

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249131

研究課題名(和文) 大型高精度宇宙スマート構造システム設計のための計算機および試験検証の融合

研究課題名(英文) Integration of design verification from computational and experimental aspects for large-scale highly-precise space 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)・准教授

研究者番号：70295715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次世代の宇宙ミッションに求められる宇宙構造システムとして、環境の変化に応じて形状を変化させることができる「宇宙スマート構造システム」に着目した。そして、このシステムを実現するために不可欠な「計算機検証と試験検証とを融合した設計検証法」を確立することを目的とした。計算機検証では不確実性のある環境下での性能評価法の確立を、試験検証法では主に熱変形やその不確実性に着目した試験検証法の確立をめざした。そして、それをもとに計算機検証と試験検証とを融合した設計検証法を構築し、宇宙スマート構造システムの設計に適用するとともに、その有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research project focuses on the "space smart structure system" which can adaptively change the shape according to the perturbation of the environmental factor as the future space structure system required for the future space mission. The objective of this research project is to establish a design verification framework combining the computational and experimental verification methods. The computer verification focuses on the structural analysis under uncertainty based on several computational statistic methods. The experimental verification considers thermal deformation under environmental uncertainty. The constructed framework is applied to the design problem of the smart space structure systems and then, the validity of the framework is clarified.

研究分野：航空宇宙工学，最適設計，信頼性工学

キーワード：航空宇宙工学 スマート構造システム 不確実性伝播モデル ロバスト最適設計 高精度画像計測 データ同化 複合材料

1. 研究開始当初の背景

宇宙構造システムにはさまざまな要求がある。たとえばアンテナ構造では反射面に高い形状精度が要求される。観測対象の多様化に伴い、その要求精度はますます高精度化してきている。これにより、軌道上の温度環境変動に対する熱変形の影響が無視できなくなってきた。従来は構造様式では要求精度を達成することが困難となってきた。

そこで、環境に応じて形状を変化させることができる「スマート構造システム」に着目した。これを用いれば、従来のパッシブな構造様式に比べて形状誤差を一桁以上改善することが期待できる。

それを実現するために最も重大な課題は、スマート構造に対して、打ち上げ前に要求精度が満足できることを示す検証方法が確立されていないことである。打ち上げ前には、軌道上の温度環境変動や製造誤差等による初期不整、材料特性の変動などのさまざまな変動要因に対して、性能要求を満足することを示す必要がある。

従来の性能要求では、十分なマージンを確保することで、不確定性の影響を高精度に推定する必要はなかった。性能要求の高度化に伴い、十分なマージンが確保できなくなってきた。不確定性の影響を高精度に推定することが必要となってきた。

2. 研究の目的

そこで、本研究は不確定性に焦点をあて、宇宙スマート構造の設計検証法を確立することを目的とする。また、現実的に、すべての項目を地上実証で検証することはできず、一部には計算機を用いた検証が必要になる。そこで、計算機検証、試験検証のそれぞれで、原因となる不確定性をどのように定量化すべきか、そして、それが変形形状の不確定性にどのように伝播するのかを定量的に評価する方法を確立することに着目する。さらに、試験と計算それぞれが互いの結果をフィードバックするために、「試験検証と計算機検証とを融合した設計検証法」を確立することに着目した。

3. 研究の方法

(A) 計算機検証、(B) 試験検証法、(C) 計算機検証と試験検証の融合 について、各担当者の専門性を活かして、以下のテーマに取り組んだ。

(A) 計算機検証法の構築：

1. スマート材料・複合材料特性とその不確定性定量化モデルの構築
2. 軌道上環境変動を考慮したスマートアンテナの性能評価モデル構築
3. 不確定性伝播モデルを含む高精度構造解析およびその近似解析モデル構築
4. 不確定性を統合した解析モデル更新法
5. 不確定性を考慮した最適設計法の構築

