

空中写真濃度計測による森林蓄積の推定に関する研究

長, 正道

<https://doi.org/10.15017/14806>

出版情報 : 九州大学農学部演習林報告. 48, pp.113-292, 1974-03. 九州大学農学部附属演習林
バージョン :
権利関係 :

表 3-18 樹種別形状別期待値 (Expected) の計算結果一覧
Table 3-18 Calculation of expected value in each species and type

	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>R</i>	Total
<i>S</i>	21.4	13.9	3.8	0.9	40.0
<i>H</i>	15.5	10.0	2.7	0.7	28.9
<i>M</i>	19.3	12.5	3.4	0.9	36.1
<i>L</i>	11.8	7.6	2.1	0.5	22.0
Total	68.0	44.0	12.0	3.0	127.0

これより χ^2 を計算すると

$$\begin{aligned}\chi^2 &= \frac{(29 - 21.4)^2}{21.4} + \frac{(10 - 13.9)^2}{13.9} + \frac{(1 - 3.8)^2}{3.8} + \dots \\ &\quad + \frac{(2 - 0.5)^2}{0.5} \\ &= 2.6990 + 1.0942 + 2.0632 + \dots + 4.5000 \\ &= 23.3583\end{aligned}$$

をうる。

いま自由度 $(4-1) \times (4-1) = 9$ における $\chi_{0.05}^2 = 16.919$, $\chi_{0.01}^2 = 21.666$ に対し、この場合の $\chi^2 = 23.3583$ はきわめて高度の有意差を示している。すなわちスギ、ヒノキ、マツ、広葉樹の各樹種における波形グラフの形状においても各樹種間に顕著な特長が認められた。

以上の実験および各分析検討の結果から、空中写真濃度波形のピーク数が本数と、各濃度レベルが樹種および幼、壮齢林等の年齢(年齢)と、また単峰、複峰、3峰、多峰等の各形状が樹種ときわめてよく対応していることが確かめられた。なおこれらの結果は前各節 (§ 3-1, § 3-2, § 3-3) の実験および分析検討の結果とも一致している。したがって森林空中写真濃度計測による各種の判読測定、とくに蓄積推定と結びつける場合きわめて有意な計測要因として期待されるものとする。

第4章 空中写真濃度計測による森林蓄積推定のための回帰式の検討

空中写真濃度計測各装置に対する基礎的実験(第2章)、ならびに空中写真濃度計測要因に対する各種濃度波形の分析検討(第3章)等の以上の成果にもとづき、本章では空中写真濃度計測による森林蓄積の推定に対する基本方式および濃度計測実験結果による分析検討と実際の蓄積推定を試みた。なお蓄積推定は多くの写真濃度計測要因のうち、材積との結びつき、すなわち相関度ももっとも高い計測要因を選び写真濃度波形基部幅、濃度波周期および波形側断面積等をその対象として用いた。また次章(第5章)における大面積森林の蓄積推定との結びつき、とくにその応用化を目的として若干の検討をあわせ試みた。

なおこれらの実験および分析検討に先だちその基礎データとなる現地調査資料、すなわち現地調査林分と空中写真との対比のもとにとられる各種の現地実測線(ストリップ)が実際にどの程度の対応度を有するかは、それをもとにして行なう各種の分析検討、とくに材

積推定の場合大きく影響するため、このチェックを最初の § 4-1 において試みた。すなわち現地実測線と写真上の濃度計測線のズレ、つまり Displacement の関係を基礎的に分析・解明し、Displacement を消去させるための現地実測線のとり方を見出し、§ 4-2 以下の各分析検討のためのデータはそれにもとづいて各種調査対象林分に適用した。

なおこれらの分析検討のための濃度計測実験は第 2 章で述べた各種の計測装置が適宜に使用されているが、その内訳は各項においてその都度述べる。

§ 4-1 写真上の濃度計測線と現地実測線との対応度^{4) 9) 15) 23) 37) 54) 84) 85) 97) 101) 108)}

写真濃度測定装置によって森林の濃度計測を行なう場合、写真上の計測線と現地実測線との対応が正確であることはきわめて重要な条件である。

一般に空中写真の像はその主点を中心に放射線状のズレつまり Displacement を生じる。そしてその Displacement の量は測定対象地の起伏(高低)の度合いによって異なる。

Displacement の状態は測線が写真主点 P よりの放射線と交叉する場合と放射線上にある場合の 2 つのケースが考えられる。この 2 つのケースについて現地森林での実測値にもとづき Displacement の量を試算し、それにもとづいて空中写真濃度計測線のとり方ならびに実測線とのズレ、調整のための計算方法等について以下にその分析検討を試みた。

1. 分析検討に用いた資料

Displacement の量の分析検討に用いた資料は宮崎県えびの営林署管内黒鹿国有林を対象とし、脚注の空中写真^{*})にもとづく現地調査(測線測量)ならびに 2.5 倍引伸写真による各スケールの測定により、それぞれ次のケースによつた。

1) 計測線が写真主点 P を通る放射線と交叉する場合

68 林班スギ、ヒノキ人工林、幅 4.0m × 長さ 50m を 1 プロットユニットとする全長 (AB 間) 775m、出発点 A (測点 O) に対する終点 B の高低差 (Δh) 92.59 m、途中最大高低差 143.34m である(表 4-1: Δh_i 欄参照)。

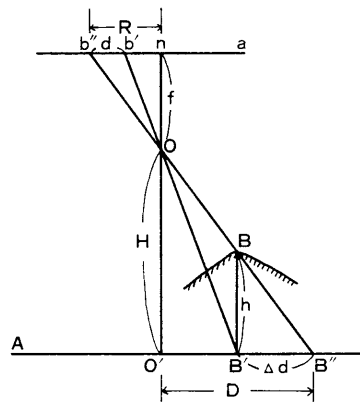


図 4-1 写真上の Displacement の状態

Fig. 4-1 Displacement on aerial photographs

^{*}) 空中写真は山-456, C9-No.6, 1966年5月25日林野庁撮影, 撮影高度 4978m, 撮影縮尺1:19675, 普通角写真($f = 209.16\text{mm}$)を使用。

2) 計測線が写真主点 P を通る放射線上にある場合

飯盛山麓スギ, ヒノキ, マツ人工林, 幅4.0m×長さ20mを1プロットユニットとする全プロット数56個(ただし最初の1プロットおよび最後の1プロットはそれぞれ13.7m, 5.0m), 全長(AB 間)1098.7m, 出発点 A (測点 O) に対する終点 B の高低差 (Δh) -37.5m, (+) の最大34.4m, 写真主点 P に対する出発点 A の高低差 -48.3m, 同 P 点からの撮影高度 H_P 5049.3m, 出発点 A からの撮影高度 H_A 5097.6mである(表4-2: Δh_i 欄参照)。

2. Displacement の量の計算式の誘導とその計算

いま写真像の Displacement の状態とその計算式は図4-1により次のとおりとなる。すなわち図4-1において正投影図の場合基準面 A に対し h の高さを有する点 B は本来 B' 点にあるべきであるが, 空中写真は中心投影のため基準面 A 上では Δd だけ Displacement した B'' 点の位置に写される。つまり写真面 a では $b'b''$ の量の Displacement をもって撮影されることになる。したがって基準面 A における中心点 (O') より B'' 点までの長さを D , 対応する写真上の鉛直点 n より b'' 点までの長さを R , 写真撮影高度を H , 同カメラ焦点距離を f とすれば, その Displacement の量 $b'b''$, すなわち d は

$$\frac{\Delta d}{h} = \frac{D}{H} \quad \therefore \Delta d = \frac{D}{H} h \quad (1)$$

$$\frac{D}{R} = \frac{H}{f} \quad \therefore D = \frac{H}{f} R \quad (2)$$

$$\frac{d}{\Delta d} = \frac{f}{H} \quad \therefore d = \frac{f}{H} \Delta d \quad (3)$$

(3)式に(1), (2)式の Δd および D を代入して

$$d = \frac{f}{H} \cdot \frac{H}{f} \cdot \frac{R \cdot h}{H}$$

すなわち

$$d = R \frac{h}{H} \quad (4)$$

となる。そしてその d つまり Displacement の量は物体(地物等)の高さが増大するに伴い, また写真の周辺部に偏るほど大きくなる。またその状態は写真主点 P を通る放射線上において基準面よりも高ければ外側に, 逆に低ければ内側にそれぞれの方向性をもってあらわれる。

これより計測線が写真主点 P より放射線と交叉する場合, および同計測線が写真主点 P より放射線上にある場合, のそれぞれについて Displacement の量の計算式の誘導とその計算を前項1の資料にもとづいて次のとおり行なった。

1) 計測線が写真主点 P を通る放射線と交叉する場合

本例の場合の現地実測線はその出発点 A において写真主点 P に対しすでに(+)の高さを有し, さらにその高さを増しつつ最終点 B にいたる。その状態を側面図で模式的に示すと図4-2のとおりである。したがって(4)式の d および h は図4-2からそれぞれ

$$d = d' + \Delta d$$

$$h = h' + \Delta h$$

となる。したがって Displacement の算出式は

$$d' + \Delta d = R \frac{h' + \Delta h}{H} \tag{5}$$

となる。

すなわち、写真主点 P を基準にした場合最終点 B において bb' つまり d の量の Displacement を生じることになる。しかし 実際の写真濃度計測は写真上 AB において行なわれるから、測定上の基点 A を基準面すなわち $0m$ とすることになる。したがって $h'=0$, $d=0$ より、(5)式は

$$\Delta d = R \frac{\Delta h}{H} \tag{6}$$

となる。

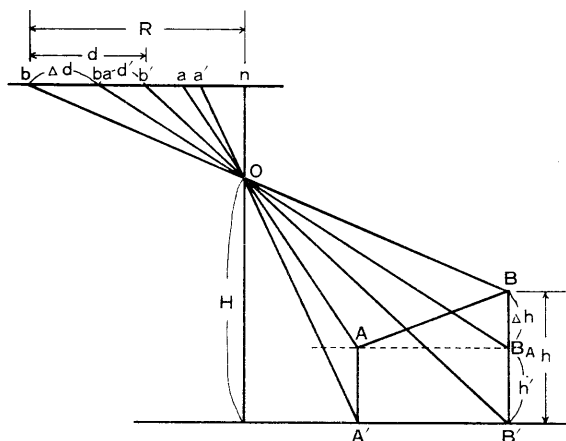


図 4-2 h' の高さを有する場合の \overline{AB} の Displacement の状態
 Fig. 4-2 Displacement of \overline{AB} when the height is h'

いま、平面上に写真主点 P , 出発点 A および終点 B を写真上の関係位置に対応させてとり、主点 P から A および Y_i' を通る放射線をえがく。 PB 線上に A を基準面としたときの B 点の位置を B_A としてとると AB_A は現地実測線の垂直投影図となる。これを図 4-3 に示す。なお AB は濃度計測線である。

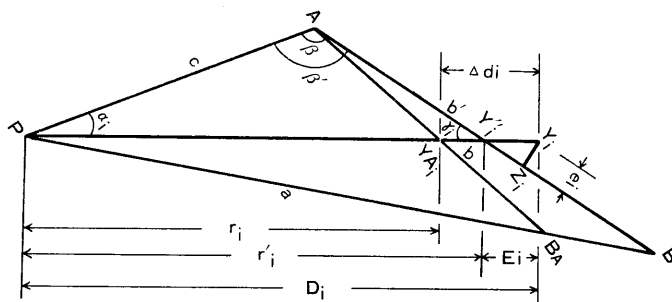


図 4-3 写真主点 P を通る放射線と交叉する場合の \overline{AB} の状態(写真面)
 Fig. 4-3 Displacement of \overline{AB} when the scanning line crosses on the line through the principle point on photographs

図4-3において $PY_{Ai} = r_i$, $Y_{Ai}Y_i = \Delta d_i$ である。したがって(6)式は

$$\begin{aligned} \Delta d_i &= (r_i + \Delta d_i) \frac{\Delta h_i}{H} \\ &= r_i \frac{\Delta h_i}{H} + \Delta d_i \frac{\Delta h_i}{H} \\ \Delta d_i \left(1 - \frac{\Delta h_i}{H}\right) &= \Delta h_i \frac{\Delta h_i}{H} \\ \therefore \Delta d_i &= \frac{r_i \frac{\Delta h_i}{H}}{\frac{H - \Delta h_i}{H}} = \frac{r_i \cdot \Delta h_i}{H - \Delta h_i} \end{aligned} \quad (7)$$

となる

これより Displacement の計算を行なうと次のとおりとなる。すなわち

AY_{Ai} : AB_A 上, A からの実測距離

Δh_i : A 点を 0 m としたときの A 面からの各測点の高さ

b_i : $\frac{AY_{Ai}}{S}$, ただし $S=19675$ (密着写真スケール)

c : 29.6mm, 密着写真上実測

r : 63.6mm, 密着写真上実測

より, PY_{Ai} の長さ r_i は

$$\begin{aligned} r_i &= \sqrt{b_i^2 + c^2 - 2 \cdot b_i \cdot c \cdot \cos \beta} \\ \text{ただし } \cos \beta &= \frac{b^2 + c^2 - r^2}{2bc} \\ &= \frac{(39.39)^2 + (29.6)^2 - (63.6)^2}{2 \times 39.39 \times 29.6} \\ &= -0.693527 \text{ (const.)} \end{aligned}$$

となる。したがって AB_A からの Displacement Δd_i は(7)式により求められる。なお撮影高度 $H = 4978\text{m}$ である。

これより写真主点 P から各測点の写真上の像までの長さ PY_i は

$$PY_i = r_i + \Delta d_i$$

となる。

一方, $\triangle AY_i'P$ において $\angle AY_i'P = \gamma_i$ とすれば

$$\sin \gamma_i = \sin [180^\circ - (\alpha_i + \beta')]$$

$$\text{ただし } \alpha_i : \cos \alpha_i = \frac{c^2 + r_i^2 - b_i^2}{2cr_i}$$

$$\beta' : \cos \beta' = \frac{c^2 + b'^2 - r'^2}{2cb}$$

$$= \frac{(29.6)^2 + (40.52)^2 - (64.8)^2}{2 \times 29.6 \times 64.8} = -0.7007771$$

$$\therefore \beta' = 180^\circ - 45^\circ 31' = 134^\circ 29' \text{ (const.)}$$

表4-1 Displacement の計算結果一覧 (写真主点 P を通る放射線と交叉する場合)

Table 4-1 Calculation of displacement (when the scanning line crosses on the line through the principle point on photographs)

Point No.	$\frac{AY_{A_i}}{AB_A}$ (Distance from AB_A to A)	Δh_i	$\left(\frac{b_i}{S}\right)$	$\frac{r_i}{\sqrt{b^2+c^2-2b_i c \cos \beta}}$	$\left(\frac{\Delta d_i}{H-\Delta H_i}\right)$	$r_i + \Delta d_i$	$\frac{\cos \alpha_i}{\left(\frac{c^2+r_i^2-b_i^2}{2cr_i}\right)}$	$\left(\frac{\sin \gamma_i}{\sin[\alpha_i+\beta_i]}\right)$	$\left(\sin \beta' \frac{c}{\sin \gamma_i}\right)$	$\frac{E_i}{(PY_i-r_i')}$	$(E_i \times \sin \gamma_i)$
	m	m	mm	mm	mm	mm			mm	mm	mm
0	0	0.00	0.00	29.600	0.000	29.600	1.0000	0.7135	29.600	0.000	0.000
1	50	7.05	2.54	31.415	0.044	31.459	0.9983	0.6715	31.449	0.010	0.007
2	100	28.82	5.08	33.325	0.194	33.519	0.9939	0.6318	33.425	0.093	0.059
3	150	34.96	7.62	35.314	0.250	35.564	0.9878	0.5958	35.448	0.116	0.069
4	200	37.57	10.17	37.378	0.269	37.647	0.9806	0.5623	37.555	0.092	0.052
5	250	48.19	12.71	39.491	0.386	39.877	0.9727	0.5314	39.741	0.136	0.072
6	300	59.75	15.25	41.651	0.506	42.157	0.9646	0.5035	42.941	0.216	0.109
7	350	78.92	17.79	43.853	0.706	44.559	0.9563	0.4774	44.235	0.324	0.155
8	400	92.85	20.33	46.089	0.876	46.965	0.9481	0.4537	46.544	0.421	0.191
9	450	104.41	22.87	48.355	1.036	49.391	0.9401	0.4318	49.905	0.486	0.210
10	500	120.18	25.41	50.647	1.253	51.900	0.9323	0.4118	51.285	0.614	0.253
11	550	134.48	27.95	52.961	1.471	54.432	0.9249	0.3934	53.680	0.751	0.296
12	600	143.34	30.50	55.305	1.640	56.945	0.9176	0.3762	56.132	0.813	0.306
13	650	137.65	33.04	57.657	1.640	59.297	0.9108	0.3605	58.574	0.723	0.260
14	700	119.45	35.58	60.094	1.478	61.572	0.9055	0.3488	60.538	1.034	0.361
15	750	106.02	38.12	62.405	1.358	63.763	0.8979	0.3322	63.578	0.185	0.061
16	775	92.59	39.39	63.600	1.205	64.805	0.8949	0.3258	65.811	(0.000)	(0.000)

$$\begin{aligned}
 \text{ただし } b' &= \sqrt{r'^2 + c^2 - 2r'c \cdot \cos \alpha} \\
 &= \sqrt{(64.8)^2 + (29.6)^2 - 2 \times 64.8 \times 29.6 \times 0.8949} \\
 &= 40.52\text{mm}
 \end{aligned}$$

より r'_i , つまり PY'_i の長さは

$$r'_i = \sin \beta' \frac{c}{\sin \gamma_i}$$

$$\text{ただし } \sin \beta' = \sin 45^\circ 31' = 0.7134543 \text{ (Const.)}$$

となる。

したがって $Y'_i Y_i$, つまり実際の濃度計測線 AB からの各点の Displacement E_i は

$$E_i = PY_i - r'_i$$

となる。

ただしこの E_i は写真主点 P からの放射線における AB からの Displacement である。実際の濃度計測は AB を中心線としてスリット幅をもって平行にスキャンされるから、各 E_i は AY'_i に直角の量が真の Displacement となる。したがって AY'_i に対する直角方向の Displacement の範囲, すなわち走査中心線 AB に対する Displacement の直角成分 $Y_i Z_i = e_i$ を

$$\sin \gamma_i = \frac{e_i}{E_i}$$

$$\therefore e_i = E_i \cdot \sin \gamma_i \quad (8)$$

により算出した。

表4-1は以上の各計算式にもとづいて算出された e_i , すなわち Displacement の量を一覧表に示したものである。

2) 計測線が写真主点 P を通る放射線上にある場合

写真主点 P に対する現地森林の地形の状態を側面図により模式的に示すと本例の場合は図4-4のとおりである。同図において A は現地実測線における出発点, B は同終点, PP' は P レベルにおける写真面, H_0 は P 点からの撮影高度, h_0 は A から P レベル写真面までの高さ, A', B' は P レベル写真面における A, B の位置, a' は A 点の P レベル写真面に対する鉛直点, L_0 は PA' (写真上の測定値) のそれぞれを示す。これより A 点における写真上の Displacement の量 Δd_0 は

$$\frac{H}{h_0} = \frac{L_0}{\Delta d_0}$$

$$\therefore \Delta d_0 = \frac{L_0 \cdot h_0}{H_0} \quad (9)$$

となる。

また実測線 AB 上任意の点, つまり求めようとする各測点 A_i における Displacement の量 Δd_i は

$$\frac{H_0}{\Delta dh_i} = \frac{D_i - \Delta d_i}{\Delta d_i}$$

$$\Delta d_i \cdot H_0 = \Delta dh_i (D_i - \Delta d_i)$$

$$\begin{aligned} \Delta d_i (H_0 + \Delta h_i) &= D_i \cdot \Delta h_i \\ \therefore \Delta d_i &= \frac{D_i \cdot \Delta h_i}{H_0 + \Delta h_i} \end{aligned} \tag{10}$$

ここで

$$\begin{aligned} D_i &= L_0' + l_i \\ &\text{(ただし } l_i \text{ は実測による各測点間の水平距離)} \\ L_0' &= L_0 + \Delta d_0 \\ \Delta d h_i &= h_0 - \Delta h_i \end{aligned}$$

