### 3.1.2　針葉樹（ヒノキ・カラマツ）の解析方法

#### (1)　樹頂点抽出及び樹高計測方法

本業務では、東京電力株式会社と当社で共同開発した樹頂点抽出技術（特許第 4279894 号）を用いてヒノキ、カラマツの解析を行った。手順は以下のとおりである。

① DCHM（図 3-6-1）から樹冠形状指数（図 3-6-2）を計算する。樹冠形状指数とは、樹冠表層面の凹凸を表角度情報で表す指数で、凸部ほど高い値になり凹部ほど低い値をとる。梢端では凸状であり、樹冠縁は凹状となり、必ず単木ごとに高い値と低い値が含まれる。そのため画像上で単木を識別しやすくなる。

② 冠形状指数を用いて、樹冠部（図 3-6-3）を抽出する。動的に決められる閾値以上のまとまりが樹冠部として抽出される。

③ 最後に樹冠部の中の DCHM を調べ、最も DCHM が高いメッシュの位置を樹頂点（図 3-6-4）として抽出する。一つの樹冠に複数の凸部がある場合の過剰抽出を避けるために樹頂点間の距離に制限値を設定し、制限値以内の距離にある複数の樹頂点のうち、最も DCHM が高い樹頂点のみを抽出する。

抽出した樹頂点の位置の DCHM を樹頂点に紐付け、樹高として情報を整備した。

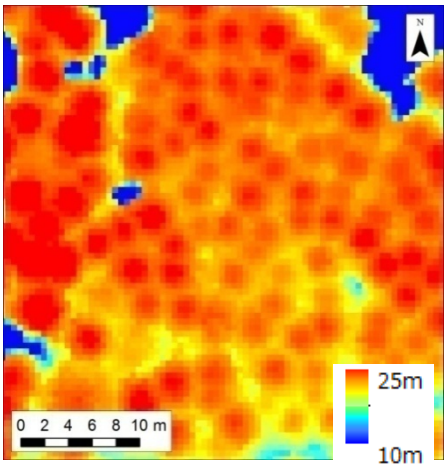



図 3-6-1　DCHM

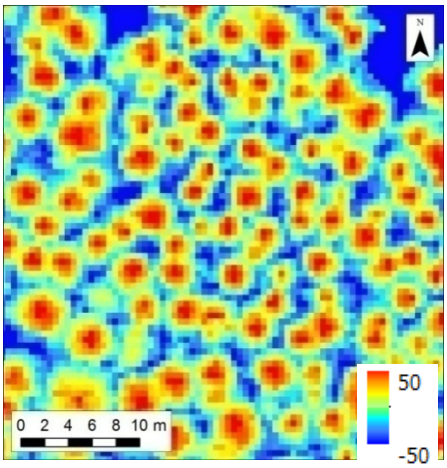



図 3-6-2　樹冠形状指数

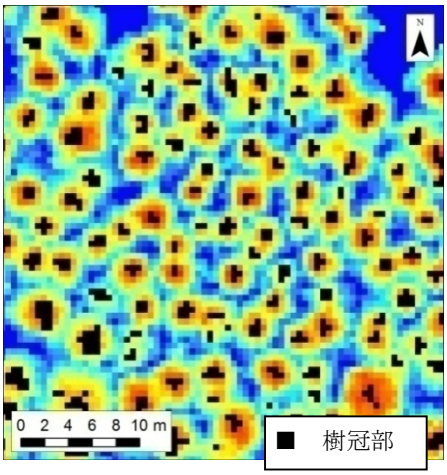



図 3-6-3　樹冠部抽出

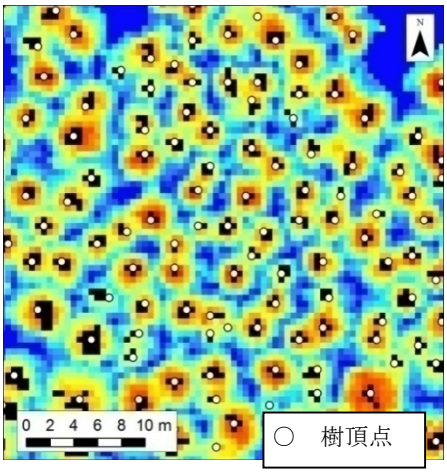



図 3-6-4　樹頂点抽出

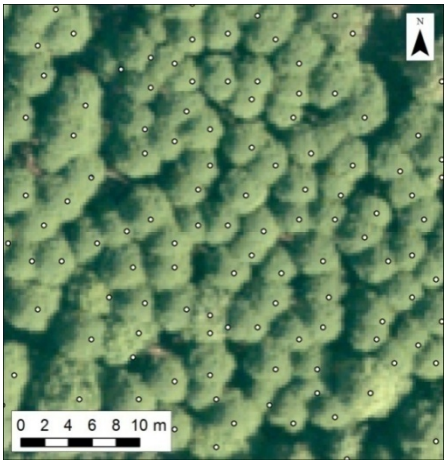



図 3-6-5　オルソ写真と樹頂点

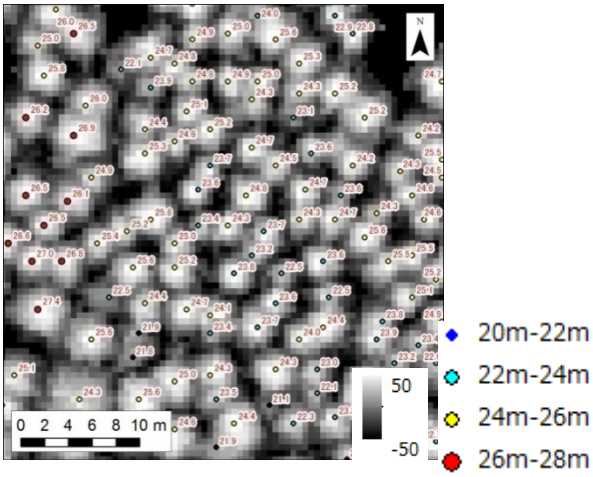



図 3-6-6　樹頂点の樹高

(2)　胸高直径及び材積計算方法

1)　胸高直径の推定手法

現地調査で得た各プロットの平均胸高直径とレーザ解析データを用いて回帰分析を行い、胸高直径推定式の作成を行った。推定式の変数はレーザ解析データから得られた樹高、樹冠投影面積、樹冠表面積、樹冠体積、樹冠長、樹冠長率である。胸高直径推定のイメージを図 3-7 に示す。

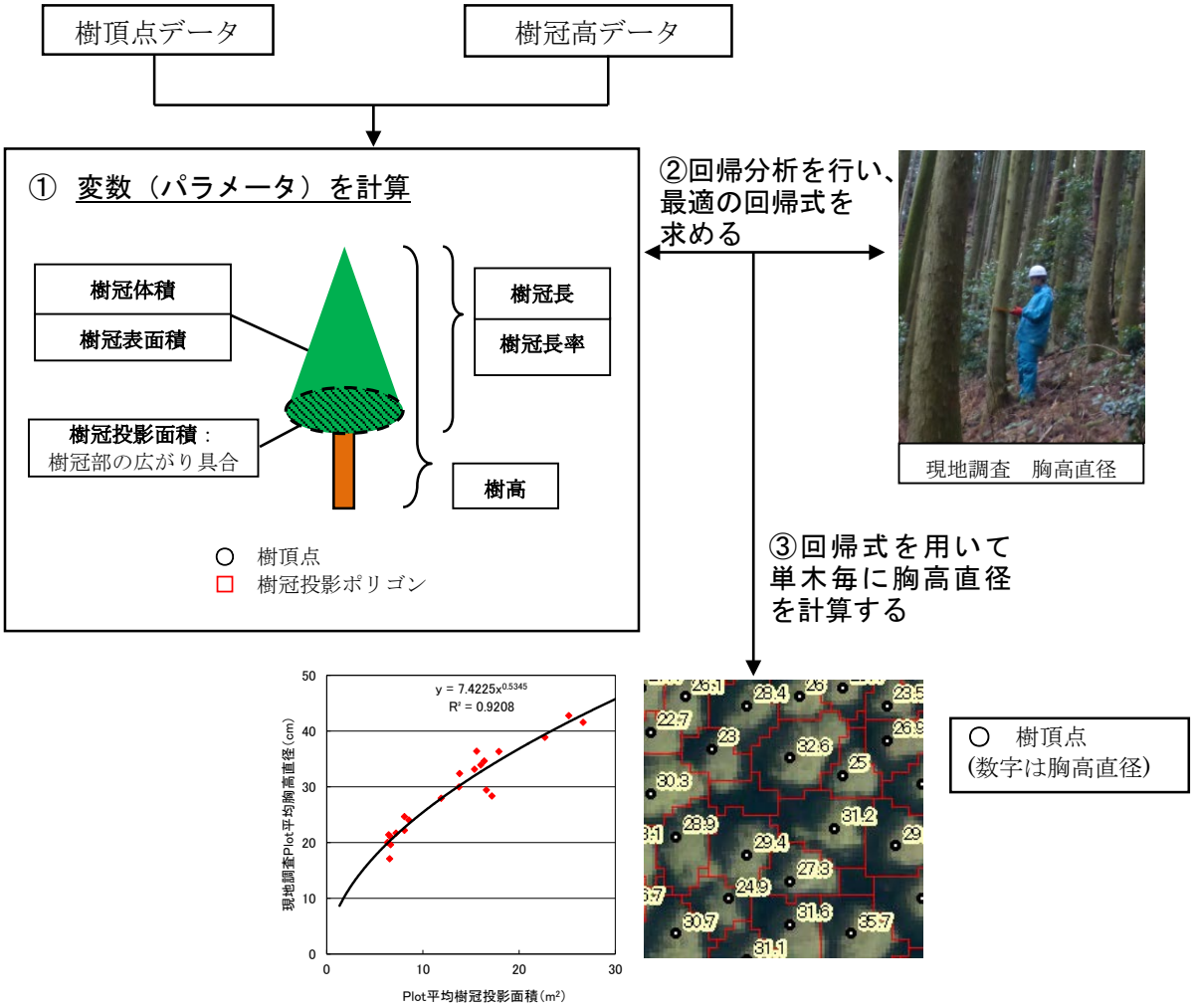



図 3-7　胸高直径の推定方法

2)　使用する変数（パラメータ）

抽出した樹頂点位置と樹冠形状指数画像をもとに樹冠投影ポリゴンの作成を行い、樹冠投影面積、樹冠長、樹冠長率を計算した。また、樹冠部が円錐形であると仮定して樹冠表面積、樹冠体積を計算した。回帰分析に使用する各変数の計算方法は以下のとおりである。

① 樹冠投影面積 ($C_a$)：

樹冠投影ポリゴンの面積（㎡）を指す。抽出した樹頂点位置と樹冠形状指数画像をもとにwatershed(分水嶺)アルゴリズムを用いた処理で、単木レベルの樹冠投影ポリゴンを作成し、その各ポリゴンの面積を算出した。watershed(分水嶺)アルゴリズムとは、数値の高低を山と谷に見立て、分割された分水界を領域とするものである。樹冠投影ポリゴンの作成イメージを図 3-8 に示す。

