

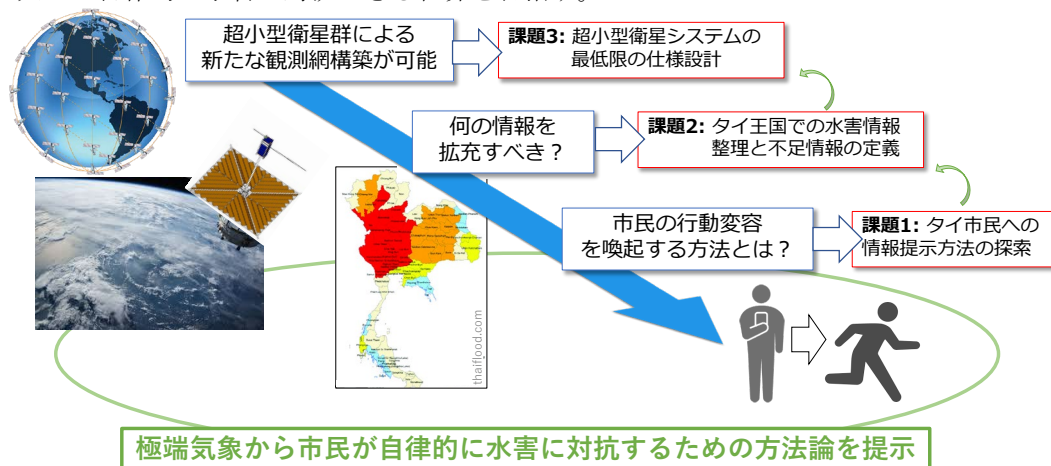
自発的な水害対策を可能にする地球観測超小型衛星群の研究

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	東京工業大学	環境・社会理工学院	助教
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：水文気象情報の種類・タイミング・伝達手段について、事例解析や現地コミュニティでの調査、流出解析・貯水池操作のシミュレーションなどから、その地域に特化した要求レベルを明確にし、実効性ある治水対策や避難情報に結び付けるためのニーズ分析を行う。対象とする地域には、概念実証のための第一段階として、国内の複数の地方自治体を選定する。

(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／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。

(3) 超小型衛星群・通信・センサの設計：超小型衛星の軌道や機数による観測頻度や通信容量等の関係を明らかにする。また、超小型衛星に搭載する無線通信回路やアンテナの基本設計を行う。

3 検討結果

3-1 社会的情報ニーズ分析

[背景・データ収集方法]

地球観測超小型衛星群の活用を目指した学際研究を行う我々が、激甚化する災害、特に風水害における現状の課題と機会領域を探索するために、ある自治体の河川や海岸の防災を所掌する機関の長（個人情報保護の観点から本報告書では所属先を伏せる）にご協力いただき、1.5時間の半構造化インタビューを実施した。具体的には、発災前後に必要な情報・データ、ステークホルダーとの関係性、防災に関して認識している課題、そして学際研究を行う我々がどのように防災分野に貢献していくべきかについて伺った。その際に議事録を作成し、これを本研究における一次データとして取り扱うことにした。

[データ分析方法]

データ分析にはKJ法 AB型[1]を用いた。KJ法とは、東京工業大学名誉教授・川喜田二郎氏の頭文字(KJ)から名付けられた質的データ分析法である。創造的な問題解決への方向づけ、収集データのまとめ、会議への応用など幅広く用いられている。ここでAB型とは、A型(図解化)とB型(文章化)の2つにより構成されている。A型は、単位化された情報をグループ編成によってまとめ、それらを図解化する方法である。B型は、単位化・グループ編成された情報を繋げて文章化する方法である。この2つを組み合わせ、A型(図解化)→B型(文章化)と進める方法をKJ法 AB型といい、反対のBA型よりも効率が良いとされており、本研究ではこれを用いた。

