

白神山地・ニッ森北麓における航空レーザ測量データと毎木調査結果の比較
Comparison between Airborne LIDAR Data and Tree Census Result in the Northern Area of
Mt. Futatsumori, Shirakami Mountains

地理地殻活動研究センター 佐藤 浩・小荒井 衛

Geography and Crustal Dynamics Research Center Hiroshi P. SATO and Mamoru KOARAI

中日本航空株式会社 加藤 悟

Nakanihon Air Service Co., Ltd. Satoru KATO

弘前大学 牧田 肇

Hirosaki University Hajime MAKITA

山形大学 八木浩司

Yamagata University Hiroshi YAGI

要 旨

気候的極相のブナ林が広がる世界自然遺産・白神山地を対象として、ブナ優占、サワグルミ優占、広葉樹混交の3ヶ所の方形区（長さ50m×幅20m）を設け、高木・亜高木の毎木調査（植生断面図・樹冠投影図の記載、測量による平面位置・樹頂高の実測、胸高直径の計測、樹種の認定）を行った。事前に計測した着葉期・落葉期の航空レーザ測量データと比較したところ、以下が判った。

1) 植生断面図をオールパルスのレーザ反射点の垂直分布と重ね合わせた。着葉期には、方形区に関わらずレーザ反射点は樹冠に多く分布した。落葉期には、ブナ優占よりもサワグルミ優占の方形区においてレーザ反射点がより多く地表面に到達していた。2) 樹冠におけるレーザ反射点の透過率（全反射点数に対する地表面への到達反射点数の割合）を樹種毎に調べた。着葉期はブナが最も小さく20%、最も大きいキハダはその2倍近い値となった。落葉期には、イタヤカエデ、ブナ、ホオノキの50%前後よりも、サワグルミが60%前後と有意に高かった。3) 航空レーザ測量データより計算したレーザ植生高から実測樹頂高を引いた値を誤差とすると、3つの方形区の平均誤差は-0.48m、平均二乗誤差は4.08mとなった。4) 高さ方向2mレベルスライスでレーザ反射点の垂直分布率を調べた。ある高さの垂直分布率が極めて高いほどバイオマス（枝・葉）がその高さに集中していると考えられる。樹木の胸高直径や樹頂高と合わせて考えると、垂直分布率は更新が一斉なのか徐々なのかの指標となる可能性がある。

1. はじめに

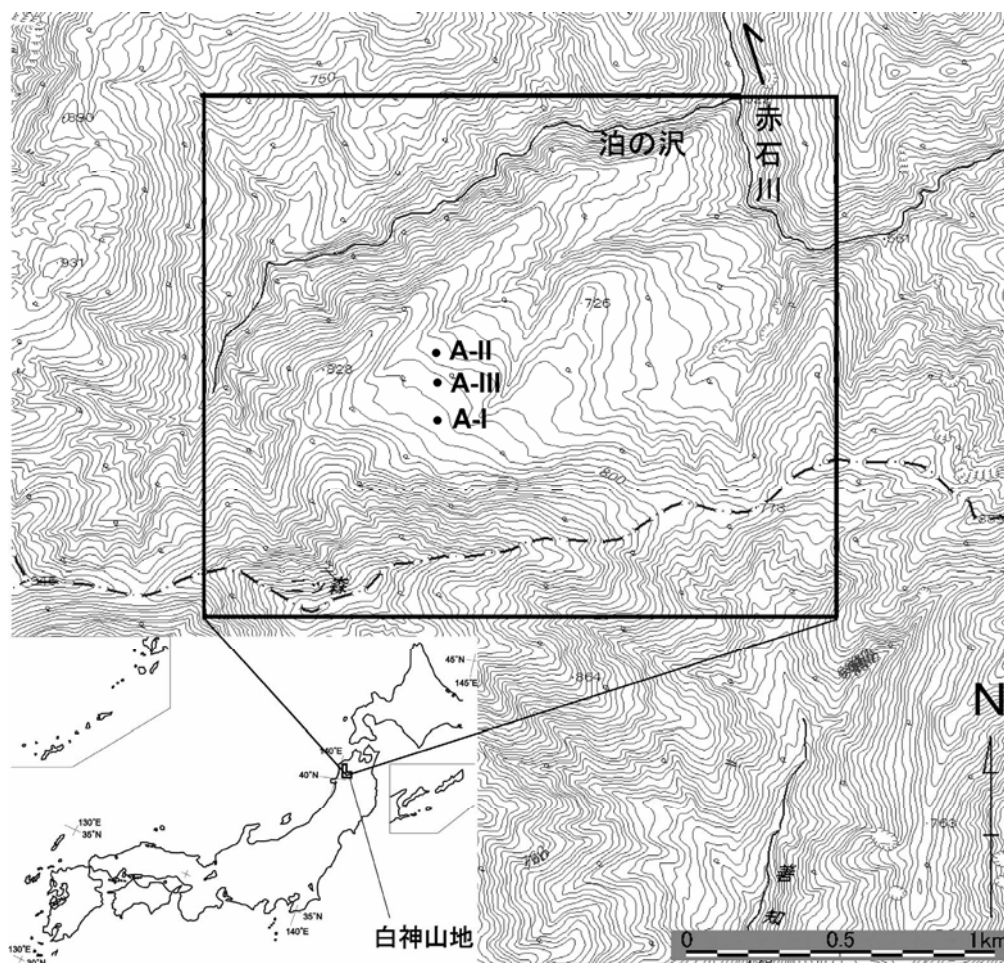
航空レーザ測量データは、今世紀に入り植生調査に応用されてきた。例えば、米ほか（2002）はカラマツ林の植林地において、航空レーザ測量データのファースト・ラストパルスのレーザ反射点群データからそれぞれ樹冠面、地表面を表す0.33mグリッド

