

特集 衛星搭載ライダー

# 宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager)

浅井 和弘<sup>1</sup>, 境澤 大亮<sup>2</sup>, 水谷 耕平<sup>3</sup>, 西澤 智明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東北工業大学(〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35-1) <sup>2</sup>字宙航空研究開発機構(〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1) <sup>3</sup>情報通信研究機構(〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1) <sup>4</sup>国立環境研究所(〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Lidar Mission of Vegetation Observation from Space Multiple-footprint Observation Lidar and Imager (MOLI)

Kazuhiro ASAI<sup>1</sup>, Daisuke SAKAIZAWA<sup>2</sup>, Kohei MIZUTANI<sup>3</sup>, and Tomoaki NISHIZAWA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tohoku Institute of Technology, Sendai, 982–8577 <sup>2</sup>The Japan Aerospace Exploration Agency, Sengen 2–1–1, Tsukuba, 305–8505 <sup>3</sup>National Institute of Information and Communications Technology, Koganei 184–8795 <sup>4</sup>National Institute of Environmental Studies, Tsukuba 305–8506

(Received August 27, 2020)

The purpose of the MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) mission is to demonstrate Japan's first space lidar and to obtain canopy height / three-dimensional forest structure information required for the evaluation of Above Ground Biomass (AGB), which plays an important role in the carbon cycle and climate change mechanisms. The lidar also makes a possibility for observing clouds and aerosols. The results obtained by MOLI will bring a guideline for the future global vegetation observation satellite. In addition, MOLI mission will provide a foothold for application development to Doppler lidar aiming at global three-dimensional observation of wind vectors, the scanning lidar realizing precision DEM, and  $H_2O$  DIAL for water vapor profiling.

キーワード: ライダー,樹高,森林バイオマス,数値表層モデル,イメージャー **Key Words**: Lidar, Canopy heigh, Forest biomass, Imager, DSM

# 1. はじめに

本文は、現在 JAXA で検討中の日本初の地球観測 用宇宙ライダーの技術実証と、科学的には炭素循環 や気候変動メカニズムにとって重要な役割を演じる 地球規模での森林バイオマス(主に地上部バイオマ ス<u>Above Ground Biomass: AGB、以下本文では AGB</u> と略す)の評価に必要な林冠高/樹冠高、三次元森 林構造情報の高精度取得、雲エアロゾル・大気パラ メータ観測を目的とした「衛星搭載・植生観測ライ ダーおよびイメージャー(MOLI: Multi-footprint Observation Lidar and Imager, 以下 MOLIと称す) ミッション」について研究開発の現状<sup>1-5)</sup>も含め紹 介する.

# 2. MOLI ミッションの背景

森林は私たちの生存に強く影響を及ぼしている. 例えば,森林は人間の生活や動物の生息地を供給 し,土壌侵食を防ぎ,流域保護に寄与している.ま た,大雨や洪水などの自然災害の緩衝として生態系 サービスに多大に関与している.一方,近年の地球 温暖化に伴う気候変動,異常気象と大いに関連付け



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) (浅井 和弘)

られるのが、海洋に次ぐ炭素貯蔵庫としての森林で ある.現在,世界の森林面積は約41億haで陸地面 積の3割を占めている. 化石燃料消費/セメント工 業生産から大気に排出される二酸化炭素(以下, CO<sub>2</sub>) は年間約 8.3 Gt であり, その中の約半分が大 気中に留まり、残りが海洋と陸地(土壌、森林、食 料畑,草地,湖沼など)に取り込まれる<sup>6)</sup>.ご承知 のように、森林を含む植生は光合成を通して吸収し たCO2を有機物であるバイオマスに変換して固定 する.世界全体の森林バイオマス蓄積量は、地上部 (AGB)+地下部(根)の生体バイオマスで約606 Gt (炭素重量換算で約 303 GtC), 枯死木や落葉落 枝の堆積物で 59 Gt(同,約 29.5 GtC)と見積もら れている. さらに森林の重要なことは、森林内には 生体バイオマスの炭素蓄積量と同程度の炭素が土壌 有機物として存在しており,森林の総炭素蓄積量は 662 GtC (2020 年) となる<sup>7,8)</sup>.

20世紀に入って爆発的に人口が増加し、急増し た人口を養うために食料の増産、薪燃料、家屋敷地 などが必要となり,森林の開墾,伐採など土地利用 変化が引き起こされ、これらによる森林破壊・劣化 が森林減少の最大の原因と言われている. また近年 では大規模森林火災が頻繁に北米大陸、アマゾン流 域,豪州で発生し大規模な森林破壊を引き起こし, 環境の面からも生物多様性の観点からも大きな問題 を提起している. 2019年9月から 2020年3月に懸 けて発生した豪州での大規模な森林火災は、死んだ り住む場所を失ったりした動物の数が約30億匹で あったことは悲惨な記憶として残っている. これら の森林破壊・劣化により 1990 年から 2020 年の 30 年間だけでも, 推定4億2000万ha(世界の全森林 面積の約1割),炭素蓄積量で約6GtC減少した. CO2 収支の観点からは、この農業、林業、その他 (違法伐採を含む)の土地利用や大規模森林火災な どに伴う土地被覆の変化は、本来なら森林によって 吸収蓄積されるべき CO2 が森林の消失により吸収 (sink) が行われなくなるので排出 (source) として 見なされる、そして、この排出として見なされる換 算 CO<sub>2</sub> 量は,実に人間起源による CO<sub>2</sub> 排出の 13%



Fig. 1 Proportion and distribution of global forest area by cli-matic domain, 2020<sup>8)</sup>.

