

令和6年度

森林情報の高度化推進に向けた
手法検討に関する調査委託事業

報 告 書

令和7年3月

林野庁

目次

1. 背景と目的.....	1
2. 林分密度管理図の作成.....	2
2.1. データの整理.....	2
2.2. データの選別.....	2
2.3. データの減数調整.....	3
2.4. 林分密度管理図の作成.....	4
2.5. 作成した林分密度管理図の精度評価.....	7
3. 樹高成長曲線の作成.....	9
4. 標準的な施業体系に関する情報収集と本数減少曲線の作成.....	14
4.1. 標準的な施業体系に関する情報収集.....	14
4.2. 本数減少曲線の作成.....	22
5. 追加調査・解析の検討.....	25
5.1. 背景・目的.....	25
5.2. 材料と方法.....	26
5.2.1. 作業のながれ.....	26
5.2.2. 対象エリア.....	26
5.2.3. 手法.....	28
5.3. 結果.....	32
5.3.1. 上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所.....	32
5.3.2. サンプル箇所の林齢と ALS による上層木平均樹高の関係.....	42
5.3.3. 現地検証.....	44
6. 天然林の林分蓄積、林分成長量に関する検討.....	48
6.1. 天然林の材積成長曲線の作成.....	48
6.2. 衛星データと航空レーザ計測による天然林の林相および材積の推定.....	58
6.2.1. 時系列衛星データを利用した林相区分図の作成.....	59
6.2.2. 航空レーザ計測データによる広葉樹の林分蓄積量の地図化.....	65
6.3. 天然林の林分蓄積、林分成長量の把握手法と森林簿の更新手法の整理.....	78
7. 都道府県向けの手順書の作成.....	82
8. 検討委員会の設置・運営.....	82
付録 林分密度管理図による収穫予想表作成の手順書.....	83

1. 背景と目的

人工林資源が本格的な利用期を迎えたことなどを背景に、近年、主伐が増加しており、森林資源の保続確保が重要な課題となっている。

保続の検討には正確な森林蓄積の把握が重要であるが、森林簿に記載されている森林蓄積は、昭和50年代に整備された収穫予想表に基づくものが多いため、新たな知見を反映して、十分な精度を確保していく必要がある。

収穫予想表は、林分密度管理図、樹高成長曲線、標準的な施業体系等を基に地域の実情に応じて都道府県において作成されるものであるが、林分密度管理図、樹高成長曲線については全国の森林資源状況を踏まえ国において作成する必要がある。また、標準的な施業体系についても長伐期施業や高齢級間伐施業など施業方法の多様化・複雑化が進んでいる状況を考えると国において一定の考え方を整理する必要がある。

令和5年度森林情報の高度化推進に向けた手法検討に関する調査委託事業（以下、令和5年度事業という。）では、令和4年度森林情報の高度化推進に向けた条件整備等に関する調査委託事業（以下、令和4年度事業という。）で収集整理されたデータを用い、現行7地域の民有林用スギ林分密度管理図の見直しを行った。また、林分密度管理図を基礎として収穫予想表を作成するために必要な樹高成長曲線及び本数減少曲線を林分密度管理図と同じ地域単位で作成した。令和6年度の本事業においては、スギに次いで重要な造林樹種であるヒノキ及びカラマツについて民有林用林分密度管理図の見直しを行い、樹高成長曲線及び本数減少曲線を作成する。

樹高成長曲線の作成に際しては、高齢級における頭打ち傾向の是正を念頭に、令和4年度事業の森林資源データに加え、航空レーザ計測のデータ等を活用して高齢級データの補充を図る。本数減少曲線の作成には令和4年度データに加え、各都道府県から植栽本数、伐期、間伐方法等の標準的な施業体系に関して情報収集を行い、その結果を参照する。

さらに新たな林分密度管理図、樹高成長曲線、本数減少曲線等を基に、各都道府県が地域の実情に応じて収穫予想表を見直す一助とするため、令和5年度事業と本事業の成果を統合してスギ、ヒノキ及びカラマツの収穫予想表の作成手順書を作成する。

一方、天然林の蓄積や成長量については、人工林のように林分密度管理図を基礎とする収穫予想表を作成することは難しいため、地域別の材積成長曲線や、衛星画像や航空レーザ計測のデータ等から期首の林相・蓄積を推定する方法を、森林簿に反映することを念頭に具体的に検討する。また、青森県と高知県のテスト地域において、検討した方法による蓄積推定精度の検証を行う。

以下、本報告書においては事業の仕様書に示された事業内容、すなわち①林分密度管理図の作成、②樹高成長曲線の作成、③標準的な施業体系に関する情報収集と本数減少曲線の作成、④追加調査・解析の検討、⑤天然林の林分蓄積、林分成長量に関する検討、⑥都道府県向けの手順書の作成、の順に沿ってそれぞれ成果を記述する。

2. 林分密度管理図の作成

2.1. データの整理

令和4年度事業で収集整理した森林資源データのうち以下の①～④のデータを使用した。

- ①『森林経営』対象森林率調査：林野庁が林齢50年生以上を対象に2014～2017年度に実施したもので、標準地は0.2haまたは0.1ha、一部は0.04haであった。同調査には一部国有林が含まれているが、民有林の標準地だけを使用した。
- ②第4期森林生態系多様性基礎調査：林野庁が2014～2018年度に実施したものである。本事業では0.1haの円形標準地のうち人工林が0.04ha以上を占める箇所限定して、人工林部分だけのデータを使用した。①と同様、民有林の標準地だけを使用した。
- ③都道府県提供データ：おおむね2008年度以降に都道府県がそれぞれの目的で独自に実施し、林野庁の依頼を受けて提供されたものである。
- ④森林簿の蓄積精度検証調査：林野庁の補助事業として2003～2005年度に都道府県が実施したもので、標準地面積は可変（立木が50本以上）であった。

以上の4種類のデータについて、全樹種の幹材積合計の95%以上（森林生態系多様性基礎調査は樹高が抽出調査であるため、胸高断面積合計の95%以上）がヒノキである箇所を抽出し、ヒノキ以外の樹種は除外して、各箇所のヒノキだけの上層樹高、平均胸高直径、幹材積合計等の集計値を算出した。カラマツについても同様にした。施業履歴の情報が含まれる②と④のデータのうち、林冠が閉鎖していない可能性が高い間伐後5年以内の箇所は、現行の密度管理図が作成された際と同様に、対象外とした。以上の手順で収集されたデータの箇所数等を表2-1に示した。

表 2-1. 収集したデータ数

データの種類	調査年度	ヒノキ	カラマツ	計
①「森林経営」対象森林率調査	2014～2017	126	31	157
② 森林生態系多様性基礎調査	2014～2018	502	62	564
③ 府県提供データ	2008～	419	61	480
④ 森林簿の蓄積精度検証調査	2003～2005	3,433	580	4,013
計		4,480	734	5,214

2.2. データの選別

既存の密度管理図が作成された際と同様に、ヒノキとカラマツそれぞれのデータに対して、林分形状高（幹材積合計÷胸高断面積合計）、平均胸高直径、平均樹高および平均単木材積をそれぞれ他の林分構成因子から推定する数式をあてはめ、4つの式のいずれかにおいて

て、有意水準 0.1%で推定誤差が有意に大きいヒノキ 152 か所、カラマツ 24 か所は異常値として棄却した。

次に、胸高断面積合計が極端に大きい箇所（ヒノキは 120 m²/ha を超える 40 か所、カラマツは 90 m²/ha を超える 1 か所）は、現地調査または集計にミスがあった可能性が高いと考え除外した。また林齢－上層樹高、林齢－本数密度の散布図上で明らかに外れ値となり、現地調査または集計のミス、林齢の不正確が疑われるヒノキ 37 か所、カラマツ 17 か所も除外した。さらに、既存の密度管理図が作成された際と同様に、上層樹高が 5m 未満のヒノキ 405 か所、カラマツ 47 か所は未閉鎖とみなして対象外とした。

2.3. データの減数調整

前項までの作業で整理されたヒノキ 3,846 か所、カラマツ 645 か所を、既存の密度管理図と同じヒノキ 4 地域、カラマツ 2 地域それぞれにおいて、上層樹高 2m 区切り、ha あたり本数 200 本区切りでクロス集計し、1つの階級内の箇所数が 11 以上の階級は、10 になるよう減数調整した。これは推定結果が特定の階級に偏らないようにするために、上限 10 か所は既存の密度管理図と同じである。減数調整の際、上記①～④の資料は、①に近いものほど新しく、標準地面積が大きくてデータの信頼性が高いと考えて残し、④に近く標準地面積が小さい箇所から先に除外した。なお、ヒノキの各地域において、データ数の都府県別割合が、私有ヒノキ人工林面積の都府県別割合と大きく乖離しないように配慮した。例えば、南近畿・四国ヒノキでは、徳島県の私有ヒノキ人工林面積に比べて徳島県のデータ数が多すぎたため、標準地面積の大小にかかわらず徳島県の④のデータを一律に除外した。このほか関東中部ヒノキの茨城県、北近畿・中国ヒノキの滋賀県、九州ヒノキの福岡県等についても、データの種類や標準地の面積とは関係なく先に除外してバランスを調整した。カラマツは検討の結果このような調整を必要とせず、クロス集計で階級内のデータ数の上限を 10 とする減数調整のみを行った。ここまでの作業で整理されたデータ数を表 2-2 に示した。

表 2-2. 整理後のデータ数

密度管理図の 地域名、樹種名	資料名				計
	「森林経営」 対象森林率 調査	森林生態系 多様性 基礎調査	府県提供 データ	森林簿の 蓄積精度 検証調査	
関東・中部ヒノキ	26	115	21	655	817
北近畿・中国ヒノキ	19	131	27	598	775
南近畿・四国ヒノキ	14	135	91	402	642
九州ヒノキ	66	81	84	397	628
ヒノキ計	125	462	223	2,052	2,862
北海道カラマツ	19	31		257	307
本州カラマツ	10	24	48	198	280
カラマツ計	29	55	48	455	587

データの林齢分布を、既存の密度管理図が昭和 50 年代に作成された当時のデータと比較すると（図 2-1）、ヒノキの場合、既存の密度管理図のデータが概ね 11～70 年生に分布するのに対して、本事業ではより若齢から 101 年生以上まで幅広く収集することができた。カラマツについては、ヒノキと比べると高齢のデータが少ないが、既存のカラマツ密度管理図のデータに比べれば本事業のデータは 51～70 年生が充実している。ヒノキ、カラマツともに従来よりも高齢級に対応した密度管理図を作成するためのデータが確保できたといえる。

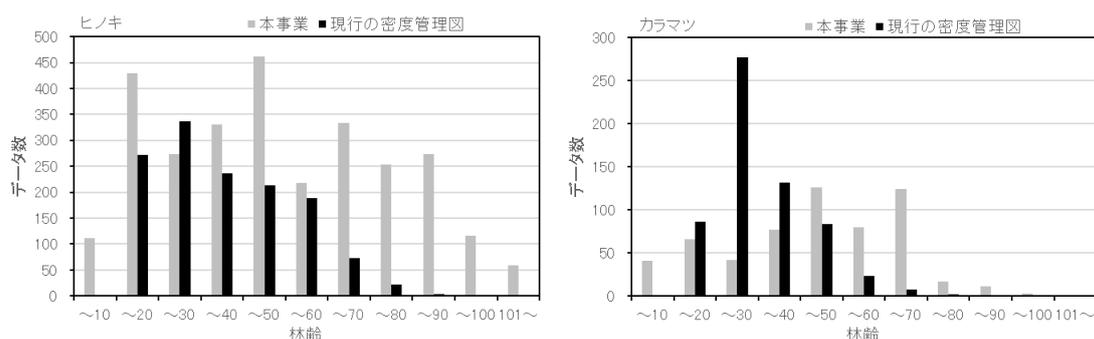


図 2-1. 林齢クラス別データ数の比較

2.4. 林分密度管理図の作成

前項までで整理したヒノキ 4 地域 2,862 か所、カラマツ 2 地域 587 か所のデータを用いて林分密度管理図を構成する各種曲線の計算を行った。曲線のあてはめは統計解析ソフトウェア R バージョン 4.3.3 により、minpack.lm パッケージに含まれる nlsLM 関数を使用して Levenberg-Marquardt 法で実行した。既存の林分密度管理図では、ヒノキは 4 地域ともに最多密度曲線の傾きが-1.5867、カラマツは 2 地域ともに-1.7159 となるように作成されている。本事業では、まず樹種別に全国のデータから極めて密度の高い林分を選抜し、新たな最多密度曲線の傾きを求めた。具体的には相対幹距が小さいほうからヒノキ、カラマツそれぞれ 1%を選抜し、本数密度と平均単木幹材積の両対数関係に直線をあてはめて最多密度曲線の傾きを決定した。その結果、最多密度曲線の傾きはヒノキが-1.5610、カラマツが-1.2725 となった。この最多密度曲線を基礎として計算した各曲線の係数を表 2-3 に、またこれら係数をもとに描出した 7 地域の林分密度管理図を図 2-2 に示した。表 2-3 でハイフンの箇所は、係数が有意でなかったため、その係数を外して改めてあてはめを行ったものである。各曲線を描くのに必要な数式は以下のとおりである。

$$V = (b_1 Ht^{b_2} + b_3 Ht^{b_4} / N)^{-1}$$

$$HF = c_1 + c_2 Ht + c_3 \sqrt{NHt} / 100$$

$$G = V / HF$$

$$Dg = 200 \sqrt{G / (\pi N)}$$

$$D = d_1 + d_2 Dg + d_3 \sqrt{NHt} / 100$$

$$Ry = V/V_{Rf}$$

$$N_{Rf} = k_4 Ht^{k_3}$$

$$N_{ntc} = (1/N_0 - V_m/(k_5 N_0^{(k_1+1)}))^{-1}$$

$$k_5 = k_1 Rf/b_3 (Rf/(1-Rf)b_1/b_3)^{k_1} (b_2/b_4)^{(k_1+1)}$$

ここで、 V : 幹材積合計 (m³/ha)、 Ht : 上層樹高 (m)、 N : 本数密度 (本/ha)、 G : 胸高断面積合計 (m³/ha)、 HF : 林分形状高、 Dg : 断面積平均直径 (cm)、 D : 平均胸高直径 (cm)、 Ry : 収量比数、 N_{Rf} : 最多密度における本数密度 (本/ha)、 N_{ntc} : 自然枯死線の本数 (本/ha)、 N_0 : 植栽本数 (本/ha)、 V_m : 平均単木幹材積 (m³)、 $b_1 \sim b_4$ 、 $c_1 \sim c_3$ 、 $d_1 \sim d_3$ 、 $k_2 \sim k_5$ は係数である。最多密度における幹材積合計 V_{Rf} は V の推定式の N に N_{Rf} を代入することで計算できる。

表 2-3. 作成した密度管理図の係数

地域、樹種	幹材積合計				限界競争比数 Rf	最多密度曲線	
	b_1	b_2	b_3	b_4		k_1	k_2
関東・中部ヒノキ	0.02359	-1.120562	10090	-3.118	0.226	-1.5610	4.9750
北近畿・中国ヒノキ	0.02729	-1.143204	11090	-3.181	0.209	-1.5610	4.9331
南近畿・四国ヒノキ	0.03413	-1.184892	12280	-3.297	0.196	-1.5610	4.8330
九州ヒノキ	0.01809	-1.044732	5088	-2.907	0.243	-1.5610	4.9555
北海道カラマツ	0.00786	-0.629802	8296	-2.941	0.293	-1.2725	3.6995
本州カラマツ	0.00592	-0.601320	5711	-2.808	0.373	-1.2725	3.7169

最多本数		林分形状高			平均胸高直径		
k_3	k_4	c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3
-1.997438	1464859	0.129349	0.442724	0.136379	-	0.985209	-0.019278
-2.037796	1538007	0.092484	0.464183	0.114606	-	0.982986	-0.015740
-2.112108	1475917	0.271628	0.422711	0.164101	-	0.989313	-0.033537
-1.862268	876190	0.471113	0.416607	0.140782	-	0.990674	-0.035444
-2.311198	1976988	0.621469	0.425302	0.096329	-	0.995467	-0.065601
-2.206680	1620799	0.992105	0.408085	0.131039	-	0.988491	-0.047642

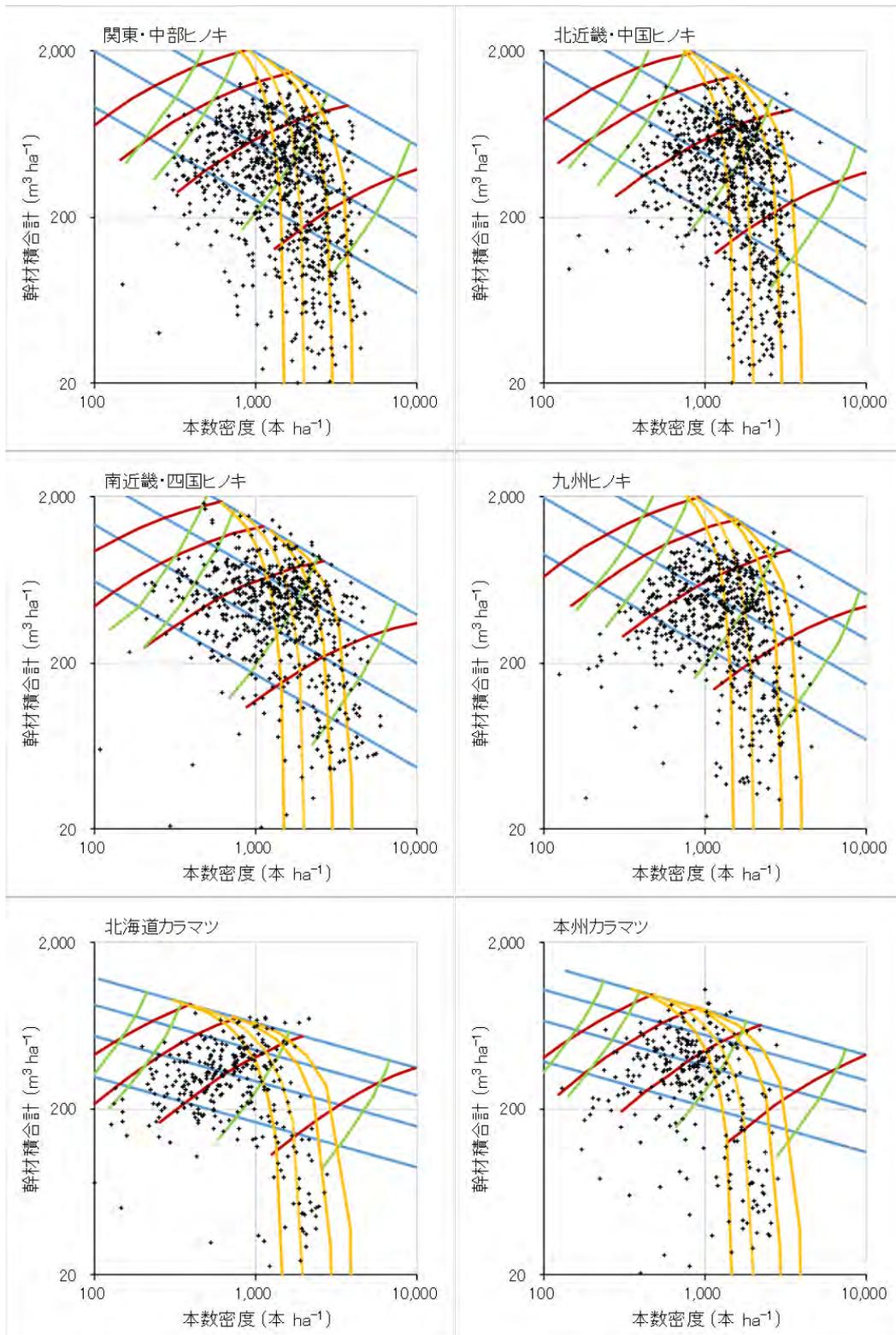


図 2-2. 作成した密度管理図とデータの分布

横軸：本数/(ha) 対数表示、縦軸：幹材積合計(m³/ha) 対数表示、青線：等収量比数曲線(上から Ry=1.0, 0.8, 0.6, 0.4)、赤線：等平均樹高曲線(上から 40, 30, 20, 10 m)、緑線：等平均直径曲線(上から 40, 30, 20, 10 cm)、橙線：自然枯死線(左から植栽本数 1500, 2000, 3000, 4000 本/ha)、黒点はデータ

令和4年度事業報告書で指摘されているとおり、既存の民有林用林分密度管理図の上に、本事業で収集したデータを重ねると、最多密度曲線（Ry1.0の等収量比数曲線）の上側になる箇所が少なからず出現する。しかし今回作成したヒノキとカラマツの林分密度管理図では、図2-2に示すように最多密度曲線を超える箇所はほとんどなかった。また、密度が高く幹材積合計が少ない箇所、すなわち若齢林のデータも自然枯死線の周辺に位置しており、現実林分をおおむね再現できているものと考えられた。

2.5. 作成した林分密度管理図の精度評価

本事業では、作成した林分密度管理図が都道府県における収穫予想表の調製に応用されることを想定している。このため特に幹材積合計の推定精度が重要である。本事業のデータに対する既存の林分密度管理図の精度および新たに作成した林分密度管理図の精度を表2-4に示した。既存の密度管理図で推定される幹材積合計は明らかに過小推定となるが、本事業で作成した密度管理図では平均誤差がほぼゼロとなり、偏りが是正された。ばらつきを表す二乗平均平方根誤差も既存の密度管理図に比べて新たな密度管理図は2~4割改善した。林齢別にみると（図2-3）、既存の密度管理図は高齢になるほど幹材積合計の過少推定の傾向が著しくなっている。本事業で作成した密度管理図は林齢に関わらず偏りは是正されているものの、高齢側では過少推定の傾向が残っていることには注意が必要である。一方、平均胸高直径の推定値も同様に既存の密度管理図が持つ過小推定の傾向が是正され、ばらつきも小さくなった（表2-4）。

表2-4. 密度管理図の幹材積合計と平均胸高直径の精度比較

地域・樹種	幹材積合計 (m ³)				平均胸高直径 (cm)			
	平均誤差		二乗平均平方根誤差		平均誤差		二乗平均平方根誤差	
	既存	本事業	既存	本事業	既存	本事業	既存	本事業
関東・中部ヒノキ	75.0	0.0	147.7	100.2	1.7	-0.1	3.8	3.0
北近畿・中国ヒノキ	69.9	-1.5	145.1	116.7	1.2	-0.1	3.2	2.9
南近畿・四国ヒノキ	98.4	0.6	162.0	100.4	2.5	0.0	4.0	2.8
九州ヒノキ	46.7	-0.4	112.6	86.0	1.1	0.0	3.0	2.5
北海道カラマツ	51.0	1.2	83.5	62.2	2.1	0.1	3.4	2.7
本州カラマツ	67.6	0.2	124.3	91.7	2.3	-0.1	3.9	3.1

(誤差=実測値-推定値)

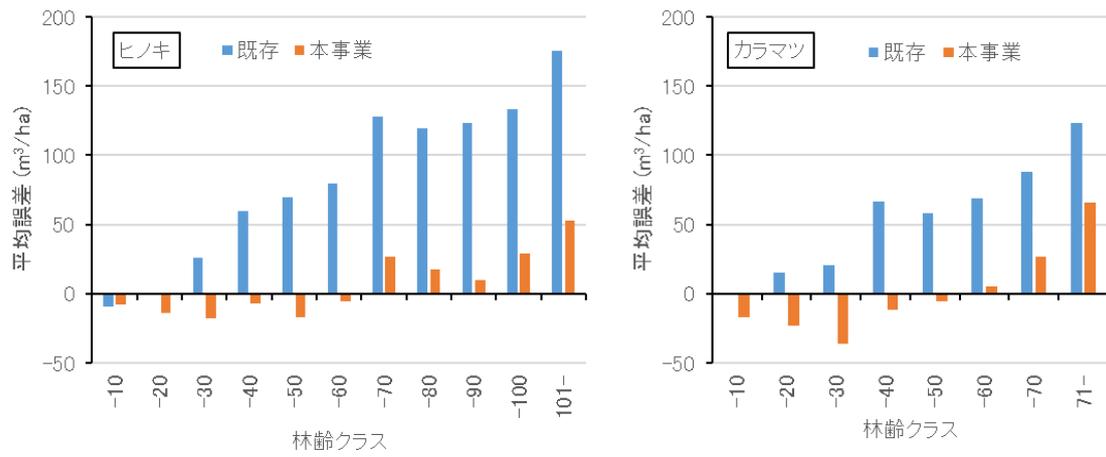


図 2-3. 幹材積合計推定値の齢級クラス別平均誤差

3. 樹高成長曲線の作成

林分密度管理図は上層樹高を時間軸の代用としているため、林分密度管理図を基礎として収穫予想表を作成するためには、上層樹高と林齢を対応づける樹高成長曲線が必要である。本項では、林分密度管理図と同じ地域区分でヒノキ4地域、カラマツ2地域の樹高成長曲線を作成した。前項の林分密度管理図の作成のために選別したデータ、ヒノキ2,862か所、カラマツ587か所に加えて、林分密度管理図では林冠未閉鎖とみなして使用しなかった上層樹高5m未満のヒノキ405か所、カラマツ47か所も使用した。後述する航空レーザデータの解析から取得されたデータセットは、各地域内すべての都道府県から網羅的に収集されたものではない。またデータは林齢と上層樹高のみであり、密度管理図の作成で行ったような異常値のチェックができないため、樹高成長曲線の作成に直接には使用せず、モデル選択の判断材料として活用した。樹高成長曲線のモデルとして代表的な以下の5つについて、樹種・地域別にあてはめを行った。

$Ht = a(1 - b \exp(-kt))$	Mitscherich 式 (M 式)
$Ht = a \exp(-b \exp(-kt))$	Gompertz 式 (G 式)
$Ht = a/(1 + b \exp(-kt))$	Logistic 式 (L 式)
$Ht = a(1 - \exp(-kt))^b$	Richards 式 (R 式)
$Ht = a \exp(-bt^{-k})$	Korf 式 (K 式)

ここで Ht : 上層樹高 (m)、 t : 林齢、 a 、 b 、 k はパラメータであり、 a は t が無限に大きくなったときの Ht の上限を表している。林分密度管理図と同様に統計解析ソフト R を用い、非線形最小二乗法の1種である Levenberg-Marquardt 法であてはめを行った。樹種・地域別のあてはめ結果を表 3-1 と図 3-1 に示した。

まずヒノキの場合、各地域におけるモデル間の RMSE の差は最大でも南近畿・四国の 0.215m であって、RMSE が 2.725~3.364 であることを考慮するとモデル間に大差はないといえた。特に現地調査データの多くが分布する 10~80 年生の範囲では各モデルの曲線の差は小さかった (図 3-1)。4 地域のうち関東・中部と北近畿・中国では M 式の RMSE が最も小さく、他の 2 地域では K 式の RMSE が最も小さかった。ただし関東・中部と北近畿・中国においても、M 式と K 式の RMSE の差は 0.01m 未満であった。また、航空レーザの解析による上層樹高に対しては、4 地域に共通して僅差ではあるが K 式の RMSE が最も小さかった。これらを総合すると、ヒノキについては令和 5 年度事業で検討したスギと同様、K 式が最も有力な選択肢になると考えられた。

カラマツの場合、北海道では R 式の RMSE が最も小さかった。本州では G 式と L 式の RMSE が他の 3 つより小さかったが、苗高に相当する林齢 1 年の推定値が G 式と L 式でそれぞれ 2.2m、3.4m になることは難点と考えられた。ただし北海道、本州ともにモデル間の

RMSE の差はヒノキよりもさらに小さく、RMSE の最小と最大の差は北海道で 0.043m、本州で 0.051m に過ぎず、5 つのモデルは実用上ほぼ同等であった。特に現地調査データの多くが分布する 10~60 年生の範囲では各モデルの曲線の差は小さかった (図 3-1)。一方、航空レーザの解析による上層樹高に対しては、北海道と本州に共通して K 式の RMSE が最も小さかった。これらを総合すると、カラマツについてもスギ、ヒノキと同様、K 式が最も有力な選択肢になると考えられた。

K 式を共通のモデルとして樹種別、地域別の樹高成長曲線を比較した (図 3-2)。初期成長のよいカラマツと晩成型のヒノキでは得られた樹高成長曲線に明瞭な差があった。ヒノキ 4 地域の地域間比較では、70 年生程度までは令和 5 年度事業で検討したスギのような明らかな地域差は認められなかった。表 3-1 の K 式の係数 a にも示されているように、70 年生以降は南近畿・四国と九州が他の地域よりも上層樹高が高く推定された。カラマツは、30 年ぐらいまでは大差がないが、加齢に伴って天然分布域である本州よりも北海道の上層樹高の方が高く推定された。

