

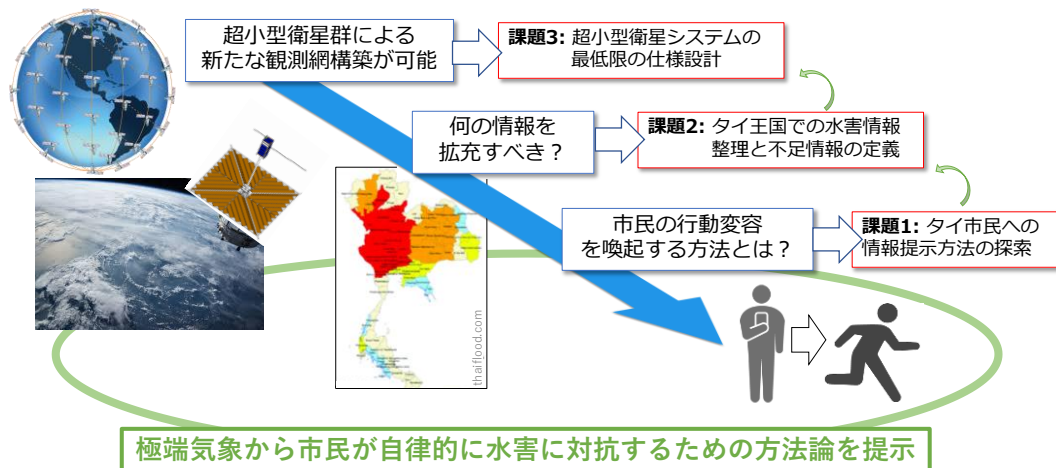
自発的な水害対策を可能にする地球観測超小型衛星群の研究（継続）

代表研究者	戸村 崇	東京工業大学 工学院 助教
共同研究者	白根 篤史	東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授
共同研究者	坂本 啓	東京工業大学 工学院 准教授
共同研究者	瀬戸 里枝	気象研究所 研究官
共同研究者	大橋 匠	東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授

1 背景と目的

人類は甚大化する極端気象により命の危機に直面している。特に東南アジアは国際河川が多く、水害が最も深刻である。極端気象増加の背景には、地球温暖化による気温の長期的な上昇や大気中の水蒸気量の増加が指摘されており、21世紀末には東南アジアのメコン川流域で10%、チャオプラヤ川流域で15%の降水量増加が予測されている。国際河川はその流域が複数の国に跨るため、特に下流側の国で迅速に降水情報を入手することが難しい。水害対策に必須の降水や洪水予測の高精度化には、流域全体を高頻度観測できることが望ましく、従来の衛星単体とは異なり、軌道などの柔軟性が高く、広範囲・高頻度観測可能な超小型衛星群による新たな観測網構築が有力な手段である。超小型衛星群により高頻度地球観測が可能になってきているが、その準リアルタイム観測データをどう市民に伝達すれば、水害時の行動変容につながるのかの検討がほとんどされていない。本課題では市民への情報伝達から超小型衛星群までを異分野横断的に研究する。

本研究の目的は極端気象から命を守るため市民が自律的に新技術を活用して水害に対抗できる世界を作ることである。激甚化する極端気象により、世界中の人々が命の危機に直面している。特に東南アジアは巨大な国際河川が多く、政治・経済・技術的課題を背景に水害に関する情報の取得や整理が進まず、実効性のある対策ができていない。本研究では、水害に悩む人々を中心に据え、彼らが真に必要な情報を定義し、これを取得できる超小型衛星群（小さく安価な人工衛星の連隊）システムと、取得データの処理システム、そして市民へのデータ通信システムを概念設計する。5つの分野の研究者により、下記3つの課題を解決し、東南アジアの人々が自律的に水害に対抗できる世界を目指す。



2 本研究の進め方

3つの課題に対してそれぞれ下記のように研究を進める。

(1)社会的情報ニーズ分析：2021年度に実施予定の大規模質問紙調査により収集したデータの数量分析を継続する。具体的には探索的因子分析、共分散構造分析により災害弱者の行動変容を促す要因の階層性および構造を明らかにする。また、その階層性・構造を参照しながら、課題仮説立案→ソリューション仮説立案→プロトタイプ作成→ユーザーテストを繰り返すデザインリサーチを実施し、仮説検証および精緻化を図る。この過程で、住民の行動変容を促しうる市民への情報伝達方法のプロトタイプの設計、特にユーザーインターフェースの設計を行う。

