

第Ⅱ編

森林施業の計画と崩壊防止機能

目次

1. 事例検証：スギ・ヒノキ林の状態と災害発生地の関係	1
1.1 データの調整・準備.....	1
1.2 ヒノキ林における森林解析.....	3
1.2.1 解析対象	3
1.2.2 施業と崩壊発生の有無	3
1.2.3 散布図による森林解析	7
1.2.4 林齢別森林解析	12
1.2.5 立木密度と ΔC の関係.....	14
1.3 スギ林における森林解析.....	17
1.3.1 施業前後の森林情報の比較	17
1.3.2 ΔC と W_r による森林解析.....	26
1.3.3 崩壊防止機能が十分といえる ΔC	29
2. 崩壊防止機能の将来予測.....	32
2.1 崩壊防止機能の評価方法.....	32
2.1.1 LYCSによる森林の成長シミュレーション.....	32
2.1.2 目指すべき森林の崩壊防止機能の目安.....	36
2.2 森林の崩壊防止機能の将来予測.....	37
2.2.1 将来予測の方法	37
2.2.2 将来予測の事例	39
3. 崩壊防止機能を向上させるための施業の計画.....	42
3.1 ガイドラインで使用する施業用語の定義.....	42
3.2 基本方針	43
3.3 崩壊防止機能を向上させる施業のポイント.....	46
3.4 整備目標の目安	51
3.5 具体的な施業の計画の考え方.....	53
3.5.1 望ましい目標林型	54
3.5.2 施業の計画の基本的な考え方	55

3.5.3 地域や成長量（地位）による考え方の違い.....	56
3.5.4 旺盛な成長が望めない地域（箇所）での施業の考え方.....	57
3.5.5 既に施業が遅れている箇所での施業の考え方.....	59
3.5.6 エリートツリー等の活用.....	60
第II編 まとめー森林施業の計画と崩壊防止機能.....	61

1. 事例検証：スギ・ヒノキ林の状態と災害発生地の関係

本章ではスギ・ヒノキ林の林分状態と災害発生有無について検討した事例を紹介する。

広島及び高知の国有林を対象として、航空 LP データ及び地上レーザスキャナによる 3 次元データを活用し、森林の点群解析により、林分状態（立木密度と樹高）を計測した。その上で、平成 30 年 7 月豪雨により発生した崩壊発生箇所との位置関係等について、検証を実施した。

1.1 データの調整・準備

1.2 及び 1.3 で検討に用いたデータは以下の方法により作成した。

① 林齢・・・森林 GIS に登録されたデータより平成 30 年時点の林齢に換算した。

② 立木密度 ③ 樹高・・・航空 LP データを用いた点群解析により、上層木の単木ごとの樹頂点及び樹高を取得し、立木密度を樹頂点から算出した。1.2 ヒノキ林：林小班の全立木を対象とし、1.3 スギ林：各林小班の中に標準地を設定し、その範囲の立木を対象とした。

④ 胸高直径・・・1.2 ヒノキ林：現地調査で計測した胸高直径と、航空 LP の解析結果である樹冠投影面積又は樹高との関係式から、単木ごとの胸高直径推定式を作成し利用した。1.3 スギ林：森林総合研究所の「収量比数 Ry 計算プログラム」を使用し、「四国国有林スギ」のパラメータを使い、樹高と立木密度から胸高直径を算定した。

⑤ 根量（根重量）・・・「単木の胸高直径と地下部重の関係（苅住昇 2010）」の回帰式及び係数を使用し、根量[kg/本]を算定した。根量 W_r [kg/m²]については、立木密度を乗じて、単位面積当たりで算出した。

表 1.1 単木の胸高直径と地下部重の関係（苅住昇 2010）

	スギ	ヒノキ	アカマツ	カラマツ
測定個数	180	61	141	118
係数 a	29.0955	51.4377	82.5245	40.6171
係数 b	2.3015	2.1493	1.8922	2.2251
相関係数	0.90	0.91	0.92	0.94

係数 a, b は、回帰式 $y=ax^b$ を適用した際の係数。 y : 地下部重量 [g]、 x : 胸高直径 [cm]

⑥ ΔC ・・・式 1-1 により森林の根系（水平根）が発揮する断面抵抗力 ΔC を算定した。

$$\Delta C = \alpha'(\Sigma A)^{1.4} \quad \text{式 1-1}$$

ΔC : 森林の根系（水平根）が発揮する断面抵抗力 [kN/m²]

ΣA : 胸高断面積合計 [m²/ha]

$$\alpha' = 9.767 \times \alpha$$

α : 樹種別係数、ヒノキ 0.00330、スギ 0.00393、広葉樹 0.00198

⑦ 安全率・・・執印ら¹2009 が提示した式 1-2 を用い、パラメータは表 1.2 の値を与えて算定した。

$$F = \frac{(\gamma Z - \gamma_w h) \cos^2 \alpha \tan \phi + C + \Delta C}{\gamma Z \cos \alpha \sin \alpha} \quad \text{式 1-2}$$

但し F : 安全率, γ : 土の湿潤単位体積重量 (kN/m^3),
 γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m^3), α : 基盤層勾配 (degree),
 Z : 表層土層厚さ (m), h : 基盤層からの地下水位 (m),
 ϕ : 土の内部摩擦角 (degree), C : 土の粘着力 (kPa),
 ΔC : 樹木根系による粘着力増分 (kPa)

表 1.2 安全率式に用いた設定値

	計算設定諸元	設定値
1	γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m^3)	9.81
2	γ : 土の湿潤単位体積重量 (kN/m^3)	17.66
3	Z : 表層土層厚さ (m)	1.0
4	ϕ : 土の内部摩擦角 (degree)	30.0
5	C : 土の粘着力 (kPa)	3.5

⑧ 施業履歴・・・林野庁業務資料を基に整理した。ただし、資料は、平成 2 年から平成 30 年までの履歴の記載となっているため、それ以前のデータについては整理対象としない。

⑨ 勾配・・・航空 LP データから作成した DEM (数値標高モデル) を用いて、傾斜角ラスタデータを作成し、対象範囲の統計値を算出した。

⑩ 雨量・・・XRAIN (高性能レーダ雨量計ネットワーク) を基に、総雨量及び 72 時間雨量の対象範囲のラスタデータを作成した。

⑪ 崩壊地データ・・・「平成 30 年度森林域における航空レーザ計測業務成果」の成果品である崩壊地ポリゴンを使用した。

¹ 執印康裕・鶴見和樹・松英恵吾・有賀一広・田坂聡明, 分布型表層崩壊モデルによる樹木根系の崩壊防止機能の定量的評価について, 日本緑化工学会誌, 35(1), 9-14, 2009

1.2 ヒノキ林における森林解析

1.2.1 解析対象

解析対象範囲は、広島県の平成 30 年 7 月豪雨災害前後の航空 LP データを有する図 1.1 の範囲とした。調査範囲内の赤枠は広島の国有林内の林小班を表し、その面積は約 2,697ha である。林小班数は同一の林小班名を 1 つとしたとき、680 か所の林小班数となった。また、林小班内に発生した崩壊地数は 179 であった。

【調査対象データ】	
●	林小班数 680 か所
●	崩壊地数 179 か所

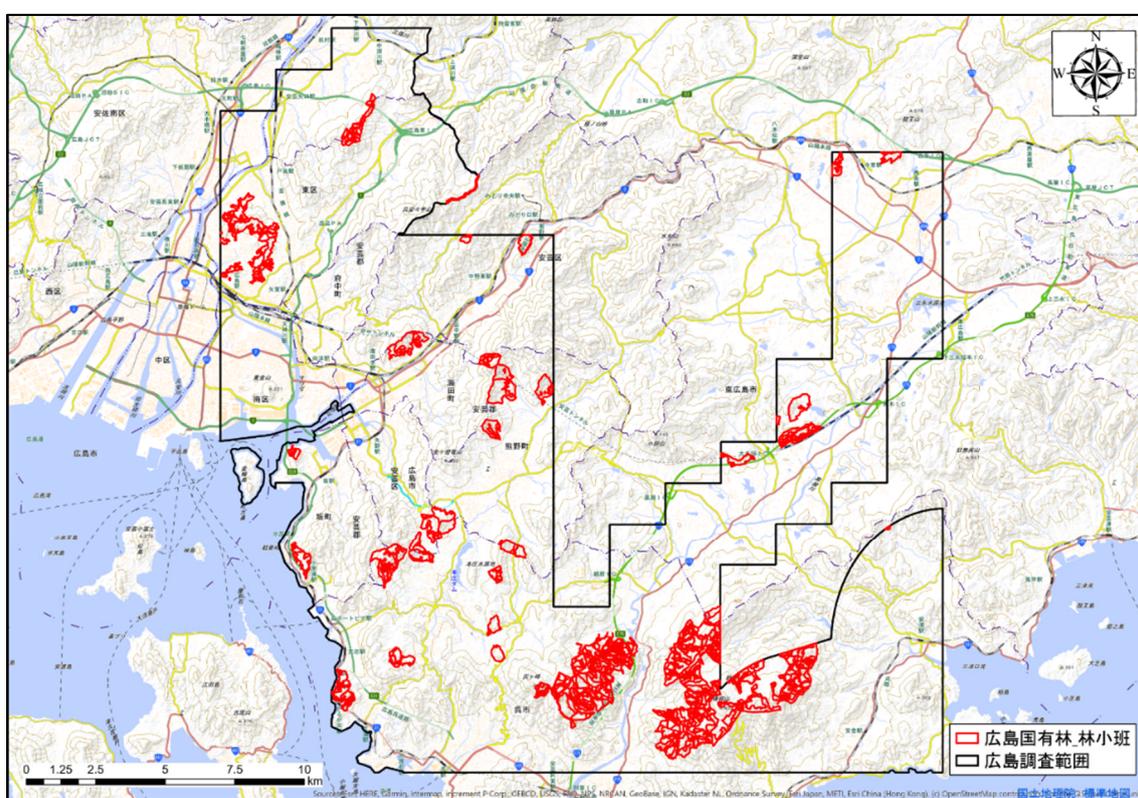


図 1.1 調査範囲及び広島の国有林林小班（調査範囲内）

1.2.2 施業と崩壊発生の有無

はじめに、広島の国有林の森林調査簿及び林野庁業務資料を基に森林施業の情報を集め、崩壊発生有無との関係を林小班単位で整理した。

施業情報が取得できた 280 か所の林小班のうち、274 か所の林小班がヒノキ林、6 か所の林小班はスギ林であったが、スギ林の林小班はごく少数であったことから、今回の検討ではスギ林の小班を除外せず、ヒノキの林小班と一括りで検討した。

施業回数は、表 1.3 の区分のうち、区分①の「皆伐」と区分②の「間伐」を数えたものとし、区分③の「その他間伐」、区分④の「育林」及び区分⑤の「その他」は除外した。また、林野庁業務資料の

施業履歴は、平成 2 年から平成 30 年までとなっており、本調査の結果は、その期間内の情報を反映したものである。

なお、本節における「施業」とは表 1.3 の 1～7 とし、8～27 については、「施業」としてカウントしていない。

表 1.3 広島県の国有林における施業の種類及び区分

No	施業の種類	区分 No	区分	No	施業の種類	区分 No	区分
1	皆伐*	①	皆伐	12	つる切り	④	育林
2	主伐(5割以上)			13	下刈り		
3	択伐*	②	間伐	14	枝打ち		
4	間伐			15	植付		
5	主伐(5割未満)			16	地拵		
6	本数調整伐			17	倒木起こし		
7	保育間伐			18	刈出し		
8	除伐	③	その他 間伐	19	植栽		
9	更新伐			20	雪起こし		
10	衛生伐			21	作業道		
11	受光伐			22	路網整備等		
				23	その他保育		
				24	その他		
				25	被害木等整理		
				26	害虫獣害防除		
				27	根踏み		

※本調査範囲内の林野庁業務資料に「皆伐」及び「択伐」の記載なし。

【皆伐の区分について】

本調査範囲内の林小班については、林野庁業務資料の施業履歴に「皆伐」の記載はない。しかし、施業履歴では、「植付」・「地拵」等の森林の更新時に実施される施業が記載された林小班及び「主伐」と記載された林小班が存在したため、それらに該当する林小班を、新旧のオルソ写真を用いて、目視により確認した。その結果、林小班内の 5 割以上の面積で、主伐又は更新されたと見られる林小班が、21 か所確認できた。それら林小班を区分①の「皆伐」とした。ただし、施業履歴に記載された施業の情報は平成 2 年以降のものであるため、それ以前の施業については、調査範囲外とした。

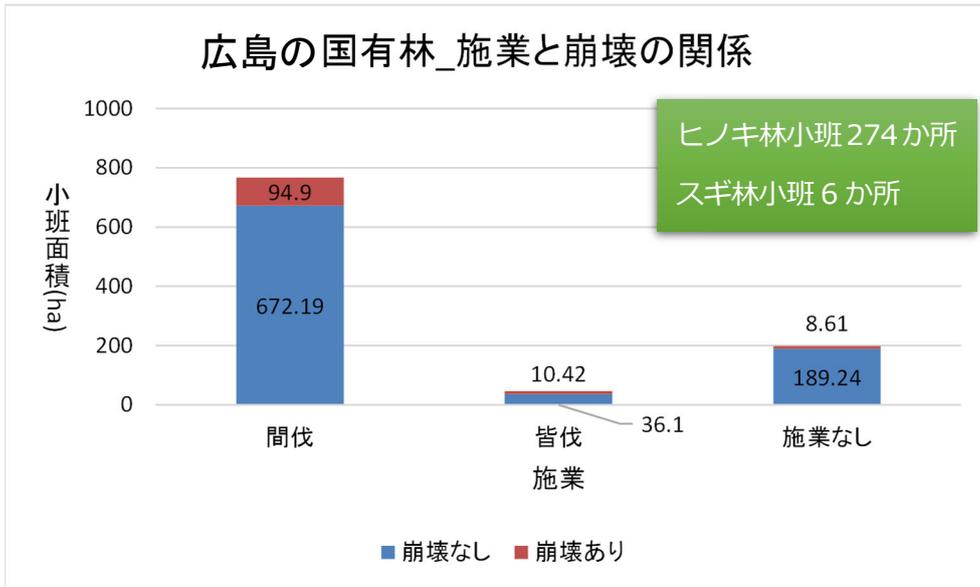


図 1.2 広島県の国有林における森林施業別及び崩壊有無別の林小班の面積（単位 ha）

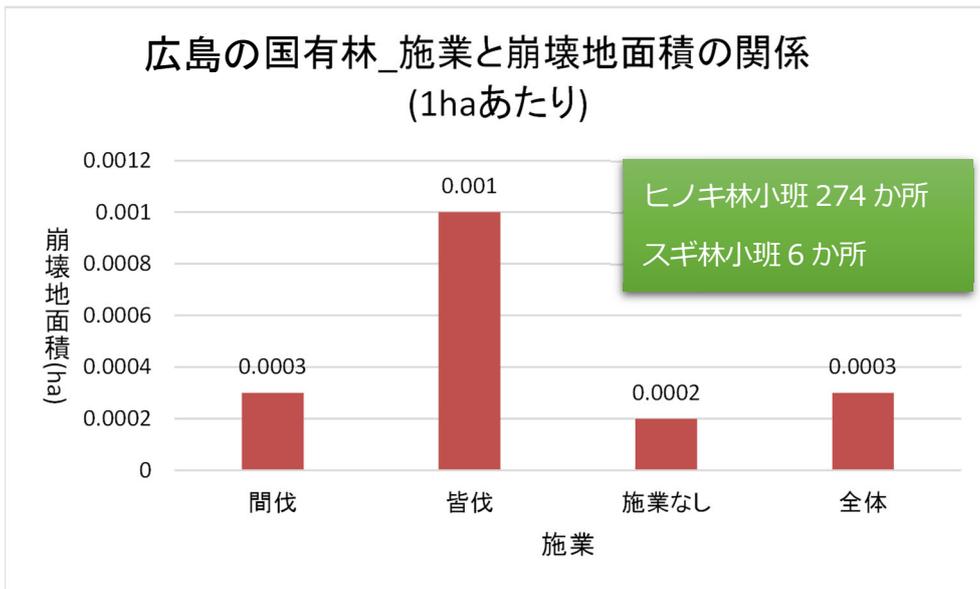


図 1.3 広島県の国有林における森林施業と崩壊地面積の関係（1ha 当たり）

図 1.2 を見ると崩壊ありとなった林小班の面積の絶対値は、間伐施業を実施した林小班で多い結果だが、1ha 当りに換算した図 1.3 では、皆伐施業の林小班が最も多い結果となった。

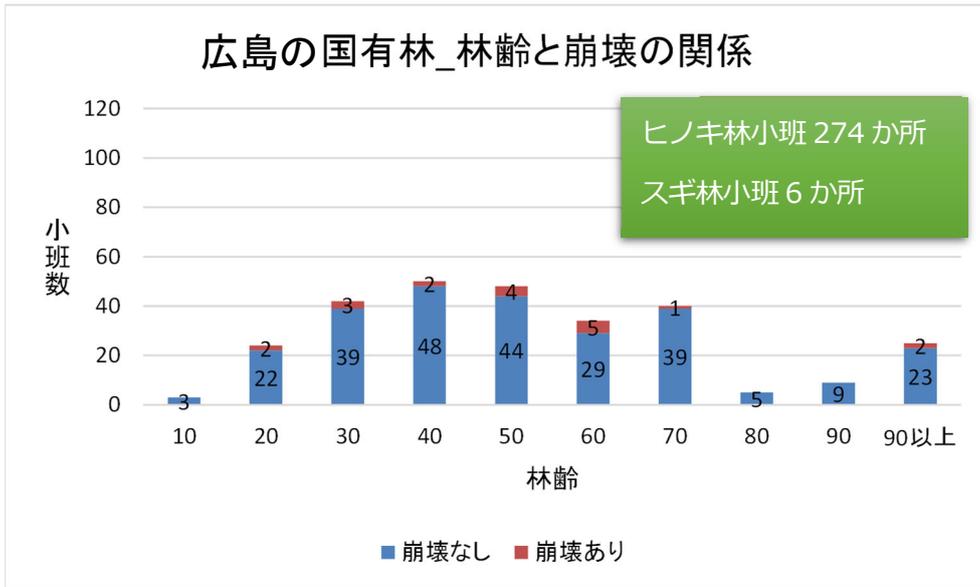


図 1.4 広島県の国有林における林齢と崩壊地の有無（林小班単位）

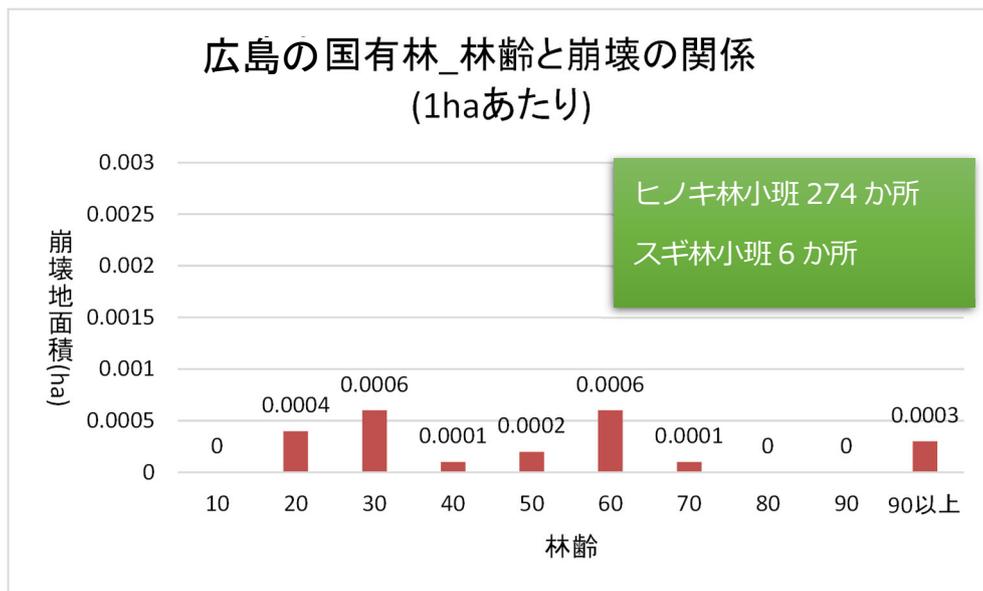


図 1.5 広島県の国有林における林齢と崩壊地面積の関係（1ha 当たり）

図 1.4 及び図 1.5 では、林齢と崩壊の関係を検証した。図 1.5 でやや 20、30 年で崩壊が多く発生しているようにも見えるが、60 年生でも崩壊は多く、特定の林齢で崩壊が発生しやすくなる傾向は特に見受けられない。

1.2.3 散布図による森林解析

LP データを基にした林小班ごとの林分情報（立木密度、樹高、胸高直径）が存在することから、林小班単位の散布図による解析を実施した。ここでの対象樹種はヒノキに限定した。

なお、航空 LP 点群から判定された樹頂点より立木密度の算定を行っているため、点密度が不足し、解析ができない林小班は除外した。そのため、解析対象はヒノキ林 139 か所の林小班となった。

【広島の有林】

- 調査範囲のヒノキ林小班数・・・274
- 解析対象としたヒノキ林小班・・・139
- 解析対象範囲の林小班の面積・・・475.1ha

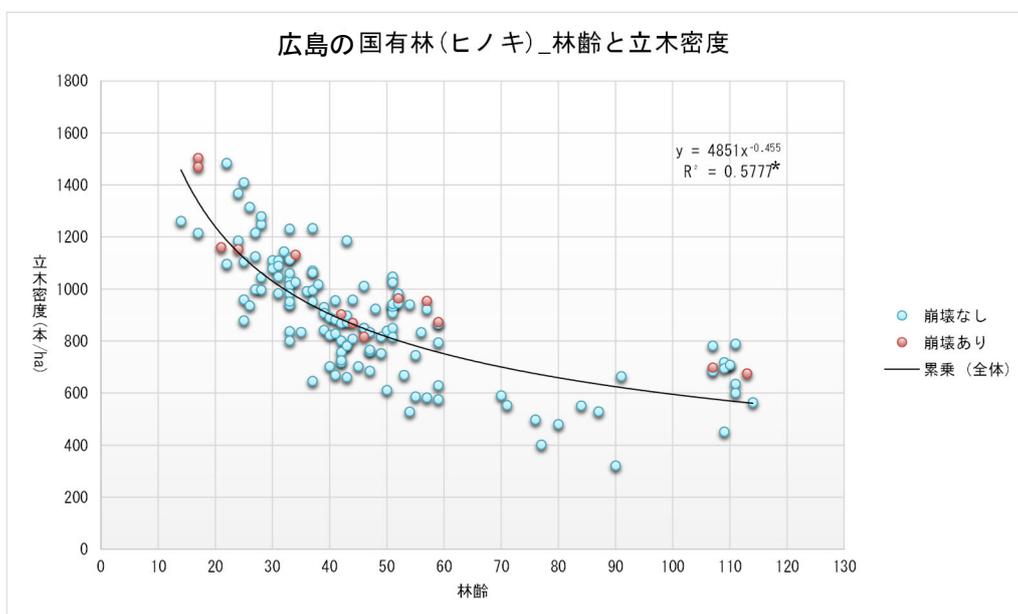


図 1.6 散布図による林齢と立木密度の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

【図 1.6 の考察】

- 若齢林で立木密度が高く、高齢林で密度が低くなる傾向が示された。
- 「崩壊あり」のプロットが回帰線より上方に散布され、同一林齢の中では比較的密な林分で崩壊が発生している。

² 有意水準。統計上、ある事象が起こる確率が偶然とは考えにくい（有意である）と判断する基準となる確率。通常は 5%、厳密には 1%を用いる。

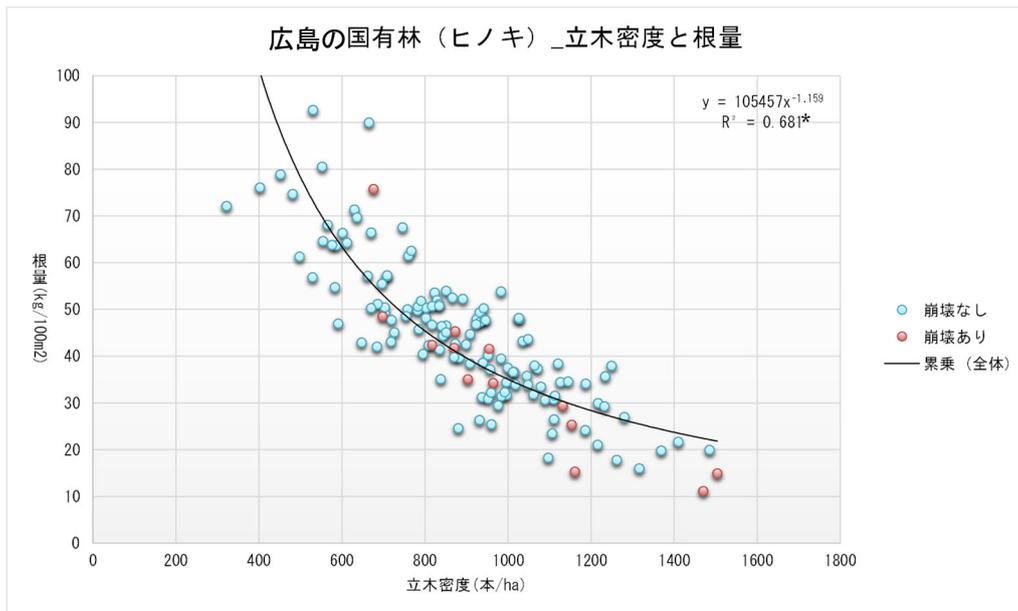


図 1.7 散布図による立木密度と根量の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

【図 1.7 の考察】

- 根量は立木密度と強い相関を持つ傾向が示された。
- 崩壊の発生の有無による傾向の違いは見られない。

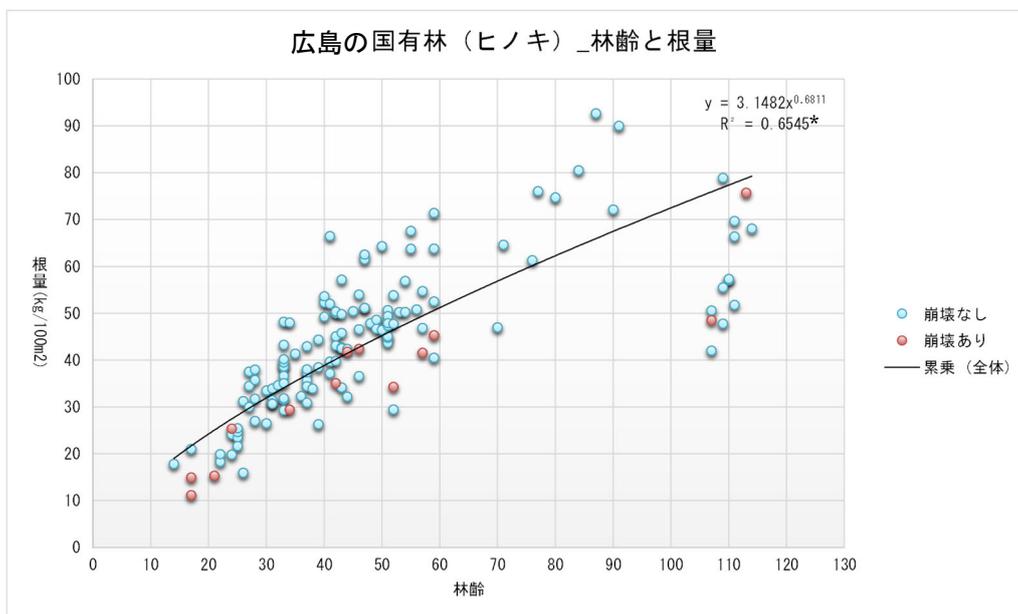


図 1.8 散布図による林齢と根量の関係 (ヒノキ)

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

【図 1.8 の考察】

- 根量は林齢と強い相関を持つ傾向が示された。
- 「崩壊あり」のプロットが回帰線よりも下方に散布され、同一林齢の中では比較的根量が少ない林分で崩壊が発生している。

