

衛星による地球観測の今後の展望  
Future Prospect of Earth Observation from Satellite

五十嵐 保

Tamotsu Igarashi

宇宙開発事業団 地球観測データ解析研究センター

National Space Development Agency of Japan

Earth Observation Research Center

igarashi@eorc.nasda.go.jp

1. はじめに

地球観測衛星ミッションには、グローバルな気候変動に関連する大気・海洋・陸域・雪氷の地球物理量の変動を定量的に観測するミッションとより人間活動に直接的に関連する土地利用、農林業、水産業、防災、資源開発・管理、環境保全等の局地あるいは地域規模の観測を行うミッションがある。

グローバル観測の代表的な地球観測衛星には、我が国では1996～97年に運用された地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS：Advanced Earth Observing Satellite）、その後継機で2000年に打ち上げが計画されている環境観測技術衛星（ADEOS-II）、更にADEOS-IIを始めとするグローバルな地球変動を15年間継続的に観測する地球環境変動観測ミッション（GCOM：Global Change Observation Mission）の研究が進められている。

また、米国航空宇宙局（NASA：National Aeronautics and Space Administration）では大型の地球観測衛星EOS、欧州宇宙機構（ESA：European Space Agency）ではENVISATの衛星計画がある。

一方地域観測を目的とする地球観測衛星には、我が国では2002年に打ち上げが計画されている陸域観測技術衛星（ALOS：Advanced Land Observing Satellite）計画がある。

更に小型のミッション実証衛星（MDS）や宇宙ステーション実験モジュール（JEM）を利用する新規開発センサの実証計画がある。

ここでは我が国の地球観測衛星計画の将来展望について、2010年までの地球観測シナリオ（Fig.1）に沿って概要を述べる。

2. グローバル観測

<2010年までの地球観測シナリオ>

基本方針	西暦	1995	2000	2005	2010
継続観測を基本方針 中・小型衛星による ミッションの分散化考慮	観測 グローバル観測 (太陽同期 / 中高度) 小型~大型	96/8 ADEOS 97/6 UOCTS IMG RIS AVNIR ILASTOMBS NSCAT POLDER	90/11 ADEOS-II AMSR ILAS-II POLDER GLI SeaWiifs	02/1-2 GCOM-A1 太陽非同期 05/8-9 GCOM-B1 太陽同期	02/8 ALOS AVNIR-2 PRISM PALSAR 情報収集衛星
実利用実証衛星として 技術開発戦略を勘案し て計画	陸域詳細観測 (太陽同期 / 低高度) 小型~大型	ADEOSの一般使用等	97/11 TRMM PR TMT VIRS CERES LIS	05/1-2 TRMM GPM共同プロジェクト DPR TMT VIRS 06/1-2 ATMOS-B/ER共同プロジェクト GPR LIDAR imager ATMOS-C SMILES IMAGER ODUS ILAS-後継 TERSEB	ALOS F/Q
単独プロジェクトから国 際協カプロジェクトへ の転換	日照(時間)変化観測 (太陽非同期 / 傾斜 / 低~中高度) 小型~大型	降雨観測ミッション 雲・放射観測ミッション 大気観測ミッション	99/7 EOS-AMT ASTER CERES MISR MODIS MOPITT EOS-PM1	05/1-2 TRMM GPM共同プロジェクト DPR TMT VIRS 06/1-2 ATMOS-B/ER共同プロジェクト GPR LIDAR imager ATMOS-C SMILES IMAGER ODUS ILAS-後継 TERSEB	
国際協力に基づく	NASAの EOSシリーズ	EOS-ANEミッション EOS-PM2ミッション	00 EOS-PM1 AIRS AMSU CERES MHS/MSR-E MODIS	03 EOS-CHEM太陽同期 HIRDLS MLS Ozone instrument TES 08 NPOESS太陽同期:30/13:30 CMIS CMPS CHS VIIRS	
国際計画	大気・海洋、陸域 気象ミッション				
MDS実証ミッション	実証実験 (太陽非同期 / 傾斜) 小型			02 MDS-2 MDS LIDAR ATRAS CER 03 JEM SMILES DOPPLER LIDAR	
大型センサの軌道上実 証	JEM, スペースシャトル 実験観測 (太陽非同期 / 低高度)			00 ENVISAT AATSR ASAR DORIS-NG GOMOS MERIS MIPAS MWR RA-2 SCIAMACY	
アルゴリズムの開発等	航空機 観測実験	▲ PR AMSR LIDAR/LALT (GPR) DIAL ▲ POLDER GLI L-SAR, TERSE (NASAの航空機+センサの利用)			

