

タテヤマスギ林におけるシステム収穫表の成長パラメータ

嘉戸 昭夫^{*1}・田中 和博^{*2}

The growth parameters of the system yield table "Silv-no-mori" in Tateyama-sugi
(*Cryptomeria japonica* D.Don) stands
Akio KATO^{*1}, Kazuhiro TANAKA^{*2}

タテヤマスギ林の成長が100年生程度まで予測できるシステム収穫表「シルブの森」を調製する目的で、成長パラメータを樹幹解析資料や毎木調査資料を用いて推定した。地位指数曲線の成長パラメータは、樹幹解析によって得られた林分の平均樹高曲線にMitscherlich成長曲線を当てはめて求めた。平均直径の成長にMitscherlich成長曲線を拡張した成長曲線を当てはめることによって、平均直径の成長パラメータを求めた。直径階毎の成長量を推定するために用いるパラメータは期首直径と定期直径成長量の関係から算出した。ここで求めた成長パラメータをExcel版の「シルブの森」に組み込み、このシステムを用いて固定調査地の成長を予測した結果、測定値と予測値がほぼ一致した。

1. はじめに

タテヤマスギは立山連峰の山麓一帯に自生するスギの総称で、いくつかの系統に分けられているが、いずれも耐雪性、耐寒性が強いとされている（宮島，1983）。天然のスギはタネ・伏条・立条によって更新するものの、造林事業では主にタネによる繁殖が行われている。現在では富山県内のスギ人工林の約80%をタテヤマスギが占めている。

田中（1992, 1995）は林分表と樹高曲線から将来の林分表と樹高曲線を予測するシステム収穫表「シルブの森」を開発した。これにより、平均直径、平均樹高および林分材積だけではなく直径階別の立木や丸太の本数の予測も可能になった。嘉戸・田中（1995）は富山県の主要スギ品種であるタテヤマスギの標準伐期齢（50年生程度）を対象に「シルブの森」を調製した。しかし、近年、木材不況をはじめとする様々な原因によって人工林の伐期齢を従来以上に延長する傾向が強まり、高齢林にも対応したシステム収穫表が必要になってきた。

本報告は、100年生程度の長伐期施業にも対応したタテヤマスギの「シルブの森」を調製する目的で、前回の調査資料に新たに調査した高齢林の資料を加えてシステム収穫表の成長パラメータを算出したものである。

2. 成長モデルの概略

「シルブの森」は同齢単純林を対象としたものであり、その基本的な設計思想は、鈴木太七の林分遷移の方程式を発展させた確率的直径成長モデル（Tanaka, 1986）と、篠崎吉郎・吉良竜夫らの密度効果の理論に基づく安藤（1968）の林分密度管理図を結合させようとするものである。すなわち、各直径階の直径成長を確率モデルで予測し、間伐の効果は密度管理図の理論に基本的に従わせたものである。