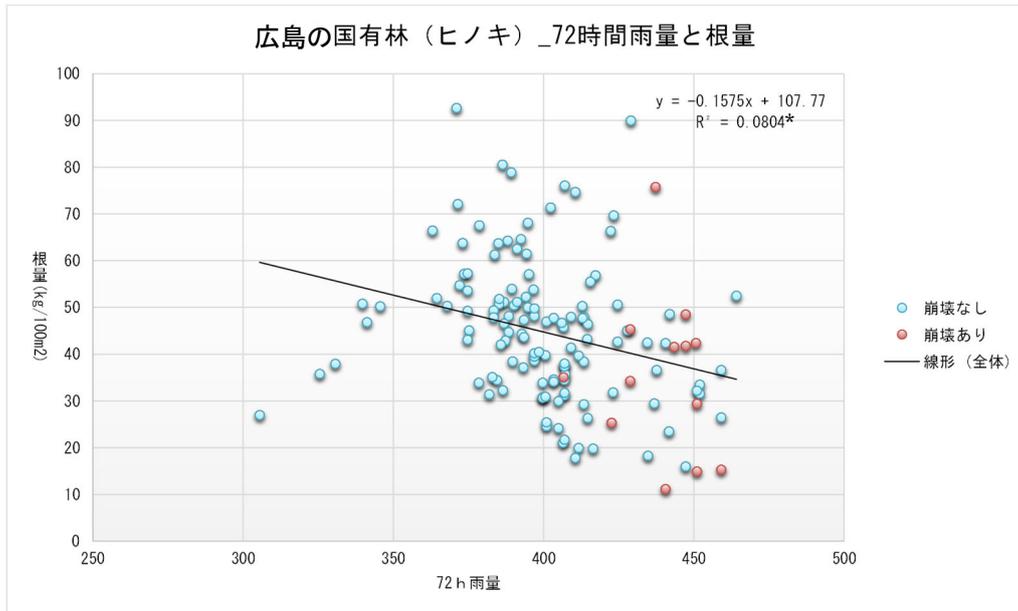


図 1.9 散布図による 72 時間雨量と根量の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

【図 1.9 の考察】

- 根量に関わらず、72 時間雨量が 400mm 以上で「崩壊あり」の林小班が見られた。

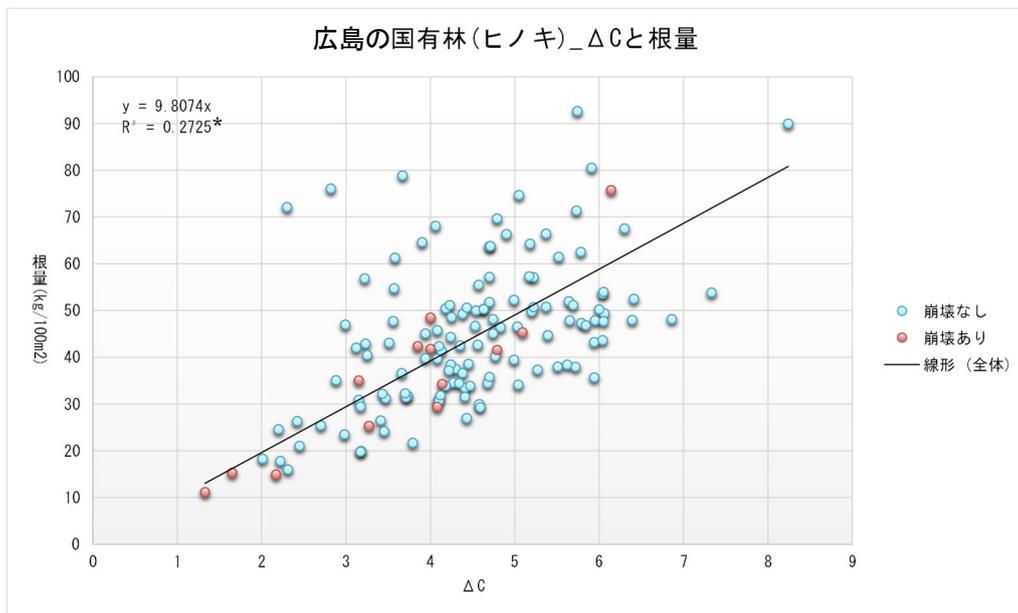


図 1.10 散布図による ΔC と根量の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

【図 1.10 の考察】

- ΔC と根量の間強い相関が存在する。両者とも胸高直径と立木密度を基に算定した値。
- ΔC (kN/m²) と根量 Wr (kg/100m²) は、 $Wr=10\Delta C$ がおおむね平均的な関係式。

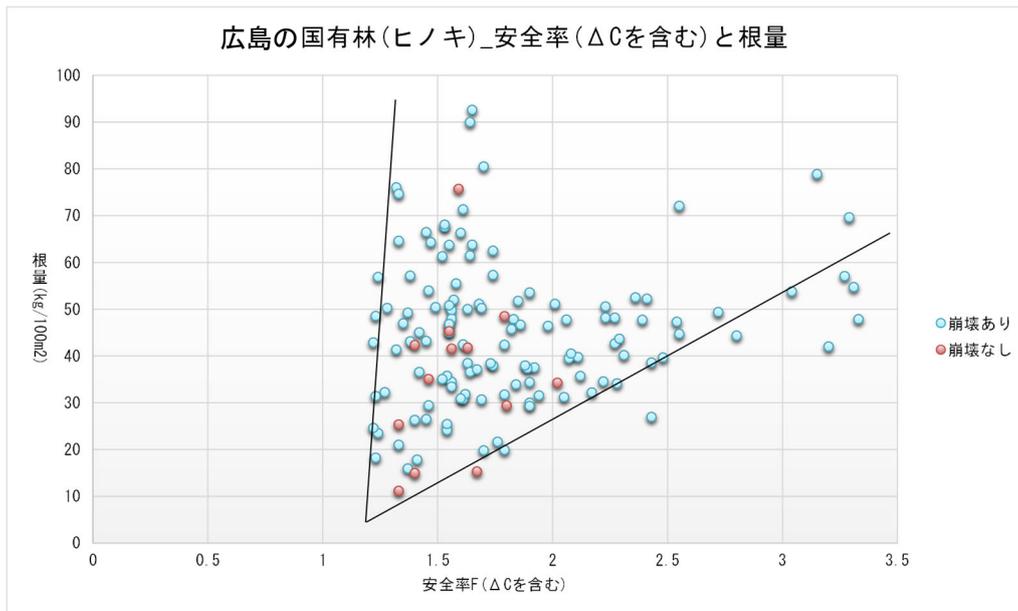


図 1.11 散布図による安全率と根量（広島県の国有林）

【図 1.11 の考察】

- トレンドラインが2種類あらわれる（図中のV字の黒線）。しかし、ラインが2本となる理由は判然としない。

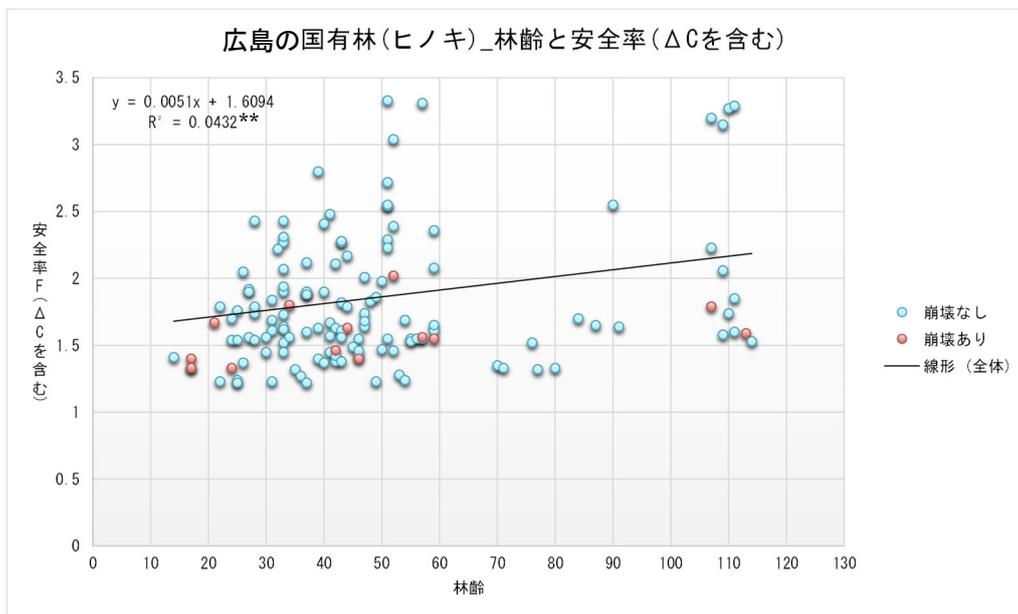


図 1.12 散布図による林齢と安全率（ΔCを含む）

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

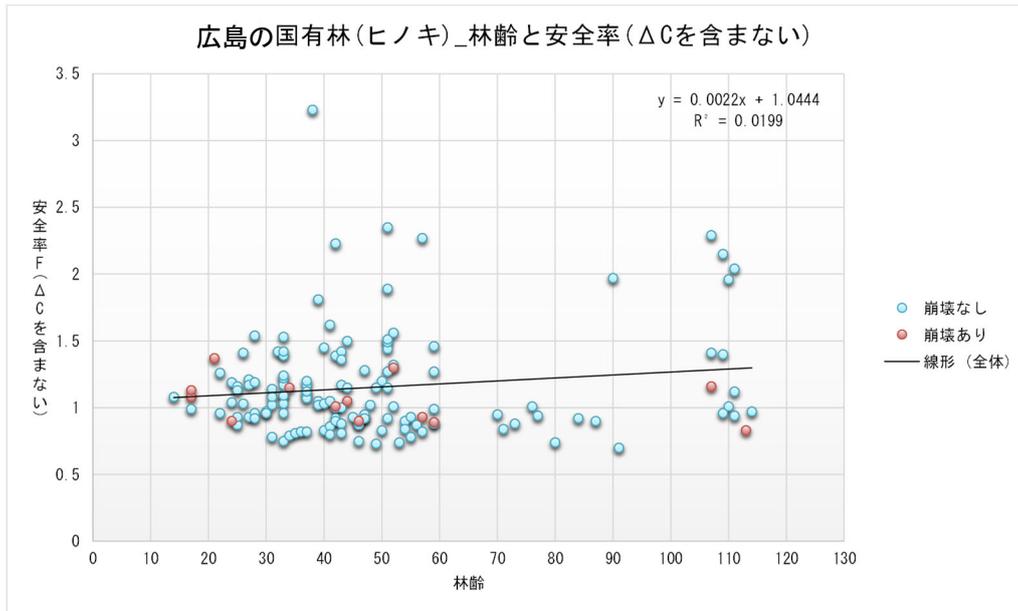


図 1.13 散布図による林齢と安全率 (ΔCを含まない)

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

表 1.4 森林の効果による安全率の増分

調査地	樹種	ΔCを含む 回帰線の傾き	ΔCを含まない 回帰線の傾き	傾きの差	林齢が50年増えたときの 斜面安全率の増分
広島	ヒノキ	0.0051	0.0022	0.0029	0.145

【図 1.12、図 1.13、表 1.4 の考察】

- 図 1.13 は安全率の算定 (式 1-2) 時に $\Delta C=0$ としたとき、図 1.12 は算定された ΔC の値を適用した場合である。
- 図 1.13 の $\Delta C=0$ 、つまり林分情報をまったく考慮しない安全率は、地盤情報のみに基づくため、林齢と安全率の間に理論上は関係が存在しない。回帰線が 0.0022 傾くが、これは収集データ自体が持つばらつきに相当する。
- 算定された ΔC の値を含む、図 1.12 の回帰線の傾きは 0.0051。これは森林の崩壊防止機能を考慮した場合の傾きに相当する。
- 回帰線の傾きの差 ($0.0051-0.0022=0.0029$) が、森林による安全率増分となる。
- 広島では、50 年生以上のヒノキにより、斜面安全率が 0.145 上昇した可能性がある。

1.2.4 林齢別森林解析

ヒノキ林 139 か所の林小班のデータについて、林齢の観点から比較検証した。

【広島の国有林内の調査対象】

- 調査範囲のヒノキの林小班数・・・139
- 調査範囲のヒノキの林小班面積・・・475.1ha

【年齢別グループ】

- 年齢 3・4 林齢 11～20 年生
- 年齢 5・6 林齢 21～30 年生
- 年齢 7・8 林齢 31～40 年生
- 年齢 9・10 林齢 41～50 年生
- 年齢 11・12 林齢 51～60 年生
- 年齢 14～23 林齢 66～115 年生

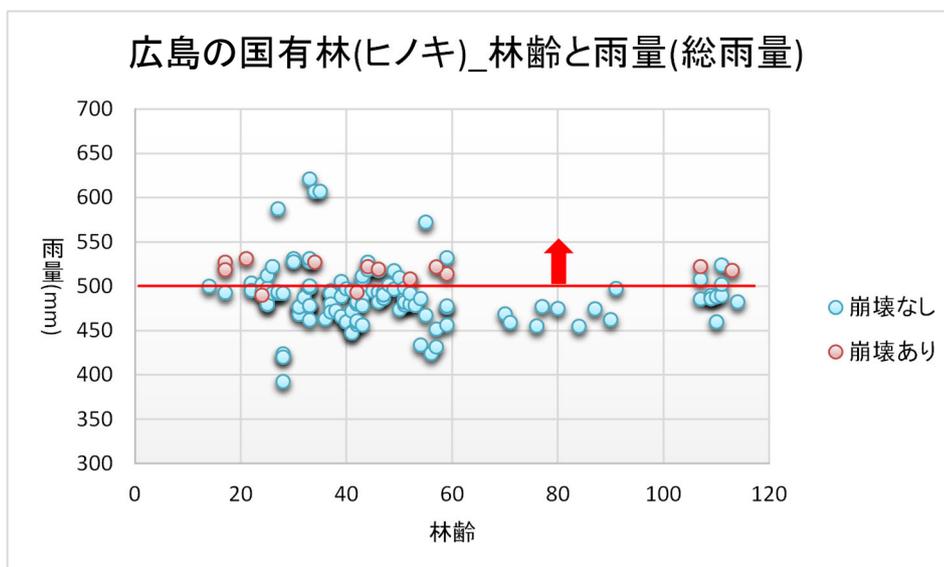


図 1.14 林齢と雨量（総雨量）

表 1.5 に各データを年齢別、崩壊地の有無別で整理し、データごとに、より値が高い方を黄色でハッチングした。年齢 13 については、当該林小班が解析対象範囲に存在しなかったため、比較をしていない。

- 全ての年齢の崩壊地ありで「72 時間雨量」が高い値を示す。「総雨量」では、年齢 11・12 以外で 500mm を超えている。
- 年齢 11・12 を除いた全ての年齢の崩壊地なしでは、「根量」が高い値を示す。(図 1.8)
- 年齢 11・12 を除いた全ての年齢の崩壊地ありでは、「立木密度」が高い値を示す。(図 1.6)
- 年齢 14～23 の崩壊地は、いずれも林齢が 100 年生以上であった。

以上のことから、崩壊が発生した要因の一つとして降雨量が挙げられる。また、年齢 11・12 以外では、根量が少なく、立木密度が高い箇所では崩壊が起りやすい傾向が見られた。

表 1.5 広島の有林における齢級別データ比較（林小班ごとのデータを齢級別グループの平均値に換算）

齢級	崩壊有無	林齢(年)	傾斜角(°)	崩壊地(箇所数)	総雨量(mm)	72時間雨量(mm)	根量(kg/本)	立木密度(本/ha)	主伐5割以上(%)	Wr(kg/100m ²)	ΔC(kN/m ²)
3・4	なし	15.5	26.0	0	496.6	408.5	19.4	1,239.0	0.8	240.5	2.3
3・4	あり	17.0	24.2	1	523.2	445.8	13.1	1,487.0	0	194.5	1.8
5・6	なし	26.2	25.0	0	491.5	402.5	27.3	1,149.9	0.4	309.4	3.6
5・6	あり	22.5	24.6	1	510.7	440.9	20.3	1,157.0	0.5	235.0	2.5
7・8	なし	35.0	24.8	0	496.6	402.2	37.9	981.3	0	366.7	4.5
7・8	あり	34.0	23.0	1	527.5	451.0	29.4	1,132.0	0	332.7	4.1
9・10	なし	44.6	26.5	0	487.8	400.3	47.9	819.3	0	385.6	4.7
9・10	あり	44.0	27.4	1.7	511.6	434.8	39.7	863.3	0	342.1	3.7
11・12	なし	52.2	23.8	0	487.4	395.5	49.8	864.8	0	423.0	5.5
11・12	あり	57.4	25.3	0.5	479.5	399.2	50.2	799.8	0	389.2	4.9
14～23	なし	96.7	24.5	0	481.5	398.3	65.2	596.9	0	379.5	4.4
14～23	あり	110.0	27.9	1	520.2	442.2	62.1	687.0	0	425.3	5.1

1.2.5 立木密度と ΔC の関係

解析対象であるヒノキ林 139 か所の林小班の立木密度と ΔC の関係を、林齢別に散布図を作成し、検証した。林齢区分は表 1.6 のとおりとした。

表 1.6 林齢区分

No	区分	林齢
1	若齢林 (幼齢林)	20 年生以下
2	壮齢林	21~49 年生
3	高齢林 (老齢林)	50 年生以上

(1) 若齢林 (幼齢林)

20 年生以下の若齢 (幼齢) になるほど樹冠が小さく、かつ、凹凸が少ない。そのため LP 点群からの樹頂点抽出が困難となり、十分な樹頂点が得られたのは 4 か所の林小班と少ない数となったが、立木密度が高くなるほど ΔC の値が小さくなる傾向が見られた。

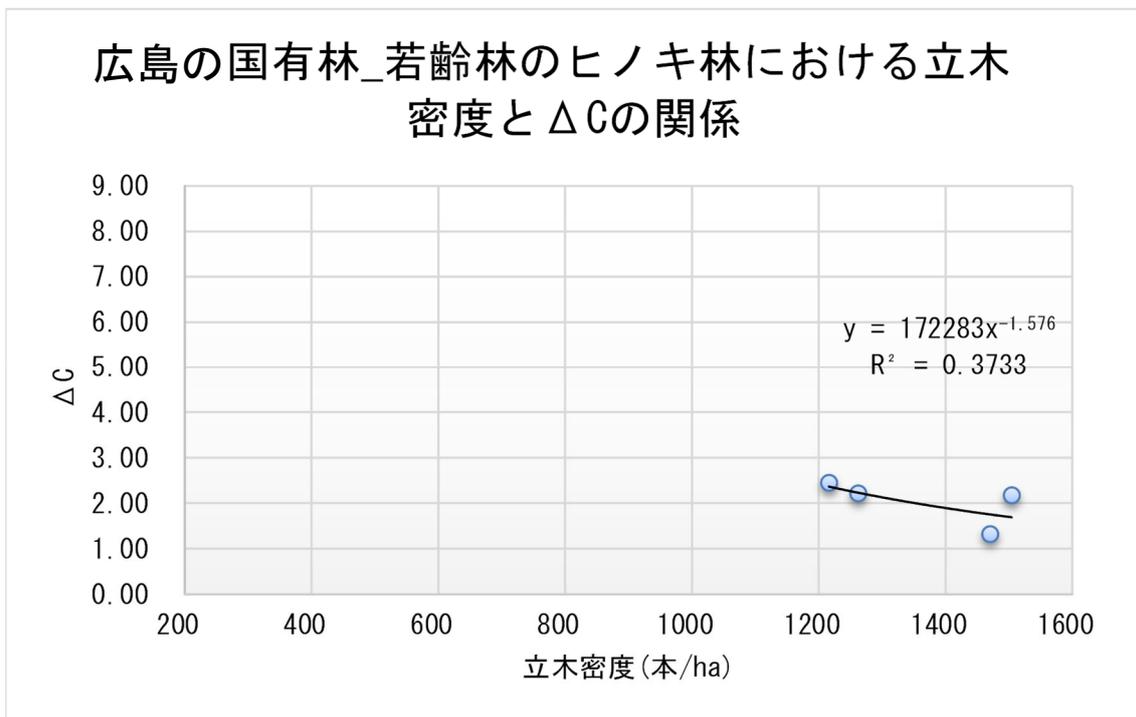


図 1.15 若齢林のヒノキ林における立木密度と ΔC の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

(2) 壮齢林

壮齢林では、立木密度が高くなると ΔC の値が小さくなる傾向が見られた。若齢林よりもやや傾きが緩い。

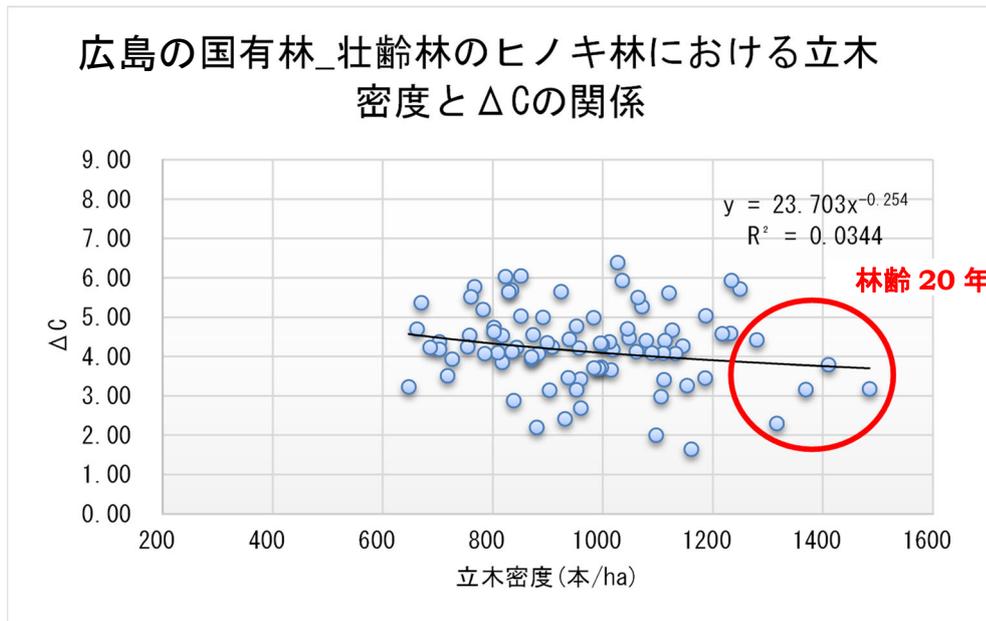


図 1.16 壮齢林のヒノキ林における立木密度と ΔC の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

(3) 高齢林（老齢林）

高齢林のデータは、基本的に立木密度が低く、疎な状態である。そのため、立木密度が高くなるほど ΔC の値が高くなる、というこれまでとは逆の傾向が見られた。

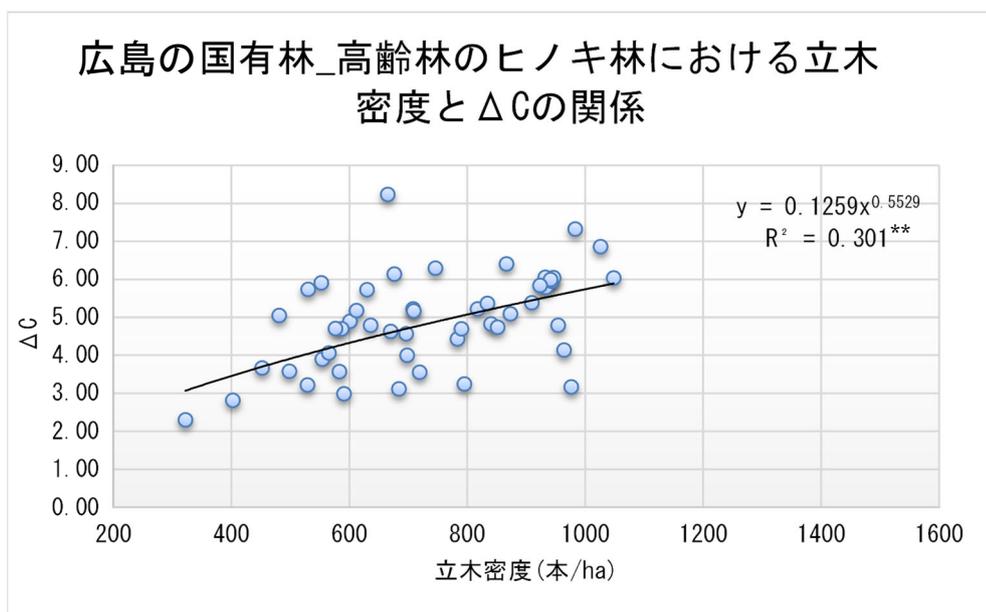


図 1.17 高齢林のヒノキ林における立木密度と ΔC の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

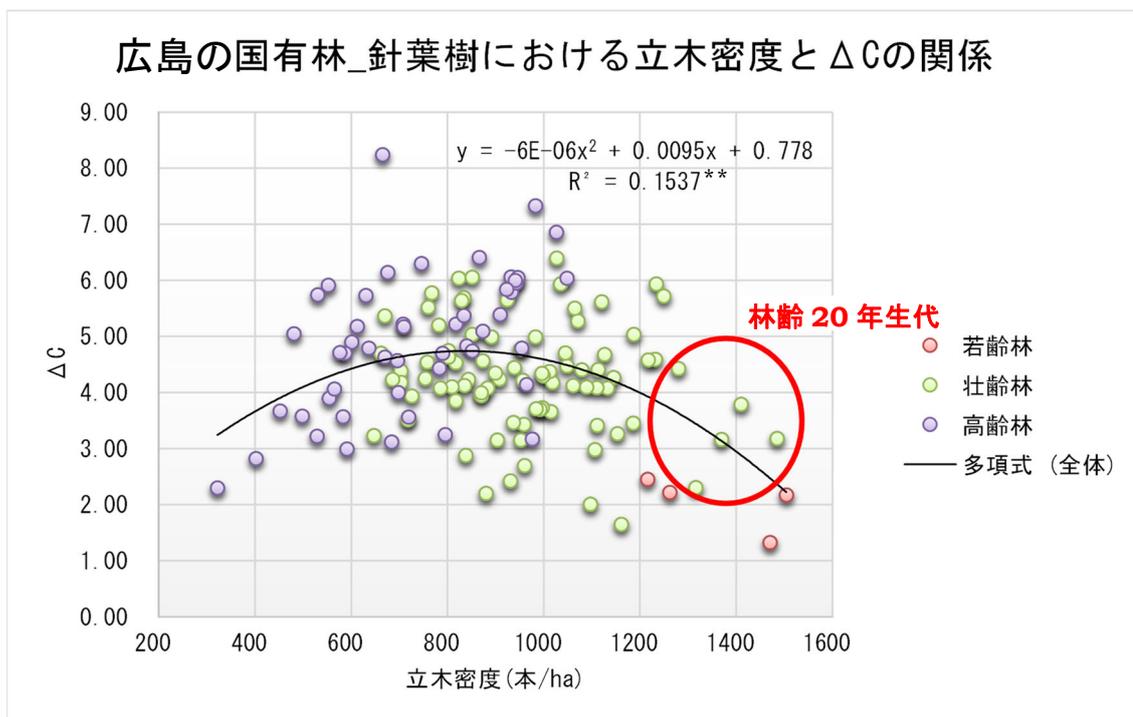


図 1.18 ヒノキ林における立木密度とΔCの関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

139か所の林小班全ての値をプロットした散布図では、立木密度の800本/haから1,000本/haの範囲がピークとなる凸型の傾向が見られた。

図 1.18の傾向は、第I編に示す北原の調査データである図 2.9と同様である。

1.3 スギ林における森林解析

1.2 では、山腹崩壊と森林の関係について、主にヒノキ林を中心に整理した。スギに関しては、高知の国有林のデータを取り上げて、検討を行った。

1.2 と同様に林小班単位で、航空 LP データから点群、樹頂点抽出、立木密度、樹高測定、直径算出の流れで林分情報を特定し、崩壊と森林の関係を整理した。

1.3.1 施業前後の森林情報の比較

施業による森林の土砂崩壊防止機能への影響力を可視化するため、施業前後の各種データの差分値を算出し比較した。

(1) 解析対象となる林小班

対象の林小班は、以下の条件を満たす高知県安芸市、香美市及び大豊町に属する 56 か所の林小班とした。このうち、8 か所の林小班が崩壊地を含む。

- 施業前後の航空 LP データがある。
- 施業前の航空 LP データの点密度が解析に足る。
- 林小班の面積が 10ha 以上である。
- 施業前の航空 LP データ取得年と施業後の航空 LP データの取得年の間に森林施業が実施されている。

