

文 部 科 学 省
地球観測技術等調査研究委託事業
「衛星コンステレーション時代のAI画像解析のための
キャリブレーション手法の開発」
成果報告書（令和3年度）

令和4年5月31日

国立大学法人山口大学

本報告書は、文部科学省の地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、国立大学法人山口大学が実施した令和3年度「衛星コンステレーション時代のAI画像解析のためのキャリブレーション手法の開発」の成果を取りまとめたものです。

目次

目次	3
1 受託業務の内容	4
1.1 受託業務の題目	4
1.2 実施機関	4
1.3 業務委託の目的	4
1.4 令和2年度における成果の目標及び業務の方法	4
1.5 委託業務実施機関	5
2 委託業務の実施体制	6
2.1 受託業務の題目	6
2.2 業務項目別実施区分	6
3 成果報告	7
3.1 校正サイトの構築	7
3.1.1 評価パターンの設置	7
3.1.2 ミラーアレイの設置	9
3.2 ターゲットサイトの構築	10
3.2.1 地上ターゲットサイトのデータ収集	10
3.3 キャリブレーション手法の開発	17
3.3.1 キャリブレーション手法の開発	17
3.4 災害等への実用化試験	26
3.4.1 海外の災害対応に関するターゲットの選定	26
4 図表	29
5 学会等発表実績（令和3年度）	エラー! ブックマークが定義されていません。

1 受託業務の内容

1.1 受託業務の題目

「衛星コンステレーション時代のAI画像解析のためのキャリブレーション手法の開発」

1.2 実施機関

(受託者(委託先))

住所 山口県山口市吉田1677番地1

機関名 国立大学法人山口大学

(再委託先)

住所 東京都中央区日本橋本町三丁目3番3号

機関名 株式会社アクセルスペース

(再委託先)

住所 茨城県つくば市天王台3-1

機関名 国立研究開発法人防災科学技術研究所

(再委託先)

住所 神戸市中央区脇浜海岸通1丁目5番2号 東館5階

機関名 一般財団法人アジア防災センター

1.3 業務委託の目的

国内外で様々な衛星画像が利用できる環境が整いつつある。国内においても民間の商用衛星データサービスが始まっている。衛星画像を用いたアプリケーション開発において、同等の特徴を有する衛星コンステレーションにより観測された様々な衛星画像を、時系列に補完し合いながら有効に活用することが不可欠になってくる。衛星コンステレーションを利用するには、センサー毎の特徴、衛星毎に違うバンドの波長域、大気の状態による見え方の違いなどを理解して教師データを作成し、様々な機械学習の手法を検討する必要がある。本委託業務では、衛星コンステレーション時代におけるAI画像解析のためのキャリブレーション手法の開発を行う。軌道上の衛星の特性を評価し、性能評価やチューニングを実施するための地上キャリブレーションサイトとして校正サイト(評価パターンとミラーアレイ)と既存の地物によるターゲットサイトを構築し、機械学習のための新たな共通データ基盤の開発を行うことで、災害時等で膨大に提供される衛星画像のAIによる自動処理を可能にする。

1.4 令和3年度における成果の目標及び業務の方法

① 校正サイトの構築

a. 評価パターンの設置

前年度の設計を元に、校正サイトに軌道上衛星の画像の位置精度や分解能等を推定するための評価パターンを設置する。また、設置した評価パターンの位置やサイズを高精度GPS等で計測し、評価パターンやその周辺環境のスペクトル値を分光放射計等で測定することで、キャリブレーションのためのリファレンスデータを構築する。

b. ミラーアレイの設置

前年度の設計を元に、校正サイトに軌道上衛星の画像の歪み等を推定するためのミラーアレイを設置する。また、①aと同様に高精度GPSや分光放射計等による精密な測定を実施するとともに、大気補正情報や気象データ(水蒸気量等)を太陽光フォトメータ等で取得する。

② ターゲットサイトの構築

a. 地上ターゲットサイトのデータ収集

前年度に選定した地上ターゲットサイトにおいて、ドローン等による撮影を実施し、キャリブレーション対象とする地物全体の反射特性を取得する。また、それに含まれる誤差を補正するために、対象地物の代表的な地点において分光放射計等による計測を実施するとともに、地上設置のセンサーにより植生情報を含む地表面の情報を取得する。

③ キャリブレーション手法の開発

a. キャリブレーション手法の開発

前年度の軌道上衛星の特性の評価結果をもとに、キャリブレーション手法の定式化とプログラム開発を実施する。また、太陽光フォトメータ等により地上の気象データや大気補正情報を取得しつつ、国内の衛星により校正サイトおよびターゲットサイトを観測し、キャリブレーションを試験的に実施する。

④ 災害等への実用化試験

a. 海外の災害対応に関するターゲットの選定

前年度に引続きセンチネルアジアの災害対応活動等を踏まえ、災害解析等を事例として衛星データを検証するターゲットを選定するとともに、衛星データ・地上データを収集する。また、研究協力の可能な海外機関に対してプロモーション活動を実施し、海外の衛星によりキャリブレーション手法を検証する計画を立案する。

1.5 委託業務実施機関

(受託者(委託先)) 委託契約書第1条第3号のとおり

(再委託先)

機関名 株式会社アクセルスペース

実施期間 令和3年4月1日から令和4年3月31日

(再委託先)

機関名 国立研究開発法人防災科学技術研究所

実施期間 令和3年4月1日から令和4年3月31日

(再委託先)

機関名 一般財団法人アジア防災センター

実施期間 令和3年4月1日から令和4年3月31日

2 委託業務の実施体制

2.1 受託業務の題目

(受託者(委託先))

役職・氏名 国立大学法人 山口大学 教授 長井正彦

(再委託先)

役職・氏名 株式会社アクセルスペース 代表取締役 中村 友哉

(再委託先)

役職・氏名 国立研究開発法人防災科学技術研究所 主任研究員 酒井 直樹

(再委託先)

役職・氏名 一般財団法人アジア防災センター 主任研究員 池田 誠

2.2 業務項目別実施区分

業 務 項 目	実 施 場 所	担 当 責 任 者
① 校正サイトの構築	山口県宇部市常盤台2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科	山口大学大学院創成科学研究科 教授 長井 正彦
② ターゲットサイトの構築	茨城県つくば市天王台3-1 防災科学技術研究所	防災科学技術研究所 酒井 直樹
③ キャリブレーション 手法の開発	山口県宇部市常盤台2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科 東京都中央区日本橋本町3-3-3 株式会社アクセルスペース	山口大学大学院創成科学研究科 教授(特命) 市川 ドルジュ 株式会社アクセルスペース 代表取締役 中村 友哉
④ 災害等への実用化試験	兵庫県神戸市中央区脇浜海岸通 1-5-2 東館5階 アジア防災センター	アジア防災センター 池田 誠

3 成果報告

近年、小型衛星による衛星のコンステレーション化が進み、様々な衛星により高頻度な観測が行われている。衛星コンステレーションとは観測周期が1日以上複数の低軌道衛星を協働させることにより、観測頻度を向上させる考え方である。例えば、1日最大12回の観測が可能になったPlanet社のPlanetScope衛星やアクセルスペース社のGRUS-1衛星5機のコンステレーションの様に、国内外で民間による衛星データ観測サービスが飛躍的に進んでいる。コンステレーション化に伴い様々な衛星が打ち上げられ、衛星データが利用される場合において、特にAI技術（機械学習や深層学習）では、様々なデータを融合することによるデータの充足や解析モデルの統一化は重要な要素である。しかし、センサーが取得している波長域、大気及び天頂角の違いやセンサーの劣化等の影響により統合して利用されるデータが同じ対象物に対して必ずしも同じ値を示すとは限らない。このような衛星データ同士の違いを統一する手法として、衛星データのキャリブレーションが必要不可欠である。

3.1 校正サイトの構築

3.1.1 評価パターンの設置

令和2年度に設計したミラーアレイ（5×5配列）をベースに、軌道上衛星の画像の位置精度や分解能等を推定するための評価パターンを設計・作成・設置する。5×5配列のミラーアレイは、およそ全体で3m×3mの大きさがあるため、評価パターンとして量産し、設置することは難しい。そこで、前年度に構築した5×5の配列のミラーアレイのミラー部分を黒色のカバーで隠し、GRUS-1衛星およびPlanetScope衛星により観測実験を行い、評価パターンのミラーの個数を検討した。図1にミラーを隠した実験の様子を示す。

図2に令和3年度に作成した評価パターンを示す。評価パターンは、実験や反射率の計算により、ミラーを2×2配列で4つ使用するものとした。これを、6セット作成しキャリブレーションに利用する。ミラーは材質によって、反射率や耐久性、歪みなどの特徴がある屋外におけるキャリブレーションの利用を考慮して5×5配列のミラーアレイと同様のメタクリル樹脂性のミラーを採用した。また、ミラーの数、大きさと曲率半径を求めるにはSPARC (Specular Array Calibration)¹手法を採用し、地上分解能が5m以下の衛星画像（GRUS-1衛星やPlanetScope衛星）に対応できるものとし、直径35cm、曲率半径3mのミラーを4個利用することとした。



図1 評価パターンのミラー数の検討

¹ Stephen J. Schiller and John Silnya, The SPecular Array Radiometric Calibration (SPARC) method: a new approach for absolute vicarious calibration in the solar reflective spectrum, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, August 2010.