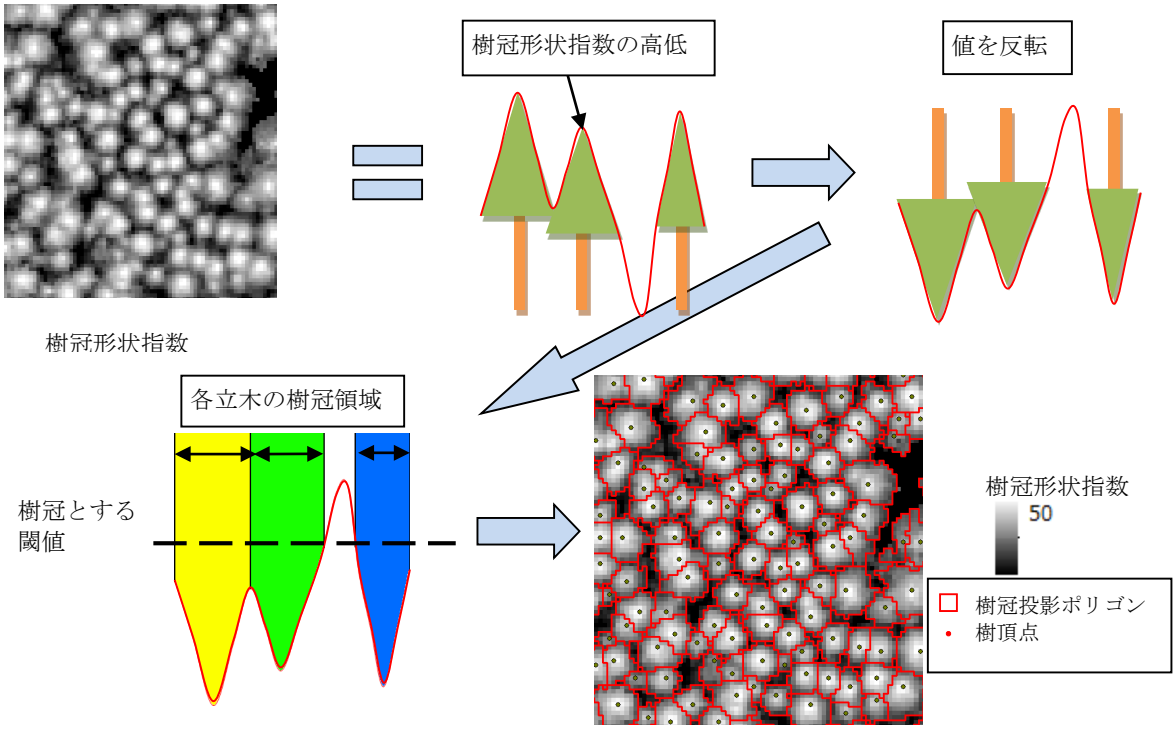



図 3-8 樹冠投影ポリゴンの作成イメージ

② 樹冠長($C_h$)

樹冠投影ポリゴン内で最も低い DCHM の値と樹高（h）との差（m）を指す。イメージ図を図 3-9 に示す。

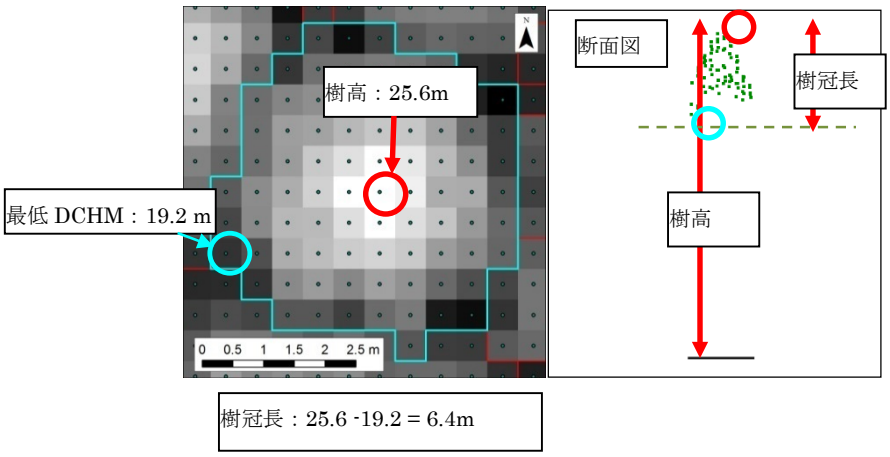



図 3-9 樹冠長 イメージ図

③　樹冠長率($C_p$)

樹冠長($C_h$)と樹高(h)の比（%）を指す。　$C_p = \dfrac{C_h}{h}$

④　樹冠表面積(A)

樹冠の形状を円錐と仮定した際（図 3-10）の、円錐の扇形部分の表面積（㎡）を指す。

$$A = \frac{\theta}{360}\pi R^2$$
$$= \pi r R$$
$$= \pi\sqrt{\frac{Ca}{\pi}}\sqrt{\frac{Ca+\pi Ch^2}{\pi}}$$
$$= \sqrt{Ca(Ca+\pi Ch^2)}$$

$2\pi R\dfrac{\theta}{360} = 2\pi r$　より　$\dfrac{\theta}{360} = \dfrac{r}{R}$

$Ca = \pi r^2$ より $r = \sqrt{\dfrac{Ca}{\pi}}$

$r^2 + Ch^2 = R^2$ より $R = \sqrt{r^2 + Ch^2} = \sqrt{\dfrac{Ca}{\pi} + Ch^2} = \sqrt{\dfrac{Ca+\pi Ch^2}{\pi}}$

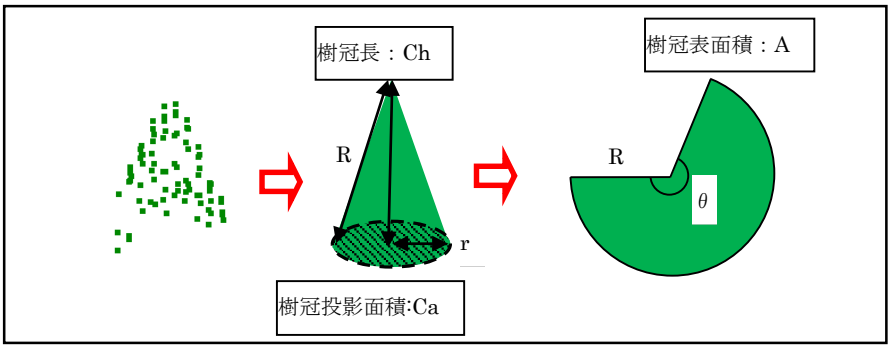



図 3-10　樹冠表面積のイメージ図

⑤　樹冠体積(V)

樹冠の形状を円錐と仮定したときの、円錐の体積（㎥）を指す。　$V = \dfrac{Ca \times Ch}{3}$

### 3) 回帰分析に使用する用語

- 補正 $R^2$ 値…回帰式を評価する場合、一般的に $R^2$ 値が使用される。しかし、重回帰分析において説明変数の数が違う場合、$R^2$ 値から式の良否を評価することはできない（説明変数の数が大きいほど $R^2$ 値は良好な値を示す）。このような説明変数の数の影響を取り除き、見かけ上の当てはまりの良さを差し引いた数値が補正 $R^2$ 値である。この数値が高いほど、回帰式から求められる予測値が目的変数に近く、回帰式の当てはまりが良いことを示す。自由度調整済決定係数ともいわれる。

- RMSE…2 乗平均平方根誤差（Root Mean Squared Error）。回帰式から求められる予測値が真値からどの程度かい離しているかを示す。0 に近い値であるほど誤差が小さいことを示す。

- p 値…回帰分析の場合、目的変数と無関係である説明変数を加えても回帰式は作成される。例えば体重を目的変数とした場合、身長や腹囲など体重と関係がある説明変数の他に、視力という全く関係ない説明変数を加えて回帰分析すると、作成された回帰式に視力の係数も設定される。しかし、その係数は偶然その値になっただけで、視力と体重に関係があることを示しているわけではない。このような目的変数と説明変数の関係を判断するために p 値が用いられる。

  p 値は、帰無仮説（ある仮説に対して真逆の仮説）が成立する確率である。本解析では、目的変数である胸高直径と説明変数である樹高、樹冠投影面積などが無関係である確率を示している。p 値が小さければ、「目的変数と説明変数は無関係ではない」ことになり、目的変数と説明変数には関係があると判断することができる。この p 値の判断基準として、一般的に 0.05(5%)未満が用いられる。

  $R^2$ 値や、RMSE が回帰式から求められる予測値を評価するものであるのに対し、p 値は回帰式の説明変数の使用の可否を判断するものである。

胸高直径の推定に使用する回帰式を決定する際、まず説明変数の p 値がすべて 0.05(5%)未満である回帰式を選び、その中で補正 $R^2$ 値が高く、RMSE が小さい式を選定する。

すなわち、目的変数（胸高直径の実測値）と説明変数（樹冠投影面積、樹高など）の関係が強く、回帰式の当てはまりが良く、回帰式から求められる予測値（胸高直径の推定値）と真値（胸高直径の真値）の誤差が小さい回帰式を良好な胸高直径の推定式として選定する。

ヒノキ、カラマツの材積は、長野地方の材積式（林野庁計画課編　立木幹材積表-東日本編-）を用い、単木の樹高と胸高直径から算出した。使用した材積式を以下に示す。

・長野地方　ヒノキ（人工林、昭和 36 年調整）

$$\log V = -5 + 0.8714371 + 1.8168788 \log d + 0.9167444 \log h \quad (d : 4 \sim 10cm)$$

$$\log V = -5 + 0.6307853 + 1.8121862 \log d + 1.1783766 \log h \quad (d : 12 \sim 20cm)$$

$$\log V = -5 + 0.8015365 + 1.6603092 \log d + 1.2042435 \log h \quad (d : 22cm\text{以上})$$

・長野地方　カラマツ（人工林、昭和 32 年調整）

$$\log V = -5 + 0.77430 + 1.8168788 \log d + 0.9167444 \log h \quad (d : 4 \sim 10cm)$$

$$\log V = -5 + 0.58495 + 1.96416 \log d + 1.04523 \log h \quad (d : 12 \sim 20cm)$$

$$\log V = -5 + 0.67205 + 1.84173 \log d + 1.11080 \log h \quad (d : 22 \sim 30cm)$$

$$\log V = -5 + 0.79071 + 1.74034 \log d + 1.13316 \log h \quad (d : 32cm\text{以上})$$

### 3.1.3　現地調査結果及び精度検証・回帰分析結果

現地調査は、航空レーザ計測による森林資源解析結果の精度検証及びその解析での回帰式の作成（単木解析におけるの胸高直径推定、総体積法による材積推定など）に必要な現地の樹木情報を取得するために実施した。

### 3.1.4　現地調査地点

航空レーザ計測結果と現地で測定した胸高直径等との回帰式を求める上で、樹高の小さい林分から大きな林分のデータを収集することが重要になる。このため、森林簿の齢級等のデータ、オルソ写真等を活用して、樹高の小さい林分から大きな林分を抽出して、調査候補地点を設定した。

