

「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」の成果の概要について

実施体制	主管実施機関	山口大学	実施期間	令和2年度～令和4年度 (3年間)	実施規模	予算総額 (契約額) 33百万円		
	研究代表者名	教授 長井正彦				1年目	2年目	3年目
	共同参画機関	(株)アクセルスペース、防災科学技術研究所、アジア防災センター				11百万円	11百万円	11百万円

背景・全体目標

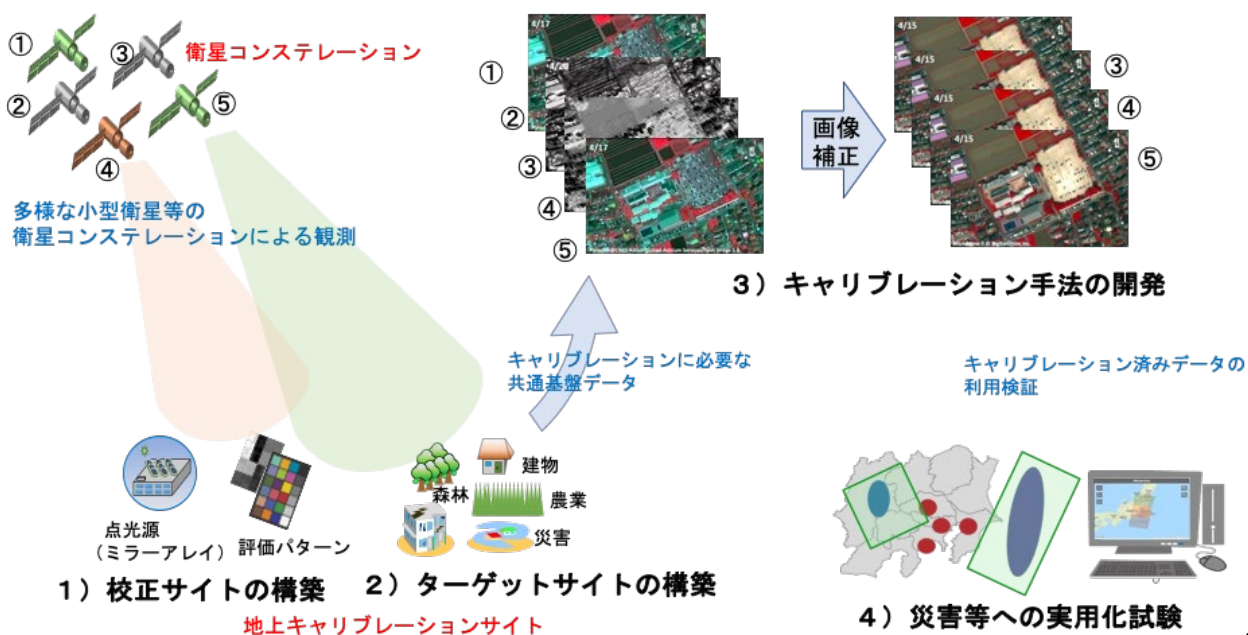
国内国内外で様々な衛星画像が利用できる環境が整いつつある。衛星画像を用いたアプリケーション開発において、同等の特徴を有する衛星コンステレーションにより観測された様々な衛星画像を、時系列に補完し合いながら有効に活用することが不可欠になってくる。衛星コンステレーションを利用するには、センサー毎の特徴、衛星毎に違うバンドの波長域、大気の状態による見え方の違いなどを理解して教師データを作成し、様々な機械学習の手法を検討する必要がある。本研究課題は、衛星コンステレーション時代におけるAI画像解析のためのキャリブレーション手法の開発を行う。軌道上の衛星の特性を評価し、性能評価やチューニングを実施するための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。

全体概要・主な成果

新規性が高く革新的なキャリブレーション手法の開発主たる目的とし、大きな二つの成果が得られた。

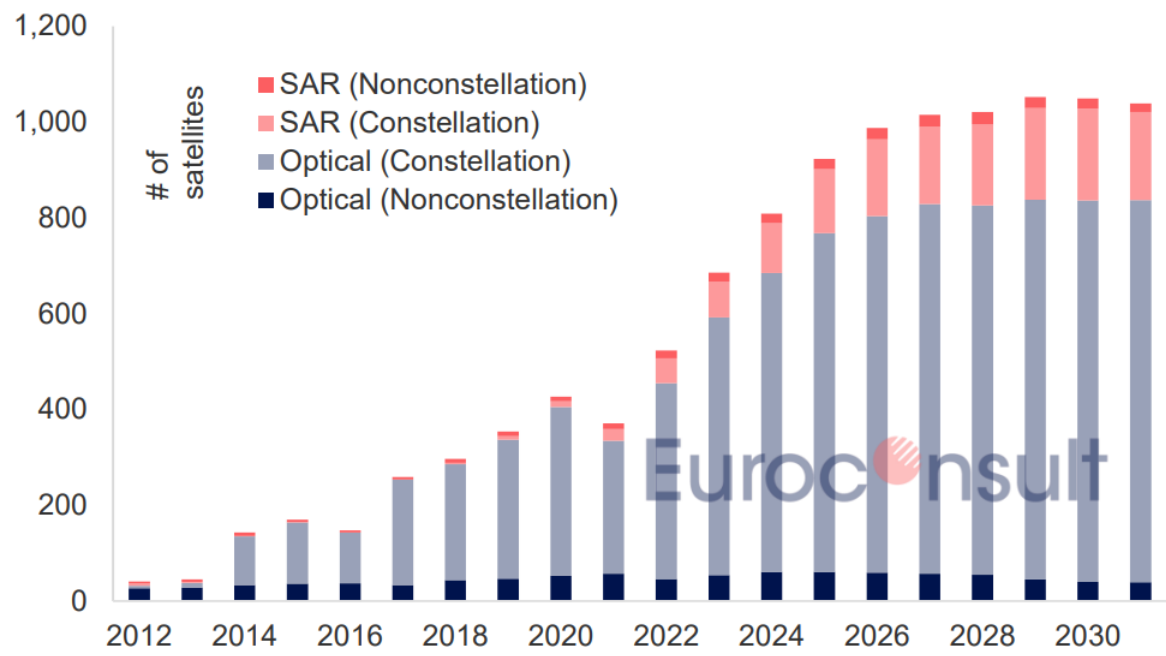
一つ目は、ミラーアレイによる校正サイトの構築である。軌道上衛星の特性 (PSF 形状) の変化を評価するために、凸面ミラーをアレイ状に並べたミラーアレイを常設した。日本初の画像校正設備となり、国内外で非常に高い評価を得た。

二つ目は、IPSFによるキャリブレーション手法の開発である。このアルゴリズムは、PSFとコンボリューションした結果の画像が、ポアソン分布と仮定して、ぼやけた画像のインスタンスであることの尤度を最大化する手法で、衛星画像のぼかしを除去することができた。図9のそれぞれの左がオリジナル画像、右がキャリブレーション済み画像である。この手法は、PSFはわかっても、画像に存在する加法的ノイズについて分からない場合に有効であり、衛星画像の品質を飛躍的に向上させることができた。



研究の背景

All satellite masses – still excluding non-dual-use military satellites



*Includes satellites from private enterprises and governments whose data are made available on a commercial basis. Excludes noncommercial satellites. HSI and GHG are part of the optical category. Meteocean, ELINT/RF and other Unknown satellites are excluded. Satellites in operation are based on reported/expected life spans.



GRUS1A

Spectral bands	Panchromatic	450-900 nm
	Blue	450-505 nm
	Green	515-585 nm
	Red	620-685 nm
	Red Edge	705-745 nm
	Near Infrared	770-900 nm
	Swath	57+ Km
Ground resolution	Panchromatic	2.5 m
	Multispectral	5.0 m



