

立木消失の指標

The Index of Stands to Vanish

ヒノキの樹幹形と成長量の関係

Relations with Stem-form and Growth Increment of Hinoki Stands

時光 博史

Tokimitsu, Hiroshi

キーワード: 樹高成長曲線、幹曲線、幹材積成長量、形比、林分モデル

要約:

梢端からの距離 l とその位置における樹皮厚を除く直径 d を用いて l/d を形比 k と呼んだ。次にヒノキ林の毎木調査結果から胸高位置における形比の一様分布、林分内の標準木の樹幹解析結果から形比 $k= a+bl$ と樹高成長曲線を求め、これによる林分モデルを作成した。モデル林分の幹曲線はBehre式となり、単木と林分の幹材積、最多密度を表す数式が導かれた。モデル林分の幹材積は現実林分より10%過少となった。林分を単木の幹の集合として容易に表現できたが、モデルは更に改良が必要と思われた。

Abstract:

The index “ l/d ” was called “ k -ratio”. “ l ” was the distance between a point on a stem and the top of the stem, and “ d ” was the diameter of the stem at the point. Next, uniform distribution of k -ratio at breast height was derived from a Hinoki stand, and a height growth curve and “ $k=a+bl$ ” was derived from a sample tree which stem was analyzed. And the formulas were integrated to a stand-model, which was composed of functions about stem curve of Behre formula, stem volume, and maximum stand density. At the stand age 66, the stem volume of the model was 10% lower than the one of real stands. As a result, the model could describe a total stands with each individual stand, and it was to be improved.

Key Words: stem volume increment, height growth curve, k-ratio, stem curve, stand model

はじめに

林(1996)は自然を相手にするために、良質なデータをとることを重視し、また複雑なものを相手にする科学的方法の誕生を期待した。この新しい科学は多仮説の考察と探索的方法によって問題の一部解明と新しい問題の発見が行われるというものである。

また、箕輪(1990、2000、2002、2004)は林分成長を上層樹高、平均胸高直径及び本数密度の3因子によって経験的な知見を含むモデルとして表現できること、また増加と減少を併せて扱うことの重要性を示した。

更に幹や枝の形状が互に類似することを、梶原(2000)は樹冠と樹幹形との関係について、伊藤ほか(2002)は照葉樹林の枝と幹について示し、千葉(2002)は針葉樹人工林の樹幹形の類似性を検討して、最小の形状比が収束する傾向を報告している。

そこで本論では林齢 t にしたがって増大する樹高 h と胸高直径 $d_{1.2}$ から導かれる指標によって、消失する立木、言い換えると林分成長に伴って低下する本数密度 n が説明され、多くの現実林分との対照が容易となる林分モデルの作成を試みた。

1. 材料と方法

間伐木選定や風雪害危険度などの実務的な指標として用いられる樹高 h と胸高直径 $d_{1.2}$ の比である形状比 $h/d_{1.2}$ に対応し、幹の一部や枝にも適用可能な指標を定義した。そしてヒノキ現実林分の毎木調査結果とその林分内の標準木の樹幹解析結果を材料として、この指標の特性を求めた。また把握された材料の特性をもとに多くの現実林分との対照が容易となる林分モデルを作成し、材料とした林分の現況と対応させ、モデル林分の成長経過を推定した。更にモデル林分がもつ問題を示して林分モデル改良の方向を求めた。

1.1 指標

梢端からの距離 l とその位置における樹皮を除いた直径 d という2つの長さの比として次の指標を定義し、その位置における形比 k と呼ぶ。

$$[1] \quad k=l/d$$

1.2 材料

広島県山県郡芸北町の標高900mの水源林に成立するヒノキ単層林のうち0.088haの現実林分についての毎木調査結果及び同林分の標準木の樹幹解析結果を用いた。

林分は生立木114本、平均樹高20m、胸高直径11~37cm・平均25cm。他に枯死立木11本、平均樹高11m、胸高直径8~22cm・平均14cm。胸高直径は輪尺で2方向mm単位の測定値を平均し、樹高は熟練者が比例式測高器により0.5m単位で測定を行った。林野庁計画課(1970)編の幹材積表を用いて樹皮厚を除いた胸高直径により算出した生立木の幹材積は0.03~1.06m³・平均0.48m³。本数密度は生立木1295本/ha、枯死立木125本/haに、樹皮厚を除いた幹材積は生立木627m³/ha、枯死立木11m³/haに相当した。

標準木は樹高20.1m、胸高直径24.7cm、地上0.2mの年輪数66。樹幹解析は標準木の樹幹について地上0.2mから1または2mごとに円板を採取し水平断面の年輪数を数え、1年輪ごとに0.1mm単位で直径を測定した。

標準木の樹齢及び林齢は標準木の地上高0.2mにおける年輪数66によって66年生とした。

1.3 方法

1.3.1 材料の解析

標準木について各地上高の年輪数を地上高0.2mの年輪数66から差し引いた数を各地上高に達した樹齢とみなした、したがってその地上高が林齢 t における樹高 h となった。この樹齢 t と樹高 h の関係を2次曲線で近似して、樹高成長曲線 $h(t)$ を求めた。

また樹幹解析結果を用いて梢端からの距離 l によってその位置における形比 k を林齢 t の10年後とについて図示し、林齢によっても変化しない形比 $k(l)$ との関係を線形で近似して求めた。

