

原著論文

## 航空機搭載型 Scanning lidar システムを用いた樹高計測： 計測条件の違いが樹高計測精度に与える影響についての検討

### Measurement of Woody Canopy Tree Heights Using Airborne Scanning Lidar Systems : Effects of Difference in Measurement Conditions of the Lidar Systems on the Accuracy of the Tree Heights Estimation

細井文樹<sup>1</sup>、吉見健司<sup>1,2</sup>、秋山幸秀<sup>3</sup>、大政謙次<sup>1\*</sup>

Fumiki Hosoi<sup>1</sup>, Kenji Yoshimi<sup>1,2</sup>, Yukihide Akiyama<sup>3</sup> and Kenji Omasa<sup>1\*</sup>

<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  
Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo  
1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

<sup>2</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  
Graduate School of Integrated Science and Art, University of East Asia  
2-1 Ichinomiya-Gakuen, Shimonoseki, Yamaguchi 751-8503, Japan

<sup>3</sup> 朝日航洋株式会社 〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-1-1  
Aero Asahi Co.  
3-1-1 Minamidai, Kawagoe, Saitama 350-1165, Japan

(2008 年 5 月 16 日受付、2008 年 9 月 8 日受理)

#### ABSTRACT

Effects of difference in measurement conditions of airborne scanning lidar systems on the accuracy of the tree heights estimation were investigated to improve the measurement efficiency. At the condition on the flight altitude of 300 m, footprint diameter was small (0.3 m) with low flight speed (60 km/h) and footprint interval of laser beams was set to almost same as the footprint diameter in order to thoroughly scan target canopies. For more efficient measurement, flight speed was raised up to 90 km/h at 500 m altitude condition. In the case, the footprint diameter was also expanded up to 0.5 m, so that footprint interval was almost same as the diameter, as was in 300 m altitude condition. At the condition on 900 m altitude, flight speed was much more raised to 230 km/h, so that the footprint interval became larger than the diameter. After the measurements, tree heights were estimated from the digital canopy height models produced from lidar data obtained at each of the conditions. The root mean square errors of the 166 tree heights estimation were 0.27, 0.30 and 2.38 m for the conditions of 300, 500 and 900 m altitude, respectively. These results showed that, when flight speed is raised for more efficient measurement, it is important for sizes of footprint diameter and interval to be set to almost same to obtain accurate results. It was also shown that tree height estimation with less error can be provided up to 0.5 m footprint diameter by adopting the almost same sizes of the footprint diameter and interval.

**Key words :** Airborne scanning lidar, Digital canopy height model, Digital elevation model, Woody canopy height

\*Corresponding author : Phone: +81-3-5841-5340, Fax: +81-3-5841-8175, E-mail: aomasa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

森林生態系の解明や地球温暖化における炭素吸収源としての森林のバイオマス量の算定のために、地上での調査に加え、航空機や人工衛星を利用したリモートセンシングによる森林の調査が行われてきた (Rignot et al., 1994 ; Cohen et al., 1995 ; Waring et al., 1995)。中でも航空機搭載型又は可搬型 Scanning lidar (Light detection and ranging) では、レーザービームを対象にスキャン照射し、その反射光を検出することにより森林の三次元構造情報を直接的に取得できる。そのため、これらの装置は森林の構造計測に積極的に活用されるようになってきた (Hyypä and Inkinen, 1999 ; Omasa et al., 2000, 2002, 2003, 2007a, 2007b ; Lefsky et al., 2002 ; Urano and Omasa, 2003 ; Maltamo et al., 2004 ; Næsset et al., 2004 ; Yoshimi et al., 2004 ; Hosoi et al., 2005 ; Hosoi and Omasa, 2006, 2007)。最近では地上におけるビーム径が数 10 cm 以下の小さなビーム径を持つ航空機搭載型 Scanning lidar システムを用い、地上におけるビーム径と地上におけるビーム間隔を同程度に設定することにより、地表の観測面を高い解像度でもれなくスキャンすることが可能となってきた (Omasa et al., 2000, 2003 ; Maltamo et al., 2004)。この装置を用いた場合、対象木はその頂点までもれなくスキャンされるため、高い精度の樹高計測が可能であることが報告されている (Omasa et al., 2000, 2003)。