KJ法の基本原理は情報を脱文脈化したのち、再文脈化することである。そして脱文脈化の鍵は、情報を単位化することである。そのため、作成した議事録を意味のまとまりで断片化し、それぞれを1単位とした。これにより、205個の断片化された情報が抽出された。次に断片化された情報の中から“親近感を覚える”もの同士を近づけていき、その内容を圧縮化して表現しうる1行見出し(表札)をつける。この表札付きの小チーム同士をさらに編成し、中チームを作り、中チーム同士をさらに編成し大チームを作る。このような手順を繰り返し編成した情報の関係性が見えるように、空間的な配置を工夫し、最後に関係性を棒線記号で関連付けを行った。

[分析結果：KJ法 A型図解化]

以上の手続きを踏まえて得られたA型図解を図1に示す。なお、同図の黄色付箋が断片化された各情報にあたる。

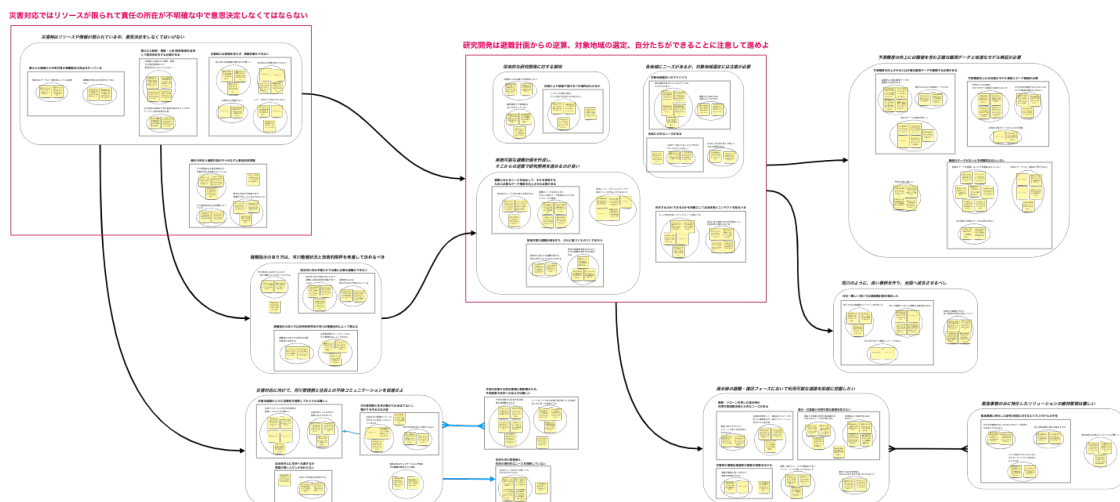


図1 半構造化インタビューのA型図解

[分析結果：KJ法B型文章化]

図1のB型文章化として、特に重要な論点を抜き出して以下に叙述する。

発災時には、限られた時間の中で、かつ、情報や人的・物的資源が不足している中で、各自治体の首長を中心に意思決定（避難指示発令等）をする必要がある。特に夜間や洪水発生時には、現場を見に行くことができず、また自治体職員も被災してしまうことで、情報収集ができないことが大きな課題となっているという。また、情報収集方法だけでなく、自治体による避難指示のあり方にも課題がある。例えば洪水であれば、基本的に自治体は指定河川洪水予報を参考に避難指示を発令している。指定河川洪水予報とは、国指定の河川の氾濫に関する情報について国交省と気象庁が合同で発表しているものであり、3時間先の予測情報を提供している（調査時。2022年6月現在、6時間先の予測まで提供している[2]）。多くの自治体はそれに従い、3時間前に避難すべきかどうか判断するわけだが、本来、避難/非避難の判断は各地域の河川の整備状況等に沿ってなされるべきである。しかしながら現状では、実際の避難に必要な時間や、そのためにどの程度呼びかけを行う必要があるか、などの時間が正確に逆算できている自治体は少ないのではないかと強い懸念が示された。理想的には、河川の整備状況等、地域の状況や導入している技術的制約を考慮に入れて、現実的に成立する避難計画を構築し、それを基に避難指示のタイミングの判断を自治体側で行わなくてはならない。

