5. 実証調査データを用いた各種分析について

5－1. 樹高成長量への影響解析

本事業における指針の作成においては、「低密度植栽」により、植栽木がどのような影響を受けるのかを調査する必要がある。

このため、本年度においてはこれまでの調査で得られた各植栽地での成長量データを利用し、植栽密度が「樹高成長」にどのような影響を与えているかを、解析・評価した。なお、次年度については、本年度の解析結果に加え、次年度の計測結果も考慮した上で、再度解析を行う必要がある。

＜これまでの議論より得られた意見＞

・植栽木の生長について、植栽密度が要因となっているのかを統計的に検討する。

5－1－1. 解析目的

「低密度植栽」による植栽木の樹高成長への影響を解析するため、植栽密度ごとに樹高成長量を比較する。さらに樹高成長量に影響する環境要因も検証する。

5－1－2. 解析方法

地域ごとに植栽年次[1]に対する樹高成長量を線形回帰モデルにより解析したところ、例えば図 5-1 に示すように、地域によって樹高成長速度（傾き）や平均樹高成長量（切片）が異なった。単純な線形回帰モデルでは、植栽密度による影響を抽出できないことがわかったため、「一般化線形混合モデル（Generalized Linear Mixed Models）」[2]を用いて、地域ごとの樹高成長量の違いを考慮しながら、『樹高成長量』がどの要因に影響を受けているのかを解析した。