図2 評価パターン（6セット作成）

作成した評価パターンを仮設置し、実際に衛星データによる観測実験を実施した。観測実験は山口大学工学部のテニスコートで行った。図3に観測実験の様子を示す。テニスコート2面に評価パターンを対角線の直線上に配置し、PlanetScope衛星による観測実験を行った。評価パターンの設置角度については、前年度に開発した計算式を用い太陽高度と衛星の軌道から決定した。設置した評価パターンについては、RTK-GNSSによりその位置情報を計測した。評価パターンの中央にGNSSアンテナを置き評価パターンの位置を精密に計測した（図4左）。GNSS計測した評価パターンの位置情報をPlanetScope画像（トゥルーカラー画像）上に配置した図を図4右に示す。それぞれの評価パターンは、8m間隔で設置しており、評価パターン6セットのM1からM6の全長サイズは40mである。

図5に、PlanetScope画像（フォールスカラー画像）を示す。画面中央（黄矢印）のテニスコートに、評価パターンが直線上に配置されていることが確認できた。評価パターンの周辺環境のスペクトル値を分光放射計等で測量（図6）することで、評価パターンの設置箇所についても検討を行った。テニスコートは背景が緑のため評価パターンの検出が容易である。グラウンド（緑矢印）に評価パターンを設置した場合には、評価パターンを検出することができない。



図3 評価パターンの観測実験

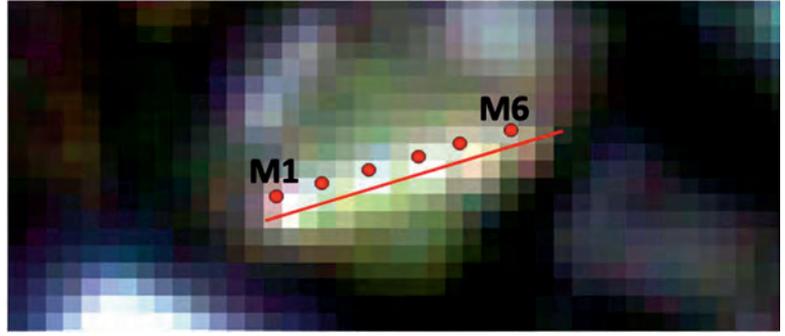


図4 評価パターンの位置の計測とパターンのサイズ

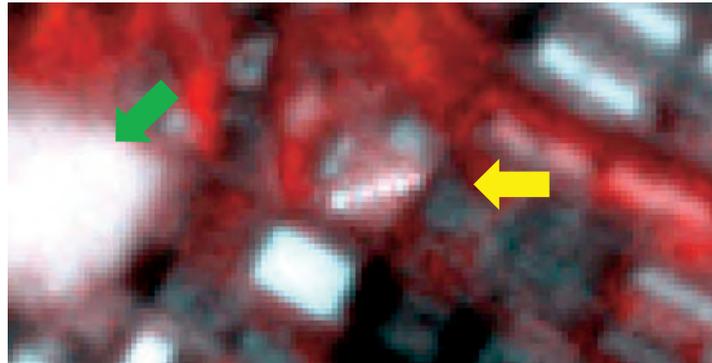


図5 PlanetScope 画像（フォールスカラー画像）による観測



図6 分光放射計による評価パターン周辺の計測

3.1.2 ミラーアレイの設置

令和2年度に、軌道上衛星の画像の歪み等を推定するための5×5配列のミラーアレイを設計および設置した。ミラーアレイは、25個のカーブミラーを天空にむけて設置し太陽光を反射させることで、軌道上衛星の光学センサー特性を把握することができる。衛星の軌道とセンサーの観測方向にあわせて、ミラーアレイの姿勢（仰角と方位角）を動かせる仕組みになっている。観測を行う際は、観測毎に姿勢を計算しミラーアレイの姿勢の調整を行っている。ミラーアレイが写った画像から光学センサー特性の一つであるPSF（Point Spread Function:点像分布関数）形状を推定する。この手法により、光学センサーの光学系の歪やボケが推定できる。図7左に令和2年度に設置したミラーアレイを示す。また、本事業による成果として案内板（図7右）も設置した。



図7 ミラーアレイ（ときわ公園）

このミラーアレイで使っているミラーは、一つ一つのミラーが取り外せる仕組みになっており、ミラーの劣化に応じて交換が可能となっている。ミラー劣化を確認するために、ミラーの反射率測定を行った。試験は、山口県産業技術センターにあるミラー反射率測定器を用いた。測定の様子を図8左に示す。ミラーは屋外に設置をしてから4ヶ月程度経過していたが、図8右の通り反射率の低下は見られなかった。今後も、キャリブレーションを実施するためのリファレンスとして使えるようにメンテナンスを行っていく。

また、ミラーアレイや周辺環境については高精度GPSや分光放射計等による精密な測量を実施するとともに、大気補正情報（エアロゾル量等）を太陽光フォトメータ等で取得した。ミラーアレイが設置してある山口県宇部市のときわ公園は、地上ターゲットサイトとなっているため、地上計測データについては、3.2章にて記載する。

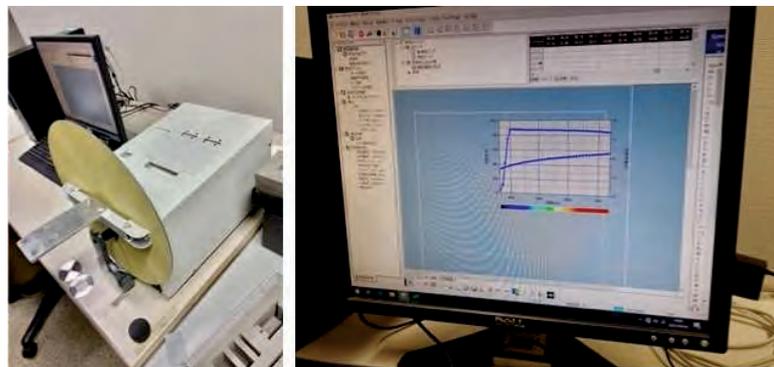


図8 ミラーの反射率測定

3.2 ターゲットサイトの構築

3.2.1 地上ターゲットサイトのデータ収集

前年度に5箇所の上ターゲットサイトを選定した。地上ターゲットサイトにおいては、ドローン等による撮影や、キャリブレーション対象とする地物全体の反射特性を取得した。また、それに含まれる誤差を補正するために、対象地物の代表的な地点において分光放射計等による計測を実施するとともに、地上設置のセンサーにより植生情報を含む地表面の情報を取得した。

① 防災科学技術研究所

防災科学技術研究所内にある大型降雨実験施設の区画内に地上ターゲットサイトとして試験用盛土を構築した。実験区画の地盤は、一般的な関東ローム地盤であり、地下水位は地表面に近いところまであり水はけが悪い。盛土材料については、過去の試験で利用された残土を用いており、粘性土や砂

質土が混在した材料である。バックホーで地盤をたたきながら整形し、土台が 30m×30m で高さ 4.5m、斜面傾斜は 30°～35° 程度の 4 つの斜面を持っている。試験用盛土については、TLS (Terrestrial Laser Scanner: 地上型レーザースキャナー) による 3次元計測を行った。図 9 に試験用盛土の TLS 計測結果を示す。

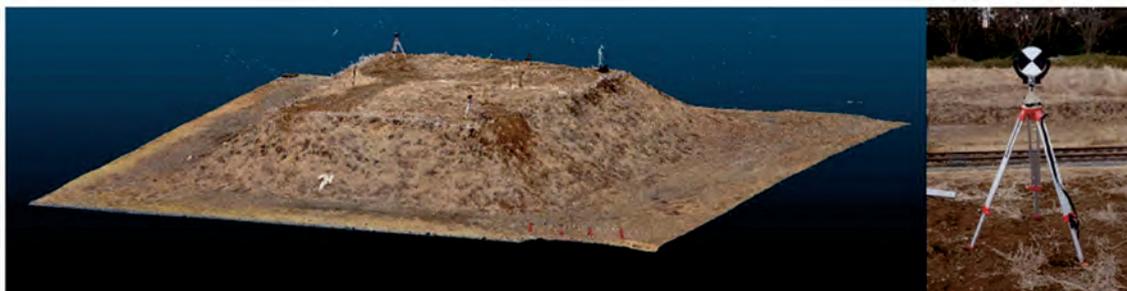


図 9 試験用盛土の TLS 計測結果 (左) と基準ターゲット例 (右)

盛土を含む降雨施設区画の時系列変化を衛星データと比較する基礎データの取得のため、点群データと公共座標を対応させる計測を行った。盛土付近に 3 点のターゲットを設け、その座標を RTK-GNSS を用いて計測した (図 10 左)。3 点のターゲットを含むように TLS で点群を取得し、TLS 位置の算出を行ったあと、その点群を固定し、その他の計測した点群をレジストレーションで合わせることでより全体の座標を取り付ける。

また、キャリブレーションを行うには、大気の影響を評価することが必要不可欠である。太陽光フォトメータは、地球を取り巻く太陽光全量を正確に計測することができる。太陽光フォトメータは、SOLAR LIGHT 社の MicrotopsII Model 540 を利用した。太陽からのオゾンを除く全波長 5 つの波長を計測することができる。複数の安定波長の相対的な直達日射強度から、その光強度変化を測定する機器である。太陽光フォトメータによる計測も実施した (図 10 右)。太陽光フォトメータの詳細については、②のときわ公園における観測で詳しく説明する。



図 10 RTK-GNSS 計測 (左) と太陽光フォトメータ計測 (右)

