係留型バルーンからの空中写真を用いた熱帯泥炭湿地林の 地上部バイオマス量推定

Estimation of the Biomass above the Ground in the Tropical Swamp Peat Forest using Balloon Stereophotographs

吉野 邦彦*・石田 朋靖**・長野 敏英***

串田 圭司****・近津 博文*****・鈴木 寛*****

Kunihiko YOSHINO, Tomoyasu ISHIDA, Toshihide NAGANO

Keiji KUSHIDA, Hirofumi CHIKATSU and Satoru SUZUKI

Abstract : Using a digital height data of the tropical swamp peat forest trees which were derived from aerial stereophotos taken from a cabled balloon, we estimated the height and the breast high diameter of every tree, then, we estimated the biomass per hectare above the ground in the tropical swamp peat forest. Comparing it with the data from a literacy, it differed about 3% from the biomass data estimated by Hara and Suzuki (1997). As a result of this research, we conclude that the usage of low altitude stereo aerophotographs are useful for the estimation of the biomass above the ground in the dense natural forest of which deeper part we can not easily access into and we need some technical improvements for it.

キーワード：デジタル林冠高データ、熱帯泥炭湿地林、地上部バイオマス量、バルーン立体写真

1. 緒 言

地球温暖化ガスの1つである炭酸ガスの循環メカニ
ズムの解明が急務とされる中、炭素のシンクやストッ

クの場合として熱帯地域の森林地帯が注目され、炭素収
支の解明を目的とした多くの研究が進行している。そ
うした研究を行う上では、森林における炭素の固定量、
放出量に加え炭素の賦存量の測定が必要であり、さま
ざまな現地調査が試みられている¹⁾。その際に炭素の
賦存量を見積もる場合には、対象地で広範囲にわたり
毎木調査を行う場合が多い。しかし、条件の悪い熱帯
林の中を調査するには多くの危険と労力が必要とな
り、更に地表に常時湛水が存在する湿地林においては
森林内部への進入さえも困難な場合が多い。

我々は、タイ国南部の沿岸近くに位置する典型的な
熱帯泥炭湿地林において、係留型バルーンを利用して
空中写真を撮影し、その写真を用いることで林冠や
ギャップの状況を目視により観測してきた²⁾。また、対
空標識が設置出来た地区においては、ステレオ写真を
撮影し、解析写真測量を行い、デジタル林冠高データ
(水平グリッド間隔20cm、高さ間隔約15cm)を作成し
た³⁾。しかし、こうしたデジタル林冠高データの森林生
態学的研究に対する応用については、その可能性が示
唆されただけである。

そこで、本研究では、熱帯泥炭湿地林のデジタル林

* 筑波大学社会工学系
Institute of Policy and Planning, Tsukuba Univer-
sity
〒305-8573 つくば市天王台1-1-1

** 宇都宮大学農学部
Faculty of Agriculture, Utsunomiya University

*** 東京農業大学国際食料情報学部
Faculty of International Food and Information
Science, Tokyo University of Agriculture

**** 北海道大学低温科学研究所
Institute of Low Temperature, Hokkaido Univer-
sity

***** 東京電気通信大学工学部
Faculty of Engineering, Tokyo Denki University

***** 日本学術振興会特別研究員
Research Fellow of Japan Society for the Promo-
tion of Science

冠高データから、森林生態情報を抽出し、地上調査結果⁴⁾と比較することにより、森林内ギャップ面積率の推定や地上部バイオマス量推定に対する、森林林冠の上空から撮影したステレオ空中写真の有効性と技術的問題点を考察する。

2. 対象地の概要

本研究が対象としたのは、タイ国最南端に位置するナラチワ県に発達した熱帯泥炭湿地林 (To Daeng Peat Swamp Forest) であり、北緯 $6^{\circ}4'$ 、東経 $101^{\circ}58'$ 、海拔 8 m に位置する淡水性湿地林である。植生は *Eugenia tumida*, *Ganua motleyana* を中心とした 17 科 26 属 31 種の樹木から構成され、胸高直径 10 cm 以上の樹木は 720 本/ha、地上部のバイオマス量は 245 t/ha と推定されている^{1),4)}。地表面は平坦であり、年間を通じて 0.1~1.0 m 水深の湛水が存在し、湛水下に埋没した落枝・落葉や倒木が木質系泥炭となって堆積している。

