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

報　告　書

令和６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. データの整理と選別 2
   2.2. データの減数調整と異常値の棄却 3
   2.3. 林分密度管理図の作成 3
   2.4. 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 10
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 15
   4.1. 標準的な施業体系に関する情報収集 15
   4.2. 本数減少曲線の作成 23
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 36
      5.3.3. 高木林での現地検証 37
      5.3.4. 現地計測収集データとの比較 39
6. 天然林の林分蓄積、林分成長量に関する検討 41
   6.1. 地域・林相別の材積成長量と材積の上限の検討 41
      6.1.1. 平均的な材積成長量と材積の上限の推定 42
      6.1.2. 地域別・林相別の材積成長量と材積上限値の推定 46
      6.1.3. パラメータの推定と構造 53
   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 55
      6.2.1. はじめに 55
      6.2.2. 時系列衛星データを利用した林相区分図の作成 55
      6.2.3. 航空レーザによる広葉樹の林分材積の地図化 62
      6.2.4. ALS による材積推定のまとめ 72
   6.3. 本章のまとめ 73
7. 都道府県向けの手順書の作成 74

8.　まとめと課題 75
付録　林分密度管理図による収穫予想表作成の手順書 76

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。

本事業では、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。）の結果を踏まえ、また同事業で収集整理された森林資源データを用い、まず現行の民有林用スギ林分密度管理図の見直しを行う。次に、林分密度管理図を基礎として収穫表を作成するには、林齢と上層樹高の関係を表す樹高成長曲線、及び林齢と本数の関係を表わす本数減少曲線が必要であることから、スギ林分密度管理図と同じ地域単位で両曲線を作成する。

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、その結果を反映する。

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の見直すのを促すため、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、収穫表のように林齢を説明因子とすることが容易ではないことが令和 4 年度事業においても再認識されている。このため、地域別・林相別の成長量を上限に達するまで期首蓄積に加算する方法や、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。

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. データの整理と選別

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 0.2 ha または 0.1 ha 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 0.1 ha の円形標準地のうち人工林が 0.04 ha 以上を占める箇所に限定して、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）がスギである箇所を抽出し、スギ以外の樹種は除外して、各箇所のスギだけの上層樹高、平均胸高直径、幹材積合計等の集計値を算出した。

なお、令和 4 年度事業において、森林生態系多様性基礎調査は第 3 期と第 4 期を整理した。しかし同一地点で調査年が 5 年違うだけのデータを両方使用することは、結果に偏りを生じる可能性があるため、調査時点がより新しく、また QA/QC の取組からより信頼性が高いと考えられる第 4 期のデータのみを使用した。

また『森林経営』対象森林率調査は高齢級林分を対象としたものだけを使用した。この理由は、若齢林分を対象としたものは、単木の積み上げによる胸高断面積合計や幹材積合計が計算できず、林分密度管理図の作成に使用できないためである。

上層樹高（m）が林齢より大きい箇所、断面積平均胸高直径（林分の胸高断面積合計÷本数を直径に換算した値）が平均胸高直径より小さい箇所、胸高断面積合計が 150m^2/ha より大きい箇所は、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。また上層樹高が 5m 未満の箇所は未閉鎖とみなして除外した。下限値 5m は既存の密度管理図と同じである。既存の密度管理図が作成された際、間伐後 5 年未満は林冠未閉鎖として現地調査の対象外とされていた。今回の使用データのうち、森林簿の蓄積精度検証調査については施業履歴の情報があるため、間伐後 5 年未満の箇所は除外した。さらに二段林状の林分も除外した。本事業では断面積平均直径が平均胸高直径の 1.1 倍を超える、または上層樹高が平均樹高の 1.2 倍を超える箇所を二段林状とみなして除外した。1.1 倍あるいは 1.2 倍というしきい値は、散布図上で視覚的に決定した値である。

2.2. データの減数調整と異常値の棄却

既存の密度管理図と同じ 7 地域それぞれにおいて、除外されなかった箇所を、上層樹高 2 m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で、上限 10 か所は既存の密度管理図と同じである。ただし、裏東北・北陸地方は全体のデータ数が多かったので、1 階級の上限を 20 か所にした。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。また、7 地域それぞれにおいて、箇所数の都道府県別割合が、民有スギ人工林面積の都道府県別割合と大きく乖離しないように考慮した。例えば、北近畿・中国地方では島根県の民有スギ人工林面積に比べて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島根県の④のデータを一律に除外した。九州地方の長崎県の④のデータも同様に一律除外した。結果として減数調整の対象になったのは④のデータがほとんどであり、②と③は少数に過ぎず、①で除外された箇所はなかった。

ここまでの整理の結果得られたデータの分布を、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した（表 2-1）。後者は概ね樹高クラス 8～28m、本数クラス 600～3,400 本/ha の範囲に分布しているのに対して、本事業のデータは概ね 6～36m、400～3,400 本/ha のより広い範囲をカバーしており、高齢級に対応した推定を可能とする条件が整えられたと考えられる。

さらに既存の密度管理図が作成された際と同様に、7 地域それぞれで減数調整済みのデータに対して、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、有意水準 0.1%で推定誤差が有意に大きい箇所は異常値として棄却した。

2.3. 林分密度管理図の作成

異常値棄却後の 7 地域計 5,366 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 4.3.1 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。収量密度効果の逆数式（幹材積合計の推定式）の計算において、既存の林分密度管理図では、7 地域とも最多密度曲線の傾きが-1.9184（安藤 1968）[1]となるように作成されている。本事業では、まず 7 地域を区分せずに全国のデータから最多密度曲線の傾きとして-1.53624 を得た。これを 7 地域共通の傾きとしてそれぞれの地域の収量密度効果の逆数式を算出した。各種係数を表 2-2 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 2-1 に

[1] 安藤貴（1982）林分の密度管理．64p，農林出版

示した。表 2-2 作成したスギ林分密度管理図の構成式と係数で空欄の箇所は、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。

表 2-1 樹高クラス（列方向）・本数クラス（行方向）別データ数

データの列 / 行ラベル	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	総計
200			1				2	1	2	3	5	8	9	4	3	5	7	1	1	3	1		56
400				1	2	2	7	9	29	34	45	54	59	54	46	43	17	6	3			1	412
600		3			6	5	16	34	60	78	78	80	80	76	55	22	9	3					605
800			2	7	10	17	35	74	74	80	80	80	79	65	25	6	3						637
1,000		7	10	10	10	25	63	74	80	78	80	80	71	30	14	1							633
1,200		12	13	5	27	35	64	75	79	80	80	64	37	26	6								603
1,400		13	11	28	29	52	64	77	80	78	53	41	20	6	1								553
1,600		13	21	22	34	40	43	76	74	62	47	24	7										463
1,800		32	24	37	39	39	60	55	52	38	13	7	1			1							398
2,000		24	19	23	44	34	46	39	34	17	12	2	2										296
2,200		36	30	22	21	25	25	31	18	13	8	1											230
2,400		34	22	26	19	20	16	22	6	7		2											174
2,600		30	21	30	20	18	21	15	6	1													162
2,800		24	18	17	11	12	12	6	2		1												103
3,000		18	11	11	10	12	6	7	2														77
3,200		9	11	5	2	3		2	1														33
3,400		7	5	2	3	1																	18
3,600		9	3	7	8	3	2																32
3,800		8	1	3	1																		13
4,000		5	5	1	5	1		1															18
4,200		2		2	2																		6
4,400		2	1	3	1																		7
4,600		2			1																		3
4,800		1					1																2
5,000		2	1																				3
5,200				1																			1
5,400		3																					3
5,600			1																				1
5,800																							
6,000																							
6,200																							
6,800																							
7,600																							
総計		296	231	263	305	344	483	598	599	569	502	443	365	261	150	78	36	10	4	3	1	1	5542

本事業

上図、下図ともに赤色の濃淡はデータ数の多少を表す

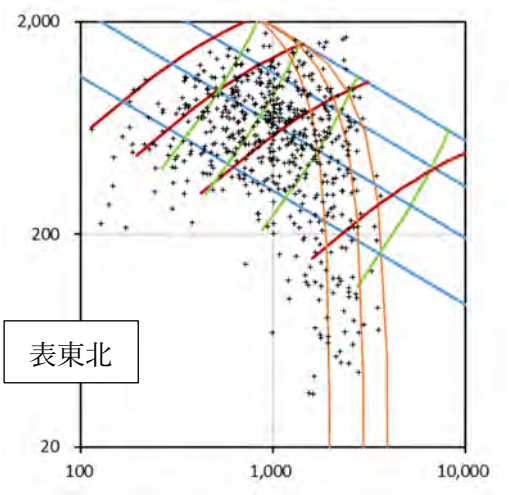
データの列 / 行ラベル	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	総計
200																							
400							1		2	1	6	9	5	5	2	2							33
600							2	5	23	24	23	20	29	8	4	1							139
800					1	2	12	29	43	56	50	40	14	7	2								256
1,000			1	2	2	12	36	57	69	62	33	22	3	5	1								305
1,200				1	8	18	46	59	65	48	13	2	3	1	1								265
1,400		2	1	3	13	46	49	55	37	17	9	2											234
1,600		3	7	7	26	41	66	44	32	6	2	2											236
1,800		2	6	11	31	33	31	26	5	2													147
2,000		2	8	10	28	40	13	12	2	1		1											117
2,200		8	10	14	27	29	23	5	2														118
2,400	1	6	9	14	19	16	9	1															75
2,600	1	3	8	13	15	18	9	3	1														71
2,800		5	10	14	13	9	3	2															56
3,000	1	9	9	13	10	6	3	1															52
3,200	1	6	7	8	8	3	1																34
3,400		1	12	9	11	1	1																35
3,600		6	5	5	5	3																	24
3,800			5	2	4																		11
4,000		1	4	3	1																		9
4,200		1	1	2	2	1																	7
4,400			3	3	2																		8
4,600		2	1	2																			5
4,800		2																					2
5,000			1	2																			3
5,200			3																				3
5,400			1	1																			2
5,600				1																			1
5,800				1																			1
6,000				1																			1
6,200		1	1																				2
6,800			1																				1
7,600				1																			1
総計	4	60	114	143	226	278	305	299	281	217	136	98	54	26	10	3							2254

昭和 50 年代

表 2-2 作成したスギ林分密度管理図の構成式と係数

地域	幹材積合計 V=1/(b1*H^b2+b3*H^b4/N)				最多本数 NRf=10^(k1+k2*logH)	
	b1	b2	b3	b4	k1	k2
表東北	0.0130	-1.023793105	7256	-2.93300	5.977405752	-1.909206895
裏東北・北陸	0.0129	-1.020651565	6237	-2.92400	6.040984636	-1.903348435
北関東・東山	0.0131	-1.027479179	8237	-2.94356	5.960212185	-1.916080821
南関東・東海	0.0271	-1.137586679	15440	-3.25900	6.200348405	-2.121413321
北近畿・中国	0.0152	-0.971085039	3707	-2.78200	5.946304555	-1.810914961
南近畿・四国	0.0241	-1.081388012	8556	-3.09800	6.255121881	-2.016611988
九州	0.0133	-0.976320939	3763	-2.79700	5.905438229	-1.820679061

地域	形状高 HF=c1+c2*H+c3*√N*H/100			平均胸高直径 d=d1+d2*dg+d3*√N*H/100			限界競争比数
	c1	c2	c3	d1	d2	d3	
表東北	0.915990	0.375940	0.218260		0.987716	-0.073900	0.370261424
裏東北・北陸	0.618985	0.373286	0.230556	0.104240	0.980030	-0.054110	0.305530502
北関東・東山	0.799740	0.389550	0.159310		0.979705	-0.014818	0.408350106
南関東・東海	1.037834	0.344151	0.231664		0.987533	-0.046154	0.264341855
北近畿・中国	1.022954	0.357938	0.123791	0.242203	0.977428	-0.051871	0.216622492
南近畿・四国	1.504744	0.334624	0.141498		0.975740	-0.035073	0.164617799
九州	0.935911	0.327128	0.251660	0.000000	0.985219	-0.034733	0.260657727



横軸：本数(/ha) 対数表示
縦軸：幹材積合計(m^3/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　10m
緑線：等平均直径曲線
　　上から 40　30　20　10cm
橙線：自然枯死線
　　左から植栽本数 2000　3000　4000
黒点：各地域の作成データ

図 2-1 作成した地域別スギ林分密度管理図

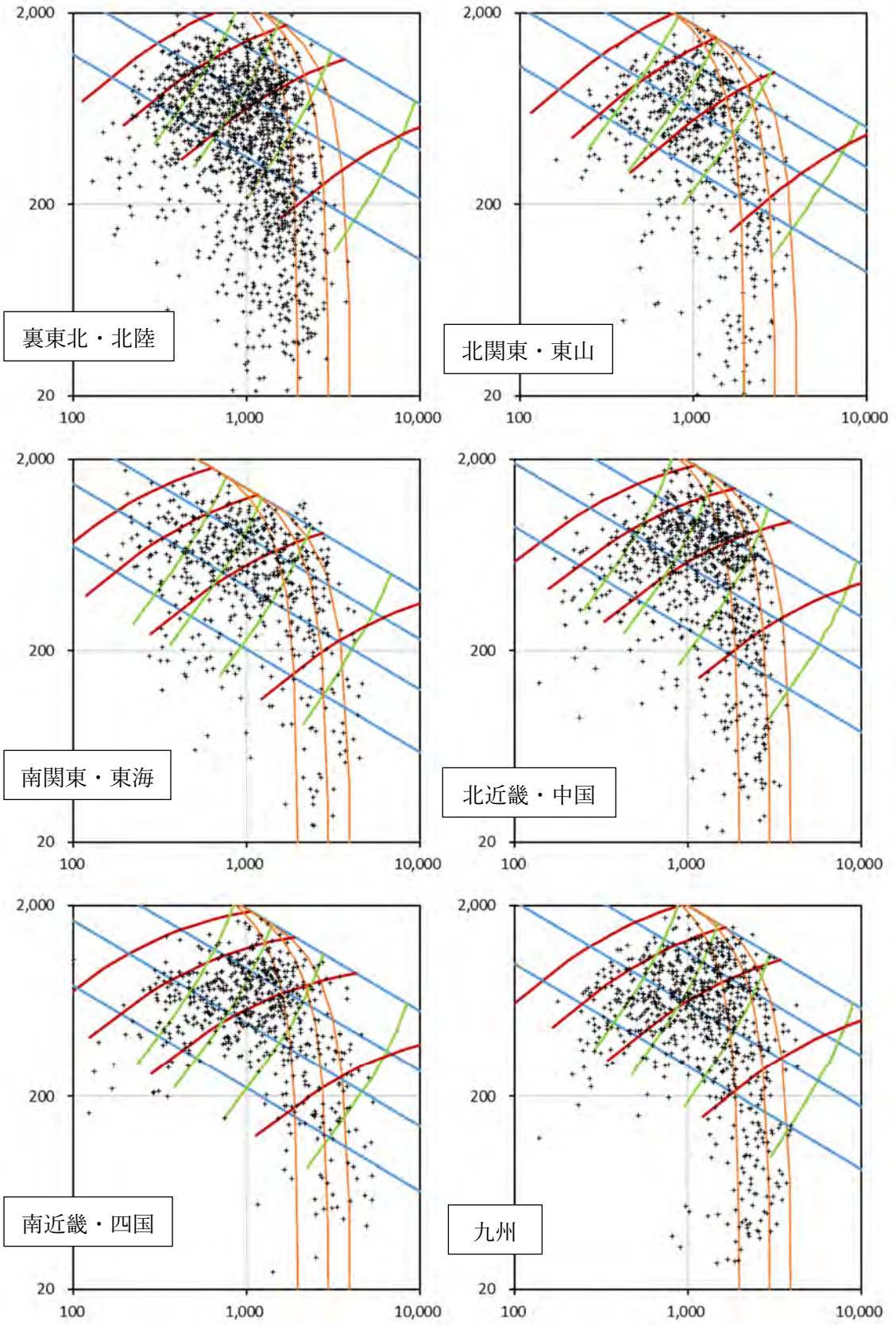


図 2-1 作成した地域別スギ林分密度管理図（続き）

令和 4 年度事業報告書で指摘されているとおり、既存の民有林用スギ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林分密度管理図では、図 2-1 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。

2.4. 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は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。

既存の林分密度管理図と、本事業で作成した修正案それぞれによって、現地データの上層樹高と本数から幹材積合計を推定して実測値と比較すると、既存の密度管理図が過少推定であった傾向が大きく改善されていることが確認された（図 2-2）。また推定精度も 3/4 程度に改善した（図 2-3）。このことは地域別でなく林齢別にみたときも同様であり、21 年生以上の範囲でそれぞれバイアス（推定値-実測値の平均値：過小推定で負になる）、RMSE（平均二乗誤差の平方根：必ず正の値となり小さいほど推定精度が高いことを示す）ともに改善している（図 2-4、図 2-5）。ただし、修正案の場合でも、高齢になるほど過少推定の傾向は残っており、また加齢とともに林分構造の多様化が進んで推定精度が低下することに注意が必要である。

また、同様に現地データの上層樹高と本数から平均胸高直径を推定して実測値と比較すると、特にバイアスは 7 地域ともに 1cm 以内となり、全体として偏りが非常に少ない推定が可能となった（図 2-6）。また修正案の直径推定精度は既存の林分密度管理図に比べて 1cm 程度改善した（図 2-7）。

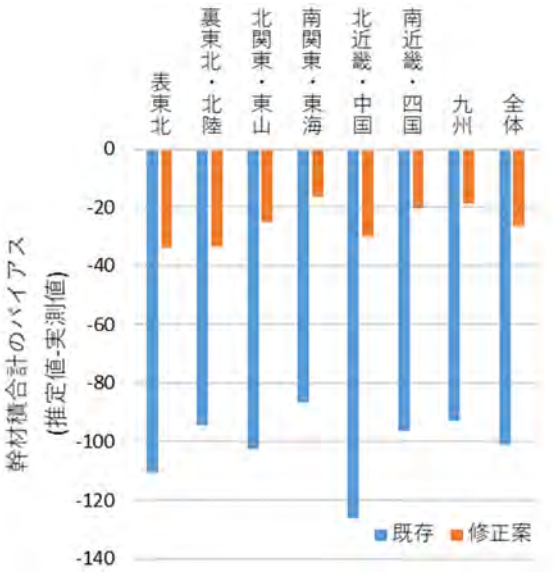


図 2-2 幹材積合計の推定バイアスの比較

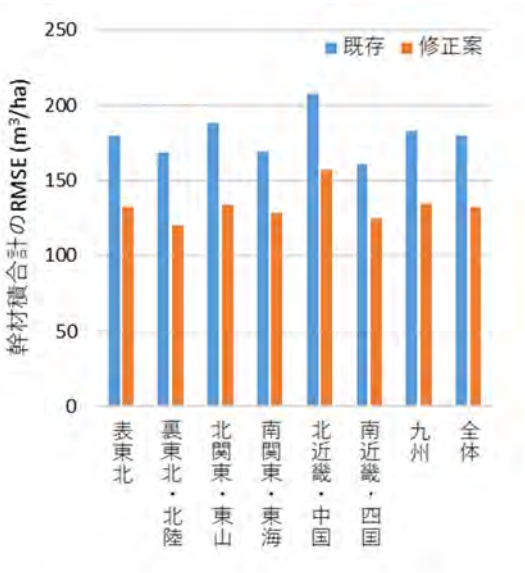


図 2-3 幹材積合計の推定精度の比較

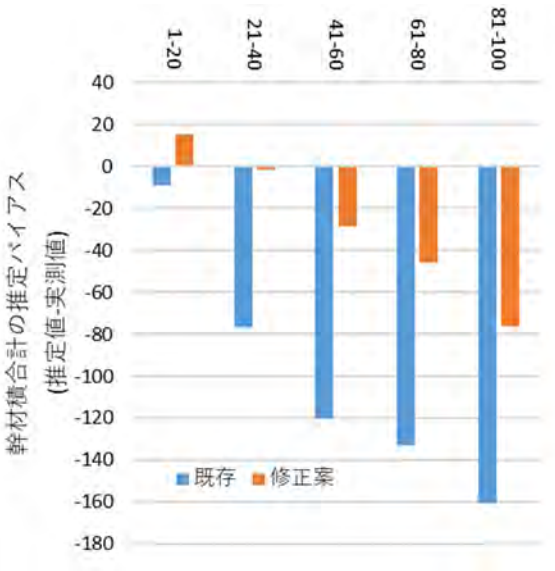


図 2-4 幹材積合計の推定バイアスの比較
(林齢別)

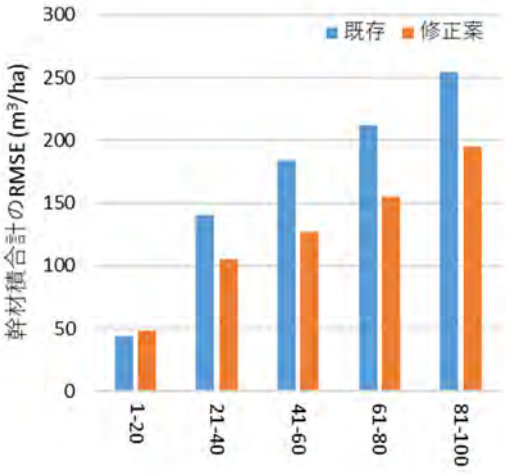


図 2-5 幹材積合計の推定精度の比較
(林齢別)

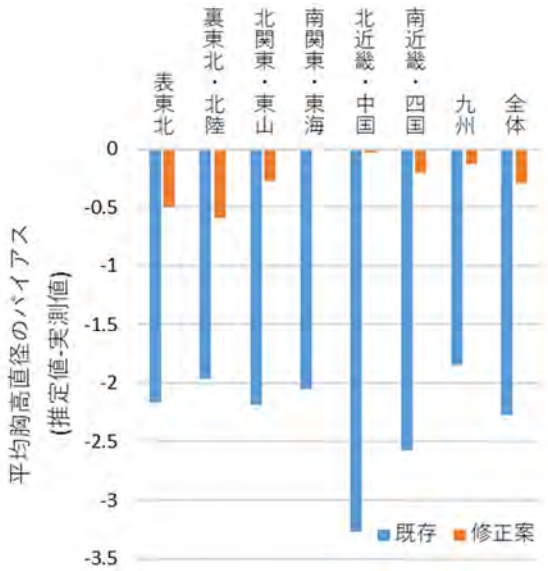


図 2-6 平均胸高直径の推定バイアスの比較

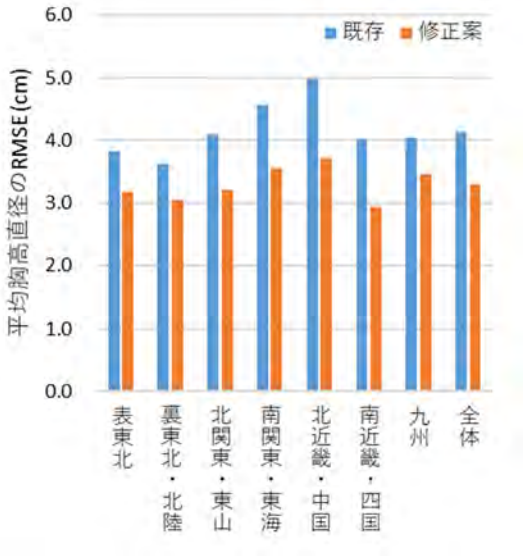


図 2-7 平均胸高直径の推定精度の比較

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 7 地域別にスギ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 5,366 か所のデータに加えて、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 未満のデータ 627 か所も使用した。5m未満のデータはすべて 2.1 の④「森林簿の蓄積精度検証調査」によるものである。追加データのうち平均胸高直径と断面積平均胸高直径の差が大きい 4 箇所は除外した。また、7 地域全体の林齢－上層樹高の散布図において、視覚的に樹高が低い方に外れ値である 11 か所は除外した。結果として 7 地域合計で 5,978 か所のデータを使用した。

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、7 地域別にあてはめを行った。

$H_t = a * (1 - b * \exp(-k * age))$	Mitscherich 式
$H_t = a * \exp(-b * \exp(-k * age))$	Gompertz 式
$H_t = a / (1 + b * \exp(-k * age))$	Logistic 式
$H_t = a * (1 - \exp(-k * age))^{\wedge} b$	Richards 式
$H_t = a * \exp(- b * age^{\wedge} -k)$	Korf 式

ここで H_t は上層樹高（m）、*age* は林齢、a、b、k はパラメータであり、a は age が無限に大きくなったときの H_t 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 法で行った。

7 地域別のあてはめ結果を表 3-1 に、標準誤差の比較を図 3-1 に示した。すべてのパラメータは統計的に有意であった。標準誤差は 3.589～4.144m の範囲であり、各地域内で比較するとモデル間の標準誤差の差は最大でも表東北地方の 0.295m であって、標準誤差の値を考慮すると大差はないといえた。

