

ISSN 0386-5878

土研資料第1832号

地下水位把握のためのランドサットデータ解析
報 告 書

昭和 57 年 3 月

建設省土木研究所
企画部システム課

はじめに

最近、リモートセンシングによるランドサットデータ、航空機 MSS (Multi Spectram Scanner) データを利用した環境調査、土地利用状況調査、各種地図作成への応用をはじめ、海底地形、海面温度、表層流調査等の海洋分野、農業災害、被害の診断、収穫量の予測調査等の農業分野および林業、地質、鉱物資源探査等幅広い分野で活発に行なわれている。

建設省土木研究所システム課においてもランドサット MSS データを利用して霞ヶ浦の水質調査等の解析を進めているが、本報告書は水資源開発公団の委託でランドサットデータから、長良川河口付近の高須輪中内の土壌水分、地下水位環境の把握の可能性を調査した結果をとりまとめたものである。

昭和 57 年 3 月

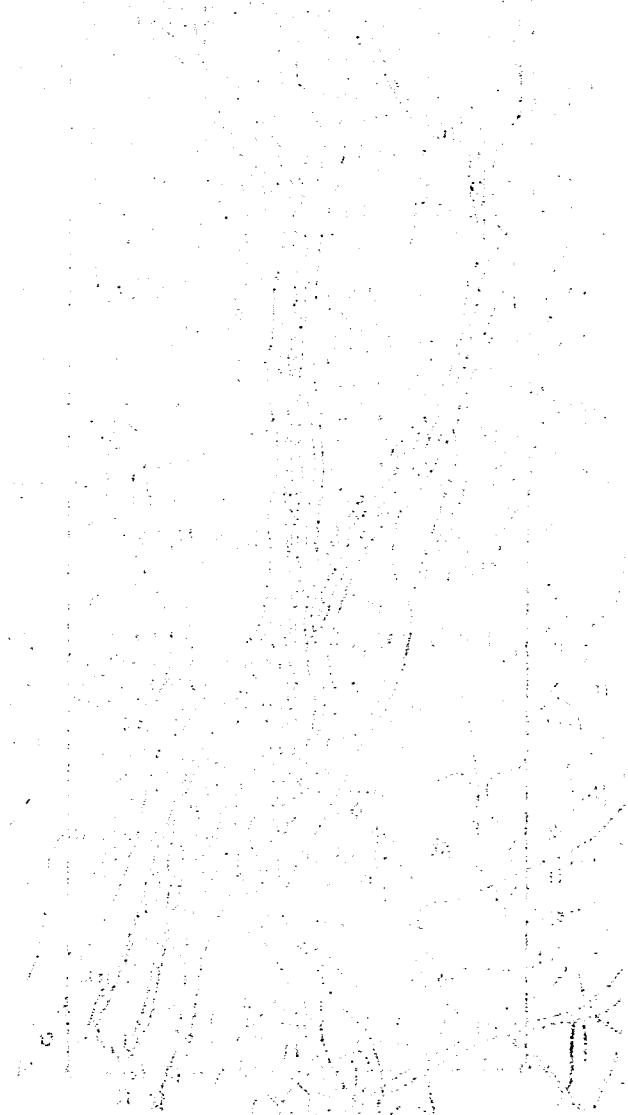
企画部システム課	課長	池村雅司
〃	自動化係長	野口正
〃		中沢保雄
河川部水文研究室	研究員	寺川陽

1. 調査の目的	1
2. 調査の方法	2
1). 調査手順	2
2). 対象地域	2
3). 対象データ	3
4). 対象地域の切出し	3
5). 回帰モデルの対象領域の抽出	3
3. 回帰モデルの作成	5
1). 地下水位観測地点に対応するランドサットデータの抽出	5
2). 単回帰分析	6
3). データの削除	6
4). 相関係数の出力結果	6
5). 地下水位レベル図の作成方法	26
4. 回帰モデルの検討	27
1). 相関係数および回帰係数	27
1-1) 相関係数の有意性の検定	27
1-2) 回帰直線の信頼区間	29
2). 回帰モデルの物理的考察	31
2-1) ランドサットMSS波長域の特徴	31
2-2) 回帰モデルの意味付け	32
3). 地下水位レベル図の結果と考察	34
4). 観測井に対応するランドサットデータ抽出の領域	34
5). 普遍回帰モデルの検討	35
6). 誤差要因	36
7). 土壌水分を取り入れた地下水位把握モデル	37
5. 地下水位と土壌水分	39
1). 毛管作用と土中毛管水の上昇高	39
2). サクション	39
3). 水分特性曲線	40
4). 地下水位と地表部土壌水分	40
5). まとめ	41
6. まとめと今後の問題点	42

1. 調査の目的

長良川河口堰建設による上流側水位の上昇は輪中という特殊な地形条件のもとで漏水量の増加、地下水位の上昇、土壌の湿潤化等の影響を与え、その対策が必要となっている。建設費全体に対する対策工費もかなりの割合となっており、土壌水分、地下水位等の環境把握の必要性が高まっている。現在、観測井により、地下水位の定期観測を行い、地下水の挙動把握に努めているが、観測井によるデータはあくまで一次元のデータであり、対象地域全体の面的な把握は観測井設置の限界もあって不可能である。

本調査は約 80 m × 80 m メッシュの分解能を持つ LANDSAT MSS (Multi-Spectrum Scanner) データ更には高分解能の航空機 MSS データにより輪中内の土壌水分、地下水環境を観測し、河口堰建設による環境の変化を 2 次元的に把握しようとするものである。



000	01	02	03
04	05	06	07
08	09	10	11
12	13	14	15

図1-1 調査区域の位置図

（単位：km）

図1-2 調査区域の位置図

2. 調査の方法

1). 調査手順

河口堰建設に伴う土壌水分、地下水環境の変化を把握するために先ず現在取得されている LAN - DSAT データによる輪中内の現環境把握の可能性の検討の必要がある。LANDSAT データにより現環境を把握することができれば、河口堰建設後における環境変化を把握でき、また LANDSAT MSS よりも高分解能、多バンドの航空機 MSS データによる高精度土壌水分、地下水位環境観測が可能となる。

前年度は、ランドサットデータの 1979 - 5 - 23, 1979 - 9 - 8, 1979 - 10 - 23 のシーンを用いて、グランドトルースデータのある輪中内の地下水位との相関を求め回帰モデルを作成した。これらのシーンは 5 月～10 月の期間で、植生から地下水位を把握するモデルであった。

今年度は 1979 - 11 - 1, 1980 - 2 - 8, 1980 - 3 - 15, 1980 - 9 - 2, 1980 - 12 - 1, 1981 - 3 - 19 の 6 シーンを処理し、主に冬の時期における地下水位（土壌水分）観測の可能性について検討を行った。

2). 対象地域

調査の対象地域は前年度処理した長良川 30 km 以南とし、

N - 35°	17. 588'
N - 35°	1. 247'
E - 136°	36. 264'
E - 136°	44. 703'

に囲まれる 12.75 km × 30.1 km を対象地域とした。

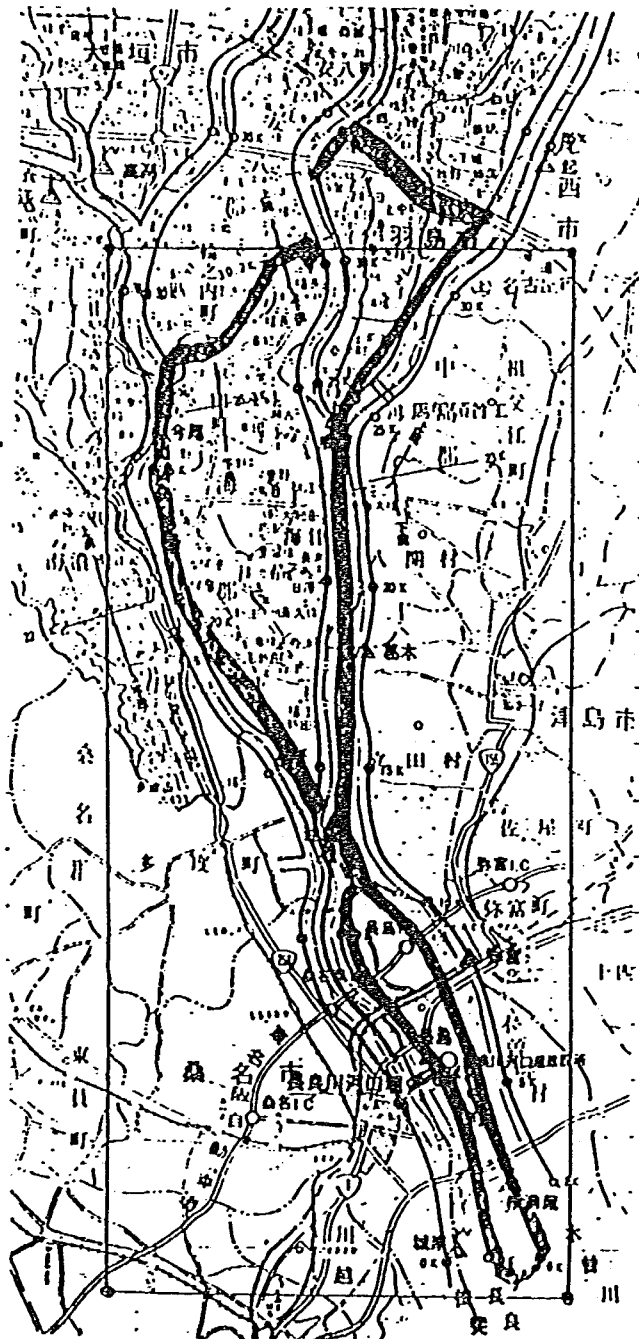


図 2.1 対象地域

3). 対象データ

今回の地下水解析に使用したランドサットデータは軌道番号 (PATH NO) 117- 画像番号 (ROW NO) 36 (伊勢) のシーンである。使用データ一覧を表 2.1 に示す。

表 2.1 ランドサット用データ一覧

項番	撮 影 年 月	撮影衛星	リ サ ン プ リ ン グ	投影法	ゲイン	補 正
1	1979-11- 1	L-2	キュービッコンボリユーション	UTM	LOW	バルク
2	80- 2- 8	L-3	"	"	"	"
3	80- 3-15	L-3	"	"	"	"
4	80- 9- 2	L-2	"	"	"	"
5	80-12- 1	L-2	"	"	"	"
6	81- 3-19	L-2	"	"	"	"

データ形状

- i) CCT (1600 BPI 1シーン×2巻)
- ii) ナチュラルカラー合成写真 240 mm
- iii) 白黒フィルム 70 mm (各4バンド)

4). 対象地域の切出し

前年度の対象地域の切出しは 79-9-8 のシーンを基準にして、他の 2 シーンの対象地域 (1275 km×30.1 km) の切出しを行っている。今年度処理した 6 シーンについても 79-9-8 を基準として、座標対応を行って前年度と今年度分の対象地域の整合をとるようにした。表 2.2 に 79-9-8 を基準とした 6 シーンの座標対応表を示す。

5). 回帰モデルの対象領域の抽出

回帰モデルの対象領域を抽出するためには、高い精度の土地利用分類図が必要である。そのためには、複数シーズンのデータの重ね合わせが有効となる。

地上物体は季節によりその反射特性を変えるものが多く、例えば水田は冬期は土壌が露出し、春は冠水し、夏秋には密集した植生を示す。このため冬期には畑地と同様な反射特性でも春には全く異なる反射特性を示すであろう。

このような考えから、2 シーズンの重ね合わせによる土地利用分類を試行し、水田について最も現状の土地利用に一致している 79-5-23 と 79-9-8 のデータによる分類の水田を回帰モデルの対象領域として抽出した。

今年度処理した 6 シーンについても、79-5-23 と 79-9-8 の重ね合わせによる土地利用分類を再処理し、その水田部と処理するシーズンの重ね合わせを行うことにより、回帰モデルの対象領域である水田部分の抽出を行った。

表 2.2 1979-9-8 を基準とした座標対応表

座標No.	1979-9-8		1979-11-1		1980-3-15		1980-9-2		1981-3-19		1980-12-1		1980-2-8	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	1248	547	1190	556	1498	596	1482	563	1339	568	1238	564	1583	553
2	1263	531	1206	540	1513	580	1497	546	1355	552	1253	548	1598	537
3	1180	450	1123	458	1429	499	1413	466	1272	473	1170	468	1516	456
4	1187	475	1129	483	1436	524	1411	491	1278	497	1175	492	1523	481
5	1156	354	1098	362	1405	402	1390	369	1248	376	1146	371	1492	359
6	1063	274	1005	282	1312	322	1295	290	1154	299	1052	291	1400	278
7	1022	191	964	198	1271	238	1255	206	1113	216	1011	208	1359	194
8	993	138	935	145	1240	183	1227	155	1086	165	983	156	1331	144
9	952	107	893	114	1200	153	1185	122	1042	134	941	125	1287	113
10	1068	248	1010	256	1316	295	1300	264	1159	274	1058	265	1404	252

3. 回帰モデルの作成

ランドサットMSSの4種類のバンドのデータを説明変量、地下水位を目的変量として回帰分析を行ったが、ランドサットデータが表面反射量をとらえたものであるから目的変量は地表（地盤）より地下水位面までの距離とした。また、重回帰モデルは4種類のバンドの値を変数として推定するためにあまり意味の無いファクターが混入する可能性があり、前年度結果の重回帰と単回帰による地下水位レベル図を見ても重回帰モデルによるものは特徴的なパターンのコントラストが低い傾向があり、単回帰モデルの方が特徴パターンの抽出には良いと思われるため、今年度の処理では単相関のみの回帰モデルを使用した。

1). 地下水位観測地点に対応するランドサットデータの抽出

目的変量とする地表から地下水位面までの距離はランドサット飛来日の観測井データとした。説明変量のランドサットMSSデータは観測井の位置に対応するランドサットの7バンドの座標位置を標定し、各バンドごとに、その点のデータを中心とする3×3の9個のデータの平均値とした。各観測点のランドサット座標位置を表3.1に示す。地下水位観測井データは表3.2.1、表3.2.2に示す。また観測井位置図は図3.1に示す。実際にランドサットデータを抽出する方法は、ディスク上に登録されている各データを各バンド毎にリストニングし、手作業によって対応するデータを読み取って平均して求めている。

表 3. 1 観測井位置

項 番	観 測 地 点	座 標	
		X	Y
1	Na - 12	99	55
2	Na - 11	109	55
3	Na - 1	112	109
4	Na - 2	71	105
5	Na - 3	56	102
6	Na - 4	117	176
7	Na - 5	103	174
8	Na - 6	85	175