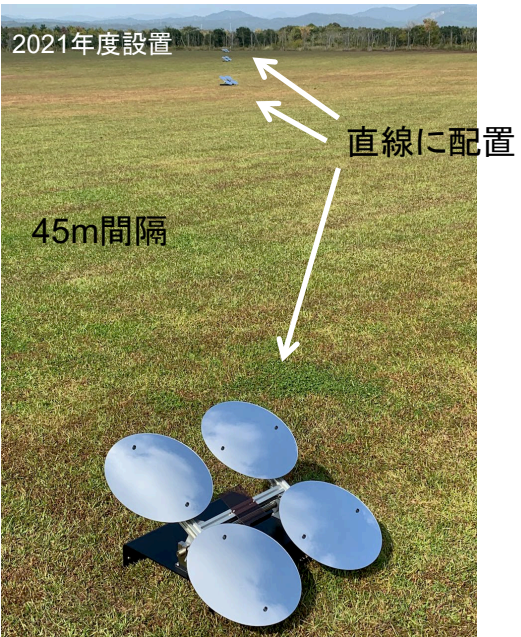
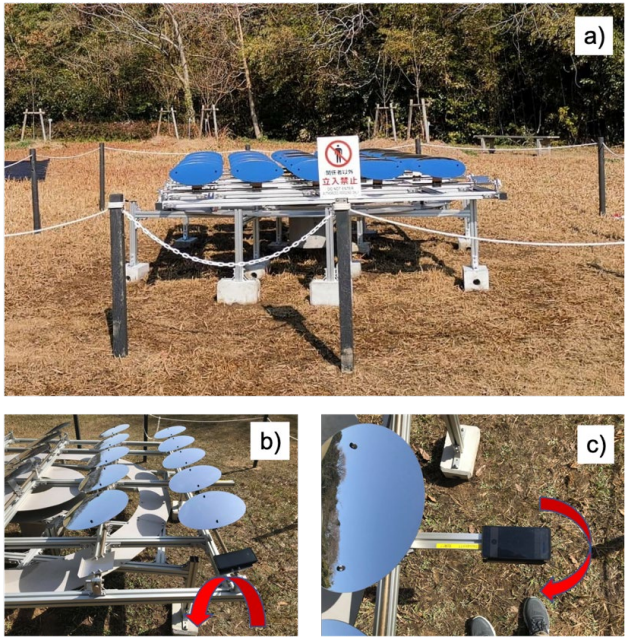
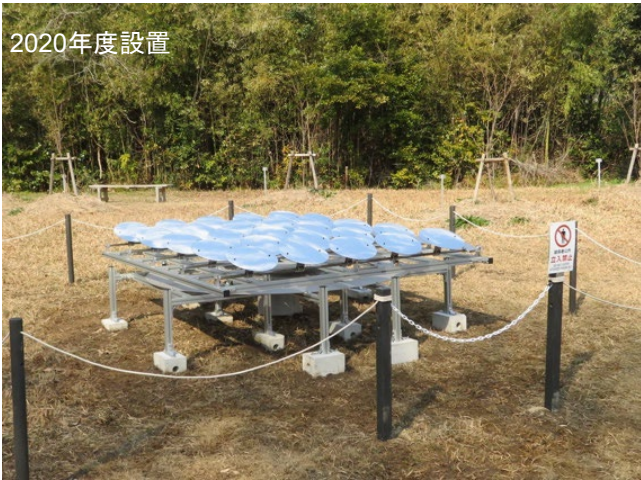
PlanetScope

Instrument	PS2	PSB.SD
Spectral Bands	Blue: 455 - 515 nm Green: 500 - 590 nm Red: 590 - 670 nm NIR: 780 - 860 nm	Blue: 465 - 515 nm Green: 513 - 549 nm Red: 650 - 680 nm Red-Edge: 697 - 713 nm NIR: 845 - 885 nm
Resolution	3.125 m	

①評価パターンおよび点光源等による校正サイトを設置し校正データの構築

実施内容・成果

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素材選定から設計・製造し、地上のターゲットとして設置することで、軌道上衛星の特性（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。山口県宇部市のときわ公園に設置したミラーアレイ（5×5配列）を常設した。また、継続的に設備を維持する外部資金の確保にも成功し、これにより継続性を確保することができた。



開発したミラーアレイ（日本初の常設）

- ・アクリル製（R:450mm, 直径:3000mm）
- ・5×5の配列で配置
- ・反射率を計算し、Landsat衛星まで観測可
- ・衛星軌道に合わせてミラーの姿勢変更可

評価パターン

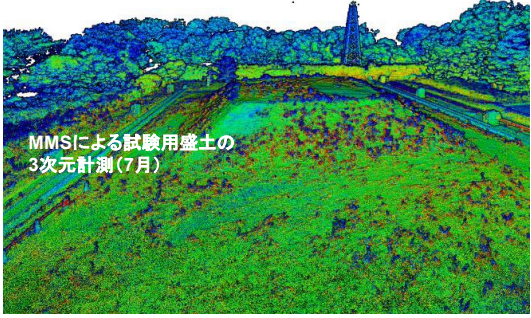
- ・2×2の配列でミラーアレイ作成
- ・設置パターンを検討

②地上のターゲットサイトによる特徴的な地物等の反射特性や災害の特徴データの構築

実施内容・成果

本事業では、5箇所の地上ターゲットサイトを選定し、継続的に観測を行っている。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。

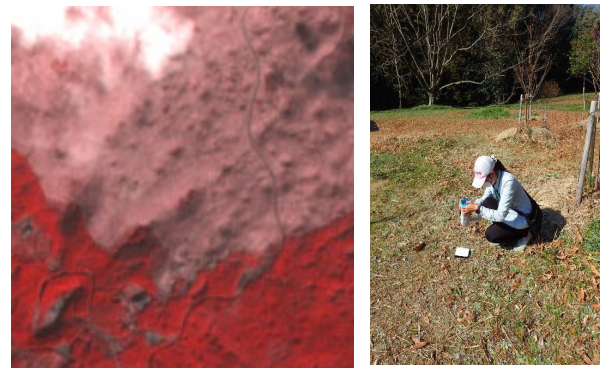
1) 防災科学技術研究所



2) 山口県宇部市 ときわ公園



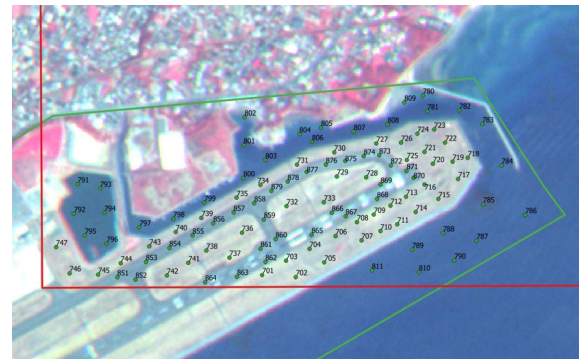
4) 山口県美祢市 秋吉台



3) 山口県山口市 山口きらら記念公園



5) 山口宇部空港ふれあい公園



②地上のターゲットサイトによる特徴的な地物等の反射特性や災害の特徴データの構築

実施内容・成果

本事業で蓄積した地上での観測データは、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公開できるように整備した。データベースは、山口大学応用衛星リモートセンシング研究センターで管理し、継続的な観測も実施しており関係機関に提供していく。

年	場所	日	観測項目	機材等
2021	秋吉台	0119	GPS	U-blox
			Spectroradiometer	
		0210	GPS	Ichimill
			Spectroradiometer	
		0317	GPS	Ichimill
			Spectroradiometer	
		0421	GPS	Ichimill
			Spectroradiometer	
		0528	GPS	Ichimill
			Spectroradiometer	
	0617	GPS	Ichimill	
		Spectroradiometer		
	きらら公園	0729	GPS	Ichimill
			Spectroradiometer	
		0831	GPS	Ichimill
			Spectroradiometer	
		0924	GPS	Ichimill
			Spectroradiometer	
		1025	GPS	Ichimill
			Spectroradiometer	
1112		GPS	Ichimill	
		Spectroradiometer		
きらら公園	0225	Spectroradiometer		
		Spectroradiometer		
0526	GPS	Ichimill		
	Spectroradiometer			
0624	GPS	Ichimill		
	Spectroradiometer			
0804	Modtran	S2		
	GPS	Ichimill		
	GRUS1A			
	PS2			
	PSBSD			
0805	Spectroradiometer			
	Sunphotometer			
1003	GPS	Ichimill		
	Spectroradiometer			
防災科研	1109	GPS	Ichimill	
		Spectroradiometer		