②山口県宇部市 ときわ公園

ミラーアレイは、ときわ公園の湖畔の西側に設置し、GRUS-1 衛星による観測に合わせて、スペクトロメータによる周辺の反射特性を計測した。植生や砂地、アスファルト等の観測を実施し、GRUS-1 衛星と PlanetScope 衛星の分解能を考慮し、十分な広さのある箇所計測を実施した。図 11 にスペクトロメータによる計測の様子を示す。スペクトロメータは ASD 社の HandHeld2 を使用した。HandHeld2 は 325nm～1075nm の対象範囲の反射率及びデジタルナンバーを 1nm 毎に取得することができる。スペクトロメータによる計測と同時に、計測した箇所の位置情報をソフトバンク社の ichimill (イチミル) で計測した。Ichimill は、準天頂衛星 (みちびき) などの GNSS から受信した信号を利用して RTK (Real Time Kinematic) 測位を行うことで、誤差数センチメートルの測位が可能である。また、図 12 に、スペクトロメータによる計測結果を示す。横軸が波長、縦軸が反射率である。植生、砂地、アスファルトの反射特性が精度良く計測できた。これらのデータは、今後、衛星データの検証とキャリブレーションの評価に利用するために、データベース化して蓄積していく。



図 11 スペクトロメータによる計測の様子

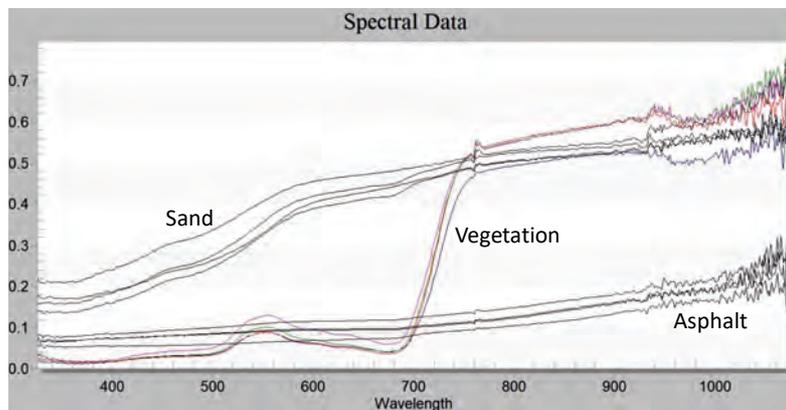


図 12 スペクトロメータによる計測結果

大気エアロゾルは、太陽光の散乱や吸収をおこない、光学衛星データのキャリブレーションを行う際は、地上からの大気放射観測が必要不可欠である。太陽光フォトメータとオゾンメータによる観測を実施した。前述した太陽光フォトメータに加えて、今年度は、オゾンメータによる観測も実施した。図 13 に太陽光フォトメータ（左）とオゾンメータ（右）による計測の様子を示す。図 14 に Langely plot による太陽光フォトメータの計測結果を示す。太陽光フォトメータでは、380nm、500nm、675nm、870nm、1020nm の 5 つの波長を計測しており、エアロゾル特性と光学的厚さ (AOT : Aerosol Optical Thickness) を計測できる。横軸は、Air mass で、太陽光が地上に届くまでに通過する大気量を表している。縦軸は、AOT を自然対数で表した数値である。Langely plot とは、太陽光フォトメータが検出する太陽直達光に対する出力値を、入射エネルギーの絶対値に結びつける方法である。

オゾンメータの MicrotopsII Model 521 は、太陽光からの UV 光の 2 波長 (305nm、312nm) を測定し、そのデータ処理によりオゾン量を計測することができる。図 15 に Langely plot によるオゾンメータの計測結果を示す。横軸 (μ) は、オゾン層を通過する放射線の実際の経路長と垂直経路長の比率を表している。縦軸は、オゾン量を自然対数で表した数値である。



図 13 太陽光フォトメータ（左）とオゾンメータ（右）による計測の様子

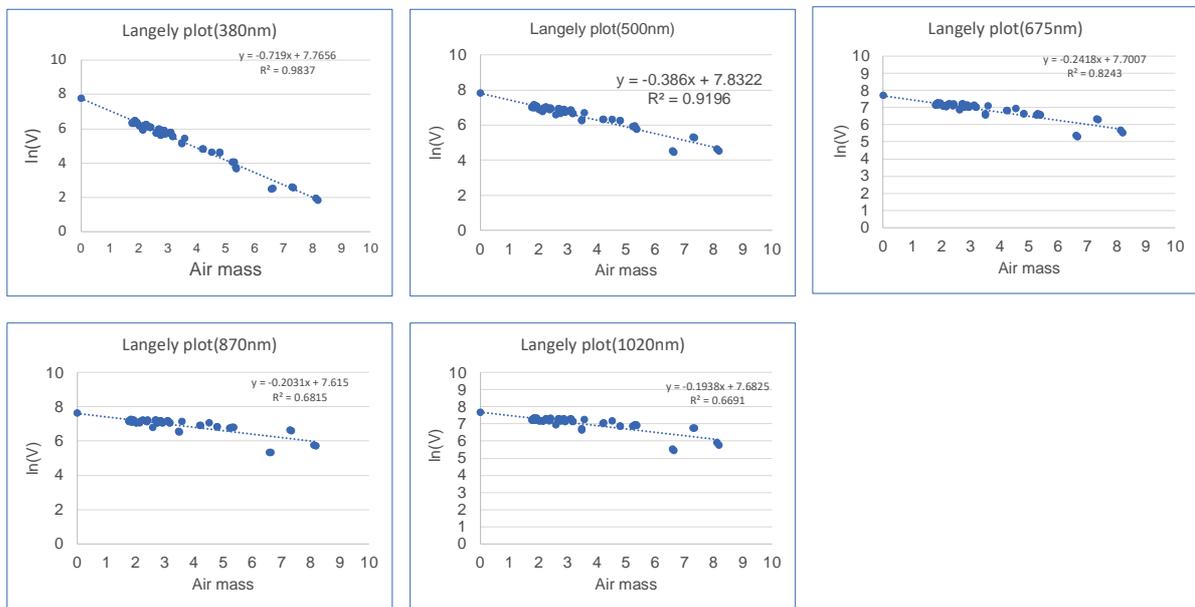


図 14 太陽光フォトメータの計測結果

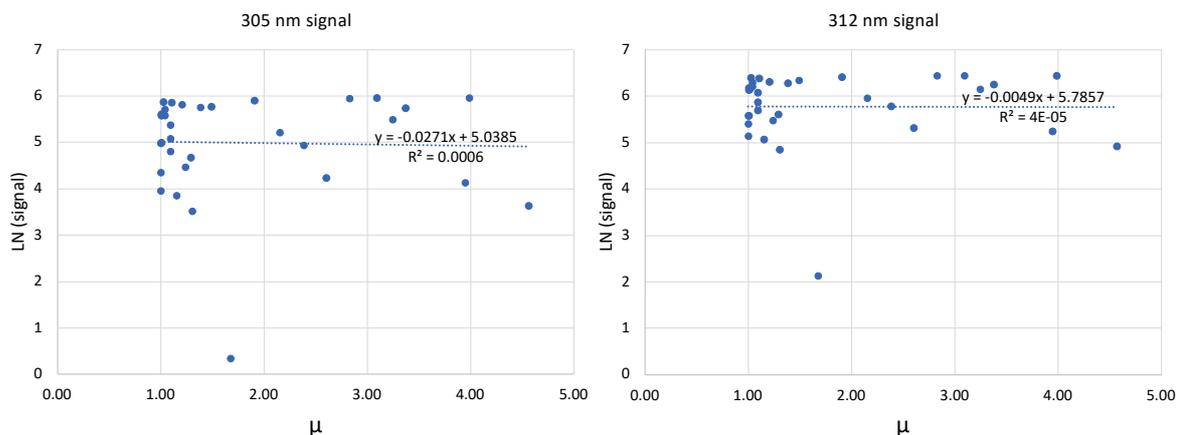


図 15 オゾンメータの計測結果

③山口県山口市 きらら公園

きらら公園では、②の山口県宇部市ときわ公園と同様に、衛星による観測に合わせて、スペクトロメータによる周辺の反射特性を計測した。また太陽光フォトメータとオゾンメータによる大気観測も実施した。使用した計測機器および観測手法については、②のときわ公園と同様である。

一方で、②のときわ公園では、山口宇部空港に近いのでドローンによる観測ができない。そのため、きらら公園では、ドローンによる観測も実施した。図 16 にドローン観測によるきらら公園の画像を示す。きらら公園では、3.1.1 の評価パターンの設置実験についても行った。ドローンにより観測した評価パターンも図 16 の通りである。



図 16 きらら公園でのドローン観測

④山口県美祢市 秋吉台

秋吉台は、山口県美祢市にある日本最大のカルスト台地である。台地上の総面積 54km²で、台地面の標高 180~420m である。山口大学工学部から車で 40 分程度の距離にあり、山口大学秋吉台アカデミックセンターを通して、様々な土地被覆変化情報が入手可能である。また、毎年 2 月頃に大規模な山焼きが実施されるので、山火事等の災害も想定した特徴的な計測も可能である。さらに、秋吉台アカデミックセンターに申請すれば、ドローンによる計測を実施することも可能である。図 17 に秋吉台で実施したドローン観測の結果を示す。毎月 1 回の頻度で、ドローン観測を実施した。3 月の山焼き後の画像、5 月以降から夏にかけて植生が活発になる状況なども観測できている。ドローン観測と同時に、スペクトロメータによる周辺の反射特性を計測した。図 18 にいくつかの地物を対象にした反射特性の例を示す。

