

2016年7月9日、東京
今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース(TF)会合
リモートセンシング分科会 総会

世界の衛星地球観測計画と我が国の課題

中島 映至・TF地球科学研究高度化WG

(JAXA地球観測研究センター長)

日本学術会議連携会員

国際気象学・大気科学学会事務局長

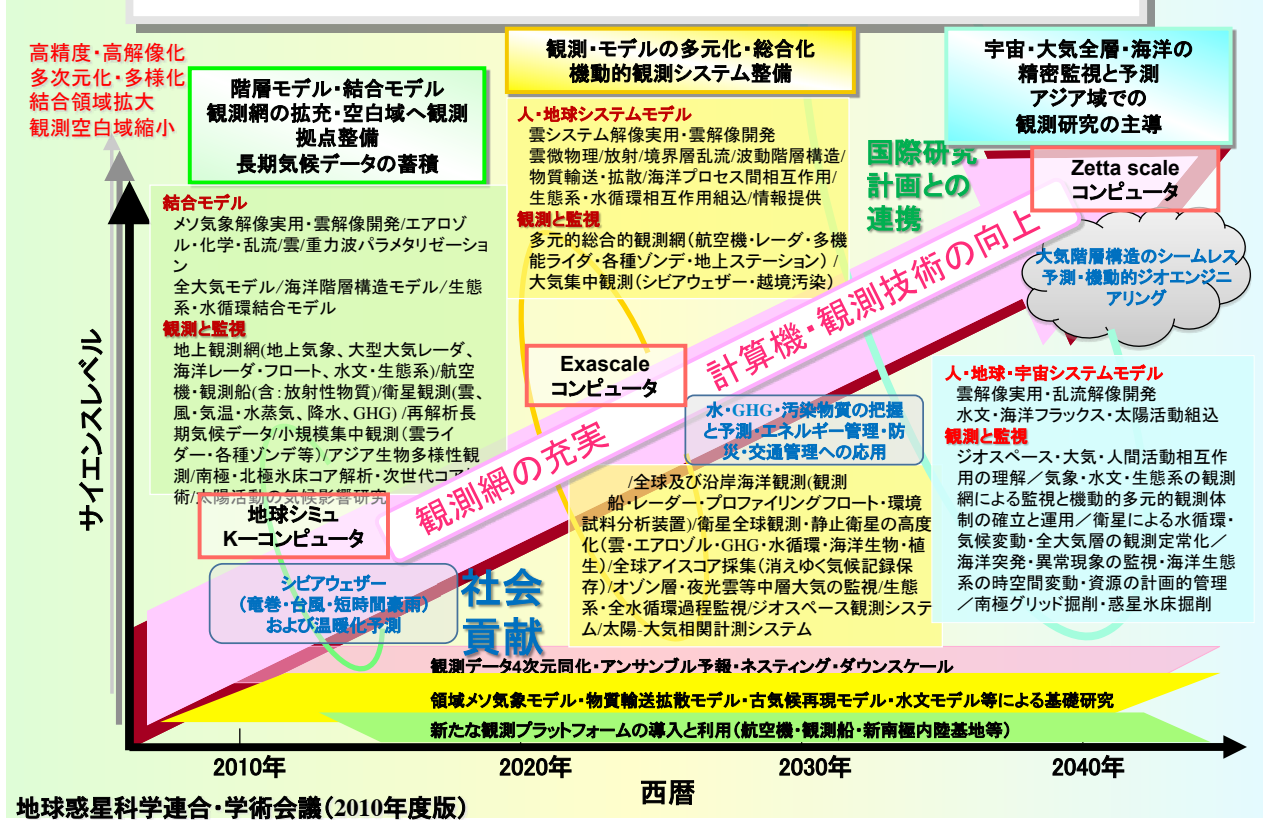
東大名誉教授

TF地球科学研究高度化WG報告

- 高度化WGでは2015年度に「我が国の地球観測の将来計画に関する提言-科学的側面-」の取りまとめを行った。この過程で参加学会からの意見照会も行った。
- 現在、「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析」を取りまとめ中である。現在、参加学会への意見聴取を終わった段階である。
- 高度化WG主査は2016年度から本多嘉明氏（千葉大 CEReS)に引き継がれた。

日本学術会議 夢ロードマップ(大気水圏科学)

基礎過程の理解と気候予測および気候監視



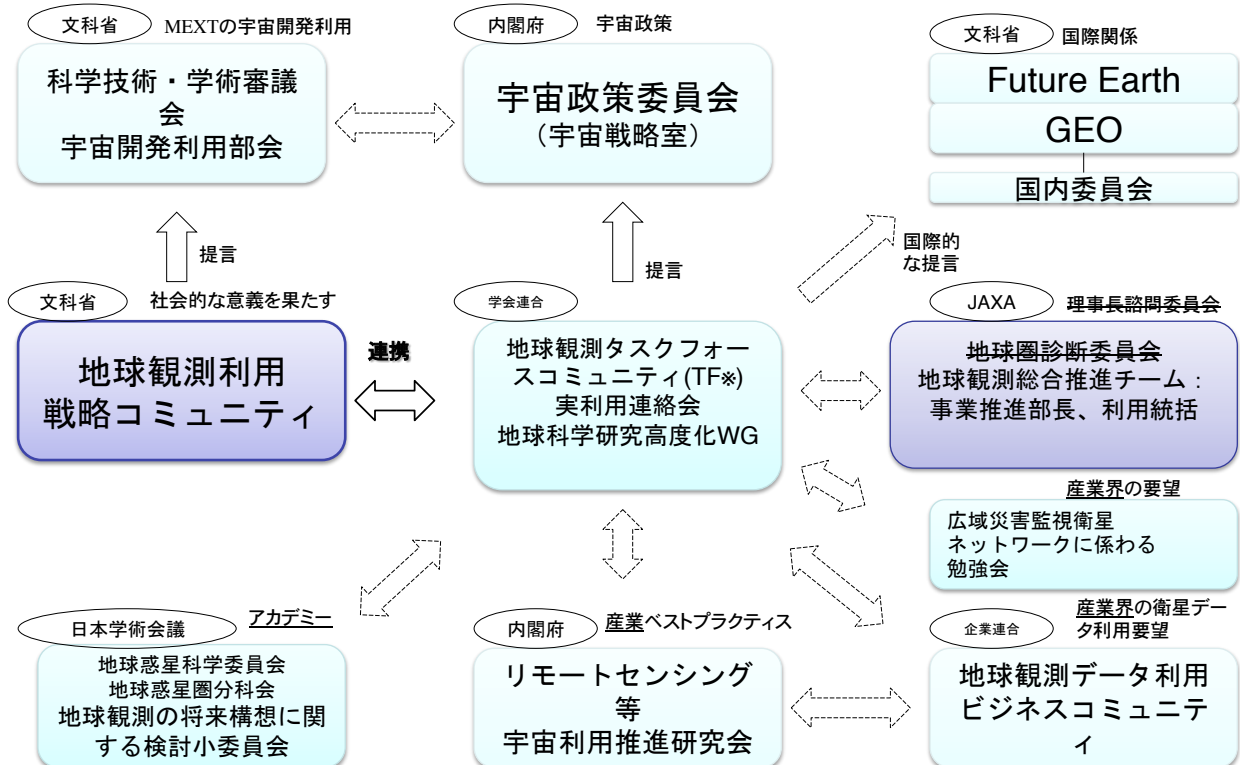
世界の衛星地球観測に関わる状況

- 地球環境問題解決に貢献するための地球観測衛星計画
- 世界気象機関 (WMO) では「2020年-2040年」期計画が盛ん
 - ・ 全球気候サービス枠組み (GFCS) の形成
- 欧州
 - ・ 「コペルニクス」プログラムによるESA-EUMETSAT連携
 - ・ コペルニクス/気候変動イニシアチブ (CCI) による様々な衛星データ解析と気候サービスへのデータ提供 (無料化)
- 米国
 - ・ NASA Decadal Survey Missions
 - ・ NOAA GOES-NEXT (R, S, T, U)
 - ・ NOAA Suomi-NPP, JPSS-1 (2017), -2 (2020) (極軌道衛星システム)
 - ・ NOAA-NASA-Europe連携
- 中国
 - 将来計画助言委員会で熱心な検討 (中島も委員)
 - ・ CMA FY-4A (2016), B (2018), C(2020), D(2021-2025), MW (2021-2025)
 - ・ CMA FY3 E/F/G (2018-)

宇宙基本計画工程表 (平成27年度改訂) (素案)

		2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度	2031年度	2032年度	2033年度	2034年度
		27年度	28年度	29年度	30年度	31年度	32年度	33年度	34年度	35年度	36年度	37年度	38年度	39年度	40年度	41年度	42年度	43年度	44年度	45年度	46年度
陸域・海域観測	先進光学衛星																				
	先進レーダ衛星																				
気象観測	静止気象衛星																				
	温室効果ガス観測技術衛星																				
その他のリモートセンシング及びセンサ等技術の高度化	水循環																				
	センサ技術																				