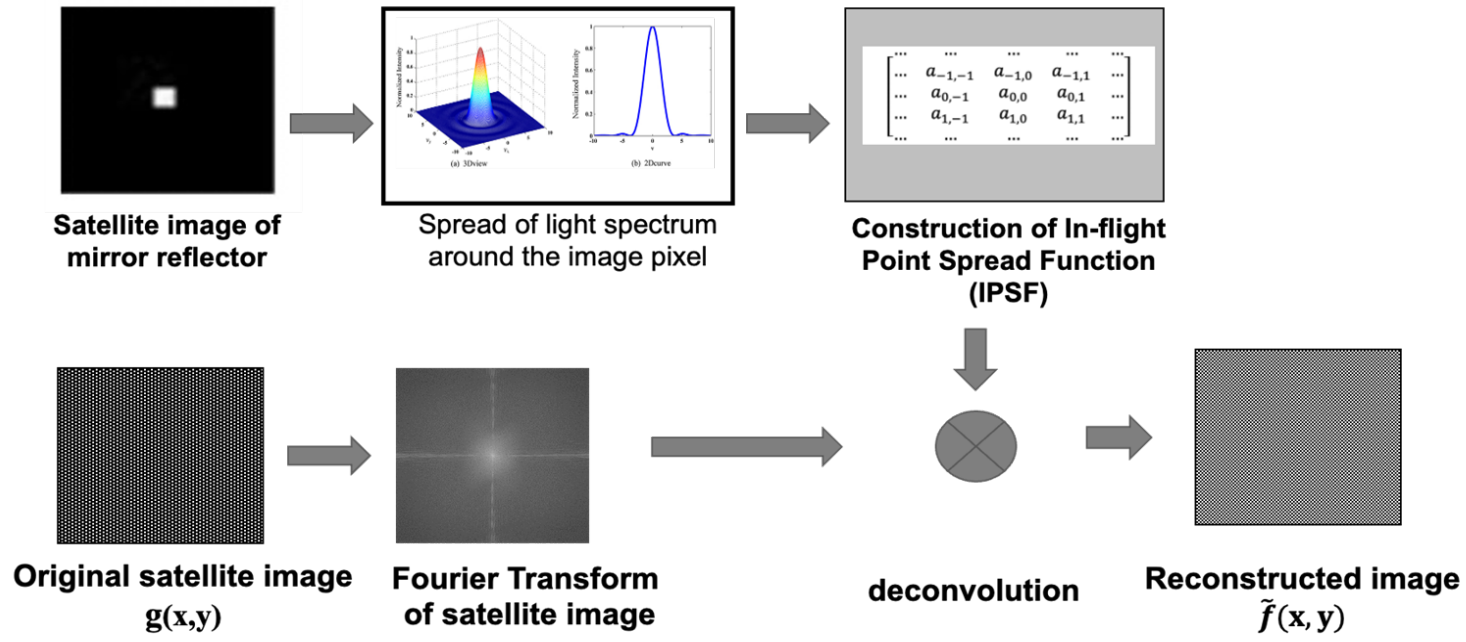
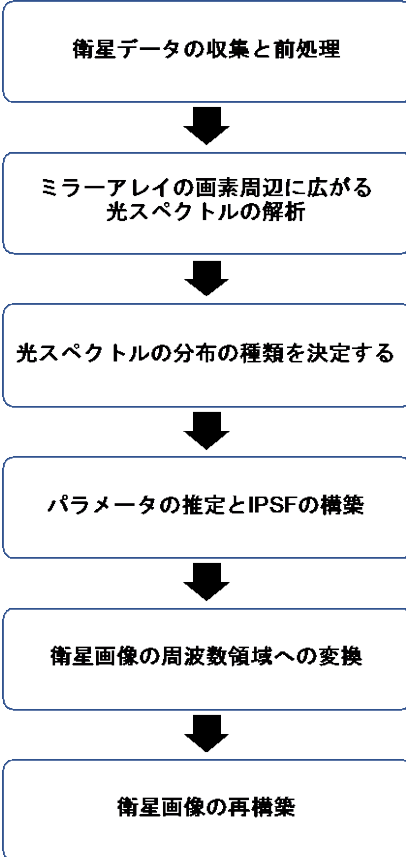
年	場所	日	観測項目	機材等
2022	宇部空港公園 (宇部市周辺)	0316	Sunphotometer	
			Sunphotometer	
		0325	GPS	Ichimill
			Sunphotometer	
		0404	GPS	Ichimill
	Sunphotometer		Model521 Model540	
	1106	Sunphotometer	Model521 Model540	
		Sunphotometer	Model521 Model540	
	きらら公園	0308	Spectroradiometer	
			Sunphotometer	Model521 Model540
		0408	GPS	Ichimill
			Spectroradiometer	
		0408	Sunphotometer	Model521 Model540
			Sunphotometer	Model521 Model540
		0602	GPS	Ichimill
Spectroradiometer				
1026		Sunphotometer	Model521 Model540	
		Sunphotometer	Model521 Model540	
1109	GPS	Ichimill		
	Spectroradiometer			
2023	宇部空港公園	0110	Sunphotometer	Model210 Model540
			Sunphotometer	Model210 Model540
ときわ公園	0208	GPS	Ichimill	
		Spectroradiometer		
0208	Sunphotometer	Model210 Model521		
	Sunphotometer	Model210 Model521		



③校正サイトおよびターゲットサイトによる標準的なキャリブレーション手法の開発

実施内容・成果

ミラーアレイを用いたキャリブレーション技術では、キャリブレーションサイトの地表面の環境に依存せず、衛星画像画素の点光源を用いる。ミラーアレイは地上の鏡面反射鏡として、画像画素の周囲に広がる光スペクトルにより、衛星画像から飛行中点像分布関数（IPSF: In-flight Point Spread Function）を生成することができた。IPSFは、衛星画像の画素から構成されるPSF（点像分布関数）である。本事業におけるキャリブレーション手法をIPSFと命名した。IPSFは、画像ピクセルの周囲に広がる光のスペクトルを基に構築することができる。計算機による画像処理では、ブレは通常、画像行列とIPSFの畳み込みによってモデル化される。衛星画像のFFT（Fast Fourier Transform）とIPSFのデコンボリューションによるデブラーリング処理で画像校正を行う手法を開発した。



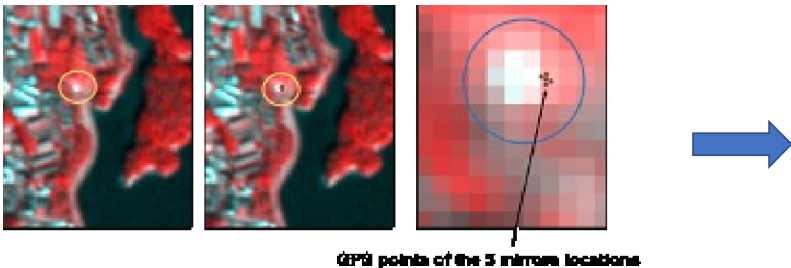
IPSFによるキャリブレーション手法の概要

Dorj Ichikawa, Masahiko Nagai, Nopphawan Tamkuan, Vaibhav Katiyar, Tsuyoshi Eguchi, Yumiko Nagai, Development and Utilization of a Mirror Array Target for the Calibration and Harmonization of Micro-Satellite Imagery, Remote Sensing 14(22) 5717-5717 2022.

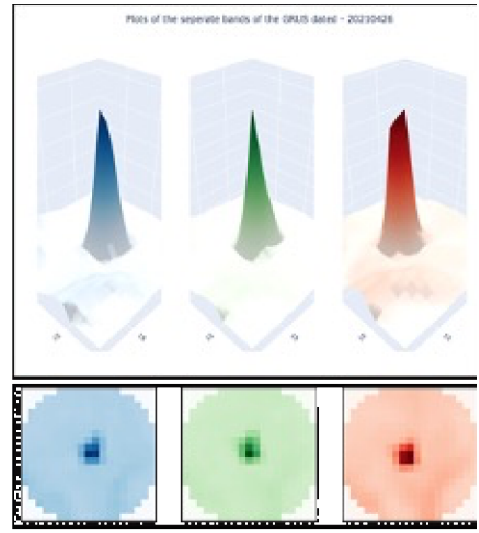
③校正サイトおよびターゲットサイトによる標準的なキャリブレーション手法の開発

実施内容・成果

ミラーアレイは、サブピクセルのバンドレジストレーション精度を精密に推定し、カラー合成画像の画質を向上させることができる。また、ミラーから反射される光エネルギーの分布分布の広がりから、IPSFを構築することができる。

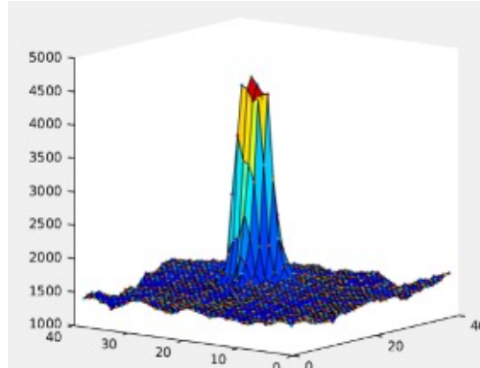
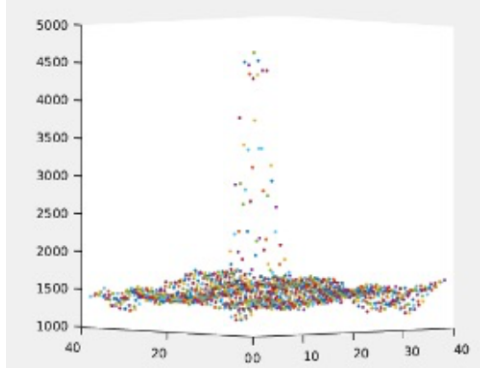


