九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

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:

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

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

これより χ²を計算すると

$$\chi^{2} = \frac{(29 - 21.4)^{2}}{21.4} + \frac{(10 - 13.9)^{2}}{13.9} + \frac{(1 - 3.8)^{2}}{3.8} + \dots + \frac{(2 - 0.5)^{2}}{0.5}$$

= 2.6990 + 1.0942 + 2.0632 + \dots + 4.5000
= 23.3583

をうる。

いま自由度 $(4-1) \times (4-1) = 9$ における $\chi^2_{.05} = 16.919$, $\chi^2_{.01} = 21.666$ 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(齢階)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考える。

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,すなわち相関度が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途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 0)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* = 209.16mm)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ブ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, 5.0 m), 全長 (AB 間) 1098.7m, 出発点 A (測点 0) に対する終点 B の高低差 (4h) – 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 5097.6 m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4d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Ddisplacement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(0')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

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

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

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

(3)式に(1), (2)式の *dd* 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

$$d = R - \frac{h}{H}$$
(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よりの放射線と交叉する場合,および同計測線が写真主点 Pよりの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

$$d' + \Delta d = R \frac{h' + \Delta h}{H}$$
(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 A B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 ABの状態(写真面)

Fig. 4-3 Displacement of \overline{AB} when the scanning line crosses on the line through the princeple point on photographs

$$\boxtimes 4 - 3 \text{ is but } PY_{A_i} = r_i, \quad Y_{A_i}Y_i = \Delta d_i \text{ to box } \text{ to this states}$$

$$\Delta d_i = (r_i + \Delta d_i) \frac{\Delta h_i}{H}$$

$$= r_i \frac{\Delta h_i}{H} + \Delta d_i \frac{\Delta h_i}{H}$$

$$\Delta d_i \left(1 - \frac{\Delta h_i}{H}\right) = \Delta h_i \frac{\Delta h_i}{H}$$

$$\therefore \Delta d_i = \frac{r_i \frac{\Delta h_i}{H}}{\frac{H - \Delta h_i}{H}} = \frac{r_i \cdot \Delta h_i}{H - \Delta h_i}$$

$$(7)$$

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

$$AY_{A_i}$$
 : 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 : $-\frac{AY_{A_i}}{S}$, 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

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 = 4978m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。

ー方,
$$\triangle AY_i'P$$
 において $\angle AY_i'P = \gamma_i \ge f \lambda i \sharp$
sin $\gamma_i = \sin [180^\circ - (\alpha_i + \beta')]$
ただし $\alpha_i : \cos \alpha_i = \frac{c^2 + r_i^2 - b_i^2}{2cr_i}$
 $\beta' : \cos \beta' = \frac{c^2 + b'^2 - r'^2}{2cb}$
 $= \frac{(29.6)^2 + (40.52)^2 - (64.8)^2}{2 \times 29.6 \times 64.8} = -0.7007771$
 $\therefore \beta' = 180^\circ - 45^\circ 31' = 134^\circ 29' \text{ (const.)}$

Point No.	$\begin{array}{c} AY_{Ai} \\ (\text{Distance from} \\ AB_A \text{ to } A \end{array}$	(A_{h_i})	$ \begin{pmatrix} b_i \\ AY_A_i \\ \hline S \end{pmatrix} $	$ \begin{pmatrix} r_i \\ \sqrt{b^2 + c^2 - 2b_i c \cos\beta} \end{pmatrix} $	$ \begin{pmatrix} \Delta d_i \\ \left(\frac{Y_i \boldsymbol{\cdot} \Delta h_i}{H - \Delta H_i} \right) \end{cases} $	$r_i + \Delta d_i$	$\frac{\cos \alpha_i}{\left(\frac{c^2+r_i^2-b_i^2}{2cr_i}\right)}$	$({ { \sin \gamma_i \over (\alpha_i + \beta_i')] } \atop (\alpha_i + \beta_i')] } $	$\frac{r_i'}{\left(\sin\beta'\frac{c}{\sin\gamma_i}\right)}$	$E_i (PY_i - r_i')$	$e_i \ (E_i imes \sin \gamma_i)$
0	m 0	0.00^{m}	0.00 mm	^{mm} 29.600	mm 0.000	29.600 mm	1.0000	0.7135	^{mm} 29.600	mm 0.000	mm 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)