宇宙開発事業団のセンサを外国衛星へ  
AMSR-E → EOS-PM1 (2000)  
DPR → GPM  
GPR or LIDAR → ERM

\* 点線は、計画中の衛星である。  
\* \* 表中の衛星名、センサ名は予断ボラリなものであり、今後国際調整等を踏まえ、決定する。  
\* \* イタリックは外国衛星もしくは外国センサ。

Fig.1 Earth Observaton Scenario from 1995 to 2010

## 2.1 地球観測プラットフォーム技術衛星 ADEOS

グローバル観測の代表的な地球観測衛星には、我が国では地球観測プラットフォーム技術衛星 ADEOS がある。1996 年 8 月に打ち上げられた後、陸域、海洋、大気の総合的な地球観測を行うために 8 つの地球観測センサが搭載され、それぞれ観測センサの機能・性能が確認され、観測データの検証が行われ、継続的なグローバル観測データセットを継続的に利用者に提供を開始していた。しかし、約 9 か月の継続観測データを取得した 1997 年 6 月に ADEOS はその機能を停止した。

その後取得された観測データの処理・解析が進み、新規に開発された海色海温走査放射計 (OCTS : Ocean Color and Temperature Scanner)、高性能可視近赤外放射計 (AVNIR : Advanced Visible Near Infrared Radiometer)、温室効果気体センサ (IMG : Interferometric Monitor for Greenhouse Gases)、改良型大気周縁分光計 (ILAS : Improved Limb Atmospheric Spectrometer)、NASA 散乱計 (NSCAT : NASA Scatterometer)、地表反射光観測装置 (POLDER : Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances)、地上・衛星間レーザ長光路吸収測定用リトロリフレクタ (RIS : Retroreflector in Space) の観測データを校正・検証することによって、観測システムの実証を行った。同時にこれらのセンサとオゾン全量分光計 (TOMS : Total Ozone Mapping Spectrometer) の継続観測によって得られたグローバルな時間変化を表わすデータセットから、様々な科学的に興味深い現象が発見されている。

科学的な観測データの例について、以下に二三の例を示す。

海洋観測においては、OCTS で観測された海洋のクロロフィル濃度分布、海面水温分布と NSCAT で観測された海上風分布の組み合わせによってエルニーニョ現象の始まりの段階の海洋・大気間の相互作用解明に関する科学的観測が得られた。

大気の観測では、1996 年秋の南極オゾンホール、97 年春の北極オゾンの減少が、TOMS と ILAS によって 3 次元分布が得られ、北極圏のオゾン減少のプロセス解明に重要なデータが得られた。また、OCTS と POLDER の観測によって大気中のエアロゾルの地域分布がグローバルに得られ、地域的・時間的な分布の変化が 10 日毎に得られるなど、地球温暖化予測に重要な不確定要素であるエアロゾルの実際の観測データが得られている。

陸域においては、OCTS が 700m の空間分解能で陸域植生の植生指数を AVHRR の規格化植生指数 (NDVI) よりも多くの階調で分類でき、薄い植生層

の分布にも感度を持つことや POLDER により双方向反射分布関数 (BRDF) が推定され、陸面の光学的な特性の地域分布を定量化する可能性が示された。

また極域の陸氷や棚氷の分布についても、NSCAT が 1 週間毎に 6km 程度の空間分解能で観測できることを示した。

これらの観測データは約 9 か月間継続して観測され、2～3 年の長期継続観測はできなかったが、衛星による観測が上記の例に示した気候や気象変動を捉える手段として有効であることが実証された。また、今後、8 つのセンサから得られた膨大な観測データの蓄積を活用すること及びこれらの複合利用等、まだ多くの研究課題が残されており研究活動の強化が必要である。

## 2.2 環境観測技術衛星 ADEOS-II

2000 年 11 月に打ち上げが計画されている ADEOS-II は、ADEOS の後継衛星として地球観測ミッションを発展させると同時に、地球環境問題に関する新たな地平を切り開くことである。

科学目的は、次の 3 つに絞られる。

- (1) 気候システムにおける水・エネルギー循環の定量的把握
- (2) 地球温暖化問題に関連する炭素循環に関わるバイオマス量と基礎生産量の定量的推定
- (3) ADEOS 観測の継続に伴う長期的な気候変動シグナルの変動検出