となる。

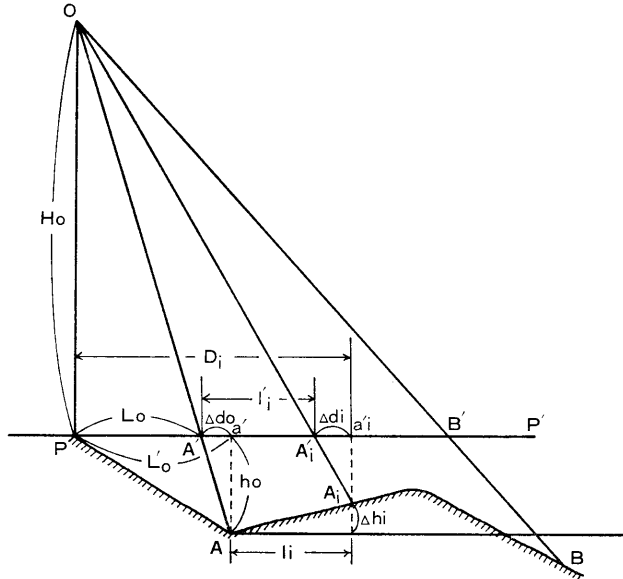


図 4-4 写真主点 P を通る放射線上にある場合の \overline{AB} の Displacement の状態(側面図)
 Fig. 4-4 Displacement of \overline{AB} when the scanning line passes through the principle point at the profile

以上の(10)式により各測点の Displacement の量を計算すると表4-2(Δd_i 欄)に示すとおりである。ただし測点の出発点 A (測点 No. 0) および終点 B (測点 No.56)を含め全測線で57点であるが、表4-2の計算はこれを4点ごとに示した。また計算ははじめ P レベルにおける写真面 PP' 上のスケール、つまり現地スケール(m単位)で求め、これを $\frac{H_0}{f} = S$ で除して密着写真スケール(mm単位)に換算した。したがって L_i は P 点から各測点 A_i までの密着写真上で長さである。なお $P(\alpha_i)$ は L_i に対する Δd_i の比率を、 $P(i)$ は各 L_i の差 l_i' の平均値 $\frac{\sum l_i'}{14} = 3.188143$ に対する各 l_i' の比率を示したものである。また表中 h_0 , L_0 , Δd_0 および S はそれぞれ

$$\begin{aligned} h_0 &= H_{0(A)} - H_0 \\ &= 5097.6 - 5049.3 = 48.3\text{m (const.)} \end{aligned}$$

ただし H_0 : P 点における撮影高度

$H_{0(A)}$: A 点における撮影高度

(いずれも空中写真上で算出)

$$L_0 = 374.183\text{m (Const.)}$$

: 写真上 PA' の長さ, 写真上より計測

$$\Delta d_0 = \frac{L_0 \cdot h_0}{H_0} = \frac{374.183 \times 48.3}{5049.3} = 3.579 \text{ (Const.)}$$

$$S = \frac{H_0}{f} = \frac{5049.3}{0.20916} = 24140.84911$$

によった。また $\sum L_i$ (出発点 A から各測点までの長さ), Δh_i (同 A を基準とする各測点の高さ) は現地調査にもとづく実測値を用いた。

3) 計算結果にもとづく考察

以上の Displacement については, 計測線が放射線と交叉する場合, Displacement の直角成分としての e_i は最大 0.306mm, 平均 0.164 mm となった。ただし Point No. 16, すなわち B 点の e は 0 にならないけれども計算の結果は -0.002 mm となった。これは計算過程での四捨五入その他に起因する誤差と考えられる。したがって表 4-1 では 0 として示した。また計測線が放射線上にある場合の Displacement の量 Δd_i は P レベルに対する現地森林の地形の起伏の状態によりその方向は変化する。すなわち本例の場合, 実測線 AB が P レベルつまり PP' より低い位置にあるため P 点からの放射線上において常に (-), すなわち写真主点 P の方向に Displacement しており, その最大は 1.022mm, 最小で 0.115mm, 平均では 0.3267mm(ただしいずれの場合も 4 測点ごと, 80m 間隔による値) を示した。

以上の結果から 1) の場合は森林の地形, とくに起伏の度合い, 傾斜の状態, 写真主点 P に対する計測線の方向等によってその Displacement の方向と量は変化するため, 空中写真の濃度計測において基礎的研究その他森林と空中写真の厳密な対応を必要とする場合は平地林または一定の角度(傾斜度)を有する緩傾斜林等の他は本例のような計測線のとり方は適切な方法とは認め難い。しかし濃度計測のスリット幅は多くの場合 Y 方向に 0.20mm を設定しているため, 中心線に対しては上下それぞれ $0.20/2=0.10$ mm の幅が保たれることになる。したがって e が平均的にそのスリット幅の中に入っていれば材積その他との対応の面では支障はないと考える。なんとなれば実際に大面積森林を対象とした濃度計測実験を行なう場合等には森林, とくに人工林の場合では比較的一様性が保たれているから, 局所的な濃度計測線からのズレは問題にならないからである。

しかし空中写真の濃度計測線の方向は現地実測線との正確な対応を必要とする場合は 2) の方法, つまり写真主点 P を通る放射線上にこれをとることが適切であると考えられる。ただしこの場合, 現地森林の地形が写真上にあらわれる Displacement の量を前記(10)式により予め計算し, 距離または時間(デジタルタイマーのタイムユニットによる計測時間)等により対応の適正化を図る必要がある。ちなみに現地地形が P レベル, つまり PP' より高い位置にある場合は本例のケースとは逆にその Displacement は (+) の方向にあらわれ前記(10)式は次の形で示される。

表 4-2 Displacement の計算結果一覧表 (写真主点 P を通る放射線上にある場合)

Table 4-2 Calculation of displacement (when the scanning line passes through the principle point on photographs)

No.	Point No.	Σl_i	Δh_i	$\frac{\Delta \Delta h_i}{(h_0 - \Delta h_i)}$	$\frac{D_i}{(L_0 + \Delta d_0 - l_i)}$	$\left(\frac{D_i \cdot \Delta \Delta h_i}{H_0 + \Delta \Delta h_i} \right)$	$\left(\frac{\Delta d_i'}{S} \right)$	$\left(\frac{L_i \Delta d_i'}{S} \right)$	$P_{(d_i)}$	l_i'	$P_{(l_i')}$
1	0	0.0	0.0	48.3	377.762	3.579	0.148	15.500	0.955		
2	4	73.7	6.1	42.2	451.462	3.741	0.155	18.546	0.836	3.046	95.5
3	8	153.7	6.1	42.2	531.462	4.405	0.182	21.832	0.834	3.286	103.1
4	12	233.7	6.1	42.2	611.462	5.068	0.210	25.119	0.836	3.287	103.1
5	16	313.7	6.1	42.2	691.462	5.731	0.237	28.405	0.834	3.286	103.1
6	20	393.7	19.4	28.9	771.462	4.390	0.182	31.775	0.573	3.370	105.7
7	24	473.7	23.2	25.1	851.462	4.212	0.174	35.096	0.496	3.321	104.2
8	28	553.7	24.5	23.8	931.462	4.370	0.181	38.403	0.471	3.307	103.7
9	32	633.7	34.4	13.9	1011.462	2.777	0.115	41.783	0.275	3.380	106.0
10	36	713.7	31.2	17.1	1091.462	3.684	0.153	45.059	0.340	3.276	102.7
11	40	793.7	8.9	39.4	1171.462	9.070	0.376	48.150	0.781	3.091	96.9
12	44	873.7	3.6	44.7	1251.462	10.982	0.455	51.385	0.885	3.235	101.5
13	48	953.7	0.5	47.8	1331.462	12.486	0.517	54.636	0.946	3.251	102.0
14	52	1033.7	-21.1	69.4	1411.462	19.137	0.793	57.674	1.375	3.038	95.3
15	56	1098.7	-37.5	85.8	1476.462	24.670	1.022	60.138	1.699	2.464	77.3

$$\begin{aligned}\frac{H_0}{\Delta dh_i} &= \frac{D_i + \Delta d_i}{\Delta d_i} \\ \Delta d_i \cdot H_0 &= \Delta dh_i (D_i + \Delta d_i) \\ \Delta d_i (H_0 - \Delta dh_i) &= D_i \cdot \Delta dh_i \\ \therefore \Delta d_i &= \frac{D_i \cdot \Delta dh_i}{H_0 - \Delta dh_i}\end{aligned}\quad (11)$$

以上の Displacement 算出式およびその結果にもとづく考察は写真主点 P とその鉛直点 n が同一点にあるもの、つまり空中写真には傾きがないものとみなして試みたものである。しかし実際には撮影時におけるいくつかの原因または条件により空中写真は若干の傾きを有するのが常である。したがってその Displacement は地形の起伏度による他、空中写真自身の傾きに起因する Displacement が存在する。

そしてこの場合、土地(地形)に起伏のない平坦な場合と起伏を有する場合の2つのケースがある。しかしこれについてはきわめて複雑な計算を必要とするにもかかわらず、それに起因する Displacement の量は微量である。たとえば焦点距離 $f=200\text{mm}$ で写真の傾きが 2° の場合、 $\frac{h}{H}$ すなわち地物の高さ h に対する写真撮影高度 H の関係が $\frac{1}{20}$ のときその Displacement は 0.4 mm 、 $\frac{1}{40}$ で 0.2mm 、 4° の場合 $\frac{1}{20}$ で 0.6mm 、 $\frac{1}{40}$ で 0.4mm にすぎない。したがって特殊のケースを除いては問題にするほどのことはないと考えられる。ちなみに空中写真による一般的な計測では $5g$ (グラード) すなわち $\frac{90^\circ}{100} \times 5 = 4^\circ 30'$ 以内の写真の傾きは許容されている。

§ 4-2 空中写真濃度と蓄積の関係

森林空中写真の濃度計測にもとづく各種濃度波形の分析検討の結果、濃度波形グラフのピーク数、基部幅、形状および濃度レベル等の濃度計測要因と本数、樹冠直径、樹種等との間にはきわめて密接な対応性と高い相関関係を有することが前章(第3章)において確かめられた。すなわち濃度波形グラフのピーク数は本数と、基部幅は樹冠直径と、また濃度波形の形状およびそのレベル(濃度値)はスギ、ヒノキ、マツ、広葉樹等の樹種および年齢(齢階)等とそれぞれ高い相関関係を有し回帰関係が成立する。

したがって以上の結果にもとづいて各計測写真濃度と蓄積との関係につき、以下にその実験と分析検討を試みた。

1. 空中写真濃度波形と本数の関係

森林蓄積の推定は単に材積のみに止まらず、その構成要因の一つである林木の本数の推定も大きな要因である。したがって濃度計測においても本数の推定はきわめて重要な要素となる。

しかし空中写真濃度波形と本数の関係については、第3章、§ 3-1: 本数と写真濃度波形のピーク数の関係、ならびに同 § 3-4 の 2 の 1): 密度と判読本数(ピーク数)の関係の各項において実験結果の分析検討および現地森林との対応度等について詳述したので本項では省略する。

なお、ユニバーサルカウンターによる濃度波周期の計測と材積との対応を本節3において試みたが、この濃度波周期は本数に代る計測要因の一つであるとみなされる。

2. 空中写真濃度波形と材積の関係⁵³⁾

種々の実験ならびに分析検討を試みた結果、材積との対応性が考えられるものとして森林空中写真濃度波形の平均基部幅、ピークの個数とプロット材積とがよく対応することを見出したので以下に実験および分析検討の結果について述べる。

1) 回帰式の試験的分析検討

空中写真濃度波形の平均基部幅(mm)およびピーク個数をそれぞれ独立変数 x_1 , x_2 とし、対応するプロット材積を y とすれば、その回帰式は

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

となる。

いま、この回帰式に対する分析検討を試験的に試みると次のとおりである。

(1) 資料

資料は宮崎県えびの営林署管内黒鹿国有林67林班た小班、面積19.78haの51年生スギ林分を対象に、対応する空中写真の主点(中心点)から放射線方向に幅20m、長さ210mのストリップを現地森林に設定した。なお同ストリップはこれを10m×10mの最小単位(Ultimate unit)に区分し各樹冠投影図の作製を行なった。

なお同上の現地調査ストリップに対応の空中写真および濃度計測ゲージは脚注に示すとおりである。*)**)

図4-5は同上の調査ストリップに対する4m幅の樹冠位置図および対応する計測濃度波形グラフを示したものである。また表4-3は計測結果にもとづく平均波形基部幅、ピーク個数とプロット材積の関係を一覧表に示したものである。ただし全体で21プロット中、Plot No.14, No.18の2プロットについては材積との対応度がきわめて悪いため除外した。またプロット材積はストリップの中心線を通る4m×10mの材積を示している。

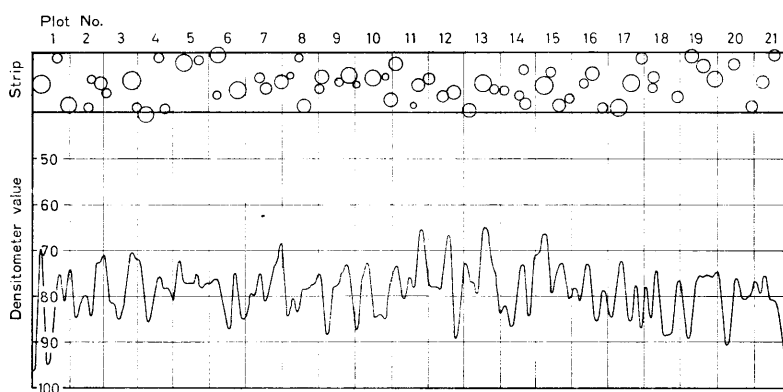


図4-5 ストリップ幅4mにおける林木樹冠位置図とその濃度波形グラフ

Fig. 4-5 Relation between densitometer waves and allocation of tree crown on strip (width 4 m)

*) 空中写真は霧島山、山-456, C9-No.6, 1966年5月25日林野庁撮影、撮影高度4978m、同縮尺1:19675、普通角写真($f=209.16\text{mm}$)の密着ポジフィルムを用いた。

***) 濃度計測ゲージは1)-(a) $0.08 \times 0.20\text{mm}$, (b) 1.4, (c) 20mm/min , (e) $\times 1$, (f) 2枚, 2)-(a) $\times 10$, 3)-(a) 480mm/min , (b) 1Vによった。

表4-3 平均波形基部幅, ピーク個数と材積の関係
 Table 4-3 Relation between volume, number of peak's and average of width of densitometer waves

Plot No.	1	平均波形基部幅 Average width x_1	ピーク個数 Number of peak's x_2	材積 Volume y	ck
		mm		m^3	
1	1	3.50	3	2.853	10.353
2	1	3.25	4	2.340	10.590
3	1	3.00	3	1.996	8.996
4	1	2.33	3	1.694	8.024
5	1	3.00	4	2.057	10.057
6	1	2.83	3	1.982	8.812
7	1	2.75	2	1.948	7.698
8	1	2.25	4	1.786	9.036
9	1	2.63	4	2.032	9.662
10	1	2.75	4	2.104	9.854
11	1	2.33	3	1.712	8.042
12	1	2.33	3	1.841	8.171
13	1	2.40	5	2.862	11.262
15	1	3.33	3	2.815	10.145
16	1	3.33	3	2.677	10.007
17	1	2.00	2	1.382	6.382
19	1	3.17	3	2.642	9.812
20	1	3.33	3	2.643	9.973
21	1	3.33	3	2.305	9.635
Total	19	53.84	62	41.671	176.511

(2) 回帰の検討

上記の資料にもとづいて, 表4-3より回帰係数算出のための最小二乗法計算を行なうと表4-4のとおりとなる。

表4-4 プロット材積 y と平均基部幅 x_1 , ピーク数 x_2 の回帰計算組織解
 Table 4-4 Solution system of regression to number of peak's, average of width of densitometer waves and volume per plot

	1	x_1	x_2	y	ck
1	19.000	53.840	62.000	41.671	176.511
x_1		156.377	175.4500	120.8629	506.5299
x_2			212.0000	137.7260	587.1760
y				94.9592	395.2191
2.833684210		3.8114	-0.2384	2.7804	6.3534
3.263157894			9.6842	1.7469	11.1927
2.193210526				3.5659	8.0932
-0.062549195			9.6693	1.9208	11.5901
0.729495723				1.5376	3.4584
0.198649333				1.1560	1.1560

これより回帰式

$$Y = -0.577 + 0.741 x_1 + 0.199 x_2$$

をうる。

いま各要因に対する分散分析は表4-5にて示すとおりである。

表4-5 回帰の分散分析
Table 4-5 Analysis of variance of regression

Source	SS	DF	MS	F
Const.	91.3932	1	91.3932	1264.08**
Reg. on x_1	2.0283	1	2.0283	28.05*
Reg. on x_2	0.3816	1	0.3816	5.28*
Error	1.1560	16	0.0723	
Total	94.9591	19		

すなわち分散分析の結果 Constant つまり常数項には高度の有意差を、また x_1 , x_2 の項でも有意性が認められ、回帰式が成立した。すなわち空中写真濃度計測における波形の平均基部幅およびピーク個数より材積推定の可能性が確かめられたといえる。

ちなみに回帰式の推定標準誤差 SE は

$$SE = \sqrt{0.07225} = \pm 0.269 \text{ m}^3$$

となる。したがってプロット平均材積 2.193 m^3 に対する誤差率は 12.3% となる。

2) 森林蓄積推定への応用^{53)c}

前項 1) による回帰式の試験的分析検討の結果、計測空中写真濃度波形の平均基部幅およびピーク個数と材積との間に回帰式が成立することが認められた。したがって濃度計測によって森林蓄積の推定が可能であることが確かめられた。

したがって、いま一つの森林を対象にその推定式を前項 1) の成果にもとづき分析検討を試みた。すなわち写真上数本の濃度計測線について平均基部幅、ピーク数を計測し、これを大標本とし、その中からグランドチェックのための Field strip をとり材積を測定して小標本とする、いわゆる二重抽出方式による蓄積推定の方法がもっとも適切な方法と考えられる。そこで以下に二重抽出方式による蓄積推定を実験的に試み、その可能性について検討を行なった。

(1) 現地調査資料

空中写真濃度計測による森林の蓄積推定に対する実験的分析検討のための資料は宮崎県えびの営林署管内黒鹿国国有林の一部、飯盛山周辺に位置する 68, 69 林班のスギ、ヒノキ、マツおよび若干の広葉樹を含む面積 92.54 ha を対象とした。同地域は標高 846 m の飯盛山の山麓に比較的なだらかなスロープをなす地形を呈し、全体的にはほぼ南方向に面し、空中写真との対応はきわめて明確な場所である。

調査は二重抽出法により全体に対し $N336^\circ 30' W$ の方向に 7 本の Densitometer strip すなわち濃度計測線を取り、これを大標本とした。そしてその中から Field strip つまり現地調査線を 1 本おき、計 3 本を抽出し小標本とし、1967年10月および11月に空中写真と

対応させて現地調査を実施した。なお現地調査線(3本)はそれぞれ幅4m×長さ50mのプロットに区切り一応これを最小単位とした。対応する空中写真および濃度計測ゲージは脚注に示すとおりである。*)**)

なお計測写真濃度の波形の基部幅は全ストリップにつきプロットごと、つまり最小単位(50m)ごとにmm単位に測定しこれを平均して平均基部幅とした。

図4-6は前記68, 69林班, 面積92.54haに対する Densitometer strip 7本(大標本)およびその中から抽出した Field strip 3本(小標本)の各計測位置図を, 表4-6は図4-6における各ストリップの測線長を一覧表に示したものである。また表4-7は Field strip 3本に対するプロット別, スギ, ヒノキ, マツ, 広葉樹別本数および材積を一覧表として示したものである。

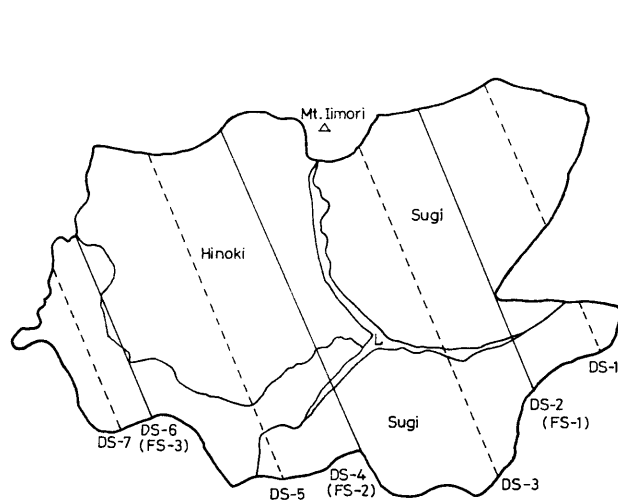


図4-6 Densitometer strip および Field strip の設定位置図
Fig. 4-6 Allocation of field strip and densitometer strip