(2)技術的情報ニーズ分析：社会的ニーズの充足に必要な、超小型衛星群・通信・センサの条件（軌道・レーダー／センサ性能・通信容量／速度など）と衛星から水文気象情報を作成する際の目的変数や精度・時空間解像度を明らかにする。これらの検討結果をもとに衛星から水文気象情報を取得するアルゴリズムを開発する。

(3)超小型衛星群・無線通信網の基本評価：昨年度実施した超小型衛星群・無線通信網の概念検討結果を反映した実機開発を開始する。具体的には、基本設計を実施し、試作を通して実現可能性を評価する。

3 検討結果

3-1 社会的情報ニーズ分析

水害対策は他の災害種と比較し、事前に把握できる可能性が高い。この要因として、技術的な進歩、特に、大雨等の気象予報精度向上が挙げられる。一方、事前に把握しても市民の適切な行動に結び付かなければ、被害拡大を抑えることはできない。本研究では、衛星により取得した準リアルタイム観測データをどのように市民に伝達すれば、水害時の行動変容につながるか探索することを目指し、研究活動を推進した。本研究の成果として、タイの水害時におけるTwitterの利用の地域性が明らかになったこと、および計画的行動理論に基づく認知的要因と避難意図の分析結果が挙げられる。さらに備えとして、避難所についても検討を行った。以下、概説する。

まず、避難所についての情報を受け取り、適切な避難を実施することが望ましい。央防災会議防災対策推進検討会議津波避難対策検討ワーキンググループの報告書[1]から現状把握と課題抽出を行った。当該報告書は、東日本大震災における津波被害を受け、国土交通省が実施した「津波避難行動に関する実態調査」の結果に基づいて作成されている。報告書からは、早期避難、避難場所の確保、高台への避難、情報提供の改善、避難訓練の実施、正しい知識の普及という6点の重要項目が抽出された。そのため、本年度は、重点項目のうち避難場所の確保および情報提供の改善について調査研究を実施した。

避難場所の確保[2]に関しては、デスクトップリサーチを行った。本報告は中でも2つの重要な学びについて共有する。まず、広域で大規模災害が発生した場合、在宅避難が望ましいとされており、国や地方自治体では在宅避難の推進を進めている。例えば、東京都では自宅備蓄の徹底や防災グッズの配布、避難支援センターの設置などを進めている。また、自治体ごとに様々な取り組みが進められており、神奈川県では在宅避難に備えたマンション向けの避難訓練を実施している。しかし、令和2年4月1日現在、都内における避難所数は約3,200か所（協定施設等を含む）、そのうち、福祉避難所は約1,500か所が確保されている[3]。それらの収容人数は約320万人に留まる。これは全都民の5分の1程度しか対応できないことと同義である。次に、避難所環境について調査した[4]。避難所における環境衛生の課題として、以下のような点が挙げられる。まず、避難所では多くの人々が集まるため、感染症の予防や清潔維持が重要であるが、設備や人材面で課題が多い。また、避難所の管理・運営には自治体職員や民間ボランティアなどが関わるため、その質や量に課題があることが多く、環境衛生管理に支障をきたすことがある。さらに、避難所においては食事提供が必要であるが、その内容や量に課題があることが多く、特定の食事制限を要する人への対応にも課題があることがわかった。加えて、避難所での生活は多くの人々が集まるためストレスを感じることも多く、その対応にも課題があることがわかった。現状、災害対策基本法に基づき、自治体が避難所の確保や避難所における環境整備に責任を持っているが、大規模災害が発生すると自治体職員自身も被災するため、機能が低下する可能性がある[5]。この点においても課題が残っていることが明らかになった。以上の調査結果から、避難所

の確保および環境の確保に関しては、多くの課題が残っており、これらを解決する包括的なアプローチの重要性が示唆された。

次に、情報提供の改善に向けては、まず情報の受け手である住民に着目し、津波避難意図および津波防災対策における IT 技術利用意図に影響する要因の構造を明らかにするため、質問紙調査を実施した。質問紙では、津波避難対策検討ワーキンググループ報告書から、避難しなかった人の理由を含めた設問を設けた。例えば以下のような要因である。

