

文 部 科 学 省
令和2年度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」
業務委託成果報告書

令和3年5月

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2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

| | | |
|-------|-----------------------|----|
| 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 | 評価パターンの設計 | 7 |
| 3.1.2 | ミラーアレイの設計 | 10 |
| 3.2 | ターゲットサイトの構築 | 15 |
| 3.2.1 | 地上ターゲットサイトの対象選定 | 15 |
| 3.3 | キャリブレーション手法の開発 | 20 |
| 3.3.1 | 軌道上衛星の特性評価 | 20 |
| 3.4 | 災害等への実用化試験 | 29 |
| 3.4.1 | 災害で利用される衛星調査 | 29 |
| 3.4.2 | 海外の災害対応に関するターゲットの選定 | 31 |
| 4 | 図表 | 33 |
| 5 | 学会等発表実績（令和2年度） | 34 |

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 2 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. 評価パターンの設計

校正サイトに使用する評価パターンを校正対象とする衛星画像の分解能に合わせて設計する。

b. ミラーアレイの設計

校正サイトに使用するミラーアレイの点光源としてカーブミラー(道路反射鏡)の利用を検討する。複数のカーブミラーを天空にむけて等間隔に正形状に設置できるように設計および構築準備を開始する。

② ターゲットサイトの構築

a. 地上ターゲットサイトの対象の選定

災害解析等を事例として衛星データを検証するための地上ターゲットの対象と場所を5箇所以上選定する。

③ キャリブレーション手法の開発

a. 軌道上衛星の特性評価

①a、bで設計した各評価パターンおよびミラーアレイの特徴をシミュレーションにより検証する。軌道上衛星の特性（MTF（Modulation Transfer Function）、GRD（Ground Resolved Distance）、PSF（Point Spread Function）、分光特性等）やそれらの変化を評価する手法、性能評価やチューニングの手法を検討する。

④ 災害等への実用化試験

a. 災害で利用される衛星調査

災害対応等で利用される光学衛星の仕様を整理する。また、構築する校正サイトやキャリブレーション手法を広く利用して貰えるように、研究協力の可能な海外機関に対して校正サイトのプロモーション活動を実施する。

b. 海外の災害対応に関するターゲットの選定

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。

1.5 委託業務実施機関

（受託者（委託先））

機関名 国立大学法人 山口大学

実施期間 令和2年9月1日から令和3年3月31日

（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2年9月1日から令和3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2年9月1日から令和3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2年9月1日から令和3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 プロジェクトディレクター 鈴木 弘二

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 2-1 6-1 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 2-1 6-1 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 鈴木 弘二 |

3 成果報告

3.1 校正サイトの構築

3.1.1 評価パターンの設計

1) 背景

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日以上を複数の低軌道衛星を展開することにより、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SKYSAT衛星やアクセルスペース社のGRUS-1衛星の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。加えて、UAVデータについても、低価格化、ソフトウェアの発展等によりデータ取得やデータ解析が簡易化され、容易に空中写真を入手することができるようになってきた。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、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において重要な要素である。しかし、センサが取得している波長域、大気及び天頂角の違いやセンサ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。図1はデータ取得日が異なることによるデータの見え方の違いである。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。

衛星データのキャリブレーションは、スペクトルメーター等で測定された地上ターゲットの分光反射等を衛星データで観測することにより、その分光反射等の差異を使用して衛星データのキャリブレーションを行う代替校正が主流である。しかし、地上ターゲットのスペクトルメーターで測定されたデータは非常に狭い範囲の反射率データを取得するため、衛星データの代替校正のためのターゲットサイトには地表被覆物が一様であることや大気の光学的厚さの薄い場所で行われる必要がある。そのため、一般的には米国ネバダ州の高地乾燥湖や中国では砂漠がしばしば利用される。しかし、コンステレーション時代において、衛星データ校正を目的とした地上データを、常に海外から入手するには非常にコストがかかる。したがって、日本国内において校正サイトを整備し、利用することは高いニーズがある。しかし、日本国内のターゲットサイトを利用することは精度、コストの問題等から継続的な利用には至っていない¹。

本研究では、評価パターンおよび点光源（ミラーアレイ）による校正サイトを設計および設置し、衛星データを校正する環境を構築する。校正サイトは、光学衛星を対象とし、衛星画像分解能やだいち3号等の新規衛星の仕様を考慮しターゲットの大きさ・色・形・配置等を設計する。



¹ 土田 聡, 外岡 秀行, 小野 晃, 衛星搭載光学センサの放射量校正第4回（前半）代替校正, 日本リモートセンシング学会誌, 2017, 37 巻, 2 号, pp. 139-146.

図1 衛星データの見え方の違い

2) 評価パターンへの設計

校正サイトの構築では、評価パターンおよびミラーアレイの点光源による校正サイトを設計および設置し、衛星データを校正する環境を構築することを目的とする。評価パターンの設計では、地上に設置する校正サイトの評価パターン（配置方法や設置箇所）について検討した。校正サイトの設置箇所、設置のパターンにより対象とする衛星が異なる。校正サイトに使用する評価パターンを校正対象とする衛星画像の分解能により評価するための実験を行った。はじめに、本研究で対象とする衛星を確認する。現在運用されているそれぞれの衛星データのマルチスペクトル波長の分解能を表1に示す。本研究では、GRUS-1衛星を軸に研究を進めるが、無償で公開されているLandsat-8やSentinel-2等の様々な衛星データにも利用できるかどうか検討した。

表1 衛星データのマルチスペクトル波長の分解能

| 衛星名 | 運用機関 | 分解能 |
|--------------|-------------|------|
| Landsat-8 | USGS/NASA | 15m |
| Sentinel-2 | ESA | 10m |
| GRUS-1 | アクセルスペース（日） | 5m |
| Planet Scope | Planet（米） | 3.7m |
| ALOS-3 | JAXA（日） | 3.2m |
| Pleiades | CNES（仏） | 2m |

令和2年11月に、山口大学工学部のグラウンドにおいて、衛星データを校正するターゲットの試験を実施した。図2に校正サイトの設置テストを示す。図2の左図に示す通り、地上に5.4m×5.4mの白色と黒色のビニールシートと、直径45mmのステンレス性の道路ミラーを設置し、ESA（欧州宇宙機関）が運用するSentinel-2衛星による観測を行った。Sentinel-2衛星は、無償で公開されており、また観測日、衛星の軌道情報も公開されているため初期の設置テストに利用した。Sentinel-2衛星の地上分解能は、可視光（マルチスペクトル）で10mである。図2の右図は、観測したSentinel-2衛星の衛星画像であるが、グラウンドの反射共同が非常に高く、設置したターゲットを捉える事ができなかった。

また、山口県山口市のきらら公園にて、上記の工学部グラウンドと同様の試験を実施した。図3の下の通り、工学部のグラウンドと同様のターゲットを設置した。左から黒色のビニールシート、白色のビニールシート、一つの道路ミラー、三つセットの道路ミラーである。図3の上には、Sentinel-2衛星による観測した画像のバンド2、3、4、8と、トゥルーカラー画像を示す。衛星画像からビニールシート（5.4m×5.4m）や三つセットの道路ミラーが確認できた。

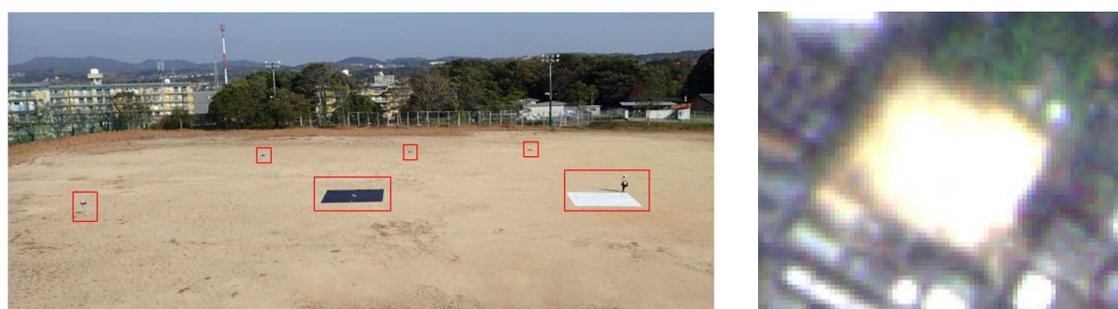


図2 工学部グラウンドにおける校正サイトの設置テスト

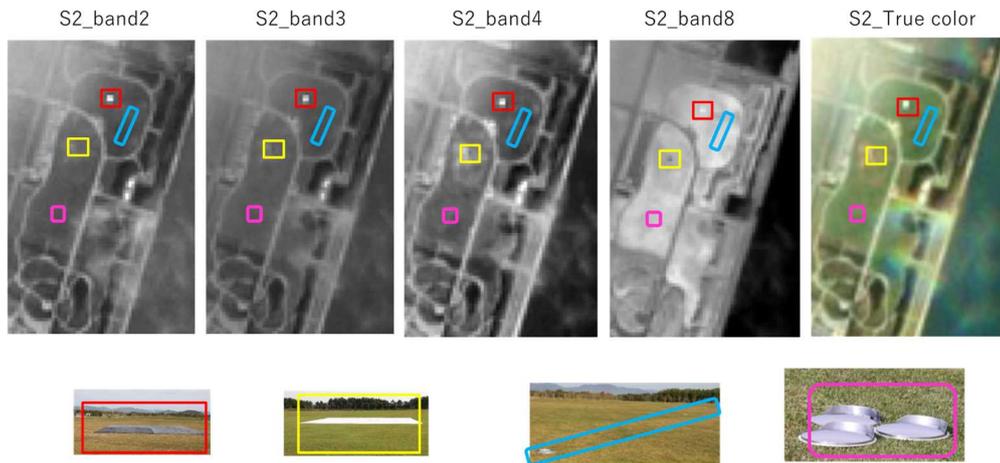


図3 きらら公園における校正サイトの設置テスト

工学部グラウンド及びきらら公園の実験により、評価パターンの設置箇所の選定は、周辺の反射強度が重要であることが分かった。グラウンドやコンクリート面などの反射強度の強い箇所に評価パターンを設置するのは望ましくないと考えられる。また、GRUS-1 衛星に加えて、無償で公開されている Sentinel-2 衛星の利用可能性も検討したが、Sentinel-2 衛星を対象とするには、大規模な大型の評価パターンが必要となる。

上記の設置テストを参考に、評価パターンについては、GRUS-1 衛星及び GRUS-1 衛星よりも高解像度画像を観測できる衛星を対象に、白黒ターゲットを設置することを決定した。白黒のつなぎ目部分（エッジ部分）を利用して光学センサのボケを把握すること可能である。図4に、評価パターンの概念²を示す。黒色ターゲットは大気散乱輝度の補正に、また白色ターゲットは大気透過率の補正に有用なデータを提供することが可能であるとする。白黒ターゲットの大きさは、一辺が5.4mのビニールシートを2枚繋げた大きさ10.8mとする。

