

# ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムによる 樹冠高の3次元リモートセンシング

大政謙次\*<sup>1</sup>・秋山幸秀\*<sup>2</sup>・石神靖弘\*<sup>1</sup>・吉見健司\*<sup>3</sup>

## 3-D Remote Sensing of Woody Canopy Heights using a Scanning Helicopter-borne Lidar System with High Spatial Resolution

Kenji OMASA\*<sup>1</sup>, Yukihide AKIYAMA\*<sup>2</sup>, Yasuhiro ISHIGAMI\*<sup>1</sup> and Kenji YOSHIMI\*<sup>3</sup>

### Abstract

In present paper 3-D remote sensing of woody canopy heights using a new scanning helicopter-borne lidar system with high spatial resolution was examined. This lidar system was characterized by (i) almost ground surface was covered by scanning a laser beam of small-footprints below tens of centimeters, (ii) precise grid data were obtained by rectangular scan using a garbomirror scanner, and (iii) there were two operational modes, first pulse mode (FP-mode) for measuring woody canopy and last pulse mode (LP-mode) for measuring ground level, of time interval meter measuring the elapsed time between the laser pulse emission and the return of the reflected pulse.

FP-mode DEM (Digital Elevation Model, grid interval=33.3 cm) and LP-mode DEM were calculated from data measured by FP-mode and LP-mode. DSM (Digital Surface Model) was computed with an error of about 15 cm from the LP-mode DEM. Mesh data (DCHM) of woody canopy heights were obtained by subtracting the DSM from the FP-mode DEM.

The laser-derived tree heights of 14 coniferous trees and 6 broadleaf trees estimated from the DCHM were in error by less than 47 cm (RMSE=19 cm) in comparison with the ground measured tree height. The median filter (3x3 mask) was effective for removal of spike noise in the DCHM. The result showed the accuracy of tree height estimate was extremely improved by the mentioned method using the scanning lidar system with high spatial resolution.

**keywords:** 3-D remote sensing, DEM, DSM, scanning lidar system, tree height

### 1. はじめに

樹木の成長量や森林生態系の保全のための情報を得

るのに、地上での調査に加えて、航空機や人工衛星を利用したりリモートセンシングによる調査が広く行われている<sup>1,2)</sup>。特に、最近では、地球温暖化の問題に関連

(2000.2.7 受付・2000.6.12 受理)

\*<sup>1</sup> 東京大学大学院農学生命科学研究科  
〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

\*<sup>2</sup> 朝日航洋 (株)  
〒305-0814 埼玉県川越市平塚 662-1

\*<sup>3</sup> 東亜大学大学院総合学術研究科  
〒751-8503 山口県下関市一の宮学園町 2-1

Copyright © 2000 RSSJ

\*<sup>1</sup> The University of Tokyo, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, Yayoi 1-1-1, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

\*<sup>2</sup> Aero Asahi Co., 662-1 Hiratsuka, Kawagoe, Saitama 350-0814, Japan

\*<sup>3</sup> University of East Asia, Graduate School of Integrated Science and Art

して、森林のもつ炭素吸収機能を推定することが必要とされ、森林の構造やバイオマス量などを精度よく推定することが望まれている<sup>3,4)</sup>。しかし、航空写真測量や SAR (Synthetic Aperture Radar), Landsat TM (Thematic Mapper) などを利用した研究では、精度が悪く、森林の構造やバイオマス量を正確に推定するには問題がある<sup>5-7)</sup>。このため、航空機からの Scanning Lidar (Light Detection And Ranging) による計測が注目されている。

航空機 Lidar による観測は、1960 から 1970 年代に海洋の水深計測の分野で発達した<sup>8,9)</sup>。その後、1980 年代になって、陸域の地形図作成の分野に応用され始めた<sup>10-12)</sup>。当初、森林の存在は、地形計測の誤差要因としての問題として扱われていたが、1980 年代の中頃から、バイオマス量を推定するための樹冠(草本も含む)の平均高を求めるのに利用され始めた<sup>12-18)</sup>。この頃使用された Lidar システムは、飛行方向に沿っての航跡上のみを計測していくものであった。

1990 年代の中頃になると、飛行方向に直角に、パルスレーザーをスキャン照射し、地形や樹高を計測する Scanning Lidar システムが使用され始めた<sup>19-22)</sup>。しかし、スキャン間隔が粗く、地上でのビーム径 (Footprint) が 1 m 以下になると、地面や平均樹高の正確な計測が難しく、実際の樹高に対して計測値が小さくなる傾向がみられた<sup>19,20)</sup>。このため、数 m 以上の大きな

ビーム径のものが有効とされ<sup>19,23,24)</sup>、この知見にそって、打ち上げが計画されている NASA の ESSP (Earth System Science Pathfinder) プログラムによる VCL (Vegetation Canopy Lidar) では、人工衛星からの地球表面の観測ということもあって 25 m のビーム径のものが搭載される予定になっている<sup>25)</sup>。

一方、小さなビーム径の Scanning Lidar システムによる樹高の計測精度を高めるために、最近、数十 cm 以下の小さなビーム径でも、ビーム径に比べてスキャン間隔を細かくし、地表の観測面を漏れなくスキャンできる能力をもつヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムがカナダの Optech 社と共著者 (朝日航洋 (株)) のあいだで共同開発された<sup>26)</sup>。このシステムでは、上記の機能に加えて、樹冠計測のために、2 軸ガルボミラースキャナによる進行方向に直角にスキャンする矩形波形スキャン方式を採用し、従来の三角波形スキャン方式により生じていたデータの粗密度のむらを改善した。また、照射パルスレーザーのビーム径 (2 種類) と反射パルスの受信方式 (2 種類) の切り替えにより、地面と樹冠の分離計測を容易にした。そこで、この Lidar システムを用いて、山の斜面に生育する広葉樹と針葉樹の混交林およびその麓の実験植物園内樹木の樹冠高の 3 次元リモートセンシングを行い、同時期に行った樹高の地上調査との比較による計測精度の検討を行った。

Table 1. Performance characteristics of the lidar system

Model No. of the system	ALTM 1025 special model	
Laser wave length	1,064	nm (Nd: YAG)
Pulse repetition frequency	25,000	Hz
Scan frequency	25	Hz
Scan angle	22.6	deg. (max.)
Sampling data per one scan (one round trip)	1,000	points
Scan type	rectangular scan or triangular scan	
Beam divergence		
First pulse mode		
Direction of scan	1.2	mrاد
Direction of flight	1.4	mrاد
Last pulse mode		
Direction of scan	0.25	mrاد
Direction of flight	0.4	mrاد
Range resolution	1	cm
Range accuracy	<15	cm (single shot)

