

図-6 植生断面図とレーザ反射点群の重ね合わせ (落葉期). 赤字は、表-3に示した樹木番号.



図-7 方形区における落葉期の航空デジタルカメラ画像

マザサの繁茂密度は非常に高くなっており、この部分のレーザ反射点の高さ方向分布は、チシマザサの存在との関連が大きいものと考えられる。

6. 3. 3 A-I (ブナ林)

着葉期のレーザ反射点分布は高木層と非常によく一致している。落葉期には林床部のデータが増加するものの、林冠部にもかなりの反射点が残る。

図-7の航空デジタルカメラによる落葉期の樹冠の画像を見ると、ブナにまだ葉が残っているためか、あるいはブナの樹形（幹が太く、枝が複雑に重なり合う）のためか、落葉後の樹木の像が不明瞭に見える。サワグルミは、ブナと比較して幹や枝が鮮明に見える。すなわち、ブナはレーザ反射点が地上に透過し難いのにに対し、サワグルミは葉がブナよりも早く落ちたためか、あるいは、幹が直立して枝が細いためか、透過し易いと判断される。

図-5, 6では、描画したNo.46の樹冠とレーザ反射点の分布に垂直方向の違いがあるが、これは、No.46の樹頂高を現地で誤認した可能性が高い。図-5の着葉期のレーザ反射点分布（緑色の点）によれば、植生断面図では表現されていない方形区北端の低木層No.43, 45, 48の枝葉垂直分布が表現されている。

7. 実測樹頂高とレーザ植生高の比較

毎木調査の実測樹頂高を樹木毎に表-3に示した。表-3のレーザ植生高については、毎木調査で得られた樹冠位置と着葉期の航空レーザ測量結果から求めたレーザ植生高データを重ね合わせ、樹冠内のレーザ植生高の最大値を読み取ったものである。

樹木No.4, 6, 24, 26, 27, 29では、樹冠が他の樹木と重なり合い、樹頂高を計測できなかった。また、No.20, 41の樹木では、折損で樹頂高が計測できなかったため、これら（表-3のピンク色の行）を比較の対象から外した。

これら以外の樹木について、実測樹頂高とレーザ

植生高と樹高の差を求めると、例えば樹木No.7のサワグルミでは17mの差に達し、その他にもNo.17, 18では、その差が10m以上になるなど、非常に大きな差があるものがあることがわかった。

この原因について検討した結果、以下のような可能性が考えられる。実測樹頂高は、トータルステーションを用いて、トータルステーションと樹木間の距離と樹頂を見た仰角から求めている。トータルステーションは大きな仰角が与えられないので、樹木からかなり距離を取って計測せざるを得ず、樹冠が重なり合う箇所は、正確に樹頂を捉えられていない可能性が高い。

そこで、以下のようにして実測樹頂高の大誤差を取り除くこととした。毎木調査による高木、亜高木、低木の目視判定は調査者の主観的によるが、周囲の樹木と比較して判定しているので、大誤差を取り除くための現地で収集できるデータとしては適切と考えることができる。別途、目視でも樹高を現地で見積もっているため、その目視樹高を参考に、高木が25m以上、亜高木が10m~25m、亜高木の樹高との重複を許して低木が15m程度以下の範囲にあると判断し、これからはずれた樹木（表-3で黄色に着色）は、目視した対象木が距離的に遠く、誤って別の木の樹高を計測してしまった可能性が高いと考え、これらを比較対照からはずすことにした。この結果、対象木は24本（うち、サワグルミ12本、ブナ6本、キハダ1本、イタヤカエデ3本、ホオノキ2本）となった。図-8には、これら24本について、実測樹頂高とレーザ植生高をプロットした。

平均誤差の平均値は-0.48mと負の値（レーザ植生高の平均値が実測樹頂高の平均値より低い）、平均二乗誤差は4.08mとなった。表-3に示すように、誤差には正負のばらつき、そして24本中6本が絶対値で5m以上のばらつきがあった。「1.」で紹介した先行研究と対比すると、平均誤差の絶対値は概ね同程度、平均二乗誤差はやや大きいことが判った。

