

高密度で推移したサワラ高齢人工林の林分構造・成長と溝腐れ被害の発生状況

太田 敬之^{1*}・須崎 智広²・安藤 博之³・仲田 昭一⁴・鈴木和次郎⁵

¹森林研究・整備機構森林総合研究所・²関東森林管理局茨城森林管理署・³関東森林管理局静岡森林管理署・
⁴関東森林管理局森林技術・支援センター・⁵元・只見町ブナセンター

林齢100年近いサワラ人工林はスギ、ヒノキ林に比べて希少であり、管理手法について不明な点が多い。密度の大きく異なるサワラ人工林3林分で8年間の成長、生存について解析を行った。調査地は茨城県常陸大宮市の尺丈山1区、尺丈山2区、石岡市の月の折区である。いずれの調査地でも間伐の記録がないが月の折区では伐根が見られたことから、過去に密度管理が行われていたと考えられる。調査開始時のサワラの密度は尺丈山1、2区、月の折区で586本ha⁻¹、1,067本ha⁻¹、450本ha⁻¹、サワラの平均胸高直径は35.5 cm、30.4 cm、47.8 cmであり、サワラの胸高断面積比はそれぞれ84%、95%、77%であった。尺丈山2区では調査開始時に200本ha⁻¹が枯死していた。最も低い品等の「低」の本数率が尺丈山1、2区では35%、47%だが、月の折区では18%であり、サワラの密度から考えて過去に劣勢木の除去が行われたと考えられた。サワラの8年間の枯死は本数率で2.4~4.5%で、「低」の品等のみ見られた。尺丈山1、2区では69.5%、48.7%のサワラに溝腐れが見られたが、月の折区では4.2%であった。サワラ高齢林の育成にあたり、間伐は平均直径を増加させ、溝腐れ被害を防ぐ可能性があることが推察された。

キーワード：間伐、胸高直径、枯死率、品等

Takayuki Ota, Tomomasa Suzaki, Hiroyuki Ando, Syoichi Nakada, and Wajiro Suzuki : Growth and survivorship, occurrence of cankers on old dense artificial stands of *Chamaecyparis pisifera*. Japanese Journal of Forest Environment 65:19-27, 2023.

There are many questions on management method of old artificial sawara cypress (*Chamaecyparis pisifera*) stands whose age are almost 100 years old because they are rare compared with sugi (*Cryptomeria japonica*) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) stands. Three plots, Shakujo1, Shakujo2, and Tsukino-ore, were selected in 2005 and total cruises were conducted three times in 8 years to analyze survival and growth. Thinning records could not be found for Shakujo1 and Shakujo2. The density of sawara cypress in Shakujo1, Shakujo2, and Tsukino-ore was 586 ha⁻¹, 1,067 ha⁻¹, and 450 ha⁻¹, respectively, and mean diameter at breast height were 35.5 cm, 30.4 cm, and 47.8 cm, respectively. All sawara cypress trees were classified into five grades. Although the lowest grade class ratio was high in Shakujo1 and Shakujo2 (35% and 47%), it was low in Tsukino-ore (18%) because cleaning cutting was conducted. The death rate in 8 years was 2.4%~4.5%. Dead trees were found only in the lowest grade class in the three plots. Tree cankers were found on 69.5% and 48.7% of sawara cypress trees in Shakujo1 and Shakujo2 but 4.2% in Tsukino-ore. Thus, it should be concluded that thinning might urge growth of diameter, prevent canker damage from spreading, and effectively maintain stand soundness.

Key words : death rate, diameter at breast height, grade, thinning

1. はじめに

サワラ (*Chamaecyparis pisifera*) は長野県、岐阜県など主に中部地方に天然分布するヒノキ科の針葉樹である(林, 1960)。材は水に強いという特性を活かして風呂桶、手桶などに使用されているが、非常に柔らかいためヒノキほど建築材として利用されていない(中川, 1994; 鈴木ら, 1950)。2017年度末のサワラ人工林の蓄積は国有林内で290万m³であり、ヒノキ人工林の3%に過ぎない(林野庁, 2016)。そのため、サワラの人工林の調査事例はスギ、ヒノキに比べて極端に少ない。

近年、針葉樹人工林の伐期齢は伐期平均成長最多を基準とした40-50年から60-80年に延長されてきている。伐期の延長は立木の太径化、高価格化といったメリットもあるが、十分手入れが行われなかった高齢林では立木や林分の健全な成長が期待できないことがある。長伐期化によって従来の伐期を過ぎた人工林が増加する現在、それらに対する育成・管理手法が求められている。密度管理の最適化を実現するためには密度の異なる高齢林で胸高直径、樹高、生存率など比較する必要がある。そうすることで間伐効果の評価を行うことが可能となろう。

定性間伐は立木本数を調整し、個体間競争を緩和すること

* 連絡・別刷り請求先 (Corresponding Author) : 〒305-8687 つくば市松の里1 森林研究・整備機構森林総合研究所 : Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization, Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8687 Japan
E-mail : takaota@ffpri.affrc.go.jp

1 Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization

2 Ibaraki Forest Management Office, Kanto Regional Forest Office

3 Shizuoka Forest Management Office, Kanto Regional Forest Office

4 Forest Technology Development and Support Center, Kanto Regional Forest Office

5 Formerly of Tadami Beech Center

(2021年12月20日受付, 2022年10月4日受理)

で立木の肥大成長を促すとともに、劣勢木を除去することで林分の質的向上を図る意義があり(寺崎, 1928), 実際, 高齢級ヒノキ人工林にその効果が認められている(安藤, 1982; 鈴木ら, 2009)。間伐が立木のサイズだけでなく材質も改善し(Cameron, 2002), 間伐林分と無間伐林分では面積当たりの材積に大きな違いはないが構造材に適した木材は間伐林に多いことが報告されている(Methley, 1995)。

