

衛星搭載用レーザセンサシステムに向けた研究

Studies for space borne laser sensor systems in JAXA

宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター:

境澤 大亮, 室岡純平, 鈴木桂子, 今井正, 佐藤亮太

宇宙航空研究開発機構 利用推進プログラム・システムズエンジニアリング室:

小林高士, 山川史郎

Earth Observation Research Ctr., JAXA: D. Sakaizawa, J. Murooka, K. Suzuki, T. Imai, R. Sato
Satellite Systems Engineering Grp., JAXA: T. Kobayashi, S. Yamakawa

Abstract

Laser/LIDAR remote sensing technologies can satisfy a variety of measurement and operational requirements. These measurement techniques are finding uses in several earth science areas, including atmospheric chemistry, water vapor, aerosols and clouds, wind speed and directions, pollution, oceanic mixed layer depth, ice sheet, vegetation canopy height, biomass, surface topography, and others. In JAXA, some activities of LIDAR/ laser sensing systems and devices have been studied to realize space borne mission, which includes data processing of 3D scanning altimeter, multi-array short wave infrared detector for biomass LIDAR, and development of space qualified pulsed laser. In this conference, we will describe our activities.

1 はじめに

衛星軌道上のライダーを用いた地球観測は ICE-Sat/GLAS¹から 10 年、以後 CALIPSO² が 2006 年に打ち上げられ現在も運用継続されている。2013 年以降も欧州宇宙機関 ESA により、風観測用ライダー衛星 ADM (Laser transmitter: ALADIN³), CALIPSO の後継としてエアロゾル観測が期待されている高スペクトル分解能ライダー ATLID (EarthCARE) の打ち上げ運用が予定されている。かつてのエリーゼ⁴以降、日本では SELENE の LRS⁵、MUSES-C の高度計と宇宙研の運用する探査機搭載システムで実現されている。我々はライダー搭載衛星ミッションの実現に向けていくつかのシステム、要素技術の研究を実施している。本シンポジウムでは特に地球下記に示す項目の概要を述べる。

2 樹木の 3 次元観測用システム

将来の超低高度衛星実用機へ搭載するセンサ候補の一つとして、レーザ高度計の検討を行っている。このシステムを衛星に搭載する事で、航空機実験では困難である全球規模での樹高測定が期待される。パルスレーザの照射タイミングは行政管理庁（現総務省）によって出された「統計に用いる標準地域メッシュおよび標準地域メッシュ・コード」の基準地域メッシュ（約 1 km 格子）と同程度の密度でプロダクトを生成する事を目安としてい

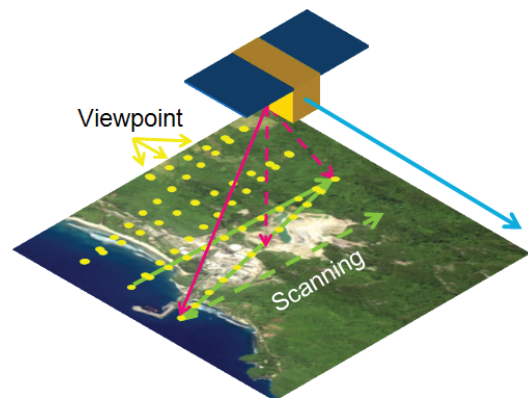


Fig.1 Concept of 3D scanning LIDAR system.

る。また独立行政法人国立環境研究所は、日本国内を 1 km の格子に分割し、森林モデルを用いて 2000~2005 年の平均的な炭素吸収量の分布を計算している。衛星搭載レーザ高度計によって 1 km 格子での樹高測定すなわち、同一格子間隔におけるバイオマス量の計測が可能となれば、同モデルの精度向上に寄与するものと期待される。更に、その半分の間隔、0.5 km メッシュでのデータ取得が可能となれば、より高精度な樹高分布、標高の観測が可能となる。これは現在より高度な森林モデル構築にもつながり意義深い。

そこで、本研究では

1. 1 km メッシュでの高度測定（通常モード）

2. 0.5 km メッシュでの高度測定（高頻度モード）

の 2 タイプのデータ取得間隔、高さ精度に対する 信号対雑音比 (S/N) の実現性を検討する。

森林には多数の種別があるものの、ここでは一般的に現地観測が困難な熱帯地方の樹高に対してシステム検討を行った。熱帯雨林の樹高は 30~70 m であり、計測精度としては 1 % 程度の精度 ± 0.5 m 以下とする。1 sec 当たりのパルス照射数を「パルスレート」、1 sec 当たりのスキャン回数を「スキャンレート」とし、40km の観測幅 ΔW に必要となるスキャン角度 θ は衛星高度を z とする場合、全角 12 度が必要になる。

