

航空機レーザースキャナを用いたブナ林の林冠構造の解析

Analysis of Canopy Structure in *Fagus crenata* Forests by Airborne Laser Scanner

西上 愛・千葉 幸弘

Nishikami, A. & Chiba, Y.

キーワード: ギャップ率, CHM, ブナ, 林冠表面積, 林分葉面積

要約: 森林域の林冠構造及び林分葉面積を推定するため、安比と苗場山のブナ林を対象にLiDAR計測による解析を行った。林冠構造を表現する指標としてCHMとDSMからギャップ率、林冠高のばらつき、林冠表面積を計算し、フィールド調査から得られた林分構造や林分葉面積との相関関係を比較した。葉面積の推定では、フィールド調査でも林冠内部の葉の空間配置を的確に把握できないため、今回用いた指標を単独で用いて林分葉面積を推定するのは困難と考えられた。今後は葉の配置などに関わる因子も考慮して推定方法を検討する必要がある。

Abstract: In order to quantify forest stand canopy structure and leaf area we used LiDAR data to analyze the three-dimensional structure of forest canopies in the Appi and Naeba beech forests. Parameters related to canopy structure, including gap ratio, variations in canopy height and canopy surface area, were then calculated from the LiDAR data. Leaf area index (LAI) was estimated using a standard forest census. Comparisons between LAI and canopy characteristics suggested that LAI cannot be estimated using a single parameter. This may be because the foliage distribution within each tree crown is variable and has a complex branching and foliage clustering structure. To estimate the spatial distribution of LAI in a forested area, other

parameters associated with beech canopy architecture, and their interactions, need to be investigated. This could facilitate the estimation of LAI from LiDAR data.

Keywords: canopy surface area, CHM, gap ratio, *Fagus crenata*, LAI

1. はじめに

近年、森林を短時間に広域に計測できるツールとして、航空機レーザースキャナ (LiDAR) の利用が有望視されている。LiDARは航空機に搭載したシステムによって林冠表面や地表面を上空から計測するものであり、地上調査や衛星リモートセンシングでは把握困難な林冠そのものの三次元構造を広域に計測することが可能である。葉の量や分布など林冠の構造を広域で把握できれば、光合成や呼吸といった生理的諸機能を森林レベルへスケールアップすることが可能となるため、LiDARを用いて林冠構造 (葉量、葉面積、枝重量など) を定量的に推定する方法を確立することが求められている。広葉樹林を対象にしたLiDAR計測については、単木の検出方法 (Brandtberg *et al.* 2003) やLiDAR計測結果と林冠構造との関係が検討されている (Lefsky *et al.* 1999, Lovell *et al.* 2003, Parker and Russ 2004, Riaño *et al.* 2004)。林分葉面積についてはレーザが樹冠に的中した割合との関係性 (Riaño *et al.* 2004) や林冠高の標準偏差との関係性 (Parker and Russ 2004) が指摘されているが、現在のところ、林分葉面積を推定することは難しい。

針葉樹とは異なり、ブナなどのような広葉樹林では一般に個々の樹冠・個体を識別することが困難である。そのため、LiDAR計測によって林冠構造を明らかにするためには、林冠表面の凹凸やギャップ構造などを代表させ得る指標を導いて、その指標性を検討しておく必要がある。そこで本研究では、日本の冷温帯を代表するブナ林を対象にLiDARによって葉面積分布を記述する解析手法を明らかにするため、LiDAR計測データから林冠構造を表現するいくつかの指標を導くとともに、通常のフィールド調査で得られる林分構造との対応関係を比較検討した。

2. 研究対象地と方法

2.1. 調査地の概要

森林総合研究所安比森林気象試験地 (岩手県八幡平市, 北緯 $40^{\circ}00'$ ・東経 $140^{\circ}56'$, 標高825m) と苗場山 (新潟県南魚沼郡湯沢町, 北緯 $36^{\circ}51'$ ・東経 $138^{\circ}41'$ 付近, 標高550~1,500m) のブナが優占する林分を対象とした。安比森林気象試験地は緩傾斜に成立するブナ二次林 (林齢約80年生) であり, 調査プロットが2か所 (安比1, 安比2) 設置されている。苗場山ブナ林には標高別に調査地が4カ所設置されている (標高550mに苗場山1, 標高900mに苗場山2と苗場山4, 標高1500mに苗場山3)。調査地の概要は後出の表1に示した。

