

大径・優良材生産を目指した人工林管理技術の確立

研究期間：令和元年度～5年度

大矢信次郎・柳澤賢一・西岡泰久[※]・戸田堅一郎[※]・秋山巖[※]・田中裕二郎[※]

高齢級人工林において大径・優良材を生産するための管理技術及び成長予測技術を検討した。まず、高齢級カラマツ人工林の樹高成長特性を明らかにするため、南佐久郡川上村の115年生カラマツ人工林において伐倒木の梢端部及び造材位置から円盤を採取し樹幹解析を行ったところ、樹高及び直径の成長は100年生を超えても継続していることが確認された。しかし、樹齢とともに成長は緩やかに減少していたことから、カラマツ人工林の伐期は120年程度にとどめることが妥当であると考えられた。また、高齢級人工林における間伐後の成長特性を明らかにするため、13～14齢級時に間伐を実施し7～10年が経過したカラマツ、ヒノキ、スギの各人工林間伐試験地において毎木調査を行った結果、高齢級人工林においても樹冠長率を維持し直径成長を促すためには間伐が必要であることが示唆された。次に、高齢級林分を含めた成長予測に対応したカラマツの樹高成長曲線を調製するため、航空レーザ計測によって得られた単木樹高データの利用を検討した。その結果、樹高曲線中心線の地位指数（40年生時の樹高）は式の種類に関らず約20であり、カラマツの標準的な樹高成長をほぼ反映し高齢級における樹高成長も持続する線形が得られた。この曲線をガイドカーブとして地位指数曲線を作成することにより、地位の優劣に対応した高齢級カラマツ人工林の樹高成長予測が可能となった。

キーワード：高齢級人工林、間伐、航空レーザ計測、樹高成長曲線、地位指数曲線

1 はじめに

長野県の人工林は、12 齢級以上の面積割合が人工林全体の 78%に達し、主伐・再造林を行う林分が徐々に増えてきている（長野県林務部 2024）。一方で、明確な目標林型を定めることなく間伐を繰り返すなど高齢級林分の施業方針が定まっていない林分も多い。高齢級人工林の目標林型としては大径かつ優良材の生産林が想定されるが、これをどのように育成していくのか、管理手法が問われている。そのためには高齢級林分を管理する上での様々な課題を解決していかななくてはならない。

まず第1の課題は、特にカラマツについては高齢級でも樹高成長が持続するのか、明らかになっていないことである。長野県では、民有林における資源量の把握や収穫量の予測等のため、1983年に人工林主要樹種の林分材積表及び収穫予想表が作成された（長野県林務部 1983, 1984）。これらの林分材積表は、概ね 80 年生までを対象とするとしていたが、当時は高齢級林分のデータが極めて少なく、高齢級林分の収穫予想を行うことは難しかった。それから 8 年後の 1991 年、カラマツについては高齢級林分のデータを追加した改訂版が作成され（長野県林務部 1991）、さらに 2005 年にもデータの追加とともに Excel 版簡易収穫予想表が作成されている（片倉ら 2005, 片倉 2005）。このようにカラマツ人工林の成長とともに、高齢林の成長

予測は精度の向上が図られているが、近年は主伐が増加傾向にあり、収穫量の予測は益々重要性を増してきている。また、100 年生を超える林分のデータは未だ少なく、新たな知見の蓄積が必要となっている。そこで本研究では、高齢級におけるカラマツの樹高成長の経過を明らかにするため、主伐が行われた 115 年生カラマツ人工林において、伐倒木の梢端部と、幹の造材位置における円盤を採取し、年輪解析を行った。

第2の課題は、高齢級人工林における間伐効果の検証である。高齢級においても間伐による直径成長促進効果が認められる例（渡邊ら 2015, 杉田ら 2017 など）がある一方、間伐から 5 年以内では明瞭な成長促進効果は認められなかった例（大矢ら 2015）もあり、継続的な検証が求められている。

第3の課題は、高齢級における正確な成長予測が確立されていないことである。しかし近年目覚ましく発展した航空レーザ計測技術により、高齢級も含めた現在の人工林における膨大な数の樹高データを取得可能になった。これによって樹高成長曲線を作成することが可能なのか、本研究ではまずカラマツを対象として、新たな成長曲線を調製することを試みた。

以上のように、本研究では大径・優良材生産を目標林型に掲げた高齢級林分の成長量の把握と間伐による成長促進の検証、並びに樹高成長予測を

[※] 元林業総合センター育林部

行う手法の 3 点を検討した。なお、本研究は県単課題（令和元年度～5 年度）として実施し、成果の一部は中部森林学会（大矢ら 2021, 大矢 2022, 大矢 2024）において発表した。

