

## わが国のスギ林における林齢と上層木平均直径との関係の地域差 —気候条件の影響—

### Effect of climatic condition on regional differences in age-diameter relationships for dominant trees in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forests in Japan

西園朋広<sup>\*1</sup>・北原文章<sup>\*2</sup>・家原敏郎<sup>\*3</sup>・光田靖<sup>\*4</sup>

Tomohiro NISHIZONO<sup>\*1</sup>, Fumiaki KITAHARA<sup>\*2</sup>, Toshiro IEHARA<sup>\*3</sup> and Yasushi MITSUDA<sup>\*4</sup>

\* 1 森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki 305-8687

\* 2 森林総合研究所四国支所

Shikoku Res. Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kochi 780-8077

\* 3 森林総合研究所九州支所

Kyusyu Res. Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kumamoto 860-0862

\* 4 宮崎大学

Faculty of Agriculture, University of Miyazaki, Miyazaki 889-219

**要旨：**林野庁森林資源モニタリング調査データを解析して、林齢ー上層木平均直径関係の地域差と同関係に及ぼす気候条件の影響を調べた。解析の対象は、わが国の13の地域のスギ林である。13地域における林齢ー上層木平均直径関係は、2つの地域グループに分かれた。暖かさ・日射・降雨・積雪に関する気候変数のうち、いくつかの変数において、林齢ー上層木平均直径関係のモデル係数との間に有意な相関が認められた。これらの結果から、(1) 冷涼で、積雪が多く、日射量・夏期降水量が少ない地域のスギは、遅い初期成長と大きな最大サイズを持つ晩成型の直径増加パターンを示し、(2) 逆の気候条件の地域のスギは、早い初期成長と小さな最大サイズを持つ早熟型のパターンを示すと考えられた。この結果は、わが国のスギ林における林齢ー上層樹高関係で認められた傾向とほぼ一致していた。

**キーワード：**地域差、林齢と上層木平均直径との関係、国家森林資源調査、森林資源モニタリング調査

**Abstract:** We analyzed Japanese National Forest Inventory data to investigate the regional difference in the relationship between tree diameter and age for dominant trees, and the effects of climatic conditions on these relationships. Our analysis focused on *Cryptomeria japonica* forests in 13 regions of Japan. The age-diameter relationships were classified into two regional groups. Several categories of climatic variables (warmth, solar radiation, precipitation, and snow depth) were significantly correlated with the parameters of a model for the age-diameter relationships. From these results, we concluded that (1) in regions with cold temperatures, deep snow, low solar radiation, and low summer precipitation, *C. japonica* shows a late-maturity pattern for diameter increase, with slow initial growth and a large maximum size, and (2) in regions with the opposite climatic conditions, it shows an early-maturity pattern with fast initial growth and small maximum size. These findings agreed with previous findings in the relationship between tree height and age for dominant trees of *C. japonica* forests.

**Key words:** regional difference, age-diameter relationships for dominant trees, forest resource monitoring survey in Japan, national forest inventory

#### I はじめに

上層木の平均サイズと林齢との関係を把握することは、該当地域における森林の成長傾向を把握するための簡便な方法の一つである。また、この関係を得ることで、森林簿等から得た林齢情報に基づいて、上層木のサイズを

推定することが可能となる。著者らは、これまでに、林野庁森林資源モニタリング調査(以下、F R M S と記す)データを解析して、全国の針葉樹単純林を対象に、林齢ー上層木平均サイズ関係を定量化して、森林簿の林齢情報用いた広域林分構造図を作成してきた(1)。この広

域林分構造図は、日本全体の森林の炭素吸収評価シミュレーションの初期データとして活用されている（5）。

また、著者らは、同データをさらに詳細に解析して、スギの林齢ー上層樹高関係の地域差とそれに与える気候条件の影響を調べた（6）。その結果、同関係が、気候条件の異なる2つの地域グループに分類可能であり、温暖な地域では、早い初期成長と小さな最大サイズを持つ早熟型の樹高増加パターンを示し、冷涼な地域では遅い初期成長と大きな最大サイズを持つ晩成型の樹高増加パターンを示すことが示唆された。しかし、既報（6）ではスギの樹高を解析の対象として、伸長成長に関する知見を得ることを目的としたため、肥大成長に関して、同様な結果が得られるかは不明である。