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 princeple point on photographs)

より r_i , つまり PY_i の長さは

$$r_i' = \sin \beta' \frac{c}{\sin \gamma_i}$$

ただし
$$\sin \beta' = \sin 45^{\circ}31' = 0.7134543$$
 (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 平行にスキャンニングされる 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 $Y_iZ_i = e_i$ を

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

$$\therefore e_i = E_i \cdot \sin \gamma_i$$
(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

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

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

$$\frac{H_0}{\varDelta dh_i} = \frac{D_i - \varDelta d_i}{\varDelta d_i}$$
$$\varDelta d_i \cdot H_0 = \varDelta dh_i (D_i - \varDelta d_i)$$

$$\Delta d_{i} (H_{0} + \Delta dh_{i}) = D_{i} \cdot \Delta dh_{i}$$

$$\therefore \Delta d_{i} = \frac{D_{i} \cdot \Delta dh_{i}}{H_{0} + \Delta dh_{i}}$$
(10)

ここで

$$D_i = L_0' + l_i$$

(ただし l_i は実測による各測点間の水平距離)
 $L_0' = L_0 + \Delta d_0$
 $\Delta dh_i = h_0 - \Delta h_i$

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 princeple 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(dd_i 欄)に示すとお りである。ただし測点は出発点 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 での密着写真上での長さである。なお $P_{(d_i)}$!は L_i に対する dd_i の比率を, $P(v_i)$ 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 , dd_0 および S はそれぞれ

$$h_0 = H_{0_{(A)}} - H_0$$

= 5097.6 - 5049.3 = 48.3m (const.)

ただし Ho : P 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.)

$$\Delta d_0 = \frac{L_0 \cdot h_0}{H_0} = \frac{374.183 \times 48.3}{5049.3} = 3.579 \text{ (Const.)}$$
$$S = \frac{H_0}{f} = \frac{5049.3}{0.20916} = 24140.84911$$

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にならなければならないが計算の結果は-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¥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=0.10mm 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, 局部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。

$(\frac{D_i - \Delta d_i'}{S})$ $\underbrace{\begin{array}{c} \Delta d_i \\ D_i \cdot \Delta dh_i \\ H_0 + \Delta dh_i \end{array}}_{Adh_i + \Delta dh_i}$ $\frac{\Delta d_i'}{\Delta d_i}$ Point No. ${\substack{\varDelta dh_i\\(h_0-\varDelta h_i)}}$ $\substack{D_i\\(L_0+\varDelta d_0-l_i)}$ $\sum l_i$ $P_{(d_i)}$ l_i' $P_{(l_i')}$ No. Δh_i 1 0 0.0 0.0 48.3 377.762 3.579 0.148 15.500 0.955 95.5 3.046 2 4 73.7 42.2 451.462 3.741 18.546 6.10.155 0.836 3.286 103.13 8 153.7 42.2531.462 4.405 0.182 21.832 0.834 6.1 3.287 103.1 12 233.7 42.2 5.068 611.462 25.119 4 6.1 0.2100.836 3.286 103.15 16 313.7 42.2 5.731 28.405 6.1 691.462 0.2370.834 3.370 105.7 6 20 393.7 19.4 28.9 771.462 4.390 0.18231.775 0.573 3.321104.27 24 23.2473.7 25.1851.462 4.2120.17435.096 0.496 3.307 103.7 0.471 8 28 553.7 24.523.8 931.462 4.370 0.181 38.403 3.380 106.0 633.7 13.9 2.77741.783 9 32 34.41011.462 0.1150.2753.276 102.7 10 36 713.7 31.217.11091.462 3.684 45.059 0.340 0.1533.091 96.9 11 793.7 39.4 1171.462 9.070 40 8.9 0.376 48.150 0.781 3.235 101.5 12 873.7 44 3.6 44.7 1251.462 10.982 0.455 51.385 0.885 3.251 102.0 13 48 953.7 47.8 1331.462 0.5 12.4860.517 54.636 0.946 3.038 95.3 14 52 1033.7 -21.169.4 1411.462 19.137 0.793 57.674 1.3752.464 77.3 15 56 1098.7 -37.5 85.8 60.138 1476.462 24.670 1.0221.699

