

カワイドニ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・図子 光太郎*²・田中 和博*³

The growth parameters of the system yield table "Silv-no-mori" in Kawaidani-sugi clone (*Cryptomeria japonica* D.Don) stands

Akio KATO*¹, Kotaro ZUSHI*², Kazuhiro TANAKA*³

カワイドニスギ林のシステム収穫表「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、測定値と予測値が良く一致した。

1. はじめに

富山県西部の氷見市から小矢部市にかけての丘陵地には1,000haを越えるカワイドニスギの造林地がある。これらは、56豪雪で大被害を受けたボカスギの代替として隣接する石川県から導入されたものである。しかし、これらのカワイドニスギ林も2004年1月の冠雪害や同年10月の台風害などをはじめとして頻繁に気象害を受けるようになり、その防除対策の確立が急務となっている。

これまでの冠雪害調査結果によると、既存のスギ林における防除対策としては立木密度管理により個々の林木を太くすることが最も有効と考えられている³⁾。これは、林齢や樹高が同じであれば直径の大きな林木ほど形状比（胸高直径に対する樹高の比）が低く耐雪性が高くなるからである。

ただし、立木密度管理によって冠雪害を軽減するには、①スギ林における冠雪害の危険度と降雪量や林木形状（直径、形状比など）の関係を明らかにして、冠雪害の危険度を評価する手法を確立することや、②間伐後の成長や収穫量を的確に予測するシ

ステムの開発が不可欠である。

近年、コンピュータとの対話によって林分成長を予測するシステム収穫表が11種類開発されている。その一つが、田中^{6, 7, 10, 11)}によって開発されたシステム収穫表「林分表予測システム」で、ある時点の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ものである。このシステムでは、将来の林分当りの材積、胸高断面積などの総量や胸高直径、樹高などの平均値だけではなく径級別の立木本数や

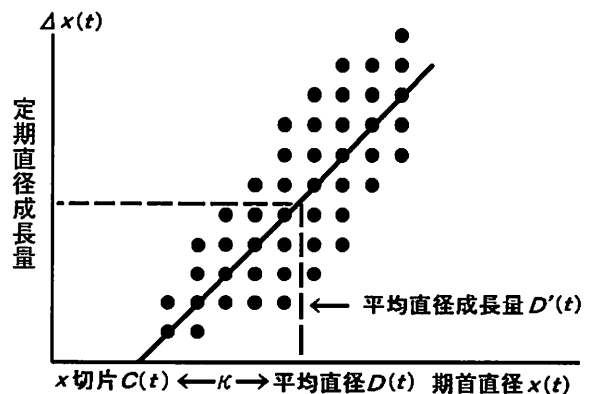


図-1 確立論的直径成長モデル

*1: 林業試験場、*2: 富山農地林務事務所、*3: 京都府立大学大学院

丸太本数なども予測できるので、冠雪害の防除といった一つの育林目標だけではなく経営目標に応じた間伐計画を作成することが可能になる。このシステム収穫表を他のそれと区別するために、田中は「シルブの森」という愛称をつけている。そこで、本報では以下「シルブの森」と呼ぶことにする。

これまでに、富山県の主要スギ品種であるタテヤマスギやボカスギを対象とした Microsoft Excel 版の「シルブの森」が調製されている^{4, 5, 12)}。しかし、林木の成長は同じスギであっても品種や地域によって成長経過が異なるため、品種や地域毎に成長パラメータを求める必要がある。

本研究では、カワイダニスギ林で毎木調査や樹幹解析などを行って、「シルブの森」の調製に必要な成長パラメータを算出したので、その結果について述べる。

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論的直径成長モデルと、篠崎吉郎・吉良竜夫らの密度効果の理論に基づく安藤貴の林分密度管理図を結合させようとするものである^{2, 8, 9, 10, 11)}。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⁹⁾であって、その概略は以下の通りである¹⁰⁾。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、