3. デジタル林冠高データからの森林内樹木の判別

3-1. デジタル林冠高データ

図 1 に、本研究で使用したデジタル林冠高データを示す。対象地で撮影したステレオ空中写真からデジタル解析写真測量により求めたものであり、東西南北にそれぞれ 50 m x 50 m の範囲で、水平グリッド間隔は 20 cm、濃淡は林冠の高さを示し、1 階調は約 15 cm の高さの違いを示す。また、当範囲は、撮影されたステレオ写真から対象とした森林の平均的な様相を示す範囲を切り出したものである。ステレオ写真の評定計算、3 次元データの算出方法、樹高の推定精度や写真撮影法等については、文献³⁾と同様である。

なお、当該範囲の近くでは、解析に用いたステレオ写真撮影の数年前に、植物生態学と森林生態学の専門家らによる地上森林調査⁴⁾が行われているが、撮影当日の風向きが悪かったために、その地上森林調査範囲と同じ範囲をステレオ写真として撮影することが出来なかった。したがって、図 1 の範囲は、地上調査範囲に近接するものの異なった範囲である。

図 1 解析したデジタル林冠高データ (文献³⁾から、濃度値反転後、引用)

3-2. 樹頂点の選定

森林内の樹木の地上部バイオマス量を推定するには、まず、森林内の樹木を個体識別し、その樹高を求める必要がある。しかし、バルーン写真から算出したデジタル林冠高データは、単なる森林林冠上面の高さデータでしかなく、樹木 1 本毎の樹高データではない。

そこで、図 1 のデジタル林冠高データからの個別樹頂点の位置と樹高を算出するにあたり、以下の手順で抽出した。

- 手順 1) デジタル林冠高データを用い等高線図の描画と凸方向の強調処理。具体的には、等高線上に上向き方向を示すハッチを付与した。
- 手順 2) 樹頂点候補地点の目視判読によるマーキングと位置座標の取得
- 手順 3) 樹頂点候補点近傍 (デジタル画像中で、フィルターサイズ 7 x 7 のウィンドウ内) での最高地点の探査と樹高の変更
- 手順 4) 個別樹の判定アルゴリズムによる個別樹の確定 (解析範囲内の樹木数の計数) と樹高算出

手順 1) では、等高線描画ルーチンにより、高さ 5 cm 毎に樹高等等高線を描いた。そして、等高線毎に、より高い等高線方向に短いハッチを描いて樹頂部判読に利用した。

手順 2) では、樹木の等高線パターンを考慮しながら、目視判読により等高線の凸部部分の最高地点に

図2 対象領域内の樹木の分布と林冠高の等高線図（等高線間隔は1 m）

マークと認識番号を付けた。局所的にハッチがある1点に収斂している地点が樹頂点候補点であると考えた。その結果、合計295個の樹頂点候補点がマークされた。その高さは最高37m、最低15.8mで15m以下では、樹頂点候補点は発見されなかった。

手順3)では、目視判読による樹頂点位置の読み取り誤差を修正した。

手順4)においては、個別樹木の主幹の頂点か、単に枝の先端部かの判定は、「個別樹木の主幹の頂点は、ある局所的な範囲内で周囲の樹木の頂点候補点の高さより高い」ことを条件にして行った。具体的には、まず、手順3)で求めた樹頂点候補点を最高点から順に、降順で順位付けを行い、最高樹高を持つ点を樹木の主幹の樹頂点と考え、その周囲半径2 m以内の樹頂点候補点は、次回の樹頂点候補点として除外して行き、全樹頂点候補点について探査を繰り返していった。ここで樹頂点候補点の選択に用いた主幹樹頂点の周囲半径の大きさは、既往の現地調査の結果（文献⁴⁾）から導いた値である。つまり、既往の現地調査結果では、当森林の1 ha当たりの樹木本数は約720本/haであった。この本数密度から1本当たりの占有面積を円と仮定した時の半径を求めた。その結果、半径約2 mの円が、当森林内の樹木1本の樹冠が占有する範囲と考えられた。

