

4.3.2 コドラート調査による精度検証＜樹高と胸高直径＞

本調査で収集された TLS 点群を、既存の ALS 点群と結合できるようにジオリファレンスを行った。両点群の結合により、地際から樹頂点までの単木データが抽出可能となった。TLS 点群と ALS 点群を結合した結果を図 4.12 に示す。

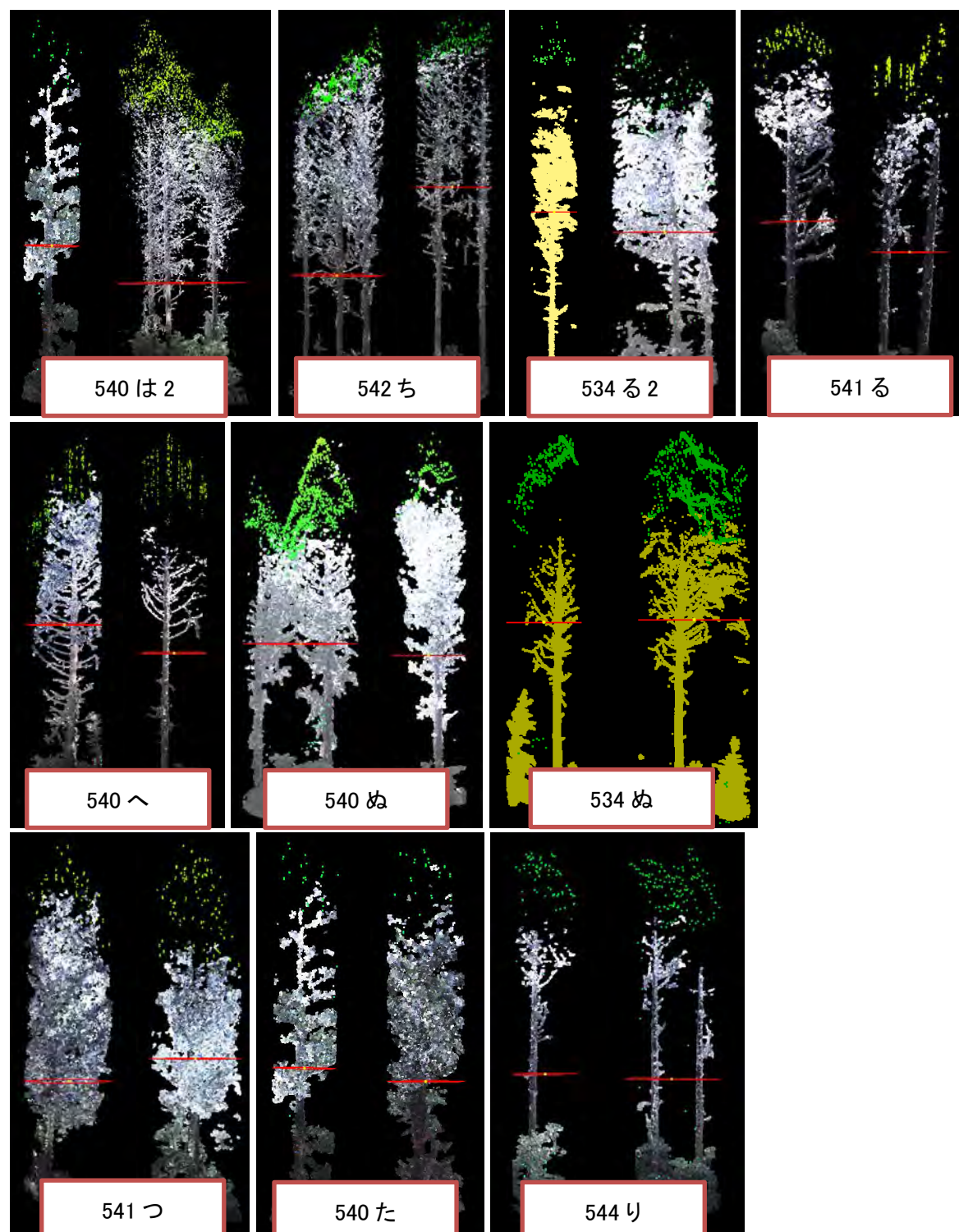


図 4.12 ジオリファレンスによる ALS 点群と TLS 点群の結合（上部緑色部分が ALS 点群）

ALS 点群の粗密により、見え方に差はあるが、おおむね TLS 点群とのつながりが確認でき、空から取得した点群と地上から取得した点群、両者を結合することで樹冠と樹幹ともに精度の高い点群集合を作成することができた。これにより、表 4.8 のデータの取得が可能となった。なお、これらの森林情報の算出は森林解析に特化したソフトウェアを使用し、実施した。

表 4.8 両点群から取得可能な森林情報（単木データ）

ALS 森林解析により取得されるデータ	TLS 森林解析により取得されるデータ
樹頂点位置	胸高直径位置
樹高	胸高直径
樹冠直径	—
樹冠面積	—
樹冠体積	—

両点群から抽出された森林情報のうち、樹高と胸高直径を毎木調査結果と比較することにより、精度検証を実施した。なお、「544 り」については、現地で収集した樹木位置情報に不備があり、樹木位置と単木の毎木調査結果との照合ができなかったため、本検証から除外することとし、9 小班を対象とした。

表 4.9 現地毎木調査と点群データによる胸高直径（DBH）と樹高の比較

No	小班名	①現地 DBH (cm)	②TLS DBH (cm)	DBH 平均 誤差率 (%)	DBH 平均 誤差± (cm)	③現地 樹高 (m)	④ALS 樹高 (m)	樹高 平均 誤差率 (%)	樹高 平均 誤差± (m)
1	540 は 2	25.2	26.6	106	1.9	17.1	16.3	95	1.0
2	542 ち	17.6	17.9	102	1.4	14.6	14.5	99	0.4
3	534 る 2	14.1	14.8	104	1.0	14.1	11.6	88	3.9
4	541 る	21.3	21.4	100	1.0	13.1	14.2	109	1.5
5	540 へ	21.1	21.4	102	0.5	15.1	14.9	99	0.4
6	540 ぬ	18.9	18.3	96	0.8	13.2	13.5	102	0.6
7	534 ぬ	26.5	27.4	103	1.2	17.4	16.5	95	0.9
8	541 つ	14.1	15.5	111	1.5	10.2	9.5	92	1.2
9	540 た	10.8	11.1	103	1.0	6.0	6.4	108	0.8
平均		18.8	19.4	103	1.1	13.4	13.0	99	1.2

