航空機 LiDAR を用いた森林構造の推定

佐々木 剛¹

¹ 京都大学大学院地球環境学堂 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

Estimation of forest stand structures using airborne LiDAR

Takeshi Sasaki¹

¹ Graduate School of Global Environment Studies, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

Abstract: This paper is a review with regard to the past studies estimating forest stand structures using airborne light detection and ranging (LiDAR). The LiDAR, which has developed greatly since the 1990s, is an active remote sensing technology that directly obtains data inside the canopy, such as ground elevation, by penetrating the tree canopy; that is, it can acquire vertical, in addition to horizontal, information about the forest, unlike passive optical remote sensing technologies. LiDAR-based forest measurements have been developed mainly in Europe and North America, and have been conducted mainly over large-scale coniferous forests consisting of relatively few tree species, compared with broad-leaved forests consisting of many tree species. The first interest in the application of LiDAR to forest measurement was to determine terrain elevations. Among the forest structural variables, tree height has been most intensively focused on by LiDAR-based estimation. Other forest variables, such as crown diameter, biomass, timber volume, fractional cover, leaf area index, tree species, and three-dimensional foliage distribution, have been also estimated using LiDAR data. The recent interests in the LiDAR application to forest survey include generalization of estimation methods of forest structure, synergetic use with other types of data such as optical image, and wildlife habitat characterization. For the future, one solution of cost reduction of LiDAR data acquisition seems effective data use including collaborative partnership for data sharing and publication. It is important to establish methods estimating heterogeneous forest structure with high accuracy for operational use of LiDAR data.

Key Words: LiDAR, Review, Forest structure, Monitoring, Remote sensing

要旨：1990年代以降大きく発展してきた航空機 LiDAR（レーザ画像検出と測距）技術は、上空から地上に向けて多数のレーザを放射し、3次元位置情報を直接的に取得する測量技術である。森林のモニタリングにおいては林冠の表面だけでなく、林冠の隙間を透過したレーザにより、樹林内部の構造の推定が可能と期待される。本論では、航空機 LiDAR を用いて森林構造を推定したこれまでの研究事例について紹介し、近年の研究の動向や今後の課題について論じた。既往研究では、LiDAR データを用いて樹高や林冠高、樹冠直径、バイオマス、幹材積、植被率、葉面積指数、3次元葉群分布の推定や、樹種の分類などが行われてきた。近年の研究で関心が持たれている事項としては、LiDAR の仕様の違いなどに影響を受けにくい、より頑健性の高い推定方法の開発や、光学センサなど他のタイプのデータと組み合わせた解析、野生動物のハビタットとしての森林構造の解析などが挙げられる。LiDAR データの利用にあたっては、その取得にかかるコストがしばしば問題となるが、既存の LiDAR データセットの共有化や公開が進みつつある。今後は LiDAR データの実用化に向けて、多様なタイプの森林の構造を高い精度で推定する手法の確立が望まれる。

キーワード：LiDAR, レビュー, 森林構造, モニタリング, リモートセンシング

* 連絡先：sasakita@kais.kyoto-u.ac.jp

受付：2012年10月22日／受理：2012年11月2日

1. はじめに

森林がその生態系サービスを十分に発揮できるようにするためには、継続的にモニタリングを行い、現況を把握し、適切な管理を行っていく必要がある。しかし、大規模な森林では、現地調査によるモニタリングはコスト、労力の面から困難である。このような場合、広域的に地上を観測できるリモートセンシング技術の活用が有効である。

リモートセンシングは、一般的には人工衛星や航空機に搭載したセンサにより地表面を観測する技術であり、広域性、同時性、反復性に優れ、緑地環境の診断や管理に欠くことのできないツールとなっている。光の反射スペクトルは、物質の種類（植物、土、水等）によって異なり、例えば植物の葉は、可視赤色域の光を多く吸収し、近赤外域の波長の光を非常に多く反射する。このような特徴により、植生を他の土地被覆から抽出することができる（Xiao *et al.* 2004）。また、正規化差分植生指数（Normalized Difference Vegetation Index; NDVI）などの植生指数を求め、広範囲の植被率や森林の葉面積指数、植物の活性度などを求める研究が多く行われている（Nemani and Running 1989 ; Chen and Cihlar 1996 ; Carlson and Ripley 1997）。従来の Landsat/TM や SPOT/HRV などの衛星画像データに加え、近年は商用の高解像度衛星である IKONOS や Quickbird のデータ、また、航空機から取得された高解像度デジタル画像の使用により、より詳細な地表面の情報を得ることが可能になりつつある（Ehlers *et al.* 2003 ; Carleer and Wolff 2004）。

しかし、こうした光学センサ、いわゆる受動型リモートセンシングによる測定は、太陽の角度や気候条件の影響を受けやすいという欠点があり、また、対象物の高さ方向の情報を直接得られないという限界がある。したがって、しばしば森林の林冠と下層植生など、似た反射スペクトルを持つ対象物同士で誤分類を起こすという問題がある（Myeong *et al.* 2001 ; Riaño *et al.* 2003）。

一方、1990 年代以降大きく発展してきた LiDAR（Light Detection and Ranging, レーザ画像検出と測距）は、能動型リモートセンシング技術の一種であり、人工衛星や航空機から地上に向けて多数のレーザを発射し、レーザが対象物に当たり跳ね返ってくるまでの時間から距離を計算し、地表面や地物の 3 次元位置情報を直接的に取得する測量技術である（Lefsky *et al.* 2002）。森林の計測において LiDAR を用いるこ

との大きな利点の一つは、光学センサによる測定と異なり、水平方向に加えて垂直方向の情報を得ることができるという点である。さらに、従来の光学センサに比べて、太陽の角度や天候に左右されにくいという利点を持つ（Baltasvicius 1999）。このような利点から、LiDAR は複雑な構造を持つ森林を測定する有効な手段として期待されてきた（Nelson *et al.* 1988 ; Lefsky *et al.* 2002）。

