

空中写真による森林調査について

九大農 長 正道

1. はじめに

空中写真は気球、ヘリコプター等による大縮尺から航空機による中縮尺、そしてLANDSAT データその他の人工衛星による超小縮尺までの広範囲におよぶ。空中写真による森林測定の研究は各大学、国立、道立、県立各林業試験場、日本林業技術協会等を中心に多くの機関で取り組まれている。また最近ではMSSデータに対する解析研究が主として国立林業試験場を中心に急速にすすめられつつある。そんな中であって、九大では主として中縮尺写真による森林測定ならびに森林調査法について各種の研究調査を行なっている。したがって、ここでは中縮尺写真による森林測定および森林調査に対するいくつかのケースと、これに関連する若干の問題点を提起し、討議の一資料に供する。

2. 空中写真の利用分野

森林に対し空中写真を用いて測定や調査等を行なう場合には、主として次のようなことがその利用分野として考えられる。なお、その具体的利用方法については、目的や対象とする森林あるいは林分の状態等によって種々に異なる。またこれらの利用分野については既に実際に応用され活用されているケースが多い。

- ・ 林相の判読、森林の層化、林分構造の解析、地形の判読、地形解析
- ・ 蓄積調査、生長量調査、面積測定
- ・ 施業計画、経営計画、砂防治山工事計画
- ・ 造林・保育・伐採・搬出（土場・林道・集運材架線）等の計画
- ・ 崩壊・風害・雪害・病虫害・山火事等の被害調査、復旧計画および予防計画
- ・ 森林環境調査、森林機能調査、その他

3. 空中写真利用上の問題点

空中写真を森林測定あるいは森林調査に利用する場合、種々の計測は空中写真を媒介とする間接測定であるため、精度、工期、測定値のチェック等の点で多くの問題点を有する。それらの多くの問題点の中で、ここでは主として蓄積調査および林分構造の解析を行なう場合に限定して、その問題点を掲げると、およそ次のことが考えられる。

- ① 空中写真の経年数および撮影時期
- ② 主要判読因子に対する判読精度

- ③ 蓄積推定における使用材積式
- ④ リモートセンシングとの結びつけ
- ⑤ 現地チェック
- ⑥ コスト

これらの問題点について順を追って以下に取り上げ、その分析・検討の結果を示すことによって問題提起に代える。

4. 空中写真の経年数および撮影時期（問題-①）

1) 空中写真の経年数⁽¹⁾

測定あるいは調査に使用する空中写真は撮影年次の新しいもの（理想からいえばその年または前年に撮影されたもの）が望ましい。しかし一般には望むべくもなく、通常2、3年ないし数年以前に撮影された写真である場合が多い。それではこのような古い写真（経年写真）は測定等に使用することはできないだろうか。この問題に対する分析結果の一事例を示し検討を試みてみよう。

(1) 調査対象地：東京都奥多摩水源林。

(2) 調査時期：1977年8月。

(3) これに対する使用空中写真は、

① 日原地区：1967年10月東京都撮影，普通角写真13枚

② 丹波山地区：1972年5月山梨県撮影，普通角写真6枚

③ 高尾山国有林：1971年国土地理院撮影，広角写真3枚

の計22枚。すなわち使用写真①，②，③は調査時点に対しそれぞれ10年，5年，6年の経年写真である。

(4) 現地調査による実測値（M）と、対応する写真判読値（P）との関係は、表-1に示すとおりである。

(5) ここで、問題は1977年時点での実測値と5年ないし10年前の空中写真による判読値との間のズレがどの程度であるかである。したがって、その検定を通常の回帰式の場合とは逆に、実測値を x 、対応する判読値を y とおき、個々の要因に対し下記により t -検定を行なった。なお、樹種はスギ・ヒノキ・カラマツの人工林と、広葉樹および針広混交林よりなる天然林の2つのグループに分けた。

$$\text{検定① } t = \frac{|a - \alpha|}{\sqrt{V(a)}} \quad (\alpha = 0)$$

$$\text{検定② } t = \frac{|b - \beta|}{\sqrt{V(b)}} \quad (\beta = 1)$$

ただし、

$$V(a) = s_{y \cdot x}^2 \frac{\sum x^2 / n - \sum (x - \bar{x})^2}{n}, \quad V(b) = s_{y \cdot x}^2 \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}$$

$$s_{y \cdot x}^2 = \frac{1}{n-2} \left[\sum (y^2) - \frac{1}{n} (\sum y)^2 \right] - b \left[\sum (xy) - \frac{1}{n} (\sum x)(\sum y) \right]$$