更に林分を構成する立木について胸高直径 $d_{1.2}$ が大から小の順に順位 i をつけ、立木の順位 i によって形比 $k_{1.2}$ を図示し、図から胸高位置における形比 $k_{1.2}(i)$ との関係を読み取った。なお各立木の胸高位置における形比 $k_{1.2}$ は次式により算出した。

$$[2] \quad k_{1.2} = (h - 1.2) / 0.96 \cdot d_{1.2}$$

上式において樹皮厚は予備的解析から胸高直径 $d_{1.2}$ の4%と仮定し、皮付き直径である毎木調査による胸高直径 $d_{1.2}$ から差し引くため式中で0.96の係数を用いた。また材料林分の幹材積についても測定値の96%の胸高直径があったとみなした。

1.3.2 林分モデルの作成

材料林分の調査現況と対比可能な林分モデルを作成した。その仮定は樹高成長曲線 $h(t)$ と形比 $k(i, l)$ を扱いが容易な数式として定め、材料の解析結果と明らかには反しないものとした。

またこのモデル林分の仮定から幹曲線 $d(l)$ 、単木の幹材積 $v(h)$ 、単木の幹材積連年成長量 $dv/dt = dv(h)/dh \cdot dh(t)/dt$ 、林分の幹材積連年成長量 $dV/dt = \int (dv(i)/dt) di$ 、最多密度 $nu(t)$ を表す数式を導いた。

更に求めた数式の定数として材料林分に対応するモデル林分の値を求め、描写が可能となった材料林分の成長過程を例示するとともに、モデル林分がもつ問題を示して改良の方向を求めた。

2. 結果と考察

2.1 現実林分の解析

2.1.1 樹高成長曲線

図3.1に樹幹解析により過去の推定された標準木の樹高 h を樹齢 t によって○印で示した。標準木の樹齢 t と m 単位の樹高 h の関係は次式で近似された。

図にはこの近似線を実線で示し図から読み取ると、あてはまりは良いと思われた。

$$[3] \quad h(t) = 0.2 + 0.4t - 0.0015t^2$$

上式は次のように変形された。

$$[4] \quad h(t) \doteq 26.7 - 0.0015(133 - t)^2$$

上式は標準木が将来も過去の傾向にそって成長すると樹齢 $t \doteq 133$ で最大値をとり、その時、樹高 h は 26.7m であることを意味する。

また[3]式を林齢について微分すると次式となった。

$$[5] \quad dh/dt = 0.4 - 0.003t$$

上式は樹高 h の連年成長量 dh/dt が成長初期に 40cm/年であり、これが林齢 t によって 1年あたり 3mm 低下したことを意味する。

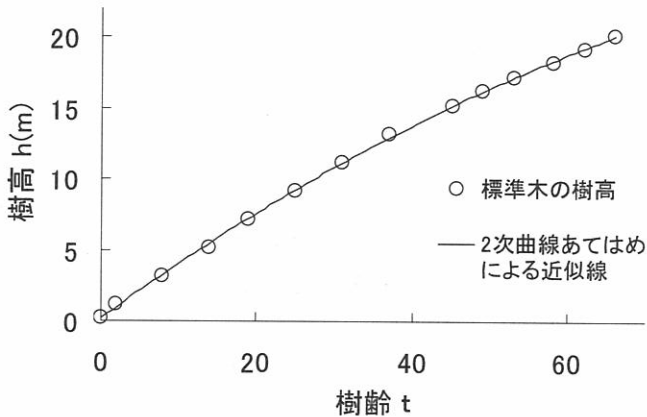


図3.1 標準木の樹高 h の推移

2.1.2 形比の変異と変化

標準木の形比 $k=l/d$ について梢端からの距離 l による変異を図3.2に示した。図3.2.1の樹皮を除いた標準木の樹幹の値から線形の関係を読み取ると、梢近傍に当たる2m以下の範囲と根株近傍の肥大した部分に当たる地上高0.2mの値を除いて次式の関係があった。

$$[6] \quad k=40+2l$$

また、同様に標準木の形比 k を10年ごとに図3.2.2に示した。標準木の形比 k は梢端からの距離によって、林齢によらず[6]式で表現された。この[6]式は形比 k が梢端からの距離 l によって定まるので、樹高にかかわらず樹幹上部の形比 k は約40で変わらず、樹幹下部の形比 k が樹高成長にしたがって増加したことを意味する。

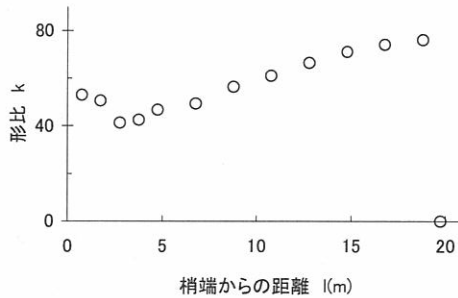


図3.2.1 標準木の形比 k (林齢 $t=66$)

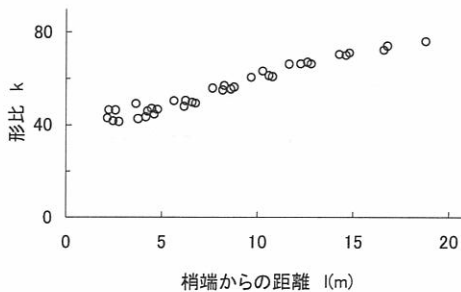


図3.2.2 標準木の10年ごとの形比 k

(林齢 $t=6, 16, 26, 36, 46, 56, 66$)