項 番	観 測 地 点	座 標	
		X	Y
9	Na - 7	70	174
10	Na - 8	57	176
11	日 原	115	190
12	Na - 9	95	229
13	Na - 10	85	231
14	金廻り - 1	115	247
15	金廻り - 2	113	247
16	油 島	111	258

注) ランドサットMSSデータと対象とした地図との整合性のため座標変換を行い、それに基づく観測井位置である。

注) 単位はピクセルである。

2). 単回帰分析

一般に変量 y と変量 x の相関係数 r は標本数 n 個とすれば

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

また $y = ax + b$ の回帰係数は

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum y_i}{n} - a \cdot \frac{\sum x_i}{n}$$

ランドサットMSS データは4種類のバンドがあるが各単バンド及び複数バンドの組合せを x を変量として、99種の組合せについて相関を求め回帰係数を算出している。さらに x, y についてそれぞれ片対数及び対数を取り計算しているので合計 396 種の相関を調べている。

3). データの削除

回帰分析においては本来標本の削除は行うべきではないが、観測日の欠測および、観測されているがその場所が工事中のものおよび地盤から地下水位面までの深さでマイナス(-)符号で被圧状態を表しているものについては削除した。また、観測井金廻り-1については

- i) 長良川に隣接して長良川からの漏水等により地下水圧が高い可能性がある。
- ii) 集落の近くに位置している。
- iii) 地下水位が他のデータより特に高い。

等を考慮して削除した。

4). 相関係数の出力結果

各シーンの相関係数出力結果の一部を表 3.3～表 3.8 に示し、散布図及び回帰直線を図 3.2.1～図 3.2.3 まで示す。

表 3.2.1 地下水観測井データ

観測日 観測地点	地盤高 TP	79年11月1日		80年3月15日		80年9月2日		81年3月19日	
		当日平均 地下水位	地盤から 地下水面 までの深さ	当日平均 地下水位	地盤から 地下水面 までの深さ	当日平均 地下水位	地盤から 地下水面 までの深さ	当日平均 地下水位	地盤から 地下水面 までの深さ
		TP(m)	(m)	TP(m)	(m)	TP(m)	(m)	TP(m)	(m)
北より									
Na-12	1.83	1.58	0.25	1.26	0.57	1.74	0.09	1.17	0.66
Na-11	2.25	1.81	0.44	1.68	0.57	2.16	0.09	1.48	0.77
Na-1	1.13	欠		0.66	0.47	0.92	0.21	1.24	-0.11
Na-2	0.30	-0.01	0.31	0.07	0.23	0.17	0.13	-0.02	0.32
Na-3	0.09	-0.11	0.20	-0.21	0.30	-0.04	0.13	-0.14	0.23
Na-4	-0.12	-0.22	0.10	-0.16	0.04	0.00	-0.12	-0.20	0.08
Na-5	-0.36	-0.69	0.33	-0.55	0.19	-0.46	0.10	-0.65	0.29
Na-6	-0.42	-0.71	0.29	-0.66	0.24	-0.47	0.05	-0.68	0.26
Na-7	-0.54	-0.90	0.36	-0.71	0.17	-0.65	0.11	-0.87	0.33
Na-8	-0.56	-0.69	0.13	-0.76	0.20	-0.54	0.02	-0.68	0.12
日原	0.55	-0.35	0.40	欠		欠		-0.45	0.50
Na-9	-0.47	-0.79	0.32	-0.72	0.25	-0.59	0.12	-0.83	0.36
Na-10	-0.44	-0.93	0.49	-0.78	0.34	-0.83	0.39	-0.79	0.35
金廻-1	-0.65	-0.24	-0.41	-0.45	-0.20	-0.13	0.52	-0.77	0.12
金廻-2	-0.47	-0.35	0.12	-0.44	0.03	欠		-0.82	0.35
(ウエルポイント工事中)									
油島	-0.30	-0.11	-0.19	-0.13	-0.17	0.06	-0.36	-0.36	0.06
(桑原)									
A		2.05		2.18		2.48			
B		3.49		3.48		3.78			
C		欠		1.57		2.05			
E		1.33		1.33		1.96			
F		1.32		1.18		1.37			

*地盤から地下水面までの深さで、マイナス符号は被圧状態を表している。

表 3.2.2. 地下水観測井データ

観測日 観測地点	地 高 TP	80年2月8日		80年12月1日					
		当 日 均 地下水位	地盤から 地下水面 までの深さ	当 日 均 地下水位	地盤から 地下水面 までの深さ	当 日 均 地下水位	地盤から 地下水面 までの深さ	当 日 均 地下水位	地盤から 地下水面 までの深さ
		TP (m)	(m)	TP (m)	(m)	TP (m)	(m)	TP (m)	(m)
北より									
Na-12	1.83	1.54	0.71	1.34	0.49				
Na-11	2.25	1.28	0.55	1.69	0.56				
Na-1	1.13	0.51	0.62	0.66	0.47				
Na-2	0.30	-0.03	0.33	0.03	0.27				
Na-3	0.09	-0.19	0.28	-0.15	0.24				
Na-4	-0.12	-0.29	0.07	-0.17	-0.05				
Na-5	-0.36	-0.72	0.36	-0.52	0.16				
Na-6	-0.42	-0.74	0.32	-0.59	0.17				
Na-7	-0.54	-0.82	0.28	-0.73	0.19				
Na-8	-0.56	-0.81	0.25	-0.76	0.22				
日 原	0.05	-0.45	0.50	-0.26	0.31				
Na-9	-0.47	-0.99	0.52	-0.61	0.14				
Na-10	-0.44	-0.92	0.48	-0.72	0.28				
金廻-1	-0.65	-0.42	-23	欠	欠				
-2	-0.47	欠	欠	-0.27	-0.20				
油 島	-0.30			-0.05	-0.35				
(桑 原) A									
B									
C									
E									
F									

*地盤から地下水面までの深さで、マイナス符号は被圧状態を表している。

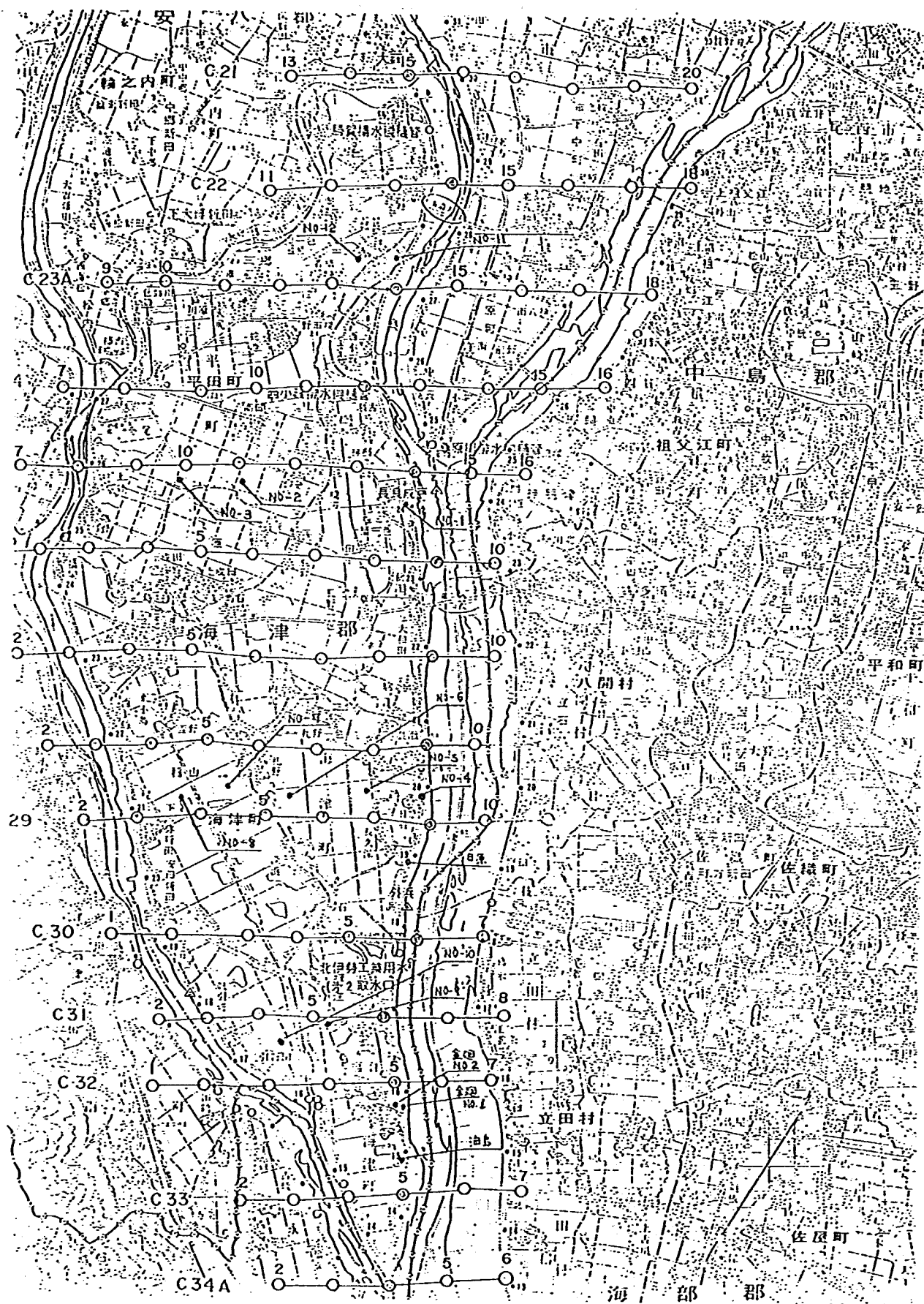


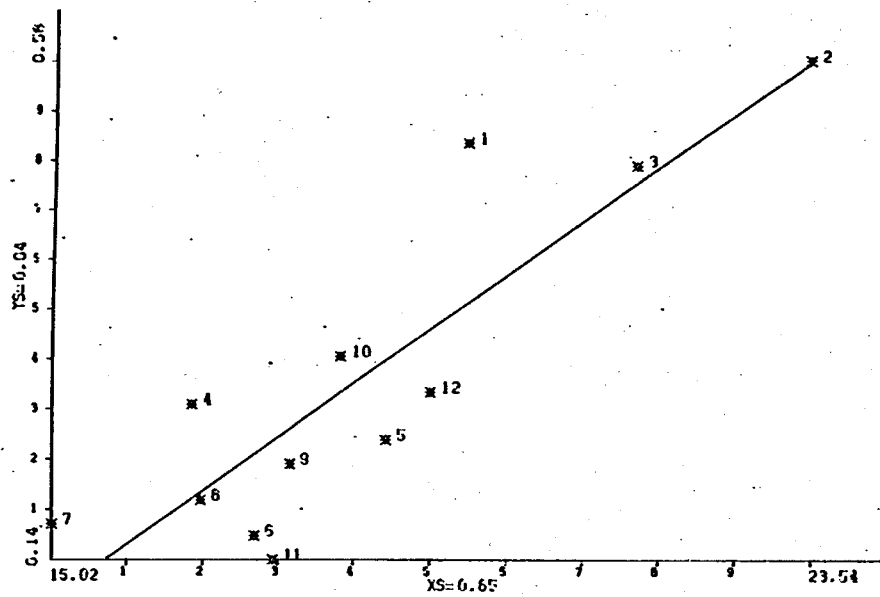
図-3.1 観測井位置図

NAGARA GAWA 1980-12- 1

CASE 90

GRO-W

X5×X7/X4



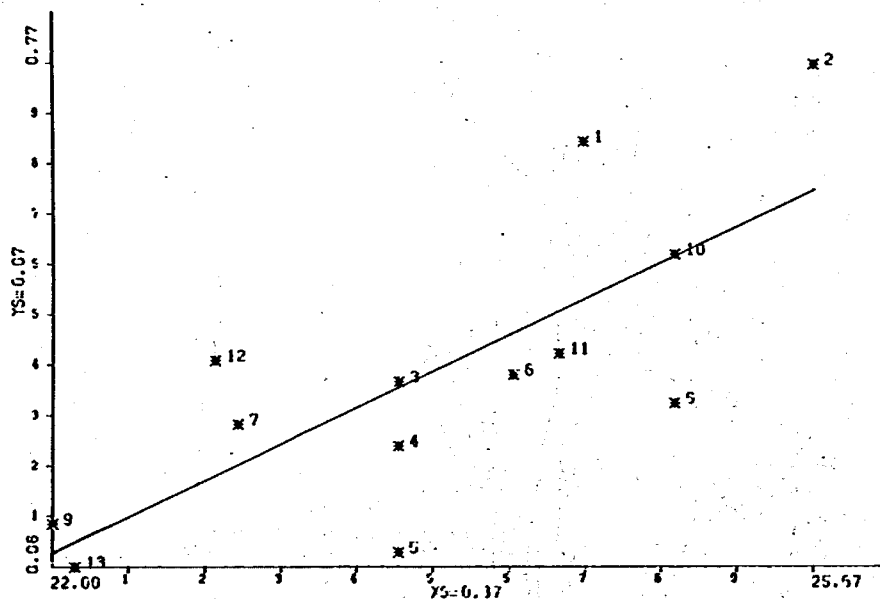
CORRELATION C 0.871008
REGRESSION C A= 0.052799
B= -0.685192