2 調査方法

2.1 高齢級カラマツ林における樹高成長量評価

調査地は、長野県南佐久郡川上村の 115 年生のカラマツ人工林である。この林分は標高約 1,450m の北東～東向き斜面に位置する個人有林で、現所有者からの聞き取りによると間伐等の施業は行われてこなかった。伐採作業が行われていた平成 30 年 12 月 17 日及び 21 日に、伐倒時に利用対象外とされた梢端部 8 本分（長さ 0.8～4.3m）を採取するとともに、梢端と同一の個体を対象として土場で 4～6 m に造材された位置から厚さ 5 cm の円盤をチェーンソーにより採取した。樹高は、伐倒時に根元から梢端までの長さを巻尺で測定した。梢端部からの円盤採取は、持ち帰って丸鋸により行い、先端から 2 m までは 10cm ごと、2 m を超える部分については 20cm ごとに約 3 cm 厚の円盤を採取した。

年輪計測は Velmex 社製の精密年輪測定装置(TA Measurement System)を使用し、樹皮から髓に向かって平均的な年輪幅を示す 1 方向のみを対象として行い、樹齢(115 年)から年輪数を差し引いた数を各円盤高に樹高が達した時点の樹齢とした。樹高成長の傾向を類型化するため、各個体の樹高成長を各種成長曲線式(修正指数式, ゴンペルツ式, ロジスティック曲線式, リチャード関数式, ミッチャーリッヒ式, 対数式)にあてはめ、各式のパラメータを Microsoft Excel のソルバーアドインを使用して最適解を求め、残差平方和により適合性を評価した。

2.2 高齢級人工林における間伐が成長に与える影響

カラマツ, ヒノキ, スギの 13 齢級以上の高齢級林分における間伐の効果を検証するため、間伐後の胸高直径成長量を継続的に調査した。試験地は、松本市の 62 年生カラマツ人工林, 阿智村の 65 年生ヒノキ人工林, 根羽村の 69 年生スギ人工林(林齢はいずれも間伐実施時点)の 3 か所で、いずれも本数間伐率で約 50%の強度間伐区, 約 30%の普通間伐区, 0%の対照区を 2009 年～2011 年に設

定したものである。胸高直径は、各立木の山側地際から高さ 1.2m に取付けたナンバーテープの位置において、ステンレス製巻尺により胸高周囲長を mm 単位で測定し、直径に変換した。測定は、間伐から 3～5 年後までは毎年行い、7～10 年後に再度行った。間伐率によって残存木のサイズに偏りが生じるため、間伐前に各試験地全体の立木(伐倒木も含む)を胸高直径の小さい順に下位木(劣勢木), 中位木(中庸木), 上位木(優勢木)の 3 ランクに等分して分類し、各試験地の同一ランク残存木における直径成長量を比較した。直径成長量の差は Steel-Dwass 法による多重比較(1 対 1 の場合は Mann-Whitney 法)により検定し、間伐による直径成長促進効果を検証した。なお、間伐は胸高直径が小さい個体を優先的に伐る下層間伐であったため、カラマツ試験地の強度間伐区では下位木が全て伐採対象となり、対照区との成長比較はできなかった。

また、樹高及び枝下高の測定には Haglof 社製の Vertex III を使用した。樹冠長率は、樹冠長(樹高から枝下高を差し引いた値)の樹高に対する割合として求めた。各試験地(樹種)の間伐前と間伐から 8～10 年後の樹高, 枝下高, 樹冠長率について、試験区間の平均値の差を Tukey-Kramer の多重比較検定により評価した。

2.3 航空レーザ計測データを活用した高齢級に対応した樹高成長曲線の調製

林務部森林づくり推進課が平成 25～26 年度に行った航空レーザ計測によって得られたデータを基に行われた森林情報解析委託事業の電子成果品を用いて、樹高成長曲線を調製することが可能か検討した。これら委託事業では、DSM(数値表層モデル)からの樹頂点抽出, 樹頂点位置における DSM と DEM(数値標高モデル)との差から得られる単木樹高データ, 航空写真による林相(樹種)解析等を行っており、今回は 1 億点以上の単木樹高データを対象とした。まず、単木樹高多点データを QGIS3.22 により市町村ごとに分割し、各市町村の森林簿の施業班データと結合した。次に、信頼性の高いデータを得るため、次の 4 条件: ①林相解析による樹種が森林簿の樹種と一致すること, ②森林簿の林種が人工林であること, ③森林簿上の面積が 0.5ha 以上ある施業班, ④混交率が 100%

