

樹冠高観測ミッション～MOLI～

Mission of tree crown height measurement: Multi-footprint Observation Lidar (MOLI)

小林 高士¹⁾、知識 柔一¹⁾、○境澤 大亮²⁾、室岡 純平²⁾、鈴木 桂子²⁾
中島 康裕²⁾、今井 正²⁾、佐藤 亮太²⁾、浅井 和弘³⁾、沢田 治雄⁴⁾

T. Kobayashi¹⁾, Y. Chishiki¹⁾, D. Sakaizawa²⁾, J. Murooka²⁾, K. Suzuki²⁾, Y. Nakajima²⁾, T. Imai²⁾, R. Sato²⁾, K. Asai³⁾, and H. Sawada⁴⁾

1) 宇宙航空研究開発機構 先進衛星技術開発室,

2) 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター,

3) 東北工業大学, 4) 東京大学生産技術研究所

1) Satellite Technology Innovation Office, JAXA,

2) Earth Observation Research Ctr., JAXA,

3) Tohoku Institute of Technology,

4) Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

Abstract

Multi-footprint Observation Lidar (MOLI) science group collaborating with JAXA have started “Phase zero” study; to understand changes and trends in terrestrial ecosystems and their functioning as forest biomass, and to characterize an impact of their changes on earth environment or climate. This study is required new measurement method from space to produce high spatial resolution global maps of the 3D structure of vegetation, such as biomass above ground. We show a brief introduction of our current and future work in this symposium.

1. はじめに

近年、衛星観測データの解析による二酸化炭素の動態把握が求められているが、その指標としてバイオマス測定がかぎとなっている。また一方で林業や森林モニタリングの領域では木材を効率的・持続的に利用・生産する目的のためにもバイオマス推定が重要である。

バイオマスは生物の乾燥重量のことであり、森林の状態を表す基本的な指標のひとつである。森林生態系の中でも樹木のバイオマスは、森林の物質循環、特に炭素動態を解明するために必須の情報である。この理由として樹木は葉や根、そして大部分を幹に大気中の二酸化炭素を光合成により炭素(炭化水素)へ変換し蓄積することから、森林がどの程度の炭素量をストックするかを表す指標となる。このバイオマス全球情報を取得するためにまず前提として、その評価手法の精度向上が必須である。くわえてREDD+のような取り組みでは広域をくまなく観測した上で、伐採や樹木の経年変化を捉える必要がある。現地観測や航空機観測ではある領域全体をカバーすることも難しく、そもそも険しい山岳地域や密林の奥地などアクセス困難な場所での継続観測に難しさがああり、ここに衛星観測を利用したソリューションの提供が期待される¹⁾。

衛星データを用いてバイオマスを推定する手法は衛星観測のデータを直接変換する手法²⁾と、土地被

覆などを一度推定してからバイオマスを見積もる²⁾の手法が一般的で、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR)、光学の衛星画像、ライダーのセンサが用いられている。現在、JAXA ではレーザー高度計による樹高観測ミッション (MOLI) による森林の3次元構造マップの取得について検討を行い、最終的にバイオマス推定精度 20t/ha の実現可能性について検討を行っている。本報告ではこれまでの研究と、今後の予定について述べる。

2. ミッション検討

次に現在バイオマス推定に用いられているセンサと精度について述べ、衛星搭載ライダーで期待される成果とミッションの役割について述べる。

2.1 光学画像 (受動光学センサ)

植生観測に用いられる衛星搭載センサは主としてMODSI(Terra/Aqua: 分解能 250m - 1km)、MERIS(ENVISAT: 分解能 300m 2012 に運用終了)、Landsat (分解能 30m - 120m)、ASTER(Terra, 分解能 15m - 90m)、AVNIR-2 (ALOS: 分解能 10m, 2011 で運用終了) の科学衛星、GeoEye, IKONOS, Quickview, Worldview-1/2 の商業衛星 (数 10cm - 数 m) がよく用いられている。科学衛星の時代から、森林の分光反射率と地上バイオマスの関係は調べられているが、Sader et al. によると

その相関は低く見積もり誤差は大きい²⁾。これは森林の分光反射特性は植物季節によって大きく変化する一方で、バイオマスの主たるリザーバーである幹に対する感度が低くなるためである。ただし、光学画像による衛星観測はもっとも多様なデータが連続的に利用することができるため、MODISの低解像度画像を用いて広域バイオマス分布を推定する事例も報告されている³⁾。中～高解像度(60m以下)では画像表面のテクスチャを用いる方法が報告されており、分光反射特性を用いたものより精度が向上する点も報告されている⁴⁾。

