

リモートセンシング技術による
実用的森林資源調査法

リモートセンシング技術による実用的森林資源調査法

I 試験担当者

経営部第2科長	中 島 巖
経営部第2科航測研究室長	大 貫 仁 人
“ 室員	樋 渡 幸 男
“	長谷川 訓 子
“	沢 田 治 雄
測定研究室員	栗 屋 善 雄

II 試験目的

1972年の地球資源観測衛星ランドサットの打上げ以来、この衛星からのデータの利用に関する実証プロジェクト研究が世界各国により行われ、このデータが広域的地球資源の把握と監視のための手段として高く評価され、広い分野で実用化への技術開発が進められている。

この試験研究は、ランドサットデータのものつ広域同時性、繰返し観測による時系列性、および、電子計算機処理可能なデータであることなどの特性を広域森林資源調査に有効に活用するための技術開発を目的として行った。この報告では、試験期間の中で、ある程度成果を得た次の事項について述べることにする。

- (1) ランドサットデータの前処理手法の開発
- (2) ランドサットデータによる森林解析法の開発
- (3) ランドサットデータをデータベースとする森林調査法の開発

この報告は、下記の分担にてとりまとめた。

- ① 全体のとりまとめ、蓄積量調査：大貫仁人
- ② 前処理、画像処理システム：沢田治雄
- ③ 画像処理：栗屋善雄
- ④ 写真判読、モザイク作成：長谷川訓子
- ⑤ 地上調査および資料収集：全員

III 試験の経過と得られた成果

1. ランドサットデータの前処理手法の確立

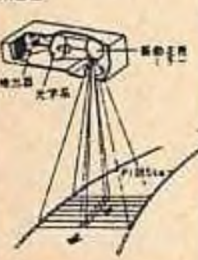
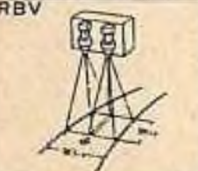
1-1. ランドサットデータ

地球資源観測実験衛星ランドサットは、地上約915kmの高度から太陽に同期してデータを収集するように設計された人工衛星で、表1-1に示す諸元を有し、表1-2に示す検知器を搭載している。日本では、1979年1月から宇宙開発事業団地球観測センターで受信されており、データの提供が行われている。

表1-1 ランドサット2・3号の主要諸元

形 式	項 目	数 値 等	備 考
	衛星高度	約915km	公称
	重量	約970kg(3号) 約953kg(2号)	
	全長	約3m	太陽電池展開時の 幅:約4m
	姿勢制御	三軸姿勢制御	
	周期	約103分	
	軌道傾斜角	約99度	
	衛星軌道	太陽同期準円軌道	
	回帰日数	18日	
	1日当たり 回帰数	14回	
	降交点通過 地方平均 太陽時	午前9時30分	
	搭載センサ	MSS, RBV, DCS	DCSは地センサ (DCP)が必要
	通信リンク	2GHz帯、400MHz帯 VHF帯	
	打上げ 年月日	1978年3月5日(3号) 1975年1月22日(2号)	

表1-2 ランドサット検知器主要諸元

形 式	項 目	仕 様 等	備 考
	名 称	マルチスペクトル・スキャナ	ランドサット3号、同2号搭載
	波長帯	バンド4: 0.5~0.6μm バンド5: 0.6~0.7μm バンド6: 0.7~0.8μm バンド7: 0.8~1.1μm バンド8: 10.4~12.6μm	可視バンド 近赤外線バンド 熱赤外線バンド(3号のみ、 ただし1979.3月で運用停止)
	地表解像度	79m(可視近赤外) 240m(熱赤外)	
	観測幅	185km	衛星飛行方向は連続 デジタル
	伝送速度	15.06Mbps	
	重量	64kg(48kg)	カゴ内は2号機
	消費電力	55W(42W)	
	名 称	リターンビーム・ビジコン・カメラ	ランドサット3号搭載
	波長帯	0.505~0.750μm	
	地表解像度	40m(公称)	
	観測幅	98×98km	サブシーン アナログ
	重量	66kg(2号機のもの) 消費電力	163W(2号機のもの)

本研究に用いたランドサットデータは、表1-3に示すものである。

1-2 ランドサットデータの前処理

表1-3 ランドサットデータ

シーン名	年 月 日	形 態
高山	1972.10.5	NASA BIP2
高山	1975.3.11	NASA BIP2
高山	1979.5.23	バルク BIL
高山	1979.10.23	精密 BIL
高山	1979.11.1	精密 BIL

1-2-1 検知器間の感度補正

ランドサット・MSSデータは、6個のセンサーで収録される(図1-1参照)。この6

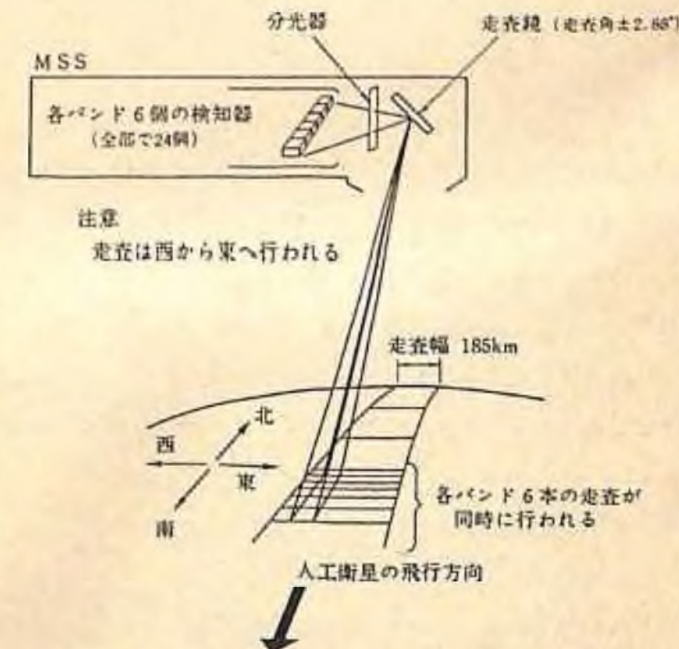


図1-1 ランドサットのMSSによる観測

個のセンサーの感度特性がそれぞれ異なるため、解析用データの作成を行う前に、まず、この感度特性を均一にするために補正を行う必要がある。一般に、この補正法としては、各検知器で収録したデータの累積頻度分布を求め、それぞれの累積頻度分布を等しくする変換式を求め、これによる補正法が用いられている。この手法は、森林地帯での解析では、やや不十分であるため、この研究のため「循環回帰式」による補正法を開発した。この循環回帰式とは、相隣接した検知器で得られたデータで、しかも、同一被写体とみられる画素のデータ

のみを用いて、4バンドそれぞれのデータ間の回帰式を求め、この回帰式が、6個の検知器間で相矛盾しないように調整するものである。この循環回帰式を用いた補正法の概要は、以下の通りである。

循環回帰式は隣あったライン(スキャナ)で隣あった画素はほとんど同じ物体であり同じ輝度をもつという仮定に基づく。

隣りあう2本のスキャナA, Bについて、Aのデータを X_A , X_A に隣あうBのデータを X_B としてスキャナAとBの回帰式、 $\hat{X}_B = a_{AB} + b_{AB} X_A$ を求めると、これはAのデータをBの輝度に変換する輝度補正式となる($\hat{X}_B: X_A$ により求められた推定値)。

この回帰式をランドサットの6本のスキャナの隣接しあうものについて求める。

$$\hat{X}_2 = a_{12} + b_{12} X_1 \quad (1)$$

$$\hat{X}_1 = a_{01} + b_{01} X_0 \quad (6)$$

(1)の補正式にランドサットのデータの取り得る0~127の数値を代入し、さらにその結果を(2)~(6)へと続けて代入すれば、これらの輝度補正式が適切なものであれば、(6)式での \hat{X}_1 は(1)式での X_1 の値に一致する(回帰の循環性)。

データの変化が激しく回帰が循環しない場合は回帰式からの残差の大きいデータをt検定により除いた後、新たに回帰式を決定しなおす。

次に基準となるスキャナを定め、他のスキャナの輝度を基準スキャナの輝度に変換する補正式を求める。

今、基準スキャナを1とすると、

$$\text{6番目のスキャナ} \quad \hat{X}_1 = a_{01} + b_{01} X_0$$

$$\text{5番目のスキャナ} \quad \hat{X}_1 = a_{01} + b_{01} (a_{50} + b_{50}) X_5$$

(6)に(5)を代入して

$$= (a_{01} + b_{01} \cdot a_{50}) + b_{01} b_{50} X_5 = a_{51} + b_{51} X_5$$

$$\text{ただし} \quad a_{51} = a_{01} + b_{01} \cdot a_{50} \quad b_{51} = b_{01} b_{50}$$

$$i \text{ 番目のスキャナ} \quad \hat{X}_1 = a_{j1} + b_{j1} (a_{ij} + b_{ij}) X_i$$

$$= a_{ij} + b_{ij} X_i \quad \text{ただし} \quad j = i + 1$$

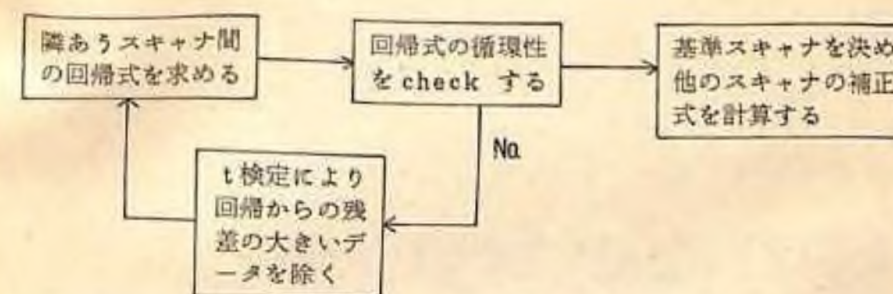
として5本のスキャナの輝度を1本目の輝度に変換するスキャナ補正式が求まる。

一般にはスキャナ本数をn, 基準スキャナをk, 補正したいスキャナをiとすると

$$\hat{X}_k = a_{jk} + b_{jk} (a_{ij} + b_{ij}) X_i \quad \text{ただし} \quad j = i + 1$$

としてスキャナ補正式が定まる。

これを流れ図に示すと下図となる。



1-2-2 幾何学的補正と正方形画素編集法

ランドサット画像は、撮像時間内での地球の回転のため、矩形とはならず平行四辺形(画素 約80m×60m)となる。また、投影法が地図の場合と異なるため、地図と比較して幾何学的な歪を持っている。このランドサットデータを地図と同じ投影法で変換し、しかも、取扱いの容易な正方形画素に編集するために、双8次多項式を用いた最近接画素法を採用した地図座標変換プログラムの開発を行った。この変換には、2万5千分の1の地形図上およびランドサット画像上で設定した地上基準点(GCP)が用いられる。一般にGCPの必要数は、20~35点であり、変換精度を、1画素以内にすることができる。

1-2-3 非画像データのオーバーレイ手法

ランドサットデータをはじめとするリモートセンシングデータは、地表事物により反射または、放射された電磁波情報を記録したものにすぎないが、このデータを処理・解析する際に、各種の既存の図面データや森林調査簿等の資料(非画像データ)を効率的、有機的に結びつけることによって、より目的に合った情報抽出が可能となる。この研究にあたって、非画像データを二次元的画像として重ね合わせを行うオーバーレイ手法を開発した。オーバーレイデータ作成のためのデータベースとして、50m×50mの正方形のメッシュ(グリッド)方式を採用した。オーバーレイデータ作成手順を図1-2に示す。非画像データの入力法として、

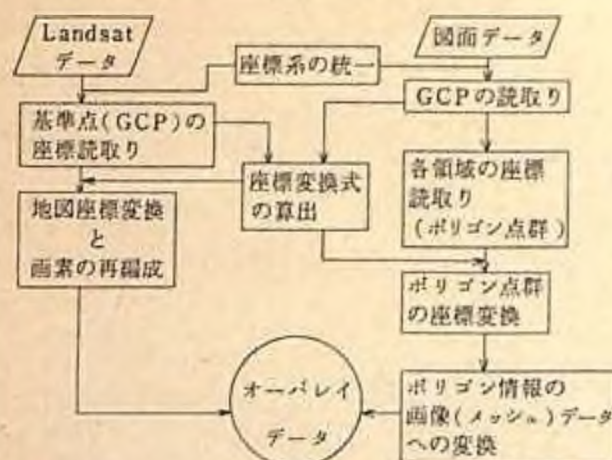


図1-2 オーバーレイデータの作成手順



写真1-1 林班界情報をランドサット画像にオーバーレイした結果

①ドラムスキャナーによるデジタル化、および ③座標読取装置による、各項目に対しての多角形の点群(ポリゴンデータ)化による2つの入力手法が可能である。写真1-1には、王滝営林署管内図(5万分の1)での林班界情報をドラムスキャナーで入力し、ランドサットデータにオーバーレイした画像を示す。