「シルブの森」で使われている直径成長モデル

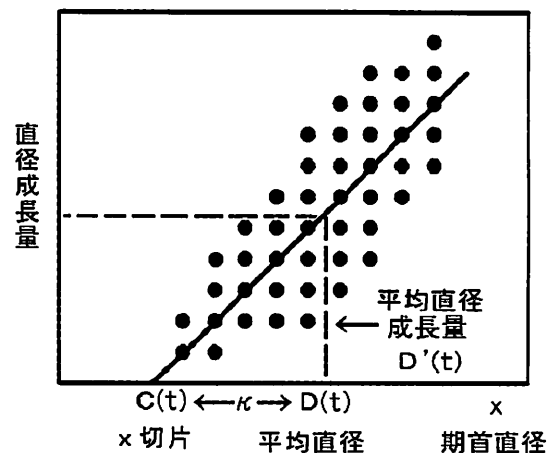


図-1 直径成長モデル

*1：森林研究所，*2：京都府立大学大学院

ルを図-1に示した。これは定期直径成長量と期首直径との関係を示す確率論的モデル (Tanaka, 1986) であって、その概略は以下のとおりである (田中, 1991b)。同齢単純林では、林木によってばらつきがあるものの、直径が太い林木ほど成長量が大きいこと、すなわち、同齢単純林では、定期成長量と期首の直径との間に明瞭な正の直線関係が認められている。回帰直線の傾きは、若齢時は急であるが、高齢になるに従い緩やかになり、また、回帰直線のまわりの各林木の直径成長量のばらつきは、直径の大きさに依存しないなどの性質も観察されている (Tanaka, 1986)。回帰直線の x 切片については、平均直径との間に明瞭な正の直線関係があることも認められている。この直径成長モデルは、回帰直線のまわりのばらつきを誤差変動としてとらえた確率論的モデルであり、いま、林齢 t 年時の胸高直径を $x(t)$ 、平均胸高直径の成長曲線を $D(t)$ 、その林齢 t についての微分を $D'(t)$ 、連年成長量の期首直径に対する回帰直線の x 切片を $C(t)$ 、ランダム変動を表すホワイトノイズを $f(t)$ 、比例定数を γ と表すことにすれば、以下の確率微分方程式で表現される。

$$dx(t)/dt = (D'(t)/(D(t) - C(t)))x(t) - D'(t)C(t)/(D(t) - C(t)) + \gamma D'(t)f(t) \quad (1)$$

「シルブの森」では、この成長モデルを離散型のモデルに直すことによって任意の期間の直径遷移確率行列を求め、直径成長量を直径階別に予測している (田中, 1992, 1995; 田中・嘉戸, 2001)。

3. 資料

「シルブの森」の成長パラメータを推定するには、固定試験地のデータを利用するのが最も望ましいが、一般に、長期にわたるデータを入手することは困難であるので、本研究では、樹幹解析の資料から、林分の成長経過を推定することにした。この場合、通常の樹幹解析と異なり、標準木以外の大小様々な大きさの立木についても樹幹解析を行い、林分を構成する各林木の樹高および直径成長傾向を把握することにした。

本報で用いた樹幹解析資料は富山県東部の黒部市池尻、上市町西種、立山町美女平、同町座主坊、富山市寺家、同市原、同市東猪谷、県西部の南砺市山本、同小又の林齢37~109年生の計9林分から採取されたもので、合計66本であった (表-1)。なお、富山市東猪谷と南砺市小

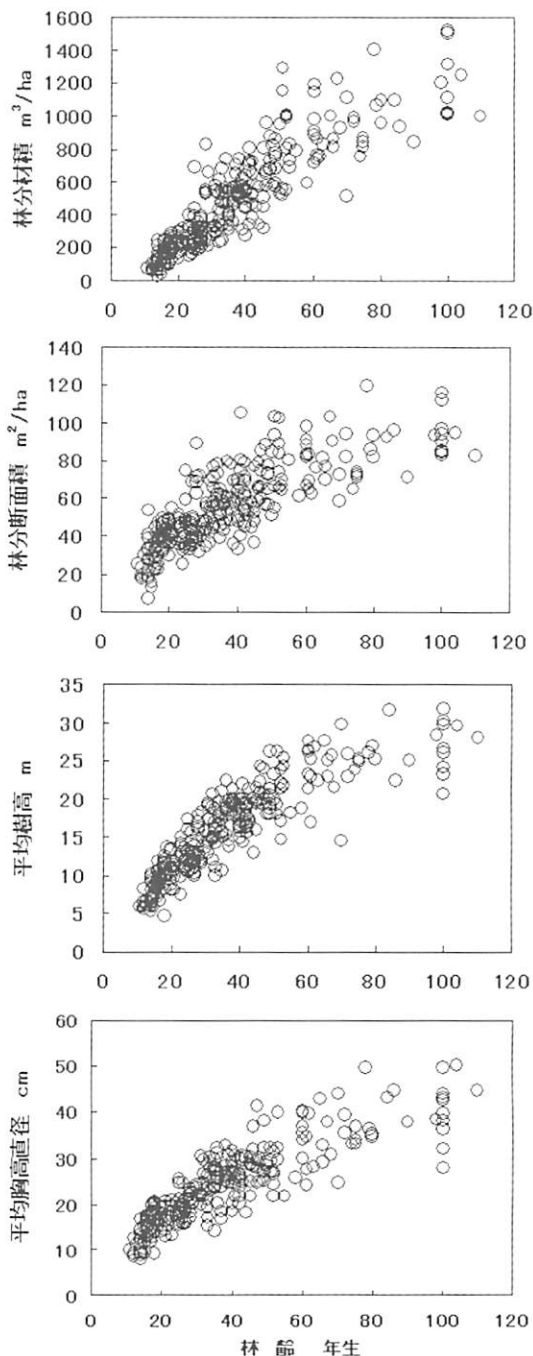


図-2 毎木調査地の概要

又の資料は標準伐期齢を対象とした「シルブの森」の調製にも使用している (嘉戸・田中, 1995)。

樹幹解析の資料だけでは、林分当りの胸高断面面積と立木本数の間に成立する競争密度効果の逆数式をもとめることができないので、毎木調査資料を用いて算出した (図-2)。これらの資料は標準伐期齢を対象とした「シルブの森」の調製に用いた毎木調査資料323箇所に、新たに高齢林を中心に調査した44箇所 (46~110年生)