であること、を満たす単木データを抽出し、属性情報を csv ファイルにエクスポートした。以上の手順により抽出した樹種別の単木樹高データを集計し施業班ごとの樹高中央値を算出した。

次に、各林齢の樹高分布の IQR（四分位範囲）を求め、IQR 内において各齢級 10 林分ずつ県下市町村から偏りなくサンプリングした。対象齢級は信頼性の高いデータが必要数得られた 4～20 齢級とした。サンプリングデータに各種樹高成長曲線式（ゴンペルツ、ミッチャーリッヒ、リチャーズ、ロジスティック）を適用し、その適合性を検討した。

3 結果および考察

3.1 高齢級カラマツ林における樹高成長量評価

梢端部及び造材位置から採取した円盤の年輪解析によって明らかになった立木 8 本分の樹齢と樹高の関係を図 1-1 に示した。樹高成長は樹齢とともに緩やかになる傾向はあるものの、いずれの個体も 100 年生を超えても 0.1m/年以上を維持していた。これらの樹高成長の経過を従来使用されてきた樹高成長曲線と比較すると、高齢級における成長が既往の樹高成長曲線を上回り継続していることが確認された。また、各個体の樹高成長を各種成長曲線式に適用した結果、個体ごとに最適成

長曲線が異なり、同一林分であっても成長特性には個体差があった。対数式に最も適合した 4 個体は、若齢期の成長量が大きく概ね 40 年生以降に曲線の傾きが緩やかになる特性がみられた。ロジスティック曲線式に最も適合した 3 個体は、初期成長は比較的緩やかであるが徐々に成長量が高まり、概ね 80 年生以降に傾きが緩やかになっていく特性がみられた。リチャード関数式に最も適合した 1 個体は、対数式と同様に若齢期の成長が良く、傾きが緩やかになる時期が比較的遅いという特性がみられた。樹高成長は同一林分であっても個体差があり、遺伝的変異や微地形・微気象、隣接個体との競争関係などが複合的に影響したものと考えられる。また、地上高 6.8m 位置の円盤における直径成長は、20 年生時前後に年輪幅が最大となり 3～8mm/年を記録し、その後徐々に低下する傾向がみられ、110 年生を超えると年輪幅はいずれの個体も 1mm 未満となっていた（図 1-2）。

以上のことから、樹高、直径とも 100 年生を超えても成長が継続していることが確認されたが、それぞれの成長量は鈍化傾向にあることや、根株心腐れ病等のリスクを考慮すると、カラマツ人工林の伐期は 120 年程度までにとどめることが妥当と考えられた。

