

論文

判別分析法による樹高曲線の傾きの解析

井上昭夫*

Analysis of the Slope of Height-Diameter Curve Using Discriminant Analysis Method

Akio INOUE *

要 旨

同齢単純林における樹高曲線の傾きを階層構造との関連から定量的に解析した。判別分析法によって、林分を構成する立木を上層木と下層木に層化した。平均樹高と上層木平均樹高、ならびに平均樹高と下層木平均樹高との間には、ともに強い正の相関が認められた。同様な関係が直径についても認められた。これらの関係を利用して、同齢単純林における樹高曲線の傾きを表す簡単なモデルを誘導した。このモデルより、樹高曲線の傾きは平均形状比に比例することが分かった。平均形状比は成育に伴って徐々に低下するが、樹冠が閉鎖し林木間での競争が生じると増大する傾向にあった。このことから、樹高曲線の傾きは成育に伴って徐々に低下するが、樹冠が閉鎖し林木間での競争が生じると急になっていくと考えられた。さらに、樹高曲線の傾きは下層間伐によって緩やかになり、上層間伐によって急になることが示唆された。

キーワード：階層構造，形状比，樹高曲線，同齢単純林，林分密度

Summary

The slope of the height-diameter curve of an even-aged pure forest stand was quantitatively analyzed in relation to forest stratification. All trees of each stand were stratified into upper- and lower-trees using the discriminant analysis method. Strongly positive correlations of mean tree heights of upper- and lower-trees to that of all trees were observed. Similar relationships for diameter were also observed. Using these relationships, a simple model that estimates the slope of the height-diameter curve was derived. The derived model showed that the slope was proportional to the mean dimension quotient. Although the mean dimension quotient tended to decrease with stand development, the quotient increased as the tree canopy closed and competition among trees occurred. From this, the slope of the height-diameter curve was considered to decrease with stand development and increase with the competition. Furthermore, it was suggested that the slope changed to become gentle or steep by thinning operations of the lower- and upper-strata, respectively.

Key words: dimension quotient, even-aged pure forest stand, forest stratification, height-diameter curve, stand density

*鳥取大学農学部生物資源環境学科森林科学講座 (〒680-8553 鳥取市湖山町南4-101)
Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori, 680-8553, Japan

I. 緒言

樹高曲線とは、ある林分のある時点における樹高と直径の平均的な関係を示す曲線である(大隅, 1987)。樹高の測定には多大な時間と労力を要するので、林内の全ての立木について樹高が測定されることは少ない。一般には、各直径階にわたって標本木が選定され、それらの樹高と直径の測定値から樹高曲線が決定される。そして、決定された樹高曲線を用いて各直径ごとの平均樹高が推定される。二変数材積表を用いた林分材積の査定において必要な樹高の測定は、この作業によって大幅に省力される。このような有用性から、樹高曲線に関する研究は、森林計測学の分野における主要なテーマの1つとして位置付けられ、数多くの経験式が提案されてきた(大隅, 1987; 南雲・箕輪, 1990)。

一般に、樹高曲線は上方にやや凸な単調増加曲線によって表され、その形状は成育に伴って変化する。択伐林や天然生林のような異齢林では、成育に伴う樹高曲線の変化は小さく安定している。これに対し、同齢単純林の樹高曲線は、成育に伴って右上方へと転位し、その傾きは徐々に緩やかになっていく(大隅, 1987; 南雲・箕輪, 1990; Schreuder *et al.*, 1993)。成育に伴う樹高曲線の転位傾向については、定量的な解析のみならず、モデル化までもが既に試みられている(例えば、白石, 1981; 田中, 1991)。しかし、成育に伴う樹高曲線の傾きの変化については定性的な記述が多く、定量的な解析はあまり行われていない(白石, 1981; 田中, 1992; 國崎ら, 1996; 1999)。

筆者は既報(Inoue *et al.*, 1998)において、主として画像解析に用いられる判別分析(Otsu, 1979; 大津ら, 1996)を応用した階層構造の新しい解析方法を提唱した。判別分析法(Discriminant Analysis Method; 以下、DAMと記す)と呼ばれるこの方法は、以下のような利点を持っている(Inoue *et al.*, 1998; Inoue, 1999b)。すなわち、(1) 林分を構成する立木を統計的に複数の階層に層化できる、(2) 層化する階層の数を任意に選択できる、(3) 層化するのに最適な階層の数を推定できる、(4) 階層化の程度(階層の分離の程度)を定量できる、(5) 解析の過程において各階層の平均樹高や相対本数を同時に算出できる。筆者はこのDAMを用いることにより、同齢単純林における樹高分布、直径分布、および樹高曲線の三者を階層構造との関連から統一的に表現する林分成長モデルの構築を目的とした研究を行っている。この研究の一環として、同齢単純林における平均樹高とDAMによって層化された上層木の平均樹高、ならびに平均樹高と下層木の平均樹高との間には、ともに強い正の相関が認められることを既に報告した(Inoue, 1999a)。本研究では、これらの関係を応用して、同齢単純林における樹高曲線の傾きを表す簡単なモデルを誘導した。そして、そのモデルを用いて、樹高曲線の傾きの成育に伴う変化と間伐による変化について考察した。