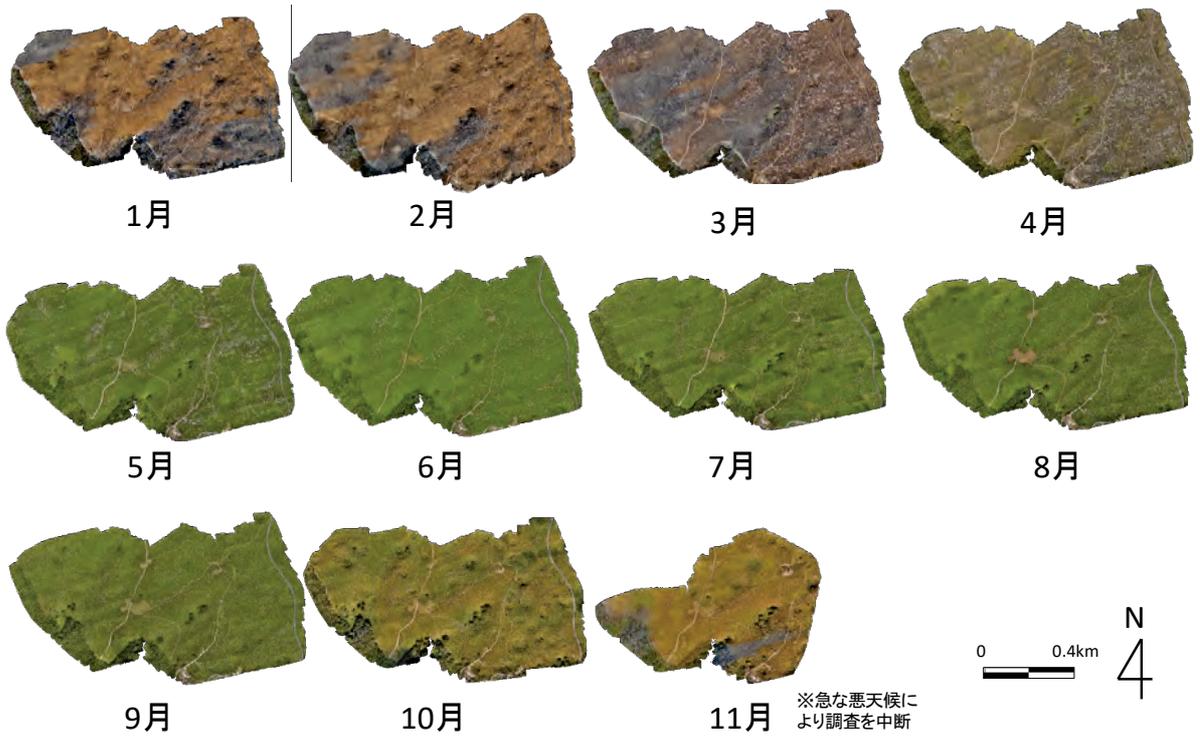


図 17 秋吉台でのドローン観測

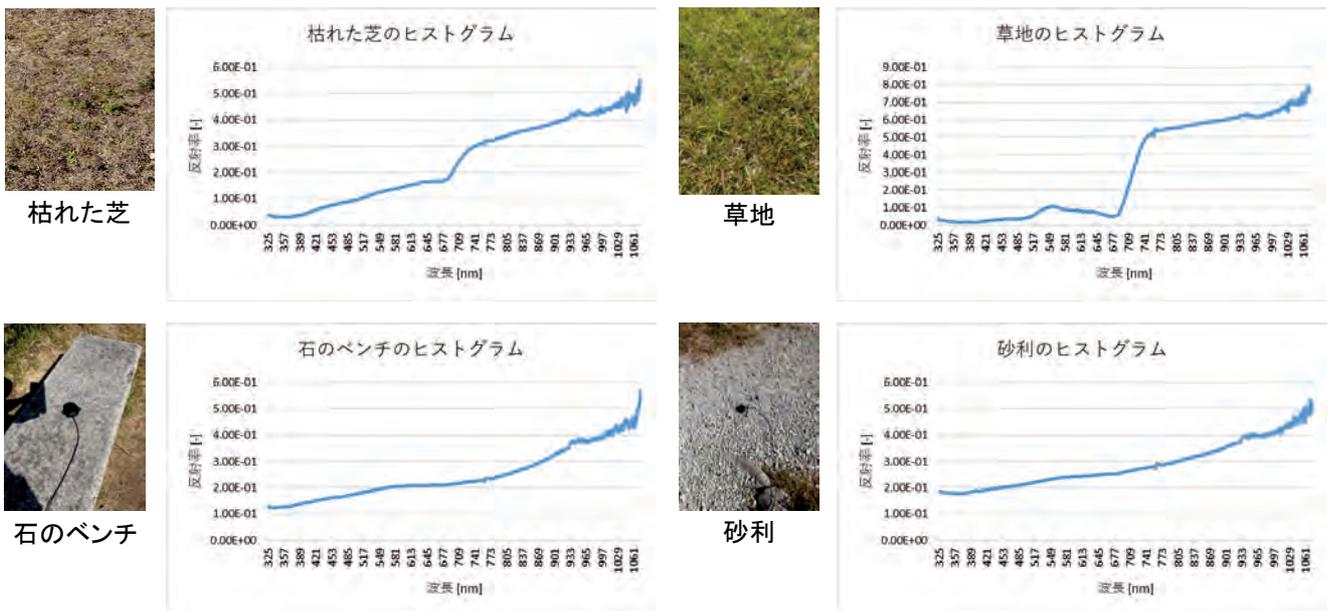


図 18 秋吉台での反射特性計測

⑤山口県宇部市 山口宇部空港公園

山口宇部空港公園では、クロスキャリブレーションのためのデータ取得を行った。クロスキャリブレーションは複数の衛星データ（センサー）で同一のターゲットサイトを観測し、センサー間で応答度を比較して行われる校正手法である。本研究では、GRUS-1 衛星と PlanetScope 衛星間のクロスキャリブレーションを行った。図 19 に、GRUS-1 衛星と PlanetScope 衛星におけるバンドの波長の比較を示す。青、緑、赤、近赤外の同じバンドを持っているが、観測する波長の幅が違うことがわかる。この違いを踏まえて、複数のセンサーを併用して利用するためには、センサー間の放射輝度を合わせる必要がある。本研究で取り組んでいるミラーアレイによるキャリブレーション手法との比較データとして利用する。図 20 に GRUS-1 衛星画像と設定したターゲットポイントを示す。赤線、緑線は、

PlanetScope 画像のカバレッジを表したものである。山口宇部空港公園を中心に、クロスキャリブレーションのためのターゲットポイントを 1200 点ほど取得した。取得したターゲットポイントを図 21 に示す。図 22 には、クロスキャリブレーションの結果を示す。縦軸が PlanetScope 衛星、横軸が GRUS-1 衛星の輝度値を示している。それぞれのバンドにおいて、非常に高い相関があることがわかる。

GRUS-1A		PlanetScope			
Ground Resolution	Panchromatic: 2.5 m	Instrument	PS2	PS2.SD	PSB.SD
	Multispectral: 5.0 m	Orbit Altitude	475 km (~98° inclination)		
Spectral Bands	Panchromatic 450-900 nm	Equator Crossing Time	9:30 - 11:30 am (local solar time)		
	Blue 450-505 nm	Ground Sample Distance	3.7m (average at reference altitude 475 km)		
	Green 515-585 nm	Spectral Bands	Blue: 455 - 515 nm	Blue: 464 - 517 nm	Coastal Blue 431-452 nm* Blue: 465-515 nm Green I: 513 - 549 nm Green II: 547 - 583 nm* Yellow: 600-620 nm* Red: 650 - 680 nm Red-Edge: 697 - 713 nm NIR: 845 - 885 nm (* avail. after 8-band release)
	Red 620-685 nm		Green: 500 - 590 nm	Green: 547 - 585 nm	
	Red Edge 705-745 nm		Red: 590 - 670 nm	Red: 650 - 682 nm	
	Near Infrared 770-900 nm		NIR: 780 - 860 nm	NIR: 846 - 888 nm	
	Swath 57+ Km		Analytic Bands	4 or 5 bands multispectral image (blue, green, red, red-edge, near-infrared)	
Life Span 5+ years	Pixel Size (orthorectified)	3.125 m			
Bit Depth 12 bit	Revisit time	Daily			
		Bit Depth	Analytic (Radiance - W m-2 sr-1 μm-1): 16-bit		
		Radiometric Corrections	<ul style="list-style-type: none"> ● Conversion to absolute radiometric values based on calibration coefficients ● Radiometric values scaled by 100 to reduce quantization error ● Calibration coefficients regularly monitored and updated with on-orbit calibration techniques. 		
		Atmospheric Corrections	<ul style="list-style-type: none"> ● Conversion to top of atmosphere (TOA) reflectance values using at-sensor radiance and supplied coefficients ● Conversion to surface reflectance values using the 6SV2.1 radiative transfer code and MODIS NRT data ● Reflectance values scaled by 10,000 to reduce quantization error 		

