

# 先進レーダー衛星利用の地上絵アニメーション制作に適した衛星測位システムとその補強法の評価

Evaluation of Satellite Positioning Systems and Augmentation Methods  
for Geoglyph Animation Production Using Advanced Radar Satellites

鈴木 浩之  
SUZUKI Hiroshi

## 1. 要旨

宇宙航空研究開発機構（JAXA）との共同研究により地球観測衛星の画像上に写し込む直線によって「流星」を表現する地上絵アニメーションの制作手法を確立し、その制作プロセスを参加者らと共有可能なアートプロジェクト化することで、概観効果の一般化を目指している。地上絵アニメーション制作に適した衛星測位システムについて調査し、短時間で正確に目的の位置へ電波反射器を配置する方法を評価する。

## 2. 序

### (1) 研究の目的

地球外の視点により得られる地球観の変化は概観効果（Overview effect）と呼ばれ、人の社会認識の変化に影響を与える可能性がある。宇宙から人の活動の痕跡を視認可能とする先進レーダー衛星画像と、地上での電波反射の技術を用い、「地球に私がいる」という現実感を衛星画像に投影することで擬似的な概観効果を獲得するとの仮説に基づき実践される芸術活動に必要な表現技術の開発が本研究の目的である。人工衛星を利用した概観効果の獲得を試みる実践的芸術活動として（曇天下の地上絵制作活動の可能性を拡大させる為の）レーダー衛星を利用し、複数の衛星画像上に描く直線を「流星」に見立て移動させる手法を開発し、その地上絵アニメーション

を描くプロセスの一般参加体験プログラムとしての実施を目指す。

本研究ではJAXAが運用する陸域観測技術衛星「だいち2号」（ALOS-2）搭載のレーダーによる地球観測システムと汎地球測位航法衛星システム（GNSS）を補完する準天頂測位衛星「みちびき」（QZSS）（内閣府が運用）を利用し、直線を描く際に地上に配置する電波反射板を予定の緯度・経度上に正確に配置し、全ての電波反射板を基準線上に安定した反射強度で写し込む手法を開発する。

本研究は光学衛星の利用による先行研究の検証<sup>1</sup>からスタートし、美術表現にレーダー衛星を利用する実践的芸術分野の研究として展開<sup>2</sup>し、レーダー衛星を利用した地上絵制作に必要な技術開発<sup>3</sup>を積み重ねてきた。2022年に小型の電波反射板を用い複数の地上絵をアニメーション化するプロセスに着手し、QZSS利用のサブメータ級測位補強サービスを応用することで、観測日が異なる衛星画像上に写し込んだ図形（直線）を意図通りの位置に連続して移動させる表現に必要な描画手法の開発を試みた。本論では2022年と比較するかたちで2023年に行った実験とその結果に基づき、即時的に地理学的緯経度を取得可能なQZSS利用ネットワークRTK/VRS法によるGNSS補完技術の（レーダー衛星利用の地上絵アニメーション制作における）有効性について評価する。また、本研究で実験に使用した〈電波反射板〉に関する耐風荷重性向上の必要性について、今後検討すべき課題として触れる。

## (2) レーダー衛星を利用した擬似的概観効果について

立花隆が宇宙を体験した多くの宇宙飛行士へのインタビューをまとめた『宇宙からの帰還』（中央公論新社、1985年）によると、宇宙飛行士はその体験を自らに問い続け、意識構造に深い内的衝動を与え続けることで（体験前と比較して）社会認識を大きく変えることが珍しくない。宇宙体験を自らに問い続けるための手がかりとして、飛躍した視点移動の体験（地上→宇宙→地上）とその視点をもたらす視覚的な記憶があると考えられる。概観効果と呼ばれる特別な影響をもたらす体験は人が地球から遠ざかることで得られてきた。対象から離れた位置に視点を移動させることで新たな視覚経験や観測を得る試みは1858年にフランスのナダールが行った気球からの写真撮影にさかのぼり、以後地球観測は人工衛星とともに発展してきた。自らが写真家であるナダールは第1回印象派展に自身のスタジオを利用させるなど芸術活動を実践する立場でありながら、現代ではリモートセンシングと呼ばれる地球観測の出発点として科学史に記録されている。鈴木は地球観測衛星を利用することで（地上にいながら）地球外から宇宙・地球・人の存在を単一の視点で認識する体験プログラムが実現可能と考えた。先行研究の調査によって、鏡によって可視光を意図的に強く反射させ、人工衛星に搭載された光学センサーに観測させる活動を知り、その行為がさながら人と人工衛星の間で交わされる原始的な通信を思わせる点に注目し2009年に光学衛星（地球観測衛星「Terra」搭載センサー「ASTER」）による地球観測システムを利用し（太陽光を鏡で反射させることで）地球外の視点と地上を繋ぐ実践的な芸術活動を試みた。残念ながらこの実験は曇天下で衛星画像が雲に覆われ失敗している。この活動に参加予定であった多くの児童が期待した擬似的宇宙体験が再び失われぬために曇天下の活動の課題に取り組む過程で、天候に関わらず高い確率で地上での電波反射活動が衛星に観測される〈電波による地球観測システム〉（レーダー衛星）利用を着想した。

## (3) リモートセンシングと芸術

人工衛星による遠隔探査（リモートセンシング）の分野では新たな地球観測衛星が打上げられ様々なセンサーによる観測データを活用した事業が試みられている。2023年にソニーグループが自社開発の人工衛星（光学式のソニー製カメラを搭載）を地上から操作する体験を一般参加者に提供する「STAR SPHERE」プロジェクトが開始されるなど、「宇宙の視点」を地上で得る新たな「宇宙体験」とも呼べる〈人工衛星を利用した宇宙への人文社会科学的なアプローチ〉に社会の関心が向けられはじめている。2014年以降は国内の芸術分野においても現代の最先端の科学技術を応用し新たな思考法を発見する目的から宇宙を表現のフィールドとしてとらえるメディアアート等が改めて注目され、「ミッション[宇宙×芸術]—コスモロジーを超えて」展をはじめとした宇宙芸術に関するアウトリーチが見られるようになった。