## 2. Scanning Lidar システム

Fig. 1 は、ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システム (Optech Co. and Aero Asahi Co. ALTM 1025 special model) による地面と樹冠構造の3次元リモートセンシングの概念図である。このシステムでは、ヘリコプターから進行方向に対して直角方向に、パルスレーザーを地表面に向かってスキャン照射し、地面や樹木から帰ってくる反射パルスの飛行時間を計測することにより、地表面との距離を算出し、さらに、地形や樹冠の3次元形状を求めることができる。このように、計測対象の3次元情報を得るリモートセンシング手法を、3次元計測に対比させて、3次元リモートセンシングという。

Table 1 は、使用した Scanning Lidar システムの基本性能の一覧である。高空間分解能を得るために、

レーザーの発射回数を 25,000 Hz と従来のシステムに比べて多くした。また、樹冠計測においては、樹冠のスキャン漏れをなくするために、ビーム径の大きい First pulse mode (FP-mode; レーザー光が反射して最初に戻ってくるパルスを受信するモード) を、地面の計測においては、樹間を通して地面にレーザー光が到達しやすく、また、地面からの反射が計測しやすいように、ビーム径の小さい Last pulse mode (LP-mode; レーザー光が反射して最後に戻ってくるパルスを受信するモード) を選択使用できるようにした。さらに、通常の三角波形スキャン (一軸式) で得られるデータの粗密度にはむらがあるので、樹冠の計測においては、空中から進行方向に直行するようにスキャンする2軸ガルボミラースキャン (矩形波形スキャン) 方式により、正確なグリッドデータを得られるようにした。なお、このシステムの距離計測の精度仕様

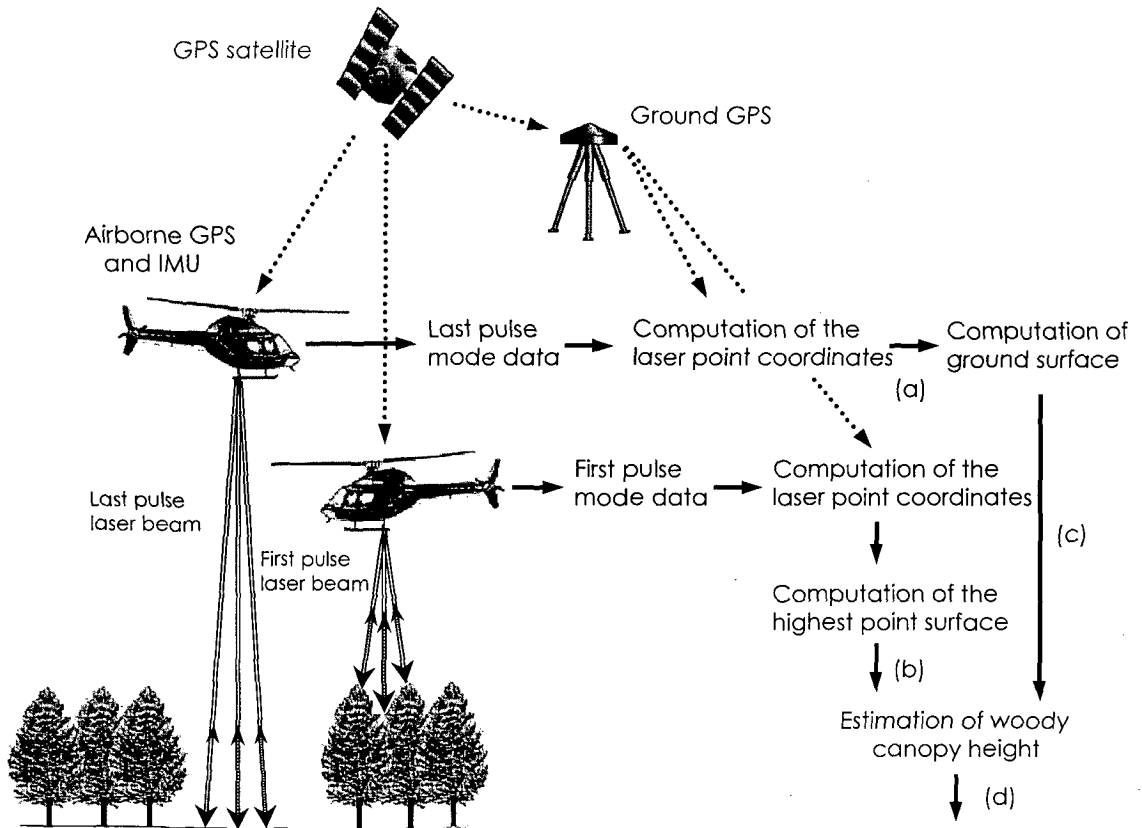


Fig. 1. Schematic diagram of 3-D remote sensing using a scanning helicopter-borne lidar system.  
 (a) LP-mode DEM. (b) FP-mode DEM. (c) DSM. (d) DCHM.

は 15 cm 以下である。

地上のレーザー反射位置の 3 次元座標は、あらかじめ Ground GPS (Global Positioning System) により正確に計測された基準位置 (三角点に設置) と、ヘリコプターに搭載されている Airborne GPS と機体の位置や姿勢を GPS と結合して正確に計測する IMU (Internal Measurement Unit) のデータ、レーザーのスキャン角 (照射角度) 及び計測された距離のデータなどから算出される (Fig. 1 参照)。このシステムにより求められる絶対座標の誤差仕様は、20~30 cm 程度であるが、基準点からの相対座標での誤差でみると、距離計測の精度である 15 cm 以下である。

### 3. 計測の方法と条件

#### 3.1 実験の対象地域

計測実験は、静岡県熱海市にある新技術開発財団の植物研究園内とそれに隣接する山の斜面を対象とした。Plate 1 は、ヘリコプターからの計測の際に撮影した対象地域の写真である。縦軸が基準位置からの偏北距離 (上方が北)、横軸が偏東距離である。下方の道路に隣接して植物研究園がみえる。この園内には、針葉樹や広葉樹の高低木、110 余種が植栽されており、また、研究園の右上方に隣接した山の斜面には、麓から頂上に向かって、アオキーイロハモミジ群落、コナラ群落、オオバーヤシャブシ群落が広がっていた。

#### 3.2 地上での樹高計測と計測時期

ヘリコプターからの Lidar システムによる計測は、個々の樹木の識別が容易に行える紅 (黄) 葉時期の 1998 年 11 月 14 日に実施した。また、それと並行して、地上で樹高 (樹冠の最高点の高さ) の計測をポータブル型の距離計 (RIEGL 社、型式: FG21-HA、精度 5 cm) を用いて行った。