のDSM (Digital Surface Model) とDTM (Digital Terrain Model) データを生成し、それらの差分（以下、「レーザ植生高データ」という。）に Watershed アルゴリズム処理して得た樹頂点のレーザ植生高を得た。毎木調査による樹頂高（代表木の胸高直径と樹頂高を実測して関係式を作り、既に判っている全木の胸高直径に内挿して推定した高さ）と比較して平均誤差0.1m前後、平均二乗誤差0.9mを報告している。

瀬戸島ほか（2005）は落葉広葉樹の二次林において、落葉前・中・後の3時期の航空レーザ測量データから TIN (Triangulated Irregular Network) で内挿した1mグリッドDSM データを生成して樹林の垂直方向の樹冠面変化を比較し、現地の常緑・落葉高木層や常緑低木層の垂直分布をよく反映していることを明らかにした。また、トータルステーションによる実測樹頂標高を正解として航空レーザ測量による樹冠面の標高を比較したところ、樹木が垂直に成育している場合はよく一致するが、倒伏して成育している場合は一致が悪く、最終的に平均二乗誤差が1.5mであることを報告した。

松英ほか（2006）は、スギ・ヒノキの植林地の複数プロットにおいて、航空レーザ測量データから Kriging 法で内挿して生成した0.1mグリッドレーザ植生高データを使って自動抽出 (Local Maximum Filter 処理) した樹頂点でレーザ植生高データを読み取り、平均樹高を計算した。これを毎木の実測樹頂高と比較して、スギ7プロットとヒノキ7プロットにおける平均誤差は、それぞれ0.58mと0.22mとなったことを報告している。

以上は、人の手が加わった樹林において、林分構造の記載や林分パラメータの推定に航空レーザ測量データの有用性を述べた研究例である。しかし、白神山地のような気候的極相に達している林分の記載や計測に航空レーザ測量データを応用した例は多くない。本研究の目的は、そのような極相林における



図ー1 研究対象地区と方形区の位置

今後の植生調査の基礎資料として、航空レーザ測量データの有用性と適用例を示すことである。

2. 研究対象地区

秋田・青森県境に位置する白神山地は、わが国に3ヶ所ある世界自然遺産の1つであり、人為的な影響が極めて低いブナ林が広がっている。本研究では、県境のニッ森北麓、泊の平地区（図ー1：3.8km²）を研究対象地区とした。標高が最も高いのは、対象地区の南に位置する花こう岩類からなるニッ森（標高 1,086m）であり、最も低いのは、赤石川本川と泊の沢の合流（標高 522m）である。

