レーザーを用いた宇宙からの大気観測

竹内 延夫 *

(1996 年 9 月 24 日 受理)

Laser Observation of the Atmospheric from the Space

Nobuo TAKEUCHI*

(Received September 24, 1996)

The earth observation by satellite becomes more important with the increase of attention to the global environment. The satellite observation started with the weather, a field of atmospheric science, and the satellite weather observation has become operational. However, the recent development of satellite sensors was on the image sensors for land and ocean. Atmospheric sensors are most important among future sensors to be developed for the EOS(Earth Observing System) program. Especially, laser altimeter and lidar (laser radar) gather a lot of attention, because of the ability of direct range measurement and the good vertical range resolution. In this article, the history of space lidar project by NASA and ESA, space shuttle lidar experiment (LITE), and space lidar program will be presented as well as the long-path absorption between the earth and the satellite.

Key Words: Atmospheric monitoring, Earth Observing System (EOS), Laser ranging, Space lidar, Long path monitoring

1. はじめに

衛星による地球観測は地球環境問題¹⁾の重要性が増すとともにますます不可欠のものとなってきた。衛星による地球観測はそもそもTIROSによる地球観測で始まった。現在, 「リモートセンシング」は本来の「遠隔計測」の定義から外れて, 「地表面を対象として衛星データを解析する手法」に限定されることが多いが, 静止衛星

GOES, METEOSAT, GMS(ひまわり)や, 極軌道衛星NOAAによる気象観測は, 大気を対象としながらも例外として“リモートセンシング”に含まれる。このことは気象衛星が歴史的にも一番古く, 最初に実用化されたことと無関係でない。また, EOS (Earth Observing System)計画の実験センサーの開発では大気のセンサーが今後最も重要であるといわれている。その中で, ライダー(レーザーライダー)とレーザー高度計

* 千葉大学環境リモートセンシング研究センター (〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

* Center for Environmental Remote Sensing(CEReS), Chiba University (1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263)

(距離計)(ともにレーザーを光源とする能動的センサー(active sensor))がスペースシャトルに搭載されて実験されており、21世紀初頭の打ち上げが予想されている。以下では、地球観測における大気環境の位置づけと計測の意義、レーザーおよびライダーによる宇宙からの大気観測の利点と現況について解説する。

2. 地球環境問題

1960年代に地球全体の環境容量の有限性が世界的に認識されるようになり、且つ、地球環境問題が大きく取り上げられるようになった。1964年に国連総会で「宇宙船地球号」という言葉が使われ、1972年に発表されたローマンクラブの「成長の限界」の報告²⁾では世界の人口の増加が続くと資源・土地・環境の面で地球の有限性にぶつかる可能性を示唆し、ゼロ成長論を提唱した。地球環境問題といわれる現象には、地球温暖化、オゾン層の破壊、成層圏エアロゾルの影響、酸性雨、異常気象、砂漠化、熱帯林の破壊、など大気に関する現象が多数ある。地球規模の観測には衛星からのリモートセンシング手法による観測が適しており^{3,4)}、1990年代はまさしく衛星による地球観測時代の幕開けと云って良い。1996年8月17日には我が国の地球観測プラットフォーム衛星ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite)⁵⁾が打ち上げられた。我が国以外に、NASA(米国)、CNES(仏)のセンサーを搭載している。この内に大気のセンサーとしてオゾン全量観測用のTOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) (NASA)、衛星の日の出・日没を利用してオゾンや他の微量気体の高度分布を測定するILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer) (環境庁)、対流圏の地球温暖化ガスを測定するIMG (Interferometric Monitor for Greenhouse Gases) (通産省)が搭載されている。これらはいずれも受動的センサーであるが、RIS (Retroreflector in Space) (環境庁) は地上から発射されたレーザー光をADEOSに搭載されたコーナークューブで反射し、衛星-地上間の微量気体濃度を測定する装置である。

