

## 論文 (Original article)

# 岐阜県郡上市における高齢スギ人工林のサイズ分布特性

宮本 和樹<sup>1)\*</sup>、荒木 眞岳<sup>2),3)</sup>、山川 博美<sup>4)</sup>、中尾 勝洋<sup>5)</sup>、  
粟屋 善雄<sup>6)</sup>、渡邊 仁志<sup>7)</sup>、久田 善純<sup>7)</sup>

### 要旨

高齢スギ人工林における個体のサイズ分布特性を明らかにするため、岐阜県郡上市のスギ人工林を対象に林分の多点調査を実施した。80年生以上の高齢人工林は1000 m<sup>3</sup>/ha前後の林分材積を有していた。サイズ不均質性の指標である変動係数およびサイズ非対称性の指標である歪度を用いて、林分の混み合い度(収量比数)とこれらの指標との関係を見ると、同じ混み合い度でも高齢林は壮齡林と比較して直径と材積の変動係数が有意に高かった。また、高齢林における直径の歪度はゼロに近い値が多く、正規分布に近い分布を示していたが、材積の歪度は正の値が多くみられ、右裾広がり分布を示していた。以上の結果から、郡上市の高齢スギ人工林は比較的高い林分蓄積量を有していると考えられ、個体のサイズ不均質性やサイズ非対称性が高い傾向がうかがえた。このことから、立木密度が低く個体サイズの格差が大きくなった高齢林では、個体ごとの管理が重要であると考えられた。

キーワード：高齢人工林、サイズ構造、変動係数、歪度、収量比数

### 1. はじめに

我が国の人工林のうちの50%が50年生を超え、本格的な利用期を迎えている(林野庁2020)。近年の施策としては間伐の推進から主伐(皆伐)と再生林の推進へと転換が図られ、伐採、搬出、育苗、植栽、初期保育について低コスト化、高度化が進められている(中村ら2019)。しかし、収益性の低さと担い手不足などの理由から森林所有者の主伐実施への意欲は依然として低いままである(中村ら2019)。このため、林業の現場は仕方なく長伐期化、高齢化に向かっている(全国林業改良普及協会2006)。増加する高齢人工林に対して適切な管理を行っていくためには、まず高齢人工林の特徴をとらえることが重要であろう。

日本の人工林の多くは、同一時期に苗木の植栽が行われる一斉林であるため、年齢構造を考える必要がない(國崎2016)。そのため、人工林の林分構造は植栽木のサイズ構造により代表される。特に、幹直径のサイズ構造は林業における径級分布と直接関係し、必要な径級の材がその人工林からどれだけ供給できるのかといった潜在的な供給力を把握するために重要である。

人工林における植栽木のサイズ構造の特徴を簡便に把握するため、様々なサイズ分布指標が考案されている。このうち、サイズ不均質性を表す指標としては、変動係

数やジニ係数が用いられ、サイズ非対称性を表す指標としては、歪度などが用いられる(Bendel et al. 1989)。これらのサイズ分布指標は林齢にともない値が変化することが報告されている(田中1983, 1992a, 國崎2001)。サイズ不均質性の指標である変動係数の場合、短期的には自己間引きの顕著な時期に減少するが、長期的には林齢とともに微増すると報告されている(國崎2001)。また、サイズ非対称性の指標である歪度の場合、林齢とともに直径分布が相対的にサイズの大きい方への歪み(正の歪み)が強まるという報告(家原1991)がある一方、相対的にサイズの小さい方への歪み(負の歪み)が強まる事例(田中1983)や林齢に関わらず歪度が正の値で安定するという事例も報告されている(田中1992a, b, 國崎ら1999)。このような林齢にともなうサイズ分布指標の変化は、その時々林齢における人工林の管理、特に間伐による林分の混み合い度の変化に影響を受けていると考えられる。しかし、林齢に加えて収量比数などの林分の混み合い度にもなうサイズ分布指標の変化とその要因については十分な知見が得られていない。

本研究の目的は、直径、樹高、材積のそれぞれについてサイズ分布指標として変動係数と歪度を用いることにより、主に壮齡スギ人工林との比較から高齢スギ人工林におけるサイズ構造の特性を明らかにすることである。

原稿受付：令和3年6月11日 原稿受理：令和4年11月8日

1) 森林総合研究所 森林植生研究領域

2) 森林総合研究所 植物生態研究領域

3) 林野庁 研究指導課

4) 森林総合研究所 九州支所

5) 森林総合研究所 関西支所

6) 岐阜大学 流域圏科学研究センター

7) 岐阜県森林研究所

\* 森林総合研究所 森林植生研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1、E-mail: mkazuki@affrc.go.jp

なお、林分の混み合い度の指標として収量比数の違いに着目した。また、本研究では、森林率および従来の主伐期を迎えた人工林面積の割合が共に高い岐阜県郡上市のスギ人工林を事例として用いた。

## 2. 調査地と方法

### 2.1 調査地

本研究の調査地は岐阜県郡上市のスギ人工林である。各林分の間伐履歴の詳細は不明であるが、郡上市の南部は藩政時代からの林業地域であり、林業遺産として認定された星宮神社の社叢林など管理された人工林がみられる(日本森林学会 2018)。郡上市は岐阜県のほぼ中央部に位置し、太平洋と日本海いずれからも離れた内陸部である。1991～2020年までの年平均気温と年降水量は、北部の長滝で11.6°Cと3075 mm、南部の八幡で12.8°Cと2690 mmである(気象庁 2021)。郡上市の北部は南部と比べて12～3月の降雪量が多い。標高は110～1810 mまでの範囲で標高差が大きく、急峻な地形が多くみられる。郡上市の森林面積は92,424 haで土地面積の89.7%を占める。森林面積の97%は民有林であり、そのうちの55%が人工林である(河合 2018)。樹種構成としては、スギとヒノキがいずれも民有林面積の27%を占めている。

### 2.2 調査方法

本研究では、森林簿情報に基づき林齢を特定し、若齢～高齢まで異なる林齢のスギ人工林において、スギ植栽木を最低20本以上含むように半径11～23 mの円形プロットによる調査を実施した。調査地の選定にあたっては、全体として林分構造や地形、林内の植生などの状況が一般的な場所を選ぶようにした。まず、2016年10～12月に12～115年生のスギ人工林21カ所で毎木調査を実施した。この調査では、80年生を超える高齢人工林は1カ所のみであったため、2019年7～8月に82～115年生スギ高齢人工林16カ所で毎木調査を実施した。プロット内のスギ植栽木および林冠部に到達している一部の他樹種(ヒノキ、アカマツ、ゴヨウマツ、モミ、ホオノキ、ケヤキ、その他広葉樹)について幹の胸高直径を得るための胸高周囲長および樹高を測定した。胸高周囲長については2016年、2019年いずれもスチールメジャーを用いてプロット内の全対象個体を測定した。樹高については2016年の調査ではVertex Laser(ハグロフ社)を用いて全対象個体を測定し、2019年の調査では半数以上の個体を対象として測定した。胸高直径のサイズ分布をみると、スギ以外の樹種の分布は小径木に多く、また、胸高断面積合計に基づくスギ以外の樹種の相対優占度は0.0～14.0%で10%未満のものがほとんどであった(Fig. S1-S3)。このため、スギのサイズ分布へのスギ以外の樹種の影響は小さいと考えられた。したがって、平均直径、平均樹高、林分材積やサイズ分布特性としての変動係数、歪度といった林分の特性値の算出については、スギ植栽

