

気象と気候研究で利用される衛星搭載 可視赤外イメージャとマイクロ波センサ*

中 島 孝**・沖 理 子***

1. はじめに

世界初の人工衛星が打上げられて50年が経た現在、衛星による地球観測は日々の天気予報や気候研究に欠かすことのできない重要な手段となっている。衛星観測では、実に様々なタイプのセンサが用いられる。可視光を赤、緑、青の3波長で観測し、写真のような合成画像が作成できる可視イメージャは、画像を新聞等で目にする機会も多く、一般にも馴染み深いセンサであろう。しかし、観測に利用する波長は紫外からマイクロ波領域まで幅広く、可視光はこれら観測波長のごく一部分である。また、観測対象や目的によって、空間分解能、波長分解能、観測幅、衛星軌道に様々な種類があり、さらに受動型と能動型の違いもある。本稿ではこれら多くのセンサのうち、日本で開発及び打上げ実績の多い可視赤外イメージャとマイクロ波センサを例に、衛星観測の特徴と主なセンサの紹介を行う。代表的な可視赤外イメージャとマイクロ波センサについて第1表に、文中の略語を略語一覧にまとめたので参照されたい。

2. 衛星観測の特徴

衛星観測の最大の利点は「広域性」である。例えば気象観測や気候研究に用いられる可視赤外イメージャを用いれば、数百mから1kmの空間解像度で全球規模の地球パラメータが推定できる。一方で衛星観測

第1表 代表的な可視赤外イメージャ・マイクロ波センサ。

波長帯	方式	空間分解能	センサ名称
可視～近赤外	受動	高空間分解能	MESSR, TM (ETM+), AVNIR, HRV (IR), ASTER
		中程度空間分解能	AVHRR, VTIR, VIRS, SeaWiFS, OCTS, GLI, SGLI, MODIS, VIIRS, MISR, POLDER, MERIS, CAL, MSI
		静止軌道衛星 ^{注1)}	GMS, MTSAT, GOES, METEOSAT, MSG, INSAT, FY
	能動 ^{注2)}	GLAS, LIDAR	
短波長赤外～熱赤外	受動	高空間分解能	TM (ETM+), HRV (IR)
		中程度空間分解能	AVHRR, VTIR, VIRS, OCTS, GLI, SGLI, MODIS, VIIRS, CAL, MSI
		静止軌道衛星 ^{注1)}	GMS, MTSAT, GOES, METEOSAT, MSG, INSAT, FY
マイクロ波 ^{注2)}	受動	SSM/I, MSR, AMSU, TMI, AMSR, HSB	
	能動	NSCAT, SeaWinds, PR, CPR, SAR, PALSAR	

注1) 静止軌道衛星は衛星名称 注2) 能動型及びマイクロ波は空間及び波長分解能の区分なし

には時間分解能の荒さや、開発運用費用を多く要するデメリットも存在する。しかしながら、ここ数十年間次々と衛星が打上げられ、今後も多くの計画がある背景には、観測の広域性に加え、センサの技術革新とデータ利用技術の発達が挙げられる。時間分解能については、複数衛星によるコンステレーション観測や、時空間的に分散した観測値とモデルを整合させる、いわゆるデータ同化の手法により克服されつつある。

衛星軌道には静止軌道 (GEO 衛星, 高度約3万6千km) と低軌道 (LEO 衛星, 同350~1500km) がある。両軌道によって時空間スケールが大まかに決まる。例えば天気予報に資する気象観測で多く用いられる GEO は、時間分解能が30分毎あるいは1時間毎と高い代わりに、観測範囲が地球と正対する地球ディスクに限定されるため、全球観測には数機を必要とする。一方、気象と気候研究に多く用いられる LEO は、全球観測 (極軌道の場合) に数日以上を要するが、単一センサでの観測が可能である。

3. 可視赤外イメージャ

可視赤外センサには、可視赤外イメージャ、能動型

* VIS-IR imagers and microwave sensors utilized for the weather and climate studies.