II. モデルの誘導

筆者は既報(Inoue, 1999a)において、スギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)とヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* Endl.)の同齢単純林を対象として、平均樹高(H_m)とDAMによって層化された上層木の平均樹高(H_u ; 以下、上層木樹高と記す)との関係を解析した。そして、平均樹高と上層木樹高の間には強い正の相関が認められ、その関係は原点を通る直線によって十分に表現できることをAkaike(1974)の情報量規準を用いて統計的に示した(Inoue, 1999a)。

$$[1] \quad H_u = \theta H_m$$

ここで、 θ は 1 より大きい定数である。平均樹高と下層木の平均樹高 (H_l ; 下層木樹高) との間にも同様な関係が認められる (Inoue, 1999a)。

$$[2] \quad H_l = \phi H_m$$

ここで、 ϕ は 1 より小さい定数である。各林木の樹高は非負であるので、平均樹高が 0 ならば、必然的に上層木樹高と下層木樹高も 0 となる。したがって、平均樹高と上層木樹高との関係、ならびに平均樹高と下層木樹高との関係がともに原点を通ることは理論的にみても妥当である。

いま、平均直径 (D_m) と DAM によって層化された上層木の平均直径 (D_u ; 上層木直径)、ならびに平均直径と下層木の平均直径 (D_l ; 下層木直径) との間にも樹高の場合と同様な関係が認められると仮定する。

$$[3] \quad D_u = \lambda D_m$$

$$[4] \quad D_l = \eta D_m$$

ここで、 λ は 1 より大きい定数、 η は 1 より小さい定数である。[1]~[4]式における定数は、いずれも樹高と直径の分布に依存している。したがって、これらの式を用いて樹高曲線の傾きを解析することは、樹高曲線が樹高と直径の分布に強く依存していることに矛盾しない。そこで、これらの回帰式を用いて、樹高曲線の傾きを表すモデルを誘導した。

樹高曲線とは、ある林分のある時点における樹高と直径の平均的な関係を示す曲線である (大隅, 1987)。したがって、平均樹高と平均直径との関係、上層木樹高と上層木直径との関係、および下層木樹高と下層木直径との関係は、いずれも近似的に樹高曲線を通ると仮定できる (白石, 1981)。そこで、下層、上層、および全層における樹高曲線の傾き (Θ_l , Θ_u , Θ_a) を次式によってそれぞれ表した。

$$[5] \quad \Theta_l = (H_m - H_l) / (D_m - D_l)$$

$$[6] \quad \Theta_u = (H_u - H_m) / (D_u - D_m)$$

$$[7] \quad \Theta_a = (H_u - H_l) / (D_u - D_l)$$

これらに[1]~[4]式を代入すると、

$$[8] \quad \Theta_l = (1 - \phi) H_m / (1 - \eta) D_m$$

$$[9] \quad \Theta_u = (\theta - 1) H_m / (\lambda - 1) D_m$$

$$[10] \quad \Theta_a = (\theta - \phi) H_m / (\lambda - \eta) D_m$$

となり、

$$[11] \quad \alpha = (1 - \phi) / (1 - \eta)$$

$$[12] \quad \beta = (\theta - 1) / (\lambda - 1)$$

$$[13] \quad \gamma = (\theta - \phi) / (\lambda - \eta)$$

とおくと、

$$[14] \quad \Theta_l = \alpha H_m / D_m$$

$$[15] \quad \Theta_u = \beta H_m / D_m$$

$$[16] \quad \Theta_a = \gamma H_m / D_m$$

を得る。[5]~[7]式からも分かるように、ここでいう下層と上層における樹高曲線の傾きとは、(D_l , H_l) と (D_m , H_m) および (D_m , H_m) と (D_u , H_u) を結ぶ各線分の傾きを指し、全層における傾きとは、(D_l , H_l) と (D_u , H_u) を結ぶ線分の傾きを指す。したがって、誘導したモデルでは、平均樹高によって上層と下層を区分していることになる。ところが、DAM