相対的には 7 地域に共通して Logistic の標準誤差が最も大きく、Mitscherich 式と Korf 式の標準誤差が小さかった。 7 地域のうち 5 地域では Korf 式の標準誤差がもっとも小さかった。他の 2 地域（裏東北・北陸地方、北近畿・中国地方）でも標準誤差が最も小さな Richards 式と Korf 式の標準誤差の差はそれぞれ 0.004m、0.021m に過ぎず、標準誤差の比較だけから見ると相対的には 7 地域に共通して Korf 式のあてはまりがよいと考えられた。

各地域別のあてはめ結果をみると、林齢 10～80 年の間は標準誤差の差から類推されるとおり、モデル間の差異は小さい（図 3-2）。若齢時に着目すると、Korf 式は原点の近くを通るのに対し、Mitscherich 式は切片が負の値になる場合があり、他の式は切片が 2m 以上になっていた。収穫予想表は林齢 1 年から作成するものではないものの、自然現象を表すものとしては Korf 式が妥当であると考えられる。一方、高齢側では総じて Korf 式の傾きが大きく、Gompertz 式と Logistic 式の傾きは小さい。この範囲は元々データが少ないため判断が難しいが、100 年を超えるような高齢林でも樹高成長が継続しているという先行研究の結果や、後述する航空レーザ計測による高齢級林分の解析結果を考え合わせると、頭打ち傾向の少ない Korf 式が妥当と考えられた。

以上のとおり標準誤差、切片および高齢級での傾きの 3 点から検討した結果、5 つのモデルの中では 7 地域に共通して Korf 式による樹高成長曲線が最も有力な選択肢になると判断した。Korf 式だけについて地域間で比較すると（図 3-3）、裏東北・北陸地方は林齢 50 年前後までは他地域より樹高成長がやや劣るが、以降の頭打ちが少ないこと、九州地方はその逆であることなど、従来から一般的に言われているスギ成長の地域性の一端が表現されている。

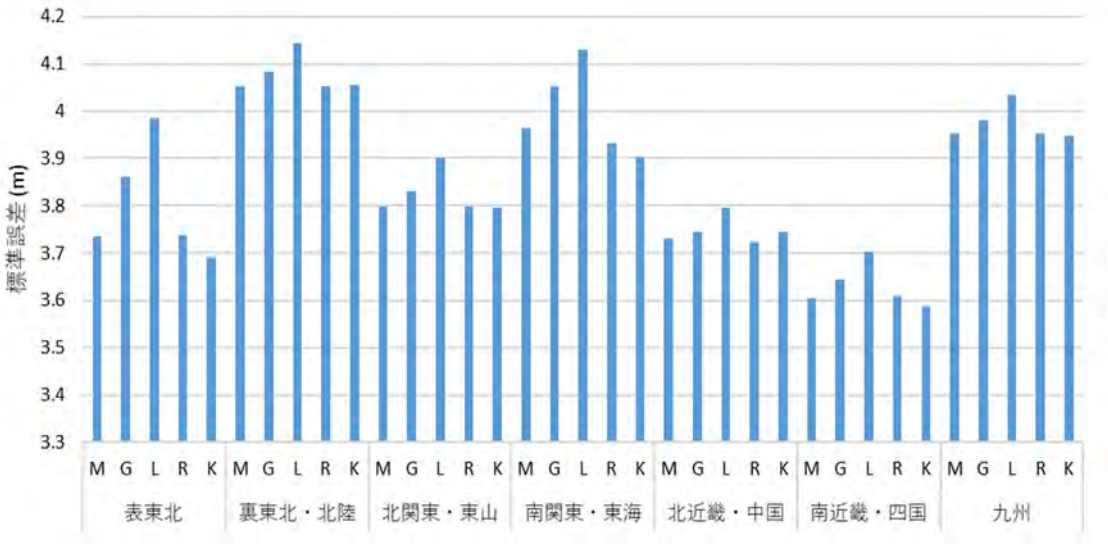


図 3-1 樹高成長曲線の標準誤差の比較

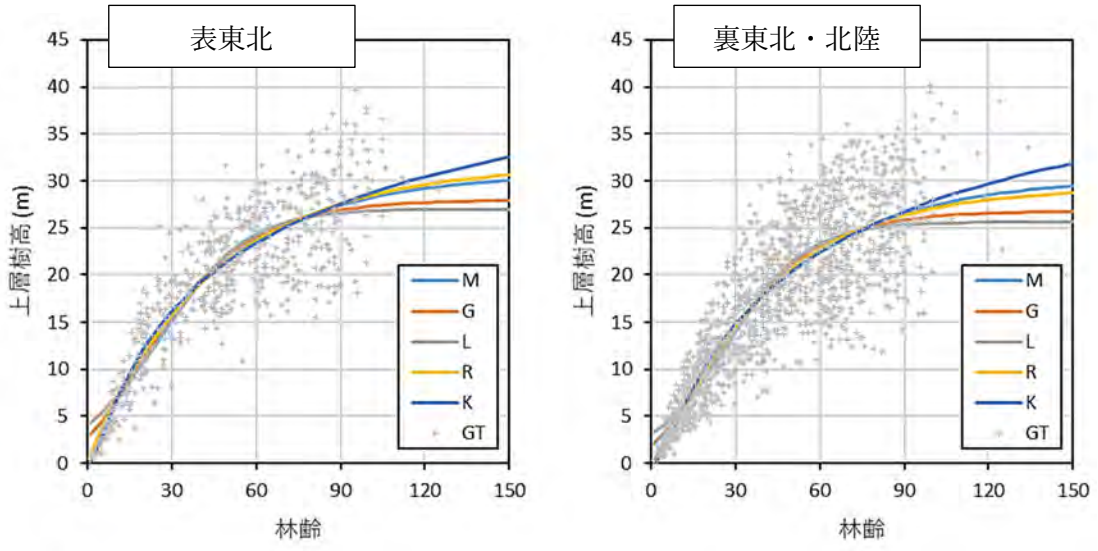


図 3-2 地域別、各モデルの樹高成長曲線

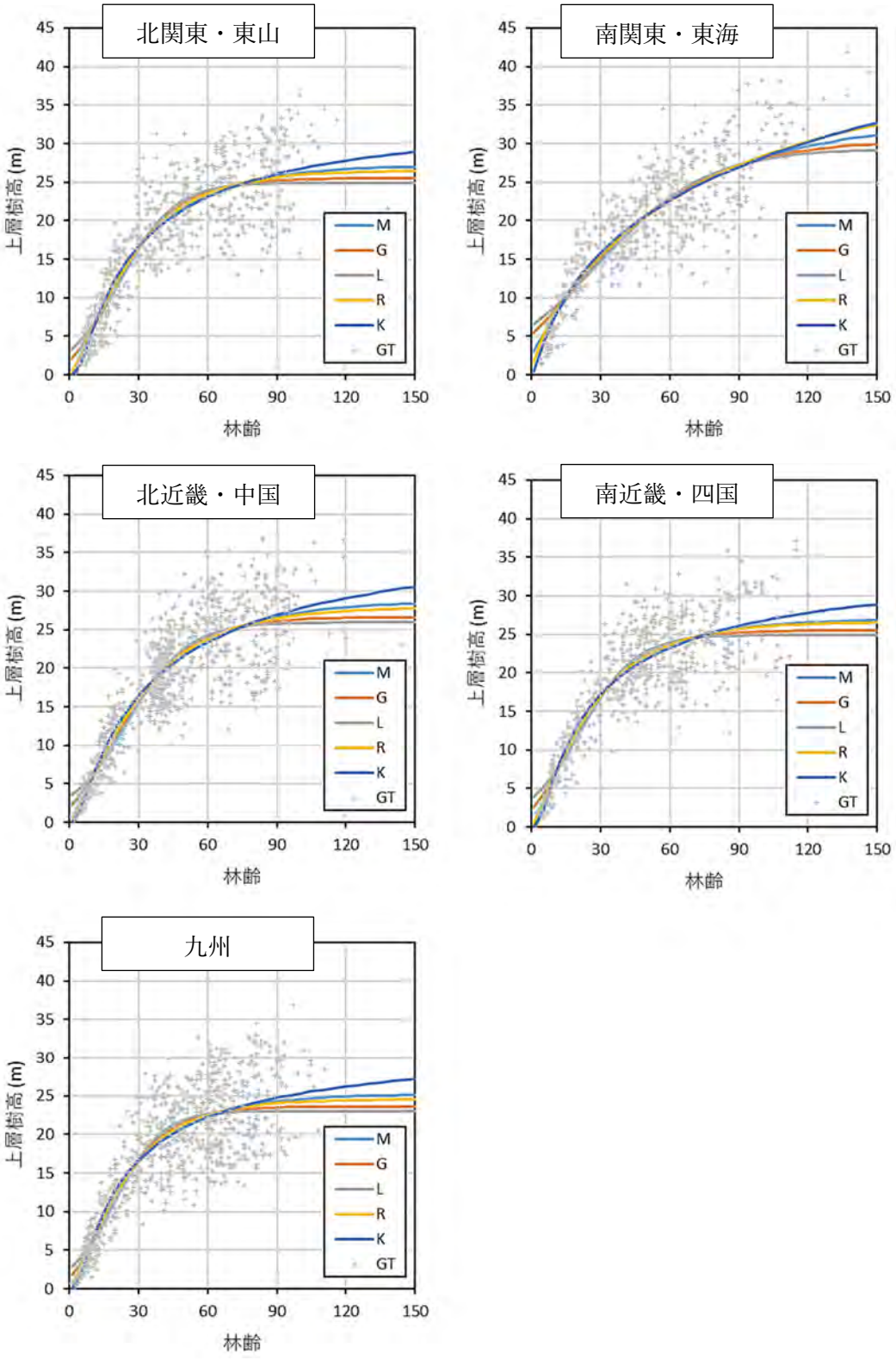


図 3-2 地域別、各モデルの樹高成長曲線（続き）

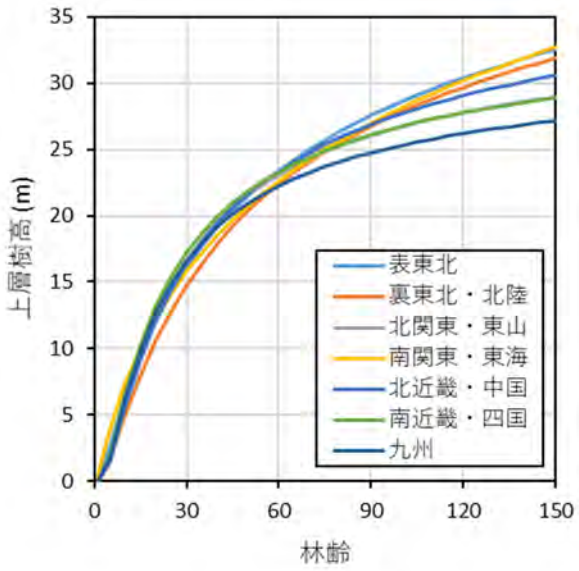


図 3-3 Korf 式による樹高成長曲線の地域比較

表 3-1 樹高成長曲線のあてはめ結果

地域	モデル	a	b	k	標準誤差 (m)
表東北	Mitscherich	30.78	1.01622	0.02471	3.735
	Gompertz	27.94	2.31388	0.04569	3.861
	Logistic	27.00	5.60183	0.06546	3.985
	Richards	31.74	0.96119	0.02205	3.737
	Korf	57.77	6.87048	0.49534	3.690
裏東北・北陸	Mitscherich	30.45	1.04801	0.02330	4.053
	Gompertz	26.76	2.63946	0.04787	4.083
	Logistic	25.61	7.35067	0.07221	4.144
	Richards	29.23	1.24270	0.02815	4.052
	Korf	54.29	8.60398	0.55518	4.056
北関東・東山	Mitscherich	27.17	1.10188	0.03438	3.799
	Gompertz	25.52	2.67517	0.06044	3.832
	Logistic	24.92	7.02522	0.08629	3.902
	Richards	26.51	1.39900	0.04157	3.799
	Korf	35.52	11.93715	0.81127	3.796
南関東・東海	Mitscherich	33.14	0.92560	0.01813	3.964
	Gompertz	30.52	1.78070	0.03045	4.052
	Logistic	29.33	3.60761	0.04285	4.130
	Richards	38.02	0.68670	0.01054	3.932
	Korf	98.66	5.34372	0.31472	3.904
北近畿・中国	Mitscherich	28.78	1.06668	0.02971	3.730
	Gompertz	26.66	2.60134	0.05362	3.744
	Logistic	25.94	6.93399	0.07705	3.795
	Richards	27.93	1.31600	0.03588	3.724
	Korf	41.23	9.92415	0.69891	3.745
南近畿・四国	Mitscherich	26.97	1.07008	0.03554	3.605
	Gompertz	25.51	2.44184	0.05960	3.644
	Logistic	24.91	5.93813	0.08347	3.703
	Richards	26.60	1.23707	0.03976	3.608
	Korf	35.77	9.88088	0.76557	3.589
九州	Mitscherich	25.19	1.09590	0.03829	3.953
	Gompertz	23.61	2.75447	0.06883	3.980
	Logistic	23.02	7.83187	0.10122	4.035
	Richards	24.54	1.40840	0.04686	3.952
	Korf	32.45	10.99020	0.82275	3.947

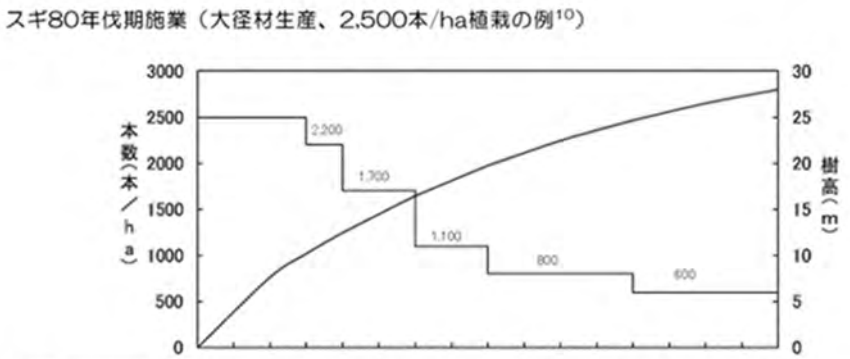
4. 標準的な施業体系に関する情報収集と本数減少曲線の作成

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実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、本業務ではウェブ検索や都道府県庁への個別照会によって施業体系図を収集しその内容を整理した。各都道府県がスギについて作成した施業体系図を本業務の収集対象とした。

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、民有林スギ林分密度管理図の適用地域ごとに整理した。



見込み	林齢	0		10		20		30		40		50		60		70		80	
	樹高(m)	0		8		13		17		20		22		25		27		28	
	胸高直径(cm)	0		11		16		20		25		30		31		36		37	
	材積（m^3／ha）			116	212	300		462		553		622		750		763		853	
間伐基準	間伐伐年				15	20		30		40				60					
	間伐本数(本)				300	500		600		300				200					
	間伐率(%)				12	23		35		27				25					
	間伐木の選定方法[11]																		

図 4-1 施業施業体系図の例（加賀森林計画区地域森林計画書より）

次に基本的に PDF 形式や画像形式で存在していた収集した施業体系図から以下の項目を Microsoft Excel 上でデジタルデータ化した。都道府県において項目名も様々であるが、名称が異なっていても同一の内容であれば以下の項目に沿って整理した。施業体系図に該当す

る情報がない場合は空欄とした。このデータセットを後述する実際の本数減少などと比較することにより、収穫予想表作成時の参考資料となる。

デジタルデータ化した項目

- 密度管理図名
- 都道府県名
- 施業タイプ：（例）大径材生産
- 地位
- 密度管理基準：Ry（収量比数）
- 施業等：（例）間伐 1 回目
- 伐期：（例）60 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）
- 間伐前本数
- 間伐後本数

施業体系図を掲載している資料の収集はウェブ検索から始めた。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、収集した資料の状況（表 4-1）、施業体系図に記載されていた施業タイプ（表 4-2）、伐期（表 4-3）、施業等（表 4-4）、密度管理図ごとの上層樹高と間伐前および間伐後･主伐後本数の散布図（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。間伐時の上層樹高が掲載されていない施業体系図が含まれる場合（例えば表東北など）、散布図上のデータ数が少なくなっており、自然枯死を反映した本数を間伐間に掲載している施業体系図の場合（例えば裏東北・北陸、北近畿・中国、南近畿・四国など）、データ数が多いように見える。

植栽本数は 1,500～7,000 本/ha とされていた。総じて南の地域と比較して北の地域の植栽本数は少なかった。また、北の地域は主伐まで記載されることが多かったが、北近畿・中国や南近畿・四国などは主伐林齢（樹高）を明確にしていない（図上では最後が 0 本にならない）例も存在した。

表 4-1 収集した資料の状況

民有林スギ密度管理図 適用地域	密度管理図に 含まれる都道府県数	提出数	%
表東北	3	2	66.7
裏東北・北陸	10	9	90.0
北関東・東山	6	6	100.0
南関東・東海	7	5	71.4
北近畿・中国	12	11	91.7
南近畿・四国	6	5	83.3
九州	8	7	87.5
総計	**52**	**44**	**84.6**

注：二つの適用地域にまたがる府県があるため、密度管理図に含まれる都道府県数の総計は 47 にならない。

表 4-2 体系図に記載されていた施業タイプ

育成単層林（少雪地帯）	間伐モデル（低密度）	中径材(非積雪地)
育成単層林（多雪・豪雪地帯）	再造林低コスト施業	柱材
育林	心持柱材・板材	長伐期
一般建築材	造作材	低密度(1500 本)
一般材	大径一般施業	低密度(2000 本)
一般材施業	大径材	低密度(2500 本)
一般材生産	大径材(積雪地)	普通植栽育林
一般材生産施業	大径材(非積雪地)	並材
皆伐一斉造林	大径材生産	優良材
間伐モデル（高密度）	中径材(積雪地)	優良大径材
間伐モデル（中密度）		

表 4-3 体系図に記載されていた伐期

35 年伐期	50 年伐期	70 年伐期
35 年伐期/70 年伐期	50 年伐期/80 年伐期	80 年伐期
40 年伐期	55-85 年伐期	88 年伐期
45 年伐期	60 年伐期	90 年伐期

表 4-4 体系図に記載されていた施業等

間伐初回	間伐 7 回目	間伐 17 回目	除伐	自然枯死
第 1 回間伐	間伐 8 回目	間伐 18 回目	針除伐	自然枯死・除伐
間伐 1 回目	間伐 9 回目	手入間伐	雑除伐	
間伐 2 回目	間伐 10 回目	収入間伐	除間伐年	
第 2 回間伐	間伐 11 回目	保育間伐 1 回目	択伐	
間伐 3 回目	間伐 12 回目	保育間伐 2 回目	主伐	
第 3 回間伐	間伐 13 回目	利用間伐 1 回目	主伐収穫	
間伐 4 回目	間伐 14 回目	利用間伐 2 回目	50 年伐採	
間伐 5 回目	間伐 15 回目	利用間伐 3 回目	80 年伐採	
間伐 6 回目	間伐 16 回目	利用間伐 4 回目	植栽時	

