

2.2 観測センサに関する調査

サマリー

- センサーは光学とマイクロ波を用いたものがメインのセグメントであり、その中でも観測対象とする物理量によって、種類は細分化される。さらに GNSS や AIS といった異なる種類の計測方法がある
- このように、センサーの種類は多種多様にあるが、いずれも真新しいものではなく、過去より提唱されてきたものである。いくらか淘汰されそうなものであるが、どの種類のセンサーも未だに改善が進められている
 - ◇ イノベーティブな分野としては、センサーの素材が挙げられるが、グラフェンなどの新素材はまだ発展途上
- 前節の調査で示した通り、わが国ではいくらか強い分野があり、その分野での強みを守っていくことがまずはファーストステップとなる

1) 本節における基本的な考え方

- 観測センサといったミッション機器は日本の宇宙関連製造業のラストリゾートとなっている領域といえる。
- 他方、グローバルレベルで様々な企業が研究開発している分野でもあり、その動向把握はわが国宇宙関連製造業にとって非常に有意義なものと考えられる。
- NASA EOS Handbook によれば、センサの種類は下表のとおりとなっている。本分類に概ね則して本節では分析を実施する。なお、これに類似した分類でセンサを集計しているデータベースとして、世界気象機関（以下、WMO）の OSCAR が挙げられる。

図表 202 EOS Handbook でのセンサ分類

センサ分類			NASA EOS Handbook (1991) におけるセンサ	NASA EOS Handbook (1999) におけるセンサ	
光 学	受 動	光学 セン サ	高解像度 イメージ 高解像度 イメージ	ASTER, HIRIS, TES	ASTER, ETM+
		中解像度 イメージ	MODIS-N/T, LIS, EOSP, MISR	MODIS, LIS, EOSP, MISR, OMI, TES	
		赤外線	イメージャ：- サウンダ：AIRS, HIRDLS, SWIRLS	イメージャ：- サウンダ：AIRS, HIRDLS	
		紫外線	SOLSTICE II	XPS	
	(未分類)	MOPITT, SAFIRE, SAGE III, SOLSTICE II	MOPITT, SAFIRE, SAGE III		
能 動	ライダ	GLRS, LAWS	GLAS		
マ イ ク ロ 波	受 動	マイクロ波 放射計	イメージャ：CERES, MIMR サウンダ：AMSU-A, MLS, MHS ミリ波・サブミリ波：-	イメージャ：CERES, AMSR-E, JMR サウンダ：AMSU, MLS, HSB ミリ波・サブミリ波：-	
	能 動	合成開口 レーダ	EOS SAR	-	
		マイクロ波 散乱計	STIKSCAT	SeaWinds	
		マイクロ波 高度計	ALT	POSEIDON-2	
降雨・雲レーダ	CERES	CERES			
他	重力・ 測地センサ	-	-		
	GPS 掩蔽センサ	GGI	-		
	太陽放射量 センサ	ACRIM, SOLSTICE II	ACRIM-III, TIM, SIM, SOLSTICE		
	X 線観測センサ	XIE	-		
	イオン観測センサ	IPEI	-		
磁気観測センサ	GOS	-			

- OSCAR のデータベースにて現在公表されているセンサーの種類を、打ち上げ年次別に整理すると下記のようなになる。特徴として下記の事項がいえる。
 - ◇ 光学の中解像度イメージャ、高解像度イメージャは伝統的に開発されており、現在でも多くの同種のセンサーが開発されている
 - ◇ 光学・受動の中で次に大きなグループは、クロスナディア短波長サウンダー、赤外サウンダーであるが、特に短波長サウンダーは近年多くの開発が行われている。
 - ◇ マイクロ波は合成開口レーダー・クロストラック型マイクロ波放射計が大きなグループであるが、近年は合成開口レーダーが主に開発されている。
 - ◇ 光学イメージャ・ライダー・雲/降雨レーダーなどは比較的新規の分野といえる。
 - ◇ 多少、数字に違いがあるものの、完全に開発されなくなったセンサー種というものは本分類では存在しない（重力センシングもオーストラリアなどで開発を行うベンチャーが現れており⁹¹²、かつ 2021 年打上の GRACE FO では以前と同様のセンサーが打ち上げられている）
- このような状況であるため、ひとつひとつの分類について代表的なものをピックアップし、動向を把握することとする。

図表 203 打ち上げ（予定含む）年次別のセンサーの種類の数

No.	分類			2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	1960- 2029 集計	2016- 2029 集計
				2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029		
1	受動	光学	中解像度イメージャ	2	3	3	2	1	3	9	5	4	2	2	0	0	0	126	36
2	受動	光学	高解像度イメージャ	6	5	4	5	6	7	9	3	0	2	0	0	0	2	189	49
3	受動	光学	クロスナディア短波長サウンダー	1	1	4	1	1	0	3	5	3	2	1	0	0	0	36	22
4	受動	光学	クロスナディア赤外サウンダー	0	1	1	1	0	1	0	2	2	2	0	1	0	0	43	11
5	受動	光学	光学イメージャ	0	3	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	9	6
6	受動	光学	広帯域放射収支計	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	1	0	0	16	4
7	受動	光学	太陽放射照度計	0	0	1	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	18	4
8	受動	マイクロ波	円錐型マイクロ波放射計	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	0	0	1	0	30	8
9	受動	マイクロ波	クロストラック型マイクロ波放射計	1	0	1	0	0	3	0	1	2	0	0	0	0	0	40	8
10	-	-	リムサウンダー	0	0	1	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	35	5
11	能動	光学	ライダー	0	0	1	2	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0	15	7
12	能動	マイクロ波	雲/降雨レーダー	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	6	3
13	能動	マイクロ波	マイクロ波散乱計	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	14	5
14	能動	マイクロ波	マイクロ波高度計	2	0	0	1	1	1	2	2	0	0	0	1	0	0	22	10
15	能動	マイクロ波	GNSS 電波掩蔽観測	1	1	1	1	1	2	1	0	1	1	0	0	0	0	28	10
16	能動	マイクロ波	合成開口レーダー	1	0	3	4	1	2	3	5	0	0	1	0	1	0	42	21
17	-	-	重力センシング	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0

出所) WMO OSCAR データベースより DB 編集

⁹¹² 例えば Q-CTRL など <https://q-ctrl.com/our-work/earth-observation/>

2) 各種センサーの代表例

A) 中解像度イメージャ

i. 概要

- 中解像度イメージャ (Moderate-resolution optical imager) は、1960 年から 126 種類のものが開発されており、2016 年以降も 36 種類開発されている。センサー種の中でシェアの大きい分野の 1 つである。主に雲やエアロゾルを対象としているもので構成されている。
- 重量は 60kg から 400kg まで様々であり、重量が大きければ消費電力が大きい傾向にある。
- 特に近年は ESA が存在感を示しており、CLIM、MAP、FLORIS、MAIA など様々なセンサーを開発している。中国の機関 (CMA、CNSA、CAST 等) も多数のセンサーを開発している。
- 近年の我が国の中解像度イメージャとしては、GOSAT-2 の TANSO-CAI2、GCOM-C の SGLI が挙げられる。

図表 204 中解像度イメージャセンサーのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	打上予定	目的	解像度	重量	消費電力
CLIM	Cloud Imager	ESA	CO2M	2026	雲	174m-348m	-	-
MAP	Multi-Angle Polarimeter	ESA	CO2M	2026	エアロゾル	1km	-	-
MSU-GSM	Electro-GOMS Imager for Electro M	Roscosmos	Electro-M N1 Electro-M N2 Electro-M N3	2025	雲	0.5-4km	150kg	90W
MSU-MR-MP	VIS/IR Imaging Radiometer for Meteor-MP	Roscosmos	Meteor-MP N1 Meteor-MP N2	2025	雲等多目的	0.25-0.5km	170kg	--
3MI	Multi-viewing Multi-channel Multi-polarisation Imager	ESA	Metop-SG-A1 Metop-SG-A2 Metop-SG-A3	2024	エアロゾル	4km	60kg	80W
FLORIS	FLuORescence Imaging Spectrometer	ESA	FLEX	2024	SIF ⁹¹³	300m	-	-
MAIA	Multi-Angle Imager for Aerosols	NASA	MAIA	2024	エアロゾル	200m	80kg	85W
METimage	Meteorological Imager (Previous name: VII - Visible and Infrared Imager)	DLR	Metop-SG-A1 Metop-SG-A2 Metop-SG-A3	2024	雲・エアロゾル	0.5km	262kg	140W
FCI	Flexible Combined Imager	ESA	MTG-I1-4	2023	雲・蒸気等	0.5-2km	300kg	500W
MERSI-3	Medium Resolution Spectral Imager - 3	CMA	FY-3F FY-3H	2023	海色等多目的	250m-1km	-	-
MSI	Multi-Spectral Imager for Earth-CARE	ESA	EarthCARE	2023	雲	500m	31kg	86W
MUS-uv/vis/nir	Multi-spectral Optical Camera - UV/VIS/NIR	CONAE	SAC-E/SABIA-MAR B	2023	海色・植生等	200m-1km	-	-
RMOI	Rainfall Measurement Optical Imager	CMA	FY-3G FY-3I	2023	雲・降水量	500m	-	-
DPC-2	Directional Polarization Camera - 2	CNSA	DQ-1 DQ-2	2022	エアロゾル	3.5km	-	-

⁹¹³ SIF:太陽光誘起クロロフィル蛍光

略称	センサー名	保有者	衛星名	打上 予定	目的	解像度	重量	消費 電力
EMIT	Earth Surface Mineral Dust Source Investigation	NASA	ISS EMIT	2022	鉱物ダスト	60m	-	-
MADPI	Multi-Angle Dual Polarisation Imaging sensor	CAST	NEMO-AM	2022	エアロゾル	40m	-	-
MIMAN Optical Camera	MIMAN Optical Camera	KARI	MIMAN	2022	微細粉塵濃度	200m	-	-
MUS-nir/swir	Multi-spectral Optical Camera - NIR/SWIR	CONAE	SAC-E/SABIA-MAR A	2022	葉面積指数	1km	-	-
OCM	Ocean Color Monitor	ISRO	OceanSat-3 OceanSat-3A	2022	海色	360° 1080m	74kg	85W
POSP	Particulate Observing Scanning Polarimeter	CNSA	DQ-1 DQ-2	2022	PM2.5 PM10	6.4km	-	-
SSTM	Sea Surface Temperature Monitor	ISRO	OceanSat-3 OceanSat-3A	2022	海面温度	1.08m	-	-
WSI	Wide Spectral Imager	CNSA	DQ-1 DQ-2	2022	大気	-	-	-
GHI	Geostationary High-speed Imager	CMA	FY-4B	2021	エアロゾル等	250m- 2km	-	-
MERSI-LL	Medium Resolution Spectral Imager - Low-Light	CMA	FY-3E FY-3J	2021	多目的	500m- 1km	-	-
MSU-GS/A	Electro-L Imager for Arctica	Roscosmos	Arctica-M N1-5	2021	雲・蒸気等	1km- 4km	106kg	150W
GOCI-II	Geostationary Ocean Color Imager: Follow-on	KIOST	GEO-KOMPSAT-2B	2020	海色・エアロゾル	250m	-	-
AMI	Advanced Meteorological Imager	KMA	GEO-KOMPSAT-2A	2019	雲・蒸気等	0.5km- 2.0km	338kg	450W
TANSO-CAI2	Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations - Cloud and Aerosol Imager / 2	JAXA	GOSAT-2	2019	雲・エアロゾル	0.5km- 1.5km	-	-
DPC	Directional Polarization Camera	CNSA	GF-5 GF-5-02	2018	雲・エアロゾル	3.5km	-	-
MERSI-2	Medium Resolution Spectral Imager -2	CMA	FY-3D	2018	多目的	250m- 1km	-	-
SGLI	Second-generation Global Imager	JAXA	GCOM-C	2018	海色・植生・エアロゾル	250m- 1km	400kg	480W

出所) OSCAR および CEOS よりデジタルプラスト編集

ii. 代表例

• CLIM (ESA)

略称	CLIM																				
センサー名	Cloud Imager																				
目的	CO2M の他のセンサーをサポートするための雲に関する情報を提供																				
概要	<ul style="list-style-type: none"> • VIS/NIR/SWIR の 3 チャンネル (詳細は下記テーブルを参考) • 二酸化炭素と二酸化窒素の複合イメージャをサポートする Multi-Angle Polarimeter (MAP) と連携して運用 • プッシュブルームスキヤニングを用いている • 観測幅 465 km. 																				
解像度	174 m (VIS and NIR) and 348 m (SWIR) at s.s.p.																				
範囲/サイクル	-																				
重量	-																				
出力	-																				
データ速度	-																				
供給者	ESA																				
開発段階	研究開発衛星																				
使用予定期間	2026-2031																				
搭載ミッション名	CO2M																				
詳細	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Channel</th> <th>Wavelength</th> <th>Bandwidth</th> <th>SNR @ specified input radiance</th> <th>IFOV at s.s.p.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CLIM-1</td> <td>670 nm</td> <td>20 nm</td> <td>... @ ... $W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$</td> <td>174 m</td> </tr> <tr> <td>CLIM-2</td> <td>753 nm</td> <td>9 nm</td> <td>... @ ... $W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$</td> <td>174 m</td> </tr> <tr> <td>CLIM-3</td> <td>1370 nm</td> <td>15 nm</td> <td>... @ ... $W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$</td> <td>348 m</td> </tr> </tbody> </table>	Channel	Wavelength	Bandwidth	SNR @ specified input radiance	IFOV at s.s.p.	CLIM-1	670 nm	20 nm	... @ ... $W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$	174 m	CLIM-2	753 nm	9 nm	... @ ... $W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$	174 m	CLIM-3	1370 nm	15 nm	... @ ... $W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$	348 m
Channel	Wavelength	Bandwidth	SNR @ specified input radiance	IFOV at s.s.p.																	
CLIM-1	670 nm	20 nm	... @ ... $W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$	174 m																	
CLIM-2	753 nm	9 nm	... @ ... $W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$	174 m																	
CLIM-3	1370 nm	15 nm	... @ ... $W m^{-2} sr^{-1} \mu^{-1}$	348 m																	

出所) OSCAR より DB 編集

• MAP (ESA)

略称	MAP																																		
センサー名	Multi-Angle Polarimeter																																		
目的	全天候型 CO2 測定の要求精度を確保するためのエアロゾル特性に関する情報を提供																																		
概要	<ul style="list-style-type: none"> 4つの異なる視野角と7つの波長で放射輝度と直線偏光度 (DoLP) を測定する VIS/NIR 放射計 (詳細は下記テーブルを参考) 二酸化炭素と二酸化窒素の複合イメージャをサポートする cloud imager (CLIM) と連携して運用 4台のカメラによるプッシュブルームスキヤニングで、4つの異なる角度 (前後±60°) で観測各カメラには、軌道をまたぐ12個の検出器が搭載されており、視野角が大きくなるにつれて、より広い観測幅が得られる。衛星の移動に伴うオーバーサンプリングにより、高画素のビニング処理を行う 																																		
解像度	1km (ただしビニング処理後)																																		
範囲/サイクル	10日ではほぼグローバルをカバー																																		
重量	-																																		
出力	-																																		
データ速度	-																																		
供給者	ESA																																		
開発段階	研究開発衛星																																		
使用予定期間	2026-2031																																		
搭載ミッション名	CO2M																																		
詳細	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Channel number</th> <th>Wavelength nm</th> <th>Bandwidth nm</th> <th>Polarisation axes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MAP-1</td> <td>410</td> <td>20</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>MAP-2</td> <td>443</td> <td>20</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>MAP-3</td> <td>490</td> <td>20</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>MAP-4</td> <td>555</td> <td>20</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>MAP-5</td> <td>670</td> <td>20</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>MAP-6</td> <td>753</td> <td>9</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>MAP-7</td> <td>865</td> <td>40</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>			Channel number	Wavelength nm	Bandwidth nm	Polarisation axes	MAP-1	410	20	3	MAP-2	443	20	3	MAP-3	490	20	3	MAP-4	555	20	3	MAP-5	670	20	3	MAP-6	753	9	1	MAP-7	865	40	3
Channel number	Wavelength nm	Bandwidth nm	Polarisation axes																																
MAP-1	410	20	3																																
MAP-2	443	20	3																																
MAP-3	490	20	3																																
MAP-4	555	20	3																																
MAP-5	670	20	3																																
MAP-6	753	9	1																																
MAP-7	865	40	3																																

出所) OSCAR

- MSU-GSM (Roscosmos)

略称	MSU-GSM
センサー名	Electro-GOMS Imager for Electro M
目的	雲や水蒸気の特徴を追跡し、風向等の導出など多目的用途を想定
概要	<ul style="list-style-type: none"> • 0.38~14.25 μm の間に 20 チャンネル (4 チャンネルが VIS、16 チャンネルが赤外線) • Electro-L N1/N2/N3 のセンサーMSU-GS の進化版である • 3 軸姿勢制御衛星
解像度	0.5 km s.s.p. (VIS), 2.0 km s.s.p. (0.9-12 μm), 4.0 km s.s.p. (13-15 μm)
範囲/サイクル	10 分ごとにフルディスク
重量	150kg
出力	90W
データ速度	-
供給者	Roscosmos
開発段階	オペレーションプログラム
使用予定期間	2025-2035
搭載ミッション名	Electro
詳細	-

出所) OSCAR

- MSU-MR-MP (Roscosmos)

略称	MSU-MR-MP
センサー名	VIS/IR Imaging Radiometer for Meteor-MP
目的	Multi-purpose imagery and wind derivation by tracking clouds and water vapour features
概要	<p>19 channels in the 0.4-12.5 μm range</p> <p>Evolution of MSU-MR flown on Meteor-M N1, N2, N2-1, N2-2</p> <p>Cross-track: swath 3000 km</p>
解像度	0.25-0.5 km
範囲/サイクル	Global coverage twice/day (IR) or once/day (VIS)
重量	170kg
出力	-
データ速度	7.5Mbps
供給者	Roscosmos
開発段階	研究開発衛星
使用予定期間	2025-2032
搭載ミッション名	Meteor-3M

出所) OSCAR

B) 高解像度イメージャ

- 高解像度イメージャ (High-resolution optical imager) は、1960 年から 189 種類のものが開発されており、2016 年以降も 49 種類開発されている。センサー種の中でシェアが最も大きい分野の 1 つである。名目的には土地利用などが対象物となっているが、Satellogic や Albedo のような民間コンステレーションでは多様な目的を想定している。
- 重量はあまり公表されていないが、Blacksky のものが軽量で解像度が高いように見受けられる。
- Agency も様々なセンサーを開発しているが、解像度に関しては Albedo など米系の民間コンステレーションが存在感を示している。

図表 205 高解像度イメージャセンサーのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	打上予定	目的	解像度	重量	消費電力
CHIME	Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment	ESA	CHIME	2029	植生 海色	20-30m	—	—
LSTM	Land Surface Temperature Monitoring	ESA	LSTM	2029	地球面 温度	30-50m	—	—
GORIZONT-MP	Multi-spectral scanner	Roscosmos	Meteor-MP N1 Meteor-MP N2	2025	画像	60- 120m	8.1kg	20.4W
TRISHNA	TRISHNA	ISRO	TRISHNA	2025	陸上 観測	50m	—	—
Albedo	Albedo Satellite Sensor	Albedo	—	2024	多目的	10cm (可視光) 2-3m(熱)	-	-
ALISS-3	Advanced Linear Imaging Self-Scanning Sensor - 3	ISRO	ResourceSat-3 ResourceSat-3A	2023	土地 植生	10-20m	—	—
ATCOR	Atmospheric Correction	ISRO	ResourceSat-3 ResourceSat-3A	2023	土地 植生	240m	—	—
AWFI-2	Advanced Wide Field Imager - 2	INPE	Amazônia-2	2023	土地 植生	20m	—	—
APAN	Advanced Panchromatic Camera	ISRO	ResourceSat-3S ResourceSat- 3SA	2022	土地 地図	2.5m	—	—
CERIA	CERIA Camera	GISTDA	THEOS-2 Small	2022	土地 災害	1.2m	—	—
HRSAT-1	High Resolution Satellite - 1	ISRO	HRSAT-1A HRSAT-1B HRSAT-1C	2022	陸上 観測	1-20m	—	—
HIS	Hyper-Spectral Imager	DLR	EnMAP	2022	植生 分類	30m	300kg	250W
LISS-V	Linear Imaging Self Scanner-V	ISRO	ResourceSat-3S ResourceSat- 3SA	2022	土地 地図	2.5m	—	—
MOLI imager	Multi-footprint Observation Lidar and Imager - Imaging component	JAXA	ISS MOLI	2022	地上部 バイオ マス	5m	—	—
MS	New Astrosat Optical Modular Imager (MS)	GISTDA	THEOS-2 Main	2022	土地 災害	2m	—	—

略称	センサー名	保有者	衛星名	打上 予定	目的	解像度	重量	消費 電力
PAN	New Astrosat Optical Modular Imager (PAN)	GISTDA	THEOS-2 Main	2022	土地 災害	0.5m	—	—
WISH	Wide-Swath and High-Resolution Optical Imager	JAXA	ALOS-3	2023*	陸上 観測	3.2m	—	—
AEISS-HR	Advanced Electronic Image Scanning System - High Resolution	KARI	CAS 500-1 CAS 500-2 KOMPSAT-7	2021	植生 DEM	0.5-2m	80kg	—
AWFI	Advanced Wide Field Imager	INPE	Amazônia-1 Amazônia-1B	2021	土地 植生	40m	—	—
HyS-SWIR	Hyperspectral Imager - Short Wave Infrared	ISRO	EOS 03 GISAT-2	2021	植生	500m	—	—
HyS-VNIR	Hyperspectral Imager - Visible Near Infrared	ISRO	EOS 03 GISAT-2	2021	海色 植生 エアロ ゾル	500m	—	—
MX-LWIR	Multispectral - Long Wave Infrared	ISRO	EOS 03 GISAT-2	2021	地表 温度	1.5km	—	—
MX-VNIR	Multi-spectral Visible Near Infrared	ISRO	EOS 03 GISAT-2	2021	画像	50m	—	—
Pléiades-Neo	Pléiades-Neo	CNES	Pléiades-Neo 3 Pléiades-Neo 4 Pléiades-Neo C Pléiades-Neo D	2021	土地 植生 DEM	0.3- 1.2m	—	—
HISUI	Hyperspectral Imager Suite	METI	ISS HISUI	2020	多目的	20*30m	—	—
HSI-2	Hyper-Spectral Imager	CAST	HJ-2A HJ-2B	2020	土地 植生	48m	—	—
IRMSS-2	Infrared Multispectral Scanner - 2	CAST	HJ-2A HJ-2B	2020	土地 災害	48m	—	—
MX	Multispectral VNIR	ISRO	CartoSat-3	2020	土地 地図	1.14m	—	—
PAN	Panchromatic Camera	ISRO	CartoSat-3	2020	画像	0.28m	—	—
WVC-2	Wide View CCD camera - 2	CAST	HJ-2A HJ-2B	2020	土地	16m	—	—
HYC	HYperspectral Camera	ASI	PRISMA	2019	土地 植生 陸水 沿岸	30m	90kg	110W
HySIS	Hyper Spectral Imaging Spectrometer	ISRO	HySIS	2019	植生	30m	—	—
KHCS	KhalifaSat Camera System	EIAST	DubaiSat-3	2019	土地 災害	0.75- 3m	70kg	168W
PAN	Panchromatic Camera	ASI	PRISMA	2019	土地 植生 陸水 沿岸	5m	—	—
SpaceView 24	SpaceView 24 imaging telescope	BSG	BlackSky-1-17	2019	土地 災害	1m	10kg	10W
AHSI	Advanced Hyperspectral Imager	CNSA	GF-5 GF-5-02	2018	—	—	—	—
DESI	DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer	DLR	ISS DESIS	2018	土地 植生	90m	—	—
ECOSTRESS	ECOsysteM Spaceborne Thermal	NASA	ISS ECOSTRESS	2018	地表面 温度	46m	266kg	527W

略称	センサー名	保有者	衛星名	打上 予定	目的	解像度	重量	消費 電力
	Radiometer Experiment on Space Station							
SpaceView- 110	SpaceView-110 Imaging System	DigitalGlobe	WorldView-4	2017	画像	0.31- 1.24m	500kg	1000W
EvM	Event Monitoring camera	ISRO	CartoSat-2C CartoSat-2D CartoSat-2E CartoSat-2F	2016	土地 観測	—	—	—
GF-4 imager	Imager of GaoFen-4	CNSA	GF-4	2016	災害	50- 400m	—	—
HRMX	High-Resolution Multi- Spectral	ISRO	CartoSat-2C CartoSat-2D CartoSat-2E CartoSat-2F	2016	土地 地図	2m	—	—
ÑuSat-Imager	ÑuSat-Imager	Satelllogic	ÑuSat	2016	多目的	1-90m	—	—

出所) OSCAR

※2023年3月1日時点の情報

- 代表例：Albedo

Crunchbase 社のデータベースによれば、資金調達は 3 ラウンド行っており、資金調達総額 58mUSD となっている。2022 年 9 月にシリーズ A として 48mUSD の資金調達を実施。

図表 206 Albedo のセンサースペック (可視光)

Visible	Nadir	30° Off-Nadir
Panchromatic	10cm	12.4cm
Multispectral	40cm	49.7cm
Spectral Bands	Pan: 400 - 700 nm Blue: 450 - 510 nm Green: 510 - 580 nm Red: 630 - 690 nm NIR: 770 - 895 nm	
NIIRS*	7.1	6.8
Geolocation Accuracy (CE90)	5.0m	7.0m
Revisit Rate (<53° latitudes, per satellite)	15 days	5 days
Revisit Rate (<53° latitudes, full constellation)	1.5 revisits/day	5 revisits / day
Image Size Per Pass	35km x 7km	35km x 7km

* National Image Interpretability Rating Scale - calculated with GIQE v5

出所) Satellite Image Corporation <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/albedo-10cm/>

図表 207 Albedo のセンサースペック (熱赤外線)

Thermal	Nadir	30° Off-Nadir
GSD	2.0m	3.0m
Spectral Band	7.5 μm - 13.5 μm (microns)	
IR NIIRS	3.5	3.2
Geolocation Accuracy (CE90)	10.0m	15.0m
Revisit Rate (<53° latitudes, per satellite)	15 days	5 days
Revisit Rate (<60° latitudes, full constellation)	1.5 revisits/day	5 revisits/day
Image Size Per Pass	35km x 6km	35km x 6km

出所) Satellite Image Corporation <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/albedo-10cm/>

C) クロスナディア短波長サウンダー

- クロスナディア短波長サウンダー（Cross-nadir shortwave sounder）は、1960年から36種類のもが開発されており、2016年以降も22種類開発されている。センサー種の中でシェアが大きい分野の1つである。
- NASA/ESA 共に CO2 を計測するためのセンサーをこの種のセンサーで開発している。

図表 208 クロスナディア短波長サウンダーのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	目的	解像度	重量	消費電力
CO2I and NO2I	Combined Carbon Dioxide and Nitrogen Dioxide Imager	ESA	CO2M	2026	CO2・NO2	0.8km	—	—
ACS-nadir	Atmospheric Composition Spectrometer (nadir-scanning component)	Roscosmos	Meteor-MP N1 Meteor-MP N2	2025	大気化学・エアロゾル	8-14km	—	—
Ozonometer-3	Scanning ozonometer	Roscosmos	Zond-M	2025	オゾン	—	—	—
GeoCarb	Geostationary Carbon Cycle Observatory	NASA	GeoCarb	2024	CO2・CH4・CO・SIF	3-6km	152kg	150W
Sentinel-4	UVN: Ultra-violet, Visible and Near-infrared sounder	ESA	MTG-S1 MTG-S2	2024	大気化学・エアロゾル・雲頂高度	8km	150kg	100W
Sentinel-5	UVNS: Ultra-violet, Visible and Near-infrared Sounder	ESA	Metop-SG-A1/2/3	2024	大気化学・エアロゾル	7km	250kg	220W
GAS-2	Greenhouse-gases Absorption Spectrometer - 2	CMA	FY-3H	2023	大気化学	3km	—	—
HySICS	Hyper-Spectral Imager for Climate Science	NASA	ISS CLARREO-PF	2023	放射輝度	50km	—	—
MicroCarb	MicroCarb	CNES	MicroCarb	2023	CO2	4.5km	72kg	57W
OMS-nadir	Ozone Monitoring Suite - nadir scanning unit	CMA	FY-3F	2023	大気化学	7*7km ~ 21*28km	—	—
TEMPO	Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution	NASA	TEMPO	2023	大気化学・エアロゾル・雲・UV-B	2.0*4.75km	—	—
EMI-2	Environment Monitoring Instrument-2	CNSA	DQ-1 DQ-2	2022	オゾン・大気化学	13*48km	—	—
NACHOS	NACHOS-Imager	LANL	NACHOS-1 NACHOS-2	2022	微量ガス	0.4km	4kg	—
Ozonometer-TM	Ozonometer	Roscosmos	Ionosphaera-M N1 -4	2022	オゾン	—	—	—
GEMS	Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer	ME	GEO-KOMPSAT-2B	2020	オゾン・大気化学	5km	110kg	—
OCO	Orbiting Carbon Observatory	NASA	ISS OCO-3	2019	CO2	1.29*2.25km	150kg	165W
EMI	Environment Monitoring Instrument	CNSA	GF-5 GF-5-02	2018	オゾン・大気化学	13*48km	—	—
GAS	Greenhouse-gases Absorption Spectrometer	CMA	FY-3D	2018	大気化学	10km	—	—
GMI	Greenhouse-gases Monitoring Instrument	CNSA	GF-5 GF-5-02	2018	CO2・CH4	10.3km	109kg	120W
TROPOMI	Tropospheric Monitoring Instrument	ESA	Sentinel-5P	2018	大気化学	7km	220kg	170W
ACGS	Atmospheric Carbon-dioxide Grating Spectrometer	MOST	TANSAT	2017	CO2	2*3km	180kg	170W
GHGSat-Spectrometer	GHGSat Imaging Spectrometer	GHGSat	GHGSat	2016	CO2・CH4	50m	5.4kg	—

出所) OSCAR

D) クロスナディア赤外サウンダー

- クロスナディア赤外サウンダー（Cross-nadir infrared sounder）は、1960年から43種類のものが開発されており、2016年以降も11種類開発されている。センサー種の中でシェアが大きい分野の1つである。
- 日本の衛星に搭載されるセンサーが2つ近年では開発されている。

図表 209 クロスナディア赤外サウンダーのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	目的	解像度	重量	消費電力
FSI	FORUM Sounding Instrument	ESA	FORUM	2027	放射線収支	15km/ 0.75km	—	—
IKFS-3	Infra Red Fourier Spectrometer - 3	Roscosmos	Meteor-MP N1 Meteor-MP N2	2025	温度・湿度・ オゾン・温室 効果ガス	14km	—	—
IRFS-GS	Infrared Fourier-transform Spectrometer - Geostationary	Roscosmos	Electro-M N1 Electro-M N2 Electro-M N3	2025	温度・湿度・ 風速	4km	—	—
IASI-NG	Infrared Atmospheric Sounder Interferometer - New Generation	CNES	Metop-SG-A1 Metop-SG-A2 Metop-SG-A3	2024	温度・湿度・ オゾン・温室 効果ガス	24km	360kg	500W
IRS	Infra Red Sounder	ESA	MTG-S1 MTG-S2	2024	温度・湿度・ 風速	4.0km	400kg	750W
PREFIRE	Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment	NASA	PREFIRE	2023	スペクトル フラックス	12.7km	3kg	6W
TANSO-3	Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations	MOE	GOSAT-GW	2023	大気化学・ エアロゾル	—	—	—
HIRAS-2	Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder - 2	CMA	FY-3E FY-3F FY-3H FY-3J	2021	温度・湿度・ オゾン・温室 効果ガス	14km	—	—
TANSO-FTS2	Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations - Fourier Transform Spectrometer / 2	JAXA	GOSAT-2	2019	大気化学・ エアロゾル	10.5km	329kg	400W
HIRAS	Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder	CMA	FY-3D	2018	温度・湿度・ オゾン・温室 効果ガス	16km	120kg	129W

出所) OSCAR

E) 光学イメージャ

- 光学イメージャ (Lightning Imager) は、1960 年から 9 種類のものが開発されており、2016 年以降は 6 種類開発されている。最近開発が相対的に盛んになってきた分野といえる。
- 主に降水量や電場などが観測の対象となっている。

図表 210 光学イメージャのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	目的	解像度	重量	消費電力
LM	Lightning Mapper	Roscosmos	Electro-M N1 Electro-M N2 Electro-M N3	2025	降水量・NOx・電場	TBD	—	—
LI	Lightning Imager	ESA	MTG-I1 - 4	2023	降水量・NOx・電場	4.5km	60kg	60W
MMIA	Modular Multispectral Imaging Array	ESA	ISS ASIM	2018	超高層雷放電	300-600m	—	—
GLM	Geostationary Lightning Mapper	NOAA	GOES-16 -18, U	2017	降水量・NOx・電場	8km	65kg	260W
LIS	Lightning Imaging Sensor	NASA	ISS LIS	2017	降水量・NOx・電場	4km	21kg	33W
LMI	Lightning Mapping Imager	CMA	FY-4A FY-4C FY-4D FY-4E FY-4F FY-4G	2017	降水量・NOx・電場	7.8km	—	—

出所) OSCAR

F) 広帯域放射収支計

- 広帯域放射収支計 (Broadband Earth Radiation Radiometer) は、1960 年から 16 種類のものが開発されており、2016 年以降は 4 種類開発されている。

図表 211 クロスナディア短波長サウンダーのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	目的	解像度	重量	消費電力
Libera	Libera	NASA	JPSS-3	2027	放射収支	—	—	—
ERBR	Earth Radiation Budget Radiometer	Roscosmos	Electro-M N1 Electro-M N2 Electro-M N3	2025	放射収支	50km	—	—
BBR	Broad-Band Radiometer	ESA	EarthCARE	2023	放射収支	10km	21.6kg	39W
ERM-2	Earth Radiation Measurement - 2	CMA	FY-3H	2023	放射収支	TBD	—	—
NISTAR	NIST Advanced Radiometer (NIST = National Institute of Standards and Technology Advanced Radiometer)	NASA	DSCOVR	2015	放射収支	—	23.5kg	—

出所) OSCAR

G) 太陽放射照度計

- 太陽放射照度計（Solar Irradiance Monitor）は、1960年から18種類のもが開発されており、2016年以降は4種類開発されている。

図表 212 太陽放射照度計のリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	主物理量	解像度	重量	消費電力
GGAK-E/ISP-2M	GGAK-L / Solar constant sensor	Roscosmos	Electro-L N4 Electro-L N5 Electro-M N1 Electro-M N2 Electro-M N3	2023	積分太陽定数	N/A	—	—
SIM-2	Solar Irradiance Monitor - 2	CMA	FY-3E FY-3H FY-3J	2021	太陽光放射照度	N/A	—	—
SSIM	Solar Spectral Irradiance Monitor	CMA	FY-3E FY-3J	2021	太陽光放射照度	N/A	—	—
TSIS	Total and Spectral Solar Irradiance Sensor	NOAA	ISS TSIS-1 ISS TSIS-2	2018	太陽光放射照度	N/A	30kg	40W

出所) OSCAR

H) 円錐型マイクロ波放射計

- 円錐型マイクロ波放射計（Conical Scanning Microwave Radiometer）は、1960年から30種類のもが開発されており、2016年以降は8種類開発されている。
- 対象物理量的には海氷・温度・塩分・海風・土壌水分量など多岐に渡る。

図表 213 円錐型マイクロ波放射計のリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	主物理量	解像度	重量	消費電力
CIMR	Copernicus Imaging Microwave Radiometer	ESA	CIMR	2028	海氷・温度・塩分	4-50km	—	—
ICI	Ice Cloud Imager	ESA	Metop-SG-B1 Metop-SG-B2 Metop-SG-B3	2025	雪氷	15km	70kg	80W
MTVZA-GY-MP	Imaging/Sounding Microwave Radiometer for Meteor-MP	Roscosmos	Meteor-MP N1 Meteor-MP N2	2025	降水量	12-250km	100kg	80W
MWI	Micro-Wave Imager	ESA	Metop-SG-B1 Metop-SG-B2 Metop-SG-B3	2025	降水量	—	220kg	250W
MWI	MicroWave Imager on WSF-M	DoD	WSF-M1	2024	海洋表面風・熱帯低気圧	38*23km/ 15*10km	—	—
AMSR-3	Advanced Microwave Scanning Radiometer - 3	JAXA	GOSAT-GW	2023	多目的	—	—	—
MWRI-RM	Micro-Wave Radiation Imager for the Rainfall Mission	CMA	FY-3G FY-3I	2023	降水量	—	—	—
COWVR	Compact Ocean Wind Vector Radiometer	NASA	ISS COWVR	2022	海上風	—	59kg	40W
SMAP	Soil Moisture Active-Passive (intended as payload)	NASA	SMAP	2015	土壌水分	3-40km	356kg	448W