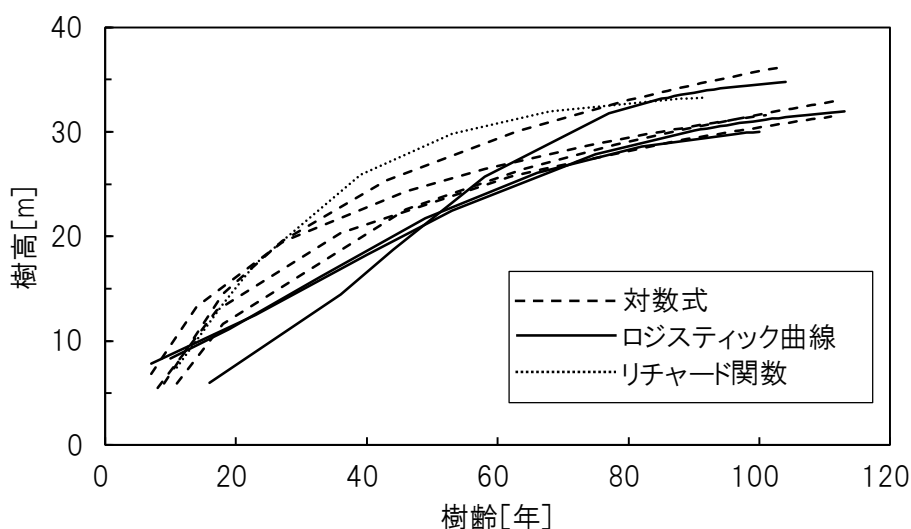


図 1-1 115 年生カラマツ 8 個体の樹高成長の推移(実測値)と適合性の高い曲線式

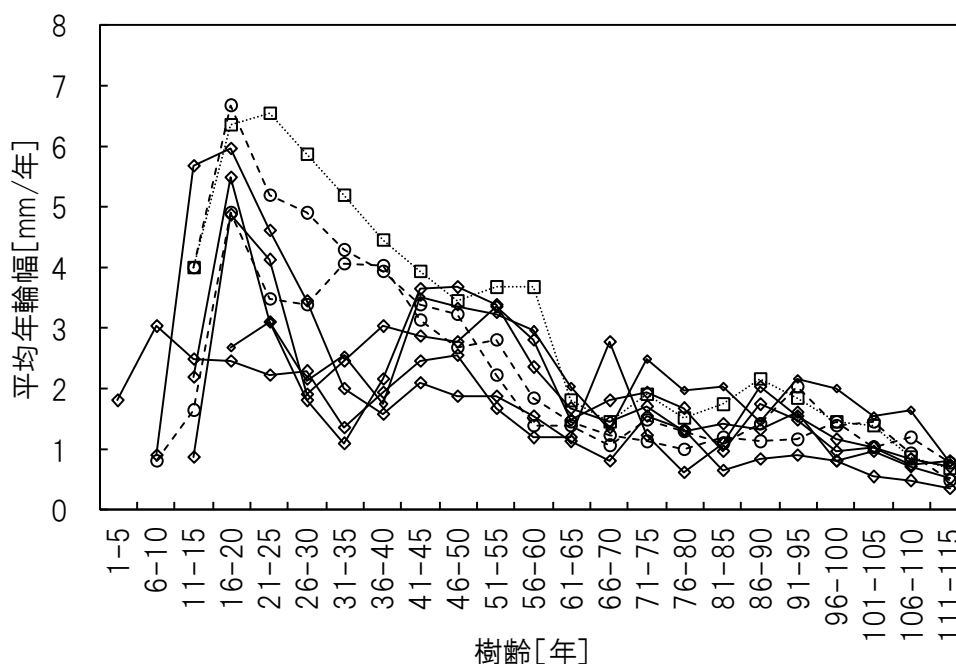


図 1-2 115 年生カラマツの地上高 6.8mにおける 5 年ごとの平均年輪幅の推移
(折れ線の種類は図 1-1 に対応)

3.2 高齢級人工林における間伐が成長に与える影響

間伐から 10 年が経過したカラマツの累積直径成長量は、中位木では強度間伐区、下位木では普通間伐区で有意に成長量が高かったが、上位木では対照区と差がなかった (図 2-1)。間伐から 8 年経過したヒノキでは、いずれのランクでも各間伐区は対照区に対する有意差が認められなかった (図 2-2)。間伐から 7 年が経過したスギでは、上位木で普通間伐区、中位木と下位木で強度間伐区において有意に成長量が高かった (図 2-3)。上位木で間伐効果が出にくい傾向がある原因は、間伐前から競争状態が優勢だったためと考えられる。以上のように、高齢級における間伐の効果には樹種間差が認められるものの、特に中位木では直径成長の促進効果が一定程度期待できると考えられた。

間伐前後の平均樹高の変化は、カラマツ、ヒノキにおいては間伐率にかかわらず有意に増加しており、13 齢級以上であっても樹高成長は継続していることが確認された (図 2-4)。スギでは各試験区とも平均値は上がっていたものの、有意差は認められなかった。枝下高については、カラマツ、ヒノキでは間伐前に比べて間伐区で有意な変化がなかったが対照区では有意に上昇していた (図 2-5)。対照区では間伐が行われなかったことによって林冠閉鎖が進み、枝

の枯れ上がりが進行したと考えられる。一方、スギの枝下高は間伐の有無にかかわらず有意な変化は認められなかった。次に樹冠長率については、ヒノキの対照区において有意に減少していたが、カラマツとヒノキはすべての試験区において間伐前後の変化は認められなかった (図 2-6)。ヒノキの対照区では樹高成長より枝下高の上昇が進んだため、樹冠長率の低下を招いたと考えられた。

以上の結果から、13 齢級以上の林分においても樹高成長は継続するものの、林冠閉鎖にともなって枝下高の上昇が進むと樹冠長率が低下することが示唆された。大径材生産を目標とする場合、直径成長を維持するためには樹冠長率を低下させないことが重要と考えられ、適度な間伐が必要と考えられた。