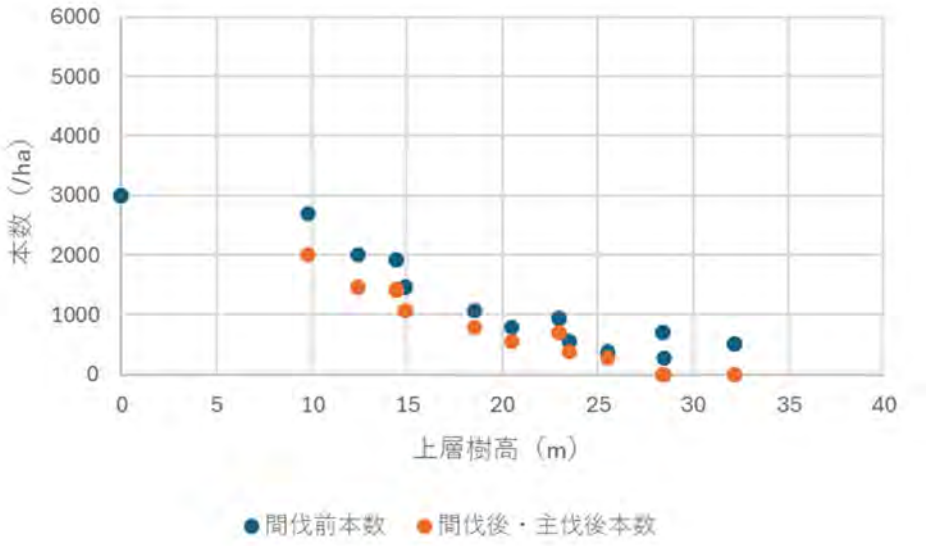


図 4-2 上層樹高と間伐前および間伐後・主伐後本数（表東北）

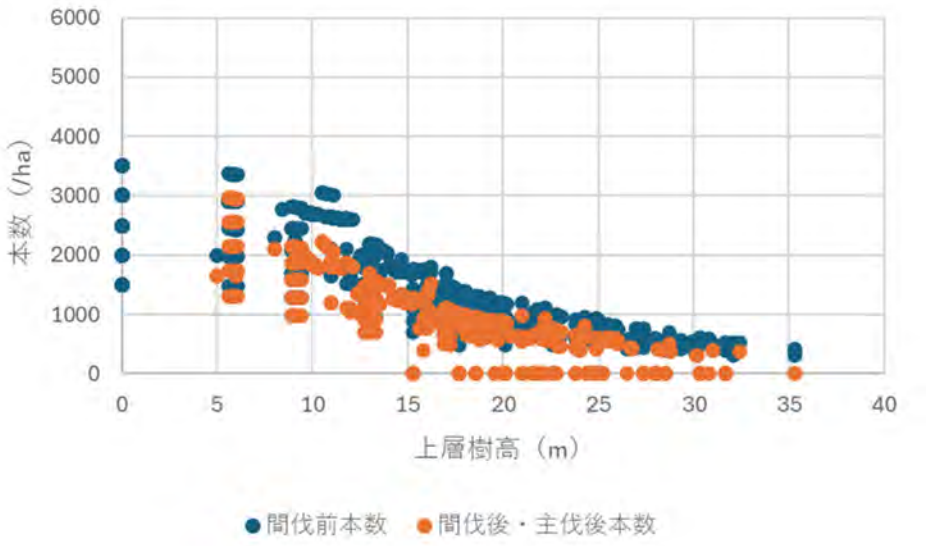


図 4-3 上層樹高と間伐前および間伐後・主伐後本数（裏東北・北陸）

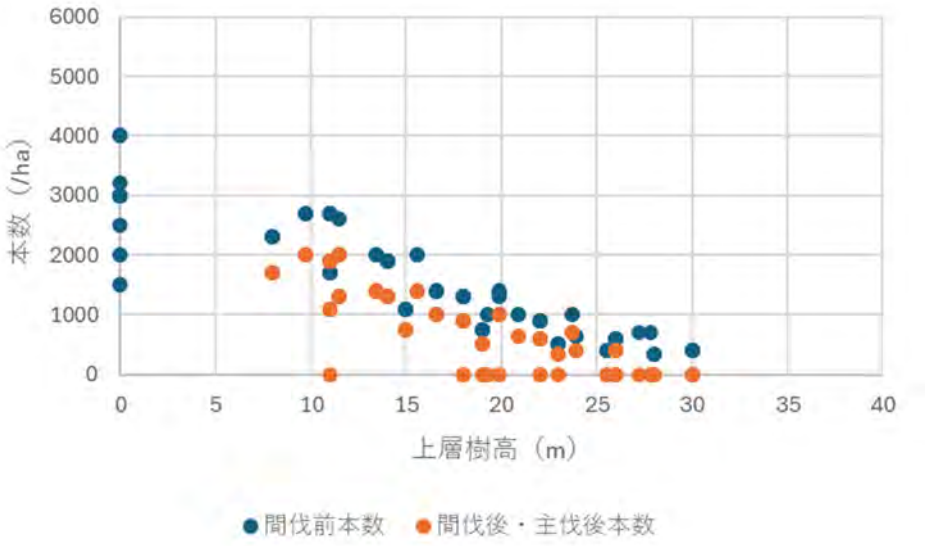


図 4-4 上層樹高と間伐前および間伐後・主伐後本数（北関東・東山）

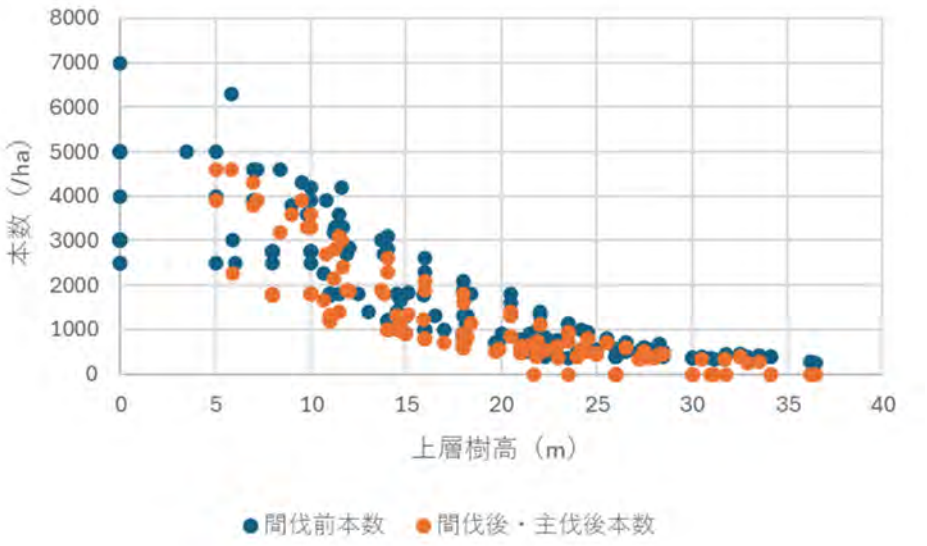


図 4-5 上層樹高と間伐前および間伐後・主伐後本数（南関東・東海）

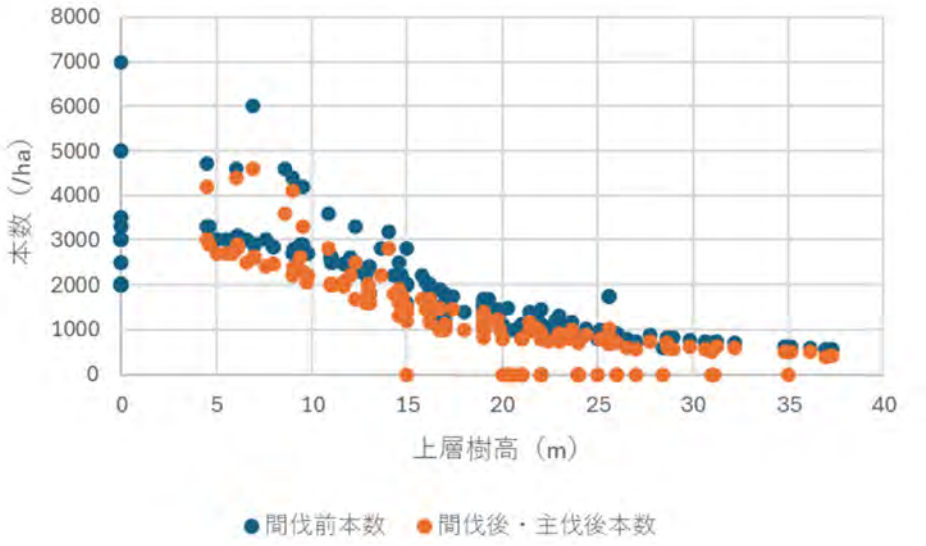


図 4-6 上層樹高と間伐前および間伐後・主伐後本数（北近畿・中国）

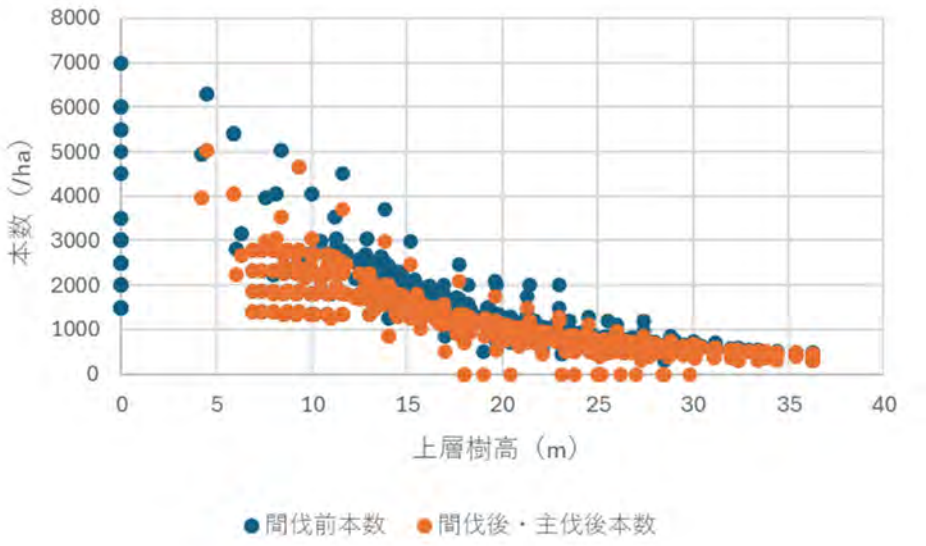


図 4-7 上層樹高と間伐前および間伐後・主伐後本数（南近畿・四国）

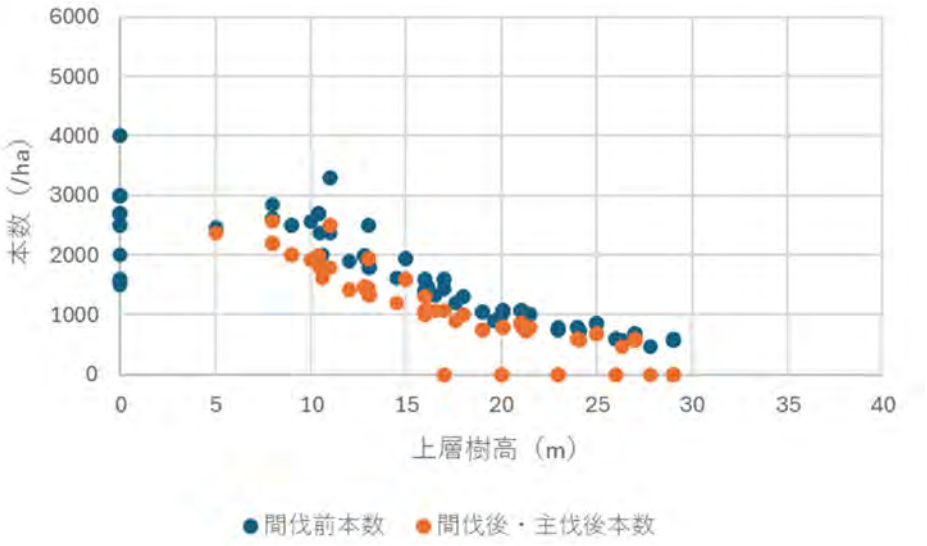


図 4-8 上層樹高と間伐前および間伐後・主伐後本数（九州）

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ず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。収穫予想表のうちでも特に森林簿の小班蓄積の算出を目的とした収穫予想表への適用を想定している。

データとして、既述の樹高成長曲線の作成に用いたのと同じ 7 地域計 5,978 か所を使用した。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、単純なべき乗式をあてはめることにした。

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 4-5、図 4-9）。7 地域いずれも係数 a、b ともに統計的に有意であった。標準誤差は地域により 462.9～708.4 本/ha であった。本数密度の影響を受けにくい上層樹高と異なり、本数は施業や被害の影響を受けばらつきが大きいことに加え、データそのものに含まれる誤差の影響もあると考えられる。

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、その範囲は地域により 2,421～4,349 本/ha で、南関東・東海地方が高いものの 3,000 本を中心とするおおむね常識的な値が得られた。裏東北・北陸地方が 2,421 本/ha と低いのは、雪害による本数減少の可能性も考えられる。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。林齢 90 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。

参考までに、これまでに述べた林分密度管理図の収量密度効果の逆数式の修正版、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 のようになる。林齢 90 年以上を除いては、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。

表 4-5 地域別本数減少曲線のあてはめ結果

地域	a	b	標準誤差（本/ha）
表東北	3034	0.9536	503.7
裏東北・北陸	2421	0.9570	462.9
北関東・東山	2924	0.9550	500.1
南関東・東海	4349	0.9373	600.4
北近畿・中国	2956	0.9602	550.0
南近畿・四国	3896	0.9473	708.4
九州	3183	0.9541	595.0

注）本数（本/ha）=a*b^上層樹高(m)

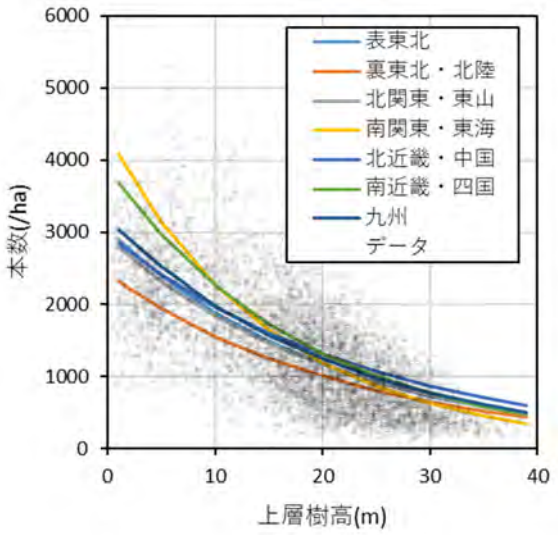


図 4-9 本数減少曲線の地域比較

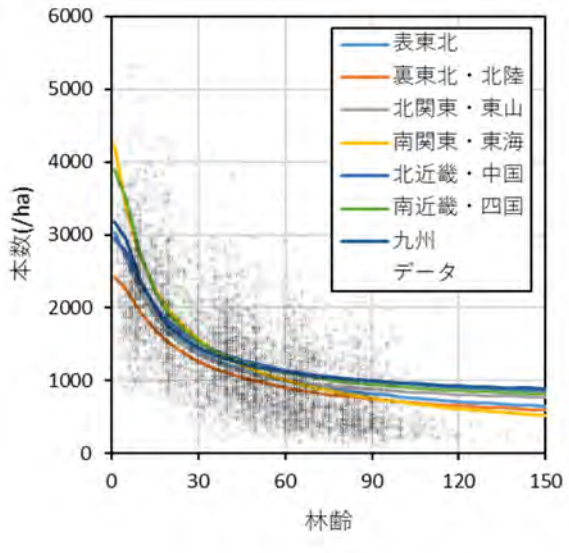


図 4-10 横軸を林齢に置き換えた本数減少曲線

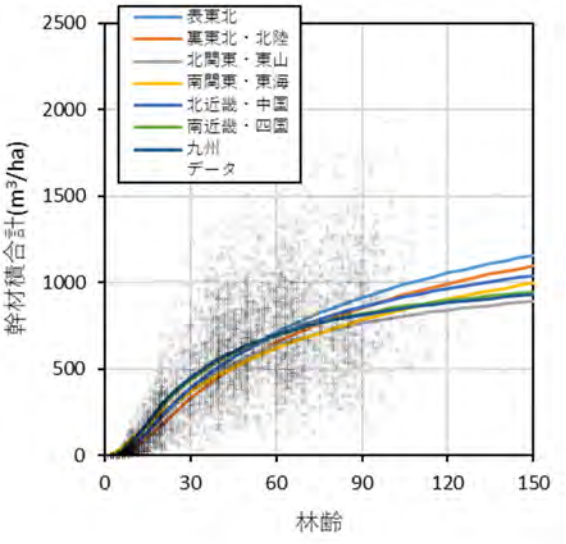


図 4-11 幹材積合計の地域別推定結果

5. 追加調査・解析の検討

5.1. 背景・目的

上述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[2]、特に林齢 101 年(20 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、スギ人工林の追加調査・解析を実施した。

表 5-1 スギ現地調査データ数（林齢別、都道府県別 一部）[2]

林齢	富山	石川	福井	山梨	長野	岐阜	静岡	愛知	三重
1～ 10	33	12	8		11	31	11	12	6
11～ 20	28	31	15		18	57	20	11	16
21～ 30	9	22	34	3	21	75	45	15	40
31～ 40	21	29	23		20	45	18	12	37
41～ 50	23	27	19	3	20	43	29	9	40
51～ 60	21	39	24	1	11	28	30	12	30
61～ 70	24	29	23		14	40	29	12	21
71～ 80	23	21	24		6	36	11	6	11
81～ 90	20	17	15	1	10	36	25	8	10
91～100	10	15	4	1	9	20	6	1	9
101～110	2	1				2	1		16
111～120	1	2				1	1		10
121～		1			1	2	5		6
計	215	246	189	9	141	416	231	98	252

網掛けはデータ数 10 未満を示す

[2] 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」の報告書より

5.2. 材料と方法

5.2.1. 作業のながれ

ALS データを使った林齢 101 年以上を対象とした高齢級林分のスギ人工林上層木平均樹高の取得の流れを図 5-1 に示す。

まず、追加調査・解析の対象県を選びデータの利用許可を取得ののち、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、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。

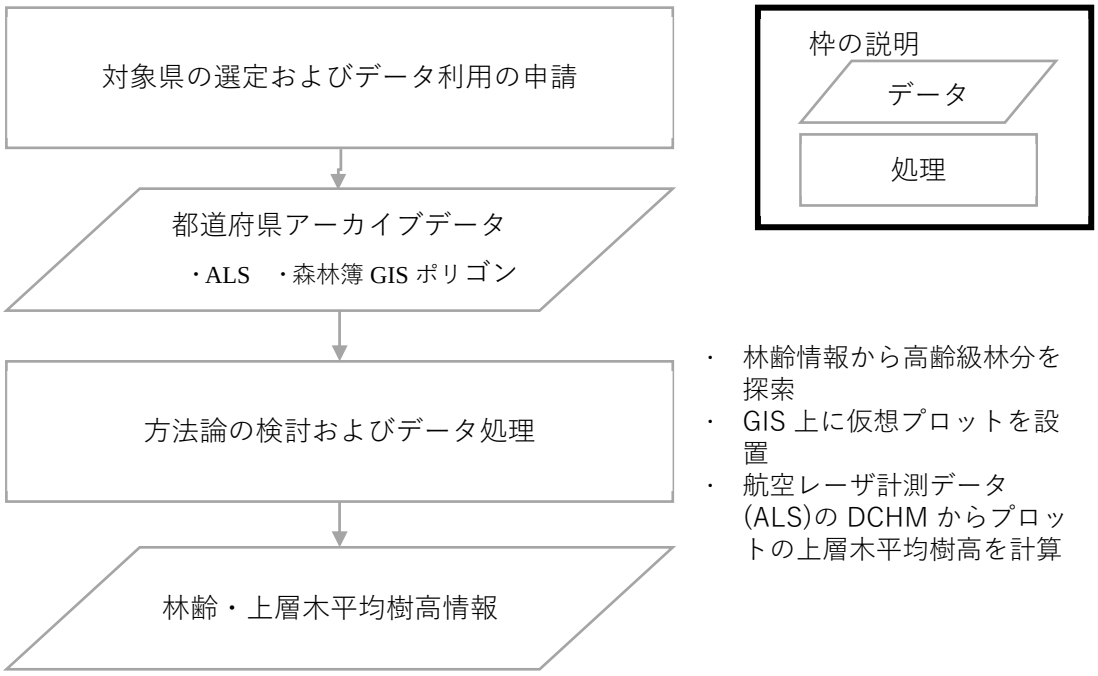


図 5-1 林齢と上層木平均樹の取得の流れ

5.2.2. 対象エリア

追加調査・解析の対象とした県を表 5-2 および図 5-2 に示す。スギ人工林密度管理図[3]の７つの地域区分をもとに、ALS データの入手が可能だった秋田県、福島県、静岡県、鳥取県、長野県、徳島県、大分県の 7 県を選択した。

[3] スギ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 54 年～56 年調整　平成 11 年 7 月復刻）

表 5-2 追加調査・解析の対象県

スギ人工林地域区分	県
裏東北・北陸	秋田県
表東北	福島県
北関東・東山	長野県
南関東・東海	静岡県
北近畿・中国	鳥取県
南近畿・四国	徳島県
九州	大分県

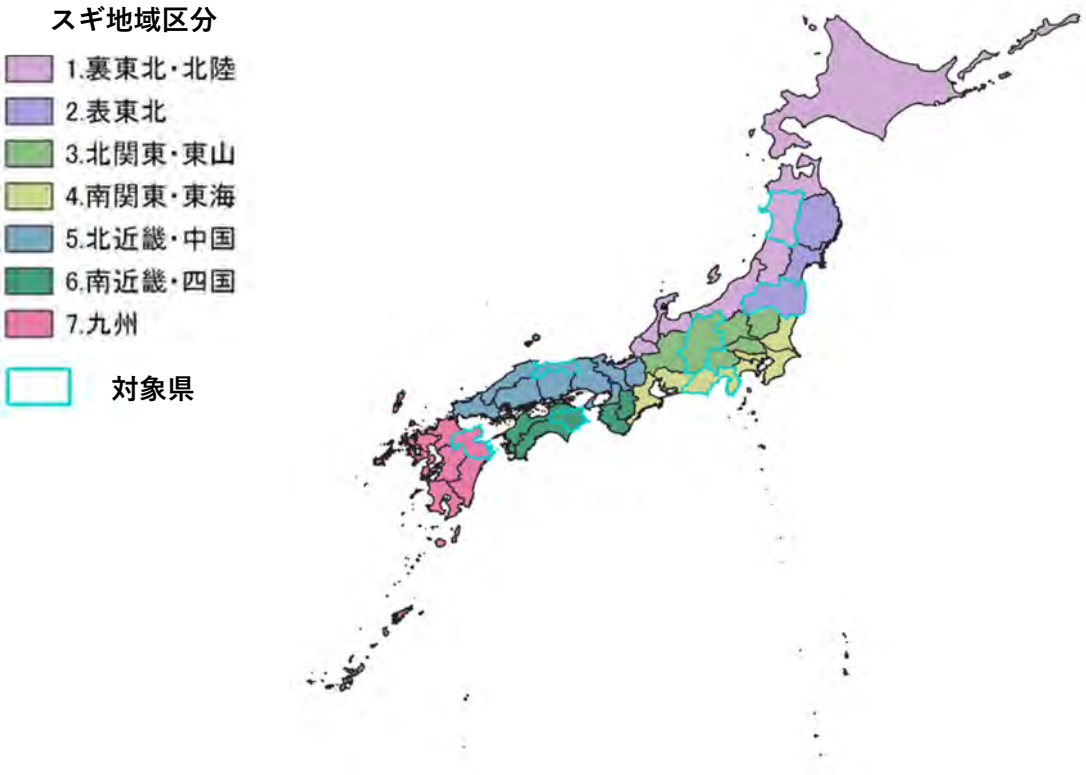


図 5-2 追加調査・解析とした対象県の分布

5.2.3. 手法

追加調査・解析の対象林分は林齢 101 年以上のスギ人工林である。林齢情報は森林簿から、上層木平均樹高については ALS データの解析結果から取得した。これらのソースデータは各県からご提供いただいたものである。ここに感謝の意を表する。

高齢級林分の林齢と上層木平均樹高取得のための作業の流れは以下のとおりである。

(1) 森林簿 GIS から高齢級林分の場所と林齢情報を取得
(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) 高齢級 GIS ポリゴンと上層木平均樹高からサンプル抽出
(6) 現地検証

（1）森林簿 GIS から高齢級林分の場所と林齢情報を取得

林齢情報の抽出では、森林簿 GIS ポリゴンから樹種（スギ）、林種（人工林）、林齢（101 年以上）、面積（0.2ha）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。

この作業を 7 つの県で処理した。

（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

上層木平均樹高のための方法には、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取得する方法である。それぞれ、メリットとデメリットがあり、前者のメリットはより真値に近い上層木平均樹高の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、また点密度は 1 点/m^2 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）。

今回採用した両者を組み合わせた手法は、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、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/m^2 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。

メッシュ単位には、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。小メッシュが 10ｍとされた理由は、地位指数のための上層木樹高の選定では 1ha あたり樹高の上位 100 本の値を使うため、10ｍメッシュあたり 1 本と換算して設定されている。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。

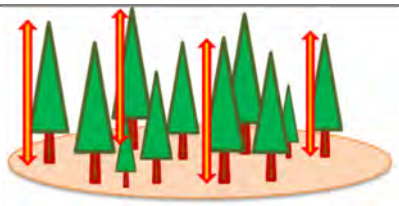
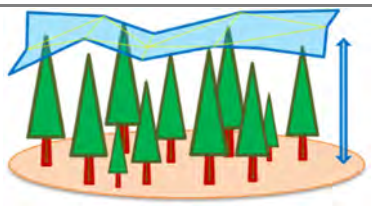
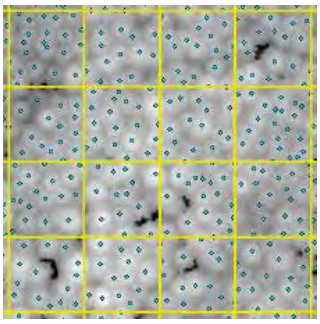
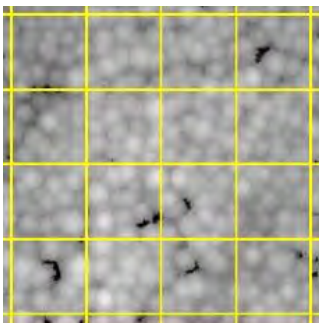
樹頂点法	DCHM 最大値法
	
	
20m メッシュ：黄色線、樹頂点：青点、DCHM 画像：白色は樹高が高く、黒が低い	

図 5-3 ALS データによる上層木平均樹高の主な取得方法[4]

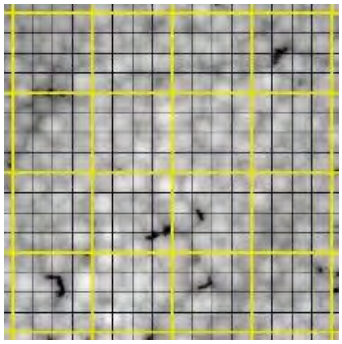
メッシュ細分最大値をメッシュ平均	
	**樹頂点法と DCHM 最大値法のメリットが期待できる** 小メッシュで最大値を抽出し、20m で平均することで DCHM 最大値法より上層木平均に近づき、樹頂点抽出法より処理が容易

図 5-4 本事業で採用した上層木平均樹高の取得方法[4]

[4] 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」報告書より

（3）ALS データの前処理

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 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 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）高齢級 GIS ポリゴンと上層木平均樹高からサンプル抽出

森林簿 GIS から抽出した小班レベルの林齢 101 年以上の GIS ポリゴンと DCHM から作成した上層木平均樹高分布図を GIS 上で重ね、齢級ごとに１０点程度をサンプルとして抽出した。ここで、森林簿の林齢が不正確の可能性もあるため、GIS 上に DCHM に加えて空中写真や高分解の衛星画像も表示し、目視で林冠の大きさや高さを確認したうえでサンプリングした。

（6）現地検証

ALS データによる上層木平均樹高が 50m を超える林分について現地で検証することとした。対象県は鳥取県で、上層木平均樹高が高い地域の八頭郡智頭町にて現地で樹高計測した。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

対象県で作成した上層木弊基準樹高の分布図とサンプル箇所を図 5-5 に示す。水色の線が県境界、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。林齢 101 年以上の小班を薄いピンク、上層木平均樹高サンプル箇所を濃いピンク色の枠線で示した。一部の県では林齢 101 年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。

