

単木間の競合関係にもとづくトドマツの生長モデル 第2報

直径生長量および樹皮厚の推定

猪 瀬 光 雄⁽¹⁾

Mitsuo INOSE : Tree Growth Model based on the Crown
Competition of Todomatsu (*Abies sachalinensis*) (II)
Estimation of the Diameter Increment and Bark Thickness

要 旨 : 地域における木材供給計画の基となる施業方法別の材種別収穫予想を行うため、単木距離従属モデルに組み込まれる樹幹上の任意の位置における直径生長量、樹皮厚および樹皮量の推定方法を、トドマツについて検討した。

種々の高さまで枝打ちした若齢木と無間伐林の壮齢木の皮内断面積生長量の垂直的配分は、いずれの木についても、枝下高を境として、それぞれ別個の直線で近似できることが認められた。この直線は、前報で述べた樹冠の競合関係から求められる樹冠長率、幹材積生長量、樹幹表面積の関数として表すことができる。このようにして求めた断面積生長量配分直線は、枝打ちを行った若齢木と壮齢木では差が認められるが、生育地の異なる壮齢木間には差はなかった。この結果から、若齢木と壮齢木別の推定式を用いて求めた各断面高における断面積生長量と期首断面積を用いて推定した直径生長量は、地際付近を除いて、良好な適合を示した。さらに、樹皮断面積の垂直的配分は、幹材積の対数一次式で求められる樹皮量と樹高に対する梢頭から各断面までの幹長の比の積で表すことができ、梢頭付近を除いて、実測値によく適合することを示した。これらの結果を組み合わせることにより、林木の生育条件による樹冠競合状態から各林木の樹幹形の生長過程を予測可能であることを示す基礎が得られた。

I はじめに

間伐方法の違いに応じた材種別収穫量を予測する目的で、単木距離従属モデル (Distance dependent model)⁽⁴⁾ による検討を進めている。前報⁽¹⁾⁽²⁾ では、立木配置を基にして、樹冠の競合関係を数量化した。その結果、単木の幹材積生長量は、隣接木との樹冠競合によって決まる樹冠の大きさから推定できることがわかった。

本報では、この幹材積生長量の垂直的配分状態を分析することによって、単木の細り形成過程のモデル化を行い、利用可能量の推定のための基礎的な検討を行った。

また、上記は樹皮を含まない部分の生長量であるから、立木の測定で得られる皮付き材積や皮付きの細り状態と関係づけるには、樹皮量および垂直的な樹皮の厚さを知る必要があるため、これらについての推定方法を考えた。

幹の肥大生長は同化生産物が幹の各部に分配された結果であり、この配分傾向については、尾中⁽⁶⁾、斉藤ら⁽⁷⁾、篠崎ら⁽⁸⁾ が枝の着生状態および着葉量と関連づけて定性的な説明を与えている。本報では、これらの知見を参考にしながら、量的な側面について分析した。

ここでは、5種類の枝打ち処理を行ったトドマツ幼齢木および無間伐林分の壮齢木の樹幹解析資料か

Table 1. 測定資料の概要
Outlines of materials.

資料番号 Sample No.	調査場所 Locations of stand	樹齢 Tree age	資料木 本数 Number of Sample tree	調査項目 Measured item
1	定山溪 営林署 篠舞 Jozankei district forest office Misumai	15	60	<p>昭和 41 年植栽のトドマツ人工林。昭和 52 年 8 月末に、180 本の植栽木について、次のように強さをかえて、5 通りの枝打ちを行った。本数は各処理 30 本 (Fig. 1 参照)。</p> <p>A : 1, 2 齢階の枝を残し, 他の枝をすべて切除。 B : 1~3 齢階の枝を残し, 他の枝をすべて切除。 C : 1~4 齢階の枝を残し, 他の枝をすべて切除。 D : 1~5 齢階の枝を残し, 他の枝をすべて切除。 E : 南側の枝を残し, 北側の枝をすべて切除。 F : 無処理</p> <p>処理後 4 年を経過した昭和 56 年 8 月末に、処理ごとに 10 本の樹幹解析木を無作為に選定した。伐倒後、枝下高、樹高および可能な限りの過去樹高を測定し、断面高 50cm ごとに円板を採取した。</p> <p>Artificial forest, reforested in the 41th year of Shōwa. In this stand, we carried out the pruning about 180 numbers of trees, classified by five types of treatment at the end of August of the 52th year of Shōwa. Numbers of sample trees are 30 respectively (See Fig. 1).</p> <p>A : Except 1, 2 years branches from top, all of the trees were pruned. B : Except 1~3 years branches from top, all of the trees were pruned. C : Except 1~4 years branches from top, all of the trees were pruned. D : Except 1~5 years branches from top, all of the trees were pruned. E : Except branches of the south side, all of the trees were pruned. F : No pruning.</p> <p>Four years after the pruning, at the end of August of the 56th year of Shōwa, ten samples of trees which were selected at random, in each types of treatment were felled. After the felling, disks were cut off every 50cm of sectional height, then clear length and the past growth of tree height were measured as possible.</p>
2	遠軽 営林署 遠軽 Engaru district forest office Engaru	37	30	<p>昭和 8 年に、ha 当たり 3000 本植栽のトドマツ人工林で、過去に下刈り、除伐が実行された。この林から、3 本に 1 本の抽出間隔で、30 本を伐倒し、樹幹解析に供した。なお、枝下高および可能な限りの過去樹高を測定した。</p> <p>Artificial forest, 3000 numbers of trees per hectare were planted in the 8th year of Shōwa. Brush cutting and cleaning cutting were carried in the past. In this forest, 30 members of sample trees which were selected at every three count were felled. After the felling, disks were cut off according to the traditional stem analysis method, then clear length and past growth of tree height were measured as possible.</p>

Table 1. (つづき) (Continued)

資料番号 Sample No.	調査場所 Locations of stand	樹齢 Tree age	資料木 本数 Number of Sample tree	調 査 項 目 Measured item
3	定山溪 宮林署 常盤 Jozankei district forest office Tokiwa	44	30	昭和2年に、ha当たり3000本植栽のトドマツ人工林で、過去に下刈り、除伐が実行された。 伐採および測定方法は資料番号2と同じ。 Artificial forest, 3000 numbers of trees per hectare were planted in the 2th year of Shōwa. Brush cutting and cleaning cutting were carried out in the past. Method of the felling and measurement are the same as Sample No. 2.
4	岩見沢 宮林署 利根別 Iwami- zawa district forest office Tonebetsu	29	30	昭和16年に、ha当たり2500本植栽のトドマツ人工林で、過去に下刈り、除伐が実行された。 伐採および測定方法は資料番号2と同じ。 Artificial forest, 2500 numbers of trees per hectare were planted in the 16th year of Shōwa. Brush cutting and cleaning cutting were carried out in the past. Method of the felling and measurement are the same as Sample No. 2.
5	道内各地 Various part of the Hokkaido	32~54	135	造林木、伐倒し、樹幹解析に供した。 Planted trees, after the felling, disks were cut off according to the traditional stem analysis method.

ら、樹冠長率と幹材積生長量および過去の樹幹の大きさをもとにした任意断面高の直径生長量の推定モデルを考えた。

また、トドマツの樹皮厚については松井ら⁹⁾の報告があるが、ここでは、樹皮断面積の垂直的配分傾向を三角形で近似し、任意の高さの樹皮厚および樹皮断面積の大きさを決める樹皮量の推定方法を提示する。なお、本報の一部はすでに発表⁹⁾している。

II 資料と測定方法

使用した資料は、定山溪宮林署管内藤舞で枝打ち処理をした幼齢林の樹幹解析木、遠軽、定山溪、岩見沢宮林管内の壮齢林で、3本に1本ずつの抽出間隔で単木的に伐倒した樹幹解析木および道内各地で伐倒した樹幹解析木の資料を利用したが、詳細は Table 1 に示すとおりである。

III 結果と考察

1. 断面積生長量の垂直的配分

幹材積生長量は光合成生産物が幹上に配分された結果であり、これは、地際から梢端までの断面積生長量の積算値で、その配分傾向は具体的には地上高別の断面積生長量の変化として示される。そこで、枝打ち処理木および壮齢木について、断面積生長量の垂直的配分傾向を調べた。