$$= \frac{SSR}{n-2}$$

これによる検定結果は表-2に示すとおりである。

表-1 現地実測値および写真判読値

No	地 区	樹 種 (林 齢)	実 測 値 (M)				判 断 値 (p)			
			CD _M	H _M	N _M	CC _M	CD	H _p	N _p	CC _p
			m	m	本	%	m	m	本	%
1	日 原 - 1	ス ギ (26)	2.9	15.2	1328	69.9	2.3	11.4	1195	55
2	" - 2	" (〃)	2.6	12.5	1750	94.5	2.2	9.4	1567	65
3	" - 3	" (〃)	2.6	14.4	2267	95.0	1.8	11.4	2088	75
4	" - 4	ヒ ノ キ (21)	2.1	7.0	2880	95.5	1.9	6.8	2259	85
5	" - 5	" (〃)	2.1	6.4	2981	84.3	1.9	5.3	2875	85
	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
16	" - 16	ス ギ (20)	1.9	12.0	2759	76.4	1.8	6.4	2398	65
17	丹波山 - 1	広天然林 (-)	10.5	18.2	206	98.1	8.2	16.7	66	45
18	" - 2	" (-)	13.6	20.8	103	146.6	8.1	18.8	80	35
	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
36	" - 20	" (-)	9.0	16.8	305	210.4	8.8	13.8	135	45
37	高尾山 - 1	" (-)	8.0	18.8	388	153.2	7.8	17.0	248	35
38	" - 2	針広天然林 (-)	7.2	19.6	388	76.0	6.2	18.0	298	35
	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
41	" - 5	ス ギ (62)	4.6	23.1	695	100.6	3.5	20.5	610	75

(日原地区16, 丹波山地区20, 高尾山国有林5, 計41ライン。うち人工林27, 天然林14)

表-2 検定結果一覧

	人 工 林 (n = 27)		天 然 林 (n = 14)	
	検 定 ①	検 定 ②	検 定 ①	検 定 ②
CD _M : CD _p	3.997**	7.679**	1.366	2.127
H _M : H _p	3.228**	0.795	0.744	2.512*
N _M : N _p	9.460**	6.520**	2.228 *	2.637*
CC _M : CC _p	0.651	2.248*	0.389	3.500*
N _M : CC _p	13.534**	536.781**	9.806 **	210.328**

(** : t. 01 , * : t. 05, ただし DF = n - 2)

検定の結果は人工林, 天然林ともその大半に有意差を示した。このことは1977年時点での実測値と, 5年ないし10年前の写真判読値との間には明らかに差異を示していることを意味する。

すなわち経年空中写真はこのままでは使用することはできない。したがって、この場合、経年空中写真の使用にもとづく写真判読値に対しては修正係数によるかまたは回帰修正等の何らかの修正を行なう必要があることになる。

- (6) 回帰による現在林分への置換：ここで若し両者の間、つまり実測値と写真判読値の間に一定の傾向があれば回帰による推定が可能である。そこで、 x と y を逆にもどし、各要因に対する実測値を y とおき、対応する写真判読値を x とし、それぞれに対する回帰計算を行なった結果は表-3に示すとおり何れの場合も高い相関により1次式が成立した。したがって、とくに修正係数による修正等を行なわなくても、必要とする測定要因は写真判読値から、この回帰式によって現在(1977年調査時点)林分への置換を行なうことができる。すなわち、このような方法によればどのような経年空中写真でもその使用は可能であるといえる。なお、図-1は㊸回帰推定のための回帰グラフと㊹ t -検定のための回帰グラフを本例のデータにもとづいてCD(樹冠直径)について示したものである。

表-3 実測値と写真判読値の回帰式

	樹種	回 帰 式	r
CD _M : CD _P	人	CD _M = -0.7289 + 1.5178 CD _P	.900
	天	CD _M = 2.4574 + .8585 CD _P	.744
H _M : H _P	人	H _M = 3.3500 + .9711 H _P	.965
	天	H _M = .4456 + 1.1181 H _P	.956
N _M : N _P	人	N _M = -52.1256 + 1.2897 N _P	.951
	天	N _M = 165.4386 + 1.1103 N _P	.979
CC _M : CC _P	人	CC _M = 18.9808 + .9562 CC _P	.842
	天	CC _M = 27.5325 + 1.5675 CC _P	.753
N _M : CC _P	人	N _M = -1467.9520 + 50.1529 CC _P	.559
	天	N _M = -753.3733 + 29.8377 CC _P	.618

- (7) この方法に対する問題点：この種の検定は厳密には㊰現在と10年前の写真、㊱現在と6年前の写真、㊲現在と5年前の写真のそれぞれについて行なうべきであると考えられる。しかし、10年前、6年前、5年前の各経年写真相互間の経年数は4年と1年に過ぎない。したがって、この程度の差(ひらき)は殆んど差異はなく、コミにしても差支えないという考え方に立った。また、この類いの検定はこのような方法でよいかどうかの問題がある。