においては平均樹高ではなく、上層と下層の級間分散を最大とするしきい値 k によって階層を分離するため (Inoue *et al.*, 1998), 誘導したモデルとの間で階層を分離する値に矛盾が生じる。しかし、判別規準と最小自乗規準の等価性より、しきい値と各階層の平均樹高との間に次の近似式が成り立つ (大津ら, 1996)。

$$[17] k \doteq (H_u + H_l)/2$$

ここで、[17]式が近似的にしか成り立たないのは、しきい値が整数となるためである。[17]式に[1]式と[2]式を代入すると、

$$[18] k \doteq (\theta + \phi)H_m/2$$

となる。したがって、

$$[19] \theta + \phi = 2$$

なる関係が成り立つようであれば、平均樹高としきい値が近似的に一致することになり、誘導したモデルと DAM との間での階層を分離する値に関する矛盾は実際には無視できることになる。

以上より、[1]～[4]式と[19]式が成り立つならば、樹高曲線の傾きは平均形状比に比例することになり、樹高曲線の傾きの成育に伴う変化を平均形状比の変化としてとらえられる。

Ⅲ. 対象地と解析方法

1. 対象地

九州大学農学部附属福岡演習林内のスギとヒノキの同齢単純林6林分を対象とした。各林分の概況を表1に示す。これらの林分の詳細については木梨 (1977) を参照されたい。

対象林分において、0.04～0.10haの固定試験地が設定された。試験地内に生存しているスギ・ヒノキについて、5年間隔で8回にわたり樹高と胸高直径が測定された。各試験地における諸量の林齢に伴う変化を表2に示す。

表1 対象林分の概況

試験地名	樹種	植栽年度(年)	標高(m)	傾斜度(°)	方位	地位
上ノ山B	スギ	1932	130～140	35	N	中下
新建D	スギ	1923	320～330	30	NNW	上下
新建E	スギ	1885	400～410	30	NWW	中
飯盛G	ヒノキ	1926	230～240	40	NNW	中下
新建H	ヒノキ	1915	430～440	20	S	下
荒平I	ヒノキ	1900	240～250	18	SE	中

* 木梨 (1977) より作成

表2 諸量の林齢に伴う変化

試験地名	面積 (ha)	林齢 (年)	樹高 (m)*	胸高直径 (cm)*	本数密度 (本/ha)
上ノ山B	0.04	19	10.68±1.20	11.99±2.57	2,625
		24	12.78±1.49	13.44±3.21	2,575
		29	14.45±1.55	14.66±3.39	2,450
		34	14.70±1.60	15.25±3.50	2,375
		39	14.93±1.60	15.75±3.71	2,325
		44	15.36±1.61	16.51±3.87	2,200
		49	15.71±1.71	17.24±4.22	2,175
新建D	0.06	54	16.11±2.25	19.21±4.51	1,550
		28	16.38±1.30	20.35±3.64	1,183
		33	17.81±1.26	22.67±4.54	1,183
		38	19.10±1.64	24.50±5.23	1,150
		43	20.21±1.71	26.20±5.64	1,083
		48	21.33±1.76	28.02±5.90	1,033
		53	22.17±1.82	29.38±6.22	1,000
新建E	0.10	58	22.62±2.02	30.63±6.83	1,000
		63	24.29±2.41	33.90±7.47	550
		66	22.83±4.14	34.70±9.98	700
		71	25.03±4.22	36.30±10.75	700
		76	25.96±3.91	37.72±10.75	680
		81	26.58±3.64	38.83±10.94	670
		86	27.05±3.81	39.77±11.28	660
飯盛G	0.05	91	27.25±3.79	40.47±11.64	660
		96	27.67±3.55	41.26±11.58	650
		101	28.97±4.43	49.64±11.27	270
		25	9.88±1.33	13.36±2.40	2,160
		30	12.16±1.39	14.64±3.01	2,120
		35	13.38±1.56	16.47±3.36	2,000
		40	14.37±1.33	19.21±3.29	1,340
新建H	0.06	45	14.70±1.37	20.44±3.77	1,340
		50	15.39±1.39	22.19±4.53	1,340
		55	16.13±1.55	23.55±5.10	1,340
		60	17.84±2.22	24.49±5.78	1,340
		36	11.32±0.93	17.56±3.30	1,867
		41	13.14±0.67	19.30±3.53	1,833
		46	14.19±0.71	20.79±3.81	1,800
荒平I	0.06	51	15.18±1.01	22.01±4.22	1,783
		56	16.09±1.41	23.11±4.72	1,783
		61	17.41±1.38	24.59±4.75	1,667
		66	18.27±1.55	25.65±5.32	1,667
		71	19.54±0.96	27.60±5.53	1,400
		51	13.54±0.99	24.37±4.04	1,033
		56	15.53±0.93	26.58±4.73	1,033
		61	17.26±0.90	28.40±4.89	1,033
		66	17.75±0.93	29.70±5.20	1,033
		71	18.22±1.01	30.93±5.56	1,033
		76	19.23±1.22	32.67±6.18	1,033
		81	19.88±1.30	33.80±6.83	1,033
		86	21.82±1.80	35.74±6.15	883