表4-6 各ストリップの測線長一覧
Table 4-6 Measurement of length to each strip

No.	Large sample	Small sample	測線長 Strip length
1	Densitometer strip-1		646 m
2	" -2	Field strip -1	670
3	" -3		788
4	" -4	" -2	775
5	" -5		780
6	" -6	" -3	468
7	" -7		394

*) 空中写真は霧島山, 山-456, C9-No.6, 1966年5月25日林野庁撮影, 撮影高度4978m, 同縮尺1:19675, 普通角写真($f=209.16\text{mm}$)の密着ポジフィルム使用。

***) 濃度計測ゲージは 1)-(a)0.08×0.20mm, (b)1.4, (c)5mm/min, (e)×1, (f)2枚, 2)-(a)×10, 3)-(a)120mm/min, (b)0.5Vによった。

表 4-7 Field strip plot 別樹種別本数 (N) および材積 (V) 一覧

Table 4-7 Relation between volume per plot (V) and number of trees (N) to each species and field strip plot

Field strip plot	スギ <i>Cryptomeria</i>		ヒノキ <i>Chamaecyparis</i>		マツ <i>Pinus</i>		広葉樹 Broadleaved		計 Total	
	N	V m ³	N	V m ³	N	V m ³	N	V m ³	N	V m ³
1- 1	24	13.125	—	—	—	—	—	—	24	13.125
2	19	9.332	—	—	—	—	—	—	19	9.332
3	15	5.376	—	—	1	1.058	—	—	16	6.434
4	19	6.798	—	—	—	—	—	—	19	6.798
5	—	—	—	—	11	10.429	—	—	11	10.429
6	—	—	—	—	9	9.301	—	—	9	9.301
7	—	—	—	—	13	11.378	—	—	13	11.378
8	—	—	—	—	11	5.136	—	—	11	5.136
9	—	—	—	—	11	9.974	—	—	11	9.974
10	—	—	—	—	10	7.688	—	—	10	7.688
11	—	—	—	—	7	2.746	—	—	7	2.746
12	—	—	—	—	9	3.726	—	—	9	3.726
13	—	—	—	—	8	3.798	—	—	8	3.797
14*	—	—	—	—	3	1.456	—	—	3	1.456
2- 1	15	15.792	—	—	—	—	—	—	15	15.792
2	15	11.737	—	—	—	—	—	—	15	11.737
3	9	6.730	—	—	—	—	5	15.206	14	21.936
4	13	10.402	—	—	—	—	1	0.266	14	10.668
5	16	8.523	—	—	—	—	4	1.718	20	10.241
6	16	6.751	—	—	—	—	—	—	16	6.751
7	15	6.305	12	3.343	—	—	1	0.183	28	9.831
8	—	—	18	6.264	—	—	—	—	18	6.264
9	—	—	22	6.750	—	—	—	—	22	6.750
10	—	—	27	7.328	—	—	—	—	27	7.328
11	—	—	27	5.643	—	—	—	—	27	5.643
12	—	—	33	6.361	—	—	1	0.053	34	6.414
13	—	—	32	6.525	—	—	—	—	32	6.524
14	—	—	15	4.439	—	—	—	—	15	4.439
15	—	—	11	3.240	—	—	—	—	11	3.240
16*	—	—	9	2.088	—	—	—	—	9	2.088
3- 1	8	10.205	—	—	—	—	—	—	8	10.205
2	10	12.624	—	—	—	—	—	—	10	12.624
3	3	1.876	—	—	—	—	11	1.251	14	3.127
4	12	5.568	—	—	—	—	19	2.948	31	8.516
5	5	3.290	—	—	—	—	6	0.913	11	4.203
6	14	8.884	—	—	—	—	—	—	14	8.884
7	1	1.067	13	5.216	2	1.706	2	0.406	18	8.395
8	—	—	17	8.236	—	—	—	—	17	8.236
9	—	—	19	8.412	—	—	—	—	19	8.412
10*	—	—	7	3.435	—	—	—	—	7	3.435

Total	229	144.385	262	77.280	95	68.395	50	22.944	636	313.004
-------	-----	---------	-----	--------	----	--------	----	--------	-----	---------

(注) 表中*印のプロットは面積に端数を有するもので、それぞれ 1-14: $4\text{ m} \times 20\text{ m} = 0.008\text{ ha}$,
2-16: $4\text{ m} \times 25\text{ m} = 0.010\text{ ha}$, 3-10: $4\text{ m} \times 18.2\text{ m} = 0.0073\text{ ha}$ である。

(Note) Mark * is fractional plot are, plot No. 1-14: each $4\text{ m} \times 20\text{ m} = 0.008\text{ ha}$, plot No. 2-16: each $4\text{ m} \times 25\text{ m} = 0.010\text{ ha}$, plot No. 3-10: each $4\text{ m} \times 18.2\text{ m} = 0.0073\text{ ha}$

(2) 現地調査資料にもとづく計算

Field strip 3本の現地調査資料(表4-7)にもとづく材積推定のための回帰式

$$Y = \bar{y} + b(x - \bar{x})$$

をうる。ただし x は写真濃度波形プロット毎平均基部幅を示し、 \bar{x} は全プロットの平均値を示す。なおここでは x の項のみによった。また表4-7の各プロット材積は $4\text{ m} \times 50\text{ m} = 200\text{ m}^2 (0.02\text{ ha})$ をすべて 0.01 ha 当りに換算した。そしてプロット材積中、その面積に端数を有するものおよび広葉樹を含み x との対応性を著しく乱すプロットは除外し、計28プロットをその計算の対象として用いた。

表4-8は上記にもとづく回帰計算のための原資料を示したものである。また表4-9はその最小二乗法計算を行なったものである。

表4-8 回帰計算のための原資料一覧
Table 4-8 Data for solution system of calculation

No.	幅4m×長50m Width 4 m×Length 50m 1 Unit	平均波形基部幅 Average of width of densitometer waves	材積 Volume (0.01 ha)	ck
		mm	m ³	
1	1	5.00	6.56	12.56
2	1	3.86	4.67	9.53
3	1	3.69	3.22	7.91
4	1	2.61	3.40	7.01
5	1	3.35	4.65	9.00
6	1	3.34	5.69	10.03
7	1	2.34	2.57	5.91
8	1	3.95	4.99	9.94
9	1	2.98	3.84	7.82
10	1	2.74	1.86	5.60
11	1	2.68	1.90	5.58
12	1	4.54	7.90	13.44
13	1	4.12	5.87	10.99
14	1	4.34	5.33	10.67
15	1	3.20	5.12	9.32
16	1	3.35	3.38	7.73
17	1	3.28	3.13	7.41
18	1	3.66	3.38	8.04
19	1	3.79	3.66	8.45
20	1	3.00	2.82	6.82
21	1	3.36	3.21	7.57
22	1	2.59	3.26	6.85
23	1	2.43	2.22	5.65
24	1	4.35	5.10	10.45
25	1	3.36	6.31	10.67
26	1	3.13	4.26	8.39
27	1	3.06	2.10	6.16
28	1	3.18	4.44	8.62
Total	28	95.28	114.84	238.12

表 4-9 材積と平均波形基部幅の回帰計算組織解

Table 4-9 Solution system of regression to average of width densitometer waves and volume

	1	x	y	ck
1	28	95.28	114.84	238.12
x		336.1442	411.2674	842.6916
y			533.5310	1059.6384
3.40285714		11.9200	20.4833	32.4033
4.10142857			62.5229	83.0062
1.71839765			27.3244	27.3244

いま、表 4-9 の最小二乗法計算にもとづき分散分析を試みると表 4-10 に示すとおりである。

表 4-10 回帰の分散分析

Table 4-10 Analysis of variance of regression

Source	SS	DF	MS	F
Const.	471.0081	1	471.0081	448.19**
Reg. on x	35.1985	1	35.1985	33.49**
Error	27.3244	26	1.0509	
Total	533.5310	28		

すなわち分散分析の結果、Constant (常数項)ならびに Reg. on x (x の項)ともに高度の有意差を示した。したがって材積推定のための回帰式は次のとおりえられる。

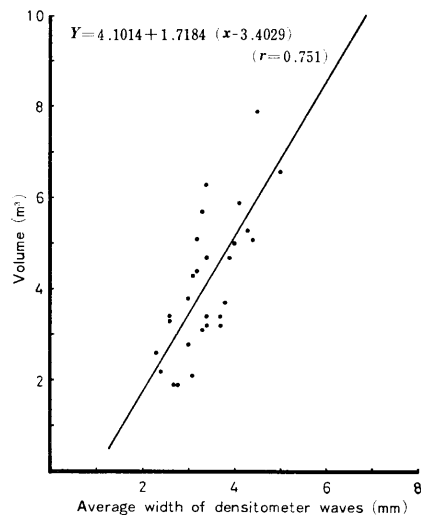


図 4-7 材積と平均波形基部幅の回帰図

Fig. 4-7 Relation between average width of densitometer waves and the volume

$$Y = 4.1014 + 1.7184 (x - 3.4029)$$

また相関係数 r は

$$r = \frac{20.4833}{\sqrt{11.9200 \times 62.5229}} = 0.751$$

となりほぼ回帰関係を満足しているといえる。図4-7は以上の回帰図を示したものである。

(3) 二重抽出法による材積ならびに誤差の計算

Densitometer strip 7本(大標本)のプロット総数89, その空中写真濃度波形の総平均基部幅は3.3073mm, 分散0.008166であった。

いま前記の回帰式から

$$\begin{aligned} Y &= 4.1014 + 1.7184 (x - 3.4029) \\ &= 4.1014 + 1.7184 (3.3073 - 3.4029) \\ &= 3.9371 \end{aligned}$$

をうる。すなわち3.9371m³が0.01ha当り平均材積となる。その分散は

$$V(Y) = V(\bar{y}) + (x - \bar{x})^2 V(b) + b^2 V(x)$$

ただし

$$V(\bar{y}) = V(4.1014) = \frac{1.0509}{28} = 0.037532$$

$$V(b) = V(1.7184) = \frac{1.0509}{11.9200} = 0.088163$$

から

$$\begin{aligned} V(Y) &= 0.037532 + (3.3073 - 3.4029)^2 (0.088163) \\ &\quad + (1.7184)^2 (0.008166) \\ &= 0.062451 \end{aligned}$$

となる。したがって標準誤差 SE は

$$SE = \sqrt{0.062451} = 0.2499$$

すなわち0.01ha当り平均材積3.9371m³に対する標準誤差は±0.2499m³となる。これより対象全面積に対する推定材積は

$$\begin{aligned} 92.54 \times (393.71 \pm 2 \times 24.99) \\ = 36433.92 \text{m}^3 \pm 4625.15 \text{m}^3 \end{aligned}$$

すなわち92.54ha当りの材積は95%確率において31808.77m³(下限)～41059.07m³(上限)の範囲で推定される。なおその誤差率は同じく95%確率において12.69%である。

かなり広い面積の森林を対象とした二重抽出法による以上の蓄積推定は、空中写真の計測濃度波形の平均基部幅のみを独立変数としたもので、ピーク個数の項は用いていないにもかかわらず、その推定結果は95%確率で誤差率12.69%におさえ、二重抽出法により写真濃度計測からの蓄積推定の可能性が見出された。実際の濃度計測あるいは回帰計算等の行程では計測要因(項目)ができるだけ少ないほど、簡便さからもまた迅速性からも効率的であると考えるが、反面、ピーク個数その他の要因を入れることは当然推定精度の向上の面からは有利であると予測される。

3. 空中写真濃度波周期と材積の関係¹⁶⁾a

いま、同齢林における1タイムユニット内の各樹冠本数 $N_{(CD)}$ を2, 4, 6, 8とする。

$N_{(CD)}$ は周波数 N_i としてユニバーサルカウンターにより計測されるから、その周期 C_i は $\frac{1}{N_i}$ によりそれぞれ 0.5, 0.25, 0.1667, 0.125 となる (第 2 章, § 2-2, 3), (1), (i): 周波数および周期の概念における図 2-8 参照)。

一方、樹冠直径 CD は胸高直径 DBH と相関があり、 DBH は材積 V と相関関係にあるから単木材積 v の大きさは上記タイムユニットの N によって変化する。いま N における単木材積を $v_{(N)}$ とすれば $v_{(2)} > v_{(4)} < v_{(6)} > v_{(8)}$ の傾向を示すと考えられる。しかしその合計材積 V は同齢林の場合、 $v \times N$ となるから、その N_i に大きく影響する。したがって各タイムユニット間の V は v とは逆の順序の $V_{(8)} > V_{(6)} < V_{(4)} > V_{(2)}$ の傾向があると考えられる。つまり各タイムユニット間の V は N の増加量と相関関係が成り立つと考えられる。つまり各タイムユニットごとの材積はその周波数 N_i の 1 次関数と考え、また周期 C_i は周波数の逆数であることから上記タイムユニットの材積は周期の双曲線関係であると考えた。

濃度計測における周期と材積の関係は以上の理論にもとづくものである。

1) 資 料

空中写真濃度波周期と材積の関係に対する回帰の分析検討のための現地調査資料は宮崎県えびの営林署管内における(A): 黒鹿国有林 68, 69 林班スギ, ヒノキ, マツおよび若干の広葉樹を含む Field strip 1, 2, 3 (§ 4-2, 2, (2)): 森林蓄積推定への応用化における表 4-7 参照), および同(B): 川添国有林 70~73 林班, 林齢 $\frac{85}{50 \sim 200}$ 年のカンソその他常緑広葉樹を主とする天然生広葉樹林(面積 270.45ha)のそれぞれを対象とした。

表 4-11(A) は(A)における Field strip 1, 2, 3 の各プロット材積 y と、対応する濃度波周期 $\frac{1}{N}$ を、また表 4-11(B) は同じく(B)における y と $\frac{1}{N}$ をそれぞれ一覧表として示したものである。なお(B)の場合は 1968 年 12 月および 1969 年 1 月、現地中央測量線 (Center line) 1040m を中心に 20m \times 20m プロット(最小単位) 160 個が左右に設置されたが、ここではこれを 40m \times 40m プロット単位を対象に示した。また濃度計測は脚注の空中写真^{*}に対し濃度計測ゲージ^{**}およびユニバーサルカウンターとの組み合わせによって行なったものである。ただし(B)の場合のみ Center line および左右 16m の両サイド各 1 本、計 3 本に対する濃度計測の平均値によった。

2) 材積と濃度波周期の回帰の計算

プロット材積 y を(A), (B)それぞれについて周期 0.01 単位 (0.066~0.075 を 0.07, 0.076~0.085 を 0.08, ...)に括約し、各周期階における重みつき平均値として回帰計算を試みた。表 4-12(A), (B)は重みつき平均値による場合の各周期階の平均材積とその重み (w) を(A), (B)について示したものである。

これより濃度波周期 $\frac{1}{N}$ を独立変数、対応する重みつき平均材積 y を従属変数とする

*^o 空中写真は 1966 年 5 月 25 日林野庁撮影、撮影高度 4978 m, 同縮尺 1: 19675, 普通角写真 ($f = 209.16\text{mm}$) の山-456, C9-No.6(A), 同No.5(B)の各空中写真による。

**^o 濃度計測ゲージは(A)の場合: 1)-(a)0.08 \times 0.20mm, (b)1.4, (c)5mm/min, (e) \times 1, (f)2, 2)-(a) \times 10, 3)-(a)120mm/min, (b)0.5V, (B): 1)-(a)0.08 \times 0.20mm, (b)5.6, (c)5mm/min, (e) \times 1, (f)1,2)-(a) \times 30, 3)-(a)120mm/min, (b)50V による。

表4-11 プロット材積 y と濃度波周期 $\frac{1}{N}$ の対応度Table 4-11 Relation between cycle $\frac{1}{N}$ and volume per plot y

(A) スギ, ヒノキ, マツ (Field strip 1, 2, 3)

(A) *Cryptomeria*, *Chamaecyparis* and *Pinus* (Field strip 1, 2, 3)

Field strip plot	4m×50m プロット材積 Volume per plot y	濃度周波数 Frequency N	濃度波周期 Cycle $\frac{1}{N}$
	m ³		
1- 1	13.125	7	0.1429
2	9.322	9	0.1111
3	6.434	12	0.0833
4	6.798	14	0.0714
5	10.429	7	0.1429
6	9.301	6	0.1667
7	11.378	4	0.2500
8	5.136	6	0.1667
9	9.974	5	0.2000
10	7.688	10	0.1000
11	2.746	7	0.1429
12	3.726	10	0.1000
13	3.797	9	0.1111
14	1.456	3	0.3333
2- 1	15.792	14	0.0714
2	11.737	13	0.0769
3	21.936	15	0.0667
4	10.668	9	0.1111
5	10.241	13	0.0769
6	6.751	10	0.1000
7	9.831	12	0.0833
8	6.264	9	0.1111
9	6.750	7	0.1429
10	7.328	10	0.1000
11	5.643	10	0.1000
12	6.414	11	0.0909
13	6.524	6	0.1667
14	4.439	6	0.1667
15	3.240	1	1.0000
16	2.088	1	1.0000
3- 1	10.205	8	0.1250
2	12.624	10	0.1000
3	3.127	12	0.0833
4	8.516	11	0.0909
5	4.203	15	0.0667
6	8.884	6	0.1667
7	8.395	7	0.1429
8	8.236	6	0.1667
9	8.412	4	0.2500
10	3.435	30	0.0333

(B) 天然生広葉樹林

(B) Natural broadleaved forest

Plot No.	40m×40m プロット材積 Volume per plot y	N	$\frac{1}{N}$	Plot No.	40m×40m プロット材積 Volume per plot y	N	$\frac{1}{N}$
	m ³				m ³		
1	49.872	6	0.1667	14	45.684	8	0.1250
2	30.120	7	0.1429	15	50.819	9	0.1111
3	40.527	9	0.1111	16	54.318	10	0.1000
4	32.595	7	0.1429	17	36.782	10	0.1000
5	30.839	9	0.1111	18	43.578	10	0.1000
6	37.601	7	0.1429	19	42.893	11	0.0909
7	28.033	9	0.1111	20	51.353	9	0.1111
8	27.640	5	0.2000	21	31.182	9	0.1111
9	32.317	6	0.1667	22	26.737	10	0.1000
10	30.691	5	0.2000	23	26.322	9	0.1111
11	18.717	7	0.1429	24	45.669	8	0.1250
12	25.950	7	0.1429	25	33.075	9	0.1111
13	62.974	7	0.1429	26	35.984	7	0.1429

回帰式は(A), (B)それぞれ

$$(A) : Y = 9.6740 - 7.8281 \left(\frac{1}{N} \right)$$

$$(B) : Y = 47.1508 - 75.4122 \left(\frac{1}{N} \right)$$

またその相関係数 r は

$$(A) : r = -0.5764$$

$$(B) : r = -0.5432$$

をえた。

図4-8(A), (B)は上記の回帰図をグラフに示したものである。

以上の結果からスギ, ヒノキ, アカマツ林(A)および天然生広葉樹林(B)のいずれの場合も森林空中写真の濃度波周期と重みつき平均材積の間に回帰関係が成立し, 前記の周期と材積の関係に対する理論は一応立証された。すなわち空中写真濃度計測の場合, 樹冠直径とその濃度波周期は相関関係にあることから, 周期を独立変数とし, 対応する材積を従属変数とする1変数材積式による蓄積の推定が可能であるといえる。ただしその相関係数 r は必ずしも高い値とはいえない。これは各周期階の資料数の不足およびその周期が(A)の場合: 0.07~0.26, (B): 0.09~0.20の範囲に集中的に偏在したこと等によるものと思料される。なお周期と材積の関係については, 樹冠直径と周期, 本数と周波数, プロットサイズと濃度計測スリット幅等の関係が複雑に関連するので, これらについて各種の実験およびその理論的分析と検討の必要が認められる。