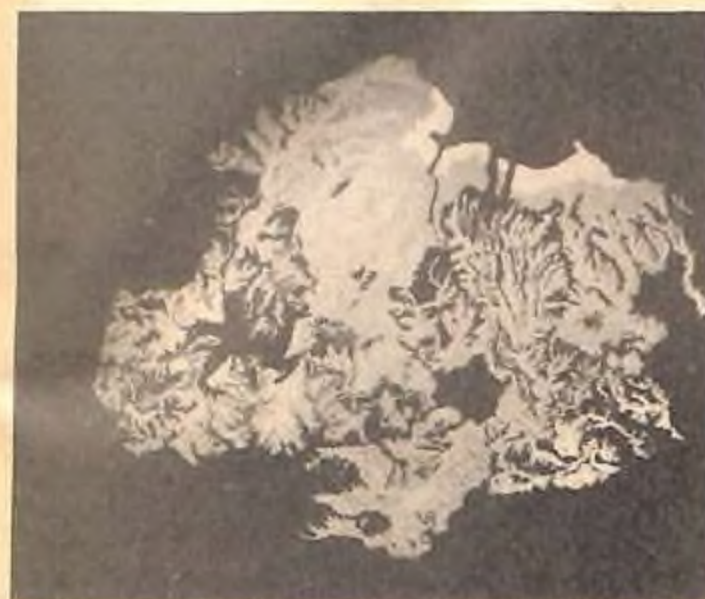


写真1-2 土壌図をランドサットデータにオーバーレイした結果

写真1-2には、御岳経営区土壌図および三浦経営区土壌図(縮尺2万分の1, 1959年作製)を座標読取装置により、ポリゴンデータとして読取り、メッシュデータに変換した結果を示す。ポリゴンデータからメッシュデータへの変換のルーチンを図1-3に示す。この地域では、前記の土壌図の他に、地質図(木曾谷地質図 縮尺5万分の1, 1953年作製)の画像化を行った。土壌図および地質図の各項目(地質区分, 土壌型)

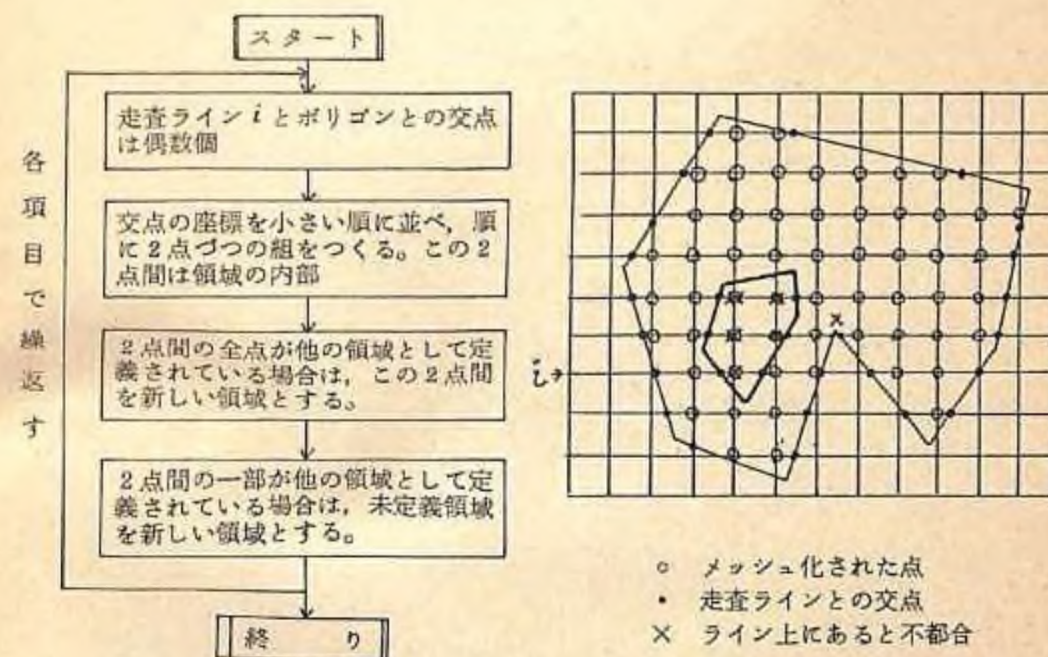


図1-3 ポリゴンデータのメッシュデータへの変換ルーチン

毎の読取りは、原図面をトレースし、座標読取り装置により、各項目を閉鎖領域曲線の座標として、最大2mm間隔のポリゴンデータとして読取り、併せて、GCPも同一ファイルに読込んだ。座標変換式として、双3次多項式まで検討し、アフィン変換で十分であるとの結果を得た(変換式の精度は、縮尺2万分の1の図面で5mm以内)。この地域内に生じた地質型および土壌型は、それぞれ22個であり、ポリゴンの点群の大きさは、地質図で約4万点、土壌図で、御岳経営区、三浦経営区 それぞれ、約2万点であった。ポリゴン点群からメッシュデータへの変換時間は、それぞれ、大型電子計算機のCPUタイムで、10秒程度であった。変換時間が小さいということは、図面情報を、線情報として保存しておいても十分活用できることを示すものであり、線情報のままに保持できれば、座標系の異なるデータベースに対しても、オーバレイデータとして容易に利用できることにもなる。

1-2-4 森林解析における地形情報の利用法

1-2-4-1 地形条件の解析

国土数値情報の一つである標高データ(原データは250mメッシュデータ)をランドサットデータ(50mメッシュ)にオーバレイした結果を用いて、地形解析を行うことができる。メッシュ毎の地形解析を(1)式を用いて行うプログラムの開発を行い、メッシュ毎の地形方位(α)と傾斜角(ϵ)の算出を行った。

$$\left. \begin{array}{l} \text{地形方位} \quad \tan \alpha = B2/B1 \\ \text{傾斜角} \quad \tan \epsilon = \sqrt{B1^2 + B2^2} \end{array} \right\} \quad (1)$$

但し

N	Z1	Z2	Z3
	Z4	Z5	Z6
	Z7	Z8	Z9

メッシュ Z5 の地形で
Z1, ..., Z9 は、隣接
のメッシュの標高

← b →

$$\left\{ \begin{array}{l} B1 = \frac{(Z1 + Z2 + Z3) - (Z7 + Z8 + Z9)}{6a} \\ B2 = \frac{(Z3 + Z6 + Z9) - (Z1 + Z4 + Z7)}{6b} \end{array} \right.$$

地形方位と傾斜角の解析画像を写真1-3と4に示す。地形方位は、ランドサットデータ



写真1-3 地形情報
(地形方位)



写真1-4 地形情報
(傾斜角)

4, 5	0 ~ 8°
3	8 ~ 20°
2	20 ~ 40°
1	40° 以上

撮像時刻の太陽条件から、向日面を明るく、背日面を暗く表示している。また、傾斜角は、表1-3に示す区分基準に従って、同一の区分メッシュが同一の色調になるように表示している。

表 1-3 傾斜類型区分表

類型区分	傾斜角
1	40° 以上
2	30° - 40° 20° - 30°
3	15° - 20° 8° - 15°
4	3° - 8°
5	0° - 3°

1-2-4-2 相対日射係数の算出と、ランドサットデータからの地形効果の除去

メッシュ（画素）毎の地形条件とランドサットデータ撮像時の太陽条件から、メッシュ毎の相対日射係数を求める計算式(2)を誘導し、相対日射係数画像の作成を行った。写真1-5にこの研究に用いたランドサット撮像時刻の相対日射係数画像を示す。



写真1-5
相対日射係数画像

$$\begin{aligned} \sin \beta = & (\cos \varepsilon \sin \phi - \sin \varepsilon \cos \alpha \cos \phi) \sin \delta \\ & + (\cos \varepsilon \cos \phi + \sin \varepsilon \cos \alpha \sin \phi) \cos \tau \cos \delta \\ & + \sin \varepsilon \sin \alpha \sin \tau \cos \delta \end{aligned} \quad (2)$$

ここで ϕ : その地点の緯度
 δ : 撮像日時の視赤緯
 τ : 時角
 ε : メッシュの傾斜角
 α : メッシュの方位角

(2)式で求められる相対日射係数を用いて、ランドサットデータから地形効果を除去する方法として、(3)式を採用し、地形効果を除去した画像の作成手法の開発を行った。

$$S' = \frac{1}{F} (S - L_p) \quad (3)$$

ここで S : オリジナルデータ
 S' : 変換データ
 L_p : バスラジアンズの推定量
 F : 相対日射係数

この地形効果除去の手法（消影手法）は、森林型区分精度を向上させることが示されている。

2 ランドサットデータと森林型との関係

ランドサットデータにより林型区分の可能性を検討するため、王滝営林署管内南滝越、北滝越、濁川国有林をテストサイトを選定し、このテストサイト全域の空中写真モザイクを作成した。（写真2-1、24頁掲載）モザイク作成に使用した空中写真は、山-882（第4オンタケサン）C10~C19、1979年10月林野庁撮影のもので、使用枚数は、180枚、作成のための作業時間は、約200時間を要した。

空中写真モザイク上で林型を判読し、このテストエリアに出現するいろいろな林型を選び代表的な地点にトレーニングエリアを選定した。トレーニングエリアの数は、全体で45箇所であり、それぞれのトレーニングエリアの写真上の特性と、森林調査簿での記載事項を表2-1に示す。

表2-1 トレーニングエリアの写真特性と

No	航空写真上				森林調							
	記号	主要樹種	疎密度	樹高 (小中大) (123)	人・天・別	林班	小 班	混				
								針				
								ヒノキ	サワラ	ヒバ	ネズコ	シラベ
1	N	コメツガ	散	1	天							
2	N2-1	コメツガ	疎	2	天	680	い	40	—	10	—	—
						681	い	30	5	5	5	5
3	S		散	1	未位	677	い	—	—	—	—	—
4	P	ハイマツ			天	760	イ	(高 山帯)				
5	N2-2	コメツガ	中	2	天	759	い					20
6	YK	カラマツ		1(人)	天	748	い	5	15			5
		(伐採後カラマツ幼樹林)				744	い	5	10			5
7	C	(伐採地)			天	749	い	5	10			10
8	P	カラマツ	密	1(人)	天	740	い	10	25			5
9	N4-1		中	3	天	738	い	5	85			
						738	は	5	85			
10	PK	カラマツ	密	1(人)	天伐	712	に	—				
					人	712	は					
11	NL2-2		中	3	天	766	い	5	25			
12	AK	カラマツ	密	2	人	737	ち					
					人	737	ぬ					
					人	737	る					
					人	737	ね					
13	YK	カラマツ	中	2(人)	人	734	い					
					天	734	ろ					
					人	735	は					
					天	735	に					
14	AK	カラマツ	密	2(人)	人	731	ほ					
					人		へ					
					人		と					
15	Ah	ヒノキ	密	3	天	723	い	80	5		5	
16	AK	カラマツ	中	3(人)	人	653	ろ					
					人	653	は					
					人	653	に					
					人	653	へ					
17	S	L	散	1	天	647	わ					
					人	647	れ					

森林調査簿記載事項

査 簿												林 齢	疎密度
交 歩 合 (歩)													
葉 樹							広 葉 樹						
コメツガ	トウヒ	モミ	ヒメコマツ	コウヤマギ	アカマツ	カラマツ	カンバ	ミズナラ	その他L	笹			
25	20								5		250	疎	
25	20								5				
—	—	—									—	—	
85	40						5				190	疎	
30	40						5				230	疎	
30	40						5		5		210	疎	
35	35						5				230	疎	
15	25	5					10		5		250	疎	
		5					5				270	中	
		5					5				270	中	
						100					—	—	
											—	—	
10	10	15					20		15		230	中	
						100					9	—	
						100					19	中	
						100					13	—	
						100					8	—	
						100					8	—	
							100				9	—	
						100					8	—	
							100				8	—	
								100			7	—	
						100					25	中	
						100					16	中	
			5						5		270	中	
						100					17	中	
						100					11	—	
						100					14	—	
						100					6	中	
							70		80		19	—	
							100				6	—	

No.	航 空 写 真 上				森 林 調 査									
	記 号	主 要 樹 種	疎密度	樹 高 (小中大) 1 2 3	人・天・別	林 班	小 班	混						
								針						
								ヒノキ	サワラ	ヒ バ	ネズコ	シラベ		
18	S	カラマツ ヒノキ	中	2	天 天 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人 人									

査 簿													
交 歩 合 (%)													
葉 樹										広 葉 樹			
コメツガ	トウヒ	モミ	ヒメ コマツ	コウ ヤマキ	アカマツ	カラマツ	カンバ	ミズナラ	その他L	笹	林 齢	疎密度	
									100		8	—	
							80		20		11	—	
						100					6	—	
											6	—	
											6	—	
						100					8	—	
											8	—	
						100					6	—	
											6	—	
					100						6	—	
						100					9	—	
											9	—	
	100										9	—	
		100									9	—	
											8	—	
									100		7	—	
									100		7	—	
											6	—	
						100					11	—	
						100					7	—	
							100				10	—	
						25					1	—	
										笹生地		—	
						100					10	—	
							100				10	—	
											—	—	
						100					10	—	
										笹生地		—	
15	30	5	10				25				210	中	
30	25	5					10		15		250	疎	
20	20	10	5						10		250	中	
25	35	5					15	5	5		250	疎	
		5					30	5	10		210	中	
		10					30	5	15		210	中	

