

## 林冠疎開がスギ断面積成長・材積成長を規定する要因に与える影響の検証

福本桂子<sup>1</sup>・西園朋広<sup>1</sup>・北原文章<sup>1</sup>・細田和男<sup>1</sup>

### 1 森林総合研究所

**要旨**：幼齢のスギ人工林では、林冠が閉鎖する前後で植栽木の成長を規定する主たる要因は、植栽木自身のサイズから植栽木間の競争へと移行することが知られている。本研究では、間伐強度の異なるスギ林分における幼齢（林齢 14 年）から壮齢（林齢 61 年）までの長期成長データに基づき、林冠が閉鎖する前後での植栽木の成長を規定している主たる要因の推移を検証する手法を検討した。その結果、断面積成長および材積成長について、中庸度間伐区では林冠閉鎖前後でサイズ依存から競争依存の成長へ推移する傾向がみられた。その一方で、その他の試験区では明確な傾向がみられなかった。このことから、壮齢林においても既往の研究と同様の傾向がみられることが示唆されたが、その他の試験区では一定の傾向がみられなかったことから、今後さらに手法の検証が必要であると考えられた。

**キーワード**：距離独立競争指数、間伐、林冠閉鎖

### The effect of thinning on the regulating factor of sugi (*Cryptomeria japonica*) basal area and volume growth at canopy closure.

Keiko FUKUMOTO<sup>1</sup>, Tomohiro NISHIZONO<sup>1</sup>, Fumiaki KITAHARA<sup>1</sup> and Kazuo HOSODA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Forestry and Forest Products Research Institute, 1, Matsunosato, Tsukuba, 305-8687

**Abstract**: The main regulating factor of tree growth generally changes from size-dependent to competition-dependent at canopy closure. This study examined technique for regulating factor of basal area and volume growth of sugi change at canopy closure based on long-term growth data. The results showed that the regulating factor of tree growth changed from size-dependent to competition-dependent at canopy closure in the moderate thinning plot. On the other hand, that change did not occur in the other plots. Those results suggested that the regulating factor of basal area and volume growth changes size-dependent to competition-dependent for mature stands; however, we need more verification because the other plots did not consistent the growth changes.

**Key-word**: Distance-independent competition index, Thinning, Canopy closure

### I はじめに

持続的な森林経営を行うために、植栽木の成長予測は有用である。適切な成長予測モデルを構築するためには、成長を規定する主要因を理解し、適切にモデルに組み込む必要がある。Inoue et al. (3) によると、林冠が閉鎖する前後で植栽木の成長を規定している主たる要因が植栽木自身のサイズから植栽木間の競争へと移行する。そのため、間伐に伴う林冠の疎開・閉鎖の過程においても、同様に、植栽木の成長を規定する要因が変化することが予想される。しかし、Inoue et al. (3) らの報告は、幼齢林（林齢 4～12 年）のみを対象としており、壮齢林において林冠疎開・閉鎖が成長を規定する主要因の変化について与える影響は未検討である。

また、Inoue et al. (3) では、20 本の対象木を樹幹解析し、林冠閉鎖前後での植栽木の成長を規定する要因の変

化を検証している。樹幹解析は手間やコストのかかる解析手法であるため、簡易な手法で植栽木の成長を規定する要因の変化を把握する手法が期待される。より簡易な手法でこのような要因の変化を表現できれば、成長予測モデルを構築する際に有用となるだろう。

そこで本研究では、間伐強度の異なる 4 つの試験区からなる間伐試験地の 47 年間（林齢 14～61 年）の継続調査データを解析し、間伐に伴う林冠疎開・閉鎖の過程で、壮齢林の植栽木の成長がサイズ依存から競争依存へ推移するの検証する手法を検討した。