出所) OSCAR

I) クロストラック型マイクロ波放射計

- クロストラック型マイクロ波放射計（Cross-Track Microwave Radiometer）は、1960 年から 40 種類のもが開発されており、2016 年以降は 8 種類開発されている。
- 対象物理量的には温度・湿度。水蒸気などとなっており、主に NASA・ESA で開発が進められている。

図表 214 クロストラック型マイクロ波放射計のリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	目的	解像度	重量	消費電力
MWR (AWS)	Microwave Radiometer (AWS)	ESA	AWS AWS-PFM	2024	温度・湿度	10-40km	—	—
MWS	Micro-Wave Sounder	ESA	Metop-SG-A1 -3	2024	温度・湿度・降水量	17-40km	132kg	137W
MW radiometer	Microwave radiometer	NASA	SWOT	2023	水蒸気補正	30km	27kg	31W
AMR-C	Advanced Microwave Radiometer - C	NOAA	CRISTAL Sentinel-6A Sentinel-6B	2021	水蒸気補正	25km	—	—
MWTS-3	Micro-Wave Temperature Sounder - 3	CMA	FY-3E,F,H,J	2021	温度	16km	—	—
TMS	TROPICS Millimeter-wave Sounder	NASA	TROPICS-01 -07	2021	温度・湿度	26-50.7km	—	—
MM Radiometer	Millimetre-wave Radiometer	NASA	ISS TEMPEST-1 ISS TEMPEST-D	2018	熱帯低気圧	—	1.23kg	—
MWR	Micro-Wave Radiometer	ESA	Sentinel-3A -D	2016	水蒸気補正	20km	24.2kg	26W

J) リムサウンダー

- リムサウンダー（Limb Sounder）は、1960 年から 35 種類のもが開発されており、2016 年以降は 5 種類開発されている。
- 対象物理量的には気体やエアロゾルなどである。

図表 215 リムサウンダーのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	主物理量	解像度	重量	消費電力
ACS-limb	Atmospheric Composition Spectrometer (limb-scanning component)	Roscosmos	Meteor-MP N1 Meteor-MP N2	2025	大気化学	水平: 300km 垂直: 3km	—	—
ALTIUS	Atmospheric Limb Tracker for Investigation of the Upcoming Stratosphere	ESA	ALTIUS	2025	オゾン・微量気体・エアロゾル	水平: 300km 垂直: 1km	—	—
OMS-limb	Ozone Monitoring Suite - limb scanning unit	CMA	FY-3F	2023	大気化学	水平: 300km 垂直: 3km	—	—
MIGHTI	Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging	NASA	ICON	2020	風・温度	水平: <500km	—	—
AIUS	Atmospheric Infrared Ultra-spectral spectrometer	CNSA	GF-5 GF-5-02	2018	大気化学	水平: 300km	—	—

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	主物理量	解像度	重量	消費電力
						垂直: 2km		

K) ライダー

- ライダー (Lidar) は、1960 年から 15 種類のものが開発されており、2016 年以降は 7 種類開発されている。
- 対象物理量的には高度や氷床・植生・CO₂/エアロゾルなど多岐に渡る。NASA がプレゼンスを示している。

図表 216 ライダーのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	打上予定	主物理量	解像度	重量	消費電力
IPDA lidar	Integrated Path Differential-Absorption Lidar	DLR	MERLIN	2026	CH ₄	50km	32.5kg	57W
ATLID	Atmospheric Lidar	ESA	EarthCARE	2023	エアロゾル・雲頂高度	水平: 30m 垂直: 100m	230kg	310W
ACDL	Aerosol and Carbon Detection Lidar	CNSA	DQ-1 DQ-2	2022	CO ₂ ・エアロゾル	陸上: 50m 海上: 100m	—	—
MOLI lidar	Multi-footprint Observation Lidar and Imager - Lidar component	JAXA	ISS MOLI	2022	植生	25m	—	—
ATLAS	Advanced Topographic Laser Altimeter System	NASA	ICESat-2	2019	氷床・雲頂高度・エアロゾル	水平: 66m 垂直: 10cm	298kg	300W
GEDI Lidar	Global Ecosystem Dynamics Investigation Lidar	NASA	ISS GEDI	2019	植生・生態系・氷	25m	230kg	516W
ALADIN	Atmospheric Laser Doppler Instrument	ESA	Aeolus	2018	風・大気後方散乱・消衰係数	水平: 87km 垂直: 250m~2km	500kg	840W
CATS	Cloud-Aerosol Transport System	NASA	ISS CATS	2015	大気汚染・塵・煙・エアロゾル	水平: 350m 垂直: 30m	500kg	1000W

L) 雲/降雨レーダー

- 雲/降雨レーダー (Cloud and Precipitation Radar) は、1960 年から 6 種類のものが開発されており、2016 年以降は 3 種類開発されている。
- 対象物理量的は名前の通り、雲・降水量であり、JAXA がプレゼンスを示している。

図表 217 雲/降雨レーダーのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	主物理量	解像度	重量	消費電力
CPR	Cloud Profiling Radar for Earth-CARE	JAXA	EarthCARE	2023	雲水	水平: 0.65km*1km 垂直: 400m	230kg	308W
PRM	Precipitation Measurement Radar	CMA	FY-3G FY-3I	2023	降水	水平: 5km 垂直: 250m	—	—
RainCube	Radar In a CubeSat	NASA	ISS RainCube	2018	降水	水平: 7.9km 垂直: 120m	5.5kg	22W

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	主物理量	解像度	重量	消費電力
DPR	Dual-frequency Precipitation Radar	JAXA	GPM Core Observatory	2014	降水	水平:5.0km 垂直:250m	780kg	710W

M) マイクロ波散乱計

- マイクロ波散乱計 (Scatterometer) は、1960 年から 14 種類のものが開発されており、2016 年以降は 5 種類開発されている。
- 対象物理量は海面風速が主体である。

図表 218 マイクロ波散乱計のリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	目的	解像度	重量	消費電力
SCA	Scatterometer	ESA	Metop-SG-B1 Metop-SG-B2 Metop-SG-B3	2025	海面風・ 土壌水分	25km	600kg	540W
OSCAT-3	Scatterometer for Oceansat-3	ISRO	OceanSat-3/3A	2022	海面風速	6.25/25/50km	—	—
WindRAD	Wind Radar	CMA	FY-3E-J	2021	海面風・ 土壌水分	10 or 25km	—	265W
SCAT	Scatterometer	NSOAS	HY-2C HY-2F HY-2G	2020	海面風速	25km	—	—
SCAT	Scatterometer	CNSA	CFOSAT CFOSAT follow-on	2019	海面風速	10km	—	—
RapidScat	Rapid Scatterometer	NASA	ISS RapidScat	2014	海面風速	25km	200kg	220W

N) マイクロ波高度計

- マイクロ波高度計 (Radar Altimeter) は、1960 年から 22 種類のものが開発されており、2016 年以降は 10 種類開発されている。
- 対象物理量は海面高度や波高が主体である。

図表 219 マイクロ波高度計のリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	目的	解像度	重量	消費電力
IRIS	Interferometric Radar altimeter for Ice and Snow	ESA	CRISTAL	2027	極域氷	10km		
Altimeter	Altimeter	NASA	SWOT	2023	海面風速・高 度・有義波高	25km	70kg	78W
KaRIN	Ka-band Radar Interferometer	NASA	SWOT	2023	水深・海況	水平: 陸上 50m 海上 1km 垂直: 陸上 10cm 海上 1m	300kg	1100 W
Altimeter	Altimeter	JAXA	COMPIRA	2022	海面風速・ 高度・有義波高	20km	—	—
SHIOSAI	SAR Height Imaging Oceanic Sensor with Advanced Interferometry	JAXA	COMPIRA	2022	海面高度	5km	—	—
Poseidon-4	Poseidon-4	ESA	Sentinel-6A Sentinel-6B	2021	有義波高・ 海面風速	20km	60kg	90W

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	目的	解像度	重量	消費電力
ALT	Radar Altimeter	NSOAS	HY-2C HY-2F HY-2G	2020	有義波高・海面風速	20km	—	—
SWIM	Surface Waves Investigation and Monitoring instrument.	CNES	CFOSAT CFOSAT follow-on	2019	波浪・有義波高	18km	—	—
Poseidon-3B	Poseidon 3B	CNES	JASON-3	2016	有義波高・海面風速	30km	70kg	78W
SRAL	Synthetic aperture Radar Altimeter	ESA	Sentinel-3A Sentinel-3B Sentinel-3C Sentinel-3D	2016	有義波高・海面風速	20km	60kg	90W

O) GNSS 電波掩蔽観測

- GNSS 電波掩蔽観測（GNSS Radio-Occultation）は、1960 年から 28 種類のもので開発されており、2016 年以降は 10 種類開発されている。
- 対象物理量は温度・湿度が主体である。

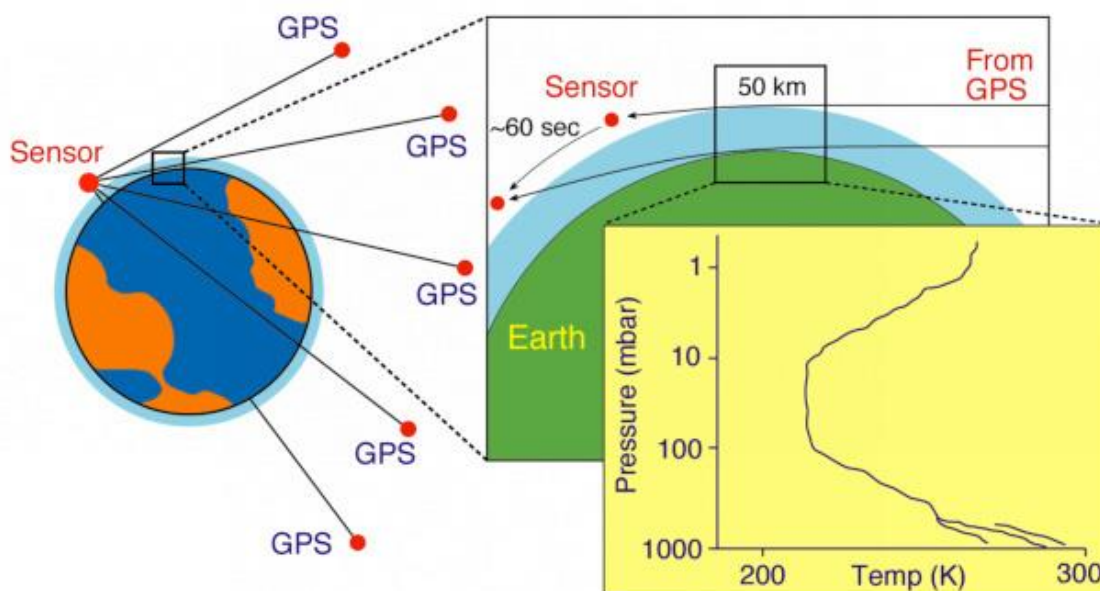
図表 220 GNSS 電波掩蔽観測のリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	主物理量	解像度	重量	消費電力
ARMA-MP	Radio occultation instrument for Meteor-MP	Roscosmos	Meteor-MP N1 Meteor-MP N2	2025	温度・湿度・地表	—	—	—
RO	Radio Occultation sounder	ESA	Metop-SG-A1 -3 Metop-SG-B1 -3	2024	温度・湿度	水平：300km 垂直：0.5km	22kg	30W
CION-2	CICERO-2 Instrument for GNSS-RO	GeoOptics	CICERO-2	2022	温度・湿度・風・降水・降水・土地被覆・土壤水分	水平：300km 垂直：0.5km	10kg	—
GNOS-2	GNSS Radio Occultation Sounder - 2	CMA	FY-3E,F,G,H,I,J	2021	温度・湿度・海上風速	水平：300km 垂直：0.5km	—	—
GNSS-RO	Global Navigation Satellite System - Radio Occultation	NOAA	Sentinel-6A Sentinel-6B	2021	温度・湿度	水平：300km 垂直：0.5km	6kg	50W
Pyxis-RO	Pyxis-RO	PlanetiQ	GNOMES-1 -3	2020	温度・湿度	水平：300km 垂直：0.5km	—	—
Tri-G	Triple G (GPS, Galileo, GLONASS)	NASA	GRACE-FO (2 sats)	2019	温度・湿度	水平：300km 垂直：0.5km	6kg	50W
ROHPP	Radio Occultations and Heavy Precipitation with PAZ	CDTI	SEOSAR/Paz	2018	温度・湿度・降雨	水平：300km 垂直：0.5km	4.6kg	16W

略称	センサー名	保有者	衛星名	開始	主物理量	解像度	重量	消費電力
CION	CICERO Instrument for GNSS-RO	GeoOptics	CICERO	2017	温度・湿度	水平：300km 垂直：0.5km	1.2kg	8W
STRATOS	STRATOS	SPIRE	Lemur-2	2016	温度・湿度	水平：300km 垂直：0.5km	—	—

- 代表例：GeoOptics 社
Crunchbase 社のデータベースによれば、資金調達は 4 ラウンド行っており、資金調達総額 20.8mUSD となっている。

図表 221 GNSS 電波掩蔽観測の仕組み



出所) GeoOptics 社ホームページ

図表 222 GeoOptics 社衛星の特徴

> ALTITUDE	500 km
> SPEED	25,200 kph
> ORBITING THE EARTH	every 100 mins
> COMPLETING GLOBAL COVERAGE	every 12 hours
> WEIGHT	10 kg
> SIZE	shoebox

出所) GeoOptics 社ホームページ

P) 合成開口レーダー (SAR)

- 合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar) は、1960 年から 42 種類のものが開発されており、2016 年以降は 21 種類開発されている近年でも大きなシェアをもつセンサーである。
- 対象物理量は森林・陸・海・土壌水分など多岐に渡り、各国政府機関・民間プレイヤーが開発を実施している。

図表 223 合成開口レーダーのリスト

略称	センサー名	保有者	衛星名	打上予定	目的	解像度	重量	消費電力
ROSE-L	Radar Observation System for Europe in L-band	ESA	ROSE-L	2028	林業・土壌水分・極氷	<=5m	—	—
HRWS-SAR	High Resolution Wide Swath X-Band Digital Beamforming SAR	DLR	HRWS-SAR	2026	海・陸・氷	0.25-25m	—	—
BRLK “Briz”	Onboard Radar Complex (X-band)	Roscosmos	Meteor-MP N1/2 Obzor-R N1-4	2023	陸	0.5 or 1km	—	—
MeteoSAR	Meteorological Synthetic Aperture Radar	Roscosmos	Meteor-M N2-3~6	2023	海・陸・氷	1m/5-500m	—	—
SAR-L (NISAR)	SAR-L for the NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar	NASA	NI-SAR	2023	海・陸・土壌水分	2-7m	—	—
SAR-P	Synthetic Aperture Radar - P-band	ESA	BIOMASS	2023	植生	50-60m	206kg	221W
SAR-S (NISAR)	SAR-S for the NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar	NASA	NI-SAR	2023	海・陸・土壌水分	2-6m	—	—
L band SAR	L-band differential interferometric synthetic aperture radar	CNSA	Ludi-Tance 1 01A-B	2022	多目的	3m	3200kg	—
PALSAR-3	Phased-Array L-band Synthetic Aperture Radar – 3	JAXA	ALOS-4	2023-	土壌水分・海洋表層	1-25m	—	—
W-SAR	W-SAR	CAST	HY-3A/B	2022	陸・海	1-10m	—	—
UMBRA-SAR	SAR instrument for UMBRA satellites	UMBRA	UMBRA	2021	地表	0.25-10m	70kg	500W
X-SAR	X-SAR	Synspective	StriX-α/β	2021	海・陸・氷	1-3m	150kg	—
CSG-SAR	COSMO-SkyMed Second Generation Synthetic Aperture Radar	ASI	CSG-1 – 4	2020	海・陸・氷	0.35-40m	810kg	17000W
Capella SAR	Capella SAR	Capella	Capella	2019	海・陸・氷	0.3m	—	—
ICEYE SAR	ICEYE SAR	ICEYE	ICEYE	2019	海・陸・氷	1-15m	—	—
SAR RCM	Synthetic Aperture Radar (C-band) for RadarSat constellation	CSA	RCM-1 -3	2019	海・陸・氷	3-100m	600kg	1270W
SAR-L	Synthetic Aperture Radar (L-band)	CONAE	SAOCOM-1A/B 2A/B	2019	海・陸・氷	10-100m	1500kg	—
S-SAR	S-band Synthetic Aperture Radar	UKSA	NovaSAR-S	2018	土壌水分・植生	6-30m	—	—
SAR-X	Synthetic Aperture Radar (X-band)	CDTI	SEOSAR/Paz	2018	海・陸・空	1-15m	—	—
XSAR	X-band Synthetic Aperture Radar	NEC	ASNARO-2	2018	海・陸・空	1-16m	—	—
SAR-C	Synthetic Aperture Radar, C-band	CNSA	GF-12(-02/03)	2016	海・陸・空	1m	—	—

略称	センサー名	保有者	衛星名	打上 予定	目的	解像 度	重量	消費 電力
			GF-3(- 02/03)					

Q) 重力センシング

- 重力センシング (Synthetic Aperture Radar) は、1960 年から 6 種類のものが開発されており、2016 年以降は新規のものは開発されていない。他方、2018 年は同じセンサーを積んだ後継機が NASA から打ち上げられている。
- 対象物理量は重力場である。

図表 224 重力センシングのリスト

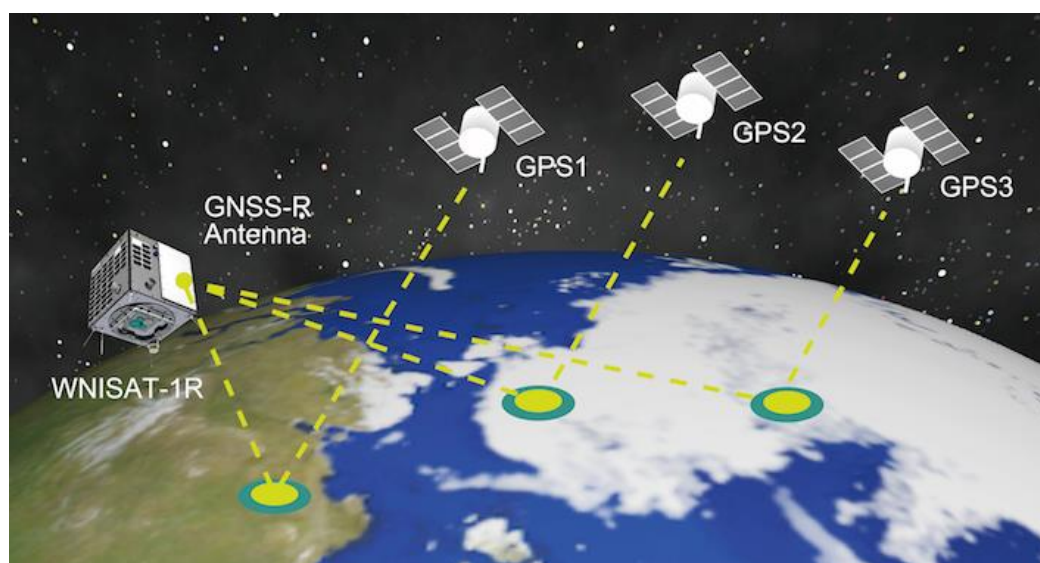
略称	センサー名	保有者	衛星名	打上 予定	主 物理 量	解像 度	重量	消費 電力
ACC	Accelerometer	ESA	SWARM-A SWARM-B SWARM-C	2014	重力 場	N/A	—	—
EGG	3-Axis Electrostatic Gravity Gradiometer	ESA	GOCE	2009	重力 場	N/A	150kg	75W
SSTI	Satellite-to-Satellite Tracking System	ESA	GOCE	2009	重力 場	N/A	6.1kg	35W
HAIRS	High Accuracy Inter-satellite Ranging System	NASA	GRACE (2 sats) GRACE-FO (2 sats)	2002	重力 場	N/A	—	—
SuperSTAR	Super Space Three-axis Accelerometer for Research	NASA	GRACE (2 sats) GRACE-FO (2 sats)	2002	重力 場	N/A	—	—
STAR	Space Three-axis Accelerometer for Research mission	DLR	CHAMP	2000	重力 場	N/A	—	—

3) その他の地球観測技術

A) GNSS-R

- GNSS-R は、地球表面で反射した GPS 衛星に代表される測位衛星（GNSS 衛星）の電波を受信し、解析することで地球表面の状態を観測する方法である⁹¹⁴。GNSS 衛星は、その数の多さからコンステレーションとみなすことができ、これと SAR 画像化技術を用いた GNSS-based Bistatic SAR は新たな地球観測手段として近年注目を浴びている⁹¹⁵。
- Small Sat Conference でも GNSS-R に関する報告がされている。

図表 225 GNSS-R の概念図



出所) Weather News

Small Sat Conference 2022

The NASA Cyclone Global Navigation Satellite System SmallSat Constellation

Christopher Ruf, Hugo Carreno Luengo University of Michigan (※筆頭)

【ポイント】

2016年12月15日に打ち上げられた8機のマイクロ衛星コンステレーションであるNASAのCyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS)ミッションにおいて、SmallSatコンステレーションの利用により可能となった工学的及び科学的側面についてのハイライトを要約

【概要】

➤ CYGNSS の概要

⁹¹⁴ <https://jp.weathernews.com/news/20598/>

⁹¹⁵ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7763647/>

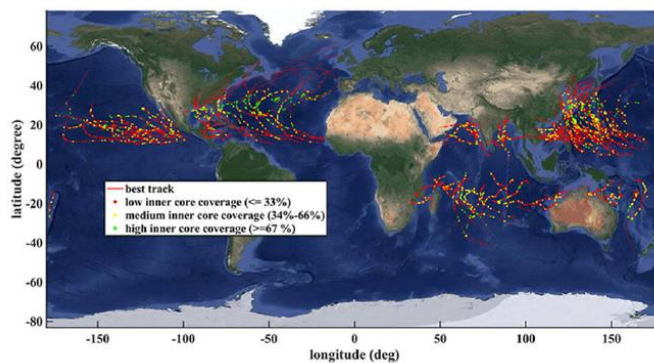
- CYGNSS は、小型衛星コンステレーションを使用した初めての NASA 地球科学ミッション
 - ・ 高度 520km、軌道傾斜角 35°の円軌道上に配置された 8 機の衛星から構成され、コンステレーションの平均再訪問時間は～7 時間。
 - ・ 各衛星は、4 チャンネルのバイスタティックレーダー受信機を搭載しており、GPS 衛星から送信され、地表面で宇宙空間に散乱した信号を測定する。
 - ・ 海上では、surface scattering cross section を直接測定し surface roughness、near-surface wind speed、air-sea latent heat flux を推定。陸上では、地表付近の土壤水分の推定や洪水氾濫の画像化も可能。
 - ・ GPS のマイクロ波周波数が低いため、降水のレベルに関わらず測定可能。
 - ・ コンステレーションの衛星数と連続的なデータ取得からサンプリングの空間密度と再訪時間が向上し、熱帯低気圧の発達を検知、熱帯風の日変化、土壤水分変動の解決が可能になる。
 - ・ Engineering commissioning は 2017 年 3 月に完了し、現在、ミッションは science operations phase にある。

➤ 報告されている内容は以下の項目

- SCIENTIFIC RESULTS OVER OCEAN

- ・ 熱帯低気圧のライフサイクルをサンプリングできる。2018 年から 2020 年の間に CYGNSS がサンプリングした、カテゴリ-3 以上の嵐。

CYGNSS が観測した Storm (2018～2020 年)



- ✓ 赤い線が嵐のライフサイクルにおける進路
- ✓ 点は CYGNSS のオーバーパスがあった場所で、点の色は inner core の密度を示す
- ✓ その他の観測項目は以下のとおり

- ・ Ocean Surface Wind Speed (海面風速)
- ・ Hurricane Prediction and Data Assimilation (ハリケーン予測とデータ同化)
- ・ Heat Flux at the Air/Sea Interface (大気/海洋界面の Heat Flux)
- ・ 海洋上で行われる測定は表面粗さに直接影響され、また表面近くの風速に影響されるため。風速を決定することができる。測定値は降水量の存在にはあまり影響されないため、豪雨が普通である熱帯低気圧の地表付近の風速を推定することが可能。ハリケーンとその付近の風速測定値を数値気象予測モデルに同化し、予測スキルの改善を実証

● SCIENTIFIC RESULTS OVER LAND

- ・ Soil Moisture (土壌水分)
- ・ Freeze/Thaw Detection (凍結/融解 検知)
- ・ Inland Water Body Extent (内陸水範囲)
- ・ 陸上では、土壌からの GNSS 反射は表面の誘電特性に敏感である。解凍状態では、土壌の誘電特性は体積含水率に強く依存するため、CYGNSS 観測から土壌水分を推定することができる。土壌の凍結状態から融解状態への移行は誘電率にも大きな影響を与えるため CYGNSS は表面の凍結/融解状態を検出することができる。内陸水域が存在すると GNSS 信号の強いコヒーレント反射が起き高空間分解能で水域マップを生成することが可能

➤ CYGNSS コンステレーションの 8 機の衛星は、5 年以上経過した後も正常に動作しており、継続的な観測を行い、科学研究コミュニティのための一連の工学および科学データプロダクトを生成している。

B) AIS

- 船舶の位置を導出する AIS Receiver が LEO 衛星に搭載されるケースが増加している。下記の Cubesat 用の AIS Receiver は 55g 以下と相当軽量である。

図表 226 Satlab A/S 社の LEO 衛星用 AIS Receiver

The QubeAIS Receiver and Polaris 4-channel AIS Receiver by Satlab A/S



The **QubeAIS Receiver** is a fully self-contained SDR-based AIS receiver suitable for LEO satellite missions. It weighs less than 55 g and uses less than 1 W during full load. The product has flight heritage from several missions including AAUSAT3 for which Aalborg University has public data. The system is designed to be easy to calibrate and is in-orbit configurable for 162 MHz or 156.8 MHz long-range AIS channels.

SPECS

data interface	UART CAN
mechanical vibration	14.1 Grms
lead time ¹	8 wk
data storage	1 GB
mass	< 55 g
power consumption ²	< 1 W

1. Standard lead time

2. during full load

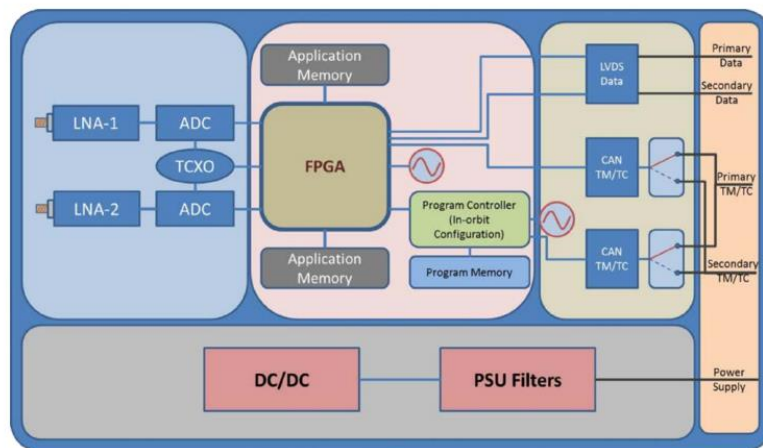
出所) <https://satsearch.co/products/satlab-qubeais-receiver>

- オンボード処理を可能としているものもある。Honeywell 社の AIS-MS03 は On-Board Processing (OBP) と On-Ground Processing (OGP)のためのスペクトルキャプチャの同時実行を可能としているとのことである。

図表 227 Hoenywell 社の AIS-MS03



GENERAL	
MASS	1400g
DIMENSIONS	228 x 180 x 41 mm
DC POWER CONSUMPTION	6 W maximum, with two channels powered
SUPPLY VOLTAGE	28V ± 6V
OPERATING TEMPERATURE RANGE	-10°C to +50°C
NON-OPERATING TEMPERATURE RANGE	-35°C to +80°C
RADIATION TOLERANCE	10 KRad
RECEIVERS	
POLARIZATIONS	2, coherent
AIS CHANNELS PER POLARIZATION	4
DEFAULT CHANNEL FREQUENCIES	161.975 MHz, 162.025 MHz, 156.775 MHz, 156.825 MHz,
SUPPORT FOR FUTURE FREQUENCIES	161.950 MHz, 162.000 MHz
CHANNEL BANDWIDTH	25 kHz
SENSITIVITY	< -118 dBm (10% AIS Packet Error Rate)
SIMULTANEOUS DYNAMIC RANGE	55 dB
RF INPUT BANDWIDTH	156.0 MHz to 163.0 MHz
FREQUENCY STABILITY	±0.5 ppm
PHASE COHERENCY	< 5°
PASSBAND RIPPLE	< 1dB
DIGITAL PROCESSOR	
RAW SAMPLE RATE	> 28.8 Ksps
SAMPLE BIT DEPTH	12 bits
OPTIONAL BUILT-IN STORAGE CAPACITY	8 GB Flash (4 x 2GB banks)
INTERFACES	
RF	2 x SMA-F, 50 Ohm
TM/TC	Dual redundant CAN bus
HIGH SPEED DATA	Dual redundant Synchronous Serial LVDS Interface up to 50 Mbps



AIS-MS03 Module

出所) https://research.csiro.au/cceo/wp-content/uploads/sites/252/2020/09/NovaSAR-1_AIS_Receiver.pdf

C) 衛星 IoT

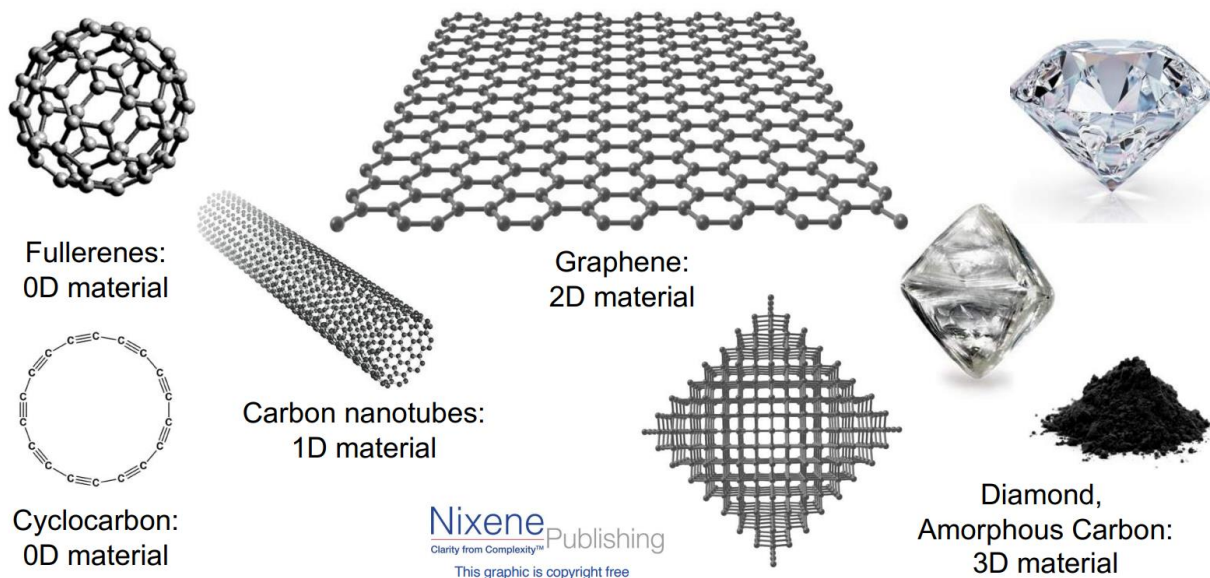
- IOT 向け通信衛星は 2.1 2) KK)の章を参照のこと

4) グラフェンについて

A) 概要

- グラフェンは、炭素原子が六角形状に結び付いた 2 次元の素材である。破壊的なイノベーションを持つ新素材として 2000 年代前半から注目されている。主な特徴は下記の通りである。

図表 228 グラフェンのイメージと他の炭素素材との違い



出所) Nixene Publishing

図表 229 グラフェンの特徴

Graphene is a Frontier Material

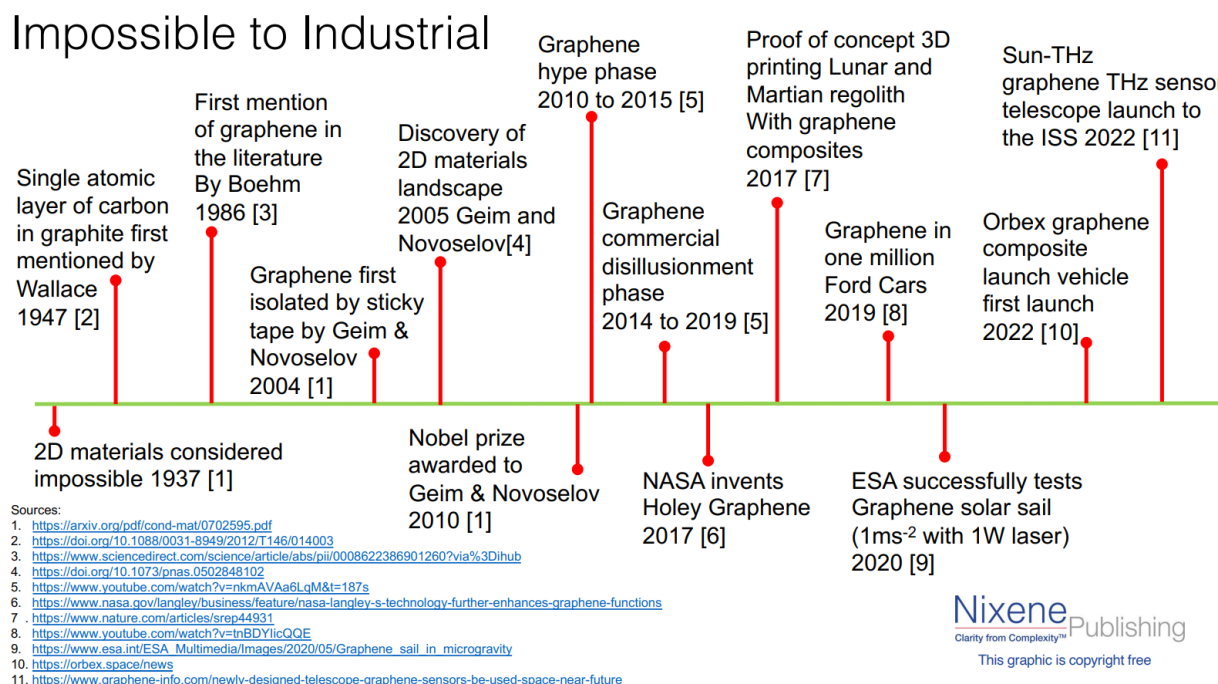
200 times stronger than steel		Highest melting point of any material in a vacuum	
World's best conductor of electricity		100 times more tear resistant than steel	
Very stable material Non-toxic		World's best conductor of heat	
Flexible and transparent		World's most fatigue resistant material	
		World's most impermeable material	

Source: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-physicsprize2010.pdf>

出所) Nixene Publishing

- 宇宙業界でもかなりの用途で利用されており、世界最薄の Solar Sail、レゴリスの 3D プリンティングやロケット、テラヘルツモニタリングのセンサーなどがグラフェンを用いて開発されている。
- 他方、量産化という状態にいたってはならず、この技術をどう商用化するかを検討する The Graphene Council⁹¹⁶といった団体も存在する。

図表 230 グラフェンの変遷



出所) Nixene Publishing

B) 開発事例

i. 赤外線センサー

- 2019年2月3日、三菱電機はグラフェンによる光ゲート効果を用いた世界最高感度の赤外線センサー披露し、高感度の赤外線センサーとして用いられている量子型センサーと比べて10倍以上の最高感度を達成したと発表した⁹¹⁷。大阪大学との共同研究成果であり、2025年度以降の事業化を目指し開発を進める方針で、開発した試作品は量子型センサーと同様に冷却が必要だが、今後は冷却が不要になるような開発も進めていくという⁹¹⁸。

ii. マイクロ波センサー

①Raytheon

- 2020年10月21日、Raytheon Intelligence & SpaceはRaytheon BBNがグラフェンとジョ

⁹¹⁶ <https://www.thegraphenecouncil.org/>

⁹¹⁷ <https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2019/pdf/0213-p15.pdf>

⁹¹⁸ <https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/1902/14/news055.html>

セフソン接合デバイスを使用して、ボロメーター (bolometer) と呼ばれるセンサーを構築し⁹¹⁹、結果が科学雑誌 *Nature* に掲載された⁹²⁰と発表した。既存のセンサーよりも 100,000 倍感度の高いマイクロ波放射線検出器とのことで、衛星通信、レーダー、Lidar、暗黒物質の探索を含む分野で大きな意味を持つ画期的なことであるとしている。