現地調査は、表 3.1 に示すとおり、ヒノキ 15 箇所、カラマツ 15 箇所の計 30 箇所で行った。現地調査地点の位置図を図 3-11 に示す。

表 3.1　本業務で調査した各樹種の地点数

| 樹種 | 点数 |
|---|---|
| ヒノキ | 15 |
| カラマツ | 15 |
| 合計 | 30 |

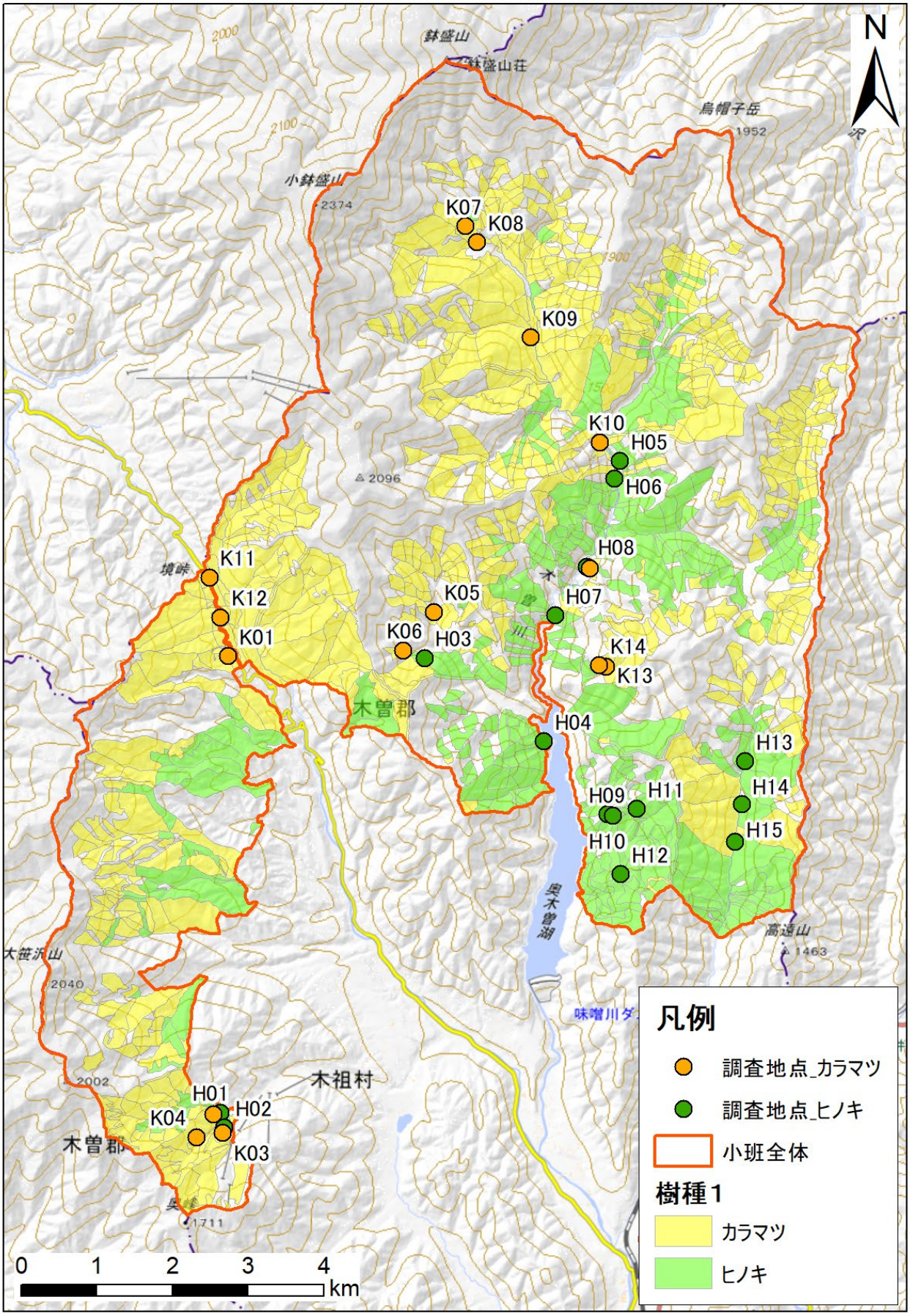



図 3-11　現地調査地点位置図

### 3.1.5　現地調査方法

現地調査に使用した調査票を図 3-12 に示す。現地調査結果を整理した調査票は資料編に添付した。

| 調査番号 | | 市町村名 | | GPS番号 | | 記入者 | | 樹種 | | 傾斜（度） | | 斜面方位 | | ／　枚 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 位置座標 | °　′　″ N　：　°　′　″ E | | | 日時分 | | ブロット面積 | ㎡ | 天気 | | 標高(m) | | 斜面位置 | 上　中　下　尾根　谷　平 | |

| No | 樹種 | DBH (cm) | H(m) | 枝下高 (m) | 樹冠未到達 | 境界木 | 材積 ($m^3$) | No | 樹種 | DBH (cm) | H(m) | 枝下高 (m) | 樹冠未到達 | 境界木 | 材積 ($m^3$) | No | 樹種 | DBH (cm) | H(m) | 枝下高 (m) | 樹冠未到達 | 境界木 | 材積 ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | 43 | | | | | | | | 85 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | 44 | | | | | | | | 86 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | 45 | | | | | | | | 87 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | 46 | | | | | | | | 88 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | 47 | | | | | | | | 89 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | 48 | | | | | | | | 90 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | 49 | | | | | | | | 91 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | 50 | | | | | | | | 92 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | 51 | | | | | | | | 93 | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | 52 | | | | | | | | 94 | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | 53 | | | | | | | | 95 | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | 54 | | | | | | | | 96 | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | 55 | | | | | | | | 97 | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | 56 | | | | | | | | 98 | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | 57 | | | | | | | | 99 | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | 58 | | | | | | | | 100 | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | 59 | | | | | | | | 広葉樹混交率 | | | | | ( | %) | |
| 18 | | | | | | | | 60 | | | | | | | | 樹冠疎密度 | | | | | ( | %) | |
| 19 | | | | | | | | 61 | | | | | | | | 間伐の有無 | | 数年内 | | | 長期間なし | | なし |
| 20 | | | | | | | | 62 | | | | | | | | 枯損木の有無 | | なし | | | 少し | | あり |
| 21 | | | | | | | | 63 | | | | | | | | 病虫害／傷の有無 | | なし | | | 少し | | あり |
| 22 | | | | | | | | 64 | | | | | | | | 獣害の有無 | | なし | | | 少し | | あり |
| 23 | | | | | | | | 65 | | | | | | | | 現地状況 | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | 66 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | 67 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | 68 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | 69 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | 70 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | 71 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | 72 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | 73 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | 74 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | 75 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | 76 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | 77 | | | | | | | | 高木層 | 高さ | m | | | 植被率 | % | |
| 36 | | | | | | | | 78 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | | | | | | | | 79 | | | | | | | | 亜高木層 | 高さ | m | | | 植被率 | % | |
| 38 | | | | | | | | 80 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | | | | | | | | 81 | | | | | | | | 低木層 | 高さ | m | | | 植被率 | % | |
| 40 | | | | | | | | 82 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | | | | | | | | 83 | | | | | | | | 草本層 | 高さ | m | | | 植被率 | % | |
| 42 | | | | | | | | 84 | | | | | | | | | | | | | | | |

図 3-12　現地調査票（現地用）

(1)　調査プロットの面積（調査プロットの設置）

本調査では、水平面積 0.04ha の円形の調査プロット（半径 11.3m）を基本とした。しかし、対象の林分がまとまって成林していない地点では水平面積 0.02ha（半径 8.0m）の円形の調査プロットを作成した。調査は、このプロット内にある樹木（胸高直径 6cm 以上：森林施業で立木の密度管理に使用される「人工林林分密度管理図（日本林業技術協会）」の最低胸高直径が 6cm のため）を対象として実施した。

調査プロットは、中心点を設定したのち、8 方向の水平距離を測定し、目印を置くことで、現地に設置した。この際、できる限りプロット内の林相および地形が単一で、プロット境界が林道や他樹種と隣接せず、広葉樹の高木やギャップのない箇所を選定した。また、事前に選定した調査地点に到達できない場合や現地の樹種が混交または異なっておりその地点で調査できない場合は、現地の状況、森林簿の齢級等のデータ、オルソ写真等から同樹種同様の林分で代替地点を再選定した。調査プロット設置イメージを図 3-13 に示す。

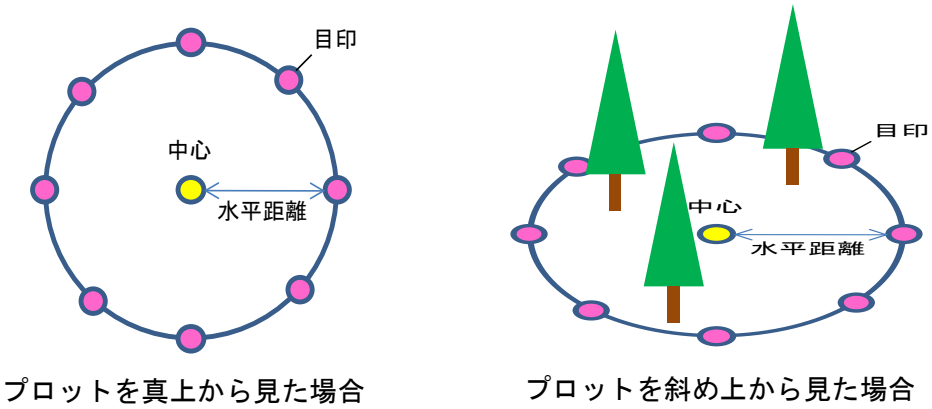



図 3-13　調査プロット設置イメージ

(2)　調査日時、位置座標

現地調査を行った日付及び時間を記録した。位置座標については、中心点の決定後中心に GNSS（ハンディ GPS 等）を設置し、プロット調査中はログを継続取得した。衛星の捕捉状況が安定したのち、中心点の座標値を記録した。

(3)　傾斜、斜面方位、斜面位置

傾斜は、プロット最上部から最下部を見通し、超音波式樹高測定器（VertexⅣ）で測定した。斜面方位は、コンパス（磁針）等を用いて 8 方位（N,NE,E,SE,S,SW,W,NW）で記録した。斜面位置は、尾根から谷までの斜面を 3 区分して、それぞれ「斜面（上）」、「斜面（中）」、「斜面（下）」とした。また、尾根上、谷上、平地で調査を行った場合はそれぞれ「尾根」、「谷」、「平」とした。斜面位置は、調査者が現地で確認できる地形（小地形）を基準とした。

(4)　樹種

樹種はプロット内で計測した樹木の樹種を記載した。

### (5) 胸高直径

胸高直径はプロット範囲内の毎木（胸高直径 6cm 以上）を測定した。樹木の山側の地表から高さ 1.2m（森林・林業実務必携 p177）位置の直径を、輪尺を用いて cm 単位で計測した。

### (6) 樹高、枝下高

樹高は「森林測定 林業技士養成研修テキスト（日本森林技術協会 2004）」の毎木調査の方法に準じて測定した。

胸高直径測定を行った立木の一部について樹高を測定し、樹高曲線を描き、直径階ごとに平均樹高をグラフから求めた。現地の樹高は、(各面積プロットの半径) を超音波式樹高測定器 (Vertex Ⅳ、Haglof 社 スウェーデン）を用いて m 単位で測定した。計測対象木は直径階ごとに同数か、直径階の本数に比例するようにプロット範囲内の 10 本程度を胸高直径の大小、斜面位置を考慮し、偏りなく選定した。計測後、取得した樹高データと胸高直径の回帰式から、樹高を測定していない樹木の樹高を推定した。枝下高は力枝（生枝で下から順にみて最も太い枝）の高さとし、それらの中で最も低い位置を測定した。

### (7) 樹冠未到達木、境界木

樹冠上層部に達していない樹木を記録した。これは航空レーザ計測データから解析できるのは上層木のみであることから、解析で抽出できていない樹木の実態を把握するためである。また、境界木としてプロットの境界線から内側 1m に位置する樹木についても同様に記録した。これは立木情報推定の解析において、GIS 上で作成したプロットと現地で設置したプロットとの境界付近の形状から生じる誤差により現地調査結果の樹木本数とレーザ測量成果の解析で求めた樹木本数が異なっていた際、境界木の本数を許容範囲とするためである。

### (8) 階層構造

航空レーザ計測では直接把握できない森林の荒廃状況の指標となる森林内部の階層構造を記録するため実施した。階層構造を高木層、亜高木層、低木層、草本層の 4 段階に分類し、その階層の面的な占有率と階層内の平均的な高さを記録した。階層構造とは林内の相対的な階層を示すもので、特定の高さが決まっているわけではなく、最も上層に達している樹冠を高木層、その一段下に樹冠を形成している層を亜高木層、低木群を低木層、草本などの最も下層を草本層として分類する。階層構造の模式図を図 3-14 に示す。

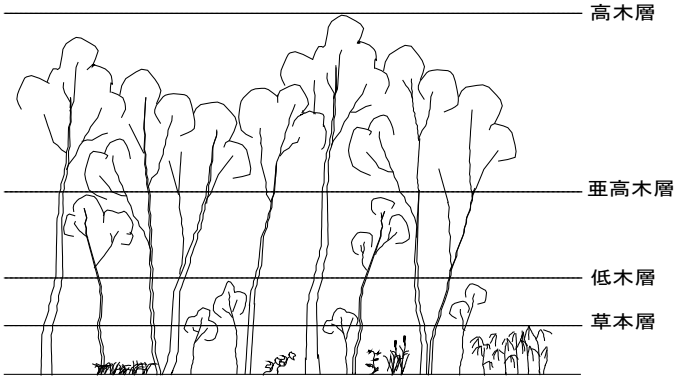



図 3-14 階層構造の模式図

### (9)　広葉樹混交率

樹冠上層部に達した広葉樹がプロット内にある場合、樹冠全体の何割を占めるかを目視で確認して、10%単位を基本として記録した。

### (10)　樹冠疎密度

航空レーザ計測では直接把握できない森林の荒廃状況の指標となる森林内部の疎密状況を記録するため実施した。林床から樹冠を見上げた時の樹冠上層部の占有率を目視で確認して、10%単位を基本として記録した。