*地上高0.2mと梢端部2mを除いた

図3.2 標準木の形比 k の変異と変化

2.1.3 胸高形比の範囲

材料とした114本の生立木について胸高における形比 $k_{1.2}$ 、胸高直径 $d_{1.2}$ (cm)、樹高 h (m)を胸高直径の順位 i によって図3.3に示した。図から読み取ると、順位 i にしたがって胸高形比 $k_{1.2}$ は増加する傾向があり、次式のとおりにおおむね60~110の範囲にあった。

$$[7] \quad k(i) = 60 + 0.4i$$

また図から読み取ると、形比 k の因子である樹高 h と胸高直径 $d_{1.2}$ のうち、樹高 h は順位 i の85%までは胸高直径によらず、おおむね20mと一定であった。順位 i の最後の15%の立木の樹高については、順位 i との相関は高くはないが、順位 i によって低下する傾向にあった。胸高直径 $d_{1.2}$ は図上で順位 i によっておおむね直線的に低下した。胸高直径 $d_{1.2}$ は高い順位 i の10%でこの直線より大であった。低い順位 i の4%に当たる5本の立木は他の立木より特に小さく、順位 i により直線的に胸高直径 $d_{1.2}$ が低下した。

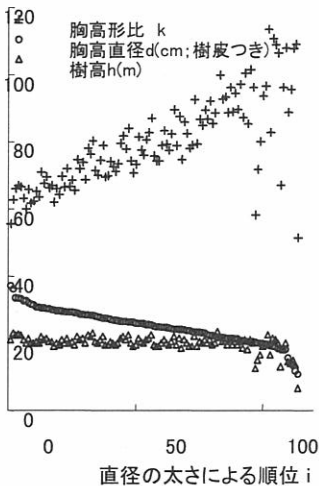


図3.3.1 生立木の形比等の分布

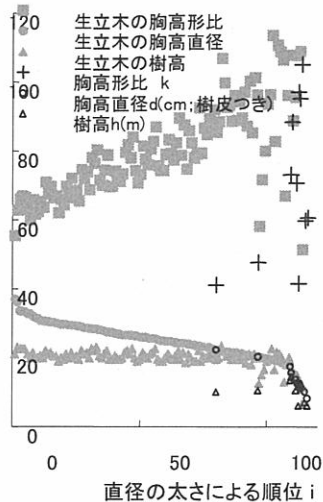


図3.3.2 枯死木の形比等の分布

図3.3 林内の胸高形比 $k_{1.2}$ の分布

更に11本の枯死木について胸高形比 $k_{1.2}$ 、胸高直径 $d_{1.2}$ (cm)、樹高 h (m)を生立木と同様の胸高直径の順位 i によって図3.3.2に示した。図3.3.1における灰色の図形は図3.3.1に示された生立木についてのものである。図から読み取ると、枯死立木11本の胸高形比 $k_{1.2}$ は40～105の範囲にばらつき、11本すべて樹高15m未満であり、そのうち9本は胸高直径 $d_{1.2}$ が18cm未満であった。やや大径の枯死木2本を例外的なものとみなして除外し、樹高 $h=14$ m、胸高直径 $d_{1.2}=17$ cmを枯死木が発生する図上の境界であるとみなして、その順位 $i=110$ を [7]式に代入すると胸高形比 $k_{1.2}=104$ となった。このことと[7]式右辺初項から次のようにいえる。

図から読み取ると、生立木の胸高形比 $k_{1.2}$ は胸高直径 $d_{1.2}$ による立木の順位 i と線形の関係があり、おおむね $k_{1.2}=60\sim 100$ が胸高直径の変異に対応した。更に図中で生立木と枯死木の境界と思われた順位 $i=110$ をこの林齢における最多密度と読み替えて ha あたりに換算すると1、250本/ ha となった。

2.2 林分モデルの作成

2.2.1 モデル林分の仮定

材料林分について数式として把握された特性をもとに、次のような諸仮定にしたがう立木の集合をモデル林分とした。

仮定1：立木はすべて同齢であり、次の樹高成長曲線 $h(t)$ にしたがう。

$$[8] \quad h(t) = hu - j(tu - t)^2$$

仮定2：ある単木の梢端からの距離 l の位置における形比 $k(l) = l/d(l)$ は林齢 t によらずすべて次の式にしたがう。

$$[9] \quad k(l) = a + bl$$

ただし a は林分について一定、 b は立木について一定

なお地際の直径 d_0 も上式にしたがう。つまり現実林分で観察される根張りはない。

仮定3：林齢 t の増加により地際の形比 $k_0=h(t)/d_0$ が上限の形比 k_u を超えた立木は消失する。すなわち[9]式から次式のとおり係数 b の上限は林齢 t によって変化する。

$$[10] \quad b \leq (k_u - a)/h(t)$$

仮定4：林分内の立木 n 本の形比 k の係数 b は一定の範囲で一様に分布する。したがってある時点における地際形比 k_0 は最小値 k_{\min} から最大値 k_{\max} までの範囲に一様に分布する。すなわち1haの面積における地際形比 k_0 が小である順に立木の順位 i を改めて定義すると、順位 i の立木の地際形比 $k(i)$ は次式で表される。

