リモートセンシングによる地球環境観測 人工衛星による地球環境観測の現状と将来

特集解説

キーワード

リモートセンシング, 気象衛星, リモートセンシング衛星,
地球環境観測衛星

下 田 陽 久

東海大学 情報技術センター

1. 始めに

1996年8月に宇宙開発事業団により ADEOS(Advanced Earth Observing Satellite)が打ち上げられた。この衛星はいわゆるグローバルチェンジ(地球環境変化)を対象とした初めての本格的な地球環境観測衛星であり、この衛星を皮切りに新しい衛星リモートセンシングの歴史が始まった。ADEOS は残念ながら太陽電池パドルの故障により、1997年6月機能を停止したが、約9ヶ月にわたるデータが蓄積されており、多大な成果が期待されている。ここでは現在運用中及び将来の地球環境観測衛星計画について解説する。

2. 衛星リモートセンシングの歴史

衛星を用いた地球観測の歴史は比較的短く、米国により Landsat-1号が打ち上げられた1972年から始まった。これ以前にも「ひまわり」(GMS:Geostationary Meteorological Satellite)を始めとする気象観測衛星があり、これらの衛星も地球を観測していたわけだが、今まではこれらの気象観測衛星は地球観測衛星に含めてこなかった。従って、約25年余りの歴史があるわけである。この間に、Landsatを始めとして、わが国の JERS-1(Earth Resources Satellite-1)など計20基以上の地球観測衛星が打ち上げられてきた。これらの衛星は主として実利用(土地利用、資源探査、農林業、漁業、災害等)を対象としたセンサを搭載していた。しかし、衛星リモートセンシングの実用化は当初考えられていたほどは進展していない。

これに対して近年になり地球環境が問題になるようになり、事態は一変した。地球環境問題が多くの人々の目にあからさまになってきたのは比較的最近の事であり、高々ここ10年程である。この問題に多くの研究者が立ち向かおうとした時に明らかになったのは、総合的な地球科学が未発達であったということであった。従来からの地球科学は、

地質学、気象学、大気化学、海洋物理学等、個々の学問分野として発展して来ており、地球上に起こる諸現象を総合的にとらえるという視点が不足していた。特に NASA(米国航空宇宙局:National Aeronautics and Space Administration)を中心にして進められた検討の結果、地球システム科学(Earth System Science)と呼ばれる総合的な地球科学の推進が必要であるという結論となった。

そのためには基礎的な情報が決定的に不足しており、衛星を用いた地球環境観測が必要となった。ここで一躍脚光を浴びたのが気象衛星である。気象衛星には大きく分けて2種類ある。一方はひまわりのような静止気象衛星であり、もう一方は NOAA のような極軌道衛星である。これらの衛星は気象予測に役立てることを目的に打ち上げられており、その分野では実用化されているといえる。このシリーズの最初の衛星は1960年に打ち上げられた TIROS-1であり、リモートセンシング衛星に比べて遥かに長い歴史を持つ。

地球環境観測に関連して最初に注目されたのは極軌道衛星であり、特に NOAA に搭載された AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)が利用された。このセンサは本来海面温度の計測と雲の観測を目的としているが、5バンドある波長帯域の内、可視と近赤外のバンドを用いることにより、グローバルな植生の変化を捉えることに成功した。最近では更に AVHRR から得られた海面温度や静止気象衛星から得られた雲の分布などが地球環境現象の解明に用いられている。

一方、本格的な地球環境現象の解明のためには、従来の気象衛星では不十分である。このため、地球環境を観測する衛星計画が米国(NASA)、日本(宇宙開発事業団)及び欧州(欧州宇宙機関:ESA:European Space Agency)で立案された。これらの計画は、地球環境の変化のタイムスケールが長いことを勘案して、何れもシリーズ化された計画であった。

これら地球環境観測衛星シリーズの内、最初に打ち上げられたのは日本の ADEOS である。2番目は米国の EOS(Earth Observing System)であり、1999年春に1号機(EOS-AM1)が打ち上げられる。欧州の計画は遅れ気味であるが、現在2000年の打ち上げが予定されている

Global Environmental Observation with Remote Sensing.
Current Status and future of Satellite Global Monitoring.
By Haruhisa Shimoda (Tokai University Research & Information Center).