このなかでも、(1) の水・エネルギー循環は ADEOS-II のミッションの特徴で、グローバル・イメジャ (GLI : Global Imager) による雲・水蒸気・エアロゾルの推定、高性能マイクロ波放射計 (AMSR : Advanced Microwave Scanning Radiometer) による水蒸気量・降水量・土壌水分量・積雪分布・積雪量等の水文パラメータの推定、NSCAT に続く SeaWinds による海面ストレスの推定、POLDER によるエアロゾルの推定、ILAS-II による極域のオゾン分布の推定等が、全球規模での水・エネルギー循環の定量的な把握に役立つものと思われる。特に SeaWinds による海面ストレスの継続的観測は、海洋大循環の変動の解明に大いに資するところがあるろう。

また、このような衛星観測による定量的な物理量推定は、的確な検証プログラムなくしてはあり得ない。

炭素循環に関する基礎生産量やクロロフィル量の推定は、ADEOS-II のもう一つのミッションの特徴である。特に、ADEOS の OCTS の発展の上に存在する GLI の持つ多チャンネルのデータや 250m の高分解能の機能は、OCTS の成果を引き継ぎ、海洋バイオマス量、基礎生産量及びその変動の推定に有効に働くことであろう。また、ILAS の成果を引き継ぐ ILAS-II は、極域のオゾンや微

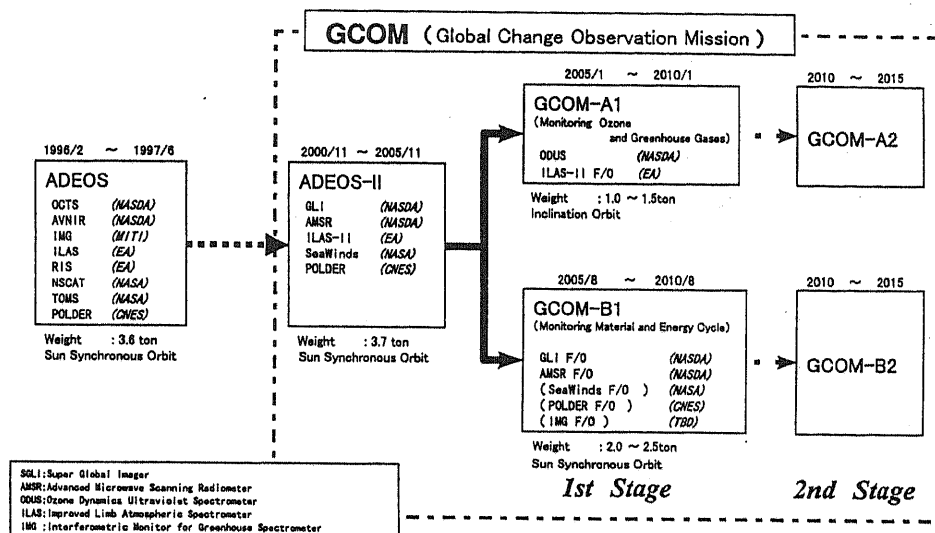


Fig.2 Concept of Satellite Plans for realizing Global Change Observation Mission

量成分気体の鉛直分布を観測でき、成層圏大気化学の発展に大いに寄与できるものと考えられる。

### 2.3 地球環境変動観測ミッション GCOM

地球環境変動観測ミッション (GCOM: Global Change Observation Mission) の目的は、センサ、衛星等技術開発主導からミッション対応型への開発理念の転換及び地球変動を観測する必要性から最低でも 15 年間継続観測することである (Fig.2)。観測に必要な期間は、エルニーニョが数年周期、気候変動が年々変動から 10 数年周期、太陽活動が 11 年周期であることによる。

GCOM とは、地球温暖化、気候変動及びオゾン層変動解明・予測に必要な地球物理量の継続的な観測計画であり、地球物理量観測に最適なセンサ、衛星によるシステム構築を目指す。

GCOM の研究目的は、

- (1) 物質・エネルギー循環と、地球温暖化の解明と予測
- (2) 大気・海洋相互作用、放射強制力等の解明並びに気候の中長期変動と地球温暖化の解明と予測
- (3) オゾン及び温室効果気体等の循環メカニズムの解明、並びにオゾン層変動と大気組成変動の解明と予測

であり、これによって地球環境変動に係わる現象の解明と予測及び地球環境保全に貢献することである。

GCOM のミッション期間は、ADEOS-II の打ち上げから始まり 2000 年 11 月～2005 年 11 月の運用期間の後、オゾン・温室効果気体観測を目的とする

