The image shows the International Space Station (ISS) in orbit above Earth. A red cone representing the sensor's field of view extends from the station to a green rectangular area on the ground, which is the sensor's footprint. The ground area shows a complex network of rivers and lakes, likely a delta region. The text is overlaid on the right side of the image.

ISS搭載植生観測ライダーミッション

MOLI: Multi-footprint Observation Lidar and Imager

JAXA 研究開発部門 センサ研究Gr
境澤大亮

1. MOLI計画の背景
2. システム概要
3. MOLIの特徴
4. MOLIの観測範囲、観測頻度
5. MOLIプロダクト
6. 主要コンポーネント(レーザ、光検出器)
7. 航空機実験結果
8. まとめ

1. MOLI計画の背景 (1/2)

全球炭素収支 (IPCC 2013, AR5, WG1)

	1750–2011 Cumulative PgC	1980–1989 PgC yr ⁻¹	1990–1999 PgC yr ⁻¹	2000–2009 PgC yr ⁻¹	2002–2011 PgC yr ⁻¹
Atmospheric increase ^a	240 ± 10 ^f	3.4 ± 0.2	3.1 ± 0.2	4.0 ± 0.2	4.3 ± 0.2
Fossil fuel combustion and cement production ^b	375 ± 30 ^f	5.5 ± 0.4	6.4 ± 0.5	7.8 ± 0.6	8.3 ± 0.7
Ocean-to-atmosphere flux ^c	-155 ± 30 ^f	-2.0 ± 0.7	-2.2 ± 0.7	-2.3 ± 0.7	-2.4 ± 0.7
Land-to-atmosphere flux <i>Partitioned as follows</i>	30 ± 45 ^f	-0.1 ± 0.8	-1.1 ± 0.9	-1.5 ± 0.9	-1.6 ± 1.0
Net land use change ^d	180 ± 80 ^g	1.4 ± 0.8	1.5 ± 0.8	1.1 ± 0.8	0.9 ± 0.8
Residual land sink ^e	-160 ± 90 ^f	-1.5 ± 1.1	-2.6 ± 1.2	-2.6 ± 1.2	-2.5 ± 1.3

土地利用変化による炭素放出、森林による炭素吸収について、他要素に比べて不確定性が高い。(Ciais et al., 2013)

不確定性の大きな理由は、広域、定量的に森林を観測することが難しいことによる。

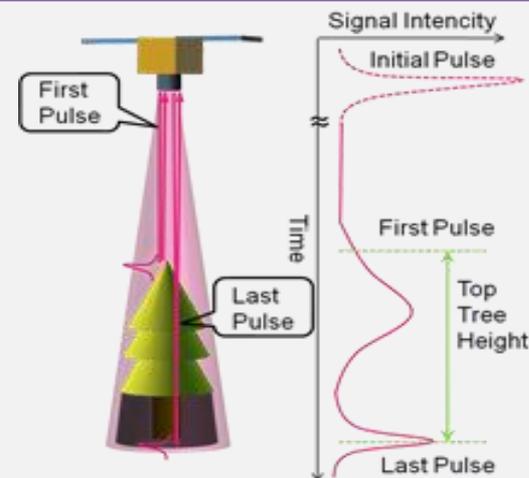
広域森林観測の方法

- 衛星観測 (Imager and SAR)
 - イメージャ衛星は広域観測が可能だが、基本的には面積のみ
 - LバンドSARは、バイオマスを推定できるが、約100t/haを超える密度では信号が飽和
 - 主要な森林である熱帯雨林では、100t/haを超えることがほとんどである

- 衛星ライダーによる観測
 - ライダーはレーザパルスを地上に向けて照射し、送信信号と受信信号との時間差から距離を測定。樹頂と地盤面の差分から森林高さ(林冠高)を推定
 - 密度の高い森林でも観測可能 (~500t/ha)
 - 林冠高 (Canopy heights) はバイオマスとよい相関

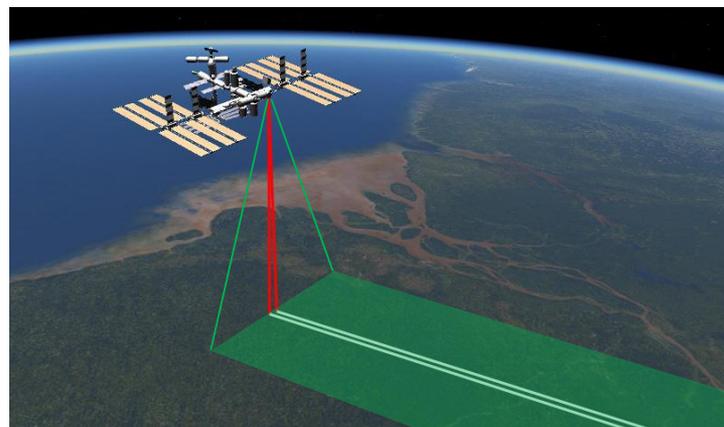


ライダー衛星は、広域に林冠高、バイオマスを推定可能
 イメージャ、SARと組み合わせて広域化(マップ化)することで全球を推定

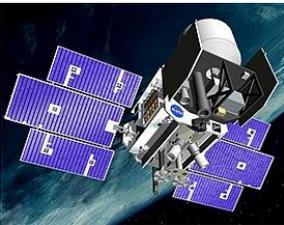
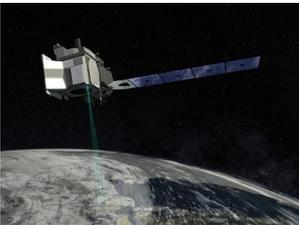


2. 植生ライダーMOLIの概要

- **MOLI** (**M**ulti-footprint **O**bservation **L**idar and **I**mager)
 - 国際宇宙ステーションきぼう曝露部に取付
 - 太陽非同期、軌道傾斜角 51.6度、高度 400km
- **搭載センサ**
 - 林冠高測定用ライダー
 - 樹木位置判別・樹冠状態確認用イメージャ
- **観測対象**
 - ISS軌道直下の森林(主要対象は熱帯林)
- **ミッション目的**
 - 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する。PALSAR-2、SGLI等と協力し、広域森林バイオマス推定手法を研究開発する。
 - 宇宙用ライダー技術を獲得し、3次元レーザスキャナ等の宇宙将来ライダーの実現を目指す。
- **打ち上げ**
 - 2023年(未定)

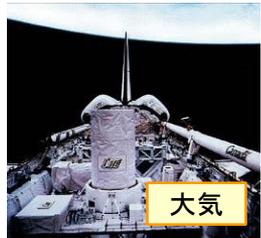


2. 植生ライダーMOLIの概要(ベンチマーク)

	MOLI	ICESat	ICESat-2	GEDI
				
ミッション	植生	氷床	氷床	植生
プラットフォーム	ISS	衛星	衛星	ISS
質量、電力	/400W	970kg/730W	1580kg/1320W	450kg/1000W
軌道高度	400 km	586 km	481 km	400 km
状態		運用終了2003.1-2010.8	運用中 2018.9 -	運用中 2018.12 -
コスト	30億円(未定)	2.83億usd / 340億円 (120jpy/usd@2003)	10.63億usd/1170億円 (112jpy/usd@2018)	9000万usd/99億円 (112jpy/usd@2018)
搭載センサ	ライダー・イメージャ	ライダー	ライダー	ライダー
ペイロード電力	250W/200kg	350W/298kg	300W/298kg	516W/230kg
特徴・知見	傾斜地上の樹高精度改善 イメージャ同時観測による位置同定精度の改善 高精度の樹高観測	氷床の標高マップ作成 世界初の衛星搭載ライダー 森林観測におけるフットプリント径、傾斜地、位置同定の問題を明示	ICESatの後継器 レーザの高出力高効率化 光子計数観測による氷床DEMの実証	森林観測用に特化したライダー 事前に定められたコストのみで実施