表 3-1. 樹高成長曲線の係数と精度

地域	モデル	a	b	k	RMSE (m)	RMSE (m) 高齢級 LiDAR
関東・中部 ヒノキ	Mitscherich	22.20	1.03388	0.03193	3.161	6.736
	Gompertz	20.92	2.29326	0.05412	3.189	7.277
	Logistic	20.43	5.51837	0.07640	3.232	7.581
	Richards	22.03	1.10998	0.03388	3.162	6.789
	Korf	33.11	7.64630	0.62985	3.169	6.156
北近畿・中国 ヒノキ	Mitscherich	21.60	1.05434	0.03424	3.294	6.948
	Gompertz	20.39	2.37949	0.05781	3.317	7.437
	Logistic	19.93	5.81908	0.08126	3.359	7.717
	Richards	21.32	1.18965	0.03783	3.294	7.034
	Korf	30.12	8.64080	0.70045	3.295	6.538
南近畿・四国 ヒノキ	Mitscherich	24.07	0.97272	0.02460	3.203	4.793
	Gompertz	22.22	2.02159	0.04267	3.286	5.090
	Logistic	21.43	4.52749	0.06125	3.364	5.338
	Richards	25.70	0.80906	0.01839	3.191	4.646
	Korf	46.92	5.85306	0.44832	3.149	4.619
九州 ヒノキ	Mitscherich	23.87	0.98191	0.02393	2.732	5.889
	Gompertz	21.85	2.08070	0.04203	2.773	6.148
	Logistic	21.05	4.76734	0.06007	2.818	6.337
	Richards	24.54	0.90355	0.02125	2.730	5.824
	Korf	52.58	5.96974	0.42095	2.725	5.669
北海道 カラマツ	Mitscherich	24.66	1.11452	0.04482	3.298	5.731
	Gompertz	23.30	2.73007	0.07639	3.299	5.904
	Logistic	22.81	7.34577	0.10752	3.333	6.027
	Richards	23.99	1.48443	0.05574	3.290	5.801
	Korf	31.93	10.28130	0.83550	3.317	5.655
本州 カラマツ	Mitscherich	23.36	1.14130	0.04897	3.969	7.185
	Gompertz	22.65	2.52728	0.07400	3.951	7.346
	Logistic	22.35	6.04817	0.09899	3.951	7.442
	Richards	22.99	1.48770	0.05820	3.960	7.265
	Korf	28.17	12.41660	0.95050	4.003	6.987

最右列は LiDAR データから推定した上層樹高によって評価した樹高成長曲線の精度

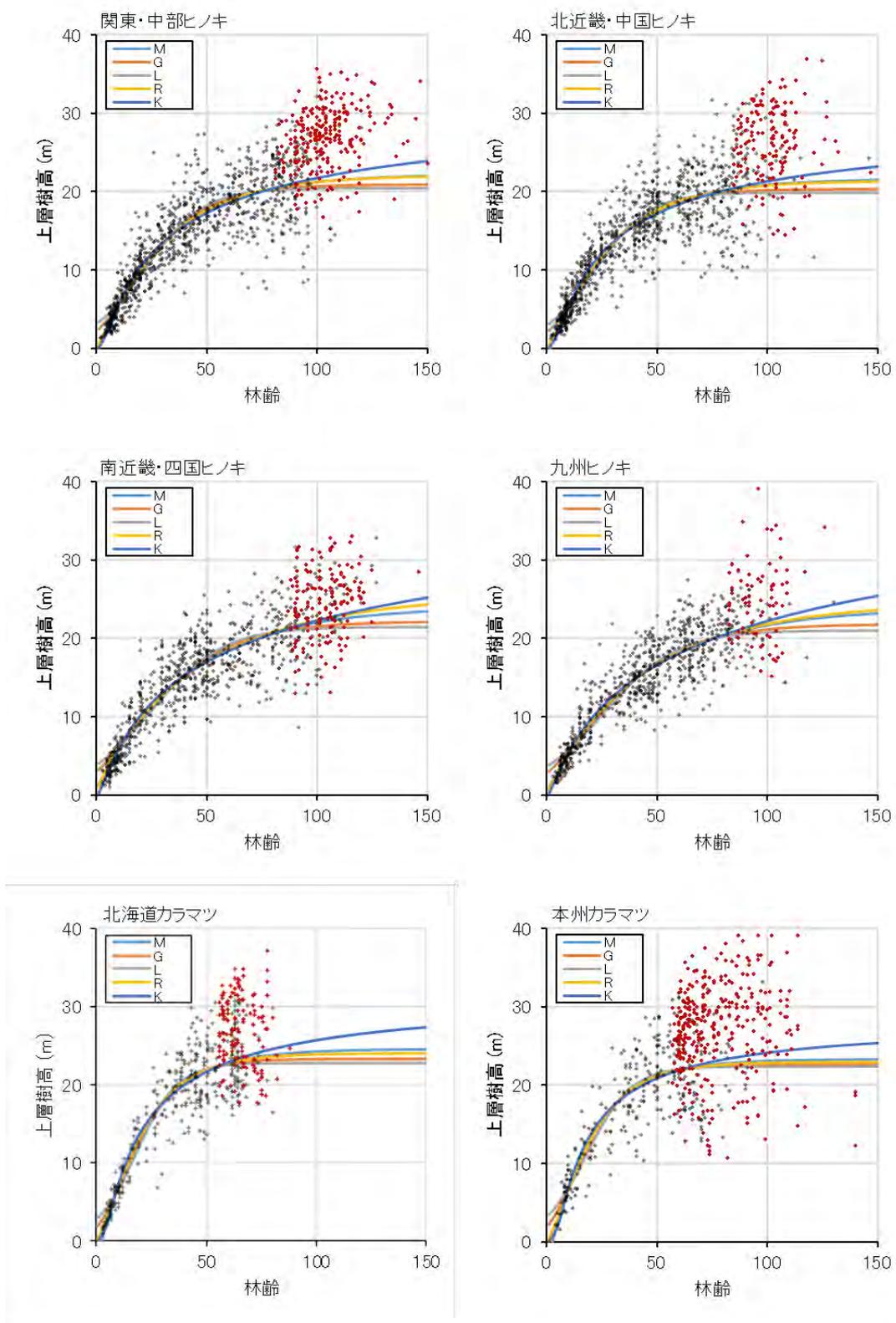


図 3-1. 各モデルの樹高成長曲線
(黒点は現地調査、赤点は LiDAR データから推定した上層樹高)

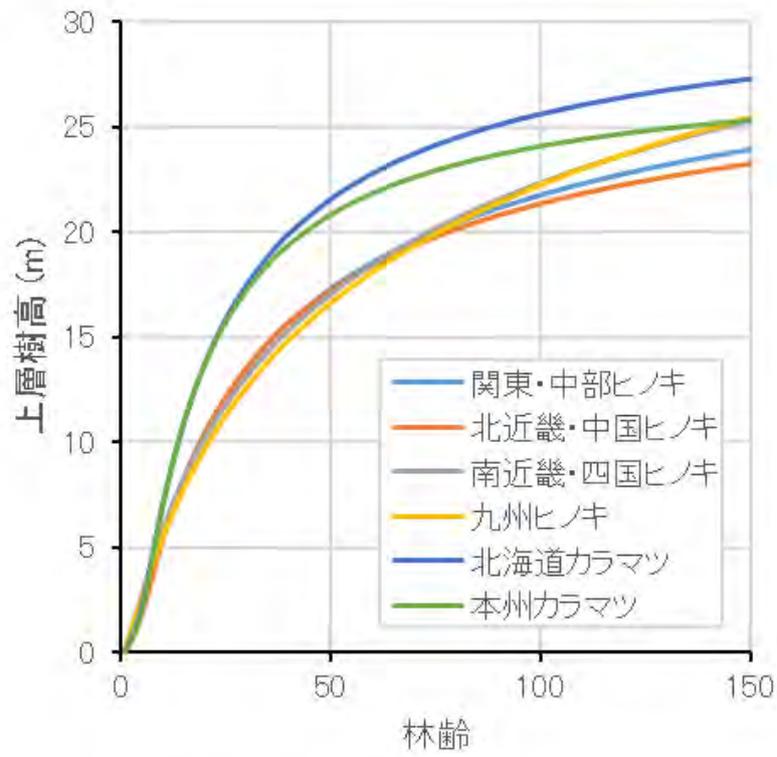


図 3-2. 樹種別、地域別の樹高成長曲線 (Korf 式)

4. 標準的な施業体系に関する情報収集と本数減少曲線の作成

4.1. 標準的な施業体系に関する情報収集

施業体系は、植栽本数、伐期、間伐方法などの各施業のまとまりであり、都道府県において林分密度管理図から収穫予想表を作成する際に地域の实情に合わせて設定されるものである。近年、長伐期施業や高齢級間伐施業の普及、低密度植栽等低コスト林業の進展などにより施業体系の多様化・複雑化が進んでおり、林野庁において施業体系の収集・整理を行い都道府県に対し必要な情報の提供を行うことが重要である。

そこで、本業務では各都道府県がヒノキおよびカラマツについて作成した施業体系図(図4-1)を対象にウェブ検索や都道府県庁への個別照会によって収集し、その内容を整理した。

施業体系を図化している施業体系図の名称は都道府県により、「施業体系図」、「施業指針」、「育林技術体系図」等様々である。これらに併せて、地域森林計画書に記載されている目標林型別の施業指針、間伐・保育・主伐の標準的な方法、標準伐期齢等(図4-1)も参考として、民有林ヒノキ林分密度管理図、民有林カラマツ林分密度管理図の適用地域ごとに整理した。

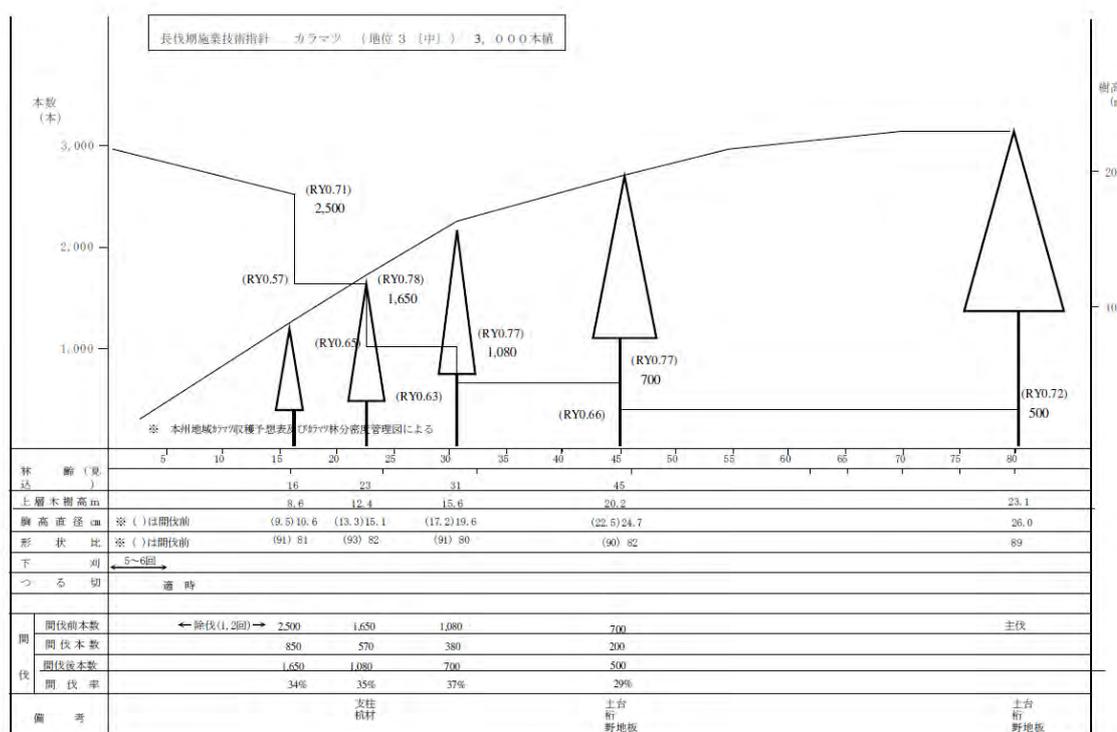


図 4-1 施業体系図の例(富士川上流森林計画区地域森林計画書より)

次に収集した施業体系図について、以下の項目毎に Microsoft Excel で整理をした。都道府県において項目名も様々であるが、名称が異なっても同一の内容であれば以下の項目に沿って整理し、該当する情報がない場合は空欄とした。

また、後述する実際の林分データから求めた本数減少曲線と比較し、収穫予想表作成時の参考とすることを目的に、植栽から主伐までの立木本数の推移について、施業体系図に基づく減少モデルを作成した。

整理した項目

- 都道府県名
- 施業タイプ：（例）長伐期施業
- 植栽本数：（例）3,000 本
- 地位：（例）地位 3
- 密度管理基準：Ry（収量比数）
- 施業等：（例）間伐
- 伐期：（例）80 年伐期
- 林齢（年）：樹高、間伐前後の本数に対応する林齢
- 樹高（m）：林齢との関係がわかるもの
- 間伐前本数
- 間伐後本数

施業体系図の収集はウェブ検索から始め、ウェブで公開されていない場合は都道府県に個別照会を行った。以降、施業体系図の収集状況（表 4-1）、施業体系図に記載の「生産目標」（表 4-2）、「仕立て方」（表 4-3）、「植栽本数」（表 4-4）、「伐期」（表 4-5）、「施業等」（表 4-6）を示す。

また、密度管理図の樹種・地域ごとに、上層樹高と間伐前および間伐後本数の関係を表す散布図（図 4-2～図 4-8）を示した。次項で検討する本数減少曲線に合わせて横軸を上層樹高にしてあり、散布図上の各点は収集した各地域の施業体系図における上層樹高と本数の対応を表している。

ヒノキは近畿、中国、四国地方では植栽本数 1,500～7,000 本/ha と幅があり、主伐時の樹高は 30m を超える例も存在した。一方、関東、中部、九州地方では植栽本数 1,500～4,000 本/ha であり、主伐時樹高は最大で 25m 程度であった。

カラマツは植栽本数 1,500～3,000 本/ha で初回間伐時樹高は 10m 前後、主伐時樹高は 30 m 前後であり、北海道と本州であまり違いは見受けられなかった。

表 4-1 (1) 施業体系図の収集状況 (ヒノキ)

民有林ヒノキ 密度管理図 適用地域	適用地域に 含まれる 都道府県数	収集できた 都道府県数
関東・中部	12	10
北近畿・中国	9	9
南近畿・四国	7	6
九州	7	6
(該当無し) ※	-	1
総計	35	32

※民有林ヒノキ密度管理図適用地域に該当しないが資料収集できた都道府県は福島県

表 4-1 (2) 施業体系図の収集状況 (カラマツ)

民有林カラマツ 密度管理図 適用地域	適用地域に 含まれる 都道府県数	収集できた 都道府県数
北海道	1	1
本州	15	7
総計	16	8

表 4-2 施業体系図に記載されていた生産目標

ヒノキ	カラマツ
建築用材、一般建築材、一般材	建築用材、一般材
柱材、優良柱材	大径材
造作材	
大径材、優良大径材	
中径材	
優良材、良質材	
並材	

表 4-3 施業体系図に記載されていた仕立て方

ヒノキ	カラマツ
密仕立	中庸仕立
中庸仕立、中仕立	疎仕立

表 4-4 施業体系図に記載されていた植栽本数

ヒノキ	1,500 本、2,000 本、2,500 本、3,000 本、3,200 本、3,300 本、3,500 本、4,000 本、4,500 本、5,000 本、5,500 本、6,000 本、7,000 本
カラマツ	1,000 本、1,500 本、1,800 本、2,000 本、2,100 本、2,200 本、2,300 本、2,500 本、2,800 本、3,000 本

表 4-5 施業体系図に記載されていた伐期

ヒノキ	40 年、45 年、50 年、52 年、60 年、65 年、67 年、70 年、75 年、78 年、80 年、85 年、90 年、150 年
カラマツ	40 年、53 年、58 年、76 年、80 年、87 年

表 4-6 施業体系図に記載されていた施業等

ヒノキ	カラマツ
除伐	除伐
枝打 (1 回~6 回)	間伐 (1 回~7 回)
間伐 (1 回~12 回)	保育間伐
保育間伐、手入間伐	利用間伐
利用間伐、収入間伐、搬出間伐	主伐
択伐	
主伐	
上木伐採・下木植栽	

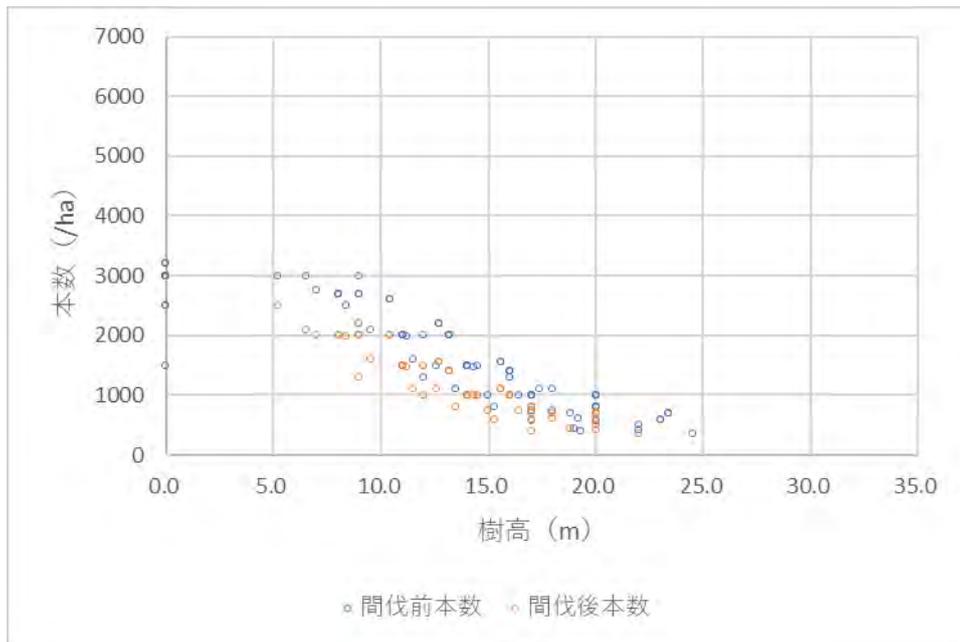


図 4-2 上層樹高と間伐前および間伐後本数（ヒノキ 関東・中部）

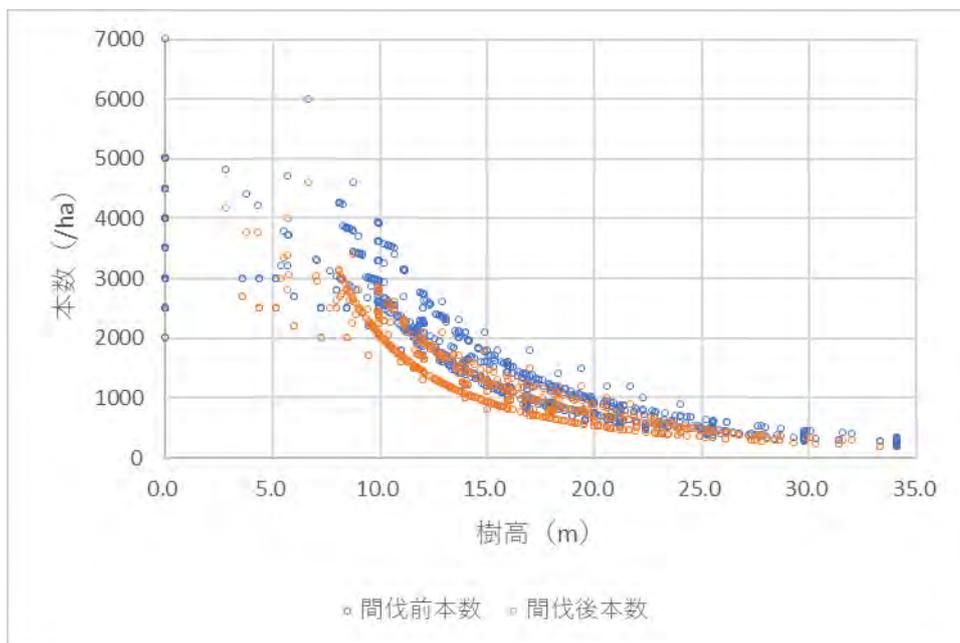


図 4-3 上層樹高と間伐前および間伐後本数（ヒノキ 北近畿・中国）

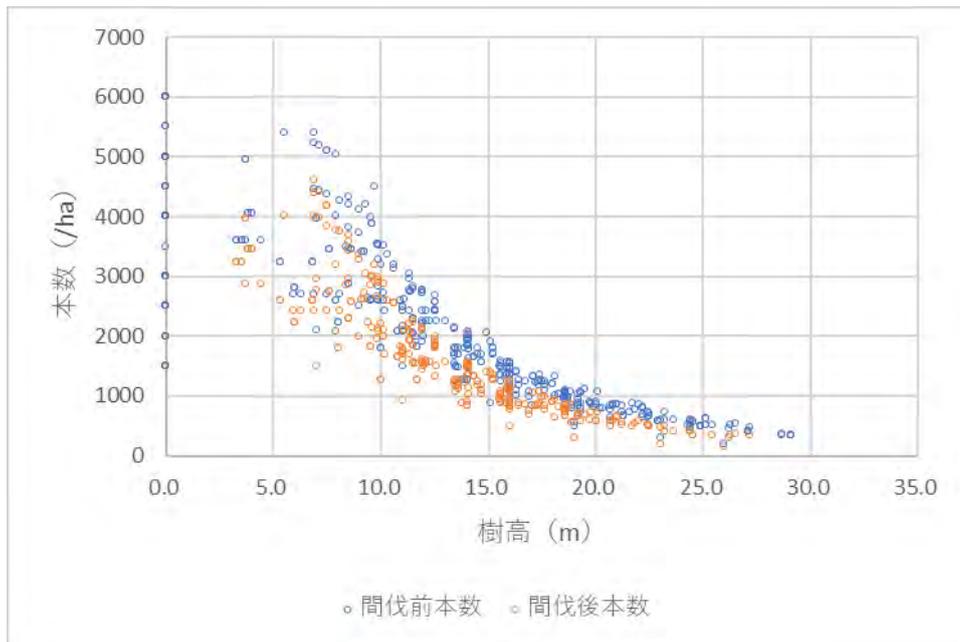


図 4-4 上層樹高と間伐前および間伐後本数（ヒノキ 南近畿・四国）

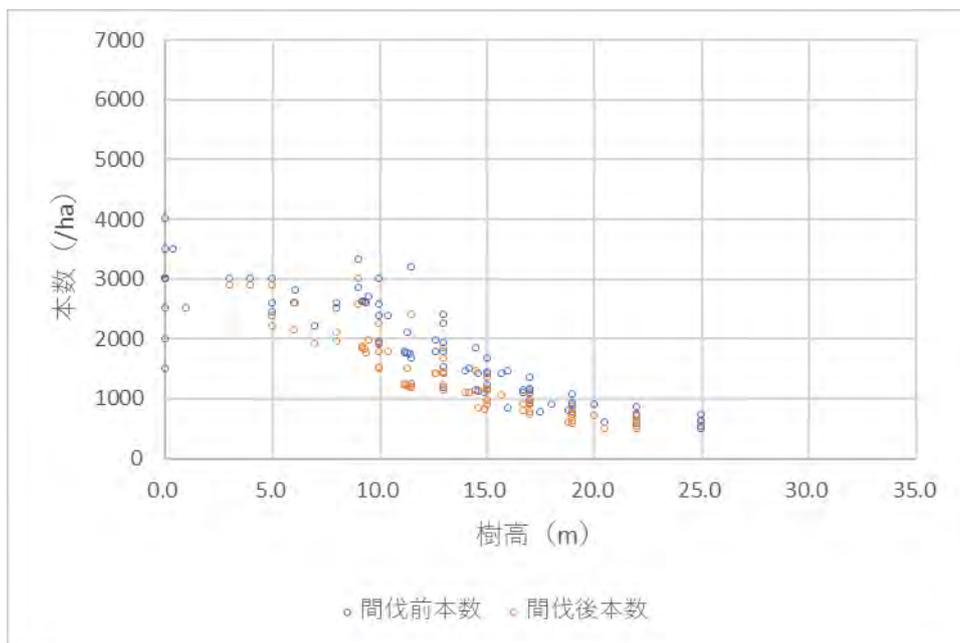


図 4-5 上層樹高と間伐前および間伐後本数（ヒノキ 九州）

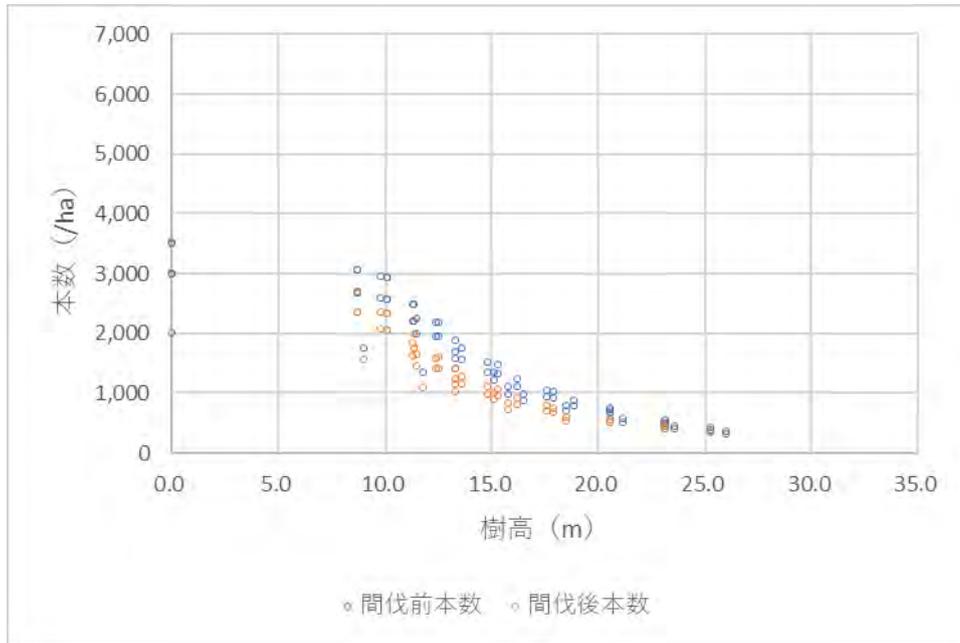


図 4-6 上層樹高と間伐前および間伐後本数（ヒノキ 其他（福島県））

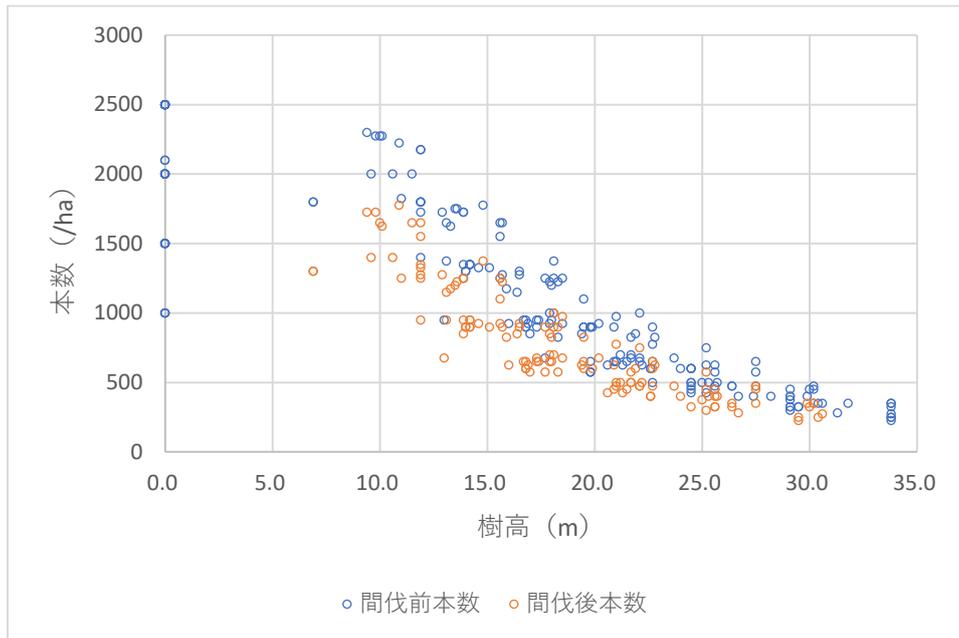


図 4-7 上層樹高と間伐前および間伐後本数 (カラマツ 北海道)

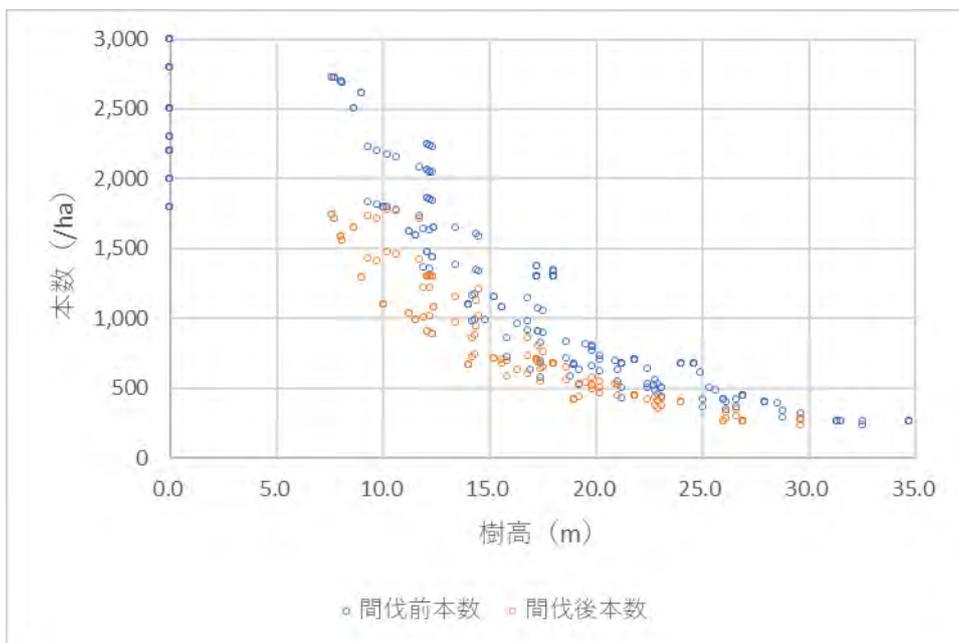


図 4-8 上層樹高と間伐前および間伐後本数 (カラマツ 本州)