LiDAR のセンサは、上空から計測する場合、人工衛星や航空機などのプラットフォームに搭載され用いられる。地上で用いる場合は、車両に搭載して移動しながら計測したり、三脚に固定して計測する。これらの中で、森林においては飛行機やヘリコプターからの計測、すなわち航空機 LiDAR による計測が最も多く行われている。本論では、この航空機 LiDAR に焦点を当てて、その概要について解説したあと、森林を対象としてその構造を推定したこれまでの研究事例について紹介し、近年の研究の動向や今後の課題について解説する。

2. 航空機 LiDAR システムの概要

2-1. 航空機 LiDAR システムの種類

航空機 LiDAR システムには、大きく分けて「波形記録方式」と「点群記録方式」の 2 種類があり、林冠の 3 次元構造を記録する方法が異なる（Lim *et al.* 2003 ; 図 1）。

波形記録方式はおおよそ 10 m 以上の大きなフットプリント（地上でのビームの幅）を持ち、レーザが当たったすべての物体について反射強度が連続した波形として記録されるものである（図 1）。主な波形記録方式の LiDAR システムには、NASA によって開発された SLICER（Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery; Lefsky *et al.* 2005）や LVIS（Laser Vegetation Imaging Sensor; Koetz *et al.* 2007）などがある。このタイプのセンサは現在のところ研究用のみ使われており、商用に利用されているものはない。このタイプの LiDAR を用いた既往研究の一部を、表 1 に示す。

一方、点群記録方式の LiDAR は、一般的には 1 m 以下の小さなフットプリントを持ち、1 秒間に数万発という多数のレーザを発射するものである。発射したレーザのビーム幅の中で当たった物質を次々と認識し、多くの場合、最初に林冠などで跳ね返ってきたものが“First return”、最後に返ってきたものが

“Last return”として、3次元位置情報とともに記録される。地表面や葉が密生した樹冠に直接当たった場合などで、First return と Last return が等しい場合は、“Only return”として記録される。LiDAR システムの中では、この小フットプリント点群記録方式タイプのものが現在のところ最も多く普及している (van Leeuwen and Nieuwenhuis 2010)。多く使われているシステムには、Optech 社の ALTM シリーズ、Leica 社の ALS シリーズ、RIEGL 社の LMS シリーズ、TopoSys 社の Falcon シリーズなどがある。点群記録方式は、システムの性能にもよるが、最大で1回のレーザ発射あたり5個程度のリターンを記録できる。このタイプの LiDAR を用いた既往研究の一部を、表2に示す。

さらに近年、小フットプリントで波形記録方式の、新しいタイプの LiDAR が登場してきている。このタ

イプは、まず反射強度を波形として記録し、反射強度にある閾値を設け、それより大きな値を拾い、点群データに変換して用いる事により、1発のレーザの発射につき First return、Last return だけでなく、閾値以上の値を示した点すべてを Intermediate return として記録できるのが特徴である (図1)。このタイプの LiDAR システムには、Optech 社の ALTM 3100 や RIEGL 社の LMS-Q560 などがあり、どちらも商用利用が可能である。

航空機 LiDAR で地上を計測する場合、一般的には、植生による反射率の高い近赤外域の波長のレーザを用いる。1064 nm のものが最も多いが、近年は 1550 nm のものも用いられている。本論では主に、現在最も普及している小フットプリント型点群記録方式の航空機 LiDAR について述べる。

図1. LiDAR システムのタイプ

表 1. LiDAR を用いて森林構造を推定した既往研究の例 (波形記録方式)

出典	対象地域	森林タイプまたは優占種	フットプ	
			リント(m)	推定したパラメータ
Lefsky et al. (1999)	オレゴン州 (アメリカ)	針葉樹林(Douglas-fir, Western hemlock 優占)	10	プロットレベルのバイオマス、葉面積指数
Means et al. (1999)	オレゴン州 (アメリカ)	針葉樹林(Douglas-fir, Western hemlock 優占)	10	プロットレベルの林冠高、断面積、バイオマス
Drake et al. (2002)	La Selva (コスタリカ)	熱帯雨林 (常緑広葉樹林)	25	地上部バイオマス、平均直径、断面積
Hudak et al. (2002)	オレゴン州 (アメリカ)	針葉樹林(Douglas-fir, Western hemlock 優占)	25	プロットレベルの林冠高
Hyde et al. (2006)	カリフォルニア州 (アメリカ)	針葉樹林(White fir, Red fir 優占)	25	林冠高 (動物のハビタット評価)
Anderson et al. (2006)	ニューハンプシャー州 (アメリカ)	落葉広葉二次林、針葉樹林	20~25	プロットレベルの林冠高、地上部バイオマス、直径
Goetz et al. (2007)	メリーランド州 (アメリカ)	針葉樹林、落葉広葉樹林、針広混交林	12	鳥類のハビタットとしての林冠構造
Boudreau et al. (2008)	ケベック州 (カナダ)	針葉樹林、落葉広葉樹林、針広混交林	65	プロットレベルの地上部バイオマス

表 2. LiDAR を用いて森林構造を推定した既往研究の例 (点群記録方式)

出典	対象地域	森林タイプまたは優占種	フット		推定したパラメータ
			プリン ト(m)	点群密度 (点/m ²)	
Nelson et al. (1984)	アパラチア山脈 (アメリカ)	落葉広葉樹林(Oak, Hickory 優占)	0.75	-	レーザプロファイラの軌跡に沿った林冠高
Maclean and Krabill (1986)	メリーランド州 (アメリカ)	温帯林 (Oak, Loblolly pine 優占)	-	-	レーザプロファイラの軌跡に沿った幹材積
Nelson et al. (1988)	ジョージア州 (アメリカ)	針葉樹林 (マツ類優占)	0.75	-	レーザプロファイラの軌跡に沿った林冠高、バイオマス、幹材積
Næsset (1997a)	ノルウェー南部	北方針葉樹林(Norway spruce, Scots pine 優占)	0.13~0.16	0.11	林分レベルの平均樹高
Næsset (1997b)	ノルウェー南部	北方針葉樹林(Norway spruce, Scots pine 優占)	0.13~0.16	0.11	林分レベルの幹材積
Næsset and Økland (2002)	ノルウェー南部	北方針葉樹林(Norway spruce 優占)	0.18~0.21	2.0~2.6	単木レベルおよびプロットレベルの樹高、樹冠長
Persson et al. (2002)	スウェーデン南部	北方針葉樹林(Norway spruce, Scots pine 優占)	0.26~1.0	4.0	単木レベルの樹木位置、樹高、樹冠直径
Popescu et al. (2002)	ヴァージニア州 (アメリカ)	針葉樹林、落葉広葉樹林、針広混交林	0.65	0.69	プロットレベルの林冠高
Leckie et al. (2003)	ブリティッシュコロンビア州 (カナダ)	密度の異なる針葉樹 (Douglas-fir)の林分	0.93	2.0	単木の抽出、樹高

