

Study on the classification of typical tree species in rural satoyama forests based on seasonally changed leaf color and canopy height by aerial survey

瀬戸島, 政博

<https://doi.org/10.15017/459025>

出版情報 : Kyushu University, 2005, 博士 (芸術工学) , 論文博士
バージョン :
権利関係 :



第4章 時系列な樹冠高変化から落葉広葉樹林の落葉推移・階層構造を把握するための基礎的研究

4.1 概要

森林域で面的な情報として計測ニーズの高いものに地盤高と樹高を挙げることができる。これらの計測には航空機搭載型レーザスキャナが有効とされ、数多くの研究が発表されている(末田ら, 1998; 田村ら, 2000; 大政ら, 2000)。末田ら(1998)は、航空機搭載の赤外線レーザ測距儀で計測した地表面植生の縦断面にフーリエ解析を施し、広域にわたる森林の構造を解析して現存量を推定している。この研究においては地表面推定の精度向上が今後の課題として挙げられている。田村ら(2000)は、航空機搭載型レーザスキャナを用いて北海道大学苫小牧演習林内で樹高計測の実験をしている。その結果、計測誤差の許容幅を1mとして、レーザスキャナデータと実測データの比較で全実測ポイント89点のうち75%にあたる67点が許容範囲内にあり、広範な樹高分布を良好な精度で測定することが可能であることを報告している。さらに、大政ら(2000)は、ヘリコプター搭載型レーザスキャナを用いて樹冠高の3次元計測を実施している。この研究では、樹冠高が地上計測値との誤差の大きい針葉樹でも47cm以内、RMS誤差で19cm以内の値であったことが報告されている。

このような航空レーザスキャナ(航空機搭載型およびヘリコプター搭載型のレーザスキャナを含める)による樹高計測においては、航空レーザスキャナで取得したデータから作成される数値表層モデル(Digital Surface Model: DSM)と数値標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)による高さ方向の変化量、すなわち両者の差分量が求める樹高となる。DSMは樹木の樹冠部(梢端部あるいは樹頂部を含む)表面の高さ(樹冠高)であり、DEMは樹木の根元の高さ(地盤高)に相当し、樹冠高と地盤高との差分が樹高になる。この場合、航空レーザスキャナから照射したレーザ光は、樹冠部に当り多くの反射光を航空機内の受信装置で受光できるためDSMは面的に比較的均一な精度で作成できる。

一方、DEMは樹冠と樹冠とのギャップ部や落葉により地表面が露出しているような場合には地盤高を精度よく表すことになるが、樹木が厚く被覆する箇所ではフィルタ処理を施すことで、取得された航空レーザスキャナデータより建物や樹木表面で反射したポイントを除去し、地表面に到達したと考えられるデータのみを抽出していくことになる。したがって、DEMについては計測条件や計測地域の地形特性などによってその精度が左右される要素があることを否めない。それに比べて、DSMは樹木の樹冠高を面的に比較的均一な精度で捉えることが可能である。ただし、航空レーザスキャナで計測される樹高は現地で実測し、求められる樹高と若干異なる。すなわち、現地で計測できる樹高は樹木の根元から梢端までの高さ(樹頂高)である。一方、航空レーザスキャナで計測される樹冠高は、必ずしも樹木の梢端とは一致せず、樹冠部の高さとなる。したがって、レーザ光のスポットが当たった箇所の樹冠の高さとなり、平均的な樹冠高といえることができる。そのために、その高さはほとんどの場合に樹頂高>樹冠高となる。

落葉期間中に観測した航空レーザスキャナで取得したデータから作成した DSM は、落葉前であれば樹葉に被覆されたその部分の高さ(樹冠高)を表すが、落葉の進行とともに樹葉の被覆率が低下し、落葉樹下層に繁茂する常緑樹低木の樹冠部や草本類表面の高さ、あるいは落葉樹の根元の高さ(地盤高)を表すことになる。落葉期間中の DSM の変化を知ることによって樹冠高の変化が捉えられ、さらにその変化から落葉の推移パターンや階層構造を把握することができる。

このような考え方によって、落葉前後の期間(落葉前、落葉中、落葉後)を通じて航空機搭載型レーザスキャナによるデータを取得し、それらから作成した DSM の差分量に基づき、落葉推移パターン(例えば、比較的早い時期に落葉する樹種や落葉が遅い樹種など)や落葉広葉樹高木層内の階層構造(落葉広葉樹林の下層に繁茂する常緑広葉樹低木や草本類などの分布)を捉えることができる。

今後とも、このような研究を進めていくためには、航空機搭載型レーザスキャナで取得したデータから作成される DEM と DSM の精度検証が重要とされる。DEM の計測精度が不十分であれば、時系列な DSM の変化から捉えられる樹冠高の変化が把握できたとしても、林床の状況(例えば裸地で露出した地表面であるのか、草本類で被覆された箇所であるのかなど)が十分に判断できないことになる。したがって、落葉の推移パターンは把握できても落葉広葉樹高木林内の階層構造を正確に把握できない。

また、時系列な DSM の変化から落葉の推移パターンや落葉広葉樹林内の階層構造を把握していくには、航空機搭載型レーザスキャナデータから作成した DSM による樹冠高と実際に現地計測された樹頂高(梢端の高さで実測の地盤高に実測樹高を加えた高さ)とにどの程度の差異を生じているかを検証しておく必要がある。

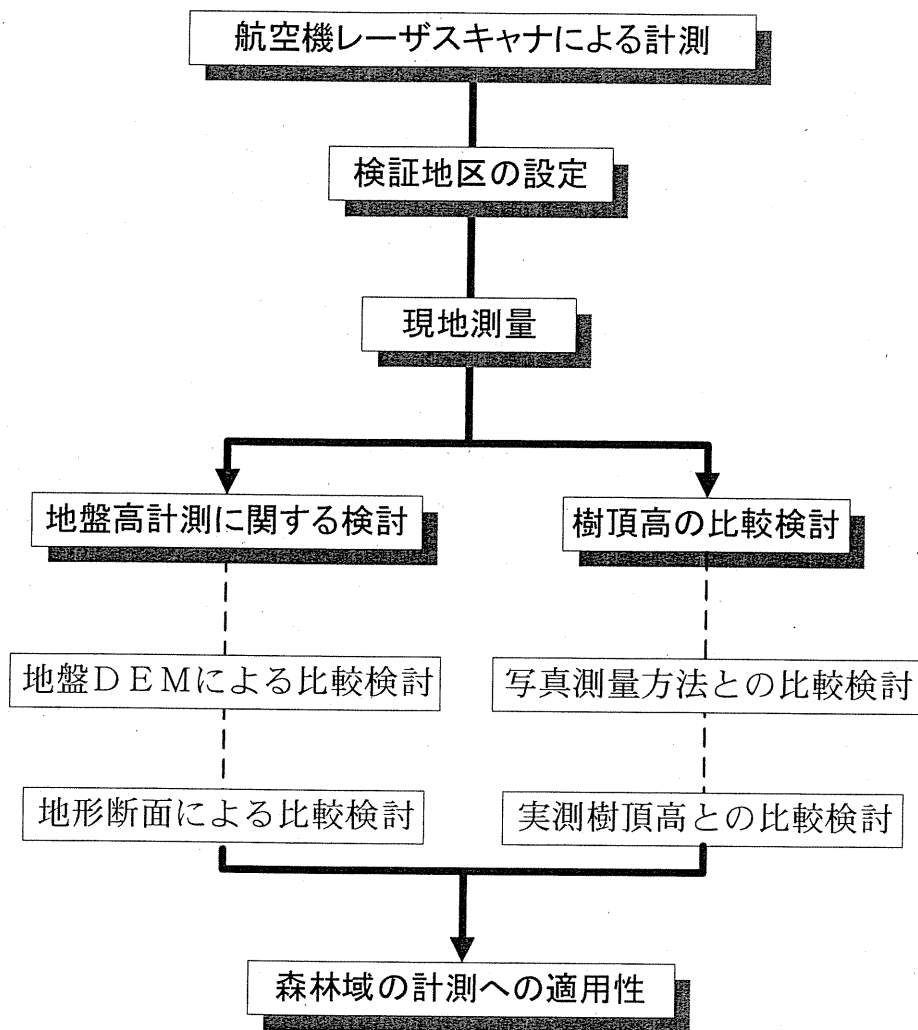
そこで、本章では里山林の重要な構成要素である落葉広葉樹林の細分化にあたり、落葉推移パターンおよび階層構造を利用していく際、その基本的な情報となる時系列に観測された航空機搭載型レーザスキャナデータから作成した DEM および DSM の精度を、現地で実測した地盤高および樹頂高との比較から検証した。

