

# ISS 搭載ミッション MOLI の概要と進捗

境澤 大亮, 大川 洋平, 三橋 怜, 澤田 義人, 今井 正, 住田 泰史

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構 MOLI プリプロジェクトチーム (〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1)

## Overview and progress of the ISS-born mission MOLI

Daisuke SAKAIZAWA, Yohei OKAWA, Rei MITSUHASHI, Yoshito SAWADA, Tadashi IMAI,  
and Taishi SUMITA

MOLI Pre-Project team., 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

**Abstract:** The Multi-footprint Observation Lidar and Imager (MOLI), is earth observation lidar mission on board the Japanese Experiment Module Exposed Facility (JEM-EF) on the International Space Station. This project advanced to Phase A in October 2021, the team began working on the next phase of the project with a formal budget. Mission instruments consist of lidar as a laser altimeter and imager. The outline of the mission will be reported.

**Key Words:** Above ground biomass, forest crown, height, DEM/DSM, space borne laser/lidar

### 1. はじめに

JAXA では、ISS に搭載するライダー・イメージャーの同時搭載ミッション(MOLI: Multi-footprint Lidar and Imager)の研究開発を進めている<sup>(1)</sup>。MOLI は、2021 年 10 月にミッション定義段階 (フェーズ A) からプロジェクト準備段階 (プリフェーズ A) へステージを変え、現在は正式プロジェクト (Phase B) に向け活動に移行している。ミッションの対象は、1) 3 次元地図の高精度化実証、2) 林冠高測定による陸域バイオマスの不確実性低減、3) 宇宙ライダーの技術実証の 3 項目である。本シンポジウムでは、MOLI ミッションの概要と進捗状況について報告する。

### 2. ミッション目的

MOLI では、国際宇宙ステーション (ISS) の船外実験プラットフォームにライダーとイメージャーを同時設置し、森林観測と地表斜面の計測を行う。レーザー高度計は、Q スイッチパルスレーザーを照射し、ターゲットまでのパルスの往復時間を計測し、その波形情報を解析して樹冠高や地盤高を求める。ICESat<sup>(2)</sup> では、樹冠高測定において、照射したフットプリントとその周辺の地盤面傾斜が測定誤差の主な原因となることが報告されており、MOLI では Fig. 1 のように 2 つのレーザーを照射し、それぞれを別々の検出器で同時に測定する。レーザーが林冠を貫通し得られる信号から DEM または DSM を生成し、フットプリントの標高から地表の傾斜、全体の波形解析から林冠高を推定する。MOLI センサシステムは、ICESat, ICESat-2, GEDI<sup>(2-4)</sup> の結果から、フットプリントの位置決定にイメージャーが不可欠であることを念頭にライダーとイメージャーの同時計測を実現する。これらの観測機器を用いたミッションの目的を以下に示す。

#### 2.1 3 次元地図高精度化実証

ALOS のパンクロマチック立体視センサ (PRISM: Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) を用いた全球高精度三次元地図 (AW3D) は、土地条件調査、建設ルート選定、都市開発計画などの大規模インフラ建設や、災害シミュレーションを行う行政に利用されている (115 カ国以上、900 件以上)。一方、AW3D は、森林地帯では地盤高データの不足により、校正されたデジタル地形モデル (DTM) の生成が困難であるという課題がある。森林地帯の場合、実際の地上高データが乏しく、DTM の精度が低下、局所的には 10m 以上の誤差が発生す

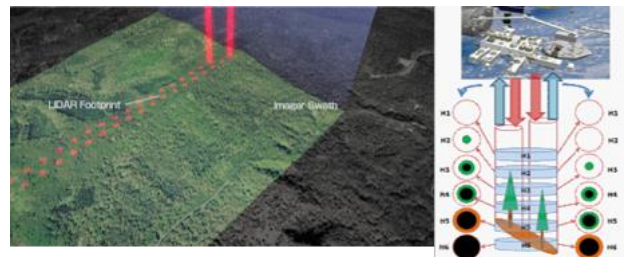


Figure 1. MOLI mission concept

る地域もある。MOLI では、レーザーパルスが林冠の樹頂部、構造、地盤を同時に取得できることから、そのデータを用いてデジタル3次元地図の誤差低減の実証を目指している。

## 2.2 森林バイオマス不確定性の減少

将来の世界平均気温の予測は、大きな不確実性を含んでいる<sup>5</sup>。この不確実性低減は、地球温暖化防止策や、その効果を高めるために重要である<sup>6</sup>。不確実性の大きな要因は、炭素収支、特に陸域の炭素吸収量の把握が不十分であることが指摘されている。森林は、陸域炭素収支の大きな不確実性の要因として重要な役割を担っていると考えられており、森林バイオマスはこの不確実性の指標の一つである。森林バイオマスの最も正確な推定は、樹木の乾燥重量を直接測定することだが、この方法では樹木を伐採する必要がある。全地域のデータを取得することには限界がある。