3. レーザーによる宇宙からの大気観測の特徴

すでに実用化されている気象観測衛星は大気観測衛星であるが、その外にも衛星観測に適した地球規模の大気現象には全球規模の気温・湿度(水蒸気圧)・気圧の分布、風の場合、大気成分(特に、微量成分)の全球分布、雲の分布、大気汚染・山火事・油田の炎上・サハラダスト/黄砂を起源とする対流圏エアロゾルの移送、火山爆発と成層圏エアロゾルの増加、などがある。以上の現象は大気の大循環モデル(GCM)や地球温暖化に関連する大気放射に貴重な情報を与える。衛星搭載のイメージセンサーは、マイクロ波領域のセンサーを別として、透明な物質の観測や測定対象物の高度分布を得ることは難しい。

レーザーは1)単色性が良いので狭帯域光学フィルターを利用して背景光を除去できる、2)指向性が良いので空間分解能の向上が可能である、3)輝度が高いので能動的センサー(例えばライダー、レーザー高度計)の光源として適している、4)ドップラーシフトを利用して速度が計測できる、などの特徴がある。

これらの性質により、レーザーを用いた衛星からの観測では、1)プラットフォームが全球をカバーする、2)対象物までの鉛直プロファイルが測定可能である、3)光と測定対象との相互作用によって透明な媒体の可視化が可能である、などの特徴がある。

ライダーの大気計測⁶⁾では、エアロゾル・雲によるミー散乱、空気分子によるレーリー散乱、差分吸収法による水蒸気・オゾン等の大気微量成分、コヒーレントライダーやエッジ法⁷⁾による風速の測定、など各種の計測が考えられる。特に宇宙からのライダー計測では地球表面の大気の外縁まで減衰させる物体がないので、遠方の対象物体を測定するのに適した配置関係となっている。しかし、その場合でも散乱光は距離の2乗に比例して減衰し、周回衛星では、計測時間に制約があるので、測定距離がイメージセンサーに比べて短くなるのはやもう得ない。また、地表付近を観測する場合には地上ライダーと同じく、雲に遮られるが、宇宙空間には他に

妨害するものがないので、雲頂高度をいつでも観測できる利点がある。

4. NASA, ESA の前駆的研究

EOS (Earth Observing System)⁸⁾は、当初宇宙基地 (Space Station) を中心に多数のセンサーを同時に搭載した極軌道衛星を計画した。その後、EOS の中心は宇宙基地から、極軌道衛星を用いた地球観測計画に移った。NASA (米国航空宇宙局) では、EOS の一環としてエアロゾル・水蒸気観測用の宇宙ライダー LASA (Lidar Atmospheric Sounder

and Altimeter)⁹⁾と全球の風の場合測定用のコヒーレントライダー LAWS (Laser Atmospheric Wind Sounder)¹⁰⁾を計画した。

LASAは開発段階へ移行する段階 (Phase B) で採用に至らなかったが、半導体レーザー励起の YAG レーザーをベースとしたシステム設計が行われ、1) 高度計測、2) 衛星からの測距、3) 雲頂高度、4) 接地境界層、5) 成層圏エアロゾル、6) 雲パラメータ、7) 対流圏エアロゾル、8) 水蒸気コラム量、9) 地表面圧力、10) オゾンコラム量、11) 水蒸気高度分布、12) 圧力高度分布、13) 気温高度分布、14) オゾン高度分布、等の観

a) NASA atmospheric lidar evolution.

b) NASA laser-ranging evolution.

Fig. 1 a) Step for developing Atmospheric Space Lidar: LASA. b) Step for developing Wind Monitoring Space Lidar: LAWS.