** Takashi Y. NAKAJIMA, 東海大学情報デザイン工学部情報システム学科, nkjm@yoyogi.ycc.u-tokai.ac.jp

*** Riko OKI, 宇宙航空研究開発機構, oki.riko@jaxa.jp

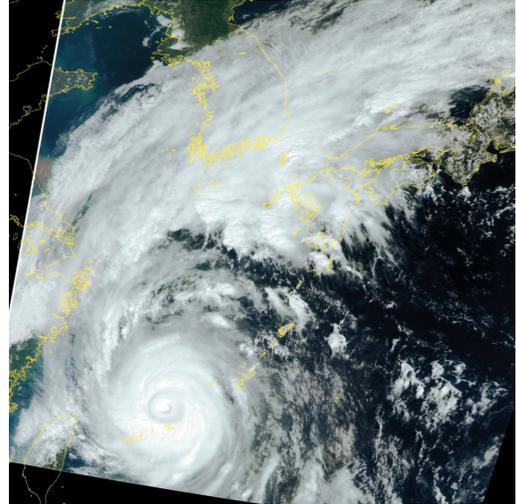
© 2007 日本気象学会

レーダー、受動型高波長分解能センサ等がある^{1,2等}。受動型のひとつである LEO 衛星搭載の中程度空間・波長分解能イメージャは、広域を短時間で観測できることから、気象気候の研究に多く用いられるセンサである。このセンサでは、空間分解能を中程度 (0.25~1 km) に抑える代わりに広い観測幅 (1000~2700 km) を持たせ、数日で全球を網羅できるような設計となっている。また、広い波長範囲での分光観測を行うことができるため、地表面から大気までの地球物理情報の推定に大変有利である。

3.1 LEO 搭載中程度空間・波長分解能イメージャ
代表的なセンサとして、空間分解能1.1 km、観測幅2700 km の NOAA 衛星 AVHRR シリーズが、TIROS-N (1978年打上げ) から NOAA18号まで30年近い歴史を誇っている。AVHRR の基本仕様は可視近赤外 2 チャンネル (0.6 μm , 0.8 μm)、短波長赤外 1 チャンネル (3.7 μm)、そしてスプリットウィンドウ (11 μm , 12 μm) の 5 チャンネルである。NOAA15号 (1998年) からは1.6 μm チャンネルが追加された。AVHRR からは全球の海面水温^{3,4)}、雲特性^{5,6)}、エアロゾル特性^{7,8)}の全球分布の観測で大きな成果が上げられている。日本には、NASDA (現 JAXA) が開発した MOS1 衛星 VTIR (可視から熱赤外に 4 チャンネル, 1987年打上げ) や、ADEOS 衛星 OCTS (12チャンネル, 1996年) がある。ADEOS-II 衛星搭載 GLI (2002年) からは、可視よりも短波長の近紫外 (0.38 μm) から熱赤外 (12 μm) の波長範囲に36のチャンネルを有し、1 km もしくは250 m の空間分解能、1600 km の観測幅という仕様になった (第1図)。GLI からは海面温度、可降水量、植生、植物プランクトン、雪氷、雲エアロゾル等、気候変動モニタリングやプロセス研究に資する地球パラメータが推定され、その結果はモデルの初期値や検証に用いられている。GLI に類似するセンサとしては NASA の Terra (1999年打上げ) および Aqua (2002年) 衛星 MODIS がある。なお、GLI は海洋観測のための可視チャンネルを充実させているのに対し MODIS は熱赤外に多くのチャンネルを持ち、大気観測に重点化しているという違いがある。

3.2 GEO 衛星搭載イメージャ

気象観測では GEO 衛星イメージャが有用である。GMS (日本, 1977年~2005年の運用)、さらに後継型の MTSAT (2005年~現在) は、「ひまわり」シリーズとして天気予報でお馴染みのものである。世界では



第1図 GLI センサが観測した台風14号 (2003年9月11日) (画像: JAXA 提供)。

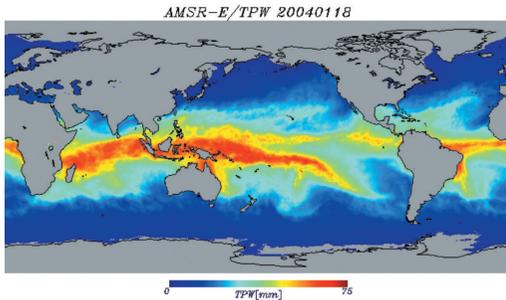
GOES (米国, 1975年~現在), METEOSAT (欧州, 1977年~現在) と MSG (2002年~現在), INSAT (インド, 1982年~現在), FY2 (中国, 1997年~現在) 等がある。センサの基本仕様は可視、熱赤外水蒸気吸収、熱赤外スプリットウィンドウである。これらのチャンネルを用いて、雲分布や雲頂温度、水蒸気分布を高時間分解能で観測することができる。

4. マイクロ波センサ

4.1 マイクロ波センサの種類とその利用形態

マイクロ波センサには、観測原理 (能動型か受動型か等) や方式、あるいは観測対象の違いによって、マイクロ波放射計、マイクロ波サウンダ、マイクロ波散乱計、マイクロ波高度計、合成開口レーダー、降雨レーダー等がある。気象気候研究によく使われるのは、マイクロ波放射計、サウンダ、散乱計、降雨レーダーの観測情報である。このうち、マイクロ波放射計の観測は1970年代前半に米国で始まった。1980年代以降、米国国防省気象衛星 (DMSP) シリーズの SSM/I で高精度観測が実現されるようになり、現在に至っている。SSM/I の高精度観測については伊東⁹⁾ に詳しい。日本でも ADEOS-II 衛星 AMSR、米国 Aqua 衛星 AMSR-E (第2図に参考画像) を開発、運用し、機器開発において最先端に肩を並べつつある。