$$[11] \quad k(i) = k_{\min} + \frac{i(k_{\max} - k_{\min})}{n}$$

仮定5：以上の仮定における変数は離散としても、連続の値として扱っても不都合はない。

2.2.2 幹曲線と単木の幹材積

形比 k の[1]式の定義と[9]式から直径 d は次式で表された。この式を梢端から地際までを表す幹曲線とみると、Behreの式であった。

$$[12] \quad d = 1/(a + bx)$$

2.2.3 単木の幹材積

直径を表す[12]式から幹材積を次式で求めた。

$$[13] \quad \begin{aligned} v &= \frac{\pi}{4} \int_0^h d(x)^2 dx \\ &= \frac{\pi}{4} \int_0^h \frac{x^2}{(a + bx)^2} dx \\ &= \frac{\pi}{4b^2} \int_0^h \left(1 - \frac{2a}{a + bx} + \frac{a^2}{(a + bx)^2} \right) dx \\ &= \frac{\pi}{4b^2} \left(h - \frac{2a}{b} \log \left(\frac{a + bh}{a} \right) + \frac{ah}{a + bh} \right) \end{aligned}$$

上式は単木の幹材積 v が樹高 $h(t)$ 、すなわち林齢 t の関数となることを意味する。

また[13]式を樹高 h で微分すると次式となった。

$$[14] \quad \frac{dv}{dh} = \frac{\pi h^2}{4(a+bh)^2}$$

上式と[8]式の林齢 t による微分によって幹材積連年成長量は次式で表された。

$$[15] \quad \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{dv}{dh} \frac{dh}{dt} \\ &= \frac{\pi h^2}{4(a+bh)^2} \frac{dh}{dt} \end{aligned}$$

2.2.4 林分の幹材積

林分の幹材積連年成長量 dV/dt は単木とは異なり本数密度 n の変化があると考えられるので一般には次式となる。

$$[16] \quad \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V(h)}{\partial h} \frac{dh(t)}{dt} + \frac{\partial V(n)}{\partial n} \frac{dn(t)}{dt}$$

ここで立木本数 n のある時点における林分の幹材積連年成長量を単木の幹材積連年成長量の合計として求めると次式となる。この式を上式と比較すると、次式は本数密度 n を定数としたことにより上式右辺の第2項が0となる場合に相当する。

$$[17] \quad \begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \int_0^n \frac{dv}{dt} di \\ &= \frac{\pi h^2}{4} \frac{dh}{dt} \int_0^n \frac{1}{k_0^2} di \\ &= \frac{\pi h^2}{4} \frac{dh}{dt} \int_0^n \frac{n^2}{(k_{\min} n + i(k_{\max} - k_{\min}))^2} di \\ &= \frac{\pi h^2 n^2}{4(k_{\max} - k_{\min})^2} \frac{dh}{dt} \int_0^n \frac{1}{\left(\frac{k_{\min} n}{k_{\max} - k_{\min}} + i\right)^2} di \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\pi h^2 n^2}{4(k_{\max} - k_{\min})^2} \frac{dh}{dt} \left[-\frac{1}{\frac{k_{\min} n}{k_{\max} - k_{\min}} + i} \right]_0^n \\
&= \frac{\pi h^2 n^2}{4(k_{\max} - k_{\min})^2} \frac{dh}{dt} \left(\frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_{\min} n} - \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_{\min} n + (k_{\max} - k_{\min}) n} \right) \\
&= \frac{\pi h^2 n}{4(k_{\max} - k_{\min})} \frac{dh}{dt} \left(\frac{1}{k_{\min}} - \frac{1}{k_{\max}} \right) \\
&= \frac{\pi h^2 n}{4k_{\max} k_{\min}} \frac{dh}{dt}
\end{aligned}$$

ただしnは林齢tによらず一定

更にある林齢tにおいて残存する立木は形比の係数bが小から順に順位nまでの立木であると考えられるので、林齢tの関数である地際形比 k_0 の最小値 k_{\min} と最大値 k_{\max} を算出しながら上式によって現存本数n本分の過去の幹材積 $dV(\tau)/d\tau$ を累加すると林齢tにおける林分の幹材積 $V(t)$ が得られると考えられた。

$$[18] \quad V(t) = \sum_{\tau=1}^t dV(\tau)/d\tau$$

2.2.5 最多密度

形比の係数bについて最大値 b_{\max} 、最小値 b_{\min} として、[11]式に $k(i) = a + b * h$ を代入して次式とした。

$$[19] \quad k(i) = a + h \left(\frac{(b_{\max} - b_{\min})i}{n} + b_{\min} \right)$$

また形比の係数bが立木について一定という仮定2と形比の係数bが一定の範囲で一様に分布するという仮定4から、林齢tによらず $(b_{\max} - b_{\min})/n$ は定数になると考えられた。更に地際形比 $k(i)$ が上限の地際形比 k_u となったときの本数の順位iが最多の本数密度 n_u となるので、上式をiについて解いた結果を最多密度 n_u とおくと次式となった。

$$[20] \quad n_u = \frac{n}{b_{\max} - b_{\min}} \left(\frac{k_u - a}{h} - b_{\min} \right)$$