航空写真上					森林調査							
No	記号	主要樹種	疎密度	樹高 (小中大) 123	人・天・別	林班	小班	混				
								針				
								ヒノキ	サワラ	ヒバ	ネズコ	シラベ
23	YK	カラマツ	密	1(人)	天	816	は	25	5		10	
24	C	伐			天伐	817	ろ	15	10			
25	F		疎中	3	天	817	は	15	5			
26	Ah	ヒノキ	中	2~3	人	335	い		5			
27	Ah	ヒノキ	密	2	人	337	い	—				
28	N4-2		中	2	人	355	い	5	20			
29	E	崩壊地			人	372	い	60	20			
30	NL3-3	コメツガ	中	3	人	342	い	90				
31	AK	カラマツ	中	2	人	343	は	75	25			
32	NL3-1	コメツガ	中	3	天	452	は					5
33	N4-8		中	3	天	430	い	5	30			
34	名古	屋営林	局管内		天	430	ろ	5	10			
35	Ah	ヒノキ	密	2	天	426	い	10	20		5	
36	Ah	ヒノキ	密	3	人	421	ろ					
37	N4-4	コメツガ	中	3	人	422	ろ					
38	民	有林			天	414	い	10	25			
39	N4-8	ヒノキ	中	3	天	415	は					15
40	N4-5	ヒノキ	中	3	天	411	い	10	40			15
41	N4-7	ヒノキ	密	3	天	409	い	25	50		5	
42	AK	カラマツ	中	2	人	410	い		5			15
43	AK	カラマツ	中	2	天	615	い	75	10		5	
44	AK	カラマツ	中	2	人	551	い	90	(人)10			
45	水				天	333	い		5			

査 簿											林 齢	疎密度
交 歩 合 (%)												
葉 樹							広 葉 樹					
コメツガ	トウヒ	モミ	ヒメ コマツ	コウ ヤマキ	アカマツ	カラマツ	カンバ	ミズナラ	その他	笹		
		10					80	5	15		210	中
		5					50	10	10		210	疎
		10					50	10	10		210	疎
30	45		5				10		5		220	中
											—	—
15	20	15	5				10		10		220	中
						10		5	5		40	中
							10				46	中
											17	—
30	45						20				160	疎
25	10	10		5				5	10		210	中
35	20	15					10		5		210	中
25		15	5				10		10			
						100					17	中
						100					17	中
15	5	15	5				20		5		240	中
25	35	5					15		5		210	中
25	35	5					15		5		260	中
10	30								5		240	中
	5	5					5		5		260	中
40	35								5			
			5						5		270	密
											45	密
30	50	5					5	5			210	中
			15						5		270	密
		5	5						5		210	中
			10						5		210	中
						100					8	—
						100					10	—

1979. 10. 23

No	分類		林令	疎密度	樹種
	記号	項目別			
4	P	天然林			ハイマツ
32	NL3-1	"	240	中	サワラ, コメツガ, トウヒ, ガンバ
21	NL2-1	"	250	疎	キノヒノキ, コメツガ, ガンバ, シラベ
22	LN3-1	"	210	中	サワラ, コメツガ, トウヒ, ネズコ, キノヒノキ
2	N2-1	"	250	疎	キノヒノキ, コメツガ, トウヒ
5	N2-2	"	190	"	トウヒ, コメツガ, シラベ
11	NL3-2	"	230	中	サワラ, コメツガ, ガンバ
28	N4-2	"	160	密	トウヒ, コメツガ, シラベ
30	NL3-3	"	210	中	サワラ, コメツガ, トウヒ, ガンバ
9	N4-1	"	270	密	サワラ (95%)
37	N4-4	"	210	"	トウヒ, コメツガ, サワラ, ガンバ
40	N4-3	"	270	"	キノヒノキ, ネズコ
41	N4-5	"	210	"	キノヒノキ, ネズコ
20	N4-6	"	210	"	トウヒ, コメツガ, ヒメコ, ガンバ
42	N4-7	"	210	"	キノヒノキ, ヒメコ, ネズコ
33	N4-8	"	240	"	サワラ, トウヒ, キノヒノキ, コメツガ

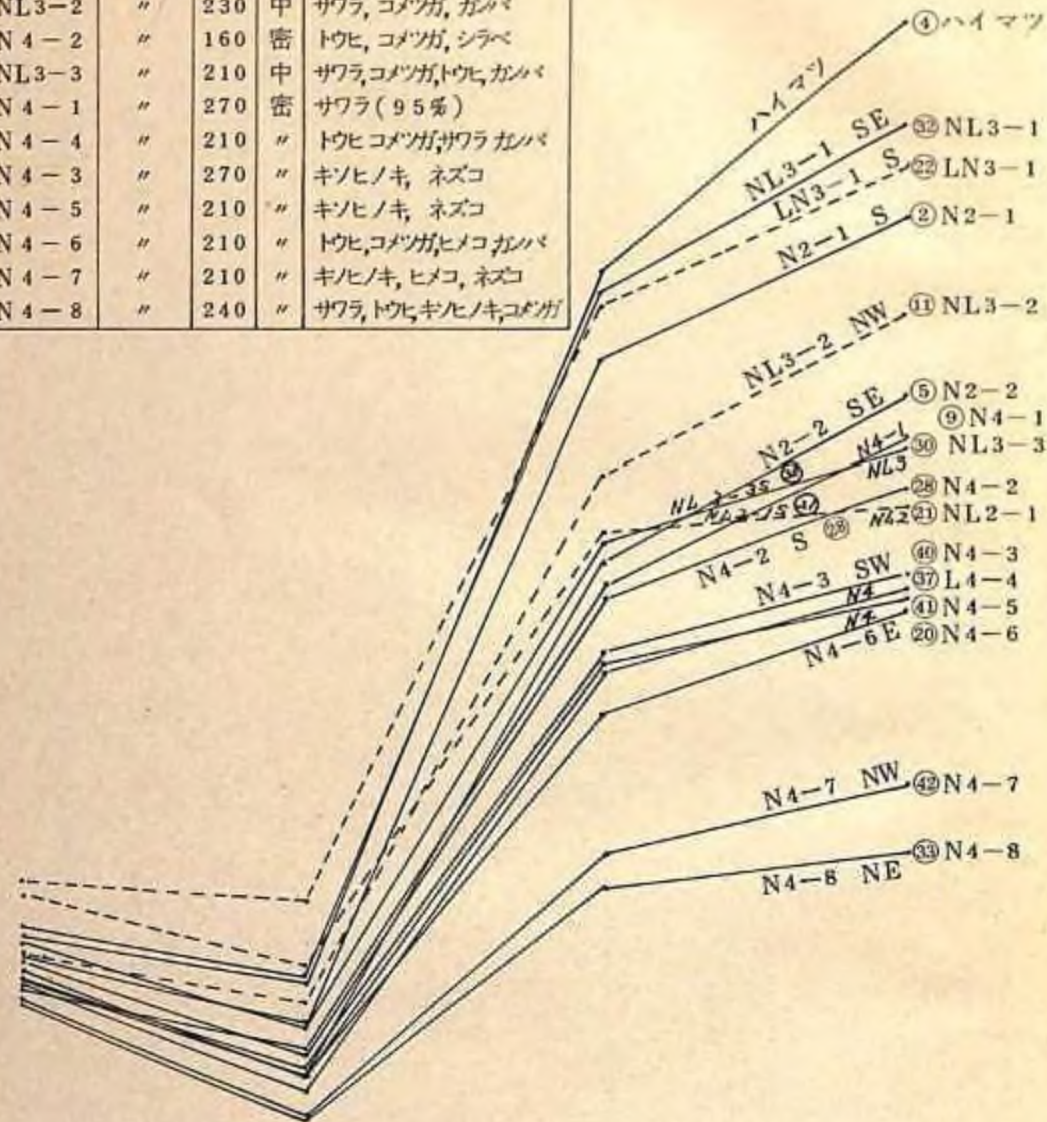
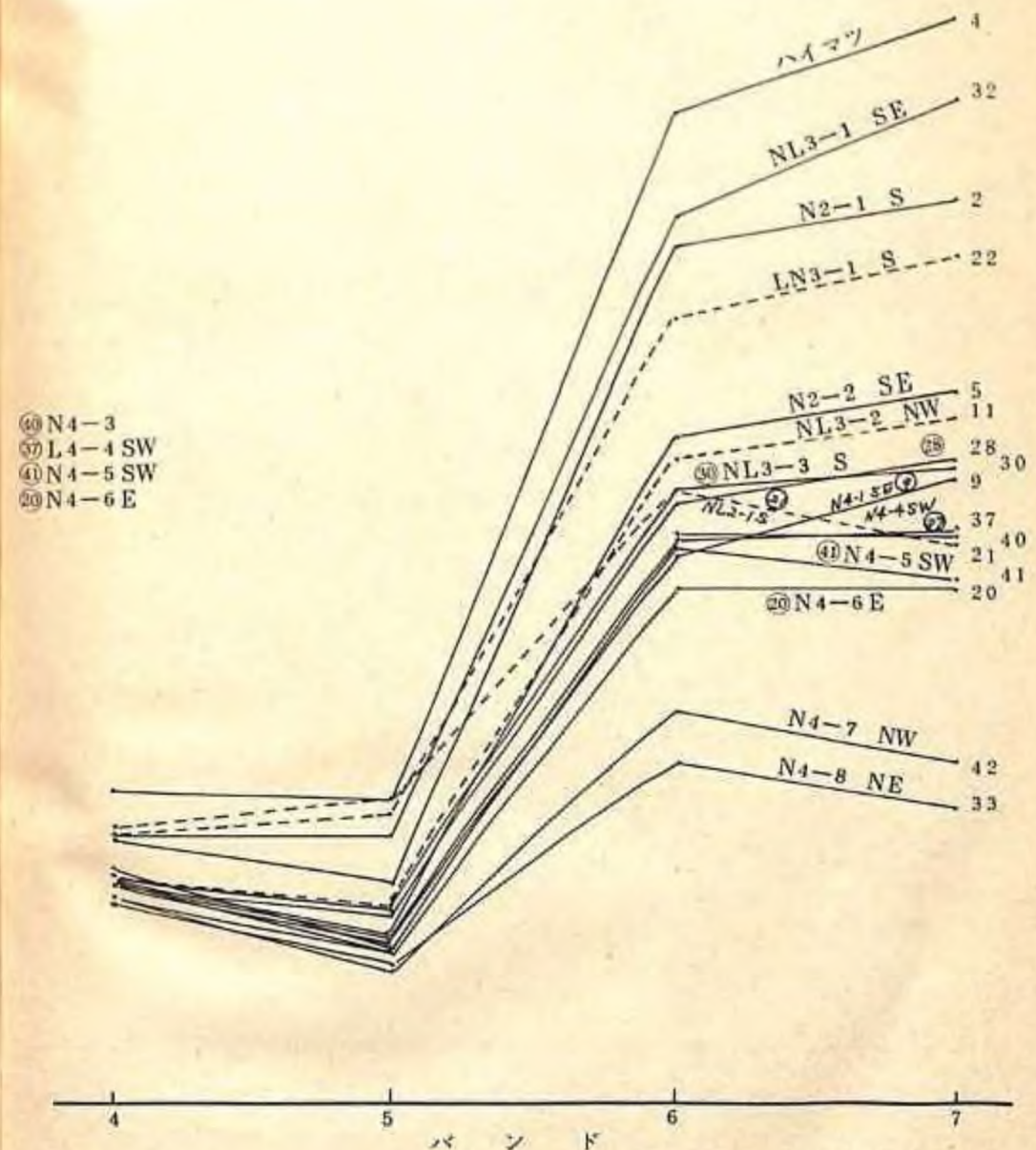


図2-1 (I) トレーニングエリアのランドサットデータの特徴

- 20 -

1979. 11. 1



- 21 -

No	分類		林令	疎密度	樹種
	記号	項目別			
4	P	天然林			ハイマツ
32	NL3-1	"	240	中	サワラ, コメツガ, トウヒ, ガンバ
21	NL2-1	"	250	疎	キノヒノキ, コメツガ, トウヒ, ガンバ
22	LN3-1	"	210	中	サワラ, ミズナラ, サワラ, ネズコ, キノヒノキ
2	N2-1	"	250	疎	キノヒノキ, コメツガ, トウヒ
5	N2-2	"	190	"	トウヒ, コメツガ, シラベ
11	NL3-2	"	230	中	サワラ, コメツガ, ガンバ
28	N4-2	"	160	密	トウヒ, コメツガ, シラベ
30	NL3-3	"	210	中	サワラ, コメツガ, トウヒ, ガンバ
9	N4-1	"	270	密	サワラ (95%)
37	N4-4	"	210	"	トウヒ, コメツガ, サワラ, ガンバ
40	N4-3	"	270	"	キノヒノキ, ネズコ
41	N4-5	"	210	"	キノヒノキ, ネズコ
20	N4-6	"	210	"	トウヒ, コメツガ, ヒメコ, ガンバ
42	N4-7	"	210	"	キノヒノキ, ヒメコ, ネズコ
33	N4-8	"	240	"	サワラ, トウヒ, キノヒノキ, コメツガ