(ENVISAT)。

3. ローカル観測とグローバル観測

歴史で述べたように、初期のリモートセンシング衛星はそのほとんどが土地利用、資源探査、農林業、漁業、防災等の分野での実利用を目指していた。そのため比較的高い地上解像力（陸域対象では 80m から 10m 程度）を持ったセンサが中心となり、逆に観測幅は比較的狭く（60km から 180km 程度）になっている。これら地球観測を対象とする衛星は大体 1 日に地球を約 14 周する。従ってその回帰周期（地球上の同じ場所を観測するのに要する時間）は 16 日から 44 日とかなり長い。こういった意味でこれらの衛星は地球上のローカルな地域を対象としていると言って良い。

一方、グローバルチェンジを対象とする場合、地球全体の情報を比較的短期間で収集する必要がある。逆に地球規模の現象を対象とするところから地上解像力はそれほど高くないで良い。その意味で、これら地球環境観測を目的とする衛星はリージョナル（地域的）或いはグローバルな観測が中心となる。

勿論、実利用を目的とする場合でも、漁業等海域が対象の場合は余り高い解像力は必要としないし、地球環境現象の解明を目的とする場合でも高い地上解像力を必要とする場合もある。従って、この分け方は絶対とは言えず、互いに補い合う所もあるが、ここでは地球環境観測を主目的とする衛星に限って話を進める。

4. 現在運用中のグローバル観測衛星

4. 1 気象衛星

先に述べたように、気象衛星は静止気象衛星と極軌道衛星に分かれる。静止気象衛星は、赤道上約 36,000km のいわゆる静止軌道に上げられた衛星であり、地上からはほぼ静止して見える。地球全体を監視するために、4 カ国（日本、米国、欧州、ロシア）が 5 カ所に打ち上げることになっているが、現在ロシアは打ち上げておらず、インドがそこに自国用の衛星を上げている。日本の衛星は GMS、米国の衛星は GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite) (E 及び W)、欧州の衛星は METEOSAT と呼ばれている。これらの衛星の主要センサは可視及び赤外のセンサであり、主要な観測対象は雲である。静止衛星の最大の利点として観測頻度が高いことが挙げられ、GMS の場合、通常は 1 時間に 1 回、台風などの緊急時には 30 分に 1 回の観測が行われている。

現在打ち上げられている極軌道気象衛星は 2 種類であり、最もよく用いられているのは米国海洋大気局 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) が上げている NOAA 衛星シリーズである。このシリーズは長い歴史を有しており、名前も何度か変わっているが、最近では NOAA の名前が用いられている。これは高度地上

800km 程度の極軌道衛星であり、午前中に地球を観測する偶数番号の衛星と午後地球を観測する奇数番号の衛星の 2 機が常時運用されている。

搭載されているセンサは AVHRR と TOVS(TIROS Operational Vertical Sounder)及び SBUV/2(Solar Backscatter Ultra-Violet Experiment/2)、ERBE(Earth Radiation Budget Experiment)の 4 種類である。AVHRR は可視から赤外に 5 つのバンドを持つセンサで、地上解像力は直下で約 1.1km、観測幅は約 2800km である。この広い観測幅のため、1 機で昼間、夜間、それぞれ 1 回ずつ地球全域を観測することが出来る。主要観測目的は海面温度と極域の雲の観測である。TOVS は実際は HIRS/2(High Resolution Infrared Radiation Sounder/2)、MSU(Microwave Sounding Unit)、SSU(Stratospheric Sounding Unit)の 3 種類のセンサの総称である。HIRS/2 は低解像力の 20 チャンネルの赤外サウンダ、MSU はマイクロ波放射計、SSU は赤外の limb サウンダであり、何れも気温、水蒸気の鉛直分布を計測することを目的としている。SBUV/2 は紫外域の放射計であり、オゾン観測を目的としている。又、ERB は広帯域(0.2 ~ 50 μm)の放射計であり、地球放射収支を観測する。

極軌道気象衛星としては NOAA 以外にロシアが METEOR シリーズを打ち上げている。センサは NOAA と類似のものを搭載しているが、データの公表が不十分のため余り利用されていない。