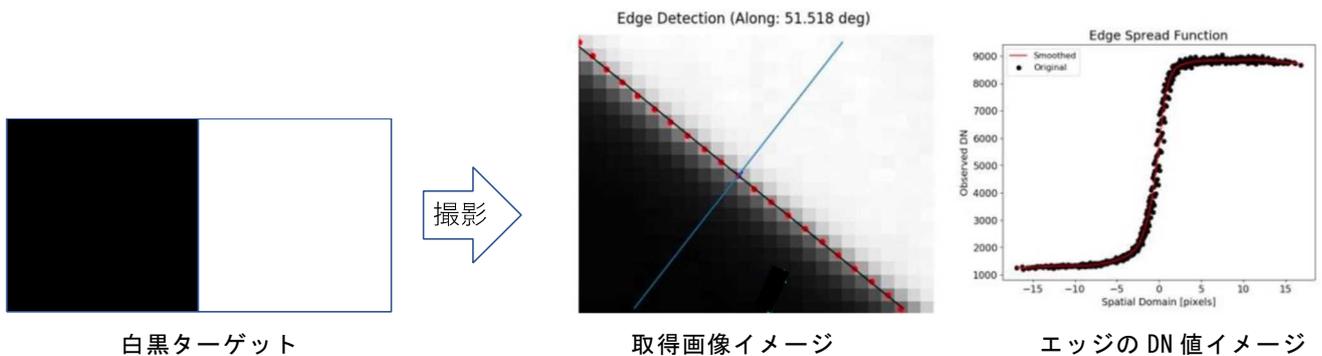


図4 評価パターンの概念

² Labsphere Co. <https://www.labsphere.com>

3.1.2 ミラーアレイの設計

1) ミラーアレイの概念

太陽光をアレイ状に並べた凸面ミラー（前章の実験では道路ミラーを使用）にて反射し、光源とするミラーアレイを設置することで、軌道上衛星の特性（MTF³、GRD⁴、PSF⁵形状、分光特性）の変化を評価し、性能評価やキャリブレーションを行う。太陽光を反射した凸面ミラーは点光源と考えられる。複数の凸面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特性を把握することができる。道路で使用される凸面ミラーの様なミラー25個を天空にむけて等間隔に正方形形状に設置する。複数の凸面ミラーが写った画像から光学センサ特性の一つであるPSF形状を推定する。この手法により、光学センサの光学系の歪やボケが推定できる。図5にミラーアレイの概念を示す。

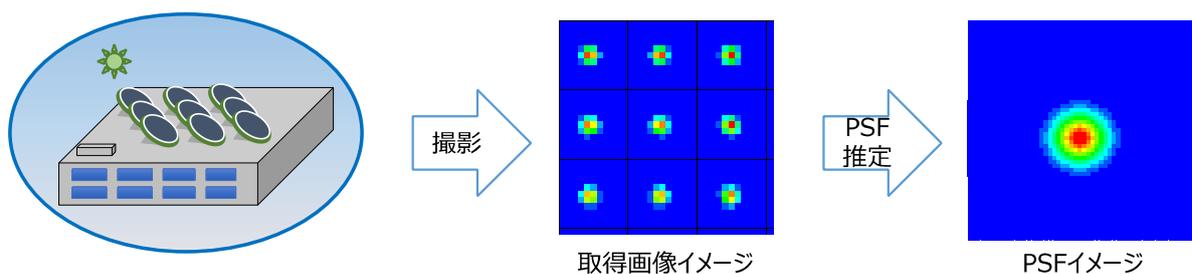


図5 ミラーアレイの概念

2) ミラーアレイの設計

① 設計の概念

本研究では、地上に設置したポイントターゲットにより、衛星画像の放射情報を計測する。ポイントターゲットは主に2種類が考えられ、一つは、LEDライト等による能動的な光源と、ミラーの様な受動的な光源である。本研究では、複数のミラーによる受動的な光源を採用し、ミラーアレイのデザインを行った。屋外の設置するため、強固かつ軽量であると同時に、最終的に撤去することも考慮して、アルミフレームを組み合わせて構築することとした。構造については、ミラーの配列や、ミラーの素材や大きさ、ミラーの向きの変更方法を考慮して設計した。また、ミラーの劣化や破損した場合でも、個々のミラーが簡単に取り替えられるように複数のミラーの配列とした。図6に、ミラーアレイのデザイン案を2つ示す。左図は一列毎にミラーの傾きを変更できる設計案で、右図は全てのミラーの傾きを同時に変更する設計案である。右図は、構造的には簡単であるが、重量が重く、安全性の観点から問題があると判断したため、左図を基に、ミラーアレイを作成する事とした。

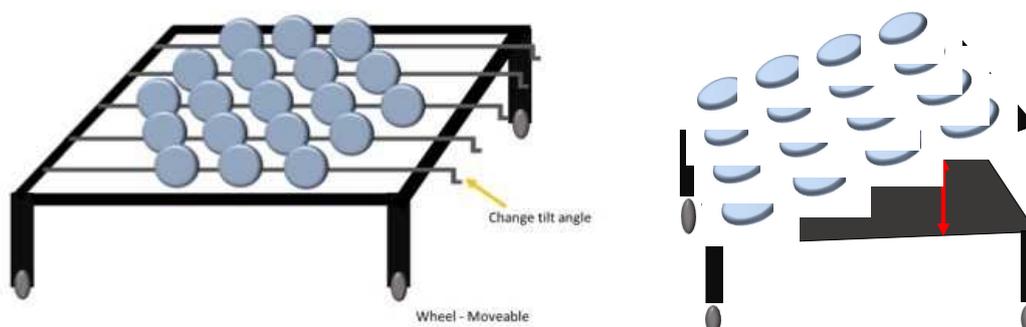


図6 ミラーアレイのデザイン案

³ Modulation Transfer. Function

⁴ Ground Resolved Distance

⁵ Point Spread Function

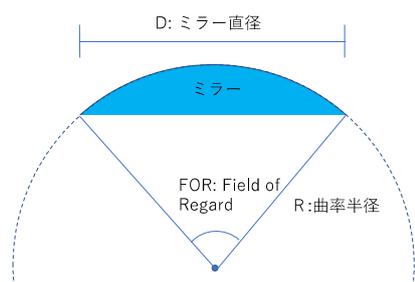
② 凸面ミラーの仕様

凸面ミラーは、材質によって、反射率や様々な耐性、歪みなどの特徴がある（表 2）。道路のカーブミラーなどは、価格や耐候性、耐衝撃性の観点からステンレス製が用いられる事が多い。本研究では、太陽光の反射率を最優先の項目とし、メタクリル樹脂性のミラーを採用した。また、メタクリル樹脂性のミラーは、耐候性、歪みにも優れており、屋外でのキャリブレーションに最適であると考えられる。

表 2 ミラーの素材と特徴⁶

| | メタクリル樹脂 | ポリカーボネート樹脂 | ステンレス | 科学強化ガラス |
|--------------|------------------|----------------|---------------|----------------|
| 明るさ (反射率) | 最も明るい (85%前後) | 明るい (80%前後) | 普通 (60%前後) | 明るい (80%前後) |
| 耐候性 | 優れている | 普通 | 優れている | 最も優れている |
| 耐衝撃性 | 普通 | 優れている | 最も優れている | 普通 |
| 耐汚染性 (曇り) | 普通 | 普通 | 優れている | 最も優れている |
| 歪み | 優れている | 普通 | 優れている | 優れている |

本研究では、キャリブレーションで用いるミラーの大きさと曲率半径、数を求めるには SPARC (Specular Array Calibration) 手法⁷を採用した。円形のミラーの反射強度は個々のミラーのサイズに依存する。直径が大きくなれば、ポインティングの位置精度があがるが、図 6 の設計により、大きなミラーでのミラーアレイ実装は構造的に難しいと考え、ミラーのサイズを直径 30cm-45cm に絞り、ミラーのサイズを選定した。また、SPARC 手法に拠ると、ミラーのサイズが小さいほど、大気中のエアロゾルの影響を少なくできるとされている。ミラーの直径、曲率半径 (Radius-Curve)、FOR (Field of Regard) の関係を図 7 と式 1 に示す。本研究では、直径 35cm、曲率半径 3m のミラーを用いるので、式 1 より、FOR は、0.233 radian (13.377 degree) となる。次に、SPARC (Specular Array Calibration) 手法による SPARC 放射伝達式⁸を式 2 に示す。



$$\text{Field - of - Regard} = 4 \arcsin \left(\frac{D}{2R} \right) \quad [\text{radians}] \quad \dots \text{式 1}$$

図 7 ミラーのサイズの関係

⁶ <https://www.dhk.gr.jp/about-mirror/mirror-types/>

⁷ 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.

⁸ <http://calvalportal.ceos.org/documents/10136/565602/CEOS-IVOS%20Mar2017%2008%20Schiller%20SPARC/e0f22f88-850d-4ab9-ac8d-cb04be149e06.jsessionid=A23A92B954B18C49B3811B52C4ACA52E>

$$L_{at-sensor}(\lambda)/mirror = \rho(\lambda)\tau_{\downarrow}(\lambda)\tau_{\uparrow}(\lambda)E_o(\lambda)\left(\frac{R}{2GSD}\right)^2 \quad \dots \dots \dots \text{式 2}$$

Watts/(m² sr micron)

$\rho(\lambda, \theta)$ = Mirror specular reflectance
 $\tau_{\downarrow}(\lambda)$ = Sun to ground transmittance
 $\tau_{\uparrow}(\lambda)$ = Ground to sensor transmittance
 $E_o(\lambda)$ = Solar spectral constant
 R = Mirror radius of curvature (m)
 GSD = Ground sample distance normal to line-of-sight (m)

ミラーアレイについては、GRUS-1等の高分解能の衛星データだけでなく、Landsat-8やSentinel-2にも対応できる仕様を検討した。Stephen⁷らの研究によると、式2のSPARC放射伝達式による個々のミラーの放射輝度(Radiance)とミラーの数を積算した値が200以上になれば観測できると考えられる。そこで、最も分解能の低いLandsat-8において、放射輝度値が200以上になるように直径35cm、曲率半径3mのミラーの数を調べて計算した。条件を変えて計算した。計算結果を表3に示す。上からLandsat-8(分解能15m)、Sentinel-2(分解能10m)、GRUS-1(分解能5m)の放射輝度値である。直径35cm、曲率半径3mのミラーを25個設置すると、Landsat-8においても放射輝度値が200以上になるため、ミラーを25個設置することで設計した。

表3 放射輝度値(上:Landsat-8, 中:Sentinel-2, 下:GRUS-1)

| | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|------------------|----|-------|
| L8 band | Blue | Green | Red | NIR | Radius-curve | 3 | meter |
| Band center (nm) | 482 | 561.4 | 654.6 | 864.7 | GSD | 15 | meter |
| Reflectance | 0.8756 | 0.8396 | 0.7904 | 0.7616 | | | |
| To Sun Trans | 0.7265 | 0.7907 | 0.8739 | 0.9668 | | | |
| To Sensor Trans | 0.8218 | 0.8656 | 0.9204 | 0.9795 | | | |
| Eo (W/m ² um) | 1975 | 1852 | 1570 | 951.2 | | | |
| Radiance /mirror (W/m ² *str*um) | 10.32463 | 10.64247 | 9.98125 | 6.860249 | | | |
| mirrors (W/m ² *str*um) | 258.1158 | 266.0617 | 249.5312 | 171.5062 | number of mirror | 25 | |
| Sentinel-2 band | Blue | Green | Red | NIR | Radius-curve | 3 | meter |
| Band center (nm) | 490 | 560 | 665 | 842 | GSD | 10 | meter |
| Reflectance | 0.8756 | 0.8396 | 0.7904 | 0.7616 | | | |
| To Sun Trans | 0.7265 | 0.7907 | 0.8739 | 0.9668 | | | |
| To Sensor Trans | 0.8218 | 0.8656 | 0.9204 | 0.9795 | | | |
| Eo (W/m ² um) | 1975 | 1852 | 1570 | 951.2 | | | |
| Radiance /mirror (W/m ² *str*um) | 23.23042 | 23.94556 | 22.45781 | 15.43556 | | | |
| mirrors (W/m ² *str*um) | 580.7606 | 598.6389 | 561.4453 | 385.889 | number of mirror | 25 | |
| GRUS band | Blue | Green | Red | NIR | Radius-curve | 3 | meter |
| Band center (nm) | 477.5 | 550 | 652.5 | 835 | GSD | 5 | meter |
| Reflectance | 0.8756 | 0.8396 | 0.7904 | 0.7616 | | | |
| To Sun Trans | 0.7265 | 0.7907 | 0.8739 | 0.9668 | | | |
| To Sensor Trans | 0.8218 | 0.8656 | 0.9204 | 0.9795 | | | |
| Eo (W/m ² um) | 1975 | 1852 | 1570 | 951.2 | | | |
| Radiance /mirror (W/m ² *str*um) | 92.92169 | 95.78222 | 89.83125 | 61.74224 | | | |
| mirrors (W/m ² *str*um) | 2323.042 | 2394.556 | 2245.781 | 1543.556 | number of mirror | 25 | |