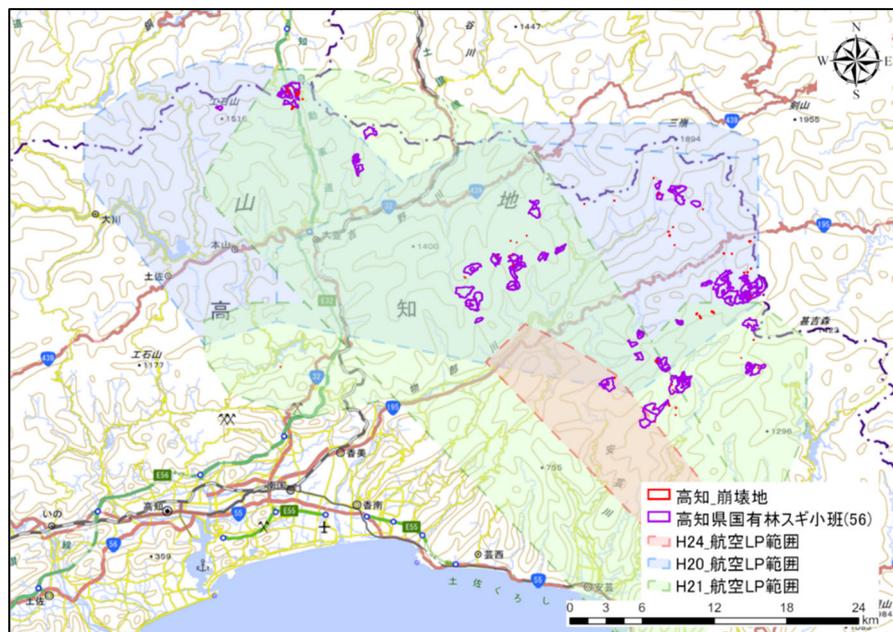


図 1.19 調査対象の 56 か所の林小班と崩壊地（紫色：林小班、赤色：崩壊地）

(2) 施業履歴と LP データ

対象となったスギを主とする 56 か所の林小班の林齢は、33～68 年生である。壮齢林から高齢林の林小班のみで、平均林齢は 52 年生であった。

56 か所の林小班の施業履歴を表 1.7 に示す。なお、施業後経過年数は災害発生年である平成 30 年までに経過した年数とした。

施業前の航空 LP データは H20, H21, H24 と複数年度取得されている林小班も存在したことから、最新施業が実施された年度と最も近いデータを森林解析に使用した。(図 1.20)

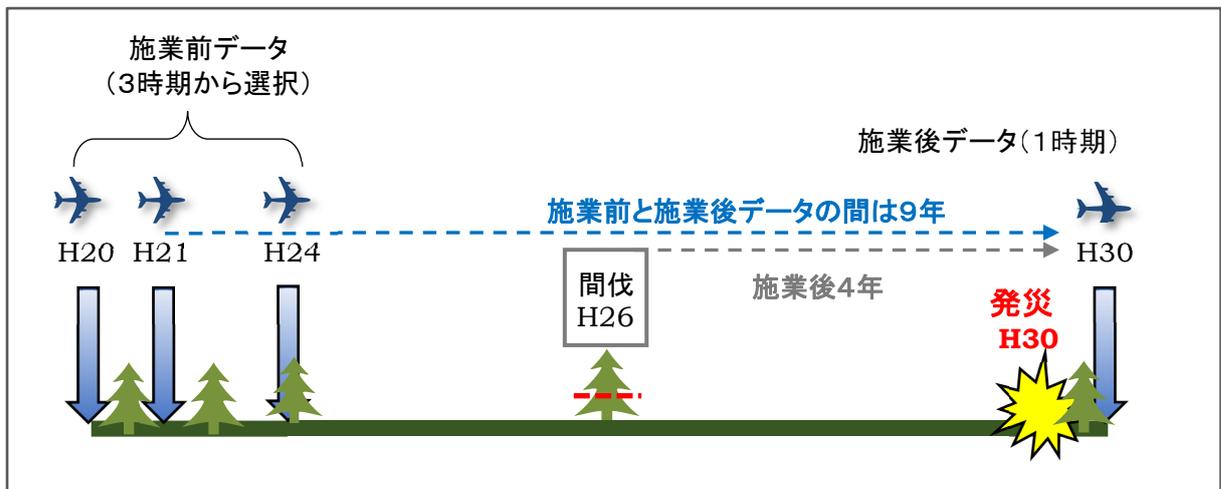


図 1.20 施業前後の LP データと施業後経過年の関係 (イメージ)

表 1.7 調査対象の 56 か所の林小班の施業履歴

小班 No	林 齢	崩壊地の有無	施業履歴	施業後経過年	施業前 LP 取得年
1	49	有	H24 保育間伐/H29 主伐 1	1	H21
2	56	有	H23 本数調整伐/H29 間伐 2	1	H21
3	56	有	H22 保育間伐/H23 間伐 2/H26 間伐 2/H28 間伐 2	2	H20
4	44	有	H26 保育間伐	4	H21
5	56	有	H20 保育間伐/H21 保育間伐/H25 間伐 2/H26 間伐 2	4	H24
6	43	有	H23 本数調整伐	7	H20
7	68	有	H23 本数調整伐	7	H21
8	49	有	H21 保育間伐	9	H20
9	54	無	H23 保育間伐/H29 主伐 1	1	H24
10	39	無	H29 本数調整伐	1	H20
11	61	無	H29 間伐 2	1	H21
12	54	無	H20 保育間伐/H28 間伐 2/H29 植付	2	H20
13	42	無	H21 保育間伐/H28 間伐 2	2	H21
14	50	無	H28 間伐	2	H20
15	56	無	H23 間伐 2/H27 間伐/H28 保育間伐	2	H21
16	63	無	H28 保育間伐	2	H21
17	66	無	H27 間伐 2	3	H21
18	45	無	H27 保育間伐	3	H21
19	50	無	H26 間伐/H27 保育間伐	3	H20
20	54	無	H21 間伐 2/H23 保育間伐	3	H21
21	61	無	H21 間伐 2/H23 間伐 2/H25 間伐 2/H27 間伐 2	3	H20
22	61	無	H26 間伐/H27 保育間伐	3	H21
23	47	無	H24 間伐 2/H25 保育間伐/ H26 保育間伐	4	H21
24	52	無	H26 間伐	4	H20
25	60	無	H25 間伐/H26 間伐	4	H20
26	58	無	H26 間伐 2	4	H20
27	49	無	H22 間伐 2/H25 保育間伐	5	H21
28	48	無	H24 保育間伐/H25 保育間伐	5	H21
29	53	無	H25 保育間伐	5	H24

施業後 LP データは H30 計測のもの

小班 No	林 齢	崩壊地の有無	施業履歴	施業後経過年	施業前 LP 取得年
30	49	無	H24 間伐/H25 間伐 2	5	H20
31	43	無	H23 本数調整伐/H25 主伐 1	5	H20
32	68	無	H20 保育間伐/H25 間伐 2	5	H20
33	53	無	H25 間伐 2	5	H21
34	33	無	H25 保育間伐	5	H20
35	52	無	H23 間伐 2/H25 保育間伐	5	H21
36	53	無	H24 保育間伐	6	H21
37	42	無	H24 保育間伐	6	H21
38	55	無	H24 間伐	6	H20
39	51	無	H24 間伐	6	H20
40	50	無	H24 間伐	6	H20
41	51	無	H21 間伐 2/H23 間伐 2/H24 間伐	6	H20
42	65	無	H24 間伐	6	H20
43	44	無	H23 本数調整伐	7	H20
44	48	無	H23 本数調整伐	7	H20
45	49	無	H22 保育間伐/H23 保育間伐	7	H20
46	48	無	H23 保育間伐	7	H20
47	52	無	H23 保育間伐	7	H20
48	46	無	H23 間伐 2	7	H20
49	65	無	H22 保育間伐/H23 間伐	7	H21
50	52	無	H22 保育間伐	8	H20
51	52	無	H21 保育間伐/H22 保育間伐	8	H21
52	54	無	H21 保育間伐	9	H20
53	59	無	H21 保育間伐	9	H20
54	38	無	H21 保育間伐	9	H20
55	49	無	H20 保育間伐/H21 保育間伐	9	H20
56	54	無	H20 主伐/H21 保育間伐	9	H20

(3) 樹高の計測方法

航空 LP 点群から樹高を抽出するための森林解析は、林小班全体（立木全数）を対象とはせず、以下に示す条件で標準地を設定してその範囲で樹高を計測した。

<崩壊地を含む 8 か所の林小班>

対象の林小班内の崩壊地周辺のスギ林に 20m×20m の範囲を 3 か所設定した。

<崩壊地を含まない 48 か所の林小班>

対象の林小班内のスギ林に 50m×50m の範囲を 1 か所設定した。



図 1.21 林小班内に設定した標準地の例（左：崩壊地あり、右：崩壊地なし）

(4) 施業前後の差分値

表 1.7 に示す施業前 LP データ（各林小班で H20, H21, H24 のいずれか）と、H30 発災後に計測された LP データ、両者を使って立木密度、 ΔC 、 W_r について、（施業後－施業前）により差分値を算定した。

各林小班での差分値を図 1.22 に一覧で示す。

図 1.22 の図上に引いたピンク色破線は ΔC の差分値が -2 以下となった林小班である。つまり、施業により ΔC が 2 [kN/m²] 以上低下した林小班が、11 か所存在する。これら 11 か所の林小班の立木密度の差分値の平均は 452 本/ha となり、全 56 林小班の平均の 283 本/ha と比較し、大きな差分、つまり強度の伐採が加えられたことが分かった。

また、図上の緑色破線は ΔC の差分値が +2 以上となった林小班で、施業により ΔC が 2 [kN/m²] 以上上昇した林小班が 15 か所存在する。これら 15 か所の林小班の立木密度の差分値の平均は 167 本/ha となり、全 56 林小班の平均の 283 本/ha と比較し、小さな差分であることが分かった。

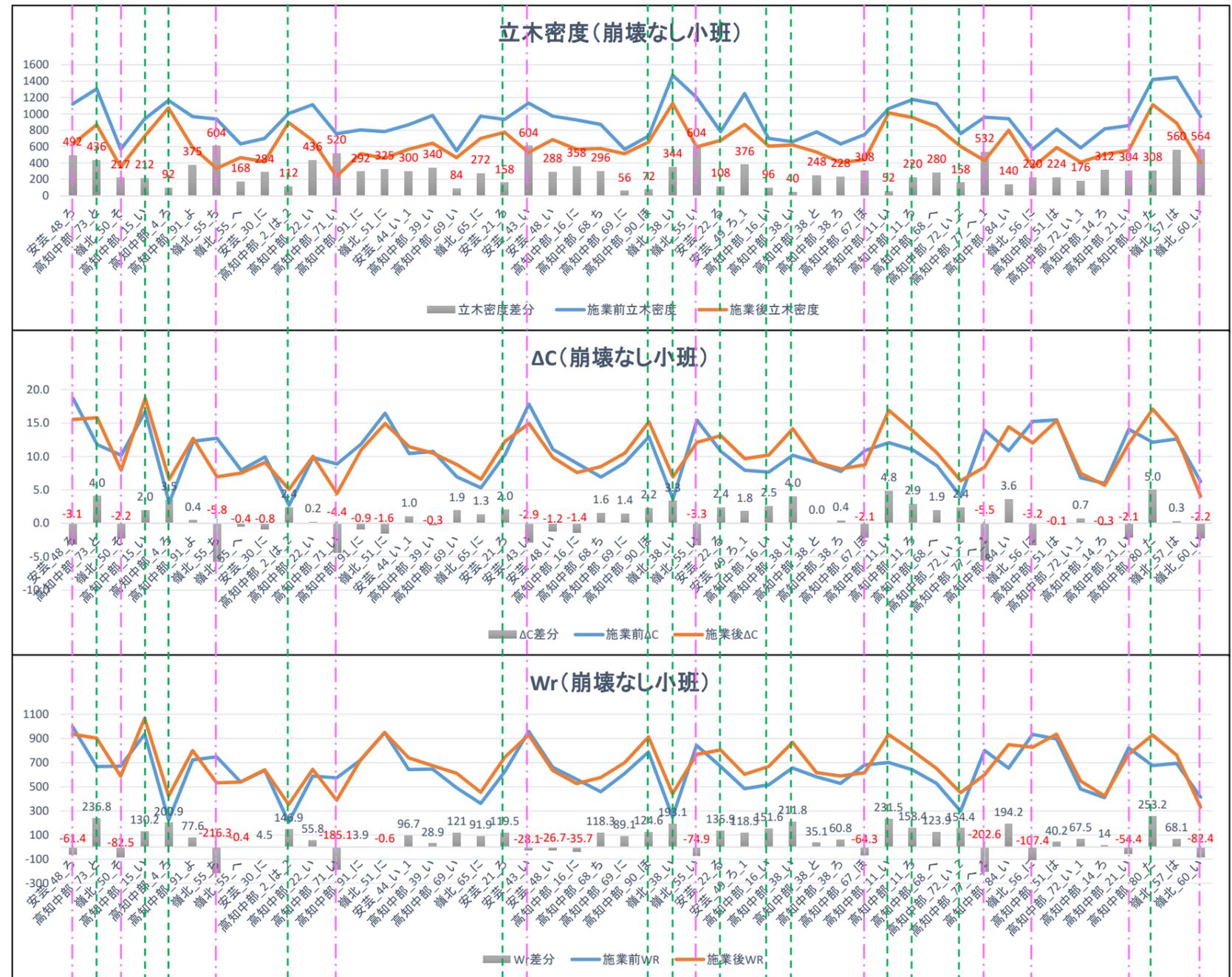
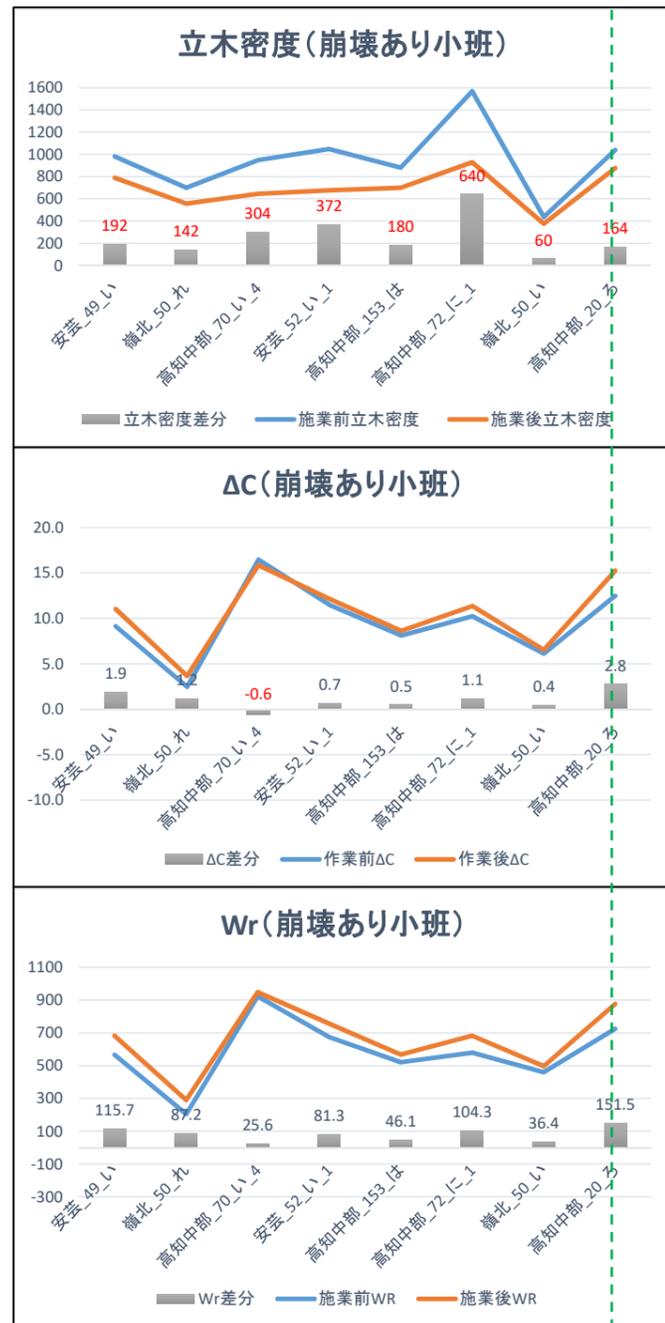


図 1.22 56 か所の林小班の施業前後の差分値比較 (立木密度とΔC、Wr)

(5) 散布図による検討（差分値）

図 1.22 の結果を踏まえ、より詳細な検証を行うため、差分値の散布図を作成し考察した。立木密度の差分と ΔC 、 W_r 及び胸高直径の差分について、図 1.23～図 1.25 を作成した。

図 1.23～図 1.24 の2つの散布図はほぼ同じ傾向が見られ、立木密度の差分値が約 320 本/ha より高いと ΔC が低下する傾向、 W_r では約 450 本/ha より高いと同様に低下する傾向が見られた。

このように散布図によるデータ分析についても、施業により密度が大きく低下すると、根系が発揮する断面抵抗力が低下しやすい傾向が見られた。

その一方で、崩壊の有無による立木密度の差分と ΔC の差分や W_r の差分との関係を見ると、特段の傾向は見受けられない。むしろ、崩壊が発生している全ての林小班は、 ΔC の差分と W_r の差分が正值（増加）となっていることから、 ΔC の差分と W_r の差分が負値（減少）であることが必ずしも崩壊に結びついているわけではない結果となった。

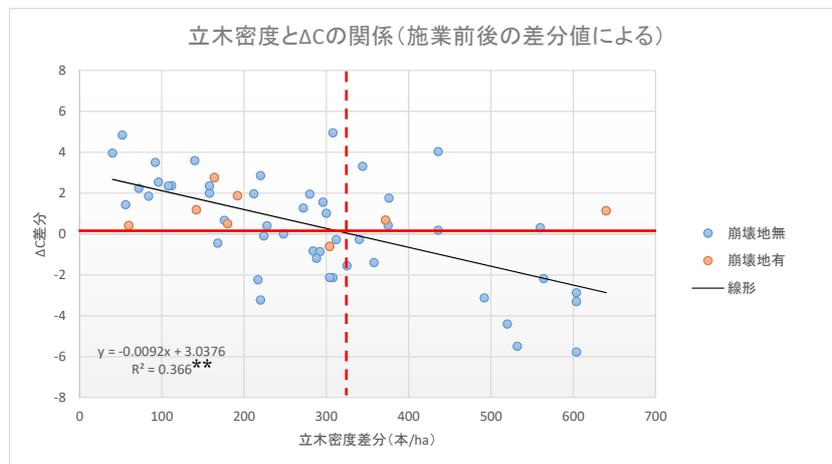


図 1.23 立木密度差分と ΔC 差分

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

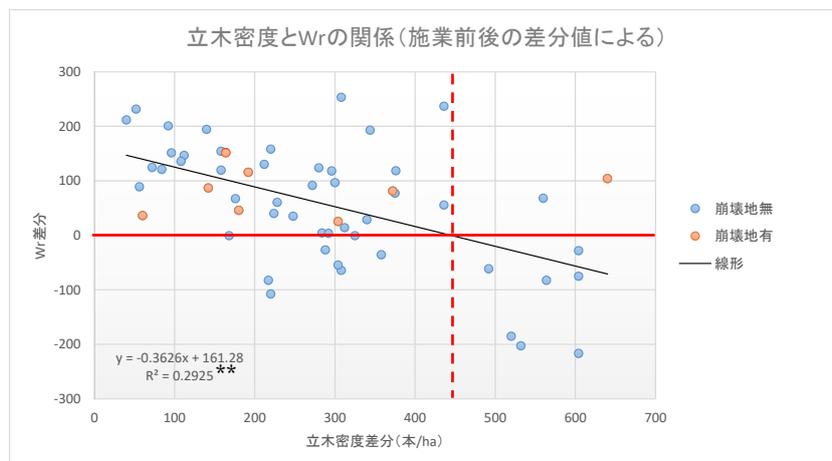


図 1.24 立木密度差分と W_r 差分

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

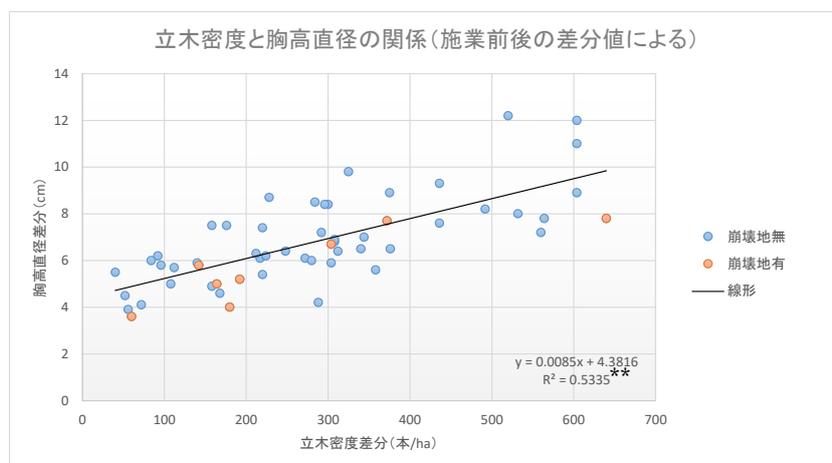


図 1.25 立木密度差分と胸高直径差分

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

図 1.25 は、施業前後の立木密度の差分と胸高直径の差分の関係で、 R^2 が 0.5335 と、比較的強い相関がでており、立木密度の差分が大きいほど、スギの成長（胸高直径の肥大）が促進されていることが分かった。

根系が発揮する断面抵抗力の指標である ΔC 及び根量 Wr の差分値が増加、又は減少した林小班の立木密度、胸高直径を抽出し表 1.8 に整理した。

表 1.8 ΔC と Wr の増減ごとの立木密度（林小班平均）

No	区分 (林小班数)	①施業後 立木密度 平均 (本/ha)	②施業前 立木密度 平均 (本/ha)	③①と② の変化率 (%)	④林齢 平均	⑤施業後 胸高直径 平均(cm)	⑥胸高 直径 差分平均 (cm)	⑦間伐
1	ΔC 増加 (34 か所)	732	960	23.7	49	33.7	6.3	1 伐 3 残
2	ΔC 減少 (21 か所)	491	866	43.2	57	39.7	7.6	2 伐 3 残
3	Wr 増加 (41 か所)	701	938	25.3	51	34.5	6.4	1 伐 3 残
4	Wr 減少 (15 か所)	468	875	46.5	56	40.2	7.9	2 伐 3 残

※ ΔC の区分については、1か所の林小班で差分値が 0 であったため、増加減少の合計が 55 か所の林小班となった。

表 1.8 では、 ΔC 及び Wr の両者共に、増加した林小班では施業前の立木密度は 950 本/ha 前後であるが、施業後は ΔC が増加した林小班で 732 本/ha、 Wr が増加した林小班で 701 本/ha となり、図 1.26 に示す ΔC 及び Wr の最も高くなる立木密度 800 本/ha 付近とおおむね近い値となった。

なお、本検証のスギ林は若齢林のデータがなく、壮齢林と高齢林のみで示された結果であることに留意する必要がある。

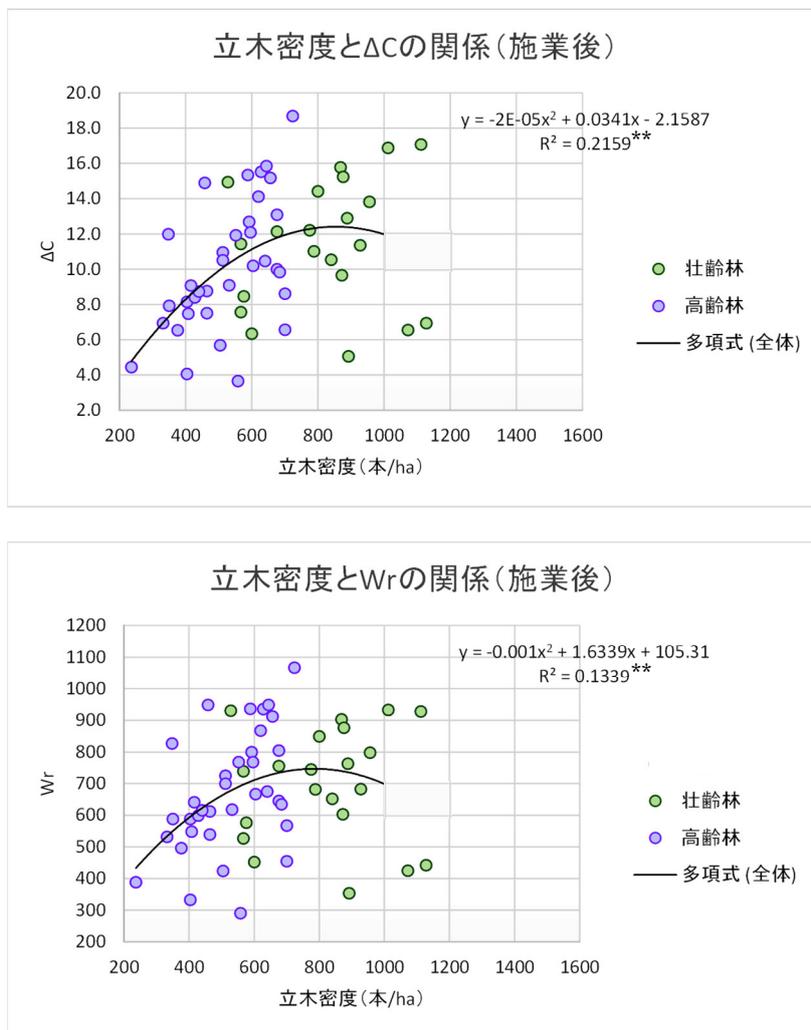


図 1.26 高知のスギ林の立木密度と根系が発揮する断面抵抗力ΔCと根量Wr (施業後)

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

図 1.27 及び図 1.28 は、施業後の立木密度がどのレベルから、ΔCやWrの差分が正值（崩壊防止力の指標が増加）に転ずるかを確認したものである。

ΔC (図 1.27) では施業後の立木密度が約 580 本/ha 以上からΔC差分が正值に転じ、施業後の立木密度が高いほど、根系が発揮する断面抵抗力の増分は大きい。Wr では立木密度が約 480 本/ha 以上から差分値が正值に転じ、ΔCと同様の傾向が見られた。

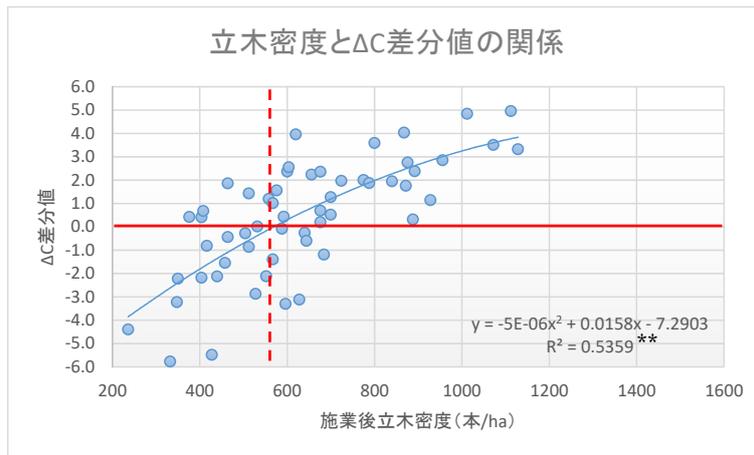


図 1.27 施業後立木密度とΔC差分値

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

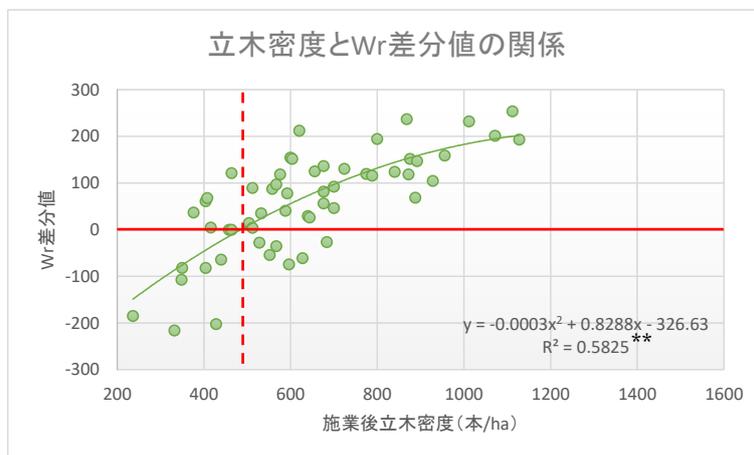


図 1.28 施業後立木密度と Wr 差分値

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

以上より、高知の国有林スギ 56 か所の林小班について、施業前後の森林情報を比較した結果、以下のことが分かった。なお、各林小班での施業後経過年数は 1～9 年で、林小班により異なる。