4.2. 本数減少曲線の作成

本項においては、林分密度管理図を基礎として収穫予想表を作成する際に、樹高成長曲線と並んで必要となる本数減少曲線を作成した。前項の標準的な施業体系による本数減少は、地域の生産目標に対して模範的な間伐の実施を想定しているのに対して、本項で作成した本数減少曲線は現実のデータから推定するものである。

データとして、前述の樹高成長曲線の作成に用いたのと同じヒノキ4地域、カラマツ2地域のデータを使用した。横軸を上層樹高、縦軸を ha あたり本数として散布図を描くと、傾きが小さくなりながら横軸に漸近する下降曲線状の関係が見てとれた。本数減少曲線には、樹高成長曲線のように候補となる一般的なモデル式がないが、縦軸を対数変換するとおおむね傾きが負の直線関係が認められるため、下の単純なべき乗式をあてはめることにした。

$$N = ab^{Ht}$$

ここで、 N ：本数 (/ha)、 Ht ；上層樹高 (m)、 a, b ；係数である。

なお、ここで本数減少曲線の横軸を林齢としなかったのは、樹高成長曲線と本数減少曲線をそれぞれ独立して作成し、両者を組み合わせて幹材積合計を推定した場合、幹材積合計が単調に増加しないことも想定されるためである。林齢から ha あたり本数を推定する場合は、樹高成長曲線を介して間接的に推定することとなる。

ここまですべてと同様に統計解析ソフト R を用い、非線形最小二乗法の 1 種である Levenberg-Marquardt 法でべき乗式のあてはめを行った（表 4-7、図 4-9）。ヒノキ2地域、カラマツ4地域すべてについて係数 a, b とも統計的に有意であった。係数 b は全て 1 未満であって、当然ながら減少曲線になった。切片である係数 a は植栽密度に相当し、その範囲はヒノキでは地域により 3,012~4,057 本/ha と標準的な値が得られた。カラマツの係数 a は北海道で 2,378 本/ha、本州で 2,627 本/ha で、ヒノキよりも少ないことは現実の一般的な傾向と一致している。ヒノキの RMSE は地域により 600.0~832.3 本/ha、カラマツの RMSE はヒノキより小さく北海道が 412.9 本/ha、本州は 396.6 本/ha であった。両樹種ともに RMSE が大きいのは、もともと本数密度は間伐や被害によってばらつきが大きいためであると考えられる。

表 4-7. 本数減少曲線の係数と精度

地域、樹種	a	b	RMSE
関東・中部ヒノキ	3401	0.9510	728.9
北近畿・中国ヒノキ	3012	0.9583	600.0
南近畿・四国ヒノキ	4057	0.9415	832.3
九州ヒノキ	3250	0.9473	633.0
北海道カラマツ	2378	0.9430	412.9
本州カラマツ	2627	0.9442	396.6

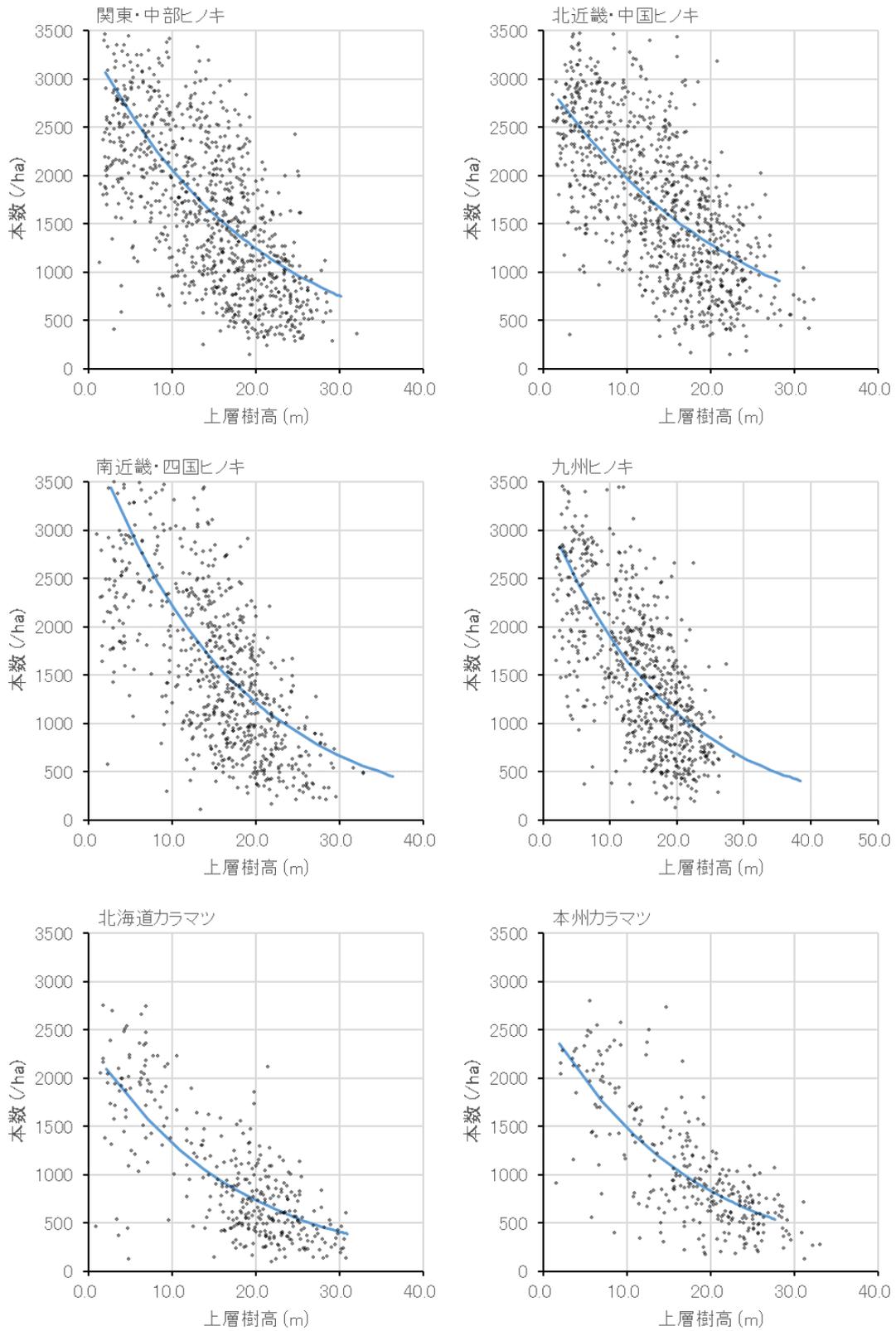


図 4-9. 樹種別、地域別本数減少曲線

図 4-9 の横軸を、樹高成長曲線を介して林齢に置き換えると図 4-10 のようになる。ヒノキの林齢 100 年以上の範囲でも 800 本/ha 以上に推定されるのは過大な印象であるが、これは樹高成長曲線(ガイドカーブ、地位中)上の計算であり、地位が高く上層樹高が高ければ、本数もそれに応じて小さく推定される。

参考として、これまでに述べた林分密度管理図の幹材積合計推定式の修正版、樹高成長曲線および本項で作成した本数減少曲線を組み合わせて幹材積合計を推定すると図 4-11 のように単調に増加する曲線となる。元データにおける平均的な幹材積合計の変化を比較的よく再現している。これは本事業で想定する収穫予想表(地位中)の林齢別幹材積合計に相当する。

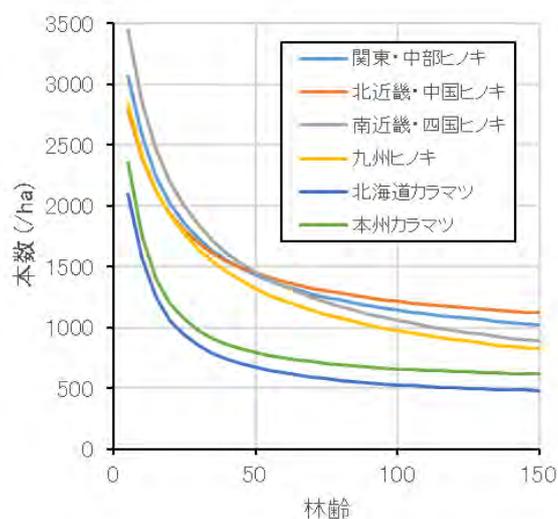


図 4-10. 林齢と本数密度との関係

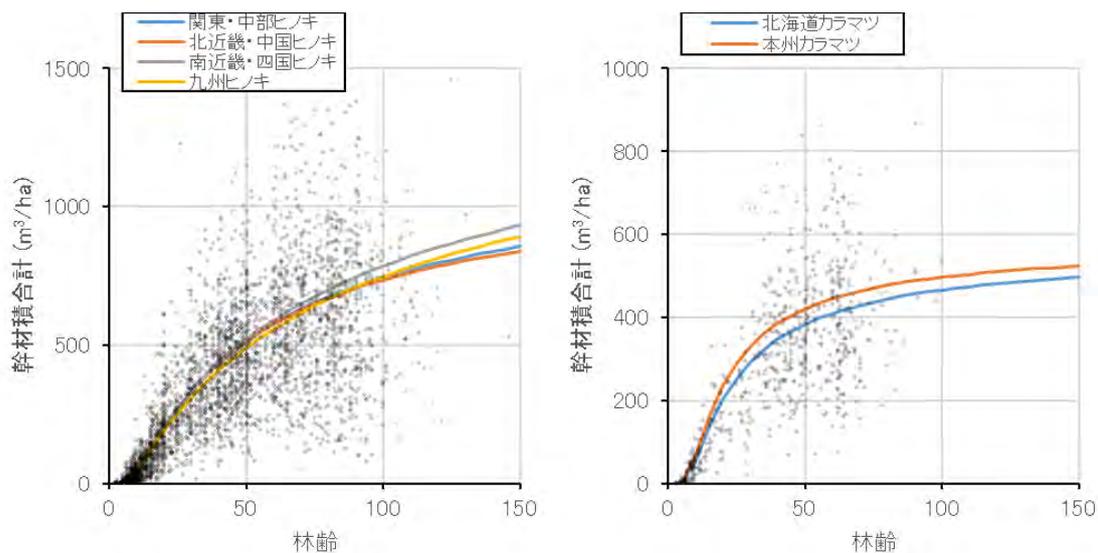


図 4-11. 樹高成長曲線と本数減少曲線をもとに推定した幹材積合計
(左：ヒノキ、右：カラマツ)

5. 追加調査・解析の検討

5.1. 背景・目的

上述のヒノキとカラマツの林分密度管理図および樹高成長曲線の作成では、高齢林の上層木平均樹高データの充実が求められているが、令和4年度事業のデータ収集の結果¹、特にヒノキについて林齢101年生(21 齢級)以上、カラマツについて林齢71年生(15 齢級)以上の高齢級林分の計測データが不足していた(表5-1)。高齢級林分のデータを増やすため、都道府県が所有する森林簿とそのGISポリゴン、および航空レーザ計測(airborne laser scanning, 以下ALS)データを収集し、ヒノキ及びカラマツ人工林の追加調査・解析を実施した。

表 5-1 ヒノキ及びカラマツ人工林の現地調査データ数(林齢別・地域別)

林齢	ヒノキ				カラマツ	
	関東 中部	北近畿 中国	南近畿 四国	九州	北海道	本州
1～10	166	166	120	119	82	36
11～20	215	224	200	177	119	48
21～30	281	273	230	162	125	65
31～40	220	226	206	211	118	62
41～50	225	286	248	275	149	80
51～60	154	161	109	166	59	79
61～70	205	171	112	183	93	62
71～80	190	130	107	119	8	14
81～90	200	134	102	99	1	13
91～100	85	39	56	38		6
101～110	13	11	31	6		
111～120	5	5	13	1		
121～	5	7	15	1		
計	1,964	1,833	1,549	1,557	754	465

網掛けはデータ数10未満を示す

¹ 林野庁事業「令和4年度森林情報の高度化推進に向けた条件整備等に関する調査委託事業」報告書より

5.2. 材料と方法

5.2.1. 作業のながれ

ALS データを使った高齢級のヒノキ及びカラマツ人工林を対象とした林齢と上層木平均樹高のデータ取得の流れを図 5-1 に示す。

まず、追加調査・解析の対象道・県を選び、データの利用許可を取得したのち、ALS データおよび森林簿を入手した。その後、方法論やデータ処理の手順を検討した。データ処理・解析を経て、高齢級林分の林齢と上層木平均樹高のデータを取得した。なお、道・県によってデータフォーマットが異なり、データ処理ではフォーマットに応じた処理方法を都度適用した。

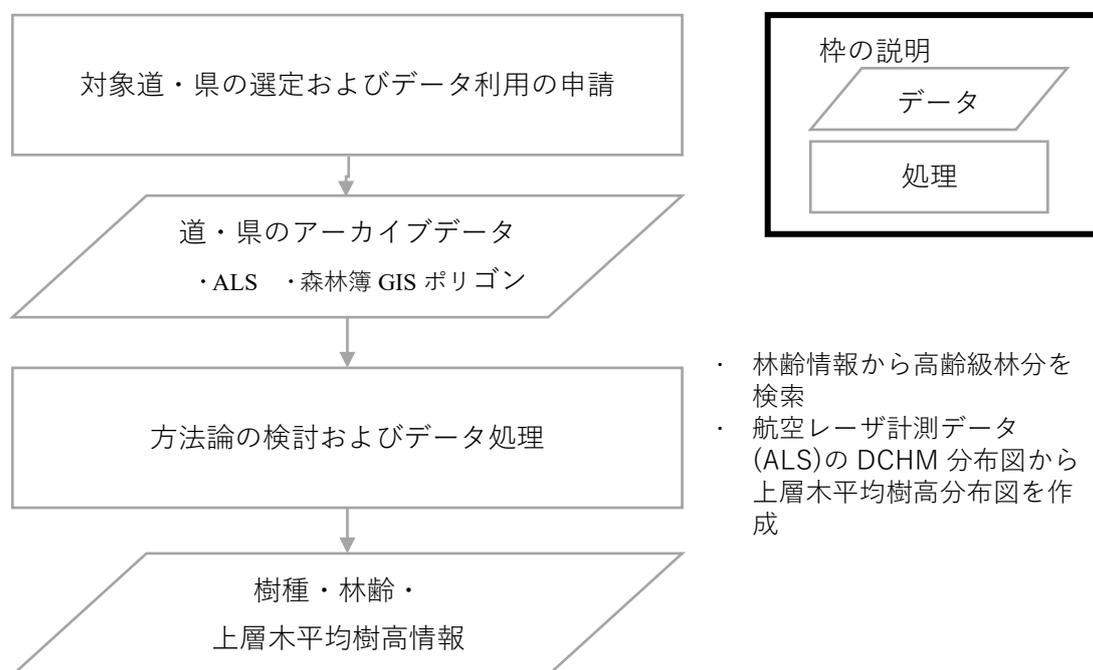


図 5-1 林齢と上層木平均樹高のデータ取得の流れ

5.2.2. 対象エリア

追加調査・解析の対象とした道・県を表 5-2 および図 5-2 に示す。ヒノキ人工林密度管理図²の 4 地域区分、カラマツ人工林密度管理図³の 2 地域区分をもとに、ALS データの入手が可能かつ ALS 撮影範囲内に対象樹種の人工林を有する道・県を選択した。

² ヒノキ人工林林分密度管理図（林野庁監修（社）日本林業技術協会 昭和 56 年～58 年調整）

³ カラマツ人工林林分密度管理図（林野庁監修（社）日本林業技術協会 昭和 56 年～57 年調整）

表 5-2 追加調査・解析の対象とした道・県

樹種	密度管理図の地域	道・県	データ入手経路	
ヒノキ	関東・中部	福島県	福島県	
		栃木県	G 空間情報センター	
		長野県	ALS:長野県 森林簿:G 空間情報センター	
		静岡県	静岡県	
	北近畿・中国	鳥取県	鳥取県	
		岡山県	ALS:林野庁 森林簿:岡山県	
	南近畿・四国	徳島県	ALS:徳島県及び国土交通省那賀川河川事務所 森林簿:徳島県	
		高知県	ALS:G 空間情報センター 森林簿:高知県	
	九州	熊本県	ALS:林野庁 森林簿:熊本県	
		大分県	大分県	
	カラマツ	北海道	北海道	北海道
		本州	秋田県	秋田県
福島県			ヒノキと同	
栃木県			ヒノキと同	
長野県			ヒノキと同	
静岡県			ヒノキと同	
鳥取県			ヒノキと同	
岡山県			ヒノキと同	
徳島県			ヒノキと同	

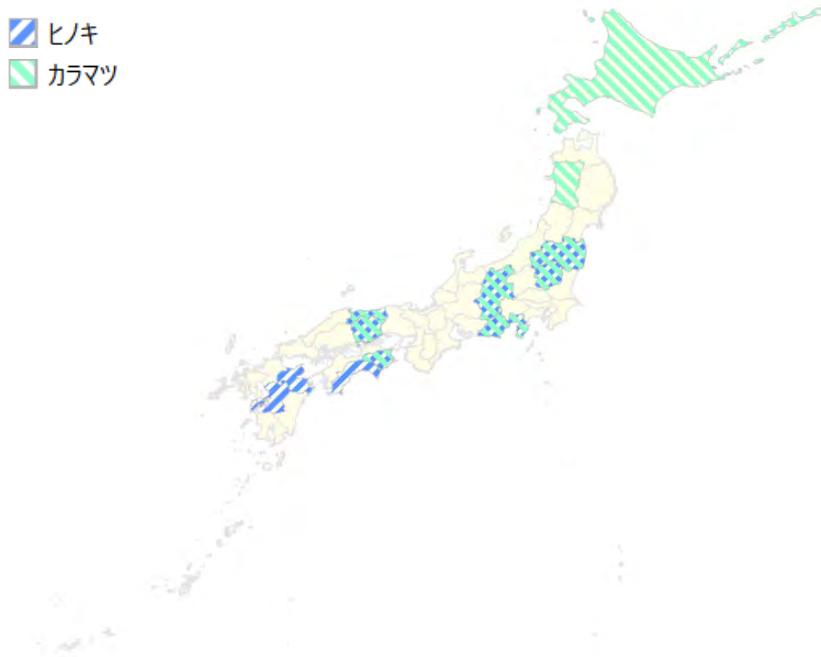


図 5-2 追加調査・解析の対象とした道・県の分布

5.2.3. 手法

追加調査・解析の対象林分は、林齢 101 年生以上のヒノキ人工林及び林齢 71 年生以上のカラマツ人工林である。林齢は森林簿から、上層木平均樹高は ALS データの解析結果からデータを取得した。これらソースデータについて、表 5-2 に示したとおり、多くは道・県から直接提供を受けた。一部のデータについては G 空間情報センター⁴から入手した。

高齢級林分の林齢と上層木平均樹高のデータを取得するための作業の流れは以下のとおりである。

- (1) 森林簿 GIS を用いたサンプル候補小班の抽出
- (2) ALS データによる上層木平均樹高分布図の作成手法の検討
- (3) ALS データの前処理
- (4) 上層木平均樹高分布図の作成
- (5) サンプル地点の上層木平均樹高の抽出および樹種判読
- (6) 現地検証

⁴ <https://front.geospatial.jp/> 運営母体：一般社団法人 社会基盤情報流通推進協議会

(1) 森林簿 GIS を用いたサンプル候補小班の抽出

林齢情報の抽出では、森林簿 GIS ポリゴンから樹種（ヒノキ/カラマツ）、林種（人工林）、林齢、面積（0.3ha 以上）の条件に合致するポリゴンを選択し、さらに ALS の計測範囲内に絞り込んだ。

林齢の絞り込みの際、上述の 3. 樹高成長曲線の作成で使われる地上調査データの林齢と上層木平均樹高との関係とズレがないかを確認するため、対象とする林齢を各樹種 10 年程度若い小班もサンプル対象とした。

(2) ALS データによる上層木平均樹高分布図の作成手法の検討

上層木平均樹高を取得するための方法には、令和 3 年度「リモートセンシング技術等を用いた森林の機能別調査の手法に関する調査事業」で開発された 10m に細分した正方区画（以下、メッシュと呼ぶ。）での最大値をさらに 20m メッシュで平均する方法を適用した。これにより ALS の計測エリア全域の上層木平均樹高の分布が得られる。この方法は、ALS データによる上層木平均樹高の主なデータ取得方法として挙げられる樹頂点法と DCHM 最大値法とを組み合わせたものである。

樹頂点法は樹頂点位置の林冠高（digital crown height model, 以下 DCHM）の値のうち上層木を選んで平均する方法、DCHM 最大値法は単位面積ごとに最大値を抽出する方法である。前者のメリットはより真値に近い上層木平均樹高のデータ取得が期待できるが、デメリットとしてデータの点密度が高いこと、処理に技術と時間を要する事があげられる。後者のメリットはデータの処理が容易であることに加え点密度は 1 点/m²でも対応可能であること、デメリットはメッシュ内の最大値を抽出するため上層木平均樹高ではなく最大樹高をとりやすい傾向があることである（図 5-3 上部）。

今回採用した両者を組み合わせた手法は細分したメッシュの最大値を平均する方法で（図 5-3 下部）、樹頂点法と DCHM 最大値法のメリットが期待できる。小メッシュで最大値を抽出して平均することで、DCHM 最大値法より上層木平均に近づき、処理方法も樹頂点抽出法より容易で処理時間が短く済む。また、点密度 1 点/m²でも対応可能であることから、データ抽出エリアの拡大が期待できる。

メッシュ単位について、まず最大値をとるための小メッシュは 10m、平均値をとるメッシュは 20m で設計されている。小メッシュを 10m としたのは、上層木の定義を 1ha あたり樹高の上位 100 本とし⁵、これを換算して 10m メッシュあたり 1 本として設定されているからである。20m メッシュについては、「令和 3 年度林業イノベーション推進総合対策のうち ICT 生産管理推進対策のうちレーザ計測による森林資源データの解析・管理の標準化事業」で森林資源データ解析・管理標準仕様案の森林資源量集計メッシュポリゴンのサイズと一致させるためである。

⁵ 西沢正久 1972 森林計測 農林出版 東京 348pp

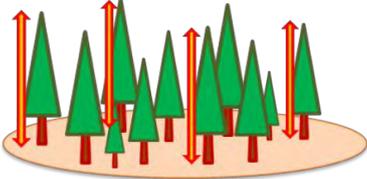
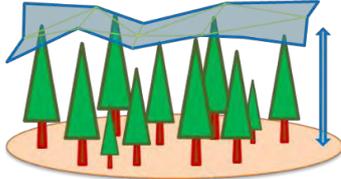
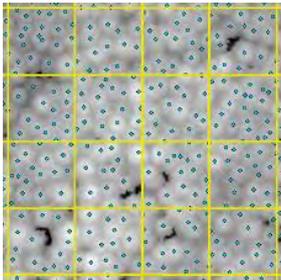
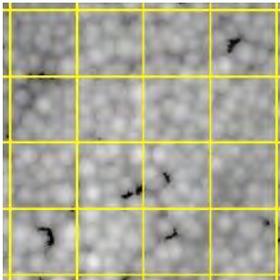
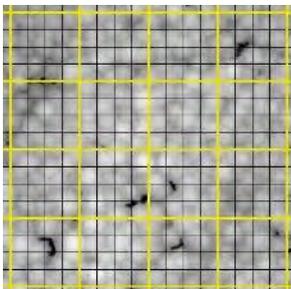
樹頂点法	DCHM 最大値法
	
	
<p>20m メッシュ：黄色線、樹頂点：青点、DCHM 画像：白色は樹高が高く、黒が低い</p>	
<p>樹頂点位置の DCHM の値のうち上層木を選び 20m メッシュ単位で平均</p>	<p>20m メッシュごとに最大値を抽出</p>
<p>メリット：より真値に近い値の取得が期待できる デメリット：データ処理に技術と時間を要す</p>	<p>メリット：データの処理が容易 デメリット：メッシュ内の最大値を抽出するため、最大樹高をとりやすい傾向</p>
<p style="text-align: center;">メッシュ細分最大値をメッシュ平均（採用された手法）</p>	
	<p>樹頂点法と DCHM 最大値法のメリットが期待 小メッシュで最大値を抽出し、20m で平均することで DCHM 最大値法より上層木平均に近づき、樹頂点抽出法より処理が容易</p>

図 5-3 ALS データによる上層木平均樹高の主な取得方法と事業で採用された方法⁶

⁶ 令和 3 年度「リモートセンシング技術等を用いた森林の機能別調査の手法に関する調査事業」報告書を一部改変

(3) ALS データの前処理

道および県から提供いただいた ALS データに DCHM TIF 画像が含まれていない場合、以下の流れでデータを処理した。

- ① 道・県の所有データに DCHM 画像が含まれていない場合は、DSM と DEM の差分から DCHM 画像を作成
- ② 道・県の所有データに DSM 画像が含まれていない場合は、オリジナルデータを las 形式に変換したうえで DSM を作成
- ③ DCHM のファイルフォーマットが tif 形式以外の場合は、tif に変換

オリジナルデータのファイルフォーマットは、lem、csv、txt、las など多岐にわたるため、それぞれの変換方法が必要となる。県レベルの広域エリアを対象とする場合、ファイル数が数千あるため、今後同じ処理を実施する際には時間を要する事に留意する必要がある。

(4) 上層木平均樹高分布図の作成

上述の(3)で得られた DCHM 画像を用い、以下の手順で上層木樹高分布図を作成した。

- ① 10m メッシュごとの最大値の DCHM 抽出
- ② 20m メッシュごとに平均 DCHM を算出

(5) サンプル地点の上層木平均樹高の抽出および樹種判読

サンプルの抽出では、上述の(1)で述べたとおり、まず森林簿小班情報から、対象樹種、対象林齢、面積(0.3ha以上)の条件を設定し、さらに ALS 撮影範囲内に絞り込んだ。対象小班のフィルタリングの際、森林簿の林齢を ALS 撮影時に換算した林齢を用いた。

次に、抽出した対象小班について、GIS 処理により小班ポリゴンから重心ポイントを発生させ、前節で作成した上層木平均樹高分布図と重なる箇所の値を抽出した。

ここで、森林簿の樹種が不正確の可能性もあるため、DCHM 画像での目視確認に加えて、無料の衛星画像閲覧サービス Google Earth を用いた目視確認で該当樹種かを判読した。単時点での樹種判読が難しい場合は、Google Earth で複数の時系列画像を見て樹種判読した。

サンプル数は、年齢級ごとに 10~20 点で、対象となる小班が多い場合はランダム変数を重心点に付与したうえでサンプル地点を選択した。

サンプルを決める際、以下のケースについてサンプル対象外とした。

- ✓ 重心点が小班外に落ちた場合
- ✓ 上層木平均樹高分布図において、重心点を含む 20m グリッドが他の林相や土地被覆と混合している場合
- ✓ 樹種が森林簿と異なる場合

(6) 現地検証

ALS データによる樹高情報を検証するため、現地で樹高計測した。ヒノキの対象県は比較的高木林が多い高知県、カラマツについては長野県とした。比較検証では、まず DCHM 画像から単木を抽出した最大値を樹高とし、実測樹高と比較した。

5.3. 結果

5.3.1. 上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所

対象道・県で作成した上層木平均樹高分布図とサンプル箇所を図 5-4 に示す。灰色の線が県境界、白黒スケールの画像が上層木平均樹高分布で、白色は数値が高く黒は低い。ヒノキについてはサンプル箇所を濃い水色、カラマツについてはサンプル箇所を橙色で示した。一部の県では対象林齢以上の小班が少ない、または入手した ALS の計測面積が小さかったため齢級ごとのサンプル数が 10 点未満となった。なお、北海道については、小面積計測データが広域に点在しているため、拡大図を付けた。