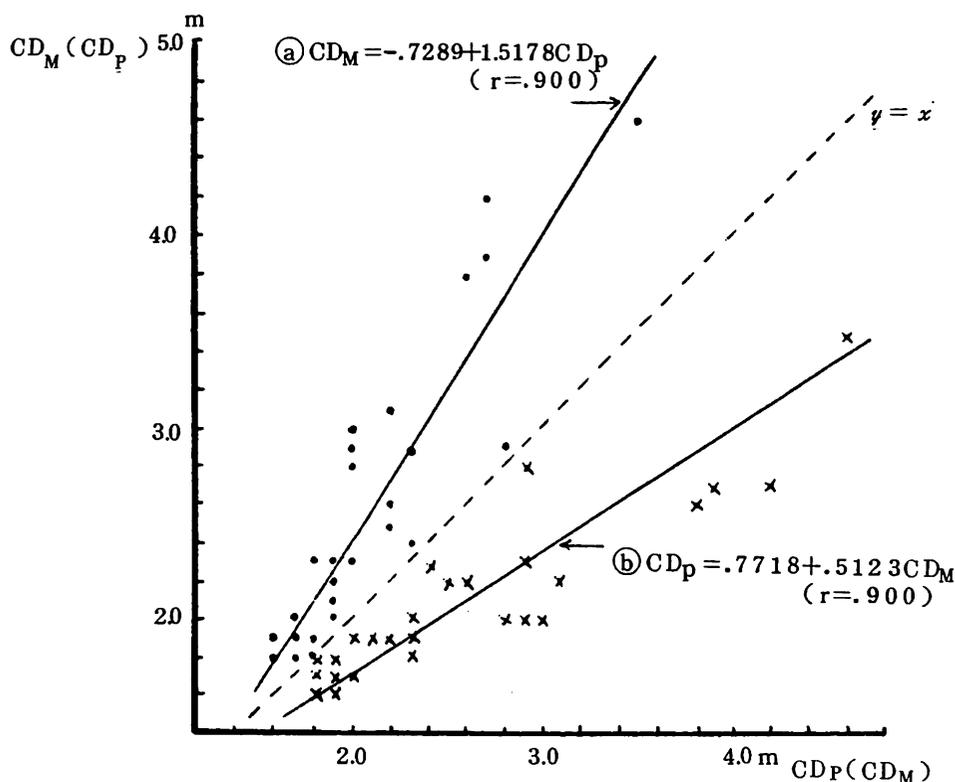


図-1 CD_M と CD_P の回帰グラフ(人工林)

- ① 回帰推定のための回帰グラフ (x :判読値 CD_P , y :実測値 CD_M)
- ② t -検定のための回帰グラフ (x :実測値 CD_M , y :判読値 CD_P)

2) 空中写真の撮影時期

林野庁で撮影される空中写真は一般に夏が中心である。しかし蓄積推定や林分構造の解析等が目的の場合は着葉期であれば時期はいつでも差支えないと考える。むしろ春は新緑の影響で、また秋は紅葉の関係で、かえって広葉樹の識別に好都合な場合もある。国土地理院によるカラー写真で春(3月)に撮影されたものは九州ではスギ、ヒノキ等の人工林の樹種識別に便利であった。落葉広葉樹で冬期撮影の写真は樹高(H)の判読測定には好都合であるが、樹冠直径(CD)は測定困難である。また起伏の激しい山岳地帯では太陽の南下に伴う影の影響でとくに冬期撮影の写真は問題がある。一般に写真の種類(白黒、カラー、赤外、広角、普通角、大縮尺、小縮尺等)により、またその使用目的により異なり、一概にどの時期がよいとは断定できないと考える。

5. 主要判読因子に対する判読精度(問題-②)

林木の主要判読因子としてはCD(樹冠直径), H(樹高), N(本数), CC(樹冠疎密度),

および Sp (樹種), A (林齢) 等がある。また地形の判読因子では傾斜度, 傾斜方位, 地形区分 (横筋, 山腹, 沢筋), 標高等がある。これらの判読測定は何れの場合も経験と熟練が必要であり, そのため常々の訓練や練習が要求される。とくに人つまり判読者間による測定値の差異が問題となる。また同一判読者でも時間のズレによる測定値の差異はよく生じる現象である。

以下, 判読因子のいくつかに対する分析の結果を示す。ただし, このデータは若干古く, われわれが空中写真の研究に着手当時 (1961年~1965年) のものである。なお, 1)~4) は宮崎県えびの営林署管内国有林, 5) は佐賀県背振村有林, の各調査データによるものである。

1) 平均樹冠直径 \bar{CD}

判読対象樹種スギ, 林齢43年生, プロット面積0.01ha (10m×10m), 1958年10月林野庁撮影, 普通角写真, 2.5倍引伸写真, 写真縮尺1:8,000による (以下同じ)。

表-4 (1) 判読者3人による判読測定結果一覧

Plot	実測値	判 読 者		
		A	B	C
1	4.57 ^m	3.9 ^m	3.7 ^m	2.7 ^m
2	3.52	3.3	3.2	3.1
3	3.10	3.3	2.0	1.8
4	2.68	2.9	2.5	2.9
5	2.41	2.8	2.1	1.7
6	2.76	2.8	2.6	2.0
7	3.40	3.2	3.1	2.9
合計	22.44	22.2	19.2	17.1
平均	3.2	3.2	2.7	2.4
		1.00	.84	.75

表-4 (2) 分散分析

	SS	DF	MS	F
Person	1.88	2	.940	7.97**
Plot	3.87	6	.645	5.47**
Error	1.42	12	.118	
Total	7.17	20		

2) 平均樹高 \bar{H}

表-5 (1) 判読者4人による判読測定結果一覧

Plot	実測値	判 読 者			
		A	B	C	D
1	21.7 ^m	25.35 ^m	19.63 ^m	26.30 ^m	22.66 ^m
2	22.0	18.54	23.57	13.81	24.43
3	20.6	19.46	21.12	17.45	22.18
4	19.0	21.49	20.03	22.36	21.36
5	20.3	17.30	19.65	18.99	20.00
6	20.3	18.97	16.65	18.99	20.62
7	21.3	16.61	19.92	14.29	18.92
合 計	145.2	137.72	140.57	132.19	150.17
平 均	20.78	19.66	20.04	18.94	21.45
		.95	.97	.91	1.03