表-1 樹幹解析調査地の概要

調査地	供試木数 本	標高 m	林齢 年生	立木 本数 本/ha	林分 材積 m ³ /ha	林分断 面積 m ² /ha	平均樹 高 m	平均 直径 cm
南砺市小又	7	350	37	975	518	57	18.4	26.9
富山市原	4	500	42	1,654	730	81	18.0	24.5
富山市東猪谷	6	450	42	1,511	725	69	19.4	23.6
黒部市池尻	11	180	53	830	826	70	24.3	32.2
富山市寺家	8	220	68	1,125	922	90	21.7	30.8
立山町座主坊	8	440	70	778	1,068	87	26.9	36.3
立山町美女平	7	1,050	86	587	936	96	22.3	44.6
上市町西種	7	450	98	766	1,204	93	28.4	38.3
南砺市山本	8	200	109	487	997	83	29.6	44.5

の資料を加えて林分平均の胸高断面積と立木密度および平均樹高の間に成り立つ等平均樹高線を求めた。

また、タテヤマスギ林分における「シルブの森」の予測精度を検討するため、黒部市池尻、富山市東猪谷および同市原の20~25年間におよび固定試験地の毎木調査資料を用いた。

4. 結果と考察

4.1 地位指数曲線

図-3は樹幹解析によって求めた優勢木の樹高曲線の一例を示したものである。この図から、南砺市山本を除くと、いずれの樹高曲線もシグモイド型の成長曲線で、変曲点は成長のごく初期の段階に表れるという、一般的な傾向が認められた。このような場合には、Mitscherlich成長曲線で近似ができることが知られている(田中, 1996)。一方、南砺市山本の樹高曲線は50年生前後で蛇行しており、他の調査地とは明らかに異なる傾向を示した。この原因については

明らかではない。

「シルブの森」では、平均樹高 H の成長を次式のMitscherlich成長曲線で表し、地位指数曲線として用いられている。

$$H(t) = M_H (1 - L_H \cdot \exp(-k_H \cdot t)) \quad (2)$$

ここで、 M_H , L_H , k_H はパラメータである。まず、南砺市山本を除いた調査地の供試木の樹高曲線にMitscherlich成長曲線をDemingの最小2乗法であてはめて、 M_H , L_H , k_H のパラメー

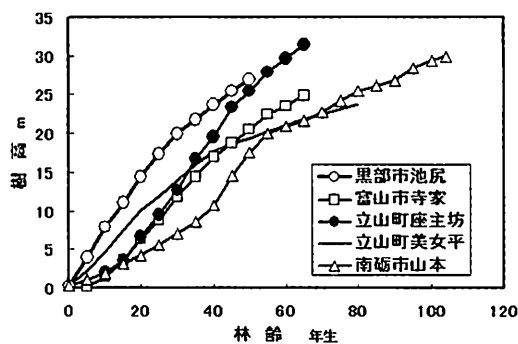


表-3 優勢木の樹高成長曲線の一例

表-2 地位指数曲線の成長パラメータ

調査地	M_H	L_H	k_H
南砺市小又	29.4	1.16	0.030
富山市原	27.0	1.03	0.029
富山市東猪谷	28.3	1.11	0.034
黒部市池尻	33.5	1.05	0.026
富山市寺家	27.3	1.24	0.028
立山町座主坊	44.9	1.15	0.016
立山町美女平	24.1	1.08	0.026
上市町西種	39.1	0.98	0.013
平均	31.7	1.10	0.025