---

[1] 植栽年次は、植栽後 n 年目を意味する。また、樹高成長量は、n 年目の植栽年次の樹高－n+1 年目の樹高で計算する。

[2]、固定効果（fixed effect）と変量効果（random effect）を共に含む線形の統計学的モデル

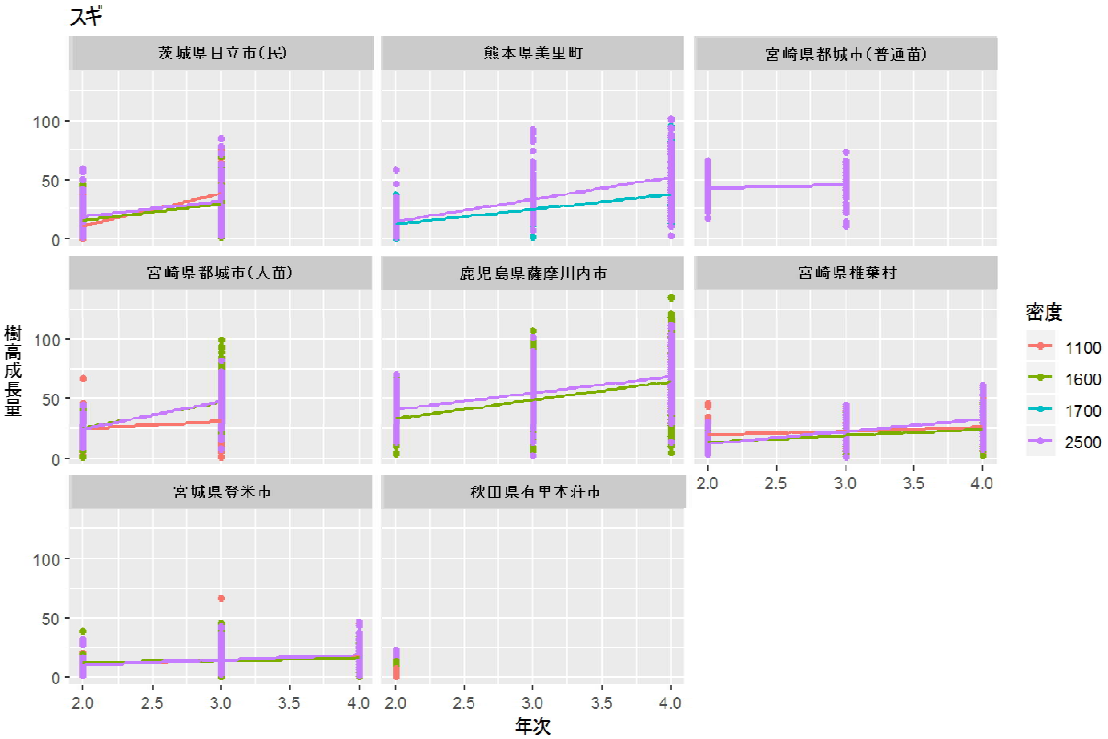

図 5-1　スギの植栽年次と樹高成長量の地域ごとの線形回帰

解析を行うにあたり、目的変数は、「樹高成長量」とし、誤差構造を正規分布と仮定した。説明変数は、「植栽密度」、「斜面方位」、「地際直径」、「植栽年次」、「C 区分」とした。さらに地域ごとの樹高成長の速度の違いを考慮するため、ランダム効果として、「地域における植栽年次の樹高成長量」をランダム傾き効果とした。さらに繰り返し同じ個体を計測しているため、反復計測の影響を考慮する必要がある。そこで、「個体 ID」をランダム切片効果とした。統計モデルで示すと下の式で表される。

樹高成長量　～　植栽密度　＋　斜面方位　＋　地際直径　＋　植栽年次　＋　C 区分
＋（1＋植栽年次 | 地域）　＋　（1 | 個体 ID）

作成したモデルは、Satterthwaite による自由度推定法を用いたワルド検定を用いて、後方ステップワイズ法による変数選択を行い、最善モデルを選択した。

データの利用に際しては、枯死・消失、誤伐、先端折れ、食害、マイナス成長等の例外的なものは除外し、健全個体のデータのみを利用した。なお、C 区分調査は限られたプロットで行ったため、解析は全てのプロット（以下、「健全個体データ」という。）及び C 区分調査を行ったプロット（以下、「C 区分データ」という。）に分けて行った。

解析にあたっては、R[3]（ver3.5.2）及び R の追加パッケージ lmerTest[4]を利用した。上述のデータの利用構造は、図 5-2 のとおりである。

【解析データの利用構造】

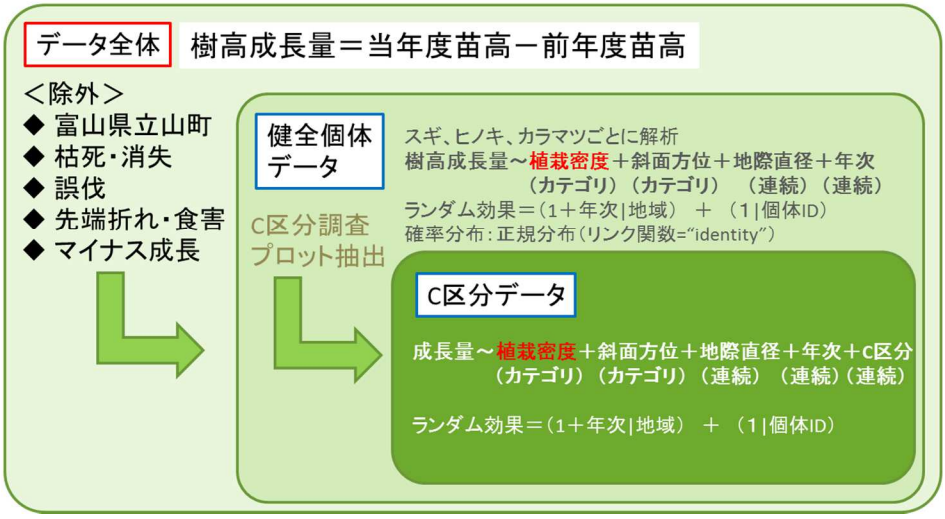

図 5-2　解析データの利用構造

5－1－3.　　解析結果

(1)　健全個体のデータを用いた解析結果

健全個体のデータを用いて解析し、選択された変数について**エラー! 参照元が見つかりません。**に示す。項目（緑枠）は選択された樹高成長量に影響のある項目、推定値（赤枠）はその影響の方向と大きさ、P 値（青枠）は変数の有意性を示す。

解析の結果、樹高成長量に影響を与える要因は、全樹種に共通して地際直径があげられ、地際直径が大きいほど樹高成長量が大きい傾向にあった。また、ヒノキ・カラマツにおいては植栽密度による影響が見られるが、通常、林冠閉鎖前での植栽密度による影響は考えにくいことから、その他各プロットでの隠れた要因の存在が考えられる。そこで、その他の情報として考えられる項目として C 区分データを用いた解析も実施した。

[3] R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

[4] Kuznetsova A, Brockhoff PB, Christensen RHB (2017). "lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models." *Journal of Statistical Software*, **82**(13), 1–26.

