

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18812

研究課題名(和文)レジリエンス工学に基づくスマート構造システムのリスクシナリオ構築と最適設計

研究課題名(英文)Optimum Design Considering Risk Scenario Based on Resilience Engineering for Smart Structural Systems

研究代表者

小木曾 望(KOGISO, NOZOMU)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70295715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：モーフィング翼や宇宙スマートリフレクターのようなスマート構造システムに、レジリエンス工学の考え方を適用し、センサーやアクチュエータが故障したとしても機能を継続できるシナリオを構築する研究を行った。  
モーフィング翼においては、複数のフラップを有する翼形態に対し、一部のフラップが故障して舵角が0に戻った場合、生き残っているフラップの舵角を変化させて故障前と同じ揚力を確保する方策を提案した。  
宇宙スマートリフレクターに関しては、一部のアクチュエータが故障した場合でも残存アクチュエータを使って形状誤差を最小として観測可能時間を伸ばすシナリオを構築し、その成果を定量的に評価する稼働率の考え方を導入した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来は、スマート構造システムのような複雑なシステムでは要素の故障による機能損失を避けるために、要素の信頼度を向上させることが重要視され、高コスト化が避けられなかった。それに対して、本研究では、レジリエンス工学の概念を適用することで、一部が故障したとしても機能を回復させることで、運用が継続できるリスクシナリオを構築できることを示した。この成果は、スマート構造システムだけでなく、複雑なシステムにおいても、コストをかけて要素の信頼度を高くしなくても、その結果、一部の要素が故障したとしても、リスクシナリオを構築することで、その機能が実現できるような低コスト化につなげることができる。

研究成果の概要(英文)：This study applied a concept of resilience engineering to smart structural systems such as morphing wings and space smart reflectors to build risk scenarios that can continue to work a part of functions even if some sensors and actuators will fail. For a wing with divided plural morphing flaps, a risk scenario to re-distribute morphing angles of survived flaps when some flap fails to return to the flap angles to zero is constructed by applying the multiobjective optimization method. For the space smart reflector, the similar idea is applied to construct a scenario that re-distribute the output displacement for the survived actuators in order to recover the lost functions by failure of some actuators.

Then, concept of operating rate is introduced to quantitatively evaluate the recoverability of the smart structural system.

研究分野：航空宇宙工学，システム工学，最適設計，信頼性

キーワード：レジリエンス工学 多目的最適設計 スマート構造システム 不確定性 アベイラビリティ ロバスト性 リスクシナリオ 回復性

### 1. 研究開始当初の背景

環境に適応して形状を高精度に変えるための有用なシステムとして、センサーやアクチュエータと一体化した**スマート構造システム**が提案されているが、その適用は一部に限られ、広く普及するに至っていない。その要因として、このスマート構造システムは要求通りの性能を満足することだけでなく、「センサーやアクチュエータの不具合が起きても上位システムや外部に悪影響をおよぼさない」ことが求められるためである。特に、航空宇宙構造システムにおいては厳しい信頼性要求が課せられる。これに対する従来の考え方は、不確定性に対する安全余裕(マージン)を適切に設定すること、つまり「**リスクを排除する**」ことである。一方、スマート構造システムは、従来型の構造では設計要求を満足できないために、環境の変動に適応して形状を変化させるものであり、もともと、リスクを排除できるマージンが少ない。そのため、従来の考え方は解決が困難である。

### 2. 研究の目的

本研究は「レジリエンス工学」<sup>(a)</sup>の考え方に着目する。これは事故や災害への対策には「想定外に対処する」ことが必要という立場から、防災の分野で普及してきた概念である。レジリエンス工学は、安全余裕だけでなく、柔軟性、緩衝力、許容度の4項目を基本特性とする。

そこで、本研究は、スマート構造システムに「変化する環境に対応できる能力」を持たせる新しいリスクシナリオを構築し、これに基づくリスク設計法の構築を目的とする。具体的には、リスクに対する次の3項目を考慮する。

