

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13929

研究課題名（和文）宇宙用大型膜の初期変形を用いた展開の高信頼性化と展張形状の高剛性化

研究課題名（英文）Improvement of Deployment Reliability and Stiffness for Space Membrane Considering on Initial Deformation

研究代表者

佐藤 泰貴（Satou, Yasutaka）

国立研究開発法人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：70726760

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、宇宙用展開膜の展開挙動や展張形状に影響を与える折り癖や膜面デバイスの反り等の初期変形を考慮し、展開の高信頼性化と展開後の高剛性化を実現した。折り癖や膜面デバイスの力学モデル化と、それらを考慮した展開・展張解析および実験モデルによる展開・展張実験を行い、現象の理解と力学モデルの検証を行った。また、これらの特性の考察に基づき、展開の高信頼性化と高剛性化を実現できる膜構造物を提案し実証実験を行うことで、実現性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙構造の打ち上げコストの大幅削減に必要な不可欠となる膜面構造物に関して、展開と展張挙動に影響を与える折り癖や膜面デバイスの変形の力学モデルの構築と展開形状の高精度予測を実現することができた。これにより、展開の信頼性向上と展張後の高剛性化を実現でき、膜面構造物の発展に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to realize high reliability of deployment and high stiffness after deployment by taking into account and utilizing the initial deformation such as creasing and curvature of membrane devices, which affect the deployment behavior and tensile shape. For this purpose, mechanical modeling of the creasing and membrane devices, deployment analysis considering them, and deployment experiments using the experimental model were conducted to understand the phenomena and to develop the design procedure.

研究分野：宇宙構造物工学

キーワード：宇宙用展開膜 折り目 太陽電池アレイ

1. 研究開始当初の背景

宇宙科学や宇宙開発におけるミッションの高度化にともない、数十～数百メートルサイズの巨大な構造物を、できるだけ低コストで打ち上げることが求められる。膜構造物は大面積の膜面を小さく折り畳んだ状態で打ち上げることができるため、上述した要求に対する親和性が高い。このため、ソーラーセイル、サンシールド、ソーラーアレイ、太陽発電衛星等、多数のアプリケーションが提案されており、中には JAXA のソーラー電力セル IKAROS(図 1)等、成功したものもある。しかし、ほとんどの宇宙用大型膜構造物は机上検討に終わっており、その理由は主に以下の二つである。

- ・ 確実に膜を展開できる、という展開の信頼性を担保(=展開の高信頼性化)できない
- ・ 展開後の形状を維持(=展開後の高剛性化)できない

伸展トラスやブームを用いたり、膜を厚くしたりすることによって、展開の信頼性や展開後の剛性を向上させる方法もあるが、巨大な膜に対応するためには重厚長大となるため、軽量かつ高収納性という膜構造の利点に反する。

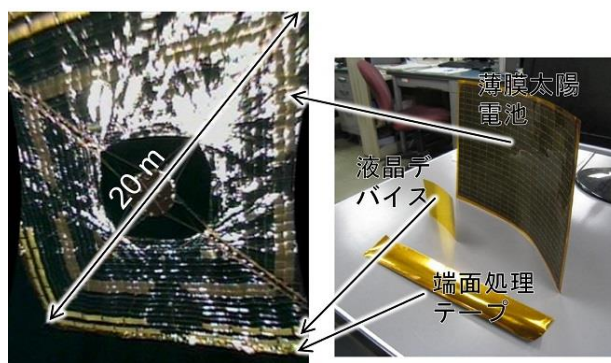


図1：IKAROSと膜面デバイス

2. 研究の目的

本研究の目的は、展開挙動や展張形状に影響を与える折り癖や膜面デバイスの反り等の初期変形を、考慮するとともに利用し、展開の高信頼性化と展開後の高剛性化を実現することである。このため、折り癖や膜面デバイスの力学モデル化と、それらを考慮した展開・展張解析、および実験モデルによる展開・展張実験を行い、現象の理解と設計論の構築を行う。