表 5-1　健全個体データを用いた解析結果

スギ

項目		推定値	std.error	t値	自由度	P値
切片		1.0	3.2	0.3	4.5	0.78
斜面方位	F	-6.7	8.6	-0.8	6.7	0.47
	NE	-0.6	1.2	-0.5	2741.2	0.65
	NW	2.6	3.9	0.7	4.4	0.54
	S	12.3	4.2	2.9	6.2	0.03
	SE	4.6	1.2	3.7	2962.3	0.00
	SW	3.6	3.8	0.9	4.4	0.40
	W	16.9	5.3	3.2	3.9	0.03
地際直径		15.7	0.4	38.3	2179.8	0.00

ヒノキ

項目		推定値	std.error	t値	自由度	P値
切片		12.4	2.7	4.6	7.6	0.00
植栽密度	1600	-3.0	0.9	-3.3	791.0	0.00
	2500	-5.0	1.0	-5.3	812.0	0.00
斜面方位	NE	4.4	2.0	2.2	578.0	0.03
	NW	8.2	2.9	2.8	405.0	0.00
	S	1.5	2.0	0.8	281.5	0.44
	SE	4.5	1.9	2.4	252.3	0.02
	SW	0.6	2.6	0.2	445.2	0.83
地際直径		10.5	0.6	17.5	1307.2	0.00

カラマツ

項目		推定値	std.error	t値	自由度	P値
切片		-6.7	2.1	-3.1	7.7	0.01
植栽密度	1600	-0.5	1.1	-0.5	1712.5	0.62
	2500	1.4	1.1	1.2	1695.1	0.21
地際直径		25.1	0.8	29.7	1653.8	0.00

:効果のある項目
:効果の方向と大きさ
※数値が大きければ効果は大きい
※＋－は効果の方向
:P値

- 項目は、モデル選択により選択された要因。
- 推定値は、モデル分析により計算された樹高成長量に対しての影響の大きさ。値の正負は影響の方向を示しており、正は樹高成長量を高める効果、負は樹高成長量を低くする効果。絶対値は、影響の大きさを示す。
- 斜面方位は、カテゴリー変数であるため、E（東斜面）を基準（切片）にしてそれぞれの項目が正か負の影響を示している。
- 植栽密度は、1,100 本/ha を基準（切片）にしている。
- 地際直径は、連続変数であるため、単純に推定値の絶対値が樹高成長量に対する影響の大きさを表す。
- std.error は、推定値の標準偏差。
- モデル分析によりそれぞれの項目の t 値と自由度を計算し、そこで求められる P 値から推定値の有意性を検定。

(2)　C 区分データを用いた解析結果

C 区分データを用いて、健全個体に加えて周辺雑草木との競合関係も勘案した解析を行った。解析結果を表 5-2 に示す。各色枠については、前項での説明のとおりである。

周辺雑草木との競合関係も勘案した解析を行ったところ、樹高成長量に影響を与える要因は、全樹種に共通するものとして、地際直径・斜面方位があげられた。ヒノキにおいては植栽密度による影響が見られるが、前述のとおり通常、林冠閉鎖前の状況での植栽密度による影響は考えにくいことから、植栽密度ならびに競合関係の状態以外の何らかの要因であることが推測される。

表 5-2　健全個体データ＋C 区分を用いた結果

スギ

項目		推定値	std.error	t値	自由度	P値
切片		1.1	4.0	0.3	8.4	0.79
斜面方位	F	-13.4	10.8	-1.2	6.5	0.26
	NE	-1.9	2.1	-0.9	607.6	0.38
	NW	-3.4	4.5	-0.8	6.0	0.47
	S	6.9	4.8	1.4	7.5	0.19
	SW	-2.2	4.4	-0.5	5.8	0.64
	W	17.3	5.9	2.9	4.6	0.04
地際直径		16.8	0.6	27.9	898.6	0.00
C区分		1.3	0.4	3.2	1240.7	0.00

ヒノキ

項目		推定値	std.error	t値	自由度	P値
切片		15.6	5.7	2.7	6.3	0.03
植栽密度	1600	-0.5	1.4	-0.3	522.4	0.74
	2500	-6.4	1.5	-4.2	480.8	0.00
斜面方位	NW	9.4	3.8	2.5	459.7	0.01
	S	12.5	3.4	3.7	401.0	0.00
	SE	6.1	2.4	2.5	435.2	0.01
	SW	4.1	3.6	1.2	474.0	0.25
地際直径		9.0	0.8	11.8	831.3	0.00

