

# 人工衛星からの地球環境計測の現状と展望

五十嵐 保

近年地球温暖化、オゾン層の破壊、砂漠化の進行などのグローバルな気候変動、異常気象、環境破壊が顕著に現れ、緊急に対策を講ずるべき課題となり、このために、全球、大陸規模から地域、国レベルの広がりでの地球環境の定量的観測データの必要性が高まってきた。

また、一方日常の社会経済活動をサポートする情報として、天気予報、海況情報、環境汚染状況把握、天然資源探査・管理、各種主題図・基本地図の作成、持続可能な都市、農業、植林などの開発計画、災害状況把握などのさまざまな応用分野で地球観測衛星からの観測データが利用されてきた。

おののの地球観測衛星にはミッションと呼ばれる観測目的があるが、それには実用、科学研究、将来の観測要求の高度化に応えるセンサーの研究および実証がある。また、観測目的ごとに観測すべき地球物理パラメーターとその観測精度要求に応じて人工衛星に搭載するセンサーの仕様設定が重要であり、宇宙からのリモートセンシングの観測原理および計測精度の理解が重要である。

## 1. 観測センサーと応用

地球観測衛星は光学（紫外～熱赤外線）およびマイクロ波を観測波長とする受動型および能動型のさまざまな観測センサー<sup>1,2)</sup>により地球を観測している。これらの観測センサーによって大気、海洋、陸域、雪氷圏のさまざまな地球物理パラメータや現象を把握することが可能となってきたが、その観測データはさまざまな研究および実用分野で役立っている。ここでは地球観測衛星に搭載されるセンサーおよびその応用について概要を解説する。

宇宙開発事業団地球観測システム本部地球観測データ解析研究センター（〒106-0032 東京都港区六本木 1-9-9）  
E-mail: igarashi@eorc.nasda.go.jp

### 1.1 光学センサー

#### 1.1.1 大気化学関連センサー

大気中の微量気体は、おののの特有の吸収または放射スペクトル線を検知することによって観測することができる。これらのセンサーは、直下視あるいは地球周縁を視野として観測する（図1）。直下視観測の場合、地球を見下ろすように、地球の任意の点からの反射、放射を観測することにより、水平分解能は高くなるが鉛直分解能には限界がある。これに対して周縁観測の場合は、さまざまな高度での水平方向の大気観測によって数kmオーダーの高い鉛直分解能が得られ、大気中央部の研究に適している。この観測では放射または吸収が観測され、掩蔽（吸収）法では、太陽、恒星などを光（放射）源として観測される。

これまでにオゾン全量分光計（TOMS: total ozone mapping spectrometer）<sup>3)</sup>などオゾン全量を全球的に監視するための分光計・放射計が利用してきた。1996年に打ち上げられた地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS: advanced earth observing satellite）<sup>4)</sup>に搭載された温室効果気体センサー（IMG: interferometric monitor for greenhouse gases）<sup>5)</sup>や改良型大気周縁赤外分光計（ILAS: improved limb atmospheric spectrometer）<sup>6)</sup>などによりオゾン以外の微量気体（気候変動に影響を及ぼす温室効果気体、環境に影響を及ぼす化学的に活性な気体、オゾン循環に影響を与える気体）に関する観測性能が検証された。

将来は鉛直分解能が1kmまで向上する可能性がある。また、観測範囲が下層大気の対流圏まで拡大されれば、大気汚染監視機能の強化および大気プロセス・モデルの改善が可能となる。

#### 1.1.2 大気サウンダー（赤外線およびマイクロ波）

大気サウンダーは、大気からの放射の3次元分布データ

を提供する。このデータから大気全体の温度および湿度の鉛直分布がわかる。一般にサウンダーは直下視観測を行うもので、観測対象の気体に対応するスペクトル特性に対応する複数のチャネルで放射を観測する。

サウンダーは輝線スペクトル線の広がりを観測することによって、大気圏のさまざまな高度からの放射を分離できる。この広がりは主に他の種類の気体との分子間衝突によって引き起こされるものであり、大気圧の減少とともに小さくなる。すなわち、輝線の中心に近い波長で観測される放射は高層大気からの放射であり、輝線中心から離れた波長で観測された放射は大気圏の下層からの放射である。