表-1 樹幹解析調査地の概要

調査地	供試木本	林齢年	平均樹高 m	平均胸高直径 cm	立木密度 本/ha	蓄積 m ³ /ha	林分断面積 m ² /ha
戸津宮							
間伐区	7	28	14.5	21.5	1006	263	37
無間伐区	7	28	14.7	20.8	1646	386	56
針木							
間伐区	7	30	20.5	29.3	767	506	52
無間伐区	7	30	20.8	27.0	1167	664	68
矢波	7	42	20.3	34.2	764	660	71

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

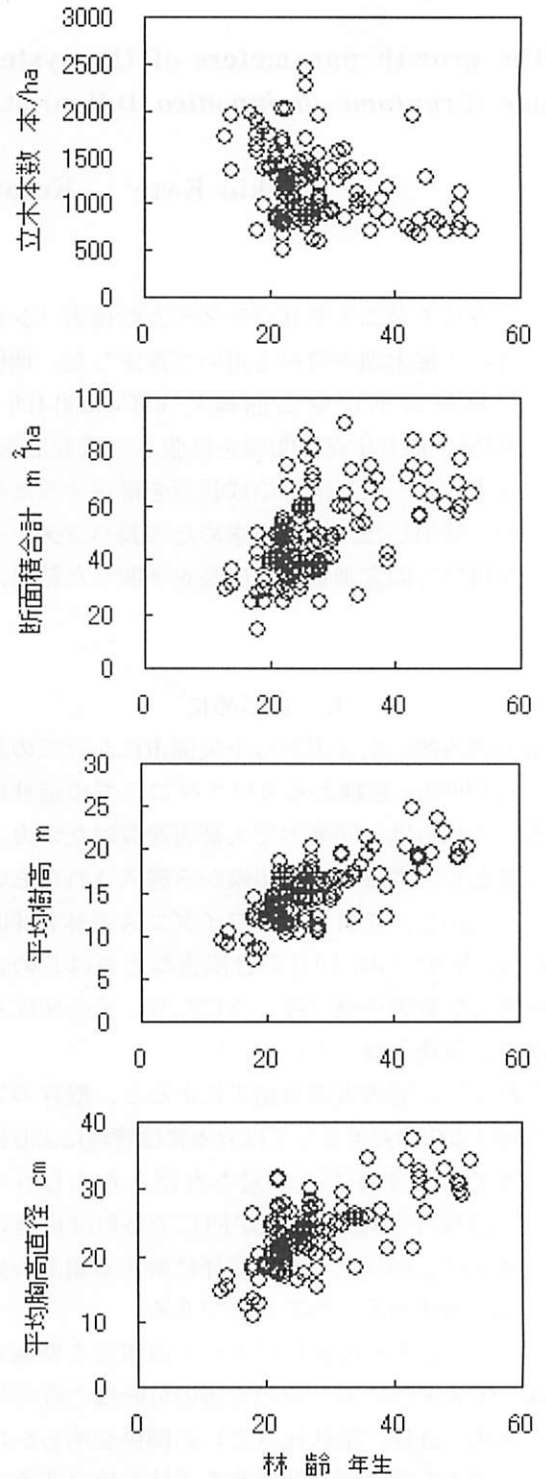


図-2 毎木調査地における林齢と立木本数、林分胸高断面積合計、平均樹高および平均胸高直径の関係

される。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、

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

という確率微分方程式で表現されるものである。

「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⁹⁾。

3. 資料

「シルブの森」の成長パラメータを推定するには、長期にわたる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、そのような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。樹幹解析資料は富山県西部の氷見市戸津宮、同市針木および小矢部市矢波の計3林分から採取されたもので、合計35本であった(表-1)。なお、戸津宮と針木の調査地では、カワダニスギ林の生産力が調査されたほか、間伐効果の検討を目的に間伐区と無間伐区がそれぞれ設けられており、不定期ではあるが毎木調査が繰り返し行われている¹⁾。そこで、これらの固定調査地の資料を用いて、カワダニスギ林分における「シルブの森」の予測精度を検討した。