- 崩壊防止力の指標（ΔC及び Wr）がピークとなる立木密度は約 800 本/ha 前後。
- 施業後の立木密度が約 580 本/ha 以上確保された林小班は、根系が発揮する断面抵抗力ΔCが向上している場合が多い。
- 施業後の立木密度が約 480 本/ha 以上確保された林小班は、Wr による崩壊防止力が向上している場合が多い。
- 強度の伐採施業がなされた場合、伐採前の崩壊防止力まで回復していない林小班（ΔCや Wr の差分が負値）が多かった。

1.3.2 ΔC と Wr による森林解析

次に差分値ではなく ΔC 及び Wr の値そのものについて検討した。

(1) 解析対象となる林小班

高知中部に位置するスギ林のうち、 $30\text{m}\times 30\text{m}$ 範囲でスギ純林を確保できる 64 か所の林小班を選定し、解析対象とした。対象となった林小班の位置を図 1.29 に示す。

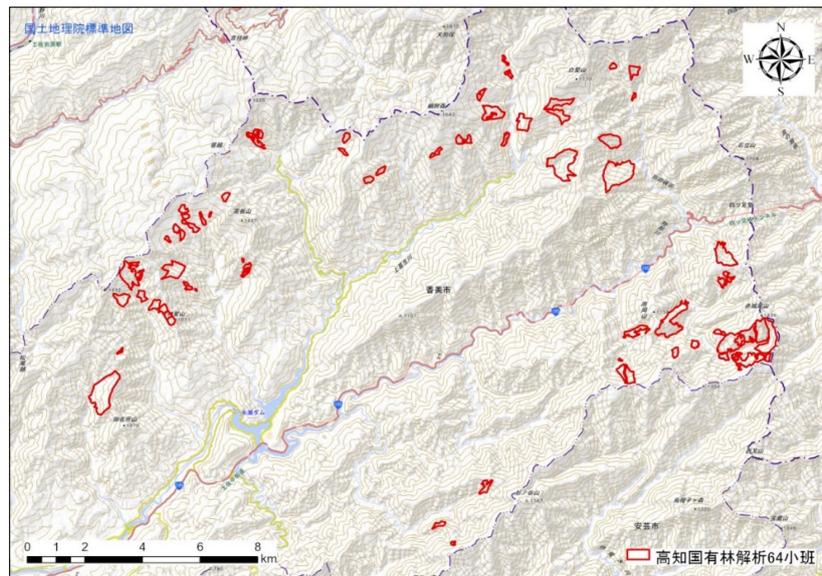


図 1.29 高知の国有林における森林解析対象の林小班（高知中部 64 か所）

(2) 樹高計測と胸高直径の算定

各林小班内で $30\text{m}\times 30\text{m}$ 範囲について、災害後の航空 LP データ（H30）を使い点群解析し、上層木の樹頂点の抽出及び立木密度の算出を行った。それらデータを基に、森林総合研究所「収量比数 Ry 計算プログラム」「四国の国有林スギ」のパラメータを用いて、胸高直径を推定した。以上より得られた立木密度、胸高直径を用いて各林小班の代表値となる ΔC 、 Wr を算定した。

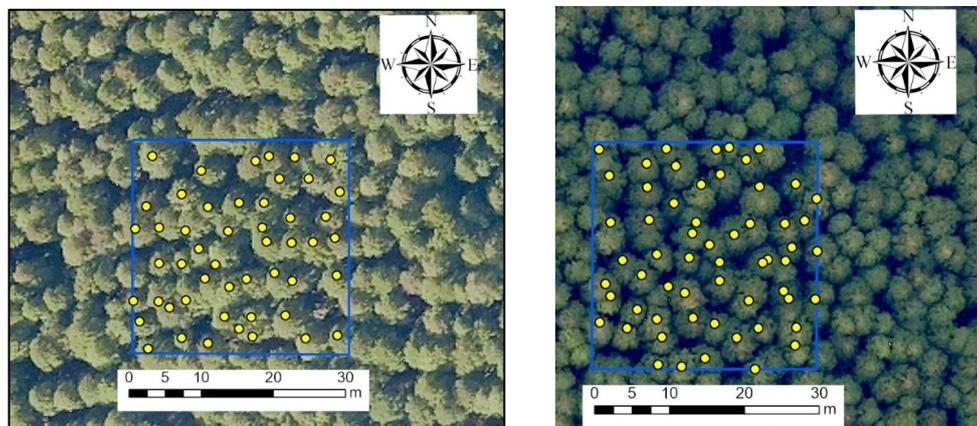


図 1.30 調査範囲の設定と樹頂点抽出例（左図：68-林班-ち、右図：72-林班-い-2）

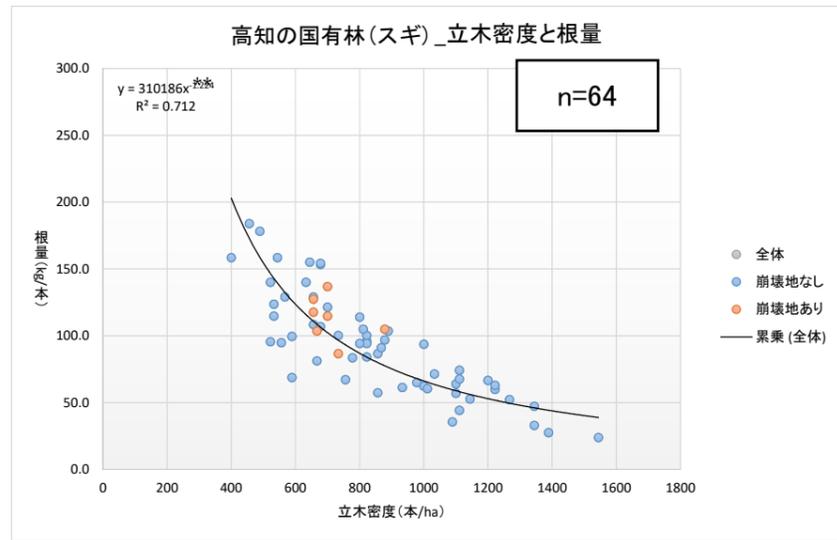


図 1.31 立木密度と根量の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

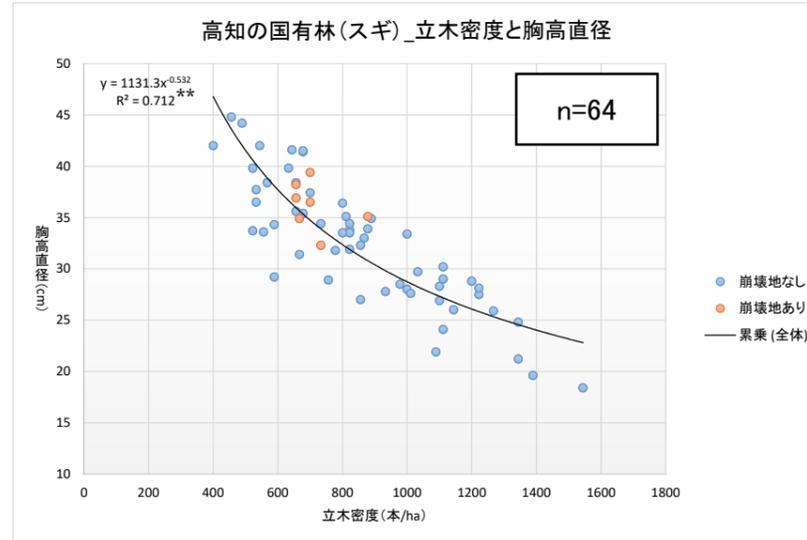


図 1.32 立木密度と胸高直径の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

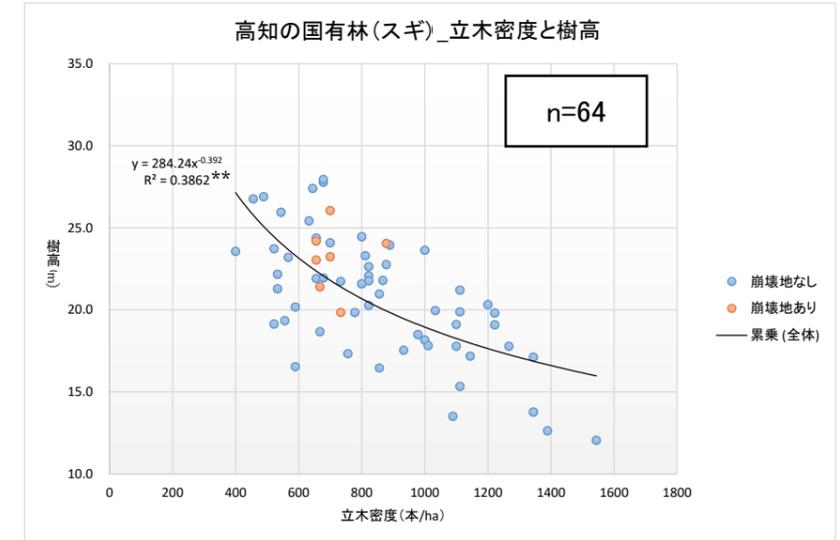


図 1.33 立木密度と樹高の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

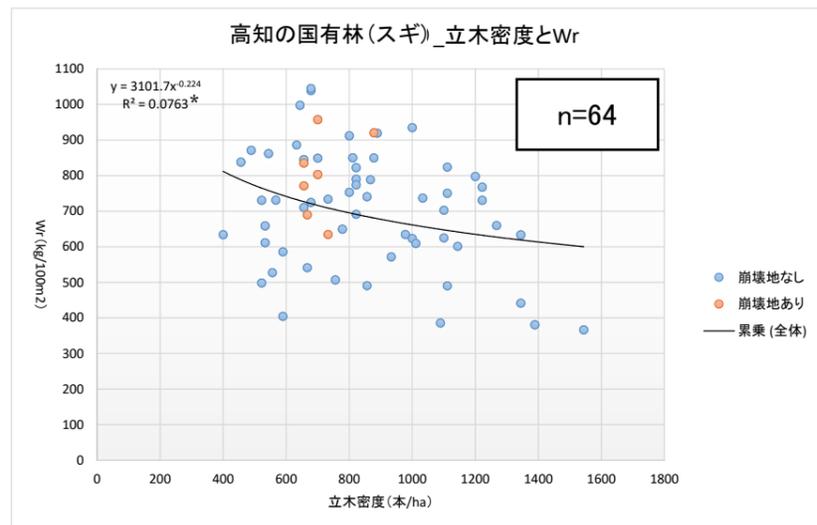


図 1.34 立木密度と Wr の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

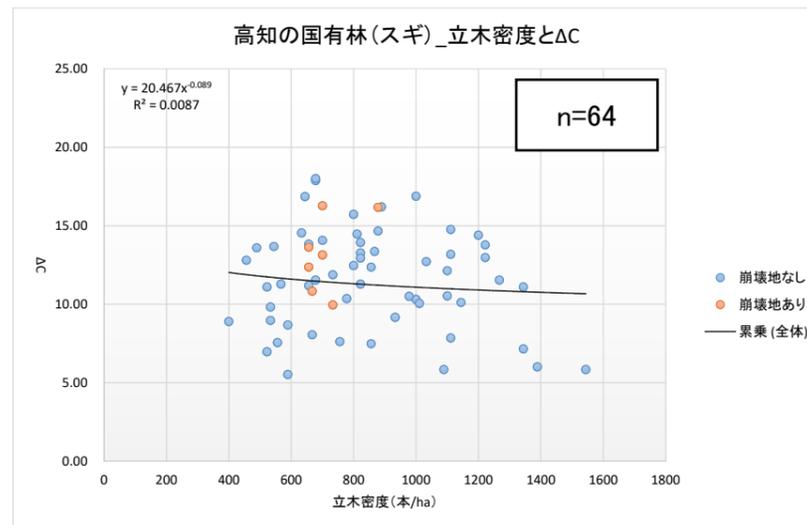


図 1.35 立木密度とΔCの関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

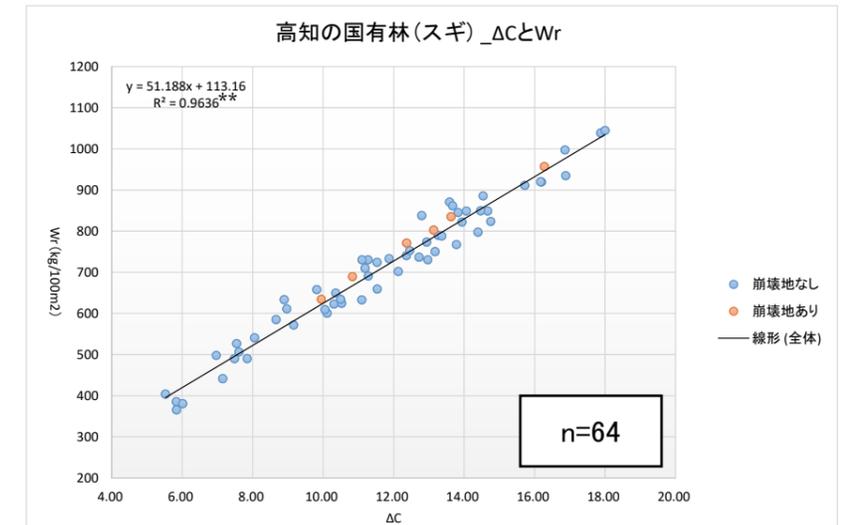


図 1.36 ΔCと Wr の関係

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

(3) 立木密度とΔC、Wr の関係

図 1.31 に示すように、立木密度と根量[kg/本]には強い相関が見られた。根量[kg/本]は、胸高直径を基に算定されるため、図 1.32 の立木密度と胸高直径の関係に強い相関が見られることに対応している。立木密度と樹高の関係(図 1.33)でも同様に、やや強い相関が見られた。

しかし、図 1.34 の立木密度と Wr[kg/100m²]及び図 1.35 の立木密度とΔCの関係は、ばらつきが大きく明瞭な傾向はみえにくい。Wr は 1 本あたりではなく、単位面積当たりの根量である。立木密度と 1 本当たりの根量[kg/本]では両者に強い相関が見られるのに対して、立木密度と根量 Wr[kg/100m²]でばらつき

が大きくなるのは、1 本当たりの根量に立木密度の情報が加わり、単位面積当たりの根量 Wr が得られるためである。

また、図中のプロットは、崩壊の有無別に着色を変えているが、ここでも崩壊の有無による違いは特徴が見てとれるものはない。

図 1.36 はΔCを横軸、Wr を縦軸としたものだが、両者は非常に強い相関が見られる。ΔCと Wr は同じ林分情報(立木密度、胸高直径)に基づき算定されるためである。その詳細については第 I 編 3.5 に記載した。

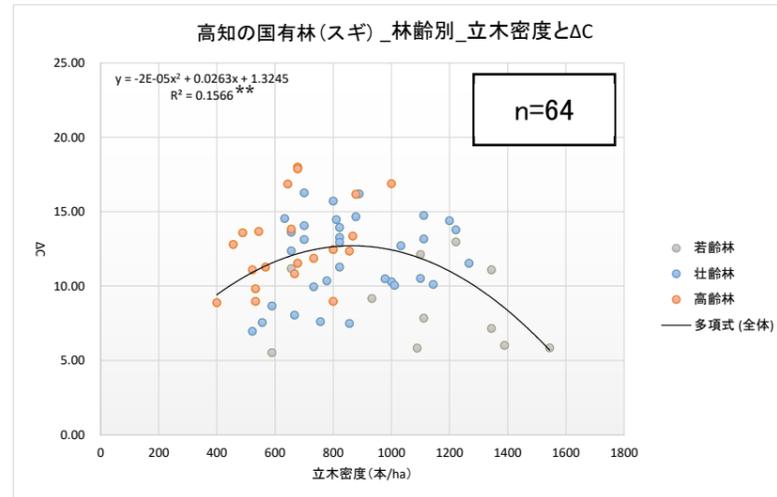


図 1.37 立木密度と ΔC の関係 (林齢別)

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

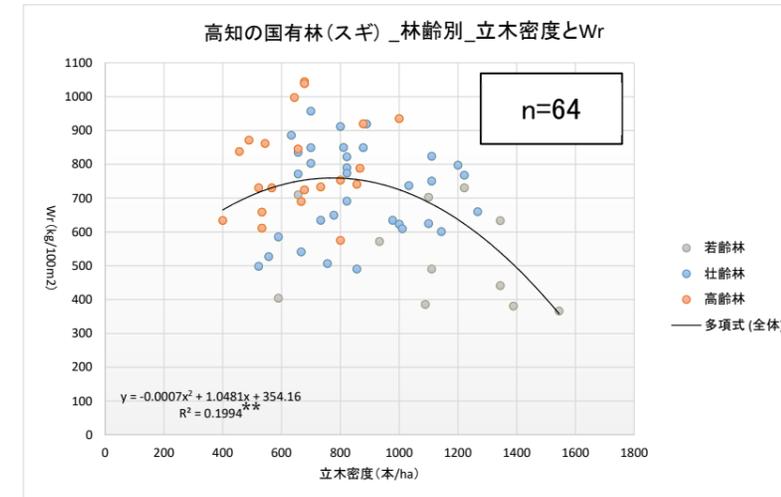


図 1.39 立木密度と Wr の関係 (林齢別)

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

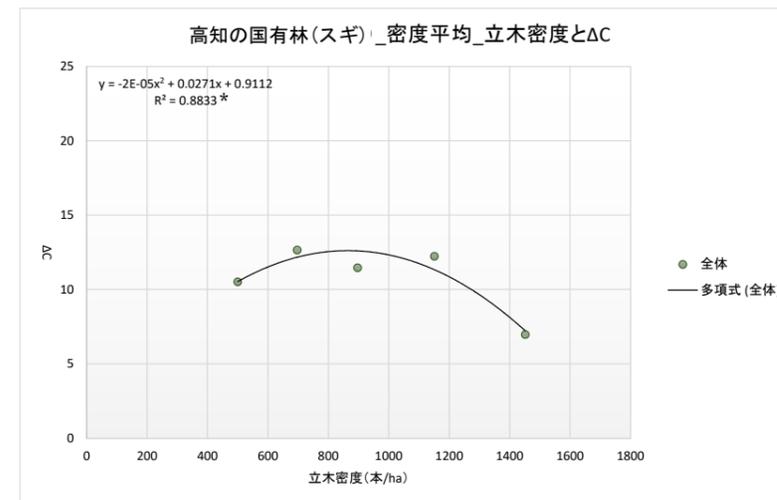


図 1.38 立木密度と ΔC の関係 (立木密度平均)

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

区分
立木密度 400-600 (本/ha)
立木密度 600-800 (本/ha)
立木密度 800-1000 (本/ha)
立木密度 1000-1200(本/ha)
立木密度 1200- (本/ha)

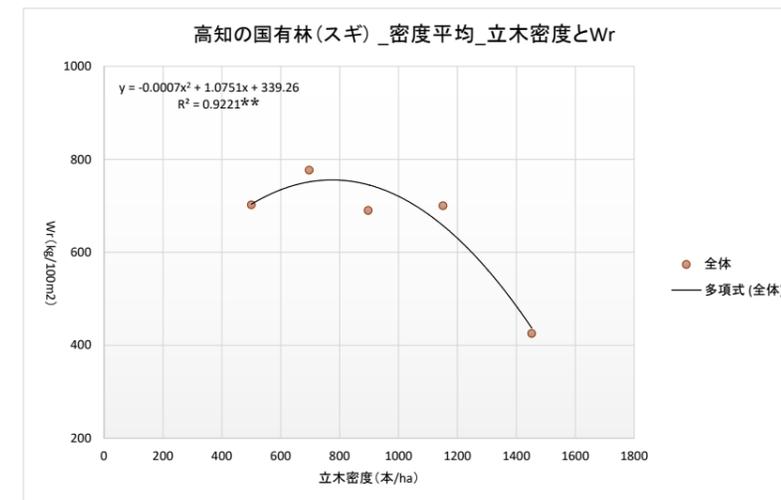


図 1.40 立木密度と Wr の関係 (立木密度平均)

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

林齢別に着色し、若齢林 (29 年生以下)、壮齢林 (30~49 年生)、高齢林 (50 年生以上) 別にプロットを塗分けし、 ΔC 、Wr との関係を示したのが図 1.38、図 1.39 である。

立木密度を 200 本/ha 刻みで 5 段階に分け、各段階の平均値を示したものが図 1.38 と図 1.40 である。段階別平均値では、400~1,200 本/ha までの 4 プロットはほぼ横ばいだが、1,200 本/ha 以上のプロットのみ ΔC 、Wr 共に小さな値となる。そのため近似曲線は累乗ではなく多項式近似としたが、この傾向は、北原らの研究で得られた図 1.41 と同様である。アーチのピークが ΔC 、Wr の最大値と捉えると、 ΔC で立木密度 800~1,000 本/ha、Wr は 800 本/ha 付近となるが、ばらつきが大きいことから確定判断に足るデータとはいえない。立木密度が 1200 本/ha 以上のプロットの林齢を見ると、ほとんどが若齢林であることから、20 年生以下の林分で崩壊発生が多いという既往の研究報告と整合するデータであることが分かる。

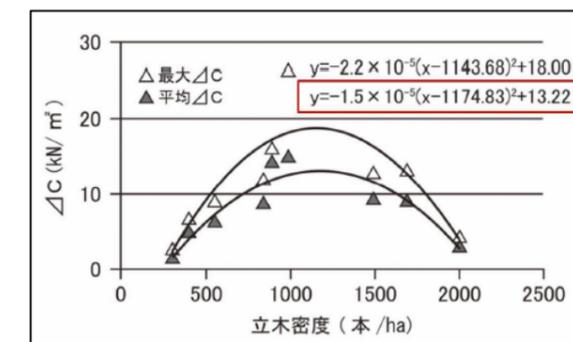


図 1.41 立木密度とカラマツ林の平均、最大 ΔC の関係 (伴・北原ら 2011、文献番号 152)

1.3.3 崩壊防止機能が十分といえる ΔC

崩壊防止機能が低い森林を目指すために必要な立木密度のしきい値をどう設定できるか検討した。崩壊防止機能の指標として、 ΔC を用いた。

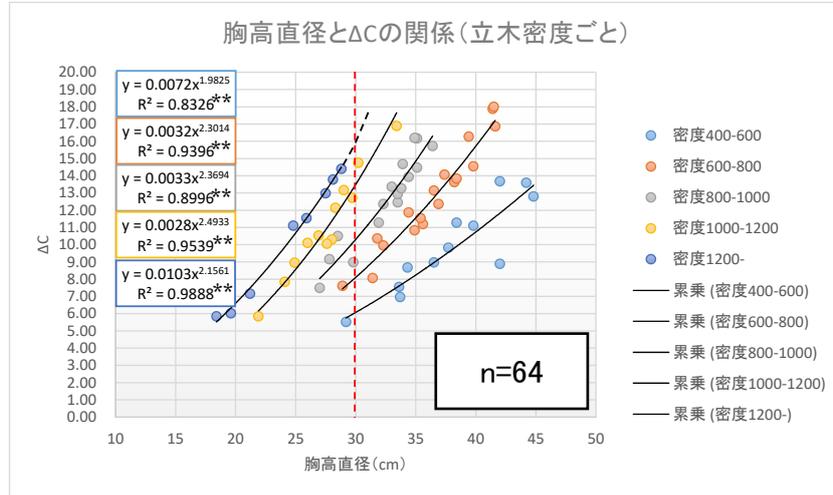


図 1.42 胸高直径と ΔC の関係 (立木密度ごと)

※**1%有意、*5%有意、無印：有意でない²

図 1.42 は、胸高直径と ΔC の関係を立木密度別に着色したものである。立木密度は 200 本/ha 刻みで階区分し、それぞれ近似曲線を算定した。近似曲線の決定係数は高く 0.83~0.99 と強い相関が見られる。近似曲線は交わることなく層状に重なり、同じ胸高直径でも立木密度が違えば、 ΔC の値が異なる。これは ΔC が立木間中央で定義される指標だからである。

近似曲線に基づき胸高直径 15~50cm までの ΔC 散布図 (図 1.43) を作成した。

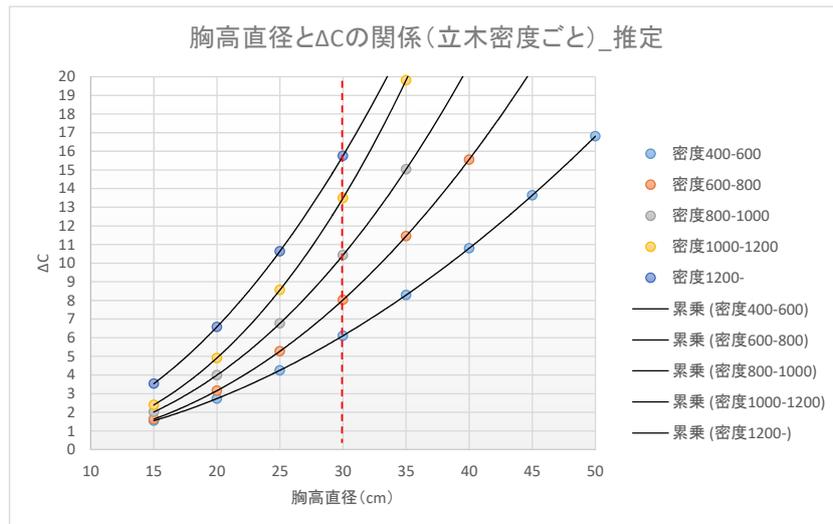
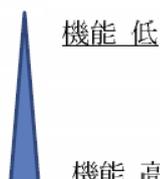


図 1.43 胸高直径と ΔC の関係 (立木密度ごと)_近似式による推定

崩壊防止機能が高い森林といえる立木密度を判断する基準として、「林野庁手引き」を参考とし、P値0.8以上となる立木密度を目標と考えた。

表 1.9 森林の土砂崩壊防止機能の判定表（林野庁手引きより）

森林の土砂崩壊防止機能区分	点P	色区分
a	~0.3	赤
b	0.3~0.8	黄
c	0.8~1.3	黄緑
d	1.3以上	緑



評価点 P が 0.8 以上あれば、森林による崩壊防止機能が一定程度確保された森林とみなせる。

本検討の対象はスギ林であるため、林野庁手引きによる樹種 P1 の配点が 1.6、これと立木密度 P2 と胸高直径 P3 の組み合わせから評価される色区分を、表 1.10 に示す。表 1.10 より崩壊防止機能の目標の目安とする黄緑色以上となる胸高直径を判定した。

表 1.10 スギ林における立木密度と胸高直径の組み合わせ判定表（林野庁手引き）

			立木密度 [本/ha]				
			400-600	600-800	800-1600	1600-1800	1800-2000
指標 P1	胸高直径 cm	指標 P3	指標 P2				
			0.5	0.8	1.0	0.7	0.4
樹種区分 A 1.6	10-15	0.2	0.16	0.26	0.32	0.22	0.13
	15-20	0.5	0.40	0.64	0.80	0.56	0.32
	20-25	1.0	0.80	1.28	1.60	1.12	0.64
	25-30	1.9	1.52	2.43	3.04	2.13	1.22
	30-35	3.0	2.40	3.84	4.80	3.36	1.92
	35-40	4.4	3.52	5.63	7.04	4.93	2.82

判定結果は以下のようになった。

- 立木密度 400-600 本/ha のとき、DBH-20cm 以上で高機能判定
- 立木密度 600-800 本/ha のとき、DBH-20cm 以上で高機能判定
- 立木密度 800-1,600 本/ha のとき、DBH-15cm 以上で高機能判定

これらを図 1.44 に当てはめると、高知のスギ林においては、 $\Delta C = 2 \sim 4 \text{ kN/m}^2$ 以上の範囲で崩壊防止機能が高機能判定（黄緑以上）となる条件となった。