3) ミラーアレイの設置

① 設置場所

ミラーアレイは、ときわ公園の湖畔の西側に設置した（図 8）。設置に関しては宇部市の協力を得て、無償で場所を提供して頂いた。

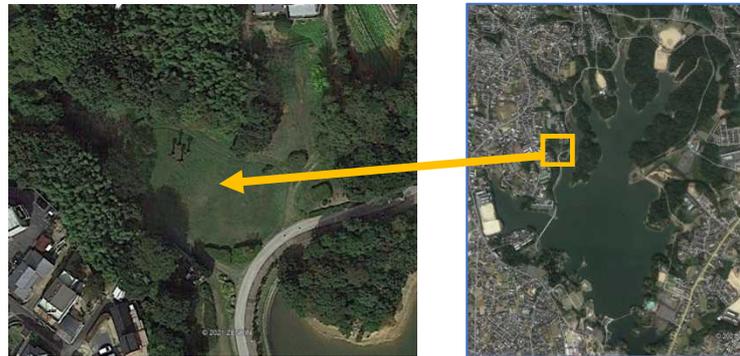


図 8 ミラーアレイの設置箇所（ときわ公園）

② 設置工事

令和 3 年 2 月 20 日に、ミラーアレイの設置工事を行った。設置工事の様子を図 9 に示す。水平を保つためのコンクリートブロックを設置し（図 9 左）、安全対策のため周辺に柵も設置した（図 9 中央）。さらに、文部科学省の地球観測技術等調査研究委託事業において、山口大学、アクセルスーペース、防災科学技術研究所、アジア防災センターの共同で実施している旨を明記した看板も設置した（図 9 右）。



図 9 ミラーアレイの設置工事（ときわ公園）

③ 機能（使い方）

ミラーアレイは、太陽光と衛星の軌道によって仰角と方位の向きを変更することができる様にした。図 10 の左図に仰角、中央図が方位角の変更している様子を示す。仰角は 1 列毎に角度を変更することができる。方位角については、25 個のミラー全体が回る事で変更することができる。また、右図には、傾けたミラーアレイの真横から見た図である。25 個のミラーが同じ仰角になっている事が分かる。

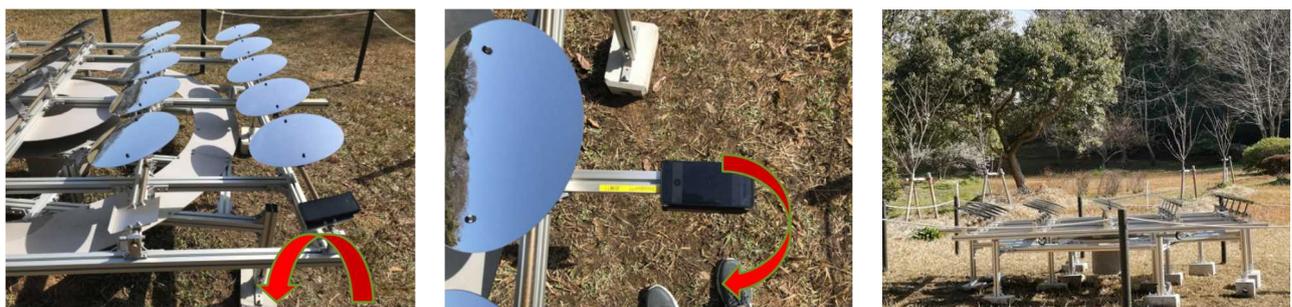


図 10 ミラーアレイの向き変更

④ 設置式

令和3年3月27日に、宇部市および山口大学の共催で衛星データ校正サイト設置式を開催した。山口大学と宇部市で連携し、宇宙産業などの成長産業を創出・育成を目指している。図9に設置式の様子を示す。



図11 ミラーアレイの設置式（右：岡学長、左：篠崎市長）

⑤ 報道

ミラーアレイの設置に関して、報道で取り上げられた。山口新聞に令和3年3月28日（図12左）、中国新聞が3月31日、朝日新聞が4月14日（図12右）に、それぞれ取り上げられた。



図12 ミラーアレイに関する報道

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対象選定

1) 地上ターゲットサイトの概要

災害時の被害状況把握の目的で崩れた建物、道路や鉄道の破損状況を模擬し、衛星画像による見え方を評価するために、植生や水域のターゲットサイトを整備し、反射特性の季節変化等の把握可能性を検討する。災害解析等を事例として衛星データを検証するための地上ターゲットの対象と場所を5箇所以上選定する。

2) 計測方法

① スペクトロメーター（分光放射計）

キャリブレーションを行うには、対象とする地物から反射される、または放射される電磁波の性質を知ることが必要不可欠である。様々な地物の反射特性や放射特性をフィールドで計測するために、スペクトロメーター（分光放射計）による計測を実施する。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の様子を図 13 に示す。



図 13 スペクトロメータによる計測

② 太陽光フォトメータ

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 MICRO TOPS II を利用した。太陽からのオゾンを除く全波長の 5 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の様子を図 14 に示す。



図 14 太陽光フォトメータによる計測

2) 選定した地上ターゲット 5 箇所

① 防災科学技術研究所

防災科学技術研究所を地上ターゲット箇所とした。図 15 に防災科学研究所の敷地図を示す。上部（北側）に正門および建物があるが、下部（南側）に、大型降雨実験施設⁹がある。大型降雨実験施設は、375m×50m の敷地で、土砂を積み上げたりして地形を変化させたり、人工的に雨をふらせて土壌を湿らせたりすることもできる。また、防災科学研究所の設備内のため、様々なデータ取得も容易にできる。これらの理由により、防災科学技術研究所を地上ターゲットとした。

また、Sentinel-1 衛星を用い、防災科学技術研究所の周辺を中心に可視化を行い、ターゲット候補について調査した。図 16 は、観測時期の違いによる後方散乱係数の変化が分かる。また、連続した観測を対象とした画像、季節の違いによる 3 時期の画像を RGB に割り当てた画像を構築した。3 時期の変化が大きい箇所が黄色で示されている。その結果、観測時期の違いに伴う後方散乱係数の変化が分かり、ターゲット候補の検討に役立つことが分かった。大型降雨実験施設は、地形を変化させて実験をおこなっているため、観測時期の違いに伴う後方散乱係数の変化が大きくなっている。

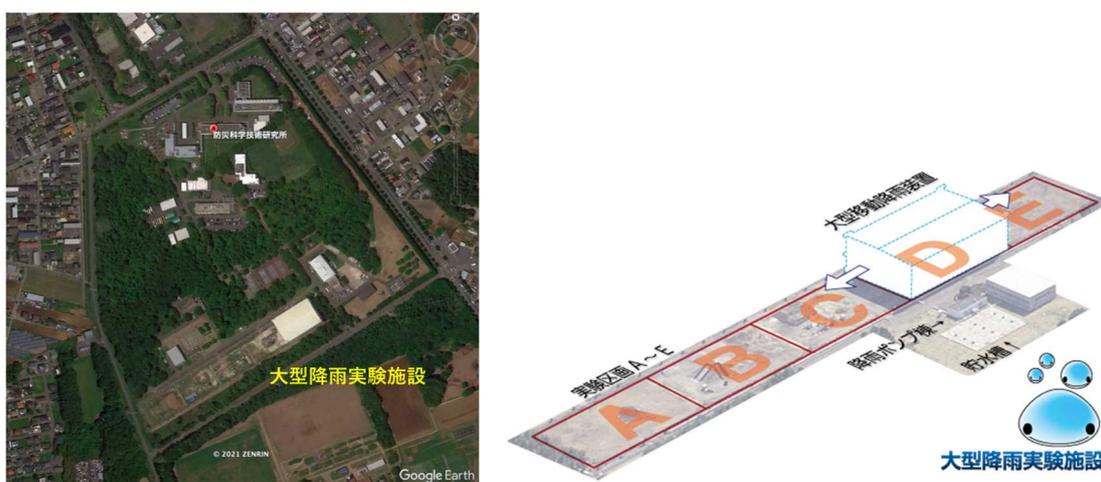


図 15 防災科学技術研究所の敷地図（左）と大型降雨実験施設（右）



図 16 防災科学技術研究所の周辺

⁹ <https://www.bosai.go.jp/shisetsu/rain/kohushisetsu001.html>

②山口県宇部市 ときわ公園

キャリブレーションを行う際は、衛星データの観測と同時に、対象物の反射特性や太陽光量等の地上データを計測する必要がある。そのため、地上ターゲットの選定で重要な点の一つは、アクセスが容易で、自由に出入り出来ることである。山口大学工学部から徒歩10分程度で移動できるときわ公園を地上ターゲットとした。ときわ公園は、宇部市が運営し、面積約100haにおよぶ常盤湖を中心に広がる総合公園である。ときわ公園には、洪水を想定した水域（常盤湖）や土砂災害を想定した裸地（グラウンド）、橋梁や駐車場などのコンクリートがあり、様々な反射特性を計測することができる。また、屋外での対象物の反射特性や太陽光量等の地上データ計測について、安定的な計測手法について検討を行った。スペクトロメーターや太陽光フォトメータは、計測前に機器のキャリブレーションが必要であるので、その手法についても検討した。

ときわ公園には、ミラーアレイが設置してあるので、ミラーアレイによる観測をするとともに、スペクトロメータによる周辺の反射特性を計測することで効率的に地上データの収集が可能になる。また衛星による観測に合わせて、太陽光フォトメータによる観測も実施した。図17にときわ公園における地上データの観測の様子を示す。図17（左）の中央にある白い点がGRUS-1衛星により観測されたミラーアレイである。図17（中央）は、赤点はGNSSによる移動軌跡で、黄点は、図17（右）の通り、地上の反射特性の計測を行った箇所である。図17（右）の地面に設置してある白色のプレートは、スペクトロメーターのキャリブレーションを行うための白板である。