4. 空中写真濃度周波数と材積の関係^{16) b}

前項3において濃度波周期と材積の間には1次式による回帰関係の成立が認められた。

表 4-12 重みづきによる各周期階の平均材積

Table 4-12 Weighted average volume of cycle class

(A) スギ, ヒノキ, マツ

(A) *Cryptomeria, Chamaecyparis and Pinus*

括約周期 Cycle interval $\frac{1}{N}$	平均材積 Average volume y	重み Weighted w
	m ³	
0.07	12.182	4
0.08	8.274	5
0.09	14.930	2
0.10	7.260	6
0.11	7.513	4
0.12	10.205	1
0.14	8.289	5
0.17	7.087	6
0.20	9.974	1
0.25	9.895	2
0.33	1.456	1
1.00	2.664	2

(B) 天然生広葉樹林

(B) Natural broadleaved forest

$\frac{1}{N}$	y	w
	m ³	
0.09	42.893	1
0.10	40.354	4
0.11	36.519	8
0.13	45.677	2
0.14	34.849	7
0.17	41.095	2
0.20	29.166	2

しかし森林空中写真の場合その濃度波形はきわめて複雑かつ不規則性を呈するため計測装置(ユニバーサルカウンター)から直接周期を計測することが困難である。そのため周期 C は前述のごとく周波数 N の逆数 $\frac{1}{N}$ によってこれを求めた。

本項では濃度周波数 N と材積を直接結びつけ、その回帰関係の分析検討を行ない、濃度周波数 N の計測により直接材積推定を行なうべくその可能性に対する究明を以下に試みた。

1) 資 料

分析検討のための資料は、濃度波周期による場合の精度その他との比較対応を考慮して前項 3 と全く同じ宮崎県えびの営林署管内の(A)黒鹿国有林68, 69林班スギ, ヒノキ, マ

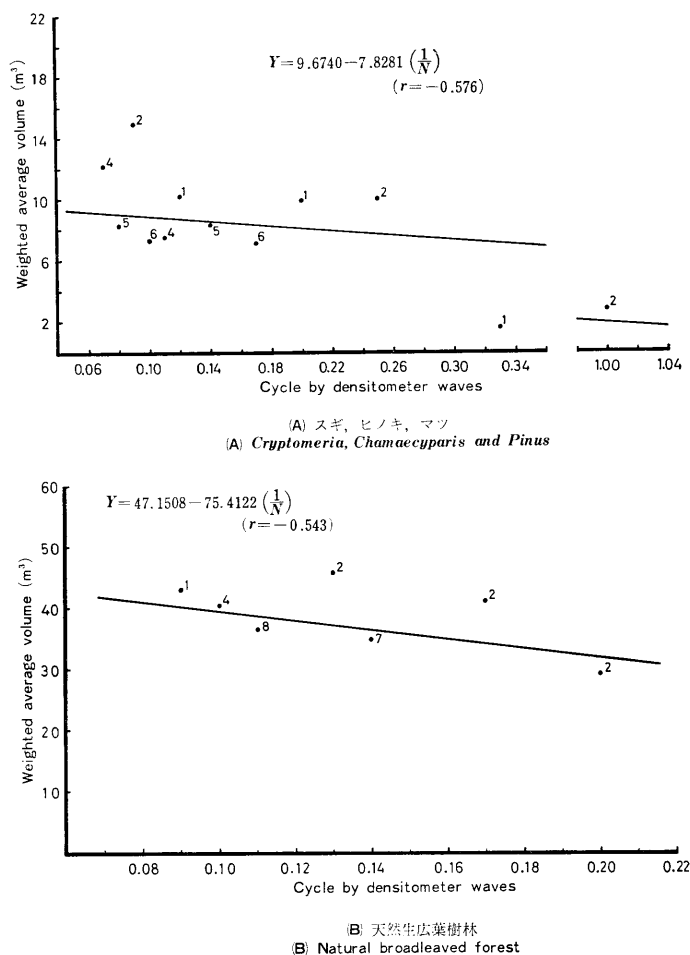


図4-8 濃度波周期と重みつき平均材積の回帰図

Fig. 4-8 Relation between cycle by densitometer waves and weighted average volume

ツ林, および同(B)川添国有林70~73林班天然生広葉樹林のそれぞれにおける濃度周波数 N とプロット材積 y の数値をそのまま用いた(表4-11 (A)および(B)参照)。したがって各プロット材積 y は(A)の場合: $4\text{m} \times 50\text{m}$ プロット, (B): $40\text{m} \times 40\text{m}$ プロットの各ユニット当り材積である。

2) 材積と濃度周波数の回帰の計算および考察

空中写真濃度計測周波数を独立変数 x とし, 対応する各プロット材積を従属変数 y とし (A), (B)のそれぞれに対する回帰の計算を以下に試みた。なお計算は x つまり濃度周波数について同一計測値階ごとに y つまりプロット材積を平均し, x 階別 y の重みつき平均値として

$$Y = b_0 + b_1 x$$

により回帰係数 b_0 , b_1 および相関係数 r を求めた。表4-13 (A), (B)は重みつき平均値

による場合の各周波数階 (x) 別プロット平均材積 (y) とその重み (w) を (A), (B) について示したものである。

表 4-13 重みづきによる各周波数階の平均材積

Table 4-13 Weighted average volume of frequency class

(A) スギ, ヒノキ, マツ

(A) *Cryptomeria, Chamaecypris and Pinus*

括約周波数 Frequency interval x	平均材積 Average volume y	重み Weighted w
	m ³	
1	2.664	2
3	1.456	1
4	9.895	2
5	9.974	1
6	7.087	6
7	8.289	5
8	10.205	1
9	7.513	4
10	7.293	6
11	7.465	2
12	6.464	3
13	10.989	2
14	11.295	2
15	13.070	2

(B) 天然生広葉樹林

(B) Natural broadleaved forest

x	y	w
	m ³	
5	29.166	2
6	41.095	2
7	34.849	7
8	45.677	2
9	36.519	8
10	40.354	4
11	42.893	1

その結果(A), (B)それぞれについて回帰式

$$(A) : Y = 4.358 + 0.417 x$$

$$r = 0.619$$

$$(B) : Y = 26.902 + 1.299 x$$

$$r = 0.516$$

をえ、回帰式の成立をみた。

ちなみに表 4-13において w すなわち重みは必ずし、括約周波数 x に対応する各平均材

積 y をそれぞれ代表値とみたてた場合の回帰計算を試みた結果は

$$(A) : Y = 4.001 + 0.489x$$

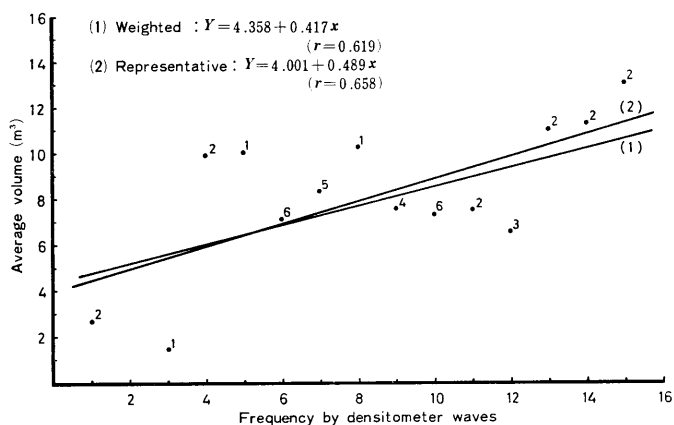
$$r = 0.658$$

$$(B) : Y = 26.831 + 1.477x$$

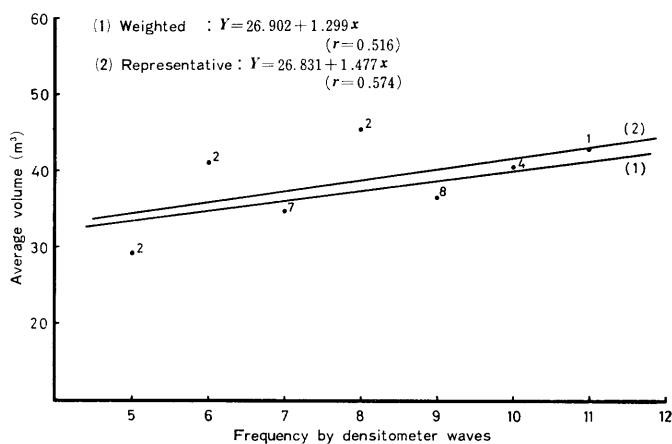
$$r = 0.574$$

となった。

図 4-9 (A), (B) はこれらの関係を重みづきの場合(1)により, また代表値に対しては(2)により, それぞれグラフに示したものである。



(A) スギ, ヒノキ, マツ
(A) *Cryptomeria, Chamaecyparis and Pinus*



(B) 天然生広葉樹林
(B) Natural broadleaved forest

図 4-9 濃度周波数と平均材積の回帰図

Fig. 4-9 Relation between frequency by densitometer waves and average volume

以上の結果から(A)スギ, ヒノギ, マツ林, および(B)カシその他常緑広葉樹林を主と

する天然生広葉樹林のいずれの場合も空中写真濃度におけるプロットごと計測周波数 x と、対応する材積 y との間には1次式による回帰関係が成立することが認められた。ただしその相関係数 r は濃度波周期による場合に比し重みづぎの場合(A)は $+0.043$ と若干上っているのに反し、(B)では逆に -0.027 とわずかながら下っている。これは回帰の計算が前項3の濃度波周期の場合と全く同じデータによっていることから、濃度波周期のところで述べたと同様の理由にもとづくものであると思料する。しかし代表値による場合は周期に比し(A): $+0.082$, (B): $+0.031$ と(A), (B)いずれも上っており、また重みづぎに対しても(A): $+0.039$, (B): $+0.058$ となる。なお回帰係数 b_1 および相関係数 r は濃度波周期の場合とは逆に(+)となっている。これは濃度波周期 C が濃度周波数 N の逆数 $\frac{1}{N}$ によってあらわされているためである。すなわち鬱閉した林分では $\frac{1}{N}$ は樹冠直径 CD をあらわすと考えられるから、その意味で平均樹冠直径は材積と関連する。一方、濃度周波数 N は本数に対応し、本数は密度をあらわすと考えられることから密度も材積と関連する。したがって濃度周波数 N と濃度波周期 C (この場合 $\frac{1}{N}$) は両者いずれの場合も材積との間に相関関係を有するが、ただしその方向係数は濃度波周期と濃度周波数とは逆になることになる。

ともあれ以上の結果より森林空中写真濃度の計測、なかんずくその周波数計測が1次式により蓄積推定のための回帰の成立をみたことは、(波形基部幅)→(周期 $\frac{1}{N}$)→(周波数 N)=(ピーク数)の関係にあることになり、そしてピーク数は樹冠本数をあらわすことから林分蓄積推定における写真濃度の自動計測化システムに対する指向性とその可能性を示す一つの成果であるといえよう。

§ 4-3 空中写真濃度波形側断面積と蓄積の関係

空中写真の濃度計測によって森林蓄積の推定を行なう場合は以上のごとく写真濃度波形基部幅、波形のピーク数、濃度波周期または濃度周波数等の写真濃度計測要因があるが、これらの諸要因を総合的に包括するものとして、いま一つ材積との結びつき、つまり相関度が高いものとして濃度波形側断面積が考えられる。とくに濃度波形側断面積は第2章、§ 2-2の1の中において述べたごとくユニバーサルカウンターおよびA-Dコンバーターとの組合せにより自動的に計測されるという利点とあわせ考え、将来大面積森林の蓄積推定を行なう場合、森林蓄積の自動計測化システムに対するもっとも大きな計測要因の一つであるとみなされる。

したがって本節において濃度波形側断面積と材積の関係について以下に模式図にもとづく理論的考察ならびに実際の林分に対する実験および濃度波形側断面積による材積推定とその分析検討を試み、次章(第5章)における大面積森林を対象とした蓄積推定のための計測システムの確立化とあいまってその実用化をはかろうとするものである。

1. 模式図にもとづく理論的考察

SPURR¹⁰⁷⁾によれば空中写真の立体視にもとづく視差測定尺の使用により林分側断面積はきわめて正確に測定されうる。そして材積の推定は林分材積と林分側断面積の対応、すなわち相関関係の存在が知られば、平均樹高あるいは林分密度等による場合よりもむしろ林分側断面積による方法の方が理論的に評価されるであろう。ただしこの場合、森林の

タイプや場所，林木のフォーム等の相違または変化に対して十分に考慮されなければならないと述べている。

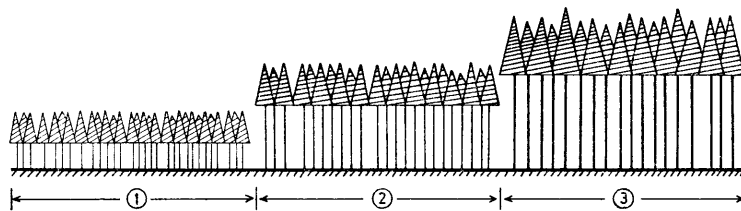
すなわち視差測定程のフローティングドット(Floating dot)を立体空中写真上の樹冠の各頂点に添わせていけば，その林分またはフローティングドットの測線上における樹冠頂の連続線が描かれることになる。これがいわゆる林分側断面の上界線となる。対応する下界線は各基準点の設定にもとづくベースグラウンドのフローティングドットの測定値または樹高の測定により容易に描かれうる。これにより対象林分または測線上の林分側断面積は測定される。これと対応する材積から回帰関係または相関関係が見出されれば林分側断面積の測定により材積の推定が可能であるということになる。⁷⁾

1) 地上での林分計測を対象とした場合

ここでまず地上での林分計測を対象に上記の関係についてその理論的分析検討を以下に試みる。

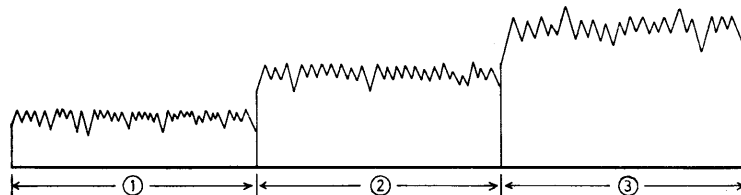
いま，年齢が幼，中，壮の3階層を有する林分(人工林)において，これをある任意の部分で垂直に切断した場合の切断面を模式的に示すと図4-10(1)のような状態を呈するであろう。同図において①は幼齡林，②は中齡林，③は壮齡林のそれぞれをあらわすものとする。

これより各単木の樹高，樹冠の頂角，樹冠直径および樹冠長などが測定されれば，その切断面の面積は求めることができる。図4-10(2)は図4-10(1)にもとづいて描かれた切断面図を示したものである。なおこの場合各単木の樹高の測定は幼，中，壮等の各階層毎に平均値をとりこれを用いても切断面としての総対的關係，つまり面積としての絶対量は求められる。そしてここでいう切断面がいわゆる前述した林分側断面(Stand profiles)と対応することになる。



(1) 幼・中・壮令階別林分の切断面図

(1) Cross section of juvenile, middle age and old age of stand



(2) 幼・中・壮令階別 Stand profiles

(2) Stand profiles of juvenile, middle age and old age

図 4-10 Stand profiles の模式図

Fig. 4-10 Model of stand profiles

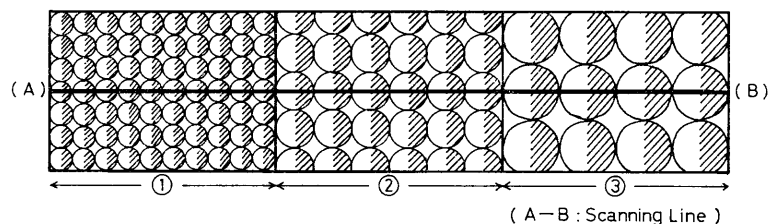
これより同一樹種をもって構成される人工林の場合、年齢(齡階)の相違により上長生長量つまり樹高の値が変わってくる。また同様の条件によって胸高直径の値も変わってくる。したがって単木の材積量はもちろん、これと関連して単位面積当り、つまり林分としての蓄積(材積)量も変化するから、その林分側断面積と材積とは回帰関係または相関関係を有するものと想定される。

なお前記図4-10(1)、(2)の模式図では地形(ベースグラウンド)を平坦的に示したが、傾斜を有する場合あるいは各種の地形の変化をもつ場合でもその理論的關係は全く同じである。また同一齡階において密度、樹高等の相違に起因する条件の違いは前述の森林タイプや場所、林木のフォーム等の変化にもとづく場合と全く同じケースにおける分析検討が試みられなければならないことになる。

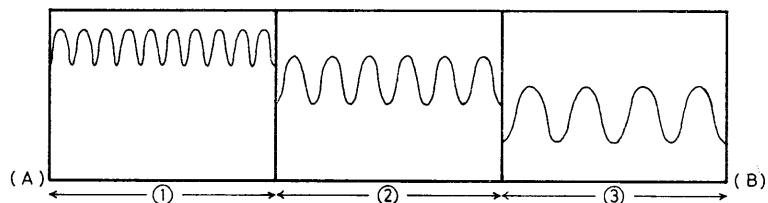
2) 写真濃度計測を対象とした場合

森林空中写真の計測濃度波形はそのグラフ上では前項の模式図(図4-10(2))の形状が各林分についてしばしば認められる。すなわちスギ、ヒノキ、あるいはマツ等の同一樹種において年齢(齡階)に相違がある場合、濃度波形はそれぞれの濃度レベルをもってグラフ上にえがかれる。これは第3章、§3-3ならびに§3-4における各樹種の濃度レベルの問題とあわせ、年齢(齡階)別の濃度レベルとしてもその実験と分析検討を試みたところであるが、前項1)のStand profilesにヒントをえて、濃度波形側断面としての取り扱いのうゑにたち、材積との対応について各種の実験および分析検討を試みた。

その基本的理論は前項におけるStand profilesすなわち林分側断面積と材積との相関関係にもとづくものであるが、これがどのようにして濃度波形側断面積との対応つまり結びつきがなされたかを以下に述べる。



(1) 幼・中・壯令階別空中写真林木樹冠像
(1) Crown of juvenile, middle age and old age of trees



(2) 幼・中・壯令階別空中写真濃度計測波形側断面積
(2) The area of profiles of densitometer waves at juvenile, middle age and old age

図4-11 森林空中写真濃度波形側断面積の模式図

Fig. 4-11 Model of the arrangement of crown and the densitometer waves

いま、同一樹種において年齢が幼、中、壮の3階層を有する人工林を仮定した場合、その空中写真像はこれを模式的に示すと図4-11(1)の状態で各林木樹冠が写されるであろう。なお同図において①は幼齡林、②は中齡林、③は壮齡林の各階層を示す。また各樹冠像は太陽光線の方向によって同図のごとく、一様の樹冠陰影を呈する。

ここである任意の部分に対し濃度計測を行えば、それによってえがかれる濃度波形のグラフは図4-11(2)に示す波形の形状を呈する。

すなわち各階層における濃度波形は樹冠直径の大(壮齡林)、中(中齡林)、小(幼齡林)等に応じてその形状つまり上下の濃度変動および波形の幅(基部幅等)の相違性とあわせ濃度レベルも同様の相違性をもってえがかれる。つまり同一樹種の場合、年齢(階層)が若より中、壮、老と進階するにつれ生長量の減少化とあわせその樹種が示す濃度、換言すれば枝葉の濃さは変化する。この現象は実際の林分について十分に認められるところである。そしてこれを被写体として写された空中写真ではさらに感光波長の反射光量にもとづき写真像の色調変化として明瞭に表現される。したがって写真濃度計測装置により計測されグラフ上にえがかれた森林空中写真の濃度は明確なレベルの相違性をもって示される。

以上の理論的根拠が各階層に対応する濃度波形側断面積として前項1)の林分側断面積との結びつけを試みたゆえんである。

ただし両者の間、つまり林分側断面積と濃度波形側断面積とでは全く逆の傾向的関係にある。林分側断面積の場合はその面積量は幼齡林<中齡林<壮齡林の関係にあるが、濃度波形側断面積の場合はその濃度の明るさによって面積が増大するため一般に幼齡林>中齡林>壮齡林となる。したがって林分側断面積と材積とは(+)の相関関係を有するのに対し、濃度波形側断面積と材積の関係は一般に(-)の相関関係となる。

