

航空写真を用いた林分蓄積量と その時系列変化の推定

鈴木 保志・竹口嘉太郎^{*1}・神崎 康一

Estimating Stand Volume and Its Change in Time Series by Means of
Aerophotograph

Yasushi SUZUKI, Yoshitarou TAKEGUCHI and Kouichi KANZAKI

要 旨

航空写真からえられる簡便な指標からの林分の蓄積量の推定とその時系列変化の把握を試みた。蓄積量のもとなるデータは昭和39年に行われた芦生演習林の毎木調査における11個のプロットの調査結果を、航空写真は昭和38年および昭和49年撮影のものを用いた。航空写真から対象プロット内の樹木の樹冠幅と樹高を計測し、蓄積量の指標値として平均樹冠幅・平均樹高・樹冠の閉鎖率を算出した。プロットの水平位置の同定、樹冠幅の測定については比較的良好な結果がえられ、指標値からの林分蓄積の推定の可能性が示された。

は じ め に

森林の経営計画を立案する際に必要な林分の蓄積量の情報を得るためには、毎木調査が不可欠であるが、この作業には多くの時間と労力を要する。航空写真を用いてこの情報を得ることができれば、それらの節約になる。また、一般に航空写真は一定の期間毎に同一地域の撮影がおこなわれているため、その時系列的な変化を把握するということも可能性として考えられる。

この航空写真からの蓄積量の推定という作業を実現する際に問題となる点として、測定精度の他に、航空写真から判別できるのは主として上層木についての情報のみであるということがあげられる。また、作業の簡便さを追求する面から、推定に要する指標は測定が容易でその数も少ないことが望まれる。そこで、毎木調査の結果をもとに上層木についての限られた情報から全林分の蓄積量を推定する可能性についてまず検討し、次に航空写真から得られる同一地点についての数値の精度を検討する。そして、撮影年代の異なる写真から同一地点についての情報を計測し、その結果について考察を行う。

^{*1} 現在の所属：アンダーセンコンサルティング(株)

調 査 方 法

芦生演習林では昭和39年に全域で計63プロットの毎木調査がおこなわれている^{1,2)}。各プロットは面積0.1haの方形区であり、胸高直径10cm以上の全木について樹種、樹冠幅、樹高、枝下高、成長量、上層・下層木区分が記録されている。林分の蓄積量の実際の値として、今回はこの毎木調査結果を用い、1～4林班に設定された11個のプロットを対象とした。その位置を図-1に示す。昭和49年の赤外カラー写真から作成された林相図¹⁾によれば、林相はどのプロットにおいても広葉樹優勢の混交林で樹冠疎密度は疎から中、樹高は高に分類されている。

同演習林の全域を撮影した航空写真としては昭和38年(モノクロ)、44年(モノクロ)、49年(赤外カラーおよびモノクロ)および平成元年(カラーおよびモノクロ)のものがある¹⁾。毎木調査結果と写真からの計測結果との照合には昭和38年撮影の写真を用いた。時系列変化の把握については、撮影季節等を考慮して昭和38年と44年撮影の写真(どちらも5月撮影、縮尺はそれぞれ1/25,000、1/20,000)の比較を試みることにした。

航空写真の評定および林分の計測にはCarto Instruments社製のAP-190ステレオ写真プロッター(以下プロッターと略記する)を用いた。同機の詳細については文献³⁾を参照されたい。

