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

A grasp of the stratification in deciduous broadleaved forest using the DSM by airborne laser scanner data before and after defoliation

瀬戸島政博*・今井 靖晃*・天野 正博**

Masahiro SETOJIMA, Yasuteru IMAI and Masahiro AMANO

Abstract : In this study, we calculated the difference quantity of the DSM of before defoliation, while defoliation, and after defoliation using time series airborne laser scanner, and we tried to estimate the stratification in deciduous broadleaved forest by grasp of the growth and the covering situation of subtree layer, shrub layer, and herb layer from the amount of change of DSM. The target area of this study was set to *Zelkova serrata* forest and cherry forest (*Prunus yedoensis* etc.) in Tama Forest Science Garden. As a result, it was able to be divided 4 stratification types that deciduous broadleaved tree layer in which the understory vegetation does not develop, deciduous broadleaved tree layer in which shrub layer and herb layer develop, deciduous broadleaved tree layer in which subtree layer and shrub of evergreen broadleaved tree develop, and evergreen broadleaved tree layer (*Quercus glauca* mainly).

1. はじめに

現在、持続的な国土環境の保全や自然資源を利用した循環型社会の形成、地球環境保全の一環として、身近な里山林の保全や利活用が叫ばれている。このような里山林の管理や利活用を進めていくうえで、里山林を構成する樹種・樹高・樹冠・階層構造などの情報を面的に捉えていく必要がある（重松ら，1997）。

里山林のように多種多様な樹種で構成されている森林をリモートセンシングなどにより外観から面的に捉えていく場合には、マルチスペクトラルデータから解析していく方法（山形ら，1996）や樹種ごとの季節的な樹葉の色調変化から解析していく方法（瀬戸島ら，2002a）で研究が進められている。樹高については、ヘリコプタや航空機に搭載したレーザスキャナを用いて

面的な樹高計測が試みられている（大政ら，2000；瀬戸島ら，2002b）。また、樹冠の面的な把握には空中写真画像を用いた画像解析による自動抽出が試みられている（小村ら，2003）。

これらに比べて、航空機レーザスキャナ（航空機 LS と略す）を用いて森林内部の階層構造（すなわち、高木、亜高木、低木、草本類等の垂直的な植生分布）の面的な把握は、武田ら（2003）、平田ら（2004）によって試みられているが、その研究事例は少ない。その主たる理由は、これまでは現地で森林内に立ち入り調査をすることによってのみ樹林の垂直的な階層構造が把握でき、他に有効な手法が採用されていなかったためと考えられる。現在でもすべてのタイプの森林の垂直的な構造、すなわち面的な階層構造を均一な精度で迅速に把握できる手法はみられない。

落葉広葉樹林に限れば、落葉前後に観測した航空機 LS の DSM (Digital Surface Model) の変化量から面的な階層構造を把握することが可能と考えられる（図 1）。

そこで、本研究では落葉前後に観測した時系列な航空機 LS を用いて、落葉前・落葉中・落葉後の DSM の変化量（差分量）を算定し、その変化量から落葉広葉樹下における亜高木・低木・草本類の生育や被覆状況を捉え、階層構造の把握を試みた。

* 国際航業株式会社 技術・事業開発本部
地球環境プロジェクト

Kokusai Kogyo Co., Ltd.

〒102-0075 東京都千代田区三番町 5

** 早稲田大学 人間科学部

School of Human Sciences, Waseda University

〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 44, NO. 2, 2005

図1 DSMの変化量から落葉広葉樹林内の階層構造を把握するための概念

2. 使用データ

使用した航空機LSは、RAMS (Ener Quest Systems 社製)で、レーザスキャナ部から15kHzのパルスレートで近赤外線レーザが発信され、対象物に当たって反射してくるレーザ光を受信する。観測測定高度は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、水平方向で±30cm、垂直方向で±15cmである。表1に使用した航空機LSデータの諸元を示す。

また、これらの航空機LSデータから作成したDSMを落葉前・落葉中・落葉後のものとして用いることの妥当性を検討するために表2に示すカラー空中写真を使用した。カラー空中写真は、Leica社製カメラRC-30で対地高度1,530m、撮影縮尺1/10,000で撮影し、そのネガフィルムから入力用スキャナにより1画素0.25