を占めてしまう<sup>6)</sup>.

地球規模で森林に蓄えられている総炭素蓄積量 662 GtC は、東南アジア(ボルネオ島など)、中部 アフリカ(コンゴなど)、中米・南米(アマゾン流 域など)にある熱帯林がその内の約 50%、日本な どが属している温帯の森林が同 20% とそれぞれ貯 蔵している。したがって、これ以上、森林破壊・劣 化による土地被覆変化を引き起こして CO<sub>2</sub> 吸収容 量を減らし更なる排出源とならないよう、地球上の あらゆる生物の持続的生存を脅かさないために、大 切な森林の評価・管理・保護の行動が求められる。

衛星リモートセンシング技術の発達により、森林 の評価・保護のための地球環境観測とくに熱帯林域 での森林バイオマス観測には合成開口レーダ (SAR) は欠かすことのできないアクティブセン サーである<sup>9,10)</sup>. 中でも, JAXA が打ち上げ, 運用 を行っている陸域観測技術衛星シリーズ, ALOS (2006年), ALOS-2 (2014年) にはフェーズドアレ イレーダー (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar: PALSAR, PALSAR-2) が搭載されており 国内外での自然災害状況の解析やグローバル森林観 測に活躍している<sup>10)</sup>. PALSAR, PALSAR-2 は全天 候観測が可能でありリアルタイムでの変化の抽出に も優れ、とくに近年、斜め観測によるデータの歪み の補正方法が改善されて以来、山岳地での森林解析 精度も上がり大いに期待されている<sup>11)</sup>. Fig. 2 は, 送信偏波:水平(H).受信偏波:垂直(V)のクロ ス偏波による受信後方散乱信号(dB)強度とAGB (Mg/ha) との相関を示している. 受信信号とバイ



Fig. 2 Relationship between backscatter power (in dB) at HV (horizontal transmit, vertical receive) polarization versus aboveground dry biomass (tons/ha)<sup>13)</sup>.

# 解\*説

オマスとの関係はバイオマス 150 Mg/ha までは良い相関にあるが、150 Mg/ha を超える様な高密度な 熱帯林では飽和現象が顕著に表れ正確な AGB 観測 が難しい<sup>12-14)</sup>.また国内の閉鎖した成熟林や、湿 地林やマングローブ林では水面による 2 回反射のた めにバイオマス推定値が過大に評価されるなどの問 題点がある.

一方, NASA は 2003 年に世界初の宇宙ライダー Geoscience Laser Altimeter System: GLAS を打ち上 げ,2004年-2009年の運用を通して,森林上部から の散乱信号と地表面からの散乱信号との時間差から 林冠高/樹冠高が直接計測できる事を明らかにし, 且つ熱帯林での森林観測(高さとバイオマス)の可 能性を示した5-19). これらを踏まえ、雲天には弱い が森林高を精度よく測定できる(最終的には高密度 バイオマス推定も可能) 光波領域の植生ライダー と、全天候型ではあるが高密度バイオマス観測では 信号が飽和してしまう電波領域の L-band SAR が有 する各々の長所を有効に利用してそれぞれのセン サーの短所を補完することにより, 高密度な熱帯林 域での AGB 観測精度を高めることが可能となる. 以上の背景に基づき研究開発が進められているの が,筆者らも参加している MOLI ミッションであ る.

#### 3. MOLI 開発の現状

#### 3.1 林冠高/樹冠高計測の原理とAGB 推定法

衛星搭載・植生ライダーの受信強度方程式は,森 林内大気も考慮すると以下の(1)式で記述できる<sup>20)</sup>.

$$P_{r_{\lambda}}(H) = \frac{P_{t_{\lambda}} \cdot K_{t_{\lambda}} \cdot K_{r_{\lambda}} \cdot A_{r} \cdot T_{atm_{\lambda}}^{2}}{H^{2}}$$

$$\times \left[ \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot \beta_{atm_{\lambda}}(H) \cdot \{(1 - C_{vc}(H))\} + \frac{\rho_{vc_{\lambda}}(H)}{\pi} \cdot \Delta C_{vc}(H) \cdot \{(1 - C_{vc}(H))\} \right]$$

$$(1)$$

ここで、 $P_{t\lambda}$ :送信レーザーエネルギー、 $K_{t\lambda}$ ,  $K_{r\lambda}$ : 波長 $\lambda$ での送信系、受信系の総合的な光学効率、 Ar:受信望遠鏡の有効面積、 $T_{atm\lambda}$ :衛星から距離 Hまでの大気透過、c:光速、 $\tau$ :レーザパルス幅、 c・ $\tau/2 = \Delta H$ :高さ分解能、 $\beta_{atm\lambda}$ :大気後方散乱係 数、 $C_{vc}$ :フットプリント面積に対する森林被覆率、  $\rho_{vc\lambda}$ :送信ビーム径 x $\Delta H$ の円筒内にある葉、幹、 枝、梢、下草の合計反射率、または地表面アルベ ド、 $\Delta C_{vc} = C_{vc}(H + \Delta H) - C_{vc}(H)$ である.