秋田県のスギ人工林試験地(3林分, 12調査区)では1910年代から長期継続調査が行われ, 秋田県のスギは晩成で60年以降も高い成長量を維持してきた(大住ら, 2000)。スギ, ヒノキ高齢人工林の樹高成長を示す地位指数曲線は各地で100年を越える林齢まで作成され(片倉ら, 2005; 長濱・近藤, 2006; 島田, 2010; 豊田ら, 2005), 従来予想されていた数値よりも樹高の伸びや材積の増加は加齢しても落ちていないという結果が得られている。岩手県のスギ人工林で90-100年生でも間伐による成長改善がみられ(國崎ら, 1999; 杉田ら, 2017), 秋田県添畑沢(Matsushita *et al.*, 2015), 鹿児島県白鹿岳間伐試験地(吉田ら, 2002)のスギ人工林では, いずれも間伐により肥大成長の改善が見られている。サワラ人工林の調査事例は限られているが, 東京大学秩父演習林で樹齢33年から82年までの調査が行われ(山本ら, 1987; 大村ら, 2004; 原口ら, 2012), サワラは比較的耐陰性が高いため, 弱度の間伐であっても小径木の成長の改善が見られること(山本ら, 1987)が報告されている。

一方, 無間伐林は自己間引きが進み, 弱度間伐林との密度の違いがみられなくなっているとの報告がある。京都府の無間伐の90年生ヒノキ人工林では斜面上部のプロットでは下部よりも高密度で小径木が多くなり, 広葉樹との混交が進んでいた(辻ら, 2007)。密度管理を行わない人工林では枯死木の増加, 成長の抑制という特徴がみられ, アテ林では無間伐林では漏脂病の被害率が増加するなど(小谷, 2014), 立木の質の低下を招くとされている。

筆者らは高齢級針葉樹人工林の適正管理を図るため, 茨城県内の林齢100年以上の針葉樹人工林(ヒノキ, スギ, サワラ)合計26ヶ所のプロットを設定し, 林分の構造・動態を追跡調査している(鈴木ら, 2009)。これらの林分は数度の間伐を経て, 密度が低下しているところがほとんどであるが, この中に間伐記録がなくきわめて高密度のサワラ林が存在する。サワラ人工林の密度と成長の関係を調査した事例が少ない中, 施業履歴の異なる林分でのサイズ構成, 生存率, 形質・被害発生などの比較はサワラ人工林の施業, 適正管理を考える上

での重要な資料になると考えられる。

長伐期林においては病害が問題となり, 特に大径木になってから病徴が出ることは長年かけて成長してきた立木の価値が失われ, 生態学的な影響だけでなく森林経営的な影響は極めて大きい。病原菌が根から入り込み幹の芯を腐らせるサワラの根腐れ病では林齢・立木密度が高いほど発病率が高い(原口ら, 2017)。また, ヒノキ大径木に溝腐れの病徴を引き起こす病原菌としてさび病菌があげられるが, サワラにも同様の病害を生じさせる(原, 1927; 佐藤, 1966; 竹下, 1978; 浜, 1987)。溝腐れ被害については密度と発症率の関係, 発症木の生存率など詳細な情報は少なく, それに対処する手法もほとんど報告されていない。今回の調査地では溝腐れが多く見られるため調査項目の一つとした。

本研究では林齢100年に近いサワラ人工林3林分を対象に, 1)立木の密度が個体のサイズ構成にどのように影響するか 2)本数密度と個体の肥大成長量, サイズごとの死亡率がどう関係するか 3)間伐と立木の形質はどう関係するか, 4)病害の出現が立木密度・立木サイズによって異なるかについて比較を行った。

2. 調査地

本調査は茨城森林管理署管内の高齢サワラ人工林3ヶ所で行った。常陸大宮市高部の50林班ろ1小班(以下, 「尺丈山1区」), 50林班と小班(以下, 「尺丈山2区」), 石岡市上青柳の222林班と小班(以下, 「月の折区」)である。3つの林分の林班沿革簿によると尺丈山1, 尺丈山2, 月の折区はそれぞれ1907年, 1912年, 1902年に植栽されている。いずれの調査地でも間伐記録は残されていない。

各調査地の年平均降水量は近隣のアメダスのデータを用い, 平均気温はそのアメダスデータから標高100mに対し0.6℃の気温遞減率を用いて算出した(表-1)。尺丈山1区, 尺丈山2区については常陸大宮, 月の折区については降水量が柿岡, 気温が土浦の観測値を用いた。3地点の年平均気温は10.8~13.5℃, 年平均降水量は1,344~1,386mmであった。サワラの天然分布域の北限は岩手県北上市で分布の中心は木曾地方であり, 年平均降水量が1,500mm以上の地域に限られている(林, 1960)。今回の調査地は年平均気温は天然分布域とほぼ変わらない(木曾福島が10.5℃)が, 降水量としては乾燥した地域と言えよう。

表-1. 調査区の諸元

調査区名	標高	平均気温	降水量	調査地の位置	
	(m)	(℃)	(mm)	北緯	東経
尺丈山1	410	10.8	1344	36.7°	140.3°
尺丈山2	380	11.0	1344	36.7°	140.3°
月の折	130	13.5	1386	36.2°	140.1°

3. 方 法

3.1 調査方法

2005年に尺丈山1区、2006年に尺丈山2区と月の折区に調査プロットを設定した。プロット面積は尺丈山1区、尺丈山2区、月の折区でそれぞれ1,400 m²、2,100 m²、1,600 m²であった。設定にあたって単一斜面上で可能な限り大きい面積のプロットを取る事を優先したため、プロットのサイズは調査地ごとに異なっている。