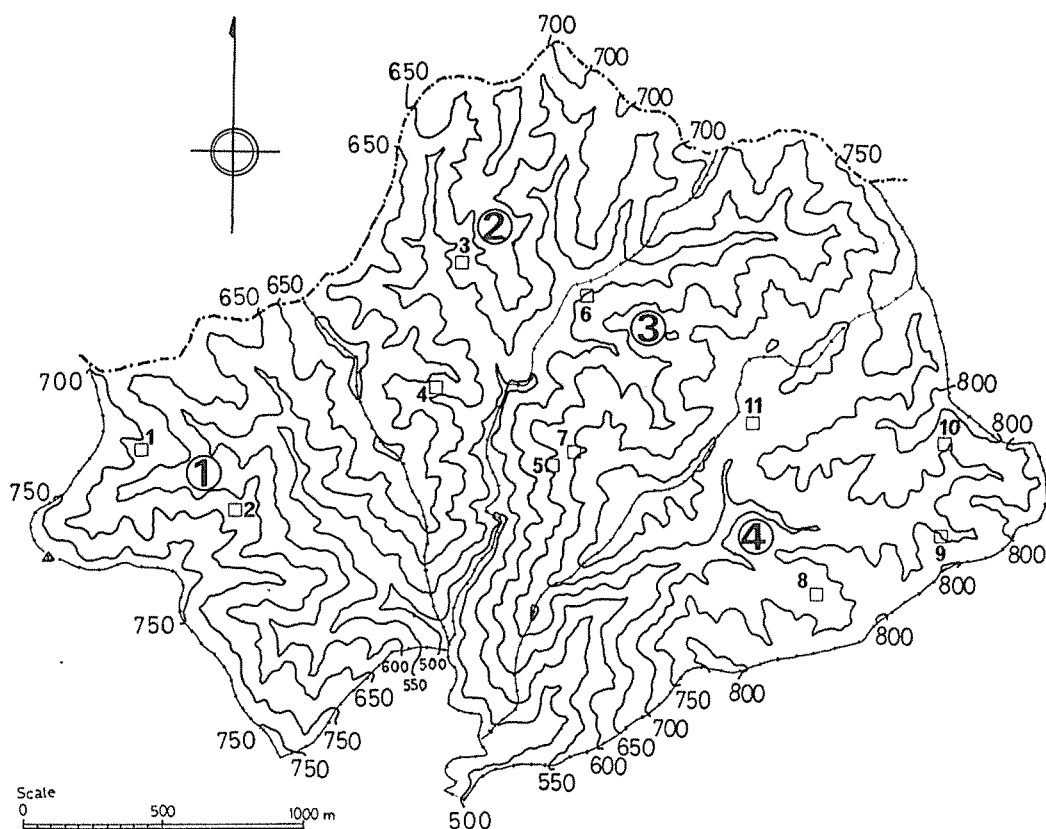


図-1 芦生演習林内プロット位置図

Fig. 1 Position of investigative plots in Ashiu experimental forest.

* : 方形はプロットを、丸で囲まれた番号は林班番号を意味する。

* : Squares mean plots and encircles number means that of compartment.

結 果 と 考 察

1. 林分蓄積量を推定する指標値について

対象とする11プロットの毎木調査結果の概略を表-1に示す。毎木調査の結果から得られる情報は樹種など質的なものも含めて多くのものがあるが、航空写真から得られる情報としてはできるだけ熟練を要せずにえられる数値的なものを想定したため、単木の情報として樹冠幅と樹高のみから指標値を定めることにした。また、写真上でのプロットの位置の同定では水平距離で20～30m程度のずれは不可避なものと考えられる。一方、水平距離で20～30m程度の位置のずれでは林分のおおまかな特性値は一定とみなしてよいものと考えられる。すなわち個々の樹木の同定は困難だが、半径数十m以内の範囲で林分を同定することは可能であると考え、林分をまとまりとして捉えることを考えた。

そこで、林分の密度を表す指標として、林分の水平面の閉鎖率という数値を次のように定義した。個々の林木の樹冠の投影面を真円と仮定し、樹冠幅を直径とする円の面積を仮にその林木の樹冠の投影面積とする。プロット内の林木のこの仮の投影面積を合計した値をプロットの面積で除した値をその林分の閉鎖率とする。実際には樹冠の投影面形は真円ではなく、重なりもあるためこの値は1をこえることもある。また、樹冠幅、樹高についてもプロット内の平均値をとり、平均樹冠幅と平均樹高とすることでその林分全体を表す数値とした。さらに、航空写真から判別できるのはおもに上層木のみであるため、上層木のみについてのこれら閉鎖率、平均樹冠幅、平均樹高の3つの数値から全林分の蓄積量がどの程度表現できるかを検討してみた。

表-1にみられるように、各プロットで上層木の蓄積量は全蓄積量の平均して約90%弱を占めている。プロットの全蓄積量を $V1$ 、上層木の蓄積量を $V2$ とすると、

$$V1 = 0.897 \cdot V2 + 4.971 \quad (r^2 = 0.860^{**}) \quad (** : 1\% \text{ 有意}) \quad \cdots(1)$$