また、樹幹解析の資料だけでは、林分当りの胸高断面積合計と立木密度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。これらの資料は平成14年から18年にかけて、氷見市59林分、小矢部市39林分及び小矢部市に隣接する石川県津幡町21林分の計119林分で調査されたものである。図-2に毎木調査地における林齢と立木本数、林分胸高断面積合計、平

均樹高および平均胸高直径の関係を示した。これらの図から明らかなように、50年生以上の高齢の林分が5林分と少なく、立木密度も2,500本/haを越える林分が認められなかった。高齢林が少ないのは造林の歴史が比較的新しいためである。また、立木本数が少ない理由として、カワダニスギは初期成長が良好なこと、雪害を回避する目的で疎植にして直径成長を促進することなどがあげられる。また、胸高断面積合計、平均樹高および平均胸高直径は林齢が同じであっても最小値と最大値では大きな差異があり、林分による変動が大きかった。

4. 結果と考察

4.1 地位指数曲線

図-3に矢波調査地の樹高成長曲線の一部を示した。この図から、樹高成長曲線はシグモイド型の成長曲線を描くが、変曲点が7~8年生以下の時期にあらわれることがわかる。このような傾向は同齢単純林において一般的な傾向であり、成育初期を除くと、MITSCHERLICH成長曲線が良く当てはまることが知られている¹⁰⁾。「シルブの森」では、平均樹高 $H(t)$ の成長を以下の MITSCHERLICH 成長曲線式で表し、地位指数曲線として用いている^{4, 5, 9, 11)}。

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

ここで、 M_H 、 L_H 、 k_H はパラメータである。

樹幹解析された35本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 のパラメータを算出した。この場合、変曲点より若い初期成長期間を除いて計算した。その結果、何れ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(図-3)。通常、地位指数曲線はパラメータ L_H 、

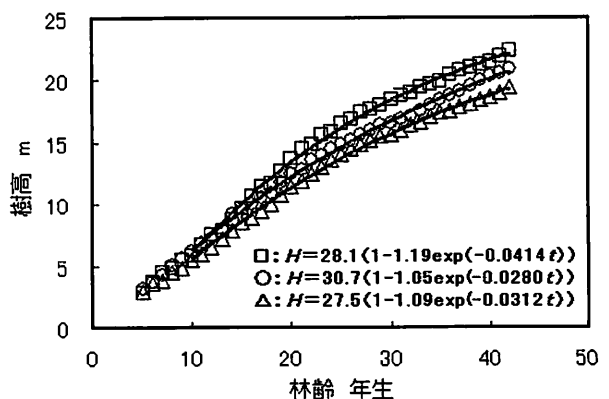


図-3 矢波調査地における樹高曲線の当てはめ

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¹⁰⁾。そこで、 L_H 、 k_H の平均値、 $L_H=1.12$ 、 $k_H=0.035$ をカワダニスギの「シルブの森」のパラメータとして採用することにした。また、 M_H は地位指数 SI によって変化させることにし、次式より算出することにした。

$$M_H = 1.382SI \quad (3)$$

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は氷見市針木における定期直径成長量と期首直径の関係を5年毎に示したものである。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。

図-5は、3箇所の樹幹解析林分における回帰直線の x 切片 $C(t)$ とその時の期首直径 $D(t)$ との関係を示したものである。これについても直線関係が認められ、 $C(t)$ の $D(t)$ に対する回帰直線は、

$$C(t)=1.04D(t)-16.7 \quad (4)$$

となった。これまでも回帰直線の傾きが1に近い傾向が認められている⁴⁾。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。

$$C(t)=D(t)-\kappa \quad (5)$$

次に、(1)式の両辺を $D(t)$ で割り、(5)式を代入すると

$$1/D(t) \cdot dx(t)/dt = 1/\kappa (x(t)-D(t)) + 1 + \gamma \cdot f(t) \quad (6)$$