土地被覆分類マップからバイオマスを推定する手法では Landsat に代表される中解像度から高解像度の森林間のギャップや密度が識別できるデータが利用され、バイオマスの推定精度(RMSE)は 50t/ha が得られている。

2.2 SAR (レーダ)

SAR 観測ではパルス圧縮と合成開口の技術を駆使して波長のみで規定される実開口レーダと比較して実効的な分解能の向上が得られる。光学観測との最大の違いは天候に左右されず、観測が可能である。現在利用されている SAR センサは PALSAR (日本 L バンド、ALOS 2011 年に運用終了)、RADARSAT1/2 (C バンド、カナダ)、ASAR (C バンド、欧州、ENVISAT、2012 年運用終了)、TerraSAR-X (X バンド、ドイツ)、CosmoSkyMed (X バンド、イタリア) があげられる。

SAR から送信されるマイクロ波は森林の内部へ透過し、樹木サイズや密度に応じて散乱を受ける。この後方散乱係数が陸上バイオマス量に対応して変化することを利用して推定を行っている。この場合、波長の短い X バンド C バンドでは幹だけでなく細い枝、葉による散乱成分が増加し、波長の長い L バンド P バンドではバイオマス量が支配的な幹や枝による散乱が主体である。日本が打ち上げた ALOS/PALSAR は SAR 衛星の中で唯一の L バンド SAR であり、2013 年打ち上げ予定の ALOS-2 にも同様の L バンド SAR が搭載予定である。

PALSAR を用いた日本国内のバイオマス推定では 200t/ha を超える領域で後方散乱係数の値がほぼ同じ値を示すようになり、感度が低くなっている⁵⁾。この場合の標準偏差は 100t/ha と大きくなるものの、200t/ha 以下で 50t/ha となっている。領域によっては 100t/ha から飽和傾向が観測されることから SAR 観測では広域推定はバイオマス量が比較的低い地域に限られる。

2.3 ICESat (ライダー)

植生バイオマス推定においては NASA/GSFC の ICESat 搭載センサ GLAS が利用されている⁶⁾。GLAS の主目的は極域氷床の経年変化や質量収支の

動態把握であるが、高度計データの特性を生かして樹高マップ、バイオスマップの推定に用いられている。GLAS による計測が上記 2 点と異なるのはレーザー光の照射により、対象までの距離情報を取得することである。これにより葉、枝、幹、下草などの林床植生、そして地盤面の各構成要素を含む森林の鉛直構造が取得可能であり、L バンド SAR では精度が劣化するバイオマスの大きい領域でも推定可能となる。一般的に地盤面からの反射強度と樹冠の反射部の時間差を取得することで樹冠高が得られる。バイオマスの推定には樹冠高の推定値と陸上バイオマスで直接取得された値の経験式が用いられている。べき乗関数として得られた経験式により、ラテンアメリカ、アフリカ、東南アジアの 500 点の検証が行われ、約 60t/ha の精度が得られている⁷⁾。

ICESat/GLAS ではレーザーの繰返し周波数は 40Hz であり、隣接する地上フットプリント間は 180m 程度の離散点データとなる。加えて 70m のフットプリントであるため、照射点における地盤面の傾斜によって樹高推定精度は大きく依存する。こういった点から全球を考慮した場合にはライダー単体でバイオマス推定量の広域取得には面的拡張の問題が挙げられる。

2.4 MOLI ミッションの目的と応用

ライダー観測を用いたバイオマス推定には 1) 樹冠高の離散的な観測データの精度向上、2) 面的なデータへの拡張、3) フットプリント内の地盤面傾斜に対する樹高推定精度の劣化の課題がある。MOLI における観測システムへの要求を Table 1 にまとめた。

ライダー観測では面的な拡張に対して ICESat/GLAS の計測データとほかの光学センサで得られた情報を組み合わせることで、樹冠高、陸上バイオマスの面的な推定が行われており⁸⁻¹⁰⁾、MOLI の観測でもこの手法の改良によって樹冠高やバイオマス推定を予定している。