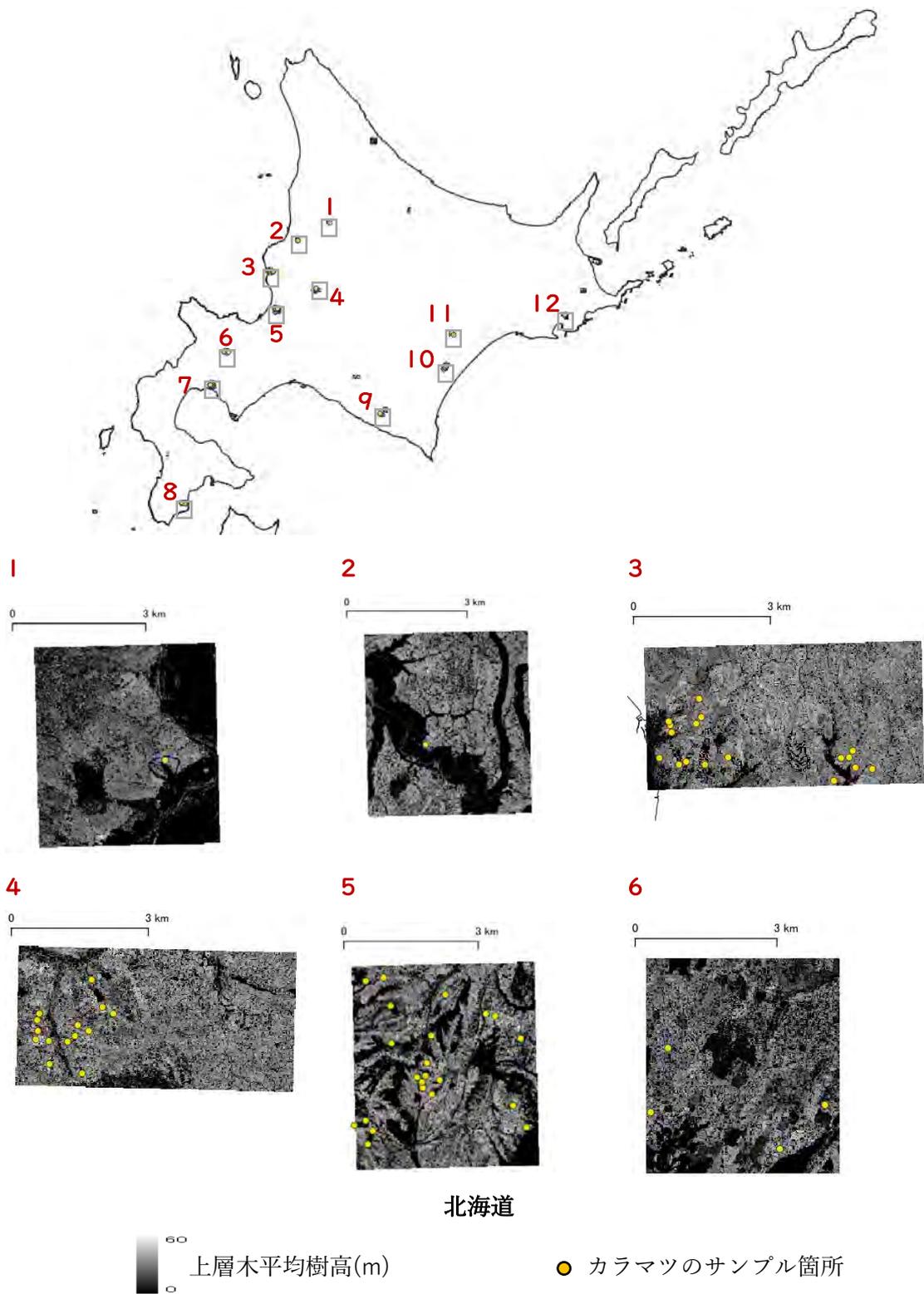


図 5-4 各道・県の ALS による上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所

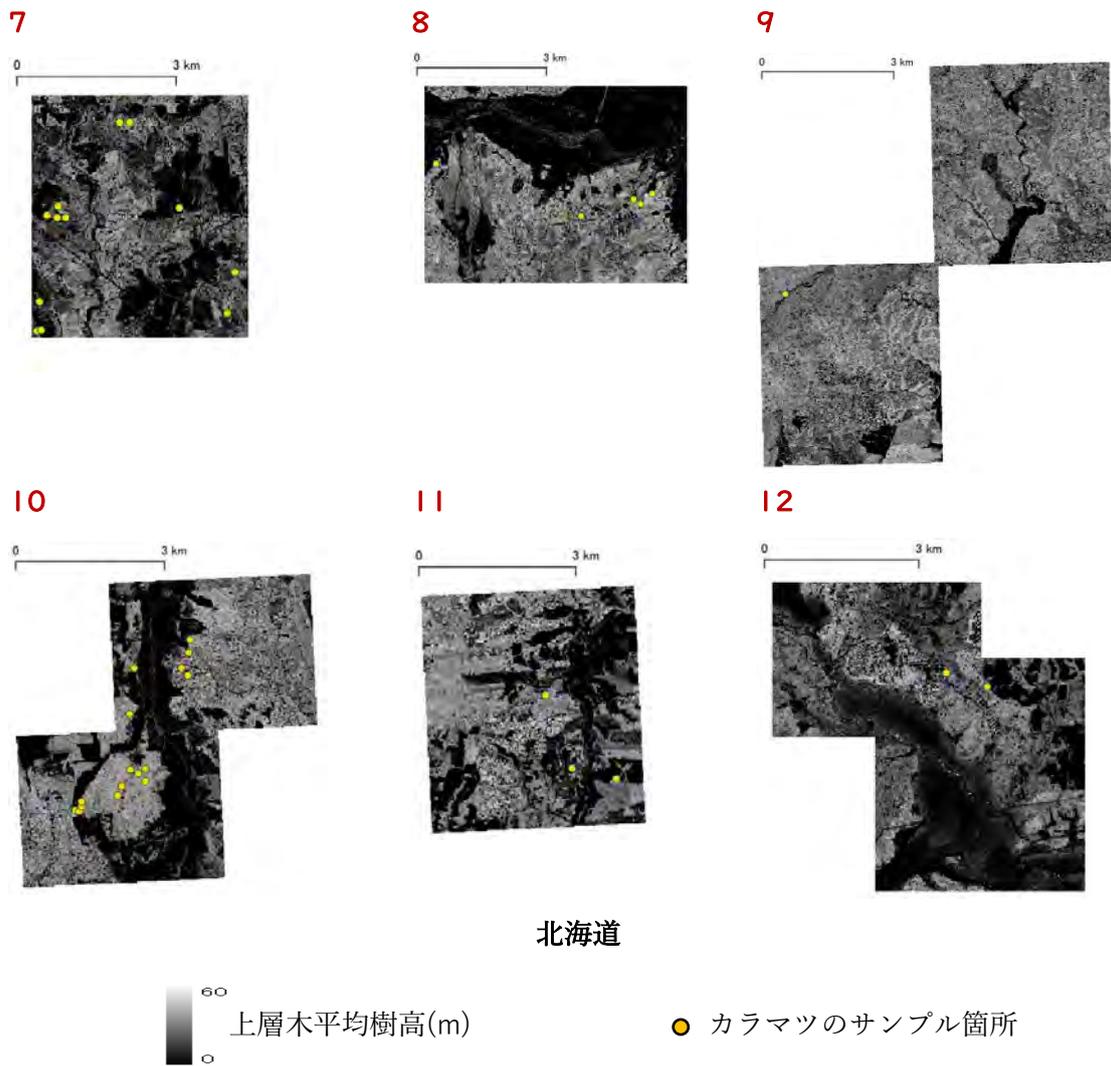
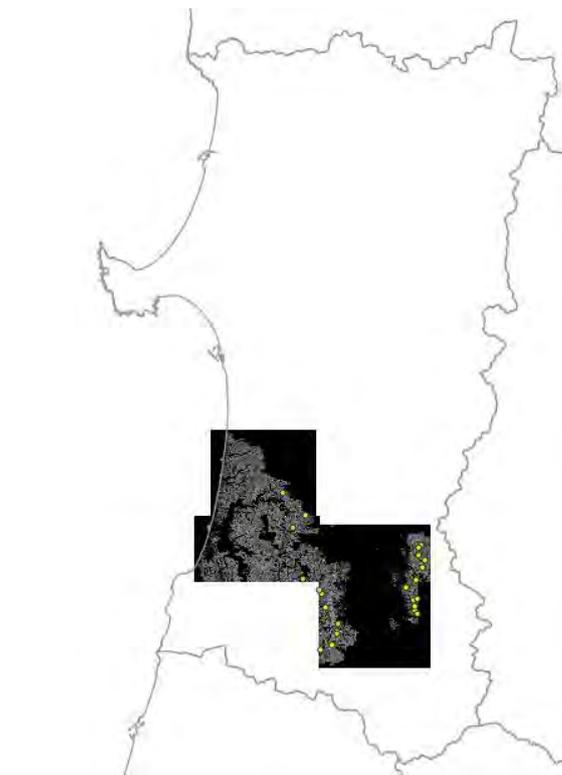
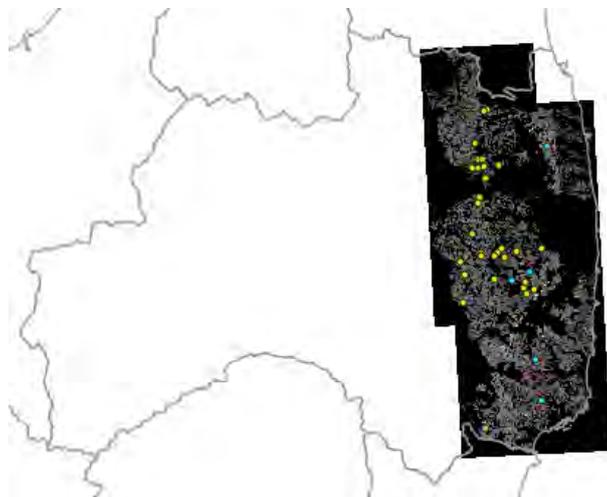


図 5-4 各道・県の ALS による上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所 (つづき)



秋田県

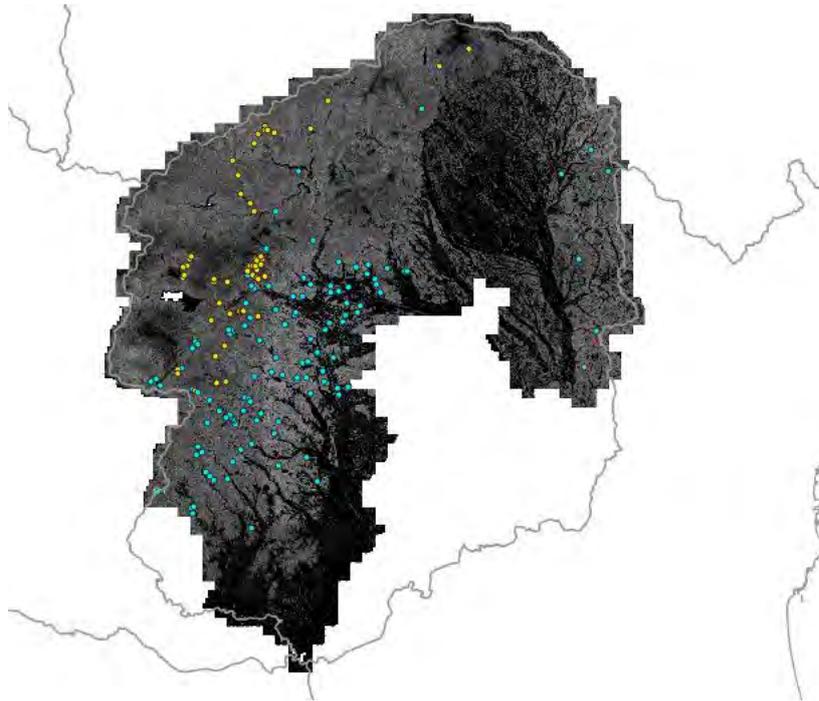


福島県

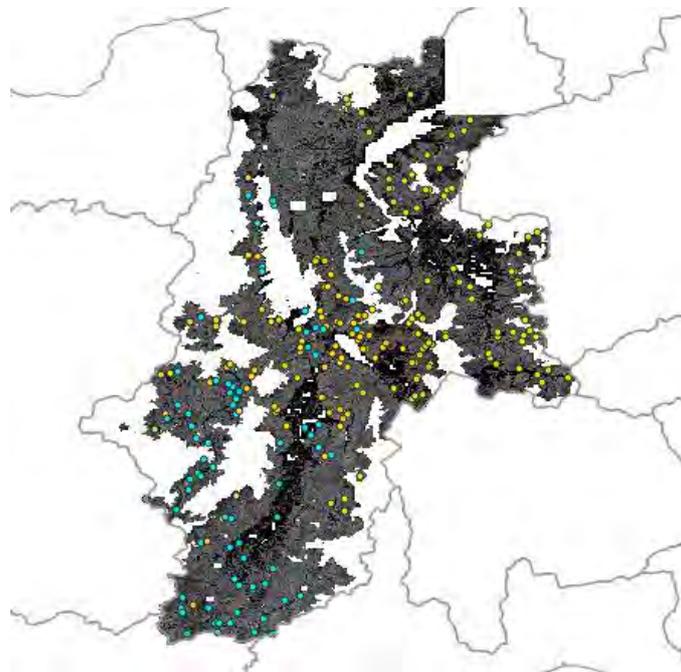
60
 上層木平均樹高(m)
 0

● ヒノキのサンプル箇所
 ● カラマツのサンプル箇所

図 5-4 各道・県の ALS による上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所 (つづき)



栃木県



長野県

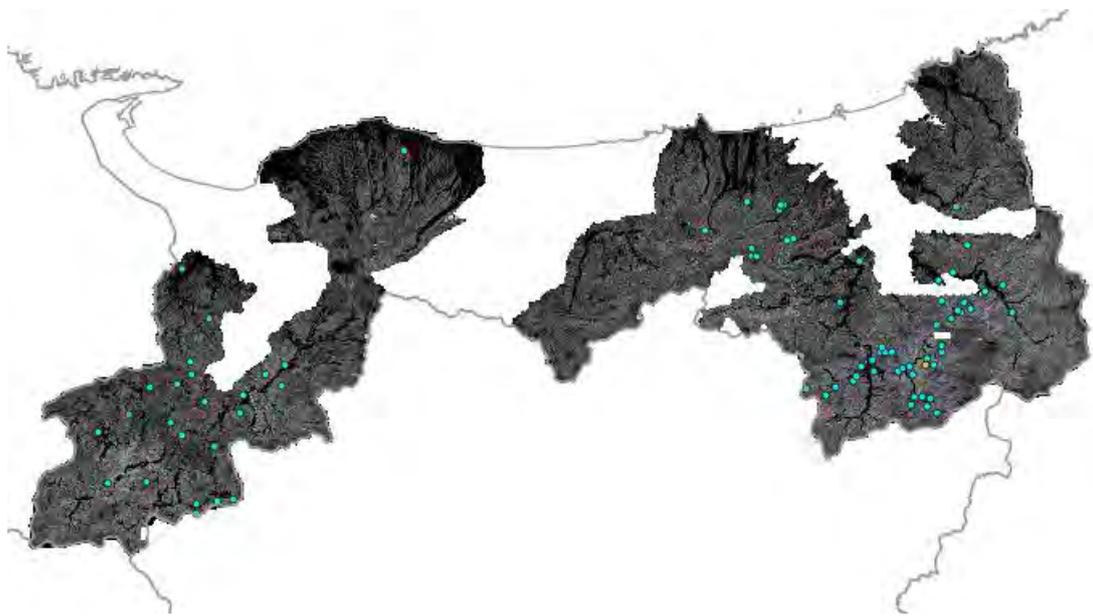


- ヒノキのサンプル箇所
- カラマツのサンプル箇所

図 5-4 各道・県の ALS による上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所 (つづき)



静岡県

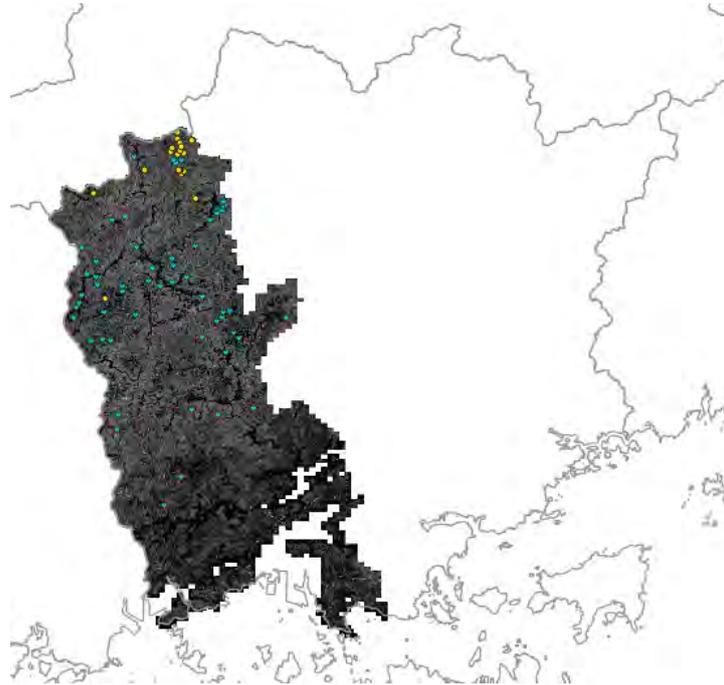


鳥取県

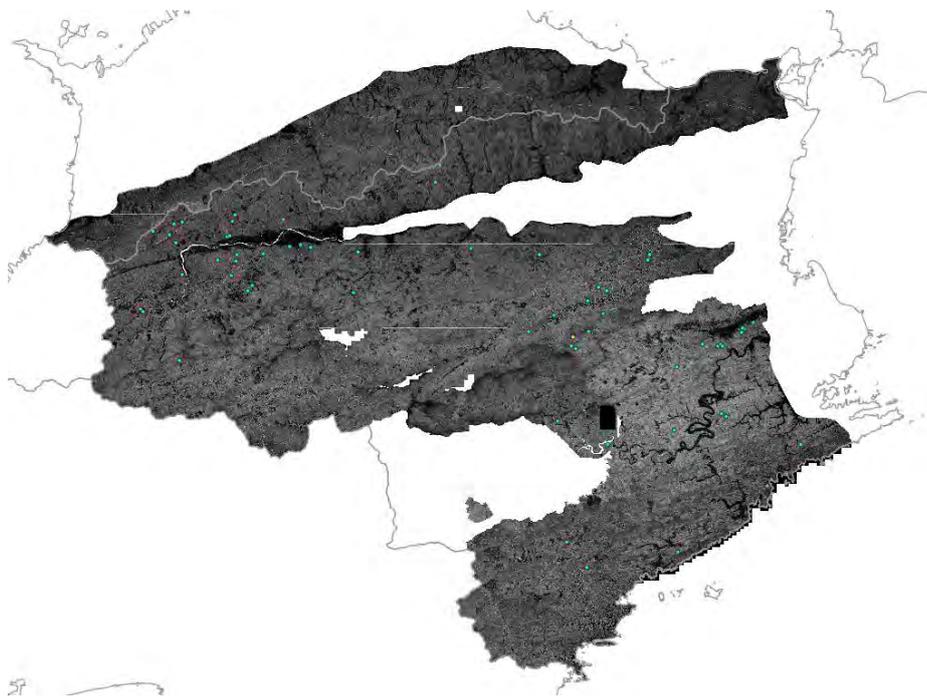
60
 上層木平均樹高(m)
 0

● ヒノキのサンプル箇所
 ● カラマツのサンプル箇所

図 5-4 各道・県の ALS による上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所 (つづき)



岡山県

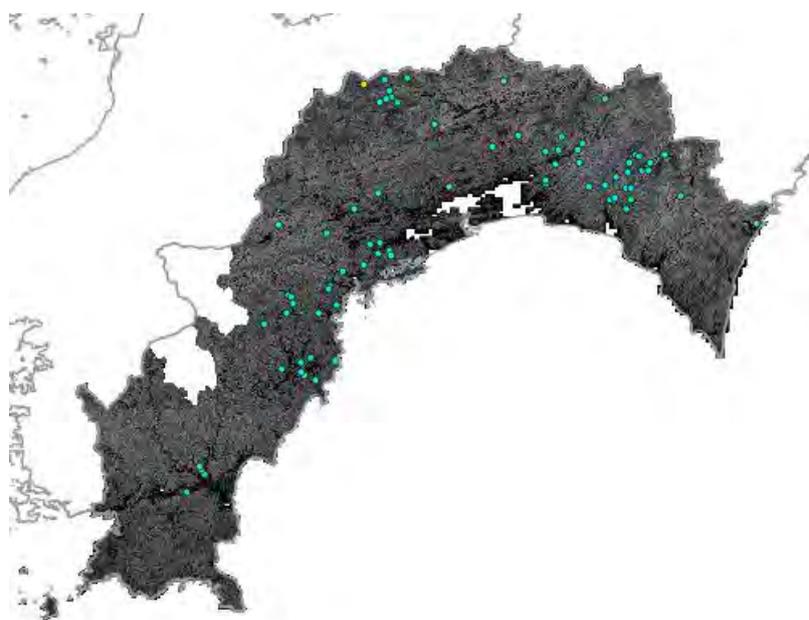


徳島県

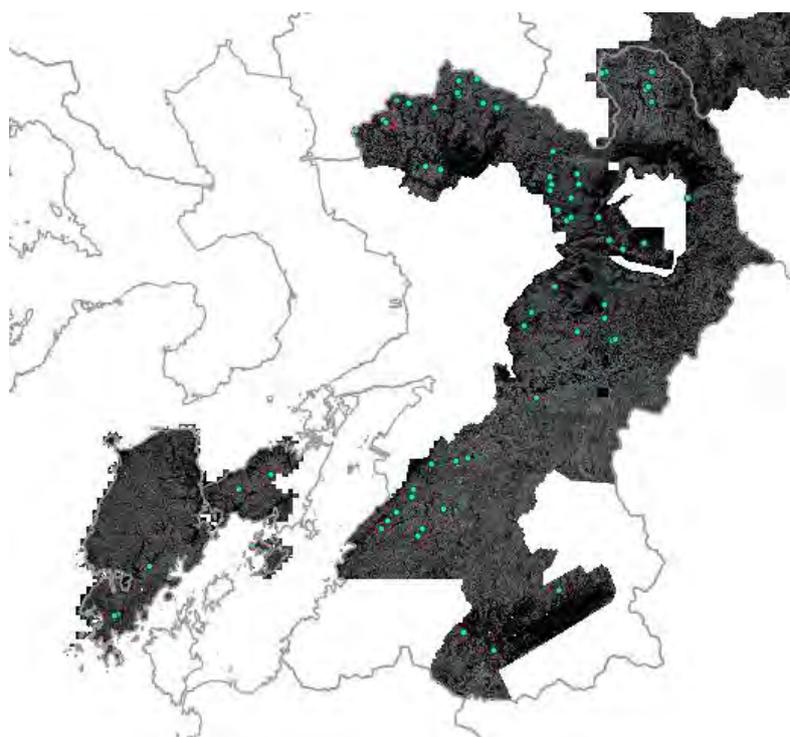


- ヒノキのサンプル箇所
- カラマツのサンプル箇所

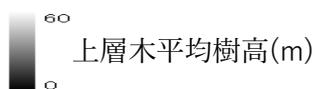
図 5-4 各道・県の ALS による上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所 (つづき)



高知県



熊本県



- ヒノキのサンプル箇所
- カラマツのサンプル箇所

図 5-4 各道・県の ALS による上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所 (つづき)

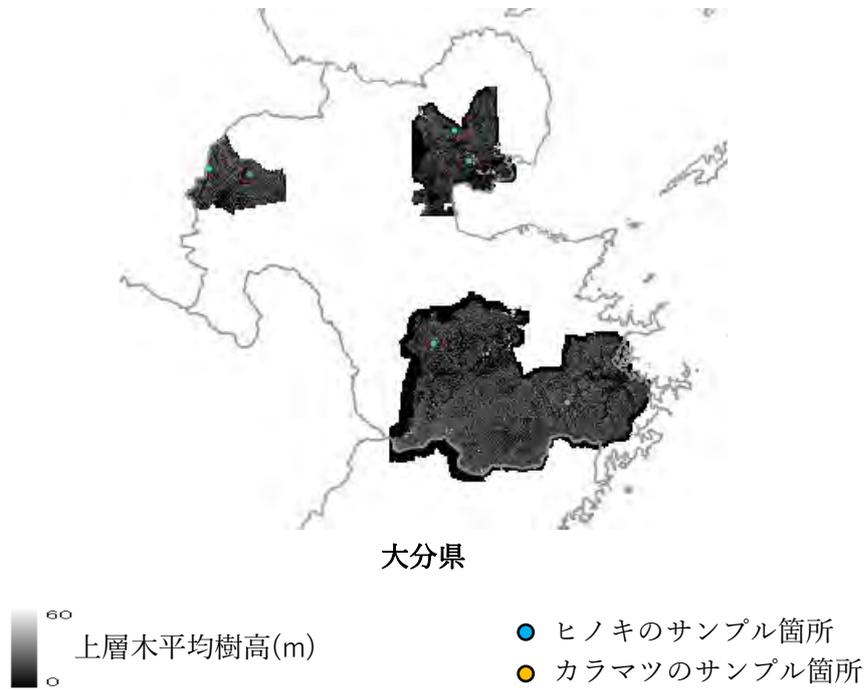


図 5-4 各道・県の ALS による上層木平均樹高分布図およびサンプル箇所 (つづき)

対象道・県の上層木平均樹高サンプルの数、平均値、最大値を表 5-3 に示す。ヒノキは 101 年生以上、カラマツは 71 年生以上の林分データである。ヒノキのサンプル数は、福島県、大分県は少ないが他県は 20 点以上存在した。カラマツについては、全体的にサンプル数が少なく、20 点以上取得できたのは、北海道、栃木県、長野県である。上層木平均樹高の平均値はヒノキ 26.2m、カラマツも同じく 26.2m で、最大値はヒノキが岡山県の 37.0m、カラマツは長野県の 41.7m だった。

表 5-3 対象道・県の上層木平均樹高サンプルの平均値と最大値

樹種	地域	道・県	サンプル数	平均	最大
ヒノキ 101 年生以上	関東・中部	福島県	3	28.8	32.1
		栃木県	89	28.1	35.2
		長野県	46	26.6	36.7
		静岡県	26	27.9	34.6
	北近畿・中国	鳥取県	59	26.0	36.7
		岡山県	31	26.4	37.0
	南近畿・四国	徳島県	43	24.6	32.2
		高知県	56	24.9	33.1
	九州	熊本県	31	24.7	34.5
		大分県	1	24.2	24.2
カラマツ 71 年生以上	北海道	北海道	40	25.7	37.1
	本州	秋田県	4	28.3	31.6
		福島県	2	28.4	29.3
		栃木県	34	21.2	32.6
		長野県	155	28.8	41.7
		鳥取県	3	32.8	39.1
		岡山県	1	31.7	31.7
		徳島県	1	10.7	10.7
		高知県	2	28.2	30.0

林齢 5 年ごとの樹種別・地域別のサンプル数集計値を表 5-4 に示す。森林簿更新年と ALS の計測年は一致していないため、林齢は ALS 計測年時に換算した値である。地上調査データが少ないヒノキ 101 年生以上、カラマツ 71 年生以上の欄を灰色で示した。ヒノキについて、齢級ごとの点数が 10 点以上の林齢は関東・中部と南近畿・四国で 120 年生まで、北近畿・中国は 110 年生、九州は 105 年生までである。カラマツについては、北海道が 80 年生まで、本州は 110 年生までである。

表 5-4 対象林齢以上の抽出箇所数

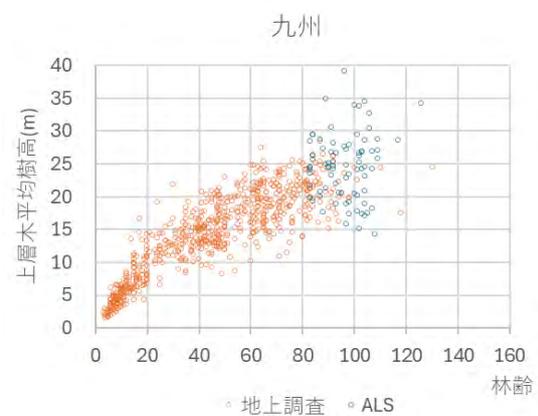
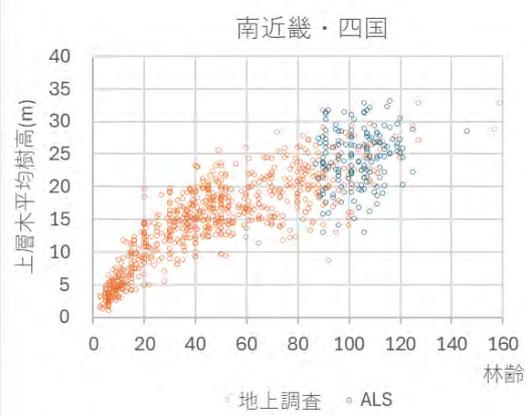
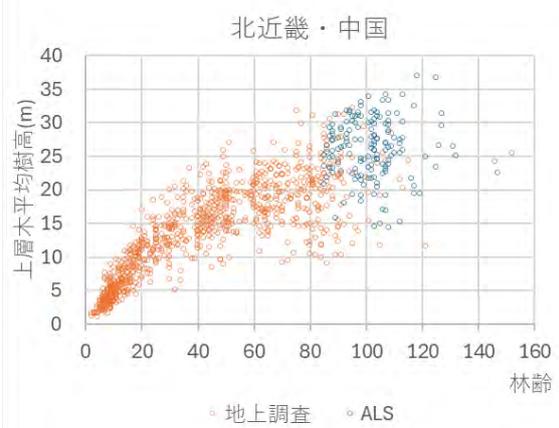
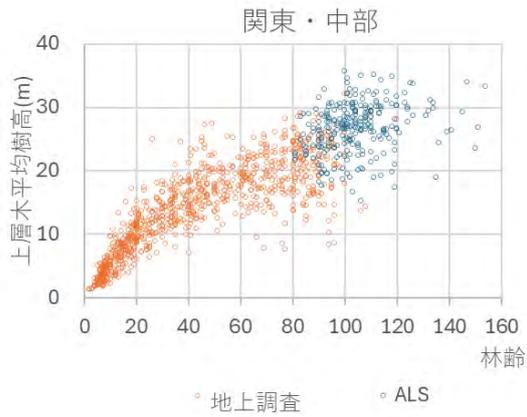
ALS 撮影時 林齢	ヒノキ				ALS 撮影時 林齢	カラマツ	
	関東・ 中部	北近 畿・ 中国	南近 畿・ 四国	九州		北海道	本州
56-60					56-60	41	30
61-65					61-65	36	73
66-70					66-70	19	40
71-75					71-75	25	47
76-80					76-80	12	24
81-85	12	3		12	81-85	2	23
86-90	19	21	16	11	86-90	1	22
91-95	35	20	21	12	91-95		25
96-100	36	21	18	13	96-100		23
101-105	55	38	27	21	101-105		14
106-110	39	28	31	9	106-110		13
111-115	24	9	23		111-115		6
116-120	19	6	12	1	116-120		1
121-125	7	3	5		121-125		
126-130	2	3		1	126-130		
131-135	6	2			131-135		
136-140	2				136-140		3
141-145	2				141-145		
146-150	2	1	1		146-150		
>151	6				>151		1
計	266	155	154	80	計	136	345
ヒノキ 101年生以上計	164	90	99	32	カラマツ 71年生以上計	40	202