図 19 GRUS-1 衛星と PlanetScope 衛星の仕様の比較

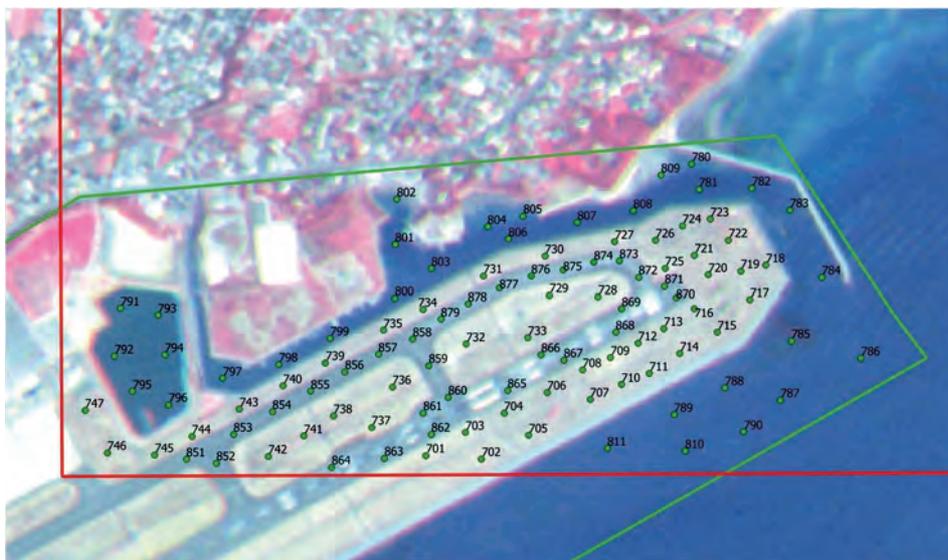


図 20 GRUS-1 衛星画像とターゲットポイント

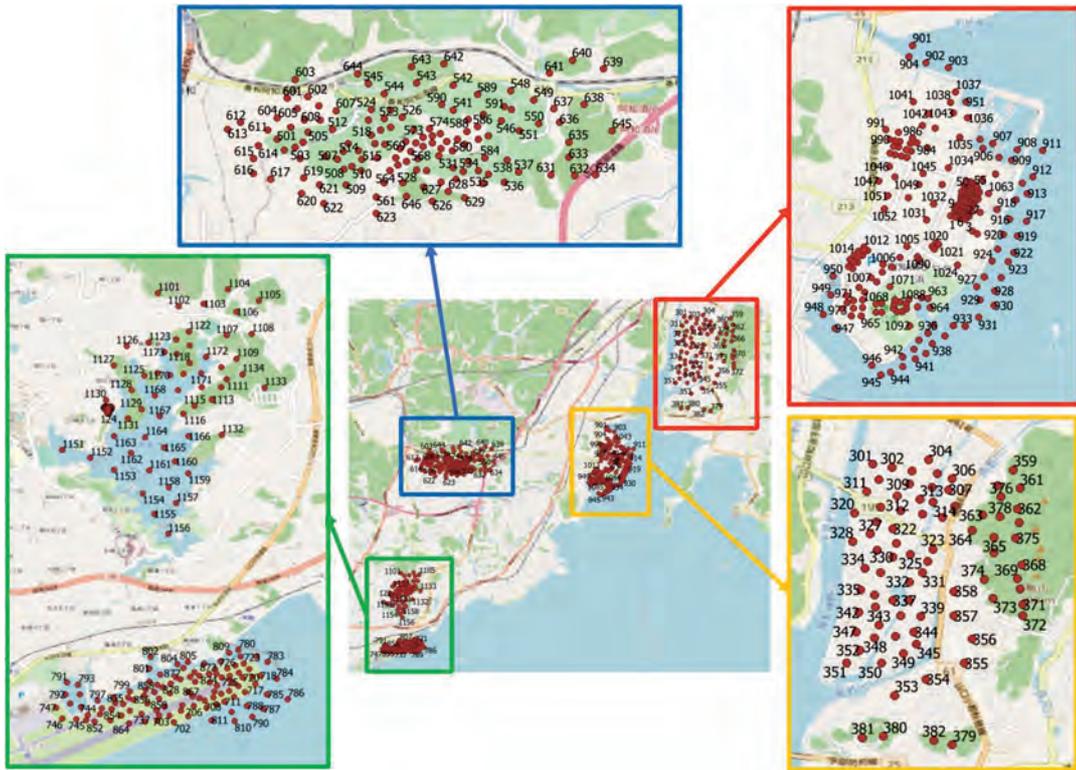


図 21 クロスキャリブレーションのためのターゲットポイント

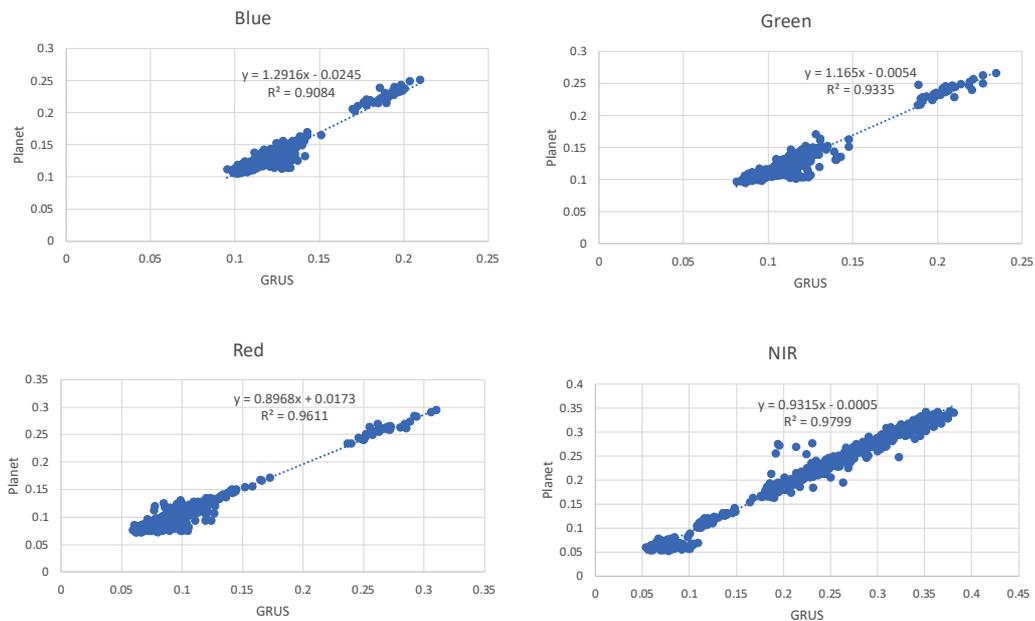


図 22 クロスキャリブレーションの結果

3.3 キャリブレーション手法の開発

3.3.1 キャリブレーション手法の開発

1) 研究対象とする衛星

株式会社アクセルスペースは 2021 年 3 月 22 日に GRUS-1B, 1C, 1D, 1E の 4 機の GRUS 衛星を軌道投入した。GRUS-1A (図 23) と同一の軌道に投入され、5 機体制になることで日本付近の緯度地域では 2~3 日に 1 回の高頻度で撮影することが可能になっている。高頻度に観測できることで、農業においては最適な収穫時期推定などの時系列のトレンド解析が可能となり、防災においては発災直後を撮影し

て災害状況の把握をすることが可能となっている。その際に5機の衛星画像品質が衛星毎にバラつきがなく、正しくキャリブレーションされている必要がある。本研究では、今後、益々増えつつある地球観測衛星や、コンステレーションの衛星間での衛星画像（図24）の品質の均一化をめざし、GRUS-1衛星を対象に、キャリブレーション手法の開発を進めている。

表1に、令和3年度のGRUS-1衛星による観測日のリストを示す。実際には雲の影響や、通信トラブルなどもあり、実際に画像が取得できたのは、月に3~4回程度である。

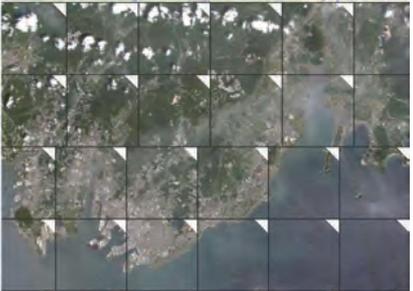


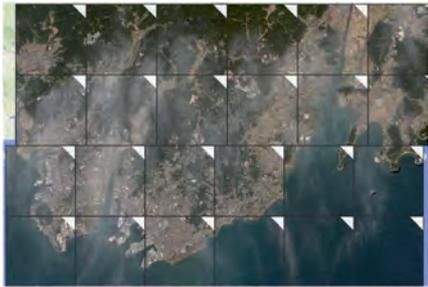
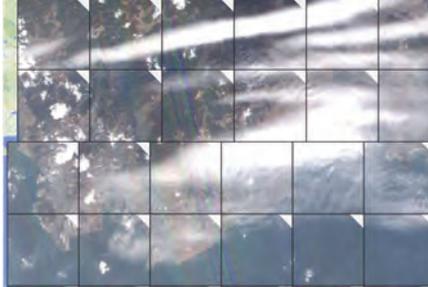
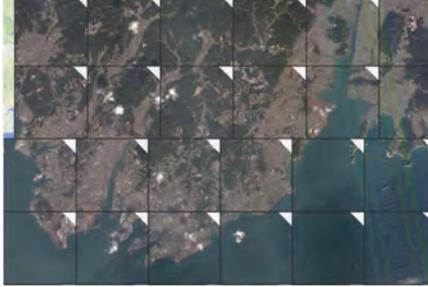
図23 GRUS-1A衛星の外観