プロット内の胸高(地表から130 cm)の周囲長が15 cm以上のすべての立木に個体識別番号を付け、胸高周囲長、樹高を測定した。胸高周囲長はスチールメジャーで、樹高は測高器(Vertex IV: Haglof社製)で測定した。サワラについては枯立木の胸高周囲長の測定も行った。2008年、2011年、2013年に3つのプロットで立木のサイズ(胸高周囲長と樹高)の再測を行い、前回測定した立木の生死を確認し、肥大成長量を算出した。サワラには溝腐れの病徴がみられるものが多かったため、幹腐朽の有無をチェックした。2回目、3回目の調査時に新たに胸高周囲長15 cmに達した立木は樹種の識別、個体識別を行い、サイズ測定を行った。

過去の伐採(間伐)履歴を把握するため、プロット内に残された古い伐根について、その個数、伐採面の直径、伐採高を測定した。伐採された立木の時点での胸高直径を推定するため、サワラ立木54本(胸高直径10.4~69.3 cm、平均24.8 ± 10.9 cm)の地上高10 cmから50 cmまでの直径および胸高直径を測定し、地上高とその高さでの直径、胸高直径の関係式を作成した。その式を伐根の高さと伐採面の直径に当てはめることで伐採当時の胸高直径を推定した。

サワラおよび植栽された針葉樹(スギ、ヒノキ)について将来の間伐を行う際の選木基準として、各立木の品等区分を行った。茨城県の高齢ヒノキ人工林で行ったのと同様の手法(鈴木ら、2009)で、将来木を「上」、調整木を「中」、除去木を「下」とし、上、中はさらに二段階に分け、特上、上、中(上)、中(下)、下と5段階にした。特上は「特に優れた形質を持つ将来木」、上は「その他の将来木」、中(上)は「間伐の対象となるが場合によっては将来木となりうる」、中(下)は「場合によっては除去木となりうる」、下は「次回の間伐時に伐採・除去すべき不良形質木」と定義される。サイズの大きい個体ほど良い品等とされる傾向はあるが曲がりなどで形質不良と判断され、大径木でも間伐対象となり得る(鈴木ら、2009)(なお、引用論文では特上、上は上(上)、上(下)となっている)。

3.2 解析方法

サワラのプロット間のサイズ分布に有意差が見られるかどうかについて比較を行った。調査開始時に立木を溝腐れの有無を元に健全木、被害木に分類した。被害木は溝腐れが見られるものを意味し、溝腐れ被害がみられないものは健全木に分類される。枯死木はプロット内で原型を留めながら立ち枯れているものを対象とし、これらは近年枯れたと判断した。健全木、被害木、枯死木の胸高直径分布、樹高分布の検定は

一元配置の分散分析を行った。手順としては各プロットの立木を健全木・被害木・枯死木(ステータス)に分類し、それぞれのステータスにおいて、直径、樹高のプロット間の比較を一元配置の分散分析で行った。プロット間の多重比較についてはHolmの方法で行った。

肥大成長について影響を及ぼす要因を抽出するため、調査開始時から2013年までの胸高直径の増分を応答変数、胸高直径、溝腐れの有無、プロット、そして胸高直径とプロットの交互作用を説明変数として一般化線形モデルによる解析を行った。また、間伐が肥大成長に及ぼす影響を推測するため、サワラを上木と下木に分け差異が見られるかを検証した。上木と下木は樹高により仕分けし、尺丈山1区では25 m、尺丈山2区では23 m、月の折区では30 mを境にそれ以上は上木、未満は下木とした。胸高直径の増分を応答変数、上木か下木か、プロット、上木下木とプロットの交互作用を説明変数とした。胸高直径は上木かどうかに関わるので説明変数から外した。検定におけるいずれも誤差構造は正規分布とした。

サワラの生存に影響する要因については3調査区全体の生存、枯死を応答変数とし、調査開始時の胸高直径、溝腐れ被害の有無、調査区を説明変数とした。誤差構造は二項分布とした。

一般化線形モデルにおいては、AICによるモデル選択を行い、最適のものを採択した。以上の解析にはR3.0.1(R Core Team, 2018)のglm関数を用いた。

4. 結 果

4.1 調査開始時の林分構造

各プロットの調査開始時(2005年、2006年)の林齢、樹種別の本数密度、サイズを表-2に示す。尺丈山1区ではスギ、月の折区ではヒノキが混植されていたが、胸高直径、樹高ともサワラとほぼ同じ値を示した(表-2)。サワラの胸高断面積比は尺丈山1、2区、月の折区でそれぞれ84.1%、95.2%、77.4%となり、スギ、ヒノキの植栽木と合わせるといずれのプロットでも95%を超えた。広葉樹はいずれの調査地でも平均胸高直径は10 cm未満で、胸高断面積比は3.2~5.0%を占めるにとどまっていた(表-2)。

サワラの本数密度は尺丈山1、2区、月の折区でそれぞれhaあたり586本、1,067本、450本であった(表-2)。サワラの平均胸高直径は月の折区の45.9 cmが最も大きく、尺丈山1区が33.8 cm、尺丈山2区が28.7 cmであり、本数密度が高いほど胸高直径は小さくなる傾向が見られた(表-2)。月の折区と尺丈山2区を比較すると、胸高断面積合計はほぼ同じだが、月の折区のサワラの本数密度は尺丈山2区の半分以下であり、平均直径は尺丈山2区の1.5倍以上の値を示した(表-2)。

立木の胸高直径分布は尺丈山1、2区でそれぞれ30 cm台、20 cm台にピークがあるのに対し、月の折区では40 cm台にピークがあり、30 cm未満の本数率は2.8%と少なかった(図-1)。胸高直径50 cm以上の本数率は尺丈山1区で3.7%、尺丈