表1 使用した航空機LSデータの諸元

観測 年月日	対地高度 (m)	走査角 (°)	走査幅 (m)	照射密度 (点/m ²)
2000.10.11	2500	15	658	0.25
2001.2.12	2500	16	703	0.25
2001.12.3	2500	20	882	0.25
2002.10.4	2590	15	682	0.25

表2 使用したカラー空中写真の諸元

撮影年月日	2000.11.5, 2000.11.19, 2000.12.5 2000.12.26, 2001.2.19, 2001.9.23
対地高度	1,530m
撮影縮尺	1/10,000
画素サイズ	0.25m×0.25m

m×0.25mの画像データを作成した。

3. 解析方法

3.1 解析対象樹林の選定と考え方

本研究では、東京都八王子市にある(独)森林総合研究所多摩森林科学園内の次の2地区を解析対象とした(図2)。

① A地区(1.94ha)は、自然状態にある落葉広葉樹林でケヤキ(*Zelkova serrata*)高木林が優占し、一部スダジイ(*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii*)・アラカシ(*Quercus glauca*)の高木林が混交する。ケヤキ高木林の林内には常緑広葉樹の亜高木・低木・草本類などが繁茂し、多層な構造からなる林内を形成している。

② B地区(0.72ha)は、サクラ保存林として多種のサクラ(*Prunus yedoensis*, *Prunus lannesiana*, *Prunus grayana*など)の高木が植林されている。植林間隔は比較的疎で、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。

上記2地区を選定した主たる理由は、A地区では多様な階層構造(ケヤキ高木層下は常緑広葉樹の亜高木や低木、草本などにより構成)が時系列なDSMの変化からどのように把握できるかをねらいとした。また、B地区では、林床が定期的に除草され、サクラ高木層下にはほとんど亜高木や低木が見られない単一な階層構造が時系列なDSMの変化からどのように把握できるかをねらいとした。

図2 解析対象地区の位置(多摩森林科学園)

3.2 航空機 LS データに基づく時系列な DSM の整備

4 時期(表 1 前掲)の航空機 LS データから、次の手順で DSM を作成した。

本研究で使用した航空機 LS は、照射した各レーザに対して反射パルスを最大 5 パルスまで記録するため、まず、ファーストパルスを抽出した。

次に、時系列比較を可能にするため、ファーストパルスの点群データに対し、TIN(Triangulated Irregular Network)による補間を行い、1 m 間隔のグリッドデータに変換した。

3.3 航空機 LS データの取得時期と時系列比較のための検討

航空機 LS で取得した DSM の時系列な変化とその相互の比較に基づく階層構造の把握に先立ち、表 1 中で、2000.10.11 を落葉前、2001.12.3 を落葉中、2001.2.12 を落葉後の DSM として用いることの妥当性を検討した。

(1) 落葉前の DSM (2000.10.11) は、落葉直前の樹冠高を捉えているはずであり、これが基準となって落葉中の DSM、落葉後の DSM との差分から階層構造が把握できる。そのため、落葉前の DSM は同じく落葉前に捉えた他時期の DSM (表 1 中で 2002.10.4) と同一の樹冠高となるはずである。そこで、両 DSM を比較照合することで、落葉前の DSM の再現性を検討した。

加えて、現場での地形測量成果および樹高計測量成果の整っている B 地区を対象として、上記 DSM と実測樹頂標高(梢端の標高。実測地盤高に樹高を加算した高さ)とを比較し、DSM が表す樹頂部の高さについて検討した。

(2) 落葉後の DSM (2001.2.12) は、ほぼ同一時期に撮影されたカラー空中写真(DSM 作成に用いた航空機 LS の観測が 2001.2.12、カラー空中写真の撮影が 2001.2.19)の色調から、落葉後の時期として用いることの妥当性を判断した。

(3) 表 1 に示すように、落葉中の DSM として用いる 2001.12.3 のデータは、落葉前の DSM と落葉後の DSM の一連のシーズンとは取得時期が異なる。そのため、落葉中のデータとして用いることの妥当性を検討した。

3.4 落葉広葉樹林の階層構造の把握

3.3 の(1)～(3)までの検討が妥当ならば、落葉前後に取得した DSM を時系列に比較することができる。ここでは A 地区と B 地区について、落葉前ー落葉中、落葉中ー落葉後、落葉前ー落葉後、の各時期間の DSM の差分量に基づく面的な階層構造の把握を試みた。また、ある地形断面を設定し、断面上での各時期間の DSM の差分量から階層構造を推定した。