温度プロファイルのトレーサーとして、一般に酸素か二酸化炭素が利用される。これはこれらの気体が基本的に大気圏全体にわたって均一に分布していることにより、温度サウンダーはこれらの気体の輝線周辺に多くのチャネルをもつようになった。湿度プロファイルの作成には、水スペクトルのなかで赤外かマイクロ波帯が利用される。

### 1.1.3 地球放射収支放射計

地球放射収支の観測には波長によって異なるが、放射の絶対値を高い精度で観測することが要求される。角度特性とともに放射の収支を計測することができる。

太陽から大気圏に入ってくる「太陽放射」の全体（波長 0.2~4.0 μm）を対象とした観測および長波として地球から放射される「地球放射」（波長 3~50 μm）の監視には、広帯域放射計が利用される。この帯域は単一のチャネル 2 つまたは一連の狭帯域チャネルで観測される。また、地表から反射される短波長放射観測には、短波放射計が利用される。

### 1.1.4 高分解能イメージヤー

高分解能イメージヤーは地表の詳細な画像を提供するセンサーである。一般には 10~100 m の空間分解能と 100 km オーダーの観測幅を走査する可視から熱赤外の映像放射計である。また商業高分解能衛星は 1~5 m の超高空間分解能の画像を提供し始めた。これらのイメージヤーは空間分解能を上げるために、帯域幅の広い单一チャネルによるパンクロマチック（全色性の）観測と土地被覆の反射スペクトルの違いによる分類や大気中の水蒸気などの補正を可能とする複数のチャネルで同時に観測するマルチスペクトル観測がある。また、立体視により立体画像の作成が可能となった。

2002 年夏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) に搭載されるパンクロマチック立体視センサー (PRISM: panchromatic remote-sensing instrument for stereo mapping)

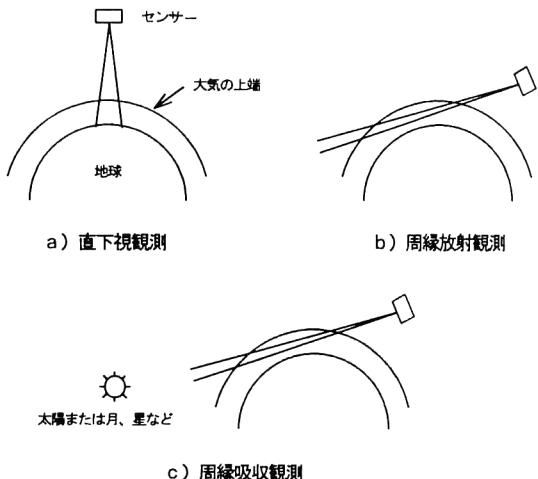


図 1 大気の観測法。

と高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2: advanced visible and near infrared radiometer type 2)<sup>7)</sup> は、それぞれ空間分解能 2.5 m のパンクロマチック 3 ライン・スキャナーと空間分解能 10 m の軌道に直行方向に指向する観測機能をもつマルチスペクトル・イメージヤーである。

土地被覆分類、森林伐採・砂漠化の監視、農業、地質図作成、内陸水、沿岸浸食、地図作成などの幅広い応用がある。さらに、海上におけるエアロゾル分布、雲の特性・分布、アルベドの推定のほか、自然および人間が管理している生態系の調査、気候変動の影響評価にも利用できる。

### 1.1.5 マルチスペクトル映像放射計 (可視光・赤外線)

可視光/赤外線マルチスペクトル映像放射計は、地球大気、地表（海洋、陸域）の画像を作成するものである。このイメージヤーは、100 m~数 km 程度の空間分解能で数百 km~数千 km の広い観測幅を走査する放射計で、正確なスペクトル情報を得るために放射輝度を精密に校正し、複数の狭いスペクトルチャネルで観測する。

2001 年 11 月に打ち上げが計画されている環境観測技術衛星 (ADEOS-II) に搭載されるグローバルイメージヤー (GLI: global imager)<sup>8)</sup> は、36 チャネルで可視から熱赤外までの観測を行う映像放射計である。これによって海面ならびに地表面温度、積雪、海水、地表面アルベド、雲量、雲頂温度などの抽出が行われる。また、生物圏のプロセスを観測するので植生およびその季節変動が求められ、グローバルな生態系による純一次基礎生産力など炭素循環プロセスのモデル化に利用できる。また、大気サウンダーチャネルの情報は、地表面温度などの各種パラメーターの算出する過程で、大気補正に利用される。