1) 枝打ち処理木

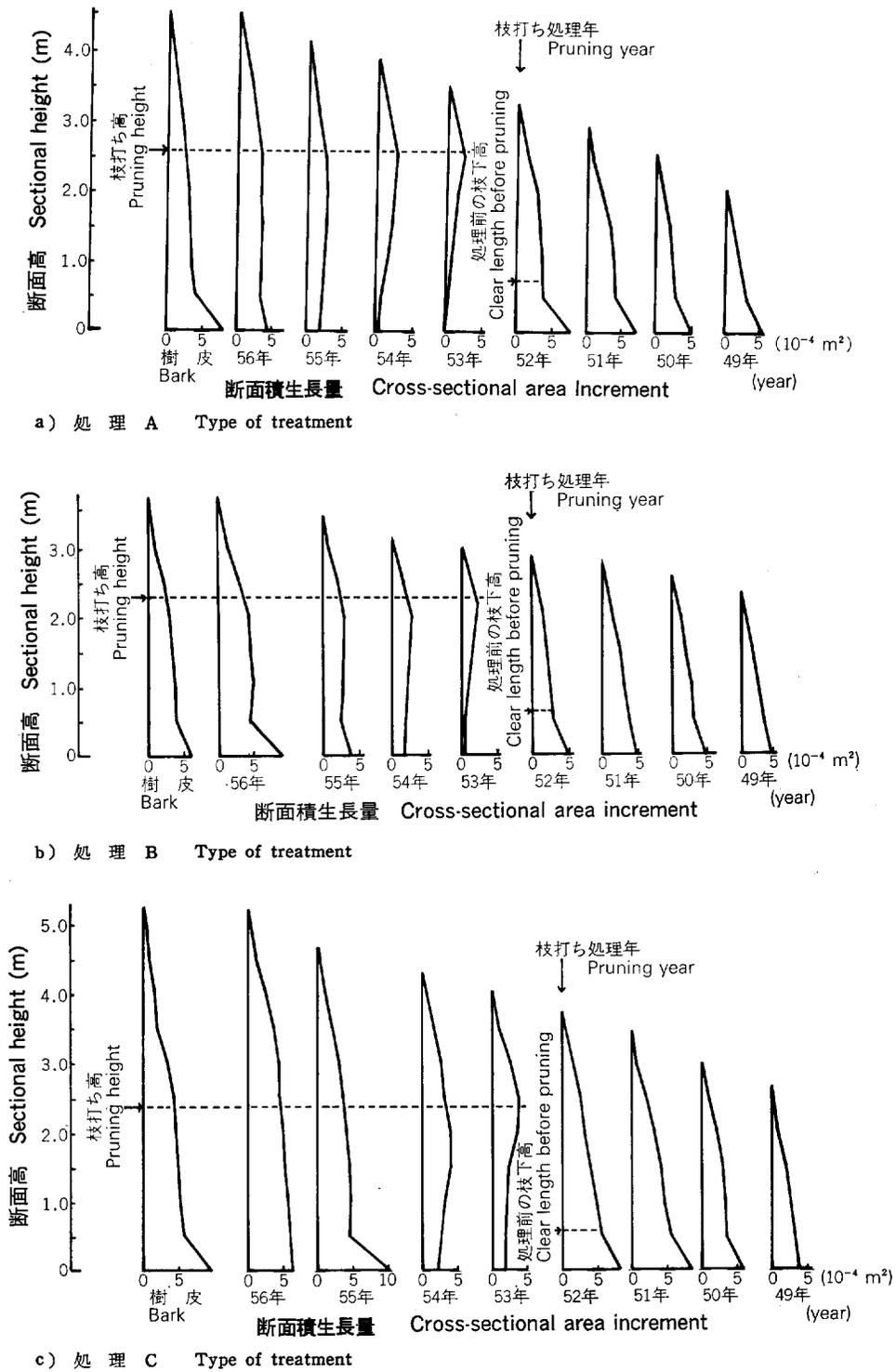
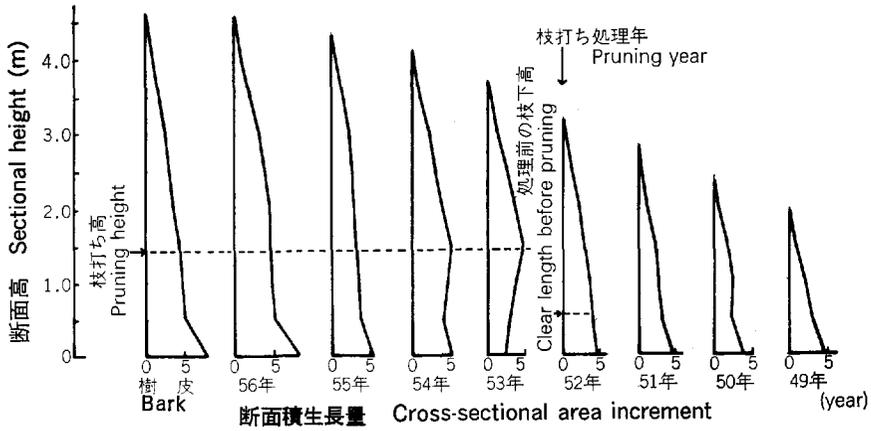
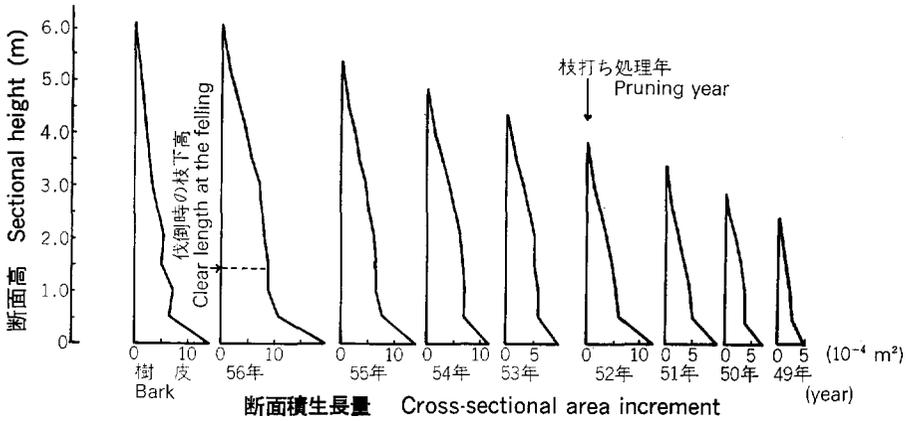


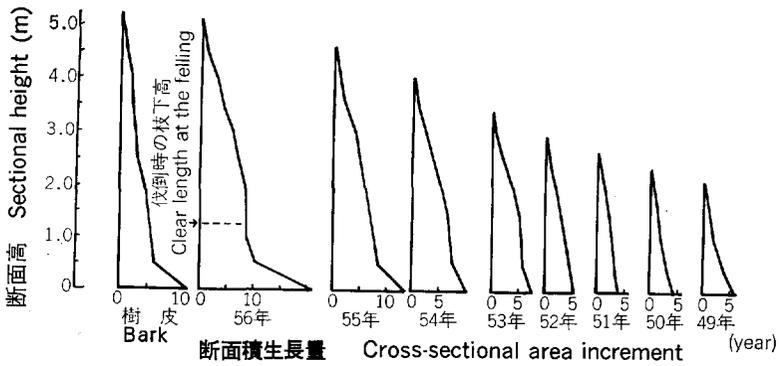
Fig. 1. 断面積生長量の垂直分布の変化
Annual transition of the distribution of cross-sectional area increment.



d) 処理 D Type of treatment



e) 処理 E Type of treatment



f) 処理 F Type of treatment

Fig. 1. (つづき) (Continued)

Fig. 1 は資料番号 1 の枝打ち処理木について、断面積生長量の毎年の配分傾向を示したものである。

a) は、処理 A の一例で、昭和 49 年から伐倒した昭和 56 年（樹齢 15 年生）までの変化である。52 年（11 年生）までの生長量は下部ほど多いが、枝打ち処理の翌年（12 年生）は枝下高の付近を境に分布傾向が変化し、この下部では下になるほど少なく、基部ではゼロである。年数の経過とともに、枝下高から下の断面積生長量は徐々に回復するが、しかし、分布傾向が変化する位置の高さは変わらない。b) は、処理 B の場合で、a) と同様に、52 年までの生長量は下部ほど多いが、枝打ち処理の翌年は、枝下高付近から下になるほど配分が減少している。しかし、4 年後の 56 年では、枝下高付近から下の配分が、根元部分を除いて、ほぼ同量になっている。c) は、上から 4 階級の枝を残した処理 C の場合で、やはり、枝打ち処理翌年の生長量の配分は、枝下高付近を境にして、その下側で漸減している。しかし、処理の 3 年後の 55 年には、枝下高から下の配分量が同程度になっている。そして、伐倒した 56 年には下部ほど多い配分に戻っている。d) は、処理 D の場合で、枝打ち処理翌年の生長量の配分は、これまでの処理と同様であるが、処理 3 年後の 55 年には、下部ほど多い配分に回復している。e) は、北側半分の枝を切除した処理 E の例で、この場合には、処理の翌年以後の断面積生長量が量的には減少するが、枝打ち処理前と同様に下部ほど配分が大きい。f) は、無処理 F の場合で、49 年から 56 年まで、断面積生長量は一貫して下部ほど多い傾向を示している。

