

ISSN 2436-441X

研 究 報 告

第 3 3 号

2 0 2 6 . 3

秋田県林業研究研修センター

目 次

低密度植栽に対応したスギ人工林新施業体系

..... 新田 響平 1~28

低密度植栽に対応したスギ人工林新施業体系

新田響平

Establishment of new systems for low-density planting of Japanese cedar forest in Akita

Kyohei Nitta

要 旨

低密度植栽に対応した施業体系を作成するため、従来の密度 3,000 本/ha を下回って植栽された試験地において、サイズや樹形、諸被害等に関する調査を実施した。22 年生時点での調査結果から、植栽木同士の競合は近年生じており、肥大成長等への影響は、隣接木よりも下刈り後に成長した広葉樹による影響が大きいと推察された。しかし、その影響は植栽木の形質悪化にはつながっておらず、除伐の必要性は低いと考えられた。雪害等の諸被害について評価した結果、欠点のない健全な植栽木は 1,000 本/ha の試験地で収穫表 50 年伐期時点の本数をすでに下回り、この密度以下では将来的な収穫量の確保は難しいと判断された。この結果等を踏まえ、植栽密度の下限値は 1,500 本/ha と設定した。スギ樹冠の多点調査の結果から、林齢と樹冠半径及び枝下高の関係について、3 つの地位級と 4 つの密度区分で予測モデルを作成した。また間伐試験地において、間伐前後と 8~9 年後に樹冠の調査を実施し、樹冠の水平方向の樹冠成長速度についての予測モデルを構築した。これら予測モデルを使い、樹冠の成長と発達に基づく間伐時期などを決定し、代表として「地位中」の立地における並材生産を想定した低密度植栽施業体系を作成した。この施業体系では従来の施業体系に比較して間伐回数が少なくなり、植栽時のみならず、収穫までのトータルコストの削減につながる可能性が示された。

I. はじめに

秋田県におけるスギ人工林面積の齢級構成は 11 齢級が最も多い一山型となっている（秋田県農林水産部, 2023）。これは若齢なスギ人工林が相対的に少ないことを意味しており、将来的に利用しやすい径級の木材の供給が少なくなることが予想される。このことから、主伐と再生林を進め、安定的な木材供給に対応できるように齢級構成の平準化を進めていく必要がある。

再生林を進めるにあたり、林業の収益性の低さが大きな課題である。収穫しても再生林経費をまかなうほどの収益が望めない場合も多い。実際、日本国内における再生林放棄の主な要因は経済的理由であるとされている（松本ら, 2015）。この背景には木材価格の低迷と高い造林コストという 2 つの課題が存在している。前者については制御が難しいことから、後者の、造林コストの低減に向けた様々な取り組みが全国各地でなされてきた。

造林コストは植栽後の下刈りや除伐等を実施する初期 10 年間で全体の 7 割を占めるとされる（松本ら, 2015）。このことから低コスト化に向けた研究や取り組みは造成・保育時期を中心に進められてきた。

1 具体的には新しい苗木生産技術の開発（コンテナ苗など）、下刈りの省略技術、一貫作業システムなど
2 がある（山川ら, 2016; 中村ら, 2019; 福本ら, 2021 など）。秋田県を含む東北地方の再生林の低コスト化
3 の取り組みは森林総合研究所東北支所（2016）にまとめられており、従来に比較して最大4割のコス
4 ト低減につながる事が報告されている。

5 造林コスト低減の手法として低密度植栽がある。森林総合研究所東北支所（2016）では苗木代や植栽
6 コストの削減技術として注目されているが、当該技術は生産目標や施業体系全般により大きな変化を
7 もたらず技術である。従来、スギ造林の植栽密度は3,000本/ha程度で、間伐を繰り返すことを基本と
8 してきた。これは無節柱材の優良材生産を目指した施業体系である（寺岡, 2009）。しかし近年の木材
9 需要は製材用よりも合板等の並材用の生産量の割合が相対的に高くなってきており（秋田県農林水産
10 部, 2023）、従来の施業体系の生産目標とは食い違いが生じている。言い換えれば、材質にこだわる必
11 要性は低くなってきており、3,000本/haという植栽密度から良質材を目指すのではなく、最初から低
12 い植栽密度で造林し、並材を目標林型とすることも選択肢の一つとなる。このとき、低密度植栽は単
13 なる初期造成コスト低減のための技術としてではなく、並材生産のための造林技術としてより大きな
14 意味をもつ。このため、低密度植栽と並材生産を結びつける新たな施業体系を検討する必要がある。

15 低密度植栽試験について、佐々木ら（2009）は広島県において異なる4段階の密度でヒノキを植栽
16 し、34年生時点での調査結果から、植栽密度の林木の成長や材質に及ぼす影響について報告している。
17 ここでは、形質面で大きく劣らず、初期造林人工の低減ができるという点で植栽密度は1,500本/ha以
18 上と提案している。また34年生時でも1,000本/ha植栽では林冠が閉鎖していないことも報告してい
19 る。福地ら（2011）は宮崎県におけるオビスギ植栽密度試験地の結果から、極端な低密度植栽は材積
20 とヤング率の低下を招くために、適切な植栽密度は2,000~2,800本/haであると報告している。八坂
21 （2013）は北海道におけるグイマツ雑種F₁の4段階の植栽密度試験地の結果から、低密度植栽は肥大
22 成長を促進し、カラマツの主要な用途である梱包材や合板に適した径級の丸太の生産性向上に寄与す
23 ると報告している。これらの報告は積雪地帯である秋田県のスギ林にそのまま適用できる知見ではな
24 いが、材質・材積収穫の面で植栽密度には下限値がある、そして、林冠閉鎖までに従来よりも年数を
25 要するといった低密度植栽の特徴を提示しているといえる。

26 野口・和田（2017）は秋田県における低密度植栽試験地の11年生時点での調査結果を報告している。
27 そこでは最も密度の低い1,000本区で形質不良木の発生が多いこと、1,000本区や2,000本区では天然
28 更新木が多くなり除伐の労力が大きくなる可能性があることなどを指摘している。このことから、秋
29 田県においても低密度植栽を実施するにあたっては植栽密度の下限のほか、スギ植栽木と天然更新木
30 の生育状況から除伐の可否と強度について検証する必要がある。

31 さらに野口・和田（2017）は既往の研究同様、植栽密度によって林冠閉鎖までの年数に差があるこ
32 とを報告している。林冠閉鎖までの年数の違いは初回間伐までの年数の違いを表している。初回間伐
33 までの年数が長くなれば、主伐までの間伐回数が低減することが予想され、植栽から主伐までのト
34 タルコストの低減につながる可能性がある。

35 間伐は密度管理と選木の技術であり、林分の個体にどの程度の樹冠を与えていくかという樹冠管理
36 技術である（藤森, 2010）。低密度植栽を実施した場合、樹冠の発達が従来の3,000本/ha植栽とは異な
37 ることは容易に想像できる。さらに、2回目、3回目以降の間伐後の樹冠の発達・成長の過程について

1 も従来の施業体系の想定とは異なるものとなり、それぞれ個別に樹冠の発達・成長をもとに間伐に適
2 した時期を見極める必要がある。このとき、様々な密度状況における樹冠の発達・成長の時系列変化
3 を把握することができれば、任意の植栽密度における林冠閉鎖までの年数や間伐と間伐の間の年数を
4 予測することが可能となる。

5 梶原（1975, 1976a, 1976b, 2020）はスギ同齢林における調査結果から、立木密度によって樹冠形状
6 （枝下高や樹冠幅）の発達に差が生じることを報告している。また大分県のスギ皆伐林における樹冠
7 の空間占有状態の経年変化を報告しており、他の樹種での研究結果から、林分全体での樹冠の総量は
8 密度によってあまり変わらない可能性を指摘している。また水永（1992）は林冠動態モデルを考案し、
9 シミュレーションにより間伐後の林冠表面形状の変化を予測している。しかし、これらの研究例にお
10 いては任意の林齢と密度という比較的単純な2つの指標を併せたときに樹冠形状がどう変化するか
11 という、より一般化されたモデル等は提示されていない。

12 本研究では樹冠形状の経年変化に基づく低密度植栽に対応した新しい施業体系を作成することを目
13 的とした。立木密度と林齢の増加に伴う樹冠の変化に着目し、①低密度植栽試験地での継続調査、②
14 様々な林齢のスギ人工林多点樹冠調査、さらに③間伐後の枝の成長速度に関する調査を実施した。

15 II. 調査地と調査方法

16 1. 低密度植栽試験地調査

17 1) 調査地

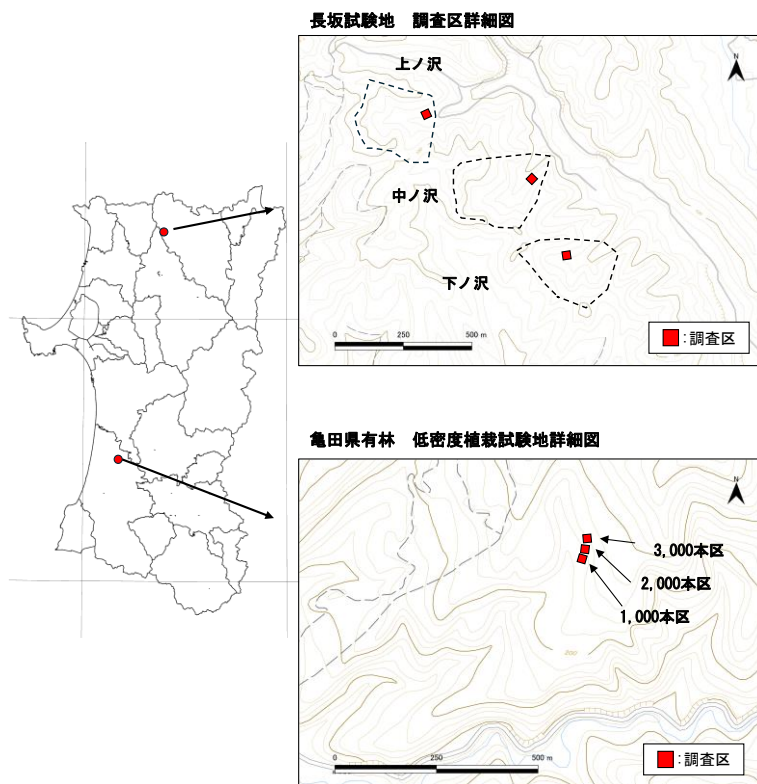
18 調査地は秋田県由利本荘市岩城亀田に位置する亀田県有林内に設定された低密度植栽試験地（総面
19 積 1.14ha）である（図-1）。最寄りの気象観測所（大正寺；調査地から約 8km）における年降水量は
20 2,089mm、年平均気温は 10.6℃である（1991-2020 年平均値（気象庁, 2026））。試験地は 1998 年に 61
21 年生のスギ人工林を皆伐した跡地であり、植栽に先立って人力で枝条を筋状に整理する地拵えが実施
22 された。その後、面積が概ね等しくなるように 1,000 本区（0.50ha）、2,000 本区（0.50ha）、3,000 本区
23 （0.44ha）の3つの植栽区が設定された（野口・和田, 2017）。2004 年 4 月に 1,000 本区内に 1,000m²
24 （40×25m）、2,000 本区内に 500m²（25×20m）、3,000 本区内に 400m²（20×20m）の調査プロットを
25 設置した。このほか試験地の保育等の情報は野口・和田（2017）による。

26 2) 毎木調査

27 植栽後 22 年目にあたる 2024 年 5 月に、3つの調査プロットにおいて植栽されたすべてのスギと胸
28 高直径（ D_{BH} ）3cm 以上の広葉樹を対象に調査を実施した。調査項目は樹種、胸高直径、樹高、枝下高、
29 樹冠半径のほか、スギ植栽木については諸被害などについても記録した。胸高直径は地上から 1.3m の
30 高さで直径巻尺かノギス、樹高及び枝下高はレーザー測高器（Impuls200: Laser Technology 社製）ある
31 いは検測桿を用いて測定した。樹冠半径は斜面に対して上下左右の4方向について胸高から赤白ポー
32 ルを用いて 10cm 単位で測定した。

33 植栽密度の違いが植栽木の成長や形質に与える影響を評価するため、胸高直径、枝下高、形状比（樹
34 高/胸高直径）、樹冠半径について、植栽区間の差違について一元配置分散分析を実施した。データの
35 等分散性が成立していない場合は分散分析に代えて Welch の検定を実施した。多重比較には Bonferroni
36
37