4.2 研究の構成

本研究は、航空機搭載型レーザスキャナによる地盤高計測に関する検討と樹頂高計測に関する検討から構成される(図-4.1 参照)。

4.2.1 航空機搭載型レーザスキャナによる地盤高把握に関する検討

ここでは、航空機搭載型レーザスキャナによる取得データからどの程度の精度内で地盤面の測定が可能かについて検討することを目的とした。すなわち、取得データにフィルタ処理を加えて地盤面を推定し、その結果を現地測量結果と比較照合することで航空機搭載型レーザスキャナによる地盤面計測の適用性について検証した。ここで用いたフィルタ処理は、取得されたレーザスキャナデータより建物や樹木表面で反射したポイントを除去し、地表面に到達したと考えられるデータのみを抽出するものである(武田ら, 2001)。フィル



図－4.1 研究構成

タ処理の概念を図－4.2 に示す。具体的には，統計処理により図中に示すビルや樹木などを除去し，周囲に比べて相対的に標高が低いポイントを抽出して，補間により地盤面（図中の破線）を想定している。

なお，航空機搭載型レーザスキャナによる取得データから作成した DEM を「LSDEM」と呼称し，現地測量による DEM を「実測 DEM」と呼称した。

4.2.2 航空機搭載型レーザスキャナによる樹冠高把握に関する検討

航空機搭載型レーザスキャナで計測できる樹冠高について，どの程度の精度で計測されているかを把握する目的から，その計測結果と従来からの写真測量手法（2000 年 11 月 5 日撮影の縮尺 1/10,000 カラー航空写真、Bentley Systems 社製 MicroStation およびオルソ

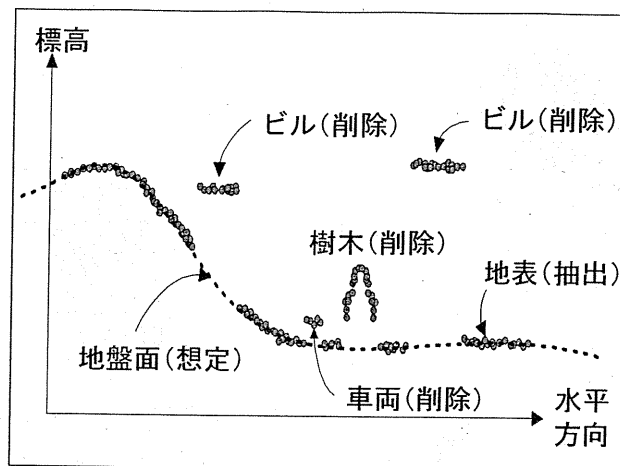


図-4.2 フィルタ処理の概念 (武田ら, 2001)

作成用モジュール SYSIMAGE を使用) に基づく樹冠高の計測結果 (航空機搭載型レーザスキャナによるものを「LSDSM」、写真測量手法によるものを「写真 DSM」とした) を比較照合することで、航空機搭載型レーザスキャナによる樹冠高計測への適用性について検討した。適用性については、ST 別の地形断面上での実測樹頂高との比較において、斜面形状の違いや構成樹種の違い、(落葉広葉樹林、常緑・落葉混交林、スギ人工林) による樹冠高の計測結果への影響などについて検討した。

4.3 検証地区設定とその考え方

本研究では、独立行政法人森林総合研究所多摩森林科学園(以下、多摩森林科学園)内に検証地区を設定した。多摩森林科学園は、高尾山に連なる山塊の東端に位置し、標高 200m 内外の丘陵地からなる約 57ha の地域である。これらの地域のうちから、①樹種の異なる樹林タイプ (スギ人工林、落葉広葉樹林、常緑樹・落葉樹混交林)、②異なる地形タイプ (急傾斜、緩傾斜、平坦面) を考慮し、検証地区を次のように設定した (図-4.3 および図-4.4)。

- ST-1 : スギ壮齡林からなる密生林が立地する急傾斜地で、地形断面の比較には最大傾斜方向に概ね直交する林道沿いに 1 測線 (A-B 断面) 設定した。
- ST-2 : サクラ保存林として多種のサクラ高木が植林された傾斜地である。植栽間隔は比較的疎で、林内は鑑賞などの目的から除間伐や剪定、除草がなされ、管理された落葉広葉樹高木林である。地形断面の比較には最大傾斜方向に 1 測線 (A-B 断面) 設定した。なお、この検証地区は、第 5 章の解析対象林としても選定した (後述, 5.4.1)。
- ST-3 : 常緑・落葉混交の壮齡林が立地し、河川沿いの平坦地と急崖部から形成されている。地形断面の比較には、平坦地を 1 測線 (A-B 断面) 設定した。

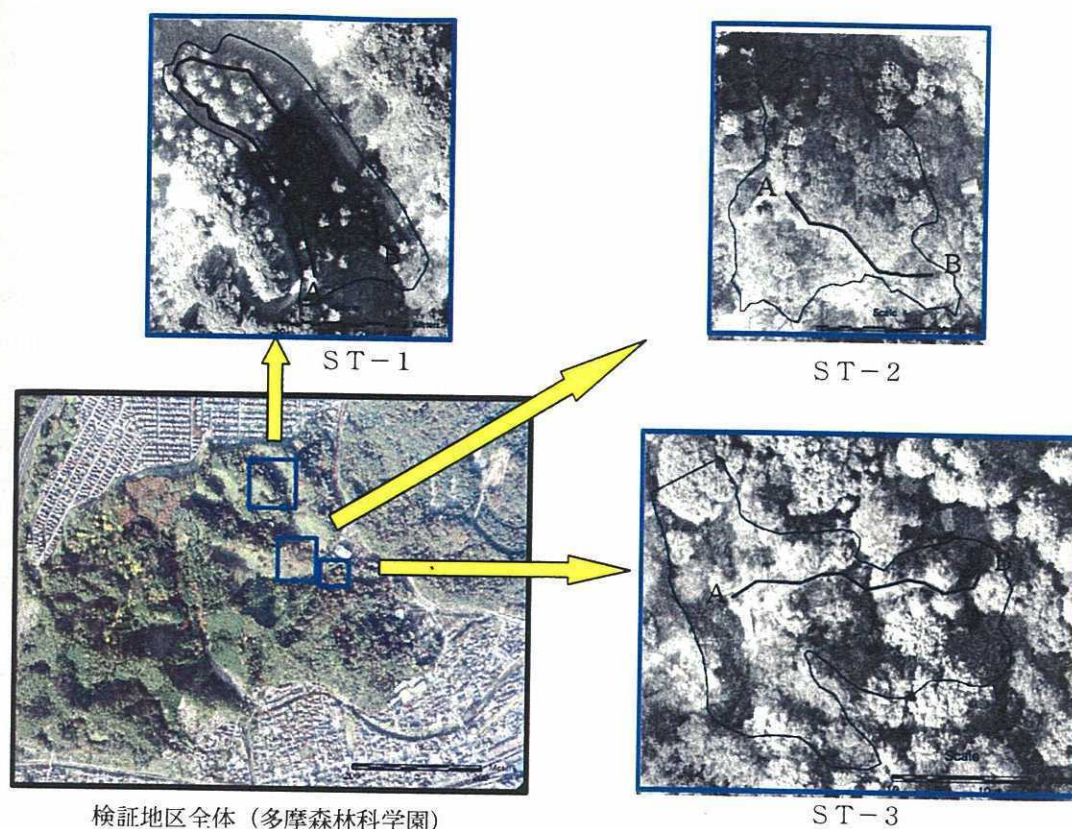


図-4.3 多摩森林科学園内の検証地区の位置 (A-Bは地形断面)



ST-2 落葉広葉樹(サクラ保存林)密生林の傾斜地



ST-1 スギ密生林で急傾斜地



ST-3 常緑落葉広葉樹密生林で平坦地

図-4.4 多摩森林科学園内の検証地区

4.4 使用センサと取得データ

4.4.1 使用した航空機搭載型レーザスキャナ

使用した航空機搭載型レーザスキャナは、RAMS (Ener Quest Systems 社製) で、レーザスキャナ部からは近赤外線レーザが 15KHz のパルスレートで発信され、対象物に当たって反射してくるレーザ光を受信する。観測高度は 300~3,000m まで可能で、スキャナの走査角は 5° ~ 45° , 走査幅は 80~2,000m まで可変である。スキャナの測定精度は、水平方向が $\pm 30\text{cm}$, 垂直精度 (高さ精度) が $\pm 15\text{cm}$ である。このスキャナでは照射した各レーザに対して反射パルスを最大 5 パルスまで記録できる。また、 $4,096 \times 4,096$ ピクセルのモノクロデジタルカメラも併せて搭載しており、レーザデータの取得と同時に画像データを取得することができる。計測地点や撮影地点等の座標情報は、システムに組み込まれている GPS と IMU により 200Hz で記録される。このデータによってデジタルカメラの傾きを計算することができ、地上での対空標識設置および標定を経ずにオルソフォトの作成が可能である。