対象とした樹木は、上空から識別しやすく、また、正確な樹高計測ができる植物研究園内の針葉樹 5 種 14 本 (ヒノキ、スギ、ヒマラヤスギ、クロマツ、サワラ)、広葉樹 6 種 6 本 (ウメ、ヤマモモ、ミツバツツジ、ヤブツバキ、キンモクセイ、ニオイシュロラン) であった。その選定にあたっては、一定の場所に集中しないように園内全域に分布するように配慮した。計測は、同一樹木で複数回行い、ばらつきが少ないこと

を確認した後、その平均値を求めた。

#### 3.3 飛行データと Lidar の計測条件

Table 2 は、ヘリコプターの飛行データと Table 1 の Lidar の基本性能から計算した地上でのビーム径 (Footprint) およびビームスキャンの間隔である。ヘリコプターは、飛行方向のスキャン漏れを防ぐために、約 50 km/h の低速で、水平に飛行させた。その際の地表面 (地面+樹冠高) からヘリコプターまでの距離は、地面の傾斜や樹冠の高さによって異なっており、その違いを高度 (Altitude) として示した。

FP-mode を使用した樹冠の計測においては、特に、スキャン漏れをなくするために、ビーム径よりもビームのスキャン幅 (スキャン方向と飛行方向) が小さくなるように、地表面 (地面+樹冠高) からの飛行高度を約 200 m に設定した。ただ、飛行高度が 170 m 程度の場所 (山の斜面上部) では、飛行速度との関係で、ビーム径よりも飛行方向のスキャン幅が数 cm 程度大きくなり、若干のスキャン漏れがあった。

地面計測のための LP-mode では、樹間を通して地面にレーザーのビームが到達しやすく、また、地面からの反射が計測しやすい、最大ビーム径が 20 cm 程度以下になる高度 (地表面 (地面+樹冠高) から約 500 m) に設定した。このため、多少のスキャン漏れがあったが、地面 (地形) の推定の際に、この程度のスキャン漏れは問題にならないと考えた。

#### 3.4 Lidar データの解析

ヘリコプターからの計測の後、記録された GPS や POS、レーザーのスキャン角などのデータとあわせて、FP-mode と LP-mode により得られた距離データから、それぞれ、レーザー反射位置の 3 次元座標を計算し、標高を示すメッシュデータ (DEM, Digital Elevation Model, メッシュ間隔 33.3 cm) を得た (Fig. 1 の流れ図を参照)。

FP-mode は、レーザー光が反射して最初に返ってくるパルスを受信するモードであるので、このモードにより得られた標高メッシュデータ (FP-mode DEM) は、樹木が生育している場所では、その位置で最も高い樹冠の標高を与える。

一方、LP-mode は、レーザー光が反射して最後に戻

ってくるパルスを受信するモードであるので、樹間を通して地面までパルス光が到達した場所では、地面の標高を与える。このため、このモードにより得られる標高メッシュデータ (LP-mode DEM) において、周辺に比べて標高が特に低い場所を抽出し、補間処理をすることにより、地面の形状 (地形、建物を含む) を示す標高メッシュデータ (DSM; Digital Surface Model) を得た。

樹冠高のメッシュデータ (DCHM; Digital Canopy Height Model) は、FP-mode DEM から DSM を引くことによって求めた。また、地上で計測された樹高と比較するために、DCHM 中の対応する樹木の頂点 (メッシュデータ値) をモニターをみながら対話型ソ

フトウェアで抽出し、樹高とした。その際、フィルターなしの場合とノイズ除去のために 3x3 メッシュの平均化フィルター及びメディアンフィルターを処理した場合を比較した。

なお、FP-mode DEM および LP-mode DEM の計算には、TopScan 社のソフトを改良したものをを用いた。また、DSM の計算には、このソフトで大雑把に DSM を求めた後、ノイズ除去のための二次元フーリエ変換を用いたローパスフィルター処理を行い、さらに、建物など、急激に高度が変化するところを補正した。3次元表示には ERDAS IMAGINE を、また、必要に応じて自作したソフトを使用した。

**Table 2. Flight data and characteristics of the lidar system on the ground**

Flight data	
Altitude: distance from a helicopter to the ground surface (or woody canopy)	
First pulse mode (for measuring woody canopy)	170-240 m
Last pulse mode (for measuring ground level)	470-540 m
Swath width	
First pulse mode	ca. 80 m x 3 flightlines
Last pulse mode	ca. 180 m x 1 flightline
Speed	ca. 50 km/h
Characteristics on the ground	
Footprint	
First pulse mode	
Direction of scan	20.4 cm at 170 m altitude 28.8 cm at 240 m
Direction of flight	23.8 cm at 170m 33.6 cm at 240 m
Last pulse mode	
Direction of scan	11.8 cm at 470 m 13.5 cm at 540 m
Direction of flight	18.8 cm at 470 m 21.6 cm at 540 m
Distance between the centers of neighboring footprints	
First pulse mode	
Direction of scan	11.3 cm at 170 m 18.8 cm at 240 m
Direction of flight	28 cm
Last pulse mode	
Direction of scan	36.8 cm at 470 m 42.3 cm at 540 m
Direction of flight	28 cm

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 Lidar データの解析結果

Plate 2 は、Plate 1 の航空写真に示した対象地域の FP-mode DEM である。このモードにより得られた DEM は、樹木が生育している場所では、その位置で最も高い樹冠の標高を与える。この Plate では、標高 274 m から 338 m までを、白い部分が標高が高く、黒くなるにつれて標高が低くなるように示している。

Plate 3 は、Plate 2 を鳥瞰図として示したものである。見やすくするために、標高の違いを色分けしてある。右上の山の斜面が高く、また、左上から右下に向かって、標高が低くなっていることがわかる。個々の樹木や建物なども容易に識別できる。

Plate 4 は、Plate 3 の左奥の場所を、視点を少し変えて拡大表示したものである。真中の階段状に真っ直ぐ伸びているのが小道で、左側に宅地造成地、右側に大小様々な樹木の樹冠が観察される。小道には、もともと階段はないので、この Plate 中の小道の階段は、DEM の作成の際の量子化誤差である。この量子化誤

差は、Lidar システムによる距離計測の精度と同程度の 15 cm 位であった。樹木は、上方からの樹冠のみの計測であるので、下部の情報が欠落している。それゆえ、一見しては樹木と識別しづらいが、樹冠部は、比較的先端部の欠落も少なく、正確に計測されていることがわかる。なお、宅地造成地は工事中だったので、路肩には廃土が、また、造成地内に切土や盛土の状態が観察された。