これまでの研究により、森林バイオマスと樹冠高の間には一定の相関があり、樹冠高の測定によるバイオマス推定が可能であることが示されています<sup>7,8</sup>。いずれの観測においても、レーザー照射点の緯度経度知識と検証データとの間に比較的大きな差異があり、ライダー同時観測におけるイメージャーの使用が強く望まれる。

## 2.3 宇宙用レーザーの動作実証

MOLI は、日本で初となる宇宙からの地球観測ライダーとなる予定です。また、MOLI の成果をもとに、衛星搭載ライダーの実現も目指している。地球観測用のライダーデータは、気象、林業、極地など幅広い分野で利用されている。軌道上での利用には、レーザーの寿命確保、性能実証、排熱処理など多くの課題があるが、MOLI ミッションでは、高輝度レーザーを宇宙で運用するための技術を獲得することを目指している。また、JAXA では高出力パルスレーザーの長寿命化の研究に取り組んでおり、ISS に搭載する高出力パルスレーザー（6W）の評価モデルを開発した。試作機を用いて、寿命、耐振動、耐熱衝撃性評価と電流源の耐環境特性評価や電磁適合性試験を完了した。真空中に置かれた試作レーザーの連続照射試験を実施し、1.5年間出力が急激に低下することなく稼働し、2回目の連続運転試験を予定している。

## 3. レーザー機器

MOLI で使用しているレーザー送信器に対する要求を Table 1 に示す。MOLI のレーザー送信器は、波長 1064nm の Q スイッチレーザーパルスで 7ns 以下のパルスを 40mJ の、150Hz で生成する。エキスパンダを介した後の最終的なビームに対して、拡がり角度 62.5 $\mu$ rad、中心位置のばらつきは 10 $\mu$ rad 以内であることが求められている。これは ISS から照射するビーム径が地上で 25m、ビーム中心位置の決定精度 15m との要求から割り当てられた値となる。

レーザーの光学配置は主発振器と光増幅器からなる MOPA 構成である。そのレイアウトを Fig.2 に示す。発振器はできるだけ低発熱とし、Q スイッチ発振器のアライメント変動を抑制する。励起光は発熱による共振器のアライメント変動を抑制するためにファイバカップルレーザーダイオード (FCLD) を使用する。FCLD は発振器から離れた位置に設置した。発振器の出力は光アイソレータを介し、1 段目と 2 段目の 2 段増幅器で 40mJ まで増幅する。発振器、光増幅器のレーザー材料は Nd:YAG セラミックスを用いた。MOPA 全体を与圧筐体に封入し、接着剤、レーザー部品に使用される有機材料からのアウトガス、レーザー装置以外からのアウトガスを抑制している。封入ガスは圧力 1 気圧以上の乾燥空気、封入に使用する接着剤とその重量は実験室での測定に基づいて決定した。光学ベンチ上の MOPA 光学系のほか、ポッケルスセル

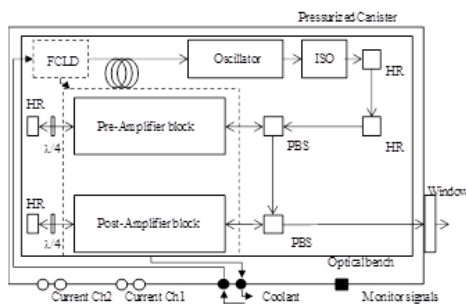


Figure 2. MOPA layout

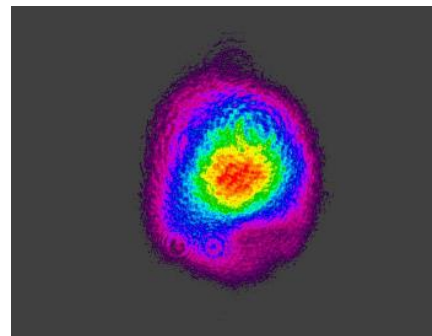


Figure 3. Far field laser beam shape

駆動用高電圧ドライバ (3.45kV, 10ns), LD 波形モニタ, 気圧センサ, 温度センサ, 冷却用コールドプレートが筐体に内蔵されている。

レーザーのファーフールドにおけるプロファイルを Fig.3 に示す。Fig.3 のレーザーの中心位置の変動は 20 $\mu$ rad 以下で、望遠鏡の拡大倍率 (x8) に応じて最終的な変動は 4 $\mu$ rad 以下となり、要求は満足している。Q スイッチレーザーのパルス幅は平均 4.5ns, 標準偏差 118ps で、レーザー立ち上がり時間は 1.9ns (パルス高さの 10%から 90%まで) である。Fig.4 は、光増幅器 LD 駆動電流の関数として、出力レーザーパワーを示している。40mJ/150Hz の出力を得るために 90A 駆動のピーク電流でレーザーの要求を満足するレーザー出力が得られている。また、90A 駆動時の LD 出力から 1064nm レーザー出力までの光-光変換効率は 9.8%, 電気-光変換効率は 5.1%であった。LD 駆動条件は、駆動ピーク電流が定格ピーク電流の 70%以下、デューティ比が定格デューティ 3%の 60%以下となっている。

