

# 150年伐期丸太生産モデルと経営の課題

## Log Production Model for 150-Year Rotation Forest Stands and Management Strategy

時光博史

Tokimitsu, Hiroshi

キーワード: 長伐期経営、樹幹モデル、経営支援、成長モデル、消失材積、材積生産効率

要約: 占有面積 $W^2$ に比例する材積生産が地際直径 $D$ 、樹高 $H$ 、占有幅 $W$ を増加させる成長モデルと楔型の樹幹モデルを作成した。成長初期を除くと断面積連年成長量の上限 $40\text{cm}^2/\text{年}$ と直径連年成長量の下限 $\Delta D_{\min}=0.25\text{cm}/\text{年}$ が単木成長の制約であった。また材積連年成長量は樹高 $H \times$ 直径 $D$ に比例する樹幹表面積と $\Delta D_{\min}/2$ の積以上だと考え、材積生産効率 $20\text{m}^3/\text{ha年}$ の指標として $W/D > 11$ を得た。直径と樹高の成長にしたがって必要となる単木の占有幅確保と、必然的に消失する材積のうち、より多くを利用することが林業経営の課題である。

Abstract: In this paper, we propose a log production model for 150-year rotation forest stands. In the proposed model, tree volume growth along with growth of the corresponding occupied space,  $W^2$ , increases tree diameter on the ground,  $D$ , tree height,  $H$ , and its occupied width,  $W$ . Except the early stage of growth, it is shown that the annual growth of tree basal area has  $40\text{cm}^2/\text{year}$  as a upper bound, and that a lower bound for the annual growth of tree diameter,  $\Delta D_{\min}$  is  $0.25\text{cm}/\text{year}$ . Assuming that the annual growth of volume is greater than or equal to the product of the surface area of a log (proportional to height times diameter) and  $\Delta D_{\min}/2$ , we estimate  $W/D > 11$  as an index for volume productivity  $20\text{m}^3/\text{ha}/\text{year}$ . As one of the tasks for forest stand management for 150 rotation age, it would be of importance to maintain enough space for individual trees as tree diameter and height grow, and to utilize most from the forgone trees over the time horizon.

## はじめに

筆者は林業経営と収益の地域福祉への提供について1901年以来100年の歴史のある財団法人八幡会の長期経営計画（2000）作成を支援した。経営計画には、150年生までの密度管理指針、将来の林分材積と間伐材積予測、更に両者を金額で表わすことが求められた。将来の生産費と木材価格は予測数値の根拠を示すことができなかったので、単価は現状又は経営者の判断にゆだねることとして、末口径級別丸太生産予測を行った。

末口径別丸太生産量を予測するための精密なシステム（1995）は種々提案されている。それをできるだけ単純化して、財団法人の理事会で説明することが容易な形を求めると、単位面積当たりで表現される林分成長モデルと林分を代表する単木成長モデル、すなわち単木の樹幹形が時間の推移によってどのように変化するかというモデルが最低限必要である。これらを示し、樹種別齢級構成から連年生産が可能となる頻度で間伐材生産を継続するスギとヒノキの密度管理指針を調整して財団法人の要請に応えた。

財団法人の経営森林はスギ及びヒノキを主体とした約300haの森林であるが、本論では対象樹種をスギに限定して、作成したモデルとこれによる林業経営の課題を示す。

## 材料と方法

### 1. 材料

分析には表1に示す3林分の測定結果を用いた。林分材積は林野庁監修の西日本立木幹材積表によって各立木の値を求めて算定したものである。調査林分は広島県比婆郡東城町川島にあり、40年生及び86年生の林分は財団法人八幡会経営森林、300年生林分は八幡神社境内林である。なお境内林内には調査区画に接して樹齢400年と伝えられる参道植栽列があり、調査区画隣接地に残る伐根の年輪数は200～300であって樹齢にはある程度幅があると思われる。また林分内の立木7本の樹幹形及び丸太31本の末口における5年ごとの年輪の直径についての測定値を用いた。樹幹形は40年生林分から2本、86年生林分から5本を伐倒して地上高1.2mから2mごとに皮付き直径をcm単位で計測した。末口径は86年生林分の立木から採材された材長2～4mの丸太の

末口における年輪の半径を原則4方向、計測が困難な部分は3方向についてmm単位で計測し、平均して直径を算出した。更に林野庁(1980)が行った北近畿・中国地方の364林分、林齢11~81年の調査値を参照した。

表1 東城町スギ林分調査値

林齢	林 分				立木1本当たり	
	本数密度	平均胸高直径	平均樹高	材積	占有面積	材積
40年	800 本/ha	30 cm	24 m	700 m <sup>3</sup> /ha	12.5 m <sup>2</sup>	0.9 m <sup>3</sup>
86年	200 本/ha	50 cm	28 m	460 m <sup>3</sup> /ha	50.0 m <sup>2</sup>	2.3 m <sup>3</sup>
300年	150 本/ha	84 cm	33 m	1,200 m <sup>3</sup> /ha	66.7 m <sup>2</sup>	8.0 m <sup>3</sup>