カラマツ

項目		推定値	std.error	t値	自由度	P値
切片		-13.6	2.9	-4.7	155.4	0.00
斜面方位	S	6.0	3.1	1.9	88.9	0.06
	SW	-13.9	1.6	-8.5	35.6	0.00
地際直径		31.0	1.2	26.3	71.9	0.00
C区分		1.9	0.8	2.5	517.5	0.01

:効果のある項目
:効果の方向と大きさ
※数値が大きければ効果は大きい
※＋－は効果の方向
:P値

※表の読み方は、表 5-1 に準じる。

(3)　考察

植栽木の樹高成長量（植栽時～平成 30 年度）について、植栽後数年間は樹種を問わず地際直径が大きく影響を与えることがわかった。また、斜面方位も影響を与えているが、特定の方位で成長がよいという結果ではないため、植栽地ごとの斜面方位以外の要因（例えば、肥沃度・水分状況・気象条件等）も関与している可能性が考えられる。

植栽密度は、スギ・カラマツにおいては影響が見やれなかった。一方で、ヒノキにおいては植栽密度による影響が検出されているが、林冠閉鎖前の段階においては、植栽密度に

よる影響はないものと考えられることから、別の隠れた要因によるものと考えられる。

<u>＜解析結果への意見＞※第３回検討委員会より</u>

・全体的な傾向は捉えられていると思われるが、調査地間での差が大きいため、調査地ごとの解析も必要であると考える。

・切片を設定しなければ、全ての項目にどのような影響が出ているかがわかるのではないか（切片なしモデルの利用）。

・本結果に、個別の調査地での解析結果をあわせ、わかりやすくまとめると、両方が有効に生きてくると考える。

・統計解析によると、一般的にはこういう傾向があるという程度にしておいた方がよい。

(4)　今後について

解析結果への意見を踏まえ、次年度については、調査地ごとに解析を行い、樹高成長量に影響する要因についての地域特性を把握し、その結果を指針に活用する。

5－2.　下刈り実施に関する解析

これまでの議論の中で、低密度植栽後の下刈りの際に起こりうる事象として、以下のような意見があった。しかし、過年度までの下刈りの分析にあたって、コストに関しては作業日報をベースとして、植栽地全体の下刈り時間・日数しか把握ができていない状態であった。また、誤伐については発生本数と生存状況しか把握でできていない状態であった。

＜これまでの議論の中での想定された事象＞

・低密度植栽であると、下刈り作業者が幅の広い植栽間隔に慣れていないため、作業に時間がかかる、かつ誤伐の発生が誘引されるのではないか。

そこで、本年度については、各調査地の植栽密度ごとの各プロット内において、下刈りの時間を計測し、植栽密度により下刈り時間や誤伐に違いがあるかを分析した。

5－2－1. 下刈りの時間分析

(1)　調査方法

前項、「4-1.調査概要（P33）」内、「②下刈りの実証調査」参照

(2)　解析方法

「下刈り時間」に対して、「植栽密度」が与える影響とその地域差について、一般化線形モデル（GLMs）[5]を用いて解析した。目的変数を「下刈り時間」とし、説明変数を「植栽密度」と「地域（市町村）」とした。モデル式は、以下のように表される。解析にあたっては、R（ver3.5.2）を利用した。

下刈り時間　～　植栽密度　＋　地域

(3)　解析結果

解析結果を表 5-3 に示す。緑枠は、下刈り時間に影響を与えている要因である。解析の結果、植栽密度と地域差ともに下刈り時間に影響を与えていることがわかった（図 5-3）。

植栽密度による影響について、植栽密度別に平均時間を計算したところ、1,100 本/ha 植栽地で 1,265 秒/ha、1,600 本/ha 植栽地で 1,557 秒/ha、1,700 本/ha 植栽地で 2,171 秒/ha（１地域のみなので参考値）、2,500 本/ha 植栽地で 1,648 秒/ha であった。

また、地域差による影響について、最も下刈り時間が短い椎葉村は、植栽密度が 1,100 本/ha で 13.6 分/ha と推定され、最も下刈り時間が長い盛岡市では、植栽密度が 1,100 本/ha で 37.9 分/ha と推定され、その差は 24.3 分/ha であった。

