

巻末資料「精密調査区における調査・分析」

(1) 精密調査区の設定

簡易画像解析による標本調査の進め方や調査法の確立を目標として、その検証のため、調査区1 (区域面積 2.43ha) を精密調査区とした。森林を対象とした標本調査については数多くの報告 (嶺 1952, 木梨 1978, 大隅 1989, 南雲・箕輪 1990, 細田ら 2012, 森林総研 2012) があるが、現在広く行われている収穫調査の際の標本調査についてはその裏付けが必ずしも判然としていない。そこで今回、簡易画像解析を契機とした新たな標本調査を行うにあたり、改めて、人工林の立木分布や地形条件等と林分構造等の関係を明らかにしておく必要があり、2ha を越える比較的広い人工林を対象に調査分析を行ったものである。ちなみに、広い林内で全ての立木サイズや3次元位置関係を詳細に計測調査した事例はこれまでほとんどなく、人工林データとしては貴重な調査事例である。

当該区域面積 (2.43ha) の全立木について、胸高直径、樹高、形質等を計測するとともに、地上レーザ計測装置 OWL (株式会社アドイン研究所製) により全立木の地際の3次元位置座標を確定した。毎木調査と地上レーザ計測の結果を正確に照合し、広葉樹および 10cm 未満のスギについても識別できるように整理し、立木に通し番号を付し、幹材積を含めて全立木のデータを整理した。この精密調査区を設定することにより、立木の三次元位置をもとに、対象区域を任意のメッシュサイズに分割したり、円形あるいは矩形の調査プロットを任意の場所に設定することが可能であり、それらに基づいた様々な集計・統計解析をすることができる。

(参考) 精密調査区における林分調査の進め方

- 調査区域の設定
UAV 離発着の便宜を考慮して、林道に近接する箇所を起点として調査区域を設定した。2.43ha に及ぶ全立木を調査する便宜を考慮し、**図-1** に示すように区域全体を概ね 20m 四方に分割した。
- 周囲測量
使用機材: ポケットコンパス及びレーザ距離計 (TruPuls) で計測し区域を確定した (**図-1**)。
- 立木位置の計測
森林 3次元レーザ計測装置 OWL (アドイン研究所製) を用いた。レーザ計測に際しては、立木の配置 (ギャップの有無など) や立木密度あるいは微地形の凹凸に配慮してスキャン地点を選びながら、林内をおおむね 10m 間隔で移動しながら計測した。
- 立木調査
毎木調査にあたっては、**図-1** の調査区画ごとに、胸高直径4cm以上の立木すべてに、立木番号を付し、胸高直径 (2cm括約) および樹高 (1m括約) を計測した。樹高計測にはVertex (Laser Technology 社製) を用いた。品質区分については、一般材と低質材とし、そのほか枯損木や欠損等の欠点を記録した。

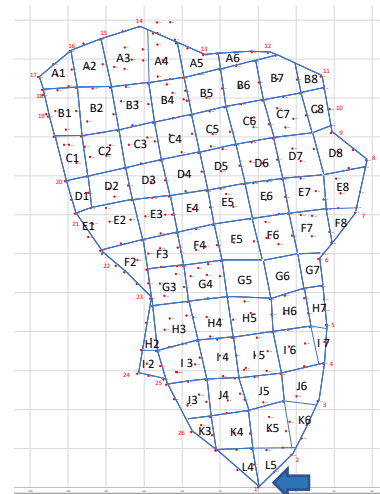


図-1 精密調査区に設定した
およそ20m四方の調査区画
最下部矢印が周囲測量の起点である。

(2) 精密調査区における立木の空間分布

精密調査区的全立木のデータセットから、立木の混み具合、サイズの違い、微地形とそれらの相関関係等、林分の空間構造を検討するとともに、収穫調査のためのサンプリング法を絞り込むための判断材料となる統計分析を行った。

① 林冠高および林分断面

OWLを用いたレーザ計測によって対象林地の地形情報も得られており、立木サイズと組み合わせることで、**図-2**のように林内の任意のラインについて、地形と樹高を表示させることで林分の断面構造を確認することができる。この図を見ると、斜面の上部から下部に至るまで、意外に樹高差は小さく、林冠高は地面とほぼ平行に推移していることがわかる。つまり、林分の断面を見る限り、微地形によって樹高はあまり影響を受けているように見受けられる。樹高の詳細は後述する。