### (11)　間伐、除間伐の回数、枯損木、病虫害/傷の有無

航空レーザ計測では直接把握できない森林内部の枯損木等の生育状況、間伐状況などの森林の荒廃状況の指標となる項目を記録するため実施した。間伐の実施状況は、切り株の有無やその腐朽具合により「数年内・長期間なし・なし」から選択し、除間伐の回数を記録した。枯損木の有無は、立ち枯れした枯死木の分布状況を「なし・少し・あり」から選択して記録した。病虫害や傷の有無は、病虫害や大きな傷、腐朽等の被害状況を「なし・少し・あり」から選択して記録した。「なし・少し・あり」の区別については、プロット内に全く見られなかった場合を「なし」、顕著でないが被害を確認した場合を「少し」、全体に目立って存在していた場合を「あり」とした。

### (12)　調査地の写真

林内状況がわかる写真を 7 枚程度撮影した。各地点 3 枚の写真をとりまとめ、写真票に整理して資料編に添付した。

### (13)　その他

下層植生や林分全体の特筆すべき事項を調査票の備考に記載した。

### 3.1.6　現地調査期間

現地調査は 2020 年 2 月 3 日～2020 年 2 月 6 日の間に実施した。

### 3.1.7　現地調査結果

#### (1)　現地調査地点の樹高、立木密度構成

現地調査地点の樹高構成を図 3-15 に、立木密度構成を図 3-16 に示す。

現地調査の結果、図 3-15 に示すとおり、樹高の小さい林分から大きな林分のデータを収集することができた。また、図 3-16 に示すとおり、立木密度の疎な林分から密な林分のデータを収集することができた。

現地調査地点が最も多かった樹高構成は、ヒノキは 25m 以上、カラマツは 15～20m、アカマツは 20～25m、広葉樹は 15～20m であった。立木密度構成は、ヒノキとアカマツは 500 本/ha～1,000 本/ha、カラマツは 1,000 本/ha～1,500 本/ha、広葉樹は～500 本/ha で最も多かった。

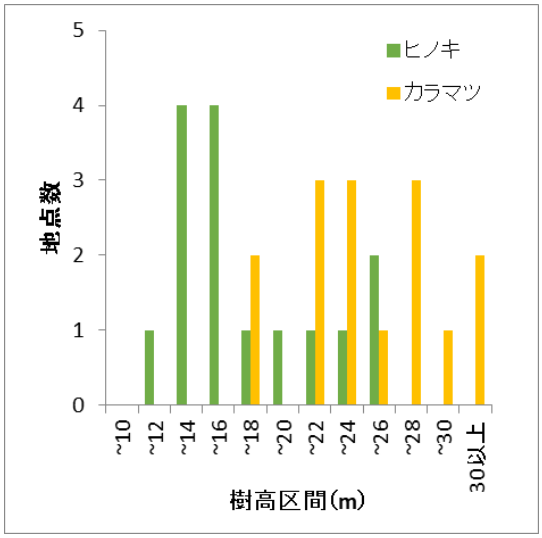



図 3-15　現地調査地点の樹高構成

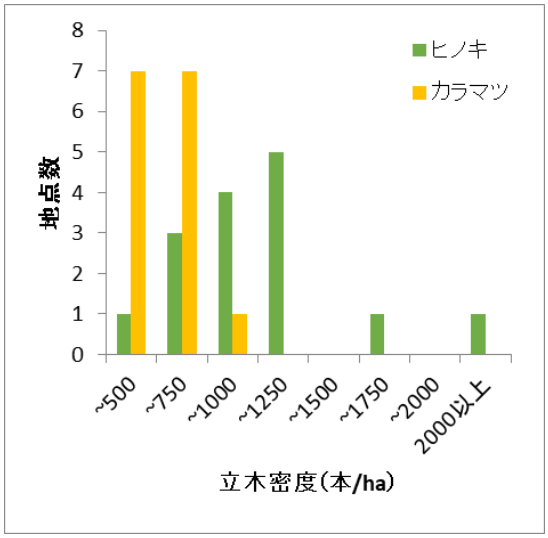



図 3-16　現地調査地点の立木密度構成

(2)　現地調査結果一覧

各現地調査地点における平均胸高直径、平均樹高、樹木本数、材積を表 3.2 に示す。なお、材積は胸高直径と樹高から長野地方の材積式(林野庁計画課編　立木幹材積表-東日本編-)を用いて、算出した。

表 3.2　現地調査結果一覧表

| 調査番号 | 樹種 | 上層木本数（本） | 全木本数（本） | 平均樹高（m） | 平均DBH（cm） | 上層木材積（㎥） | プロット面積（ha） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H01 | ヒノキ | 40 | 40 | 14.3 | 21.3 | 10.195 | 0.04 |
| H02 | ヒノキ | 8 | 8 | 24.6 | 38.0 | 10.414 | 0.04 |
| H03 | ヒノキ | 49 | 58 | 13.1 | 19.0 | 9.353 | 0.04 |
| H04 | ヒノキ | 22 | 25 | 19.6 | 24.4 | 10.363 | 0.02 |
| H05 | ヒノキ | 39 | 39 | 14.3 | 21.9 | 10.807 | 0.04 |
| H06 | ヒノキ | 34 | 42 | 12.9 | 16.4 | 4.995 | 0.02 |
| H07 | ヒノキ | 44 | 46 | 14.1 | 20.9 | 10.451 | 0.04 |
| H08 | ヒノキ | 34 | 38 | 13.0 | 19.6 | 7.143 | 0.04 |
| H09 | ヒノキ | 87 | 92 | 10.6 | 14.8 | 8.619 | 0.04 |
| H10 | ヒノキ | 30 | 33 | 22.6 | 31.1 | 25.150 | 0.04 |
| H11 | ヒノキ | 30 | 34 | 24.5 | 30.6 | 26.858 | 0.04 |
| H12 | ヒノキ | 42 | 42 | 12.3 | 17.8 | 6.512 | 0.04 |
| H13 | ヒノキ | 44 | 55 | 14.5 | 21.7 | 11.885 | 0.04 |
| H14 | ヒノキ | 34 | 35 | 16.1 | 22.0 | 10.612 | 0.04 |
| H15 | ヒノキ | 25 | 29 | 21.9 | 27.6 | 16.888 | 0.04 |
| K01 | カラマツ | 14 | 15 | 30.4 | 31.7 | 17.596 | 0.04 |
| K02 | カラマツ | 18 | 18 | 31.3 | 31.6 | 23.418 | 0.04 |
| K03 | カラマツ | 18 | 20 | 26.5 | 30.8 | 18.267 | 0.04 |
| K04 | カラマツ | 25 | 25 | 25.2 | 27.6 | 19.480 | 0.04 |
| K05 | カラマツ | 26 | 26 | 22.0 | 27.0 | 17.047 | 0.04 |
| K06 | カラマツ | 12 | 13 | 26.1 | 38.3 | 17.232 | 0.04 |
| K07 | カラマツ | 28 | 28 | 20.8 | 25.3 | 15.342 | 0.04 |
| K08 | カラマツ | 28 | 30 | 23.0 | 27.0 | 19.075 | 0.04 |
| K09 | カラマツ | 27 | 28 | 22.2 | 27.0 | 18.232 | 0.04 |
| K10 | カラマツ | 16 | 16 | 26.9 | 32.1 | 17.827 | 0.04 |
| K11 | カラマツ | 20 | 20 | 20.6 | 27.0 | 11.991 | 0.04 |
| K12 | カラマツ | 26 | 26 | 22.5 | 25.8 | 15.953 | 0.04 |
| K13 | カラマツ | 29 | 36 | 17.7 | 22.0 | 10.355 | 0.04 |
| K14 | カラマツ | 37 | 49 | 16.8 | 20.7 | 10.913 | 0.04 |
| K15 | カラマツ | 12 | 20 | 28.1 | 36.0 | 17.551 | 0.04 |

### 3.1.8　現地調査比較結果及び回帰分析結果

#### (1)　針葉樹の解析結果

#### 1)　立木本数データの検証

レーザ計測結果を用いたヒノキ、カラマツの資源解析によって、現地調査で得たデータと比較してどの程度相違があるのかを検証した。精度検証に使用した指標を以下に示す。

①　現地比（%）

レーザ計測による解析結果と現地調査結果の比で計算され、解析結果が現地調査結果と比べて過小の場合 100%以下、過大の場合 100%以上を示す。

$$現地比 = \frac{\hat{y}}{y}$$

レーザ計測による解析結果: $\hat{y}$　　現地調査結果: $y$

例：レーザ計測による推定樹高　22(m)　現地調査樹高　20(m)

現地比　22/20=110%

②　誤差率（%）

レーザ計測による解析結果と現地調査結果との差の比率を示す数値で、差と現地調査結果との比で計算される。

$$誤差率 = \left|\frac{\hat{y} - y}{y}\right|$$

レーザ計測による解析結果: $\hat{y}$　　現地調査結果: $現地比 = \frac{\hat{y}}{y}$

例：レーザ計測による推定樹高　22(m)　現地調査樹高　20(m)

誤差率　|22-20|/20= 10%

③　RMSE

二乗平均平方根誤差（Root Mean Squared Error）であり、解析結果が現地調査結果からどの程度かい離しているかを示す。0 に近い値であるほど誤差が小さいことを示す。平均誤差率が相対的な誤差の率を表しているのに対し､RMSE は誤差の絶対値を示している。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(\hat{y}_k - y_k)^2}$$

レーザ計測による解析結果: $\hat{y}$　　現地調査結果: $現地比 = \frac{\hat{y}}{y}$

調査地点数：N

例：すべての現地調査プロットで、レーザ計測による推定樹高と現地調査樹高の差が 2(m)の場合、RMSE=2

④　R(相関係数)

２つのデータ群の相関の強さを表す。相関係数は-1.0～+1.0 の値をとり、マイナスの場合は負の相関、プラスの場合は正の相関を表す。精度に明確な基準はないが、「絶対値 0.7 以上：強い相関がある、絶対値 0.4 以上：比較的強い相関がある、絶対値 0.2 以上：弱い相関がある、絶対値 0.2 未満：ほとんど相関がない」と考えられている。

現地調査はヒノキ 15 箇所、カラマツ 15 箇所の計 30 箇所で実施した。航空レーザ計測による樹頂点抽出では、上空から計測した樹冠の形状を用いるため、樹頂点が林分の上層に達している上層木の本数が抽出される。そのため、樹冠未到達木が多い林分では航空レーザ計測により推定した本数と現地における本数に相違が発生する可能性があり、解析結果を活用する際には注意が必要である。そこで、航空レーザ計測による推定本数の精度検証には、全木本数の比較と、上層木との比較の 2 種類の比較を行った。なお、プロット内の全木を現地調査する際に、頂点が周囲の樹木の力枝より低い樹木は樹冠未到達木、それ以外は上層木と記録した。上層木と樹冠未到達木のイメージ図を図 3-17 に示す。