大かっこ内第1項は衛星--森林--地表面間の大気 情報を表し,i)衛星から林冠までの光路ではCvc (H)=0であり,通常の大気ライダー受信光強度,



Fig. 3 Waveform of return signal from earth surface through atmosphere.

ii)森林内では Cvc≠0, この項は林冠到達後の森林 内への透過光を表し林冠一地表間での森林内大気情 報に対応している.一方,第2項は送信ビーム径 x△Hの円筒内にある葉,幹,枝,梢,草本などに 関する植生情報を与え,送信パルス光は最終的に地 表面に到達し後,地表面アルベドで反射され衛星上 のライダー受光系に戻る.Fig.3に,例として航空 機ライダー(詳細は次節4.)で取得したリターン 信号(青線)を示す.

横軸は受信光強度,縦軸はデジタイザーの Bin# に各々対応している. リターン信号は,森林上部 (林冠) に到達した送信光による反射光から始まり (Signal start),送信パルス光は時々刻々森林内部の 高木層,亜高木層,低木層を進み,草本層を経て最 後に地表面(Ground surface)に到達する. リター ン信号は林冠高、各層での葉、幹、枝、梢の密度、 地表面などの情報を持っている. このデジタル化さ れた信号は"waveform"と呼ばれ、林冠高/樹冠高 は Signal start-Ground surface 間の bin# x ΔH から算 出される. すなわち森林上部からのリターン信号 Signal start は必ず出現するので、地表面からのリ ターン信号 Ground surface が得られるならば,正確 にかつ確実に林冠高/樹冠高が計測可能である. AGB の推定・算出は、上述の方法で得られた林冠 高/樹冠高をパラメータとしたアロメトリー法によ り求める方法とノイズレベルから或る閾値以上の信 号を Signal stop 側から Siganl start まで積分し、その 面積との割合に達する相対高(Relative Height: RH) など waveform が持つ統計量を使った多重回帰解析 法がある.

Waveform はフットプリント内の地盤が傾斜して



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) (浅井 和弘)

いると、平地での waveform に対し波形が伸長して しまう. その結果、林冠/樹冠の推定高や、アロメ トリー法による AGB 値、多重回帰法による AGB 値ともに誤差を含むようになる. この様に、AGB 値の推定精度は観測域の地形、気候区分、植生分 布、森林構造、うっぺい度などに大きく影響を受け るので正確な校正/検証が重要となる. MOLI ライ ダーはフットプリント内の地盤情報取得のために、 2本の送信ビームを同時に地表に向け照射して地上 に一対のフットプリントを出現させ、レーザーの高 繰り返しを利用して多数のフットプリント対からの 受信信号を解析して地盤傾斜を推定する新方式を取 り入れた<sup>21)</sup>.

#### 3.2 Nd:YAG レーザー

MOLIのレーザー送信器は, 波長 1064 nm で 40 mJ の Qsw レーザーパルスを 7 ns 以下のパルス幅で 生成する.運用する環境は ISS が周回する宇宙空間 であり,一般的な計測や加工に利用されるレーザー の運用環境と異なり, MOLIで使用するレーザーは 製作終了後, ISS へ取付けられ運用が終了するまで の間,一切の調整は行うことができない.このた め,輸送や取付,宇宙飛行士による取扱いで想定さ れる振動や衝撃に耐える必要がある.また真空環境 かつ放射線に晒されるため,使用する電子部品,光 学部品の放射線耐性やその防護措置が必要となる.

ミッション機器を含めて,使用されている接着剤 や部材から排出される分子状の物質(溶剤など多岐 にわたり、コンタミネーションと呼ぶ) がレーザー と相互作用することによって光学部品のレーザー照 射面に蓄積し, 焼損させるレーザーの機能喪失を引 き起こす。このコンタミネーションにより引き起こ されるレーザーの機能喪失をどのように防ぐのか, その条件を明らかにすることは、軌道上での長期間 のレーザー動作を実現する上で必須であり、MOLI 以降の地球環境計測用レーザー装置開発にも有用と なる、コンタミネーションの発生源は製作工程で用 いられる固化済接着剤が主である. コンタミネー ション防護の方法として、レーザーの製作工程に接 着剤不使用を徹底することが挙げられる. ただし レーザー製作工程で使用を禁止しても、それ以外の 電源,望遠鏡,光検出器,信号処理部の製作工程に も接着剤が利用されるため、レーザー以外からのコ ンタミネーションの飛来は阻止できない. そのため 各製作工程において溶剤の使用禁止も手段として考 えられるが、それまで蓄積された製作工程の見直し により、新規手順の作成・検証の作業が生まれ、 レーザー制作以外にも開発リスクが発生する. これ



Fig. 4 MOPA layout on the optical bench.

と比較すると、レーザー単体で防護策を講じ、他の 工程は確立された方式を用いるほうが合理的であ る. MOLIのレーザー送信器は光学ベンチに組んだ レーザー光学系を与圧筐体に封入し、レーザー自身 で発生するコンタミネーションを抑制、他の機器か ら飛来するコンタミネーションの影響を最小化する 形態とした.

