

マレーシア・サバ州中央部の熱帯生産林における IKONOS を用いた地上部バイオマスの分布推定

松浦俊也・平田泰雅・Langner Andreas・齋藤英樹(森林総研)・北山兼弘(京都大)・
Phua Mui-How・Korom Alexius・Wong Wilson.(マレーシア・サバ大)

要旨: マレーシア・サバ州中央部の生産林にて2009年9月撮影のIKONOS画像を用いて地上部バイオマス(AGB)の異なる森林の分布を推定した。まず2007~2011年に取得した45ヶ所の円形毎木調査プロット(半径15mまたは20m)を用い、DBHのみに基づく一般アロメトリー式によりAGB(t/ha)を推定した。次に、IKONOS画像の各バンドのDNとNDVIについて各プロット内における平均とSDを求め、地上調査によるAGBと比較した。AGBの異なる3タイプの森林(AGB: <150, 150-300, >300 t/ha)を分類回帰木(CART)により解析すると、赤と緑バンドの平均値と近赤外バンドのSDにより森林毎の分布の8割強が正しく分類された。さらに、オブジェクトベース画像解析によるセグメントに同結果を代入してAGBの分布を推定した。なお、高バイオマスの森林をさらに細分することは困難であった。これは、各バンドの平均値とSDでは林冠が粗でギャップの多い低バイオマスの森林と樹冠の影のある高バイオマスの森林を区別しづらいためと考えられ、同特徴を表現する指標が必要と考えられた。

キーワード: 高分解能衛星画像, オブジェクトベース画像解析, 分類回帰木, 林冠

Abstract: Present study estimated the forest distribution with different above ground biomass (AGB) using a very high resolution satellite imagery IKONOS taken in September 2009 in a production forest in central Sabah, Malaysia. AGB is estimated in 45 circular plots (15 or 20 m radius) taken from 2007 to 2011 with a DBH based general allometric equation. AGB within each circular plot was then compared with mean and SD of digital number (DN) and NDVI from the imagery. Using classification and regression tree (CART), more than 80 % of three types of forest with different AGB (<150, 150-300, >300 t/ha) were successfully distinguished with the mean of red and green bands and SD of near infrared red band. The result was further used for estimating AGB distribution using object-based image analysis. High AGB forest (>300 t/ha) cannot be further classified with the CART probably due to the difficulty in distinguishing low biomass forest with canopy gaps from high biomass forest with crown shadows. Further indices would be investigated which can distinguish such differences.

Keywords: very high resolution satellite imagery, object based image analysis, CART, forest canopy

I はじめに

森林の減少・劣化が進む東南アジアの熱帯林のモニタリングは森林炭素蓄積および生物多様性の保全の両面において重要である。マレーシア・サバ州では、広大な森林がアブラヤシ園に転換された一方、残存する森林では皆伐、択伐、低インパクト施業(RIL)など様々な施業が行われている。このような施業方法の違いは林冠構造や地上部バイオマスに影響を与えたと考えられる。

ここで、2000年頃より利用可能となった、樹冠より小さい数十cm~数m程度の解像度をもつ高分解能衛星画像は、これらの林冠構造の違いを把握する上で有

効である(2)。高分解能衛星画像の解析では、樹冠や林冠の構造を捉えられるオブジェクトベース画像解析がピクセルベースの画像解析よりも有効とされ、各気候帯における人工林や天然林で研究が進められている(3)。しかし、高分解能衛星画像を用いて施業方法の違いによる林冠構造や地上バイオマスの違いを東南アジアの生産林地域で解析した研究事例は未だ少ない。

そこで本研究では、施業方法の異なる熱帯生産林地域を対象に、高分解能衛星画像を用いたオブジェクトベース画像解析によって森林の林冠構造を区分し、毎木調査結果との比較により地上部バイオマス(AGB)の

