

# 飛行体搭載用ライダーに向けた 946nm 帯ライダーの検討

境澤 大亮<sup>1</sup>, 坂江 亜弥<sup>1</sup>, 今井 正<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構 研究開発部門センサ研究グループ (〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1)

## Research for laser and detector for 946nm airborne/space-borne lidar systems

Daisuke SAKAIZAWA<sup>1</sup>, Tsugumi SAKAE<sup>1</sup>, and Tadashi IMAI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sensor systems research group, JAXA, 2-1-11 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

**Abstract:** Lidar for altimetry is widely used in airborne/satellite observations for topography, structure height, and coastal bathymetry, providing crucial data for canopy height measurements. Current systems use low-power lasers with galvano scanners, but their coverage is limited. To address this, a 0.9 $\mu$ m laser system is being explored, offering better detector sensitivity than the commonly used 1 $\mu$ m. The Nd-based 0.9 $\mu$ m laser, combined with photon-counting detectors, is under evaluation. Preliminary tests on passive Q-switched lasers and SPAD arrays show promise in improving coverage and accuracy. This presentation discusses system considerations and experimental results.

**Key Words:** altimeter, 946nm, quasi-4 level laser, SPAD,

### 1. はじめに

高度計用ライダーは、航空測量分野で地形、構造物の高さや沿岸域の測深計測に幅広く利用され、その点群観測データは、林冠高観測基準として利用されている<sup>1)</sup>。主として使用されるシステムは低出力レーザービームをガルバノスキャナの掃引等で、単位面積当たり複数のレーザーフットプリントを単位時間辺り 200-1000 km<sup>2</sup>/h のデータ取得を可能とする<sup>2)</sup>。広範な 1000km<sup>2</sup>/h を取得する場合、1m<sup>2</sup> 辺りに落ちるレーザービームの割合 (カバー率) は 3 割程度に留まる<sup>2)</sup>。数多くのレーザーフットプリントを配置することで、ある面積内に効率的にビームを配置し、緯度経度グリッドごとにデータを整理する取扱いが可能である。一方、カバー率を高くするには時間当たりの観測可能面積や、何往復も同じ地点を往復する必要がある。

この低カバー率改善を目指したスキャナーに対して検討を実施した<sup>2)</sup>。コンセプトを Fig.1 に示す。Nd, Yb の 1 $\mu$ m レーザーを用いて宇宙から利用する場合、広範な領域を十分な SN 比で計測するには、レーザー出力や望遠鏡開口が大きくなり、利用可能な電力・搭載リソースを超過してしまう。また光検出器の効率改善等、現状技術からの乖離があり、その差を埋める技術開発を要する。その乖離を埋める一端として 1 $\mu$ m 帯より、検出器感度が高く自動車搭載用に開発が進む Nd の 0.9 $\mu$ m 帯の利用について調査を行っている。本発表では 0.9 $\mu$ m 帯のレーザーや光検出器を組み合わせたシステム検討について報告する。

### 2. 観測対象とシステムへの要求

衛星搭載用ライダーは令和 5 年度宇宙基本計画<sup>1)</sup>から具体的な名称で明記され MOLI 以降も推進する活動となる。この高度計への要求項目は、陸域森林バイオマス (Above ground biomass: AGB) と、土地利用の観点がある。AGB は林冠高との関係から推定する手法が一般的になっており、正確な地盤面高度と、その上の構造物の高さ推定、展葉構造の把握が求められている。土地利用に対しては主に地表面高度をデジタル地図で再現するデジタルツイン<sup>ii)</sup>の観点から、より立体地図の高度情報の正確性、高精度化の要望が出されている。加えてライダー観測点も MOLI のような直下点のみの観測から、CT 方向 (Cross track 方向、衛星進行方向とは直交する方向) へ観測点数増大や地表分解能向上が要望されている。航空測量と同様のデータ取り扱いを目指した衛星搭載システムでは、ISS-GEDI や ICESat-2 に搭載されたライダーがある<sup>3,4)</sup>。