となる。(6)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、 Y 切片は1である。なお、 $\gamma \cdot f(t)$ 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-6は針木調査地の樹幹解析の資料に(6)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0.0614であったことから、 κ は16.5となった。同様の方法で、戸津宮と矢波の κ を算出した結果、それぞれ16.3、14.5となり、3林分の値はきわめて近かった。そこで、これらの平均値

15.7をカワダニスギの κ として採用した。

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。

$$1/g = \rho/\lambda_H + \alpha_H/\lambda_H \quad (7)$$

ここで、 λ_H は平均樹高 H における最大林分断面積

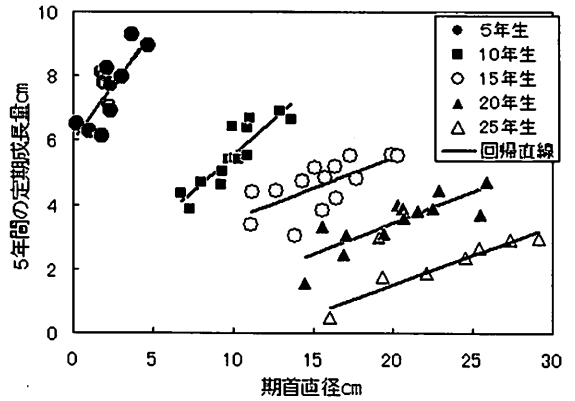


図-4 期首直径と定期直径成長量の関係 (針木調査地)

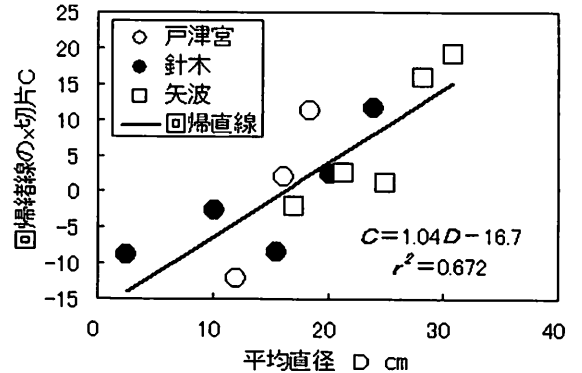


図-5 回帰直線の x 切片 C と平均直径 D の関係

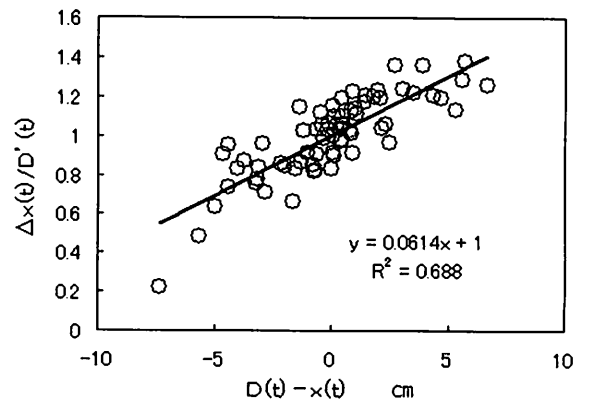


図-6 各立木の胸高直径 $x(t)$ と平均胸高直径 $D(t)$ の差と立木の直径成長量 $\Delta x(t)$ の平均直径成長量 $D'(t)$ に対する比の関係