本研究では、肥大成長に関するサイズとして上層木の平均直径を解析の対象とし、既報（6）と同等の方法を用いて、スギ林の上層木における林齢ー平均直径関係の地域差とそれに与える気候条件の影響を明らかにすることを目的とした。

## II 資料

1. 森林データ 資料として、第一期（1999～2003年）のFRMSで得られた毎木調査データ（林齢・樹種・胸高直径）を用いた。同データからスギ単純林を抽出し、解析の対象とした（詳細は、（6）を参照されたい）。林分ごとに上層木（直径が大きい方から本数で20%までの個体）の平均直径を求めた。林分の全ての個体ではなく上層木のみを解析の対象としたのは、林分密度の違いが直径サイズに与える影響を軽減しようとしたためである。

2. 地域区分 農林水産技術会議事務局編（7）の地域区分（17地域：図-1）を利用した。II. 1で抽出したスギ単純林データについて、該当する地域を特定し、地域ごとに分割した（6）。17地域のうち、スギ単純林データの存在した13地域を解析の対象とした（表-1）。

3. 気候データ 温度条件の影響を検討するために、平均気温、最寒月平均気温、暖かさの指数および好適期間を用いた。暖かさの指数は、月平均気温と5°Cとの差を求める、正の値のみを積算して求めた。好適期間は、平均気温が5°Cを超える月の日数の和として求めた（3）。光条件の影響を検討するために、年日照時間と年全天日射量を用いた。水分条件の影響を検討するために、年降水量、夏期降水量（5～9月の降水量の和）、冬期降水量（5～9月の降水量の和）および年平均大気飽差を用いた。積雪条件の影響を検討するために、最大積雪深を用いた。つまり、計11の気候変数を解析に用いた。

大気飽差以外の気候値については、気象庁（4）のメ

ッシュ気候値から得た。用いた値は約1km解像度であり、1971年から2000年の月平均値である。大気飽差の値は、気候モデルの一つであるMIROC-hi 3.2（2）の出力データから得た。用いたデータは、農業環境技術研究所によって1km解像度に内挿されたもので、2001年から2010年の月平均値である。これらの気候値が格納されたメッシュポリゴンとFRMSプロットのポイントデータを重ねて、プロットが内包されたメッシュの気候値を該当プロットの気候値として得た。各プロットにおいて得られた気候値から、上記の11変数を計算した。解析対象の13地域それぞれにおいて、解析に用いたプロットの気候変数の平均値を得た。この平均値を以後の解析に供した。

## III 方法

1. 林齢ー上層木平均直径関係の定量化 林齢 $t$ （年）と上層木平均直径 $D$ （cm）との関係を近似するために、次式で示すミッチャーリッヒ式を用いた。

$$D = M(1 - \exp[-kt])$$

ここで、 $M$ と $k$ は係数である。 $M$ は $t=\infty$ のときの $D$ のサイズを意味し、 $kM$ は $D$ が小さいときの $D$ の増加速度を意味している（10, 6）。また、 $k$ は $D$ が中間的な大きさのときの $D$ の増加速度の減退程度を意味している（6）。この式を地域ごとのデータに回帰し、係数を推定した。本研究では、係数 $M$ と $k$ の違いで林齢ー上層木平均直径関係の地域差を表現できると考えた。回帰には一般化非線形最小2乗モデル（9）を用いた。誤差の不等分散性を考慮するためである。残差分析に基づいて、地域ごとに適切な誤差構造を設定した。一般化非線形最小2乗モデルを適用するために、統計ソフトRのnlmeパッケージ（9）のgnls関数を用いた。なお、多くの地域において、回帰後に外れ値が認められたので、有意水準1%で標準化残差に関する両側外れ値検定を実施した。外れ値と判断されたデータを解析から除外した。回帰と外れ値検定の工程を、外れ値が無くなるまで繰り返した。最終的に2396個の林分を解析に用いた（表-1）。