4.4.2 取得データ

航空機搭載型レーザスキャナの計測は、表-4.1 に示す計測諸元に従って、2000 年 10 月 11 日 (落葉前)、2001 年 2 月 12 日 (落葉後)、2002 年 10 月 4 日 (落葉前) に実施した。計測コースを図-4.5 に示す (本研究では検証箇所のみデータを使用)。

表-4.1 使用した航空機レーザスキャナの計測諸元

条 件	設 定 値
データ取得高度 (m)	2500
飛行速度 (km/h)	200
スキャニング角度 ($^{\circ}$)	15
スキャニング幅 (m)	650
デジタルカメラ (mm)	90

上記の計測諸元でデータ取得した場合、一度にスキャンできるエリアは幅約 650m であるため、3 コースに分けて計測し、この時のレーザ照射密度は約 2m 四方に 1 レーザとなる。

レーザスキャナを用いた森林域の計測では、ヘリコプターを用いて低高度から低速で観測することによりレーザの照射密度を高めて高精度に計測する方法(大政ら, 2000)や、レーザのフットプリントのサイズを大きくして間隙なく観測することにより地盤面と樹頂 (梢端) を確実に捉える方法(Means, J. E. et al, 1999)が検討されている。本研究で使用したレーザスキャナは広域の地形測量を目的とした汎用型のもので、これらの事例のように森林計測に適した特性を必ずしも有していないが、このような汎用性や効率性を有するレーザ

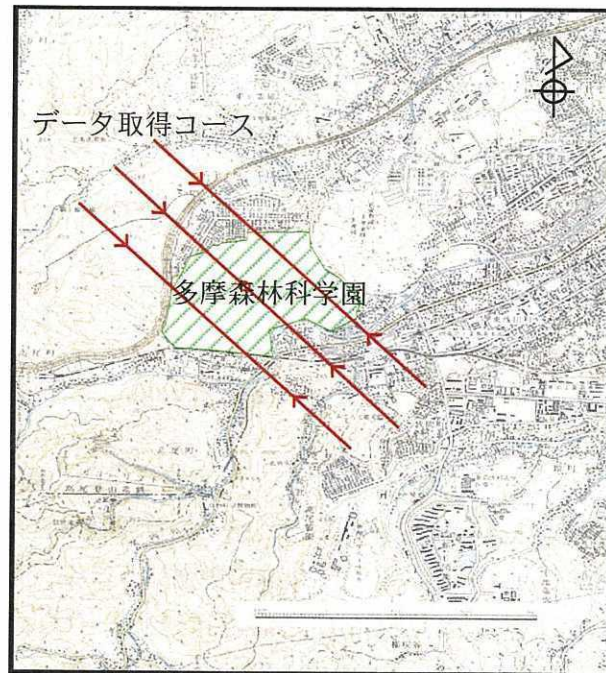


図-4.5 航空機レーザスキャナの計測コース

スキャナの森林計測への適用性を明らかにするため、前述の計測条件を採用した。

現地地形測量は、地表面が最もよく露出する厳冬期（2001年2月8～9日）に実施した。測量にあたっては、地形面が急激に変化している傾斜変換点で約1m間隔、地形の変化が緩やかな地点では約2m間隔で計測した（図-4.6）。なお、地形計測にはトプコン社製のトータルステーション（GPT-1002）を用い、また樹高計測にはティンバーテック社製の樹高計（VERTEXⅢ）を使用した（表-4.2）。

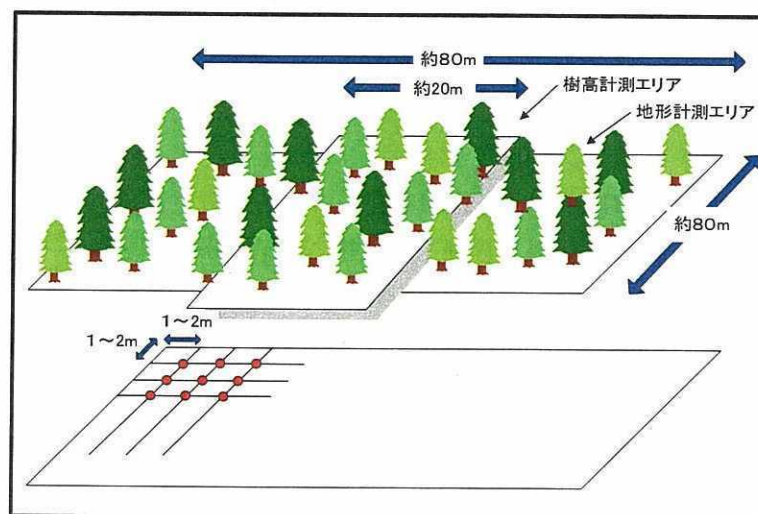


図-4.6 現地計測方法

表-4.2 使用した現地測量機器一覧

GPT-1002 (株) トプコン	望遠鏡分解能力	2.5"
	測距部 (プリズム)	6,000m
VERTEXⅢ (株) ティンバーテック	測定距離	30m
	測角範囲	-55°~+85°
	距離分解能	1 cm
	角度分解能	0.1°
	高さ分解能	10cm

4.5 地盤高の把握に関する考察

ここでは、多摩森林科学園に設定した ST-1~3 の検証地区内について、平面的分布および特定の地形断面における航空機搭載型レーザスキャナによる DEM (LSDEM) と実測による DEM (実測 DEM) を比較照合した。LSDEM および実測 DEM は、2m 間隔のものを 1m 間隔に補間した上で両者を比較照合した。とくに、構成樹種の違いおよび斜面形状の違いなどによる両 DEM の整合性を考察した。

また、地形断面上には ST-1~3 の検証地区内に設定した測線 (前掲の図-4.3 を参照) 沿いに LSDEM と実測 DEM から求めた断面形状の整合性を分析した。

図-4.7 には、多摩森林科学園全体のカラー航空オルソ画像を示すとともに、航空機搭載型レーザスキャナによる樹冠高 (LSDSM) のカラー陰影画像を図-4.8 に、フィルタ処理によって求めた地盤高 (LSDEM) のカラー陰影画像を図-4.9 に、樹冠高と地盤高の差分から求められた樹高を図-4.10 に示す。

4.5.1 検証箇所(ST)別にみた比較検討

表-4.3 には、落葉前・後に観測した航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM と実測 DEM との誤差を示す。

(1) ST-1 での比較検討

落葉前の LSDEM (図-4.11(1)) では、全体的にみると LSDEM と実測 DEM の差が 1m 以内の領域が多く、その比率は 75% に相当し、両者は比較的整合している。しかし、地区北端部では LSDEM が実測 DEM よりやや高めの値を示し、中央部では LSDEM が実測 DEM よりやや低い値を示すなど、一部で差異がみられる。このうち、北端部は壮齢の大径木が密生している箇所であり、その影響でレーザ光が地表面まで到達していないため、LSDEM が高めに算定されたものと考えられる。また、この範囲にはアオキ (*Aucuba japonica*) などの常緑広葉樹が低木層を優占し複層林を形成しており、その影響を受けた可能性もある。さらに、この箇所は一次谷の谷頭部に相当し凹地が形成されており、フィルタ処理後の数少ない測定点の補間により作成された LSDEM では、平面に近い地形表現と

なるため、実測 DEM に比べて高い値を示したと考えられる。一方、地区中央部では幼齢林が密生しているために、地表面に到達する測定点が少ない。さらにフィルタ処理により多くの測定点が除去されてしまうため、微地形が十分に表現できていない。現地を詳細にみると、この範囲は小さな尾根で緩やかな凸地形を示している。数少ない測定点から作られる LSDEM では、平面に近い地形表現となり、凸地形を示すこの範囲では、実測 DEM に比べ低めの値を示すと考えられる。

落葉後(2001.2.12 観測)の航空機搭載型レーザスキャナデータを用いた場合の LSDEM と実測 DEM の比較結果を表-4.3 および図-4.11(2)に示す。当然のことながら、落葉後に観測した航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM の方が植被の影響が少なく計測精度がよい。すなわち、落葉後に観測した航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM と実測 DEM を比較した場合、実測した 279 点での RMSE が 0.9m であり、両 DEM の差が 1m 以内にある地点が実測箇所の 93%に相当していた(前掲、表-4.3)。これは、落葉前に観測した航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM に比較して RMSE で 2 倍に精度が向上している。加えて、実測 DEM との乖離が 1m 以内の箇所が、落葉前に比べて落葉後の LSDEM では 20%ほど向上していた。