## 2. 方法

林(1996)は複雑なものを相手にする方法として、多仮説の考察を探索的方法によって行い、問題の一部解明と新しい問題の発見を行うという考え方を示した。これは、ある条件下に成立する仮説を立て、検証し、理論を確立しあるいは因果関係を把握するという従来の考え方に対するものである。林の考え方に対応する具体的な方法として本論では、単木の樹幹形と林分成長とを表現する可能な限り単純なモデルを作成し、モデルの限界と問題の発見に努める。

箕輪(1990)は平均樹高、本数密度、平均直径の3次元によって経験上の知見を含んだ林分成長モデルが表現できることを示した。このモデルは一定の面積を区画して測定し又は施業するという行動に対応している。これに対して本論では、伐採の対象となって丸太が生産される1本の立木を育成するという行動に対応するモデルを作成する。モデルとなる1本の樹木は、樹高 $H$ 、地際直径 $D$ をもつ。ここで本数密度 $N$ に対応するものとして占有面積 $S=1/N$ 及び占有幅 $W=S^{0.5}$ を定義する。地際断面積は $G=\pi D^2/4$ である。また、このモデルでは林分閉鎖しているとみなすことができる場合には1という本数又は幹材積等の値 $X$ を占有面積で除して単位面積当たりの値、すなわち林分の値 $X/S=NX$ が得られる。最後にモデルの形を明示するため、モデルの一部を探索する過程で変動の幅が小さく、当面は定数とみなす値又は定数を $a_i$ として示し、モデルの形が明らかになった後に必要があると思われれば改めて時間や長さの関数として扱う。

## 結果と考察

## 1. 樹幹モデル

7本の地上高別樹幹直径から樹幹の横断面積を算出し、計測位置の地上高による値を図1に示した。単位は相対的な値として相対的な地上高については樹高を100%、相対的な横断面積については地上1.2m位置の横断面積を100%として示した。

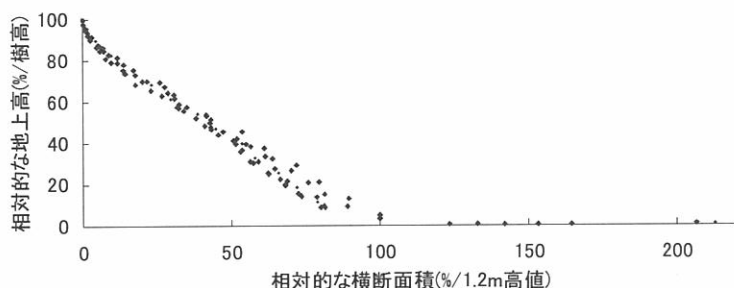


図1 樹幹の横断面積と地上高との関係

図1により樹幹頂点に対応する相対的な地上高100%の図上の点から右下に斜めに伸びる1本の直線を読み取った。樹幹頂点からの距離を $L$ として樹幹頂点からの距離に応じた樹幹の横断面積を $g=a_1L$ とすると幹材積 $V$ は次のように算出される。

$$[1] \quad V = \int_0^H g dL = a_1 H^2 / 2$$

これは単木の樹幹全体の樹幹曲線を放物体とみなしたことを意味する。地際の断面積は $G=\pi D^2/4$ である。また樹幹を表す放物体の地際の断面積は $g$ の定義から $G=a_1H$ であり、これにより $a_1$ を消去すると単木材積 $V$ は次式で表わされる。この式は形数法によって示された係数1/2の幹材積の形である。図1において原点を頂点とする直角三角形の面積を算出する形であるともいえる。

$$[2] \quad V = GH / 2$$

なお地上高1.2mより低い位置の相対的な横断面積は200%を超えるものもある。しかし荏住(1979)は根株付近では幹と根の組織が入り組ん

でいるので幹と根の区別が難しいことを指摘した。このことから根株付近の計測値は単純な樹幹モデルの作成に利用することは適当でないと考えられるので無視した。

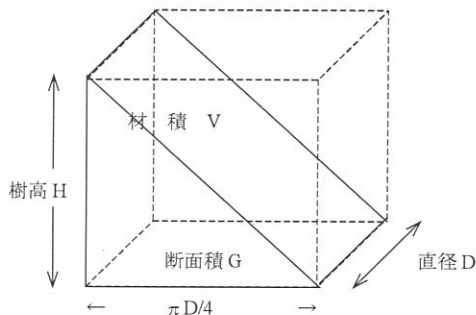


図2 樹幹のモデル

ここで樹幹について $V$ 、 $D$ 、 $G$ 、 $H$ 及び樹幹からの丸太採材を考えるうえで必要な樹幹の細りを表現する幹曲線に対応する線を直線で表現するモデルを作成すると図2のようになる。この図で地際の断面積 $G=\pi D^2/4$ 、材積 $V=GH/2$ であり、樹高 $H$ と $\pi D/4$ の長さの辺を2辺とする直角三角形は図1に対応し、楔形の図形の横断面積は[2]式のモデルの樹幹における同じ地上高の横断面積に対応している。また直径 $D$ と樹高 $H$ の比は形状比又は森田(1989)の $D/H$ 比として林分密度の評価や施業指針に用いられている。図2の樹高 $H$ と直径 $D$ を2辺とする長方形の形はこれらの指標の値を反映する。

