環境計測用衛星搭載レーザーレーダ(ライダー)技術

境澤 大亮¹, 中島 正勝¹, 田中 智章², 森野 勇², 内野 修²

¹宇宙航空研究開発機構 (〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1)

²国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

Space-Borne Lidar Technology for Global Environmental Observation Research

Daisuke SAKAIZAWA,¹ Masakatsu NAKAJIMA,¹ Tomoaki TANAKA,²

Isamu MORINO,² and Osamu UCHINO²

¹Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8505

²National Institute of Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506

(Received September 3, 2010)

Over the past decade, lidar (light detection and ranging) technologies for environmental study have advanced from ground-based to space-borne. The GLAS (the Geoscience Laser Altimeter System) and CALIPSO (the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) demonstrated lidar usability from space, both with the goal of measuring ice sheets, aerosols and clouds, and using those observationally derived data to improve climate modeling; for example, for better estimates of radiative forcing by aerosols. Subsequently, several studies have demonstrated the feasibility of using lidar systems to observe atmospheric winds and trace gases. The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has also initiated research and development to overcome the limitations of existing passive sounding concepts. This paper will introduce current and near-future space-borne lidar missions. In addition, the preliminary results of a demonstration flight test to evaluate the column-averaged CO₂ density will be presented.

Key Words: Space-borne lidar, DIAL, IPDA, LAS, Carbon dioxide

1. はじめに

高分解能衛星画像や気象衛星, 地球観測衛星の商業利用や数値予報モデルへのデータ同化利用^{†1}を通じて各国の地球観測衛星開発が盛んになっている。背景の一つとして気候変動の将来予測やその検証があげられる。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が示した放射収支の導出には雲やエアロゾル, 微量気体等の観測値を用いた数値モデルによる解析研究が大きな効果を発揮した。ただし各物理量が気候変動に及ぼす影響には未だ不確実性があり, 観測データの高精度, 高確度, 高分解能化による低減が今後の課題である。特に二酸化炭素(CO₂)やメタン(CH₄), エアロゾル等の自然起源および人為起源を区別した生成消失要因の評価等, 課題が多岐にわたる。現在の観測研究は現場観測器を用いて航空機搭載, 地上システムを含め高精度な値が得られるものの, 全球を補う観測点を実現することが困難である。一方衛星軌道上

からの観測は地上観測で得られるデータと比較して精度の点で劣るものの同一の観測器で全球を一様に評価できることが大きな利点である。これまで主要な衛星光学観測は太陽光や地球の放射熱を光源とした受動型センサによる2次元観測であるが, 近年レーザーを光源とするライダーの衛星搭載システムの開発が活発化している。

ライダーはレーザーを用いたセンサであり, 太陽光や地球の放射熱を観測する従来の受動センサと比べて観測量の3次元分布を精度良く取得できる。ライダーの技術開発はレーザーや光検出器, 通信技術やデータ処理技術の向上によって, 過去10数年で地上観測, 航空機搭載を経て衛星搭載を実現しデータ利用に至る分野にまで大きく進展した。ライダーでは従来の受動型光学センサでは得られない3次元分布や昼夜観測が可能である。本稿ではライダー計測技術の概要と現在進められている衛星搭載ライダーの概要について紹介する。

^{†1} データ同化: 数値天気予報や各種の最適化処理に用いられている技法。観測や実験データを最適化理論を用いて取込み, モデル結果を逐次修正する。観測データと数値モデルの双方から情報を取り出して, 統計的あるいは力学的に組合せて, 最適な条件や推定を求める手法。