GPI points of the 5 mirror locations



GRUS1-A 2021-04-26

ミラーアレイの画素周辺に広がる光スペクトルの解析



IPSFの構築

IPSF

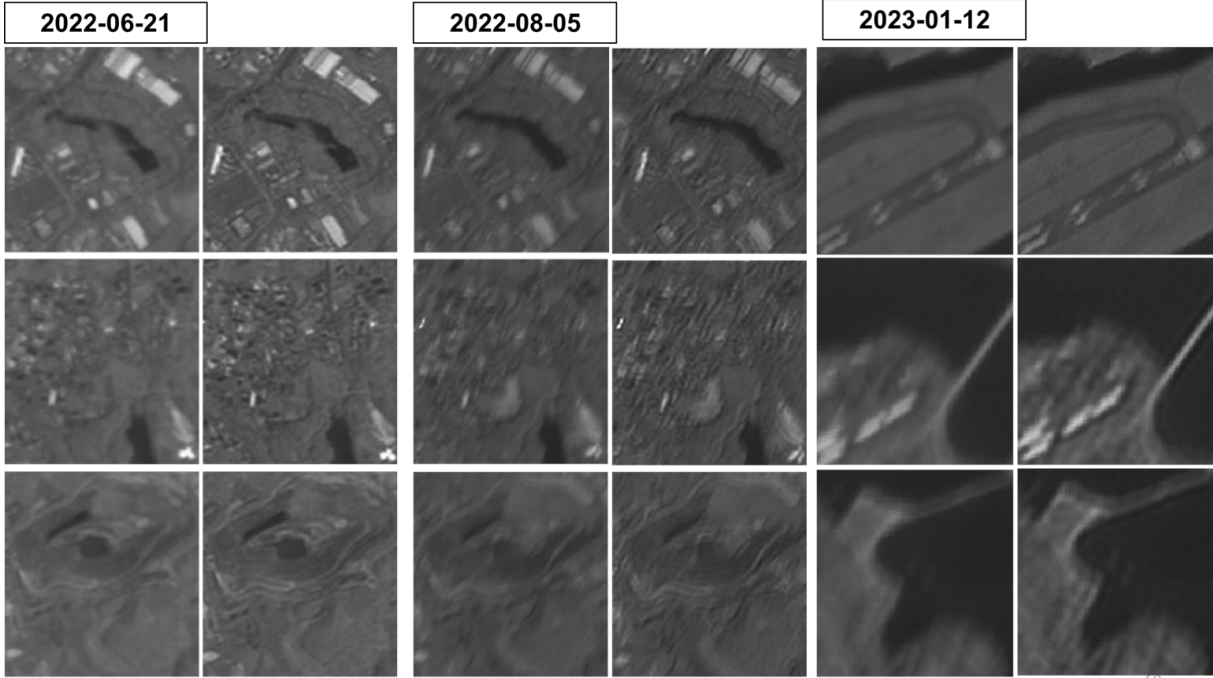
0.0394	0.0399	0.0400	0.0399	0.0394
0.0399	0.0403	0.404	0.0403	0.0399
0.0400	0.0404	0.0406	0.0404	0.0400
0.0399	0.0403	0.0404	0.0403	0.0399
0.0394	0.0399	0.0400	0.0399	0.0394

③校正サイトおよびターゲットサイトによる標準的なキャリブレーション手法の開発

実施内容・成果

本研究では、IPSFによるキャリブレーションで衛星画像のぼかしを除去することができた。それぞれ3時期に観測された画像に対し、それぞれの左がオリジナル画像、右がキャリブレーション済み画像である。このアルゴリズムは、PSFとコンボリューションした結果の画像が、ポアソン分布と仮定して、ぼやけた画像のインスタンスであることの尤度を最大化する。この手法は、PSFはわかっても、画像に存在する加法性ノイズについて分からない場合に有効である。

Date	GRUS1 Panchromatic image	Fourier Transform	Reconstructed image
2021/4/26			
2021/6/21			
2021/8/5			
2023/1/12			



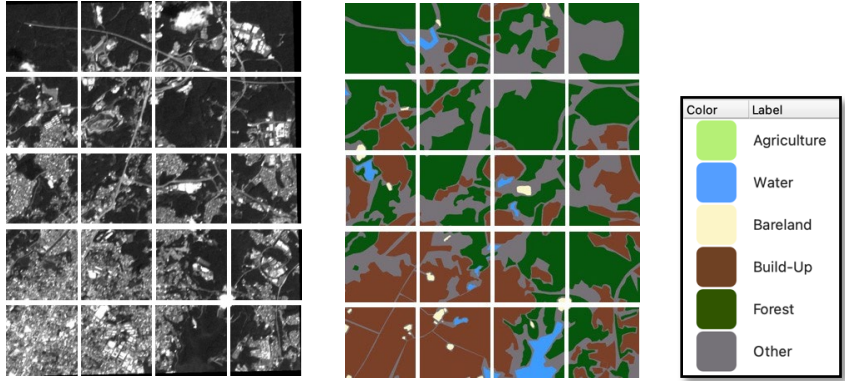
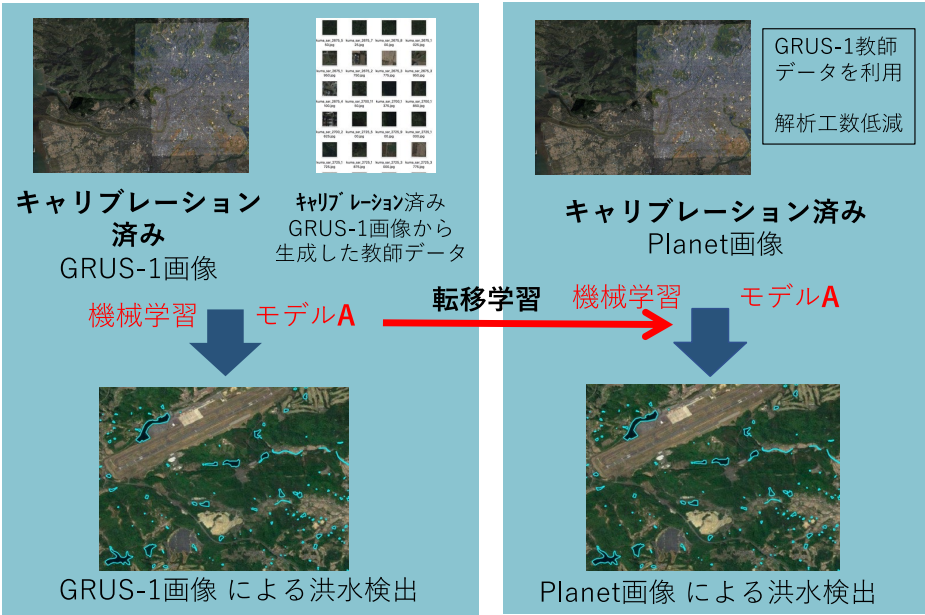
IPSFによるキャリブレーションの結果

反復処理アルゴリズムによるLucy-Richardson
アルゴリズムの実現

④ キャリブレーション済み衛星データによる災害等への実用化試験

実施内容・成果

キャリブレーションによるAI解析の効果を評価するために転移学習によるAI解析を実施した。本事業では、U-NETを用いた転移学習を実装した。転移学習は、ある一連のタスクで学んだ経験・知識を、新しい関連するタスクでより速く学習し、より良いパフォーマンスを発揮するために使用する。より少ないエポック数で、解析でき、精度湖上もみられた。



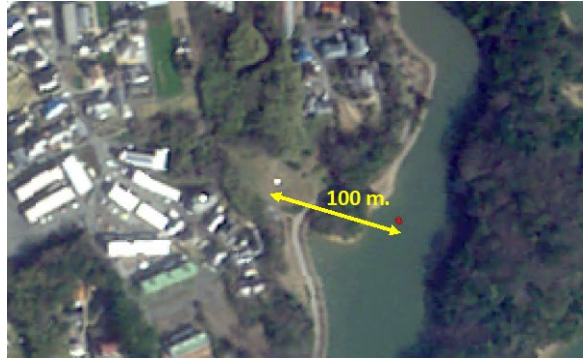
教師データの例

		Accuracy				
Transfer (from-> to)		Agriculture	Forest	Water	Bare-land	Build-Up
Original	GRUS -> PS2	0.71	0.82	0.79	0.63	0.72
	GRUS -> PSB.SD	0.73	0.82	0.83	0.65	0.71
Calibrated	GRUS -> PS2	0.75	0.89	0.84	0.70	0.71
	GRUS -> PSB.SD	0.79	0.88	0.88	0.69	0.73

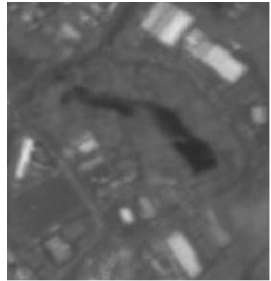
④ キャリブレーション済み衛星データによる災害等への実用化試験

実施内容・成果

アジア太平洋地域宇宙機関会議（Asia-Pacific Regional Space Agency Forum, APRSAF）やセンチネルアジア年次会合等で、アジアの災害対応活動等を踏まえ、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た。

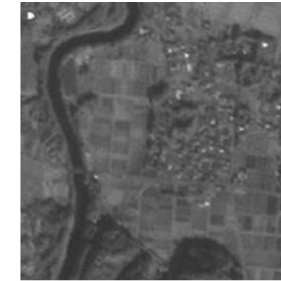


Cartosat-2E (ISRO) によるミラーアレイの観測



オリジナル画像

キャリブレーション済み



オリジナル画像

キャリブレーション済み

PlanetScope画像のキャリブレーション

センチネルアジア等でプロモーション活動

その他の成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他 研究発表	実用化事業	プレスリリー ス・取材対応	展示会展 展
	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 1	国内 : 4 国際 : 5	国内 : 3 国際 : 0	国内 : 2 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0
受賞・表彰リスト						

成果展開の状況・期待される効果

- ▶ 本成果が基盤となり、以下の研究開発に繋がった。
 - ① 2022年度経済安全保障重要技術育成プログラム／高感度小型多波長赤外線センサ技術の開発
「高感度小型多波長赤外線センサ開発およびフィールド実証」
研究費総額：22,000千円
内容：本事業で開発したミラーアレイによるIPSFキャリブレーション手法を、多波長センターのキャリブレーションに転用する研究開発
 - ② 2023年 SIP第3期「スマート防災ネットワークの構築」
「災害情報の広域かつ瞬時把握・共有」
研究費総額：95,000千円
内容：ミラーアレイによるIPSFキャリブレーション手法を災害対応における社会実装を行う。次から次へと打ち上げられる光学衛星に対し、即時解析を可能とするシステム構築として、キャリブレーションによるAI解析の高度化と教師データの相互利用する技術開発。
- ▶ ミラーアレイの設置に関しては、プレスリリースを行い、新しい研究開発設備ということで大きく報道された。上記の開発プログラムの中で、継続的に研究開発を続けていく。
- ▶ 留学生の受け入れを実施。