表-1 S.39年 毎木調査結果
Table 1 Results of complete tree tally in 1964

プロット 番号 plot no.	プロット全体 all over a plot					上層木のみ only upper trees				
	本数 Num. of trees	蓄積 Volume m3	平均	平均	閉鎖率 Closure Rate	本数 Num. of trees	蓄積 Volume m3	平均	平均	閉鎖率 Closure Rate
			樹冠幅	樹高				樹冠幅	樹高	
			Mean	Mean				Mean	Mean	
			Crown	Tree				Crown	Tree	
Width	height	Width	height							
m	m	m	m							
1	21	13.89	6.69	11.69	0.92533	5	10.42	9.62	17.20	0.43430
2	34	22.40	7.21	14.06	1.71761	14	19.31	10.13	18.14	1.21582
3	101	22.05	4.42	10.80	1.78072	54	18.37	4.79	12.55	1.11458
4	84	22.91	5.82	11.95	2.71659	32	17.86	7.49	15.68	1.65206
5	53	20.09	6.07	11.77	1.86542	23	17.09	7.06	15.65	1.06165
6	52	23.52	6.68	13.02	2.13825	25	18.73	7.89	16.58	1.41952
7	18	20.38	7.51	14.51	0.92522	9	19.64	9.30	19.36	0.67813
8	14	32.50	10.65	20.04	1.59983	6	31.22	15.70	28.67	1.27986
9	35	21.64	7.59	12.17	1.90452	23	20.99	8.45	13.91	1.54671
10	31	17.99	6.42	12.32	1.35394	23	16.69	6.68	12.89	1.06744
11	43	27.01	6.37	14.78	1.75790	17	20.93	8.39	18.72	1.18493
Mean	44.1	22.22	6.86	13.37	1.69867	21.0	19.20	8.68	17.21	1.15045
std.	26.0	4.54	1.46	2.43	0.48944	13.2	4.69	2.64	4.22	0.33780

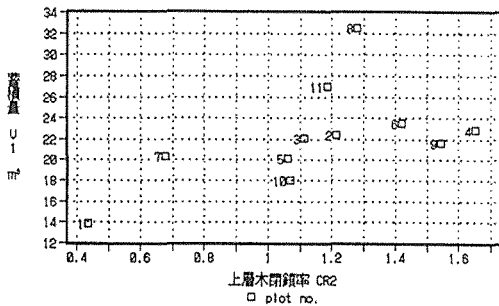


図 2-1 V1 と CR2 の関係

Fig. 2-1 Relation between V1 and CR2

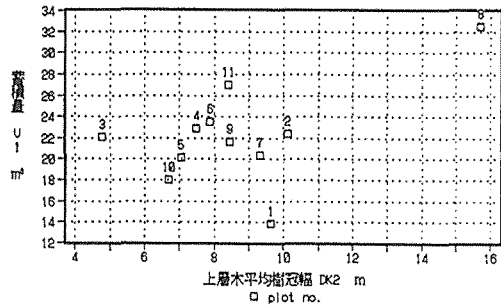


図 2-2 V1 と DK2 の関係

Fig. 2-2 Relation between V1 and DK2

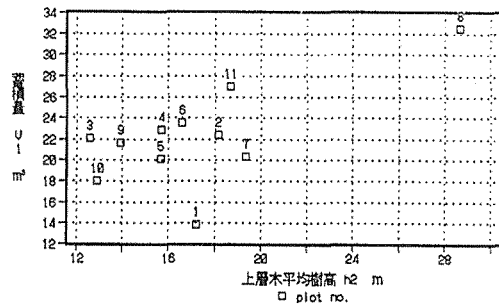


図 2-3 V1 と h2 の関係

Fig. 2-3 Relation between V1 and h2

表-2 変数間の相関

Table 2 Correlation of parameters

	V1	CR2	DK2	h2
V1	1.0000	0.5550	0.5540	0.6834
CR2	--	(*)	(*)	*
DK2		--	-	-
h2			1.0000	0.9402
			--	**
				1.0000
				--

**: 1%有意 Significant rate 1%

*: 5%有意 Significant rate 5%

(*): 10%有意 Significant rate 10%

と表される。

上層木の閉鎖率、平均樹冠幅、平均樹高をそれぞれ $CR2$, $DK2$, $h2$ とすると、 $V1$ とそれぞれの指標値の間の関係は図 2-1 ~ 3 および表-2 のようになる。この 3 つの指標値での $V1$ の重回帰分析を試みた。指標値間の相関をみると表-2 のように $DK2$ と $h2$ 間の相関が高く共線性が予測される。そこで従属変数 $V1$ を最もよく表現する 2 変数の組合せを探索した結果、次の式が得られた。

$$V1 = 8.063 \cdot CR2 + 0.776 \cdot h2 - 0.423 \quad (r^2 = 0.827^{**}) \quad \dots(2)$$