図-4.7 カラー航空オルソ画像

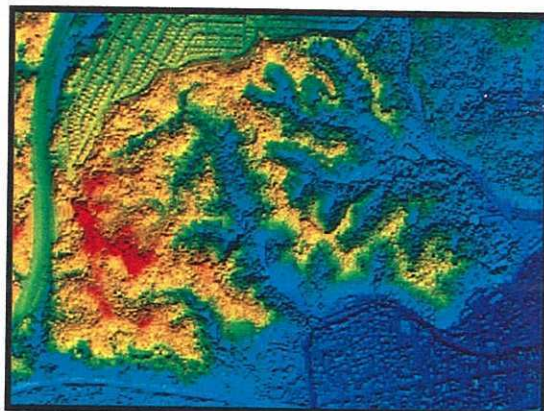


図-4.8 樹冠高(DSM)のカラー陰影画像

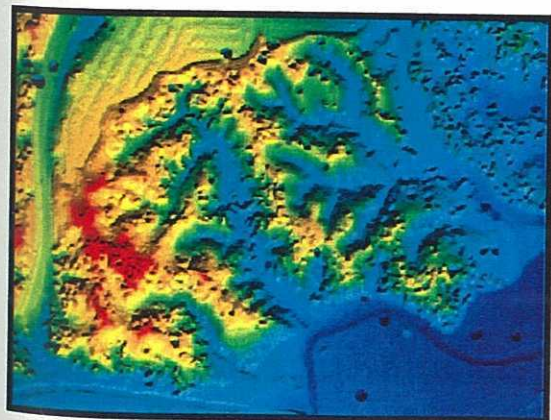


図-4.9 地盤高(DEM)のカラー陰影画像

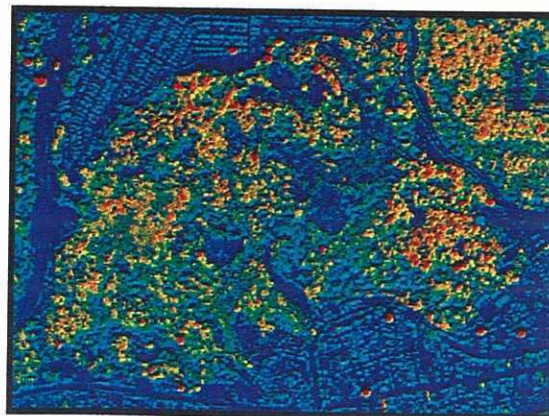
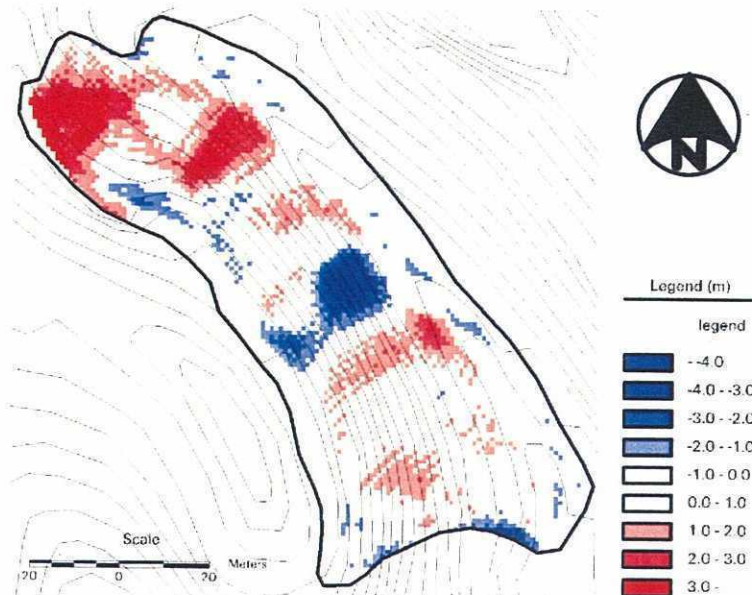


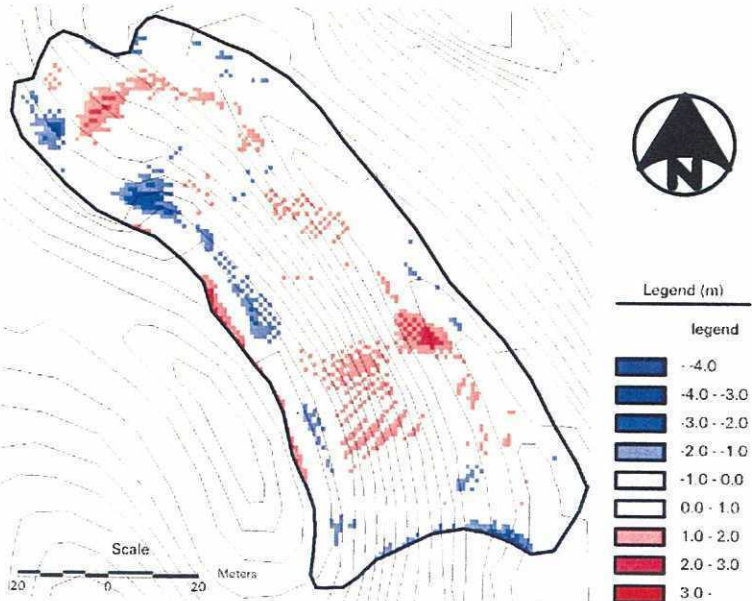
図-4.10 樹高のカラー陰影画像

表-4.3 落葉前・後の LSDEM と実測 DEM の誤差

検証 箇所	測定 点数	落葉前(2000.10.11)の LSDEM		落葉後(2001.2.12)の LSDEM	
		RMSE(m)	1m 以内の比率(%)	RMSE(m)	1m 以内の比率(%)
ST-1	279	1.950	74.7	0.886	93.0
ST-2	526	0.496	94.1	0.486	97.9
ST-3	314	4.352	60.6	0.669	93.6



(1) 落葉前の航空機搭載型レーザスキャナによる DEM



(2) 落葉後の航空機搭載型レーザスキャナによる DEM

図-4.11 落葉前・後の LSDEM と実測 DEM の相違箇所

(ST-1: スギ密生林で急傾斜地)

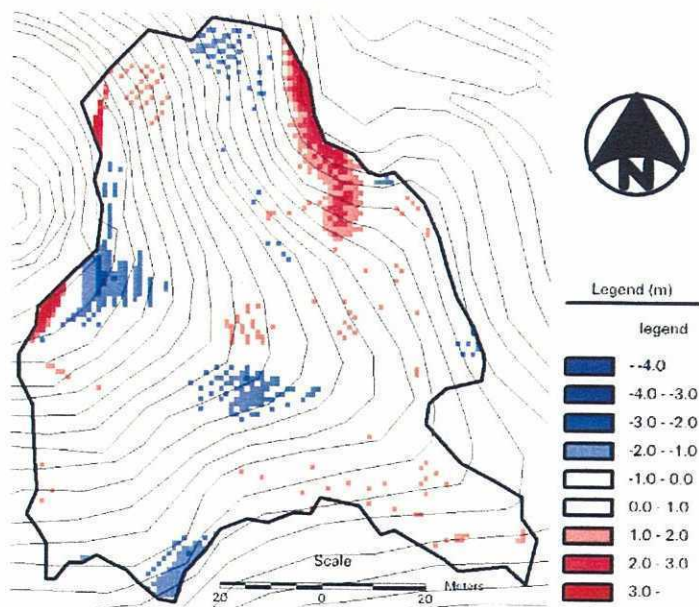
(2)ST-2 での比較検討

落葉前の LSDEM (図-4.12(1)) では、落葉前に観測した航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM と実測 DEM の差はほぼ全域(約 94%)で 1m 以下であり、全実測点の RMSE は 0.5m 以下で 3 ST の中で最もよく一致している(前掲、表-4.3)。全体に落葉広葉樹の密生林(サクラ保存林)であるが、ST-1、3 に比べて相対的に樹冠密度は低く、レーザ光が地表面まで届きやすいこと、緩斜面でありフィルタ処理により間引かれたデータでも地形が十分表現できたためと考えられる。しかし、地区北端部や中央部の一部に LSDEM と実測 DEM が相違する箇所がみられる(前掲、図-4.12(1))。これらの箇所には大径木が分布し、フィルタ処理により多くの測定点が間引かれていること、斜面末端の急崖部にあたり複雑な地形を示していることなどが原因として挙げられる。