このように、ある高さ以下の枝をすべて切除した場合、断面積生長量の垂直的分布は残された最下端の枝の着生位置、すなわち枝下高を境に変化する。そこで、処理 A~D のデータを含みにして、図上で読みとった配分の変化する点の高さを枝下高に対してプロットすると、Fig. 2 にみられるように、両者の対応はきわめて良好で、この関係は原点を通る傾き 1 の直線で表せる。さらに、樹幹上の断面積生長量の分布が、幹の根元部分を除くと、枝下高の上部と下部で、それぞれ直線で近似できることが認められる。

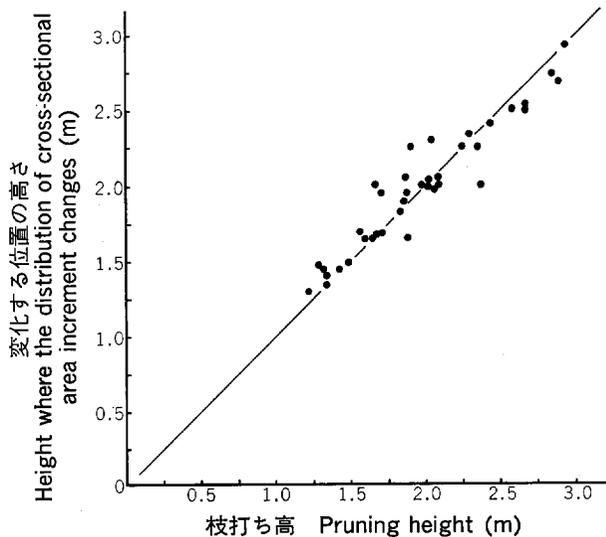


Fig. 2. 枝打ち高と断面積生長量の分布の変化する位置の高さとの関係 ($r=0.95$)

Relationship between the clear length and the height where the distribution of cross-sectional area increment changes.

2) 壮齡木の断面積生長量の垂直的配分

Fig. 3 a)~c) は、資料番号2の37年生の無間伐林分の伐倒木データのうち、代表的な壮齡木について、33~37年生までの毎年の断面積生長量の垂直的配分をプロットしたものである。

a) は、林内優勢木の例で、各年とも下部ほど配分が多くなる傾向を示している。b) は、林内の平均的な木の場合で、各年とも枝下高から下の配分量はほぼ等しい。c) は、隣接木から被圧されている劣勢木の場合で、断面積生長量の配分は、枝下高から下に向かって直線的に減少し、37年生の伐倒時には地際

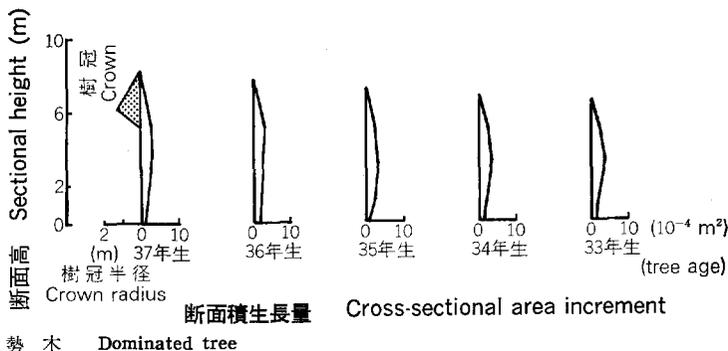
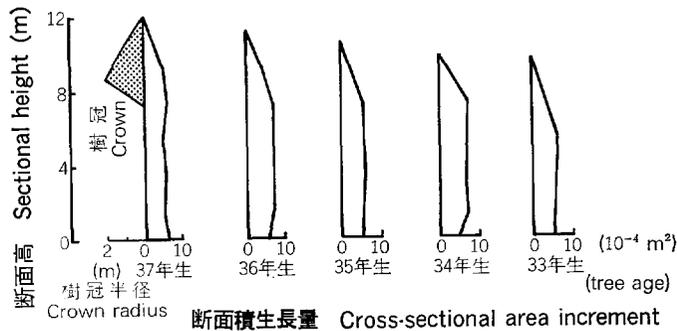
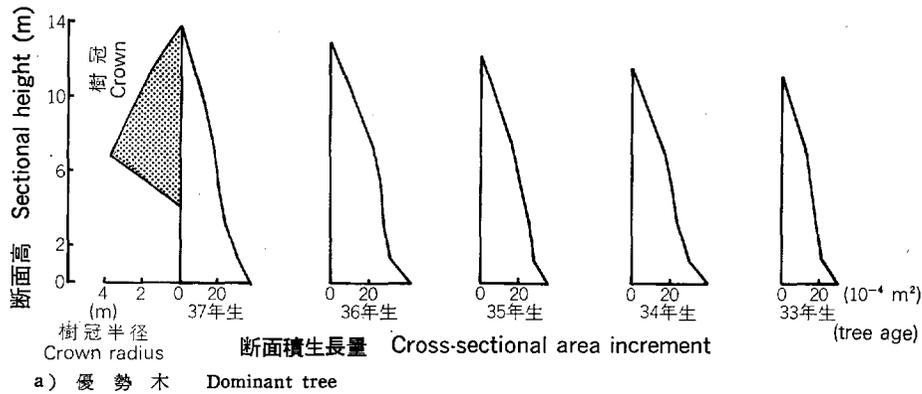


Fig. 3. 優劣の差異による林内木の断面積生長量の垂直分布の変化 (遠軽)
Annual transition of cross-sectional area increment according to the crown class in the artificial forest (Engaru).

での配分がゼロに近い値になっている。これらのことは、他のサンプル木についても、優劣に応じて同様の傾向をとることが認められた。

前報¹⁾²⁾で、樹冠容積が材積生長量と密接な関係があることを示したが、以上の結果は、隣接木との競合によって決まる樹冠の着生高とその上部の樹冠容積の大きさが、樹幹上の断面積生長量の垂直的な分布にも影響することを示している。そこで、断面積生長量の配分が、枝下高の上と下で、それぞれ直線で近似できると仮定すると、断面高別の断面積生長量の推定モデルが、次のようにして導ける。

2. 断面高別断面積生長量の推定

さきの仮定から、樹幹上の断面積生長量の分布は、Fig. 4 a) に示すように、枝下高 R を境にして、その上部では直線 AP 、下部では PQ で表される。また、特別の場合として、樹冠が地際まで十分に発達した孤立木では、枝下高をゼロとすることによって、分布は直線 \overline{AB} で与えられることになる。ここで、 \overline{OA} 、 \overline{OR} の長さは、それぞれ樹高 h および枝下高 h_B に対応する。したがって、斜線部分 $APQO$ の面積は、枝下高が h_B のときの幹材積生長量 Δv に等しく、また、その場合の幹基部の断面積生長量は、線分 \overline{OQ} の長さ g_x で与えられる。