標準化偏回帰係数: $CR2$ 0.601, $h2$ 0.721

このように、上層木のみからえられた指標値によって全体の林分の蓄積量のある程度表現できるものと考えられる。しかし、図 2 にみられるように、プロット 8 の値はやや特異値の傾向があるので、この値を除いた 10 個のデータによる重回帰式 (3) と、参考までに 3 つの指標値による重回帰式 (4) を以下に示しておく。

$$V1 = 7.814 \cdot CR2 + 0.677 \cdot h2 + 1.414 \quad (r^2 = 0.648^*) \quad (*: 5\% \text{ 有意}) \quad \dots(3)$$

標準化偏回帰係数: $CR2$ 0.829, $h2$ 0.462

$$V1 = 8.249 \cdot CR2 - 1.460 \cdot DK2 + 1.636 \cdot h2 - 2.757 \quad (r^2 = 0.910^{**}) \quad \dots(4)$$

標準化偏回帰係数: $CR2$ 0.616, $DK2$ -0.849, $h2$ 1.521

2. 航空写真からの指標値の測定

林分の指標値を計測した航空写真の評定に関する値を表-3 に、計測値の概略を表-4 に示す。写真は昭和 38 年のものは a, b, c の 3 組を、昭和 49 年のものは d, e の 2 組を用いた。a, b については評定作業を 2 回行った。どの写真組・評定回においても、絶対評定値点数は 6 点、相対評

定値点数は9点とすることを基本条件としたが、絶対評定の精度をあげるために不確かな絶対評定地点を除外したため d1 では絶対評定値点数が5点となっている。

表-3に示した値は、モデル座表系を決定する相互評定の結果として偏差 (mm), 右側写真の座標系3軸の回転角 ω , ϕ , κ , 絶対評定の結果として縮尺, X, Y, Z 各座標系の推定標準誤差である。表-3の最下段にはその写真組, 評定回に計測したプロットの番号を示した。相互評定の結果をみると, 昭和49年の写真では ω の角度が大きく, 偏差も比較的大きな値となっている。これは写真撮影中の飛行機のロール角が比較的大きかったことを示しており, 昭和38年の写真に比べモデル座標系の精度が幾分悪いことを示唆している。絶対評定の結果をみると, 昭和38年の写真組では a2 の X, Y の推定誤差が比較的大きい。昭和49年の写真では X, Y, Z とともにその推定誤差は昭和38年に比べると大きくなっており, 特に d1 の Z の推定誤差は大きくなっている。対象としているのが山岳地域の写真であるため, 絶対評定地点の同定の精度の低さがあらわれたものと考えられる。

写真上での毎木調査プロットの位置の同定は, プロッターに表示される写真上の座標系の x, y 座標をプロットの実際の x, y 座標に合わせるにより行った。同定された地点を5千分の1地形図上でのプロットの位置と比較した結果, ほぼ同じ地点であることが確認できた。しかしプロッターに計算されたモデル座標系のZ座標の精度は写真組・地点により思わしくないものもあり, 表-4の標高偏差の項に示すように最大で200m以上ずれていたものもあった。プロッターにより航空写真から計算された座標系の精度は, X, Y についてはプロットのおおまかな水平位置を同定するには十分な程度のものであるが, 標高の絶対値を得るには必ずしも十分とはいえない。

同定されたプロットの推定中心点付近の判別可能な10本の木を計測対象木とし, 各林木について東西方向・南北方向の樹冠幅と, 地表と思われる最も近い点と木の頂点との標高差を計測した。これらの計測値から, 平均樹冠幅と平均樹高をもとめた。また, 計測した区域を含む樹冠の外周を計測区域面の外周としその内部の面積を計測した。閉鎖率はこの面積を写真から計測したプロットの面積として計算した(表-4)。