2. ライダーを用いた環境計測の意義

エアロゾルや大気風、ならびに微量気体の観測を行うライダーは、通常ナノ秒パルスレーザーを大気中へ照射し、大気分子や粒子による散乱光強度を測定する。衛星観測ライダーとしてミー散乱ライダー、高スペクトル分解能ライダー(High Spectral Resolution Lidar: HSRL)、ドップラー風ライダー(Doppler Wind Lidar: DWL)、差分吸収ライダー(Differential Absorption lidar: DIAL)のシステムが運用もしくは開発が進められている。ミー散乱ライダーは大気中のエアロゾルにより散乱されたレーザー強度を測定する。得られた信号からエアロゾルの後方散乱係数や消散係数(光学的厚さ)といった物理量が得られるが、一波長での観測ではいくつかの仮定が必要となる。一方、HSRLではこれらの仮定を置くことなく物理量の測定が可能である¹⁻³⁾。HSRLでは受光系に狭帯域のエタロンフィルタやヨウ素フィルタなど高精度な分光測定を必要とするが粒子散乱(ミー散乱)と分子散乱(レイリー散乱)を分離して検出・評価が可能である⁴⁾。エアロゾルは大気微粒子として一括りとされるが、粒子径は10 nm~10 μ m程度と幅広く、生成過程も多様であるため気候変動予測では自然起源として海塩・土壌粒子、人為起源として硫酸塩、炭素(ブラックカーボン)の4種類の粒子を類型としている。エアロゾルはそれ自身が放射収支に影響を与え、かつ雲の生成にも密接にかかわるため、複合的なメカニズム解明は重要課題である。しかし時空間的に変動が大きく、確定的な把握が非常に難しいため衛星搭載ライダーによる継続的な大気エアロゾル観測が重要となる。

DWLは大気分子や風とともに運動するエアロゾルの散乱で生じるドップラー周波数を検出する。355 nmや532 nmの紫外~可視域ではインコヒーレントシステム(Incoherent DWL: IDWL)、1.5~2.0 μ mの短波長赤外域ではコヒーレントシステム(Coherent DWL: CDWL)が用いられる^{5,6)}。CDWLは航空機の運航に関わる晴天乱気流の検知や、夏季の東京都下で発生する急激な低気圧の発達を事前に検出する試みに利用されている。IDWLは大気分子からの散乱光も検出可能なため成層圏低層の風速測定が可能である。ただし同じ条件下のシステム規模で比較するとレーザーパルス単一ショットあたりの信号雑音比でCDWLの方が有利となる。数値気象予報モデルで利用される風の観測データは、世界各地に点在する気象台で実施されている気象ゾンデ(ヘリウムなどを充填した気球に機材を取り付けて放球し気象データの高度分布を取得する観測器)や船舶、航空機での観測データに依存しており海洋上や未開発地域のデータ、特に3次元データが極端に乏しい。衛星搭載ライダーによる大気風の3次元データはこういった数値天気予報の改善のみならず、気候変動にかかる大気大循環の予測にも重要である。

DIALは少なくとも2つのレーザーを用いてCO₂や水蒸気、オゾンといった微量気体濃度を取得できる。レーザーは微量気体固有の吸収線に対して吸収量の強い波長(オンライン)と弱い波長(オフライン)を利用し、双方の

Table 1 Absorption wavelengths for atmospheric trace gases considered key indicators of climate change and absorption bands suitable for DIAL or LAS measurements.

Molecular	Absorption band
H ₂ O	725–780 nm, 813–818 nm, 930–960 nm
O ₃	280–300 nm
SO ₂	300 nm $\pm$ 1 nm
CH ₄	1670 nm, 3390 nm
CO	2320–2380 nm, 4550–4800 nm
NO ₂	400–700 nm, 3400 nm
O ₂	760 nm(O ₂ -A), 1270 nm

差分から光学的厚さが測定できる。この光学的厚さと気象データを用いて微量気体濃度が推定できる。Table 1にこれまで実施された地上、航空機DIALの観測波長と衛星からのDIAL観測で着目されているO₂、CO、NO₂観測に適したレーザー波長を示す⁷⁻¹³⁾。周知のとおり、CO₂やCH₄といった微量気体は地球の放射収支に与える影響が顕著なものとして着目されており、エアロゾルや雲同様に観測データの整備が求められている。微量気体の将来予測や影響評価の不確実性を改善するためCO₂の場合、要求されている精度は全球平均濃度、386.8 ppm(2009年、世界気象機関)に対して1~2 ppmである^{14,15)}。2009年1月には本格的な宇宙からのCO₂観測を目的として温室効果ガス観測技術衛星GOSAT¹⁶⁾(Greenhouse gases Observing SATellite)が全球観測を開始、2013年にはOCO-2(the Orbiting Carbon Observatory-2 by NASA)の打ち上げが計画され2016年まで観測計画が策定されている。以降の継続観測システムにはこれらの後継機に加え、レーザーを用いたDIALや長光路差分吸収ライダー(Integrated Path Differential Absorption lidar: IPDA-lidar)、レーザー差分吸収分光計(Laser differential absorption spectrometer: LAS)も議論されている。著者らは距離分解能測定を行わずシステムと観測ターゲット間に存在する微量気体の全量を測定するLASの開発を2005年から開始した¹⁷⁾。受動型センサと比較してDIAL、LASによる衛星軌道上からの観測は、1)シベリア森林帯等を含む冬季高緯度帯で受動型のように光源の入射角に対して季節依存性がない、2)昼夜にわたって同じ観測量で評価ができる、3)視野が狭く(地上フットプリント100 m以下)観測要求達成に際しエアロゾルや雲の影響を受けにくい、