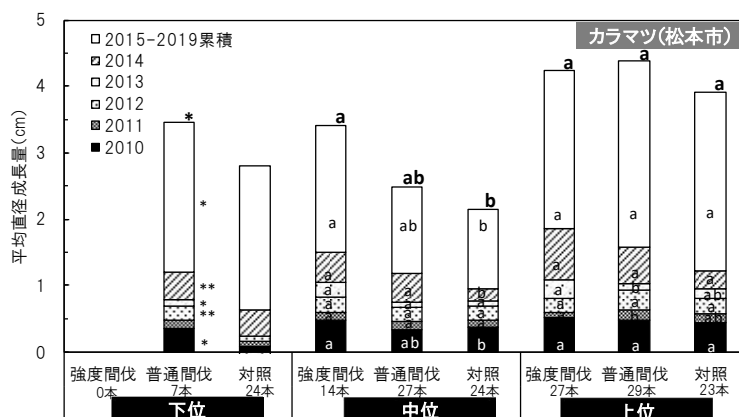


図 2-1 62 年生時に間伐を行ったカラマツ人工林における間伐後 10 成長期の平均直径成長量※

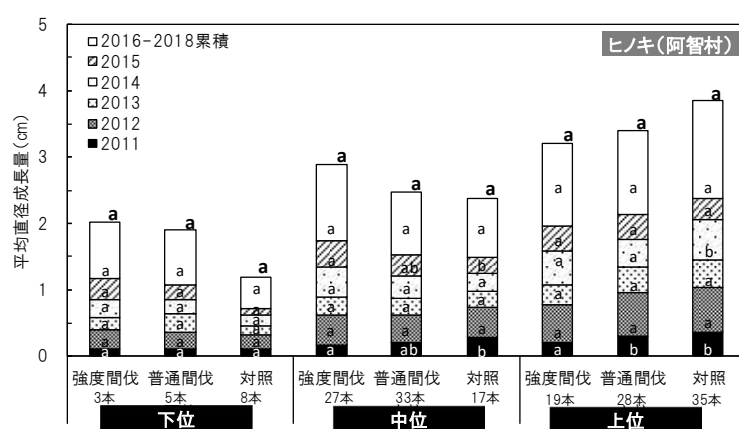


図 2-2 65 年生時に間伐を行ったヒノキ人工林における間伐後 8 成長期の平均直径成長量※

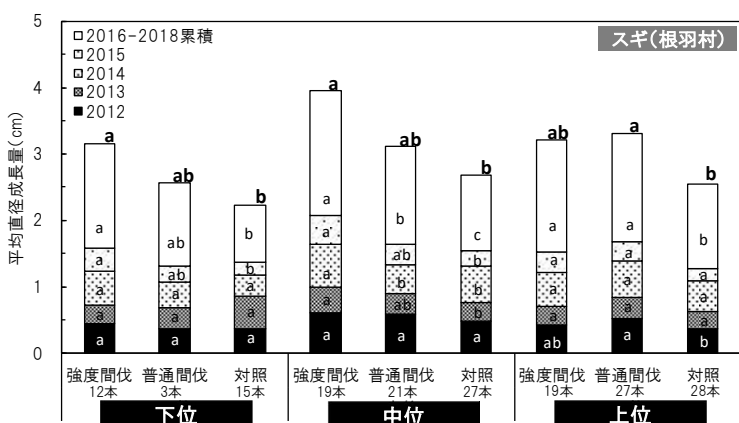


図 2-3 69 年生時に間伐を行ったスギ人工林における間伐後 7 成長期の平均直径成長量※

※図 2-1, 2-2, 2-3 とも、各直径ランクの各成長期において同一アルファベットを含まない試験区間に有意差あり(Steel-Dwass の多重比較検定, $p<0.05$)。各バー右肩の太字は全成長期の累積成長量の有意差を示している

※図 2-1 の下位では強度間伐区に該当木がなかったため、普通間伐区と対照区の2者を Mann-Whitney 法により検定し、有意差がある場合は普通間伐区の該当年の右に*を表示した(*: $p<0.05$, **: $p<0.01$)