構成は主発振器と光増幅器からなる MOPA であ る. 試験モデルを Fig. 4 に示す. 軌道上の運用開始 後アライメント調整を行うことは難しく,ある程度 の温度範囲に晒されることになる発振器は,可能な 限り低出力化し,発熱に伴う共振器のアライメント 変動や出力低下に対して,堅牢となるよう,励起光 はファイバーカップリングレーザー(Fiber Coupled Laser Diode: FCLD)による端面励起 Qsw パルス レーザーとした. FCLD は発振器より離れた場所に 配置することで,励起光源の発熱による Qsw 発振 器のアライメント変動も抑制する.

発振器出力は光アイソレータを介して前段,後段 の2段増幅器により40mJに増幅する.発振器およ び光増幅器に使用するレーザー媒質として, Nd:YAGセラミックスを採用している. MOPA全体 は、レーザー構成部材に使用される接着剤や洗剤, 部材そのものから発生するアウトガスやレーザー機 器以外から飛来するアウトガスを除外するため、与 圧筐体に封入して使用する.筐体に封入する気体は 乾燥空気を1気圧とし、内部で使用する接着剤の重 量は別途試験を実施した条件を適用し、筐体を密閉 した.筐体内部には MOPA を配置した光学ベンチ に加え、ポッケルスセル駆動用の高電圧電源、LD 波形モニタ、気圧センサー、温度センサー、冷却用 コールドプレートが内蔵されている.

#### 3.3 ライダーとイメージャー

MOLI ミッションは, 高度 330 km-435 km, 軌道 傾斜角 51.6°で現在飛行中の国際宇宙ステーション



(International Space Station: ISS)-日本実験棟 (Japanese Experimental Module: JEM)-暴露部(Exposed Facility: EF) に搭載を予定している. したがって MOLI の観測緯度範囲はこの傾斜角に挟まれた熱帯 林,温帯林,および北方林の一部となる(Fig.1を 参照). ライダーシステムは基本的には、次の三つ の観測モードを有している. Fig. 5 に, ISS-JEM-EF に搭載された MOLIの概念図を示す. なお、ライ ダーから射出された2本の送信ビーム(赤色)は, 後述する地盤面傾斜角度および方位角の自己決定用 である.

①レーザー高度計モード:

森林、人工物など標高より高い地表面の高さを測 る「数値表層モデル (Digital Surface Model: DSM)」 用データ,海面,植生や人口建造物のない土地や森 林内の林床に到達したレーザー送信光からの反射光 を使って標高を測る「数値標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)」用データ,得られた DSM データから DEM データを差し引いて「林冠/樹冠 高 (Digital Canopy Height Model: DCHM)」データも 同時に正確に取得する.

②waveform モード:

森林内の葉、枝は分布型散乱体として光学的には 機能するために森林の内部構造が推察可能となり. また樹高,バイオマス,森林の立体構造(攪乱有 無, 単層/複層等) は生物多様性の保存にとっても



重要な指標であるから、本ミッションで取得される waveform は全球規模での生物多様性の理解や保全 計画策定等に対し有用な情報提供源として期待され る.

③大気観測モード:5節にて詳しく述べる

先に述べたように,森林は光合成を通してバイオ マスを生成し生態系や生物圏の炭素循環メカニズ ム, CO2 収支に寄与している. しかし森林を含む 陸域植生は、「人為的土地利用の変化」の影響によ りその CO2 収支推定値が 1.4±0.8 PgC/年間と大き な誤差を有している.本提案ミッションは未だ解決 されていないバイオマス推定時の誤差の低減化を図 り、森林が関わる CO2 収支の高精度な推定を目的 とする. そのために、 ライダー/イメージャーの設 計/開発には ISS 飛行高度からレーザーを地表に照 射してフットプリント内の林冠/樹冠の高さを観測 し、最終的には地球規模で森林バイオマスを精度良 く算出できる様に以下の項目がミッション要求とし て求められている

- ・宇宙環境下で24時間,1年間の稼働
- ・地上の人間に対するアイセーフ基準の順守
- ・フットプリント内の測定精度
  - +/-3m(林冠高/樹冠高<15m), +/-25% (林冠高/樹冠高>15 m)
  - +/-25 t/ha (バイオマス密度<100 t/ha), +/ -25% (同>100 t/ha)

Table 1 に、MOLI ミッション機器であるライダー とイメージャーの諸特性を示す.

過去に運用された GLAS, また 2018 年 12 月に打 ち上げられて現在運用中の Global Ecosystem Dynamics Investigation Lidar: GEDI/NASA (2019 年-2021年予定)は、ライダーと画像センサーであ

フイダー仕様	
出力 @波長	40mJ @1064nm
パルス幅	<7nsec
受信口径	60cm φ
送信ビーム拡がり	$63\mu\mathrm{rad}$
検出器	2x2 アレイ Si-APD
	2x1 検出用
	2x1 予備用
高さ分解能	0.75m
観測高度の範囲	-50m-150m
フットプリント径	25 m <i>φ</i>
S/N比	>10
イメージャー仕様	
	0. 55–0. 63 μ m
観測バンド	0. 64–0. 72 μ m
	0.74-0.88 µ m

5m

1000m

分解能

観測幅

Table 1 Characteristics of MOLI mission instruments (lidar and imager).

