

森林地上部バイオマス分布・動態の衛星観測

本岡 肇¹・島田 政信¹

1. 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

Satellite observation of distribution and dynamics of forest above-ground biomass

Keywords: forest biomass, satellite remote sensing, synthetic aperture radar, optical sensor, LiDAR

Takeshi Motohka¹, Masanobu Shimada¹

1. Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency
2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

1. はじめに

人工衛星による宇宙からの地球観測（衛星リモートセンシング）は、地球表面の広い範囲を時系列に観測することのできる技術であり、地球環境の変化を調べる上で不可欠なものとなっている。本稿では、この衛星リモートセンシングによる森林地上部バイオマスや炭素量の観測に関する現在の研究動向を紹介する。

バイオマスとは、生物の乾燥重量のことであり、森林の状態を表す最も基本的な量のひとつである。森林生態系の中でも、樹木のバイオマスは、森林での物質循環、特に炭素の動態を解明するために必須の情報である。樹木は、一般的に、光合成によって空気中の二酸化炭素を体内に取り込み、それを炭水化物へと変換して幹や根、葉などの器官に蓄える。成長とともに幹や根は太くなり、バイオマスが増加する。すなわち、バイオマスは、森林の炭素動態において、炭素をどれくらい蓄えているのかということを表すストックの一部分を示している。近年、気候変動のメカニズム解明や対策のために、高い温室効果を持つ二酸化炭素の動態を把握することが求められているが、そのためには、バイオマスを測定することが鍵となる。一方で、林業のように木材を効率的・持続的に生産するという目的のためにも、バイオマスを知ることが重要である。

近年では、REDD+ (Reducing Emission from Deforestation and forest Degradation plus; 途上国における森林減少や劣化からの温室効果ガス排出削減、ならびに森林保全・持続可能な森林管理・森林炭素蓄積の増強) の取り組みが世界的に進められており、バイオマス測定の重要性と要求は、ますます強くなっている。REDD+は、主に、熱帯雨林が多く存在する途上国を対象にしており、対象地域に経済的なインセンティブを与えることで、森林伐採や劣化を防ぐ取り組みである。例えば、ある対象地域において、森林伐採を防ぐことで二酸化炭素の排出を事前予想（ベースライン）よりも削減した場合には、その削減分を炭素クレジットとして排出権取引に利用できる、という仕組みが考えられて

いる。うまく機能すれば、温室効果ガスの排出削減だけでなく、天然林やそこに生息する多種多様な生物を保全することにもつながる。REDD+の実施には様々な困難があるが、何よりもまず前提として、森林の炭素蓄積、つまりバイオマスの正確な評価手法が必須である。精度が求められるのはもちろんのこと、REDD+では地域や国といった規模での取り組みを想定しているため、広域をくまなく観測する必要があり、さらには、伐採や劣化などの時間的変化も捉える必要がある。地上計測や航空機観測で領域全体をカバーするには費用が多大にかかり、険しい山岳地帯や密林の奥などのアクセス困難な場所の観測もしなければならない。これらの問題を解決する方法として、衛星観測が強く期待されている (Gibbs et al. 2007)。現在、多くの研究者が衛星データの解析手法や新規衛星センサの開発を試みている。

人工衛星による観測のメリットとして、広域をシームレスに観測できること、アクセス困難な地域や危険な地域の観測が可能であること、時系列の観測が可能であること、などが挙げられる。植生観測によく用いられる衛星センサ（飛行高度 600-800 km）であれば、一回の通過時における観測幅は数 km～約 2000 km、頻度は毎日～数ヶ月ごとの観測が可能である（解像度と観測幅・頻度にはトレードオフの関係があり、解像度が高くなれば、観測幅が狭く、頻度も低くなる）。また、衛星観測は、ひとつの手法で広域を均一に観測することが可能であり、サンプリング密度や手法の違いによる地域間のバイアスを避けることもできる。一方、デメリットは、データの解釈や物理量への変換が難しいことである。ほとんどの衛星センサは、観測のために電磁波を使っており、生データとして、電磁波の強度や位相、偏波などが記録される。そのため、これらを樹木のバイオマスや土地被覆分類図など、必要とする物理量や主題図に変換しなければならない。