こうしたスキャン漏れのない設定においては、高い樹高計測精度が得られる反面、飛行速度は低く抑えられており、計測効率の面で問題がある。計測効率を上げるために飛行速度を上げた場合、ビーム間隔が広がり、スキャン漏れによる樹高計測の精度の悪化が懸念される。また、飛行速度を上げるとともにビーム径を大きくすればスキャン漏れは防げるが、ビーム径の拡大に伴ってデータの解像度が下がり、樹高計測の精度に影響を及ぼす可能性がある。飛行速度を上げ、計測効率を向上させるためにはこうした計測条件の違いが精度に及ぼす影響を明らかにする必要があるが、これまで十分な検討はなされていない。

そこで本研究では、飛行対地高度や飛行速度、ビーム径の異なる 3 種類の計測条件で航空機 Scanning lidar による樹高計測を行い、地上からの直接計測より得たデータとの比較から樹高計測誤差を求め、計測条件の違いが樹高計測精度に及ぼす影響について検証した。その際、lidar データに含まれるスパイクノイズを除去するためのフィルタ処理の計測精度に及ぼす影響についても検証した。

これらの結果を基に、計測精度を保ちながら計測効率を上げるための条件について検討を行った。

## 2. 計測対象および方法

### 2.1 計測対象地域と実測データの取得

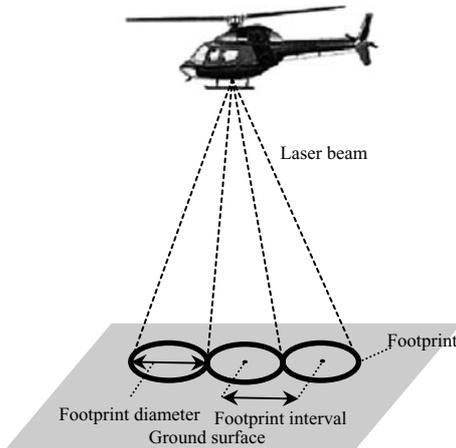
計測サイトは、東京都新宿区にある環境省国民公園新宿御苑園内とした。この公園内には、250 余種の針葉樹や広葉樹の高低木が 20,000 本栽培されている。このサイトにて、2001 年 11 月から約 1 週間の期間、地上から 11 種 166 本 (カツラ、クスノキ、クロマツ、ケヤキ、シラカシ、セコイアメスギ、タイサンボク、ヒマラヤスギ、プラタナス、メタセコイア、ユリノキ) の樹木の樹高 (樹冠の最高点の高さ) の実測を行った。計測にはポータブル型のレーザー距離計 (RIEGL 社、Lasertape FG21-HA、精度  $\pm 5$  cm) を使用し、三角測量の原理に基づき、同一樹木で 6 回の樹高計測を行い、その平均値を一本の樹木の樹高の実測値として 166 本分の樹高データを取得した。