Fig. 5 Conceptual diagram of MOLI onboard ISS-JEM-EF.



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI(Multi-footprint Observation Lidar and Imager)(浅井 和弘)

るイメージャーとの同時観測システムを採用してい ない. 我々は、上述したミッション要求を満たすた めにはフットプリント内の画像情報による樹冠のサ イズ、高さ、および圃場データが非常に重要である との認識の元に, 高解像度イメージャーをライダー に隣接させた同時観測方式を採用した.また 3.1 で 指摘をしたように、林冠高/樹冠高の算出に際して は地盤情報が重要である. MOLI ライダーはこの地 盤傾斜に起因する誤差低減を目的に、二分割した送 信レーザー光を地表面に照射してフットプリント対 を作り、ショット毎に along-track 方向に連続的に出 現する多数のフットプリント対の中から近接した3 フットプリントを選び出して、それぞれの衛星-地 上間の往復時間の差より地盤面傾斜角度および方位 角を自己決定する機能を持たせている<sup>21)</sup>. Fig. 5 に は、ライダーから射出された2本のビームを赤色で 模写してある.

#### 4. 航空機搭載植生ライダーと搭載実験

MOLIの植生観測における実証と解析アルゴリズ ムの開発, さらに MOLI が衛星搭載されたときの 検証実験に使うため航空機搭載植生ライダーを開発 し,2016年11月に航空機搭載実験を行った. MOLI はイメージャーとの組合せで観測位置確認, 森林状況確認,さらには観測幅を拡張することを考 えており,航空機実験でも可視光用のカメラをライ ダー装置に同架して MOLIの運用状況を模擬でき るようにした.

航空機搭載植生ライダー装置(Fig. 6)では 20 Hz の Nd: YAG パルスレーザー(Quantel 社: Ultra50 GRM のアッテネータ付き)の基本波と 2 倍波を受 信望遠鏡の中心位置前方から約 0.6°の広角で送信 する.受信望遠鏡は広視野を確保するため口径 10 cm Ø の屈折望遠鏡にした.波長 1064 nm の受信は, 試作した MOLI ライダー用検出器である 2x2 アレ イ Si-APD の全 4 素子を使い, 4Channel 分のリター ン信号出力を得る. 532 nm の P, S 偏光受信用には 単素子の APD を 2 個使い, スタートパルス用にも



Fig. 6 Optical and data flow configurations of the lidar.

APDを1個使っている.Nd:YAGパルスレーザーからの送信光は約0.6°に拡げられており、これを検出器の各素子が円形のパターンで切り取った形となる.したがって、波長1064 nm での視野は2×2に配置された直径0.21°の各円形で、隣り合った視野の中心は0.22°離れている.532 nm での視野は直径約0.5°の円形である.このライダー装置は532 nmの(偏光)チャンネルを持つことにより、地表面の波長反射特性を得られる可能性がある.また、海面上で測定を行えば532 nm での海洋植物プランクトン観測の可能性があるが、航空機実験ではそれに適したパラメータでの観測は行っていない.

レーザー光は航空機の窓から下方に打ち出され、 反射光が望遠鏡で集光され各々のAPDにより検出 される.スタートパルス,Qsw信号も6Chの受信 信号と共に500 MHzの高速ADポストエレクトロ ニクスでデジタル信号に変えられて信号取得開始時 刻と共にコントロール用のPCに記録される.PC はGPSタイムサーバーからNTP(Network Time Protocol)で時刻補正されるようになっている.一 方,航空機の位置・姿勢は航空機に搭載されている POSシステム(INS+GPS)により0.5 msec毎に記 録されており、この時刻と信号の記録時刻を突き合 わせることによりレーザー発振時刻における航空機 の位置・姿勢が分かるようになっている.

航空機搭載実験は 2016 年 11 月 16, 17, 18 日に 行われたが,その前の試験飛行において,窓からの レーザー光の反射が強す ぎて 1064 nm 用の4 個 (Ch1-4)の検出器の内 Ch4 が壊れた.そこで,反 射光の方向をより望遠鏡から遠ざけ影響を小さくし たうえで,Ch1-3 で観測を行うことにした.3素子 あれば1ショットのデータから地盤の傾きは推定で きる.また,航空機の速度が 100 m/s 前後なので, ショットごとの進行方向の距離は約5 m となり, 連続するデータからも地盤傾斜の推定が行える.

観測方向の初期同定では海岸線の地形を使うこと が有効であった.カメラ画像とライダーのリターン 信号を比較することにより,大体の位置を推定し, その後 Fig. 7 (縦軸は信号強度,横軸は bin#.右側 が低高度側.陸地構造物からのリターン信号,海面 からのリターン信号が見られる.)のように信号の 形と地形写真を比べることにより航空機に対する視 野の方向を視野の 1/10 程度で決めることができた. Fig. 8 には 5600 m の高度(視野は直径約 20 m)か らの森林観測の一例を示す.室戸のある谷筋に Ch1,2 がかかっており山側は Ch1, Ch3 の方角であ る.これらの信号から地盤傾斜の導出が可能にな る.実際,いくつかの現地検証地点において地盤面





Fig. 7 Return signals of Ch1 and Ch2 at 1064 nm, and measured positions indicated on a coastline picture.