表-5 (2) 分 散 分 析

	SS	DF	MS	F
Person	24.27	3	8.090	1.19
Plot	91.60	6	15.267	2.25
Error	122.29	18	6.794	
Total	238.16	27		

3) ha 当り本数 N

表-6 (1) 判読者4人による判読測定結果一覧

Plot	実測値	判 読 者			
		A	B	C	D
1	400	375	400	425	400
2	800	400	525	725	700
3	900	550	450	700	900
4	700	550	575	675	700
5	1000	550	725	675	800
6	600	575	750	650	600
7	600	575	700	650	800
合 計	6000	3575	4125	4500	4900
平 均	857	510	589	643	843
		.60	.69	.75	.98

表-6 分散分析
(2)

	SS	DF	MS	F
person	136250.00	3	45416.67	5.65**
plot	234598.21	6	39099.70	4.86**
Error	144687.50	18	8038.19	
Total	515535.71	27		

4) ha当り材積 V

表-7(1) 判読者3人の判読値にもとづく材積推定結果一覧

Plot	実測値	判読者		
		A	B	C
1	470.5 m ³	650 m ³	361 m ³	622 m ³
2	794.4	267	651	221
3	823.9	377	308	267
4	486.5	489	383	605
5	643.5	255	424	307
6	412.5	357	335	331
7	543.9	275	569	177
合計	4175.2	2670	3031	2530
平均	596	381	433	361
		.64	.73	.61

表-7(2) 分散分析

	SS	DF	MS	F
Person	19091.52	2	9545.76	.42
Plot	144842.95	6	24140.49	1.06
Error	272658.48	12	22721.54	
Total	436592.95	20		

以上の結果からおよそ次のことが指挙される。まず、(1)CD及び(3)Nの両者ではplot(プロット)間に有意差があるのは当然としても、Person(判読者)間にも有意差を示しており、判読測定に対する経験と熟練度が問われ要求されるゆえんと考える。(2)HではPerson, Plotの何れにも有意差を示さなかった。これは一般的な現象とは逆の傾向である。それらの判読結果にもとづく(4)Vでも有意差はなかった。これは全体的にプラス・マイナスで相殺されての結果ではないかと思われる。なお、全体を通じて実測値に対し何れの場合も判読測定値は過小となっている。これは初期にみられる一般的な傾向と一致する。ともあれ、判読者間における判読測定値の差異は避けられない現象と考

える。したがって空中写真による主要判読因子の判読測定は、測定対象林分等に対し同一判読者による同一時点、つまり短時間による集中的な測定を実施することがその解決法の一つであると考えらる。

5) 点格子板による面積の測定

佐賀県背振村有林、面積0.4 ha～4.0 haの林分を対象に、写真の中心部と周辺部、標高が高と低の各2個所、計8個所について、Person A, B, Cの3人、点格子板スケール1, 2, 5, mmの3種類、および点格子板1枚(単点格子板)と左右2枚(複点格子板)により面積測定を行なった。なお、使用空中写真は1963年10月国土地理院撮影、広角写真、2.0倍引伸、縮尺1:10,000による。その結果に対する分散分析は表-8に示すとおりである。

表-8 面積測定に対する分散分析

(A) 単点格子板の場合

	SS	DF	MS	F
Block	6 169.99	7	881.43	9.44 **
Person	605.32	2	302.66	3.24*
Scale	744.87	2	372.44	3.99*
P × S	503.20	4	125.80	1.35
Error	5230.99	56	93.41	
Total	13254.99	71		

(B) 複点格子板の場合

	SS	DF	MS	F
Block	10476.85	7	1496.69	14.27 **
Person	132.03	2	66.02	.63
Scale	1510.18	2	755.09	7.20 **
P × S	90.23	4	22.56	.22
Error	5873.09	56	104.88	
Total	18082.38	71		

分散分析の結果からは、Block間に有意差を示しているが、これはもともと面積が異なるためで当然の結果といえる。Person間では単点格子板では5%レベルで有意差を示したが、複点格子板では有意差がない。つまり判読所要時間は図-2にみられるように単に比し複が常に時間を要しているが、精度の面では図-3のとおり単に対し複がよくなっている。つまり複雑な判読測定作業に対応した結果が得られているといえる。

その他では、前記えびの営林署管内国有林に対する同一空中写真での写真引伸率2.5倍と5.0倍による判読精度のチェックを試みた結果は、その精度に殆んど差異は認められなかった⁽⁴⁾。ただ判読が容易な点で5.0倍伸の方がやゝ優っていた。しかし持ち運びや保管、判読作業の面での不便を考慮する

と強いて大伸しの必要はないと考える。また、写真上の判読プロットサイズ0.01, 0.05, 0.09 haによる判読精度の分析結果では、誤差率 y に対するプロットサイズ x の関係は $Y = 5.75 - 0.34x$ により精度の向上がみられた。⁽⁵⁾ただしこの場合、判読者A, B, Cの3人の間には有意差はなかった。