## 2. 空間モデル

樹木が林内において占有する空間を同じように直線で表わすと図3のとおりである。樹幹に蓄積されて材積として把握される木材生産の制約要因としては、樹冠において行われる光合成や荻住(1979)が示した根系圏における水分や養分の吸収が考えられる。閉鎖した林分では、両者のうちどちらかが材積成長の制約になると考えられるので、両者のうち制約となるものの平面投影面積に対応するものとして占有面積 $S$ が想定される。占有面積の値を反映する $W$ と $H$ の比は相対幹距として密度管理の指標として用いられる。この

ため図3における樹高 $H$ と占有幅 $W$ を2辺とする長方形の形は相対幹距の値を反映するモデルの形として使用することが期待できる。

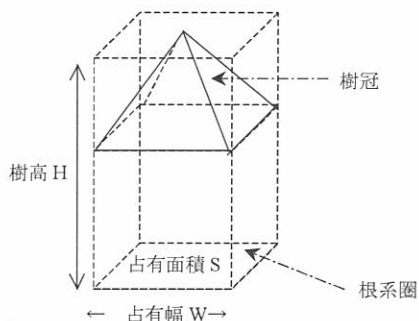


図3 樹木が占有する空間のモデル

### 3. 材積生産モデル

材積生産について占有面積が制約となった場合には材積の連年成長量 $\Delta V$ は占有面積 $S$ によって増減すると考えられる。また十分に閉鎖した林分では、面積当たりの葉量は樹種ごとにほぼ一定の値となることが知られており、生産物の総量とそのうちの樹幹への配分も閉鎖した林分ではある程度安定すると思われる。そこで次のように比例すると仮定する。

$$[3] \quad \Delta V = a_2 S$$

それぞれを樹齢 $t$ の関数である連続量とすると材積は過去の生産量が蓄積したものであるから

$$[4] \quad V(t) = a_2 \int_0^t S(\tau) d\tau$$

となる。材積生産速度 $V(t)'$ と材積の連年成長量 $\Delta V(t)$ をほぼ等しいものとして、この関係を図4に示すと、左縦軸を尺度とする材積の連年成長量についての曲線と右縦軸を尺度とする占有面積の変化を示す曲線とは同形となる。また、それぞれの曲線と樹齢 $t$ という時間軸とにはさまれた縦縞の図の面積は樹齢 $t$ までに樹幹に蓄積され合計された材積と、それだけの量の樹幹を形成するための材積が1年で生産される占有面積を表している。両者は[4]式のとおり定数 $a_2$ を介して比例関係にある。

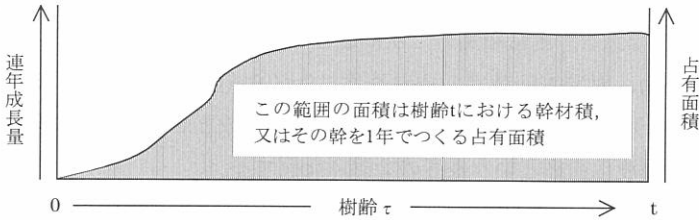


図4 材積生産モデル

#### 4. 形状固定モデル

4.1. 樹木形状モデル：樹木の形状が表現される3つの長さである直径 $D$ 、樹高 $H$ 、占有幅 $W$ についての相互の比は林分の評価や施業の指針として用いられる。これらはそれぞれ指標となるほど安定しており、指標として使用可能なほど変動するものである。単純なモデルを作成するために、これらをまず定数と仮定してモデルを作成する。

値の相互の比が時間によらず一定であると仮定し、 $D/H=a_3$ 、 $W/H=a_4$ とする。そうすると $W/D=a_4/a_3=a_5$ 、 $D^2/W^2=1/a_5^2$ 、 $DH/W^2=a_3/a_4^2$ 、 $D^2H/HW^2=1/a_5^2$ も一定である。なお $a_5$ は西沢（1972）の樹冠幅一直径比に対応する。また地際断面面積は $G=\pi D^2/4=a_6 D^2$ 、樹幹表面積は $a_7 DH$ 、樹幹中心線を含む樹幹の縦断面面積は $a_8 DH$ 、幹材積は $V=a_9 GH=a_6 a_9 D^2 H$ として表わすことができるので、これらを占有面積 $S=W^2$ で除して得られる単位面積当たりの地際断面面積 $G/S=a_6/a_5^2$ 、樹幹表面積 $a_7 DH/S=a_3 a_7/a_4^2$ 、中心線を含む樹幹縦断面面積 $a_8 DH/S=a_3 a_8/a_4^2$ 、樹高の1単位長さ当たり幹材積 $V/HS=a_6 a_9/a_5^2$ も長さに依存しない定数、すなわち時間によらず一定の値となる。更に樹幹の形状を前節の仮定の放物線として算出すると $a_7=2\pi/3$ 、 $a_8=2/3$ 、 $a_9=1/2$ となった。

4.2. 樹木成長モデル：長さを樹高 $H$ で代表させて $S(t)=W(t)^2=a_4^2 H(t)^2$ 、 $V(t)=a_{10} H(t)^3$ として $V(t)$ を $t$ で微分して成長速度を求めると $V(t)'=3a_{10} H(t)^2 H(t)'$ として示された。

