

## 論文

1 伐5残のスギ列状間伐林分における航空機 LiDAR データと天空率との関係\*<sup>1</sup>高橋與明\*<sup>2</sup>・山川博美\*<sup>2</sup>・近藤雅信\*<sup>3</sup>

高橋與明・山川博美・近藤雅信：1伐5残のスギ列状間伐林分における航空機 LiDAR データと天空率との関係 九州森林研究 68：27-30, 2015 1伐5残のスギ列状間伐林分において、全天空写真から算出した天空率と航空機 LiDAR データとの関係を調べた。レーザー透過率に関係する単純な4種類の説明変数を定義し、全天空写真撮影地点を中心とする仮想円内に含まれるレーザーの点群データから各説明変数を算出した。仮想円の半径を1m刻みで増加させ、各説明変数と天空率との相関分析を行った。スピアマンの順位相関係数の大きさと散布図の両者から判断した結果、ほとんどの説明変数は天空率と密接な線形関係が認められた。相関係数は、仮想円の半径が3mの場合に最も大きくなっていった。これらの結果から、用いる説明変数と仮想円の半径の選び方によって、地上計測による天空率を航空機 LiDAR データでスケールアップできる可能性が示唆された。しかしながら、本研究結果は今回の航空機 LiDAR 計測設定における解析範囲内で使用した LiDAR データに限った知見であることに注意する必要があると考えられた。

キーワード：航空機 LiDAR, 光環境, 天空率, リモートセンシング, レーザ透過率

## I. はじめに

森林内の光環境を地上で測定するさまざまな光学的な方法の中で（例えば Gerdrón *et al.*, 1998; Jennings *et al.*, 1999; Muraoka *et al.*, 2001; Inoue *et al.*, 2002）、デジタルカメラによる全天空写真撮影法が比較的安価でなおかつ手軽な方法であることが広く知られている（例えば Inoue *et al.*, 2004; Ishida *et al.*, 2004; Yamamoto *et al.*, 2010）。この方法で精度よく得られる開空度（Canopy openness）や天空率（Sky factor）といった林内のある一地点もしくは局所的な狭い範囲における光環境指標値を、リモートセンシング技術を併用してスケールアップすることができれば、面的な広がりを持つ森林の内部の光環境を広域で隈なく把握できる可能性が出てくる（Riaño *et al.*, 2004）。

現在、地形の標高計測で広く利用されている small-footprint 型の航空機 LiDAR は、航空機の進行方向に対して直交方向にスキニングしながらレーザーパルスを森林に向けて照射し、樹冠の表面の三次元位置座標のみならずレーザーの透過性を利用して樹冠の内部や樹冠下の地面部などの三次元位置座標を広域に取得できる航空機リモートセンシング技術の一つである（Næsset, 1997; Hyypä *et al.*, 1999）。すなわち、航空機 LiDAR データを用いれば、森林においてはレーザーの透過性を利用して林内光環境を推測することができると考えられる。これまでに、このレーザー透過性に着目して航空機 LiDAR データから森林内の光環境を二次元的に（Riaño *et al.*, 2004; Morsodof *et al.*, 2006; Hopkinson and Chasmer, 2009; Wasser *et al.*, 2013）あるいは三次元的に（Todd *et al.*, 2003）推定する研究が海外の様々な森林タイプで行われており、地上計測による林内光環境指標値と航空機 LiDAR データとの密接な関係を示した結果が複数報告されている。一方、国内

の森林においては、そのような事例研究は現時点でほとんど見当たらない。そこで本研究では、スギのある列状間伐林分を対象に、林内で全天空写真撮影した画像から算出した天空率と航空機 LiDAR データとの関係を調べ、スケールアップのための基礎的な知見を事例的に得ることを目的とした。