で、 α_H は平均樹高の関数である。(7)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。

$$1/\lambda_H = a_1 \cdot H^{a_2} \quad (8)$$

$$\alpha_H/\lambda_H = b_1 \cdot H^{b_2} \quad (9)$$

119林分の毎木調査資料を(7)式に当てはめて、非線形の最小二乗法を用いて、(8)式と(9)式の a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 の係数を算出した。その結果、 $a_1 = 0.0465$ 、 $a_2 = -0.6608$ 、 $b_1 = 4863$ 、 $b_2 = -2.161$ 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。

$$\alpha_H = b_1/a_1 \cdot H^{b_2 - a_2} = 104581H^{-1.500} \quad (10)$$

$$\lambda_H = 1/(a_1 H^{a_2}) = 1/(0.0465H^{0.6608}) = 21.5H^{0.6608} \quad (11)$$

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(11)。そこで、最大林分断面積 λ_H の平方根と平均樹高の関係に、MITSCHERLICH 式を DEMING の最小二乗法で当てはめ、次式を得た(図-7)。

$$\sqrt{\lambda_H} = 18.81(1 - 0.673\exp(-0.0345H)) \quad (12)$$

つぎに、 λ の平方根と平均樹高の関係を、 λ の平方根と林齢の関係に変換した。まず、(2)式の地位

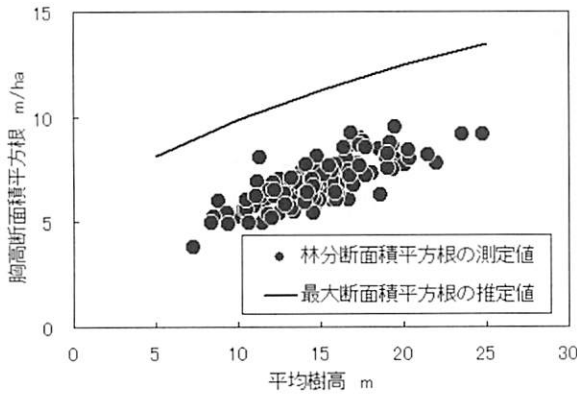


図-7 平均樹高Hと林分胸高断面積の平方根および最大胸高断面積の平方根の関係

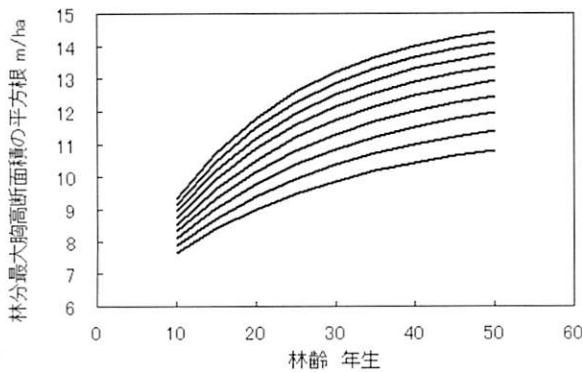


図-8 林分最大胸高断面積の平方根 $\sqrt{\lambda_H}$ の成長曲線と地位の関係

指数曲線を使って林齢10から50年生まで5年毎に平均樹高を求めた。つづいて、これらの平均樹高を(12)式に代入して林齢10から50年生まで5年毎に λ の平方根を算出し、今度は、 λ の平方根と林齢との関係に、MITSCHERLICH 式を DEMING の最小二乗法で当てはめて、 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。

$$\sqrt{\lambda(t)} = M_\lambda(1 - L_\lambda \exp(-k_\lambda \cdot t)) \quad (13)$$

以上のような計算を地位指数12~28mについて2m毎に行った(図-8)。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-9に示した。これらの図から明らかのように、 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大する傾向を示した。これは、林分断面積 λ_H 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