Toshiya MATSUURA, Yasumasa HIRATA, Andreas LANGNER, Hideki SAITO (Forestry and Forest Products Research Institute, 1, Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687), Kanehiro KITAYAMA (Kyoto University), Mui-How PHUA, Alexius KOROM, Wilson WONG (Universiti Malaysia, Sabah), Estimation of above ground biomass distribution in tropical production forest in central Sabah Malaysia using IKONOS imagery

異なる森林の分布を面的に推定することを目的とした。

II 対象地

熱帯低地の生産林が広がるマレーシア・サバ州中部において、異なる施業形態をもつ隣接する3ヶ所の森林管理区(5° 14-30' N, 117° 11-36' E)を対象とした。デラマコット森林管理区では1995年より低インパクト施業が進められており、地上部バイオマスの豊かな森林が広がっている(4,5)。西隣するタンクラップ森林管理区では、2000年頃まで従来型のインパクトの大きい択伐林施業が行われ、その後再植林が進められつつあるが前者に比べて劣化した森林が広がっている(4,5)。タンクラップの南に隣接するピナンガ森林管理区では、2006~2007年に皆伐林施業が行われ、その後再植林が進められている。なお、これらの生産林地域の周囲には、大規模皆伐後に土地利用転換された広大なアブラヤシ園が広がっている。

III データと方法

1. IKONOS 衛星画像の領域分割 解析の流れを図-1に示す。解析には2009年9月16日に撮影された高分解能衛星画像 IKONOS を用いた。IKONOS には1m解像度のパンクロ画像と4m解像度の赤(R)、緑(G)、青(B)、近赤外(IR)のマルチバンドの観測波長域がある。まず、衛星画像のRPCファイルを用いて画像を幾何補正した。次に、各バンドのデジタルナンバー(DN)に加え、植生の活力を表す正規化植生指数： $NDVI=(IR-R)/(IR+R)$ を算出し、オブジェクトベース画像解析の代表的ソフトウェアである eCognition Developer 8.64 (Trimble 社)を用いて画像を領域分割した。eCognition では、いくつかのパラメータを設定することで解析目的に適した大きさや形状の領域分割が行える。本研究では、森林に関わる既往研究を参考に、カラーパラメータを0.8、シェープパラメータを0.2、コンパクト性のパラメータを0.5に設定した。ここで、カラーとシェープの両パラメータは合計で1になる。森林の場合、各セグメントの形状よりも画素の値が重要であるため、シェープよりもカラーのパラメータを重視した。また、生成されるセグメントの大きさに関するスケールパラメータ(SP)を50~250まで段階的に変化させて林冠のセグメントの特徴を比較し、林冠構造の違いにより林相を良好に区分できた SP=200 にて領域分割した。このときセグメントの平均面積は0.83haとなり、後述する円形調査プロット(半径15mまたは20m)よりも十分大きい領域が生成された。さら

に、各セグメントにおける各バンドのDNやNDVIの平均値と標準偏差(SD)を算出した。

次に、雲やヘイズと裸地を青バンドにて、影と水域を近赤外バンドにて閾値を設定してマスクし、解析から除外した。なお、ピクセル毎に閾値を設定すると、個々の樹冠の影やギャップなど、オブジェクトベース画像解析において必要となる林冠構造の情報も除外されてしまう。そこで、eCognition による領域分割によって得られたセグメントごとの各バンドの平均値に閾値を与えることで、個々の樹冠の影やギャップなどの小面積の特徴を残しつつ、雲やヘイズ、雲の影、裸地、水域などの十分な面積をもつ特徴のみにマスクをかけた。