Popescu et al. (2003)	ヴァージニア州 (アメリカ)	針葉樹林、落葉広葉樹林、針広混交林	0.65	2.0	単木レベルの樹冠直径およびプロットレベルの幹材積、バイオマス
Riano et al. (2003)	ドイツ南東部	針葉樹林、落葉広葉樹林	0.30～0.38	6.7	林冠高、植被率
Holmgren and Persson (2004)	スウェーデン南部	北方針葉樹林(Norway spruce, Scots pine 優占)	0.26	4.0	単木の抽出、樹種分類
Lim and Treitz (2004)	オンタリオ州 (カナダ)	落葉広葉樹林(Sugar maple, Yellow birch 優占)	0.2	3.0	プロットレベルの地上部バイオマス
Maltamo et al. (2004)	フィンランド南部	北方針葉樹林(Norway spruce, Scots pine 優占)	0.2	10	単木レベルの樹高
Morsdorf et al. (2004)	スイス国立公園	針葉樹林(Mountain pine 優占)	0.2～0.3	>30	単木レベルの樹木位置、樹高、樹冠直径
瀬戸島ほか(2005)	東京 (日本)	落葉広葉樹林	-	0.25	森林の階層構造
Takahashi et al. (2005a)	愛知 (日本)	スギ植林	0.15	8.8～16	単木レベルの樹高
Takahashi et al. (2005b)	愛知 (日本)	スギ植林	0.15	8.8～16	単木レベルの幹材積
Goodwin et al. (2006)	ニューサウスウェールズ州 (オーストラリア)	Flooded gum, Blackbutt, spotted gum, Tallowood	0.2～0.6	0.18～1.8	プロットレベルの林冠高、植被率
Hopkinson et al. (2006)	カナダの13の地域の森林	針葉樹林、落葉広葉樹林、針広混交林	-	0.25～2.8	林冠高
Packalén and Maltamo (2006)	フィンランド東部	針葉樹林(Norway spruce, Scots pine 優占)	0.45	0.7	プロットレベルの樹種ごとの幹材積
Simard et al. (2006)	フロリダ州 (アメリカ)	マングローブ林	0.13	0.44	樹高、バイオマス
Yu et al. (2006)	フィンランド南部	針葉樹林(Norway spruce, Scots pine 優占)	0.4	10	単木レベルの樹高成長量
Chen et al. (2007)	カリフォルニア州 (アメリカ)	サバンナ林	0.18	9.5	単木レベルの断面積、幹材積
Coops et al. (2007)	ブリティッシュコロンビア州 (カナダ)	針葉樹林(Douglas-fir, Western hemlock 優占)	0.19	0.7	林冠高、林冠の断面図、植被率、垂直方向の葉群分布
Donoghue et al. (2007)	スコットランド	針葉樹植林地 (Lodgepole pine, Sitka spruce)	0.2	4.0	プロットレベルの林冠高、幹材積
Clawges et al. (2008)	サウスダコタ州 (アメリカ)	針葉樹林(Ponderosa pine 優占)	<0.56	>0.06	鳥類の種多様性に関連する林冠構造
Heurich (2008)	ドイツ南部	針広混交林(Norway spruce, European beech 優占)	0.8	5～10	単木レベルの樹高、樹冠直径、胸高直径、幹材積
Hilker et al. (2008)	ブリティッシュコロンビア州 (カナダ)	針葉樹林(Douglas-fir 優占)	0.2	0.7	林分レベルの林冠高

Hopkinson et al. (2008)	オンタリオ州 (カナダ)	Red pine 植林地	-	2.5～ 3.6	プロットレベルの平均樹高成長量
伊藤ほか (2008)	栃木 (日本)	スギ・ヒノキ植林	0.25	8.8	単木レベルの樹高、幹材積
Jensen et al. (2008)	アイダホ州 (ア メリカ)	針葉樹林 (Western red cedar, Douglas-fir 優占)	0.3～ 0.6	0.26～ 0.36	葉面積指数
Naesset and Gobakken (2008)	ノルウェー南 東部	北方針葉樹林 (Norway spruce, Scots pine 優占)	0.21～ 0.48	0.7～ 1.2	プロットレベルの地上部および地下 部バイオマス
Popescu and Zhao (2008)	テキサス州東 部 (アメリカ)	樹齢の異なるマツ類植 林地	-	2.6	単木レベルでの樹冠下部の高さ

2-2. 航空機 LiDAR システムの発展

航空機 LiDAR によって地上を計測する際、最も基本となる情報は地表面の標高である。地表面で跳ね返ってきたレーザは、不整三角網モデル (Triangulated Irregular Network, TIN)、最近隣内挿法、スプライン補間などのアルゴリズムを用いてメッシュ化され、数値標高モデル (Digital Elevation Model, DEM) が作成される (Wulder *et al.* 2008)。標高を求める際、植生の多い場所では地表面に届くレーザの割合が減少し、推定精度が下がるなどの問題が生じ得るため、DEM 作成にはその都度最適なアルゴリズムを選択する必要がある (Wulder *et al.* 2008)。日本では、国土交通省の各地方整備局が、主な水系沿いにおいて治水を目的として LiDAR を用いた標高データを整備しており、また、国土地理院により、航空機 LiDAR から求められた 5 m メッシュの標高データが多くの地域で整備されつつある。