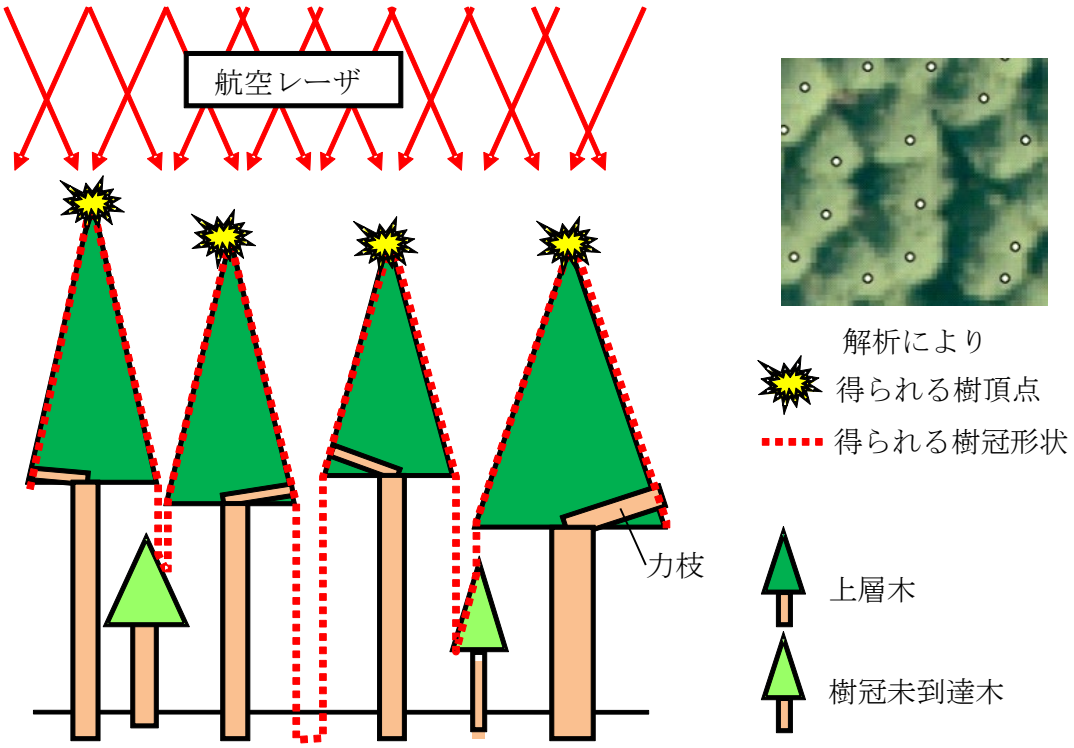



図 3-17　上層木と樹冠未到達木のイメージ

ヒノキの現地調査の上層木本数・全木本数とレーザ解析本数の比較結果を表 3.3 および図 3-18 に、カラマツの比較結果を表 3.4 および図 3-19 に示す。

ヒノキ林における現地調査で上層木本数は平均 37.5 本、全木本数は平均 41.1 本確認された。レーザ解析によって抽出出来た本数は平均 33.9 本であった。現地調査による上層木本数とレーザ解析による抽出本数との平均誤差率は 8.4%で RMSE が 7.06 で相関係数が 0.94 以上を示しており、平均誤差率 10%以内に収まることから高い精度の解析が行えたと考えられる。

カラマツ林における現地調査で上層木は平均 22.4 本、全木は平均 41.1 本確認された。レーザ解析によって抽出できた本数は平均 33.9 本であった。レーザ解析による抽出本数と現地調査による上層木本数との平均誤差率は 8.4%で RMSE が 7.06 であった。上層木本数の相関係数は 0.94 と高い値を示しており、平均誤差率 10%以内に収まることから高い精度の解析が行えたと考えられる。

表 3.3 ヒノキの現地調査本数とレーザ解析樹木本数の比較(左：上層木、右：全木)

| プロット名 | 現地調査上層木本数（本） | レーザ解析樹木本数（本数） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| H01 | 40 | 40 | 100% | 0% |
| H02 | 49 | 49 | 100% | 0% |
| H03 | 22 | 13 | 59% | 41% |
| H04 | 8 | 8 | 100% | 0% |
| H05 | 39 | 39 | 100% | 0% |
| H06 | 34 | 30 | 88% | 12% |
| H07 | 44 | 41 | 93% | 7% |
| H08 | 34 | 34 | 100% | 0% |
| H09 | 87 | 63 | 72% | 28% |
| H10 | 30 | 28 | 93% | 7% |
| H11 | 30 | 27 | 90% | 10% |
| H12 | 42 | 42 | 100% | 0% |
| H13 | 44 | 37 | 84% | 16% |
| H14 | 34 | 32 | 94% | 6% |
| H15 | 25 | 25 | 100% | 0% |
| 平均 | 37.5 | 33.9 | | 8.4% |
| | | R | 0.94 | |
| | | RMSE | 7.06 | |

| プロット名 | 現地調査全木本数（本） | レーザ解析樹木本数（本） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| H01 | 40 | 40 | 100% | 0% |
| H02 | 58 | 49 | 84% | 16% |
| H03 | 25 | 13 | 52% | 48% |
| H04 | 8 | 8 | 100% | 0% |
| H05 | 39 | 39 | 100% | 0% |
| H06 | 42 | 30 | 71% | 29% |
| H07 | 46 | 41 | 89% | 11% |
| H08 | 38 | 34 | 89% | 11% |
| H09 | 92 | 63 | 68% | 32% |
| H10 | 33 | 28 | 85% | 15% |
| H11 | 34 | 27 | 79% | 21% |
| H12 | 42 | 42 | 100% | 0% |
| H13 | 55 | 37 | 67% | 33% |
| H14 | 35 | 32 | 91% | 9% |
| H15 | 29 | 25 | 86% | 14% |
| 平均 | 41.1 | 33.9 | | 15.7% |
| | | R | 0.92 | |
| | | RMSE | 10.56 | |

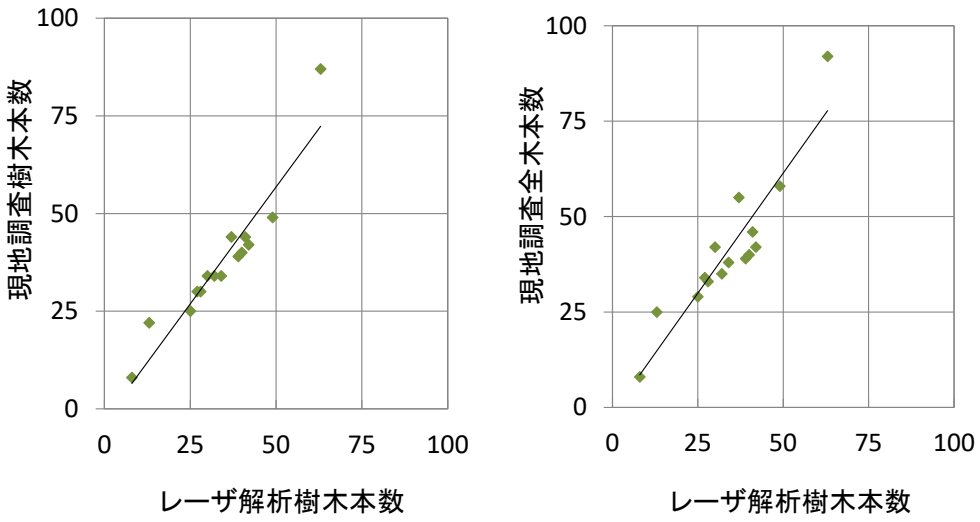
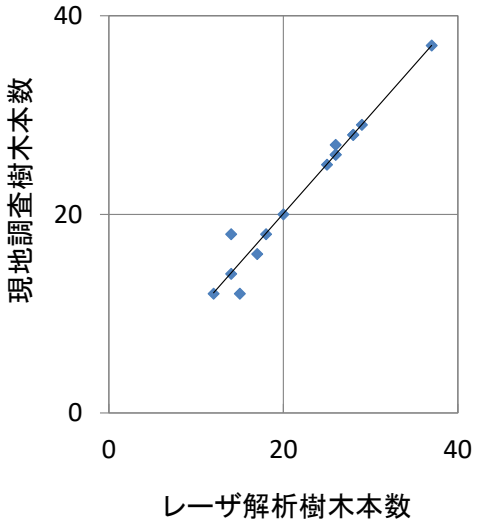



図 3-18　ヒノキの現地調査立木密度とレーザ解析立木密度の比較

表 3.4　カラマツの現地調査本数とレーザ解析樹木本数の比較（左：上層木、右：全木）

| プロット名 | 現地調査上層木本数（本） | レーザ解析樹木本数（本数） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| K01 | 14 | 14 | 100% | 0% |
| K02 | 18 | 18 | 100% | 0% |
| K03 | 18 | 14 | 78% | 22% |
| K04 | 25 | 25 | 100% | 0% |
| K05 | 26 | 26 | 100% | 0% |
| K06 | 12 | 15 | 125% | 25% |
| K07 | 28 | 28 | 100% | 0% |
| K08 | 28 | 28 | 100% | 0% |
| K09 | 27 | 26 | 96% | 4% |
| K10 | 16 | 17 | 106% | 6% |
| K11 | 20 | 20 | 100% | 0% |
| K12 | 26 | 26 | 100% | 0% |
| K13 | 29 | 29 | 100% | 0% |
| K14 | 37 | 37 | 100% | 0% |
| K15 | 12 | 12 | 100% | 0% |
| 平均 | 22.4 | 22.3 | | 3.8% |
| | | R | 0.98 | |
| | | RMSE | 1.34 | |

| プロット名 | 現地調査全木本数（本） | レーザ解析樹木本数（本） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| K01 | 15 | 14 | 93% | 7% |
| K02 | 18 | 18 | 100% | 0% |
| K03 | 20 | 14 | 70% | 30% |
| K04 | 25 | 25 | 100% | 0% |
| K05 | 26 | 26 | 100% | 0% |
| K06 | 13 | 15 | 115% | 15% |
| K07 | 28 | 28 | 100% | 0% |
| K08 | 30 | 28 | 93% | 7% |
| K09 | 28 | 26 | 93% | 7% |
| K10 | 16 | 17 | 106% | 6% |
| K11 | 20 | 20 | 100% | 0% |
| K12 | 26 | 26 | 100% | 0% |
| K13 | 36 | 29 | 81% | 19% |
| K14 | 49 | 37 | 76% | 24% |
| K15 | 20 | 12 | 60% | 40% |
| 平均 | 24.7 | 22.3 | | 10.4% |
| | | R | 0.91 | |
| | | RMSE | 4.52 | |



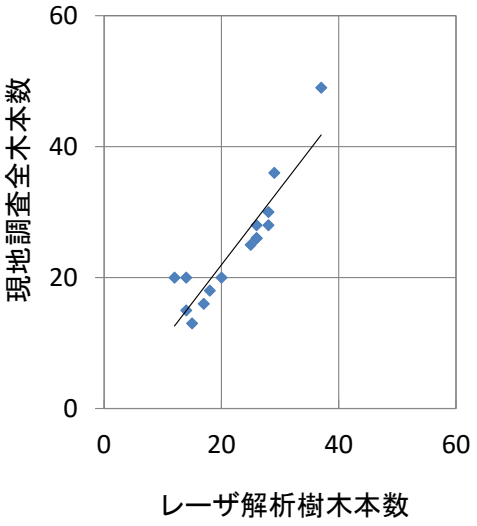




図 3-19　カラマツの現地調査本数とレーザ解析樹木本数の比較

2)　本数の誤差原因(ヒノキ・カラマツ)