本調査区は平均傾斜約20度であり、**図-3**に示すように、全体としては比較的なだらかということになるが、微地形的には40度を越える急斜面があり、また流量が少ないながらも小溪流が入り、過去の間伐の際の作業路もあって、微地形としては変化が見られる林分である。

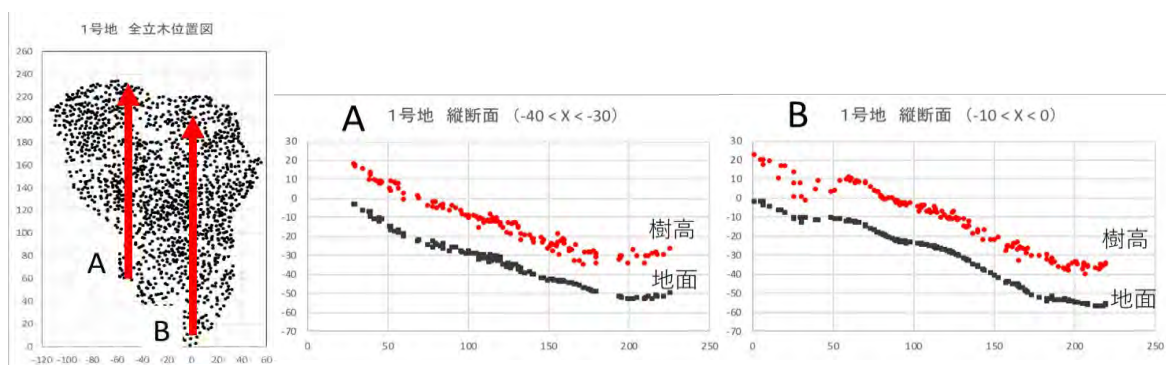


図-2 精密調査区の横断面例

対象区域のA及びBラインにおいて地盤高及び樹高をプロットした。

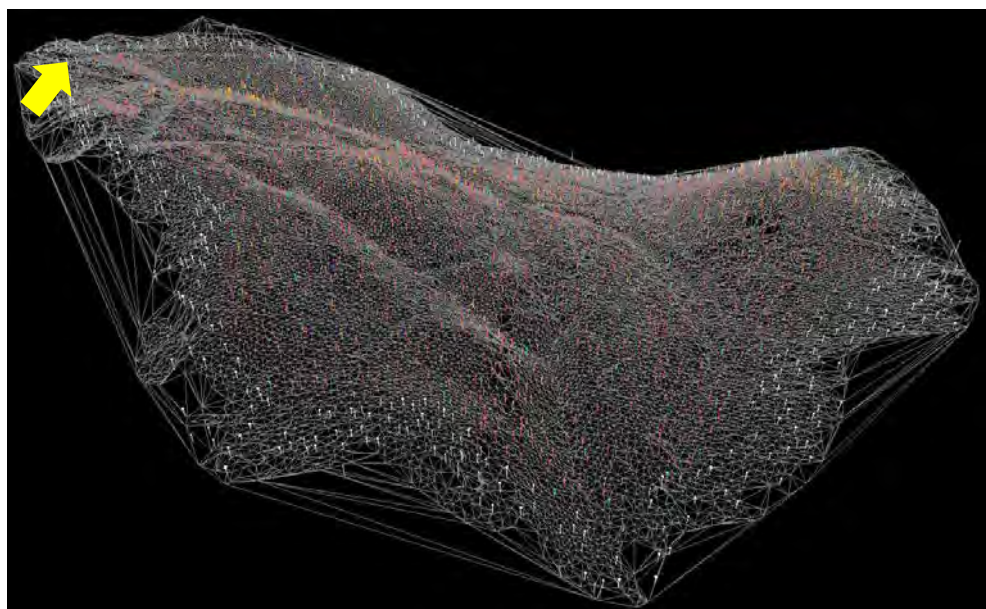


図-3 精密調査区（調査区1）の地形

左上の矢印は図1と同じく周囲測量の起点位置

② 立木サイズの空間分布

全立木の胸高直径、樹高、単木材積の面的分布を確認した（**図-3** A, B, C）。図中の○印の大きさは、立木サイズの大きさの違いを相対的に表示したものである。また各図の黒色●は、それぞれのサイズが平均値以下の立木である。図のマスキは20m間隔である。

この調査区の地形をおおまかに見ると、図の最下部が最も標高が高く、上方に向かって斜面が下って、上の1/3でやや上昇するような地形である。林地の中央部で立木本数が多く、そのため平均胸高直径が小さく、平均樹高もやや低いことがわかる。立木配置について見ると、斜面の上部や下部といった地形的な要因に関係しているというわけではなく、現地の微地形で判断すると、やや凸地形の場所で立木密度が高かったという印象である。