- ・津波に対する認識の不足
- ・避難場所への移動の困難
- ・家族やペットの心配
- ・情報不足
- ・過去の災害経験の少なさ

津波避難対策検討ワーキンググループ報告書との違いは、「過去の災害経験の少なさ」に起因した因子が出現しなかったことである。その理由として、回答者のほとんどが津波被害に関する経験がないことが挙げられる（津波被害を経験した割合：4.2%）。

最後に本研究が目指す国際的な展開に向けた端緒として、2022 年のタイ王国における洪水発生時期に Twitter データの収集を行った。結果として、バンコクに関するツイートが中心であり、特に交通事情に関するツイートが多く見受けられた。バンコクは洪水が発生しやすい地域であり、洪水問題に長年取り組んできたが、地理的な条件や急速な都市化によって洪水リスクが高まっている。

バンコクの洪水問題は、主に以下の要因によって引き起こされている。

1. 地理的条件：バンコクは、チャオプラヤ川とその支流の流域に位置している。この地域は平坦であり、雨水や河川の水が容易に集まりやすくなっている。
2. 都市化と排水システム：バンコクは急速な都市化が進み、建物や道路が増えた。この都市化により、地表の浸透性が低下し、雨水が排水システムに十分に排出されなくなる。

一方、バンコクは被災者増加や経済成長に伴う自動車交通量の増加によって交通渋滞が深刻化している。バンコクが洪水となれば、渋滞はさらに深刻となる。このような状況を反映し、収集したツイートは交通事情に関するものに集中したと推測される。以上から、タイ王国、特にバンコクにおいては、洪水時の交通情報に関するニーズが高いと考えられる。



図1 避難意図の要因概念図と洪水に関するタイ王国のツイッター利用図

3-2 技術的情報ニーズ分析

大きな水害が発生すると停電も同時に発生することが多く、携帯電話の基地局が停止することが考えられる。救難活動の際に限られたリソースを適切に配分するには被災者の密度分布を適切に知ることが必要となる。そこでスマートフォンの発する電波に着目し、その電波の強度分布を超小型衛星から観測可能かどうかの基礎検討を実施した。

現状のスマホを用いた際の通信回線設計を行いフェージビリティおよび予想される性能について検討した。当初 5G や LTE といった移動体無線通信規格の使用を考えていたが、スマホに搭載されている Wi-Fi を利用したほうがよりシンプルに、地上インフラに頼らないシステムでの実現が可能であるため、Wi-Fi 電波による被災者マッピング技術の検討を行った。詳細な回線設計の条件を表 1 に示す。

5. 2GHz 帯の WiFi の使用を想定し、帯域幅は 20MHz とした。低軌道衛星コンステレーションを仮定し高度 400km、衛星搭載アンテナは 10m×10m の大型の膜展開アンテナとした。スマホ (UE) 側は、送信電力を 10dBm、アンテナ利得を 0dBi として回線設計を行った。

回線設計より、被災者マッピング性能として、400km 上空の衛星搭載アンテナによるスポットエリアのサイズは直径 1km となることがわかった。このスポットが日本列島全体を走査し、スポット内の WiFi 電波強度からスポット内の被災者を推定し、早急な被災状況の取得を実現する。

また、複数のスマホからの信号対雑音比 S/N を計算した結果を表 2 に示す。スポットエリア内におけるスマホの台数が 10000 台のとき S/N は 14.8dB, 100 台でも 4.8dB と十分検知できる値となることがわかり、被災者マッピングシステムの実現性を確認することができた。

通信回線設計および衛星コンステレーションの要求仕様の検討を通して、被災者マッピングの解析手法の明確化、性能の見積もり、そして実現性の確認を行った。

表 1: 詳細な回線設計の条件

	周波数	GHz	5.2
	帯域幅	MHz	20
	送受信間距離	km	400
UE	送信電力	dBm	10
UE	アンテナ利得	dBi	0
BS	アンテナ辺の長さ	m	10
BS	アンテナ効率	%	50
BS	エリア直径	m	1,022
BS	温度	K	300
BS	雑音指数 NF	dB	10