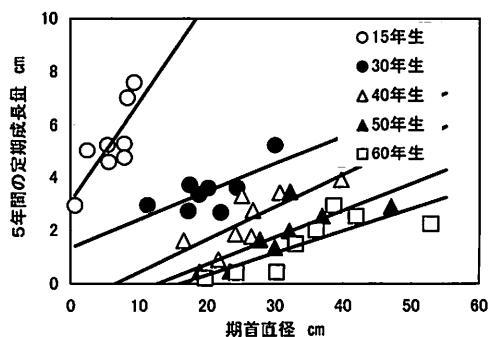


表-4 期首胸高直径と定期直径成長量の関係 (座主坊試験地)

タを算出し、調査地毎の平均値を表-2に示した。なお、変曲点より若い初期成長期間を除くため、8年生以上のデータについて計算した。その結果、各調査地の供試木についてもMitscherlich成長曲線式の当てはまりは良かった。ただし、パラメータは M_H だけではなく L_H や k_H も調査地によって差異があった。 M_H 値から、最終到達樹高は座主坊が最も高く、反対に美女平は最も低いと推測された。上市町西種や立山町座主坊の k_H は富山市東猪谷や南砺市小又のそれに比べてが小さいことから、前者は後者に比べて晩生型の成長パターンを示すといえる。

通常、地位指数曲線はパラメータ L_H 、 k_H を樹種毎に固定し、 M_H を変化させて作成されている(田中, 1996)。そこで、タテヤマスギの地位指数曲線のパラメータ L_H および k_H は7カ所の調査地の平均値を用いることとし、それぞれ1.10、0.025とした(表-2)。また、 M_H は地位によって変化させることにした。

4.2 定期直径成長量と期首直径の関係

先にも述べたように、このシステム収穫表では、各直径階の直径成長量の予測に定期直径成長量と期首直径の関係を利用している。図-4は立山町座主坊調査地における5年間の定期直径成長量と期首直径の関係を示したものである。この結果によると両者の間に直線関係があり、回帰直線の傾きは高齢になるに従い緩やかになる傾向が確認された。

この回帰直線のx切片 $C(t)$ は期首直径の平均値 $D(t)$ に伴って直線的に増加し、その傾きは1に近い傾向がスギ林やヒノキ林で観察されている(Tanaka, 1986 ; 田中ら, 1995 ; 嘉戸・田中, 1995 ; 嘉戸ら, 2008)。そこで、次のような関係を仮定した。ただし、 κ は定数である。

$$C(t) = D(t) - \kappa \tag{3}$$

次に、(1)式の両辺を $D'(t)$ で割り、(3)式を代入すると

$$1/D'(t) \cdot dx(t)/dt = 1/\kappa(x(t) - D(t)) + 1 + \gamma \cdot f(t) \tag{4}$$

となる。(4)式は、各立木の胸高直径成長量の平均直径成長量に対する比が各立木の胸高直径と平均直径との差の1次式として表せることを示している。しかも、その傾きは $1/\kappa$ であり、 $\gamma \cdot f(t)$ はランダムな誤差変動であるので、平均は0と見なせるものである。

図-5は立山町座主坊の樹幹解析の資料に(4)式をあてはめたものである。ここでは、年次変動を除去するために、5年間の定期成長量を用いた。この図から、各立木の胸高直径と平均直径との差と各立木の胸高直径成長量の平均直径成長量に対する比との間に1次式が成り立つことがわかる。そして、図中の1次式の傾きは0.0488であったことから、 κ は20.5となった。同様の方法で、南砺市山本を除く調査地において κ を算出し、表-3に示した。 κ 値は林分により変動し、胸高直径や立木密度の大きな林分で

表-3 供試木の胸高直径と平均胸高直径の差 x と胸高直径成長量の定期胸高直径成長量に対する比 y の回帰式の係数と κ 値

調査地	林齢 年生	$y = ax + b$		r^2	κ
		a	b		
南砺市小又	37	0.0616	1.000	0.590	16.2
富山市原	42	0.0827	1.000	0.769	12.1
富山市東猪谷	42	0.0600	1.000	0.526	16.7
黒部市池尻	53	0.0768	0.984	0.493	13.0
富山市寺家	68	0.0520	0.941	0.493	19.2
立山町座主坊	70	0.0488	0.994	0.533	20.5
立山町美女平	86	0.0396	1.000	0.591	25.3
上市町西種	98	0.0786	1.000	0.375	12.7
平均値					17.0