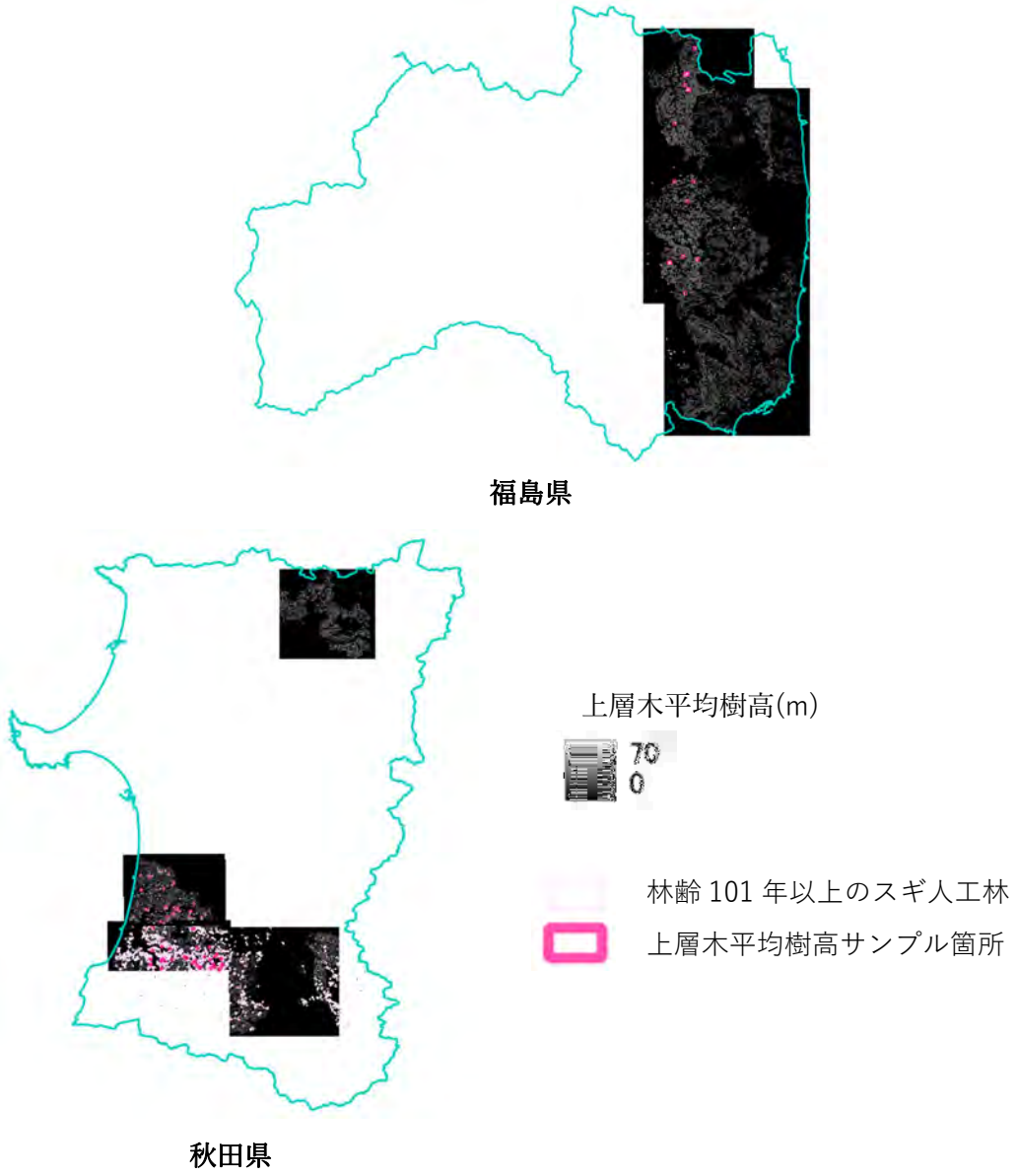
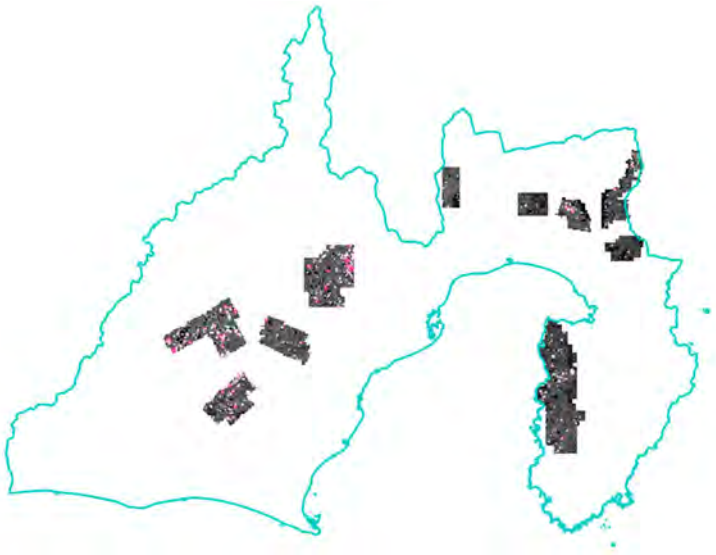


図 5-5 各県の ALS による上層木平均樹高分布図、森林簿高齢級小班およびサンプル箇所



静岡県

鳥取県

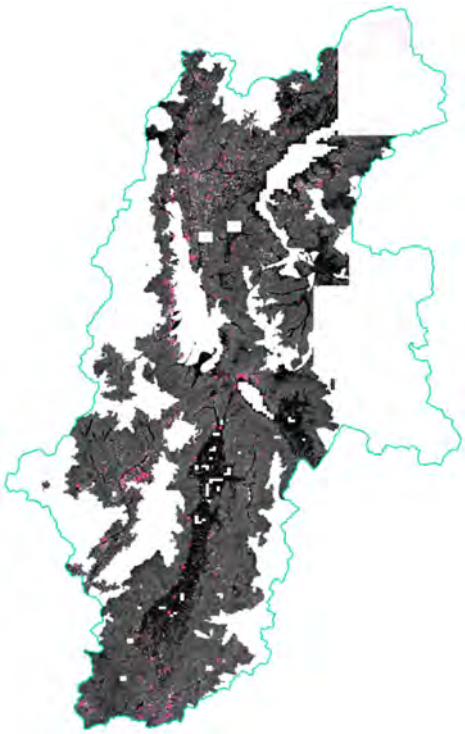
上層木平均樹高(m)

70
0

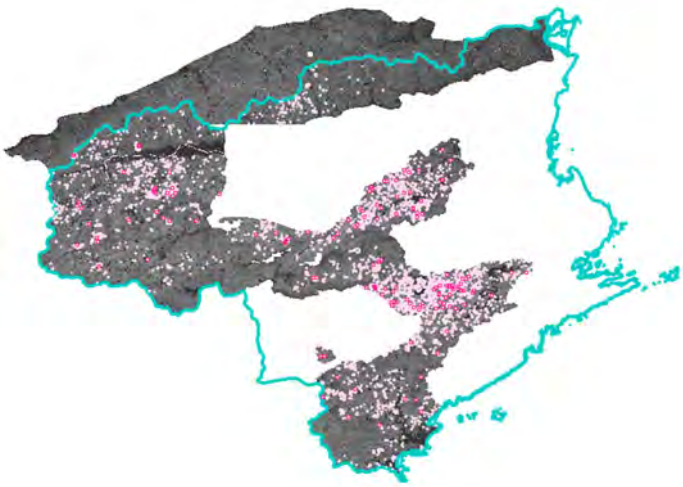
林齢 101 年以上のスギ人工林

上層木平均樹高サンプル箇所

図 5-5 各県の ALS による上層木平均樹高分布図、森林簿高齢級小班およびサンプル箇所 （つづき）



長野県



徳島県

図 5-5 各県の ALS による上層木平均樹高分布図、森林簿高齢級小班およびサンプル箇所 （つづき）

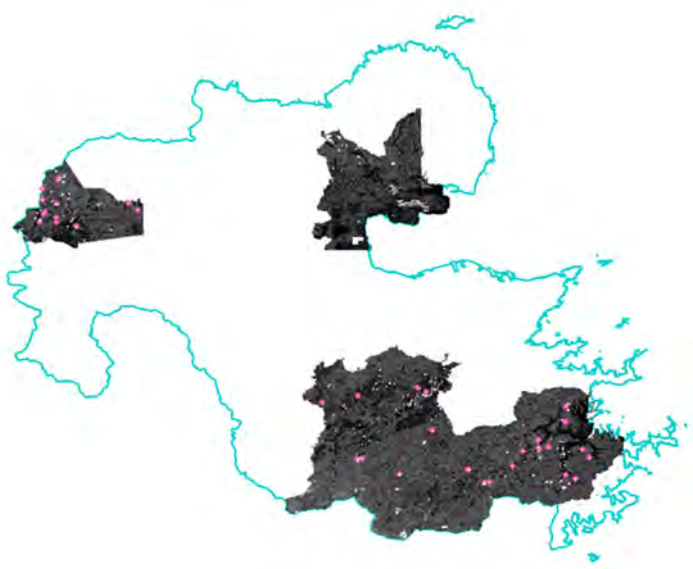


図 5-5 各県の ALS による上層木平均樹高分布図、森林簿高齢級小班
およびサンプル箇所 （つづき）

対象県別のサンプル箇所数を表 5-3 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。

表 5-3 林齢 101 年以上の抽出箇所数

ALS 撮影時の林齢	福島	秋田	静岡	長野	鳥取	徳島	大分	総計
101-105		51	12	12	20	21	21	137
106-110	6	37	8	24	19	22	3	119
111-115	1	24	10	14	25	15	1	90
116-120		9	14	12	22	8	1	66
>121	3	1	11	37	90	18	5	165
総計	10	122	55	99	176	84	31	577

ALS: airborne laser scanning 航空レーザ計測

5.3.2. サンプル箇所の林齢と ALS による上層木平均樹高

図 5-6 にサンプル箇所の林齢と ALS による上層木平均樹高の散布図を対象 7 県別に示す。

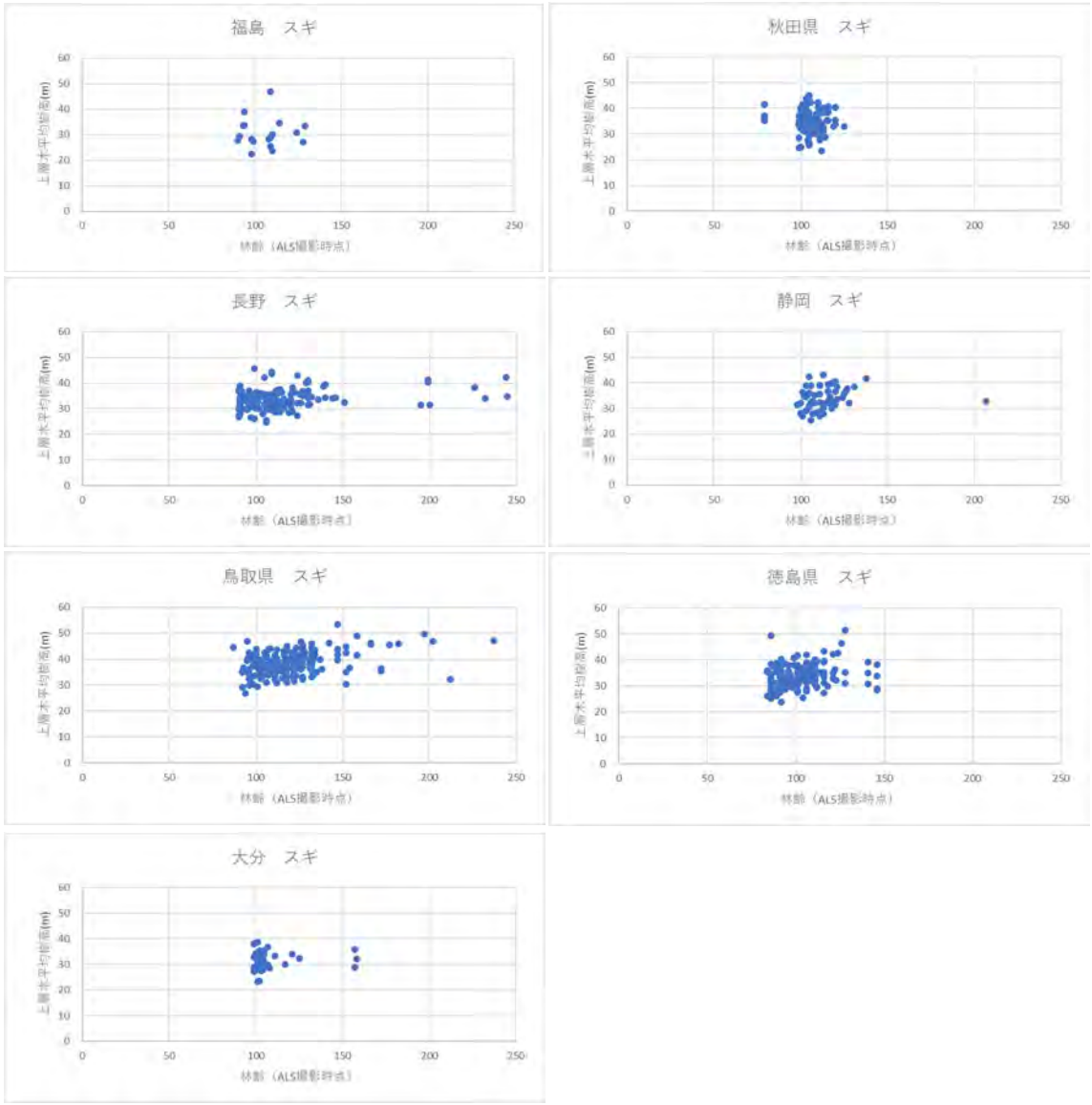


図 5-6 サンプル箇所の林齢と ALS データによる上層木平均樹高

対象県の上層木平均樹高サンプルの平均値と最大値を表 5-4 に示す。全体の平均値は35.6m で最大値は 53.4m だった。福島県と大分県ではサンプル数が少ないため各県のデータの傾向を述べる事は難しいが、他 5 県について上層木平均樹高が 40m を超える林分も見られ、鳥取県と徳島県については 50m を超えるサンプル箇所が存在した。

表 5-4　対象県の上層木平均樹高サンプルの平均値と最大値

地域	県	サンプル数	上層木平均樹高	
			平均値	最大値
裏東北・北陸	秋田	122	34.6	45.1
表東北	福島	10	30.9	46.9
北関東・東山	長野	99	34.1	44.3
南関東・東海	静岡	55	34.3	43.1
北近畿・中国	鳥取	176	38.8	53.4
南近畿・四国	徳島	84	34.9	51.5
九州	大分	31	31.4	38.7
	総計	577	35.6	53.4

5.3.3.　高木林での現地検証

上層木平均樹高が特に高かった鳥取県智頭町内の林分を対象に、ALS による高さを検証するため、現地で樹高を計測した。林内の写真を参考として図 5-7 に示す。この林分は傾斜地にも関わらず樹高 50m 以上の立木が分布していた。

調査結果を図 5-8 に示す。上層木平均樹高が 50m 前後の林分を対象に、高木を選定の上樹高計測をしたところ、ALS の DCHM 画像から単木を抽出した最大値を樹高と近い値となった。立木平均絶対誤差は 1.9m で、バーテックスを用いた樹高計測による個人誤差が 1 m 程度、また樹高 50m 以上の高木の計測結果と考えると、大きな誤差ではないと言える。以上の結果から、このエリアの ALS による上層木樹高は実態に近い数値を示していると考えられる。

図 5-7　現地検証を実施したスギ人工林の地点

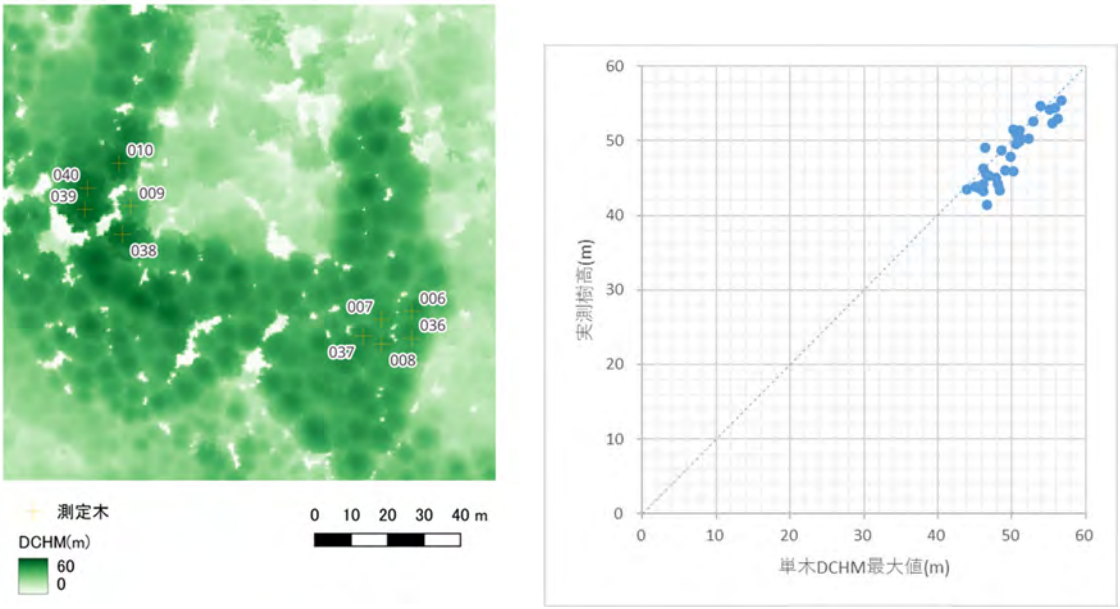


図 5-8　現地検証による単木 DCHM 最大値と実測樹高の関係

5.3.4. 現地計測収集データとの比較

秋田県での ALS から得られた上層木平均樹高の結果について、これまで収集された現地計測調査（FM 高齢級調査、森林生態系多様性基礎調査（NFI）、県提供、蓄積検証調査）との比較を図 5-9 に示す。ALS によるデータは一部 100 年以下も含んでいるが、現地調査データと比較すると全体的にやや高めであった。特に、蓄積精度検証調査データと比較すると違いが大きい。現地調査より数値が高くなった要因として、サンプリングの際に、20m 以下の低い上層木樹高のデータを除いたこと、目視確認の際に樹冠の大きさが相対的に小さい林分を除いたことがあげられる。

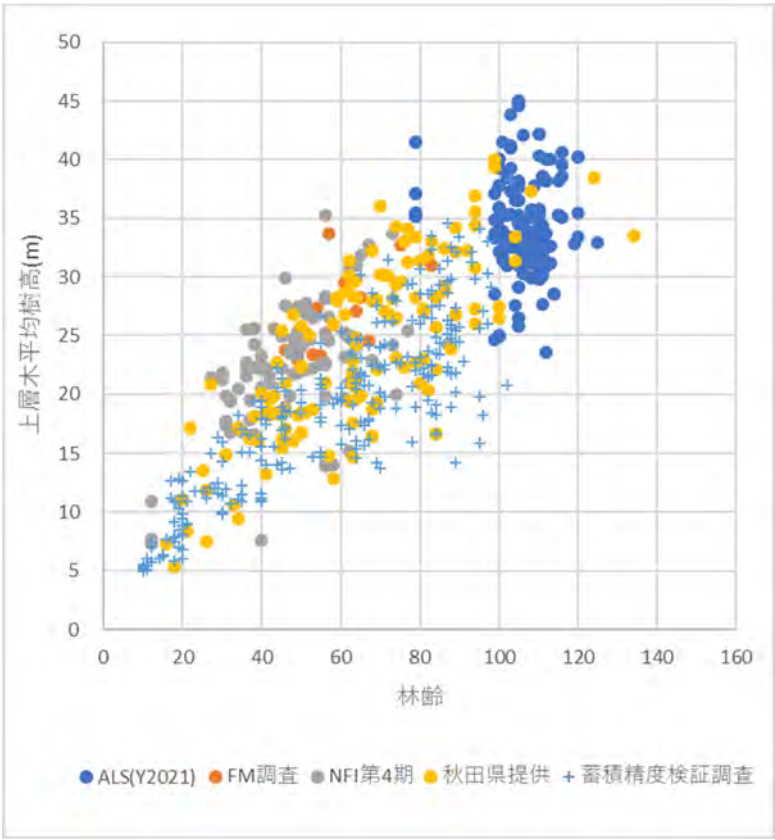
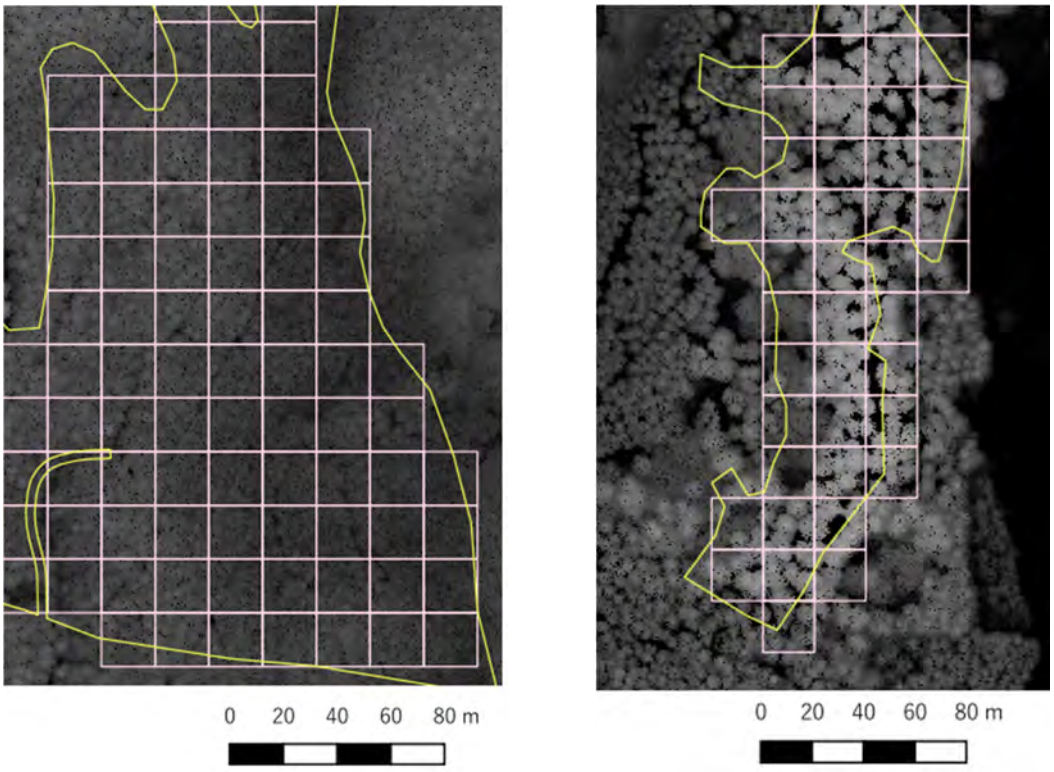


図 5-9　スギ裏東北地方の現地調査と ALS による林齢と上層木平均樹高

図 5-10 に、上層木平均樹高が 20m以上で樹冠径が小さい林分の DCHM 画像を左に、比較のためサンプリングした同齢の林分を右に示す。林齢は 104 年で、黄色線は小班界、ピンクの枠線は一辺 20m の正方ポリゴンである。左図は上層木平均樹高が 20m 前後で、右図は 40m 前後と高さに大きな差があり、また樹冠径が左図は 3m 前後、右図は 6 m 前後である。林齢が 100 年を超える林分で樹冠径が左図のように小さいとは考え難く、目視確認の際にはサンプル対象外とした。

今後の課題として、サンプリング方法の再検討と現地調査による林齢情報の検証があげられる。まずサンプリングについて、NFI では森林簿の林齢を参照していることから、ALS のサンプリングでも恣意性を避けるため目視による確認はなしとし、統計処理によってデータをフィルタリングする方法が考えられる。例えば齢級ごとに平均値を中心に標準偏差の幅で閾値を設定する方法である。

現地調査による林齢情報の検証については、森林簿上は高齢級だが DCHM 画像では樹冠径が小さい林分を対象に、林齢や施業履歴などを自治体や所有者、森林施業者等にヒアリングし情報収集する方法が考えられる。



サンプリングから外した箇所
林齢 104 年, 上層木平均樹高 20m 前後

サンプリング箇所
林齢 104 年, 上層木平均樹高 40m 前後

図 5-10　サンプリングから外した箇所とサンプリング箇所の比較

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、樹齢、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、林齢、蓄積は、人工林の小班よりも不確実性が大きいと考えられる。そこで本項では、森林簿に現状記載されている内容に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、昨年度事業で整理した森林生態系多様性基礎調査（National Forest Inventory; 以下NFI）の第 3 期と第 4 期の天然林のデータを用い、地域・林相別の材積成長曲線を作成した。この際、昨年度事業の結果から、NFI データに収録されている森林簿記載の林齢ではプロット材積を十分に説明できないことが分かっているので、森林簿記載の林齢は不確かであっても、第 3 期と第 4 期の調査間隔が 5 年間であることは確実なことに着目した別のアプローチを選択した。

次に、新たな林相区分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し更新する方法を検討した。

さらに、森林簿記載の林齢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材積から林齢を逆推定することが可能になる。以上の組み合わせにより、初期化した各小班の林相、林齢と新たな材積成長曲線で現在および将来の小班蓄積を更新していくことを想定して以下の検討を進めた。

6.1. 地域・林相別の材積成長量と材積の上限の検討

天然林は、様々な樹種や樹齢の立木から構成されており、同齢単純林のような林分密度管理図や収穫表の作成は困難である。また、天然林に関する森林簿の記載内容（樹種、林齢、平均樹高、材積等）は、人工林よりも不確実性が高いのが実態であると考えられる。そこで本提案では、森林簿に記載されている林齢に依存せず、地域・林相ごとに一定の成長量を期首の材積に加算することで小班の材積を増加させる方法を想定した。その際、伐採まで無限に材積が増加することは不合理であるため、 ヘクタールあたり材積の上限についても併せて検討した。

具体的には、NFI データの分析により、天然林の地域別・林相別の平均的な材積成長量（m^3/ha/年）と材積の上限（m^3/ha）を推定した。材積は現行の林野庁計画課編「立木幹材積表」東日本編及び西日本編によって計算した。地域区分としては、林分密度管理図の地域や都道府県単位を基本に、分析に用いることのできるデータの数やばらつき、自然条件等を考慮して、合理的な地域区分を検討した。また、林相区分は将来的なリモートセンシングの利用を念頭に、常緑広葉樹林、落葉広葉樹林、常緑針葉樹林、落葉針葉樹林及びこれらの混