1 の方法による補正を用いた。これに加えて、樹冠半径については各区の植栽間隔の 1/2 (1,000 本区約
2 1.6m, 2,000 本区約 1.1m, 3,000 本区約 0.9m) と比較した。さらに、スギ植栽木と広葉樹それぞれで
3 樹高階別ヒストグラムを作成し、区内で階層構造を比較した。これら統計解析は統計ソフト R4.5.0 (R
4 Core Team, 2025) を使用した。
5



図一 1 低密度植栽試験地及び長坂試験地位置図と調査区配置図

6

7 3) 材質調査

8 植栽密度の違いによる材質への影響を検討するため、植栽後 20 年目にあたる 2020 年 4 月に調査プ
9 ロット内の、諸被害のないスギ上層木 20 本をそれぞれ抽出し、その樹高と胸高直径を測定するととも
10 に応力波伝播速度を測定した。樹高はレーザー測高器、胸高直径は地上高 1.3m で直径巻尺を用いて測
11 定した。応力波伝播速度は FAKOPP (FAKOPP 社) を用いて、斜面に対して幹の左右、すな
12 わち等高線方向の両側で、かつ胸高部位から上下 50cm の部位にセンサーを打ち込み、両側 3 回ずつ
13 計 6 回測定し、その平均値を個体の測定値とした。測定値をもとに単位距離である 1m あたりの応力
14 波伝播速度(m/s)を計算した。

15 応力波伝播速度を応答変数、植栽区、胸高直径および樹高を説明変数としてモデル化し、説明変数
16 の影響力を解析した。応力波伝播速度の確率分布は 0 以上の対数正規分布であると仮定し、応答変数
17 を対数変換した後、1 次の交互作用を考慮して 1m 関数でモデル化した。その後、MASS パッケージの
18 stepAIC 関数を用いて AIC に基づく変数選択を実施し、AIC 最小のモデルを最適モデルとした。これ
19 ら統計解析は統計ソフト R4.5.0 を使用した。

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17

2. スギ樹冠の多点調査

1) 調査地・調査方法

調査は秋田県内の8~93年生のスギ人工47林分で実施した(表-1)。調査地内において上層林冠を構成する任意のスギ個体(対象個体)を選定し、その樹高と胸高直径を調査した。その後、対象個体との間に伐根や被圧木がなく、かつ上層林冠を構成する隣接スギ個体(隣接個体)を選定し、対象個体における隣接個体方向の樹冠半径と枝下高並びに個体間水平距離をレーザー測高器で計測した(図-2)。調査後は森林簿の情報から対象個体の林齢を整理するとともに秋田県森林技術センター(2013)に基づき地位級を5区分で判定した。また個体間水平距離から対象木と隣接木との換算密度(本/ha: $10000/\text{個体間水平距離}(\text{m})^2$)を算出した。

データ数を確保するため、1.1)の低密度植栽試験地の調査データも活用した。本研究で計測された2024年データに加え、同様の方法で計測された2013年、2020年データを解析対象とした。当該試験地において、個体の枝下高や樹冠半径は設計密度の影響を反映していると想定し、隣接個体方向の枝下高は個体の測定値を、隣接個体方向の樹冠半径は個体樹冠半径平均値を、隣接個体との距離は植栽間隔(1,000本区3.2m, 2,000本区2.2m, 3,000本区1.8m)として解析データに含めた。

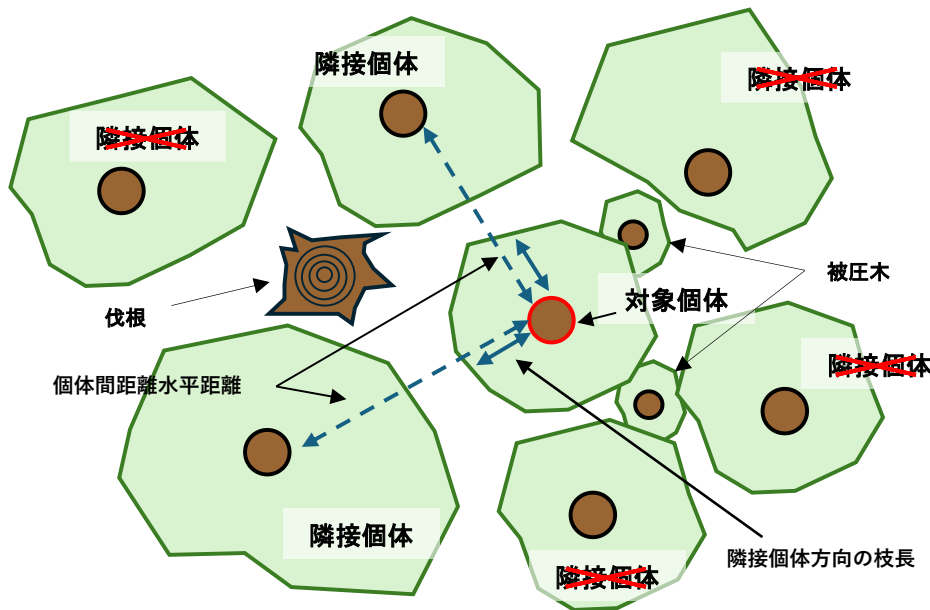


図-2 スギ樹冠多点調査の模式図

赤縁茶色はスギ対象個体、黒縁で茶色がスギ隣接個体候補、緑縁で黄緑の範囲がスギ樹冠の範囲を示している。取り消し線のある隣接個体は、対象個体との間に被圧木や伐根があるため、個体間距離などを計測する対象とならないことを示している。

18
19

表一 1 スギ樹冠多点調査実施箇所

調査地名	市町村	地名	林小班	調査時林齢	調査年
秋田_01	秋田市	下浜羽川	298-108	22	2020
秋田_02	秋田市	河辺北野田高野	12-19-5	35	2020
秋田_03	秋田市	河辺北野田高野	12-14	41	2020
秋田_04	秋田市	河辺北野田高野	20-1-1	33	2020
秋田_05	秋田市	河辺北野田高野	18-75	27	2020
秋田_06	秋田市	河辺北野田高野	19-16-1	37	2022
秋田_07	秋田市	雄和種沢釜ヶ沢	55-16-00	32	2023
秋田_08	秋田市	雄和平尾鳥柳沢	39-13-2	28	2023
秋田_09	秋田市	雄和萱ヶ沢	71-20	55	2023
秋田_10	秋田市	雄和萱ヶ沢	71-22	87	2023
秋田_11	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-1	73	2023
秋田_12	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-18	76	2023
秋田_13	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-19	63	2023
秋田_14	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-20	63	2023
秋田_15	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-21	62	2023
秋田_16	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-28	59	2023
秋田_17	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-29	69	2023
秋田_18	秋田市	雄和平尾鳥西ノ沢	34-50	93	2023
秋田_19	秋田市	雄和平尾鳥西ノ沢	34-50-1	44	2023
秋田_20	秋田市	雄和平尾鳥西ノ沢	34-51-1	49	2023
秋田_21	秋田市	雄和平尾鳥田ノ沢	29-93	61	2023
秋田_22	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-48	58	2023
秋田_23	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-49	56	2023
秋田_24	秋田市	雄和平尾鳥田ノ沢	29-93	61	2023
秋田_25	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-49	56	2023
秋田_26	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-50	88	2023
秋田_27	秋田市	雄和平尾鳥小平	28-50-1	50	2023
羽後_01	羽後町	西馬音内堀回天拝山	73-15	70	2021
羽後_02	羽後町	田沢館ノ下	5-96	79	2021
仙北_01	仙北市	田沢湖卒田字柴倉	17-29	14	2020
仙北_02	仙北市	田沢湖卒田字柴倉	17-30	14	2020
仙北_03	仙北市	田沢湖卒田字梅沢東田	14-137	66	2023
仙北_04	仙北市	田沢湖卒田字梅沢東田	14-138	84	2023
能代_01	能代市	大台野	89-10	75	2023
能代_02	能代市	大台野	89-8	75	2023
能代_03	能代市	大台野	89-9	64	2023
八峰町_01	八峰町	峰浜水沢	30-63	8	2021
八峰町_02	八峰町	峰浜手這坂	35-34	8	2021
東成瀬_01	東成瀬村	椿川	31-17-46	57	2023
東成瀬_02	東成瀬村	椿川	31-22	57	2023
東成瀬_03	東成瀬村	椿川	31-25	57	2023
藤里_01	藤里町	粕毛下鴨助岱	21-53	66	2021
藤里_02	横手市	増田町狙半内大黒沢	30-65	37	2021
由利本荘_01	由利本荘市	矢島町木材桜山	11-159	81	2021
由利本荘_02	由利本荘市	矢島町木材桜山	11-162	54	2021
由利本荘_03	由利本荘市	岩城福俣小滝ヶ沢	77-1-13	78	2023
由利本荘_04	由利本荘市	岩城福俣池ノ沢	79-9-2	26	2023

1 2) 解析

2 解析に先んじて5つに区分された地位級について地位1, 2等を「地位上」、地位3等を「地位中」、
3 地位4, 5等を「地位下」の3つに再区分した。また換算密度についても1,000本/ha未満, 1,000本/ha
4 以上2,000本/ha未満, 2,000本/ha以上3,000本/ha未満, 3,000本/ha以上の4つに区分した。

6 (1) 樹冠半径の伸長速度

7 林齢の増加に伴う樹冠半径の伸長速度を評価するため、林齢と樹冠半径の関係について散布図を作
8 成した。これらのデータの観察から樹冠半径伸長モデルを検討するにあたり次の仮定を設けた。

9 ① ある方向の樹冠半径は、その方向に競合する個体があれば、林齢の増加とともに生理的限界
10 までは直線的に増加する。

11 ② ある方向の樹冠半径は、その方向に競合する個体があれば、成長に伴い、ある林齢の段階で競
12 合個体と接し、その後、成長は鈍化ないし停止、あるいは低下する。

13 この2つの仮定をもとに、林齢と樹冠半径の関係について、ある林齢で、傾きと切片が異なる2つ
14 の1次関数式いずれかを採用するモデルを3つの補助関数(式-1~3)と1つの目的関数(式-4)
15 により定義した。当該モデルについて統計ソフトR4.5.0のoptim関数により、地位級3区分、換算密
16 度4区分の計12の組み合わせ全てにおいて、残差平方和が最小となるよう繰り返し計算を実施し、
17 パラメータを推定した。

$$19 \quad f_1(t) = 0 (t < a), \quad f_1(t) = 1 (t \geq a) \quad (\text{式-1})$$

$$20 \quad f_2(t) = b_1 * t + c_1 \quad (\text{式-2})$$

$$21 \quad f_3(t) = b_2 * t + c_2 \quad (\text{式-3})$$

$$22 \quad B_L(t) = (1 - f_1(t)) * f_2(t) + f_1(t) * f_3(t) \quad (\text{式-4})$$

24 ただし、 t は林齢、 $B_L(t)$ は林齢 t における樹冠半径(m)、 a , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 は推定するパラメータを
25 それぞれ示す。

27 (2) 枝の枯れ上がり速度

28 林齢の増加に伴う枝の枯れ上がり速度を評価するため、林齢と枝下高の関係について散布図を作成
29 した。その後、林齢と枝下高の関係について、林齢と樹高の関係にも適用される原点を通るRichards
30 成長関数(Richards, 1959)(式-5)を適用した。統計ソフトR4.5.0のoptim関数により、地位級3区
31 分、換算密度4区分の計12の全ての組み合わせにおいて、残差平方和が最小となるよう繰り返し計
32 算を実施しパラメータを推定した。

$$34 \quad B_{H_t} = a * (1 - \exp(-b * t))^c \quad (\text{式-5})$$

36 ただし、 t は林齢、 B_{H_t} は林齢 t における枝下高、 a , b , c は推定するパラメータ、 \exp は指数関数
37 をそれぞれ示す。

3. 間伐後の樹冠成長量調査

1) 調査地・調査方法

調査は秋田県大館市長坂地内の県有林にある長坂試験地で実施した(図-1)。長坂試験地は標高90~170mの低山地にあり、上ノ沢(6.55ha)、中ノ沢(7.52ha)及び下ノ沢(6.50ha)の3流域からなる。代表的な地質は第三紀凝灰岩、土壌は淡色性黒ボク土壌および適潤性褐色森林土壌である。当該試験地の主たる林相はスギ人工林であり、上ノ沢と中ノ沢は1963年に、下ノ沢は1970年に植栽され、1987年から1995年の間に除伐や間伐が実施されている。その後、森林伐採などの地表被覆状態の変化が水流出に与える影響を評価する目的で2002年に森林水文試験地としての観測が開始された(金子ら、2010)。