衛星による森林バイオマス観測については、まだ発展途上の段階であり、手法を確立するには至っていない。多種多様なアプローチが試みられているのが現状である。用いられるセンサは多様で、電波を用いたレーダ、光学センサ（短波放射などの比較的短い波長の電磁波を主に利用するセンサ）、LiDAR（Light Detection And Ranging）の 3 種が代表的である。

これらのデータを利用するアプローチには、大きく分けて、衛星データを直接的にバイオマスに変換する方法と、土地被覆や樹冠閉鎖度などを一度推定してからバイオマスを推定する方法の 2 種類がある (Lu 2006; 図 1)。前者は Direct remote sensing method (DR 法)、後者は Combine and assign method (CA 法)とも呼ばれる (Goetz et al. 2009)。DR 法は、森林地上部バイオマスと衛星観測データの関係を調べ、経験的にバイオマスを求める方法である。一方、CA 法は、衛星データなどを用いて作成した植生図や伐採分布図などから場所ごとにクラス分けを行い、各クラスに対してバイオマスや炭素量の代表値をあてがう方法である。DR 法は連続的な推定値を出力するため、CA 法に比べて詳細な分布を提供できる。しかし、現状では対応できる衛星データは限られており（詳細は後述）、今後の研究開発が期待されている。

以降、人工衛星のセンサごとに手法の特徴や課題について述べる。

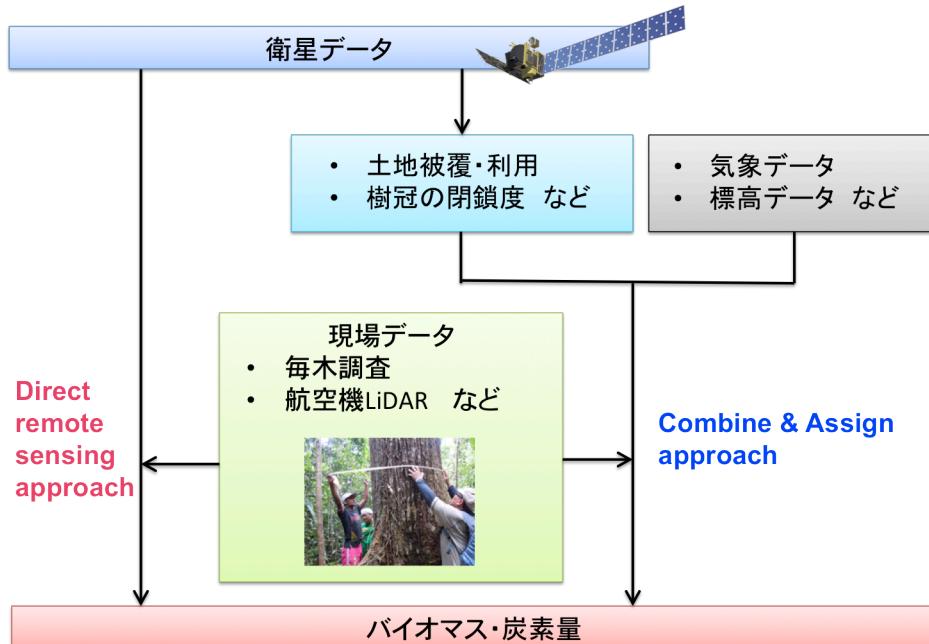


図 1 衛星データから森林地上部バイオマスを推定するための、2種類のアプローチ。

2. 合成開口レーダによる方法

合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) は、衛星や航空機に搭載されたアンテナからマイクロ波（波長約 1 mm – 1 m）と呼ばれる電波を送信し、地球表面から散乱された電波の強度、位相、偏波を記録する。これらの情報から、地球表面の状態を調べることができる。SAR の有用な特徴として、まず、高分解能であることが挙げられる。一般に、衛星センサ（実開口レーダを含む）の空間分解能は波長が長くなるほど低下する。マイクロ波の L バンドと言われる波長帯（約 23 cm）を用いた場合、この分解能は約 15 km 程度になる。ところが SAR では、パルス圧縮と合成開口という 2つの技術を駆使することによって、この分解能を、数 m のオーダーにまで向上させることができる。また、SAR は、全天候で観測可能であるという利点を持つ。マイクロ波のうち、比較的波長の長いものについては、雲や雨をすり抜けることが可能であり、雲の下の地表面の観測が可能である（図 2）。この特徴は、特に熱帯などの雲の多い地域で非常に有用である。現在、多くの衛星 SAR が地球観測のために運用されている：ALOS PALSAR（L バンド、日本、2011 年に運用終了）、ALOS-2 PALSAR-2（L バンド、日本、2013 年打ち上げ予定）、RADARSAT 1/2（C バンド、カナダ）、ENVISAT ASAR（C バンド、欧州、2012 年に運用終了）、TerraSAR-X / Tandem-X（X バンド、ドイツ）、CosmoSkyMed（X バンド、イタリア）。