その検証には現地調査に加えて、表 2 (前掲)に示す 6 時期分のカラー空中写真を使用した。現地計測は、B 地区ではトータルステーション(トプコン製 GPT-1002)による測量で地盤高、樹頂標高(梢端の標高)を求めた。樹頂標高は、樹木の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距離を計測した。A 地区は、既設の基準点から遠距離にあるため、調査向きのコンパクトな DGPS とレーザ測距儀(MGL 社製 LaserAce300)、樹高計(ティンバーテック社製 VERTEX)を用いた。

4 航空機 LS データの取得時期と時系列比較のための検討

4.1 2000年10月11日取得の DSM を落葉前の DSM として用いることの妥当性検討

落葉前の DSM として、2000年10月11日のデータを使用した。このデータとは約 1 ヶ月間の隔りがあるが、図 3(a) (2000年11月5日)のカラー空中写真で、A 地区、B 地区での紅葉・黄葉の様子を判読できる。図 3(b)の11月中旬(11月19日)では、A 地区、B 地区とも紅葉・黄葉のピークに達している様子がわかる。また、参考までに撮影年は異なるが10月上旬に近い時期である図 3(f)の画像(2001年9月23日)を見ると、A 地区では紅葉・黄葉は見られず、B 地区のごく一部に紅葉が見受けられる。

以上の点から、2000年10月11日観測のデータから作成した DSM を落葉前の A 地区および B 地区の樹冠表面を捉えたデータとして用いることは妥当と考えた。

4.2 2001年2月12日取得の DSM を落葉後の DSM として用いることの妥当性検討

図 3(c) (2000年12月5日)では、A 地区は少しずつ落葉が進み、B 地区でも落葉が進行していた。図 3(d) (2000年12月26日)では、両地区とも完全に落葉してい

図3 解析地区における時系列なカラー空中写真

るのがわかる。図3(e)は、航空機LS観測をした2001年2月12日から1週間を経た2月19日の画像であり、より一層落葉状況が明確となる。

以上の点から、2001年2月12日観測のデータから作成したDSMを落葉後のA地区およびB地区の状態を捉えたデータとして用いることは妥当と考えた。

4.3 2001年12月3日取得のDSMを落葉中のDSMとして用いることの妥当性検討

ここでは、1シーズン異なる2001年12月3日取得のDSMを落葉前のDSM(2000年10月11日)と落葉後のDSM(2001年2月12日)の間の時期(落葉中)を示すデータとして用いることの妥当性を検討した。撮影年は異なるが、カラー空中写真撮影をした2000年12月5日と2001年12月3日の気温を比較すると、最低気温で2℃程度2000年12月5日の方が低く(独森林総合研究所多摩森林科学園内での気象観測データによる)、同日に撮影されたカラー空中写真上でも、A地区・B地区とも落葉が進行している様子がわかる(図3(c))。

このような気温の傾向とカラー空中写真上の色調変

化を勘案すれば、2001年12月3日取得のDSMは、落葉期間中に相当するものと考えることができる。

5. 落葉前のDSMの再現性と実測樹高との関連性

5.1 落葉前のDSM間の再現性検討

ここでは、落葉前のDSMとして用いる2000年10月11日と、この取得月日に近いが取得年の異なる2002年10月4日のDSMとを比較することによって、落葉前のDSMによる樹冠部の高さの再現性について検討した。

図4には、A地区およびB地区における落葉前のDSM(2000年10月11日と2002年10月4日)間の相関を示す。A地区では11,010点を用いた両DSM間の相関係数が0.959、B地区では4,025点を用いた両DSM間の相関係数が0.970であり、観測時期に2年間の隔たりがあっても、両DSM間の相関はA地区、B地区とも高い。A地区では、2000年10月11日に比べて2002年10月4日の方が高い値を示す点がやや見受けられるが、

A 地区（ケヤキ林）における両 DSM の相関

B 地区（サクラ保存林）における両 DSM の相関

図 4 落葉前（2000年10月11日と2002年10月4日）の DSM の相関

これらの点の多くは樹冠ギャップに位置しており、草本類の繁茂状況に起因するものと思われる。したがって、両 DSM の再現性が認められ、ともに同一の高さ（樹冠高）を捉えていると考えられる。