2. 林齢ー上層木平均直径関係の分類 係数 $M$ と $k$ を用いて各地域の林齢ー上層木平均直径関係をグループに分けた。解析には、標準化した $M$ と $k$ の値を用い、クラスタ分析（Ward法）を適用した。類似度の尺度としてユークリッド平方距離を用いた。

3. 林齢ー上層木平均直径関係と気候条件との関係 各地域で得られた11の気候変数と $M \cdot k \cdot kM$ との相関係数を算出して、有意水準5%で両側検定した。

## IV 結果

1. 林齢ー上層木平均直径関係の定量化 得られた係数は、全ての地域で統計的に有意であった（表-2）。

2. 林齢ー上層木平均直径関係の分類  $M$  と  $k$  の値を用いたクラスタ分析の結果（図-2），13 地域は大きく2つのグループ（以下、グループAとグループBと記す）に分かれた。地理的に見ると（図-3），グループAに属する地域が日本海側あるいは北日本に分布しており、グループBに属する地域が太平洋側あるいは南日本に分布していた。グループAにおける  $k$  の平均値はグループBと比べて小さかった（ $t$  検定， $p < 0.01$ ）。グループAにおける  $M$  の平均値はグループBと比べて大きかった（ $t$  検定， $p < 0.01$ ）。グループAとBの林齢ー上層木平均直径関係を比較すると（図-4），グループBの曲線では、グループAと比べて、弱齢時に大きな増加速度を示し、高齢時には小さな増加速度を示した。そのため、弱齢時ではグループBの上層木平均直径が大きいが、高齢時ではグループAの上層木平均直径が大きかった。

3. 林齢ー上層木平均直径関係と気候条件との関係  $k$  は、平均気温、好適期間、年日照時間、年全天日射量、夏期降水量および年平均大気飽差と正の相関を持ち、最深積雪深と負の相関を持っていた（表-3）。しかし、最寒月平均気温、暖かさの指数、年降水量および冬期降水量とは有意な相関を持っていなかった。 $M$  は、冬期降水量および最深積雪深と正の相関を持ち、好適期間、年日照時間、年全天日射量および夏期降水量と負の相関を持っていた。しかし、平均気温、最寒月平均気温、暖かさの指数、年降水量、冬期降水量および年平均大気飽差とは有意な相関を持っていなかった。 $kM$  と気候変数との関係は  $k$  と気候変数の関係と似た傾向を示した。ただし、 $k$  とは違って平均気温、年日照時間および年平均大気飽差とは有意な相関を持っていなかった。

## V 考察

13 地域における林齢ー上層木平均直径関係は、2つの地域グループ（AとB）に分かれた（図-2・3）。グループAに属する地域は、日本海側あるいは北日本にまとまって分布しており、同地域のスギは遅い初期成長と大きな最大サイズを持つ晩成型の直径増加パターンを示した（図-4）。一方、グループBに属する地域は、太平洋側あるいは南日本にまとまって分布しており（図-2・3），同地域のスギは早い初期成長と小さな最大サイズを持つ早熟型の直径増加パターンを示した（図-4）。

暖かく、日射量・夏期降水量が多い場合に  $kM$  は大きかった（表-3）。また、積雪が多いと  $kM$  は小さかつ

た。 $kM$  は初期成長を意味しているから、温暖な地域では、冷涼な地域と比べて直径の初期成長が良好だといえる。 $k$  は  $kM$  と似た傾向を示したが、 $kM$  と異なり年日照時間が長く、年平均大気飽差が大きい場合に  $k$  は大きかった。 $k$  は成長の減退程度を意味しているから、水ストレスの大きい地域では成長の減退程度が大きいのかもしれない。

一方、暖かく、日射量が多く、夏期降水量が多い場合に  $M$  は小さかった（表-3）。 $M$  は最大サイズを意味しているから、温暖な地域では、冷涼な地域と比べて直径の最大サイズが小さいといえる。

以上をまとめると、冷涼で、積雪が多く、日射量・夏期降水量が少ない地域（グループA）のスギは、遅い初期成長と大きな最大サイズを持つ晩成型の直径増加パターンを示した。逆の気候条件の地域（グループB）のスギは、早い初期成長と小さな最大サイズを持つ早熟型のパターンを示した。結論として、林齢ー上層木平均直径関係の分析から得られたこれらの結果は、林齢ー上層樹高関係で認められた傾向（6）とほとんど一致していた。