- (1) 環境の変動が想定内・想定外に関わらず、上位システムの安全が確保できること。
- (2) 想定外環境下でのスマート構造システムの機能劣化が緩やかであること。
- (3) 環境が戻った場合にスマート構造システムの機能が回復できること。

### 3. 研究の方法

環境の変動が想定内の場合と想定外の場合に分けて、航空機のモーフィング翼および宇宙機のスマートリフレクターシステムを対象として、下記の項目に取り組む。

#### (1) 上位システムおよび外部の安全確保のためのリスクシナリオ構築

不確実な環境のもとでスマート構造システムが故障した場合に上位システムや外部への影響をおよぼさないためのリスクシナリオをレジリエンス工学に基づいて構築する。

#### (2) 不確定性を考慮したスマート構造の機能確保のための最適設計法の構築

構築したリスクシナリオに基づいたスマート構造要素の配置問題を多目的最適設計問題として取扱い、機能とリスクに対するトレードオフ関係を明確にする。

ここで、想定内環境においては主にアクチュエータやセンサーの単一要素の故障を考慮し、想定外環境では主にアクチュエータやセンサーの劣化や複数要素の故障、一部機能の喪失を考慮する。

### 4. 研究成果

ここでは紙面の都合上、モーフィング翼および宇宙スマートリフレクターのレジリエント運用に関する2つの事例を簡単に紹介する。その他の研究は発表論文等を参照いただきたい。

#### (1) モーフィング翼を対象とした研究

ここでは、図1に示すように、8枚のフラップを有する主翼<sup>(b)</sup>のフラップをモーフィングフラップに置き換える。そして、8枚のうち1枚が故障してフラップ角が0となった場合に、故障していない残りのフラップのフラップ角を変えることで、正常時と同等の揚力を発生させること、同時に翼根曲げモーメントを低減させる回復シナリオを提案した例を示す。

そのために、各フラップの舵角を設計変数として、次に示す多目的最適設計問題として定式化した。

$$\text{Minimize: } f_1(\mathbf{x}) = M_{\text{root}}(\mathbf{x})$$

$$\text{Minimize: } f_2(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^8 |x_i - x_{i0}|$$

$$\text{Minimize: } f_3(\mathbf{x}) = |L(\mathbf{x}) - L_0|$$

ここで、 $M_{\text{root}}$ は翼根の曲げモーメント、 $x_{i0}$ は故障前のフラップ角(全フラップで一定とする)、 $L_0$ はその

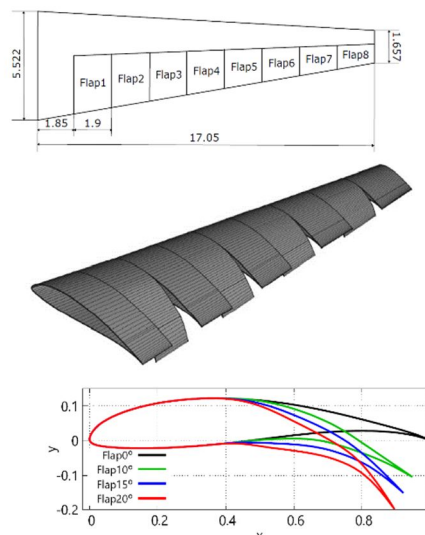


図1: 8枚のフラップをもつ主翼モデル

$x$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
Case 1	0°	10°	20°	10°	9°	11°	9°	0°
Case 2	0°	10°	16°	10°	11°	11°	10°	8°
Case 3	0°	10°	16°	10°	11°	10°	10°	8°

Case	Decreasing rate of $M_{root}$ [%]	$\frac{L-L_0}{L_0}$	$\sum_{i=1}^8  x_i - x_0 $
1	3.63	$8.22 \times 10^{-5}$	23°
2	0.340	$-3.90 \times 10^{-4}$	10°
3	1.14	$-6.93 \times 10^{-3}$	9°

