

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04562

研究課題名(和文) 宇宙大型膜面上の通信システム構築を目指した電波-構造同時最適設計手法の構築

研究課題名(英文) Research on simultaneous optimization method of radio wave and large membrane space structure to construct communication system

研究代表者

鳥阪 綾子 (TORISAKA, AYAKO)

東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：70449338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、～を大型宇宙軽量構造およびマイクロ波の分野横断型の設計指針を提示する事ができたと考える。超軽量構造の代表である膜面構造の皺の低減条件を突き止めた。皺の低減化手段として、皺のばしのアクチュエータと自身の形状モニタリングを同時に行うSMAアンテナの提案と実証を行った。実際の衛星への高周波通信システムの搭載にあたっては構造と電波の相互干渉を考慮に入れた設計視点と相互のフィードバックが設計段階から必要である点を実例を用いて示した。パッチアンテナの軽量化を、誘電体の配置問題と捉えなおして電波の経路をコントロールする方針がアンテナ特性の大幅なゲイン値向上に繋がる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大型宇宙構造物の代表格である膜面や薄板上に搭載された通信素子を含む構造について、剛性を確保しつつ電波特性の劣化を防ぐ両立性を目指し、本課題では搭載膜面の皺の低減といった構造の検討から構造部材が電波特性に及ぼす影響まで精査し、構造と電気系を同時に取り扱う事による大型軽量構造とマイクロ波の分野横断型の設計に必要な設計上の着眼点を導きだした。その必要性はSMAアンテナなどのハードウェアを提案・製作、または実際の衛星への搭載を例にして実証された。これは宇宙に限らず地上技術に対しても新しい観点である事で社会的意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：It is considered that this research presents the cross-field design guidelines for large space lightweight structures and microwaves by (1) to (4). (1) Conditions for reducing wrinkles in a membrane of the typical ultra-lightweight structure are found out. (2) As a means of reducing wrinkles, we proposed and demonstrated an SMA antenna which works simultaneously as a wrinkle-extending actuator and a self-monitor of the shape of itself using microwave. (3) In order to mount a high-frequency communication system on an actual satellite, a design viewpoint that should be taken into consideration from the design stage are shown using actual examples. Those are mutual interference between the structure and radio waves and mutual feedback. (4) It was shown that the policy of controlling the radio wave path by reconsidering the weight reduction of the patch antenna as a dielectric placement problem could lead to a significant improvement in the gain value of the antenna characteristics.

研究分野：大型宇宙構造物の最適設計と構造振動

キーワード：structure-microwave SMA antenna wrinkle reduction reflection of microwave optimization design

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙構造分野における大規模軽量構造物、特に膜面展開構造物には効率良く展開するための構造提案に加えて膜面上で宇宙ミッションを遂行するための機能性をいかに搭載するかという議論が加わるようになってきた。この手段として、大面積を有する薄膜構造と親和性の高い、L帯以上の高周波のパッチアンテナの搭載が想定される。しかし付随する集積回路部等をまとめたうえでアンテナじたいにも構造設計が施され、さらに構造本体にも剛性確保のための設計が施されるという二重の構造設計が質量増と層厚化の原因となっている。ここに劇的な質量減かつ薄型化を実現するための同時設計手法の登場が必要視されている。一方で、宇宙軽量構造の分野では膜に圧縮材であるブームを用いた本体構造が主流で、この展開可能性や展開再現性を国際的に競っているのが現状である。特にこの構造を用いた膜面の形状安定性を目指す最適設計に関する研究については、申請者らによる膜とブームの接合点を、満足化最適化手法を導入して皺の少ない膜面構造の設計法を提案したに留まっている。しかしながら膜面の皺を解消する手段にまで言及できてはいないのと、それらが重要な搭載物であるアンテナの電波特性に及ぼす影響といった、分野を横断した検討も未考慮のままであった。

## 2. 研究の目的

構造と電気系を同時に取り扱って、膜面の剛性を確保しつつ電波特性の劣化を防ぐ両立性を目指し、本課題では形状回復と剛性を保持する機能性構造部材が電波特性に及ぼす影響を調査し、特に軽量構造およびマイクロ波の分野横断型の設計手法の確立を目指す事に注力した。