JAXA 2. 植生ライダー-MOLIの概要 (衛星搭載ライダー)

海外



LITE/STS-64
(NASA, 1994)

大気

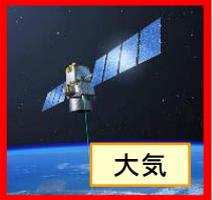
GLAS/ICESAT
(NASA, 2003-2011)

氷床・大気



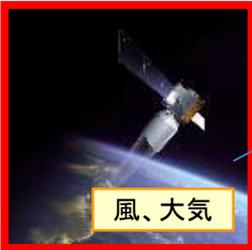
CALIOP/CALIPSO
(NASA, 2006-)

大気



ADM-Aeolus
(ESA, 2018-)

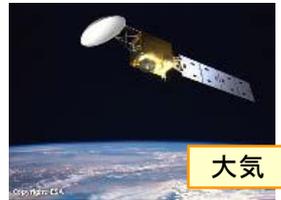
風、大気



氷床、地表高

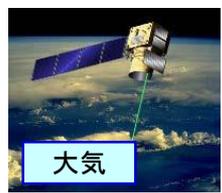
ATLAS/ICESat2
(NASA, 2018-)

EarthCARE
(ESA/JAXA, 2020)



大気

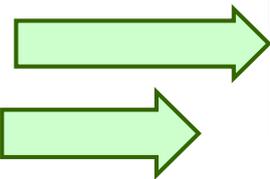
国内



ELISE/MDS-2
(NASDA, 2002-Aborted)

大気

植生ライダーシステム
の検討
宇宙用パルスレーザ
光源の研究



植生

MOLI/ISS-JEM
(JAXA, 2021)

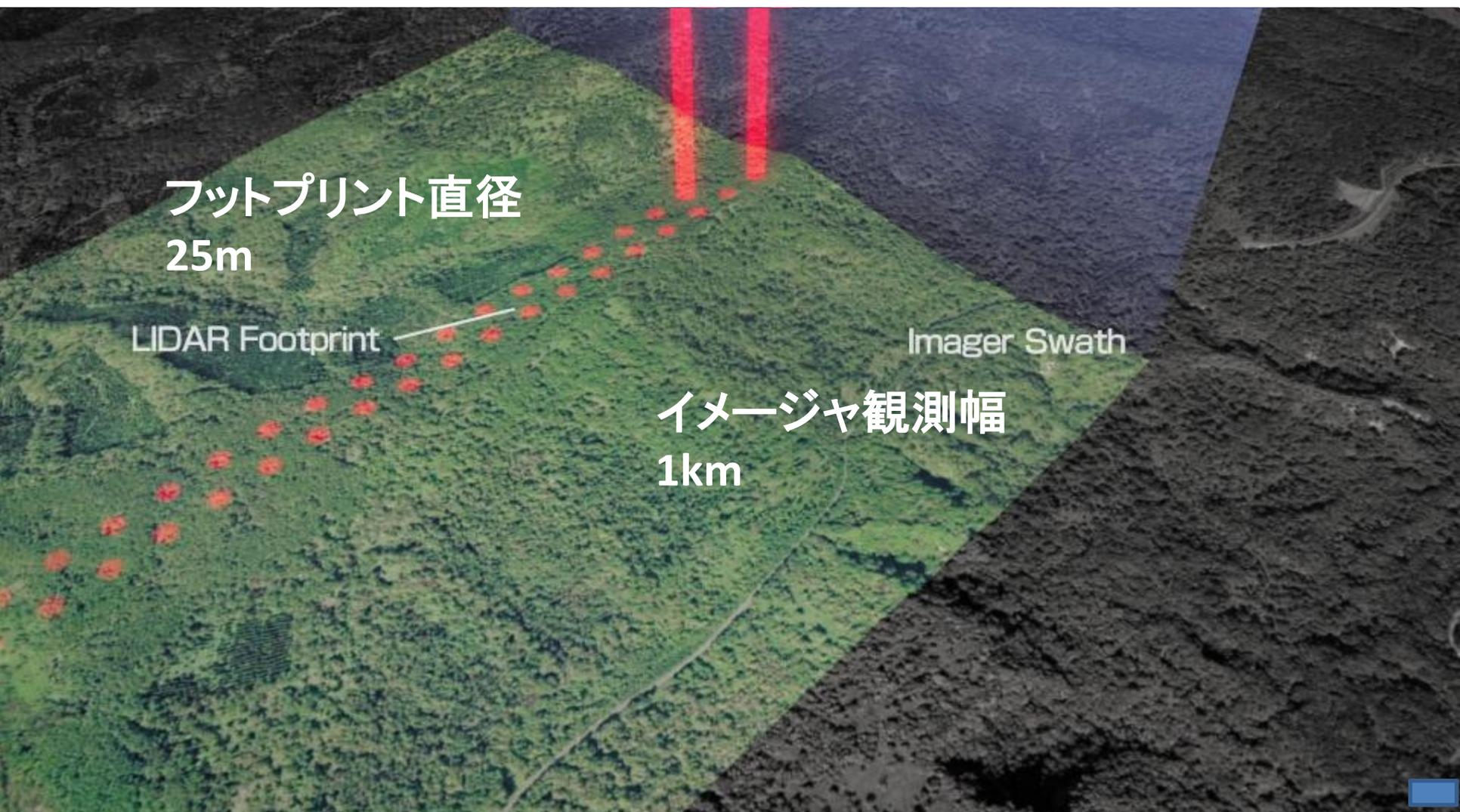
1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2018	2019-
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-------

- 1m以上の望遠鏡や高出力なレーザ光源が必要
- 大型ミラーは製造コスト・時間の問題あり & 搭載レーザ光源は高出力化に課題

2. MOLIシステムの外観・概要

Item	Value	Notes
Laser Wavelength	1064nm	Nd:YAG Laser
Number of beam	2	
Laser Energy	> 20mJ	Total 40mJ
Pulse Repetition Frequency	150Hz	
Diameter of footprint	25m	
Number of receiver element	2	2 array detector
Total sensor system Power	400W	(TBD)
Total Weight	300kg	(TBD)
Mission life	> 1 year	> 2 year (target)
Altitude of ISS orbit	Around 400km	
Imager Spatial resolution	5.0m	
Imager Swath	1000m	
Imager Bandwidth	B1: 520 - 600 nm (Green) B2: 610 - 690 nm (Red) B3: 760 - 890 nm (NIR)	