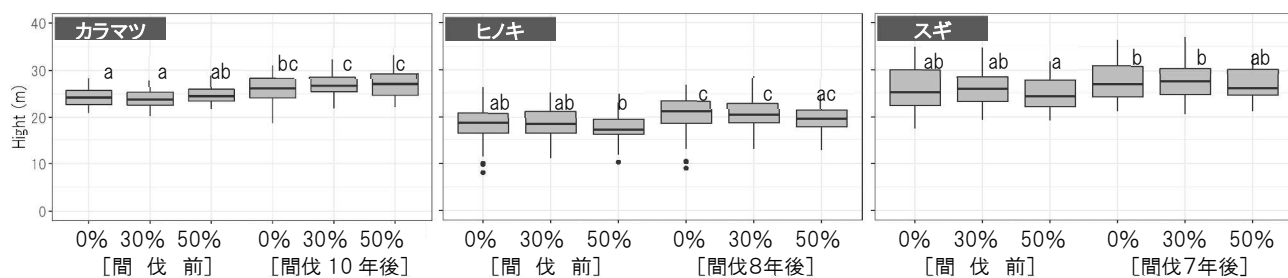


図 2-4 間伐前後の樹高の変化

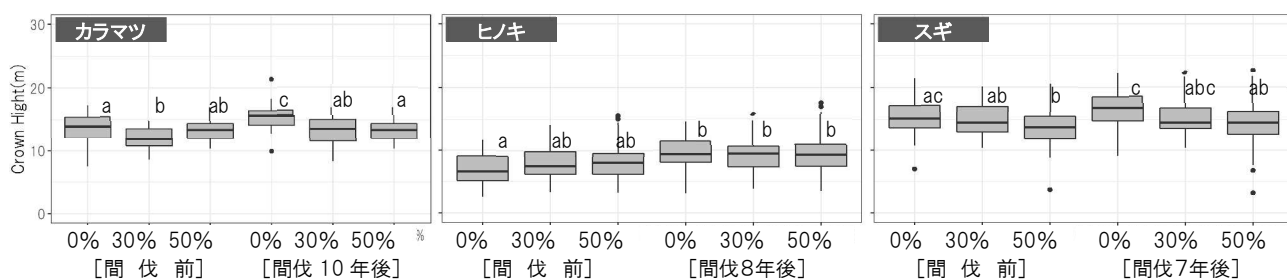


図 2-5 間伐前後の枝下高の変化

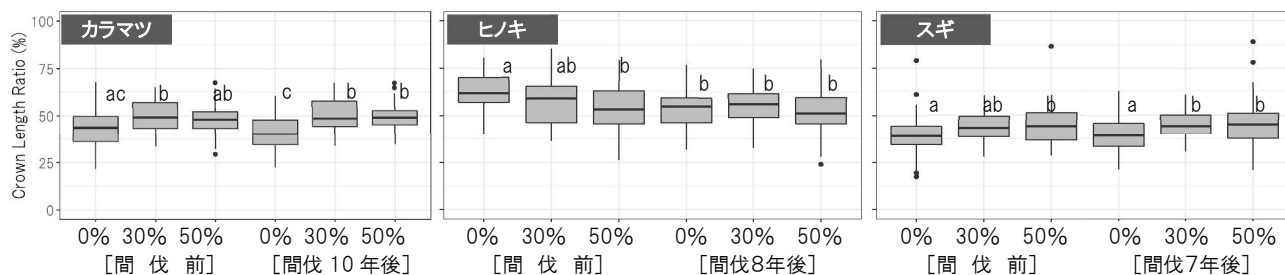


図 2-6 間伐前後の樹冠長率の変化

※図 2-4、2-5、2-6 とも、各樹種において同一の符号を含まない試験区間に有意差あり(Tukey-Kramer の多重比較検定, $p < 0.05$)

3.3 航空レーザ計測データを活用した高齢級に対応した樹高成長曲線の調製

県内の 77 市町村におけるカラマツ人工林の林分ごとの樹高中央値の分布を図 3-1 に示した(外れ値を除く)。20 年生未満の若齢林においては、実際より明らかに樹高が高いと考えられるデータもあり、隣接林分の樹高の影響を受けている可能性が考えられた。また、80 年生以上の高齢級林分においては、樹高は必ずしも増加傾向を示していなかった。この原因は、成長の良い林分ほど早期に伐採されることや、高齢級では雪害、風害、雨氷害等の気象害により梢端折れや幹折れが発生し樹高が低下しやすいことなどが推測された。

樹高成長曲線調製のためのサンプリングにおいては、各林齢の四分位範囲内(図 3-2)から明らかに異常値と考えられる点や気象害等を受けたと考えられる点を極力排除し、妥当かつ健全と考えられる林

分をサンプリングした(図 3-3)。各種成長曲線式を適用した結果、最も妥当と判断されたのはミッチャーリッヒ式で、地位指数 20(40 年生時に樹高 20m)に相当する曲線であり、県下の標準的なカラマツ林の実態をほぼ適切に反映していると考えられた(図 3-3)。今回作成したミッチャーリッヒ式の樹高成長曲線と従来使用してきた樹高成長曲線(平成 3 年版)を比較すると、今回の曲線は若齢期における成長がやや緩やかであるものの、80 年生を超えてからも樹高成長が継続する線形となった。次に、ミッチャーリッヒ式による樹高成長曲線(地位指数曲線 20 に相当)をガイドカーブとして地位指数 12, 16, 24, 28 の地位指数曲線を調製した(図 3-4)。これにより、高齢級カラマツ人工林の地位の優劣に応じた樹高成長予測が少なくとも 120 年生まで可能となった。今後、他の主要造林樹種でも同様の地位指数曲線を作成し、活用を進める予定である。