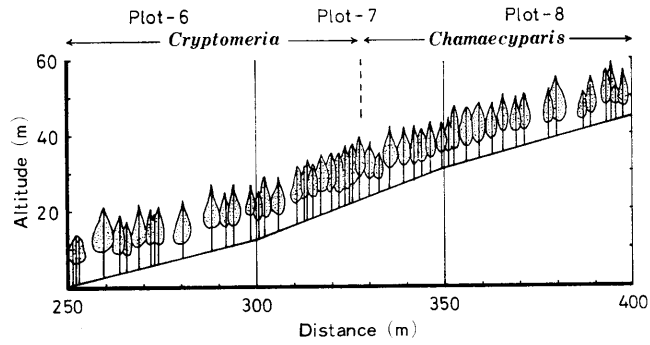
なお実際の森林は上記の模式図に示すような整然とした並び方はしないから、それによってえがかれる濃度波形グラフも樹冠直径の若干の変動とあわせ規則的な形状を呈することはありえない。すなわち写真の部位によっては樹冠直径の $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, …等の濃度計測が行なわれるから、その波形グラフの形状もそれに対応して複雑に変化するのが常である(第3章, §3-1, 図3-1(1), (2), (3)参照)。しかしいかなる場合も波形グラフとしてあらわれる濃度の基本的性質に変わりはないから、原則としてその理論にもとづいて適用してもさしつかえないと考える。また濃度が異なる他の樹種が混交する場合についてもこれを樹種別に分類(層化)し分析検討を行なうことにより、材積との対応度ならびに精度上に問題はないと考える。

2. 林分による実験⁵³⁾d

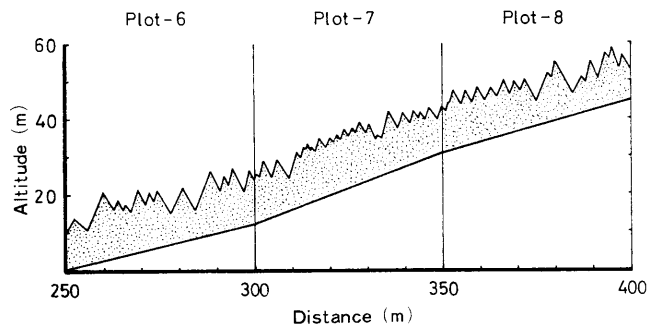
前項の模式図にもとづく理論的考察の結果を実際の林分すなわち森林空中写真について実験的に適用し、その濃度計測を以下に試みた。

実験に用いた資料は宮崎県えびの営林署管内黒鹿国有林68, 69林班スギ, ヒノキ, マツおよび広葉樹(一部)に対し、1967年10月および11月現地調査を実施した Field strip No. 1, 2, 3のうち No. 2(§4-2, 2, 2), (1)における図4-6および表4-7参照)を対象とした。すなわち幅4m×長さ50mユニットプロット16個のそれぞれに対応する計測濃度波形側断面積を写真濃度測定装置, A-Dコンバーターおよびユニバーサルカウンターにより計測させた結果を各プロット材積と対比させると表4-14に示すとおりである。なお図

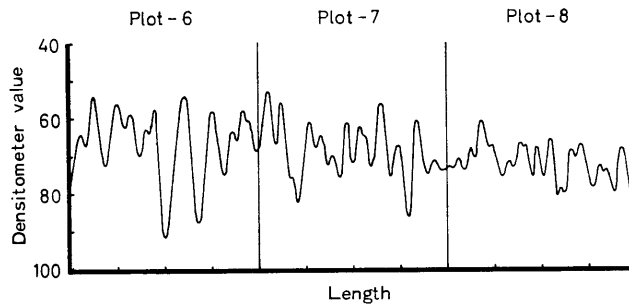
4-12 (1), (2), (3)はその林分立木位置図, 林分側断面 (Stand profiles) および計測濃度波形を部分的的(Plot-6, 7, 8)に示したものである。



(1) 林分立木位置図
(1) Forest



(2) 林分側断面
(2) Stand profiles



(3) 計測濃度波形グラフ
(3) Densitometer waves

図 4-12 林分にもとづく林分側断面と濃度波形グラフの関係
Fig. 4-12 Relation between densitometer waves and stand profiles

表 4-14 プロット別材積と対応する濃度波形側断面積一覧
 Table 4-14 Relation between the area of profile of densitometer waves and volume per plot

Plot No.	1	濃度波形側断面積 The area of profile of densitometer waves x cm ²	プロット材積 (200m ² 当り) Volume per plot y m ³	log y	$1+x+\log y$
1	1	17.1	15.792	1.1984	19.2984
2	1	17.3	11.737	1.0696	19.3696
3	1	20.4	21.936	1.3412	22.7412
4	1	17.3	10.668	1.0281	19.3281
5	1	21.6	10.241	1.0103	23.6103
6	1	16.7	6.751	0.8294	18.5294
7	1	16.5	9.831	0.9926	18.4926
8	1	13.2	6.264	0.7969	14.9969
9	1	12.8	6.750	0.8293	14.6293
10	1	14.1	7.328	0.8650	15.9650
11	1	12.6	5.643	0.7515	14.3515
12	1	12.9	6.414	0.8071	14.7071
13	1	10.4	6.525	0.8149	12.2149
14	1	10.1	4.439	0.6473	11.7473
15	1	8.1	3.240	0.5105	9.6105
16	1	3.3	2.088	0.3197	4.6197
Total	16	224.4	135.647	13.8118	254.2118

これより計測濃度波形側断面積を x 、対応する各プロット材積を y とし、 x と y の対応性のチェックのための回帰計算を表 4-15のごとく最小二乗法計算によって試みた。なお、ここで y は対数を取り $\log y$ として計算を行なった (表 4-14 表参照)。またその分散分析の結果は表 4-16 に示すとおりである。

分散分析の結果は Const.(常数項), Reg. on x (x の回帰の項) とともに高度の有意性を示した。したがって回帰式

表 4-15 プロット材積と濃度波形側断面積の回帰計算組織解
 Table 4-15 Solution system of regression to the area of profile of densitometer waves and volume per plot

	1	x	log y	$1+x+\log y$
1	16	224.4	13.8118	254.2118
x		3473.58	209.6086	3907.5886
log y			12.8629	236.2833
14.0250		326.37	15.8981	342.2681
0.8632375			0.9400	16.8381
0.0487119			0.1656	0.1656

表4-16 回帰の分散分析
Table 4-16 Analysis of variance of regression

Source	SS	DF	MS	F
Const.	11.9229	1	11.9229	1010.42**
Reg. on x	0.7744	1	0.7744	65.63**
Error	0.1656	14	0.0118	
Total	12.8629	16		

$$\begin{aligned}\log Y &= b_0 + b_1(x - \bar{x}) \\ &= 0.8632 + 0.0487(x - 14.0250)\end{aligned}$$

をえ、その相関係数 r は

$$r = \frac{15.8981}{\sqrt{326.37} \sqrt{0.9400}} = 0.917$$

となった。図4-13はこの関係をグラフに示したものである。

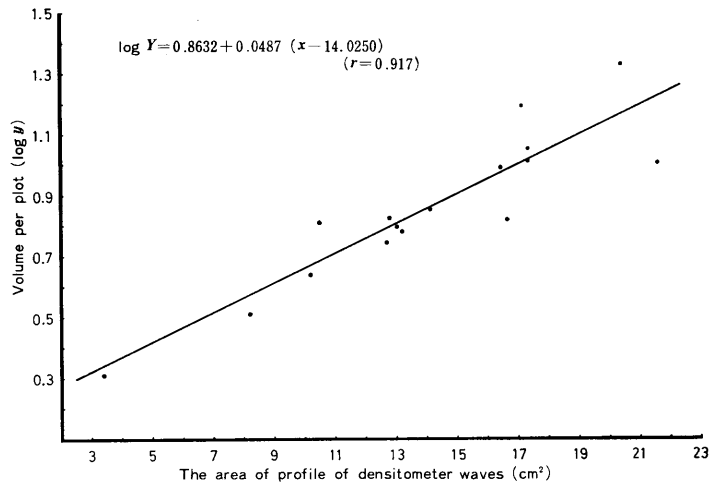


図4-13 濃度波形側断面積 (x) と対応するプロット材積 ($\log y$) の回帰図
Fig. 4-13 Relation between volume per plot and the area of profile of densitometer waves
(*Cryptomeria*, *Chamaecyparis* and broadleaved)

林分に対する以上の実験および分析の結果から、前項1の模式図にもとづく理論、つまり計測濃度波形側断面積と材積の関係はきわめて高い相関関係すなわち対応性にあることが確かめられた。したがって森林空中写真の濃度波形側断面積の計測によって林分材積の推定を行なうことの可能性が立証されたといえる。なお本項による実験結果では濃度レベルの異なるスギ、ヒノキ、マツおよび広葉樹等の各樹種が含まれたため、その傾向すなわち相関係数は(+)によってあらわれている。

3. 空中写真濃度波形側断面積による材積回帰式の検討

空中写真濃度の波形側断面積が林分またはプロットの材積ときわめてよく対応することが以上の模式図による理論的考察およびその理論にもとづいて試みた実際の林分に対する実験と分析の結果から確かめられ、あわせて林分材積推定化への応用の可能性が見出されたので、森林空中写真を対象にその濃度波形側断面積を計測させ、これによって林分材積推定のための回帰その他の計算および分析検討を以下に試みた。なお本実験研究については多くの林分を対象に実験と分析検討を実施したが、いずれの場合もほぼ同様の成果がえられたので、本項では前項における実験例を含めその一部の結果を記述するにとどめる。またこれらを整理する意味でスギ、ヒノキ等の針葉樹人工林と天然生広葉樹林にわけ、それぞれ齢階または樹種の構成要因別にこれを区分した。

1) 針葉樹人工林を対象とした場合

(1) スギ、ヒノキ壮齢林の場合¹³⁾*

(i) 資 料

スギ、ヒノキ壮齢林に対する実験および分析検討のための資料は宮崎県えびの営林署管内黒鹿国有林68林班スギ、ヒノキ人工林、林齢50年をその対象とした。そして同林分について幅5.0m×長さ1098.7mの測線(ストリップ)調査を現地に行ない、同測線を20m毎に区切りこれを1プロットユニット(最小単位)とした。これによりとられたプロット数は55個、うち疎開地(空地)、保護樹帯(広葉樹林帯)等を除く実際の使用プロット数は43個である。

(ii) 写真濃度波形側断面積の計測

写真濃度波形側断面積の計測は写真濃度計測装置、A-Dコンバーターおよびユニバーサルカウンターを連結させて各プロット毎に行なった。*)**)

表4-17は5m×20m=0.01ha当りプロット材積と、対応する計測写真濃度波形側断面積を一覧表に示したものである。

(iii) 材積回帰式の計算

いま、濃度波形側断面積を x 、対応するプロット材積を y とし、 y は対数を取り、 x を 0.5cm^2 単位に括約して対応するプロット材積 $\log y$ を x とともに平均し、重みづき平均値による材積回帰式を以下に求めた。表4-18は濃度波形側断面積の平均値 x に対応するプロット材積 $\log y$ の平均値およびその重み w を示したものである。

これより材積回帰式算出のための最小二乗法計算およびその分散分析は表4-19および表4-20に示すとおりである。

すなわち分散分析の結果、1次式における回帰係数 b_0 、 b_1 ともに有意にあらわれた。したがって材積回帰式は

$$\log Y = 0.4605 + 0.0278 x$$

その標準誤差 SE は

*) 空中写真は山-456, C9-6, 1966年5月25日林野庁撮影, 撮影高度4978m, 同縮尺1:19675, 普通角写真($f=209.16\text{mm}$)の密着ポジフィルムを使用した。

**) 濃度計測ゲージは写真濃度測定装置: 1)-(a)0.08×0.20mm, (b)1.4, (c)5mm/min, (e)×1, (f)2枚, 2)-(a)×10, (3)-(a)120mm/min, (b)10V, A-Dコンバーター: 1000Vレンジ, ユニバーサルカウンター: 1ms, 1Vによった。

$$SE = \sqrt{0.00703} = \pm 0.0838$$

となった。また相関係数 r は

表 4-17 濃度波形側断面積およびプロット材積一覧表

Table 4-17 Relation between volume per plot and the area of profile of densitometer waves

No.	Plot No.	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves	プロット材積 Volume per plot	No.	Plot No.	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves	プロット材積 Volume per plot
		cm ²	m ³			cm ²	m ³
1	1	4.11	3.654	23	31	9.60	5.828
2	2	8.10	3.801	24	32	8.40	3.697
3	3	7.59	5.125	25	33	8.28	5.698
4	4	7.11	4.892	26	34	8.61	5.784
5	5	7.98	4.266	27	35	7.59	3.741
6	6	7.62	4.522	28	36	8.52	4.463
7	7	9.00	6.976	29	37	8.40	5.145
8	8	8.10	6.504	30	38	7.80	3.153
9	9	5.88	3.850	31	40	6.12	6.159
10	10	8.91	8.390	32	41	9.78	5.111
11	11	8.10	6.510	33	42	8.40	3.847
12	13	9.12	4.499	34	43	8.40	4.853
13	14	9.30	7.875	35	44	9.21	4.243
14	16	8.31	4.365	36	45	7.41	3.414
15	18	8.19	4.737	37	46	8.49	3.640
16	19	8.10	5.415	38	47	8.40	4.468
17	21	8.91	7.126	39	48	8.01	5.907
18	22	8.79	4.289	40	49	7.29	3.874
19	27	10.92	5.082	41	52	5.70	4.863
20	28	9.00	4.963	42	53	7.59	3.971
21	29	7.29	6.855	43	55	8.10	3.630
22	30	10.71	6.166				

表 4-18 濃度波形側断面積 x およびプロット材積 $\log y$ の重みつき平均値

Table 4-18 Relation between weighted mean of volume per plot $\log y$ and the area of profile of densitometer waves x

No.	x	$\log y$	w	No.	x	$\log y$	w
	cm ²				cm ²		
1	4.11	0.5628	1	7	8.42	0.6569	10
2	5.70	0.6869	1	8	8.99	0.7470	7
3	6.00	0.6875	2	9	9.45	0.8309	2
4	7.11	0.6895	1	10	9.78	0.7085	1
5	7.48	0.6421	7	11	10.71	0.7900	1
6	8.05	0.6751	9	12	10.92	0.7060	1

表 4-19 重みつき平均値によるプロット材積と濃度波形側断面積の回帰計算組織解
 Table 4-19 Solution system of regression to the area of profile of densitometer waves and volume per plot by weighted mean

	w	wx	$w \log y$	$w(1+x+\log y)$
1	43	351.17	29.5491	423.7191
x		2929.7181	243.0354	3523.9235
$\log y$			20.4237	293.0082
8.16674419		61.8025	1.7155	63.5180
0.68718837			0.1179	1.8334
0.02775778			0.0703	0.0703

表 4-20 回帰の分散分析
 Table 4-20 Analysis of variance of regression

Source	SS	DF	MS	F
Const.	20.3058	1	20.3058	2900.83**
Reg. on x	0.0476	1	0.0476	6.80*
Error	0.0703	10	0.0070	
Total	20.4237	12		

$$r = \frac{1.7155}{\sqrt{61.8025 \times 0.1179}} = 0.6355$$

となる。図 4-14 はこの関係をグラフに示したものである。

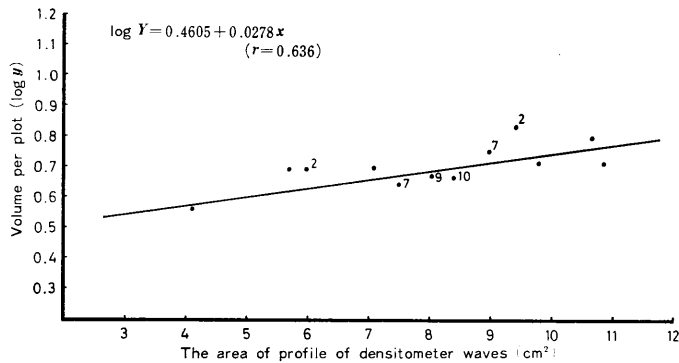


図 4-14 濃度波形側断面積 (x) とプロット材積 ($\log y$) の回帰図
 Fig. 4-14 Relation between volume per plot and the area of profile of densitometer waves
 (Middle age class of *Cryptomeria* & *Chamaecyparis*)

(iv) 考 察

本林分の場合、プロット間の材積変動が殆ど認められず、そのため濃度波形側断面積 (x) の変化に対し Reg. on x 、つまり b_1 は 0.0278 ときわめて小さい値を示す。これは本林分が林齢、蓄積、密度ともにほぼ一定の人工林であることによるものと考えられる。なお上

記重みつき平均値の x , $\log y$ をそれぞれの部分の代表値とみなして個々にとりあつた場合の相関係数 r は 0.708 と若干高くなる。またそのときの回帰係数は $b_0=0.5090$, $b_1=0.0235$ となり、回帰係数そのものは重みづきの場合と殆んど変わらない。

(2) 一部幼齢林を含むスギ壮齢林の場合⁵⁷⁾ a

(i) 資 料

スギ幼、壮齢林に対する分析検討のための資料は前項(1)と同じ宮崎県えびの営林署管内の林齢55年(壮齢林)および部分的に18年(幼齢林)を含む67林班スギ人工林をその対象とした。同林分に対する現地調査は1970年9月5,6日、空中写真の主点(中心点)より放射線方向にそれぞれ Strip No.1: N65°E方向に幅5.0m×長さ310m, Strip No.2: N135°W方向に同5.0m×460mの2本のストリップ調査を行なった。なお各ストリップはこれを20mの長さに区切り1プロットユニットとした。

(ii) 写真濃度波形側断面積の計測

写真濃度波形側断面積の計測はこれも前項(1)に使用した空中写真と同じ山-456, C9-6の密着ポジフィルムに対し脚注のゲージによって行なった。^{*}

表4-21はStrip No.1,2別写真濃度波形側断面積と、対応するプロット材積を一覧表に示したものである。ただしStrip No.1の最後のプロット(No.16)は長さ10mすなわち0.5プロットとなったためこれを2倍して1プロット単位にした。これによりプロット総数はStrip No.1が16, Strip No.2が23となる。

表4-21 Strip No.1,2別濃度波形側断面積およびプロット材積一覧表
Table 4-21 Relation between volume per plot and the area of profile of densitometer waves in each strip No.1 and strip No.2

Strip No.	Plot No.	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves	プロット材積 Volume per plot	Strip No.	Plot No.	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves	プロット材積 Volume per plot	
		cm ²	m ³			cm ²	m ³	
1	1	7.36	7.28	2	5	6.26	6.39	
	2	8.88	8.93		6	6.04	6.39	
	3	7.08	6.00		7	9.50	6.18	
	4	7.35	7.28		8	9.52	6.59	
	5	8.86	4.05		9	7.96	9.01	
	6	4.30	4.52		10	8.26	5.26	
	7	6.84	6.50		11	9.18	8.42	
	8	6.50	10.73		12	6.18	10.64	
	9	6.42	8.78		13	8.06	5.61	
	10	4.18	5.78		14	6.80	8.49	
	11	3.00	7.81		15	7.54	4.66	
	12	6.14	8.87		16	8.54	7.52	
	13	4.30	10.48		17	8.02	8.73	
	14	14.82	1.54		18	7.26	11.04	
	15	16.98	0.95		19	6.22	7.02	
	16	20.10	0.28		20	8.10	4.57	
Total	16	133.12	99.78		21	5.52	7.83	
Mean		8.3200	6.2363		22	6.64	6.79	
2	1	8.50	6.47		23	8.00	7.62	
	2	6.54	6.78		Total	23	174.42	171.72
	3	6.50	6.94		Mean		7.5835	7.4661
	4	9.28	12.77					

* 濃度計測ゲージは写真濃度測定装置: 1)-(a)0.08×0.20mm, (b)1.4, (c)5mm/min, (e)×1, (f)2枚, 2)-(a)×10, 3)-(a)240mm/min, (b)10V, A-Dコンバーター: 100Vレンジ, ユニバーサルカウンター: 1ms, 1V によった。