NAGARA GAWA 1981- 3-19

CASE 1

GRO-W

X4



CORRELATION C 0.757138
REGRESSION C A= 0.139514
B= -2.990359

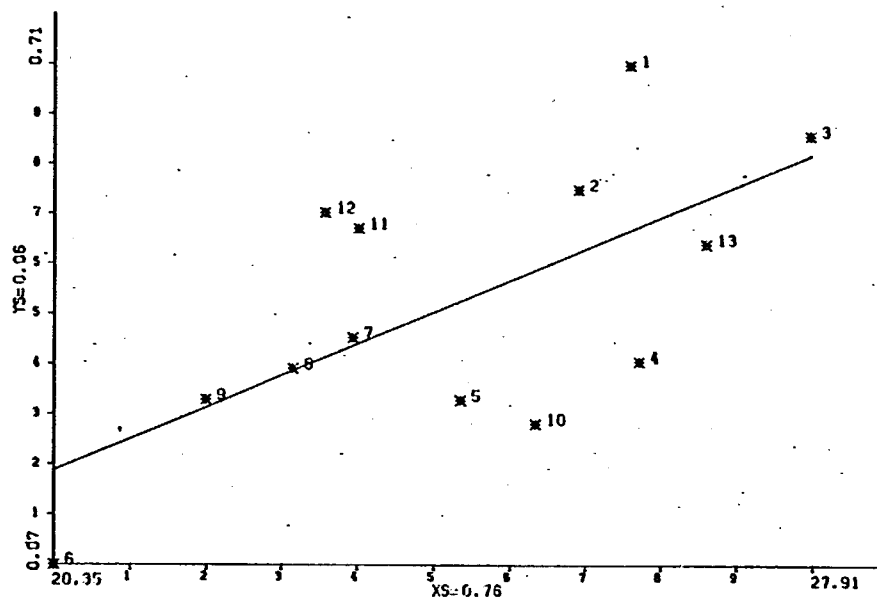
図 3.2.1 散布図及び回帰直線

NAGARA GAWA 1980- 2- 8

CASE 84

GRO-W

X4×X6/X5



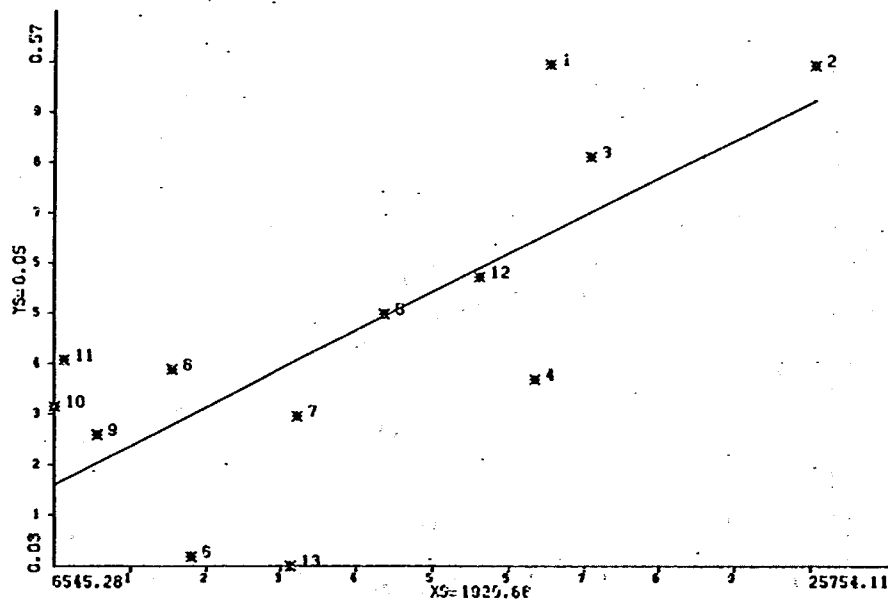
CORRELATION C 0.657831
REGRESSION C A= 0.053473
B= -0.898019

NAGARA GAWA 1980- 3-15

CASE 45

GRO-W

X4×X6×X7



CORRELATION C 0.740824
REGRESSION C A= 0.000022
B= -0.024858

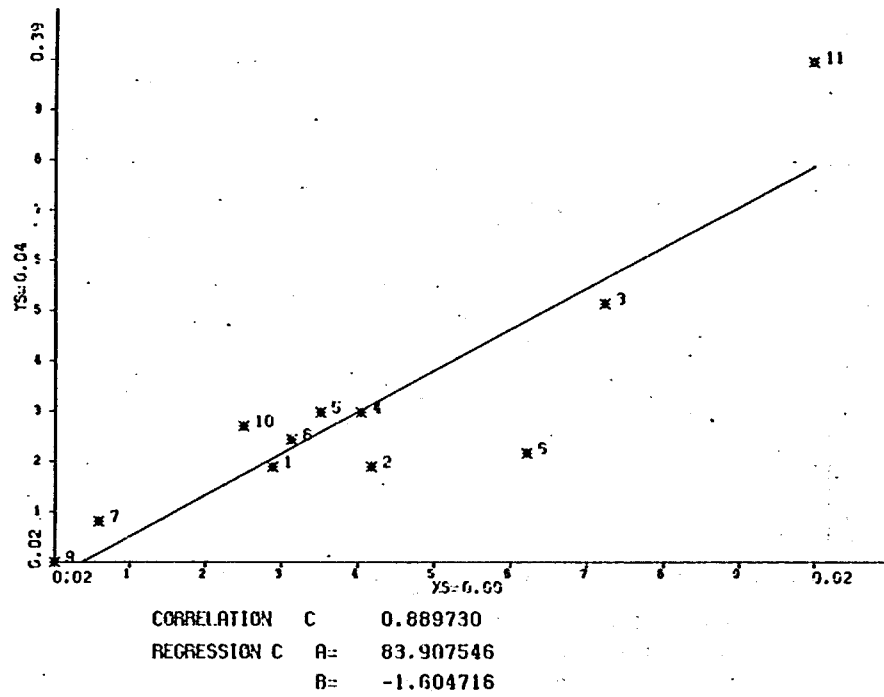
图 3.2.2

NAGARA GAWA 1980-9-2

CASE 8

GRO-W

1/X7

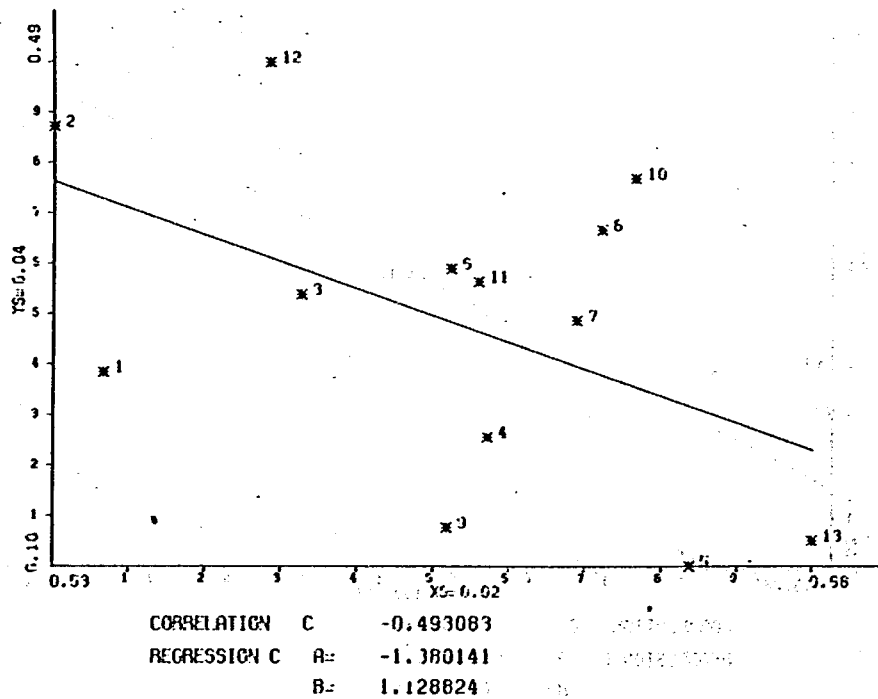


NAGARA GAWA 1979-11-1

CASE 28

GRO-W

X4/X6



3.2.3

表 3.3 相関係数

***** INPUT INFORMATION *****

NAGARA GAWA 1980- 9- 2

OBJECT VARIABLES NAME

1 GRO-W

NO	NAME	X4	X5	X6	X7	OBJECT VARIABLES
1	NO-12	18.56	17.56	46.56	49.33	1 0.090
2	NO-11	22.00	19.67	56.44	48.22	1 0.090
3	NO- 1	16.78	13.78	43.44	45.77	1 0.210
4	NO- 2	16.44	14.00	47.33	48.33	1 0.130
5	NO-3	17.11	19.67	45.00	46.78	1 0.130
6	NO- 5	18.22	15.22	44.55	46.56	1 0.100
7	NO- 6	16.22	15.33	49.89	51.44	1 0.050
8	NO- 7	20.22	18.33	53.00	49.11	1 0.110
9	NO- 8	18.55	15.33	46.22	52.00	1 0.020
10	NO- 9	18.78	19.11	47.67	49.67	1 0.120
11	NO-10	18.89	16.56	43.67	43.78	1 0.390

4	GRO-W	X7	-0.8725350	-0.0360104	1.8757401	** 4
8	GRO-W	1/X7	0.8897301	83.9075470	-1.6047163	** 8
103	GRO-W	LOG X7	-0.8758049	-1.7238846	6.8186865	** 103
202	LOG GRO-W	X7	-0.8827602	-0.2782041	11.2130365	** 202
206	LOG GRO-W	1/X7	0.8726399	628.455811	-15.2665386	** 206
301	LOG GRO-W	LOG X7	-0.8730190	-13.1219072	48.6392365	** 301
305	LOG GRO-W	LOG 1/X7	0.8730190	13.1219072	48.6392365	** 305
346	LOG GRO-W	LOG X4+X7-X5	-0.8708616	-11.7430601	43.7023621	** 346

表 3.4.1 相関係数

***** INPUT INFORMATION *****

NAGARA GAWA 1979-11- 1

OBJECT VARIABLES ARE

1 GRO-W

NO.	NAME	X4	X5	X6	X7	OBJECT VARIABLES
1	NO-12	19.56	22.78	36.22	32.00	1 0.250
2	NO-11	17.67	17.33	33.33	31.22	1 0.440
3	NO- 2	19.44	25.00	33.56	28.89	1 0.310
4	NO- 3	19.78	26.22	32.11	27.00	1 0.200
5	NO- 4	18.22	20.78	27.78	23.67	1 0.100
6	NO- 5	18.67	24.89	30.67	25.56	1 0.330
7	NO- 6	19.22	24.78	30.33	26.22	1 0.290
8	NO- 7	17.67	21.44	27.67	22.33	1 0.360
9	NO- 8	18.78	25.00	30.89	26.00	1 0.130
10	NIHARA	17.78	21.67	27.56	21.67	1 0.400
11	NO- 9	18.56	23.44	30.22	22.56	1 0.320
12	NO-10	17.44	22.22	30.44	26.33	1 0.490
13	KANA-2	18.22	21.22	26.78	19.89	1 0.120

5	GRO-W	1/X4	0.4854301	26.2337494	-1.1296911	** 5
28	GRO-W	X4/X6	-0.4930828	-1.3801413	1.1288242	** 28
33	GRO-W	X6/X4	0.4800503	0.4794016	-0.5028560	** 33
80	GRO-W	X7/X4/X6	0.5089906	18.5873718	-0.5510969	** 80
82	GRO-W	X4X5/X6	-0.4723389	-0.0324518	0.7396218	** 82
85	GRO-W	X4X6/X7	-0.4912242	-0.0379337	1.1324587	** 85
95	GRO-W	(X4-X6)/X6	-0.4930629	-1.3799334	-0.2512340	** 95
100	GRO-W	LOG X4	-0.4747541	-1.3781891	4.3107014	** 100
104	GRO-W	LOG 1/X4	0.4747541	1.3781891	4.3107014	** 104

表 3.4.2

127	GR0-W	LOG X4/X6	-0.4867653	-0.8159049	-0.1183518	** 127
132	GR0-W	LOG X6/X4	0.4867797	0.8159491	-0.1183736	** 132
184	GR0-W	LOG X4X6/X7	-0.4996215	-0.8403949	2.8935709	** 184
226	LOG GR0-W	X4/X6	-0.5110398	-5.9629421	2.2812004	** 226
231	LOG GR0-W	X6/X4	0.4922086	2.0492201	-4.7321653	** 231
293	LOG GR0-W	(X4-X6)/X6	-0.5109294	-5.9613867	-3.6811275	** 293
325	LOG GR0-W	LOG X4/X6	-0.5017828	-3.5063467	-3.0979090	** 325
330	LOG GR0-W	LOG X6/X4	0.5018039	3.5065727	-3.0980206	** 330
392	LOG GR0-W	LOG (X4-X6)/X6 -3.949	-0.5007405	-3.1449528	-3.2475777	** 392

表 3.5.1 相関係数

INPUT INFORMATION

NAGARA GAWA 1980- 2- 8

OBJECT VARIABLES NAME

1 GRO-W

NUMB	NAME	X4	X5	X6	X7	OBJECT VARIABLES	
1	NO-12	21.00	21.00	26.11	21.89	1	0.710
2	NO-11	22.33	21.44	24.56	20.22	1	0.550
3	NO- 1	21.78	21.33	27.33	24.11	1	0.620
4	NO- 2	21.33	21.00	25.78	23.11	1	0.330
5	NO- 3	22.44	20.44	22.22	17.67	1	0.280
6	NO- 4	20.00	19.00	19.33	16.22	1	0.070
7	NO- 5	20.78	20.78	23.33	20.33	1	0.360
8	NO- 6	20.89	21.44	23.33	19.33	1	0.320
9	NO- 7	20.11	19.33	21.00	17.11	1	0.280
10	NO- 8	22.00	21.78	24.89	20.78	1	0.250
11	HIHAR	21.89	21.00	22.44	18.44	1	0.500
12	NO- 9	21.56	20.78	22.22	18.33	1	0.520
13	NO-10	21.00	21.11	27.00	23.00	1	0.480

7	GRO-W	1/X6	-0.6660126	-26.5493011	1.5311966	##	7
10	GRO-W	X4+X6	0.6669345	0.0422052	-1.4992037	##	10
12	GRO-W	X5+X6	0.6546421	0.0377118	-1.2770481	##	12
22	GRO-W	X4X6	0.6618603	0.0019676	-0.5945292	##	22
24	GRO-W	X5X6	0.6480629	0.0017776	-0.4774859	##	24
39	GRO-W	X4+X5+X6	0.6574387	0.0331934	-1.7830286	##	39
41	GRO-W	X4+X6+X7	0.6362796	0.0217772	-1.0138016	##	41
43	GRO-W	X4X5X6	0.6465998	0.0000736	-0.3753509	##	43
48	GRO-W	X4+X6-X5	0.6593865	0.0539572	-0.9071023	##	48

表 3.5.2

59	GRD-W	$X4+X5+X6+X7$	0.6402303	0.0194511	-1.2668419	** 59
73	GRD-W	$X5/X4/X6$	-0.6698776	-31.2671509	1.6977196	** 73
84	GRD-W	$X4 \times X6/X5$	0.6578313	0.0534727	-0.8980196	** 84
102	GRD-W	LOG $X6$	0.6586775	1.1310329	-3.1747465	** 102
106	GRD-W	LOG $1/X6$	-0.6586775	-1.1310329	-3.1747465	** 106
109	GRD-W	LOG $X4+X6$	0.6693349	1.8656416	-6.6983776	** 109
111	GRD-W	LOG $X5+X6$	0.6579026	1.6472826	-5.8473654	** 111
121	GRD-W	LOG $X4 \times X6$	0.6686585	0.9639544	-5.5944700	** 121
123	GRD-W	LOG $X5 \times X6$	0.6582115	0.8546789	-4.8933783	** 123
138	GRD-W	LOG $X4+X5+X6$	0.6575750	2.1187334	-8.4662752	** 138
142	GRD-W	LOG $X4 \times X5 \times X6$	0.6555985	0.7317550	-6.3696108	** 142
147	GRD-W	LOG $X4+X6-X5$	0.6640758	1.3023329	-3.7462225	** 147
172	GRD-W	LOG $X5/X4/X6$	-0.6629990	-1.2940636	-3.7225056	** 172
183	GRD-W	LOG $X4 \times X6/X5$	0.6631723	1.2949066	-3.7251940	** 183
200	LOG GRD-W	$X5$	0.6616380	0.4870802	-11.1601248	** 200
201	LOG GRD-W	$X6$	0.6808757	0.1686987	-5.0445814	** 201
204	LOG GRD-W	$1/X5$	-0.6799231	-205.721771	8.8760548	** 204
205	LOG GRD-W	$1/X6$	-0.7236283	-97.3981323	3.1023903	** 205
208	LOG GRD-W	$X4+X6$	0.7201899	0.1538876	-7.9722004	** 208