これまでにも、「秋田地方のスギの成長は晩成型である」こと等、成長の地域差について断片的な報告はなされてきた（例えば、（8））。しかし、全国のスギ林を対象に統一的な方法で評価した報告はなかった。本研究と（6）は、成長の地域差を統一的な方法で裏付けた初の試みであり、得られた結果は最適な森林管理手法を探索するための基礎資料として役立つと考える。

本研究は農林水産省プロジェクト研究「農林水産分野における地球温暖化対策のための緩和及び適応技術の開発」の一環として実施した。

## 引用文献

- (1) 家原敏郎・西園朋広・石橋 聰・田中邦宏・細田和男 (2011) 森林資源調査データによる林分構造の広域モニタリング手法の開発. (地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響評価と緩和及び適応技術の開発. 農林水産技術会議編, 農林水産技術会議, 東京) 69-73
- (2) K-1 MODEL DEVELOPERS (2004) K-1 coupled model (MIROC) description. Center for System Research, University of Tokyo, Tokyo, Japan
- (3) KIKUZAWA, K. (1996) Geographical distribution of leaf time span and species diversity of trees simulated by a leaf-longevity model. Vegetatio **122**: 61-67
- (4) 気象庁 (2002) メッシュ気候値 2000. 気象業務支援センター, 東京 (CD-ROM)
- (5) MITSUDA, Y., KANOMATA, H. and MATSUMOTO, M.

- (2010) Developing a national-level system for simulating the forest carbon dynamics of planted forests in Japan. Int. For. Rev. 12(5):28
- (6) NISHIZONO, T., KITAHARA, F., IEHARA, T. and MITSUDA, Y. (2014) Geographical variation in age-height relationships for dominant trees in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forests in Japan. J. For. Res. 19:305-316
- (7) 農林省農林水産技術会議事務局編 (1964) 土地利



図-1. 地域区分  
Fig. 1 Regional division of Japan

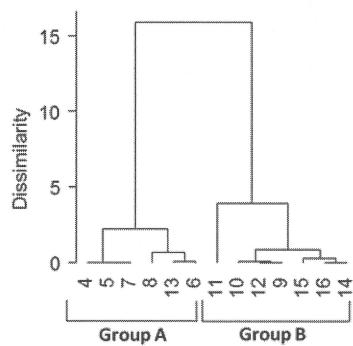


図-2. クラスタ分析の樹形図  
Fig. 2 Dendrogram for the grouping of the 13 regions

表-2. 各地域における回帰係数の推定  
Table 2 Model parameters for the 13 regions

地域番号*	<i>k</i>		<i>M</i>	
	Estimate	p-value	Estimate	p-value
4	0.0369	<0.001	48.47	<0.001
6	0.0295	<0.001	54.19	<0.001
5	0.0348	<0.001	48.32	<0.001
7	0.0353	<0.001	48.05	<0.001
8	0.0286	<0.001	59.18	<0.001
9	0.0432	<0.001	44.16	<0.001
10	0.0458	<0.001	42.31	<0.001
13	0.0325	<0.001	52.10	<0.001
11	0.0728	<0.001	38.44	<0.001
12	0.0418	<0.001	43.55	<0.001
14	0.0541	<0.001	41.94	<0.001
15	0.0476	<0.001	39.44	<0.001
16	0.0538	<0.001	42.34	<0.001

\* 番号は図-1の地域番号に対応している。  
Numbers correspond to the numbers in Fig. 1.

用区分の手順と方法. 農林統計協会, 東京 : 432pp

- (8) 大友栄松 (1983) スギ林成長の特性—樹種間比較.  
(新版スギのすべて. 全国林業改良普及協会編, 629pp,  
全国林業改良普及協会, 東京) 486-501.