衛星進行方向のデータ取得間隔は対地速度 / (2 × スキャンレート) で表わす事が出来る。進行方向のデータ取得間隔を通常モードの 1 km 以下にするには 4 Hz 以上のスキャンレート、高頻度モードでは 7.8 Hz のスキャンレートが必要となる。横方向のデータ間隔は、パルスレートとスキャンレートのトレードオフとなっており、通常モードで横方向 1 km 格子以下とするには約 350 Hz のパルスレートが、高頻度モードでは横方向 0.5 km 格子以下にするには約 1300 Hz のパルスレートが必要となる。

レーザ高度計の高さ精度要因にはプラットフォームの位置精度、姿勢精度、レーザ測距システムの精度となる。各誤差の RMS 誤差が全体の誤差になると仮定する。位置精度、姿勢精度はそれぞれ ± 25 cm、20cm と置くと測距精度は ± 0.4 m の精度が要求される。ここから測距精度 ΔR に必要な S/N は ΔT をパルス幅、 c を光速とすると $\Delta R = 0.5c\Delta T(S/N)^{-0.5}$ からパルス幅 4 ns のレーザで $S/N \geq 2.3$ 以上が必要となる。

植生の樹冠やアナログ波形から樹木の葉構造を測定する場合、地表面からの信号を分離し絶対的な樹冠高を測定する必要がある。この場合上に述べたようなレーザ送信方向をスキャンするシステムによる樹高測定では山間部などの地表傾斜は樹高精度の影響を与える。スキャニングライダーと同様に検討している植生ライダーの特徴は、使用する検出器をアレイ化し地上のレーザフットプリントを分割することが挙げられる。これにより、地表が平坦化斜面となっているかを把握し、より精度の良い樹冠高の測定を測る。しかし、検出器をアレイ化することは、元来少ない受信光量をさらに分割することと同義であり、信号対雑音比 (S/N) が不足し精度の良い測定ができない可能性がある。昨年度、我々はこの実現性を確認する目的で、システム検討を行った。想定した市販の Si-APD アレイでは、樹冠高の測定で用いる近赤外領域での感度が不足すること、及び、Si-APD アレイの後段

のアンプにおいては、植生ライダーに求められる高帯域の影響でノイズが大きくなってしまふことが判明し、それに伴い S/N も低くなっているという結果が得られた。この結果を受けて、今年度は十分な S/N の確保のため、高帯域であっても高感度かつ低ノイズが可能な Si-APD アレイ検出器の試作を行っている。

3 CO₂ 計測用 LAS

放射強制力として CO₂ は人為的な寄与率が最も高いと指摘されており、そのフラックスに残存するモデル推定値の 1σ は 50~100% と見積もられている⁷。大気中の微量気体観測はタワー観測や陸上に配置された観測サイト、航空機観測キャンペーン、商用航空機を用いた長期観測の継続、そして AIRS, SCHIAMACHY, GOSAT といった衛星観測手法の登場により CO₂ に対する時空間変動の理解が改善されつつある。こういった全球の振る舞いを理解するには観測データと輸送モデルを組み合わせた動体解析の研究が大きな威力を発揮する。ただし CO₂ は背景濃度に対して微量な変化量を議論しなければならないため、観測センサにはバイアス誤差のない精度 1 ppm (0.3%) を達成する高い性能が要求される。

受動型センサと比較した場合、CO₂ 観測に影響を及ぼす以下のような利点がある。

1. 自発的な光源を有しているため太陽天頂角の季節依存性に関係なく気柱量観測を実施でき、十分な S/N で昼夜にわたって高緯度帯を確保できる。
2. 太陽位置と衛星間のバイスタティックな光路とは異なり衛星と地表面間のみのカラム観測が実施できる。
3. フットプリントが小さく (100m 以下実質 60m 程度) となり、まばらな雲があっても地表面からの信号を取得できる。
4. 上記の通りフットプリントが小さく、現行のシステムや計画中の CarbonSat と比較して CO₂ 濃度の局所的検知が期待できる。
5. 距離計測も同時に可能であるため高層に存在する氷晶雲の存在を容易に検知して影響を除外できる。
6. 海洋上では陸上と比べて地表面反射は劣るものの CO₂ 濃度の空間変動量が少なく、長時間積分により海上も陸上と同等の観測精度を維持できる。
7. 差分吸収により微量気体の光学的厚さを観測するため、フットプリント内で地表面反射率が空間的に変動しようとも観測量には影響を与えない。