## 3. 研究の方法

研究は後述に示す様に[I][II]の2つの段階に分けて執り行う。まずは構造のみに着目し、[I]として膜-ブーム展開後の膜面形状精度の向上のための条件とその方法の提案を行い、さらに立体膜面構造の設計に言及する。[II]では通信システムを有するパネル型衛星の構造からの電波の反射を考慮した設計を行い、さらにパッチアンテナの劇的な軽量化を目的とした構造位相最適化とアンテナ特性に与える影響を精査する。

### **[I] 膜-ブーム展開後の形状精度の向上を目指した膜面構造に関する設計**

- ① 膜-ブーム構造内の、膜部の皺の最小化を実現する構造的条件の探求。
- ② 形状精度のためのSMAアンテナの提案。

### **[II] パッチアンテナを対象とした複合領域的大型宇宙膜面構造物の設計法の提案**

- ① パネル型衛星（トランスフォーマ衛星）の衛星本体構造からの電波の反射を考慮した通信品質向上のための設計
- ② 劇的な軽量化を目指したアンテナ基板の提案と構造特性およびアンテナ特性への寄与度の調査とその考察

上記[I]ではまず構造のみに着目し、膜面の構造位相最適設計法として張力場理論を用いた皺（リンクル）をリンクル強度として定量的に評価する手法を導入して定式化し皺の発生を最小化させる構造的条件を調査(①)する。その実現のための形状安定性を確保する手段として、SMA材のアクチュエータとしての形状回復機能とアンテナゲインの変化による膜面ヘルスモニタリング技術の両方を1つのハードに集約したシステムであるSMAアンテナを提案し、実証する(②)。[II]構造-電波の合領域的大型宇宙膜面構造物の取り扱いに着目する。宇宙太陽光発電を見据えた数キロにも及ぶパネル型宇宙構造物への適用を想定し、その小型版ともいえる

JAXAで開発検討中のトランスフォーマ衛星を対象にして、衛星本体構造からの電波の反射による通信品質への影響を精査した上での設計指針を示す(①)。また、大型化を見据えてマス効果に着目し、一般的には削減するという認識がないアンテナ基板の誘電体部分の削減を試み、構造特性およびアンテナ特性への寄与を調査し(②)、構造-電波最適設計への指針を得る。

#### 4. 研究成果

上述の研究の方法に従って、各項目の成果を示す。

##### [I]-①

膜面の状態として面内2方向の応力が正の場合を張力状態、1方向のみ負かつもう1方向の歪みが負の場合を緩み、1方向の応力が負かつもう1方向の歪みが正の場合を皺と定義する。

図1に示す様に正方形のカプトン膜のブームへの結合部を4隅の4か所として想定し、張力をかけて膜を張った状況下、折りたたみ線の配置を各頂点からsの距離として、解析で得た皺領域のリンクル量のRMS値と非皺領域のリンクル量のRMS値の比(リンクルの削減率)を実験で取得した面外方向変位の比とで比較し、誤差8.6%以内の精度良い一致を得た。なお、皺部は弾塑性材としてmindlin板要素でモデル化した。

その上で6種類の折畳み線の配置パターンやsを変化させ、リンクル量との関係性を調査したところ、図2に示す結果を得た。なお、左上コンターは非接触測定による実際の膜面の変形量を示し、右側の図はリンクル強度の分布を示す。この図は、しわが最も軽減できる条件は「折り目で分断された2つの領域で、しわを解消するのに必要なエネルギー量の総和が等しい時」である事を示している。[成果：国際学会1件]

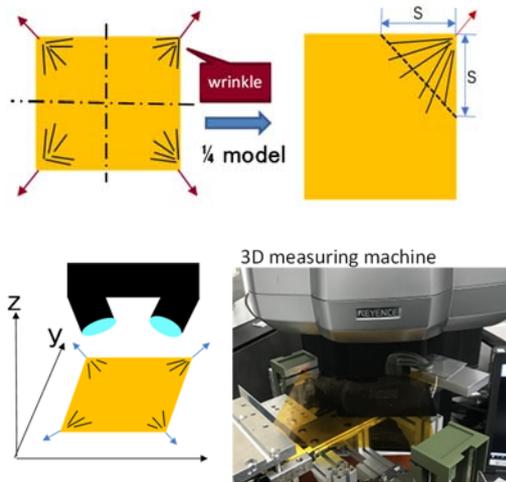


図1 Target model (Top) and Experiment set (bottom)