森林を対象として LiDAR による計測が行われはじめた頃は、取得されたデータは主に DEM の作成のみに用いられており、この場合、植生の部分のデータはノイズとされ、利用されていなかった (Nelson *et al.* 1988)。しかし 1980 年代から、レーザの点群データの中で植生に当たったものを用いて森林の構造の記述に用いる研究が、徐々に行われるようになってきた (Nelson *et al.* 1984 ; Maclean and Krabill 1986 ; Nelson *et al.* 1988)。その後 1990 年代に入って、全地球測位システム (Global Positioning System, GPS) および慣性航法装置 (Inertial Navigation Systems, INS) を統合することにより、航空機の位置の細かい計測が可能になり、データ収集能力が向上した。また、初期の航空機 LiDAR の装置は、機体の直下のみを測定できる「レーザプロファイラ」であったが、1990 年代になって、

地面を横方向にスキャンしながら飛行し幅広い範囲を計測できる「レーザスキャナ」が多く使われるようになってきた。さらに、初期の点群記録型 LiDAR は一発のレーザの発射につき 1 点しか記録できないものであったが、その後、最低でも First return と Last return の 2 つ、システムによってはさらに多くの点を記録できるようになった。このように、航空機 LiDAR 技術は飛躍的に進歩し、森林への応用例が大きく増加した。

LiDAR を用いた森林の計測は、主にヨーロッパと北米で発達してきたもので (Hyypä *et al.* 2004)、比較的大規模で均一な林分からなる森林を対象とした研究事例が多い。一方、熱帯雨林など特に複雑な構造を持った森林や、日本の天然林や里山林などの多様な樹種で構成される広葉樹林での研究例は不足している (Clark *et al.* 2004 ; Sasaki *et al.* 2008)。

3. 航空機 LiDAR による森林構造の推定

航空機 LiDAR によって森林構造を推定した研究の中で、最も多く行われてきたのは樹高や林冠高の推定である (Næsset 1997a ; Hudak *et al.* 2002 ; Popescu *et al.* 2002 ; Maltamo *et al.* 2004 ; Hopkinson *et al.* 2006)。樹高や林冠高は森林の構造を表す最も基本的なパラメータであり、LiDAR の 3 次元データから直接得られる。また、しばしば材積やバイオマスなど、他の森林構造パラメータを推定する際に用いられる重要な指数である (Lim *et al.* 2003)。点群記録方式の LiDAR の場合、林冠の頂部に当たった First return のデータから、数値表層モデル (Digital Surface Model, DSM) が得られる。DSM の値から DEM の値を差し引くことによって、林冠高のモデル (Canopy

Height Model, CHM) が計算できる (Hyypä *et al.* 2004).

LiDAR データから森林構造を推定する場合、1 本 1 本の樹木を単木レベルで抽出して解析する場合と、プロットや林分レベルで LiDAR データ由来の統計量から推定する場合の、2 通りの方法がある (Reutebuch *et al.* 2005).

3-1. 単木レベルでの樹木の抽出

LiDAR データからの単木抽出は、多くの場合、まず DSM または CHM を作成し、局所最大値フィルタを用いて 1 本 1 本の樹木の樹頂部を検出することから始まる (Persson *et al.* 2002 ; Popescu *et al.* 2003 ; Takahashi *et al.* 2005a ; Popescu and Zhao 2008). この手法は高解像度デジタル画像の解析で樹木の位置を求める際にも使われる方法 (平田 2009) と同じものである。樹頂部を検出した後、Watershed 法などの領域分割法を用いて、単木の樹冠が抽出される (Heurich 2008). こうして単木が抽出されてしまえば、対象とする範囲内の立木本数、つまり立木密度が求められ、また樹冠直径や樹冠投影面積を推定することができる。

さらに、樹高と樹冠に関する情報を用いて、樹種の分類やバイオマス、材積など、森林の構造をあらわす他のさまざまなパラメータを推定することも可能である。例えば Holmgren and Persson (2004) はスウェーデン南部の針葉樹林において、レーザの点の高さ、林冠内のレーザの透過率や、点群への放物面の当てはめによって得られた樹冠形状に関する指数などを用いて、Norway spruce (*Picea abies*) と Scots pine (*Pinus sylvestris*) の 2 種類の針葉樹の分類を行った。Takahashi *et al.* (2005b) は日本のスギ植林地において、LiDAR データから求めた樹高および樹冠構造に関するさまざまな統計量を用いて重回帰モデルを作成し、単木レベルの幹材積を推定した。伊藤ほか (2008) は、日本のスギ・ヒノキ林を対象として、樹種ごとにさまざまな樹冠パラメータを実測し、LiDAR データから求めた値と比較した結果、どちらの樹種でも樹冠表面積が LiDAR によって高い精度で推定できることを示した。

Heurich (2008) は、ドイツ南部の針広混交林において、LiDAR データから求めた単木単位の樹冠直径と樹高の値を説明変数として、材積の推定を行った結果、針葉樹のほうが広葉樹よりも推定精度が高いという結果を得た。一般的に、LiDAR による広葉樹

の単木抽出は難しいとされている。その理由は、広葉樹林の場合、しばしば 1 本の樹木が 2 つ以上の樹冠を持ち、はっきりした樹頂部を持たないことが多く、また林冠が閉鎖した森林では個体間の境界も不明瞭なことが多いためである。実際、LiDAR データから単木抽出を行った既往研究は、ほとんどが樹頂がはっきりした針葉樹林を対象としたものであり、広葉樹林を対象としたものは非常に少ない。

また、林冠を構成する大きな樹木に比べ、小さな樹木は抽出するのが難しい。さらに、階層構造を持った森林の場合、下層にある樹木の抽出の精度は低くなる (Holmgren and Persson 2004; Maltamo *et al.* 2004). Persson *et al.* (2002) は、スウェーデン南部の針葉樹林において LiDAR データから単木抽出を行った結果、本数にして 71 パーセント、材積にして 91 パーセントの樹木が正しく抽出された。この結果は、材積の大きな樹木のほうがより高い精度で抽出されたことを示している。