大きくなる傾向がみられた。しかし、これ以上のことについては明らかにできなかったので、今回はタテヤマスの κ の初期値として調査地の平均値17.0を採用した。

4.3 最大林分断面積

平均樹高 H における平均胸高断面積 g と立木密度 ρ の競争密度効果の逆数式は、次式で示されている。

$$1/g = \rho / \lambda_H + \alpha_H / \lambda_H \quad (5)$$

ここで、 λ_H は平均樹高 H における最大林分断面積で、 α_H は平均樹高の関数である。(5) 式の $1/\lambda_H$ と α_H/λ_H を樹高の関数とするため、次式で表わすことにした。

$$1/\lambda_H = a_1 \cdot H^{a_2} \quad (6)$$

$$\alpha_H/\lambda_H = b_1 \cdot H^{b_2} \quad (7)$$

367林分の毎木調査資料を (5) 式に当てはめて、Demingの最小2乗法を用いて、(6) 式と (7) 式の a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の係数を算出した。その結果、 $a_1=0.05077$, $a_2=-0.6125$, $b_1=2606$, $b_2=-2.003$ となり、 α_H および λ_H と平均樹高 H の関係が次式で示された。

$$\alpha_H = b_1/a_1 \cdot H^{b_2-a_2} = 51325 H^{-1.3905} \quad (8)$$

$$\lambda_H = 1/(a_1 H^{a_2}) = 1/(0.05077 H^{-0.6125}) = 19.7 H^{0.6125} \quad (9)$$

Mitscherlich成長曲線式は直径や樹高など、長さの次元を持つ量の成長を表わす方程式である (田中, 1996)。そこで、図-6に示すように最大林分断面積 λ_H の平方根と平均樹高の関係に、Mitscherlich成長曲線式をDemingの最小2乗法で当てはめ、次式を得た。

$$\sqrt{\lambda_H} = 15.17(1 - 0.635 \exp(-0.044H)) \quad (10)$$

つぎに、 λ_H の平方根と平均樹高の関係を、 λ_H の平方根と林齢の関係に変換した。まず、(2) 式の地位指数曲線の L_H を1.10, k_H を0.025として、地位指数14~26の M_H を算出した。この地位指数曲線を使って林齢10から100年生ままで10年毎に平均樹高を求めた。つづいて、これらの平均樹高を (10) 式に代入して林齢10から100年生ままで10年毎に λ_H の平方根を算出し、今度は、 λ_H の平方根と林齢との関係に、Mitscherlich成長曲線式をDemingの最小2乗法で当てはめて、 λ の平方根と林齢 t の成長曲線における成長パラメータ M_λ , L_λ , k_λ を算出した。

$$\sqrt{\lambda(t)} = M_\lambda(1 - L_\lambda \exp(-k_\lambda \cdot t)) \quad (11)$$

以上のような計算を地位指数14~26mについて2m毎に行った (図-7)。こうして求めた M_λ , L_λ , k_λ の成長パラメータと地位指数 SI との関係を図-8に示した。これらの図から明らかにように、 M_λ , L_λ , k_λ の3つの成長パラメータは地位が高くなるのに伴って直線的に増える傾向を示した。これは、林分断面積 λ の平方根の成長曲線は上限値だけでなく成長速度も地位によって変化することを示唆している。そこで、「シルブの森」では M_λ , L_λ , k_λ などの成長パラメータを、地位指数によって変化させることにした。

$$M_\lambda = 0.191SI + 8.903 \quad (r^2=0.992) \quad (12)$$

$$L_\lambda = 0.0046SI + 0.511 \quad (r^2=0.973) \quad (13)$$

$$k_\lambda = 0.00036SI + 0.0314 \quad (r^2=0.839) \quad (14)$$

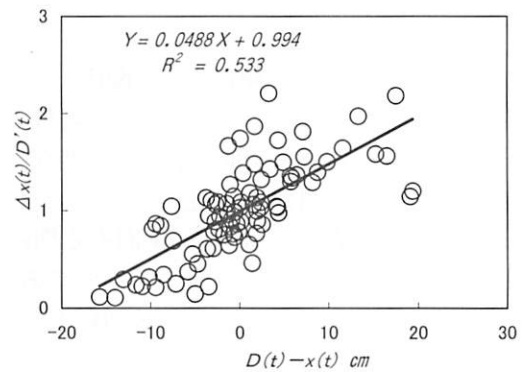


図-5 供試木の胸高直径 $x(t)$ と平均胸高直径 $D(t)$ の差と供試木の胸高直径成長量 $\Delta x(t)$ の定期平均胸高直径成長量 $D'(t)$ に対する比の関係 (立山町座主坊)