表 2: 複数のスマホからの信号対雑音比 S/N を計算した結果

エリア内スマホ台数		10,000	1,000	100
衛星での受信レベル	dBm	-76.0	-81.0	-86.0
S/N	dB	14.8	9.8	4.8

3-3 超小型衛星群・無線通信の基本設計

通信およびレーダの実現に必要な超小型衛星搭載用アンテナの電気設計及び機械設計を実施した。高利得なアンテナが必要となるためリフレクタレーアンテナ形式を採用し、電磁界シミュレータによりアンテナを設計し、高利得な特性が実現できる見込みを得た。また、超小型衛星に搭載するための機械設計として 2 層展開膜のプロトタイプを試作し、小型収納が可能なことを確認した。

(1) 電気設計

超小型衛星搭載用リフレクタレーアンテナを図 2 に示す。リフレクタレーアンテナは一次放射器とリフレクタレーから構成される。一次放射器は無線機と接続され、送信時はリフレクタレーに対し電波を照射する。リフレクタレーは多数の反射素子から構成され、反射位相を調整することで平面構造でありながらパラボラ反射面と同等の役割を果たす。つまり焦点から放射された球面波を平面波に変換する機能を持つ。

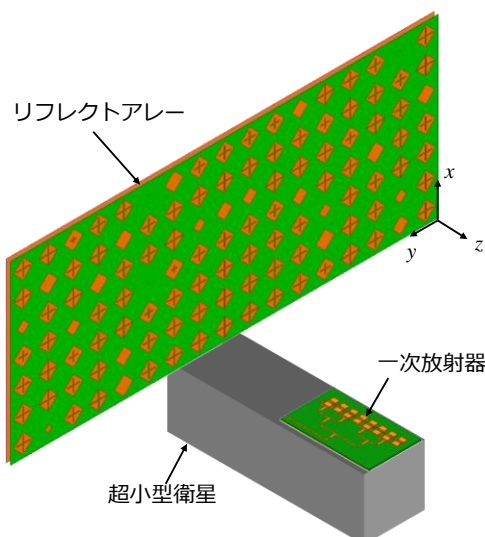


図2 超小型衛星搭載用リフレクトアレーアンテナ

一次放射器の構造を図3に示す。一次放射器は8つのパッチアンテナから構成され、それぞれに位相差をつけて励振することでアンテナ膜面に向かって電波が放射される。給電点から各放射素子までの距離を調整し適切な位相をつけることで所望の方向にメインビーム方向を調整している。

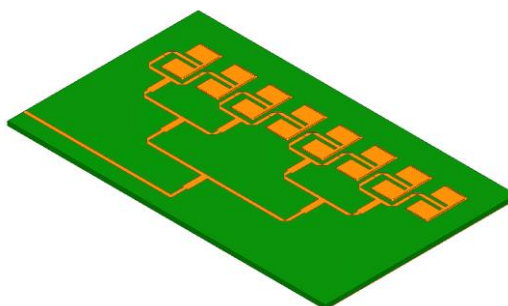
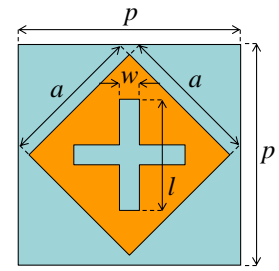
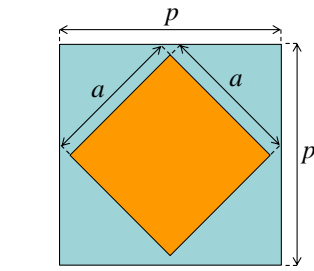
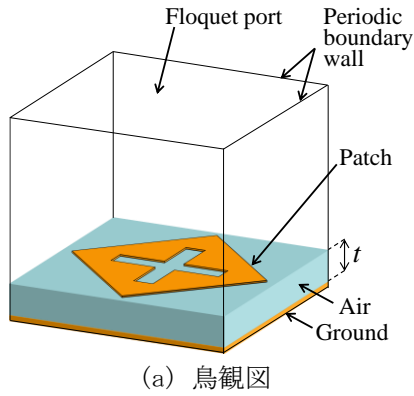


図3 一次放射器の構造

リフレクトアレーを構成する反射素子構造を図4に示す。パッチとグラウンドから構成され、それらが5mm離されている。パッチにはスロット無しと有りの2種があり、それぞれパッチとスロットの寸法を変えることで反射位相を制御している。これは電流の経路長が変わり素子の長さが変わるからである。スロットはパッチ場を流れる電流経路を妨げるため、等価的にパッチが長くなるように作用する。