(iii) 同齡林分に対する分析

2本のストリップは Strip No. 1 に部分的に幼齡林(18年生スギ林)を含む以外は殆ど55年生のスギ壯齡林で占められている。しかしそのストリップの方向がそれぞれ異なるため、これに起因する地形、太陽光線の方向等も異なる。したがって濃度のあられ方も若干の相違を呈する。とくに Strip No. 1 は林縁部に接して伸びているため Strip No. 2 に対する濃度レベルのズレが認められる。そこでまず2本のストリップについて壯齡林のみのプロットを対象に、すなわち Strip No. 1 における幼齡林の3プロット(No.14, 15, 16)をはずし、その濃度波形側断面積を x 、対応するプロット材積を y とし、 x および y (Strip No. 1 と 2 の区別は添字をもって行なう) についてそれぞれ変化の度合いに差があるかどうかを以下のごとく検定した。

まず濃度波形側断面積についてそれぞれの分散比をとり、その分散の有意性検定を試みると

$$F = \frac{s^2_{x_1}}{s^2_{x_2}}$$

$$s^2_{x_1} = \frac{39.7860}{12} = 3.3155$$

$$s^2_{x_2} = \frac{32.1567}{22} = 1.4617$$

$$\therefore F = \frac{3.3155}{1.4617} = 2.268^*$$

(ただし $df : 12, 22$)

となり、自由度12, 22において5%レベルで分散は有意となる。したがって平均値の t -検定は濃度波形側断面積については実施しない。

これに対し材積の場合は

$$F = \frac{s^2_{y_1}}{s^2_{y_2}}$$

$$s^2_{y_1} = \frac{52.0392}{12} = 4.3366$$

$$s^2_{y_2} = \frac{88.7831}{22} = 4.0356$$

$$\therefore F = \frac{4.3366}{4.0356} = 1.075^{\text{not sig.}}$$

(ただし $df : 12, 22$)

となり、2本のストリップ間の分散に有意差は認められない。ちなみに材積の平均値間の比較を t -検定により試みると

$$t = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{s_{D\bar{y}}}$$

$$= \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{\sqrt{\frac{\sum y_2^2 + \sum y_1^2}{(N_2 + N_1) - 2} \left(\frac{1}{N_2} + \frac{1}{N_1} \right)}}$$

$$= \frac{7.4660 - 7.4623}{\sqrt{\frac{88.7831 + 52.0392}{(23 + 13) - 2} \left(\frac{1}{23} + \frac{1}{13} \right)}} = \frac{0.0037}{0.7062} < 1^{\text{not sig.}}$$

となり、材積間にも差がない。

すなわち55年生スギ壮齡林を対象とした場合、Strip No. 1, 2間では蓄積度つまり材積にはそのプロットの間の変動にもまた平均値間にも差がないにもかかわらず、濃度波形側断面積つまり濃度レベルのあらわれ方にはその違いを示す。したがって濃度計測上はStrip No. 1と2では異質の林分であるとみなさざるをえない。これより材積回帰式の計算はStrip No. 1, 2についてそれぞれ行なう必要がある。

(iv) 異齡林に対する回帰の計算と分析

同一ストリップ内で異齡林を含むものはここではStrip No. 1である。すなわちStrip No. 1における全プロット数16個のうち55年生スギ林13プロット、これに対しわずか3プロットではあるが18年生スギ林が含まれている。したがって同ストリップに対し下記のとおり材積回帰式の計算を試みた。

すなわちStrip No. 1におけるプロット16個に対し濃度波形側断面積 x を独立変数、対応するプロット材積 y を従属変数として材積回帰式算出のための最小二乗法計算を行なうと表4-22に示すとおりである。また表4-23はその分散分析を示したものである。

表4-22 Strip No. 1, 2におけるプロット材積と濃度波形側断面積の回帰計算組織解
Table 4-22 Solution system of regression to the area of profile of densitometer waves and volume per plot in each strip No. 1 and strip No. 2

	1	x	y	$1+x+y$
1	16	133.12	99.78	248.90
x		1459.1864	646.5296	2238.8360
y			779.3102	1525.6198
8.3200000		351.6280	-183.6400	167.9880
6.23625000			157.0572	-26.5828
-0.522256475			61.1500	61.1500

表4-23 回帰の分散分布
Table 4-23 Analysis of variance of regression

Source	SS	DF	MS	F
Const.	622.2530	1	622.2530	142.46**
Reg. on x	95.9072	1	95.9072	21.96**
Error	61.1500	14	4.3679	
Total	779.3102	16		

分散分析の結果は常数項、回帰係数ともに高度の有意差を示した。したがって材積回帰式

$$\begin{aligned} Y &= \bar{y} + b(x - \bar{x}) \\ &= 6.2363 - 0.5223(x - 8.3200) \end{aligned}$$

をえ、その相関係数 r は

$$r = \frac{-183.6400}{\sqrt{351.6280 \times 157.0572}} = -0.781$$

となりきわめて高い相関をえた。

いま、上記の関係をグラフに示すと図4-15のとおりである。同グラフにおいて回帰線に対する上下の線は95%信頼帯の幅 (Confidence band: CB) をあらわしたものであり、その計算は

$$CB = sy \cdot t_{.025} \\ = \sqrt{V(Y)} \cdot t_{.025}$$

ただし

$$V(Y) = V(\bar{y}) + V(b) (x - \bar{x})^2 \\ = V(6.2363) + V(-0.5233) (x - 8.3200)^2 \\ = \frac{4.3679}{16} + \frac{4.3679}{351.6280} (x - 8.3200)^2 \\ = 0.27299375 + 0.01242193 (x - 8.3200)^2$$

$$df = 16 - 2 = 14 \text{ における } t_{.025} = 2.1448$$

により各 x における信頼帯 $\bar{Y} \pm t_{.025} CB$ を計算してえがいたものである。これにより写真濃度による材積回帰線の信頼度が確かめられた。

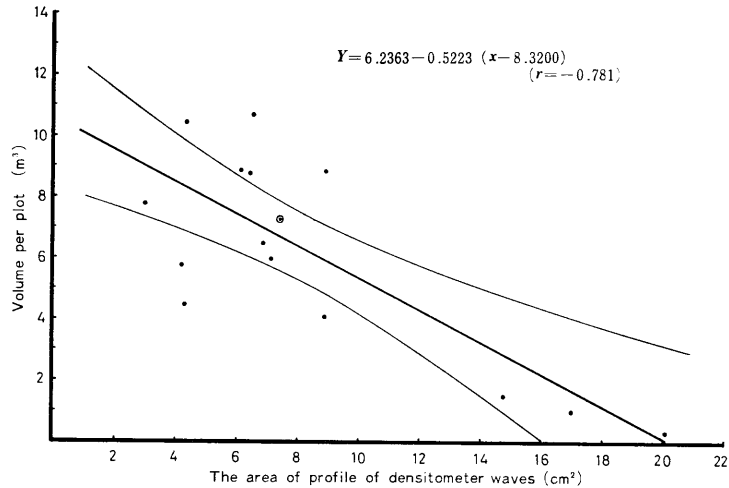


図 4-15 濃度波形側断面積にもとづく材積回帰図とその95%信頼帯

Fig. 4-15 Relation between volume per plot and the area of profile of densitometer waves, and the 95 percent confidence band (Juvenile and middle age of *Cryptomeria*)

(3) スギ幼, 中, 壮齡林の場合⁵⁷⁾b

(i) 資 料

林齡(齡階)が幼, 中, 壯の3レベルの場合の資料はこれも同じ宮崎県えびの営林署管内黒鹿国有林67, 68林班スギ人工林を対象とした。

現地調査は1970年12月19~25日, 幅8.0m×長さ20mを1プロットユニットとする下記のストリップ3本を空中写真上の主点に対しそれぞれ放射線状に現地林分に対応させてと

った。

Strip No.	測線長/プロット数	齡 階 (林齡)
1	660.0m/33プロット	幼齡林(18年), 壯齡林(54年)
2	148.7m/ 8プロット	幼齡林(17年)
3	183.0m/ 9プロット	中齡林(45年)

(ii) 写真濃度波形側断面積の計測

現地調査ストリップおよび同ストリップ内各プロットに対応する写真濃度波形側断面積の計測は脚注の空中写真^{*}および濃度計測ゲージ^{**}によって行なった。

表4-24はStrip-1, 2, 3 別各プロット毎濃度波形側断面積および材積を一覧表に示したものである。ただし Strip-1 については全33プロット中スギ以外の樹種, 林道, 裸地等を除外した。これによりプロット数はそれぞれ Strip-1 が26, Strip-2 が8, Strip-3 が9, 計43個となった。

表4-24 ストリップ別濃度波形側断面積およびプロット材積一覧表

Table 4-24 Relation between volume per plot and the area of profile of densitometer waves in each strip

Strip No.	Plot No.	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves	プロット材積 Volume per plot	Strip No.	Plot No.	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves	プロット材積 Volume per plot
		cm ²	m ³			cm ²	m ³
1	1	9.00	6.840	1	26	18.00	1.420
	2	4.20	8.930		33	17.00	0.370
	3	3.10	4.490	Sum	26	208.101	143.750
	4	2.70	10.570	2	1	8.55	2.881
	5	3.20	2.670		2	8.42	1.582
	6	19.80	2.140		3	7.88	2.702
	7	12.60	0.730		4	7.80	1.615
	8	4.50	6.520		5	6.75	2.338
	9	4.50	10.040		6	6.68	3.785
	10	3.60	4.080		7	6.60	2.808
	11	7.70	9.200		8	4.95	4.123
	12	12.10	5.880	Sum	8	57.63	21.834
	13	30.50	0.340	3	1	5.04	10.461
14	9.30	0.790	2		5.76	11.601	
15	4.70	2.100	3		4.92	10.168	
16	4.20	12.770	4		4.38	10.450	
18	7.40	0.000	5		6.96	7.059	
19	4.30	6.790	6		6.84	3.817	
20	5.00	5.360	7		4.74	5.746	
21	4.60	10.630	8		5.70	3.506	
22	5.30	10.010	9		10.01	2.591	
23	2.10	6.840	Sum	9	54.35	65.405	
24	4.50	6.300	Total	43	320.08	230.989	
25	4.20	7.940					

* 空中写真は山-456, C 9-6, 1966年5月25日林野庁撮影, 撮影高度4978m, 同縮尺1:19675, 普通角写真($f=209.16\text{mm}$)の密着ポジフィルムを用いた。

** 濃度計測ゲージは写真濃度測計装置: 1)-(a)0.08×0.20mm, (b)5.6, (c)5mm/min, (e)×1, (f)1枚, 2)-(a)×10, 3)-(a)120mm/min, (b)10V, A-D コンバーター: 100V レンジ, ユニバーサルカウンター: 1ms, 0.1V によった。

(iii) 材積回帰式の計算

材積回帰式の計算はストリップ3本、計43個のプロットをその対象として行なった。まず3本のストリップをまとめて全体の2次式の回帰計算を試みたが、分散分析の結果 x^2 の項が有意でなく2次式は成立しなかった(表4-25参照)。

表4-25 2次式の場合の回帰の分散分析

Table 4-25 Analysis of variance of regression on the occasion of quadratic equation

Source	SS	DF	MS	F
Const.	1237.4101	1	1237.4101	132.56**
Reg. on x	149.3779	1	149.3779	16.00**
Reg. on x^2	34.6928	1	34.6928	3.72 ^{not sig}
Error	373.3832	40	9.3346	
Total	1794.8643	43		

したがって Strip-1, 2, 3の全体について1次式により回帰計算を行なった。表4-26は1次式の最小二乗法計算を、また表4-27はその分散分析の結果を示したものである。

表4-26 1次式の場合の回帰計算組織解

Table 4-26 Solution system of regression on the occasion of linear equation

	1	x	y	$1+x+y$
1	43	320.08	230.989	594.069
x		3752.5456	1295.5318	5188.1574
y			1796.2967	3322.8175
7.4437209		1189.9594	-423.8858	766.0736
5.3718372			555.4614	131.5776
-0.356218707			404.4653	404.4653

表4-27 1次式の場合の回帰の分散分析

Table 4-27 Analysis of variance of regression on the occasion of linear equation

Source	SS	DF	MS	F
Const.	1240.8353	1	1240.8353	125.78**
Reg. on x	150.9961	1	150.9961	15.31**
Error	404.4653	41	404.4653	
Total	1796.2967	43		

分散分析の結果、常数項、 x の項ともに高度の有意差を示した。これにより材積回帰式

$$Y = 5.3718 - 0.3562(x - 7.4437)$$

$$(\quad = 8.0232 - 0.3562x)$$

をえた。図4-16はこの関係をグラフにあらわしたものである。

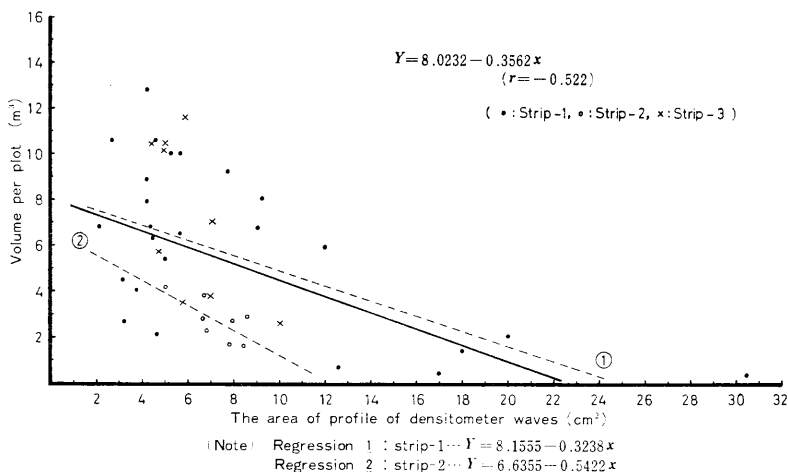


図 4-16 濃度波形側断面積 (x) とプロット材積 (y) の回帰図

Fig. 4-16 Relation between volume per plot and the area of profile of densitometer waves (Juvenile, middle age & old age of *Cryptomeria*)

(iv) 分析と考察

幼, 中, 壯の各年齢に対する以上の回帰計算の結果, 回帰の成立が認められた。しかしその相関係数 r は

$$r = \frac{-423.8858}{\sqrt{1189.9594 \times 555.4614}} = -0.522$$

となり必ずしも高い相関とはいえない。これは前項(2)の場合と同じく3本の各ストリップの方向性が異なることに起因するものと思料される。したがってある広さ以上の面積を対象としてその濃度計測を行なう場合には, 単に Displacement を避けるために放射線方向のストリップをとるだけに限定せず, むしろ濃度要因の同一条件化を図るためには平行なストリップなど, その都度適切な処置が必要と考える。

なお Strip-1, 2, 3 の各々におけるプロット材積 y に対する写真濃度波形側断面積 x の回帰の共分散分析を試みると表 4-28 に示すとおりとなる。

表 4-28 プロット材積 y に対する濃度波形側断面積 x の回帰の共分散分析
Table 4-28 Analysis of co-variance of regression between the area of profile of densitometer waves x and the volume per plot y

Strip No.	DF	$\Sigma(x-\bar{x})^2$	$\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})$	$\Sigma(y-\bar{y})^2$	DF	b	$\Sigma d^2_{y,x}$	MS	F
1	25	1129.4096	-370.6379	362.9839	24	-0.3282	241.3518	10.0563	
2	7	10.0286	-5.4380	5.7979	6	-0.5422	2.8492	0.4749	
3	8	24.1413	-31.2054	97.8401	7	-1.2926	57.5035	8.2148	
Within					37		301.7045	8.1542	
Reg. diff.					2		22.3689	11.1845	1.37 ^{not sig}
Common reg.	40	1163.5795	-407.2813	466.6219	39	-0.3500	324.0734	8.3096	
Adj. mean					2		80.3919	40.1960	4.84*
General	42	1189.9594	-423.8858	555.4614	41	-0.3562	404.4653	9.8650	

表4-28より Deg. diff, すなわち各ストリップに対する回帰の平行性には差が認められない。換言すれば各ストリップとも全体の回帰線に対しては平行であるということになる。これに対し Adj. mean, すなわち中心点の高さに対しては5%レベルで有意差を示す。つまり各ストリップの平均値間には差があることを意味する。

また各ストリップ毎の回帰の分析を試みる表4-29(1),(2),(3)のとおりとなる。

表4-29 各ストリップ別回帰の分散分析
Table 4-29 Analysis of variance of regression in each strip

(1) Strip-1

Source	SS	DF	MS	F
Const.	794.7716	1	794.7716	79.03**
Reg. on x	121.6321	1	121.6321	12.10**
Error	241.3518	24	10.0563	
Total	1157.7555	26		

(2) Strip-2

Source	SS	DF	MS	F
Const.	59.5904	1	59.5904	125.48**
Reg. on x	2.9487	1	2.9487	6.21*
Error	2.8492	6	0.4749	
Total	65.3883	8		

(3) Strip-3

Source	SS	DF	MS	F
Const.	475.3127	1	475.3127	55.67**
Reg. on x	40.3366	1	40.3366	4.91 ^{not sig}
Error	57.5035	7	8.2148	
Total	573.1528	9		

ここで Strip-1 は壮齡林中若干の幼齡林プロットを含み, Strip-2 は幼齡林のみであるが平地林に位置する。したがってこの両ストリップは独自の回帰が成立する。これに対し Strip-3 は中齡林のみで, かつ蓄積度すなわち各プロット間の材積の分布状態に不均一性を呈するため回帰は成立しない。前記図4-16において回帰線①は Strip-1 の資料のみによる場合を, 回帰線②は Strip-2 の資料のみによる場合のそれぞれの回帰線を示したものである。

また Strip-1, 2, 3 のそれぞれに対する回帰誤差の分散の均一性についてを BARTLETT'S test¹¹⁰⁾にもとづいて次のとおり試みた(表4-30参照)。

表 4-30 分散の均一性に対する BARTLETT's test
Table 4-30 BARTLETT's test of homogeneity of variance

Sample	$\sum d^2_{y,x}$	DF	Reciprocal $\left(\frac{1}{DF}\right)$	MS (s^2)	$\log s^2$	$DF \cdot \log s^2$
1	241.3518	24	0.04167	10.0563	1.00200	$1.00260 \times 24 = 24.06240$
2	2.8492	6	0.16667	0.4749	1.67660	$(-0.32340) \times 6 = -1.94040$
3	57.5035	7	0.14285	8.2148	0.91461	$0.91461 \times 7 = 6.40227$
a=3	301.7045	37	0.35119			28.52427

すなわち表 4-30 の計算表から

$$\bar{s}^2 = \frac{\sum d^2_{y,x}}{\sum DF} = \frac{301.7045}{37} = 8.15418$$

$$(\log \bar{s}^2) \sum DF = 0.91137 \times 37 = 33.72069$$

$$\begin{aligned} \chi^2 &= 2.3026 [(\log \bar{s}^2) \sum DF - \sum DF(\log s^2)] \\ &= 2.3026 \times [33.72069 - 28.52427] \\ &= 11.96528 \end{aligned}$$

Correction factor C

$$\begin{aligned} &= 1 + \frac{1}{3 \times 2} \times \left[\sum \frac{1}{DF} - \frac{1}{\sum DF} \right] \\ &= 1 + \frac{1}{6} \times \left[0.35119 - \frac{1}{37} \right] \\ &= 1.05403 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{Correction } \chi^2 &= \frac{\chi^2}{\text{Correction factor C}} \\ &= \frac{11.96528}{1.05403} = 11.35^{**} \end{aligned}$$

(ただし $f = a - 1 = 2$)

すなわち BARTLETT's test の結果, Strip-1, 3 に対し Strip-2 の回帰誤差の分散はきわめて小さく, その均一性は認められない。

以上の結果から齢級が異なることによって濃度波形側断面積と材積の回帰の誤差分散はかなりの差異を示す。しかし全体的な点の分布の状態は一応一定の傾向がみられるので材積回帰式の成立を図るためには, 本実験のように各ストリップをまとめて取りあつかうことが必要であるとする。

2) 天然生広葉樹林を対象とした場合

(1) 常緑広葉樹林の場合⁵⁵⁾

(i) 資 料

天然生広葉樹林の中で常緑広葉樹林を対象とした濃度波形側断面積の計測による蓄積推定のための回帰の分析は, 宮崎県えびの営林署管内川添国有林栗野岳北面, 70~73林班, 面積 270.45ha の調査資料を用いた。同林分はイス, タブ, カシ, シイ, カゴノキ, ツバキ, ユズリハ, サザンカ, シキミ, ヤブニッケイ等の常緑広葉樹を主要樹種とし, 他にミ