表-2. 調査開始時の林分構造

調査区名	林齢 (年)	本数密度 (本 ha ⁻¹)	胸高断面積合計 (m ² ha ⁻¹)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	
尺丈山 1	98	サワラ	586	57.1	33.8 ± 10.4	22.7 ± 5.4
		スギ	64	7.4	38.0 ± 5.9	23.4 ± 7.6
		広葉樹	264	3.4	9.0 ± 8.0	7.4 ± 3.7
		総数	914	67.9	26.9 ± 14.9	18.7 ± 8.4
尺丈山 2	94	サワラ	1067	77.4	28.7 ± 9.9	18.9 ± 4.0
		広葉樹	315	3.9	9.9 ± 7.7	8.3 ± 4.6
		総数	1381	81.3	24.4 ± 12.3	16.4 ± 6.1
月の折	104	サワラ	450	77.2	45.9 ± 8.7	29.0 ± 2.7
		ヒノキ	113	19.4	46.6 ± 7.1	30.1 ± 3.1
		広葉樹	550	3.2	7.9 ± 3.6	6.9 ± 2.2
		総数	1113	100.1	27.2 ± 20.1	18.3 ± 11.5

注) 尺丈山 1 は2005年, 他は2006年の測定。胸高直径・樹高は平均 ± 標準偏差

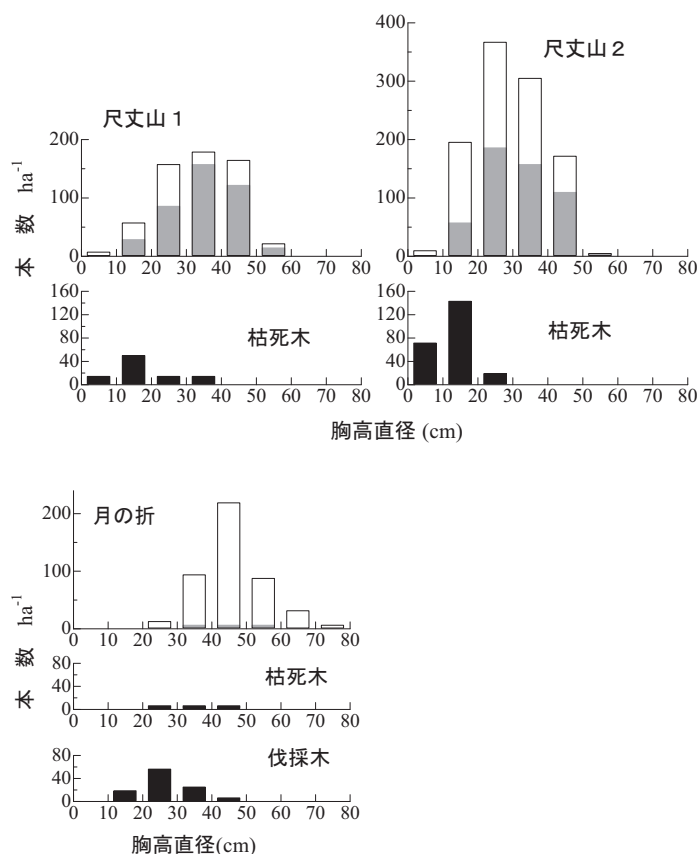


図-1. 調査開始時の各プロットのサワラの胸高直径分布

立木：□健全木 ■被害木

伐採木の胸高直径はサワラ立木の高さ30 cm, 50 cm, 130 cmでの直径の測定を行い, 伐根の直径, 高さから推定したものの。

表-3. 調査開始時の枯死木、被害木の割合

調査区名	枯死木		被害木	
	密度(本 ha ⁻¹)	割合(%)	密度(本 ha ⁻¹)	割合(%)
尺丈山 1	92.9	12.8	407.1	69.5
尺丈山 2	219.0	18.1	519.0	48.7
月の折	18.8	4.0	18.8	4.2

枯死木の割合は枯死木本数 / (生存木本数 + 枯死木本数) * 100。
被害木の割合は被害木本数 / 生存木本数 * 100で算出した

表-4. 調査開始時の調査区・ステータスごとの平均サイズ

調査区名	胸高直径(cm)			樹高(m)		
	健全木	被害木	枯死木	健全木	被害木	枯死木
尺丈山 1	30.4 ± 11.1 ^a	35.3 ± 9.7 ^a	18.1 ± 8.3 ^b	22.8 ± 4.2 ^a	23.5 ± 4.2 ^a	13.1 ± 4.5 ^b
尺丈山 2	26.2 ± 9.9 ^a	31.3 ± 9.2 ^b	12.8 ± 5.0 ^c	18.2 ± 4.8 ^a	19.5 ± 3.1 ^b	9.9 ± 3.7 ^c
月の折	46.0 ± 8.7 ^a	45.3 ± 6.7 ^a	33.5 ± 5.7 ^b	29.2 ± 2.7 ^a	30.2 ± 0.9 ^a	19.8 ± 4.5 ^b

数値は平均値 ± 標準偏差。異なる英小字はそれぞれの調査区内におけるステータス間で有意差があることを示す。

山 2 区で0.5%であるのに対し、月の折区では27.8%であり、胸高直径50 cm以上の本数率は調査区により大きな違いが見られた(図-1)。3つの調査地の胸高直径分布には有意差がみられた($F = 82.5$, $df = 2$, $p < 0.001$)。

林内の伐根は尺丈山 2 区ではまったく見られず、尺丈山 1 区ではプロット内に 1 個(7.1本ha⁻¹)であった。月の折区では伐根の密度は106.3本ha⁻¹で、これはサワラ生立木の23.6%、枯死木を含めても22.6%に相当する。伐採木の伐採時の胸高直径を推定したところ、尺丈山 1 区では15.7 cm、月の折区では27.0 ± 7.8 cmであった。月の折区の伐採木の推定胸高直径は最大で42.6 cm、最小で13.6 cmであり、伐採木の29.4%が胸高直径30 cm以上、20 cm未満の本数率は17.6%と推定された(図-1)。