Fig. 1 Schematic diagram of LAS system for atmospheric CO₂ sensing.

4) 地表面反射率の変動にともなう観測精度への影響がない、といった優位性を持つ。我々はFig. 1のような構成のプロトタイプを開発し地上及び航空機試験による実証試験を行っている。このプロトタイプを用いた地上試験ではランダム誤差0.5 % (2 ppm) 以下が得られている¹⁸⁾。衛星搭載用として他にNASA、ESAでも積極的に研究開発が進められている¹⁹⁻²¹⁾。

3. 衛星搭載ライダーの現状

宇宙からのライダー観測は1994年にNASAが実施したLITE (Lidar in-Space Technology Experiment) 計画から始まる²²⁾。この計画ではスペースシャトルにミー散乱ライダーを搭載し11日間の運用で宇宙からのライダー観測とその技術実証を達成した。ただしレーザー発振にはフラッシュランプ励起システムが利用されており、3 kW におよぶ消費電力が必要なシステムであった。その後LD励起システムの改良に伴い250–300 W程度にまで改善され、2003年にICESat (The Ice, Cloud and land Elevation SATellite)²³⁾、2006年にCALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)²⁴⁾が打上げられた。ICESat搭載のGLAS (the Geoscience Laser Altimeter System) は高度計 (送信レーザー: 73 mJ-40 Hz/1064 nm, 36 mJ-40 Hz/532 nm, 水平分解能: 175 m, 高さ精度: 15 cm)、CALIPSO搭載のCALIOP (the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) はエアロゾル・絹雲観測器としてNd:YAGレーザーの基本波(1064 nm)と第二高調波(532 nm)を観測に使用している (送信レーザー: 110 mJ-20.2 Hz/1064 nm, 532 nm, 高度分解能: 30 m, 水平分解能: 333 m)。GLASでは初期にレーザーの不具合が報告されたが運用調整により7年にわたるキャンペーン観測を実施し、2010年2月まで運用を継続した。CALIPSOはGLASにおけるレーザー不具合の対策を施し2006年の打上げ以降、設計寿命3年を超え2010年11月以降も観測を継続しており、Fig. 2に示すようなエアロゾルの鉛直構造の観測やダストイベントの動体解析の検証に利用されている。また、ICESatでは他の衛星観測データと併用して全球の樹冠マップが作成されている²⁵⁾。この樹冠マップは現場観測データや樹齢などを組合せて森林のCO₂吸収量推定に利用される。CALIPSOではエアロゾルに加え黄砂等の動態研究や大気輸送モデルの検証に用いられている。IPCCの放射強制力の見積りにも用いられる全球エアロゾル気候モデルSPRINTARSへのデータ提供や数値モデルが示すデータの強力な検証手段として威力を発揮する²⁶⁻²⁸⁾。

2010年11月現在、打上げに向けて開発中のライダー搭載衛星はESA/JAXA/NICTの日欧共同プロジェクトでレーダ (Cloud Profiling Radar: CPR) とライダー (ATmospheric LIDar: ATLID) に加え受動光学センサをバランスよく搭載したEarthCARE^{29,30)}、大気風観測用のライダーでESAにより開発が進められているADM-Aeolus³¹⁾ (the Atmospheric Dynamics Mission) である。EarthCAREはCALIPSOの後継として雲/放射相互作用、熱帯降雨およ

Fig. 2 Validation of aerosol transport model analysis using CALIPSO²⁶⁾. This figure shows the Taklimakan dust journey during which Asian dust from the Taklimakan Desert travels around the world in 13 days. Vertical color images obtained from CALIOP observations: (a) depolarization ratio related to aerosol shape, [spherical (lower values) or non-spherical (higher value)], (b) dust extinction coefficients related to atmospheric transmittance, (c) analyzed trajectory of dust transport path [the same as the yellow line indicated in (a) and (b)]. (Reprinted by permission from Nature Geoscience Volume 2, No. 8, pp.529-596, supplementary data, Fig. S2, August 2009 Copyright: Macmillan Publishers Limited.).