表 3.5.3

209	LOG GRO-W	X4+X7	0.6579924	0.1406404	-6.8442936	** 209
210	LOG GRO-W	X5+X6	0.7095315	0.1380140	-7.1849556	** 210
220	LOG GRO-W	X4X6	0.7124413	0.0071515	-4.6620350	** 220
221	LOG GRO-W	X4X7	0.6441652	0.0066090	-3.8541279	** 221
222	LOG GRO-W	X5X6	0.6994722	0.0064784	-4.2453146	** 222
237	LOG GRO-W	X4+X5+X6	0.7280715	0.1241275	-9.2113600	** 237
238	LOG GRO-W	X4+X5+X7	0.6842968	0.1177120	-8.3447056	** 238
239	LOG GRO-W	X4+X6+X7	0.6733683	0.0778224	-6.0992966	** 239
240	LOG GRO-W	X5+X6+X7	0.6647462	0.0723990	-5.7086592	** 240
241	LOG GRO-W	X4X5X6	0.7107135	0.0002731	-3.9253092	** 241
242	LOG GRO-W	X4X5X7	0.6619700	0.0002707	-3.4446745	** 242
246	LOG GRO-W	X4+X6-X5	0.6827289	0.1886408	-5.6163502	** 246
257	LOG GRO-W	X4+X5+X6+X7	0.6901101	0.0707968	-7.1141911	** 257
268	LOG GRO-W	X4/X5/X6	-0.6877699	-75.6372223	2.2657976	** 268
271	LOG GRO-W	X5/X4/X6	-0.7185026	-113.237061	3.6525812	** 271
282	LOG GRO-W	X4X6/X5	0.6818824	0.1871571	-5.5897198	** 282
299	LOG GRO-W	LOG X5	0.6646268	9.8730469	-30.9859161	** 299
300	LOG GRO-W	LOG X6	0.7015271	4.0676928	-13.9034729	** 300

表 3.5.4

303	LOG GRO-W	LOG 1/X5	-0.6646268	-9.8730469	-30.9859161	** 303
304	LOG GRO-W	LOG 1/X6	-0.7015271	-4.0676928	-13.9034729	** 304
307	LOG GRO-W	LOG X4+X6	0.7308296	6.8798265	-27.2238922	** 307
308	LOG GRO-W	LOG X4+X7	0.6682213	5.8037500	-22.6184692	** 308
309	LOG GRO-W	LOG X5+X6	0.7215813	6.1013660	-24.1872864	** 309
319	LOG GRO-W	LOG X4X6	0.7353273	3.5798903	-23.3097229	** 319
320	LOG GRO-W	LOG X4X7	0.6742828	2.8832893	-18.4704437	** 320
321	LOG GRO-W	LOG X5X6	0.7269225	3.1874142	-20.7887878	** 321
336	LOG GRO-W	LOG X4+X5+X6	0.7340816	7.9889174	-34.4793091	** 336
337	LOG GRO-W	LOG X4+X5+X7	0.6879328	7.1705904	-30.6296997	** 337
338	LOG GRO-W	LOG X4+X6+X7	0.6878778	5.0895586	-22.2718201	** 338
339	LOG GRO-W	LOG X5+X6+X7	0.6806082	4.6950617	-20.5859833	** 339
340	LOG GRO-W	LOG X4X5X6	0.7383143	2.7826385	-26.7909546	** 340
341	LOG GRO-W	LOG X4X5X7	0.6964778	2.3941698	-22.7762146	** 341
342	LOG GRO-W	LOG X4X6X7	0.6899087	1.7074337	-16.7616577	** 342
345	LOG GRO-W	LOG X4+X6-X5	0.6991649	4.6302357	-15.7881174	** 345
356	LOG GRO-W	LOG X4+X5+X6+X7	0.7007421	6.0552607	-27.9849091	** 356
370	LOG GRO-W	LOG X5/X4/X6	-0.6987743	-4.6057911	-15.7196007	** 370
381	LOG GRO-W	LOG X4X6/X5	0.6990416	4.6093502	-15.7309542	** 381

表 3.6.1 相関係数

INPUT INFORMATION:

NAGARA GAWA 1980- 3-15

OBJECT VARIABLES NAME

1 GRO-W

NUMB	NAME	X4	X5	X6	X7	OBJECT VARIABLES
1	NO-12	23.67	21.78	29.56	27.22	1 0.570
2	NO-11	26.11	28.33	33.00	29.89	1 0.570
3	NO- 1	25.56	23.44	30.78	25.56	1 0.470
4	NO- 2	20.89	21.44	30.33	29.56	1 0.230
5	NO- 3	21.67	19.89	27.44	25.11	1 0.300
6	NO- 4	21.44	19.89	23.44	19.89	1 0.040
7	NO- 5	22.89	21.89	24.89	22.33	1 0.190
8	NO- 6	21.56	19.00	22.56	19.56	1 0.240
9	NO- 7	19.33	18.44	21.00	18.78	1 0.170
10	NO- 8	19.11	15.00	19.89	17.22	1 0.200
11	NO- 9	20.44	18.33	20.33	16.33	1 0.250
12	NO-10	22.78	21.56	29.11	26.11	1 0.340
13	KA- 2	24.00	20.33	24.78	21.11	1 0.030

3	GRO-W	X6	0.6952161	0.0274662	-0.4353160	## 3
10	GRO-W	X4+X6	0.6913238	0.0192484	-0.6507902	## 10
11	GRO-W	X4+X7	0.6808402	0.0190551	-0.5851292	## 11
12	GRO-W	X5+X6	0.6901985	0.0164811	-0.4918917	## 12
22	GRO-W	X4*X6	0.7149556	0.0008435	-0.2158417	## 22
23	GRO-W	X4*X7	0.7127631	0.0008895	-0.1832996	## 23
24	GRO-W	X5*X6	0.7103403	0.0007228	-0.1192555	## 24
25	GRO-W	X5*X7	0.6973025	0.0007477	-0.0868000	## 25
26	GRO-W	X6*X7	0.6957649	0.0005497	-0.0604787	## 26

表 3.6.2

43	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 43
44	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 44
45	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 45
46	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 46
59	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 59

47	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 47
48	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 48
49	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 49
50	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 50
51	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 51
52	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 52
53	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 53
54	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 54
55	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 55
56	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 56
57	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 57
58	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 58
59	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 59
60	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 60
61	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 61
62	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 62
63	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 63
64	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 64
65	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 65
66	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 66
67	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 67
68	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 68
69	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 69
70	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 70
71	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 71
72	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 72
73	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 73
74	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 74
75	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 75
76	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 76
77	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 77
78	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 78
79	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 79
80	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 80
81	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 81
82	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 82
83	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 83
84	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 84
85	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 85
86	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 86
87	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 87
88	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 88
89	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 89
90	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 90
91	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 91
92	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 92
93	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 93
94	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 94
95	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 95
96	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 96
97	GR0-W	X4*X5*X6	0.7192290	0.0000248	-0.0333518	** 97
98	GR0-W	X4*X5*X7	0.7216099	0.0000271	-0.0238353	** 98
99	GR0-W	X4*X6*X7	0.7408238	0.0000216	-0.0248578	** 99
100	GR0-W	X5*X6*X7	0.7259188	0.0000193	0.0208326	** 100
101	GR0-W	X4+X5+X6+X7	0.6888100	0.0089132	-0.5421013	** 101

表 3.7.1 相関係数

***** INPUT INFORMATION *****

NIAGARA GAWA 1980-12- 1

OBJECT VARIABLES NAME

1 GRO-W

NUMB	NAME	X4	X5	X6	X7	OBJECT VARIABLES
1	NO-12	14.78	16.78	20.89	17.34	1 0.490
2	NO-11	16.22	18.78	23.67	20.33	1 0.560
3	NO- 1	16.22	19.00	22.78	18.44	1 0.470
4	NO- 2	15.89	18.11	21.56	14.56	1 0.270
5	NO- 3	16.89	20.11	21.33	15.78	1 0.240
6	NO- 5	15.11	17.56	19.11	14.89	1 0.160
7	NO- 6	15.11	16.89	17.22	13.44	1 0.170
8	NO- 7	15.44	16.11	22.22	16.00	1 0.190
9	NO- 8	16.11	17.00	20.11	16.78	1 0.220
10	HIHAR	15.56	16.89	20.00	16.84	1 0.310
11	NO- 9	14.89	17.78	20.67	14.67	1 0.140
12	NO-10	15.78	17.67	21.33	17.22	1 0.280

4	GRO-W	X7	0.8572159	0.0636363	-0.7492636	## 4
8	GRO-W	1/X7	-0.8244146	-16.5958862	1.3184261	## 8
17	GRO-W	X4-X7	-0.8436788	-0.0684643	0.2443687	## 17
26	GRO-W	X6X7	0.8296457	0.0018327	-0.3391362	## 26
36	GRO-W	X7/X4	0.8460867	1.0857048	-0.8415869	## 36
51	GRO-W	X5+X7-X4	0.8568931	0.0576653	-0.7701920	## 51
71	GRO-W	X4/X5/X7	-0.8408564	-18.2314453	1.2905092	## 71
90	GRO-W	X5X7/X4	0.8710081	0.0527994	-0.6851923	## 90
92	GRO-W	X6X7/X4	0.8441987	0.0320474	-0.4111449	## 92

表 3.7.2

103	GRO-W	LOG X7	0.8422993	1.0364561	-2.5986567	** 103
107	GRO-W	LOG 1/X7	-0.8422993	-1.0364561	-2.5986567	** 107
116	GRO-W	LOG X4-X7 -8.220	-0.8736312	-0.4830054	1.2534380	** 116
128	GRO-W	LOG X4/X7	-0.8263525	-1.1169167	0.2493569	** 128
135	GRO-W	LOG X7/X4	0.8263521	1.1169157	0.2493574	** 135
150	GRO-W	LOG X5+X7-X4	0.8448134	1.0733414	-2.8289919	** 150
170	GRO-W	LOG X4/X5/X7	-0.8580246	-0.9913034	-2.5939531	** 170
189	GRO-W	LOG X5X7/X4	0.8582203	0.9917755	-2.5953274	** 189
195	GRO-W	LOG (X4-X7)/X7 -0.404	-0.8577646	-0.4218153	-0.1406022	** 195
202	LOG GRO-W	X7	0.8457344	0.2045766	-4.6775522	** 202
206	LOG GRO-W	1/X7	-0.8272389	-54.2600098	2.0257864	** 206
249	LOG GRO-W	X5+X7-X4	0.8229223	0.1804476	-4.6539812	** 249
288	LOG GRO-W	X5X7/X4	0.8337777	0.1646877	-4.3781319	** 288
301	LOG GRO-W	LOG X7	0.8379453	3.3597336	-10.7003450	** 301
305	LOG GRO-W	LOG 1/X7	-0.8379188	-3.3595915	-10.6999493	** 305
314	LOG GRO-W	LOG X4-X7 -8.220	-0.8216282	-1.4800892	1.6159983	** 314
368	LOG GRO-W	LOG X4/X5/X7	-0.8268339	-3.1126652	-10.3919611	** 368
387	LOG GRO-W	LOG X5X7/X4	0.8270619	3.1143456	-10.3968525	** 387

表 3.8.1 相関係数

***** INPUT INFORMATION *****

NAGARA GAHA 1981- 3-19

OBJECT VARIABLES NAME

1 GRO-W

NUMB	NAME	X4	X5	X6	X7	OBJECT VARIABLES
1	NU-12	24.56	28.22	37.89	31.67	1 0.660
2	NU-11	25.67	32.00	38.22	33.33	1 0.770
3	NU- 2	23.67	26.56	45.22	44.33	1 0.320
4	NU- 3	23.67	31.56	35.78	30.67	1 0.230
5	NU- 4	23.67	29.67	31.78	25.55	1 0.080
6	NU- 5	25.00	30.78	35.56	30.11	1 0.290
7	NU- 6	22.89	26.78	30.89	23.89	1 0.260
8	NU- 7	24.22	29.11	31.67	24.78	1 0.330
9	NU- 8	22.00	27.00	31.00	23.78	1 0.120
10	HIHARA	25.00	29.89	34.67	28.33	1 0.500
11	NU- 9	24.44	28.44	30.67	21.89	1 0.360
12	NU-10	22.78	26.11	32.11	25.22	1 0.350
13	ABURA	22.11	25.33	26.89	20.89	1 0.060

1	GRO-W	X4	0.7571380	0.1395143	-2.9903593	## 1
5	GRO-W	1/X4	-0.7473216	-77.2140961	3.5813417	## 5
100	GRO-W	LOG X4	0.7475643	3.2470713	-9.9585867	## 100
104	GRO-W	LOG 1/X4	-0.7475802	-3.2471552	-9.9588528	## 104
199	GRO-W	LOG X4	0.7379777	0.4921851	-13.0479345	## 199
203	GRO-W	LOG 1/X4	-0.7387077	-276.228271	10.2970972	## 203
220	GRO-W	X4X6	0.6805896	0.0039016	-4.4951992	## 220
298	GRO-W	LOG X4	0.7334646	11.5314589	-37.8725586	## 298

表 3.8.2

302	LOG GR0-W	LOG 1/X4	-0.7334646	-11.5314589	-37.8725586	** 302
319	LOG GR0-W	LOG X4X6	0.7103776	3.3212757	-23.5377350	** 319
340	LOG GR0-W	LOG X4X5X6	0.6889790	2.4799500	-26.2180176	** 340

5). 地下水位レベル図の作成

単回帰分析によって得た回帰係数により、地下水位（地盤から地下水位面までの深さ）を面的な 2 次元情報に展開する。地下水位レベル図作成にあたっては以下の手法上の考慮を行った。

- i) 地下水位レベルをプロットする範囲は揖斐川と木曽川にはさまれた地域とした。
- ii) 地下水位がマイナスの値（被圧状態となった場合）は地盤（ゼロ）として表示した。
- iii) 地下水位レベルは土地利用分類上で水田に分類された画素のみ描画した。
- iv) 位置情報を与えるために 7 バンドを使用し水域と陸域の境界に実線を入れた。