水文観測開始後、3流域では1ないし2回の試験的間伐が実施された(表-2)。具体的には、2006年から2007年冬期(第1期)にかけて上ノ沢と下ノ沢で本数伐採率50%、2016年から2017年夏(第2期)にかけて上ノ沢で再度本数伐採率50%、中ノ沢で30%の間伐が実施された。第1期においては中ノ沢が、第2期では下ノ沢が対照区として設定され、間伐を実施していない。

間伐後の樹冠成長量の調査は、この履歴の異なる3流域において、第1期と第2期の試験期間における間伐後の樹冠の成長に着目して実施した。3流域に25m×20mの方形区を設定し、間伐後の2007年と第2期の処理直前である2016年、第2期処理後の2024年に毎木調査を実施した。調査間隔は第1期が9年、第2期が8年である。調査は調査区内の上層林冠を構成しているすべてのスギ立木及び広葉樹を対象に実施した。ナンバーテープによる個体識別を実施するとともに調査区内の相対位置、樹種、胸高直径(測定高1.3m)、樹高について調査した。胸高直径は2007年と2016年は直径巻尺で測定、2024年は周囲長スチールメジャーで測定し、表計算ソフト上で円周率を除いて算出した。樹高はレーザー測高器を用いて測定した。樹冠の成長量を評価するため、立木位置を中心として8方向の樹冠半径をレーザー測器で測定した。調査区内の相対位置データをもとに、樹冠半径を測定した8方向(45°の範囲内)に存在する最も近接する林冠構成個体との距離を算出し、その方向における換算密度を計算した。

第1期ならびに第2期それぞれについて、隣接個体方向の樹冠半径の年平均相対成長量を次式により算出した。

$$\text{第1期の隣接個体方向の樹冠半径の相対成長量} = (\ln \text{樹冠半径}_{2016} - \ln \text{樹冠半径}_{2007}) / (2016 - 2007)$$

$$\text{第2期の隣接個体方向の樹冠半径の相対成長量} = (\ln \text{樹冠半径}_{2024} - \ln \text{樹冠半径}_{2016}) / (2024 - 2016)$$

これら樹冠半径の相対成長率を個体サイズとともに整理した。すなわち、1個体あたり、最大8方

表-2 長坂試験地における間伐履歴と間伐強度

流域	第1期		第2期	
上ノ沢	2006-2007冬	本数50%	2016-2017冬	本数50%
中ノ沢			2017夏	本数50%
下ノ沢	2006-2007冬	本数50%		

1 向の相対成長量が存在するように集計した。

2 2) 解析方法

3 解析は統計ソフト R4.5.0 で実施した。第 1 期と第 2 期の区別なく、樹冠半径の相対成長量を応答
4 変数、期首直径 (第 1 期は 2007 年, 第 2 期は 2016 年データ), 期首樹高 (期首直径に同じ) および換
5 算密度を説明変数として多変量解析を実施した。説明変数間の相関分析を実施した後, 多重共線性を
6 排除するため, prcomp 関数を用いて主成分分析を実施した。その後, 抽出された主成分を説明変数と
7 してパッケージ tree の tree 関数で回帰樹を作成し, 交互作用の次元を検討した。また変数間に曲線関
8 係があるか検討するため, lm 関数で 2 次項を含む一般線形モデルを作成した。これらを踏まえ, 3 次
9 の交互作用項と 2 次項を含むモデルを最大モデルとして lm 関数で解析した後, MASS パッケージの
10 stepAIC 関数を用いて変数選択を実施し, AIC が最小となるモデルを最適モデルとした。本研究では
11 任意の個体と隣接木との競合関係に注目し, 3 流域の違いは考慮しなかった。また林齢の違いは個体
12 サイズと関係していると考えられるため, 多重共線性の視点から解析には含めなかった。

14 Ⅲ. 結果

15 1. 低密度植栽試験

16 1) 毎木調査の概要

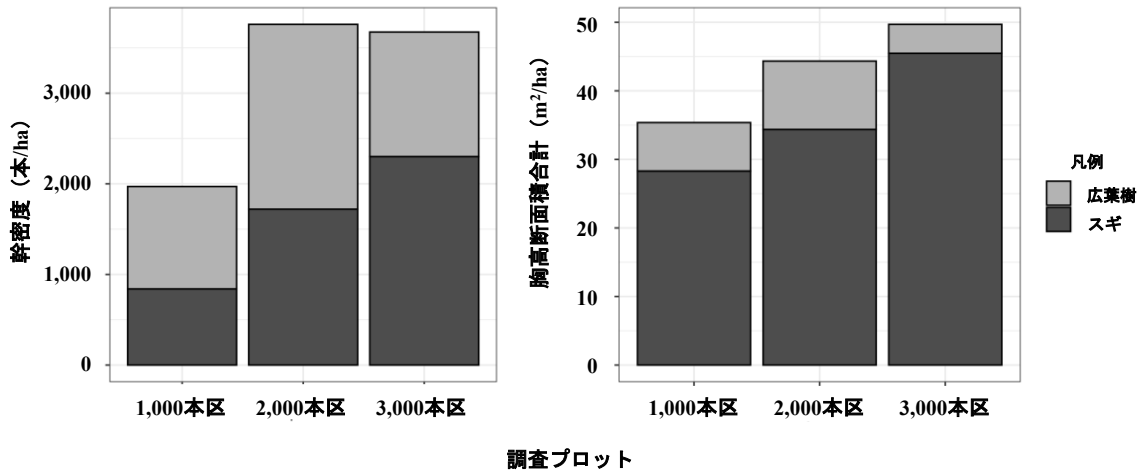
17 各区における幹密度と胸高断面積合計を図-3 に示す。スギ植栽木は 1,000 本区で 840 本/ha, 2,000
18 本区で 1,720 本/ha, 3,000 本区で 2,300 本/ha であった。試験地設定時の植栽密度 (1,000 本区 1,030 本
19 /ha, 2,000 本区 1,980 本/ha, 3,000 本区 2,500 本/ha (野口・和田, 2017)) と比較するといずれの植栽区
20 もやや減少していたものの, 8 割以上の生存率となっていた。スギ植栽木以外 (広葉樹 $D_{BH} \geq 3\text{cm}$) は,
21 1,000 本区で 1,130 本/ha, 2,000 本区で 2,040 本/ha, 3,000 本区で 1,375 本/ha が生育しており, その順
22 番は 2,000 本区 > 3,000 本区 > 1,000 本区であった。区全体の幹密度は 2,000 本区の幹密度が最も多か
23 った。また各区におけるスギの胸高断面積合計は 1,000 本区で $28.3\text{m}^2/\text{ha}$, 2,000 本区で $34.4\text{m}^2/\text{ha}$, 3,000
24 本区で $45.5\text{m}^2/\text{ha}$ となっており, 植栽密度が高いほど大きな値を示した。スギ植栽木以外では 1,000 本
25 区で $7.1\text{m}^2/\text{ha}$, 2,000 本区で $10.0\text{m}^2/\text{ha}$, 3,000 本区で $4.2\text{m}^2/\text{ha}$ となっており, その順番は 2,000 本区 >
26 1,000 本区 > 3,000 本区であり, 幹密度とは異なっていた。またその割合はいずれの区でもスギの割合
27 が 75%以上となっており, スギの優占度が高かった。

29 2) 個体サイズと形状

30 個体サイズや形状について, 植栽区間で比較した (図-4)。その結果, 胸高直径と樹冠半径の平均
31 値は 1,000 本区が 2,000 本区や 3,000 本区に比較して有意に大きかった (Welch の検定, $p < 0.05$)。枝下
32 高では 3,000 本区が他の 2 区に比較して有意に高かった (一元配置分散分析, $p < 0.05$)。形状比につい
33 て, 雪害等による被害個体が極端な数値を示したが植栽区間で有意な差は認められず 70 前後であっ
34 た。

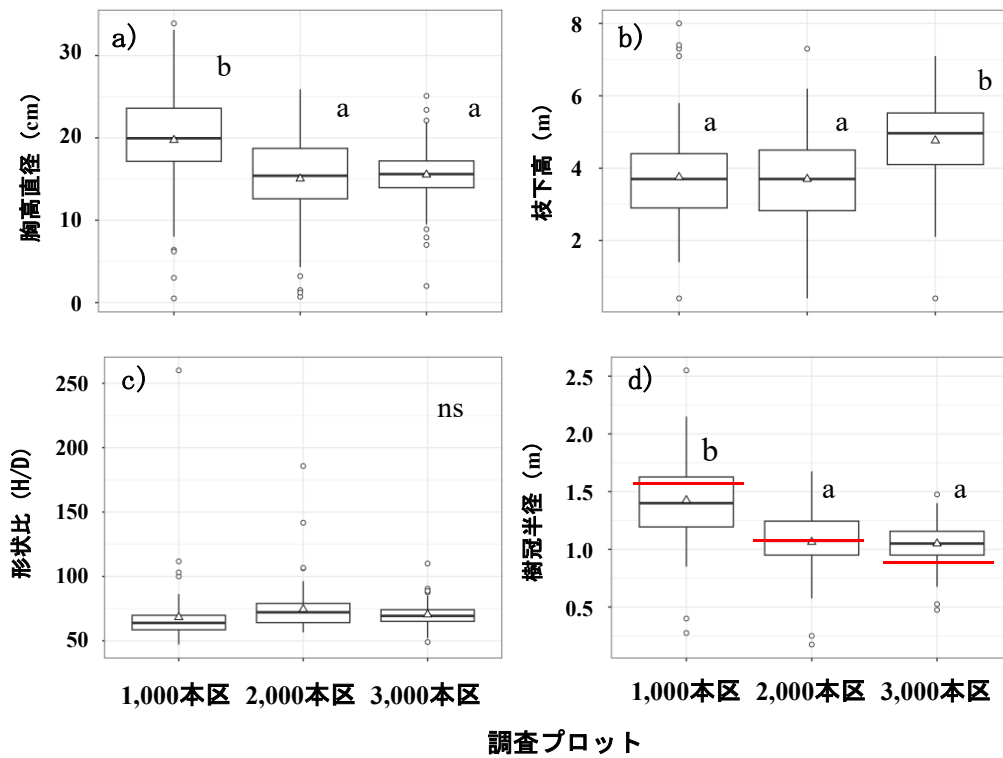
35 樹冠半径の平均値は 1,000 本区で 1.42m, 2,000 本区で 1.06m, 3,000 本区で 1.05m であり, 各区の植
36 栽間隔の 1/2 (1,000 本区約 1.6m, 2,000 本区約 1.1m, 3,000 本区約 0.9m) と比較すると, 1,000 本区は
37 やや小さく, 2,000 本区は同等, 3,000 本区はやや大きかった (図-4)。

1



図ー3 低密度植栽試験地 22 年生時におけるスギ植栽木及び広葉樹 ($D_{BH} \geq 3\text{cm}$) の幹密度と胸高断面積合計

2



図ー4 低密度植栽試験地 22 年生時における調査プロット毎のスギ植栽木のサイズ

a) 胸高直径, b) 枝下高, c) 形状比, d) 樹冠半径。箱ひげ内の黒線は中央値, △は平均値を示す。図中の異なるアルファベットは多重比較 (Bonferroni 補正) で有意差 ($p < 0.05$) があることを示す。また樹冠半径図内の朱線は各区における植栽間隔の 1/2 の値を示す。

3

4

1 3) 健全木の割合

2 各区の植栽木の形質別本数割合を図-5に示す。各区の健全木の本数は1,000本区で690本/ha、
3 2,000本区で1,460本/ha、3,000本区で1,850本/haであった。また、その割合はそれぞれ67.0%、73.7%、
4 74%であり、1,000本区でやや低かった。

6 4) スギ植栽木と競合植生の階層構造

7 スギ植栽木と広葉樹 ($D_{BH} \geq 3\text{cm}$) の樹
8 高階別本数分布を図-6に示す。スギ植
9 栽木の樹高(平均値±標準誤差)は1,000
10 本区 $12.5 \pm 0.3\text{m}$ 、2,000本区 $10.5 \pm 0.3\text{m}$ 、
11 3,000本区 $10.7 \pm 0.2\text{m}$ であり、その分布は
12 10m以上の樹高階に集中していた。これに
13 対し、広葉樹の樹高はそれぞれ $8.0 \pm 0.3\text{m}$ 、
14 $8.0 \pm 0.3\text{m}$ 、 $6.8 \pm 0.3\text{m}$ であり、その分布は
15 一部の個体がスギと同等の階層に生育し
16 ているものの、その多くが10m未満の樹
17 高階、すなわちスギよりも低い階層に生
18 育していた。