草本のチシマザサ (*Sasa kurilensis*) は、ブナ (*Fagus Crenata*) の林床を覆うほか、高木・亜高木を欠いている箇所において、ある程度広い面積を占める草地をなす。谷やガリーに沿って常に土砂移動の影響にさらされる下部谷壁斜面や、ニッ森北面をはじめとする箇所では雪崩が岩盤を刻み込んだ筋状地形 (Sekiguchi and Sugiyama, 2003) など、雪崩の影響を受けた斜面（以下、「雪崩斜面」という。）では、イワノガリヤス (*Calamagrostis langsdorffii*)

などの草本、エゾニュウ (*Angelica ursina*) などの高茎草本が、小地形・微地形に応じて、ある程度まとまった面積をもって分布している。また、雪崩斜面にはマルバマンサク (*Hamamelis japonica* var. *obtusata*)・タニウツギ (*Weigeta hortensis*) などの低木が点在する (佐藤ほか, 2005b)。

3. 航空レーザ測量データ

後述の毎木調査の結果と重ね合わせるため、表ー1に示すように、落葉期と着葉期の航空レーザ測量データを取得した。これらのデータは、ファースト、セカンド、サード、ラストの4つのパルスに対応するレーザ反射点を含んでいる。落葉期のラストパルスのレーザ反射点から、自動フィルタリング及び画面上での目視によるフィルタリングを通して植生におけるレーザ反射点を排除し、TIN による補間によって、1mグリッドDTMデータを生成した。

本研究の対象地区では、裸地は別として、レーザ反射点は、一般に植生の表面で反射したものが多い。そこで、TIN による補間によって着葉期・落葉期の1mグリッドDSMデータを生成した。さらに、落葉

期の1 mグリッド DTM データとの差分から、着葉期・落葉期の1 mグリッドレーザ植生高を計算した。このデータにより、植生の高さを高密度かつ広域に把握することが可能になる。

表ー1 航空レーザ測量データ諸元

取得月日	2004年7月31日	2004年10月30日
パルス周波数	24,000 Hz	69,000Hz
データ取得幅	532.1 m	532.1 m
スキャン周波数	30 Hz	45 Hz
計測回数	2回/1コース(対面方向に飛行)	1回/1コース
対地高度	203.7 km/h	203.7 km/h
スキャン角度	25°	25°
ビーム幅	0.3 mrad	0.3 mrad
コース間隔	250 m	250 m
コース間重複率	基準面標高 700m において約 53%	基準面標高 700m において約 53%
計測点間隔	1.89 m(進行方向) 1.37 m(進行方向と直交する方向)	1.26 m(進行方向) 0.72 m(進行方向と直交する方向)

4. 毎木調査

2005年10月1日～5日に局地的な毎木調査を行い、広域的なデータを取得できる航空レーザ測量データと比較してその妥当性を検討しようとした。白神山地の植生は気候的極相としてのブナ林に代表されるが、泊の平ではブナと並び土地的極相のサワグルミの純林なども分布し、いずれも樹高30mに及ぶ大径木によって林分が構成されている。

緩傾斜地では上層木の植被率もおおむね低く、個々の樹冠に間隔のあることから林内・林床の見通しが可能であり、比較的単純な林分構造となっている。そこで、方形区の大きさを50m×20mとして、樹頂高10m以上の樹木を対象に毎木調査を行った。

4. 1 方形区の設定

現場における方形区の設置位置については、落葉期の2 mグリッド DTM 航空レーザ測量データから作成した2 m間隔の等高線図、1975年に国土地理院が撮影した空中写真を判読して別途作成した相観植生図と正射画像、正射画像と等高線図の重ね合わせ図を参照した上で、決定した。

その結果、泊の平の地すべり平坦面(標高700m前後)で3ヶ所、1)ブナ優占の地点、2)サワグルミ優占の地点、3)広葉樹混交の地点、すなわちサワグルミが主であるが、周辺にはブナが分布するほかイタヤカエデ(*Acer pictum*)・ホオノキ(*Magnolia obovata*)など多様な樹種が分布する地

点を選んだ。以下、図ー1に示すように方形区を北からA-II, A-III, A-Iとする。樹木番号もこの順に付した。

4. 2 方形区の概要

4. 2. 1 A-II (サワグルミ林)

泊の平中央やや北西側、地すべり滑落崖下の東西に伸びる浅い谷底面のサワグルミ純林であり、南側を滑落崖に区切られる東西方向の方形区を設定した。図ー2(b)に、方形区A-IIの2 m間隔等高線図を示した。これは、落葉期の航空レーザ測量によるDTMデータから作成した図である。A-IIが位置する谷は、滑落崖と地すべり移動体の間に形成された凹地に相当する。