### 2.2 航空機搭載型 Scanning lidar システムによる計測

本計測に使用した航空機搭載型の Scanning lidar システム (ALTM1225 special model, Optech and Aero Asahi, Japan) は、航空機の進行方向に対して直角方向にパルスレーザーを地表面へスキャン照射し、地面や樹木で反射して戻ってくる反射パルスの飛行時間を基に地表面との距離を計測し、地形や樹冠の三次元形状を取得することができる。本システムの反射パルス受光モードには、レーザー光が反射して最初に戻ってくるパルスを受光する First Pulse mode (FP-mode) と、レーザー光が反射して最後に戻ってくるパルスを受光する Last Pulse mode (LP-mode) の 2 種類ある。これら二つの受光モードを使用し、Table 1 に示すような三つの計測条件にて計測を行った。対地高度 300 m の設定では、地上部でのビーム径が 0.30 m であるため高い解像度を有し、さらに地上の対象を漏れなくスキャンできるよう、地上部でのビーム径 (Fig. 1 の Footprint diameter に相当) と地上部でのビーム間隔 (Fig. 1 の Footprint interval に相当) が同程度になるように配慮した。この設定は高精度の樹高計測を可能とする標準的な設定であるといえる。この設定に対し、計測効率を上げるための計測条件をさらに二つ設定した。一つは対地高度 500 m の設定で、ここでも高度 300 m の設定と同様に地上部でのビーム径と地上部でのビーム間隔を同程度にし、スキャン漏れを起こさないような配慮をしているが、高度が上がってビーム径が 0.50 m まで広がっており、その分飛行速度を対地高度 300 m の 1.5 倍 (90 km/h) ま

**Table 1** Measurement conditions of airborne scanning lidar systems

Performance characteristics	Platform		
	Aerospatiale AS350B	Aerospatiale AS350B	Cessna 208
Date	11/19, 2001	11/19, 2001	5/24, 2002
Flight altitude (m)	300	500	900
Flight speed (km/h)	60	90	230
Pulse repetition frequency (Hz)	25000	25000	25000
Scan frequency (Hz)	20	20	27
Scan angle (deg.)	20	20	18
Beam divergence (mrad)	1.0	1.0	0.2
Footprint diameter on the ground (m)	0.30	0.50	0.18
Footprint interval on the ground (m)	0.17 - 0.42	0.28 - 0.63	0.69 - 1.18



**Fig. 1** Illustration of relationship between footprint diameter and footprint interval on the ground surface.

で上げることが可能であった。もう一つの設定は対地高度 900 m の設定で、ここではスキャン漏れが発生することを承知の上で、飛行速度を上げることが第一の目的とし、飛行速度を 230 km/h まで上げ、スキャン回数も 27 Hz まで上げた。さらにビーム拡散度を 0.2 mrad まで絞り込み、地上部でのビーム広がりを抑える設定をとった。

こうして取得された距離データと 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)、航空機に搭載されている GPS 及び航空機の位置や姿勢を計測する IMU (Inertial Measurement Unit) のデータ、さらにはレーザーのスキャン角のデータから、地上のレーザー反射位置の 3 次元座標が得られた。このシステムの距離精度は基準位置からの相対座標で見た場合、15 cm 以内であった。

### 2.3 標高メッシュデータの作成

本 Scanning lidar システムによって得られたレーザー反射位置の 3 次元座標を基に、一定のメッシュ間隔で標高を表す標高メッシュデータ (Digital Elevation Model : DEM) を作成した。DEM のメッシュ間隔は、対地高度 300、500、900 m でそれぞれ 0.33、0.50、1.00 m とした。

FP-mode は、レーザー光が計測対象物に当たり反射し、最初に戻ってくるパルスを受信するモードであるため、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、そのメッシュ内に樹木が生育している場合には、そのメッシュ内で最も高い樹冠の標高をとらえている (Omasa et al., 2000)。

一方 LP-mode は、レーザー光が計測対象物に当たって反射し、最後に戻ってくるパルスを受信するモードであるため、パルス光が樹間を通して地面まで到達した場所では、地表面の標高を与える。そのため、このモードにより得られた標高メッシュデータ (LP-mode DEM) において、標高が特に低い場所を抽出し、補間処理を行うことにより、地表面の形状 (建築物も含まれる) を表す標高メッシュデータ (Digital Terrain Model : DTM) を得た。

さらに FP-mode DEM から DTM を減ずることによって、地表面の起伏の影響を除いた正味の樹冠高を表すメッシュデータ (Digital Canopy Height Model : DCHM) を求めた。