4. 回帰モデルの検討

1). 相関係数および回帰係数

1-1) 相関係数の有意性の検定

2つの確率変数 x , y の間の直線的関連性をあらわす統計量として, 単相関係数 r は

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

ただし (x_i, y_i) は同時点でとられた変数の組の値 ($i = 1, 2, \dots, n$)

n : 試料の組数

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

によって定義される。

この場合 H : 母集団の相関係数 $P = 0$ なる帰無仮説を検定するためには H のもとで, 任意の n に対し

$$t = r \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r^2} \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

なる量が自由度 $(n-2)$ の t 分布に従うという知識を使うことができる。

①式を r について解くと

$$|r| = \frac{1}{\sqrt{\frac{N-2}{t^2} + 1}}$$

従って

$$|r| \geq \frac{1}{\sqrt{t^2 (N-2, \alpha) + 1}}$$

であれば帰無仮説Hは否定され、変数(x, y)それぞれの属する母集団の間にも相関があると判断してよい。ここでt(N-2, α)は自由度(n-2), 両側危険率αに対するt分布の値であり、表4.1から読みとることができる。

表 4.1 t 分布の表

α 2α n-2	.250 (.500)	.200 (.400)	.150 (.300)	.100 (.200)	.050 (.100)	.025 (.050)	.010 (.020)	.005 (.010)	.0005 (.0010)
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.599
3	.765	.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924
4	.741	.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	.727	.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	.718	.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	.711	.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	.706	.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	.703	.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	.700	.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	.697	.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	.695	.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	.694	.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	.692	.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	.691	.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	.690	.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	.689	.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	.688	.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	.688	.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	.687	.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	.686	.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	.686	.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	.685	.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.768
24	.685	.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	.684	.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	.684	.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	.684	.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	.683	.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	.683	.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	.683	.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
31	.682	.853	1.054	1.309	1.696	2.040	2.453	2.744	3.633
32	.682	.853	1.054	1.309	1.694	2.037	2.449	2.738	3.622
33	.682	.853	1.053	1.308	1.692	2.035	2.445	2.733	3.611
34	.682	.852	1.052	1.307	1.691	2.032	2.441	2.728	3.601
35	.682	.852	1.052	1.306	1.690	2.030	2.438	2.724	3.591
36	.681	.852	1.052	1.306	1.688	2.028	2.434	2.719	3.582
37	.681	.851	1.051	1.305	1.687	2.026	2.431	2.715	3.574
38	.681	.851	1.051	1.304	1.686	2.024	2.429	2.712	3.566
39	.681	.851	1.050	1.304	1.685	2.023	2.426	2.708	3.558
40	.681	.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
41	.681	.850	1.050	1.303	1.683	2.020	2.421	2.701	3.544
42	.680	.850	1.049	1.302	1.682	2.018	2.418	2.698	3.538
43	.680	.850	1.049	1.302	1.681	2.017	2.416	2.695	3.532
44	.680	.850	1.049	1.301	1.680	2.015	2.414	2.692	3.526
45	.680	.850	1.049	1.301	1.679	2.014	2.412	2.690	3.520
46	.680	.850	1.048	1.300	1.679	2.013	2.410	2.687	3.515
47	.680	.849	1.048	1.300	1.678	2.012	2.408	2.685	3.510
48	.680	.849	1.048	1.299	1.677	2.011	2.407	2.682	3.505
49	.680	.849	1.048	1.299	1.677	2.010	2.405	2.680	3.500
50	.679	.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.496
60	.679	.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
80	.678	.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.416
120	.677	.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
240	.676	.843	1.039	1.285	1.651	1.970	2.342	2.596	3.332
∞	.674	.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

α の欄：片側危険率
2α の欄：両側危険率

ちなみに今回のケースでは母集団に相関があると判断できるための r の条件は表 4.2 の通りである。

表 4.2 検定結果

日 付	n	$(1-\alpha) \times 100$	r = 相関係数	相関の mx
1979-11-1	n=13	90 %	0.476	0.511
80-2-8	n=13	98 %	0.634	0.738
80-3-15	n=13	99 %	0.684	0.741
80-9-2	n=11	99.9 %	0.847	0.890
80-12-1	n=12	99.9 %	0.823	0.871
81-3-19	n=13	99 %	0.684	0.757

1-2) 回帰直線の信頼区間

2 種類の変数 (x , y) の多数組の試料についてその間の一般的関係を 1 次式 $y = ax + b$ であらわしたときその回帰係数 a , b の最良推定値は

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\hat{b} = \bar{y} - a\bar{x}$$

で与えられる。

このとき変数 x に対応して回帰線 (すなわち y の平均値) のとり得る値の範囲を信頼区間と呼ぶがこれは

$$\hat{y} - t(n-2, \alpha) \sqrt{D \cdot Ve} < y < \hat{y} + t(n-2, \alpha) \sqrt{D \cdot Ve}$$

ただし

$$Ve = \frac{1}{n-2} \left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \hat{a}^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}$$

$$D = \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

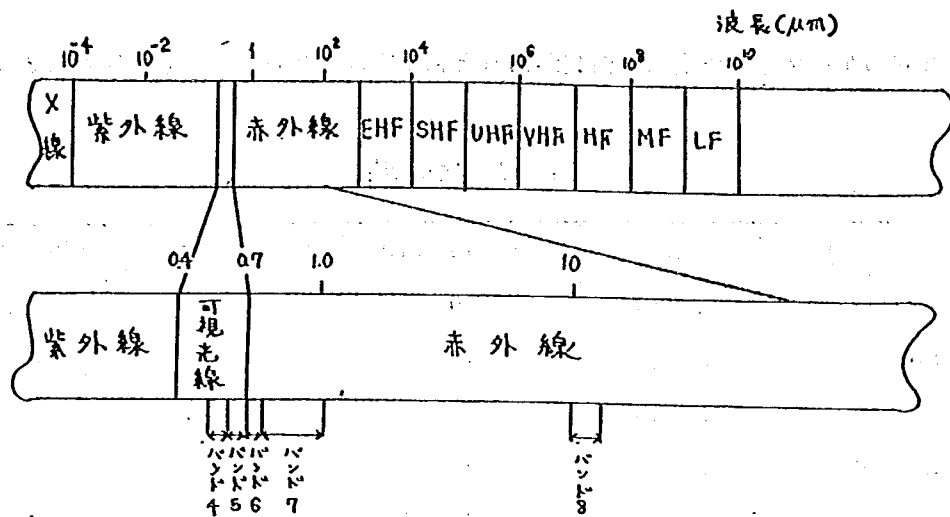


図 4.3 電磁波のスペクトル図

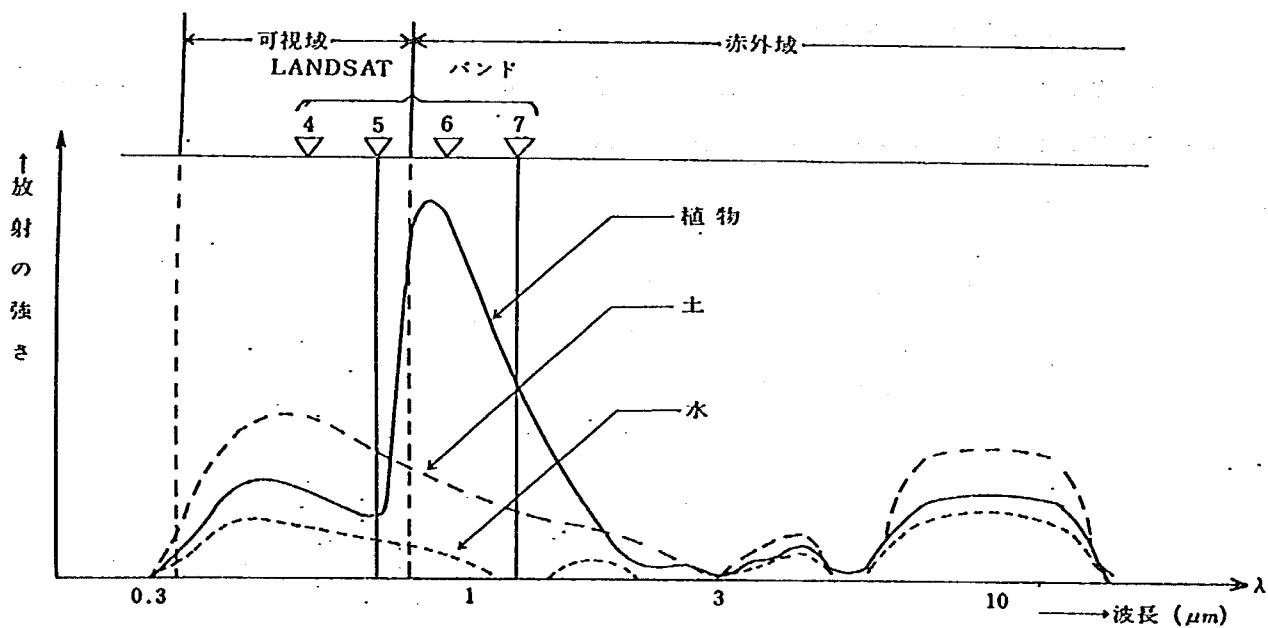


図 4.4 物体のスペクトル放射特性

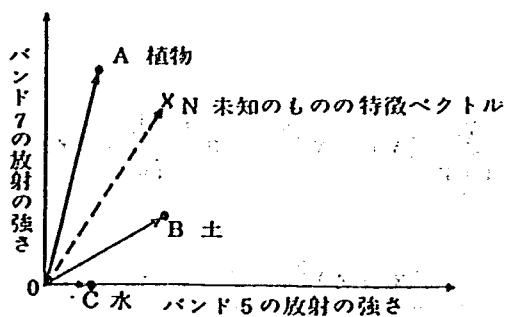


図 4.5 物体の特徴空間

で与えられる。ここでD項の大きさがxの値に対応して異なっていることに注意する必要がある。

なお、回帰式を用いて今後観測されるxの値に対応するyの値の推定区間を求める場合には、上式のD項を次のように置き換える。

$$D = 1 + \frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

2). 回帰モデルの物理的考察

2-1) ランドサットMSS 波長域の特徴

物体の表面からは可視光の他に赤外線（近赤外、中赤外、遠赤外）紫外線やマイクロ波などが反射して放出されている。これらを総称して電磁波といい、図4.3に電磁波のスペクトルを示す。

全ての物体は、その種類によって固有の電磁波の放射特性を持つことを利用して、地上から反射してくる電磁波を異なる波長毎に測り比較判別して物体を識別する。これらの原理図として図4.4に物体のスペクトル放射性、図4.5に物体の特徴空間図、図4.6に1979-5-23と1979-9-8のデータによる重ね合せによる土地利用分類図、写真-1に1980-3-15のナチュラルカラー合成写真をまた、図-4.7～4.10に1980-3-15の各バンドのレベルスライス図を示すが、ランドサットのMSSの各波長域は次のような特徴を有している。

i) 4バンド（0.5～0.6 μm）可視域

ナチュラルカラー合成写真からも判別できるが、多度町付近上空は雲がある。4バンドは雲や霧による影響が最も大きく、反射レベルが高く出ている。長良川と木曽川の反射レベルが大きな違いとなって出ている。木曽川は反射レベルが低く、長良川と揖斐川では揖斐川の方が反射レベルが高くなっている。水に対する4バンドの特徴としては、0.48 μm付近で透過率が最大となり、河川の水質等の違い、海底の様子等の調査に適している。また、人工構造物、都市の観察も出来る。

ii) 5バンド（0.6～0.7 μm）可視域

この波長域になると揖斐川と陸地（高須輪中）の判別ができなくなる。長良川は4バンドより反射レベルが低く判別しやすくなり、河口に近づくにしたがい、反射レベルのちがいが出てくる。木曽川の河口から尾張大橋付近までは反射レベルは0～10に落ちてくる。雲の影響はすこしやわらいでく

iii) 6バンド（0.7～0.8 μm）近赤外域

近赤外の波長域では、光は水面でほとんど吸収された水中における光の透過は少なくなってくるため、全体的に水の反射レベルが落ちて、木曽川、長良川、揖斐川の輪郭が明瞭になってくる。河川敷内の洲、油島千本松締切堤などが判別できるようになる。4.5バンドと比べ雲の影響はなくなり、雲と雲の影が明瞭になり、雲の影は水と同じような反射特性となるから桑名、多度町にあたかも大きな