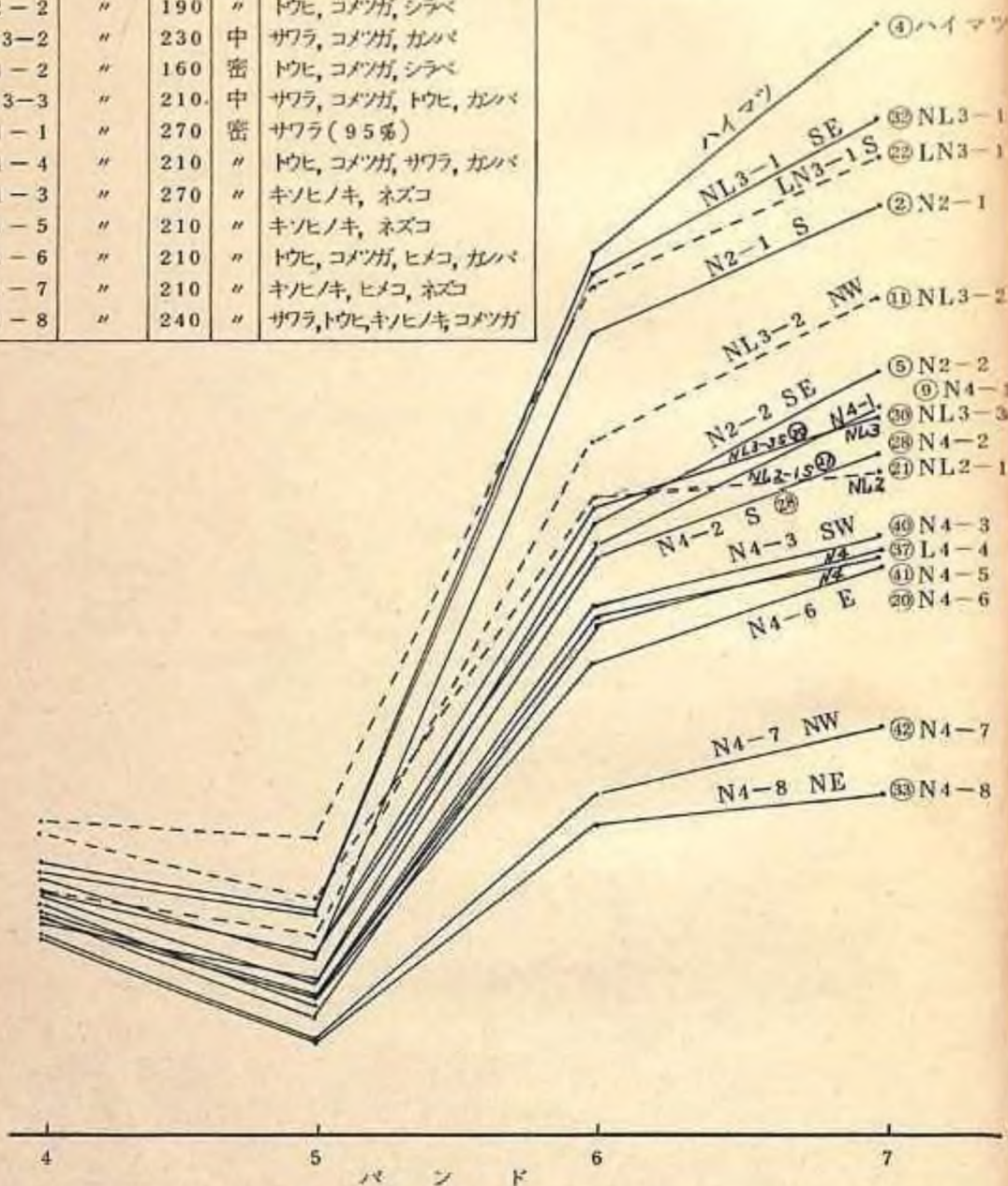


図2-1 (2) トレーニングエリアのランドサットデータの特徴

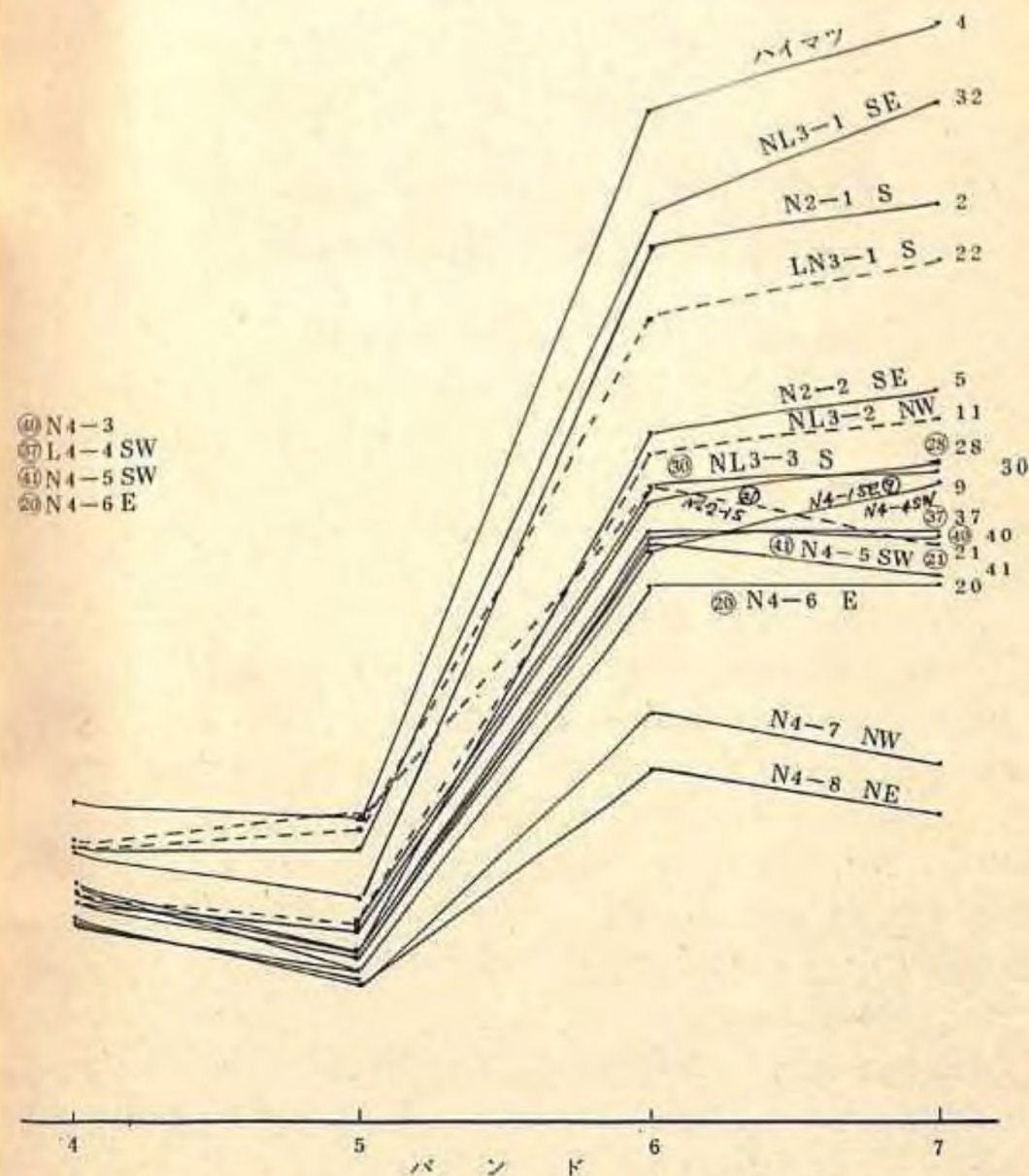




写真 2-1 御岳テストエリアの空中写真モザイク

次に、これらのトレーニングエリアがランドサットデータ上でどのように表現されているかを代表的なトレーニングエリアについて、1979年10月28日と同年11月1日のデータについて整理しとりまとめ、結果を4次元のグラフとして表現した(図2-1)。この図から、林型のちがいが、ランドサットデータにかなり反映されていることが明らかとなった。

8 ランドサットデータによる森林解析手法の開発

ランドサットデータをはじめとするリモートセンシングデータは、例えば、可視域、近赤外域、熱赤外域等の巾の広い電磁波情報を多波長帯でとらえたものであり、いうなれば、多次元(多チャンネル)データである。表1-2から明らかなように、ランドサット・MSSデータは、4次元データである。さらに多時期データの組合せや非画像データの利用等チャンネル数(次元)の大きなデータが利用される。このデータを解析するためには、濃度変換、エッジ強調、カラー合成、フィルタリング等の前処理的画像処理に加えて、多次元データ解析手法が有効に利用される。この研究では、多変量解析手法による画像解析のための基本的プログラムの開発を行なった。

画像解析手法として、一般的に、トレーニングエリアのランドツルースを解析の基本として用いる「教師あり」区分法と、画像データがもつ多次元の特徴空間を統計的に解析する「教師なし」区分法が使われている。

ここでは、「教師あり」区分法として、(1)最尤法、(2)距離法、(3)線型判別法、

(4)相関法、(5)正規化相関法 についてのプログラム開発を、「教師なし」区分法として、クラスタリング手法のプログラム開発を行なった。さらに、多次元の特徴空間を強調し、しかも、有効なチャンネルの選定等に役に立つ主成分分析プログラムの開発を行なった。以下、それぞれの手法の概略をのべる。

8-1 最尤法

$$X_{ik} = \begin{pmatrix} X_{i1k} \\ X_{i2k} \\ \vdots \\ X_{ink} \end{pmatrix} \quad \begin{cases} k=1, \dots, L & : \text{クラス総数} \\ i=1, \dots, m & : \text{ランドツルースデータの個数} \end{cases}$$

X が正規分布に従うと仮定されるとき、クラス k の確率密度関数 $f_k(X)$ は次式で表わされる。

$$f_k(X) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |\Sigma_k|^{\frac{1}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X - \bar{X}_k)^t \Sigma_k^{-1} (X - \bar{X}_k) \right\}$$

Σ_k は クラス k の分散-共分散行列

$$\Sigma_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (X_{ik} - \bar{X}_k)^t (X_{ik} - \bar{X}_k)$$

ただし

$$\bar{X}_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{ik}$$

$$d_k^2 = (X - \bar{X}_k)^t \Sigma_k^{-1} (X - \bar{X}_k) \quad \text{とおくと}$$

$$f_k(X) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |\Sigma_k|^{\frac{1}{2}}} \exp \left(-\frac{1}{2} d_k^2 \right)$$

上式の対数をとって

$$g_k(X) = \log |\Sigma_k| + d_k^2$$

未知データ X がいずれのクラスにも属さないこともあるため、次のような許容限界値を消

足するデータのみを最尤法にかけるように工夫する。

$$d_k^2 \leq d_a^2$$

または

$$\frac{|X_j - X_{jk}|}{\sigma_{jk}} \leq t_{ja} \quad (j=1, \dots, n)$$

普通 d_a または t_{ja} は経験的に定められる。

3-2 線型判別法

m 個のクラス g_k ($k=1, \dots, m$) があり、おのおのが、 $N(\mu_k, \Sigma_k)$ に従う正規確率密度をもつとき、その確率密度は(4)式で表わされる。

$$f_k(X) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |\Sigma_k|^{\frac{1}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X - \mu_k)^t \Sigma_k^{-1} (X - \mu_k) \right\} \quad (4)$$

両辺を対数変換して U_k とおくと、

$$U_k = -\frac{n}{2} \log(2\pi) - \frac{1}{2} \log |\Sigma_k| - \frac{1}{2} (X - \mu_k)^t \Sigma_k^{-1} (X - \mu_k) \quad (5)$$

$$= -\frac{1}{2} X^t \Sigma_k^{-1} X + X^t \Sigma_k^{-1} \mu_k - \frac{1}{2} \mu_k^t \Sigma_k^{-1} \mu_k + \ell_k \quad (6)$$

$$\text{ただし } \ell_k = -\frac{1}{2} (\log |\Sigma_k| + n \log(2\pi))$$

(5)式は変数 X_1, X_2, \dots, X_n に関して、2次式となるので、この値が最大となるクラスに判別すればよい。もし、分散・共分散行列 Σ_k がどのクラスでも一定で、 $\Sigma_k = \Sigma$ ($k=1, \dots, n$) とおけるなら、(6)式の各項の中で、

$$-\frac{1}{2} X^t \Sigma^{-1} X + \ell_k$$

の部分は、すべてのクラスに共通となるから、この部分を除くと、(6)式と等価な(7)式が得られる。

$$U_k = X^t \Sigma \mu_k - \frac{1}{2} \mu_k^t \Sigma^{-1} \mu_k \quad (7)$$

(7)式は、変数 $X = (X_1, \dots, X_n)^t$ に関して一次式である。これを線型判別式という。すなわち、(7)式の U_k を最大とするような、クラスに区分すればよい。

3-3 最短距離法

最短距離法は、未知のデータが帰属すべきクラスを、そのデータから最も近いクラスに分類する方法で、この場合に用いる距離には、いろいろな概念がある。ここでは、ユークリッドの距離を採用した。

ユークリッド距離は、次式で定義される。

$$d_k^2 = (X - \mu_k)^t (X - \mu_k) = \|X - \mu_k\|^2$$

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \quad \mu_k = \begin{pmatrix} \bar{X}_{1k} \\ \bar{X}_{2k} \\ \vdots \\ \bar{X}_{nk} \end{pmatrix} \quad \text{クラス } k \text{ の平均ベクトル}$$

3-4 相関法

$$\mu_k = \begin{pmatrix} \mu_{k1} \\ \mu_{k2} \\ \vdots \\ \mu_{kn} \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \quad \text{とおくとき}$$

$$r_k = \frac{\mu_k^t X}{|\mu_k^t \mu_k|^{\frac{1}{2}}} \quad \text{と定義した } r_k \text{ が最大となる対}$$

象画素をクラス k に区分する方法

3-5 正規化相関法

$$\rho_k = \frac{(\mu_k - \bar{\mu}_k)^t X}{|(\mu_k - \bar{\mu}_k)^t (\mu_k - \bar{\mu}_k)|^{\frac{1}{2}}}$$

$$\text{但し } \bar{\mu}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mu_{kj}$$

と定義した ρ_k が最大となるような、クラス k に、対象画素 X を区分する方法

8-6 クラスタリング手法

クラスター解析は、ランドツルスデータを用いない分類法の1つで、ランドツルスの実行できない地域の解析や、解析対象となる分類項目が明確に定義されにくい場合、または、オリジナルデータが形づくるスペクトル空間がランドツルスだけでは、十分にうまくならない場合に、理論的に一貫した手法で分類を行なうことのできる極めて有効な機能である。クラスターとクラスターの類似度をどのように定義するかによって、いくつかの手法が考えられている。ここでは、最短距離法 (nearest neighbour method) によるクラスター解析プログラムの開発を行った。次にクラスター解析のアルゴリズムを示す。