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 princeple point on photographs)

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

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

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

$$\therefore \quad \Delta d_i = \frac{D_i \cdot \Delta dh_i}{H_0 - \Delta dh_i}$$
(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)に起伏のない平担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繁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=200mm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 $\frac{90^{\circ}}{100}$ ×5=4°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)b}

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 x₁, x₂ とし, 対応するプロット材積を y とすれば,その回帰式は

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2$$

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。





*) 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=209.16mm)の密着ポジフィルムを用いた。

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

Plot No.	1	平均波形基部幅 Average width x_1	ピーク個数 Number of peak's _{x2}	材 積 Volume y	ck
1	1	mm 3.50	3	2.853 m ³	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

	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	

(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 x1, ピーク数 x2 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	У	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
У				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

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

となる。したがってプロット平均材積 2.193 m³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⁾。

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) 現地調查資料

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92.54haを対象とした。同地域は標高846m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°30'W の方向に7本の Densitometer strip すなわち濃度計測線をとり、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 stirp 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 sam	ple	Small san	nple	測線長 Strip length	:
1	Densitometer s	trip-1			m 646	
2	"	-2	Field st	rip -1	670	
3	"	-3			788	
4	"	-4	"	-2	775	
5	"	-5			780	
6	"	-6	"	-3	468	
7	"	-7			394	
	l l				1	

*) 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=209.16mm)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。

Field strip plot	Z Cry	ギ ptomeria	E Chai	ニノキ maecyparis	4	r ب Pinus	应 Bro	、葉 樹 adleaved		計 Total
here any second s	N	V	N	V	$N \mid$	V	N	V	\overline{N}	V
1-1	24	13.125^{m^3}	-	— ^{m³}	_	— ^{m3}	_	— ^{m³}	24	13.125^{m^3}
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		—	—	1000k	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

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

	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 m×20m=0.008ha、 2-16: 4m×25m=0.010ha、3-10: 4m×18.2m=0.0073haである。

(Note) Mark * is fractional plot are, plot No. 1-14: each $4 \text{ m} \times 20 \text{ m} = 0.008$ ha, plot No. 2-16: each $4 \text{ m} \times 25 \text{ m} = 0.010$ ha, plot No. 3-10: each $4 \text{ m} \times 18.2 \text{ m} = 0.0073$ 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0.01ha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。