我が国における地球観測コミュニティの関連図



※日本リモートセンシング学会、日本写真測量学会、日本海洋学会、日本地球惑星科学連合、日本活断層学会、日本農業気象学会、日本気象学会、日本沙漠学会、日本情報地質学会、日本雪氷学会、日本測地学会、日本大気化学学会、日本地理学会、日本地震学会、計測自動制御学会、システム農学会、日本森林学会、水文・水資源学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、地理情報システム学会

状況

- 世界は2020-2040計画で白熱
- 日本の存在感、それが急速に薄れるか、中国の台頭
- 日々、非常に多くの重要地球観測案件がある
- 宇宙政策委員会は司令塔になっていない；知恵がない
 - ・ 地球観測小委員会を作るべき
 - ・ ボトムアップでの計画づくりが必要
- JAXA, 文科省に地球観測マネジメントのプロがいなくなってきた、理解もなくなってきた
- 一方で、科学者も自分のやりたいことがあたかも一番重要な風に言う
- これまでに出た提言書だけでは、政府が何をしたら良いかがわからない
- 世界に130以上の地球観測衛星計画がある；ある意味では環境バブル
- ハードとサイエンスがわかるプロによる客観的な分析が必要

報告書

地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析

2016.7.xx

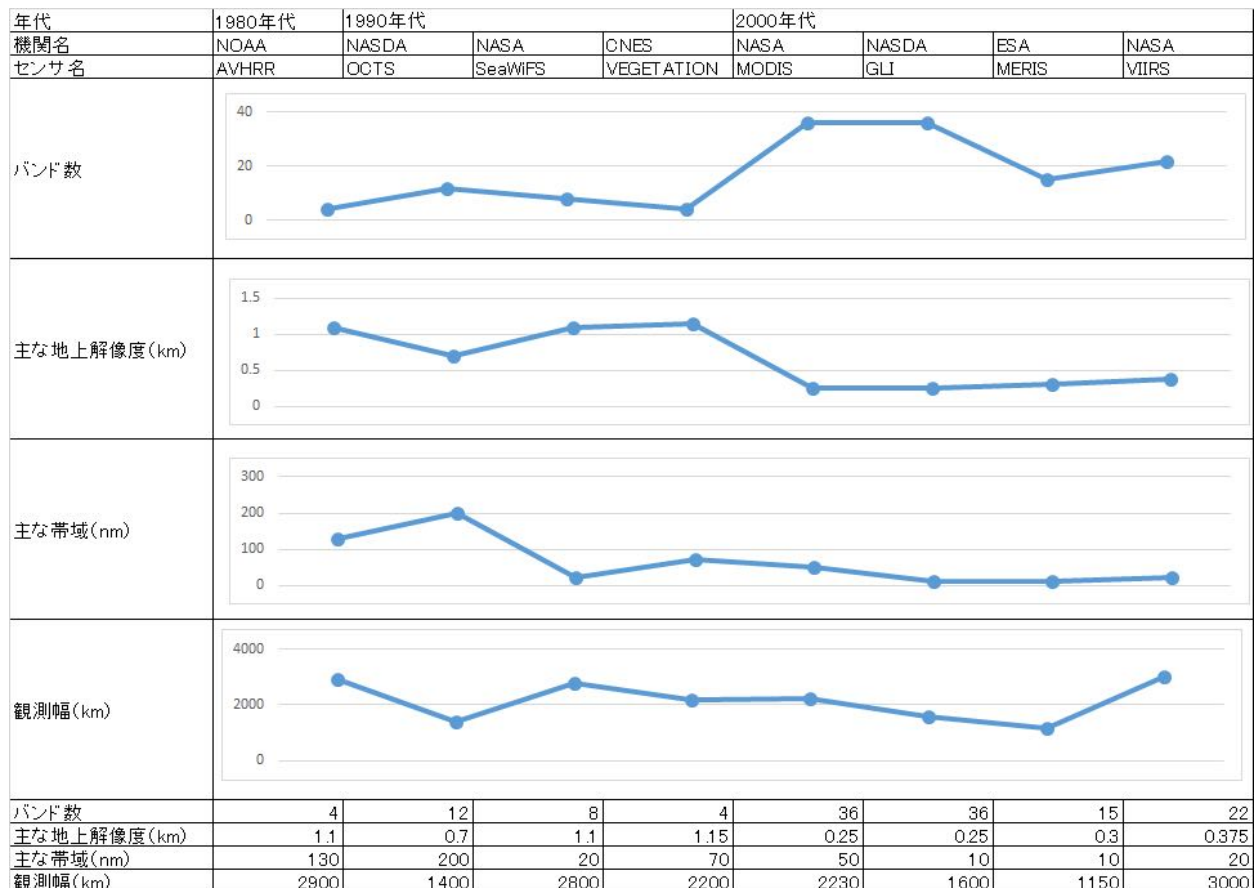
地球観測TF地球科学研究高度化WG

日本気象学会 気象研究ノート投稿予定

高解像センシング

Optical		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
OpenFree	Landsat-8																	
	Landsat-9																	
	Sentinel-2	1	2															
HR	ASTER																	
	SPOT-6,7	2																
	Fomosat-5																	
	KazEO Sat-2																	
VHR	先進光学																	
	先進光学2																	
	ASNARO-1																	
	WorldView-1																	
	WorldView-2																	
	WorldView-3																	
	WorldView-4																	
	GeoEye-1																	
	Pleiades	1																
	Kompsat-3																	
Yaogan-24																		
SAR	OpenFree	Sentinel-1	1	2					3	4				5	6			
		ALOS-2																
	L	先進SAR																
		Radarsat-2																
	C	Radarsat-3				3												
		TerraSAR-X																
	X	TanDEM-X																
		PAZ																
	TerraSAR-X2																	
	CosmoSkymed	4																
	Kompsat-5																	
	Yaogan-29																	

図4.2.1 全球光学センサ仕様の推移



2. 総論

下田陽久、中島映至、本多嘉明、若林裕之、中村健治、高橋暢宏、杉本伸夫、笠井康子、今須良一、操野年之、江淵直人

- 主に基本気候変数（Essential Climate Variable: ECV）を対象とするセンサと、プロセス研究を対象とするセンサに分かれる
- 高分解能光学センサ：分解能と観測幅がトレードオフの関係にある。商業衛星が主として高分解能に特化して価値を高めようとしているのに対して、国が担当する分野は、商業化が難しい広観測幅や高頻度機能を提供する必要がある。このような衛星計画にはLandsat、Sentinel-2、我が国の先進光学衛星の計画がある。Landsatは15/30m、Sentinelは10mの分解能で持ち、観測幅はそれぞれ180km、290kmとなっている。一方、我が国の先進光学衛星は0.8/3.2mの分解能、70km観測幅を設定している。この選択は、欧米が目指すオープン・フリーなデータポリシーを持つ衛星より分解能で優り、観測幅で劣っている。今後の方向としては、観測頻度を上げるため、より広観測幅とするか、あるいは、複数衛星、海外との協力などを考慮すべきではないかと思われる。
- SAR：他国のSARがCあるいはXバンドであるのに対し、現在唯一のLバンドSARは我が国のPALSAR2のみ。今後、米国がNISARにLバンドSARを搭載する計画であるが、我が国としては今後ともLバンドSARに傾注すべきであろう。Lバンドの分解能は電波の制約から現在ほぼ限界に達しているが、観測幅の拡大、S/N、S/Aの改善等が求められる。
- 中分解能センサ：我が国の技術的優位性を保つのが第一の戦略であるが、加えて、新規技術への挑戦も必要である。全球光学センサでは、米国がMODISの後継としてNPP及びJPSS搭載のVIIRS、欧州がSentinel-3及び、METOP-SGのMETImage、3MIのシリーズがある。これらに対して、GCOM-C1のSGLIは近紫外チャンネルの搭載、高分解能、偏光観測機能の搭載などの面で上回っており、より高性能な後継センサを継続的に上げていくことにより、優位性を継続できる。また、これを中心としてより多くのセンサによる同時観測を目指すコンステレーションも重要な選択肢になっている。