#### 4. プロダクト

MOLI のプロジェクトは評価基準に林冠高および森林バイオマスを高精度に推定する手法を開発し、データを広く公開することを挙げている。加えて、L-band SAR (ALOS-2/PALSAR-2 等), GCOM-C/SGLI 等の他衛星の観測データを統合的に使用して広域に森林バイオマスを推定する手法の研究開発を行う。これらの提供プロダクトリストを Table 1 に示す。

また、現状の衛星による 3 次元地図の最大課題は森林等の構造物、地表物の下の地盤面を識別できず、森林等の下の DTM の精度が低い (10m 以上)、または、精度保証を設定できていないことであるため、MOLI の実証目的は、上記森林下の DTM の高精度化 (5m(RMSE)以下の精度) が目標である。森林の地表被覆率 (地盤面が森林によって覆われる率) が高く地盤面の視認性が下がると、ライダー信号の S/N が下がり地盤面の高さの観測精度が悪化する。このため、地盤面からのライダー信号がほとんど無くなる森林の地表被覆率が 95%以上となるエリアを除外し、95%未満となるエリアにおいて DTM を製作実証し、5m(RMSE)以下の精度を確認する。森林の地表被覆の影響確認のために地表被覆率約 30%毎に各々 10 例以上を実施する。精度評価は、ライダーフットプリント以外のポイントも含めてエリア内の任意のポイントで実施する。

#### 5. まとめ

MOLI は正式な予算が認められ、プロジェクト準備の段階に入った。ISS の運用期間が限られてきているため、開発を加速し、2024 年度には軌道上実証を予定している。レーザー機器はエンジニアリングフライトモデルを製作する前に、試作機を用いた様々な評価試験を実施した。今後はシステム全体のステージを進めるプロジェクト準備活動を加速する。

Table 1. MOLI product list

Product level	Product category	Products	Remark
L1 (Standard)	Lidar footprint products	Waveforms(500Msps)	$\geq$ including geolocation data Footprint Position Accuracy $\leq$ 15m
	Imager product (1km swath)	Image (Red, Green, NIR)	geometrically corrected
L2 (Standard)	Lidar footprint products	Ground heights	$\leq$ 3m(*1)
		Canopy heights	$\pm$ 3m(*2), $\pm$ 20% (*3)
		Forest biomass	$\pm$ 25t/ha (*4), $\pm$ 25% (*5)
L3 (Research)	Integrated products with Lidar and imager (1km swath)	Canopy heights	Target
L4 (Research)	Wall-to-Wall map products (Integrated with GCOM-C/SGLI, SAR Data)	Forest biomass	oCanopy heights, $\pm$ ~5m(*2), $\pm$ ~40% (*3)
		Canopy height map	oForest biomass $\pm$ ~40t/ha (*4), $\pm$ ~40% (*5)
		Forest biomass map	

\*1 RMSE: Forest surface coverage is less than 95% and ground slope is less than 30 degrees.)

\*2 Canopy Height is under 15m, \*3 Canopy Height is over 15m

※4 Biomass density is under 100t/ha, ※5 Biomass density is over 100t/ha

#### 参考文献

- 1) D. Sakaizawa in 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS). IEEE, 2022, vol. I, pp. 1861-1864.
- 2) James B. Abshire: Geophys. Res. Lett., vol. 32, pp. L21S02, March 2005.
- 3) Ralph Dubayah: Science of Remote Sensing, vol. 1, pp. 100002, 2020.
- 4) T. Markus: Remote Sensing of Environment, pp. 260 - 273, 2017.
- 5) E. Hawkins and R. Sutton: Climate Dynamics, vol. 37, pp. 407 - 418, 2021.
- 6) C. Le Quere: Earth System Science Data, vol. 8, pp. 605-649, 2016.
- 7) M.A. Lefsky : Geophys. Res. Lett., vol. 32, pp. L22S02, March 2005.
- 8) Masato Hayashi: *Molecular Spectra and Molecular Structure II. Infrared and Raman Spectra of Polyatomic Molecules* (D. von Nostand Company, Inc., Princeton, 1945) p. 122.