※No. 1～9 の値は全て単木ごとの結果の平均値。単木ごとの調査データは巻末資料参照。

毎木調査結果との比較は各コドラートの単木ごとに行ったが、表 4.9 では各コドラートの単木データの平均を示す。胸高直径では±2cm、樹高では±2m を許容範囲とし、その範囲を超えた小班については、推定式作成のベースとするデータから除外する。全 9 小班のうち、「534 る 2」の樹高については、±3.9m の誤差があり、精度不十分であったため、除外することとした。

毎木調査は円形コドラート内の中心付近の表 4.10 に示す本数を対象に行った。各小班の単木データの比較結果については図 4.13～図 4.15 に示す。

表 4.10 コドラート内樹木数と毎木調査樹木数

No	小班名	コドラート内 樹木数	毎木調査 樹木数
1	540 は 2	20	6
2	542 ち	30	8
3	534 る 2	29	8
4	541 る	13	8
5	540 へ	20	6
6	540 め	21	9
7	534 め	12	11
8	541 つ	28	7
9	540 た	20	6

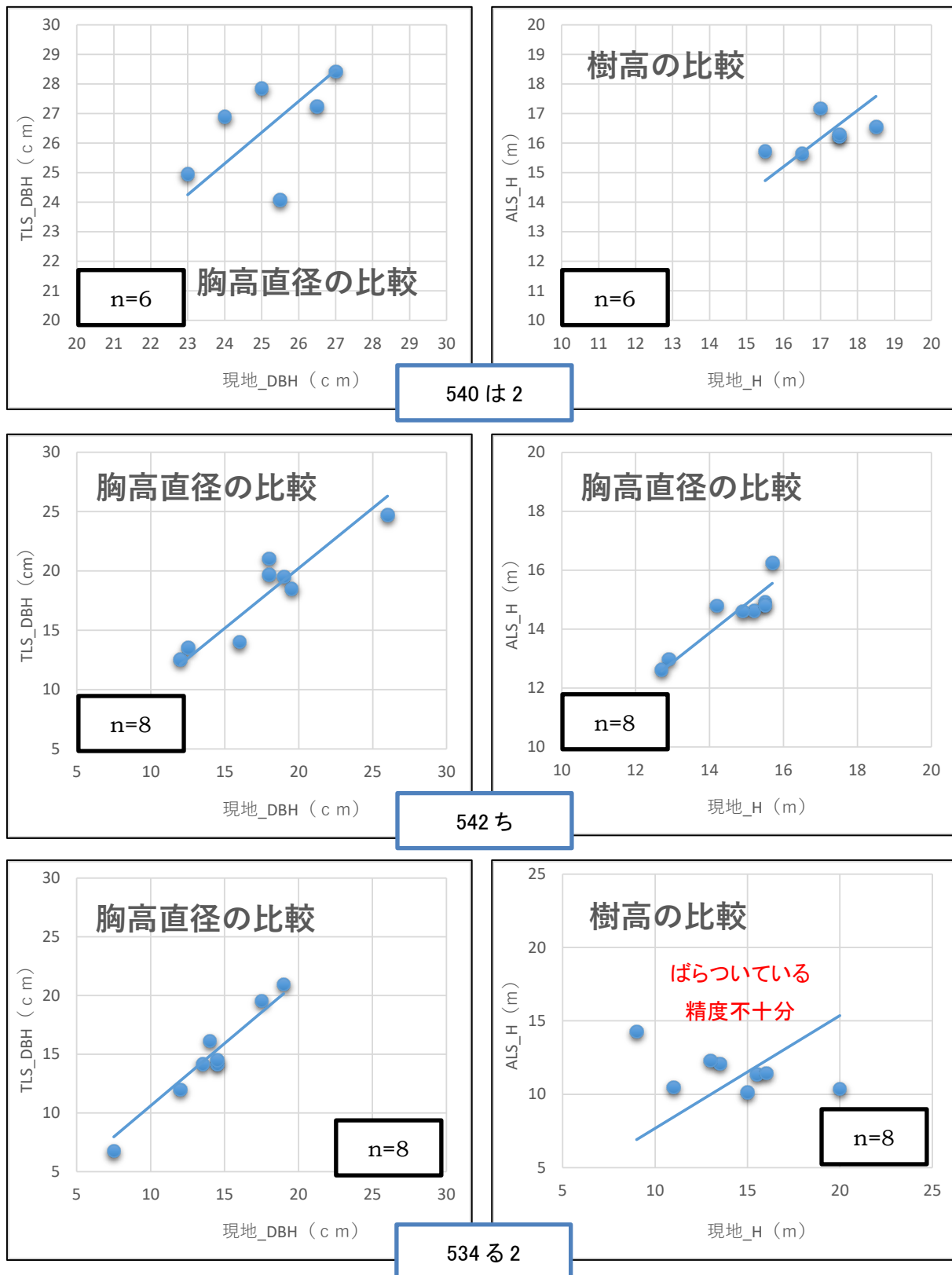


図 4.13 小班ごとの単木データの比較（左：胸高直径、右：樹高）

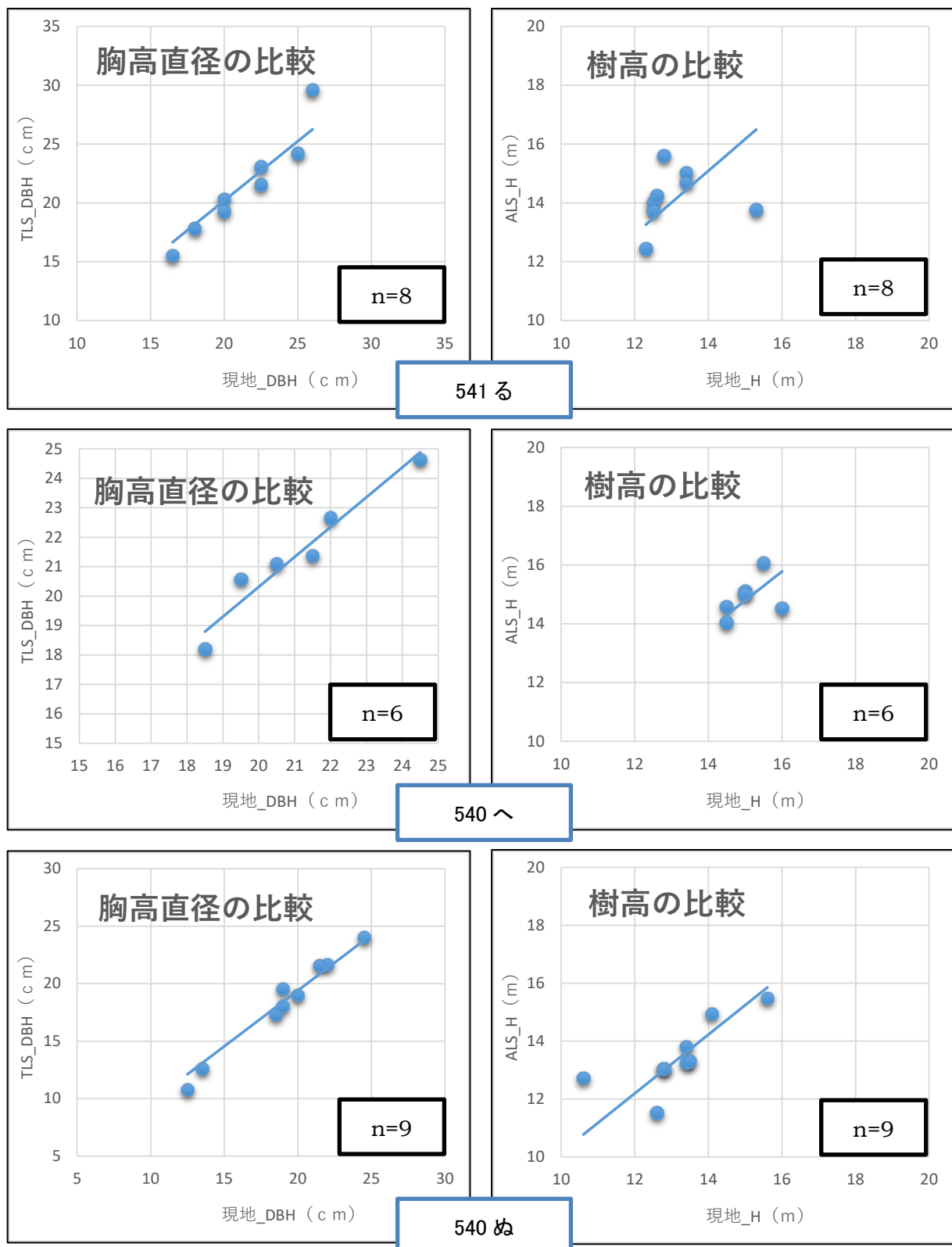


図 4.14 小班ごとの単木データの比較（左：胸高直径、右：樹高）

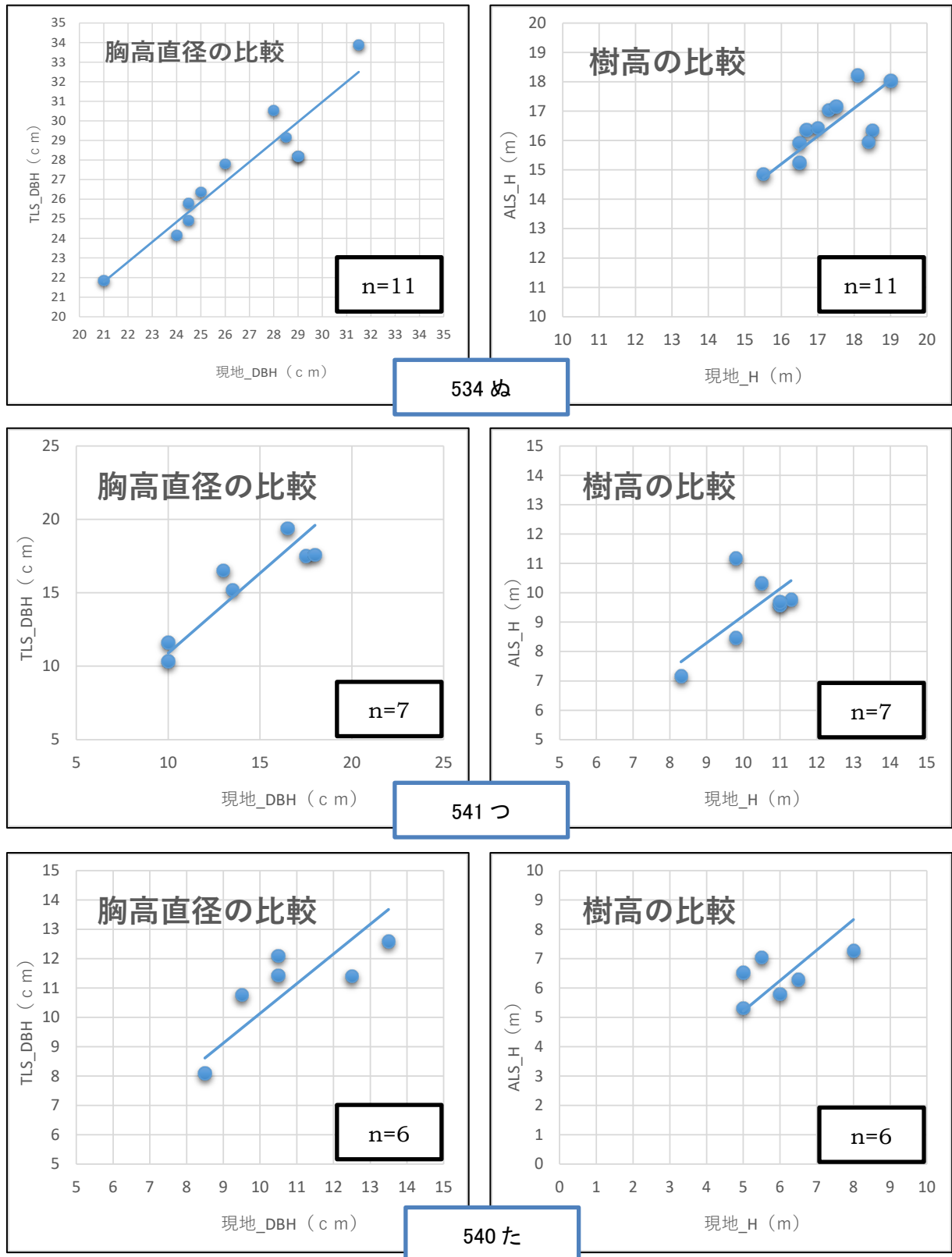


図 4.15 小班ごとの単木データの比較（左：胸高直径、右：樹高）

「534 る 2」を除外したコドラート平均による毎木調査結果と点群データ解析結果の樹高、及び胸高直径の比較を図 4.16 に示す。

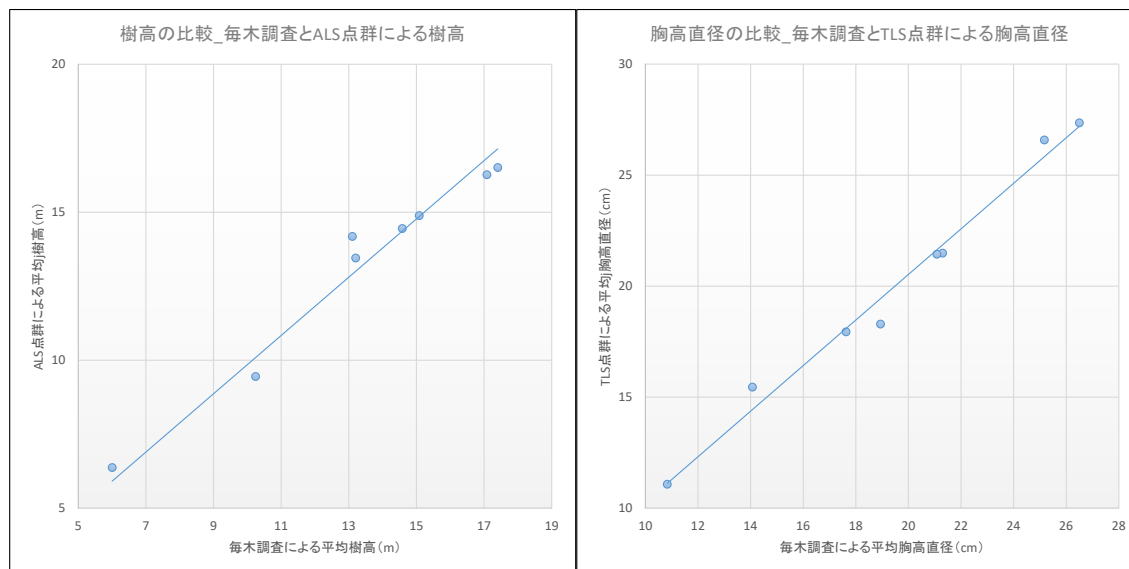