No.	幅4m×長50m Width 4m×Length 50m 1 Unit	平均波形基部幅 Average of width of densitometer waves	材 Tolume (0.01ha)	ck
$ \begin{array}{c} 1\\2\\3\\4\\5\\6\\7\\8\\9\\10\\11\\12\\13\\14\\15\\16\\17\\18\\19\\20\\21\\22\\23\\24\\25\\25\\24\\25\\25\\24\\25\\25\\24\\25\\25\\24\\25\\25\\24\\25\\25\\24\\25\\25\\25\\24\\25\\25\\25\\24\\25\\25\\25\\25\\24\\25\\25\\25\\25\\25\\25\\25\\25\\25\\25\\25\\25\\25\\$		$\begin{array}{c} \text{mm} \\ 5.00 \\ 3.86 \\ 3.69 \\ 2.61 \\ 3.35 \\ 3.34 \\ 2.34 \\ 3.95 \\ 2.98 \\ 2.74 \\ 2.68 \\ 4.54 \\ 4.12 \\ 4.34 \\ 3.20 \\ 3.35 \\ 3.28 \\ 3.66 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 2.59 \\ 2.43 \\ 4.35 \\ 3.36 \\ 3.76 \\ 3.66 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.36 \\ 3.66 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.66 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.66 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.66 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.66 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.66 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.66 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.86 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.86 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.86 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.86 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.36 \\ 3.86 \\ 3.79 \\ 3.00 \\ 3.86 \\ 3.86 \\ 3.79 \\ 3.86 \\ 3$	$\begin{array}{c} m^3 \\ 6.56 \\ 4.67 \\ 3.22 \\ 3.40 \\ 4.65 \\ 5.69 \\ 2.57 \\ 4.99 \\ 3.84 \\ 1.86 \\ 1.90 \\ 7.90 \\ 5.87 \\ 5.33 \\ 5.12 \\ 3.38 \\ 3.13 \\ 3.38 \\ 3.66 \\ 2.82 \\ 3.21 \\ 3.26 \\ 2.22 \\ 5.10 \\ 6.31 \end{array}$	$\begin{array}{c} 12.56\\ 9.53\\ 7.91\\ 7.01\\ 9.00\\ 10.03\\ 5.91\\ 9.94\\ 7.82\\ 5.60\\ 5.58\\ 13.44\\ 10.99\\ 10.67\\ 9.32\\ 7.73\\ 7.41\\ 8.04\\ 8.45\\ 6.82\\ 7.57\\ 6.85\\ 5.65\\ 10.45\\ 10.67\\ \end{array}$
26 27 28	1 1 1	$3.13 \\ 3.06 \\ 3.18$	$4.26 \\ 2.10 \\ 4.44$	$8.39 \\ 6.16 \\ 8.62$
Total	28	95.28	114.84	238.12

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

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	У	ck
1	28	95.28	114.84	238.12
x		336.1442	411.2674	842.6916
у			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 with of densitometer waves and the volume

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 strip7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

Y = 4.1014 + 1.7184 (x - 3.4029)= 4.1014 + 1.7184 (3.3073 - 3.4029) = 3.9371

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

 $V(Y) = 0.037532 + (3.3073 - 3.4029)^2(0.088163)$ $+ (1.7184)^2(0.008166)$

= 0.062451

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

 $92.54 \times (393.71 \pm 2 \times 24.99)$

$$= 36433.92 \,\mathrm{m}^3 \pm 4625.15 \,\mathrm{m}^3$$

すなわち 92.54ha 当りの材積は 95%確率において 31808.77 m³(下限) ~ 41059.07 m³(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。

 $N_{\text{(CD)}}$ 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*₍₅₎ > *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 ($\S4-2$, 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 $\frac{85}{50~200}$ 年のカシその他 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 × 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×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づき平均値として回帰計算 を試みた。表4-12(A), (B)は重みづ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,対応する重みづき平均材積 y を従属変数とする

^{*)} 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 = 209.16mm)の山-456, C9-No.6(A),同No.5(B)の各空中写真による。

^{**)} 濃度計測ゲージは(A)の場合:1)-(a)0.08×0.20mm, (b)1.4, (c)5mm/min, (e)×1, (f)2, 2)-(a)×10, 3)-(a)120mm/min, (b)0.5V, (B):1)-(a)0.08×0.20mm, (b)5.6, (c)5mm/min, (e)×1, (f)1,2)-(a)×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 <i>y</i>	濃度問波数 Frequency N	濃度波周期 Cycle <u>1</u> N
1 1	m ³	7	0 1420
1-1	13.123	0	0.1429
2	9.322	5 12	0.0833
1	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 <i>y</i>	N	$\frac{1}{N}$	Plot No.	40m×40m プロット材積 Volume per plot <i>y</i>	N	$\frac{1}{N}$
1	m ³ 49.872	6	0.1667	14	m^{3} 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づ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い難い。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	平 均 材 積 Average volume	重 み Weighted
$\frac{1}{N}$	у	w
0.07	m^{3} 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