### 1.1.6 ライダー

宇宙用ライダーはその観測機能により、レーザー高度

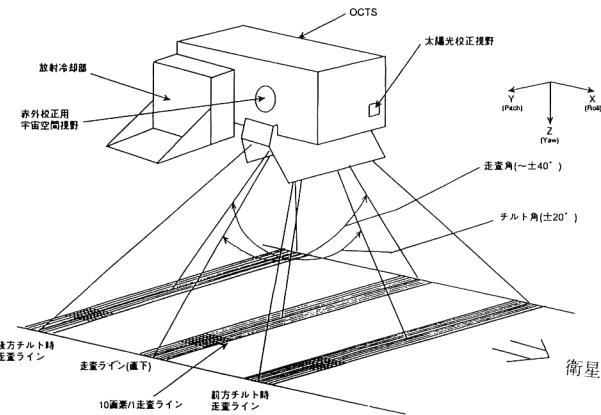


図2 OCTSの観測概念図。

計、後方散乱ライダー、差分吸収ライダー、ドップラーライダーに分けることができる。宇宙用のライダーで実績があるスペースシャトル搭載のライダー実験 LITE では、エアロゾルおよび雲の鉛直断面観測に成功した。宇宙用ライダーは、水蒸気、雲、エアロゾルの緯度によって異なる鉛直分布を放射計やサウンダーなど他のセンサーよりも高い高度分解能で観測できることを利用して他のセンサーの検証に利用できることである。また、面的に走査することにより 3 次元観測が可能となる。

#### 1.1.7 多方向放射計

複数の入射角で地表や雲からの反射、放射を観測し反射率、放射率の角度による異方性の情報を得る。これによつて海上のエアロゾルについて粒子の大きさおよび構成が得られ、エアロゾルの特性がわかる。

また、植生状態、作物収穫高の評価に利用される植生指数の高精度化にも、二方向性反射分布関数 (BRDF: bidirectional reflectance distribution function) の観測データの利用が研究されている。

#### 1.1.8 海色放射計・映像分光計

植物プランクトン、浮遊懸濁物、有色溶融有機物などによって特徴づけられる水色を観測するために、0.4~0.8 μm の可視および近赤外の波長帯で水面から射出する放射の輝度を定量的に観測し、それぞれの物質の濃度を抽出する。ADEOS に搭載された海色海温走査放射計 (OCTS: ocean color and temperature scanner)<sup>9)</sup> の可視近赤外 8 チャネル (中心波長: 0.412, 0.443, 0.490, 0.520, 0.565, 0.670, 0.765, 0.865 μm), 熱赤外 4 チャネル (波長帯: 3.55~3.88, 8.25~8.80, 10.3~11.4, 11.4~12.7 μm) (図2) によりクロロフィル a (図3) と海面水温を同時に観測し分布画像を作成した。

#### 1.1.9 偏向観測放射計

この放射計は、求めたい情報が透過波、反射波あるいは

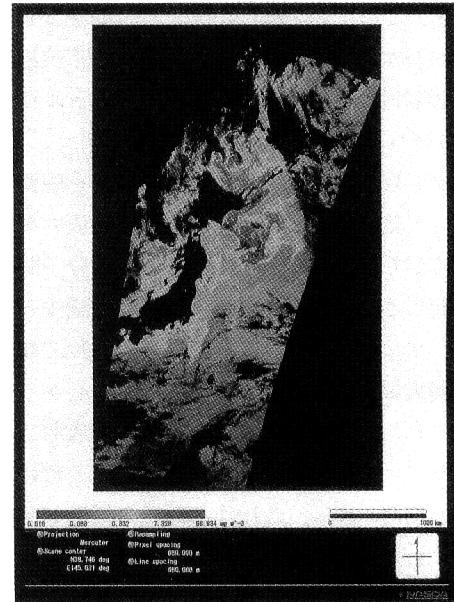


図3 OCTS 可視近赤外観測データから抽出されたクロロフィル濃度分布図。(カラー口絵ページ参照)

散乱波の偏向状態に埋もれてしまうような応用に対して利用される。一般に、可視光線および赤外線の波長帯で受信された放射の偏向状態を観測するもので、多方向観測機能と併せて使えば方向性の情報も得られる。実例として ADEOS に搭載された地表反射光観測装置 (POLDER: polarization and directionality of the earth's reflectances)<sup>10)</sup> がある。