- なお、bolometer は入射電磁波のエネルギーを熱化して検出するもので原理的には全ての周波数で使用できるが、多数の光子が次々と検出される場合には検出器自体の波長分解能力はほとんど期待できない。他の原理による検出器を作るのが困難な場合に多用され、遠赤外線からサブミリ波の周波数帯で利用されるほか、X 線検出器としても利用される⁹²¹。

②Emberion⁹²²と Graphene Flagship⁹²³

- フィンランドで赤外線カメラなどを手掛ける Emberion は、赤外線イメージング事業をさらに発展させるために 600 万ユーロの資金を調達している。Emberion は、グラフェンやその他の層状材料の応用技術開発におけるリーダーの一つで、Graphene Flagship のパートナーである。
- Graphene Flagship は、Human Brain Project や Quantum Technologies などの Flagship とともに、EU が主要な科学技術の課題に対処し、EU のイノベーションを促進するために立ち上げたものである⁹²⁴。

⁹¹⁹ <https://www.raytheonintelligenceandspace.com/news/2020/10/21/delivering-promise-graphene>

⁹²⁰ https://www.nature.com/articles/s41586-020-2752-4.epdf?sharing_token=92bAOS_32e3xR5FLmatM4dRgN0jAjWel9jnR3ZoTv0OdC4FLDHOCgv4TAZ4ETQKFSH-_llmnHi4RrpD7XSkHLlzYQfdeIDrM-YGLODZF2ct2Aq6OPFM1o45tjZ25ng4PgDOOVllqNDLQVljgWtchinC2NNAJ3-QIu0kWNsJ-7FQ%3D

⁹²¹ <https://astro-dic.jp/bolometer/>

⁹²² <https://www.emberion.com/>

⁹²³ <https://graphene-flagship.eu/>

⁹²⁴ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/flagships>

5) 日本の弱み・強みの分析

- OSCARのデータベースには各センサー種の中でどのセンサーが最もミッションを達成できるか、といった観点で評価がなされている。
- そのうち日本の衛星のうち、優先度1・2のセンサーを搭載している衛星種とみなされた数を下図表にとりまとめている。
- これを見ると、雲・降水量センサーは日本の強みといえるし、その他のセンサー種でも日本がプレゼンスを発揮できている部分がある。

図表 231 センサー種類ごとの日本保有衛星のプレゼンス

LN	センサー種類	衛星種類	日本保有衛星の衛星種数		日本保有衛星種のシェア[%]
			優先度 1	優先度 2	
1	Cloud and precipitation profiling by radar	4	1	1	50.0
2	Ocean colour imagery from LEO	17	1	1	11.8
3	Multi-purpose VIS/IR imagery from GEO	27	2	0	7.4
4	High-resolution imagery for land observation	29	1	1	6.9
5	MW imagery	70	4	0	5.7
6	Space Weather: Solar activity monitoring	97	1	4	5.2
7	Instruments covering 400-700 nm	99	5	0	5.1
8	IR temperature/humidity sounding from LEO	22	1	0	4.5
9	Instruments covering 8.5-15 micrometers	45	2	0	4.4
10	Instruments covering 1-300 GHz	105	4	0	3.8
11	Space weather: Energetic particles monitoring	411	10	2	2.9
12	Space Weather: Field and wave monitoring	141	2	1	2.1
13	Synthetic Aperture Radar	19	0	4	21.1
14	Cross-nadir IR spectrometry (for chemistry) from LEO	10	0	1	10.0
15	Multi-purpose VIS/IR imagery from LEO	16	0	1	6.3
16	Instruments covering 1300-3000 nm	17	0	1	5.9
17	Radar altimetry	21	0	1	4.8
18	Instruments covering 5.0-8.5 micrometers	45	0	2	4.4
19	Instruments covering 3.0-5.0 micrometers	35	0	1	2.9
20	Instruments covering 700-1300 nm	41	0	1	2.4
21	MW temperature/humidity sounding from GEO	0	0	0	
22	Ocean colour imagery from GEO	1	0	0	0
23	Cross-nadir SW spectrometry (for chemistry) from GEO	2	0	0	0
24	Instrument covering 15 micrometers - 1 mm (300-20,000 GHz)	2	0	0	0
25	Cross-nadir SW spectrometry (for chemistry) from LEO	5	0	0	0
26	Lidar observation (for wind, for cloud/aerosol, for trace gases, for altimetry)	6	0	0	0
27	Radio occultation sounding	8	0	0	0
28	Imagery with special viewing geometry	8	0	0	0
29	Earth radiation budget from GEO	9	0	0	0
30	Limb-sounding spectrometry	9	0	0	0
31	Cross-nadir IR spectrometry (for chemistry) from GEO	14	0	0	0
32	IR temperature/humidity sounding from GEO	14	0	0	0
33	Gravity field measuring systems	20	0	0	0

出所) OSCAR より DB 編集

2.3 センサフュージョンに関する調査

サマリー

- センサフュージョンにおいては、衛星データの処理レベルの様々な段階で、様々な組み合わせで行われており、多くの社会的／科学的インパクトに寄与している。
- 技術的には、全体的に機械学習、特に CNN を用いた研究が主流となっており、高空間分解能化／高スペクトル分解能化／分類精度の高度化、および計算コストの削減を目指したモデル／アーキテクチャの研究が活発である。
- 地球観測衛星のセンサフュージョンアルゴリズム研究においては中国が大いに先行しており、欧州が時点に続いている。米国、日本、インド等は大幅に遅れを取っている状況。
- 日本はセンサフュージョンアルゴリズム研究では中国／欧州に大幅な遅れをとっている。一方で、センサフュージョンのための有用な衛星データという観点では、豊富なアーカイブをもち、かつ様々な活用用途が見込まれる ALOS-1/2 データが強みとなるだろう。
- デスクトップ調査と IGARSS 2022 の聴講結果を踏まえると、今後は高解像度ハイパースペクトル画像、および MVIR/LWIR の波長域における HS 観測衛星等のニーズが高まると考えられる。

1) 本節における基本的な考え方

- NISAR や Albedo のように近年の衛星では複数種類のセンサを搭載し、組み合わせることで新たな示唆を得ようとする取組が行われている。例えば、Phi-sat ではオンボード AI 以外の検証もなされており、FMPL-2 (Flexible Microwave Payload - 2) では、センサの組み合わせにより観測の精度が向上するかが検証された。海氷の厚さや密度、面積の観測が行われ、Lバンドマイクロ波放射計のデータに GNSS 反射計のデータを足すと、ニューラルネットワークによる予測の精度が上がる実証された。
- センサフュージョンでは、宇宙関係機関、民間衛星観測企業、画像処理企業などが、センサの空間的分布、センサ種類、センサデータの処理装置の配置、処理に対する意思決定者間での意思疎通のためのネットワークなどの問題に対してどのように取り組むべきかという点に着目する。
- データ処理については、目的に応じたデータの関連性の把握と適切なデータ選択が重要となる。選択したデータを例えば Lebel0 で融合するか、Lebel 1 で融合するかといった、フュージョンアルゴリズムのアーキテクチャーも課題となると考える。
- センサフュージョンの普及にはレベル 0→レベル 1 処理のオープンソース化が必要といった論調もあり、このような課題についても適宜とりまとめる。

2) 本検討におけるセンサフュージョンの定義

- 本検討では、センサフュージョンを「異なるセンサ／衛星により撮影された同一地点のデータを融合させ、単一のデータを生成するプロセス」と定義する。
- センサフュージョンは、Raw data に近い低次のプロダクトから、機械学習を用いた予測の決定等の最高次のプロダクトに至るまでの様々な段階で行われ、融合するデータの処理レベルによって目的や技術課題が異なる（図表 232 参照）。
- 機械学習を用いたフュージョンアルゴリズムにおいては、中国が大いに先行しており、IGARSS 2022 においても中国の研究機関からの発表が大多数であった。
- 以降では、フュージョン分類ごとに概況や利用シーン、フュージョンによる付加価値について記載する。

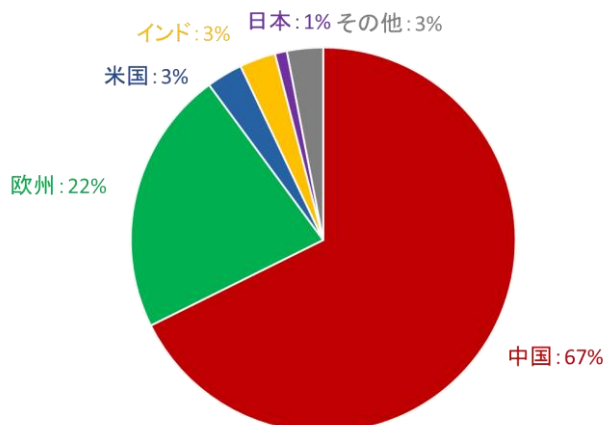
図表 232 データ処理レベル毎のセンサフュージョンの分類

	Raw Data (L0)	Cal/Val Data (~L2)	物理量 (L3,L4)	AI Ready	特徴検出／予測
Fusion 分類	低次元プロダクトのfusion		Pixel Level fusion		Feature Level fusion Decision Level fusion
目的	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 複数センサの同時点／同地点観測（主にSAR） ✓ 複数バンドによる相互補完 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 空間分解能向上 ✓ スペクトル分解能向上 ✓ SAR解析やAI処理を含む後続処理の精度向上 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 異なる特徴の融合による予測精度向上
技術課題	<ul style="list-style-type: none"> ✓ オンボード処理などによる同期 ✓ キャリブレーションモデル等の前処理のナレッジ共有 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ バンシャープニング／Unmixingなどによる超解像における機械学習モデル、アーキテクチャ 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 分類の機械学習モデル ✓ 融合そのものの機会学習モデル、アーキテクチャ
事例	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Harmony ✓ BIOMASS/NISAR/GEDI 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 全てのマルチスペクトル衛星／ハイパースペクトル衛星 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Phi-sat FMPL-2 ✓ 高頻度船舶検出サービス（スカパーJSAT）

出所) 各種調査をもとに DB にて作成

図表 233 IGARSS 2022 におけるセンサフュージョンアルゴリズム研究の国別発表数

合計: 91件



※その他: アルジェリア、サウジアラビア、シンガポール

出所) IGARSS より DB 編集

3) 低次元プロダクトのフュージョン

A) 概況

- 従来、センサフュージョンは衛星画像のフュージョンや、画像から得られた特徴や予測のフュージョンとして活用されてきた。
- 昨今、Harmony に代表されるような同時点／同地点観測による性能向上を見込むプロジェクトが立ち上がりつつある。これらのフュージョンにおいては、衛星の同期が必須となり、アルゴリズムや内部データフロー等を含むオンボード L0 処理スキームのプロトタイプ仕様と高レベルの設計等が必要となる。
- また、バイオマス量推定においては NISAR や ALOS-2 に代表される L バンド衛星と BIOMASS に代表される P バンド衛星観測データを合わせて一つの物理量を推定する試みが行われており、統一されたキャリブレーション処理を行うために低次元処理レベルでの融合が必要となると考えられる。

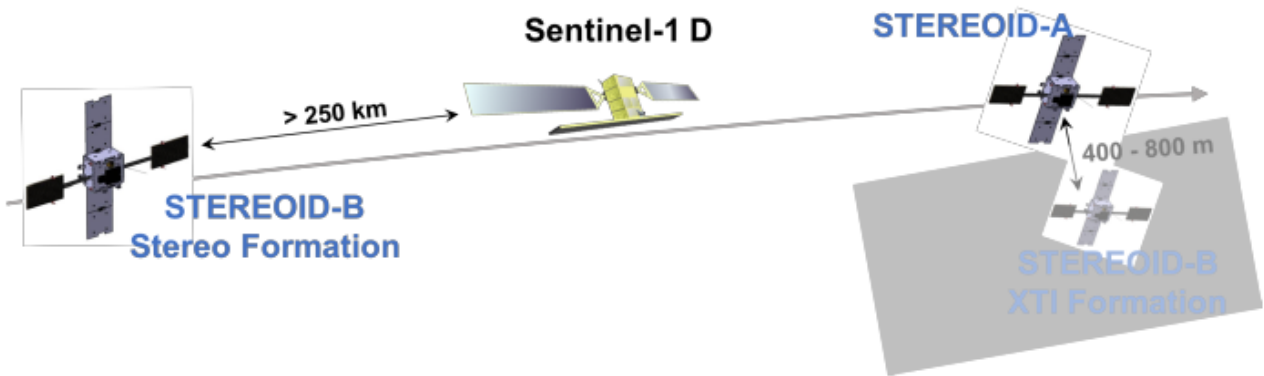
B) 事例 : Harmony ミッション (ESA)

i. 概要

- Harmony (旧 STEOROID) ミッションは 2 つの 500kg 程度の衛星で構成され、Sentinel-1 C または D の準同一軌道面上で、Sentinel の前後 250km 地点に配置 (図表 234 参照)。
- Harmony 衛星および Sentinel-1 による Cross-Track Interferometry (XTI) および、Along-Track Interferometry (ATI) 双方が可能な構成。
- 2 つの Harmony 衛星は HELIX 構成、かつ、1 つの Harmony 衛星と Sentinel-1 C, D の相対位置は不変。
- Sentinel の照射したレーダーを受信する C バンド SAR レシーバーが主なペイロード。
- 上記により同時、同地点の複数センサによる観測を実現。
- 加えて、水蒸気の推定と補正のための 2 つのバンドを備えた TIR (熱赤外) コンポーネントと、中程度のスペクトル解像度を備えた VNIR (可視近赤外) コンポーネントを備えた中解像度のマルチスペクトルペイロードを搭載。
- 海／氷河・氷床／地表の詳細な動きや変形などを観測することで、それぞれの力学的過程の理解を深めるためのデータ提供を目的としている。具体的には、ESA における地球観測戦略⁹²⁵に基づく challenge の解決を目指している (図表 235 参照)。

⁹²⁵ Rast M., Kern M., “Earth Observation Science Strategy for ESA: A New Era for Scientific Advances and Societal Ben”

図表 234 Harmony 衛星の構成



出所) Paco Lopez Dekker, et al., ” Stereo Thermo-Optically Enhanced Radar for Earth, Ocean, Ice, and land Dynamics (STEREIOD)”

図表 235 Harmony ミッションの目的

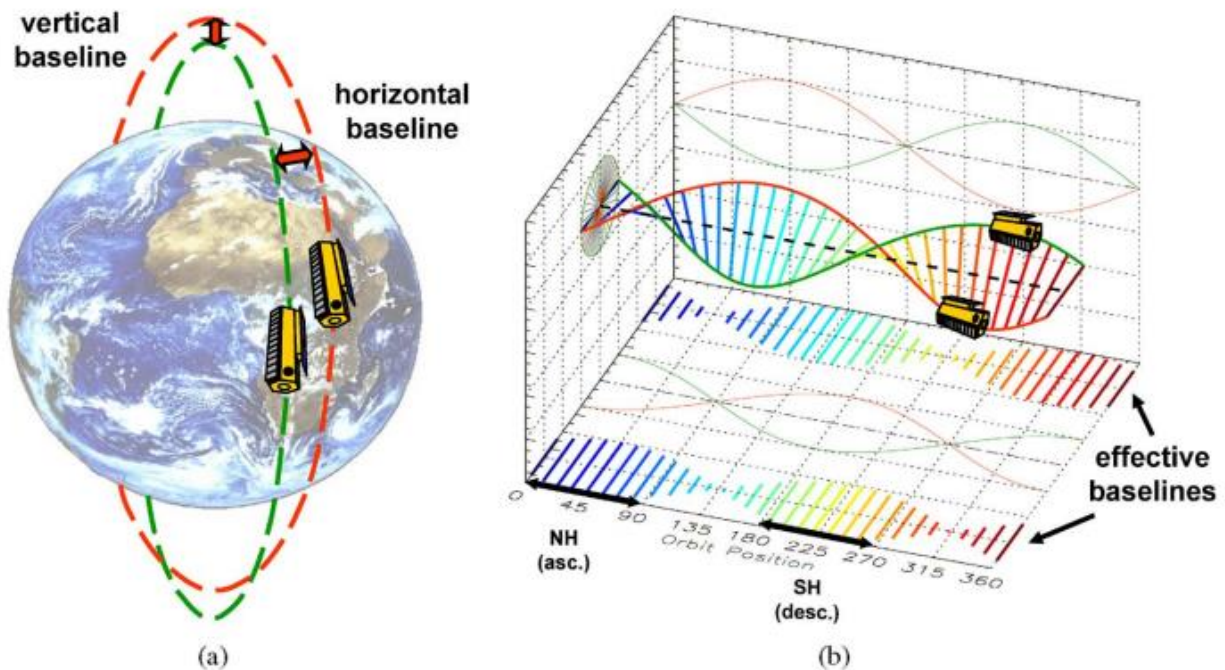
Short description	ESA challenge
SC-1 Quantify the temporal change of volume and mass of glaciers, ice caps and outlet glaciers of ice sheets and their contribution to sea level change	C2
SC-2 Study the 3-D deformation and flow dynamics of ice sheets and glaciers in order to better understand processes affecting their stability and dynamic response to climate change	C1
SC-3 Measure the instantaneous sea ice drift velocity and deformation, improve estimations of sea ice roughness and thickness with high spatial resolution in support of sea ice model development, to improve both operational forecast and mass balance studies.	C3
SC-4 Quantify sea ice and Marginal Ice Zone (MIZ) mesoscale variability	C3
SO-1 Provide high resolution observational surface currents and wave data to validate and develop models for coastal processes.	O1
SO-2 Characterize and quantify small-scale (100 m to 10 km) ocean dynamics through the simultaneous retrieval of high resolution TSCV fields and Sea Surface Temperature (SST).	O2
SO-3 Measure the surface deformation field, i.e. de gradients of the Total Surface Current Vector (TSCV), in order to retrieve surface divergence/strain, vorticity, and shear	O4
SO-4 Retrieve high resolution surface conditions (SST, winds, waves and current) in order to improve our understanding of air-sea interactions, especially momentum and heat fluxes	O4
SO-5 fully characterize extreme weather events, such as cyclones or polar lows, in order to improve our understanding of their physics.	
SG-1 Monitor 3D surface motion relating to: co-seismic, inter-seismic, and post-seismic deformation; tectonic rifting; volcanism; and landslides.	G1
SG-2 Assess topographic changes over time due to volcanic and landslide activity.	G1

出所) Paco Lopez Dekker, et al., ” Stereo Thermo-Optically Enhanced Radar for Earth, Ocean, Ice, and land Dynamics (STEREIOD)”

ii. センサフュージョンの付加価値

- Sentinel の視線方向に加えて、Harmony 衛星による新たな 2 つの線形独立な視線方向が追加される。これらのフュージョンにより、SAR の Doppler-Shift 観測で高解像度な地表風と海洋表面の速度ベクトルの観測、すなわち Total Surface Current Vector (TSCV) 観測が可能となり、特に海洋表面の速度ベクトルは 10cm/s オーダーの精度で観測可能となる。
- TanDEM-X 同様の HELIX 構成（図表 236 参照）を組む 2 つの Harmony 衛星のフュージョンにより、Cross-Track Interferometry (XTI) による陸地と氷の正確な DEM を提供することが可能となる。
- 一方の Harmony 衛星と Sentinel-1 のフュージョンによる Along Track Interferometry (ATI) により、ステレオ構成よりも空間分解能が 1 桁向上したデータを提供することが可能となる。

図表 236 HELIX 構成の概略図



出所) Gerhard Krieger, et al., ” Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) Missions Employing Formation Flying”

iii. 技術課題

- Harmony 衛星と Sentinel-1 の同地点/同時点観測を実現するためには、Harmony 衛星と Sentinel-1 の同期が必須。アルゴリズム、内部データフロー等を含む、オンボード L0 処理スキームのプロトタイプ仕様と高レベルの設計が重点課題。

C) 事例 : BIOMASS/NISAR/GEDI ミッション

i. 概要

- ESA による BIOMASS ミッション⁹²⁶ (P バンド SAR)、NASA-Indian Space Research Organization (ISRO) 共同による NISAR ミッション⁹²⁷ (L バンド/S バンド SAR)、さらに NASA-Maryland 大学共同による GEDI ミッション⁹²⁸ (LiDAR) 等、全球の森林バイオマス量とその変化の観測を主な目的とするミッションが近年数多く立ち上がっており、一部は既に運用開始済みである。
- NISAR や ALOS-1/2 に代表されるような L バンドと、BIOMASS に代表される P バンドそれぞれの観測において、森林バイオマスの量の推定には感度に上限/下限があることが知られており、BIOMASS/NISAR/GEDI 等の融合による性能向上が求められている^{929,930}
- 例えば、BioSAR-1/2 を用いた L バンド SAR データおよび P バンド SAR データの融合により、それぞれ単体の解析によって得られるものよりも精度の高い森林バイオマス量の推定が可能であることが分かっている⁹³⁰。
- また、機械学習を用いた L バンド SAR と光学画像を低次の処理レベルで融合し、Support Vector Machine (SVM) や多層ニューラルネットワークを活用した機械学習により森林バイオマス量推定の精度が向上した事例もあり、今後機械学習を用いた L バンドと P バンドの融合についても研究が進むと考えられる⁹³¹。

ii. 技術課題

- 今後、上記のような本格的な複合センサーデータの解析を行う場合には、それぞれのデータのキャリブレーション処理を把握することが重要となると考えられ、L1 アルゴリズムの公開が求められるだろう。

iii. 今後の動向

- NASA-ESA 共同の開発プラットフォームである Multi-mission Algorithm and Analysis Platform (MAAP) においては、BIOMASS/NISAR/GEDI での活用が見込まれており、また MAAP にて開発されたプロダクトは、低次元から高次元まで幅広く open source 化することが想定されている⁹³²。

⁹²⁶ ESA ホームページ : <https://earth.esa.int/eogateway/missions/biomass>

⁹²⁷ NASA ホームページ : <https://nisar.jpl.nasa.gov/>

⁹²⁸ Maryland 大学ホームページ : <https://gedi.umd.edu/mission/mission-overview/>

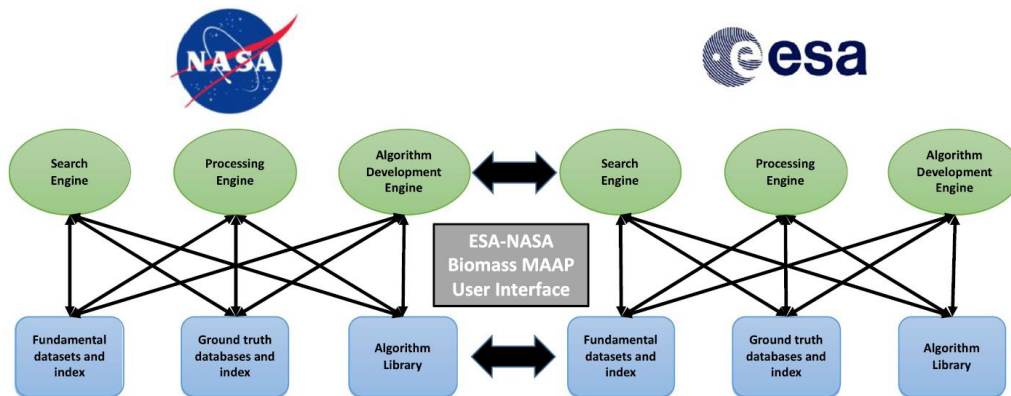
⁹²⁹ NASA “NASA-ISRO SAR (NISAR) Mission Science Users’ Handbook”

⁹³⁰ Schlund M., Davidson M. W. J., “Aboveground Forest Biomass Estimation Combining L- and P-Band SAR Acquisitions”

⁹³¹ Vafaei, S, et al., “Improving Accuracy Estimation of Forest Aboveground Biomass Based on Incorporation of ALOS-2 PALSAR-2 and Sentinel-2A Imagery and Machine Learning: A Case Study of the Hyrcanian Forest Area (Iran)”

⁹³² Albinet C., et al., “A Joint ESA-NASA Multi-mission Algorithm and Analysis Platform (MAAP) for Biomass, NISAR, and GEDI”

図表 237 MAAP の概略図



出所) Albinet C., et al., “A Joint ESA-NASA Multi-mission Algorithm and Analysis Platform (MAAP) for Biomass, NISAR, and GEDI”

4) Pixel Level Fusion

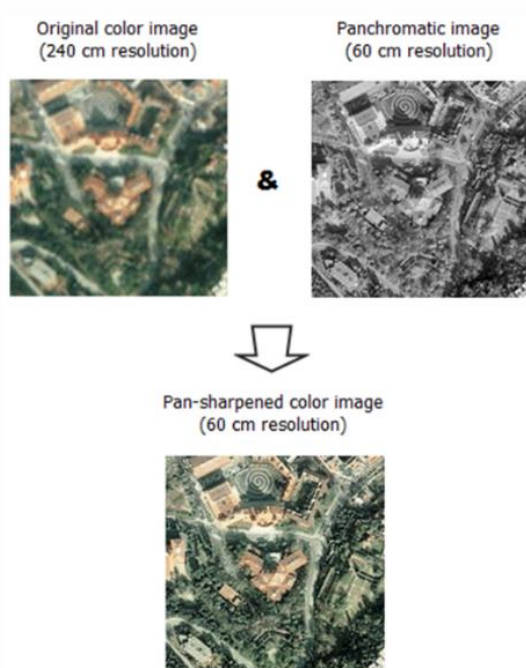
A) 概況

- 最も低次かつシンプルな処理で、ピクセルごとに観測された物理量を融合する。空間分解能／スペクトル分解能向上の目的で融合されることが一般的
- 高スペクトル分解能かつ低空間分解能の画像と、低スペクトル分解能かつ高空間分解能の画像の融合により、高スペクトル分解能かつ高空間分解能の画像を生成する、超解像の一種。
- パンシャープニングや Unmixing といった手法が多く用いられる。
- 現在は機械学習、特に CNN や Autoencoder を用いた研究が活発であり、IGARSS 2022 においても多くの発表がなされている。

i. パンシャープニング

- 低スペクトル分解能・高空間分解能であるパンクロマティック画像と、高スペクトル分解能・低空間分解能であるマルチスペクトル／ハイパースペクトル画像を融合させることにより、高スペクトル分解能・高空間分解能の画像を作成する手法（次頁図表参照）。

図表 238 パンシャープニングの概略図

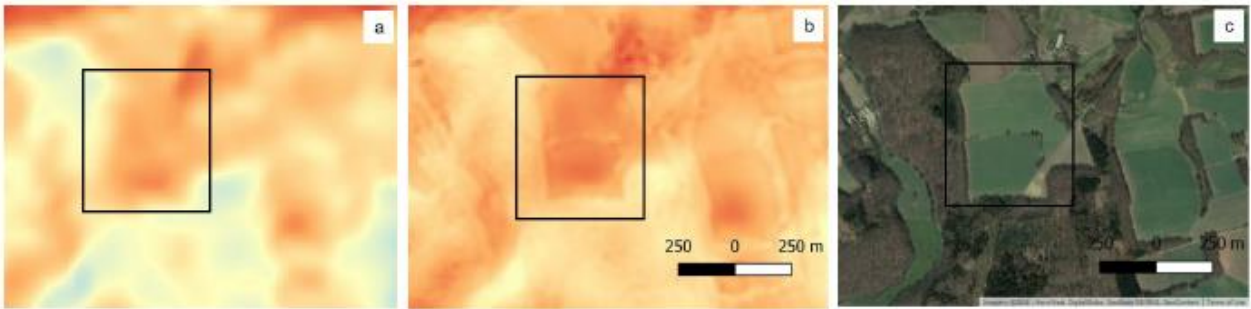


出所) ESRI 社 ArkGIS ホームページより (<https://desktop.arcgis.com/ja/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-of-panchromatic-sharpening.htm>)

- ◇ WorldView や Landsat プロジェクトによるパンクロマティックバンドの高解像度画像が教師データに資するほど十分に蓄積されていることにより、Convolutional Neural Network (CNN) の活用が活発に行われている。
- もともとは SPOT 衛星の PAN 画像とマルチスペクトル画像、および SPOT 衛星の PAN 画像と Landsat マルチスペクトル画像などに代表されるような、RGB 画像と PAN 画像の融合が一般的であったが、近年はその他のバンドや、ハイパースペクトル画像との融合も普及しており、RGB 画像でトレーニングされた CNN モデルをハイパースペクトル画像のデータセットで微調整することで、ハイパースペクトル画像のパンシャープニングに最適化された CNN モデルを構築する手法なども研究されている⁹³³。
- また、近年では熱バンドとパンクロマティック画像の融合により高解像度な熱画像を生成する研究もあり、IGARSS 2022 においても発表があった (図表 239 参照)。高解像度熱画像は主に軍事的なターゲット検知等への活用が期待されている。

⁹³³ Y. Yuan, et al., "Hyperspectral image superresolution by transfer learning,"

図表 239 熱バンドとパングロマティック画像の融合の例



出所) IGARSS 2022 TH2.MMA.9 より、Shuai Fang, et al., “A TWO-LAYERS SUPER-RESOLUTION BASED GENERATION ADVERSARIAL SPATIOTEMPORAL FUSION MODEL”

ii. Unmixing

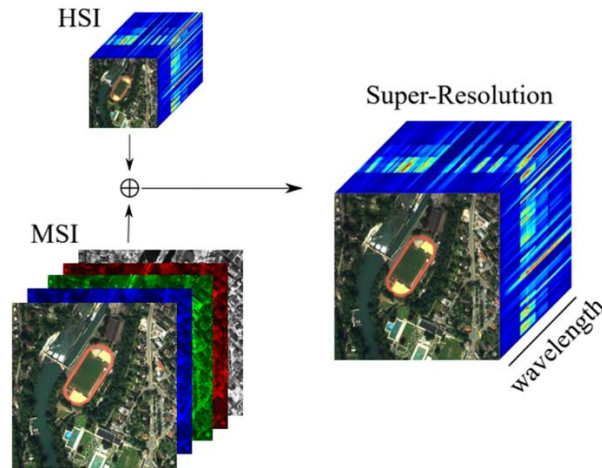
- 近年、数百バンドからなる連続スペクトルを取得するハイパースペクトルイメージングにより、新しい技術分野が開かれている。
- マルチスペクトルと比較すると、ハイパースペクトルはスペクトル分解能が高い分、各スペクトルの空間分解能は低い。高い空間分解能とスペクトル分解能の双方を実現するために、ハイパースペクトル画像とマルチスペクトル画像の融合に関する研究が活発であり、IGARSS 2022 においても多くの発表がなされている。
- マルチスペクトル画像がスペクトル情報を保持していることから、上記の融合方法はパンシャープニングとは異なる。
- ハイパースペクトル画像とマルチスペクトル画像の融合等により高い空間／スペクトル分解能の画像を生成する **Unmixing** (分離) と呼ばれる手法が主流 (図表 240 参照)。
- ハイパースペクトル画像の各ピクセルは連続的なスペクトルで構成される。**Unmixing** はこれらのスペクトルを、異なる散乱体 (エンドメンバ) からの反射光の線形結合としてとらえるモデル (**linear unmixing**) と、多重散乱による結果として生成されたスペクトルとしてとらえるモデル (**non-linear unmixing**) で、2つの手法に分けられる (図表 241 参照)。
- **Unmixing** においては、エンドメンバとその存在比を特定することが重要であり、機械学習によるアプローチが積極的に採用されている。最近では CNN や Autoencoder と呼ばれる手法の活用が盛んであり、IGARSS 2022 においても多くのモデル研究が発表されている。(2.6 定常調査・動向分析 参照)。

iii. 技術課題と今後の動向

- 機械学習全般の課題としては、教師データの不足や計算コストが挙げられる。
- また、フュージョン特有の課題として、CNN を用いたハイパースペクトル画像のフュージョンでは、一般にスペクトル情報を読み捨てる傾向があることが挙げられる。IGARSS 2022 では、これによる融合後の画像の空間分解能の低下を解決するためのフュージョンモデルが多く研究されている (3.6 定常調査・動向分析 参照)。

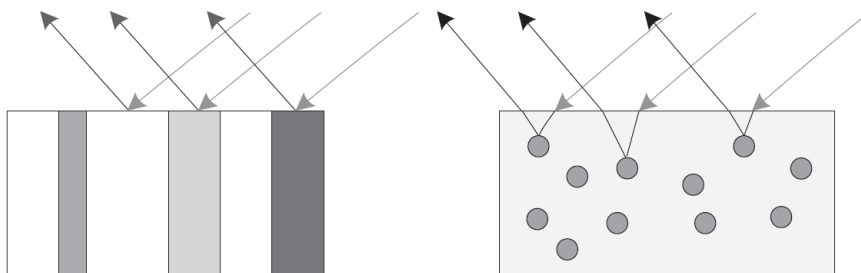
- 今後は主に最先端の機械学習手法を用いた精度向上や、計算コストを削減するアーキテクチャの研究が進むと予測される。

図表 240 Unmixing の概略図



出所) Charis Lanaras et al., “Hyperspectral Super-Resolution with Spectral Unmixing Constraints”

図表 241 Linear Unmixing と Non-Linear unmixing



出所 : Wei J. and Wang X., “An Overview on Linear Unmixing of Hyperspectral Data”

※左図が Linear Unmixing、右図が Non-linear Unmixing

5) Feature Level Fusion/Decision Level Fusion

A) 概況

- 近年のリモートセンシング業界では、各ピクセルイメージに対して与えられた分類（土地利用や土地被覆、損害レベルなどの分類）を割り当てる作業である画像分類や、特定の物体を検知するオブジェクト検知、さらには、時系列データから気候変動変化を検知する変化検知に関する技術研究が活発。
- Digital Surface Model や赤外/光学/SAR 画像等を組み合わせ、CNN や Deep Belief Network (DBN) および Recurrent Neural Network (RNN) などの機械学習を用いて分類/検知が行われている。
- これらの予測の精度向上を目的として、様々なセンサ画像から得られる特徴や予測を融合する

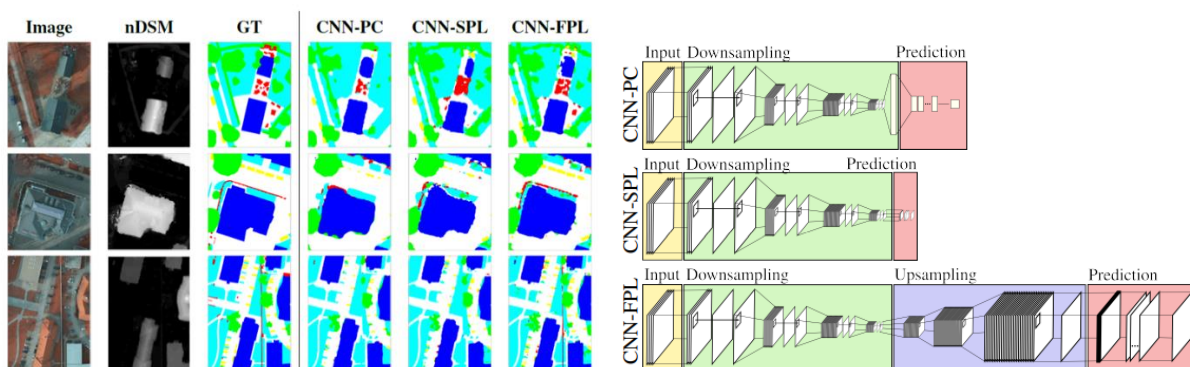
試みが行われている。

- 特徴検出や予測そのもののモデルは画像解析技術として広く研究が行われている一方、特徴や予測の融合に関するモデルのような、フュージョン特有の AI 処理についても機械学習の活用が研究されている。

i. Feature Level Fusion

- 各画像においてそれぞれ CNN 等によって検出された特徴を融合する。複数データソースをスタックし、単一のデータキューブとして処理するのが一般的
- たとえば、DSM(樹木や建物を含んだ高さの 3 次元データ)と光学衛星データをインプットとしたセグメンテーション等が挙げられる。セグメンテーションには CNN-PC/CNN-SPL 等の、検索窓中央のピクセルを分類するモデルや、CNN-FPL 等逆畳み込み(デコンボリューション)を活用したモデル等が用いられる(図表 242 参照)。