ズナラ, サクラ, カエデ, ミズメ等の落葉広葉樹をわずかに含み, 林齢は50~200年, 平均85年の林分構成を呈する。

現地調査は1968年12月および1969年1月, 栗野岳山麓より山頂に対し中央計測線 (Center line) 1040m を中心に, 20m×20m ユニットプロット160個 (プロット面積合計6.40 ha) を左右に設置し, DBH 20cm以上の立木に対する 毎木調査を実施し, 各プロット材積を計上した。

(ii) 写真濃度波形側断面積の計測

写真濃度波形側断面積の計測は上記の現地調査プロット(20m×20mプロットユニット)を40m×40mのストリップとみため, これを Center line 1本および左右16mの両サイド各1本, 計3本の写真濃度計測線に対して脚注の空中写真^{*)}および濃度計測ゲージ^{**)}により行なった。

これにより計測された濃度波形側断面積はいずれも40m×40mプロット単位, 計26個としてとりあつかった。表4-31は Center, Right, Left の各スリット (濃度計測線) における計測濃度波形側断面積から40m×40mプロット単位の平均濃度波形側断面積 (mean) を求め, これとプロット材積を対応させて一覧表に示したものである。

表4-31 各計測線別濃度波形側断面積およびプロット材積一覧表

Table 4-31 Relation between volume per plot and the area of profile of densitometer waves in each scanning line

Plot No.	濃度波形側断面積 (cm ²) Area of profile of densitometer waves				40m×40m プロット材積 Volume per plot in 40m×40m (m ³)	Plot No.	濃度波形側断面積 (cm ²) Area of profile of densitometer waves				40m×40m プロット材積 Volume per plot in 40m×40m (m ³)
	Center	Right	Left	mean			Center	Right	Left	mean	
1	105.5	74.6	75.9	85.3	49.782	14	143.3	103.5	177.6	141.5	45.684
2	120.7	67.7	51.9	80.1	30.120	15	116.5	135.0	135.6	129.0	50.819
3	152.2	122.6	68.4	114.4	40.527	16	104.1	135.9	161.1	133.7	54.318
4	80.2	120.9	84.0	95.0	32.595	17	108.2	182.3	143.4	144.6	36.782
5	65.3	182.1	124.2	123.9	30.839	18	120.0	90.1	171.3	127.1	43.578
6	85.8	114.6	135.0	111.8	37.601	19	119.5	128.1	76.5	108.0	42.893
7	149.6	126.0	113.4	129.7	28.033	20	96.5	170.7	89.4	118.9	51.353
8	99.3	64.5	54.0	72.6	27.640	21	121.6	64.5	149.4	111.8	31.182
9	106.7	44.4	76.6	75.9	32.317	22	111.7	89.1	88.5	96.4	26.737
10	86.6	61.2	77.7	75.2	30.691	23	116.8	106.2	82.5	101.8	26.322
11	60.8	98.4	56.7	72.0	18.717	24	140.3	88.8	83.5	104.2	45.669
12	115.4	106.2	113.1	111.6	25.950	25	110.9	81.9	126.3	106.4	33.075
13	136.0	72.3	140.7	116.3	62.974	26	56.0	96.3	131.3	94.5	35.984

* 空中写真は山-456, C9-5, 1966年5月25日林野庁撮影, 撮影高度4978m, 同縮尺1:19675, 普通角写真($f=209.16\text{mm}$)の密着ポジフィルムを使用した。

** 濃度計測ゲージは写真濃度測定装置: 1)-(a)0.08×0.20mm, (b)5.6, (c)5mm/min, (d)16m (現地対応実長), (e)×1, (f)1枚, 2)-(a)×30, 3)-(a)120mm/min, (b)50V, A-Dコンバーター: 1000Vレンジ, ユニバーサルカウンター: 1ms, 0.1V によった。

(iii) 材積回帰式の計算

表4-31における写真濃度波形側断面積とプロット材積の間には一応相関関係が認められる。そこで Center, Right, Left の3本の濃度計測線の平均値すなわち平均写真濃度波形側断面積 (mean) を x とし, $x=10\text{cm}^2$ 単位毎に対応するプロット材積の重みづき平均材積を y とし, x および y とその重み w の一覧表(表4-32)より, 材積回帰式算出のための最小二乗法計算を表4-33のごとく試みた。

表4-32 濃度波形側断面積 x およびプロット材積 y の重み (w) づき平均値

Table 4-32 Relation between weighted mean volume per plot and the area of profile of densitometer waves

No.	x	y	w
1	72.3	23.175	2
2	72.1	31.043	3
3	91.6	39.484	3
4	100.8	32.909	3
5	111.8	35.205	6
6	119.7	48.389	3
7	129.9	44.187	4
8	143.1	41.233	2
Total	846.3	295.629	26

表4-33 重みづき平均値によるプロット材積と濃度波形側断面積の回帰計算組織解

Table 4-33 Solution system of regression to the area of profile of densitometer waves and volume per plot by weighted mean

	w	wx	wy	$w(1+x+y)$
1	26	2788.8	972.277	3787.077
x		310372.38	107086.2678	420247.4478
y			37562.623807	145621.168607
107.261538461		11241.4014	2798.3409	14039.7423
37.395269230			1204.0636	4002.4045
0.248931677			507.4679	507.4679

これより材積回帰式

$$Y = 10.6945 + 0.2489 x$$

をうる。

いまその分散分析を回帰係数 および 各平均値間について行なうと表4-34に示すとおりである。

表4-34 回帰の分散分析
Table 4-34 Analysis of variance of regression

Source	SS	DF	MS	F
Reg. on x	696.5957	1	696.5957	8.24*
Departure	507.4679	6	84.5780	
Between	1204.0636	7	172.0091	1.90 ^{not sig}
Within	1630.9499	18	90.6083	
Total	2835.0135	25		

すなわち回帰は5%レベルで有意であるが濃度波形側断面積毎のプロット材積(Within)では変動が高いため、その平均値間(Between)には有意差は認められなかった。なお相関係数 r および回帰の標準誤差 SE はそれぞれ

$$r = \frac{2798.3409}{\sqrt{11241.4014} \times \sqrt{1204.0636}} = 0.761$$

$$SE = \sqrt{\frac{SSR}{n-p}}$$

$$= \sqrt{\frac{507.4679}{8-2}} = \pm 9.1966$$

となった。図4-17は以上の関係をグラフにあらわしたものである。

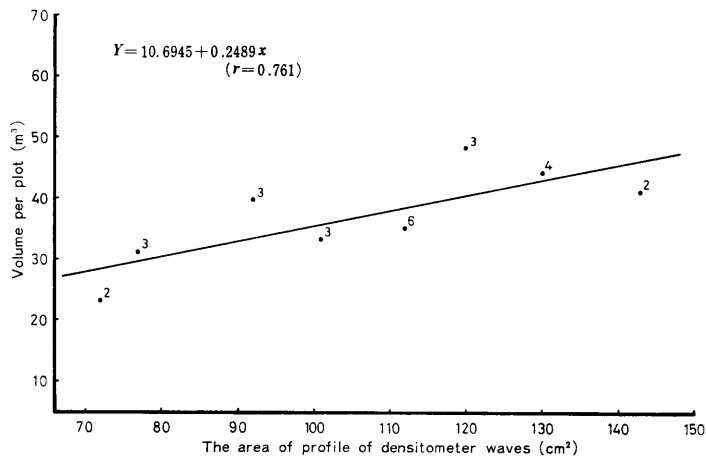


図4-17 濃度波形側断面積 (x) とプロット材積 (y) の回帰図
Fig. 4-17 Relation between volume per plot and the area of profile of densitometer waves
(Natural broadleaved forest of evergreen)

ちなみに写真濃度周波数の計測にもとづく計測周波数と濃度波形グラフ本数および同周波数とプロット本数の関係に対する本林分の実験結果は計測周波数を x , 対応する波形グラフ本数を $y_{(a)}$ としたとき

$$Y_{(a)} = 3.1776 + 0.6452 x$$

$$r = 0.835$$

また計測周波数 x とプロット本数 $y_{(P)}$ の場合は

$$Y_{(P)} = 20.0429 + 3.3000 x$$

$$r = 0.820$$

となり、いずれも1次式により高い相関係数をえた。これにより空中写真濃度周波数の計測による本数推定の可能性もあわせて確かめられた。

(2) 落葉広葉樹林の場合⁵⁶⁾

(i) 資 料

落葉広葉樹林に対する分析検討のための資料は大分県大分営林署管内九重国有林15林班い小班をその対象とした。同林分は標高 1556.0m を有する黒岳の北山麓に位置し、面積 105.51ha、林齢は 45~185 年、平均125年の天然生落葉広葉樹林で、その主要樹種はブナ 20%、シデ15%、コナラ、カエデ各10%、ケヤキ 5%、その他よりなる。

現地調査は1969年 8月および1970年 1月、幅10m×長さ40mのプロット12個、合計(全長) 480m のストリップをとった。分析検討はその12個のストリップ・プロットについて試みたものである。

(ii) 写真濃度波形側断面積の計測

写真濃度波形側断面積の計測は脚注の空中写真*) および濃度計測ゲージ**) によって行なった。

表 4-35は12個の各プロットに対する材積(10m×40mプロット材積) および写真濃度波形側断面積を併行して計測させた濃度周波数の値とともに一覧表に示したものである。

表 4-35 プロット別本数、材積および対応する濃度周波数、濃度波形側断面積一覧表
Table 4-35 The area of profile of densitometer waves, frequency, volume and number of tree per plot

Plot No.	本 数 Number of tree	材 積 Volume	濃度周波数 Frequency	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves
1	14	m ³ 9.660	11	cm ² 12.201
2	14	8.490	8	11.301
3	4	10.222	9	12.399
4	3	5.664	9	31.200
5	5	2.600	6	10.299
6	8	14.515	8	5.499
7	8	10.254	8	9.999
8	9	7.459	9	12.201
9	4	12.758	5	27.399
10	8	5.244	8	1.800
11	3	4.312	6	10.299
12	4	14.567	5	10.920

*) 空中写真は1969年 5月21日林野庁撮影、撮影高度4208m、同縮尺1: 10904、 $f=152.62\text{mm}$ の広角写真による密着ポジフィルム、No.033を用いた。

**) 濃度計測ゲージは写真濃度測定装置: 1)-(a)0.08×0.20mm, (b)4, (c) 5mm/min, (e)×1, (f) 1枚, 2)-(a)×10, 3)-(a) 120mm/min, (b)10V, A-Dコンバーター: 1000Vレンジ, ユニバーサルカウンター: 1ms, 0.1Vによった。

(iii) 材積回帰式の計算

写真濃度波形側断面積を x , 対応するプロット材積を y としたとき, その関係はこれを個々にとりあつた場合, ばらつきが大きいので回帰関係は認め難い。また重みつき平均値や対数変換等によつても同様の結果を呈する。このことは分析検討のための資料(プロット数)が少ないこととあわせ, その対象林分がブナ, シデ, コナラ, カエデ, ケヤキ等の落葉樹種であるのに対し, 使用した空中写真は5月の新緑の時期に撮影されたものであるため写真像の色調が必ずしも樹種の有する本来の濃度を示していないこと, またこれらの反射率と赤外線との関係が相互に作用して濃度計測の際きわめて大きなばらつきを呈すること等に原因があるものと考えられる。

そこで前記濃度波形側断面積 x の対数 $\log x$ に周波数 P の逆数 $\frac{1}{P}$, すなわち周期を乗じたもの $\frac{\log x}{P}$ を独立変数とし, 材積 y の対数 $\log y$ を本数 N で除したものを $\frac{\log y}{N}$ を従属変数とする回帰式

$$\left(\frac{\log y}{N}\right) = b_0 + b_1 \left(\frac{\log x}{P}\right)$$

を導いた。ここに b_0 , b_1 は回帰係数とする。表4-36は上記の回帰式計算のための準備表である。

表4-36 材積回帰計算準備表
Table 4-36 Preparation of calculation of volume regression

Plot No.	$\log y$	N	$\frac{\log y}{N}$	$\log x$	P	$\frac{\log x}{P}$
1	0.9580	14	0.0704	1.0864	11	0.0988
2	0.9289	14	0.0664	1.0531	8	0.1316
3	1.0095	4	0.2524	1.0934	9	0.1215
4	0.7531	3	0.2510	1.4942	9	0.1660
5	0.4150	5	0.0830	1.0128	6	0.1688
6	1.1618	8	0.1452	0.7403	8	0.0925
7	1.0109	8	0.1264	1.0000	8	0.1250
8	0.8727	9	0.0970	1.0864	9	0.1207
9	1.1058	4	0.2765	1.4377	5	0.2875
10	0.7199	8	0.0900	0.2553	8	0.0319
11	0.6347	3	0.2116	1.0128	6	0.1688
12	1.1634	4	0.2909	1.0382	5	0.2076

表4-36において $\frac{\log x}{P}$ を x' , $\frac{\log y}{N}$ を y' とおけば上記の回帰式は

$$Y' = b_0 + b_1 x'$$

となる。これより回帰係数 b_0 , b_1 および相関係数 r を求めると

$$Y' = 0.0355 + 0.8918 x'$$

$$r = 0.658$$

となり, 必ずしも十分な精度ではないが一応1次式による回帰の成立が認められた。図4

-18 はこれをグラフに示したものである。

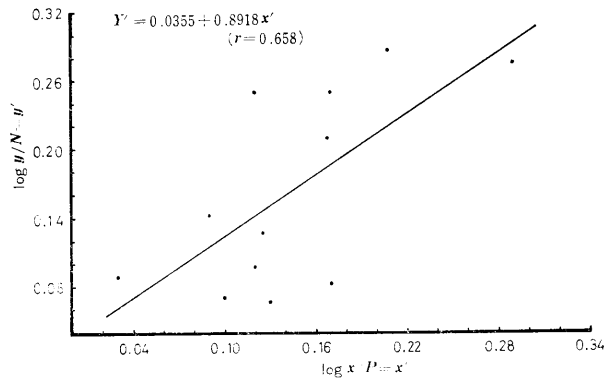


図 4-18 $\frac{\log x}{P} = x'$ と $\frac{\log y}{N} = y'$ の回帰図

Fig. 4-18 Relation between $\log y/N=y'$ and $\log x/P=x'$
(Natural broadleaved forest of deciduous)

なお濃度波形側断面積の計測と併行して行なった濃度周波数による本数の回帰は濃度周波数を x とし、対応するプロット本数を y としたとき

$$Y = -2.6182 + 1.2545 x$$

$$r = 0.586$$

となった。

(3) 針、広および常緑樹、落葉樹混交林の場合¹⁸⁾a

(i) 資 料

針、広および常緑樹、落葉樹等の各種の樹種が混交する天然生広葉樹林として九州大学宮崎演習林をその対象とした。同演習林は宮崎県東臼杵郡椎葉村に所在し標高 650m～1600m の山岳天然生林で、その主要樹種はブナ、カエデ類、ミズナラ、ヒメシヤラ、シデ、ミズメ、ヤマザクラ、サワグルミ等の落葉広葉樹でその殆んどが占められ、ウラジロガシ、マテバシイ等の常緑広葉樹が若干混交し、他にモミ、ツガ、アカマツ等の針葉樹が散生あるいは点生的に生育する。その比率は材積で広葉樹80%：針葉樹20%である。

分析検討のための現地調査は1970年6月1～5日、同演習林内35林班に対し、幅10m×長さ1000mのストリップをN65°E方向にとり、その中を長さ40m単位に区切り1プロットユニットとした。その結果25個のプロットがえられた。

(ii) 写真濃度波形側断面積の計測

写真濃度波形側断面積の計測は前項(i)の現地調査ストリップに対応する脚注の空中写真^{*}および濃度計測ゲージ^{**})によりそれぞれプロット毎に行なった。

表4-37はプロット毎N(針葉樹)L(広葉樹)別材積および計測写真濃度波形側断面積を本数とともに一覧表に示したものである。

* 空中写真は1969年10月28日宮崎県撮影、山-551, C9-6, 撮影高度5000m, 同縮尺1:20000, 普通角写真($f=210.30\text{mm}$)による密着ポジフィルムを使用した。

** 濃度計測ゲージは写真濃度測定装置: 1)-(a)0.08×0.20mm, (b)1.4, (c)5mm/min, (e)×1, (f)2枚, 2)-(a)×10, 3)-(a)120mm/min, (b)10V, A-Dコンバーター: 100Vレンジ, ユニバーサルカウンター: 1ms, 1Vによった。

表 4-37 プロット毎N, L別本数, 材積および濃度波形側断面積一覧表
 Table 4-37 The area of profile of densitometer waves, volume and number of N and L in each plot

Plot No.	本 数 Number of tree			材 積 Volume			濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves
	N	L	Total	N	L	Total	
1	16	47	63	4.422 ^{m³}	5.969 ^{m³}	10.391 ^{m³}	15.7 ^{cm²}
2	3	14	17	0.687	0.821	1.508	23.6
3	—	19	19	—	0.933	0.933	16.2
4	5	29	34	2.757	2.672	5.429	16.9
5	5	11	16	1.339	1.152	2.491	14.9
6	—	11	11	—	1.311	1.317	23.4
7	—	16	16	—	1.356	1.356	19.4
8	2	24	26	0.975	2.565	3.540	14.9
9	4	12	16	1.073	1.841	2.914	30.2
10	5	19	24	2.066	5.048	7.114	29.8
11	1	11	12	0.881	0.754	1.635	8.0
12	1	26	27	1.018	2.271	3.289	25.2
13	7	18	25	2.906	4.799	7.705	37.8
14	1	24	25	0.385	3.502	3.887	32.3
15	—	26	26	—	3.429	3.429	34.3
16	2	29	31	0.852	3.827	4.679	23.4
17	1	31	32	0.108	4.798	4.906	27.3
18	—	42	42	—	3.592	3.592	24.0
19	1	21	22	1.662	2.828	4.490	27.1
20	—	24	24	—	7.011	7.011	26.0
21	—	10	10	—	9.166	9.166	22.0
22	10	29	39	4.933	3.488	8.421	21.0
23	—	31	31	—	2.376	2.376	31.4
24	2	29	31	1.851	2.794	4.645	16.7
25	2	20	22	0.779	5.190	5.969	15.3
Total	68	573	641	28.694	83.499	112.193	576.81
Percentage	10.6%	89.4%		25.6%	74.4%		

(iii) 材積回帰式の計算

材積回帰式の計算はまずN, Lこみによる全体のプロット材積と写真濃度波形側断面積の関係について試みた。

すなわち濃度波形側断面積を x とし, 対応するプロット材積を y として回帰式の計算を行なった結果

$$Y = 1.5933 + 0.0949 x$$

をえ, その相関係数 $r=0.362$ となり回帰式の成立は認められなかった。これはNの比率が本数で10.6%に過ぎず, 樹冠直径, 濃度波形側断面積ともLに比しきわめて小さく, したがって空中写真上では広葉樹天然生林としての林相を呈し, その濃度波形グラフの形状も

広葉樹林としての特性を示している。ところが材積ではNは全体の25.6%に達し、そのため濃度波形側断面積とプロット材積との対応性をいちじるしく乱していることに起因するものと思料される(プロット1および22はNの材積がそれぞれ42.6%, 58.6%ときわめて高く、またプロット21は谷部による蔭の影響のため材積に比し波形側断面積が小さく計測されたため、これらははじめから除外して行なった)。

そこで各プロットについてNをはずしL材積のみを対象に回帰計算を試みた。なお各濃度波形側断面積はこれを2.0cm²単位に括約しその平均値をそれぞれ濃度波形側断面積階の代表値とした(表4-38参照、ただしプロット21のみは除外)。

表4-38 波形面積の括約による平均プロット材積および濃度波形側断面積一覧表
(Lのみによる)

Table 4-38 Mean of volume per plot and the mean by class interval of area of profile of densitometer waves

No.	括約波形側断面積区分 Class interval of area of profile of densitometer waves	平均波形側断面積 Profile of densitometer waves of mean	平均プロット材積 Volume per plot of mean	w Weight
		cm ²	m ³	
1	8 (7.1 ~ 9.0)	8.0	0.751	1
2	14 (13.1 ~ 15.0)	14.9	1.859	2
3	16 (15.1 ~ 17.0)	16.2	3.512	5
4	20 (19.1 ~ 21.0)	20.2	2.422	2
5	24 (23.1 ~ 25.0)	23.6	2.389	4
6	26 (25.1 ~ 27.0)	25.6	4.641	2
7	28 (27.1 ~ 29.0)	27.2	3.813	2
8	30 (29.1 ~ 31.0)	30.0	3.445	2
9	32 (31.1 ~ 33.0)	31.9	2.939	2
10	34 (33.1 ~ 35.0)	34.3	3.429	1
11	38 (37.1 ~ 39.0)	37.8	4.799	1