3. 研究の方法

上記目的のため、次の二つの段階で検討を行うこととした。

- (1) 展開および展張挙動をシミュレーションによって予測する際、初期変形をモデル化する必要がある。ここでは、折り癖および膜面デバイスの反りを対象とし、それらの力学モデルの構築、実験検証と現象理解、膜面全体を解析する際に用いる簡易力学モデルの構築を行う。
- (2) 展開信頼性の向上および展張後の高剛性化のため、上記(1)を考慮しつつ、最適な折り畳みと展開方法を検討する。ここでは、二次元展開する薄膜太陽電池アレイを対象とし、その展開信頼性の向上と展開後の高剛性化を検討する。

4. 研究成果

(1) 展開および展張挙動を予測するための折り癖の力学モデルの構築

展開および展張挙動を予測するとともに、高精度な展張形状を得るためには、折り癖の展開特性を明らかにする必要がある。既往研究では、弾塑性を考慮した折り目モデルが検討されたものの、実際の折り畳みに近い、十分に折り癖がつけられた場合には、その折り目モデルによる解析結果と実験結果は一致しなかった。本研究では、その原因が膜材の応力緩和にあることを明らかにし、まず折り癖部分のローカルな変形を対象として応力緩和を考慮した数学モデルの構築と実験検証を行った。また、膜面全体を解析する際に用いることが可能な簡易力学モデルを構築した。

折り癖部分のローカルな変形特性の解明とモデル化においては、まず、膜の展開形状特性を明らかにするため、折り癖の形成・折り癖形成荷重の除去・展開の実験を行った(図2)。その結果、図3に示すように、応力緩和により折り癖形成荷重除去後の経過時間が長くなるにつれて、折り目の角度が小さくなることが示された。有限要素解析においては、膜材の粘弾性材料特性の計測とその材料モデルを構築し、応力緩和の挙動を予測した。さらに、簡易に折り癖形状を予測するための理論モデルを構築した。これらの結果、実験・有限要素解析・理論がよく一致することが示されたため、力学モデルを検証することが出来たと同時に、膜構造の展開・展張挙動を予測するためには、粘性の効果が重要であることを明らかにした。