これらの偏向情報は、水や雲の粒子とエアロゾルのサイズならびに散乱特性の推定に利用される。また、雲の光学的厚さと相に関する情報も得られる。地表から後方散乱した放射の偏向状態からは、他の映像センサーで得られた観測データの補正やアルベド、反射率、植生分類などの二方向性反射の研究などにも利用できる。

#### 1.2 マイクロ波センサー

##### 1.2.1 降雨レーダーおよび雲レーダー

降雨レーダーは、センチメートルオーダーの波長でのマイクロ波散乱を利用して、降雨雲の氷粒子や水滴からの後方散乱を検知し、これらの粒子の鉛直プロファイルを得る。1997 年に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星 (TRMM: tropical rainfall measurement mission) に搭載された降雨レーダー (PR: precipitation radar)<sup>11)</sup> は、世界初の人工衛星搭載降雨レーダーとして、熱帯から亜熱帯の降雨観測に成功した。

雲レーダーは、ミリメーターオーダーの非常に短い波長で雲粒や氷粒子からの散乱を検知し、雲水 (氷) 量や雲底高度などの雲の 3 次元構造を推定する。現在、95 GHz 帯のミリ波を用いる雲レーダー (CPR: cloud profiling

radar) の研究が行われている。

### 1.2.2 マルチスペクトル映像放射計（マイクロ波）

マイクロ波のいくつかのチャネルで放射観測するセンサーである。空間分解能は、アンテナのメインビームが地表面を照射する領域が5～数十kmとなり赤外よりも大きくなるが、グローバルな分布を観測する全天候観測に適している。マイクロ波は雲や弱い降雨を透過する特性から全天候観測が可能であり、また地表面の誘電率の違いの検出、土壤中のマイクロ波透過の土壤水分依存性を利用して、植生や土壤の観測に適している。土壤水分は、農業、水文学、気候学をはじめ植物の健康状態を知る指標としても期待されている。また、海洋循環のメカニズムを知る上で塩分濃度の観測の重要性も指摘されている。

ADEOS-IIに搭載される高性能マイクロ波放射計(AMSR: advanced microwave scanning radiometer)<sup>12)</sup>により積算水蒸気量、積算雲水量、降雨量、海上風速、海面水温、海水分布・密接度、土壤水分量などが得られるが、水蒸気については数値天気予報の入力データとして同化手法の研究が行われており、観測センサーのデータとコンピューターが一体となった使われ方が始まろうとしている。

### 1.2.3 映像レーダー

地表のマイクロ波画像を作成するレーダーである。合成開口レーダー(SAR: synthetic aperture radar)は空間分解能10～100mで観測幅100km程度の観測が可能である。観測周波数帯はL(0.390～1.550GHz), C(4.20～5.75GHz), X(5.75～10.90GHz)バンドが主に使われているが、それぞれの波長によって地表面の被覆、特に植生層の透過性、散乱特性が異なることから観測目的が違ってくる。また、森林の植生量(バイオマス)推定には波長が長く透過性が高く森林の幹と地表面での散乱が支配的なLやP(0.225～0.390GHz)バンドが適している。

合成開口レーダーは、一般には後方散乱強度を濃淡画像にして地上の物体、表面粗度による表面散乱や、植生、土壤などの層からの体積散乱の空間分布情報を利用することが主である。また、2つの時間に少し異なる点から観測された2つの画像から干渉処理によって位相シフトを計測し、3次元立体画像を作成することができる。また、2つの観測時間間に発生した火山活動や地震による地殻変動、地下水汲み上げなどによる地盤陥没、氷河の流れによる変位をセンチメートルオーダーで計測できる。

また、ALOSに搭載されるフェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダー(PALSAR: phased array type L-band synthetic aperture radar)のように垂直・水平偏波の送受組み合わせによる多偏波観測や複数の衛星データ

を組み合わせた多周波観測により、土地被覆や表面粗度、土壤水分のより正確な分類が行える。

### 1.2.4 レーダー高度計

レーダーの測距機能を利用し、地表面の地勢プロファイルを衛星軌道に沿って観測する非映像センサーである。通常2～4cmの精度で海面高度を観測する目的で利用されるが、非常に短い電波をパルス送受信することにより、その時間間隔から正確な地表、氷床面からの高さがわかる。