樹高推定の面的な拡張は、ライダーで得られた値を教師データとし、MODIS から得られる土地被覆分類や SRTM/ASTER 等の DEM データ等を環境変数とする参照テーブルを作成、ライダー観測値のない隣接地域でも樹高推定を行う。

地盤面傾斜についての対策として、ライダーの検出素子を 4 分割のアレイ検出器とし、レーザーの繰返しを上げ衛星の AT 方向に連続したレーザー照射を行う。これにより 1 観測データの情報量が増えるため、4 つの波形情報から特異値分解による以下の式を用いて、地盤面傾斜を補正することが期待できる。

$$X=U \Sigma V^T$$

X は 4 素子から得られたライダーデータ行列、U は植生の樹高成分のみが含まれる行列、V は地形情報を含む行列となる。この解析では 4 つの波形データを独立解析するよりも樹高推定がノイズに対して

Table 1. Requirements of MOLI measurement

RMSE	< 3m
Pointing accuracy	1 σ < 10 m
Observation region	N51° – S51°
Frequency	60,000 point within 1 degree grid per 1 year
Lidar	
Wavelength	1064nm
Pulse energy	60 mJ
Pulse repetition rate	150 Hz
Pulse width	< 10 ns
Telescope Dima	0.7 m
Beam divergence	0.123 mrad
Footprint	50 m @ 400km
Field of view	25 m/pixel
Detector	Si-APD 2x2 array

堅牢となることが期待できる。また地盤面の受信信号強度が微弱となっても情報分離が期待される。

バイオマス推定については目的変数を陸上バイオマス、説明変数をライダー波形データのパラメータとして多変量解析によって推定する手法を開発している。樹高推定同様 GLAS のデータを用いて地上の実測値と比較すると推定誤差として 40t/ha 程度と見積もっている。MOLI では GLAS と比較して 4 分割素子による地盤面傾斜の補正、AT 方向に連続計測することでの解析データの上昇により、現在見積もっている精度の更なる向上が期待できる。

MOLI によるミッションでは上記のバイオマス推定量をもとに環境政策、災害予測精度、土地利用計画といった分野への利用を期待している。

3. レーザー研究モデルの開発

新規の宇宙機搭載ライダーの実現にむけて、MOLI では検出器とレーザー送信機の実現性、宇宙環境での動作安定性が求められる。JAXA では 2011 年度より宇宙用パルスレーザーの信頼性向上に向けた研究を実施しており、10W 級レーザーの製作、半導体レーザーの耐久試験、放射線体制試験、レーザー誘起コンタミネーションによる光学素子破壊の抑制について研究を行っている。今年度に入りパルスレーザーの研究から MOLI の研究と統合して実施することとなり、製作するシステムについてはすべて MOLI のシステムを念頭に置いた値へ変更することとしている。

昨年度までにレーザーの製作では伝導冷却型レーザー共振器および前段増幅器の製作を行い、双方の組合せ試験でパルス幅 10ns 程度、35mJ/150Hz の出力までを確認した。

レーザーダイオードの耐久試験では複数のベンダーからサンプルを入手し、現在までに 7G ショット以上の動作を確認し、寿命曲線が得られている。複

数の条件で設定した結果と比較すると規定の寿命曲線に対して注入電流の絶対定格に対する derating の設定により、レーザーダイオードの寿命の定式化について可能性が見えてきた。

放射線体制試験についてもガンマ線、プロトンによる照射試験を実施し、使用予定のベンダーが製作したレーザーダイオードスタックについて前後での入出力特性や、劈開面の状態について差異がないことを確認した。

レーザー誘起コンタミネーションによる光学素子の破壊抑止については宇宙用環境下で重要な要素となる。宇宙機や搭載センサは製作時に清浄度の高いクリーンルームで事前に有機溶剤などの物質をベーキング処理によって部品レベルから除外する。管理基準は NASA をはじめ、ESA、JAXA においても厳密に規定されている。厳密な管理のもとでアウトガスによる分子状コンタミネーションは管理されているものの、軌道上で動作する宇宙機では時間経過に伴ってきわめてゆっくりと分子状のコンタミネーションが発生する。これはベーキング処理などで枯渇しきれないことをあらわしており、宇宙機であれば断熱材 MLI の劣化による太陽光吸収率の上昇、望遠鏡であれば主鏡や副鏡に付着し、反射率の劣化を招く。これがパルスレーザーの筐体内に発生する場合、筐体内を浮遊するコンタミネーションがレーザーにより打出され光軸の光学素子に堆積し始め、一定量を超えると薄膜や基盤に焼損を引き起こす。