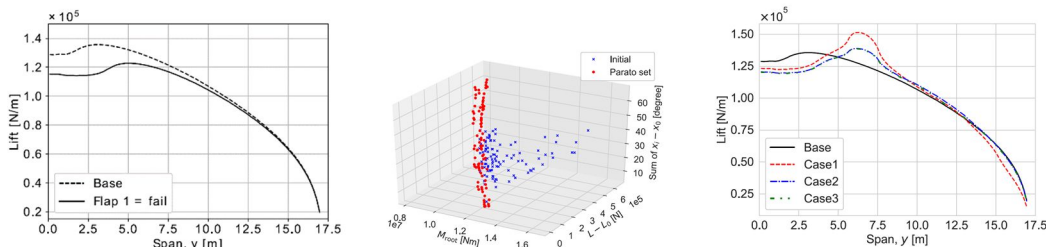


図 2: フラップ 1 が故障した後の回復例 (フラップ角分布, 目的関数, ノミナル時および故障後の揚力分布, パレート解集合, 回復後の揚力分布)

$x$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
Case 1	10°	14°	10°	11°	0°	10°	10°	11°
Case 2	9°	15°	10°	11°	0°	10°	9°	11°
Case 3	10°	14°	10°	11°	0°	10°	10°	10°
Case 4	10°	15°	10°	11°	0°	10°	8°	10°
Case 5	20°	14°	10°	0°	0°	10°	1°	10°
Case 6	9°	15°	10°	11°	0°	10°	10°	10°

Case	Decreasing rate of $M_{root}$ [%]	$\frac{L-L_0}{L_0} [\times 10^{-3}]$	$\sum_{i=1}^8  x_i - x_0 $
1	3.26	$-1.56 \times 10^{-3}$	6°
2	3.33	$8.41 \times 10^{-5}$	9°
3	4.03	$-6.28 \times 10^{-3}$	5°
4	4.28	$-3.22 \times 10^{-3}$	8°
5	9.90	$-1.01 \times 10^{-3}$	33°
6	3.65	$-1.50 \times 10^{-3}$	7°

図 3: フラップ 5 が故障した後の回復例 (フラップ角分布と目的関数)

時点の揚力,  $L$  は揚力である. つまり, フラップ故障後, できるだけ少ない舵角変化で, 揚力の維持をめざすとともに, 曲げモーメントの最小化をめざす. この多目的最適設計問題に対して NSGA-II<sup>(c)</sup> を適用し, 故障後の舵角変更シナリオを得た. 空力解析には渦格子法である Athena Voltex Lattice (AVL)<sup>(d)</sup> を用いた.

ここでは, フラップ 1 とフラップ 5 が故障した場合の 2 例について, 故障前と故障後の揚力差が 1% 以内であった例を図 2 および図 3 に示す. 多目的最適化を利用したことで, 翼根曲げモーメントを最小化できる場合, フラップ角の変化量を最小化できる場合の両者が得られ, 状況に応じていずれかの場合を採用することができる.

ここには, 一部の結果のみを示したが, 一部のフラップが故障したとしても性能を劣化させることなく, 運用が可能となることを示した.

## (2) アクチュエータの故障を考慮した宇宙スマートリフレクタのレジリエント運用

サブミリ波で宇宙を観測するシステムとして気球 VLBI が提案されている. その高い鏡面精度を実現するために, 重力変形や温度変形, 取り付け誤差などによって生じる主鏡の形状誤差を副鏡に取り付けたアクチュエータで適応的に補正するスマートリフレクタが提案されている<sup>(e)</sup>. 副鏡は, 図 4 に示すように 6 枚のペタルに分割され, それぞれ 2 本のアクチュエータを搭載する.

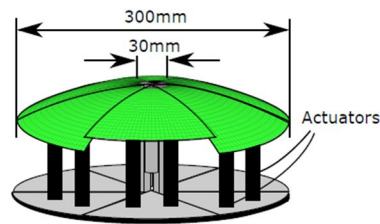
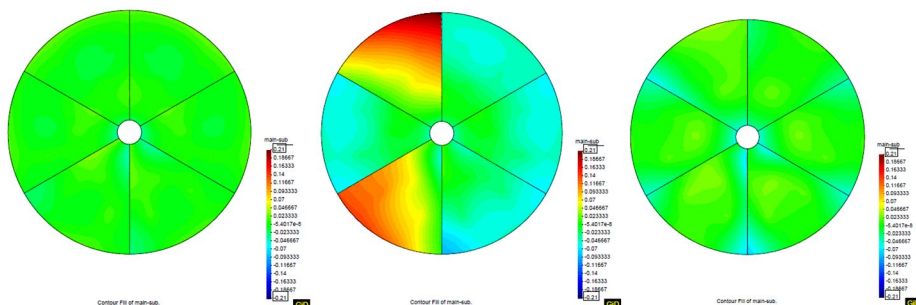