ここで、実際の断面積生長量の分布データから直線 AP 、 PQ および g_x を求める計算手順は、次のとおりである。

Fig. 4 a) で、直線 \overline{AP} および \overline{PQ} を最小二乗法によって求めるため、a) 図を c) 図のように座標変

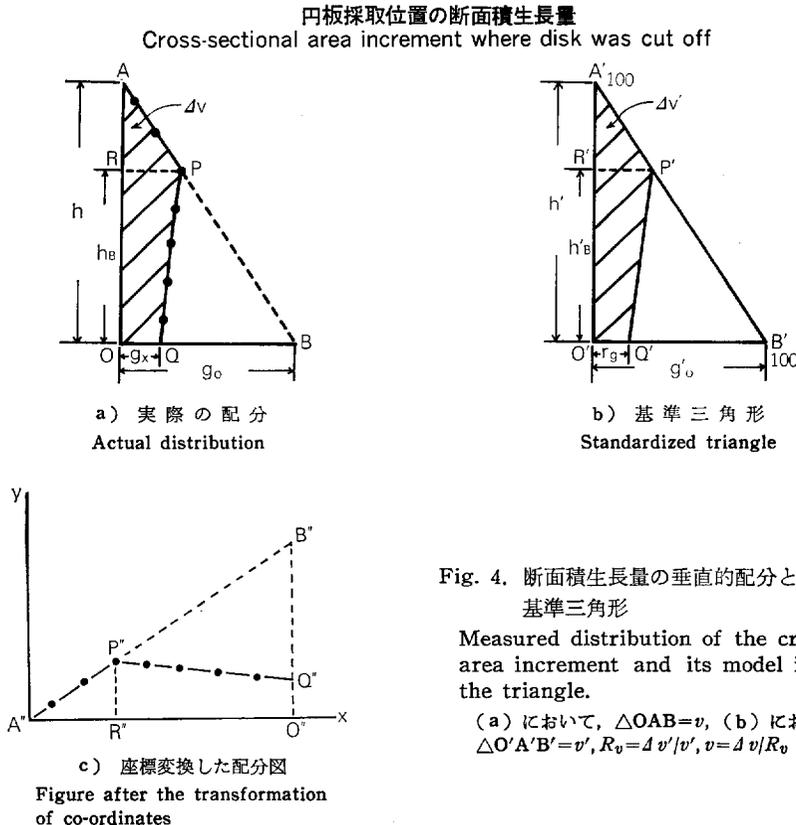


Fig. 4. 断面積生長量の垂直的配分とその基準三角形

Measured distribution of the cross-sectional area increment and its model indicated by the triangle.

(a) において、 $\triangle OAB = v$, (b) において $\triangle O'A'B' = v'$, $R_0 = \Delta v' / v'$, $v = \Delta v / R_0$

換する。これは、各測定値の断面高から樹高を差し引いたあと、反時計まわりに90°回転させたものである。この回転は次式による。

$$A_x = X \cos(A) - Y \sin(A) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$A_y = X \sin(A) + Y \cos(A) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 A_x, A_y : 座標変換後の各点の X, Y 座標, X, Y : 変換前の座標, また、 $A = (\pi/180) \times 90^\circ$ である。

次に、変換後のデータについて、c) 図で、 x 座標が R'' より小さい測定値は原点 A'' を通る最小二乗法で、また、 R'' より大きい測定値は通常の最小二乗法で、次式の係数を決定する。

$$y = bx \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$y = a + bx \quad \dots\dots\dots(4)$$

結局、a) 図の g_x は c) 図で、(4) 式について x に H を代入したときの値であり、直線 $\overline{O''B''}$ は (3) 式で x に H を代入したときの値である。ここで、直線 $\overline{A''P''}$ は Fig. 4 a) の \overline{AP} 、 $\overline{P''Q''}$ は \overline{PQ} に等しい。以上から直線 \overline{AP} 、 \overline{PQ} が決定できる。

次に、断面高とそれに対応する断面積生長量を、それぞれ \overline{OA} および \overline{OB} の長さの百分率で表し、a) 図を基準化すると b) 図が得られる。これを断面積生長量配分の基準三角形と呼ぶことにすると、底辺での基準化された断面積生長量 r_g は、基準三角形の底辺の長さ g_0' に対する比率になる。また、基準化された枝下高 h_B' の位置の断面積生長量 g_1' は、 $(100 - h_B')$ に等しい。したがって、基準三角形の底辺における断面積生長量の配分率 r_g が与えられれば、 h_B' から配分傾向を定める二つの直線 $\overline{A'P'}$ および $\overline{P'Q'}$ が決定できる。これを実際の大きさに復元するには、b) 図で、まず、基準三角形 $O'A'B'$ の面積に対する斜線部分 $A'P'Q'O'$ の面積の比 R_v を求める。次に、実際の材積生長量 Δv をこの値で割ってもとの尺度での三角形 OAB の面積 $v = \Delta v / R_v$ をうる。ついで、底辺の大きさ $g_0 = 2v/h$ から材積生長量の配分三角形 OAB の形状が決定される。すなわち、幹基部の断面積生長量 g_x は、 \overline{OB} の長さ g_0 と基準三角形の底辺における配分率 r_g とによって、

$$g_x = g_0 \cdot r_g / 100$$

と表せる。また、枝下高における断面積生長量 g_1 は、

$$g_1 = g_0(h - h_B) / h$$

となる。したがって、樹冠長率 $(h - h_B) / h$ を r_c とすると、点 P, Q, A, B の座標が、それぞれ $(r_c \cdot r_g, h(1 - r_c))$, $(g_x, 0)$, $(0, h)$ および $(g_0, 0)$ となるので、2直線 \overline{AB} , \overline{PQ} の方程式は、

$$Y = h - \frac{h}{g_0} X \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$Y = \frac{h(1 - r_c)}{g_0(r_c + r_g/100)} X - \frac{(r_g/100) \cdot h \cdot (1 - r_c)}{(r_c - r_g/100)} \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここで、 X は断面高 Y における断面積生長量である。これによって、枝下高から上では (5) 式、下側では (6) 式を X について解くことによって、任意の高さ Y における断面積生長量が推定できる。ただし、特別な場合として、樹冠長率が g_x に等しい場合、つまり、枝下高から下部での配分が同量のとときは、(6) 式のかわりに、次式

$$X = g_x \quad \dots\dots\dots(6')$$

で、枝下高から下の断面積生長量が推定できる。

さて、これまでは基準三角形の底辺の断面積生長量の配分率 r_g を既知としたが、次に、この推定法について考える。

さきに述べた枝打ち処理木および壮齢木の断面積生長量の垂直的配分の状態から、 r_g には、樹冠長率、材積生長量ならびにこの配分の土台になる幹の表面積、樹高、幹材積などの因子が関与しているものと考えられる。ここで、〔材積生長量/幹の皮内表面積〕は幹材生長量が幹の表面に均等に配分されるときに年輪幅に相等するが、実際には均等に配分されず、断面高によってウエイトが変化する。このため、樹幹表面積 1 単位当たりの幹材積生長量の大きさは、断面積生長量の高さ別配分に影響を与えるものと思われる。そこで、樹冠長率、樹高、幹材積、〔断面積生長量/幹の皮内表面積〕、および材積生長量と r_g との関係を、資料番号 1, 2, 3 の各々のデータについて分析した。重回帰分析の結果、いずれの資料においても、樹冠長率および〔材積生長量/皮内の樹幹表面積〕の二つの因子の寄与が高いことがわかった。そこで、この二つを因子とした次のような回帰を資料ごとに求めた。

$$r_g = a_0 + a_1 \cdot c_r + a_2 \cdot (\Delta v/S) \times 100 \quad \dots\dots\dots (7)$$

- ここで、 S : 皮内樹幹表面積 (10^{-4} m^2 , 期首の値)
- Δv : 年当たり材積生長量 (10^{-4} m^3 , 期末の値)
- c_r : 樹冠長率 ($r_c \times 100$, %)
- a_0, a_1, a_2 : 定数

資料番号 1, 2, 3 の各々のデータから求めた係数は、Table 2 のとおりである。資料番号 1 の係数 a_2 は他の 2 者の倍近い値を示している。これは、枝打ち処理の影響によるものと考えられる。資料番号 2 と 3 では各係数とも似通った値を示し、通常の林分に適用するためには、資料番号 2 および 3 を込みにして計算された係数の値が適当と思われる。

3. 任意断面高の直径生長量の推定

前節で任意の高さの断面積生長量の推定モデルを示したが、これから、次のようにして任意断面高の直径生長量が計算できる。

$$\Delta D = D_1 - D_0 = 2\sqrt{(G + \Delta G)/\pi} - D_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

- ここで、 D_0 : 前年の直径 (cm)
- D_1 : 当年の直径 (cm)
- G : 前年の断面積 ($= \pi D_0^2/4$, cm^2)
- ΔG : 断面積生長量 (cm^2)
- ΔD : 直径生長量 (cm)

Table 2. 配分率 r_g の係数
Coefficients of r_g .