測を目的に専門家による報告書がまとめられた。大気成分の計測ではLASA実現の道筋として

- 1) 48インチ受光口径の地上ライダーシステム
- 2) Electra/990搭載航空機ライダー
- 3) ER-2搭載高々度航空機ライダー
- 4) シャトルLITE観測

5) LASA計画

の開発手順を計画した。一方、レーザー高度計の方はFig. 1に示すような開発段階を提案した。

GLRS(Geoscience Laser Ranging System)がミー散乱ライダーの機能も併せ持つように変更され、GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)と名前を変えて2002年に打ち上げが予定されている。

LAWSも、その開発手順として

- 1) CAT(Clear Air Turbulence)計画(航空機搭載レーザーによるドップラー効果測定)
- 2) SSWIM(Severe Storm Wind Measurement)計画(航空機搭載コヒーレントCO₂ライダーによる2次元風の場の測定)
- 3) GLOBE(Global Backscatter Experiment)計画¹¹⁾(エアロゾル後方散乱係数の地域的・気象的依存性を調べるために太平洋地域を対象としたDC-8搭載測定機器による観測)
- 4) LAWS計画

の開発手順を踏み、開発段階(Phase B)へ移行したが、装置が大型であるので、搭載する衛星が決まらない内にEOSの縮小案の対象となった。当初は10J/パルス、2Hzの繰り返しのCO₂レーザーを光源とし、地上800kmからの風を水平方向には30-50km、鉛直方向には1kmの空間分解能、精度1m/sで測定することを目指していたが、現在は縮小した案が検討されている。

一方、ESA(European Space Agency)ではNASAとは独自の路線で大気用ライダー(ATLID: Atmospheric Lidar)や風観測用のALADIN(Atmospheric Laser Doppler Instrument)の構想がCNRS(仏)やDLR(独)のグループを中心に早くから検討されてきた。

5. LITE (Lidar In-space Technology Experiment)¹²⁾

LITEはLASA計画の途中段階として計画され

た。1994年9月9日に打ち上げられたスペースシャトルSTS-64(高度260km~240km, 軌道傾斜角57°)に搭載され、11日間の飛行の間に3.5~5時間の観測が10回、15~40分の観測が32回行われた。軌道の1周期は89.6分、衛星の地上投影速度は7.4km/sで、直径1mの望遠鏡とフラッシュランプ励起のNd:YAGレーザーの3波長(355, 532, 1064nm)を使用している。レーザーの繰り返し周波数は10Hzで、真下に対して5°傾けてレーザー光を発射した。鉛直方向の分解能は15m, ショット間のフットプリント間隔は740mである。

LITEの観測目的は

- [対流圏] 1) エアロゾルの散乱比と波長依存性, 2) 接地境界層高度と構造, 3) 接地境界層の光学的厚さ

- [成層圏] 1) エアロゾルの散乱比と波長依存性, 2) 40kmまでの密度と温度

- [雲] 1) 鉛直分布, 2) 雲量, 3) アルビード, 4) 光学的厚さ

- [地表面] 1) 地表面アルビード, 2) 後方散乱の入射角度依存性

である。Fig. 2に1994年9月17日に南大西洋上におけるLITEのライダー観測とNASA Wallops センターのP3に搭載されたライダーによる観測データとの比較を示す。波長は532nmで、LITEのデータは200ショットの、P-3Bのは15分間の平均である。図中、矢印は圏界面高度を示す。Fig. 3にはアトラス山脈付近のエアロゾルの構造の測定例を示す。

Fig. 2 Profiles of stratospheric aerosol scattering ratio at 532 nm observed by LITE and by a lidar on board the NASA Wallops P-3B over South Atlantic Ocean on September 17, 1994.¹²⁾

Fig. 3 Aerosol structure in the vicinity of Atlas Mountains and the Atlantic coast of Morocco.¹²⁾

6. 地上・衛星間レーザー長光路吸収測定

本年8月に打ち上げられたADEOSにはレーザー長光路測定用のコーナーキューブ反射鏡RIS (環境庁)が搭載されている^{13,14)}。RISでは宇宙からではないが地上からのレーザー光をADEOS搭載のRISに向けて発射し、コーナーキューブで反射されて戻ってきたレーザー光強度を測定して途中光路の微量気体濃度を測定する。コーナーキューブの有効口径は50cmで、その反射率は0.8以上、使用波長範囲はほぼ近紫外から熱赤外(0.35~14 μ m)までをカバーする。RISでは同位体を用いたTEA-CO₂レーザーとその第2, 第3高調波を光源として、オゾン、フロン12, 硝酸, 炭酸ガス, CO, N₂O, メタンの観測が予定されている。この際、吸収が大きい分子(オゾン, メタン)では吸収線の形状から高度分布を、吸収強度が小さい分子は気柱全量を求める、計画である。RISはレーザーを光源とした衛星・地上間の最初の長光路吸収実験であり、日本だけでなく、外国機関(英国: 赤外波長可変レーザーを使用)の参加も予定されている。