「ミラーアレイ」を開発した長井正彦教授（右）と研究スタッフ。2023年3月27日午後0時44分、山口県宇部市のときわ公園、高橋観望所にて撮影。

その他の成果

今後の研究開発計画

文部科学省の令和5年度教育研究組織改革分（組織整備）概算要求の教育研究組織整備に採択された。この事業は、膨大な衛星データを幅広く利用するための教育/研究と社会/産業に実装するための拠点形成を行うものである。具体的には、当該分野の喫緊の課題である科学者・技術者（データサイエンティストやデータエンジニア）の養成（世界水準のSDGs専門人材の育成）に取り組むとともに、深層学習等のAI技術の適用による解析手法の自動化やその迅速化、多種多様な衛星データを利用するための衛星データ校正技術、災害対応や環境監視、営農支援等の社会実装など、衛星データ解析の新規手法開発を加速させる教育研究拠点を形成する。

本事業で開発した校正サイトは、上記事業により、組織的、資金的に人的体制を整え、継続していく計画である。

組織整備により強化される「衛星データ解析部門」「災害レジリエンス部門」の人材・機能を活用し、本学の卓越した校正・解析技術により、**経済・社会・環境等の様々な観点から衛星データを評価し、災害対応等のサービスを創出するための技術開発を目指す**

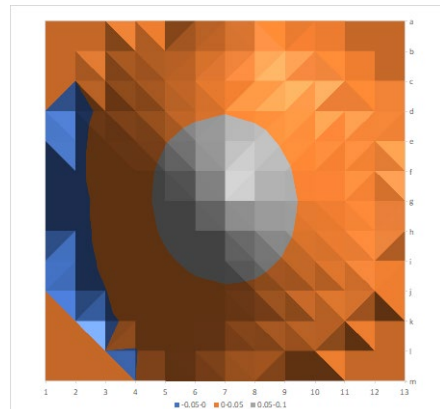
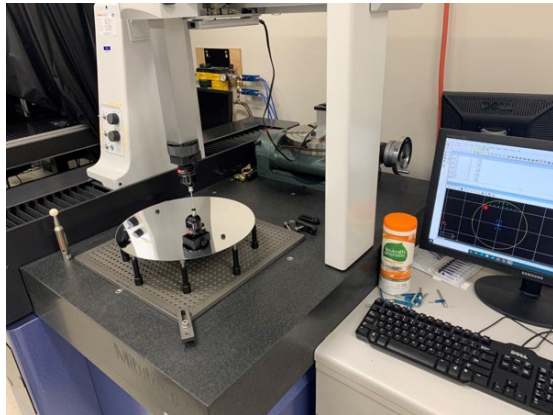


(参考) ①評価パターンおよび点光源等による校正サイトを設置し校正データの構築

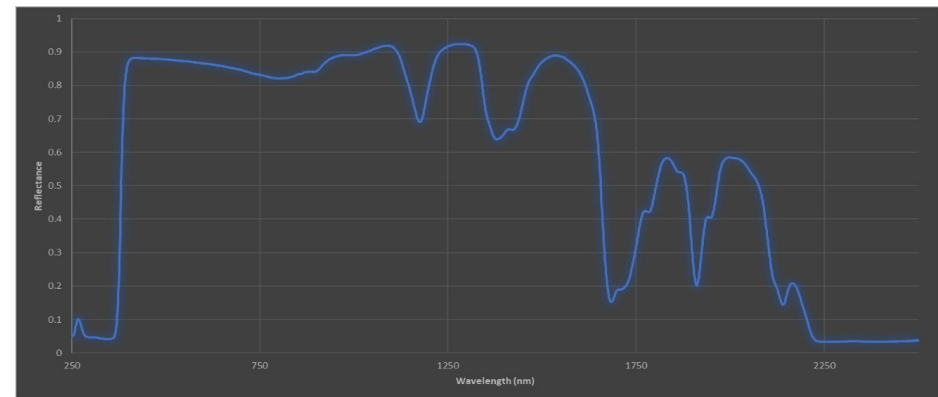
実施内容・成果

本事業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。ミラーの性能や劣化等を確認するために、ミラーの反射率測定を行った。初年度に設置したミラーが、3年度の事業終盤においても、同等の反射率であることが確認できた。

ミラーの形状試験



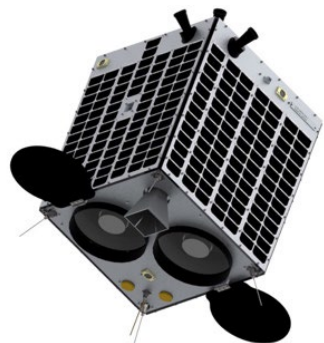
ミラーの反射測定



(参考) ③校正サイトおよびターゲットサイトによる標準的なキャリブレーション手法の開発

実施内容・成果

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た。GRUS-1A, 1B, 1C, 1D, 1Eの5機の衛星は、同一の緒元であるが、画像としての見え方が違う。月に3~4回程度である画像取得を行った。



GRUS-1A衛星

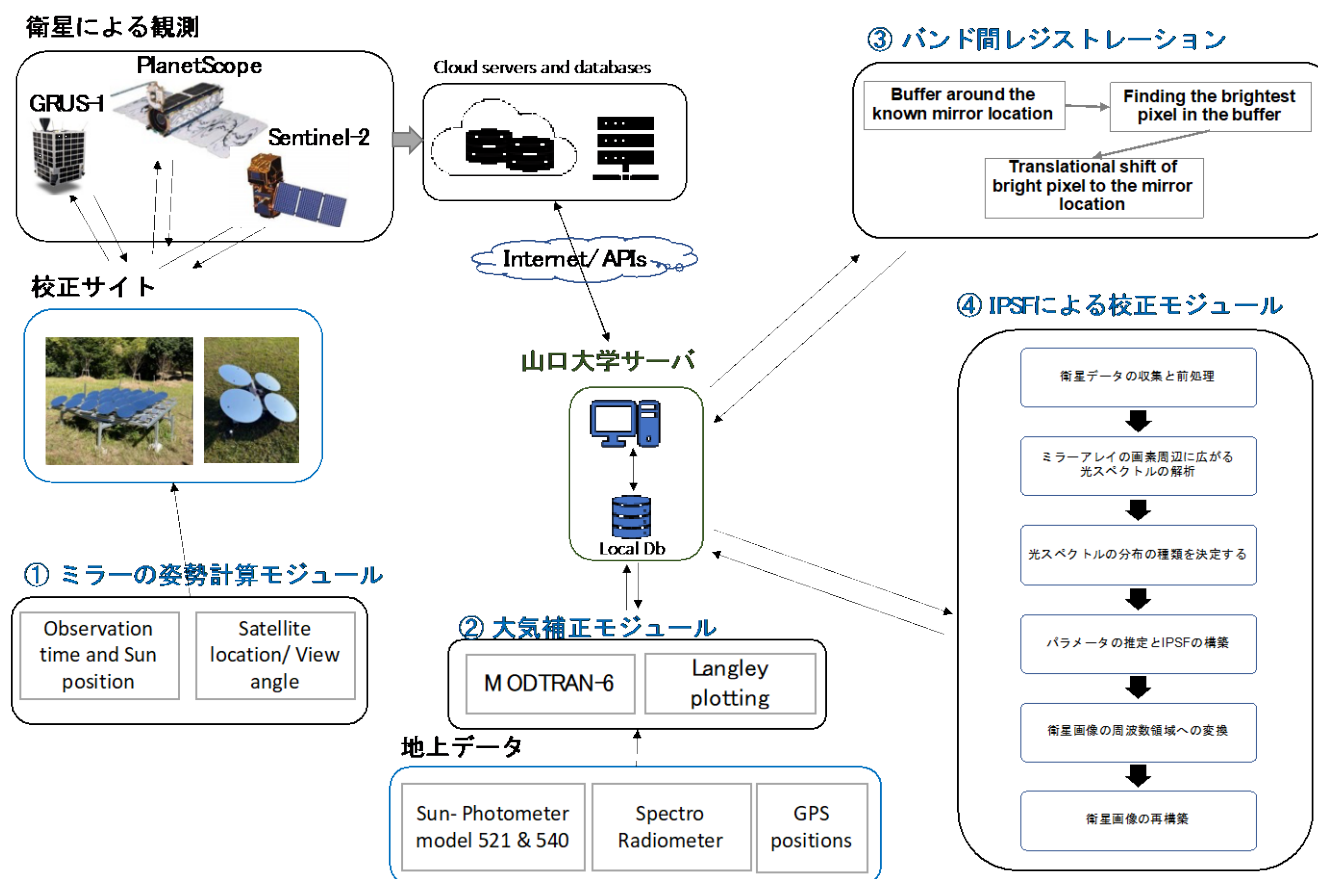
項目	内容		
衛星数	5機 (2021年8月現在)		
設計寿命	5年 以上		
衛星高度	585 km, 太陽同期準回帰軌道		
赤道通過時刻	10:40-11:00 (地方時)		
スペクトルバンド	バンドID	名称	スペクトルバンド(nm)
	バンド0	バンクロマティック	450-900 nm
	バンド1	青	450-505 nm
	バンド2	緑	515-585 nm
	バンド3	赤	620-685 nm
	バンド4	レッドエッジ	705-745 nm
バンド5	近赤外	770-900 nm	
地上分解能(直下撮影時)	バンクロマティック: 2.5 m 以下 マルチスペクトル: 5.0 m 以下		
撮影幅	55km 以上		
最長撮影距離	1,000 km		
センサービット深度	12ビット		