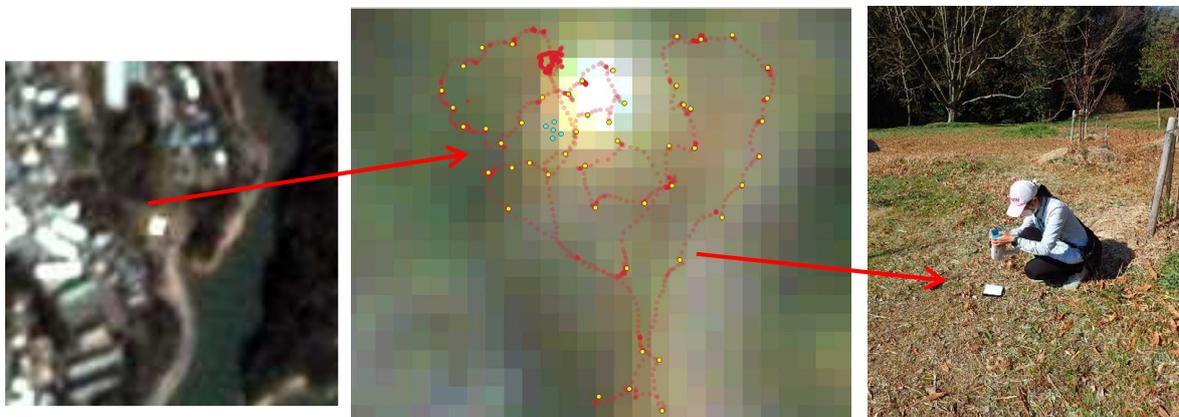


図17 ときわ公園に置ける地上データ観測

表4 スペクトロメータによる反射量データ（図17）リスト

| No. | ID | lat | long | ele | Time | Original data file |
|-----|----|-------------|-------------|-----------|-----------------------|--------------------|
| 1 | 1 | 33.95669507 | 131.2812704 | 27.674683 | 2021-02-22 10:26:48am | Spectrum00001.asd. |
| 2 | 2 | 33.9566909 | 131.2812145 | 26.297159 | 2021-02-22 10:28:18am | Spectrum00002.asd. |
| 3 | 3 | 33.95666314 | 131.2811788 | 24.786072 | 2021-02-22 10:29:18am | Spectrum00003.asd. |
| 4 | 4 | 33.95662587 | 131.2811381 | 26.195709 | 2021-02-22 10:30:11am | Spectrum00004.asd. |
| 5 | 5 | 33.95659921 | 131.2811587 | 29.456978 | 2021-02-22 10:31:02am | Spectrum00005.asd. |
| 6 | 6 | 33.95656976 | 131.2811762 | 32.625004 | 2021-02-22 10:31:52am | Spectrum00006.asd. |
| 7 | 7 | 33.95656615 | 131.2812176 | 29.707733 | 2021-02-22 10:32:44am | Spectrum00007.asd. |
| 8 | 8 | 33.95654291 | 131.2812453 | 27.384895 | 2021-02-22 10:33:37am | Spectrum00008.asd. |
| 9 | 9 | 33.95657348 | 131.2812845 | 25.474012 | 2021-02-22 10:34:29am | Spectrum00009.asd. |
| 10 | 10 | 33.95661232 | 131.2813234 | 24.822575 | 2021-02-22 10:35:23am | Spectrum00010.asd. |
| 11 | 11 | 33.95661654 | 131.2813716 | 26.711353 | 2021-02-22 10:36:14am | Spectrum00011.asd. |
| 12 | 12 | 33.95663671 | 131.2813972 | 27.90377 | 2021-02-22 10:37:07am | Spectrum00012.asd. |
| 13 | 13 | 33.95665153 | 131.2814543 | 29.759983 | 2021-02-22 10:38:04am | Spectrum00013.asd. |
| 14 | 14 | 33.95660012 | 131.2814737 | 28.763271 | 2021-02-22 10:39:05am | Spectrum00014.asd. |
| 15 | 15 | 33.95657164 | 131.281445 | 29.055126 | 2021-02-22 10:39:59am | Spectrum00015.asd. |
| 16 | 16 | 33.95658323 | 131.2814055 | 28.851807 | 2021-02-22 10:40:53am | Spectrum00016.asd. |
| 17 | 17 | 33.95655807 | 131.2813839 | 31.999462 | 2021-02-22 10:41:48am | Spectrum00017.asd. |
| 18 | 18 | 33.95652414 | 131.2813631 | 28.112183 | 2021-02-22 10:42:41am | Spectrum00018.asd. |
| 19 | 19 | 33.95649274 | 131.2813308 | 27.312775 | 2021-02-22 10:43:33am | Spectrum00019.asd. |
| 20 | 20 | 33.95651193 | 131.2812972 | 22.357655 | 2021-02-22 10:44:31am | Spectrum00020.asd. |
| 21 | 21 | 33.9565051 | 131.281264 | 23.889767 | 2021-02-22 10:45:27am | Spectrum00021.asd. |

③山口県山口市 山口きらら記念公園

山口きらら記念公園（以下、きらら公園）は、山口県山口市阿知須にある山口県立の都市公園である。きらら公園には、50ha 程ある大芝生広場（図 18）があり、地上ターゲットとした理由は、山口大学工学部から車で 20 分程度の近場にあり、広大な広場で、山口県の許可を取り、ドローンによる計測を実施したり、人工的な地上ターゲットを設置したりすることも可能だからである。図 18（右）に、ドローンにより観測を行った人工ターゲット（ビニールシート）を、ドローンにより撮影した図を示す。きらら公園においても、スペクトロメータによる周辺の反射特性計測や、衛星による観測に合わせた太陽光フォトメータによる観測を実施した。



図 18 きらら公園の大芝生広場（左と中央）と人工ターゲット設置例（右）

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。地上ターゲットとした理由は、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だからである。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。

秋吉台では、2021 年 2 月 10 日に、秋吉台の Sentinel-2 衛星による観測に合わせて、地上による計測を行った。図 19 に、Sentinel-2 画像より観測された秋吉台のフォールスカラー画像を示す。表 5 は、図 19 において計測した反射量データリストである。

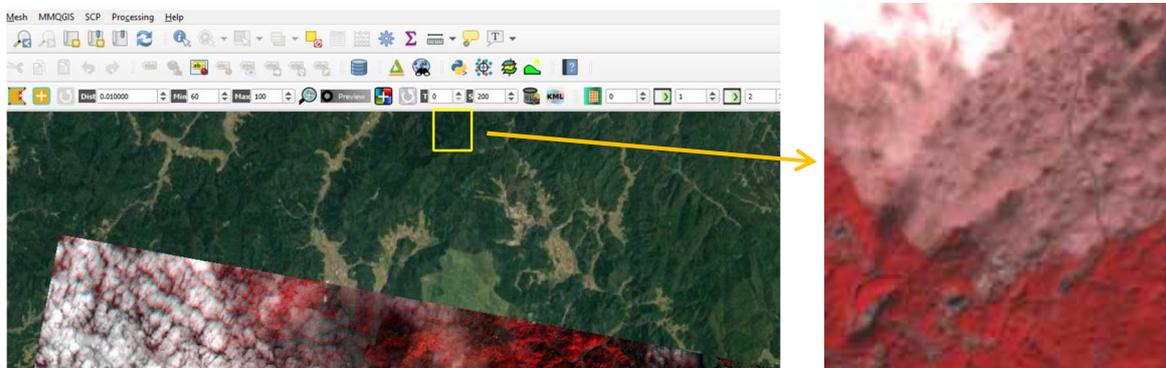


図 19 秋吉台の Sentinel-2 画像

表 5 スペクトロメータによる反射量データ（図 19）リスト

| ID | lat | long | ele | Time | Original data file |
|----|-------------|-------------|------------|-----------------------|--------------------|
| 1 | 34.23830152 | 131.3036574 | 231.330505 | 2021-02-10 11:33:46am | Spectrum00001.asd. |
| 2 | 34.23830899 | 131.3036506 | 232.220428 | 2021-02-10 11:34:27am | Spectrum00002.asd. |
| 3 | 34.23831601 | 131.303644 | 232.297821 | 2021-02-10 11:34:53am | Spectrum00003.asd. |
| 4 | 34.23832339 | 131.3036377 | 231.935028 | 2021-02-10 11:35:16am | Spectrum00004.asd. |
| 5 | 34.23833038 | 131.3036309 | 232.890198 | 2021-02-10 11:35:40am | Spectrum00005.asd. |
| 6 | 34.23833805 | 131.3036241 | 232.539581 | 2021-02-10 11:36:03am | Spectrum00006.asd. |
| 7 | 34.23834464 | 131.3036178 | 233.115234 | 2021-02-10 11:36:25am | Spectrum00007.asd. |
| 8 | 34.23835145 | 131.303611 | 232.890396 | 2021-02-10 11:36:46am | Spectrum00008.asd. |
| 9 | 34.23835866 | 131.3036042 | 232.570175 | 2021-02-10 11:37:13am | Spectrum00009.asd. |
| 10 | 34.23836564 | 131.3035981 | 232.880035 | 2021-02-10 11:37:32am | Spectrum00010.asd. |

⑤山口県宇部市 山口宇部空港ふれあい公園

山口宇部空港ふれあい公園（図 20）は、山口大学工学部から車で 10 分程度の近場にある。または、空港の滑走路もあり高精度で測量が実施されているため、衛星データの校正に利用できると考えた。また、2021 年 12 月 2 日に、PlanetScope 衛星による観測実験を実施した。図 21 に PlanetScope 画像を示す。画像の中から無作為にサンプルピクセルと抽出し、今後はこれらのピクセルと地上データや他衛星データを比較して検証していく。



図 20 山口宇部空港公園

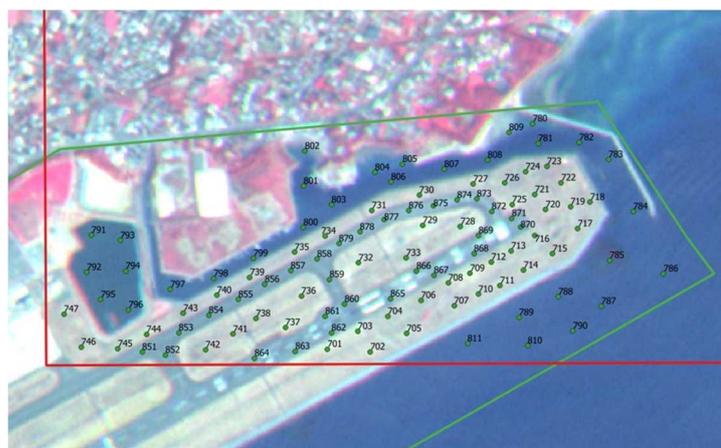


図 21 PlanetScope 衛星による観測実験

3.3 キャリブレーション手法の開発

3.3.1 軌道上衛星の特性評価

1) 研究対象とする衛星

衛星コンステレーションでは、複数の衛星との協働による観測体制をつくることで、観測頻度を飛躍的に向上させることができる。日本国内では、(株)アクセルスペースが小型衛星（GRUS 衛星による衛星コンステレーションの構築を進めている。2018 年 12 月 27 日に GRUS-1A 衛星(図 22)の 1 号機の打ち上げに成功した。(株)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 衛星を軌道投入に成功した。表 6 に GRUS-1A の主要諸元を示す。GRUS-1B, 1C, 1D, 1E は、GRUS-1A と同じ望遠鏡・センサを搭載した同型機であり、通信速度の増大などの改良がおこなわれている。GRUS-1A と同一の軌道に投入されており 5 機体制になることで、日本付近の緯度地域では 2 日～3 日に 1 回程度高頻度で撮影することが可能になる。表 7 に、GRUS-1A の軌道諸言を示す。高頻度に観測できることで、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。図 23 に、GRUS-1A の観測スペクトルバンドを示す。GRUS-1A は、可視波長に加えて、植生分析等に多用されるレッドエッジ波長、近赤外波長も同じ地上分解能で観測している。

令和 3 年度は、GRUS-1A を用いて、山口県宇部市周辺を観測した（図 24）。観測は定期観測に実施し（表 8）、ミラーアレイやターゲットサイトの観測と衛星画像提供を行った。ミラーアレイを観測するにあたり、GRUS-1A の軌道や高度、さらには観測時間の太陽高度から、ミラーアレイの方位と仰角を決定した（図 25）。

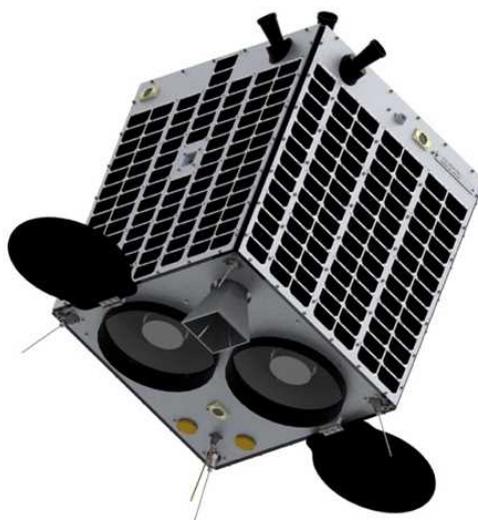


図 22 GRUS-1A 衛星の外観

表 6 GRUS-1A 主要緒言

| スペクトルバンド | バンド名 | | 波長帯 |
|----------|----------------------|------|-----------|
| | パンクロマティック | | 450-900nm |
| | 青 | | 450-505nm |
| | 緑 | | 515-585nm |
| | 赤 | | 620-685nm |
| | レッドエッジ | | 705-745nm |
| | 近赤外 | | 770-900nm |
| 地上分解能 | パンクロマティック | 2.5m | |
| | マルチスペクトル | 5.0m | |
| 観測幅 | 57km 以上 | | |
| 最長撮影距離 | ~1000km | | |
| センサビット深度 | 12bit | | |
| 衛星質量 | 約 100kg | | |
| 衛星サイズ | 約 60cm x 60cm x 80cm | | |
| 設計寿命 | 5 年 | | |

表 7 GRUS-1A の軌道緒言

| | |
|----------|-------------------|
| 打上日 | 2018 年 12 月 27 日 |
| 軌道 | 太陽同期準極軌道 |
| 高度 | ~585km, |
| 赤道通過時刻 | 11:00~11:30 (地方時) |
| 軌道傾斜角 | 97.7 度 |
| 周期 | 96.4 分 |
| NORAD ID | 43890 |
| 回帰 | 約 14 日 |
| 打ち上げ場所 | ロシア・ポストチヌイ宇宙基地 |
| 打上ロケット | ソユーズ2ロケット |