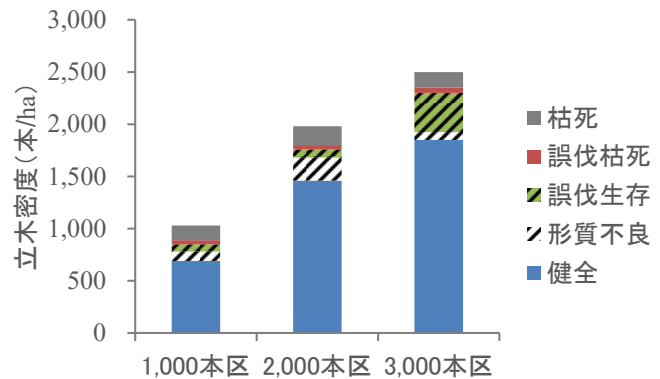


図-5 低密度植栽試験地の22年生時におけるスギ植栽木の形質別本数

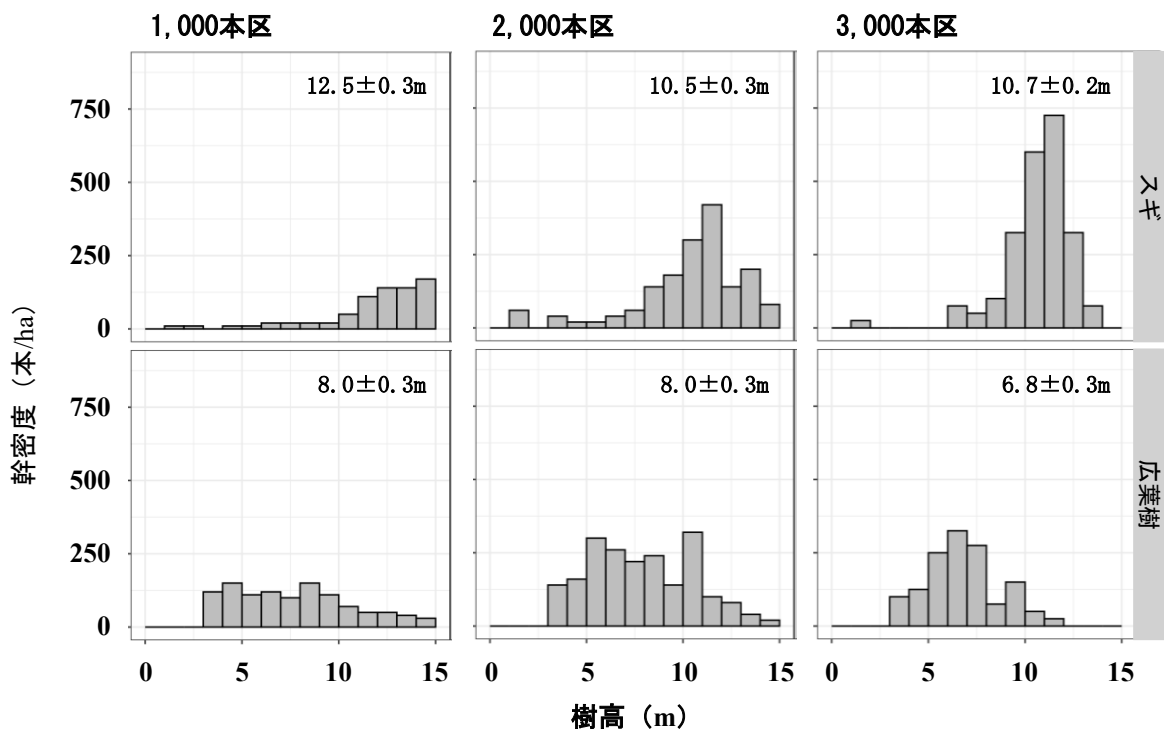


図-6 低密度植栽試験地の22年生時におけるスギ植栽木と広葉樹 ($D_{BH} \geq 3\text{cm}$) の樹高階別本数

図中の値は樹高(平均値±標準誤差)を示している。

1 5) 応力波伝播速度の違い

2 材質調査木のサイズと応力波伝播速度の概要を表-3に示す。調査木の樹高は 1,000 本区 11.4m,
 3 2,000 本区 9.9m, 3,000 本区 9.5m であった。2020 年の調査区における平均樹高と比較すると 1,000 本
 4 区と 3,000 本区では有意差はなかったものの, 2,000 本区では材質調査木が有意に大きかった (Welch
 5 の t 検定, $t=4.33, p<0.01$)。胸高直径は 1,000 本区 17.7cm, 2,000 本区 15.4cm, 3,000 本区 14.5cm であ
 6 り, 区全体の平均値と比較すると 1,000 本区と 3,000 本区では有意差はなく, 2,000 本区では材質調査
 7 木が有意に大きかった (Student の t 検定, $t=2.514, p<0.05$)。これら調査木から計測された応力波伝播
 8 速度 (平均値±標準誤差) はそれぞれ 1,000 本区 2680.4 ± 57.1 m/s, 2,000 本区 2581.8 ± 50.1 m/s, 3,000
 9 本区 2652.2 ± 48.6 m/s であり, 平均値に対する標準誤差の割合はいずれの区でも小さかった。

10 応力波伝播速度の予測モデルにおける変数選択の結果, 調査区と樹高, 胸高直径そして胸高直径と
 11 調査区の交互作用を含むモデルが最適モデルとなった。調査区の係数は 1,000 本区を 0 とした場合,
 12 2,000 本区-0.31, 3,000 本区-0.19 といずれも負となっていた。樹高の係数は 0.03, 胸高直径の係数は
 13 0.02 であり, 応力波伝播速度への影響は樹高と直径で異なった。調査区と胸高直径の交互作用の係数
 14 は 2,000 本区と 3,000 本区いずれも正であった。しかしながら, モデル全体としては有意ではなかつ
 15 た ($r^2=0.05, p=0.190$)。

表-3 調査区別の材質調査木のサイズと応力波伝播速度ならびに 2020 年調査区の
 サイズ

平均値±標準誤差。表内の*および**は t 検定(樹高は等分散を仮定しない Welch の t 検定、胸高直
 径は等分散を仮定する Student の t 検定)による平均値比較でそれぞれ $p<0.05$, $p<0.01$ で有意差が
 あることを示す。

区名	区分	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	応力波伝播速度 (m/s)
1,000本区	サンプル	11.4 ± 0.3	17.7 ± 0.9	2680.4 ± 57.1
	プロット	10.6 ~ 0.3	17.1 ~ 0.6	
2,000本区	サンプル	9.9 ± 0.2	15.4 ± 0.6	2581.8 ± 50.1
	プロット	8.7 ~ 0.2	13.1 ~ 0.4	
3,000本区	サンプル	9.5 ± 0.1	14.5 ± 0.4	2652.2 ± 48.6
	プロット	9.2 ~ 0.1	13.7 ~ 0.3	

16

17

表-4 応力波伝播速度の予測モデル

	係数	標準誤差	t値	p-value
切片	7.909	0.141	56.25	0.000 ***
2,000本区	-0.311	0.146	-2.14	0.037 *
3,000本区	-0.186	0.180	-1.04	0.306
樹高	0.025	0.016	1.52	0.135
胸高直径	-0.017	0.007	-2.50	0.016 *
2,000本区 : 胸高直径	0.018	0.009	1.99	0.051
3,000本区 : 胸高直径	0.012	0.012	0.99	0.325

1 2. スギ多点調査に基づく樹冠半径と枝下高の経年変化

2 1) 樹冠半径の経年変化と予測モデル

3 林齢と樹冠半径の関係について、全体と地位3区分および密度4区分(12パターン)毎の散布図を
4 図-7に示す。樹冠半径は、全体としては林齢の増加に伴い大きくなる傾向が確認できたが、地位や
5 密度で区分するとそれぞれで異なる特徴が見られた。具体的には、同一密度で比較した場合、密度1,000
6 本/ha未満では地位が高いほど、林齢が高くなったときの樹冠半径のばらつきが大きくなった。しかし
7 それ以外の密度区分では林齢の増加に伴う変化は大きくないものの、やや増加した後、ほぼ横ばいに
8 なるか、あるいは林齢の増加に伴い低下するような傾向が見受けられた。

9 林齢と樹冠半径の関係について、12パターン毎に推定に用いたパラメータ初期値と推定されたパ
10 ラメータを表-5に示す。同じ地位級で比較した場合、パラメータ a は地位上と中では密度が高いほ
11 ど小さくなる傾向を示した。逆に地位下では密度が高いほどパラメータ a は大きくなっていった。パラ
12 メータ $b1$ はいずれのパターンにおいても正の値を示したが、地位級や密度の影響は不明瞭であった。
13 パラメータ $b2$ は地位上の密度2,000本/ha以上と地位中の3,000本/ha以上、そして地位下の2,000本
14 /ha以上3,000本未満/haの4つのパターンで負の値を示し、そのほかでは正の値を示した。

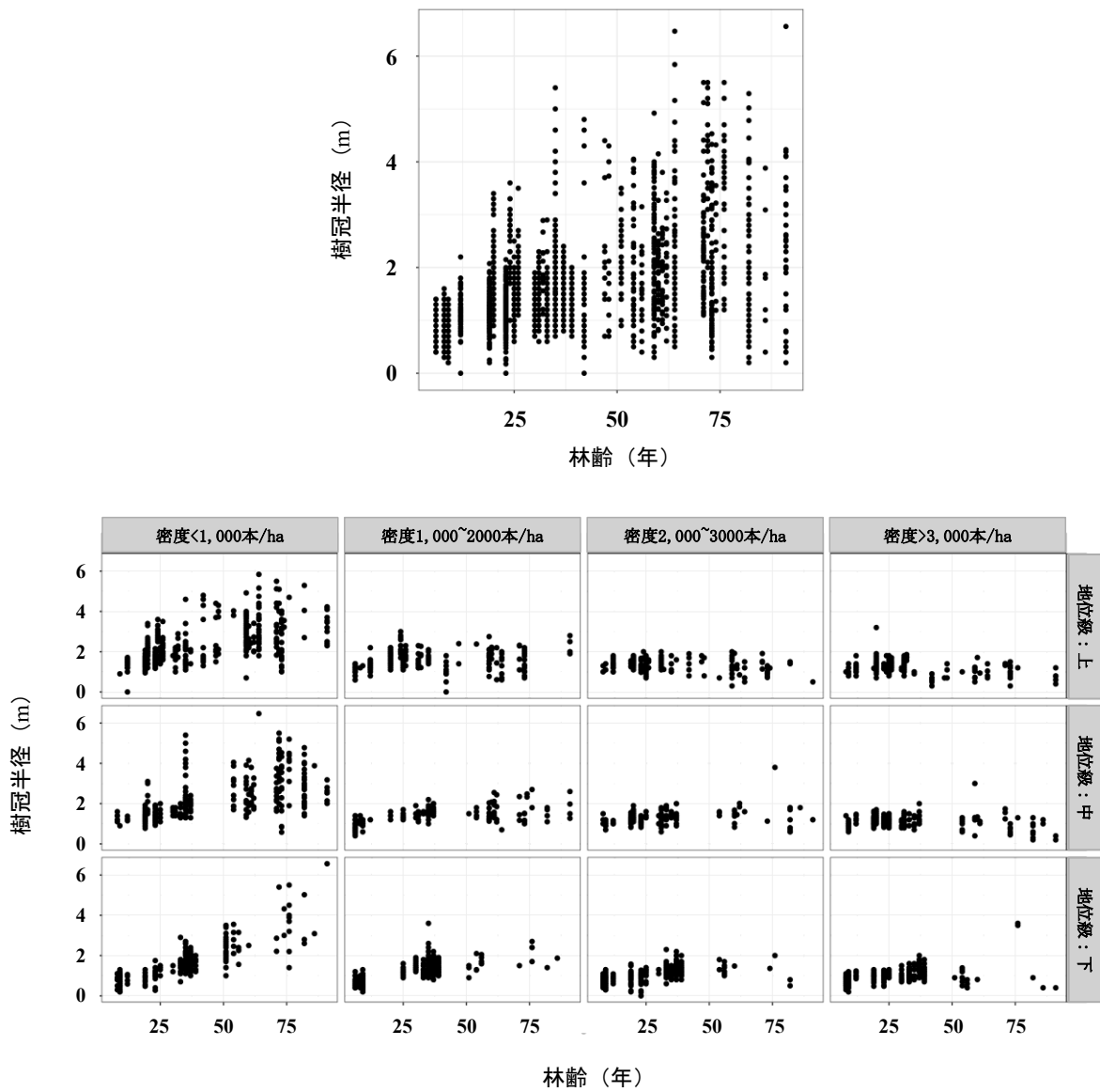
15

16 2) 枝下高の経年変化と予測モデル

17 林齢と枝下高の関係について、全体と地位3区分および密度4区分(12パターン)毎の散布図を林
18 齢と樹高の関係の散布図とともに図-8に示す。枝下高は林齢の増加に伴い高くなっていったが、高い
19 林齢においては、樹高同様その増加量が鈍化している様子が確認された。同一密度区分で比較すると、
20 地位が高いほど頭打ちになった時の枝下高が高くなる傾向が見られた。一方、同一地位区分では密度
21 による違いは明瞭でなかった。