膜面全体を解析するための折り癖の簡易力学モデルにおいては、図4に示すように有限要素

解析のシェル要素同士の中に回転バネを導入し、そのバネ定数に上述した折り癖の力学特性を用いることによって、膜全体の解析ができる簡易モデルを構築した。

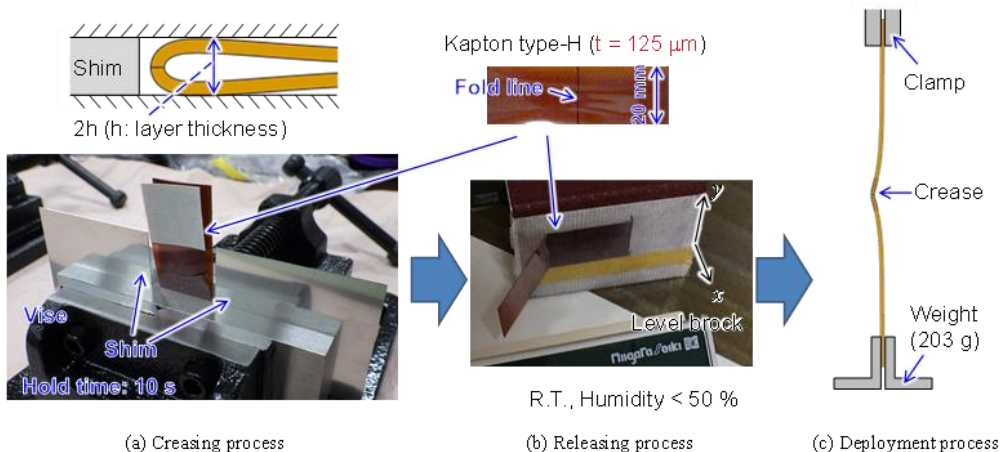


図 2：折り癖形成・折り癖形成荷重除去・展開張力载荷試験

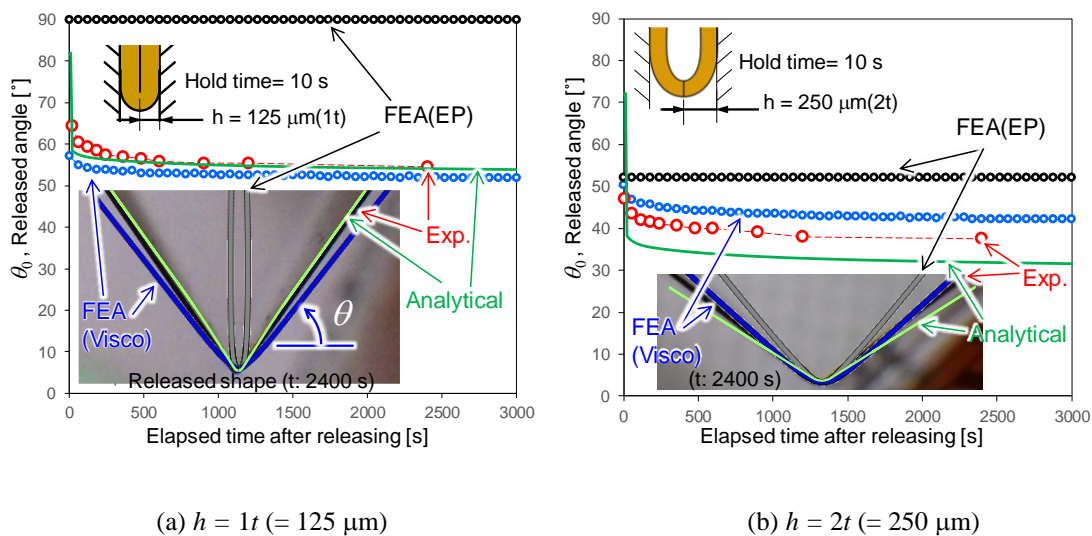


図 3：折り目形成荷重除去後の角度

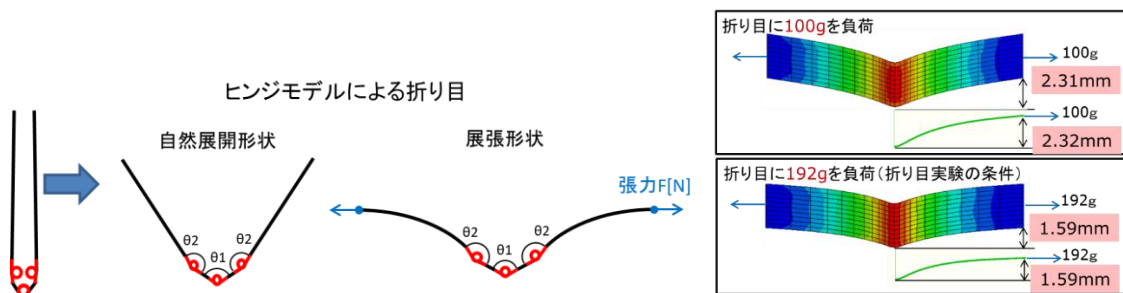


図 4：折り癖の簡易力学モデル

(2) 展開および展張挙動を予測するための膜面デバイスの力学モデルの構築

膜面デバイスのうち、薄膜太陽電池セルを対象とし、その反り変形の現象理解とモデル化を行った。接着剤でフィルムに貼り付けられた薄膜太陽電池セルが温度変化する際、セル・接着剤・フィルムの線膨張係数のミスマッチにより、反りが生じる。図 5 は一例として、OKEANOS に用いられることを想定していた薄膜太陽電池セルが、極低温となった場合に、接着剤がガラス転移点を下回り、セルと接着剤の線膨張係数のミスマッチにより接着部分が大きく反ることを示した実験である。