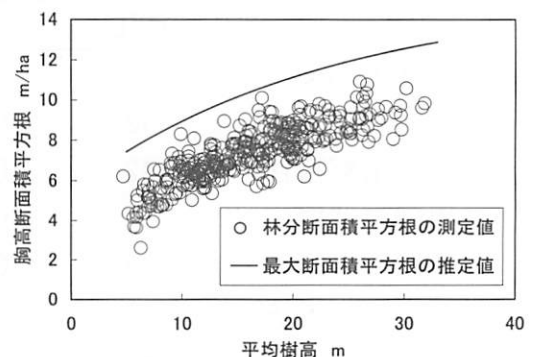


図-6 平均樹高 H と林分胸高断面積の平方根および最大胸高断面積の平方根の関係

4.4 平均胸高直径の成長曲線

「シルブの森」では、平均胸高直径が次式の成長モデルで表現されている (田中, 1991, 1995)。

$$D(t) = 1/\sqrt{(\rho + qa)} \cdot M_D (1 - L_D \cdot \exp(-k_D \cdot t)) \tag{15}$$

ここで、 M_D , L_D , k_D は成長パラメータで、 ρ は立木本数、 q は間伐のたび毎に変化する補正項、 a は平均樹高の関数である (田中, 1991)。この成長モデルではMitscherlich成長曲線の上限值のみが立木本数の影響を受けると仮定している。

本研究では、補正項 q が一定の傾向で変化しているものと仮定して、 qa と平均樹高の関数を (8) 式で近似した。また、平均胸高直径の成長曲線の (15) 式のパラメータ L_D , k_D は、(11) 式のパラメータ L_λ , k_λ と同じなので、(13) 式と (14) 式を用いて地位指数との関係から求めることにした。

つぎに、(15) 式を (16) 式のようなMitscherlich成長曲線式に変形し、毎木調査で得られた平均直径、立木本数および平均樹高から推定された qa などを代入して M_D を最小2乗法で求めた。

$$D(t)\sqrt{(\rho + qa)} = M_D (1 - L_D \cdot \exp(-k_D \cdot t)) \tag{16}$$

つぎに、 M_D も地位指数 SI によって変動するとして、 $M_D = a \cdot SI + b$ を仮定し、 a と b を最小2乗法で推定した。その結果、(17) 式が得られた。
 $M_D = 24.7SI + 919$ (17)

4.5 成長予測精度

本報で求めた成長パラメータを用いて長伐期施業に対応したExcel版の「シルブの森」を調製した (田中和博・嘉戸昭夫, 2001)。つぎに、富山市原、黒部市池尻および富山市東猪谷の3箇所の固定調査地における成長量の測定値と「シルブの森」による予測値を比較した。富山市原では25年生の資料を用いて20年後の成育状態を、黒部市池尻では28年生の資料を用いて20年後の成育状態を、そして富山市東猪谷では42年生の資料を用いて25年後の成育状態を予測した。表-4には平均値と総量の測定値と予測値を、図-9には直径階別本数分布の測定値と予測値を示した。なお、シルブの森では自己間引きが考慮されていないので、自然枯死木を間伐木とみ