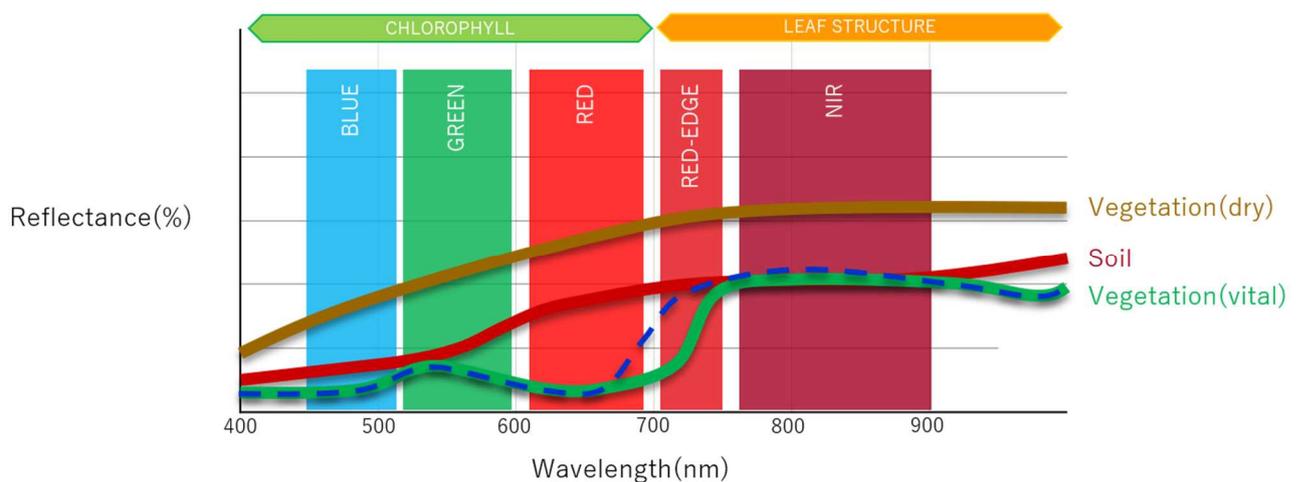


図 23 GRUS-1A の観測スペクトルバンド



図 24 GRUS-1A の画像

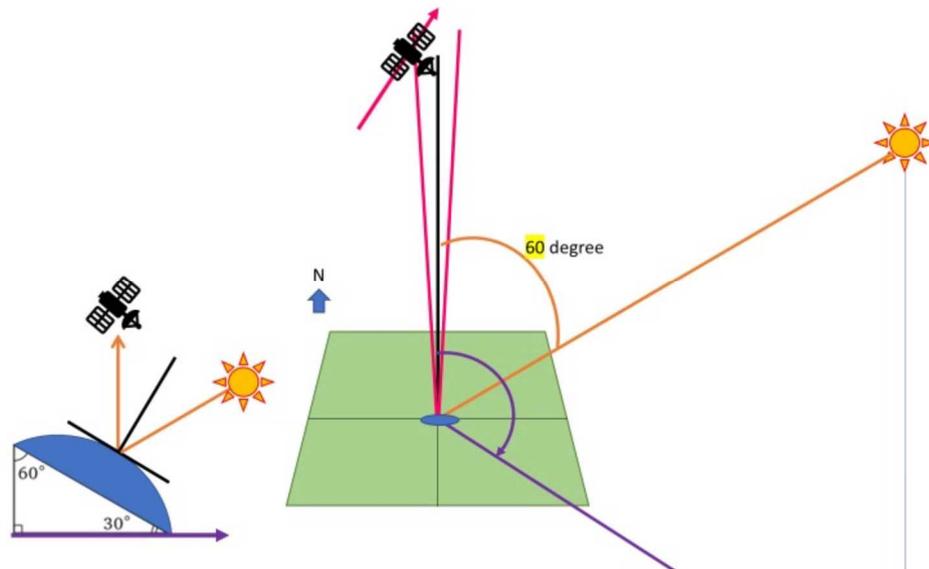
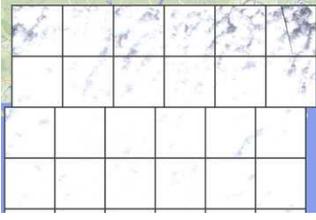
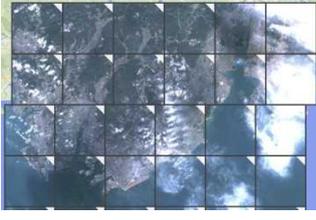
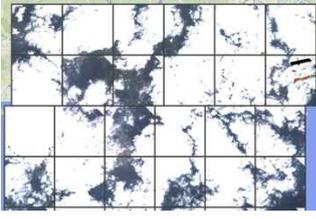
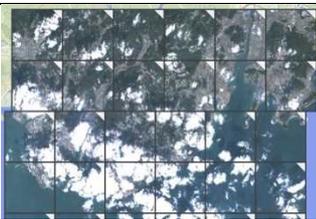
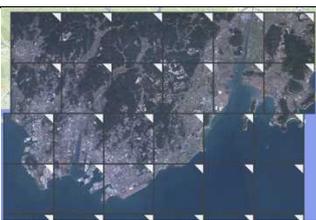


図 25 ミラーアレイの方向の計算

表 8 GRUS-1A による山口県宇部市周辺の観測日

| | |
|-------------------------------|--|
| <p>2021年1月2日 (ほぼ曇り)</p> |  |
| <p>2021年1月15日 (一部曇り)</p> |  |
| <p>2021年1月27日 (大部分曇り)</p> |  |
| <p>2021年1月28日 (ほぼ雲なし)</p> |  |
| <p>2021年2月9日 (一部曇り)</p> |  |
| <p>2021年2月21日 (雲なし)</p> |  |
| <p>2021年2月22日 (ほぼ雲なし)</p> |  |

2) 既存のキャリブレーション手法

① 代替校正

代替校正はスペクトルメーター等で測定された地上ターゲットの分光反射等を衛星データで観測することにより、その分光反射等の差異を使用して衛星データの校正を行う手法である。しかし、地上ターゲットのスペクトルメーターで測定されたデータは非常に狭い範囲の反射率データを取得するため、衛星データの代替校正のためのターゲットサイトには地表被覆物が一様であることや大気の光学的厚さの薄い場所で行われる必要がある。代替校正の概念図を図 26 に示す。スペクトロメータによる地上の計測と UAV による観測を行い、これらの地上のデータをもちいて、衛星データの代替校正を行う。

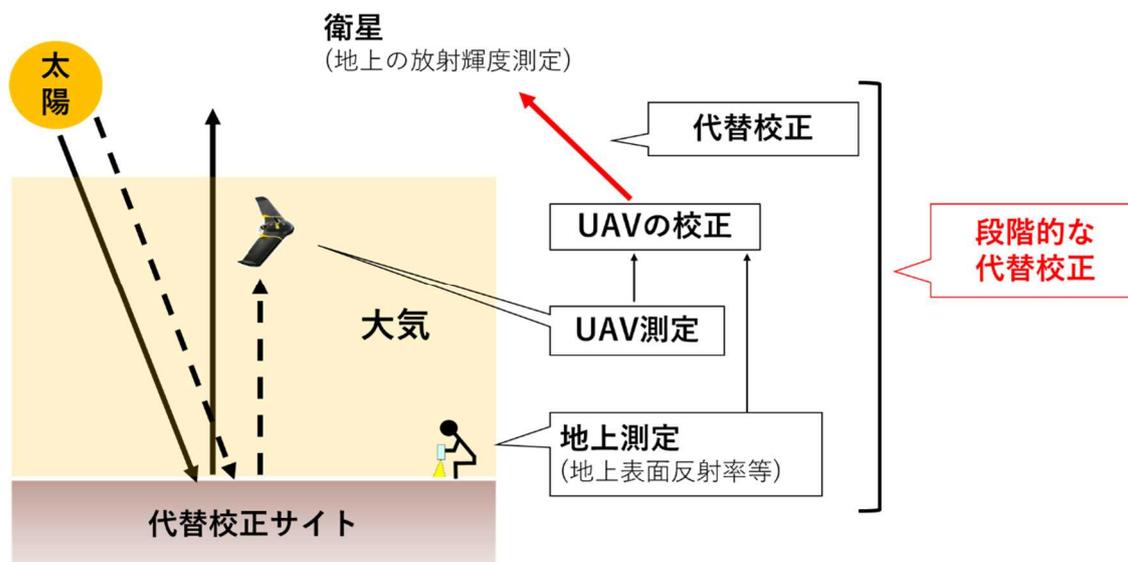


図 26 代替校正の概念図

② 相互校正 (クロスキャリブレーション)

相互校正は同等の性能を有する複数のセンサ間で、同一のターゲットサイトを観測し、センサ間で応答度を比較して行われる校正手法である。同一のターゲットは、大気の影響を限りなく少なくするために、同日に撮影されることが望ましい。

相互校正の目的は、複数の衛星のセンサを併用してデータ解析を行う際に、センサ間での放射輝度の基準を合わせることである。併用するセンサが2つであれば、効果的な手法であるが、併用するセンサの数が増えてくると、非常に手間がかかる。そのため、衛星コンステレーションには向いていない。また、複数のセンサを時空間的に補完して解析する場合、校正精度が低いセンサに対し、校正精度がより高いとされるセンサに合わせることで、相対的に校正精度を高めることができる。

3) ミラーアレイによるキャリブレーション手法の開発

① ミラーアレイによるキャリブレーション手法

太陽からの太陽放射は、大気を通して地表面で反射し、放射輝度の反射率 (Surface Reflectance) として人工衛星で受信する。この時に人工衛星が受信するのは TOA (Top Of the Atmosphere: 大気上端) における反射率になる。もし大気の影響がなければ、TOA における反射率と、BOA (Bottom Of the Atmosphere: 大気下端) による反射率は同じになる。しかし、実際は、大気の影響による太陽放射の散乱や吸収があり、TOA と BOA における反射率は違ってくる。

図 27 に、新規キャリブレーション手法の概要を示す。太陽光をアレイ状に並べた凸面ミラーにて反射し、光源とするミラーアレイを設置することで、軌道上衛星の特性変化を評価し、性能評価や放射性キャリブレーションを行う。大気の影響については、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である MODTRAN¹⁰ (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) を利用する。気放射伝達モデルは、6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum¹¹) のように無償で公開されているモデルもあるが、MODTRAN は、紫外域から可視域、遠赤外域までをカバーした大気放射を対象としているため採用した。

既存の代替校正や相互校正では、スペクトロメータにより地表面で反射率を計測するが、衛星データの観測毎に、様々な地表面の反射率を計測するのは膨大な労力を必要とする。ミラーアレイによるキャリブレーション手法は、地上での反射率を計測する労力が大幅に軽減できる。また、ミラーアレイは、点の光源を参照とし、2次元の PSF (Point Spread Function) を推定することでキャリブレーションを行う。そのため、衛星の進行方向に左右されず、安定したキャリブレーションが可能である。特に、点の光源を利用するため、フットプリント (Footprint¹²) が小さい高分解能衛星画像のキャリブレーションに効果的で、近年主流になりつつある 2.5m~10m 程度に有効である。本研究で対象としている GRUS-1 衛星や PlanetScope 衛星 (表 1) には、有効である。

図 28 は、新規キャリブレーション手法の流れを示す。地球観測衛星によるミラーアレイの放射データの観測と大気観測を行う。それぞれ TOA における反射率を求める。MODTRAN により TOA の放射データを推定し、ミラーアレイの観測点における PSF 解析をした TOA の放射データとの不確実性解析により評価を行う。