6. 蓄積推定における使用材積式 (問題-③)

蓄積推定の目的は、西沢によれば、⁽⁶⁾ ① 事業への利用, ② 経営のためのある範囲に対する全体推定, ③ 国家資源の把握等大規模推定, の3つに分けられる。そしてそれぞれの調査法は、①は毎木, ②, ③はサンプリングと空中写真が用いられる。すなわち推定対象面積の増大にともない空中写真は必要不可欠となる。なお、①の場合でも位置の確認や搬出ルートの検討に空中写真が併用されるケースも多い。

その蓄積推定のための使用材積式としては、大きくは④その林分に適合した材積式の調製, ⑤既存の材積式との適合度のチェックによる推定, および⑥現地調査データ

との対応による回帰推定, の3つに分類される。そしてその何れの場合も空中写真の主要判読因子としては、

CD : 樹冠直径	CD : 平均樹冠直径
H : 樹高	H : 〃 樹高
CC : 樹冠疎密度	CC : 〃 樹冠疎密度
N : 本数	
Sp : 樹種	

等がその測定対象となる。

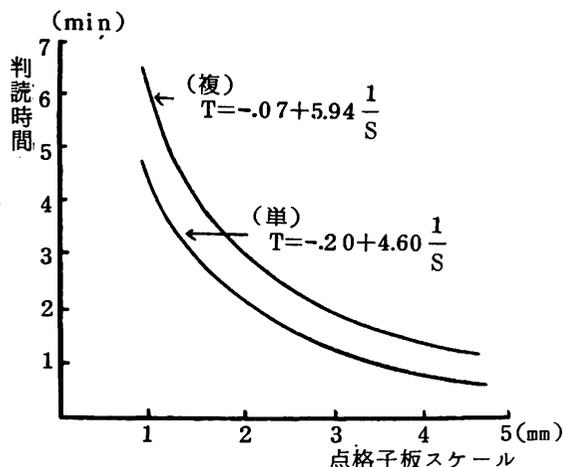


図-2 1個所当り平均判読時間

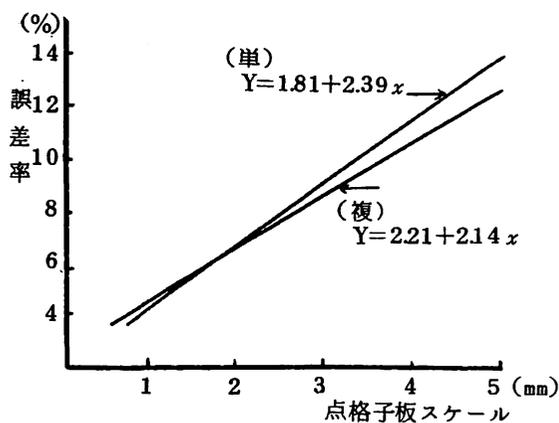


図-3 単複別, スケール別精度

1) 空中写真材積式の一例

空中写真材積式は、㉔単木材積式と㉕林分材積式に分けられ、さらに㉔は①単木材積式と②平均単木材積式に細分される。しかし、②はこれに本数Nを乗じることにより㉕の林分材積式と同質の材積式とみなしうる。

ここで、材積式調製に必要なデータ数は、木梨によれば⁽⁷⁾ \sqrt{MS} を単一木または単一プロット推定標準誤差または偏差として材積式における残差の σ と考え、空中写真材積式の単一測定値推定誤差を単木材積式、林分材積式のそれぞれについておさえ、材積式誤差率とデータ数nは、 $n = (CV/E)^2$ により計算して求めうる。

以上により九大で調製された空中写真材積式の一例を示すと下記のとおりである。⁽⁷⁾⁽⁸⁾

(1) 単木材積式

① スギ(大矢国有林)

$$V = .3410 - .2022 CD - .0382 H + .0277 CD \cdot H$$

② クロマツ(九大早良演習林)

$$V = -2.2031 + .1742 CD + .1206 H$$

③ モミ・ツガ(九大宮崎演習林)

$$V = CD (.0134 H - .1161) + .1212$$

④ 常緑広葉樹(えびの営林署)

$$V = -6.4933 + .2916 \overline{CD} + .4593 \overline{H}$$

⑤ 落葉広葉樹(九大宮崎演習林)

$$V = \overline{CD} (.0110 \overline{H} - .0587)$$

(2) 林分材積式

① スギⅠ(えびの営林署)

$$V = -12.5607 + .6604 N + .9541 \overline{CD} + .5123 \overline{H}$$

② スギⅡ(えびの営林署)

$$V = -5.6540 + .5219 N + 1.5096 \overline{CD} + .1501 \overline{H}$$

③ スギ(佐賀県背振村有林)

$$V = -20.9504 + 16.1676 \overline{CC} + 3.6685 \overline{CD} + 1.2440 \overline{H}$$