8-6-1 クラスター解析手順

ここで採用したクラスター解析の手順は、

- I) N個のクラスターの仮の中心位置の初期値を決める。
- II) 解析しようとする領域に含まれる点群がどのクラスター中心に“近い”かを分類する。
- III) 各クラスターに属すると判定されたデータ点群から、そのクラスターの新しい中心位置を算出する。
- IV) 中心位置が変化しなくなるまで、すなわち、全てのデータ点群が前回までにとられたクラスターに属すると判定されるまで、(II)と(III)の手順を繰り返す。
- V) 最終的に各クラスターの中心位置が定まったら、各クラスター間の分離度を算出し、各クラスター間に類似性が見い出せたら、それらのクラスターのグループ化を行う。

以上のクラスター解析の手順を流れ図に示すと図8-1となる。通常クラスター内のデータは、楕円状にその値が分布するとみなされるから、クラスター間の分離度の尺度は図8-2に示すように、2つのクラスターが存在する時にクラスター中心を結ぶ直線距離とクラスターの境界と中心との間の距離を D_{rs} , D_r , D_s とすると

$$\text{分離度 } \Delta_{rs} = \frac{D_{rs}}{D_r + D_s}$$

で定義する。

$$\text{ここで } D_{rs} = \left(\sum_{i=1}^L (\mu_{ir} - \mu_{is})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$D_k = \frac{(L+2)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^L (\mu_{ir} - \mu_{is})^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (\sigma_k^{-1})_{ij} (\mu_{ir} - \mu_{is})^t (\mu_{jr} - \mu_{js}) \right)^{\frac{1}{2}}}$$

($k = r, s$)

ここで算出された分離度 Δ_{rs} を用いると

- | | |
|------------------------------------|---------------------------|
| (a) $\Delta_{rs} > 1$ | 分離度がよい |
| (b) $1 \geq \Delta_{rs} \geq 0.75$ | 分離度が悪い |
| (c) $0.75 > \Delta_{rs}$ | 類似性があり、1つのグループとしてみなすことが可能 |

と判定できる。

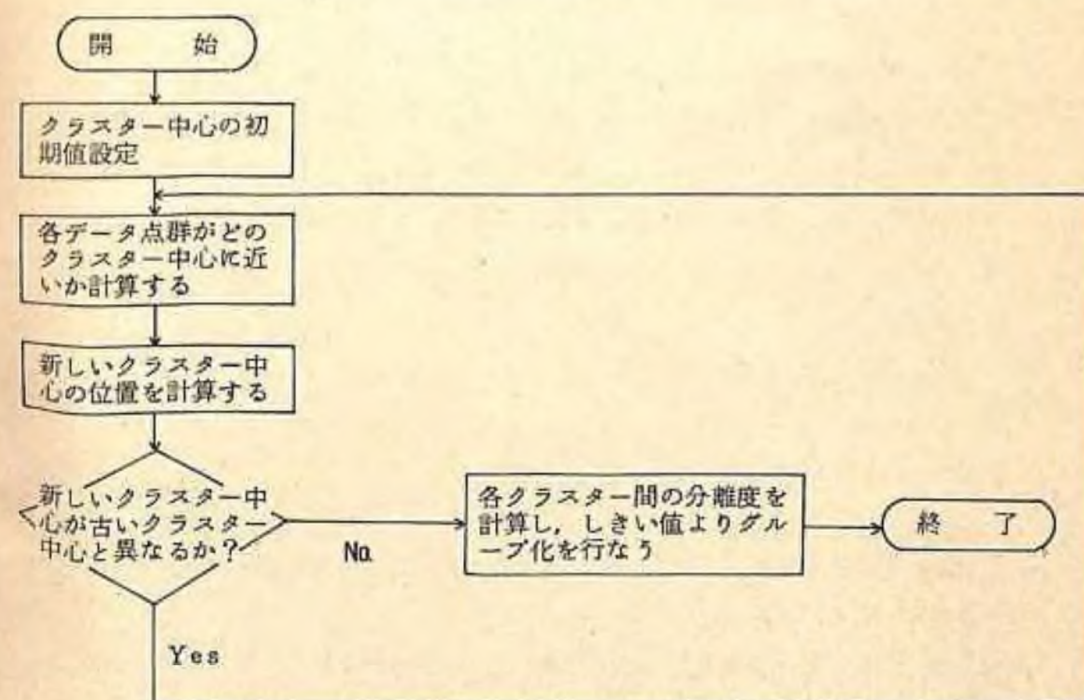


図8-1 クラスタリング・アルゴリズム

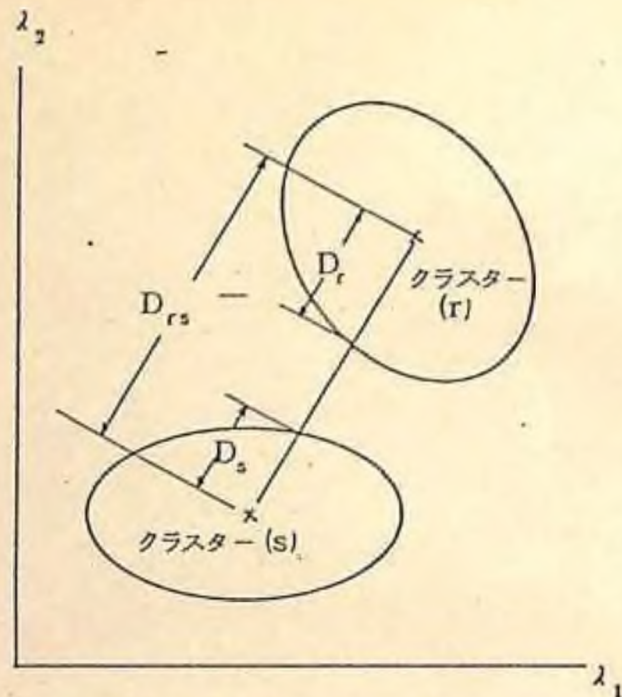


図 3-2 クラスタ間の分離度

3-7 主成分分析法

主成分分析とは、 n 次元のデータ $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^t$ のもつ情報を、少数次元 (m 次元) の総合特性値 $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_m)^t$ (これを主成分という) に要約する手法である。この総合特性値 (主成分) Z は、もとの n 次元の変数の 1 次式で表わされる。

$$Z_i = a_{i1} X_1 + a_{i2} X_2 + \dots + a_{in} X_n = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \quad (8)$$

但し $\sum_{j=1}^n a_{ij}^2 = 1 \quad (i = 1, \dots, m)$

これらの主成分の係数 $\{a_{ij}\}$ は、 m 個の主成分が互に無相関で、かつ、もとの n 次元の情報をできるだけ多く集めるように定められる。

いま、 X の分散-共分散行列を Σ とおくと、主成分の係数ベクトル $A = \{a_{ij}\}$ は、次の固有方程式を解けばよい。

$$\Sigma A - \lambda A = 0 \quad (9)$$

$$|\Sigma - \lambda I| = 0 \quad (10)$$

(10) 式で求められる Σ の固有値は n 個の正または 0 の値をもつ。この固有値の大きいほうから順に m 個 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ をとり、対応する固有ベクトル $\{a_{1i}\}$ 、

$\{a_{2i}\}$ 、 \dots 、 $\{a_{mi}\}$; $i = 1, 2, \dots, n$ を主成分の係数 $\{a_{ij}\}$ とすればよい。

この主成分は、次の性質をもつ。

- 1) 主成分 Z_k の分散は、固有値 λ_k に等しい。
- 2) 各主成分は互に無相関である。
- 3) 主成分 Z_k ともとのデータ X_i との相関は次式で与えられる。

$$r(Z_k, X_i) = \sqrt{\lambda_k} a_{ki} \quad (k = 1, 2, \dots, m; \quad i = 1, 2, \dots, p)$$

- 4) この相関係数を 2 乗して、 i について加えると λ_k になる。

$$\sum_{i=1}^n r^2(Z_k, X_i) = \sum \lambda_k a_{ki}^2 = \lambda_k$$

- 5) m 個の主成分 $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_m\}$ のもとの変数 X_i に対する寄与率 ν_i は次式となる。

$$\nu_i = \sum_{k=1}^m r^2(Z_k, X_i) = \sum_{k=1}^m \lambda_k a_{ki}^2$$

- 6) 各データ X_i の m 個の主成分 (Z_1, Z_2, \dots, Z_m) に対する重回帰式は次式となる。

$$X_i = a_{1i} Z_1 + a_{2i} Z_2 + \dots + a_{mi} Z_m \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

3-8 森林型区分の実験

上記した、いくつかの画像解析の手法により、1979年10月23日のランドサットデータを用いて、同一のトレーニングエリアデータから、森林の被覆タイプ区分を行なったところ、表 3-1 ~ 表 3-6 となった。

ここで設定したクラスの数 17 で、各クラスの平均と共分散は表 3-7 の通りである。区分結果は、各クラスをさらに統合し、区分精度および図化精度でとりまとめている。ここで、区分精度と図化精度は、次式で定義している。

$$\text{区分精度} \quad C_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^{k+1} n_{ij}} \times 100(\%)$$

表 3-1 最尤法による森林型区分結果 (国値=8 のとき)

区 分 項 目	図化精度 (%)	ランドサットデータによる区分結果 (%)							
		S	H	L	Y	G	B	F	none
針 葉 樹 林 (S)	83.7	(90)	2		1		1		6
混交林広葉樹林 (H)	48.0	13	(59)	14	8		6		
カラマツ林 (L)	54.5		1	(70)		2	17		4
幼令林疎林 (Y)	70.1	1	8	9	(76)				6
ササ・草地 (G)	70.9			9		(73)	4	7	7
伐採地新植地 (B)	32.0	15	1	21			(63)		
農地裸地 (F)	81.0							(86)	14

全体の区分精度=87.94%

全体の図化精度=77.58%

表 3-2 最尤法による森林型区分結果 (国値=10 のとき)

区 分 項 目	図化精度 (%)	ランドサットデータによる区分結果 (%)							
		S	H	L	Y	G	B	F	none
針 葉 樹 林 (S)	86.9	(93)	2		1		1		3
混交林広葉樹林 (H)	48.0	13	(59)	14	8		6		
カラマツ林 (L)	56.1		7	(73)	1	1	17		1
幼令林疎林 (Y)	72.7	1	9	8	(79)				3
ササ・草地 (G)	73.4			9		(76)	4	7	4
伐採地新植地 (B)	32.0	15	1	21			(63)		
農地裸地 (F)	92.7							(74)	

全体の区分精度=88.11%

全体の図化精度=80.69%

表 3-3 線型判別関数法による区分結果

区 分 項 目	図化精度 (%)	ランドサットデータによる区分結果 (%)							
		S	H	L	Y	G	B	F	
針 葉 樹 林 (S)	85.7	(96)	2				2		
混交林広葉樹林 (H)	44.1	12	(56)	13	14		5		
カラマツ林 (L)	45.5	2	8	(59)	1	5	25		
幼令林疎林 (Y)	72.4	2	7	7	(83)		1		
ササ・草地 (G)	65.1			12		(74)	4	10	
伐採地新植地 (B)	15.8	38	5	19	2		(86)		
農地裸地 (F)	87.8			3				(97)	

全体の区分精度=87.75%

全体の図化精度=77.75%

表 3-4 最短距離法による区分結果

区 分 項 目	図化精度 (%)	ランドサットデータによる区分結果 (%)							
		S	H	L	Y	G	B	F	
針 葉 樹 林 (S)	68.6	(93)	5		1		1		
混交林広葉樹林 (H)	29.3	34	(44)	8	9		5		
カラマツ林 (L)	36.5	21	9	(46)	2	5	17		
幼令林疎林 (Y)	62.1	3	19	6	(72)				
ササ・草地 (G)	52.9	4	1	16	12	(59)		8	
伐採地新植地 (B)	1.0	77	8	13			(2)		
農地裸地 (F)	82.5			11				(89)	

全体の区分精度=78.34%

全体の図化精度=68.31%

表 3-5 相関法による区分結果

区 分 項 目	図化精度 (%)	ランドサットデータによる区分結果 (%)							
		S	H	L	Y	G	B	F	
針 葉 樹 林 (S)	72.4	(82)	4	4	2		8		
混交林広葉樹林 (H)	30.1	9	(48)	14	21		8		
カラマツ林 (L)	36.7	3	5	(61)		13	18		
幼令林疎林 (Y)	31.2	12	36	13	(38)		1		
ササ・草地 (G)	28.2	1		39		(41)	3	16	
新採地新植地 (B)	10.2	19		55			(26)		
農地裸地 (F)	78.3	1				14		(85)	

全体の区分精度=78.31%

全体の図化精度=61.65%

表 3-6 正規化相関法による区分結果

区 分 項 目	図化精度 (%)	ランドサットデータによる区分結果 (%)							
		S	H	L	Y	G	B	F	
針 葉 樹 林 (S)	65.1	(80)	8	4	6		5	2	
混交林広葉樹林 (H)	23.5	14	(40)	18	18	1	9		
カラマツ林 (L)	25.5	9	16	(39)	8	11	16	1	
幼令林疎林 (Y)	15.5	20	34	19	(22)	1	4		
ササ・草地 (G)	39.1	3	3	22	1	(57)	9	5	
伐採地新植地 (B)	9.8	38	1	23	4	4	(26)	4	
農地裸地 (F)	59.3	7		2		11	7	(73)	