また、疑似衛星観測データを用いたフラックス推定精度の観測シミュレーションでは 2 つのオンライン波長を用

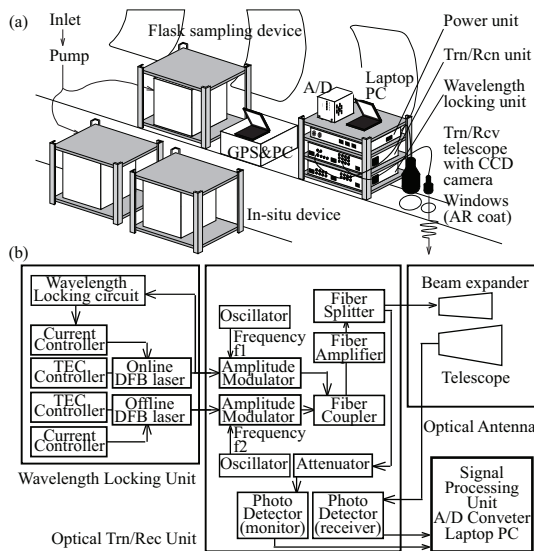


Fig.2 (a) Airborne instrument setup and (b) block diagram of the 1.57 μm prototype LAS system. TEC: thermo electric cooler, DFB laser: distributed feedback laser.

いて 0.5% の観測精度でもフラックス推定精度に現在よりもインパクトを与えることが報告されている^{8,9}。

本システムの実証を地上試験と航空機試験によって確認した。データの解析結果から現場測定器などから得られた高精度 CO₂ データと比較して相関係数 0.99 が得られた。低出力のレーザーパワーと小口径望遠鏡ながら、地上試験では精度 0.5% 航空機試験では高度 0.5km-7km の飛行高度で 0.7 - 1.4% の性能が得られている¹⁰⁻¹²。軌道高度 400 km におけるシステム検討を実施したところ、望遠鏡径 75cm、レーザー出力 25W@ CW のシステムにより上記で示した 0.5% のランダム誤差以上の性能を発揮することが期待できる。

4 宇宙用レーザー

地球観測用衛星搭載システムは ICESat 搭載の GLAS、CALIPSO 搭載の CALIOP といずれのシステムも軌道上の厳しい外部環境に耐えうる Q-sw パルスレーザーの実現が重要な要素となっている。地球観測用途のレーザー送信機は新宇宙探査用のレーザー高度計に比べ、大きなリソースと筐体構造に余裕がある一方で、5年以上のミッション運用年数を求められる。これまで宇宙環境下で動作するレーザーの寿命（パルスカウント）とパルスレーザーの平均出力の関係は図 3 のようになる。波長変換を用いて各種の要求を満足する場合、10W 以上の 1 μm レーザーの実現が求められている。またレーザー送信機に冗長系を持たせ、1 台あたりの寿命を 3 年以上とする場合、100Hz 駆動で 9×10^9 ショットのレーザー照射後

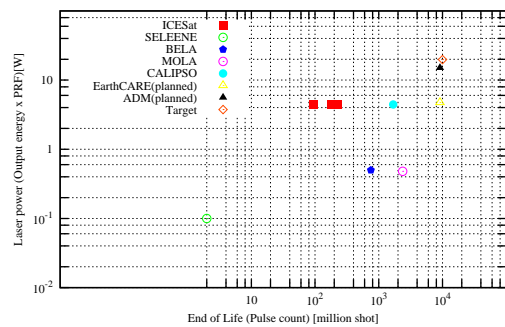


Fig.3 Power and EOL (end of life) of the laser transmitters for previous, current and planned space borne LIDAR.