### 1.2.5 海上風散乱計

海上風散乱計は、狭いスペクトル帯域幅をもつマイクロ波により照射された海面からのレーダー後方散乱を観測し、海上風の風向・風速を求めるレーダーである。後方散乱の強度は、海上風による海面の風応力によって発生する海面のさざ波の大きさと、散乱計から送信されたパルス波の伝搬方向とさざ波の向きのなす角度による。

一般に3つ以上の方向から観測し、風向・風速を求める。ADEOSに搭載された散乱計(NSCAT: NASA scatterometer)は、軌道の両側に観測幅をもち、3日間でグローバルな観測域が得られ、実用気象予報の改善や気候モデル研究においても重要な役割を果たした。また、このデータは、船舶の最適航路、海水分布・密接度などのほかに、地表面の状態(熱帯雨林分布、極域雪氷分布、砂漠の監視など)についても新たな応用例が得られた。現在、後継の散乱計SeaWindsが米国のQuikSCATに搭載され運用中であるがADEOS-IIにも搭載され運用が継続される。

## 2. 地球観測センターの展望

### 2.1 グローバル観測ミッション

わが国のグローバルな地球観測(図4)は、ADEOS(1996～97年)によって始まった。その後継機のADEOS-II(2001年～)にはGLIとAMSRがグローバル観測を再開する計画である。また、これ以降15年間を地球変動観測ミッション(GCOM: global change observation mission)の期間として、大気化学ミッションのためのGCOM-A1衛星(2005年～)にTOMSのオゾン層観測機能を改良したオゾンダイナミクス紫外分光計(ODUS: ozone dynamics ultraviolet spectrometer)を搭載する構想である。また、多目的の地球観測衛星GCOM-B1衛星には、GLIの後継センサーであるSGLIとAMSRが搭載され観測を継続する構想である。