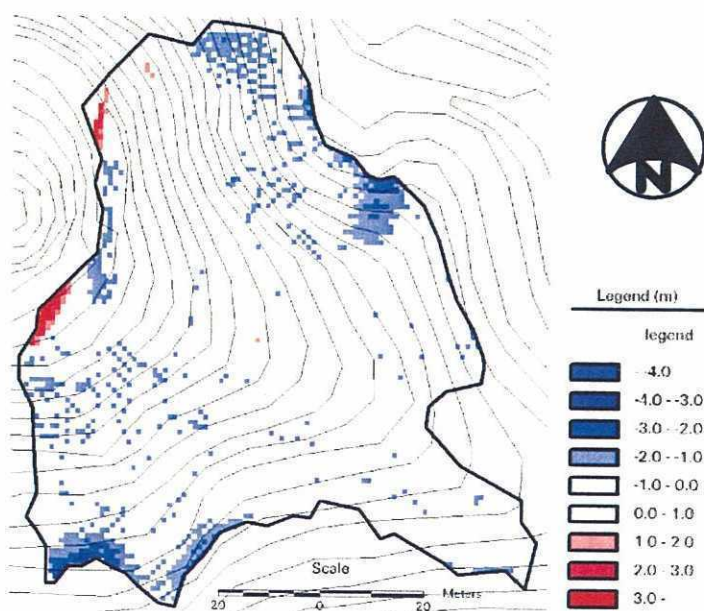
また、落葉後に観測した航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM と実測による DEM を比較した場合(図-4.12(2))、実測した 526 点での RMSE が 0.5m であり、両 DEM の差が 1m 以内にある地点が実測箇所の 98% (前掲、表-4.4) であり、落葉前の場合に比較してわずかに精度向上が図られている。これは、相対的に樹冠密度は低く、また除草や剪定などによる管理が施され、下層植生がほとんど生育していない落葉広葉樹林であったためレーザ光が地表面まで届きやすかったこと、緩斜面でありフィルタ処理により間引かれたデータでも地形が十分表現できたためと考えられる。したがって、ST-2 のような管理された樹林(サクラ保存林)の場合には、落葉前に観測した航空機搭載型レーザスキャナデータからでも高精度の LSDEM が生成できることが分かる。しかし、地区の境界部などの一部に両 DEM の相違する箇所がみられる(前掲図-4.12)。これらの箇所は、斜面末端の急崖部にあたり、複雑な微地形を示している箇所であるためレーザ光が十分に到達していなかったと考えられる。

(3)ST-3 での比較検討

落葉前の航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM と実測 DEM の比較(図-4.13(1))では、とくに地区西部でよく整合していた。それ以外の箇所では両者の差異が大きく、誤差 1m 以内の割合は 61%程度、全実測点での RMSE は 4m 強である(前掲、表-4.3)。地区南部や北端部では LSDEM が高めに、地区東部では LSDEM が低めに算出されている。地区西部では地表面がほぼ平坦で、常緑広葉樹・落葉広葉樹混交林からなり、樹冠密度も比較的疎であるため、地盤 DEM が精度よく算出された(前掲、図-4.13(1))。一方、それ以外の箇所では、高木層が高密度に繁茂しておりレーザ光が地表面まで到達できていないこと、急崖部、急斜面から形成される複雑な地形を呈していることから、フィルタ処理で間引かれた測定点では十分に地形が表現できない。たとえば、地区北端ではケヤキやモミの大径木が林立しており、これらの樹冠で反射されたデータの一部が地表面として抽出されるため、実測 DEM より高めの値を示したものと考えられる。また、地区南端では北端と同様の高密度な高木層の影響に加えて、河川沿いの急崖、急斜面が凹地形を呈しており、

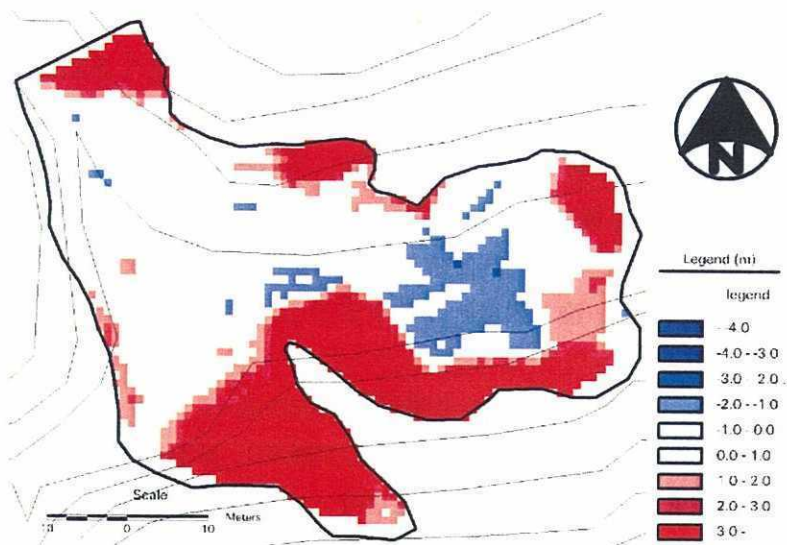


(1)落葉前の航空機搭載型レーザスキャナによる DEM

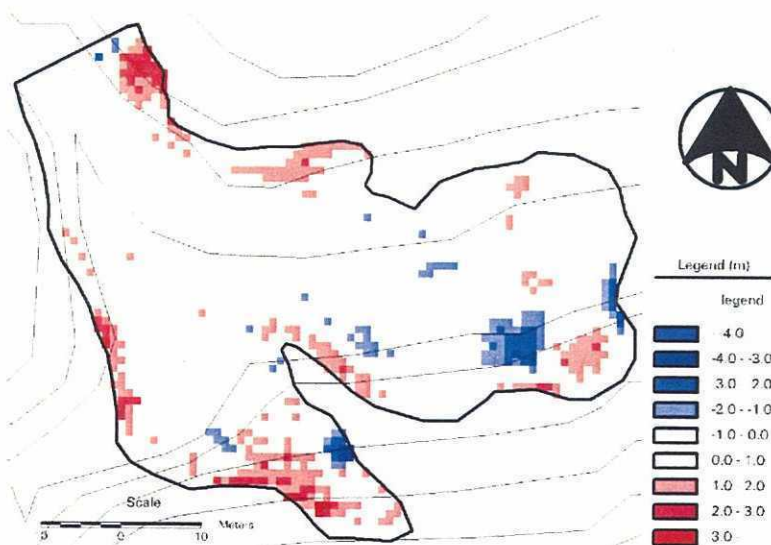


(2)落葉後の航空機搭載型レーザスキャナによる DEM

図-4.12 落葉前・後の LSDEM と実測 DEM の相違箇所
(ST-2: 落葉広葉樹林 (サクラ保存林) 密生林での傾斜地)



(1) 落葉前の航空機搭載型レーザスキャナによる DEM



(2) 落葉後の航空機搭載型レーザスキャナによる DEM

図-4.13 落葉前・後の LSDEM と実測 DEM の相違箇所
(ST-3: 常緑・落葉広葉樹密生林で平坦地)

数少ない測定点の補間による平面的な LSDEM が高めの値を示したものと考えられる。一方、地区東部ではゆるやかなマウンド状の凸地形が認められ、前記同様に平面に近い LSDEM が低めの値を示したと考えられる。

落葉後に観測した航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM と実測 DEM を比較する (図-4.13(2))と、実測した 314 点に対する航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM の誤差は、RMSE で 0.7m であり、両 DEM の差が 1m 以内の割合は 94% に相当していた (前掲、表-4.3)。地区西部では地表面がほぼ平坦で、常緑広葉樹・落葉広葉樹混交林からなり、樹冠密度も比較的疎であるため、DEM が精度よく算出された。地区西部以外の一部で両 DEM に差異が生じている。これは常緑広葉樹の高木層が高密度に繁茂し、急崖部、急斜面から形成される複雑な地形を呈しているためにフィルタ処理で間引かれた測定点だけでは十分に地形が表現できなかったためである (前掲、図-4.13(2))。

以上のように、ST-1~3 での検証結果から落葉後に計測した航空機搭載型レーザスキャナデータによる LSDEM と実測による DEM は整合し、面的にしかも迅速に地盤高を計測していく限りにおいては有効な一手法と考えられる。また、ST-2 のように ST-1 や ST-3 に比較して樹冠ギャップの多い箇所では落葉前に観測した航空機搭載型レーザスキャナによる LSDEM と落葉後の LSDEM には大差がなく、地盤高を精確に計測できることが分かった。