撮影月	撮影日/ 撮影サンプル
22年4月	4, 8, 10, 17 4月4日
22年5月	4, 10, 17 5月4日
22年6月	4, 8, 12, 30 6月4日
22年7月	22, 24, 27 7月24日
22年8月	6, 19, 20, 25, 27 8月25日
22年9月	9, 16, 22 9月16日
22年10月	2, 4, 10, 12, 18, 26, 29 10月2日
22年11月	6, 9, 12, 16, 25, 28 11月6日
22年12月	3, 6, 9, 14, 20, 28 12月6日

(参考) ③校正サイトおよびターゲットサイトによる標準的なキャリブレーション手法の開発

実施内容・成果

定期的に校正サイトの撮影を実施し、自動で補正が可能なソフトモジュール等の組み合わせによるシステム化（自動化）を検討した。具体的に運用する場合には、定期的（年に2回程度）に校正サイトの撮影を実施し、キャリブレーション手法の処理プロセスを実施する。本事業において、開発した成果のモジュール化を検討した。モジュール化とは、システムなどを設計する際に、全体を機能的なまとまりであるモジュール（module）の組み合わせとして構成する手法である。



事後評価票

令和5年3月末現在

1. プログラム名 地球観測技術等調査研究委託事業
2. 課題名 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
3. 主管実施機関・研究代表者 国立大学法人山口大学 教授 長井正彦
4. 共同参画機関 株式会社アクセルスペース、国立研究開発法人防災科学技術研究所 一般財団法人アジア防災センター
5. 事業期間 令和2年度～令和4年度
6. 総経費 33百万円
7. 自己点検結果
(1) 課題の達成状況
「所期の目標に対する達成度」 ◆ 所期の目標 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。本研究課題は、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。本研究は次の4テーマを設定して研究開発を進めた。 1) 評価パターンおよび点光源等による <u>校正サイト</u> を設置し校正データの構築 2) 地上の <u>ターゲットサイト</u> による特徴的な地物等の反射特性や災害の特徴データの構築 3) 校正サイトおよびターゲットサイトによる標準的な <u>キャリブレーション手法の開発</u> 4) キャリブレーション済み衛星データによる <u>災害等への実用化試験</u>

◆ 達成度

1) 校正サイトの構築

<目標値>

ミラーアレイおよび評価パターンによる校正サイトをそれぞれ設置し校正に必要な観測データを構築する。

<評価指標>

- ① ミラーアレイを設計・作成し1箇所常設する。
- ② 評価パターンを設計・作成し1箇所常設する。
- ③ 継続性を確保し、実用化の目処を立てる。

<達成度>

- ① 本事業では、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素材選定から設計・製造し、地上のターゲットとして設置することで、軌道上衛星の特性（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。山口県宇部市のときわ公園に設置したミラーアレイ（5×5配列）（図1）を常設した。よって所期の目標を達成することができた。



図1 ミラーアレイ

- ② ミラーを2×2配列で4つ使用するターゲットを6セット作成し、テニスコート2面に評価パターンとして直線上に配置した（図2）。大学の施設のため、設置する箇所をマークしておき、常設と同じ条件になるように、必要に応じて容易にパターンを配置できるよう整備した。よって所期の目標を達成することができた。



図 2

- ③ ミラーの経年劣化を踏まえて精密測量を継続的に実施（図 3）。本事業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。ミラーの性能や劣化等を確認するために、ミラーの反射率測定を行った。また、継続的に設備を維持する外部資金の確保にも成功し、これにより継続性を確保することができた。よって所期の目標を達成することができた。

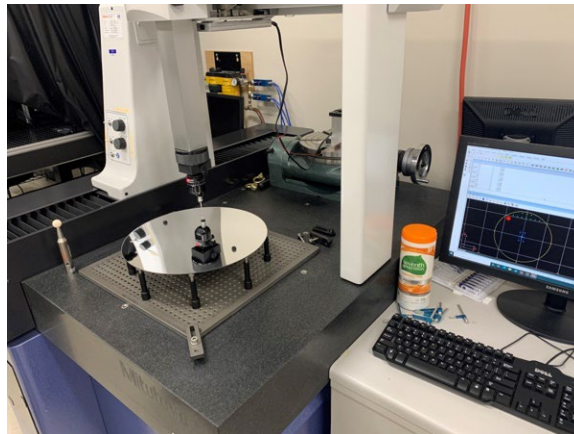


図 3 ミラーの精密測量

2) ターゲットサイトの構築

<目標値>

地上のターゲットサイトによる特徴的な地物等の反射特性や災害の特徴データの構築する。

<評価指標>

- ① 5箇所のターゲットサイトを選定し、地上データを取得する。
- ② 収集したデータについては、登録利用者を対象に公開する。

<達成度>

- ① 本事業では、5箇所の地上ターゲットサイトを選定し、継続的に観測を行っている。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。よって所期の目標を達成することができた。

5箇所の地上ターゲットサイトは以下の通り。

- a) 防災科学技術研究所
- b) 山口県宇部市 ときわ公園
- c) 山口県山口市 きらら公園
- d) 山口県美祢市 秋吉台
- e) 山口県宇部市 山口宇部空港公園

- ② 本事業で蓄積した地上での観測データは、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（図4）して蓄積し公開できるように整備した。データベースは、山口大学応用衛星リモートセンシング研究センターで管理し、関係機関に提供していく。よって所期の目標を達成することができた。

年	場所	日	観測項目	機材等
2021	秋吉台	0119	GPS Spectroradiometer	U-blox
		0210	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		0317	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		0421	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		0528	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		0617	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		0729	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		0831	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		0924	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		1025	GPS Spectroradiometer	Ichimill
	1112	GPS Spectroradiometer	Ichimill	
	さらら公園	0225	Spectroradiometer	
		0526	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		0624	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		0804	Modtran GPS	S2 GRUS1A
		0805	Modtran	PS2 PSBSD
			Spectroradiometer Sunphotometer	
		1003	GPS	Ichimill
防災科研		1109	GPS Spectroradiometer	Ichimill
2022	宇部空港公園 (宇部市周辺)	0316	Sunphotometer	
		0325	GPS	Ichimill
			GPS	Ichimill
		0404	Sunphotometer	Model521 Model540
		1106	Sunphotometer	Model521 Model540
		1112	Sunphotometer	Model521 Model540
	さらら公園		Spectroradiometer	
		0308	Sunphotometer	Model521 Model540
			GPS	Ichimill
		0408	Spectroradiometer Sunphotometer	Model521 Model540
		0602	GPS Spectroradiometer	Ichimill
		1026	Sunphotometer	Model521 Model540
			GPS Spectroradiometer	Ichimill
		1109	Spectroradiometer Sunphotometer	Model210 Model540
防災科研	1221	GPS Spectroradiometer	Ichimill	
宇部空港公園	0110	Spectroradiometer		
		GPS	Ichimill	
2023	ときわ公園	0208	Spectroradiometer	
			Sunphotometer	Model210 Model521

図4 データベース化した地上データリスト

3) キャリブレーション手法の開発

<目標値>

校正サイトおよびターゲットサイトによる標準的なキャリブレーション手法を開発する。

<評価指標>

- ① 校正サイトを利用した PSF によるキャリブレーション手法を開発すること。
- ② 開発した手法をシステム化し、登録利用者を対象に公開する。

<達成度>

- ① ミラーアレイを用いたキャリブレーション技術では、キャリブレーションサイトの地表面の環境に依存せず、衛星画像画素の点光源を用いる。ミラーアレイは地上の鏡面反射鏡として、画像画素の周囲に広がる光スペクトルにより、衛星画像から飛行中点像分布関数（IPSF: In-flight Point Spread Function）を生成することができた。IPSF は、衛星画像の画素から構成される PSF（点像分布関数）である。本事業におけるキャリブレーション手法を IPSF と命名した。IPSF は、画像ピクセルの周囲に広がる光のスペクトルを基に構築することができる。本事業

業における光学衛星画像キャリブレーションの目的は、何らかの原因でぼやけた（劣化した）画像を復元することである。計算機による画像処理では、ブレは通常、画像行列と IPSF の畳み込みによってモデル化される。衛星画像の FFT (Fast Fourier Transform) と IPSF のデコンボリューションによるデブラーリング処理で画像校正を行う手法を開発した。この研究内容は、Impact factor の高い国際ジャーナル「remote sensing (impact factor: 5.0)」に掲載された。よって所期の目標を達成することができた。