---

[5]固定効果（fixed effect）のみで線形の回帰を行う統計学的モデル。正規分布以外の誤差構造も統合的に扱うことができる。

(4)　考察

解析の結果から、表 5-3 より葛巻市を基準に下刈り時間の推定値を計算[6]すると、植栽密度が 1,100 本/ha で 32.5 分、2,500 本/ha で 34.9 分となり 2,500 本/ha の方が 2.4 分/ha 程度の時間増となることがわかった。しかし、低密度植栽地の方が下刈り時間が長くなる地域も見られたことから、その他の要因も下刈り時間に影響を与えていると考えられる（図 5-3）。

また、地域により下刈り時間の地域差が非常に大きいこと（表 5-3、図 5-3）については、ヒアリング結果より下刈り時間に影響を与える要因として、「地形要因」や「雑草木の状況（苗が見えているかどうか）」等が影響していることが指摘されている。さらに「経験年数」が影響している可能性が考えられる（後述）。これらの影響が組み合わさり、地域差として現れていると考えられる。

表 5-3　植栽密度と地域と下刈り時間の結果

項目		推定値	std.error	t値	p値
切片		1842.5	167.6	11.0	0.00
植栽密度		0.1	0.1	2.1	0.04
市	葛巻市（切片）				
	吉備中央町	-854.5	169.2	-5.1	0.00
	薩摩川内市	238.1	168.2	1.4	0.16
	四万十町	-1168.4	169.2	-6.9	0.00
	紫波町	-993.4	168.2	-5.9	0.00
	盛岡市	323.2	169.2	1.9	0.06
	大紀町	134.3	176.5	0.8	0.45
	大村市	-370.8	176.5	-2.1	0.04
	椎葉村	-1139.5	169.2	-6.7	0.00
	登米市	-785.0	169.2	-4.6	0.00
	都城市	-765.3	157.5	-4.9	0.00
	東彼杵町	-462.8	169.2	-2.7	0.01
	日立市_スギ	-727.3	169.2	-4.3	0.00
	日立市_ヒノキ	-798.7	169.2	-4.7	0.00
	美里市	-17.0	168.2	-0.1	0.92