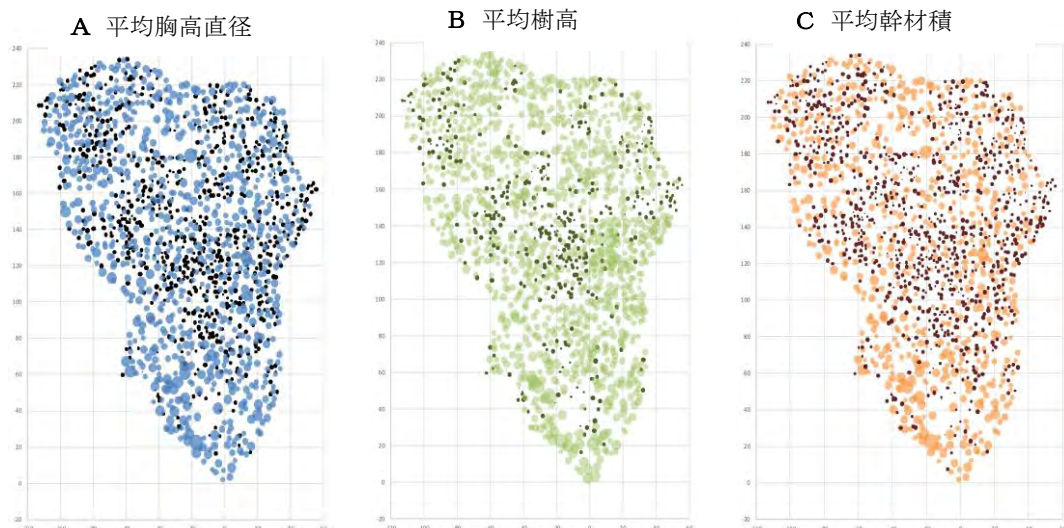


図-3 精密調査区における全立木のサイズ分布
各図の●印はサイズが平均値以下の立木を示す

胸高直径と樹高の分布図で、平均値以下の個体数に注目すると、樹高の方が平均値以下の個体が少ないように見える。これは、胸高直径と樹高のヒストグラムを比べればわかるように（図-4A,B,C）、胸高直径はやや小さい個体数が多く、樹高はやや高い個体の方にヒストグラムのピークが偏っているためである。材積では、さらに小さい個体にヒストグラムが偏っているため、図-3でわかるように、平均値以下の個体数が多くなっている。

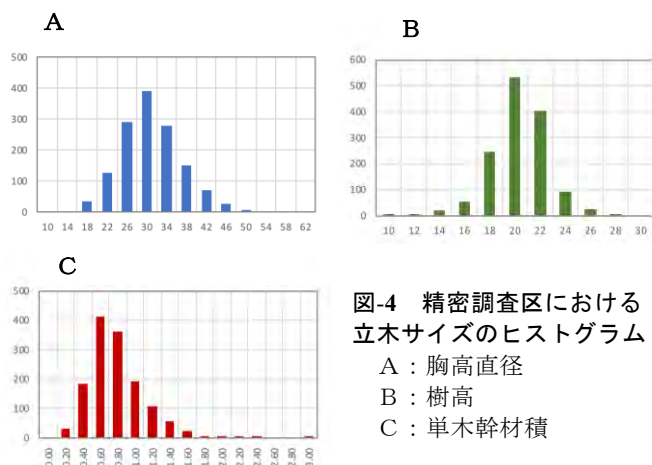


図-4 精密調査区における立木サイズのヒストグラム
A：胸高直径
B：樹高
C：単木幹材積

立木位置をもう少し単純化するため、図

-3の20mメッシュごとに平均の立木サイズ、林分密度、地盤高等を集約したのが、図-5である。林内の立木本数密度（下段左）は中央部と左上の箇所が多く、そのために平均直径はそうした場所で小さくなっており、平均樹高も中央部でやや低い傾向がある。それに対してha材積は（図右上）、林分密度との関係は認めがたく、林分全体で大きな違いは見られない。