### 2.2 高分解能観測ミッション

高分解能観測(図5)では、光学センサーは1987年以来MESSR、OPS、AVNIRと空間分解能の向上とステレオ視による立体画像の作成機能について改良を図ってき

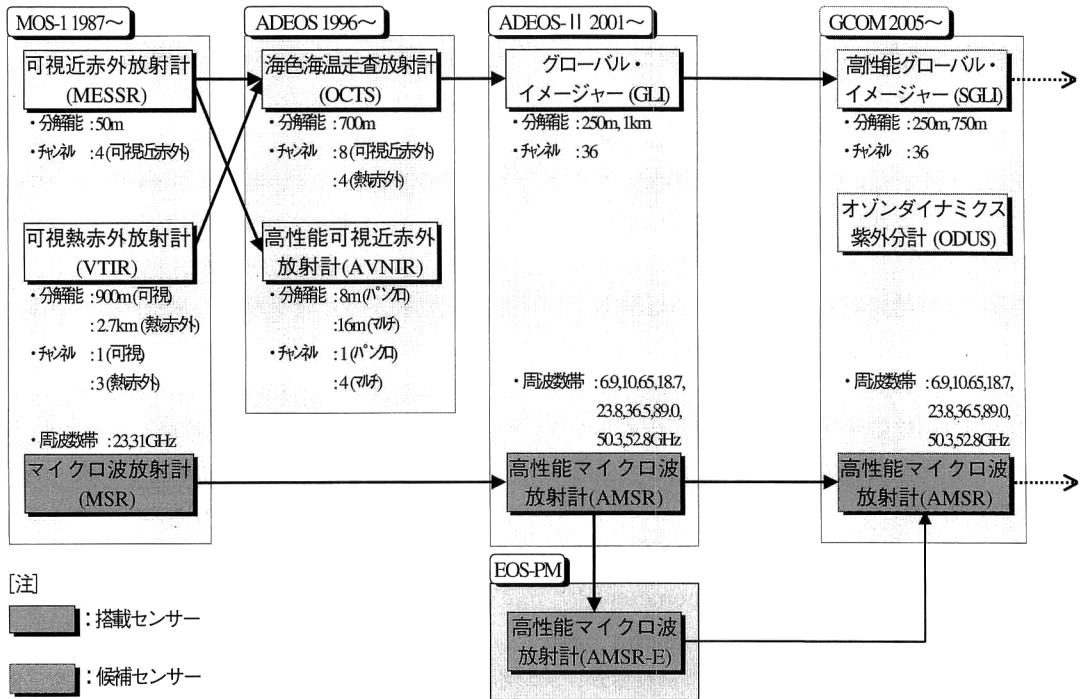


図4 グローバル観測ミッションに対応するセンサーの流れ。

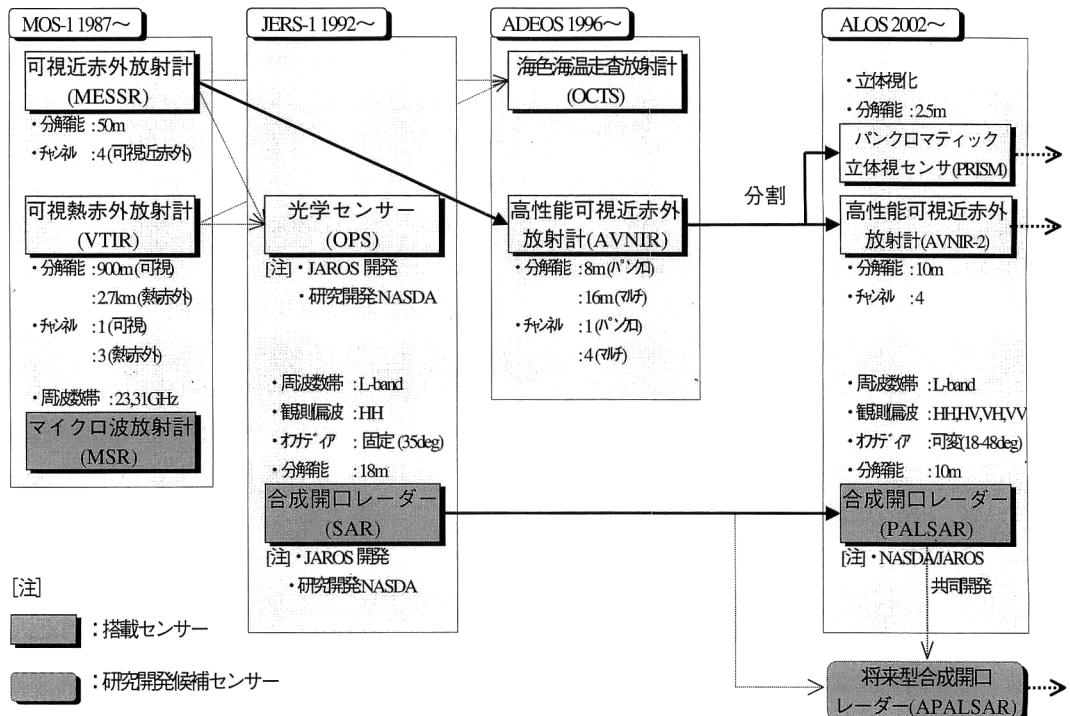


図5 高分解能の観測ミッションに対応するセンサーの流れ。

た。また、マイクロ波センサーでは1992年以降SARの観測を約6年半続け森林マッピングや干渉処理のデータ処理技術を実証してきた。2002年にはこれらの技術をさらに高めたALOSの打ち上げを計画しており、PRISM, AVNIR-2およびPALSARを搭載する計画である。

### 2.3 先端的観測ミッション

先端的観測ミッション（図6）として、宇宙ステーション/日本実験モジュールで超伝導サブミリ波リム放射サウンダー（SMILES: superconducting submillimeter-wave limb-emission sounder）の搭載観測実験が計画されてい