Plate 5 は、対象地域の LP-mode DEM である。LP-mode は、レーザー光が反射して最後に戻ってくるパルスを受信するモードであるので、FP-mode に比べて、樹木の内部の枝ぶりや下層植生の情報が得られる。また、樹間を通して地面までパルス光が到達した場所では、その位置で最も低い地面の標高を与える。このため、道路など地面の露出部分が Plate 2 に比べて多かった。

Plate 6 は、Plate 5 の LP-mode DEM から推定された DSM (地面+建物) の鳥瞰図である。対象地域の地形図や地上調査の結果から判断して、樹木が茂っていたにもかかわらず、植物研究園内の地形が正確に描か

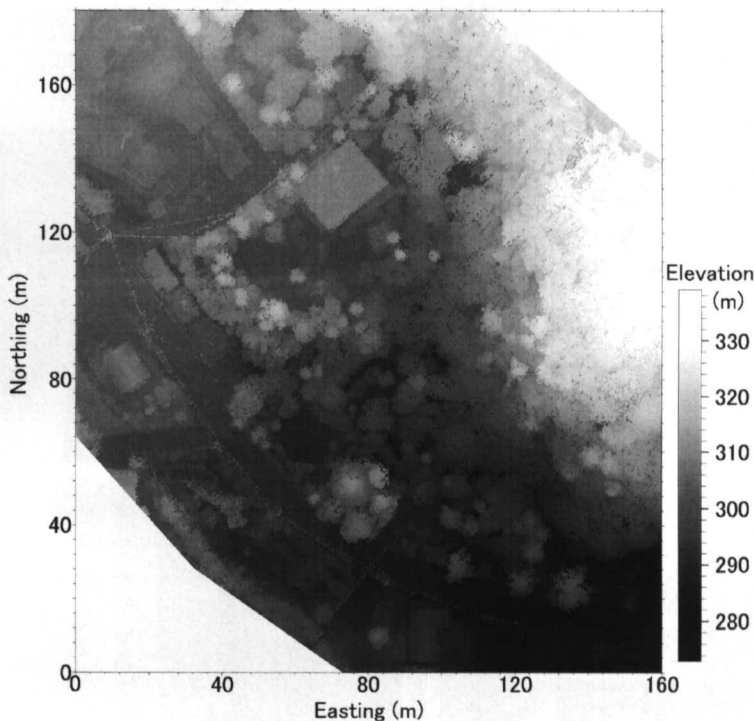


Plate 2. FP mode-DEM of the test site shown in Plate 1.

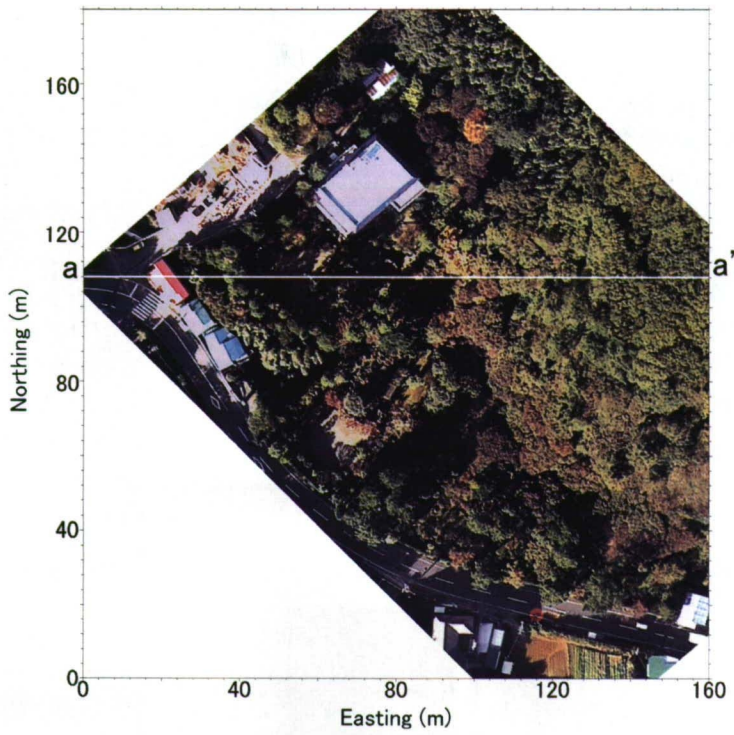


Plate 1. Aerial photograph of a test site.

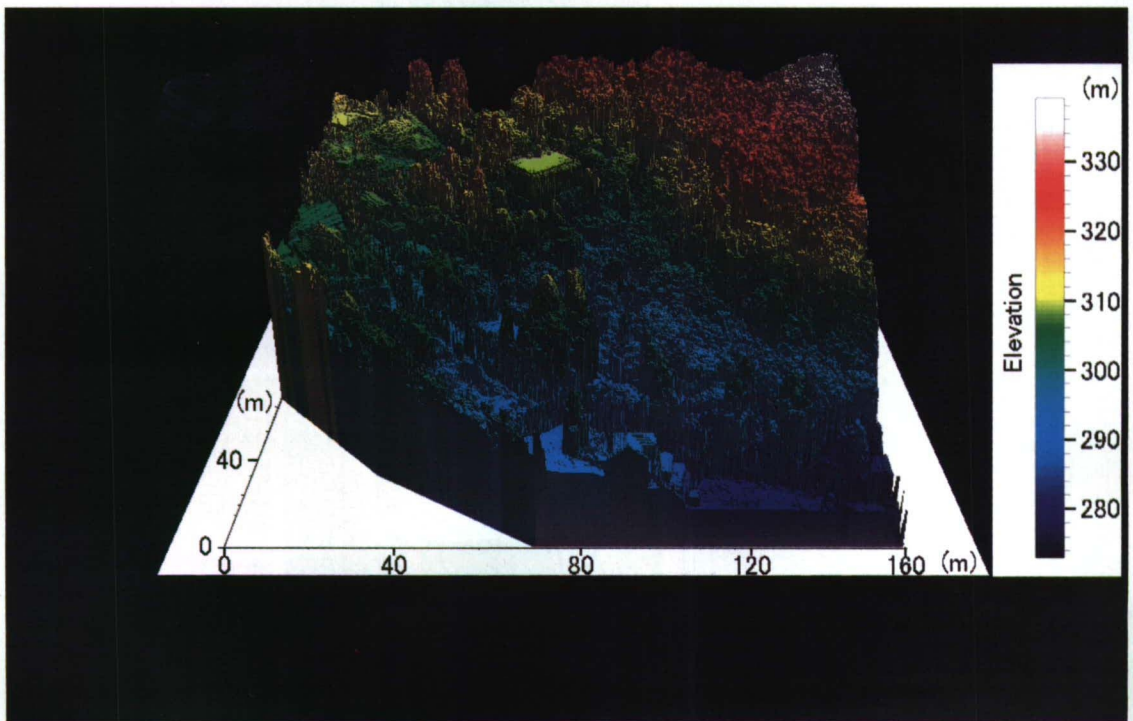


Plate 3. 3-D view of FP mode-DEM shown in Plate 2.