## II. 材料と方法

## 1. 現地調査と全天空写真撮影

研究対象地は、鹿児島県霧島市の国有林内の38年生（2013年度）スギの列状間伐林分（1伐5残で、不良木の除間伐ありの平坦な地形の林分）である。林分調査と全天空写真撮影は2014年の2月から3月にかけて行った。図-1に示すように、林分内に伐採方向を短辺とする33.3m×66.6mの矩形プロット（内部を11.1m×11.1mの18個のコドラートに区切った）を設置し、プロット内の全立木の樹高、胸高直径を測定し、さらにコドラートごとに樹木の相対位置を野帳に記録した。プロット内の平均樹高は18.3m、平均胸高直径は26.3cm、形状比は70、立木密度は1087本/haであった。次に、図-1に示すように、全天空写真撮影する位置を、伐採列においてはその中心に、残存列においては植栽列の東側から2列目と3列目の間と4列目と5列目の間の二か所に配置した。撮影地点と樹木位置との関係を現地で野帳に記録し、ある高精細な25cmメッシュのLiDAR画像上で全天空写真撮影地点と樹木位置を画像判読によって決定した（図-1）。

全天空写真撮影は、3月13日の曇天日に行った。撮影に使用したデジタルカメラはNikon coolpix E 4500、レンズはNikon FC-E 8である。デジタルカメラを三脚に固定して地上高1.2mに設置し、Yamamoto *et al.* (2010) に従ってまずは林外の開け

\*<sup>1</sup> Takahashi, T., Yamagawa, H. and Kondo, M. : Relationship between airborne LiDAR data and the sky factor in a sixth row thinned stand of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*).

\*<sup>2</sup> 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Center, For & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862, Japan.

\*<sup>3</sup> 中日本航空株式会社 Nakanihon Air Service Co., Ltd., Nishikasugai, Aichi 480-0202, Japan.

た場所でオートモードで露出時間と絞り値を決定した。それぞれは、 $1/1887$  秒、 $f/7.5$  であった。その際、測光モードは Ishida (2004) に従ってレンズの中央付近の光を測定するスポットモードにした。次に、林内に移動して撮影地点で地上高 1.2m にデジタルカメラを設置し、林外で決定した露出時間と絞り値になるべく近い値 (それぞれ  $1/2000$  秒と  $f/5.3$ ) を固定値にして、マニュアルモードで全天空写真を撮影した。林内では図-1 に示すように合計 57 点 (図中の \* 印) で撮影を行ったが、時間経過とともに林外・林内の明るさが開始時点と比較して暗くなってきたため、途中で林外に出て露出時間と絞り値を再設定した後 ( $1/500$  秒と  $f/5.3$ )、林内に戻って撮影を続けた。全天空写真撮影した画像は LIA 32 (<http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/>) を用いて判別分析による二値化処理を行って空のピクセルとそれ以外のピクセルに分離し、Inoue *et al.* (1996) や Yamamoto *et al.* (2010) で示されている方法で算出される天空率 (Sky factor) を以後の解析に使用した。