2. 毎木調査による地上部バイオマスの推定 2010~2011年にかけて、対象地内に半径15mまたは20mの円形プロットを計18ヶ所設置し、すべての樹木のDBH(10cm以上)を計測した。さらに、サバ州林業局森林研究センターおよびデラマコット森林保護区が2007~2008年にデラマコット・タンクラップ両森林管理区に設置した半径20mの円形の毎木調査プロットデータの利用許諾を得て、このうちIKONOS画像に含まれ雲やヘイズや影の影響が少ない27ヶ所のデータを用いた。以上、合計45ヶ所のプロットデータについて、下記の熱帯雨林の一般アロメトリー式(I)を用いて地上部バイオマスを推定した。

$$AGB = \exp\{-2.314 + 2.530 \times \ln(DBH)\}$$

3. 統計解析 ノンパラメトリックな解析手法のひとつである分類回帰木(CART: Classification and regression tree)を用いて、IKONOS画像と地上部バイオマスとの関係を解析した。CARTでは、各説明変数の二分割を繰り返し、応答変数ごとのばらつきが最小となるように分類基準が選択される。この手法は、欠損値をもつデータや非線形のデータも扱うことができ、得られた結果を解釈しやすいなどの利点をもつ。分類には統計ソフトウェアR.2.12.1のmvpartパッケージを用いた。応答変数には、前述の半径15mまたは20mの円形の毎木調査プロット45ヶ所のデータから推定したAGB(t/ha)の値を低(<150)(n=5)、中(150-300)(n=21)、高(>300)(n=19)に3区分したものをを用いた(図-2)。一方、説明変数には、各円形プロット内に中心座標が含まれるピクセルについて、各バンドのDNおよびNDVIの平均値とSDをゾーン統計量として算出

した。さらにクロスバリデーションにより、CARTにより生成された樹形図を樹形の複雑さと予測誤差の関係に基づき剪定した。

IV 結果と考察

アロメトリー式から求めた AGB の値は 12.5～708.3t/ha となった。皆伐や強度択伐をうけて劣化した森林から低インパクト施業が行われている良好な森林まで、多様なバイオマスをもつプロットデータを得られた。

CART の樹形図では、円形プロット内の各バンドの DN の平均値と SD によりバイオマスの異なる森林が区別されていった (図-3)。まず、赤バンドの平均値が大きい場所が植生の少ない低バイオマスの森林 (AGB<150t/ha) として区別された。次に、緑バンドの平均値が大きい場所が、主に中程度のバイオマス (AGB:150-300t/ha) の森林として区分された。さらに近赤外バンドの SD の大きさにより中程度のバイオマスと高バイオマスの森林 (AGB>300t/ha) が区別された。近赤外バンドの SD は森林の樹冠の粗密を表していると考えられた。以上によりトレーニングデータの 82.2% が分類された。得られた分類木の条件式を、オブジェクトベース画像解析における各セグメントに当てはめて作成した AGB の分布推定図を図-4 に示す。皆伐や強度択伐後の低バイオマスの森林とそれ以外の森林を区別できた。

なお、本研究では、予め区切りのよい値で AGB を区分して分類木を適用した。分類数や区切りの値を変えると結果は変化する。例えば、高バイオマスの森林をさらに 2 区分して (AGB: 300-450t/ha と >450t/ha)、計 4 区分で解析したところ、上記の 3 区分の場合と同様に、まず平均値、次に SD により森林タイプが区分されていく。しかし、樹形図の複雑さと予測誤差に基づき剪定すると、低バイオマスの森林を緑や赤バンドの平均値で分類した後に、SD に関する変数が選ばれず、高バイオマスの森林を区別できない場合が多くなった。また、応答変数に AGB の値を直接用いた回帰木においても、同様に高バイオマスの森林の区分がなされない場合が多かった。これは、樹冠どうしの影が多くみられる高バイオマスの森林と、ギャップの多い中程度のバイオマスの森林が、類似する SD の値をとり区別が難しいことなどが理由と考えられた。これらの解決のためには、今回用いた平均と SD に加え、テクスチャや樹冠率、影の割合などの他の特徴量も算出し、一般化線形モデルなどの他の統計モデルも用いたさらな