資料番号 Sample No.	a_0	a_1	a_2	R
1	-18.041	0.5031	1.8380	0.80
2	-14.999	0.9530	0.8146	0.82
3	-16.944	0.7114	1.0434	0.80
2 + 3	-14.437	0.7513	0.9618	0.81

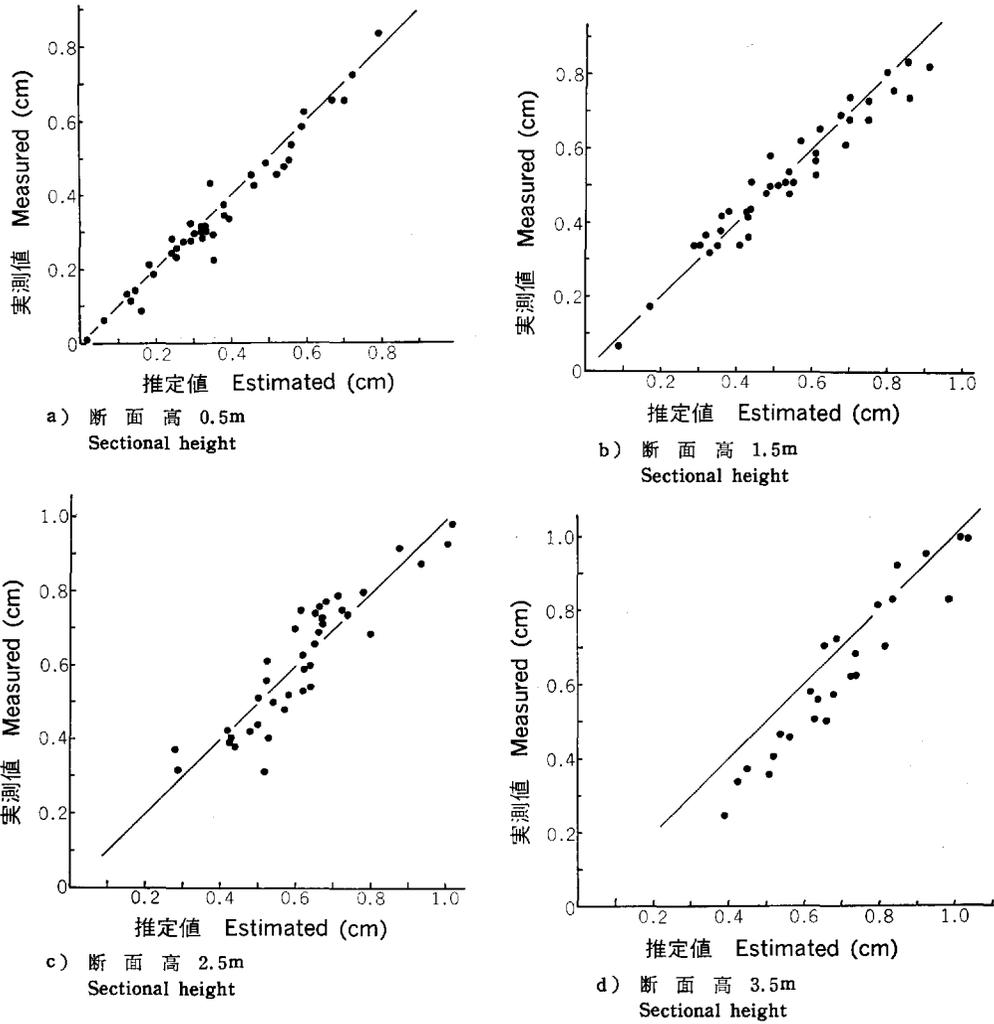


Fig. 5. 断面高別直径生長量の推定値と実測値の関係 (枝打ち処理木)
Relationship between estimated and measured value of diameter
in each sectional height (Pruning tree).

Table 3. 樹齢および断面高別相関係数
Coefficient of correlations in each sectional height and tree age.

		断面高 Sectional height							
		0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
樹 齢 Tree age	12 年	0.91	0.94	0.96	0.96	0.89	0.92	0.86	0.89
	13 年	0.88	0.98	0.97	0.97	0.85	0.90	0.80	0.95
	14 年	0.87	0.94	0.96	0.94	0.92	0.88	0.78	0.79
	15 年	0.83	0.95	0.97	0.96	0.90	0.85	0.80	0.84

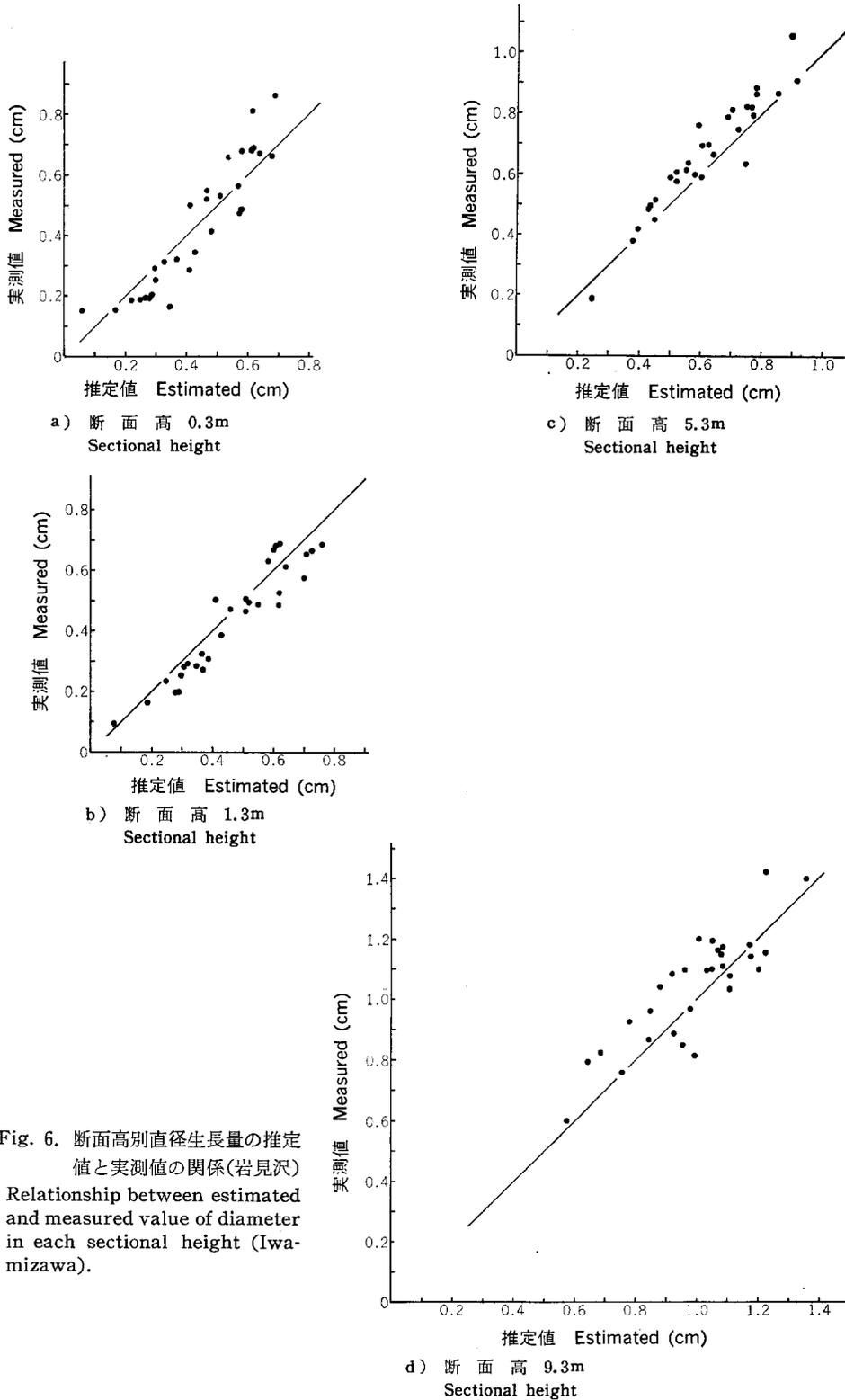


Fig. 6. 断面高別直径生長量の推定値と実測値の關係(岩見沢)
Relationship between estimated and measured value of diameter in each sectional height (Iwamizawa).