以上の手順により、解析対象範囲内には、合計171本

図3 対象領域内の樹高の度数分布図

の樹木が個別樹として認識された。図2に林冠高の間隔1 m毎の等高線図と個別樹として選択された地点(O印)、除外された地点(X印)を示す。なお、図2では図を見易くするために等高線間隔1 mで描画した。そのため、前述の樹頂部候補点位置の読み取りに用いた等高線図とは、等高線パターンが若干、異なっていることに留意されたい。さらに、Hara et al. (1995)によれば、当該森林では、林内に建設されている高さ約37mのタワーと同程度の高さの樹木は存在しないので⁴⁾、個別樹候補点のうち、36mを超えた2点については、写真で確認の上、左右画像対応点探査エラー（マッチングエラー）であると考え除外した。その結果、当該範囲で個別樹と考えられる樹木は合計169本で、平均樹高25.9mで、最高樹高33.41m、最低樹高は17.7mであった。樹高度数分布図を図3に示す。

4. デジタル林冠高データからの森林地上部バイオマス量の推定

デジタル林冠高データから森林内地上部バイオマス量は、以下の手順で推定する。森林内には林冠を構成する高木が老衰や自然災害などの原因で倒木した結果、低木しか生育していない部位（ギャップと呼ぶ）が存在する。

本研究ではギャップ内でのバイオマス量がそれ以外の部位と比べて無視しうと考え、レベルスライス処理により、ギャップの部位を決定する。次に、ギャップ以外の場所で樹木の頂点の位置を選び出し、既往の研究にならい、樹高から、その樹木の地上部バイオマ

表 1 閾値の林冠高とギャップの面積率

閾値 (高さ (m))	ギャップの面積率 (%)
12.0	0.8
13.0	1.1
14.0	1.7
15.0	2.3
16.0	3.8
17.0	5.6
18.0	8.3
19.0	13.0

量を推定する回帰式を用いて、シーン全体の全地上部バイオマス量を推定する。

4-1. ギャップ部位の推定

デジタル林冠高データから、ある高さ以下の部分がギャップであると見なして、閾値の高さを変化させ、その閾値以下の部分の面積率をレベルスライシング処理により求めた。表 1 に、閾値の林冠高とその時のギャップの面積率を示す。ところで前節 3-2 において、樹木先端候補点探査の際に樹高15m 以下の高さでは、樹木先端候補点はまったく発見できなかった。そこで、本解析では、15m 以下の林冠高の範囲をギャップの範囲と見なすこととした。その時のギャップ率は、2.3%であった。

4-2. 地上部バイオマス量の推定

森林のバイオマス量は、構成する樹木の樹高と相関があることが知られている。Yamakura & Hagihara (1986)は、マレーシアの熱帯林調査から、胸高直径あるいは樹高から地上部バイオマス量等を推定する式を求めており³⁾、Hara et al. (1995) は本研究対象地域の地上調査結果にこの式を援用しバイオマス量を推定している⁴⁾。そこで、ここでは前節で求めた樹高データと Yamakura & Hagihara (1986) らの式 (EQ. 1~EQ. 6)⁵⁾を用いて当該森林の地上部バイオマス量を推定した。なお、式中 H を樹高 (m) とした。

胸高直径：

$$DBH(cm) = \frac{1}{1.757 \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{88.43} \right)} \quad (EQ. 1)$$

幹重量：

$$W_Stem(kg) = 0.02903 \times (DBH^2 \times H)^{0.9813} \quad (EQ. 2)$$

表 2 推定した50mx50mの範囲における森林地上部バイオマス重量

	樹高 (m)	胸高 直径 (cm)	幹 (kg)	小 枝 (kg)	葉 (kg)	地上部 バイオマ ス(小枝 + 幹 + 葉) (kg)	葉面積 (m ²)
平 均	25.9	21.0	296.0	49.6	6.3	351.9	65.6
標準偏差	3.1	3.5	126.3	22.4	2.0	150.7	19.7
合 計	-	-	50026.3	8389.4	1060.6	59476.3	11078.7