灰色の欄：ヒノキ林齢 101 年生以上、カラマツ林齢 71 年生以上

5.3.2. サンプル箇所の林齢と ALS による上層木平均樹高の関係

サンプル地点の林齢と上層木平均樹高の散布図を密度管理図の樹種・地域別に示す（図 5-5）。図中の青い点が ALS による上層木平均樹高で、オレンジ色で示した地上調査による上層木平均樹高の分布傾向と比べ乖離していないことが示された。

◆ ヒノキ



◆ カラマツ

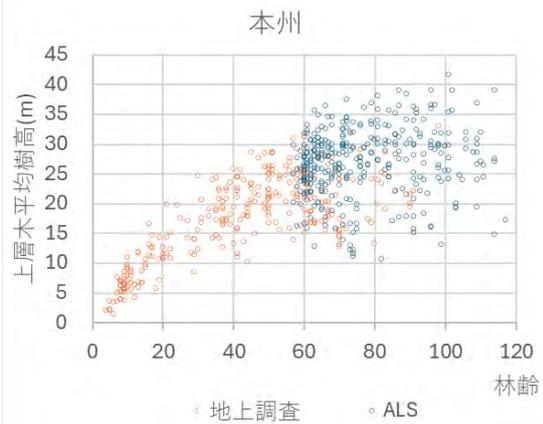
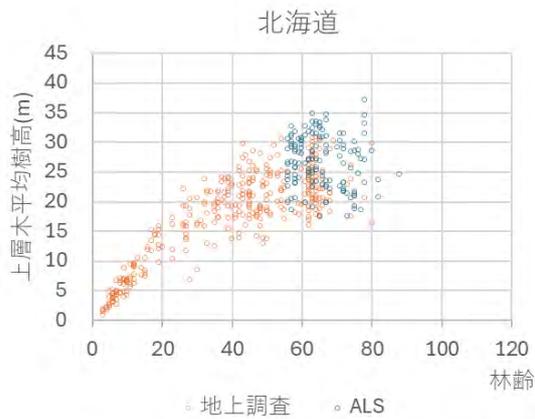
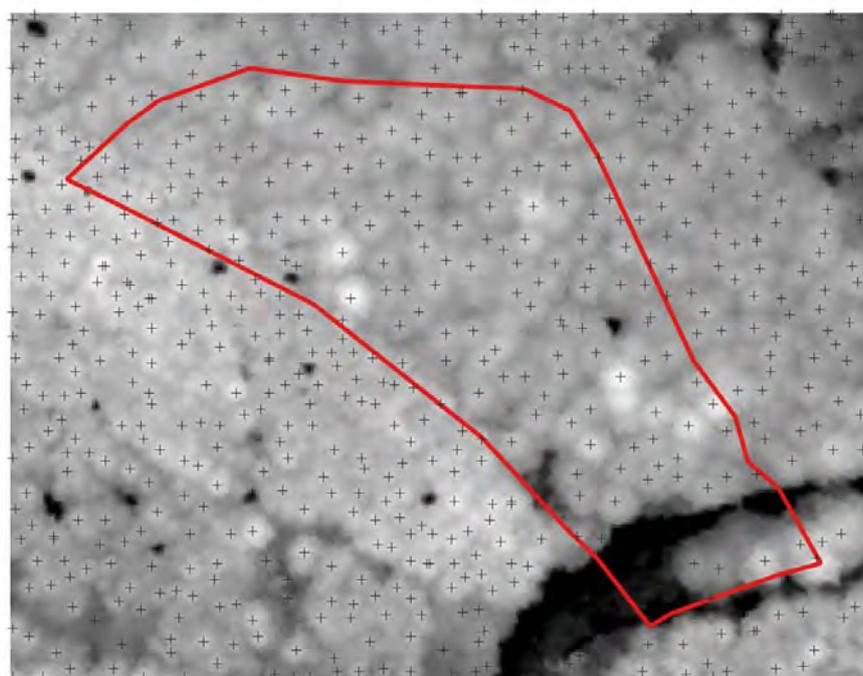


図 5-5 サンプル箇所の林齢と ALS データによる上層木平均樹高

5.3.3. 現地検証

DCHM を利用することにより広域の上層木平均樹高を得ることができるとされている。一方、樹高成長曲線を作成する際に高い樹高は大きく寄与すると考えられる。そこで、DCHM から求めた樹頂点の高さ（すなわち、推定樹高）が実際の樹高とどの程度差があるかを確認するため、ヒノキとカラマツについて高い樹高の小班において現地で樹高を計測し、DCHM 樹頂点の高さと比較した。対象地はヒノキ・カラマツそれぞれの産地として有名な高知県および長野県とした。現地では、DCHM 樹頂点の位置を示した図面（図 5-6 に例示）をもとに樹頂点と実際の木を突合し、バーテックスを用いて 2 名で樹高を測定した。



背景 DCHM 画像（白いほど高い）、樹頂点 (+)、対象小班界（赤枠）

図 5-6 DCHM 樹頂点の位置を示した図面の例

まず、ヒノキについて結果を図 5-7 に示す。参考に林内の写真（図 5-8）を示す。5 か所のヒノキ林で計 61 本について樹高計測したところ、実測樹高と DCHM 樹頂点高の平均誤差率は 3.9% で、森林生態系多様性基礎調査の QAQC 調査では 10% 以内を適正とみなしているところから、大きな誤差ではないと言える。なお、実測値に対する DCHM 樹頂点の平均誤差は +0.5m で過大推定、2 名の計測平均絶対誤差は 0.3m だった。

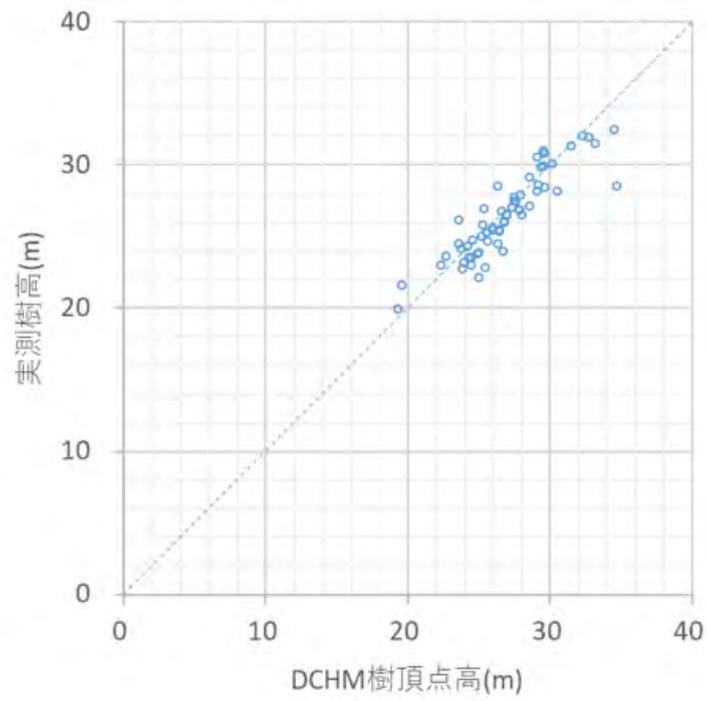


図 5-7 ヒノキ林の DCHM 樹頂点高と実測樹高の関係

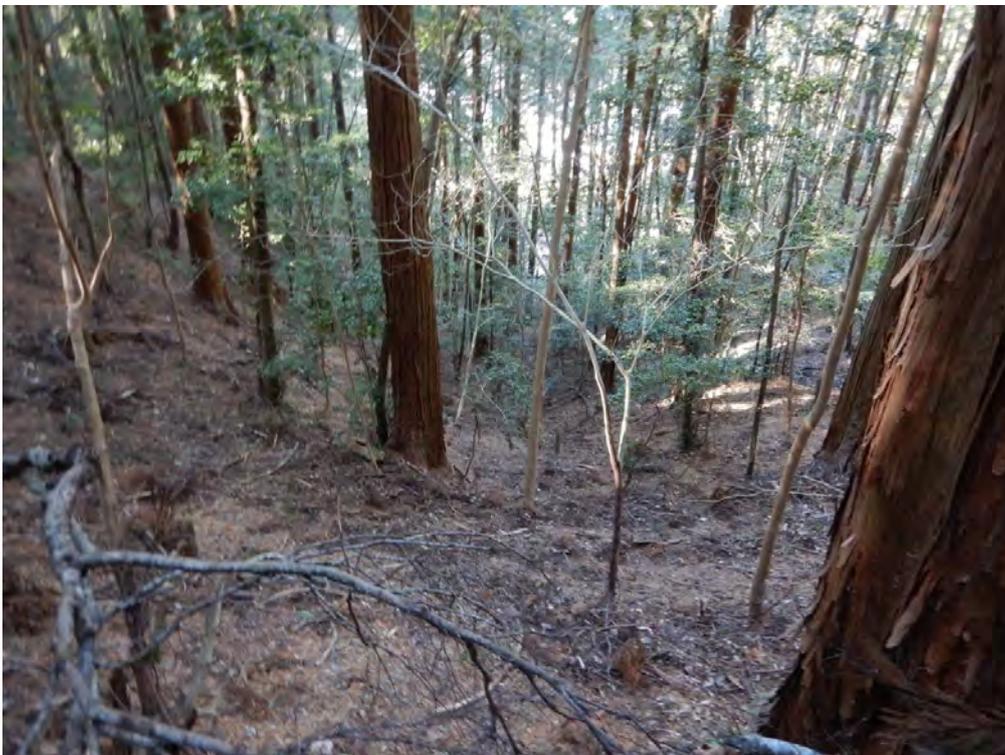


図 5-8 ヒノキ林調査地内の様子

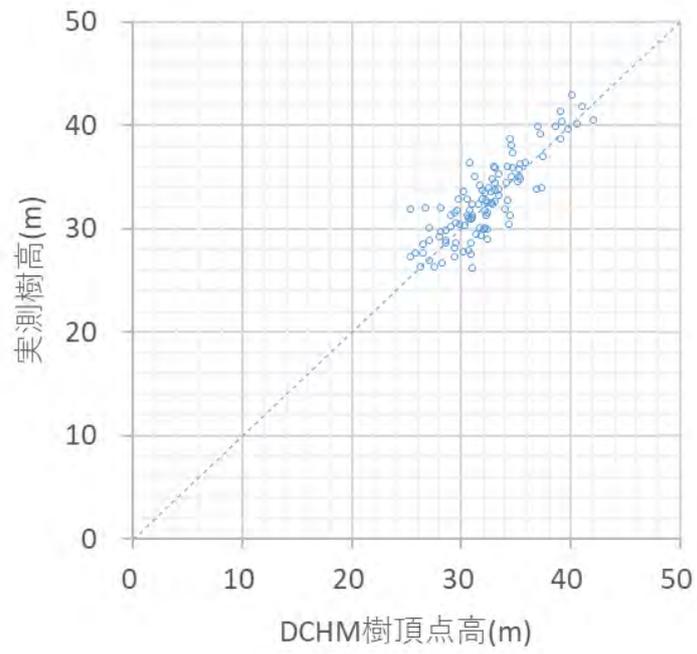


図 5-9 カラマツ林の DCHM 樹頂点高と実測樹高の関係



図 5-10 カラマツ林調査地内の様子

次に、カラマツについて結果を図 5-9 に示す。参考に林内の写真を図 5-10 に示す。6 か所のカラマツ林で計 107 本について樹高計測したところ、実測樹高と DCHM 樹頂点高の平均誤差率は 5.2% で、ヒノキと同じく QAQC 調査の評価基準から判断すると大きな誤差ではないと言える。なお、実測値に対する DCHM 樹頂点の平均誤差は -0.4 m で過小推定、2 名の計測平均絶対誤差は 0.3m だった。

カラマツの形状は垂直だけではなく、曲がり、S 字型も多数存在した。今回の樹高は森林生態系多様性基礎調査における樹高計測の注意点、「※曲がり部分も可能な限り樹幹長を樹高として測定」に従って計測したため、DCHM 樹頂点がカラマツの実測値に比べて小さくなったと考えられる。

6. 天然林の林分蓄積、林分成長量に関する検討

天然林はひとつの小班であっても多様な樹種、樹齡、サイズの樹木が含まれている。このため、森林簿に記載されている天然林の小班の樹種、林齡、蓄積は、人工林の小班よりも不確か性が大きいと考えられる。そこで本章では、森林簿に現状記載されている内容になるべく依存せずに現在および将来の小班蓄積を推定することを想定して検討を進めた。

まず、森林生態系多様性基礎調査（National Forest Inventory, 以下 NFI）の天然林のデータを用い、林相・地域別の材積成長曲線を作成した。

次に、新たな林相別の材積成長曲線が用意されたとして、それらを各小班に適用する際、より正しい林相区分をもとにして適切な材積成長曲線を選択できるようにするため、リモートセンシングにより各小班の林相区分を推定する方法を検討した。

さらに、森林簿記載の林齡が不確かであることも考慮し、各小班の材積をリモートセンシングにより推定する方法を検討した。各小班の現状の材積をリモートセンシングによって推定することができれば、材積成長曲線を介して将来の材積を推定することが可能になる。

以上を踏まえ、本章の最後において天然林の林分蓄積、林分成長量を把握し、森林簿情報の更新を行う手法について整理する。

6.1. 天然林の材積成長曲線の作成

材積成長曲線の作成に用いるデータを「森林生態系多様性基礎調査データ解析プログラム Ver.2」から抽出した。第4期データから、更新方法が天然更新かつ林分分割数が1（プロット全体が天然林）のプロットを選んだ。森林タイプや優占樹種がタケ類や外来樹種であるプロット、また林齡や材積など集計に不可欠な項目が欠落しているプロットは対象外とした。さらに材積の異常値を検出するため、前期からの継続プロットに限定し、前期からの年あたり材積変化量の絶対値が大きいほうから1%は除外した。以上のように抽出した4,811プロットを森林タイプと優占樹種をもとに6つの林相に分類した（表6-1）。林相別の材積成長曲線の作成においては、表6-1のとおり落葉針葉樹林はわずかしこ出現しないため常緑針葉樹林と統合して針葉樹林とした。また同様に出現数の少ない針広混交林については、上記の「解析プログラム」から個々のプロットの正確な混交歩合が得られないものの、針広混交林のプロットの過半数は優占樹種が落葉広葉樹であったことから落葉広葉樹林として扱った。さらに次項で述べるように、リモートセンシングによって常緑広葉樹林と落葉広葉樹林とを区別することは難しい場合が多いため、広葉樹林として統合した。以上の検討から、林相としては①区分なし（分類不能を含む）、②広葉樹林、③針葉樹林の3種類について材積成長曲線を作成することとした。

表 6-1. 林相別、都道府県別プロット数

都道府県	落葉 針葉樹林	常緑 針葉樹林	落葉 広葉樹林	常緑 広葉樹林	針広混交 林	分類不能	計
北海道	13	384	1,271		52		1,720
青森		24	101		7		132
岩手	1	25	225		9		260
宮城		14	81		3		98
秋田	1	20	156		4		181
山形		12	158		3		173
福島		15	109		3		127
茨城		7	13	3			23
栃木	1	10	53		2		66
群馬		12	77		4		93
埼玉		2	7				9
千葉			6	11		1	18
東京		1	5	9			15
神奈川		1	12	1			14
新潟		19	116	1	2		138
富山		5	32		1		38
石川		12	32	1	2		47
福井		5	42	9	1		57
山梨	2	10	22		2		36
長野	3	37	81		7		128
岐阜		27	89	3	4		123
静岡		8	25	9	1		43
愛知		8	12	4	1		25
三重		7	20	22	1	1	51
滋賀		13	25	1	2	1	42
京都		14	28	6		1	49
大阪		1	3	4			8
兵庫		14	54	25	2	1	96
奈良		5	8	3	2		18
和歌山		4	15	19	2	2	42
鳥取		12	37	8	1	1	59
島根		28	73	28	5	3	137
岡山		13	54	12			79
広島		28	78	10	4	2	122
山口		7	18	40	1	2	68
徳島		6	21	13	3		43
香川		3	7	10	1		21
愛媛		7	27	13		1	48
高知		4	21	31		1	57
福岡			3	14		3	20
佐賀				3			3
長崎			6	27		2	35
熊本		2	22	31		1	56
大分		2	6	8		2	18
宮崎		6	17	38	1	7	69
鹿児島		3	5	72		2	82
沖縄		2		22			24
計	21	839	3,273	511	133	34	4,811

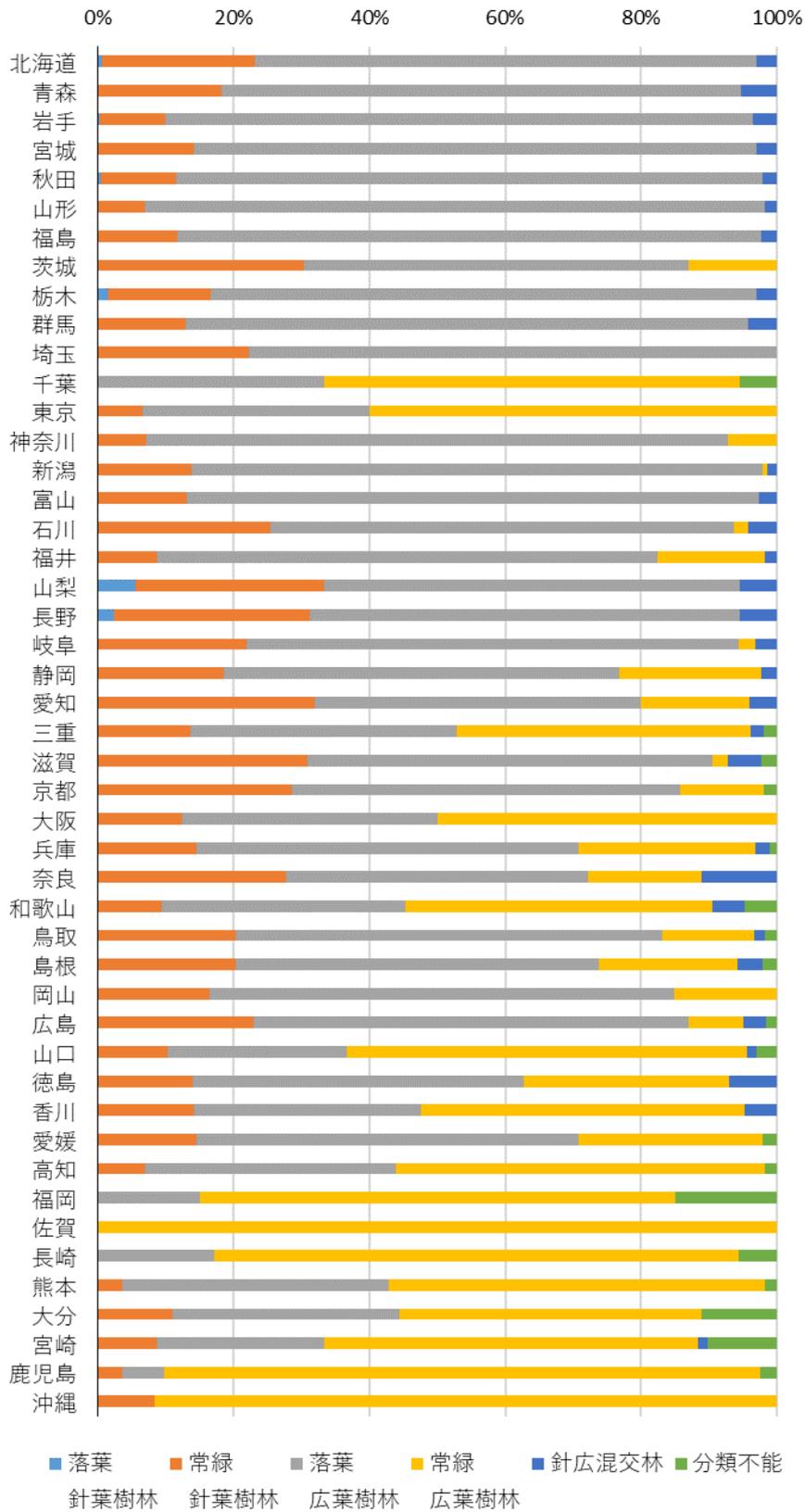


図 6-1. 都道府県別林相区分別プロット数割合

材積成長曲線のモデル式として、代表的な成長曲線であり、本事業でも樹高成長曲線の候補の1つとした次の Mitscherich 式を用いた。

$$V = a(1 - b \exp(-kt))$$

ここで、 V : 材積 (m^3/ha)、 t : 林齢 (森林簿の林齢)、 a, b, k : 係数である。 a は成長曲線が漸近する材積の上限値を表す。人工林の上層樹高とは異なり、天然林は林齢ゼロのとき材積もほぼゼロとみなせる (原点を通る) ため、 b は1に固定した。あてはめは統計解析ソフト R を用い、非線形最小二乗法 (Levenberg-Marquardt 法) によって行った。

林相区分なし (全樹種) の材積成長曲線について、まず初めに都道府県別にあてはめを行ったところ、得られた回帰係数 a, k が両方とも統計的に有意 (有意水準 5% 未満) だったのは北海道～福島、栃木、群馬、埼玉、長野、岐阜、愛知、鳥根、岡山、広島、愛媛、高知の 17 道県にとどまった。138 か所の新潟が有意にならない一方で、9 か所の埼玉は有意になるなど例外も多いが、概ねプロット数が 100 未満の都府県では統計的に有意な材積成長曲線が得られなかった。このため地域別にあてはめを行うこととし、広葉樹林に関する既存の林分密度管理図の地域区分を踏まえつつ、気候や潜在植生を反映すると考えられる林相割合 (図 6-1) に着目してより適切な地域区分を検討した。

常緑針葉樹の割合は北海道、中部地域、中国地域でやや大きく、九州では少ない傾向であった。落葉広葉樹林の割合は西に行くほど小さい傾向であった。常緑広葉樹林の割合は、千葉、東京、大阪が周囲の府県に比べて突出して大きかったが、そもそもプロット数が少ないこれらを例外とすると、静岡以西で概ね西に行くほど大きい傾向であった。ただし山口以外の中国 4 県は常緑広葉樹林の割合が小さかった。四国では落葉広葉樹林と常緑広葉樹林の割合が同等、九州では常緑広葉樹林の割合が落葉広葉樹林を上回っていた。

このように、各林相区分の割合は地域によって異なる傾向を示し、例えば前述の密度管理図において同地域に区分される関東・中部地方であっても常緑針葉樹林の割合に差が見られることから、当該密度管理図の地域区分の細分化や再編成を行い、統計的に有意となるような地域区分を検討したところ、林相区分なし (全樹種) の材積成長曲線については表 6-1 の罫線で区分した 8 地域別にあてはめを行うことが適当であった。広葉樹林も同様に 8 地域とした。針葉樹林について、北海道と東北は問題なかったが、関東以西の 6 地域は得られた回帰係数の片方または両方が統計的に有意でなかった (有意水準 5% 未満) ので、試行錯誤の結果、関東・中部と近畿以西の 2 地域に再区分した。

林相別、地域別のあてはめ結果を表 6-2 に示した。すべての地域において、得られた回帰係数 a, k は統計的に有意 (有意水準 5% 未満) となった。係数 a は前述のとおり材積の上限値を示すものであるが、広葉樹林については常緑樹林の割合が多い四国、九州地域で係数 a の値がやや大きくなった。広葉樹の 8 地域の係数 a が 210.2～289.9 であるのに対し、針葉樹 4 地域の係数 a は 311.3～428.1 であり、針葉樹のほうが大きかった。特に針葉樹の東北、

関東・中部の係数 a は 400 以上であった。標準誤差は林相、地域により 91.8~202.9 m³/ha と大きく、特に針葉樹林で標準誤差が大きかった。

図 6-2 に林相別、地域別の材積成長曲線をそれぞれの NFI プロットのデータとともに図示した。各図で「中」としているのが地位を区分しない場合の材積成長曲線である。さらに、材積成長曲線をガイドカーブとして、地位級を 3 段階としたときに、地位上と地位下の中心線に相当するカーブもあわせて図示した。図示されているのは地位を 3 段階とした場合であって、これらの曲線は無段階で描くことが可能である。特定の林分の現在の林齢と材積が分かっているとき、材積成長曲線を介して、この林分の n 年後の材積を次式で計算することができる。

$$x_{t+n} = V_{t+n} \frac{x_t}{V_t}$$

ここで V_t は材積成長曲線上の t 年の材積、 x_t は t 年生であることが分かっている特定の林分の材積である。この計算方法は、樹高成長曲線（ガイドカーブ）を各地位指数の地位指数曲線に展開する際に用いられる手法の 1 つ⁷で、林齢に対して樹高（ここでは材積）の変動係数（標準偏差／平均）が一定であることを仮定したものである。図 6-2 に見てとれるように、ここで使用したデータはばらつきが大きく、材積の変動係数と林齢との間に明瞭な傾向を見出すことが難しかったため、上記の簡易な計算式を示した。

なお、令和 5 年度事業においては、Mitscherich 式と並んで代表的なシグモイド型成長曲線である次の Chapman-Richards 式を用いた解析を行った。

$$V = A(1 - \exp(-kt))^{\frac{1}{1-m}}$$

本年度事業と同様に NFI データを用いたが、不確実性が高い林齢 t を説明変数にするのを避けるため、Chapman-Richards 式を微分形に変換し、第 3 期と第 4 期の間の年あたり材積成長量を目的変数、第 3 期のプロット材積 v を説明変数として 3 つのパラメータの推定を行った。Chapman-Richards 式の微分形は次のとおりである。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^{1-m}k}{1-m} v^m - \frac{k}{1-m} v$$

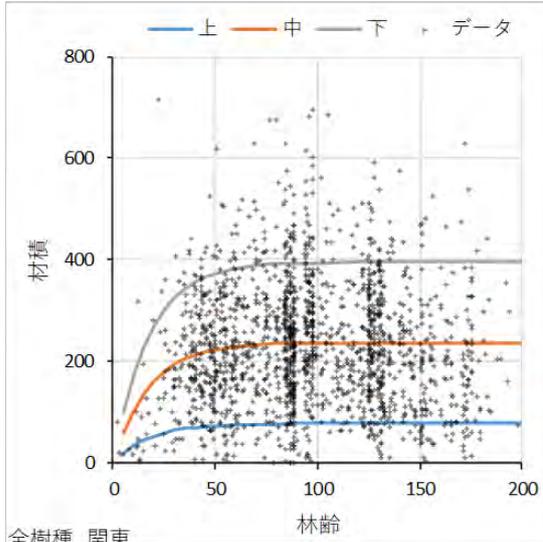
この際、全国一括などデータ数が十分である場合は 3 つのパラメータ A , m , k を推定することができたが、都道府県単位などデータ数が少ない場合はパラメータの推定ができない（非線形最小二乗法で収束解が得られない、または統計的に有意でない）場合が多かった。そのため、パラメータ m , k は全国共通の値で固定し、材積の上限を表すパラメータ A のみを地域別、都道府県別、林相別に推定して比較を行った。この結果、広葉樹林より針葉樹林

⁷ 西沢正久（1972）森林測定. 250p. 農林出版

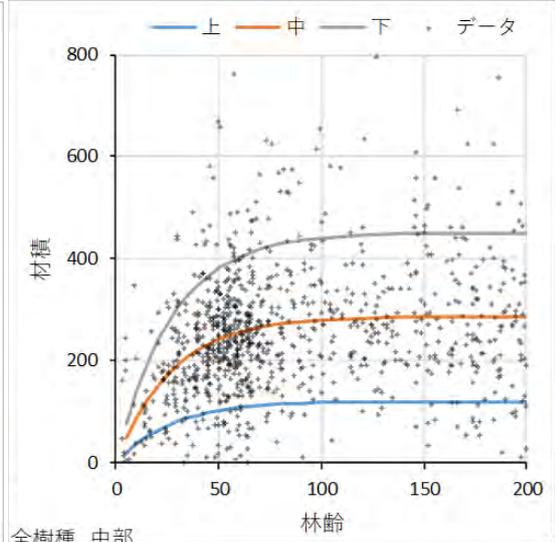
の A が大きい、寒冷地より温暖な地域の A が大きいといった、合理的な説明が可能な傾向を見出すことができた。しかしながらパラメータ m, k は全国共通の値で固定しており、材積の上限以外の地域性や林相による違いを反映できないことに課題があった。また、データの少ない一部の県で、得られた A が環境条件の類似した周囲の隣県とは大きく異なるケースが見られることも問題であった。