交林（材積混交率 25～75%）を基本とし、区分をより大括りにする選択肢も含め、合理的な林相区分を検討した。

6.1.1. 平均的な材積成長量と材積の上限の推定

NFI の第 3 期（2009～2013 年）と第 4 期（2014～2018 年）の毎木調査データを使って、天然林の林分蓄積と林分成長量を求めた。第 3 期に測定された天然林の数は 6,512 プロット（全体の 49.0%）、第 4 期は 6,132 プロット（48.5%）である。解析に用いるプロットは、以下の条件で選定した：「林分材積が 20 m3/ha 以上」「第 3 期から第 4 期にかけて『継続調査』が行われている」「第 3 期から第 4 期にかけての林分成長量が±300 m3/ha 未満」「第 3 期と第 4 期の緯度経度の実測値の距離が 20 m 未満」。以上のフィルタリングの結果、残った 4,058 プロットを統計解析の対象とした。期間中の枯死木の発生により成長量がマイナスになるプロットもそのまま集計した。

材積成長量と材積上限値を野外データから推定するには、何かしらのモデルが必要となる。ここで、単純な線形回帰式などは材積が理論上無限に増加するため不合理である。そこで本研究では、材積が時間とともに上限値に向かって漸近するシグモイド型のモデルである Chapman-Richards 関数を用いた。同関数の基本形は以下の式で表される。

$$y = A(1 - e^{-kt})^{\frac{1}{1-m}} \quad (式\ 1)$$

ここで、y は林分材積（m^3/ha）、t は林齢（年）、A、k、m はパラメータである（各パラメータの意味は表 6-1 を参照）。式 1 を用いれば、林分材積と林齢に関する一時点のデータ（スナップショット）からパラメータ A、k、m を求めることができる。しかし、NFI のように森林簿による天然林の林齢は不確実性が高い。そのため、本課題では Chapman-Richards 関数の微分方程式で表した式 2 を用いた。

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = \frac{A^{1-m}k}{1-m}y^m - \frac{k}{1-m}y \quad (式\ 2)$$

y、t、A、k、m の定義は式(1)と同じである。左辺 dy/dt は林分材積の成長率を表す。

式 2 は、成長率を求めるために二時点のデータが必要となる代わりに、林齢の情報が必要なくなる。NFI の第三期と第四期のデータを使えば、二時点のデータは問題なく得られる。従って、林齢の情報を必要としない式 2 を用いることで、式 1 を用いるよりも信頼性の高いパラメータ推定が可能になると期待される。式 2 の左辺は、林分成長量と測定間隔（Δt）の差分商 $\frac{y(t+\Delta t)-y(t)}{\Delta t}$ によって求めた。式 2 を全国の天然林プロットのデータ（n=4,058）に当てはめることで、任意の期首材積に対する平均的な材積成長量および材積の上限を推定した。パラメータの推定方法については次節「6.1.3 節 パラメータの推定方法と構造」を参照。

なお、式 1 を変形して、t を y の式とすれば以下の式 3 となる。

$$t = -\frac{\log\left[1 - \left(\frac{y}{A}\right)^{1-m}\right]}{k} \quad \text{(式 3)}$$

式 2 で推定されたパラメータ A、k、m と林分材積 y を式 3 に代入すれば、対象林分の林齢を逆推定することが可能である。ただし、理論上の林分材積の上限値を表すパラメータ A を、林分材積 y が超えてしまう場合は推定できない（log の中がマイナスとなるため）。

Chapman-Richards 関数のパラメータ A、k、m の推定結果を表 6-1 に示す。全国の天然林の林分材積の上限値は、平均して 526.7m^3/ha だった。期首材積が 138.7 m3/ha の時に材積成長量はピークとなり、その時の平均成長量は 4.71 m^3/ha/年だった（図 6-1）。また、材積成長量がピークとなる林齢は 42.8 年だった（図 6-2）。材積は林齢 200～300 年ごろに頭打ちとなる傾向がみられた（図 6-2）。これらの林分上限値やピーク時の平均成長量、ピークに達する林齢は、各地の広葉樹林収穫表や森林モニタリング調査の結果とも概ね一致する。また、図 6-1 のヒストグラムが示す通り、NFI 調査では林分材積（2009～2013 年の第 3 期調査）が 100～300 m^3/ha（林齢 34.5～80.6 年に相当）と、これから大きく成長すると期待されるプロットが多く見られたことから、全国の天然林の平均材積は今後数十年間に渡って増加していく可能性が高いと思われる。

図 6-3 は、NFI 調査での森林簿による林齢と今回の Chapman-Richards 関数（式 3）を使って推定された林齢の関係を示している。両者には全く相関がみられなかった（相関係数 0.001 未満）。この結果は、天然林の林齢推定の難しさや不確実性をあらためて示唆している。

表 6-1 Chapman-Richards 関数のパラメータ推定結果
（材積の上限値に地域・林相の差がないと仮定した場合）

			推定結果		
パラメータ	単位	意味	平均値	0.025 分位数	0.975 分位数
A	m^3/ha	材積の上限値	526.7	484.0	588.4
k	なし	成長速度を規定	0.0186	0.0136	0.0227
m	なし	*代謝スケーリング*指数	0.550	0.285	0.831

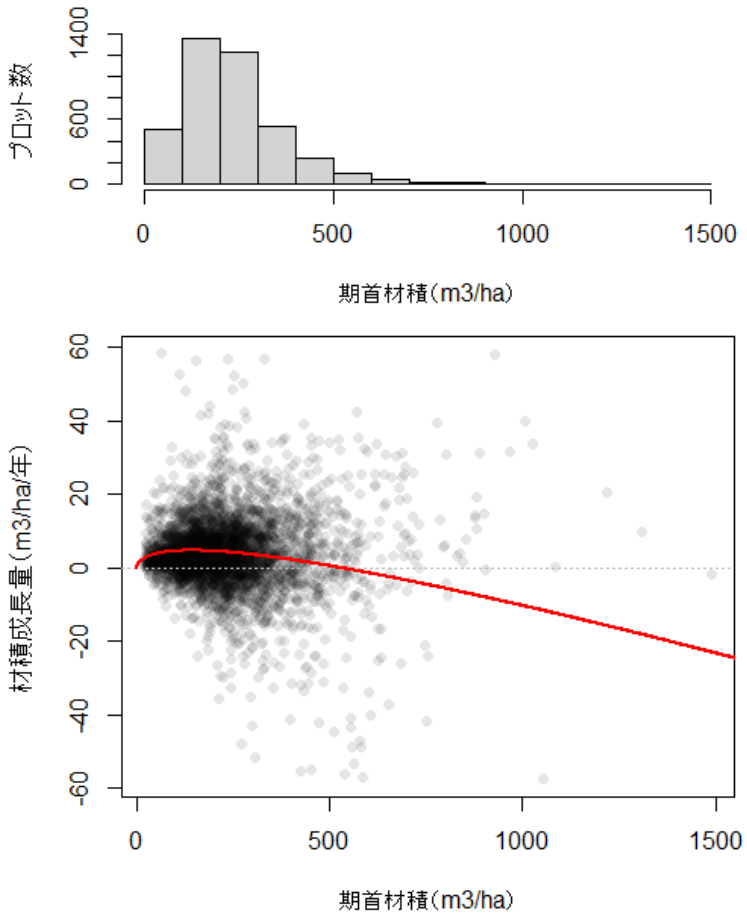


図 6-1 期首材積のヒストグラムおよび期首材積と材積成長量の関係
（材積の上限値に地域・林相の差がないと仮定した場合）
点は NFI プロットの実測データ（n=4,058）、赤線は当てはめた Chapman-Richards 関数（式 2）を示す

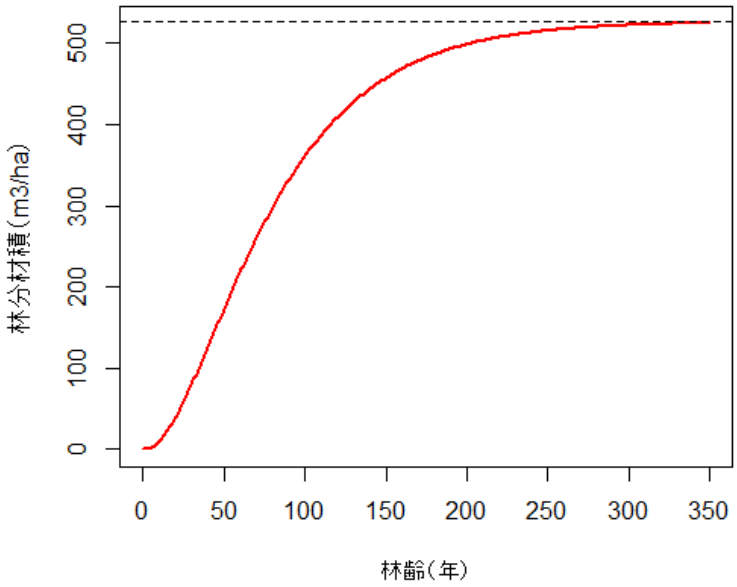


図 6-2 林齢と林分材積の関係（材積の上限値に地域・林相の差がないと仮定した場合）
赤線は当てはめた Chapman-Richards 関数、破線は材積の上限値（漸近線）を表す

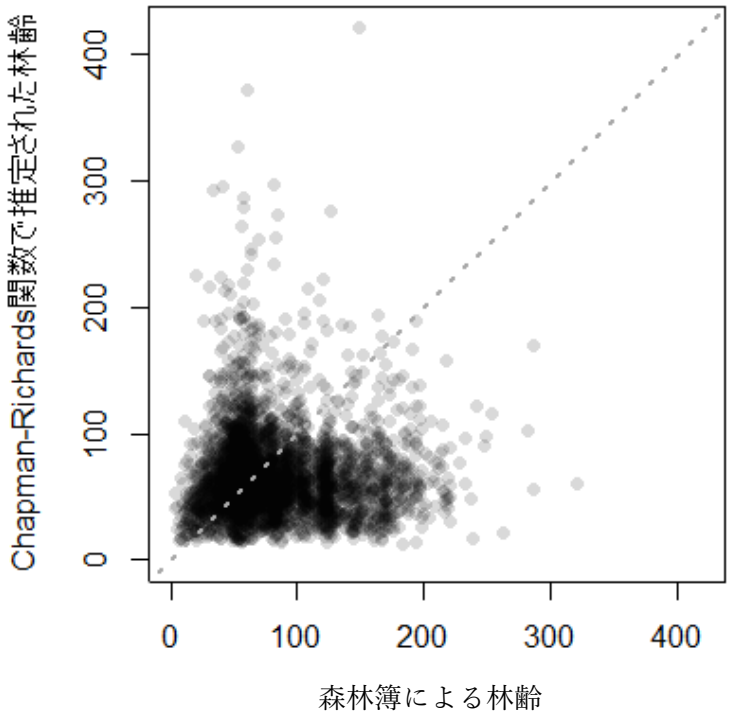


図 6-3 森林簿による林齢と Chapman-Richards 関数で推定された林齢の関係

6.1.2. 地域別・林相別の材積成長量と材積上限値の推定

前節と同じ基準でフィルタリングを行った 4,058 プロットのデータおよび Chapman-Richards 関数を使って、地域別・林相別の材積成長量と材積上限値を推定した。地域区分については「地方」と「都道府県と振興局」（以下、都道府県）の 2 段階を検討した。「地方」は、民有林用の広葉樹林分密度管理図の地域区分に基づく 5 地域（②東北、③関東・中部、④北陸・山陰、⑤近畿・山陽、⑥四国・九州）に、①北海道と⑦沖縄県を加えた 7 地方とした。「都道府県」については、北海道は振興局（空知、石狩、後志、胆振、日高、渡島、檜山、上川、留萌、宗谷、オホーツク、十勝、釧路、根室）を単位とし、北海道以外は県（青森、岩手、…、沖縄）を単位とした。ただし、京都府と兵庫県については、民有林用林分密度管理図の地域区分に従い、東北・山陰に位置する京都（丹後）と兵庫（但馬）、および山陽・近畿に位置する京都（その他）と兵庫（その他）に区分した。林相区分は「針葉樹林・広葉樹林・針広混交林」（以下、大区分）と「常緑広葉樹林・落葉広葉樹林・常緑針葉樹林・落葉針葉樹林・針広混交林」（以下、小区分）の 2 段階を検討した。針広混交林は材積混交率 25〜75%とした。

前節で示した Chapman-Richards 関数のパラメータ A、k、m のうち、A は材積の上限値を表し、k と m は曲線の形を決定するパラメータである。例えば、Chapman-Richards 関数を地位指数曲線として適用する際は、一般的にパラメータ k と m を固定してガイドカーブを定めたうえで、林分ごとの林齢と樹高を使ってパラメータ A を求めることで、その林分の地位指数を推定する。本研究ではこの方法に倣い、パラメータ k と m の値は全プロットで共通としたうえで、パラメータ A は地域と林相の一次式で表されると仮定した。

$$A = \alpha + \beta + \gamma \quad (式\ 4)$$

ここで、α は材積上限値の地域・林相を通じた平均値、β は上限値の地域間の差違、γ は上限値の林相間の差違を表す。

Chapman-Richards 関数の微分方程式（式 2）と式 4 を使って、データの数やばらつき、およびモデルの複雑性やデータへの当てはまりを考慮して、統計学的に理にかなった地域・林相区分を検討した。具体的には、上限値の地域間の差（β）について、以下の 3 通りのケースを統計的に比較した：①地域間で差が無い（材積の上限値 A が全国で一律）、②地方間で差がある、③都道府県間で差がある。同様に、上限値の林相間の差（γ）についても以下の 3 通りのケースを統計的に比較した：①' 林相間で差が無い、②' 大区分間（針葉樹林・広葉樹林・針広混交林）で差がある、③' 小区分間（常緑広葉樹林・落葉広葉樹林・常緑針葉樹林・落葉針葉樹林・針広混交林）で差がある。以上、β と γ それぞれ 3 通り、総当たりで計 9 通りのモデルを比較した。比較の基準には、モデルの複雑性と当てはまりのバランスを評価する Widely-applicable Akaike Information Criterion（WAIC）を用いた。WAIC に

基づくモデル選択では、一般的にその値が小さいほど良いモデルと判断される。パラメータの推定と構造の詳細については次節「6.1.3 節 パラメータの推定方法と構造」を参照。

モデル選択の結果、地域および林相のどちらも、区分を細かくするに従って WAIC 値が小さくなった（表 6-2）。最も WAIC 値が小さかった最良モデルは、③都道府県および③' 小区分（常緑広葉樹林・落葉広葉樹林・常緑針葉樹林・落葉針葉樹林・針広混交林）のレベルで差を仮定したモデルだった（表 6-2）。この結果から、材積の成長量や上限値は、都道府県間および林相小区分間で異なることが統計的に示された。従って、林分材積の成長予測を行う際は、対象林分の地域・林相についてなるべく細かな情報を使って予測するのが良い。ただし、モデリングをする上では、地域・林相区分をこれ以上細かくするのは困難だと思われる。その理由として、今回使用できたプロットの数が 4,058 サンプルだったのに対して、都道府県・振興局の数が 62、林相小区分の数が 5 となっており、各組み合わせのサンプル数の単純期待値が 4,058/(62×5)=13.1 と、値がやや小さくなっている点が挙げられる。今後、NFI 第 5 期のデータが加われば、区分をより細かくしたモデリングが可能になるかもしれない。

以下では、モデルの選択で最良と判断された「③都道府県および③' 小区分間で差を仮定したモデル」の結果の詳細を示す。最良モデルのパラメータ α（材積上限値 A の地域・林相を通じた平均値）、k、m の推定値はそれぞれ 466.3、0.0294、0.660 だった。これらの値は、前節で検討したモデルの推定値（表 6-1）と大きくは変わらなかった（なお、前節のモデルは「①地域間でも①' 林相間でも差がないと仮定したモデル」に相当する）。ただし、最良モデルは前節のモデルと比べて成長曲線の傾きが急になり（図 6-4）、林齢 150〜200 年程度で材積が頭打ちになる傾向が見られた。両モデル間のこうした差違の理由を特定することは現時点では難しいが、今後サンプル数が増えれば、傾きを規定するパラメータ k や m の挙動を地域・林相間で比較するなどして、原因を特定することが可能になるかもしれない。

図 6-4 は、推定された地方別の成長曲線を表す。北海道や北陸・山陰地方で林分材積の上限値が約 360m^3/ha となっており、他の地方と比べて低い傾向が見られた。比較的寒冷な両地方において林分材積の上限値が低いのは、生物学的に妥当な結果であると思われる。一方で、九州・四国や関東・中部地方では上限値が高い傾向が見られた（図 6-4）。

北海道について振興局管轄地域別に見てみると、宗谷地方が他よりも林分材積の上限値が低かった（図 6-5）。地方レベルで見たときに寒冷地で上限値が低かったのと同様に、道内でも最北端に位置する宗谷地方は寒冷な気候によって生産性が制限されているのかもしれない。

東北地方では、太平洋側に位置する青森県・岩手県・宮城県で上限値が低い傾向があった（図 6-6）。これら三陸地域では、夏季に吹く冷涼で湿った風（やませ）によって気温低下や日照不足が生じることで、森林の成長が抑えられている可能性がある。

関東・中部地方では、千葉県が突出して生産性が高かった（図 6-7）。その一因として、同県の大部分を占める房総半島が温暖な海洋性気候に恵まれている点が考えられる。また、他県にも言えることではあるが、過去の施業履歴（薪炭利用など）によって樹木が適度に間

引かれ、成長率の高い状況（成長曲線の傾きがピークとなる変曲点付近）にある林分が多く存在しているのかもしれない。

北陸・山陰地方では、県間で上限値に大きな差が見られた（富山で 144.2 m^3/ha、兵庫但馬地域で 540.8 m^3/ha）（図 6-8）。

近畿・山陽地方では、三重県や奈良県で上限値が高い傾向があった（図 6-9）。これらの県の山間部は近畿の屋根と呼ばれ、雨量が多く、また台風などの自然撹乱の影響も比較的大きいと考えられる。このことから、豊富な降水量や適度なギャップ形成によって高い生産性が保たれている可能性がある。

九州・四国地方では、熊本県が際立って材積の上限値が高かった（図 6-10）。この原因は現時点では判然としないが、サンプリングの際の偶然性（成長の良い林分が偶然多く含まれた）などの可能性も含めて、今後検討する必要がある。

林相の大区分別に見ると、針葉樹林、広葉樹林、針広混交林の順で材積の上限値が高かった（図 6-11）。しかし、その幅は 449.3〜487.2 m^3/ha となっており、差は大きくなかった。林相の小区分別に見ると、常緑針葉樹林、常緑広葉樹林、落葉広葉樹林、落葉針葉雨林の順で上限値が高かった（図 6-12）。特に、常緑針葉樹林と常緑広葉林が 610 m^3/ha 付近、落葉広葉樹林と落葉針葉雨林が 400 m^3/ha 付近となっており、常緑と落葉の間で大きな差が見られた。

なお、図 6-4〜図 6-9 は、林相間で上限値に差がない（式 4 の γ が 0）と仮定した場合の地域別の成長曲線を示している。同様に、図 6-10 と図 6-11 は、地域間の上限値に差がない（式 4 の β が 0）と仮定した場合の成長曲線を示している。本研究で推定した成長曲線を実際の予測に用いる際は、β と γ の値を対応する地域・林相に応じて変化させることで、任意の地方・都道府県・林相大区分・林相小区分の組み合わせ（例えば、「東北地方の天然林（林相の区別なし）」や「宮崎県の常緑針葉樹林」など）の材積成長を推定することができる。

表 6-2 WAIC に基づくモデル選択の結果

	林相間の差		
地域間の差	① ' なし	② ' 大区分	③ ' 小区分
①なし	28041	27996	27866
②地方	27883	27840	27782
③都道府県	27741	27689	27668

注）WAIC が小さいほうが良いモデルと判断される

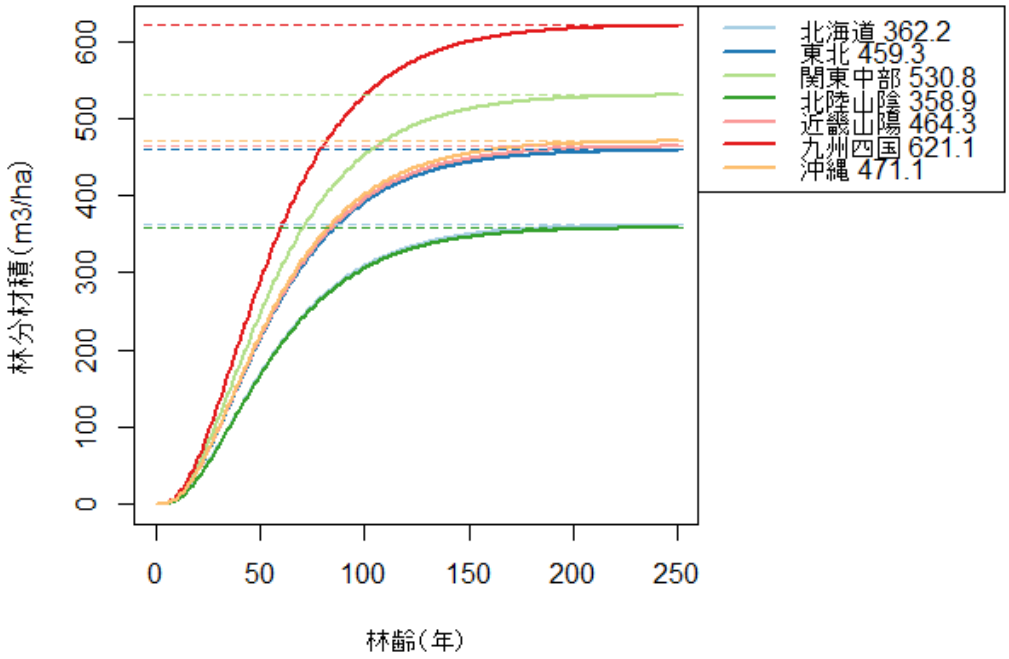


図 6-4 地方別の林分材積の成長曲線（Chapman-Richards 関数）
凡例中の数値は材積の上限値（漸近線）を表す

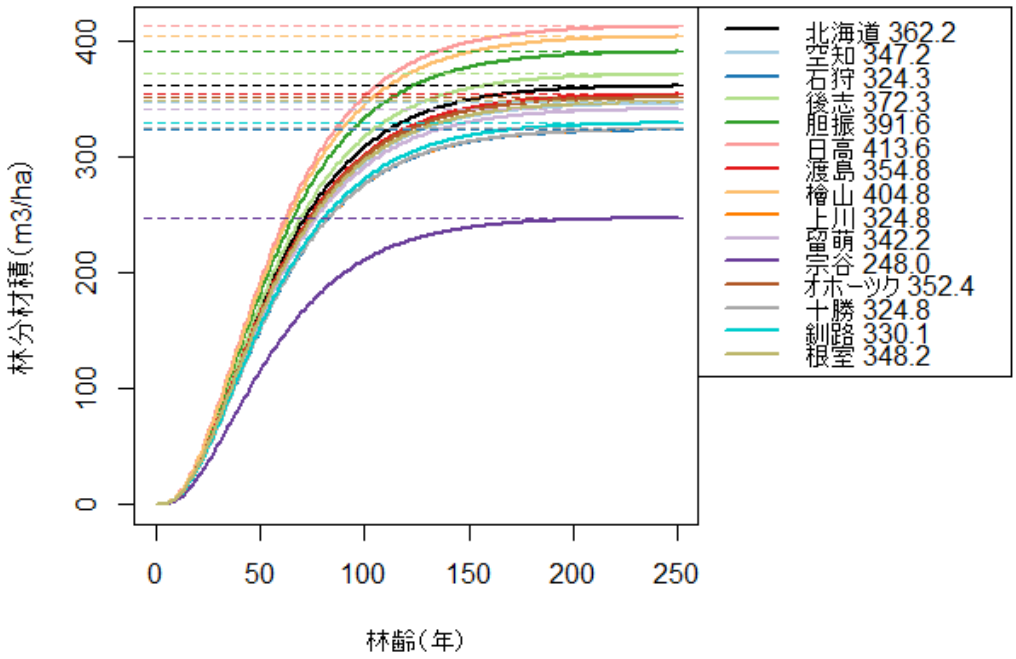


図 6-5 北海道および 14 振興局管轄地域別の林分材積の成長曲線（Chapman-Richards 関数）．凡例中の数値は材積の上限値（漸近線）を表す

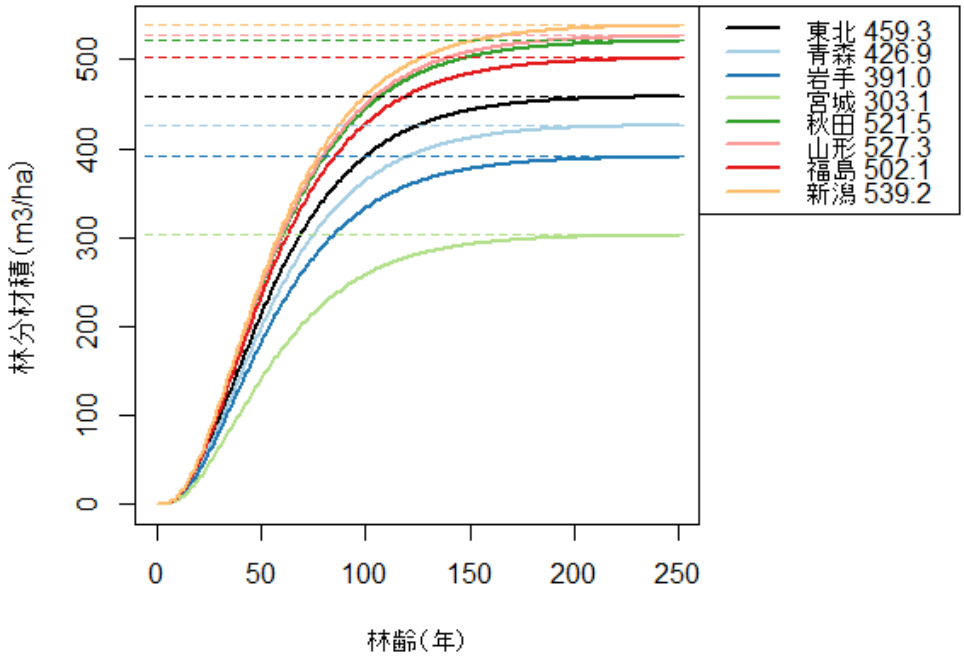


図 6-6 東北地方および同地方 7 都道府県別の林分材積の成長曲線（Chapman-Richards 関数）．凡例中の数値は材積の上限値（漸近線）を表す

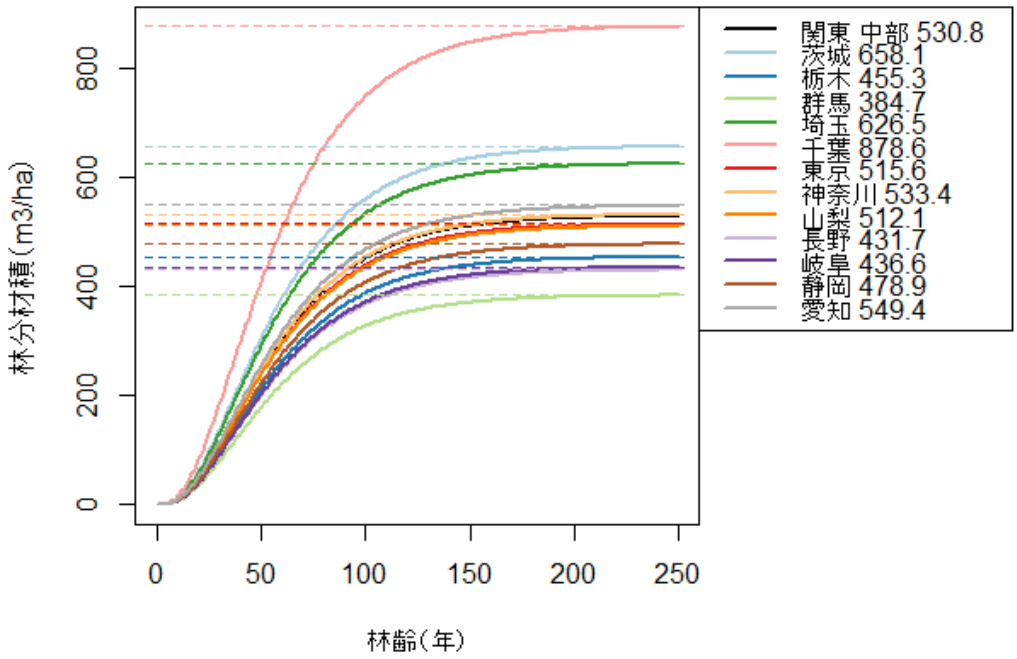


図 6-7 関東・中部地方および同地方 12 都道府県別の林分材積の成長曲線（Chapman-Richards 関数）．凡例中の数値は材積の上限値（漸近線）を表す