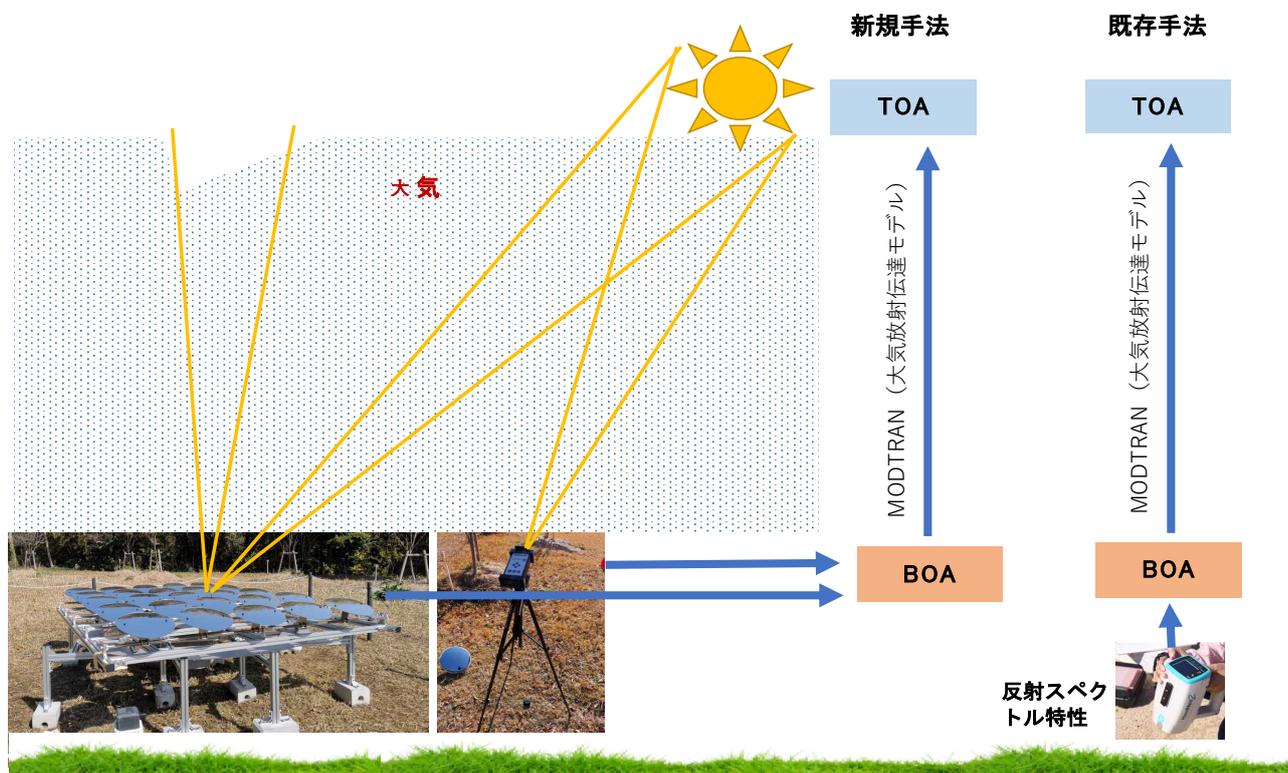


図 27 新規キャリブレーションの概要

¹⁰ <http://modtran.spectral.com>

¹¹ MODIS LAND SURFACE REFLECTANCE, Science Computing Facility : <http://6s.ltdri.org/index.html>

¹² 地球観測衛星で直接観測可能な区域のこと

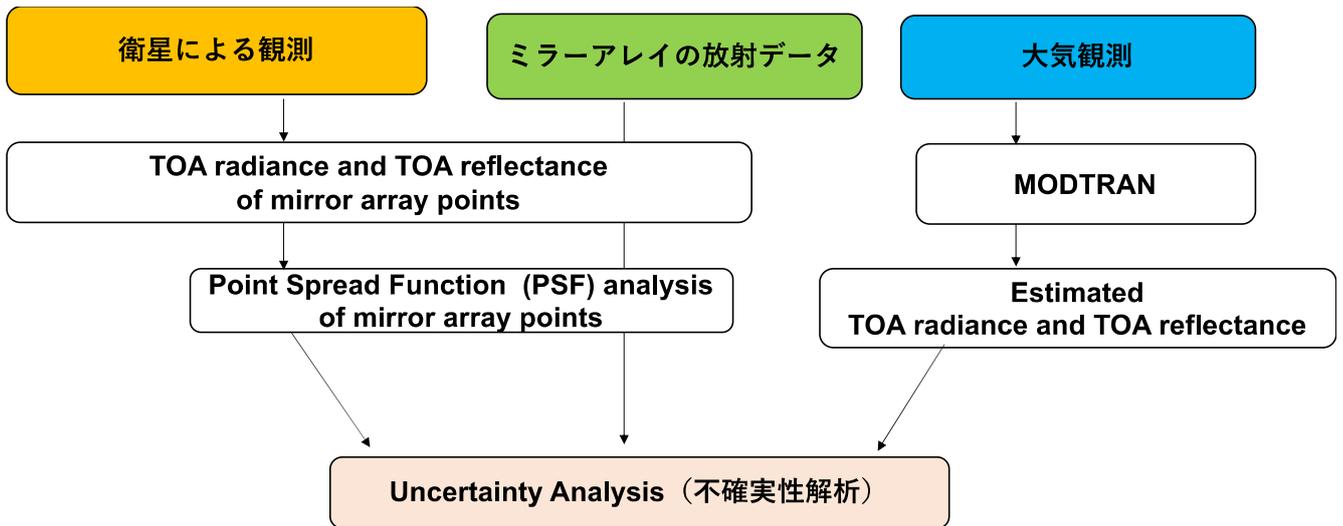


図 28 新規キャリブレーションの流れ

衛星による観測では、ミラーアレイおよび周辺のピクセルの DN 値 (Digital Number) を求める。図 29 に示す通り、緑色の枠で混まれているのがミラーアレイのピクセルの DN 値であり、赤枠が周辺のピクセルの DN 値である。それぞれ DN 値の平均値をとり、式 3 によりミラーアレイに関する DN 値を求める。Point Spread Function (PSF) や Modulation Transfer Function (MTF) は、衛星画像から計測することができる。本研究では、画像内のミラーアレイの点にあたり、2 次元のガウス関数より求める。式 4 に PSF モデル¹³を示す。衛星画像の TOA における反射率や放射輝度¹⁴は、式 5、式 6 より求める。

$$\text{Target } \Sigma \text{DN} = \sum_{n=1}^9 [DN(n) - DN_{\text{background}}] \quad \dots \text{式 3}$$

n: number of total target DN (green box = 9 pixels)
 DN_{background}: from pixel average in (red box)

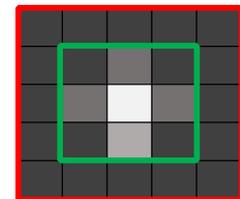


図 29 ミラーアレイの DN 値

$$Z(x, y) = a \exp \left\{ -\alpha \left[\left(\frac{x - bx}{c_x} \right)^2 + \left(\frac{y - by}{c_y} \right)^2 \right] \right\} + d + m_{xx} + m_{yy} \quad \dots \text{式 4}$$

α = scaling constant,
 a = amplitude,
 $b_{x,y}$ = center in x or y,
 $c_{x,y}$ = width in x or y,
 d = offset, and
 $m_{x,y}$ = plane slope in x or y

¹³ Stephen J. Schiller, John Silny, "The Specular Array Radiometric Calibration (SPARC) method: a new approach for absolute vicarious calibration in the solar reflective spectrum," Proc. SPIE 7813, Remote Sensing System Engineering III, 78130E (26 August 2010); <https://doi.org/10.1117/12.864071>

¹⁴ http://calvalportal.ceos.org/documents/10136/192557/File9CEOSIVOS2012_Schiller.pdf/a8989c0a-af06-4486-b705-446b7110cf33;jsessionid=D33E1D5ACF8B53CC219344FF3947A71F?version=1.0

TOA Intensity (Sensor Independent)

$$I(\lambda, \theta_r)_{TOA} = \frac{1}{4} \rho(\lambda, \theta_r) \tau_{\downarrow}(\lambda) \tau_{\uparrow}(\lambda) E_o(\lambda) R^2 \quad \dots \dots \dots \text{式 5}$$

Watts/(sr micron)/mirror

Effective At-Sensor Radiance/Mirror (sensor and collection geometry specific)

$$L_{at-sensor}(\lambda, \theta_r) = \rho(\lambda, \theta_r) \tau_{\downarrow}(\lambda) \tau_{\uparrow}(\lambda) E_o(\lambda) \frac{R^2}{4GSD(x)GSD(y)} \quad \dots \dots \dots \text{式 6}$$

Watts/(m² sr micron)/mirror

$\rho(\lambda, \theta_r)$ = Mirror specular reflectance at the reflectance angle θ_r ,

$E_o(\lambda)$ = Solar spectral constant

$\tau_{\downarrow}(\lambda)$ = Sun to ground transmittance

R = Mirror radius of curvature (m)

$\tau_{\uparrow}(\lambda)$ = Ground to sensor transmittance

GSD = Line-of-site ground sample distance (m)

② 評価パターンおよびミラーアレイの特徴をシミュレーションにより検証

白黒ターゲットによる評価パターンは、白黒のつなぎ目部分（エッジ部分）を利用して光学センサのボケを把握すること可能である。一般的に、画素単位およびピクセル単位のマッチングによる誤差は、地表面のテクスチャや地形起伏など観測対象の特徴と、画像のノイズ(S/N: Signal to Noise Ratio) やボケ(MTF: Modulation Transfer Function) などのラジオメトリック性能に依存する。本研究では、GRUS-1 衛星画像におけるピクセル単位のマッチングによる誤差を評価し、バンド間レジストレーションを実施することで画像のボケの低減のシミュレーションを行った。図 30 に、シミュレーションの結果を示す。左図がオリジナル画像、右図がシミュレーション結果である。陸域では分かり難いが、水域と陸域の境界線でボケが顕著に表れており、ボケの低減により、エッジがシャープになっていることがわかる。

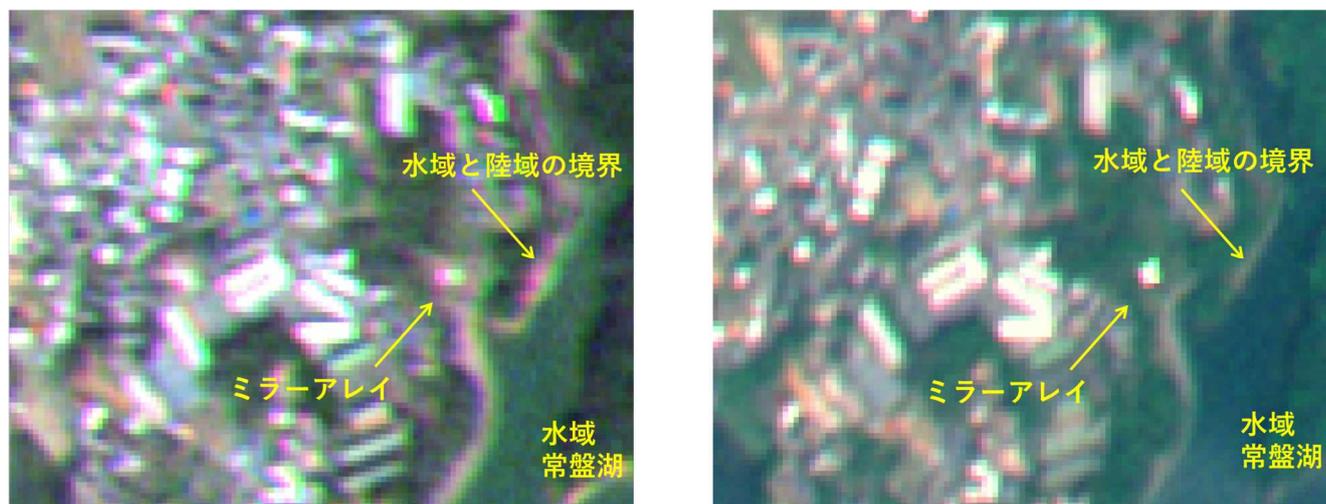


図 30 画像のボケの低減のシミュレーション

ミラーアレイの特徴を使うことで、画像から光学センサ特性の一つである PSF 形状を推定し、取得画像のボケを修正できるが、ここではミラーアレイによる放射性キャリブレーションについてのシミュレーションを行う。本研究におけるキャリブレーション手法開発の目的は、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である。シミュレーションにおいては、GRUS-1 衛星画像と Planet Lab 社の PlanetScope 衛星¹⁵の比較検証を行った。シミュレーションを実施するために、2020 年 4 月 4 日の同日に撮影されたアーカイブ画像を利用した。図 31 に GRUS-1 衛星画像と PlanetScope 衛星画像のスペクトルバンドの比