樹頂点の抽出精度を向上するためには、樹冠部形状がレーザデータにより精密に再現できていることが前提条件となる。つまり、DCHM(樹冠高データ）ひいては DCSM（樹冠表層データ）が正確に取得できていない場合、樹冠部の形状が不正確となり、樹頂点の抽出に誤差が生じる。DCSM が正確に取得できない理由としては、計測時の条件や林地の条件、樹木の並び等様々な要因が考えられるが、現在の技術では補正の方法が確立されていない。樹頂点の誤差が生じるのは以下のパターンが考えられる。

a)　樹頂点が現地調査の結果より多く抽出：

ファーストパルスが樹冠の表層ではなく樹冠内部の枝葉で反射し、1 本の樹木が 2 本以上と判断された（図 3-20)。

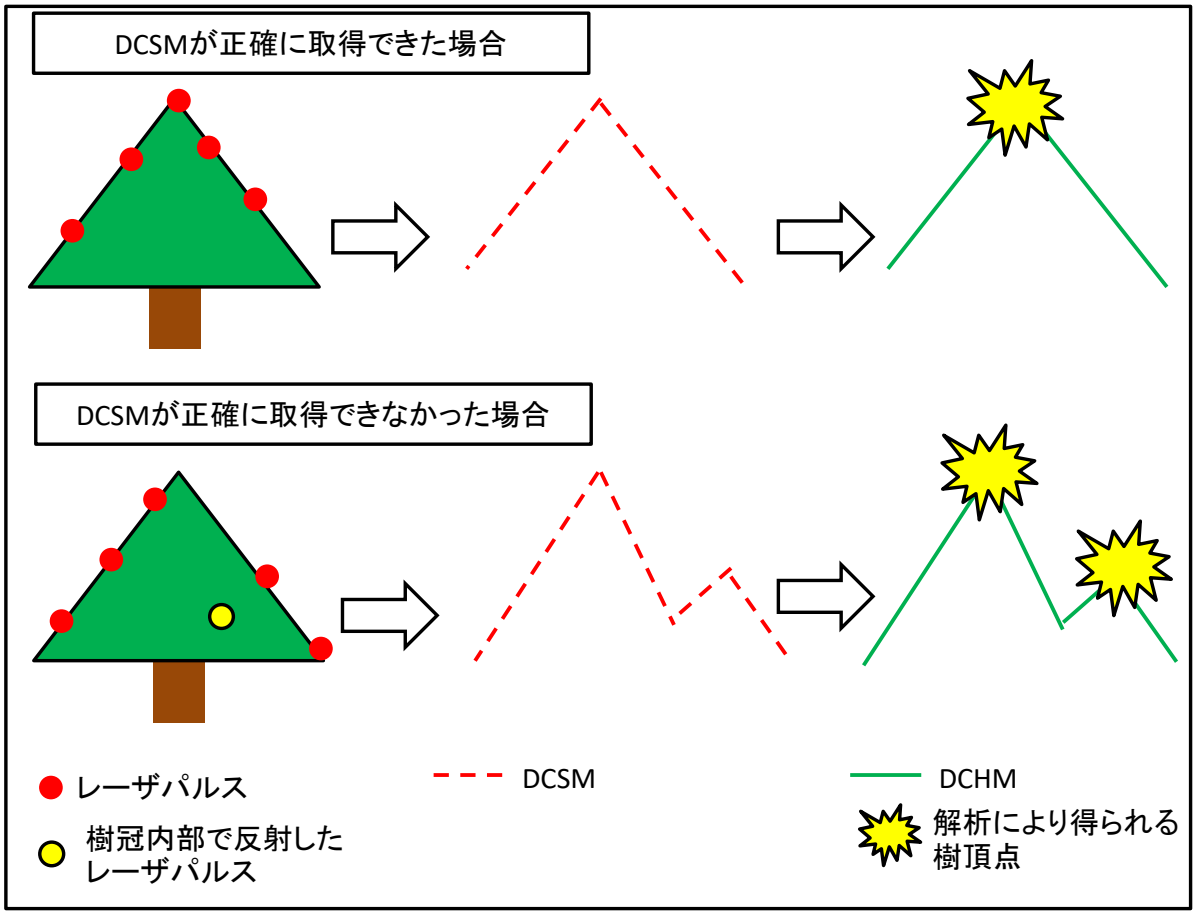



図 3-20　DCSM が正確に取得できない例のイメージ図 1

b)　樹頂点が現地調査の結果より少なく抽出：

上層木ではあるが隣接する立木が優勢木または同等の樹高であるために、同一の樹冠として判断された（図 3-21）。立木密度が高いような林分では特に発生しやすい事象である。

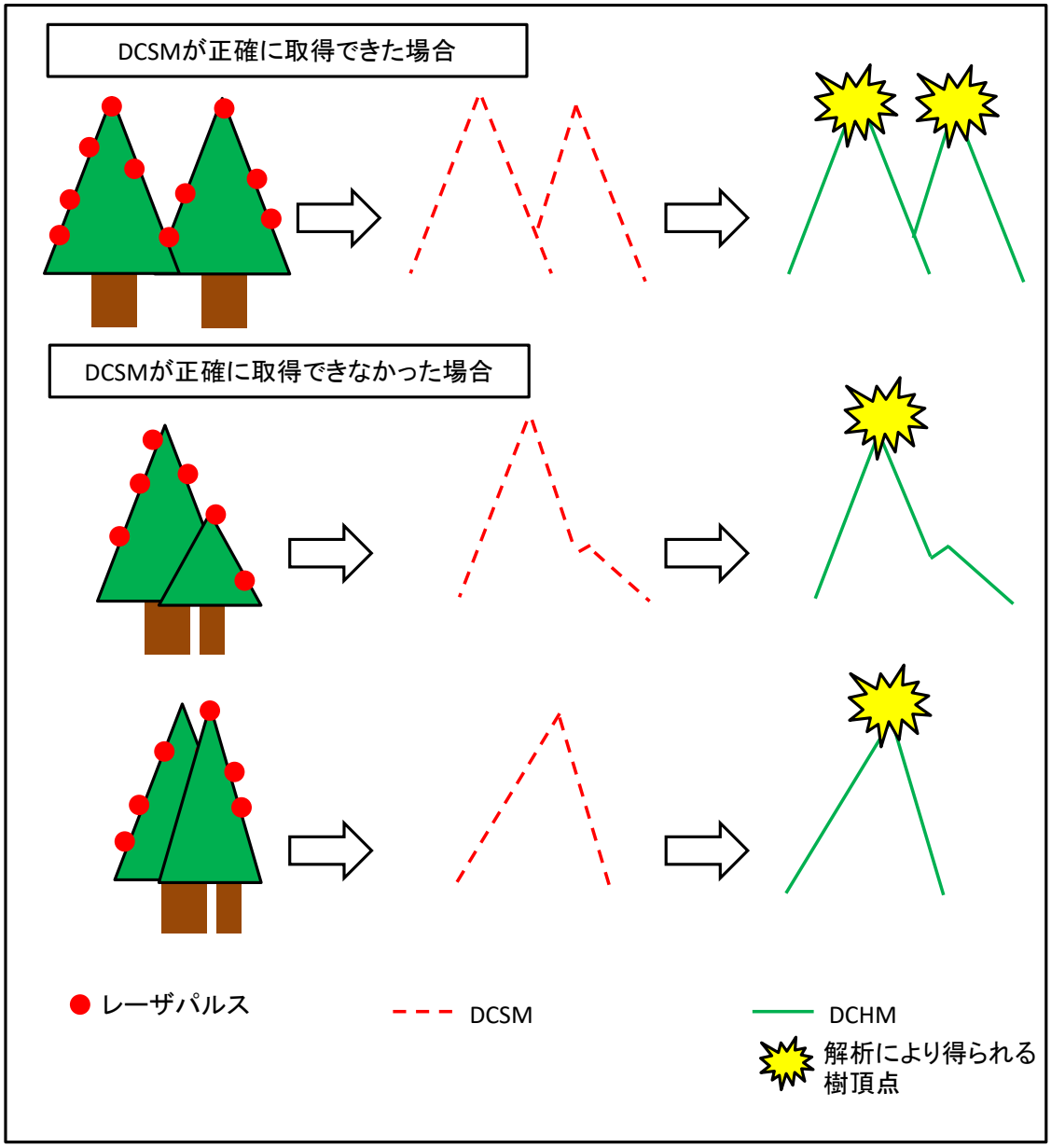



図 3-21　DCSM が正確に取得できない例のイメージ図 2

### 3) 樹高データの検証

レーザ解析結果から樹頂点を抽出すると同時に樹頂点の樹高を DCHM より算出した。現地調査平均樹高とレーザ解析平均樹高との比較を

表 3.5 と図 3-22 に示す。

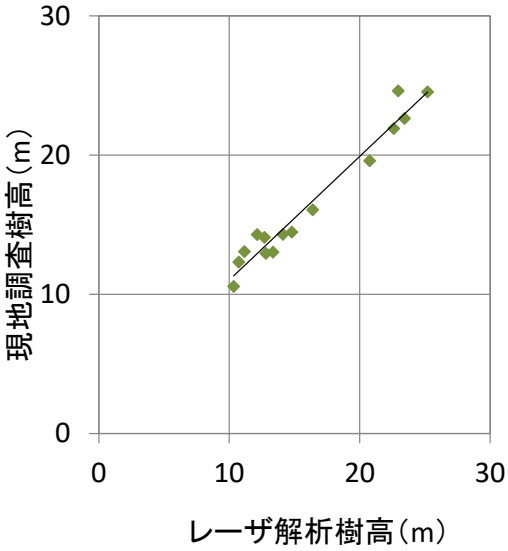
ヒノキ林における現地調査の平均樹高は 16.6m、レーザ解析による平均樹高は 16.2m であった。現地調査の樹高に対するレーザ解析の樹高の平均誤差率は 5.7%、RMSE は 1.12 であった。相関係数は 0.98 と高く、平均誤差率 10%以内に収まることから高い精度の解析が行えたと考えられる。

カラマツ林における現地調査の平均樹高は 24.0m、レーザ解析による平均樹高は 23.8m であった。現地調査の樹高に対するレーザ解析の樹高の平均誤差率は 4.3%、RMSE は 1.19 であった。相関係数は 0.96 であり、平均誤差率 10%以内に収まることから、ヒノキと同様に高い精度の解析が行えたと考えられる。

表 3.5　現地調査樹高とレーザ解析樹高の比較（左：ヒノキ、右：カラマツ）

| プロット名 | 現地調査平均樹高（m） | レーザ解析平均樹高（m） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| H01 | 14.3 | 12.1 | 85% | 15% |
| H02 | 13.1 | 11.2 | 85% | 15% |
| H03 | 19.6 | 20.8 | 106% | 6% |
| H04 | 24.6 | 22.9 | 93% | 7% |
| H05 | 14.3 | 14.1 | 99% | 1% |
| H06 | 12.9 | 12.8 | 99% | 1% |
| H07 | 14.1 | 12.7 | 90% | 10% |
| H08 | 13.0 | 13.4 | 102% | 2% |
| H09 | 10.6 | 10.3 | 98% | 2% |
| H10 | 22.6 | 23.4 | 103% | 3% |
| H11 | 24.5 | 25.2 | 103% | 3% |
| H12 | 12.3 | 10.7 | 87% | 13% |
| H13 | 14.5 | 14.8 | 102% | 2% |
| H14 | 16.1 | 16.4 | 102% | 2% |
| H15 | 21.9 | 22.6 | 103% | 3% |
| 平均 | 16.6 | 16.2 | | 5.7% |
| | | R | 0.98 | |
| | | RMSE | 1.12 | |

| プロット名 | 現地調査平均樹高（m） | レーザ解析平均樹高（m） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| K01 | 30.4 | 29.1 | 96% | 4% |
| K02 | 31.3 | 30.9 | 99% | 1% |
| K03 | 26.5 | 28.8 | 109% | 9% |
| K04 | 25.2 | 25.0 | 99% | 1% |
| K05 | 22.0 | 22.9 | 104% | 4% |
| K06 | 26.1 | 23.9 | 92% | 8% |
| K07 | 20.8 | 21.5 | 104% | 4% |
| K08 | 23.0 | 21.9 | 95% | 5% |
| K09 | 22.2 | 23.6 | 106% | 6% |
| K10 | 26.9 | 25.5 | 95% | 5% |
| K11 | 20.6 | 20.3 | 98% | 2% |
| K12 | 22.5 | 22.0 | 98% | 2% |
| K13 | 17.7 | 18.8 | 106% | 6% |
| K14 | 16.8 | 15.7 | 94% | 6% |
| K15 | 28.1 | 27.9 | 99% | 1% |
| 平均 | 24.0 | 23.8 | | 4.3% |
| | | R | 0.96 | |
| | | RMSE | 1.19 | |



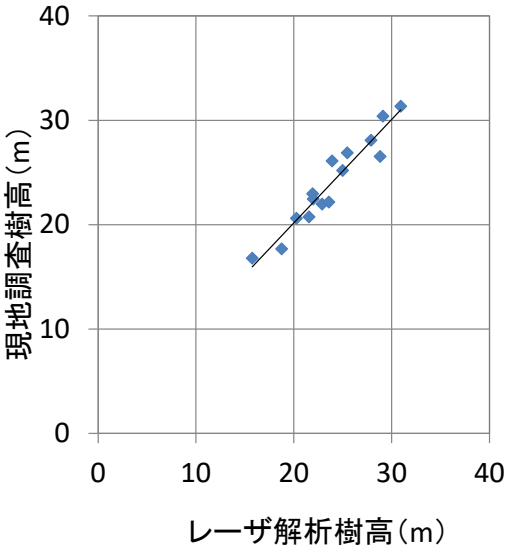



図 3-22　現地調査樹高とレーザ解析樹高の比較（左：ヒノキ、右：カラマツ）

4)　胸高直径回帰分析結果

現地で計測した平均胸高直径 d(cm)と、レーザ計測より求められた 6 つの変数との比較を行い、最も関係の強い変数を使用することで、平均胸高直径を推定する回帰式を求めた。6 つの変数は、樹高 h(m)、樹冠投影面積 $C_a$(㎡)、樹冠長 $C_h$(m)、樹冠長率 $C_p$(%)、樹冠表面積 A(㎡)、樹冠体積 V(㎥)である。回帰式を求める際には、6 つの変数から強い関係が予想される変数の組み合わせを 10 パターン試行し比較を行った。回帰式の基本型は以下の式となる。

$$d = \alpha \times \mathrm{X}_1^{\beta_1} \times \mathrm{X}_2^{\beta_2} \times \mathrm{X}_3^{\beta_3}$$