単木レベルで樹冠を抽出する場合、レーザのフットプリントが小さいことと、レーザの点群密度が十分に高いことが必要である。密度が低いと樹頂を捉えられない可能性が高くなり、樹高の過小評価となり、その値を用いて推定したバイオマスや材積も過小評価となる可能性が高い。また、密度が低かったりフットプリントが大きいと、樹冠の境界部分を捉えられない可能性がある。その場合、樹冠直径や樹冠投影面積が正しく求められず、さらに立木密度の推定精度も悪くなる。一般的に、十分な精度で単木が抽出できる点群密度は、1 m² あたり 4 点から 5 点以上であると言われている (Wulder *et al.* 2008). Popescu *et al.* (2003) は、点群密度が 1 点 / m² のとき、単木の樹高はある程度高い精度で推定できるが、特に混交林では樹冠幅が正しく推定できないという結果を得ている。

3-2. プロット、林分レベルでの森林構造の推定

一方、プロットや林分レベルの手法は、エリアベースの手法とも呼ばれ、対象とするエリアの中で、3 次元点群データを用いてさまざまな統計量を計算し、回帰モデルや判別分析モデルなどを用いて森林の構造を推定するものである。用いる統計量はレーザの点群の高さの平均値や最大値、地面まで達した点の数の割合などで、これらはプロットや林分レベルでの林冠高、バイオマス、幹材積などを求めるのに使われる。

Næsset (1997b) は、ノルウェー南西部の Norway spruce と Scots pine が優占する北方針葉樹林において、点群の平均高さや林冠を透過した点群の割合の値を用いて回帰モデルを作成し、林分材積を推定した。Lim and Treitz (2004) は、カナダ・オンタリオ州の Sugar maple (*Acer saccharum*) および Yellow birch (*Betula alleghaniensis*) が優占する落葉広葉樹林において、点群の高さのパーセンタイルの値を用いて地上部バイオマスを推定するモデルを作成した。Donoghue *et al.* (2007) は、スコットランドの Lodgepole pine (*Pinus contorta*) と Sitka spruce (*Picea sitchensis*) の 2 種の針葉樹からなる同齢の人工林において、種によって林冠構造が異なることを利用し、林冠のレーザの反射率や点群データの垂直方向のばらつき等の値から、林分内のそれぞれの種の割合を推定した。瀬戸島ほか (2005) は、日本の落葉広葉樹林において、落葉前後に観測した LiDAR データから DSM の変化量を求め、階層構造の把握を試みた。Ioki *et al.* (2009) は日本の広葉樹主体の都市林において、LiDAR データからプロットレベルで点群の高さの平均とパーセンタイル、および地面まで達した点の割合を求め、林分材積を推定するモデルを作成した。

プロットや林分レベルでの森林構造の推定は、レーザの点群密度がおおよそ 1 m^2 以下と低い場合や、広葉樹林のような単木抽出が困難な森林、階層を持ち垂直構造が複雑な森林を計測する場合に有利である (Reutebuch *et al.* 2005; Wulder *et al.* 2008)。しかし、得られた森林構造の推定モデルは経験的なものとなり、対象とする森林のタイプや LiDAR システムの種類が異なると適用が難しい可能性がある (Lim and Treitz 2004; Næsset and Gobakken 2008)。

スカンジナビア諸国では、LiDAR データから得られた林冠高や林分レベルの幹材積の推定精度は、写真判読など他のリモートセンシングの手法と同等か、より優れているという研究結果が示され、LiDAR は大規模な森林インベントリを作成する際の実用的な手段の一つとして取り入れられ始めている (Næsset *et al.* 2004)。しかし、こうした森林は、限られた数の種の針葉樹が優占し、比較的均一な構造を持った森林である。日本の自然林や里山林、都市林のように、多くの樹種からなる複雑な構造を持った森林においては、LiDAR データを用いた林分構造の推定方法は確立されておらず、研究途上にある。

4. 近年の研究の特徴と課題

4-1. LiDAR システムの進歩

近年増加している LiDAR データの利用として、小フットプリント・波形記録方式の LiDAR を森林の構造推定に用いた研究例が増加している (Koetz *et al.* 2008; Miura and Jones 2010; Sasaki *et al.* 2012)。このタイプの LiDAR は 1 発のレーザの発射につき多数の点を記録できるのが特徴であり、林冠内部の葉群分布など、より詳細な構造の解析が可能と期待されている (Sasaki *et al.* 2012)。

4-2. 頑健性の高い推定方法の検討

LiDAR によって同じ場所を複数回計測することにより、森林の成長や枯死の状態など、時間的な変化をモニタリングすることが可能である (Reutebuch *et al.* 2005)。しかし、LiDAR システムは急速に進歩しているため、計測の度に仕様の異なるシステムを用いる場合が多くなり、LiDAR データから森林構造パラメータを推定するモデルがその都度異なることになりかねない (Næsset and Gobakken 2008)。また、LiDAR データと森林構造の関係は、対象とする森林の林相によっても異なると考えられる。

Hopkinson and Chasmer (2009) は、カナダの樹種や林齢が異なる 7 箇所の森林地帯において、LiDAR データを用いて植被率の推定を行ったところ、レーザの林冠透過率に関する指数の中で、レーザの反射強度を用いた指数が最も安定しているという結果を得た。また、Sasaki *et al.* (2008) は、日本の広葉樹林において、約 11 点/m^2 と高密度な LiDAR データから葉面積指数と天空率を推定する指数を提案し、点群密度を約 1 点/m^2 まで間引いた後でも、この指数が高い推定精度を保っていることを示した。したがって、この指数はより低いレーザの発射密度においても安定しており、より低コストで森林構造の推定ができる可能性が示された。

このような LiDAR の仕様や対象地の林相の違いに左右されない頑健な推定手法の開発は重要であるが、まだ研究例が少なく、今後の課題であると言える (Næsset and Gobakken 2008)。