令和 5 年度事業の結果を踏まえて、本年度の検討過程では、パラメータ m, k を全国共通の値で固定せずに、地域区分を大括りにすることにより Chapman-Richards 式の微分形で地域別、林相別材積成長曲線を作成することを試みたが、結果的にパラメータの推定ができな（非線形最小二乗法で収束解が得られない、または統計的に有意でない）場合が多かった。このため、上記のとおり林齢を説明変数とする Mitscherich 式によって材積成長曲線を作成した。前述のとおり、天然林は林齢ゼロのとき材積もほぼゼロとみなせる（原点を通る）ためパラメータ b は 1 に固定したものの、材積の上限を表すパラメータ A だけでなく、若齢時の傾きに関するパラメータ k も可変であるため、パラメータ A だけが可変の Chapman-Richards 式よりも現実のデータを反映していると考えられる。森林簿に記載された天然林の林齢の不確実性が高いことは本報告書で繰り返し述べたとおりであるが、図 6-2 に示したように全体として、特に 50 年生程度までは林齢が高いほど材積が増加する傾向がうかがわれる。

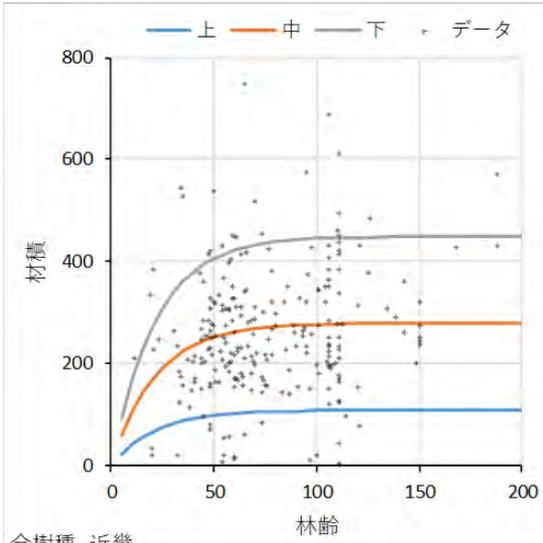
全樹種_北海道



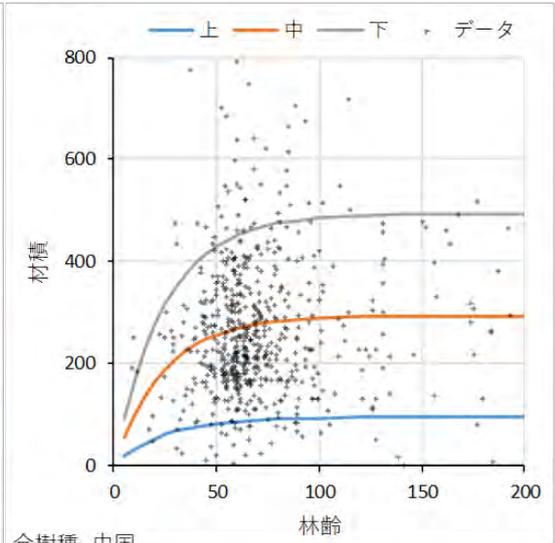
全樹種_東北



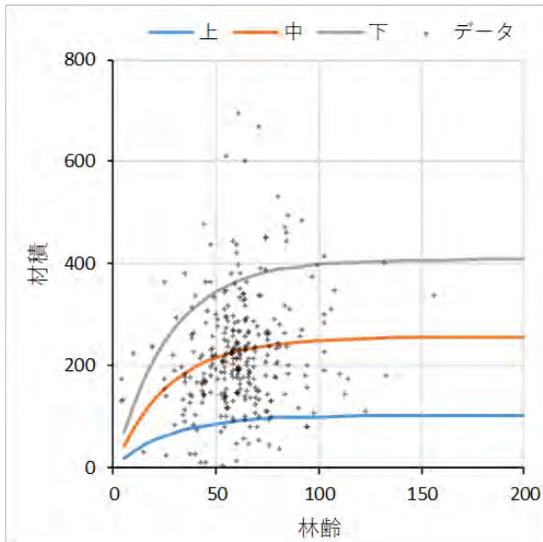
全樹種_関東



全樹種_中部



全樹種_近畿



全樹種_中国

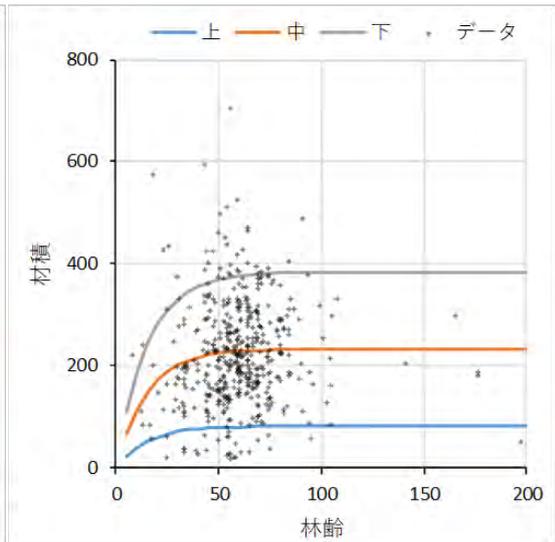
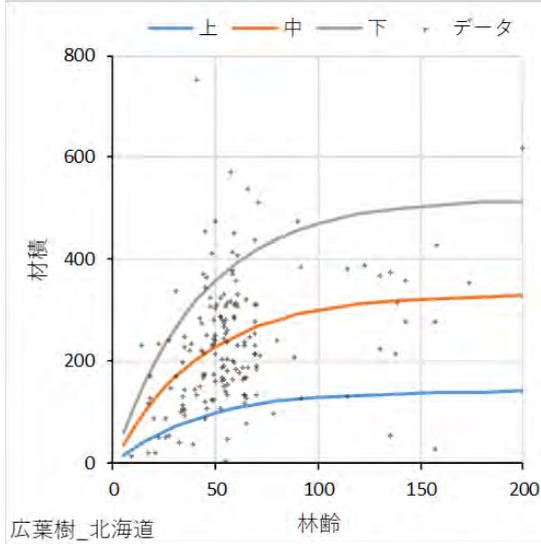
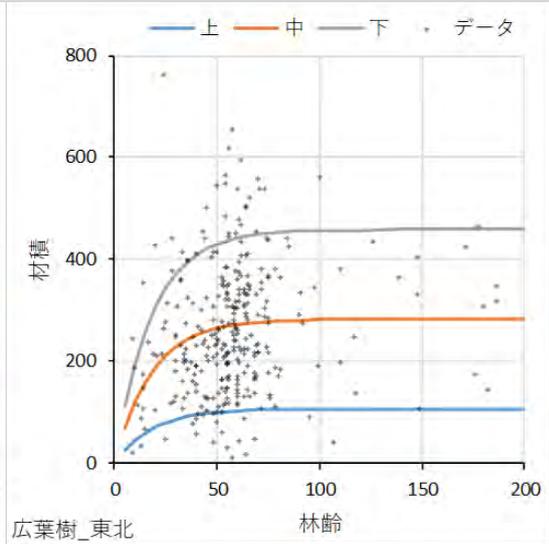


図 6-2. 天然林の林相別、地域別材積成長曲線（全樹種は林相区分なしを指す）

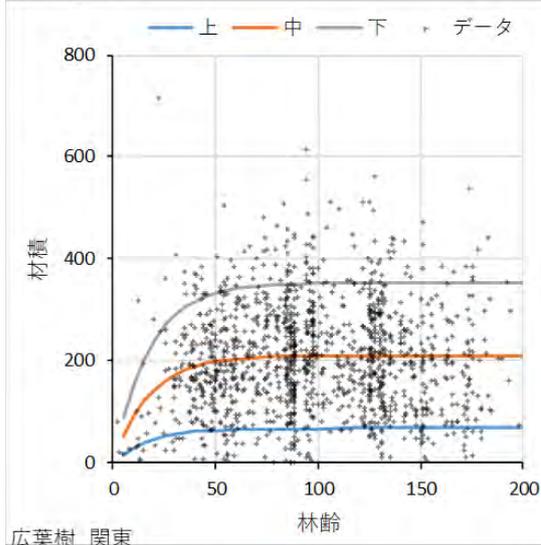
全樹種_四国



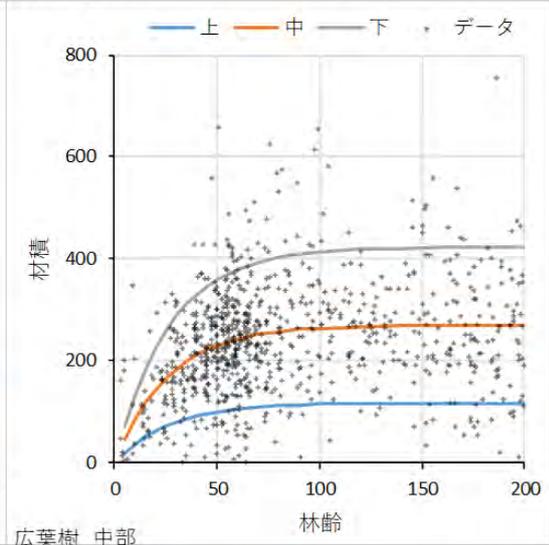
全樹種_九州



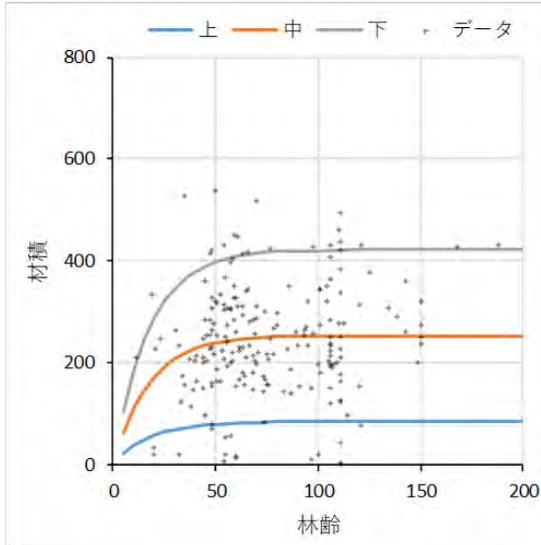
広葉樹_北海道



広葉樹_東北



広葉樹_関東



広葉樹_中部

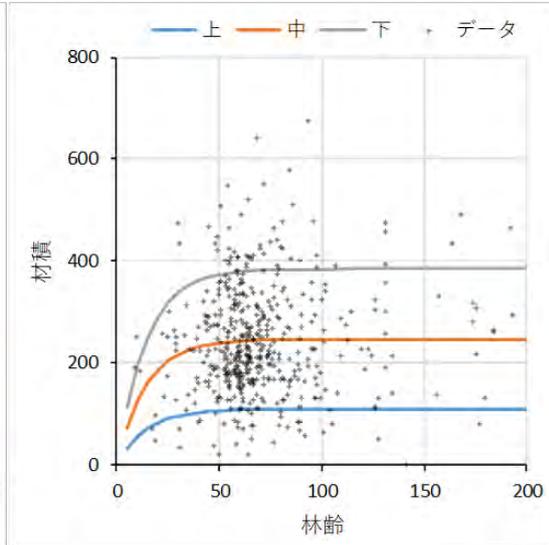


図 6-2. 天然林の林相別、地域別材積成長曲線 (続き)

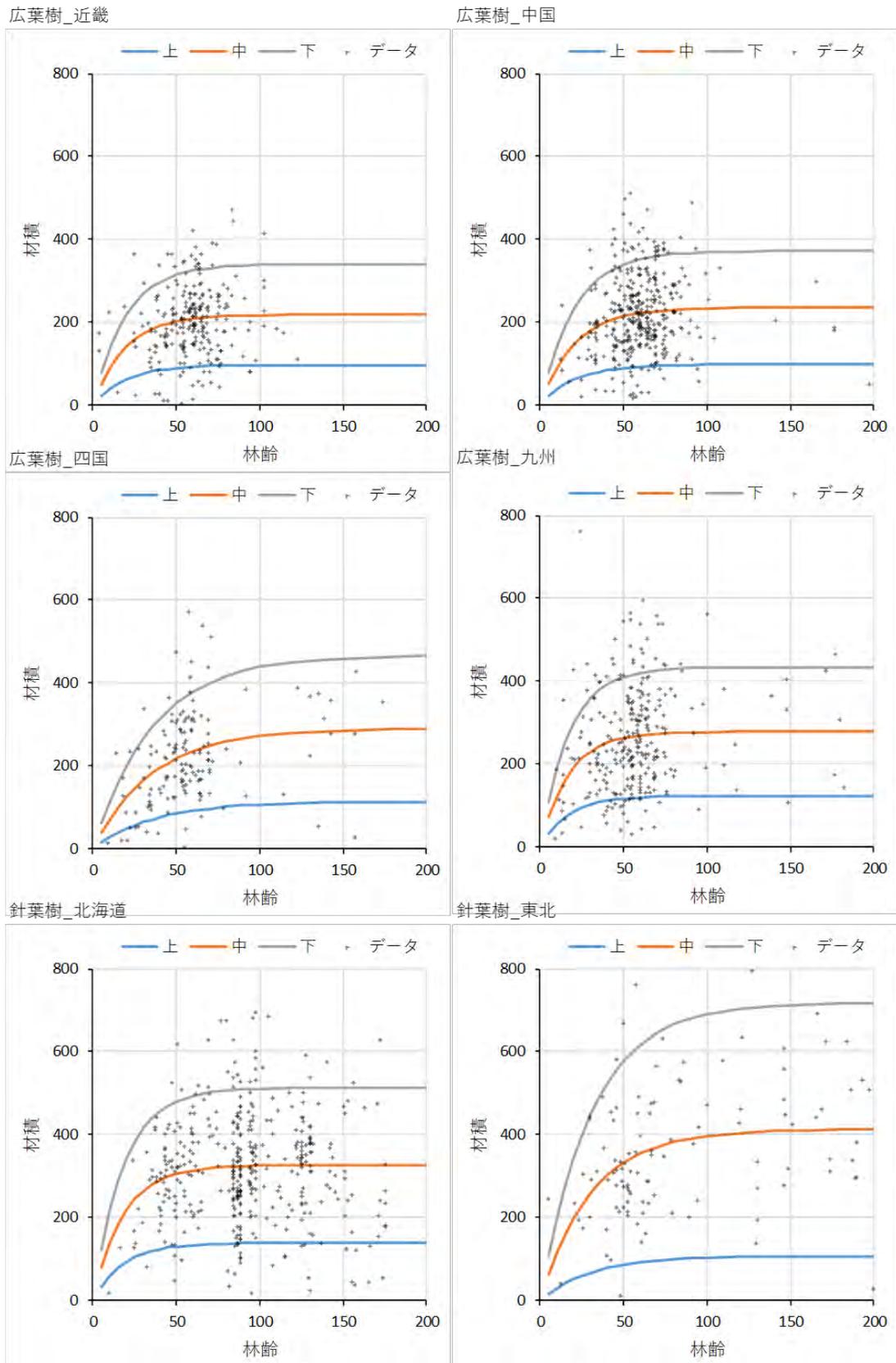
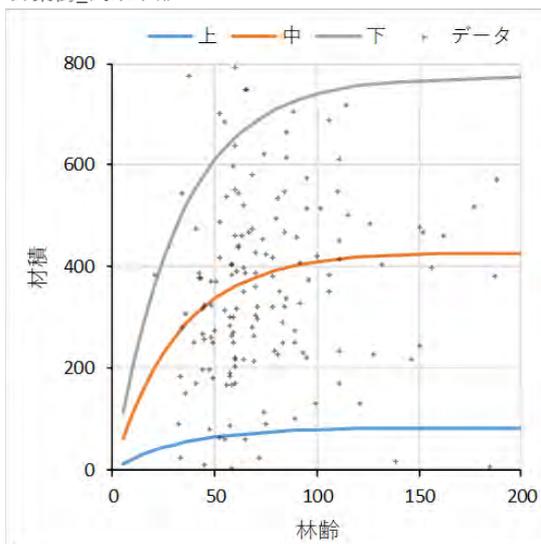


図 6-2. 天然林の林相別、地域別材積成長曲線 (続き)

針葉樹_関東中部



針葉樹_近畿以西

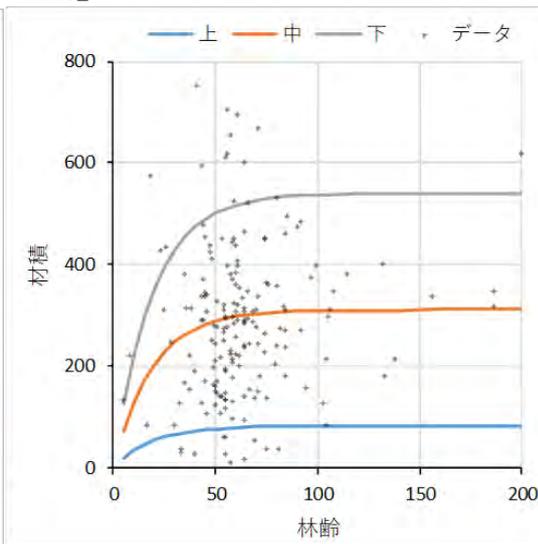


図 6-2. 天然林の林相別、地域別材積成長曲線（続き）

表 6-2. 材積成長曲線のあてはめ結果

林相	地域区分	プロット数	a	k	標準誤差 (m ³ /ha)
区分なし	北海道	1720	236.8 ***	0.05760 ***	119.4
	東北	971	286.0 ***	0.03748 ***	118.5
	関東	238	278.8 ***	0.04710 ***	131.2
	中部	635	294.1 ***	0.04149 ***	146.6
	近畿	306	256.0 ***	0.03729 ***	113.2
	中国	465	232.8 ***	0.06633 ***	106.1
	四国	169	330.7 ***	0.02371 ***	114.8
	九州	307	282.7 ***	0.05606 ***	125.8
広葉樹林	北海道	1323	210.2 ***	0.05750 ***	102.9
	東北	859	270.0 ***	0.03814 ***	104.4
	関東	203	253.9 ***	0.05780 **	109.3
	中部	499	247.5 ***	0.07033 ***	108.5
	近畿	242	218.5 ***	0.05186 **	93.8
	中国	369	235.4 ***	0.04871 ***	91.8
	四国	147	289.9 ***	0.02799 ***	100.2
	九州	275	278.4 ***	0.05900 ***	121.6
針葉樹林	北海道	397	325.8 ***	0.05547 ***	130.0
	東北	112	412.6 ***	0.03272 ***	162.6
	関東・中部	170	428.1 ***	0.03134 ***	202.9
	近畿以西	181	311.3 ***	0.05325 *	155.8

*: p<0.05 **: p<0.01 ***: p<0.001

6.2. 衛星データと航空レーザ計測による天然林の林相および材積の推定

本項では、従来のように収穫予想表を用いて林齢から林分蓄積を推定するのではなく、航空レーザ計測データを用いて、現在の林分蓄積を求める方法を検討した。

ただし、一般的に行政が所持する航空レーザ計測データはレーザ計測点の xyz の計測値のみであり、このデータから針葉樹・広葉樹や樹種などの森林タイプを求めるのは、極めて困難である。このために、この節では課題を2つに分け、

- 1) 衛星データを用いた森林の区分の分析 (6.2.1 節)
- 2) 航空レーザによる広葉樹の林分蓄積の地図化 (6.2.2 節)

として、常緑広葉樹林を主とする四国地域と落葉広葉樹林を主とする青森県を対象として分析した。

・常緑広葉樹林の分析対象地域の検討

広域の広葉樹資源量を把握するため航空レーザ計測データを用いた。航空レーザ計測データによる森林資源量の推定式を作成するためには、当該航空レーザ計測地域における 20～30 点以上の地上プロット調査データが併せて必要である。広域の地上プロット調査を実行するのは、大変な労力を要するために、既存の計測資料として、NFI のデータを用いた。

航空レーザ計測データによる森林資源量の把握分析のために、航空レーザ計測データと NFI データを用いる際の条件を検討する。4km メッシュ毎に設定された NFI の調査点の空間的な密度を踏まえ、森林資源量の推定式の作成に当たり十分な点数を確保しようとする、航空レーザ計測範囲は県または複数県のスケールとなる。一方、航空レーザ計測データには砂防などの精密地形計測を目的としたものと、森林資源の把握を目的としたものがある。両者とも航空レーザの計測範囲は、数市町村程度のスケールで計測される事例が多い。前者でも大規模災害の場合には県単位以上で計測される例があり、後者でも 1 県の民有林が 1 年で計測された事例もある。まとめると、航空レーザデータの計測の空間的広がり、NFI データの分布を十分に検討して、特に NFI データ数が十分に確保できる箇所を選択する必要がある。

常緑広葉樹の空間分布を把握するために、第 4 期(2014-2018)の NFI データを集計し、針葉樹、常緑広葉樹又は落葉広葉樹、いずれかの胸高断面積合計がプロット内で 90%以上を占めるプロットを選択し、四国地域で地図化した(図 6-3)。常緑広葉樹は主に太平洋側の海沿いに分布しており、常緑広葉樹の十分なデータ数が期待できる高知県を対象とした。

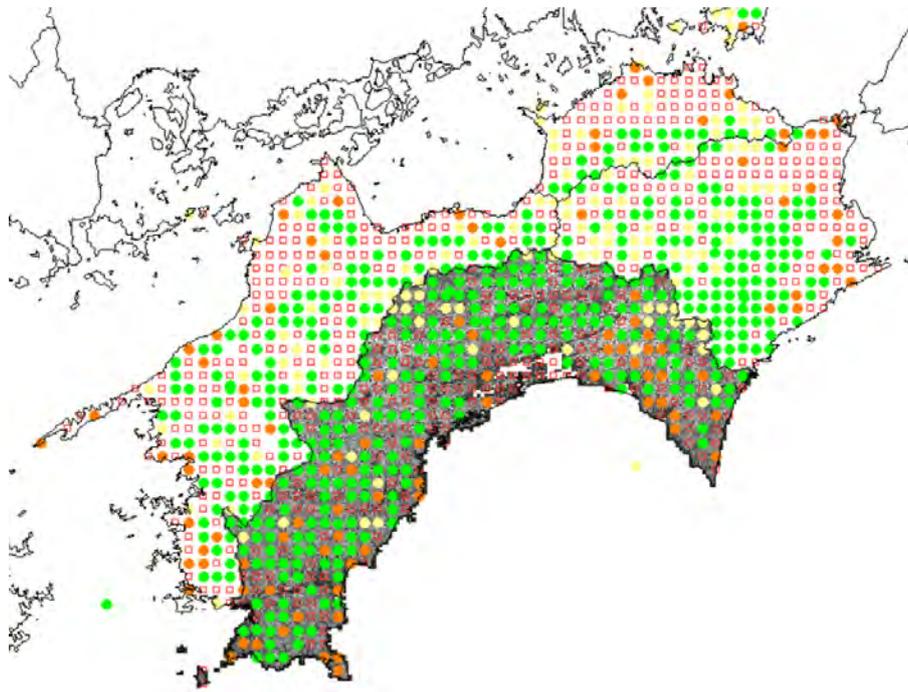


図 6-3 森林生態系多様性基礎調査(NFI)による四国の林相分布地図
 (●針葉樹、●落葉広葉樹、●常緑広葉樹、□その他・混交)

6.2.1. 時系列衛星データを利用した林相区分図の作成

林相区分図を作成する際に対象地が広範囲に及ぶ場合、衛星データ（主として光学センサ）を利用することが多い。ただし、光学センサは雲の影響を受けるため、解析に適した雲量の少ないデータが取得される確率が低く、ひとつの観測データに基づいて全域を隈なく解析することが難しかった。ところが近年、様々な時系列解析アルゴリズムが考案され、大容量の衛星データを時系列的に解析する環境が整ってきたことで、雲や雲の影、積雪・冠雪の影響がある画素を除外して地表面の反射率を合成処理すること（雲なし合成処理）が可能となってきた。そこで本事業では、雲なし合成画像を基本として対象地全体を解析することを検討した。解析には Landsat 衛星のデータを利用した。

時系列解析による雲なし合成処理には、令和5年度事業において青森県を解析した際と同様に、COLD（COntinuous monitoring of Land Disturbance）アルゴリズム⁸を用いた。COLDアルゴリズムは土地攪乱モニタリングのためのアルゴリズムであるが、地表面反射率を時間（日単位）の関数としてモデリングすることから、得られたパラメータを利用することで任意の時点の地表面反射率を推定することができる。このアルゴリズムでは、各画素につい

⁸ Zhu *et al.* (2019) Continuous monitoring of land disturbance based on Landsat time series. *Remote Sensing of Environment* 238, 11116.

て、時系列のある時点 x におけるバンド i の地表面反射率の予測値 $\hat{\rho}_{i,x}$ を下記の harmonic model で表現している：

$$\hat{\rho}_{i,x} = a_{0,i} + \sum_{k=1}^3 \left\{ a_{k,i} \cos\left(\frac{2\pi}{T}x\right) + b_{k,i} \sin\left(\frac{2\pi}{T}x\right) \right\} + c_{0,i}x$$

ここで、 T は 365.25、 a 、 b 、 c はデータから推定するパラメータであり、 k は clear observation（雲や雪等の影響がない観測データ）の数によって決まるパラメータである。

本事業では、令和 5 年度事業と解析の条件を揃え、2007 年の年始から 2015 年の年末までの Landsat5 号、7 号および 8 号のデータをパラメータ推定に利用した。パラメータを時系列衛星データから推定した後、着葉期と落葉期の地表面反射率を推定し、合成画像を生成した。林相区分のための訓練・検証用のデータを一定数確保する必要があることから、時系列衛星データの解析はレーザ計測データによる資源量推定の対象地である高知県だけでなく、四国および中国地域にまたがる広範囲を対象とした（図 6-4）。

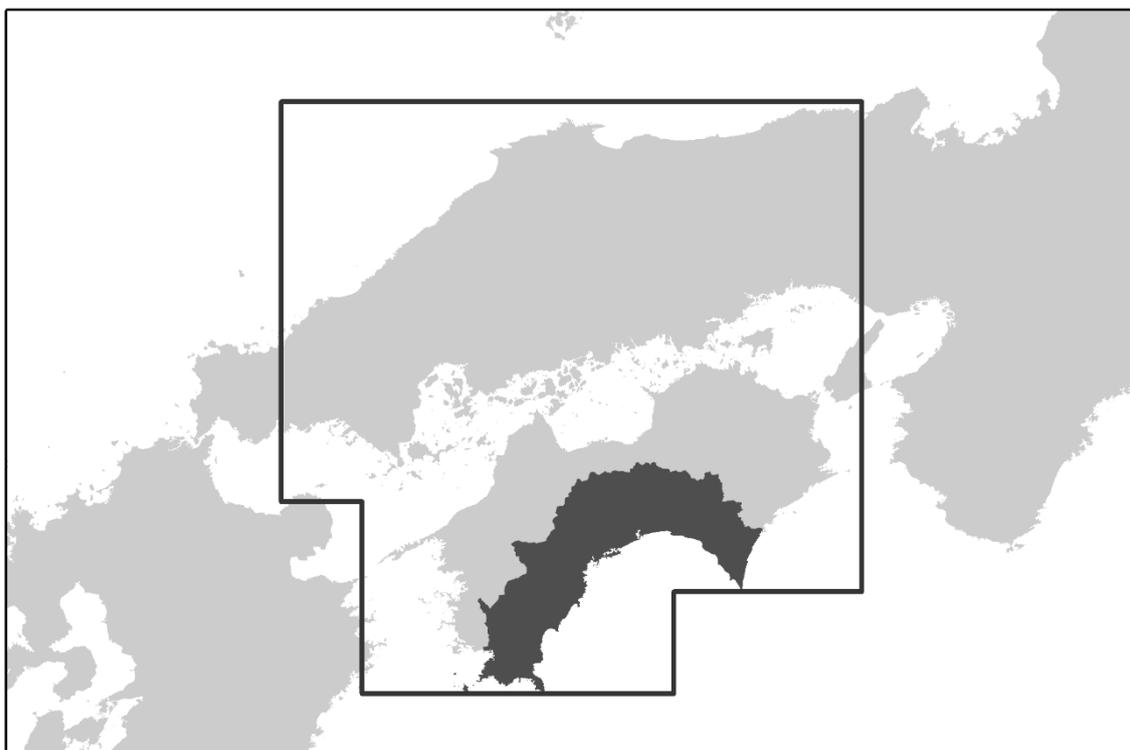


図 6-4 林相区分図作成の対象地（高知県）と時系列モデルの解析対象範囲（黒枠）

時系列衛星データの解析で推定したパラメータを用いて、着葉期画像として2015年6月1日の、落葉期画像として2015年4月1日⁹の地表面反射率を推定して画像を合成した。その結果、どちらの時期でも雲のない推定反射率画像を合成することができた(図6-5)。また、令和5年度事業の青森県の事例とは異なり、対象地では積雪の影響が小さいため、落葉期画像の合成結果も良好で、カラー合成した際に不自然な発色になる画素はほとんどなかった。着葉期と落葉期の画像を比較すると、落葉期画像は落葉広葉樹が広範囲に高標高の山岳域が茶色で表示されており、地表面反射率の推定結果が妥当であると判断できた。