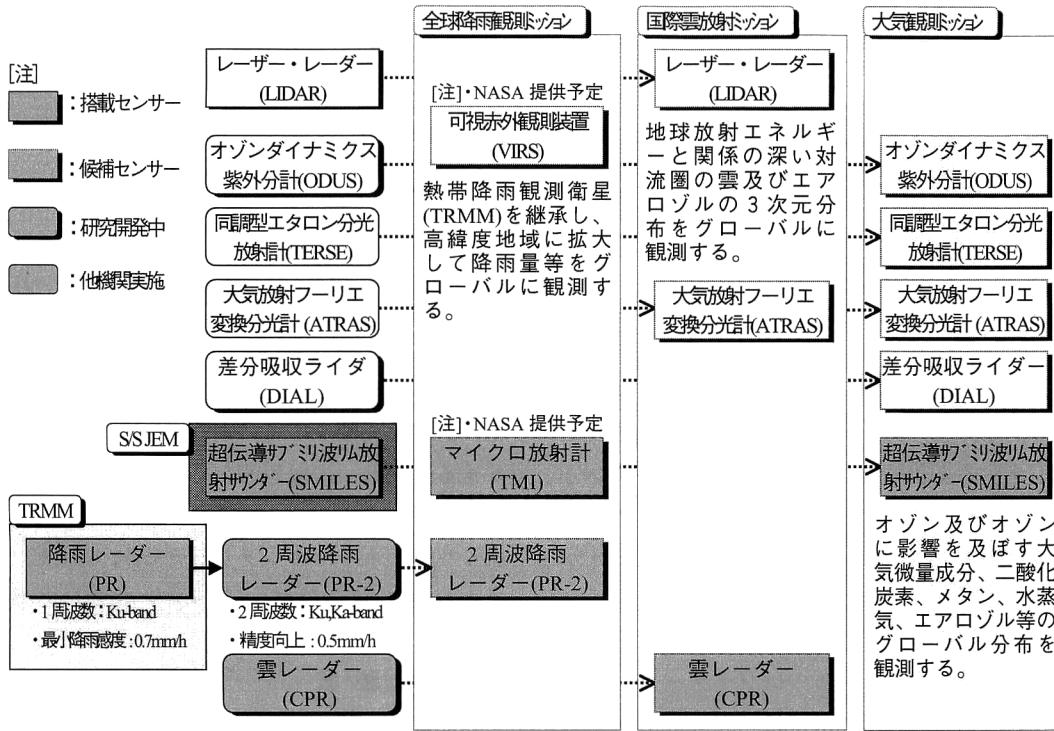


図6 先端的な観測ミッションに対応するセンサーの流れ。

る。この他に、全球降雨観測ミッション、国際雲放射ミッション、大気観測ミッションを目標としてレーザー・レーダー (LIDAR)、オゾンダイナミクス紫外分光計 (ODUS)、同調型エタロン分光放射計 (TERSE: tunable etalon remote sounding of the earth)、大気放射フーリエ変換分光計 (ATRAS: atmospheric radiation spectrometer)、差分吸収ライダー (DIAL: differential absorption LIDAR)、2周波降雨レーダー (DPR: dual-frequency precipitation radar)、雲レーダー (CPR: cloud profiling radar) の研究開発が行われている。

## 文 献

- Committee on Earth Observation Satellites (CEOS): "Capabilities of Earth observation," *Towards an Integrated Global Observing Strategy* (1997 CEOS Yearbook, 1997) pp. 17-31.
- 五十嵐保: "宇宙開発事業団における人工衛星からの地球観測プロジェクト", 計測と制御, 35 (1996) 659-664.
- A. J. Krueger and G. Jaross: "TOMS/ADEOS instrument characterization," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 37 (1999) 1543-1549.
- H. Shimoda: "ADEOS overview," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 37 (1999) 1465-1471.
- H. Kobayashi, A. Shimota, C. Yoshigahara, I. Yoshida, Y. Uehara and K. Kondo: "Satellite-borne high-resolution

FTIR for lower atmosphere sounding and its evaluation," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 37 (1999) 1496-1507.

- Y. Sasano, M. Suzuki, T. Yokota and H. Kanzawa: "ILAS for stratospheric ozone layer monitoring: Outline of data processing (Version 3.00 and 3.10) and validation experiments," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 37 (1999) 1508-1516.
- 大沢右二: "PRISM, AVNIR-2の機能・性能", 写真測量とリモートセンシング, 38 (1999) 27-30.
- T. Y. Nakajima, T. Nakajima, M. Nakajima, H. Fukushima, M. Kuji, A. Uchiyama and M. Kishino: "Optimization of the advanced earth observing satellite II global imager channels by use of radiative transfer calculations," Appl. Opt., 37 (1998) 3149-3163.
- M. Shimada, H. Oaku, Y. Mitomi, H. Murakami and H. Kawamura: "Calibration of the ocean color and temperature scanner," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 37 (1999) 1484-1495.
- O. Hagolle, P. Goloub, P.-Y. Deschamps, H. Cosnefroy, X. Briottet, T. Bailleul, J.-M. Nicolas, F. Parol, B. Lafrance and M. Herman: "Results of POLDER in-flight calibration," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 37 (1999) 1550-1566.
- 古津年章, 黒岩博司: "TRMM 搭載降雨レーダー", 日本リモートセンシング学会誌, 18 (1998) 28-39.
- 柴田 彰: "多波長マイクロ波放射計による大気・海洋・陸域の観測", 日本リモートセンシング学会誌, 12 (1992) 59-64.

(2000年6月10日受理)