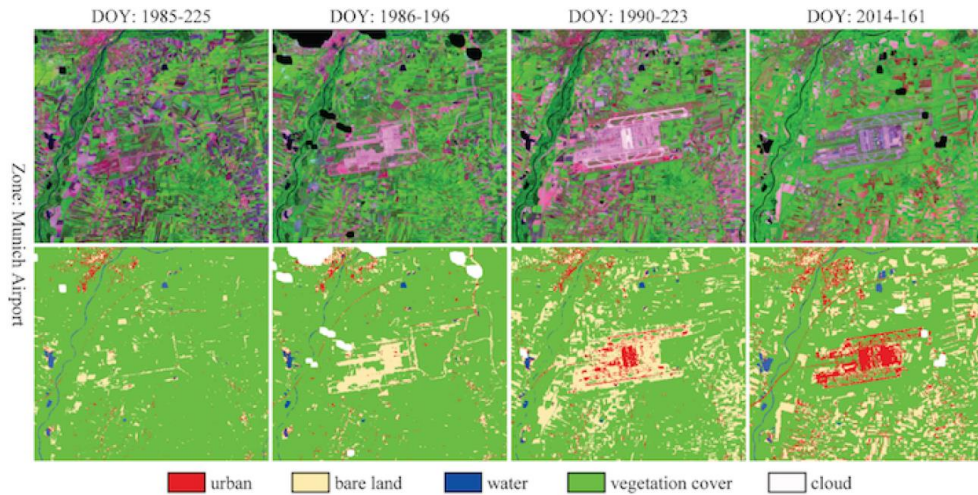
図表 242 Feature Level Fusion における CNN 活用例



出所) Michele Volpi, “Dense semantic labeling of sub-decimeter resolution images with convolutional neural networks”

- 複数センサで特徴検出し、それらを融合することによる Change detection が現在活発。
- GeoFen-1 と WorldView-2 のフュージョン：
比較対象の 2 つの画像それぞれで DBN(Deep Belief Network)による特徴抽出を行い、その差分で評価⁹³⁴。
- 光学画像と SAR 画像のフュージョン：
比較対象の 2 つの画像それぞれで RNN による特徴抽出を行い、その差分で評価。時系列データとしてデータを入力することにより時系列的な情報を活用する点が特徴⁹³⁵。

図表 243 光学画像と SAR 画像の融合による変化検知の例



出所) Xiao Xiang Zhu et al., “Deep Learning in Remote Sensing: A Review”

- 各データで深層学習モデルを構築し、中間層でモデルを融合するアプローチも研究されている。例えば下記：
 - ◇ PolSAR とハイパースペクトルデータを並行して処理し、結果の情報を土地被覆分類のために畳み込み層で融合する研究⁹³⁶
 - ◇ 都市における SAR 画像と光学画像に対して、対応するパッチを識別する研究⁹³⁷
- ii. Decision Level Fusion
 - CNN の最終出力の融合。様々な CNN のモデルがクラスを予測し、それらの予測を融合する。下記が特に注目すべき手法
 - ◇ CIR(赤外/RGB)や DSM、nDSM をインプットとして、CNN よって取得した分類マップと、ランダムフォレスト分類器によって取得した別のマップを融合する手法⁹³⁸
 - ◇ CNN のアンサンブルを学習し、予測を平均化する手法。CIR の処理と DSM の処理で 2 つ

⁹³⁴ P. Zhang, et al., “Change detection based on deep feature representation and mapping transformation for multi-spatial-resolution remote sensing images”

⁹³⁵ H. Lyu, et al., “A deep information based transfer learning method to detect annual urban dynamics of four developed cities from 1984-2016 by Landsat data,”

⁹³⁶ J. Hu, et al., “FusioNet: A two-stream convolutional neural network for urban scene classification using PolSAR and hyperspectral data”

⁹³⁷ L. Mou, et al., “A CNN for the identification of corresponding patches in SAR and optical imagery of urban scenes”

⁹³⁸ S. Paisitkriangkrai, et al., “Semantic labeling of aerial and satellite imagery”

のメインストリームを融合する。上記の手法と比べ、エンドツーエンドで完全に学習できるメリットがある一方、計算コストが莫大であることと、複雑なアーキテクチャがデメリット⁹³⁹。

- ◇ ネットワーク内で学習された融合
- ◇ 最適な融合を学習する手法。例えば、残差学習ロジックに基づいた融合ネットワークの学習により、事前のトレーニング済みモデルによって取得された 2 つのマップを融合。追加の係数を学習することで平均融合結果を修正する方法を学習する⁹⁴⁰。

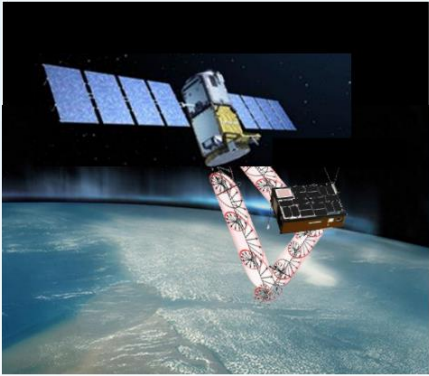
B) 事例 : Phi-sat ミッションにおける FMPL-2

i. 概要

- Phi-sat ミッションは、Cat-5/A, Cat-5/B の 2 衛星で構成され、Cat-5/A は GNSS-R と L バンド MicroWave Radiometer (MWR) を搭載した Flexible Microwave Payload-2 (FMPL-2) を主なペイロードとし、Cat-5/B は可視近赤外 (VNIR) および熱赤外 (TIR) 領域のハイパースペクトル観測器 Hyperscout-2 を主なペイロードとする (図表 244 参照)。
- Cat-5/A, Cat-5/B それぞれのペイロードを利用し、主に下記を目的としている：
 - ◇ GNSS-R、MWR を用いた北極圏および南極圏の海氷の検知、厚さのモニタリング
 - ◇ Hyperscout-2 と MWR を用いた高解像度な土壌水分量の測定

図表 244 FMPL-2 の概要

FMPL-2: Instrument Overview



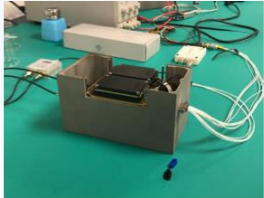
Artist view of FMPL-2 performing cGNSS-R

Flexible Microwave Payload -2:

Combined GNSS-R scatterometer and L-band Microwave Radiometer in a single instrument using Software Defined Radio.

Applications:

- Sea-ice detection (GNSS-R) and sea-ice thickness monitoring (MWR)
- Water ponds over ice (GNSS-R)
- Low resolution soil moisture (MWR)
- High resolution soil moisture after data fusion with Hyperscout-2 data



FMPL-2 integrated in its aluminum box

6

出所) Joan Francesc Munoz martin, et al., “The Flexible Microwave Payload -2: A SDR-based GNSS-R instrument for CubeSats”

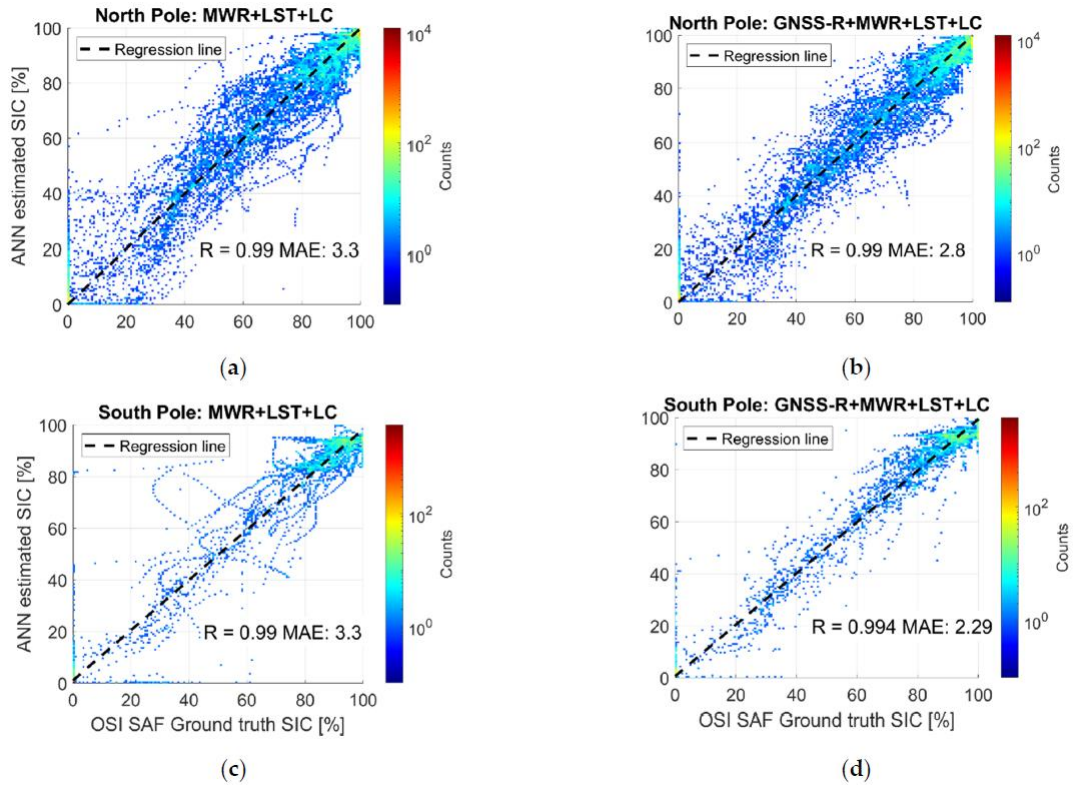
⁹³⁹ D. Marcos, et al., “Geospatial correspondence for multimodal registration,”

⁹⁴⁰ N. Audebert, et al., “Semantic segmentation of earth observation data using multimodal and multi-scale deep networks,”

ii. センサフュージョンの付加価値

- MWR 画像と他補足データをインプットとした neural network の活用により各ピクセルの氷／水判定を低空間分解能 (12.5km) で行い、neural network により解析された GNSS-R データと融合することで海氷マップの高空間分解能化 (~250m)、および予測精度の向上 (参照) を実現。

図表 245 GNSS-R および Lバンド MWR を用いた海氷の予測精度向上



出所) David Llaveria, et al., “Sea Ice Concentration and Sea Ice Extent Mapping with L-Band Microwave Radiometry and GNSS-R Data from the FFSCat Mission Using Neural Networks”

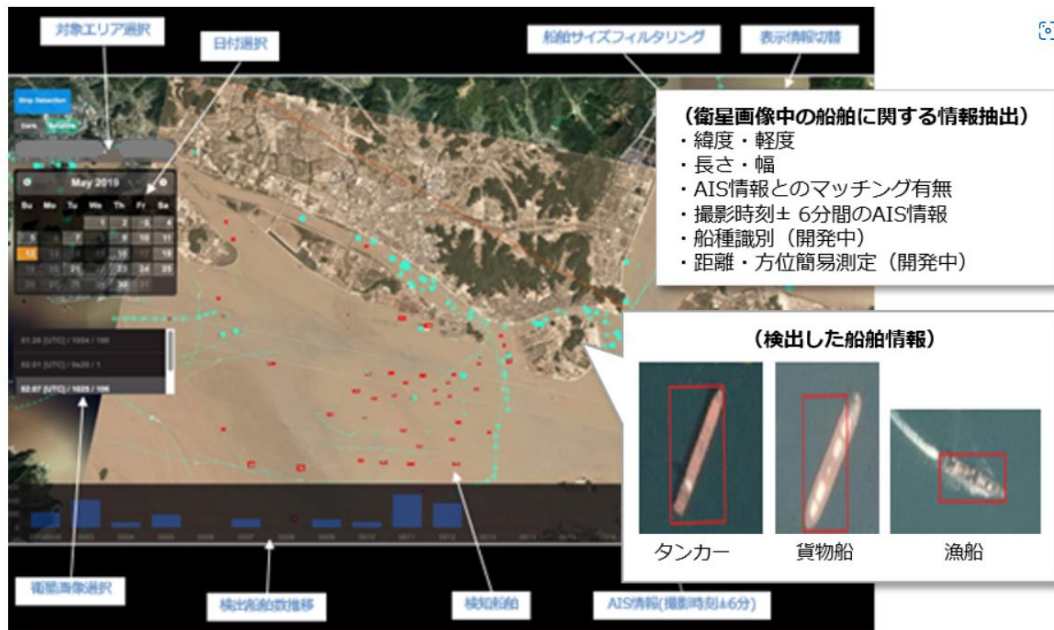
左図が MWR のみ、右図が MWR と GNSS-R の融合

C) 事例：高頻度船舶検出サービス（スカパーJSAT 社）

i. 概要

- Planet Labs, Inc が提供する低軌道衛星 Dove コンステレーションによる高頻度（日次スケール）かつ高空間分解能（3m）の全地球画像から、AI や画像認識技術により船舶を検知。
- 船舶自動識別装置である Automatic Identification System (AIS) の情報を掛け合わせ、高頻度の船舶動静把握を可能にする GUI サービスを提供（図表 246 参照）。

図表 246 高頻度船舶検出サービスポータルイメージ



出所) スカパーJSAT 社ホームページより

https://www.skyperfectjsat.space/news/detail/post_22.html

ii. センサフュージョンの付加価値

- 高頻度の光学衛星画像（日次）と AIS 情報の融合による高頻度の船舶動静把握により、運行管理を高度化
- AIS 情報では探知できない船舶の把握
- 遭難船の検出
- 密輸、密航、密漁、海賊等の違法船舶の検出
- 無人離島の要注意船、外国船の監視、不審船の検出

6) 日本の強み・弱みの分析

- AI/ML を活用したフュージョン技術は中国が大いに先行しており、その他の先進国は後れを取っている状況。
- 一方で、フュージョンにおける国内衛星データの強みは、NASA/ESA ミッションとのフュージョンが想定される、かつ多くのアーカイブを持つ ALOS-1/2 データであると考えられる。
 - ◇ ALOS-1/2 データは BIOMASS/GEDI とフュージョンすることでバイオマス量の推定高度化を図ることが可能である。
 - ◇ 加えて、ALOS-1/2 は L-band SAR 観測のアーカイブデータが他の衛星と比べて多く蓄積されており、フュージョンに必要なデータが取得しやすい。
 - ◇ ALOS データを活用した全球高精度デジタル 3D 地図である ALOS World 3D (AW3D)⁹⁴¹ による高さ情報は、他のデータを組み合わせた土地利用マップ精度向上が見込まれる。一方で、CNES/Airbus 社にて 2022 年末から運用開始予定の CO3D 衛星⁹⁴²による全球 Digital Surface Model が脅威となるだろう。

⁹⁴¹ <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/aw3d/index.htm>

⁹⁴² <https://www.intelligence-airbusds.com/newsroom/press-releases/airbus-to-develop-co3d-earth-observation-programme-for-cnes/>

7) まとめ

A) センサフュージョンの付加価値

- 前述した事例や定常調査の事例（2.6 参照）のように、センサフュージョンはセンサバリエーション、データ処理段階バリエーションの多岐にわたるバリエーションで、様々な用途に対して利用されている。図表 247 に、調査した事例についてセンサフュージョンの付加価値、および社会的／科学的インパクトについてまとめる。

図表 247 センサフュージョンの付加価値、および社会的／科学的インパクト

フュージョンの付加価値	組み合わせ例	社会的／科学的インパクトの一例
空間分解能向上 スペクトル分解能向上 時間分解能向上	HS×PAN/MS×PAN/HS×M S/PAN×Thermal 超解像	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 高空間分解能／スペクトル分解能イメージ作成 ✓ SAR解析やAI処理を含む後続処理の精度向上
	光学×光学 超解像	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 高空間分解能／時間分解能イメージ作成 ✓ SAR解析やAI処理を含む後続処理の精度向上
	GNSS-R×L-band 超解像	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 海氷マップの高解像度化
	SAR×マイクロ波放射計×光学 (NDVI)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 土壌水分量マップ／植生バイオマスマップの高解像度化
同地点／同時点観測	C-band SAR × C-band SAR (Harmony プロジェクト)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 海洋表面速度の推定高度化
天候／昼夜依存性 解消	SAR×光学	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 森林バイオマス量の推定高度化 ✓ 土地利用／土地被覆マップ精度向上
バンドを跨いだ 物理量推定	X-band SAR × C-band SAR	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 作物分類の高度化
	P-band SAR × L-band SAR	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 森林バイオマス量の推定高度化
高さ情報の活用	L/P-band SAR × LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 森林バイオマス量の推定高度化
	光学×DSM／DEM	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 土地利用マップ精度向上
	光学×LiDAR	
異常船舶の識別	光学×AIS	<ul style="list-style-type: none"> ✓ AISで識別されない異常船舶の検知

出所) 各種調査より DB にて作成

B) 本調査と定常調査から得られる国内の将来地球観測衛星に対する示唆

- センサフュージョンにおける機械学習アルゴリズムについては中国が大いに先行しており、その他の先進国が後れを取っている状況。
- L-band で最も豊富なアーカイブをもつ ALOS-1/2 の観測データは、BIOMASS/GEDI とのフュージョンによるバイオマス量の推定高度化や、AW3D の高さ情報の活用による土地利用マップ精度の向上などが期待される。
- 機械学習等を用いた高空間分解能化や高スペクトル分解能化の研究は、言い換えれば科学的ニーズを満たす空間分解能/スペクトル分解能を満たす画像が観測から得られていないということの意味している。

現在、HS 画像と MS 画像/PAN 画像のフュージョンによる HS 画像の高空間分解能化の手法（パンシャープニング/Unmixing/機械学習）が活発に研究されている。これは、科学的/社会的に高空間分解能の HS 画像のインパクトが大きい一方で、直接観測により十分な空間分解能の HS 画像が得られていないことを意味している。

以上から、高空間分解能の HS 観測が可能なセンサに高いニーズがあることが示唆される。

- 一方で、現在の HS 画像が NVIR/SWIR の波長域に限定されていることも課題視されている。生態/環境の分野では MWIR/LWIR の波長域における HS 観測がなく、現状はデータドリブンな超解像が不可能であり、HS 画像を利用せずに MS 画像を高スペクトル分解能化する手法なども研究されている⁹⁴³。

このことから、MVIR/LWIR の波長域における HS 観測衛星の運用には一定のニーズがあると考えられる。

⁹⁴³ Lingyu Sha, et al., “FULL-SPECTRUM SPECTRAL SUPER-RESOLUTION METHOD BASED ON LSMM” ※ IEEE IGARSS 2022 より

2.4 新しい宇宙観測サービスに関する調査

サマリー

- **Tip&Cue** とは、撮像された衛星データの解析結果 (**Tip**) を起点として新規の撮像指令 (**Cue**) を出す技術であり、近年様々な企業が自社サービスへの活用を開始している。
- **Tip&Cue** が生み出す価値は下記の 2 点であり、特に 2 点目を重視したサービスが展開されている。
 - ◇ 一日の間に複数回対象物を撮像することが可能になり、対象物がどのように移動しているかを、既存の方法よりも高精度に観察することができる。
⇒巨大冰山や船舶の移動経路の観測に活用されている。
 - ◇ 変異があった領域に対してアラートを発することで高解像度の画像を取得し、迅速に高解像度の画像を提供することができる。
⇒駐機中の航空機を用いた軍事活動や、山火事のモニタリングに活用されている。
- デスクトップ調査と IGARSS2022 の聴講内容を踏まえると、今後は、オンボード処理能力と衛星間通信を改善し、地上局を介さない **Tip&Cue** の実現を目指すと考えられる。
- ただ、衛星画像の地点登録については、GCP や DEM といった大容量データの参照が必要なため、当面は地上局との通信を介して登録が行われることが予想される。今後宇宙空間での解析拠点や衛星間光通信技術が発達することで、地点登録にかかる時間は短縮されると見込まれる。
- 日本の強み・弱みとしては、現時点で多数の衛星を保有している企業が無い点ことから、複数衛星間の通信を基盤にした即応的なサービスをこれから日本で立ち上げることは難しいと考える。一方で、今後 **Tip&Cue** への活用が期待される衛星間通信や宇宙空間での解析拠点については、WARPSPACE 社や Space compass 社が 2024 年に向けたサービス提供に動き出しており、**Tip&Cue** のプロセスの一部を担うことでプレゼンスを発揮することができる可能性がある。

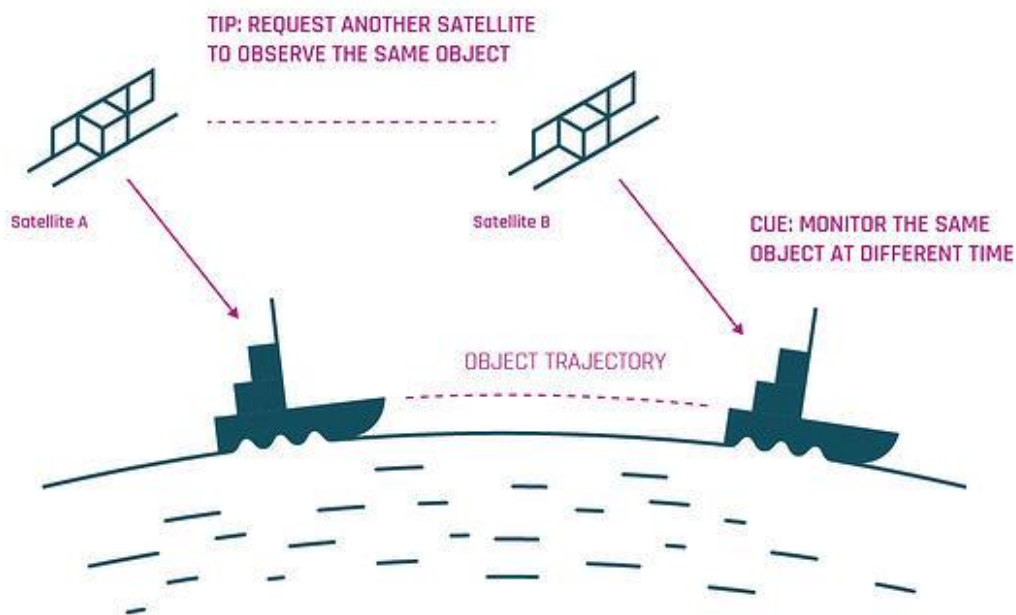
1) 本節における基本的な考え方

- Tip&Que は、衛星で特定の領域あるいは物体を監視する際に、その領域の画像の「Cue」を得るために別の相補的なセンサプラットフォームに「Tip」を要求するプロセスである。Tip& Cue は、①同一コンステレーション、②異なる衛星、③地上や航空機などに搭載または設置された、異なるタイプのセンサが用いられると考えられる。①～③の形態について、必要となる複数衛星群運用技術や複数衛星群画像処理に着目し調査を行う。

2) 利用シーンおよび Tip&Cue の付加価値

- Tip&Cue を使って取得されるデータには、大きく二つの特徴がある。一つ目の特徴は、対象物を短い時間間隔で追い続けること可能である点で、同一衛星コンステレーション間での Tip & Cue によって撮像されるデータはこの特徴を持つことが多い。この特徴から、Tip&Cue により撮像された画像は「対象物がどのように移動しているか」を観察することに適しており、これまでに船舶や巨大氷山の監視などに利用されてきた。

図表 248 Tip&Cue による船舶の追跡イメージ



出所) <https://www.iceve.com/blog/tip-and-cue-technique-for-efficient-near-real-time-satellite-monitoring-of-moving-objects>

- 二つ目の特徴は、変異があった対象の高解像度データを効率的に集めることができる点で、別々の衛星群間での Tip& Cue によって撮像されるデータがこの特徴を持つことが多い。この特徴から、Tip& Cue により撮像された画像は、従来の衛星観測が抱える課題である観測範囲と情報量のトレードオフを回避している。衛星観測では広域的な観測を低解像度で行うか、狭域的な観測を高解像度で行うかを選択する必要がある、モニタリング的観点で変異を見つけようとした場合、広域的な観測を行う必要があった。しかし、広域的な観測で得られるデータは解像度が低いため、船舶の特定や土地被覆など、詳細な情報を高い精度で得ることができなかつた。この課題を克服する仕組みが Tip& Cue である。具体的なスキームとしては、低解像度・広範囲・高頻度で撮像する衛星群の使って定常的に各地の情報をモニタリングし、データ解析においてモニタリング結果に異常が発生した際にのみ、その領域を高解像度で観測できる衛星に指令を送り、より情報量の多いデータを入手する。その結果、これまで衛星で観測することが難しかった、山火事の発生検知や、移動する艦隊の個々の船舶の識別をといった解析を行うことができるようになった。
- これらの Tip& Cue の特徴を活用して自社サービスを提供している企業について、概要とサービスの特徴、今後の動向について記載する。

A) Palantir 社

i. 概要

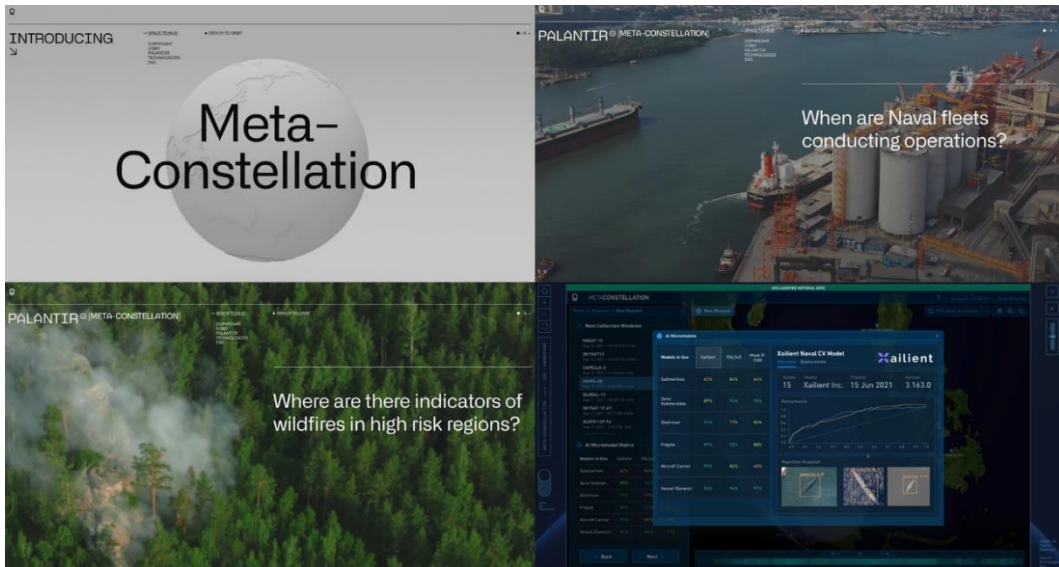
- Palantir 社は 2003 年に設立した SaaS 系企業であり、AI を用いたビッグデータ処理からの示唆の導出に強みを持つ。米軍、国防総省、FBI、CIA といったインテリジェンスに関わる機関を主要顧客として抱えている一方で、近年民間企業まで顧客の裾野を伸ばしている。Palantir 社は 2021 年には BlackSky と、2022 年には Satelloic 社とそれぞれ提携しており、その他の協力企業も含めた各社が提供する衛星画像から取得したデータを解析するプラットフォーム (MetaConstellation) を提供している。⁹⁴⁴

ii. Tip& Cue の活用事例

- MetaConstellation では各社が保有する衛星の場所がリアルタイムに表示されており、船舶や農作物、山火事などの情報について変異が確認された際にはアラートが上がる。ユーザはアラートに対して詳細な情報を得たい領域 (AOI) を設定し、撮像できる衛星を選ぶことで任意の領域に対して目的のデータを即座に得ることができる。

⁹⁴⁴ <https://www.palantir.com/offerings/metaconstellation/>

図表 249 MetaConstellation の概要



出所) <https://www.palantir.com/offerings/metaconstellation/>より抜粋し、DB にて作成

- また、Palantir 社が提供する AI ソフト (Edge AI) を Satellogic 社が打ち上げる衛星に搭載することでスムーズなオンボード処理を可能にしており、その結果 Tip&Cue の Tip の部分を効率化している。そのため、MetaConstellation が対象としている主要なサービスとしては **Tip & Cue を活かした軍事船舶の動向把握、山火事の発生検知など、情報の鮮度が重要な事象の検知**が押しだされている。⁹⁴⁵

iii. 今後の動向 (Palantir 社へのヒアリング)

- Palantir 社は今後も Satellogic から打ち上げる衛星に Edge AI を搭載する予定であり、Tip & Cue による即応的な衛星観測を強化していだろう。一方で、現状の Edge AI が持つ衛星観測における課題も認識しており、今後は衛星間通信のみによる Tip&Cue など、ダウンリンクを介さない方法も視野に入れて Edge AI のアップデートを行っていく予定である。⁹⁴⁶ (詳細は「2.4 4) 技術的な課題」にて後述)

⁹⁴⁵ <https://www.palantir.com/offerings/metaconstellation/>

⁹⁴⁶ <https://blog.palantir.com/edge-ai-in-space-93d793433a1e>

B) MAXAR Technologies 社（旧デジタルグローブ社）

i. 概要

- MAXAR Technologies 社（以下 MAXAR 社）は 1957 年の米国 Philco 社に創設された研究部門に由来を持つ衛星開発会社であり、2017 年に光学衛星に強みを持つデジタルグローブ社と、SAR 衛星に強みを持つ MDA 社が合併することで MAXAR 社が設立された。一方で、MDA 社は 2020 年に再度売却されており、現在の MAXAR 社の強みは高解像度の光学衛星となった。2022 年 6 月時点で軌道上には 90 以上の衛星を保有している。

ii. Tip&Cue の活用

- MAXAR 社でも Palantir 社と同様に AIS において Tip&Cue を使用した効率的な高解像度画像の提供を行っている。Crow's Nest と名付けられたこのサービスでは、従来の AIS センサや SAR 衛星による広域的な観測による船舶の感知と、MAXAR 社が保有する高解像度衛星による観測を利用した船舶の詳細な同定を強みとしている。⁹⁴⁷

図表 250 Crow's Nest の概要

Crow's Nest Maritime Monitoring and Security (MMS) solution provides comprehensive maritime satellite surveillance

- Multi-Sensor SAR Vessel Detection**: Dynamic broad area vessel detection coverage
- Maritime Tipping & Cueing**: Greater insight into the vessels that matter most
- Optical & SAR Port Monitoring**: Monitoring plans for areas of interest
- SecureWatch Maritime**: In Development. Intuitive application for rapid analysis

Expert Analysis

© 2022 Maxar Technologies

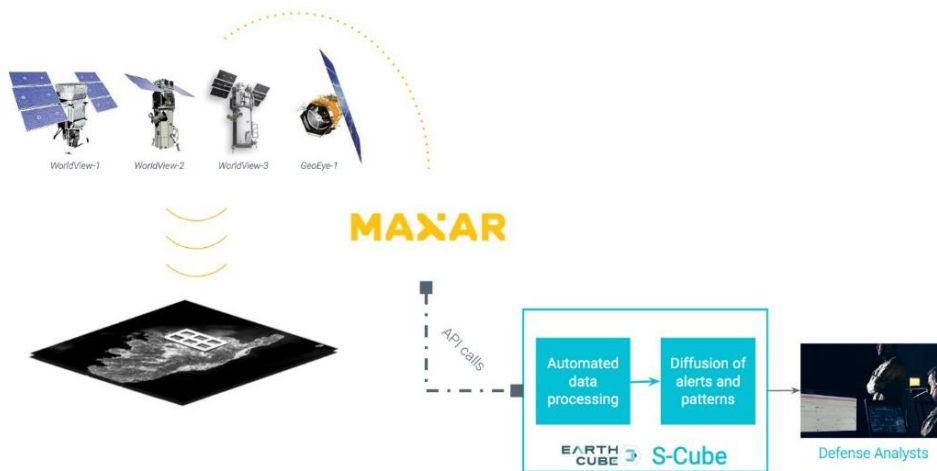
出所) <https://gogeomatics.ca/maxar-technologies-gives-us-a-new-ocean-view-from-the-crows-nest/>

- また、2020 年には Earthcube と連携し、MAXAR 社の光学衛星によって観測された画像の処理および変異に対するアラートを AI によって自動化した。この機能をインテリジェンス向けに提供し、航空機の周辺環境の変化など、変異があった領域の観測をサポートするサービスを行っている。⁹⁴⁸

⁹⁴⁷ https://microsites.maxar.com/storymaps/crows-nest/?utm_source=blog&utm_medium=organic&utm_campaign=crows-nest

⁹⁴⁸ <https://blog.maxar.com/earth-intelligence/2020/using-earthcubes-artificial-intelligence-and-maxars-industry-leading-satellite-imagery-to-tip-and-cue-defense-analysts>

図表 251 MAXAR と Earthcube の連携



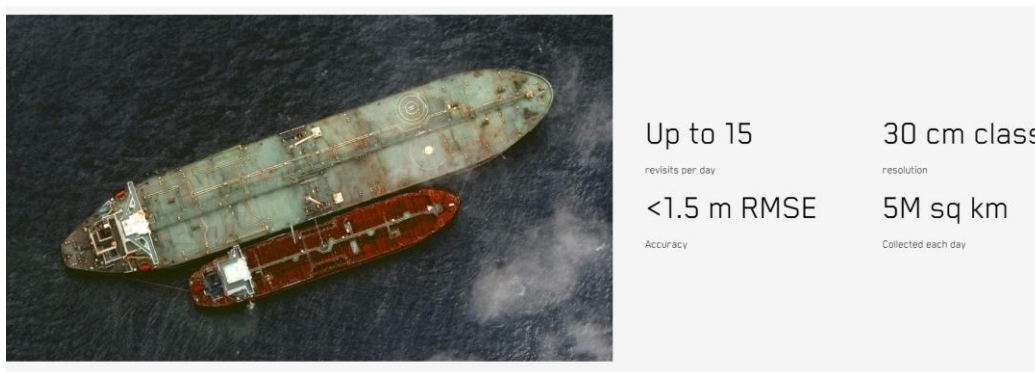
出所) <https://blog.maxar.com/earth-intelligence/2020/using-earthcubes-artificial-intelligence-and-maxars-industry-leading-satellite-imagery-to-tip-and-cue-defense-analysts>

- 一方で、どのサービスにおいても Tip を生成する際のオンボード処理に関する記載はなく、基本的にはダウンリンクした観測データを地上局にて処理、解析し、検出された変異を Cue として別の衛星に転送していると考えられる。

iii. 今後の動向

- MAXAR 社では今後 WorldView Legion という高解像光学衛星をコンステレーションとして打ち上げ、リビジット性を上げることで顧客の需要に答えようとしている。⁹⁴⁹
 一方で、衛星画像の処理技術の向上など、ソフトウェア面での方針は打ち出されておらず、Tip & Cue においてもその効率を上げるというよりは、最終的に出力される情報の質を上げるという方針で事業を進めていくことが予想される。

図表 252 WorldView Legion の概要



出所) <https://www.maxar.com/splash/it-takes-a-legion>

⁹⁴⁹ <https://www.maxar.com/splash/it-takes-a-legion>

C) Planet 社

i. 概要

- Planet 社は 2010 年に米国にて設立されたリモートセンシング企業である。自社で多数の衛星を打ち上げるとともに、Blackbridge 社や Terra Bella 社などのリモートセンシング企業を買収することで、2022 年 6 月時点で約 150 の光学衛星からなるコンステレーションを保有している。また、2021 年にはパッシブ SAR 衛星を保有する VenderSat 社を買収し、光学衛星だけでなく SAR 衛星も利用可能となった。
- これらの衛星により観測されたデータを解析し、Planet 社はクライアントの意思決定に資する指標を導出するサービスを提供している。このサービスの分野は農業・安全保障・公共・地図・森林・エネルギー・金融・保険など多岐に渡る。

図表 253 Planet 社のサービス概要（再掲）



出所) https://s29.q4cdn.com/903184914/files/doc_presentation/investor-presentation-20210707.pdf

ii. Tip&Cue の活用

- Planet では、インテリジェンス部門に対して Tip&Cue を活用したサービスを提供している。実際に公開されていた事例では、中国において非認可で建設されていた核ミサイルの建設場について、コンステレーションを介して早期に変異を検出し、即座に高解像度の画像を提供することができたと紹介されている⁹⁵⁰。
- 一方で、変異の検出を光学衛星と SAR 衛星のどちらで行っているのかについては記載がなかった。

⁹⁵⁰ <https://www.planet.com/pulse/new-space-opportunities-supplying-the-future-of-tip-and-cue-strategies/>

iii. 今後の動向

- 直近の動向としては、Planet が製造する次世代高解像度光学衛星コンステレーション Pelican の打ち上げがある。現在の高解像度光学衛星 SkySat を補強する形で Pelican を運用することで、Tip&Cue においてより迅速に高解像度の画像を顧客に届けることが可能になる⁹⁵¹。
- また、長期的な動向としては、Planet は Tip&Cue のより高次元な自動化を目論んでいる。現在の Tip&Cue では、一つのターゲット（例えば船舶）に絞って変異を検出し、そのターゲットに関して高解像度の画像や別センサによる画像を提供している。Planet は、この段階は Tip & Cue の途中段階だとしており、今後は「船舶の変異」という現象に付随して発生し得るイベント（例えば特定にエリアの人の動きなど）についても、自動的に衛星に撮像指令を与えることで、決断をサポートするために必要な多様な情報を自動的に得ることができるようになる必要があると述べている⁹⁵²。