$\frac{1}{N}$	у	w
0.09	m^{3} 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

(B) Natural broadleaved forest

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 濃度波周期と重みづ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: $4m \times 50m$ プロット,(B): $40m \times 40m$ 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 として(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 の重みづき平均値として

$$Y = b_0 + b_1 x$$

により回帰係数 bo, b1 および相関係数 r を求めた。表 4-13 (A), (B) は重みづき 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, Chamaecyparis and Pinus

括約周波数 Frequency interval x	平 均 材 積 Average volume <i>y</i>	重 み Weighted w
1	$\frac{\mathrm{m}^3}{2.664}$	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
5	^{m³} 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
	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 すなわち重みをはずし, 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) :
$$Y = 4.001 + 0.489 x$$

 $r = 0.658$
(B) : $Y = 26.831 + 1.477 x$
 $r = 0.574$

となった。

図4-9(A), (B) はこれらの関係を重みづきの場合は(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。



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きの場合(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, また重みづきに 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で 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稈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。

すなわち視差測定稈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齢階を有する林分(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は幼齢林, ②は中齢林, ③は壮齢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,壮等の各齢階毎に 平均値をとりこれを用いても切断面としての総対的関係,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。



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(齢階)の相違により上長生長 量つまり樹高の値が変ってくる。また同様の条件によって胸高直径の値も変ってくる。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関係は全く同じで ある。また同一齢階において密度,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いての分析検討 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(齢階)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(齢階)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え 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。



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齢階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は幼齢林,②は中齢林,③は壮齢林の各齢階を示す。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なえば、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。

すなわち各齢階における濃度波形は樹冠直径の大(壮齢林),中(中齢林),小(幼齢林)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(齢階)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齢階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齢林<中齢林<壮齢林の関係にあるが,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齢林>中齢 林>壮齢林となる。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 4 m×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(Plot-6, 7, 8)に示したものである。

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

Plot No.	1	濃度波形側断面積 The area of profile of densitometer waves <i>x</i>	プロット材積 (200m ² 当り) Volume per plot <i>y</i>	log y	$1+x+\log y$
1	1	cm ² 17.1	m^{3} 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

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

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は対数をとり $\log y$ 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		

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

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。



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)g

(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は対数をとり,xを 0.5cm² 単位に括約して対応するプロット材積 $\log y \in x$ 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=209.16mm)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)10 V, A-D コンバーター:1000Vレンジ,ユニバーサルカウンタ -: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
1	1	cm ² 4.11	$\frac{m^3}{3.654}$	23	31	$\frac{\mathrm{cm}^2}{9.60}$	5.828^{m^3}
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 の重みづき平均値

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			1	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 4-19 Solution system of regression to the area of profile of densitometer waves and volume per plot by weighted mean

	w	wx	w log y	$w\left(1+x+\log y\right)$
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	Ø	分	餀	分	朳
------------	---	---	---	---	---	---

Table 4-20 Analysis of variance of regress
--

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。



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

記重みづき平均値の 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かった 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。