SAR の測定する後方散乱係数（単位面積あたりの、入射電波が一様方向に散乱した場合の電波強度に対する、後方に散乱される電波強度の比）は、森林の地上部バイオマスに応答して変化することが知られている。SAR から送信されたマイクロ波は、森林のキャノピーの中にまで透過し、樹木のサイズや密度、角度などの構造に応じて散乱される。マイクロ波の波長によって応答は異なり、比較的波長の短い X バンドや C バンドでは、幹

だけでなく、葉や細い枝によっても散乱される。一方、波長の長い L バンドや P バンドでは、葉にはあまり感度がなく、幹や枝によって散乱される。そのため、波長によって、後方散乱係数とバイオマスの関係は異なってくる (Le Toan et al. 1992; Imhoff 1995)。しかしながら、バイオマスがある程度まで大きくなると、後方散乱係数がほとんど変化しなくなる飽和の現象が起こる。飽和の起こるバイオマスの値は波長によって異なり、波長が長いほうが、より高いバイオマスまで感度を持つ。

図 3 は、日本の各種森林における、SAR の後方散乱係数と地上部バイオマスの関係である。200 t/ha 程度でほぼ後方散乱係数が同じ値を示すようになり、感度が低くなっていることがわかる。標準偏差は約 100 t/ha であるが、200 t/ha 以下のプロットのみを対象とすると、約 50 t/ha となる。得られた経験式を用いると、飽和の影響のため高いバイオマスの精度は悪いが、図 4 のような分布図を得られる。そのほか、アマゾン (Luckman et al. 1997)、シベリア (Rauste 2005)、オーストラリア (Lucas et al. 2010)、東南アジア (Englhart et al. 2011)、アフリカ (Mitchard et al. 2009)、北欧 (Sandberg et al. 2011) など、数多くの地域で上記と同様の関係が得られている。SAR のデータを直接的に用いる方法では、この後方散乱係数を用いる方法が考えられるが、飽和の影響のため、高いバイオマスを推定することができない。そのため、広域に適用している事例は、バイオマスの比較的低い地域がほとんどである。飽和の影響を最小限にするために、これまでの衛星 SAR では使われていない、波長の長い P バンドを用いた衛星 SAR (BIOMASS ミッション; Hélière et al. 2009) が計画されている。また、後方散乱係数だけでなく、電波の持つ位相や偏波の情報を用いる方法 (ポラリメトリック・インターフェロメトリ) も研究されており (Papathanassiou and Cloude 2001)，今後の実用化が期待されている。

