密度管理されたスギ高齢人工林における 4 密度管理指標間の関係と過密林分での基準値の評価

吉田茂二郎^{*,1}・田中 文²・太田徹志³・溝上展也¹・福本桂子⁴

本研究では、密度管理されたスギ高齢人工林を対象に四つの密度管理指標（相対幹距（ Sr ）、収量比数（ Ry ）、形状比（ H/D ）、樹冠長率（ CLp ））間の関係を明らかにし、各指標の過密林分の基準値を評価することを目的とした。その結果、 Ry と Sr の間に最も強い相関が認められた。その関係から Ry の過密林分の基準値である 0.8 は、 Sr の場合には 14.8% に相当することがわかった。さらに、これまでの研究成果から、同様の結果が得られており、 Sr の過密林分の基準値としては 15% が適切であると示唆された。

キーワード：密度管理指標、スギ高齢人工林、相対幹距、収量比数

Shigejiro Yoshida,^{*,1} Aya Tanaka,² Tetsuji Ota,³ Nobuya Mizoue,¹ Keiko Fukumoto⁴ (2018) The Relation among the Four Indices of Stand Density for Well-managed Plantations of Old Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) and the Reference Value Investigation of the Indices Correlated with the Degree of Crowding. J Jpn For Soc 100: 77-80 We analyzed the relation among the four indices of stand density for well-managed plantations of old Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don), and investigated the reference value of indices correlated with the degree of crowding. The analysis included the relative spacing index (Sr), a yield index based on the stand density control diagram (Ry), the ratio of mean height to diameter (H/D) and the percentage of crown length (CLp). As a result, the relation between Ry and Sr is the strongest of all relations. The index value of the degree of crowding for Ry , that is 0.8, reveals the equivalent of 14.8% of Sr . The results of previous studies revealed the same results, and the 15% of Sr is suggested for the value of the degree of crowding.

Key words: indices of stand density, plantations of old Sugi, a relative spacing index, a yield index based on the stand density control diagram

I. はじめに

近年、林業採算性の悪化から、従来の 40~50 年生での皆伐が減少し、人工林の高齢化が進んでいる。高齢化した林分を長伐期施業に対応した林分へ誘導するには、林分密度を調整して目標林型へと導く必要がある。従来から、林分密度を評価する尺度はさまざま提案されている。最近では、全国で行われている森林総合監理士（フォレスター）研修の基本テキスト（2014）には、林分密度の評価指標として相対幹距（ Sr ）、収量比数（ Ry ）、形状比（ H/D ）、樹冠長率（ CLp ）が取り上げられ、指標ごとに過密林分の基準値が示されている。密度管理指標に関する研究として、指標間の関係解析（西園ら 2013；竹下 1985）や、粗放管理されたスギ人工林において指標の対応関係を調べたもの（國崎 2011, 2013）はあるが、高齢林における密度管理指標の対応関係は明らかになっておらず、各指標の基準値の整合性は検討されていない。そこで本研究では、密度管理されたスギ高齢人工林を対象に密度管理指標間の関係を明らかにし、各指標の過密林分の基準値を評価することを目的とした。

II. 対象地および調査方法

対象地は、著者らが所属する研究室が 1970 年代後半から管理しているスギ人工林内に設定された間伐試験地であり（表-1）、どの試験地も式（1）の相対幹距（以下、 Sr ）（西沢 1972）を基準に間伐が複数回行われている。

$$Sr = \frac{100}{\sqrt{N}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここで、 N は ha 当たりの立木本数であり、 H_{100} は上位樹高 100 本/ha に相当する立木の平均と定義した（西沢 1972）。しかし、前述のフォレスターテキスト等では（1）式の樹高には、上層木（被圧木を除く林木）の平均樹高（ H_t ）が用いられているために、試験地の説明を除く本研究の解析では以後 H_t を利用した。なお、 H_{100} を利用した相対幹距（以下、 Sr_{100} ）は通常のものに比べて 1% 程度低い傾向を示した。ここで、試験地詳細を以下に示す。