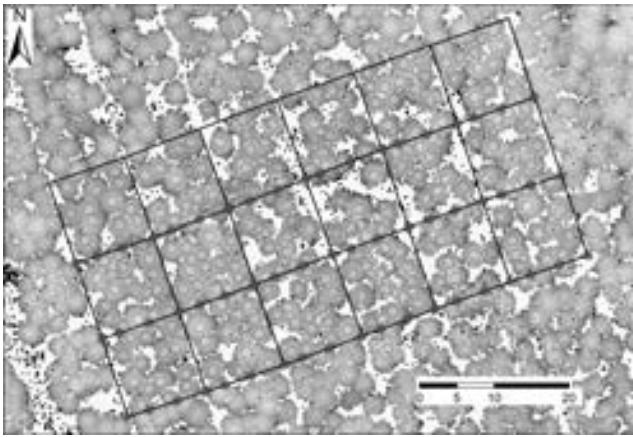


図-1. ある LiDAR 画像 (25 cm メッシュ) 上での全天空写真撮影地点と樹木位置。\*と○はそれぞれ全天空写真撮影地点および樹木位置を表す。

## 2. 航空機 LiDAR 計測と LiDAR データ

航空機 LiDAR 計測は 2013 年 12 月 12 日に中日本航空 (株) が行った。LiDAR センサは RIEGL 社製の LMS-Q 560 を利用し、基準となるある地点から対地高度 600m に設定し、レーザスキャン方向が列状間伐林分の伐採方向にある程度平行になるように本研究対象地を回転翼で計測した。飛行速度は 100km/h、レーザの発射頻度は 50,000Hz、スキャン角度は  $\pm 30$  度、ビームの拡がり角は 0.3mrad、回転翼の進行方向および直交方向のレーザ計測点の間隔はともに 0.78m (レーザ点密度は 1.64 点/m<sup>2</sup>) の設定であった。なお、後述するデータ解析が行われた範囲内の実際の平均レーザ点密度は、約 2.5 点/m<sup>2</sup>、レーザの入射角は最小で約 2 度から最大で約 9.4 度のデータであった。DEM の作成のためのノイズフィルタリングには Terrasolid 社製の TerraScan を利用し、技術者の目視によるノイズのチェックも同時に行い、フィルタリング後の地盤面反射データから TIN を生成し、線形補間で標高値を決定した DEM を準備した。

本研究で使用した LiDAR センサは波形記録式 (full-waveform) であり、使用しているレーザパルス幅 (< 4 ns) から計算すると距離分解能は 0.5m 程度になるため、理想的には

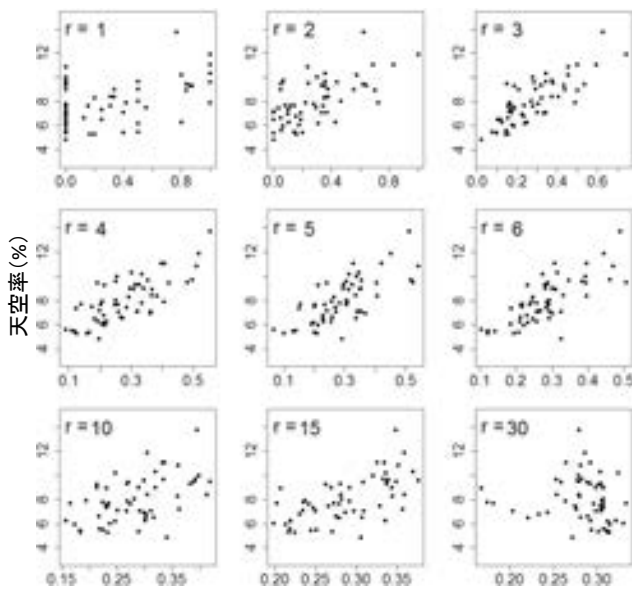
森林内部を光路上で約 0.5m ごとにレーザが反射した三次元位置座標を計測できることになる。反射エネルギーのピークの検出率を高める (閾値を下げる) ことでより多くの座標データを得ることができることになるが、同時にノイズデータも増えることになる。今回は、RIEGL 社が推奨している閾値 (Intensity = 9) を基準に、一つの照射レーザパルスに対してその閾値以上の反射エネルギーが検出されたピークを Wagner *et al.* (2006) の方法 (Gaussian decomposition) で分離することで得られた離散的な反射位置座標を取り出して解析に使用することとした。

次に、本研究における語句の定義をする。まず、レーザの反射が最初に返ってくるものをファーストリターン、最後に返ってくるものをラストリターン、ファーストリターンとラストリターンの間に複数検出されたものを中間リターンと定義する。また、ファーストリターンとラストリターンが同一の場合はシングルリターンと定義する。森林における各リターンのイメージは、ファーストリターンは主に樹冠表層部、中間リターンは主に樹冠内部、ラストリターンは主に地面部や一部は樹冠内部、シングルリターンは樹冠表層部や地面部、で構成されるイメージである。本研究対象地では、上述の閾値をもとに分離されたあるレーザパルスの最大リターン数は 6 であった (その場合は中間リターン数が 4 つということになる)。以後の解析においては、これら 4 種類のリターンで構成されるデータを DEM からの比高にした点群データを総称して LiDAR データと呼ぶことにする。また、樹冠部と地面部の LiDAR データの区別は、全天空写真を撮影した際のデジタルカメラの設置高 (1.2m) を基準として (Morsodof *et al.*, 2006; Hopkinson and Chasmer, 2009)、設置高以下のデータを地面部のデータ、設置高より高いデータを樹冠部のデータと定義した。