図 4.16 コドラート平均による毎木調査結果と点群データ解析結果の比較
(左：樹高、右：胸高直径)

表 4.11 現地毎木調査と点群データによる胸高直径と樹高の比較（「534 る 2」除外）

No	小班名	①現地 DBH (cm)	②TLS DBH (cm)	DBH 平均 誤差率 (%)	DBH 平均 誤差± (cm)	③現地 樹高 (m)	④ALS 樹高 (m)	樹高 平均 誤差率 (%)	樹高 平均 誤差± (m)
1	540 は 2	25.2	26.6	106	1.9	17.1	16.3	95	1.0
2	542 ち	17.6	17.9	102	1.4	14.6	14.5	99	0.4
3	534 る 2	14.1	14.8	104	1.0	14.1	11.6	88	3.9
4	541 る	21.3	21.4	100	1.0	13.1	14.2	109	1.5
5	540 へ	21.1	21.4	102	0.5	15.1	14.9	99	0.4
6	540 ん	18.9	18.3	96	0.8	13.2	13.5	102	0.6
7	534 ん	26.5	27.4	103	1.2	17.4	16.5	95	0.9
8	541 つ	14.1	15.5	111	1.5	10.2	9.5	92	1.2
9	540 た	10.8	11.1	103	1.0	6.0	6.4	108	0.8
平均		19.4	20.0	103	1.2	13.3	13.2	100	0.9

※No. 1～9 の値は全て単木ごとの結果の平均値。単木ごとの調査データは巻末資料参照。

「534 る 2」を除外し、胸高直径、及び樹高の RMSE を算出したところ、胸高直径で 1.2、樹高で 0.9 と誤差が少ないと言える値となった。これらの精度検証により、推定式に用いる小班を表 4.11 の「534 る 2」以外の 8 小班とした。

4. 4 胸高直径推定式の検討