なお、FP-mode DEM および LP-mode DEM の算出には、TopScan 社のソフトを改良したものを用いた。また、DTM の算出には、そのソフトにより DTM を求めた後、二次元フーリエ変換を用いたローパスフィルタ処理により、ノイズの除去を行った。

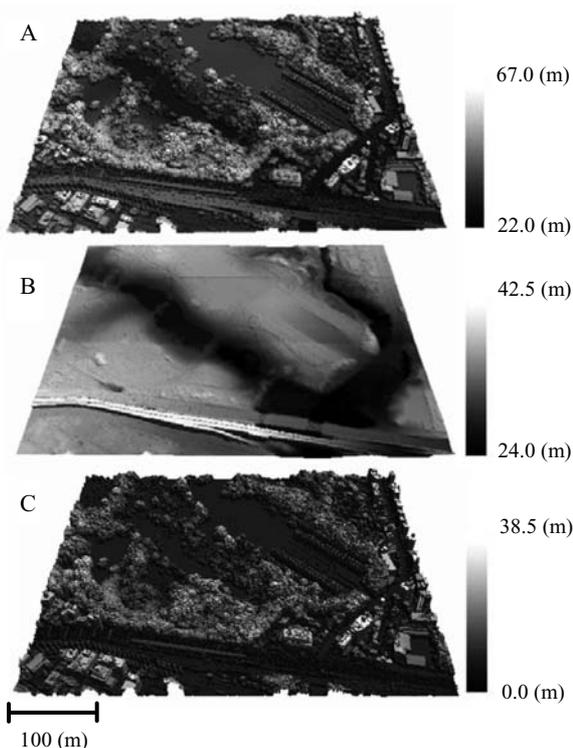
### 2.4 樹高の推定

地上での直接樹高計測と比較するため、地上計測を行った樹木に対応する DCHM 中の樹木の頂点 (メッシュデータ値) をモニターしながら対話型ソフトウェア (ERDAS IMAGINE) で目視により抽出した。その際、フィルタなしの場合と、データに含まれているスパイクノイズを除去するために 3 × 3 画素の平均化フィルタ及びメディアンフィルタで処理した場合との比較を行った。また、誤差要因を調べるため、樹種別の誤差評価も行った。

## 3. 結 果

### 3.1 標高メッシュデータ

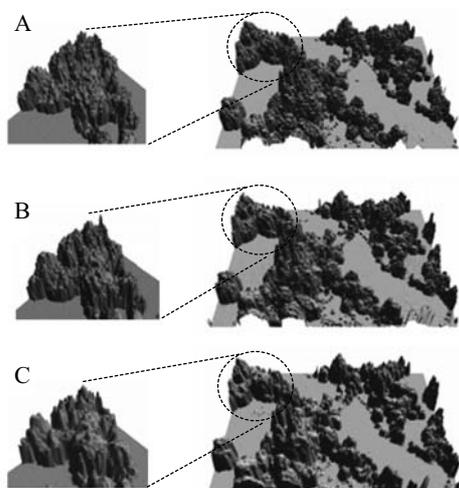
Fig. 2 は、対象地域の対地高度 300 m における標高メッシュデータを示す。この対地高度では 0.33 m という高い解像度でメッシュデータが作成されたため、FP-mode DEM (Fig. 2A) においては、建物や樹木の樹冠、中央に流れる川などが容易に識別することが可能であった。Fig. 2B の DTM は、LP-mode DEM において特に低い所を抽出し、補間処理を行い推定したもので、樹木が生育していたにもかかわらず、対象地域の地形図や地上調査の結果から判断して、対象地域の地形が正確に推定出来ていた。



**Fig. 2** Digital Elevation Models (DEMs) produced from lidar data at the 300 m flight altitude condition. (A) FP-mode DEM, (B) DTM (Digital Terrain Model), (C) DCHM (Digital Canopy Height Model).