全体の区分精度=74.03%

全体の図化精度=54.11%

表 3-7 森林型区分に用いたクラスの平均値と分散・共分散行列

ク ラ ス 名	記 号	バ ン ド	平 均 値	分 散 ・ 共 分 散 行 列			
				1	2	3	4
針 葉 樹 林	1S	1	10.6	0.49	0.14	0.82	0.18
		2	17.1	0.14	0.88	0.51	0.48
		3	22.4	0.32	0.51	2.24	2.08
		4	25.3	0.15	0.48	2.08	3.77
	2S	1	5.4	0.58	-	0.10	-
		2	5.8	0.07	0.89	0.14	0.28
		3	14.8	0.10	0.14	1.42	1.12
		4	17.1	-	0.28	1.12	2.07
	3S	1	10.3	0.23	0.14	0.08	0.21
		2	7.4	0.14	0.52	0.10	0.25
		3	24.8	0.08	0.10	0.78	0.50
		4	30.4	0.21	0.25	0.50	1.05
	4S	1	11.7	0.78	0.25	1.48	1.29
		2	8.9	0.25	0.75	1.88	1.29
		3	31.7	1.48	1.33	8.05	7.27
		4	36.4	1.29	1.29	7.27	7.51
	5S	1	11.1	0.65	0.37	0.96	0.79
		2	7.8	0.37	1.00	2.08	2.35
		3	25.8	0.96	2.08	7.90	7.41
		4	30.1	0.79	2.35	7.41	8.00
	6S	1	10.9	0.73	0.18	1.16	1.48
		2	7.9	0.18	0.53	0.67	0.96
		3	24.5	1.16	0.67	7.29	7.67
		4	28.7	1.48	0.96	7.67	10.26
混交林広葉樹林	7H	1	18.0	1.04	0.92	4.03	4.83
		2	11.0	0.92	1.83	8.13	8.92
		3	40.6	4.03	8.13	40.66	44.10
		4	46.0	4.83	8.92	44.10	51.12
	8H	1	12.9	0.97	0.56	1.94	2.26
		2	10.7	0.56	1.18	1.84	2.14
		3	36.3	1.94	1.84	23.55	26.88
		4	41.5	2.26	2.14	26.88	34.15
	9H	1	11.8	1.15	1.07	4.98	6.37
		2	9.8	1.07	1.47	5.64	7.37
		3	30.0	4.98	5.64	32.03	41.27
		4	34.9	6.37	7.37	41.27	56.96
カラマツ 林	10L	1	13.5	2.14	3.24	2.48	2.96
		2	13.4	3.24	8.49	4.73	5.72
		3	23.8	2.48	4.73	8.13	7.72
		4	31.9	2.96	5.72	7.72	9.51
	11L	1	14.5	3.85	2.45	1.02	0.93
		2	12.1	2.45	2.52	0.56	0.99
		3	36.8	10.22	8.56	4.53	46.74
		4	40.3	9.93	8.99	4.57	52.51
	12G	1	14.7	3.88	1.98	1.54	1.16
		2	10.9	1.98	1.47	0.85	0.77
		3	41.9	15.45	6.85	9.57	11.26
		4	46.4	19.16	7.97	11.26	13.47
	18G	1	12.6	1.01	0.48	0.69	0.44
		2	9.2	0.48	0.84	0.50	0.24
		3	34.8	0.69	0.50	4.67	4.73
		4	41.8	0.44	0.24	4.73	5.27
	14G	1	16.4	2.84	2.11	8.18	8.52
		2	13.2	2.11	3.20	4.65	3.94
		3	43.8	8.18	4.65	61.84	72.77
		4	57.1	8.52	3.94	72.77	91.12
伐採地・新植地	15B	1	18.9	13.96	18.09	23.82	27.73
		2	13.6	18.09	26.57	33.83	30.72
		3	38.3	23.82	33.83	122.16	125.84
		4	39.3	27.73	30.72	125.84	132.75
	16Y	1	12.1	0.90	0.55	2.87	3.07
		2	9.8	0.55	1.34	2.85	2.62
		3	27.2	2.87	2.85	21.73	21.71
		4	30.1	3.07	2.62	21.71	24.64
	17F	1	17.3	13.8	17.2	-	-
		2	15.9	17.2	28.2	0.18	0.84
		3	25.5	-	0.18	3.87	3.88
		4	24.4	-	0.89	3.88	6.08
幼令林疎林	17F	1	17.3	13.8	17.2	-	-
		2	15.9	17.2	28.2	0.18	0.84
		3	25.5	-	0.18	3.87	3.88
		4	24.4	-	0.89	3.88	6.08
農地・裸地	17F	1	17.3	13.8	17.2	-	-
		2	15.9	17.2	28.2	0.18	0.84
		3	25.5	-	0.18	3.87	3.88
		4	24.4	-	0.89	3.88	6.08

$$\text{図化精度 } M_i = \frac{n_{ii}}{\sum_{j=1}^{k+1} n_{ij} + \sum_{i=1}^k n_{ij} - n_{ii}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{全体の区分精度 } C = \sum_{i=1}^k P_i \quad C_{ii}$$

$$\text{全体の図化精度 } M = \sum_{i=1}^k P_i \quad M_i$$

ここで

n_{ij} : i のクラスのデータが j のクラスに区分された個数

k : クラスの数

区分精度、図化精度共に精度的にすぐれている順序は次の通りであった。

最尤法>線型判別法>最短距離法>相関法>正規化相関法

最尤法と線型判別法との区分結果は、精度的には、若干前者が優れているが、ほぼ同じ結果となる。計算時間は500ライン×512画素、4次元データを17クラスに区分した場合最尤法が124分、線型判別法が48分で、約3倍後者が計算時間が短いという利点があることから、ソフトウェアで森林の解析を行おうとする場合、トレーニングエリアの取捨選択や評価等の解析過程の試行錯誤の作業過程に用いることに有効と考えられる。トレーニングエリアが純粹でなく混合している場合には、個々のクラスの区分結果は最尤法が最適であるという結果を得た。

8-9 クラスタリングによる森林型区分実験

前記のクラスタリングのルーチンにより、クラスター解析を行った。用いたデータは1979年11月1日のものである。

この11月のデータに対して、186のカテゴリーの設定が可能であった。ここで求められた各カテゴリーを、実際のカテゴリーと対応する対応表を作ることが問題となる。この場合、2-8で用いたと同じトレーニングエリアを用いた対応表作成を行った。この対応表から作成した森林型区分図の精度を表8-8に示す。この場合の基準データとして、同じトレーニングエリアのデータを用いた。

表8-8 クラスタリングによる森林型区分結果

区 分 項 目	図化精度 (%)	ランドサットデータによる区分結果(%)							
		S	H	L	Y	G	B	F	none
針 葉 樹 林 (S)	71.5	(76)	2		20	2			
混交林広葉樹林 (H)	38.0	8	(50)	12	12	17	1		
カラマツ林 (L)	62.2	1	6	(75)	7	5	6		
幼令林疎林 (Y)	16.9	13	11	18	(56)	2			
ササ・草地 (G)	63.0		15	2	4	(78)	1		
伐採地新植地 (B)	67.1	4	0	9	1		(74)	3	9
農地裸地 (F)	94.3			2				(98)	

全体の区分精度=72.95%

全体の図化精度=61.46%

4. ランドサットデータによる森林解析精度の向上

ランドサットデータの解析手法については8に述べたように、それぞれが特色をもつことにもふれた。解析手法としては、「教師なし」区分手法と「教師あり」区分手法があるが、「教師なし」区分手法の代表的手法としてのクラスタリング手法では、統計的に求められるクラスターを最終的にどのように意味づけするか、すなわち、クラスターのグループへの割付け法が問題であり、このために、トレーニングエリアのランドツルースを必要とする。また、「教師あり」区分手法は、トレーニングエリアのランドツルースに基づく、統計量が最終的なクラス区分に用いられるため、対象地全域にわたる画像全体に対して、統計的な調和のあるトレーニングデータの選定が必要となるが、調和をもたせることが困難で、この解析のために、あらかじめ、画像空間を明確化する必要があり、そのために、「教師なし」区分手法が必要となる。すなわち、「教師なし」区分手法と「教師あり」区分手法を調和した形で利用できる体系化が効率的画像解析の手法として必要となる。

さらに、画像解析の手法に加えて、解析精度を向上させる手法として、特に森林植生を解析する場合、季節変動を行うスペクトル情報の効率的利用が必要となる。すなわち、画素単位でオーバレイデータとして集積したマルチテンポラルデータの活用である。御岳山テストエリアにおいて、紅葉前(19791023)と紅葉後(1979111)の2時期の8次元のランドサットデータを用いた場合、①針葉樹林、②針広混交林および広葉樹林、③カラマツ林、④幼令林、⑤ササ生地、⑥裸地と伐採地、⑦農地、村落、裸地の7項目の最尤法による森林被覆区分では、単時期のデータを用いた場合に比べて、区分精度で10%、図化精



図 3-8 2 時期 8 次元ランドサットデータによる森林被覆タイプ区分結果を X-Y プロッターで図面化したもの



度で 20% 程度の判別能向上がみられた (表 3-9)。こゝで求めた森林被覆タイプ区分の結果を、X-Y プロッターにより図面化したものを、図 3-8 に示す。

表 3-9 2 時期のマルチテンポラルランドサットデータによる森林型区分結果
(主成分分析法, 最尤法使用)

区 分 項 目	図化精度 (%)	ランドサットデータによる区分結果 (%)							
		S	H	L	Y	G	B	F	none
針 葉 樹 林 (S)	85	(92)	4		2				2
混交林・広葉樹林 (H)	82	1	(93)	2	1	2			1
カラマツ林 (L)	85			(87)	8	1	3		1
幼令林・疎林 (Y)	58		15	2	(83)				
ササ・草地 (G)	85	1	4	1		(90)	1		3
伐採地・新植地 (B)	75	1				6	(84)		9
農地・裸地 (F)	91				7			(90)	3

全体の区分精度 = 90.4%

全体の図化精度 = 85.4%

5. ランドサットデータをデータベースとする森林調査の開発

5-1 はじめに

ランドサットデータを画像解析することにより作成された森林植生区分や森林型区分の結果は、カラーコード化し出力すれば、短時間のうちに図面化され、分布図となる。これは、それ自体有効に利用されるが、また、森林資源調査等のデータベースとして活用される。画像解析の手法によりある程度均一的な森林型として区分が可能であれば、個々の森林型に平均蓄積量を乗ずることにより、概略的な総蓄積量が求められる。Langley (1975) や Colwell (1976) は、このような概念に基づいて、広域的な森林資源調査にランドサットデータが利用可能であることを示した。この場合、広域同時性に特長をもつランドサットデータをデータベースとした多段サンプリングが採用された。即ち、人工衛星データ — 航空機データ — 地上調査データといった多段的なデータの利用により各々により得られる情報の特性 (表 5-1 参照) を有効に活用しようとするものである。蓄積量調査の場合、蓄積量に関連する情報量の連繫を行う。すなわち、ランドサットデータでの画素単位での材積級区分、空中写真によるプロット当りの、または、単木の材積量推定、地上調査によるプロットまたは単木の材積測定等の材積に関連する情報量を相互に活用する手法を採用する。この場合、推定材積量に比例する確率で、それぞれの情報の結びつきを行なう手法として、確

表5-1 各種データの特性の比較

データの種類 データの特徴	地上調査データ	航空機データ	人工衛星データ
広域性	△	○ 観測時間がかかる	◎
広域同時性	△ 不可能	○ 航行時間の差異がある	◎
周期性	△ ロボット観測で可能	△ 経費が増大	◎
緊急性	○ 時間的に間に合わない 接近不可能	◎	△ 周期の間は不可能
定性的精度	◎ 高い詳細度	◎ 解像度がすぐれている	○ 解像力に限界がある
定量的精度	◎ 計測可能	○ 空中写真判読材積表の活用	△ 補助データが必要
電子計算機処理	○ 可能ではあるが量的能力なし	○ 可能だが経費が高い	◎ 解像力に問題あり
単位面積当りの経費	△	△	◎

◎：非常にすぐれている

○：ややすぐれている、または普通

△：やや劣る

率比例抽出法が効率的に利用された。この試験研究は、この手法の適用試験とし実施した。

5-2 ランドサットデータの材積級区分

3-1で述べた画像解析の手法によって行った土地利用区分および林型区分結果を用いて、森林蓄積に関連する指標としての材積級区分を行った。区分項目は、①河川・湖水・貯水池、②裸地・崩壊地・河川敷、③都市・村落、④水田・畑地、⑤ササ生地および草地、⑥伐採跡地・新植地、⑦若令林、⑧広葉樹林（二次林を含む）、⑨マツ林、⑩カラマツ林、⑪スギ・ヒノキ壮令林、⑫針広混交林、⑬針葉樹天然林である。これらの区分精度は、区分精度91.5%、図化精度86.2%であった。これらの区分項目に対して、地上調査結果および森林調査簿を参考として、材積級区分を試みた。設定した材積級は、①NF（材積10m³/ha以下）②T1（10～150m³/ha）、③T2（150～350m³/ha）、④T3（350m³/ha以上）の4区分である。この区分項目と材積級の対応は表5-2であった。この材積級区分に従いランドサットデータを区分した結果を、空中写真判読結果により評価したところ、

表5-3となった。この表から明らかなように、隣接する材積級間では、若干の混同がみられるが、2階級離れるとはほとんど混同はみられない。画像解析にあたって、どの区分項目にも属さないもの、および、陰という項目で区分された結果をNFと材積級区分したため、NFがT1、T2、T3と混同されるという結果となった。全体的な材積級区分精度は、88.6%と良好な結果を得た。誤った区分結果により生起する各材積級の面積変化は、NF=+3.9%、T1=-1.0%、T2=-8.5%、T3=+7.4%であった。