## 3. データ解析

まず、レーザ透過率に関する単純な 4 種類の説明変数を定義した。説明変数は、 $V_a$ : 樹冠部の点群データ数に対する地面部の点群データ数、 $V_b$ : レーザ照射数に対する地面部の点群データ数、 $V_c$ : レーザ照射数に対するファーストリターン数、 $V_d$ : 全てのシングルリターン数に対する地面部のシングルリターン数、の 4 種類である。これらの説明変数のうち、 $V_a$  と  $V_b$  の定義は単純で理解しやすいと考えられる。 $V_c$  を定義した理由は、航空機から照射したレーザの中には例えば樹冠表層部を透過 (通過) した後、樹木の枝や幹にヒットしてそこで反射エネルギーが LiDAR センサの検出限界以下になってしまうものがあり (Hopkinson and Chasmer, 2009)、その場合は地面部の情報が得られないことになるため、照射したレーザの中で樹冠表層部を透過して樹冠内部に少しでも侵入したレーザがどの程度の割合であるかを  $V_c$  は表現しえると考えたからである。 $V_d$  を定義した理由は、樹冠表層部で遮断されたレーザのシングルリターンと、主に林冠ギャップを通過して地面部にまで到達したレーザのシングルリターンに着目したからである。

次に、全天空写真撮影地点を中心とする仮想円内に含まれるレーザの点群データから各説明変数を算出した。仮想円の半径 (m) は、1m ~ 30m まで 1m 刻みで変化させ、各半径の仮想円内から算出した各説明変数と天空率との関係について、スピアマンの順位相関分析を行った。



$V_d$ : 全てのシングルリターン数に対する地面部のシングルリターン数

図-2. 説明変数  $V_d$  と天空率との関係。図中の  $r$  は仮想円の半径 (m) を表す。

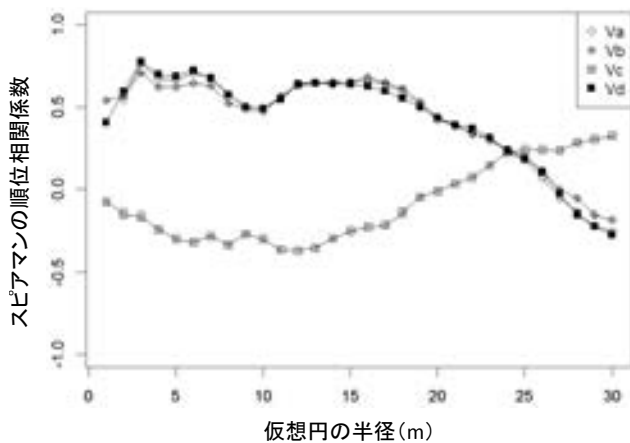


図-3. 仮想円の半径の変化に伴う各説明変数と天空率との相関係数の変動

### Ⅲ. 結果

図-2に、例として説明変数  $V_d$  と天空率との関係を散布図で示す。仮想円の半径が1m~6m, 10m, 15m, 30mの場合を示している。57地点の地上計測による天空率は、最小値は4.9, 最大値は13.8, 平均値は8.0, 標準偏差は1.9であった。この散布図から、仮想円の半径が1m~2m程度の場合にはばらつきが大きい、3m~6m程度の場合に線形関係が明瞭に表れ、半径がそれ以上に大きくなるにつれて相関関係が不明瞭になることがわかった。 $V_d$  と天空率とのこのような関係と同様の関係が説明変数  $V_a$  と  $V_b$  にも認められたが、 $V_c$  では仮想円の半径に関わらず明瞭な線形関係は認められなかった。