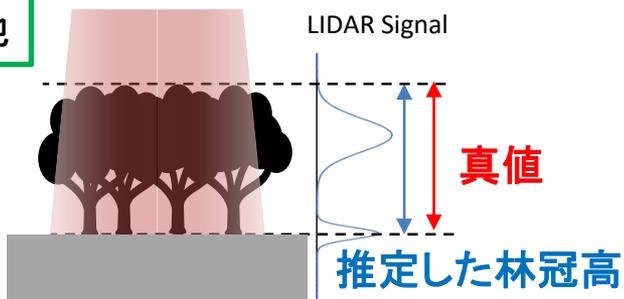
2. MOLIの搭載イメージ、観測イメージ



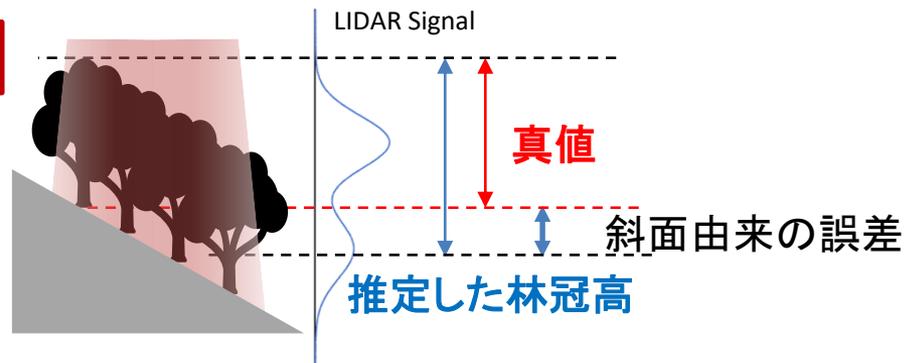
3. MOLIの特徴 (1/2)

マルチフットプリントにより、森林高さをより高精度に推定

平地

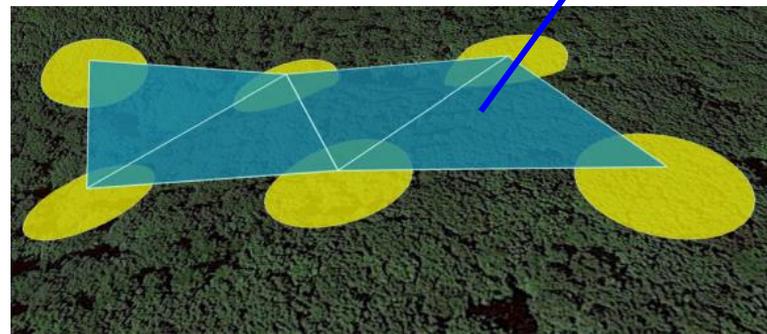
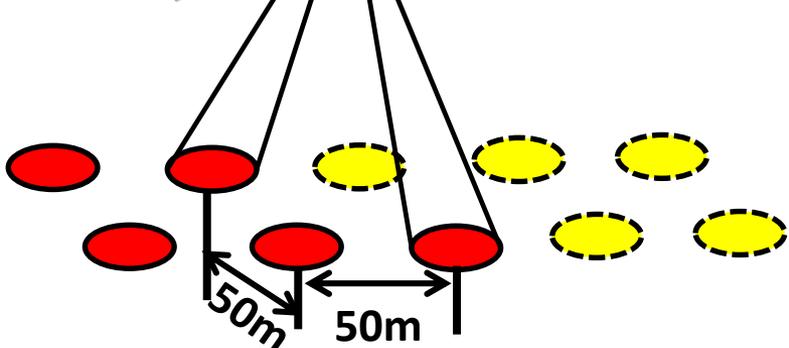
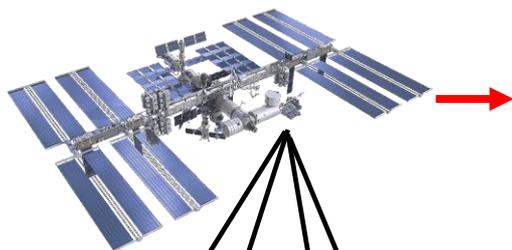


斜面



林冠高 = 信号開始と終了の時間差

林冠高 = 信号開始・終了の時間差 + 斜面補正項



TINから斜面を推定

3. MOLIの特徴 (2/2)

イメージャデータを用いて、林冠高、バイオマスを面的に拡張

ライダーフットプリント



1km幅



全球

MOLIイメージャ

分解能: 5 m

観測幅: 1,000 m

Band

Green: 520-600 nm

Red: 610-690 nm

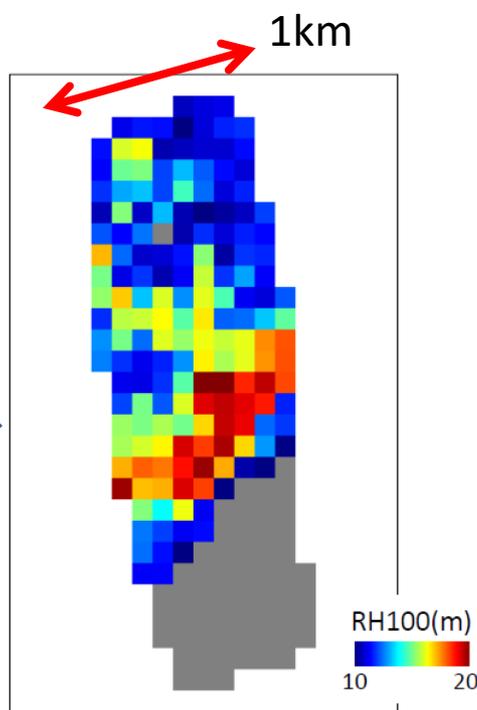
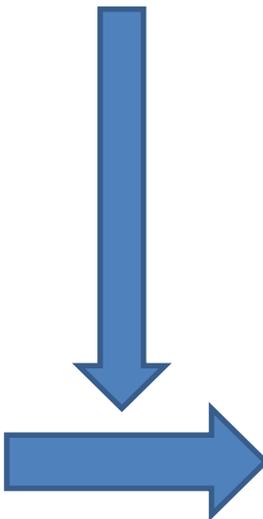
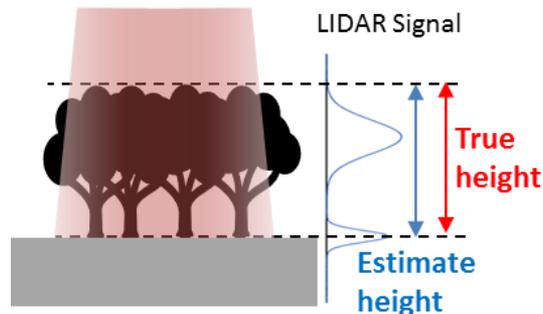
NIR: 760-890 nm

(Corresponding to ALOS-3)