Fig. 8 Return signals at 1064 nm and on-board-camera picture.

の傾斜補正をしたほうが平均的な樹冠高が精度よく 導出され, MOLIの要求精度を満たすとの結果も出 ている<sup>4)</sup>. 航空機搭載実験では各種の樹林を観測し ており, データは樹冠高や炭素蓄積量を精度よく見 積もるためのアルゴリズム開発に使われている.

### 5. 観測可能な大気パラメータ

MOLI ライダーの測定データを用いることで, 雲の検出と共に雲・エアロゾル(以下, 大気粒子)の 波長 1064 nm での消散係数,後方散乱係数,光学 的深さといった光学特性の推定が可能と考えられ る.2006 年に NASA によって打ち上げられた CALIPSO 衛星に搭載された 2 波長(532, 1064 nm) 偏光 Mie 散乱ライダーである CALIOP の解析では, 測定データから大気粒子の検出,大気粒子のタイプ 識別,そして消散係数等の光学特性の全球推定が行 われてきた<sup>22)</sup>. CALIOP 解析の多くでは測定された 波長 532 nm での減衰付き後方散乱係数と偏光解消 度が用いられているが, MOLIでは波長 1064 nm の 減衰付き後方散乱係数を用いた大気粒子推定を行 う.

従来のライダー解析における雲検出の多くでは, 信号校正されたライダー測定値である減衰付き後方 散乱係数を用いた閾値法が利用されている<sup>22)</sup>. 減 衰付き後方散乱係数は大気粒子等の消散によるライ ダー信号の減衰補正がなされていない.よって、ス ペースライダーからの雲検出では、検出対象高度よ り上空に光学的に厚い大気粒子層が存在した場合. 誤判定を引き起こす可能性がある(検出対象高度に 本来は雲が有るはずなのに雲無しと判定される). そこで、雲検出をより高確度に実施するために、大 気粒子の光学特性を推定して信号減衰を補正した後 に雲検出を行い、更に雲検出の判定結果を大気粒子 の光学特性推定に反映するとした、雲検出と大気粒 子の光学特性推定を同時に行う解析手法の開発を進 めている. 大気粒子の光学特性推定では Fernald の 手法<sup>23)</sup>や Platt の手法<sup>24)</sup>の応用を検討している.そ の際にライダー比をどのように設定するかは重要な 検討事項となる. また, MOLI ライダーは植生計測 を主目的として設計されているため、従来の大気粒 子計測用のスペースライダーに比べると光学的に薄 い大気粒子(バックグラウンドエアロゾル等)に対 する感度は低いという欠点がある一方で、その高 度・水平分解能は 10 倍以上と格段に高いといった 特徴も備えている、解析の工夫により、これまで把 握出来なかった細かな大気現象を広範囲・同時に捉 えることのできる可能性を秘めている.加えて. MOLI ミッションではライダーと共にイメージャー による計測も行われる. ライダーの高度分布計測と イメージャーの水平分布計測の複合解析から、 雲層 検出や大気粒子の光学特性の推定精度の向上が期待 できる.

上記解析から, 雲検出による上空の雲の有無, 大 気粒子の光学特性推定からライダー信号の減衰に関 する情報が得られ, これらの情報は本ミッションの 核となる森林パラメータの高精度推定の実現に活用 される. 例えば, 地表面近傍でのライダー測定デー タの品質検査・保持(森林パラメータ推定で用いる 測定データの取捨選択など)に利用される. また, MOLI ミッションからの大気粒子プロダクトの発信 は, 科学コミュニティー並びに国内外社会に貢献す



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI(Multi-footprint Observation Lidar and Imager)(浅井 和弘)

るものであり重要な価値をもつ. CALIOP による連 続観測は,大気粒子の巨視的・微視的特性に関する 10年以上にわたる全球データを創生し,大気粒子 に関わる気候・大気環境の諸分野での科学的知見の 創出に多大な貢献を果たした. この CALIOP 観測 の功績に基づき,宇宙からのライダーによる大気粒 子の高度分布計測の継続が期待されると共に,大気 粒子プロダクトの長期・継続的な取得も切望されて おり, MOLI ミッションはこれに貢献するものとも なる.

# 6. 我が国の宇宙ライダーにとっての MOLI 開発の重要性

現在の所, MOLIのフライトモデル開発および打 ち上げ時期については未だ確定していないが, 目下 の目標は2023年としている.本ミッションの将来 展望として, MOLIの実用性が確認されたなら国内 行政機関, 研究機関などとの連携を通して, MOLI 後継機として本格的且つ継続的な植生観測ミッショ ンへ展開して国際貢献に役立てたい.

次に、レーザー高度計モードでの MOLI は宇宙 から地盤面までの精度良い測距が可能なため、 DEM 情報, DSM 情報さらに陰になってフォトグラ メトリーでは得られない地盤高 (Digital Terrain Model: DTM) 情報が精度よく得られる. これらは、 ALOS-PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) で取得された全球数値地 表モデル (ALOS World 3D: AW3D)<sup>25)</sup>の較正/比較 用にも応用可能であり、世界に誇る AW3D の更な る高精度化に役立つ可能性を秘めている.