地球観測衛星を芸術分野に応用する試みは1980年6月11日にカリフォルニアのモハーベ砂漠においてトム・ヴァン・サンがアメリカの人工衛星 Landsat 3（光学センサー）を利用して制作した《リフレクションズ・フロム・アース》（Reflections From Earth）が最初だといわれており、1989年にはピエル・コントゥグがフランスで《シニャチュール・テール》を制作し地球観測衛星「SPOT-1」（光学センサー）がこれを撮像している。2000年にはスペースシャトルエンデバー号（STS-99）のミッションの一つである「シャトル レーダー トポグラフィー ミッション」（SRTM）と連動したレーダー電波反射実験教育プログラムが世界各地で実施された。日本国内でも当時の宇宙開発事業団が、自作のコーナキューブリフレクタを利用し衛星画像上に文字などを写し込む教育プログラムへの参加者を募集し、宇宙少年団など多くの団体が参加した。2013年より鈴木、大木により本研究の前身となる地上絵制作技術の開発がスタートし、続く2019～2021年度において地上絵アニメーション制作技術へと移行する為の映像表現の探究へと展開し、2022年から2023年にかけて地上絵ア

ニメーションの制作実験を開始している。

#### (4) 先進レーダー衛星の利用

1980年以降の実践的芸術活動の分野において人工衛星を利用した擬似的な概観効果の獲得が試みられ、特別な地上絵の描画によって人の活動の痕跡を地球外から可視化する作品群が生まれた。しかし、光学的な地球観測衛星を利用した従来の地上絵制作では地表が雲で遮られることが課題であった。降水量が多い日本ではこの影響は無視できない。1975年から2015年にかけての東京都年間曇天日数は127日から187日（出典：社会生活統計指標－都道府県の指標－2015）で推移しており、1年の3分の1から2分の1程度が曇天による活動の制限を受ける可能性がある。本研究では従来の光学衛星に代えて、曇天下で地上観測が可能なレーダー衛星を利用することで地上絵が衛星画像上に写し込まれる確率を高める。地球観測衛星「だいち2号」(ALOS-2)は搭載されたレーダーにより曇天下の地表を宇宙から観測できる特性を持ち、衛星からの観測でありながら雲が写り込まない。「だいち2号」を利用することで参加者らが協力して描く巨大な地上絵制作について天候を理由に中止する可能性を低くすることが出来る。

#### (5) 地上絵から地上絵アニメーションへ

2010年までは光学センサー搭載の地球観測衛星(Terra搭載ASTER)を利用した表現技術の開発を試みていたが、曇天下での中止が課題だった。日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)が運用する衛星に、電波(Lバンド)を利用する地球観測衛星「だいち2号」(ALOS-2)がある。ALOS-2は搭載されたレーダーにより曇天下の地表を宇宙から観測できる特性を持ち、衛星からの観測でありながら雲が写り込まない。衛星画像上の静止した点から動きのある流星を表すアニメーションに変更することで、地表の「私」を発見しやすくなる。

本研究で扱う「だいち2号」画像の1ピクセルは、地上の3m×3mの範囲の電波反射の強弱を表しており、異なる日時の「だいち2号」画像を重ねた場

合に、電波反射強度の差を抽出することで得られる解析画像が(地上でおこる様々な要因により)無数の点の集合として描出され、さながら「星空」を想起させる。

本研究ではこれまで衛星画像上に静止した点を描いてきたが、動きのある流星を表現するアニメーションの制作へと展開することで、参加者や鑑賞者が(静止画と比較して)衛星画像上に電波反射の痕跡を発見しやすくなると考えた。

従来は静止した地上絵を基本としており、点の集積した平面から、明度の違いを利用して鑑賞者に「星座」を認識させる必要があった。地上に配置した電波反射器の数や角度調整の精度によって反射強度が充分得られず、形を伝える視覚的な変化が乏しくなり、表現の力に欠けるケースもあった。本研究では高精度の衛星測位の手法を応用し、地上絵を時間軸方向に重ね、動きを伴う映像表現(地上絵アニメーション)へと展開することで、衛星画像内に人為的な地上絵の描画を確認することが容易な新たな表現手法が得られると考えた。

#### (6) 地上絵アニメーションと地理学的経緯度情報

紙やセルなどのアナログ素材を用いた一般的なアニメーション制作においては、時間に沿って連続する絵を正しい位置で描いていくために「タップ」と呼ばれる器具を用いる。タップは3つの突起が付いた定規状の器具で、タップの突起を挿す為の穴が空いた紙を束ねて使用する。タップの突起が各紙を3点で固定する為、絵の座標は突起を起点として常に標準化される。衛星画像上に描く地上絵をアニメーション表現の動画素材として用いる場合においても、時間に沿って1枚ずつ変化するそれぞれの絵の中に位置の基準を得る必要がある。そこで、本研究で取り組む地上絵アニメーションでは実際に電波反射器を配置する現地と衛星画像上の地理学的経緯度を一致させ、描かれた地上絵の位置の標準化を目指した。

衛星画像はデータ内に地理学的経緯度の情報を有している。実際に電波反射器を配置する現場の観測

点の緯度・経度が正確に測位できれば、衛星画像上でも緯度・経度が正しく反映されることから、現場での測位が重要になる。

電波反射器を配置する現場では、正確な測位を行う必要がある一方で測位のプロセスに時間の短縮が求められる。現場を撮像する衛星の観測時刻は予め計画されており、測位に時間がかかり過ぎた場合に電波反射器の配置に影響が及びかねない。また、測位の作業は電波反射器の展開と並行して進むことから現場で多くの人員を割くことが難しい。さらに、本研究によって開発する地上絵アニメーション制作技術は将来的に一般参加可能なアートプロジェクトとして公開し、各所で実施されることを目標<sup>4</sup>としており、専門家による特殊な技能を必要とせず低コストで機能する測位法の採用が望ましい。

- ・ 少ない時間での測位
- ・ 少ない人数での測位
- ・ 少ない費用で実施可能な測位

これらの条件を満たす測位の方法として衛星による測位が考えられる。

衛星測位システムは全地球航法衛星システム (GNSS) と呼ばれ、QZSS (日本)、GPS (アメリカ)、GLONASS (ロシア)、Galileo (EU) 等が日常的に利用されている。GNSSを利用した測位には「単独測位」「相対測位」「RTK方式」「ネットワーク型RTK測位」等があり測位の精度や用途が異なる。また、それぞれの方式に必要な受信機の種類や必要な台数、通信設備なども異なる。本研究では先に挙げた3つの条件に当てはまる最も適した衛星測位システムの方式としてネットワークRTK/VRSを用い、地上絵アニメーションの制作に応用可能かを実際の電波反射器の配置と撮像結果によって評価した。