る検討が必要と考えられた。

V おわりに

本研究では IKONOS 画像と地上部バイオマスとの関係について CART を用いて解析し、オブジェクトベース画像解析に基づきマッピングした。毎木調査においては、サバ大学の方々に大変協力頂いた。サバ州森林研究センターの Jupiri Titin 氏およびデラマコット森林保護区の Peter Lagan 氏からは、毎木調査のサンプルプロットにおける貴重な調査データの使用許諾を得た。本研究は、環境研究総合推進費 D-1006 「熱帯林の REDD における生物多様性保護コベネフィットの最大化に関する研究」(H22-24) の支援を受けた。

VI 引用文献

- (1) BROWN, S. (1997) Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer. FAO Forestry paper, 134:55pp.
- (2) CLARK, D.B., READ, J.M., CLARK, M.L., CRUZ, A.M., DOTI, M.F., CLARK, D.A. (2004) Application of 1-m and 4-m resolution satellite data to ecological studies of tropical rain forests. *Ecol. Appl.*, 14(1):61-74.
- (3) HIRATA Y., FURUYA, N., SAKAI, A., TAKAHASHI, T., AWAYA, Y., SAKAI, T. (2011) Segmentation and classification with discriminant analysis of Quickbird multispectral and panchromatic data to distinguish *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtuse* patches. *J. For. Plann.*, 16:1-12.
- (4) IMAI, N., SAMEJIMA, H., LANGNER, A., ONG, R.C., KITA, S., TITIN, J., CHUNG, A.Y., LAGAN, P., LEE, Y. F., KITAYAMA, K. (2009) Co-benefits of sustainable forest management in biodiversity conservation and carbon sequestration. *Plos One*, 4(12):1-7.
- (5) 北山兼弘 (2010) マレーシア・サバ州における持続的森林管理とその炭素貯留・生物多様性保護効果. *海外の森林と林業*, 77:2-8.