D) ICEYE 社

i. 概要

- ICEYE 社は 2014 年にフィンランドで設立されたりモートセンシング企業である。2018 年から SAR 衛星の打ち上げを行っており、2022 年 6 月時点で 21 機の X バンド SAR 衛星を軌道に保有している。これらの衛星により撮像された SAR 画像と数値標高モデルを組み合わせた浸水深などを提供しており、主要な顧客は政府系機関や保険業界である。

図表 254 ICEYE 社が提供する浸水深モデル



出所) https://www.iceye.com/hubfs/ICEYE_Flood_Briefing_New_South_Wales_2022.pdf

ii. Tip&Cue の活用

- ICEYE 社は 2021 年 12 月に、C バンド SAR 衛星を保有するリモートセンシング企業 MDA 社と提携したことを発表し、自社の X バンド SAR 衛星と MDA 社の C バンド SAR 衛星を同一のコンステレーション (CHORUS) として扱うことで、Tip&Cue の Tip の検出頻度を向上させた。CHORUS によって、従来航空機によって観測されていた北大西洋の氷山のモニタリ

⁹⁵¹ <https://www.planet.com/pulse/our-next-generation-satellite-constellation-pelican-is-expected-to-deliver-very-high-resolution-and-rapid-revist-capabilities/>

⁹⁵² Planet 『Future Trends in New Space Automated Tip&Cue』

ングが可能になり、また、移動する船舶の検出頻度も向上させることができた⁹⁵³。

E) Ursa Space Systems 社

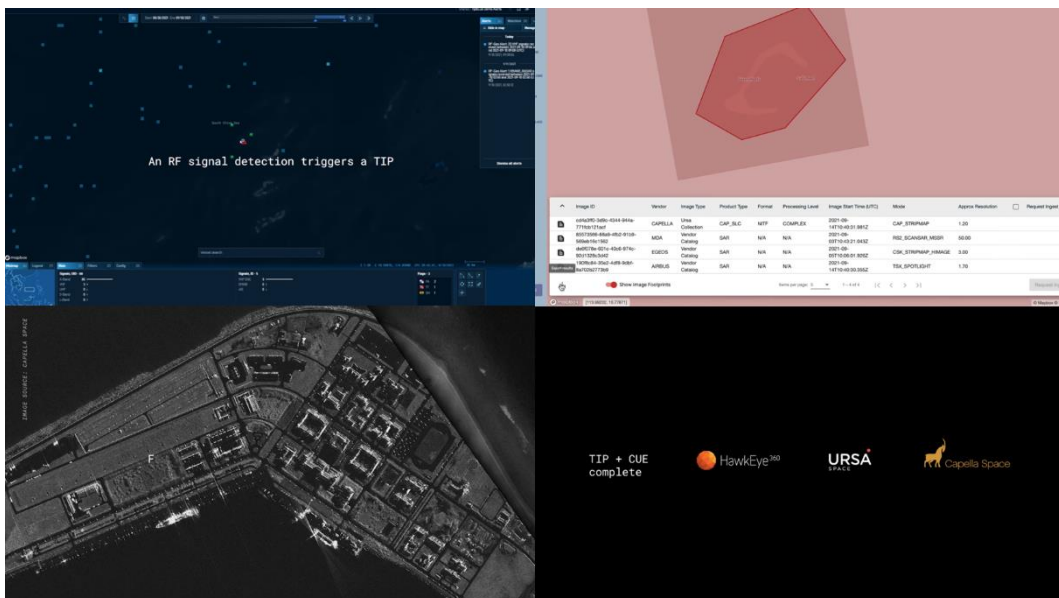
i. 概要

- Ursa Space Systems 社（以下 Ursa 社）は 2014 年に米国にて設立された衛星データ解析企業である。自社で衛星は保有していないものの、数多くの衛星保有企業と提携を結んでおり、その画像の豊富さから Virtual Constellation を謳っている。Ursa 社は当初は SAR 画像の解析に強みを持っていたが、2021 年に BlackSky 社と、2022 年に Satellogic 社とそれぞれ提携することで、光学衛星についてもデータおよび解析結果の提供が行えるようになった。Ursa 社ではこれらの衛星データを利用して自動車の製造工程や石油産出量、船舶のモニタリング等をサービスとして提供している。⁹⁵⁴

ii. Tip&Cue の活用

- Ursa 社では、AIS サービスにおいてマイクロ波観測衛星と SAR 衛星のデータを組み合わせた Tip&Cue を活用している。実際に紹介されていた事例では、Hawkeye360° による RF マッピングで観測された異常な船舶情報について、Capella Space 社の高解像度 SAR 衛星で船舶画像を撮像するというサービスを提供しており、トランジスタをオフにしている船舶（いわゆる dark vessel）の検出に活用できるとしている。

図表 255 Ursa Space Systems の Tip&Cue 概要



出所) <https://vimeo.com/606838735/>より抜粋し、DBにて作成

⁹⁵³ <https://www.iceye.com/press/press-releases/mda-and-iceye-sign-agreement-to-integrate-x-band-sar-satellite-into-mda-chorus-constellation>

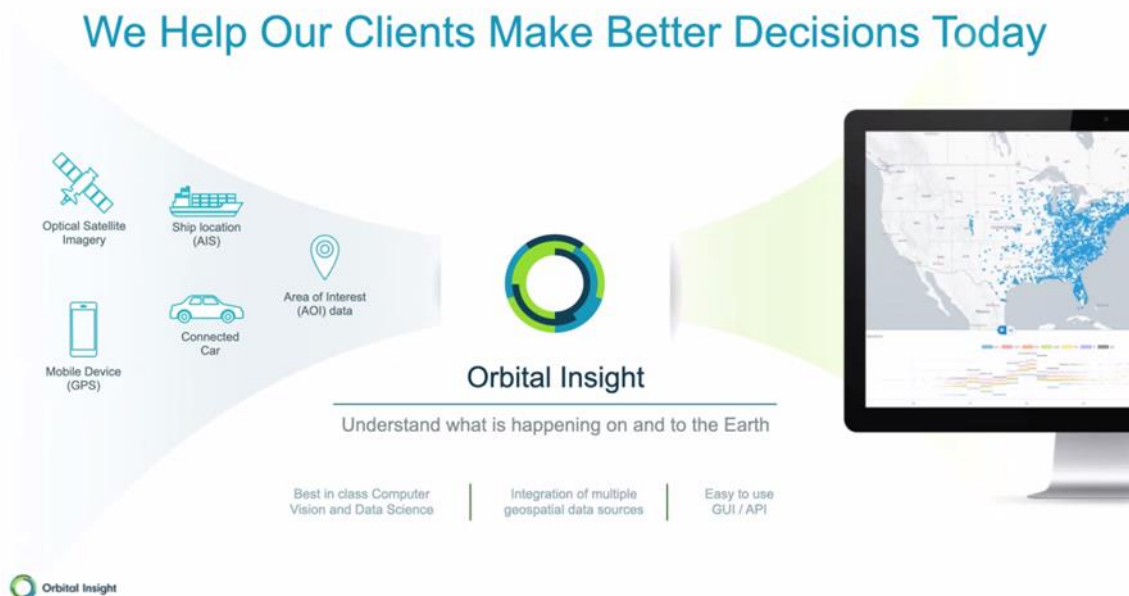
⁹⁵⁴ <https://ursaspace.com/product-catalog/>

F) Orbital Insight 社

i. 概要

- Orbital Insight 社は 2013 年に米国にて設立された衛星データ解析企業である。Planet 社や Airbus 社、Satellogic 社と提携することで衛星データを取得し、その他の航空データや IoT データなどを含めて解析することで、ある地点での船舶や飛行機、交通情報などを導き出すプラットフォーム (Orbital Insight GO) を提供している。

図表 256 Orbital Insight 社のサービス概要



出所) <https://jp.orbitalinsight.com/archives/blog/first-time-to-use-go/>

ii. Tip&Cue の活用

- Orbital Insight GO には Tip&Cue を達成するための AI が搭載されており、変異のある領域を抽出し、顧客に提供することができる。対象としているサービスは交通量の監視によるサプライチェーンマネジメントや、森林のモニタリングがある。⁹⁵⁵
- 一方で、Orbital Insight 社は衛星データを購入し、IoT データを組み合わせることで得られる示唆を提供する「解析業者」というスタンスでビジネスを行っている。そのため、AI による解析から変異を検出する段階までは Orbital Insight 社から提供するが、その変異に応じた高解像度データの提供は行っていない。

iii. 今後の動向

- Orbital Insight 社にヒアリングを行ったところ、今後は Orbital Insight GO の AI の質を高めて解析パターンを増やすことに注力していると述べていた。一方で、Tip&Cue による高解像度データの提供を行う予定は今のところ無いようだ。

⁹⁵⁵ <https://orbitalinsight.com/resources/data-sheets/tip-and-cue>

3) キーとなる技術課題

i. 概要

- 現在行われている Tip&Cue の主要な形態である、地上局を挟んだ Tip&Cue のプロセスにおいて発生する処理は下記の 6 つのステップに分かれる。
 - ①撮像
 - ②オンボード処理
 - ③ダウンリンク
 - ④地上局での解析
 - ⑤地上局から衛星への指令送信
 - ⑥指令を受けとった衛星による撮像
- また、今後地上局を挟まずに衛星間通信を行う際には、⑦衛星間通信も考慮に入れる必要がある。これらのステップの内、Tip&Cue を提供する各社が特に課題と認識しており、かつ Tip&Cue に特徴的な課題である②オンボード処理と⑦衛星間通信について、どのような技術的課題があるかをまとめた。

ii. オンボード処理

- Tip&Cue では特定の物体や変異のある領域を認識して指令を出す必要があるため、価値の高い情報を提供するためには、撮像された画像を即座に解析しなければならない。現在の運用では、撮像されたデータはオンボード処理後に地上局にダウンリンクされ、そこで変異を導出する解析を行う。一方で、衛星データのような大容量データはダウンリンクに時間がかかることが課題となっていた。そのため、Tip&Cue においてオンボード処理に求められる機能は迅速にデータ解析可能な形に衛星データを処理することと、可能な限り容量を小さくすることである。
- Palantir は特にオンボード処理に力を入れた AI を提供している。2022 年に新しく Satelloic の衛星に搭載された Edge AI では、衛星データをオンボード処理し、不要なデータを識別して取り除くことで容量を小さくし、ダウンリンクにかかる時間を短縮している。一方で、Edge AI において見つかった課題とその対応策について報告があったため、下記に記載する。⁹⁵⁶

◇ 使用電力

衛星上で使用することができる電力は非常に限られており、オンボード処理に使用できる電力は少ない。そのため、Edge AI を運用している際にも電力不足による再起動が何度か発生していた。

そこで Palantir は、Edge AI が電力不足によりソフトウェアを再起動した際にもシームレスに解析が再開できる仕組みを構築した。

また、IGRASS にてベンチマーク結果が発表されたオンボード処理用次世代プロセッサでも、その電力効率が良いことが特出しされていた。今後ソフトウェアとハードウェアの両面から、限られた電力での効率的なオンボード処理が推進されると考えられる。⁹⁵⁷

⁹⁵⁶ <https://blog.palantir.com/edge-ai-in-space-93d793433a1e>

⁹⁵⁷ JPL, Ubotica, Hewlett Packard Enterprise "BENCHMARKING DEEP LEARNING INFERENCE OF REMOTE

◇ 画像解析

Satelloptic の光学衛星により撮像される画像は、RGB の三原色に加えて近赤外光（NIR）のデータも持つ。一方で、通常の画像処理 AI は RGB データに対して解析するように設計されているため、生データをそのままオンボード AI で処理した際には解析結果のクオリティが非常に低下してしまう。一方で、RGB 画像の解析と比較して、近赤外を含むような画像に対する解析の開発は進んでおらず、Edge AI では高いクオリティで解析結果を提供することができなかった。

そこで Palantir は、衛星によって撮像された画像から NIR データを無視できるような前処理を開発し、標準的な画像処理 AI でも衛星画像の解析ができるようにした。

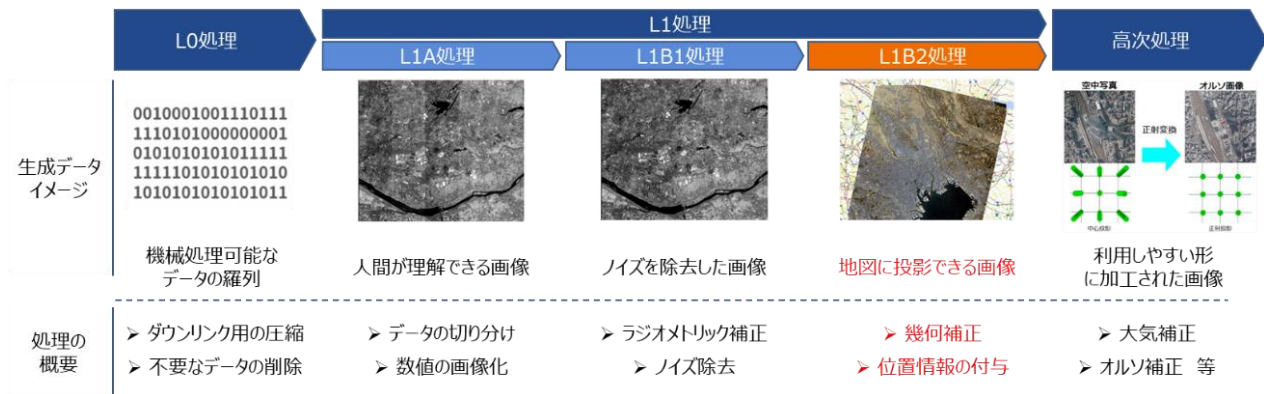
◇ オンボードでの地点登録

現状のオンボード処理では、撮像した衛星データを地球上の座標に落とし込んだ際に、数百メートルの誤差が生じている。この修正は現在地上局での解析によって対処されているが、今後オンボード処理のみで Tip&Cue を行うため、Palantir ではオンボードでの座標登録を 10 m 未満で達成するための AI の開発に取り組んでいる。

【参考】衛星画像の座標登録の概要

- ・ 衛星は各センサを通じて取得した画像を段階的に処理することで利用可能な衛星データを生成している。光学と SAR で画像処理の方法は少し異なるが、L1 処理の後半に行う「幾何補正」という処理を通じて座標登録が行われる点では同じである。⁹⁵⁸

図表 257 処理の流れ



出所) DB にて作成

- ・ 幾何補正前では、衛星のセンサや地球の自転などにより発生する画像の歪みを取り除いた後、衛星が持つ座標情報を基に仮の座標を画像に付与する。一方で、この時点では実際の地図上の座標と衛星画像上の座標に数百 m 程度の誤差が存在するため、既存の

座業情報を持つ画像（Google earth や航空画像）の地図情報をコントロール（GCP, Ground Control Point）や数値標高モデル（DEM）を用いて最終的な補正が行われる。

959

- GCP や DEM はデータ容量が非常に大きいことから衛星はこれらのデータを保有しておらず、現状宇宙空間でこれらのデータを参照して座標登録を行うことは難しい。一方でデータのダウンリンクは地上局との位置関係が重要になるため、数時間程度の時間がかかる。後述する衛星間通信技術の進展や、解析拠点としての大型衛星の出現が衛星画像の座標登録の効率化に寄与することが期待される。

iii. 衛星間通信

- 現状の Tip&Cue は、一度解析データを衛星から地上局にダウンリンクし、その後地上局での解析結果を踏まえて別の衛星に撮像の指令を送っている。一方で、今後さらに Tip&Cue を効率的に行う上では、地上局を挟まずに Tip&Cue を成立させる必要があり、オンボード処理と同様に衛星間通信をアップデートすることが求められる。
- 近年の衛星間通信開発のトレンドは、超高速光通信の活用と、中軌道および静止軌道における通信衛星の整備であり、日本では、筑波大学発の WARPSPACE 社や、JAXA の LUCAS プロジェクト、NTT とスカパーJSAT の協業において衛星間通信技術の開発が進められている。この中でも、通信衛星の整備は、下記の二つ点で Tip&Cue の推進に寄与する技術と考えられる。

◇ ハブとしての通信衛星

オンボード処理のみで Tip を生成できるようになった場合、衛星は衛星からの通信によって撮像を行う。その際、同一コンステレーション内の衛星間では容易に通信を行うことができるが、異なるコンステレーション同士での通信はそれぞれが調整を行う必要がある。

そこで、ハブとなる通信衛星を介して各社のコンステレーションを繋ぐことで、調整無しに他社の衛星-衛星間で Tip&Cue を行うことが可能になる。

米国の SpaceLink 社や、日本の筑波大発ベンチャー WARPSPACE 社がハブとしての光通信衛星事業を構想しており、2024 年頃からのサービス開始に向けて準備を進めている。⁹⁶⁰

◇ 解析拠点としての通信衛星

また、大型の通信衛星を宇宙空間でのデータ解析拠点として活用して Tip&Cue を推進する施策も行われる可能性がある。Capella Space 社は、Inmarsat 社の静止衛星を介した撮像指令を利用することで、2020 年に民間 SAR 企業として初めて地上局からの指令に依存しない撮像を行った。⁹⁶¹

今後このような指令を出す衛星が、インプットされるデータを元に Tip を生成する解析拠点としての機能を持つことで、宇宙空間で完結する Tip&Cue の推進に寄与することが期待される。

NTT 社とスカパーJSAT 社が共同で設立したベンチャー企業 Space Compass 社は、衛星と

⁹⁵⁹Parul Institute of Engineering and Technology, ISRO “A Survey on Geometric Correction of Satellite Imagery”

⁹⁶⁰ <https://sorabatake.jp/27077/>

⁹⁶¹ <https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/government/2020/world-first-as-new-real-time-link-between-satellites-promises-qu.html>

地上局との通信を仲介し、かつ、宇宙空間でのデータ解析も目論む「宇宙データセンタ」を静止軌道衛星として構築しようとしており、この衛星が新しい Tip&Cue の仕組みを創り出す可能性がある。⁹⁶²

図表 258 Space Compass 社の宇宙データセンタ概要



出所：https://www.skyperfectjsat.space/news/detail/ntt_space_compass.html

4) その他の課題

- これまで Tip&Cue の手順の間で発生する各ステップにおいて現在認識されている課題について紹介してきたが、この説ではそれ以外の課題について紹介する。
- 制限されたアップリンク帯域幅
 - 衛星-地上局間の通信は、ダウンリンクとアップリンクで全く異なるデータをやり取りする。ダウンリンクの際には衛星が撮像したデータをやり取りするため、その容量は数 GB を超え、広い帯域幅が確保されている。一方で、地上局から衛星にアップリンクする際には従来大容量のデータのやり取りは行われていなかったため、狭い帯域幅が確保されている。ただ、Edge AI では定期的にソフトウェアのアップデートを行うため、狭い帯域幅ではデータのやり取りに問題が生じ、アップデートできないケースがあった。
 - そこで Palantir は、ソフトウェアのアップデートの際に新しいソフトウェアをアップロードするのではなく、現在のバージョンと最新のバージョンの違いをエンコードするフレームワークを開発し、アップリンクに必要な容量を削減した。
 - 一方で、アップリンク帯域に対する課題は Palantir に限った問題ではない。今後衛星-衛星間通信によって Tip&Cue を完結させるためには、オンボード処理の質を向上させる必要があり、

⁹⁶² https://www.skyperfectjsat.space/news/detail/ntt_space_compass.html

その際にはソフトウェアの随時アップデートしていく必要がある。そのため、アップロードするデータの容量を下げる努力をするとともに、アップリンク帯域幅を拡張していく必要があるだろう。

5) 日本の強み・弱みの分析

- 日本の強み・弱みとしては、現時点で多数の衛星を保有している企業が無い点ことから、複数衛星間の通信を基盤にした即応的なサービスをこれから日本で立ち上げることは難しいと考える。
- 一方で、今後 Tip&Cue への活用が期待される衛星間通信や宇宙空間でも解析拠点については、WARPSPACE 社や Space compass 社が 2024 年に向けたサービス提供に動き出しており、Tip & Cue のプロセスの一部を担うことでプレゼンスを発揮することができる可能性がある。

2.5 観測データの地上処理に関する調査

サマリー

- 地上処理としては CNN などの深層学習のアルゴリズムが衛星データの高解像度化や 3D データ構成に利用されている。
- また Explainable AI（説明可能な AI）を利用し、衛星データを分析した結果に対する根拠の説明ができるような研究も活発になっている。
- AI による衛星データ処理を取り入れている企業は多数存在するが、中でも UP42 社では積極的に超解像を取り入れており、すでにサービスとして展開している。

1) 本節における基本的な考え方

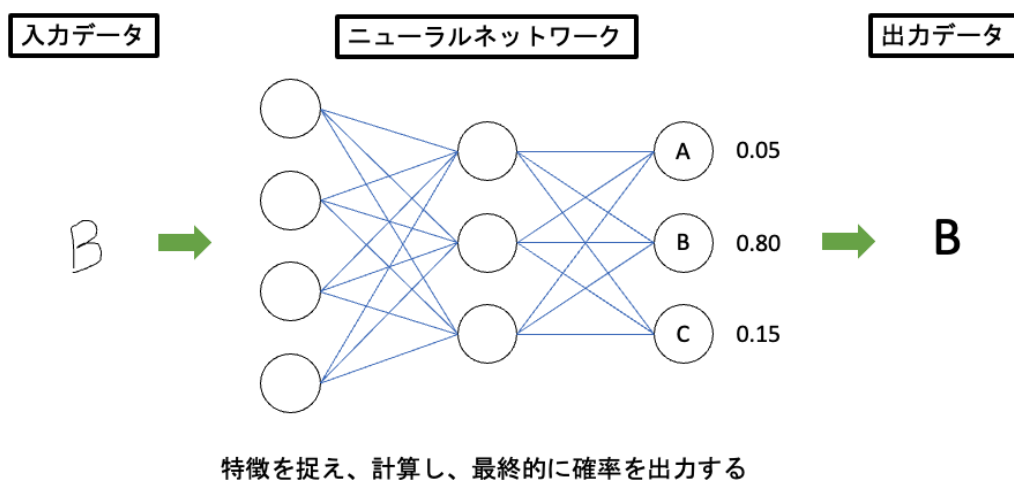
- LV で区切られている観測データの地上処理は、衛星やミッション毎にそれぞれの標準プログラムおよびその処理の内容が異なっており、その点に留意した調査が必要である。
- キーとなる技術の一つが、従来は、高分解能のモノクロ画像と分解能の低いカラー画像を合成することで疑似的に高分解能のカラー画像を作るパンシャープン処理である。従来、パンシャープン処理は光学衛星データのマルチスペクトルデータとパンクロマティックデータを融合する作業が主流であったが、近年、熱赤外データやハイパースペクトルデータ等の他のセンサーデータへも拡張されている。その中で、他のセンサーデータへのパンシャープン処理に対して深層学習手法を使うことが注目されている。
- このようにいくつかキーとなる技術があるため、その概要を取りまとめると共に、実際にそのような処理を行っている企業の事業モデルや付加価値等を導出する。

2) キーとなる技術

A) パンシャープン/Unmixing

- センサーの特性を表す分解能については、センサーの分解能が高いほど、地上の小さな物体を識別することが可能となる。高分解能だが情報が少ないモノクロ画像（パンクロマティック画像）と、分解能の低い情報が多きカラー画像（マルチスペクトル画像）を合成することで、疑似的に高分解能のカラー画像を作ることができる。センサフュージョンの章においても記載した通り、この画像処理技術をパンシャープニング/パンシャープン処理と呼ぶ。
- 従来、パンシャープン処理は光学衛星データのパンクロマティック画像とマルチスペクトル画像を融合する作業が主流であったが、近年、熱赤外データやハイパースペクトルデータ等の他のセンサーデータへも拡張されている。
- また、パンクロマティック画像を使わず、マルチスペクトル画像とハイパースペクトル画像を組み合わせることでより高い空間／スペクトル分解能の画像を生成する **Unmixing**（分離）と呼ばれる手法が活発に研究されている。
- そして、これらの処理のアルゴリズムとして機械学習手法、とりわけ深層学習手法を使うことが注目されている。理由の1つとして深層学習を適用するためのデータが豊富になってきたことが大きいとされている。深層学習ではニューラルネットワークという人間の脳をモデルにした、データのパターンを認識するためのアルゴリズムが利用されている。入力データに対する一定の傾向性を内部の複数層に分かれた処理によって解釈し、データにラベルをつける、分類するといったことが可能になる。

図表 259 ニューラルネットワークによる画像分類のイメージ



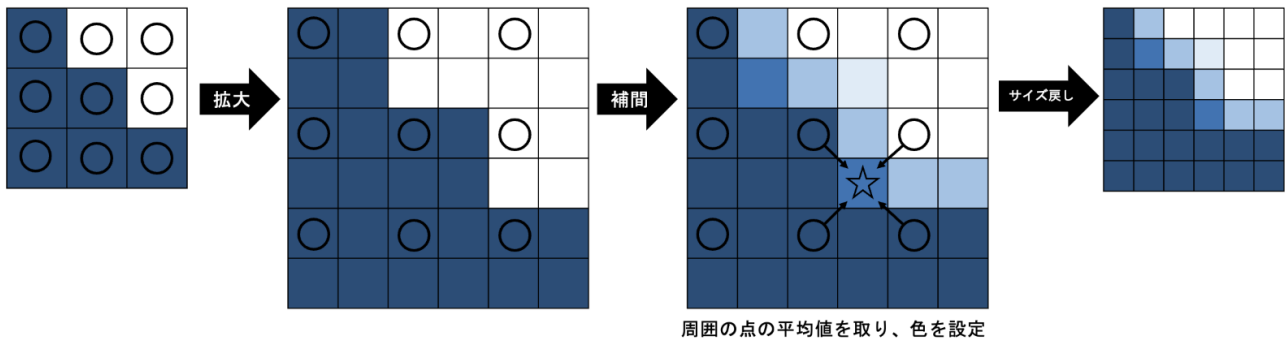
出所) DB 作成

- 衛星画像解析の分野では SRCNN (Super-Resolution Convolutional Neural Network) と呼ばれるアルゴリズムが開発されている (詳細は後述)。

B) 最近傍法

- 画像の解像度を上げることはすなわち、画像を拡大することに等しく、そのためには拡大する画像を補間する必要がある。画像拡大のための補間アルゴリズムは多数考案されており、もっとも簡易なアルゴリズムの 1 つが、最近傍法 (Nearest Neighbor 法) と呼ばれる手法であり、パンシャープン処理に利用されている。
- 最近傍法とは拡大した点の画素値として、最近傍の画素値をそのまま用いる方法である。より高い精度を得るために、近傍の 1 点ではなく、近傍 4 点を用いて線形補間を行う Bilinear 法や、4×4 の近傍領域において隣接点までの距離に応じて重付け補間を行う Bicubic 法といった手法も存在する。さらに、 $2N \times 2N$ (N は 3 あるいは 4 の場合が多い) の近傍点を用いる Lanczos 法と呼ばれるアルゴリズムもある。

図表 260 画像拡大したときの最近傍法による補間イメージ



出所) DB 作成

- これらの補間アルゴリズムでは、元の画像に含まれる画素を利用しているため、ボケやジャギー（斜め線に鋸歯状のギザギザが発生する現象）による画像の劣化が発生する。これを回避するため、元の画像に含まれない高周波成分の推定を行うことで拡大部分を補完し画像の解像度を向上させる超解像と呼ばれる方法が考案されている。ここでいう周波数成分とは画素が動いたときに画素値がどれくらい変化するかを表すものである。画像の場合、各画素の濃度値を一般的に1バイトで表すものとするれば濃度値は0~255の範囲の正弦関数で表すことができ、周波数成分として捉えることができる。

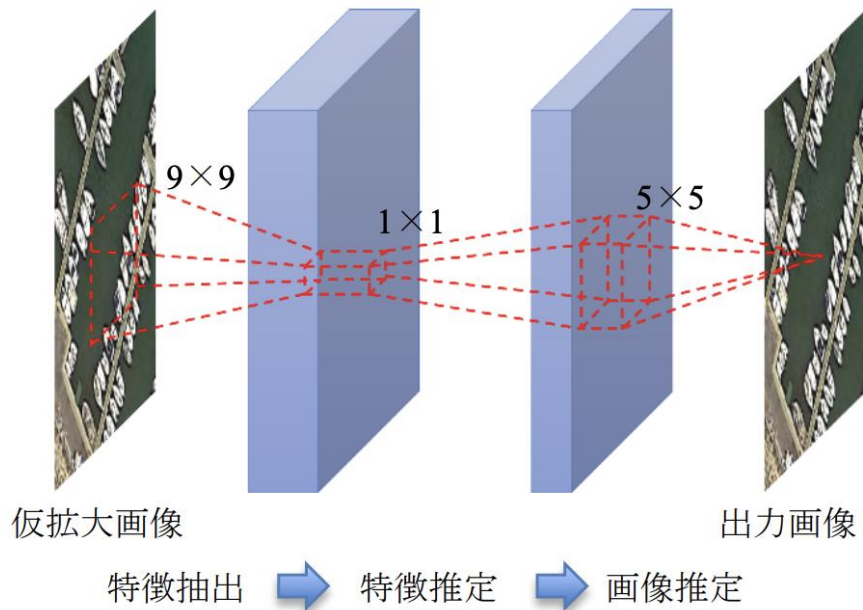
C) 辞書学習

- 多変量解析の一種であり、超解像の手法として利用される。大量のデータの中に「辞書」として表現できる共通項があるかを計算して探すアルゴリズム。
- 超解像を行うためには高解像度の画像と低解像度の画像をペアにして辞書として蓄える（学習する）。そして超解像したい低解像度な入力データに対して、特徴が近い辞書を探すことで、高解像度データを生成することができるという仕組み。
- Bicubic 法などの最近傍法よりも計算時間がかかるが、精度が高いという特徴がある¹⁷。

D) SRCNN

- 2014年に畳み込みニューラルネットワーク（CNN：Convolutional Neural Network）を用いて入力画像と出力画像の写像を直接行う Super-Resolution Convolutional Neural Network（SRCNN）が発表され、ディープラーニングによる超解像の起点となった。SRCNNは複数層の畳み込みニューラルネットワークで構成されており、Bicubic法で拡大した低解像度の画像をネットワークに入力し高解像度の画像が出力されるように学習を行うものである¹⁸。
- 従来まで主流であった辞書学習による超解像に比べ、少ない計算量で超解像を行うことができる。また最近傍法よりも高い精度を実現できる¹⁹。

図表 261 Super-Resolution Convolutional Neural Network



出所) 周波数解析に基づく CNN の適応的選択によるリモートセンシング画像の超解像手法²⁰

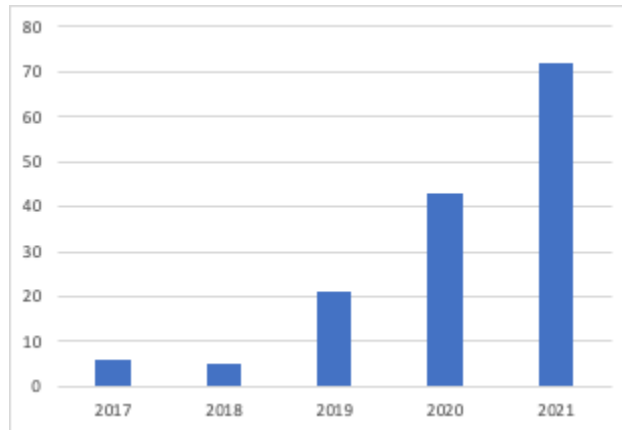
E) 3D 再構成

- 複数のリモセンデータを使い、数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model) といった 3D データを生成することができる。
- 一般的な 3D データ生成にあたっては、2 枚以上の異なる角度で観測されたリモセンデータを使い、「カメラの位置と向き」の計算、「ステレオマッチングによる 3D 推定」の 2 つの処理を行う。
- ステレオマッチングとは、同一の静止シーンを別視点からとらえた 2 枚の画像を用いて、画像中に写るシーンの奥行きを推定する方法であり、3 次元画像計測技術の一つとして使われている。近年、ステレオマッチングにおいて深層学習（特に CNN）が使われるようになってきており、大幅な精度改善が期待されている。
- CNN によって大量の画像を学習することで、従来手法で問題となっていた画像の歪みや、キャリブレーション誤差、遮蔽問題（一方の画像に写っている被写体領域がもう一方の画像において視界に入らない問題）といった点を解決できる。

F) Explainable AI（説明可能な AI）

- AI による学習処理によって計算された結果を説明するための技術。例えば、いくつもある説明変数から予測結果に大きく寄与している説明変数を抽出できる。医療現場においては有望視されている。従来は癌の発見をサポートする AI があっても、診断の根拠となる症状や症例を説明できず使われていなかった。しかし Explainable AI による分析ができるようになれば、癌の診断根拠を説明でき、医師としての説明責任を果たせるようになる。
- 2019 年から論文数が急激に増え、徐々に注目度が高まっている。

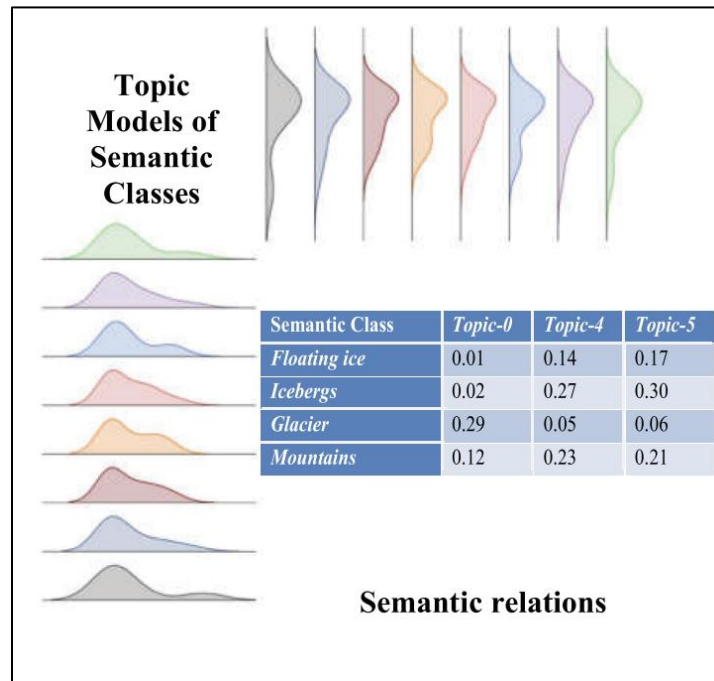
図表 262 論文検索サイト「arXiv」における「Explainable AI」の検索ヒット数



出所) 論文検索サイト「arXiv」のデータをもとに DB 作成

- 衛星画像を利用したデータ分析においても Explainable AI が適用される論文がいくつか発表されている。
- 例えばリモセンデータを利用して算出した NDVI 値や経済情報などの異種混合のデータセットを使い、Covid-19 の感染人数や死亡者数を予測するモデルを開発した論文²¹において Explainable AI が利用されている。Explainable AI の手法を使い、予測結果に対する各データの影響度を算出することで、「何のデータによってこの予測結果となったのか」を説明可能にしている。
- また大量の SAR データを土地被覆によって分類するという問題において Explainable AI の手法が使われている²²。画像分類した結果としていくつかのグループ（論文中では Topic と呼ばれている）に各画像が分類されるが、Explainable AI によってその Topic 間で何が異なるのか（山や水、氷などの要素がどの程度含まれているのか）を確認できる利点を得られる。

図表 263 各 Topic の要素割合



出所) Feature-Free Explainable Data Mining in SAR Images Using Latent Dirichlet Allocation

3) キーとなる技術課題

A) 教師データの不足

- リモセンデータは教師データが豊富ではない場合が多いため、限られたトレーニングサンプルでより深い学習ができるような工夫が必要。
- 超解像の一般的な方法では、元の画像を高解像画像としその画像をデグレードさせて粗くしたものを低解像度画像として学習するが、衛星画像の領域においては元の画像よりも詳細に見えるようにする事が目的のため、超解像の教師データとなる高解像画像がないことが多い。
- 上記の場合、元画像より高解像の別の衛星データを教師データにする必要があり、位置合わせなど地理空間情報の処理といった余分な負担がかかる。
- また、教師データ不足を解決するために、GAN などの教師なし学習を超解像に適用する研究も進められている²³。

B) リモートセンシング処理の特殊性

- リモセンデータが時系列かつ空間的に特殊であるため、他の分野で成果を出している深層学習モデルが使いにくい。
- 例えば、リモセンデータは画像データでありながら観測した日時が刻一刻と変わるため時系列データとしての側面を持っている。つまり一般的な画像処理だけでなく時系列的な特徴を踏まえた上での処理が必要になる。
- また、どのようなセンサでどのようにして得られた物理量なのかというようなセンサ特性と、得られたデータの品質に関する専門知識を理解した上で用いる必要がある。例えば同じ衛星か

ら得られた海面水温でも、「光学センサから得られた海面水温」と「マイクロ波放射計で得られた海面水温」では観測方法が異なるため、誤差要因や精度が異なるため、正確に特徴と処理方法を理解しておかないと、間違った結果を算出してしまう可能性がある。