4.5.2 斜面形状の相違による比較検討

ST 別の比較結果より、地形面の形態により LSDEM 作成への適用性に差異を生じることが分かった。平坦地である ST-3 の一部や緩斜面である ST-2 など、単一の傾斜の地形面では相対的に適用性が高く、急斜面である ST-1 や急崖部である ST-3 の一部など、変化が急で複雑な地形の場合は適用性がやや劣ることが分かった。とくに樹冠密度が高い範囲では、この傾向が顕著である。また、谷頭や河川沿いの急崖など凹地形の箇所では、実測 DEM に比べて LSDEM は高めの値を示し、尾根部など凸地形の箇所では LSDEM が低めの値を示すことも確認された。これは、LSDEM 作成のためのフィルタ処理によりレーザ光が地表面に到達した測定点のみを抽出しており、実際に利用できる測定点の数はかなり少なくなり、その補間により得られる DEM では複雑に急変する地形面を表現できていないためと考えられる。すなわち、数少ない測定点により得られる LSDEM は、ある範囲の地形を平面に近い形状で近似するため、谷頭や尾根など小規模な凹凸地形のある箇所では誤差を生じやすいことによると思われる。樹冠密度によってもこの傾向は異なるので一概に結論はできないが、一般に、急崖部などの複雑な地形になるほど、LSDEM 作成への航空機搭載型レーザスキャナデータの適用性は低下すると言える。

4.5.3 構成樹種の相違による比較検討

ST 別の比較結果より、構成樹種も LSDEM 作成への適用性に大きく影響することが分かった。樹冠密度が相対的に低い落葉広葉樹林からなる ST-2 や落葉広葉樹・針葉樹混交林からなる ST-3 の一部では、LSDEM と実測 DEM はよく一致しているが、樹冠密度が高

い針葉樹林、落葉広葉樹・針葉樹混交林からなる ST-1, ST-3 の一部では両者の整合が若干悪くなる。また、各 ST で大径木が存在する範囲でも、両者の整合性が若干悪くなる傾向がみられた。これは、樹冠密度の高い樹種ではレーザ光が地表面に到達する点数が少なく、その補間により作成される DEM では実際の地形を十分表現できないためと考えられる。また、ST-1 のように複層林を形成している箇所では、中～低木層の影響により LSDEM が高めに算出される可能性もある。さらに、大径木が存在する場合は、レーザが地表に到達しない領域が広範囲におよぶこと、樹冠で反射されるデータの一部分が地表として抽出されてしまうことにより、誤差を生じやすいと考えられる。一方、落葉広葉樹林を含む ST-3 では一部で落葉が始まっている影響もあり、レーザ光が地表面まで到達する点数が多く、実際の地形面を正確に表現できているためと考えられる。このように、樹種構成のみならず、樹冠密度や観測する時期（季節）による樹木の状態、大径木の存在も、DEM 作成に対する航空機搭載型レーザスキャナデータの適用性に影響する面があると考えられる。

4.5.4 地形断面による比較検討

ここでは、特定の地形断面上において落葉後に観測した航空機搭載型レーザスキャナデータから作成した LSDEM と実測による DEM(実測 DEM)を比較した。図-4.14 には ST 別の特定地形断面上における落葉後の DEM と実測 DEM, 落葉前の DSM と実測樹頂高(樹高)を比較したものを示す。

(1)ST-1 の地形断面上における落葉後の LSDEM と実測 DEM の比較検討

ST-1 全体では(前掲、表-4.3 参照)、落葉前・後の LSDEM と実測 DEM との誤差は RMS で、約 2m と約 0.9m となり、スギ壮齡林からなる密生林においても落葉後に取得した航空機搭載型レーザスキャナデータから作成した LSDEM の方が、落葉前の LSDEM より実測値に近いことが分かった。

図-4.14(前掲)をみると、急斜面(傾斜角は平均で約 42°)であるにも拘わらず両者の DEM の差異は全体に 1~2m であるが、斜面上部や急峻部ではとくに落葉後の LSDEM と実測 DEM が乖離している。これは樹冠が密生するスギ壮齡林における LSDEM 作成過程でのフィルタ処理にまだ課題を残しているものと解釈される。一方、落葉後の LSDEM と実測 DEM が整合している箇所は、林内あるいは林縁での低木層などの落葉による地表面(ないしはその付近)の露出により計測精度が向上したものと考えられる。

(2)ST-2 の地形断面上における落葉後の LSDEM と実測 DEM の比較検討

ST-2 は、サクラ保存林が立地する緩斜面(傾斜角は平均で 20°)で、落葉後の LSDEM と実測 DEM の比較結果(前掲、表-4.3 を参照)をみると、地区全体でその差は RMS で約 0.5m 以内であり、その比率も 94%以上を示している。

図-4.14(前掲)をみると、斜面のどの部分においても落葉後の LSDEM と実測 DEM との

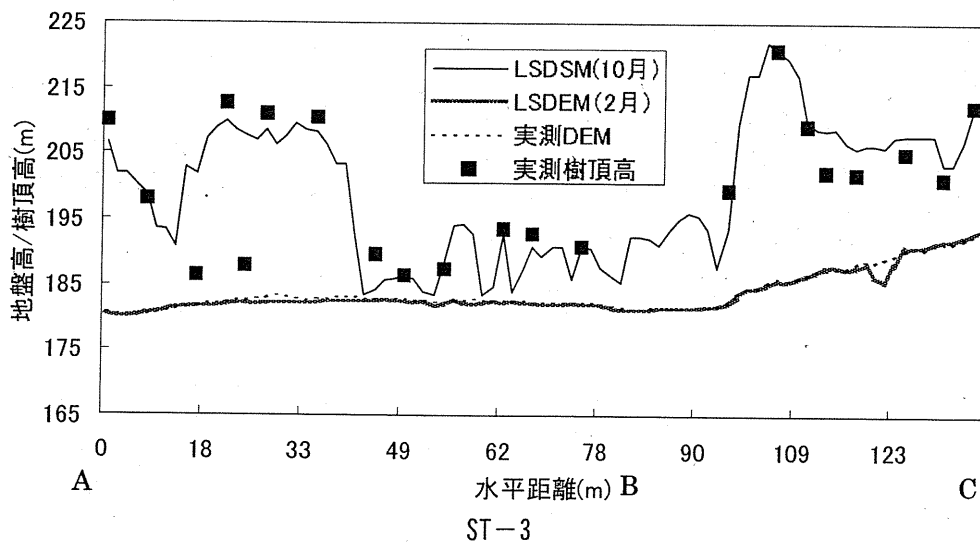
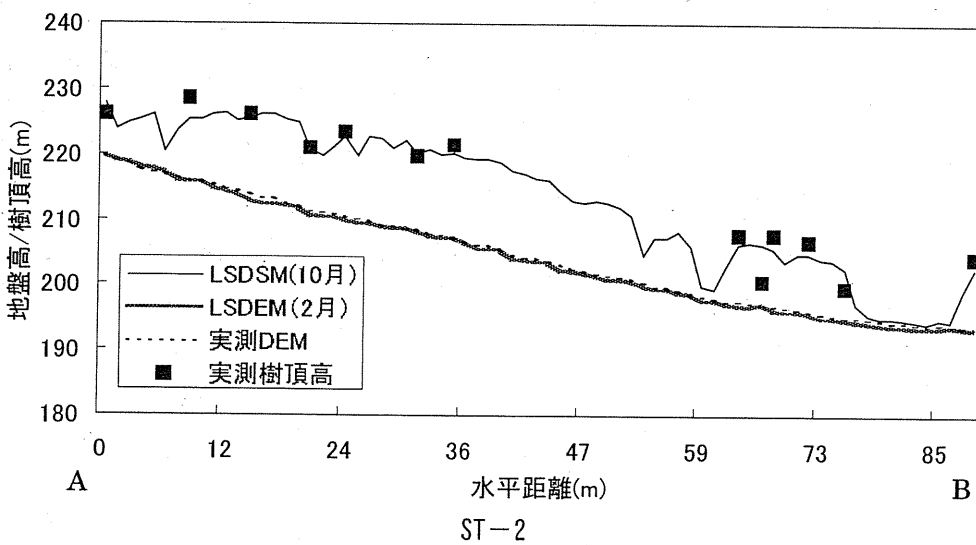
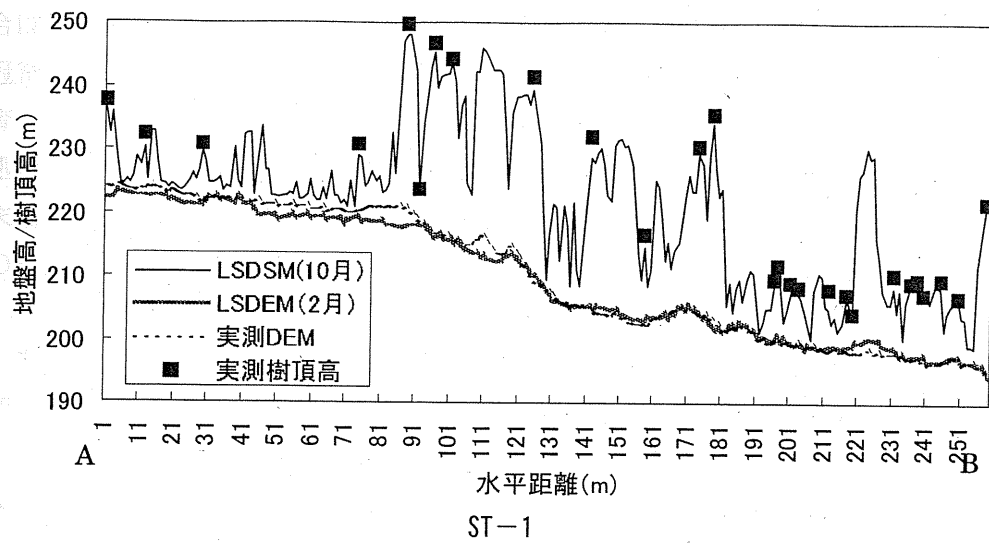