図右下は地盤高だが、一般的な想像としては、地形に応じて地位が変化すると考えられるので、地盤高が低い箇所（谷部）ほど樹高が高いといった傾向を予想しがちであるが、上述したように、樹高や胸高直径に関して地位の影響は必ずしも認められず、むしろ図2で示したように林冠高（平均樹高）はほぼ同程度であった。当該林地には間伐実行の際の作業道や搬出路があつて、その近傍では立木が少ないといった状況もあるが（図6）、伐期齢近く到達した人工林では、それまでの施業の影響等もあつて、林地全体としてみるとその構造や個体サイズは均質な状態になっているわけではない。

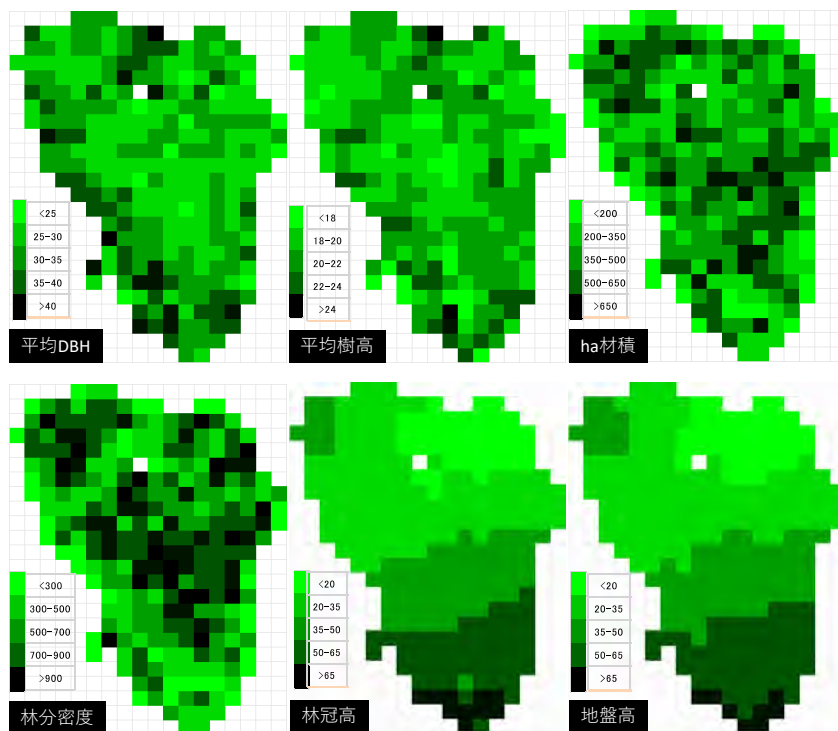


図-5 メッシュ化した林分データ

各計測項目の値が「大きい」あるいは「高い」ほど濃色で示した。ただし、林冠高と地盤高は相対値であり実際の高さではない。



図-6 疎開された林冠

③ 立木サイズの定量的な関係

土壌条件が均一な平地林であれば、個々の林木は概ね揃って成長するはずであるが、植栽当時の立地条件や植生あるいは地ごしらえなど様々な要因が絡み、それが植栽木の成長差として現れる。本調査地についても林木成長の不均質さが確認されたが、不均質さの程度については、現時点では比較対照とする情報がなく不明である。ただ本調査地はその面積が2.43haと広く、すでに述べたように微地形レベルでの多様さ(傾斜で0~40度)、林分密度(100~900本/ha)やhaあたり材積(150~700m³/ha)のバラツキの大きさは比較的大きく、収穫調査における標本サンプリングを探る上では恐らく好適な不均質さを呈しているものと推察される。

改めて、標本サンプリングを探るために必要な条件を検討するため、立木サイズを左右する要因について分析する。収穫調査を目的とする以上、立木のサンプリングに際しては、そのサイズを万遍なく網羅するとともに、その本数ヒストグラムの傾向が林分全体のものと相似形になるのが理想であろう。簡易画像解析法では、オルソ画像の解析によって立木の空間分布、すなわちメッシュ単位の立木(本数)密度は確実に得られるが、立木サイズに関する情報は不明である。そこで、立木密度と立木サイズに定量的関係が見出せるのであれば、立木密度の情報を以て標本サンプルの指標とすることができると考えられる。これは「密度効果」からの類推である。