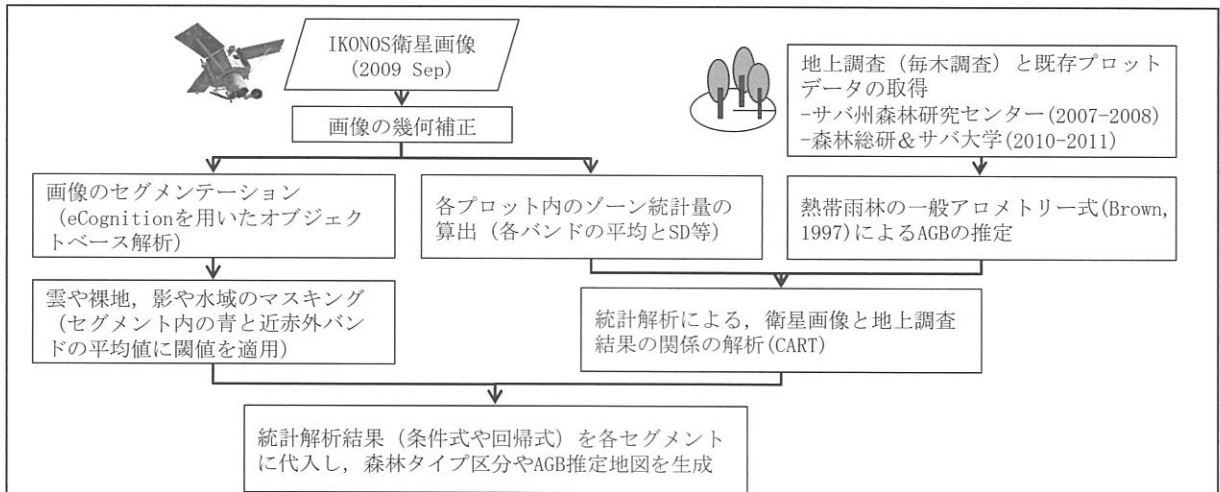


図-1. 解析の流れ

Fig.1 Analysis flow

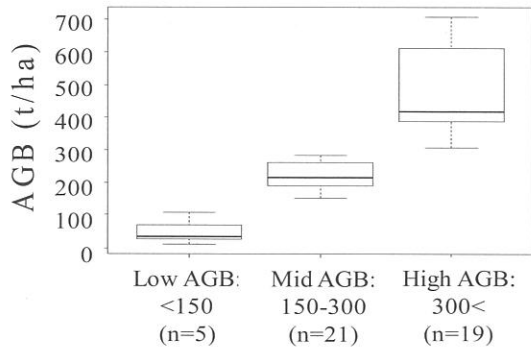


図-2. 調査プロットの AGB 3 区分 (小, 中, 大) 毎の箱ひげ図. 太線は中央値, 箱の上下は第 1, 第 3 四分位点, 上下の線は 5, 95 パーセンタイルを示す.

Fig.2 Box plot of three AGB classes (low, mid and high) of the study plots. Bold line shows median, each box indicate lower and upper quartiles, and lower and upper lines are 5 and 95 percentiles.

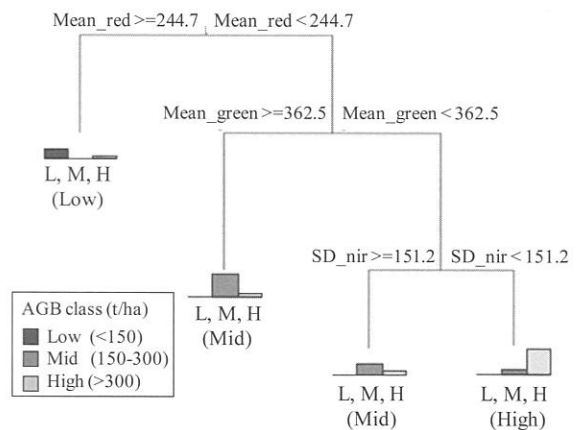


図-3. CART により生成された樹形図. 棒グラフは分類された AGB 3 区分毎のプロット数を示す.

Fig.3 Dendrogram generated from CART. Bar graph shows the number of classified plots with low, mid and high AGB.

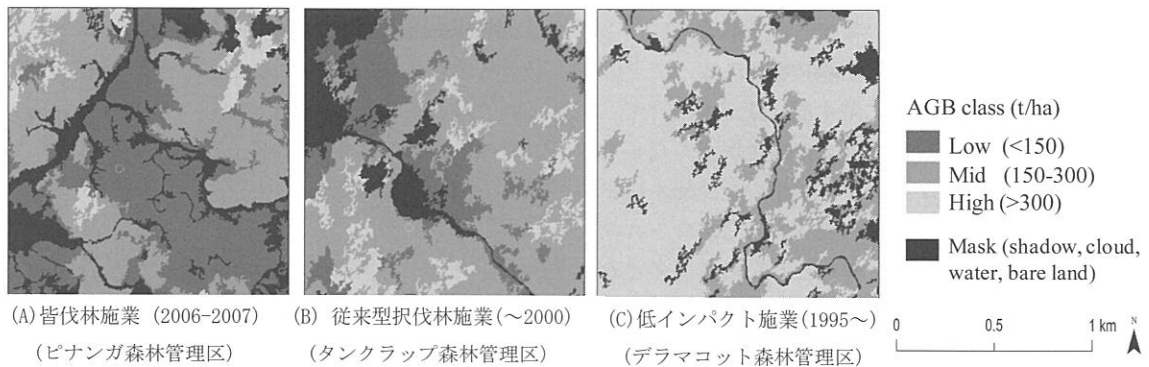


図-4. CART の分類木に基づき作成した AGB の分布推定図

Fig.4 Distribution of above ground biomass (AGB) estimated from CART.