小枝重量：

$$W_Branch(kg) = 0.1192 \times W_Stem^{1.059} \quad (EQ. 3)$$

葉重量：

$$W_Leaf(kg) = 0.09146 \times (W_Stem + W_Branch)^{0.7266} \quad (EQ. 4)$$

葉面積：

$$Leaf_Area(m^2) = 11.67 \times W_Leaf^{0.9412} \quad (EQ. 5)$$

全地上部バイオマス重量：

$$W_Ground(kg) = W_Stem + W_Branch + W_Leaf \quad (EQ. 6)$$

表 2 に上記の推定式を用いた地上各部位でのバイオマス量等の推定値を示す。この地上部バイオマス量を単位面積当たりに換算すると238ton/ha と推定された。ただし、ギャップにおけるバイオマス量はゼロと仮定した。

5. 考 察

本研究で推定された対象地域の樹木の平均樹高25.7 m は、Hara らにより報告された値25m とほぼ同等の値であった⁴⁾。また、地上部バイオマス量は単位面積当たり238ton/ha であった。一方、地上踏査による毎木調査から、同一森林内の隣接地域における地上部の全バイオマス量が245ton/ha と求められており⁴⁾、本研究での推定値はこの値よりも3%程度小さいものの、極めて良い一致を示した。しかし、Hara ら(Hara & Suzuki からの私信)によると、対象とした森林において樹高17m 以上の樹木による地上部バイオマス量は地上部の全バイオマス量の77%にあたる189ton/ha と推定されている。この値と比較した場合、バルーン空中写真で撮影された樹高17.7m 以上の樹木に対する推定値は26%の過大評価となる。こうした過大評価の原因は、バイオマス量が場所により不均一で有ることに加

え、個別樹の選択アルゴリズムの欠陥により、個別樹として不適当な樹木を選択したことが原因と考えられ、更に検討をする必要がある。

本解析のように空中写真に基づいた解析では、本来、写真に撮影されるような林冠を構成する樹木の地上部バイオマス量しか推定できず、林冠の下に隠れた低木については考慮することが出来ない。したがって、本方法による推定値は実際の値よりも小さくなってしまいうという原理的な欠点が内包されている。また、本方法では、写真の上で濃度の差を識別することが困難なギャップ内のバイオマス量を加算していない。しかしながら、この森林の場合に17m以上の樹木による地上部バイオマス量が地上部全バイオマス量の77%であったように、林冠部を形成する樹木の地上部バイオマス量によって、地上部の全バイオマス量を概ね推定できると考えられる。更に、林冠を形成する樹木と林冠下の中低木とのバイオマス量の比率を代表的な個所の地上調査によって求めれば、推定精度は更に高めることが可能である。

本研究の対象地は地表面が湛水した平坦な場所であり、林冠高のデータと湛水面との差から直接に樹高を推定することができた。こうした手法は、他の湿地林や沿岸域に生育するマングローブ林あるいは平地林などでも適用することができる。しかしながら、地表面に起伏のある場所に適用するためには、地表面の標高を何らかの方法で別に取得する必要がある。たとえばチークなどが育つ熱帯モンスーン林や我が国のブナ林のような落葉をおこす森林では、落葉した時期にも撮影を行って地表の標高データを求めておき、林冠高から差し引くことで本方法が適用できると考えられる。森林生態学の分野への応用が期待される。

6. 結論および今後の課題

6-1. 結 論

本研究では、係留型バルーンから撮影した熱帯湿地林の空中ステレオ写真解析により作成したデジタル林冠高さデータを用いて、解析対象範囲での樹木毎に頂点の高さを算出した。その平均樹高は25.9mであった。そして、樹高から地上部バイオマス量を推定する既往の研究成果による経験式を当てはめ、当該範囲の森林内の地上部バイオマス量を推定し、単位面積当たり238ton/haの値を得た。さらに、この写真解析範囲の

バイオマス量推定値を同一森林内の近傍範囲における地上調査結果と比較した結果、地上調査値よりも3%小さい値であった。しかし、地上調査に基づく樹高17m以上の樹木が持つ地上部バイオマス量の推定値と比較すると、本研究での推定値は26%過大評価していた。