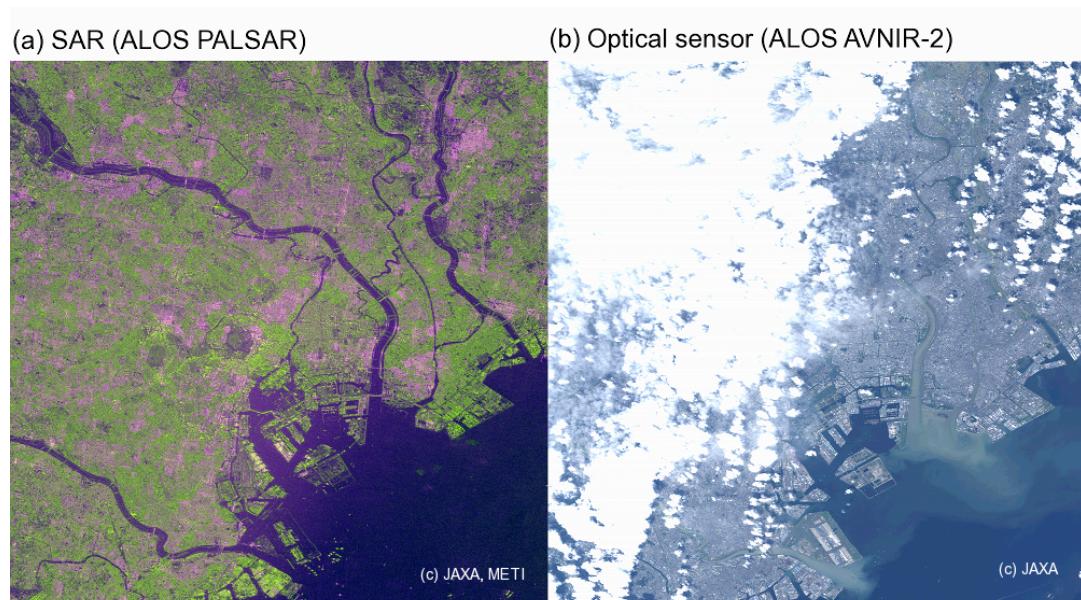


図 2 衛星 ALOS に搭載の合成開口レーダ (SAR) と光学センサによる取得画像 (観測日: 2007 年 9 月 15 日, 場所: 東京中心部周辺)。(a) L バンド SAR (PALSAR, R/G/B = HH 偏波/HV 偏波/HH 偏波-HV 偏波), (b) 光学センサ (AVNIR-2, R/G/B = バンド 3/バン

ド 2/バンド 1)。

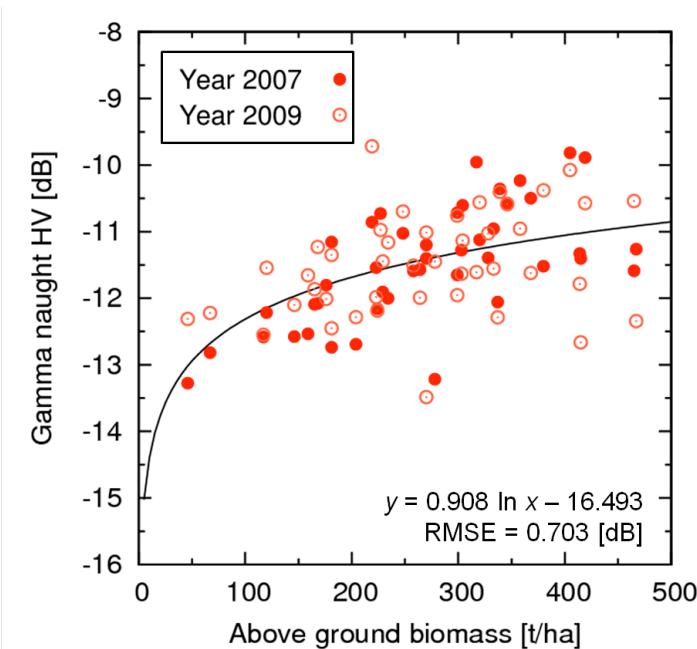


図 3 環境省生物多様性センターモニタリングサイト 1000(石原ら 2010; Ishihara et al. 2011)による森林地上部バイオマスデータと ALOS PALSAR の後方散乱係数(HV 偏波)の関係。Motohka et al. (2011)を改変。