一方[3]式から単木材積の成長速度は $V(t)'=a_2 S(t)$ として、この $S(t)$ と $V(t)'$ を代入して整理すると次のように樹高の成長速度は林齢 $t$ によらず一定となる。

$$[5] \quad H(t)' = a_2 a_4^2 / 3 a_{10}$$

そうすると樹高の一次関数として表された地際直径 $D(t)$ 、占有幅 $W(t)$ の成長速度も一定である。更に樹高の二次関数として表わされた地際断面積 $G(t)$ 、占有面積 $S(t)$ 、樹幹表面積等の成長速度は $2aH(t)H'(t)$ となるので、その時点の樹高という長さに比例する。同様にして三次関数として表わされた幹材積 $V(t)$ の成長速度は樹高という長さの2乗に比例する。

占有面積の単位当たり材積生産効率 $a_2$ が一定であって、形状が固定された相似形の樹木が成長するモデルは、長さの成長速度が一定で、面積の成長速度は長さに比例し、体積の成長速度は長さの2乗に比例した。これらの成長速度は現実の樹木では連年成長量として測定されたものと比較されることになる。

## 5. 単木の肥大成長

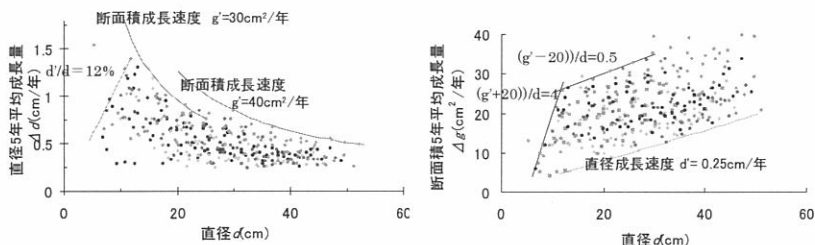


図5 直径・断面積の連年成長量と直径の関係

形状が固定された樹木成長モデルの連年成長量に当たる成長速度は前節では低下しなかった。しかし現実の閉鎖した林分の連年成長量には上限が存在すると予想される。その限界の探索に向かう。材料とした末口における直径 $d$ と断面積 $g$ の成長を連年成長量と直径との関係として示すと図5のとおりである。なお末口の直径や断面積は樹齢 $l$ によって増大し、地上高によって減少する関数でもありと考えられるので、その値の範囲をみることにする。

図5左図は5年おきの直径の平均値 $d=(d(t)+d(t+5))/2$ と対応する直径の5年間平均成長量 $\Delta d=(d(t+5)-d(t))/5$ を対比したものである。また右図は5年間の断面積平均成長量 $\Delta g=\pi(d^2(t+5)-d^2(t))/20$ と5年おきの対応する直径の平均値を対比したものである。なお5年間平均成長量は連年成長量の近似値であ



る。計算式を用いる場合は直径と断面積を連続量とみて $t$ で微分した成長速度をこれに対応させた。

左図から直径の連年成長量の上限を読み取ることは困難であるが1.6cm/年以上と思われる。直径12cm以下の範囲では、図中左上の1点を例外として無視すると、上限は成長率 $d'/d=12\%$ である。成長率一定として近似された成長は指数型であると箕輪（1990）は示した。また右図から読み取ることのできる断面積の連年成長量の2つの上限値について次式の関係を用いて左図に曲線で示した。

$$[6] \quad g(t)' = \pi d(t) d(t)' / 2$$

図5左図から断面積の連年成長量の上限は直径20cmまでは $30\text{cm}^2/\text{年}$ 、直径20cm以上では $40\text{cm}^2/\text{年}$ であると思われた。

また右図からは形状固定モデルから予想される直径に比例する断面積の連年成長量に当たる $g'=ad$ となる線形は上限としては読み取ることができなかった。しかし、これに定数が加減された $g'=a_{11}d+a_{12}$ という上限を示す線形を読み取ることができた。その上限は

$$[7] \quad g' = 0.5d + 20$$

であり、左図左方の1点を例外として無視すると更に次式の上限を読み取ることができた。

$$[8] \quad g' = 4d - 20$$

2つの上限を示す線の交点は両式を解いて $(d, g') = (11.4\text{cm}, 25.7\text{cm}^2)$ であった。制約となる上限についてみると直径12cm以上では直径11cm以下と比較して $a_{11}$ は8倍となり、 $a_{12}$ の値の正負は逆転した。また右図では直径30cm以上で $40\text{cm}^2/\text{年}$ という断面積の連年成長量の上限があると思われた。更に左図からは直径の連年成長量の下限が $0.25\text{cm}/\text{年}$ であることが読み取れた。右図からもこれに対応する下限の係数 $a_{13}$ が読み取れた。

以上を形状固定モデルと比較すると、次のように考えられる。形状固定モデルでは直径成長速度が一定であった。材料では肥大成長が抑えられて直径の連年成長量が低い一定値 $0.25\text{cm}/\text{年}$ に近づく場合と、直径の連年成長量が安定する大径木について形状固定モデルに近似したモデルの作成が期待できる。