2.3 現実とモデルとの対応

2.3.1 概況

モデル林分で仮定した定数と主要数値の材料林分の現況に対応する値を次とした。

$$a=40, b \geq 1, hu=26.7\text{m}, j=0.0015\text{m}/\text{年}^2, k_{1.2\text{max}}=100, \\ n=1, 250\text{本}/\text{ha}, t=66\text{年}, tu=133\text{年}$$

また樹齡 t を[8]式に代入して樹高 h を算出し、胸高形比 $k_{1.2}$ における上限を100として樹高 h のうち梢端から胸高位置までの距離 $(h-1.2)\text{m}$ を[10]式に代入して次の値が得られた。

$$b \leq 3.2, h(66) \doteq 20\text{m}$$

また形比の係数 b の最小値と最大値 $b \doteq (1, 3.2)$ に対応する値として[12]式から地際直径 d_0 、[9]式から地際形比 k_0 、[20]式から最多密度 nu を求め、最大の地際形比を上限の地際形比とみなすと次のようになった。

$$d_0 \doteq (33, 19)\text{cm}, k_0 \doteq (60, 104), ku \doteq 104, nu=1, 250\text{本}/\text{ha}$$

2.3.2 幹材積

形比の係数 b の最小値と最大値 $b \doteq (1, 3.2)$ に対応する単木の幹材積 v と幹材積連年成長量 dv/dt は、[13][15]式から次のように求められた。

$$v \doteq (0.70, 0.29)\text{m}^3, dv/dt \doteq (0.0176, 0.0059)\text{m}^3/\text{年}$$

林分の幹材積連年成長量 dV/dt は[17]式から林齡 $t=66$ における値が求められた。

$$dV/dt \doteq 12.7\text{m}^3/\text{年ha}$$

また[19][20]式に林齡 $t=66$ 時点の値 $a=40$ 、 $b_{\text{max}} \doteq 3.2$ 、 $b_{\text{min}}=1$ 、 $n=1$ 、250と上限の形比 $ku \doteq 104$ を代入して順位 i の立木の地際形比 $k(i)$ と最多密度 nu を表す式が次のとおり得られた。

$$[21] \quad k(i) \doteq 40 + h \left(\frac{i}{568} + 1 \right)$$

$$[22] \quad n_u \doteq 568 \left(\frac{64}{h} - 1 \right)$$

更に[21]式とその右辺第2項から形比の係数 b を立木ごとに求め、[13]式によって林齢 $t=66$ における1250本それぞれの材積を合計すると林分材積 V は次となった。

$$V \doteq 562 \text{ m}^3/\text{ha}$$

一方同じ値を66年時点の本数密度 $n=1$ 、250一定として、各林齢 t における最大の地際形比 k_{\max} を[21]式によって算出し、1年ごとに樹高の値とともに[17]式に代入して[18]式のとおり66年分合計して求めると林分の幹材積 $V \doteq 570 \text{ m}^3/\text{ha}$ となって若干の誤差が生じた。また[22]式により算出した各年の最多密度 nu を次式のとおり [17]式に代入し 66年分合計すると次式の値となった。これは最多密度が保たれた場合における既に消失した間伐木や枯死木の材積を含む総成長量に当たると考えられた。これは既に算出された林分の幹材積連年成長量 $dV/dt=12.7 \text{ m}^3/\text{年ha}$ の66年間分合計にほぼ対応した。

$$\sum_{t=1}^{66} dV/dt \doteq 836 \text{ m}^3/\text{ha}$$

更に広島県において一般的な植栽密度 $n=3$ 、000から始めて同様に66年分合計すると幹材積 $V \doteq 767 \text{ m}^3/\text{ha}$ となった。なお、最大樹高となる林齢 $t=133$ 時点の[22]式による本数密度 n は794本/haであった。

図3.4にはこの計算過程におけるモデル林分の幹材積連年成長量 dV/dt とそれを累加した林分の幹材積 V または消失立木を含む幹材積総成長量 $\Sigma dV/dt$ の推移を示した。

以上、モデル林分について算出された林齢 $t=66$ における林分に現存する幹材積は $562 \text{ m}^3/\text{ha}$ 、3000本植栽の場合は総成長量 $767 \text{ m}^3/\text{ha}$ 、最多密度が保たれると総成長量 $836 \text{ m}^3/\text{ha}$ となった。モデル林分の幹材積の総成長量は現存材積と比較して最多密度を保つと49%、3000本植栽では36%増加した。更にこのモデル林分についての3値を現実林分の推定値とみなすと、現存材積で10%過少、枯死立木も含めた立木として現存する総成長量について3000本植栽では20%過大、最多密度を保つと31%過大の推定であった。