表-3 計測した写真の評定結果

Table 3 Orientation results of measured aerophotographs

	s.38(1963)					s.49(1974)	
	a1 *5	a2	b1	b2	c1	d1	e1
dev.(mm) *1	0.750	0.066	0.069	0.064	0.040	0.169	0.170
R- ω (°) *2	-0.242	-0.257	-0.387	-0.208	0.126	-2.069	2.102
ϕ (°) *2	0.824	0.803	-1.117	-0.590	0.362	-0.809	0.600
κ (°) *2	0.052	0.065	0.223	0.218	0.390	-0.760	0.203
scale *3	25.181	24.980	22.768	23.185	23.551	19.343	21.272
dev.X(m) *4	6.962	21.802	1.939	2.427	6.944	34.745	14.284
dev.Y(m) *4	6.674	12.227	3.041	2.949	9.132	37.632	14.623
dev.Z(m) *4	7.539	8.262	5.324	9.453	5.488	155.503	31.636
plot	1,2	3,4	5,6,7	8,11	9,10,11	1~4	5~11

*1: Deviation of Relative Orientation

*2: Result of R-photo orientations (Relative Orientation)

*3: Obj./Model scale, obj.units/mm (Absolute Orientation)

*4: Expected planimetric accuracy, obj. units (Absolute Orientation)

*5: Character means photo sets and number means that of orientation.

表-4 航空写真からの計測結果
Table 4 Measurement results from aerophotos

(A) s.38 1963							(B) s.49 1974						
プロット 番号	平均 樹冠幅 Mean Crown Width	平均 樹高 Mean Tree height	測定 面積 Measured Area	閉鎖率 Crown Rate	写真*1 セット of Photos	標高 Dev. of level	プロット 番号	平均 樹冠幅 Mean Crown Width	平均 樹高 Mean Tree height	測定 面積 Measured Area	閉鎖率 Crown Rate	写真*1 セット of Photos	標高 Dev. of level
plot no.	本 m	本 m	㎡ m ²	㎡ m ²	*1 m	m	plot no.	本 m	本 m	㎡ m ²	㎡ m ²	*1 m	m
1	15.86	5.59	2166.7	0.94988	a1	-35.9	1	10.42	11.13	954.3	0.94305	d1	220.8
2	13.57	5.75	1836.6	0.84689	a1	-37.3	2	12.98	23.09	1583.9	0.88950	d1	158.7
3	6.54	4.32	496.8	0.69459	a2	-117.6	3	11.49	12.66	957.7	1.15608	d1	135.5
4	10.48	4.71	1243.6	0.71194	a2	-99.2	4	7.90	23.83	650.1	0.84287	d1	137.8
5	12.07	5.68	1337.2	0.88194	b1	-32.8	5	7.68	5.42	704.5	0.82328	e1	24.0
6	11.57	3.68	1255.9	0.92055	b1	-4.3	6	9.52	6.67	928.5	0.81118	e1	-153.9
7	13.20	5.89	1580.7	0.92346	b1	-24.5	7	6.78	6.28	578.2	0.70771	e1	39.8
8	14.83	6.91	2202.2	0.81448	b2	2.5	8	11.45	14.72	1267.9	0.90677	e1	90.7
9	10.90	7.37	1178.7	0.80939	c1	17.7	9	11.63	16.03	1515.7	0.80595	e1	28.3
10	10.58	5.82	1266.2	0.82051	c1	6.9	10	7.03	9.34	572.8	0.88750	e1	32.2
11	9.53	4.45	1088.4	0.69417	b2	-9.1	11	5.69	7.18	475.6	0.70744	e1	51.8
Mean	11.74	5.47	1423.0	0.82435		-30.3	Mean	9.32	12.40	926.3	0.86194		69.6
std.	2.48	1.06	474.6	0.08812		40.9	std.	2.31	6.18	365.9	0.11745		93.7

*1: 表-2参照
*1: see Table 2.