### II 材料と方法

**1. 使用したデータ** 使用したデータは、高知県高岡郡に位置する四万十森林管理署管内の下川山国有林 215 林班は小班内に設置された試験地から得た。1972 年

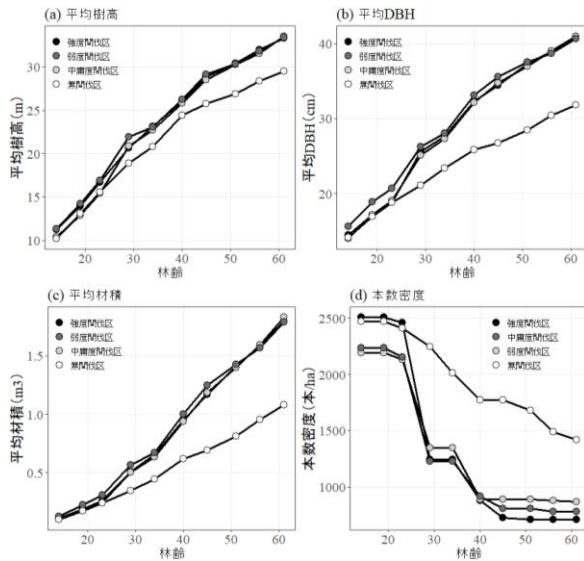


図-1. 各間伐区における平均樹高・平均 DBH・平均材積・立木密度の推移

The summary of mean height (m), mean DBH (cm), mean volume (m<sup>3</sup>) and stand density (ha/trees).

に試験地が設置され、2019 年時点で 61 年生となるスギ林分である (4)。試験地の標高は約 500m、傾斜は 5～10 度である。試験地には間伐強度の異なる 4 つの試験区が設定されている。本論文では、合計間伐率の高いものから強度間伐区、中庸度間伐区、弱度間伐区とした。試験地の面積は合計で 2.80 ha である。25 年生時に 1 回目 (本数間伐率: 強度 41%, 中庸度 38%, 弱度 32%), 37 年生時に 2 回目 (本数間伐率: 強度 38%, 中庸度 34%, 弱度 34%) の間伐が実施されている。14 年生時から 61 年生時まで、5～6 年おきに樹高、胸高直径が測定された (図-1)。各試験区では全立木の胸高直径を測定し、間伐区ごとに約 30 本の樹高を測定した。未測定木の樹高については、樹高曲線を作成して推定した。10 回分の測定データを用いて、のべ 1,077 本分の断面積成長量および材積成長量を解析に用いた。なお、本データでは、植栽後に林冠閉鎖したときの林齢、間伐に伴う林冠疎開・閉鎖時の林齢に関する詳細な情報は記録されていない。そのため、無間伐区の本数密度の減少が始まった約 20 年生時を、植栽後の林冠閉鎖時の林齢と仮定した (図-1)。また、千葉 (2) を参考に、間伐後約 5～10 年で林冠が再び閉鎖したと仮定した。

**2. 解析方法** 断面積成長量および材積成長量について、それぞれの成長が個体サイズに依存しているか、個体間の競争に依存しているのか調べた。まず個体サイズ依存を表現するために以下の一次式を用いた。

$$\Delta d_{i,j} = a_1 BA_{i,i} + a_2 \quad (1)$$

$$\Delta v_{i,j} = b_1 BA_{i,i} + b_2 \quad (2)$$

ここで  $\Delta d_{i,j}$  と  $\Delta v_{i,j}$  は、ある林分  $I$ 、測定回  $j$  の対象木  $i$  における胸高断面積成長量 (m<sup>2</sup>/年) と材積成長量 (m<sup>3</sup>/年) を、 $BA_{i,i}$  は胸高断面積 (m<sup>2</sup>) を示す。次に、競争依存を表現するために以下の一次式を用いた。

$$\Delta d_{i,j} = c_1 CI_{i,j} + c_2 \quad (3)$$

$$\Delta v_{i,j} = d_1 CI_{i,j} + d_2 \quad (4)$$

ここで、 $CI_{i,j}$  は、以下で定義される競争指数である。

$$CI_{i,j} = BAL_{i,i,j} \quad (5)$$

$BAL_{i,i,j}$  (Basal area in larger trees) は、ある林分  $I$ 、測定回  $j$  における対象木  $i$  よりも胸高直径の大きい個体の断面積合計で表される距離独立競争指数である (8)。