本研究手法による森林の地上部バイオマス量の推定精度は、第一にステレオ空中写真の評定精度と3次元座標計算精度、第二に、樹頂点樹高算出用個別樹の抽出精度、第三に林冠下樹木が持つ地上部バイオマス量の考慮の程度、第四に、森林樹木の樹高から地上部バイオマス量を推定する回帰式の推定精度に左右される。こうした点については、今後さらに改良を加えていく必要がある。

バルーン空中写真を利用した本方法は、地上調査に比べて地上部バイオマス量の推定精度や信頼性は低いと考えられる。しかし、観測に要する労力や、踏査が不可能な範囲まで含めた広い範囲が簡便に観測できる点を考え合わせると、対象とする森林の生態学的特色を定量化する上で有効な手段になり得る。

6-2. 今後の課題

係留型バルーンによる空中ステレオ写真を、熱帯の森林生態学的研究に応用する上で、今後の課題として、以下のことが考えられる。

- 1) 解析写真測量法で撮影する空中写真の評定計算を行うには、地上基準点が必要不可欠であるが、森林内にも必ず数点の基準点を設置する必要がある。森林内に地上基準点を設置する方法と地上測量法を工夫する必要があるだろう。本研究で撮影した空中写真には、森林内への基準点設置条件の厳しさから、森林内に1地点しか設置できず、完全に写真の歪みが除去できたわけではなかった。森林内の基準点を増やした上での精度の検討が必要である。
- 2) 本研究では、地上部バイオマス量推定のために用いる個別樹木の抽出は、林冠高デジタル画像上で、樹頂部候補点の凸部の抽出作業による目視判読により行った。必然的に凸部の誤認や抽出エラーが生じる恐れが高く、今後、この作業の自動化アルゴリズムの開発や誤差の大きさの評価などが必要であろう。
- 3) 空中写真の解析では、写真に撮影されている林冠の樹木しか解析できず、森林内の中層、低層の樹木

層を形成する樹高が低い樹種は解析できない。こうした樹木のバイオマス量の占める割合を評価する必要があるだろう。

- 4) 空中写真による地上部バイオマス量の推定精度について、今後、地上調査との詳細な比較検討により、考察しておくことが必要であろう。
- 5) 地表面が平坦でないところに育つ落葉林を対象に、空中ステレオ写真による地表面標高の推定を踏まえた適用を試みる必要がある。

謝 辞

東京情報大学原 慶太郎教授には対象とした森林に関するバイオマスデータの提供を受けた。謝意を表す。本研究は、文部省科学研究費補助金（平成7年～11年度創成的基礎研究 No. 09NP0901代表 佐々木恵彦）の補助を受けた。

（受付日2000.3.28, 受理日2000.11.8）

引用文献

- 1) SUZUKI S., ISHIDA T., NAGANO T., and WAIJAROEN S. (1999): Influences of Deforestation on Carbon Balances in a Natural Tropical Peat Swamp Forest in Thailand. *Environ. Control in Biology.*, 37(2), 115, 1999
- 2) NAGANO, Toshihide (1990): Studies on Mangrove in Thailand-An Aerial Photographic Survey Using a Balloon-*Environ. Control in Biology.*, 28(3), 119, 1990
- 3) Kushida, K, Yoshino, K. et al. (1998): Automated DEM Extraction from Balloon Images of a Tropical Peat Swamp Forest in Narathiwat, Thailand, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 5, pp. 97-104, 1998
- 4) HARA, K, SUZUKI K., Chawalit NIYOMDHAM and Tanit NUYIM (1995): Vegetation Structure of a Natural Peat Swamp Forest at To-Daeng Study Area in Narathiwat, Thailand. In: *A TROPICAL SWAMP FOREST ECOSYSTEM AND ITS GREENHOUSE GAS EMISSION* (Ed: P. VIJARNSORN et al.) NODAI RESEARCH INSTITUTE, p. 25-34, 1995
- 5) Yamakura & Hagihara (1986): Aboveground biomass of tropical rain forest stands in Indonesian Borneo, *Vegetatio* 68, pp71-82, 1986