木のみを対象とすることとした。なお、若齢林と高齢林については郡上市北部と南部の地点がほぼ半数ずつであるが、壮齢林では北部の林分のみであることから、林分特性の地域差に関する評価を行うことはできなかった。

### 2.3 データ解析

2019年の追加調査において樹高は全木調査ではないため、胸高直径と樹高の関係を林分ごとに拡張相対成長式(Ogawa et al. 1965)を用いて推定した。また、幹材積は胸高直径と樹高のデータを用いて、立木幹材積表(東日本編)(林野庁 1970)の材積式から算出した。なお、算出にあたってはMicrosoft Excel用の幹材積プログラムStemVolume関数(細田ら 2010)を用いた。

林分における立木のサイズ分布特性を指標化し、異なる林齢の林分間で比較するため、個体の胸高直径、樹高、幹材積について、変動係数と歪度という2つのサイズ分布指標を求めた。このうち、変動係数はサイズ不均質性の指標として、歪度はサイズ非対称性の指標として用いた。変動係数は以下の式で算出される。

$$\text{変動係数} = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$$

ここで、 $\bar{x}$ と $s$ はそれぞれ個体サイズの平均値と標準偏差を表す。変動係数は百分率の形で算出した。歪度は分布の非対称性に関する統計量であり、相対的にサイズの大きな個体あるいは小さな個体に分布が偏っているかを示す。歪度は以下の式で算出される。

$$\text{歪度} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

ここで、 $x_i$ は $i$ 番目の個体サイズの値、 $\bar{x}$ と $s$ はそれぞれ個体サイズの平均値と標準偏差を表す。サイズ分布は、歪度が負の値の場合は左裾広がり(林分内で相対的に大きいサイズの個体に偏っている)、ゼロの場合は正規分布(対称)、正の値の場合は右裾広がり(林分内で相対的に小さいサイズの個体に偏っている)となる。林分の歪度がゼロ(正規分布)から有意に異なるかについて、モンテカルロ法により $p$ 値を求め、判定した。 $p$ 値の算出には統計ソフトR(R Core Team 2020)のパッケージnormtestを用いた。

本研究では40年生未満の林分を若齢林、40～80年生未満の林分を壮齢林、80年生以上の林分を高齢林とした。本研究では各林分の林齢情報は森林簿に基づいているが、森林簿情報が実際の林分の状態と一致していない場合が存在する可能性が考えられた。そこで、林齢と樹高との関係を見た場合に、ばらつきが少なく、その関係が比較的明瞭となる林分のみに着目することとした。結果の節(3.1)で後述するように、地位を一定の範囲(概ね地位級1と3の中央線の間)に絞った林分データでは、すべてのデータを用いた場合と比べて、林齢と

樹高の間で当てはまりのよい増加曲線が得られたことから、林齢による区分が利用可能であると判断した。林齢と立木密度、平均樹高、平均胸高直径および林分材積との関係を把握するため、これらの関係について線形・非線形回帰を行い、赤池情報量基準 (AIC、赤池ら 2007) に基づいて式を決定した。林齢と立木密度の関係では、岐阜県林政部 (1992) の平均樹高にともなう立木密度の減少関係に用いられた片対数式  $\ln y = a + bx$  を参考に、これを変形した指数式  $y = \exp(a + bx)$  を用いて表した。林齢と平均樹高ならびに林齢と林分材積の関係については、吉本ら (2012) を参考にして単分子反応式  $y = a(1 - \exp(-bx))$  を用いて表した。単分子反応式は成長関数として代表的なミッチャーリッヒ式に類似しているがミッチャーリッヒ式よりも少ない 2 つのパラメータで求めることができるため、比較的データ数が少ない場合でも推定可能である。林齢と平均胸高直径の関係についても単分子反応式

による予測を行ったが、直線回帰の方が AIC の値がわずかに小さく、予測精度が向上することが示唆されたため、直線回帰を用いて表した。当てはまりの良さの指標として、標準化した平方根平均二乗誤差 (Normalized root mean square error, NRMSE) を用いた。また、回帰によって得られたモデルと説明変数を含まない NULL モデルとの有意差を尤度比検定によって求め、それぞれの回帰の p 値とした。NRMSE と p 値の算出には、統計ソフト R (R Core Team 2020) のパッケージ rcompanion の accuracy 関数と nagelkerke 関数を用いた。

本研究ではまた、スギのサイズ分布特性を表す変動係数と歪度を応答変数、林分の混み合い度を表す収量比数を共変量として、混み合い度にもなう変動係数と歪度の変化を壮齢林と高齢林で比較した。これは、混み合い度によって変動係数や歪度が異なると考えられることから、同じ混み合い度で壮齢林と高齢林における変動係数や歪度の違いを比較するためである。収量比数は林分の上層木平均樹高および立木密度に基づき、森林総合研究所「収量比数 Ry 計算プログラム」(細田 2020) を使用して求めた。解析には一般化線形モデル (GLM) による共分散分析を用いた (Crawley 2005)。応答変数の分布として、変動係数についてはガンマ分布 (リンク関数は逆数関数) を、歪度については正規分布 (リンク関数は恒等関数) を用いた。ただし、若齢林については 30 年生で約 600 本/ha と通常の密度管理からするとかなり低密度の林分が含まれており、データ数も若齢林全体で 4 林分と少ないことから、解析には用いず、参考として傾向を図示するにとどめた。したがって、共分散分析による比較は壮齢林と高齢林についてのみ行った。なお、GLM により得られた回帰係数について本研究では、「切片」および「共変量の係数」と表現する。後者は直線回帰の場合の傾きに相当する。共分散分析についても、フリーの統計解析ソフト R version 4.0.2 を用いた (R Core Team 2020)。