この凹地内部の微地形に着目すると、方形区A-IIは、滑落崖基部の標高736m～742m、傾斜18°前後の崖錐あるいはその二次的な堆積面(以下、「崖錐性斜面」という.)と谷底面(標高730m～736m)の境界付近に位置している。方形区の北側において谷底面を刻むガリーは東流しており、それに向かって浅い谷が崖錐性斜面を刻んでいる。この斜面に繁茂する植生と黒褐色の土壌の存在から、大規模な土壌攪乱の頻度は、それほど短くないと考えられる。

方形区の西端には、滑落崖上より高位面(標高760m付近より斜面上方)を刻むガリーが滑落崖を侵食して方形区に流入しており、高位面からの流送土砂というよりも、滑落崖を構成する無層理のマサ土、挟在する貧弱な成層構造を有する花こう岩類の角礫・亜円礫由来の土砂がガリーに沿って滑落崖基部に流送され、谷底面を被覆している。すなわち、方形区西端は、中径10cm前後の礫交じり砂質の扇状地(傾斜11°前後)に相当する。この傾斜を考えると、この扇状地の形成は、流れ全体に砂礫が分散している飽和岩屑流(土石流)というよりも、掃流状集合流動(上層に水の層を有する流れで、下層が砂礫の集合流動)で形成された(佐藤ほか, 2005a)のであろう。扇状地上は植生が乏しいこと、土壌を欠いた砂分の堆積物や地衣類の付着を欠いた礫が露出していることを考えると、扇状地への流水と土砂供給はほぼ毎年のように活発に繰り返されている。

このような地形的特徴を踏まえると、方形区A-IIのサワグルミ林は、佐藤(1988)が北海道南の松前半島で記載したサワグルミ林における3タイプの地形(土石流段丘型・沖積錐型、河岸段丘型)のうち、沖積錐型に近い。

高木層・亜高木層ともすべてサワグルミが占め、他の樹種は出現していない。高木層は樹高25m～35m、植被率60%～70%、亜高木層は樹高15m～20m、植被率は40%程度である。林内はやや暗い印象であるが、上層の空隙部分も少なくない。低木層に

はサワグルミの幼木のほか、オオカメノキ、ミネカエデ (*Acer tschonoskii* Maximowicz) などが認められ、樹高は2 m～5 m程度、植被率は10%以下である。草本層は全体的にリョウメンシダなどのシダ類が優占するが、方形区西端の扇状地では草本層を欠く。チシマザサは一部で密度が高いが全体的な被度は低い。その他の草本としてはエゾニュウ、エゾアジサイなどが少数認められる。

4. 2. 2 A-Ⅲ (広葉樹混交林)

方形区A-Ⅲは、方形区A-IとA-IIのほぼ中間、A-IIより高位の面にある。A-Ⅲの面とA-IIの面との間には地すべり滑落崖がある。方形区A-Ⅲの標高は760m～780mであり、方形区北半分が位置する浅い谷は、A-Ⅲの北にある滑落崖に向いているというよりも、北西を向いて凹地状をなしている。この浅い谷に向かって、方形区の南南西の方向からガリーが流入しているが、林床は黒褐色の土壌に覆われ、その表面が流送土砂による攪乱を受けている痕跡は無かった。ただし、こうした浅い谷では毎年の融雪期、直ちに排水されるような布状洪水の影響を受けているかもしれない。

方形区A-IIの南を限る滑落崖の地質露頭から考えると、方形区A-Ⅲの土壌下部は、ニッ森の風化物が土石流あるいは雪崩で供給されてきた無層理のマサ土とそれに交じる中径15cm前後の花こう岩類角礫・亜円礫からなると思われる。しかし、それらが方形区A-Ⅲの地表面に露出することはない。

方形区内はキハダ (*Phellodendron amurense*)、ホオノキを含むサワグルミ林となっている。周囲はイタヤカエデの高木を含むブナ林が分布していた。高木層は樹高20m～30m程度のキハダ、サワグルミが中心であり、方形区外のブナ、イタヤカエデも方形区内に枝を広げていた。植被率は50%程度であるが、キハダの枝葉密度はやや低い。亜高木層には少数のサワグルミ・方形区北端のホオノキが含まれる。樹高は15m、植被率20%以下、林内は明るかった。