前節までの方法を用いて、枝打ち処理木および壮齢木について、断面高別直径生長量を推定し、実測値と対比した。

Fig. 5 は、枝打ち処理 A~D を適用した 40 本の資料木について、処理 2 年後の直径生長量を断面高別に推定したものである。ここでは、断面高 0.5, 1.5, 2.5 および 3.5m の 4 例を示した。

a) は、断面高 0.5m の直径生長量の推定値と実測値の関係で、偏り、変動ともに少ない ($r=0.98$)。b) は、地上 1.5m の高さの推定で、a) と同様、偏り、変動ともにわずかである ($r=0.97$)。c) は、地上 2.5m の高さの場合で、変動がやや増加するものの、偏りは少ない ($r=0.90$)。d) は、地上 3.5m の梢端近くの場合で、幾分偏りが生じているものの適合はよい ($r=0.95$)。なお、その他の年における推定結果の相関係数を Table 3 に示した。

以上は、枝打ち処理木の場合であるが、次に資料番号 2 および 3 のデータを込みにして求めた r_g の値 (Table 2) を利用して、資料番号 4 の岩見沢のデータ 30 本 (伐倒時 29 年生) について、推定値と実測値を対応させたのが Fig. 6 である。ここでは、四つの断面高について示した。

a) は、断面高 0.3m の高さにおける場合で、直径生長量が大きくなるにしたがい、過少推定の傾向をとるが、これは、Fig. 7 a) に示されるように、根張りの影響が考えられる。b) は、1.3m つまり、胸高位置での推定であるが、やや大きめになっている。これは、枝下高から下の断面積生長量の配分傾向が完全な直線ではなく、Fig. 7 b) に示すように、資料のなかに配分傾向が内側に弯曲するものがあるためである。c) は、断面高 5.3m の高さの場合で、やや小さめの推定であるが、変動は少ない ($r=0.94$)。d) は、地上 9.3m の高さの場合で、変動は増加するが、偏りは少ない。

以上、枝打ち処理木および壮齢木について、直径生長量の推定を行ったが、高さの部位によって、幾分偏りの生じる場合があるが、実測値と推定値の相関係数は 0.8~0.98 の範囲にあり、適合は良好と認められた。

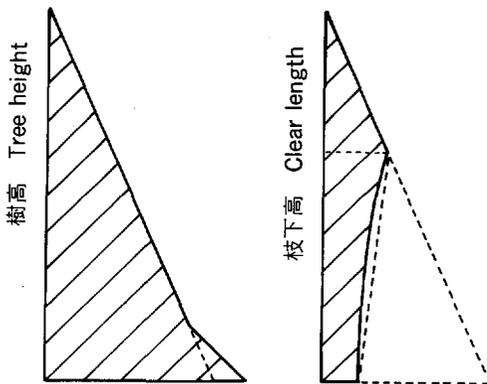


Fig. 7. 断面積生長量の配分例
Example of the distribution of cross-sectional area increment (Schematic).

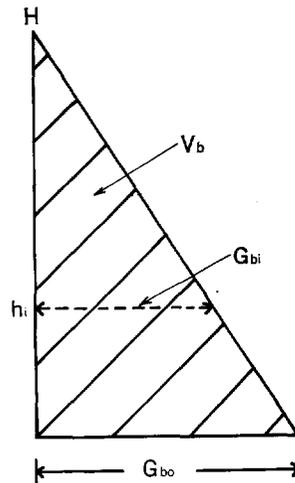


Fig. 8. 樹皮断面積の垂直的配分モデル
Schematic of the vertical distribution of bark thickness.

4. 樹皮厚および樹皮量の推定

1) 樹皮断面積の垂直的配分

前節では、皮内断面積生長量の縦断的配分が、樹冠長率および〔材積生長量/皮内樹幹表面積〕に影響されることを示したが、樹皮断面積の垂直的配分の場合は、これらの因子に影響されず、その配分傾向は、根張り部分を除くと、孤立木であるか林内優勢木、劣勢木であるかに関係なく、ほぼ三角形状であることが認められる。

樹皮断面積の垂直的配分を三角形 (Fig. 8) と仮定し、単木の樹皮量 Vb を既知としたとき、この三角形の底辺の大きさ Gb_0 (10^{-4} m^2) は、樹高を H (m) としたとき、

$$Gb_0 = 20,000 Vb/H$$

となり、任意の高さ h_i の断面積 Gb_i は、

$$Gb_i = Gb_0 \cdot (H - h_i)/H$$

となる。

そこで、資料番号5の樹幹解析木データから得られた樹皮量の実測値から、上式で断面高別樹皮断面積を算出し、この値と実測値を比較した。なお、樹高の相対的な位置における適合具合をみるために、相対断面高のクラス (樹高の10分の1の部位の高さごとにクラス分けした。すなわち、10分の1の部位のクラスは地際から10分の1部位まで、10分の2クラスを10分の1の部位から10分の2の部位まで、というように10クラスに分類する) 別に対応させた。ここでは、 $\frac{2}{10}$ 、 $\frac{5}{10}$ 、 $\frac{8}{10}$ の3クラスの結果のみを示した (Fig. 9)。

a) は、 $\frac{2}{10}$ 部位のクラスでの推定で、偏り、バラツキともに少なく、良好な適合を示している ($r=0.96$)。b) は、幹の中央部 ($\frac{5}{10}$ 部位のクラス) の推定で、a) と同様適合は良好である ($r=0.96$)。c) は、幹の上部 ($\frac{8}{10}$ 部位のクラス) の推定で、偏りはみられないが、変動がやや大きい ($r=0.89$)。

以上、相対高のクラス別に、樹皮断面積の推定値と実測値の関係を検討した結果、相関係数は0.85~0.96の範囲にあり、どの断面高でも偏りが少なく、良好な適合を示した。このことから、樹皮断面積の高さ別配分は三角形で近似できることがわかる。

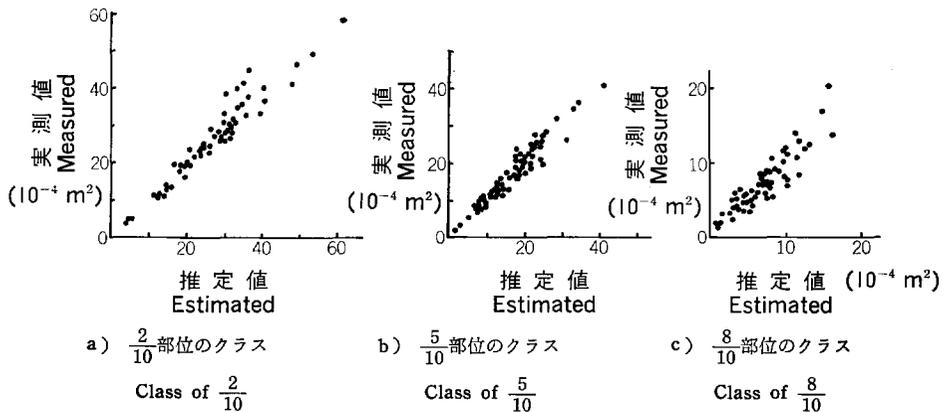


Fig. 9. 相対断面高別樹皮断面積の推定値と実測値の関係
Relationship between estimated and measured value of the sectional area of bark thickness in each sectional height.

2) 樹皮厚の垂直的配分

前節の結果から、樹皮断面積の高さ別配分を三角形とすると、樹皮量 (Vb)、樹高 (H)、任意の高さ (h_i) での皮付き直径 (D_i) を与えた場合の、その高さでの樹皮厚 Db_i は、以下のようにして得られる (Fig. 8)。