このDTMをFP-mode DEMから引くことにより、樹冠の正味の高さを表すDCHMがFig. 2Cのように求められた。

Fig. 3は対地高度を変えて取得されたlidarデータから作成されたDCHMのうち、一部分を拡大して比較を行ったものである。Fig. 3より、対地高度が高くなるにつれ樹冠表面の細かな凹凸がなくなっていくことが確認され、画像の解像度が低下していくことが確認された。



**Fig. 3** Close up views of a part of DCHM produced from lidar data at each measurement condition. Flight altitudes of (A) 300 m, (B) 500 m, (C) 900 m.

### 3.2 樹高計測精度

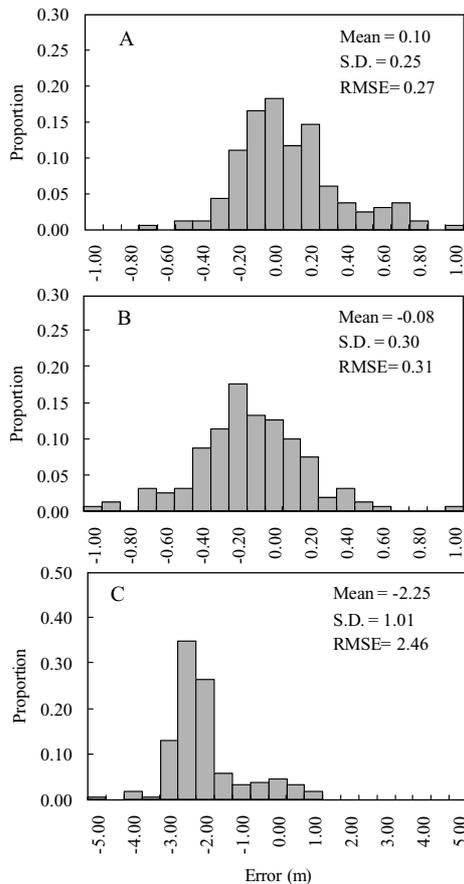
Table 2は、対地高度300、500、900 mのlidar計測データから作成されたDCHMより得られた対象木全体及び樹種ごとの樹高計測誤差を比較したものである。比較は二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error : RMSE) と平均誤差 (Mean error, Table 2の括弧内の値) により行った。Table 2より、樹種によらずいずれの高さにおいてもフィルタをかけない場合よりもかける場合の方が樹高を過小評価する傾向が大きくなることが分かった。特に対地高度900 mではフィルタをかけることによる過小評価が著しかった。

さらにTable 2により、フィルタ処理を行わなかった場合の対象木全体の精度を対地高度ごとに比較をしてみると、高度300、500、900 mの順にそれぞれ0.27、0.30、2.38 mのRMSE値であった。この結果より、対地高度500 mの計測条件でも、対地高度300 mの条件と同程度の精度で計測できることが分かった。他方、対地高度が900 mになるとRMSEが著しく大きくなることが分かった。またTable 2の平均誤差の値から、対地高度500、900 mの条件では対地高度300 mの条件よりも樹高を過小評価する傾向があることが分かった。こうした傾向は、樹種によらず広葉樹、針葉樹のどちらにも共通に見られた (Table 2)。

Fig. 4とFig. 5は広葉樹と針葉樹それぞれの樹高計測誤差のヒストグラムを対地高度ごとに比較した結果である。どちらの樹種でも対地高度300、500 mではRMSE及び標準偏差 (Standard Deviation : S.D.) は同程度であることが分かった。また、対地高度900 mではRMSE、標準偏差ともに他の対地高度よりも著しく大きかった。Fig. 4、Fig. 5の平均誤差の値 (ヒストグラムのピーク位置近傍) から、対地高度500、900 mでは対地高度300 mよりも過小評価の傾向があることが分かり、特に対地高度900 mではそ