1. 平家山スギ高齢級間伐試験地

平家山スギ高齢級間伐試験地（以下、平家山試験地）は、大分県玖珠郡九重町大字野上に位置する九州電力社有林（九州林産株式会社が管理）15 林班の小班内に設定されて

*連絡先著者（Corresponding author）E-mail: syoshida@agr.kyushu-u.ac.jp

¹ 九州大学大学院農学研究院 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1（Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, Fukuoka 812-8581, Japan）

² 九州大学農学部 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1（Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, Fukuoka 812-8581, Japan）

³ 九州大学持続可能な社会のための決断科学センター 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1（Institute of Decision Science for a Sustainable Society, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, Fukuoka 812-8581, Japan）

⁴ 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1（Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan）
（2017 年 7 月 18 日受付：2018 年 3 月 8 日受理）

表-1. 最終調査時の対象地の概況

試験地 (林齢)	間伐区	本数密度 (本/ha)	平均 胸高直径 (cm)	平均 樹高 (m)	上層木 平均樹高 (m)	胸高断面積 合計 (m ² /ha)	幹材積 合計 (m ³ /ha)	相対幹距 (%)
平家山 (91)	弱度	308	54.1	37.5	37.5	72.8	1041.6	15.2
	中度	208	59.1	39.2	39.2	34.6	839.1	17.7
	強度	212	54.5	36.1	36.3	35.7	555.1	18.9
白鹿岳 (107)	無	813	38.4	28.7	29.0	98.1	1201.0	12.1
	弱度	638	39.5	25.8	26.3	80.4	892.7	15.0
	中度	544	44.0	28.2	28.2	61.9	974.7	15.2
	強度	444	46.0	28.5	28.5	64.4	867.4	16.6
高 隈 (87)	無	813	41.7	24.2	24.4	112.7	1138.7	14.6
	中度	652	41.6	26.8	27.1	93.1	1048.8	14.5

いる。1922（大正 11）年に山引苗が植栽された面積 2.03 ha の実生林分で、2018 年現在 97 年生である。1978 年（57 年生）に高齢級間伐試験地を設定し、 Sr_{100} に基づいた間伐（13%）が行われた。その後、1998 年（77 年生）に台風被害を受け、試験地全体の密度にばらつきが生じたため、それを利用する形で高齢級間伐試験地 2.03 ha の中に間伐強度を変えた 3 間伐区を設定した（加賀 1999）。各間伐区は 50×50 m で強度区（ Sr_{100} 19%）、中度区（同 17）、弱度区（同 15）とし、間伐は間伐区設定時の 1998 年（77 年生）と 2014 年 9 月（同 93）の 2 回行った。実際の間伐では、はじめに林分調査を行い、つぎに基準の Sr_{100} からはじめに間伐すべき本数を計算し、それをもとに立木配置がなるべく均等になるよう概ね下層間伐を実施した。この平家山試験地では、森林簿から 1950 年（同 29）と 1967 年（同 46）にも間伐が行われていることがわかっている。

2. 白鹿岳スギ高齢級間伐試験地（吉田ら 2002；鈴木ら 2009）

白鹿岳スギ高齢級間伐試験地（以下、白鹿岳試験地）は、鹿児島県曾於市財部町大字南股轟木藪谷に位置する轟木国有林（都城森林事務所管内）1136 林班わ小班に位置し、1907（明治 40）年に植栽されたメアサスギ（一部クロスギを含む）の林分で、2018 年現在 112 年生である。この試験地が設定されたものの林分は、木梨と西澤両博士が日本におけるサンプリングの森林への応用を目的に、1953 年（47 年生）に約 60 ha を毎木調査した非常に貴重な森林（Kinashi 1954）で、その南東部の比較的地形の凹凸が少ない地域を選んで間伐試験地が設定され、それ以外の部分は皆伐された。間伐試験地は、1977 年（71 年生）に Sr_{100} をもとに無間伐区を含めて 4 間伐区を設定した。各間伐区は 40×40 m で、強度区（ Sr_{100} 17%）、中度区（同 15）、弱度区（同 13）そして無間伐区（同約 11）で、それらが田の字型に隣接し、その周囲に幅 20 m のバッファゾーンがあり、全体としては 120×120 m の試験地になっている。ただし、間伐試験地の設定時 1977 年（71 年生）の強度間伐区では、一気に疎開することを避けるために、中度区と同じ 15% にし、1983 年（同 77）と 1997 年（同 91）には基準通りの間伐が行われた。1977 年（71 年生）までは国有林の施業方針に沿った保育がなされていたと考えられるが、詳細は明らかではない。