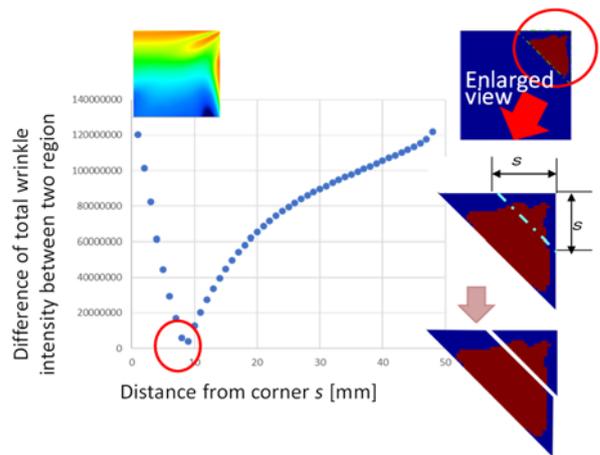


図2 Difference of wrinkle amount between the two regions and arrangement of a crease

##### [I]-②

上記の膜面上の皺および折れ線を強制的に解消する手段として、SMAアンテナを提案し、その実証を行った。これは2つの機能を併せ持つ。周回軌道上の太陽側で

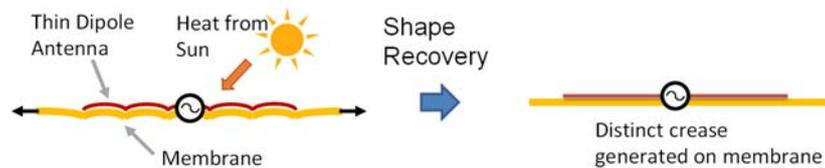


図3 Shape Recovery of SMA

必ず受ける事になる熱による形状記憶合金(SMA)の形状回復(図3)と、SMAを放射体とするダイポールアンテナの形状の違いによるアンテナ利得の差から自身の形状を推定するヘルスマニタリング機能(図4)である。特に前者は宇宙環境での利用であるが故に100%の実行性を有する。SMAアンテナにはこの実証のためにひずみゲージが貼付してあり、アンテナ直下の基板ではブリッジ回路による増幅と、さらに検波器(A/D変換)が備えてある。2019年打上の70cm四方の膜面を有する超小型衛星Origami Sat-1に搭載するために以下の検証・実証を行い、システムの成立性を示した。

- 図 4 左下のような放射体の折れ曲げ状態におけるアンテナパターンを 3次元実測を近傍界測定装置を用いて行ったところ、直線偏波(図 4 中央)において有意な差が生じる事が分かった。同時に、変形に対する線形な歪値を得、電波と歪の直接計測による両面からの測定システムの有用性を示した。

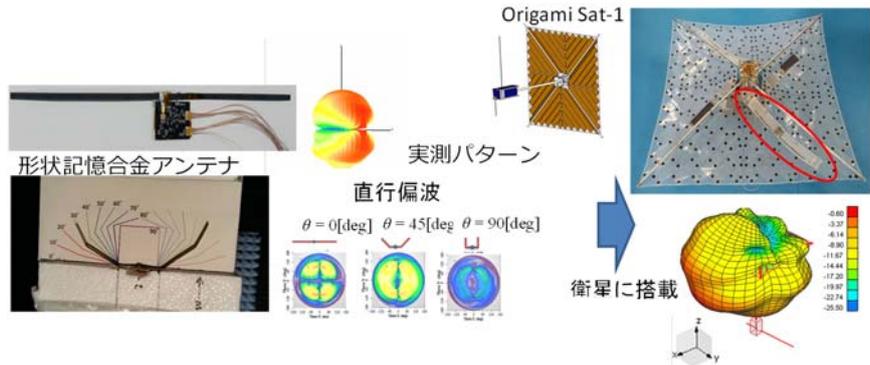


図 4 Health Monitoring by SMA antenna

- Origami Sat-1 のように膜面上へのアンテナ配置(図 4 右上)はアンテナの直下に大面積の膜=誘電体が存在する事と同じであり、このような構体が存在する場合でのアンテナパターンの 3次元解析を行い、アンテナ単体でのビームパターンから崩れるもののアンテナの指向が衛星本体側にある事を示した(図 4 右下)。
- 膜面上のアンテナと衛星構体との(回転)位相による受信感度を調査し、変形が検波器による分解能内である位相を提示し、膜上システム的设计・構築にはこのような検討を設計にフィードバックする必要がある事を示した。