各試験区および各測定回において式 (1)～式 (4) を当てはめ、AIC を算出し、値が小さな式を適切なモデルとして選択した。断面積成長量については式 (1) および式 (3)、材積成長量については式 (2) および式 (4) における AIC を比較した。そのうえで、断面積成長量および材積成長量が個体サイズに依存しているか、個体間競争に依存しているのかを検討した。また、AIC の差が 2 以下であれば、モデル間には差がないとみなした (1)。統計解析には R 3.1.3 を用いた (5)。

### III 結果

断面積成長量におけるサイズ依存モデルと競争依存モデルの AIC を比較した結果を表-1 に示す。強度間伐区では、林冠閉鎖前の 14 年生時にはサイズ依存の成長を示した。最初の林冠閉鎖後の 23 年生時にはサイズ依存、1 回目の間伐後、林冠が閉鎖した時期と考えられる 34 年生時には競争依存の成長に推移する傾向がみられた。2 回目の間伐後、45 年生時に競争依存の成長を示した。中庸度間伐区では、林冠閉鎖前の 14 年生時にサイズ依存を示し、1、2 回目の間伐後の 29～45 年生時までサイズ依存の成長を示し、林冠が閉鎖したと考えられる 51、56 年生時に競争依存に推移する傾向がみられた。弱度間伐区では、林冠が閉鎖する前の 14 年生時にはサイズ依存、19 年生時は競争依存の成長を示した。1 回目の間伐後、サイズ依存あるいは競争依存の成長について明確な傾向はみられなかった。2 回目の間伐後、45 年生時にサイズ依存、林冠が閉鎖したと考えられる 51 年生時に競争依存の成長に推移していたが、56 年生時は再びサイズ依存の成長を示していた。無間伐区では、林冠閉鎖前はサイズ依存の成長を示していたが、林冠閉鎖後も 51 年生時を除き、すべての林齢でサイズ依存の成長を示していた。材積成長量について、いずれの試験区についても断面

表-1. 断面積成長量における林齢別・間伐区別サイズ依存および競争依存モデルの AIC 比較  
Comparison of AIC between size-dependent and competition-dependent models for basal area growth under different thinning intensities along stand ages. Bold values indicate that the difference of AIC was smaller than 2.

林齢	1) 強度間伐区		2) 中庸度間伐区		3) 弱度間伐区		4) 無間伐区	
	サイズ	競争	サイズ	競争	サイズ	競争	サイズ	競争
14	<b>-3359.1</b>	-3342.6	<b>-3058.9</b>	-3048.0	<b>-2618.7</b>	-2590.6	<b>-3237.7</b>	-3167.3
19	-2761.0	-2760.0	-2912.9	-2913.7	-2530.2	<b>-2535.0</b>	<b>-2987.0</b>	-2972.3
23	<b>-1650.7</b>	-1646.4	<b>-1778.8</b>	-1768.0	-1602.8	-1602.8	<b>-2908.2</b>	-2872.6
29	-1621.7	-1620.7	<b>-1697.8</b>	-1695.3	-1494.7	-1495.8	<b>-2464.0</b>	-2437.7
34	-1090.4	<b>-1093.3</b>	<b>-1199.9</b>	-1192.8	-1020.0	-1021.6	<b>-2237.3</b>	-2207.3
40	-855.1	-855.0	<b>-1016.1</b>	-1008.0	-979.0	-978.9	<b>-1899.8</b>	-1896.7
45	-827.7	<b>-830.1</b>	<b>-1069.7</b>	-1055.2	<b>-861.7</b>	-846.0	<b>-1956.0</b>	-1916.3
51	-774.9	-776.3	-956.5	<b>-968.5</b>	-769.8	<b>-772.5</b>	-1537.7	<b>-1550.3</b>
56	-796.7	-796.4	-995.3	<b>-1003.1</b>	<b>-957.0</b>	-946.4	<b>-1571.7</b>	-1551.2

表-2. 材積成長量における林齢別・間伐区別サイズ依存および競争依存モデルの AIC 比較  
Comparison of AIC between size-dependent and competition-dependent models for volume growth under different thinning intensities along stand ages. Bold values indicate that the difference of AIC was smaller than 2.