3. 鹿児島大学高隈演習林スギ高齢級間伐試験地

鹿児島大学高隈演習林スギ高齢級間伐試験地（以下、高

隈試験地）は、4 林班つ小班に位置し、1930（昭和 5）年に鹿児島高等農林 25 周年記念として植栽された記念林の一部で、2018 年現在 89 年生である。1984 年（55 年生）に記念林成長量試験地を設定し、その後 1998 年（同 69）に無間伐区を含めて Sr_{100} をもとに 3 間伐区が設定された。各間伐区は強度区（ Sr_{100} 19.2%）、中度区（同 16.5）、無間伐区（同約 12）で構成されており、面積は間伐区が 0.25 ha で、無間伐区は 0.15 ha である。過去にどのような施業が行われたかについては明らかではないが、筆者が 1980 年（51 年生）に測定を開始したときには、間伐を行った形跡は認められなかった。その後も 1998 年（同 69）までは間伐は行われなかった。なお、強度間伐区は、1993 年の台風災害時に試験地下方斜面が立木ともども流され面積に変動があったことから、今回の解析から除外した。平家山と白鹿岳の両試験地では、各間伐区が同一斜面内に接して位置しているが、高隈試験地では同一林分ではあるが、異なった斜面に位置している。

4. 調査方法

試験地の全立木には、山側から 1.2 m の高さに十字と番号が描かれており、直径はこのマーク位置に沿って直径巻尺を用いて 0.1 cm 括約で全立木の測定を行い、樹高は山側から測高器を用いて 0.1 m 括約で全立木を測定した。枝下高と樹冠幅については各間伐区とも直径が小さいものから大きなものまでばらつくように約 20～30 本の資料木（固定）について、枝下高は測高器、樹冠幅はシュピーゲル・レラスコープを用いて、0.1 m 括約で樹高測定と同時に測定した。ここで枝下高は樹冠から離れて下に孤立的に存在する枝を含まず、斜面上側と下部で梢端から連続する枝の一番下の平均高と定義（國崎 2011）した。また樹冠幅は梢端から枝下高付近までの樹冠全体の形（パラボラ形、竹下 1985）を最初に想定し、その最大水平直径とした。枝下高は、樹高測定時に樹高そして枝下高の順に測定し、樹冠幅は、樹高測定時の水平距離とシュピーゲル・レラスコープのスリット幅をもとに算出した。なお、樹高測定には、平家山と白鹿岳試験地が設定された 1970 年代後半当時はアルティレベル測高器を、その後 1980 年頃からはブルームライス測高器とプリズム式簡易距離計を併用した方法（吉田 1991）を、さらに 2000 年代はバーテックス測高器を用いた。樹高と樹冠の測定には、測定者の個人誤差が発生することが想定されるため、鈴木ら（2009）を除いて吉田が全て測定した。

平家山試験地では、試験地設定時の1978年（57年生）、高齢級間伐試験地設定時の1998年（同77）、2003年（同82）、2012年（同91）に林分調査を実施した。なお、この林分では、1978年（同57）の間伐後に樹勢回復のために施肥が行われた（加賀1999）。白鹿岳試験地では、1977年（同71）、1983年（同77）、1997年（同91）の間伐時と、その後は2003年（同97）、2007年（同101）、2013年（同107）に林分調査を行った。高隈試験地では、1987年（同58）、1993年（同64）、1998年（同69）、2005年（同76）、2016年（同87）に林分調査を行った。