7. 宇宙ライダー (Space Lidar)

NASAでは、前述のようにレーザー高度計GLRSを高度だけでなく、雲やエアロゾルの計測もできるように設計を変更し、GLAS (Geoscience Laser Altimeter System)¹⁵⁾というセン

サー名でfree-flyer型の衛星に搭載し、高度705 km, 軌道傾斜角94°の円軌道に2002年に打ち上げる予定である。Table IにGLASの仕様を示す。

ESA (European Space Agency)ではNASAとは独自の路線で大気用ライダー (ATLID: Atmospheric Lidar)や風観測用のALADIN (Atmospheric Laser Doppler Instrument)の開発を進めている。ATLID¹⁶⁾は1988年から観測目標を選択するための概念設計を行い、気象・気候学者の要望に応じて、GEWEX (Global Energy and Water Experiment)に対応して、熱帯における降雨および循環の問題、雲/放射相互作用、地表面を經由する水/エネルギー交換の量的研究を目標とすべきであるという結論をだした。そのためには雲量、雲頂/雲底高度、光学的厚さと接地境界層高度の測定が要求される。さらにレーザーの動作方式として高繰り返し低エネルギー型を選定し、受光部(望遠鏡部)も掃引型を選定した。Phase Iで決定した仕様をTable IIに示す。ATLIDは2003年打ち上げ予定のEnvisat-2に搭載予定で、1991年から開発プログラムが開始された。また、天気予報の精度の向上のためには全球の風の場合を計測することが重要で、ALADIN¹⁷⁾の研究が進められている。CO₂レーザーを光源とする10 μ mのドップラー風ライダー (DWL: Doppler wind lidar)と、2 μ m帯の全固体でeye-safeなTm:Ho: Host (YAGおよびYLF)のレーザーを光源とするDWLと、紫外領域でのインコヒーレントDWL (IDWL)が検討された。IDWLは技術的にはリスクが最小で、成層圏低層で大きな信号が得られると云う特徴を持つが、コヒーレントなDWLと同じ規模のシステムでは単一ショットに対しては信号雑音比 (SNR) が不十分であることが結論¹⁸⁾され、サブユニットの技術が確立されている10 μ m帯のDWLと長寿命の2 μ m帯のDWLが研究の対象となっている。

我が国の宇宙開発事業団 (NASDA)でもE-lidar (Experimental lidar)計画のもとに宇宙ライダーの開発が1990年から始まった。約50ppsの繰り返しで全固体化されたNd:YAGレーザーとNd:YLFレーザーが光源として開発検討された。これらの開発研究をもとにMDS-2 (Mission Demonstration Satellite-2号機)として、H-2Aを用いて2001年2月

Table I Specification of Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)

Laser	Diode-pumped Nd:YAG laser (40pps, 100 μ rad)
Telescope	90cm ϕ , Cassegrain, FOV = 200 μ rad.
Altimetry channel	
target	Polar ice sheet, land topography, roughness / slope of terrain, height of tree / vegetation
wavelength	1064nm (APD)
precision	10cm
Lidar channel	
target	cloud height/dense aerosol ($\Delta z = 75$ m, $\Delta r = 175$ m) for 1064nm thin aerosol ($\Delta z = 75$ m, $\Delta r = 7$ km; 40 accumulation) for 532nm
wavelength	1064nm (APD), 532nm (PMT: photon counting)