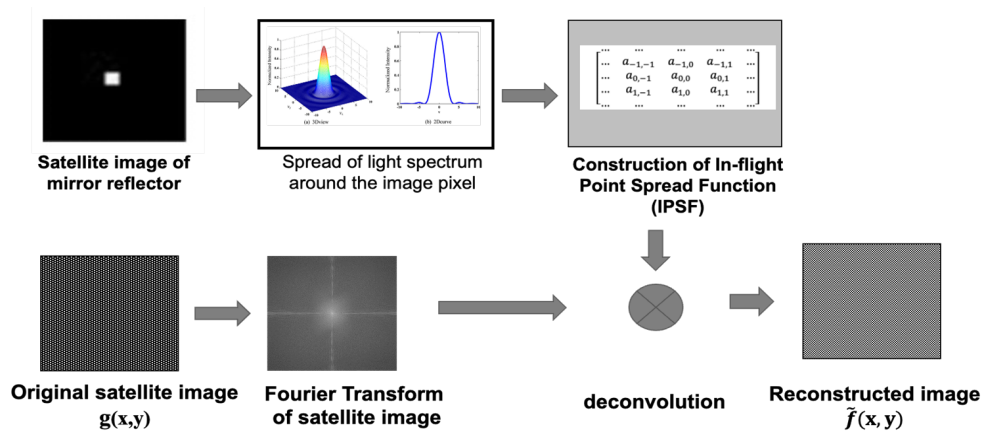


図5 IPSFによるキャリブレーション手法の概要

- ② 定期的に校正サイトの撮影を実施し、自動で補正が可能なソフトモジュール等の組み合わせによるシステム化（自動化）を検討した。具体的に運用する場合には、定期的（年に2回程度）に校正サイトの撮影を実施し、キャリブレーション手法の処理プロセスを実施する。本事業において、開発した成果のモジュール化を検討した。モジュール化とは、システムなどを設計する際に、全体を機能的なまとまりであるモジュール (module) の組み合わせとして構成する手法である。本手法の公開は、山口大学応用衛星リモートセンシング研究センターで管理し、関係機関に提供していく計画である。各モジュールを設計し、目標を達成することができた。

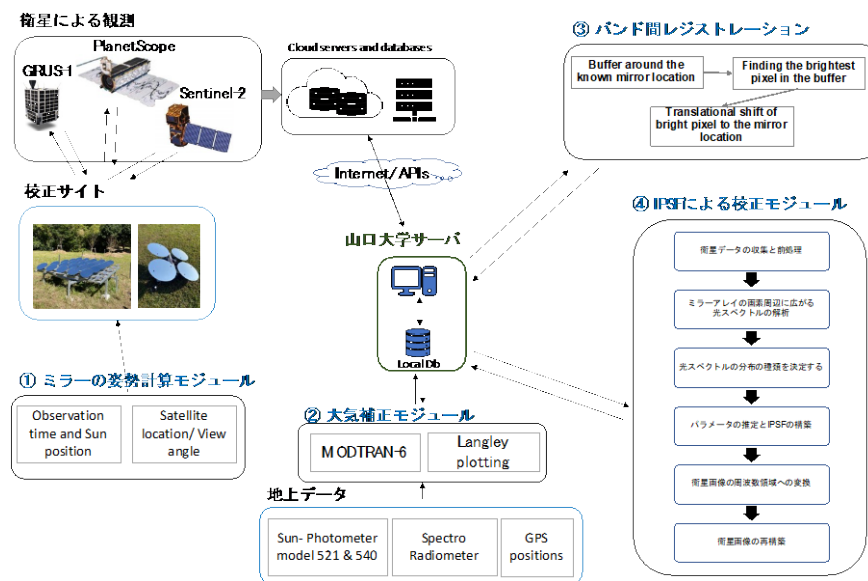


図6 キャリブレーション手法のシステム化

4) 災害等への実用化試験

<目標値>

キャリブレーション済み衛星データによる災害等への実用化試験を行う。

<評価指標>

- ① センチネルアジアなどの枠組を利用し、校正サイトのプロモーションを年1回以上実施する。
- ② キャリブレーション済み衛星データを用いて、2箇所以上の被災検知の精度評価を実施する。

<達成度>

- ① アジア太平洋地域宇宙機関会議 (Asia-Pacific Regional Space Agency Forum, APRSAF) やセンチネルアジア年次会合等で、アジアの災害対応活動等を踏まえ、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た。令和3年度は2回、令和4年度は3回のプロモーション活動を実施した。令和2年度は新型コロナウイルスのため十分な活動ができなかったが、総合的に目標を達成することができた。令和5年度になっても継続的なプロモーションを実施している。また、APRSAFで、本研究成果を発表したことがきっかけとなり、フィリピン宇宙局 (PhilSA) およびインドネシア宇宙局 (現 BRIN) からの留学生の受け入れに繋がった。留学生は、ミラーアレイによるキャリブレーションの研究を実施している。
- ② 本事業における主たる目的は、光学衛星のキャリブレーション手法の開発であるが、キャリブレーションによるAI解析の効果を評価するために転移学習によるAI解析を実施した。本事業では、U-NETを用いた転移学習を実装した。転移学習は、ある一連のタスクで学んだ経験・知識を、新しい関連するタスクでより速く学習し、より良いパフォーマンスを発揮するために使用する。転移学習は、高速コンバージェンスによりトレーニング時間の短縮ができる。また、特に学習可能なパラメータ数が少ない場合、特に、災害時に新規衛星を利用する場合に有効であることがわかった。GRUS-1、PlanetScopeのPS2およびPSB.SDを用い、山口県宇部市および令和2年7月豪雨災害(球磨川流域)の2箇所を対象に精度評価を実施した。AI解析(転移学習)キャリブレーション済み衛星画像を用いた場合、モデルの収束が速くなる。つまり、より少ないエポック数で、ネットワークがより低い損失値に到達することができる。精度としては、PlanetScopeのPS2、PSB.SDともに分類精度は上がった。よって所期の目標を達成することができた。

		Accuracy				
	Transfer (from-> to)	Agriculture	Forest	Water	Bare-land	Build-Up
Original	GRUS -> PS2	0.71	0.82	0.79	0.63	0.72
	GRUS -> PSB.SD	0.73	0.82	0.83	0.65	0.71
Calibrated	GRUS -> PS2	0.75	0.89	0.84	0.70	0.71
	GRUS -> PSB.SD	0.79	0.88	0.88	0.69	0.73

図7 AI解析(転移学習)の精度の比較

「必要性」

【国費を用いた研究開発としての意義】

宇宙関連の調査会社ユーロコンサルの調査レポートによると、2020年代後半には年間1000機以上の地球観測衛星の打ち上げが計画されている。そのおよそ8割が光学衛星であり、さらに打ち上げの大部分を占める小型衛星をどう利用していくかが迅速な災害対応にとって鍵となる。多くの小型衛星が災害対応に利用できるようになる一方で、衛星データの仕様や一様ではなく、また衛星画像の品質にも大きなばらつきがあり、衛星データ解析および利活用の障壁となっている。

本事業で開発した地上キャリブレーションサイトの構築とキャリブレーション手法の開発は、小型衛星の開発・運用を実施している機関において喫緊の課題となっている「画像校正」に大きく貢献する内容である。画像校正技術開発は、地球観測衛星の飛躍的な増加と連動して世界的に見てもニーズが高く実用化につながる。特に国内、東南アジアの新興国においても、次々と自国の地球観測衛星の打ち上げが成功しているが、欧米の高分解能衛星と比較して撮影された画像の質が落ちるため、衛星データの利用が広がらない。キャリブレーション手法が開発されれば、各衛星特有のノイズや画像の歪み等に補正がされ、衛星データの解析精度が向上し利活用が進む、結果として、人工衛星等の開発も活発になり、宇宙ビジネスのサイクルが上手く機能する。

【科学的・技術的意義】

ミラーアレイによるデータ校正サイトの常設とPSFを用いた衛星画像のキャリブレーション手法の開発は、国内初の試みであり、世界的なコンステレーション化の急速な進展、地球観測衛星の飛躍的な増加に的確に対応した基盤技術開発となった。また、JAXAやアクセルスペース社、Planet Lab社と研究連携協定を締結し、ミラーアレイによるデータ校正サイトの有用性を実証することができた。また、衛星の小型化・量産化による打ち上げの増加等により、今後国際競争の激化が予想される当該分野において、衛星データの活用において必須の校正・解析等の先端技術に極めて高い優位性をもつことができた。Impact factorの高い国際ジャーナルにも掲載され、フィリピン宇宙局(PhilSA)およびインドネシア宇宙局(現BRIN)が自国の衛星での実装を希望したりと、独創性がたかく、革新的な研究内容である。

「有効性」

【新しい知の創出】

本研究では、ミラーアレイを用いたIPSFによるキャリブレーションで衛星画像のぼかしを除去することができ、衛星画像の品質を飛躍的に向上させることができた。このアルゴリズムは、PSFとコンボリューションした結果の画像が、ポアソン分布と仮定して、ぼやけた画像のインスタンスであることの尤度を最大化する。この手法は、PSFはわかっても、画像に存在する加法性ノイズについて分からない場合に有効であるため、様々な衛星画像の校正に利用することができる。

また、ミラーアレイを利用して、校正サイトの地上・大気計測に基づく代替校正法の実験も行った。校正・検証方法は、GRUS-1およびPlanetScope(PS2およびPSB、SD機器)の衛星データを用いて行