Table 1. スギ人工林多点調査地の林分概況

プロット	林齢 (年)	平均 胸高 直径 (cm)	平均 樹高 (m)	林分 幹材積 (m <sup>3</sup> /ha)	立木 密度 (本/ha)	収量 比数	相対 幹距比
Y1	12	16.5	10.8	288.8	2105	0.72	0.20
Y2	18	20.4	11.4	319.0	1579	0.65	0.22
Y3	27	35.6	20.4	558.1	589	0.58	0.20
Y4	37	31.5	23.9	870.0	934	0.82	0.14
M1	41	23.2	21.2	561.4	1245	0.83	0.13
M2	41	26.6	23.3	738.5	1146	0.85	0.13
M3	45	35.8	24.0	960.9	845	0.78	0.14
M4	47	25.5	21.0	984.7	1746	0.93	0.11
M5	51	46.6	32.3	796.5	344	0.62	0.17
M6	51	26.2	18.9	679.3	1356	0.81	0.14
M7	51	50.0	31.0	1422.7	550	0.76	0.14
M8	52	32.2	26.5	856.8	796	0.81	0.13
M9	54	33.3	28.3	1221.0	962	0.89	0.11
M10	54	27.0	24.8	1257.6	1608	0.98	0.10
M11	54	36.9	26.0	501.1	382	0.56	0.20
M12	55	34.7	24.7	674.7	622	0.68	0.16
M13	55	32.3	24.7	763.2	796	0.76	0.14
M14	58	55.9	34.9	746.4	217	0.52	0.19
M15	73	40.0	21.9	779.8	619	0.63	0.18
M16	77	44.3	32.6	1168.2	511	0.76	0.14
O1	82	45.0	27.9	956.3	467	0.66	0.17
O2	82	43.7	31.3	935.9	430	0.69	0.15
O3	82	45.0	29.6	1133.9	523	0.73	0.15
O4	86	34.8	27.0	713.3	509	0.67	0.16
O5	86	36.6	26.0	874.6	608	0.72	0.16
O6	90	61.5	37.1	926.6	215	0.53	0.18
O7	94	55.5	32.7	646.7	196	0.45	0.22
O8	97	52.3	34.4	776.1	247	0.55	0.18
O9	97	56.0	38.8	937.2	231	0.60	0.17
O10	97	61.8	34.7	973.2	231	0.53	0.19
O11	102	44.7	32.7	1281.7	557	0.79	0.13
O12	105	66.9	39.4	1371.0	255	0.63	0.16
O13	105	52.5	31.5	1153.1	389	0.66	0.16
O14	109	56.4	30.7	702.9	223	0.46	0.22
O15	112	55.3	30.2	596.0	199	0.42	0.23
O16	112	57.5	34.1	1024.4	286	0.59	0.17
O17	115	41.2	30.7	1395.1	736	0.84	0.12

### 3. 結果

#### 3.1 調査林分の概要と林齢に対する林分特性の傾向

スギ人工林多点調査地の林分概況を Table 1 に示す。林齢の範囲は若齢林で 12 ~ 37 年生、壮齢林で 41 ~ 77 年生、高齢林で 82 ~ 115 年生であった。一般的に過密とされる収量比数 0.8 以上 (全国森林組合連合会 2012) の林分の割合は若齢林で 25% (1/4)、壮齢林で 44% (7/16)、高齢林で 6% (1/17) であり、壮齢林で過密林の割合が最も高かった。また、相対幹距比 15% 以下の林分の割合 (吉田ら 2018) でみると、若齢林で 25% (1/4)、壮齢林で 69% (11/16)、高齢林で 24% (4/17) となり、やはり壮齢林で過密林の割合が最も高かった。平均胸高直径は若齢林で 16.5 ~ 35.6 cm、壮齢林で 23.2 ~ 55.9 cm、高齢林で 34.8 ~ 66.9 cm であり、林齢間で一定程度範囲の重複があるものの、全体として林齢とともに増加していた。平均樹高についても同様の傾向を示し、平均樹高は若齢林で 10.8 ~ 23.9 m、

壮齡林で 18.9 ~ 34.9 m、高齢林で 26.0 ~ 39.4 m であった。一方、林分材積は若齡林で 288.8 ~ 870.0 m<sup>3</sup>/ha、壮齡林で 501.1 ~ 1422.7 m<sup>3</sup>/ha、高齢林で 596.0 ~ 1395.1 m<sup>3</sup>/ha であり、ばらつきが大きいものの壮齡林と高齢林では林分材積の範囲が類似していた。また、壮齡林においても同等の値を示す林分がみられたが、80 年生以上の高齢林では 1000 m<sup>3</sup>/ha 前後の高蓄積の値を示す林分が多くみられた (900 m<sup>3</sup>/ha 以上の林分数は、壮齡林で 6/16、高齢林で 11/17)。

Fig. 1 に林齢と立木密度、平均樹高、平均胸高直径、林分材積との関係を示す。立木密度は 12 年生時の推定値 1772 本/ha の状態から若齡林の間に急激に減少した後、壮齡林ではばらつきが大きいものの減少傾向が続き (40 ~ 80 年生時の推定値で 1086 ~ 539 本/ha)、80 年生以上の高齢林では 380 本/ha 前後 (100 年生時の推定値) で変化していた (Fig. 1a)。平均樹高は林齢とともに増加していき、80 年生以降で 30 m 以上 (回帰による推定値) になると次第に頭打ちの傾向となっていた (Fig. 1b)。岐阜県林政部 (1992) に基づく地位別樹高成長曲線から判断すると、今回の対象林分の樹高は一部を除き概ね地位級 1 ~ 3 に相当していた (Fig. 1b)。平均胸高直径は平均樹高とは

異なり頭打ちの傾向はみられず、林齢とともに直線的な増加傾向がみられた (Fig. 1c)。林分材積は平均樹高と同様の傾向で林齢とともに増加していき、実際の林分では 51 年生で 1000 m<sup>3</sup>/ha を超えるものもみられた。ただし、樹高と比べて NRMSE の値が大きく、壮齡林と高齢林でみると林分材積は約 500 ~ 1400 m<sup>3</sup>/ha の範囲でみられ、ばらつきが大きかった (Fig. 1d, Table 1)。

地位が大きく異なることによる林分データのばらつきの影響を少なくするため、概ね地位級 1 と 3 の中央線の間に分布する林分のみに着目して Fig. 1 と同様の関係を求めた図を Fig. 2 に示す。いずれの関係でも回帰の NRMSE は Fig. 1 の場合よりも小さく、特に林齢と平均樹高および林齢と平均胸高直径との関係で当てはまりが良くなっていた。

### 3.2 サイズ分布特性値の比較

#### 3.2.1 サイズ分布特性値の概要

スギの個体の胸高直径、樹高、材積の変動係数について林分ごとに算出した結果を Table 2 に示す。胸高直径の変動係数の範囲は若齡林で 15.9 ~ 28.1、壮齡林で 7.9 ~ 30.9、高齢林で 15.0 ~ 43.0 であった。樹高の変動係数は