このような反りを予測するための力学モデルの構築を行うとともに、十分なせん断強度を持ちつつ、かつ特定の反り形状を得るための接着面積および接着位置の決定方法を提案した。ここでは、図 6 のように接着位置の最適配置を、反り形状を目的関数とした最適化を行うことによって求めた。また、この反りを 40 m の OKEANOS セイルのような大型膜の解析で考慮するための簡易モデルを構築した。

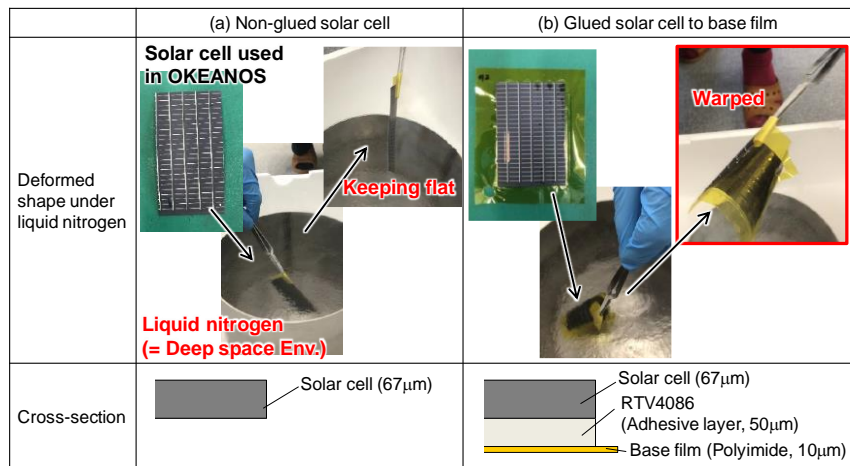


図5：薄膜太陽電池セルの反り

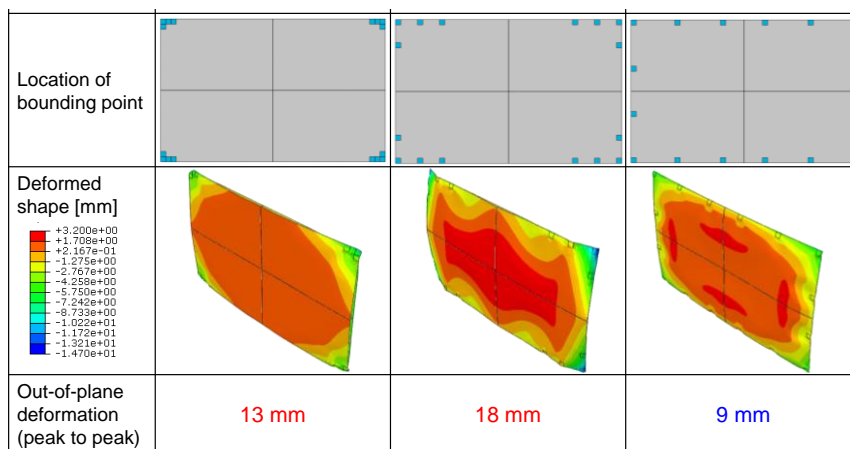


図6：膜面デバイスの反り形状のための接着剤の配置最適化

(3) 展開信頼性の向上および展張後の高剛性化

研究期間中における国内外の動向から、今後の宇宙用膜構造物の用途として、高精度化が重要であることが示された。折り癖や膜面デバイスの反りが展張後に残留する場合、それらによる面外方向の残留変形が精度悪化の要因となる。本研究では、二次元展開する太陽電池アレイを対象とし、折り癖や膜面デバイスを考慮した展開構造概念の提案により展開挙動の高信頼性化を図りつつも、高剛性化に関しては上記展開構造概念において考慮することとした。