また平時の課題として、河川管理者と住民間の繋がりの希薄さが挙げられた。繋がりの希薄さにより、特に災害未経験の住民に対して災害の危険性を理解してもらうのは難しいという。また、発災直前には、災害に関する予測情報を自治体が住民へ伝達するが、防災意識の高い人のみ反応する傾向にあるという。とはいえ、予測の空振りは住民の防災意識に悪影響を与えてしまうため、予測結果の住民への伝え方には非常に苦慮しているようである。

以上のような課題が挙げられた中、超小型衛星群を活用した学際研究を推進しようとする我々は、どのような方向性で研究を進めていけば良いのだろうか。

まず、インフォーマントからは、実効性のある避難計画に整合する研究開発を強く期待する声が挙がった。例えば、避難に必要な時間の逆算し、何時間前にどのような情報が必要になるのか探索し、それを実現するような研究開発が1つのアプローチとしてあり得るという。また、避難におけるステークホルダーのニーズを突き止め、各ユーザーの価値観を想像しながら社会に受け入れられるものを作っていく必要があると提案を受けた。なお、河川や海岸の防災を所掌する機関では、現場での裁量が大きく、現場での良い事例が報告されると、全国で実施していく流れになるという。そのため研究活動を推進する際には、具体的な協力地域を選定することが良策といえよう。一方、地域毎それぞれの課題がある。研究対象地域の選定にあたっては、我々の研究に対してリソースを割いていただく自治体職員の余力も必要であり、最近被害を受けた地域は除外した方が良いという。その上で、研究者と自治体がwin-winの関係性を構築できるよう、我々研究者らが何を目指しているのか、より具体化する必要があると述べられた。

具体的な災害対策に対するニーズについては以下のように言及された。

発災時、被災状況に関する情報が瞬時に届くところは、ほとんど無被害に近い。一方、情報が収集できないところは壊滅的な被害を受けている可能性が高いという。しかし、このような地域の情報こそ出来る限り早く収集したいものである。また、河川の氾濫や津波が一度発生すると、救援・支援のために現場へ赴くための道が限定される。このような避難・復旧フェーズにおいて、衛星やドローンを活用し、被害状況の同定が簡単に行えるのであれば、非常にニーズが高いのではないかと、この言及があった。

なお、洪水被害は破堤した場所が分かれば、比較的被害状況についても把握しやすいが、津波は被害が超広範囲に及ぶため状況把握はより困難となる。南海トラフ巨大地震とそれに伴う大津波の被害も想定される今日において、まずは津波に焦点を絞って研究開発を行い、それを洪水に応用していくのが良いのではないかと、この提案があった。一方で、緊急事態のみに特化した技術の場合、いつ来るかわからない機器のために常時メンテナンスを行うことが難しいという社会経済的な問題も存在するという。コストが非常に抑えられるのであれば問題ないが、そうでなければ、平時から利用することを念頭においた技術設計が求められるという。

[考察：学際研究開発の方向性]

我々は当初、風水害被害に対応した学際研究というように、災害の意味を広範に捉えていたが、より焦点を絞った研究開発が求められることがわかった。特に、南海トラフ巨大地震と大津波への対応が急務であることが示唆された。

当該地震に関して、政府は2022年1月に、40年以内発生確率を90%程度へ引き上げられた。当該地震では、

静岡から宮崎にかけて震度7の強い揺れが数分にわたって続き、地震発生から最短2分で1m以上の津波が沿岸部に到達し、最大34mにもおよぶ大津波襲来も予測されている。その結果、死者・行方不明者数32.3万人（cf. 東日本大震災：約1.6万人）に達するという[3]。

発災直後、このような人的被害を最小限に食い止めるには、生存率が著しく低下する「72時間」以内の迅速な救助・救援活動が不可欠である。しかし大規模災害ほど、通信・交通インフラは壊滅的なダメージを受け、自治体・防災機関による情報収集は難しくなる。実際に東日本大震災では、水没・流出により通信インフラが麻痺し、加えて、道路の亀裂・段差・落橋などにより、被害状況把握や人命救助は困難を極めた[4]。これよりも超広域にわたる被害が想定される南海トラフ巨大地震において、既存インフラに頼らず、人口の空間分布、特に要救援者数の空間分布をいち早く把握し、限られたリソースを適切に配分する減災戦略（トリアージ）が必要になるだろう。