図 4.3.1 全球マイクロ波センサのロードマップ

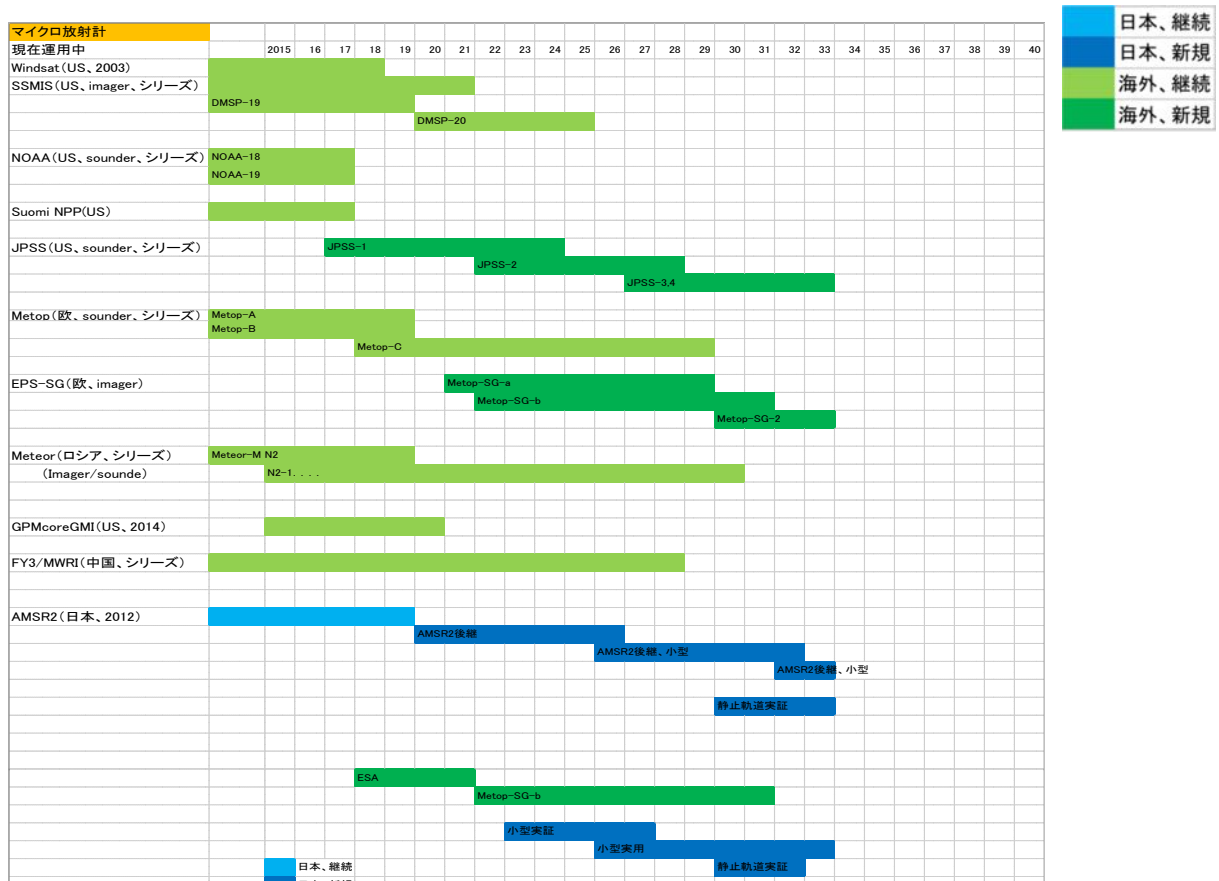
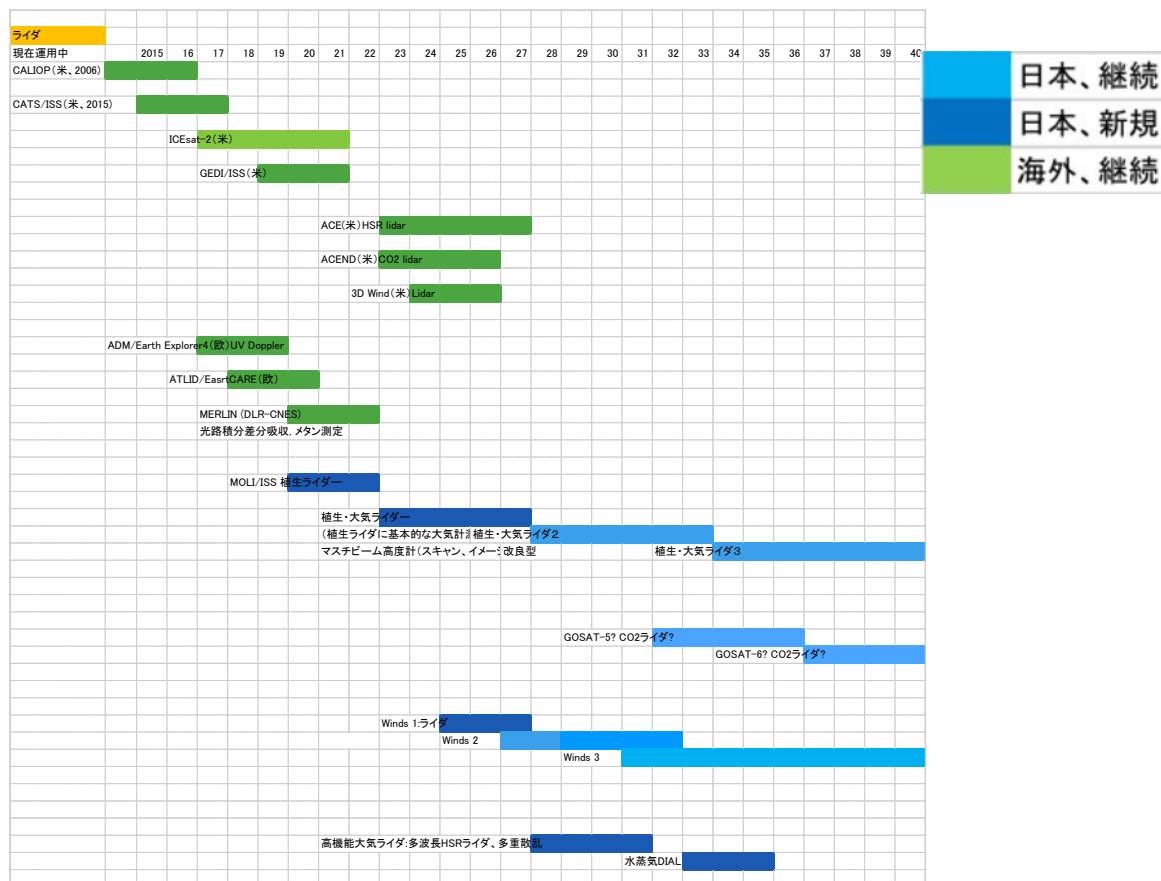


図4.5.1 ライダミッションのロードマップ



2. 総論

- **マイクロ波放射計**：イメージャに関しては、米国にSSM/IS、GMI、欧州にMETOP-SGのMWIの計画があるが、我が国AMSR-2の性能が圧倒的に高い。この分野でも継続性が極めて重要なため、AMSR-2後継機の早急な打ち上げが必要である。更にこの優位性を継続するため、較正の高度化、アンテナの大型化等が期待される。サウンダに関しては、米国のATMS、METOPのAMSU、METOP-SGのMWS等が有り、我が国に開発実績が無いことも踏まえ、海外センサーの利用戦略が良いのではないかとと思われる。
- **雲・降水レーダ**：我が国が優れている分野である。降水レーダは我が国のみが保有する技術で有り、降水の3次元観測、陸域の高精度観測などを成功させてきた。これらは気象・気候・地表面の監視の観点で継続することが国際的にも要望されており、後継機の開発が必要である。また、気象庁が数値気象予報に取り入れたことを考慮すると、観測幅の拡大、小型降水レーダのコンステレーションによる観測頻度の増大などが期待される。雲レーダに関しては、NASAについて2機目の開発であるが、ドップラー観測機能の付加、アンテナ開口の拡大等により、最高性能の雲レーダを開発している。今後は3次元雲レーダの開発が期待される。また、この分野では、雲、降水レーダの同時搭載が求められているが、太陽同期か非同期かなど、軌道の問題もあり、更に議論が必要である。
- **ライダー**に関しては、現時点で成功しているのは米国だけで有り、CLIPSO搭載のCALIOP及びISS搭載のCATSが運用されている。何れもエアロゾル観測を目的としたミーライダーである。その他、米国では、ISS搭載樹高観測ライダーのGEDI及び氷床観測用のIceSat-2が計画されている。欧州では風観測用のドップラライダー、ALADIN/ADM-Aelousとエアロゾル観測用のEarthCare搭載ATLIDが計画されている。我が国ではMDS搭載ELISEが開発途中で開発打ち切りとなり、その後計画がなかったが、現在ISS搭載MOLIの研究が始まっている。ライダーは重要な宇宙技術で有り、我が国としてもこの機会を逃さず、MOLIを開発すると共に、今後のドップラライダー等の開発も進める必要がある。