なお、藤原ら（2002）の研究によれば、幼齢の落葉広葉樹において年間あたりの梢端部の成長速度は0.38～0.60m/年と報告されている。A 地区のケヤキ林の林齢が90年、B 地区のサクラ林が移植後38年であることから、両樹林の成長速度は藤原らの報告値より小さいと考えられる。したがって、この値からみて2年間での樹冠高の変化は無視できる程度と考えられる。

5.2 落葉前の DSM と実測樹頂標高との比較

5.1から2000年10月11日の DSM と2002年10月4日の DSM との相関は高く、両 DSM とともに落葉前の樹冠高を捉えていると考えられる。次に、落葉前の DSM（樹冠高）と実測樹頂標高とを比較し、その相違を検討した。B 地区では、これまでに詳細な現地計測による成果（瀬戸島ら，2002b）があり、この地区で比較検討をした。図5は、A-B断面（図10(c)に示す）での落葉前の DSM と実測樹頂標高を比較した結果である。なお、図10(c)は A-B 断面を中心に左右5m、計10mの幅を対象として図示した。B 地区のサクラ林で2001年2月8～9日に実測をした20本のうち、同図の地形断面には16本の実測樹頂高を示している。20本の実測本数について、実測時期に近い2000年10月11日の DSM

図 5 落葉前の DSM と実測樹頂標高の対応

との RMSE 誤差を見ると、1.5m であった。同図において、地形断面上で両者を比較すると、一部を除いてよく一致していることがわかる。一致している箇所は樹木がほぼ垂直に生育しているのに対し、差異の見られる箇所では樹木が倒伏している場合であった（図 5 中の写真を参照）。

以上から、落葉前の DSM による樹冠高と実測による樹頂高では、1.5m 前後の差異を考慮する必要がある。

6. 落葉広葉樹林の階層構造の把握

落葉前の DSM は実測樹頂標高と 1.5m 前後の差を生じている。そのため、両者の差が 2 m 以内であれば樹葉の茂り具合は無変化と考え、落葉前の DSM は落葉前の樹冠高を面的に表現しているとした。したがって、落葉前の DSM を基準にして、落葉中、落葉後の DSM の変化（すなわち樹冠高の変化）を求めることにより、相対的な落葉広葉樹林内の垂直的な構造（階層構造）を把握することができる。そこで、A 地区、B 地区について、落葉前から落葉後までの 3 時期の DSM の各差分量を求め、現地調査による検証を加えて、階層構造を把握した。

6.1 ケヤキ優占の落葉広葉樹林での階層構造の把握

6.1.1 面的な DSM の差分量からみた階層構造の把握

図 6(a)~(c)は落葉の進行時期別に DSM の差分量を求めたものである。また、当該地区の面的な DSM の差分量の分布を詳述するために、図 7 に示す地区全体を①~⑤に区分した。概ね尾根部と谷底部の地形に従って区分した。図 6(a)の期間（10月中旬~12月初旬）では、④の箇所（図 7 に表示）以外で差分量が大きく、図 6(b)の期間（12月初旬~2月中旬）では地区の半分で差分量の変化が表れている（図 7 中の②、③、⑤の箇所）。

図 6(c)は落葉前後の DSM の差分総量を示したもので、差分量 21m 以上からなる箇所が地区全体（1.94ha）の 25.5%（0.50ha）を占め、それに次いで差分量 16~20 m の箇所が 24.1%（0.47ha）、差分量 11~15m の箇所が 16.4%（0.32ha）であった。

①の箇所は 2~5 m、6~10m、11~15m の各差分量が混在し、一部に差分量が 16m 以上の箇所もある。これらの差分量からみて、大半の箇所ではケヤキ高木層

下が常緑広葉樹の亜高木層や低木層で被われる階層構造であると推定された。現地検証により、ケヤキ高木層と常緑広葉樹等の亜高木層・低木層に被われる箇所であることがわかった。この箇所の高木の樹高が 16~27m（実測した 12 本の平均樹高 21.4m）、亜高木・低木の樹高が 3~11m（実測した 8 本の平均樹高 7.5m）であった。したがって、高木と亜高木・低木の樹高差は 5~25m の間で、平均でみれば 15m 内外となり、DSM の差分量とよく整合していた。このことから、差分量 16m 以上の箇所は亜高木・低木のあまり発達しないケヤキ高木層、それ以外は常緑広葉樹の亜高木・低木の発達する階層構造を持つケヤキ高木層に大別できた。