そこで、精密調査区を異なるメッシュサイズ(10m、20m、30m)に分割して、メッシュごとの立木密度(haあたり本数に換算)と立木サイズの関係解析した。単一の林分内での分析なので、直ちに密度効果と同様の関係を期待することはできないが、それでも図-7に示すように、平均胸高直径林分密度との「べき乗関係」($Y = a X^{-b}$)は、10mおよび20mメッシュで統計的には有意であった。平均樹高については、すでに述べたように、本調査区内でそれほどの樹高差が認められなかったが、10mメッシュでのみ林分密度と有意な関係が認められた。言い換えると、平均胸高直径および樹高については林分密度との間でマイナス勾配の”べき乗式”の成立が認められ、立木サイズが林分密度と依存関係にあるということである。一方、haあたり材積と林分密度の関係(下段)は

すべてのメッシュサイズで正の相関が認められた。以上の結果から、単一林分内のことではあるが、サンプル調査を行うにあたって、林分密度を主たる指標とすることによって、立木サイズも反映したサンプリングが一定程度可能と判断される。

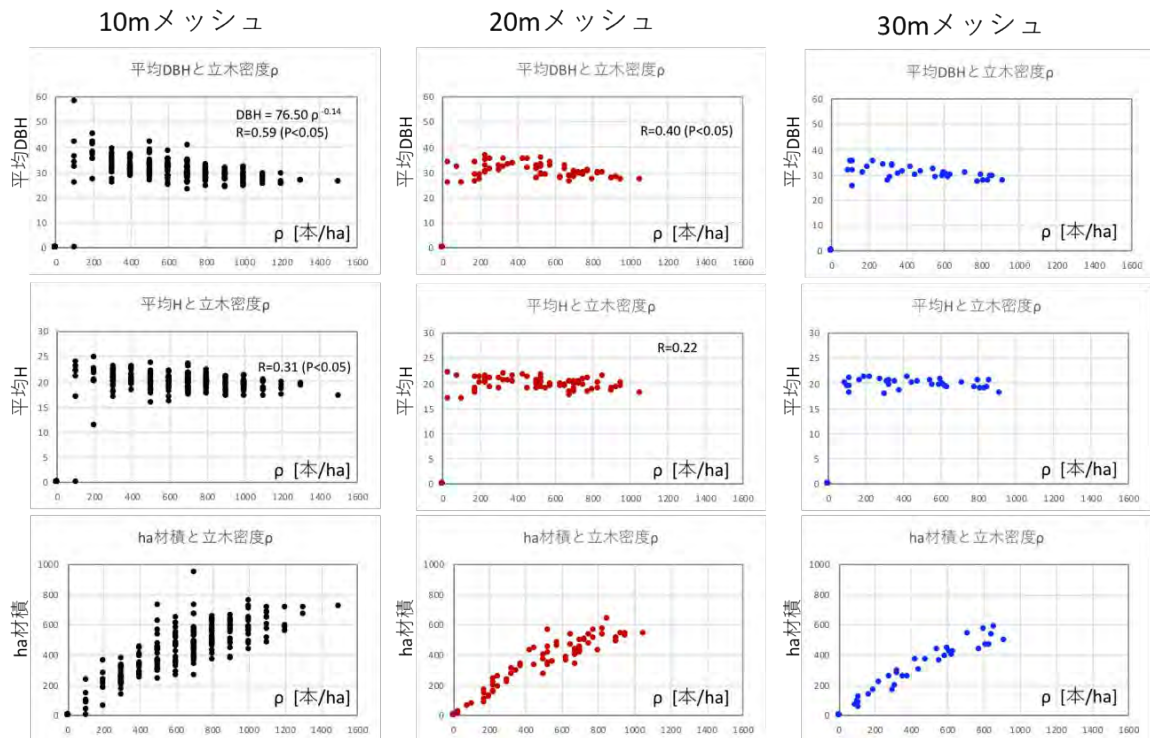


図-7 異なるメッシュサイズによる立木サイズと林分密度の関係解析

(3) 円形プロットによるサンプリングのシミュレーション

収穫調査における標本調査法のひとつとして、円形プロットによるランダムサンプリングも現実的な手法としてはあり得る。林分内の不均質さを考慮すれば、その不均質さに応じてサンプル数が増えることになるが、本調査林分にあつて、統計的に妥当なサンプリング数について検討しておく。

ランダムサンプリングの抽出率ごとの推定精度を検討するため、モンテカルロ法によるシミュレーションを行った。精密調査区において円形プロット（面積100m²、200m²、300m²）をランダムに配置して、円形プロット数（10、20、30個）を変化させた場合の立木サイズ（胸高直径、樹高）および林分材積の推定誤差率を解析した。それぞれのパターン（例えば、100m²の円形プロット10個をランダムに配置など）について1000回繰り返し実験を行い、胸高直径と樹高それぞれの平均値ならびに林分材積を求めた（図-8）。ちなみに1000回繰り返し実験なので、各図のヒストグラム合計は1,000である。