GCOM-A1(2005年1月～2010年1月)と、物質・エネルギー循環観測を目的とするGCOM-B1(2005年8月～2010年8月)の2つの衛星が引き継ぎ、更に、GCOM-A2, B2によって2010～2015年の継続観測を行う構想である。GCOM-A1には、オゾン観測センサODUSとILAS-II後継機が、また、GCOM-B1には、GLIの後継センサSGLI、AMSRの後継センサ及びSeaWindsの後継センサAlpha Scatterometerが搭載される計画で、その他にPOLDERやIMGの後継センサのフーリエ変換型大気放射分光計(ATRAS: Atmospheric Radiation Spectrometer)等の候補センサがある。

2000年度からGCOMの研究及びオゾンダイナミクス紫外分光計(ODUS: Ozone Dynamics Ultraviolet Spectrometer)の開発研究を開始する予算要求を行っている。

### 3. 陸域詳細観測

#### 3.1 地球資源衛星1号JERS-1等

陸域詳細観測として我が国では、海洋観測衛星1号、1号bのMESSR、地球資源衛星1号JERS-1の合成開口レーダSAR及び光学センサOPS及びADEOSのAVNIRがある。これらの取得データは様々な応用分野で利用実証がなされ、利用推進が図られてきたが、引き続きグローバル熱帯林、北方林マッピング・プロジェクト、地殻変動解析等の利用が続いている。また、MESSR、OPS、SARの長期観測データの蓄積を利用して東南アジア地域等の継続的な土地被覆変化を表わすデータセットの作成も期待されている。

#### 3.2 陸域観測技術衛星ALOS

陸域観測技術衛星(ALOS: Advanced Land Observing Satellite)は、地球資源衛星1号JERS-1を引き継ぎ、地図作成、地域観測、災害状況把握及び資源探査を目的とし、高分解能の光学センサPRISM、AVNIR-II及び合成開口レーダPALSARを搭載する計画で開発が進められている。

米国を中心に計画されている空間分解能1～3mの高分解能商業衛星との違いは、ALOSでは都市域のスポット的な観測ではなく、より広域にわたる地域レベルの観測を比較的雲の影響を少なくして効果的に観測できるように観測幅を35km(PRISM)、70km(PALSAR, AVNIR-2)と広く取っている。また、PRISMは空間分解能2.5mとして3ラインセンサとすることによって、デジタル標高モデル(DEM)作成用のステレオペア画像が1軌道の飛行で同時期に取得できることから雲の影響を受ける確率を低減している。また、災害状況を把握する観測頻度を向上するために、AVNIR-2ではクロストラック方向のポイ

ンティング、PALSAR では入射角可変機能によるクロストラック方向の観測幅を広げている。また、PRISM では 2.5m の空間分解能でも放射輝度のラジオメトリック分解能を上げて、ステレオマッチングができるように S/N を 70 以上としている等の設計を行っており、基本的に高分解能商業衛星とは異なるミッション対応の衛星システムである。

### 3.3 情報収集衛星

外交・防衛等の安全保障及び大規模災害等への対応等の危機管理のために必要な情報の収集を目的とする情報収集システムについて、2002 年度に衛星 4 機を打ち上げることを目標に 2000 年度に開発に着手することが要望されている。

## 4. 日照（時間）変化観測

### 4.1 降雨観測ミッション

熱帯降雨観測衛星（TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission）は、地球の気候を含む様々な自然現象を支配する水の循環を地球規模で把握、理解するために日米協力により開発され、1997 年 11 月に打ち上げられ運用を続けている。特にこれまで観測データの乏しい亜熱帯地域の海上の降雨を定量的に観測することにより、地球規模の水の循環に伴う熱輸送を解明し、地球変動のメカニズムの解明及び変動予測を可能にすることを目指している。

TRMM には、日本（NASDA, CRL）が開発した世界初の衛星搭載降雨レーダ（PR : Precipitation Radar）が搭載され、降雨の 3 次元分布がグローバルに得られるようになった。他に NASA が開発した TRMM マイクロ波観測装置（TMI : TRMM Microwave Imager）、可視赤外観測装置（VIRS : Visible Infrared Scanner）、雷観測装置（LIS : Lightning Imaging Sensor）、雲・地球放射エネルギー観測装置（CERES : Clouds and Earth's Radiant Energy System）が搭載され、同時観測が行われている。

打ち上げ後継続する観測によって、PR の観測データからマイクロ波放射計や赤外放射計では得られなかったサイクロンや台風の降雨強度分布が海上・陸上において世界規模で捉えられた。また、エルニーニョの発生から衰退までの変動に係わる太平洋の降雨域・強度分布、海面水温、雲分布が同時に観測される等、気候、気象の変動を解明するための重要な水・エネルギー循環に関する観測データが得られている。