図 4: スマート副鏡

本研究では, このアクチュエータが故障したとしても残存アクチュエータの出力変位を再配分し, システムとしての機能を維持するレジリエント運用を提案した. 主鏡変形は対象天体観測時の仰角変化による重力変形, 温度変化による熱変形によ



(a) 故障前 (b) アクチュエータ故障後 (c) 残存アクチュエータによる再配分後

図 5: アクチュエータ故障前・故障後・再配分後の鏡面誤差分布

て変化し、アクチュエータ出力によって副鏡形状を変化させ、観測可能なアンテナゲインになるように補正する。たとえば、アクチュエータが故障したとしても、残存アクチュエータを用いて、観測可能な状態に変化させる。その例として、右上と右下の2か所のペタルの片方のアクチュエータが故障する前と故障した後、さらに残存アクチュエータの出力変位を再配分した後のアンテナシステムの鏡面誤差分布を図5に示す。アクチュエータ出力を再配分することで性能が回復できることがわかる。

さらに、そのレジリエンス性を定量的に評価する指標として、アクチュエータが $n$ 個故障した時の観測可能な時間の割合を稼働率 $a_n$ と定義する。アクチュエータ出力再配分により、要求鏡面誤差を満たしているときは観測可能、そうでない場合は観測不可能と考える。これには、観測対象天体を観測する際のアンテナ仰角による主鏡の重力変形が影響するため、観測可能確率を用いて稼働率 $a_n$ を求めることができる。そして、3個以上故障した場合には回復はほぼ不可能と考え、信頼度を次式で定義する。

$$R(t) = P_0(t) + a_1P_1(t) + a_2P_2(t)$$

ここで、 $P_n(t)$ はアクチュエータが $n$ 個故障する確率であり、アクチュエータの故障が独立な指数分布に従うと仮定すると、 $R(t)$ は次式で表される。

$$R(t) = (1 - 12a_1 + 66a_2)e^{-12\lambda t} + (12a_1 - 132a_2)132e^{-11\lambda t} + 66a_2e^{-10\lambda t}$$

この関係を用いると、アクチュエータ故障率による信頼度の変化を求めることができる。また、目標信頼度を達成できる故障率の下限値を求めることができる。その結果を図6、図7に示す。これより、レジリエント運用による効果が定量的に評価できることがわかる。