4.2 サワラの枯死木、溝腐れ被害木の密度とサイズ分布

尺丈山 1 区、尺丈山 2 区には調査開始時に多くのサワラの枯死木が見られた(図-1, 表-3)。枯死木の密度が最も高かった尺丈山 2 区で219.0本ha⁻¹、尺丈山 1 区の92.9本ha⁻¹、枯死木の生存木に対する割合としては尺丈山 2 区が20.5%と最も高かった(表-3)。それに対し、月の折区のプロット内の枯死木は18.8本ha⁻¹で尺丈山 1, 2 区を下回っていた。枯死木の個体数は尺丈山の 2 つのプロットでは胸高直径10 cm台が最も多く(図-1)、平均胸高直径は生立木より小さかった(生立木28.8 ± 9.9 cm, 枯死木12.6 ± 5.1 cm, $p < 0.001$, t検定)。間伐が行われていない尺丈山 1, 2 区では調査開始前に多くの立ち枯れ木が生じており(表-3, 図-1)、間伐の有無が枯死率に影響している可能性は高いと考えられる。

溝腐れ被害木の本数率は尺丈山 1 区で69.5%、尺丈山 2 区で48.7%と高い割合を示したのに対し、月の折区では4.2%と低く、プロット間で大きな違いが見られた(表-3)。被害木のサイズ分布は尺丈山 1, 2 区とも太いサイズにまで及ん

でおり、枯死木のように小さいサイズへの偏りは見られなかった(図-1)。各プロットの健全木、被害木、枯死木の胸高直径分布、樹高分布を比較したところ、いずれのプロットでも枯死木は胸高直径、樹高とも健全木より有意に小さかった(表-4)。溝腐れ被害木については尺丈山 2 区で胸高直径、樹高とも平均値が健全木より有意に大きく、尺丈山 1 区、月の折区では被害木と健全木の間で有意差は見られなかった(表-4)。

4.3 サワラの品等ごとの本数分布とサイズ

サワラを 5 段階に区分した品等ごとの本数率、平均胸高直径、調査期間内の枯死率を表-5 に示す。各プロット内に最も品等の高い特上は 1 本ずつしかなく、特上、上に区分された本数率も大きな違いは見られなかった。一方、最も品等の低い「下」の本数率は月の折区で18.1%だったのに対し、尺丈山 1 区では34.9%、尺丈山 2 区では46.6%と高かった。月の折区では中(上)の品等が最も多かったのに対し、他の二つの調査地では「下」の品等が最も高い割合を示し、立木の密度が高い調査区で品等の低い立木が多いという結果となった(表-5)。

品等区分ごとの平均胸高直径はいずれのプロットでも品等が下がるにつれて小さくなる傾向がみられた。尺丈山 1, 2 区では品等「下」の平均直径は小さく、中(下)のそれぞれ68%, 66%であったが、月の折区では97%とほとんど違いはみられなかった。また、月の折区の「下」の品等の平均胸高直径は他の 2 調査区の「上」の平均直径よりも大きかった(表-5)。調査開始時から2013年までに枯死したサワラはすべての調査区で「下」の品等の立木だけであり、3つの調査区で調査開始時から2013年までの枯死率に有意差は見られなかった(表-5)。

表-5. サワラの調査区ごとの本数率, 平均直径, 枯死率

	調査地	品等				
		特上	上	中(上)	中(下)	下
本数率 (%)	尺丈山 1	1.2	6.0	24.1	33.7	34.9
	尺丈山 2	0.4	9.0	17.9	25.6	46.6
	月の折	1.4	8.3	41.7	30.6	18.1
胸高直径 (cm)	尺丈山 1	45.2	41.6±7.0	39.5±8.8	37.0±7.2	24.7±8.7
	尺丈山 2	42.7	36.6±4.6	35.4±6.7	33.3±7.7	22.1±8.5
	月の折	58.6	53.2±7.6	47.7±8.8	43.2±6.9	42.1±8.6
枯死率 (%)	尺丈山 1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9
	尺丈山 2	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6
	月の折	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6

平均直径は最初の調査時(2005年, 2006年)。胸高直径は平均 ± 標準偏差。特上の品等は各プロット 1 本ずつしかなかったため胸高直径の標準偏差はない。枯死率は調査開始時から2013年までに枯死した本数率。

表-6. サワラの肥大成長を応答変数とした一般化線形モデルにおける変数の選択

	尺丈山 1	尺丈山 2	月の折	調査区×直径
直径	0.108 ± 0.010	0.078 ± 0.006	0.072 ± 0.010	
品等		0.298 ± 0.121		
溝腐れ被害		0.219 ± 0.095		

数値は推定値 ± 標準誤差。AIC基準で選択されなかった説明変数は空欄とする

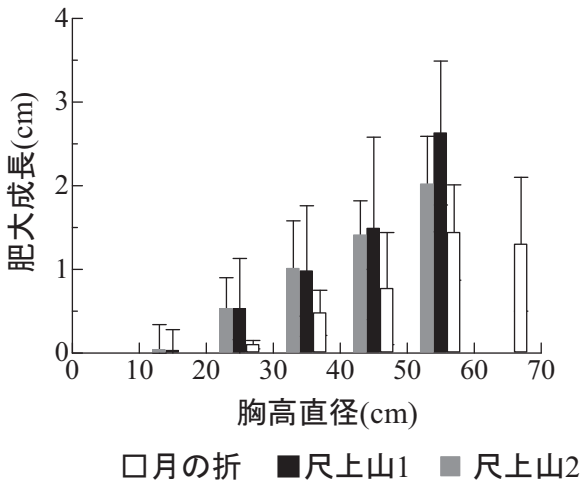


図-2. 胸高直径別の平均肥大成長量

4.4 サワラの肥大成長量と関係する要因

サワラの期間ごとの肥大成長量とそれに関わる要因についての解析結果を表-6に示す。いずれの調査地でも胸高直径と直径の肥大成長量に有意な関係が見られ、同じ調査区内ではサイズの大きい木ほど成長量が大きくなる傾向が見られた。一方、品等と肥大成長との関係は尺丈山 2 区にのみ認められ、