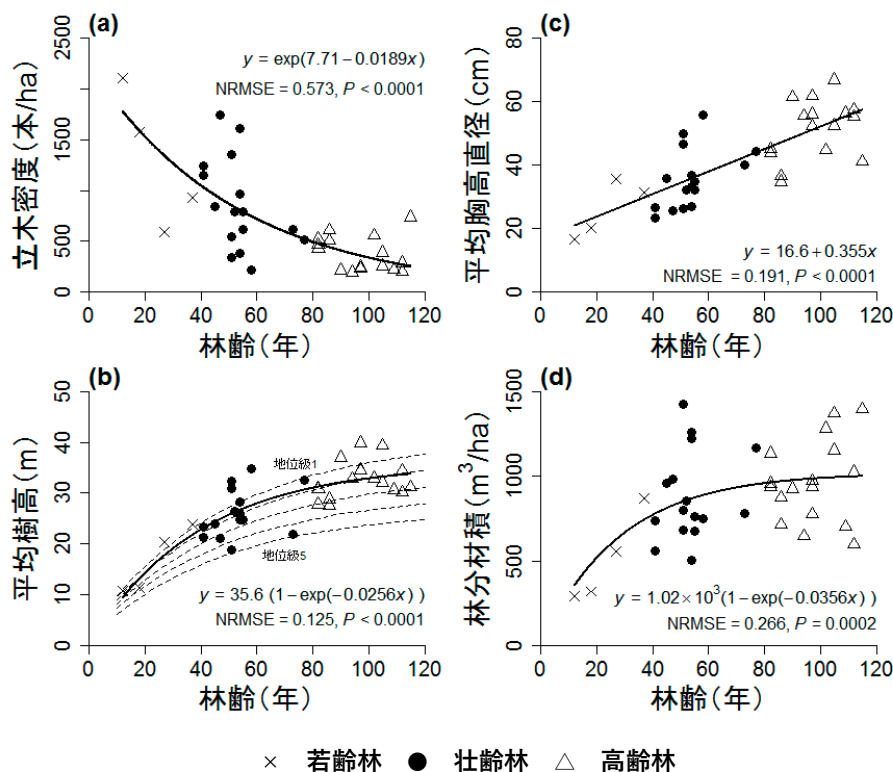


Fig. 1. 郡上市のスギ人工林における林齢と (a) 立木密度、(b) 平均樹高、(c) 平均胸高直径、(d) 林分材積との関係 (b) における点線は岐阜県林政部 (1992) に基づく地位別樹高成長曲線を表す (上から地位級 1 ~ 5)。回帰の当てはまりの良さの指標として、標準化した平方根平均二乗誤差 (NRMSE) を用いた。p 値は説明変数を含まないモデル (NULL モデル) との比較によるものである (尤度比検定)。

他と比較して最も低く、その範囲は若齢林で 9.7～23.2、壮齢林で 3.9～18.4、高齢林で 3.7～15.3 であった。材積の変動係数は他と比較して最も高く、その範囲は若齢林で 33.9～76.6、壮齢林で 14.1～65.4、高齢林で 31.9～79.9 であった。

スギの胸高直径、樹高、材積の歪度について林分ごとに算出した結果を、同じく Table 2 に示す。胸高直径の歪度は 37 林分中 5 林分（若齢林 1 林分、壮齢林 1 林分、高齢林 3 林分）でゼロから有意に異なる値がみられ、これらはすべて正の値であった。樹高の歪度は 37 林分中 13 林分（若齢林 2 林分、壮齢林 8 林分、高齢林 3 林分）で有意な値がみられ、このうち 10 林分（若齢林 2 林分、壮齢林 7 林分、高齢林 1 林分）で負の値を示し、壮齢林で比較的多くみられた。一方、正の値を示したのは壮齢林 1 林分と高齢林 2 林分であった。材積の歪度は 37 林分中 16 林分（若齢林 3 林分、壮齢林 5 林分、高齢林 8 林分）で有意な値がみられ、これらはすべて正の値であった。樹高の歪度で負の値を示した林分では左裾広りの分布であり、劣勢木が林内に残存している状況が示唆される。一方、主に胸高直径や材積の歪度でみられたような正の

値を示した林分では右裾広りの分布であり、少数の優勢木が生じている状況を示している。Fig. S1-S9 には個体の胸高直径、樹高、材積について林分ごとのサイズ分布を示しており、Table 2 の歪度で有意な値を示した林分とサイズ分布との対応がわかる。特に、壮齢林で歪度が有意な負の値を示した林分の樹高分布をみると、左裾広りの分布となっていることが確認できる (Fig. S5)。

### 3.2.2 混み合い度とサイズ分布特性との関係

林分の混み合い度の指標である収量比数に対する変動係数と歪度の変化を Fig. 3 に示す。ここでは、地位が大きく異なることによる林分データのばらつきの影響を少なくするため、Fig. 2 と同様、地位級 1 と 3 の中央線の間分布する林分に限って解析した結果を示している。共分散分析では、全体として壮齢林と高齢林の間で共変量の係数に有意差がみられず、収量比数と胸高直径の変動係数および収量比数と材積の変動係数との関係で切片にのみ有意差がみられた (Fig. 3a, c)。収量比数の増加にともない、変動係数はやや増加する傾向がみられた。一方、収量比数の増加にともない樹高の歪度は減少する傾向が