また将来の地球観測を考える上で,ライダーは絶対に欠かすことの出来ない衛星搭載アクティブセン サーとなるであろう.現在,以下の様な高機能ライ ダーミッションが提案されている.

- ・H<sub>2</sub>O 濃度, CO<sub>2</sub> 濃度などの大気組成分子の 3 次元マッピング可能な DIAL など<sup>26)</sup>
- ・全球3次元観測をめざすドップラーライ ダー<sup>27,28)</sup>
- ・観測幅を有す DEM 情報取得用スキャンニング ライダー
- ・大気粒子を計測するドップラー計測機能を備えた に偏光高スペクトル分解ライダー<sup>29)</sup>

我が国初のライダーミッション・MOLIの成功が もたらす基盤技術は、これら次世代ライダーの開発 に必ず繋がる重要な技術でもあると信じている.

#### 謝 辞

MOLI ミッションの検討が始まってから約 10 年

が経った.本ミッション検討の立ち上げ時から強力 な推進者であった故下田陽久先生(元東海大学教 授)に心より謝辞を述べる.

#### 参考文献

- K. Asai, H. Sawada, N. Sugimoto, K. Mizutani, S. Ishii, T. Nisizawa, H. Shimoda, Y. Honda, K. Kajiwara, G. Takao, Y. Hirata, N. Saigusa, M. Hayashi, Y. Sawada, Y. Awaya, T. Endo, T. Kimura, T. Imai, D. Sakaizawa, J. Murooka, T. Kobayashi, K. Suzuki, "MOLI: Multi-footprint Observation Lidar and Imager onboard International Space Station (ISS)- Japanese Experimental Module (JEM)/Exposed Facility (EF)", First International Workshop on Space-based Lidar Remote Sensing Techniques and Emerging Technologies, (2014).
- 2) 今井 正,境澤大亮,グェン タット トルン,三橋 怜, 澤田義人,林 真智,木村俊義,浅井和弘,平田泰雅, 宇宙からの森林観測\_ISS 搭載植生ライダー MOLI 計 画,日本リモートセンシング学会誌 40 (2020) 20.
- K. Asai, Mission Requirements of MOLI Proc. International Workshop on Vegetation Lidar and Application from Space (2016) 13.
- R. Mitsuhashi, J. Murooka, D. Sakaizawa, T. Imai, Y. Kimura, K. Asai and H. Shimoda, Overview of vegetation Lidar "MOLI", *Proc. SPIE Remote Sensing* (2018) 107850Q.
- 5) 浅井和弘,平田泰雅,鷹尾 元,本多嘉明,梶原康司, 栗屋善雄,須崎純一,遠藤貴宏,松永恒雄,澤田義人, 杉本伸夫,西澤智明,水谷耕平,石井昌憲,木村俊義, 今井 正,林 真智,境澤大亮,室岡純平,三橋 怜, グ エン タット トルン,植生ライダー (MOLI), JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-10.
- 6) P. R. Shukla et al. Technical Summary, 2019. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- 7) FAO/ITTO, The State of Forests in the Amazon Basin, Congo Basin and Southeast Asia, A report prepared for the Summit of the Three Rainforest Basins Brazzaville, Republic of Congo, May-3 June, 2011
- 8) Global Forest Resources Assessment 2020 (Key findings, FRA2020, FAO. 2020, 林野庁 計画課 海外林業協力室 (仮訳)
- M. Santo and O. Cartus:Research Pathways of Forest Above-Ground Biomass Estimation Based on SARBackscatter and Interferometric SAR observations, Remote Sens. 10 (2018) 608.
- 10)林 真智,森林バイオマス推定のリモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌 40 (2020) 2.
- 11) 島田政信, ALOS PALSAR による熱帯雨林森林状況監視. 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・宇宙・航行エレクトロニクス 109 (2009) 139.
- R. Dubayah, (2010), The Destiny of DESDynI Science and Applications fusing L-band SAR and Lidar in the Next Decade, 2010 IGARSS (2010) WE1.L09.2.
- H. H. Shugart, S. Saatchi and F. G. Hall :Importance of structure and its measurement in quantifying function of forest ecosystems, J. Geophys. Res., 115, G00E13, 2010
- 14) Y. Yu and S. Saatchi, Sensitivity of L-band SAR backscatter to



aboveground biomass of global forests. Remote Sens. 8 (2016) 522.