* 平均値±標準偏差

2. 解析方法

既報 (Inoue, 1999a) と同様、まず、DAM を用いて林分を構成する立木を上層木と下層木に層化した。層化の方法は以下の通りである (Inoue *et al*, 1998 ; Inoue, 1999a; 1999b)。林分を構成する立木を上層木と下層木に層化するためには、樹高ヒストグラム上に1つのしきい値 k を決定することが必要である。しきい値よりも高い樹高をもつ立木は上層木、低い樹高をもつ立木は下層木として層化される。しきい値は、判別分析に用いられる規準に基づいて決定される。すなわち、いま、解析の対象とする林分が L 個の樹高階によって構成されているとする。また、樹高階 i に属する立木の本数を n_i 、全立木本数を N とする。このとき、最も良い分離を与えるしきい値を最適とする判別規準の立場 (Otsu, 1979) から、2層間の級間分散 σ_B^2 :

$$[20] \quad \sigma_B^2 = P_l (H_l - H_m)^2 + P_u (H_u - H_m)^2$$

ただし、

$$[21] \quad p_i = n_i/N$$

$$[22] \quad P_l = \sum_{i=1}^k p_i$$

$$[23] \quad P_u = \sum_{i=k+1}^L p_i$$

$$[24] \quad H_l = \sum_{i=1}^k ip_i / P_l$$

$$[25] \quad H_u = \sum_{i=k+1}^L ip_i / P_u$$

$$[26] \quad H_m = \sum_{i=1}^L ip_i$$

を最大とする k を最適なしきい値として採用する。ここで、 p_i は樹高階 i に属する立木の相対本数、 P_l と P_u は下層木と上層木の相対本数である。なお、本研究では、樹高階の幅は1mとした。

次いで、平均樹高と上層木樹高との関係、ならびに平均樹高と下層木樹高との関係を[1]式と[2]式によってそれぞれ回帰し、両式の傾き θ と ϕ を求めた。また、求めた θ と ϕ より、[19]式が成り立つか否かについて検討した。

そして、全立木の平均直径と DAM によって層化された上層木と下層木の平均直径をそれぞれ求めた。樹高の場合と同様、平均直径と上層木直径との関係、ならびに平均直径と下層木直径との関係を[3]式と[4]式によってそれぞれ回帰し、両式の傾き λ と η を求めた。

誘導したモデルによると、樹高曲線の傾きは平均形状比に伴って変化する。また、平均形状比は成育段階と林分密度によって変化すると考えられる。そこで、成育に伴う平均形状比の変化について解析した。一般に、同齢単純林における成育段階を表す測度としては上層木の平均樹高が用いられる場合が多い (安藤, 1968 ; 國崎ら, 1996 ; 1999)。しかし、[1]式からも分かるように、本研究では、平均樹高と上層木樹高は正の比例関係にある (Inoue, 1999a) として

いるので、成育段階を表す測度として平均樹高を用いた。

さらに、成育に伴う林分密度の変化についても解析した。林分密度を表す測度としては、次式によって与えられる相対幹距 Sr (南雲・箕輪, 1990) を用いた。

$$[27] \quad Sr = 10000/H_m\sqrt{\rho}$$

ここで、 ρ はhaあたりの立木本数である。

IV. 結果と考察

1. 同齢単純林の階層構造

スギとヒノキの同齢単純林における平均樹高と上層木樹高との関係を図1に示す。平均樹高と上層木樹高の間には強い正の相関が認められた。回帰式の傾き θ はスギ林で1.081 ($r=0.985$), ヒノキ林で1.056 ($r=0.994$) となった。平均樹高と下層木樹高の間にも強い正の相関が認められ、傾き ϕ はスギ林で0.871 ($r=0.940$), ヒノキ林で0.928 ($r=0.983$) となった(図2)。得られた θ と ϕ の和は、スギ林で1.952, ヒノキ林で1.984となったことから、[19]式は成り立つものと考えられる。したがって、誘導したモデルと DAM の間での階層を分離す