[成果：論文 1 件 国際学会 1 件 国内学会 1 件]

【II】-①

1m 四方程度の多くのパネルを有し、その形態を自由に変化させるパネル型衛星(トランスフォーマ衛星)に 2.1[GHz]の高周波アンテナ素子を搭載した時の通信品質を構造設計にフィードバックするために、PO(Physical Optics)法を用いた電磁界解析を用いて衛星構造体からの電波の反射の様子を調査した。パネル形態ごとにアンテナパターン

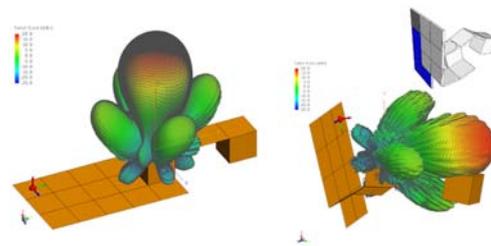


図 5 Transformer Sat. Initial model

に波打ちを確認し、これは方向によって周期的に受信感度のムラが生じる事を意味し、さらに衛星のコンフィギュレーションによっても変化する事から、通信品質への悪影響と通信データのポスト処理の困難さを招く運用形態である事を示唆する。この点が改善されたものが表 1 に示す現行型の運用形態であり、図 5 で示されたようなメインビームの周期的な乱れは大幅に改善された。従って、アンテナのピークゲイン値と半値幅の情報を用いたポスト処理のし易さも確保出来たこととなる。

表 1 Transformer Sat. Antenna characteristics of the current model

	(a) Deployed	(b) Random Config.	(c) Nominal Model	(d) Single eye model
Peak gain[dBi]	25.90	24.96	24.18	24.56
Half power beam width [deg]	10.72	10.56	10.24	10.45

システム設計段階での、このような構造設計と電波の相互フィードバックによる検討が行われる例は未だ希であるが、本例が高周波を扱う上での構造-電波の同時設計の重要性を示唆したと考える。

[成果： 国際学会 1 件 国内学会 1 件]

[II]–②

マス効果を狙ったパッチアンテナじたいの軽量化を目的として、放射パッチと基板と Gnd の構成要素のうち基板部分を設計領域としてコンプライアンス最小化の位相最適化によって質量 70%削減モデル(図 6 左下)のアンテナ特性を検討した。図 6 には基板の材質として一般的な RTDuroid, ポリウレタン, ポリイミドの 3 種に対し, 中実モデル(従来の基板)と位相最適化モデルの比較を示している。アンテナゲインの最大値は表 2 に示す通りである。ポリウレタンの場合に位相最適化モデルによるアンテナゲイン値の増加が見られた。一般的な見解としてはゲイン値の低下が想定されるが, このような増加現象が見られるのは次の考察からも可能な現象であると考えられる。

位相最適化による質量低減が巨視的みると構造の低密度化と捉える事ができ, 全体として低誘電率かつ低正接誘電の状態を生み出していると考えて良い。材料密度が下がると, 全体の質量が下がる事によって共振周波数は上がるので, 電氣的視点からはパッチアンテナのパッチ部が大きくなった事と同等と考えられる。つまりビーム幅が狭まり, 低正接誘電であるが故に全体のエネルギー損失が少ないためゲイン値が増加する事となる。