(B) 試験検証法の構築：

1. 既存BBM試験と設計課題抽出
2. 高精度計測法の開発
3. 地上試験計測装置の設計
4. 高精度スマート構造プロトタイプ的设计開発、地上試験による検証

(C) 計算機検証と試験検証の融合：

1. 計算機検証：不確定性モデルの改善と最適設計法の再構築
2. 大型モデルの設計と計算機検証
3. 試験検証：大型モデルの部分評価による検証

前半の2年間は(A)、(B)のテーマに並行して取り組み、後半の2年間はそれらの成果を取り込んで(C)のテーマに取り組んだ

本研究では、主に、図1に示すスマート形状可変鏡アンテナシステムを高精度宇宙スマート構造システムの対象として研究を進めた。これは、主鏡と形状可変副鏡からなる。主鏡に初期不整や熱変形などによるゆがみが生じた場合、主鏡で反射した電波の位相がずれてしまう。そのゆがみを補正するために、副鏡の形状を適応的に変化させることで電波信号を補正するシステムである。そのスマート副鏡の試作モデルを図2に示す。これは鏡面部の下に鏡面調整用の圧電アクチュエータを6本組み込んでいる。高い精度(1 μ m程度)と十分なストローク(1mm程度)を実現するとともに、鏡面を変形させるのに十分な保持力を達成できるように、積層型の圧電アクチュエータと変位拡大機構を組み合わせた構成から構成されている。

また、可変形状副鏡のもう一つの例として、図3に示すCFRP製の副鏡装置も用いた。CFRP

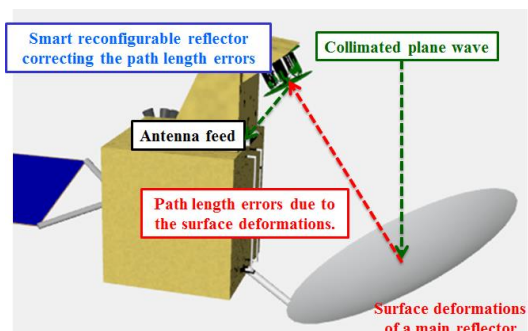


図1：形状可変鏡を用いた高精度スマートアンテナシステム

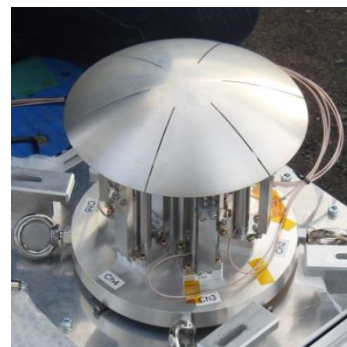


図2：スマート形状可変鏡試作モデル

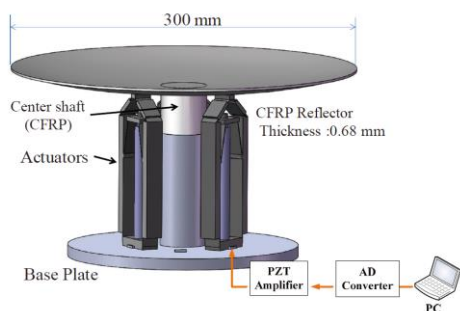


図 3: CFRP 製スマート形状可変鏡試作モデル

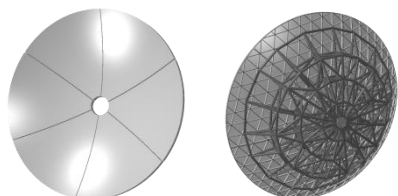


図 4: アイソグリッド構造からなる主鏡モデル

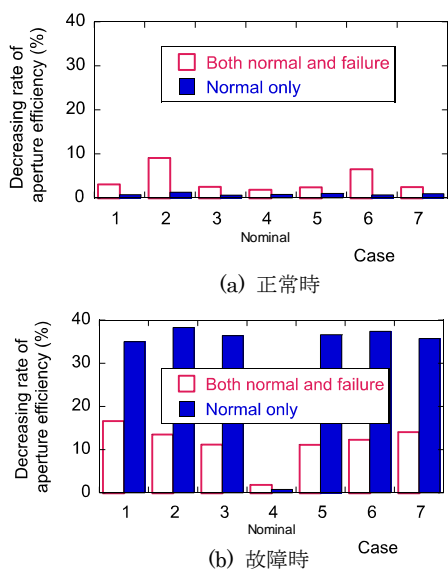


図 5: 副鏡調整機構が正常の場合と故障した場合での確定的な最適解とロバスト最適解での開口効率比較

は軽量化が求められる宇宙構造においては重要な材料である一方で、異方性材料として繊維配向角の不確定性の影響を考慮した。

4. 研究成果

紙面の都合上、いくつかの成果を抜粋して掲載する。

(1) 不確定性を考慮した多目的最適設計の開発とその応用 [論文 9, 18, 20, 21, 22]

不確定性を考慮した最適設計法として、信頼性に基づく最適設計法やロバスト最適設計法がある。これを高精度宇宙構造システムの設計に適用するためには、複数の設計条件を考慮する必要がある。そこで、多目的最適設計法の一つである満足化トレードオフ法と組み合わせた手法を開発した。