広域のデータを必要とする数値天気予報においてマ



第2図 AMSR-Eから推定された可降水量。
2004年1月12日から18日までの7日間平均値 (画像: JAXA 提供)。

マイクロ波センサデータの利用が活発である。例えばマイクロ波サウンダは赤外サウンダと並んで温度や水蒸気場データとして数値天気予報システムでは欠かせないデータ源である。またマイクロ波放射計から得られた可降水量もデータ同化に使われている。同じく放射計から推定される海面水温、土壌水分、積雪等についても、数値予報と気候モデルの境界値や、それらの検証のための気候値として利用される。

4.2 マイクロ波センサ開発の動向

1990年代までは、考える現実的な観測を技術的に実現するべく機器の開発が行われる時代であったが、現在はそれら観測の高度化、すなわち、より高い観測精度や空間分解能の達成、新たな周波数の利用が開発の動向である。この背景として、物理量推定の際の多周波情報利用の有効性が明らかになってきたことがある。1997年に打上げられ現在も運用中の熱帯降雨観測衛星 (TRMM) は、観測対象を降水に絞り、降雨レーダー、マイクロ波放射計、可視赤外イメージャを同時搭載した。降雨レーダーの観測からは降水の鉛直情報の取得が可能であり、長期データの蓄積とも相まって、全球の降水システムの気候学的特徴を記述する、降水システム気候学ともいえる研究分野が拓かれた。これと平行し、降雨レーダーとマイクロ波放射計の同時観測情報は、降水システムを多角的に捉えることとなり、それまでのマイクロ波放射計や可視赤外イメージャ単独利用の降水推定手法から、多周波情報利用の手法の時代を切り開き、降水推定精度の改善に大きく寄与した。TRMMの成功から、この観測を高度化し、2周波レーダーと、より高周波のチャンネルを加えたマイクロ波放射計により、全球の固相をも含む降水の高精度観測を目的とした全球降水観測 (GPM) 計画も既に2013年頃の実現を目標に研究開発

段階にある。これまで陸上域でのマイクロ放射計による降水強度推定やサウンダによる気温の鉛直分布の精度は海上に比較して十分ではなかったが、近年の陸上データのニーズに牽引され、より高い周波数帯を利用した波放射計・サウンダが増えている。

気象予報現業等でのマイクロ波センサ全体の利用が有効なことから、一層の観測頻度の増加が望まれており、世界的にみて衛星搭載マイクロ波センサの計画は増えることはあっても減ることはないようにみえる。GPMはTRMMのような単独衛星の観測のみならず、他衛星に搭載されたマイクロ波放射計等のデータを最大限活用し、高頻度での降水観測を行う計画である。観測頻度向上のため、静止衛星軌道からのマイクロ波センサによる常時観測等も技術検討課題として挙げられている。

ここ数年、気候研究におけるマイクロ波センサの利用の機運が高まっている。その背景として、10年スケールでのデータ蓄積や計算機環境の発達で大量の衛星データを扱えるようになったことが挙げられる。土壌水分量等、現時点では長期データがない物理量も今後データが蓄積されていく可能性がある。

6. 衛星観測をめぐる最近の動き

衛星観測は、いわゆるリモート (遠隔)・センシング (探知) である。従って観測シグナルから物理量を得るためには目的に適した解析アルゴリズムが必要となる。近年の放射伝達計算手法の発達により、放射シミュレーションとセンサシグナルの比較から物理量を推定する解析手法が主流となってきた。さらに最近の衛星観測の利用のひとつにモデルとの融合がある。前述のデータ同化や、例えば雲粒の成長過程を解明するための雲モデルの検証データとしての利用等、プロセス研究にも衛星データが利用されるようになった。

観測の3次元化も最近の潮流である。受動型のセンサは、水平2次元で広範囲に観測することを得意としている。これまでも受動型の高分解能スペクトル情報を活用したサウンダや掩蔽法による鉛直観測があったが、特に雲、雨、エアロゾルのような大気中粒子の直接的な計測として能動型の衛星センサが打上げられるようになってきた。代表的なものに、降雨レーダー (TRMM)、ライダ (CALIPSO)、雲レーダー (CloudSat) がある。TRMM後継機としてGPM (JAXA/NASA) が、雲レーダーについてはEarth-CARE衛星 (JAXA/NICT/ESA) の計画が進められ