又、米国空軍が NOAA と類似の衛星 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)を矢張り常時 2 機運用している。DMSP には AVHRR 類似のセンサ OLS(Operational Linescan System)の他に、マイクロ波放射計 SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)が搭載されており、水蒸気量の観測、海上風速の観測等によく利用されている。

4. 2 地球環境観測衛星

現在運用中の衛星で、特定目的の地球環境観測を対象とした衛星としては、UARS(Upper Atmospheric Research Satellite)、TOPEX/Poseidon、SeaStar、TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)が挙げられる。UARS は、1991 年 NASA によって打ち上げられた衛星で成層圏の科学を対象としている。10 基の搭載センサの内、CLAES(Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer)、ISAMS(Improved Stratospheric and Mesospheric Sounder)、MLS(Microwave Limb Sounder)、HALOE (Halogen Occultation Experiment)の 4 つのセンサは大気化学を観測対象とした衛星であり、オゾンホール成因分析等に威力を発揮している。HRDI(High Resolution Doppler Imager)、WINDII(Wind Imaging Interferometer)の 2 つのセンサは高層の風の測定、SOLSTICE(Solar-Stellar Irradiance Comparison Experiment)、SUSIM(Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor)、PEM(Particle Environment Monitor)、ACRIM II(Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor)の 4 つのセンサは太陽から地球に入ってくるエネルギーを紫外から赤外線及び粒子に関して測定している。

TOPEX/Poseidon は、マイクロ波高度計を中心とした衛星であり、海面高度の測定を目的としている。TOPEX/Poseidon には、2 種類のマイクロ波高度計の他、大気補正のためのマイクロ波放射計、軌道確定のための GPS(Global Positioning System)およびレーザ追跡用のコーナリフレクタ等が搭載されている。現在、海面高度測定精度は 2 ~ 3cm に達しており、ジオイドの観測や、潮流の観測に利用されている。

SeaStar は海面の色を対象とした衛星で 1997 年 8 月に打ち上げられた。搭載センサは SeaWiFS(Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor)1 種類である。SeaWiFS は OCTS(Ocean Color and Temperature Scanner)の海面色チャンネルとよく似た 8 チャンネルの可視放射計で、クロロフィル量の観測を目的とする。

TRMM は日米共同で 1997 年 11 月に打ち上げられた衛星であり、名前通り熱帯域の降雨観測を目的としている。TRMM 搭載センサは計 5 基有るがこの内 PR(Precipitation Radar)、TMI(TRMM Microwave Imager)、VIRS(Visible Infrared Scanner)が降雨観測用のセンサである。PR は降雨レーダであり、マイクロ波の後方散乱から降雨の 3 次元分布を算出する。TMI は SSM/I を簡略化したマイクロ波放射計、VIRS は AVHRR を簡略化した赤外放射計で、それぞれ単独に或いは組み合わせて降雨量を算出する。

これら単一ミッションの地球観測衛星に対して総合的な地球環境観測を目的とする衛星がこれから数多く打ち上げられる。その最初になったのは日本が 1996 年 8 月に打ち上げた ADEOS である。ADEOS 搭載センサは計 8 基ありこの内 AVNIR(Advanced Visible and Near Infrared Radiometer)だけはローカルな観測を目的とするセンサである。

OCTS は海中のクロロフィル量と海面温度を観測する可視・赤外放射計である。IMG(Interferometric Monitor for Greenhouse Gases)は高分解能の Michelson-Fourier 赤外分光計であり、3.3 ~ 15 μm の範囲を 0.1cm⁻¹の分解能で観測する。観測対象は、気温・水蒸気の鉛直分布及び CO₂、CH₄、O₃等の温室効果気体の観測である。ILAS(Improved Limb Atmospheric Sounder)は太陽掩蔽法を用いる Limb サウンダであり、オゾンの鉛直分布観測が主目的である。NSCAT(NASA Scatterometer)はマイクロ波の散乱計であり、海上風ベクトルを観測する。TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer)は紫外の放射計で、NIMBUS7 の TOMS から 4 基目に当たり、オゾン全量の観測を行う。POLDER(Polarization and Directionality of Earth's Reflectance)は、偏光と BRDF(双方向反射率分布関数:Bi-directional Reflectance Distribution Function)を観測する可視放射計で、エアロゾル、雲等の観測が期待されている。RIS(Retroreflector in Space)はコーナリフレクタであり、地上のレーザを用いて大気観測を行う。