The problem of profile of densitometer wavesThe profile of densitometer waves117.367.28256.266.3928.888.93666.046.3937.086.0079.506.1847.357.28899.226.5958.864.0597.969.0164.304.52108.265.2676.846.50119.188.4286.5010.73126.1810.6496.428.78138.065.61104.185.78146.808.49113.007.81157.544.66126.148.87168.547.52134.3010.48178.028.731414.821.54187.2611.041516.980.95196.227.021620.100.28<					1			1
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	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
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $			cm ²	m ³			cm ²	m ³
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	1	1	7.36	7.28	2	5	6.26	6.39
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		2	8.88	8.93		6	6.04	6.39
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		3	7.08	6.00		7	9.50	6.18
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		4	7.36	7.28		8	9.52	6.59
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		5	8.86	4.05		9	7.96	9.01
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		6	4.30	4.52		10	8.26	5.26
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		7	6.84	6.50		11	9.18	8.42
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		8	6.50	10.73		12	6.18	10.64
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		9	6.42	8.78		13	8.06	5.61
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		10	4.18	5.78		14	6.80	8.49
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		11	3.00	7.81		15	7.54	4.66
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		12	6.14	8.87		16	8.54	7.52
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		13	4.30	10.48		17	8.02	8.73
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		14	14.82	1.54		18	7.26	11 04
16 20.10 0.28 20 8.10 4.57 Total 16 133.12 99.78 21 5.52 7.83		15	16.98	0.95		19	6.22	7.02
Total 16 133.12 99.78 21 5.52 7.83		16	20.10	0.28		20	8.10	4.57
Total 16 133.12 99.78				0.20		21	5 52	7.83
100.12 100.12 b b4 b 79	Total	16	133.12	99.78		22	6 64	6 79
Mean 8.3200 6.2363 23 8.00 7.62	Mean		8.3200	6.2363		23	8.00	7.62
2 1 8.50 6.47	2	1	8.50	6.47				1
2 6.54 6.78 Total 23 174.42 171.72		2	6.54	6.78	Total	23	174.42	171.72
3 6.50 6.94		3	6.50	6.94			1	1
4 9.28 12.77 Mean 7.5835 7.4661		4	9.28	12.77	Mean		7.5835	7.4661

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

*) 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) 同齢林分に対する分析

2本のストリップは Strip No. 1に部分的に幼齢林 (18年生スギ林) を含む以外は殆ど 55年生のスギ壮齢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われ方も若 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壮齢林のみ のプロットを対象に、すなわち Strip No.1における 幼齢林の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

$$\begin{split} t &= \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{s_{D\bar{y}}} \\ &= \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{\sqrt{\frac{\sum y_2 + \sum y_1^2}{(N_2 + N_1) - 2} \left(\frac{1}{N_2} + \frac{1}{N_1}\right)}} \\ &= \frac{7.4660 - 7.4623}{\sqrt{\frac{88.7831 + 52.0392}{(23 + 13) - 2} \left(\frac{1}{-23} + \frac{1}{13}\right)}} = \frac{0.0037}{0.7062} < 1^{\text{not sig}} \end{split}$$

となり、材積間にも差がない。

すなわち55年生スギ壮齢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) 異齢林に対する回帰の計算と分析

同一ストリップ内で異齢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	у	1+x+y
1	16	133.12	99.78	248.90
x		1459.1864	646.5296	2238.8360
У			779.3102	1525.6198
8.32000000		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

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

= 6.2363 - 0.5223(x - 8.3200)
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

$$CB = sy \cdot t_{.025}$$

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

$$f_{2} \neq 0$$

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

$$= V(6.2363) + V(-0.5233) (x - 8.3200)^{2}$$

$$= \frac{4.3679}{16} + \frac{4.3679}{351.6280} (x - 8.3200)^{2}$$

$$= 0.27299375 + 0.01242193 (x - 8.3200)^{2}$$

$$df = 16 - 2 = 14 \text{ is bit 5. } t_{.025} = 2.1448$$

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, 壮齢林の場合^{57)b}

(i) 資料

林齢(齢階)が幼,中,壮の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	齢 階(林齢)
1	660.0m/33プロット	幼齢林(18年),壮齢林(54年)
2	148.7m/ 8プロット	幼齢林(17年)
3	183.0m/ 9プロット	中齢林(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	-	$\overline{2}$	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	2	1 1	5.04	10.461
		14	9.30	0.790	5	2	5.76	11 601
		15	4.70	2.100		2	1 92	10 168
		10	4.20	12.770		1	4.32	10.100
		18	7.40	0.000		5	6.96	7 059
		19	4.30	6.790		6	6.84	2 817
		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		l a	10 01	2 501
		23	2.10	b.840	- Cum	9	E4 25	2.391
		24	4.50	6.300	Sum	9	54.30	05.405
		25	4.20	7.940	Total	43	320.08	230.989