※表の読み方は、表 5-1 に準じる。

[6] 下刈りの推定値は、1842.5 + 0.1×「植栽密度」　＋　「地域（市）の推定値」で計算できる。

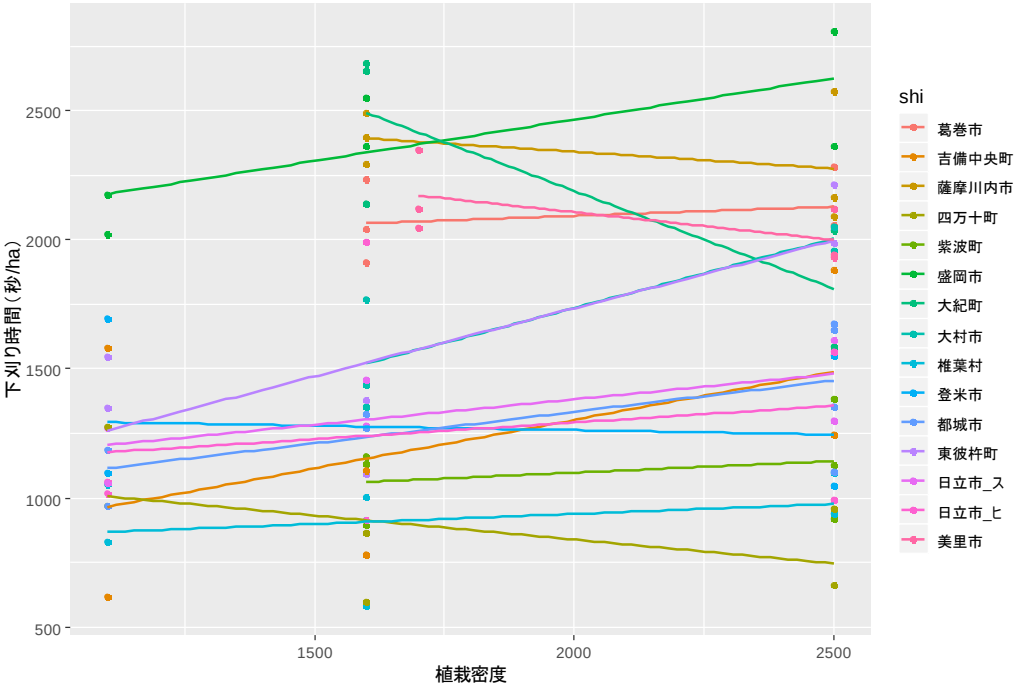

図 5-3　植栽密度と下刈りの関係

（参考）

どのような要因が下刈り時間に影響を与えるかを考えるにあたり、経験年数について全ての調査地のデータを用いて検討した。地域や個人の技術による状況の違いもあるため、あくまで参考であるが、経験年数が 10 年程度の作業者の場合、下刈り時間が安定せず、５年未満の作業者の場合下刈り時間が長くなる傾向が見られた（図 5-4）。なお、作業者の経験年数の内訳は図 5-5 に示す通りである。

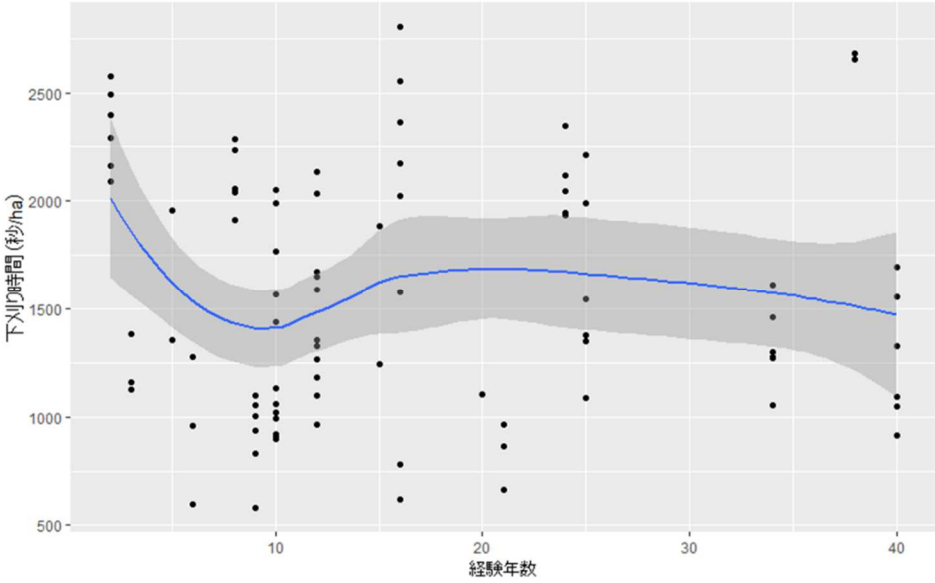

図 5-4　経験年数と下刈り時間の結果

青線：平滑化シュプライン（灰色：95%信頼区間）

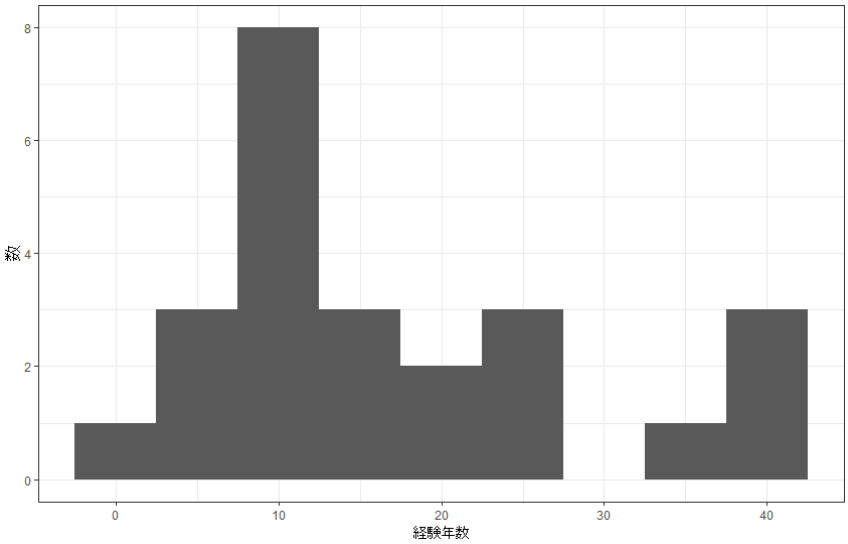

図 5-5　作業者の経験年数の内訳

5－2－2.　　誤伐の発生状況

(1)　調査方法

前項、「4-1.調査概要（P33）」内、「①追跡調査」実施時に、誤伐の発生を確認するとともに、「②下刈りの実証調査」内ヒアリングの実施時に誤伐についての作業者の意見をとりまとめた。