われた。その結果、衛星センサーの各バンドにおける精度が確認され、時系列データを用いたアプリケーションのためのマルチセンサー画像のハーモナイゼーションに利用できる。つまり、今後、打ち上げられる多くの衛星データをハーモナイゼーションすることにより、統合的な解析が可能になり、衛星データの利活用が格段に進む。また、ミラーアレイの設置に関しては、プレスリリースを行い、新しい研究開発設備ということで大きく報道された。



図8 ミラーアレイ設置の新聞報道

【人材の養成】

本研究開発の期間（令和2年度～4年度）において、関連した研究内容により2名が修士論文研究を実施した。さらに、研究では、多くの地上観測データを必要としたため、観測実験には、多くの学生（35人）が参画し、地上のスペクトル計測、RTK-GNSSによる精密測量、太陽光フォトメータによる大気観測、ドローン観測などを実施した。学生や若手研究者がリモートセンシング技術の基礎的な計測技術を修得することができ、人材の養成にも成功した。特に、フィールドでの物理量測定は、リモートセンシングには欠かせない技術であるが、首都圏での大学では実施することが難しい。フィールドワークを多く実施することで、首都圏ではできないリモートセンシング教育を行うことができた。

また、本研究のプロモーションにより、令和4年10月にフィリピン宇宙局（PhilSA）から留学生を受け入れ要請があり、フィリピン宇宙局の保有するDIWATA-2衛星のミラーアレイを用いたキャリブレーションに関する研究を開始した。フィリピン宇宙局の人材を育成するとともに、国際貢献も実現している。令和6年4月には、同様の目的で、インドネシア宇宙局（現BRIN）から、衛星のキャリブレーションに関する研究を実施するための留学生を受け入れる。

「効率性」

【研究開発の手段やアプローチの妥当性】

- ・ 校正サイト構築において、点光源等による校正サイトとして「ミラーアレイ」を構築した。日本国内には、ミラーアレイの前例がなく、衛星データ校正に必要な形状、素材、大きさなどの

試験を繰り返し実施し、ミラーアレイの設計を行った。この設計に人件費があてられた。

- ・ 上記の設計をもとに、ミラーアレイを作成し、物品費があてられた。民生品を用いて制作したため、海外での同等品の1/10程度の価格で作成することができた。
- ・ キャリブレーション手法の開発において、GRUS-1衛星を利用した。観測を実施するための調整や施設利用料として費用が使われた。観測毎のデータ購入と比較すると、格安でデータを利用することができた。
- ・ ターゲットサイトの構築および災害等への実用化試験については、新型コロナウイルスのため、旅費が返納された。Web会議や、山口県内にターゲットサイトを選定することにより目的は達成できた。

(2) 成果

「アウトプット」

本研究課題は、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である。新規性が高く革新的なキャリブレーション手法の開発が主たる目的であり、大きな二つのアウトプットが得られた。

一つ目は、ミラーアレイによる校正サイトの構築である。軌道上衛星の特性（PSF形状）の変化を評価するために、凸面ミラーをアレイ状に並べたミラーアレイを常設した。日本初の画像校正設備となり、国内外で非常に高い評価を得た。

二つ目は、IPSFによるキャリブレーション手法の開発である。このアルゴリズムは、PSFとコンボリューションした結果の画像が、ポアソン分布と仮定して、ぼやけた画像のインスタンスであることの尤度を最大化する手法で、衛星画像のぼかしを除去することができた。図9のそれぞれの左がオリジナル画像、右がキャリブレーション済み画像である。この手法は、PSFはわかっても、画像に存在する加法性ノイズについて分からない場合に有効であり、衛星画像の品質を飛躍的に向上させることができた。

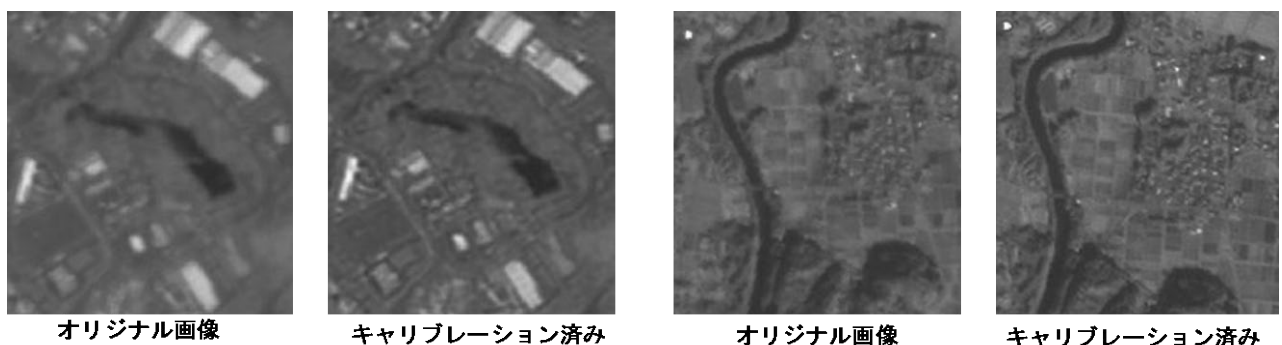


図9 キャリブレーション済み画像

「アウトカム」 (令和5年10月末時点)

<学会発表実績>

国内学会発表：4件

国際学会発表：5件

国際ジャーナル：1件

<本研究が基礎となった研究費の獲得>

- ① 2022年度経済安全保障重要技術育成プログラム／高感度小型多波長赤外線センサ技術の開発
「高感度小型多波長赤外線センサ開発およびフィールド実証」
研究費総額：22,000千円
内容：本事業で開発したミラーアレイによるIPSFキャリブレーション手法を、多波長センターのキャリブレーションに転用する研究開発
- ② 2023年SIP第3期「スマート防災ネットワークの構築」
「災害情報の広域かつ瞬時把握・共有」
研究費総額：95,000千円
内容：ミラーアレイによるIPSFキャリブレーション手法を災害対応における社会実装を行う。次から次へと打ち上げられる光学衛星に対し、即時解析を可能とするシステム構築として、キャリブレーションによるAI解析の高度化と教師データの相互利用する技術開発。
- ③ 2021年 JAXA ALOS-3 校正検証サイエンスチーム
「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」
内容：ALOS-3を対象とし、本事業で開発したミラーアレイによるIPSFによるキャリブレーションを実施する。ALOS-3の打ち上げ失敗により実現しなかった。

<本研究に関する連携協定>

- ① 令和3年3月山口大学とアクセルスペース社による研究連携協定（国内大学初）
- ② Planet Labs社との衛星データ利用協定（国内大学初）

(3) 今後の展望

山口大学は、平成28年度に研究推進の司令塔である全学組織「大学研究推進機構」の下に「応用衛星リモートセンシング研究センター」を中核拠点として設置し、戦略的に重点支援を行ってきた。応用衛星リモートセンシング研究センターは、文部科学省の令和5年度教育研究組織改革分（組織整備）概算要求の教育研究組織整備に採択された。この事業は、膨大な衛星データを幅広く利用するための教育/研究と社会/産業に実装するための拠点形成を行うものである。具体的には、当該分野の喫緊の課題である科学者・技術者（データサイエンティストやデータエンジニア）の養成（世

界水準の SDGs 専門人材の育成)に取り組むとともに、深層学習等の AI 技術の適用による解析手法の自動化やその迅速化、多種多様な衛星データを利用するための衛星データ校正技術、災害対応や環境監視、営農支援等の社会実装など、衛星データ解析の新規手法開発を加速させる教育研究拠点を形成する。

本事業で開発した校正サイトは、上記事業により、組織的、資金的に人的体制を整え、継続していく計画である。

8. 評価点

S

評価を以下の5段階評価とする。

- S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。
- A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。
- B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。
- C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。
- D) 成果はほとんど得られていない。

9. 評価理由

本事業では、光学画像のキャリブレーションのための校正サイトとターゲットサイトの設置、IPSF と名付けるキャリブレーション技術の開発、及び AI 画像解析への適用のそれぞれにおいて目標通りの成果を得た。キャリブレーション技術は我が国初と新規性が高く、AI 解析の結果は特性の異なるコンステ衛星画像を統合し災害分野への利用性の向上をもたらす社会的意義が大きい成果が得られたと評価できる。

データ処理手法の開発だけでなく実証試験によりその有効性を確認しており、低コスト化も図るなど、非常に完成度が高いと言え、本手法は今後の衛星データ利用拡大への貢献が期待される。また、センチネルアジアや APRSAF でプロモーションを実施し国際的にアピールしていることも評価できる。今後は、採択された後継事業において、検討されているキャリブレーション手法の標準化を実行し、多くのユーザに使用してもらい、より性能が高く使いやすいソフトウェア・モジュール群の社会実装の実現につなげることで、宇宙航空利用の促進への一層の貢献が見込まれる。

以上より、本課題は、相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献していると認められる。

今後は、以下の点が期待される。

- さらなる定量的な検証結果を取得するとともに、オペレーショナルなレベルのツールを開発し、社会実装が進むことを期待する。
- 当初の構想のうち達成していない災害等への実用化試験等については今後実施することを期待する。