⁹ 高知県は気候が温暖なため、林相区分に利用する落葉期画像としてはもう少し早い時期が適するが、太陽高度が低く地形効果補正が難しいことから4月1日とした。

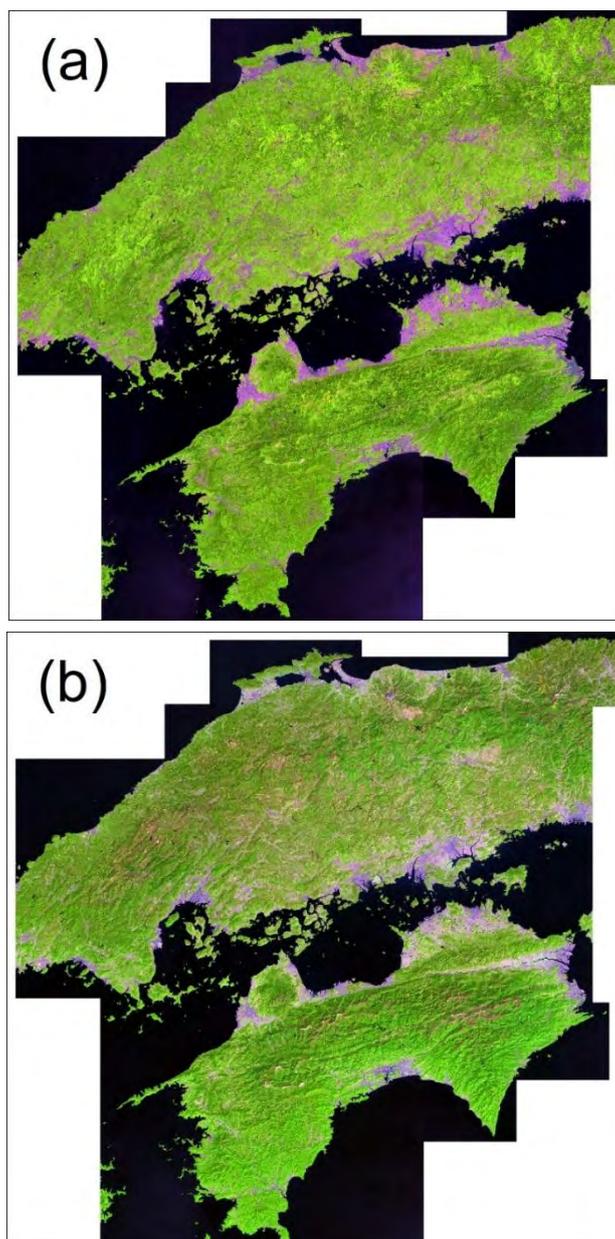


図 6-5 時系列解析によって処理した着葉期(a)と落葉期(b)の雲なし合成画像
(R に短波長赤外、G に近赤外、B に赤波長帯のバンドを割り当てカラー合成)

地形効果補正

令和5年度事業と同様に、推定した地表面反射率の合成画像に対して、地形（斜面方位と傾斜）の影響による光量の差異を標準化するための地形効果補正を行った。地形データには、JAXA が配布している ALOS 全球数値地表モデル（AW3D30）を利用した。なお、事前に地形データと合成画像の位置ズレを小さくするための精密幾何補正を実施済みである。地形効果補正はミンナート法によって行い、補正のための係数（Minnaert 定数）を得るための回

帰分析には、先行研究¹⁰を参考にして、斜面方位角と傾斜角による層別ランダムサンプリングによって得られたデータを利用した。

着葉期画像に対して地形効果補正を行った結果を図 6-6 に示す。補正前の画像も 6 月 1 日の反射率を推定したものであり、太陽高度が高いことから地形の影響は比較的小さいが、補正後の画像は地形による陰影の影響が緩和され、濃緑色で発色された針葉樹林と黄緑色の広葉樹林のエリアが明瞭となった。

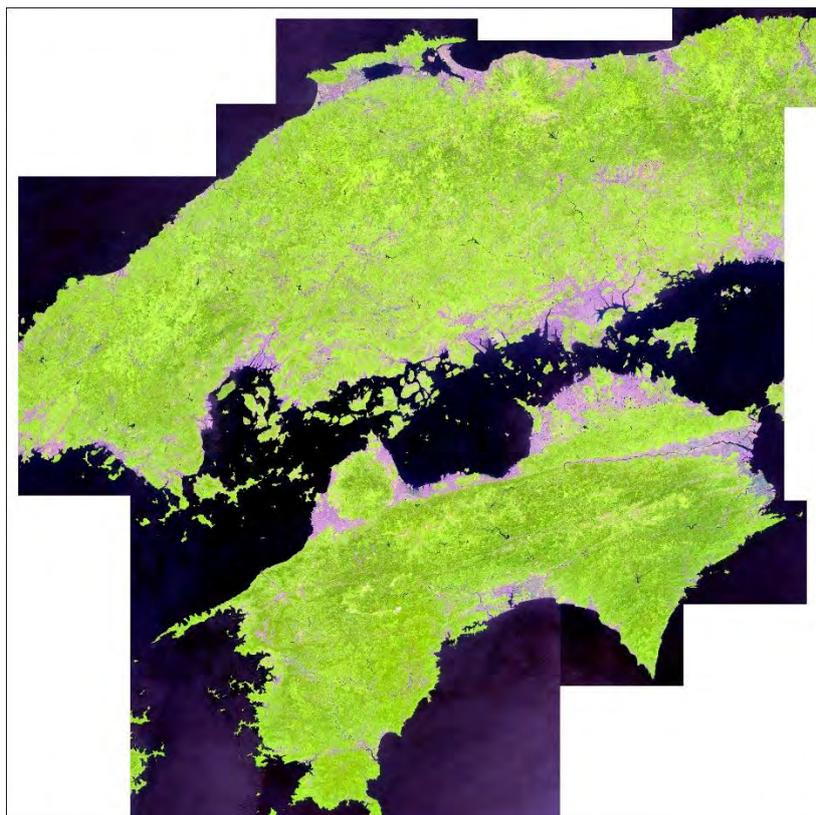


図 6-6 地形効果補正後の雲なし合成画像（着葉期のみ図示）

機械学習モデルを用いた林相区分

林相区分を行うための方法として、ランダムフォレスト¹¹を利用した。ランダムフォレストは分類モデルや回帰モデルの構築に利用される機械学習モデルのひとつで、衛星データの解析においてもよく利用される手法である。分類モデルの訓練および検証用のデータには NFI のデータを利用した。針葉樹と広葉樹が混交しているプロットや林分の境界に設定

¹⁰ Murakami, T. (2007) Comparison of Minnaert constants based on multi-temporal SPOT/HRV data for three forest types. *Bulletin of the Faculty of Agriculture Niigata University* 60: 83-90.

¹¹ Breiman, L. (2001) Random Forests. *Machine Learning* 45 (1): 5-32.

されたプロットは少しの位置ズレで優占森林タイプ（針葉樹林／広葉樹林）が変わってしまう可能性がある。そこで、胸高断面積合計を基準に優占森林タイプ（針葉樹林／広葉樹林）を決め、いずれかの割合が90%以上となるプロットのデータのみを解析に利用した。また、プロットの計画位置座標と実測位置座標の差が大きなプロット（>50m）も解析から除外した。なお、森林域の抽出には、国土数値情報の森林地域データを利用し、対象地を切り出したうえで林相区分図を作成した。

本解析に先立ち、まず着葉期画像に加えて落葉期画像の反射率を利用することで広葉樹林を常緑タイプと落葉タイプに区分可能かどうかを検討した。着葉期画像と落葉期画像の各バンドの反射率を説明変数として林相区分を試みたところ、落葉広葉樹は概ね良好に区分されるものの、常緑広葉樹と常緑針葉樹の間での誤分類が多く、常緑広葉樹はそのほとんどが常緑針葉樹に誤分類されることが判明した。そのため、広葉樹林について、常緑広葉樹と落葉広葉樹の2クラスを設定することが難しく、1つのクラスとして扱うこととした。また、広葉樹を常緑性と落葉性に区分しないため、落葉期画像を使う効果があまりないと判断し、着葉期画像のみを使って林相区分を行う方針とした。

最終的にランダムフォレストによって分類した際の精度評価結果を表6-3に、作成した林相区分図を図6-7に示す。作成した林相区分図は総合精度（正答率）で85.8%であった。精度検証が混交度の低い地上データを使って行われたこと、常緑広葉樹林のエリアが常緑針葉樹林に誤分類されていて針葉樹林の面積が多くなっていることなどについての留意が必要であるが、作成した林相区分図は全体としては概ね良好な精度を有していると考えられた。

表 6-3 林相区分図の判別効率表

		NFIデータに基づくクラス			作成者精度 (%)	利用者精度 (%)	
		針葉樹林	広葉樹林	合計			
林相区分図のクラス	針葉樹林	201	29	230	90.5	87.4	
	広葉樹林	21	101	122	77.7	82.8	
	合計	222	130	352			
		総合精度 (%): 85.8					

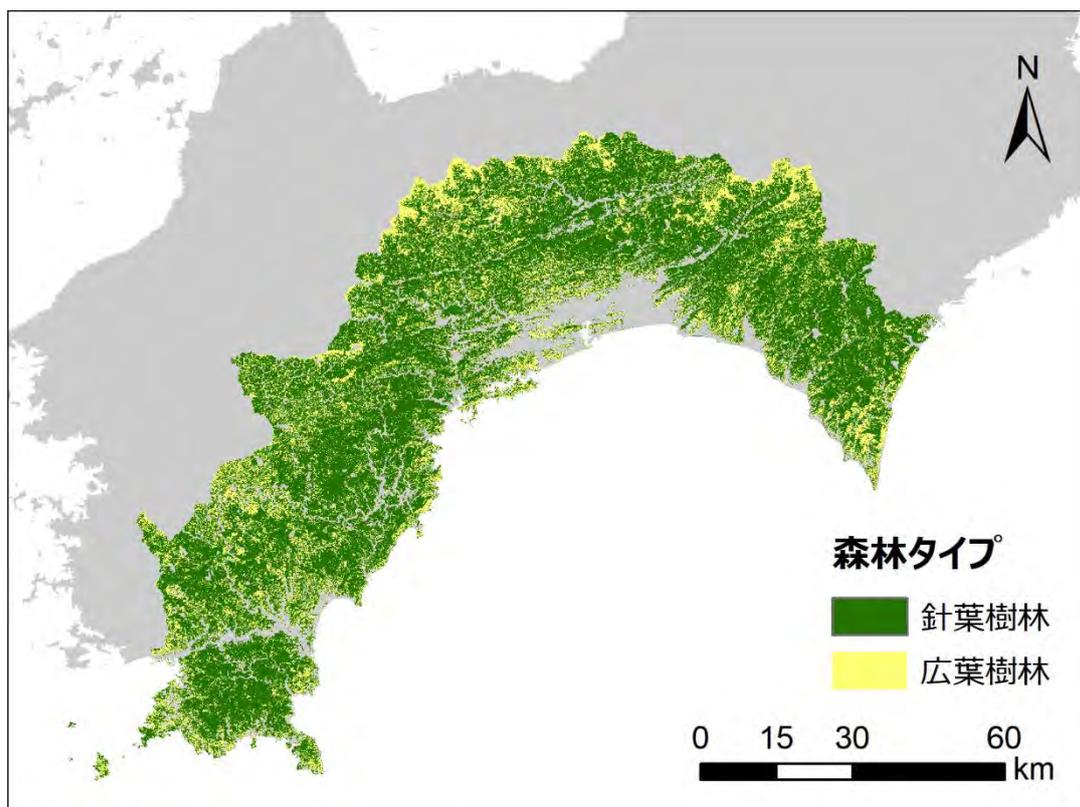


図 6-7 ランダムフォレストによって解析した林相区分図

6.2.2. 航空レーザ計測データによる広葉樹の林分蓄積量の地図化

1) はじめに

令和5年度事業では、青森県の落葉広葉樹林を対象として、航空レーザ計測による林分蓄積量の推定手法を検討した。本年度は落葉広葉樹林に加えて、常緑広葉樹林を対象として、航空レーザ計測データによる林分蓄積量の推定手法を検討した。

2) 方法

2-1) 高知県の航空レーザ計測データ

高知県の航空レーザ計測データとしては、「平成30年度森林域における航空レーザ計測業務(その2)」を用いた。このデータは、高知県と愛媛県の全県について、2018年に計測された広域のデータである。この航空レーザデータは、防災のための地形計測として行われており、地盤高(Digital Terrain Model, DTM)とレーザ点群データが計測・作成されている。

点群の処理には、フリーソフトの LidR を用いた。林冠高(Digital Height Model, DHM)は、点群データから、地盤高 DTM との差分として計算した。

$$\text{数式 1} \quad \text{林冠高 DHM} = \text{点群データ}(z) - \text{地盤高 DTM}$$

NFI の計測中心位置から計測範囲である半径 17.84 m の円形プロットのポリゴンを生成してこのポリゴン毎に林冠高 DHM を集計し、平均林冠高(Mean Canopy Height, MCH)を航空レーザー指数として算出した。また、NFI の第 3 期と第 4 期の広葉樹の林分蓄積 V を目的変数、MCH を説明変数として、回帰モデルを作成した。

MCH から V を推定するモデル式の候補として、比の式(数式 2¹²)、べき乗式(数式 3¹³)、線形式(数式 4¹⁴)の 3 つが挙げられる。

$$\text{数式 2} \quad V = a \cdot \text{MCH}$$

$$\text{数式 3} \quad V = a \cdot \text{MCH}^b$$

$$\text{数式 4} \quad V = a \cdot \text{MCH} + b$$

式の当てはまりの良さを精度 RMSE で評価すると、説明変数が多いために数式 3 と数式 4 は、数式 2 よりも良い場合が多い。また、植栽直後のように MCH が 0 に近い林は V も 0 に近く、原点を通るという点では数式 2 と数式 3 が優れている。数式 4 は、様々な統計分析とモデル化が容易である点で、数式 2 と数式 3 よりも優れている。ただし、数式 4 は V がマイナスになる場合があるため、地図化処理において注意が必要である。本論では、統計分析が容易であり、あてはめの結果として得られた係数の解釈も容易な数式 4 を用いて分析することとした。

・航空レーザーによる第 3 期と第 4 期の林分蓄積量の分析

地上プロット調査データと航空レーザー計測データの関係から林分蓄積推定式を作成する際に、地上調査年(t_2)と航空レーザー計測年(t_1)は同期観測で一致させるのが原則であるが(数式 5)、 t_1 と t_2 が数年異なる場合がある。間伐などの大きな変化が無い場合に、 t_1 と t_2 が数年異なっても、収穫予想表などの成長モデルを利用して地上調査年(t_2)の林分蓄積量 $V(t_2)$ に成

¹² 都築勇人, 日下部朝子, 末田達彦 (2006) 航空機レーザー測距法によるカナダ西部亜寒帯林の広域森林蓄積量推定. 日本林学会誌, 88(2): 103-113.

¹³ Asner, P. G., Mascaro, J., Muller-Landau, C. H., Vieilledent, G., Vaudry, R., Rasamoelina, M., Hall, S. J., van Breugel, M. (2012) A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping, *Oecologia* 168:1147–1160.

¹⁴ 小谷英司, 粟屋善雄(2013a) 低密度 LiDAR データによる人工針葉樹林の林分パラメータの推定、写真測量とリモートセンシング、52(2):44-55.

長量分 ΔV を加味することで航空レーザ計測年(t_1)の林分蓄積量 $V(t_1)$ を算出する方法がある(数式 6, 数式 7¹⁴)。あるいは、地上調査年(t_2)の林分蓄積量 $V(t_2)$ を基準にして、航空レーザ計測年(t_1)の平均林冠高 $MCH(t_1)$ を用いて林分蓄積量 $V(t_2)$ の推定モデルを作成しても、推定モデル内に成長量分が含まれると考えることができる(数式 8~数式 10)。本事業では数式 8~数式 10 の方法を採用した。

①同期観測の場合

$$\text{数式 5 } V(t_1) = a \cdot MCH(t_1) + b$$

②航空レーザ計測年 t_1 と地上調査年 t_2 が一致しない場合で、航空レーザ計測年 t_1 に合わせて地上調査 $V(t_2)$ を補正する場合

$$\text{数式 6 } V(t_1) = V(t_2) + \Delta V$$

$$\text{数式 7 } V(t_1) = a \cdot MCH(t_1) + b$$

③航空レーザ計測年 t_1 と地上調査年 t_2 が一致しない場合で、航空レーザ計測年 t_1 のデータから推定した地上調査 $V(t_2)$ の推定モデル式に成長量 ΔV が加味されると考える場合¹⁵

$$\text{数式 8 } V(t_2) = a \cdot MCH(t_1) + b - \Delta V \quad (\text{数式 5 に数式 6 を代入})$$

$$\text{数式 9 } b' = b - \Delta V$$

$$\text{数式 10 } V(t_2) = a \cdot MCH(t_1) + b'$$

本事業の場合、NFI の第 3 期(2009-2013)と第 4 期(2014-2018)の林分蓄積を、2018 年の 1 時期の航空レーザ計測データから推定する。第 3 期と第 4 期の異なる時点の地上調査データを使用することで、各期における林分蓄積推定式を作成し、それぞれの時期の林分蓄積を推定できる。

・落葉広葉樹林における落葉期の航空レーザ計測データの分析

NFI による林相区分図(図 6-3)に示したとおり、高知県には常緑広葉樹林だけでなく落葉広葉樹林が混在している。

¹⁵ Kodani, E., Nakamura, K., Sakamoto, T., Nishizono, T., Kimura, K. (2013b) Estimating forest stand variables in coastal area of Aomori Prefecture by low density LiDAR, Proceeding of International Symposium of Remote Sensing (DVD): 1-4

スギやヒノキなどの常緑針葉樹の林冠高は1年を通して計測値が安定しているのに対して、落葉広葉樹林では葉の茂る夏季に比べて葉が落ちる秋～冬期は、レーザが林冠を透過するために林冠高が低くなる。秋期は航空レーザ計測による林冠高がそれぞれの場所での落葉の進行度合いで変化し、林冠高を用いた森林資源分析を進めるうえでの大きな誤差要因になる。

令和5年度事業で青森県の落葉広葉樹林を対象とした分析では、航空レーザ計測データは、6～9月頃の葉の茂る夏季のデータを選択し、11月の晩秋で落葉している地域は除外した。また県中央部の八甲田山系など標高の高い地域は、6月頃に航空レーザ計測データが計測されたが、葉が開いていないために想定よりも林冠高が低く、正確な林冠高を計測できていなかったと判定し、やはり分析から除外した。本年度事業で利用した高知県の航空レーザ計測データは、正確な計測日や計測期間を示す地図が報告書に掲載されていない。ただし、報告書には計測時期が9月7日～12月31日であることだけは記載されていることから、通常は積雪期に計測を行わないことを考えあわせると、本事業で使用するレーザデータの計測時期は9月上旬から11月頃と推定される。この時期は落葉広葉樹林の落葉が進行する時期であり、葉の有無が航空レーザ計測による林冠高に影響を与えることが懸念される。このため、NFIデータから算出したVとMCHの関係に対して、落葉広葉樹林における葉の有無が与えた影響を分析することとした。落葉広葉樹が胸高断面積合計の90%以上を占めるNFIのプロットを対象に、航空レーザ計測と同時に撮影されたカラーオルソフォトを用いて、航空レーザ計測時における落葉広葉樹林の葉の有無を判定した。さらにその周囲を判読して落葉した箇所の概略的な地図を作成した。

・青森県での航空レーザ計測データによるNFI第3期の林分蓄積推定

青森県は、2021-2022年頃に砂防事業と森林資源解析事業により、航空レーザ計測を11箇所で実施しており、これらのデータを分析に用いた。林分蓄積推定式は、令和5年度事業で得られたNFI第4期の結果に加えて、NFI第3期の林分蓄積の推定式を作成した。

2-2) 森林GISとの連携

青森県の森林GISに対して、航空レーザ計測データを用いて作成したNFI第4期の落葉広葉樹林の林分蓄積地図を反映し、データの連携方法について検討した。具体的に、青森県の森林GISでは、所有者毎に小班を設定し、小班の中で森林タイプが異なる場合に施業班を設定しており、森林資源情報は施業班単位で整備されている。航空レーザ計測データにより作成した落葉広葉樹林の林分蓄積地図を用いて、施業班のポリゴン単位で林分蓄積を集計し、属性情報として付加した。

3) 結果と考察

3-1) 高知県の航空レーザ計測データ

- ・ 落葉広葉樹林で葉の有無が航空レーザ分析に与える影響

落葉広葉樹林における葉の有無が航空レーザ計測データによる林分蓄積推定に与える影響を分析した。落葉広葉樹が胸高断面積合計の 90%以上を占める NFI プロットについて、オルソフォト判読による航空レーザ計測時の葉の有無により分けて、航空レーザによる平均林冠高と NFI データから算出した林分蓄積の散布図を示す (図 6-8)。

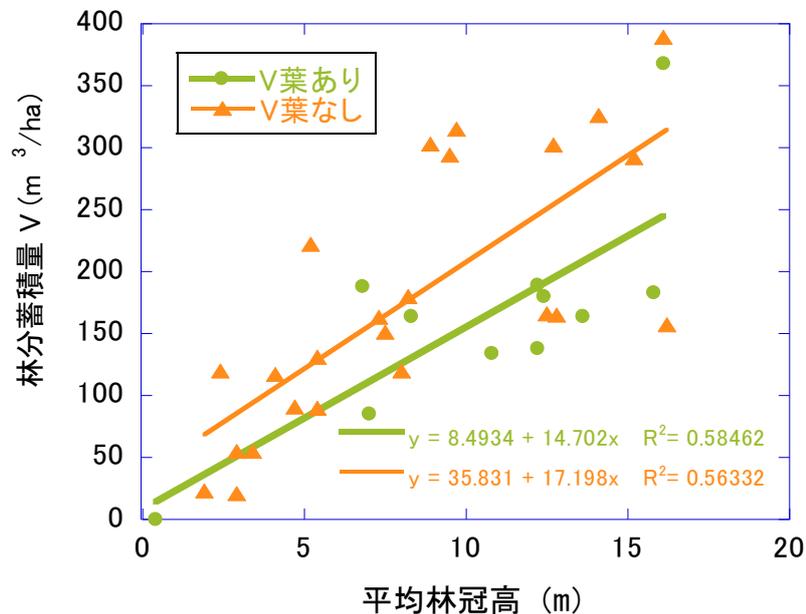


図 6-8 落葉広葉樹林における葉の有無ごとの航空レーザ平均林冠高と林分蓄積の関係

葉が無い場合の回帰直線は、葉がある場合の回帰直線より Y 軸で上に位置した。平均林冠高 MCH と林分蓄積(V) は比例関係となる(数式 11)。葉が無い場合に、林冠高が低下するが、林分の大きさに関わらず全ての林分で同程度(Δ MCH)低下する場合(数式 12)、林分の大きさに比例して $(1+\Delta$ MCH)低下する場合(数式 13)、に分けられる。 Δ MCH は、数式 12 では切片に、数式 13 では切片と傾きに影響を与える。図 6-8 の葉の有無による 2 つの回帰直線の傾向から、傾きは一定で、数式 13 より数式 12 の方が現実に近いと考える。

$$\text{数式 11 } V = a \cdot \text{MCH} + b$$

$$\text{数式 12 } V = a \cdot (\text{MCH} + \Delta\text{MCH}) + b$$

$$\text{数式 13 } V = a \cdot \text{MCH} \cdot (1 + \Delta\text{MCH}) + b$$

(数式 11 に比べて、数式 12 と数式 13 では葉が落ちるために MCH は低下しているので、 ΔMCH で補って、数式 11 と同じ a, b となるように ΔMCH を調整する)

落葉広葉樹林では、葉の有無によって、平均林冠高と林分蓄積の関係が異なる(図 6-8; 数式 12 と数式 13)。このために、航空レーザ計測データから林分蓄積などの森林資源量を求めるには、葉の落ちた落葉広葉樹林は除外して、分析して地図化の方が良いと考える。

また、航空レーザ計測時の落葉広葉樹の葉の有無の判読と並行して、概略的に、葉の落ちた地域を地図化して、葉のある地域のみを分析対象とした。

・秋期の落葉広葉樹林の取扱への考察

落葉広葉樹林で葉が落ちた際に、仮に、全ての林分で航空レーザ林冠高が 0 m になる、つまり航空レーザ林冠高データは森林のサイズに関して一切の情報を持たない場合には、V の大きさに対して全く反応しない xy 平面上で $x=0$ の直線となる。

しかし、実際には葉が落ちても、数式 12 と図 6-8 のように林冠高の平均 (MCH) と林分蓄積 (V) は比例関係にあり、つまり航空レーザ林冠高データは森林の大きさに関して情報を持っている。秋期の落葉広葉樹林の分析上の問題点は、高知県全体の航空レーザ計測データの中で、葉が落ちた林分と葉がある林分が混在し、航空レーザデータの林冠高の平均 MCH データからでは、それぞれどこに存在するか分からないことである。

航空レーザ計測の報告書に十分な記載が無いために、具体的にどこを何日に撮影したかは不明である。しかし、高知県のオルソフォト全体を観察すると、おおよそ長方形のブロック毎に明るさや色が異なっている点から、航空レーザはブロック毎に、異なる日に、おそらく複数の機材で計測されたと推定される。また、オルソフォトの落葉から判断して、秋の 10 月後半-11 月前半に計測されたと推定される。落葉期に計測日が異なるために、計測ブロック毎に落葉の進行が異なる。そして、同じ計測ブロックでも、標高の高い箇所では葉が落ちており、標高が低い箇所では葉が落ちていない事例もあった。

航空レーザ計測に付随して撮影されたオルソフォトを使用して、NFI の落葉広葉樹林のプロットを目視判読することで、葉の有無を確認できた。しかし、高知県全体において広葉樹の林分蓄積量を地図化するために落葉樹林の葉の有無を小班単位のスケーラで目視判読するのは、作業量が膨大であり、現実的ではない。このために本事業では、撮影ブロック単位のスケーラで大まかに落葉分布の目視判読を行い概略的な地図を作成した。

さらに、小班単位のスケーラで検討する場合には、高知県全体のオルソフォトから落葉広葉樹林の葉の有無を自動分類する手法を開発するか、航空レーザの林冠高データを分析して、葉のある・無い林分を抽出するという技術開発が挙げられる。しかし、前例も無く、開発に時間を要すると考える。

・高知県のNFI第4期と第3期の林分蓄積の推定式

人工衛星画像による森林タイプ区分では、針葉樹と広葉樹に2分しており、広葉樹では常緑広葉樹と落葉広葉樹を区別していない。仮に、航空レーザ分析で常緑と落葉の広葉樹を分けて推定式を作成しても、常緑と落葉を区分した地図が無い場合に、地図化できない。まとめると、航空レーザ計測データにより推定する林分蓄積の地図化に当たり、本事業では広葉樹という区分のみで実施する必要がある。

このために、プロット内で常緑広葉樹若しくは落葉広葉樹の断面積合計が90%以上となる第4期NFIデータから算出した林分蓄積V4と、航空レーザによる平均林冠高(落葉広葉樹については葉のある時期に計測したデータのみを対象)MCHとで回帰分析を行い、林分蓄積推定式を作成した(数式14; 図6-9左)。

$$\text{数式 14 } V_4 = 22.0 \cdot \text{MCH} - 23.3 \quad (R^2=0.483, \text{RMSE}=88.4)$$

散布図から航空レーザによる林冠高の平均MCHとNFIデータによる林分蓄積の間に直線関係の傾向があり、決定係数は大きくないが、精度は88.4 m³/haであり、航空レーザ計測データと現地調査データの回帰分析でよく見られる範囲内であった。

同様に第3期のNFIデータから算出した広葉樹の林分蓄積V3と、航空レーザによる林冠高の平均MCHとで回帰分析を行い、林分蓄積推定式を作成した(数式15; 図6-9右)。

$$\text{数式 15 } V_3 = 20.8 \cdot \text{MCH} - 63.8 \quad (R^2= 0.431, \text{RMSE}= 83.7)$$

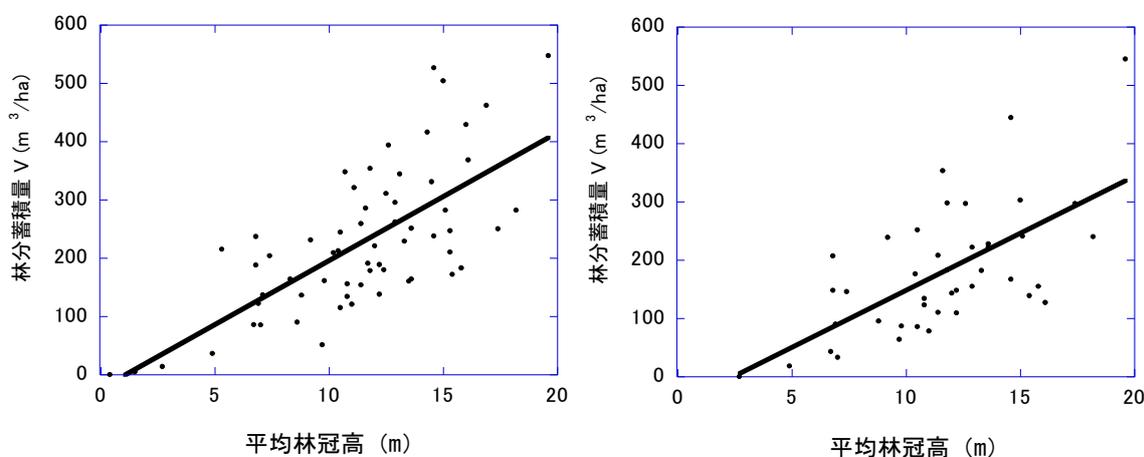


図 6-9 航空レーザの平均林冠高と林分蓄積の関係 (左: 第4期、右: 第3期)