その結果

$$Y = 0.6692 + 0.0988 x$$

$$r = 0.750$$

をえ、濃度波形側断面積とプロット材積との間に回帰関係が認められた。図4-19はこれをグラフに示したものである。

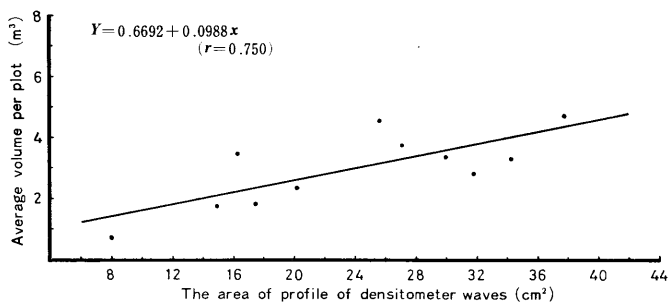


図4-19 濃度波形側断面積(x)と平均プロット材積(y)の回帰図
Fig. 4-19 Relation between average volume per plot and the area of profile of densitometer waves
(Mixing with N, evergreen and deciduous L)

なお本林分の場合、濃度計測に用いた空中写真が10月28日撮影によるため、起伏度(傾斜度)が強い本林分での蔭影および落葉広葉樹林における紅葉が写真濃度に影響し回帰の精度を大きく低下させたことは否めない。また異質の濃度要因、すなわちこの場合針葉樹が混交することによる濃度計測上のとりあつかい方についても一つの成果がえられたものと評価されよう。

(4) ブナ林の場合¹⁴⁾

(i) 資 料

天然生広葉樹林の場合、各種の樹種にもとづく濃度要因の相違が計測写真濃度波形側断面面積に複雑に作用し、その傾向は年齢の輻輳性および蓄積度の不均一性とあいまって回帰の成立、なかんずくその精度を大きく低下させる原因となっている。そのため本項では濃度要因の相違を消去する意図のもとに同一樹種の林分構成を有するブナ林をその対象として資料をえらび、濃度計測にもとづく分析検討を試みた。

すなわち、福島県山口宮林署管内檜枝岐ブナ林、62林班(N 15%, L 85%でLのほとんどは年齢100~200年、平均150年のブナ林によって構成される)を調査対象林分とし、1970年8月18~22日、幅10m×長さ20mを最小ユニット(プロット)とする全長1037mのストリップ、プロット総数52個を現地林分と対応させて空中写真の主点を中心にほぼS-N方向に設定した。

(ii) 写真濃度波形側断面面積の計測

現地調査ストリップならびに同ストリップ内52個のプロットに対応する写真濃度波形側断面面積の計測は脚注の空中写真^{*)}および濃度計測ゲージ^{**)}によって行なった。

表4-39は各プロット別に材積と対応させて計測写真濃度波形側断面面積を一覧表に示したものである。ただし無立木地プロット5個(Plot No. 2, 3, 32, 44, 45)は除外した。したがって対象プロット数は47個となった。

(iii) 材積と写真濃度波形側断面面積の関係

表4-39にもとづき、濃度波形側断面面積を独立変数 x とし、対応するプロット材積を従属変数 y としてこれをグラフ上にプロットした場合、その分布はほぼ円形状を呈し相関関係はほとんど認められない(図4-20参照)。またこれをN, L別ならびに10m×40m, 10m×100m等の各プロットサイズ別に分析検討を試みた結果もほぼ同様の傾向を示す。

すなわち天然生ブナ林を主とする本林分の場合、全体としてはほぼ一定の蓄積度を有するが局部的に若干の変化、つまりかなりの大小があるにもかかわらず濃度はそれに対応しない。いいかえると濃度からの材積の推定はこのような天然生林では困難である。ちなみにプロットサイズを10m×40mにとった場合のプロット材積 y と波形側断面面積 x の関係(回帰式)は

$$Y = 4.2045 + 0.1435 x$$

となる。しかしその回帰係数はReg. on x , すなわち波形側断面面積の回帰の項が not sig. と

^{*)} 空中写真は1968年6月7日林野庁撮影、撮影高度5600m、同縮尺1: 20000、普通角写真($f=209.77$ mm)にもとづく山-534, C26-26の密着ポジフィルムを使用した。

^{**)} 濃度計測ゲージは写真濃度測定装置: 1)-(a)0.08×0.20mm, (b)5.6, (c)5mm/min, (e)×1, (f)2枚, 2)-(a)×10, 3)-(a)240mm/min, (b)10V, A-Dコンバーター: 100Vレンジ, ユニバーサルカウンター: 1ms, 1V によった。

表 4-39 プロット別材積および濃度波形側断面積一覧表

Table 4-39 The area of profile of densitometer waves and volume in each plot

No.	Plot No.	材積 Volume m ³	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves cm ²	No.	Plot No.	材積 Volume m ³	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves cm ²
1	1	0.343	17.4	25	27	2.210	13.5
2	4	3.832	20.4	26	28	2.700	19.8
3	5	5.877	18.3	27	29	4.240	15.3
4	6	8.313	15.9	28	30	3.581	18.9
5	7	6.741	14.1	29	31	5.730	18.0
6	8	3.778	19.2	30	33	5.700	17.4
7	9	4.770	16.2	31	34	0.810	22.2
8	10	7.022	18.9	32	35	13.730	19.5
9	11	9.633	19.8	33	36	3.980	22.5
10	12	9.157	18.3	34	37	9.750	22.5
11	13	4.823	18.6	35	38	2.172	23.1
12	14	1.700	20.4	36	39	7.200	25.5
13	15	6.740	20.1	37	40	1.810	15.9
14	16	9.356	22.5	38	41	0.270	17.1
15	17	6.317	15.6	39	42	10.040	19.5
16	18	6.116	18.6	40	43	0.030	20.1
17	19	7.070	20.7	41	46	1.420	18.9
18	20	3.836	15.6	42	47	7.200	22.5
19	21	1.539	17.1	43	48	0.650	15.3
20	22	3.846	26.1	44	49	7.460	18.5
21	23	3.070	22.2	45	50	2.810	21.9
22	24	5.220	23.1	46	51	4.000	18.0
23	25	0.720	16.2	47	52	11.600	16.3
24	26	5.930	20.7	Total	47	234.842	898.2

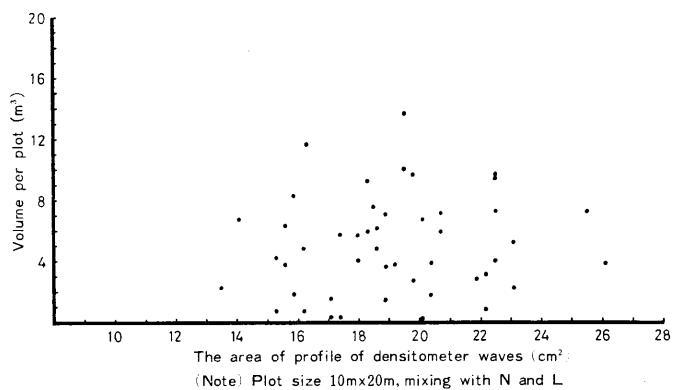


図 4-20 濃度波形側断面積 (x) とプロット材積 (y) の関係
 Fig. 4-20 Relation between volume per plot and the area of profile of
 densitometer waves
 (Natural *Fagus* forest)

なるため回帰式は成立しない。したがってこのような林分で濃度計測を行なう場合、各林分毎の濃度と材積の平均値を用いることになるであろう。いま10m×20mプロットサイズにおける波形側断面積および材積の平均値、標準偏差、変異係数の値はそれぞれ次のとおりとなる。

	波形側断面積	材積
平均値	19.1106	4.9966
標準偏差	2.8756	3.2355
変異係数	0.1505	0.6475

(5) 広葉樹各林分の比較検討¹⁴⁾

以上の4林分に対する分析検討の結果から、天然生林の場合その樹種、林齢、蓄積度等の林分構成要因、地形、樹高その他の立地条件のほか、空中写真の撮影時期、撮影方法、写真現象焼付処理条件等により写真濃度、とくに濃度波形側断面積に大きく影響をおよぼし、ためにその精度の変動も大きいことが察知される。すなわち広葉樹の材積と写真濃度波形側断面積の関係については対象林分の質的内容およびそのベースとなる濃度要因が複雑に作用し多くの問題をはらむ。¹²⁾ したがって濃度計測による材積推定への適用化にはなお検討の余地を有する。これは既往において実施した他の広葉樹林分についても同様のことがいえる。

そこで、ここでとりあつかった4林分を対象に、濃度波形側断面積および材積の各平均値に対する検定を行ない、林分の特性に対する若干の分析と考察を以下に試みる。

検定に先だちまず福島県檜枝岐ブナ林をA、宮崎県えびの常緑広葉樹林をB、大分県黒岳落葉広葉樹林をC、九州大学宮崎演習林針広常落混交林をDとし、濃度波形側断面積および材積に関する各要因を表4-40に一覧表として示す。

これより各林分の写真濃度波形側断面積および材積の平均値の検定を、まず分散について

$$F = \frac{s_{x_i}^2}{s_{x_j}^2}$$

により行ない、その結果有意差がない場合、平均値について

$$t = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{s_{D\bar{x}}}$$

ただし

$$\begin{aligned} s_{D\bar{x}} &= \sqrt{\frac{\sum x_i^2 + \sum x_j^2}{(N_i + N_j) - 2} \left(\frac{1}{N_i} + \frac{1}{N_j} \right)} \\ &= \sqrt{\frac{(N_i - 1)s_i^2 + (N_j - 1)s_j^2}{(N_i + N_j) - 2} \left(\frac{1}{N_i} + \frac{1}{N_j} \right)} \end{aligned}$$

により行なった。ただしA、B、C、Dの各林分について計測単位、とくにプロットサイズ、写真濃度計測ゲージ等に若干の相違があるためBは一応その対象からはずし、またAについては同一単位になるように揃えた。

検定ははじめCとD、ついでAとCについてそれぞれ行なった。その結果は表4-41に

示すとおりである。

表4-40 各林分別計測要因一覧

Table 4-40 Measurement of the area of profile of densitometer waves and volume in each forest (A, B, C, D)

内 容		A	B	C	D
プロットサイズ (m) Plot size		10×20	40×40	10×40	10×40
(ha)		(0.02)	(0.16)	(0.04)	(0.04)
プロット個数 Number of plot		47	26	12	25
波 形 面 積 (x) Area of profile of densitometer	平 均 値 (\bar{x}) Mean	19.1106	106.9884	12.9597	23.0720
	標 準 偏 差 (SX) Standard deviation	2.8756	21.3411	8.2720	7.2527
	標 準 誤 差 (SE) Standard error	0.4194	4.1853	2.3879	1.4505
	変 異 係 数 (CV) Coefficient of variation	0.1507	0.1955	0.6383	0.3144
材 積 (y) Volume	平 均 値 (\bar{y}) Mean	4.9966	37.3916	8.8120	4.4877
	標 準 偏 差 (SY) Standard deviation	3.2355	10.6447	3.9244	2.6155
	標 準 誤 差 (SE) Standard error	0.4719	2.0876	1.1329	0.5231
	変 異 係 数 (CV) Coefficient of variation	0.6475	0.2847	0.4453	0.5828

表4-41 分散および平均値の検定

Table 4-41 Test of the mean and variance of the area of profile of densitometer waves and volume

	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves (x)	材 積 Volume (y)
① C : D	$F = 1.3007$ not sig (DF: 11, 24) $t = 3.7948^{**}$ (DF: 35)	$F = 2.2512^*$ (DF: 11, 24) $t = 3.9884^{**}$ (DF: 35)
② A : C	$F = 8.2748^{**}$ (DF: 11, 46) $t = 4.2654^{**}$ (DF: 57)	$F = 1.0851$ not sig (DF: 11, 46) $t = 0.6815$ not sig (DF: 57)

すなわち表4-41にもとづく検定の結果、CとDの間では濃度波形側断面積の分散は有意差がないが、平均値間には1%レベルで有意差を示す。材積は分散、平均値間ともに分散では5%レベルで、平均値間では1%レベルでそれぞれ有意差を示す。またAとCの間では濃度波形側断面積は分散、平均値ともに高度の有意差を示し、材積については逆に分散、平均値のいずれも有意差がなかった。

以上の結果からCとDでは濃度波形側断面積では平均値に差があり、材積では本質的にその分布の状態が異なることを意味し、またAとCでは逆に材積間には差がないが、その濃度波形側断面積は分散、平均値間ともに大きく異なった性質を有していることを意味するものと考えられる。すなわち平均材積に差がある林分では当然その濃度波形側断面積間に差異を示す。一方、平均材積間には差がなくても濃度波形側断面積間に差異を示すことがある。このことは平均材積の如何にかかわらずその林分が有する質的相違、たとえば樹種や年齢、径級その他の林分構成要因に原因して濃度波形側断面積間には差異を生ずるということを示しているといえる。すなわち天然生広葉樹林としての複雑な林分構成にもとづく一つの特長であると思われる。

§ 4-4 要約と若干の考察

森林蓄積の推定を空中写真の濃度計測によって行なう場合は以上において実験ならびに各種の分析検討を試みたように、写真濃度波形の平均基部幅、同ピークの個数、写真濃度波周期および同周波数等と材積の回帰関係(§ 4-2)、ならびに写真濃度波形側断面積の回帰関係(§ 4-3)の、大別して二つの方法が考えられる。

いま § 4-2 においてえられた成果を要約すると、まず試験的に試みた 51 年生スギ林分、面積 19.78 ha に対する平均濃度波形基部幅 (x_1)、ピーク個数 (x_2) と材積 (y) の関係は

$$Y = -0.577 + 0.741 x_1 + 0.199 x_2$$

の回帰式をえ、各回帰係数とも有意性が認められた。そして回帰式の標準誤差はプロット平均材積の 12.3% となった。

これによりスギ、ヒノキ、マツ林分、面積 92.54 ha に対する蓄積推定のための二重抽出法による濃度計測調査を実施した結果、濃度波形基部幅のプロット平均値 x および材積 y により回帰式

$$Y = 4.1014 + 1.7184 (x - 3.4029)$$

$$r = 0.751$$

をえ、これにもとづき対象全面積 92.54 ha に対する推定材積 \hat{V} は

$$\begin{aligned} \hat{V} &= 92.54 \times (393.71 \pm 2 \times 24.99) \\ &= 36433.92 \text{ m}^3 \pm 4625.15 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

その誤差率は 95% 確率で 12.7% となり、一応の成果が認められた。

ついで空中写真濃度波周期および濃度周波数と各材積の関係は、周期 ($\frac{1}{N}$) の場合、(A) スギ、ヒノキ、マツ林分、(B) 天然生広葉樹林分のそれぞれにおいて材積 y の回帰は

$$(A): Y = 9.6740 - 7.8281 \left(\frac{1}{N}\right)$$

$$r = -0.576$$

$$(B): Y = 47.1508 - 75.4122 \left(\frac{1}{N}\right)$$

$$r = -0.543$$

となり、また周波数 (x) による場合、同上の (A)、(B) それぞれにおいて重みつき平均値のとき

$$(A): Y = 4.358 + 0.417x$$

$$r = 0.619$$

$$(B): Y = 26.902 + 1.299x$$

$$r = 0.516$$

重みをはずしてそれぞれを代表値とみたてた場合

$$(A): Y = 4.001 + 0.489x$$

$$r = 0.658$$

$$(B): Y = 26.831 + 1.477x$$

$$r = 0.574$$

をえた。

さらに 森林濃度波形側断面を林分側断面すなわち Stand profiles とみたて、その理論的立証の成果のうえにたって試みた、各種の林分に対する濃度波形側断面積 (x) と各プロット材積 (y) の関係は、スギ、ヒノキ、マツ等の針葉樹 (N) および常緑樹、落葉樹、常・落混交林等の天然生広葉樹林 (L) のそれぞれについて

[N]

(1) スギ、ヒノキ、マツ壮齡林

$$Y = 0.8632 + 0.0487(x - 14.0250)$$

$$r = 0.917$$

(2) スギ、ヒノキ壯齡林

$$Y = 0.4605 + 0.0278x$$

$$r = 0.636$$

(3) スギ幼・壯齡林

$$Y = 6.2363 + 0.5223(x - 8.3200)$$

$$r = -0.781$$

(4) スギ幼・中・壯齡林

$$Y = 8.0232 - 0.3562x$$

$$r = -0.522$$

[L]

(1) 常緑広葉樹林

$$Y = 10.6945 + 0.2489x$$

$$r = 0.761$$

(2) 落葉広葉樹林

$$Y = 0.0355 + 0.8918x$$

$$r = 0.658$$

(3) 常・落および針・広混交林
(ただし L のみによる)

$$Y = 0.6692 + 0.0988x$$

$$r = 0.750$$

等の回帰式および各相関係数 r をえ、濃度波形側断面積による回帰の成立が確かめられた

(ただし広葉樹林中ブナ林の場合は蓄積度の均一性に起因し10m×20mプロット47個からは回帰は成立しなかったのでここでは省略した)。

以上の結果、いずれの場合もその相関係数 r はほぼ満足な値をえたと考える。したがって森林空中写真濃度の計測にもとづく蓄積推定は上記の各回帰式により一応可能であるといえる。すなわち濃度波形側断面積は濃度波形基部幅、波形のピーク数、濃度波周期、濃度周波数等の諸要因が総合的に包括された濃度成分とみなされる。したがって濃度波形側断面積の計測は各濃度要因がそれぞれにもっている特性、つまり材積との関係を総合的に測定するという点で効果的な計測要因であると考えられる。

ただしここでスギ幼・壮齡林の場合にみられるように齡級を異にする場合、BARTLETT'S test ではその内容には異質性を有するという結果が示された。また同齡林でもストリップの方向を異にすることにより濃度レベルに違いがあることも F -検定の結果明らかになった。すなわちそれぞれにとられたデータは各種の条件と要因にもとづきそれぞれに異質性、つまり不均一性を有するものであり、このような不均一なデータの集りによって構成される回帰式には大きな誤差要因をはらんでいるとみなさなければならない。したがってこのような場合は樹種、林齡、あるいは太陽光線に対する光の条件、傾斜方向等の濃度要因をできるだけ同一条件に揃わせるための層化を行なう必要がある。

第5章 大面積森林を対象とした蓄積の推定

地上調査における胸高直径、樹高その他の測定による蓄積推定を一般に直接測定と称することに對し、空中写真の濃度計測による森林蓄積の推定は空中写真という媒体物を用いかつ光学機器すなわち写真濃度測定装置により各種の濃度要因の計測による材積との相関あるいは回帰関係等との結びつきにもとづいて行なう推定方法であるため間接測定である。大面積にまたがる森林がその推定の対象となるとき、その精度、計測システム等の観点から濃度計測はもっとも大きな特長ないしは利点を發揮するものといえる。

すなわち大面積森林に対し空中写真濃度の計測を行ない、第1ステップとして濃度を必要に応じて数レベルに分ち、第2ステップで各濃度レベル毎に森林、非森林部分の分類を行なう。そして第3ステップで森林部分について樹種、蓄積等の推定を行なう計測システムが考えられる。

以上の視点にたつて本章では前2章(第3章および第4章)の各成果、とくに第4章において試みた各種森林に対する空中写真濃度計測による森林蓄積推定のための回帰式の検討、なかんずく材積と各濃度要因との回帰関係および相関関係等の成果をベースに、はじめその理論的方式を二重標本抽出法(Double sampling)のもとに示し、ついで広域森林地帯における林相区分ならびに大面積森林を対象とする蓄積推定を試み、写真濃度計測による森林蓄積推定の基本的方式を実証的に示した。

§5-1 大面積森林蓄積推定に対する理論的方式^{8) 92) 99)}

空中写真濃度計測にもとづき、①大面積森林に対し濃度計測を行ない空中写真濃度レベルをA, B, C, Dの4段階に分つ。そして②各レベル毎に森林部分と非森林部分に分類する。③その中で森林部分を対象にスギ、ヒノキ、マツ、広葉樹等の樹種判読を濃度のレベ