(2)　解析方法

「誤伐の発生確率」に対して、「植栽密度」、「地域」、「雑木の繁茂度[7]（C 区分指数）」が与える影響について、「一般化線形モデル（GLMs）」を用いて解析した。目的変数として「誤罰の発生確率（誤伐数：健全木数）」、説明変数を「植栽密度」、「地域」、「雑木の繁茂度（C 区分指数）」とした。誤差構造は、二項分布を仮定した。モデルは以下の式のように表される。

（誤伐数：健全木数）　～　植栽密度　＋　地域　＋　C 区分指数

モデルを後方ステップワイズ法によって AIC 基準によるモデル選択を行い、最善モデルを選択した。

(3)　解析結果

解析の結果、誤伐に対して植栽密度は影響を与えないことがわかった。また、各地域での発生数に大きなばらつきが見られた（表 5-4、図 5-6 図 5-6　誤伐の発生状況）が、誤伐に対して地域の差も影響がなかった。

---

[7] 調査プロットの雑木の繁茂度合いを示すために、プロット内の植栽木の C 区分データから以下の式で C 区分指数を求め、調査プロットの繁茂度とした。
C1C2×1.5　＋　C3×2　＋　C4×4

表 5-4　誤伐の発生状況

		植栽密度			
地域	樹種	1100本	1600本	1700本	2500本
岩手県紫波町	カラマツ	設定なし	0	設定なし	1
岩手県盛岡市	カラマツ	0	0	設定なし	0
岩手県葛巻市	カラマツ	設定なし	3	設定なし	1
宮城県登米市	スギ	1	1	設定なし	4
三重県大紀町	ヒノキ	設定なし	0	設定なし	0
長崎県大村市	スギ	設定なし	3	設定なし	2
長崎県東彼杵町	スギ	0	1	設定なし	2
熊本県美里市	スギ	設定なし	設定なし	8	2
宮崎県椎葉村	スギ	1	0	設定なし	2
鹿児島県薩摩川内市	スギ	設定なし	3	設定なし	0
茨城県日立市（国有林）	ヒノキ	3	12	設定なし	3
茨城県日立市（民有林）	スギ	4	1	設定なし	5
岐阜県高山市	カラマツ	0	0	設定なし	0
岡山県吉備中央町	ヒノキ	0	1	設定なし	1
高知県四万十町	ヒノキ	0	0	設定なし	2
宮崎県都城市（大苗）	スギ大苗	2	0	設定なし	2
宮崎県都城市	スギ普通苗	0	0	設定なし	1
北海道下川町	カラマツ	0	0	設定なし	0
秋田県由利本荘市	スギ	1	0	設定なし	0
富山県立山町	スギ	0	1	設定なし	0
	平均	0.9	1.4	8.0	1.4