【使用するデータ】

胸高直径推定式の検討には、精度検証により対象とした 8 小班の LP データ解析により抽出した森林情報を使用する。これらの森林情報は各コドラート内の全樹木の単木データから平均を算出したものである。毎木調査との比較検証を実施したサンプル樹木の胸高直径と樹高関係のグラフ、及びコドラート内の全樹木の胸高直径と樹高関係のグラフを図 4.17 に示す。これら 2 つのグラフの傾きに大きな差は見られず、同じ傾向であると考える。

表 4.12 8 小班の全樹木の平均データ

基本情報					TLS 解析	ALS 解析			
No	小班名	林 齢	立木数	立木密度 (本/ha)	DBH (cm)	樹高 (m)	樹冠面積 (m²)	樹冠直径 (m)	樹冠体積 (m³)
1	540 は 2	33	20	1,300	21.9	16.1	9.7	3.4	24.9
2	542 ち	43	30	1,950	18.5	14.7	5.4	2.5	10.7
4	541 る	44	13	1,300	20.5	13.7	6.7	2.8	12.2
5	540 へ	44	20	1,300	21.3	14.7	7.7	3.1	18.0
6	540 ん	30	21	1,365	18.2	13.3	7.3	2.9	16.6
7	534 ん	43	12	780	27.1	16.5	14.3	4.2	37.7
8	541 つ	22	28	2,477	14.7	9.4	3.3	1.9	6.6
9	540 た	21	20	2,548	10.5	6.1	3.0	1.9	4.6
			計 164						
平均		35	21.4	1,656	19.1	13.1	7.2	2.8	16.4

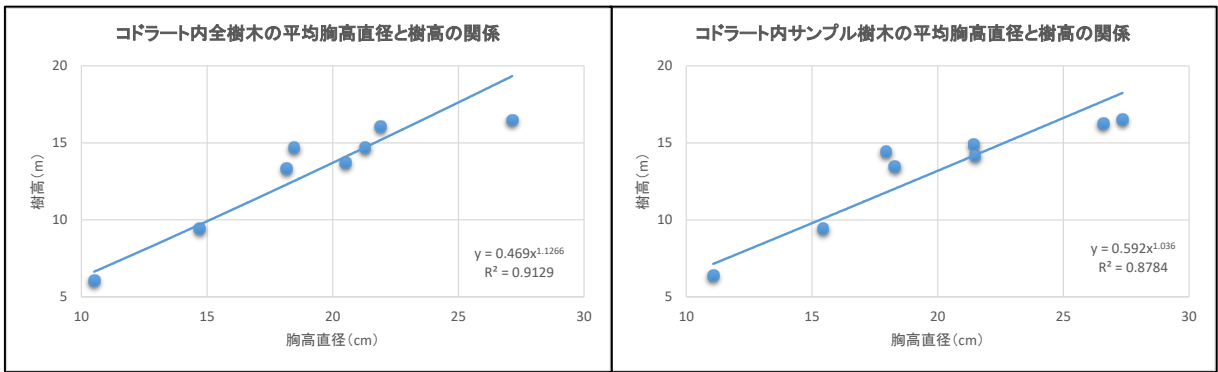


図 4.17 サンプル樹木の平均データと全樹木の平均データの傾向
(胸高直径と樹高の関係)