2.2. フィールド調査

すべての調査プロットにおいて胸高直径5cm以上の林木を対象とし, 樹種の同定, 胸高直径の計測が行われ, 苗場山4以外では樹高の計測も行われた。さらに, 安比の試験地外で伐倒された9本のブナのデータから, 以下の相対成長式を導き, これを用いて各調査プロットの葉面積を推定した。

$$[1] \quad W_L = 0.019 D^{1.56} \quad (R^2=0.75)$$

$$[2] \quad L_A = 22.6 W_L^{0.72} \quad (R^2=0.98)$$

ただし, W_L : 葉重量(kg), L_A : 葉面積(m^2), D : 胸高直径(cm)。

2.3. LiDAR計測

ヘリコプター搭載空中レーザ計測システム (ALMAPS: 朝日航洋㈱) によって計測を行った。安比では2001年に気象観測タワーを中心にした1km²の範囲を計測した。苗場山では2003年に各調査プロット周辺0.16km²を対象に計測が行われた。両地域のLiDAR計測の仕様は表2の通りである。この計測結果

表1. 調査プロットの林分の概要

プロット	立木密度 (本数/ha)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	胸高断面積合計 (m ² /ha)	林分材積 (m ³ /ha)	林分葉面積 (ha/ha)
安比1	2208	14.7	14.1	46.6	355.2	6.1
安比2	1244	19.9	14.2	50.8	390.1	4.6
苗場山1	265	38.0	23.7	40.4	514.3	2.1
苗場山2	1033	23.2	18.3	48.3	432.6	4.4
苗場山3	450	24.7	13.0	30.4	259.8	2.1
苗場山4	362	32.1	-	32.5	-	2.3

注: 苗場山4は樹高の計測を行っていない。

表2. LiDAR計測の仕様

計測地域	対地高度 (m)	対地速度 (km/h)	ビーム 拡散度 (mrad)	地上計測幅 (m)	地上での ビーム直径 (m)	計測間隔 (m)
安比	200～300	50	1.2	70～110	0.24～0.36	0.14～0.21
苗場山	500～600	70	0.2	175～220	0.10～0.12	0.35～0.42

注: 安比, 苗場山ともにレーザー発射回数: 25,000Hz, スキャン角度: 20°, スキャン回数: 25Hzである.

から, 地表面を表すDTM (Digital Terrain Model), 計測対象物である林分の表面を表すDSM (Digital Surface Model), DTMとDSMとの差で林分表面の高さを表すCHM (Canopy Height Model) が計算され, 計測区域の地形および林冠構造が三次元座標の集合データとして得られている. 本研究では, X座標 (東西方向) およびY座標 (南北方向) で表される0.5m間隔の地上位置と, それに対応したZ座標であるDTM, DSM, CHMの値をデータセットとして用いた.

このデータセットから得られる林分葉面積に関わる林冠構造の指標として, 本研究では「ギャップ率」, 「CHMの分布に関わる値 (CHMの頻度分布や平均値, 標準偏差, 最大値, 最小値, 最大値－最小値, 変動係数)」, 「林冠表面積」を用いた. ギャップ率は平面上の林冠の疎密度を表し, CHMから計算される値は垂直方向の林冠表面の状態を知る指標となり, さらに, 葉の多くは林冠の外側に位置していることから, 林冠表面積も葉面積を知る上での重要な指標であると考えた.

調査プロット内にはギャップも含まれ, すべての座標がブナ的林冠を表しているわけではない. そこで, 以下の(1)および(2)の条件をとともに満たす座標を林冠データと見なし, 上述のCHMの分布に関わる値と林冠表面積の計算に用いた.

(1) CHMが5 m以上の座標

フィールド調査の結果, ほとんどの調査対象木の樹高が5 m以上であったことから, CHMが5 m以上の座標を林冠と見なすことにした.