表-7. サワラの上木と下木の肥大成長量

	尺丈山 1	尺丈山 2	月の折
上木	1.42 ± 1.09	1.26 ± 0.44	1.01 ± 0.75
下木	0.58 ± 0.85	0.47 ± 0.57	0.62 ± 0.49

数値は平均値 ± 標準偏差(単位はcm)。尺丈山 1. 尺丈山 2. 月の折. それぞれにおいて樹高25m. 23m. 30mで上木と下木を区分けした。

品等が良いものほど肥大成長量が大きい傾向が見られた(表-6)。溝腐れ被害木と健全木の肥大成長量では尺丈山 2 区で被害木のほうが肥大成長が大きいという結果となった(表-6)。

3つのプロット間でサワラのサイズ別の肥大成長を比較したところ、尺丈山 1, 2 区に対し、月の折区では肥大成長がいずれの胸高直径階でも小さくなる傾向が見られた(図-2)。胸高直径に対する肥大成長量は尺丈山 1, 2 区と月の折区の間には有意な違いが見られ、月の折区の肥大成長が他の二つに比べて有意に小さい結果となった($p < 0.001$)。

サワラの上木と下木の肥大成長の差異については、上木が下木よりも成長が大きく($p < 0.001$)、調査区間でも月の折区が小さい傾向が見られた($p = 0.014$)。上木, 下木に分けてサイト間の比較を行うと、下木の平均肥大成長は月の折が

表-8. サワラの生存率を応答変数とした一般化線形モデルにおいて選択された説明変数

	推定値±標準誤差	p値
2005年の直径	0.221 ± 0.083	0.009
調査区	-1.713 ± 1.447	0.236
溝腐れ被害	1.193 ± 0.756	0.115

p値はパラメータの有意検定結果

最も大きく、逆に上木の肥大成長は月の折が最も小さかった(表-7)。また、上木下木とプロットの交互作用についてはAIC判定により採用されなかった。

4.5 サワラの調査開始後の死亡率と関係する要因

調査開始時(2005, 2006年)に生育していたサワラ立木のうち、2013年までに枯死した割合は尺丈山1, 尺丈山2, 月の折区でそれぞれ2.4%, 4.5%, 1.4%であった。3つのプロットの枯死率に有意差は見られず($p = 0.236$)、調査開始時に多くの立ち枯れ木が見られた尺丈山2区でも調査期間中には多くの枯死は発生していなかった。サワラの調査開始から8年間の死亡率と立木の胸高直径、溝腐れ被害の有無については尺丈山1区、月の折区ではいずれも死亡率との間に有意な関係は見られなかったが($p = 0.236$)、胸高直径が大きい立木では枯死が起こりにくい傾向が見られた($p = 0.009$) (表-8)。

5. 考 察

5.1 密度と林分構造の関係

尺丈山1, 2区は過去の間伐記録がなく、林内の伐根もほとんど見られず、長期間放置されてきたとみられる。月の折区では2006年の胸高直径30cm未満のサワラの立木全体に対する本数率は2.8%でこれは尺丈山1, 2区のそれぞれ37.8%, 53.6%に比べて極端に低かった(図-1)。月の折区ではサワラの密度が低く、立ち枯木が少ないことや伐根の存在から、過去の間伐により立木密度が低下し胸高直径のサイズが大きいほうにシフトしたと考えられる(図-1)。サワラの枯死木の発生は小径木を中心に見られた(図-1)が、月の折区では小径木の比率が低いことが、枯死木が少ない一因と考えられる(表-3, 表-4)。

同じ茨城県内でヒノキの100年生前後の人工林6林分の調査結果では、間伐は1~3回行われ、ヒノキの平均胸高直径は34.5~44.3cmであった(鈴木ら, 2009)。このうち、間伐を林齢31年のときに1回だけ行った95年生のヒノキ人工林の事例では密度が843本 ha^{-1} であったが、品等構成では「下」の本数率が12.7%であり、間伐を複数回行っている他の林分(いずれも5%未満)よりも高かった(鈴木ら, 2009; 須崎智広 私信)。一方、今回調査を行ったサワラ高齢林では品等「下」の本数率は尺丈山1区で34.9%, 尺丈山2区で46.6%とこれらのヒノキ高齢林の値を大きく上回っていた(表-5)。高密度のスギ人工林においては密度が高いほど劣勢木の本数率が高く、若年時の間伐が劣勢木の割合を抑えることが報告

されている(國崎, 2015)。また、間伐を行った後の品等は次の間伐までに個体間の競争によって変化し、そのため優勢木が劣勢木になることもあり(寺崎, 1909)、複数回の間伐は劣勢木を確実に除去する効果が期待される(鈴木ら, 2009)。今回の結果では調査期間内に枯死した立木はすべて品等が「下」であり(表-5)、自己間引が起きて全体として品等が向上したという見方もあるが、枯死した本数は各調査区とも品等「下」の10%, 全本数の5%にも達していない(表-5)。林齢143年時に下層間伐を行った高齢スギ人工林(間伐前密度は約450本 ha^{-1})では間伐率1.1%の対照区に比べて24.8%の間伐区で上層木の成長改善効果が報告されており(國崎ら, 1999)、本調査地のような高密度の人工林では間伐の必要性はより高いと推察される。