### 3. 研究手法

#### (1) 衛星測位システム (GNSS) に関する調査

国土地理院のWEBサイトの記述によれば、衛星測位システムは以下のように説明されている。

衛星測位システムは、英語の *Global Navigation Satellite System* の頭文字から「GNSS」と表記されます。GNSS衛星には、QZSS (日本)、GPS (アメリカ)、GLONASS (ロシア)、Galileo (EU) 等があります。

日本のみちびきは、日本の上空に長く滞在する準天頂軌道の衛星が主体となって構成され、2018年11月から4機運用されています。みちびきはアジア・オセアニア地域のみを対象とするためRNSS (*Regional Navigation Satellite System*) に含まれる場合もあります。

さらに同ページでは1台の受信機による単独測位と2台以上の受信機を利用する相対測位に加えネットワーク型RTK測位に対応するみちびきの機能について以下のように説明している。

ネットワーク型RTK測位は、観測に含まれる誤差を電子基準点のリアルタイム観測データ等を利用して補正することで、リアルタイムでcm級の測位を効率的に行う方式です。ネットワーク型RTK測位はいくつかの方式が提案されており、日本を含む数カ国で既に実用化されているものもあります。

[https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi\\_aboutGNSS.html](https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_aboutGNSS.html) (2023年11月7日確認)

内閣府が運用する準天頂衛星「みちびき」は日本国内においてGNSS単独測位で生じる数メートルの誤差を1 m程度 (サブメータ級)、もしくは数センチメートル程度 (センチメートル級) に縮める機能を有し、地上絵アニメーション制作において電波反射器の正確な配置を補う上で有効と考えられる。サブメータ級測位補強サービスは、地上のサブメータ基地局が抽出した誤差情報をもとに補強情報を生成し、一般に利用されている測位信号であるL1C/A信号と同じ形式のL1S信号として「みちびき」から配信することで、1台の受信機でありながら衛星測位の誤差を1 m程度に抑える (参考)。また、センチメートル級測位補強サービスは、受信機に接続され

た携帯電話経由で観測点の概略位置をサービス提供事業者へ送信し、その概略位置を元に生成された仮想基準点（VRS点）を補正データとして携帯電話・インターネット回線で（衛星測位を行う現場の受信機に接続中のコンピュータ等を介して）受信することで誤差を数センチメートル程度に低減することもわかった。

（参考）「みちびき（準天頂衛星システム）／サブメータ級測位補強サービス」内閣府 宇宙開発戦略推進事業局 WEBサイト2023年11月7日確認

[https://qzss.go.jp/overview/services/sv05\\_slas.html](https://qzss.go.jp/overview/services/sv05_slas.html)  
「VRSサービス」日本GPSデータサービス株式会社 WEBサイト 2023年11月7日確認

[https://www.gpsdata.co.jp/service\\_menu/realtime/](https://www.gpsdata.co.jp/service_menu/realtime/)

## （2）実験を行うQZSS利用衛星測位システム補強の種類

日本国内において有効に衛星測位システムを補強する「みちびき」は、GNSSの精度を高めるために単独測位、相対測位以外に以下の方法が利用可能である。

- A. LIS信号によるサブメータ級測位補強システム
- B. ネットワークRTK/VRS法
- C. RTK（基地局+移動局）間接法
- D. CLAS法

Aは電離圏遅延による誤差を解消するための補強情報を利用するが同じ周波数を利用するため受信機は1台。BはVRSと呼ばれる仮想基地局を立てることで誤差数cmの正確な測位を可能にする方法で携帯電話ネットワーク通信と1台の受信機を用いる。CはRTK対応受信機が更に1台必要で今回の用途ではコストがかかり過ぎると判断し、Dの受信機は一般的にRTK用受信機よりさらに高価でありCと同様に今回評価する方法のリストから除いた。

## （3）実験に向けた準備

準天頂測位衛星「みちびき」（QZSS）を利用し、直線を描くように電波反射板を予定の緯度・経度に高精度で複数回配置する。異なる日に配置した全ての

電波反射板が基準線上に正確に写し込まれるかを衛星画像上で評価する実験を計画した。

2022年度は電波反射器を正確に配置するために衛星測位を利用し、地上に直線を描画する実験を2回行った。石川県の協力を得て金沢市内を流れる犀川の河川敷に自立式の電波反射板を40基配置し、反射面を真方位角100度に合わせることで、ALOS-2からの観測用電波の正反射を試みた。2023年度にはQZSSのGPS測位補完の方法を変更し、2回目の実験でより精度の高い電波反射板の配置を目指した。配置する電波反射器は実験を行うフィールドに効率よく搬入した後に少人数で短時間のうちに展開する必要があることから、軽量で組み立てが容易、かつ、自立する構造であることが求められた。先行研究で利用した電波反射板<sup>5</sup>を改良し、方位角の調整と地面への固定を目的として底面中央に7mm程度の直径の穴を開け、配置当日にその穴にペグを打ち込み固定した。

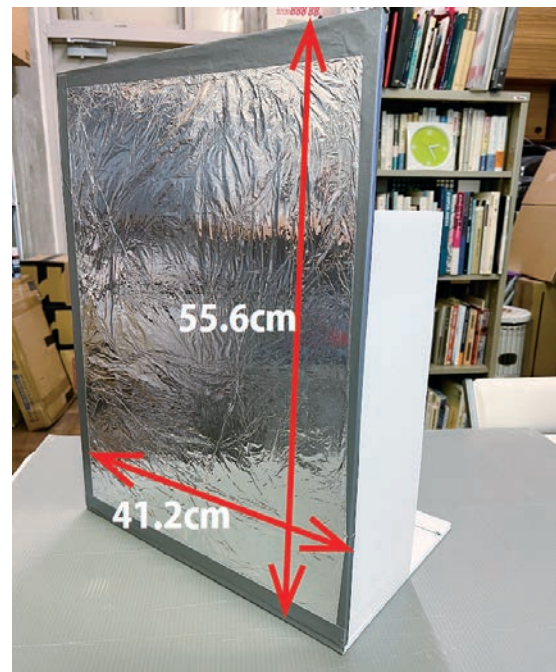


図1 電波反射板



図2 電波反射板の固定

#### (4) 実験の方法

2022年8月及び2023年6～7月に、石川県金沢市内犀川緑地芝生公園（上菊橋上流右岸）において、全長60mの直線上に40基（1.5m毎に1基）の電波反射器配置を4回（2022年2回、2023年2回）実施し、その直線を計画通り配置する目的でGNSS衛星測位のサブメータ級即位補強サービス（SLAS）とセンチメータ級測位補強サービス（ネットワークRTK/VRS方式）を比較した。電波反射器の反射面は「だいち2号」の軌道に向けて全て100度に合わせて配置した。