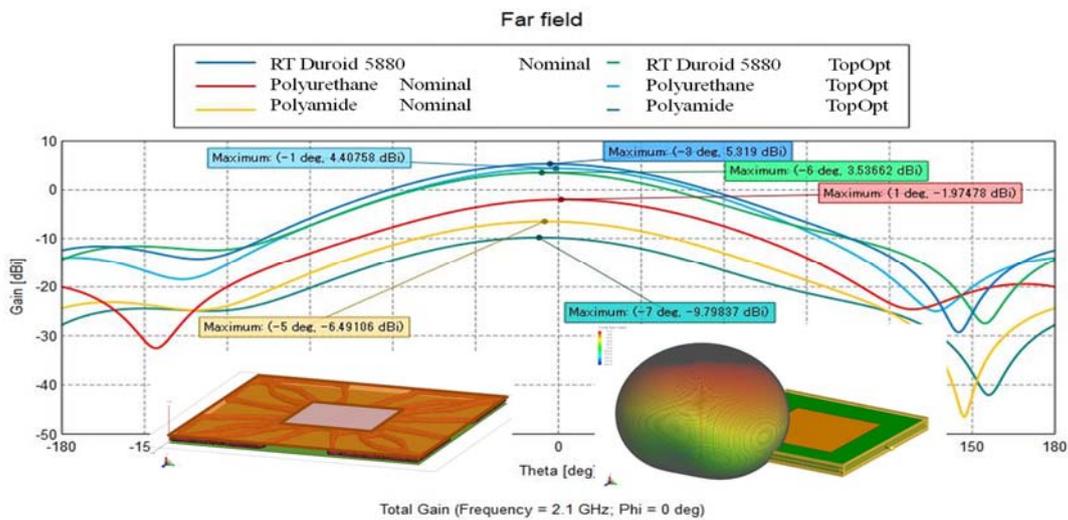


図 6 Materials and Antenna patterns, Nominal vs. topology optimized model

なお, アンテナ設計の基本パラメータである正接誘電と誘電率の組み合わせを設計パラメータとしたときのアンテナゲイン値の最大化を Simplex Nelder-Mead 法を用いて行ったところ, ゲイン値の取りうる幅は, 提案の位相最適化によって取りうる幅の方が大きい事が分かった。つまり, 基板内を通過する電波の経路を誘電体の散らばりでコントロールする事の有効性が示されたと考え, この点のさらなる研究を進める意義を見出したと考える。

[成果： 国際学会 1 件]

表 2 Maximum Gain of patch antennas

Antenna Gain (Max)		
Dielectric	Nominal [dBi]	Topology Opt. [dBi]
RT/Duroid 5880	5.32	3.54
polyurethane	-1.97	4.41
polyamide	-6.49	-9.79