5.2 肥大成長、枯死率と密度の関係

プロット内ではサワラの胸高直径が大きいほど肥大成長が大きくなる傾向がみられたが(表-6)、プロット間で比較すると平均直径の最も大きい月の折区で同じ胸高直径でも肥大成長が小さくなる傾向が見られた(図-2)。これは月の折区ではサワラの胸高直径が他の2区に比べて大きく(表-2)、例えば胸高直径30cm台の立木が月の折区では下層木だが、他の2区では上層木になるといったことが、その要因と考えられる。また、月の折では下木の成長はむしろ他の調査区を上回るが、上木の肥大成長が他の調査区より小さかった(表-7)。被陰の影響が小さい上木でこうしたことが見られた要因については今回の調査では十分な確証は得られなかった。

東京大学秩父演習林でスギとサワラの無間伐林と強間伐林で植栽後29年から54年まで追跡調査したところ、スギでは無間伐林のほうが平均直径は小さいが、大径木の密度、サイズ構成は無間伐林分と弱間伐林分ではほぼ同じであった(山本ら, 1987)。サワラは無間伐林では間伐林に比べ小径木の成長が劣る上、大径木の密度は無間伐林では間伐林の半分程度となり、大径木の生産にはサワラは間伐が必要であるとしている(山本ら, 1987)。林齢90~100年の10年間はサワラの無間伐林では約150~300本 ha^{-1} の枯死木を生じており、枯死木の胸高直径分布は生残木より小さい方に偏っていた(大村ら, 2004)。サワラの高齢人工林では間伐を行わないと小径木の大量の枯死の心配があり、大径木の生産が困難となることが示唆された。

5.3 溝腐れ被害と間伐の有無について

本研究では無間伐の2林分で多くの溝腐れ被害が観察された(表-3, 図-1)。腐朽は凍裂による割れに菌が入り込んだものという意見もある(高尾ら, 2021)。凍裂は冬期に立木の材の中の水分が凍結し、幹が割れる現象であり、茨城県のスギ高齢人工林(調査時林齢97年)でも約11%の立木に凍裂がみられた(太田敬之 未発表)。全国のスギ人工林では凍裂被害は本数率で30%程度が最高であり、寒冷地であってもほとんど凍裂の観察されない林分も見られた(今川, 1997)。尺丈山1, 2区でそれぞれ69.5%, 48.7%に幹腐れ被害が見られたが(表-3)、これはスギ林と比較するとかなり高く、幹腐れの主因が凍裂とは考えにくい。

一方、サワラで非常に高い割合で溝腐れ被害が見られた事例としては鳥取県の60年生林分で92%の幹に(竹下, 1978), 秩父では65年生林分で約半数に(五十嵐ら, 1995)溝腐れが見られた。ヒノキにも被害を引き起こすとされているが, 被害率はサワラのほうが高い。例えば東京大学秩父演習林では65年生の人工林では腐朽している割合はサワラの約半数に対しヒノキでは10%程度であり(五十嵐ら, 1995), 茨城県内のヒノキ高齢人工林9林分(2005年の時点での林齢が94~104年)(鈴木ら, 2009; 須崎ら, 2012)では溝腐れの被害率が最大で13%でありサワラ林のように70%近い罹患率を示す林分は見られなかった。サワラはヒノキに比べていずれも高い割合で幹腐れが見られ, 植栽林地や林分管理のあり方を検討する必要がある。

アメリカのマツ林では癌腫の病徴の発現は乾燥, 雪, 虫による傷などのストレスで起きやすいことが報告されており(Nicholls and Ostry, 1990), 本調査でも密度が高く成長の抑制された林分で多く発生している(表-2, 表-3)。ヒバ林では人工林, 天然林での調査結果から立木密度が高い林分で漏脂病が発生しやすく, 間伐によって密度を下げることで林内の通気性, 光量の改善が発病率を下げると推測している(窪野ら, 2003)。さび病菌が枯れ枝から侵入する(竹下, 1978)ことも手入れ不足の森林で樹病が発生しやすくなる一因となり得ることが示唆されている。

5. おわりに

本調査はサワラ高齢人工林で密度の異なる林分のサイズ分布, 品等分布を比較したものであり, 密度管理の重要性を示す結果となった。密度の高いまま放置されたサワラ人工林では品等の落ちる立木が多く, 多くの枯損木を生じさせた。高密度の人工林では溝腐れ被害が生じやすく, 特にサイズの大きい個体で被害が起きやすいことからサワラ林を高齢林に持っていくべきかどうかは, 間伐などの管理が適正に行えるか, 考慮した上で判断すべきであろう。

6. 謝 辞

本研究の調査の実施にあたっては関東森林管理局森林技術・支援センターに調査地の設定, 調査協力など多大なご協力をいただいた。元所長の林田栄, 屋代忠幸両氏そして調査区の設定や調査に協力いただいた池田伸氏(元茨城森林管理署)をはじめ職員各位に感謝する。

本研究は森林総合研究所交付金プロジェクト(課題番号201104)の補助をうけた。

引用文献

安藤 貴(1982) 林分の密度管理. 126pp, 農林出版, 東京.
 Cameron, A.D. (2002) Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. *Forestry* 75:25-35.
 浜 武人(1987) 中部山岳地帯針葉樹の主要さび病に関する研究. 林業試験場研究報告343: 1-118.
 原 撰祐(1927) 実験樹木病害篇. 402pp, 養賢堂, 東京.