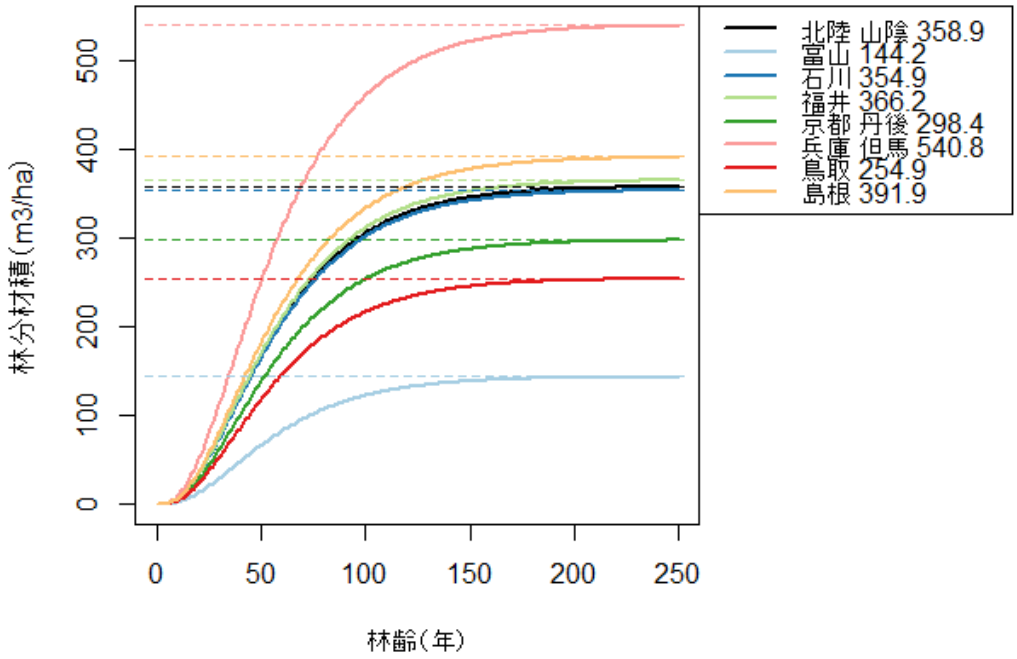


図 6-8 北陸・山陰地方および同地方 7 都道府県（京都府丹後、兵庫県但馬）別の林分材積の成長曲線（Chapman-Richards 関数）．凡例中の数値は材積の上限値（漸近線）を表す

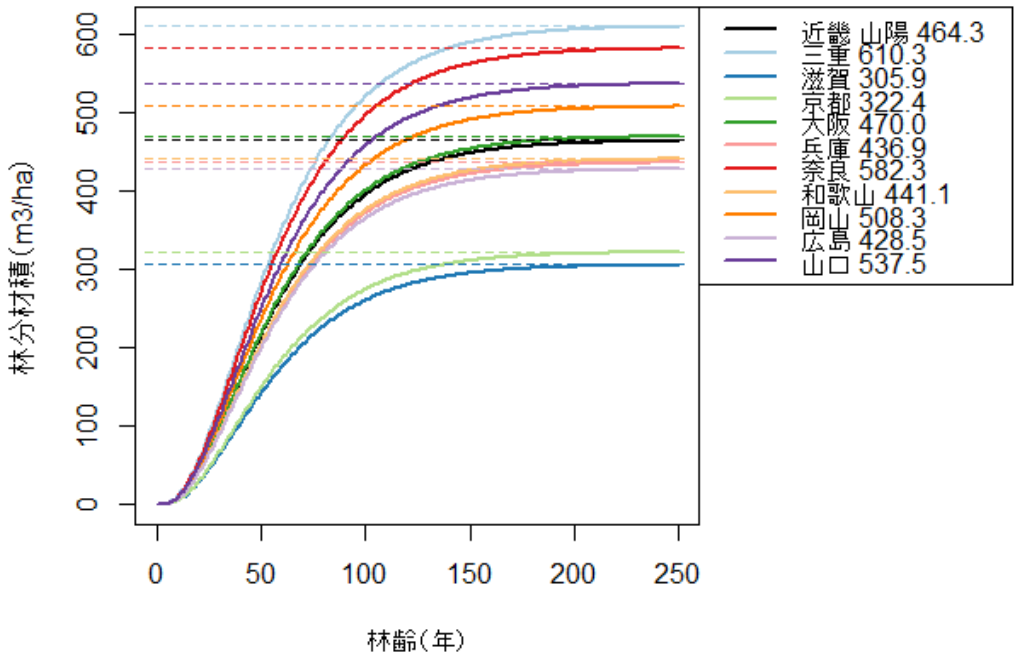


図 6-9 近畿・山陰地方および同地方 10 都道府県（丹後と但馬地域を除く）別の林分材積の成長曲線（Chapman-Richards 関数）．凡例中の数値は材積の上限値（漸近線）を表す

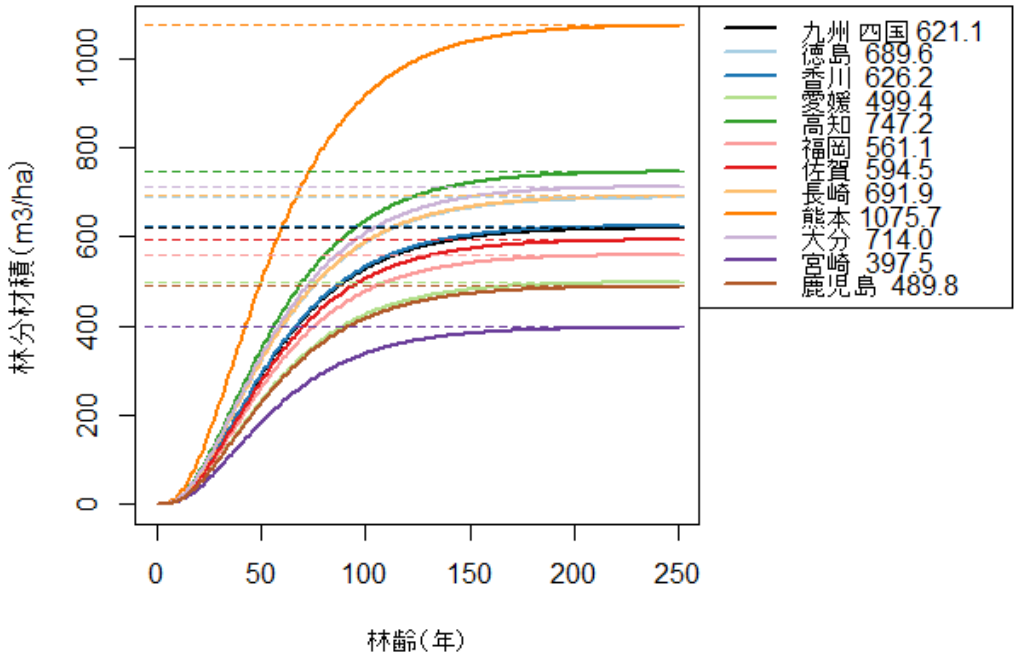


図 6-10 九州・四国地方および同地方 11 都道府県別の林分材積の成長曲線（Chapman-Richards 関数）．凡例中の数値は材積の上限値（漸近線）を表す

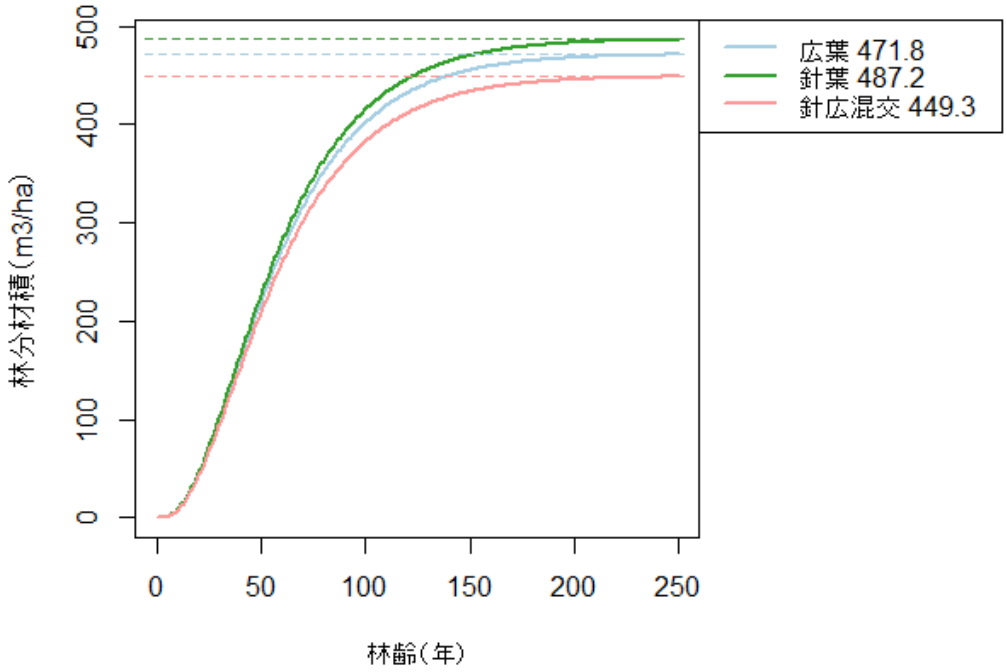


図 6-11 林相の大区分別の林分材積の成長曲線（Chapman-Richards 関数）。凡例中の数値は材積の上限値（漸近線）を表す

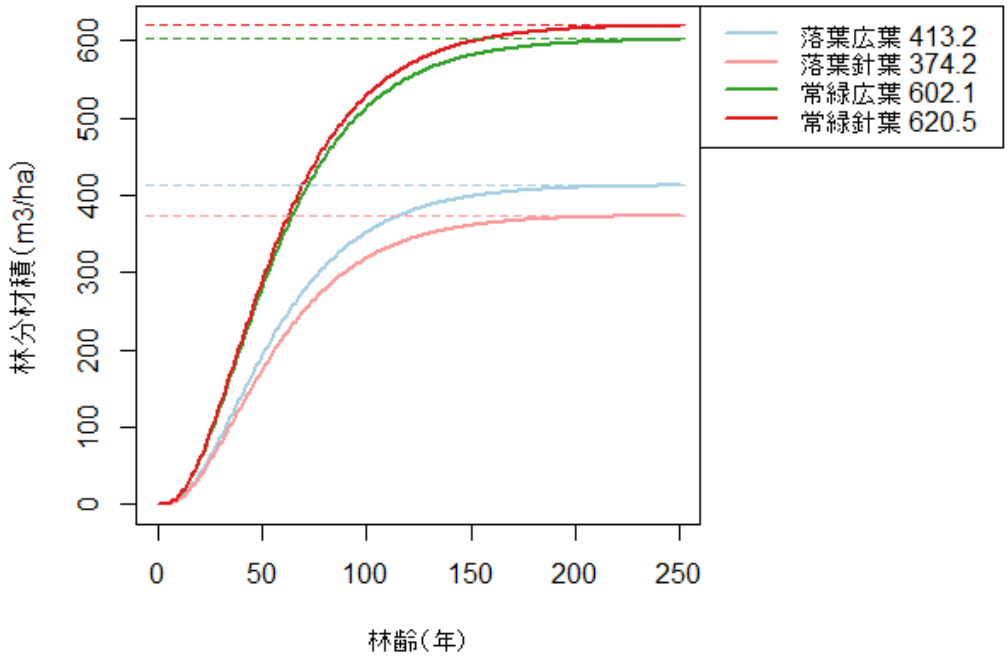


図 6-12 林相の小区分別の林分材積の成長曲線（Chapman-Richards 関数）．凡例中の数値は材積の上限値（漸近線）を表す

6.1.3. パラメータの推定と構造

NFI データの数やばらつきを考慮した統計学的に合理的な地域・林相区分を、Chapman-Richards 関数の微分方程式（式 2）と式 4 を使って検討した。式 2 と 4 を組み合わせたモデルは構造が複雑なため、最小二乗法や最尤法によるパラメータ推定は難しい。そこで本研究では、より柔軟なパラメータ推定が可能なマルコフ連鎖モンテカルロ法に基づくベイズ推定を用いた。値の推定にはベイズモデリングソフト Stan 2.32.2 と統計ソフト R 4.3.1 を使用した。なお、後述の通り、ベイズ推定では確率分布を使ってパラメータを定義する。

前節で示したように、材積の上限値 A の地域間の差（β）と林相間の差（γ）それぞれについて 3 通りのケースを統計的に比較した。このうち、①地域間で差が無いケース、および①' 林相間で差が無いケースは、それぞれ式 2 の β と γ を 0 にした場合に相当する。なお、6.1.1 節で行った全国の平均的な材積成長量と材積の上限の推定は、β と γ の両方を 0 にした場合に相当する。

次に、材積の上限値 A に関して ②地方（北海道、東北、関東・中部、北陸・山陰、近畿・山陽、四国・九州、沖縄）間で差があるケース、および ②' 林相大区分（針葉樹林・広葉樹林・針広混交林）間で差があるケースについては、β と γ の事前分布を以下のように定義することでパラメータ推定を行った。

$$\beta_R \sim \mathrm{Normal}(0, {\sigma_1}^2), \qquad R = 1, 2, \ldots, 7$$

$$\beta_L \sim \mathrm{Normal}(0, {\sigma_2}^2), \qquad L = 1, 2, 3 \quad (式\ 5)$$

ここで、β_R は 7 つの地方（Regions）間の差、β_L は 3 つの林相大区分（Large groups）間の差、Normal は正規分布を表す。正規分布の平均値は 0、標準偏差 σ_1 と σ_2 は無情報一様分布分 Uniform(0, 1000）で表されるとした。

最後に、材積の上限値 A に関して ③都道府県と振興局（空知、石狩、…、青森、岩手、…、沖縄）間で差があるケース、および ②' 林相小区分（常緑広葉樹林・落葉広葉樹林・常緑針葉樹林・落葉針葉樹林・針広混交林）間で差があるケースでは、β と γ の事前分布を以下のように定義することでパラメータ推定を行った。

$$\beta_P \sim \mathrm{Normal}(\beta_R, {\sigma_3}^2), \qquad P = 1, 2, \ldots, 62$$

$$\beta_S \sim \mathrm{Normal}(\beta_L, {\sigma_4}^2), \qquad S = 1, 2, \ldots, 5 \quad (式\ 6)$$

ここで、β_P は 62 つの都道府県と振興局（Prefectures）間の差、β_S は 5 つの林相小区分（Small groups）間の差、Normal は正規分布を表す。β_P の正規分布の平均値は β_R、すなわち各都道府県や振興局が属する地方の値とした。同様に、β_S の正規分布の平均値は β_L、すなわち各小区分が属する大区分の値とした。β_S と β_L の定義は式 5 と同じである。

以上、β と γ それぞれ 3 通り、総当たりで計 9 通りのモデルを比較した。比較の基準には、モデルの複雑性と当てはまりのバランスを評価する Widely-applicable Akaike Information Criterion（WAIC）を用いた。WAIC の値が最も小さいモデルを最適なモデルと判断した（表 6-2）。

なお、式 2 の左辺を林分材積（m^3/ha）の成長率としてパラメータ推定を行った場合、パラメータが収束しなかった。そのため、はじめに左辺を林分バイオマス（t/ha）の成長率としてパラメータ推定を行い、推定結果に全プロットのデータを使って得た林分材積 y と林分バイオマス b と比（y/b = 1.307567）を乗じることで、材積成長量と材積上限値を求めた。

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

6.2.1. はじめに

天然林・広葉樹林を、パルプ等のチップ材として経済的に利用するために、あるいは温暖化対応で炭素量を評価するために、林分材積は森林情報として最も重要なパラメータの一つである。

天然林・広葉樹林の林分材積を求めるために、林齢毎の林分材積をまとめた収穫表を用いるのが、林業実務では一般的である。しかし、林分材積について収穫表の推定値と地上の標準地調査の結果とを比較すると、天然林・広葉樹林では無相関である[5]。つまり、収穫表から広葉樹天然林の林分材積の推定は、不確かであり、難しい。

一方で、近年、航空レーザ計測が、都道府県や、市町村、林野庁により、広域の森林資源把握で用いられている。航空レーザ計測は、スギ・ヒノキの針葉樹人工林に限らず、天然林・広葉樹林の森林資源量の把握もできる[6]。

そこで本論では、従来のように収穫表を用いて林齢から林分材積を推定するのではなく、全く異なる方法として、航空レーザ計測データを用いて、現在の林分材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林相区分図の作成 (6.2.2 節)

2）航空レーザによる広葉樹の林分材積の地図化 (6.2.3 節)

として、青森県を対象として分析した。

6.2.2. 時系列衛星データを利用した林相区分図の作成

時系列衛星データの解析による雲なし合成画像の生成

林相区分図を作成する際、対象地が全県などの広範囲におよぶ場合は衛星データ（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[7]、衛星データによって全域を隈なく

---

[5] 林野庁(2016) 平成 27 年度森林吸収源インベントリ情報整備事業（審査対応等（次期枠組みにおける森林吸収量の算定・計上方法に係る調査・分析））報告書、180pp.

[6] Kodani E., and Awaya Y. (2008) Estimating mean height and stand volume in broad leaved forest stands using LiDAR, Journal of Forest Planning, 13, 239-244.

[7] 秋山侃・川村健介（2003）Landsat5 号の快晴データ取得率に関する農林業分野からの一考察. 写真測量とリモートセンシング 42(3), 29-34.

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。

時系列解析には、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、画素に対して時系列アルゴリズムある時点 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。

今回の解析では、パラメータ推定に要する計算時間を考慮して、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。後述の通り、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と考え、時系列衛星データの解析を青森県より広い北東北 3 県（青森・岩手・秋田）を含む範囲とした（図 6-13）。

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

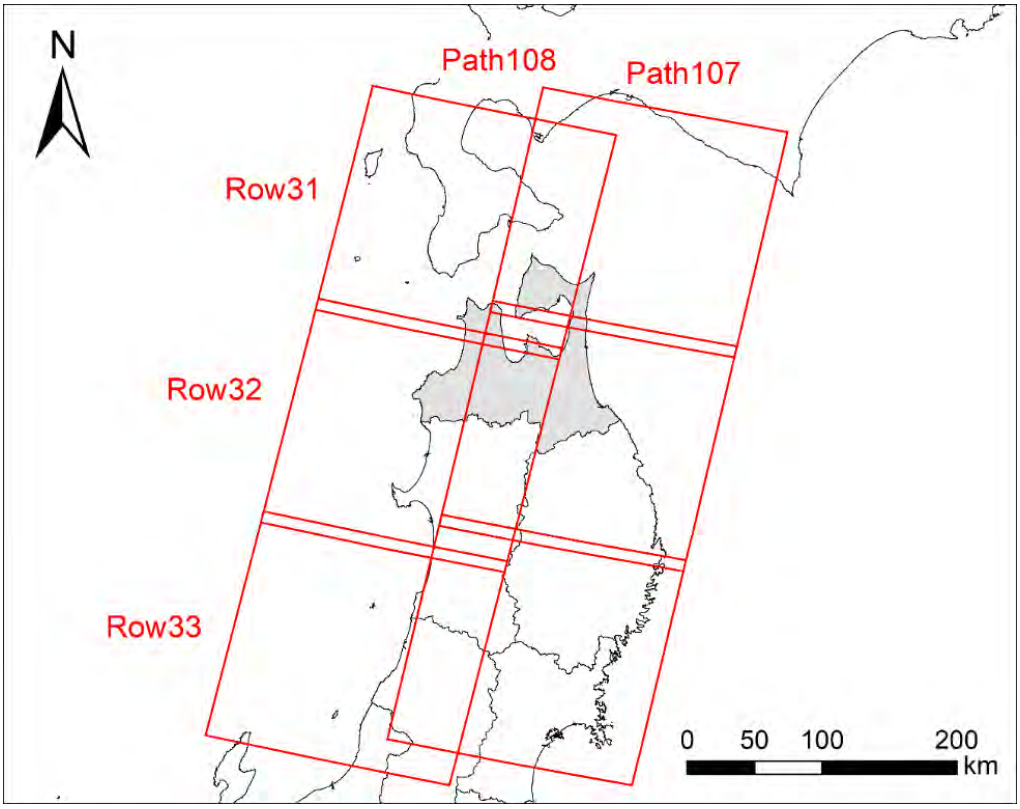


図 6-13 林相区分図作成の対象地（青森県）と時系列モデルの解析対象範囲
赤色の区画は 1 つの Landsat 画像がカバーする範囲（Path と Row で整理された配布単位[9]）
北東北をカバーするため 6 つの区画の Landsat データを収集・整備した

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、2015 年 8 月 1 日（着葉期画像）および 2015 年 4 月 1 日（落葉期画像）の地表面反射率を推定して合成した。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 6-14(a)および図 6-14(c)）。ただし、合成画像のクオリティは着葉期画像と落葉期画像で異なった。着葉期画像については、全域で雲のない画像が合成されており、実際に観測された衛星データ（図 6-14(b)）と類似した合成画像が得られた。このことから、推定した地表反射率が妥当であると判断できた。落葉期画像については、着葉期と同様に雲がない合成画像が得られ、また積雪の影響のある画素（図 6-14 (d)において水色で発色された画素）もほとんど除去されているものの、日本海側の山地や高標高域（白神山地周辺や八甲田山系）などで落葉期にもかかわらず黄緑色の不自然な発色になっていた（つまり、葉がついている状態の森林の反射率が推定された）。いくつかの画素を時系列的に確認したところ、長い積雪期間を有するエリアでは、想定以上に clear observation と判断されたデータ数が限られていた。そのため、限られた着