22 地位3区分および密度4区分(12パターン)毎の推定に用いたパラメータ初期値と推定された非
23 線形回帰式のパラメータを表-6に示す。推定の結果、パラメータ a は同じ地位級でも密度によって
24 異なり、地位上では17.8~25.3、地位中では16.1~24.5となっており、概ね密度が高いほど高い値を
25 示していた。地位下については47.7~207.8と大きくばらついており、他の地位級に比較して値が大き
26 かった。パラメータ b は地位上では0.057~0.089、地位中では0.036~0.053、地位下では0.003~0.008
27 となっており、パラメータ c は地位上で4.3~9.7、地位中3.1~5.5、地位下1.5~2.0であり、どちらも
28 地位級が高いほど値が大きい傾向が見られたが、密度との関係は不明瞭だった。

29

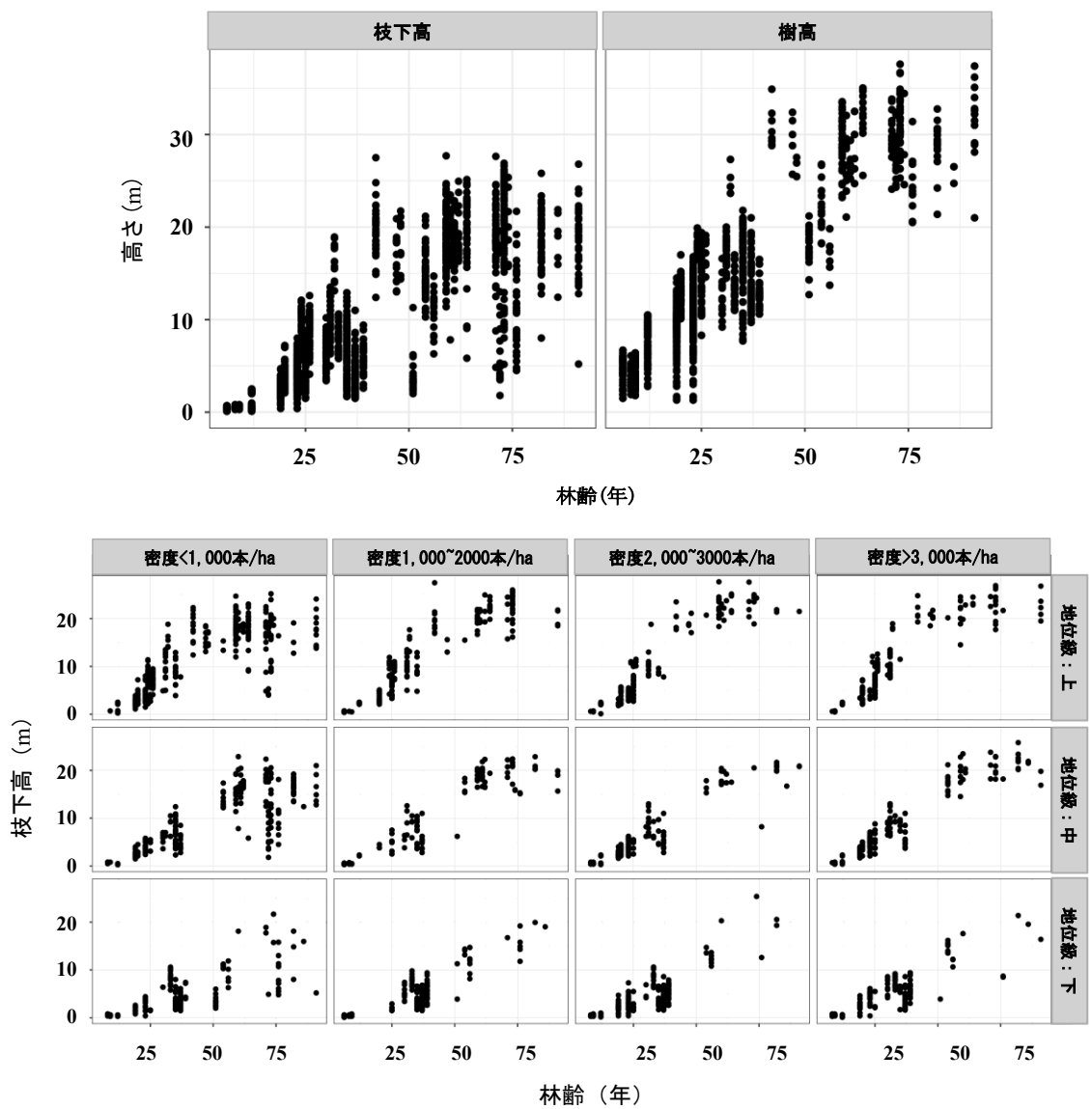


図一 7 林齢と樹冠半径の関係

上段は林齢と樹冠半径の関係，下段は地位級区分及び密度区分毎の林齢と樹冠半径の関係を示す。

表一5 地位級および密度区分別の樹冠半径予測モデル

地位	項目	推定初期値						推定されたパラメータ					
		a	b1	c1	b2	c2	a	b1	c1	b2	c2		
地位上	1,000本/ha未満	40	0.075	0	0.01	3	44.782	0.032	1.105	0.010	2.333		
	1,000本/ha以上2,000本/ha未満	23	0.08	0	0.01	1.9	24.314	0.056	0.709	0.001	1.493		
	2,000本/ha以上3,000本/ha未満	21	0.08	0.3	-0.01	1.8	21.254	0.029	0.899	-0.005	1.512		
地位中	3,000本/ha以上	19	0.06	0.3	-0.01	1.3	19.566	0.009	1.040	-0.008	1.483		
	1,000本/ha未満	30	0.08	0.58	0.01	2.5	33.291	0.014	1.149	0.014	1.932		
	1,000本/ha以上2,000本/ha未満	30	0.06	0.4	0.01	1.9	31.340	0.025	0.760	0.002	1.537		
地位下	2,000本/ha以上3,000本/ha未満	25	0.048	0.6	0.01	1.2	25.233	0.014	0.910	0.001	1.334		
	3,000本/ha以上	22	0.05	0.2	-0.01	1.1	22.390	0.021	0.756	-0.004	1.249		
	1,000本/ha未満	25	0.04	0.2	0.04	0.1	24.361	0.020	0.556	0.044	0.156		
地位下	1,000本/ha以上2,000本/ha未満	25	0.064	0.2	0.01	1.6	27.123	0.031	0.440	0.010	1.103		
	2,000本/ha以上3,000本/ha未満	37	0.04	0	-0.01	1.5	39.269	0.020	0.547	-0.013	2.130		
	3,000本/ha以上	40	0.03	0.2	-0.01	1.2	47.046	0.016	0.602	0.015	0.190		



図－8 林齢と枝下高の関係

上段は林齢と枝下高（左）に加えて林齢と樹高の関係（右），下段は地位級区分及び密度区分毎の林齢と枝下高の関係を示す。

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10

表－6 地位級および密度区分別の林齢－枝下高予測モデル

地位	項目 密度区分	推定初期値			推定されたパラメータ		
		a	b	c	a	b	c
地位上	1,000本/ha未満	25.2	0.001	0.172	17.835	0.089	9.712
	1,000本/ha以上3,000本/ha未満	27.5	0.001	0.140	23.768	0.057	4.257
	2,000本/ha以上3,000本/ha未満	27.7	0.001	0.108	25.319	0.062	5.755
	3,000本/ha以上	26.9	0.001	0.082	23.933	0.072	6.636
地位中	1,000本/ha未満	22.88	0.001	0.274	16.140	0.053	4.663
	1,000本/ha以上3,000本/ha未満	22.86	0.001	0.187	22.658	0.050	5.529
	2,000本/ha以上3,000本/ha未満	21.68	0.001	0.122	23.797	0.036	3.143
	3,000本/ha以上	25.81	0.001	0.138	24.494	0.041	3.334
地位下	1,000本/ha未満	21.67	0.001	0.374	134.166	0.003	1.549
	1,000本/ha以上3,000本/ha未満	19.93	0.001	0.228	126.281	0.006	1.963
	2,000本/ha以上3,000本/ha未満	25.37	0.001	0.174	207.790	0.004	1.775
	3,000本/ha以上	21.38	0.001	0.191	47.712	0.008	1.533

1
2
3
4
5
6
7
8
9

3. 間伐試験地での樹冠成長量

1) 期首の個体サイズと枝の長さ

長坂試験地における毎木調査結果の概要を表－7に示す。期首樹高は $17.3 \pm 0.1\text{m}$ (平均値±標準誤差, 以下同様) で範囲は 6.8~27.9m, 期首胸高直径は $22.3 \pm 0.1\text{cm}$ で, 範囲は 11.8~39.3cm であった。換算密度は 61~15,225 本/ha であり, 個体間距離は大きくばらついていた。また樹冠半径は期首が $1.2 \pm 0.0\text{m}$, 期末が $1.4 \pm 0.0\text{m}$ であり, 全体として枝の長さは増加しており, 樹冠半径の相対成長量の平均値は $0.02 \pm 0.0\text{year}^{-1}$ であった。

表－7 長坂試験地における調査結果概要 (n=1980)

	mean	±	se	max	min
期首樹高 (m)	17.3	±	0.1	27.9	6.8
期首胸高直径 (cm)	22.3	±	0.1	39.3	11.8
換算密度 (本/ha)	1,287.2	±	38.6	15,225	61
期首樹冠半径 (m)	1.2	±	0.0	3.4	0.0
期末樹冠半径 (m)	1.4	±	0.0	4.0	0.1
相対枝長成長量 (year^{-1})	0.02	±	0.00	0.6	-0.3

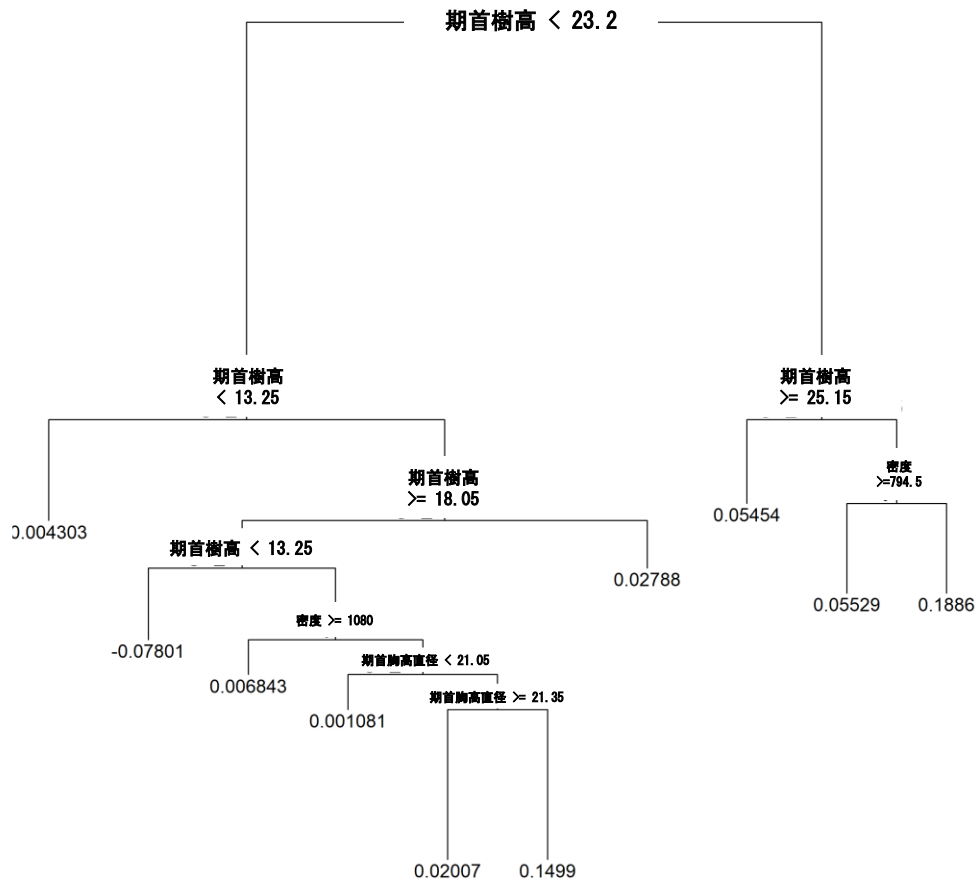
10
11
12
13

2) 樹冠半径相対成長量予測モデル

(1) 樹木モデルによる説明変数の影響評価

樹冠半径の相対成長量を応答変数とし, 期首樹高, 期首直径ならびに換算密度を説明変数とした予

- 1 測モデルの解析に先んじて、樹木モデル分析を実施した（図一 9）。作成された樹木モデルでは期首樹
 2 高や期首胸高直径といった個体サイズの指標で分岐し、換算密度での分岐は少なかった。
 3