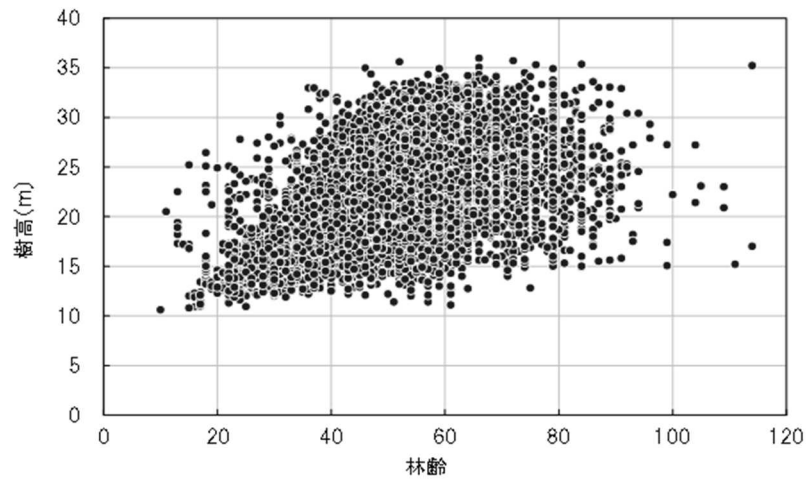


図 3-1 長野県のカラマツ人工林における樹高中央値の分布

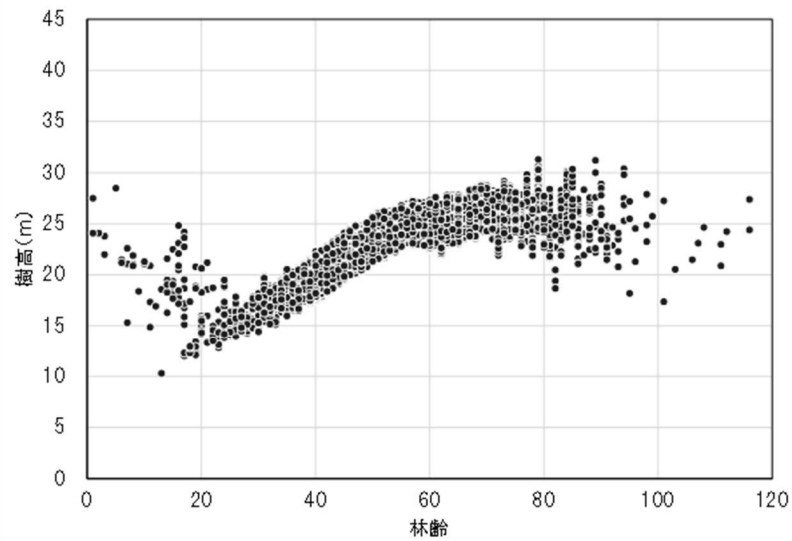


図 3-2 各林齢の四分位範囲内における樹高中央値の分布

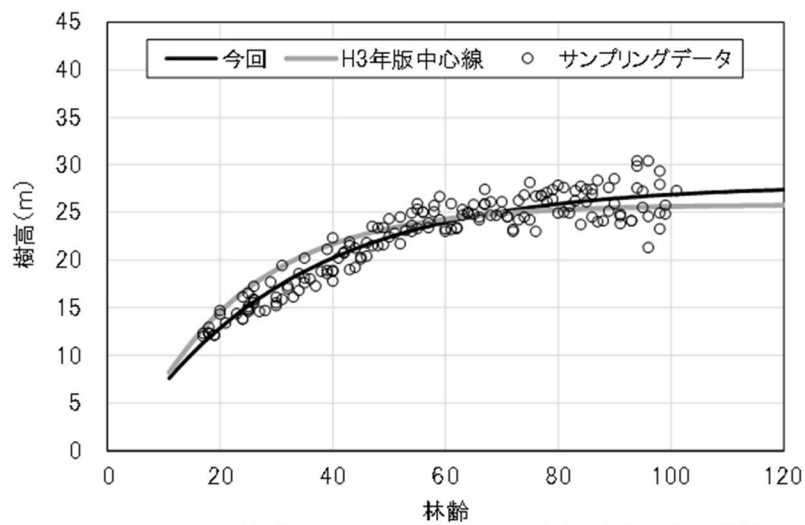


図 3-3 カラマツ林分サンプリングデータの分布と樹高成長曲線

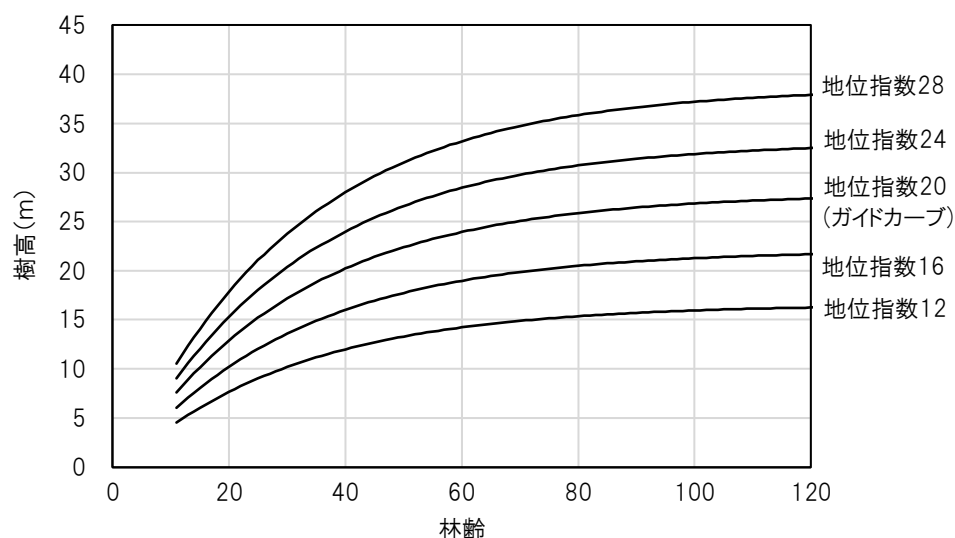


図 3-4 カラマツ林分地位指数曲線

4 おわりに

本研究により、カラマツを中心として高齢級での樹高成長の緩やかな持続が確認された。間伐の効果についても特に中位木では各間伐区の直径成長量が対照区より有意に高く、成長促進効果は一定程度期待できると考えられた。今後は、航空レーザ計測データを基に作成した地位指数曲線について長野県で広く使用できるよう、長野県林務部内で調整を図りたい。

謝辞

本研究の実施にあたっては、双葉林業合資会社、長野県佐久地域振興局林務課、長野県南信州地域振興局林務課、長野県林務部森林づくり推進課の皆様にも多大なるご協力をいただきました。ここに感謝申し上げます。

引用文献

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. 長野県林業総合センター研究報告 19:1-16、