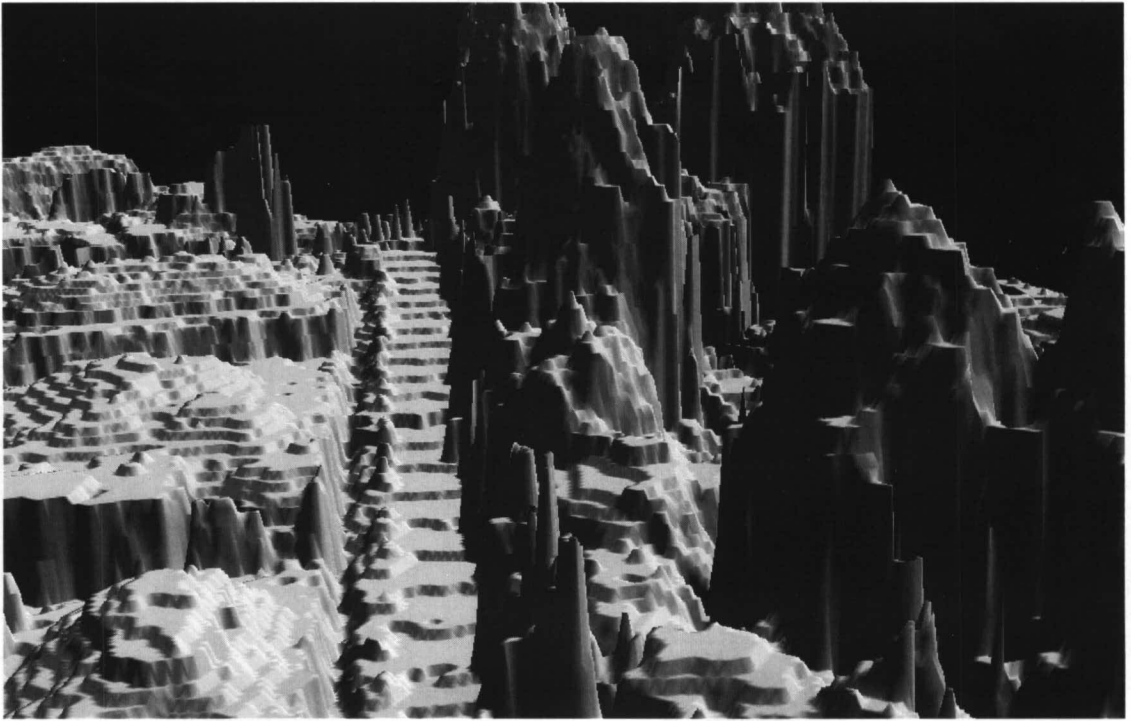


Plate 4. 3-D close-up view of a place in Plate 2.

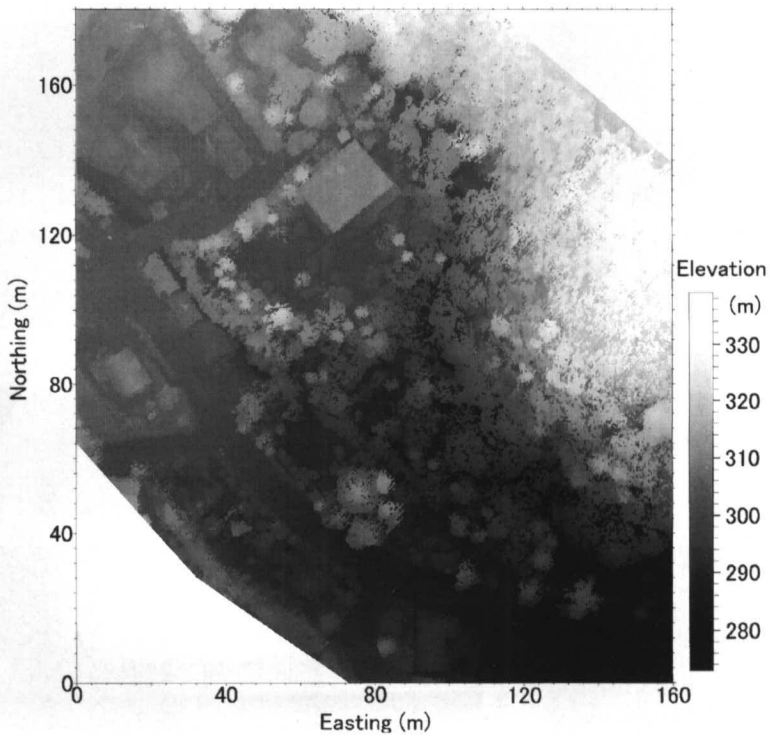


Plate 5. LP mode-DEM of the test site shown in Plate 1.