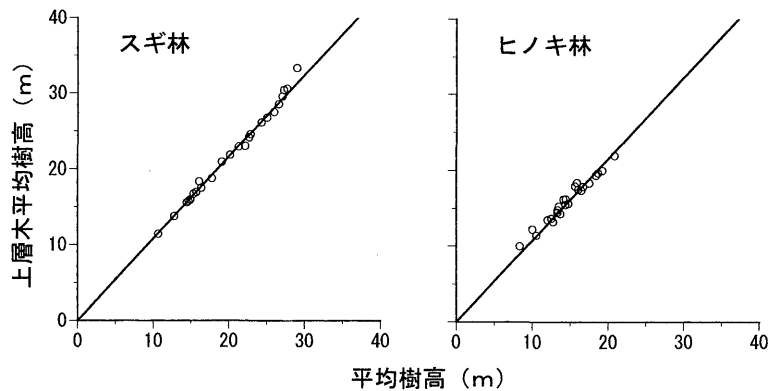


図1 平均樹高と上層木平均樹高との関係

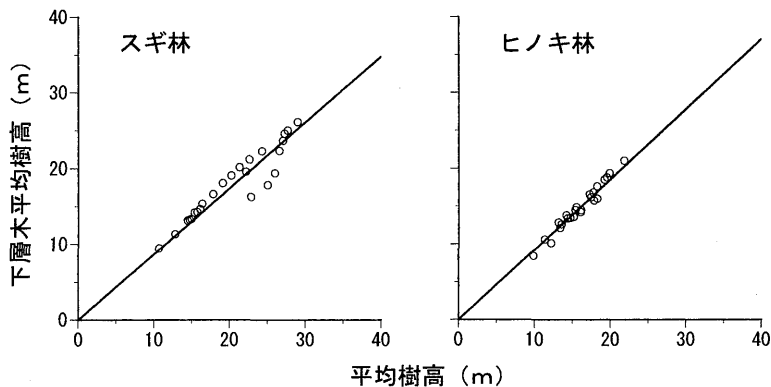


図2 平均樹高と下層木平均樹高との関係

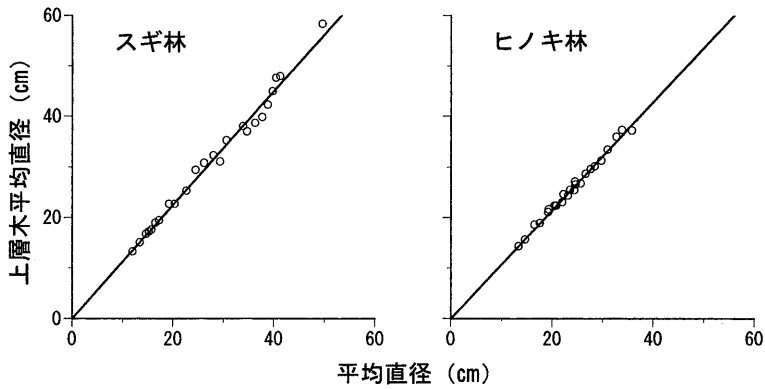


図3 平均直径と上層木平均直径との関係

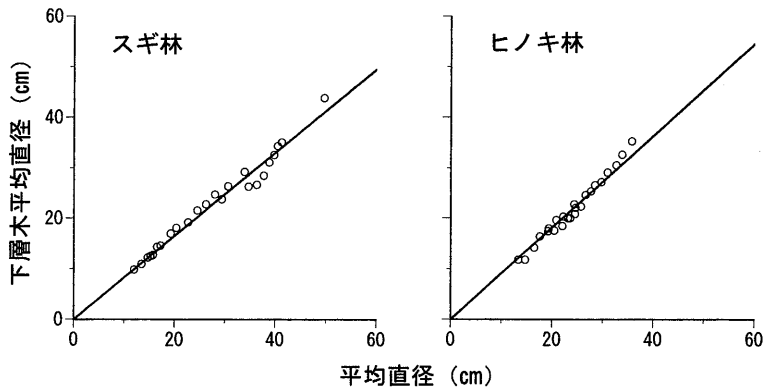


図4 平均直径と下層木平均直径との関係

る値に関する矛盾は実際には無視できると考えて良い。

筆者は既報 (Inoue, 1999a) において、九州大学福岡演習林内のスギとヒノキの同齢単純林内に設定された0.02haの試験地において測定された樹高のデータを用いて、本研究と同様な方法により、平均樹高と上層木樹高、および下層木樹高との関係を解析した。その結果、回帰式の傾き θ はスギ林で1.091 ($r=0.979$)、ヒノキ林で1.056 ($r=0.997$)、 ϕ はスギ林で0.816 ($r=0.849$)、ヒノキ林で0.924 ($r=0.986$)となった (Inoue, 1999a)。これらの値と本研究の結果を比較すると、試験地の面積が異なっているにも関わらず、回帰式の傾きは比較的近い値を示していることが分かる。このことは、林分の面積が0.02~0.10ha程度の範囲では、平均樹高と上層木樹高との関係、ならびに平均樹高と下層木樹高との関係があまり変化しないことを示唆している。