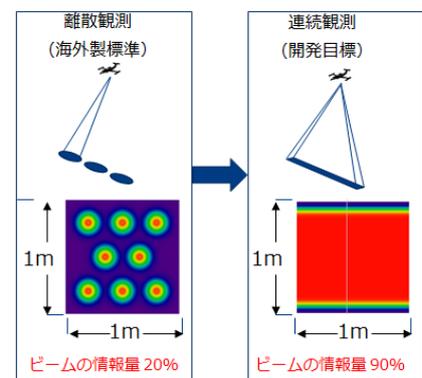


Figure 1 Concept of laser scanner

<sup>i</sup> [https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei\\_fy05/honbun\\_fy05.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf)

<sup>ii</sup> <https://earth.jaxa.jp/conseo/news/20230328-1/document02.pdf>

MOLIやICESat<sup>5)</sup>のようにパルス出力の大きなレーザーを搭載するライダーは電力リソースが切迫しており、観測点数の増加は容易ではない。このため航空測量やICESat-2と同様の低出力高繰り返し型レーザーと光子計数検出器を組み合わせたシステムを前提とした。このシステム概算値をTable 1に示す。レーザー1ショット辺りダークカウントによる誤検知確率を超える光子数が返ってくる条件とし、1.0  $\mu\text{m}$ と0.9  $\mu\text{m}$ でそれぞれ現在参照できる光検出器の性能を用いて求めた。

Table 1では、光検出器における光子検出確率が1  $\mu\text{m}$ よりも約20倍高い0.9  $\mu\text{m}$ 帯に着目している。可視～近赤外域で感度を持つAPDではSi, InGaAsが挙げられるが、暗電流を含めた雑音特性からSi製のSPADを候補とした。Siでは近赤外域の光吸収係数が大幅に低下するため、実効光路長を金属箔反射による延長、吸収層厚みの近赤外域への適応など行い感度改善を行う。これにより、光子検出確率は0.9  $\mu\text{m}$ で0.24まで得られ、1  $\mu\text{m}$ より性能面で利点がある<sup>6,7)</sup>。加えて、0.9  $\mu\text{m}$ 帯は車載ライダー関連で開発進捗が著しく、品質や入手性という点、宇宙用スクリーニングの観点でも利点が挙げられる。

一方、0.9  $\mu\text{m}$ 帯は地球大気に豊富に存在する水蒸気吸収線の影響を受ける。Fig. 2に高分解能放射伝達計算モデルで0.9  $\mu\text{m}$ 周りの透過率を示す。Fig. 2上側がNd:YAGが利得を持つ946nm、下側がNd:YVO<sub>4</sub>/GdVO<sub>4</sub>が利得を示す912nmの大気透過率である。912nm帯は比較的吸収が弱い領域の選択性が高く、946nm帯は912nm帯よりも選択肢が乏しい。ただレーザー発振に注意を払えば、水蒸気吸収線の弱い領域での観測が期待できる。一方1  $\mu\text{m}$ 帯で汎用性が高い、高輝度な光に耐性がある薄膜や、宇宙用を想定した場合に対応可能な薄膜ひいては、その成膜業者の選定が今後の課題になる。

### 3. 0.9 $\mu\text{m}$ 帯レーザー

0.9  $\mu\text{m}$ のレーザー発振はNdの ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ の遷移で得られ、1  $\mu\text{m}$ 、1.3  $\mu\text{m}$ に次ぐNdの3番目に大きな利得帯域を持つ<sup>8)</sup>。1  $\mu\text{m}$ の誘導放出断面積(Nd:YAG  $2 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ )と比較して約一桁値が小さく( $3 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ )、高い利得の実現に工夫が必要になる。また、レーザーの下順位 ${}^4I_{9/2}$ の $852 \text{cm}^{-1}$ は規定準位にも近く、利得は熱によ