図24 GRUS-1Aの画像

表1 GRUS-1Aによる山口県宇部市周辺の観測日

<p>2021年4月1日、13日、26日</p>	
<p>2021年5月</p>	<p>観測なし</p>
<p>2021年6月21日</p>	
<p>2021年7月1日、2日、14日、10日、21日</p>	
<p>2021年8月3日、5日、8日、11日、18日、21日、26日</p>	
<p>2021年9月</p>	

<p>2021年10月13日、18日、26日、31日</p>	
<p>2021年11月2日、6日、8日、15日、18日、26日</p>	
<p>2021年12月1日、3日、6日、10日、14日、16日、19日、21日、28日、29日</p>	
<p>2022年1月16日、23日、26日、28日、30日</p>	
<p>2022年2月2日、3日、5日、8日、12日、15日、18日、23日、28日</p>	
<p>2022年3月5日、13日、18日、22日、26日、28日、31日</p>	

2) 新規キャリブレーション手法の開発

山口県宇部市ときわ公園に設置したミラーアレイを利用し、新規キャリブレーション手法の開発を進める。令和2年度に開発したミラーアレイの姿勢や反射強度の計算の検証として、設計通りにGRUS-1衛星でミラーアレイが撮影できるかどうか確認を行った。図25は、2021年3月に撮影されたGRUS-1衛星の衛星画像である。衛星画像は、はっきりとミラーアレイが確認できる。図24左は、ミラーアレイにズームしたバンド1（青バンド）の画像である。赤線に沿った画像の輝度値のヒストグラムを見ると、ミラーを中心に、ピークがあることが確認できた。

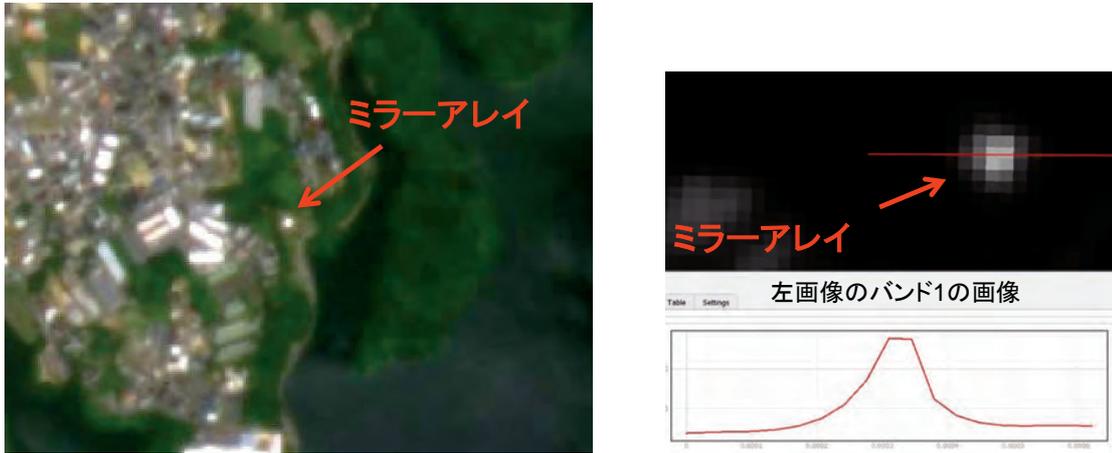


図25 GRUS-1Aの画像

ミラーアレイを観測した衛星画像を、青、緑、赤のそれぞれバンド毎に表示したものが図26である。画像の中心の色の濃い箇所がミラーアレイであるが、バンド毎に色の濃さ（反射強度値）の分布が違うことが分かる。この違いが、それぞれのバンドを重ね合わせてトゥルーカラー画像表示した際のボケやにじみの原因となる。

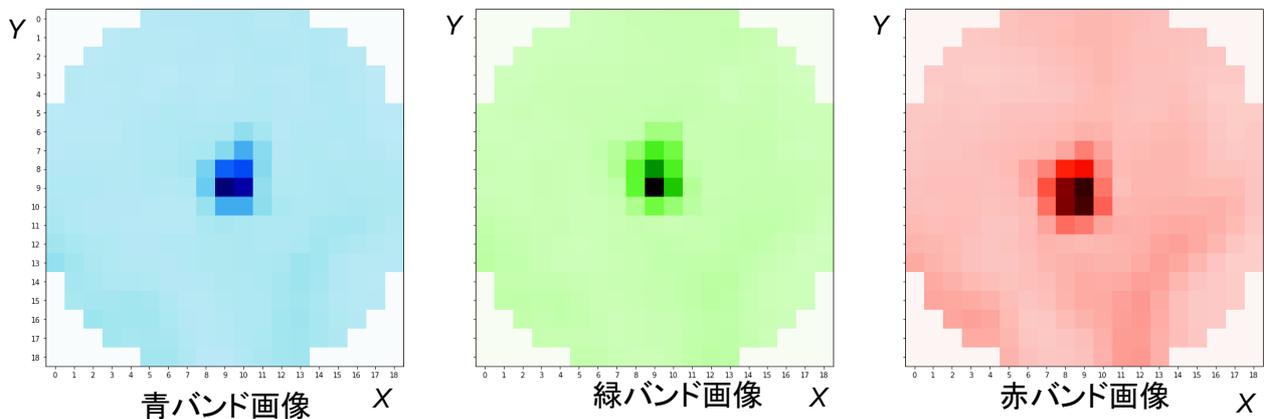


図26 バンド毎のミラーアレイの画像

図27の3つのグラフは、青、緑、赤のそれぞれバンド毎にZ軸を反射強度として3次元グラフ表示したものである。それぞれのバンドのピークの形が違うことがわかる。緑バンドは、シャープなピークであるが、青バンドと赤バンドは、ピークが2つのピクセルにまたがっており、補正が必要であると考えられる。

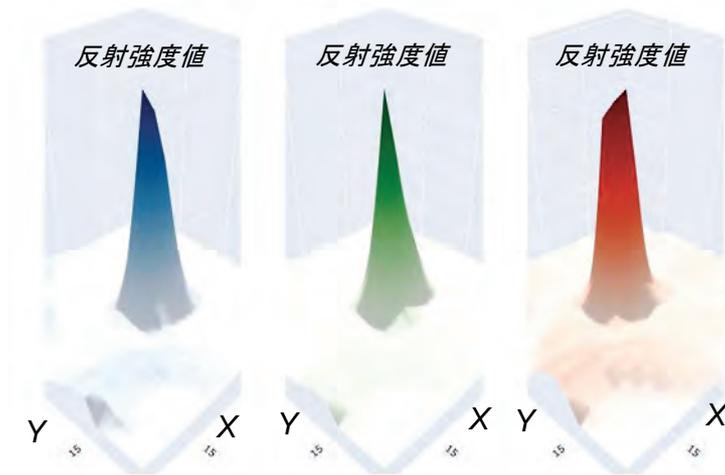


図 27 バンド毎の反射強度の 3 次元表示

図 28 にバンド毎の反射強度のピーク値の比較を示す。青、緑、赤のそれぞれバンドの 3 次元グラフ表示を重ねて表示することで、画像の特徴を評価する。図 28 左のでは、3 つのバンドを重ねてみると、バンド間におけるズレが分かる。このグラフからは画像ボケの評価ができる。反射強度の広がりを等高線 (Counter lines) で表示し、それぞれのバンドにおける等高線のひろがりの違いが画像のボケの原因となる。図 28 中央の画像の放射特性の評価では、それぞれのバンドの反射強度の違いがわかる。これが、放射特性となる。例えば、同じ衛星で継続的に観測すれば、センサーの経年劣化がわかり、画像の補正に利用することができる。図 28 右のグラフは、青、緑、赤バンドのピークの X、Y 座標の位置を比較することにより、バンド間レジストレーションの評価ができる。それぞれのバンドの反射強度のピークのズレを評価し、バンド間の幾何補正 (位置のズレ補正) の情報として利用することができる。

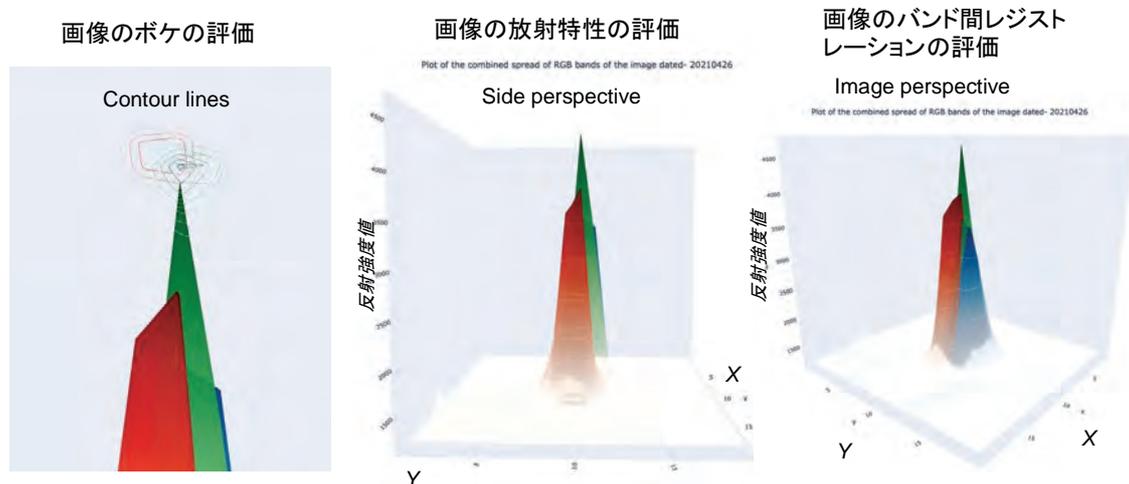


図 28 バンド毎の反射強度の比較と画像の評価

図 28 の評価を元に、バンド間レジストレーション校正/幾何補正を行った。RTK-GNSS により、ミラーレイの正確な位置情報を計測してあるので、画像からミラーレイの位置と衛星画像のズレがわかる。図 29 上に、校正前のミラーレイを観測した赤、緑、青のバンド毎の衛星画像とミラーレイの位置情報を示す。バンド毎の衛星画像とミラーレイの位置関係を見ると、バンド毎に違うことがわかる。これは、バンド間のミスレジストレーションによるものである。バンド間の位置のずれが地物のエッジのシャープさに影響する。図 29 下に、赤、緑、青のバンドをトゥルーカラー合成した画像を示す。バンド間のミスレジストレーションにより、画像の下が赤く見えたり、上側が緑色に