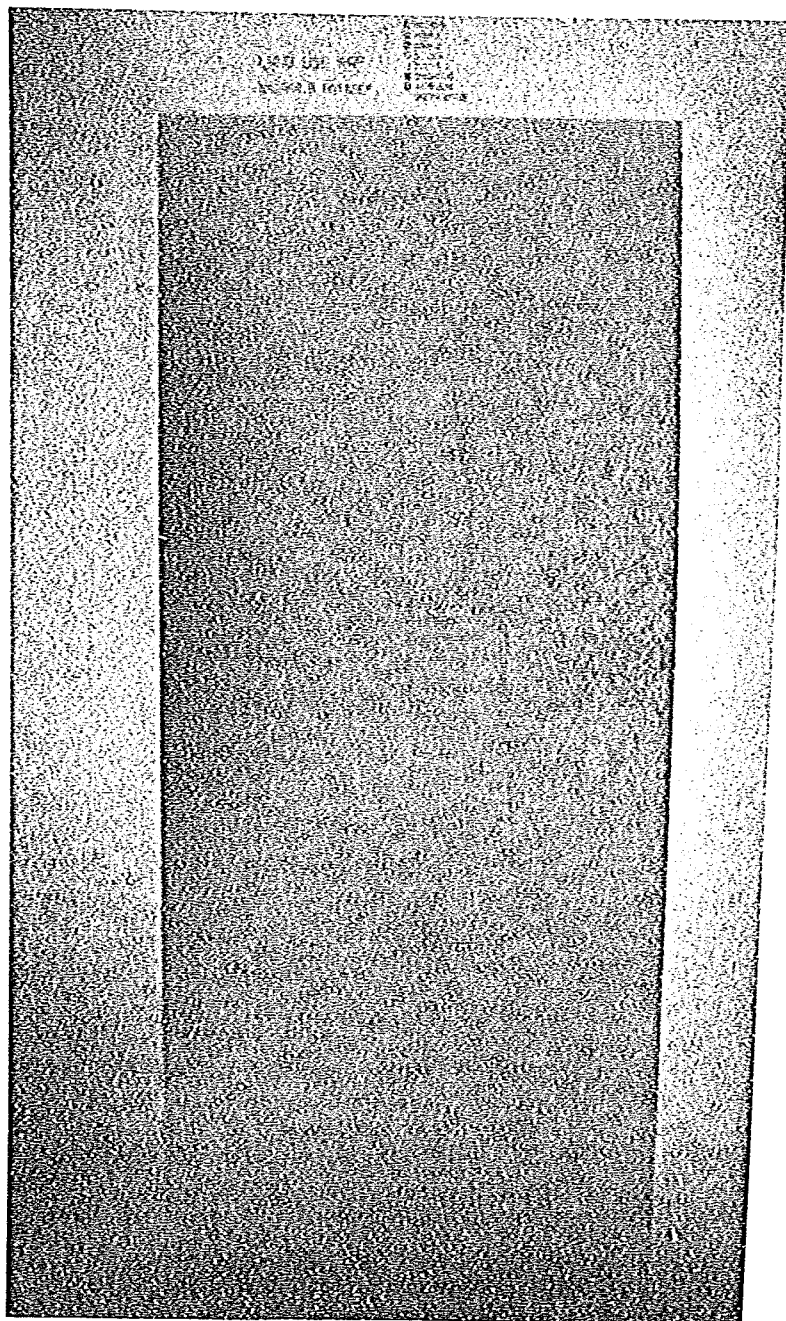


图 4. 6

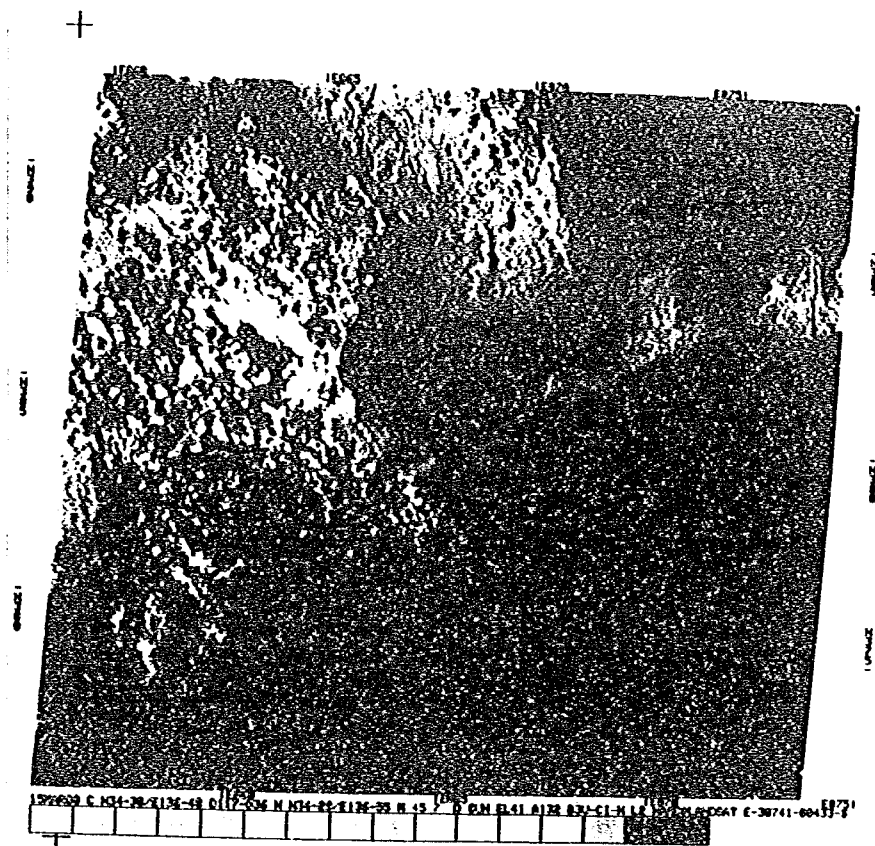


写真 1

4 870

• 1/4 • 1/2 • 3/4 • 1 • 1 1/4 • 1 1/2 • 1 3/4 • 2 • 2 1/4 • 2 1/2 • 2 3/4 • 3 • 3 1/4 • 3 1/2 • 3 3/4 • 4 • 4 1/4 • 4 1/2 • 4 3/4 • 5 • 5 1/4 • 5 1/2 • 5 3/4 • 6 • 6 1/4 • 6 1/2 • 6 3/4 • 7 • 7 1/4 • 7 1/2 • 7 3/4 • 8 • 8 1/4 • 8 1/2 • 8 3/4 • 9 • 9 1/4 • 9 1/2 • 9 3/4 • 10 • 10 1/4 • 10 1/2 • 10 3/4 • 11 • 11 1/4 • 11 1/2 • 11 3/4 • 12 • 12 1/4 • 12 1/2 • 12 3/4 • 13 • 13 1/4 • 13 1/2 • 13 3/4 • 14 • 14 1/4 • 14 1/2 • 14 3/4 • 15 • 15 1/4 • 15 1/2 • 15 3/4 • 16 • 16 1/4 • 16 1/2 • 16 3/4 • 17 • 17 1/4 • 17 1/2 • 17 3/4 • 18 • 18 1/4 • 18 1/2 • 18 3/4 • 19 • 19 1/4 • 19 1/2 • 19 3/4 • 20 • 20 1/4 • 20 1/2 • 20 3/4 • 21 • 21 1/4 • 21 1/2 • 21 3/4 • 22 • 22 1/4 • 22 1/2 • 22 3/4 • 23 • 23 1/4 • 23 1/2 • 23 3/4 • 24 • 24 1/4 • 24 1/2 • 24 3/4 • 25 • 25 1/4 • 25 1/2 • 25 3/4 • 26 • 26 1/4 • 26 1/2 • 26 3/4 • 27 • 27 1/4 • 27 1/2 • 27 3/4 • 28 • 28 1/4 • 28 1/2 • 28 3/4 • 29 • 29 1/4 • 29 1/2 • 29 3/4 • 30 • 30 1/4 • 30 1/2 • 30 3/4 • 31 • 31 1/4 • 31 1/2 • 31 3/4 • 32 • 32 1/4 • 32 1/2 • 32 3/4 • 33 • 33 1/4 • 33 1/2 • 33 3/4 • 34 • 34 1/4 • 34 1/2 • 34 3/4 • 35 • 35 1/4 • 35 1/2 • 35 3/4 • 36 • 36 1/4 • 36 1/2 • 36 3/4 • 37 • 37 1/4 • 37 1/2 • 37 3/4 • 38 • 38 1/4 • 38 1/2 • 38 3/4 • 39 • 39 1/4 • 39 1/2 • 39 3/4 • 40 • 40 1/4 • 40 1/2 • 40 3/4 • 41 • 41 1/4 • 41 1/2 • 41 3/4 • 42 • 42 1/4 • 42 1/2 • 42 3/4 • 43 • 43 1/4 • 43 1/2 • 43 3/4 • 44 • 44 1/4 • 44 1/2 • 44 3/4 • 45 • 45 1/4 • 45 1/2 • 45 3/4 • 46 • 46 1/4 • 46 1/2 • 46 3/4 • 47 • 47 1/4 • 47 1/2 • 47 3/4 • 48 • 48 1/4 • 48 1/2 • 48 3/4 • 49 • 49 1/4 • 49 1/2 • 49 3/4 • 50 • 50 1/4 • 50 1/2 • 50 3/4 • 51 • 51 1/4 • 51 1/2 • 51 3/4 • 52 • 52 1/4 • 52 1/2 • 52 3/4 • 53 • 53 1/4 • 53 1/2 • 53 3/4 • 54 • 54 1/4 • 54 1/2 • 54 3/4 • 55 • 55 1/4 • 55 1/2 • 55 3/4 • 56 • 56 1/4 • 56 1/2 • 56 3/4 • 57 • 57 1/4 • 57 1/2 • 57 3/4 • 58 • 58 1/4 • 58 1/2 • 58 3/4 • 59 • 59 1/4 • 59 1/2 • 59 3/4 • 60 • 60 1/4 • 60 1/2 • 60 3/4 • 61 • 61 1/4 • 61 1/2 • 61 3/4 • 62 • 62 1/4 • 62 1/2 • 62 3/4 • 63 • 63 1/4 • 63 1/2 • 63 3/4 • 64 • 64 1/4 • 64 1/2 • 64 3/4 • 65 • 65 1/4 • 65 1/2 • 65 3/4 • 66 • 66 1/4 • 66 1/2 • 66 3/4 • 67 • 67 1/4 • 67 1/2 • 67 3/4 • 68 • 68 1/4 • 68 1/2 • 68 3/4 • 69 • 69 1/4 • 69 1/2 • 69 3/4 • 70 • 70 1/4 • 70 1/2 • 70 3/4 • 71 • 71 1/4 • 71 1/2 • 71 3/4 • 72 • 72 1/4 • 72 1/2 • 72 3/4 • 73 • 73 1/4 • 73 1/2 • 73 3/4 • 74 • 74 1/4 • 74 1/2 • 74 3/4 • 75 • 75 1/4 • 75 1/2 • 75 3/4 • 76 • 76 1/4 • 76 1/2 • 76 3/4 • 77 • 77 1/4 • 77 1/2 • 77 3/4 • 78 • 78 1/4 • 78 1/2 • 78 3/4 • 79 • 79 1/4 • 79 1/2 • 79 3/4 • 80 • 80 1/4 • 80 1/2 • 80 3/4 • 81 • 81 1/4 • 81 1/2 • 81 3/4 • 82 • 82 1/4 • 82 1/2 • 82 3/4 • 83 • 83 1/4 • 83 1/2 • 83 3/4 • 84 • 84 1/4 • 84 1/2 • 84 3/4 • 85 • 85 1/4 • 85 1/2 • 85 3/4 • 86 • 86 1/4 • 86 1/2 • 86 3/4 • 87 • 87 1/4 • 87 1/2 • 87 3/4 • 88 • 88 1/4 • 88 1/2 • 88 3/4 • 89 • 89 1/4 • 89 1/2 • 89 3/4 • 90 • 90 1/4 • 90 1/2 • 90 3/4 • 91 • 91 1/4 • 91 1/2 • 91 3/4 • 92 • 92 1/4 • 92 1/2 • 92 3/4 • 93 • 93 1/4 • 93 1/2 • 93 3/4 • 94 • 94 1/4 • 94 1/2 • 94 3/4 • 95 • 95 1/4 • 95 1/2 • 95 3/4 • 96 • 96 1/4 • 96 1/2 • 96 3/4 • 97 • 97 1/4 • 97 1/2 • 97 3/4 • 98 • 98 1/4 • 98 1/2 • 98 3/4 • 99 • 99 1/4 • 99 1/2 • 99 3/4 • 100 • 100 1/4 • 100 1/2 • 100 3/4 • 101 • 101 1/4 • 101 1/2 • 101 3/4 • 102 • 102 1/4 • 102 1/2 • 102 3/4 • 103 • 103 1/4 • 103 1/2 • 103 3/4 • 104 • 104 1/4 • 104 1/2 • 104 3/4 • 105 • 105 1/4 • 105 1/2 • 105 3/4 • 106 • 106 1/4 • 106 1/2 • 106 3/4 • 107 • 107 1/4 • 107 1/2 • 107 3/4 • 108 • 108 1/4 • 108 1/2 • 108 3/4 • 109 • 109 1/4 • 109 1/2 • 109 3/4 • 110 • 110 1/4 • 110 1/2 • 110 3/4 • 111 • 111 1/4 • 111 1/2 • 111 3/4 • 112 • 112 1/4 • 112 1/2 • 112 3/4 • 113 • 113 1/4 • 113 1/2 • 113 3/4 • 114 • 114 1/4 • 114 1/2 • 114 3/4 • 115 • 115 1/4 • 115 1/2 • 115 3/4 • 116 • 116 1/4 • 116 1/2 • 116 3/4 • 117 • 117 1/4 • 117 1/2 • 117 3/4 • 118 • 118 1/4 • 118 1/2 • 118 3/4 • 119 • 119 1/4 • 119 1/2 • 119 3/4 • 120 • 120 1/4 • 120 1/2 • 120 3/4 • 121 • 121 1/4 • 121 1/2 • 121 3/4 • 122 • 122 1/4 • 122 1/2 • 122 3/4 • 123 • 123 1/4 • 123 1/2 • 123 3/4 • 124 • 124 1/4 • 124 1/2 • 124 3/4 • 125 • 125 1/4 • 125 1/2 • 125 3/4 • 126 • 126 1/4 • 126 1/2 • 126 3/4 • 127 • 127 1/4 • 127 1/2 • 127 3/4 • 128 • 128 1/4 • 128 1/2 • 128 3/4 • 129 • 129 1/4 • 129 1/2 • 129 3/4 • 130 • 130 1/4 • 130 1/2 • 130 3/4 • 131 • 131 1/4 • 131 1/2 • 131 3/4 • 132 • 132 1/4 • 132 1/2 • 132 3/4 • 133 • 133 1/4 • 133 1/2 • 133 3/4 • 134 • 134 1/4 • 134 1/2 • 134 3/4 • 135 • 135 1/4 • 135 1/2 • 135 3/4 • 136 • 136 1/4 • 136 1/2 • 136 3/4 • 137 • 137 1/4 • 137 1/2 • 137 3/4 • 138 • 138 1/4 • 138 1/2 • 138 3/4 • 139 • 139 1/4 • 139 1/2 • 139 3/4 • 140 • 140 1/4 • 140 1/2 • 140 3/4 • 141 • 141 1/4 • 141 1/2 • 141 3/