3. 航空写真から測定された指標値と実際の指標値 および蓄積量との関係について

各プロット、各指標値について、航空写真から得られた値と毎木調査結果から得られた値の関係を図-3～5に示す。この節ではまず昭和38年の写真から得られた値と毎木調査結果から得られた値の関係について考察する。各図とも昭和38年の写真から得られた値は正方形で、毎木調査結果のうち当該プロット全体の値については菱形で、上層木のみについての値は三角形で示している。

3-1. 平均樹冠幅 (図-3)

昭和38年の写真の値と毎木調査結果の値を比較すると、写真の値はやや過大ではあるが、プロット間の値の順列としてみるとプロット1, 5, 11ではやや異なるがおおむね同様の値となっているようにみられる。写真の値と毎木調査結果の値との相関を調べてみると、写真の値と全木の値との相関係数は0.6842 (5%有意)、上層木のみとの相関係数は0.7443 (5%有意)であった。

3-2. 平均樹高 (図-4)

昭和38年の写真の値はおおむね過小となっている。航空写真ではかならずしも地表が確認できるわけではないので、下層木の樹冠表面を地表と誤認して樹高を計測している可能性がある。そこで上層木の平均樹高と下層木の平均樹高との差を×印で図にプロットしてみると、6～10プロットでは値の差が大きい、8と9あるいは9と10プロットを除けば値の順列としてはほぼ同様の傾向を示している。

3-3. 閉鎖率 (図-5)

毎木調査結果では上層木のみのもので1以上となるプロットが多いが、写真からの値はほとんど

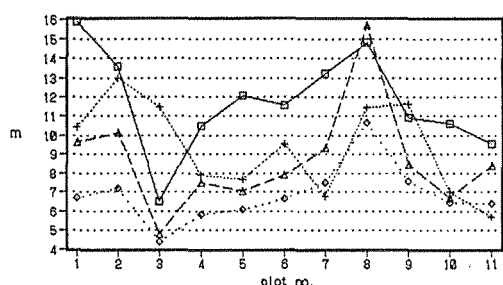


図3 平均樹冠幅

Fig. 3 Mean crown widths

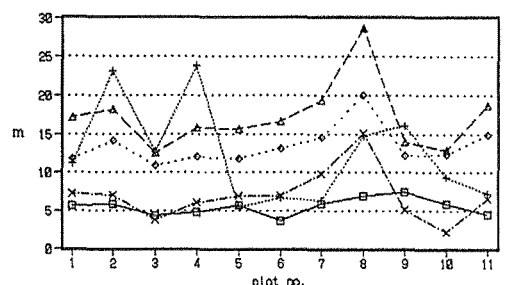


図4 平均樹高

Fig. 4 Mean tree heights

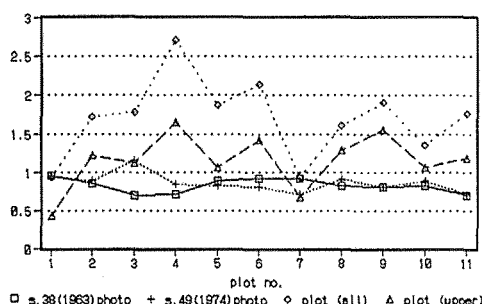


図5 閉鎖率

Fig. 5 Crown closure rates

どが1以下である。これは写真からは真に最上層の樹冠層しか判読できないということと、毎木調査では方形のプロット内に幹がある樹木を測定の対象とするが、今回定めた写真からの計測方式では判読した樹冠の外縁をたどって仮想プロットの面積としたため、閉鎖率の分母となるプロット面積の値が写真からの値の方が大きくなってしまっているためと考えられる。計測方法の改良は今後の課題である。写真の値と毎木調査結果の全木の値との相関係数は0.5374(10%有意)、上層木のみとの相関係数は0.5430(10%有意)であった。

3-4. 写真から計測した値からの蓄積量の推定

昭和38年の写真から計測した各プロットの閉鎖率、平均樹冠幅、平均樹高をそれぞれ CR_{38} 、 DK_{38} 、 h_{38} とする。この3変数から従属変数をもっともよく表現する2変数の組合せを探索して V_1 を重回帰分析してみると、変数の組合せは CR_{38} と DK_{38} となったが、 r^2 の値は0.3403と低く、有意ではなかった。回帰の残差を検討して、残差の大きいプロット1のデータを除外して同様の分析をして得られた結果を参考として下に示しておく。

$$V_1 = -40.067 \cdot CR_{38} + 1.548 \cdot DK_{38} + 38.045 \quad (r^2 = 0.496) \quad (10\% \text{ 有意}) \quad \cdots (5)$$