また形状固定モデルでは断面積成長速度 $g(t)'$ が直径 $d(t)$ に比例した。直径の成長速度 $d(t)'$ が一定として[6]式で直径の関数として示された断面積成長速度 $g(t)'$ を更に直径 $d$ で微分すると直径の変化による断面積成長速度の変化は次のように表される。

$$[9] \quad \frac{\partial g(t)'}{\partial d} = \frac{\pi d(t)'}{2}$$

材料からは直径12cmを境に8分の1となる2つの上限の値 $\partial g'/\partial d = a_{11} = (4, 0.5) \text{ cm}^2/\text{cm年}$ が読み取られた。この値を[9]式に代入して対応する直径成長速度 $d'$ を求めると $d' = (2.5, 0.3) \text{ cm/年}$ となった。この値と[7][8]式の形から肥大成長は次のようであったといえる。直径11cmまでは直径の連年成長量が2.5cm/年で一定となる形状固定モデルに似た成長が行われたが、材料の断面積の連年成長量は $20 \text{ cm}^2/\text{年} + \alpha$ が不足していた。直径12cm以後は直径の連年成長量が0.3cm/年で一定となる形状固定モデルに似た成長が行われたが、材料の断面積の連年成長量は $20 \text{ cm}^2/\text{年} - \alpha$ が過大であった。ただし $\alpha$ は直径連年成長量0.25cm/年以上及び直径連年成長量2.5cm/年以下という条件を満たす非負の値である。

断面積連年成長量に上限があり、直径連年成長量に下限があればこの2つの条件を満たす直径 $d$ には限界がある。直径成長速度 $d' = 0.25 \text{ cm/年}$ を下限、断面積成長速度 $g' = 40 \text{ cm}^2/\text{年}$ を上限として[6]式により求めると直径 $d = 102 \text{ cm}$ であった。樹幹下部では遅くても $d \text{ cm} / 0.25 \text{ cm} = 102 / 0.25 = 408 \text{ 年}$ 、早ければ $g \text{ cm}^2 / 40 \text{ cm}^2 = \pi 102^2 / 4 / 40 = 204 \text{ 年}$ でその大きさに到達することになる。なお材料とした300年生林分における胸高直径の最大値は皮付き径で118cmであった。

## 6. 現実林分の推定値

**6.1. 占有面積と材積生産効率：**図6に占有面積 $S$ と占有幅 $W = S^{0.5}$ を林齢によって示した。材料とした川島地区の3林分の値は大きい四角、林野庁(1980)による北近畿・中国地方スギ林について値は小さな点で示した。図6右図から図中の線のとおり占有幅 $W$ の成長速度は高速のとき15cm/年、また低速のとき2.5cm/年と推定された。占有幅の成長速度は高速では低速の6倍であった。スギの成長が初期に旺盛であることを考慮すると、初期に高速の成長コースをたどり、やがて他の成長コースに乗り換えるものと思われる。八幡会

の2林分は8年目以降 $W/t=7.5\text{cm}/\text{年}$ の中速で成長し、300年生林分は5年目以降低速であると仮定して右図の線分に対応する曲線を占有面積について描くと左図のとおりであった。

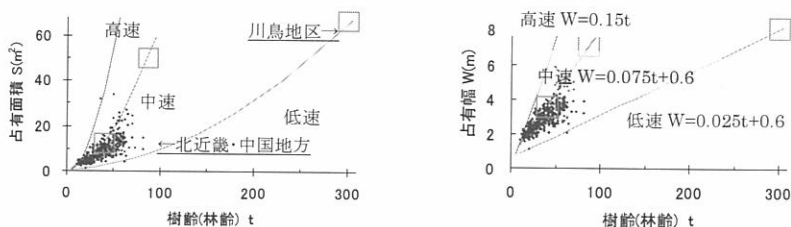


図6 占有面積・占有幅成長経過の推定

図6左図に示した林齢 $t=(40,86,300)$ 年の3林分の平均木について、図4縦線の範囲に当たる面積を求めて、[4]式に単木材積 $V(t)=(0.9,2.3,8.0)\text{m}^3$ とともに代入すると3林分の材積生産効率は $a_2=(2700,1500,1100)\text{cm}^3/\text{m}^2\text{年}$ となった。ha単位とすると $a_2=(27,15,11)\text{m}^3/\text{ha年}$ である。この差は地位に当たる $a_2$ そのものと、算出式から林分の閉鎖度合及び占有面積の成長コースの変異によると思われた。

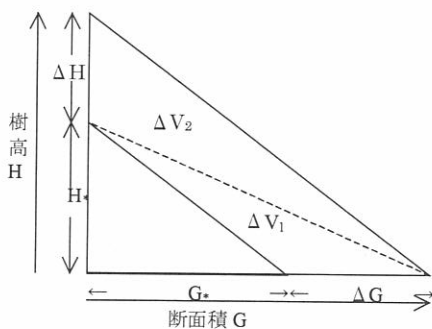


図7 断面積・樹高・材積連年成長量の関係

6.2. 単木連年成長量と限界：3林分平均の概数として $a_2=2000\text{cm}^3/\text{m}^2\text{年}$   
 $=20\text{m}^3/\text{ha年}$ と仮定しよう。また占有面積の限界は300年生林分の概数である  
 $70\text{m}^2$ と仮定して、 $V(t)'=a_2S(t)$ によって求めると単木の材積成長速度は  
 $V(t)'=140000\text{cm}^3/\text{年}=0.14\text{m}^3/\text{年}$ が上限であった。材料とした3林分を代表する  
 単木の平均成長量が $V(t)/t=(0.0225, 0.0267, 0.0267)\text{m}^3/\text{年}$ であるからこれは大きな  
 値である。