②の箇所の大部分は DSM の差分量が 16m 以上からなる。現地検証から、この箇所の高木の樹高は 15~27 m であり、5~6 m の樹高をもつ亜高木が急斜面上に疎らに分布していた。すなわち、急斜面上では、ケヤキ高木層下に低木・草本が広く被い、亜高木が疎らに分布する構造であり、尾根部や谷底付近では、ケヤキ高木層下に低木・草本が疎らに分布する構造であった。

③の箇所は②の箇所と同様、ほとんどの箇所の DSM 差分量が 16m 以上であり、亜高木・低木の発達していない高木層から形成される階層構造と推定された。現地検証により平均樹高 23m からなるケヤキ高木層で被われ、亜高木・低木がほとんど発達していないことが確認された。

④の箇所は、DSM の差分量 0~1 m を中心に、2~5 m、6~10m、11~15m の各差分量をもつエリアがドーナツ状に分布する。この箇所は、常緑広葉樹高木層と落葉広葉樹高木層が分布する。常緑広葉樹高木層は DSM の差分量 0~1 m を示す。この周縁には差分量 2~5 m、6~10m のエリアが広がり、落葉広葉樹高木層のすぐ直下に常緑広葉樹の亜高木が分布していると推定される。さらのその外縁には差分量 11~15m のエリアがあり、その層下には常緑広葉樹の亜高木・低木が発達する階層構造であると推定された。現地検証から、この箇所の落葉広葉樹高木層の樹高は 14~24 m（実測した 12 本の平均樹高 18m）に対して、亜高木・低木の平均樹高が 11m に及び、常緑広葉樹の亜高木・低木の発達した林相であり、DSM の差分量からみた階層構造とよく整合していた。

⑤の箇所は、DSM の差分量が 16m 以上の箇所が大半を占めている。この箇所は主としてケヤキ高木層から構成され、樹高差 20m 以上であった。

(a) 2000.10.11-2001.12.3

(b) 2001.12.3-2002.2.12

(c) 2000.10.11-2002.2.12

図6 各時期のDSM差分量 (A地区)

図7 A地区のゾーニング

A-B断面の場合

C-D断面の場合

図8 落葉前後のDSMの垂直的变化 (A地区)

A-B断面の場合

C-D断面の場合

図9 落葉前後のDSMに基づく樹林内の階層構造 (A地区)

6.1.2 地形断面でみた階層構造の把握

次に、A-B断面(図8, 図9, 断面位置は図6(c)に示す。なお、図9は図8のDSMの垂直的变化と現地検証結果に基づく模式図表示である。橙色の樹冠はケヤキを、黄色の樹冠はコナラを、緑色の樹冠は常緑広葉樹を想定している)での時系列なDSMの差分量をみると、谷地形を示す箇所には生育するケヤキ高木層では比較的早い時期から落葉し、その層下には亜高木・低木があまり発達しない階層構造を示す(②および⑤の谷地形部)。現地検証においても、アオキ(*Aucuba japonica*)などの低木層とケヤキ高木層からなる階層構造を確認でき、アラカシなどの亜高木層は見られなかった。④の箇所の尾根部にはアラカシなど常緑広葉樹の高木層が立地し、隣接する落葉広葉樹高木層は落葉の進行した12月初旬以降に落葉している様子(図6(b)参照)が認められ、ケヤキとは異なるコナラ(*Quercus serrata*)の高木層であることが現地検証で確認できた。その層下は、アラカシなどの常緑広葉樹の亜高木で被われていた。同様に②の箇所の急斜面上にも12月初旬以降に落葉が進行している高木層が認められ、その層下は常緑広葉樹の低木や草本類で被われていた。

以上から、A-B断面上の階層構造は、①亜高木・低木の発達が進んでいない落葉広葉樹高木層(主としてケヤキ高木層)、②低木・草本が下層に発達する落葉広葉樹高木層(主としてケヤキ高木層)、③常緑広葉樹の亜高木・低木が下層に発達する落葉広葉樹高木層(コナラ高木層・ケヤキ高木層)、④常緑広葉樹高木層(主としてアラカシ高木層)の4パターンに区分できた(図9)。