**Table 2** Effects of filtering for spike noise reduction on tree heights estimation accuracy. The values in parenthesis show mean errors

Tree type	Flight altitude (m)	Root mean square error (Mean error) (m)		
		Filter type	3×3 Mean	3×3 Median
Total	300	0.27 (0.10)	0.33 (-0.14)	0.30 (-0.14)
	500	0.30 (-0.08)	0.60 (-0.45)	0.52 (-0.43)
	900	2.38 (-2.11)	4.63 (-4.22)	3.73 (-3.42)
Conifer	300	0.21 (0.05)	0.39 (-0.27)	0.31 (-0.18)
	500	0.16 (-0.06)	0.65 (-0.55)	0.47 (-0.36)
	900	0.43 (-0.20)	1.70 (-1.46)	1.50 (-1.26)
Broadleaf	300	0.27 (0.10)	0.32 (-0.08)	0.29 (-0.14)
	500	0.31 (-0.08)	0.61 (-0.44)	0.53 (-0.43)
	900	2.46 (-2.25)	4.77 (-4.41)	3.83 (-3.57)

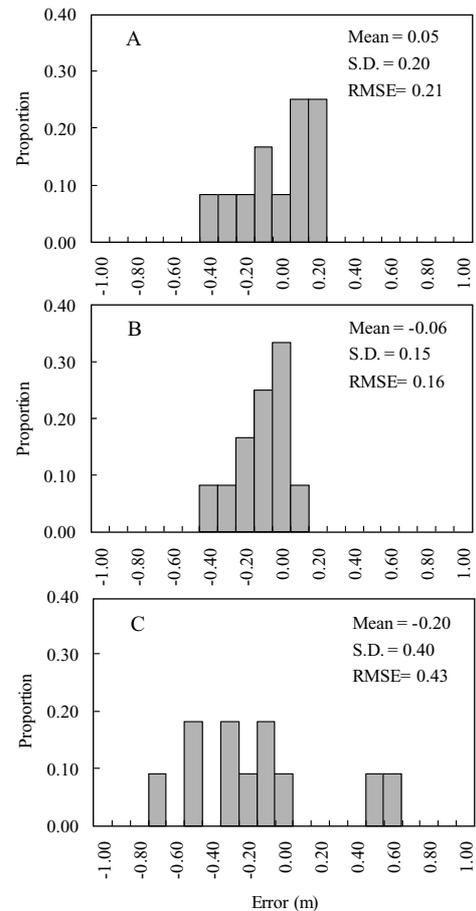


**Fig. 4** Error distribution of lidar-derived tree heights estimation for broad-leaved trees at each measurement condition. Flight altitudes of (A) 300 m, (B) 500 m, (C) 900 m.

の平均値が大きくマイナス側にシフトしていることが確認された。さらに Fig. 4 と Fig. 5 の比較から樹種間で誤差比較を行った場合、広葉樹の方が針葉樹よりも RMSE、標準偏差ともに大きかった。

#### 4. 考 察

航空機搭載型 Scanning lidar により取得されたデータに含まれるスパイクノイズの要因としては、空中の浮遊物や雲などにレーザー光線が反射する場合や、レーザーが対象に対して多重反射して計測長が長くなるということが報告されている (Fujii, 2008)。したがって計測時の環境条件によって、データに含まれるスパイクノイズの量も異なってくるものと考えられる。本実験ではスパイクノイズ除去のためのフィルタを使用しない場合が最も高い精度であったということは、作成した DCHM には、大きな誤差をもたらすスパイクノイズはほとんど含まれていなかったものと考えられ、上述したようなスパイクノイズを発生させる要因は本計測ではほとんどなかったものと考えられる。スパイクノイズが含まれていない状態で Mean フィルタや Median フィルタをかけたために、本



**Fig. 5** Error distribution of lidar-derived tree heights estimation for coniferous trees at each measurement condition. Flight altitudes of (A) 300 m, (B) 500 m, (C) 900 m.