[9] https://www.usgs.gov/media/files/landsat-wrs-2-descending-path-row-shapefile

葉期間の観測値を使ってモデルのパラメータが推定されることになり、季節変動が考慮されないことで、落葉期における合成画像と実際の観測画像との差が生じたと考えられた。

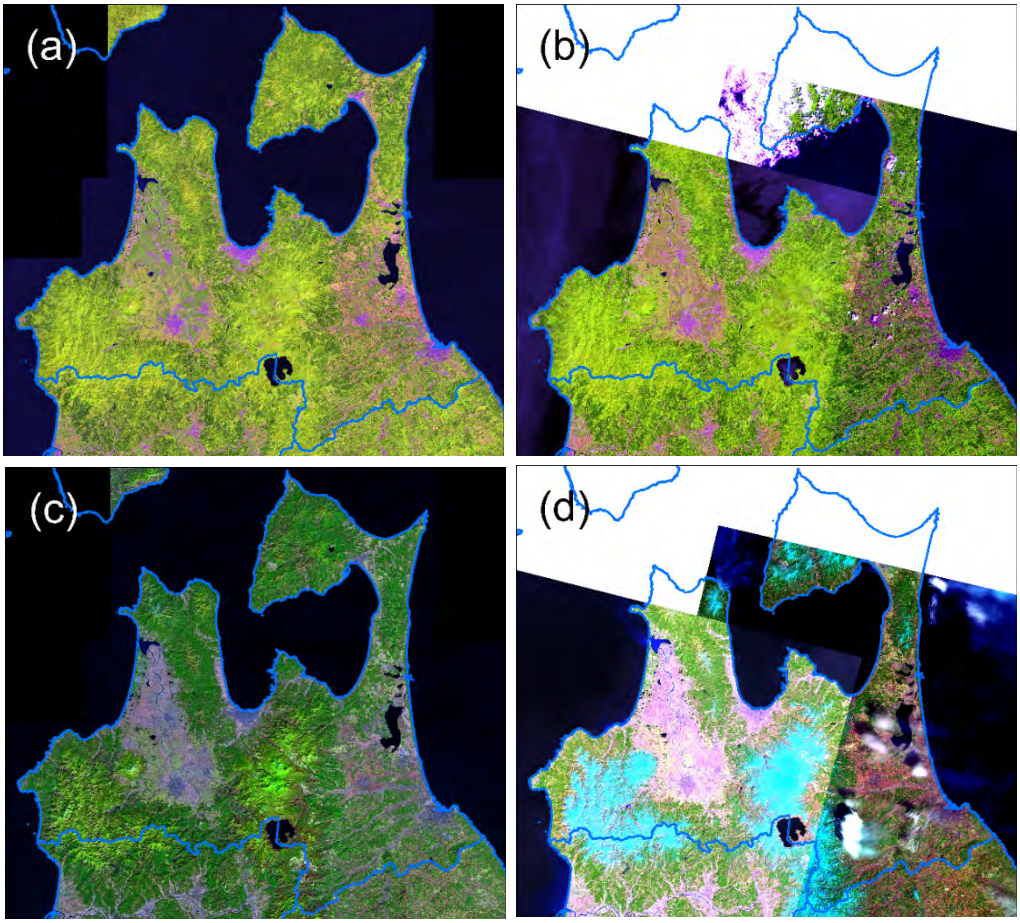


図 6-14 着葉期と落葉期の雲なし合成画像(a, c)と実際の衛星データ(b, d)

赤に短波長、緑に近赤外波長、青に可視域赤波長帯のデータを割り当ててカラー合成した。(a)と(c)はそれぞれ 2015 年 8 月 1 日と 2015 年 4 月 1 日の推定地表面反射率を示す。(b)と(d)はそれぞれ反射率を推定した日付に近い時期に観測されたデータのうち、雲量の少ないものを図示した。(b)と(d)は Path ごとに観測日が異なり、データごとにストレッチングをかけて表示しているため、色合いが異なる。

着葉期と落葉期、あるいはそれ以上の複数の季節の画像を使うことで、分類精度を高めることができる可能性が示唆されている[10]。そのため、条件がよい地域では、多季節の合成画

[10] Tanaka *et al*. (2012) Simple method for land-cover mapping by combining multi-temporal Landsat ETM+ images and systematically sampled ground truth data: a case study in Japan. *Journal of Forest Planning* 18(1): 77-85.

像を生成して組み合わせ、分類モデルの説明変数を増やすことで林相区分図の精度を高めることができると予想できる。しかし、今回の対象地では落葉期画像の合成結果が十分でないため、着葉期画像のみに基づいて林相区分を行うことが適切であると判断した。また、対象地に一定の広がりを有する常緑広葉樹林がないこと、着葉期画像のみを用いた解析になることから常緑と落葉の区分が難しいと考え、林層区分のクラスを最小限の 2 クラス（針葉樹林および広葉樹林）とした。

地形効果補正

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[11]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 6-15 地形効果補正後の着葉期画像に示す。補正前の画像（図 6-14(a)）には、地形による陰影がはっきりと残っているが、補正後はこれらの影響が緩和された（立体感のないのっぺりとした）画像になっており、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になった。補正後画像の目視判読に基づく評価は良好であり、林相区分図作成に適したデータが得られたと判断できた。

[11] 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.

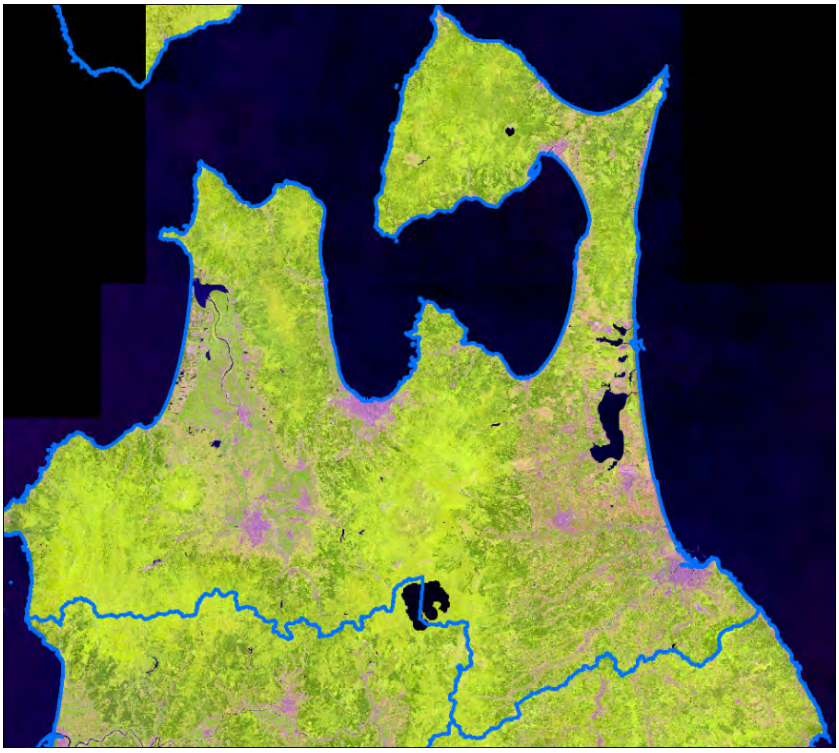


図 6-15 地形効果補正後の着葉期画像

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[12]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[13]。分類に用いる説明変数には、着葉期画像の各バンドの地表面反射率を利用した。

分類モデルの訓練および検証用のデータには NFI 第 4 期のデータを利用した。訓練・検証用データの数量を確保するため、NFI データは北東北 3 県で測定されたデータを利用した。混交しているプロットや林分の境界に設定されたプロットは少しの位置ズレで優占森林タイプ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、その割合が 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。

[12] Breiman, L. (2001) Random Forests. *Machine Learning* 45 (1): 5-32.
[13] Belgiu and Drăguţ (2016) Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 114: 24-31.

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、林相区分図を図 6-16 に示す。作成した林相区分図は総合精度では約 90%であり、クラスごとの作成者精度・利用者精度にも偏りは生じていなかった。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を割り引いて考える必要はあるが、作成した林相区分図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				
		針葉樹林	広葉樹林	合計	作成者精度 (%)	利用者精度 (%)
林相区分図のクラス	針葉樹林	203	26	229	84.2	88.6
	広葉樹林	38	346	384	93.0	90.1
	合計	241	372	613		
	総合精度 (%):	89.6				

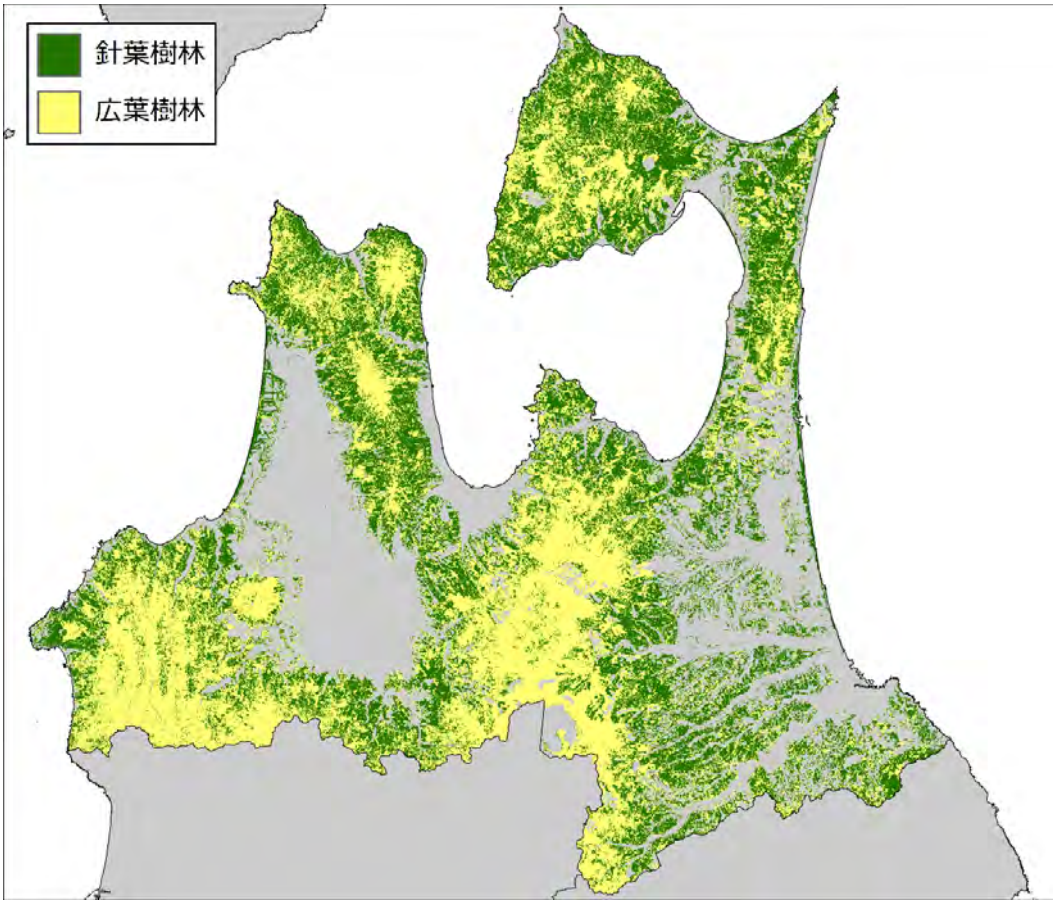


図 6-16 ランダムフォレストによって解析した林相区分図

考察

時系列衛星データを用いて雲なし合成画像を作成したところ、積雪期間が長いエリアにおいて、落葉期の推定反射率と実測反射率との間の整合性に問題があることが分かった。その一方、このような比較的に解析の難しいエリアでも着葉期については実際の観測データに類似した画像を合成することが可能であることが確かめられた。積雪期間が長くなるのは高緯度地域の日本海側や北海道、高標高域などであり、このようなエリアでは分類クラスを多くすることが難しい等のクラス設定に制約が生じる可能性があることに留意する必要がある。

着葉期の合成画像に地形効果補正を行ったあと、ランダムフォレストによって針葉樹林と広葉樹林を分類したところ約 90%の正答率（総合精度）で林相を区分できることがわかった。航空機レーザ測量を実施し、さらに森林資源解析業務を発注する場合、判読等に基づいて詳細な林相区分図が作成されることもある。しかしながら、地形データを作成用する目的などでレーザ測量を実施した場合には林相区分図が作成されないことも多く、全域で更新済みの林相区分図を利用できるとはいいがたい状況にある。事実、本事業においても対象域全体をカバーする林相区分図がなかったため、ALS の計測範囲をカバーする林相区分図を新たに整備する必要があり、今回作成した林相区分図を広葉樹林の抽出に利用した。ALS の森林資源解析では判読に基づいて林層区分を行うことが多く、作業量が膨大となる。本節で検討した林相区分図の作成方法は、処理時間を要するが自動化できる部分が多く、また既存のデータを活用できるため、低コストに林相区分図を作成できる利点がある。

6.2.3. 航空レーザによる広葉樹の林分材積の地図化

方法

・航空レーザ航測データの収集

分析対象は、青森県とした。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箇所で実施した。これらの事業により計測したデータの分布を事業毎に色分けして、地図として示した(図 6-17)。青森県の事業で民有林が主であり、国有林が多い白神山地、津軽半島、下北半島などでレーザ計測が全面でなく欠けている箇所も多い。一方で、青森県の中央に位置する八甲田山周辺など国有林が主な地域で、全面でレーザ計測された箇所もある。

航空レーザ計測の分析では、航空レーザにより計測した林冠を含めた地表面の高さである表面高(Digital Surface Model, DSM)と、地面の高さである地盤高(Digital Terrain Model,

DTM)があり、表面高と地盤高の差から、森林の高さである林冠高(Digital Height Model, DHM)を求める(数式 1)。航空レーザ計測による森林資源解析では、この林冠高を分析に用いる。

数式 1 林冠高 DHM = 表面高 DSM ― 地盤高 DTM

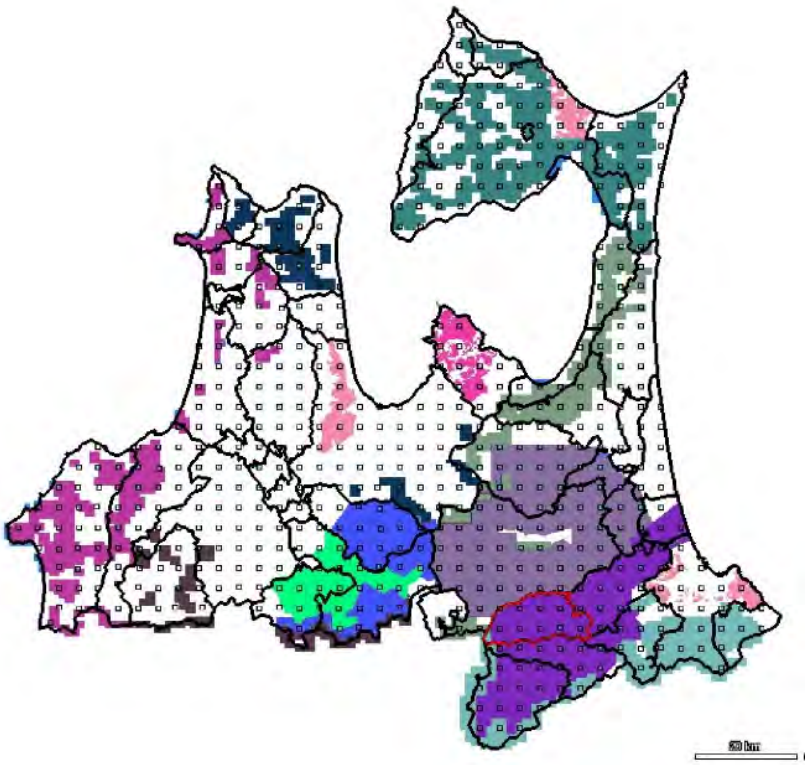


図 6-17 青森県の航空レーザ計測の範囲 （黒点：4km メッシュの森林生態系多様性基礎調査の調査地点、黒線：市町村界、背景：航空レーザ事業毎に色分け)

・森林生態系多様性基礎調査（NFI）

航空レーザ計測の分析では、大量の地上の標準地プロットデータが必要である。地上の標準地プロットデータとして、NFI 第 4 期（2014-2018 年）の資料を用いた。

NFI データを集計し、プロット毎の林分材積、平均樹高、上層樹高として胸高断面積で重み付けした Lorey 樹高などを求めた。また、広葉樹の割合の指標として、胸高断面積合計の広葉樹の割合を算出した。衛星画像による広葉樹・針葉樹区分の際に用いた基準に合わせて、プロット内で広葉樹の断面積合計が 90%以上のプロットデータを抽出して、分析に用いた。

・航空レーザ計測の分析手法：単木法と林分法

航空レーザ計測データの分析手法としては、単木法と林分法がある。単木法は、林冠高データから単木の梢端を抽出し、単木単位で樹高や材積等を推定する。国内の航空レーザ計測

による森林資源解析では、スギやヒノキなどの針葉樹人工林では、この単木法が用いられている[14]。

一方で、広葉樹林は、スギやヒノキなどの針葉樹人工林のように梢端が明瞭でなく、隣接する単木と区別がつかない場合が多く、林冠上部で枝が複雑に分かれて梢端が 1 つではない場合も多い。梢端が不明瞭なために、航空レーザ計測により広葉樹林の分析する場合に、単木法は極めて困難である。このために、広葉樹では分析単位が単木でなく、20m メッシュ単位等の林分単位で分析する。

航空レーザの林分法の分析方法の概要として、20m メッシュ等の林冠高のレーザデータを集計し、様々な指数を算出し、林分材積などの林分パラメータとの回帰式を求め、航空レーザの指数と回帰式から林分パラメータの広域推定を行う。航空レーザによる林分材積推定では、特に林冠高の平均が有効であることが過去の研究事例から分かっている[15,16]。

本論では、航空レーザ指数として、林冠高の平均、最大、標準偏差を算出した。林分パラメータの林分材積と、平均樹高、上層樹高である Lorey 樹高分析に対して、航空レーザ指数との決定係数を求め、最も決定係数が高い指数を選択し、回帰分析から推定式を求めた。航空レーザ計測データと、林分材積推定式から、広域の林分材積の推定地図を作成した。

結果

・航空レーザデータから落葉期データの除去

航空レーザ計測による林冠高データを地図化すると、森林域で平均林冠高が異常に低い箇所を見つけた。最も目立つのは、八甲田山周辺の落葉広葉樹林であった。この箇所には航空写真の判読から十分に大きな広葉樹林が存在するが、航空レーザの平均林冠高が数 m と低く、これまでの航空レーザ計測の分析の経験から、異常値と判定し、林分材積推定に適さない箇所と評価した。分布としては、航空レーザによる地盤高データから標高 950-1000m 以上の尾根部の箇所に塊まっていた。航空レーザの撮影時期を調べると、5 月から 6 月上旬であり、高標高な箇所の落葉広葉樹林では葉が十分に開いておらず、林冠高が低くなったと推定した。一方で、標高が 800m などやや低くなると、高い林冠高の箇所も混在しており、林分材積推定に利用しても問題ないと評価した。

航空レーザの地盤高データから高標高の箇所を地図化し、青森県内で八甲田山周辺と同様に林冠高が低い箇所を探索した。この結果、航空レーザ計測範囲で、白神岳周辺など高い

---

[14]日本林野測量協会(2014) 森林・林業分野における航空レーザ計測積算ハンドブック、57pp、東京.

[15] 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.

[16] 小谷英司、栗屋善雄(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.

山の尾根筋で標高が 1000m 以上の数カ所で、空中写真の広葉樹と比べて、林冠高が異常に低く塊まっている箇所を見つけた。これらも航空レーザ計測が、開葉前のデータであり、分析に不適と判定した。

以上の判読結果から、青森県内において標高が 1000m 以上の落葉広葉樹林で林冠高が異常に低い箇所が塊まっているのを見出した。1000m よりやや低い標高でも展葉中の箇所も存在すると推定するので、林冠高の分布の観察から十分に林冠高が高い標高 800m 以下を分析対象に限定した。

一方で、事業毎に航空レーザ計測日を再検討した。多くの事例で、航空レーザ計測日は、5 月半ばから 10 月上旬であった。しかし、青森県平内町のレーザ計測事業は、10 月 27 日～11 月 8 日に計測されており、全てのデータが紅葉から落葉期であった。このためにこの事業データも、分析から除外した。

航空レーザの計測時期について検討する。本論のデータの多くを占める青森県の砂防事業は、2022 年度に補正予算により航空レーザ計測が行われた。補正予算のために夏季を主に航空レーザ計測が行われた。一方で、通常の予算では 4 月に始まり、行政による公示と入札などの過程を経ると、航空レーザの計測時期が秋に入ってしまう可能性がある。また、国土交通省の河川事業と砂防事業のため、あるいは国土地理院の精密地形計測のために実施される航空レーザ計測では、2000 年代のデータにはレーザが地面に到達しやすいように落葉後の晩秋を狙って計測された事例も見られる[17]。

スギやヒノキなどの常緑針葉樹林であれば、晩秋などの落葉期でも林冠に葉が十分についており、航空レーザによる林冠高に問題はなく森林資源の分析ができる。一方で、落葉広葉樹林では、早春や晩秋の落葉期に葉がない箇所では、航空レーザによる林冠高が低くなり、森林資源の分析が難しくなる。一番問題となる場合を考えると、早春や晩秋に、標高の低い山の麓では気温も高く葉が開いて繁っていても、一方で、標高の高い山の稜線では、早春には気温が低くまだ葉が開いていない、または晩秋には既に落葉している。このように春や秋の葉の展葉が広域で不均質な状態で、つまりどの箇所がどこまで展葉しているか分からない場合に、航空レーザによる広域の森林資源の分析は非常に難しくなる。

まとめると、航空レーザ計測により森林資源量を求める際には、スギ・ヒノキなどの常緑針葉樹林と比べて、落葉広葉樹林では葉が茂る夏季という計測時期が非常に重要であり、計測データの撮影時期や林冠高データの分布に十分な注意をする必要がある。

・推定モデルの作成

標準地プロットによる林分材積、平均樹高、上層樹高の Lorey 樹高と、航空レーザ計測のレーザ指数である林冠高の平均、最大、標準偏差とで、決定係数を算出した(表 6-4)。今回の目的である林分材積については、航空レーザ林冠高・平均が最も決定係数が大きかった。

---

[17] 日本測量調査技術協会 (2024) 航空レーザ測量データポータルサイト、<<https://www.sokugikyo.or.jp/laser/>>, (2024 年 2 月 20 日閲覧)

これまでの研究例でも、林分材積と航空レーザの林冠高・平均とで最も決定係数が大きい[16]、林冠高・平均は林分材積推定に有効であり[15]、本論の結果と一致する。ただし、散布図と R^2 から、バラツキの大きい結果となった(図 6-18)。

表 6-4 航空レーザ指数と林分材積等の決定係数

	林分材積 (m^3/ha)	平均樹高 (m)	Lorey 樹高 (m)
林冠高・平均	**0.383**	0.065	**0.536**
林冠高・標準偏差	0.115	0.101	0.437
林冠高・最大	0.023	0.000	0.142

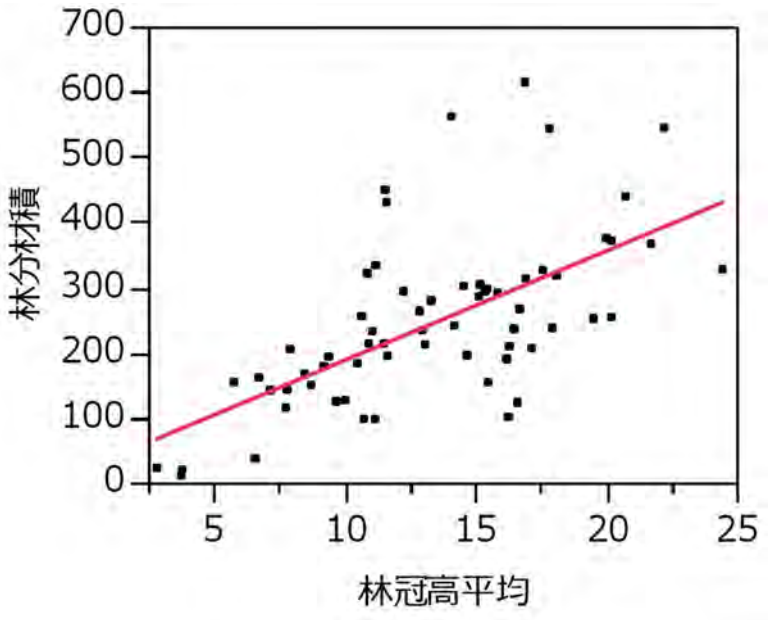


図 6-18 航空レーザ計測による林冠高・平均と林分材積の散布図

これまでの航空レーザ計測の研究と比較すると、林分の樹高と航空レーザの平均林冠高には強い関係があり、さらに林分の樹高と林分材積は強い関係にあり、林分の樹高推定は、林分材積の分析で重要となる[16]。ただし、平均樹高について、人工林と異なり天然林の広葉樹林では、少数の上層木よりも林内に多くある下層の小径木の影響が強く、平均樹高が低くなる場合がある。このために平均樹高と、林冠高・平均の決定係数が小さくなったと考える(表 6-4)。これに対して、上層木樹高を示す Lorey 高では、航空レーザの林冠高・平均の決定係数が大きかった(表 6-4)。航空レーザによる広葉樹林の分析では、平均樹高よりも上層木樹高の Lorey 高で分析が適切とわかった。