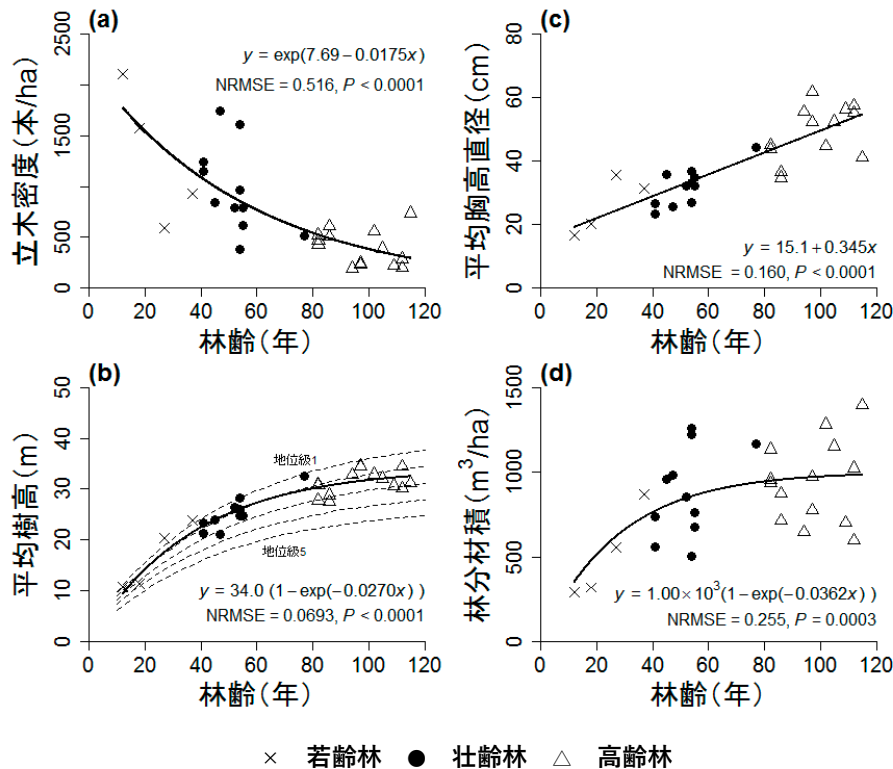


Fig. 2. 郡上市のスギ人工林における林齢と (a) 立木密度、(b) 平均樹高、(c) 平均胸高直径、(d) 林分材積との関係 (概ね地位級 1 と 3 の中央線の間分布する林分のみに着目した場合) (b) における点線は岐阜県林政部 (1992) に基づく地位別樹高成長曲線を表す (上から地位級 1～5)。回帰の当てはまりの良さの指標として、標準化した平方根平均二乗誤差 (NRMSE) を用いた。p 値は説明変数を含まないモデル (NULL モデル) との比較によるものである (尤度比検定)。

みられた。しかし、胸高直径の歪度および材積の歪度については有意な共変量の係数が得られず、収量比数は共変量として有効ではなかった。

胸高直径の変動係数では、壮齢林と比べて高齢林で回帰の切片が有意に高く、同じ収量比数でみると高齢林で変動係数が高いことが示された (Fig. 3a)。樹高の変動係数では、壮齢林と高齢林の切片に有意差はみられなかった (Fig. 3b)。材積の変動係数は胸高直径の変動係数と同様に、高齢林で切片が有意に高く、同じ収量比数でみると高齢林で変動係数が高いことが示された (Fig. 3c)。

胸高直径の歪度では、壮齢林と高齢林との間で切片に有意差はみられなかった (Fig. 3d)。歪度の値はゼロから有意に異なる林分が多くみられ (Table 2)、壮齢林と高齢林いずれも正規分布に近い林分が多いことがうかが

**Table 2.** 胸高直径、樹高、幹材積のサイズ分布における変動係数と歪度

プロット	変動係数			歪度		
	胸高直径	樹高	幹材積	胸高直径	樹高	幹材積
Y1	28.1	23.2	76.6	0.7 *	0.13	1.39 *
Y2	25.5	21.7	58.5	0.14	-0.89 *	0.75 *
Y3	15.9	9.7	33.9	0.44	0.19	0.64 *
Y4	20.7	13.6	44.5	-0.25	-0.89 *	0.14
M1	15.4	7.5	32.9	-0.25	-1.29 *	0.11
M2	14.2	8.6	34.2	0.28	-0.23	1.03 *
M3	15.4	9.6	33.8	0.13	-0.53 *	0.42
M4	24.4	12.2	53.2	0.20	-0.60 *	0.57 *
M5	7.9	4.8	14.1	-0.37	-0.71	-0.50
M6	14.2	6.9	32.6	0.30	-0.49	0.58 *
M7	18.9	10.5	35.8	0.02	-1.16 *	0.33
M8	21.0	12.3	46.4	0.21	-0.22	0.47
M9	27.6	18.0	61.3	0.58 *	-1.20 *	1.57 *
M10	30.9	18.4	65.4	0.29	-1.19 *	0.80 *
M11	17.9	10.4	38.4	0.12	0.04	0.35
M12	10.5	4.6	20.6	0.25	0.83 *	0.21
M13	10.6	3.9	21.5	-0.40	-0.26	-0.18
M14	14.9	8.8	28.5	-0.19	-0.75	0.36
M15	16.6	9.2	33.5	-0.08	-1.08 *	0.28
M16	23.5	12.9	48.5	0.26	-0.47	0.55
O1	28.0	9.6	49.2	-0.53	-0.90 *	-0.10
O2	26.3	9.0	60.6	1.36 *	0.78 *	2.65 *
O3	26.9	10.0	56.4	0.54	0.09	1.26 *
O4	43.0	13.3	77.2	0.15	-0.31	0.62
O5	35.3	15.3	79.9	0.84 *	0.35	1.73 *
O6	16.0	3.7	32.1	0.65	0.32	1.04 *
O7	21.5	5.3	42.9	0.58	0.41	0.81
O8	20.8	8.8	43.7	0.34	0.14	0.83 *
O9	25.2	12.0	51.4	0.06	-0.20	0.62
O10	22.4	6.4	50.0	1.39 *	0.89 *	2.12 *
O11	22.7	7.8	43.7	0.01	-0.40	0.52
O12	21.6	8.4	39.2	-0.36	0.41	0.11
O13	24.1	10.9	50.2	0.20	-0.06	0.79
O14	16.6	7.0	36.4	0.61	0.38	1.11 *
O15	16.4	6.4	33.8	0.16	-0.09	0.50
O16	15.0	7.7	31.9	-0.15	-0.47	0.67
O17	24.1	7.3	47.4	0.32	0.00	0.75 *

\* は歪度がゼロ (正規分布) から有意に異なることを示す ( $p < 0.05$ )。

えた。樹高の歪度も同様に、壮齢林と高齢林との間で切片に有意差はみられなかったが、共通の回帰として表された (Fig. 3e)。歪度の値としては、収量比数が比較的高い壮齢林で負の値 (左裾広がり) が多かったのに対し、収量比数が比較的低い高齢林ではゼロ付近 (正規分布に近い) の値が多かった (Table 2)。材積の歪度では、壮齢林よりも高齢林で回帰の切片が高い傾向があったものの有意ではなかった (Fig. 3f)。歪度の値としては壮齢林と高齢林いずれもほとんどが正の値であった (Table 2)。

Fig. 2 で示した収量比数と変動係数および歪度の関係について、地位級の範囲を限定せず、すべてのデータを用いて解析した結果を Fig. S10 に示す。変動係数については Fig. 2 と同様に胸高直径と材積で切片に有意差がみられ、高齢林で変動係数が高かった (Fig. S10a, c)。一方歪度についてはいずれの関係も有意な回帰が得られず収量比数が共変量として有効ではなかったが、樹高と材積については高齢林で有意に高かった (Fig. S10e, f)。