（α:定数　X1～X3:説明変数　β1～β3:説明変数の係数）

ヒノキ・カラマツにおける回帰式の比較結果を表 3.6 に示す。

ヒノキの胸高直径の回帰式は、全ての変数の p 値が 5%未満である回帰式は式 1~4、6,7,10 の 8 つの回帰式であった。8 つの式の中で補正 $R^2$ 値が最も高く、RMSE が最も小さい値であった式は式 6 であったため、ヒノキの胸高直径推定式には式 6 を採用した。

カラマツの胸高直径の回帰式は全ての変数の p 値が 5%未満であった回帰式は 2～4 の 3 つの回帰式であった。8 つの式の中で補正 $R^2$ 値が最も高く、RMSE が最も小さい値である回帰式は式 5 であったことから、カラマツの胸高直径推定に式 5 を採用した。

以上のことから各樹種の胸高直径の回帰式は以下の式となる。

・ヒノキの回帰式

$$d = 2.786 \times \mathrm{A}^{0.148} \times h^{0.571}$$

（A:樹冠表面積　h:樹高）

・カラマツの回帰式

$$d = 5.837 \times \mathrm{Ca}^{0.328} \times h^{0.195}$$

（Ca:樹冠投影面積　h：樹高）

## 表 3.6　回帰式の比較結果（ヒノキ・カラマツ）

【ヒノキ　回帰分析結果】

| 回帰式 | 説明変数の組合せ | α | | β1 | | β2 | | β3 | | 補正$R^2$ | RMSE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $X_1$ 樹高 | 2.944 | ** | 0.741 | *** | | | | | 0.810 | 2.72 |
| 2 | $X_1$ 樹冠投影面積 | 5.838 | *** | 0.536 | *** | | | | | 0.737 | 2.91 |
| 3 | $X_1$ 樹冠表面積 | 6.528 | *** | 0.350 | *** | | | | | 0.566 | 3.89 |
| 4 | $X_1$ 樹冠体積 | 9.687 | *** | 0.270 | *** | | | | | 0.605 | 3.94 |
| 5 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹高 | 3.308 | *** | 0.229 | † | 0.489 | ** | | | 0.844 | 2.04 |
| 6 | $X_1$ 樹冠表面積<br>$X_2$ 樹高 | 2.786 | *** | 0.148 | * | 0.571 | *** | | | 0.868 | 1.76 |
| 7 | $X_1$ 樹冠体積<br>$X_2$ 樹高 | 3.430 | *** | 0.115 | * | 0.555 | *** | | | 0.867 | 1.88 |
| 8 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹冠長 | 5.340 | *** | 0.682 | ** | −0.175 | | | | 0.740 | 2.68 |
| 9 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹冠長率 | 9.544 | *** | 0.572 | *** | −0.169 | † | | | 0.783 | 2.47 |
| 10 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹高<br>$X_3$ 樹冠長 | 2.539 | ** | −0.380 | | 0.901 | ** | 0.421 | * | 0.884 | 1.53 |
| 11 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹高<br>$X_3$ 樹冠長率 | 0.403 | | −0.357 | | 1.286 | ** | 0.405 | † | 0.881 | 1.52 |

【カラマツ　回帰分析結果】

| 回帰式 | 説明変数の組合せ | α | | β1 | | β2 | | β3 | | 補正$R^2$ | RMSE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $X_1$ 樹高 | 2.729 | † | 0.741 | *** | | | | | 0.611 | 3.11 |
| 2 | $X_1$ 樹冠投影面積 | 8.359 | *** | 0.415 | *** | | | | | 0.728 | 2.83 |
| 3 | $X_1$ 樹冠表面積 | 11.842 | *** | 0.217 | *** | | | | | 0.551 | 3.40 |
| 4 | $X_1$ 樹冠体積 | 14.731 | *** | 0.171 | *** | | | | | 0.593 | 3.42 |
| 5 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹高 | 5.837 | ** | 0.328 | * | 0.195 | | | | 0.719 | 2.78 |
| 6 | $X_1$ 樹冠表面積<br>$X_2$ 樹高 | 4.102 | † | 0.085 | | 0.503 | | | | 0.607 | 3.07 |
| 7 | $X_1$ 樹冠体積<br>$X_2$ 樹高 | 5.275 | * | 0.084 | | 0.431 | | | | 0.622 | 3.08 |
| 8 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹冠長 | 7.962 | *** | 0.453 | ** | −0.034 | | | | 0.709 | 2.82 |
| 9 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹冠長率 | 8.952 | *** | 0.450 | *** | −0.052 | | | | 0.713 | 2.80 |
| 10 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹高<br>$X_3$ 樹冠長 | 4.796 | * | 0.373 | * | 0.252 | | −0.063 | | 0.704 | 2.74 |
| 11 | $X_1$ 樹冠投影面積<br>$X_2$ 樹高<br>$X_3$ 樹冠長率 | 6.278 | ** | 0.364 | * | 0.191 | | −0.050 | | 0.700 | 2.74 |

† p値<0.1　* p値<0.05　** p値<0.01　*** p値<0.001　採用された回帰式

### 5)　既存の胸高直径推定回帰式の利用

本事業では、レーザ計測を活用した収穫調査のさらなる効率化と、今後の現地プロット調査の省力化を目的とし、既存の胸高直径推定回帰式を適用し、現地調査結果と比較することで、精度検証を実施した。ここでいう既存式とは、アジア航測株式会社が過去に実施した現地プロット調査の結果に基づく回帰式である。ヒノキ、カラマツの既存式を以下に示す。

・ヒノキの回帰式

$$d = 6.222 \times \mathrm{Ca}^{0.344} \times h^{0.177}$$　　(Ca:樹冠投影面積　h:樹高)

・カラマツの回帰式

$$d = 2.420 \times \mathrm{Ca}^{0.461} \times h^{0.350}$$　　(Ca:樹冠投影面積　h：樹高)

### 6) 胸高直径データの検証

前項で求められた回帰式及び既存の回帰式を用いて胸高直径を推定し、現地調査の平均胸高直径と比較した。現地調査平均胸高直径とレーザ解析平均胸高直径の比較を表 3.7,図 3-23 に示す。

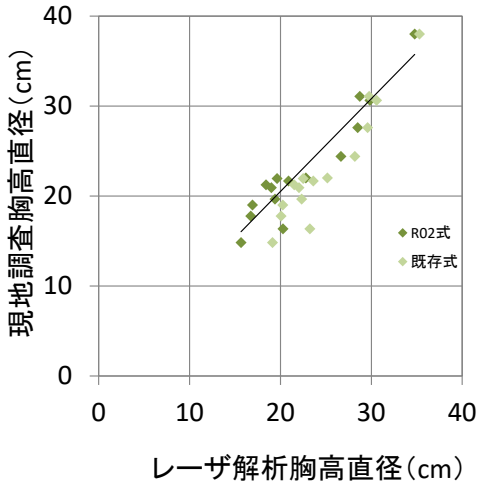
ヒノキ林における現地調査の平均胸高直径は 23.1cm、レーザ解析により推定した R02 式平均胸高直径は 22.6cm であった。現地調査による平均胸高直径に対するレーザ解析による胸高直径推定の誤差は 7.1%であり、RMSE は 1.76 であった。相関係数は 0.96 と高く、平均誤差率 15%を大幅に下回ることから、高い精度の解析が行えたと考える。

カラマツ林における現地調査の平均胸高直径は 28.7cm、レーザ解析により推定した平均胸高直径は 27.8cm であった。現地調査による平均胸高直径に対するレーザ解析による胸高直径推定の誤差は 5.4%であり、RMSE は 2.78 であった。相関係数は 0.82 と高く、平均誤差率 15%を大幅に下回ることから、ヒノキ同様に高い精度の解析が行えたと考える。

表 3.7　現地調査平均単木材積とレーザ解析平均単木材積の比較（左：ヒノキ、右：カラマツ）

| プロット名 | 現地調査 平均胸高直径 (cm) | R02式 レーザ解析 平均胸高直径 (cm) | 既存式 レーザ解析 平均胸高直径 (cm) | R02式 誤差率 | 既存式 誤差率 |
|---|---|---|---|---|---|
| H01 | 21.3 | 18.6 | 21.5 | 12% | 1% |
| H02 | 19.0 | 16.8 | 20.2 | 11% | 7% |
| H03 | 24.4 | 26.0 | 28.2 | 6% | 15% |
| H04 | 38.0 | 36.7 | 35.3 | 3% | 7% |
| H05 | 21.9 | 20.2 | 22.5 | 8% | 3% |
| H06 | 16.4 | 19.8 | 23.2 | 21% | 42% |
| H07 | 20.9 | 18.8 | 22.0 | 10% | 5% |
| H08 | 19.6 | 19.5 | 22.3 | 1% | 14% |
| H09 | 14.8 | 15.7 | 19.1 | 6% | 29% |
| H10 | 31.1 | 28.4 | 29.8 | 8% | 4% |
| H11 | 30.6 | 29.6 | 30.6 | 3% | 0% |
| H12 | 17.8 | 17.1 | 20.1 | 4% | 13% |
| H13 | 21.7 | 20.7 | 23.6 | 5% | 9% |
| H14 | 22.0 | 23.0 | 25.2 | 4% | 14% |
| H15 | 27.6 | 28.2 | 29.6 | 2% | 7% |
| 平均 | 23.1 | 22.6 | 24.9 | 7.1% | 11.4% |
| R | | 0.96 | 0.95 | | |
| RMSE | | 1.76 | 2.86 | | |

| プロット名 | 現地調査 平均胸高直径 (cm) | R02式 レーザ解析 平均胸高直径 (cm) | 既存式 レーザ解析 平均胸高直径 (cm) | R02式 誤差率 | 既存式 誤差率 |
|---|---|---|---|---|---|
| K01 | 31.7 | 33.6 | 37.0 | 6% | 17% |
| K02 | 31.6 | 30.7 | 32.9 | 3% | 4% |
| K03 | 30.8 | 33.6 | 37.3 | 9% | 21% |
| K04 | 27.6 | 27.6 | 27.7 | 0% | 1% |
| K05 | 27.0 | 26.2 | 25.6 | 3% | 5% |
| K06 | 38.3 | 29.1 | 30.0 | 24% | 22% |
| K07 | 25.3 | 23.5 | 22.0 | 7% | 13% |
| K08 | 27.0 | 25.3 | 24.4 | 6% | 10% |
| K09 | 27.0 | 26.1 | 25.8 | 3% | 5% |
| K10 | 32.1 | 29.7 | 30.7 | 8% | 4% |
| K11 | 27.0 | 27.3 | 26.9 | 1% | 0% |
| K12 | 25.8 | 26.3 | 25.7 | 2% | 0% |
| K13 | 22.0 | 22.3 | 20.1 | 1% | 9% |
| K14 | 20.7 | 21.1 | 18.5 | 2% | 11% |
| K15 | 36.0 | 34.1 | 38.4 | 5% | 7% |
| 平均 | 28.7 | 27.8 | 28.2 | 5.4% | 8.5% |
| R | | 0.82 | 0.82 | | |
| RMSE | | 2.78 | 3.45 | | |