- (9) PINHEIRO, J.C. and BATES, D.M. (2000) Mixed  
-effects models in S and S-Plus. Springer, New York, 528pp

- (10) 篠崎吉郎 (1979) Mitscherlich の原理. 化学と生  
物 17:677-679

表-1. 各地域の解析対象林分

Table 1 Summary of stand attributes for the forest stands in 13 regions

地域番号**	林分数**	林齢(年)**			上層木平均直徑(cm)**			上層木平均樹高(m)**		
		Mean	SD	Range	Mean	SD	Range	Mean	SD	Range
4	79	33.7	13.9	6-80	32.9	8.6	12.6-51	18.1	5.6	7.7-33.3
6	399	36.6	15.1	5-88	34.1	11.2	5.8-70.4	18.2	5.6	3.5-34.6
5	201	34.4	12.3	4-86	32.5	8.7	5.4-53.3	19.0	4.9	3.8-32.2
7	146	38.3	12.2	6-81	34.4	8.5	9.7-50.1	20.4	4.6	7.2-32.2
8	219	41.8	18.0	10-95	39.0	12.4	9.7-67.5	19.0	5.6	4.8-32.2
9	130	38.7	14.3	11-140	34.7	7.6	12.2-57	21.4	4.4	6.6-33.8
10	84	43.0	14.0	10-96	35.2	7.6	14.9-51.7	20.7	4.2	11-32.1
13	99	40.2	15.7	10-100	36.3	9.3	8.9-51.2	19.9	5.1	5.4-32.5
11	173	40.3	13.2	5-90	35.4	6.8	13.6-52.3	20.5	4.1	9.1-32.1
12	208	41.6	14.3	10-85	34.6	7.1	10.2-53.2	20.5	4.5	4.1-30.7
14	168	38.0	11.9	6-90	35.4	7.5	6.2-54.2	20.7	4.5	4.6-33
15	115	37.8	10.0	15-67	32.2	6.0	17.1-49.9	18.8	3.7	10.7-28.2
16	375	36.1	10.7	9-80	35.3	8.1	11.8-58.4	20.0	4.3	6.8-32.5

\* 番号は図-1の地域番号に対応している。Numbers correspond to the numbers in Fig. 1.

\*\* これらの値は最終的な回帰分析に用いた林分のみを用いて計算された(II. 1. 参照)。These values were calculated for the plots used in regression analysis after excluding outliers.

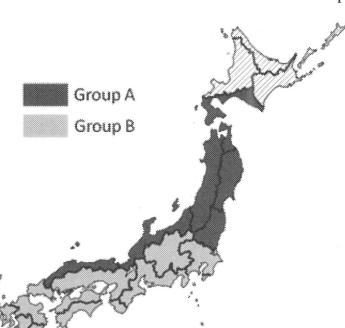


図-3. クラスタの分布  
Fig. 3 Distribution of the regional groups

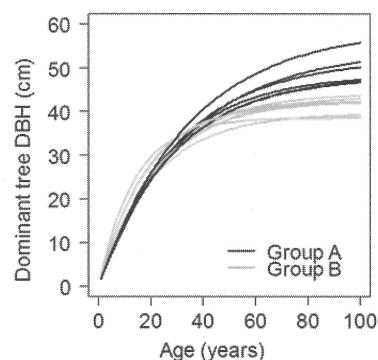


図-4. 各地域の回帰曲線  
Fig. 4 Curves for the 13 regions

表-3. 気候変数と回帰係数との間の相関分析

Table 3 Correlations of the environmental variables with the model parameters

気候変数名	<i>k</i>		<i>M</i>		<i>KM</i>	
	r	p-value	r	p-value	r	p-value
平均気温	0.556	0.048	-0.468	0.107	0.535	0.060
最寒月平均気温	0.468	0.107	-0.341	0.254	0.466	0.108
暖かさの指數	0.543	0.055	-0.450	0.123	0.525	0.066
好適期間	0.600	0.030	-0.564	0.045	0.560	0.046
年日照時間	0.600	0.030	-0.762	0.002	0.495	0.086
年全天日射量	0.653	0.015	-0.767	0.002	0.560	0.047
年降水量	0.464	0.110	-0.203	0.506	0.519	0.069
夏期降水量	0.732	0.004	-0.668	0.013	0.689	0.009
冬期降水量	-0.325	0.279	0.659	0.014	-0.173	0.572
年平均大気飽差	0.561	0.046	-0.523	0.067	0.515	0.072
最深積雪深	-0.699	0.008	0.839	0.000	-0.581	0.037