原口竜成・千嶋 武・高德佳絵・丹羽悠二・神塚武一・五十嵐勇治・相川美絵子・吉田弓子・鎌田直人(2012) 埼玉県秩父市における間伐強度の異なるサワラ人工林の成長解析. 関東森林研究63-2:57-60.
 原口竜成・平尾聡秀・山田利博(2017) 東京大学秩父演習林におけるサワラ根株心腐被害の発生状況. 関東森林研究68:181-184.
 林 弥栄(1960) 日本産針葉樹の分類と分布. 農林出版, 東京.
 五十嵐勇治・斎藤 登・大畑 茂(1995) 65年生のサワラ・ヒノキ間伐木の造材歩止り. 東大演習林技術官等試験研究・研修会議報告書, 21-29.
 今川一志(1997) 樹木の凍裂—発生状況とその原因—. わかりやすい林業研究解説シリーズ106. 88pp, 林業科学技術振興所, 東京.
 片倉正行・山内仁人・古川 仁(2005) ヒノキおよびカラマツ人工林の長伐期施業に関する研究—長期育成循環施業に対応する森林管理技術の開発—. 長野県林業総合センター研究報告19:1-16.
 小谷二郎(2014) アテ人工林での間伐の強度や方法の違いが成長に与える影響. 石川県農林総合研究センター林業試験場研究報告46:1-6.
 窪野高徳・市原 優・兼平文憲・田中功二(2003) 東北地方のヒバ天然林及び人工林における漏脂病被害実態と被害形態の把握. 東北森林学会誌8:88-93.
 國崎貴嗣(2015) スギ若齢人工林における劣勢木の本数割合の変化. 岩手大学農学部演習林報告46:1-10.
 國崎貴嗣・藁谷紀恵・柴田信明(1999) 岩手山麓におけるスギ高齢林の林分構造と成長. 日本林学会誌81:346-350.
 Matsushita, M., Takata, K., Hitsuma, G., Yagihashi, T., Noguchi, M., Shibata, M., and Masaki, T. (2015) A novel growth model evaluating age-size effect on long-term trends in tree growth. *Functional Ecology* 29:1250-1259.
 Methley, J. (1995) *Mensuration. Report on Forest Research*, Forest Commission, HMSO, London.
 長濱孝行・近藤洋史(2006) 長伐期施業に対応した鹿児島県スギ人工林収穫予測. 日本森林学会誌88:71-78.
 中川重年(1994) 針葉樹. 188pp, 保育社, 大阪.
 Nicholls, T. and Ostry, M.E. (1990) *Sphaeropsis sapinea* cankers on stressed red and jack pines in Minnesota and Wisconsin. *Plant Disease* 74:54-56.
 大村和也・澤田晴雄・大畑 茂(2004) 秩父演習林における人工林固定測定地林分成長資料. 演習林43: 1-192.
 大住克博・森麻須夫・桜井尚武・斎藤勝郎・佐藤昭敏・関 剛(2000) 秋田地方で記録された高齢スギ人工林の成長経過. 日本林学会誌82:179-187.
 R Core Team (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, <http://www.R-project.org/>
 林野庁(2016) 第68次平成28年国有林野事業統計書
 佐藤邦彦(1966) サワラのさび病によるみぞ腐型被害. 森林防疫ニュース15:47.
 島田博匡(2010) 三重県のスギ・ヒノキ人工林における長伐期施業に対応した林分収穫表の作成. 三重県林業研究所研究報告2:1-28.
 杉田久志・梶本卓也・福島成樹・高橋利彦・吉田茂二郎(2017) 強度間伐が行われたスギ高齢人工林における林分および個体の成長. 森林総合研究所研究報告16:225-238.
 須崎智広・持宝美宜・太田敬之・鈴木和次郎(2012) 70年間無間伐の高齢ヒノキ人工林の動態. 第2回関東森林学会大会講演要旨集:22.
 鈴木恭介・永田潤一・岡本健治(1950) サワラ材に関する研究(第1報). 日本林学会誌32:315-322.
 鈴木和次郎・池田 伸・平野辰典・須崎智広・和佐英二・石神智生(2009) 高齢級ヒノキ人工林の林分構造にみる間伐履歴の影響. 日本森林学会誌91:9-14.
 高尾真世・小林 元・山越麻由・城田徹央・岡野哲郎・白澤紘

- 明・荒瀬輝夫・木下 渉・野溝幸雄・酒井敏信 (2021) 亜高山帯常緑針葉樹林におけるオオシラビソ・シラビソ立木の腐朽診断. 森林立地63:39-44.
- 竹下 努 (1978) サワラの樹幹溝腐れ型被害の調査. 鳥取県林業試験場試験研究報告21:17-26.
- 寺崎 渡 (1909) 落葉松林間伐試験第一回検定報告. 林業試験報告 6 :97-166.
- 寺崎 渡 (1928) 実験間伐法要綱. 239pp. 大日本山林會, 東京.
- 豊田信行・石川 実・中岡圭一 (2005) 愛媛県高齢級針葉樹人工林の樹高成長. 愛媛県林業技術センター研究報告23:41-48.
- 辻 貴文・石井弘明・金澤洋一 (2007) 京都府北部の無間伐ヒノキ高齢林における斜面位置と林分構造の関係. 日本森林学会誌89:160-166.
- 山本博一・伊藤幸也・大畑 茂・佐々木和男・大村和也 (1987) 東京大学秩父演習林のスギ・ヒノキ・サワラ・カラマツの生長試験地における間伐効果の解析. 東京大学農学部演習林報告76:287-329.
- 吉田茂二郎・安元岳玄・溝上展也・今田盛生・寺岡行雄 (2002) 白鹿岳間伐試験地におけるスギ高齢林の間伐効果について— 相対幹距比を基礎にした分析—. 九州大学農学部演習林報告 83:53-61.