4) AI 技術を利用している企業

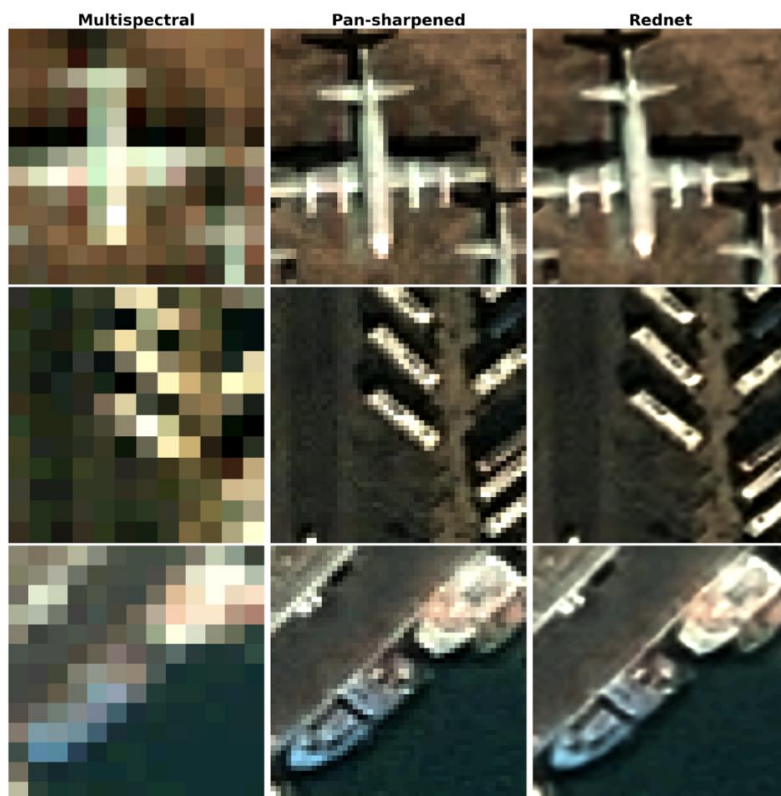
- 近年、衛星画像の処理に AI を利用する動きは活発になっており、数多くの宇宙系企業が積極的に取り入れている。本調査ではその中でも衛星画像の高解像度化に AI を適用している企業を選び、下記に詳細を記載した。

A) up42 (ドイツ)

i. 概要

- 衛星データプラットフォームを提供する企業 (Airbus の 100%子会社)。
- Pleiades によって得られたマルチスペクトルデータとパンシャープンしたデータを使い、超解像の学習モデルを構築しており、その結果は論文として発表されている²⁴。
- 論文内では、さまざまな CNN アーキテクチャを比較し、解像度の高い画像を精度高く生成できるアルゴリズムを導き出しており、RedNet という CNN アーキテクチャのアルゴリズムが最も精度が高かったとされている。マルチスペクトル画像 (2m の解像度) とパンシャープン画像 (0.5m の解像度)、RedNet (0.125m の解像度) を提供した画像を並べたものを以下に記載。

図表 264 超解像画像の比較



出所) UP42 のホームページの超解像解説ページ²⁵

- 同アルゴリズムは up42 のプラットフォームに実装され、利用することができる²⁶。Preiades や SPOT、Sentinel-2 の衛星画像を超解像によって高解像度化する機能をサービスとして提供しており、Sentinel-2 の超解像に至ってはソースコードも公開しているため²⁷、プログラミングができるのであれば無償で Sentinel-2 の画像の取得と高解像度化が可能になっている。

ii. 今後の動向（UP42 へのヒアリング）

【UP42 の Platform 全体について】

- **（質問）UP42 のプラットフォームはどのようなシステム構造になっているか。**
 - ◇ UP42 データでは、Airbus、Intermap、21AT、Capella Space など、世界有数のプロバイダーのアーカイブデータにアクセス可能。UP42 タスクでは、複数のコンステレーションのデータを含む複雑なタスキング注文を行うことが可能。UP42 の統一されたタスキング・インターフェースは、完全自動化されたクロスセンサー・タスキングを可能とし、電子メールによる連絡等の必要性を大幅に削減。UP42 アナリティクスでは、処理アルゴリズムにアクセスしたり、独自のアルゴリズムを使用したりすることができ、分析をさらに強化することを可能としている。
 - ◇ パートナーには、データのみを提供する企業、分析アルゴリズムのみを提供する企業、両方を提供する企業など、さまざまな形態が存在。
- **（質問）UP42 の収益構造はどのようなになっているか。**
 - ◇ データの仲介業者としての収益と、分析アルゴリズムのレベニューシェアの収益がある。

【Processing Platform について】

- **（質問）複数の分析アルゴリズムが Processing Block として用意されているが、どのような基準で用意する分析アルゴリズムを選択しているか。また光学データを対象にしたものが見えるが、今後 InSAR など SAR データを対象にしたアルゴリズムを用意する予定はあるか。**
 - ◇ UP42 が提供する分析アルゴリズムはパートナーが提供するアルゴリズムに依存している。これまでは光学データを提供する企業が多く、そのため光学の分析アルゴリズムが充実していた。ただ、直近 6 か月では Capella Space や ICEYE といった企業との提携が増加し、パートナーから SAR 関連のアルゴリズム提供が増えてきている（現状は SAR の分析アルゴリズムは 7 つ提供しており、今後も増える予定）。
 - ◇ また、UP42 ではアップロードされたアルゴリズムのテストを実施しており、クオリティの保証も行っている。UP42 は顧客がシェアしたくないアルゴリズムもアップロードできるようにしており、そこでプライベートな解析を行うことができるようになっている。
- **（質問）DEM 生成や 3D 再構成のアルゴリズムを用意する予定はあるか。**
 - ◇ DEM データとしては Airbus の「WorldDEM™ Neo」をリリース⁹⁶³。また、Intermap 社の NEXTMap® Elevation Data Suite をプラットフォームに統合。現在、他の DEM データを提供するパートナーと連絡を取っている。

⁹⁶³ <https://docs.up42.com/data/datasets/worlddem-neo>

- ◇ DSM や DEM のデータについても、社内での必要性を認識してリリースできるように動いている。
- ・ (質問) **Land Cover Classifier** や **Super-Resolution** のブロックはあらかじめ用意されたトレーニングデータを使って推論できる、と記載されている。そのデータの再学習は定期的に再実行しているか。その場合はどのようなタイミングで実行しているか。
 - ◇ **Land Cover Classifier** については企業への衛星データ活用のデモンストレーション用ということもあり、再学習は行っていない。また **Super-Resolution** もすでに教師データが十分にあるため再学習が必要な状況には至っていない。
 - ◇ また、**UP42** は分析業者ではなく分析プラットフォームである。そのため、分析アルゴリズムを提供するパートナーが、再学習やアップデートの必要性を感じた時に新規バージョンとしてアルゴリズムをアップロードできるようになっている。なお **UP42** のプラットフォーム上ではバージョンが確認できるようになっている。
 - ◇ ただ、機械学習の分析アルゴリズムの再学習の重要性は **UP42** も認識しており、**UP42** のプラットフォーム上では顧客自身が再学習したり、顧客からのフィードバックをパートナー企業に届けたりすることができる形態を取ろうとしている。
- ・ (質問) 分析アルゴリズムのソースコードは確認できる形になっているか。
 - ◇ コードの内容はすべて見えないようになっており、**UP42** から見ることはできない。
- ・ (質問) 今後はどのようなアルゴリズムを増やしていく予定か。もしくはどのようなアルゴリズムがユーザや世間から求められているか。
 - ◇ 基本的にはパートナーに依存しているが、**Analytics Ready data** のニーズは高いと **UP42** として認識している。現在はパートナーから取得したデータを標準化し、機械学習に適用可能なデータとするアルゴリズムの開発に注力している。

【Data Platform について】

- ・ (質問) 基本的には提供したデータを公開するものの、一部の機微な情報については公開範囲から除くなどの公開範囲の設定は可能か。
 - ◇ 一部の地点のデータを提供リストから除くことや、アクセス権を制限することは可能。
 - ◇ また、パートナー企業には **UP42** の利用者の一部情報を見れるようにしており、特定のリストに入っている企業かどうか、などは確認できるようになっている。
- ・ (質問) 今後、**platform** で利用できる衛星データの種類を増やすために、マーケットプレイスに登録してもらった企業を増やす計画はあるか。また、どのように行うか。
 - ◇ 衛星データ市場を拡大していくためにも、**UP42** は今後以下の 3 点に焦点を当てて事業を拡大していく予定
 1. 多様なデータのプロバイダーになること
 2. 多様なデータの解析が可能なプラットフォームになること
 3. ESRI と **UP42** との協業のような衛星データのエコシステムを拡大すること
- ・ (質問) オープンソースデータやアルゴリズムは競合と認識しているか。
 - ◇ 競合とは認識しておらず、重要なパートナーだと認識している。**Sentinel-1** や **Landsat**、

MODIS のデータも **UP42** に取り込んでいる。

- ◇ また、多くの顧客は最終的には高解像度のデータを求めており、解析の初期段階では場所を絞るためにオープンフリーの低解像度データを使用するが、そのあとの高解像度のデータ使用するシーンでは、当該データは競合ではないと考える。

B) MAXAR(米国)

- MAXAR は通信衛星、地球観測衛星、レーダー衛星、軌道上サービス衛星、衛星製品、および関連サービスの製造を専門とする企業。
- 超解像を利用している。
- 画像のピクセル数を増加させ、各ピクセルで表示された情報の明瞭さを向上させるインテリジェントな HD (High-Definition) Technology を開発。HD Technology は、画像の特定の要件に合わせた数学モデルを使いピクセル数を増やすことで、視覚を向上させている。
- 例えば 30cm の元画像から 15cm の高解像画像を生成することができる²⁸。

C) SpaceKnow (米国)

- 様々な地球観測衛星のデータから AI により分析したデータを提供している企業。
- 経済を理解するために衛星データを利用。大量の地球観測画像、独自の機械学習/人工知能 (ML/AI) アルゴリズム、経験豊富なエンジニアと科学者のチームが、トレーダー、ポートフォリオ・マネージャー、企業ストラテジスト、エコノミスト、政府に宇宙からのユニークな視点を提供。
- SpaceKnow Nowcasting Solutions というサービスは、4 つの製品で構成されており、各製品はさまざまな国や業界に、リアルタイムに近い頻度で高頻度のアクティビティ・データを提供。SpaceKnow は、ユーザが地上で起きる事象を知る手助けをしている。例えば衛星から夜間光を捉え、その規模の大きさにより、経済規模を指標化して政府機関や投資家に提供。

D) シャープと Tellus (日本)

- シャープと Tellus が協力し、Tellus 上で超解像を実現できるツール「Tellus-Claiboyant」を 2021 年 10 月 21 日から提供している²⁹。
- 教師データとして SPACEIMAGING 社(米国)の衛星 IKONOS の分解能 3m の画像を使い、AVNIR-2 と PALSAR-2 の衛星データの解像度を 2 倍または 4 倍に向上させる深層学習のモデルを開発。TellusOS や Tellus API から利用可能となっている。

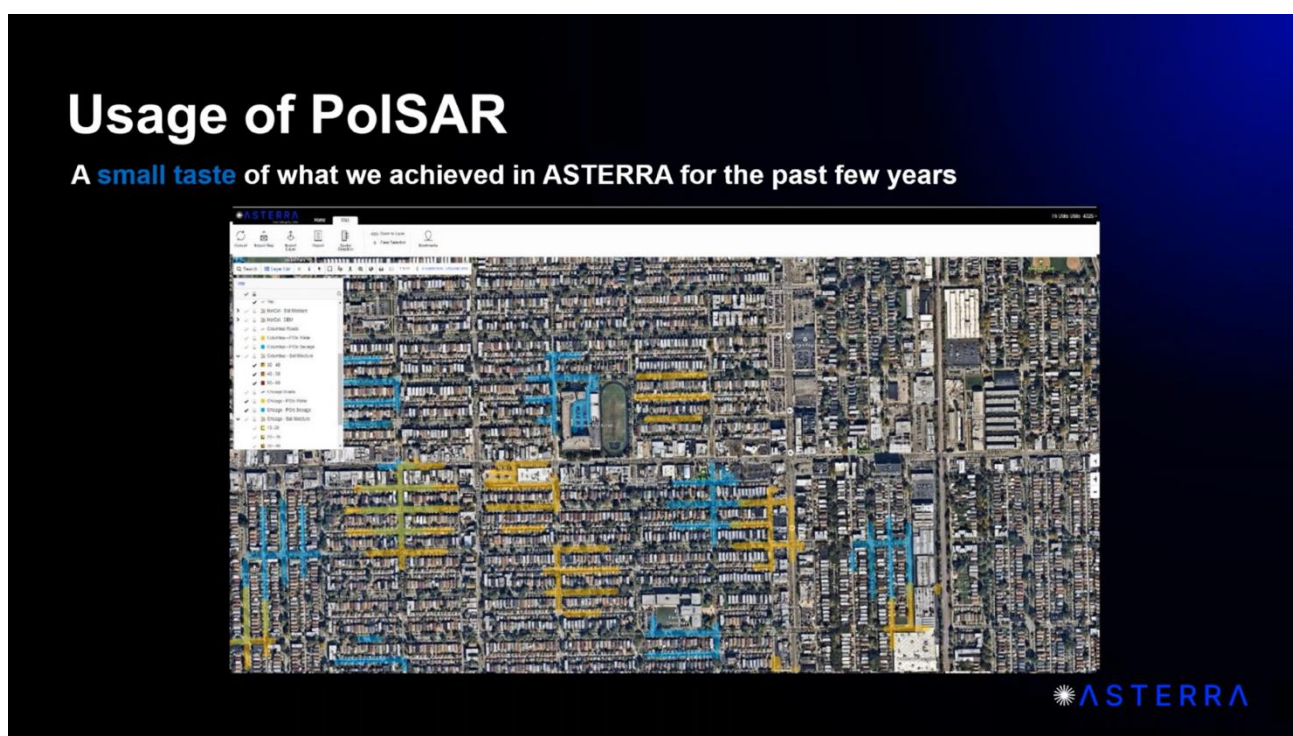
E) 【超解像の参考】 Solafune と日本マイクロソフト

- Solafune は、衛星データや地理空間データの活用をテーマにしたデータ解析コンテストの運営を通して、アルゴリズムライセンス事業を展開している。2021 年 8 月には日本マイクロソフトと衛星データのビジネス利用の促進を目的とした協業を発表し、同年 9 月、日本マイクロソフトと共同で衛星データの実用化に向けた「超解像技術」を開発するデータ解析コンテストの開催を発表した。
- 「市街地の高解像度画像を活用した超解像度画像の生成」を競うもので、参加者は、Solafune から提供される 1m 程度の評価用データを 25cm 解像度の超解像度画像に向上させ、所定のサイトから投稿し、画像評価指標 SSIM (structural similarity) によって評価され、スコアが比較される。同年 12 月に終了している。

5) (参考) PolSAR による水漏れ検知

- SAR データを利用したデータ解析といえば InSAR (干渉合成開口レーダ) が主流になっているが、Utilis 社 (イスラエル) は PolSAR (偏波合成開口レーダ) という手法を使って衛星データの分析をしている。InSAR は 2 時点の SAR データの位相の違いから地表の変化を検出する手法だが、PolSAR は複数偏波の違いから地表の特性を捉える手法。同社は ALOS-2 及び SAOCOM のデータを利用して、PolSAR 解析を行い、水道管の水漏れを検知するサービス (ASTERRA) を展開している。
- 日本では愛知県豊田市上下水道局にて同サービスが利用され、水道管の漏水調査による成果が公表されている⁹⁶⁴。具体的には、同サービスによって漏水の可能性のある区域に絞り込んだ上で現地調査をした、という内容。絞り込みをせずに全件調査した場合は約 5 年かかる調査だったところを約 7 ヶ月で完了しており、大幅に効率化できたとのこと⁹⁶⁵。

図表 265 PolSAR により水漏れ検出結果



出所) IGRASS Leading the PolSAR Revolution の発表スライド

⁹⁶⁴ <https://www.city.toyota.aichi.jp/pressrelease/1043553/1044032.html>

⁹⁶⁵ <https://newscast.jp/news/6184035>

2.6 定常調査・動向分析

1) IGARSS

- 農作物生育に係る土壌水分量マップや農作物生育マップなどの作成ではANN適用に関する研究が進められているが、本分野では日本でも衛星データの分析にAI処理を適用したサービス提供が試みられており、同等のレベルにあると考えられる。
- オンボード処理の分野では受動センサーや能動センサーに対する地上からの無線干渉の検知とFPGAによるオンボードプロセッサの構成法に関する発表が多かった。インテリジェントとして無線干渉源を発見するサービスを提供する企業も出現しているが、今後の高解像度化を見据えるとオンボードでの無線干渉抑圧技術の開発が進むものと考えられる。
- 米国では次世代の赤外線サウンダーにLEOとGEOを利用することが検討されている。LEOによりグローバルな情報を収集するもので、GEOの代替となるものではなく、補完的な役割となるものと思われる。
- 各セッションの詳細は「別紙1_IGARSS2022報告書」を参照。

2) Small Satellite Conference

- 衛星の動向について
 - ◇ 主に軍事／森林火災検知／メタンガス検知等を目的として、小型衛星によるコンステレーション構築やハイパースペクトル観測機器／衛星の開発がトレンドである。
 - ◇ Planet社やSpire社(3U cubesat)、Swarm社(0.25U cubesat)に代表される商用コンステレーションの領域が近年急激に成長しており、特に空間分解能を高める目的で低軌道でのコンステレーション運用が主流である。衛星2013年頃の予測よりは下振れるものの、今後も継続的に商用衛星コンステレーションの発展が続くことが予想される。
- コンステレーション運用について
 - ◇ 現在主流の低軌道コンステレーションは、重力の影響で高頻度な軌道修正を行う必要がある。Planetは低軌道のコンステレーションSkySatにおける軌道修正自動化システムの開発を試みており、実衛星を用いた実証に成功している。
 - ◇ 地球観測のニーズによっては局所的かつ連続的な撮像のニーズがある、かつ一部コンステレーションが故障した際の可用性の向上のニーズもあり、コンステレーション衛星の再配置アルゴリズムの研究なども盛んに行われている
- ダウンリンクについて
 - ◇ 小型衛星のSWaP-C (size, weight, power, cost)、ハイパースペクトル観測の膨大なデータ量、火星探索による遠隔データ通信などに起因してダウンリンク等のデータ通信容量削減が求められており、機械学習用のGPU等を含むオンボード処理システムを搭載した衛星開発の研究が活発に行われている。欧州ではESAがオンボード処理システムの宇宙空間実証に特化した衛星OPS-SATを打ち上げている。また、米国ではNASAによるIn-Space Validation of Earth Science Technology (InVEST)プログラムによる資金提供や、国防総省のSpace Teste Program Houston 6 pallet (STP-H6)プログラムによるISS上でのオンボード処理ソフトウェア実証が進められている。

- ◇ オンボード処理によるデータの削減だけでなく、通信技術に関する研究も行われており、光通信を用いたダウンリンク高速化の実証が行われつつある。
- 各セッションの詳細は「別紙 2_SmallSat2022 報告書」を参照

3) World Satellite business week

- 市場全体の動向について
 - ◇ COVID-19／ウクライナ等の世界情勢の不安定さから一定の影響を受けている。例えば米国では特に New Space のような不確実性の高い企業に対して投資が減少傾向にあると報告があった。しかしながら、昨今の世界的なアンカーテナンシーの増加は投資家にとっては非常にポジティブであり、今後も宇宙事業は投資家にとって魅力的な領域である。
COVID-19 はサプライチェーンにも影響を与えている。
 - ◇ 2021 年の国際的な宇宙市場は、総額 337Bil ドルにおよび、そのうちの 10%は Upstream（製造／打ち上げ／地上局）、90%は Downstream（衛星運用／アプリケーション）。この宇宙市場における地球観測領域（EO）が占める割合は 5%程度である。
 - ◇ データおよびアプリケーションのセクターでは、民間企業が大幅に台頭している。2030 年には年間 700 基の商用衛星によるデータ提供が予測され、最近ではハイパースペクトル観測衛星や Green House Gas (GHG) モニタリング等いくつかの限定的なセンサー／ペイロードが急激に成長している。
 - ◇ 国際的なサービス提供を目的としたバリューチェーンの同セクター内の水平統合や、コスト最適化のためのバリューチェーンを跨いだ垂直統合が活発に行われている。
- Near RealTime (NRT) なデータ提供について
 - ◇ 保険領域や防衛／インテリジェンス領域等を含む EO データ活用全体で、よりリアルタイム性の高いデータ提供が求められており、現在の技術とニーズの間にギャップがある。例えば保険領域では 1 時間スケールのデータアップデートが、海事においては違法船舶等の監視には分スケールのレイテンシーが求められている。上記を解決するために重要な要素は下記：
 - 大規模なコンステレーション構築による再訪率の向上
 - オンボード処理の向上による転送データ量の削減
 - 衛星間通信および Ground Segment as a Service (GSaaS)を活用したダウンリンクタイムの短縮
 - 衛星間通信で利用される光通信での標準化
- フュージョンについて
 - ◇ 実際に顧客の意思決定に関わるインサイトを提供するためには、単一のセンサーデータでは不十分。SAR／光学（ハイパースペクトル含む）／RF／熱赤外衛星観測データや UAV／航空機／バルーン等の他センサーデータをフュージョンすることで各波長観測の特徴や空間分解能／時間分解能／スペクトル分解能を補完することが重要である他、サプライチェーンデータ等の非センサーデータを掛け合わせるが必要不可欠。

- AI/ML について
 - ◇ 主に防衛/インテリジェンス領域で AI/ML を活用したソリューションのニーズが高い。民間においても徐々に市場が形成されつつある。

4) AGU

- Smallsat について
 - ◇ SmallSat において今後注目すべき開発項目として、衛星の自律化（複数の衛星が連携して観測）、レーザを含む伝送リンクの広帯域化、低 SWaP（サイズ、重量、電力）化、オンボードプロセッサ（CPU、GPU、FPGA）、AI/ML 等が挙げられており、注視が必要である。
 - ◇ 加えて、軌道上サービスが展開された場合に、現在のように小型衛星を短期間で打ち上げるのか軌道上サービスを利用した方がいいのかといった議論もあり、軌道上サービスにも注目が集まっていると思われる。
 - ◇ データバイの継続が必要との指摘があり、シスルナ空間のデータもデータバイになるかもしれないとの議論もあった。
- GEO 衛星について
 - ◇ GEO 衛星観測は空間分解能が低い代わりに、広いカバレッジやリアルタイム観測等の利点があり、さほど高い空間分解能を求められないようなグローバルな観測を行う上では、軌道として価値が高い。
 - ◇ 低空間分解能については、LEO 衛星データとの融合により空間分解能を補完するような活用方法も考えられる。
 - ◇ GeoCarb ミッション中止に見るように、大規模な開発を要する GEO 衛星ミッションでは、スケジュール/コスト/後発ミッションの台頭などのリスクを抱えていることは留意すべきポイント。
- データフュージョンについて
 - ◇ AI アルゴリズムに関する発表が多数。Landsat と Sentinel のデータを融合する HLS（Harmonized Landsat Sentinel）、Sentinel-1 の SAR 画像と Sentinel-3 高度計データを利用する湖水の推移測定、SAR 画像と光学画像のフュージョンを行うためのアルゴリズムなどが発表された。
 - ◇ Planet 社が同社の Planet Fusion の発表を積極的に行っている。Planet は準リアルタイムでの地球観測の実現を目指して、Landsat-8/9、Sentinel-2、MODIS などの光学画像を利用する手法を開発している。
 - ◇ 仮に組織などが変化した場合においてもデータ融合をスムーズに行うためには、情報ソースに対するオープンデータ化が重要との指摘がされていた。
 - ◇ SnowEx ではこれまで LiDAR が中心であった積雪深マッピングをグローバルに可能とするためのデータフュージョンやデータ同化に関する発表が行われた。
- 各セッションの詳細は「別紙 4_AGU2022 報告書」を参照。

5) EOcafe

- 観測データの地上処理プラットフォームについて
 - ◇ AI/ML を活用した衛星データ解析が近年の潮流であり、その有効性を高めるためには誰もがオープンにアクセスできる衛星データのプラットフォームが重要である
 - ◇ ESA では新しい持続可能なオープンデータ提供の形として、Copernicus Data Space Ecosystem のユーザートライアルを 2023 年 1 月末から開始した⁹⁶⁶。これはこれまでオープン&フリーだった Copernicus Data Hub と有償サービスあった CREODIAS を統合し、さらに解析環境を具備したサービスであり、オープンな衛星データ/解析プラットフォームのトレイルブレイザーになる可能性がある。
 - ◇ 一方で、各プロダクトのライセンスをどのように調整し、ユーザーが使いやすくプロバイダーが納得できる形にするかについては今後も検討が必要である。
- 各セッションの詳細は「別紙 5_EOcafe 報告書」を参照。

⁹⁶⁶ <https://dataspace.copernicus.eu/index.html#ecosystem>

2.7 適時調査・事実確認

- 1) 国内外の宇宙関係スタートアップ企業一覧（2022年8月19日）
- 2) 国内外の宇宙関係スタートアップ企業の推移（2022年8月19日）
 - グローバルのスタートアップをカバーするデータベース **Crunchbase**⁹⁶⁷にて個社の状況を把握した。以下の検索ワード（OR検索）に該当した企業を抽出し、当該企業群のホームページ上で地球観測を謳っている企業をさらに抽出したところ 211 社が該当した。
 - Earth Observation（地球観測）
 - Satellite imaging（衛星画像）
 - Satellite imagery（衛星画像）
 - Synthetic Aperture Radar（合成開口レーダ）
 - Hyperspectral Satellite（ハイパースペクトル観測衛星）
 - Infrared Satellite（赤外線観測衛星）
 - Satellite Operators（衛星運用企業）
 - 211 社の国別の構成は下記のとおりである。

図表 266 企業数上位 8 か国の代表企業

国籍	企業数	主な代表企業
United States	67	Planet, BlackSky, Capella Space, Rocket Lab, Umbra, PredaSAR, GeoOptics, AstroDigital
United Kingdom	29	Satellite Vu, Rezatec, Earth-i, Geospatial Insight, Bird.i, Terrabotics,
Germany	12	Orora Tech, LiveEO, Mavuno Technologies, European Space Imaging, Greenspin, Earth Observation Solutions and Services, Village Data Analytics
Canada	10	NorthStar Earth & Space, SkyWatch, BlackBridge, 3VGeomatics
India	10	Mapmyindia, Prakshep, GreenSat Innovation Labs, AgriCentral, Farmonaut Technologies Private Limited, Shoghi Communications, Aapah Innovations
Australia	7	Q-CTRL, Arlula, Esper Satellite Imagery, Treeblue, Solar Captus, C3X Australia, Lux Aerobot
The Netherlands	7	Overstory, MetaSensing, RoadEO, SurveyAuto, Skylab Analytics, Goodwood Earth
Japan	6	Astroscale, AxelSpace, Synspective, iQPS, Infostellar, Sigma-SAR Institute

出所) Crunchbase をベースに DB 編集

- エクイティベースでの資金調達額で比較すると順位は大分異なる。ウルグアイ (Satellogic)・

⁹⁶⁷ 2007年にTechCrunch社(米、カリフォルニア)の子会社として設立されたCrunchBase社(米、カリフォルニア)による、世界最大級のベンチャー企業のデータベースサービス。世界各国のベンチャー企業の概要、経営メンバー、資金調達額、投資家、商品・サービスなど、50万件以上の情報が登録されており、網羅的に検索できる

フィンランド(ICEYE)など1社の影響が大きい国もある。

図表 267 企業数上位8か国の代表企業

国	企業数	エクイティ 調達企業数	エクイティ 調達金額 (USD)
United States	67	35	2,285,815,739
Japan	6	5	627,012,329
Uruguay	1	1	333,100,000
Finland	1	1	299,199,708
Canada	10	3	134,601,204
France	5	3	128,928,337
United Kingdom	29	10	73,064,866
Australia	7	3	40,620,511
Spain	2	2	39,194,794
Germany	12	4	38,379,398
India	10	3	34,550,000
Russian Federation	3	1	20,000,000
Austria	3	1	20,000,000
Switzerland	5	2	16,500,000
Israel	3	2	6,120,000
The Netherlands	7	2	5,986,997
Norway	2	1	1,478,614
Argentina	1	1	710,000
Italy	5	1	424,028
Singapore	3	1	200,000
Czech Republic	1	1	56,437
Saudi Arabia	3	1	55,000
Estonia	2	1	40,000

出所) Crunchbase をベースに DB 編集

- なお、上場済主要企業の売上高は下記の通りである。

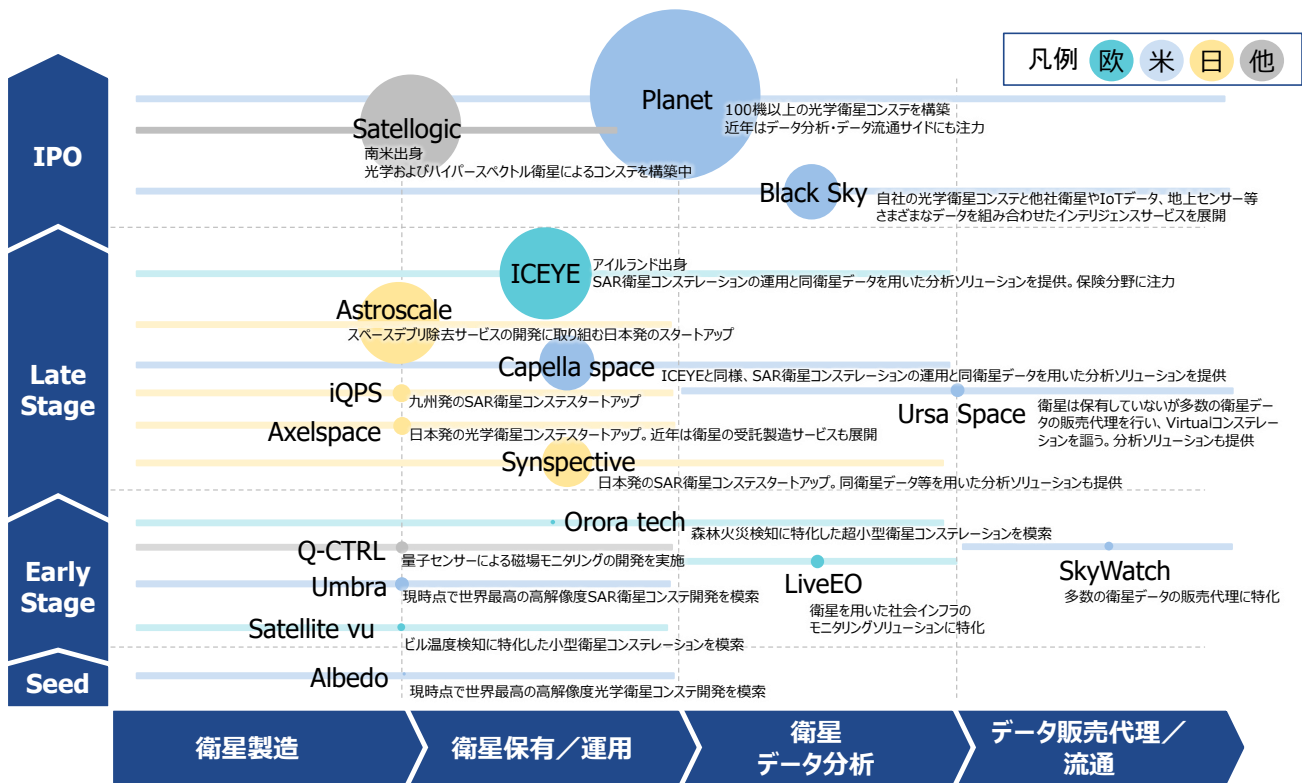
図表 268 上場済み企業の年間売上高

Organization Name	Headquarters Location	Country	Revenue(USD)
Planet	San Francisco, California, United States	United States	131,209,000
Rocket Lab	Huntington Beach, California, United States	United States	62,237,000
BlackSky Global	Seattle, Washington, United States	United States	34,085,000
MapmyIndia	New Delhi, Delhi, India	India	26,902,000
Satelloptic	Montevideo, NA - Uruguay, Uruguay	Uruguay	4,247,000

出所) 各社 IR 情報より DB 編集

- 各社のステージとバリューチェーンをまとめると以下の図表の通りである。
 - ◇ バリューチェーンが広めの企業のほうが IPO であつたり Late Stage にある。
 - ◇ 米国企業が先行するが、日系企業も複数 Late Stage に至っている企業が存在する。

図表 269 代表的スタートアップのまとめ

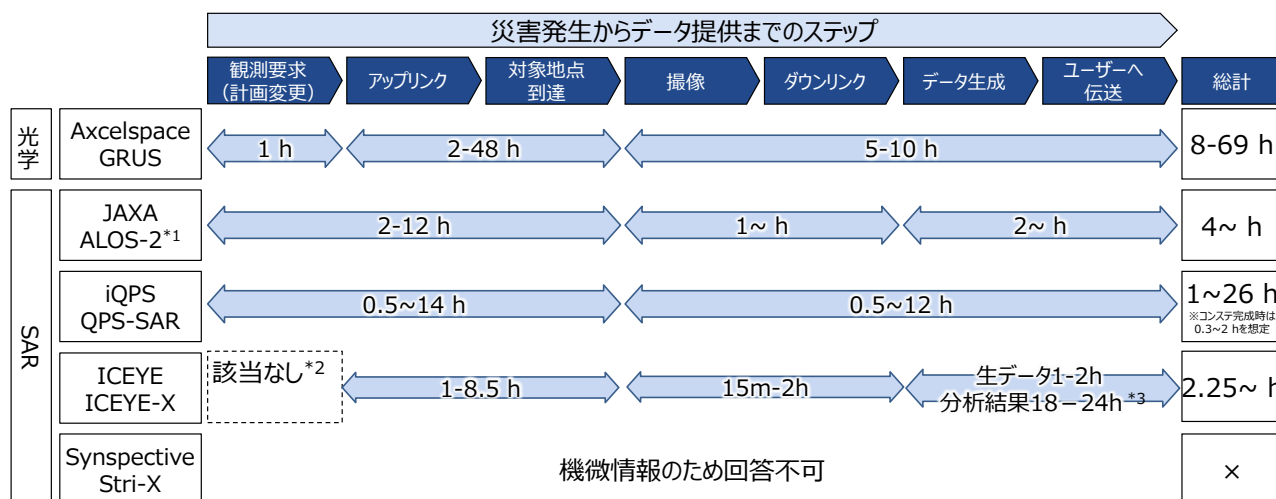


出所) Crunchbase、各社 IR 情報より DB 編集

3) 災害観測のリードタイム (2022年11月29日)

- 防災利用を念頭に、我が国における小型を含む観測衛星の今後の研究開発計画立案の参考情報として、衛星運用を行う各社の災害観測のリードタイムを、当該企業へのメール照会およびヒアリングを通して把握した。結果は下記のとおりである。
- 災害発生時に各社の衛星がどこにあるかによって状況がかなり変わることが把握できた。