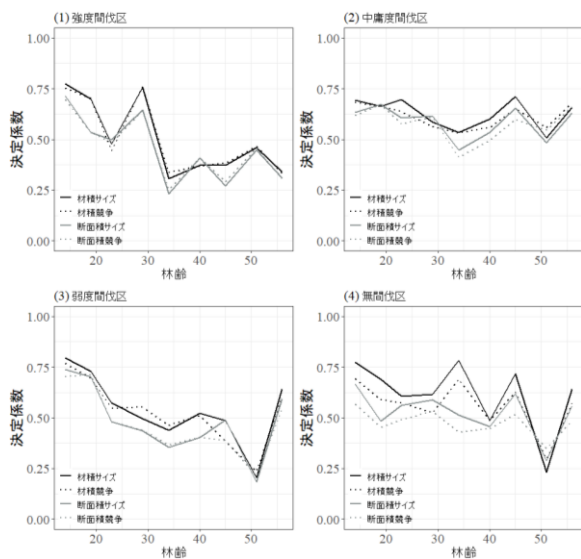
林齢	1) 強度間伐区		2) 中庸度間伐区		3) 弱度間伐区		4) 無間伐区	
	サイズ	競争	サイズ	競争	サイズ	競争	サイズ	競争
14	<b>-2141.4</b>	-2115.7	<b>-1980.0</b>	-1971.0	<b>-1681.7</b>	-1655.1	<b>-2183.8</b>	-2100.4
19	-1687.6	<b>-1691.8</b>	-1727.0	-1727.1	<b>-1446.5</b>	-1423.3	<b>-1815.1</b>	-1743.0
23	<b>-939.9</b>	-931.0	<b>-979.1</b>	-952.1	<b>-883.2</b>	-874.7	<b>-1723.6</b>	-1704.9
29	-945.3	<b>-948.8</b>	<b>-905.5</b>	-897.6	-861.9	<b>-877.9</b>	<b>-1436.8</b>	-1393.0
34	-589.3	<b>-593.7</b>	-655.7	-655.3	-565.3	<b>-569.2</b>	<b>-1303.7</b>	-1236.8
40	-445.6	-445.1	<b>-525.5</b>	-516.2	<b>-510.2</b>	-507.5	-1045.5	-1045.6
45	-412.8	-414.0	<b>-575.0</b>	-556.9	<b>-440.9</b>	-425.4	<b>-1117.8</b>	-1072.5
51	-400.9	-401.8	-499.1	<b>-508.5</b>	-399.3	<b>-402.1</b>	-794.1	<b>-806.9</b>
56	-383.4	-383.0	-518.6	<b>-525.6</b>	<b>-485.2</b>	-474.4	<b>-854.9</b>	-829.9

積成長量とおおよそ同様の傾向がみられた(表-2)。強度間伐区の場合、林冠閉鎖前の14年生にはサイズ依存、19年生時には競争依存の成長を示し、1回目の間伐後、29、34年生時のいずれも競争依存の成長を示しており、林冠閉鎖に伴うサイズ依存から競争依存の成長への明確な推移はみられなかった。中庸度間伐区では、林冠閉鎖後の23年生時にサイズ依存の成長を示した。その後、29年生時にもサイズ依存の成長を示していた。2回目の間伐後の40、45年生時にサイズ依存の成長を示し、再び林冠が閉鎖したと考えられる51、56年生時には競争依存の成長を示しており、林冠閉鎖に伴ってサイズ依存から競争依存に推移する傾向がみられた。弱度間伐区では、23年生時までサイズ依存の成長を示し、1回目の間伐後の29、34年生時は競争依存の傾向を示していた。2回目の間伐後の40、45年生時にはサイズ依存の成長を示し、林冠が閉鎖した51年生時に一度競争依存に推移する傾向がみられた。その後56年生時に、再びサイズ依存の成長を示した。無間伐区では、40、51年生時を除き、すべ

て的林齢でサイズ依存の成長を示していた。モデルにおける決定係数は、0.25~0.75の範囲で推移していた(図-2)。いずれの試験区においても、断面積成長と材積成長を比較すると、材積成長で決定係数が高い傾向がみられた。