先行事例では、地震・津波の影響を受けない準天頂衛星「みちびき」を活用し、基地局を経由せず、緊急情報を衛星から被災者に直接通知するシステムが検討されているが、衛星→被災者の一方向通信に留まる[5]。しかし、既存通信網が断絶された状況下で被災状況を把握するには、被災者↔衛星間の双方向通信を実現する必要がある。とはいえ、いつ起きるか分からない津波のために、人々が衛星通信用の大型通信機を平常時から持ち歩くことは考えられない。

このような背景のもと、我々は、住民の多くが常時所有すると考えられるスマホを活用し、双方向通信システムの実現を目指す、という研究開発コンセプト（ソリューション仮説）を構築した（図2）。具体的には第1段階として既存のスマホ電波を活用し、第2段階として「災難除け御守」に入る程度の超小型通信機とスマホを組み合わせる。また、提案システムを活用し、人々の避難意図を高めるUI/UXデザイン、および、自治体との共創により救援トリアージのためのシステム活用方法の検討も行う。以上のように、超学際的に研究を推進し、来たる巨大地震・津波に備えて、人的被害を極限まで抑える実効性のある減災戦略実現に貢献していく。

なお、インフォーマントが「研究者と自治体がwin-winの関係性を構築できるよう、我々研究者らが何をを目指して何ができるのか、より具体化する必要がある」と言及するように、まず我々が目指す研究開発コンセプトの技術的な実現可能性を検証することが重要だと考えられる。そこで、2022年度は技術検証を中心に研究開発を実施していくことにする。

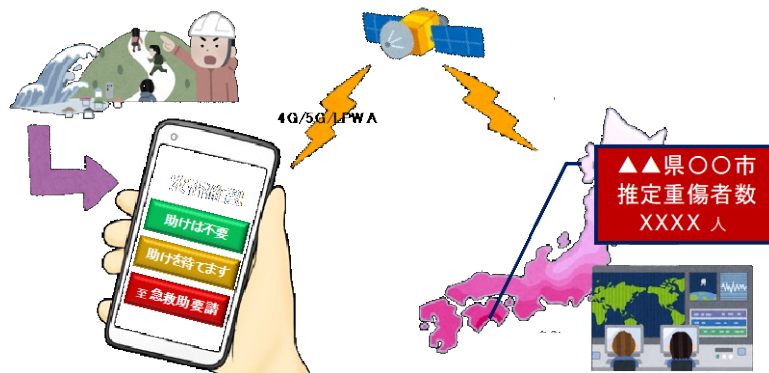


図2 構築した研究開発コンセプト（ソリューション仮説）

3-2 技術的情報ニーズ分析 [6]

合成開口レーダー（SAR）を搭載した小型衛星群による地球観測で、日照条件や天候に左右されない高頻度の観測が可能になる。小型衛星群を用いて洪水を時間的・空間的にどのように観測するかを検討した。設計した超小型衛星群を用いて洪水監視の仮想実験を、日本で発生した2つの洪水事例を用いて行った。実験の結果、高度570kmの太陽同期軌道、30kmの観測幅、15~30°の入射角、20機の衛星で構成したSAR搭載小型衛星群では、全観測データのうち累積洪水範囲の87%を取得できることが判明した。しかし、それぞれの洪水の特性やSAR衛星の観測システムの違いにより、2つのケースの観測結果には差があり、河川の種類に応じて個別に評価する必要があることが明らかになった。

本研究では、SAR小型衛星コンステレーションを用いて、洪水域をどのように空間的・時間的に観測する

ことができるかを検討した。まず、Walker Constellation 法を用いて、T (衛星の総数)、P (等間隔の軌道面数)、F (隣接する面の衛星間の相対位相差) をパラメータとしたコンステレーションを設計した。そして、設計した SAR 小型衛星コンステレーションを、日本における 2 つの洪水事象を想定した数値シミュレーションによる仮想洪水モニタリング実験に適用した。