4.4.1 線形回帰分析による推定式の検討

精度検証により対象とした8小班のヒノキ立木164本を対象に線形回帰による回帰分析を実施した。

回帰分析には、TLS点群解析により算出した平均胸高直径 d (m) を目的変数とし、ALS点群解析により算出した樹高 h (m)、樹冠面積 Ca (m²)、樹冠直径 Cd (m)、樹冠体積 V (m³) の4つを説明変数とした。推定式の目的変数と説明変数の関係は以下のとおりである。

$$d = a + X_1 \times \beta 1 + X_2 \times \beta 2$$

回帰分析の結果を表4.13に示す。説明変数は6パターンで試行した。

表 4.13 回帰分析結果（線形回帰）

No	説明変数	α	$\beta 1$	$\beta 2$	補正 R^2	RMSE
1	X_1 : 樹冠面積 Ca	0.127***	0.009***	—	0.464	4.16
2	X_1 : 樹冠直径 Cd	0.081***	0.038***	—	0.467	4.14
3	X_1 : 樹冠体積 V	0.142***	0.003***	—	0.447	4.22
4	X_1 : 樹高 h X_2 : 樹冠面積 Ca	0.038***	0.009***	0.004***	0.652	3.36
5	X_1 : 樹高 h X_2 : 樹冠直径 Cd	0.017†	0.009***	0.019***	0.647	3.35
6	X_1 : 樹高 h X_2 : 樹冠体積 V	0.043***	0.009***	0.001***	0.655	3.55

† p 値 < 0.1 * p 値 0.05 ** p 値 < 0.01 *** p 値 < 0.001

推定式の決定には、 p 値、 R^2 、RMSE を用いた。 p 値については、0.05 未満を統計的に有意とみなし、それ以上の変数が含まれている推定式は採用しないこととした。

表 4.13 の結果から、 p 値の条件を満たした説明変数のうち、 R^2 が 0.655 と最も良好であった変数は No.6（樹高・樹冠体積）であったが、No.4（樹高・樹冠面積）についても、0.652 と僅差であった。また、両者の RMSE については、No.4（樹高・樹冠面積）で 3.36、No.6（樹高・樹冠体積）で 3.55 と No.4（樹高・樹冠面積）の方が良好であったため、No.4 を採用する。採用した胸高直径推定式を以下に示す。

$$d = 0.038 + h \times 0.009 + Ca \times 0.004$$

d : 胸高直径 (m)、 h : 樹高 (m)、 Ca : 樹冠面積 (m²)

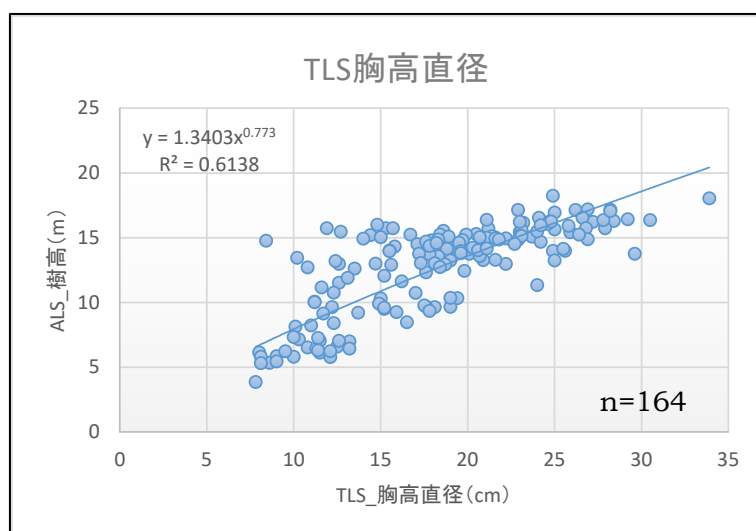


図 4.18 回帰分析に使った 8 小班のヒノキ 164 本（計測値）

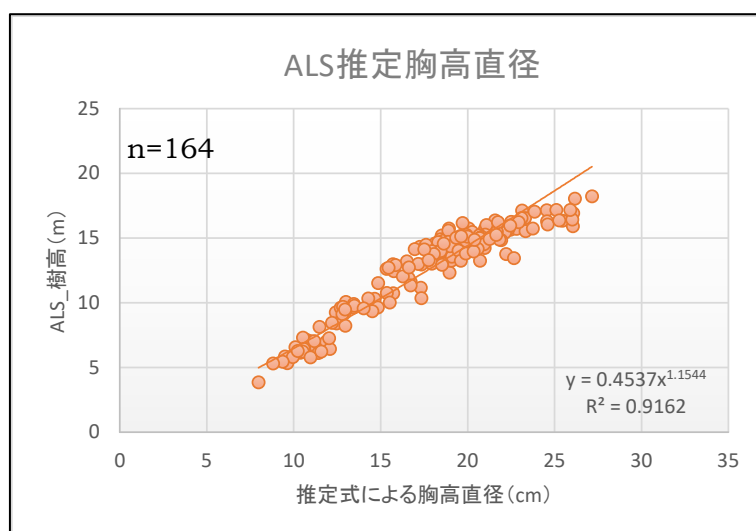


図 4.19 回帰分析に使った 8 小班のヒノキ 164 本（推定値）

4.4.2 胸高直径推定式の精度検証（線形回帰による）

採用した胸高直径推定式（式 1）を用いて、ALS 点群より平均胸高直径 d を線形回帰により推定した。

検証用データは 8 小班内のコドラート外の樹木から、無作為に各 5 本選定したヒノキ 40 本である。

ALS 計測 → 樹高と樹冠面積 → 胸高直径推定式（式 1） → 比較検証
 TLS 計測 → 胸高直径 → 比較検証

検証用ヒノキ 40 本について、TLS 計測による胸高直径と ALS 樹高の関係、及び推定式 1 による胸高直径と ALS 樹高の関係を図 4.20 に示す。

推定式 1 による胸高直径と TLS 計測胸高直径の誤差率は 107%、RMSE は 3.35 となり、推定式の精度はおおむね良好と言える。図 4.21 に両者を同時にプロットすると、オレンジ色の ALS 推定値は胸高直径 10cm 前後の小径木では、やや過大な直径値を推定しているが、20~30cm 付近ではほぼ同等の直径を算出している。