④ ヒノキ(蕨野・黒鹿国有林)

$$V = .3219 N + .0856 \overline{CD} \cdot \overline{H} + 1.0796 \overline{CD}$$

⑤ スギ・ヒノキ(九大粕屋演習林)

$$V = -298.8992 + 17.6201 \overline{CD} + 34.1356 \overline{H}$$

⑥ アカマツ(九大粕屋演習林)

$$V = (.0138 \overline{CD} \cdot \overline{H} - .0977 \overline{CD} - .0244) N$$

⑦ アカマツ（佐賀県背振村有林）

$$V = -220.3123 + 4.4302 \overline{CC}$$

⑧ 常緑広葉樹（九大宮崎演習林）

$$V = -230.416 + 635.046 \overline{CC} + 25.815 \overline{CD}$$

⑨ 落葉広葉樹（佐賀県背振村有林）

$$V = -48.5298 + 1.1728 \overline{CC}$$

以上の材積式ではCDおよびHがその殆んどに關与している。これは立木幹材積式の場合と同様の成立条件によるものと考えられる。なお、式の両端では合わなくなるケースがあり、重回帰式の欠点の一つとみられる。したがって用いられた（とられた）データの範囲内、つまりそのデータにもとづく適用範囲を明確にした上で使用しないと適合度の点で問題を生じることになると考える。

2) 空中写真による蓄積推定

(1) 単純推定による場合⁽⁹⁾

この方法は同一樹種、同一林齢等の単層林分が対象となる。

$$\text{平均値} : \bar{y} = \frac{\sum y}{n}$$

$$\text{分散} : s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]$$

$$\text{標準偏差} : s = \sqrt{s^2}$$

$$\text{信頼区間} : \bar{y} \pm t \times \frac{s}{\sqrt{n}}$$

ただし

n : 空中写真判読プロット数

y : 空中写真判読ha当り本数または材積

t : 自由度 n-1 における t の値

(2) 標本調査方式による場合⁽⁷⁾

(i) 層化抽出 (Stratified sampling)

この場合、空中写真は層化のみに用いられる。層化の基準としては、樹種、林齢が中心であるが、この他にも樹高級、材積級等を層化の基準として用いることがある。そしてこれらにもとづいていくつかの層をつくる。

(ii) 回帰推定 (Regression estimate)

空中写真による判読測定値と、それに対応する現地（地上）の測定値（実測値）を回帰式で結び、推定する方法。

(iii) 三重抽出 (Triple sampling)

第1標本 (First sample) は n 個の単純無作意抽出標本で写真上のプロットとする。h

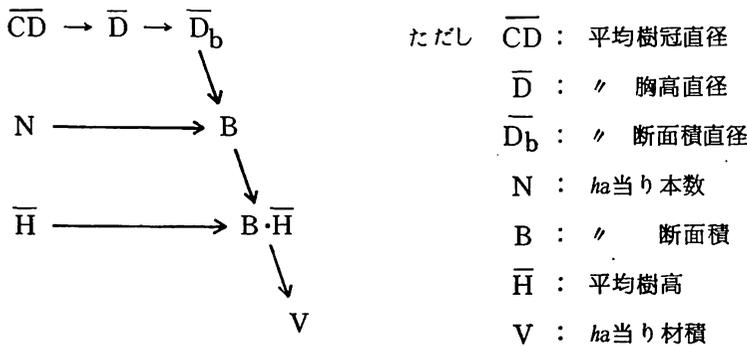
層における標本数を n_h とすると、 h 層の比率 $\omega_h = n_h / n$ で、これは h 層の真の比率 $W_h = N_h / N$ の推定値となる。第2標本 (Second sample) は n_{Lh} 個の層化無作意標本であって h 層に属し、かつその標本については判読が行なわれる。第3標本 (Third sample) は n_{Sh} 個の無作意標本で第2標本の中からとられ、かつこの標本は地上調査 (現地測定) がなされる。つまり母集団全体がいくつかの層に分かれているとき、空中写真上の n 個の標本中、ある層におちたものが n_L 個とすると、 n_h / n がその層の比率となり、 n_L の中から n_{Lh} がとられて写真判読され、ついで n_{Lh} の中から n_{Sh} がとられて実測が行なわれる方法である。

(iv) 二重抽出 (Double sampling)

二重抽出は、前記の三重抽出の場合における第1標本 (First sample) がない方法。

(3) 現地調査データとの対応による回帰推定

この推定方式の場合のダイアグラムは次に示すとおりである。⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾



上記のダイアグラムにもとづき、各要因の推定式を順を追って示すと次のとおりとなる。

- ① $\overline{CD} = b_0 + b_1 \overline{CD}_p$
- ② $\overline{D} = b_0 + b_1 \overline{CD}$
- ③ $\overline{D}_b = b_0 + b_1 \overline{D}$
- ④ $N = b_0 + b_1 N_p$
- ⑤ $B = (\pi \overline{D}_b^2 / 4) \cdot N$
- ⑥ $\overline{H} = b_0 + b_1 \overline{H}_p$
- ⑦ $V = b_0 + b_1 B \cdot \overline{H}$

いま、本方式によって1977年に試みた、東京都奥多摩水源林に対する回帰推定の例を示すと表一9のとおりである。⁽¹²⁾⁽¹³⁾ なお、使用空中写真は4-1) 空中写真の経年数の項で分析・検討に用いたのと同じである。