ている。さらに最近の傾向として、前述の GPM や NASA が運用中の A-Train (Aqua, CloudSat, CALIPSO) のような複数衛星の運用, 利用がある。

7. まとめ

本稿では、可視赤外イメージャとマイクロ波センサを例に、衛星観測の特徴や利用について述べてきたが、例えば可視～熱赤外を高波長分解能で観測し、大気微量成分等を推定するセンサ (ADEOS-II 衛星 ILAS-II 等) や、フーリエ変換赤外分光から大気微量成分を観測するセンサ (ADEOS 衛星 IMG 等) も用いられている。また、放射収支観測のために、可視域、赤外域といった広い波長範囲を観測する ERBE や CERES のようなセンサが重要な観測を行っていることを申し添えたい。

日本の衛星観測計画としては、前述の GPM と EarthCARE に加え、温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT, JAXA/MOE/NIES) や地球環境変動観測ミッション (GCOM, JAXA) 等がある。これからの衛星観測では、気候モニタリングに資する数十年単位の観測を継続させつつ、プロセス研究を行う新しい観測方式を用いた野心的な計画をバランス良く織り交ぜることが重要である。気候変動の行方に大きな関心が寄せられるなか、全球規模での気象観測や気候モニタリングという大役を担い、衛星観測は今後ますますその重要度を増して行くであろう。

謝辞

衛星センサ諸元について、JAXA, リモート・センシング技術センター, 衛星計画プロジェクトの諸元データを参照した。センサ分類においては、参照文献に加え、多くの研究者からの意見を頂いた。

参考文献

- 1) 土屋清編著, 1990: リモートセンシング概論, 朝倉書店.
- 2) 村井俊治監修, 下田陽久編集, 1997: リモートセンシングハンドブック, 日本リモートセンシング研究会.
- 3) Reynolds, R. W. and T. M. Smith, 1994: J. Climate, 7, 929-948.
- 4) Sakaida, F. *et al.*, 2000: J. Oceanogr., 56, 707-716.
- 5) Han, Q. *et al.*, 1994: J. Climate, 7, 465-497.
- 6) Nakajima, T. Y. and T. Nakajima, 1995: J. Atmos. Sci., 52, 4043-4059.
- 7) Kaufman, Y. and T. Nakajima, 1993: J. Appl. Meteor. 32, 729-744.
- 8) Higurashi *et al.*, 2000: J. Atmos. Sci., 13, 2011-2027.
- 9) 伊東康之, 1996: 気象研究ノート, (187), 177-196.

略語一覧

- ADEOS(-II): Advanced Earth Observing Satellite(-II) みどり(2)
- ALOS: Advanced Land Observing Satellite だいち
- AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer
- AVNIR2: Advanced Visible and Near Infrared Radiometer-type 2
- CALIPSO: Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
- CERES: Clouds and the Earth's Radiant Energy System
- CloudSat: Cloud Satellite
- DMSP: Defense Meteorological Satellite Program
- ERBE: Earth Radiation Budget Experiment
- EarthCARE: Earth Cloud, Aerosol and Radiation Explorer
- ESA: European Space Agency 欧州宇宙機関
- FY: FengYun
- GEO: Geostationary Earth Orbit
- GLI: Global Imager
- GMS: Geostationary Meteorological Satellite ひまわり
- GOES: Geostationary Operational Environment Satellite
- GOSAT: Greenhouse Gases Observing Satellite
- GPM: Global Precipitation Measurement
- ILAS(-II): Improved Limb Atmospheric Spectrometer (-II)
- IMG: Interferometric Monitor for Greenhouse Gases
- INSAT: Indian National Satellite
- JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency 宇宙航空研究開発機構
- LANDSAT: Land remote-sensing Satellite
- LEO: Low Earth Orbit
- MOE: Ministry of the Environment 環境省
- MOS: Marine Observation Satellite もも
- MTSAT: Multi-functional Transport Satellite ひまわり
- NASA: National Aeronautics and Space Administration 航空宇宙局
- NASDA: National Space Development Agency of Japan 宇宙開発事業団
- NICT: National Institute of Information and Communications Technology 情報通信研究機構
- NIES: National Institute for Environmental Studies 国立環境研究所
- NOAA: National Oceanic & Atmospheric Administration 海洋大気局
- OCTS: Ocean Color and Temperature Scanner
- SSM/I: Special Sensor Microwave Imager
- TIROS-N: Television Infrared Operational Satellite-Next generation.
- TM: Thematic Mapper
- TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission
- METEOSAT: Meteorological Satellite
- MSG: METEOSAT Second Generation
- VTIR: Visible and Thermal Infrared Radiometer