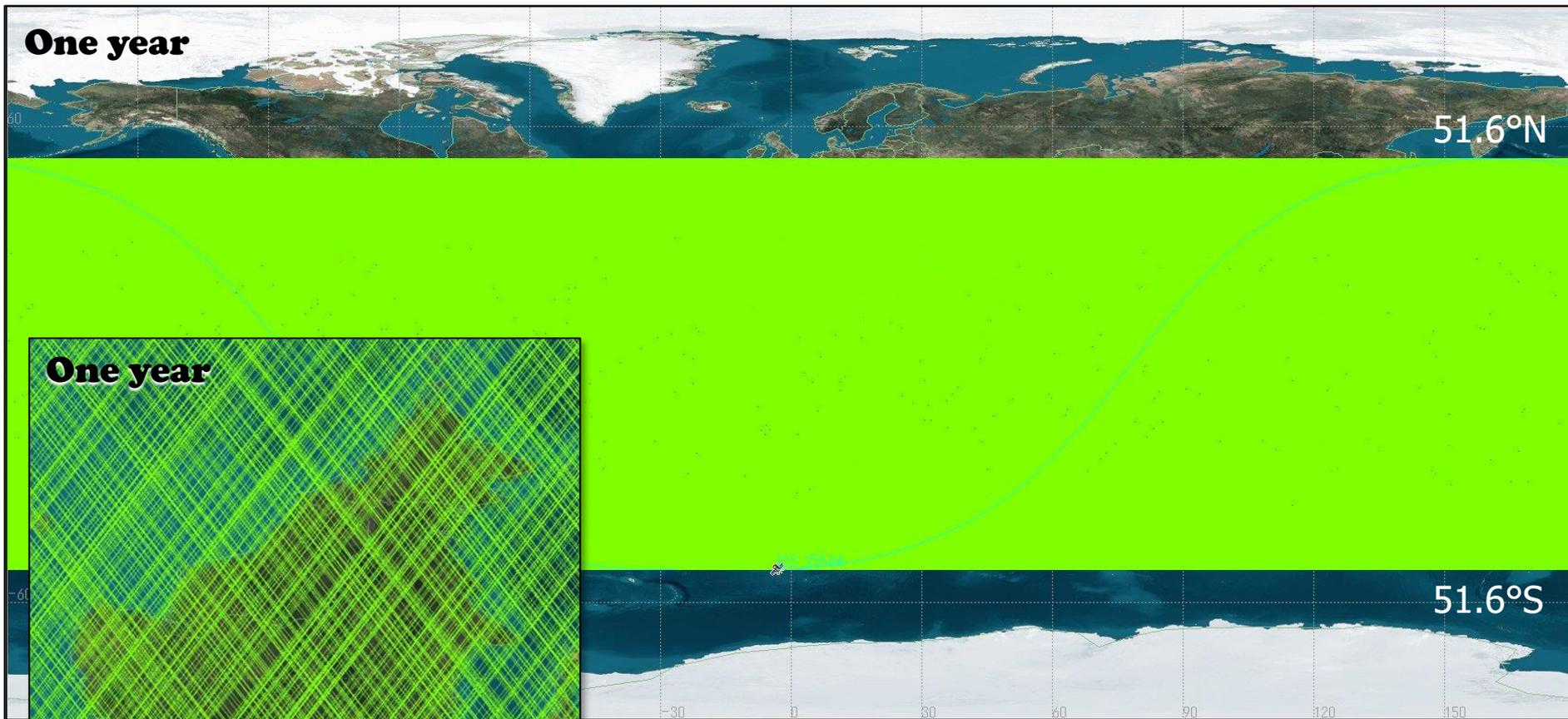
イメージャデータ

Lidar data



データ融合

4. MOLI の観測範囲、頻度(例:ボルネオ島)



赤道付近で、
軌道間の間隔は平均3.5 km

MOLI observation area (ISS orbit).

4. MOLI の観測頻度(日本)



1か月

上空通過時間:

2223sec

観測点数:

666,900点



半年

上空通過時間:

14757sec

観測点数:

4,427,100点



1年

上空通過時間:

29704sec

観測点数:

8,911,200点

5. MOLI データプロダクト

レベル	Product category	Products	Remark
L1B (標準)	Lidar footprint products	ライダー波形	位置情報、位置決定精度 15m以下
	Imager product (1km swath)	画像データ (Red, Green, NIR)	幾何補正済み
L2 (標準)	MOLIフットプリント 林冠高・バイオマス	林冠高	±3m(Canopy Height is under 15m) ±20% (Canopy Height is over 15m)
		バイオマス	±25t/ha (Biomass density is under 100t/ha) ±25% (Biomass density is over 100t/ha)
L3 (研究)	MOLIイメージャとの融合 (1km swath)	林冠高(1km)	Target
		バイオマスマップ (1km)	○Canopy heights ±~5m(Canopy Height is under 15m) ±~40% (Canopy Height is over 15m)
L4 (研究)	広域マップ (使用データ: SGLI、LandSAT、MODIS)	林冠高マップ(広域)	○Forest biomass ±~40t/ha (Biomass density is under 100t/ha)
		バイオマスマップ (広域)	±~40% (Biomass density is over 100t/ha)

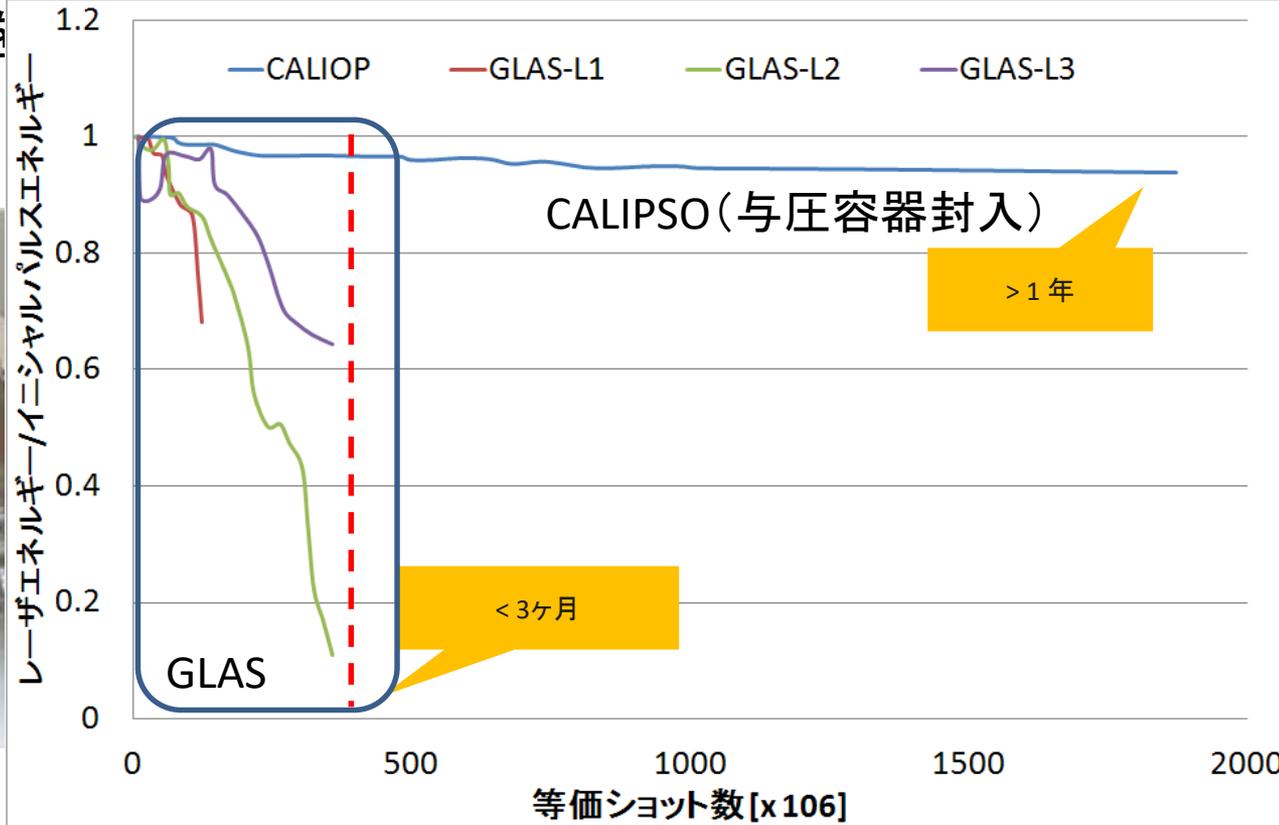
※ Multi-footprint is expected to compensate each product up to 30 degrees of slope.