見えていたりする。反射率の一番高い白色のピクセルがミラーレイの位置とずれていることがわかる。

衛星画像の校正の一つとして、ミラーレイを用いたバンド間レジストレーションの校正を実施した。ミラーレイの位置と、衛星画像の輝度値が最も高いピクセルを重ね合わせるためにX、Yのシフトによる幾何補正を行った。図 30 にミラーレイと放射強度のピークの位置を一致させた校正後の画像を示す。図 30 上の赤、緑、青のバンドのそれぞれにおいて、反射率の一番高い白色のピクセルとミラーレイの位置が一致している。図 30 下に校正後のトゥルーカラー合成画像を示す。幾何補正によりバンド間レジストレーションが補正され、エッジがシャープになっている。

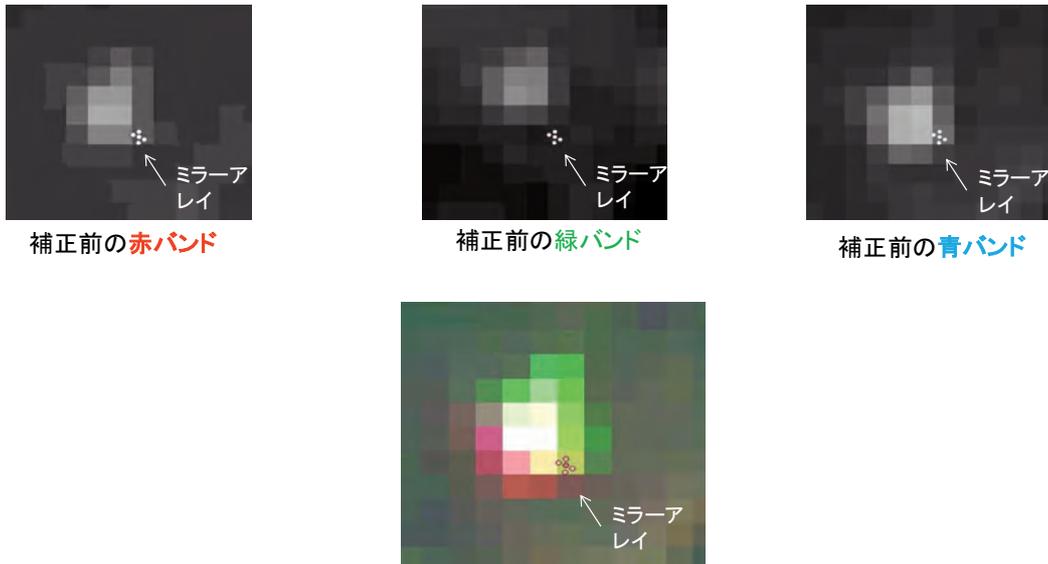


図 29 バンド間レジストレーションの校正前



図 30 バンド間レジストレーションの校正後

これを、衛星画像全体に実装したものが図 31 である。図 31 左がオリジナルの GRUS-1 画像で、図 31 右がバンド間レジストレーションの校正後の画像である。校正後のトゥルーカラー画像の方が、エッジがシャープな画像となっている。ミラーレイを用いることで、非常に容易にバンド間レジストレーションの校正ができた。



図 31 バンド間レジストレーションの校正前（左）と校正後（右）

バンド間レジストレーション校正の実施により、バンド間の位置ズレによる画像のボケは補正できたが、センサー由来の放射特性による画像のボケやにじみは残っている。本研究では、この研究では PSF（点像分布関数）を用いたキャリブレーション手法を開発する。PSF を用いた手法について、アメリカでは衛星搭載されたセンサーの特性を評価するために用いられた実績がある²。しかし、日本では実装した実績はなく、特に複数のコンステレーション衛星を AI 解析で統合して利用するための画像校正を目的とし、PSF を用いて衛星画像の校正をする研究は、新規性の高いテーマである。

PSF を用いて衛星画像の校正をするには、大気補正が重要である。3.2.1 地上ターゲットサイトのデータ収集において、太陽光フォトメータ（MicrotopsII Model 540）およびオゾンメータ（MicrotopsII Model 521）を用いて、地上からの気象データや大気補正情報を取得した。計測したデータを用いて、TOT（Total Optical Depth）を求める。図 32 に示すとおり、それぞれの機器から、エアロゾルの光学的厚さ、水蒸気、レイリー散乱、オゾンカラムをもとめ TOT とする。これらの地上観測データから、MODTRAN（MODerate resolution atmospheric TRANsmission）というアメリカ・空軍研究所と Spectral Sciences 社が共同開発した大気放射伝達モデルをもちい、TOA radiance（Top Of Atmosphere radiance：大気上端輝度）を算出する。これにより、人工衛星が観測した放射輝度、つまり大気上端輝度と、実際の地表面の放射輝度の二つを用いることでキャリブレーションが実施できる。

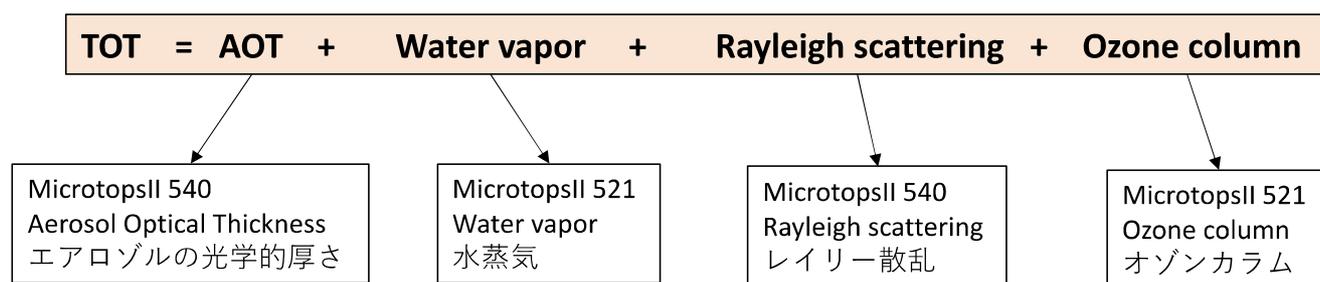


図 32 大気補正情報の計測

² <https://www.labsphere.com/product/flare-vicarious-calibration-network/>

図 33 に PSF によるキャリブレーション手法を定式化した概要を示す。定式化については令和 2 年度の成果を用い、PSF を算出する。図 33 の青矢印が PSF を算出する手順である。ミラーアレイの反射率と太陽光フォトメータ等から取得し生成したピクセルを正解画像とした。また、衛星により実際に観測されたミラーアレイのピクセルを準備し、それぞれの画像をフーリエ変換し、2 つの画像の畳み込みをおこなって PSF を求めた。

この PSF を使って、画像の校正を行った。図 33 の緑矢印がキャリブレーションの手順である。実際に観測された衛星画像に対し、算出された PSF を用いて逆畳み込みをすることでキャリブレーションを行い、校正済み画像を作成した。