低木層には樹高2 m～3 mのオオバクロモジ、オオカメノキがやや多く、高さ約6 mのブナの稚樹も認められた。また、ホオノキ (亜高木) の周辺では高さ3 m以下の萌芽が群生しており、多雪の影響のためか樹形が著しく変形していた。低木層の植被率は20%～30%である。草本層はチシマザサが優占しており、植被率は80%～90%、部分的に密生状態となっていた。そのほかではヒメアオキ、ユキザサ (*Smilacina japonica*)、シダ類が少数認められた。

4. 2. 3 A-I (ブナ林)

ニッ森北東側緩斜面のブナ林であり、泊の平中央を南南西方向に伸びる谷の先端部分に位置する。谷

壁には、方形区A-IIの南の滑落崖で見られた厚いマサ土や、花こう岩類の礫が同様に確認されたが、礫層の層厚は薄い。方形区は西北西～東南東に設定しており、谷から派生する深さ1 m前後の複数の浅いガリーが南南東から横断方向に刻まれている。林床は黒褐色の土壌に覆われる。ガリーの河床には一部マサ土が露出することから侵食河床であり、ガリーを通じて供給された砂礫が林床表層の土壌を覆うことは無い。その他、地形・地質的条件はA-Ⅲに似ていた。

高木層はほぼブナの純林となっており、樹高は25 m～30m、植被率は40%程度である。亜高木層にはブナのほかイタヤカエデが現れ、樹高は20m、植被率は高木層よりやや低く30%ほどである。林内は上層木を大きく欠く部分もあり、全体的にやや疎林の傾向であった。

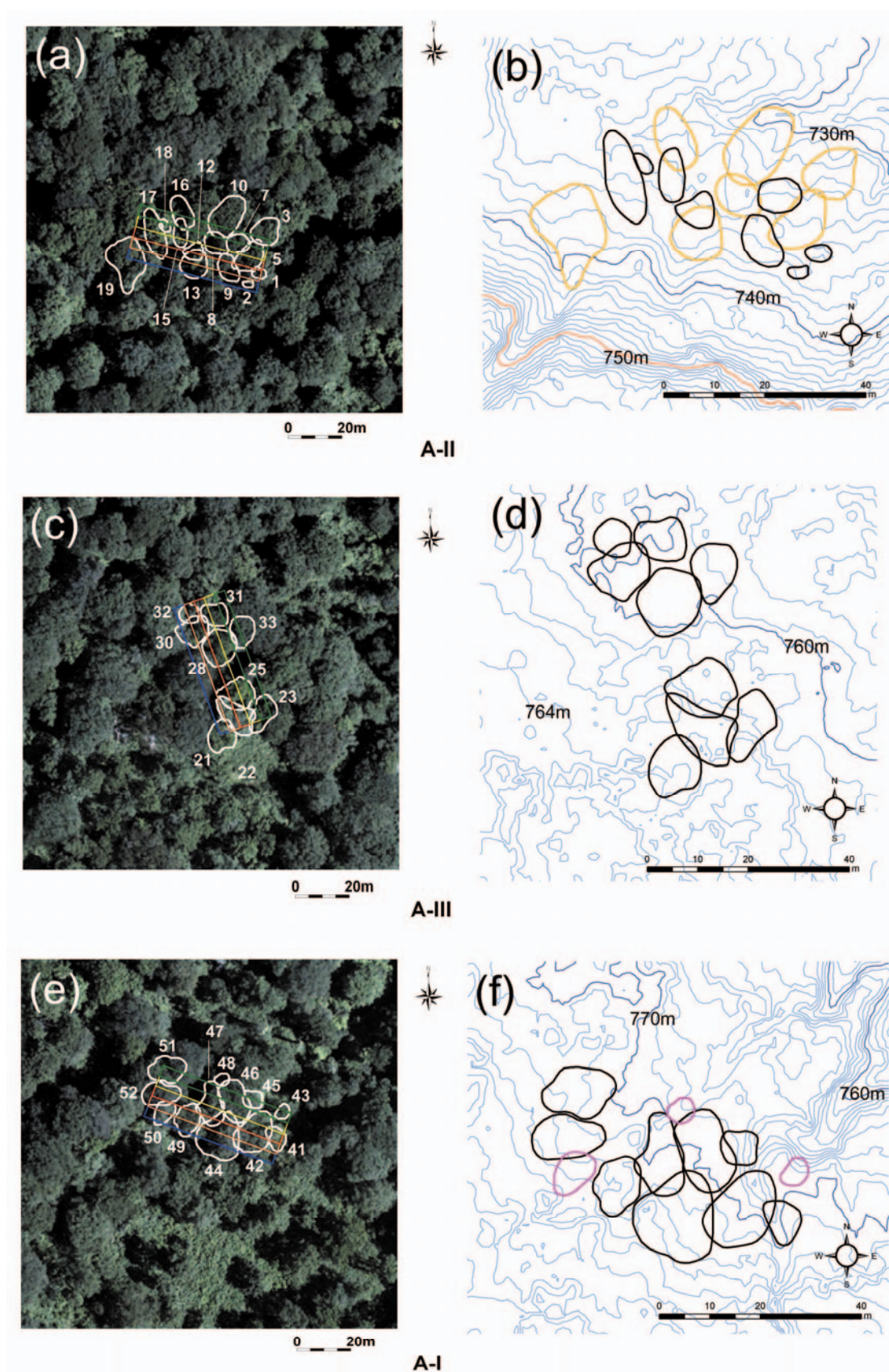
低木層には高さ5 m～10mのイタヤカエデが少数認められるほか、高さ5 mまでのサワグルミ、オオカメノキ (*Viburnum furcatum*)、オオバクロモジ (*Lindera umbellata* var. *membranacea*)、ハウチワカエデ (*Acer japonicum*) などが含まれた。植被率は10%～20%程度でかなり疎である。草本層は高さ1.5mまでのチシマザサが優占するが、分布にはやや偏りがあり、植被率は0%～60%程度である。その他の草本層としては、ヒメアオキ (*Aucuba japonica* var. *borealis*)、エゾアジサイ (*Hydrangea serrata* var. *megacarpa*) や、リョウメンシダ (*Arachniodes standishii*) などのシダ類が散生していた。