4-3. 他のデータとの統合

LiDAR データからは、高さなどの垂直方向の情報が高い精度で得られるのに対し、従来の光学センサのデータからは植生の分類や活性度の推定に有用な

反射率の情報が得られる。これらを組み合わせて用いる事で、お互いに補完的に働き、より高い精度で森林の構造を推定できると期待される (Hyypä *et al.* 2004)。また、広大な面積を LiDAR により計測することがコストの面で難しい場合、均一な林分であれば、LiDAR データによる推定値を航空写真や衛星画像のデータを用いて外挿することも可能である。

Leckie *et al.* (2003) は、カナダ・バンクーバー島の Douglas-fir が優占する針葉樹林において、ヘリコプターから取得した高解像度マルチスペクトル画像から Valley-following 法を用いて単木の抽出を行った結果、地表面の植生を樹木と誤分類するケースがあった。しかし、同時に取得された LiDAR データ由来の高さ情報を加えることにより、これらのエラーは大幅に除去された。Hilker *et al.* (2008) は、同じくバンクーバー島の針葉樹林において、LiDAR データ由来の林冠高を衛星画像データを用いてより広範囲に外挿することにより、低コストで広範囲の森林のインベントリーを作成できる可能性を示した。Jones *et al.* (2010) は、カナダ南西部の針広混交林において、飛行機から同時に取得されたハイパースペクトル画像データと LiDAR データを組み合わせ、11 種の樹種の分類を行い、画像データのみを用いた場合に比べて分類精度が向上することを示した。

4-4. 解析手法の多様化

LiDAR の点群データの解析手法の中で、近年急速に研究事例が増加しているものとして、オブジェクトベースの画像解析を用いたものが挙げられる。この解析手法は、高解像度の画像の場合、最初に画像をある程度のまとまりを持ったピクセルの集合（オブジェクト）に分け、各オブジェクトを最小単位として分類を行うもので、オブジェクトごとに多くの特徴量の計算が可能となる (Blaschke 2010)。

Pascual *et al.* (2008) は、スペイン中部の森林地帯において、オブジェクトベースの画像解析手法を用いて、異なる林相の境界を LiDAR から得られた高さのデータによって分割し、さらに高さの平均や標準偏差の値を用いて林相を 5 つのタイプに分類した。Sasaki *et al.* (2011) は、日本の広葉樹主体の都市林において、高解像度近赤外デジタル画像に LiDAR のデータを組み合わせ、オブジェクトベース画像分類によって樹木を抽出し、さらに樹種分類を行い、ピクセルベースの分類による結果と比較した。その結果、オブジェクトベースの分類手法によって

ノイズの発生が解消され、さらに LiDAR のデータを組み合わせることにより樹木の抽出精度、樹種の分類精度が向上した。

4-5. 生物のハビタットとしての森林構造の解析

森林内部の空間構造は、そこに生息する野生動物の種の構成や多様性と深く関わっていることが知られており、特に鳥類のハビタットとしての構造に関する研究が古くから行われている (MacArthur and MacArthur 1961 ; 石田 1987 ; Brokaw and Lent 1999)。近年の生物多様性に関する認識の高まりを受けて、LiDAR に関する研究も、鳥類をはじめとする野生動物のハビタットとしての森林構造について調べたものが増加してきている (Vierling *et al.* 2008)。

Sasaki *et al.* (2012) は、日本の都市林において、現地の目視による調査で求めた 3 次元葉群分布と、LiDAR から求めた点群の分布の関係を 1 m ボクセル単位で調べた結果、非常に高い精度で再現され、また、鳥類の多様性と関係が深いとされる葉群階層多様度 (MacArthur and MacArthur 1961) も高い精度で推定できることを示した。Hinsley *et al.* (2008) は、イギリス・ウェールズの都市林とイングランドの保護林において、林冠高と樹林の分断状況を LiDAR データから求め、それらとシジュウカラ類の繁殖状況との関係を調べた。Müller *et al.* (2010) は、ドイツ南部の針広混交林において、LiDAR データから求めた林冠の高さやレーザの透過率に関する指数と、鳥類群集の種組成との関係を調べた。

これらの例のように、LiDAR データを用いたハビタットの推定は、鳥類に関するものが圧倒的に多く、両生類や爬虫類、無脊椎動物についてはまだ非常に研究例が少なく (Vierling *et al.* 2008 ; Müller and Brandl 2009)、今後の研究事例の積み重ねが重要である。

5. おわりに

本論で述べたように、森林の広範囲のモニタリングにおいて、ほぼ天候に左右されずに対象物の 3 次元位置情報を直接記録できる航空機 LiDAR の技術は大きな可能性を持つ。LiDAR を用いて森林を計測するにあたっては、その取得にかかるコストがしばしば問題となる。しかし、LiDAR データから標高モデル (DEM) や洪水ハザードマップなどを整備する際、同時に取得された森林内部のデータなどは十分に活

用されていない場合が多く、このような生データを効率的に用いれば、森林の生産性や CO₂ 吸収量、生物のハビタットとしての林分構造の推定などを低コストで行える可能性がある。アメリカでは現在、さまざまな目的で地上を計測した LiDAR データセットの共有化や公開が進みつつある。また、LiDAR データを解析するソフトウェアについても、より手軽に利用できるものが次々と開発されている。このように、LiDAR 技術とそれを取り巻く環境は大きく進歩を続けており、今後はその実用化に向けて、多様なタイプの森林の構造を高い精度で推定する手法の確立が望まれる。