でもレーザーのエネルギー減衰を抑え、半導体レーザーの経年劣化のみに抑える必要がある。地上設置、航空機搭載レーザーと異なり、これら宇宙用レーザーはメンテナンスによる装置寿命の延命が一切排除されるため、長期運用に耐えうる光学素子や半導体レーザー、致命的な損傷を引き起こすコンタミネーションの抑制が重要になってくる。宇宙用機材の組み立て時に各部材をベーキングしコンタミネーションの絶対量を落とすことは可能だが、コンタミそのものの発生は消すことはできず、高真空環境下で生じるコンタミネーションは光学薄膜に付着し、Q-sw レーザーにおいては致命的な焼損を引き起こす要因となっている。この現象は特に紫外域で顕著になることが報告されており、^{13,14} 我々は赤外、可視域でこれらの影響や、レーザー筐体内の発生源についての知見を向上することを目的とする。この研究は情報通信研究機構、理化学研究所とともに 3 年間の研究として Nd:YAG を用いた 1 μm の Q-sw レーザー（10ns 以下, 100mJ, 100Hz 以上: 最終 10W - 15W）の全個体伝導冷却型レーザーの実現を目指す。

Reference

- [1] James B. Abshire, Xiaoli Sun, Haris Riris, J. Marcos Sirota, Jan F. McGarry, Steve Palm, Donghui Yi, and Peter Liiva, "Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance", *Geophys. Res. Lett.*, 32, (2005).
- [2] D. M. Winker, W. H. Hunt, and M. J. McGill, "Initial performance assessment of CALIOP", *Geophys. Res. Lett.*, 34,(2007).
- [3] Oliver Reitebuch, Christian Lemmerz, Engelbert Nagel, Ulrike Paffrath, Yannig Durand, Martin Endemann, Frederic Fabre and Marc Chaloupy, "The Airborne Demonstrator for the Direct-Detection DopplerWind Lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part I: Instrument Design and Comparison to Satellite Instrument", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26,

- 2501?2515, (2009).
- [4] Tadashi Imai, Yasuaki Kawamura, Noritaka Tanioka, Kazu Asai, Toshikazu Itabe, Osamu Uchino, Takao Kobayashi, Yashuhiro Sasano, Toshi-nori Aoyagi, "NASDA ELISE (MDS-lidar) program", Proc. SPIE, 3218, (1997).
- [5] S. Oshigami, Y. Yamaguchi, A. Yamaji, T. Ono, A. Kumamoto, T. Kobayashi, and H. Nakagawa, "Distribution of the subsurface reflectors of the western nearside maria observed from Kaguya with Lunar Radar Sounder", Geophys. Res. Lett., 36, L18202, (2009).
- [6] 小林高士, "超低高度衛星搭載レーザー高度計を用いた地球観測ミッションの検討", 第 55 回宇宙科学技術連合後援会, 2D04, (2011).
- [7] D.A. Randall, R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor, "Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change" [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [8] S. R. Kawa, J. Mao, J. B. Abshire, G. J. Collatz, X. Sun and C. J. Weaver, "Simulation studies for a space-based CO₂ lidar mission", Tellus B, 62, 759-769 (2010).
- [9] T. Kaminski, M. Sholze, and S. Houeling, "Quantifying the benefit of A-SCOPE data for reducing uncertainties in terrestrial carbon fluxes in CCSAS", Tellus B, 62, 784-796 (2010)
- [10] S. Kameyama, M. Imaki, Y. Hirano, S. Ueno, S. Kawakami, D. Sakaizawa, and M. Nakajima, "1.6 micron continuous-wave modulation hard-target differential absorption lidar system for CO₂ sensing", Opt. Lett., 34, 1513-1515, (2009).
- [11] D. Sakaizawa, S. Kawakami, M. Nakajima, Y. Sawa, and H. Matsueda, "Ground-based demonstration of a CO₂ remote sensor using a 1.57 μm differential laser absorption spectrometer with direct detection", J. Appl. Remote Sens. 4, 043548, (2010).
- [12] D. Sakaizawa, S. Kawakami, M. Nakajima, T. Tanaka, I. Morino, and O. Uchino, "An airborne amplitude-modulated 1.57 μm differential laser absorption spectrometry: simultaneous measurement of partial column-averaged dry air mixing ratio of CO₂ and target range", Atmos. Meas. Tech. Discuss., 5, 4851-4880, (2012).
- [13] Wolfgang Riede, Helmut Schroeder, Gintare Batavi-ciute, Denny Wernham, Adrian Tighe, Federico Pet-tazzi, Jorge Alves, "Laser-induced contamination on space optics", Proc. SPIE, 8190, 1E, (2011).
- [14] D. Wernham, "Optical Coatings in Space", Proc. SPIE, 8168, 0F, (2011).
- [15] Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto, K. Kasahara, K. Tajime, "208-W TEM00 operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser", Opt. Lett., 24, 679-681, (1999).