図一 9 枝長相対成長量の樹木モデル

4
 5 (2) 主成分分析

6 説明変数のうち期首樹高と期首胸高直径には高い相関が確認された（Pearson の積率相関係数
 7 $r=0.85$ ）。多重共線性の影響を排除するため、3つの説明変数に対して主成分分析を実施した。その結
 8 果、3つの主成分（PC1～3）が生成され、累積寄与率はPC1で0.63、PC2までで0.95を示した（表一
 9 8）。各主成分における各説明変数の固有ベクトルを図一 10に示す。PC1の固有ベクトルは期首樹高
 10 と期首胸高直径が正の値を示し、密度は負の値を示しており、その絶対値は期首直径や樹高に比較し
 11 て密度が小さかった。PC2の固有ベクトルは3つの変数いずれにおいても正の値を示しており、その
 12 絶対値は密度が顕著に大きかった。PC3の固有ベクトルは期首樹高が正、期首胸高直径と密度は負の
 13 値を示し、その絶対値は期首樹高と期首胸高直径が密度に比較して大きかった。

14
 15 (3) 樹冠半径の相対成長量最適モデル

16 樹冠半径の相対成長量を応答変数、抽出された3つの主成分を説明変数として3次の交互作用項と
 17 2次項を含むモデルの変数選択後の最適モデルを表一 9に示す。係数には3つの主成分のほか、PC1

1 の2次項, 3主成分の3次までのすべての組み合わせの交互作用が選択され, モデル全体としては統
 2 計的に有意であった ($F=16.55, p<0.001$)。係数はPC1とPC2及びPC1~3の交互作用項のみ負の値を示
 3 し, それ以外は正の値であった。
 4

表-8 3つ説明変数(期首樹高, 期首胸高直径, 換算密度)から抽出された主成分の寄与率

	PC1	PC2	PC3
標準偏差	1.369	0.986	0.391
寄与率	0.625	0.324	0.051
累積寄与率	0.625	0.949	1.000

5

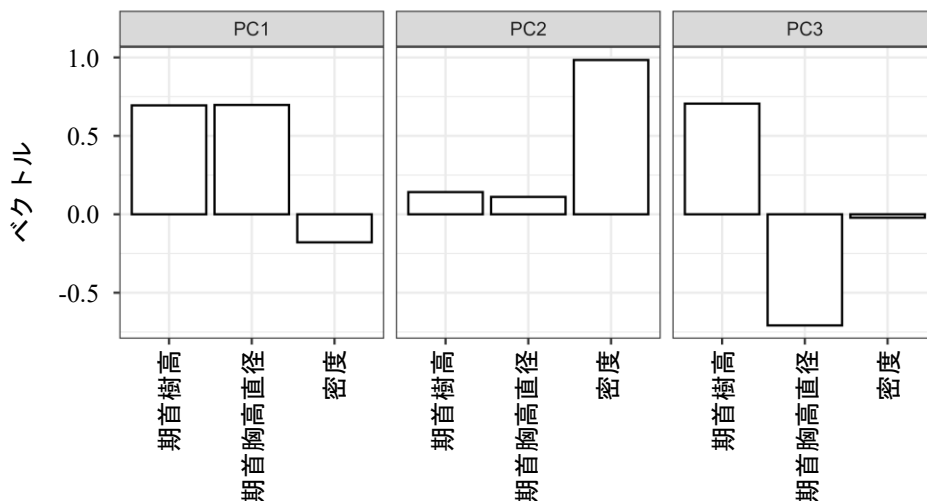


図-10 3つ説明変数(期首樹高, 期首胸高直径, 換算密度)から抽出された主成分の固有ベクトル

表-9 枝長の相対成長量の最適予測モデル

	係数	標準誤差	t値	p-value
切片	0.018	0.002	11.886	0.000 ***
PC1	0.008	0.001	9.152	0.000 ***
PC2	0.002	0.001	1.406	0.160
PC3	0.009	0.003	3.054	0.002 **
I(PC1^2)	0.002	0.001	3.053	0.002 **
PC1:PC2	-0.001	0.001	-0.768	0.442
PC1:PC3	0.007	0.002	3.021	0.003 **
PC2:PC3	0.003	0.003	0.985	0.325
PC1:PC2:PC3	-0.005	0.002	-2.160	0.031 *

6

IV. 考察

1. スギの成長に対する植栽密度の影響

スギの植栽木の胸高直径や樹冠半径においては 1,000 本区が他の植栽区よりも有意に高い値を示した (図-4 a, d)。また枝下高については 3,000 本区が他の植栽密度よりも有意に高かった (図-4 b)。このことから植栽密度が植栽木の肥大成長や枝下高、樹冠半径に何らかの影響を与えたと考えられる。この植栽密度の影響をスギ植栽木同士の直接的な影響と競合植生による間接的な影響の両面から考察する。

1,000 本区では樹冠半径の平均値が植栽間隔の 1/2 の値を下回っていた。一方で、2,000 本区では同程度、3,000 本区では上回っていた (図-4 d)。このことから 22 年生時点において 1,000 本区では林冠は未閉鎖、2,000 本区では樹冠が隣接木の樹冠と接する状態、3,000 本区では隣接木同士の林冠がやや交差した状態になっており、概ね閉鎖している状態と判断できる。同一試験地での植栽後 11 年時点における調査では 3,000 本区のみが隣接木同士の林冠が接していたと報告されている (野口・和田, 2017)。つまり、前回調査からの 10 数年で樹冠がさらに成長・発達したといえる。当該試験地における植栽木同士の競合関係は、2,000 本区や 3,000 本区において今後より本格的になると予想されるものの、これまでの生育経過の中では限定的と考えられる。

低密度試験地における競合植生を調査した結果、その幹密度は 2,000 本区で最も多く、次いで、3,000 本区、1,000 本区の順であった (図-3)。胸高断面積合計ではスギの割合が高いが、幹密度ではスギを上回る本数の競合植生が生育していたこととなる。スギは若齢 (4 年生未満) では樹冠の梢端部が覆われていない限り顕著な成長の低下はないとされている (山川ら, 2016)。しかし前述したように当該試験地における本研究での調査では胸高直径及び枝下高の一部で有意差が確認されている (図-4)。スギ植栽木同士の競合はまだ少ないと判断されたことから、下刈り終了後に侵入したこれら天然更新木が植栽木の肥大成長や枝下高に影響した可能性がある。

階層構造をみるとスギが上層林冠を構成しているが、1,000 本区や 2,000 本区では、その上層林冠に一部の競合植生も到達している (図-6)。加えて 1,000 本区の競合植生の侵入本数が 2,000 本や 3,000 本区に比較して少なかったことを加味すると (図-3)、競合植生の量が植栽木の肥大成長や樹冠の発達を抑制したと考えられる。また 3,000 本区においてもスギ林冠のすぐ下層に競合植生が生育していたことから、林冠の閉鎖と競合植生による下層空間の占有が枝下の枯れ上がりに寄与した可能性が高い。これは野口・和田 (2017) における天然更新木がスギ植栽木の成長と個体サイズに影響したという指摘と矛盾しない。ただし、植栽木の平均樹高と枝下高から樹冠長率を計算するといずれも 50% を超える。藤森 (2010) は弱齢林の個体成長を維持する樹冠長率の目安を 30% としている。当該試験地の植栽木はこの目安と比較しても十分な樹冠量を維持しているといえる。また形状比は全ての調査区において 70 前後と差がなく、雪害等の発生リスクが大きいとされる形状比 90 (豪雪協, 1984) を下回っている。さらに健全木の割合は 1,000 本区でやや低いものの他の区との割合の差は小さい (図-5)。つまり、22 年生までの経過を見る限り、低密度植栽に起因するマイナスの影響は、後述する健全木の絶対的な本数低下以外は大きくないと考えられる。この同一試験地による考察の違いは、約 10 年という年数の経過で植栽木が成長し上層で優占したことで (図-6)、競合植生の影響が相対的に減少したためと推察される。以上のことから、植栽から 10 年程度で実施する除伐は、植栽から数年間の下刈り

1 を前提とすれば省略できると考えられる。ただし、今後、競合植生による植栽木への影響がさらに高
2 まる可能性も捨てきれない。さらに除伐を省略することで初回間伐時の作業コストが増大する可能性
3 もあることから、除伐省略の影響評価は今後の課題である。

4 ところで、天然更新木は生物多様性あるいは林地保全といった生態系サービスという視点からは林
5 業生産とは別の意味を持つこととなる。清和（2013）は最初から針広混交林を目指すのであれば、植
6 栽密度は 500 本/ha 程度でよいとしている。これは北海道のグイマツ雑種 F₁ における密度試験の結果
7 に基づいていることから、秋田県のスギにそのまま適用できるとはいいきれない。しかし、そうした
8 木材生産機能以外の、多面的機能の積極的な発揮を目的に低密度植栽を採用するという選択肢も今後
9 ニーズが高まってくる可能性がある。様々な立地環境で低密度植栽を実施した場合の広葉樹等の天然
10 更新の動態については今後さらなる調査が必要である。

11 12 **2. 植栽密度の違いが材質に与える影響**

13 材質調査の実施個体と調査区全体の樹高および胸高直径の平均値を比較した結果、1,000 本区や
14 3,000 本区では有意な差はなかったが、2,000 本区では樹高、直径ともに材質調査個体で有意に大きか
15 った。このことから個体サイズが材質に影響している場合、2,000 本区では調査区全体よりも過大ある
16 いは過小に評価してしまう可能性がある。応力波伝播速度を応答変数とする最適モデルにおける個体
17 サイズに関する係数は、樹高が 0.025、胸高直径が-0.017 で、有意であったのは胸高直径のみであった
18 （表-4）。これは同じ区内であれば個体サイズが応力波伝播速度に影響する可能性を示している。し
19 かし植栽区の係数は交互作用項も含め 2,000 本区のみで有意であり、最適モデル全体も有意ではなか
20 った。このことから、材質調査を実施した個体のサイズが 2,000 本区における応力波伝播速度に影響
21 した可能性はあるものの、植栽から 20 年時点では、植栽密度は木材の堅さには影響しないと考えられ
22 た。これは、植栽密度が低くなると応力波伝播速度が低くなるとする福地ら（2011）の結果とは異なる
23 る。この違いにはいくつかの原因が考えられる。1 つは林齢の違いである。一般的なスギのヤング率
24 は 75t/cm² であり（農林水産省林業試験場, 1973）、藤澤ら（2005）におけるそのときの応力波伝播速度
25 は概ね 3,000m/s である。本研究における応力波伝播速度の平均値は 2,500~2,600m/s であり（表-3）、
26 福地ら（2011）に対してだけでなく、一般的なスギよりも低い。つまり、植栽密度による木材の堅さ
27 に差が生じなかったのは、本研究における調査地の林齢が先行研究に比較して低く、材が未成熟だっ
28 た可能性がある。また別の理由として、前述したように植栽密度による影響が競合植生を介した間接
29 的なものにとどまっていることが挙げられる。特に 2,000 本区や 3,000 本区におけるスギ植栽木同士
30 の競争関係はこれから本格化し、その直接的な影響も今後増大すると予測される。以上のことから、
31 より年数が経過した段階で再度調査を実施し、競合植生さらには植栽木同士の競争関係により材質が
32 どう変化するのか、植栽密度の影響が現れてくるのかを調査する必要がある。

33 34 **3. 植栽密度の下限值**

35 低密度植栽試験地の 22 年生時点での植栽木の形質調査の結果、欠点のないスギ健全木の立木密度
36 は 1,000 本区では 690 本/ha となっていた（図-5）。これは標準的な施業を実施した場合の収穫期の
37 成立本数 787 本/ha（地位中 50 年生（秋田県森林技術センター, 2012））を下回っている。一方で 2,000