TRMM の設計寿命は 3 年であるが、エルニーニョの変動に伴う太平洋の降雨域の観測やを捉える等の観点から、11 年以上の長期観測が期待されており、日米による 2 周波降雨レーダ（DPR : Dual-frequency Precipitation Radar）、

TMI 及び VIRS を搭載する後継機ミッション TRMM/GPM 共同プロジェクトの検討が行われている。

#### 4.2 雲・放射観測ミッション

また、TRMM と同様に日照（時間）変化観測のために太陽非同期、傾斜、低中高度軌道が要求されるミッションとして、雲・放射観測ミッションの構想がある。これには研究中の 95Ghz 帯ミリ波を用いる雲レーダ（CPR：Cloud Profile Radar）、MDS-2 で実証される予定のミー散乱ライダーの改良型のライダー・イメージャ（LIDAR Imager）を搭載する ATMOS-B/ERM 共同プロジェクトの構想が検討されている。

#### 4.3 大気観測ミッション

大気、特に人間活動が大気に及ぼす影響が現われる下部成層圏から上部対流圏にかけて重点を置いた観測を目的に、太陽非同期、傾斜、低中高度軌道が要求されるミッションとして、大気観測ミッションの構想がある。これには超伝導サブミリ波リム放射サウンダ（SMILES：Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder）、IMG 後継センサ、差分吸収ライダー（DIAL：Differential Absorption LIDAR）、オゾンダイナミクス紫外分光計（ODUS：Ozone Dynamics Ultraviolet Spectrometer）、ILAS 後継、同調型エタロン分光放射計（TERSE：Tunable Etalon Remote Sounding of the Earth）を搭載する ATMOS-C 衛星の構想が検討されている。

### 5. 国際協力及び国際計画

NASA が計画する大型の地球観測衛星 EOS シリーズは国際協力によって搭載センサを他機関から供給を受けて搭載する。1999 年に打ち上げが計画されている EOS-AM1（TERRA）には、日本から通商産業省が ASTER を搭載する。また、2000 年に打ち上げが計画されている EOS-PM1 には、NASDA が AMSR-E を搭載する。

また、日本は直接センサを搭載しないが、ADEOS-II 以降のグローバル観測衛星と同時期に同種のセンサによる観測頻度の向上や相互に補完し合う複合的な観測データの利用が有効と考えられる衛星として、上記の計画以外に ESA が 2000 年に打ち上げ予定の ENVISAT、NASA の EOS-CHEM、2008 年以降 NOAA、DMSP 等のミッションを引き継ぎ継続運用する米国の実用環境衛星 NPOESS がある。

### 6. ミッション実証及び軌道上実証



新たな地球観測センサの開発には、これまでになかった観測原理や先端技術を基に実際に実現可能な観測システムの機能・性能及び観測データの利用可能性を実証する必要がある。このために、MDS 実証ミッション及び JEM 実験観測の計画がある。

ミッション実証衛星を用いた地球観測センサの実証計画は、2002 年打ち上げの MDS-2 に巻雲、エアロゾル、雲の多層構造を観測対象とするミ-散乱ライダー (MIE-LIDAR) を搭載する ELISE (Experimental Lidar in Space Experiment) 計画が最初の計画として認められ、その後の計画は ATRAS, CPR の搭載候補が検討されている。

また、国際宇宙ステーション/日本実験モジュール (ISS/JEM) による実験観測では、上層大気微量成分気体濃度分布を定量的に測定する SMILES が最初の搭載センサとして選定された。

## 7. まとめ

今後の計画として開発が認可されている確実な計画と未だ構想の検討段階にある計画について分かりやすく示した。また、今後の地球観測の展開については、GCOM が目指すミッションが一つの新しい方向性を示している。このミッションは、地球環境変動の把握とその先の変動予測にまで貢献することが目標となっている。このためには、観測精度を向上させる必要があり、衛星からのリモートセンシングにより得られる観測データと地上観測によるデータの相互補完による精度向上、複合観測データの組合せ処理による精度向上が地球環境の変動を表わす物理量を推定する上で重要となってくる。したがって、データセットの作成において地上観測の充実がこれまで以上に比重を増してくる。

また、将来の変動を予測するためには、観測データセットをモデルに四次元同化することが必要になってくる。したがって、観測・モデル・プロセス研究の間の連携を強化する必要がある。衛星からのリモートセンシングが果たす役割を目的優先で考え、可能性を追及してゆく時期が来ている。