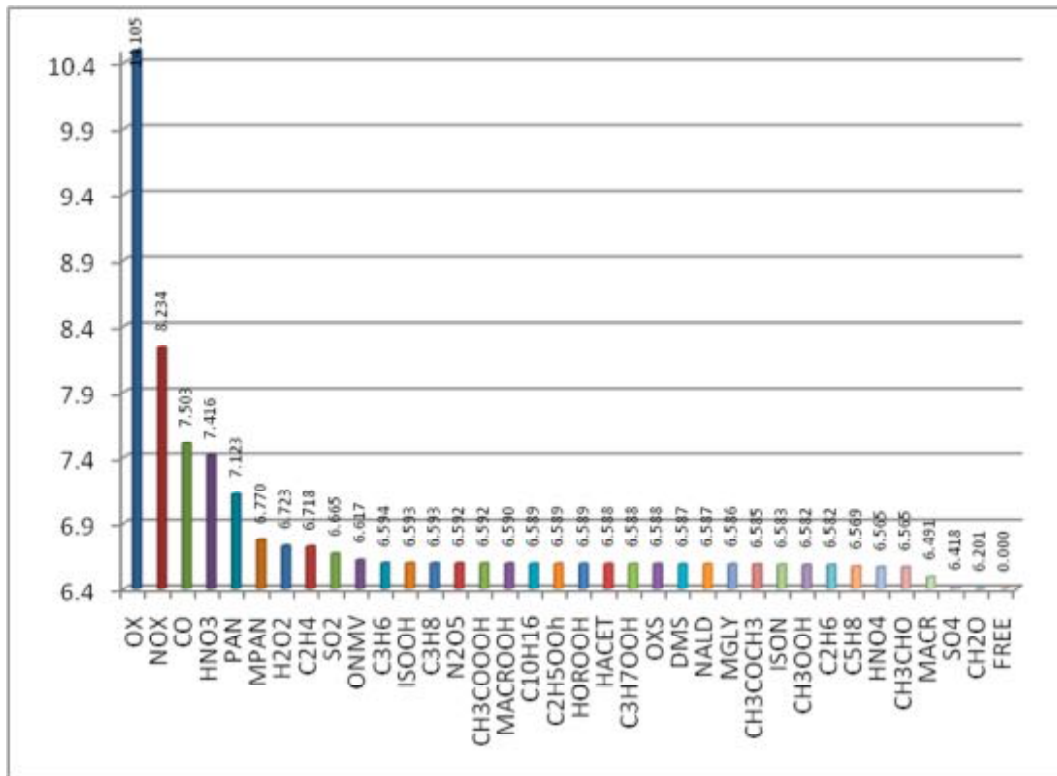
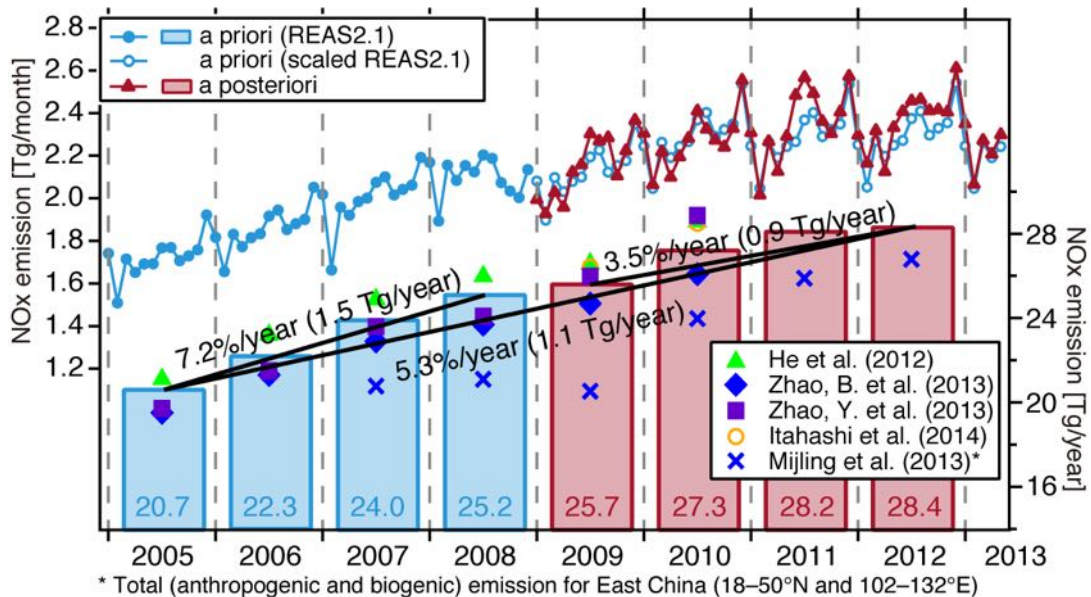


図4. 6. 4 オゾンをはじめ様々な物質の静止衛星観測値を同化できたときの、東アジア地表オゾン濃度の予測精度改善率(%)。(大気環境観測衛星検討会での検討資料) pbを越えた日数。(a)1985年および(b)2010年。(環境省webサイトより)

中国域からの年間NOx排出量の変化

- 2009年以降、増加率が減少
- 削減施策への衛星観測利用の可能性



2. 総論

- 大気化学センサは1985年から成層圏オゾン層破壊と気候変動の監視を目的として世界各国で数多くの衛星が打ち上げられた。多くは寿命を迎え、軌道上において現存しているのは、カナダのSciSAT搭載ACE、米国AURA搭載MLS、スウェーデン・カナダのOdin搭載SMR/OSIRIS衛星である。世界的な今後の動向は大気汚染監視に向いており、AURA搭載OMI、TES及びNPP搭載OMPSが運用されている。今後の計画では、JPSS-1及び2にOMPSが搭載される予定の他、24時間の日変化がモニタできる静止衛星が中心となってきている。米国では静止衛星搭載大気化学ミッションとしてTEMPO、欧州ではMTGにSentinel-4、アジアでは韓国のGEMSが2018～2019年の打ち上げを予定している。また、低地球軌道（LEO）衛星においては欧州ESAが気象衛星シリーズとしてSentinel-5P、その後、METOP-SGにIASI-NGとSentinel-5を打ち上げる予定である。我が国では、ILAS、ILAS2、IMG、SMILES等、実績を上げてきたが、アジアの大国であるにも関わらず大気汚染実態把握に関する打ち上げ計画に予算配分されていないのが現状である。今後、我が国としては、センサの小型化による多数展開や静止軌道の利用により、時空間的に細やかな汚染大気の実態把握と予測を行って行くべきである。
- 温室効果ガスセンサに関しては、我が国がGOSAT搭載TANSO-FTSで最初のセンサを開発し、CO₂及びCH₄の観測で高精度を達成。その後米国でOCO₂が上がり、OCO₃もISS搭載で計画。欧州ではCarbonSatが不採択、CNESがmicroCarbの開発を計画。我が国は、GOSAT-2の開発を開始しており、更に後継機が続く予定。GOSATの性能が最高であり、今後も海外衛星の標準となり続けると思われる。GOSATにより、CO₂とメタンの気柱量やクロロフィル蛍光の観測が可能であることが世界で始めて実証され、世界的に唯一、6年以上の衛星データが取得されている。今後、全球光学センサとの組み合わせで炭素循環の理解がより進展すると期待される。将来の開発要素としては、観測ポイント数の増加、更なるS/Nの増加などがある。赤外サウンダに関しては、米国がNPP、JPSSにCrIS、欧州がMETOPのIASI、METOP-SGのIASI-NGが計画、長期の観測が可能となっている。わが国でもGOSATのTANSOで赤外観測可能ではあるが、海外に比べて観測点数が圧倒的に少ない。今後検討するのであれば、静止衛星用であろう。

図4.8.1. New generation of geostationary meteorological satellitesの計画

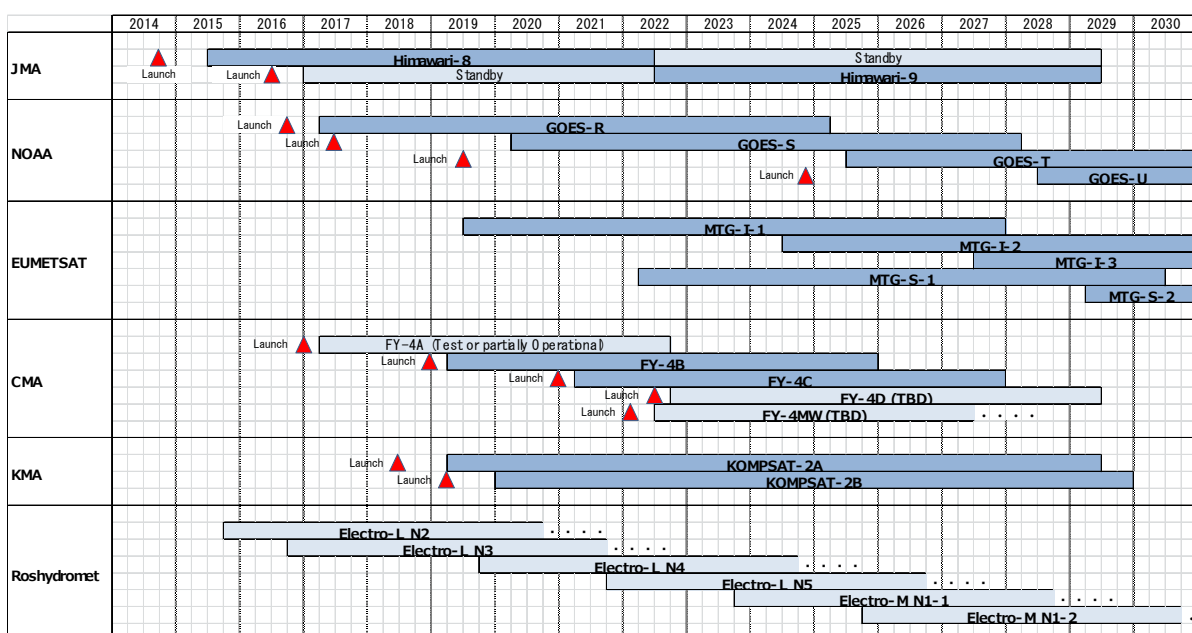


表4.8.1. Geo-Leo Corresponding VIS-IR Imagery Bands (μm)