図-4.14 ST別の地形断面上での落葉後DEMと実測DEM, 落葉前DSMと実測樹頂高との比較

整合は極めてよい。これは、サクラ保存林が密生するが ST-1, ST-3 に比べて相対的に樹冠密度が低く、また除草や剪定などによる管理が施され、草丈の高い草本層がほとんど生育していないため、レーザ光が地表面まで届きやすかったこと、緩斜面地でありフィルタ処理により間引かれたデータでも地形が十分表現できたためと考えられる。しかし、斜面末端のような複雑な微地形を示している箇所ではレーザ光が十分に到達していないため両 DEM に相違が認められた。

(3) ST-3 の地形断面上における落葉後の LSDEM と実測 DEM の比較検討

ST-3 は、常緑・落葉混交の壮齡林からなる平坦面（傾斜角は平均で約 5° ）であり、一部に河川や急崖がある。落葉後の LSDEM と実測 DEM の比較結果(前掲, 表-4.3 を参照)をみると、落葉後の LSDEM は RESE で 0.7m と精度向上がみられる。

図-4.14（前掲）をみると、落葉後の LSDEM と実測 DEM とはよく整合している。これは、平均傾斜角が 5° という平坦面であったためと考えられる。

以上のように、落葉前の LSDEM ではその精度が対象地の地形に影響され、とくに急傾斜地では精度が低下する傾向があること、緩斜面や平坦面であれば比較的正確に地形面を表現できることが分かった。一方、落葉後の LSDEM は急崖部などの複雑な地形箇所を除けば実測 DEM の整合はよく、落葉後の LSDEM は樹冠高計測の基礎データとなる地盤高として用いることが有効と考えられる。

4.6 樹冠高の把握に関する考察

4.6.1 写真測量手法により作成した樹冠高との比較

写真測量手法で作成した DSM(写真 DSM)と航空機搭載型レーザスキャナによる LSDSM（落葉前の 2000 年 10 月 11 日取得データから作成）を比較したものを図-4.15 および図-4.16 に示す。

写真 DSM 画像と比較すると、LSDSM が詳細に樹冠高の分布を捉え、樹冠形状をよく表しているのに対して、写真 DSM は全体にぼやけたイメージで、樹冠形状は全く識別できない。とくに、スギの壮齡林からなる ST-1 では、LSDSM で高木の樹冠が明瞭に表されているが、写真 DSM では個別の樹冠は全く識別できない状況である。これは、LSDSM では各測定点は狭いフットプリント(直径 60cm)内の点的な高さデータを表しているのに対し、写真 DSM では 2m メッシュ内の平均的な標高を表しているためと考えられる。

4.6.2 地形断面による比較検討

ここでは、多摩森林科学園に設定した ST-1~3 の地形断面について、航空機搭載型レーザスキャナデータから作成した落葉前の LSDSM による樹冠高と実測による樹頂高と比較照合し、LSDSM の精度検証とその適用性について検討した。

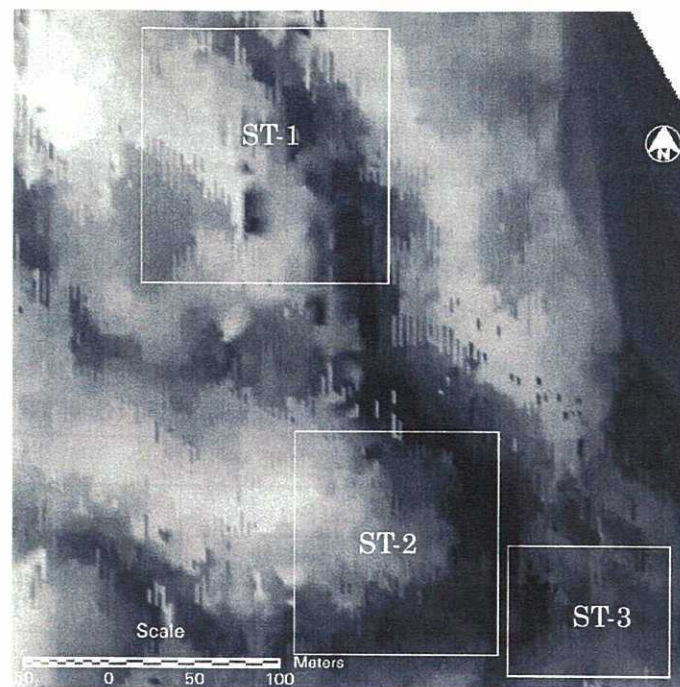


図-4.15 写真測量手法による樹冠高(写真 DSM)分布

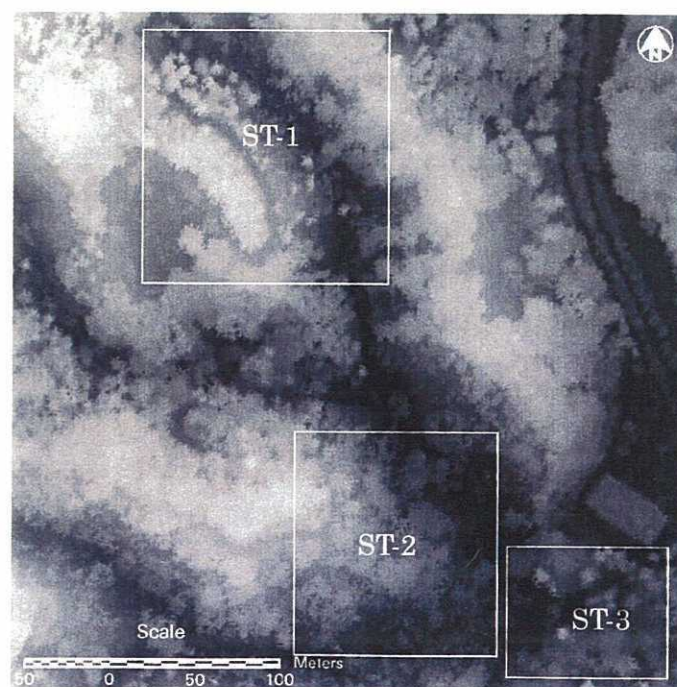


図-4.16 航空機搭載型レーザスキャナによる樹冠高 (LSDSM) 分布

なお、ここでは実測によって求められる樹頂高と LSDSM による樹冠高を区分して用いた。すなわち、前述したように、樹頂高は現地実測によって求められる樹木梢端の標高で、樹幹の根元から幹に沿って、その樹木が茂らせている葉の最も高いところまでの垂直距離（樹高）を計測し、根元の標高値を加えたものである。それに比べて、航空機搭載型レーザスキャナデータはランダムに照射された点群であり、常に樹木梢端の樹頂部に照射されているとは限らず、樹木梢端を含む樹冠部を面的に捉えた高さデータとなるため、樹頂高と区別して樹冠高と呼称している。

多摩森林科学園における ST 別の地形断面上における LSDSM による樹冠高と実測樹頂高との比較結果を表-4.4 および図-4.14（前掲）に示す。

表-4.4 ST 別の地形断面上における実測樹頂高に対する LSDSM の誤差

検証箇所	測定本数	LSDSM の RMS 誤差(m)
ST-1	31	1.689
ST-2	20	1.489
ST-3	15	1.493

(1) ST-1 の地形断面上における比較検討

ST-1 の地形断面上における LSDSM と実測樹頂高の差異は実測本数 31 本で RMS 誤差が 1.7m である(前掲, 表-4.4)。全体的に LSDSM は実測樹頂高に比べて若干低めとなる傾向があり、前述の LSDSM が実測樹冠高に比べて若干高めに算出されることも勘案すると、樹冠高としては若干低めに算出される可能性がある。