そして、その手法を主鏡面構造設計問題に適用した。主鏡は図 4 に示すような 6 分割されたアイソグリッド構造からなる。副鏡調整機構の故障や温度条件などの複数の条件を考慮した状態であっても、主鏡の変形誤差を性能要件内に収める構造形状を求めた。

図 5 は、確定的な最適設計(青)とロバスト最適設計(赤)に対するいくつかの荷重ケースに対する性能比較を示している。正常時は確定的最適設計の方が優れているが、故障してしまうと確定的最適設計の性能は大きく低下してしまう。これに対し、ロバスト設計は性能低下が低く、故障時においても性能要件を満足していることを示している。

(2) データ同化を利用した不確定性の高精度推定法の開発と非線形構造問題への適用 [論文 10]

不確定性の影響を定量化する手法として、アンサンブルカルマンフィルターを用いたデータ同化手法を開発した。この種の手法ではシステムノイズの大きさがパラメータの推定精度に影響するが、それに対処できる手法を開発した。非線形応答を考慮する必要がある構造問題に対しても有効に機能することを明らかにした。

(3) 熱変形を考慮したアクチュエータ設計 [論文 17, 学会発表 1 他]

スマート副鏡では、鏡面の変形量を確保するため、 piezoelectric アクチュエータと変位拡大機構を組み合わせた構成としている。初期試作モデル(図 1-3)では板バネやネジを多用した構造となっている。これは取り付け誤差やガタの影響を受けるため、図 6(a) に示すコンプライアントメカニズムを適用した一体型の変位拡大機構を設計開発し、所望の性能が達成できることを確認した。

ここで、軌道上で利用するためには、温度環境の変動を考慮する必要がある。変位拡大機構と piezoelectric 素子の熱膨張係数の違いを考慮する必要がある。変位拡大機構に用いている SUS の熱膨張係数は piezoelectric 素子のそれよりも大きく、温度上昇に伴い、変位拡大機構が piezoelectric アクチュエータより大きく変形してし

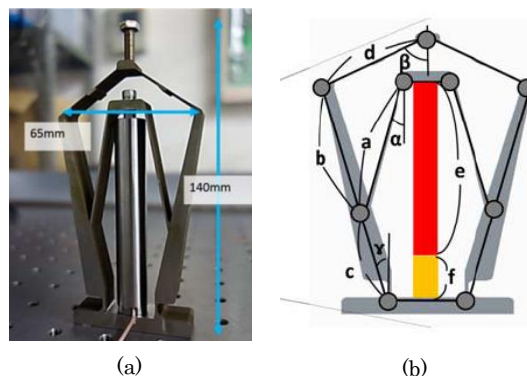


図 6: コンプライアントメカニズムからなる変位拡大機構を有する圧電アクチュエータ

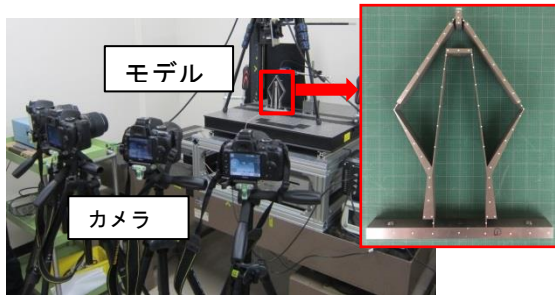


図 7：画像計測を用いた変位拡大機構の変形計測

まう。この問題を解決するために、図 6(b)に示すように、熱膨張係数の違いを相殺する材料を挿入する方法を提案し、解析および試験により、その妥当性を確認している。

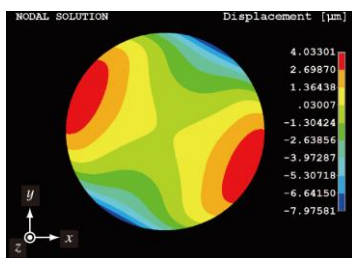
変位拡大機構は、構造が柔軟であるほど変位拡大率が高くなる。しかしながら、構造要素として剛性を確保する必要もある。そこで、多目的最適設計を利用し、固有振動数制約のもとで変位拡大性能を最大化する形態を求める研究も行った。

この変位拡大機構は、大型高精度スマート構造の実現に向けた今後の研究においても利用していく。そのために、図 7 に示すような画像計測を用いた変形計測などの計測実験も進めている。