6a. 主要コンポーネント(レーザ)

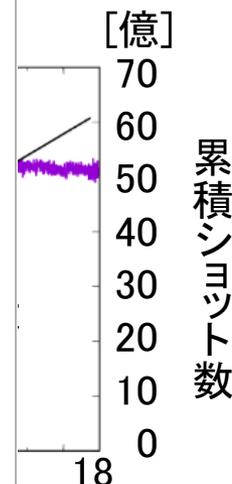
衛星搭載レーザに向けた最大技術課題への対応

- ✓ 真空中で、レーザ機器内部で発生したレーザ誘起コンタミネーションによりレーザ光学系のコーティングが焼損する事象が発生。(例: ICEsat/GLAS)
- ✓ 対策として、コンタミネーション発生を抑止するためレーザを与圧容器に封入。
- ✓ レーザ誘起コンタミネーションとなる原因物質を実験で確認。与圧容器封入と実験結果を

結果を
作り、

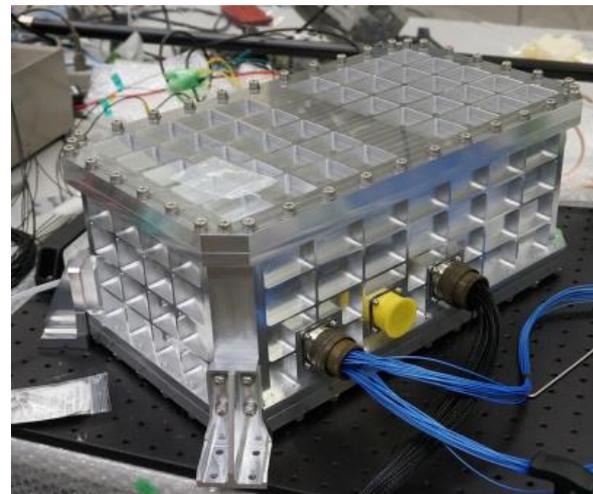


5Wクラス)を試



EMを想定したレーザ試作と環境評価試験

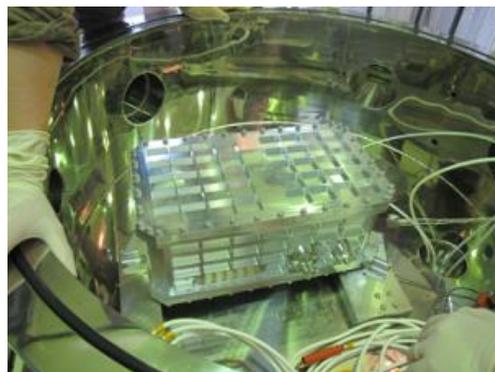
1. 恒温槽を用いて熱ショック試験: **PASSED**
2. 真空試験: **PASSED**
3. 振動試験:
 構造数学モデルの妥当性評価: **PASSED**
 構造強度の確認試験: **FY2019**



レーザ送信部の外観 (約350x400x250)



送信部@恒温槽内



送信部@真空チャンバ内



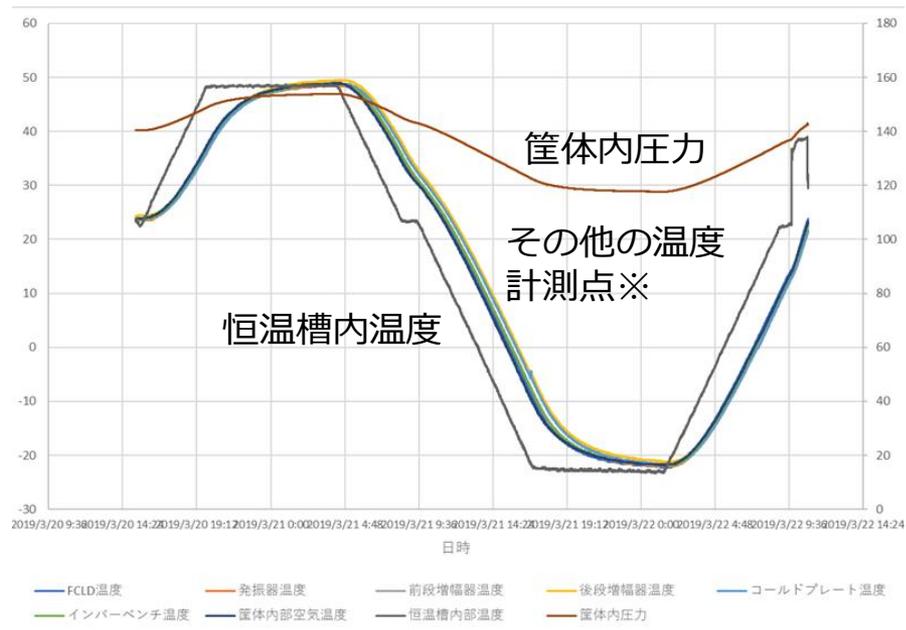
送信部@加振器

恒温槽を用いた熱ショック試験

- 2019.3.20 – 3.22 まで乾燥空気を封入した筐体を恒温槽に設置し、上限(+50°C)、下限(-20°C)とした熱ショックを印可
 - 各点の温度をモニタしながら、筐体の気体封入の保持を評価
 - 前後でプロファイル、出力の評価
- 気体封入圧力に変化は観測されず
- 出力、プロファイルとも劣化はし



送信部@恒温槽内



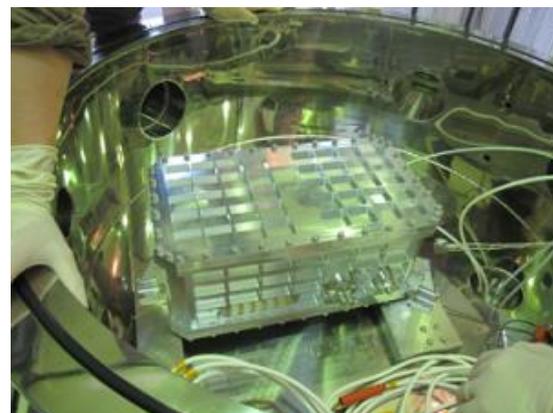
※FCLD, 発振器、前段後段増幅器、コールドプレート、インバーベンチ、筐体内空気温度

真空試験

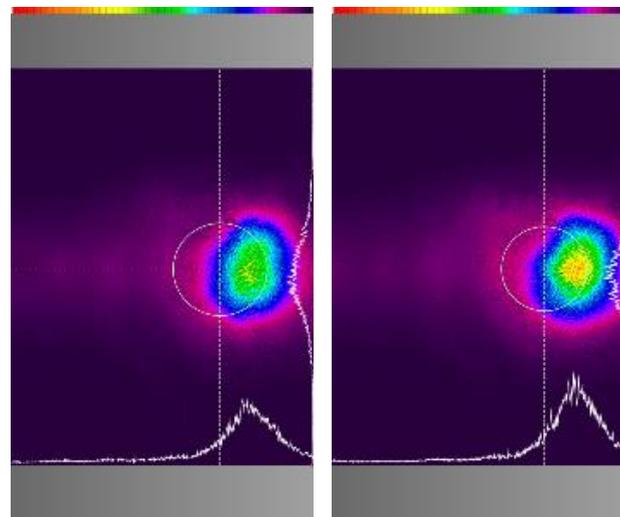
- ✓ 恒温槽の熱ショックを印可後、真空チャンバにレーザを封入
- ✓ 筐体内部の圧力変化、冷媒温度の上限 (24°C) および下限 (16°C) での出力変化を調査