図-3では、4種類全ての説明変数について、各説明変数と天空率との関係を線形関係とみなした場合のスピアマンの順位相関係数を仮想円の半径ごとに示している。図-3からは、 $V_a$ ,  $V_b$ ,

$V_d$  については仮想円の半径が大きくなるにつれて、相関係数が3mで最大となり、その後は多少の増減をするが全体として減少傾向が読み取れた。

### Ⅳ. 考察

本研究では、レーザーの透過性を表現する単純な説明変数  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ,  $V_d$  を定義した。これら4種類の説明変数のうち、 $V_c$  についてのみ天空率との密接な関係が認められず、他の変数ではそれが認められたのは、本研究対象地の林分における天空率は、単木の樹冠内の葉と葉の間（もしくはシュートとシュートの間）の空隙で占められる割合よりも、単木樹冠の間に存在する林冠ギャップで占められる割合のほうが高いことを意味しているものと推察される。

説明変数  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_d$  に関して、図-2における仮想半径が1mと2mの場合にはばらつきが大きい理由は、全天空写真撮影した位置の誤差の影響が無視できないことのほかに、IIの2で述べた平均レーザー点密度が約2.5点/m<sup>2</sup>という比較的少ないレーザー照射数であるため、仮想円内のレーザー照射数（それぞれ約8個と約31個）では天空率をうまく表現できていない可能性が考えられる。一方、仮想半径が3m（レーザー照射数は約71個）以上の場合は、少なくとも本研究対象林分における天空率を表現するための最低限のレーザー照射数はあったと考えられる（必要最小限あるいは最適な点群データ数（≒平均レーザー点密度）については、本研究の解析からは議論できない）。

本研究と同様に、LiDARデータと全天空写真撮影画像から算出した林内光環境指標値との関係について仮想円を利用して解析スケールを変化させて調べた既存研究がある。Riaño *et al.* (2004) は、スペインのあるヨーロッパアカマツ (*Pinus sylvestris*) 林とナラ (*Quercus pyrenaica*) 林で研究を行い、平均樹高が約13mのアカマツ林では仮想円の半径が2.5mの時に、LiDARデータとcovered ground（樹冠被覆率と樹冠閉鎖率のどちらを指すのかは定義されてないためわからない）とのピアソンの積率相関係数が最大となり、半径の増加とともに相関係数が減少することを示した。Morsodof *et al.* (2006) は、スイス国立公園 (SNP) にある90年生から200年生のモンタナマツ (*Pinus mugo ssp. Uninata*) が優占する森林で研究を行い、仮想円の半径が2mの場合にfractional cover（1から開空度を引いた値）との線形関係が最良であることを述べている。これら二つの既存研究で使用されたLiDARセンサは、どちらもTopoSys社の機器であり、センサのスキャン角が±7.15度（固定値）と極めて鋭角なレーザー入射角のセンサであることが特徴であり、また、平均レーザー点密度はRiaño *et al.* (2004) では約9.3点/m<sup>2</sup>, Morsodof *et al.* (2006) では20点/m<sup>2</sup>以上であった。仮想円内に含まれるLiDARデータ中で、樹冠表層部にヒットしたあるレーザーが地盤面に到達した場合に、レーザーの入射角が大きければ大きいほど仮想円内の樹冠表層部のLiDARデータと地面部のLiDARデータとが同一のレーザーである確率が下がることになることとなるため、全天空写真解析値との関係性が不明瞭になる可能性が考えられる。以上のことから、本研究での結果（図-2, 3）がこの二つの既存研究結果と類似したのは、解析に利用さ



れたLiDARデータの入射角が最大で約9.4度（これは仮想円の半径が30mの場合であり、仮想円の半径が例えば3mの場合の最大レーザー入射角は約6.5度であった）と鋭角であったこと、スギ（*Cryptomeria japonica*）が針葉樹タイプであることが主な理由であると推察される。