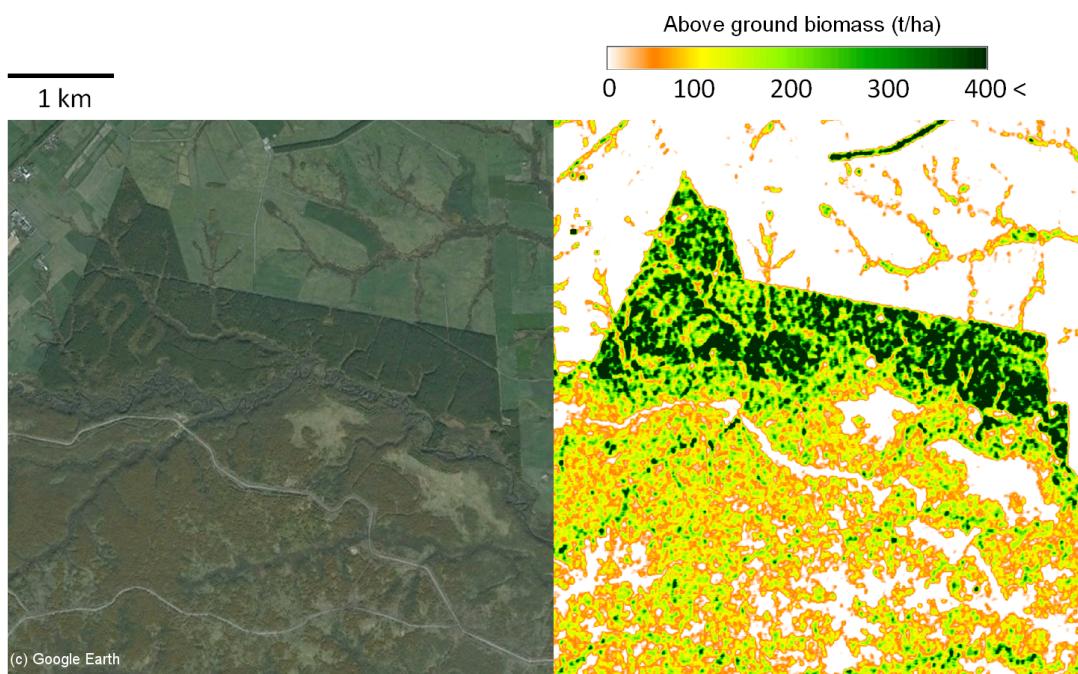


図 4 図 3 の経験式を用いて推定した森林の地上部バイオマス分布 (右)。

3. 光学センサによる方法

光学センサは、可視域と赤外域の波長帯を測定するセンサであり、主に太陽光の反射・散乱や熱放射を観測する。例えば、インターネットの地図サービスで使われる高解像度の衛星空中写真も、光学センサによるものである。センサや衛星によって解像度・観測幅・観測頻度は様々であり、植生観測によく用いられるセンサには次のようなものがある：Terra/Aqua MODIS（解像度 250-1000 m, 米国）, ENVISAT MERIS（解像度 300 m, 欧州, 2012 年に運用終了）, Landsat（解像度 30-120 m, 米国）, ASTER（解像度 15-90 m, 日本・米国）, ALOS AVNIR-2（解像度 10 m, 日本, 2011 年に運用終了）, GeoEye・IKONOS・QuickBird・WorldView-1/2 などの商用センサ（解像度 数 10 cm-数 m）。

衛星によって測定される森林の分光反射特性（波長別の光の反射率）と地上部バイオマスの関係は、古くから調べられているものの、相関が低いことがわかっている（Sader et al. 1989）。これは、森林における可視域・近赤外域の反射率が主に葉の量・色素・配置の影響を強く受け、幹や枝の量には感度が弱いためである。また、分光反射特性は展葉や紅葉などの植物季節（フェノロジー）によって大きく変化することも、バイオマスの推定を困難にする（Muukkonen and Heiskanen 2007）。さらには、雲や大気エアロゾルの影響を受けるため、これらを除去する前処理が必要になる。このように困難は多くあるが、MODIS などの低解像度（250-1000 m）データを用いて広域のバイオマス分布を推定している事例もある（Baccini et al. 2008）。一方、中解像度以上（60 m 以下）のデータでは、画像表面のテクスチャを用いる方法もあり、分光反射特性のみを用いる場合に比べて精度が向上することが示されている（Sarker and Nichol 2011）。

上記のような DR 法には多くの困難があるため、まず樹冠の閉鎖度や土地被覆タイプなどを衛星データから決定し、そこからバイオマスを推定する CA 法の開発も多く行われている（Hall et al. 2006; Labrecque et al. 2006; Asner 2009, Asner et al. 2010）。この方法では、Landsat などの主に中解像度（10-60 m）から高解像度（-10 m）の森林のギャップや密度が判読できるデータがよく用いられる。推定精度（RMSE）は、50 t/ha 程度が得られている。