## 4. 考察

### 4.1 郡上市のスギ人工林

調査、解析の対象とした郡上市のスギ人工林は特に高齢林で  $900 \text{ m}^3/\text{ha}$  以上の林分の割合が多く、高蓄積の傾向がみられた (Table 2)。その理由として、高齢林では比較的地位の高い林分が多かったことが考えられる (Fig. 1b)。岐阜・愛知・富山県の 80 ~ 117 年生のスギ高齢人工林 33 林分の調査では、本研究と同じ地位別樹高成長曲線 (岐阜県林政部 1992) が地位の判定に用いられており、地位級 1 ~ 5 まで幅広い地位の林分がみられたと報告されている (横井・三村 2014)。これに対し、本研究の高齢林分はすべて地位級 3 以上のもので占められており、これが高蓄積の林分が多くみられた一因と考えられる。一方で、同じ林齢でも林分材積は大きなばらつきがみられた (Fig. 1d)。このばらつきの要因としては、地位だけでなく、立木密度の違い (Fig. 1a) に反映されるように異なる間伐履歴の影響が考えられる。

### 4.2 直径・樹高・材積分布の特性

本研究では、歪度が有意に正の値となる林分が材積分布で特に多くみられた (Table 2)。直径、樹高、材積のうち、正の歪み (右裾広がり) が比較的大きいのが材積分布であり、反対に正の歪みが比較的小さいのが樹高分布であるといわれている (Hara 1984a, b, 國崎 2001)。これは樹木個体の成長においては、直径よりも樹高への資源配分が優先されるという考えに基づいて説明される (Hara 1984a)。どの個体も樹高に優先的に資源を配分するため樹高では優劣がつきにくい、資源に余裕がある個体ほど樹高だけでなく直径にも配分できるため直径では優劣がつきやすい。材積分布の正の歪みは、主に直径分布における個体差が増幅したものと考えられる。

スギをはじめ人工林における直径の変動係数は、間伐

や自己間引きにより立木密度が低下した際には一旦減少するものの、その後時間の経過とともに微増すると報告されている(國崎 2001)。本研究においても胸高直径の変動係数は壮齡林よりも高齢林で高くなっていた (Fig. 3a)。同じ収量比数でも高齢林は壮齡林と比べて胸高直径の変動係数が高く、林分内における個体間の胸高直径の格差が顕著であることがうかがえた (Fig. 3a)。個体間競争の程度を反映して、変動係数は立木密度が高い林分では増加し、間伐(下層間伐を想定)により競争が緩和されると減少するが、間伐後一定期間が経過すると再び増加することが指摘されている(國崎 2001)。収量比数から考えると郡上市の高齡林において過密林分は少なく、概ね適正に管理されているように見える。しかし、そのような高齢林で胸高直径の変動係数が高いのは、自己間引き

や間伐履歴の違いにより生じた過去の個体間差を反映している可能性がある。一方、歪度については高齢林と壮齡林で差が見られなかった。國崎(2001)は文献レビューに基づき、壮齡期以降の林分では間伐により競争が緩和されるため、壮齡期以降に歪度の増減が明確でない林分が多いことを指摘しており、本研究の結果にもこれと同様の要因が影響していると考えられる。

間伐によるサイズ分布への影響は、間伐方法の違いや間伐前の立木密度によっても異なることがこれまでに報告されている(國崎 2001)。変動係数は一般に下層間伐により減少するが(田中 1992a)、間伐木がより上層に及ぶほど変動係数が増加する事例がトドマツ林で報告されている(阿部 1979)。歪度は間伐木がより上層に及ぶほど減少することが若齡から壮齡のスギ林とヒノキ林で報告さ

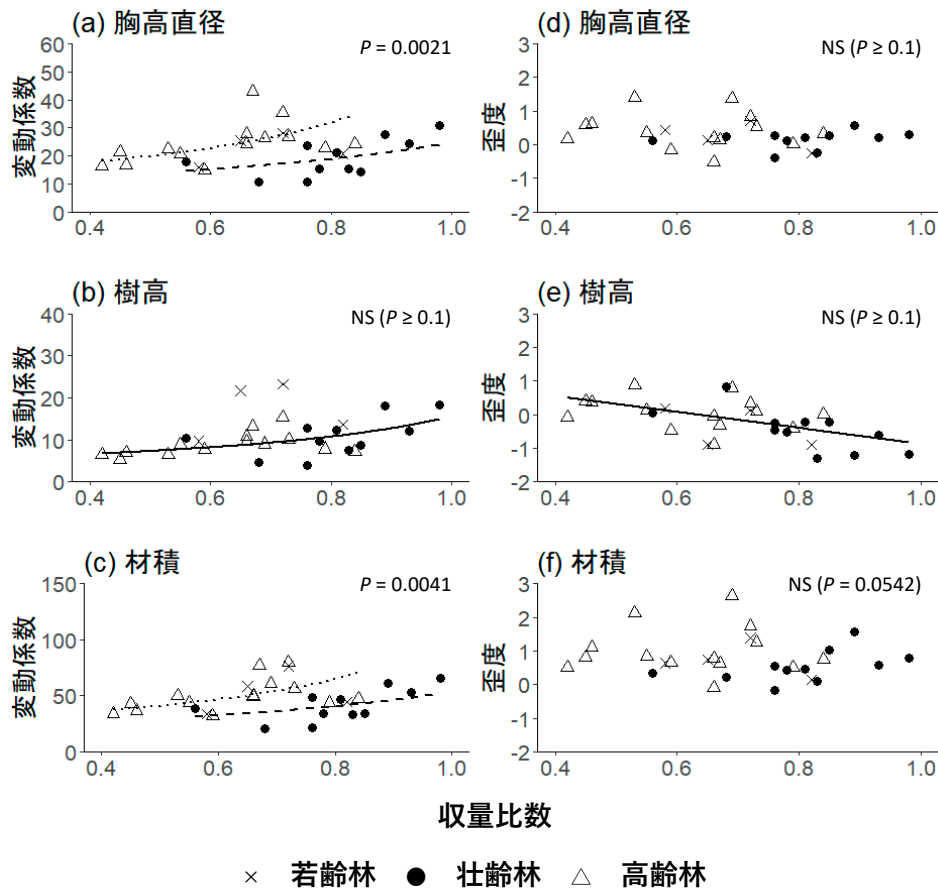


Fig. 3. 壮齡林と高齢林における収量比数に対する個体サイズ(胸高直径、樹高、材積)の変動係数(a-c)と歪度(d-f)の関係(概ね地位級1と3の中央線間に分布する林分のみに着目した場合)

破線(壮齡林)と点線(高齢林)は共変量の係数(直線回帰の傾きに相当)は共通だが切片が壮齡林と高齢林で異なり、それぞれで有意な回帰が得られたことを示す。実線は、共変量の係数も切片も共通の回帰で表されることを示す。p値はGLMに基づく共分散分析による切片の有意差、NSは切片に有意差がみられなかったことを示す。なお、共変量の係数についてはすべての関係で壮齡林と高齢林との間に有意差がみられなかった。若齡林は解析には用いていないが参考値としてプロットした。