Table II Basic ATLID instrument requirement

Orbit	Type	Polar orbit, sunsynchronous
	Mean altitude	800km
Scan geometry	Full swath width	1400km (± 700 km, along track)
	Shot spacing	< 20km
	Footprint diameter	100m < d < 500m
	Observation range	Ground to 35km
	Altitude resolution accuracy	100m
Laser transmitter (diode-pumped Nd:YAG)	Wavelength	1.064 μ m (optical 532nm)
	Pulse energy / repetition rate	100mJ / 100Hz
Operation mode		day and night, continuous
Lifetime		3 years
Radiometric requirements	Measurement/horiz. cell size	SNR
Cloud top height	single-shot/20km	4
Cumulus		
Altostratus		
Cirrus		
PBL		6
Cirrus extent	averaged / 20km	6
Cirrus optical depth	averaged / 100km	20

に打ち上げの予定である。

以上, NASDA, NASA, ESAの研究を中心に衛星搭載のライダーから大気を観測するプロジェクトの概要について紹介した。宇宙ライダーの実現もいよいよ秒読みの時代となった。今後の発展が楽しみである。

参 考 文 献

- 1) 地球環境工学ハンドブック編集委員会編：地球環境工学ハンドブック（オーム社,1993）
- 2) D.H. Meadows *et al.*: The limits of growth (Universe Books, 1972)
- 3) 土屋清編著：リモートセンシング概論（朝倉書店, 1990）。
- 4) 竹内延夫：オプトロニクス **15** (1996) No.6 133.
- 5) 宇宙開発事業団：ADEOSレファレンスハンドブック（1995）
- 6) 杉本伸夫, 竹内延夫：応用物理 **63** (1994) 444.
- 7) C. L. Korb, B. M. Gentry and Chi. Y. Weng: Appl. Optics **31** (1992) 4202.
- 8) NASA: From pattern to process: the strategy of the earth observing system, EOS Science Steering Committee Report (1985).
- 9) NASA EOS Instrument Panel Report: LASA **IId** (1985).
- 10) NASA EOS Instrument Panel Report: LAWS **Ilg** (1985).
- 11) D. A. Bowdle: Proc. 16th Inter. Laser Radar Conf.,

- Cambridge, MA, 1992, p.57.
- 12) D. M. Winker, R. H. Couch and M. P. McCormick: Proc. IEEE **84** (1996) 164.
- 13) 湊 淳, 杉本伸夫, 笹野泰弘: レーザー研究 **19** (1991) 1153.
- 14) A. Minato, N. Sugimoto and Y. Sasano: Appl. Opt. **31** (1992) 6015.
- 15) J. B. Abshire, J. C. Smith, R. E. Schutz: Proc. 17th Int. Laser Radar Conf., Sendai (1994) p.215.
- 16) M. F. Hueber: Proc. Lidar Techniques for Remote Sensing, Rome 1994 (SPIE Proc. Report 2310) p.34.
- 17) C. Norrie, A. Marini and E. Armandillo: Proc. Lidar Techniques for Remote Sensing, Rome 1994 (SPIE Proc. Report 2310) p.170.
- 18) 文献17および, ESTEC Report on Contract No.8989/90/NL/PB (1991).

レーザーワード

宇宙ライダー (space lidar)

人工衛星に搭載され地球表面・大気, もしくは惑星表面を測定するライダー(レーザーライダー)をさす。spaceborne lidarということもある。ライダーは能動的なセンサーなので到達距離は短い。人工衛星に搭載することによって地球全域をカバーすることが可能となる。宇宙から地球を測定すると対流圏外での減衰を無視できるのでエアロゾル, 雲, 大気境界層構造, 混合層高度, 風向・風速などを効率良く測定することが可能である。通常, レーザー高度計(測距計)なども含まれる。しかし, 地球外から後方散乱光を受光するので到達距離は500~700km程度である。すでに, space shuttleを用いたLITE計画が1994年に成功しており, 我が国では2001年にMDS-2計画で打ち上げの予定である。

(竹内 延夫)