*) 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=209.16mm)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	у	1 + x + y
1	43	320.08	230.989	594.069
x		3752.5456	1295.5318	5188.1574
у			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。

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

(= 8.0232 - 0.3562 x)

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,壮の各齢階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。

Strip No.	DF	$\sum (x - \overline{x})^2$	$\sum (x - \overline{x})(y - \overline{y})$	$\sum (y - \overline{y})^2$	DF	b	$\sum d^2 y \cdot x$	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	1189.95 9 4	-423.8858	555.4614	41 -	-0.3562	404.4653	9.8650	

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

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パラレル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

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		
			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

(1) Strip-1

ここで Strip-1は壮齢林中若干の幼齢林プロットを含み, Strip-2は幼齢林のみである 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は中齢林のみで,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)。

						•
Sample	$\sum d^2 y \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{x}$	DF	$\begin{array}{c} \text{Reciprocal} \\ \left(\frac{1}{DF}\right) \end{array}$	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

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

すなわち表 4-30 の計算表から

$$\bar{s}^{2} = \frac{\sum d_{y\cdot x}^{2}}{\sum DF} = \frac{301.7045}{37} = 8.15418$$

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

$$\chi^{2} = 2.3026 [(\log \bar{s}^{2}) \sum DF - \sum DF(\log s^{2})]$$

$$= 2.3026 \times [33.72069 - 28.52427]$$

$$= 11.96528$$
Correction factor C
$$= 1 + \frac{1}{3 \times 2} \times \left[\sum \frac{1}{DF} - \frac{1}{\sum DF} \right]$$

$$= 1 + \frac{1}{6} \times \left[0.35119 - \frac{1}{37} \right]$$

$$= 1.05403$$

$$\therefore \text{ Correction } \chi^{2} = \frac{\chi^{2}}{\text{Correction factor } C}$$

$$=\frac{11.96528}{1.05403} = 11.35^{**}$$
(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 とが必要であると考える。

- 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て、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 $40m \times 40m$ 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 $40m \times 40m$ 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	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	Plot	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
	Center	Right	Left	mean	$\begin{array}{c c} 40m \times 40m \\ (m^3) \end{array}$	110.	Center	Right	Left	mean	$40 \text{m} \times 40 \text{m}$ (m ³)
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*=209.16mm)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 cm³ 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	У	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
у			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。

Source SSDFMS F696.5957 696.5957 Reg. on x1 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

表4-34 回 帰 の 分 散 分 析 Table 4-34 Analysis of variance of regression

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

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

$$r = 0.835$$

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。

1	• · · · · ·			
Plot No.	本 数 Number of tree	材 Tolume	濃度周波数 Frequency	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves
		m ³		Cm ²
1	14	9.660	11	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

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

*) 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=152.62mm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 個々にとりあつかった場合, ばらつきが大きいため回帰関係は認め難い。また重みづき平 均値や対数変換等によっ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 $\frac{\log y}{N}$ 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	Р	$\frac{\log x}{P}$
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。



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=210.30mm)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。

Plot No.	Nu Z	太	t ee	<i>ا</i>	才 積 Volume	濃度波形側断面積 Area of profile of	
100 100	N	L	Total	N	L	Total	densitometer waves
1	16	47	63	m^{3} 4,422	m^{3} 5,969	m^{3} 10.391	cm^2 15.7
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%		

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

(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2.0cm⁴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
1	8 (7.1 ~ 9.0)	cm ² 8.0	0.751^{m^3}	1
2	14 (13.1 \sim 15.0)	14.9	1.859	2
3	16 (15.1 \sim 17.0)	16.2	3.512	5
4	20 (19.1 \sim 21.0)	20.2	2.422	2
5	24 (23.1 \sim 25.0)	23.6	2.389	4
6	26 (25.1 \sim 27.0)	25.6	4.641	2
7	28 (27.1 \sim 29.0)	27.2	3.813	2
8	$30 \ (29.1 \sim 31.0)$	30.0	3.445	2
9	$32 (31.1 \sim 33.0)$	31.9	2,939	2
10	$34 (33.1 \sim 35.0)$	34.3	3.429	1
11	$38 (37.1 \sim 39.0)$	37.8	4.799	1
				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。