ADEOS に搭載されたセンサにより、El-Nino や 97 年春の北極オゾンの減少などが観測されたほか、エアロゾルの全球分布、植物プランクトンの全球分布など多くの成果が

得られており、研究の進行につれて更に研究成果が増すものと期待されている。

5. 将来計画

5.1 気象衛星

先ず、NOAA の将来計画であるが、軍の計画(DMSP)と NOAA を統合する方針が打ち出され、2007 年頃から NPOESS(National Polar Orbiting Environment Satellite System)として常時 2 基が運用される予定である。搭載センサは NOAA 及び DMSP から大きな変更が計画されている。AVHRR は 15 ~ 30 チャンネル程度になり、現在計画されている可視赤外面像センサから得られる物理量の大半をカバーする。マイクロ波放射計は SSM/I、SSM/T 等を統合し、やはり現在考えられているマイクロ波放射計(イメージャ)の大半の物理量をカバーする。更にサウウンダとして、23 ~ 183GHz の間に 20 チャンネルを有する AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit)の搭載が考えられている。又、HIRS/2 についても、より高スペクトル分解能を持つセンサへの変更が考慮されている。

もう一つ大きな計画は EUMETSAT(欧州気象衛星開発協会:European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)が計画している METOP である。METOP には現在、AVHRR/3、MHS(Microwave Humidity Sounder)、AMSU-A、HIRS/4、IASI(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)、ASCAT(Advanced Scatterometer)、GOME(Global Ozone Monitoring Experiment)、GRAS(Global Positioning System Receiver for Atmospheric Sounding)の計 8 種類のセンサが搭載される予定である。IASI は走査型の Michelson-Fourier 赤外分光計であり、1cm⁻¹程度の波長分解能を持つ。

何れにしても、これら将来の極軌道気象衛星の狙いは高精度の気温、水蒸気の測定にある。気温では高度分解能約 1km、測定精度約 1K、水蒸気では高度分解能約 2km、測定精度約 10%が当面の目標となっている。

5.2 地球環境観測衛星

ADEOS に続いて、ADEOS II が 2000 年に打ち上げられる。ADEOS II では、AVNIR と IMG、RIS 及び TOMS が搭載されない。OCTS はその発展系である GLI(Global Imager)に変わる。GLI は海面色用に 16 チャンネル、海面温度に 4 チャンネル、植生用に 6 チャンネル、雲に 6 チャンネル等計 36 チャンネルを持つ可視・近赤外・赤外のイメージングスペクトルメータである。又、植生用の 6 チャンネルは 250m の地上解像力を持つ。更に ADEOS には無かったマイクロ波放射計として AMSR(Advanced Microwave Scanning Radiometer)が搭載される。その他は、NSCAT が回転パラボラアンテナ式の SeaWinds に変わり、ILAS は機能が強化された ILAS II に変わる。POLDER は全く同じものが搭載される。

ADEOS シリーズに続くのは米国、NASA が計画している EOS シリーズである。最初に打ち上げられるのは 1999 年の EOS-AM1 であり、5 基のセンサが搭載される。その中心になるのは GLI と同様 36 チャンネルの MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer)である。日本からは通産省開発の ASTER(Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflectance Spectrometer)が搭載される。ASTER は可視・近赤外 3 チャンネル、短波長赤外 6 チャンネル、赤外 5 チャンネルの高解像度センサである。又、可視では、衛星進行方向のステレオ視能力を持つ。この他には BRDF 測定用の MISR、地球放射収支測定用の CERES、CO 測定用の MOPITT が搭載される。

EOS ではこの後、EOS-PM1、EOS-CHEM 等が計画されており、PM1 では大気観測用センサが、CHEM では対流圏の大気化学用センサが搭載される。EOS シリーズは元々各 3 機づつで計 15 年の継続観測を計画していたが、予算削減の影響から今後の計画ははっきりしない。