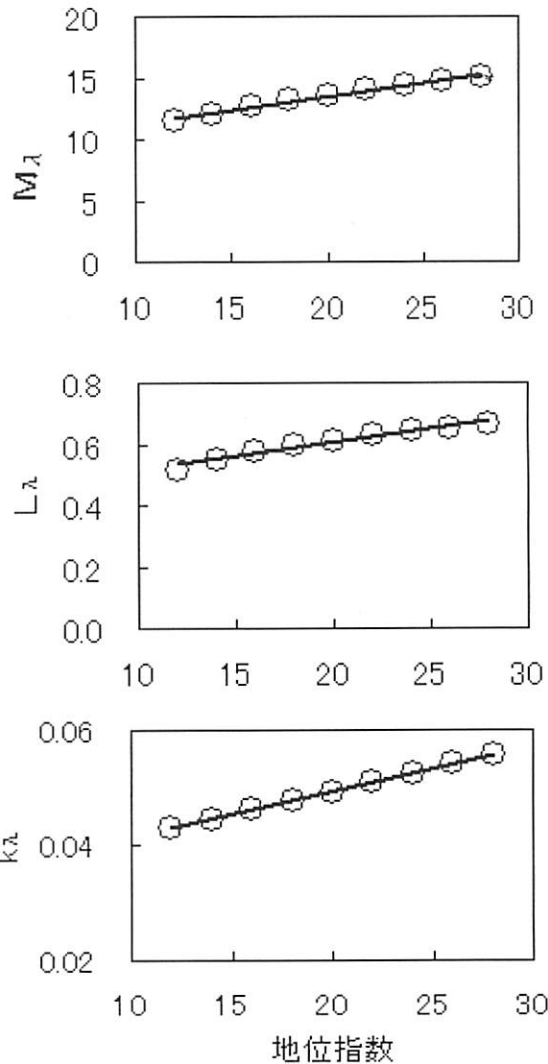


図-9 パラメータ M_λ 、 L_λ 、 k_λ と地位指数の関係

ている。そこで、「シルブの森」では M_t 、 L_t 、 k_t 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。

$$M_t = 0.221SI + 9.06 \quad (r^2 = 0.988) \quad (14)$$

$$L_t = 0.00887SI + 0.426 \quad (r^2 = 0.967) \quad (15)$$

$$k_t = 0.000794SI + 0.0335 \quad (r^2 = 0.999) \quad (16)$$

4.4 平均胸高直径の成長曲線

「シルブの森」^{5,7)} 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。

$$D(t) = 1/\sqrt{(\rho + q\alpha)} \cdot M_D(1 - L_D \cdot \exp(-k_D \cdot t)) \quad (17)$$

ここで、 M_D 、 L_D 、 k_D は成長パラメータで、 ρ は立木密度、 q は間伐のたび毎に変化する補正項、 α は平均樹高の関数である⁹⁾。この成長モデルでは MITSCHERLICH 成長曲線の上限值のみが立木密度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、 $q\alpha$ と平均樹高の関係を (10) 式で近似した。また、平均胸高直径の成長曲線 (17) 式のパラメータ L_D 、 k_D は、(13) 式のパラメータ L_t 、 k_t と同じなので、(15) 式と (16) 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、(17) 式を (18) 式のような MITSCHERLICH 式に変形し、毎木調査で得られた平均直径、立木密度および平均樹高から推定された $q\alpha$ などを代入して M_D を最小二乗法で求めた。

$$D(t)\sqrt{(\rho + q\alpha)} = M_D(1 - L_D \cdot \exp(-k_D \cdot t)) \quad (18)$$

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 を最小二乗法で推定した。その結果、(19) 式が得られた。

$$M_D = 24.4SI + 1032 \quad (19)$$

4.5 成長予測結果と精度

本報で求めた成長パラメータを用いて Excel 版の「シルブの森」を調製したのち、戸津宮と針木の2箇所の固定調査地における成長量の予測値と測定値を比較検討した。

各調査地の測定時の林齢、予測期間、予測項目等は次の通りである。戸津宮調査地では23年生時に間伐区と無間伐区が設定されている。そこで、このときの毎木調査資料を用いて5年後の平均胸高直径、平均樹高、胸高断面積合計、蓄積および直径分布の測定値と予測値とを比較した。また、針木調査地でも23年生時に間伐区と無間伐区が設定されている。