出力変化は上限下限で +/- 5%以内

プロファイルは右図のように大きな変化はなし



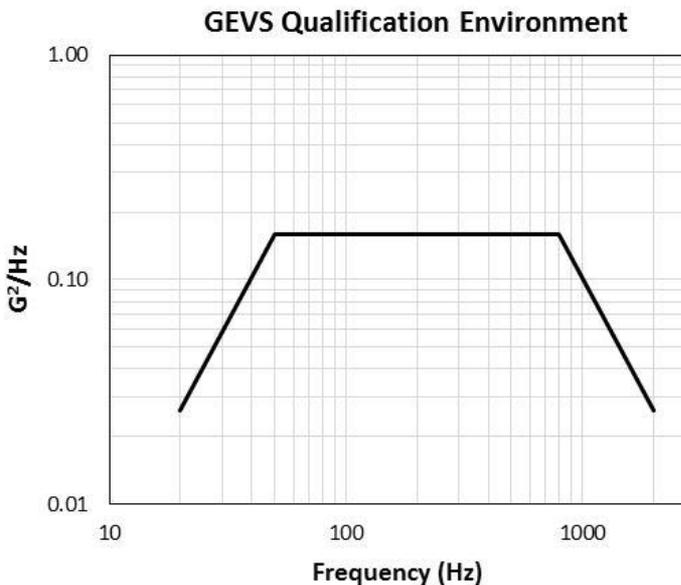
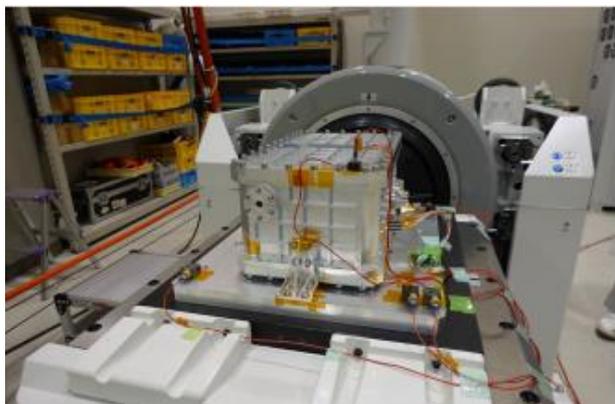
送信部@真空チャンバ内



真空チャンバ内で冷媒温度24°C/16°Cのビーム形状

振動試験による構造強度評価

- 振動試験構造強度の評価、構造数学モデルの妥当性評価:
 - 環境試験実施も、未完了 FY2019 に再試験を予定
 - 筐体の最低次固有値～、550Hz
 - 光学ベンチ～ 151Hz



Frequency (Hz)	ASD Level (g ² /Hz)	
	Qualification	Acceptance
20	0.026	0.013
20-50	+6 dB/oct	+6 dB/oct
50-800	0.16	0.08
800-2000	-6 dB/oct	-6 dB/oct
2000	0.026	0.013
Overall	14.1 G _{rms}	10.0 G _{rms}

6b. 主要コンポーネント(光検出器)

- 試作したライダー受信検出器用Si-APDに対して放射線試験を実施。
- ISS軌道(高度約400km)ではドーズ量が低い(約0.07krad/year)ため、 γ 線によるTIDは実施せずプロトンによるSE評価を兼ね、プロトンで生じるTIDを利用した。

◇結果

項目	照射前	照射後
暗電流(アレイ素子4ch分合計)	11.2 nA	11.4 nA
感度(M = 1)	0.49 A/W	0.49 A/W
入力換算雑音電力(NEP)	1.3 nWrms	1.3 nWrms
シングルイベントによる信号出力頻度	照射試験中に生じたシングルイベント出力の回数から換算すると、ISS軌道では0.5回/24時間に相当	

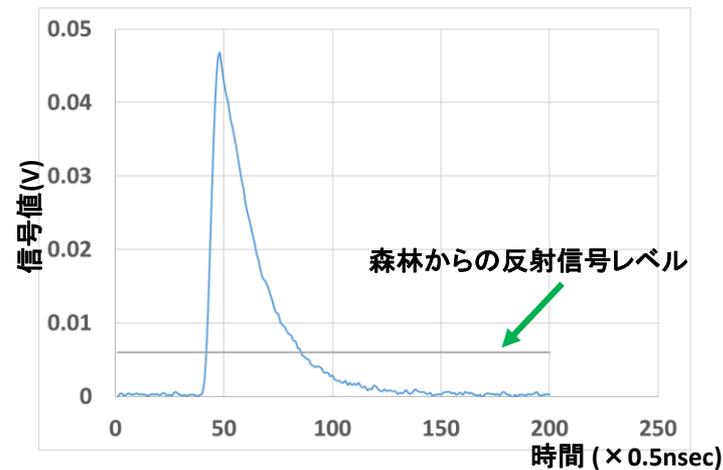
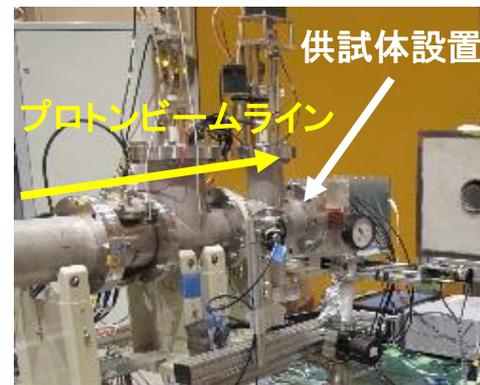
暗電流が微増しているが、S/Nへの影響は無視できるレベル。

シングルイベント(SE)による信号出力については、林冠高推定精度に悪影響を及ぼす可能性があるが、

- SE発生による機器損傷はなく、また、機器リセットの必要はない
- SEによる信号の継続時間は短く、影響は1パルスのみである
- APD出力信号を記録する時間はレーザ1パルス当たり27 μ sec
- 記録時間が総計で24時間となるのは250日間分の観測に相当

上記を考慮するとMOLIのミッション期間1年(365日)でシングルイベントの影響を受けるのは約0.7パルスとなる。1年で得られるデータは約47億パルス分であり、統計的に無視できる頻度と考えられる。