ここで[2]式 $V=GH/2$ を $t$ で微分する。すると成長速度が得られるので、こ  
 れを微小な値とみて連年成長量 $\Delta X$ 相互の関係として次式及び図7に示す。

$$[10] \quad \Delta V(t) = \Delta G(t)H(t)/2 + G(t)\Delta H(t)/2$$

材積の連年成長量は次のように肥大成長と伸長成長に関わる2つの部分に分  
 かれた。

$$[11] \quad \Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2$$

両者の上限についてみよう。材積連年成長量の上限は $\Delta V=0.14\text{m}^3$ を仮定し  
 た。 $\Delta V_2=0$ 、 $\Delta H=0$ と仮定して樹高成長がとまった場合を想定して $\Delta V=\Delta V_1$ と  
 する。このとき $\Delta G$ の上限と思われた値 $\Delta G=40\text{cm}^2$ と $\Delta V_1=\Delta GH/2$ の関係から  
 $H_*$ を求めると $H_*=70\text{m}$ となり我が国で最も高いスギの樹高に近い値が得られ  
 た。

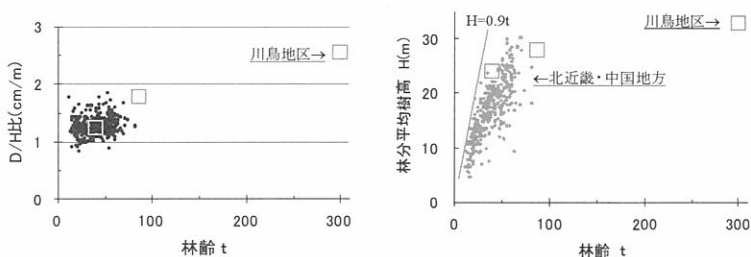


図8 D/H比・樹高と林齢の関係

また図8に $D/H$ 比 $a_3$ 及び樹高と林齢の関係を示した。微分すると $D'=a_3H'$   
 ある。 $\Delta H$ は大きな値をとるという仮定をたてると、 $D/H$ 比は小さくなる。  
 左図の下限からこれを見ると $a_3=1\text{cm/m}=0.01\text{m/m}$ と読み取れた。

一方 $\Delta D$ の範囲はこれまでの探索から $0.25 \sim 2.5\text{cm/年}$ と思われた。  
 $D/H=1\text{cm/m}$ のとき、これに対応する樹高の連年成長量 $\Delta H$ は $25\text{cm} \sim 2.5\text{m/年}$

である。また図8右図から樹高成長速度の上限は0.9m/年と読み取れた。このことから伸長する樹高の連年成長量 $\Delta H$ の範囲は0.25~0.9m/年であると思われる。 $\Delta H=25\text{cm/年}$ では132年で300年生林分の樹高33mに達する。

材積連年成長量の上限は $\Delta V=0.14\text{m}^3$ を仮定した。 $\Delta V_1=0$ 、 $\Delta G=0$ と仮定して、肥大成長が地際で停止する時点を想定し $\Delta V=V_2$ の上限を概算する。 $\Delta H$ の範囲を0.25~0.9m/年と仮定すると上限の材積連年成長 $\Delta V_2=G\cdot\Delta H/2$ の関係から $11200>G>3100\text{cm}^2$ が求められ、これに対応する直径は119~63cmとなった。 $\Delta H=25\text{cm/年}$ の成長が優先する樹幹直径は119cmが上限となる。

更に直径の連年成長量の下限 $\Delta D_{\min}=0.25\text{cm/年}$ に対応する最低限の材積連年成長量は、樹幹表面のどの位置であっても最低の成長が行われた場合であるから、樹幹表面積と年輪幅  $\Delta D_{\min}/2$ の積として次式で与えられる。

$$[12] \quad \Delta V(t) = \Delta D_{\min} a_7 D(t) H(t) / 2$$

この式に材料から得た $a_7=2\pi/3$ 、 $\Delta D_{\min}=0.0025\text{m/年}$ 、 $D=a_3H$ を代入して次式が得られた。

$$[13] \quad \Delta V(t) = 0.0026 a_3 H(t)^2$$

式 $\Delta V(t)=a_2 S(t)$ によって占有面積に換算すると $a_2 S(t)=0.0026 a_3 H(t)^2$ であり、 $S=W^2$ から

$$[14] \quad W(t) = (0.0026 a_3 / a_2)^{0.5} H(t)$$

となって、樹高又は直径の成長に対応して増加する最低限度必要な占有面積や占有幅が存在することが示された。[14]式に本論で推定した $a_2=0.002\text{m}^3/\text{m}^2$ 、 $a_3=0.01$ を代入すると $W/H=0.114$ となった。また $H=D/a_3$ によって[14]式から $H$ を消去すると $W/D=a_5$ が一定となる次式を得る。 $W/D=11.4$ となった。

$$[15] \quad W(t) = (0.0026 / a_2 a_3)^{0.5} D(t)$$

このとき[13]式から $\Delta V=0.14\text{m}^3/\text{年}$ に対応する樹高の上限 $H=73\text{m}$ が得られる。

図9左図に現実林分の相対幹距 $W/H$ を示すと、この値は下限に近似したものであった。しかし材料の86年及び300年生林分では0.2以上となった。また図9右図によって現実林分の $W/D$ をみると下限10が認められた。材料の3林分は $W/D=(11.8, 14.1, 9.7)$ であった。