同様に、C-D断面(図8, 図9, 断面位置は図6(c)に示す。なお、図9は図8のDSMの垂直的变化と現地検証結果に基づく模式図表示である。橙色の樹冠はケヤキを、黄色の樹冠はコナラを、緑色の樹冠は常緑広葉樹を想定している)の時系列なDSMの差分量をみると、③の箇所と④の箇所の境をなす谷地形部では比較的早い時期に落葉し、その差分量も大きい。現地検証により、ケヤキ高木層とアオキの低木層からなる階層構造であることが確認できた。③の箇所では、比較的早い時期に落葉する高木層と12月初旬以降に落葉するケヤキの高木層があることがわかった。どちらもその下層に亜高木・低木はあまり発達していない。④の箇所の尾根部や斜面部は、アラカシなど常緑広葉樹林の高木層や亜高木層に被われ、そのなかにコナラの高木が分布する階層構造であることを現地検証で確認した。

以上から、C-D断面上の階層構造は、①亜高木・低木があまり発達しない落葉広葉樹高木層(比較的落葉時期が早い林相とそれよりも落葉の遅い林相がある)、②常緑広葉樹の亜高木が下層を被う落葉広葉樹高木層(コナラ高木層・ケヤキ高木層)、③常緑広葉樹高木層(主としてアラカシ高木層)の3パターンに区分できた(図9)。

6.2 サクラ高木林での階層構造の把握

6.2.1 面的なDSMの差分量からみた階層構造の把握

図10(a)~(c)は、落葉の進行時期別にDSMの差分量を求めたものである。また、当該地区の面的なDSMの差分量の分布を詳述するために、図11に示す地区全体を①~⑥に区分した。当該地区は東ないし南東向き斜面であり、傾斜の緩急に従って6箇所に区分した。図10(a)の時期(10月中旬~12月初旬)では、地区全体(0.72ha)に対して差分量2~5mの箇所が60.4%(0.43ha)、また差分量6~10mの箇所が17.1%(0.12ha)認められる。したがって、地区全体の77.5%(0.57ha)で落葉していたものと考えられる。また、B地区での実測本数20本の平均樹高10.7mであることを勘案しても、落葉の進行途中と推定される。

図10(b)の期間(12月初旬~2月中旬)では、差分量0~1mを示す落葉を終えた箇所(ただし、一部には常緑広葉樹が存在するため差分量0~1mを示す箇所も含まれる)が地区全体の45.3%(0.33ha)に相当し、この期間に落葉して差分量2~5mを示す箇所が地区全体の42.7%(0.31ha)を占めている。また、一部の箇所(図11で⑥と示す箇所)では、差分量11~15mを示すところもあり、落葉がこの時期に集中していたことを物語っている。

図10(c)に示すように、落葉前(10月中旬)と落葉後(2月中旬)の間での差分量でみると、地区全体の75.6%(0.54ha)で6~10mないし11~15mの差分量が認められた。これらの差分量は、B地区のサクラ林の平均樹高にほぼ相当し、サクラ林内の下層の草本類がほとんど未発達な(定期的な管理がなされているため)状態であることがわかる。ただし、一部では差分量が0~1mの箇所もあり、常緑広葉樹が生育している箇所であった。

次に、図11に示す①~⑥のゾーニング別に傾向をみる。①の箇所(図11に表示)では、大半が差分量6~10

m, 11~15m のエリアで占められている。前記の実測樹高(20本の平均樹高が10.7m)と比較してもサクラ林の下層に他の植生(例えば亜高木など)が発達していないことがわかる。現地検証でもススキ(*Miscanthus sinensis anderss*)などが点在する以外は草丈の高い草本はみられなかった。また、この箇所(の西側に)差分量16~20m のエリアがあるのは、カエデ類(*Acer mono* var. *marmoratum*, *Acer palmatum* var. *amoenum*)などの他の落葉広葉樹高木である。

②の箇所も①とほぼ同様の傾向にあり、差分量11~15m のエリアが大半を占め、サクラ林の下層には草丈の高い草本層はほとんど発達していないことがわかる。ただし、図10(c)中でC付近にはアラカシなどの常緑広葉樹高木やススキなどが分布していることを現地検証で確認した。

③の箇所では、西側に差分量0~1m のエリアと中央部に差分量2~5m のエリアがみられる。差分量0~1m のエリアは林道に伴うオープンスペースと樹高約8m のアラカシや樹高約1m の常緑広葉樹低木(主としてヒサカキ(*Eurya japonica*))が分布していた。これ以外は差分量6~10m, 11~15m のエリアであり、現地計測した平均樹高(10.7m)とほぼ同じ値を示し、現地でも草本類は認められるものの草丈の高いものはみられなかった。