$$Gb_i = Gb_0(H - h_i)/H$$

$$G_i = \pi D_i^2/4$$

$$Gx_i = G_i - Gb_i$$

$$Dx_i = 2\sqrt{Gx_i/\pi}$$

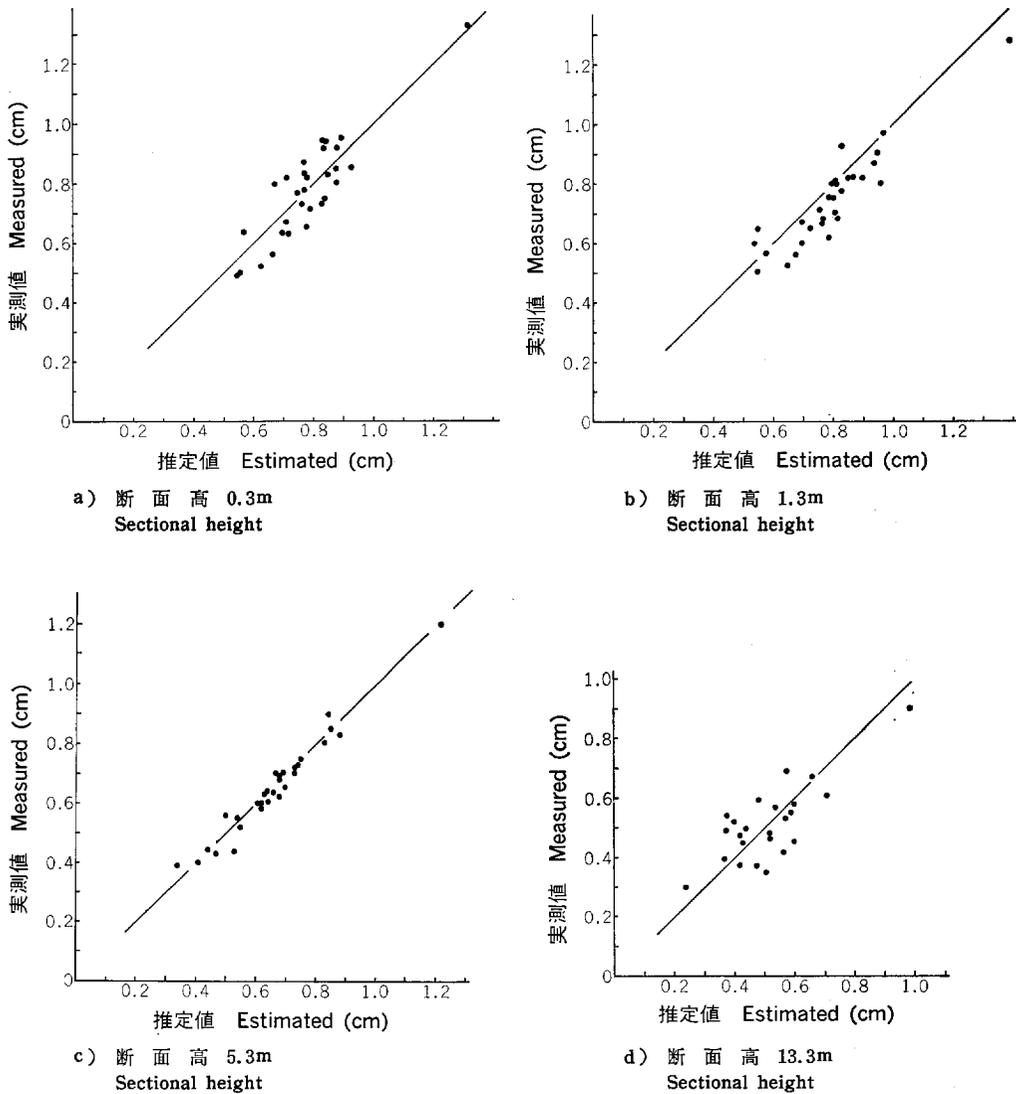


Fig. 10. 断面高別樹皮厚の推定値と実測値の関係 (常盤)
Relationship between estimated and measured value of bark thickness in each sectional height (Tokiwa).

$$Db_i = D_i - Dx_i$$

ここで、 Gb_i : 与えられた高さでの樹皮断面積,

Gx_i : 皮内断面積,

Dx_i : 皮内直径

以上の方法を資料番号3の常盤の樹幹解析木30本についてあてはめ、推定値と実測値との対応をみたのが Fig. 10 である。断面高別に0.3, 1.3, 3.3m, ……と、以後2mごとに推定を行ったが、ここでは、0.3, 1.3, 5.3, 13.3の4例について示してある。

a) は、0.3mの断面高の推定で、偏り、バラツキともに少なく、良好な適合を示している ($r=0.89$)。b) は、胸高位置の場合で、やや小さめな推定であるが、適合はよい ($r=0.91$)。c) は5.3mの断面高での推定で、偏り、変動ともにわずかで、非常によい適合を示している ($r=0.98$)。d) は、断面高13.3mで、先端近くの位置の推定で、変動は増加するが、偏りは少ない ($r=0.75$)。

以上、四つの断面高で、樹皮厚の推定値と実測値との対応を調べた結果、先端部に近づくにしたがい、変動が増加するものの、この方法は皮付きの細りを推定するには十分実用可能であることがわかった。

3) 樹皮量の推定

前節の樹皮厚の推定では、樹皮量を既知としたが、ここで、樹皮量の推定を考え、樹皮断面積および樹皮厚の推定と関連づけることとする。

単木の樹皮量はいろいろな因子に影響されるといわれる。例えば、胸高直径、樹高、樹齡、品種、地位、気候など⁵⁾である。しかし、胸高直径、樹高、皮付き材積、地位指数、樹齡および形状比の六つの因

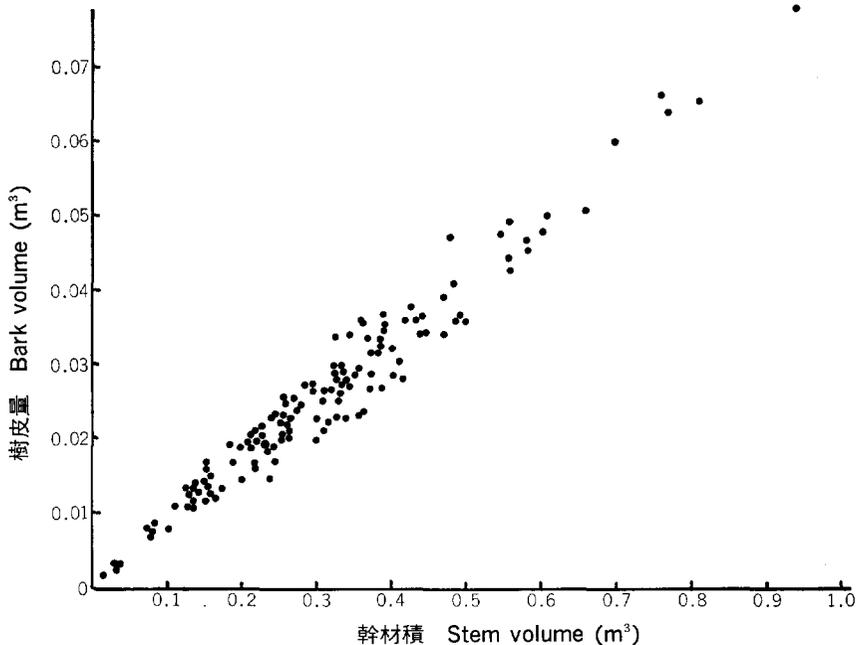


Fig. 11. 幹材積と樹皮量の関係
Relationship between stem and bark volume.

子を取り、樹皮量との関係を分析したところ、皮付き材積 V による寄与が高く、他の因子の寄与はわずかで、樹皮量 Vb が、

$$Vb = 0.07496 V^{0.90477} \quad (r=0.98)$$

と、冪乗式で表現できることがわかった (Fig. 11)。したがって、皮付き材積および皮付き直径から、断面高別の樹皮厚の推定ができる。これによって、皮付き部分を含めた単木の細り状態が推定できることになる。

IV おわりに

定山溪営林署簾舞試験区では、幼齢木の枝の着生高と着葉量を枝打ちで調節する5種類の処理を行い、処理後4年間の直径生長量を分析した。また、遠軽営林署遠軽試験区および、定山溪営林署常盤試験区では、壮齢木を対象として、林内から3本に1本の割合で標本木を系統的に抽出し、各林木の断面積生長量の垂直的配分の違いを調べた。次に、同化生産物の幹への配分傾向を、枝下高を境に、二つの直線傾向で近似し、任意断面高の直径生長量を推定するモデルを考えた。簾舞の枝打ち処理木については、処理2年後の直径生長量を、また、遠軽および定山溪の壮齢木のデータから得られた結果から、岩見沢営林署利根別試験区の29年生時の直径生長量を、前述の計算モデルから推定し、実測値と対応させると、地際近くを除いた断面高では、いずれも良好な適合が得られた。

また、以上の結果は皮内直径の場合であるが、皮付き材積と関連させるため、樹皮断面積の垂直的分布を分析することによって、これを三角形で近似することにより、樹皮厚の推定法を示した。この結果、梢端に近づくにつれて、変動は増加するものの、偏りの少ない良好な推定値が得られた。また、樹皮量は幹材積から推定できることがわかった。

前報¹⁾²⁾ および本報の結果から、①隣接木との樹冠競合→②樹冠の形状と大きさ→③樹冠容積→④幹材積生長量→⑤断面高別直径生長量→⑥断面高別樹皮厚の推定という流れで、単木の生長過程のモデル化が可能ながことが明らかとなった。