1 本区では 1,460 本/ha, 3,000 本区では 1,850 本/ha であり, 2 区については同水準を上回っており, 間伐
2 の余地があった。この結果は植栽密度 1,000 本/ha で再造林を実施した場合, 秋田県においては従来ほ
3 どの材積収穫が得られないことを示している。このことから秋田県における植栽密度の下限値は 1,000
4 本/ha と 2,000 本/ha の間の 1,500 本/ha 程度と考えられる。これは福地ら (2011) の提示した, 材質の
5 低下を生じさせない適切な植栽密度 2,000~2,800 本/ha よりも低い。しかし, 前項で示したように植栽
6 密度が材質に与える影響は 20 年生時点ではほとんどなく, その後に植栽密度の影響が増大するとし
7 ても, 後述するように, 20 年生以降は間伐の実施が前提となる。以上のことから秋田県におけるスギ
8 の植栽密度の下限値としては 1,500 本/ha 程度を採用するのが適当であると考えられる。

9

10 4. 植栽密度の違いと初回間伐までの年数

11 1) 樹冠の水平方向への成長に対する地位・密度の影響

12 モデル式-1 は 2 つの 1 次式 (式-2 および 3) の変化点として定義しており, そのパラメータ a
13 はその変化点となる林齢である。パラメータ a は, 地位上と地位中においては密度が高いほど低い値,
14 つまり, より低い林齢となる傾向がみられた (表-5)。これは密度が高いほど隣接個体との距離が近
15 く, 同じ速度で枝が伸長した場合に樹冠が接するまでの時間が短くなることを表している。一方で地
16 位下では密度が高くなるほどパラメータ a が高くなるという逆の傾向を示した。これについては推測
17 の域を出ないものの, 次のようなことが想定できる。地位下と判断される立地環境はスギの樹高成長
18 が遅い。そこでは相対的にスギ植栽木以外の植生の優占度も高くなり, それら競合植生との競争が激
19 しくなるために林冠の閉鎖まで時間を要するというものである。ただし, 地位下に区分されるデータ
20 数は地位上や中に比較して少ないために推定精度が低い可能性もある。このことから特に地位が低い
21 立地における推定モデルは今後さらなる検討が必要である。

22 パラメータ b_1 , b_2 はそれぞれ 1 次式の傾きを表している (表-5)。 b_1 の推定値はいずれのパタ
23 ーンにおいても正であった。このことから, 隣接木と樹冠が接していない場合に枝が林齢に応じて成
24 長するという仮定はおおむね正しい予測であったと考えられた。また b_2 は, 一部例外はあるものの,
25 b_1 よりも小さい値となっており, パラメータ a によって当てはめる直線が変化するとその傾きが小さ
26 くなる, すなわち樹冠が接した後は枝の成長速度は鈍化・停滞・低下いずれかへと変化するという予
27 測をおおむね支持する結果となった。しかしパラメータ a 同様, 特に地位の低い林分におけるデータ
28 の蓄積は今後の課題である。

29

30 2) 枝の枯れ上がりと地位・密度の影響

31 Richards 式におけるパラメータ a は曲線の最終到達点, パラメータ b は成長曲線の立ち上がりの早
32 さ, パラメータ c は成長曲線の形を定めるとされる (大隅・石川, 1983)。この点から考えると地位下
33 において推定されたパラメータ a は枝下高としては明らかな異常値を示している (表-6)。これは地
34 位下に区分されるデータ数が相対的に少ないことに起因していると考えられる。ここから本研究にお
35 いては地位上と中に注目して考察する。

36 同一の地位区分で比較した場合, 地位上と中においては密度が高いほどパラメータ a は大きくなる,
37 すなわち密度が高いほど枝下高の最終到達点が高くなる傾向が見られた (表-6)。これは密度が高い

1 ほど、林内の光環境が悪化し、枝下高が高くなるという経験的な観察がモデルからも裏付けられたと
 2 いう。また同一密度区分で比較すると最も高い密度を除いて地位が低い方が曲線の最終到達点は低
 3 くなる傾向が見られた。地位の高さは樹高成長の良さを意味している。地位が低ければ樹高も低くな
 4 り、その分枝下高の最大値も低下すると予想されることから、推定したモデルは実際の林地の現象を
 5 再現していると考えられる。パラメータ b は同一地位において比較した場合、密度の違いによる傾向
 6 は不明瞭であったが、同一密度で比較した場合、地位が高いほうで値が大きくなっていた。このこと
 7 からパラメータ b は地位に依存して変化すると推察されるが、その絶対値は 0.1 未満と非常に小さい
 8 ことからモデル内での影響力は小さいと考えられる。パラメータ c は大隅・石川 (1983) における $1/(1-$
 9 $m)$ であり、曲線は $0 \leq m < 1$ ならば Mitcherlich 型、 $m=1$ ならば Gompertz 型、 $m > 1$ ならば Logistic 型であ
 10 るとしている。推定された c から m を計算するといずれも $0 \leq m < 1$ となり、林齢と枝下高の予測式は
 11 いずれも Mitcherlich 型であると判断された。

13 3) 樹冠発達から見た初回間伐の林齢

14 地位中 1,000 本/ha 以上の密度区分に
 15 おける林齢-樹冠半径モデル (表-5)
 16 の予測線を図示した (図-11)。植栽
 17 密度の下限値である 1,500 本/ha が含ま
 18 れる 1,000 本/ha 以上 2,000 本/ha 未満の
 19 線では、樹冠半径が植栽間隔の 1/2 の
 20 長さとなる林齢は 20~25 年である。つ
 21 まり隣接木と樹冠が接するまでは植栽
 22 から 20~25 年必要であると考えられ
 23 る。同様に従来よりも低密度な 2,000 本
 24 /ha, 2,500 本/ha それぞれについて、樹
 25 冠半径が植栽間隔の 1/2 となる時期を
 26 算出すると 2,000 本/ha では 15 年前後、
 27 2,500 本/ha では 10 年前後となる。野
 28 口・和田 (2017) では 11 年生時点での
 29 低密度植栽試験地において 3,000 本区
 30 (引用元では従来区) では閉鎖には至
 31 っていないものの樹冠が接し始めてい
 32 ると報告している。また本研究で調査
 33 した植栽から 22 年目の低密度植栽試
 34 験地の結果 (図-4) では 1,000 本区は
 35 未閉鎖、2,000 本区は樹冠が接している
 36 状態、3,000 本区は樹冠が互いに少し交
 37 差している状態であり、推定結果と大きくは矛盾しない。このことから、1,500 本/ha, 2,000 本/ha,

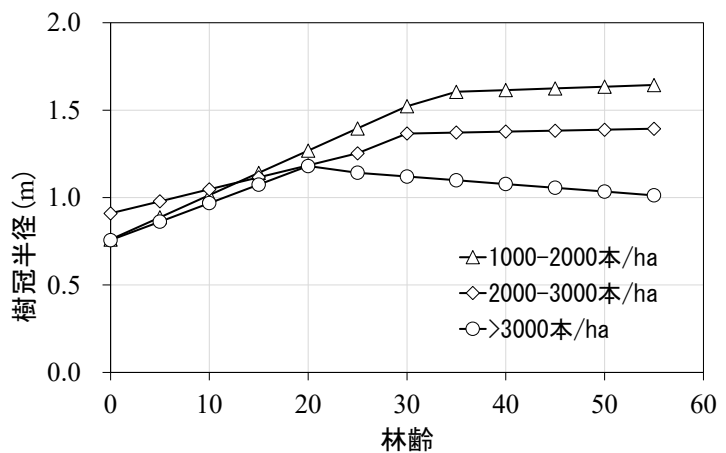


図-11 地位中における林齢-樹冠半径予測モデルの密度区分別樹冠半径

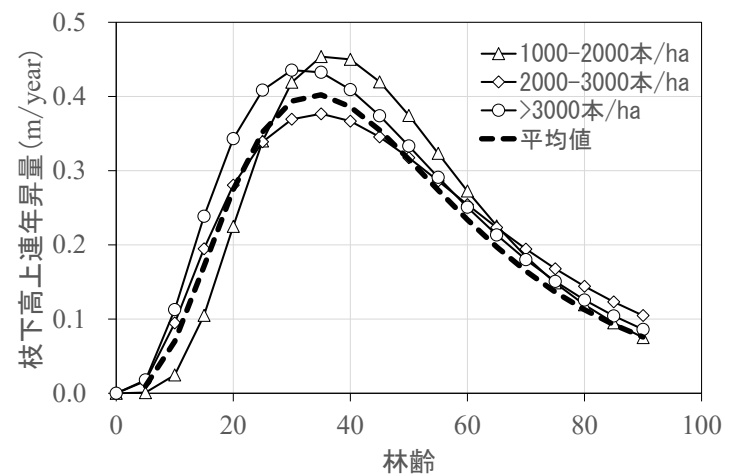


図-12 地位中における林齢-枝下高予測モデルの密度区分別枝下高の連年上昇量

1 2,500 本/ha で植栽した場合の林冠閉鎖開始時期はそれぞれおよそ 20 年, 15 年, 10 年であり, この林
2 齢が初回の間伐を計画する時期の目安となる。

3 地位中の 1,000 本/ha 以上の密度区分における林齢—枝下高予測モデル (表—6) から枝下高の連年
4 上昇量を算出した (図—12)。枝下高の上昇速度について, 密度区分で頭打ちになる林齢には差がみ
5 られるものの, 同一林齢における上昇速度の密度区分間の差は 0.5m/year 未満と小さい。このことから
6 枝の枯れ上がり速度は, 煩雑さを回避するため, 密度にかかわらず各林齢における平均値を採用する
7 のが普及上望ましいと考えられる。ここで 3 段階の植栽密度それぞれの林冠閉鎖開始時期における枝
8 下高の連年上昇量は 20 年で 0.27m/year, 15 年で 0.17m/year, 10 年で 0.07m/year であった。これは例
9 えば 20 年生で間伐をせずに放置した場合に 5 年間で 1m 以上枝下高が上昇する可能性を示している。
10 つまり, これら枝下高の連年上昇量は林齢における間伐検討期間の目安といえる。仮に枝の枯れ上が
11 りを 100cm 以内にしたいとすれば 20 年生では 4 年以内に, 15 年生では 5 年以内に間伐を実施する必
12 要がある。10 年生では 14 年以内に間伐が必要ということになるが, 枝下高の連年上昇量は 40 年生く
13 らいまで林齢の増加に伴い指数的に増加するため実際は 10 年以内に間伐を実施する必要がある。以
14 上のように, 任意の林齢における枝の枯れ上がり速度予測は, 良質な無節材を生産する上でも応用可
15 能な知見といえる。しかし本研究において目指しているのはあくまで並材生産であり, 樹冠量の確保
16 とそれに伴う良好な肥大成長が重要である。以上を踏まえ, 従来よりも低密度な 1,500 本/ha, 2,000 本
17 /ha, 2,500 本/ha で植栽した場合の, 樹冠発達から見た初回間伐の林齢はそれぞれ 24 年, 20 年, 15 年
18 を提案する。

19 20 5. 間伐後の樹冠半径成長量から見た間伐間インターバル

21 主成分分析による PC1 の固有ベクトルは期首の樹高および胸高直径の絶対値が大きい正の値, 密
22 度の絶対値が小さい負の値を示していた (図—10)。このことから PC1 は個体サイズに伴い大きく
23 なる「個体サイズ成分」と解釈できる。また PC2 の固有ベクトルはいずれも正の値であったが, 密度
24 の絶対値が期首サイズに比較して大きいことから, 密度が高いと高くなる「空間密閉度」と捉えるこ
25 とができる。さらに PC3 の固有ベクトルにおいて, 個体サイズを示す期首の樹高と胸高直径の絶対値
26 は概ね同じであったが符号が異なり, 樹高は正で胸高直径は負の値を示した。また, 密度は絶対値の
27 小さいマイナスであることから PC3 は樹高が高く, 胸高直径が小さいと大きくなる成分, つまり形
28 状比の高い「かんまん度合」といえる。寄与率は PC1 で 0.63 と PC2 で 0.32, 累積寄与率 95%程度で
29 あることから (表—8), 枝の相対成長量は概ね「個体サイズ」と「空間密閉度」によって決まってい
30 ると考えられる。

31 最適モデルにおいて, PC1 の係数は有意で正の値を示している。つまり「個体サイズ」が大きいほ
32 ど枝相対成長量が大きいということになる。これは「個体サイズ」が大きいほど樹冠サイズも大きく,
33 光環境をめぐる競争で有利に働くためと考えられる。しかし「空間密閉度」を示す PC2 や「かんまん
34 度合」を示す PC3 はそれらが高いほどマイナスに作用すると予想されたが, 実際の係数の符号は正の
35 値を示し, 予想とは異なる結果となった。これは PC1 「個体サイズ」のモデル内における影響力が相
36 対的に大きいためと考えられる。実際, PC2 と PC3 は, PC1 との交互作用においても変数選択されて
37 いるほか, PC1 は二次項も採用されている。つまり本研究において, 間伐後の残存木の枝の水平方向