準天頂測位衛星「みちびき」（QZSS）は測位補強データの発信やネットワークRTK法による衛星測位の手段を提供しており、本研究ではこれらに対応する受信機とアンテナ（株式会社コア製「cohac<sup>∞</sup>（インフィニティ）QZNEO）」（参考）を利用し、電波反射器を配置するための基準となる計測点（各撮像回につき3点）の緯経度を計測した。電波反射器配置のためのネットワークRTK/VRS方式の評価実験に際しては、日本GPSデータサービス株式会社が提供する「GPS dataリアルタイム補正データ配信サービス〈Ntrip方式〉」を利用し、仮想基準点（VRS）データをネットワーク通信網（NTTドコモ回線）と携帯電話（Apple社製 iPhone 13Pro+テザリング）経由で取得した。

（参考）

みちびき、GPS、GLONASS、Galileo、BeiDouの5つの衛星測位システムに対応したマルチGNSS測位受信機。L1S信号に対応、みちびきのSLAS（サブメータ級測位補強サービス）受信可能。RTKを活用した測位も可能。

「cohac<sup>∞</sup> QZNEO（コハク・インフィニティ・キューズイーネオ）」株式会社コア製

<https://www.core.co.jp/service/industrial/gnss/receiver/qzneo>（2023年11月7日確認）



図3 QZSS受信アンテナと計測に用いた三脚（スピーカースタンドを使用）



図4 QZSS受信アンテナと三脚、電波反射板



図5 QZSS受信アンテナの支柱に取り付けた水準器



図6 計測用三脚の上に取り付けたQZSS受信アンテナ

#### 4. 実験結果

【サブメータ級測位補強サービス (SLAS) による衛星測位補完を利用して配置した電波反射器の位置精度の評価】(実験1)

「みちびき」から送られてくる〈誤差を小さく抑

えるための補強データ〉を利用することで、誤差1mの精度で電波反射器を意図する位置に配置可能な準天頂測位衛星「みちびき」(QZSS)のサブメータ級測位補強サービス (SLAS) を利用し、地図上に仮に配置した長い基準線と重なるように、実際のフィールドで電波反射器を配置し60mの直線を衛星画像上に描く。撮像した衛星画像の緯度経度を合わせて重ね合わせた場合に、描画する2本の直線はまっすぐ進む流星の軌跡のように基準線の上に重なって描画されるかを評価する。

〈1回目の撮像〉

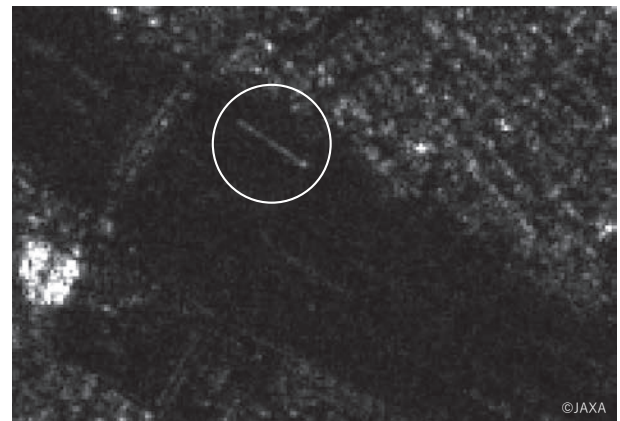


図7 実験1(1回目)の撮像で記録された電波反射器の反射

シーンID ALOS2444162880-220814

衛星名 ALOS-2

センサー名 PALSAR-2

観測中心時刻 2022年8月14日11時56分41秒 (JST)

オフナディア角 32.8度

パス番号 020

偏波モード S

偏波チャンネル HH

センサー運用モード SM1

アンテナ方向 右側

計測点 (計画)

A点 緯度 36.5482662° / 経度 136.6630993°

B点 緯度 36.5481397° / 経度 136.6633233°

C点 緯度 36.5479517° / 経度 136.6636272°



図8 2022年8月14日撮像準備中の現場

〈2回目の撮像〉

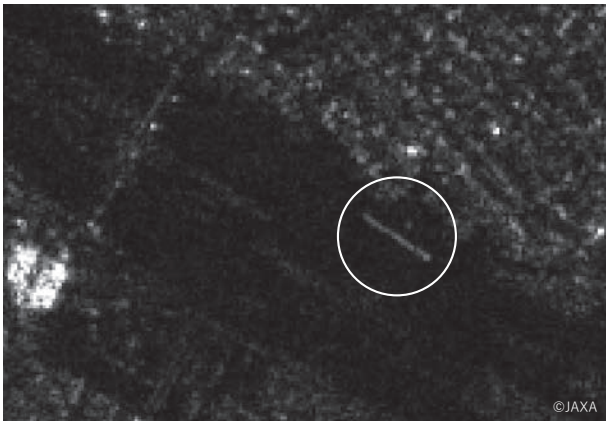


図9 実験1(2回目)の撮像で記録された電波反射器の反射

シーンID ALOS2446232880-220828

衛星名 ALOS-2

センサー名 PALSAR-2

観測中心時刻 2022年8月28日11時56分41秒(JST)

オフナディア角 35.8度

パス番号 020

偏波モード S

偏波チャンネル HH

センサー運用モード SM1

アンテナ方向 右側

計測点(計画)

D点 緯度 36.5476557° / 経度 136.6641695°

E点 緯度 36.5475111° / 経度 136.664438°

F点 緯度 36.5475124° / 経度 136.6644743°



図10 2022年8月28日撮像準備中の現場

〈実験1の結果〉

1回目の撮像は意図する位置からわずかに北にずれた(図11、A、B、C)。2回目の撮像で配置した直線は概ね基準線上に描画されたことが確認できた(図11、D、E、F)。1回目の撮像では測位の際にアンテナを移動させてから十分な時間を確保できていなかった可能性が高い。2回目の撮像では受信機が取得する位置情報が安定化するまでアンテナを固定したが、素早い測位が求められる現場において度々作業が遅滞した。