なお、直径生長量の推定の際に、樹幹基部近くでは過少な推定を示したが、この偏りは根張りの影響を考慮に入れて修正できるものと思われる。また、モデルのなかの計算式(7)の定数は、本報では、遠軽および定山溪の2林分のデータについて分析し、ほぼ同様の結果を得たが、さらに、データを追加して、係数の一般化をはかる予定である。

なお、末筆ながら、前報³⁾の(3)式における係数 a_0 , a_1 , a_2 の値は、算出方法を改良したため、本報に示した値に訂正したい。

引用文献

- 1) 猪瀬光雄：トドマツの単木生長モデル (I) 枝の生長と樹冠の発達. 日林誌, 63, 410~415, (1981)
- 2) 猪瀬光雄：単木間の競合関係にもとづくトドマツの成長モデル (I) 樹冠の発達と材積成長量. 林試研報, 318, 103~127, (1982)
- 3) 猪瀬光雄：トドマツの単木生長モデル (II) 断面高別直径成長量の推定. 日林誌, 65, 224~228, (1983)
- 4) 木梨謙吉・西沢正久・長 正道：林分シュミレーションに対する生長モデルの研究 (I) モデル設定の概要. 87回日林論, 45~46, (1976)

- 5) 松井善喜・馬場強逸：トドマツ樹皮の測樹学的考察。林試北海道支場年報，69，(1951)
- 6) 尾中文彦：樹木の肥大成長の縦断的配分。京都大演習林報，18，1～52，(1953)
- 7) 斎藤秀樹・四手井綱英・菅 誠：樹幹形についての考察—2，3の幹形の表し方および幹における同化物質の垂直配分についての考え方—。京都大演習林報，40，93～110，(1968)
- 8) SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI, K. & KIRA, T.: A quantitative analysis of plant form—The pipe model theory (I) Basic analysis. Jap. J. Ecol. 14: 97～105, (1964)

**Tree Growth Model based on the Crown Competition of
Todomatsu (*Abies sachalinensis*) (II)**

Estimation of the Diameter Increment and Bark Thickness

MITSUO INOSE⁽¹⁾

Summary

As the diameter growth is formed by the vertical distribution of the product of photosynthesis over the stem, the author analyzed the tendency toward vertical distribution.

In addition to this, the author analyzed the bark thickness over the stem.

As a result, bark thickness over the stem was estimated by the bark volume and the diameter with bark at any height.

In this report, the data of several sample plots of artificial forest are used. The first was in Misumai, where trees were pruned by five types of treatment; The second was in Engaru, where thirty trees were felled, etc. (See Table 1).

Based on the data of the vertical distribution of cross-sectional area increment, the author proposed a diameter growth model for a given sectional height of the tree, based on the crown length rate, stem volume increment and stem size of last year.

1. Vertical distribution of the stem volume increment

Stem volume increment is the summation of the cross-sectional area increment from the root to the tip, and the tendency of its vertical distribution over the stem is shown as the change of cross-sectional area increment at any sectional height. Therefore, the author analyzed the tendency using the stem analysis data of Misumai and Engaru and Tokiwa (See Table 1).

As a result of these analyses, it became clear that there was a strong correlation between clear length and the height, where the vertical distribution of cross-sectional area increment changes, and the tendency of vertical distribution of cross-sectional area increment is divided into two lines which cross each other at the clear length (See Fig. 1-c).

If we make the assumption that the tendency of its distribution is approximated by two straight lines, it is possible to construct the following diameter growth model.

Received December 8, 1984

(1) Hokkaido Branch Station

2. Estimation of cross-sectional area increment at any sectional height.

Under the above assumption, these straight lines of the vertical distribution of cross-sectional area increment are shown as \overline{AP} which represents the under part from the clear length (See Fig. 4). If the clear length is zero, its distribution is represented by line \overline{AB} ; and the cross-sectional area increment at the base of tree is represented by line \overline{OB} .

Here, the length of line \overline{OA} and \overline{OR} are equal to the tree height h and the clear length h_B respectively, and the area of shaded part $APQO$ equals the stem volume increment (ΔV). In this case, the actual sectional area increment at the base of tree is given by the length of line $OQ (=g_x)$.

Next, when we show the sectional height of tree and sectional area increment as the percentage of tree height and size of base OB respectively, the standardized triangle $A'B'O'$ can be determined (See Fig. 4 (b)). In this triangle $A'B'O'$, r_g the cross-sectional area increment in the base of the triangle $A'B'O'$ is a percentage of g_0' which is the length of the base of the triangle $A'B'O'$.

Therefore, if we can estimate the value of r_g , both lines $\overline{A'P'}$ and $\overline{P'R'}$ can be determined.

Then, we can calculate the actual size of the triangle ABO in the following (See Fig. 4).

$$\begin{aligned} Rv &= \Delta V' / V' \\ V &= \Delta V / Rv \\ g_x &= g_0 \cdot r_g / 100 \end{aligned}$$

where, if we define r_c as $(h - h_B)/h$, the co-ordinates of points P, Q, A, B are $(r_c \cdot g_0, h(1 - r_c))$, $(g_x, 0)$, $(0, h)$, $(g_0, 0)$ respectively.

Hence, equations of lines \overline{AB} and \overline{PQ} are,

$$Y = h - (h/g_0)X \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Y = \frac{h(1-r_c)}{g_0(r_c+r_g/100)}X - \frac{(r_c/100) \cdot h \cdot (1-r_c)}{(r_c-r_g/100)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

where, X is cross-sectional area increment at sectional height Y . Then, we can estimate the cross-sectional area increment at any sectional height, using equation (1) which calculates the upper part from the clear length, and (2) which calculated the lower part. In the special case, when the crown length rate $(h' - h'_B)$ equals r_g , we can calculate it using the following equation (2)', instead of (2).

$$X = g_x$$

Now, r_g is given by the following equation.

$$r_g = a_0 + a_1 \cdot c_r + a_2(\Delta v/S) \quad \dots\dots\dots(3)$$

Where, S : Superficial area of stem (10^{-4} m^2)

Δv : Annual stem volume increment (10^{-4} m^3)

c_r : Crown length rate ($r_c \times 100, \%$)

a_0, a_1, a_2 : Constant

3. Estimation of the diameter increment at any sectional height.

We can estimate the diameter increment at any sectional height using the cross-sectional area increment in the following equation.

$$\Delta D = D_1 - D_0 = 2\sqrt{(G + \Delta G/\pi)} - D_0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

where, D_0 : Diameter recorded last year (cm)

D_1 : Diameter recorded this year (cm)

G : Cross-sectional area recorded last year (10^{-4} m^2)

ΔG : Cross-sectional area increment (10^{-4} m^2)

ΔD : Diameter increment (cm)

As mentioned above, the author proposed a diameter growth model. Then, I examined the relationship between the measured and the estimated values using this growth model, about the sample No. 1 and No. 2 (See Figs. 8, 9).

As a result, the relationship between the measured and estimated values coincided fairly well, except that certain deviation appears near the stem bottom because of root swelling.

Therefore, it is possible to estimate the diameter increment at any sectional height using this model.

4. Estimation of bark thickness and bark volume.

The vertical tendency of the distribution of the cross-sectional area of the bark, is approximated as a triangle.

For the bark thickness, it is assumed that the vertical distribution of the cross-sectional area of bark is a triangle.

Under the above assumption, it is possible to estimate the cross-sectional area of bark (Gb_i) and bark thickness (Db_i) according to the following equations.

$$\begin{aligned}Gb_0 &= 20000 Vb/H \\Gb_i &= Gb_0 \cdot (H - h_i)/H \\G_i &= \pi D_i^2/4 \\Gx_i &= G_i - Gb_i \\Dx_i &= 2\sqrt{Gx_i/\pi} \\Db_i &= D_i - Dx_i\end{aligned}$$

where, Vb : Bark volume

H : Tree height

h_i : Length of the base of the triangle

Gb_0 : Height at which estimation is being performed

D_i : Diameter including bark

Dx_i : Diameter not including bark

Then, I examined the relationship between estimated and measured values using the above equations, for sample No. 3 (See Fig. 10).

The relationship between estimated and measured values coincided fairly well, but variation increased toward the tip.

Then, we can estimate the bark volume using the following equation

$$Vb = 0.07496 V^{0.90477}$$

where, V : Stem volume

Thus, the tree growth of Todomatsu is expressed in the following cycle.

1. Tree height growth and branch extension→2. Crown competition with adjacent trees→3. Crown volume increase→4. Stem volume in response to crown volume increment→5. Diameter increment at any sectional height→6. Bark thickness at any sectional height.