以上のように比較をすれば、長伐期、大径木では $D$ と $W$ は増大するが、 $H$ の増大が伴わないので、育成の指標は $W/D$ が適当であると思われた。これは牛山（1954）が示した間伐指針と類似している。[12]式の制約を満たす樹高 $H$ と直径 $D$ のトレードオフ関係は更に解明が必要であろう。

一方[12]と[3]式からは次式が得られた。

$$[16] \quad a_2 = \Delta D_{\min} a_7 D(t) H(t) / 2S(t)$$

この式の形から樹幹表面積に対応する $DH$ や単位面積当たり樹幹表面積に対応する $DH/S$ 又は $DHN$ を指標にすると直径の連年成長量の下限 $\Delta D_{\min}$ に焦点を合わせることができる。樹木の成長を制御するという観点から、検討するべきであろう。なお $a_2=20\text{m}^3/\text{ha}$ 、 $\Delta D_{\min}=0.25\text{cm}/\text{年}$ として単位面積当たり樹幹表面積は $a_7 D(t) H(t) / S(t)=1.6$ が上限である。

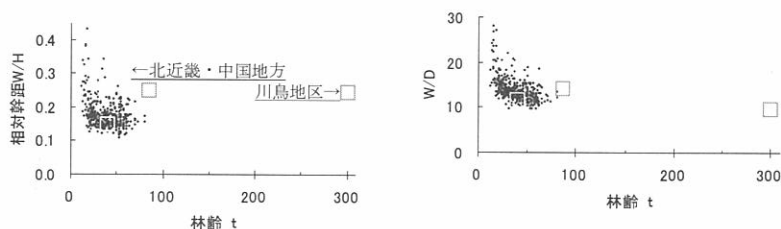


図9 相対幹距・ $W/D$ と林齢の関係

## 7. 林分成長モデル

これまで単木についてモデルを作成した。単木についての値 $x$ を次のとおり占有面積 $S$ で除して単位面積当たりとして閉鎖した林分の値 $X$ に変換する。

$$[17] \quad X = x / S$$

ここで単木材積 $V(t)$ を占有面積 $S(t)$ で除して得られる林分材積 $\Omega(t)=V(t)/S(t)$ を定義する。林分材積を微分して得られた林分の成長速度は

$$[18] \quad (V(t)/S(t))' = V(t)'/S(t) - V(t)S(t)'/S(t)^2$$

林分材積の定義から

$$[19] \quad \Omega(t)' = V(t)'/S(t) - \Omega(t)S(t)'/S(t)$$

林分材積の成長速度 $\Omega(t)'$ は2項に分かれた。前項 $V(t)'/S(t)$ は単木材積の成長速度 $V(t)'$ を単位面積当たりとしたものである。また後項 $\Omega(t)S(t)'/S(t)$ は林分

材積 $\Omega(t)$ に占有面積の成長率 $S(t)'/S(t)$ を乗じたものである。[19]式は単木の成長量を単純に合計したものが林分の成長量ではなく、その合計から単木の占有面積拡大にしたがって消失する林分材積の部分を差し引くべきことを表している。

また図6を参考に占有面積成長過程を次のように仮定する。

$$[20] \quad S(t) = a_{13}^2 t^i$$

そうすると $S(t)' = i a_{13}^2 t^{i-1}$ 、 $S(t)'/S(t) = i/t$ となる。また $S(t)$ を[4]式に代入して $V(t) = a_2 a_{13}^2 t^{(i+1)}/(i+1)$ 、 $V(t)' = a_2 a_{13}^2 t^i$ となり林分材積は次のように増加する形となって林分材積成長速度は $\Omega(t)' = a_2/(i+1)$ と一定の値をとる。

$$[21] \quad \Omega(t) = a_2 t / (i+1)$$

林齢 $t$ における林分材積は地位を表すと考えられる単位面積当たり材積生産効率 $a_2$ によるだけでなく単木の占有面積拡大の指標と考えられる $i$ によっても変化することが表された。これを施業指数 $i$ と呼ぶ。材料の3林分について $a_2 = 20 \text{ m}^3/\text{ha}$ と仮定して施業指数を求めると $i = (0.14, 2.7, 4)$ と差は大であり、 $i$ によっても林分材積の差異は説明可能である。林分材積の現存量 $\Omega(t)$ は施業指数 $i$ が小さくなれば増大する。時点 $t$ までの消失材積は小さく林地に残存する立木の材積は大きくなる。このような $i$ の選択は早期に強度の間伐を行うことにより、伐期まで残存する単木の占有面積拡張速度の低下を防ぎ、伐期まで残存する単木に林分全体で生産される材積をより多く配分させる施業を選択することに対応すると考えられる。