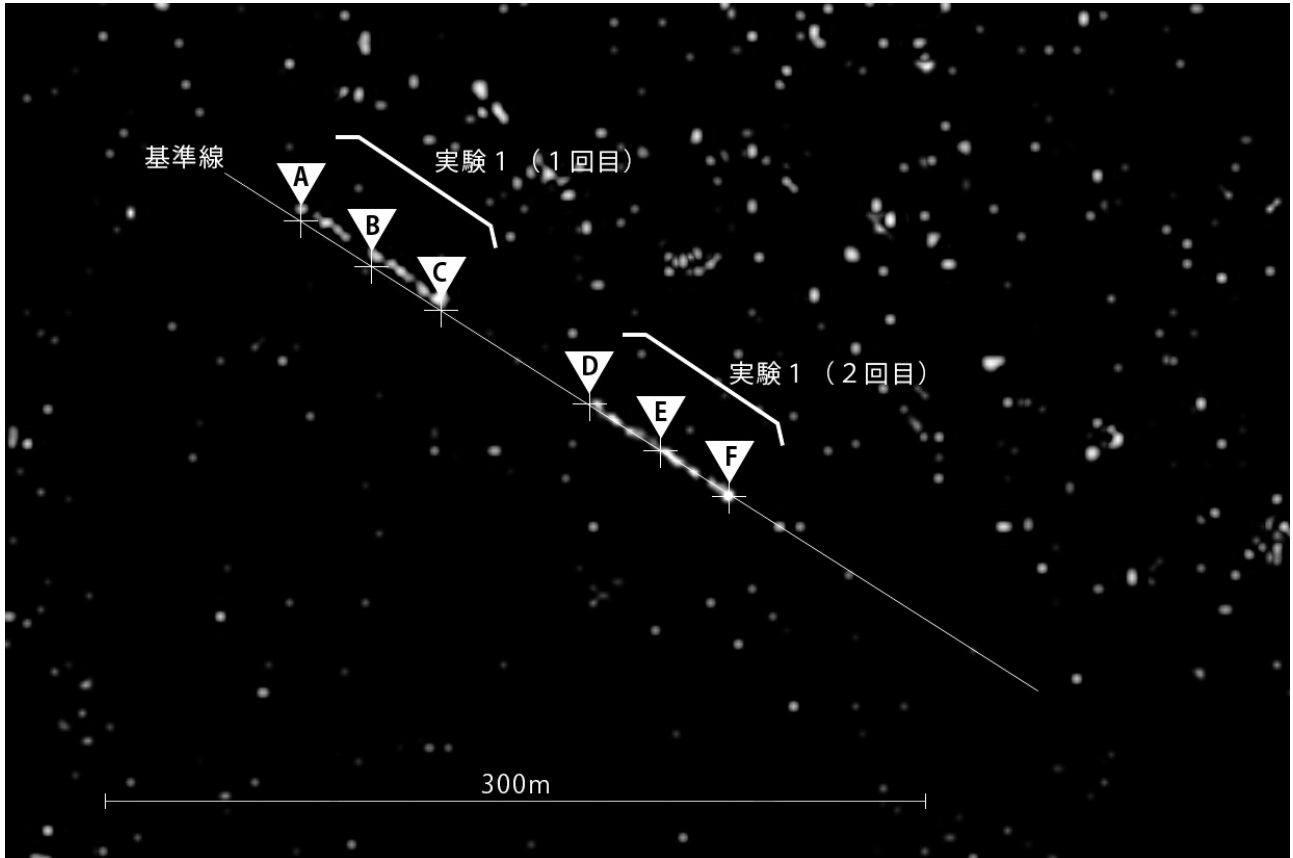


図11 実験1の結果 (石川県金沢市内犀川緑地芝生公園 (上菊橋上流右岸) / 撮像: ALOS-2 / 画像処理: 鈴木浩之)<sup>6</sup>

【センチメートル級測位補強サービス (ネットワークRTK-GNSS/VRS方式) による衛星測位補完を利用して配置した電波反射器の位置精度の評価】 (実験2)

携帯電話通信回線などのネットワーク通信によって仮想基準局の補正データを得ることで、誤差1～5cmの精度で意図する位置に電波反射器を配置可能な準天頂測位衛星「みちびき」(QZSS)のセンチメートル級測位補強サービス (ネットワークRTK/VRS方式) を利用し、地図上に仮定した長い基準線に重なるように、実際のフィールドで電波反射器を配置し60mの直線を衛星画像上に描く。撮像した衛星画像の緯度経度を合わせて重ね合わせた場合に、描画する2本の直線はまっすぐ進む流星の軌跡のように基準線の上に重なって描画されるかを評価する。

〈3回目の撮像〉

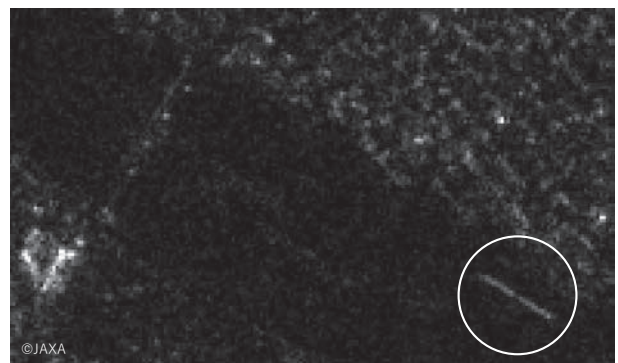


図12 実験2 (3回目)の撮像で記録された電波反射器の反射

シーンID ALOS2489702880-230618  
 衛星名 ALOS-2  
 センサー名 PALSAR-2  
 観測中心時刻 2023年6月18日11時56分40秒 (JST)  
 オフナディア角 35.4度  
 パス番号 020

偏波モード S  
偏波チャンネル HH  
センサー運用モード SM1  
アンテナ方向 右側

計測点 (計画)

G点 緯度 36.547050° / 経度 136.665297°  
H点 緯度 36.547198° / 経度 136.665024°  
I点 緯度 36.547330° / 経度 136.664782°



図13 2023年6月18日撮像準備中の現場

偏波モード S  
偏波チャンネル HH  
センサー運用モード SM1  
アンテナ方向 右側

計測点 (計画)

J点 緯度 36.5467557° / 経度 136.6658328°  
K点 緯度 36.5469071° / 経度 136.6655552°  
L点 緯度 36.5470579° / 経度 136.6652776°