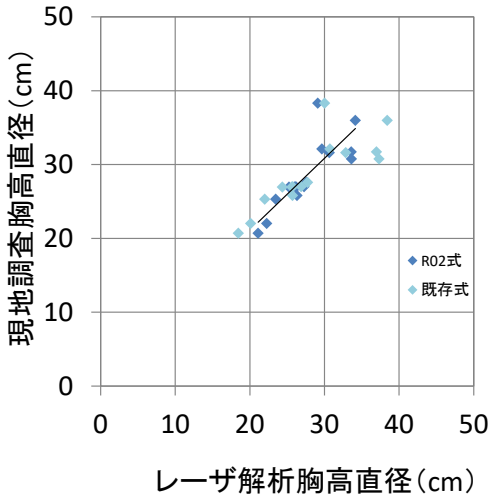




図 3-23　現地調査平均単木材積とレーザ解析平均単木材積の比較（左：ヒノキ、右：カラマツ）

### 7) 材積データの検証

ヒノキ、カラマツの材積を推定した。まず、現地調査プロット内の樹木の平均単木材積とレーザ解析による平均単木材積との比較を行った。結果を表 3.8、図 3-24 に示す。

ヒノキ林における現地調査の平均単木材積は 0.42 ㎥であり、レーザ解析により推定した平均単木材積は 0.39 ㎥であった。現地調査に対するレーザ解析の平均単木材積推定の誤差率は 15.2%であり、RMSE は 0.07、相関係数は 0.98 であった。また、カラマツ林における現地調査の平均単木材積は 0.85 ㎥であり、レーザ解析により推定した平均単木材積は 0.79 ㎥であった。現地調査に対するレーザ解析の平均単木材積推定の誤差率は 10.2%であり、RMSE は 0.19 であり、相関係数は 0.87 であった。ヒノキは平均誤差率 15%程度であり、カラマツについては下回った。相関係数が高いことから高精度の単木推定を行うことが出来たと判断できた。

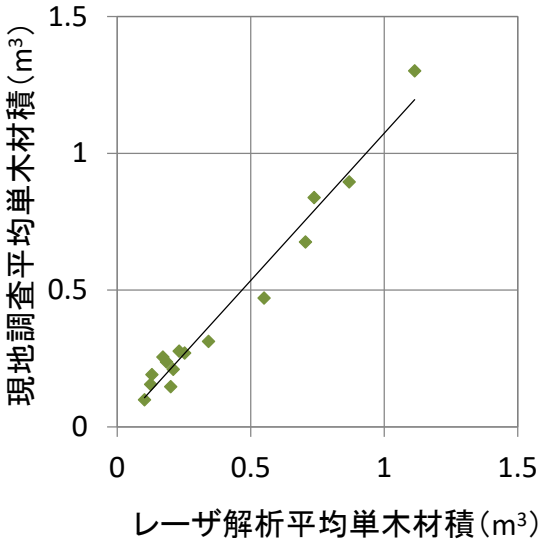
次に現地調査プロット内の樹木の合計材積とレーザ解析による合計材積との比較を行った。合計材積は単木材積の推定誤差に加え、本数推定の誤差も含まれるものであり、単木材積の誤差よりも大きくなる場合もある。結果を表 3.9、図 3-25 に示す。

ヒノキ林における現地調査の合計材積は 12.0 ㎥であり、レーザ解析により推定した合計材積は 10.2 ㎥であった。現地調査に対するレーザ解析の合計材積の誤差率は 18.6%であり、RMSE は 2.46 であった。また、カラマツ林における現地調査の合計材積は 16.7 ㎥であり、レーザ解析により推定した合計材積は 15.6 ㎥であった。現地調査に対するレーザ解析の合計材積の誤差率は 7.2%であり、RMSE は 1.80 であった。ヒノキについては単木材積と同様に平均誤差率 15%を上回ったが、相関係数が高いことから高精度の単木推定を行うことが出来た判断した。カラマツは誤差率 15%以内を大きく下回り、相関係数も高いことから高精度の単木推定を行うことが出来た判断した。

表 3.8　現地調査平均単木材積とレーザ解析平均単木材積の比較（左：ヒノキ、右：カラマツ）

| プロット名 | 現地調査平均単木材積（m³） | レーザ解析平均単木材積（m³） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| H01 | 0.25 | 0.17 | 67% | 33% |
| H02 | 0.19 | 0.13 | 68% | 32% |
| H03 | 0.47 | 0.55 | 117% | 17% |
| H04 | 1.30 | 1.11 | 86% | 14% |
| H05 | 0.28 | 0.23 | 84% | 16% |
| H06 | 0.15 | 0.20 | 136% | 36% |
| H07 | 0.24 | 0.18 | 78% | 22% |
| H08 | 0.21 | 0.21 | 100% | 0% |
| H09 | 0.10 | 0.10 | 103% | 3% |
| H10 | 0.84 | 0.74 | 88% | 12% |
| H11 | 0.90 | 0.87 | 97% | 3% |
| H12 | 0.16 | 0.13 | 81% | 19% |
| H13 | 0.27 | 0.25 | 94% | 6% |
| H14 | 0.31 | 0.34 | 110% | 10% |
| H15 | 0.68 | 0.70 | 104% | 4% |
| 平均 | 0.42 | 0.39 | | 15.2% |
| | | R | 0.98 | |
| | | RMSE | 0.07 | |

| プロット名 | 現地調査平均単木材積（m³） | レーザ解析平均単木材積（m³） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| K01 | 1.26 | 1.31 | 104% | 4% |
| K02 | 1.30 | 1.20 | 92% | 8% |
| K03 | 1.01 | 1.31 | 129% | 29% |
| K04 | 0.78 | 0.77 | 99% | 1% |
| K05 | 0.66 | 0.64 | 97% | 3% |
| K06 | 1.44 | 0.83 | 58% | 42% |
| K07 | 0.55 | 0.49 | 90% | 10% |
| K08 | 0.68 | 0.58 | 86% | 14% |
| K09 | 0.68 | 0.67 | 99% | 1% |
| K10 | 1.11 | 0.90 | 80% | 20% |
| K11 | 0.60 | 0.59 | 99% | 1% |
| K12 | 0.61 | 0.62 | 100% | 0% |
| K13 | 0.36 | 0.38 | 106% | 6% |
| K14 | 0.29 | 0.29 | 98% | 2% |
| K15 | 1.46 | 1.30 | 89% | 11% |
| 平均 | 0.85 | 0.79 | | 10.2% |
| | | R | 0.87 | |
| | | RMSE | 0.19 | |



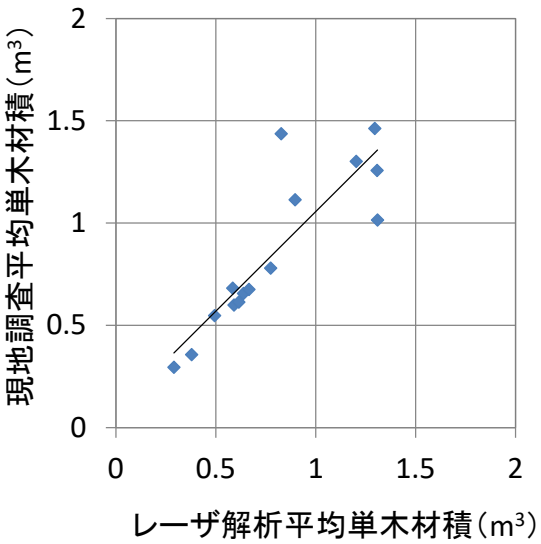




図 3-24　現地調査平均単木材積とレーザ解析平均単木材積の比較（左：ヒノキ、右：カラマツ）

表 3.9　現地調査合計材積とレーザ解析合計材積の比較（左：ヒノキ、右：カラマツ）

| プロット名 | 現地調査合計材積（$m^3$） | レーザ解析合計材積（$m^3$） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| H01 | 10.2 | 6.8 | 67% | 33% |
| H02 | 9.4 | 6.4 | 68% | 32% |
| H03 | 10.4 | 7.1 | 69% | 31% |
| H04 | 10.4 | 8.9 | 86% | 14% |
| H05 | 10.8 | 9.0 | 84% | 16% |
| H06 | 5.0 | 6.0 | 120% | 20% |
| H07 | 10.5 | 7.6 | 72% | 28% |
| H08 | 7.1 | 7.1 | 100% | 0% |
| H09 | 8.6 | 6.4 | 74% | 26% |
| H10 | 25.2 | 20.7 | 82% | 18% |
| H11 | 26.9 | 23.5 | 87% | 13% |
| H12 | 6.5 | 5.3 | 81% | 19% |
| H13 | 11.9 | 9.3 | 79% | 21% |
| H14 | 10.6 | 10.9 | 103% | 3% |
| H15 | 16.9 | 17.6 | 104% | 4% |
| 平均 | 12.0 | 10.2 | | 18.6% |
| | | R | 0.97 | |
| | | RMSE | 2.46 | |

| プロット名 | 現地調査合計材積（$m^3$） | レーザ解析合計材積（$m^3$） | 現地比 | 誤差率 |
|---|---|---|---|---|
| K01 | 17.6 | 18.3 | 104% | 4% |
| K02 | 23.4 | 21.6 | 92% | 8% |
| K03 | 18.3 | 18.3 | 100% | 0% |
| K04 | 19.5 | 19.3 | 99% | 1% |
| K05 | 17.0 | 16.6 | 97% | 3% |
| K06 | 17.2 | 12.4 | 72% | 28% |
| K07 | 15.3 | 13.8 | 90% | 10% |
| K08 | 19.1 | 16.4 | 86% | 14% |
| K09 | 18.2 | 17.3 | 95% | 5% |
| K10 | 17.8 | 15.2 | 85% | 15% |
| K11 | 12.0 | 11.8 | 99% | 1% |
| K12 | 16.0 | 16.0 | 100% | 0% |
| K13 | 10.4 | 11.0 | 106% | 6% |
| K14 | 10.9 | 10.7 | 98% | 2% |
| K15 | 17.6 | 15.5 | 89% | 11% |
| 平均 | 16.7 | 15.6 | | 7.2% |
| | | R | 0.90 | |
| | | RMSE | 1.80 | |

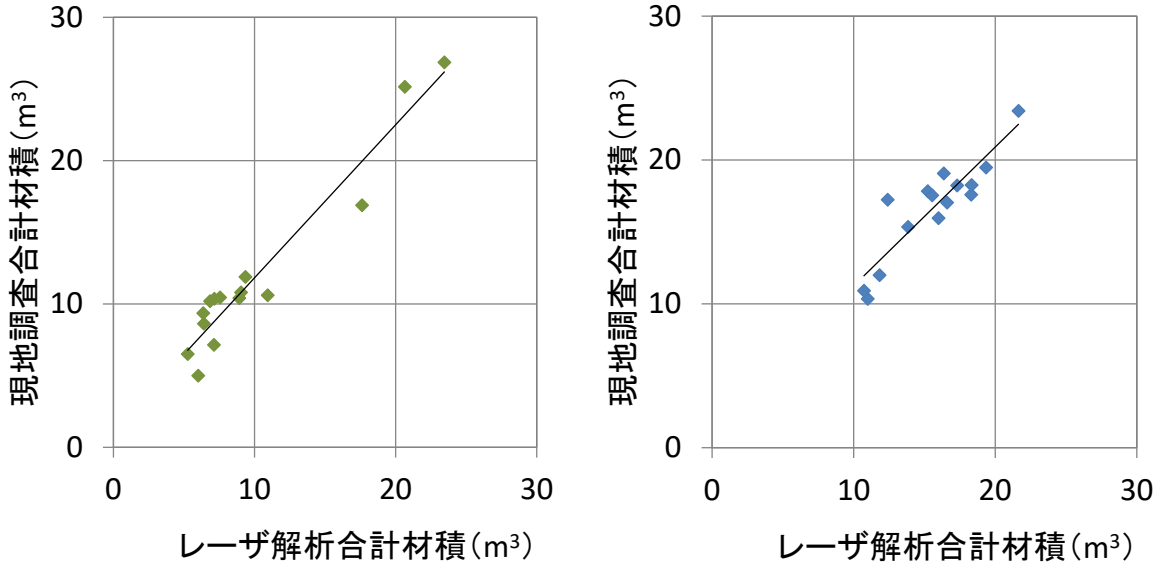



図 3-25　現地調査合計材積とレーザ解析合計材積の比較（左：ヒノキ、右：カラマツ）