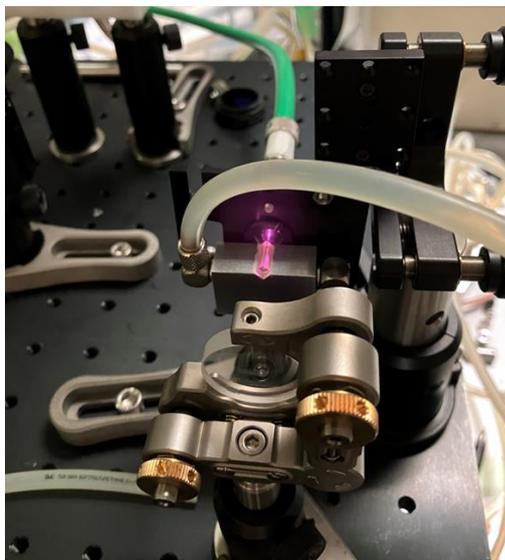


Figure 2 Picture during oscillation test: the output mirror mounted on the front mount.

Table 1 Tentative system specification for photon-counting altimeter from space.

Wavelength [ $\mu\text{m}$ ]	0.9	1	0.4	0.5
Energy [mJ]	1.2	8	1	1
PRF [kHz]	10	10	10	10
Detection Efficiency [event/photon]	0.24	0.01	0.45	0.55
swath [km]	0.5	0.5	0.5	0.5

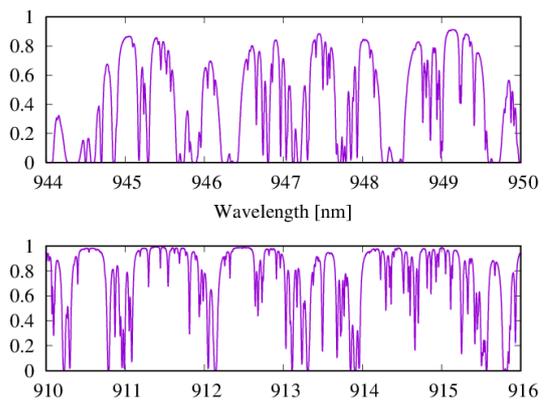


Fig.1 Detail atmospheric transmittance around 912 nm and 946nm.

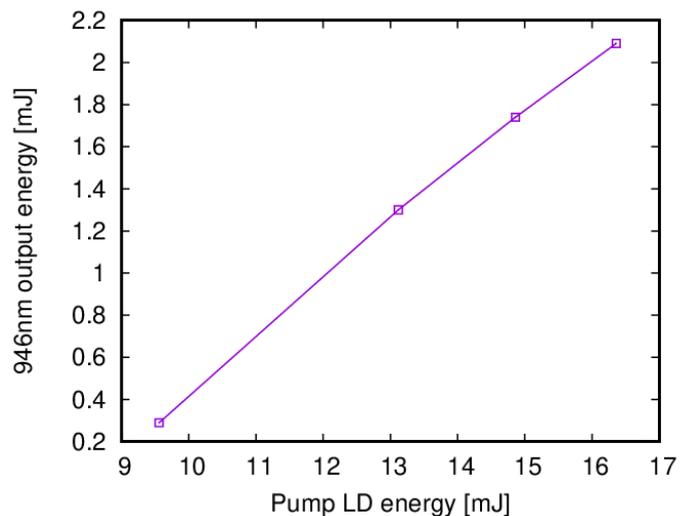


Figure 3 946 nm input/output characteristics for a cavity length of 130mm.