$$d = 0.038 + h \times 0.009 + Ca \times 0.004 \cdots \text{式 1}$$

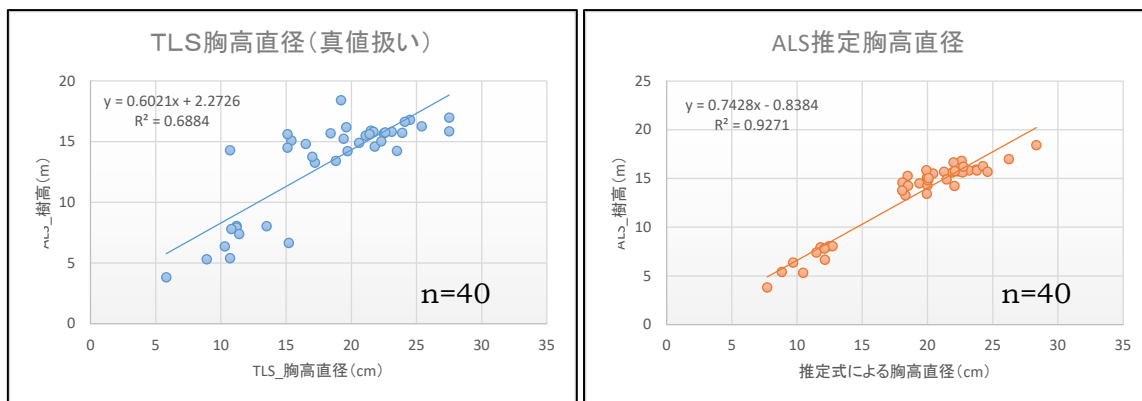


図 4.20 胸高直径と樹高の関係（左：TLS 計測値、右：ALS 推定値）

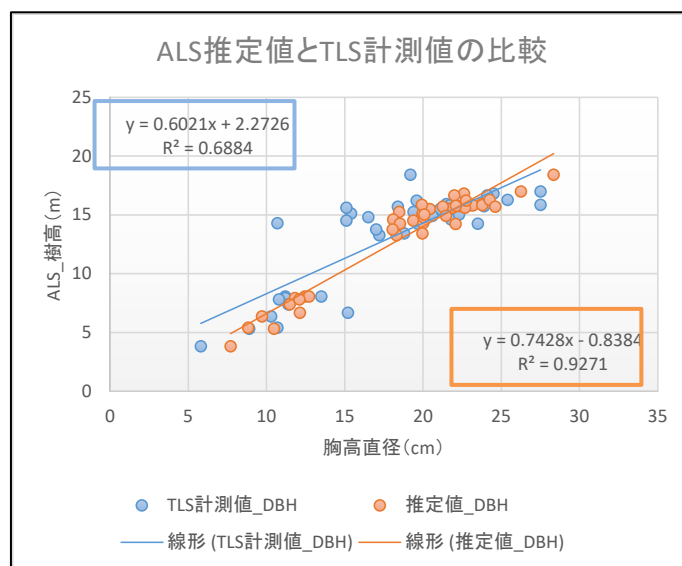


図 4.21 TLS 計測値と ALS 推定値の比較（胸高直径と樹高）

4.4.3 非線形回帰分析による推定式の検討

精度検証により対象とした 8 小班のヒノキ立木 164 本を対象に線形回帰による回帰分析を実施し、式 1 を得られたが、樹高と胸高直径の関係を示すプロットから、樹高が高くなるほど傾きがやや緩くなる傾向が見られたため、非線形回帰による推定式の検討を実施した。

回帰分析では、線形回帰と同様に TLS 点群解析により算出した平均胸高直径 d (m) を目的変数とし、ALS 点群解析により算出した樹高 h (m)、樹冠面積 Ca (m²)、樹冠直径 Cd (m)、樹冠体積 V (m³) の 4 つを説明変数とした。推定式の目的変数と説明変数の関係は以下のとおりである。

$$d = a \times (X_1^{\beta 1}) \times (X_2^{\beta 2})$$

回帰分析の結果を表 4.14 に示す。説明変数は 6 パターンで試行した。

表 4.14 回帰分析結果 (非線形回帰)

No	説明変数	α	$\beta 1$	$\beta 2$	補正 R ²	RMSE
1	X ₁ : 樹冠面積 Ca	0.118***	0.265***	—	0.466	4.20
2	X ₁ : 樹冠直径 Cd	0.111***	0.530***	—	0.466	4.20
3	X ₁ : 樹冠体積 V	0.116***	0.199***	—	0.478	4.15
4	X ₁ : 樹高 h X ₂ : 樹冠面積 Ca	0.029***	0.641***	0.125***	0.653	3.36
5	X ₁ : 樹高 h X ₂ : 樹冠直径 Cd	0.028***	0.641***	0.250***	0.653	3.36
6	X ₁ : 樹高 h X ₂ : 樹冠体積 V	0.030***	0.630***	0.097***	0.659	3.33

† p 値<0.1 * p 値 0.05 ** p 値<0.01 *** p 値<0.001

推定式の決定には、p 値、R²、RMSE を用いた。p 値については、線形回帰と同様に 0.05 未満を統計的に有意とみなし、それ以上の変数が含まれている推定式は採用しないこととした。

表 4.14 の結果から、p 値の条件を満たした説明変数のうち、No.4、No.5 と僅差ではあるが、No.6 (樹高・樹冠体積) の R² が 0.659 と最も良好であった。また、RMSE については、同様に No.4、No.5 と僅差ではあるが、No.6 (樹高・樹冠体積) で 3.33 と良好であった。これらの結果から、非線形回帰による検討では No.6 を採用する。採用した胸高直径推定式を以下に示す。

$$d = 0.030 \times (h^{0.630}) \times (V^{0.097}) \cdots \text{式 2}$$

d : 胸高直径 (m)、h : 樹高 (m)、V : 樹冠体積 (m³)