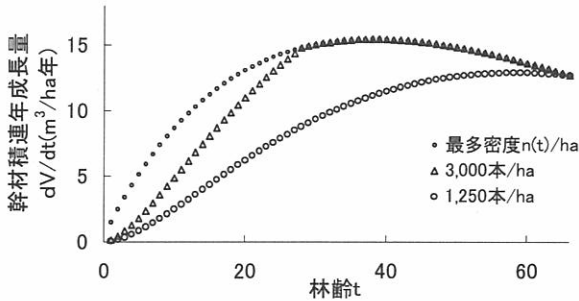


図3.4.1 林分の幹材積連年成長量 dV/dt の推移

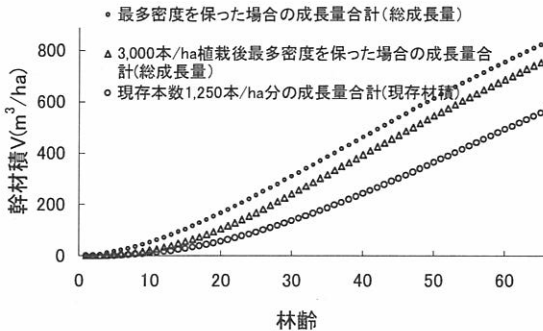


図3.4.2 林分の幹材積成長量合計 ΣV の推移

図3.4 モデル林分の幹材積成長量

2.3.3 成長過程

図3.5に現実林分の標準木とこれに対応するモデル林分の立木、すなわち66年生時点で地際形比 $k_0=82$ となる順位 $i=625$ の立木について幹材積 v と幹材積連年成長量 dv/dt の推移を細い実線で示した。モデル林分の値を現実林分の推定値とみなすと、図3.5.1の幹材積の推移は25年生で16%過小推定、66年生で2%過大推定となるものの図から読み取ると全体としてよく近似されていた。図3.5.2の単木の幹材積連年成長量 dv/dt についてもモデル林分の立木は滑らかに変化した。しかしこれと比較するために図3.5.2に○印で示した現実林分の標準木の幹材積連年成長量は初期には規則的に増加したが、15年生

から変動を始め、20年生以降は $0.007\sim 0.009\text{m}^3/\text{年}$ を中心に毎年大きく変動した。

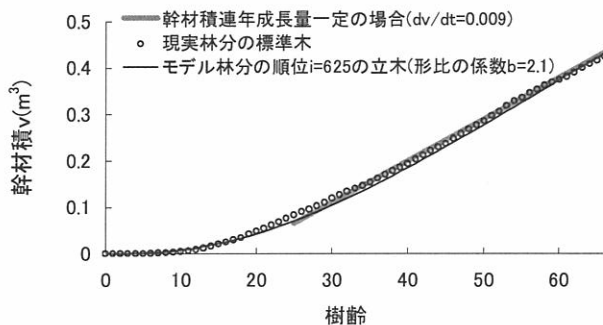


図3.5.1 単木の幹材積の推移

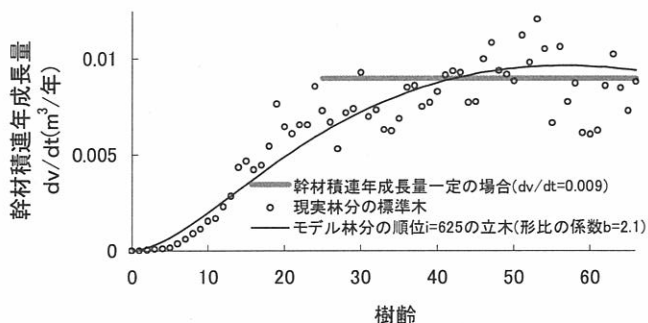


図3.5.1 単木の幹材積連年成長量の推移

図3.5 現実林分標準木と対応するモデル林分の立木の成長量

この変動する連年成長量そのものは近似されていないが、累計された単木の幹材積 v は全体としてよく近似されていた。このことから単木の幹材積連年成長量変動した林齢 $t=15\sim 20$ 以降において安定していたものは確率的な期待値である、すなわち、モデル林分の立木の幹材積連年成長量 dv/dt は現実林分の期待値を表現したと考えることができた。ただし図3.5.2から読み

取ると、このような期待値がよく近似されているかどうかは明らかでなかった。

更に図3.5において林齢の範囲を限定して現実林分の値の分布をみると、部分的には線形で近似することが適当と思われた。例として幹材積連年成長量 dv/dt が $0.009\text{m}^3/\text{年}$ となる場合を図中に太い灰色実線で示すと、林齢 $t=35$ 以降はモデル林分よりも良くあてはまると思われた。

2.3.4 モデル林分の問題点

モデル林分において単木及び林分の幹材積連年成長量は図3.5から読み取ると林齢 $t=66$ 付近では安定していると思われた。その後モデル林分において林齢 t が増加すると、図には示さなかったがいずれも減少し林齢 $t=133$ では0となった。これは図3.1において、あてはまりが良いとおもわれた2次曲線の性質によるものと考えられた。材料とした現実林分からは林齢 $t=67$ 以降に対応する値が得られていないので数値を比較した精度の論議は本論ではできなかった。しかし現実林分において単木の幹材積連年成長量 $dv/dt=0$ とは立木の枯死、消失を意味すると考えられた。植木ほか(1999)の記録によると木曾谷には300年生のヒノキ林が現存し、岩手県には1000年に達したヒノキもあると森澤は報告している。このことから現実林分の立木については、すべてが133年で消失するとは思われないという点が多く現実林分と対照させるという本論で目的とするモデル林分の最大の問題点になると思われた。

なお樹高64mになると仮定2の[9]式によって地際形比 k_0 が増加して全立木が上限の形比 $ku=104$ に達し、[20]式により最多密度が0となってモデル林分の立木すべてが消失することとなるが、この樹高は仮定1における[8]式中の樹高の上限 hu を大きく超えているので現実林分と比較しながら行う林齢 $t=60\sim 130$ までの範囲の検討においては比較的小さな問題であろう。