表5-2 材積級と区分項目との対応

材積級	NF	T1	T2	T3
区分項目	①②③④⑤⑥⑦	⑧⑨⑩	⑪⑫	⑬

表5-3 LANDSAT・MSSデータの材積級区分
(トレーニングエリアでの結果)

材積級	LANDSAT データの材積級区分				材積級	ウェイト
	NF	T1	T2	T3		
空判 NF	98.7%	1.3%	0%	0%	NF = None forest 10m ³ /ha以下	0
中 T1	11.6	83.7	3.7	1.0	T1 = 150m ³ /ha以下	1
写 T2	2.2	1.4	67.6	28.8	T2 = 150～ 350m ³ /ha	3
真読 T3	1.4	2.6	18.5	77.5	T3 = 350m ³ /ha以上	5
材積級変化	+3.9	-1.0	-8.5	+7.4		

5-3 第1次抽出単位PSUの設定

材積級に区分したランドサットデータの各画素に対して、材積級に正比例したウェイトづけを行った。ここで採用したウェイトは、NF=0、T1=1、T2=3、T3=5である。

本研究で森林の蓄積量調査のために採用した確率比例抽出法による多段サンプリング調査において、推定材積量 \hat{V} は

$$\hat{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \frac{y_i}{p_i}$$

で表わされ、その分散 $\text{Var}(\hat{V})$ は

$$\text{Var}(\hat{V}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \left(\frac{y_i}{p_i} - V \right)^2 = \frac{1}{n} S^2$$

で表わされる。

ここで、一般に用いられている信頼限界の概念は

$$P\left\{\hat{V} - t_{\alpha; n-1} \sqrt{V_{ar}(\hat{V})} < \mu < \hat{V} + t_{\alpha; n-1} \sqrt{V_{ar}(\hat{V})}\right\} = 1 - \alpha$$

と表わされ、ある一定の精度 d を得ることを考えたとき、

$$d = t \sqrt{V_{ar}(\hat{V})}$$

即ち、

$$d^2 = t^2 V_{ar}(\hat{V}) = \frac{t^2 S^2}{n}$$

よって、サンプリングサイズ n は

$$n = \frac{t^2 S^2}{d^2}$$

となる。ところで、 S^2 は、未知であるため、 n を決定するためには、あらかじめ S^2 を推定する必要がある。

いま、ランドサントデータの各画素に対して材積級区分を行なった結果に対して、 N の第 1 次抽出単位 PSU を設定することを考えるから、母集団の分散 S^2 は、

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

ここで

y_i : 第 i 番目の PSU の総蓄積量

\bar{y} : 平均

で与えられる。ところで、各 PSU の総蓄積量は、その PSU に含まれる画素に与えられたウェイトの総和であり、次式であらわされる。

$$y_i = \sum_{\ell} \sum_k W_{\ell k} \cdot C_{\ell k}$$

ここで

$k = 1, \dots, m$; PSU のライン番号

$\ell = 1, \dots, n$; PSU の各ラインに含まれる画素番号

W ; 材積級 C に与えられたウェイト

C ; 第 $k-\ell$ 番目の画素に与えられた材積級

即ち、PSU 内分散 S^2 は、PSU の大きさや形によって変化する可能性がある。ここで、 S^2 が、PSU の形を矩形と考えた場合、この矩形の大きさによりどのように変化するかを検討した。対象地として、5 万分の 1 の地形図の図葉「加子母」と「上松」を選定し、それぞれの地域に対して別個に検討した。この 5 万分の 1 の地形図の 1 図葉の大きさは、37 cm \times 45 cm = 18500 m \times 22500 m = 370 ライン \times 450 画素 (ランドサットの画素の大きさ 50 m \times 50 m) に相当するが、実験には、対象母集団として公約数の多い、360 ライン \times 450 画素を採用した。PSU として、 m ライン \times n 画素の矩形を考えたとき、 m と n をいろいろと変化させて、 S^2 がどのように変化するかを求めたところ、PSU に含まれる画素数 (PSU の大きさ) と S^2 との関係は、図 5-1 となった。結果として、「加子母」と「上松」との差異は図から明らかなように全くみられなかった。また、PSU の形 (たて長、または、よこ長の矩形) による差異もみられなかった。PSU の大きさと S^2 との関係は、図 3-1 より明らかなように、逆比例的関係にあることが判明し、PSU 内分散 S^2 が小さく、かつ、PSU の大きさが適度に小さな範囲として、PSU の大きさは、画素数として、900 ~ 1,200 が最適であるとの結果を得た。

この地域の空中写真は、画枠 18 cm (焦点距離 21 cm)、縮尺 2 万分の 1、オーバーラップ 60%、サイドラップ 80% で撮影されているから、1 モデルの有効面積は 2160 m \times 1440 m = 310 ha である。この有効面積は、画素数 43 ライン \times 29 画素 = 1,247 画素となる。そこで、分散の大きさと空中写真上での判読作業の容易さ、および、地上調査の行程を勘案した場合、PSU の大きさとして、40 ライン \times 30 画素、または、40 ライン \times 25 画素位の空中写真の 1 モデル分の大きさが適当であるという指針を

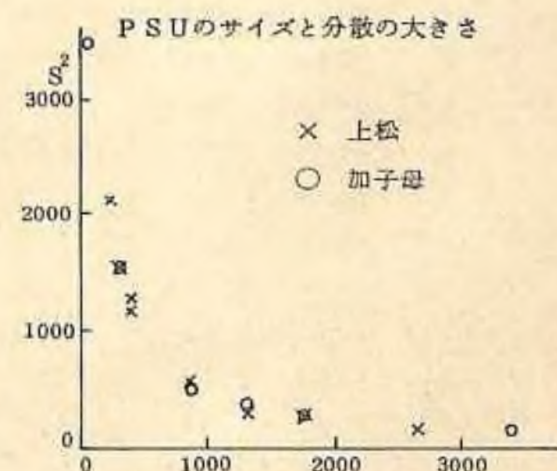


図 5-1 PSU のサイズ

得た。

調査対象地域を東西15等分、南北10等分に分割すると、1個のPSUの大きさは、東西1.5km×南北1.85km=2775haで、1110個の面素からなり、上記の検討結果にも合致するため、この大きさでPSUの設定を行った。PSUは、全体でN=150個である。それぞれのPSUに対して、各面素に対して、表5-4のような材積級のウェイトづけを行い、PSUのウェイト合計 W_i ($i=1, 2, \dots, N$)を求めた。

この W_i を補助情報として用いて、各PSUの抽出確率 P_i を計算した。

$$P_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

抽出確率 P_i に正比例するような抽出法を用いて、PSUの抽出を行った。抽出したPSUの数は、調査費用、作業効率、誤差率を勘案し、 $m=10$ 個とした。抽出したPSUの配置とそのPSUの抽出確率 P_i を図5-2に示す。

P.S.U.No.2 表5-4 各SSUの判読材積

SSU No.	林分体積指数	判読材積 m ³ /ha	調査簿による m ³ /ha
1	2099	370	290
2	1702	108	290
3	1164	360	290
4	2052	478	290
5	8050	671	420
* 6	2519	263	310
7	1297	288	420
* 8	2180	435	420
9	2140	670	290
10	706	296	350
* ⑪	1716	654	360
12	2369	782	360
13	1735	295	350
14	642	98	320
15	1609	455	360

判読材積：空中写真林分材積表から求めた値

林分体積指数：判読林分高と樹冠疎密度の積

調査簿による材積

：五滝営林署の森林調査簿に記載されている、小班単位での蓄積量

* : 現地調査用に選定されたSSU

* ⑪ : 現地調査を行なったプロット

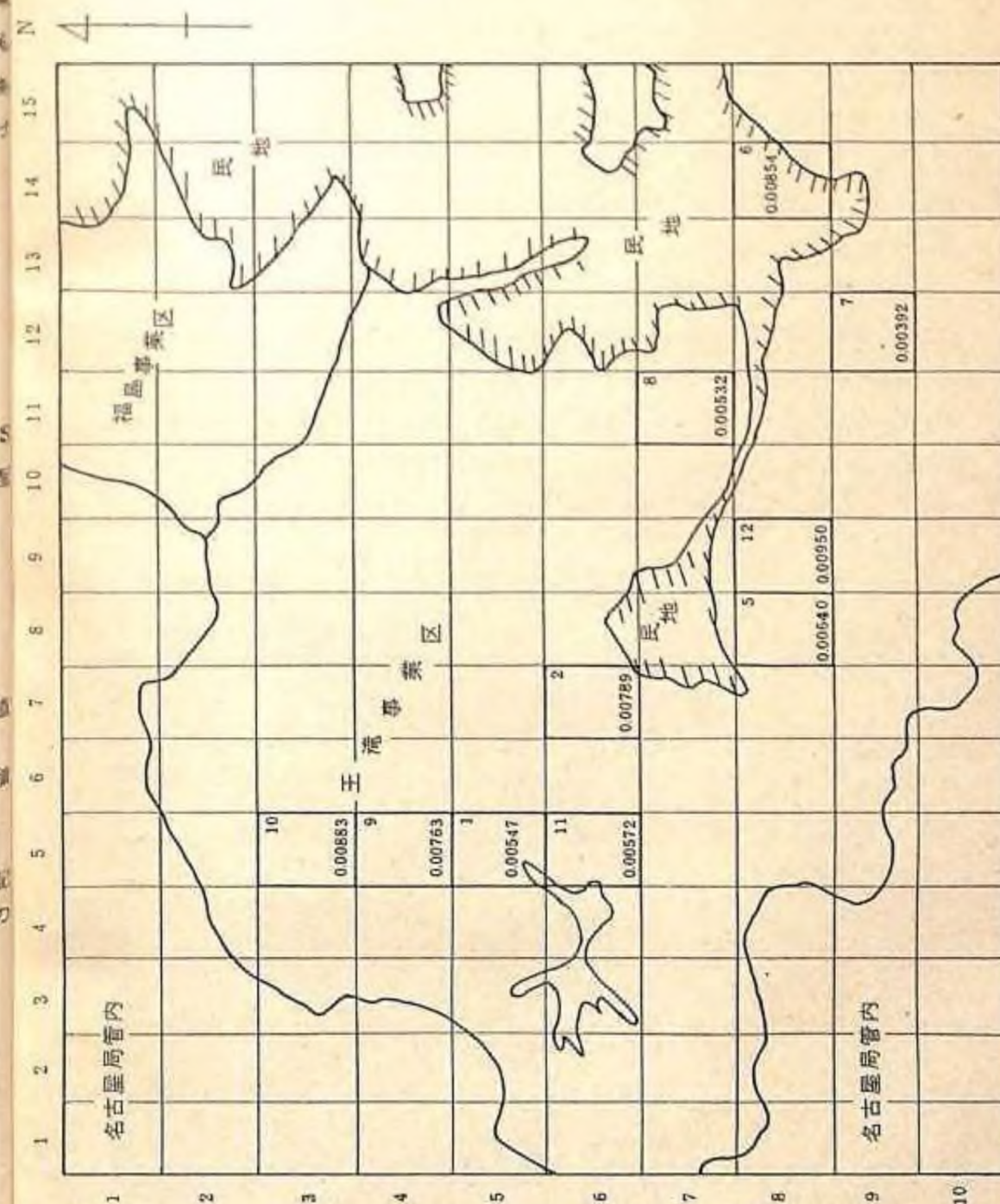


図5-2 抽出された第1次抽出プロット(PSU)の配置図とその抽出確率(P_i)

5-4 第2次抽出単位SSUの設定とSSUの蓄積量推定

抽出されたPSU10個に対し、各々のPSUに、地図上で図5-3に示すような15個のSSUを設定した。

また、各PSUおよび各SSUを空中写真（林野庁1974年10月撮影の2.5倍伸し、写真縮尺約8千分の1）に移写した。その1例を写真5-1に示す。

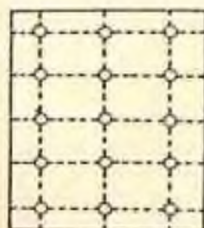


図5-3 SSUの配置
(○:SSU)

各PSUの15個のSSUに対して、林分高、樹冠直径、本数、疎密度、標高、傾斜を判読因子として、写真判読を行った。判読結果を用いて、空中写真林分材積表（第8地域木曽ヒノキ林、亜高山NL混交林、ヒノキ林、カラマツ林空中写真林分材積表）から、判読材積を求めた。この結果の1例を表5-4に示す。この判読材積を指標とし、判読材積に比例する抽出確率により、各PSUから、3個のSSUを選定し、現



写真5-1

抽出されたPSUと
配置されたSSU

地調査用プロットとした。

5-5 現地調査

選定されたSSU、合計30点について現地調査を計画し実行した。調査は、空中写真上に落されたSSUの位置に主プロットを設定し、時間が許せば、その東西南北へ50m移動した位置に副プロットを設定して、各調査点で0.04haの円形プロットの毎木調査を行った。実際に調査ができたのは、30個のSSUのうち、17個についてであった。調査結果を、表5-5に示す。