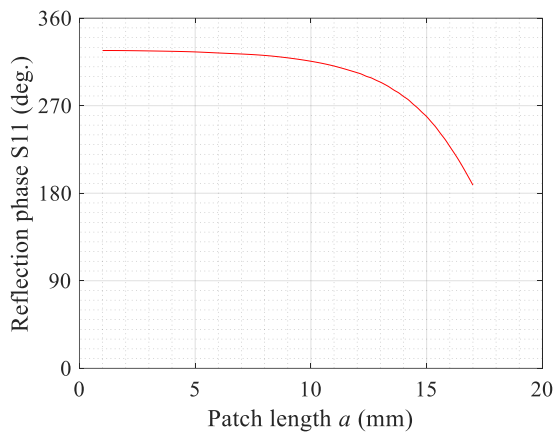
この反射素子を有限要素法シミュレータ Ansys HFSS により解析する。素子間相互結合を考慮するため周期境界を仮定し、Floquet port から平面波を入射する。スロット無しの場合のパッチ長による反射位相の変化を図5(a)に、スロット有りの場合の反射位相を同図(b)に示す。スロット長及びパッチ長により反射位相を332度の範囲で変化できることが分かる。



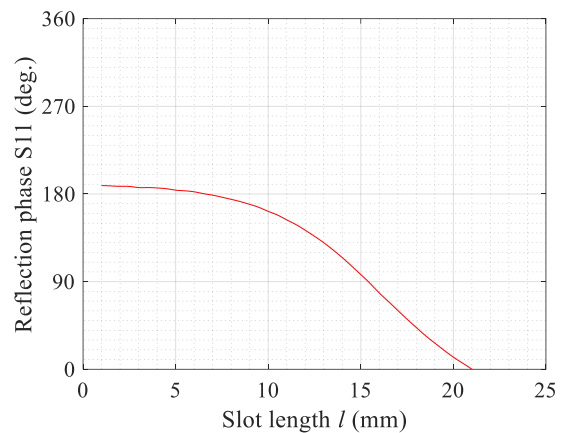
(b) スロット無しの場合の上面図

(c) スロット有りの場合の上面図

図4 反射素子構造



(a) スロット無しのパッチ長による反射位相特性



(b) スロット有りの場合のスロット長による反射位相特性

図5 反射位相特性

先に設計した反射素子を用い、リフレクタレーを構成する。各反射素子に求められる反射位相は、一次放射器の位置、反射素子の位置、一次放射器の放射位相、所望の電波放射方向から決定される。本検討では一次放射器の放射位相として遠方界放射パターンを用い設計した。これにより得られたパッチの形状で図2のリフレクタレーアンテナを解析した。アンテナ放射パターンを図6に示す。正面方向に鋭いピークを持つ特性が得られたことが分かる。アンテナ利得は角度0度で最高の19.9dBiが得られた。

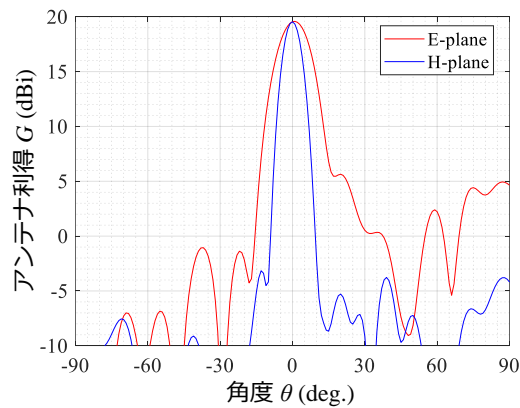


図6 アンテナ放射パターン

(2) 機構設計

2層展開膜アンテナの構造を図7に示す。2枚の織物膜とアンテナ基板兼ポップアップ機構、展開用ブームから構成される。アンテナ基板兼ポップアップ機構はフレキシブル基板で構成され、2枚の織物膜を5mm離す支持構造とリフレクタレーアンテナ用の反射素子の2つの役割を果たしている。フレキシブル基板には反射素子とグラウンドの銅箔が構成され、コの字型に折り込むことで、1枚のフレキシブル基板で両者の機能を持つ。織物膜はフラッシュパターンにより折畳み可能であり、織物の柔軟性が膜の厚みによる周長差を吸収する。