III. 解析方法

1. 密度管理指標の比較

本研究では、密度管理指標として相対幹距（ Sr ）、収量比数（ Ry ）、形状比（ H/D ）、樹冠長率（ CLp ）を用いた。まず、 Ry と Sr の関係式（西園ら2013、以下 Ry - Sr 式）、および Sr と樹冠長（ CL ）の関係式（竹下1985、以下 Sr - CL 式）と、3試験地の実測データを比較した。これらの関係は以下の式で表される。

$$Sr = 100^2 \sqrt{\frac{b_1}{b_3}} \sqrt{\frac{1}{Ry(1-R_f)} - 1} \sqrt{\frac{1}{H_i^{b_1-b_2+2}}} \quad (2)$$

$$CL = (2.125 - 3Sr) \left\{ (H+1) \left(\frac{Sr}{0.375} \right)^{0.7} - 1 \right\} \quad (3)$$

ここで、 H_i は上層木平均樹高、 H は樹高であり、 $b_1 \sim b_4$ および R_f は地域と樹種ごとに定まる定数である。また(2)式の定数は九州地方スギ林分密度管理図（林野庁1980）を参照した。

次に、対象地の実測データから Sr と各密度管理指標の関係式を求めた。 Ry と H/D は指数関数で近似し、 CLp はKanazawa *et al.* (1985)を参考に拡張相対成長式で近似した。

IV. 結果と考察

1. 理論式と実測データの比較と密度管理指標の対応関係

3試験地の実測データは Ry の増加に伴い Sr が減少し、西園ら(2013)が導いた Ry - Sr 式と同様の傾向を示した(図-1)。また実測値と推定 Sr の決定係数は0.90と当てはまりがよく、本対象地において Ry - Sr 式は適用できると考えられた。

図-1. Ry - Sr 式と実測プロットの比較

また実測データは Sr の増加に伴い CL は増加し、 Sr - CL 式と同様の傾向を示した(図-2)が、 Sr - CL 式から求まる推定 CL は実測値よりも平均で3.5m過大であった。この約3.5mの誤差は、3試験地の平均樹高25~40mで考えると CLp で約13%の誤差に相当するため、本対象地において Sr - CL 式の適用は難しいと考えられた。

Sr と Ry 、 H/D 、 CLp の関係は以下の式(4)~(6)で近似された。

$$Ry = 1.86e^{-0.0567Sr} \quad (R^2 = 0.90) \quad (4)$$

$$\frac{H}{D} = 115.00e^{-0.0322Sr} \quad (R^2 = 0.42) \quad (5)$$

$$\frac{1}{CLp} = \frac{1}{1.81Sr^{1.09}} + 1 \quad (R^2 = 0.36) \quad (6)$$

これらの(5)と(6)式的相关図を図-3に示した。 Ry と Sr の関係と同様に、 H/D と Sr には負の相関($R^2=0.42$)があったが、 CLp と Sr 間では正の相関($R^2=0.36$)であった。

これらの3式から求めたスギ高齢人工林における密度管理指標の対応関係を図-4に示した。フォレスター基本テキスト(2014)では、過密林分の基準値として Sr 、 Ry 、 H/D 、 CLp それぞれで17、0.8、80、40%という値を提示している。これらの基準に基づく過密林分を指標ごとに図中に矢印で示した。たとえば Ry の過密林分の基準値である0.8は、 Sr だと14.8%、 H/D と CLp ではそれぞれ71.5と16.8%に対応した(図-4)。つまり、 Ry が0.8の林分は、 Sr と CLp を基準にすると過密となり、 H/D を基準にすると適切な密度状態となることから、フォレスター基本テキスト(2014)で示す基準値には指標間でズレがあることがわかった。図-1と式(4)から、 Ry を基準に Sr を修正することを考えると、上層木平均樹高が25~35mで Ry が0.8の林分密度は Sr で約15%に相当することから、高齢林においては Sr の過密林分の基準値を現行の17%から15%程度に引き下げる必要があると思われる。