ここでは、間伐区は7年後、無間伐区は12年後について測定値と予測値を比較検討した。なお、予測期間が一定でないのは、試験地により調査間隔が異なることや間伐や雪害などによる影響が少ない期間を選んだためである。

まず、平均胸高直径、平均樹高、胸高断面積合計および蓄積の測定値と予測値を比較した結果を表-2に示す。これらの結果によると、平均胸高直径および平均樹高についてみると、4箇所の調査地においても測定値と予測値の差異が小さいことがわかる。胸高断面積合計および蓄積については、測定値の方が予測値より少し小さくなる傾向が見られた。この一因は、冠雪害等による本数減少に起因するものである。雪害木を測定値に加えるとより予測値に近くなった。したがって、「シルブの森」では林分の平均値や総量が高い精度で予測できたといえる。

つぎに、直径階別本数分布の測定値と予測値を比較した結果を図-10に示した。この図から、何れの調査地においても、測定値と予測値に類似傾向が認められた。そこで、二標本コルモゴロフ・スミルノフ検定を行って、測定値と予測値の分布関数の間に差があるか否かについて検討した。その結果、戸津宮無間伐区と針木無間伐区の有意確率はそれぞれ32.2、95.6%となり、5%有意水準をこえた。したがって、これらの調査地では測定値と予測値の分布関数に差異があるとはいえなかった。

一方、戸津宮間伐区と針木間伐区の有意確率はそれぞれ0.28、0.00%となり、いずれも5%有意水準より小さかったことから、これらの調査地では測定値と予測値の分布関数に差異があったといえる。

以上のことから、本報で調製したカワイダニスギ林の「シルブの森」を用いると、10年後の成長量をかなり正確に予測できることがわかった。ただし、直径分布は概ね予測できるものの、測定値と予測値が統計的にみてもつねに差異がないという高い精度ではなかった。

5. おわりに

カワイダニスギのシステム収穫表「シルブの森」を調製する目的で、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た。本調査で用いた資料の大半は50年生以下の林分から収集されたことから、今回調製した「シルブの森」の適応範囲は50年生以下となった。今後は長伐期施業にも対応で

きるようするため、さらに高齢な林分の資料を収集して、成長パラメータを再調製する予定である。

本研究を行うにあたり、石川県林業試験場の小谷二郎博士、同農林水産部の間明弘光林業専門技術員に調査地選定の労をお願いした。また、富山県林業技術センターの相浦英春氏からは、氷見市における樹幹解析資料や固定調査地の資料の提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

1) 相浦英春：カワイダニスギ人工林における成長

と間伐,富山林技セ研報19,16-23 (2006)

2) 安藤 貴：密度管理、農林出版、246PP。(1968)

3) 嘉戸昭夫：スギ人工林における冠雪害抵抗性の推定とその応用に関する研究, 富山林技セ研報 4,1-77 (2001)

4) 嘉戸昭夫・田中和博：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 (1995)

5) 嘉戸昭夫・田中和博：ポカスギのシステム収穫

表-2 「シルブの森」による成長予測値と測定値の比較

調査地		立木本数	平均直径	平均樹高	蓄積	断面積合
		本/ha	cm	m	m ³ /ha	計 m ² /ha
戸津宮間伐区 (23年生から5年後を予測)	測定値	1006	24.2	15.6	352	46.8
	予測値	1006	24.5	15.9	366	47.9
戸津宮無間伐区 (23年生から5年後を予測)	測定値	1645	21.5	14.9	441	60.5
	予測値	1646	21.6	14.4	427	60.9
針木間伐区 (23年生から7年後を予測)	測定値	733	30.5	20.6	527	54.1
	予測値	783	30.3	21.0	569	57.7
針木無間伐区 (23年生から12年後を予測)	測定値	1150	30.2	22.8	913	84.5
	予測値	1200	30.2	23.1	960	88.5