樹高の場合と同様、平均直径と上層木直径との間にも強い正の相関が認められた (図3)。回帰式の傾き λ はスギ林で1.124 ($r=0.994$)、ヒノキ林で1.072 ($r=0.995$)であった。平均直径と下層木直径との間にも強い正の相関が認められ、傾き η はスギ林で0.826 ($r=0.987$)、ヒノキ林で0.910 ($r=0.990$)となった (図4)。回帰式の傾きを樹高と直径で比較すると、いずれの樹種においても θ よりも λ の方が大きく、 ϕ よりも η の方が小さかった。このことは、上

層木と下層木でのサイズ差が樹高よりも直径で相対的に大きい、すなわち、樹高サイズのばらつきよりも直径サイズのばらつきの方が大きいことを意味しており、樹高の変動係数よりも直径の変動係数が大きいという既存の報告 (Tanaka, 1988; 南雲・箕輪, 1990) に整合する。

以上の結果から、[1]～[4]式と[19]式は成り立っているため、樹高曲線の傾きは平均形状比に比例すると結論できる。そこで、得られた回帰式の傾きを[11]～[13]式に代入した。その結果、定数 α 、 β 、 γ は、スギ林で0.801, 0.653, 0.737、ヒノキ林で0.800, 0.777, 0.790となった。いずれの樹種においても β よりも α が大きかった。このことから、下層における樹高曲線の傾きは、上層におけるそれよりも急であることが分かる。 β よりも α が大きい場合、樹高曲線は上に凸な単調増加曲線となり、逆に β よりも α が小さい場合、樹高曲線は下に凸な単調増加曲線となる。一般に、樹高曲線は上にやや凸な単調増加曲線によって表されるので (大隅, 1987)、 β よりも α が大きかったことは、誘導したモデルの妥当性を支持していると考えられる。

2. 成育に伴う形状比の変化

成育に伴う平均形状比と相対幹距の変化を図5と図6にそれぞれ示す。上ノ山Bと新建Eにおいては、相対幹距が低下から増大へと転じたのに対応して、平均形状比は増大から低下へと転じた。新建Dにおいても、相対幹距が低下から増大へと転じる時期が認められたが、平均形状比は成育に伴って緩やかに低下した。新建Hと荒平Iにおいては、成育に伴って相対幹距は低下し、平均形状比は緩やかに増大した。飯盛Gにおいては、平均形状比が増大から低下へと転じた後、再び成育に伴って増大するようになった。この傾向は、成育に伴う相対幹距の変化に対応していた。新建Dにおいて他の試験地と傾向がやや異なっていたのは、相対幹距が増大へと転じた時期が高齢であったことに加え、増大の程度があまり大きくなかったため、林分密度の変化の影響が直径成長にあまり現れなかったのではないかと推察される。

以上のことから、平均形状比の成育に伴う変化には、相対幹距が密接に関連していることが示唆される。すなわち、相対幹距が増大するにつれて平均形状比は低下するが、逆に相対幹距