#### IV 考察

Inoue et al. (3) は、幼齡林において林冠疎開から閉鎖の過程で植栽木の成長はサイズ依存から競争依存へと推移することを示した。本研究では、断面積成長量および材積成長量において、中庸度間伐区では、林冠閉鎖に伴うサイズ依存から競争依存の成長への推移がみられた(表-1, 2)。このことから、幼齡林だけでなく壮齡林においても同様の傾向がみられることが示唆された。しかし、中庸度間伐区以外の試験区では、サイズ依存から競争依存への推移が若干みられたものの、すべてを把握することはできなかった。特に、無間伐では林冠閉鎖に伴うサイズ依存から競争依存への明確な推移はみられな



図－ 2. 間伐区別サイズ依存モデルおよび競争依存モデルの決定係数の推移

Coefficient of determination for size-dependent and competition-dependent model of basal area and volume growth with different thinning intensities.

かった。この詳細な理由は、本研究で明らかにすることはできなかったが、1つの可能性として、今回競争指数として用いた BAL では、植栽木の成長を規定する要因の推移を完全には把握できないことが考えられる。一般的に、競争指数は距離従属競争指数と距離独立競争指数に分けられる。距離従属競争指数は、隣接木との距離に応じた競争を考慮した指数であり、林分内の植栽木の位置情報を必要とする (8)。林分内の立木の位置関係を考慮するため、植栽木間の競争関係を表現するに優れていると考えられる。Inoue et al. (3) は、距離従属競争指数を用いていた。そのため、より詳細な競争関係を表現できていたと考えられる。その一方で、本研究で用いた距離独立競争指数は林分内の位置情報を考慮しない。そのため、今回用いた BAL のような距離独立競争指数では、植栽木間の競争関係を表現するには不十分であった可能性がある。また、一般的に、期首直径と直径成長量には、強い正の線形関係があるとされる (6, 7)。この関係性は樹冠の疎開・閉鎖の過程に関わらず保たれる。このことから、樹冠が閉鎖し、個体間同士の競争が始まったとしても個体サイズの効果は継続していると考えられる。そのため、競争効果を組み込んだモデルが選択されにくかった可能性がある。特に、無間伐区ではその傾向が顕著に見られていた (表－ 1, 2)。このような理由で、サイズ依存から競争依存への推移をうまく把握することができなかったかもしれない。さらなる検証および

モデルの改良が必要であると考えられた。

## VI おわりに

本研究では、長期データを用い、林冠閉鎖前後における植栽木の成長要因の変化を検証する手法を検討した。その結果、壮齢林においても既往の研究と同様の傾向がみられることが示唆された。また、中庸度間伐区では、林冠閉鎖前後でサイズ依存から競争依存の成長に推移する傾向を把握できたが、その他の試験区では明確なその傾向を把握できなかった。今後、競争効果モデル内で距離従属指数を用いるなど、モデルの改良および検証が必要となる。そのうえで、成長予測モデルにこれらの要因を組み込むことで、より正確な長期成長予測が可能になると考えられる。

## 引用文献

- (1) Bumham KP and Anderson DR (2002) Model selection and multimodel inference : a practical information-theoretic approach. Spnnger-Veflag, New York, New York. pp70-72
- (2) 千葉幸弘 (2009) 間伐に伴う林冠再閉鎖までの所要年数. 関東森林研究 60 : 149-150
- (3) Inoue S, Shirota T, Mitsuda Y, Ishii H and Gyokusen K (2008) Effects of individual size, local competition and canopy closure on the stem volume growth in a monoclonal Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation. Ecol. Res. 23 : 953-964
- (4) 北原文章 (2015) 下ル川山スギ人工林収穫試験地の調査結果. 森林総研四国支所年報 56 : 33-34
- (5) R Core Team (2019) R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- (6) 白石則彦 (1985) 同齢単純林における直径分布の解析とその生長予測への応用 (II) 直径分散の変化について. 日林誌 67 : 305-310
- (7) Tanaka K (1986) A stochastic model of diameter growth in an even-aged pure forest stand. J. Jpn. For. Soc. 68 : 226-236.
- (8) Weiskittel AR, Hann DW, Kershaw JA and Vanclay JK (2011) Forest growth and yield modeling. Wiley-Blackwell. pp1-36