来保存されるべき樹木の頂点の値が周囲の画素との平均や Median に置き換えられてしまい、頂点が平滑化され、過小評価が生じたものと考えられる。特に、もともと解像度の高くない高度 900 m の条件では、平滑化の影響が誤差に大きく影響したものと考えられる。

平均誤差の比較から、対地高度 500 m では対地高度 300 m よりも全体として樹高を過小評価する傾向があったが、これは 500 m が 300 m よりも地上でのビーム径が大きく、解像度が低いため、樹高を低く見積もったためと考えられる。しかし RMSE の値でみれば、両対地高度はほぼ同程度の精度であるといえる。したがって、スキャン漏れのない設定をとることにより、地上でのビーム径 0.5 m 程度までは対地高度 300 m (地上でのビーム径 0.3 m) とほぼ同等な精度で樹高計測が可能であり、結果として、飛行速度を対地高度 300 m の場合の 1.5 倍 (90 km/h) まで上げ、精度を犠牲にせずに計測時間を短縮することが可能であることが分かった。

対地高度 900 m では、飛行速度が 230 km/h と計測効率は極めて高い設定だが、地上部でのビームとビームの間

隔が地上部でのビーム径よりも広く (Table 1 参照)、スキャン漏れが生じていた。そのため樹木の頂点にビームが当たらず、過小評価が大きくなったものと考えられる。こうしたスキャン漏れによる過小評価は既往の論文でも報告されている (Næsset et al., 2004)。この結果から、樹高計測の精度を保ちつつ飛行速度を上げて計測効率を高めるためには、スキャン漏れのない設定をとることが重要であることが確認された。

広葉樹と針葉樹の誤差比較において、広葉樹の方が針葉樹より RMSE および標準偏差ともに大きいことが確認された。この要因としては、lidar の計測誤差というより、地上での直接計測データ自体に含まれている誤差が考えられる。針葉樹の樹冠形状は三角錐状で樹木の頂点が同定しやすいのに対し、広葉樹では樹冠形状は楕円体状で樹木の頂点が針葉樹より認識しにくく、直接計測時の頂点位置同定の際のずれが広葉樹の直接計測の誤差として含まれているものと考えられる。頂点が認識しにくい広葉樹の場合は 1 本の樹木の計測数を増やす等、直接計測に含まれる誤差を低減することも lidar 計測の誤差評価には重要となる。以上の理由により広葉樹と針葉樹で RMSE 値に差はあったが、Table 2 及び Fig. 4、5 の結果から、レーザービームのスキャン漏れを無くした設定をとることにより、どちらの樹種でも樹高計測の精度を保ちつつ、飛行速度を上げて計測効率を高めることが可能であることが確認された。

## 5. おわりに

本研究では航空機搭載型 Scanning lidar を用いて飛行速度、対地高度、ビーム径などの計測条件を変えた樹高計測を行い、計測条件が樹高計測精度に与える影響を検証し、計測効率を向上させるための計測条件について検討した。その結果、飛行速度を上げる際には、地上部でのビーム径と地上部でのビームの間隔を同程度にし、スキャン漏れをなくすような設定をとることが計測精度を維持するために重要であることが示された。この設定をとった場合、地上部ビーム径が 0.5 m 程度までは高い樹高計測精度を維持できることが示された。またスパイクノイズ除去を目的とした各種フィルタ処理については、フィルタをかけることでかえって精度の悪化を招く場合があり、メッシュデータに含まれるスパイクノイズの量や画像の解像度によってフィルタを適用すべきか否か判断する必要があると考えられる。

スキャン漏れのない設定をとり、飛行速度をさらに上げて計測効率を向上させようと考えた場合、計測精度維

持の観点からビーム径の拡大ではなく、ビーム径を小さく保ったまま、ビームの発射回数を増加させることが望ましい。最近では装置の性能向上により、ビームの発射回数を 100,000 Hz、スキャン回数を 70 Hz まで上げられる lidar システムも使用可能になってきている。今後は本実験での知見をもとにこうした装置を活用していくことにより、計測精度と計測効率を高い次元で両立させる計測が可能になるものと考えられる。