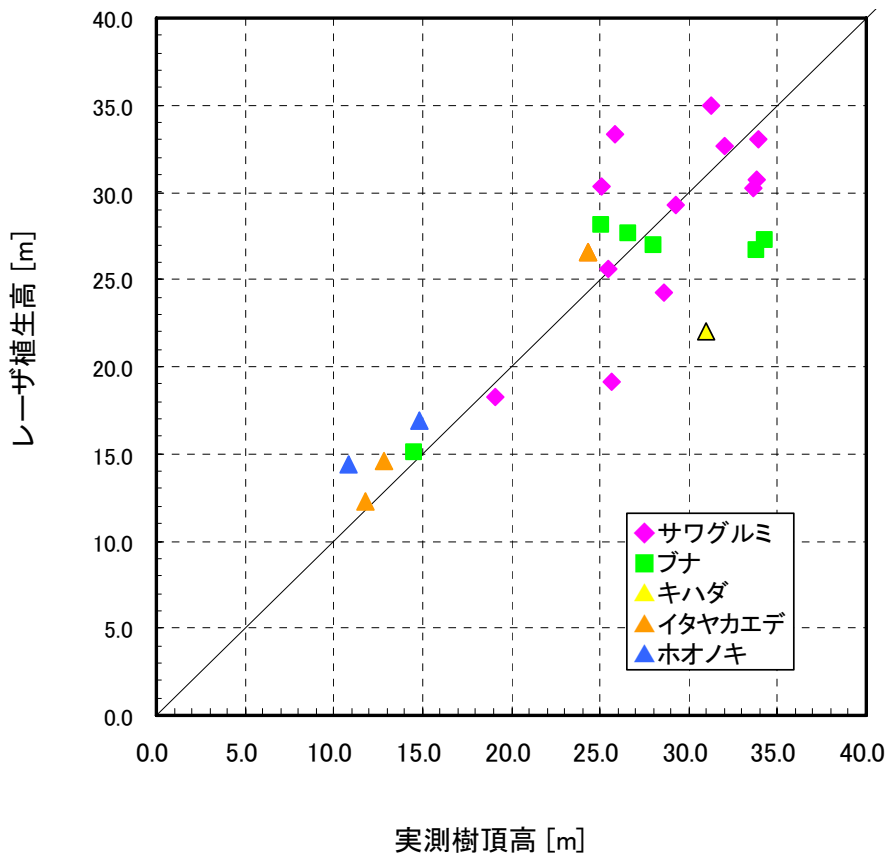


図-8 最終的に比較対象とした樹木の実測樹頂高とレーザ植生高。レーザ植生高は樹冠内の最大値を示す。

8. レーザ透過率と毎木調査の関係

着葉期と落葉期の航空レーザ測量データから、5mグリッドでレーザ透過率を計算した。ここでレーザ透過率は、5mグリッドを1mグリッドに区切り(5mグリッドに1mグリッドが25個ある)、何らかのパルスの反射点が存在する1mグリッドの個数(最大25個)に対する、地表面の反射点が存在する1mグリッドの個数の割合と定義した。

毎木調査によって得られた樹冠において、計算されたレーザ透過率を読み取って表-3に整理した。表-3のレーザ透過率の平均値を樹種毎(イタヤカエデ4本、サワグルミ20本、ブナ8本、ホオノキ2本)に求めたのが、図-9である(キハダは1本のみ)。

図-9を見ると、着葉期では、ブナのレーザ透過率が最も小さく、最も大きいキハダのレーザ透過率はその2倍近い値となった。また、落葉期にはサワグルミのレーザ透過率が、イタヤカエデ、ブナ、ホオノキと比較して大きいことが判った。すなわち、落葉したサワグルミでは、他の樹種と比較して、レーザ光が枝・葉で反射されず地表面に透過している。これは、「6.3」で検討した落葉期におけるサワグルミ林におけるレーザ反射点の垂直的な分布の傾向と同様である。キハダも、落葉期にはサワグルミと同じ程度のレーザ透過率を示した。

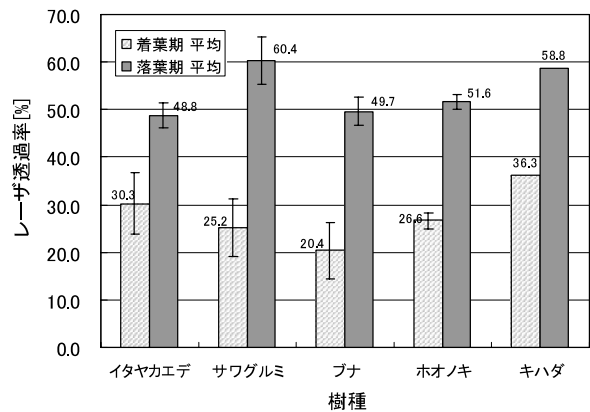


図-9 樹種に応じたレーザ透過率(平均値)。エラーバーは標準偏差。キハダの対象本数は1本。

9. 調査対象木のレーザ反射点垂直分布率

「6.3」と「7.」で述べたように、着葉期においても、航空レーザ測量のレーザ光が全て樹冠で反射するのではなく、ある程度透過すること、また、環境省東北地区自然保護事務所(2005)は、本研究の対象地区から赤石川の downstream 8km のテストサイトにおいて、高さ別のレーザ反射点分布率を地上型レーザ測距儀による場合と航空レーザ測量による場合で比較したところ、両者には良い相関