→当該Si-APD検出器をフライト品に使用可能であることを確認。



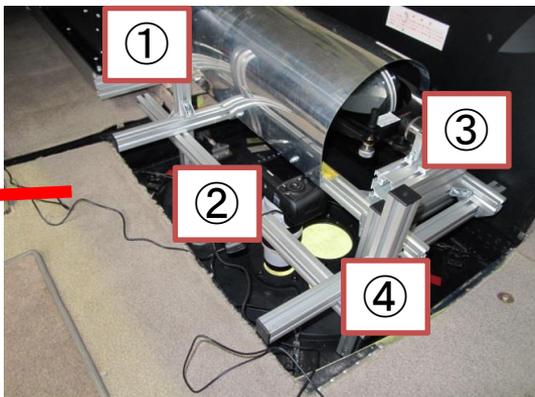
シングルイベントによる出力波形例

7. 航空機実験

MOLIのフットプリント配置を模擬した航空機実験を実施し、マルチフットプリント観測によって得られた地表面傾斜情報を用いた斜面補正を評価した。



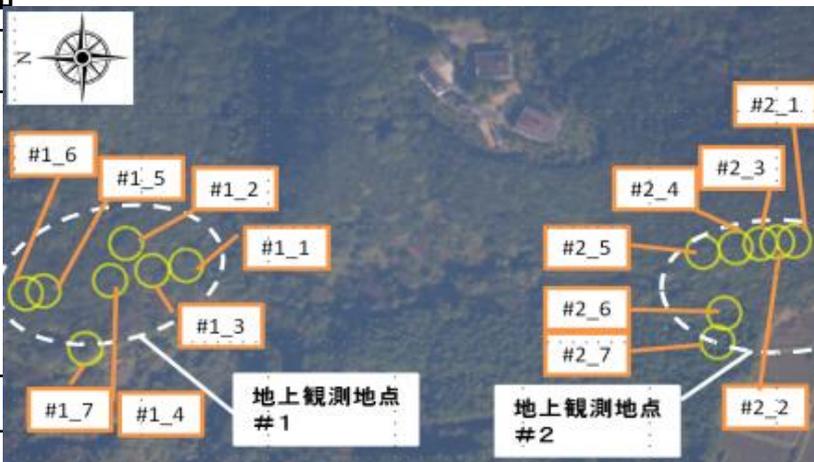
使用した航空機(King Air 200T)



搭載機器

- ①ライダー
- ②デジタルカメラ
- ③折り返しミラー
- ④観測窓 (AR Coating)

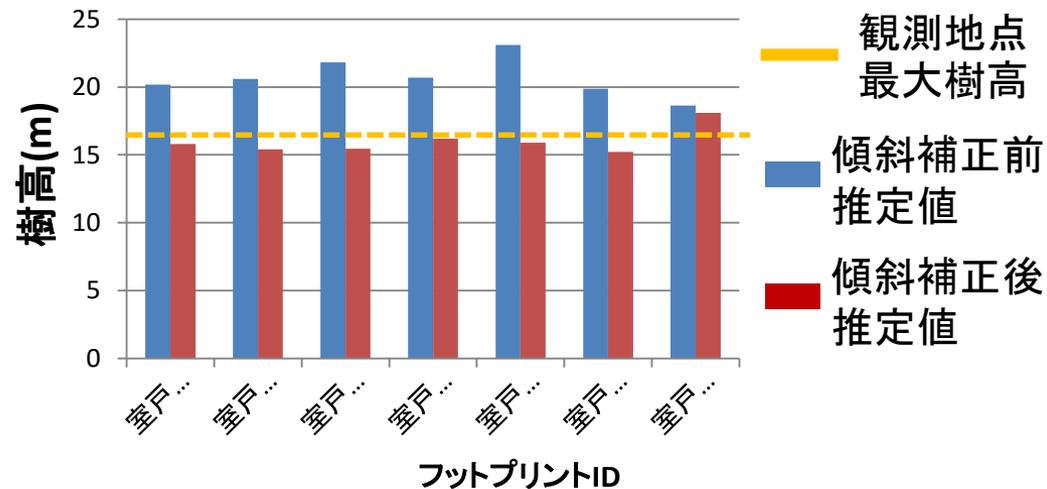
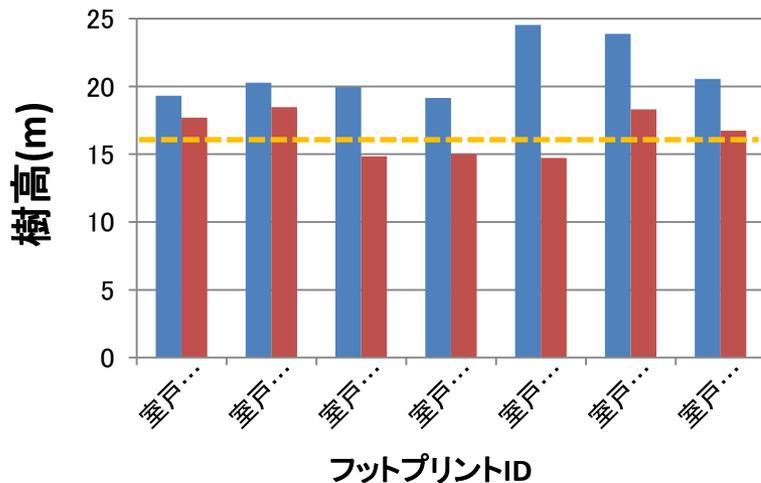
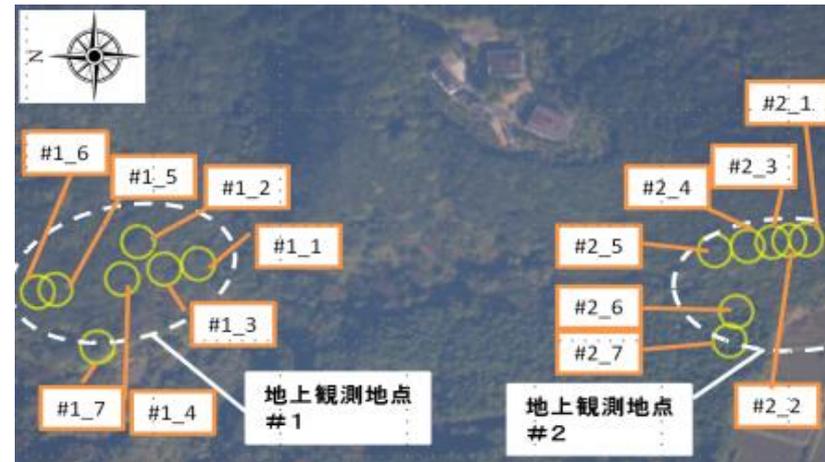
条件	MOLI	航空機実験
フットプリント	<p>赤:レーザー 青:APD視野 (点線は使用しない)</p>	<p>赤:レーザー 青:APD視野 (点線は試用しない)</p>
レーザー出力	20mJ	2mJ(値を調整)
繰り返し周波数	150Hz	20Hz(装置固有値)
その他		観測地点複数回飛行



航空機実験で撮影された写真と地上観測地点(白線#1,#2)付近の解析対象航空機LIDAR観測地点(高知県室戸市)

7. 航空機実験結果

- 航空機実験と併せて実施した地上観測において、#1・#2地点共にほぼ一様な樹高と確認。
(#1最大樹高16.3m, #2最大樹高16.9m)
 - マルチフットプリントによる傾斜補正を適応した林冠高推定値は、補正前の推定値より地上観測結果(真値)との誤差が小さくなった。
- マルチフットプリントによる傾斜補正が林冠高推定において効果的である事を確認した。



補正前推定値誤差平均: 4.94[m]
補正後推定値誤差平均: 1.54[m]

補正前推定値誤差平均: 4.30[m]
補正後推定値誤差平均: 1.08[m]