4. LiDAR による方法

LiDAR は、対象に向けてレーザー光を発射し、反射や散乱されて返ってきた光の往復時間や強度などを測定するセンサである。光が発射されて返ってくるまでの時間から、対象までの距離を知ることができる。人工衛星から森林に向かってレーザー光を打ち込むと、葉、枝、幹、林床植生、地面など各構成要素からの反射が時間差で記録され、反射強度の鉛直方向プロファイルを得ることができる（図 5）。一般に、地面からの反射強度は最も大きく、一方で樹冠は反射の開始部であると見なせるので、その時間差を見ることで、樹冠高を推定することができる。

LiDAR を搭載した人工衛星には、米国の ICESat がある（Schutz et al. 2005）。ICESat の主目的は氷床の質量収支の解明であるが、森林のバイオマス推定にもデータは活用されている。運用期間は 2003 年から 2009 年であり、現在は後継の ICESat-2 が計画されている。

る。ICESat の 1 回の観測のフットプリントは約 70 m, レーザー光の波長には近赤外(1064 nm)と可視緑 (532 nm) が用いられている。そのため、雲があるところでは観測できない。アマゾンや米国内での検証では、ICESat による樹冠高の推定精度 (RMSE) は 3-5 m 程度である (Lefsky et al. 2005; 2007; Lefsky 2010)。特に, Lorey's height (胸高断面積で重みづけ平均した樹高) の推定精度が最も高いことがわかっている (Lefsky 2010)。森林バイオマスの推定は、ICESat による樹冠高の推定値と地上部バイオマスの間の経験式を用いて行われている。経験式はべき関数になることが、ラテンアメリカ、アフリカ、東南アジアの約 500 点のバイオマス観測データを用いて確かめられている (Lefsky et al. 2005; Saatchi et al. 2011)。Lefsky et al. (2005) は、地上部バイオマスを約 60 t/ha の精度 (RMSE) で推定している。

LiDAR の計測におけるレーザー光パルスは、一定間隔ごとに発射される。ICESat の場合は 40 Hz (1 秒間に 40 回) であり、これは、衛星進行方向に沿って平均約 170 m の間隔で観測することになる。すなわち、LiDAR による測定は、面的なデータ取得ではなく、離散的な点でのデータ取得になる。そのため、LiDAR による推定値と光学センサなどの観測データと組み合わせることで、樹冠高や地上部バイオマス、炭素蓄積量の面的な推定が行われている (Lefsky 2010; Saatchi et al. 2011; Harris et al. 2012)。手法は、ICESat により推定されたバイオマスを教師データとした機械学習であり、入力として MODIS データやマイクロ波散乱計データ (QuickSCAT) が主に用いられている。MODIS や散乱計データの解像度が低いため、それに合わせて出力のバイオマス分布も解像度 1 km となっているが、今後の高解像度化が望まれる。

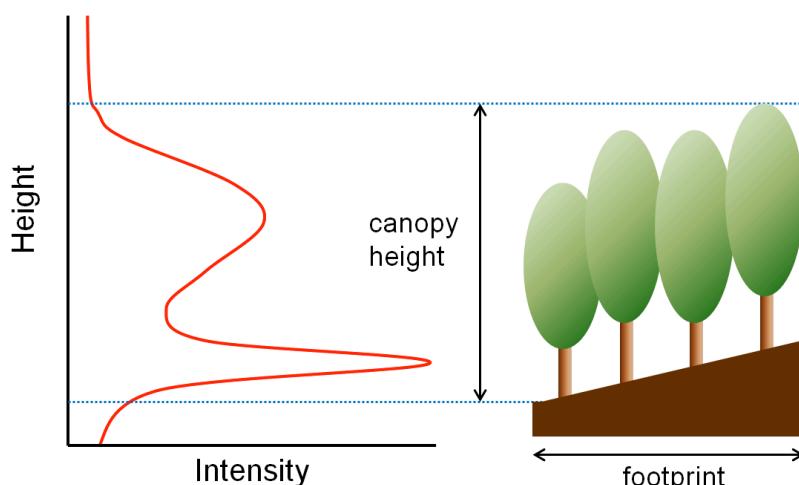


図 5 衛星 LiDAR によって得られるデータの模式図 (左図中の赤線)。観測点ごとに、図のような波形データが得られる。

5. まとめ

上述のように、衛星観測によるバイオマス推定には様々なアプローチがあり、それぞれにメリット・デメリットがある。地域利用に必要とされる解像度 (10-100 m 程度) で