引用文献

- Anderson, J., Martin, M. E., Smith, M.-L., Dubayah, R. O., Hofton, M. A., Hyde, P., Peterson, B. E., Blair, J. B. and Knox, R. G. 2006. The use of waveform lidar to measure northern temperate mixed conifer and deciduous forest structure in New Hampshire. *Remote Sensing of Environment* 105: 248-261.
- Baltsavias, E. P. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54: 83-94.
- Blaschke, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65: 2-16.
- Boudreau, J., Nelson, R. F., Margolis, H. A., Beaudoin, A., Guindon, L. and Kimes, D. S. 2008. Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec. *Remote Sensing of Environment* 112: 3876-3890.
- Brokaw, N. V. L. and Lent, R. A. 1999. Vertical structure. *Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems* (Hunter, I. and Malcom, L. eds.), 373-399. Cambridge University Press, Cambridge.
- Carleer, A. and Wolff, E. 2004. Exploitation of very high resolution satellite data for tree species identification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70: 135-140.
- Carlson, T. N. and Ripley, D. A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62: 241-251.
- Chen, J. M. and Cihlar, J. 1996. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment* 55: 153-162.
- Chen, Q., Gong, P., Baldocchi, D. and Tian, Y. Q. 2007. Estimating basal area and stem volume for individual trees from lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 73: 1355-1365.
- Clark, M. L., Clark, D. B. and Roberts, D. A. 2004. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. *Remote Sensing of Environment* 91: 68-89.
- Clawges, R., Vierling, K., Vierling, L. and Rowell, E. 2008. The use of airborne lidar to assess avian species diversity, density, and occurrence in a pine/aspen forest. *Remote Sensing of Environment* 112: 2064-2073.
- Coops, N. C., Hilker, T., Wulder, M. A., St-Onge, B., Newnham, G., Siggins, A. and Trofymow, J. A. 2007. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR. *Trees - Structure and Function* 21: 295-310.
- Donoghue, D. N. M., Watt, P. J., Cox, N. J. and Wilson, J. 2007. Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment* 110: 509-522.
- Drake, J. B., Dubayah, R. O., Clark, D. B., Knox, R. G., Blair, J. B., Hofton, M. A., Chazdon, R. L., Weishampel, J. F., and Prince, S. 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics, using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment* 79: 305-319.
- Ehlers, M., Gaehler, M. and Janowsky, R. 2003. Automated analysis of ultra high resolution remote sensing data for biotope type mapping: New possibilities and challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57: 315-326.
- Goetz, S., Steinberg, D., Dubayah, R. and Blair, B. 2007. Laser remote sensing of canopy habitat heterogeneity as a predictor of bird species richness in an eastern temperate forest, USA. *Remote Sensing of Environment* 108: 254-263.
- Goodwin, N. R., Coops, N. C. and Culvenor, D. S. 2006. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sensing of Environment* 103: 140-152.
- Heurich, M. 2008. Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured

- natural forests of the Bavarian Forest National Park. *Forest Ecology and Management* 255: 2416-2433.
- Hilker, T., Wulder, M.A. and Coops, N.C. 2008. Update of forest inventory data with lidar and high spatial resolution satellite imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing* 34: 5-12.
- Hinsley, S. A., Hill, R. A., Bellamy, P. E., Harrison, N. M., Speakman, J. R., Wilson, A. K. and Ferns, P. N. 2008. Effects of structural and functional habitat gaps on breeding woodland birds: Working harder for less. *Landscape Ecology* 23: 615-626.
- 平田泰雅. 2009. 高分解能衛星データの森林モニタリングへの応用. *日本森林学会誌* 91: 136-146.
- Holmgren, J. and Persson, Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90: 415-423.
- Hopkinson, C. and Chasmer, L. 2009. Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. *Remote Sensing of Environment* 113: 275-288.
- Hopkinson, C., Chasmer, L. and Hall, R. J. 2008. The uncertainty in conifer plantation growth prediction from multi-temporal lidar datasets. *Remote Sensing of Environment* 112: 1168-1180.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Lim, K., Treitz, P. and Creed, I. 2006. Towards a universal lidar canopy height indicator. *Canadian Journal of Remote Sensing* 32: 1-14.
- Hudak, A. T., Lefsky, M. A., Cohen, W. B. and Berterretche, M. 2002. Integration of lidar and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height. *Remote Sensing of Environment* 82: 397-416.
- Hyde, P., Dubayah, R., Walker, W., Blair, J.B., Hofton, M. and Hunsaker, C. 2006. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy. *Remote Sensing of Environment* 102: 63-73.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönnholm, P., Pyysalo, U., Pitkänen, J. and Maltamo, M. 2004. Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 Part 8/W2: 82-88.
- Ioki, K., Imanishi, J., Sasaki, T., Morimoto, Y. and Kitada, K. 2009. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. *Landscape and Ecological Engineering* 6(1): 29-36.
- 石田健. 1987. 植生断面図によって評価した森林の空間構造と鳥類の多様性. *東京大学農学部演習林報告* 76: 267-278.
- 伊藤拓弥・松英恵吾・内藤健司. 2008. 航空機LiDARによる森林資源量推定—スギ・ヒノキの樹高・樹冠量による立木幹材積推定式の検討—. *写真測量とリモートセンシング* 47(1): 26-35.
- Jensen, J. L. R., Humes, K. S., Vierling, L. A. and Hudak, A. T. 2008. Discrete return lidar-based prediction of leaf area index in two conifer forests. *Remote Sensing of Environment* 112: 3947-3957.
- Jones, T. G., Coops, N. C. and Sharma, T. 2010. Assessing the utility of airborne hyperspectral and LiDAR data for species distribution mapping in the coastal Pacific Northwest, Canada. *Remote Sensing of Environment* 114: 2841-2852.
- Koetz, B., Morsdorf, F., van der Linden, S., Curt, T. and Allgöwer, B. 2008. Multi-source land cover classification for forest fire management based on imaging spectrometry and LiDAR data. *Forest Ecology and Management* 256: 263-271.
- Koetz, B., Sun, G., Morsdorf, F., Ranson, K. J., Kneubühler, M., Itten, K. and Allgöwer, B. 2007. Fusion of imaging spectrometer and LIDAR data over combined radiative transfer models for forest canopy characterization. *Remote Sensing of Environment* 106: 449-459.
- Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L. and Shreenan, R. 2003. Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 633-649.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A. and Harding, D. 1999. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment* 70: 339-361.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G. and Harding, D. J. 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience* 52: 19-30.
- Lefsky, M. A., Hudak, A. T., Cohen, W. B. and Acker, S. A. 2005. Geographic variability in lidar predictions of