び循環の量的研究を目的としている。またADMは世界初の衛星搭載IDWLであり、狭帯域光注入 (Injection seeding) により狭帯域化したNd:YAGの第三高調波 (100 mJ-50 Hz) とHSRLの特性を生かして対流圏から成層圏に至る大気風の鉛直構造を計測する。得られた観測データは事前に検討されたデータ同化により気象予報の精度向上に向けた取組みが期待される³²⁾。

4. JAXAにおける取組と基盤技術への要求

4.1 航空機観測

JAXAでは先に述べたCO₂観測用LASのプロトタイプを航空機に搭載し、CO₂気柱量観測の実証試験を実施した。LASシステムを航空機内に設置し、光学窓を通してレーザーを地表に向けて照射し地表からの散乱光を観測する。航空機試験は2010年2月と2009年8月の晴天時の正午前後に観測した。全飛行経路はFig. 3が示すとおり関東と北海道で実施した。一例として8月の観測について述べる。この観測では北海道帯広市近傍の牧草地で集中的に観測した。得られた観測データの検証には航空機外の空気CO₂濃度を直接測定したものをを用いた。大気中のCO₂濃度は飛行高度7 kmから0.5 kmまで降下するスパイラル観測で採取した。

Fig. 3 Locations of flights of JAXA LAS system.

LASの光学的厚さとフラスコサンプリングで取得したCO₂濃度から計算した光学的厚さをFig. 4に示す。図中の点が平均値、エラーバーは光学的厚さ($\Delta\tau$)のばらつき具合を示しており、光学的厚さの大小はそのまま飛行高度に比例する。 $\Delta\tau=0.15$ 付近が最もエラーバーが小さい。検証データから計算した値と観測で得られたCO₂の $\Delta\tau$ は良く対応しており、相関係数で0.99が得られた。観測値と気象データの高度プロファイルを用いて推定した地表からある高度までの気柱濃度はFig. 5のように得られた。下層付近で検証データと比較して5 ppmv近い差が表れたが下層ほどCO₂気柱量の減少傾向が確認できる。日中の強い日射の影響で植生による光合成の効果でCO₂濃度が減少しているものと推測される。Fig. 4で示したエラーバーは受信望遠鏡の大口径化やレーザーパワーの高出力化により要求精度の達成が期待される。

Fig. 4 Result of airborne flight tests: correlation between measured and calculated differential absorption optical depths from validation data.

現在この結果をもとに衛星搭載システムの仕様の策定を開始している。実際にはCO₂単体の計測よりもミュー散乱ライダーやCO、CH₄もしくはイメージャ等、他の要素との同時観測が望ましい。今後の航空機観測では、人為起源やバイオマス燃焼起源CO₂の情報抽出に着目して将来ミッションを前提とした継続観測を計画している。

4.2 センサ技術への要求

ライダーで利用される要素技術で特にレーザー開発は衛星リソースの制限のために開発負荷が大きく、観測要求を満たすために欠かせないセンサの心臓部となる。通常のアエロゾル観測には汎用性の高いLD励起Qsw-Nd:YAGレーザーとその高調波が広く利用されている。HSRLや微量気体観測等で高精度の分光計測が求められる場合、パルスレーザーの狭帯域化や発振波長を気体の吸収線に安定化する機構が必要となる。DWLやDIAL、LASでは宇宙環境下にあってもこの機構が定常的に長期間動作する設計が必要となる(例：狭帯域化率>99.9%、波長安定度100 kHz以下)。また上空からのレーザー照射を考慮するとアイセーフ(eye safe)の観点から、1570 nmや2060 nm帯のレーザーを用いてDWL、LASによる風、微量気体観測用として利用が期待されている。他に宇宙用センサとしてレーザー発振に重要となるのはLD励起全固体レーザーの高出力化、および電気-光変換効率の高効率化と発熱量の低減および冷却方法である。Nd:YAGレーザーのように885 nm-LDを用いた励起構成では基底準位から直接レーザー上準位へ励起できる分発熱量が抑えられ、冷却に要する電力の低減や、熱レンズ補償にかかる共振器設計の負荷の低減が期待できるため当該技術の普及が望まれる。また打上げ時の衝撃や振動、過酷な環境下(宇宙線、熱サイクル、超高真空)での定常動作と高真空中で発生するアウトガスに起因する光

Fig. 5 Example of airborne test: evaluated partial column-averaged column CO₂ density (= q) (left) and difference between calculated and measured values (right). q_{LAS} is obtained from LAS, q_{val} is obtained from validation data.