各コンステレーションの観測挙動を仮定し、洪水モニタリングの観測性能を評価するための独自の性能指標を導入することに成功した。その結果、高度 570km の太陽同期軌道、30km の観測幅、入射角 15-30°、衛星 20 基の SAR 小型衛星群により、1 ケースで時系列観測における被害範囲 (累積洪水範囲) の 87% の捕捉を達成できることが実証された。2 つのケースの結果を比較すると、観測性能はそれぞれの洪水の特徴に依存し、それは SAR 小型衛星観測システムのいくつかの特徴に関係していることがわかった。

本論文で示した、特定の衛星と軌道を用いた条件下での日本における 2 つのケーススタディの結果は、洪水災害モニタリングの観点から SAR 小型衛星コンステレーションに求められる具体的な要件を明確に結論づけるには不十分であると思われる。しかし、最適なパラメータ設定はそれぞれ異なるため、様々な地域の様々な種類の衛星や軌道 (例えば、低・中緯度に焦点を当てた低い軌道傾斜) を用いた洪水ケースについて、個別の評価が必要であることが示唆された。この点、本研究で提案したアプローチは、世界中のあらゆる地域のあらゆる洪水ケースに適用可能であり、最初の枠組みを構築し、今後の解析のための評価手法を確立したという点で、本研究は有用であると思われる。したがって、本研究を基に、他の小型 SAR 衛星を用いた他の地域でのより包括的な解析を行い、必要に応じて普遍的な適用を決定する必要がある。

3-3 超小型衛星群・無線通信の基本設計

(1) 合成開口レーダ

地球観測超小型衛星の概念設計を開始した。地球観測の手法として合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) を対象に下記 3 要素の検討を開始した。SAR の性能として画像の粒度を表す分解能、画像の品質を表す雑音等価後方散乱係数 (NESZ: Noise Equivalent Sigma Zero) を評価した。数式的に観測周波数、送信電力、分解能の関係を明らかにした。結果として、より高い周波数・大きな面積のアンテナを使用することで、より低い電力で、同一の分解能を実現できることが明らかになった。NESZ に関しても同様により高い周波数・大きな面積のアンテナを使用することで、NESZ が改善できることが明らかになった。

アジマス分解能 Δ_A 、レンジ分解能 Δ_R 、NESZ はそれぞれ以下の式で表される。レンジ分解能を 100m としたときの中心周波数と送信電力に対する NESZ の関係を図3に示す。その他パラメータは表 1 に示す。8GHz を使用する場合、NESZ を -16dB 以下とするには 400W 級の出力が必要であると分かる。

$$\Delta_A = \frac{L}{2}$$

$$\Delta_R = \frac{c}{2B \sin \theta}$$

$$NESZ = (8\pi R^3 k T_0 v_{st}) (NFL_s) \frac{\lambda}{P_t A^2 \eta^2}$$

表 1 合成開口レーダの仕様

L	レンジ方向アンテナ長さ	0.7m
c	光速	2.9979×10^8 m/s
B	チャープ帯域幅	レンジ分解能より決定
θ	観測対象の地平面に対する法線と衛星と観測対象を結んだ線の成す角度	37°

R	衛星と観測対象の距離	6.2607×10^2 km
k	ボルツマン定数	1.3806×10^{-23} J/K
T_0	地球の温度	270 K
v_{st}	衛星の速度	7700 m/s
NF	受信機雑音	5.5 dB
L_s	システムロス	3.5 dB
λ	中心周波数における波長	設計変数
P_t	送信電力の平均	設計変数
A	アンテナ面積	0.49m^2
η	アンテナ効率	0.5