図7は本研究で提案した太陽電池アレイ構造様式概念図および試作したBBMである。図に示すように、直交に配置されたCFRPブームを用いて、太陽電池が搭載された正方形の膜面に張力を与える。膜面はブームとは独立に収納される。本提案構造は、展開の高信頼性化と展開後の高剛性化が期待できると考えられる。展開の高信頼性化は、折り畳みパターンであるミウラ折りの折り癖の展開方向を考慮し、無理なく折り癖が展開する方向にブームが伸展する設計となっている。図に示すように、モーターは二つのローラーを回転させ、それによって折り畳まれたCFRPブームが押し出される。ブームは収納時にドラムに巻きつけられており、ゼンマイばねによって張力が負荷されている。展開後の高剛性化は、展開機構の配置とモーターによる膜面への張力負荷によって実現する。展開後に展開機構が膜面の中央または先端にある場合は固有振動数が低下するため、図に示すように膜面展開後であっても展開機構を探索機側面から動かないように配置する。このような配置にするため、折り畳み可能な十字ブームを提案した。これは、図に示すように伸展ブームと折り畳みブームによって構成され、折り畳みブームは折り畳まれた状態でドラムに巻き付け収納される。2本のブームを直交させるため、折り畳みブームの直径は伸展ブームの直径より大きくなっている。また、展開機構自体は探索機に対して動かないため、展開機構自体のロンチロックが不要となる。

提案した展開構造の展開試験の結果を図8に示す。この図に示されるように、安定して展開できることが確認できた。また、図中では重力補償用の治具を用いているが、用いずにブームと膜の自重が負荷されるような極端に外乱が大きい場合であっても展開することができ、高い展開信頼性が得られた。展張後の剛性を評価するため、ブーム剛性のコリレーションを行った解析モ