④の箇所では、中央に差分量0~1m のエリアが認められる以外は、差分量6~10m と11~15m のエリアからなる。差分量0~1m のエリアはサクラを鑑賞するための休息場であり、差分量6~10m および11~15m のエリアは現地計測した平均樹高(10.7m)とほぼ同じ値を示し、現地でもサクラ林下には一部にススキが見られる以外は草丈の低い草本類が分布していた。

⑤の箇所では、差分量0~1m と6~10m のエリアからなる。差分量0~1m のエリアでは、樹高1m 前後の常緑広葉樹低木(主としてツバキ(*Camellia japonica*))が分布していた。また、差分量6~10m のエリアでは、サクラ林下に草丈の低い草本類が疎らに分布していた。

⑥の箇所では、差分量0~1m と6~10m および11~15m のエリアからなる。差分量0~1m のエリアには、樹高約1m 以下の常緑広葉樹低木が疎らに分布し、それ以外は草丈の低い草本類が広く分布していた。差分量6~10m および11~15m のエリアでは、サクラ林下に一部ススキなどの分布がみられる以外は、草丈

の低い草本類が疎らに分布していた。また、差分量16~20m の小エリアがあるが、これはカエデ類などの落葉広葉樹であった。

6.2.2 地形断面でみた階層構造の把握

A-B 断面(図12, 図13, 断面位置は図10(c)に示す。なお、図13は図12の DSM の垂直的变化と現地検証結果に基づく模式図表示である。橙色の樹冠はサクラを、黄色の樹冠はカエデ類を、緑色の樹冠は常緑広葉樹を想定している)の時系列な DSM の差分量をみると、A 付近では、林道のオープンスペースが捉えられ、差分量0~1m を示す。これに隣接して8m 前後の樹高を持つアラカシ(常緑広葉樹)の高木が生育する。さらに、斜面中央部から斜面下部にかけては、落葉時期に個体差があるものの、サクラ高木層(10~15m)が厚く被い、その下層には常緑広葉樹の低木や草本類などが分布している状況がわかる(図11④, ⑤の範囲)。現地検証において、A から水平距離で50~80m の間(図11⑤の範囲)で樹高10m 前後のサクラ高木層の下にツバキ(*Camellia japonica*)の低木が確認できた。B 付近は低木ないし亜高木のサクラ林からなり、下層の草本類の分布は少なかった。

C-D 断面(図12, 図13, 断面位置は図10(c)に示す。なお、図13は図12の DSM の垂直的变化と現地検証結果に基づく模式図表示である。橙色の樹冠はサクラを、黄色の樹冠はカエデ類を、緑色の樹冠は常緑広葉樹を想定している)の時系列な DSM の差分量をみると、C 付近では常緑広葉樹の高木が分布している。急斜面上は10m 前後の樹高を持つサクラ林で被われ、わずかにカラムシ(*Boehmeria nivea gaud*), クサギ(*Clerodendron trichotomum thunb*), ニワトコ(*Sambucus sieboldiana blume*), ナキリスゲ(*Carex sendaica fanchet* var. *nakiri*), ヒメカンスゲ(*Carex conica boott*)などが下層に見られた。断面のほぼ中央の尾根部には10m 前後の樹高からなるサクラ林が分布し、その下層には草本類がわずかにみられる程度であった。D に近い箇所では15m 前後の樹高を持つサクラの高木層(カエデ類の単木を含む)が分布し、その林内には、ススキ、アブラススキ(*Eccoilopus cotulifer* A. cams), ニワトコ, クサギ, イヌワラビ(*Athyrium niponicum hance*)などがみられた。

以上のことから、B 地区ではサクラ保存林として定期的な管理(枝打ち, 下刈りなど)が施され、ほとんど

(a) 2000.10.11-2001.12.3

(b) 2001.12.3-2001.2.12

(c) 2000.10.11-2001.2.12

図10 各時期のDSM 差分量 (B 地区)

図11 B 地区のゾーニング

A-B 断面の場合

C-D 断面の場合

図12 落葉前後のDSM の垂直的变化 (B 地区)

A-B 断面の場合

C-D 断面の場合

図13 落葉前後のDSM に基づく樹林内の階層構造 (B 地区)