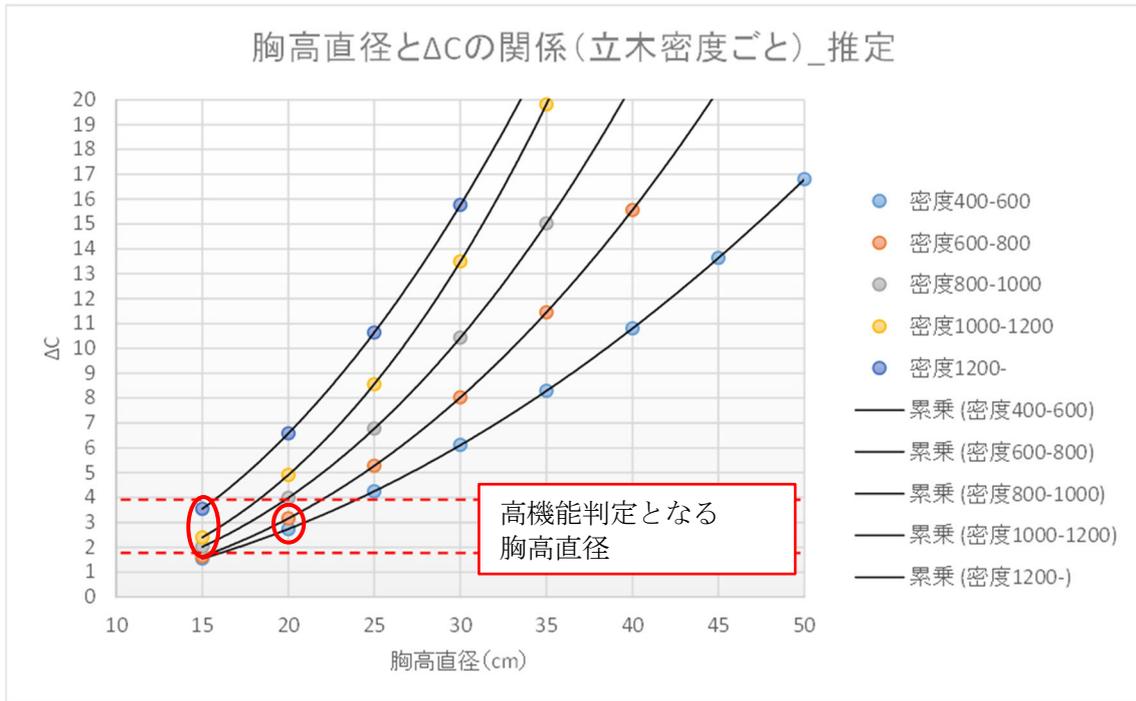


図 1.44 崩壊防止機能が高機能判定となる ΔC の推定

例えば $\Delta C=3 \text{ kN/m}^2$ を目指す場合は、立木密度 800~1,000 本/ha のとき、胸高直径は約 18cm を満たす必要がある。また、胸高直径が 20cm のときは $\Delta C=3 \text{ kN/m}^2$ を満たすためには、立木密度が 600~800 本/ha 程度以上である必要がある。このように、胸高直径と立木密度の組合せから、目標とする森林の崩壊防止機能に達しているかどうか判定が可能となる。

次章以降では、施業を含む森林の成長シミュレーションを行い、森林の崩壊防止機能の将来を予測する例を示す。その中で、施業が崩壊防止機能に与える影響や、間伐等の実施タイミングによる崩壊防止機能の増減をどのように評価し、森林施業の計画に反映させていくのか、考え方の一端を紹介する。

2. 崩壊防止機能の将来予測

森林の崩壊防止機能が時間とともにどう変化するのか、また施業による増減を評価できれば、それを踏まえた森林施業を計画することができる。

2.1 崩壊防止機能の評価方法

2.1.1 LYCSによる森林の成長シミュレーション

森林総合研究所により開発された「収穫表作成システム LYCS3.3 (LYCS:ライクス)」(以下、「LYCS」という)を用いて、いくつかの森林施業パターンを設定し、シミュレーションした結果から、森林の崩壊防止機能を表す指標である林野庁手引きの「評価点P」及び森林根系(水平根)が発揮する「断面抵抗力 ΔC 」を算定した。

(1) LYCSパラメータの設定

仮定の森林を想定し、表 2.1 の対象地域、樹種及び地位を設定し、表 2.2 をパラメータとして使用した。初期立木数は 3,000 本、シミュレーション期間は 10~60 年生とした。地位 1 及び地位 3 の各地域と樹種の組み合わせを、表 2.3 の施業 0~4 の 5 パターンで、シミュレーションした。

表 2.1 シミュレーションの対象地域、樹種及び地位

	地域	樹種	地位
1	青森	スギ	1・3
2	愛知・岐阜	スギ	1・3
3	熊本	スギ	1・3
4	愛知・岐阜南部	ヒノキ	1・3
5	中国	ヒノキ	1・3
6	九州	ヒノキ	1・3

表 2.2 LYCS で使用したパラメータ

	間伐種類	間伐年	間伐方法	間伐率	内容
1	0	無施業	—	—	放置(初期本数 3000)
2	1	15年	下層	15%	除伐
3	2	30年	下層+全層	30%	伐り捨て間伐
4	3	40年	全層	25%	1伐3残 搬出間伐
5	4	55年	全層	33%	3残中列 搬出間伐

表 2.3 施業パターン

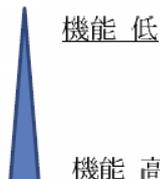
	施業パターン名	間伐種類の組み合わせ
1	施業 0	0
2	施業 1	1
3	施業 2	1 → 2
4	施業 3	1 → 2 → 3
5	施業 4	1 → 2 → 3 → 4

(2) 森林の成長シミュレーション結果と ΔC に求める目安値

シミュレーションより出力されたデータから、胸高直径及び立木密度を抽出し、それらを基に「評価点 P」及び「根系が発揮する断面抵抗力 ΔC 」を算定した。

表 2.4 森林の土砂崩壊防止機能の判定表（林野庁手引きより）

森林の土砂崩壊防止機能区分	点P	色区分
a	~0.3	赤
b	0.3~0.8	黄
c	0.8~1.3	黄緑
d	1.3以上	緑



森林の成長に伴う「評価点 P」の変化を追いかけ、表 2.4 を参考に、

- ・低機能（赤）→やや低機能（黄）へ切り替わるときの林齢と ΔC
- ・やや低機能（黄）→やや高機能（黄緑）へ切り替わるときの林齢と ΔC

これらを調べてとりまとめたのが、表 2.5 及び表 2.6 である。

表 2.5 のスギでは地位 1 と地位 3 を用意した。地位 1 では林齢 25 年から遅くとも 40 年で、全ての地域及び施業パターンで低機能（赤）を抜け出すが、地位 3 の青森、愛知では施業 0 や施業 1 の場合に 60 年経過しても低機能（赤）から抜け出せない。地位及び地域によって、森林の成長度合いが異なることが分かった。

また、地位 1 は成長がよく、低機能（赤）を抜け出すが、そのときの ΔC 値は非常に大きく一部では 15~19 kN/m² と非現実的な値となる。 ΔC は過大となりやすい問題を有することは第 I 編 2.4.1 で指摘したが、それが露呈した形である。この場合は、評価点 P をやや低機能（黄）にするために必要な ΔC の条件を求めているため、P と ΔC の指向性、性質の違いも影響している。いずれ、地位 1 スギにおいて算定されたこの大きな ΔC を目標値とするのはふさわしくない。

森林に求める最低限の崩壊防止機能を測る指標として、評価点 P のみ、あるいは ΔC のみを単独指標に用いることは、地位 1 スギのように、偏った結果をもたらす危険性がある。したがって、2つの指標を併用することを基本とした。施業の計画を考える上で求める最低限の崩壊防止機能を見積もるという観点から、条件が悪く ΔC が小さくなる地位 3 の結果を用いることとする。ただし、熊本スギは地位 3 であっても、他地域に比べ生育が各段に良いため、 ΔC のしきい値算定の対象から除外した。参照した ΔC は、表 2.5 及び表 2.6 の青枠範囲である。これらの ΔC をとりまとめたものを表 2.7 に示す。

森林が低機能（赤）を抜け出すための必要最低限の値はスギで $\Delta C=3$ 、ヒノキで $\Delta C=4$ である。

表 2.5 シミュレーション結果による ΔC の検証 (スギ)

樹種	青森スギ (地位1)				樹種	青森スギ (地位3)			
機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上		機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上	
項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC	項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC
施業0	35	13.7	45	15.6	施業0	低機能状態	-	低機能状態	-
施業1	35	14	40	16.7	施業1	低機能状態	-	低機能状態	-
施業2	30	8.2	35	10.1	施業2	60	4	やや低機能状態	-
施業3	30	8.2	35	10.1	施業3	60	3	やや低機能状態	-
施業4	30	8.2	35	10.1	施業4	60	1.8	やや低機能状態	-
樹種	愛知スギ (地位1)				樹種	愛知スギ (地位3)			
機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上		機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上	
項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC	項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC
施業0	40	10.1	45	10.5	施業0	低機能状態	-	低機能状態	-
施業1	35	9.1	40	10	施業1	低機能状態	-	低機能状態	-
施業2	30	5.2	40	7.7	施業2	40	4.6	やや低機能状態	-
施業3	30	5.2	40	5.3	施業3	40	3.1	やや低機能状態	-
施業4	30	5.2	40	5.3	施業4	40	3.1	やや低機能状態	-
樹種	熊本スギ (地位1)				樹種	熊本スギ (地位3)			
機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上		機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上	
項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC	項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC
施業0	30	18.9	45	23	施業0	30	16.2	50	25.5
施業1	25	15.3	45	22.8	施業1	30	16.8	45	22.5
施業2	25	15.3	30	12.1	施業2	やや高機能状態	-	30	10.7
施業3	25	15.3	30	12.1	施業3	やや高機能状態	-	30	10.7
施業4	25	15.3	30	12.1	施業4	やや高機能状態	-	30	10.7

表 2.6 シミュレーション結果による ΔC の検証 (ヒノキ)

樹種	愛知ヒノキ (地位1)				樹種	愛知ヒノキ (地位3)			
機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上		機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上	
項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC	項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC
施業0	低機能状態	-	低機能状態	-	施業0	低機能状態	-	低機能状態	-
施業1	55	6.9	やや低機能状態	-	施業1	低機能状態	-	低機能状態	-
施業2	30	5.0	55	6.5	施業2	40	4.2	やや低機能状態	-
施業3	30	5.0	50	5.0	施業3	40	2.8	60	5.8
施業4	30	5.0	50	5.0	施業4	40	2.8	60	3.7
樹種	中国ヒノキ (地位1)				樹種	中国ヒノキ (地位3)			
機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上		機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上	
項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC	項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC
施業0	45	8.5	55	8.0	施業0	低機能状態	-	低機能状態	-
施業1	40	9.0	50	8.2	施業1	低機能状態	-	低機能状態	-
施業2	30	5.9	35	6.9	施業2	35	3.9	やや低機能状態	-
施業3	30	5.9	35	6.9	施業3	35	3.9	やや低機能状態	-
施業4	30	5.9	35	6.9	施業4	35	3.9	50	4.2
樹種	九州ヒノキ (地位1)				樹種	九州ヒノキ (地位3)			
機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上		機能	低 (赤) → やや低 (黄)		やや低 (黄) → やや高 (黄緑) 以上	
項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC	項目	林齢	ΔC	林齢	ΔC
施業0	40	7	55	7.3	施業0	低機能状態	-	低機能状態	-
施業1	40	7	50	7.4	施業1	低機能状態	-	低機能状態	-
施業2	30	3.8	45	6.2	施業2	35	4.0	やや低機能状態	-
施業3	30	3.8	45	4.6	施業3	35	4.0	60	5.8
施業4	30	3.8	45	4.6	施業4	35	4.0	60	3.7

表 2.7 評価点 P の低機能判定を抜け出すのに必要な ΔC しきい値

(上段：スギ、下段：ヒノキ)

青森スギ (地位3)			愛知スギ (地位3)			ΔC 平均値	
項目	林齢	ΔC	項目	林齢	ΔC		
施業2	60	4	施業2	40	4.6		3
施業3	60	3	施業3	40	3.1		
施業4	60	1.8	施業4	40	3.1		
愛知ヒノキ (地位3)		中国ヒノキ (地位3)		九州ヒノキ (地位3)		ΔC 平均値	
項目	林齢	ΔC	項目	林齢	ΔC		
施業2	40	4.2	施業2	35	3.9		4
施業3	40	2.8	施業3	35	3.9		
施業4	40	2.8	施業4	35	3.9		

※平均値は整数値になるよう四捨五入した。

2.1.2 目指すべき森林の崩壊防止機能の目安

(1) 最低限必要とされる ΔC 値の目安

2.1.1 で森林が低機能（赤）を抜け出すために必要な最低限の値が、スギで $\Delta C=3$ 、ヒノキで $\Delta C=4$ として得られた。森林の崩壊防止機能として必要な最低限の ΔC 値には、これらの値を採用した。

(2) 崩壊防止機能が低い森林

最低限必要な ΔC の値のみで、崩壊防止機能が低い森林を定義すると、平坦な森林地においても崩壊防止機能の向上が必要と誤解される可能性がある。崩壊防止機能が低い森林を抽出し、当該林分に対する施業の計画等を検討する際には、勾配等の地形要因を併せて考える必要がある。

崩壊は本来、森林とは関係なく地形要因、地質要因、降雨要因によって発生する。したがって、地形を考慮要素に加えるとともに、山地災害危険地区等の山地斜面で既に見積もられている別の指標を対象に加えた。そのうえで、本ガイドラインでは、崩壊防止機能の低い森林を評価するための指標として、表 2.8 を掲げる。A~D の4つの要因があり、条件としては、A かつ B かつ (C 又は D) に該当した場合のみ、崩壊防止機能の低い森林と評価するものとする。記号で記せば、A&B&C 又は A&B&D である。

表 2.8 に示す「C：傾斜角」の設定については、急傾斜地法等の急傾斜地とされる傾斜角30度以上に準じた。ただし、「D：その他の指標」に該当する箇所については、A及びBの条件を満たす場合、傾斜角が30度未満であっても、崩壊防止機能の低い森林と評価する。

表 2.8 崩壊防止機能の低い森林を評価するための指標

	A :	B :	C :	D :
項目	評価点 P	ΔC [kN/m ²]	傾斜角	その他の指標
閾値	0.3 未満 判定・赤	スギ：3 未満 ヒノキ：4 未満	30 度以上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 山地災害危険地区 ・ 土砂災害警戒区域 ・ 土砂災害危険箇所 <p style="text-align: right;">等</p>

(A かつ B かつ C) 又は (A かつ B かつ D)
の場合、崩壊防止機能の低い森林と評価する

表 2.8 の指標で崩壊防止機能が低いと判定された森林については、2.2 及び 3.章を参考とし、森林の機能回復に向けた適切な森林施業の計画を速やかに実施することを推奨する。

2.2 森林の崩壊防止機能の将来予測

森林の土砂災害の防止・軽減を図るため、崩壊防止機能が低いとされる森林への適切な施業は重要である。また、適切な施業が必要な森林を特定するための方法を前章にて提示した。本章においては、現在の森林の崩壊防止機能区分と、それが将来どのように変化するかを具体的に予測する方法を示す。林分を伐採した場合の崩壊防止機能の低下度合いの事前推測等、効率的かつ適切な森林施業の計画の目安となるよう活用されたい。

2.2.1 将来予測の方法

将来予測を実施するためのフローを図 2.1 に示す。

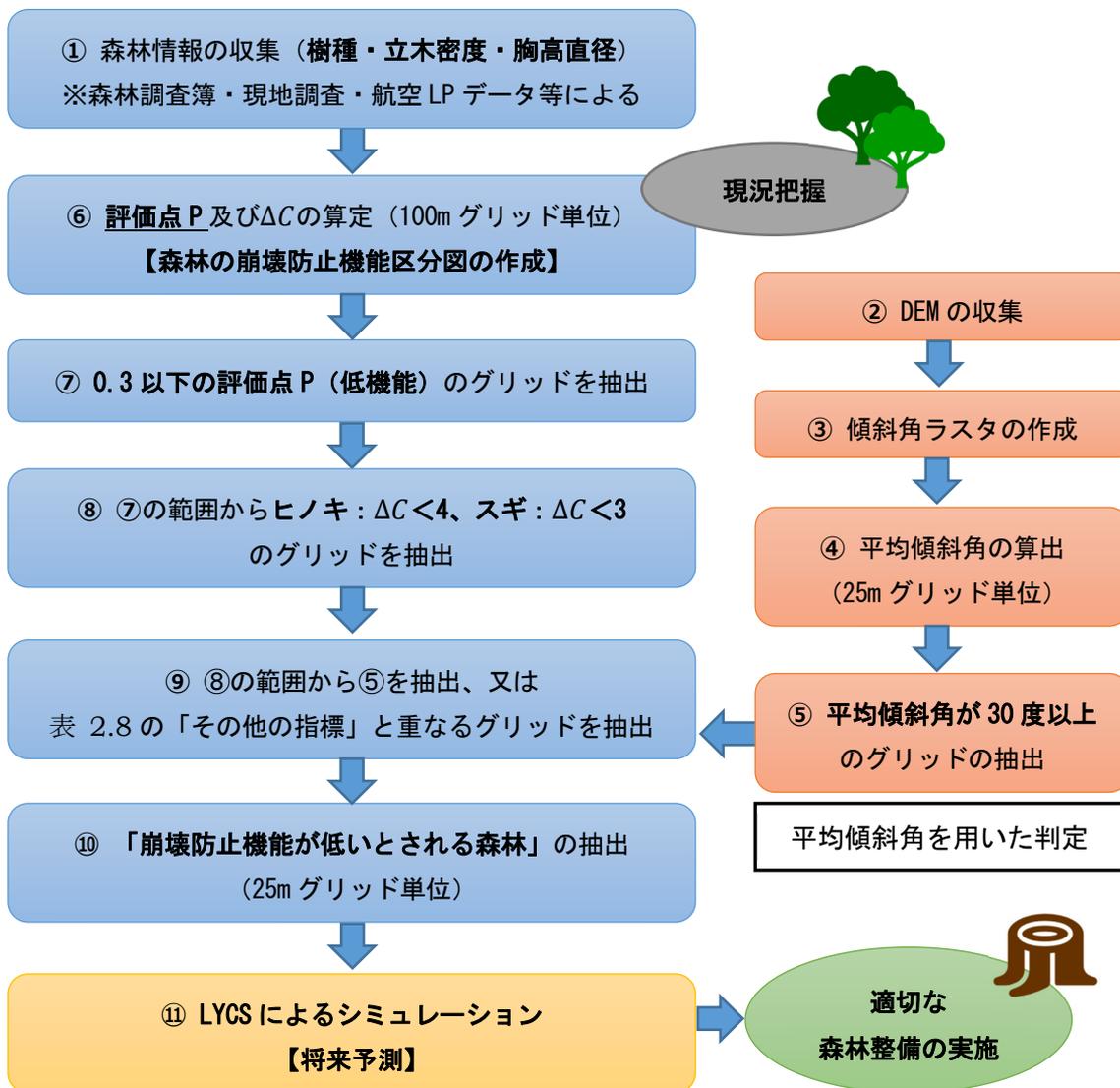


図 2.1 将来予測のフロー

将来予測は、対象範囲において現状の崩壊防止機能区分図を作成して、表 2.8 の指標にのっとり崩壊防止機能が低い森林に特定された林分に対して実施する。現況の崩壊防止機能と将来予定する除伐、間伐等の施業の影響を踏まえた崩壊防止機能を評価するために LYCS による成長シミュレーションを行う。

図 2.1 フロー①の森林情報の収集においては、森林簿や森林調査簿を活用することが最も簡易だが、更新時期によって森林状況が変化することがあるので留意されたい。昨今は航空 LP データの整備が進み、また、その点群データを用いた森林解析技術も向上している。航空 LP データ、又は UAV 写真測量である SfM による点群等を活用することで、上層木樹頂点及び樹高が抽出できる。抽出した樹頂点から立木密度を求め、樹高と立木密度から、森林総合研究所の「収量比数 Ry 計算プログラム」を用い、調査地域の平均的な胸高直径をエクセル上で求めることができる。

これらの森林情報から、「森林の崩壊防止機能区分図」を GIS 等のシステムで作成する。GIS 上での評価単位は 100m グリッドを推奨するが、森林簿や森林調査簿の情報を活用する場合、林小班ごとのデータとなるため、林小班単位でもかまわない。林小班のポリゴンに森林情報の属性を入力した上で、グリッドを重ね、範囲内の属性値、又はその平均値を求め、グリッドに付与すればグリッド単位での作業が行える。

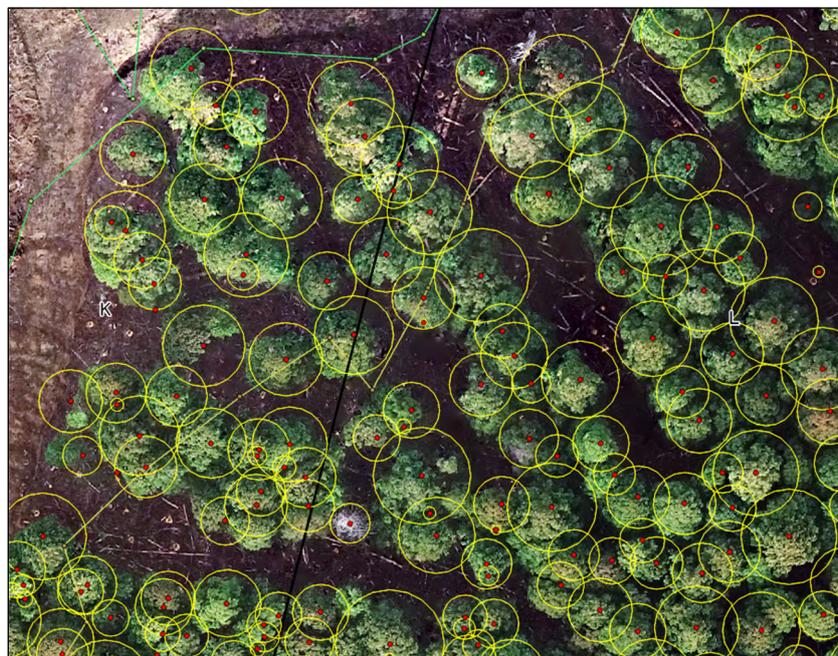


図 2.2 点群解析による樹頂点抽出結果の表示例

2.2.2 では、崩壊防止機能が低い森林の抽出例とグリッド単位での崩壊防止機能の将来予測の具体例を示す。

2.2.2 将来予測の事例

広島県の国有林内のヒノキ林を対象モデルとし、2.2.1の方法で「崩壊防止機能の低い森林」を抽出し、LYCSによる将来予測を行った事例を示す。

まず、表 2.8 にのっとり、評価点 P が 0.3 未満かつ ΔC が 4 未満（ヒノキの場合）のグリッドを抽出した（図 2.3）。ここでのグリッドサイズは 100m である。

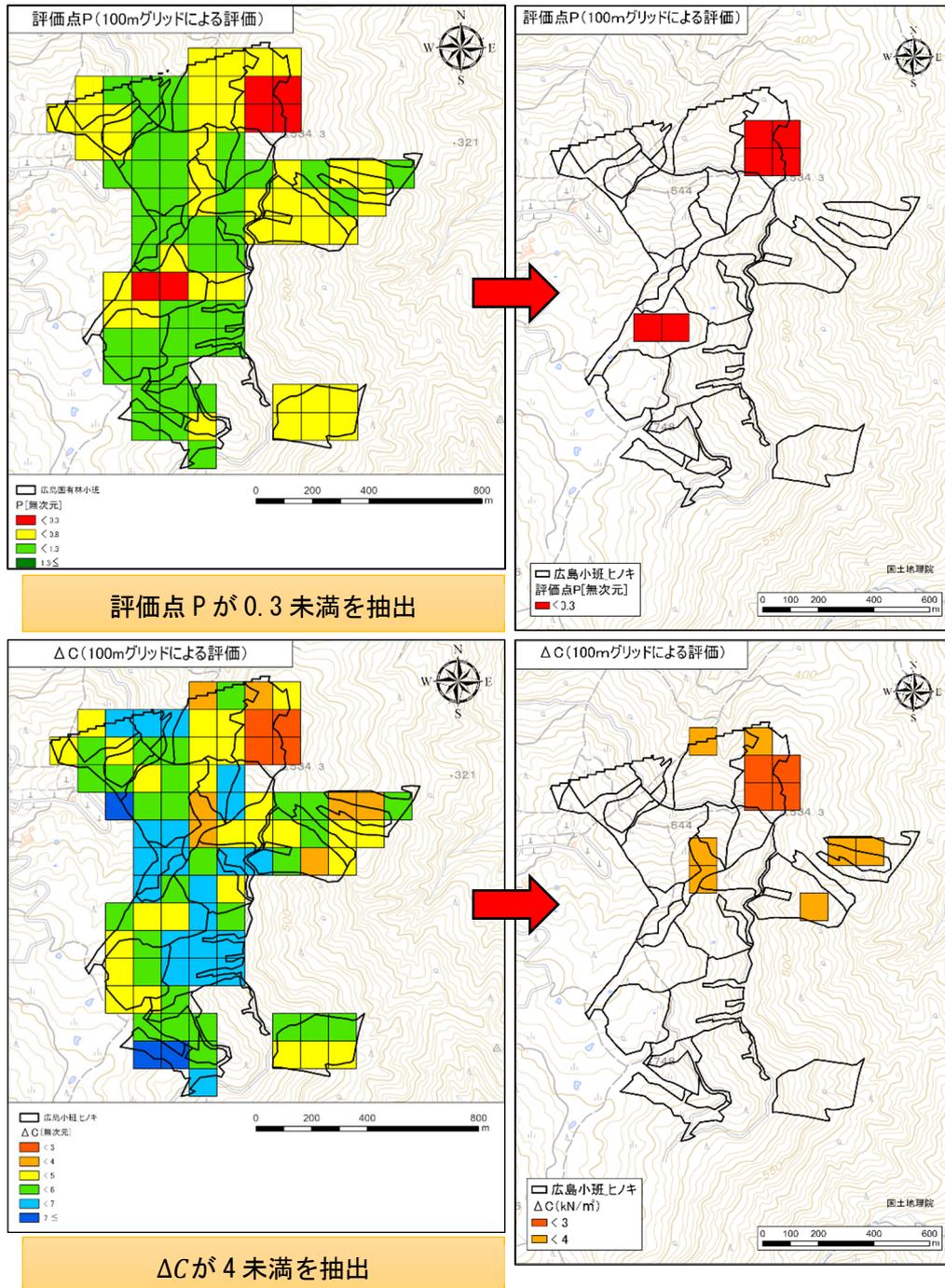


図 2.3 崩壊防止機能が低い森林を抽出

次に、基盤地図情報の 5mDEM を基に算出した傾斜角を、25m グリッドごとの平均値とした。100m グリッドで傾斜を見ると小さな尾根や谷が消失するため、傾斜角データは 100m ではなく 25m グリッドで処理した。

最後に、評価点 P が 0.3 未満かつ ΔC が 4 未満（ヒノキの場合）のグリッドに傾斜角 30 度以上のグリッド情報を重ねて「崩壊防止機能の低い森林」を抽出した（図 2.4）。