#	Himawari -8/ AHI	MTSAT-2/ IMAGER	MSG/ SEVIRI	MTG/ FCI	KOMPSAT -2A/AMI	FY-4/ AGRI	GOES- R/ABI	GOES -15	GOES -11	SNPP/JPSS/ VIIRS	Terra, Aqua/ MODIS	GCOM-C/SGLI	NOAA/ AVHRR
1	0.47			0.444	0.455	0.47	0.47			0.488 (M03)	0.488	0.490 (VN4)	
2	0.51			0.510	0.511					0.555 (M04)	0.531	0.530 (VN5)	
3	0.64	0.68	0.635	0.640	0.642	0.65	0.64	0.65	0.65	0.672 (M05) 0.64 (I01)	0.667	0.6735 (VN7,VN8,P1)	0.630
4	0.86		0.81	0.865	0.860	0.825	0.86			0.865 (M07) 0.865 (I02)	0.870	0.8685 (VN10, VN11, P2)	0.862
				0.914							0.905		
				1.380	1.38	1.375	1.38			1.378 (M09)	1.375	1.380 (SW2)	
5	1.6		1.64	1.610	1.61	1.61	1.61			1.610 (M10) 1.61 (I03)	1.640	1.630 (SW3)	1.61
6	2.3			2.250		2.25	2.26			2.250 (M11)	2.130	2.210 (SW4)	
7	3.9	3.7	3.92	3.80	3.85	3.75	3.90	3.90	3.90	3.70 (M12) 3.74 (I04)	3.750		3.74
8	6.2	6.8	6.25	6.30	6.24	6.25	6.15	6.55	6.75		6.715		
9	6.9				6.95	7.1	7.00						
10	7.3		7.35	7.35	7.34		7.40				7.325		
11	8.6		8.70	8.70	8.60	8.5	8.50			8.55 (M14)	8.550		
12	9.6		9.66	9.66	9.63		9.70				9.730		
13	10.4	10.8	10.8	10.50	10.43	10.7	10.3	10.70	10.70	10.763 (M15)		10.8 (T1)	10.80
14	11.2				11.20	11.0	11.2			11.45 (I05)	11.030		
15	12.4	12.0	12.0	12.30	12.30		12.3		11.95	12.013 (M16)	12.020	12.0 (T2)	12.00
16	13.3		13.4	13.30	13.30	13.5	13.3	13.35			13.335		

大気環境観測衛星検討会がまとめた静止大気環境観測計画 GMAP-Asia との観測要求と仕様要求 (表 4. 6. 1、表 4. 6. 2) を示す。表 4. 6. 1

時間分解能	1—6 時間 (目的に応じて選択可能) 東アジアの大気質観測では、1-2 時間が望ましい。イベント観測 (光化学スモッグ・森林火災・火山噴火) 時などは 1 時間程度が望ましい。	
時間カバー	24 時間/日 (紫外/可視光観測は昼間のみ)	
空間カバー	アジア広域・東アジア全域・大都市上空を目的によって選択。	
水平分解能	1x1 km—50x50 km (目的に応じて) 東アジアの大気質観測のためには 10x10km が望ましい。航路、放出源や都市大気質観測を行う場合は、1x1 km—2x2 km 程度が望ましい。	
鉛直分解能	対流圏-成層圏分離 全ての化学種について、境界層 (0-2km) の分離が望ましい。	
プロダクト	標準	オゾン (O ₃) ・ 二酸化窒素 (NO ₂) ・ 一酸化炭素 (CO) ・ エアロゾル光学的厚み (AOT) ・ HCHO ・ 輝度温度 ・ SO ₂
	拡張	境界層 O ₃ ・ HNO ₃ ・ PAN ・ CH ₄ ・ CH ₃ OH ・ CH ₃ CHO ・ H ₂ O ₂ ・ HCN ・ NH ₃ ・ CHOCHO ・ エアロゾルタイプ分類 ・ CO ₂ ・ エアロゾル量 ・ 水蒸気

表 4. 6. 2

センサ	紫外/可視ハイパースペクトルイメージャー	赤外ハイパースペクトルセンサ
観測波長（波数）域	O ₃ ・SO ₂ ・NO ₂ ・HCHO およびエアマスファクター導出に必要な O ₄ などの観測バンドをカバーするために、観測波長域は 280–580 nm とする。	気温・水蒸気・O ₃ ・CO・HNO ₃ などの観測バンドをカバーするために、観測波数域は 700–1200 cm ⁻¹ および 1600–2250 cm ⁻¹ とする
波長（波数）分解能	観測対象物質等の吸収構造を十分に分解して計測するために 0.4 nm 程度	対流圏カラムが分離できる程度の鉛直分解能を実現するため 0.6 cm ⁻¹ 以下
時間分解能(対象域カバーに要する)	1-2 時間程度	1 時間程度
空間分解能	2-10km 程度	10km 程度
感度・S/N 比	波長 330nm にて S/N>500 波長 500nm にて S/N>350	波数 1030(cm ⁻¹) にて S/N>200 波数 2160(cm ⁻¹) にて S/N>30

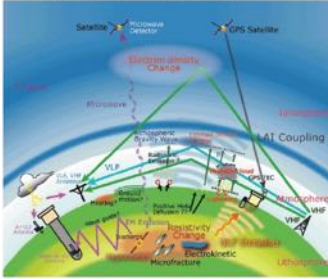
2. 総論

- 静止衛星：連続観測という周回衛星にはない特性を有している。全球をカバーするためには5基程度の衛星が必要であり、我が国ではひまわりがその国際分担の役割を果たしている。気象観測に関しては、WMOが高性能イメージャ、赤外サウンダ、雷センサを推奨している。このうち高性能イメージャに関してはひまわり8号が、世界初の搭載衛星となった。その後、米国のGOES-R、欧州のMTGも同様のセンサを搭載する予定である。しかし、サウンダと雷センサはひまわりに搭載されておらず、今後の開発が必要である。一方、気象以外の分野では、高分解能光センサ、マイクロ波イメージャ、ミリ波、サブミリ波観測、降水レーダ、大気化学センサ等の要望が挙がっている。中国は静止気象衛星を予備機1機を含めて常時3機運用しており、韓国でも2011年以降、静止気象衛星を運用しており、その他、インド、ロシアも静止気象衛星を運用していることから、アジア・オセアニア地域に関しては、世界的により充実した観測網が維持できることが期待される。この観点でどのような国際分担をするかの国際議論が必要である。

地震先行現象プロジェクト

萌芽的ミッションの例

- 小型衛星群による電磁気学的地震先行現象事例収集
- 観測項目: 電子密度、電子温度、VLF帯電波強度等
- 地表観測との連携
 - ULF、VLF、LF、VHF帯およびGPS地上観測網との連携
 - テストフィールドの構築(東海、北海道、近畿さらには台湾など)
- 地震先行現象に関する地圏・大気圏・電離圏結合仮説の実証



上位目標
 短期・直前予知に資する地震電磁気現象の解明(地震前大気圏・電離圏変動の立証)ならびに地球科学における新たなパラダイムの確立

図4.9.1 衛星リモートセンシングの可能性とS-NETへの期待(中須賀, 2014)

図4.9.2 信頼できる地震先行現象の検証
 ⇔大気圏-電離圏変動の総理解
 =まさにEarth System Science

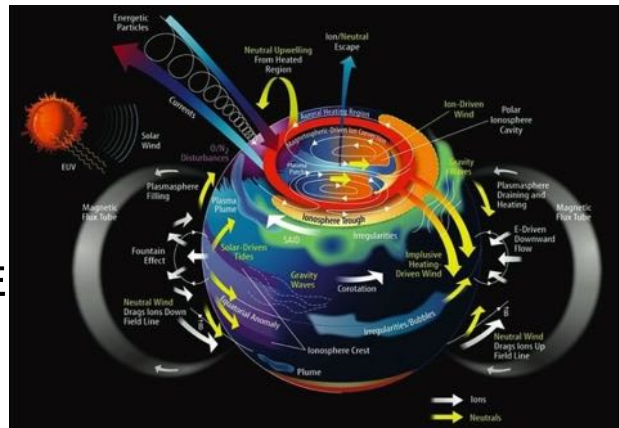
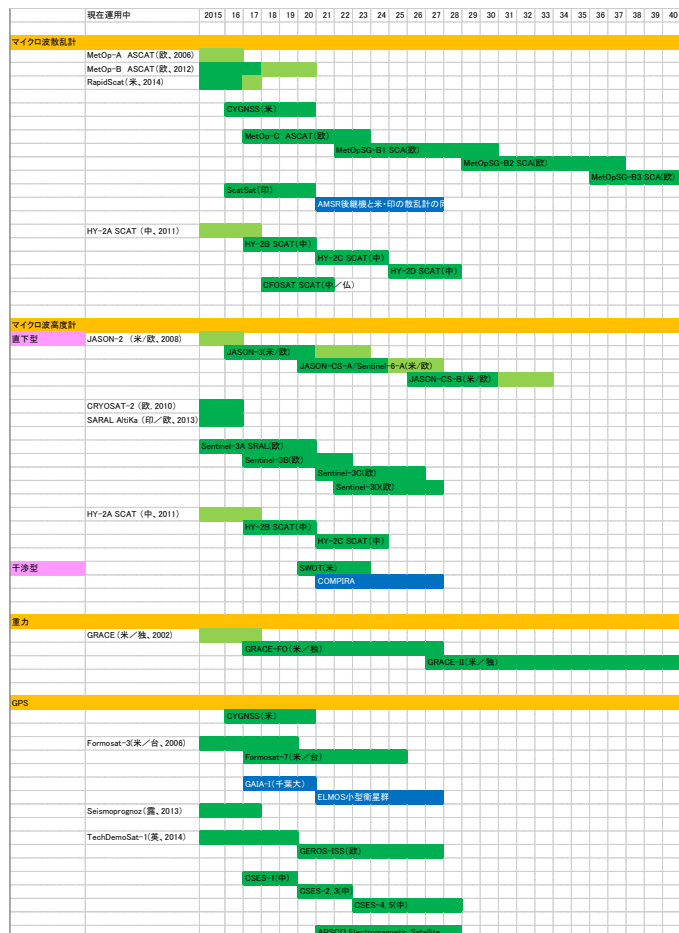