図表 270 災害発生時の緊急観測データ提供にかかる時間



※JAXA以外は各社へのヒアリングを基に作成

※各衛星の災害発生時の場所にも大きく依存するため、撮像時間を保証するものではない

*1: JAXA「人工衛星の防災活用について」

*2: ICEYEでは観測要求を他者から受領する仕組みが現状ない。ICEYEで気象状況を常時モニタリングして運用計画を策定・修正している

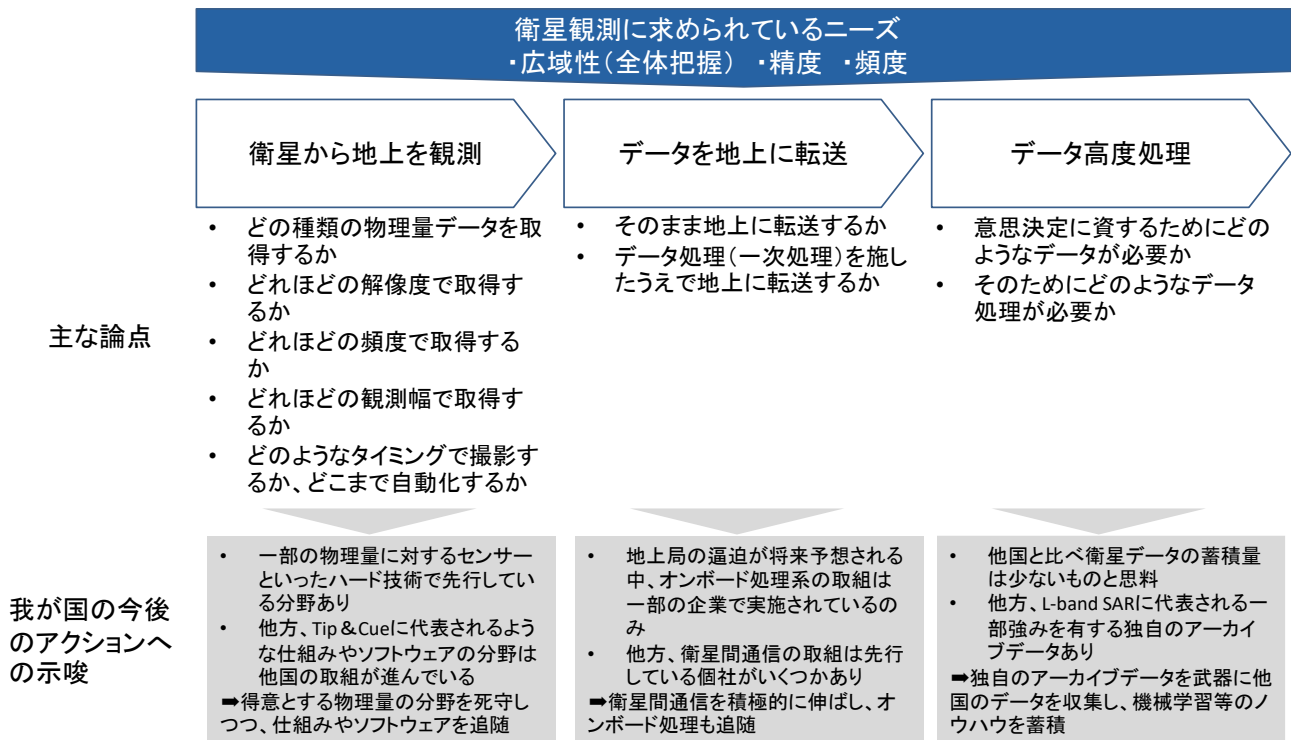
*3: ICEYEでは洪水の場合、SAR以外の各種データ (SNS等) を取り込んで浸水域、浸水高を解析した結果を解析開始から24時間で提供しているため、これを「標準データ」とする前提で記載

2.8 研究開発に関する戦略マップ（案）のとりまとめ

1) 戦略マップ構築における基本的な考え方

- 文部科学省殿が今後研究開発を行うにあたって目標とすべきところは、日本の衛星の収支や便益がプラスであり、産業としてその状態が持続可能となっていることであろう。
- そのためには、地球観測衛星から得られる観測データの利活用が、サービスの対価の支払い手であるエンドユーザーの何らかの意思決定に資するものでなければならない。そのような観点から、単に日本の衛星のスペックや分析技術等の他国との比較に留まらず、エンドユーザー視点での考察も肝要と考える。例えば、衛星データの用途・ニーズに応じて、時間分解能を求めるエンドユーザーもいれば、精度を求めるエンドユーザーも存在する。安全保障・災害用途の場合には、観測要求からの所要時間を最重要視するエンドユーザーが大半である。かかる視点から、エンドユーザーやユースケースの種類を意味ある構造化により整理することで、日本の地球観測技術がどのような貢献をしていくべきかを考察する。

図表 271 2.1～2.7 の調査結果のとりまとめ



2) 地球観測衛星に対するユーザーニーズ調査

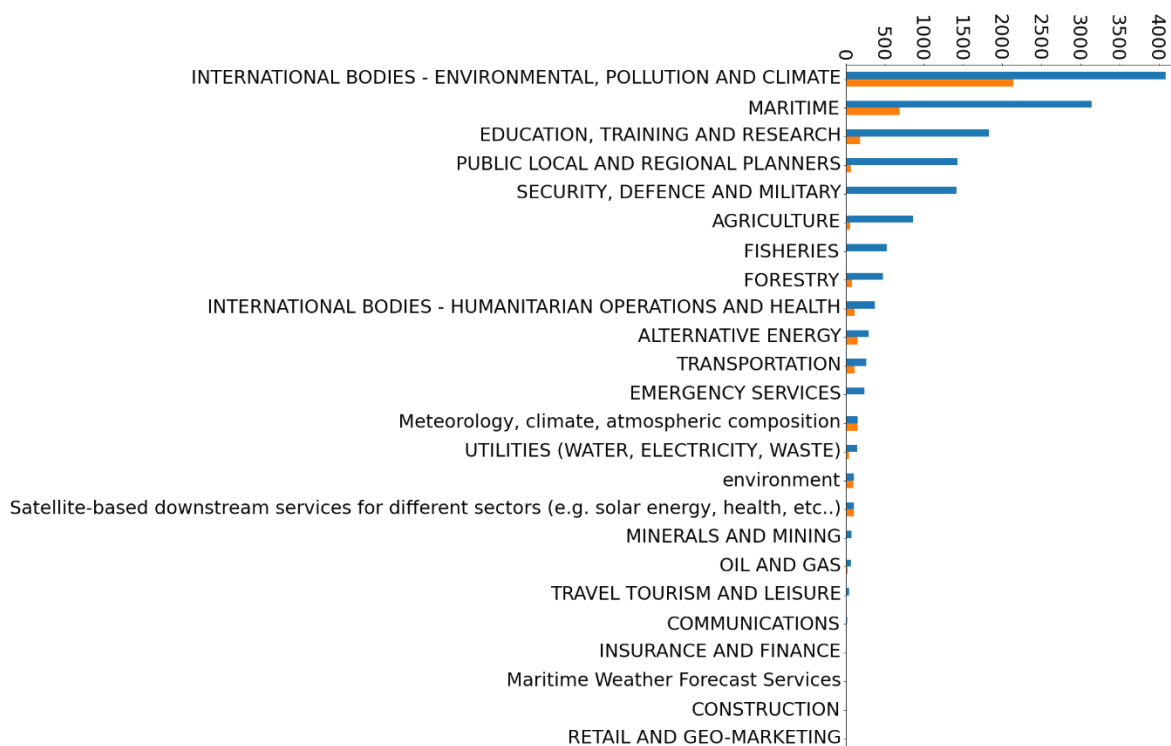
A) 概要

- まずは地球観測衛星に対するユーザーニーズを把握する。
- European Commission (EC) により 2015 年～2019 年に実施された Copernicus プログラムに対するユーザーニーズ調査の結果⁹⁶⁸を解析して得られた、地球観測衛星に求められるニーズを以下にまとめる。

B) 手法

- 上述したユーザーニーズ調査は 15,530 件の回答が得られている。同回答には、研究者や民間企業からどのような衛星データがどのような時間分解能・空間分解能などで必要か、といった回答が得られている。時間分解能・空間分解能など計 17 のニーズ項目で調査が行われている。
- ただし、多くの回答が N/A で埋まっているなど信頼性が必ずしも高くない回答で占められている。
- よって、比較的信頼性の高い回答のみを抽出する目的で、全 15,530 件の回答者のうち、6 件以上のニーズ項目に回答した「有効回答者」3,927 件を抽出した。
- 各市場領域における回答者／有効回答者の分布は下図の通りである。

図表 272 コペルニクスプログラムのユーザーニーズ調査における市場領域ごとの回答者数の分布



※青：全回答者のヒストグラム、オレンジ：有効回答者のヒストグラム

⁹⁶⁸ 「Nextspace database for user requirements」

<https://www.copernicus.eu/en/documentation/studies-and-surveys>

- 市場領域について、下表のとおり回答者数と有効回答者数の上位から 6 件を分析対象とした。

図表 273 本節における分析対象の抽出結果

#	EARSC Beneficiary Market Area	概要	回答者数	有効 回答者数	解析 対象
1	INTERNATIONAL BODIES - ENVIRONMENTAL, POLLUTION AND CLIMATE	環境／汚染／気候	4,085	2,136	○
2	MARITIME	海事	3,135	684	○
3	EDUCATION, TRAINING AND RESEARCH	教育／研究	1,828	175	○
4	PUBLIC LOCAL AND REGIONAL PLANNERS	地域計画	1,424	58	○
5	SECURITY, DEFENCE AND MILITARY	安全保障	1,406	0	—
6	AGRICULTURE	農業	857	48	○
7	FISHERIES	漁業	519	0	—
8	FORESTRY	森林	470	75	○
9	INTERNATIONAL BODIES - HUMANITARIAN OPERATIONS AND HEALTH	人道的活動／健康	366	107	—
10	ALTERNATIVE ENERGY	新エネルギー	291	143	—
11	TRANSPORTATION	輸送	257	106	—
12	EMERGENCY SERVICES	エネルギー	230	2	—
・・・ (以下略)					

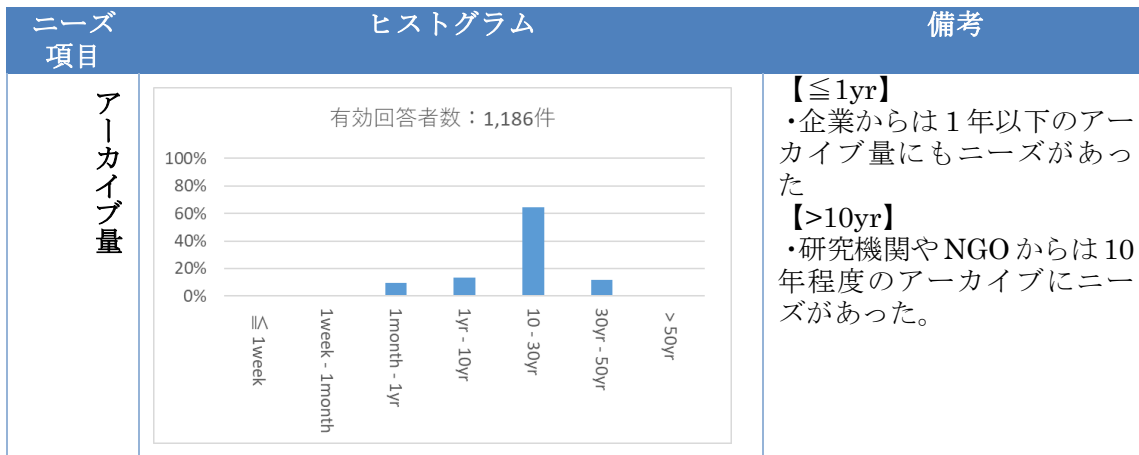
- ニーズ項目は、衛星データの品質として一般的であると考えられる下記 4 項目を解析対象とした：
 - HZTAL RESOLUTION Future：空間分解能（平面）
 - TEMPORAL RESOLUTION Future：時間分解能
 - LATENCY Future：レイテンシー
 - ARCHIVE LENGTH Future：アーカイブ量

C) 解析結果

- 下記より市場ごとの空間分解能（平面）・時間分解能・レイテンシー・アーカイブ量のユーザーからのニーズのヒストグラムを示す。
- i. 環境／汚染／気候（INTERNATIONAL BODIES - ENVIRONMENTAL, POLLUTION AND CLIMATE）
- 本分野の分析で利用される物理量として有効回答の中で頻出して挙げられたのは、GHG／大気汚染物質であった。
 - エンドユーザーが衛星データに要求する空間分解能（平面）・時間分解能・レイテンシー・アーカイブ量のヒストグラムは下図表の通りである。

図表 274 環境/汚染/気候における各ニーズのヒストグラム

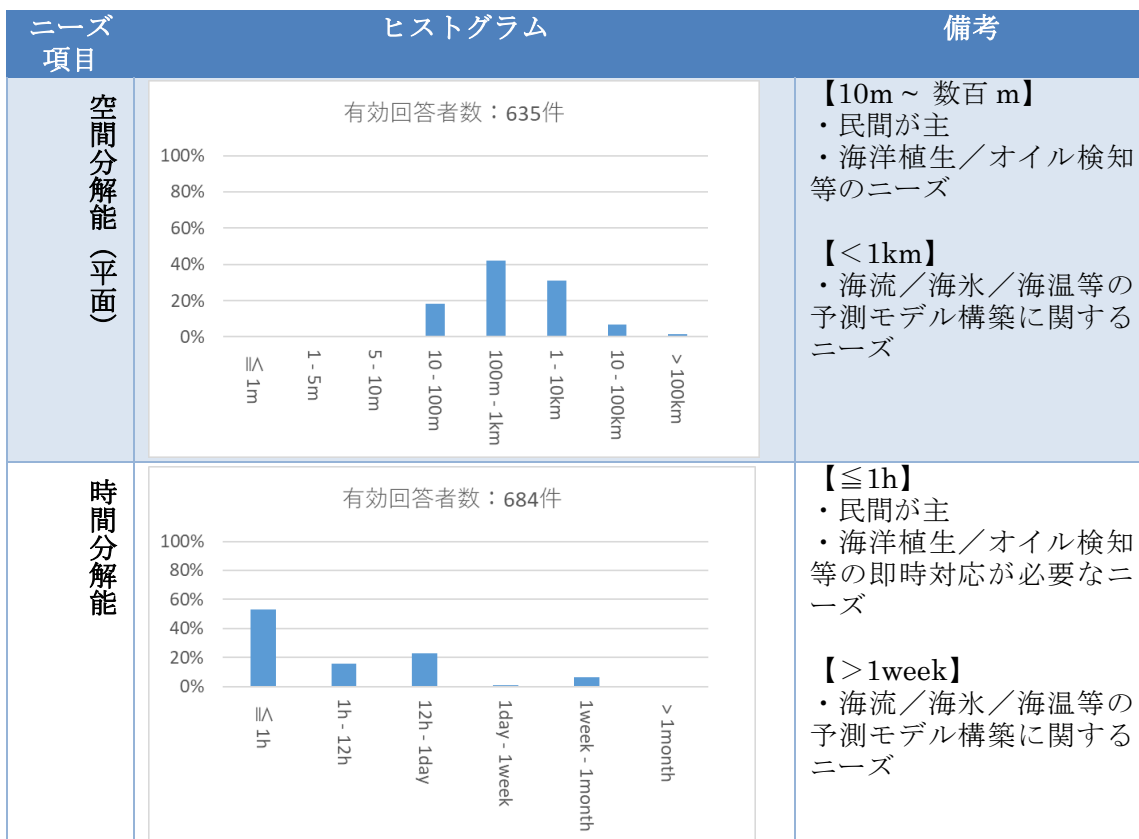
ニーズ項目	ヒストグラム	備考																		
空間分解能（平面）	<p>有効回答者数：2,132件</p> <table border="1"> <caption>空間分解能（平面）ヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>空間分解能 (平面)</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1m</td><td>0</td></tr> <tr><td>1-5m</td><td>0</td></tr> <tr><td>5-10m</td><td>0</td></tr> <tr><td>10-100m</td><td>0</td></tr> <tr><td>100m-1km</td><td>~2</td></tr> <tr><td>1-10km</td><td>~55</td></tr> <tr><td>10-100km</td><td>~35</td></tr> <tr><td>>100km</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	空間分解能 (平面)	割合 (%)	1m	0	1-5m	0	5-10m	0	10-100m	0	100m-1km	~2	1-10km	~55	10-100km	~35	>100km	0	<p>【1-10km】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 企業も含めたニーズ • GHG や大気汚染情報を地域特異的に観察するニーズがあった <p>【10-100 km】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 公的機関のニーズ。 • 全球の状態を把握したい国際機関や研究者向けと考えられる
空間分解能 (平面)	割合 (%)																			
1m	0																			
1-5m	0																			
5-10m	0																			
10-100m	0																			
100m-1km	~2																			
1-10km	~55																			
10-100km	~35																			
>100km	0																			
時間分解能	<p>有効回答者数：1,741件</p> <table border="1"> <caption>時間分解能ヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>時間分解能</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1h</td><td>~30</td></tr> <tr><td>1h-12h</td><td>~50</td></tr> <tr><td>12h-1day</td><td>~10</td></tr> <tr><td>1day-1week</td><td>~5</td></tr> <tr><td>1week-1month</td><td>~2</td></tr> <tr><td>>1month</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	時間分解能	割合 (%)	1h	~30	1h-12h	~50	12h-1day	~10	1day-1week	~5	1week-1month	~2	>1month	0	<p>【≤1h】</p> <ul style="list-style-type: none"> • GHG／汚染物質の Near Real Time モニタリング <p>【1h-12h】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 気温／海温／雲／降水等、気象予報関連情報に対するニーズ 				
時間分解能	割合 (%)																			
1h	~30																			
1h-12h	~50																			
12h-1day	~10																			
1day-1week	~5																			
1week-1month	~2																			
>1month	0																			
レイテンシー	<p>有効回答者数：538件</p> <table border="1"> <caption>レイテンシーヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>レイテンシー</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Near Real Time</td><td>~20</td></tr> <tr><td>1h-12h</td><td>~40</td></tr> <tr><td>12h-1day</td><td>~5</td></tr> <tr><td>1day-1week</td><td>~20</td></tr> <tr><td>1week-1month</td><td>~15</td></tr> <tr><td>1-6month</td><td>~2</td></tr> <tr><td>>6month</td><td>~5</td></tr> </tbody> </table>	レイテンシー	割合 (%)	Near Real Time	~20	1h-12h	~40	12h-1day	~5	1day-1week	~20	1week-1month	~15	1-6month	~2	>6month	~5	<p>【Near Real Time ~ 12h】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 気温／海温／雲／降水等、気象予報関連情報に対するニーズ <p>【1day ~ 1month】</p> <ul style="list-style-type: none"> • アルベドおよび GHG 観測に対するニーズ 		
レイテンシー	割合 (%)																			
Near Real Time	~20																			
1h-12h	~40																			
12h-1day	~5																			
1day-1week	~20																			
1week-1month	~15																			
1-6month	~2																			
>6month	~5																			

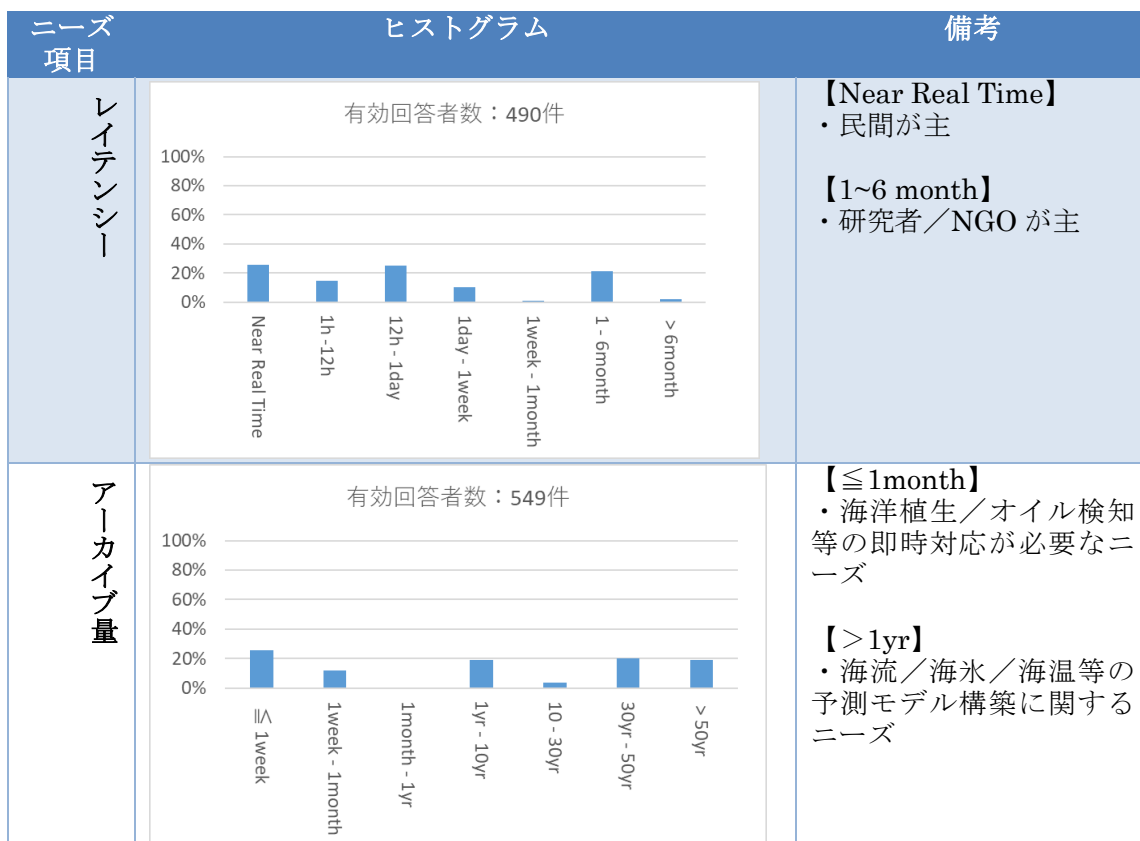


ii. 海事 (MARITIME)

- 本分野の分析で利用される物理量として有効回答の中で頻出して挙げられたのは、海面水温／海流／海氷/海洋植生／オイルの分布であった。
- エンドユーザーが衛星データに要求する空間分解能 (平面)・時間分解能・レイテンシー・アーカイブ量のヒストグラムは下図表の通りである。

図表 275 海事における各ニーズのヒストグラム

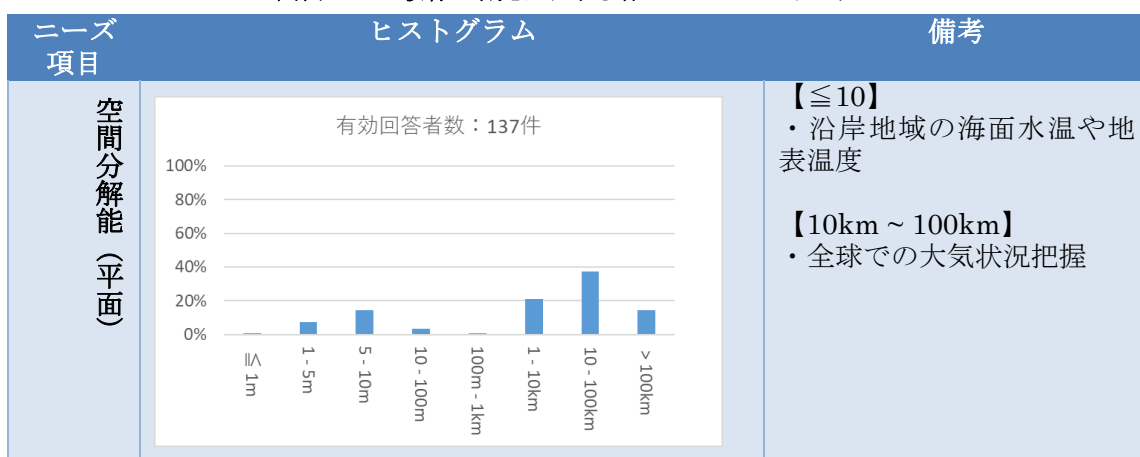




iii. 教育／研究 (EDUCATION, TRAINING AND RESEARCH)

- 本分野の分析で利用される物理量として有効回答の中で頻出して挙げられたのは、O3, CO, NO2, SO2, CH2O, NO, CH4, HNO3, イソプレン, PAN, C2H6, OH, NO2 であった。
- エンドユーザーが衛星データに要求する空間分解能 (平面)・時間分解能・レイテンシー・アーカイブ量のヒストグラムは下図表の通りである。

図表 276 教育・研究における各ニーズのヒストグラム



ニーズ項目	ヒストグラム	備考																
時間分解能	<p>有効回答者数：173件</p> <table border="1"> <caption>時間分解能ヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>時間分解能</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1h</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td>1h - 12h</td> <td>55%</td> </tr> <tr> <td>12h - 1day</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td>1day - 1week</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>1week - 1month</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>> 1month</td> <td>0%</td> </tr> </tbody> </table>	時間分解能	割合 (%)	1h	20%	1h - 12h	55%	12h - 1day	20%	1day - 1week	0%	1week - 1month	0%	> 1month	0%	-		
時間分解能	割合 (%)																	
1h	20%																	
1h - 12h	55%																	
12h - 1day	20%																	
1day - 1week	0%																	
1week - 1month	0%																	
> 1month	0%																	
レイテンシー	<p>有効回答者数：29件</p> <table border="1"> <caption>レイテンシーヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>レイテンシー</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Near Real Time</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>1h - 12h</td> <td>95%</td> </tr> <tr> <td>12h - 1day</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>1day - 1week</td> <td>5%</td> </tr> <tr> <td>1week - 1month</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>1 - 6month</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>> 6month</td> <td>0%</td> </tr> </tbody> </table>	レイテンシー	割合 (%)	Near Real Time	0%	1h - 12h	95%	12h - 1day	0%	1day - 1week	5%	1week - 1month	0%	1 - 6month	0%	> 6month	0%	-
レイテンシー	割合 (%)																	
Near Real Time	0%																	
1h - 12h	95%																	
12h - 1day	0%																	
1day - 1week	5%																	
1week - 1month	0%																	
1 - 6month	0%																	
> 6month	0%																	
アーカイブ量	<p>有効回答者数：139件</p> <table border="1"> <caption>アーカイブ量ヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>アーカイブ量</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1week - 1month</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>1month - 1yr</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>1yr - 10yr</td> <td>5%</td> </tr> <tr> <td>10 - 30yr</td> <td>95%</td> </tr> <tr> <td>30yr - 50yr</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>> 50yr</td> <td>0%</td> </tr> </tbody> </table>	アーカイブ量	割合 (%)	1week - 1month	0%	1month - 1yr	0%	1yr - 10yr	5%	10 - 30yr	95%	30yr - 50yr	0%	> 50yr	0%	-		
アーカイブ量	割合 (%)																	
1week - 1month	0%																	
1month - 1yr	0%																	
1yr - 10yr	5%																	
10 - 30yr	95%																	
30yr - 50yr	0%																	
> 50yr	0%																	

iv. 地域計画 (PUBLIC LOCAL AND REGIONAL PLANNERS)

- 本分野の分析で利用される物理量として有効回答の中で頻出して挙げられたのは、GHG/大気汚染物質、土地利用状況、高度 (Lidar による) であった。
- エンドユーザーが衛星データに要求する空間分解能 (平面)・時間分解能・レイテンシー・アーカイブ量のヒストグラムは下図表の通りである。

図表 277 地域計画における各ニーズのヒストグラム

ニーズ項目	ヒストグラム	備考																		
空間分解能 (平面)	<p>有効回答者数：58件</p> <table border="1"> <caption>空間分解能 (平面) ヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>空間分解能 (平面)</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1m</td><td>0</td></tr> <tr><td>1-5m</td><td>~5</td></tr> <tr><td>5-10m</td><td>~5</td></tr> <tr><td>10-100m</td><td>~5</td></tr> <tr><td>100m-1km</td><td>~10</td></tr> <tr><td>1-10km</td><td>0</td></tr> <tr><td>10-100km</td><td>~78</td></tr> <tr><td>>100km</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	空間分解能 (平面)	割合 (%)	1m	0	1-5m	~5	5-10m	~5	10-100m	~5	100m-1km	~10	1-10km	0	10-100km	~78	>100km	0	<p>【5m 付近】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 土地利用/LiDAR 観測 <p>【100m 付近】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 大気汚染物質 <p>【10km ~ 100km】</p> <ul style="list-style-type: none"> • GHG
空間分解能 (平面)	割合 (%)																			
1m	0																			
1-5m	~5																			
5-10m	~5																			
10-100m	~5																			
100m-1km	~10																			
1-10km	0																			
10-100km	~78																			
>100km	0																			
時間分解能	<p>有効回答者数：53件</p> <table border="1"> <caption>時間分解能 ヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>時間分解能</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1h</td><td>~10</td></tr> <tr><td>1h-12h</td><td>0</td></tr> <tr><td>12h-1day</td><td>~85</td></tr> <tr><td>1day-1week</td><td>0</td></tr> <tr><td>1week-1month</td><td>0</td></tr> <tr><td>>1month</td><td>~5</td></tr> </tbody> </table>	時間分解能	割合 (%)	1h	~10	1h-12h	0	12h-1day	~85	1day-1week	0	1week-1month	0	>1month	~5	<p>【12h ~ 1day】</p> <ul style="list-style-type: none"> • GHG モニタリング 				
時間分解能	割合 (%)																			
1h	~10																			
1h-12h	0																			
12h-1day	~85																			
1day-1week	0																			
1week-1month	0																			
>1month	~5																			
レイテンシー	<p>有効回答者数：10件</p> <table border="1"> <caption>レイテンシー ヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>レイテンシー</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Near Real Time</td><td>0</td></tr> <tr><td>1h-12h</td><td>0</td></tr> <tr><td>12h-1day</td><td>~50</td></tr> <tr><td>1day-1week</td><td>0</td></tr> <tr><td>1week-1month</td><td>~10</td></tr> <tr><td>1-6month</td><td>0</td></tr> <tr><td>>6month</td><td>~40</td></tr> </tbody> </table>	レイテンシー	割合 (%)	Near Real Time	0	1h-12h	0	12h-1day	~50	1day-1week	0	1week-1month	~10	1-6month	0	>6month	~40	<ul style="list-style-type: none"> • ニーズは少ない <p>【12h - 1day】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 風速観測 <p>【6month 以上】</p> <ul style="list-style-type: none"> • GHG/大気汚染物質/土地被覆/地表温度等 		
レイテンシー	割合 (%)																			
Near Real Time	0																			
1h-12h	0																			
12h-1day	~50																			
1day-1week	0																			
1week-1month	~10																			
1-6month	0																			
>6month	~40																			

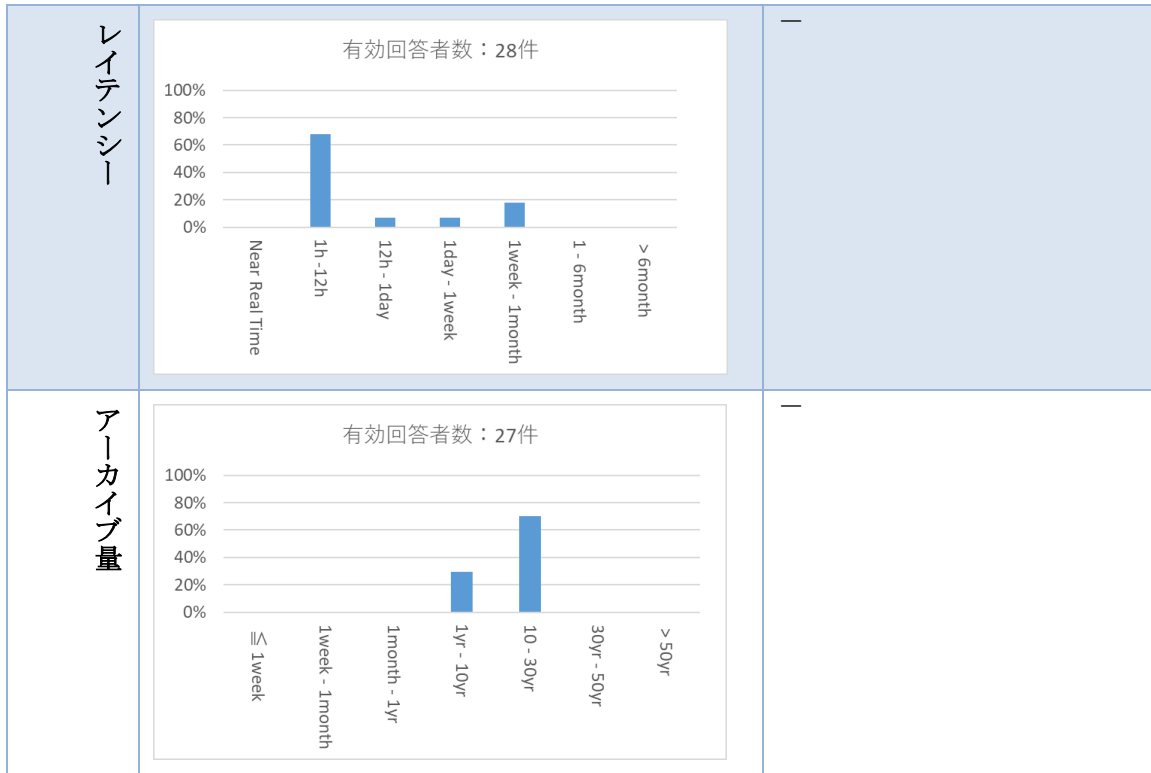
アーカイブ量	<p>主要なニーズ無し</p>	<p>・ごく一部の被覆分類や大気観測で10年以上の長期のアーカイブのニーズがあったが、アーカイブ量を要件に含めているニーズは10%未満であった。</p>
--------	-----------------	--

v. 農業（AGRICULTURE）

- 本分野の分析で利用される物理量として有効回答の中で頻出して挙げられたのは、土地被覆／作物分類／NDVI／土壌水分／洪水域であった。
- エンドユーザーが衛星データに要求する空間分解能（平面）・時間分解能・レイテンシー・アーカイブ量のヒストグラムは下図表の通りである。

図表 278 農業における各ニーズのヒストグラム

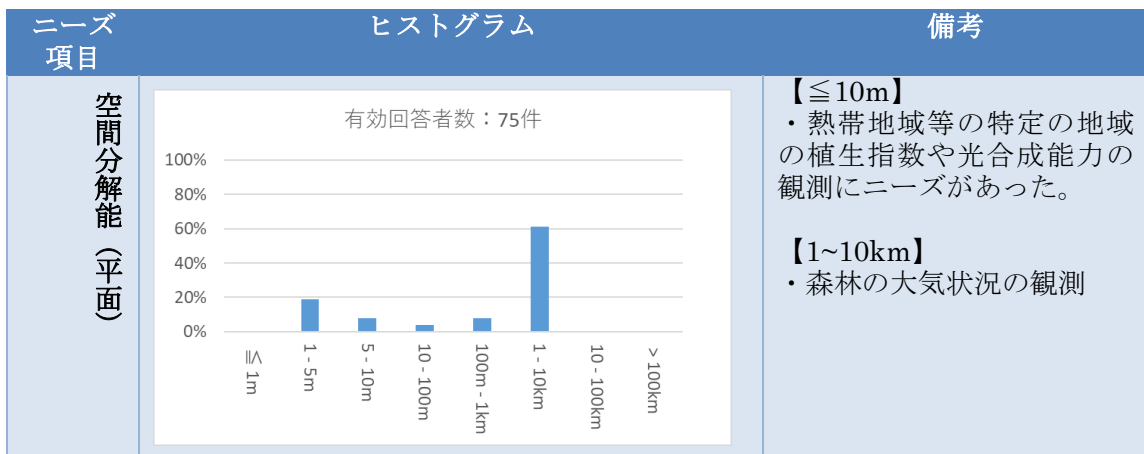
ニーズ項目	ヒストグラム	備考																		
空間分解能（平面）	<p>有効回答者数：48件</p> <table border="1"> <caption>空間分解能（平面）ヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>空間分解能</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>$\le 1m$</td><td>~5</td></tr> <tr><td>1-5m</td><td>~45</td></tr> <tr><td>5-10m</td><td>~15</td></tr> <tr><td>10-100m</td><td>~35</td></tr> <tr><td>100m-1km</td><td>~5</td></tr> <tr><td>1-10km</td><td>0</td></tr> <tr><td>10-100km</td><td>0</td></tr> <tr><td>>100km</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	空間分解能	割合 (%)	$\le 1m$	~5	1-5m	~45	5-10m	~15	10-100m	~35	100m-1km	~5	1-10km	0	10-100km	0	>100km	0	<p>【10m～100m】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・土地被覆／作物分類／土壌水分／NDVI等の作物生産予測に関するニーズ <p>【$\le 5m$】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・洪水検知
空間分解能	割合 (%)																			
$\le 1m$	~5																			
1-5m	~45																			
5-10m	~15																			
10-100m	~35																			
100m-1km	~5																			
1-10km	0																			
10-100km	0																			
>100km	0																			
時間分解能	<p>有効回答者数：45件</p> <table border="1"> <caption>時間分解能ヒストグラムデータ</caption> <thead> <tr> <th>時間分解能</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>$\le 1h$</td><td>0</td></tr> <tr><td>1h-12h</td><td>0</td></tr> <tr><td>12h-1day</td><td>~30</td></tr> <tr><td>1day-1week</td><td>~60</td></tr> <tr><td>1week-1month</td><td>~5</td></tr> <tr><td>>1month</td><td>~10</td></tr> </tbody> </table>	時間分解能	割合 (%)	$\le 1h$	0	1h-12h	0	12h-1day	~30	1day-1week	~60	1week-1month	~5	>1month	~10	<ul style="list-style-type: none"> ・民間企業であっても求める時間分解能は短いもの（1～24時間）から長いもの（数日～1カ月）まで様々あった 				
時間分解能	割合 (%)																			
$\le 1h$	0																			
1h-12h	0																			
12h-1day	~30																			
1day-1week	~60																			
1week-1month	~5																			
>1month	~10																			



vi. 森林 (FORESTRY)