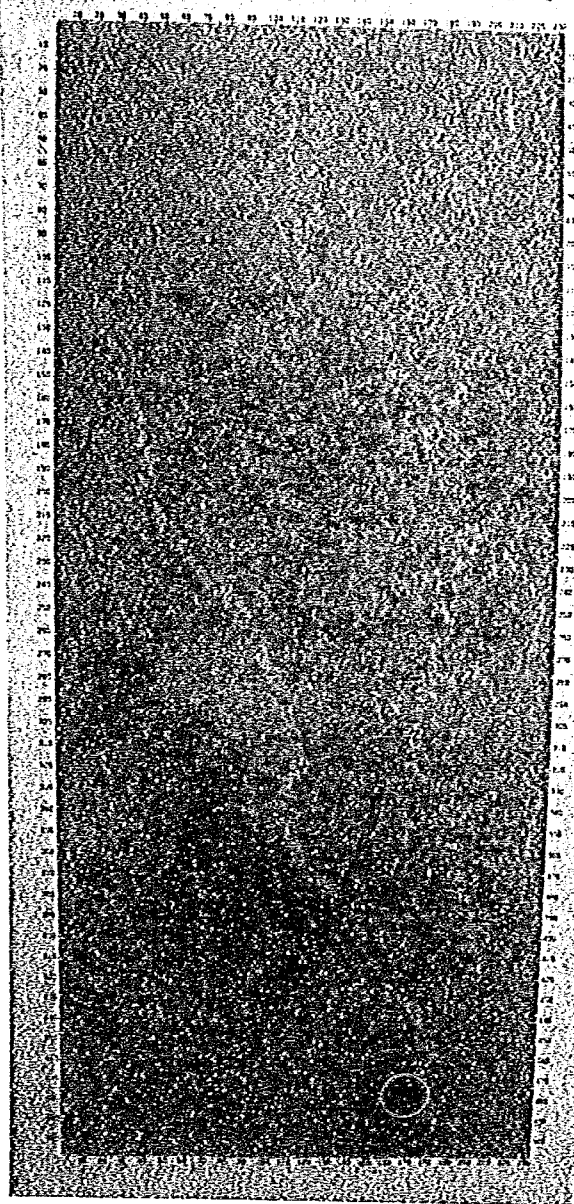


图 4.7

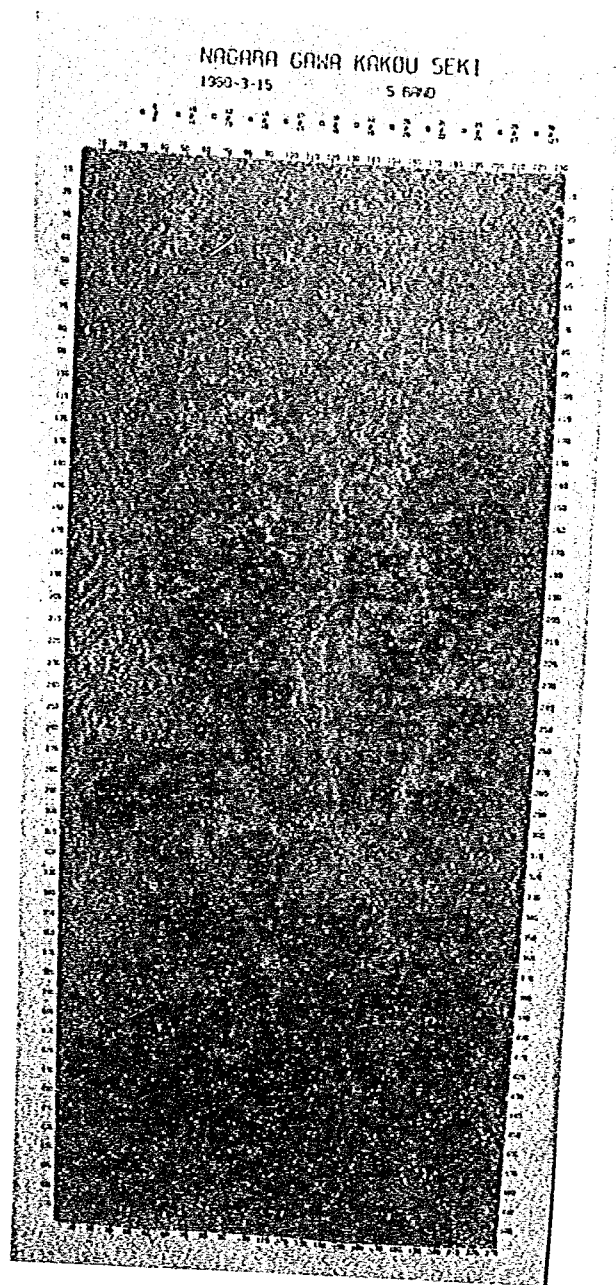


図 4. 8

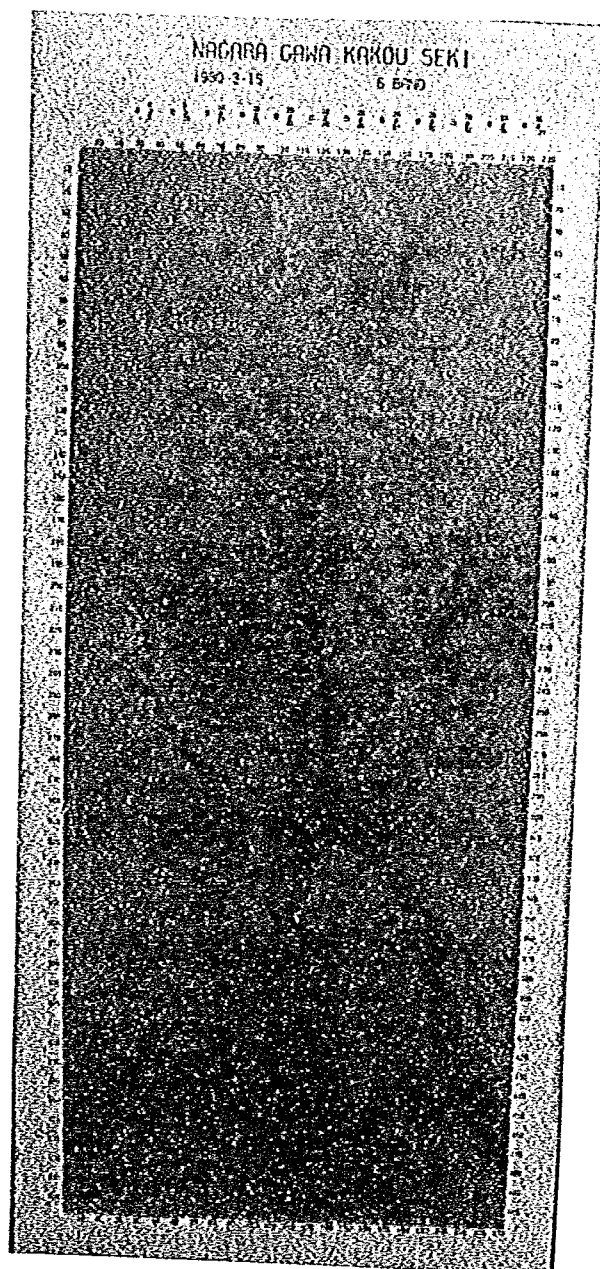


図 4. 9

NAGARA GAWA KAKOU SEKI
1920-3-15 7 550

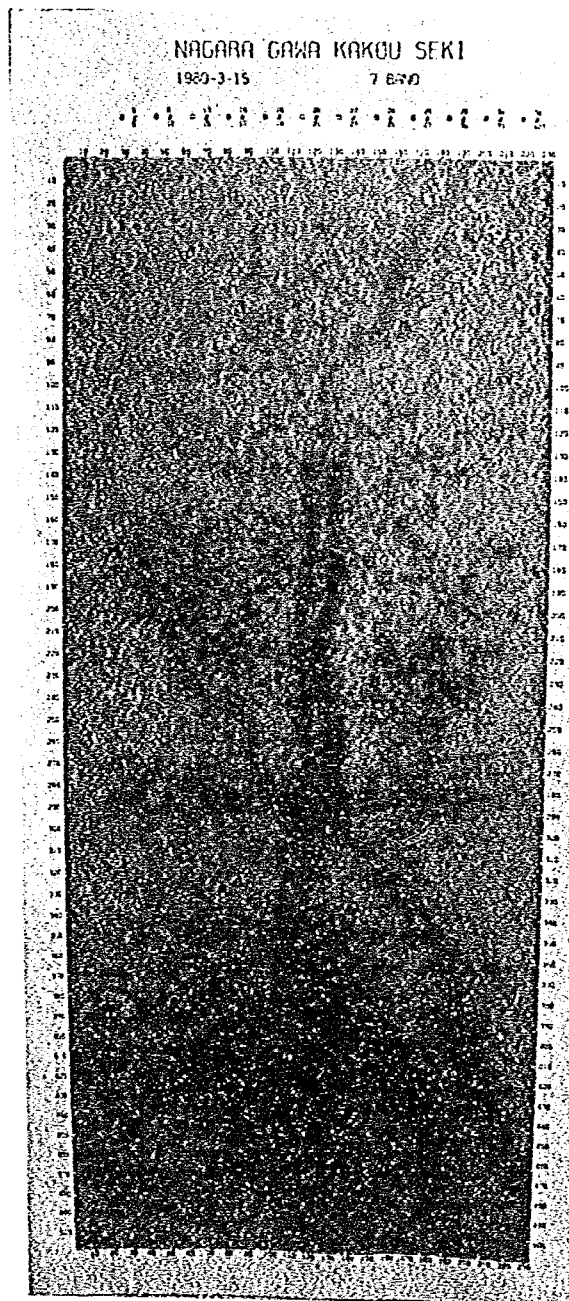


図 4. 10

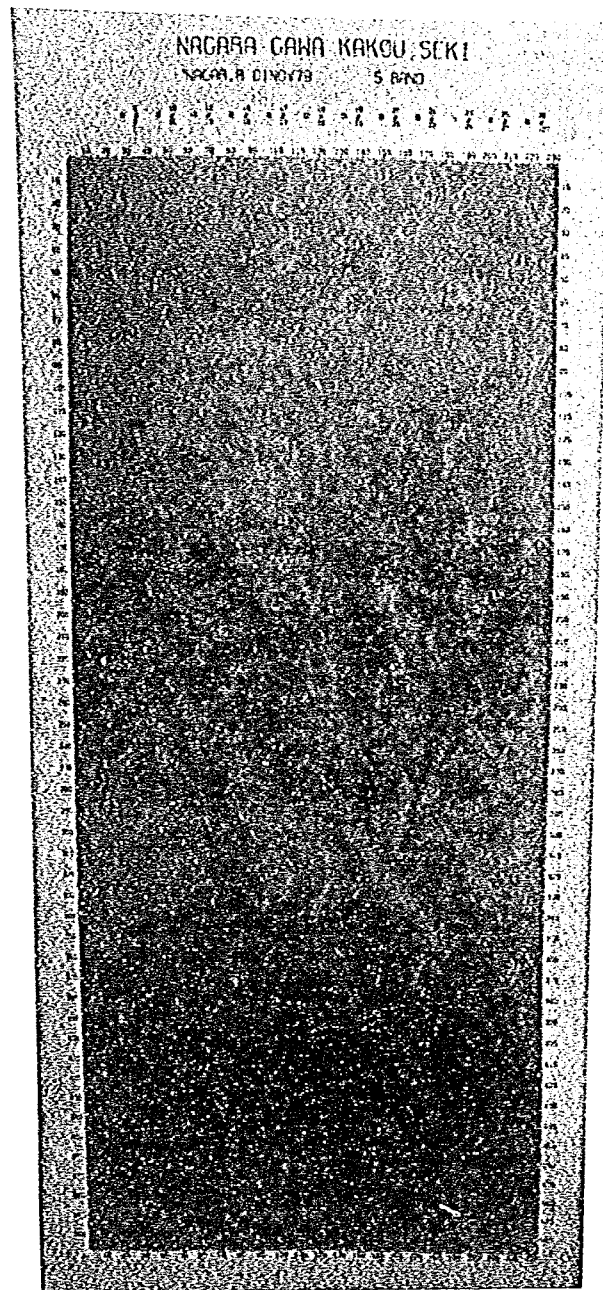
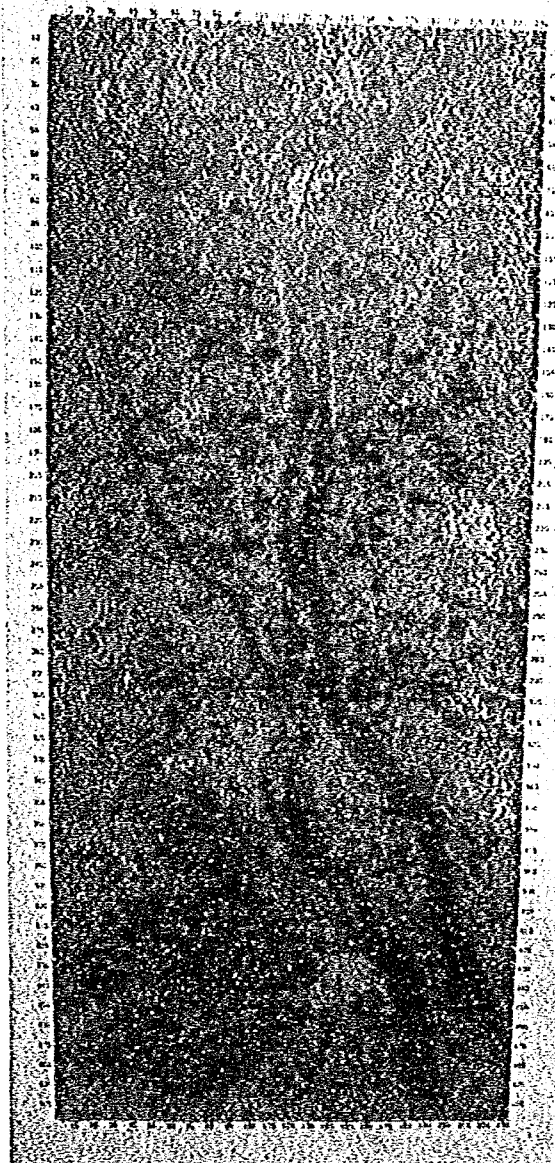


図 4.11

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4} \quad \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{8} \quad \frac{1}{4} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{16}$$