どの箇所でもサクラ林のみの単層な階層構造を示しているが、一部では下層に常緑広葉樹の低木層（ツバキ）などを交えるやや複層の階層構造を示す箇所や、常緑広葉樹の高木（アラカシ）が生育する箇所が存在することが時系列な DSM の差分量と現地検証で把握できた。

7. ま と め

- (1) 航空機 LS による落葉前の DSM と実測樹頂標高との関係を B 地区（サクラ保存林）で検証した結果、実測値との誤差は RMSE で 1.5m であった。したがって、落葉前の DSM は 2m 以内の誤差範囲で落葉前の樹冠高を面的に表現していると考えられ、落葉前の DSM を基準に、落葉中・落葉後の DSM との差分量から落葉広葉樹高木層の垂直的な階層構造を把握することが可能となった。
- (2) 落葉前後の DSM の差分量から、A 地区では、地区全体（1.94ha）の 91.2%（1.76ha）が落葉広葉樹の高木層で占められ、一部常緑広葉樹高木層が分布する箇所が抽出できた。B 地区では、地区全体（0.72ha）の 75.6%（0.543ha）がサクラ林の単層をなす階層構造を示すが、一部で常緑広葉樹の低木層を交えた複層を示す箇所や常緑広葉樹高木が生育する箇所も認められた。
- (3) (2)による解析結果と現地調査から当該地区の階層構造を分析した。その結果、同一樹種でも落葉時期に個体差があるため、その影響を受ける箇所もあるが、下層に低木・草本の発達が進んでいない落葉広葉樹高木層（A 地区ではケヤキ高木層、B 地区ではサクラ高木層）、低木・草本が下層に発達する落葉広葉樹高木層（A 地区ではケヤキ高木層、B 地区ではサクラ高木層）、常緑広葉樹の亜高木・低木が下層に発達する落葉広葉樹高木層（A 地区ではコナラ高木層・ケヤキ高木層、B 地区ではサクラ高木層）、常緑広葉樹高木層（主としてアラカシ高木層）の 4 パターンの階層構造に区分できた。

8. おわりに

階層構造のより詳細な把握にあたっては、今後、本研究で試みた落葉前後に観測した航空機 LS データから作成した DSM の解析に加えて、航空機あるいは高

分解能衛星から取得した時系列な画像データを併用した解析手法の確立を目指したい。なお、本研究をまとめるにあたり、(独)森林総合研究所多摩森林科学園教育資源グループの勝木俊雄主任研究官には、多大なご協力を頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表する次第です。

(受付日 2004.8.30, 受理日 2005.3.11)

参考文献

- 大政謙次, 秋山幸秀, 石神靖弘, 吉見健司, 2000. ヘリコプタ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.
- 小村良太郎, 久保 守, 鎌田直人, 村本健一郎, 2003. ヘリコプタ空撮画像による森林の樹冠解析, 第114回日本林学会学術講演集, pp.310.
- 重松敏則, 朝廣和夫, 瀬戸島政博, 牧田史子, 1997. 現存植生環境動態図の作成とその活用に関する基礎的研究, ランドスケープ研究, 60(5), pp.527-530.
- 瀬戸島政博, 赤松幸生, 今井靖晃, 重松敏則, 朝廣和夫, 児玉滋彦, 2002a. カラー航空写真上の季節の色調変化からみた里山構成樹種の識別に関する研究, ランドスケープ研究, 65(5), pp.679-684.
- 瀬戸島政博, 赤松幸生, 船橋 学, 今井靖晃, 天野正博, 2002b. 航空機レーザスキャナによる森林域の計測とその適用性, 写真測量とリモートセンシング, 41(2), pp.15-26.
- 武田知己, 小熊宏之, 藤沼康実, 米 康充, 2003. サイドルッキングライダによる森林の LAD 計測技術の開発, 日本リモートセンシング学会第35回学術講演会論文集, pp.53-54.
- 藤原宣夫, 山岸 裕, 村中重仁, 2002. 都市緑化樹木による CO₂固定量の算定方法に関する研究, 日本緑化工学会誌, 28(1), pp.26-31.
- 平田泰雅, 柴田銃江, 佐藤香織, 酒井 敦, 倉本恵生, 古家直行, 2004. 航空機レーザスキャナによる下層植生の把握, 第115回日本林学会大会学術講演集, pp.477.
- 山形与志樹, 安岡善文, 岩熊敏夫, 1996. casi 画像と微細標高データの重ね合わせ解析による湿原モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, 16(4), pp.33-40.