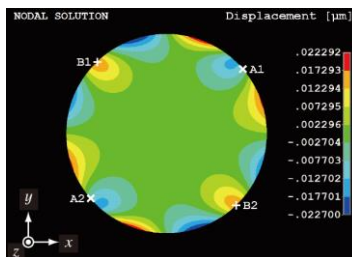
(4) CFRP 製リフレクターの熱変形における不確定性の影響 [論文 4, 5, 11, 12]

軽量化が求められる宇宙構造物では、CFRP 製のリフレクターも提案されている。CFRP は異方性材料であり、その積層構成により剛性が大きく変化する。また、材料特性の不確定性だけでなく、繊維配向角の不確定性も考慮する必要がある。

そこで、影響の大きな最上層の繊維配向角の不確定性に着目し、熱変形による変形モードの影響を考察した。その変形モードを図 8(a) に示す。さらに、アクチュエータを配置



(a) 繊維配向角の変動による熱変形



(b) アクチュエータによる変形制御

図 8：CFRP 製リフレクターの繊維配向角の変動が熱変形におよぼす影響

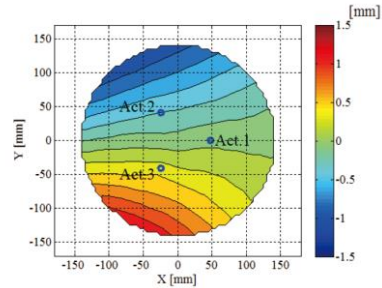
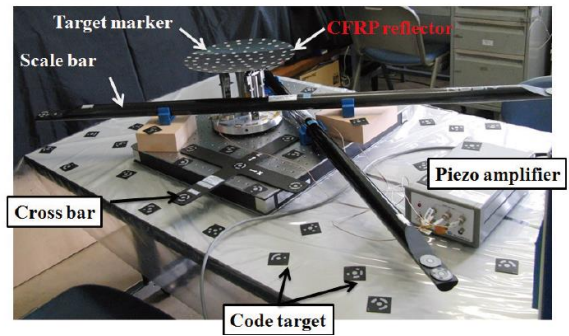


図 9：画像計測による CFRP 製スマートリフレクターの変形計測実験

したスマート可変鏡により、図 8(b) のように、その変形を大きく減少させることができることを明らかにしている。さらに、恒温槽を利用した計測実験も進めている。

また、図 9 に示すように、CFRP 製スマートリフレクターにおいても、CFRP の特性を考慮した変形状態を高精度に計測するための画像計測実験法も確立した。

(5) 高精度画像計測法の開発とその応用 [論文 3, 6, 7, 8, 13, 14, 19]

高精度スマート形状可変鏡を機能させるには、主鏡の変形形状を知る必要がある。レーザー変位計などによる点計測は計測精度が高いが、同時に一点しか計測できない。これに対し、カメラ画像を用いた画像計測は点計測に比べて計測精度は劣るが、画像の面情報が得られる利点がある。一方、その計測精度は画像解像度にも依存するため、大型構造物を計測しようとする計測精度が悪化する問題点がある。

この問題を解決するために、まず、大型構造物を小領域に分割して撮影する。一方、全特徴点を点計測により求める。そして、画像中の特徴点をマッチングすることにより、全体を高精度に計測する手法を提案した。その概念を図 10 に、その検証結果を図 11 に示す。

これは、画像が重なる領域に置いた物体を異なるカメラで計測した結果を図 11(a), (b) に示している。それぞれのカメラ座標が異なるために違う位置を示しているが、点計測を利用した特徴点マッチングを用いることで、図 11(c) に示すように、同じ座標が得られている。