図4.9.3 散乱計・測地・重力・GPS
 ミッションのロードマップ



■ 日本、継続
■ 日本、新規
■ 海外、継続
■ 海外、新規

2. 総論

- マイクロ波散乱計：米国のADEOS搭載NSCAT、ADEOSII搭載SeaWinds、QuikScat搭載SeaWinds、ISS搭載RapidScatのKaバンド散乱計、欧州のMETOP搭載ASCATのCバンド散乱計が運用中である。欧州では更にMETOP-SGにASCAT後継のSCAが搭載される予定である。これ以外にはインドがOceansat-2にKaバンド散乱計を搭載したが、運用中止となった。インドは今後もKaバンド散乱計を上げる予定である。欧州の散乱計は棒アンテナを用いるため、観測幅が狭いが、米国、インドは回転式のパラボラを用いているため、1日でほぼ全球の観測が可能である。今後も欧州、インドで最低2機の散乱計が運用されれば、実用的な地球観測システムが構築されると思われる。我が国での新たな開発の優先順位は低いと思える。
- 高度計：JASONシリーズの精度が高く、更に今後も継続する計画であるため、高精度観測には問題が無い。更に、若干精度は落ちるが欧州のCryosat2、Sentinel-3のSRAL等が有り、直下型高度計の観測システムは充実している。一方、合成開口技術を用いた面で観測する高度計の開発が行われている。米国はSWOTを2020頃打ち上げの予定で有り、我が国でもCOMPIRAの研究が行われている。観測幅はそれほど大きくないが、漁業等には有効利用される可能性がある。
- 重力観測：NASAのGRACEが大きな成果を上げた。今後、後継機が計画されているが、将来的にはより精度の高い重力観測が行われると思われる。現時点で我が国には重力観測の経験はほとんど無いが、将来の高精度観測に必要な要素技術は有しているため、将来的には国際共同開発の可能性もある。
- GPS掩蔽：台湾とNOAAの共同により、12基の衛星が打ち上げられる予定である。このほか米国、欧州の一部の衛星にも搭載される。気象庁もこれらのデータを使用するため、我が国としても、一部の衛星に搭載すべきではないだろうか。

2. 総論（結論と提言）

以上の分析から得られる結論と提言をまとめる。

- 地球観測センサは、社会に貢献するために社会的使命をもつ観測と、地球システムの未解明課題に挑戦する研究に資する科学的観測を併せて行ってきた。例えば、地球温暖化などの気候変動問題では、その科学的解明と対策のために、継続的な観測は欠かせない。
- 本分析結果から、我が国がリーダーシップをとって観測を継続すべきセンサと新たに取り組む価値のあるセンサや基礎技術が浮かび上がってきた。
- 我が国が優位性をもって継続すべき（国際的な責務もある）センサとしては、広幅観測の高分解能光学センサ、LバンドSAR、中分解能センサ、マイクロ波イメージャ、（雲）・降水レーダ、温室効果ガスセンサ、大気化学センサが挙げられる。また、新たに取り組むべきものとしては、ライダ、高度計などのセンサ技術が挙げられる。静止気象衛星は日常の気象予報に定着している一方で高分解能化・多チャンネル化の流れが加速すると考えられたため、高機能化を図りながら継続して観測するべきである。さらに、低軌道衛星でのみ可能であった技術もその進展と効果を考慮したうえで静止衛星への移行も検討すべきである。センサの小型化は重要な技術課題であり、GPSのように多数の衛星に搭載することにより地球科学に貢献することは可能であるが、センサによっては原理的に小型化が不可能なものもある。それぞれのセンサの国際社会での優位性・有用性や我が国の衛星戦略における重要性の詳細については各論を参照。
- これらのセンサによる観測を実施することを提言する。これらを組み合わせて2020年～2040年期の衛星開発のロードマップを早急に作るべきであるべきである。我が国の体力と世界からの期待に対応するためには、2～3年に1機の打ち上げ努力が必要である。
- これらの計画を持続可能にするためには、小型化等により開発コストをこれまでの8割程度に抑えることや、JAXA以外の資金の活用および国際協力ミッションの更なる推進が必要である。また、このような長期計画にとって衛星の長寿命化の努力が重要である。TRMMは17年を超えて運用している実績がある。

結論

- 各カテゴリーの優先順位は明らかになってきた
- 本分析は学会誌に投稿予定
- その中から、何をやるべきかを決めるのは、コミュニティと政府の優先順位判断が必要
- 他の地球観測計画分析
 - ・ WMO GCOS, WIGOS
 - ・ CEOSのコンステレーション：ACC-VC, ACC-P, OSVW-VC, SST-VC, OCR-VC, LSI-VC
 - ・ 地球観測利用戦略コミュニティ提言書：優先順位
- GEO
- 地球温暖化観測・情報利活用推進委員会：気候変動適用情報プラットフォームの新設
- イノベーション戦略 内閣府総合会議 地球環境情報プラットフォーム
- 情報収集、準天頂等の計画との重要性の比較検討

各論

4.1. 高解像度センシング

若林裕之・土田聡・岩崎晃・井上吉雄・石塚直樹

- 高解像度センサは精細なデータ取得が可能：多目的なミッション
- 森林や氷河など：高解像度データは不可欠
- 業務によっては継続利用の整備計画。衛星寿命が延びて2020年代の計画はこれから。
- オープン・フリーデータ：LandsatやSentinelが登場
- 観測頻度の向上は農業利用を中心として強い要望があり、重要な仕様となっている。
- 超小型や小型の衛星を多数利用プロジェクトが民間企業で進められている。
- 解像度・刈幅・観測頻度のトレードオフ：複数衛星、各国戦略が異なる。
- 地球科学上の社会実装に期待：最細が産業に最近。農業、国土管理、地域防災、社会基盤
- 光学センサ：パナクロマチック+マルチスペクトルを基本構成とし、目的に合わせバンド追加
- 熱赤外観測を行うセンサは少ない。ハイパースペクトルは実証目的段階
- 光学センサの刈幅拡張：軸はずし三枚鏡方式、分解能化：コルシュ方式
- ステレオ視：全球標高DBが整備中。災害時の地形把握や気候変動によるDB更新が主目的
- 機能のフル実装、低解像度実装、短基線実装、複数機実装などを比較検討が必要。
- 大型光学望遠鏡による静止：常時観測が可能であり、コストと利便性の面で戦略検討要
- SAR技術：高分解能化、広観測幅、多偏波観測、複数衛星による干渉SAR性能向上に期待
- 日本：LバンドSAR、85MHz高分解能化、衛星視線方向とのアスペクト比を考慮したアンテナサイズ。高分解能化：スポットライト。森林、地盤変動、海水、氷河モニタリング等に期待
- 観測幅拡張：SCANSARからDBFによるアンテナ多ビーム化
- SAR多偏波観測：有効
- 高品質データと高頻度化が重要：基幹衛星と小型衛星の組み合わせ
- データ量増大傾向：データダウンリンクも含めた宇宙システムとしての検討要