表一9により目的とする林分構造の解析は一応完成したことになる。しかし本例は公益的機能の計量化を目的として調査が実施されたため、このあとワイブル分布を応用して諸要因の直径階別解析を試み、最終的には公益的機能との結びつけが行なわれた。しかしその内容はここでは省

略する。また本方式により九大粕屋演習林の森林調査簿の作製も実施し、その妥当性がチェックされたが、これも割愛する。

表一 各要因に対する回帰推定

	スギ		ヒノキ		天然林	
	回帰式	r	回帰式	r	回帰式	r
① $\overline{CD}_p \rightarrow \overline{CD}$	$\overline{CD} = -.372 + 1.432\overline{CD}_p$	.933	$\overline{CD} = -.511 + 1.471\overline{CD}_p$	.848	$\overline{CD} = -3.184 + 1.138\overline{CD}_p$	.889
② $\overline{CD} \rightarrow \overline{D}$	$\overline{D} = .725 + 6.660\overline{CD}$	.982	$\overline{D} = -2.854 + 7.502\overline{CD}$	.958	$\overline{D} = 2.871 + 3.498\overline{CD}$	.771
③ $\overline{D} \rightarrow \overline{D}_b$	$\overline{D}_b = .456 + .996\overline{D}$	.999	$\overline{D}_b = .113 + 1.015\overline{D}$	.999	$\overline{D}_b = 4.057 + 1.005\overline{D}$	.980
④ $N_p \rightarrow N$	$N = 98.644 + 1.210N_p$	.913	$N = -131.637 + 1.570N_p$	.894	$N = 208.792 + 2.143N_p$	.839
⑤ $\overline{H}_p \rightarrow \overline{H}$	$\overline{H} = 5.214 + .831\overline{H}_p$	.972	$\overline{H} = 2.242 + 1.026\overline{H}_p$	.989	$\overline{H} = -2.412 + .836\overline{H}_p$	.830
⑥ $\overline{H} \cdot B \rightarrow V$	$V = 67.881 + .448\overline{H} \cdot B$	.982	$V = 2.766 + .520\overline{H} \cdot B$	.999	$V = 118.898 + .468\overline{H} \cdot B$	.626

なお、この方式による場合、回帰式がきわめて多く、そのため現実と遊離していく恐れはないかどうか、また空中写真によって大枠をおさえた場合、小班、林班、あるいは林分等の細かな点での適合度に対する懸念等の点が問題点として指掌される。したがって、これらに対する確たるチェックが図られなければならないであろう。

7. リモートセンシングとの結びつけ（問題一④）

最近、気球やヘリ等による大縮尺写真から航空機による中縮尺写真、そしてLANDSATデータをはじめとする人工衛星による超小縮尺写真等までを含めてリモートセンシング（Remote sensing）と称されている。しかし、ここでは超高空つまり宇宙空間から人工衛星によってとられるデータによって行なわれる諸種の解析に対するの呼称とする。このリモートセンシングの森林への適（応）用は、森林環境や森林の分布、森林の質、ならびに大まかな資源の把握等がその利用法として考えられる。とくにLANDSATデータのように一定期間（18日）毎同一地点同一時刻繰り返し撮影という特質から、森林に対しては環境モニタリングやアセスメント等の面で貴重なデータを提供してくれることになる。しかしその分解能から、森林蓄積や林分構造の解析、林業経営等へのダイレクトな利用化は現時点では無理ではないかと思われる。したがって中高度の空中写真やグランドトゥース等のステップを経ての有効適切な利用方法の確立が望まれる。また解析装置その他高度の専門知識が要求されるため、どこでもそして誰もが手軽に利用できるというわけにはいかない。林学林業部門では林業試験場（中島・大貫・沢田ら）により鋭意研究がすすめられているので、この問題に関する展望や問題提起は林試関係者に委ねたい。

8. 現地チェック（問題－⑤）

空中写真に関してはその利用形態の如何を問わず、現状では現地チェックが必要不可欠となる。そしてこの現地チェックで問題となるのが現地と空中写真との対比にもとづく写真上への正確な刺針である。この刺針に正確さを欠くと、そのあとのすべての対応関係が根底から歪められることになり、したがってそれによって行なわれる判読測定やその結果から導かれる推定が現地の情報とはマッチしなくなる。現地チェックを正確に行なうためには、対象となる森林または林分の周辺の状態、形、林内の状態、位置やプロットまたはライン、林木等の確認がその条件となる。そしてそのためには空中写真に対する肉眼立体視が要求される。これは訓練により容易に実行可能であるが、ややもするとこれが障害となって空中写真の利用化を阻むことになる。経験と熟練、そのための訓練を必要とするが故に普遍性を欠く原因ともなりかねないところに問題点を感じる。