れている(家原 1991)。また、立木密度が高いほど変動係数が大きく、歪度は増加しやすいとされる(Hara 1984b、國崎 1998)。この点については、本研究において、混み合い度の指標として用いた収量比数が高いほど変動係数が高くなるパターンと類似しているが(Fig. 3a)、歪度では明確な関係がみられなかった(Fig. 3d)。本研究は1回の多点調査データに基づくため、間伐方法の違いや過去の立木密度の変化などによるサイズ分布構造への影響を詳細に評価することはできなかったが、こうした要因がサイズ分布に及ぼす影響にも注意する必要がある。

樹高の変動係数については胸高直径の場合とは異なり、壮齡林と高齡林では収量比数との変動係数の関係において共通の回帰で表され、切片に有意差がみられなかった(Fig. 3b)。通常、一斉林では壮齡期以降多くの個体が林冠部へ到達しているため、胸高直径と比べて樹高のばらつきは生じにくいと考えられる(田中 1983)。歪度についても、共分散分析により壮齡林と高齡林は共通の回帰で表された(Fig. 3e)。ただし、それぞれの林分に注目すると、収量比数が比較的高い壮齡林で負の歪み(左裾広がり)が多いのに対し、収量比数が比較的低い高齡林でゼロ(正規分布)に近い歪みの少ない状態が多かった(Table 2)。この理由としては、過去に被圧木、劣勢木として残存していた個体が自己間引きにより枯損あるいは間伐により除かれた結果、高齡林では負の歪みが弱められ、正規分布に近くなったためと考えられる。このような樹高の歪度の差には、収量比数で表される混み合い度のほか、地位の違いも影響していると考えられる。

材積の変動係数については、胸高直径と類似した傾向となり高齡林で高くなった(Fig. 3c)。また、歪度については収量比数と関係なく高齡林で高い林分(正の値で右裾広がり)が多く、サイズ非対称性が高い傾向がみられたものの(Table 2)、胸高直径と同様、壮齡林と高齡林の間で有意差はみられなかった(Fig. 3f)。個体間競争の影響を検討する場合には乾重量や材積を指標とするのが望ましいといわれている一方で、材積のサイズ分布動態の傾向は胸高直径のそれとほぼ同様と考えられている(Hara 1993)。これは、上述のように資源配分の点から樹高よりも直径で優劣が付きやすいことを反映し(Hara 1984a)、材積は直径の影響をより大きく受けるからであると考えられる。

#### 4.3 今後の人工林管理への示唆

本研究で行った林分調査に基づき、調査対象の郡上市のスギ林は主として地位級1~3の林分により構成され地位が高く、蓄積の高い林分が多かったことが示された(Fig. 1-2、Table 1)。また、80年生以上の高齡林では、壮齡林と比較して変動係数で表される個体の胸高直径および材積のサイズ不均質性が増加する傾向が示された(Fig. 3)。さらに、歪度で表される個体の材積のサイズ非対称性についても高齡林で高い傾向が示された(Table 2)。時

間経過とともにサイズ不均質性やサイズ非対称性が高まる傾向は、主に固定試験地における経年変化のモニタリング事例において報告されているが(田中 1992a、國崎 2001)、本研究は、林分の多点調査でも林齢にともないサイズ不均質性やサイズ非対称性の増加がみとめられた事例のひとつである。伐期の長期化にともない、壮齡林から高齡林まで幅広い林齢の林分が収穫の対象となり、間伐自体も収穫の一部となりうる人工林管理では、長期にわたり残す木の価値を高めることが施業上重要である。本研究の結果から明らかとなったように、立木密度が低下した高齡林で個体サイズのばらつきが大きくなるという状況を踏まえると、個体ごとのサイズや形状に配慮した管理に着目する必要がある。このように本研究では、立木密度が低く個体サイズのばらつきが大きくなった高齡林においては、1本1本の状況を見極めて残す木を保育する個体管理が重要であることが示唆されたといえる。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、郡上市農林水産部林務課の河合智氏、同情報課の日置欽昭氏と関係者の皆様ならびに各地域振興事務所の皆様には、調査対象の民有林に関する情報提供と調査許可手続きに関してご助力いただいた。また、民有林所有者の皆様には現地調査をご承諾いただき、現地をご案内いただいた。森林総合研究所森林植生研究領域の佐藤保氏、同植物生態研究領域の壁谷大介氏には研究計画設計に関するご協力と関係者への調整を行っていただいた。担当編集委員ならびに2名の査読者の皆様には本論文の改訂に関する有用なコメントを多数いただいた。以上の皆様に深く感謝申し上げる。本研究は森林総合研究所交付金プロジェクト「積極的長伐期林業を目指した大径材生産技術の開発」(課題番号201804)により実施された。

#### 引用文献

- 阿部 信行(1979) トドマツ人工林における間伐内容と直径分布との関連分析. 日林論, 90, 97-98.
- 赤池 弘次・甘利 俊一・北川 源四郎・樺島 祥介・下平 英寿(2007) 赤池情報量基準AIC—モデリング・予測・知識発見—(室田 一雄・土屋 隆 編). 共立出版, 160pp.
- Bendel, R. B., Higgins, S. S., Teberg, J. E. and Pyke, D. A. (1989) Comparison of skewness coefficient, coefficient of variation, and Gini coefficient as inequality measures within populations. *Oecologia*, 78, 394-400.
- Crawley, M.J. (2005) (野間口謙太郎・菊池泰樹 訳, 2008) 統計学: Rを用いた入門書. 共立出版, 344pp.
- 岐阜県林政部(1992) スギ人工林林分収穫表・林分密度管理図. 21pp.
- Hara, T. (1984a) A stochastic model and the moment dynamics of the growth and size distribution in plant populations. *J.*