4.2. 全球光学イメージング

本多嘉明・中島孝・村上浩・菊池麻紀・木村俊義・森山雅雄・奈佐原顕郎・早坂忠裕

- 気候変動影響の顕在化の把握と対処が重要課題、ESMのためのECVの長期継続観測値が要
- ECVの取得には高空間分解能、高波長分解能が不可欠、我が国のセンサは世界最高水準
- GLI: 世界の多チャンネル化、高解像度化の先鞭
- 全球気候変動監視、全球陸域生態系監視、陸域の熱赤外観測、多岐の学術に役立つ。欧米諸国は国際問題や地球環境問題における国際的主導権を確保のためにも継続的な観測を計画
- アクティブセンサ、マイクロ波センサなどの観測データとの複合的な観測はESMの飛躍的な進展に繋がる。従って、積極的複数衛星運用（Jトレイン型）による観測を実現する戦略が重要。
- 積極的複数衛星運用：クロロフィル蛍光、形質、高精度バオマス等の飛躍的精度可
- 恒常的な地表面温度観測は、大規模森林火災、植物の水ストレス、農業生産や公衆衛生の支援情報などに役立つ。
- 海洋環境と生態系の時空間的变化、資源管理に資する情報取得：持続可能水産資源利用に要
- 生物多様性・窒素循環などの課題に大いに役立つ情報が得られる。
- 気候変動予測において最大の不確定要素：雲の詳細観測が重要
- 地球の放射収支：エアロゾル観測、雲成長プロセスへの影響過程の観測
- グリーンランド氷床のアルベド低下と融解域の拡大進行：長期継続が重要
- 我が国の地球観測資産を考慮すると、積極的複数衛星運用（Jトレイン型）の実現に向けて我が国が主導的役割を果たせる。全2030年までは世界最高水準のGCOM-Cシリーズ継続で長期継続観測を実現し、その中で積極的複数衛星運用の基幹衛星および随伴衛星の製造技術を育成し、運用技術の試験開発を行う戦略が有効である。
- 地球観測静止衛星と光データリレー衛星：宇宙ビジネス拡大に貢献可

4.3. 全球マイクロ波センサ

中村健治・江淵直人・沖理子・可知美佐子・久保田拓志・青梨和正・沖大幹・早坂忠裕・今岡啓治

- イメージャ、サウンダは成熟したセンサ、その現業利用に各国でシリーズ化
- 日本のAMSR、AMSR-E、AMSR2シリーズは世界最高水準の性能
- AMSR2の高い空間分解能と6、7GHzチャンネルはユニークかつ貴重
- 当面の大変更は期待小、AMSR2後継はより大型、周辺メッシュ型アンテナ、受信機小型化等
- 低周波（L、P）：土壌水分や海面塩分濃度に有効、開発すべき。AMSR2後継の一部でも良い。
- 地球気候と環境変動：長期・安定のデータが要。校正が重要。日本は大きな経験に強み。一方、他マイクロ波との相互校正は遅れ。コンステレーション主導には、この方面の努力要
- コンステレーションに寄与できる小型マイクロ波放射計も開発すべき
- 観測頻度向上が必要：各国センサとのコンステレーションを前提。短期予報、防災にも重要。
- コンステレーションのコア（reference standard）としてAMSR2 後継機を位置づけるべき。
- 大気観測と比較校正には太陽非同期が望ましいが、観測継続、極域観測を考えると、従来の太陽同期が適当。大気は小型マイクロ波放射計を含めたコンステレーションが適当。
- 大きな流れとしてモデルとの融合
- サウンダは日本は遅れており、新たに参入は不適切
- 静止軌道からのイメージャを開発目標として挙げるべき
- イメージャは大気については降水レーダ、雲レーダとのトレイン観測が望ましい
- ミリ波・サブミリ波：氷雲・水蒸気観測の先端技術として期待。受信機の小型化
- ミリ波・サブミリ波の静止軌道観測は将来の大きな開発目標
- 掩蔽法（GNSS occultation）の受信機開発は大きな開発要素は無く、また国際協力の成果が期待できるので開発を進め、各種の衛星に搭載すべき。

4.4. 降雨・雲レーダ

高橋暢宏・岡本創・高薮縁・鈴木健太郎・大野裕一・可知美佐子・久保田拓志・沖理子

- 降水レーダも雲レーダもTRMM、GPM(、 EarthCAREで技術的に世界をリード
- 日米・日欧、または国際的連携で実施：中心センサ（レーダ）は日本に依存、将来にも期待
- TRMMやGPM搭載の降水レーダ：全球降水マップ（GSMaP）の実現と利用拡大
- TRMM、GPM観測：気候研究、科学研究に広く利用
- 降水と雲に伴う非断熱加熱は重要な基本要素：RMM/PRにより初めて3次元潜熱加熱推定
- EarthCARE：初の雲ドップラー速度観測。将来もドップラー、偏波観測技術開発は要
- 雲レーダ技術は米国と日本のみ、地球温暖化評価のためにも継続観測で日米に期待
- DPR-2：最新技術の降水レーダへの応用で、GPMの倍の走査幅かつ10~100倍の感度向上が可
- 降水観測ミッションの1つの方向性：小型化・低価格化、海外展開が期待
- GSMaPの将来：将来の高機能レーダにより高精度化、防災・農業・公衆衛生等での利用向上
- 静止衛星のレーダ搭載は実現可、現業気象予報モデルへの直接入力期待
- 雲・降水レーダ観測は、地球温暖化問題での全球標準情報の標準となる。
- GPM/DPRの同化も気象庁の数値予報で利用され始めた。さらなる発展に期待
- 増加が予想される極端気象の監視や予測にとって、衛星観測が不可欠
- 氷晶等の観測には、EarthCARE等の継続的な雲レーダ観測が必要
- 米国：3周波レーダ搭載CaPPMを検討。日本はレーダ提供等を視野に入れるべき
- 雲レーダと降水レーダ等の融合は数値気候モデル評価で「パフォーマンス志向」から「プロセス志向」を可能に
- 雲・降水レーダの組み合わせは、雲放射加熱と降水潜熱加熱の双方を同時に推定可能にするため、気候学研究に非常に有用である。

4.5. ライダ

杉本伸夫、西澤智明、水谷耕平、石井昌憲、岡本創、林真智、佐藤薫、菊池麻紀、木村俊義

- LITE(1994), GLAS/ICESat(2003-10), CALIOP/CALIPSO(2006-)。CALIOPとISS大気ライダCATSが運用中
- CALIOP : 約10年以上の長寿命の革新。雲・エアロゾル研究に大きなインパクト
- 風観測ライダALADIN/ADM-Aeolous (欧)、雲・エアロゾルライダATLID/EarthCARE (欧日)が計画。また、GLAS/ICESatの後継としてATLAS/ICESat2 (米)が計画。
- CALIOP後継が必要とされる中で、雲・エアロゾル・放射観測ミッションが計画されているが、それ以降の計画は具体化していない。
- GLASは植生観測にも利用されたが、植生観測を主目的として、ISS搭載植生ライダMOLI (日)とGEDI (米)が進行。MOLIは近接するマルチビームを用いて地面の傾斜を推定し、樹高やバイオマスの計測精度を向上するユニークなライダ
- MOLIはライダによる宇宙からの地球観測の日本の最初のミッションとなるもので技術的観点から重要。MOLIは大気観測の機能を持たないが、後継ミッションで後方散乱ライダとしての大気観測機能を持たせることは可能。
- コヒーレント・ドップラーライダによる風の3次元測定や差分吸収ライダによる二酸化炭素などの温室効果ガスの測定についてもライダ手法の利点が期待され、米国、欧州、日本で技術的な検討。

4.6. 大気化学

笠井康子・林田佐智子・金谷有剛・北 和之・入江仁士・齋藤尚子・今須良一

- オゾン層破壊、地球温暖化、大気汚染等の地球環境問題の把握と理解。国際施策に強く関連
- TOMS, GOME等の衛星直下視型可視紫外分光観測：オゾンホール発見。モントリオール議定書成立後はプロセス研究。太陽掩蔽観測センサ (UV, TIR, MW) によるオゾン破壊物質観測。Envisat/MIPAS, SCHIYAMACHY、AURA/MLS, カナダSciSAT/ACE、スウェーデン・カナダのOdin/SMR, OSIRIS等世界で20を超える。また、NPP搭載OMPSが運用。今後は、JPSS-1及び2にOMPSが予定
- わが国：ADEOS/ILAS (赤外掩蔽), ADEOS-II/ILAS-II (赤外掩蔽), IMG, ISS/SMILES (サブミリ) 等4機のセンサ技術保有。いずれも分光スペクトルの高品質で世界トップ技術
- 温暖化問題：CO₂、CH₄観測のGOSAT衛星は初。TIRS, sWIR両バンド搭載はGOSATのみ
- UNEP/短寿命気候汚染物質削減のための気候と大気浄化の国際パートナーシップ (CCAC) 施策
- 世界: AURA/OMI (可視紫外Nadir), TES (赤外放射Nadir), Envisat/SCHIYAMACHY (可視紫外近赤外Nadir-Limb) が汚染大気観測で先鞭。今後は、JPSS-1, 2/OMPSが予定
- 今後は、24時間の日変化が観測できる静止衛星が主流。米国では静止衛星搭載大気化学ミッションとしてTEMPO (可視紫外近赤外) を2018年、欧州ではMeteosat Third Generation satellites搭載のSentinel-4、アジアでは韓国GEMS (可視紫外近赤外) が2018~2019年を予定。
- LEOにおいては欧州ESAが気象衛星シリーズとしてSentinel-5P、その後、METOP-SGにIASI-NGとSentinel-5を打ち上げる予定。
- 大気汚染観測分野では我が国は大きく遅れ、予算配分されていない。ISS/uvSCOPEのみ
- 今後、我が国としては、小型センサの多数展開や静止衛星などを利用し、時空間的に細やかな汚染大気の実態把握と予測が必要