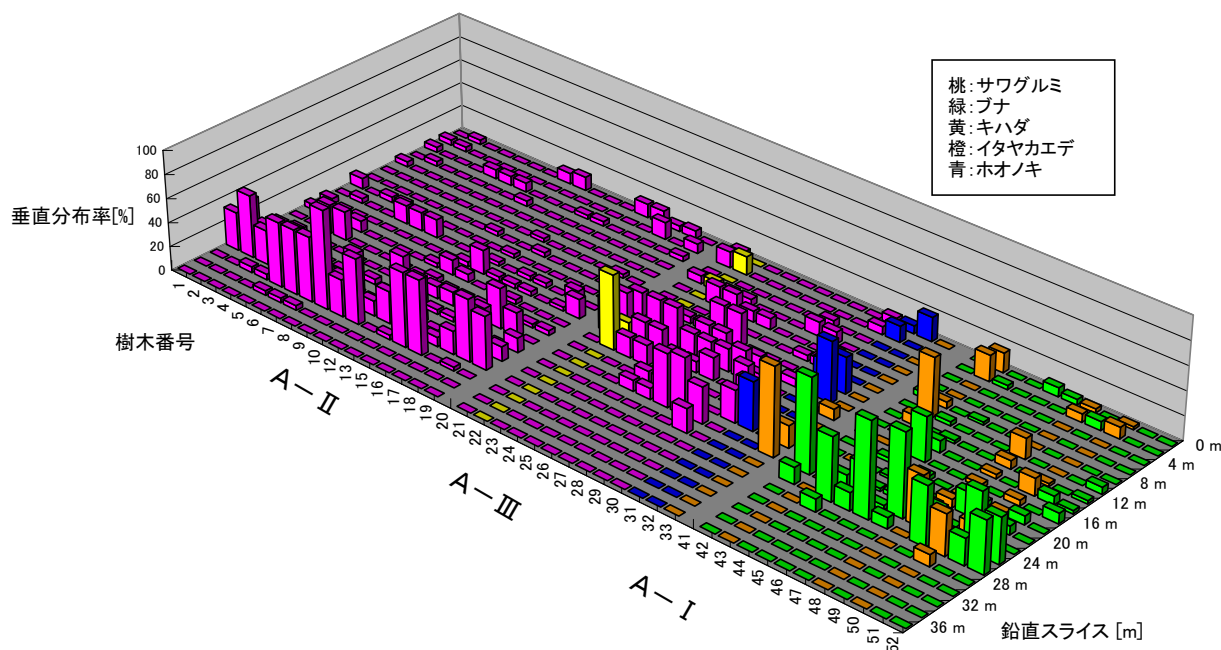


図-10 着葉期のレーザ反射点垂直分布率グラフ

があることを示した。

植生の類似する本研究の対象地区においても、航空レーザ測量データを用いて、上空からでも樹冠に完全に遮られることなく、着葉期の葉や枝・幹からなるバイオマスの垂直方向分布率を明らかにする可能性がある。

本研究では、着葉期の全パルスのレーザ反射点数を5mグリッド毎に数え、次に、注目する5mグリッドにおいて高さ方向2mレベルスライスで層別レーザ反射点数を数え、最後に層別レーザ反射点数を全反射点数で割ることによって、平面位置5mグリッド高さ方向2m毎のレーザ反射点垂直分布率データを作成した。このデータを樹冠投影図と重ねることによって、幹の平面位置に相当する箇所でのレーザ反射点垂直分布率を対象木毎に調べた。その結果を表-4に示し、図-10はグラフ化したものである。これらの図表で、鉛直スライス0mとは地表面から0m以上2m未満の区間長2m、鉛直スライス30mとは、地表面から30m以上32m未満の区間長2mという意味である。表-4で樹種名にピンク色を付したのは、表-3において樹冠が他の樹木に覆われ、あるいは重複しているピンク色で彩色した樹木を意味する。また表-4では、垂直分布率20%以上の鉛直スライスを灰色で彩色した。