 片倉正行 (2005) Excel 版簡易収穫予測表. 長野県林総セ ミニ技術情報 44 (URL: <https://www.pref.nagano.lg.jp/ringyosogo/joho/minigijutsu/documents/mini44.pdf>)
 長野県林務部 (1983) 長野県民有林 カラマツ・スギ表系・スギ裏系人工林林分材積表・人工林収穫予想表. 78pp.

長野県林務部 (1984) 長野県民有林アカマツ・ヒノキ 人工林林分材積表・人工林収穫予想表. 66pp.
 長野県林務部 (1991) 長野県民有林カラマツ人工林・長伐期施業の手引き. 115pp.
 大矢信次郎・近藤道治・近藤道治・戸田堅一郎・中澤昌彦・高野毅・高野毅・小林直樹 (2015) 針葉樹人工林の健全化のための森林管理技術の確立. 長野県林業総合センター研究報告 29:1-16.
 大矢信次郎・田中裕二郎・秋山巖 (2021) 高齢級人工林における間伐後の直径成長量の経年変化.) 第 11 回中部森林学会大会講演要旨集:18
 大矢信次郎 (2022) 高齢級人工林における間伐後の成長経過. 第 12 回中部森林学会大会講演要旨集:19
 大矢信次郎 (2024) 航空レーザ計測から得られた単木樹高データによるカラマツ樹高成長曲線の調製. 中部森林研究 72:5-6.
 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(4):225-238.
 渡邊仁志・茂木靖和・大洞智宏 (2015) 間伐が高齢級ヒノキ過密林の林分構造と成長に及ぼす影響. 日本森林学会誌 97:182-185.