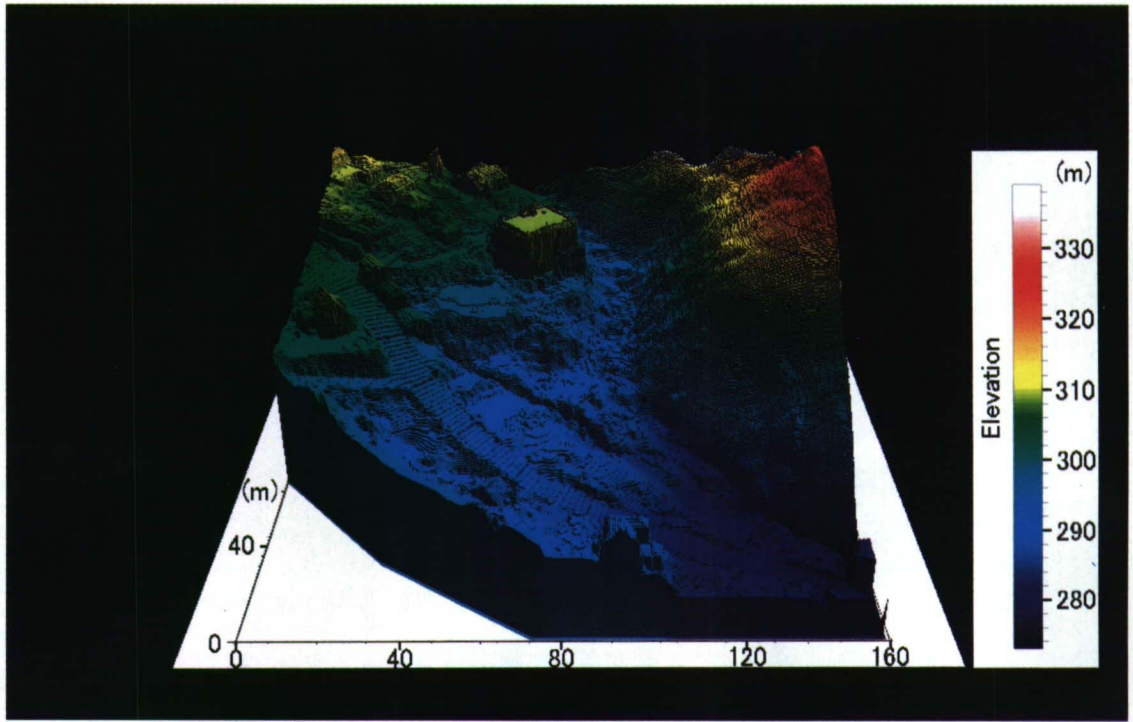


Plate 6. 3-D view of DSM computed from Plate 5.

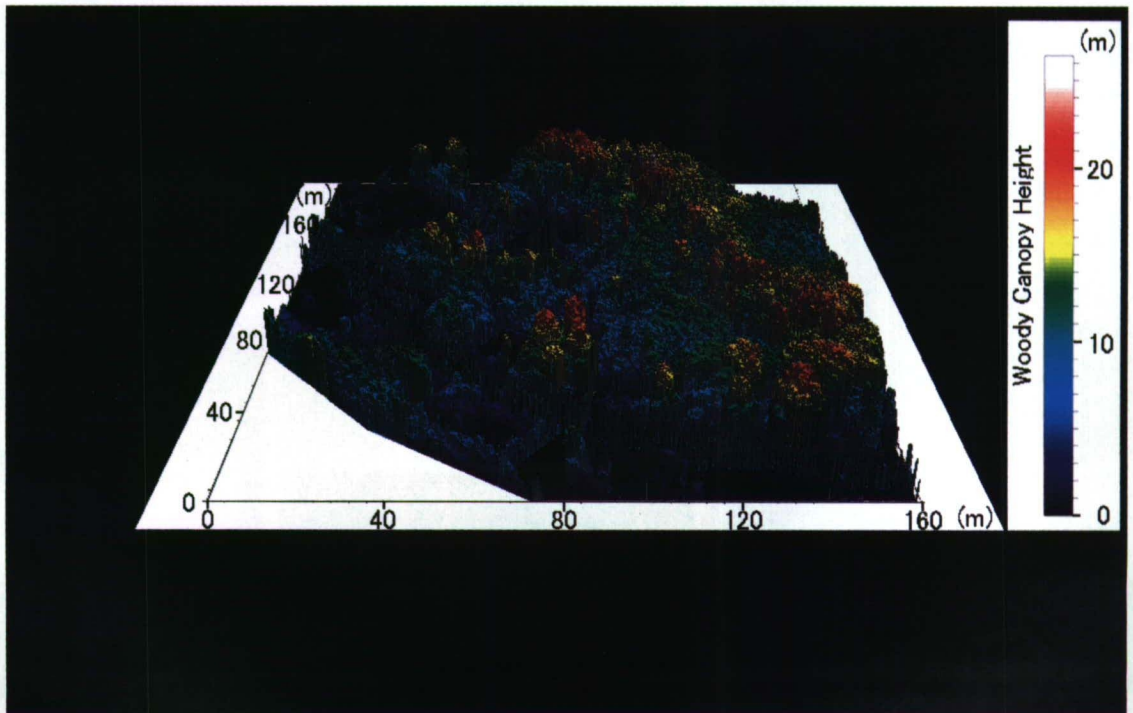


Plate 7. 3-D view of woody canopy heights (DCHM).

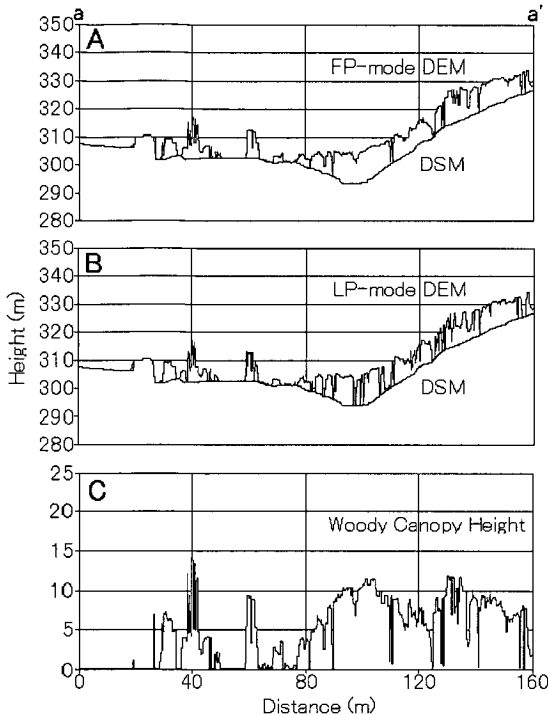


Fig. 2. FP-mode DEM, LP-mode DEM, DSM and woody canopy heights in a-a' section on Plate 1.