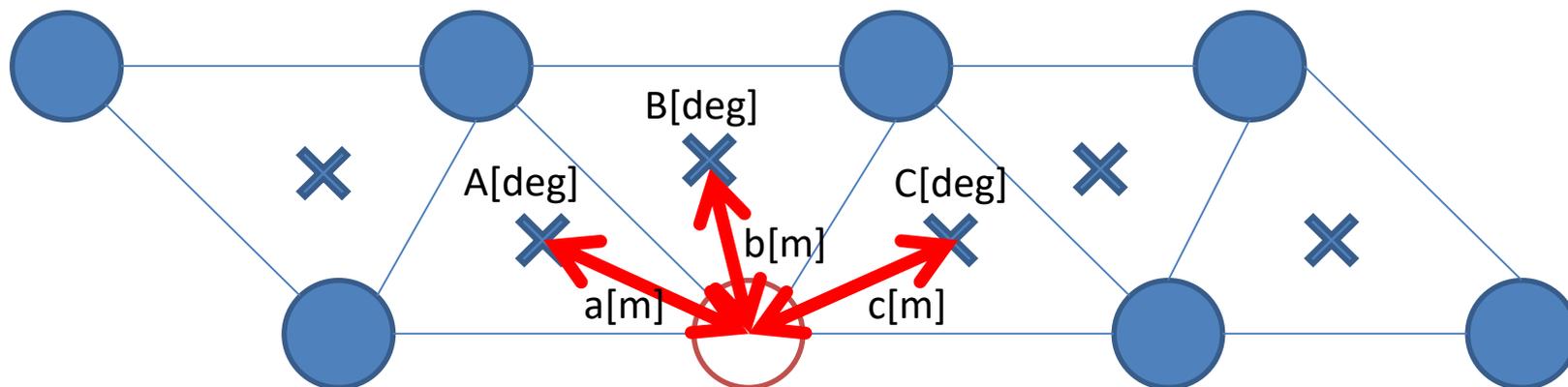
8. まとめ

- MOLIは森林観測に特化し、高精度な林冠高測定を行うライダー（レーザ高度計）である。他衛星データ（イメージャ、SAR）との融合により広域のバイオマスマップを作成する。
- ライダーの重要コンポーネントであるレーザ送信部については、真空環境下での寿命試験を実施した。世界最高レベルのショット数を達成し、技術的実現性の目途を得ている。
- MOLIのフットプリント配置を模擬した航空機実験を実施し、マルチフットプリント観測によって得られた地表面傾斜情報を用いた斜面補正の有効性を確認した。
- 実現に向け、さらに検討を進めている。

補足資料

7. 航空機実験結果

■フットプリント内傾斜角推定



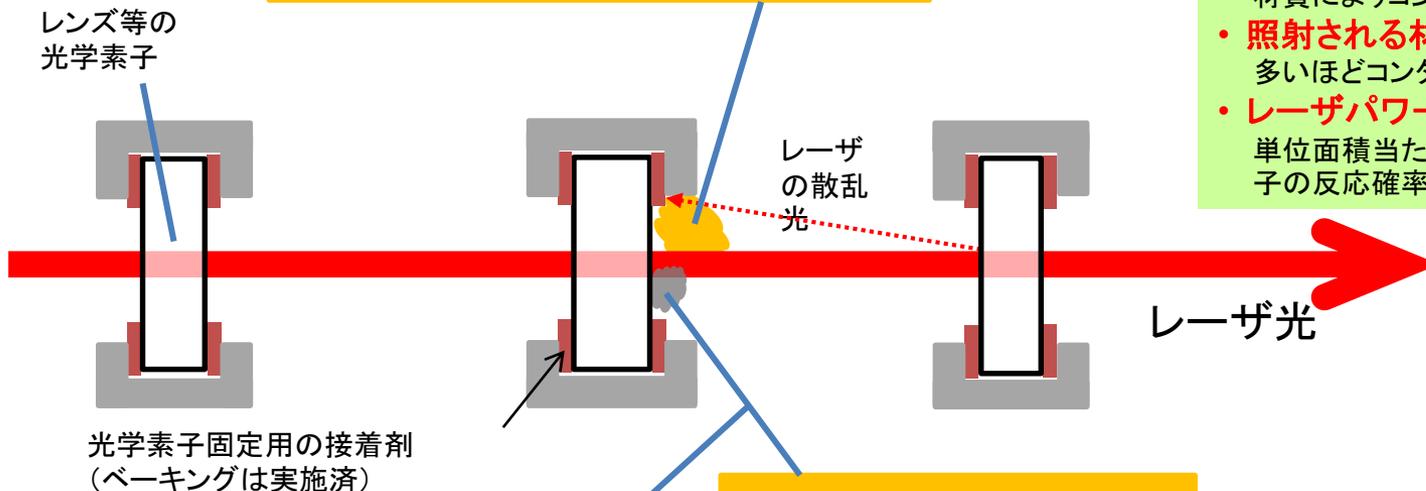
各フットプリントにおける地盤面検出タイミングの差から、フットプリント3点で形成される三角形の傾斜を算出する。(上図×印の地点の傾斜角)

各三角形の頂点となっているフットプリント中心と×印の距離で重みづけした平均値を各フットプリント内の傾斜として算出する。

$$\text{例) 赤色のFP傾斜} = \frac{a}{a+b+c} \times A + \frac{b}{a+b+c} \times B + \frac{c}{a+b+c} \times C$$

林冠高測定時には算出したフットプリント内の傾斜角を用いて補正を行う。

① 散乱したレーザー光が接着剤等に当たり、分子がはじき出され、ガスとして漂う。(接着剤以外では、ハーネスの被覆、ネジ固着剤等がある)



③ 蓄積量が多くなるほど透過率が低下する。蓄積物の焼損が発生すると、素子表面のコーティングも焼損・剥離等のダメージを受け、出力の顕著な低下となる。

② 漂ったガスがレーザー光に照射されて化学変化を起こし反応性が上がり、光学素子表面に付着しやすくなって蓄積する。

発生する原因とその確率

- **真空 (①関連)**
周囲が真空の方が分子がはじき出されやすい。
- **照射される材質 (①関連)**
材質によりコンタミの出やすさが変わる。
- **照射される材料の量 (①関連)**
多いほどコンタミが発生する量が多くなる。
- **レーザーパワー密度 (②関連)**
単位面積当たりのエネルギーが大きいほど分子の反応確率が上がる。

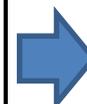


レーザー誘起コンタミネーション (LIC*) 実験で発生した光学素子上に付着した物質

*LIC; Laser Induced Contamination

課題解決策

- 実験によるコンタミネーション原因物質の調査 → 当該物質の不使用、使用量抑制
- 実験によるLIC発生時のレーザーパワー密度閾値調査 → 閾値以下のレーザーパワー密度設定
- コンタミネーション発生抑圧、発生したコンタミネーション分子の自由行程制限 → 容器内の与圧化
- 酸素によるコンタミネーション物質分解効果 → 封入気体の選定(酸素を含むこと)
- コンタミネーション発生物質のレーザー光路への露出防止 → 素子固定治具の形状工夫



これらの対策を用いたレーザーを内製で試作し、寿命試験実施。1年以上の動作を確認。



1か月

上空通過時間:

2918sec

レーザ出射回数:

875,520点



半年

上空通過時間:

18025sec

レーザ出射回数:

5,407,680点



1年

上空通過時間:

36493sec

レーザ出射回数:

10,948,140点