4. 3 方形区の調査内容・方法と結果

方形区では、1) 4隅の平面位置の測量、2) 樹種の認定、3) トータルステーションによる樹頂高の実測、4) 胸高直径の計測、5) 幹の平面位置の測量、6) 高木、亜高木、低木の目視判定、7) 方形区長辺方向の植生断面図 (林分の断面図) の記載、8) 高木・亜高木の樹冠投影図の記載を行った。

平面位置の測量は、以下の手順で行った。まず、各方形区近傍の上空の開けた箇所 GPS 測量機を用いたスタティック測量を行った。

次に、最寄りの4点の電子基準点 (岩崎、藤里、西目屋、能代) のGPSデータを用いた三次元網平均計算処理を経て基準点の位置を決めた (平面 X, Y 及び高さ方向の標準偏差: それぞれ4 mm 前後)。さらに、基準点からトータルステーションを用いた多角測量によって方形区4隅や幹の平面位置を測量した。多角測量の閉合差は4 cm 前後であった。従って、平面位置の測量精度は誤差伝播の法則から4 cm 前後と考えることができる。



図ー2 (a) (c) (e) : 樹冠投影図と図ー5, 6で色分けされたレーザ点群を囲む矩形位置 (同色で示す). (b) (d) (f) : 樹冠投影図と方形区的位置を1m間隔の等高線図 (落葉期の航空レーザ測量データに基づく) に重ねた図. 樹冠に付した番号は, 表ー3の樹木番号と一致する. 樹冠が他の樹木によって被覆あるいは重複している樹木については省略. (b)の橙色・黒色の樹冠はそれぞれサワグルミの老樹・若樹グループ, (f)の赤紫色の樹冠はイタヤカエデ.