9. コ ス ト（問題－⑥）

空中写真を利用することにより、たとえば蓄積推定がどの程度のコストでできるかという問題は、精度や時間（工期）の問題と併せ重要な要素の一つである。

いま、仮りに5,000 haの森林に対し二重抽出法により、精度（誤差率）10%つまり $E=0.1$ で蓄積推定を実施する場合、費用の割合を $c_w=1$ 、 $c_L=5$ 、 $c_s=100$ 、また相関係数 $\rho=0.5$ 、林分変異係数 $C_v=0.7$ とすれば、精度一定の場合の小標本 n_s は

$$\begin{aligned} n_s &= \left(\frac{t(C_v)}{E} \right)^2 \left[(1-\rho)^2 + \rho\sqrt{1+\rho^2} \sqrt{\frac{c_L}{c_s}} \right] \\ &= \left(\frac{2.0 \times 0.7}{0.1} \right)^2 \left[(1-0.5)^2 + 0.5\sqrt{1-0.5^2} \times \sqrt{\frac{5}{100}} \right] \\ &= 67.8 \div 68 \end{aligned}$$

となる。一方、費用一定（ $C=30$ 万円の予算とする）の場合、現地調査1日3人で4プロット工期とし、1人1日当りの費用を5,000円と見込んだとき、1プロット当り $3 \times 5,000 / 4 = 3,750$ 円から、費用一定では

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{C}{c_s} \frac{\sqrt{1-\rho^2}}{\sqrt{1-\rho^2} + \rho\sqrt{c_L/c_s}} \\ &= \left(\frac{300000}{3750} \right) \times \frac{\sqrt{1+0.5^2}}{\sqrt{1-0.5^2} + 0.5\sqrt{5/100}} \\ &= 71.2 \div 71 \end{aligned}$$

となる。つまり費用一定の場合の71プロットは精度一定の場合の68プロットの精度を十分満足していることになる。したがって小標本は71プロットで済む。

これに対し空中写真を用いない場合のプロット数 n は

$$n = \left(\frac{t \times C_v}{E} \right)^2 = \left(\frac{2 \times 0.7}{0.1} \right)^2 = 196$$

となる。したがって71プロットの小標本は196プロットに対してはおよそ3分の1の36%で済むことになる。もっともこの場合、空中写真の経費が加算されるのは当然であるが、それでもコストの面でははるかに有利であるといえる。なお、上記の計算は仮定の数字をあてはめており、実際は現地調査コスト(100)や写真判読コスト(5)等は前以ておさえておく必要がある。ちなみに、この場合の大標本 n_L は

$$n_L = \sqrt{\frac{0.5^2}{1-0.5^2}} \times \sqrt{\frac{100}{5}} \times 71 = 184.1 \doteq 184$$

となる。⁽⁷⁾

10. むすびに代えて

空中写真に関してはこの他にも多くの問題点を有する。たとえば写真の縮尺、判読の精度、その判読精度に対する個人誤差、写真との対応を目的とした場合のデータのとり方、面積の測定、森林層化に対する基準、等々が指掌される。とくに判読精度は各種推定要因との結びつけに対し直接間接に大きく関与するため、最も重要な問題の一つであると考え。なおこの判読精度に関しては、ここでは判読者間の差異の度合いのみについて触れたに過ぎず、問題の本質には到達していない。また、この問題は写真の撮影縮尺、つまり精度とのかねあいにもとづく最適写真縮尺とも関連する。一般に林野庁では普通角写真による2万分の1、国土地理院では広角写真による8千分の1から2万分の1の各撮影縮尺で撮られているのが通例である。したがってこれ以上の大縮尺写真を撮影するとなれば、コストとの関係が新たな問題となる。要は使用目的に対する精度とコストの関係と考える。なおこの問題に関しては実験・研究の成果の積み重ねにもとづく事例的な検討が必要と認められる。以上の諸課題をも含めて問題提起とし、むすびに代える。

引用および参考文献

- (1) 長正道・西沢正久・山崎英祐：空中写真の利用による森林の公益的機能の計量法に関する研究 (Ⅱ). 日林九支論 31, 1978
- (2) 菱川和郎：トリプルサンプリングによる航空写真からの材積推定. 九大卒論, 1962
- (3) 木梨謙吉・長正道・古賀泰博：点格子板法による航空写真からの森林面積の測定に関する研究.

77 日林講, 1966

- (4) 木梨謙吉・宮崎博之・長 正道： 引伸率2.5倍と5.0倍の航空写真における判読精度と材積推定誤差について. 72 日林講, 1962
- (5) 木梨謙吉・長 正道： 航空写真による材積推定の精度について— とくにプロット・サイズ (0.01, 0.05, 0.09 ha) による精度の比較— .73 日林講, 1962
- (6) 西沢正久： 世界主要国における森林調査体系について(Ⅱ). 90 日林論, 1979
- (7) 木梨謙吉： 森林調査詳説. 農林出版, 1978
- (8) 木梨謙吉： 重回帰式による森林航空写真材積表について. 72 日林講, 1962
- (9) 西沢正久： 森林測定. 農林出版, 1972
- (10) 吉田茂二郎・長 正道・西沢正久： 森林経営計画における空中写真の応用 (I) — 九州大学柏屋演習林における実験研究例 — . 日林九支論 31, 1978
- (11) 吉田茂二郎： 同上テーマ. 九大卒論, 1977
- (12) 西沢正久・長 正道・山崎英祐： 空中写真の利用による森林の公益的機能の計量法に関する研究(Ⅳ). 89 日林論, 1978
- (13) 山崎英祐： 空中写真による林分構造の解析に関する研究 — 東京都奥多摩水源林に対する一検討 — . 九大卒論, 1978