れていた。また、山の斜面や建物、道路、河川なども細部にわたって現況と一致していた。

Fig. 2 は、Plate 1 に示された a-a' の断面における FP-mode DEM (A), LP-mode DEM (B), DSM (A, B) 及び樹冠高 (C) の断面分布の例である。繰り返しになるが、LP-mode のレーザー光の方が、FP-mode のそれよりも地面により多く到達しており、LP-mode DEM から、DSM がよく推定できることがわかる。経験的に、地面が 20% 程度以上（樹冠密度が 80% 程度以下）見えていれば、Lidar による距離計測の精度で地形の推定が可能であるとされるが、この結果からは、もう少し地面への到達率が少なくても、推定が可能であることが推察された。

Plate 7 は、FP-mode DEM から DSM を引くことによって求められた DCHM の鳥瞰図である。山や谷、建物などの部分が除かれ、平地に樹木が生育しているように表示されている。この鳥瞰図から、樹冠の形や樹木の高さがわかる。

## 4.2 樹高の計測精度の検討

Table 3 は、地上で計測した樹高と DCHM から得られた樹高の誤差を比較したものである。DCHM には、スパイク状のノイズが含まれており、これを 3x3 画素の平均化フィルターとメディアンフィルターにより除去した。結果は、針葉樹 (5 種 14 本)、広葉樹 (6 種 6 本) 共に、平均化フィルターよりもメディアンフィルターの方がよかった。これは、フィルター処理をすることによって、樹高を過小推定する傾向があったが、メディアンフィルターの方がその傾向が小さいことによる。そして、樹冠の先端が平坦な広葉樹よりも、尖っている針葉樹の方がその効果が大きかった。結果として、メディアンフィルター処理をした場合、個々の樹木において、針葉樹で 47 cm、広葉樹で 40 cm の誤差内での計測が可能であった。なお、RMSE でみると、針葉樹で 19 cm、広葉樹で 12 cm 程度の誤差であった。

Scanning Lidar システムによる樹高計測の誤差要因として、地上でのレーザーのビーム径 (Footprint) とスキャン間隔の問題が指摘されている<sup>19,20)</sup>。Næsset (1997)<sup>20)</sup>は、Optech ALTM 1020 (pulse repetition frequency=2000 Hz, scan frequency=7 Hz, beam divergence=0.25 mrad) を使用して、高度 460-600 m から平均樹高を計測し、補正処理をしない場合、テストサイトによっては、平均樹高を 4.1-5.5 m、過小推定することを示した。この場合の地上でのビーム径は 13-16 cm、ビームのスキャン間隔は 2.8-3.3 m であったので、地表の観測面のカバー率を計算すると 0.2% 程度になる。このような粗いスキャン間隔では、樹木の先端を正確に検出することは難しく、また、密な森林では地面の推定にも誤差が生じるので、これらの誤差が積算されて、このような大きな誤差になったものと考えられる。なお、地上での樹高計測の誤差や、1年に 1 m 近く成長する樹木もあるので、Lidar システムによる計測時期と地上計測の時期の違いなども、正確な誤差評価をする場合には問題になる。

今回の実験では、地表の観測面を漏れなくスキャンすることのできる小さなビーム径の Scanning Lidar システムを用いた。そして、Lidar システムによる計測と地上での計測を並行して行い、樹木の成長による

**Table 3. Improvement of difference (error) between ground measured tree height and lidar-derived tree height using digital filters.**

Type of tree	Tree height		Range of error			RMSE		
	Range	Mean	NF	AF	MF	NF	AF	MF
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Coniferous tree	11.20~19.65	15.05	-0.02~2.26	-0.79~0.26	-0.47~0.19	0.71	0.37	0.19
Broadleaf tree	1.95~10.40	6.58	-0.02~0.97	-0.46~0.11	-0.40~0.13	0.39	0.17	0.12

\*Tree height=ground measured tree height

\*\*Error=(ground measured tree height)-(laser-derived tree height)

\*\*\*RMSE=root mean square error

\*\*\*\*NF=no filter, AF=3x3 averaging filter, MF=3x3 median filter

誤差をなくした。また、上空から識別しやすく、かつ、地上計測の際に、樹高が正確に計測できる樹木を選定した。これらの処置によって、計測誤差は、個々の樹木で、47 cm 以下、RMSE で 19 cm 以下という結果を得た。この結果は、ビーム径の大小を問わず、従来の Lidar システムによる計測誤差に比べて格段に精度が向上したことを示している。

上述の樹高計測の誤差は、地形の推定誤差を含んでいる。計測樹木の選定に際しては、一定場所に集中しないように植物研究園内全域に分布するように配慮したことから、植物研究園内では、地形も樹木の計測誤差の範囲内で正確に計測されたことがわかる。これは、地形の計測誤差が、Lidar システムの距離計測の精度や DEM の作成の際の量子化誤差と同程度の精度 (15 cm 程度) であったことを示している。

以上の結果から、小さなビーム径の Scanning Lidar システムを用いて、地表の観測面を漏れなくスキャンすることにより、地形や樹冠の標高を、細かく、正確に計測できることがわかった。

## 5. おわりに

本論文では、新しく開発されたヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムを用いて、樹冠高の3次元リモートセンシングを行い、その精度について検討した。この Lidar システムの特徴は、(i) 地上でのレーザーのビーム径が数十 cm 以下と小さいにもかかわらず、ビーム径に比べてスキャン間隔を小さくし、地表の観測面を漏れなくスキャンできること、(ii) 矩形波形スキャン方式により、正確なグリッドデ

ータが得られること、(iii) 樹冠を FP-mode により、地面を LP-mode により、切り替えて計測する方式であることなどである。

DEM や DSM は、33.3 cm メッシュデータとして得られたが、樹木が繁茂していたにもかかわらず、樹冠や地形を正確 (Lidar の計測精度 (15 cm 以下) と同程度) に計測できた。樹冠高のメッシュデータ (DCHM) は、FP-mode DEM から DSM を引くことにより得られたが、樹高を地上で計測した結果と比較すると、誤差の大きい針葉樹でも、個々の樹木において 47 cm 以内、RMSE で 19 cm 以内の計測誤差であった。これは、従来の Lidar システムによる計測誤差に比べて、格段に精度がよいことを示している。なお、樹高を求める際のノイズフィルターとして、3x3 画素のメディアンフィルターが有効であった。

今後、この Scanning Lidar システムを用いて、樹冠高に加えて、バイオマス量などの推定を行っていく予定である。また、解析の自動化についても検討する予定である。

## 謝辞

本研究にあたって、新技術開発財団の助成を受けた。また、東京大学名誉教授 尾上守夫先生や同財団の関係者には、研究に際して、多大な協力を受けた。ここに関係各位に感謝の意を表する。