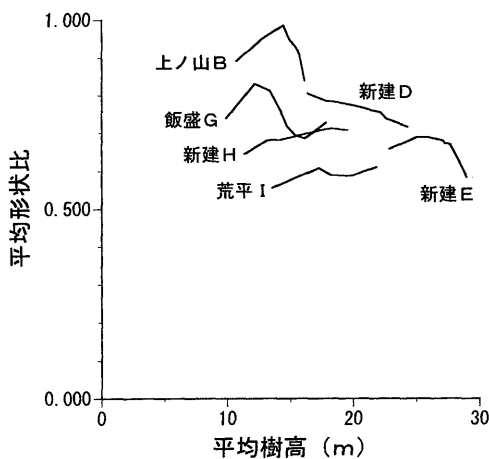


図5 成育に伴う平均形状比の変化

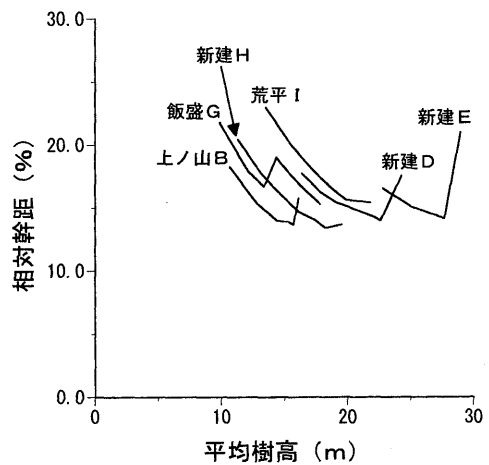


図6 成育に伴う相対幹距の変化

が低下すると平均形状比は増大するようである。これは、間伐等によって相対幹距が増大すると林木の成育空間が広がり、直径成長に必要な樹冠を広げられるようになるのに対し、相対幹距が低下し林分密度が高まると林木間での競争が生じ、直径成長が抑制されるようになる（小林, 1978; Lanner, 1985; 南雲・箕輪, 1990）一方で、樹高成長は林分密度の影響を受けにくい（安藤, 1968; Lanner, 1985）ためと推察される。また、林木間での競争が生じる時期は樹冠が閉鎖する時期に対応するので（小林, 1978; 南雲・箕輪, 1990）、平均形状比が低下から増加へと転じる時期も樹冠が閉鎖する時期に対応すると考えられる。

竹内ら（1997）は、若齢のヒノキ同齢単純林を対象として、成育に伴う平均形状比の変化を解析した。そして、平均形状比は成育に伴って徐々に低下するが、樹冠が閉鎖すると増大する傾向が認められることを示した（竹内ら, 1997）。本研究の結果は、竹内ら（1997）の報告と良く一致している。したがって、平均形状比は成育に伴って徐々に低下するが、樹冠が閉鎖し林木間での競争が生じるようになると増大に転じるという傾向は、若齢林のみならず壮・老齢林においても認められる可能性がある。

3. 成育に伴う樹高曲線の傾きの変化

成育に伴う樹高曲線の傾きの変化を定量的に解析した報告はあまり多くない。白石（1981）は、天城地方のスギ同齢単純林を対象として、平均樹高と平均直径によって相対化した樹高曲線における係数の成育に伴う変化を解析し、樹高曲線の傾きが高齢になるにしたがって緩やかになっていくことを説明した。一方、田中（1992）は、秋田地方と千葉県のスギ同齢単純林を対象とした解析から、樹高曲線の傾きが成育に伴って徐々に緩やかになっていく傾向を定量的に示した。また、國崎ら（1996）は、定期的の下層間伐が施された大分県のスギ・ヒノキ同齢単純林を対象として、成育に伴う樹高曲線の傾きの変化について検討した。さらに、國崎ら（1999）は、大分県と岩手県のスギ同齢単純林を対象として、密度管理の違いが樹高曲線の傾きに及ぼす影響について検討した。

一方、誘導したモデルによると、下層、上層、全層における樹高曲線の傾きは、いずれも平均形状比に比例することになる。前節でも述べたように、平均形状比は成育に伴って低下するが、樹冠が閉鎖し林木間での競争が生じると増加に転じる傾向が認められる。したがって、樹高曲線の傾きは成育に伴って徐々に緩やかになっていくが、樹冠が閉鎖し林木間での競争が生じると徐々に急になっていくと考えられる。國崎ら（1999）は、林齢50年までほとんど間伐が実施されていない岩手県のスギ同齢単純林における樹高曲線の傾きを解析した結果、間伐が実施されていない期間においては樹高曲線の傾きが成育に伴って徐々に急になったのに対し、間伐が実施されるようになると傾きが緩やかになったことを報告している。モデルより推察された結論は、國崎ら（1999）の解析結果と良く一致している。また、白石（1981）と田中（1992）が解析の対象とした林分は、樹高曲線の傾きが成育に伴って緩やかになっていたことから、國崎ら（1996; 1999）が解析の対象とした大分県のスギ・ヒノキ同齢単純林と同様、定期的の間伐が実施されていた林分であると推察できる。

4. 間伐による樹高曲線の傾きの変化

林木間での光を巡る競争の影響は、一方向的（Cannell and Grace, 1993）であることに加え、樹高成長よりも直径成長に強く現れるため（Messier and Puttonen, 1995）、下層木の形状比は、

上層木の形状比に比べて相対的に高くなる。したがって、下層間伐が実施されると形状比の高い下層木が多く伐採されるため、平均形状比が低くなるのに対し、上層間伐が実施されると平均形状比は高くなる。このため、樹高曲線の傾きは下層間伐によって緩やかになり、逆に上層間伐によって急になると考えられる。そして、下層間伐が実施された後においては、上述のように、樹高曲線の傾きは成育に伴って徐々に緩やかになっていくが、再び樹冠が閉鎖し林木間での競争が生じると急になっていくものと推察できる。