2.3.5 問題解決の方向

林齢 $t=133$ において全立木が消失するという問題はモデル林分の仮定1[8]式において2次式をあてはめたことに起因し、林齢 $t=130$ 近傍では現実林分を近

似できないと思われた。そこでモデル林分の仮定を修正して、全立木の幹材積連年成長量が林齢 $t=66$ において0となる問題点の解決を試みた。

仮定1の樹高成長曲線を林齢 $t=66$ まで有効とし、これ以降モデル林分の幹材積連年成長量 dV/dt が林齢 $t=66$ 時点と同一になる樹高の連年成長量 dh/dt を[17]式により求めて図3.6に示した。図中に示された細かい実線は仮定1にしたがって林齢 $t=133$ で0となる樹高の連年成長量 dh/dt の推移である。図中の大きい○印はモデル林分の樹高成長にしたがって地際形比 k_0 が高まり、[20]式によって本数密度が低下し、樹高成長が維持された場合である。この場合林齢 $t=133$ で約21cm/年であり、その時点の樹高 $h=33.4$ m、本数密度 $n=519$ 本/haとなった。また林齢 $t=66$ 時点の本数密度 $n=1,250$ 本/haを維持した場合の樹高の連年成長量 dh/dt を小さい○印で示した。この場合林齢 $t=133$ で約11cm/年であり、その時点の樹高 h は29.5mとなった。林齢 $t=66$ 以後67年の間に58%の本数減少がない場合には樹高の連年成長量 dh/dt は約2分の1となった。

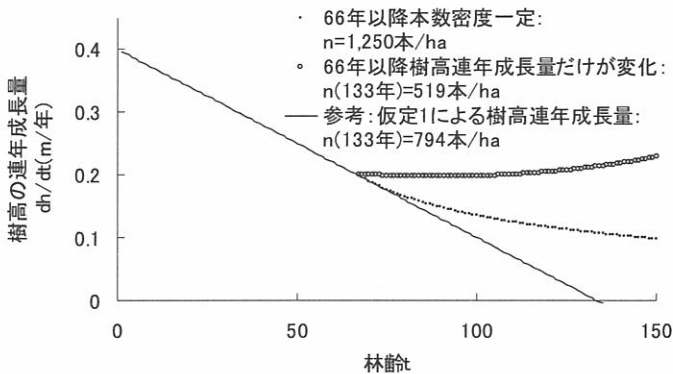


図3.6 モデル林分の幹材積連年成長量 dV/dt 林齢 $t=66$ 以降一定とする樹高の連年成長量 dh/dt

また以上の樹高の連年成長量 dh/dt の変化は主として[17]式によって算出された。この[17]式によると林齢 $t=130$ 以前であれば仮定1以外の修正によってもモデル林分の幹材積連年成長量 dV/dt を林齢 $t=66$ 時点と同一に維持する

ことは可能であろう。[17]式右辺の変数について、地際形比 k_0 の低下、すなわち仮定2に反して形比の係数 b または a が林齢により低下、または仮定3に反して本数密度 n を増加させる方向である。

2.3.6 考察

形比 k という指標を定義し、枯死立木がみられる程長期間高密度で安定して成長した現実林分の毎木調査結果と林分内の標準木の樹幹解析結果を材料に形比 k について線形の変異、変化とばらつきの規則性、そして樹高成長曲線を示した。次にこの規則性に大きくは反しない仮定を置いて樹高成長曲線 $h(t)$ 、幹曲線 $d(l)$ 、単木の幹材積 $v(t)$ とそのばらつき、林分の幹材積 $V(t)$ 、最多密度 $n_u(t)$ を算出することが可能な整然とした林分モデルを作成した。更に材料とした現実林分に対応する値を与えてモデル林分を定めると、林齢 $t=66$ までの現実林分の標準木の幹材積の推移を全体としてよく近似して、現存材積は標準木相当の立木で2%過大、林分では9%過少に推定された。しかしモデル林分には特定時点で全立木が消失するという大きな問題があり高齢林への適用に限界があった。これは問題となった林齢 $t=133$ において樹高の連年成長量 $dh/dt=11\sim 21\text{cm/年}$ が可能であれば回避される。竹内ほか(2003)は高齢のスギについては樹高50mの立木で4~19cm/年の樹高成長が持続したことを確認している。ヒノキ高齢林についても梢端部の折損を考慮のうえ樹高の連年成長量の確認が望まれる。

また形比 k を変形して幹曲線式としたBehre式の適用は井上ほか(2001)によりヒノキに適用されており、形比 k の導入自体は材料林分以外の林分への適用が否定されるものではないと思われた。次に形比 k の係数 b と a が立木について一定であり、地際形比 k_0 が一様分布し地際形比に上限 k_u があるという仮定は、立木の直径による順位の変動がなく細い立木から順に消失するという材料とした林分の成長経過を表現していると考えられた。これは長期間安定した変化が持続したと思われる材料林分から抽出された性質であって、そのままでは間伐により急激に本数減少する林分を表現できないと思われた。特に間伐により本数密度 n を低下させて残存木の肥大、すなわち残存立木につ