- 本分野の分析で利用される物理量として有効回答の中で頻出して挙げられたのは、GHG/大気汚染物質/Fire Radiation Power (FRP)/NDVIであった。
- エンドユーザーが衛星データに要求する空間分解能 (平面)・時間分解能・レイテンシー・アーカイブ量のヒストグラムは下図表の通りである。

図表 279 森林における各ニーズのヒストグラム



<p>時間分解能</p>	<p>有効回答者数：68件</p> <table border="1"> <caption>時間分解能のニーズ分布 (有効回答者数: 68件)</caption> <thead> <tr> <th>時間分解能</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≤ 1h</td> <td>~68</td> </tr> <tr> <td>1h-12h</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>12h-1day</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1day-1week</td> <td>~10</td> </tr> <tr> <td>1week-1month</td> <td>~20</td> </tr> <tr> <td>> 1month</td> <td>~2</td> </tr> </tbody> </table>	時間分解能	割合 (%)	≤ 1h	~68	1h-12h	0	12h-1day	0	1day-1week	~10	1week-1month	~20	> 1month	~2	<p>【≤1h】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・インデックス保険向けの植生データや山火事検知の観測 <p>【1month】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全球の土地利用／土地被覆被覆マップ 		
時間分解能	割合 (%)																	
≤ 1h	~68																	
1h-12h	0																	
12h-1day	0																	
1day-1week	~10																	
1week-1month	~20																	
> 1month	~2																	
<p>レイテンシー</p>	<p>有効回答者数：27件</p> <table border="1"> <caption>レイテンシーのニーズ分布 (有効回答者数: 27件)</caption> <thead> <tr> <th>レイテンシー</th> <th>割合 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Near Real Time</td> <td>~5</td> </tr> <tr> <td>1h-12h</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>12h-1day</td> <td>~45</td> </tr> <tr> <td>1day-1week</td> <td>~30</td> </tr> <tr> <td>1week-1month</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1-6month</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>> 6month</td> <td>~20</td> </tr> </tbody> </table>	レイテンシー	割合 (%)	Near Real Time	~5	1h-12h	0	12h-1day	~45	1day-1week	~30	1week-1month	0	1-6month	0	> 6month	~20	<p>【12h～1day】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・森林の気象情報や FRP <p>【>6month】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全球の土地利用／土地被覆被覆マップ
レイテンシー	割合 (%)																	
Near Real Time	~5																	
1h-12h	0																	
12h-1day	~45																	
1day-1week	~30																	
1week-1month	0																	
1-6month	0																	
> 6month	~20																	
<p>アーカイブ量</p>	<p>主要なニーズ無し</p>	<p>—</p>																

3) Gap 分析

A) 概要

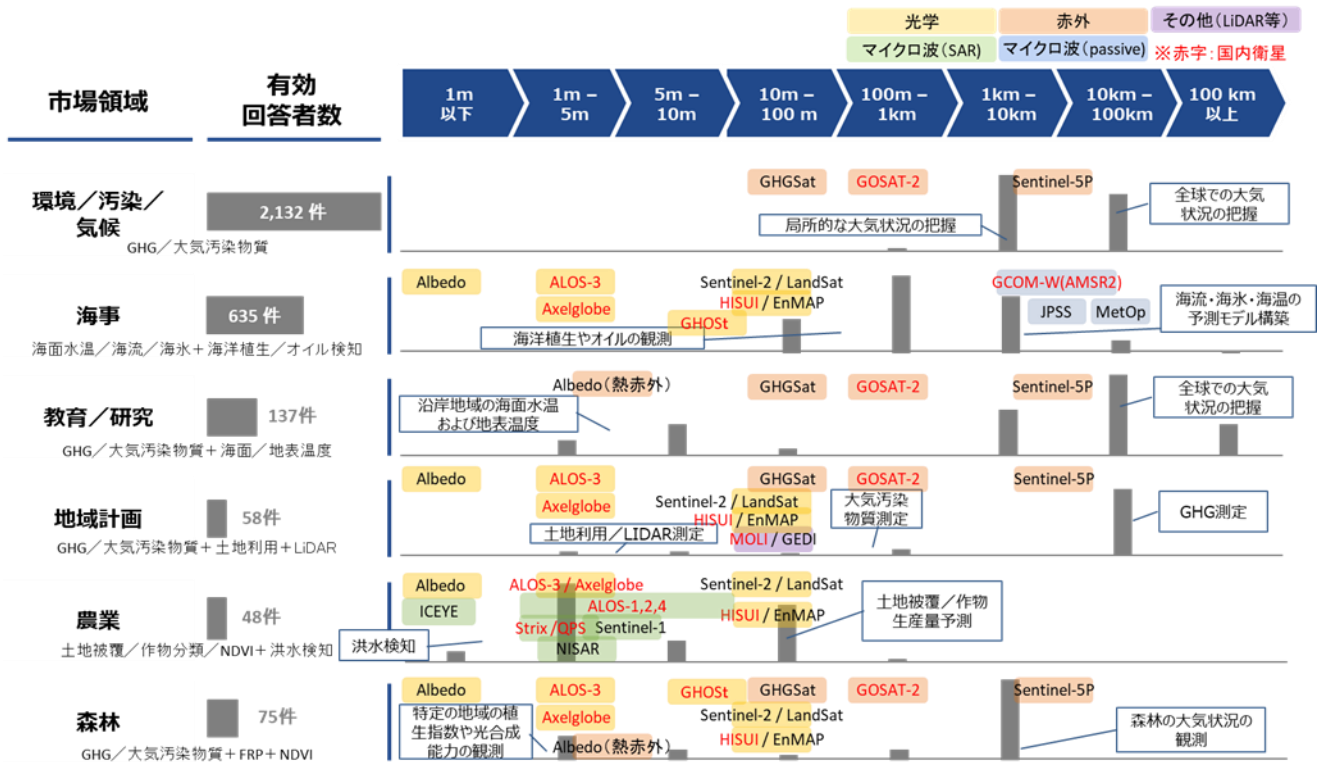
- 前節のニーズと 2.1 で調査した日本国内外の衛星スペックとを比較し、特にどの分野・どのニーズ項目に対してエンドユーザーとのギャップがあるかを把握した。

B) 空間分解能（平面）

- 下図表は、前節のヒストグラムのうち、空間分解能に関するヒストグラムを市場領域別・閾値別にとりまとめ、該当する衛星スペックをプロットしたものである。本図表より下記の事項が把握できる。

- ◇ 最頻値となっているニーズの空間分解能は概ね既存衛星で対応できている。
- ◇ 他方、Lidar 衛星に関しては、空間分解能（平面）で 1m-5m でのニーズがある程度確認されたものの、MOLI や GEDI 等とはギャップがあることがわかる。

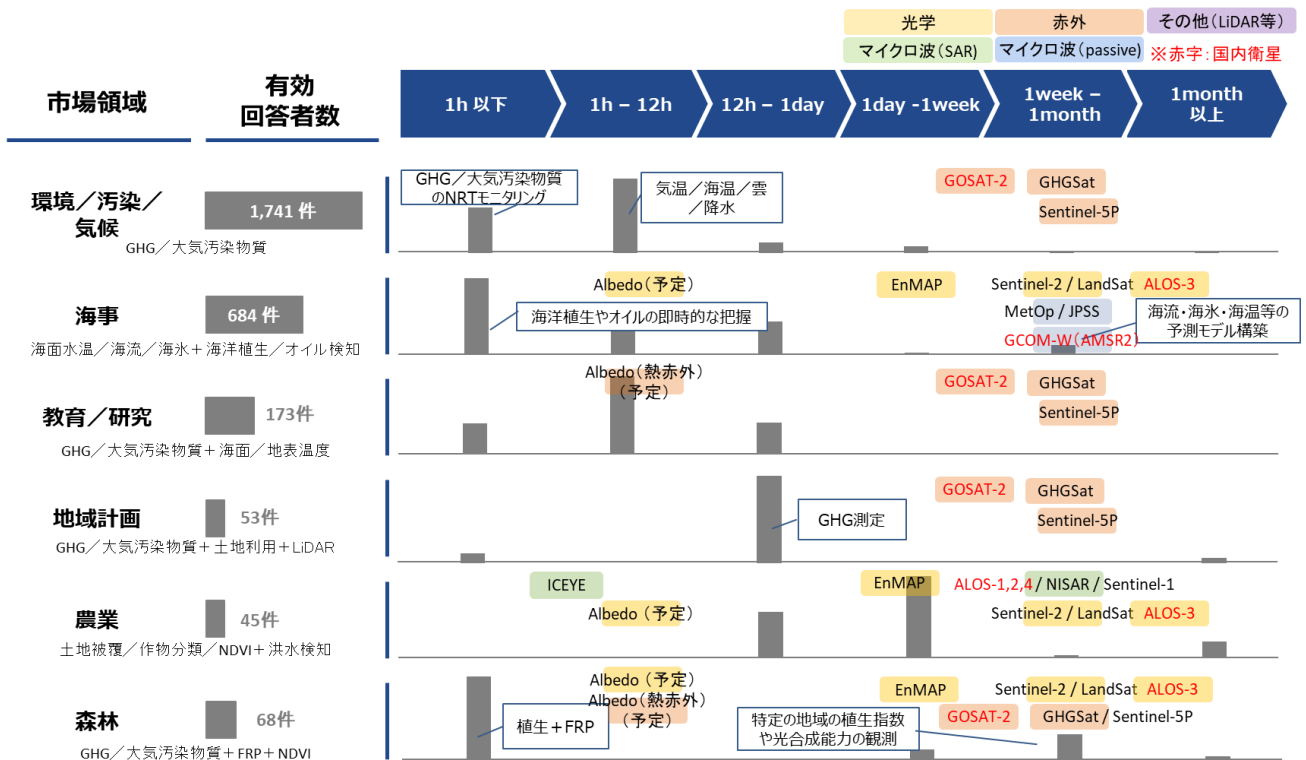
図表 280 空間分解能に関する市場領域別のニーズと衛星スペックの関係



C) 時間分解能

- 下図表は、前節のヒストグラムのうち、時間分解能に関するヒストグラムを市場領域別・閾値別にとりまとめ、該当する衛星スペックをプロットしたものである。本図表より下記の事項が把握できる。
 - ユーザーは1時間～半日といった高い時間分解能を求めているケースが多く、現状の衛星スペックと大きなギャップが見られる。
 - 対策の1つとしてGEOでの衛星開発が考えられるが、空間分解能でギャップが生まれる可能性が高い。
 - 次の対策として、LEOでの小型衛星コンステが考えられるが、下図表にいくらか例をプロットしているが、まだエンドユーザーのニーズとギャップがある状況である。事業リスクも大きいため、1つの会社のコンステレーションに依存するよりかは、複数国・複数社の衛星データを相互補完（フュージョン）することが鍵となりうる。

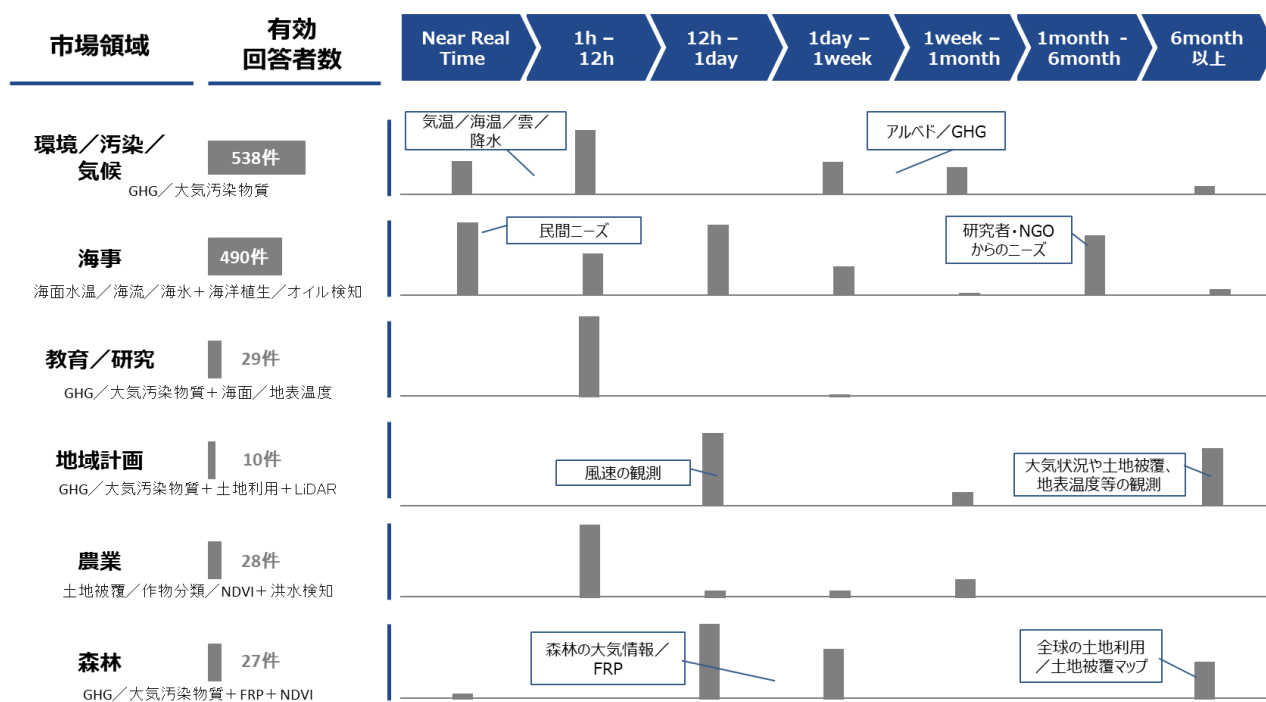
図表 281 時間分解能に関する市場領域別のニーズと衛星スペックの関係



D) レイテンシー

- 下図表は、前節のヒストグラムのうち、レイテンシーに関するヒストグラムを市場領域別・閾値別にとりまとめたものである。2.7.3)で示した通り、各社衛星のレイテンシーは撮像要求時の位置や地上局の位置などの関係から幅があったため、ここには衛星スペックを示していない。下記図表より以下の事項が把握できる。
 - 領域横断的に Near Real Time ~ 1 日以内のレイテンシーが求められており、ニーズとシーズに大きなギャップが存在すると推測される。
 - 解決には、衛星の機数を増加させることやオンボードプロセッサ/衛星通信の技術進歩・地上局サービスの充実、さらに Tip& Cue による衛星間連携など複数の手法を駆使することが肝要と考えられる。

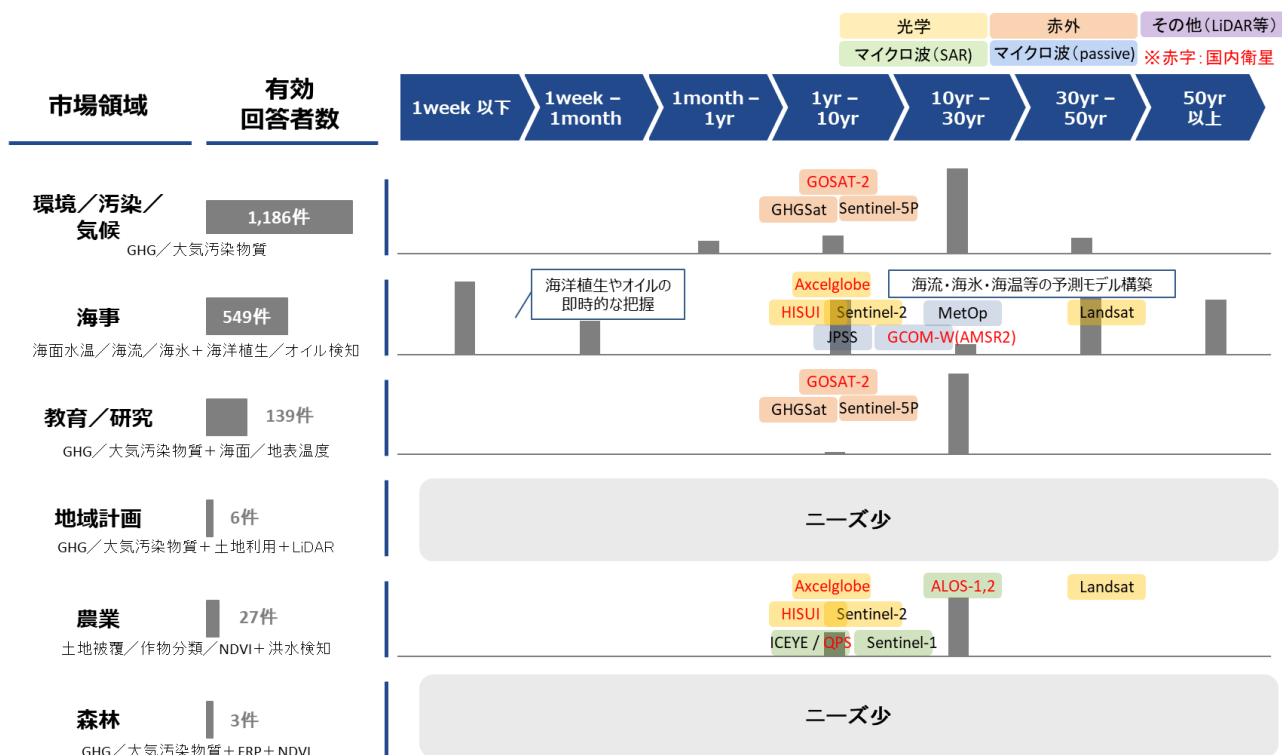
図表 282 レイテンシーに関する市場領域別のニーズ



E) アーカイブ量

- 下図表は、前節のヒストグラムのうち、アーカイブ量に関するヒストグラムを市場領域別・閾値別にとりまとめ、該当する衛星スペックをプロットしたものである。本図表より下記の事項が把握できる。
 - どの市場領域でも 10 年以上のアーカイブを求める回答が多い。
 - 複数国・複数社による対応が正に必要なところであり、ALOS-1,2 の豊富なアーカイブは国際的に貢献できる領域と考えられる。

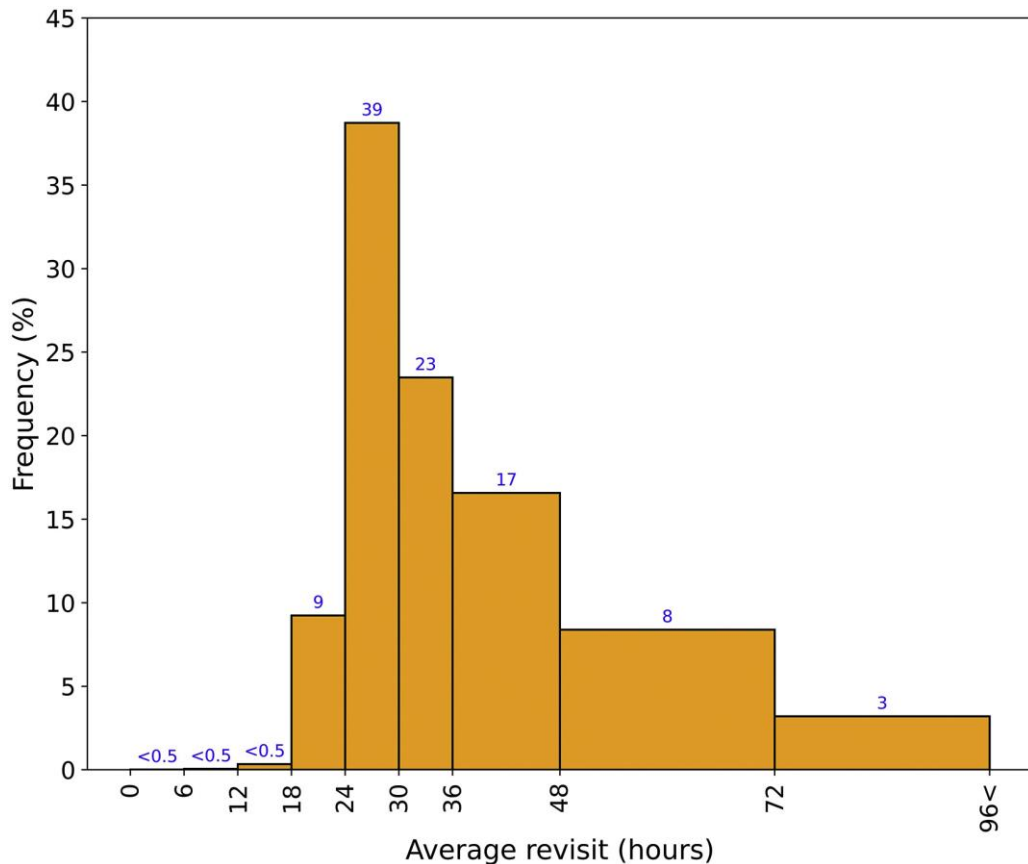
図表 283 アーカイブ量に関する市場領域別のニーズ



F) Gap 分析のまとめ

- どの用途においてもある程度、空間分解能ではニーズに衛星が追いついてきた様子がわかる。
- 他方、時間分解能は、衛星単体や既存の衛星コンステレーションでは、まだニーズとのギャップがあることがわかる。既存の衛星コンステレーションはこれから機数が増えるため、ある程度ニーズに近づくものと考えられる。しかし、下図の通り、衛星が 100 機ある衛星コンステレーションでも再訪期間の最頻値は 24 時間～30 時間というところであり、将来的にニーズとスペックのギャップが大きい項目の 1 つになるものと考えられる。
- レイテンシーも、2.7.3) で示した通り、衛星スペック側はかなりの幅がある一方、ニーズサイドはニアリアルタイムや 1 日以内など低レイテンシーを求めている。こちらもニーズとスペックにギャップがある事項といえる。
- アーカイブもニーズのボリュームゾーンは 10 年～30 年であり、データの蓄積が望まれる。他方、この課題は時間で解決できる。

図表 284 PlanetScope における再訪時間のヒストグラム



出所) David P. Roy, Haiyan Huang, Rasmus Houborg, Vitor S. Martins 「A global analysis of the temporal availability of PlanetScope high spatial resolution multi-spectral imagery」 2021

4) 戦略マップ

- これらの分析を踏まえた上で考えられる戦略マップは下記の通りである。各領域における設計の考え方は下記の通りである。

【財務】

- まず、目指すべきゴールは、わが国の衛星に関わるビジネスの収支や便益がプラスとなっており、産業として持続可能な状態となっていることである。

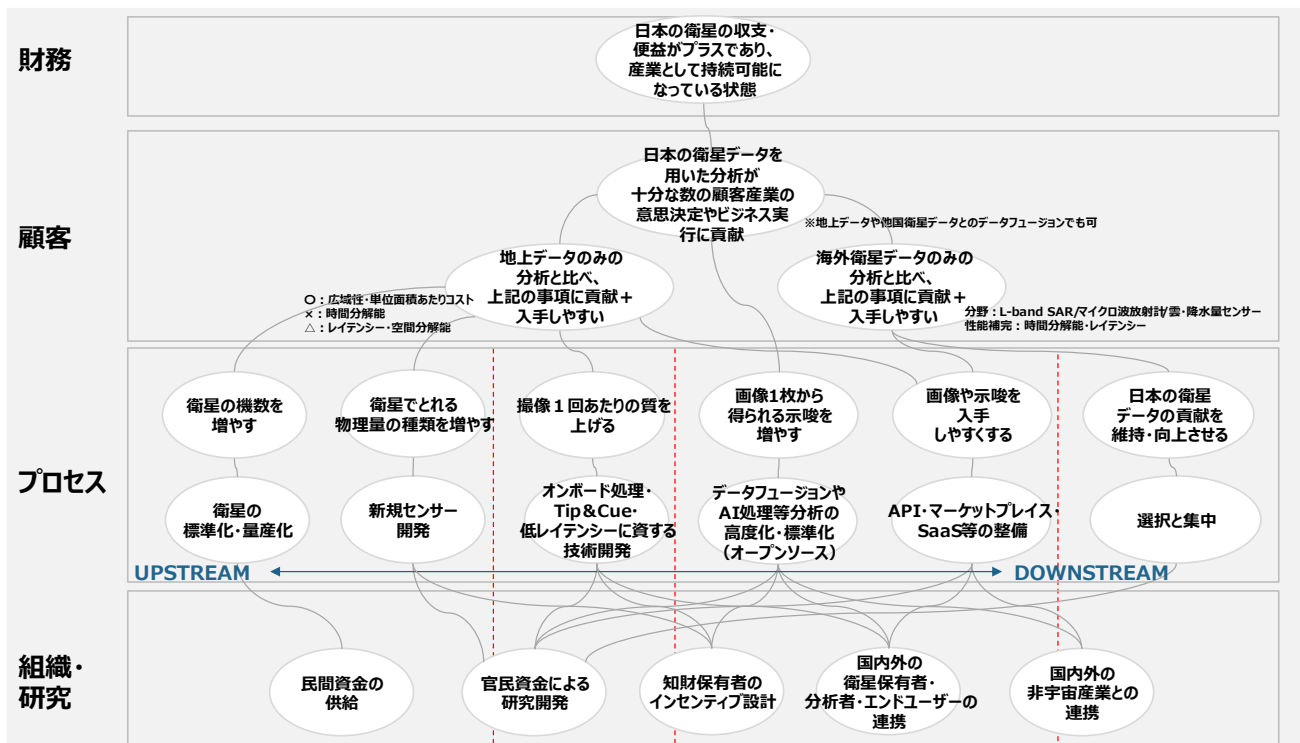
【顧客】

- 産業として持続可能な状態となるためには、日本の衛星データを用いた分析が、十分な数の顧客産業の意思決定やビジネス実行に貢献し、十分な対価をもらわなければならない。十分な対価をもらえれば、地上データや他国衛星データとのデータフュージョンによる示唆でもよいものと考えられる。
- 上記のような状況に至るためには、地上データのみ分析、もしくは海外衛星データのみ分析と比べ、日本の衛星データを加えたほうが顧客の意思決定やビジネス実行に貢献しうるものとしなければならない。

【プロセス】

- 衛星データの優位性は、広域性や単位面積あたりのコストの低さである。他方、弱みとしては時間分解能などが挙げられ、これを直接的に解決するためには衛星の機数を増やす、すなわち衛星の標準化や量産化が必要と考えられる。
- また、衛星でとれる物理量の種類を増やすことも重要であり、そのためには新規センサー開発が必要である。

図表 285 戦略マップ



- 限られた数の衛星を効率的に運用する必要があるため、撮像 1 回あたりの質を上げることも重要である。質の定義は、衛星データの分析可能部分の多さや衛星データの新鮮さなどが挙げられるが、それらの向上に資するオンボード処理などの技術の開発が肝要である。
- また、撮像された画像 1 枚から得られる示唆を増やすことも必要であり、そのためにはデータフュージョンや AI 処理に関する知見の蓄積も重要である。衛星データ処理の特殊性は AI 処理等を促進する上でボトルネックの一部になっているので、様々な人が解析できるよう、オープンデータ・オープンソースのような取組がここでは必要となる。
- 画像や画像分析から得られる示唆を入手しやすくする必要があるが、そのためには API やマーケットプレイス、Software as a Service での仕組みなどの構築が望ましいものと考えられる。
- 最後に日本の衛星データの貢献を維持・向上させる必要があり、限られたリソースの中で実施するためには、強み・弱みなどを踏まえた上での選択と集中が必要であろう。

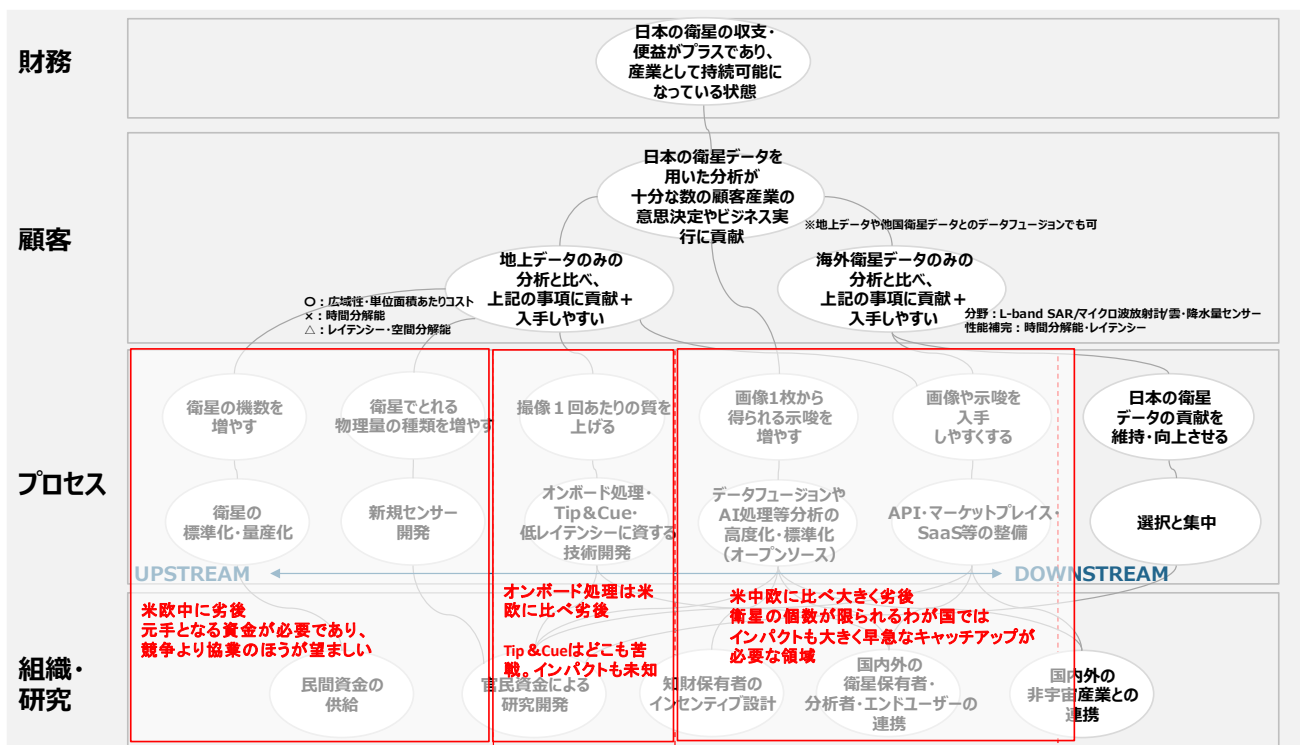
【組織・研究】

- 上記のプロセスを達成するためには、組織的な取り組みや研究開発が必要である。
 - ◇ 量産化にあたっては民間資金によるリスクマネーの供給が期待される。
 - ◇ 新種センサやオンボード処理・AI 処理などの各種要素技術の研究開発は、官民双方からの資金を原資とした研究開発が必要と考えられる。
 - ◇ AI 処理やデータフュージョンを促進するためにはある程度オープンデータやオープンソースなどの取組が必要であり、特にオープンソースなどは知財保有者が同取り組みに参画するインセンティブ設計が必要となる。
 - ◇ そして、フュージョンするデータの量や種類を多くし、教師データを充実させ、データや分析結果を入手しやすくするような仕組みを得るためには、国内外・宇宙/非宇宙産業等の垣根を超えた取り組みが必要と考えられる。

5) アクションプラン

- 戦略マップを踏まえた上でアクションプランを策定するにあたり、基本的な考え方は下記の通りである。
 - ◇ アップストリームの部分の衛星の標準化・量産化や新規センサ開発は、量的な側面があり、多額の先行投資が必要となる。政府資金や民間市場からの資金供給が米国等と比べ劣後しているわが国では、競争より協業のほうが望ましい分野と考えられる。
 - ◇ 撮像 1 回あたりの質を上げるオンボード処理や Tip&Cue などの技術も欧米に比べ劣後している。ただし、Tip&Cue については、欧米勢もまだ手探り状態であり、インパクトが未知である。このあたりは進捗状況をより慎重に調査する必要があるものと考えられる。
 - ◇ 衛星の機数が限られるわが国では、画像 1 枚から得られる示唆を増やす取り組みは非常に重要であり、かつデータフュージョンや AI 処理等の高度化・標準化に関する研究開発は大きく劣後している状態である。早急なキャッチアップが必要な分野といえるだろう。

図表 286 戦略マップを基にしたアクションプランの基本的な考え方



- 上述した考えの下、本調査から得られた今後の文部科学省殿のアクションプランに関するレコメンデーションは下記のとおりである。
 - ✧ 本検討で抽出した我が国の強みである L-band SAR やマイクロ波放射計、雲・降水量センサなどの優位性をキープするなど、選択と集中の方針をまずは策定すべきである。この際、どの種類のセンサも開発が停止しているためではないため、強みとなっていない分野も調査は必要であることを明記し、次期計画立案のための調査は継続すべきものと考えられる。
 - ✧ 衛星データの量に関しては、衛星の標準化・量産化が必要であり、国際協業が重要なトピックとなるため、標準化領域を選定すると共にアライアンス先国の選定・協議などが最初のステップとなるだろう。
 - ✧ 衛星データの質に関しては、①センサー自身の能力をあげる、②撮像の取舍選択を自動化する、③新鮮さで質を上げる、④データの掛け合わせで示唆を増やす、などの様々な方向が存在する。特にデータフュージョン等AI処理技術の高度化は大きく劣後している状況であり、注力領域の選定やオープンデータ・オープンソース戦略などの策定などの早急なキャッチアップが必要である。
 - ✧ 下図表はその全体像を示したものであるが、特にオレンジ部が技術開発の点で特に重要な部分であり、文部科学省殿が主として担当すべき領域と考えられる。

図表 287 アクションプランに関するレコメンデーション

技術開発の点で特に重要					
	2023	2024	2025	2026	2027
選択と集中の方針策定	方針案の策定	実行とモニタリング及び次期計画立案のための調査			
衛星の標準化・量産化	標準化領域の選定	実証・規格設定			量産
	アライアンス先国の選定・協議+国際的標準化活動				
新規センサー開発	L-ban SAR/マイクロ波放射計など我が国の強みのあるセンサーのニーズ・競合動向把握				
	新規開発方針策定	設計・実証・規格設定			次期開発方針策定
アライアンス先国の選定・協議+国際的標準化活動					
オンボード処理	ハード開発実証支援		規格設定		量産
	アルゴリズム開発実証支援		規格設定		量産
Tip& Cue	海外動向継続把握	方針検討			
低レイテンシーに資する技術	衛星間通信戦略構築		実証支援		実装
	光通信技術戦略構築		実証支援		実装
地上局増設					
データフュージョン等 AI処理技術の高度化	注力領域の選定	データフュージョン・AI処理実証支援			実装
	オープンデータ・オープンソース戦略の検討		オープンデータ・オープンソース推進		
	AI開発プラットフォーム構築支援				
アライアンス先国の選定・協議+国際的標準化活動					
API/マーケットプレイス/SaaS等の整備	リモセン法の継続的な見直し				
	アライアンス先国の選定・協議/データ融通の枠組み等の整備				
	衛星データプラットフォーム・API等の継続的整備・改善				

3. 調査結果のとりまとめ

- 本業務では、地球観測衛星にまつわる外部環境変化を調査し、国内リソースと比較することで観測衛星の研究開発立案への示唆を得ることを目的とした。
- 観測データ利活用に関する調査では、わが国の衛星が地表の降水量、地表面地形、バイオマスなど一部の分野で量的に強みを有していることを把握できた。他方、オンボード処理に関しては供給や利用の点で欧米に比べ劣後している状況が把握できた。
- 観測センサに関する調査においてもわが国所有の衛星が積んでいるセンサが雲・降水量センサー・L-bandSAR・マイクロ波放射計など一部の分野で強みを有していることが把握できた。
- センサフュージョンや Tip&Cue、AI などを用いた地上データ処理の調査では、いずれの調査においても欧米のほうが先行している状況が把握できた。他方、衛星間通信など地球観測衛星のインフラとなる部分において、一部わが国の企業がプレゼンスを発揮している状況も把握できた。
- 定常調査や適時調査の結果も上記と同様であり、一部の分野で一部の機関・企業が個別の努力で強みを確保している状況にある。
- また、全体像としてエンドユーザーの変わりゆくニーズに対し、わが国の衛星産業がどれほど対応できるかの Gap 分析を実施したところ、空間分解能に関してはある程度エンドユーザーのニーズに充足できている状況である一方、時間分解能やレイテンシー、アーカイブ量などに関し、まだまだ多くの課題があることが把握できた。なお、これらの課題はわが国だけではなく世界全体の衛星産業共通の課題ともいえる。
- 上記の状況を踏まえた上で、戦略マップおよびアクションプランに関するレコメンデーションを以下のようにとりまとめた。
 - ◇ 時間分解能やレイテンシーに関する課題を解決するための最初的手段である衛星機数の増加に関しては、標準化や量産化を視野にいたした国際協業が必要と考えられる。
 - ◇ 衛星の機数が限られるわが国においては衛星データの質を向上させる取り組みが必須であり、これに資する重要技術であるオンボード処理やデータフュージョン、AI 処理などは欧米と比べ劣後している状況である。この分野の早急なキャッチアップに資する研究開発や実証事業がアクションプランの最初のステップとなる。