(2) 隣接座標とのDSMの差が3.5m未満の座標

ギャップがある場合などは, 林冠表面の連続性が途切れることになる. そのため, 隣接する点同士のZ座標 (DSM) の差が大きすぎる場合は連続し

た樹冠 (林冠) とは見なさず、その差の限界値を3.5mとした。ブナ孤立木の樹冠の外形を計測したところ、水平距離0.5mの変化に対して垂直距離の変化は最大でも3.47mであったことから、この値を限界値とした。

なお、ギャップ面積の割合については、林冠表面積の計算で用いなかった座標、すなわち、隣接座標のDSMの差が3.5m以上でCHMが 5 m未満の座標をギャップとし、全座標数に対する割合として算出した。

3. 結果と考察

フィールド調査結果から調査プロットの林分構造を比較した。安比と苗場山の各調査プロットから得られた立木本数などの値と算出した林分葉面積を表1に示す。立木密度は安比 1, 2 でそれぞれ2,208本/ha, 1,244本/haであり、苗場山 1, 3, 4 (それぞれ265本/ha, 450本/ha, 362本/ha) と比べて高かった。また、平均直径は安比で14.7-19.9cm, 苗場山 1, 3, 4 で24.7-38.0cmとなっており、安比の調査プロットの方が小さかった。苗場山の調査プロットの中でも、苗場山 2 は本数が多く (1,033本/ha) 平均直径も安比の調査プロットの値に近かった (23.2cm)。林分葉面積については、本数の多いプロットの方が林分葉面積の大きい傾向がみられ、また、苗場山 1, 3, 4 ではいずれも 2 ha/ha程度であった。さらに、苗場山 1, 3, 4 では林木のサイズの分布域が広く (順に6-88cm, 6-62cm, 12-64cm)、比較的大径の林木まで存在していたが、苗場山 2 と安比 1, 2 では、12-22cm程度の林木が多く存在し、サイズの分布域は比較的狭かった (6-48cm)。

次に、林冠構造の指標と林分葉面積との関連関係を検討した。LiDAR計測で得られるギャップ率と林分葉面積との関係では (図1)、林分葉面積の大きい安比 1, 2 と苗場山 2 はギャップ率が低く、ギャップ率のやや高い苗場山 1, 3 は林分葉面積が小さく、反比例の関係にあるように見受けられる。しかし、苗場山 4 はギャップ率が低い割に林分葉面積が小さく、苗場山の 3 プロットについて見るとギャップ率に関係なく林分葉面積がほぼ一定に近かった。したがって、ギャップ率単独で林分葉面積を推定するのは困難と考えられる。

林冠高を表すCHMを用いた値について見ると、CHMのばらつき (変動係数) の大きい林分ほど林分葉面積が小さくなる傾向がみられた (図2)。一方、林冠

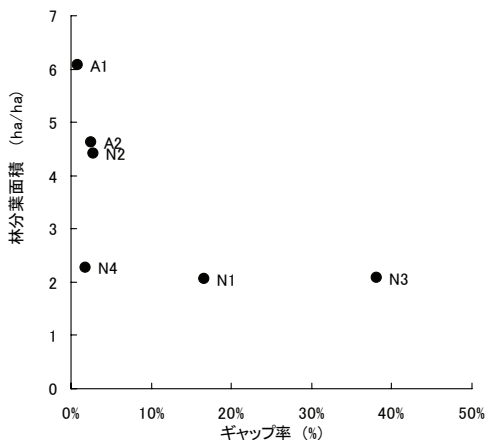


図1. ギャップ率と林分葉面積との関係
注: 図中N1-4は苗場山1-4, A1-2は安比1-2を表す.

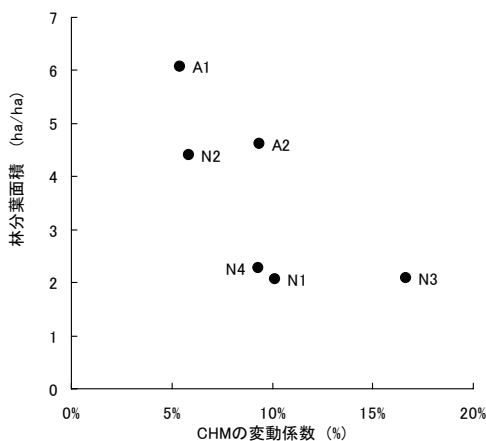


図2. CHMの変動係数と林分葉面積との関係
注: 図中N1-4は苗場山1-4, A1-2は安比1-2を表す.