精度良くバイオマスを推定できる方法の研究開発は、まだ発展途上である。今後、各種アプローチの統合をより一層進め、互いのメリットを最大限に活かす手法を開発することが求められる。特に、衛星データから直接的にバイオマスを推定する DR 法は、SAR と光学センサのどちらにおいても、高いバイオマスの推定が困難である。例えば、CA 法と組み合わせることで、推定精度を向上させることができるかもしれない。一方で、手法の統合利用と同時に、新規手法の開発も重要である。現在、日本では植生観測のための地球観測衛星・センサとして、ALOS-2 PALSAR-2 (L バンド SAR) , ALOS-3 (光学センサ) , GCOM-C (光学センサ) , iLOVE (宇宙ステーション搭載の植生 LiDAR) などを開発中であり、新規機能の追加や、性能の向上が図られている。今後の研究開発の進展が期待される。

引用文献

- Asner, G. P. 2009. Tropical forest carbon assessment: Integrating satellite and airborne mapping approaches. *Environ. Res. Lett.*, 4: 034009.
- Asner, G. P., Powell, G. V. N., Mascaro, J., Knapp, D. E., Clark, J. K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M., Hughes, R. F. 2010. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107: 16738–16742.
- Baccini, A., Laporte, N., Goetz, S. J., Sun, M., Dong, H. 2008. A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environ. Res. Lett.*, 3: 045011.
- Englhart, S., Keuck, V., Siegert, F. 2011. Aboveground biomass retrieval in tropical forests—the potential of combined X- and L-band SAR data use, *Rem. Sens. Environ.*, 115: 1260–1271.
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., Foley, J. A. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environ. Res. Lett.*, 2: 045023.
- Goetz, S. J., Baccini, A., Laporte, N. T., Johns, T., Walker, W., Kellndorfer, J., Houghton, R. A., Sun, M. 2009. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon Balance and Management*, 4: doi:10.1186/1750-0680-4-2
- Hall, R. J., Skakun, R. S., Arsenault, E. J., Case, B. S. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecol. Manag.*, 225: 378–390.
- Harris, N. L., Brown, S., Hagen, S. C., Saatchi, S. S., Petrova, S., Salas, W., Hansen, M. C., Potapov, P. V., Lotsch, A. 2012. Baseline Map of Carbon Emissions from Deforestation in Tropical Regions. *Science*, 336: 1573-1576.
- Hélière, F., Lin, C., Fois, F., Davidson, M., Thompson, A., Bensi, P. 2009. BIOMASS: A P-band SAR Earth explorer core mission candidate. *Proc. IEEE Radar Conf.*: 1–6.