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,福島県山口営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積の関係

表 4-39 にもとづき,濃度波形側断面積を独立変数 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, 10 m×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) 5nm/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: 1 ms, 1V によった。

No.	Plot No.	材 積 Volume	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves	No.	Plot No.	材 積 Volume	濃度波形側断面積 Area of profile of densitometer waves
1	1	m^{3}	cm ²	05	97	m ³	12 ^{cm²}
1	1	0.343	17.4	20	21	2.210	13.5
2	4	5.632	20.4	20	28	2.700	19.8
3	5	5.8//	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

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





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	ť	1	値			19	.110	6			4.9966
標	準	偏	差			2	.875	6			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

$$F = \frac{s_{xi}^2}{s_{xj}^2}$$

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

$$t = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{S \bar{p}_{\bar{x}}}$$

ただし

$$\begin{split} s_{\mathcal{D}_{x}} &= \sqrt{\frac{\sum x_{i}^{2} + \sum x_{j}^{2}}{(N_{i} + N_{j}) - 2} \left(\frac{1}{N_{i}} + \frac{1}{N_{j}}\right)} \\ &= \sqrt{\frac{(N_{i} - 1)s_{i}^{2} + (N_{j} - 1)s_{j}^{2}}{(N_{i} + N_{j}) - 2} \left(\frac{1}{N_{i}} + \frac{1}{N_{j}}\right)} \end{split}$$

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

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 Content	A	В	С	D
	プロットサイズ (m) Plot size	10 imes 20	$40\! imes\!40$	$10\! imes\!40$	$10\! imes\!40$
	(ha)	(0.02)	(0.16)	(0.04)	(0.04)
	プロット個数 Number of plot	47	26	12	25
(x) 基 型 强 税 税 Area of profile of densitometer	平均值(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
	变異係数(CV) Coefficient of variation	0.1507	0.1955	0.6383	0.3144
材 積 Nolume (y)	平均值(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
	变異係数(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
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考する。

§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19.78haに対する平均濃度波形基部幅 (x1),ピーク個数 (x2)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92.54ha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 92.54haに対する推定材積 \hat{V} は

 $\hat{V} = 92.54 \times (393.71 \pm 2 \times 24.99)$

 $= \ 36433.92 \, m^3 \ \pm \ 4625.15 \, m^3$

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 v 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づき平均値 のとき

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

 $r = 0.619$
(B): $Y = 26.902 + 1.299 x$
 $r = 0.516$
重みをはずしてそれぞれを代表値とみたてた場合
(A): $Y = 4.001 + 0.489 x$
 $r = 0.658$
(B): $Y = 26.831 + 1.477 x$
 $r = 0.574$

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,マツ壮齢林 Y = 0.8632 + 0.0487(x - 14.0250)r = 0.917(2) スギ, ヒノキ壮齢林 Y = 0.4605 + 0.0278 xr = 0.636(3) スギ幼・壮齢林 Y = 6.2363 + 0.5223(x - 8.3200)r = -0.781(4) スギ幼・中・壮齢林 Y = 8.0232 - 0.3562 xr = -0.522[L] (1) 常緑広葉樹林 Y = 10.6945 + 0.2489 xr = 0.761(2) 落葉広葉樹林 Y = 0.0355 + 0.8918 xr = 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 + 0.0988 xr = 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

(ただし広葉樹林分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る。

ただしここでスギ幼・壮齢林の場合にみられるように齢級を異にする場合, 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 同齢林でもストリッ 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, 林齢, 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 ることに対し,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発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。

以上の視点にたって本章では前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