る影響を受ける。似たエネルギー構造の Tm, Ho の発振帯域 ( $300\text{ cm}^{-1}$  程度) より、高いエネルギー準位にあるため、 $2\mu\text{m}$  レーザーよりも熱の影響は受けづらいが、それでも再吸収による利得制限がある。加えて、主発振帯域の  $1\mu\text{m}$  や  $1.3\mu\text{m}$  の帯域に利得を取られないよう工夫を凝らす必要がある。

パルス駆動で  $946\text{nm}$  のレーザー発振実験を試みた。試験系の画像を Fig.2 に示す。励起はピーク出力  $120\text{W}$  の QCW 出力 LD をコア径  $600\mu\text{m}$  の光ファイバーへカップリングし、リレーレンズを通して Nd:YAG 結晶を端面励起している。端面励起の光共振器は Nd:YAG 結晶端面の片方に施した  $946\text{nm}$  HR コーティングと出力鏡で構成した。残りの端面は  $946\text{nm}$  および  $1\mu\text{m}$  で高透過率のコーティングを施した。フリーラン発振では、共振器長  $30\text{mm}$ ,  $60\text{mm}$ ,  $130\text{mm}$  で出力評価を行った。繰り返し数  $100\text{Hz}$ , LD 入力  $19\text{mJ}$  の  $808\text{nm}$  LD 入力条件に対して、 $30\text{mm}$  の共振器では、 $5\text{mJ}$ ,  $60\text{mm}$  の共振器長では  $3.5\text{mJ}$ ,  $130\text{mm}$  の共振器長では  $2.3\text{mJ}$  が得られた。Fig.3 に  $130\text{mm}$  の共振器長で取得した入出力特性を示す。

次に受動 Q スイッチ素子による小型化を期待して、Cr:YAG (初期透過率  $30\%$ ) を過飽和吸収帯として発振実験を行った。バースト発振のような、 $Q_{\text{sw}}$  発振が得られたものの定常的な  $Q_{\text{sw}}$  発振は得られていない。レート方程式や、Cr:YAG の物性値を再度見直し、実験を継続している。

#### 4. 光子計数型検出器

光子計数型光検出器は、微弱な光を高精度で検出できるため、ライダー観測でも利用されている。代表的なものとして光電子増倍管 (Photomultiplier tube: PMT) と APD (Avalanche photo-diode) が含まれる。PMT は光電効果を利用して光子を電子に変換し、電子増倍プロセスを通じて信号増幅で生じる光パルスの数を計数する。地上～衛星搭載と多方面で PMT は利用されているが、真空管構造のため 1 検出素子当たりのサイズや、衛星等振動環境においては衝撃耐性に留意する必要がある。APD は対応波長に応じてシリコン製と InGaAs 製があり、PMT ほどの高電圧を駆動しないことから近年車載用の単一光子検出器 (Single photon avalanche diode: SPAD) として急速に普及している。APD のガイガーモードを利用して光子検出を行うため、不感時間があるなど利用する場合の留意点がある。想定しているシステムでは、アレイ構造の利用を想定しており、半導体デバイスの特徴として小型化集積化に向いている SPAD に着目した。SPAD は複数のガイガーモード APD を組み合わせるため、一つの APD の不感時間があっても他の素子が応答可能といった特徴を有している。

SPAD の小型集積化により  $1\text{mm}$  角の素子で多数光子検出が可能のため SPAD をアレイ化することで想定するライダーの観測幅拡大に対する検出器として考慮している。我々のグループでこの SPAD の特性に対して評価を実施した。Fig.4 に暗幕内にバイアス回路と共に配置した SPAD アレイ (浜松ホトニクス社製 S14420-1550MG) と簡易試験系を光源の応答波形と共に示す。

光源はファイバーカップリング出力の半導体レーザー ( $\lambda=915\text{ nm}$ ) 光を、OD5-7 の ND フィルタを組み合わせ、検出器面 ( $\phi 0.5\text{mm}$ ) に集光させ SPAD からの応答をオシロスコープで取得した。取得した波形データからパルス応答波形のヒストグラムを作成したものが Fig.5 である。SPAD で期待していた多光子検出が 1 素子で得られており、単一光子のガイガーモード APD よりも計数漏れは防げることを確認できた。一方、多光子検出時のピーク値は数が増えるごとにばらつきが多くなる傾向があり、これが SPAD 固有か素子単体の特性なのか、本試験データから判断できず、追加の試験を予定している。また、実際に入射光量に対する線形性評価試験の準備を行っている。