## 林業経営の課題

以上の検討結果から、スギの管理指針として早期に本数密度を減少させ、 $W/D > 1.1 \sim 1.2$ を維持して各立木に断面積連年成長量の上限 $G = 40 \text{ cm}^2/\text{年}$ に近い肥大成長を持続させる成長コースを財団法人に提案した。図5左図にその上限は示されている。また樹幹形は図2の楔形として末口径を算出し、元玉と2番玉以降に分けた2種の素材単価を適用し、素材生産、輸送、市場経費を控除して間伐材生産による5年単位の収入予測と立木の評価を2050年まで

について行い、提示した。材料とした林分と前節までの試算から、胸高直径1mとなる200年以上の期間についての成長も期待できる。

70年生までは広島県（1977）の既存の育林技術体系と地元の慣行があった。財団法人が採用した具体的な施業指針は間伐を繰り返して林齢によって本数密度を減少させていくという既存の体系を延長した形である。これまで現地で使用され、参考にされてきたこの指針の形によって、理事長は新たなモデルによる多様な結論や指針案を検討して不合理ではないことを確かめ、理事会は許容できるものであることを認めてこれを承認した。こうして財団法人八幡会は2000年3月から150年伐期の具体的な計画によって運営されることとなった。

財団法人には現存する86年生林分を扱うための指針が必要であった。指針がなく財産を維持するという意志をもつ理事長が不在であれば、経営の持続を長くは望むことができないと思われる。これまで育成した人工林を必要に応じて伐採して収入を得ることは、財団法人を運営するために必要なことである。皆伐によって収入を得ることは容易であるが、スギ材の価格水準は現在では間伐で収益が得られるとは限らない水準である。財団法人として林業収入を得て地域福祉に貢献があったという記憶がなければ、多くの林家と同様に放置か皆伐かが選択された可能性もある。

皆伐されて再造林が行われなければスギ林の成長力 $a_2$ は生かされなくなる。放置すれば個々の立木の成長力は $\alpha$ によって乱れ、 $D/H$ 比 $a_3$ は低下して風雪害の危険が高まる。また放置すれば林分から消失する材積 $\Omega(t)S(t)/S(t)$ が当面は小さくなるものの、将来生じる大きな消失を避けることはできなくなる。時間 $t$ により増大する直径 $D$ は最低限度の生産を求めて占有幅 $W$ の拡大を要請し、占有面積 $S$ は占有幅が2乗されて大きく拡大する。そして時間 $t$ の増大にしたがって増大する林分材積 $\Omega$ について、より大きな消失 $\Omega S'/S$ を招くことになる。このような損失が生じる前に、指針を持って早期に準備し、間伐で消失の損失を最小限に抑え、現地を見て計画や指針がまだ使用できるものであることを確かめ、必要に応じて修正し、あるいは新たな指針を導入することが経営の課題であり、経営者の役割であろう。



## おわりに

提示したモデルは1つの形であるから現実とは異なるものである。変動する丸太価格だけではなく成長を予測したモデルもこれから実現する現実の成長にあわせて変えていく必要がある。経営者次第では示された指針をもとに過大な生産の契約が結ばれてしまう危険もある。経営者にとってモデルは自らの思考や他者への説明に役立つものでなければならない。しかも自分自身を錯覚に誘うものであってはならない。そのためには現実とは少し異なる明快なモデルが必要である。このような要請をもって経営する意志を育てるモデルの作成を目標とし、現状では不足する長伐期に関わるデータを蓄積して、更にモデルに改良を加えたい。

## 謝辞

最後に林業経営について問いを投げかけ、材料を提供していただいた財団法人八幡会の小塩敏爾理事長、発表の機会を与えていただいた三重大大学の松村直人助教授、施業指針を求めて、ともに現地調査を続けている広島県立林業技術センター林業生産部の兵藤博部長などお世話になった方々に御礼申し上げます。

## 引用文献

- 林知己夫 1996. 創立 30 周年記念特集記念講演－森林理念と良質データ、森林計画誌 26:3-16.
- 広島県林務部 1977. 広島県優良材生産育林技術体系、42.
- 菊住 昇 1979. 樹木根系図説、誠文堂新光社、東京、1121.
- 木平勇吉ら 1995. システム収穫表プログラム－文部省科学研究費補助金試験研究(B)研究成果報告書 (No. 04556019) 一、198.
- 箕輪光博 1990. 林木成長論、pp. 147-234、現代林学講義 10 測樹学 (南雲秀次郎・箕輪光博)、地球社、243.
- 森田榮一 1989. 山よみどりよ、退官記念自費出版、148.
- 西沢正久 1972. 森林測定、農林出版、348.

- 林野庁 1980. スギ人工林林分密度管理図説明書－北近畿・中国地方ほか－、  
84.
- 牛山六郎 1954. 胸径に基準をおく間伐方法、長野営林局局報 21:12-23.
- 財団法人八幡会 2000. 山と人と百年史、170.