以上より, 本課題は①~④を軽量構造およびマイクロ波の分野横断型の設計指針として提示する事ができたと考える。

- ① 超軽量構造の代表である膜面構造の皺の低減条件を突き止めた。
- ② 皺の低減化の手段として, 皺のばしのアクチュエータと自身の形状モニタリングを同時に行う SMA アンテナの提案と実証を行った。
- ③ 今後に電波を用いたミッションが増える事を見据え, 実際の衛星への高周波通信システムの搭載にあたっては構造と電波の相互干渉を考慮に入れた設計視点と相互のフィードバックが設計段階から必要である点を実例を用いて示した。
- ④ 大型軽量宇宙構造の構築のためにマス効果を狙ったパッチアンテナの軽量化を, 誘電体の配置問題と捉えなおして電波の経路をコントロールする方針がアンテナ特性の大幅なゲイン値向上に繋がる可能性を示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7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 Torisaka Ayako, Hasegawa Shoichi, Miura Satoshi, Parque Victor, Miyashita Tomoyuki, Yamakawa Hiroshi, Natori M. C.	4. 巻 58
2. 論文標題 Electromagnet-Based Three-Dimensional Self-Assembly System for Hierarchical Modular Space Structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 472 ~ 485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.a34884	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 Miura Satoshi, Saito Kazuki, Torisaka Ayako, Parque Victor, Miyashita Tomoyuki	4. 巻 67
2. 論文標題 Shape optimization of a three-dimensional membrane-structured solar sail using an angular momentum unloading strategy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 2706 ~ 2715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2020.12.036	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 Parque Victor, Suzaki Wataru, Miura Satoshi, Torisaka Ayako, Miyashita Tomoyuki, Natori Michihiro	4. 巻 67
2. 論文標題 Packaging of thick membranes using a multi-spiral folding approach: Flat and curved surfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 2589 ~ 2612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2020.09.040	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 Torisaka Ayako, Eguchi Kohei, Miura Satoshi, Parque Victor, Miyashita Tomoyuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Leg-circle transformable wheel for improved runnability of a lunar rover	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent Material Systems and Structures	6. 最初と最後の頁 1013 ~ 1023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1045389x20952545	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 Ikeya Kosuke, Sakamoto Hiraku, et.al., (Torisaka Ayako, 37/38)	4. 巻 173
2. 論文標題 Significance of 3U CubeSat OrigamiSat-1 for space demonstration of multifunctional deployable membrane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 363 ~ 377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2020.04.016	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 Torisaka A., Hayashi D., Kawasaki S., Nishii N., Terada Y., Yokoyama S., Sakamoto H.	4. 巻 160
2. 論文標題 Development of shape monitoring system using SMA dipole antenna on a deployable membrane structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 147 ~ 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2019.04.007	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20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Ayako Torisaka
2. 発表標題 Reduction of Patch Antenna Dielectrics by Topology Optimization and Influence on Radio Wave Characteristics
3. 学会等名 The AIAA Science and Technology Forum and Exposition (Scitech2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y.Sugawara, T.Chujo, Y.Kubo, Y.Sato, M.Otsuki, R.Ikeda, M.Fujita, K.Sawada, K.Tsumura, S.Matsuura, T.Kotani, A.S Sugihara, A.Torisaka, O.Mori, S.Kawasaki, J.Kawaguchi
2. 発表標題 Transformable spacecraft: Feasibility study and conceptual design
3. 学会等名 71st IAC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中条俊大, 菅原佳城, トランスフォーマー宇宙機の実現とその応用に関する研究WG
2. 発表標題 トランスフォーマー宇宙機のミッション検討状況
3. 学会等名 10th UNISEC Space Takumi Conference for Practical Study of Problem Finding and Solving in Space Systems
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林大介, 鳥阪綾子, 宮城祥吾, 吉田巧, 山本隆彦, 吉田賢史, 西川健二郎, 川崎繁男
2. 発表標題 固体化マリンレーダに用いる民生用高出力GaN増幅器と宇宙ICETによるSpace-by-wirelessシステムの展開
3. 学会等名 第20回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A.Torisaka, S.Hasegawa, S.Miura, V.Parque, T.Miyashita, H.Yamakawa, M.C.Natori
2. 発表標題 Optimization and demonstration of 3D self-assembly system of hierarchical modular space structure using electromagnet
3. 学会等名 The AIAA Science and Technology Forum and Exposition (Scitech2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki SAITO, Ayako TORISAKA, Victor PARQUE, Satoshi MIURA, Tomoyuki MIYASHITA
2. 発表標題 A Study of Angular Momentum Unloading Strategy of Reaction Wheel by Solar Radiation Pressure Using Membrane Structure
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Solar Sailing (ISSS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 大介、鳥阪 綾子、宮城 祥吾、吉田 巧、山本 隆彦、吉田 賢史、西川 健二郎、川崎 繁男
2. 発表標題 固体化マリンレーダに用いる民生用高出力GaN増幅器と宇宙ICETによるSpace-by-wirelessシステムの展開
3. 学会等名 第20回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ayako Torisaka, Kohei Eguchi, Satoshi Miura, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita
2. 発表標題 Runnability Improvement of the moon rover with leg-circle transformable wheel
3. 学会等名 30th International Conference on Adaptive Structures and Technologies(ICAST2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ayako Torisaka, Kohei Ogawa, Satoshi Miura, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, Hiroshi Yamakawa
2. 発表標題 Study on in-plane and out-of-plane deformation considering elastic plasticity of membrane
3. 学会等名 AIAA Scitech 2019 Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Torisaka, D. Hayshi, S. Kawasaki, N. Nishii, Y. Terada, S. Yokoyama, H. Sakamoto
2. 発表標題 Development of shape monitoring system using SMA dipole antenna on a deployable membrane structure
3. 学会等名 69th International Astronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥泉信克, 森治, 佐藤泰貴, 松下将典, 宮崎康行, 古谷寛, 坂本啓, 松永三郎, 斉藤一哉, 鳥阪綾子, 名取通弘
2. 発表標題 OKEANOSの電力セイル展開機構と展開展張
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥阪綾子, 西井直輝, 林大介, 川崎繁男
2. 発表標題 SMA材を用いた膜上構造物の形状センシング
3. 学会等名 第60回構造強度に関する講演会
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
研究分担者	宮下 朋之 (MIYASHITA TOMOYUKI)  (20329080)	早稲田大学・理工学術院・教授  (32689)	
研究分担者	山川 宏 (YAMAKAWA HIROSHI)  (00097263)	早稲田大学・理工学術院・名誉教授  (32689)	

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
---------	---------