國崎(2013)は、粗放的に管理されたスギ高齢人工林の簡便な密度管理指標として、 Sr が最良とし15%前後で自己間引きが発生する段階に達するため、混み過ぎの基準を16%未満とするのが適当と述べているが、本研究の密度管理が行われてきたスギ高齢人工林の場合であっても、ほぼ同じ結果が少し低い値が得られたことになる。吉田ら

図-2. Sr - CL 式と実測プロットの比較

図-3. 密度管理指標間の関係 (Sr - H/D (上図), Sr - CLp (下図))

図-4. 密度管理指標の対応関係

(2002) も、本研究の白鹿岳試験地での1回目間伐から同2回目の期間の成長解析から、 Sr_{100} が約15%以上の間伐は、林木の成長に影響することを明らかにしている。そして早い段階から Sr を最も有効な密度指標と考えてきた西

沢(1972)は、国有林のスギの収穫表調製に用いられた資料の分析(葉袋・西沢 1971)から、強度間伐は21%、中度は17%、弱度は13%、無間伐は10%としており、今回の研究結果はその中度と弱度の中間値であり、ほぼ妥当な値であるといえよう。以上から、 Ry と強い相関がある Sr の過密林分の基準値を現行の17%から15%に引き下げることが妥当であろう。

本研究では、密度管理されたスギ高齢人工林を対象に密度管理指標の関係を明らかにすること、密度管理指標としての Sr について混み具合の基準値を明らかにすることを目的としてきた。今後は、本研究中でも取り扱った密度管理指標としての樹冠長率を代表とする樹冠の指標と、材積成長、断面積成長および直径成長との関係についても解析を進める予定である。

本研究で利用した平家山と白鹿岳の両試験地は、元九州大学の西澤正久教授が設定したものであり、その先見性に心から感謝の意を表したい。また、平家山試験地の測定では、九州林産株式会社の歴代の担当者(山部、加賀、松尾の各部長)、白鹿岳試験地では、九州森林管理局の担当営林署(都城営林署の歴代の署長)の方々にご協力をいただいた。ここに心から御礼を申し上げたい。今後とも可能な限り計測を継続し、貴重なデータを分析することで、九州におけるスギ人工林管理の一助になればと願っている。

引用文献

- 加賀英昭(1999) 平家山スギ参考林について. 日本林学会九支研論 52: 23-24
- Kanazawa Y, Kiyono Y, Fujimori T (1985) Crown development and stem growth in relation to stand density in even-aged pure stands (II) clear-length model of *Cryptomeria japonica* stands as a function of stand density and tree height. J Jpn For Soc 67: 391-397
- Kinashi K (1954) Forest inventory by sampling methods. 九大演報 23: 1-153
- 國崎貴嗣(2011) 粗放管理されたスギ高齢林における簡便な個体管理指標の探索. 岩大演報 42: 45-56
- 國崎貴嗣(2013) 粗放的に管理されたスギ若齢人工林の簡便な密度管理指標の探索. 岩大演報 44: 1-18
- 葉袋次郎・西沢正久(1971) 収穫予測法の一方法について. 日林講 82: 58-60
- 西園朋広・井上昭夫・細田和男(2013) 収量比数と相対幹距との関係—関係式の誘導とその性質. 森林計画誌 47 (1): 16-28
- 西沢正久(1972) 森林測定. 農林出版
- 林野庁(1980) 九州地方スギ林分密度管理図. 日本林業技術協会
- 森林総合監理士(フォレスター)基本テキスト作成委員会(2014) 森林総合監理士(フォレスター)基本テキスト
- 鈴木寿仁・竹内郁雄・寺岡行雄・吉田茂二郎(2009) スギ高齢林における間伐強度の違いが成長に及ぼす影響. 九州森林研究 62: 66-69
- 竹下敬司(1985) パラボラ樹冠形モデルによるスギ林の構造解析. 九大演報 55: 55-104
- 吉田茂二郎(1991) 継続的な森林調査法に関する研究(II) 一樹高測定法の検討一. 日本林学会大会発表論文集 102: 173-174
- 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—. 九大演報 83: 53-61