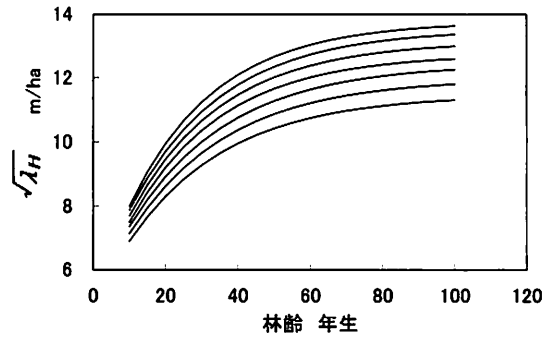


図-7 林分最大断面積の平方根 $\sqrt{\lambda_H}$ の成長曲線と地位の関係

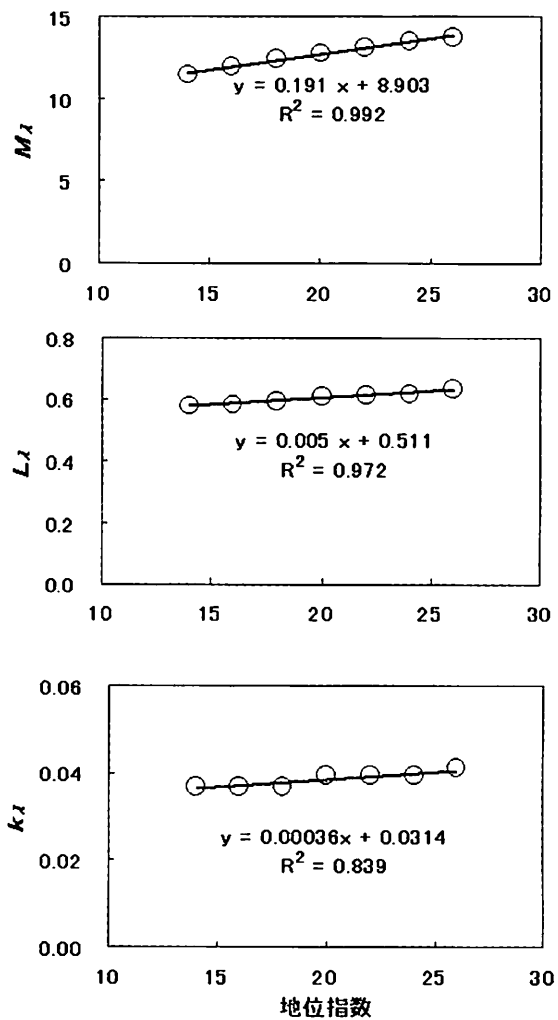


図-8 パラメータ M_λ , L_λ , k_λ と地位指数の関係

なして計算した。

平均値と総量の中で測定値と予測値の差異が最も小さかったのは平均胸高直径で0.8~1.7%であった。これに比べると平均樹高や林分材積の差異は大きかったが、それでも最大6.8%で

あった。

直径階別本数分布についてみると、測定値と予測値が類似する傾向が各調査地において認められた。コルモゴロフ・スミルノフ検定を行って、測定値と予測値の胸高直径分布間に差があるか否かについて検討したところ、いずれの調査地においても有意確率が5%より小さかったことから、測定値と予測値の胸高直径分布に有意な差異があったと判断された。これらのことから、今回調製した「シルブの森」を用いると胸高直径分布も予測できるものの、測定値と予測値が統計的にみても差異がないというほどの高い精度ではなかった。

5. おわりに

樹幹解析資料や毎木調査資料を用いて成長パラメータを推定し、100年生程度の長伐期施業にも対応できるタテヤマスギのシステム収穫表「シルブの森」を調製した。このシステムを用いると20年後の林分の平均値や総量が7%以下の精度で予測できた。また、直径階別本数分布も予測することが可能であったが、統計的にみても差異がないというほどの高い精度ではなかった。

今後の課題としては予測精度を一層高めることが必要である。そのためには調査林分を増やすことや地位指数曲線や κ などの成長パラメータの推定法の改良などが必要と考えられる。また、長期間の成長予測を行う場合には、自己間引きによる立木本数の減少を考慮する必要がある。「シルブの森」に自己間引きのプログラムを加えることが求められる。