1 の成長には、間伐によって林冠に空間ができたこと以上に、その時点における個体サイズが大きいこ
2 とが重要であると考えられた。ただし、本研究においては間伐後の水平方向の樹冠半径についてのみ
3 に着目しており、枝下高の概念が含まれていない。すなわち同化器官としての樹冠量を正しく評価で
4 きていない可能性がある。梶原(1976b)は陽樹冠が個体の材積成長に重要であることを指摘している。
5 また水永(1992)は林冠動態モデルによるシミュレーションにおいて間伐時に樹冠が大きい個体ほど
6 間伐後に樹冠が大きくなることを指摘している。このことから樹冠形状のより正確な把握が、より精
7 度の高い予測につながると考えられる。加えて、本研究では長坂試験地における40年生から60年生
8 という限られた林齢範囲における事例であり、より若齢あるいは高齢なスギ林分における間伐後の枝
9 の成長が本研究と同様の結果となるかは不明である。特により高齢な林齢における間伐後の樹冠形状
10 の変化については先行研究を含め、より詳細に検討する必要がある。

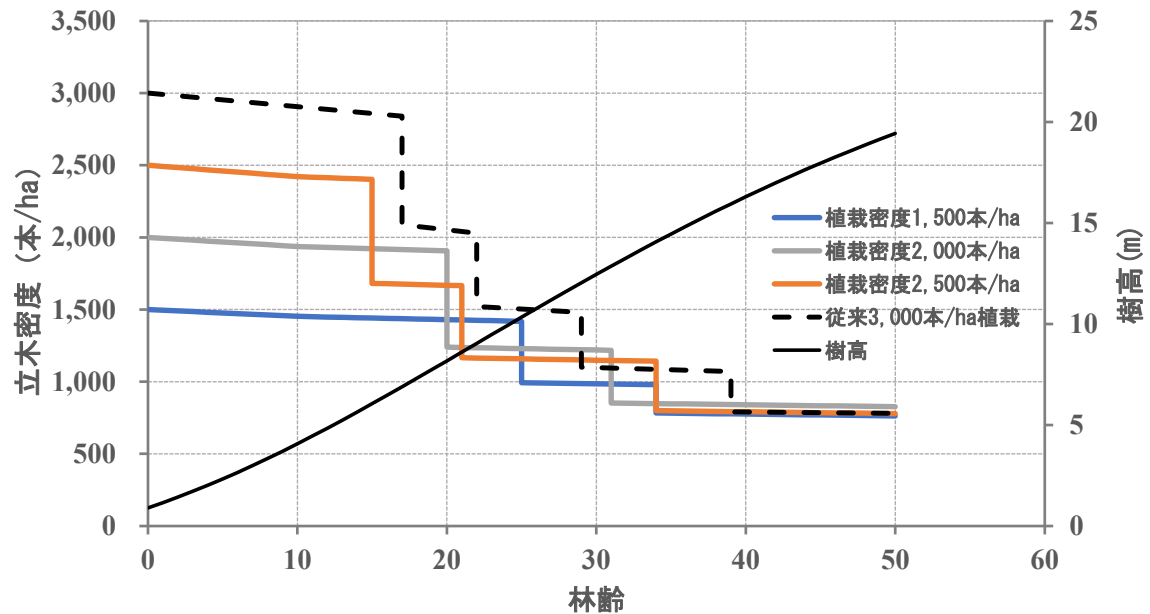
11

12 6. 低密度植栽に対応した新施業体系

13 これまでの考察を踏まえ、低密度植栽に対応した新施業体系について、ここでは地位中の立地にお
14 ける事例を代表して検討する。

15 想定する伐期は標準伐期齢の50年とした。植栽密度は従来の3,000本/haよりも少ない本数で、かつ
16 植栽密度の下限値と考えられた1,500本/haのほか、2,000本/ha、そして2,500本/haの3パターンを想
17 定した。自然枯死については秋田県内の収穫試験地の長期データ(西園ら,2023)から計算された年平
18 均枯死率0.016を植栽から収穫までに一律で適用した。初回間伐林齢はそれぞれ前述した24、20、15
19 年生時とした。初回間伐までの植栽後の枝の横方向の発達については樹冠半径成長モデル(表-4)
20 の地位中における密度区分1,000本/ha以上2,000本/ha未満と2,000本/ha以上3,000本/ha未満をそれ
21 ぞれ適用して計算した。初回間伐後の枝の成長は長坂試験地における樹冠半径の相対成長率の平均値
22 (表-6)を用いて毎年1.021倍に成長する仮定とした。2回目以降の間伐は、樹冠半径が立木密度か
23 ら逆算される植栽間隔の1/2の値に達した段階で実施することとした。初回の間伐は本数率で30~
24 35%、2回目以降は20~30%で実施することとし、いずれも主伐時に収穫表における地位中50年生
25 時の本数である787本/ha程度となるように適宜設定した。保育作業としての下刈りは従来通り実施
26 し、除伐は実施しないこととした。なお、下刈り時の誤伐や、除伐時に実施される形質不良木の除去
27 は考慮しないこととした。

28 前項の仮定に基づきシミュレートされた施業体系図を図-13に示す。収穫までの間伐回数は植栽
29 密度1,500本/haや2,000本/haでは2回、2,500本/haでも3回であり、従来の4回に比較して減少し
30 た。1,500本/haについては初回間伐をより強度にすることで1度の間伐で収穫ができる可能性もある
31 と考えられた。つまり低密度植栽は植栽に係るコストの低減のみならず、間伐回数を減らすという意
32 味で、植栽から主伐までのトータルコストの低減に寄与する可能性が示唆された。



図－1 3 地位「中」立地における3パターンの植栽密度における施業体系案

図中の点線は従来の3,000本植栽で良質材生産を想定した立木密度の変化を示す。また図中の実曲線は地位中における樹高(第2軸)を示す。

2

3

7. おわりに

本研究では低密度植栽に対応した施業体系を検討するにあたり、様々な密度及び地位級におけるスギ樹冠の成長と発達に焦点をあてて調査・解析を実施し、主伐に至るまでのトータルコストを低減できる可能性が示された。しかしながら、データの不足により低い地位級における樹冠発達のモデリングは不十分であり、また間伐の効果としての樹冠成長予測についても樹冠サイズの把握や林齢のばらつきといった課題が残った。今後はこうした課題に取り組み、間伐と樹冠の管理を直接結びつけてより精度の高い成果への発展を目指したい。

11

12

13

謝 辞

本研究の遂行にあたり、多くの方からの協力を頂いた。略儀ではあるがここに記して謝意を示したい。まずは野外調査に協力して頂いた会計年度職員の大塚香氏、高橋法人氏、高野光一氏、千葉智子氏には心からお礼を申し上げます。また同様に調査及び解析に協力頂いた林業研究研修センター諸氏にも厚くお礼申し上げます。そして貴重なデータを残して頂いた前任研究課題担当者2名にも心から感謝する。本研究は政策予算研究課題「秋田スギの低密度植栽に対応した新施業体系の確立」(令和2～6年度)において実施した。

20

引用文献

- 1
2 秋田県農林水産部（2023）令和4年度版 秋田県林業統計。
3 秋田県森林技術センター（2013）秋田県民有林スギ林分収穫表—平成24年度森林資源モニタリング
4 調査成果品一。秋田県森林技術センター
5 藤森隆郎（2010）林業普及双書 No.163 間伐と目標林型を考える。（社）全国林業改良普及協会
6 藤澤義武・柏木学・井上祐二郎・倉本哲嗣・平岡裕一郎（2005）FAKOPPによる立木ヤング率評価手
7 法のヒノキへの応用。九州森林研究 58:142-143
8 福地晋輔・吉田茂二郎・溝上展也・村上拓彦・加治佐剛・太田徹志・長島啓子（2011）低コスト林業
9 に向けた植栽密度の検討—オビスギ植栽密度試験地の結果から—。日林誌 93:303-308
10 福本桂子・北原文章・細田和男・芦原誠一・加治佐剛・寺岡行雄（2021）下刈りスケジュールの違い
11 が雑木の量と除伐作業時間に与える影響—鹿児島県13年生スギ林の事例—。日林誌 103:48-52
12 豪雪地帯林業技術開発協議会（1984）雪に強い森林の育て方。日本林業調査会
13 梶原幹弘（1975）スギ同齢林における樹冠の形態と量に関する研究（Ⅰ）—樹冠形—。日林誌 57:425-
14 431
15 梶原幹弘（1976a）スギ同齢林における樹冠の形態と量に関する研究（Ⅱ）—林分内での樹冠の形態—。
16 日林誌 58:97-103
17 梶原幹弘（1976b）スギ同齢林における樹冠の形態と量に関する研究（Ⅲ）—樹冠の形態の生育段階的
18 変化—。日林誌 58:313-320
19 梶原幹弘（2020）植栽による択伐林で日本の森林改善—樹冠の働きと量から考える—。築地書館。
20 金子智紀・武田響一・野口正二・大原偉樹・藤枝基久（2010）積雪地帯の近接したスギ人工林3小流
21 域における流出特性の比較。日林誌 92:208-216
22 気象庁（2026）各種データ・資料（<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>），2026年2月26日
23 閲覧
24 松本和馬・小谷英司・駒木貴彰（2015）東北地方における低コスト再生林の実用化と課題。東北森林
25 科学会誌 20（1）:1-15
26 中村松三・伊藤哲・山川博美・平田令子（2019）低コスト再生林への挑戦—貫作業システム・コン
27 テナ苗と下刈り省略—。日本林業調査会
28 水永博己（1992）林冠動態モデルによる間伐効果予測（Ⅰ）間伐後の林冠表面形状の動態。日林誌 74:314-
29 324
30 西園朋広・細田和男・齋藤英樹・高橋正義・北原文章・山田祐亮・鄭峻介・志水克人・石橋聡・古家
31 直行・辰巳晋一・小谷英司・松浦俊也・齋藤和彦・田中邦宏・田中真哉・福本桂子・近藤洋史・
32 高橋與明・佐野真琴・鷹尾元（2023）平成28～令和2年度に調査した収穫試験地等固定試験地
33 の経年成長データ（収穫試験報告第27号）。森林総合研究所研究報告 Vol.22-No.3（No.467）:141-
34 190
35 野口麻穂子・和田覚（2017）秋田県における植栽密度の異なるスギ若齢林の林分構造と成長。日林誌
36 99:41-45
37 農林水産省林業試験場（1973）木材工業ハンドブック。丸善

- 1 大隅眞一・石川善朗（1983）樹木の生長解析に対する Richards 生長関数の適用性について．京都府立
2 大学学術報告 農学 35:49-76
- 3 R Core Team （2025）. *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical
4 Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- 5 Richards, F. J. （1959） A flexible Growth Function for Empirical Use. *Journal of Experimental Botany*10:290-
6 300
- 7 清和研二（2013）多種共存の森—1000年続く森と林業の恵み—. 築地書館.
- 8 寺岡行雄（2009）低コスト林業をねらった林業経営．*林木の育種* No.232:20-21
- 9 佐々木祐希子・竹内郁雄・寺岡行雄（2009）植栽密度の違いが植栽木の成長に及ぼす影響—ヒノキ 34
10 年生林分における事例—. *九州森林研究* 62:14-17
- 11 森林総合研究所東北支所（2016）東北地方の多雪環境に適した低コスト再造林システムの実用化に向
12 けた研究成果集「ここまでやれる再造林の低コスト化—東北地方の挑戦—」.
- 13 山川博美・重永英年・荒木眞岳・野宮治人（2016）スギ植栽木の樹高成長に及ぼす期首サイズと周辺
14 雑草木の影響．*日林誌* 98:241-246
- 15 八坂通泰（2013）グイマツ雑種 F_1 の低密度植栽．（低コスト造林・育林技術最前線．全国林業改良普
16 及協会編，全国林業改良普及協会） 117-118

研究報告（第 33 号）

令和 8 年 3 月発行

編 集 編集委員長 千葉 崇

編集委員 細谷 百合子, 和田 覚, 田村 浩喜, 澤田 智志

発 行 秋田県林業研究研修センター

〒019-2611 秋田県秋田市河辺戸島字井戸尻台 4 7 - 2

T E L 018-882-4511

F A X 018-882-4443

U R L <http://www.pref.akita.lg.jp/pages/genre/rinken>

e-mail forest-c@pref.akita.lg.jp

BULLETIN
OF
AKITA FOREST RESEACH AND TRAINING CENTER

No.33 2026.3

Establishment of new system for low-density planting of Japanese cedar forest in
Akita

Kyohei Nitta 1~28