- Theor. Biol., 109, 172–190.
- Hara, T. (1984b) Dynamics of stand structure in plant monocultures. *J Theor. Biol.*, 110, 223–239.
- Hara, T. (1993) Mode of competition and size-structure dynamics in plant communities. *Plant Species Biol.*, 8, 75–84.
- 細田 和男・光田 靖・家原 敏郎 (2010) 現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違およびその修正方法. *森林計画誌*, 44, 23–39.
- 細田 和男 (2020) “収量比数  $R_y$  計算プログラム”, <https://www.ffpri.affrc.go.jp/database/yieldindex/index.html>, (参照 2021-8-29).
- 家原 敏郎 (1991) 数理モデルによる森林成長の樹種・地域特性の解明 (IV) 関西地域における直径分布の地域・施業特性. *日林論*, 102, 157–158.
- 気象庁 (2021) “気象庁ホームページ：過去の気象データ検索”, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (参照 2021-3-25).
- 河合 智 (2018) 災害リスクを考慮した木材生産の推進と将来目標区分について. *森利誌*, 33, 85–88.
- 國崎 貴詞 (1998) 若い針葉樹同齡単純林の直径分布の動態. *岩大演報*, 29, 11–25.
- 國崎 貴詞 (2001) 樹木同齡単純林における胸高直径分布とその動態—針葉樹を中心として—. *森林計画誌*, 35, 31–45.
- 國崎 貴詞 (2016) 人工同齡単純林の林分構造に関する古典的解析法. *岩大演報*, 47, 59–71.
- 國崎 貴詞・藁谷 紀恵・柴田 信明 (1999) 岩手山麓におけるスギ高齡林の林分構造と成長. *日林誌*, 81, 346–350.
- 中村 松三・伊藤 哲・山川 博美・平田 令子 (2019) 低コスト再造林への挑戦：一貫作業システム・コンテナ苗と下刈り省力化. *日本林業調査会*, 168pp.
- 日本森林学会 (2018) “林業遺産：No.35 郡上林業の歴史と技術を伝承する資料・展示と社叢林”. *日本森林学会ウェブサイト*, <https://www.forestry.jp/forestryheritage/2018-3235/>, (参照 2022-4-12).
- Ogawa, H., Yoda, K., Ogino, K. and Kira, T. (1965) Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand II. Plant biomass. *Nature and life in Southeast Asia*, 4, 49–80.
- R core team (2020) “R: A language and environment for statistical computing”. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/>.
- 林野庁 (1970) 立木幹材積表 (東日本編). *日本林業調査会*, 333pp.
- 林野庁 (2020) 令和元年度森林・林業白書. *林野庁*, 346pp.
- 田中 和博 (1983) 林齢に伴う直径分布型および樹高分布型の変化に関する一考察. *日林誌*, 65, 473–476.
- 田中 和博 (1992a) 二次元林分遷移の方程式とその応用に  
関する研究. *三重大演報*, 17, 1–171.
- 田中 和博 (1992b) 平倉演習林藤堂スギ林分の林齢 168 年から 180 年までの定期成長. *三重大演報*, 17, 211–231.
- 横井 秀一・三村 晴彦 (2014) 岐阜・愛知・富山県のスギ高齡人工林の林分構造. *中部森林技術交流発表集*, 26, 7.
- 吉田 茂二郎・田中 文・太田 徹志・溝上 展也・福本 桂子 (2018) 密度管理されたスギ高齡人工林における 4 密度管理指標間の関係と過密林分での基準値の評価. *日林誌*, 100, 77–80.
- 吉本 敦・加茂 憲一・柳原 宏和 (2012) R による環境データの統計解析—森林分野での応用—. *朝倉書店*, 202pp.
- 全国森林組合連合会 (2012) 森林施業プランナーテキスト基礎編. *森林施業プランナー協会*, 191pp.
- 全国林業改良普及協会 (2006) 長伐期林を解き明かす. *全国林業改良普及協会*, 196pp.

#### 補足電子資料

以下はオンライン版のみの掲載となります。

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/465/index.html>

#### Fig. S1. スギ若齡林における胸高直径のサイズ分布

図中の % は胸高断面積合計に基づくスギ以外の樹種が占める相対優占度を表す。

#### Fig. S2. スギ壯齡林における胸高直径のサイズ分布

図中の % は胸高断面積合計に基づくスギ以外の樹種が占める相対優占度を表す。

#### Fig. S3. スギ高齡林における胸高直径のサイズ分布

図中の % は胸高断面積合計に基づくスギ以外の樹種が占める相対優占度を表す。

#### Fig. S4. スギ若齡林における樹高のサイズ分布

#### Fig. S5. スギ壯齡林における樹高のサイズ分布

#### Fig. S6. スギ高齡林における樹高のサイズ分布

#### Fig. S7. スギ若齡林における材積のサイズ分布

#### Fig. S8. スギ壯齡林における材積のサイズ分布

#### Fig. S9. スギ高齡林における材積のサイズ分布

#### Fig. S10. 壯齡林と高齡林における収量比数に対する個体サイズ (胸高直径、樹高、材積) の変動係数 (a-c) と歪度 (d-f) の関係

破線 (壯齡林) と点線 (高齡林) は共変量の係数 (直線回帰の傾きに相当) は共通だが切片が壯齡林と高齡林で異なり、それぞれで有意な回帰が得られたことを示す。実線は、共変量の係数も切片も共通の回帰で表されることを示す。実線、破線、点線がなく、p 値が NS 以外で示されているものは、有意な共変量の係数が得られなかったが切片 (変動係数や歪度に関する壯齡林と高齡林の平均値に相当) には壯齡林と高齡林との間で有意差があることを示す。p 値は GLM に基

づく共分散分析による切片の有意差、NSは切片に有意差がみられなかったことを示す。なお、共変量の係数についてはすべての関係で壮齡林と高齡林との間に有意差がみられなかった。若齡林は解析には用いていないが参考値としてプロットした。

## Size distribution characteristics of old-growth Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations in Gujo city, Gifu Prefecture, Japan

Kazuki MIYAMOTO<sup>1)\*</sup>, Masatake G. ARAKI<sup>2),3)</sup>, Hiromi YAMAGAWA<sup>4)</sup>, Katsuhiro NAKAO<sup>5)</sup>,  
Yoshio AWAYA<sup>6)</sup>, Hitoshi WATANABE<sup>7)</sup> and Yoshizumi HISADA<sup>7)</sup>

### Abstract

To clarify the size distribution characteristics of trees in old-growth Japanese cedar plantations, we conducted a multi-point survey in Gujo City, Gifu Prefecture, Japan. The old-growth stands ( $\geq 80$  years) comprised around 1000 m<sup>3</sup> stand volume. The relationships between tree crowding indices (relative yield index), indices of size heterogeneity (coefficient of variation), and size asymmetry (skewness) revealed that the size heterogeneity of diameter and stem volume was significantly higher in old-growth stands than in mature stands (40–80 years) under identical crowding conditions. In most of the old-growth stands, the skewness of diameter did not significantly differ from zero indicating a normal distribution, whereas the skewness of stem volume was significantly positive, indicating a positively skewed distribution with its tail on the right side. These results suggest that the old-growth Japanese cedar plantations in Gujo City are characterized by relatively high stand volumes, high size heterogeneity and high size asymmetry. The results also suggest that individual tree management is important in old-growth stands with lower tree density and large disparity in tree size.

**Key words :** old-growth plantation forest, size structure, coefficient of variation, skewness, relative yield index

---

Received 11 June 2021, Accepted 8 November 2022

1) Department of Forest Vegetation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Plant Ecology, FFPRI

3) Forest Research, Extension and Protection Division, Forestry Agency

4) Kyushu Research Center, FFPRI

5) Kansai Research Center, FFPRI

6) River Basin Research Center, Gifu University

7) Gifu Prefectural Research Institute for Forests

\* Department of Forest Vegetation, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; E-mail: mkazuki@affrc.go.jp