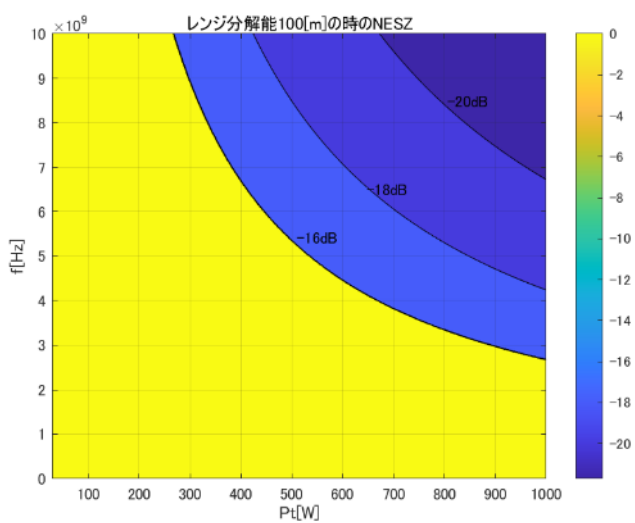


図3 送信電力と中心周波数に対する NESZ

(2) データダウンリンク用の回線設計

衛星で取得したデータを地上に送信するための回線設計を検討する。図4に衛星および地上局の位置関係を示す。衛星高度 500km, 周波数 5.84GHz, データ通信速度 1kbps, 変調方式 BPSK としリンクマージンを求めた。

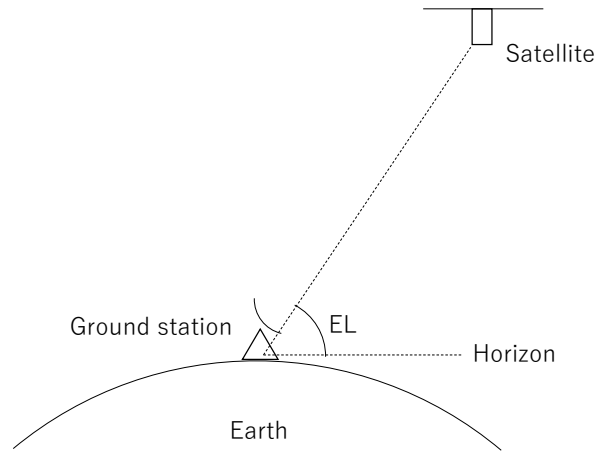


図4 衛星と地上局の位置関係

リンクマージン M は下記の式で表される。

$$M = (C/N_0)_{\text{rec}} - (C/N_0)_{\text{req}}$$

$$(C/N_0)_{\text{rec}} = P_t + G_t - L_d - L_p - L_{\text{ion}} - L_A - L_{RA} + G/T - c_B$$

$$(C/N_0)_{\text{req}} = BR + (E_b/N_0)_{\text{req}} + L_m + L_{GM} - G_c$$

ここで各パラメータは表 2に示す。

送信アンテナに4素子パッチアンテナを用いた場合のリンクマージンを図5に示す。地上局の仰角0度から90度に対してリンクマージンが3dB以上となることが分かった。よってワンパスで330kbit=41kBのデータがダウンロードできることが分かる。