アンテナを模擬した展開膜の試作品を図8に示す。厚さ $70\mu\text{m}$ のポリエステル織物、 $25\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムで構成され、両者は両面テープで張り付けた。展開膜の頂点とブーム先端をテグスで固定し、展開膜とブームをハブに巻き付けて収納する。収納状態の写真を図8(b)に示す。 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ の断面積内に収納できることが示された。

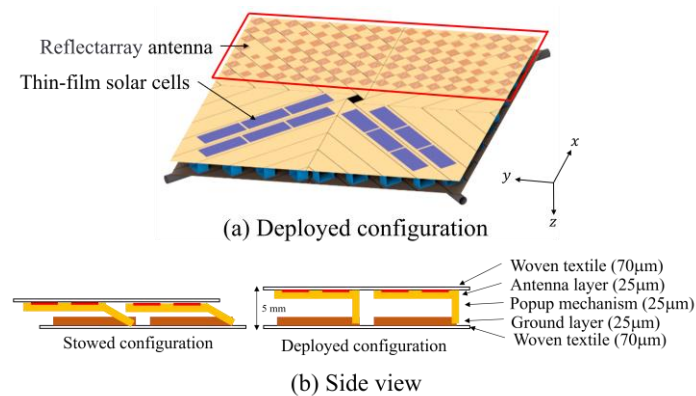
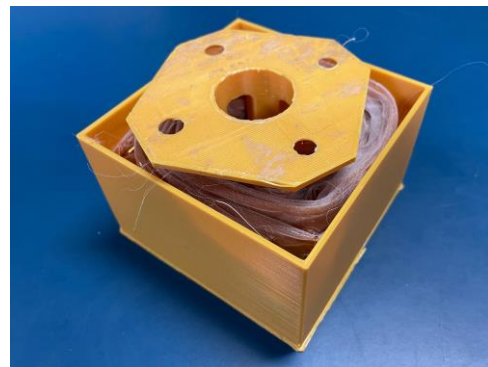


図7 展開膜アンテナの構造



(a) 展開状態



(b) 収納状態

図8 アンテナ模擬展開膜 [6]

4 まとめ

本研究では市民が自律的に新技術を活用して水害に対抗できる世界を作ることとを目的とし、3つの課題を設定し研究に取り組んだ。(1)社会的情報ニーズ分析では防災関係機関をヒアリング、住民のアンケート調査、ソーシャルネットワーキングサービスを分析した。(2)技術的情報ニーズ分析では超小型衛星による被災者分布マッピングを検討した。(3)超小型衛星の基本設計では超小型衛星搭載用リフレクタレーアンテナの電気・機械設計を実施した。今後は各分野の課題を進めるとともに3分野を融合させ市民が自律的に新技術を活用して水害に対抗できる世界の実現を目指す。

【参考文献】

- [1] 中央防災会議(2012),「津波避難対策検討ワーキンググループ 報告」
<https://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/report.pdf> (2023年6月26日閲覧)
- [2] 中央防災会議(2013),「首都直下地震の被害想定と対策について(最終報告)」
https://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_report.pdf (2023年6月26日閲覧)
- [3] 東京都総務局総合防災部防災計画課 (n.d.)「避難所及び避難場所」
<https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/bousai/1000026/1000316.html> (2023年6月26日閲覧)
- [4] 内閣府(防災担当)(2022),「避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針(改定)」
<https://www.bousai.go.jp/taisaku/hinanjo/pdf/2204kankyokakuho.pdf> (2023年6月26日閲覧)
- [5] 内閣府(防災担当)(2012),「東日本大震災における災害応急対策の主な課題」
https://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/5/pdf/3.pdf (2023年6月26日閲覧)
- [6] G. Nakayama, et al., “Space Demonstration of Two-layer Pop-up Origami Deployable Membrane Reflectarray Antenna by 3U CubeSat OrigamiSat-2,” Proceedings of the Small Satellite Conference, Advanced Technologies - Research & Academia II, SSC23-WVIII-03, 2023.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Two-layer pop-up origami deployable membrane reflectarray antenna stowed in 1U CubeSat	AIAA/USU Conf. Small Satellites	2022年8月
二層型宇宙膜面アレーアンテナの展開形状評価	日本機械学会年次大会	2022年9月
超小型衛星搭載リフレクタレーアンテナ一次放射器用プリント基板ビームチルトアレーの設計	電子情報通信学会・総合大会	2023年3月