表-4を見ると、例えば樹木 No. 5, 6, 7の垂直分布率は等しい。これは、3つの樹木の平面的な隔たりが数mだったため、垂直分布率を読み取る5mグリッドのある1グリッドに、これら3本の幹の

平面位置が集中したためである。

表-4と図-10を見ると、方形区A-II（サワグルミ林）のサワグルミは上層の狭い範囲に比較的高い垂直分布率（すなわちバイオマスの集中）が記録されている。すなわち、葉・枝のバイオマス20%超の垂直分布率は鉛直スライス28m, 30m, 32mの合計区間長6mに集中しており、とりわけ50%超の垂直分布率が鉛直スライス30mと32mに多く見られた。この特徴は、「5.1」で分類した250cm~325cmの老樹グループと75cm~225cmの若樹グループの両方に見られる。例外的に、鉛直スライス22m付近で20%以上の垂直分布率が見られるのは、樹木 No. 4の垂高木の存在を反映し、鉛直スライス18m付近で20%が現れるのは、垂高木のNo. 12の存在を反映している。

また、表-4と図-10を見ると、方形区A-III（広葉樹混交林）の樹木の垂直分布率は上層のみならず中層までまんべんなく分布している。例えば、サワグルミに着目すると垂直分布率20%以上は鉛直スライス12m~26mの合計区間長16mに及ぶ。上層に比較的高い垂直分布率が集中する本数はA-IIの場合と比較して少なく、樹木 No. 27とNo. 28（鉛直スライス24mの43.8%と47.1%）である。No. 28の鉛直スライス16mで垂直分布率23.5%が現れる理由は、図-2(c)と図-5のA-IIIを参照すると、No. 28の下層の枝・葉の存在を示している。表-4の鉛直スライス12mで27.3%の垂直分布率が見られるのは、この付近における垂高木No. 26の枝・葉の存在

を示す。

A-I (ブナ林) のブナでは垂直分布率 20%以上が集中しているのは、表-4において鉛直スライス 24m~26mの合計区間長 4 mで、A-II より狭い区間にバイオマスが集まっていた。表-4を見ると、樹木 No. 43 と No. 48 のイタヤカエデの垂直分布率が鉛直スライス 10mでそれぞれ 48.6%と 17.2%であった。表-3の実測樹頂高がそれぞれ 11.8mと 12.9 mであったことを考えると、これらの垂直分布率は、亜高木のイタヤカエデの樹冠部、すなわちバイオマスの集中を示している。また、ブナのうち最も胸高直径が小さかった樹木 No. 45 (胸高直径 65cm) は、表-3を見ると実測樹頂高 14.5mの亜高木であり、2 m程度の違いはあるが、表-4における鉛直スライス 16m付近の鉛直分布率 36.6%と対応、すなわち樹冠の存在に応じたバイオマスの集中を表しているものと思われる。

まとめると、方形区A-II (サワグルミ林) では、老樹グループを更新する若樹グループも、胸高直径 250cm 以上の老樹に比肩するほど高木層にバイオマスを集中させており、若樹グループのサワグルミの成長の早さ (佐藤, 1995) を伺わせる。レーザ反射点垂直分布率は、高木層へのバイオマス集中を定量的に裏付けたが、胸高直径に応じて老樹・若樹グループと 2 分類される以上、垂直分布率だけを見て、すべての高木が同時期に萌芽したと結論するのは早計である。サワグルミの亜高木は、小規模な土砂攪乱に応じてこの林を更新していると思われる。その樹冠に応じたバイオマスの集中が、例えば鉛直スライス 18mや 22mに見られる。しかし、高木層へのバイオマスの集中に比べると散見される程度である。

方形区A-III (広葉樹混交林) では、胸高直径が 225cm 以上の大径木による一斉林は見あたらず、胸高直径 225cm 未満の 7 本のサワグルミ高木と 5 本のサワグルミ亜高木が入り交じって、バイオマスが鉛直方向に分散している。そのため、A-II のサワグルミ林と比較すると、サワグルミが徐々に更新していることを伺わせる。また、A-II と比較して、攪乱の頻度や規模の一層の低さや小ささを反映しているのであろうか、多様な樹種の侵入に応じて、バイオマスをより一層、鉛直方向に分散させているようである。