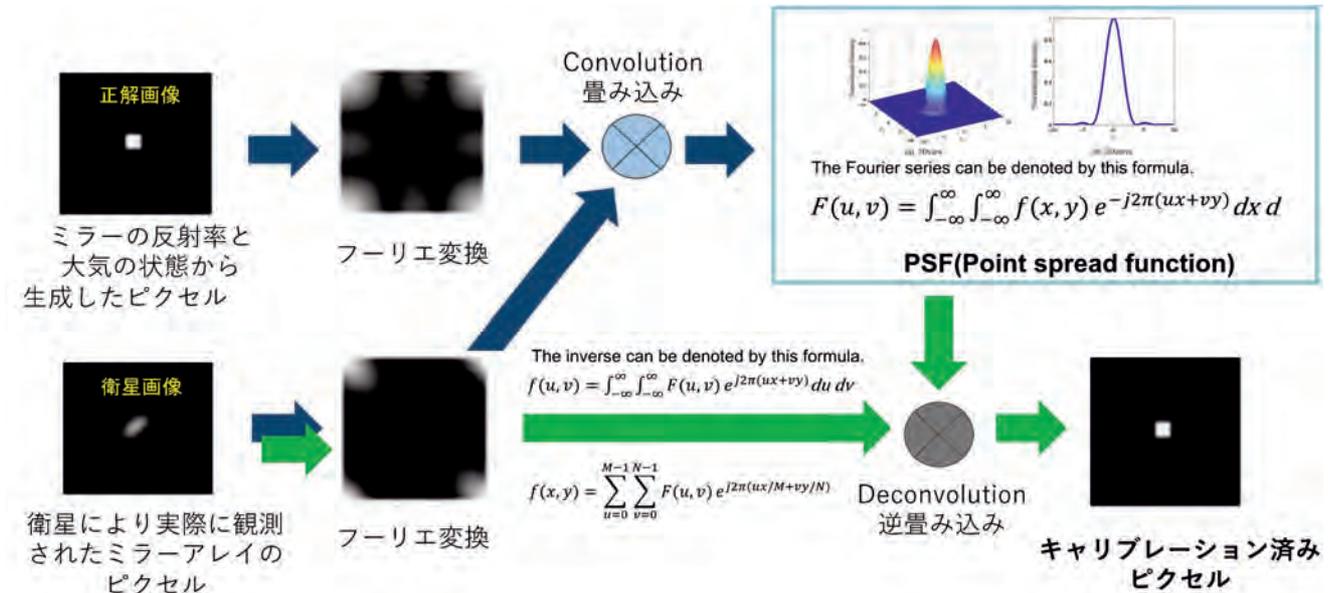


図 33 PSF によるキャリブレーション手法の定式化

図 34 に PSF によるキャリブレーション前画像（左）と済み画像（右）を示す。これが、PSF によるキャリブレーション手法の実装結果である。このバンドは、赤バンドの例であるが、実際には全ての赤、緑、青バンドのそれぞれで PSF によるキャリブレーションを実装した。画像のボケやにじみがとれて、非常にシャープな画像となった。これを、画像全体に実装したものが図 35 になる。補正後トゥルーカラー画像の方が、エッジがシャープな画像になった。PSF を用いることで、非常に容易に補正が実施できるようになった。



図 34 PSF によるキャリブレーション前画像（左）と済み画像（右）（赤バンド）



図 35 PSF によるキャリブレーション前画像（左）と済み画像（右）（トゥルーカラー画像）

3.4 災害等への実用化試験

3.4.1 海外の災害対応に関するターゲットの選定

前年度に引続きセンチネルアジアの災害対応活動等を踏まえ、災害解析等を事例として衛星データを検証するための衛星データ・地上データを収集した。また、研究協力の可能な海外機関に対してプロモーション活動を実施し、海外の衛星によりキャリブレーション手法を検証する計画を立案した。

アジア地域における複数の宇宙機関は、独自の地球観測衛星を有し、環境、農業、防災などのために運用されている。これら地球観測衛星の多くは光学センサーを実装し、太陽光が地球上の物体にあたることで反射する可視光線や近赤外線を捉えて地上の様子を観測することができる。これらの宇宙機関は、宇宙技術によるアジア太平洋地域の災害管理への貢献を目的としてセンチネル・アジアを立ち上げた。国際協

力により、災害時に地球観測衛星画像を提供し、自然災害による被害を軽減することを目指している。センチネル・アジアに加盟する宇宙機関は、ISRO（インド）、JAXA（日本）、GISTDA（タイ）、NARLabs（台湾）、CRISP（シンガポール）、VAST（ベトナム）、MBRSC（アラブ首長国連邦）であり（図 36）、これらの機関が保有する地球観測衛星に対して、センチネルアジアの年次会合等を通して、PSF を用いたキャリブレーション手法の実装について説明をおこなった。実際に、インド宇宙機関（ISRO）と台湾国家実験研究院宇宙機構（NARLabs）からの協力依頼をとりつけ、山口県宇部市に設置してあるミラーアレイの観測を行う手続きを開始した。図 37 に ISRO が Cartosat-2E を用いて試験的に山口県宇部市のミラーアレイを観測した画像を示す。提供された画像の位置精度が低いため、幾何補正をする所から画像の処理を開始し、今後 PSF によるキャリブレーションを実施していく。図 37 左は、オリジナルの Cartosat-2E 画像で、画像内の赤点がミラーアレイの位置である。100m 程度の位置ずれが確認できた。図 37 右は、ミラーアレイを用いて幾何補正を行った Cartosat-2E 画像である。撮影されたミラーアレイと、GNSS で観測したミラーアレイの位置情報が精度良く重なっている。



図 36 センチネル・アジアで活動する宇宙機関と各地球観測衛星



図 37 Cartosat-2E (ISRO) によるミラーアレイの観測

また、防災分野における宇宙技術の利活用や、センチネル・アジアの活動などに関連した国際会議に参加し、光学センサーによる活動事例など、プロモーション活動を行ってきた。2021年11月30日から12月3日まで、ベトナム科学技術院（VAST）、日本の文部科学省、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の共催により、アジア・太平洋地域宇宙機関会議（Asia-Pacific Regional Space Agency Forum, APRSAF）の年次会合がオンラインで開催され、PSFを用いたキャリブレーション手法の紹介を行った。発表後に、フィリピン宇宙庁（PhilSA）から、PSFを用いたキャリブレーション手法に関する問い合わせがあり、PhilSAが運用している地球観測衛星DIWATA-1で実装したいとの事である。PhilSAから1名のスタッフを、修士課程の学生として山口大学大学院創成科学研究科の長井研究室に送り、共同研究を進めることとなった。2022年9月末に来日予定である。

また、JAXAは、2021年度に第3回地球観測研究公募³を行った。「ALOS-3校正検証」のプログラムにおいて、「ALOS-3を対象としたミラーアレイによるキャリブレーション手法の検証」という研究テーマとして、本研究の成果をALOS-3に展開し、太陽光の反射を光源とするミラーアレイを地上に設置することで、軌道上衛星の特性であるPSF形状の変化を評価し、性能評価やキャリブレーションを行う内容で採択された。

プロモーション活動により、本研究の成果が評価され、様々な形での展開が見えてきた。

³ <https://earth.jaxa.jp/ja/research/cooperation/ra3/index.html>

4 図表

表 1	GRUS-1A による山口県宇部市周辺の観測日	19
図 1	評価パターンのミラー数の検討	7
図 2	評価パターン (6 セット作成)	8
図 3	評価パターンの観測実験	8
図 4	評価パターンの位置の計測とパターンのサイズ	9
図 5	PlanetScope 画像 (フォールスカラー画像) による観測	9
図 6	分光放射計による評価パターン周辺の計測	9
図 7	ミラーアレイ (ときわ公園)	10
図 8	ミラーの反射率測定	10
図 9	試験用盛土の TLS 計測結果 (左) と基準ターゲット例 (右)	11
図 10	RTK-GNSS 計測 (左) と太陽光フォトメータ計測 (右)	11
図 11	スペクトロメータによる計測の様子	12
図 12	スペクトロメータによる計測結果	12
図 13	太陽光フォトメータ (左) とオゾンメータ (右) による計測の様子	13
図 14	太陽光フォトメータの計測結果	13
図 15	オゾンメータの計測結果	13
図 16	きらら公園でのドローン観測	14
図 17	秋吉台でのドローン観測	15
図 18	秋吉台での反射特性計測	15
図 19	GRUS-1 衛星と PlanetScope 衛星の仕様の比較	16
図 20	GRUS-1 衛星画像とターゲットポイント	16
図 21	クロスキャリブレーションのためのターゲットポイント	17
図 22	クロスキャリブレーションの結果	17
図 23	GRUS-1A 衛星の外観	18
図 24	GRUS-1A の画像	18
図 25	GRUS-1A の画像	21
図 26	バンド毎のミラーアレイの画像	21
図 27	バンド毎の反射強度の 3 次元表示	22
図 28	バンド毎の反射強度の比較と画像の評価	22
図 29	バンド間レジストレーションの校正前	23
図 30	バンド間レジストレーションの校正後	23
図 31	バンド間レジストレーションの校正前 (左) と校正後 (右)	24
図 32	大気補正情報の計測	24
図 33	PSF によるキャリブレーション手法の定式化	25
図 34	PSF によるキャリブレーション前画像 (左) と済み画像 (右) (赤バンド)	26
図 35	PSF によるキャリブレーション前画像 (左) と済み画像 (右) (トゥルーカラー画像)	26
図 36	センチネル・アジアで活動する宇宙機関と各地球観測衛星	27
図 37	Cartosat-2E (ISRO) によるミラーアレイの観測	27

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「衛星コンステレーション時代のAI画像解析のためのキャリブレーション手法の開発」

機関名国立大学法人山口大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
衛星データ校正サイト構築とミラーアレイによる校正手法に関する研究，長井正彦，ノバワン タム クワン（口頭）	長井 正彦，ノバワン タム クワン，市川 ドルジュ，中村 友哉，酒井 直樹，田口 仁，池田 誠	日本リモートセンシング学会第70回学術講演会	2021年5月	国内
光学衛星とマルチスペクトルドローンによる秋吉台の植生モニタリング（口頭）	江口 毅，市川 ドルジュ，和田里花，蓮池 ひかる，長井 正彦	日本リモートセンシング学会第70回学術講演会	2021年5月	国内
Development of Mirror Target Calibration for Optical Satellite Data（口頭）	Masahiko Nagai	Asia-Pacific Regional Space Agency Forum: APRSAF-27	2021年12月1日	海外
Calibration Facilities and Method Based on Point-Source Reflectors for Optical Satellite Data Applications（口頭）	Masahiko Nagai, Nopphawan Tamkuan, Dorj Ichikawa, Vaibhav Katiyar, Yumiko Nagai, Tsuyoshi Eguchi	International Symposium on Space Technology and Science (ISTS)	2022年2月	海外

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別

（注）発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。