図15 2023年7月16日撮像準備中の現場

〈4回目の撮像〉

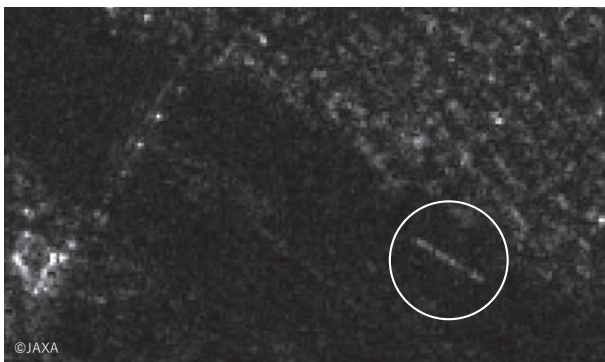


図14 実験2 (4回目)の撮像で記録された電波反射器の反射

シーンID ALOS2493842880-230716

衛星名 ALOS-2

センサー名 PALSAR-2

観測中心時刻 2023年7月16日11時56分40秒 (JST)

オフナディア角 35.8度

パス番号 020

〈実験2の結果〉

1回目 (図16、G、H、I) と2回目 (図16、J、K、L) に配置した電波反射器で描いた直線は、いずれも衛星画像上でお互いの延長線上に描画され、電波反射板が正しく配置されたことが確認できた。受信機で取得した測位結果を安定的に随時確認することができ、電波反射器を配置する現場において遅滞なく工程を進めることが出来た。

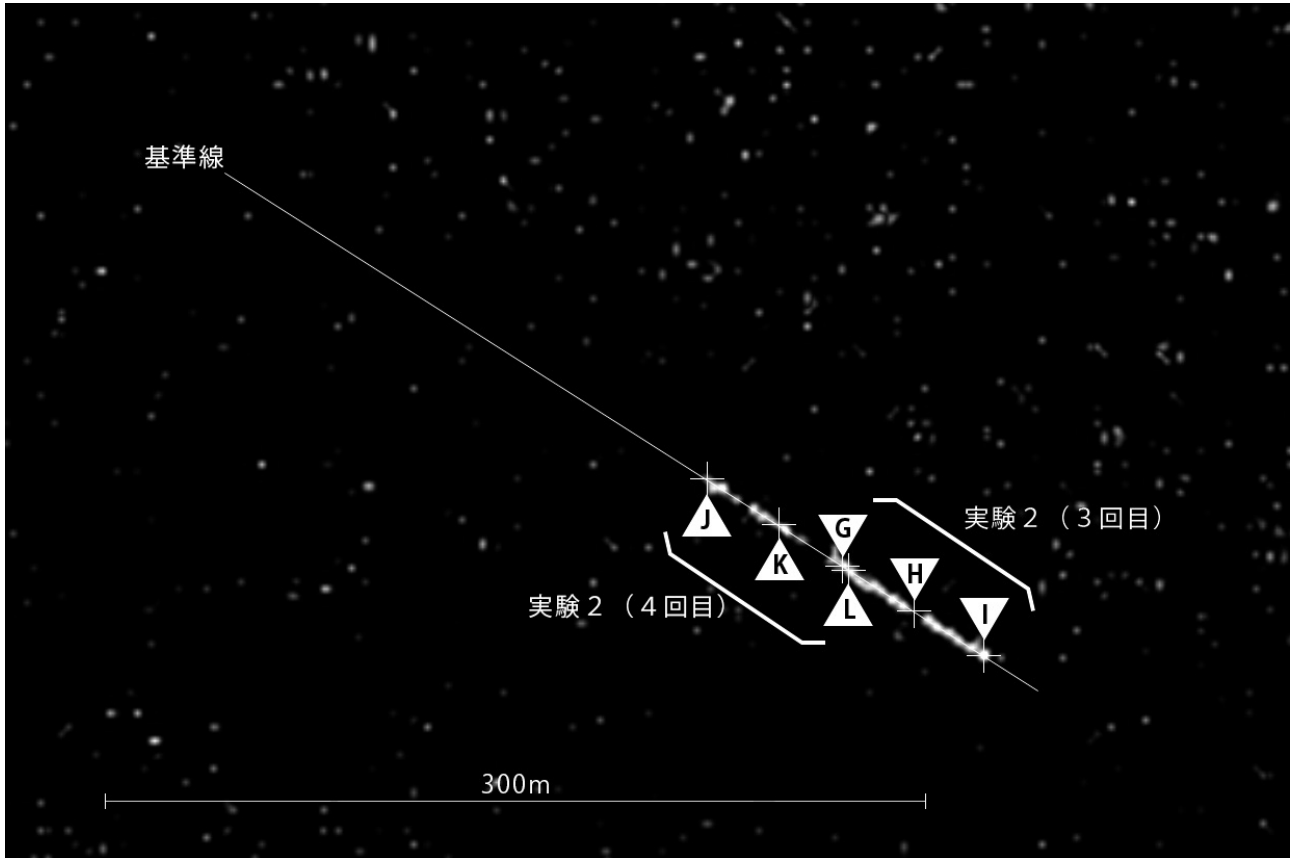


図16 実験2の結果（石川県金沢市内犀川緑地芝生公園（上菊橋上流右岸）／撮像：ALOS-2／画像処理：鈴木浩之<sup>6</sup>）

## 5. 考察

### (1) QZSS利用サブメータ級（相対測位）とセンチメータ級（ネットワークRTK/VRS）の比較

受信機1台を用いたQZSSサブメータ級測位補完法では、測位を開始しアンテナを固定してから受信する緯経度の情報が安定化するまでの時間が長く、地上絵アニメーション制作の現場においては混乱が生じた。信頼度も低く、実際に実験1の1回目の測位結果は基準とする線からわずかにずれた。アンテナを固定し安定化するまで待つことで実験1の2回目の結果に見られるように信頼度は高まるが、位置の確定にかかる時間の長さを考慮すると、より効率的な測位法を検討する必要があると思われる。

一方のセンチメータ級（ネットワークRTK/VRS）の測位法は測位結果の信頼度が高く緯経度の計測結

果の表示も即時的であり地上絵アニメーションの制作現場において必要な〈目的とする緯経度を素早く正確に特定する〉機能を備えている。一般的な携帯電話通信網を経由するかたちで利用可能な仮想的な電子基準点を安価な契約で利用することが確認でき、対応する受信機とアンテナと専用アプリケーションをインストールしたWindows PC、テザリングが可能なスマートフォン機能を有する携帯電話を1組用意することで、電波反射器を正確に配置することが可能な配置手続きを構築可能であることが確認できた。