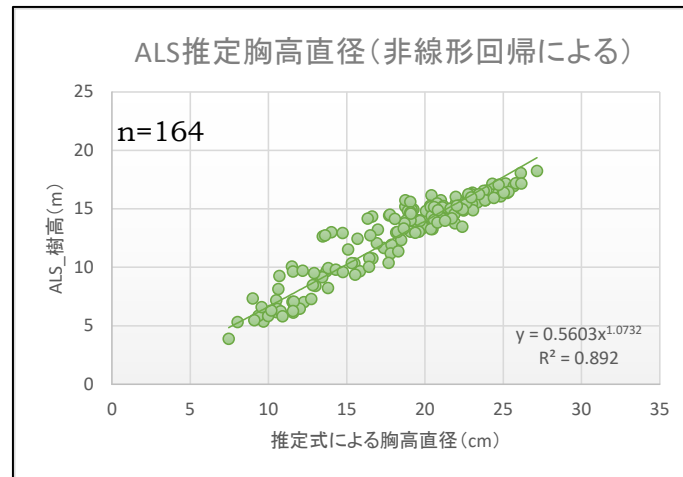


図 4.22 回帰分析に使った 8 小班のヒノキ 164 本（非線形回帰による推定値）

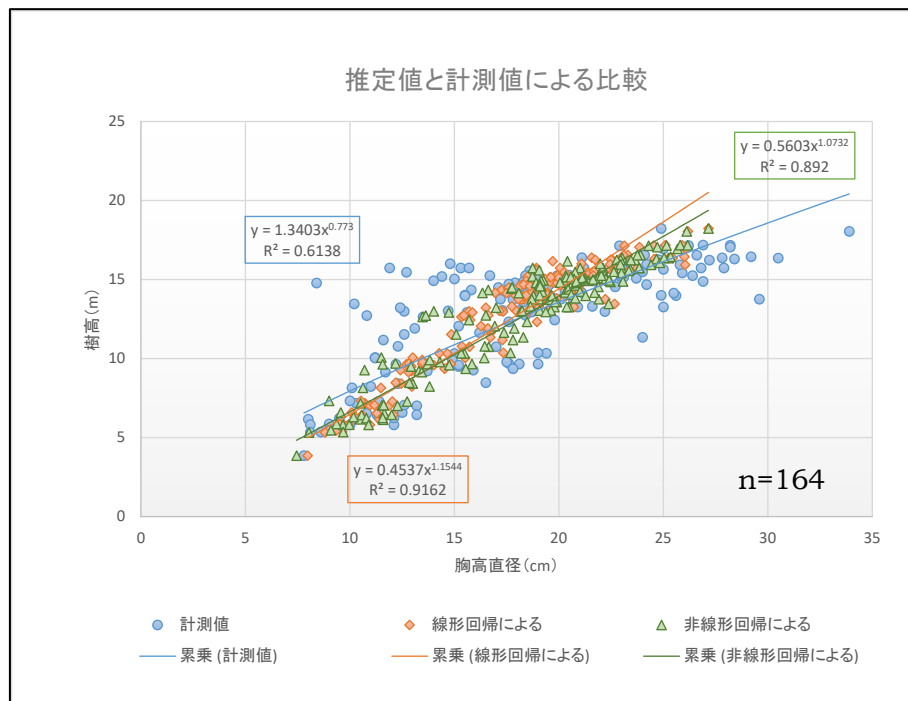


図 4.23 計測値と推定値（線形回帰と非線形回帰）の比較

図 4.23 では樹高と胸高直径の関係を示し、計測値と式 1、及び式 2 による胸高直径推定値を比較したものである。式 1 の近似曲線（オレンジ色）と比較し、式 2 の近似曲線（緑色）の傾きは僅差ではあるが、計測値（青色）に近づいていることがわかる。また、計測値では樹高 10～15mあたりのプロットにばらつきが見られたが、式 2 では、式 1 と比較し、樹高 10～15mあたりのプロットにややばらつきが見られ、全体的にまとまりのある式 1 のプロットと比較し、計測値に近い傾向が見られた。

これらのことから、広島国有林におけるヒノキの胸高直径の推定式として、非線形回帰による式 2 を採用することとする。

4.4.4 胸高直径推定式の精度検証（非線形回帰による）

採用した胸高直径推定式（式 2）を用いて、ALS 点群より平均胸高直径 d を非線形回帰により推定した。

検証用データは線形回帰式 1 による検証で使用したヒノキ 40 本である。

ALS 計測 → 樹高と樹冠体積 → 胸高直径推定式（式 2） → 比較検証
 TLS 計測 → 胸高直径 → 比較検証

検証用ヒノキ 40 本について、TLS 計測による胸高直径と ALS 樹高の関係、及び推定式 2 による胸高直径と ALS 樹高の関係を図 4.24 に示す。

推定式 2 による胸高直径と TLS 計測胸高直径の誤差率は 109%、RMSE は 3.56 となり、推定式の精度はおおむね良好と言える。図 4.25、及び図 4.26 は、TLS 計測値と ALS 推定値の比較を示しており、図 4.25 の非線形回帰による ALS 推定値は、図 4.26 の線形回帰による ALS 推定値と比較し、TLS 計測値の傾きに近づいていることがわかる。

$$d = 0.030 \times (h^{0.630}) \times (V^{0.097}) \dots \text{式 2}$$

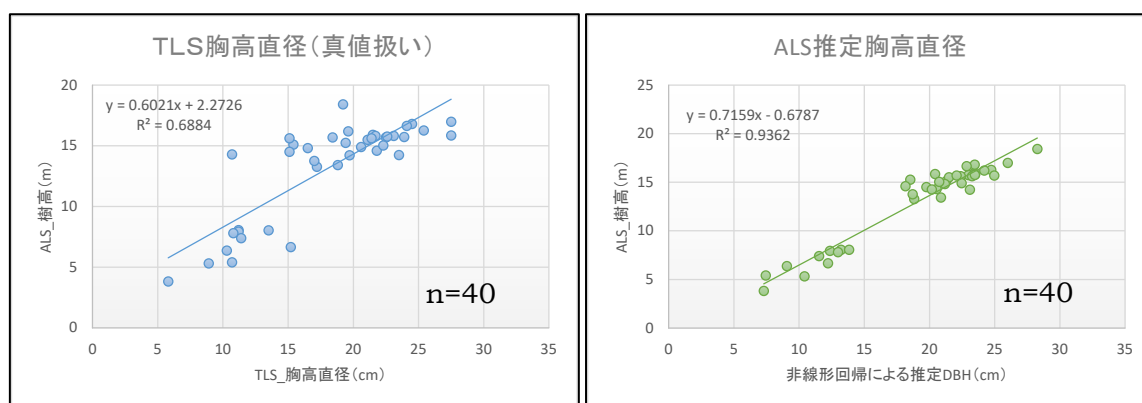


図 4.24 胸高直径と樹高の関係（左：TLS 計測値、右：ALS 推定値）

令和元年度委員会では、広島野路山国有林の ΔC 、及び W_r マップの作成に、森林総合研究所の「収量比数 R_y 計算プログラム」を使用し、算出した胸高直径を使用した。が、本年度は式 2 を用いて胸高直径を算出し、同じ範囲のマップの作成を再度実施する。