・広域での広葉樹林の林分材積の推定地図

回帰分析による広葉樹林の林分材積推定式と、航空レーザの林冠高・平均データから広域の林分材積推定地図を作成し、さらに前節の衛星画像による広葉樹分布地図を重ね合わせて広葉樹に限定し、広葉樹林の林分材積の推定地図を作成した(図 6-19)。なお、航空レーザのデータからは、標高 800m 以上と落葉期の航空レーザ事業の分は除外している。民有林の小班を重ねると、林分材積の大きい小班や、小さい小班があり、推定地図として矛盾なく妥当と考える(図 6-19 の右図)。全体的には、白神山地と八甲田山周辺など国有林の奥山に林分材積の大きい林分が塊まっており(図 6-19 の中央部分と左部分)、民有林は林分材積の小さい林分が多くある(図 6-19 の右図)。

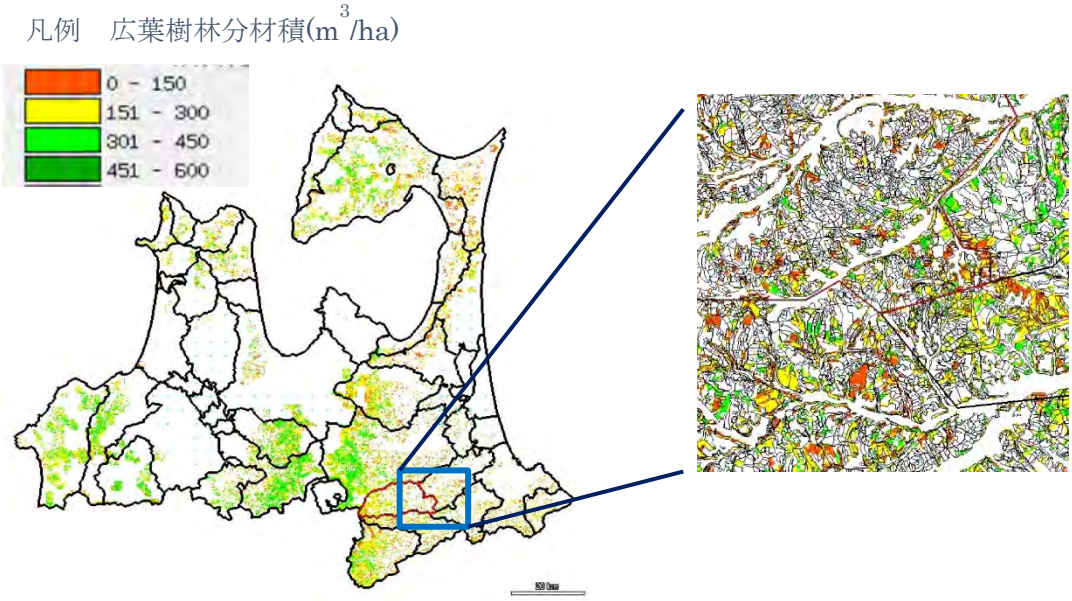


図 6-19 青森県の航空レーザによる広葉樹の林分材積の推定地図
(右図の黒線：民有林の小班界)

・これまでの研究との比較

航空レーザの林冠高・平均により、林分材積を求めたこれまでの研究を集め、比較した(表6-5)[6,15,18,19,20,16,21,22,23,24,25]。これまでの研究の森林タイプは、スギとヒノキなど常緑の針葉樹人工林が主である。Tsuzuki *et al*.(2008)と林ら(2013)の広域推定では、スギとヒノキなどの針葉樹人工林と広葉樹天然林を、まとめて分析しており、広葉樹だけの分析はない。米(2008)も大学の演習林の高齢な広葉樹と針葉樹の天然林が主であり、Kodani and Awaya(2008)は、常緑広葉樹林(n=12)と落葉広葉樹林(n=6)である。今回の解析の特徴は、落葉広葉樹のみを対象とした初めての大規模な解析事例であり、直接に比較できる事例は無いことがわかった。

これまでの林分材積の推定精度は、41.8 〜121.3 であり、本論の 99.4 はこれまでの結果の範囲内であり(表 6-5)、精度が低い結果ではない。ただし、図 6-18 に示した通りバラツキが大きい事例である。

航空レーザ林冠高・平均による林分材積推定式の係数を比較する。これまでの国内の研究結果の傾きは３０くらいであり、切片は小さい場合が多い。一方で、本論の傾きは、16.7 と他の事例にくらべて、傾きが小さい結果となった。落葉広葉樹林は、一般的に傾きが小さいのか、本論のみの結果なのか、さらに他の地域で分析を進める必要がある。

---

[18] 日下部朝子, 都築勇人, 末田達彦（2008）シベリア亜寒帯林を対象とした航空レーザー測距法による葉面積指数の広域推定, 日本林学会誌 88(1): 21-29.

[19] Takejima, K. and Iuchi M. (2006) The development of a forest stand volume estimation method using LIDAR data in hinoki forest. Proceedings of the international conference Silvilaser 2006, 89-93.

[20] 今井靖晃, 船橋学, 天野正博, 岩本宏二郎（2008）航空レーザデータに基づく植林地の林分材積推定, 日本写真測量学会秋期学術講演論文集, 63-66.

[21] 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.

[22] 小谷英司、鷹尾元、細田和夫、家原敏郎、古家直行、西園朋広、北原文章、金森匡彦、山田祐亮（2015）航空機 LiDAR によるスギ林の材積推定手法の開発　―林分推定法の精度比較－、第 126 回森林学会大会学術講演集、126:177.

[23] 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.

[24] 林真智、山形与志樹、平春、哈斯巴干、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.

[25] 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.

表 6-5 これまでの航空レーザの林冠高平均を用いた林分材積推定式の比較

筆頭著者	森林タイプ	本論での計算した回帰式 *1	精度	相対精度	データ数	林分材積 最大	林分材積 平均
都築ら (2006)	カナダ西部亜寒帯林	y = 17.2 x	**82.9**	**31%**	47	543	**271**
日下部ら (2006)	シベリア亜寒帯林	y = 18.5 x	**45.8**	**37%**	10	251	**125**
Takejima and Iuchi (2006)	岐阜県のヒノキ林	y = 25.8 x	**41.8**	**15%**	21	518	**283**
今井ら (2008)	3県のスギ･ヒノキ林	y = 36.1x − 17.3	**89.0**	**18%**	19	718	**504**
小谷･粟屋 (2013a)	四国西部の広域針葉樹林	y = 28.1 x	**105.7**	**45%**	24	881	**233**
Kodani et al. (2013b)	青森県の海岸マツ林	y = 33.1 x	**77.9**	**22%**	20	734	**349**
小谷ら (2015)	秋田県のスギ林	$y = 5.15\ x^{1.70}$	**99.3**	**15%**	44	1405	**660**
Tsuzuki et al.(2008)	愛媛県の広域森林	y = 32.2 x	**119.4**	**29%**	34	865	**408**
林ら (2013)	神奈川県の広域森林	$y = 8.00\ x^{1.39}$	**121.3**	**40%**	50	804	**304**
米 (2008)	北海道の冷温帯林	y = 29.8 x	**47.5**	**23%**	12	410	**210**
Kodani and Awaya (2008)	四国西部の広域広葉樹林	y = 31.2 x	**116.4**	**34%**	18	854	**342**
本論:小谷ら (2024)	青森県の広葉樹林	y = 16.7x + 22.9	**99.4**	**41%**	66	613	**244**

*1 y:林分材積、x:航空レーザ 林冠高･平均

・航空レーザ計測による広葉樹資源把握についての考察

表 6-5 に列挙した研究事例は、本論以外は全て著者らが現地でプロット調査した資料をもとに分析している。一方で、本論の結果から、全国で整備された NFI のプロット資料を、航空レーザ計測による森林資源把握に活用できることがわかった。

ただし、NFI のデータ密度が低く活用できない場合も過去にあった。これまで他の地域で、航空レーザ計測などのリモートセンシングによる森林資源量把握の調査研究で、NFI の活用を試みてきた。しかし、NFI のプロットの 4km メッシュに 1 点という空間的な密度の低さが、問題となった。表 6-5 のように、森林資源の推定式を作成するには、最低でも 20-30 点以上のプロット調査資料が必要である。例えば、市町村スケール以下では、NFI のプロットが、分析に適するものは数点となり、分析に必要なプロット点数が確保できない場合があった。このために、本論のように都道府県スケール、森林が狭い都府県では複数の都府県スケールが、NFI のプロット活用に必要な条件となる。

そもそも本論で用いた林冠高･平均を用いる手法は、精密地形によく用いられる航空レーザでレーザ密度が 1 点/m^2 前後と低い、いわゆる低密度データで開発された手法である。一方で、森林資源解析では、航空レーザのレーザ密度が 4 点/m^2 以上と、高密度なデータが用いられる。しかし、広葉樹では、スギ・ヒノキなどの針葉樹林のように梢端が明瞭でなく、単木抽出は困難である。このため航空レーザが高密度データでも、広葉樹では本論で用いたような林冠高・平均のように 20m メッシュなど林分単位での分析方法が用いるしかない。本論では、砂防事業用で精密地形計測のためのデータと、林野事業用で森林資源解析のためのデータを、併せて全データを同じ林分法で分析した。このように林冠高・平均など林分単位の方法は、精密地形計測用や森林資源解析用など、既存のほぼ全ての航空レーザ計測データを活用でき、汎用性は高い。

航空レーザ計測ポータルサイトでは、これまでに主に国土交通省、国土地理院などが精密地形用に航空レーザ計測した箇所を、場所毎に年度毎に、地図上にまとめている [17]。この航

空レーザデータを活用し、広葉樹の資源量把握が期待される。ただし、精密地形用の航空レーザ計測は、晩秋以降に計測されたデータがあり、落葉広葉樹林の落葉が本論での分析と同様に問題となる。また、都道府県スケールで分析するには、複数の航空レーザ計測データを用いる必要があり、林分材積の推定式を作る場合には、航空レーザの計測年次の違いを考慮する必要がある。

森林資源把握のために、都道府県による民有林で航空レーザ計測の事業が全国で行われている。しかし、スギやヒノキなど針葉樹林の資源解析が主である。広葉樹の資源解析が行われていない事例もあり、この場合には、既存の航空レーザ計測データを収集して生態系基礎調査のプロットデータを用いて林分材積推定式を作成した本論の手法は有効である。ただし、森林資源把握のための航空レーザ計測データでも、精密地形と同様に、航空レーザの計測時期が落葉期に入ってないか、また事業が全県を複数年で計測の場合の年次のずれなどについて、注意が必要である。

航空レーザ計測による広葉樹林の解析事例は少ない(表 6-5)。広葉樹の森林タイプについても、常緑広葉樹林と落葉広葉樹林や、里山の二次林と奥山の老齢林など、広葉樹タイプ毎に推定式どうなるかさらに検討が必要と考える。さらに実際にデータを収集して、各地域で分析する必要がある。

広葉樹　森林資源量の更新方法の考察

本論では、航空レーザ計測で広葉樹の森林資源量を推定した。ただし、これは航空レーザで計測した時点の現存量の把握に限定される点に、注意する必要がある。言いかえると、航空レーザ計測の計測年から時間が経過するほど、伐採などの施業や森林の成長などにより林分材積は変化し、航空レーザ計測による林分材積とは乖離していく。林齢と面積と森林タイプがわかれば、0 年から高齢までの林分材積が把握できる収穫表と、航空レーザ計測とは、将来予測の点で全く異なる。

航空レーザ計測で、時間経過による乖離について、一般的な解決方法は 2 つある。1 つは、航空レーザ計測と成長モデルによる将来予測と、2 つめはリモートセンシング手法による 5 年ごとや 10 年ごとの繰り返し計測である。ここでは汎用性の高いリモートセンシングの繰り返し計測について、方向性をまとめる。

・繰り返し計測による航空レーザ森林資源情報の更新のレビュー

リモートセンシング手法による繰り返し計測について、計測手法としては 4 つ挙げられる： 高密度航空レーザ計測、低密度航空レーザ計測、航空写真測量、ドローン写真測量。なお、行政などで森林の林相判読や伐採把握に、高解像度の人工衛星画像がよく用いられている。一般的に、リモートセンシングで材積を求めるには、林冠の高さ情報が重要である(数式 1)。高解像度人工衛星画像では、正確に林冠の高さ情報を得ることが難しく、材積などの森林資源把握には不適であり、ここでは取り上げない。

航空レーザ計測には、高密度航空レーザ計測、低密度航空レーザ計測の 2 種類がある。高密度航空レーザ計測は、国内の民有林などで単木単位の森林資源解析で広く用いられ、レーザ計測密度は 4 点/m^2 以上である [14]。これに対して低密度航空レーザは、主に精密地形計測で用いられレーザ計測密度は 1 点/m^2 以下である。低密度航空レーザは、高密度航空レーザのように単木単位の森林資源把握はできないが、本論のように林分単位(20m メッシュ単位)での森林資源把握はできる。

森林資源情報の更新に関して、高密度航空レーザ計測の研究例を挙げる[26]。高密度航空レーザ計測では、過去と更新のための最近という 2 時期の航空レーザ計測データから、スギなどの針葉樹林を単木抽出する。航空レーザ計測は測量精度が数十 cm 以内と高く、過去と現在の単木データの位置はほぼ同じであり、単木の位置から、単木単位で立木データを連結した。これにより、過去と現在のデータの比較から、間伐の有無、樹高などを単木単位で追跡できる。

低密度航空レーザ計測は、森林資源把握に関しては表 6-5 にまとめたが、情報更新に関する研究は、いまだ見あたらない。

航空写真測量については、国内では森林資源把握の研究発表が近年見られるが、応用的である情報更新よりも以前の基礎的な研究段階である。航空写真測量では地盤高 DTM が計測できないので、航空写真測量による表面高 DSM と、既存の航空レーザ測量による地盤高 DTM から林冠高 DHM を求め、森林資源を分析する(数式 1)。林冠高 DHM から上層樹高を求めて地位指数を求める研究や[27]、林冠高 DHM から林分材積を求める研究が発表されている[28]。低密度航空レーザ計測や航空写真測量から森林資源量が求められるので、情報更新も十分に可能と予想する。ただし、分析は 20m メッシュなどの林分単位となる。

ドローン写真測量については、過去数年で森林資源を求める多くの発表が行われ、情報更新については小谷・西園(2023)の報告が挙げられる[29]。航空写真測量と同様にドローン写真測量も、地盤高 DTM は計測できない。このため森林資源解析で必要な林冠高 DHM を求めるためには、ドローン写真測量による表面高 DSM と、既存の航空レーザ計測による地盤高 DTM を用いて分析する。まず、2013 年に秋田県で航空レーザ計測を実施し、単木単位での樹高や材積を分析した。次いで、2020 年ドローン写真測量を実施し、単木を抽出し、航空レーザ立木位置に合わせて位置補正をした。立木位置図を比較すると、航空レーザとドロー

---

[26] 北林拓、大野勝正(2023) 2 時期の航空レーザ測量による森林評価、日本森林学会大会学術講演集、134:98.

[27] 光田靖(2023) 地位指数推定モデル開発におけるデータソースの違いが及ぼす影響、 日本森林学会大会学術講演集、134:137.

[28] 小谷英司(2024) デジタル航空写真測量によるスギ林の林分材積の推定、 日本森林学会大会学術講演集、135:.

[29] 小谷英司、西園朋広(2023) 無人航空機空中写真による過去の航空レーザ測量の森林資源情報の更新. 日本森林学会大会学術講演集、134:98.

ン写真測量とで同じ立木が近い位置にあることが分かり、近傍の立木を連結するプログラムを作成して、過去と最新計測の単木データを連結した。これにより、間伐の有無などが追跡でき、単木単位で情報更新できることがわかった。

コストについては、航空計測、地盤高 DTM の作成、地上での標準地調査とデータ分析が必要である。例えば、積算資料と聞き取り調査と入札実績から試算すると、高密度航空レーザ測量では、1km^2 あたりの単価は、航空計測(1６万円)、地盤高 DTM の作成（4 万円)、地上調査とデータ解析(15 万円)である。データ更新の場合に、地盤高 DTM の作成は必要なく、解析費用は一定と推定するので、航空計測のみに着目してリストアップした(表 6-6)。

表 6-6 航空レーザ森林資源情報の更新のためのリモートセンシング手法による計測コストの比較

計測手法	計測コスト(/km^2)	分析単位	対象スケール
高密度航空レーザ計測	￥１６０，０００	単木	広域スケール
低密度航空レーザ計測	￥　５０，０００	林分	広域スケール
航空写真測量	￥　　８，０００	林分	広域スケール
ドローン写真測量	￥　２５，０００	単木	施業スケール

情報の単位としては、単木単位、20m メッシュなどの林分単位、小班単位が挙げられる。リモートセンシングの手法では、データの種類により、単木単位できる場合と、20m メッシュなどの林分単位までの場合があるので、同様に表にまとめた。

計測の対象スケールは、森林計画などを念頭に置くと、市町村単位や流域単位など広域スケールがある。一方で、主伐や間伐などの数 ha 以下の施業スケールもある。計測手法ごとに適切なスケールは異なるので、手法ごとに表にまとめた。

更新の候補の 4 種類を比較する。現状では、高密度航空レーザ計測により、民有林の森林資源解析が進められているが、5 年、10 年でのデータ更新を考えると、計測費用が最も高額である点が問題となる(表 6-6)。コストの点からは、広域スケールでは、航空写真測量が候補になると考える。また、施業スケールでは、ドローン写真測量が挙げられる。ドローン写真測量は、広域スケールの計測は困難であるが、伐採や間伐などの施業毎に、施業前後にと、細やかに計測ができる利点がある。

リモートセンシングによる航空レーザによる森林資源情報の情報更新について国内での関連研究はいまだに少ない。また、本論での広葉樹に関しては、情報更新の研究事例が見あたらない。費用対効果もの点から、さらに研究を進める必要がある。

6.2.4. ALS による材積推定のまとめ

青森県を対象として、時系列の人工衛星画像データを用いて、夏季の雲の無い針葉樹・広葉樹の森林タイプ地図を作成できた。

青森県の森林タイプ地図と、航空レーザ計測データ、NFI のプロットを用いて、広葉樹の森林資源量の推定地図を作成した。既存のデータを効果的に用いたことにより、広域に低コストに推定できた。

今後の課題として、航空レーザによる広葉樹の森林資源把握の研究例は少ないために青森県以外の他の地域や、常緑広葉樹などの落葉広葉樹林とは異なる森林タイプの分析が必要と考える。

6.3. 本章のまとめ

本章 6.の冒頭にも述べたように、天然林については現状において森林簿に記載されている樹種（林相）、林齢、蓄積の不確実性が高く収穫表に基づく将来推計が困難であったが、本章で示した都道府県別・林相別材積成長曲線、時系列衛星画像による林相区分、低密度 ALS による蓄積推定を組み合わせることにより森林簿の更新、精度向上を図ることが可能と考えられた。更新・精度向上のイメージを図 6-20 に示す。

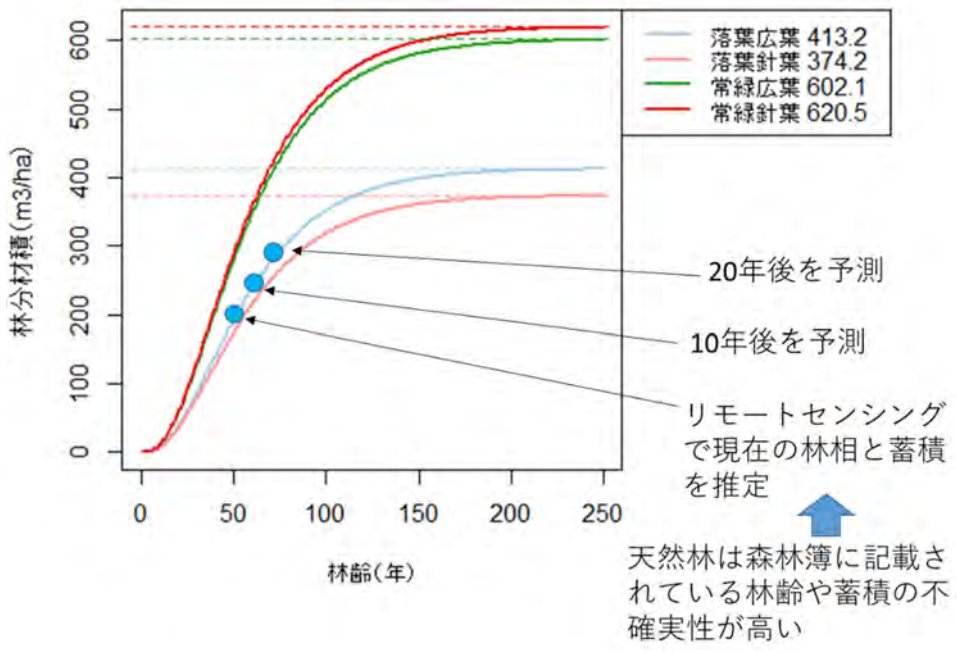


図 6-20 天然林の都道府県別・林相別材積成長曲線とリモートセンシングによる森林簿の更新イメージ

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。スギ人工林の高齢級化の対応が求められる中で、これから収穫予想表更新を希望する都道府県のうち、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。手順書には上述の 2.~4.の結果も踏まえ整理した。

8. まとめと課題

本事業では、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の結果を踏まえ、また同事業で収集整理された森林資源データを用い、まず現行の民有林用スギ林分密度管理図の見直しを行った。その結果、幹材積合計と平均胸高直径について、現行よりもバイアスとばらつきの小さい推定式を得ることができた。ただし、高齢になるほど過少推定になる傾向は残っており、加齢とともに林分構造の多様化が進んで推定精度が低下することに注意が必要である。また、算出される収量比数は現行とは大きく異なることにも注意を要する。見直された林分密度管理図を収穫予想表作成の基礎とすることには問題ないが、間伐の指針として用いる場合にはこれまで指針としてきた現行の林分密度管理図との整合性を考慮する必要がある。

次に、林分密度管理図から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スギ林分密度管理図と同じ地域単位で作成した。樹高成長曲線は、標準誤差、切片および高齢級での傾きの 3 点から検討した結果、5 つのモデルの中では 7 地域に共通して Korf 式による樹高成長曲線が最も有力な選択肢になると判断された。地域間で比較すると、裏東北・北陸地方は晩成型、九州地方は早生型であることなど、従来から一般的に言われているスギ成長の地域性の一端を再現することができた。

高齢級の樹高成長データの不足を補うため、7 県を対象に航空レーザの解析によって多数のサンプリングデータを取得できた。目視によるフィルタリングのためそのまま通常の地上調査データと同等に扱うのが困難と思われるケースもあったが、サンプリング方法の改善と現地林齢情報の確認により、有力なデータ収集手段になり得ることが再確認された。

現実のデータをもとに 7 地域別にあてはめを行った本数減少曲線の作成と並行して、各都道府県の施業体系図を収集整理した。これらは各県での収穫予想表の見直しにあたって、加齢に伴う本数減少や間伐シナリオを設定する際の重要な参考資料として活用できる。

一方、天然林については、森林生態系多様性基礎調査第 3 期と第 4 期のデータをもとにして、森林簿に記載されている林齢の不確実性の影響を受けない手法を用いて、地域別、林相別の材積成長曲線を作成することができた。林相区分を常緑広葉樹林、落葉広葉樹林、常緑針葉樹林・落葉針葉樹林、針広混交林の 5 つに細分し、地域区分を都道府県とした場合に材積成長の上限値が最もよく説明できた。しかし例えば千葉県や熊本県など、突出して材積成長の上限値が高くなるケースもあることから、実用化に向けては第 5 期データや森林生態系多様性基礎調査以外のデータを追加することも含め、材積成長曲線の信頼性をより高める取組を継続する必要がある。

材積成長曲線を適用するにあたって必要となる天然林の林相区分や現在の蓄積の推定は、無償のランドサット時系列画像や、森林管理目的以外で取得された低密度レーザ計測データを活用し、低コストで実行可能であることを、青森県を事例として示すことができた。

付録

林分密度管理図による収穫予想表作成の手順書