地上で計測した天空率を航空機LiDARデータでスケールアップすることを考えた場合、本研究結果から少なくとも用いる説明変数と仮想円の半径の選び方次第でスケールアップできる可能性が示唆された。しかしながら、平均レーザー点密度がある程度は確保されていること（少なくとも本研究では約2.5点/m<sup>2</sup>）を前提として、利用するLiDARデータのレーザー入射角に注意を払ってスケールアップを試みる必要があるといえる。本研究ではスキャン角を±30度に固定してLiDAR計測しているため、同一林分における解析範囲より外側のエリアではより広角（すなわち、+9.4度以上+30度以下、-30度以上-9.4度以下）の入射角のデータが存在しており、そのようなエリアに対して今回の解析範囲内で作成したなんらかのモデルが単純に当てはまるか否かはわからないため、これについては検証の余地が残されている。また、本研究の航空機LiDARデータは対地高度600mで計測されたデータであるが、例えば1000mや1500mといった高高度になるとレーザー透過率が著しく低下するため（Takahashi *et al.*, 2008）、そのような場合は本研究で定義した説明変数のみを単純に利用するだけでは天空率を適切に説明できない可能性が考えられる。このため、少なくともレーザー透過率に関する説明変数に依存したスケールアップ手法を考える際には、航空機の対地高度に十分注意を払う必要があるであろう。さらに、今回の航空機LiDAR計測は、Ⅱの2で述べたようにレーザースキャン方向が列状間伐林分の伐採方向にある程度平行になるように行われているが、直交する方向で計測した場合の詳細な解析結果もスケールアップのための基礎的な知見として重要であると考えられる。これは今後の課題である。

## V. まとめ

本研究では、1伐5残のスギ列状間伐林分において、全天空写真から算出した天空率と航空機LiDARデータとの関係を調べた。レーザー透過率に関する単純な4種類の説明変数を定義し、全

空写真撮影地点を中心とする仮想円内に含まれるレーザーの点群データから各説明変数を算出した。ほとんどの説明変数は、仮想円の半径が3mの場合に天空率と最も密接な線形関係が認められた。結果から、用いる説明変数と仮想円の半径の選び方によって、地上計測による天空率を航空機LiDARデータでスケールアップできる可能性が示唆されたが、本研究結果は今回の航空機LiDAR計測設定における解析範囲内で使用したLiDARデータ（例えばレーザー入射角は最大で約9.4度）に限った知見であることに注意する必要があると考えられた。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費（24780163）の助成を受けて行った。

## 引用文献

- Gerdron F *et al.* (1998) *Agric For Meteorol* 92:55-70.  
 Hopkinson C and Chasmer L (2009) *Rem Sens Environ* 113: 275-288.  
 Hyypä J *et al.* (1999) *Photogramm J Fin* 16: 27-42.  
 Inoue A *et al.* (1996) *J For Plann* 2: 125-129.  
 Inoue A *et al.* (2002) *J For Plann* 8: 67-70.  
 Inoue A *et al.* (2004) *Agric For Meteorol* 126: 89-97.  
 Ishida M (2004) *Can J For Res* 34: 2208-2216.  
 Jennings *et al.* (1999) *Forestry* 72:59-73.  
 Muraoka H *et al.* (2001) *Funct Ecol* 15: 798-803.  
 Næsset E (1997) *ISPRS Photogramm Rem Sens* 52: 49-56.  
 Morsodof F *et al.* (2006) *Rem Sens Environ* 104: 50-61.  
 Riaño D *et al.* (2004) *Agric For Meteorol* 124: 269-275.  
 Takahashi T *et al.* (2008) *Photogramm J Fin* 21: 86-96.  
 Todd K W *et al.* (2003) *Can J Rem Sens* 29: 544-555.  
 Wasser L *et al.* (2013) *PLOS ONE* 8: 1-13.  
 Wagner W *et al.* (2006) *ISPRS Photogramm Rem Sens* 60: 100-112.  
 Yamamoto K *et al.* (2010) *J For Res* 15: 283-288.  
 (2014年12月2日受付；2015年1月26日受理)