¹⁵ <https://www.planet.com/company/>

較を示す。青バンド、緑バンド、赤バンド、近赤外バンドにおいて、それぞれの衛星のセンサーの波長が僅かに違うことが分かる。図 32 に GRUS-1 衛星画像と PlanetScope 衛星画像の各バンドにおける反射率の比較を示す。ランダムに 600 個のピクセルを選択し、図 32 のグラフを作成した。ミラーアレイを用いた放射性キャリブレーションにより誤差を補正することができる。図 33 に GRUS-1 衛星画像と PlanetScope 衛星画像の NDVI¹⁶画像を示す。ここでは、GRUS-1 衛星画像の反射率を PlanetScope 衛星画像の反射率に合うように補正するシミュレーションを実施した。図 33 に示す通り、2 つの NDVI 画像が似ている。ミラーアレイを用いた放射性キャリブレーションにより様々な衛星画像を、時系列に補完し合いながら利用できる。

| GRUS-1A | | PlanetScope | |
|-------------------|---|--|---|
| Ground Resolution | Panchromatic: 2.5 m Multispectral: 5.0 m | Instrument | PS2 PS2.SD PSB.SD |
| Spectral Bands | Panchromatic: 450-900 nm | Orbit Altitude | 475 km (~98° inclination) |
| | Blue: 450-505 nm | Equator Crossing Time | 9:30 - 11:30 am (local solar time) |
| | Green: 515-585 nm | Ground Sample Distance | 3.7m (average at reference altitude 475 km) |
| | Red: 620-685 nm | Spectral Bands | Blue: 455 - 515 nm Blue: 464 - 517 nm |
| | Red Edge: 705-745 nm | | Green: 500 - 590 nm Green: 547 - 585 nm |
| | Near Infrared: 770-900 nm | Red: 590 - 670 nm Red: 650 - 682 nm | Coastal Blue 431-452 nm* |
| Swath: 57+ Km | NIR: 780 - 860 nm NIR: 846 - 888 nm | Blue: 465-515 nm | |
| Life Span | 5+ years | Analytic Bands | 4 or 5 bands multispectral image (blue, green, red, red-edge, near-infrared) |
| Bit Depth | 12 bit | Pixel Size (orthorectified) | 3.125 m |
| | | 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 31 GRUS-1 衛星画像と PlanetScope 衛星画像のスペクトルバンドの比較

¹⁶ Normalized Difference Vegetation Index (規化植生指数)

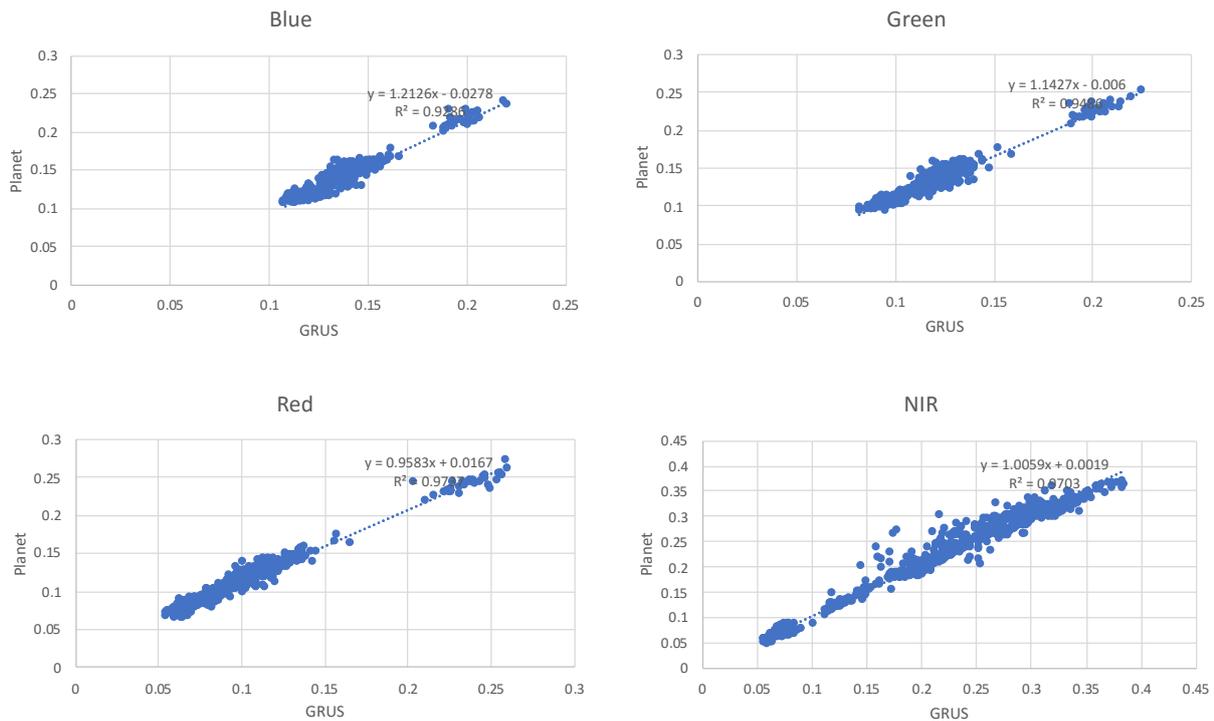


図 32 各バンドにおける反射率の比較

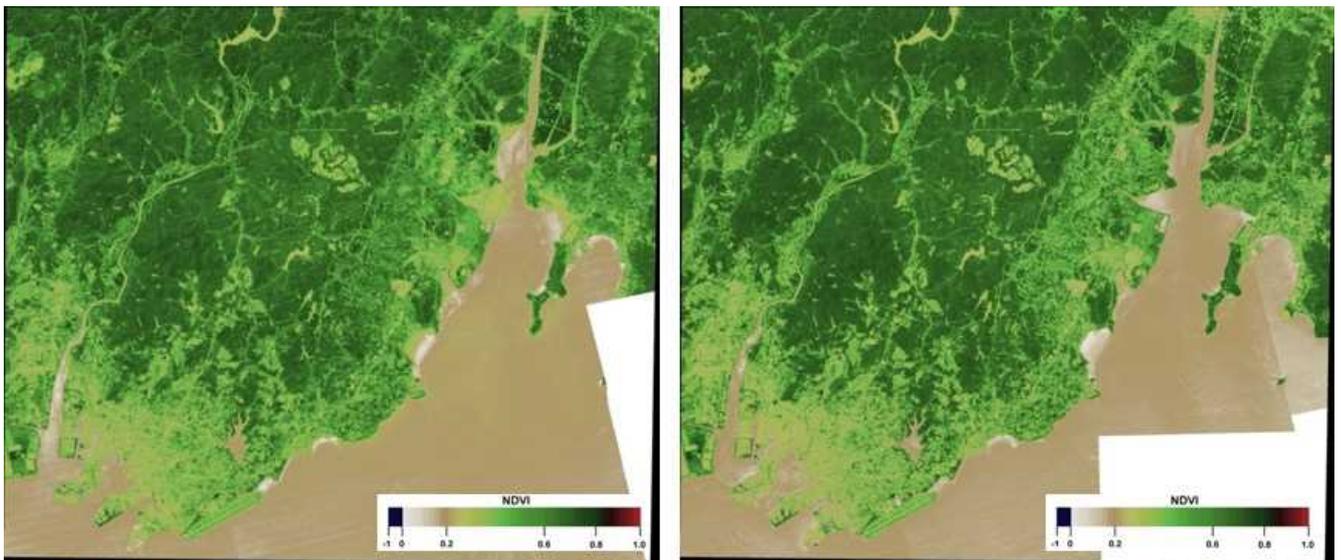


図 33 NDVI 画像の比較 (右 : GRUS-1、左 : PlanetScope)

3.4 災害等への実用化試験

3.4.1 災害で利用される衛星調査

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。

図 34 に示すセンチネル・アジアのプロジェクトに参加している宇宙機関の地球観測衛星（光学センサ）について、表 9 の通りそれぞれの仕様を整理した。なお、センチネル・アジアの活動の一つである緊急観

測（実際の災害時において衛星画像などのデータ提供を行う）においては、被災地における支援活動や復興対応などに有効活用されてきている。

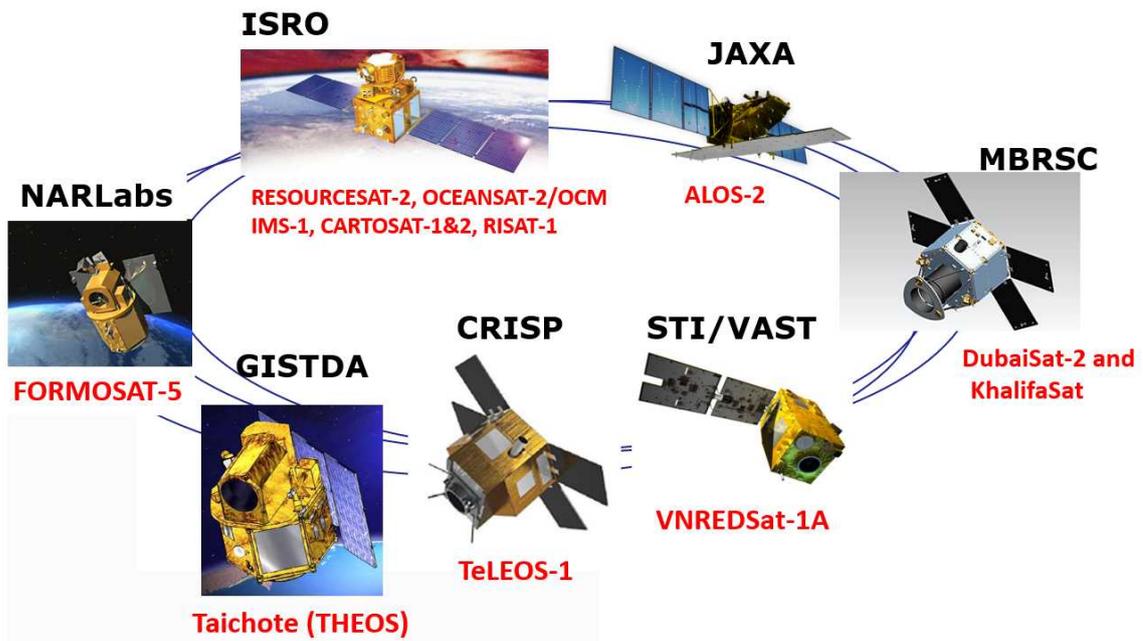


図 34 センチネル・アジアで活動する宇宙機関と各地球観測衛星

本研究においては、センチネル・アジアの災害対応活動等を踏まえ、プロモーション活動及び衛星データを検証するターゲットを選定した。2021年1月19日に開催されたセンチネル・アジアのステアリングコミッティ（オンライン）において、アジア防災センターから、当該事業に関する説明と協力参加機関の依頼について呼びかけを行った。その後、台湾の NARLabs とインドの ISRO と個別に観測に関する協議を行い、次年度以降に対応されることになった。

なお、2019年において対応されたセンチネル・アジアの緊急観測では、合計 25 件の災害に対して衛星画像など各種データの提供が行われた。今回、選定した台湾の NARLabs とインドの ISRO については、図 35 に示す通り、NARLabs が 25 件中 11 件、ISRO が 25 件中 19 件と、センチネル・アジアの活動に対して積極的に協力している機関である。