アウトガスによるコンタミネーション量を把握するため、真空容器に宇宙用のレーザーで使用する接着剤や配線材等を封入して発生量を 1 気圧と 100Pa 程度の圧力で封入した状態で調査した。付着量を計測するセンサ表面にはおよそ原子 1 層程度の体積量しか存在せず、これまで報告されている数十層にも及ぶ堆積層は確認できなかった。比較対象となる 10⁻³Pa 以下の高真空での条件では計測ができなかったため、今後は高真空時での計測ができる環境を整える予定である。

地盤面傾斜の補正のために 4 分割素子を用いる。この場合、隣接する素子間で地盤面が検出できることに加えて、1 素子あたりで樹木の頂点部分を取り逃さず、適切な地上観測の視野が必要となる。最終的には衛星から地表に対する観測では 1 素子あたりの観測視野を 25m とし、レーザーの地上フットプリントは連続で照射する仕様とした。4 分割素子による信号検出と地盤面傾斜の検出のアルゴリズム実証のため、昨年度製作した 4 分割素子を組み込んだ試験装置の改修を行い、今年度後半に観測システムの実証を行う予定である。

4. まとめ

衛星軌道上から樹冠高検出による樹高マップの生成からバイオマス推定に向けた研究を実施している。

ICESat の観測データを下に新たに樹高算出や、バイオマス推定のアルゴリズムを検討し、樹高精度 3m や 20t/ha の推定精度達成についてめどが得られてきた。樹冠高計測用ライダーのミッション要求書策定を実施する予定である。

5. 謝辞

MOLI データの利用による樹高算出・バイオマス推定アルゴリズムについては東京大学生産技術研究所：澤田義人氏、国立環境研究所：林真智氏、リモートセンシング技術センター：遠藤貴宏氏に多大なる助言と貢献を頂きました。ここに謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) H.K. Gibbs, S. Brown, and J.O. Foley; "Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality", *Environ. Res. Lett.* 2 045023 (2007).
- 2) S.A.Sader, R.B.Waide, W.T.Lawrence, A.T.Joyce; "Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data", *Rem. Sens. Environ.* 28, 143, (1989)
- 3) A.Baccini, N.Laporte, S.J.Goetz, M.Sun, H.Dong; "A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery", *Environ. Res. Lett.*, 3, 045011, (2008)
- 4) L.R.Sarker and J.E.Nichol; "Improved forest biomass estimates using ALOS AVNIR-2 texture indices", *Rem. Sens. Environ.* 115, 968, (2011).
- 5) T.Motooka, M.Shimada, O.Isoguchi, M.Ishihara, S.Suzuki, "Relationships between PALSAR backscattering data and forest above ground biomass in Japan", *Proc. IEEE International Geosci. Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3518 (2011)
- 6) J.B. Abshire, X. Sun, H. Riris, J.M. Sirota, J. F. McGarry, S. Palm, "Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance", *Geophys. Res. Lett.* 32, L210S02, (2005).
- 7) M.Lefsky, D. Harding, M.Keller, W.Cohen, C.Carabajal, F.Del Bom Espirito-Santo, M.Hunter, R.de Oliveira Jr. P. de Camargo,"Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat", *Geophys. Res. Lett.*, 32 (2005).
- 8) M.Lefsky; "A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System", *Geophys. Res. Lett.*, 37, L073622, (2010).
- 9) S.S.Saatchi, N.L.Harris, S.Brown, M.Lefsky, E.T.A.Mitchard, W.Salas, B.R.Zutta, W.Buermann, S.L.Lewis, S.Hagen, S.Petrova, L.White, M.Silman, and A.Morel, "Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, (2011).
- 10) N.L.Harris, S.Brown, S.C.Hagen, S.S.Saatchi, S.Petrova, W.Salas, M.C.Hansen, P.V.Potapov, A.Lotsch; "Baseline Map of Carbon Emissions from Deforestation in Tropical Regions", *Science*, 336, 1573, (2012).
- 11) F.G. Hall, K. Bergen, J.B. Blair, R. Dubayah, R. Houghton, G. Hurtt, J. Kellndorfer, M. Lefsky, J. Ranson, S. Saatchi, H.H. Shugart, and D. Wickland; "Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements", *NASA publications*, 60, (2001).