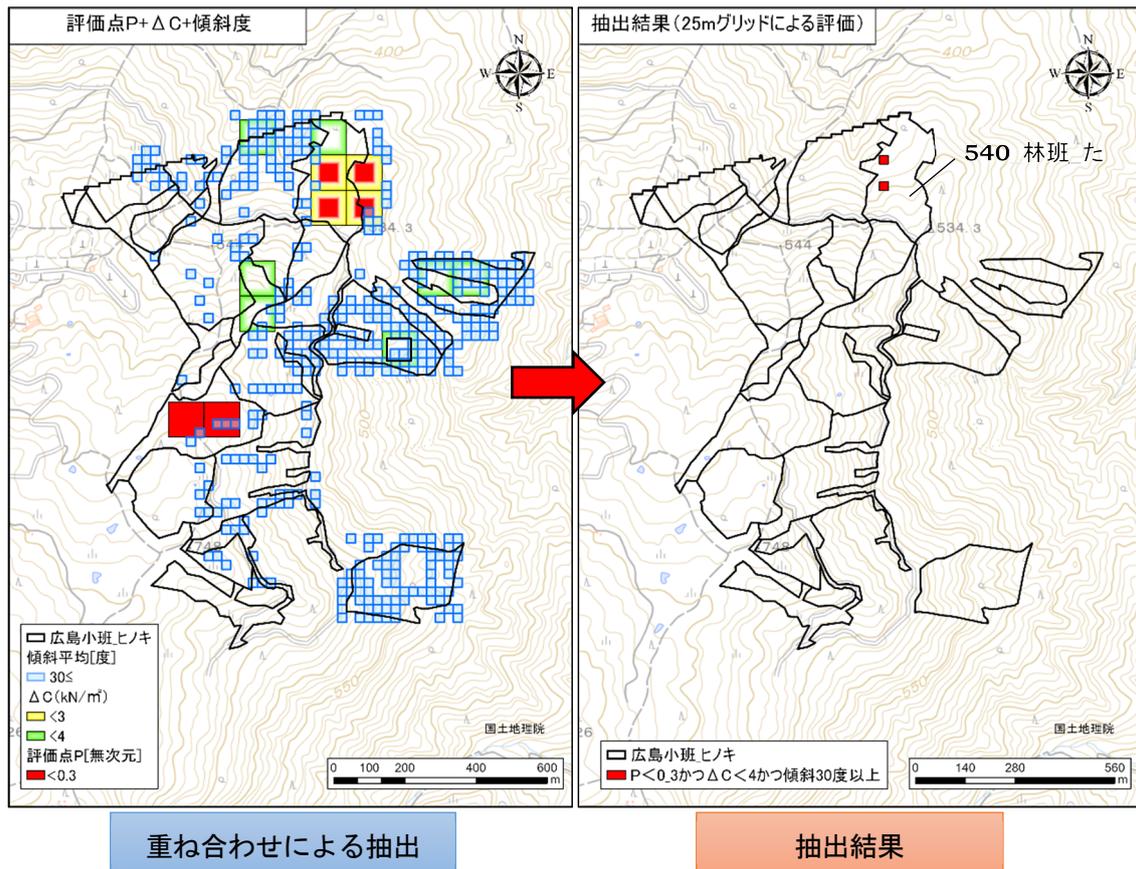


図 2.4 「崩壊防止機能の低い森林」の抽出イメージ

図 2.4 の赤い■（25m グリッド）が最終的に特定された「傾斜角が 30 度以上の崩壊防止機能の低い森林」である。抽出されたグリッドが入る林小班の主な情報を表 2.9 に示す。

表 2.9 「崩壊防止機能の低い森林」の主な情報

林小班名	林齢 (年生)	過去の 施業回数	過去の 施業年(年)	過去の 施業内容
540_林班_た	21	1	2007	除伐
林小班内の 崩壊地の有無	胸高直径 (cm)	立木密度 (本/ha)	評価点 P	ΔC (kN/m^2)
有	13.7	1,356	0.2	2.1

※使用した森林調査簿の最新更新は 2019 年。

抽出されたグリッドは、除伐のみ実施された若い林齢の森林であった。LYCSではパラメータとして、現在の立木密度及び平均胸高直径を与え、成長シミュレーションを実施している。評価点P及び ΔC の時系列変化を図2.5に示す。

今回の検討では2回の施業を計画した。35年生時20%切捨間伐、55年生時25%搬出間伐である。

評価点Pは25年生でやや低機能(黄)になり、この時点で「崩壊防止機能の低い森林」からは外れる。40年生でやや高機能(黄緑)まで向上しその後、60年生時においてもやや高機能(黄緑)を保った状態となる。

ΔC は30年生の時点で4.72となり、最低限の目安である $\Delta C=4$ 未満を抜け出す。その後、35年の間伐を経て ΔC は増加を続けるが、55年の間伐で一度 ΔC の低下が生じる。60年生時に ΔC は4.96まで減少するが、70年生で5.75と ΔC は5以上に到達する。

今回取り上げたヒノキ林は21年生と若く、立木密度が1,356本/haと適度に整備され、成長シミュレーション上、間伐施業を加えずとも評価点P及び ΔC は向上し、「崩壊防止機能の低い森林」(ヒノキ： $\Delta C=4$ 未満)からは外れる。したがって、崩壊防止機能のみに限定すれば、施業の必要性はない。ただし、経済林として成長シミュレーションを見ると、無施業時の主副林木の総収量は70年生時で375 m³/haに対し、2回の間伐施業を実施した場合は443 m³/ha (+18%)まで増加する。また、間伐施業を行ってもその間に「崩壊防止機能の低い森林」(ヒノキ： $\Delta C=4$ 未満)となることはないことも確認できる。

LYCSを使い森林の成長シミュレーションを行うことで、森林が発揮する崩壊防止機能を考慮しつつ、収益性とのバランスを検討し、効率的かつ効果的な森林施業の計画の立案に活用することができる。

次の3章では、崩壊防止機能の向上を意識した森林施業の計画の考え方を具体的に示す。

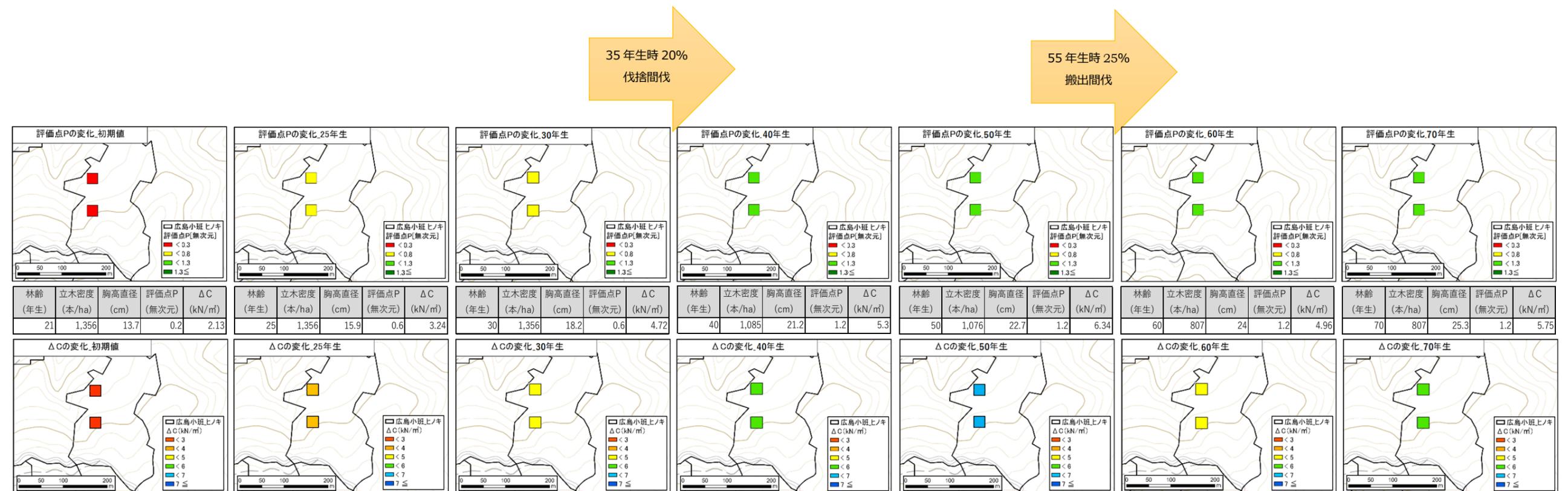
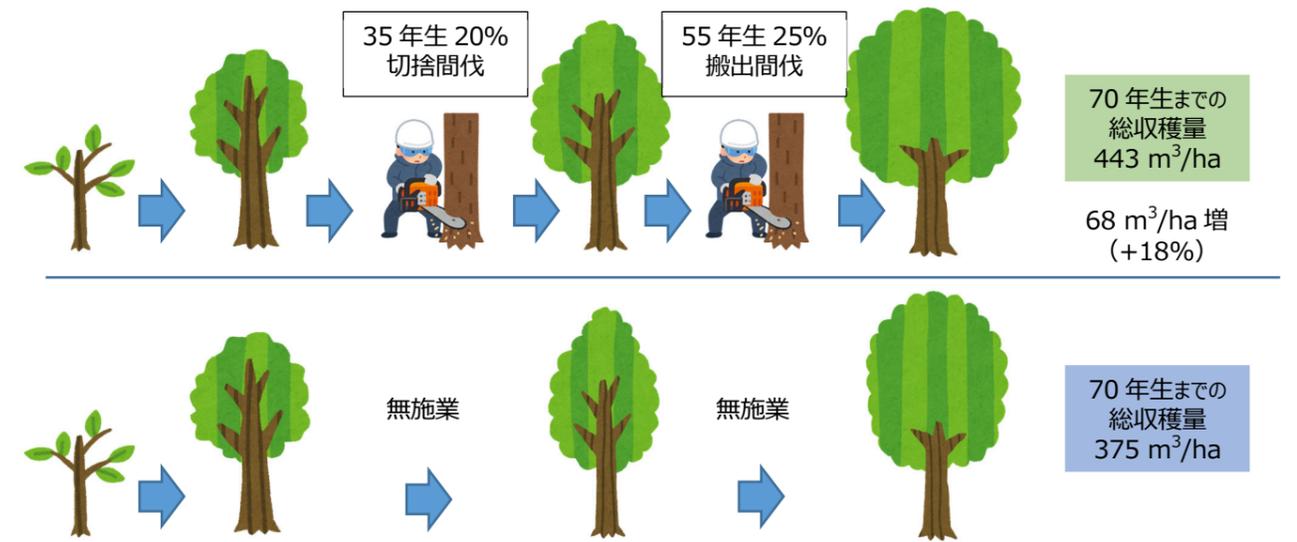


図 2.5 LYCSによる森林の将来予測：評価点P及び ΔC の変化(上段：評価点P、下段： ΔC)

3. 崩壊防止機能を向上させるための施業の計画

3.1 ガイドラインで使用する施業用語の定義

林業で使用される用語は、地域や団体によって異なることが多いため、本ガイドラインでは、以下に示す用語に統一する。

表 3.1 本ガイドラインでの用語の使い方

用語	本ガイドラインでの意味	
単層林	林齢や高さのほぼ等しい樹木から構成される森林	
複層林	林齢や高さの異なる樹木から構成される森林（ある一定の面積が複数の林齢の単層林の組み合わせによって構成される森林も含む）	
天然生林	自然の遷移に委ね主として天然力（自然に散布された種子や根株からの萌芽など）により成立維持される森林	
針広混交林	林冠層が針葉樹（主に植栽木）と広葉樹で構成される森林（下層のみに広葉樹が侵入している森林は針広混交林とはしない）	
広葉樹林	林冠層が広葉樹で構成される森林	
更新	伐採などにより樹木等がなくなった箇所に植林や天然力を活用して森林の世代を変えること（変わる事）	
下刈り	植栽した苗木の成育を妨げる雑草や灌木を刈り払う作業 一般に植栽後の数年間実施される	
除伐	育てようとする樹木の生育を妨げる他の樹木を刈り払う作業 一般に間伐が必要となる状態（植栽木が互いに接し合う状態）までの間に数回実施される	
間伐	育てようとする樹木同士の競争を軽減するために行う伐採 保安林内では基本的に 35%の伐採率が上限となる	
間伐方法	列状間伐	作業の低コスト化等を目的に一定の間隔で列状に間伐を行う方法
	定性間伐	形質が良く健全な樹木を優先的に育成するため、形質や成育が不良な樹木を優先的に選定し間伐を行う方法
主伐	更新又は更新準備のための伐採若しくは上層木の全面的な伐採	
主伐方法	皆伐	森林を構成する林木を一定のまとまりで一度に伐採する方法
	漸伐	天然更新に必要な上層木を保存しておおむね 70%以内の伐採率で森林を構成する林木を一定のまとまりで一度に伐採する方法
	択伐	木材として利用できる大きさになった樹木をおおむね 30%以内の伐採率で部分的に伐採する方法
	誘導伐	単層林が複層状態に至るまでの間に下層樹木の更新や育成のために上層の樹木を抜き伐りする方法（主に長期循環型の育成方法として実施される）
長伐期施業	通常の伐採林齢のおおむね 2 倍以上に相当する林齢で主伐を行う施業方法	
天然生林施業	植林などの人為的な更新を行わず、森林を自然の推移に委ね天然力を活用して森林を造成する施業方法	

3.2 基本方針

(1) 本ガイドラインの意図するところ

除伐や間伐は基本的に森林の状態を向上させる施業だが、皆伐等の強い伐採を行うと森林の崩壊防止機能は一時的に低下する。その後、時間の経過とともに崩壊防止機能は回復していくが、崩壊防止機能の低下度合いや期間は小さく、短くなることが望ましい。森林の利活用を計画する上で、どのような整備が望ましいか、その判断基準を示すことが本ガイドラインの狙いである。

例えば平坦な土地では崩壊の発生は想定されず、崩壊防止機能が発揮されることを期待する場所ではない。そのような場所では経済林としての活用を基本とする森林経営を行い、逆に急勾配の斜面や、保全対象に面した斜面など崩壊防止機能を重点的に検討する必要がある箇所、若しくは崩壊防止機能を発揮させたい森林では、経済林としての活用に加えて、防災への配慮も求められる。なお、森林の崩壊防止機能は基本的に表層崩壊に対して有効であり、数百年に一度のような極端な豪雨や深層崩壊に対しては極めて限定的な効果にとどまるものと考えられる。

p.II-42 で示した例では間伐により収穫量が2割増となったが、主伐でなく間伐であっても、伐採箇所周辺の根が腐朽するとともに崩壊防止機能は一時的に低下する。しかし、面的に見て崩壊防止機能の低い箇所が点状であれば崩壊発生にはつながらず、列状伐採のように線状範囲の低下であっても一定幅未満の伐採幅であれば同じく崩壊発生を直接引き起こすわけではない。このガイドラインでは防災に配慮しつつ経済林として森林を活用するための基本的な考え方を整理した。伐採により過度に機能低下が生じてはいないか、その確認をとるために第II編 2.1.2 で最低限維持すべき（下回らない）崩壊防止機能の目安を提示し、第I編 3.3 では崩壊防止機能を定量化/評価する方法を記載している。

本ガイドラインでは全ての森林において崩壊をゼロにすることを目指すものではないが、少なくとも施業を行ったことで崩壊が発生することのないよう、施業の計画を立てる際に伐採面積や伐採強度、時期などについて配慮すべき内容を提示したものである。

また、林野庁では国有林野の管理経営に当たって、森林の重視すべき機能別に管理経営の指針を策定している。これも同様に森林の防災機能と生産性や利活用とのバランスをとるために用途別、機能別に分けて考える方策であり、(3) でその一部を紹介する。

(2) 崩壊防止機能を向上させる施業の基本方針

崩壊防止機能の高い理想的な森林とは、樹木の健全な成育により根系が深くかつ広く発達し、林内に適度な陽光が入ることで下層植生が良好に繁茂しており、林床は常に落葉層を保持しているような森林である。これは、発達した根系で土壌を保持するとともに下層・林床植生（落葉層）により地表を流れる水を分散させて侵食を発生させない森林であるが、時間経過とともに姿が変化する森林をこのような状態で保持するためには、適期に適切な管理（施業）を実施することが必要となる。また、崩壊防止機能の発揮には根系が健全に成育していることが

重要であるため、「皆伐」のような立木がない状態の期間がない（少ない）方が望ましい。そのため、崩壊防止機能を向上させる施業の基本方針としては、下記に示すとおりとする。

2.1.2 の指標で判断される「崩壊防止機能の低い森林」や「崩壊防止機能を発揮させたい森林」では、地域で定められた整備計画（例えば市町村森林整備計画など）に基づき計画的に施業を実施することを基本とし、極力立木密度が低く疎となる箇所（弱部）が連続しない施業方法を検討する。また、大規模な「皆伐」は行わず「漸伐」「択伐」「誘導伐」などにより更新を行い、更新時に大面積が無立木地にならないよう留意する。

(3) 森林の機能類型

林野庁では、国有林野の管理経営に当たって、各機能類型に応じた管理経営の指針が策定されており、土砂の流出、崩壊等の山地災害防止機能の高い森林を目指す「山地災害防止タイプ（土砂流出・崩壊防備エリア）」では下記に示す施業指針が定められている。

●国有林野の各機能類型に応じた管理経営の指針について（平成 11 年 1 月 29 日付け 11 林野経第 4 号林野庁長官通達）より抜粋

「山地災害防止タイプ（土砂流出・崩壊防備エリア）」

【施業方法】

- ・ 天然力の活用が可能な林分は、育成複層林、天然生林へ導く施業を行う
- ・ 天然更新が可能な育成単層林は、複層伐や群状択伐等で積極的に広葉樹の導入を図り針広混交林を目指す

【伐採・搬出】

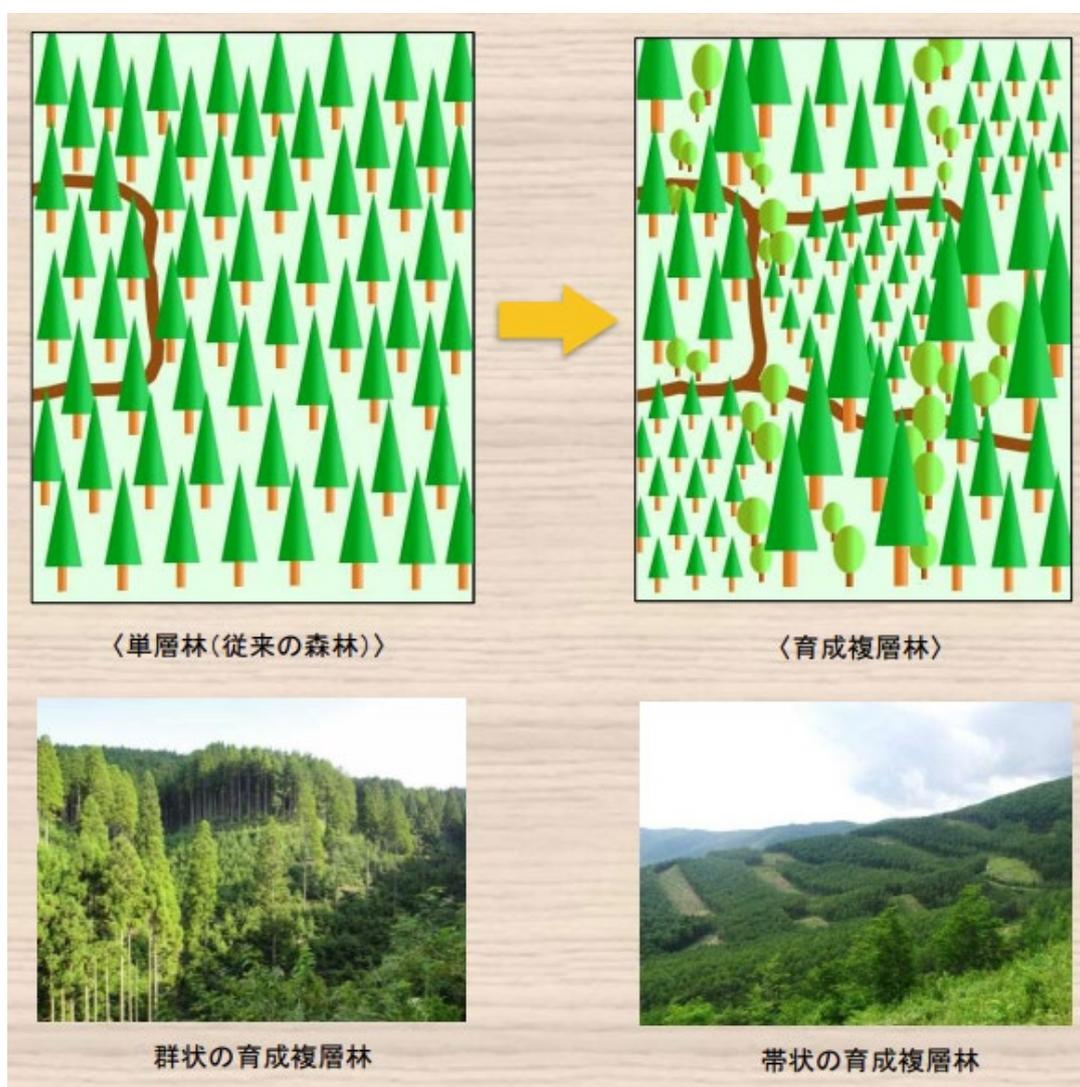
- ・ 主伐は複層伐又は択伐を基本とし、林分構造の改良を図る箇所では、成長の衰退した林木等を対象とする。複層伐又は択伐が基本
- ・ 伐採により著しく土砂の流出や崩壊による被害のおそれが高まる場合は、伐採を行わない
- ・ 複層伐の場合、伐採後の材積で標準伐期齢時の材積 50%以上を維持し、1 伐採箇所の面積は 1ha 以下とする

【保育・間伐】

- ・ 樹種の多様化による根系の充実を図るため、針葉樹林では広葉樹の育成を図る
- ・ 下層木、林床植生を促すため、やや疎仕立ての密度管理とする

崩壊が懸念されるような危険度の高い箇所は、急斜面で経済林に適さない場合が多いことから、上記の指針も含め多くの指針等で天然生林又は針広混交林に誘導することが勧められている。これは、多様な樹種による根系の充実を図ることを目的としているためであり、必ずしも広葉樹（林）の根系発達が針葉樹と比べ優位であるという意味ではない。したがって、経済林として循環活用する箇所では単層林として循環させることも可能である。ただし、更新時に皆伐を選択しないことを考えると、最終的には樹種を問わず「複層林」を目指すことが望ましい。

なお、ここでいう「複層林」は、同じ地点の森林が複層状態であること以外にも、ある一定の面積が林齢の異なる複数の単層林が組み合わさった形で構成される森林も含む（平面的に林齢や高さの異なる森林が成育している状況：図 3.1 参照）。



※出典：国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林整備センター 育成複層林造成推進リーフレット

図 3.1 平面的な複層林のイメージ

3.3 崩壊防止機能を向上させる施業のポイント

I編でも示したが、林野庁手引きでは、土砂崩壊防止機能が高い森林として以下の3つの条件が示され評価点Pの考え方が提示されている。基本的には、樹木単木の根系が十分に発達し、その単木が面的にある程度の量が確保されている森林とすることが重要となる。

- 【土砂崩壊防止機能が高い森林】**
- ①根系の引き抜き抵抗力が大きい樹種からなる森林
 - ②立木密度が1,000～1,200本/ha程度の森林
 - ③胸高直径が大きい樹木からなる森林

①の根系の引き抜き抵抗力が大きい樹種は、最も良い森林としてスギや針・広天然成林が提示されており、次いでヒノキや広葉樹二次林等が示されている。②については、立木密度が高すぎる場合は単木の成長が悪く根系が発達しないため機能が低く、逆に立木密度が低すぎる場合は、立木本数が少なく根系の絶対量が低減するため、適正な立木密度があるとされている。③の胸高直径の大きさは、図3.2に示すとおり根の成長（量）と直接の相関関係が確認されていることから、崩壊防止に対し重要な指標とされている。

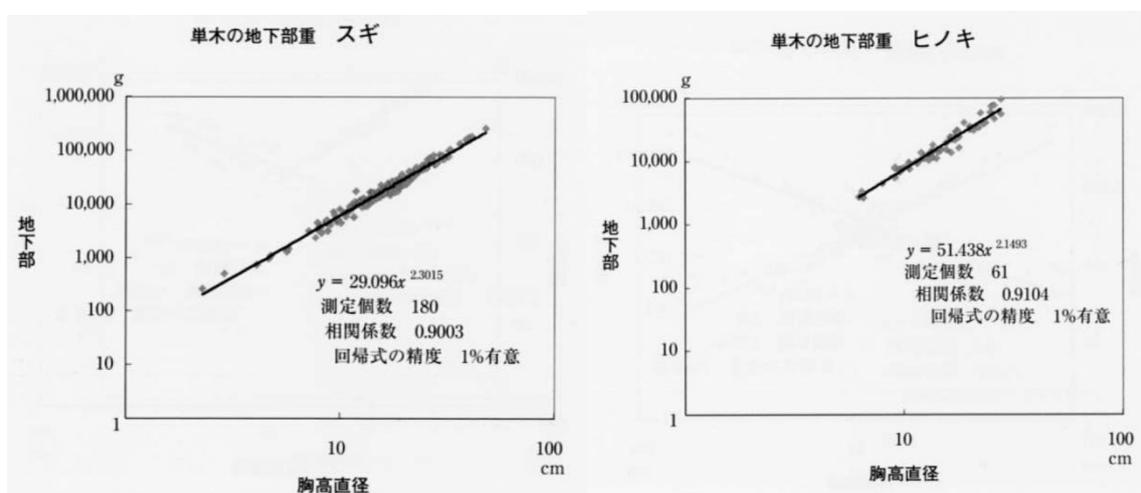


図 3.2 単木の胸高直径と地下部重の関係（苅住昇 2010）

樹木の集合体である森林は、立木密度の高い箇所には胸高直径の大きな樹木が成育できないという特性があり、胸高直径の成長は立木密度に依存する。そのため、崩壊防止機能を高く発揮する森林とするためには、胸高直径を効率よく肥大させる管理（間伐の実施）が重要となる。

つまり、胸高直径が適度に大きく、立木密度が適度に保たれているバランスの取れた森林が「崩壊防止機能の高い森林」であるといえ、特に立木密度を適正にコントロールすることが重要となる。このバランスが崩れた場合、以下のような問題が発生する。

【立木密度が高い場合】

立木密度が高い状態で樹木が成長した場合、林冠の閉鎖により林内の光環境が悪化し、枝の枯れ上がりが見られ、樹冠長率（樹冠長/樹高）が低くなる傾向が見られる。樹冠長率が低い個体は、着葉量が確保されないことから、たとえ間伐などの施業により密度管理を行ったとしてもその後の旺盛な成長が望めないことが多い（スギなどの針葉樹は、萌芽などで新たな枝が発生することが望めないため、一度樹冠長率が低下すると成長に必要な葉量が確保できず十分な光合成が行えない）。

そのため、胸高直径が大きな樹木で構成された森林を造成するためには、単木の枝の枯れ上がりが発生する前に「早めの間伐」を実施し、健全な樹木を育成することが重要となる。特に初期の間伐が遅れると樹冠長率が低くなりやすいため、初回の間伐をしっかりと実施することが重要となる。

【立木密度が低い場合】

立木密度が低い場合、樹木単木では良い肥大成長が望めるが、立木密度が低くなりすぎると単木の肥大効果（単木の根系発達効果）よりも森林全体に成育する単木の本数が少なくなる効果の方が上回るようになるため根系の絶対量が不足し、崩壊防止機能が低減することが知られている（図 3.3 参照。ΔCは立木間中央の根系が発揮する断面抵抗力を表す）。

したがって、立木密度が低くなりすぎた場合は、補植などにより森林全体の根系量を確保する施業が崩壊防止機能を発揮するためには有効であり、長伐期施業（下層植栽実施）や複層林に誘導する施業を選択することが望ましい。

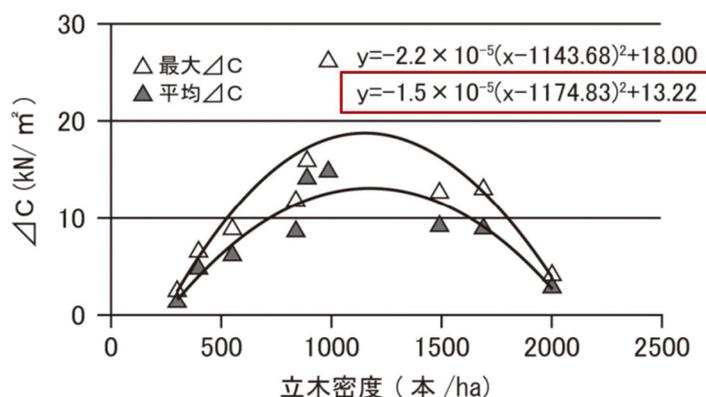


図 3.3 カラマツ林の平均、最大ΔCと立木密度の関係（伴・北原ら 2011）

【立木密度と胸高直径の適正なバランス】

図 3.3 からは、立木密度が 1,000~1,200 本/ha 程度のときに最も崩壊防止機能が高いことが伺える。これは評価点 P の指標とも整合しており、評価点 P では表 3.2 に示すとおり立木密度が 800~1,600 本/ha の範囲で最も高い評価点が与えられることとなっている。

また、LYCS でのシミュレーションでは図 3.4、図 3.5 のとおり施業を行うことで地域や地位、樹種に関係なく胸高直径が大きくなることが明らかであり、特にヒノキ林で施業効果が高いことが分かる。このように、適正な施業を行い密度をコントロールすることで胸高直径の成長（根系の成長）が促されることから、地域ごとに定められた整備計画をしっかりと実施した上で、密度が 800 本/ha 以下となるような段階で補植などを実施する施業を繰り返す（バランスを保つ）ことにより、立木密度と胸高直径が適正な森林となり機能が効果的に発揮されるものとする。