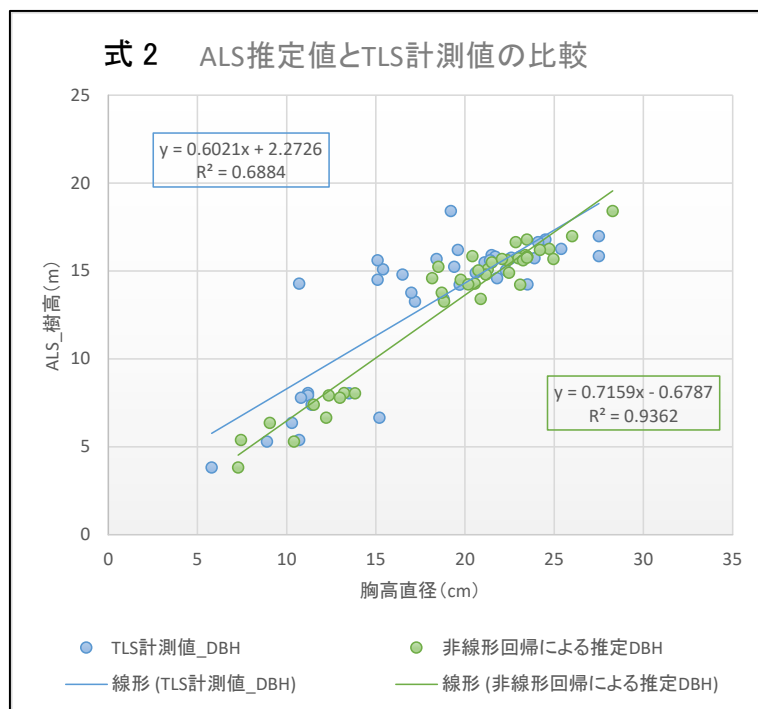


図 4.25 TLS 計測値と非線形回帰による ALS 推定値の比較

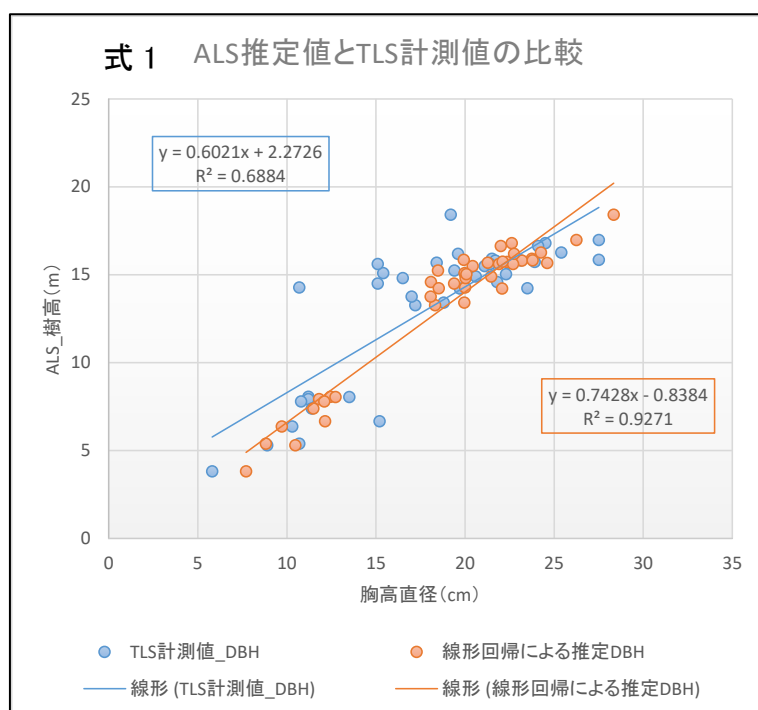


図 4.26 TLS 計測値と線形回帰による ALS 推定値の比較

4.5 胸高直径推定式による土砂崩壊防止機能区分図の作成

採用した推定式を用いて算出した胸高直径から ΔC マップ（手引）、 ΔC マップ（胸高断面積合計 ΣA による方法）、及び Wr マップを作成した。

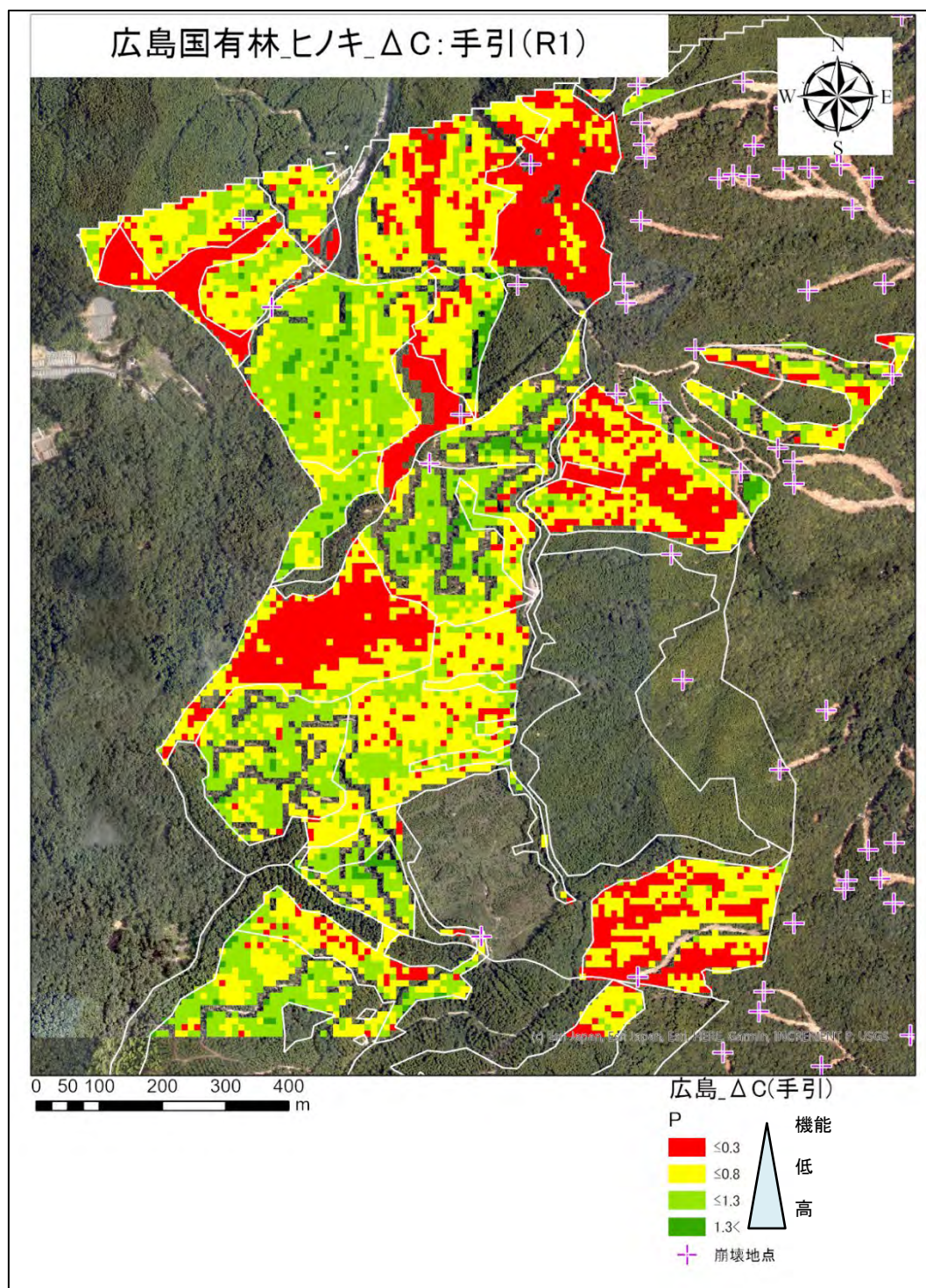


図 4.27 ΔC マップ：手引（令和元年度作成、収量比数 R_y 計算プログラムによる）