepted for publication)
- (12) 伊藤誠, 小木曾望: 認識的不確定性を考慮した構造設計法に関する考察, 第33回宇宙構造・材料シンポジウム, (2017), B14.
- (13) 玉置久, 他: システムとレジリエンス, システム/制御/情報, 60(1), (2016), pp. 18-23.
- (14) 高橋晶世, 嶋田徹: 宇宙輸送におけるレジリエンス・エンジニアリング, 日本機械学会年次大会2017, (2017), G1700304.
- (15) 野本 秀樹, 植田 聡史: レジリエンス・エンジニアリングによる新しい宇宙機冗長設計, 第12回クリティカルソフトウェアワークショップ, (2015), (<https://www.ipa.go.jp/files/000043907.pdf>, (2018年1月15日アクセス))
- (16) H. Nomoto et al.: Resilient Redundancy: Design Study of the New HTV (H-II Transfer Vehicle), *Space Safety is No Accident*, 7th IAASS Conference, (T. Sgobba and E. Rongier (eds.)), Springer, (2017), pp. 529-536.
- (17) 南部陽介: 超小型衛星の構造設計に対する安全要求のゴール指向要求分析, 第30回宇宙構造・材料シンポジウム, (2014), A06.
- (18) 高田毅士: 福島事故後の原子力安全確保のためのリスク論の重要性, 日本原子力学会誌, 56(4), (2014), pp. 250-255.