- Imhoff, M. L. 1995. Radar backscatter and biomass saturation—ramifications for global biomass inventory. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33: 511–518.
- 石原正恵・石田健・井田秀行・伊東明・榎木勉・大久保達弘・金子隆之・金子信博・倉本恵生・酒井武・齊藤哲・崎尾均・齋元道徳・芝野博文・杉田久志・鈴木三男・高木正博・高嶋敦史・武生雅明・田代直明・田中信行・徳地直子・並川寛司・新山馨・西村尚之・野口麻穂子・野宮治人・日浦勉・藤原章雄・星野大介・本間航介・蒔田明史・正木隆・吉岡崇仁・吉田俊也. 2010. モニタリングサイト 1000 森林・草原調査コアサイト・準コアサイトの毎木調査データの概要. 日本生態学会誌 60 : 111 –123.
- Ishihara, M. I., Suzuki, S. N., Nakamura, M., Enoki, T., Fujiwara A., Hiura F., Homma, K., Hoshino, D., Hoshizaki, K., Ida, H., Ishida, K., Itoh, A., Kaneko, T., Kubota, K., Kuraji, K., Kuramoto, S., Makita, A., Masaki, T., Namikawa, K., Niiyama, K., Noguchi, M., Nomiya, H., Ohkubo, T., Saito, S., Sakai, T., Sakimoto, M., Sakio, H., Shibano, H., Sugita, H., Suzuki, M., Takashima, A., Tanaka, N., Tashiro, N., Tokuchi, N., Yakushima Forest Environment Conservation Center, Yoshida, T., Yoshida, Y. 2011. Forest stand structure, composition, and dynamics in 34 sites over Japan. *Ecological Research (Data Paper)*, 26: 1007-1008.
- Labrecque, S., Fournier, R. A., Luther, J. E., Piercey, D. E. 2006. A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in Western Newfoundland. *Forest Ecol. Manag.*, 226: 129-144.
- Lefsky, M., Harding, D., Keller, M., Cohen, W., Carabajal, C., Del Bom Espirito-Santo, F., Hunter, M., de Oliveira Jr., R. de Camargo, P. 2005. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophys. Res. Lett.*, 32: doi:10.1029/2005GL023971.
- Lefsky, M. A., Keller, M., Pang, Y., de Camargo, P. Hunter, M. O. 2007. Revised method for forest canopy height estimation from the Geoscience Laser Altimeter System waveforms. *J. Appl. Remote Sens.*, 1: 1-18.
- Lefsky, M. 2010. A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System. *Geophys. Res. Lett.*, 37: doi:10.1029/2010GL043622.
- LeToan, T., Beaudoin, A., Riou, J., Guyon, D. 1992. Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30: 403–411.
- Lu, D. 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *Int. J. Remote Sens.*, 27: 1297-1328.
- Lucas, R., Armston, J., Fairfax, R., Fensham, R., Accad, A., Carreiras, J., Kelley, J., Bunting, P., Clewley, D., Bray, S., Metcalfe, D., Dwyer, J., Bowen, M., Eyre, T., Laidlaw, M., Shimada, M. 2010. An Evaluation of the ALOS PALSAR L-Band Backscatter—Above Ground Biomass Relationship Queensland, Australia: Impacts of Surface Moisture

- Condition and Vegetation Structure. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3: 576–593.
- Luckman, A. J., Baker, J. R., Kuplich, T. M., Yanasse, C. C. F., Frery, A. C. 1997. A Study of the Relationship between Radar Backscatter and Regenerating Forest Biomass for Spaceborne SAR Instruments. *Rem. Sens. Environ.*, 60: 1-13.
- Mitchard, E. T. A., Saatchi, S. S., Woodhouse, I. H., Nangendo, G., Ribeiro, N. S., Williams, M., Ryan, C. M., Lewis, S. L., Feldpausch, T. R., Meir, P. 2009. Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: a consistent relationship across four different African landscapes. *Geophys. Res. Lett.*, 36: doi:10.1029/2009GL040692.
- Motohka, T., Shimada, M., Isoguchi, O., Ishihara, M. I., Suzuki, S. N. 2011. Relationships between PALSAR backscattering data and forest above ground biomass in Japan. *Proc. IEEE International Geosci. Remote Sensing Symposium (IGARSS)*: 3518-3521.
- Muukkonen, P., Heiskanen, J. 2007. Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and the ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. *Rem. Sens. Environ.*, 107: 617–624.
- Papathanassiou, K. P., Cloude, S. R. 2001. Single-baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 39: 2352–2363.
- Rauste, Y. 2005. Multi-temporal JERS SAR data in boreal forest biomass mapping. *Rem. Sens. Environ.*, 97: 263–275.
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., Morel, A. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108: 9899-9904.
- Sader, S. A., Waide, R. B., Lawrence, W. T., Joyce, A. T. 1989. Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. *Rem. Sens. Environ.*, 28: 143-156.
- Sandberg, G., Ulander, L. M. H., Fransson, J. E. S., Holmgren, J., LeToan, T. 2011. L- and P-band backscatter intensity for biomass retrieval in hemiboreal forest. *Rem. Sens. Environ.*, 115: 2874-2886.
- Sarker, L. R., Nichol, J. E. 2011. Improved forest biomass estimates using ALOS AVNIR-2 texture indices. *Rem. Sens. Environ.*, 115: 968-977.
- Schutz, B., Zwally, H., Shuman, C., Hancock, D. DiMarzio, J. 2005. Overview of the ICESat Mission. *Geophys. Res. Lett.*, 32: doi:10.1029/2005GL024009.