表面積は1.7-2.5ha/haの狭い範囲に存在し、林冠表面積と林分葉面積には比例関係などの単純な関係は認められなかった (図3). 林冠表面 (あるいは上層) 付近に偏って葉が存在していれば、林冠表面積と林分葉量はほぼ比例関係を示すと考えられるが、実際には上述したように両者の間には明瞭な関係は認められなかった. したがって、安比と苗場山の各プロットはブナ林という点で

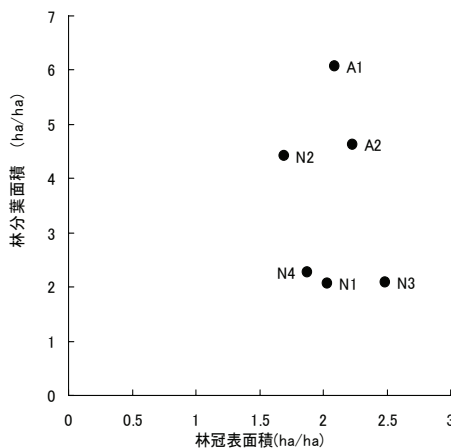


図3. 林冠表面積と林分葉面積との関係

注: 図中N1-4は苗場山1-4, A1-2は安比1-2を表す.

共通しているものの、樹高や林分密度など様々な要因によって、プロットごとの葉の空間配置がかなり異なっている可能性がある。安比1と2、苗場山2のような林分は、CHMのぼらつきが小さく、しかもギャップがほとんどないため、葉が効率的に林冠内に分布して生育空間を占有していると考えられる。その結果、林分葉面積が大きくなっているものと推察される。苗場山1、3、4については、いずれの林分も明らかに安比1、2や苗場山2とは異なり大径の林木が多いことから高齢林と考えられる。このように高齢のブナ林では、個体間競争などによる林冠の構造的変化が減少すると考えられ、当該林分の生育環境である気象条件や土壌条件等に対する適応的な林分構造が安定的に実現されるようになっていていると考えられる。その結果、苗場山1、3、4では林分葉面積が小さい値でほぼ一定になっていたと考えられる。

林分葉量については、過去実施された多くの伐倒調査によってデータ (Cannel 1982) が蓄積されているが、ブナ等の広葉樹林の調査報告 (Maruyama 1971など) は決して多くはない。その理由は、針葉樹のように均整のとれた樹形ではないため、調査自体が困難であるのも事実である。今回の調査地における林分葉量は、これまでの調査報告の範囲内にあり、ほぼ妥当な推定値と言える。しかし、ブナのような広葉樹では、伐倒調査の対象個体の選定の仕方によって、林分葉量の推定値がかなり異なる場合があり得る。そうした調査技術上

の問題が、今回の解析結果を左右するという側面も否定できない。広葉樹林におけるこのような推定精度の問題は、針葉樹の場合とは事情が明らかに異なると言ってよいであろう。一方、LiDARのように上空から計測して得られる林冠構造データでは、林冠内部の葉量分布に関する情報が必ずしも十分ではない。したがって広葉樹林の林分葉量を推定するためには、今後、地上センサスによる樹形や各器官の相互関係等とLiDAR計測データを併せて解析し、林分葉量の推定法を開発する必要がある。

引用文献

- Brandtberg, T., Warner, T.A., Landenberger, R.E. and McGraw, J.B. 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment* 85: 290-303
- Cannell, M.G.R. 1982. World forest biomass and primary production data. Academic Press. London. 391p.
- Lefsky, M.A., Harding, D., Cohen, W.B., Parker, G. and Shugart, H.H. 1999. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment* 67: 83-98
- Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Culvenor, D.S. and Coops, N.C. 2003. Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Canadian J. of Remote Sensing* 29(5): 607-622
- Maruyama, K. 1971. Effect of altitude on dry matter production of primeval Japanese beech forest communities in Naeba Mountains. *Memoirs of the Faculty of Agriculture. Niigata Univ.* 9: 87-171
- Parker, G.G. and Russ, M.E. 2004. The canopy surface and stand development: assessing forest canopy structure and complexity with near-surface altimetry. *Forest Ecology and Management* 189: 307-315
- Riaño, D., Valladares, F., Condès, S. and Chuvieco, E. 2004. Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 124: 269-275