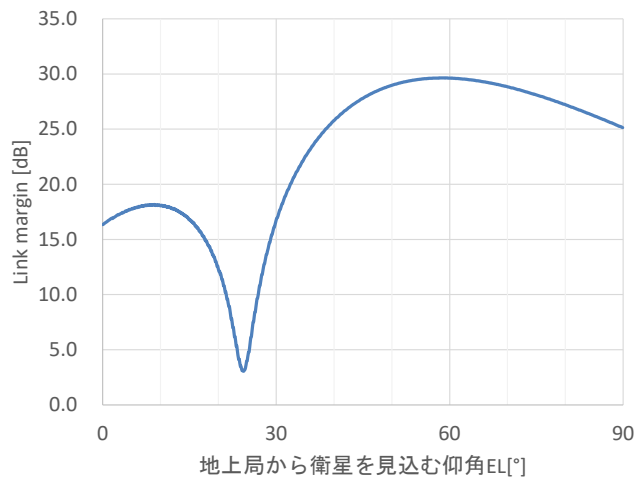


図5 4素子パッチアンテナを用いた場合のリンクマージン

表 2 回線設計時のパラメータ

$(C/N_0)_{\text{rec}}$	受信信号の受信電力と雑音電力密度の比[dB Hz]	衛星位置により決定
$(C/N_0)_{\text{rec}}$	所望の通信を実現するのに必要となる受信電力と雑音電力密度の比[dB Hz]	39.3 dB Hz
P_t	送信機の送信電力[dBW]	-1.0 dBW
G_t	送信アンテナ利得[dBi]	13.8 dB
L_d	自由空間伝搬損失[dB]	183.8 dB (EL=90° の場合)
L_p	偏波損失[dB]	3.0 dB
L_{ion}	電離層吸収損失[dB]	0.5 dB
L_A	大気吸収損失[dB]	0.5 dB
L_{RA}	降雨損失[dB]	1.0 dB
G/T	受信局のアンテナ利得と雑音温度の比[dB/K]	4.6 dB
c_B	ボルツマン定数[dB W/(K Hz)]	-228.6
BR	ビットレート[dB Hz]	30.0 dB Hz
$(E_b/N_0)_{\text{rec}}$	所望 BER を実現するのに必要な[dB]	4.2 dB
L_m	変調損失[dB]	4.1 dB
L_{GM}	ハードウェア劣化量[dB]	1.0 dB
G_c	符号化利得[dB]	0.0 dB

(3) 超小型衛星の基礎検討

衛星の電力収支を検討した。まず、CubeSat に搭載可能なコンポーネントを比較した。バッテリー容量は 80Wh、太陽電池の発電電力は最大 5.10W、平均 3.28W が入手可能である。よって消費電力を 80Wh 以下に抑える必要がある。OrigamiSat-1 に搭載した 5.84GHz 帯通信機の消費電力は 19.7W であり、30 分使用すると衛星のノミナル消費電力も合わせ 51.5Wh となる。SAR での観測も同程度の消費電力に抑える必要があり、観測時間が限られることが判明した。

姿勢制御の方式について検討した。磁気トルカは地球近傍でのみの使用に限られ、制御速度も遅いが、軽量かつ低コストであり CubeSat に多く使用されている。CubeSat に搭載可能な磁気トルカでモジュールサイズ 95.9x90.1x17mm³、消費電力 1.2W、出力 0.2Am² が入手可能であると判明した。

(4) 超小型衛星用アンテナの基礎検討[7]

地球観測超小型衛星で大型のアレーアンテナを実現するためのアンテナ構造の設計について、新たな構造設計概念を考案し、モックアップ製作によって概念検証を行った。(i) 展開アンテナ側の配線が少ないリフレクトアレー方式を用いる、(ii) 5.84GHzに対応するためリフレクトアレーの厚さ5mmの誘電体層を真空により実現するため、5mm間隔で離れた2層の膜を展開する、(iii) CubeSat 1U (10cm×10cm×10cm)のサイズに収納でき、打ち上げ後に軌道上で1m×1m級のアンテナへ展開することを目指す。

上記(i)～(iii)を実現するため、「飛び出す絵本」の機構を膜面上に配置することで展開後2層に分離する新たな展開リフレクトアレーアンテナ構造を提案した[7]。下図にモックアップによる、製作・収納・展開の概念検証結果を示す。現状で44cm×44cmサイズのアンテナ構造の成立性が確認できており、今後より大型のプロトタイプを製作していく。

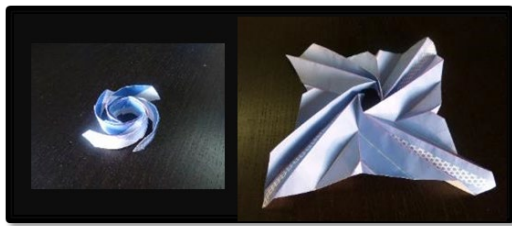
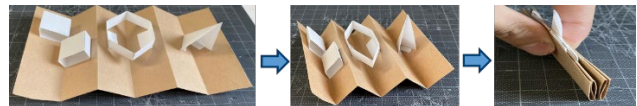
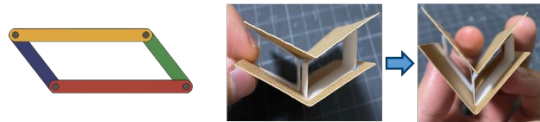