- R. A. Houghton, F. Hall, and S. J. Goetz, Importance of biomass in the global carbon cycle, J. Geophys. Res. 114 (2009).
- 16) A. Baccini1, S. J. Goetz, W. S. Walker1, N. T. Laporte1, M. Sun1, D. Sulla-Menashe2, J. Hackler1, P. S. A., Beck1, R. Dubayah3, M. A. Friedl2, S. Samanta1 and R. A. Houghton (2012), Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps, SUPPLE-MENTARY INFORMATION, NATURE CLIMATE CHANGE 2 (2012).
- 17) SS. Saatchi, NL. Harris, S. Brown, M. Lefsky, E. T. A. Mitchard, W. Salas et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proc Natl Acad Sci.* (2011) p. 9899.
- 18) Yoshito Sawada et al., A new 500-m resolution map of canopy height for Amazon forest using spaceborne LiDAR and cloudfree MODIS imagery, Int'l J. of Applied Earth Observation and Geoinformation 43 (2015) 92.
- Masatomo Hayashi et al, Regional forest biomass estimation using ICESat/GLAS spaceborne LiDAR over Borneo, Carbon Management, 6 (1-2), 19–33 (2015).
- 20) 大日方範昂, 佐藤龍太郎, 浅井和弘, A-4 植生ライ ダー方程式を用いた数値シミュレーション結果と ICESat/GLAS データとの比較, 予稿集 第 29 回レーザ センシングシンポジウム (2011) p. 10.
- 21)澤田義人、遠藤貴宏、三橋 怜、林 真智、室岡純平、今 井 正、水谷耕平、宇宙機用ライダー観測は径シミュ レータと真相学習器を用いたラージフットプリントライ ダー波形データからの地盤面1の自動推定、日本写真測 量学会令和元年度次学術講演会(2019) p. 111.
- 22) M.-H. Kim, A. H. Omar, J. L. Tacjett, M. A. Vaughan, D. M. Winker, C. R. Trepte, Y. Hu, Z. Liu, L. R. Poole, M. C. Pitts, J. Kar, and B. E. Magill: The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm, Atmos. Meas. Tech. 11 (2018) 6107.
- F. G. Fernald: Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments, Appl. Opt. 23 (1984) 652.
- 24) C. M. R. Platt: Lidar and radiometric observations of cirrus clouds, J. Atmos. Sci. 30 (1973) 1191.
- 25) 大竹篤史,世界100カ国以上で採用!全世界デジタル 3D 地図 AW3D-ビッグデータ・AIから生まれるバー チャル空間が社会を変える一,デジタルプラクティス, 10 (2019).
- 26)阿保 真,長澤親生,柴田泰邦,内野 修,柴田 隆,酒 井 哲「衛星搭載水蒸気観測用差分吸収ライダー (DIAL) の技術実証」JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-07.
- 27)石井昌憲,岡本幸三,久保田拓志,松本紋子,佐藤 篤, 境澤大亮,西澤智明,津上哲也,石橋俊之,田中宙中, 沖 理子,佐藤正樹,岩崎俊樹,数値予報精度向上のための衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測 JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-08.
- 28) 岡本 創,木村俊義,境澤大亮,石井昌憲,西澤智明, 衛星搭載イメージング FTS とドップラー風ライダによる全球風速複合観測 JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-07.
- 29) 岡本 創,鈴木健太郎,西澤智明,石井昌憲,富田英一, ドップラー雲レーダと多視野角・高スペクトル分解・偏 光ドップラーライダによる雲・エアロゾル・鉛直流観測

z = 2 z = 2 JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-09.



東北工業大学名誉教授. 1968年,東 京電機大学工学部電気通信工学科卒. 東北大学電気通信研究所研究生・助 手,郵政省電波研究所(現・情報通 信研究機構)主任研究官,ジョージ ア工科大学ポストDr.,東北工業大学 助教授・教授,同大学新技術創造研 究センター長を経て退職(2013年).

研究分野:飛翔体搭載ライダー,新波長固体レーザ. NASDA 招へい開発部員(ライダー実証衛星(MDS・2 ELISE ミッション1995-2000), JAXA 招 へい/客員 (MOLI ミッション計画, 2008-2016年,航空機搭載大 気擾乱検出 CDL 開発, 2010-2017年).受賞:研究奨励 賞(トーキン科学技術振興財団, 1990年), Order of Merit 賞(ICLAS, 2019年),功労賞(レーザセンシン グ学会, 2019年),所属学会:日本リモートセンシング 学会,レーザセンシング学会,日本地球惑星科学連合 (JPGU) 会員.





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主任研究開発員. 2008年,東京都立大学大学院工学研 究科電気工学専攻修了博士(工学), 2008年,宇宙航空研究開発機構地球 観測研究センター招聘研究員,2013 年から同研究員を経て現職.地球観 測用ライダーの研究・開発に従事.



国立研究開発法人情報通信研究機 構 戦略的プログラムオフィス マ ネージャー. 1980年,京都大学理学 部卒. 1985年,京都大学理学博士. 1991年より郵政省通信総合研究所 (現・情報通信研究機構).研究分 野:リモートセンシング,ライダー. 首都大学東京客員教授 (2001-2017).

JAXA 客員 (2017-).



2004年に東北大学大学院理学研究科 博士課程を修了し,理学博士の学位 を取得.その後,日本学術振興会 PD (気象庁気象研究所)を経て,2007 年より NIES 特別研究員として国立 環境研究所に勤務し,2011年に同研 究所の主任研究員となる.現在は, 国立環境研究所環境計測研究セン

ター室長および九州大学客員教授.地上ネットワーク ライダーや衛星・船舶搭載ライダーの観測データを用 いたエアロゾル・雲の光学・微物理特性の解析研究や, 高スペクトル分解ライダー等のライダーシステムの開



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) (浅井 和弘)

発に従事している.現在は、日欧共同地球観測衛星 ミッション EarthCARE のサインエンスチームにも参加 し、同衛星搭載ライダー等を用いたエアロゾル・雲推 定アルゴリズムの開発チームの PI を務めている.日本 気象学会会員、日本地球惑星科学連合(JPGU)会員.