ここで提案した計測法をいくつかの構造問題の形状計測に適用し、その有効性を明らかにしている。

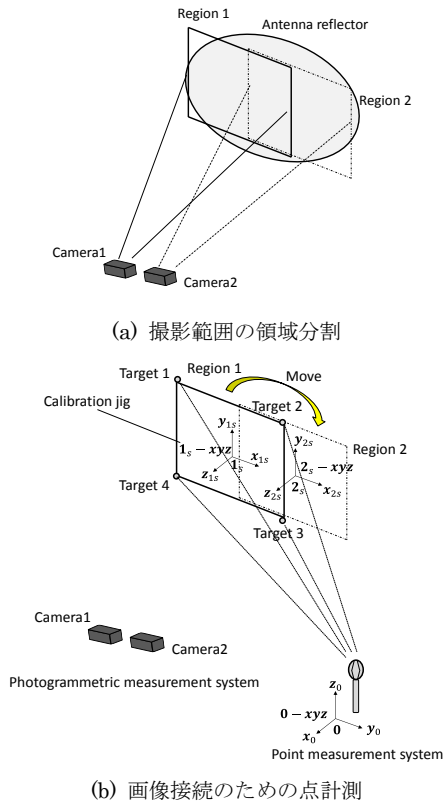


図 10: 点計測と画像計測を融合した大型構造の高精度形状計測法

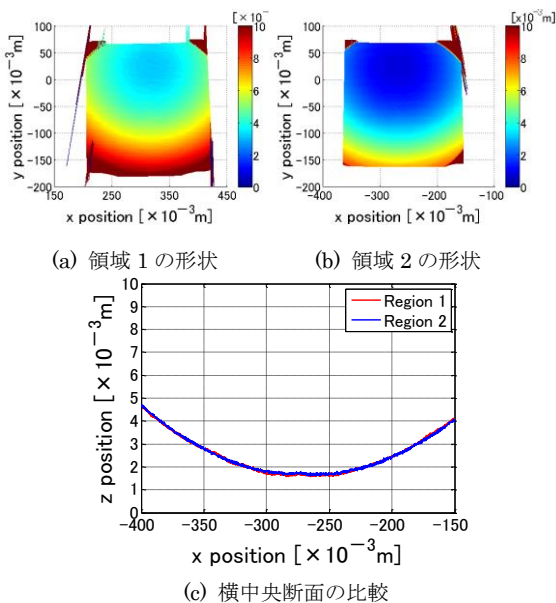


図 11: 点計測と面計測を融合した高精度形状計測

(6) まとめ

ここでは、宇宙スマート構造を実現するために必要な計算機検証、試験検証およびそれらを融合した設計検証法の確立を目的とした研究で得られた成果の一部を紹介した。

今後は、宇宙スマート構造の軌道上実証に向けた次の段階に進んでいく予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 22 件)

- 1 田中宏明, 坂本啓, 石村康生, 小木曾望

(他 2 名), 宇宙用高精度大型構造物の研究開発: スマート形状可変鏡, 日本航空宇宙学会誌, **66** (2018), 135-140, 査読有, doi: 10.14822/kjsass.66.5_135

- 2 T. Iwasa, Wrinkle-reduction law for rectangular membranes under a shear load, AIAA Journal, (2018), (in press), 査読有, doi: 10.2514/1.J056870

- 3 T. Iwasa, Experimental verification on simplified estimation method for envelope curve of wrinkled membrane surface distortions, Thin-Walled Structures, **122** (2018), 622-634, 査読有, doi:10.1016/j.tws.2017.10.049.

- 4 H. Tanaka, Study on anisotropic characteristics of a CFRP deformable reflector system, Aerospace Technology Japan, **16** (2018), 57-62, 査読有, doi:10.2322/tastj.16.57

- 5 S. Tanaka, T. Ikeda (他 2 名), Suppression of out-of-plane thermal deformation of CFRP reflectors by linear actuators, Aerospace Technology Japan, **16** (2018), 116-122, 査読有, doi:10.2322/tastj.16.116

- 6 岩佐 貴史 (他 2 名), 複数カメラを用いたサンプリングモアレ法による柔軟物体表面形状の高解像度振動計測, 実験力学, **17**, (2017), 97-102, 査読有, doi: 10.11395/jjsem.17.97

- 7 T. Iwasa, Approximate estimation of wrinkle wavelength and maximum amplitude using a tension-field solution, International Journal of Solids and Structures, **121** (2017), 201-211, 査読有, doi:10.1016/j.ijsolstr.2017.05.029

- 8 H. Tanaka, Non-Contact strain measurement of mesh surface using digital image analyses, Aerospace Technology Japan, **15** (2017), a37-a44, 査読有, doi:10.2322/tastj.15.a37

- 9 小木曾 望(1 番目), 田中 宏明(6 番目 他 4 名), 多目的最適設計法を利用した気球 VLBI における副鏡調整機構の故障を考慮した主鏡面構造設計, 航空宇宙技術, **15** (2016), 91-100, 査読有, doi:10.2322/astj.15.91

- 10 T. Akita, R. Takaki and N. Kogiso, An adaptive estimation of nonlinear structural deformations by using the ensemble Kalman filter, Aerospace Technology Japan, **14** (2016), Pc_43-Pc_49, 査読有, doi:10.2322/tastj.14.Pc_43