(2) ST-2 の地形断面上における比較検討

ST-2 の地形断面上における LSDSM と実測樹頂高の差異は実測本数 20 本で比較した場合、LSDSM の RMS 誤差 1.5m である(前掲, 表-4.4)。地形断面上で両者を比較すると(前掲, 図-4.14)、一部を除いて LSDSM と実測樹頂高とよく一致していることが分かる。したがって、樹冠高は極めて精度よく計測できる可能性がある。また、図-4.17 には LSDSM と実測樹頂高との差分量を区分したものを示す。同図から実測本数の約 70%に相当する樹木箇所では±1m 以内の差であり、落葉前の LSDSM は実測樹頂高と比較的よく一致していることが分かる。

LSDSM と実測樹頂高が一致している箇所では樹木が垂直に成育(図-4.18)しているのに対し、両者に差異がみられる箇所では樹木が倒伏(図-4.19)している場合が多い。これは倒伏した樹木では実測した樹頂位置が根元(すなわち実測時に樹木位置とした地点)からシフトしており、樹冠形状を忠実に捉えた LSDSM と差異を生じたものと考えられる。

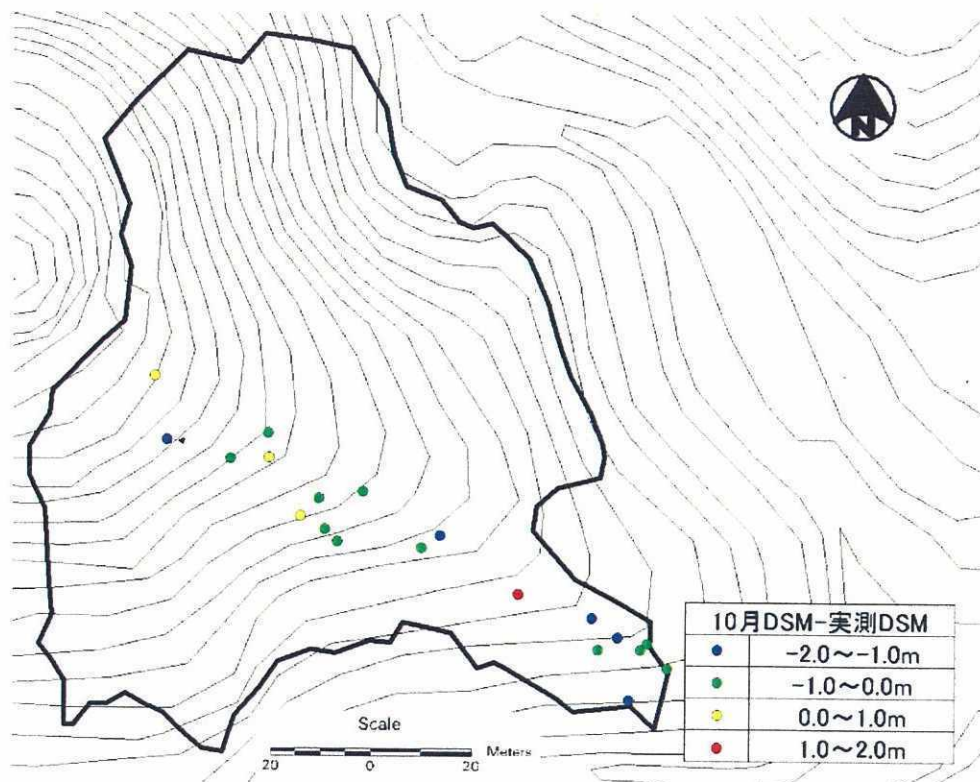


図-4.17 ST-2における落葉前の LSDSM と実測樹頂高の比較



図-4.18 ST-2 での整合箇所

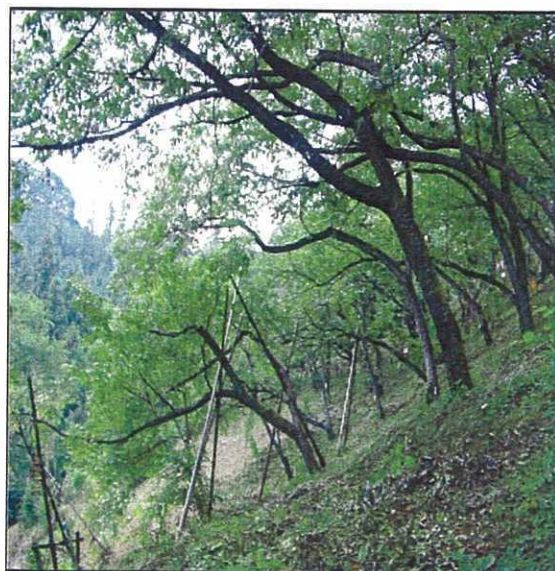


図-4.19 ST-2 での不整合箇所

(3) ST-3 の地形断面上における比較検討

ST-3 の地形断面上における LSDSM と実測樹頂高の差異は実測本数 15 本で比較した場合、LSDSM の RMS 誤差 1.5m である(前掲, 表-4.4)。地形断面上で両者を比較すると(前掲, 図-4.14), 一部を除いて LSDSM と実測樹頂高とよく一致していることが分かる。前述の LSDEM が実測 DEM とよく一致していることを勘案すれば, ST-3 のような平坦面では樹冠高は LSDSM で極めてよく測定できる可能性があるものと考えられる。

4.7 まとめ

4.7.1 地盤高の把握に関する考察

- (1) 落葉前・後の DEM の面的な比較では, 実測 DEM と比較して各 ST とも落葉後の LSDEM が RMS 誤差で 0.486~0.886m, 1m 以内の誤差は検証箇所の全測定点に対し 93.0~97.9%の範囲内にあり, このことから落葉後の LSDEM と実測 DEM との整合が高いことが把握できた。また, 地形面の形態により実測 DEM との差を生じていることも判明した。すなわち, 落葉後の LSDEM を用いれば ST-2 および ST-3 のような緩傾斜面や単一な平坦面ではより高い精度で地盤高を把握できることが分かった。ただし, 急激な傾斜変換点をなす急崖部を含む複雑な急傾斜地形の把握には課題が残る。
- (2) 落葉前の LSDEM と構成樹種との関係では, 下層植生の発達の少ない単一な落葉広葉樹や人工林の箇所では実測 DEM との整合はよいが, 複層林のように階層構造を持つ場合には下層の低木層の影響が残る。反面, 落葉前~落葉後までの時系列な LSDEM を併用した解析からこのような階層構造の把握が可能となることを示唆していた。
- (3) 地形断面上での比較では, 落葉後の LSDEM は急崖部などの複雑な地形箇所を除けば実測 DEM の整合はよく, 落葉後の LSDEM は樹冠高計測の基礎データとなる地盤高として用いることが有効と考えられた。

4.7.2 樹冠高の把握に関する考察

- (1) 航空機搭載型レーザスキャナによる樹冠高(LSDSM)計測の場合は, 写真測量手法に比べ, 樹冠形状は詳細に捉えられている。写真測量手法では周辺の樹冠による影響を受けやすく, とくに樹冠形状が鮮明なスギ林では, 実際の樹冠形状との差異が大きいことが分かった。
- (2) 航空機搭載型レーザスキャナによる樹冠高(LSDSM)の精度検証では, 落葉前に観測した LSDSM と実測樹頂高とを比較した。ST-1 では測定本数 31 本に対する LSDSM の誤差は RMS で 1.689m, ST-2 では測定本数 20 本で 1.489m, ST-3 では測定本数 15 本で 1.493m であった。
- (3) 落葉前に観測した LSDSM と実測樹頂高とは概ね 1~2m の差であることが分かった。

広葉樹などのように現場で樹頂部を特定しにくいことや現地計測に使用したディファレンシャル GPS および簡易レーザ計測器の測定精度を勘案すればほぼ妥当な数値と考えられる。

参考文献（第4章） アルファベット順に表記

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 Environment, 67, pp.298-308.

大政謙次, 秋山幸秀, 石神靖弘, 吉見健司(2000) : 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, 日本リモートセンシング学会誌, 20(4), pp.34-46.

末田達彦, 福島義宏(1998) : 森林縦断面のフーリエ解析による現存量の推定, 広域的適用を目指した森林の間接計測手法開発と分散型データ処理技術手法の構築, 平成 7~9 年度文部科学研究費補助金基礎研究(A)(1)研究成果報告書, pp.14-26.

武田浩志, 栗崎直子(2001) : 3 次元都市モデル作成のための航空機レーザー測定のデータ処理, 全国測量技術大会 2001 資料集, pp.38-43.

田村正行, 高槻幸枝(2000) : 航空機レーザスキャナによる樹高計測, 日本写真測量学会誌 写真測量とリモートセンシング, 39(2), pp.8-13.