図6 超小型衛星搭載アンテナ構造の折畳みパターン



(a) Various pop-up picture book mechanisms

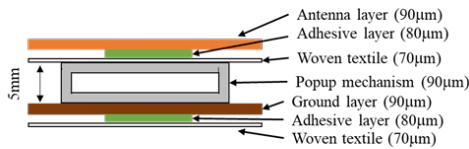


(b) Four-bar linkage parallel mechanism

図7 飛び出す絵本に用いられている機構[7]



(a) Deployed configuration



(b) Side view of paper mockup

図8 2層式の膜面リフレクトアレーアンテナのペーパーモックアップ[7]

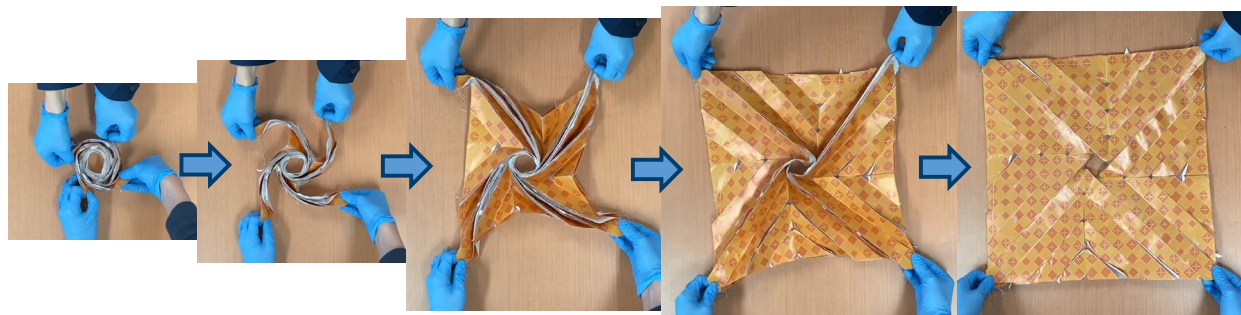


図9 展開アンテナ構造モックアップによる収納・展開のデモンストレーション[7]

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所掌機関長インタビュー結果を分析した。(2)技術的情報ニーズ分析では合成開口レーダを搭載した小型衛星群による地球観測を検証した。(3)超小型衛星群・通信・センサの設計では合成開口レーダ、データダウンリンク、超小型衛星の基礎検討、観測用アンテナについて調査検討した。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] 川喜田二郎『発想法 改版』(中公新書, 2017)
- [2] 気象庁大気海洋部, 配信資料に関するお知らせ, (2021). Available at: <https://www.data.jma.go.jp/suishin/oshirase/pdf/20210315.pdf> (Retrieved June 29, 2022)
- [3] 内閣府, 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ資料,(n.d.). Available at: https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html (Retrieved June 29, 2022)
- [4] 総務省総合通信基盤局, 東日本大震災における通信の被災状況、復旧等に関する取り組み状況, (2011). Available at: <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/kentokai/kinoukakuho/2/pdf/1.pdf> (Retrieved June 29, 2022)
- [5] 内閣府, みちびき(準天頂衛星システム), (n.d.). Available at: <https://qzss.go.jp/index.html> (Retrieved June 29, 2022)
- [6] Kitajima, N.; Seto, R.; Yamazaki, D.; Zhou, X.; Ma, W.; Kanae, S. Potential of a SAR Small-Satellite Constellation for Rapid Monitoring of Flood Extent. *Remote Sens.* 2021, 13, 1959. <https://doi.org/10.3390/rs13101959>
- [7] Takashi Tomura, Hiraku Sakamoto, Yuki Takeda, Gen Nakayama, Toranosuke Yanagi, Motoki Moritani, Shuhei Koike, Yuki Takeda, Shinya Tamura, Kazuki Nagai, Sora Kanamaru, “Two-layer pop-up origami deployable membrane reflectarray antenna stowed in 1U CubeSat,” SSC22-WKVI-05, Small Satellite Conference, Aug. 2022.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Simulation results of a foldable reflectarray composed of four triangular notched patches	Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP), 220358	2021年10月
大型展開パッチ・リフレクトアレーアンテナの機械的・電氣的構成のトレードオフ評価	宇宙科学技術連合講演会, 3J09	2021年11月