## 引用文献

- Cohen, W. B., Spies, T. A. and Fiorella, M., 1995 : Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U.S.A. *Int. J. Remote Sens.*, **16**, 721-746.
- Fujii, N., 2008 : Noise reduction. In : *The airborne laser measurement from basic to application*- (ed. by Saito, K.). Association of Precise Survey & Applied Technology, Tokyo, pp. 97. (藤井紀綱, 2008 : ノイズ除去. In 図解航空レーザー計測 - 基礎から応用まで -, 監修 齊藤和也, 日本測量技術調査協会, pp. 97.)
- Hyypä, J. and Inkinen, M., 1999 : Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogramm. J. Finland*, **16**, 27-42.
- Hosoi, F. and Omasa, K., 2006 : Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE Trans. Geosci. Remote*, **44**, 3610-3618.
- Hosoi, F. and Omasa, K., 2007 : Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf-area-density profile using 3D portable lidar imaging. *J. Exp. Bot.*, **58**, 3464-3473.
- Hosoi, F., Yoshimi, K., Shimizu, Y. and Omasa, K., 2005 : 3-D measurement of trees using a portable scanning lidar. *Phyton-Ann. Rei. Bot. A.*, **45**, 497-500.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G. and Harding, D. J., 2002 : Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*, **52**, 19-30.
- 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. *Can. J. Forest Res.*, **34**, 1791-1801.
- 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. *Scand. J. Forest Res.*, **19**, 482-499.
- Omasa, K., Akiyama, Y., Ishigami, Y. and Yoshimi, K., 2000 : 3-D remote sensing of woody canopy heights using a scanning helicopter-borne lidar system with high spatial resolution. *J.*

- Remote Sens. Soc. Jpn.*, **20**, 394-406.
- Omasa, K., Hosoi, F. and Konishi, A., 2007a : 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *J. Exp. Bot.*, **58**, 881-898.
- Omasa, K., Hosoi, F., Uenishi, T. M., Shimizu, Y. and Akiyama, Y., 2007b : Three-dimensional modelling of an urban park and trees by combined airborne and portable on-ground scanning LIDAR remote sensing. *Environ. Model. Assess.*, doi : 10.1007/s10666-007-9115-5.
- Omasa, K., Qiu G. Y., Watanuki, K., Yoshimi, K. and Akiyama, Y., 2003 : Accurate estimation of forest carbon stocks by 3-D remote sensing of individual trees. *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 1198-1201.
- Omasa, K., Urano, Y., Oguma, H. and Fujinuma, Y., 2002 : Mapping of tree position of *Larix leptolepis* woods and estimation of diameter at breast height (DBH) and biomass of the trees using range data measured by a portable scanning lidar. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, **22**, 550-557.
- Rignot, E., Way, J., Williams, C. and Viereck, L., 1994 : Radar estimates of above ground biomass in boreal forests of interior Alaska. *IEEE Trans. Geosci. Remote*, **32**, 1117-1124.
- Urano, Y. and Omasa, K., 2003 : Error estimation about the biomass of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) woods measured by a portable scanning lidar. *Eco-engineering*, **15**, 79-85.
- Waring, R. H., Way, J. B., Hunt, E. R., Morrissey, L., Ranson, K. J., Weishampel, J. F., Oren, R. and Franklin, S. E., 1995 : Biologists toolbox-imaging radar for ecosystem studies. *BioScience* **45**, 715-723.
- Yoshimi, K., Hosoi, F., Shimizu, Y., Yamada, H. and Omasa, K., 2004 : 3D measurement of terrain and woody canopy height using portable scanning lidar. *Eco-Engineering*, **16**, 203-207.