表5-5 SSUの現地調査結果と判読値

PSU No.	SSU No.	地上調査値 (m³/ha)	判読材積 (m³/ha)	森林調査簿 (m³/ha)	PSU内でのSSU の抽出確率 P_{ij}	PSUの抽出 確率 P_i
1	3	207	143	270	0.1001	0.00547
2	11	620	654	360	0.1073	0.00789
5	4	350	218	550	0.1045	0.00640
	10	706	652		0.1220	
6	12	918	730	450	0.1978	0.00854
	15	550	506	450	0.1944	
7	12	404	365	170	0.0784	0.00392
8	12	673	640	430	0.1602	0.00532
9	1	772	512	300	0.0791	0.00763
	3	457	559	590	0.0863	
	4	1002	455	500	0.1547	
	7	568	626	300	0.0967	
	14	848	843	250	0.0530	
10	9a	292	280	300	} 0.0873	0.00883
	9b	721	526	230		
	12a	141	125	230	} 0.0620	
	12b	219	448	230		
11	5a	90	404	130	} 0.1059	0.00572
	5b	267	271	130		
	8a	475	495	170	} 0.1526	
	8b	473	477	170		
12	4	561	472	400	0.0630	0.00950

5-6 対象地域の蓄積量推定

以上のような手順で調査を行ったとき、2段階確率比例抽出法となる。このときの対象地域の総蓄積量 \hat{V} は、(11)式で与えられ、

$$\hat{V} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{V_i}{p_i} \quad (11)$$

その分散 $V_{ar}(\hat{V})$ は、(12)式で与えられる。

$$V_{ar}(\hat{V}) = \frac{1}{m(m-1)} \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{V_i}{p_i} \right)^2 - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \frac{V_i}{p_i} \right)^2 \right) \quad (12)$$

ここで

$$V_i = \frac{A}{Na} \cdot \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{V_{ij}}{p_{ij}} \quad (13)$$

但し

V_i : 第 i 番目の PSU の推定材積

p_i : 第 i 番目の PSU の抽出確率

m : 抽出された PSU の数

A : PSU の面積

N : 各 PSU に設定した SSU の数

a : SSU の面積

n_i : 第 i 番目の PSU において抽出された SSU の数

V_{ij} : 第 i 番目の PSU の第 j 番目の SSU での現地調査材積

p_{ij} : 第 i 番目の PSU の第 j 番目の SSU の抽出確率

表 5-6 と 7 に、この計算式を用いた計算手順を示す。

ただし、 $A = 2775 \text{ ha}$

$m = 10$

$a = 0.04 \text{ ha}$

表 5-6, 7 より次の結果を得た。

$$\hat{V} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{V_i}{p_i} = 13141.91735 \Rightarrow 13140000 (\text{m}^3)$$

$$V_{ar}(\hat{V}) = \frac{1}{m(m-1)} \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{V_i}{p_i} \right)^2 - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \frac{V_i}{p_i} \right)^2 \right)$$

$$= 29382 \times 10^{12}$$

$$\sqrt{V_{ar}(\hat{V})} = 171410973 \Rightarrow 1714000 (\text{m}^3)$$

$$\text{誤差率 } e = \frac{t_{0.05,9} \sqrt{V_{ar}(\hat{V})}}{\hat{V}} \times 100 = \frac{(2.262)(1714000)}{(13140000)} \times 100 = 29.51 (\%)$$

表 5-6 第 2 次抽出プロット (SSU) の地上調査結果から第 1 次抽出プロット PSU の蓄積推定手順

PSU No	SSU No	n_i	SSU の地上調査値 (V_{ij}/a) m^3/ha	PSU 内での SSU の抽出 確率 (p_{ij})	($\frac{V_{ij}}{a \cdot p_{ij}}$)	$V_i/A = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{V_{ij}}{a \cdot p_{ij}}$	$\frac{1}{N} \frac{V_i}{A'}$ (m^3/ha)
1	3	1	207	0.1001	206793	206793	137862
2	11	1	620	0.1073	577819	577819	385213
5	4	2	350 706	0.1045 0.1220	334928 578689	456808	304539
6	12	2	918 550	0.1978 0.1944	464105 282922	378513	249009
7	12	1	404	0.0784	515306	515306	343537
8	12	1	673	0.1602	420100	420100	280067
9	1	5	772 457 1002 563 348	0.0791 0.0863 0.1547 0.0967 0.0530	975980 529548 647205 582213 656604	678410	452273
10	9a 9b 12a 12b	2	292 721 141 219	0.0873 0.0621	580183 289855	435019	290013
11	5a 5b 8a 8b	2	90 267 475 473	0.1059 0.1526	168555 310616	239586	159724
12	4	1	561	0.0630	890476	890476	593651

表5-7 第1次抽出プロットPSUの蓄積推定値からの蓄積量(\hat{V})と分散($V_{ar}(\hat{V})$)の計算手順

PSU No.	PSUの推定材積 (V_i/A)	PSUの抽出確率	$V_i/p_i:A$
1	137862	0.00547	25203291
2	385213	0.00789	48822940
5	304539	0.00640	47584219
6	249009	0.00854	29157963
7	343537	0.00392	87636990
8	280067	0.00532	52644173
9	452273	0.00763	59275623
10	290013	0.00883	32844054
11	159724	0.00572	27923776
12	593651	0.00950	62489579

$$\sum_{i=1}^m \frac{V_i}{p_i} \cdot \frac{1}{A} = 473582607$$

$$\begin{aligned}\hat{V} &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{V_i}{p_i} = \frac{1}{m} \cdot A \cdot \sum_{i=1}^m \frac{V_i}{p_i A} = \frac{1}{10} \cdot (2775) \cdot (473582607) \\ &= 1314191735 \text{ m}^3 \\ &= 13140000 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{ar}(\hat{V}) &= \frac{1}{m(m-1)} \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{V_i}{p_i} \right)^2 - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \frac{V_i}{p_i} \right)^2 \right) \\ &= \frac{A^2}{m(m-1)} \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{V_i}{A \cdot p_i} \right)^2 - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \frac{V_i}{A \cdot p_i} \right)^2 \right) \\ &= \frac{(2775)^2}{(10)(9)} (25862 \times 10^{10} - \frac{1}{10} (47358 \times 10^5)^2) \\ &= 29382 \times 10^{12}\end{aligned}$$

確率比例抽出法においては、補助変量と目的変量とが正比例しているかどうかにより推定の精度が影響される。

空中写真の判読材積 V_A と現地調査により得られた立木材積 V_G との関係をみると図5-4となり、ほぼ正比例関係がみとめられる。PSU毎に求めた蓄積量の指標であるウェイト合計とこゝで最終的に求めたPSUの推定材積との関係は、図5-5となり、正比例的関係がみられない。この点については今後の検討を要する課題である。

一方、対象地域の総蓄積量を森林調査簿から求めてみた(ただし、対象地に民有林が含まれるが、民有林の調査簿が手に入らなかったため、国有林の調査簿の結果を空中写真情報を加味して演繹した)ところ、 $V=913$ 万 m^3 となり、推定蓄積量 $\hat{V}=1314$ 万 m^3 は約44%の過大推定となった。これは、表5-5からも明らかなように現地調査値 V_G と森林調査簿記載値 V_B との関係が図5-6に示すように、 V_G が V_B に比べて過大となっていること、および、空中写真判読材積 V_A と V_B との関係も図5-7より明かなよう

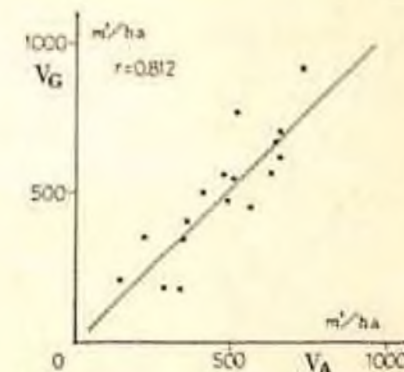


図5-4 判読材積と現地調査材積

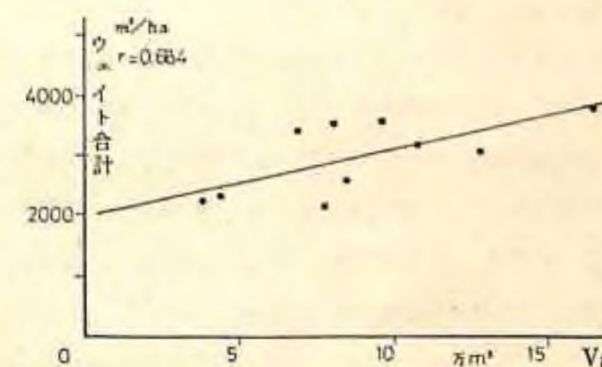


図5-5 PSU推定材積とウェイト合計

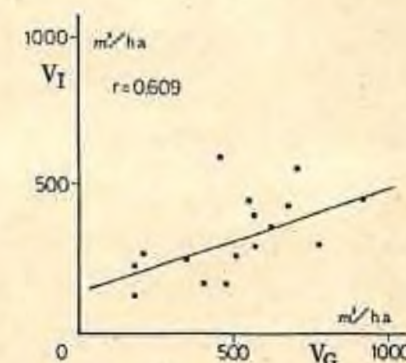


図5-6 現地調査材積と調査簿記載値

に V_A が V_B に比べ過大になっていることに原因しているものと推定される。

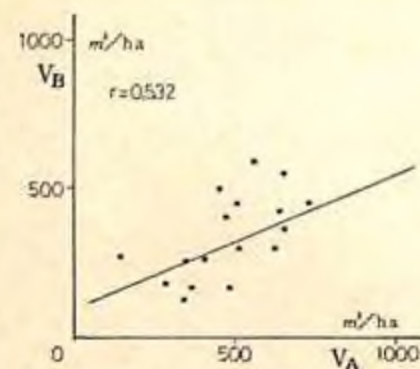


図 5-7 判読材積と調査簿記載値

IV ま と め

ランドサットデータを林業的に利用するための基礎的技術として、ランドサットデータの電磁的補正や地図座標変換、オーバーレイデータ作成等の前処理システムが完成し、5万分の1の地形図を基準とするデータベースの作成が可能となった。マルチテンポラル・ランドサットデータ利用により、森林型区分、土地利用区分が区分精度85%以上で行え得る技術が確立した。また、最尤法、最短距離法、線型判別関数法、相関法、正規化相関法、クラスティング手法、主成分分析法等の画像処理技術をシステム化した。国土数値情報のランドサットデータへのオーバーレイシステムが整備され、250mメッシュの標高データをキュービックコンボリューション手法により、50mメッシュのデータに変換し、地形解析を行うシステムの作成を行った。さらに、この地形情報を用いて、太陽条件を加えて、相対日射係数をメッシュ毎に求めるシステムを作成した。さらに、この相対日射係数を用いて、ランドサットデータから地形効果を除去する消影技術を開発した。この手法を適用することにより、山岳地帯での森林型区分精度を区分精度で10%、図化精度で15%向上させることができた。

ランドサットデータによる土地被覆区分、森林型区分結果から蓄積級区分が88.6%の精度で可能であった。また、ランドサットデータをデータベースとする多段（今回は2段）サンプリング手法を適用して、森林資源調査実験を行ったところ、ランドサットデータ上で設定される第1次抽出プロットの大きさは、50mの正方形画素で、900～1200個位の大きさが適切で、面積として、は、2万分の1の空中写真の1モデル分の大きさが適正であるとの結果を得た。対象面積4万haの森林に対して、10個のPSU、17個の第2次抽出プロットの地上調査（地上調査プロット面積計0.7ha）の結果から蓄積量を推定した結果、合計蓄積量131.4万 m^3 （誤差率29.5%）となり、森林調査簿合計91.3万 m^3 に比較して、44%の過大推定となった。

V おわりに

本試験研究において開発されたランドサットデータの前処理手法および画像解析手法は、基本的処理手法として、ランドサットデータ利用にあたって既に全般的な利用が計られている。多段サンプリング手法は、広域的資源調査に効率的に利用可能であることが明らかとなり、本研究成果は伐採材積量把握やバイオマス賦存量調査への適用のための基礎的技術として活用が期待されている。

本研究においては、リモートセンシング技術による調査手法の体系化、新技術の経済効率性の考察ならびに新技術の実用化等についての検討を行なうまでには至っていない、これらは今後の残された課題である。

関 連 業 績

- 1 中島 巖、大貫仁人：LANDSATデータによる陸域環境の計測、環境のモニタリングのためのリモートセンシングデータの処理に関する研究 P.27～39 産業研究所 1977
- 2 中島 巖、大貫仁人：LANDSATデータによる陸域環境の計測 P.22～37 産業研究所 1979
- 3 大貫仁人：LANDSAT、MSSデータを利用した森林調査法（Ⅲ）、第90日林論 1979
- 4 沢田治雄：LANDSAT、MSSデータを利用した森林伐採面積の把握（Ⅰ）、第90回日林論、1979
- 5 大貫仁人他：基礎と応用、林業の統計学、地球出版、1979
- 6 Itsuhito Ohnuki：Landat Data Processing Study for Forest Management, prepared for International Geographical Union: Commission on Geographical Data Sensing and Processing 1980
- 7 中島 巖：リモートセンシング技術の動向 — 農林業分野 — リモートセンシングセミナー資料集 P.37～44, 1980
- 8 大貫仁人：ランドサットデータの林業的利用 — 現状と将来 — , 林業技術6468 P.11～16, 1981
- 9 大貫仁人：リモートセンシングデータの森林情報への利用と問題点、写真測量とリモートセンシング 81 I P.31～35, 1981
- 10 大貫仁人：LANDSATデータの地形条件の差による電磁的歪の補正法とその効果、192回日林論、1981 P.147～148

- 1.1 大貫仁人：LANDSAT・MSSデータを利用した森林調査法（Ⅳ） — 蓄積量推定について — ， 92回日林論 1981 P.151～152
- 1.2 I.Nakajima, I.Ohnaki：Computer-aided Remote Sensing Application for Forest planning, XVII IUFRO World Congress Div.6. P.195～210, 1982