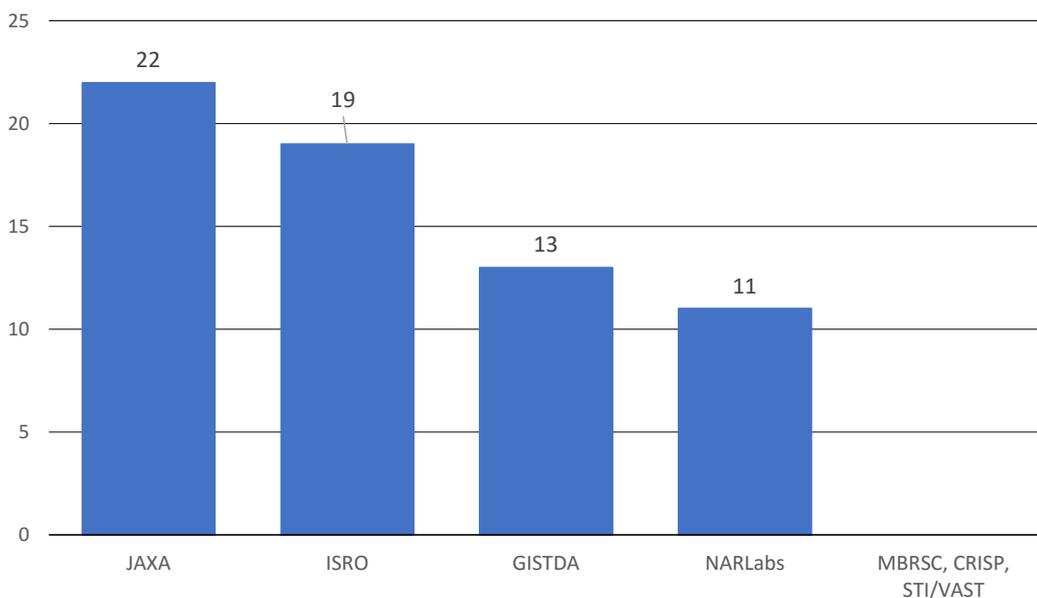


図 35 センチネル・アジア緊急観測活動に対する各宇宙機関の対応数（2019年）

3.4.2 海外の災害対応に関するターゲットの選定

近年、小型衛星の低価格化により、アジアの国々も小型衛星が保有できるようになってきた。しかし、小型衛星の場合は、センサ固有のメカニカルな校正を精度良く実施することは難しい。そこで、衛星画像のキャリブレーション技術の開発が重要になる。センチネル・アジアの活動においても、各国の衛星データがキャリブレーションにより補完的に利用できるようになれば、災害時の衛星データ解析の自動化や検出精度の向上が可能となる。

センチネル・アジアの災害対応活動を踏まえ、2つの海外ターゲットを選定した。センチネル・アジアの災害対応において、その半数以上が洪水災害である。一つ目のターゲットは、インドのアッサム地域にある洪水を対象としたテストサイトである。この地域には、教師データとなる467のタイル画像と、68の検証用の評価タイル画像が公開されている。図36(右)に、アッサムにおけるターゲットの場所を示す。位置は、緯度：26.189754°、経度：92.889395.961239°、高度：70mである。

二つ目のターゲットは、米国テキサス州のミラーサイトである。テキサス州では、Labsphere社がテキサス大学と連携して様々なキャリブレーションの実用化および事業化を検討している。対象地の位置座標は、緯度：32.663175°、経度：-97.961239°、高度：267mである。一般的な、衛星データ校正では、大気の影響を少なくするために、米国などの高地・乾燥地帯で行われるが、本研究による成果を評価する目的で、海外のターゲットをテキサス州とした。図36(左)に、ターゲットの設置状況を示す。上から、線状のターゲット、真ん中が統一的に配置されたターゲット、下がBRDF(双方向反射率分布関数)ターゲットである。Labsphere社とは定期的な協議を重ね、研究および検証目的で、テキサス州のターゲットを利用できるような協力を得た。

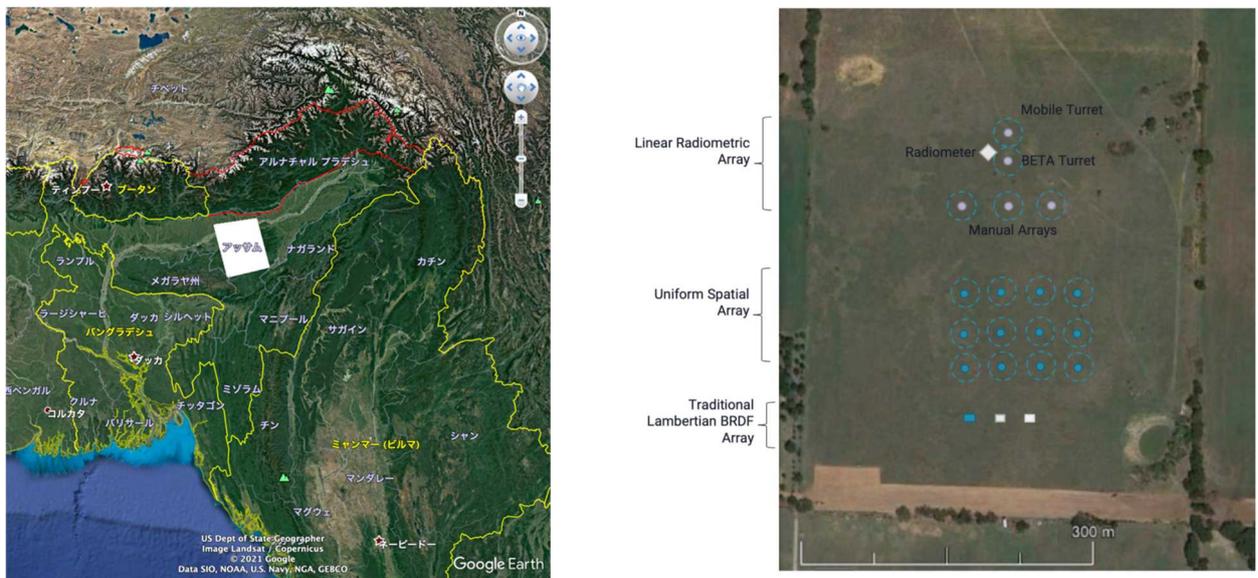


図36 海外のターゲットサイト（左：アッサム（インド）、右：テキサス（米国））

表 9 センチネルアジアで利用されている光学衛星の仕様

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|--|---|-----------------------------|---|---|--|--|---|--|----------------|---|
| 名称 | KhalifaSat | WREDSat-1A | TeLEOS-1 | THEOS | RESOURCESAT-1 / 2 / 2A | CartoSat-2 | ALOS-1 | | | | |
| 国 | UAEアラブ 首長国連邦 | ベトナム | シンガポール | タイ | インド | インド | 日本 | | | | |
| 運用状態 | 運用中 | 運用中 | 運用中 | 運用中 | 運用中 | 運用中 | 終了 (2011/4) *現在はアーカイブデータとしてデータ提供されている | | | | |
| 運用機関 | EIAST | STI-VAST | ST Electronics (STEE) | GISDA | ISRO | ISRO | JAXA | | | | |
| 搭載光学 センサー | KHOS (KhalifaSat Camera System) | NAOMI (New AstroSat Optical Modular Instrument) | TeLEOS-1 Imager | Panchromatic Camera (PAN Camera) | Multispec tral Camera (MS Camera) | LISS-4 (Linear Imaging Self- Scanning Sensor-4) | LISS-3 (Linear Imaging Self- Scanning Sensor-3) | AWiFS (Advanced Wide Field Sensor) | PAN Camera (Panchromatic Camera) | AVNIR-2 | PRISM |
| 観測幅 | 12 km | 17.5 km (ク ロストラック 方向 ±30° の範 囲で) | 12 km | 22 km (直 下) | 90 km (直 下) | 23.9 km (MS mode)* 70 km (PAN mode) | 141 km | 740 km | 9.6 km | 70 km (最 大) | 70 km (直下 視のみ)・35 km (3方向同 時視) |
| 解像度 (分解能) | 0.75 m (PA), 2.98 m (XS) | 2.5 m (PA) 10 m (MS) いずれも直 下観測時 | 1 m (直下) | 2 m | 15 m | 5.8 m | 23.5 m | 56 m (直下) 70 m (スラ ス端) | 0.8 m (直下) | 10m (最高) | 2.5 m |

*RESOURCESAT-2はMSモードも観測幅 70 km

(引用：一般財団法人リモート・センシング技術センターホームページ、<https://www.restec.or.jp/index.html>)

4 図表

| | | |
|------|--|----|
| 表 1 | 衛星データのマルチスペクトル波長の分解能 | 8 |
| 表 2 | ミラーの素材と特徴 | 11 |
| 表 3 | 放射輝度値（上：Landsat-8, 中：Sentinel-2, 下：GRUS-1） | 12 |
| 表 4 | スペクトロメータによる反射量データ（図 17）リスト | 17 |
| 表 5 | スペクトロメータによる反射量データ（図 19）リスト | 18 |
| 表 6 | GRUS-1A 主要緒言 | 21 |
| 表 7 | GRUS-1A の軌道緒言 | 21 |
| 表 8 | GRUS-1A による山口県宇部市周辺の観測日 | 23 |
| 表 9 | センチネルアジアで利用されている光学衛星の仕様 | 32 |
| | | |
| 図 1 | 衛星データの見え方の違い | 8 |
| 図 2 | 工学部グラウンドにおける校正サイトの設置テスト | 8 |
| 図 3 | きらら公園における校正サイトの設置テスト | 9 |
| 図 4 | 評価パターンの概念 | 9 |
| 図 5 | ミラーアレイの概念 | 10 |
| 図 6 | ミラーアレイのデザイン案 | 10 |
| 図 7 | ミラーのサイズの関係 | 11 |
| 図 8 | ミラーアレイの設置箇所（ときわ公園） | 13 |
| 図 9 | ミラーアレイの設置工事（ときわ公園） | 13 |
| 図 10 | ミラーアレイの向き変更 | 13 |
| 図 11 | ミラーアレイの設置式（右：岡学長、左：篠崎市長） | 14 |
| 図 12 | ミラーアレイに関する報道 | 14 |
| 図 13 | スペクトロメータによる計測 | 15 |
| 図 14 | 太陽光フォトメータによる計測 | 15 |
| 図 15 | 防災科学技術研究所の敷地図（左）と大型降雨実験施設（右） | 16 |
| 図 16 | 防災科学技術研究所の周辺 | 16 |
| 図 17 | ときわ公園に置ける地上データ観測 | 17 |
| 図 18 | きらら公園の大芝生広場（左と中央）と人工ターゲット設置例（右） | 18 |
| 図 19 | 秋吉台の Sentinel-2 画像 | 18 |
| 図 20 | 山口宇部空港公園 | 19 |
| 図 21 | PlanetScope 衛星による観測実験 | 19 |
| 図 22 | GRUS-1A 衛星の外観 | 20 |
| 図 23 | GRUS-1A の観測スペクトルバンド | 21 |
| 図 24 | GRUS-1A の画像 | 22 |
| 図 25 | ミラーアレイの方向の計算 | 22 |
| 図 26 | 代替校正の概念図 | 24 |
| 図 27 | 新規キャリブレーションの概要 | 25 |
| 図 28 | 新規キャリブレーションの流れ | 26 |
| 図 29 | ミラーアレイの DN 値 | 26 |
| 図 30 | 画像のボケの低減のシミュレーション | 27 |

| | | |
|------|---|----|
| 図 31 | GRUS-1 衛星画像と PlanetScope 衛星画像のスペクトルバンドの比較 | 28 |
| 図 32 | 各バンドにおける反射率の比較 | 29 |
| 図 33 | NDVI 画像の比較（右：GRUS-1、左：PlanetScope） | 29 |
| 図 34 | 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 | 30 |
| 図 35 | センチネル・アジア緊急観測活動に対する各宇宙機関の対応数（2019 年） | 30 |
| 図 36 | 海外のターゲットサイト（左：アッサム（インド）、右：テキサス（米国）） | 31 |

5 学会等発表実績（令和 2 年度）

なし。