4.7. 温室効果ガス

今須良一・横田達也・松永恒雄・齋藤尚子

- CO₂観測: TIRによる上空濃度観測が最初。その後、SWIRによる鉛直平均濃度観測が行われた。両バンド搭載はGOSATのみ
- CO₂, CH₄に特化した衛星はGOSATが世界初。続いてOCO-2 (CO₂のみ) も観測。
- GOSAT: データ数は少ないが、圧倒的な高精度観測により、他国衛星の校正規準。今後も、S/N向上などによりトップ精度を維持、サングリント以外の海上、低照度の高緯度への観測域の拡大等が必要
- GOSAT: 亜大陸規模でのCO₂発生・吸収量推定の誤差半減が主目的。一部地域で目標を達成
- GOSAT: 太陽光励起クロロフィル蛍光(SIF)を初観測
- 他国の計画がメガシティ域からのCO₂排出量監視に重点を置く中、GOSAT-2は、それに加え、陸域生態系によるCO₂吸収量把握を目指すべき。SIF利用、陸域生態系モデルの高度化等の同時利用が我が国の強みになる。
- GOSATとGCOM-C、GCOM-Wなど日本の他衛星との複合利用で、SIF、渇水ストレス、熱放散等の植物生理生態学情報を総合的に得られ、GPP、NPP推定の高精度化に期待
- 炭素同位体(¹³C)などの測定により、人為・自然起源のCO₂の分離が可能
- GOSAT-2: 雲域回避用ダイナミック (インテリジェント) ポインティング等の新技術導入
- 新技術: 1次元・2次元アレイ素子を用いたイメージングFTS(GOSAT-I)、可動部の無いスタティックFTS(GOSAT-S)、静止衛星からの温室効果ガスの常時監視(GOSAT-G)を検討すべき

4.8. 静止衛星

操野 年之・笠井康子・本多嘉明・中島孝・村上浩・可知美佐子・平田貴文・石元裕史

- 可視・赤外放射計: これまで多バンド化、高解像度化、高頻度化の技術革新に遅れており、用途が気象観測に留まっていたが、近年の技術革新により、数年の内に、可視・赤外放射計のみならず、赤外サウンダ及び雷検知装置等、低軌道で実現された技術が実現する。
- 高緯度地域を除く全球を観測するためには同じ仕様の衛星を5~6機程度、等間隔に配置する必要がある。これに加えて、極軌道衛星による高緯度地域での観測の重なりを利用することで、多バンド・高解像度・高頻度観測を全球で実現することが可能。
- 高解像度、高頻度、多ビット数、多バンドなどの観測の高精度化に伴い、観測データ量が飛躍的に増大することが予想され、衛星本体の観測仕様だけではなく、衛星から地上へのデータのダウンリンクについても併せて検討が必要。
- 日本: NASDAが静止気象衛星GMS初号機を1977年に打ち上げて開始。現行の「ひまわり8号」は、2016年中打ち上げ予定の同一観測仕様の「ひまわり9号」と共に、東経140度赤道上で相互バックアップの観測体制を確立し、2029年まで観測を継続する予定。
- 現行「ひまわり8号」に搭載された高性能可視・赤外イメージャAHIは、他の静止気象衛星運用機関に先駆け、16バンドの波長帯/500m (VIS)・2km (IR) の空間分解能を有し、全球を10分毎に観測することが可能。
- 世界気象機関 (WMO) が定めた全球観測計画のベース・ラインに準拠した観測仕様の実現が求められており、2025年を指向した要求仕様では、“高性能イメージャ (High-resolution multi-spectral Vis/IR imagers)” による観測の継続と併せて、“赤外ハイパースペクトラル・サウンダー (IR hyper-spectral sounders)” 及び“雷検知 (Lightning imagers)” の搭載が期待されている。次期静止気象衛星 (「ひまわり10・11号」) での実現可能性についても、今後、検討が開始される予定である。
- 中国、韓国での静止衛星システムが高度化している (NKJ追加)。

4.9. 散乱計・測地・重力・GPS (1/3)

江淵直人・村上浩・磯口 治・児玉哲哉・福田洋一

<散乱計>

- 米国：QuikSCAT/SeaWinds (1999-2009), 2014年のISS/RapidScat以降、後継計画はない
- 欧州：現業気象衛星Metop シリーズ/ASCAT、気象予報を主目的とした観測が行われており、今後も継続見込み。ただしASCATは観測幅が狭いため、時間サンプリングが足りない欠点がある
- インド：ScatSat が計画。米欧協力で全球観測を実現し、データ質も著しく向上する見込み
- 中国：HYシリーズに散乱計が搭載。しかし運用中の HY-2Aデータは一般研究者には入手困難。今後もデータ公開やデータ質には疑問が残る。
- 日本：ADEOS、ADEOS-2にNASAの散乱計 (NSCAT、SeaWinds) を搭載した経験があるが、独自開発・運用の実績はない。新たに独自開発に着手しても国際的優位性の獲得は難しい。
- ADEOS-2等から、マイクロ波放射計との同時搭載は研究・実利用両面で意義が高い
- 米欧やインドとの協力で散乱計提供を受け、AMSR後継との同時搭載を目指す案がある

<高度計>

- 直下型タイプの高度計は、計測精度の向上とSARによる高解像度化を目指したもので Cryosat-2 (EU)、Sentinel-3 (EU)、Jason-CS (EU/USA) などが計画
- 干渉型高度計：2次元高解像度観測のSWOT (US/FR)、COMPIRA (日本) 等が計画。直下外のある程度の観測幅を持つため大幅な時空間解像度向上が可能、漁業や沿岸海況監視等に期待
- 欧米で開発・運用の直下型タイプを日本でゼロから開発するのは優位性が持てない
- JERS-1やALOS-1/2等で培ってきた日本のレーダ衛星技術を活用した干渉型高度計 (COMPIRA/SHIOSAI) に向けた技術開発を進めるべき。
- 先行のSWOTと利用技術の開発や観測範囲について連携して進めることが効果的
- アルゴブイ、船舶観測、海洋数値モデルとの海洋統合観測システムとして構築すべき

4.9. 散乱計・測地・重力・GPS (2/3)

江淵直人・村上浩・磯口 治・児玉哲哉・福田洋一

<重力・測地>

- 稼働中の重力ミッションは双子衛星GRACEのみ。マイクロ波測距と電磁式加速度計を使用。
- 2017年中の打ち上げを目的に、GRACEの後継ミッション (GRACE-FO)の準備。
- GRACE-FOの後、2020年代には実現するであろうレーザー干渉計を用いた衛星重力ミッション (仮にGRACE-IIと呼ぶ) では、GRACEに対して2~3桁の精度向上が期待される。
- 2020~2040年の時期では、重力ミッションの要素技術は、マイクロ波測距、電磁加速度計から、レーザー干渉技術、原子干渉計へと移っていくものと予想。
- 衛星の小型化や国際協力による複数衛星ミッションの連携が重要
- 我が国では、月重力場測定の実績はあるものの、地球での重力ミッションの実績が無いことから、すべて独自のミッション開発を実施することは必ずしも得策でない。
- 一方、重力場測定で必要とされるレーザー干渉技術は、LISAやDECIGOなど、宇宙重力波望遠鏡で必要とされるレーザー干渉技術と共通するもので、また、光衛星間通信も重要な要素技術であるが、これらについては優れた技術を有している。さらに原子干渉計についても、基礎的な研究が実施されている。我が国では、これらの要素技術を利用し、国際協力のもとに地球観測への応用を探ることが効果的。
- 重力場に限らず地球衛星観測データの高度利用にとっては、解析技術や数値モデリングとともに、その根幹となる高精度な地球基準座標系の維持も重要である。1986年に打上げられた「あじさい」は、今なお世界の測距局から追尾観測が続けられており、もっとも測距データの多い衛星の1つ。
- 地球衛星観測で、地球基準座標系の恩恵を多く受けている我が国では、新たな測地衛星の投入を含め、地球基準座標系への国際貢献も重要な課題の一つである。

4.9. 散乱計・測地・重力・GPS (3/3)

江淵直人・村上浩・磯口 治・児玉哲哉・福田洋一

<GPS>

- GNSS掩蔽観測は我が国が獲得すべき小型・安価・高精度な地球観測計測技術であり、既に気象庁により気象予測精度の改善に実用されており、気象コミュニティ等から要望されている。今後もCOSMIC後継群の運用が予定されており、我が国の掩蔽観測への国際的貢献が望まれる。
- 我が国の高精度電離圏計測技術は、COSPAR・URSI傘下の国際標準電離層タスクグループからも要望されており、その場観測との組合せによる高精度電離圏計測が可能となる（SSAという観点でも重要）。
- 我が国の実現可能な小型・超小型衛星群ミッションとして、掩蔽観測と我が国の国際的に評価の高い電離圏計測技術による、海洋を含む地圏－大気圏－電離圏総合観測ミッションが提案されており、気象予測精度向上、科学研究、地震前電離圏変動検証への貢献が期待される。
- 情報収集衛星10機体制下では、衛星システムの小型・超小型化が継続観測の唯一現実的解と思われる。