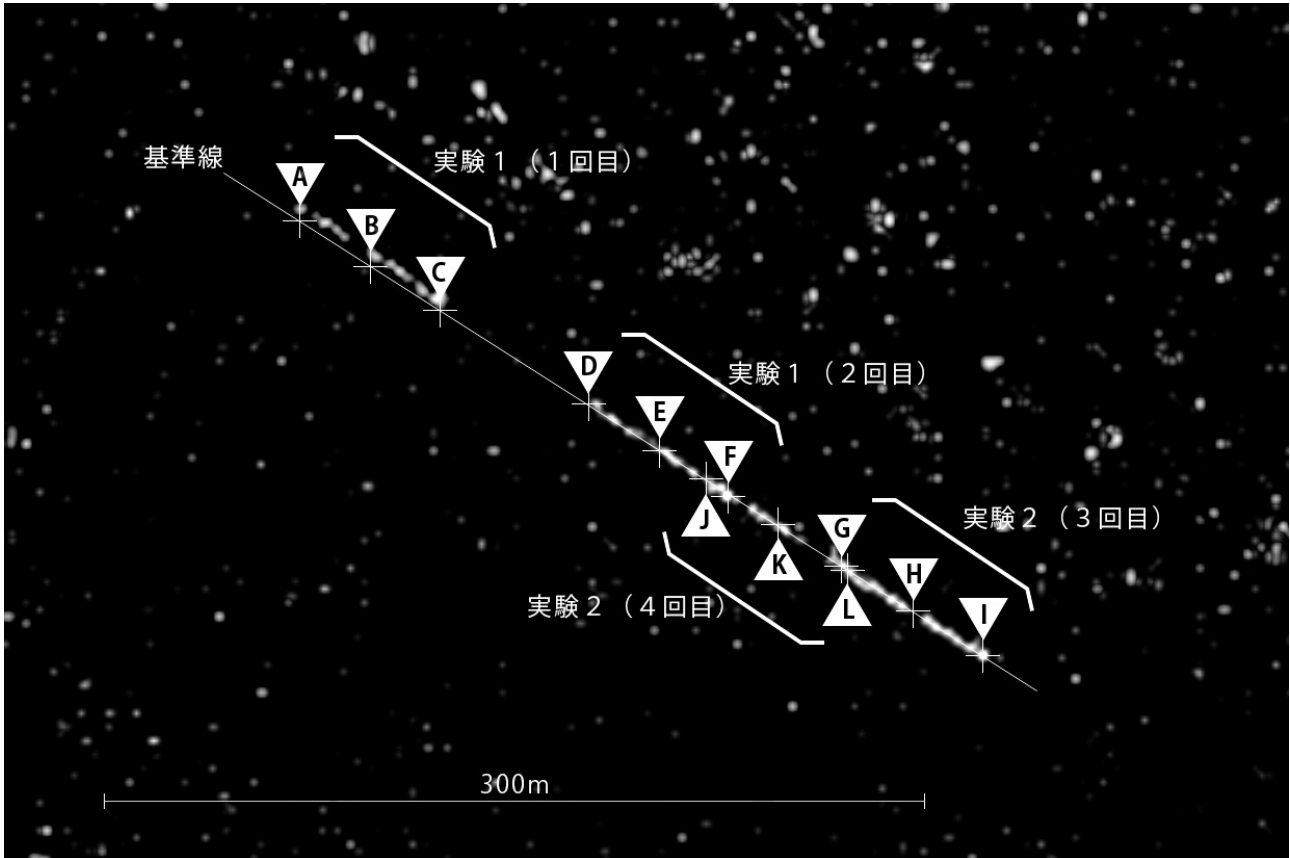


図17 実験1・実験2の衛星画像を合わせた結果（この結果から実験1〈1回目〉配置の電波反射器による反射が計画した緯経度の点A～Cに沿っていないことが確認でき、現場の測位が基準線から北にずれていたことがわかった）

(2) 突風による描画強度の低下に関する考察

電波反射器を正確に配置する方法について評価する実験を実施する中で、電波反射板の反射強度について新たな課題が見つかった。電波反射板の構造は風速10mを超える突風が吹く条件では、高い頻度で電波反射板の方位角や仰角に大きな影響を与え、場合によっては許容される誤差（中心から1度程度）を超え反射強度を低下させることが衛星画像上で確認された（図17、AとBの間、KとLの間、Hの地点）。3回目の撮像時は他の3回の撮像回に比べ風が穏やかで毎秒10m以上の突風が吹いていない（表3）ことから、衛星画像（図12）上に描いた直線の明瞭度が比較的高く保たれていたと推察できる。

今後の新たな課題として電波反射板の反射面についての耐風荷重対策の検討が必要だと考える。

金沢市内の風向と風速（表1～4）

（参考）「過去の気象データ」国土交通省 気象庁 WEBサイト（「金沢」を観測地として選択した場合）2023年11月2日 確認

<https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>

表1 実験1「1回目」2022年8月14日午前

時分	風向・風速(m/s)			
	平均	風向	最大瞬間	風向
10:00	6.3	南西	10.5	南西
10:10	5.7	西南西	11.1	西南西
10:20	7.0	西南西	10.5	西南西
10:30	7.1	南西	13.1	南西
10:40	6.5	南西	11.5	南西
10:50	7.3	南西	10.9	南西
11:00	6.9	南西	10.8	南西
11:10	5.8	南西	10.0	南西
11:20	7.9	南西	13.5	南西
11:30	7.0	南西	11.7	南西
11:40	7.3	南西	12.3	南西
11:50	5.7	南西	10.8	南南西
12:00	6.6	南西	11.9	西南西

表2 実験1「2回目」8月28日午前

時分	風向・風速(m/s)			
	平均	風向	最大瞬間	風向
10:00	4.8	北北東	7.1	北北東
10:10	4.3	北東	6.5	北東
10:20	4.7	東北東	9.8	東北東
10:30	6.5	東北東	8.7	北東
10:40	5.3	北東	7.5	北北東
10:50	5.2	北東	8.0	東北東
11:00	5.1	東北東	7.8	東北東
11:10	6.3	東北東	9.7	東北東
11:20	7.5	東北東	11.5	東
11:30	7.4	東北東	12.3	東北東
11:40	7.3	東北東	11.1	東
11:50	6.8	東北東	11.1	北東
12:00	6.7	東北東	11.2	東