標準化偏回帰係数: CR_{38} -0.853, DK_{38} 0.885

この式では閉鎖率、平均樹冠幅にかかる回帰係数の正負の値が(2)~(4)式とは逆の値になっている。平均樹高の説明力が低かったのは、値の精度に問題があったためと考えられる。

4. 指標値の時系列変化について

前節と同様、指標値毎に考察を行う。昭和49年の写真から計測された指標値の値は図-3~5に+印で示されている。

4-1. 平均樹冠幅 (図-3)

昭和49年の全計測値の平均は昭和39年の値を2mほど下回っている。実際の真値は不明であるが、個々のプロットの変化をみると、1と7プロットでは低下、3と8プロットでは増加していることが推測される。昭和38年の計測結果の検討から、この指標値についてはある程度の精度が期待できるものと思われる。

4-2. 平均樹高 (図-4)

全体として過大な値になっている。これは、写真の写り具合の関係で、昭和49年の写真では樹高の計測がより行いやすかったことが原因のひとつとして考えられる。2、4プロットでは特に高い値となっているが、昭和49年の写真では撮影時に飛行機が東西方向に飛行していることもあり、東向きの緩斜面となっているこれらのプロットでは (図-1 参照) 特に樹高の計測が行いやすかった。ともあれ、1、3、8、9の4つのプロットでも平均樹高が増加していることが推測される。

4-3. 閉鎖率 (図-5)

昭和38年の写真では1、6、7のプロットで相対的に値が大きく、3、4、11のプロットで相対的に値が小さかったが、昭和49年の写真では3のプロットで相対的に値が大きく、7と11のプロットで相対的に値が小さくなっている。3のプロットでは昭和38年の写真と毎本調査結果をみると比較的疎な若齢林であることがうかがわれるため、閉鎖率も昭和49年にかけて増加していることが推測される。今回採用した計測方法では計測区域の樹冠のギャップにより閉鎖率の値はかなり影響されることが考えられるので、計測面積を広げるなどの対策を考慮する必要性が認められる。

お わ り に

以上、航空写真を用いて林分の蓄積量およびその時系列変化を推定することを目標として、蓄積量に関する指標値の設定とその計測、計測結果について考察してきた。

指標値としては計測区域の林分の平均樹冠幅、平均樹高と閉鎖率が因子として有用であることの可能性を確認できたが、これについてはさらに多くのデータを解析する必要がある。航空写真からの林分の位置の同定については水平距離20~30m程度のオーダーならば十分に可能であることが確認できた。また、本文中に述べた方法による林分の指標値の計測についても、計測個体数や計測の反復回数などの検討により精度を向上させればさらに有効なものとなると思われる。しかし、標高値についての絶対評定の精度の向上は今後の課題である。

時系列変化については推測の域をこえる結果は得ることができなかった。

今後データのさらなる取得、計測方法の改善等を通じて手法の開発を進めていく予定である。

引用文献

- 1) 和田茂彦・川村誠・神崎康一：芦生演習林の林況について(Ⅱ)ー林相と林分構造ー。京大演集報. 22. 140~152, 1991
- 2) 安藤信・川那辺三郎：冷温帯下部天然生林の更新技術Ⅱー天然生林の林分構造および蓄積の標高、地形の違いによる変化ー。京大演報. 56. 67~80, 1984
- 3) 鈴木保志・三宅徹・神崎康一：ステレオ写真プロッターの林道路線選定支援システムへの利用。京大演報. 62. 221~228, 1990

Résumé

We tried to estimate stand volume and change of it in time series by index values measured from aerophotographs. We used the data of 11 plots, which are the results of a complete forest tree tally, as the basic data of stand volume. This tree tally was surveyed on Ashiu experimental forest in 1964. We used the aerophotos of this area which were taken in 1963 and 1974. Tree crown widths and tree heights of objected plots have measured from the aerophotos, and mean tree crown widths, mean tree heights and crown closure rates have calculated as index values out from these values. We have got rather good results of identifying the planimetric location of investigative plots and measurement of tree crown widths. It would be able to said that there are some possibility of estimating stand volume from the index values.