第4期の林分蓄積推定式を用いて(数式 14)、航空レーザによる平均林冠高から作成した林分蓄積量の推定地図、人工衛星による林相区分図、航空レーザ計測と同時に撮影されたオルソフォトを判読しての落葉広葉樹林で葉が落ちた地域の地図、これらの3つの地図を重ね合わせて、高知県の広葉樹の林分蓄積推定地図を作成した(図 6-10)。

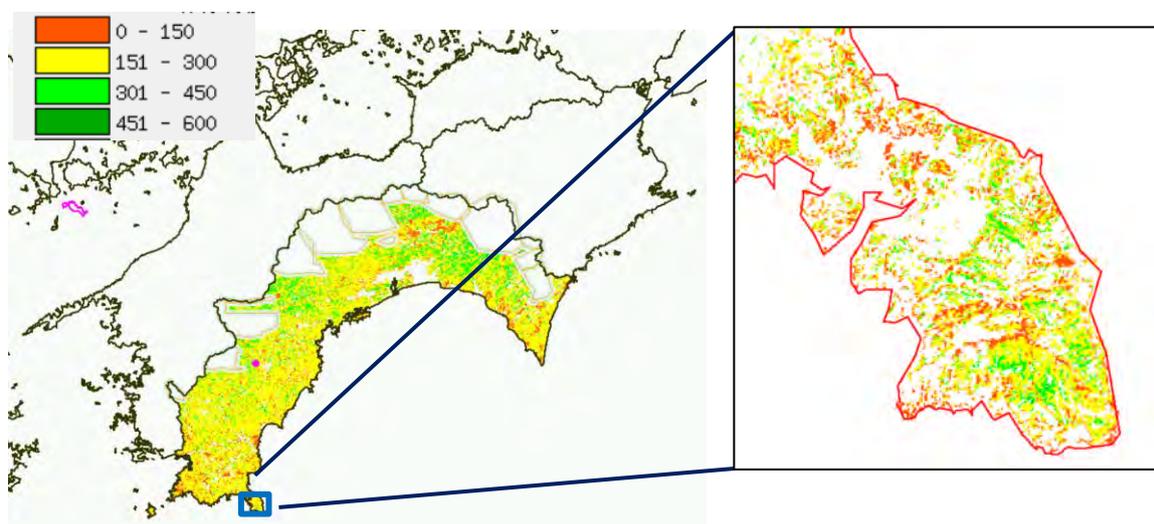


図 6-10 航空レーザ計測による広葉樹の林分蓄積の推定地図
(県境沿いの白抜きは、落葉後の落葉広葉樹林であるため分析の対象外とした地区)

・青森県の NFI 第4期と第3期の林分蓄積の推定式

令和5年度事業の分析結果から、第4期 NFI データから算出した林分蓄積と航空レーザによる林冠高の平均 MCH との回帰分析により作成した落葉広葉樹林の林分蓄積の推定式は、数式 16 となった。

$$\text{数式 16 } V_4 = 16.7 \cdot \text{MCH} + 22.9 \quad (R^2=0.384, \text{RMSE}=99.4)$$

さらに、第3期 NFI のデータを用いて、同様に航空レーザによる林冠高の平均 MCH と落葉広葉樹林の林分蓄積の回帰分析により、推定式を作成した(数式 17)。

$$\text{数式 17 } V_3 = 15.1 \cdot \text{MCH} + 37.4 \quad (R^2=0.320, \text{RMSE}=95.6)$$

第3期の推定式も、第4期と推定式と同様の式となった。

・青森県と高知県における第3期と第4期の林分蓄積推定式の比較

推定式の傾きは、高知県で約 21、青森県で約 16 と同程度であるが、推定式の切片はレンジが広く異なった。

第3期と第4期を比較すると、高知県は回帰式の傾きは近い値であるのに対して切片が大きく異なるが、青森県は切片と傾きは同じくらいの大きさであった。NFI データから算出

した林分蓄積の平均値は、高知県で第3期 171 m³/ha、第4期は 226 m³/ha であり、一方で青森県は、第3期 242 m³/ha、第4期は 246 m³/ha である。つまり広葉樹林について、高知県は第3期から第4期にかけて全体的に成長しているが、青森県は全体としてはほとんど成長していないことになる。高知県では全体的な成長のためか、高知県で第3期と第4期の回帰式を比較して、切片の増加により($\Delta V_{3to4} = 40.5$)、成長している形の式となった(数式 18)。

$$\text{数式 18 } V_4 = a \cdot \text{MCH} + b + \Delta V_{3to4}$$

一方で、青森県の場合は、高知県のように切片の増加により成長している式とはならなかった。第3期と第4期で推定式の切片と傾きに小さな違いはあるが、プロット全体の平均の成長量が小さいので、大きな違いとならなかったと考える。

青森県と高知県の林分蓄積推定式の違いに影響を及ぼした要因として、広葉樹林の主体が青森県では落葉広葉樹であるのに対し高知県では常緑広葉樹であり状況が異なることや、パルプ利用等で伐採されている地域とあまり利用されず伐採されない地域があることなどが考えられる。また、NFI はシステムティックサンプリングで計測データにばらつきを含むために、1 県スケールではなく複数県のスケールでデータ分析を行うことの検討が必要と考える。さらに、航空レーザによる林冠高の平均 MCH と NFI データにより算出した林分蓄積の散布図のバラツキは大きい (図 6-9)。

成長量の分析については、様々な要因が考えられるが、本事業では高知県と青森県の2件と分析事例が少ない。このため、今後はさらに他の県の分析など事例を増やして検討する必要がある。

3-2) 森林 GIS と航空レーザ森林蓄積地図との連携

森林 GIS の最小管理単位の小班(青森県では施業班)毎に、航空レーザ計測による広葉樹林の林分蓄積の推定地図(航空レーザ森林蓄積地図)を集計することが、森林 GIS と航空レーザ森林蓄積地図との連携する上で有用である。このために、GIS の集計機能を用いて、小班(施業班)のポリゴン毎に、20m メッシュの航空レーザ計測による林分蓄積地図のポリゴン内の蓄積を集計し、小班(施業班)のポリゴンの属性テーブルとして出力した(図 6-11)。小班ポリゴンと属性テーブルはリンクしているので、例えば、PC の画面上で GIS のある小班(施業班)をクリックすれば、その属性テーブルの森林簿の小班の番号や森林蓄積とともに、航空レーザ計測の森林蓄積も表示できる。森林 GIS と航空レーザの連携処理のフロー図を示す(図 6-12)。森林 GIS 上では小班毎にリンクする形で、従来の森林簿と航空レーザ森林簿が表として並在する。

青森県の場合、例えば航空レーザ計測の 2021-22 年より以前に伐採された箇所について、従来の森林簿において伐採情報が更新されていない場合に、航空レーザ計測結果との差が

大きくなるので、航空レーザ計測結果が森林簿の更新のアラームとして活用できると考える。

現在、航空レーザ計測による森林資源把握が、各都道府県の民有林で積極的に実施されている。航空レーザ計測によって把握した森林資源量を積極的に活用しようとする県でも、従来の森林簿によるシステムを今後も活用する必要があるために、前段のような小班単位で航空レーザ計測によって把握した森林蓄積と既存の森林簿の森林蓄積の併記が用いられると聞く。小班単位で森林資源情報を管理する場合には、従来からの蓄積と新たに航空レーザ計測で把握された蓄積を併記し、必要に応じて使い分ける方向が、適切と考える。

・森林 GIS と航空レーザ計測の連携に関する考察

航空レーザ計測による森林資源解析結果を、森林管理目的で利用していく場合を検討する。上記のように、既存の森林 GIS の小班ポリゴン単位で林分蓄積を集計する場合と、航空レーザ計測データの分析結果をそのままに管理（本事業の場合には青森県の広葉樹森林蓄積量の 20m メッシュ地図をそのまま管理）する場合の 2 通りが挙げられる。

まず航空レーザ計測の技術的問題点を考察する。林分蓄積や上層樹高を目的変数として、航空レーザ計測データを用いて本事業のようにメッシュ単位で広葉樹林の林分蓄積を推定するのは、航空レーザ計測データと地上プロット調査データが十分にあれば、広域の林分蓄積を推定することが可能である。メッシュサイズは、10m などさらに細かくすることも可能である。広域分析において現状で難しいのは、森林タイプの現況地図の作成である。本事業では、県単位と広域で低コストに、かつ森林簿と独立に、森林タイプの現況地図を作成するという前提条件で、無料で公開されている解像度約 30m の中解像度の衛星画像を用いて林相区分図を作成した。しかし、衛星画像の解像度 30m では、全県の把握には適するが、小班単位での把握にはやや粗いと評価する。さらに解像度の高い Sentinel も利用が始まっており、今後改善が可能である。ただし、衛星画像を分類する場合に、森林タイプとしては、広葉樹と針葉樹の分類に留まる。本事業の過程で、落葉広葉樹林と常緑広葉樹林の分類を検討したが難しく、精度が悪いため分類を断念した。なお、林業実務で要望されるスギとヒノキの分類も、衛星画像分類では一般的には難しい。国内で最も細かく、解像度も高い森林タイプの現況地図は、航空レーザ計測による森林資源解析で作成される。ここでは、航空レーザ計測による単木樹冠の形状と航空レーザ反射強度などを利用して、スギ、ヒノキ、広葉樹などが区分できるように表示し、目視判読により地図化する方法も併せて提案する。ただし、目視判読のために、広域把握では作業量もコストも大きい。

次いで、民有林の森林 GIS の小班についての問題である。本事業で用いた青森県の森林 GIS について、聞き取りによると、青森県では地籍調査が既にかかなりの地域で完了しており、地籍調査の個人の境界図をベースに、森林 GIS の小班が作成され、さらに小班内の森林タイプや施業毎に施業班として区分される。青森県の現地で森林 GIS を併用してプロット調

査した経験から、矛盾が無く精度の高い地図と高く評価する。このような場合には、小班(施業班)単位で、航空レーザの林分蓄積を集計しても問題は少ないと考える。

一方で、他県の民有林では、一小班内に複数の林齢と林相で複数の所有者を含む小班において地上調査した事もある。このような精度の粗い小班の場合には、林班を処理するように、小班毎に衛星画像による針葉樹・広葉樹の面積を求め、さらに衛星画像による広葉樹の箇所のみで航空レーザ林分蓄積を集計して、小班属性に付加していくことになる。

一方で、森林 GIS では、小班単位に限らず、伐採や間伐などの施業毎に対象区域のポリゴンを生成し、作成ポリゴンを対象として、航空レーザ計測による林分蓄積や上層樹高メッシュを、QGIS などの汎用 GIS を用いて集計できる。このような場合を想定すると、航空レーザ計測の解析結果の森林資源情報を小班ポリゴン単位に集約して森林資源情報を管理するのも良いが、より解像度の高いメッシュ単位でそのまま管理・利用するのも適切と考える。

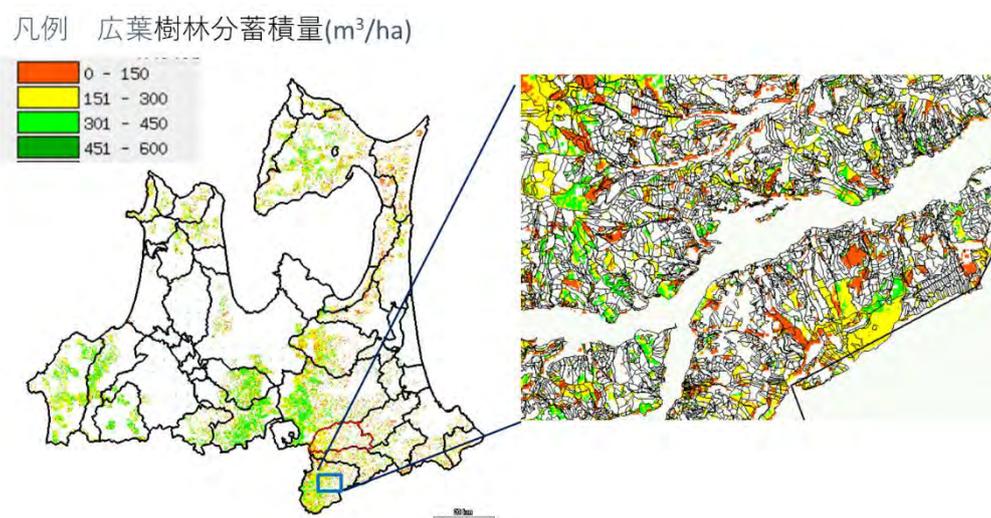


図 6-11 森林 GIS と航空レーザ森林蓄積地図の連携（民有林の小班（施業班）単位で、航空レーザによる広葉樹材積を集計し、森林簿に属性を付加する）

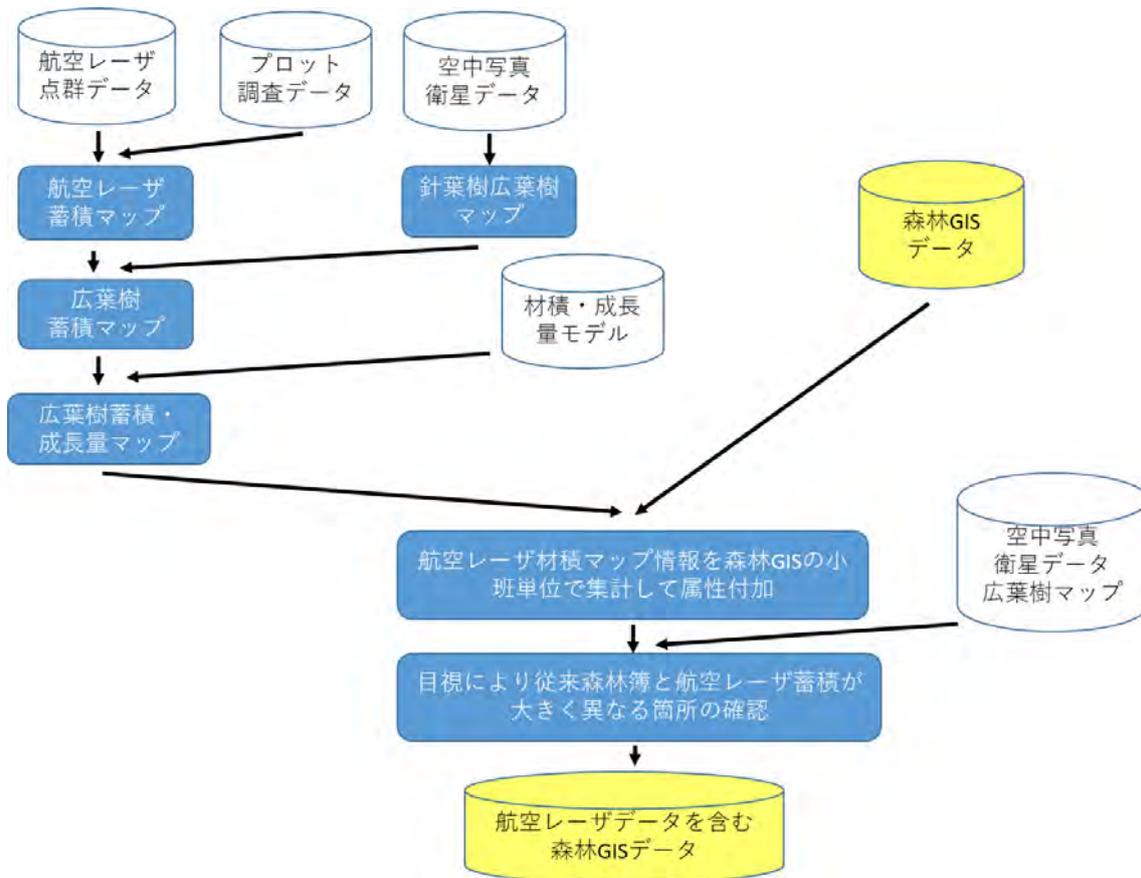


図 6-12 森林 GIS と航空レーザ蓄積の連携のデータフロー

4) 青森県及び高知県の NFI プロット第 3 期と第 4 期における林分蓄積推定精度

航空レーザ計測データから推定した林分蓄積量について、当該レーザ計測地域における NFI プロットの地上調査結果から算出した林分蓄積量と比較することで精度の検証を行った。R5 年度事業で実施した青森県の落葉広葉樹林を対象とした検証結果と、本年度の高知県における常緑広葉樹林を含む広葉樹林を対象とした検証結果は図 6-13 のとおりであった。

図中に示したとおり、NFI の地上調査結果を真値とみなしたとき、航空レーザによる推定蓄積の RMSE は 78.9~97.9 m³/ha であり、青森県に比べて相対的に蓄積の少ない高知県の方が RMSE も小さかった。第 3 期と第 4 期との比較では、前述のとおり青森県は第 3 期と第 4 期の平均蓄積がほとんど変わらないのに対して、高知県では第 3 期から第 4 期にかけて増加しているため、RMSE も大きくなったと考えられる。航空レーザ計測による平均林冠高から針葉樹林と広葉樹林が混在したテストエリアの蓄積を推定した過去の国内の事例と比較すると、米 (2008)¹⁶が北海道において 47.5 m³/ha という高い精度を得ているが、これは地

¹⁶ 米康充 (2008) 航空機および地上リモートセンシングを用いた北方林広域森林バイオマス計測に関する研究, 北海道大学演習林研究報告, 65(1), 61-131.

上調査が 12 か所と限られた地域を対象にしたものである。Tsuzuki et al. (2008)¹⁷は愛媛県を対象に 119.4 m³/ha、林ら (2013)¹⁸は神奈川県を対象に 121.3 m³/ha という精度を得ている。本事業の結果はこの 2 つの事例よりもやや良好であるが、これは 2 つの事例とは異なり広葉樹林に限定しているためとも考えられる。まず衛星画像等による林相区分を行ったうえで、次に航空レーザによる蓄積推定を行うという 2 段階の解析の有用性が示唆されたといえる。

¹⁷ Tsuzuki, H., Nelson, R. and Sweda, T. (2008) Estimating timber stock of Ehime prefecture, Japan using airborne laser profiling, *Journal of Forest Planning*, 13, 259–265.

¹⁸ 林真智、山形与志樹、平春、ハ斯巴干、鈴木力英、三枝信子 (2013) 航空機 LiDAR データを利用した横浜市の森林バイオマス地図の作成、写真測量とリモートセンシング、52(6): 306-315.

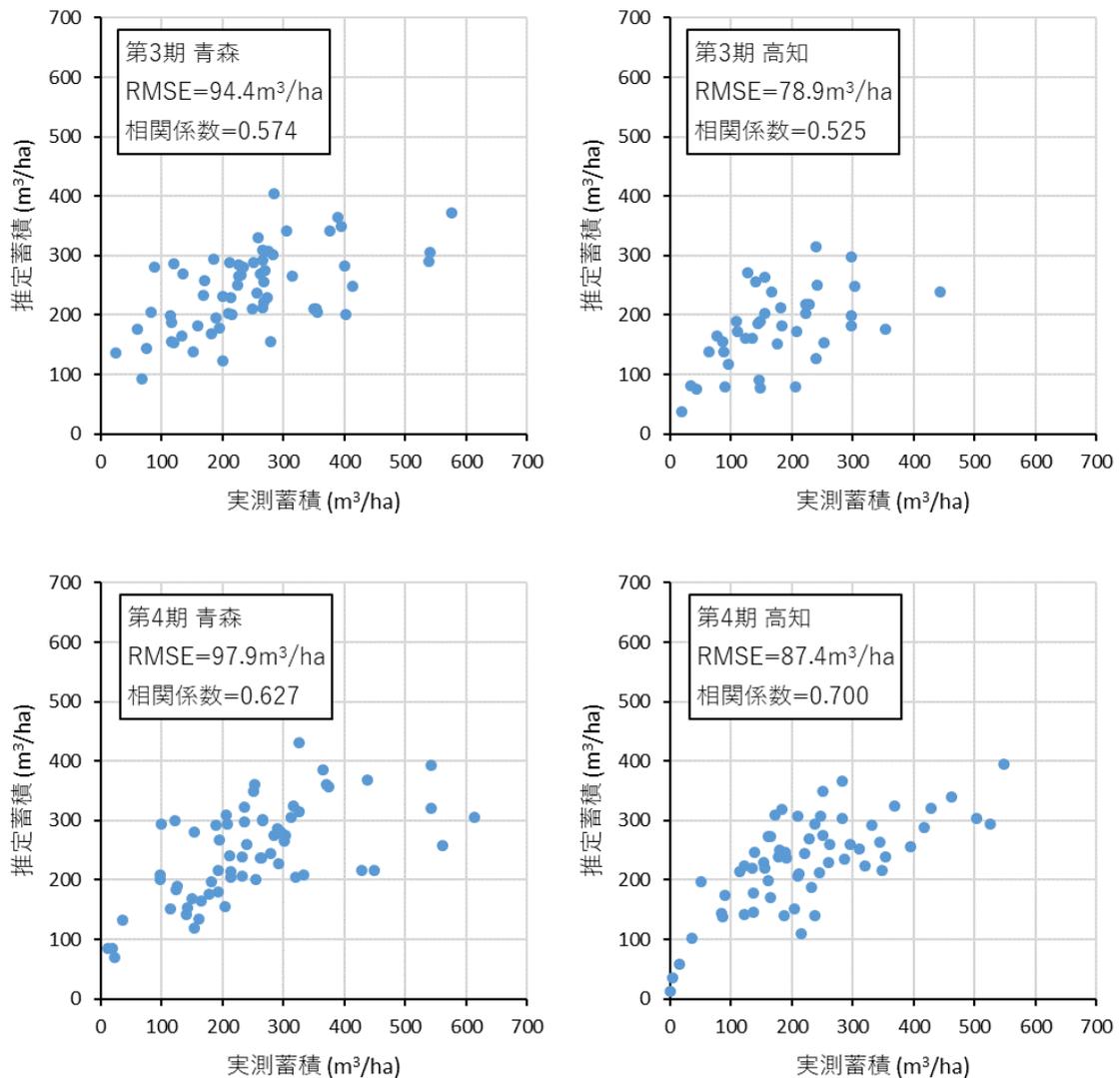


図 6-13 NFI 実測蓄積と航空レーザによる推定蓄積の比較

6.3. 天然林の林分蓄積、林分成長量の把握手法と森林簿の更新手法の整理

リモートセンシングによって天然林の林分蓄積を推定する各手法の得失を表 6-4 に整理した。このなかでは我が国の森林域においても計測が進んでいる航空レーザ計測データから推定する方法が現時点では最も有力である。広葉樹林の蓄積を平均林冠高の一次式で推定する場合、比較的密度の低いレーザでも利用可能であるが、特に落葉樹林帯では開葉期の航空レーザデータが必要となる。平均林冠高による林分蓄積の推定式を作成するには、森林簿を修正したい地域に対して多点の地上調査を行うことが必須となるが、本事業で行ったように県単位など広域スケールを対象にする場合は、精度の向上が進んでいる NFI のデータを活用することも可能である。

航空レーザ計測を定期的に繰り返せば、1時点の蓄積だけでなく2時点間の成長量を推定することは可能である。しかし現状において航空レーザ計測の繰り返しは費用面で現実的ではない。ある1時点で航空レーザによって小班蓄積を修正した後、しばらくの間は材積成長曲線に沿って成長するものとして成長量を算出し、将来の小班蓄積を推定するのが現実的である。また、現在では撮影されることが少なくなったが、正確な地盤高が利用できれば、空中写真によっても林冠高を推定することができる。したがって、航空レーザ計測を1回行って正確な地盤高とその時点の林冠高を把握したうえで、2回目以降は空中写真を定期的に撮影して林冠高の変化を把握することにより、人工林、天然林を問わず成長量をモニタリングする方法も考えられる。

衛星画像の解析により植生区分や皆伐地の検出を行う技術はある程度確立しており、100%ではないにしても、8~9割の精度で針葉樹と広葉樹を判別できることは前述のとおりである。Landsatは2週間程度の観測間隔で地上解像度30m程度のデータを無償で利用することができるので、森林簿の林相区分を広域スケールで自動的に修正する方法としては有力である。機械学習の教師データとして多点の地上調査データが必要であり、その際、本事業で行った通りNFIのデータが活用可能であることは航空レーザによる蓄積推定と同様である。また、地域に限られるのであれば、森林GIS上で天然林の小班のみを抽出し、高解像度の衛星画像を目視判読し、林相に間違いがあれば修正するという方法も考えられる。なお、航空レーザにしても衛星画像にしても、それらを応用して森林簿を修正するには森林GISに収録された小班の位置、小班界が正確であることが前提である。

本事業で取り組んだ各手法によって、森林簿のうち天然林の小班の情報を更新する方法を表6-5に整理した。最下段は航空レーザ計測データによる蓄積推定と衛星画像による針広区分を両方行うパターンである。その後の将来の材積は、本事業で提案したような材積成長曲線(表6-2)を利用して更新することになる。現在の林齢 t と材積 x_t が分かっているとき、材積成長曲線を介して n 年後の材積を計算する数式を以下に再掲する。

$$x_{t+n} = V_{t+n} \frac{x_t}{V_t}$$

ここで V_t は材積成長曲線上の林齢 t 年の材積である。

最上段は、リモートセンシングによる修正は行わず、材積成長曲線のみを置き換えるパターンであるが、将来の蓄積の計算方法は最下段のパターンと同様である。

表 6-4. 天然林の蓄積を推定する手法の比較

手法	長所	短所
衛星画像	安価 林相区分ができる	一般的に高さ情報は得られない（注） ので蓄積推定は難しい
衛星レーザ	高さ情報が得られる 計測は昼夜を問わない	現状では点密度が低く面的な計測は まだ行われていない 解析方法は発展途上
空中写真	安価 林相区分ができる 林冠表面高が計測できる	林冠高を算出するには別途正確な地 盤高も必要
航空レーザ	林冠表面高と地盤高が同時に計 測できる	高価 レーザの反射強度による林相区分は 技術開発の途上
UAV 画像	安価 林相区分ができる 林冠表面高の計測ができる	広域での実行は難しい 林冠高を算出するには別途正確な地 盤高も必要
UAV レーザ	林冠表面高と地盤高が同時に計 測できる	高価 レーザの反射強度による林相区分は 技術開発の途上 広域での実行は難しい
地上レーザ	本数や直径を計測できる 現地計測のため結果として正確 な林相・樹種が分かる	林冠高の計測精度が低い 広域での実行は難しい

（注）特別な高解像度衛星画像から 3 次元モデルを作成した製品もある
（例えば <https://www.aw3d.jp/products/standard/>）

表 6-5. 森林簿の更新手法の整理

航空レーザによる蓄積推定	衛星画像による針広区分	森林簿の修正と更新		
		林相	現在の蓄積	将来の蓄積
行わない または データがない	行わない	現状維持	現状維持	材積成長曲線（針広別または林相区分なし）で更新
	行う	衛星画像で修正	現状維持	材積成長曲線（針広別）で更新
行う	行わない	現状維持	航空レーザによる推定値	材積成長曲線（林相区分なし）で更新
	行う	衛星画像で修正	航空レーザによる推定値	材積成長曲線（針広別）で更新

(注) 現状維持とは、森林簿に現在記載されている内容を維持することを指す。

7. 都道府県向けの手順書の作成

収穫予想表は、各都道府県において林分密度管理図、樹高成長曲線、標準的な施業体系等を基に地域の実情に応じて作成するものである。人工林資源が本格的な利用期を迎え、森林資源の保続確保が重要な課題となっている中で、これから収穫予想表の更新を検討している都道府県のうち、担当者が自ら更新を行う場合を想定した手順書を作成した（付録1参照）。手順書はスギ・ヒノキ・カラマツ人工林を対象としたもので、上述の2.~4.の結果も踏まえ整理した。

8. 検討委員会の設置・運営

事業の実施に当たっては、学識経験者からなる検討委員会を設置・運営し、検討委員会において課題に係る意見を集約し、結果を検討した。検討委員会の開催スケジュールと各委員会に置く検討内容、及び委員は表 8-1 及び表 8-2 に示すとおりである。

表 8-1 委員会の開催スケジュールおよび検討内容

回	時期	検討概要
第1回	令和6年 10月2日	業務の基本方針の確認・検討および進捗状況の確認
第2回	令和7年 1月21日	解析・作業の進捗状況の確認および結果の共有、取りまとめに向けた検討事項の確認 等

表 8-2 検討委員

氏名	所属・役職	専門分野
丹下 健	東京大学 特任教授	造林学、生態生理学
村上 拓彦	新潟大学 自然科学系（農学部） 准教授	リモートセンシング、森林計画、森林計測
吉田 俊也	北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 教授	森林生態学、天然林施業

敬称略

令和6年度 森林情報の高度化推進に向けた手法検討に関する調査委託事業
報告書

令和7年3月

(受託者)

令和6年度森林情報の高度化推進に向けた手法検討に関する調査委託事業共同事業体
国立研究開発法人森林研究・整備機構 / 一般社団法人日本森林技術協会