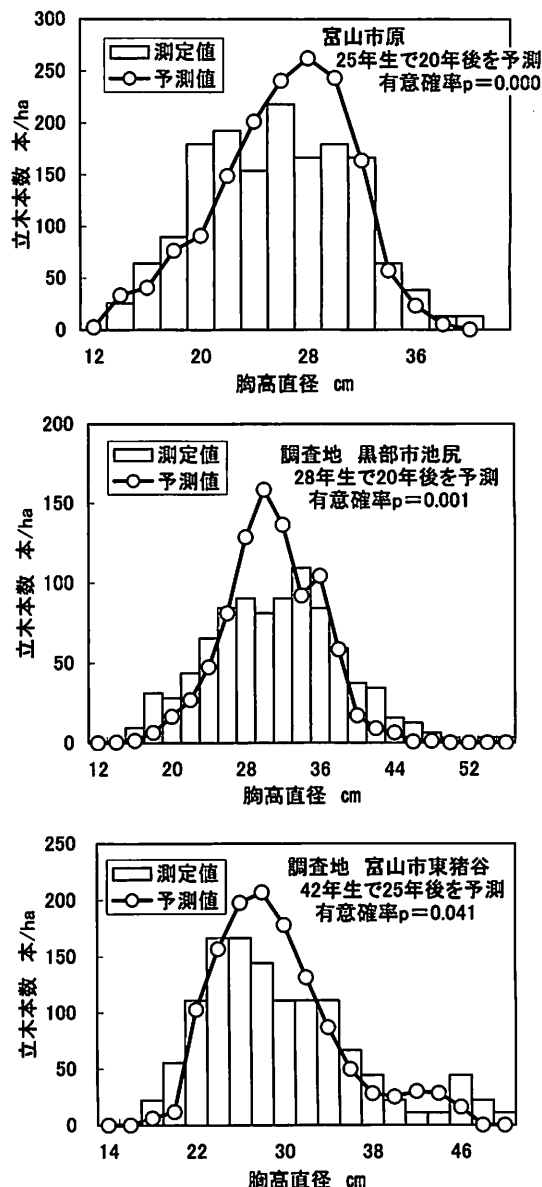


図-9 直径階別本数分布の測定値と予測値

表-4 「シルブの森」による成長測定値と予測値

調査地		立木本数	平均直径	平均樹高	林分材積	林分断面積
		本/ha	cm	m	m ³ /ha	m ² /ha
富山市原	測定値	1564	25.7	19.7	804	85
	25年生で20年後を予測	予測値	1564	25.5	21.0	856
黒部市池尻	測定値	894	31.2	24.7	846	72
	28年生で20年後を予測	予測値	894	30.9	26.2	857
富山市東猪谷	測定値	1234	29.9	26.2	1149	92
	42年生で25年後を予測	予測値	1258	29.4	25.4	1171

引用文献

- 安藤 貴 (1968) 密度管理.246pp, 農林出版, 東京.
- 嘉戸昭夫・田中和博 (1995) タテヤマスギの樹幹解析資料から推定したシステム収穫表の成長パラメータ. 日本林学会論文集106: 185-188
- 嘉戸昭夫・関子光太郎・田中和博 (2008) カワイダニスギ林におけるシステム収穫表の成長パラメータ, 富山県林技セ研報21: 9-16
- Tanaka, K. (1986) A stochastic model of diameter growth in an even-aged pure forest stand. J. Jan. For. Soc.68: 226-236
- 田中和博 (1991a) 各成長段階における最大林分断面積の推定. 森林計画誌16: 99-124
- 田中和博 (1991b) 森林の成長モデル. 森林科学 3: 28-31
- 田中和博 (1992) 林分表予測システムの開発 (システム収穫表. 138pp, 木平勇吉代表, 文部省科学研究費総合 (A) 研究成果報告書, 東京農工大学) : 125-132
- 田中和博 (1995) 林分表と樹高曲線から将来の林分表と樹高曲線を予測するシステム (システム収穫表プログラム. 198pp, 木平勇吉代表, 文部省科学研究費総合 (B) 研究成果報告書, 東京農工大学) : 22-32
- 田中和博・小段應司・油井利恭 (1995) 尾鷲ヒノキ林固定調査地資料から推定したシステム収穫表の成長パラメータ. 43回日林中支論: 17-20
- 田中和博 (1996) 森林計画学入門, 192pp, 森林計画学出版局, 東京
- 田中和博・嘉戸昭夫 (2001) 富山県システム収穫表Excel版の開発. 日林学術講112: 149
- 宮島 寛 (1983) 品種 (スギのすべて. 629pp, 坂口勝美監修, 全国林業改良普及協会, 東京) : 126-140

Summary

The purpose of this research is to make the system yield table "Silv-no-mori" that is predictable of growth of Tateyama-sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) stands of about the 100th grader. The growth parameters which were necessary for the preparation of "Silv-no-mori" were estimated from the stem analysis data in 8 stands and the forest inventory data in 367 stands. The growth parameters of the site index curve was found by applying a MITSCHERLICH growth curve to the average tree height curve for the stand, which it was obtained from the stem analysis. The growth parameter of the average diameter was by applying the growth curve which expanded a Mitscherlich growth curve, in the growth of the average diameter of stand. The parameter used to estimate the growth increment of every diameter class was calculated from the relations between the time neck diameter and the amount of periodic diameter growth. The predicted values corresponded to the measurement values mostly as a result of predicting the growth of three fixed test areas by using "Silv-no-mori" of the Excel edition which was done like this and which was made.