この図からわかるように、標本数が大きいほど出現する平均値の分散が小さくなり、平均値は真値（林分全体の平均値）に収斂していく。同様のことは胸高直径、樹高、材積のいずれについても確認された。図-8は、面積100m²の円形プロットのみを例示しているが、円形プロットの面積が大きくなるほど、推定値の分散は小さくなり、少ない標本数で真値に近い推定値を得ることができるようになる。

現地調査での効率性を考えると、必要な推定精度を保ちつつ、より少ない標本数で林分調査を行うことが求められる。そこで、上述したシミュレーション結果をもとに、胸高直径、樹高、材積等について、想定される推定誤差率を満たすように、円形プロットによるサンプル調査に必要なサンプル数を次式により求めた（表-1）。ただし、推定誤差率を E 、変動係数を CV 、必要なサンプル数を n とする（森林総研2012、細田ら2012）：

$$n = (2 CV / E)^2 \quad (1)$$

なお、変動係数 CV は、調査面積（今回は円形プロットの面積）に依存する。森林における円形プロット調査を考えるとその大きさは半径5.64m（面積100m²）が現実的と考えられるので、今回は100m²の円形プロットのみを想定した。参考までに円形プロットの面積200m²では半径は7.98m、300m²では半径9.77mである。

表-1 想定する誤差率を満足させる必要サンプル数

想定する誤差率	DBH	樹高	単木材積	林分材積	林分密度
5%	26	11	138	225	333
10%	7	3	35	57	84
15%	3	2	16	25	37

面積100m²円形プロットにより、信頼度95%で計算した

表-1に示したように、想定する誤差率に応じた必要サンプル数は、平均DBHと平均樹高ではそれほど多くはないが、林分材積や林分密度では相当数の円形プロットが必要になることがわかる。対象とする測定項目によって必要サンプル数がこのように大きく異なる理由は、測定項目によって平均値のバラツキ（変動係数）が異なるためである。今回の精密調査区では、胸高直径と樹高についてみると100m²の範囲内でのバラツキは、材積や密度のバラツキに比べるとかなり小さい。実際、100m²の円形プロット内の立木本数は少ない場合は1本、多ければ10本以上あるので、それと連動してha材積の換算値にも違いが生じる。それに対して胸高直径や樹高の平均値は、円形プロット内の立木本数が多くても少なくともそれほどの違いは生じない。そうしたことが表-1の必要サンプル数の違いとなっている。

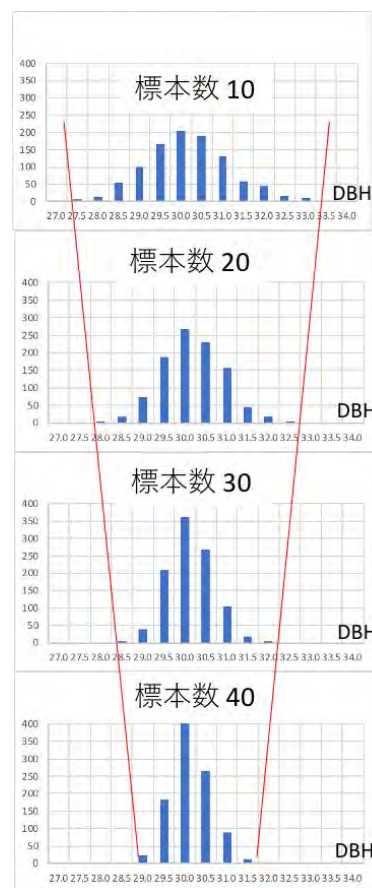


図-8 ランダムサンプリングによる平均胸高直径の出現数
100m²円形プロットのランダムサンプリング(標本数10~40個)を、それぞれ1000回繰返した。図中の赤線は分布範囲の目安。

令和元年度リモートセンシング技術を活用した収穫調査の効率化手法検討委託事業

報 告 書

令和 2 年 3 月

業務受託：「令和元年度リモートセンシング技術を活用した収穫調査の効率化手法
検討委託事業」共同企業体

一般財団法人日本森林林業振興会

〒112-0004

東京都文京区後楽 1-7-12

TEL：03-3816-2471

担当：石田祐二

アジア航測株式会社

〒215-0004

川崎市麻生区万福寺 1-2-2

TEL：044-967-6461

担当：大野勝正