樹冠投影図の作成方法は、ビニールテープで引いた5m×5mの格子を目印に、樹冠平面投影の輪郭をスケッチした。測量した方形区4隅の平面位置を与えて、さらにその輪郭にも絶対座標を与えた。

表-2に1)の結果を示し、表-3に2)~6)の結果を示す。4)については「5.」に、7)については「6.」に詳しく述べる。8)については図-2に結果を示す。樹冠が他の樹木によって被覆あるいは重複している樹木については省略している。

表-2 方形区4隅の平面位置（平面直角座標系第Ⅹ系、世界測地系）

方形区番号	X	Y
A-II	49395.0	-60251.3
	49375.6	-60256.3
	49388.2	-60304.2
	49407.6	-60299.2
A-III	49306.8	-60285.6
	49313.8	-60266.9
	49267.2	-60250.3
	49260.4	-60269.0
A-I	49121.5	-60248.4
	49139.3	-60295.8
	49158.1	-60288.9
	49140.3	-60241.4

5. 胸高直径の頻度に見る方形区の特徴

図-3には、樹種別方形区別の胸高直径の頻度を示す。以下、方形区A-II、A-III、A-Iの順に特徴を考察する。

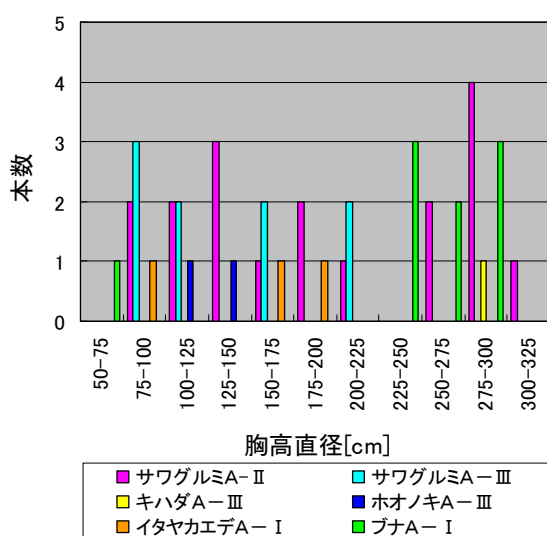


図-3 胸高直径の頻度

5. 1 方形区A-II

図-3の方形区A-IIにおけるサワグルミ（18本）の胸高直径には、125cm~150cmと175cm~200cm、275cm~300cmに3つのピークを持ち、最後のピークが最も明瞭である。175cm~200cmのピークは不明瞭のため、125cm~150cmをピークとする山に属するのかもしれない。そうすると、胸高直径が樹齢と正の相関があると仮定すれば、方形区A-IIのサワグルミは、胸高直径250cm~325cmの「老樹グループ」と75cm~225cmの「若樹グループ」に分けられると考えられる。

図-2(b)では、老樹グループに属するのは樹木No. 3, 5, 8, 10, 13, 16, 19であり、樹冠を橙色で示した。若樹グループはそれ以外であり樹冠は黒色である。若樹グループは老樹グループの隙間を埋めるように点在し、両グループに分布の偏りはない。また、老樹グループでは若樹グループに見られるほど樹冠面積の小さなものは無い。

以上から、老樹グループは、方形区西端に流入するガリーからの供給土砂による頻度の低い大規模な攪乱を受けた際に一斉に侵入したサワグルミに由来し、若樹グループは、ガリーあるいは崖錐からの頻度の高い小規模な土砂供給によって生じた攪乱のためにパッチ状に枯死したサワグルミの後に侵入した個体群であると考えられる。

5. 2 方形区A-III

図-3に示した方形区A-IIIにおけるサワグルミ（9本）、キハダ（1本）、ホオノキ（2本）の胸高直径のうちキハダが突出して大きい。キハダはA-IIIの樹木の中で実測樹頂高も一番高い（表-3）。サワグルミの胸高直径は、75cm~225cmに分布する。すなわち、A-IIIのサワグルミにはA-IIの若樹グループ相当樹はあるが、老樹グループ相当樹は無い。ホオノキは2本あり、胸高直径は100cm~125cm、125cm~150cm、実測樹頂高10m~15m（表-3）と、キハダ・サワグルミより小型である。

このことから、この方形区では、キハダの後継樹としての亜高木は無く、サワグルミについては小規模な攪乱によって生じた樹冠ギャップを利用した更新が進んでいると考えられる。その攪乱が土砂供給による土壌の攪乱なのか、風倒によるものなのかは判らない。北側に方形区A-IIを含むサワグルミ純林が立地することを考えると、新たに生じるギャップへの種子の供給源に欠くことは無い。ホオノキも、こうして生じた樹冠ギャップを利用して生育している。佐藤（1995）は、攪乱の頻度が小規模だとサワグルミ林は遷移後期種も含めた多様な林へと遷移していくと述べており、方形区A-IIIも、この事例に相当する広葉樹混交林と考えられる。