一方、無間伐林分では、間伐実施林分に比べて林木間での競争が激しく肥大成長が抑制されることに加え、形状比の高い劣勢木が間伐されずに多く存在しているために、平均形状比は高くなる。その結果、樹高曲線の傾きは間伐実施林分に比べて相対的に急になると考えられる。実際、國崎ら（1999）は、定期的の下層間伐が施された大分県のスギ同齡單純林と林齡50年までほとんど間伐が実施されていない岩手県のスギ同齡單純林を対象として、樹高曲線の傾きの成育に伴う変化を比較した結果、岩手県のスギ林における樹高曲線の傾きが、成育段階を通して大分県のスギ林におけるそれよりも急であったことを報告している。

V. 結 言

本研究では、同齡單純林における樹高曲線の傾きに関する簡単なモデルを誘導した。誘導したモデルより、樹高曲線の傾きの成育に伴う変化は、平均形状比の変化によって説明できることが分かった。このことより、樹高曲線の傾きは、成育に伴って徐々に緩やかになっていくが、樹冠が閉鎖し林木間での競争が生じるようになると徐々に急になっていくことと、下層間伐が実施されると緩やかになるのに対し、上層間伐が実施されると急になることが示唆された。今後は、得られた結果に基づいて、同齡單純林における樹高分布、直径分布、および樹高曲線の三者を階層構造との関連から統一的に表現する林分成長モデルを構築していきたいと考えている。

謝 辞

本研究を行うにあたり、貴重な固定試験地データの使用を快諾して下さった九州大学農学部森林経理学教室の吉田茂二郎助教授と今田盛生教授に対し心よりお礼申し上げます。また、長い期間にわたり固定試験地の計測に携わってこられた同教室の先輩諸氏に対し深甚の謝意を表します。

引用文献

- Akaike, K. (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Automat. Contr.* AC 19: 716-723.
- 安藤 貴 (1968) 同齡單純林の密度管理に関する生態学的研究. *林試研報* 210: 1-153.
- Cannell, M. G. R. and Grace, J. (1993) Competition for light: detection, measurement, and quantification. *Can. J. For. Res.* 23: 1969-1979.
- Inoue, A. (1999a) Statistical analysis of the relationship between upper- and mean-tree heights using discriminant analysis method. *J. For. Plann.* 5: 73-76.
- Inoue, A. (1999b) A new method for analyzing forest stratification based on discriminant criteria (II) - Comparison with the method using symmetric type difference diagrams. *J. For. Plann.* 5: 77-85.

- Inoue, A., Mizoue, N., Yoshida, S. and Imada, M. (1998) A new method for analyzing forest stratification based on discriminant criteria. *J. For. Plann.* 4: 35-38.
- 木梨謙吉 (1977) 森林調査詳説. 660pp, 農林出版, 東京.
- 小林正吾 (1978) カラマツ人工林の林分成長モデルに関する研究. *北林試研報* 15 : 1-164.
- 國崎貴嗣・加賀英昭・今田盛生 (1996) 針葉樹人工林における林分構造のばらつき (II). *九大演報* 75 : 77-87.
- 國崎貴嗣・川村かの子・齋藤信人 (1999) 密度管理の違いがスギ人工同齡單純林の樹高曲線の形状に及ぼす影響. *岩大演報* 30 : 97-108.
- Lanner, R. M. (1985) On the insensitivity of height growth to spacing. *For. Ecol. Manage.* 13: 143-148.
- Messier, C. and Puttonen, P. (1995) Growth, allocation, and morphological responses of *Betula pubescens* and *Betula pendula* to shade in developing Scots pine stands. *Can. J. For. Res.* 25: 629-637.
- 南雲秀次郎・箕輪光博 (1990) 測樹学. 243pp, 地球社, 東京.
- 大隅眞一編 (1987) 森林計測学講義. 287pp, 養賢堂, 東京.
- Otsu, N. (1979) An automatic threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybernet.* SMC 9: 62-66.
- 大津展之・栗田多喜夫・関田 巖 (1996) パターン認識 ー理論と応用ー. 214pp, 朝倉書店, 東京.
- Schreuder, H. T., Gregoire, T. G. and Wood, G. B. (1993) Sampling methods for multiresource forest inventory. 446pp, Wiley, New York.
- 白石則彦 (1981) 相対化した樹高曲線の形の比較. *日林論* 92: 81-82.
- 竹内郁雄・川崎達郎・森 茂太 (1997) ヒノキ若齡人工林における形状比の変化. *日林誌* 79 : 137-142.
- Tanaka, K. (1988) A stochastic model of height growth in an even-aged pure forest stand—Why is the coefficients of variation of the height distribution smaller than that of the diameter distribution ?. *Jpn. J. For. Soc.* 70: 20-29.
- 田中和博 (1991) 林分の成長に伴う樹高曲線の転位と修正 HENRICKSEN 式の適用. *日林誌* 73 : 172-177.
- 田中和博 (1992) 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 : 1-172.

(2000年2月18日受理)