- 11 S. Tanaka, T. Ikeda, A. Senba, Thermal deformation generated on a CFRP laminated reflector, Mechanical Engineering Journal, **3** (2016), 16-00296, 査読有, doi:10.1299/mej.16-00296

- 12 S. Tanaka, T. Ikeda, A. Senba, Sensitivity analysis of thermal deformation of CFRP laminate reflector due to fiber orientation error, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **30** (2016), 4423-4426, 査読有, doi: 10.1007/s12206-016-0905-z
- 13 岩佐貴史, 原田卓, 凹面ターゲットマーカーを用いた 3 次元形状計測データのマッチング精度検証, *実験力学*, **16** (2016), 221-225, 査読有, doi:10.11395/jjsem.16.221
- 14 T. Iwasa and T. Harada, A Precise Connection Method for Surface Shape Data Measured by the Grating Projection Method, *Transaction of JSASS*, **59** (2016), 251-257, 査読有, doi:10.2322/tjsass.59.251
- 15 T. Okabe, N. Kogiso, H. Sakamoto and H. Tanaka, Finite Element Updating for High Precision Space Reflector Model Using Multiobjective Optimization, *Aerospace Technology Japan*, **14** (2016), Pc-7-Pc_12, 査読有, doi:10.2322/tastj.14.Pc_7
- 16 田中宏明, 圧電アクチュエータと合焦点機構による反射鏡アンテナの行路誤差制御, *日本機械学会論文集*, **82** (2016), 15-00521, 査読有, doi:10.1299/transjsme.15-00521
- 17 K. Gotou, H. Sakamoto, A. Inagaki, H. Tanaka, K. Ishimura, and M. Okuma, Actuator design for space smart reflector to reduce thermal distortion, *Aerospace Technology*, **14** (2016), Pc_25-Pc_31, 査読有, doi:10.2322/tastj.14.Pc_25
- 18 M. Toyoda and N. Kogiso, Robust multiobjective optimization method using satisficing trade-off method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **29** (2015), 1361-1367, 査読有, doi:10.1007/s12206-015-0305-9
- 19 岩佐貴史, 小木曾望 (他 3 名), 面計測と点計測を統合した大型宇宙構造物の高精度形状計測法の提案, *航空宇宙技術*, **12**, (2015), 95-103, 査読有, doi: 10.2322/astj.14.95
- 20 N. Kogiso (2 番目), H. Tanaka (4 番目他 2 名), Trade-off analysis for structural design of high-precision space reflector using multiobjective optimization method, *Mechanical Engineering Journal*, **2** (2015), 15-00058, 査読有, doi:10.1299/mej.15-00058
- 21 M. Toyoda and N. Kogiso, Robust multiobjective optimization method using satisficing trade-off method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **29** (2015), 1361-1367, 査読有, doi:10.1007/s12206-015-0305-9
- 22 N. Kogiso (他 2 名), Reliability-based multiobjective optimization using the satisficing trade-off method, *Mechanical Engineering Journal*, **1** (2014), DSM0063, 査読有, doi:10.1299/mej.2014dsm0063
- [学会発表] (計 94 件)
1. R. Kashiya, H. Sakamoto, M. Okuma, H. Tanaka and K. Ishimura, Athermalization of Deformable Reflector's Actuators for Radio Astronomy Satellites, *AIAA SciTech Forum*, (2018), AIAA 2018-1199, 1-16, doi:10.2514/6.2018-1199
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
小木曾 望 (KOGISO, NOZOMU)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 70295715
- (2) 研究分担者
田中 宏明 (TANAKA, HIROAKI)
防衛大学校・システム工学群・教授
研究者番号: 90532002
- 岩佐 貴史 (IWASA, TAKASHI)
鳥取大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 90450717
- 池田 忠繁 (IKEDA, TADASHIGE)
中部大学・工学部・教授
研究者番号: 40273271
- 秋田 剛 (AKITA, TAKESHI)
千葉工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 20405343
- 坂本 啓 (SAKAMOTO, HIRAKU)
東京工業大学・工学院・准教授
研究者番号: 40516001
- 仙場 淳彦 (SENBA, ATSUHIKO)
名城大学・理工学部・准教授
研究者番号: 60432019
- (3) 連携研究者
石村 康生 (ISHIMURA, KOSEI)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授
研究者番号: 1033626
- 萩 芳郎 (OGI, YOSHIRO) (H26~27 年度)
東京大学・生産技術研究所・特任講師
研究者番号 00512005