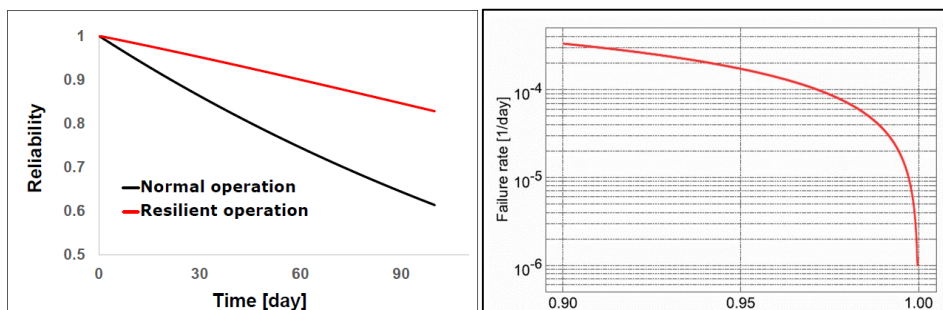


図6: ある故障率に対する信頼度の比較

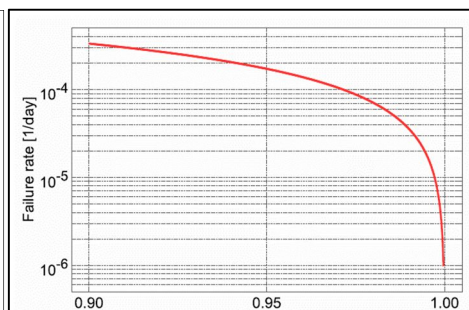


図7: 故障率とEOB信頼度の関係

### (3) まとめ

本研究では、モーフィング翼や宇宙スマートリフレクタのようなスマート構造システムに、レジリエンス工学の考え方を適用し、センサーやアクチュエータが故障したとしても機能を継続できるシナリオを構築する研究を行った。

モーフィング翼においては、複数のフラップを有する翼形態に対し、一部のフラップが故障して舵角が0に戻った場合、生き残っているフラップの舵角を変化させて故障前と同じ揚力を確保する方策を提案した。宇宙スマートリフレクタに関しては、一部のアクチュエータが故障した場合でも残存アクチュエータを使って形状誤差を最小として観測可能時間を伸ばすシナリオを構築し、その成果を定量的に評価する稼働率の考え方を導入した。

### <引用文献>

- (a) 例えば、古田、菅野: レジリエンス工学の誕生と展望, システム制御情報, 60(1), 2016, pp. 3-8.
- (b) 田代悠介, 津島夏樹, 横関智弘, 玉山雅人, 適応翼による荷重制御手法の効率化と最適化検討, 第60回構造強度に関する講演会, (2018), 2B12.
- (c) Deb, K., A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, (2002), 182 - 197
- (d) Budziak, K., Aerodynamic Analysis with Athena Vortex Lattice (AVL), Hamburg University of Applied Sciences (2015).
- (e) Tanaka, H., 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), 764-773.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 GON Yoya, KOGISO Nozomu	4. 巻 64
2. 論文標題 Effect of Member Length Uncertainty and Backlash on Deformation Accuracy for a High-Precision Space Truss Structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 31 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.64.31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoya Gon and Nozomu Kogiso	4. 巻 18
2. 論文標題 Deployment Repeatability of Pointing Performance for Highly Precise Extensible Optical Bench Considering Uncertainties on Backlash and Friction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society of Aeronautics and Space Sciences, Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 25-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.18.25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoya Gon and Nozomu Kogiso	4. 巻 64
2. 論文標題 Effect of Member Length Uncertainty and Backlash on Deformation Accuracy for High-Precision Space Truss Structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society of Aeronautics and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 31-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.64.31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kisumi IIDA, Seiya MATSUSHITA, Nozomu KOGISO, Hiroaki TANAKA
2. 発表標題 Optimal Actuator Layout for Highly Precise Smart Space Reflector System Based on Concept of Resilience Engineering
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小木曾望, 飯田輝澄, 松下征矢
2. 発表標題 レジリエンス工学に基づくスマートリフレクターの運用に関する考察
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第62回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂野文香, 松下征矢, 小木曾望, 田中宏明
2. 発表標題 不確定性伝播を考慮したスマート副鏡を用いた高精度アンテナシステムにおける最適設計
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木優希, 坂野文香, 松下征矢, 小木曾望, 田中宏明
2. 発表標題 光束分離近似法によるスマートアンテナの不確定性伝播解析
3. 学会等名 第21回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小木曾望, 横山知樹, 飯田輝澄
2. 発表標題 モーフィングフラップへのレジリエンス工学の適用について
3. 学会等名 第9回構造物の安全性および信頼性に関する国内講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田輝澄, 小木曾 望
2. 発表標題 レジリエンス工学に基づいたスマート副鏡におけるアクチュエータ配分についての考察
3. 学会等名 第35回宇宙構造・材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nozomu Kogiso, Hiroaki Tanaka, Takashi Iwasa, Takeshi Akita, Hiraku Sakamoto, Tadashige Ikeda, Atsuhiko Senba, Kosei Ishimura
2. 発表標題 Application of Smart Structures to Highly Precise Space Reflector System
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関