- forest stand structure in the Pacific Northwest. *Remote Sensing of Environment* 95: 532-548.
- Lim, K. S. and Treitz, P.M. 2004. Estimation of above ground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 558-570.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. and Flood, M. 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27: 88-106.
- MacArthur, R. H. and MacArthur, J. W. 1961. On bird species diversity. *Ecology* 42: 594-598.
- Maclean, G. A. and Krabill, W. B. 1986. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne lidar system. *Canadian Journal of Remote Sensing* 12: 7-18.
- Maltamo, M., Mustonen, K., Hyypä, J., Pitkänen, J. and Yu, X. 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1791-1801.
- Means, J. E., Acker, S. A., Harding, D. J., Blair, J. B., Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Harmon, M. E., and McKee, W. A. 1999. Use of large-footprint scanning airborne Lidar to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment* 67: 298-308.
- Miura, N. and Jones, S. D. 2010. Characterizing forest ecological structure using pulse types and heights of airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 114: 1069-1076.
- Morsdorf, F., Meier, E., Kötz, B., Itten, K. I., Dobbertin, M. and Allgöwer, B. 2004. LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sensing of Environment* 92: 353-362.
- Müller, J. and Brandl, R. 2009. Assessing biodiversity by remote sensing in mountainous terrain: The potential of LiDAR to predict forest beetle assemblages. *Journal of Applied Ecology* 46: 897-905.
- Müller, J., Stadler, J. and Brandl, R. 2010. Composition versus physiognomy of vegetation as predictors of bird assemblages: The role of lidar. *Remote Sensing of Environment* 114: 490-495.
- Myeong, S., Nowak, D. J., Hopkins, P. F. and Brock, R. H. 2001. Urban cover mapping using digital, high-spatial resolution aerial imagery. *Urban Ecosystems* 5: 243-256.
- Næsset, E. 1997a. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52: 49-56.
- Næsset, E. 1997b. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61: 246-253.
- Næsset, E. and Gobakken, T. 2008. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sensing of Environment* 112: 3079-3090.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. and Söderman, U. 2004. Laser scanning of forest resources: The nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 482-499.
- Næsset, E. and Økland, T. 2002. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment* 79: 105-115.
- Nelson, R., Krabill, W. and MacLean, G. 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 15: 201-212.
- Nelson, R., Krabill, W. and Tonelli, J. 1988. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 24: 247-267.
- Nemani, R. R. and Running, S. W. 1989. Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation. *Agric Forest Methodol* 44: 245-260.
- Packalén, P. and Maltamo, M. 2006. Predicting the plot volume by tree species using airborne laser scanning and aerial photographs. *Forest Science* 52: 611-622.
- Pascual, C., García-Abril, A., García-Montero, L. G., Martín-Fernández, S. and Cohen, W. B. 2008. Object-based semi-automatic approach for forest structure characterization using lidar data in heterogeneous pinus sylvestris stands. *Forest Ecology and Management* 255: 3677-3685.
- Persson, Å., Holmgren, J. and Söderman, U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an

- airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68: 925-932.
- Popescu, S. C., Wynne, R. H. and Nelson, R. F. 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: Local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture* 37: 71-95.
- Popescu, S. C., Wynne, R. H. and Nelson, R. F. 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 564-577.
- Popescu, S. C. and Zhao, K. 2008. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. *Remote Sensing of Environment* 112: 767-781.
- Reutebuch, S. E., Andersen, H-E. and McGaughey, R. J. 2005. Light detection and ranging (LIDAR): An emerging tool for multiple resource inventory. *Journal of Forestry* 103: 286-292.
- Riaño, D., Meier, E., Allgöwer, B., Chuvieco, E. and Ustin, S. L. 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment* 86: 177-186.
- Sasaki, T., Imanishi, J., Fukui, W., Tokunaga, F. and Morimoto, Y. 2012. Fine-scale replication and quantitative assessment of forest vertical structure using LiDAR for forest avian habitat characterization. *Forest Science and Technology* 8(3): 145-153.
- Sasaki, T., Imanishi, J., Ioki, K., Morimoto, Y. and Kitada, K. 2008. Estimation of leaf area index and canopy openness in broad-leaved forest using airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography. *Landscape and Ecological Engineering* 4: 47-55.
- Sasaki, T., Imanishi, J., Ioki, K., Morimoto, Y. and Kitada, K. 2011. Object-based classification of land cover and tree species by integrating airborne LiDAR and high spatial resolution imagery data. *Landscape and Ecological Engineering* 8(2): 157-171.
- 瀬戸島政博・今井靖晃・天野正博. 2005. 落葉前後に観測した航空機レーザスキャナによる DSM を用いた落葉広葉樹林内の階層構造の把握. 写真測量とリモートセンシング 44(2): 43-53.
- Simard, M., Zhang, K., Rivera-Monroy, V. H., Ross, M. S., Ruiz, P. L., Castañeda-Moya, E., Twilley, R. R. and Rodriguez, E. 2006. Mapping height and biomass of mangrove forests in Everglades National Park with SRTM elevation data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72: 299-311.
- Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y. and Tsuzuku, M. 2005a. Estimating individual tree heights of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR. *Journal of Forest Research* 10: 135-142.
- Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y. and Tsuzuku, M. 2005b. Predicting individual stem volumes of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR. *Journal of Forest Research* 10: 305-312.
- van Leeuwen, M. and Nieuwenhuis, M. 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research* 129: 749-770.
- Vierling, K. T., Vierling, L. A., Gould, W. A., Martinuzzi, S. and Clawges, R. M. 2008. Lidar: Shedding new light on habitat characterization and modeling. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6: 90-98.
- Wulder, M. A., Bater, C. W., Coops, N. C., Hilker, T. and White, J. C. 2008. The role of LiDAR in sustainable forest management. *Forestry Chronicle* 84: 807-826.
- Xiao, Q., Ustin, S. L. and McPherson, E. G. 2004. Using AVIRIS data and multiple-masking techniques to map urban forest tree species. *International Journal of Remote Sensing* 25: 5637-5654.
- Yu, X., Hyypä, J., Kukko, A., Maltamo, M. and Kaartinen, H. 2006. Change detection techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanner data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72: 1339-1348.