いて形比の係数 b の低下や係数 a の変化を生じさせることは困難であると思われた。しかしその影響は[17]式から読み取ると次のように表現可能である。

本数密度 n の低下は直接に林分の幹材積連年成長量 dV/dt を低下させるが、林分の幹材積連年成長量 dV/dt が回復すると残存立木の地際形比 k_0 が低下、すなわち直径の肥大が進み、樹高の連年成長量 dh/dt が増大する場合もある。[17]式による高齡林の試算では本数密度 n が維持されると樹高の連年成長量 dh/dt が低下し、樹高の連年成長量 dh/dt がほぼ維持されると本数密度 n が低下するという関係が示され、両者の量はトレードオフ関係にあった。これから逆に本数密度 n の低下が十分でないために材料林分の林齡 $t=40\sim60$ における樹高の連年成長量 dh/dt の低下が生じたとも考えられた。

このように間伐による林分成長の変化は本論において導いた数式により検討や修正がある程度可能であり、数式の組み合わせと若干の補正を行うことにより近似値を算出することは可能と思われた。現実に関伐施業が行われた林分の成長経過の多数調査を行ってモデル林分との対照を行い、この問題を解決したい。また樹高 h や地際形比 k_0 の変化が小さくなり安定する傾向のある高齡木については、特徴的な樹幹形状や高齡単層林の複層林への変化という本数密度 n が増加する場合を加味するなどモデルの大きな修正が必要になることも考えられる。今後現実林分の調査、解析を進めたい。

更にモデル林分においては現実林分の変動の期待値が現実林分に対応して滑らかに変化したと説明することはできた。しかし現実林分の標準木について幹材積連年成長量は林齡 $t=14$ まで規則的に変化し、以後変動がみられたことは仮定5に反しており、現実林分の成長仮定は1つの規則性を表す数式によるのではなく、幹材積の成長期を初期の安定成長期と毎年大きく変動する変動期に分けるべきであるとも思われた。幹材積連年成長量 dV/dt の源は限界のある空間を占めて光合成による生産が行われる林冠である。このことから個々の立木における幹材積連年成長量 dv/dt の変動は樹冠の損傷によるものと思われた。図5から読み取ると標準木の幹材積連年成長量の期待値は林齡 $t=35$ 以降一定であるという仮定も成り立ち、これによってまた異なる林分モデルが作成できるものと思われた。この本論とは異なる林分モデルの単位面積当たり連年成長量の推移を想定すると、初期に植栽本数分の安定して拡大

する樹冠の生産による安定増加がみられ、林齢 $t=20$ 前後に最大となった後、毎年確率的に損傷を受ける林冠の生産によるやや低水準の量となり、以後林分としては若干の変動がみられ、単木には大きな変動がみられるものとなる。更に地際形比 k_0 が高い立木、すなわち比較的細長い小さな立木にとって相対的に大となる連年成長量の変動は、あるとき下限の0に至り、その立木は枯死して本数密度 n が林齢とともに低下するという変化が現実林分に生じるものと思われた。

このように考えると、林分の限られた樹冠を分け合う立木の本数密度 n を低下させ、単木当たりでは大となった樹冠について残存立木を均等に配置して損傷を防ぎ、立木が将来消失する確率を低下させるという林分全体を扱う施業上の指針が導かれよう。本論で示したモデル林分は単木の樹幹形から林分の幹材積まで明確に数値化することを可能としたので、このような指針を評価し、運用することが容易になると期待したい。今後林齢 $t=20$ 前後に一時的に大きな値をとると予想した林分の幹材積連年成長量や本数密度 n の減少履歴の相違に基づく地際形比 k_0 の差異を織り込んで更にモデルの改良を行うことが、上限を仮定した立木消失の指標、形比 k の示す方向であろう。

謝辞

最後に現地調査に協力いただいた広島県立林業技術センター林業生産部の兵藤博部長、吉岡寿主任研究員、その他お世話になった方々に御礼申し上げます。

引用文献

- 千葉幸弘.2002.樹幹形成過程における密度効果－幹の細りの表現形－.日林講.113:23.
- 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.

- 井上昭夫・黒川泰亨.2001.相対幹曲線式の新しい推定方法 - システム収穫表への応用 -. 日林誌.83(1):1~4.
- 伊藤奈々恵・山本博一・箕輪光博・唐鎌勇・米道学・高德佳絵.2002.照葉樹林における広葉樹の材積表作成及び樹幹解析—東大千葉演習林の旧薪炭林を事例として—. 日林講.113:253.
- 梶原幹弘・梶原規弘.2000.樹冠からみた林木の成長と形質—密度管理と林型による異同—. 森林計画学会出版局.東京.
- 南雲秀次郎・箕輪光博.1990.現代林学講義10測樹学.地球社.東京.
箕輪光博.2000.思想としての森林經理.林業技術.705:2~7.
- 箕輪光博.2002.資本評価三態.森林資源管理と数理モデル—21世紀ニューミレニアムに向けて—(吉本敦、松村直人、近藤洋史).29~39.森林計画学会出版局.東京.
- 箕輪光博.2004.保続性と持続性を考える.林業技術.733:2~7.
- 林野庁計画課.1970.立木幹材積表—西日本編—.319pp.日本林業調査会.東京.
- 竹内郁雄・伊東宏樹.2003.スギ高齢人工林の樹高成長.日林誌.85(2):121~126.
- 植木達人・淡田和宏・金井健介.1999.1998年度森林計画学会夏季セミナー「木曾国有林—施業の多様化に向けて—」.森林計画誌.32:39~42.