方形区A-I (ブナ林) では、胸高直径 225cm~300cm の 8 本のブナが、鉛直スライス 24m~26mに枝・葉のバイオマスを圧倒的に集中させている一斉林であることが示唆された。鉛直スライス 10m~16 mには、亜高木の樹冠の存在に応じたバイオマスの集中がみられるが散見される程度であり、ブナまたはイタヤカエデ等によって更新が、しかも他段階的に進んでいるようには見受けられない。

10. おわりに

毎木調査によって植生断面図を描き、レーザ反射点と重ねることによって、樹種に応じた植生の 3 次元構造を視覚的に確かめることができた。着葉期では樹種によらず樹冠表面に反射点が多く見られたが、落葉期ではサワグルミの反射点がほぼ地表面に到達しているのに対し、ブナでは樹冠付近でレーザ反射点が多くみられることが判った。落葉期の航空デジタルカメラ画像で確認した結果、これは葉が枝に残っているためではなく、ブナの樹形 (幹・枝の太さや枝の複雑な重なり具合) を反映していることが判った。この違いは、レーザ透過率を計算することによって定量的に表現することができた。

レーザ植生高と実測樹頂高の比較においては、実測樹頂高に大誤差が含まれている可能性が高いことから、高木・亜高木・低木の目視判定を組み合わせることで大誤差を排除することによって、レーザ植生高の妥当性を吟味した。30mを超える大径木も多く存在する森林でのレーザ植生高の平均誤差が約 50cm であったことから、航空レーザ測量による植生高調査は、概ね十分な精度を有しており、広範囲の森林で樹高を計測する手段としては非常に有効な手段であることが確認できた。

航空レーザ測量でも、レーザ反射点密度が低いと樹頂で反射点を捉えきれないおそれがある。毎木調査で、No. 22 のキハダは樹冠が十分に発達していないことが確認されており、航空レーザ測量で樹頂が正確に捉えられなかった例であると考えられる。1 本だけのサンプルであるが、着葉期でさえ、キハダは他のどの樹種よりもレーザ透過率が高かった。しかし、本研究で用いた航空レーザ測量データは 1 m² に少なくとも 1 点、実際には概ね 1 m² に 2~3 点の密度で計測されていること、対象木が全て広葉樹からなり、樹冠の形状が針葉樹のように尖っていないことから、樹冠の中で最高点を計測する方法で計測した植生高には、こうした誤差は発生しにくいと推察される。また、レーザ反射点の垂直分布率を方形区毎、樹種毎に明らかにしたことにより、同じ樹種でも林分構造が異なることがあることを示した。

最後に、泊の平地区の入林及び調査に際しては、事前に津軽森林管理署の許可を得た。現地のガイドとして白神マタギ舎の工藤光治氏と小池幸雄氏、測量器材の運搬には弘前大学探検部、キャンプキーパーとして白神マタギ舎の小池宏美氏にお世話になった。ここに記して感謝します。

参考文献

- 環境省東北地区自然保護事務所 (2005) : 平成 16 年度白神山地におけるブナ林の森林構造及び動態の解明に関する調査研究業務報告書.
- 佐藤 創 (1988) : 道南松前半島におけるサワグルミ林の構造と成立地形, 森林立地, 30(1), 1-9.
- 佐藤 創 (1995) : 北海道南部のサワグルミ林の成立維持機構に関する研究, 北海道立林業試験場研究報告, 32, 55-96.
- 佐藤 浩, 中島達也, 福住真仁, 上妻由拓 (2005a) : 火山活動終了後の雲仙普賢岳・水無川流域におけるガリの一次元河床高変動計算, 地形, 26, 259-280.
- 佐藤 浩, 牧田肇, 八木浩司, 加藤 悟, 宮坂 聡 (2005b) : LIDAR による新たな植生図成手法の検討, 写真測量とリモートセンシング, 44(6), 36-39.
- 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.
- 松英恵吾, 伊藤拓弥, 内藤健司 (2006) : 航空 LiDAR による森林資源量推定 - 密度の異なるスギ・ヒノキの林分パラメータ推定 -, 写真測量とリモートセンシング, 45(1), 4-13.
- 米 康充, 小熊宏之, 山形与志樹 (2002) : 京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発 - 航空機 Lidar によるカラマツ林の樹冠計測と材積・炭素重量計測精度の検証 -, 日本リモートセンシング学会誌, 22, 531-543.
- Sekiguchi T. and Sugiyama, Y. (2003) : Geomorphological features and distribution of avalanche furrows in heavy snowfall regions in Japan, *Zeit für Geomorphologie.N.F.*, 130, 117-128.