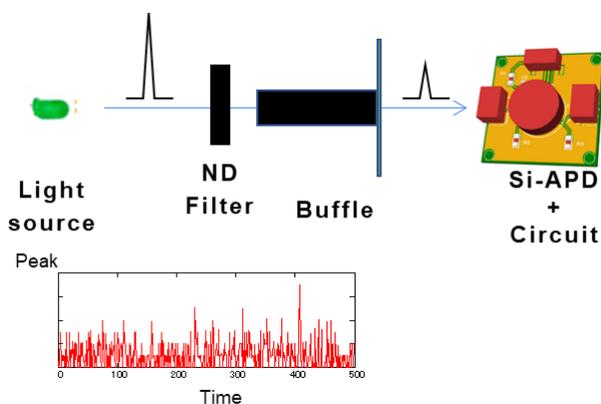


Figure 5 Schematic diagram of SPAD and the corresponding time-series data.

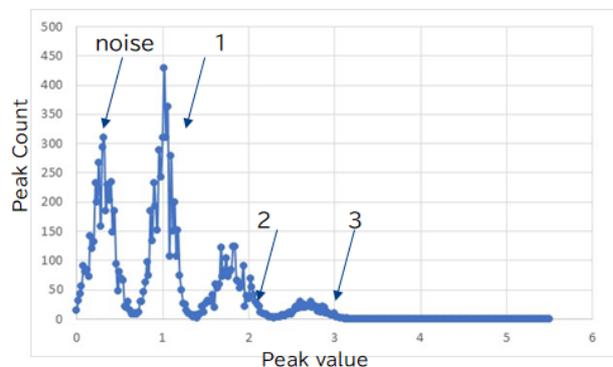


Figure 4 A histogram of multi-photon detection in the SPAD. The numbers displayed in the figure indicate the number of detected photons.

## 5. まとめ

航空機や衛星等飛翔体に搭載したライダーで直下点観測から観測幅を拡げ、観測面積当たりのビーム照射割合を向上させ得るシステム検討を行っている。1 $\mu\text{m}$ 帯で広く利用される高度計を光子計数型として宇宙利用を想定した場合に、検出器感度が低くなる点に対し、検出器感度の高い領域を使用できる0.9 $\mu\text{m}$ 帯を用いたシステムの概要を取り上げた。送信光源となる0.9 $\mu\text{m}$ 帯レーザーで受動Qswを用いた発振実験を行った。高速な立上りに対し薄膜損傷が起き、1064nmと比較して薄膜のダメージ耐性を含めて早急な調査が必要になってきた。アレイ型光検出器の素子候補としてSAPDの特性評価試験を実施し、多光子検出性能を確認した。これら試験データや構築ノウハウを整理し、スキヤニングもしくはスキヤナー機能の原理実証を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 国内特許第 4279894 号
- 2) 境澤 大亮：41 回 レーザーセンシングシンポジウム予稿集，つくば (2023).
- 3) T. A. Neumann: *Remote Sensing of Environment* **233** (2019) 111325.
- 4) Ralph Dubayah: *Science of Remote Sensing*, **1** (2020) 100002.
- 5) J.B.Abshire et al.: *Geophysical Research Letters*, 32 (2005) <https://doi.org/10.1029/2005GL024028>
- 6) 田代 睦聡，伊藤恭佑：応用物理 **91** (2022) 220.
- 7) Tuan Thanh Ta et al.: *Proc IEEE symposium on VLSI Circuits*, Honolulu, Hi USA 2020.
- 8) D. krennich et al.: *Applied Physics B*, **92** (2008) 165.