デルを用いて膜面搭載状態での固有振動数解析を行った（図9）。この結果から、実用に耐えうる剛性を有していることが明らかになった。

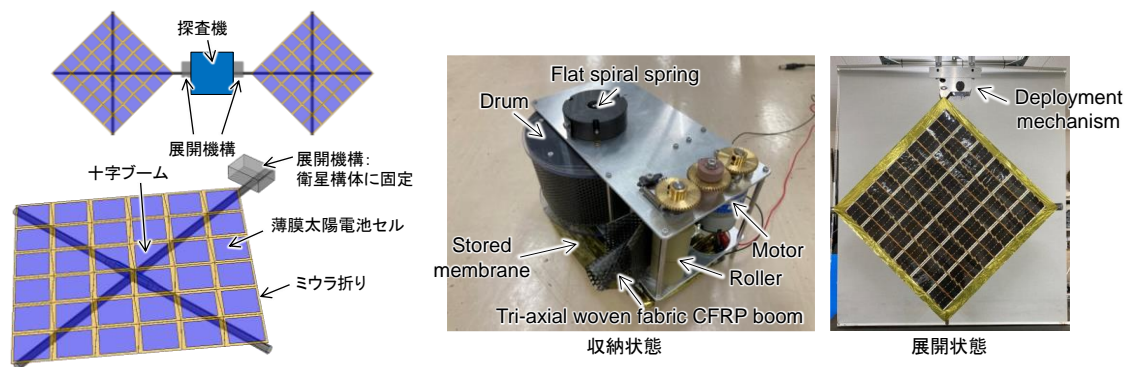


図7：提案する太陽電池アレイ膜構造

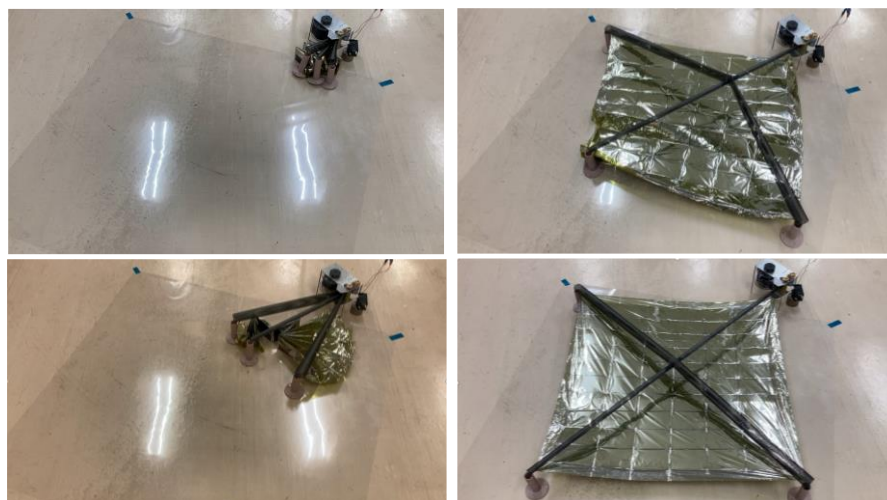


図8：提案する太陽電池アレイ膜構造物の展開試験

	1次: 振り	2次: 面外曲げ	3次: 面内曲げ
モード形状			
固有振動数	0.6 Hz	1.4 Hz	1.9 Hz

図9：提案する太陽電池アレイ膜構造物の固有振動数解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okuizumi Nobukatsu, Satou Yasutaka, Mori Osamu, Sakamoto Hiraku, Furuya Hiroshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Analytical Investigation of Global Deployed Shape of a Spinning Solar Sail Membrane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1075～1086
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J059717	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikeda, R., Mori, O., Satou, Y., and Sugawara Y.	4. 巻 Vol.17, No.6
2. 論文標題 Deformation Direction and Curvature Control of Multilayer Thin Films Produced by Sputtering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 603-610
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.17.603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasutaka Satou, Hiroshi Furuya, Shoko Kaida and Tomoyuki Miyashita	4. 巻 Vol. 60, No. 8
2. 論文標題 Visco-Elasto-Plastic Behavior of Creased Space Membrane	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 4934-4942
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J060442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 佐藤泰貴, 渡邊秋人, 伊藤裕明, 堀利行, 貝田翔子
2. 発表標題 十字ブームによるミウラ折り膜面の展開構造の試作
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会講演集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 貝田翔子, 佐藤泰貴, 宮下朋之
2. 発表標題 宇宙膜面構造物の折り目形状を考慮した高精度な展張形状予測
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会講演集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 貝田翔子, 佐藤泰貴, 宮下朋之
2. 発表標題 宇宙膜面構造物の粘弾塑性を考慮した折り目形状予測の高精度化
3. 学会等名 第63回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Takao, Osamu Mori, Masanori Matsushita, Nobukatsu Okuizumi, Yasutaka Satou, Jun ' Ichiro Kawaguchi
2. 発表標題 Active shape control of membrane structures using spin-synchronous vibrations
3. 学会等名 AIAA Scitech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 貝田翔子, 佐藤泰貴, 宮下朋之
2. 発表標題 宇宙膜面構造物の折り目の粘弾塑性を考慮した展開時の面外形状の予測
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 Y. Satou, H. Furuya, K. Shoko, T. Miyashita
2. 発表標題 Visco-Elasto-Plastic Behavior of Creased Space Membrane
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasutaka Satou , Osamu Mori, Masanori Matsushita, and Nobukatsu Okuizumi
2. 発表標題 Effects of Glued Thin-Film Solar Cells on Shape of Membrane Structure
3. 学会等名 AIAA, SciTech2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松下将典, 奥泉信克, 西山和孝, 森治, 中条俊大, 松本純, 横田力男, 豊田裕之, 佐藤泰貴, 他
2. 発表標題 OKEANOSの電力セイル、展開機構、高比推力イオンエンジンの研究開発状況
3. 学会等名 第19回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2019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
---------	---------