## 引用文献

- 1) R. J Hobbs and H. A. Mooney (ed.), 大政謙次, 恒川篤史, 福原道一 (監訳): 生物圏機能のリモ-

- トセンシング, Springer-Verlag Tokyo, 東京, 1993.
- 2) V. A. Sample (ed.), 後藤恵之 (監訳): 生態系管理へのリモートセンシングと GIS の活用, フジ・テクノシステム, 東京, pp. 431, 1999.
  - 3) W. M. Post: Uncertainties in the terrestrial carbon cycle. *Vegetation Dynamics and Global Change*, A. M. Solomon and H. H. Shugart (ed.), pp. 116-132, Chapman and Hall, New York, 1993.
  - 4) 田村正行: 陸域リモートセンシング, 地球環境研究展望—地球の温暖化 (現象解明)—pp. 36-38, 国立環境研究所地球環境研究グループ, 1998.
  - 5) E. Rignot, J. Way, C. Williams and L. Viereck: Radar estimates of aboveground biomass in boreal forests of interior Alaska. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.*, 32, pp. 1117-1124, 1994.
  - 6) W. B. Cohen, T. A. Spies and M. Fiorella: Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U. S. A. *Int. J. Remote Sens.* 16, pp. 721-746, 1995.
  - 7) R. H. Waring, J. Way, E. R. Hunt, Jr., et al.: Imaging radar for ecosystem studies. *Bio-Science*, 45, pp. 715-723, 1995.
  - 8) G. D. Hickman and J. E. Hogg: Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements. *Remote Sens. Environ.* 1, pp. 47-58, 1969.
  - 9) F. E. Hoge, R. N. Swift and E. B. Frederick: Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system. *Appl. Opt.* 19, pp. 871-883, 1980.
  - 10) L. E. Link and J. G. Collins: Airborne laser systems use in terrain mapping. *Proc. 15th Int. Symp. on Remote Sens. of Environ.*, Ann Arbor, MI, pp. 95-110, 1981.
  - 11) W. B. Krabill, J. G. Collins, L. E. Link, R. N. Swift and M. L. Butler: Airborne laser topographic mapping results. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 50, pp. 685-694, 1984.
  - 12) H. Schreier, J. Lougheed, J. R. Gibson and J. Russel: Calibrating an airborne laser profiling system. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 50, pp. 1591-1598, 1984.
  - 13) R. F. Nelson, W. B. Krabill and G. A. Maclean: Determining forest canopy characteristics using airborne laser data, *Remote Sens. Environ.* 15, pp. 201-212, 1984.
  - 14) G. A. Maclean and W. B. Krabill: Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LIDAR system. *Can. J. Remote Sens.* 12, pp. 7-18, 1986.
  - 15) R. Nelson, W. Krabill and J. Tonelli: Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sens. Environ.* 24, pp. 247-267, 1988.
  - 16) J. C. Ritchie, J. H. Everitt, D. E. Escobar, T. J. Jackson and M. R. Davis: Airborne laser measurements of rangeland canopy cover and distribution. *J. Range Manage.* 45, pp. 189-193, 1992.
  - 17) J. C. Ritchie, D. L. Evans, D. Jacobs, J. H. Everitt and M. A. Weltz: Measuring canopy structure with an airborne laser altimeter. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 36, pp. 1235-1238, 1993.
  - 18) M. A. Weltz, J. C. Ritchie and H. D. Fox: Comparison of laser and field measurements of vegetation height and canopy cover. *Water Resour. Res.* 30, pp. 1311-1319, 1994.
  - 19) M. Nilson: Estimation tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sens. Environ.* 56, pp. 1-7, 1996.
  - 20) E. Næsset: Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J. Photogramm Remote Sens.* 52, pp. 49-56, 1997.
  - 21) M. Flood and B. Gutelius: Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 63, pp. 327-366, 1997.

- 22) 真屋学, 沼田洋一, 斎藤和也, 早川清二郎, 田村正行: レーザプロファイラによる樹高計測手法の開発。日本リモートセンシング学会第26回学術講演論文集 pp. 385-388, 1999.
- 23) M. A. Lefsky, D. Harding, W. B. Cohen, G. Parker and H. H. Shugart: Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. Remote Sens. Environ. 67, pp. 83-98, 1999.
- 24) J. E. Means, S. A. Acker, D. J. Harding et al.: Use of large-footprint scanning airborne lidar

to estimate forest stand characteristics in the western Cascades of Oregon. Remote Sens. Environ. 67, pp. 298-308, 1999.

- 25) R. Dubayah, J. B. Blair, J. L. Bufton et al.: The Vegetation Canopy Lidar Mission. Land Satellite Information in the Next Decade II: Sources and Applications. pp. 11-112, ASPRS, Washington D. C. 1997.
- 26) 秋山幸秀: 空中レーザー高密度地形計測の治山事業における活用方法。第37回治山研究発表論文集, pp. 343-350, 1999.

### 〔著者紹介〕

#### ●大政 謙次 (オオマサ ケンジ)



所属: 東京大学大学院農学生命科学研究科

1950年12月生。75年愛媛大学大学院農学研究科(農業工学)修士課程修了。76年環境庁国立公害研究所(現在: 国立環境研究所)に入所。87年同技術部室長。90年同生物圏環境部室長。98年筑波大学生物科学研究

科教授(併任), 99年東京大学大学院農学生命科学研究科教授, 現在に至る。85年工学博士(東京大学)。植物や生態系の構造や機能の画像計測, リモートセンシングに関する研究に従事。また, 環境汚染や地球温暖化, 砂漠化などの植物・生態系分野の研究も行っている。科学技術庁長官賞(研究功績者表彰), 日本生物環境調節学会奨励賞, 日本農業気象学会賞[学術賞], CELSS学会論文賞・功労賞などを受賞。日本リモートセンシング学会, 計測自動制御学会, 環境科学会, 農業土木学会, SPIE, 米国植物生理学会などの会員。

e-mail: aomasa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

#### ●秋山 幸秀 (アキヤマ ユキヒデ)



所属: 朝日航洋株式会社 空中探査事務室

1963年4月生。94年東海大学大学院海洋学研究科海洋科学専攻博士課程修了・理学博士。94年朝日航洋株式会社入社, 現在に至る。防災環境調査, リモートセンシングに関する業務に従事。また, 航空機搭載型レ

ーザー測量システムの研究開発及び利活用関連の業務を行っている。日本地震学会, 日本測地学会, 物理探査学会, 日本写真測量学会, 砂防学会, 太平洋学会などの会員。

#### ●石神 靖弘 (イシガミ ヤスヒロ)



所属: 東京大学大学院農学生命科学研究科

1999年東京大学農学部生物システム工学専修卒, 同年修士課程入学, 現在に至る。生態系のモデリングおよびリモートセンシングの研究に従事。

#### ●吉見 健司 (ヨシミ ケンジ)



所属: 東亜大学大学院総合学術研究科

東京大学大学院農学生命科学研究科特別研究学生

1999年東亜大学工学部組織工学科卒業,

1999年東亜大学大学院総合学術研究科博士前期課程入学, 東京大学

大学院農学生命科学研究科特別研究学生, 現在に至る。画像情報処理の研究に従事。