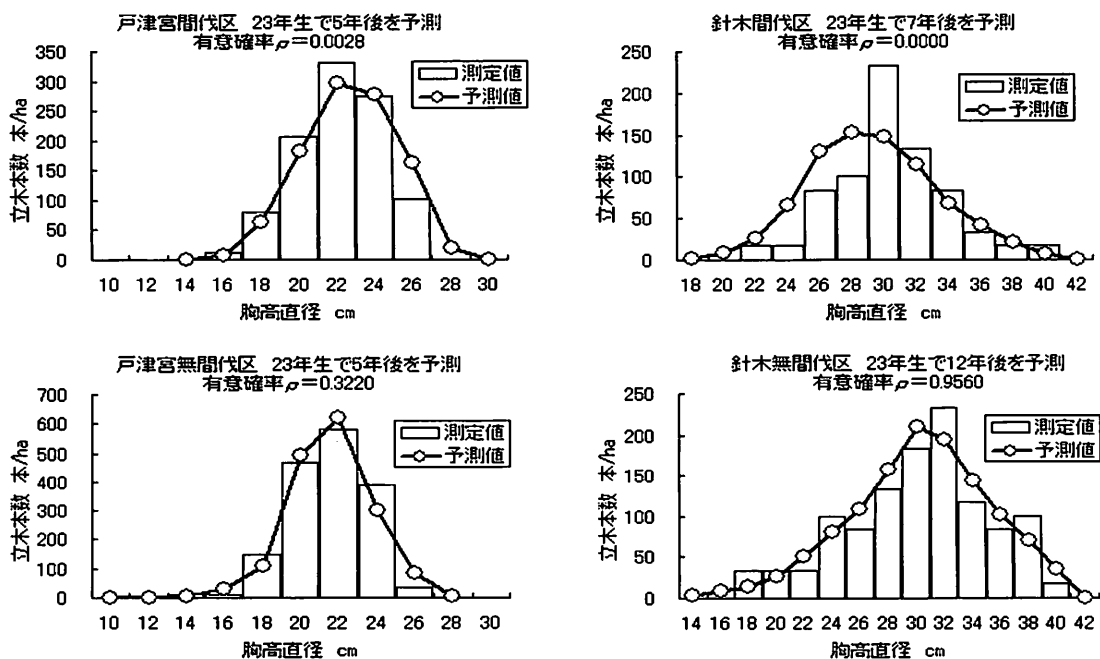


図-10 直径階別本数分布の測定値と予測値の比較

- 表の成長パラメータ, 中部森林研究45,43-46 (1997)
- 6) 木平勇吉: システム収穫表(科研成果報告書), 東京農工大学, 138pp. (1992)
- 7) 木平勇吉: システム収穫表プログラム, 科研成果報告書, 東京農工大学, 198pp. (1955)
- 8) TANAKA, K.: A stochastic model of diameter growth in an even-aged pure forest stand, J. Jan. For. Soc.68 : 226-236 (1986)
- 9) 田中和博: 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 (1991)
- 10) 田中和博: 森林の成長モデル, 森林科学 3, 28-31 (1991)
- 11) 田中和博: 森林計画学入門, 森林計画学出版局, 192pp. 東京 (1996)
- 12) 田中和博・嘉戸昭夫: 富山県システム収穫表 Excel 版の開発. 日林学術講112,149 (2001)

Summary

The purpose of this research was to make a system yield table "Silv-no-mori" which makes growth predictions of Kawaidani-sugi clone (*Cryptomeria japonica* D.Don) stands. The growth parameters which were necessary for the preparation of "Silv-no-mori" were estimated from the stem analysis data and the forest inventory data. The growth parameters of the site index curve were 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 obtained by applying the growth curve, which expanded a MITSCHERLICH growth curve, in the growth of the average diameter of the 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 two fixed test areas by using "Silv-no-mori" of the Excel edition which was done in the same manner.