学素子損傷のリスクヘッジが最も重要な要素となる。

検出器にはパルスレーザーの波形を歪みなく計測するため最低でパルス線幅の3倍程度の帯域(300 MHz~1 GHz)が求められる。広帯域の検出器では等価雑音が増大し、微弱なエコー検出に障害となる。紫外~可視波長領域では光電子増倍管による光子計数法により高感度な計測が可能となる。一方1.6 μm ~2.0 μm の波長は微量気体の吸収線が比較的多く存在し、アイセーフ特性のレーザーが利用できCDWLやDIAL, LASに適した領域である。ただし検出器の性能は可視域と比較して低雑音化など課題が残る。現在1.6 μm でもアバランシェフォトダイオードや光電子増倍管を用いて光子計数法が可能となったが、ダークカウントの低減とダイナミックレンジの増大による性能の拡大が望まれる。

5. おわりに

望遠鏡の大口径、軽量化やレーザーや周辺素子の技術向上に伴って、地上定点観測からネットワーク化、車載、船舶、航空機、衛星と地球環境計測におけるほぼすべてのプラットフォームでライダーの搭載が可能となった。これらのプラットフォームは物理量の動体解析に有用なデータを供給し検証手段としても多様な場所で時間変化を測定することができるようになった。エアロゾルの気候影響を評価するためCALIPSOが役立てられ、2013年以降には後継機として日欧共同プロジェクトであるEarthCAREの打ち上げが予定されている。EarthCARE搭載のライダーはレーダとの同時運用により、地球の放射収支を推定する研究に役立てられる。CALIPSO, EarthCAREのその後の計画としてNASAの将来構想には雲・エアロゾルと海洋エコシステムの観測を目的としたACE(Aerosol/Cloud/Ecosystem)計画(2010年代中期以降の打ち上げ目標)が挙げられている。ACEには能動、受動型の観測器を5台搭載し、エアロゾルだけでなく雲粒子、降雨までの総合的な観測を提案している。また欧州宇宙機関のADM-Aeolusにより、これまで実現されていなかった衛星からの大気風データの鉛直構造観測が期待されており、2013年の打ち上げが予定されている(2010年11月時点)。NASAの将来構想にも3D-Wind, SPARCLEといった風観測計画が挙げられており、気象予測の高度化に向けた研究も進められている。また現在の地球観測衛星は単一の観測器を搭載したものからACEのように受動型と能動型を組合せた、多機能型のシステムに移行しつつある。初期段階においては各種観測データ間の利用や有効性を焦点に研究がすすめられると思われるが、今後はこういった組合せによる衛星観測システムが長期モニタリングの中核を担うと想定される。JAXAにおいては能動型観測器の最後の一角としてライダー搭載衛星に対する議論が再始動し、基盤技術の早急な整備が求められている。レーザーや検出器についてはいずれの観測衛星に対しても要求項目を満足するために高機能化や低電力化、宇宙環境下を模擬した試験が急務である。