表 3.2 評価点 P の本数密度の評点（針葉樹人工林の場合）

針葉樹人工林					
本数 (本/ha)	400~600	600~800	800~1,600	1,600~1,800	1,800~2,000
評価点	0.5	0.8	1.0	0.7	0.4

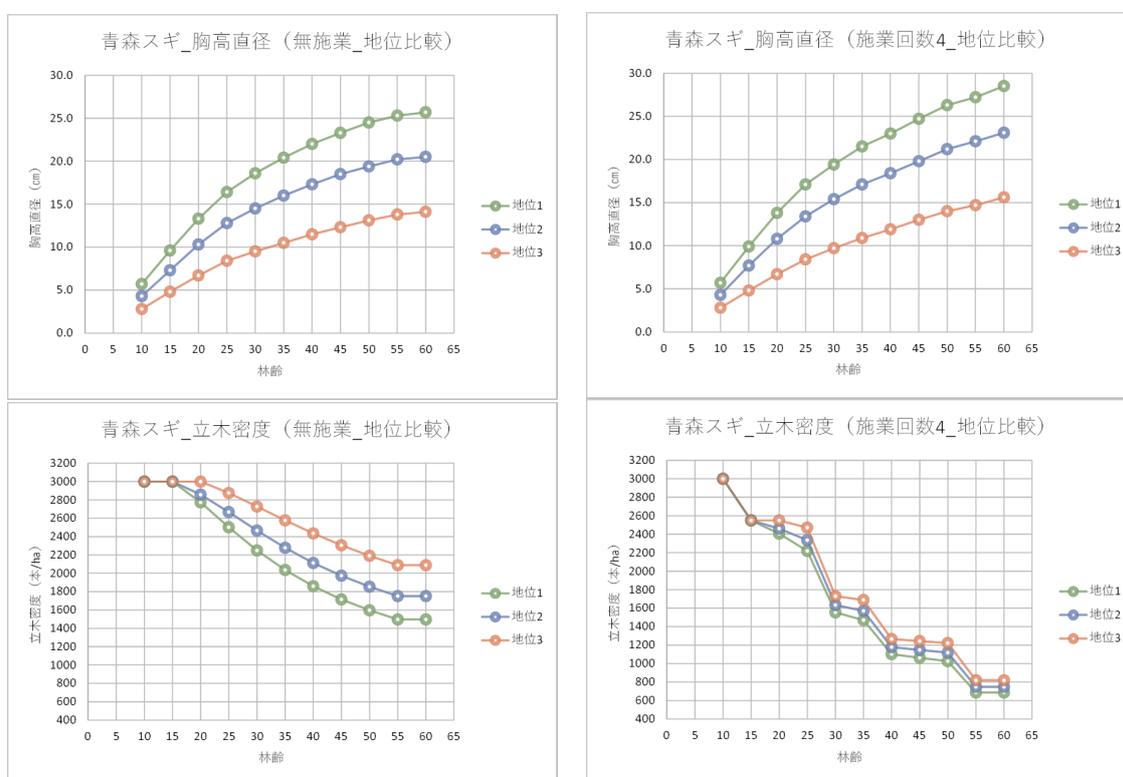


図 3.4 青森スギの無施業と 4 回施業の胸高直径と密度変化（左：無施業、右：4 回施業）

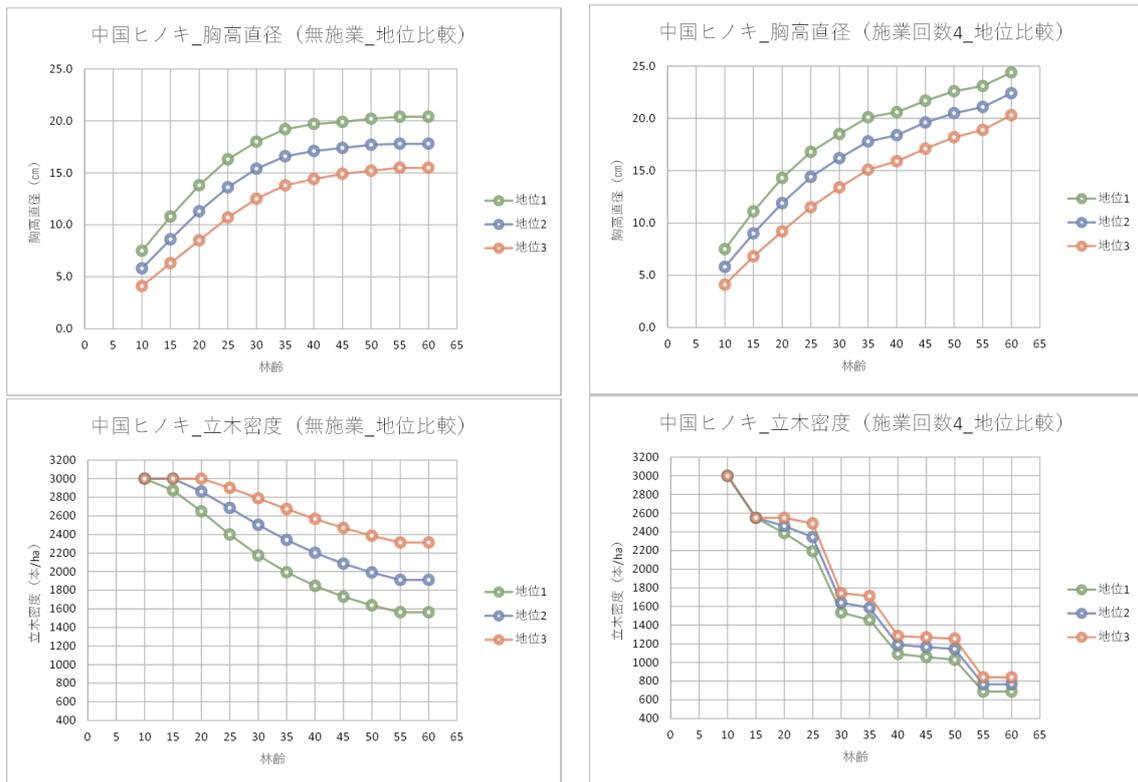


図 3.5 中国ヒノキの無施業と4回施業の胸高直径と密度変化 (左:無施業、右:4回施業)

【皆伐 (立木密度の極端な低下) による影響と植栽木の効果の関係】

崩壊防止機能の発揮には、立木密度を適切にコントロールすることが重要だが、立木密度を極端に低下させる施業が「主伐」であり、特に皆伐は立木の効果が得られない (無立木地) 状態となる。ただし、伐採後も根株などはすぐに腐朽しないことから、崩壊防止に影響する根の引き抜き抵抗力は伐採後直ちに「ゼロ」になるわけではなく徐々に低下する。また、皆伐箇所では更新のために伐採後なるべく早く植栽することが通常で、植栽木が成長することで新たな根系の引き抜き抵抗力の増加が期待できる。これらの関係を示したのが図 3.6 であり、森林は伐採後直ちに植栽したとしても 10 年~20 年くらいで最も崩壊防止機能が低下することが知られている。

急斜面で皆伐した場合、林床を覆う落葉落枝が流失し蒸発散や枝葉等による緩衝効果が望めず、降雨による表土攪乱の可能性が増加するなど、崩壊防止の観点から望ましくない。一方で比較的平坦な斜面で皆伐した場合は、表土攪乱される可能性は低く、そもそも崩壊が生じないことから皆伐施業が問題となる可能性は低い。また、主伐としての「皆伐施業」は崩壊防止機能の観点から基本的に推奨できないが、崩壊発生のおそれがないなど対象斜面の状況や樹種に応じて計画することは可能である。ただし、伐採に伴う崩壊防止機能の低下度合いを小さく、低下期間を短くするために新植し、更新が速やかになされるよう配慮することが望ましい。

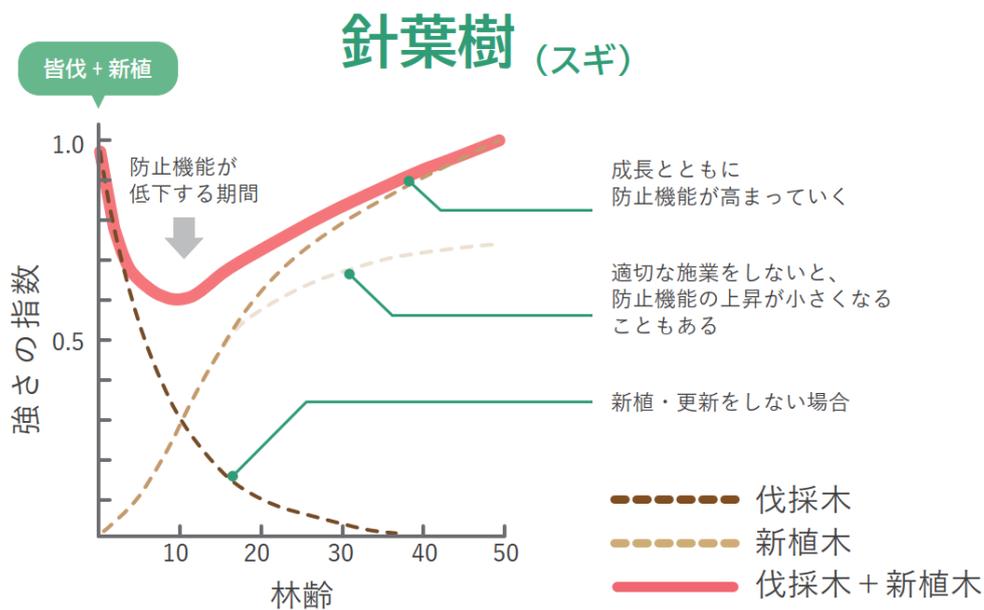


図 3.6 森林伐採後の根系強度の経年変化 (北村ら¹1981 を元に加筆作成)

以上を踏まえ、崩壊防止機能を向上させる施業のポイントとしては以下のとおりである。

- ◆ 間伐により適正な密度管理を心がけ、密度が下がり過ぎた場合は補植する
- ◆ 早めの間伐を実施することで樹冠長率が確保された健全な樹木の成長を促す
- ◆ 林床が落葉や植生で被覆されるよう、林内に適度な光を入れる (適正な密度管理)
- ◆ 大規模な皆伐施業を避け、長伐期施業も含めた複層林を目指す
- ◆ 更新時 (誘導伐による複層化含む) はなるべく早く植栽し、植栽木の成長を促す

¹ 北村嘉一・難波宣士 (1981) : 抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能、林業試験場研究報告、No.313、p.175-208.

3.4 整備目標の目安

崩壊防止機能の高い森林を目指すためには、立木密度と胸高直径のバランス（立木密度のコントロール）が重要であることを示した。したがって、施業を実施する際には「立木密度」、「胸高直径」を整備目標の指標として利用することが有効となる。

林野庁が「土砂流出防止機能の高い森づくり指針（林野庁,平成27年3月）」で示した、崩壊防止林の林齢30年生以上の指標値を見ると表3.3のとおりとなる。理想的な施業を考える上では、表3.3に示す値を早期に達成できるよう施業の計画を立てることが望ましい。なお、針広混交林、広葉樹林については明確な密度管理等が困難であるため、おおむね胸高直径20cm以上を目指すこととされている。

表 3.3 崩壊防止機能を発揮する森林整備の目安（針葉樹）

指標	樹種	指針	理想
胸高直径	スギ	22cm	23~25cm
	ヒノキ	20cm	20cm 以上
立木密度	スギ	1200 本/ha	800~1100 本/ha
	ヒノキ	1200 本/ha	800~1200 本/ha

ただし、表3.3に示された値は地域ごとの成長度合などの条件が加味されておらず、理想的に成長した場合であるが、実際は地域や地位により成長にばらつきが見られる。そこで、前章で実施したLYCSによるシミュレーションを基に、少なくとも林齢30年時点で評価点Pが「やや低機能」となり、林齢40年時点で「やや高機能（あるいは高機能）」となる最低限の指標値の設定を試みた（成長度合「高」）。ただし、ヒノキはスギに比べ成長が遅いため林齢40年時点で「やや高機能」をクリアする箇所が少なかったため、林齢50年で「やや高機能」をクリアする指標値を抽出した（成長度合「低」）。その結果、表3.4に示すとおりとなった。

表 3.4 崩壊防止機能を発揮させるための最低限の整備目標値

樹種	成長度合	林齢30年		林齢40年		林齢50年	
		胸高直径 (cm)	立木密度 (本/ha)	胸高直径 (cm)	立木密度 (本/ha)	胸高直径 (cm)	立木密度 (本/ha)
スギ	高	17.5	1600	21.5	1300	22 以上	1300 以下
	低			19.0	1500	21.0	1400
ヒノキ	高	16.5	1600	21.0	1100	21 以上	1100 以下
	低			19.0	1200	21.0	1100

胸高直径は0.5cm、密度は100本/ha単位で丸めた

したがって、崩壊防止機能の高い森林を目指す施業としては、表3.3に示す値を目標に、

少なくとも表 3.4 に示す値を達成するように整備を進めていくことが重要である。表 3.5 にも示したとおり、地域や地位により胸高直径と立木密度とのバランス（成長量）は大きく異なることから、表 3.3、表 3.4 を参考に各地域に応じた目標値を設定し計画的に整備を進めていくことが望ましい。また、健全な林分として整備するためには、形状比 80 以下、樹冠長率 30%以上を確保するよう、単木の健全性にも十分留意することが重要となる。

【参考：最低限の整備目標値の考え方】

表 3.4 は下の表 3.5 を基に作成した。表 3.5 は、各地区のスギ・ヒノキで成長シミュレーションを実施し、林齢 30 年で評価点 P が「低機能（赤）」を抜け出し「やや低機能（薄緑）」にぎりぎり達する地位・施業回数を抽出している。その後、林齢 40 年、林齢 50 年時に指標値がどう変化しているかを確認し、林齢 50 年時点で評価点 P 値が「やや高機能」をクリアしない場合は対象から外した。その上で、林齢 40 年時点までに「やや高機能」をクリアした場合を「成長度合 高」、林齢 50 年時点までに「やや高機能」をクリアした場合を「成長度合 低」として整理した。抽出された胸高直径、立木密度の平均値を表 3.4 で採用している。

表 3.5 シミュレーション結果より抽出した胸高直径と立木密度

樹種	地区	地位	施業回数	林齢30年				林齢40年				林齢50年			
				胸高直径	立木密度	ΔC	P	胸高直径	立木密度	ΔC	P	胸高直径	立木密度	ΔC	P
				(cm)	(本/ha)			(cm)	(本/ha)			(cm)	(本/ha)		
スギ	青森	1	2回以上	19.4	1554	8.15	0.8	23.2	1390	11.79	1.6	-	-	-	-
		2	2回以上	15.4	1634	4.58	0.6	18.7	1508	7.05	0.8	21.3	1392	9.08	1.6
	愛知	1	2回	16.8	1502	5.20	0.8	20.5	1339	7.72	1.6	-	-	-	-
		1	3回以上	16.8	1502	5.20	0.8	20.1	1062	5.28	1.6	-	-	-	-
	熊本	5	2回	18.7	1685	8.24	0.6	22.1	1612	12.36	1.1	-	-	-	-
		5	3回以上	18.7	1685	8.24	0.6	21.9	1237	8.32	1.6	-	-	-	-
	目標	成長度合 高		17.6	1600			21.6	1300						
		成長度合 低		17.6	1600			18.7	1500			21.3	1400		
ヒノキ	愛知	1	3回以上	16.9	1634	4.98	0.4	18.3	1183	3.96	0.6	20.3	1134	4.99	1.2
		1	2回	18.5	1535	5.88	0.6	20.9	1385	7.17	1.2	-	-	-	-
	中国	1	3回以上	18.5	1535	5.88	0.6	20.6	1092	4.94	1.2	-	-	-	-
		2	3回以上	16.2	1640	4.45	0.4	18.4	1189	4.05	0.6	20.5	1143	5.19	1.2
	九州	1	2回	15.8	1526	3.75	0.6	19.5	1327	5.56	0.6	22.2	1170	6.70	1.2
		1	3回以上	15.8	1526	3.75	0.6	19.1	1066	3.86	0.6	22.5	962	5.29	1.2
		2	2回	15.6	1655	4.06	0.4	18.8	1518	6.06	0.6	20.8	1388	7.09	1.2
		2	3回以上	15.6	1655	4.06	0.4	18.5	1190	4.12	0.6	21.4	1114	5.65	1.2
	目標	成長度合 高		16.6	1600			20.8	1100						
		成長度合 低		16.6	1600			18.8	1200			21.3	1100		

※表中 は「やや低機能」、 は「やや高機能」、 は「高機能」を示す

3.5 具体的な施業の計画の考え方

崩壊防止機能を向上させる具体的な施業の計画としては、以下のとおりである。次章以降に詳細を整理した。

【目標・目的】

- ◆ 下層植生が繁茂し、健全で胸高直径の大きな樹木で占められている林分が途切れることなく存在する状態を継続させる
- ◆ そのためにも、地域で定められた整備計画に基づき計画的な施業を実施する
- ◆ 目標林型は、樹種や構造を問わず当該地の目的に応じて設定できるが、極力複層林（平面的な複層林含む）とし皆伐を行わないことが望ましい

【方法】

- ◆ 過密な森林は、弱度の間伐を段階的に実施し、徐々に整備目標値に近づける
- ◆ 疎な森林は、補植を行うか天然生林施業を実施し整備目標値に近づける
- ◆ 旺盛な成長が望めない地域では、極力胸高直径が肥大するよう「疎」仕立ての施業を行い、整備目標値に近づける
- ◆ 既に施業が遅れている箇所においても、その時点からこまめな施業を実施し整備目標値に近づける
- ◆ その際、単木の樹冠長率や形状比に留意し弱度の間伐を複数回繰り返すなど、単木の健全性などにも留意する
- ◆ エリートツリーは初期の成長が早いことから、早期の崩壊防止機能の発揮が期待できるため、危険度の高い重要な場所では積極的に活用することが望ましい

【留意点】

- ◆ 旺盛な成長が望めない地域ほど、施業の重要性が増すため、より計画的な施業を心掛ける
- ◆ 天然力を活用する天然生林施業を実施する場合には、モニタリングにより施業効果や更新状況を必ず確認すること
- ◆ 根系のない弱部を連続させることで危険性が高まることから、極力弱部が連続するような施業を選択しない（列状伐採に関する詳細は3.5.1参照）

【その他】

- ◆ 表面侵食を防止するため、間伐材は筋工などとして利用することが望ましい
- ◆ 作業道からの崩壊発生を防ぐため、道路開設の際には排水などに十分留意すること

3.5.1 望ましい目標林型

下層植生が繁茂し、健全で胸高直径の大きな樹木が途切れることなく存在する状態が継続している森林

先にも述べたとおり、崩壊防止機能の高い森林は下記①～③に示した項目を満足していることが求められるものであり、これらを満足していれば目標とする樹種や構造にはこだわる必要はない。

- ① 主林木が健全で胸高直径の大きな樹木で構成され根系が十分に発達していること
- ② 下層植生や落葉層などにより林床が覆われており容易に表層侵食が発生しないこと
- ③ 弱部となるような根系が存在しない連続した空間を極力なくすこと

③で「連続した空間」とは列状伐採時に生ずる線状の伐採範囲をいう。ここでは列状伐採を禁ずるものではないが、伐採幅が大きくかつ傾斜方向に設定した場合には当該箇所が崩壊側壁となる可能性が高まる。したがって、崩壊防止機能に配慮する施業の場合は大きな伐採幅を取らないことが望ましい。

図 3.7 はヒノキ林の立木間隔に応じた ΔC だが、立木間隔が 3.5m 程度を超えてくると、 ΔC が 5 以下となりやすいことが分かる。ヒノキの最低限の ΔC 値が 4 である (2.1.2 参照) ことから、伐採幅が 3.5m より大きい場合は ΔC が過小となる可能性がある。 ΔC の大きさは樹齢や樹種でも異なるため、一律に伐採幅の大小の判断はできない。したがって、詳細は個別に判断する必要がある。

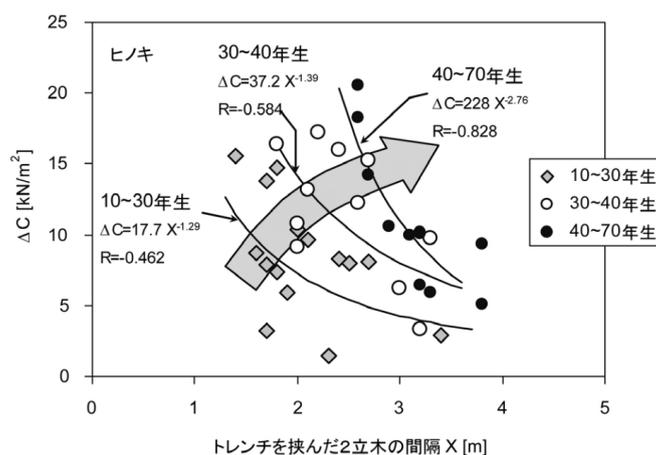


図 3.7 ヒノキの根系が発揮する断面抵抗力と立木間隔 (林齢別) 42

42 木下篤彦・坂井佑介・大野亮一・田畑三郎・川島正照・山崎孝成 (2012) : スギ・ヒノキ林における水平根が発揮する抵抗力の検討, 砂防学会誌, Vol.65, NO.5, p.11-20.

また、循環型の経済林では針葉樹の単層林、水土保持タイプの様な森林では針広混交林の複層林や天然生林[※]等といったように当該地区の目的に応じて目標林型を設定することが望ましい。

ただし、循環型の経済林等で更新の時期を迎えた場合、崩壊防止機能の観点からは、極力「皆伐」を控えることが望ましい。そのため、経済林として循環させる単層林であっても、地形等の条件から崩壊防止機能の発揮が求められるものを更新させる際には、「誘導伐」のような平面的に複層林状態を構成させるような施業、若しくは「漸伐」や「択伐」により無立木地の期間がなくなるような施業を心がける必要がある。特に、水が集まる凹地形等の微地形が崩壊発生に影響する可能性が高いことから、そのような場所は特に注意が必要である。

※場所によっては、目標林型を針広混交林や天然生林などとし、天然力を活用した更新方法を選択する場合もあるが、その場合にも放置するのではなくモニタリングを行い、更新していることを確認することが崩壊防止機能発揮のために重要となる。その際、例えば「国有林野事業における天然力を活用した施業実行マニュアル（林野庁，平成30年3月）」等を参考に、更新の確認や施業の検証を行うことが望ましい。

3.5.2 施業の計画の基本的な考え方

地域ごとに定められた整備計画に基づき、計画的に確実な施業を実施する

LYCSを用いて実施したシミュレーションでは、どの地域のスギ、ヒノキにおいても施業を実施することで、無施業よりも胸高直径が大きくなる結果が得られた。特に施業の効果は2回実施以降から発揮されることが多く（図3.8、図3.9参照）、計画的に継続的な施業を実施する重要性が示された。そのため、崩壊防止機能の高い森林を目指すためには、地域ごとに定められた整備計画に基づき、計画的で確実な施業を行うことが重要となる。

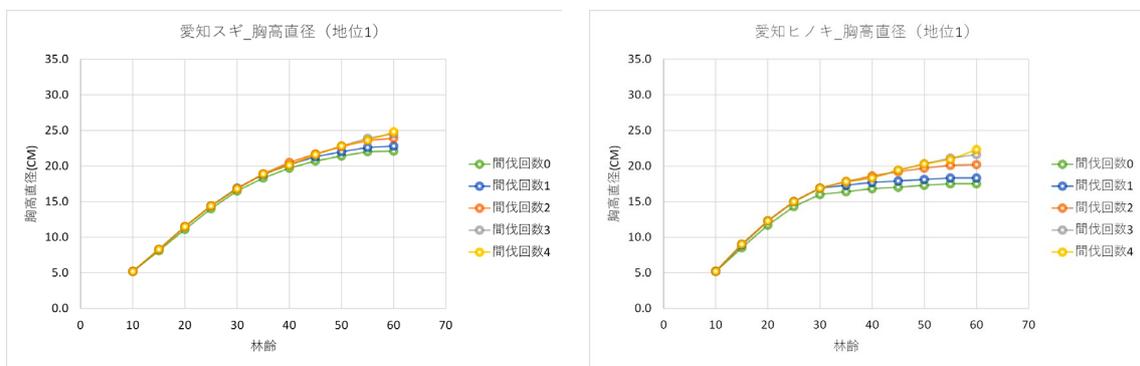


図 3.8 施業回数による胸高直径の成長変化（左図：愛知スギ、右図：愛知ヒノキ）

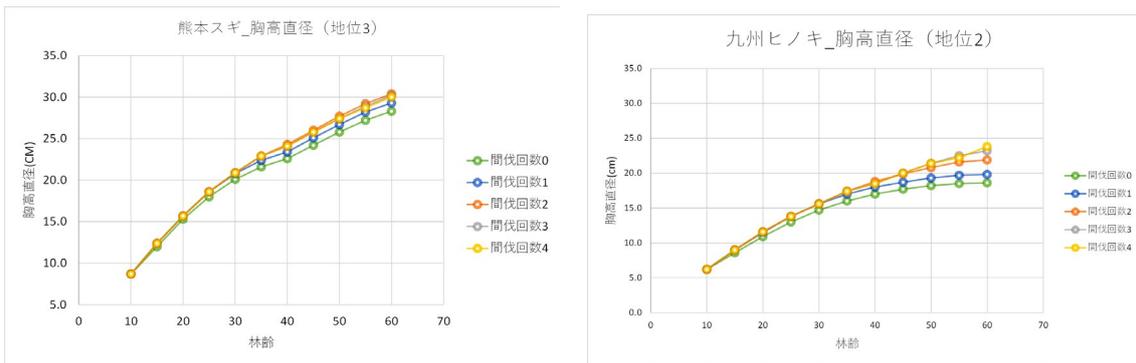


図 3.9 施業回数による胸高直径の成長変化 (左図：九州スギ、右図：九州ヒノキ)

3.5.3 地域や成長量 (地位) による考え方の違い

温暖な地域や地位の高い箇所など樹木成長が活発な箇所よりも寒冷地や成長量 (地位等) が低い箇所ほど、施業による立木密度のコントロールが重要となることから、しっかりと計画的な施業を心がける必要がある

LYCS によるシミュレーション結果から、施業による評価点 P の変化を表したのが図 3.10 となる。先に示したとおり、地域や地位に関係なく施業を実施することで、より早く評価点 P が高くなるのが分かる。しかし、成長の良い箇所 (熊本・地位 1) では、施業を行わない (あるいは施業回数 1 回) でも比較的早い時期から評価点 P が高まるのに対し、成長の悪い箇所 (青森・地位 2) では、施業を行わない場合、林齢 50 年時でも崩壊防止機能が「低機能」と判断される。一方で、施業を 2 回以上実施した場合、評価点 P は林齢 30 年から「やや低機能」に向上しており、寒冷地や地位の低い箇所等、成長量が低い箇所ほど施業の重要性が高いことが分かる。したがって、崩壊防止機能の向上を考慮した場合、成長量が低いと考えられる箇所ほど、積極的な施業を実施し、適切な密度コントロールにより効果的に胸高直径を肥大させることが重要となる。

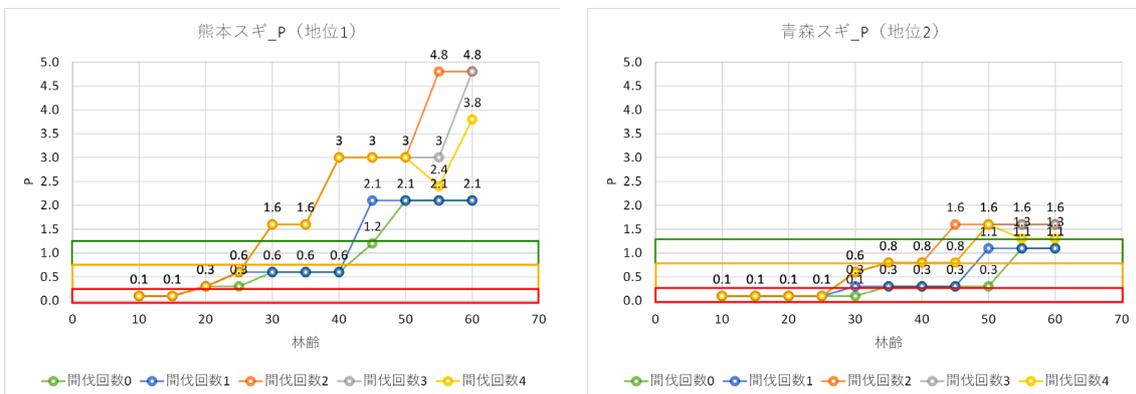


図 3.10 施業による評価点 P の変化

【参考：施業4回時の評価点Pの低下】

図 3.10 を見ると、施業 4 回の 55 年時に評価点 P が低下していることが分かる。これは、シミュレーションの条件として、林齢 55 年時に 4 回目の施業を行ったことで立木密度が低下した影響である。このように、立木密度を下げすぎると評価点 P (ΔC) もは低下するため、立木密度が大きく低下する場合には、補植を実施し森林全体の密度を保つことが望ましい（目標林型として複層林を目指す理由）。