表3 実験2「3回目」2023年6月18日

\*風が穏やかで突風が観測されていない

時分	風向・風速(m/s)			
	平均	風向	最大瞬間	風向
10:00	2.5	西	4.3	西
10:10	2.5	西南西	4.3	西南西
10:20	2.3	西	3.9	西南西
10:30	1.8	西南西	3.2	西
10:40	1.9	西	2.9	西南西
10:50	1.3	西南西	2.2	西南西
11:00	1.4	西	2.3	北西
11:10	1.9	西北西	2.8	西北西
11:20	1.9	北西	3.4	北
11:30	2.1	北北西	3.3	北北西
11:40	2.9	北北西	4.4	北
11:50	3.7	北	4.7	北北東
12:00	3.1	北	4.5	北

表4 実験2「4回目」7月16日午前(右)

時分	風向・風速(m/s)			
	平均	風向	最大瞬間	風向
10:00	6.6	南西	10.8	南西
10:10	6.4	西南西	12.4	西南西
10:20	8.1	西南西	11.1	南西
10:30	5.5	西南西	9.9	南西
10:40	6.4	西南西	10.4	西南西
10:50	5.3	西南西	9.6	西南西
11:00	7.1	西南西	12.5	西南西
11:10	7.0	西南西	11.1	西南西
11:20	5.2	西南西	9.0	西
11:30	6.8	西南西	10.5	西南西
11:40	5.9	西南西	11.1	西南西
11:50	6.1	西南西	10.4	西南西
12:00	5.9	西南西	10.3	西

(3) 研究成果を応用した作品制作

〈地上にしながら概観効果の獲得を試みる地上絵アニメーション制作〉の全体像を総合的に鑑賞者に伝えるため、地上絵アニメーション映像のパートにドキュメンタリー映像や制作手順の内容を加えるかたちで本編を構成する短編映像作品(鈴木浩之+大木真人、2023年)『Kanazawa Meteor 2023』を制作し、電波反射板の実物と共に展覧会「移動と身体—知覚する表現へ」(日本映像学会 メディアアート研究会企画、2023年9月15日~10月1日、愛知県立芸術大学 芸術資料館)にて公開した。



図18 愛知県立芸術大学 芸術資料館での展示風景

6. 結論

(1) 先進レーダー衛星利用の地上絵アニメーション制作に適した衛星測位システムとその補強法

本研究で実施した実験結果から、QZSS衛星測位補強システムを利用することで先進レーダー衛星利用の地上絵アニメーション制作に必要な(電波反射器を配置するフィールドにおける)緯経度計測が迅速かつ正確に実施可能であることが確認できた。特に、センチメートル級ネットワークRTK/VRS法の利用は、測位結果の信頼度が高く緯経度の計測結果の表示が即時的であり地上絵アニメーションの制作現場において必要な(目的とする緯経度を短時間で正確に計測する)機能を備えていた。

## (2) 電波反射器具の改良の必要性

これまでの研究で使用してきた電波反射板の耐風荷重の限界により実験中に反射面の方位角や仰角が1度以上変化し、十分な反射が得られないポイントを複数確認した。今後の研究で日常的に起こり得る突風に耐えられる電波反射板の改良を行う必要がある。

## (3) 今後の展開

何枚もの「流星」の地上絵を、長期間、大勢で、コマ撮り地上絵アニメーションとして紡いでいく撮影技術は、今後打ち上げ予定の（ALOS-2よりも高頻度で同じ地点を観測可能な）ALOS-4の運用が開始されることで活発化することが期待される。

## (4) おわりに

ナダールはカメラを気球に載せ地上から離れた上空から地上を観測し、芸術（写真表現）と科学（リモートセンシング）の両分野にまたがる歴史的な成果を残した。ナダール以降もロケットの父と呼ばれるフォン・ブランは映画「月世界の女」に描かれた地球外の世界に惹かれ、アポロ17号クルーによる写真「ザ・ブルー・マープル」（世界初の地球全球写真）は「かけがえのない地球」のシンボルとなるなど、遠隔探査という同じフィールドにおいて芸術と科学の双方が互いに大きな影響を与え続けている<sup>1</sup>。本研究は人文社会科学と自然科学に跨る遠隔探索の領域において実践的芸術活動を継続し、引き続き〈地球外の視点による地球観の共有〉を目指す新たな美術表現技術の開発に力を入れていきたい。

## 附記

本論文は2022～2024年度 JAXA地球観測研究公募（EO-RA3）採択研究、2022年 RESTEC研究助成 採択研究、2022年 三谷研究開発支援財団研究助成 採択研究の成果（の一部）である。

## 註

- 1 鈴木浩之「宇宙芸術の変遷～人工衛星を中心として～」(2013年、金沢美術工芸大学 紀要第57号、p.p.69-77)
- 2 鈴木浩之「人工衛星を利用した地上絵の制作に関する研究」(2013年、金沢美術工芸大学 紀要第57号、p.p.79-90)
- 3 鈴木浩之「陸域観測技術衛星2号「だいち2号」を利用した地上絵の制作に関する研究」(2015年、金沢美術工芸大学 紀要第59号、p.p.27-40)
- 4 鈴木浩之「地球観測衛星を利用した市民参加型地上絵制作プログラムの開発に関する研究」(2016年、金沢美術工芸大学 紀要第60号、p.p.33-58)
- 5 「だいち2号」に小型の電波反射板（幅41cm×高さ56cm）を写し込むことに成功（JPSC科研費19K00223）。鈴木浩之・大木真人「人工衛星と電波反射板を利用した地上絵制作技術に関する研究」(2018年、金沢美術工芸大学 紀要第62号、p.p.63-75)
- 6 電波反射器が地上で反射した観測用電波を人工衛星に搭載されたシステムで受信し、ダウンロードされたデータに変化を抽出する視覚的な処理を行なった画像（差分解析）

## 謝辞

本研究の実施に際し宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター 主任研究開発員 大木真人氏にはALOS-2の衛星画像の解析や電波反射器配置計画へのアドバイスなど多くの場面で支えていただきました。また、金沢美術工芸大学及び同大学院学生の方々には研究補助員として電波反射板の製作、試験的な撮像、実験の準備と実施、記録撮影、広報活動などでご協力をいただきました。深謝申し上げます。

（すずき・ひろし 油画／メディアアート）  
（2023年11月8日 受理）