参考文献

- 1) J. Bosenberg and R. Hoff: Plan for the implementation of the GAW Aerosol Lidar Observation Network GALION, WMO GAW Report No.178 (WMO Geneva, Switzerland 2008) p.52.
- 2) T. Nishizawa, H. Okamoto, T. Takemura, N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Shimizu: J. Geophys. Res. **113** (2008) D21201.
- 3) A. Papayannis, V. Amiridis, L. Mona, G. Tsaknakis, D. Balis, J. Bosenberg, A. Chaikovski, F. De Tomasi, I. Grigorov, I. Mattis et al.: J. Geophys. Lett. **113** (2008) D10204.
- 4) M. Esselborn, M. Wirth, A. Fix, M. Tesche, and G. Ehret: Appl. Opt. **47** (2008) 346.
- 5) N. Cézar, A. Dolfi-Bouteyre, J.-P. Huignard, and P. H. Flamant: Appl. Opt. **48** (2009) 2321.
- 6) S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, Y. Hirano, and S. Wadaka: Appl. Opt. **46** (2007) 1953.
- 7) E. V. Browell, C. F. Butler, M. A. Fenn, W. B. Grant, S. Ismail, M. R. Schoeberl, O. B. Toon, M. Loewenstein, and J. R. Podolske: Science **261** (1993) 1155.
- 8) H. Vogelmann and T. Trick: Appl. Opt. **47** (2008) 2116.
- 9) T. Fujii, T. Fukuchi, N. Cao, K. Nemoto, and N. Takeuchi: Appl. Opt. **41** (2002) 524.
- 10) M. Nakazato, T. Nagai, T. Sakai, and Y. Hirose: Appl. Opt. **46** (2007) 2269.
- 11) G. J. Koch, J. Beyon, F. Gibert, B. W. Barnes, S. Ismail, M. Petros, P. Petzar, J. Yu, E. A. Modlin, K. J. Davis, and U. N. Singh: Appl. Opt. **47** (2008) 944.
- 12) F. Gibert, P. H. Flamant, and J. Cuesta: J. Atmos. Oceanic Technol. **25** (2008) 1477.
- 13) D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M. Nakazato, and T. Sakai: Appl. Opt. **48** (2009) 748.
- 14) C. E. Miller, D. Crisp, P. L. DeCola, S. C. Olsen, J. T. Randerson, A. M. Michalak, A. Alkhalid, Rayner, D. J. Jacob, P. Suntharalingam et al: J. Geophys. Res. **112** (2007) D10314.
- 15) P. K. Parta, S. Maksyutov, Y. Sasano, H. Nakajima, G. Inoue, and T. Nakazawa: J. Geophys. Res. **108** (2003) 4759.
- 16) A. Kuze, H. Suto, M. Nakajima, and T. Hamasaki: Appl. Opt. **48** (2009) 6716.
- 17) S. Kameyama, M. Imaki, Y. Hirano, S. Ueno, S. Kawakami, D. Sakaizawa, and M. Nakajima: Opt. Lett. **34** (2009) 1513.
- 18) D. Sakaizawa, S. Kawakami, M. Nakajima, Y. Sawa, and H. Matsueda: J. Appl. Remote Sens. **3** (2010) 043548.
- 19) A. Amediek, A. Fix, M. Wirth, and G. Ehret: Appl. Phys. B **92** (2008) 295.
- 20) J. B. Abshire, R. Haris, G. Allan, C. Weaver, J. Mao, X. Sun, W. Hasselbrack, S. R. Kawa, and S. Biraud: Tellus B **62** (2010) 770.
- 21) E. V. Browell, J. Dobler, S. Kooi, Y. Choi, F. W. Harrison, B. Moore, and T. S. Zaccaro: Proc. 25th Int. Laser Radar Conf., St. Petersburg Russia, July 2010.
- 22) D. M. Winker, R. H. Couch and M. P. McCormick: Proc. IEEE B **84** (1996) 164.
- 23) J. B. Abshire, X. Sun, J. M. Sirota, J. F. McGarry, S. Palm, D. Yi, and P. Liiva: Geophys. Res. Lett. **32** (2005) L21S02.
- 24) D. M. Winker, W. H. Hunt, and J. McGill: Geophys. Res. Lett. **34** (2007) L17811.
- 25) M. A. Lefsky: Geophys. Res. Lett. **37** (2010) L15401.
- 26) I. Uno, K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara, and N. Sugimoto: Nature Geoscience **2** (2009) 557.
- 27) T. Sakiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi: Atmos. Chem. Phys. **10** (2010) 39.
- 28) T. Takemura, H. Okamoto, Y. Murayama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima: J. Geophys. Res. **105** (2000) 17853.
- 29) A. Heliere, A. Lefebvre, T. Wehr, J.-L. Bezy, and Y. Durand: Proc. IGARSS **1** (2007) 4975.
- 30) European Space Agency: Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer (ESA SP-1279 European Space Research and Technology Centre, 2004) p.66.
- 31) A. Ansmann, U. Wandinger, O. Le Rille, D. Lajas, and A. G. Straume: Appl. Opt. **46** (2007) 6606.
- 32) H. Kornich and E. Kallen: Tellus A **60** (2008) 261.