これら日本の ADEOS シリーズ、米国の EOS シリーズに対応するのが ESA の ENVISAT である。ENVISAT の搭載センサの内 ASAR は、ERS 搭載の AMI SAR の改良型であり、高解像度センサであるが、他のセンサは全てグローバルセンサである。観測対象は海洋(AATSR:Advanced ATSR,RA-2:Radar Altimeter)、大気(SCIAMACHY:Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography, MIPAS:Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding, MWR:Microwave Radiometer, GOMOS:Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)、植生(MERIS:Medium-Resolution Imaging Spectrometer)、放射収支(ScaRaB:Scanner for the Radiation Budget)とほぼ地球環境全体に及んでいる。ただし、ENVISAT は現在の所 1 機で終了し、その後はそれぞれの観測対象毎に比較的小さい衛星を上げる方針のようである。

以上現時点で決定している将来計画について述べたが、これらは何れも 2005 年程度までの運用を考えており、NPOESS を除くと、2005 年以降の計画はない。現在日本では ADEOS II の後継機として ADEOS III の研究が進められているが、未だ確定はしていない。米国では現在 EOS の後継機に対する要求の調査が始まったところである。

5. 3 小型衛星

前項で述べた、大型のマルチミッション衛星に対して、最近小型衛星を用いた単ミッション地球観測衛星計画も進んでいる。小型衛星は、安価であり、開発期間が短いことから、機動性に富む。米国(NASA)では、モニタリングを中心としたマルチミッション衛星に対して、プロセススタディを対象とするミッションを小型衛星で打ち上げる方針である。その計画は ESSP(Earth System Science Pathfinder)と呼ばれ、第 1 号が 2000 年に打ち上げられる予定である。この衛星には、樹木の高さを測定する Lidar が搭載される。

我が国でもこれに似た計画として、MDS(Mission Demonstration Satellite)計画がある。MDS は地球観測専用で

はないが、第 2 号にエアロゾルを観測するミュー散乱 Lidar が搭載される予定である(2000-2002 年打ち上げ予定)。又、衛星ではないが、宇宙ステーションの日本実験モジュールに地球観測センサを搭載する計画も進んでおり、最初にサブミリ波の地球周縁サウンダとして SMILES(Sub-Milimeter Limb Emission Sounder)が 2003 年に打ち上げられる予定である。

6. リモートセンシングデータの解析

地球環境問題を対象とするようになって、リモートセンシングデータの解析は大きく変化した。ここでは、単なる画像解析ではなく、データから物理量を抽出する必要に迫られた。対象とされる物理量としては以下のようなものがある。

海面温度、海上風速・風向、クロロフィル量・気温・水蒸気の鉛直分布、大気微量成分の水平・鉛直分布、エアロゾル量・光学的厚さ、雲量・光学的厚さ・鉛直分布、降雨量、アルベド、放射収支、バイオマス

ここでは紙数の関係から、一つ一つのアルゴリズムには立ち入らないが、これらの物理量抽出問題に共通する問題について簡単に述べておく。リモートセンシングは基本的に電磁波を用いて地球の情報を得る手段であるため、これらの物理量を直接的に計測するものではない。従って、ある物理量を x とすれば、観測する電磁波 $I(\lambda)$ (λ は波長)とは対象と電磁波との相互作用を表す関数 f を媒介して

$$I(\lambda) = f(x) + i$$

という関係がある。ここで i は雑音である。従って、 x を求める過程は逆問題となる。更に、 f が明確に解らない、或いは ill-posed な逆問題となっている等の場合が多く、リモートセンシングデータから十分な精度でこれらの物理量を計測可能になるには未だ多くの研究が必要である。

7. 終わりに

以上、衛星リモートセンシングの現状と将来について簡単に概括した。衛星リモートセンシングが始まって四半世紀が経とうとしているが、一部の気象部門を除き、商業的にも科学的にも実用化されたとは言えないのが現状である。しかし、センサ技術及び解析技術の進歩により、ここ数年の内に多くの分野での実用化が期待される。

(平成 10 年 9 月 1 日受付)

下田 陽久

1944年10月10日生。67年3月東京大学工学部工業化学科卒業。72年同大学院博士課程了。同年東海大学講師。画像処理、リモートセンシングの研究に従事。現在、同大学工学部、及び情報技術センター教授。94年より宇宙開発事業団兼任。工博。著書「画像解析ハンドブック」等。