3.5.4 旺盛な成長が望めない地域（箇所）での施業の考え方

旺盛な成長が望めない地域（箇所）では、なるべく早い時期に少し強めの間伐を行うことが望ましい。ただし、形状比が高い森林では、弱度の間伐を計画的に繰り返し実施することで、気象害（雪害）等による被災を軽減する施業を選択する

LYCS のシミュレーションを実施した地区で、一番成長量が低い青森スギ（地位 3）では、標準とした施業 4 回を実施したとしても評価点 P が林齢 55 年の時点で「低機能」となるなど、成長量が低く旺盛な成長が望めない。このような地区では、通常の施業を実施したとしても崩壊防止機能が十分に発揮されないことが考えられる。このような場合の施業方法を検討するため、表 3.6 に示す施業モデルにより評価点 P 及び ΔC の変化を確認した。

その結果、図 3.11 に示したとおり、なるべく早く少し強めの施業（間伐）を実施することで、評価点 P がより早く高くなることが確認された。特に、現在青森県で試験的に実施されているような「低コスト施業（初期植栽本数を 1,000 本と極端に少なくした方法）」は、崩壊防止機能の観点からはとても効果が高い可能性が示された。これは、林分の密度が低いほど胸高直径の肥大効果が得られやすいことを示している。成育条件として成長が望めない地域や箇所では、極力早い時期から「疎仕立て（収量比数*0.6 程度）」の施業を行うことが効果的であるとも考えられる。ただし低コスト施業については、樹種特性による成長の違い（スギで肥大効果が見られても、ヒノキでは見られなかったという報告がある）や植栽後 20 年位までは ΔC が低い、というシミュレーション結果も得られていることから、周辺環境や個別の林分条件に応じた検討が必要となる。

表 3.6 シミュレーションに用いた施業モデル

施業モデル	施業タイプ	初期本数	主伐林齢	施業方法	
				間伐率 (%)	間伐年 (林齢)
施業①	標準	3,000	60	15/30/25/33	15/30/40/55
施業②	こまめな施業	3,000	60	15/15/30/25/33	11/16/21/31/41
施業③	早め強めの施業	3,000	60	35/35/30	11/21/31
施業④	低コスト施業	1,000	60	15	40

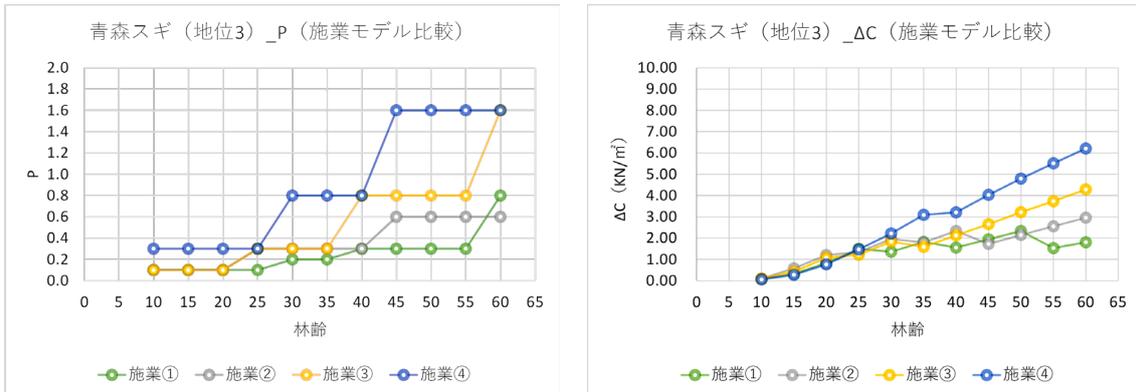


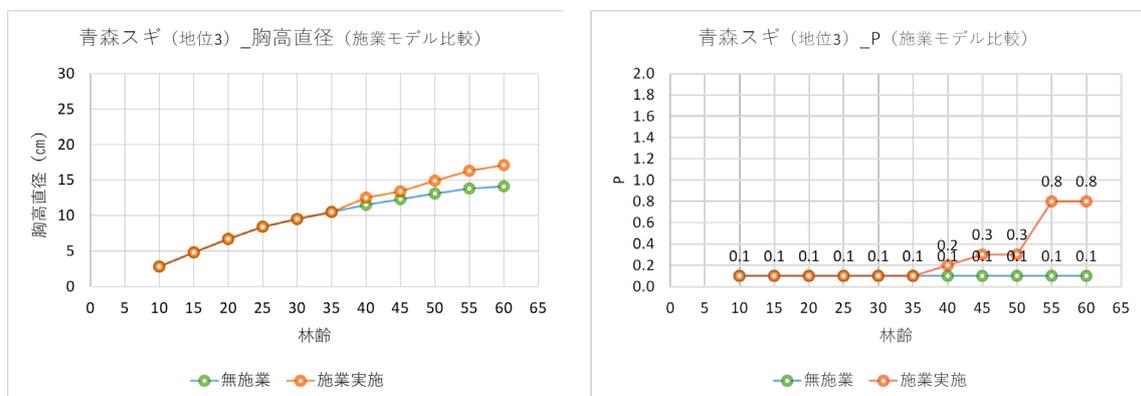
図 3.11 施業モデルごとの評価点 P と ΔC の変化

※収量比数とは、森林の混み具合（立木密度の状態）や間伐の適期等を判断する指標の一つであり、密度管理図等を用いて確認する。人工林の場合、収量比数 0.7 程度を目指すことが標準とされ、0.8 より大きい場合は「密」、0.6 より小さい場合は「疎」として判断される。

3.5.5 既に施業が遅れている箇所での施業の考え方

既に施業が遅れている場合にも、その時点から極力早い段階で間伐などを実施することで崩壊防止機能の高い森林を目指す。ただし、樹冠長率が十分ではなく今後の成長が望めないような箇所では、小面積の「誘導伐」を繰り返し早期に更新を図ることが望ましい（天然生林施業を選択した場合には、順調に更新できているかなどを必ずモニタリングする）

上記に述べてきたとおり、崩壊防止機能の高い森林とするためには計画的な施業の実施が望まれるが、施業が遅れた場合にも、その時点からこまめな施業を行うことで図 3.12 に示すとおり胸高直径の肥大成長による評価点 P の向上が望める。そのため、しばらく放置された森林であっても、施業の必要性が明らかとなった時点から極力早い段階で間伐などの施業を実施することが望ましい。ただし、立木密度が高い状態で放置された森林では、樹冠長率が極端に低くなっている場合や形状比が高くなっていることが懸念されることから、気象害等の発生を防ぐため弱度の間伐を繰り返す施業や小面積の「誘導伐」を繰り返し、平面的な複層林を目指すなど、単木の健全性や周囲の気象害の危険性なども勘案した施業方法を模索することが重要である。



※ここでの施業は、林齢 40 年時から 5 年おきに間伐を実施（間伐率 35/20/15/15）

図 3.12 施業遅れ林分（林齢 40 年時点まで無施業）に対する施業効果

3.5.6 エリートツリー等の活用

先にも示したとおり、森林の崩壊防止機能は伐採後に新たに苗木を植栽したとしても伐採後 10～20 年の期間で最も機能が低下することが知られている(図 3.13 参照)。この期間は、伐採木の根系が徐々に腐朽し機能が低下する期間であるとともに新植木の根系が成長して機能を発揮するまでの期間に当たる。この期間の森林の崩壊防止機能低下を極力小さくするためには、伐採木の根系の腐朽を遅らせることは困難であるため、新植木の根系補強力を早期に発現させることが重要となる。

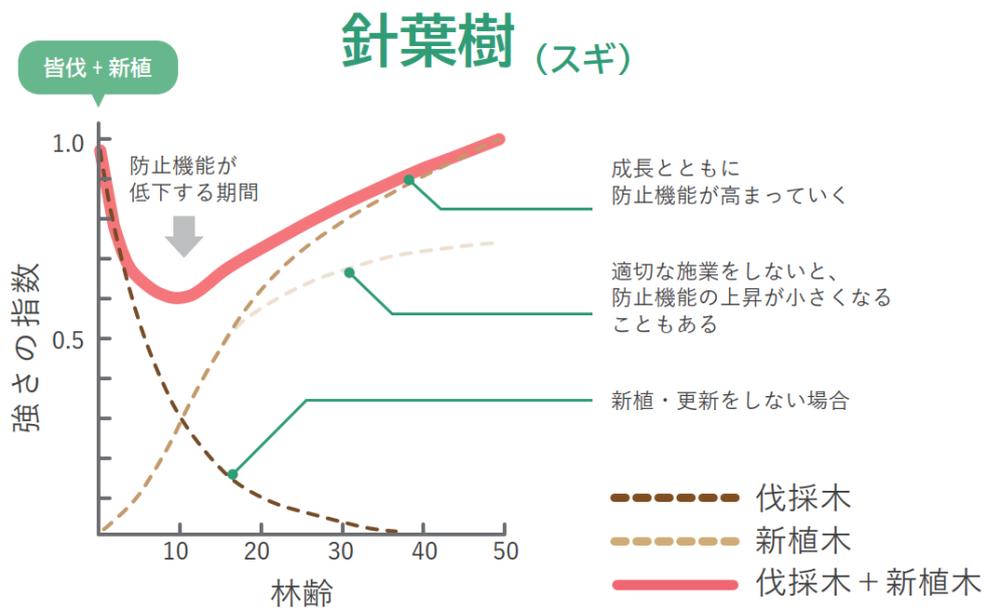


図 3.13 森林伐採後の根系強度の経年変化 (図 3.6 再掲)

エリートツリーは、成長・形質に優れた品種や花粉症対策品種等の開発のため全国から選抜・保存された精英樹（第一世代）から、より成長特性等が優れた個体を選抜（第二世代）したものであり、その成長特性については、図 3.14 に示すとおり非エリートツリー（在来品種等）と比べ、地上部の初期成長が早いことが知られている³。

³ 川野康朗・岡田康彦（2019）：エリートツリーの開発・普及による「緑の国土強靱化」に向けて、水利科学、63巻、4号、p.21-39.

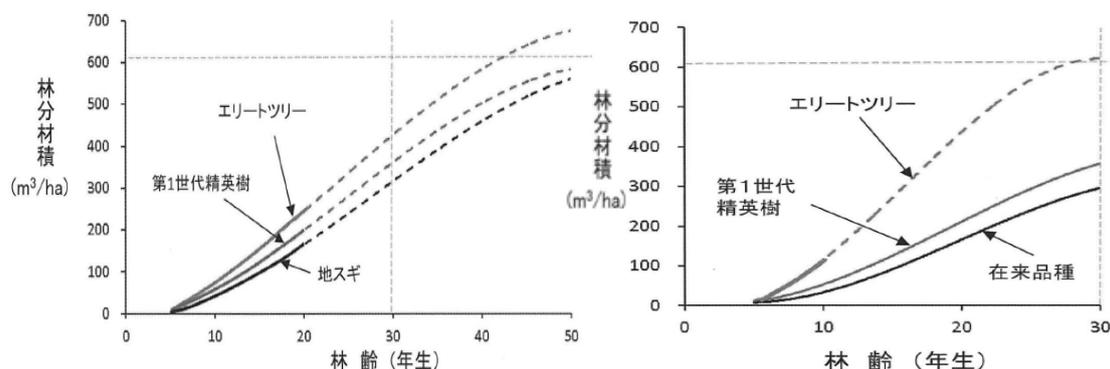


図 3.14 エリートツリー（スギ）の成長予測（左図：実生苗、右図：さし木）³

エリートツリーのT/R率を調査し、非エリートツリーと比較したところ両者はおおむね同等（第I編 2.3.3 参照）と考えられ、地上部がより早く成長するエリートツリーは経済林として有用であり、かつ地下部根系には従来品種と同等以上の崩壊防止機能が期待できる。

そのため、危険度の高い場所や保全対象が近いなど、重要度の高い箇所では、積極的にエリートツリーを活用することにより、伐採後の機能低下期間をより短くし、早期の機能回復を期待することができると思われる。

第II編 まとめ—森林施業の計画と崩壊防止機能

森林は、主に木材生産の場として活用されるが、一方で多面的機能を有しており、特に気候変動に伴う豪雨の増加など災害の危険性が增大している中で、森林が発揮する防災機能は重要視されている。そのような中では、経済活動としての林業と国土保全が両立するよう、森林の保全に配慮した施業が重要となる。

本ガイドラインでも示したとおり、森林の崩壊防止機能を高めるためには大規模な皆伐施業を避けることが望ましいなど、経済林としての効率的な整備と森林の防災機能の発揮には一部トレードオフの関係もあるが、基本的には計画的な施業を実施し、樹木の肥大成長を促すこと（材積を増やすこと）が経済林としても国土保全としても望ましい姿であることは変わらない。

そのため、地形や保全対象との位置関係等から崩壊防止機能が求められる、又は崩壊防止機能を発揮させたい森林（斜面）においては、本ガイドラインで示した留意点を考慮した上で施業を実施することが、結果として国土の保全（森林の多面的機能の維持・向上）と木材生産としての経済活動をバランスよく継続することにつながる。

森林の崩壊防止機能を発揮させたい斜面においては、通常の施業の考え方以外に、本ガイドラインで示した留意点についても意識した施業の計画を立てた上で施業を実施し、安全で効果的、継続的な森林活用を行っていただきたいと考える。

【評価点 P の算定方法】

林野庁手引き⁴に基づく。

$$\left. \begin{array}{l} \text{樹種：} \quad P1 \\ \text{立木密度：} \quad P2 \\ \text{胸高直径：} \quad P3 \end{array} \right\} \rightarrow \text{評価点 } P = P1 \times P2 \times P3$$

表 森林の土砂崩壊防止機能区分のランク判定

森林の土砂崩壊防止機能区分	点P	色区分
a	~0.3	赤
b	0.3~0.8	黄
c	0.8~1.3	緑
d	1.3以上	青

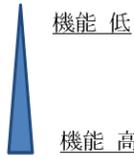


表 樹種 P1, 立木密度 P2, 胸高直径 P3 の点数

樹種(P1)		立木密度(P2)			胸高直径(P3)	
区分	点数	本数 (本/ha)	点数		胸高直径 (cm)	点数
			針葉樹人工林	針葉樹人工林以外		
A (参考樹種:スギ、 針・広天然生林)	1.6	400~600	0.5	0.5	10~15	0.2
		600~800	0.8	0.8	15~20	0.5
B (参考樹種:ヒノキ、 広葉樹二次林)	1.2	800~1,600	1.0	1.0	20~25	1.0
		1,600~1,800	0.7	1.0	25~30	1.9
C (参考樹種:マツ類)	0.8	1,800~2,000	0.4	1.0	30~35	3.0
					35~40	4.4

【根系が発揮する断面抵抗力 ΔC の算定方法】

- 20~100m 程度のグリッド、又は林班/林小班を検討単位とする。
検討単位ごとに胸高断面積合計 ΣA [m²/ha]を設定する。
- ΣA の設定方法は任意。
下記(1)~(3)はLPデータを活用して ΣA を設定する一例として示す。

- (1) 樹種とLPデータから推定された樹高、立木密度を検討単位ごとに整理する。
- (2) 樹種、樹高と立木密度から胸高直径を推定する。
樹高~胸高直径関係は現地データがあれば回帰式を使い、なければ当該地域の密度管理図等を用いる。
- (3) 検討単位ごとに立木密度と胸高直径を整理し、胸高断面積合計 ΣA [m²/ha]を算定する

- 北原の簡易式を使い、 ΔC を算定する。

$$\Delta C = 9.767 \times \alpha (\Sigma A)^{1.4}$$

樹種別係数 α : ヒノキ0.00330, スギ0.00393, 広葉樹0.00198

単位 : ΔC [kN/m²]、 ΣA [m²/ha]

(算定法の詳細については第I編3章を参照)

⁴ 林野庁治山課：平成27年度流域山地災害等対策調査（流木災害対策手法検討調査）委託事業成果品

【参考】LYCSによる森林の成長シミュレーションを使った根系が発揮する抵抗力 ΔC 、評価点P算定の一例

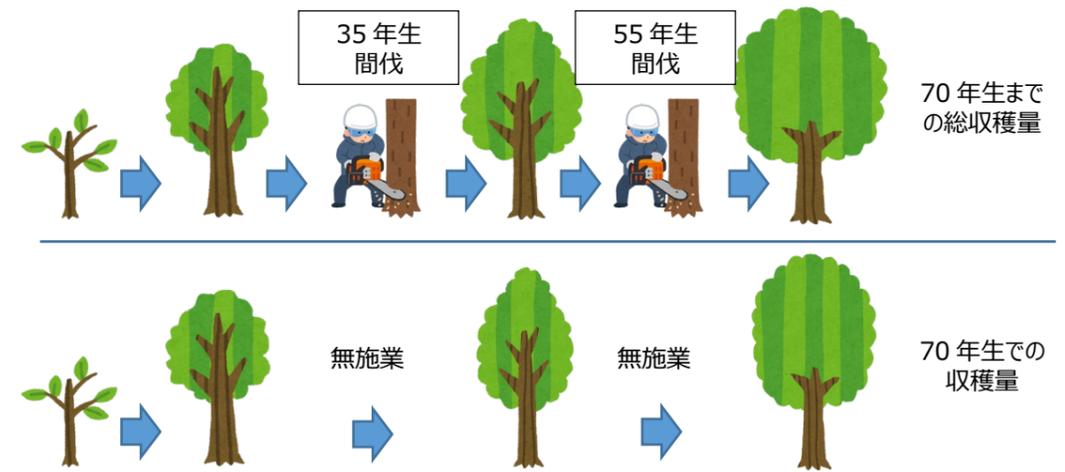
愛知のヒノキとスギを例として、LYCS⁵による成長シミュレーションの結果と根系が発揮する断面抵抗力 ΔC と評価点Pの算定例を表にまとめた。LYCSから得られた本数密度と胸高直径を使って、 ΔC と評価点Pを前ページの方法で算出したものである。

無施業とした場合と、間伐施業をした場合の2通りとし、伐採は35年生で1伐3残(25%)、55年生で3残の中央を伐採(33%)する想定とした。

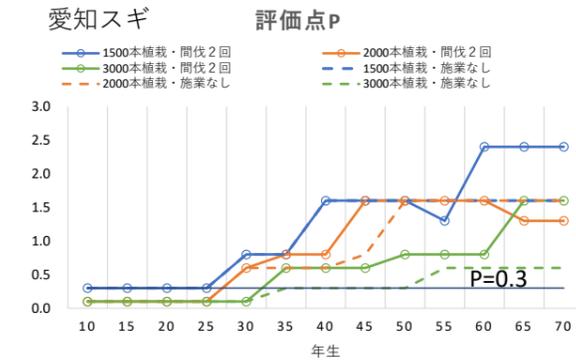
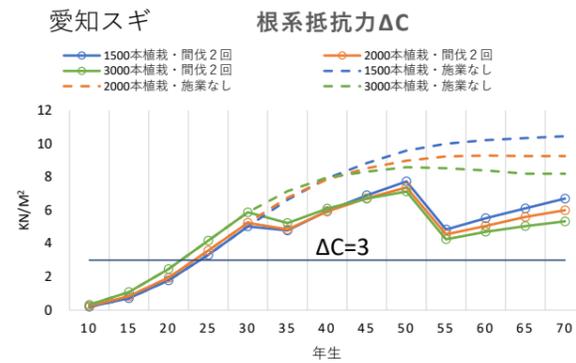
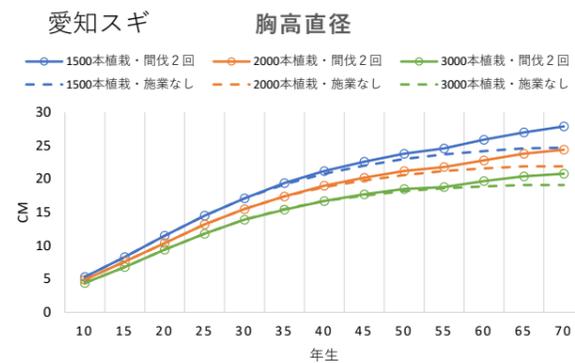
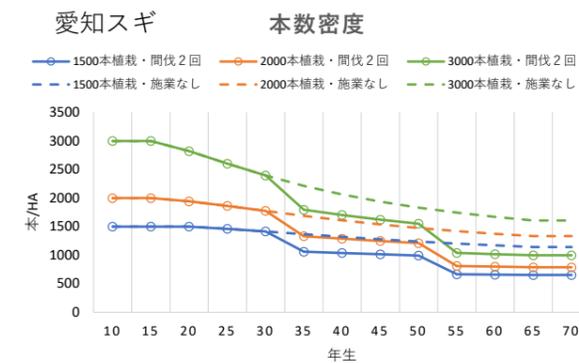
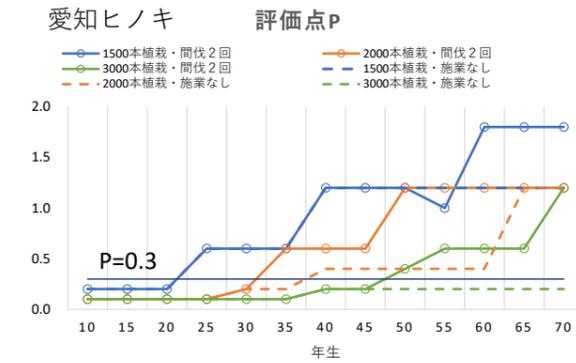
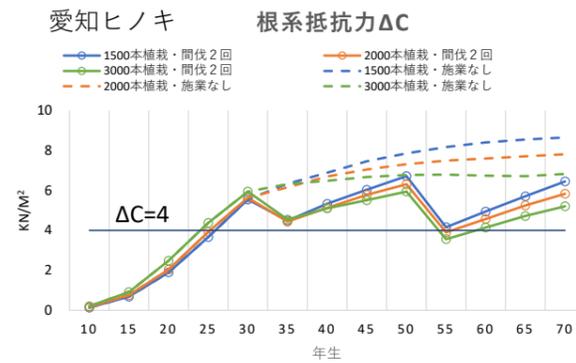
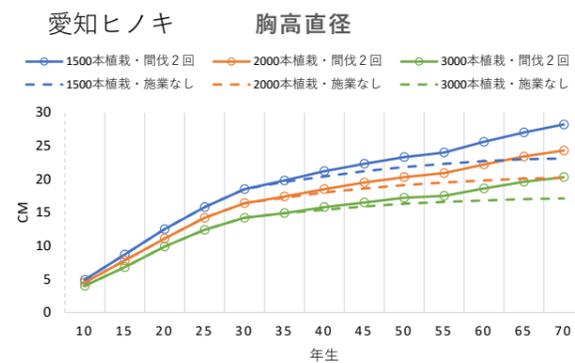
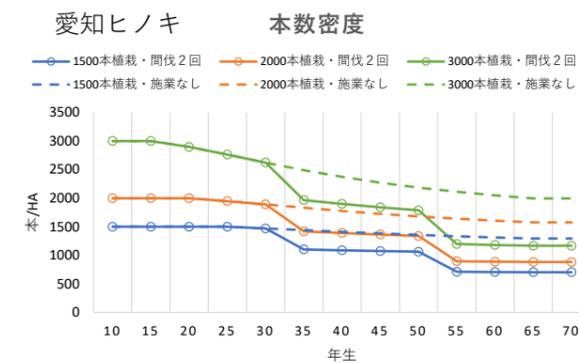
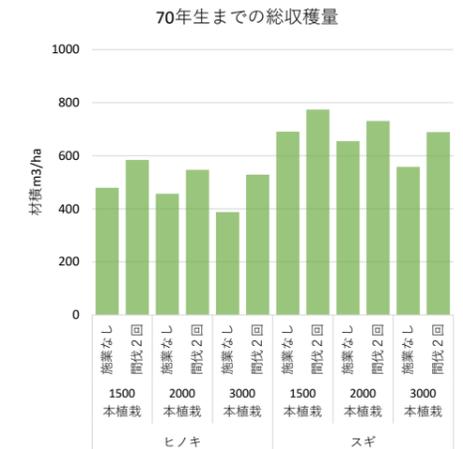
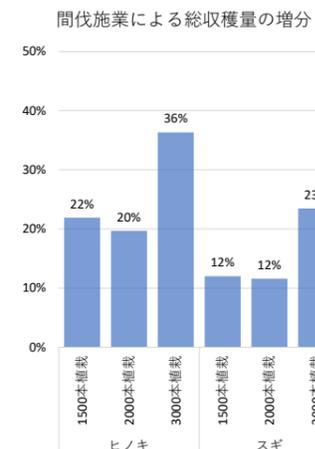
2回の間伐施業による総収穫量の増分は12~36%であり、施業による効果が数値で評価されている。

伐採にともない根系が発揮する断面抵抗力 ΔC の低下が生じるが、基本的には最低限とされるヒノキ $\Delta C=4$ 以上、スギ $\Delta C=3$ 以上をクリアする。ヒノキの3000本植栽のケースのみ55年生で $\Delta C=4$ 未満となるが、このとき評価点Pがしきい値である0.3を超えていることから、 $\Delta C < 4$ かつ $P < 0.3$ (第II編表 2.8参照)とはならず『崩壊防止機能の低い森林』には該当しない。

LYCSによる成長シミュレーションを使い、 ΔC とPによる評価を行うことで、森林整備の効率化と森林の崩壊防止機能、双方を両立させることが可能となる。 ※ 下刈り、除伐、間伐等の施業は想定していないため、実際に表内のような順調な値を示すかは不明



樹種	初期植栽 [本/ha]	間伐 35年, 55年	70年 総収穫量 [m ³ /ha]	30年生				50年生				70年生			
				本数密度 [本/ha]	胸高直径 [cm]	評価点 P	ΔC [kN/m ²]	本数密度 [本/ha]	胸高直径 [cm]	評価点 P	ΔC [kN/m ²]	本数密度 [本/ha]	胸高直径 [cm]	評価点 P	ΔC [kN/m ²]
ヒノキ 愛知 地位2	1500	なし*	479	1471	18.5	0.6	5.54	1358	21.8	1.2	7.85	1296	23.1	1.2	8.65
		25%, 33%	584	1471	18.5	0.6	5.54	1063	23.3	1.2	6.71	705	28.2	1.8	6.44
	2000	なし*	457	1892	16.4	0.2	5.63	1682	19.1	0.4	7.31	1576	20.2	1.2	7.81
		25%, 33%	547	1892	16.4	0.2	5.63	1339	20.3	1.2	6.30	884	24.3	1.2	5.83
	3000	なし*	388	2623	14.2	0.1	5.94	2185	16.3	0.2	6.77	1997	17.1	0.2	6.82
		25%, 33%	529	2623	14.2	0.1	5.94	1788	17.2	0.4	5.94	1168	20.3	1.2	5.21
スギ 愛知 地位2	1500	なし*	691	1416	17.1	0.8	5.03	1240	23.0	1.6	9.57	1144	24.7	1.6	10.44
		25%, 33%	774	1416	17.1	0.8	5.03	994	23.8	1.6	7.73	653	27.9	2.4	6.70
	2000	なし*	655	1776	15.5	0.6	5.24	1476	20.6	1.6	8.97	1334	21.9	1.6	9.25
		25%, 33%	731	1776	15.5	0.6	5.24	1211	21.2	1.6	7.37	789	24.4	1.3	6.00
	3000	なし*	558	2395	13.9	0.1	5.87	1832	18.2	0.3	8.59	1609	19.1	0.6	8.20
		25%, 33%	689	2395	13.9	0.1	5.87	1552	18.5	0.8	7.13	998	20.8	1.6	5.33



⁵ <https://www2.ffpri.go.jp/labs/LYCS/> 収穫表作成システム LYCS 3.3、森林総合研究所の公開エクセルプログラム