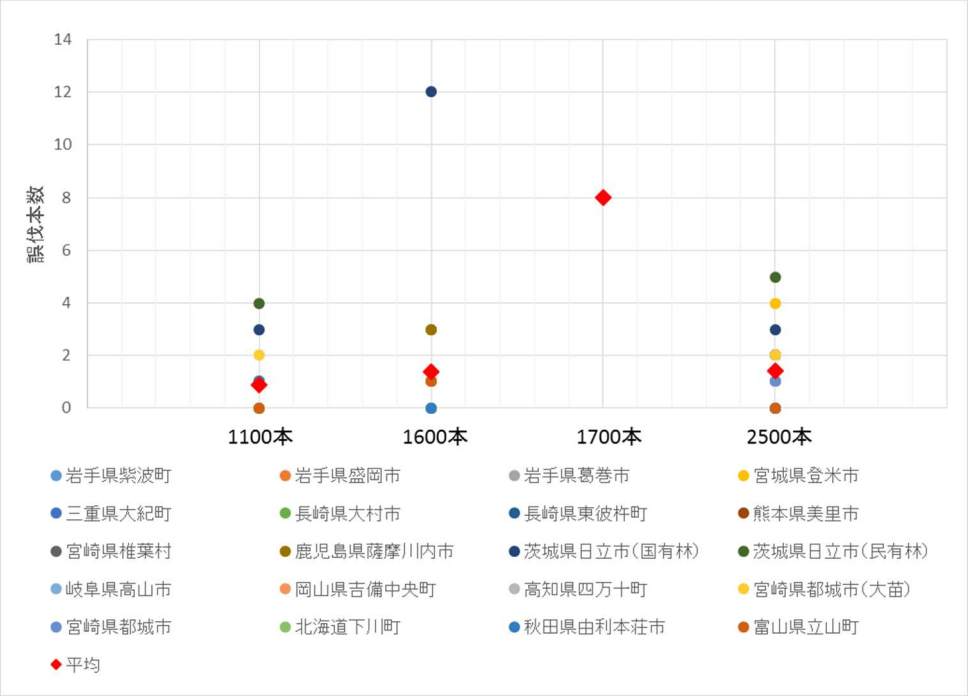

図 5-6　誤伐の発生状況

モデル選択の結果、誤伐に対して影響がある要因は、C 区分指数（雑草木の繁茂度）であった（表 5-5）。C 区分が競合状態（C4）になるほど、誤伐率が上がる傾向が見られた（図 5-7）。この結果は、ヒアリングより得られた、植栽木の目視確認ができない箇所において下刈りの実施は難しくなり、注意が必要となるという証言を裏付けるものである。

表 5-5　誤伐と C 区分指数（雑木の繁茂度）の関係

項目	推定値	std.error	t値	p値
切片	-5.50	0.70	-7.81	0.00
C区分指数	0.62	0.26	2.35	0.02

※表の読み方は、表 5-1 に準じる。

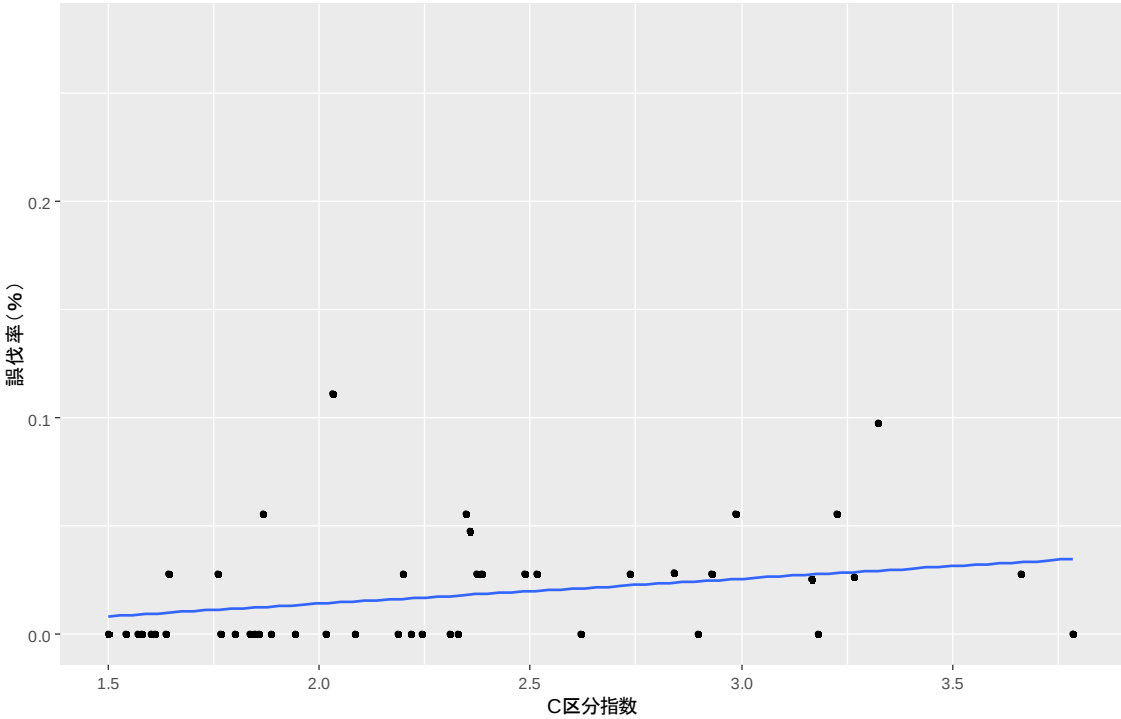

図 5-7　誤伐と C 区分の関係