! 4. 12

7-2009.R (SF 155) 7 BYO

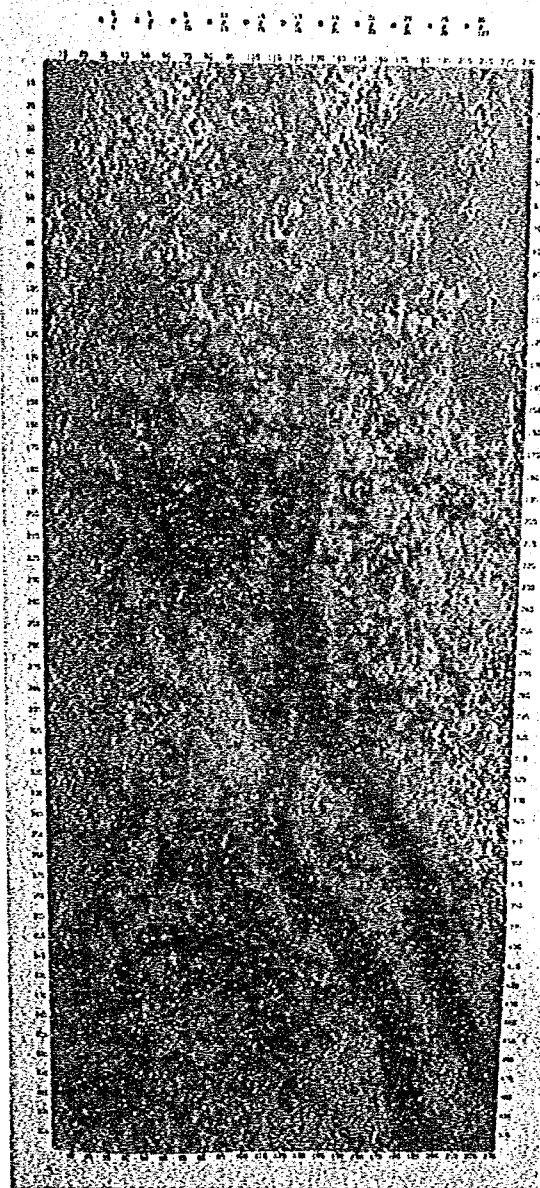


图 4.13

THOMAS 021783 7 P25

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

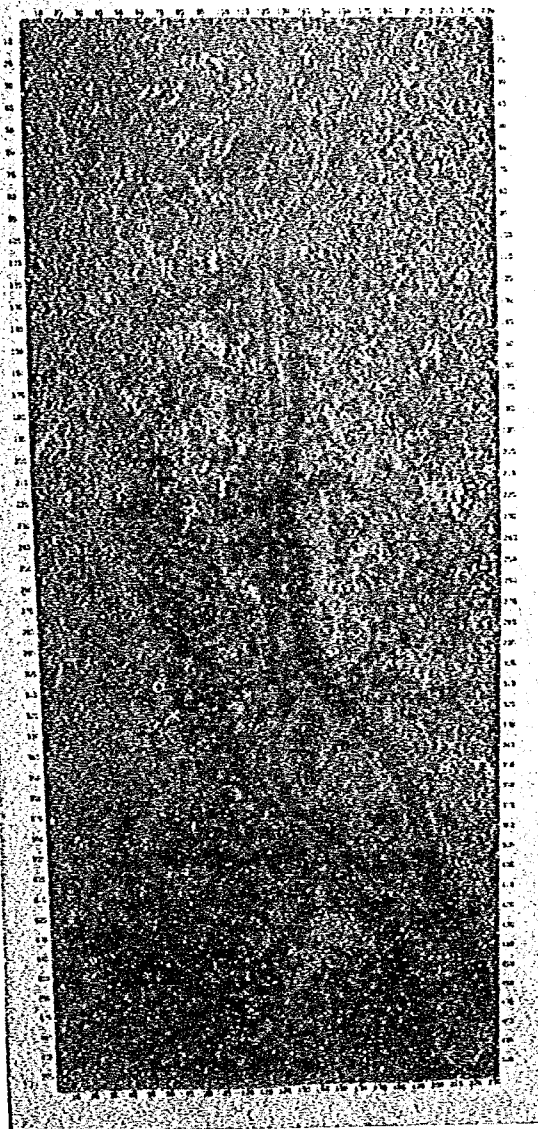
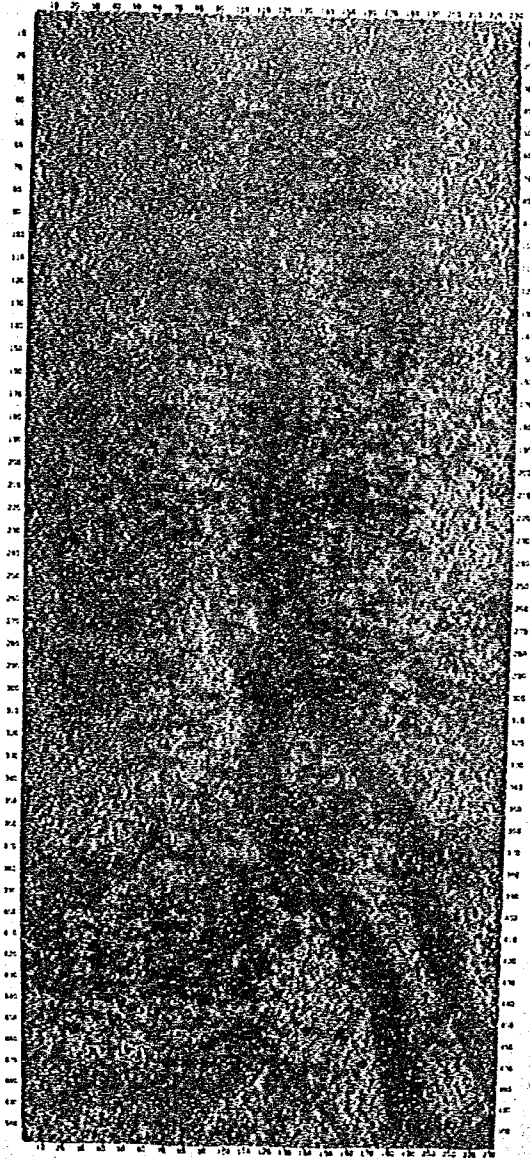
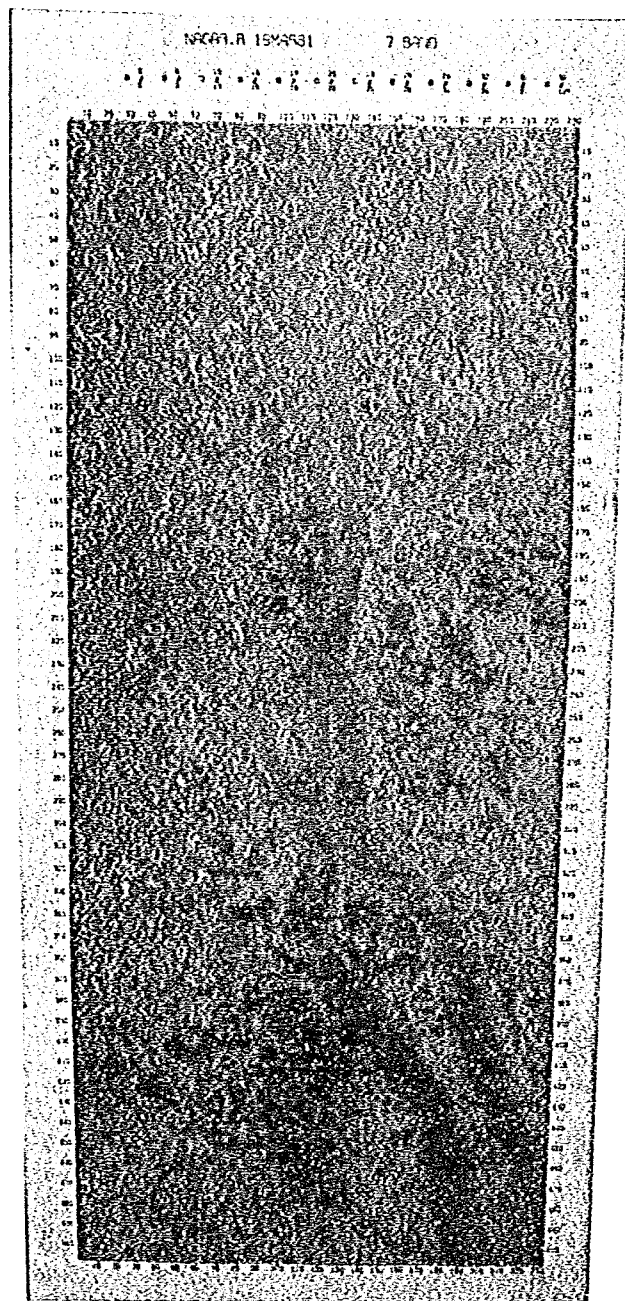


图 4.14

7 979

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{3}{6} + \frac{2}{6} = \frac{5}{6}$$




4. 16

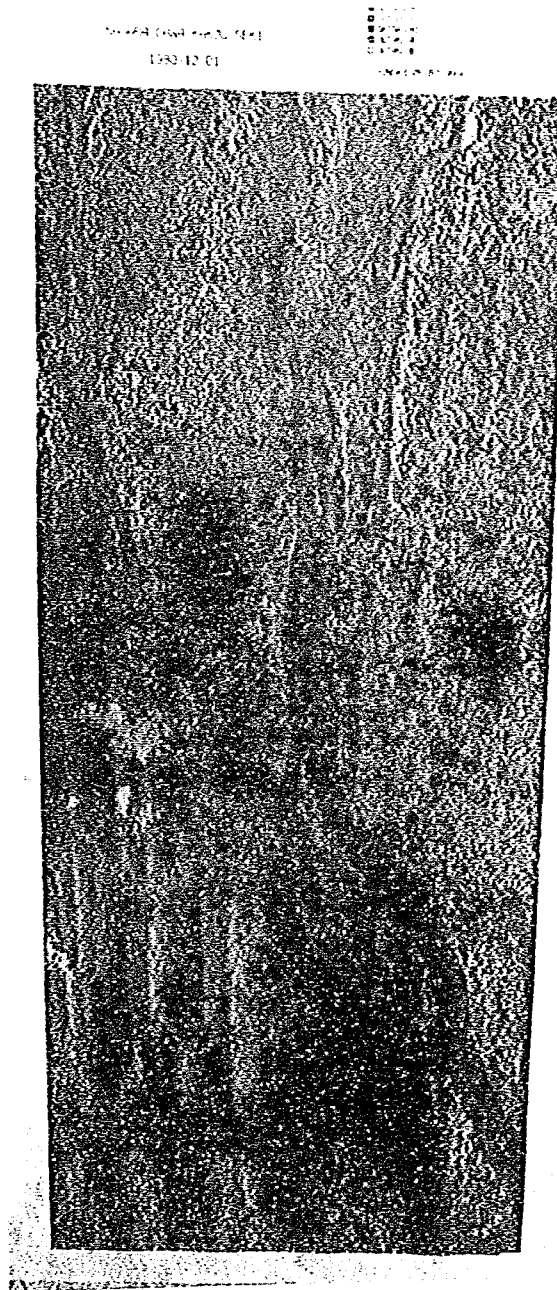


图 4.17

湖があるように出てくる。

iv) 7 バンド ($0.8 \sim 1.1 \mu\text{m}$) 近赤外域

この波長域では、光は水面でさらに吸収されるため、反射レベルが低く、水域と陸域の区別が明瞭となる。7 バンドにおいては水の反射レベルが最も低く、次に市街などの人工構造物などが低く、植物は高い反射レベルを示し、人工草地（ゴルフ場など）が最も高い反射特性を示す。また、うすい雲は消えてくる。

v) 8 バンド ($10.4 \sim 12.6 \mu\text{m}$) 遠赤外域

図 4.4 の物体のスペクトル放射特性図の $10 \mu\text{m}$ 付近に放射の強い所があるが、これは赤外域の遠赤外領域で、物体は太陽の光が当たっていても赤外線を放射している。その強さは物体の温度が高い程大きいので、放射の強さを測定すれば、その物体の温度がわかり、排水の温度分布図等の調査に適している。しかしながら、ランドサット 3 号では、このチャンネルは故障しているのでデータは得られない。

図 4.11 ～ 4.12 に 1979 - 11 - 1 の 5 バンド、7 バンドのレベルスライス図、図 4.13 に 1980 - 2 - 8 の 7 バンド、図 4.14 に 1980 - 9 - 2 の 7 バンド、図 4.15 に 1980 - 12 - 1 の 7 バンド、図 4.16 に 1981 - 3 - 19 の 7 バンドのレベルスライス図を示し、図 4.17 に 1980 - 12 - 1 の土地利用分類図を示す。

2 - 2) 回帰モデルの意味付け

i) 1980 - 9 - 2 のデータ

図 4.14 の 1980 年 9 月 2 日の撮影の MSS の 7 バンドのレベルスライス図から明らかなように 7 バンドは植物に関して強い反射特性を示している。一般的に植物の葉の分光反射特性で、可視域の反射はクロロフィルを主体とする色素の種類および量に関係し、 $0.75 \sim 1.1 \mu\text{m}$ の近赤外域の反射は葉の内部の細胞の構造に、 $1.3 \sim 2.8 \mu\text{m}$ 付近の領域では葉中に含まれる水分の量によって決まるといわれ植物調査などに用いられている。

前年度処理した 1979 - 9 - 8 と同様に 7 バンドが他と比較して良い相関になっている。相関係数は負であるから 7 バンドの値が大きければ地盤から地下水位面までの距離は小さくなり、地下水位は上昇する。

高須輪中内の土地利用図の水田部を対象とした場合、1980 - 9 - 2 の時期では、収穫期になっていると考えられる。7 バンドは植生に対して強い反射特性を示すため、同一種類の植生を考えた場合地下水位が高い所では植生が弱まらず繁っていて反射レベルが高くなり、逆に地下水位が低い所では植生が弱まっていて反射レベルが低くなると考えられる。また、この時期の長島輪中は 7 バンドのレベルスライス図から判断すると稲の刈入れが大部分終了しているものと考えられる。

ii) 1979 - 11 - 1 のデータ

1979 年 11 月 1 日撮影の MSS の 4 バンドの相関係数 $r = 0.4696$ 、5 バンドが -0.2837 となっている。前年度処理した 1979 - 10 - 23 のシーンと同様に負の相関であり 4.5 バンドの値が大きくなれば地盤と地下水位面までの距離が短くなり地下水位が高くなることを示している。

4バンド ($0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$)、5バンド ($0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$) の可視領域では、地下水位 (土壌水分) が高い所は、低い所より黒ずんでいて反射レベルが低くなるはずであるから逆の関係が成立している。また、4、5バンドの相関が他より高く出ていることは、この時期には稲の刈入れも終了し地面が露出しているものと思われるが、負の相関が出る物理的な意味付けは得られなかった。

iii) 1980-2-8, 1980-3-15, 1980-12-1, 1981-3-19のデータ

図4.6の1979-5-23と1979-9-8の重ね合せによる土地利用分類図と図4.17の1980-12-1の土地利用分類図の水田部分および名シーンのレベルスライス図から判断すると1979-9-8の水田部よりレベルが低くなっているのに、土壌は露出している。一般的に同一土壌でも水分が少ないとき反射率は大きくなり、水分が増大したときでも土壌の種類により反射率の曲線 (図4.18) がことなる。

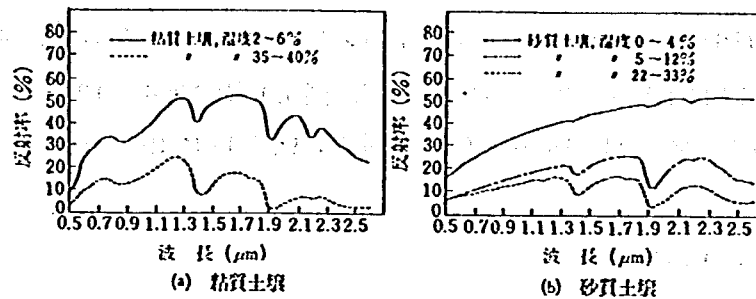


図4.18 土壌の反射率曲線

また、土壌に含まれる有機物、鉄化合物等によっても反射率は変化する。ランドサットMSS データは $0.5 \mu\text{m} \sim 1.1 \mu\text{m}$ を4分割して使用しているが $0.5 \mu\text{m} \sim 0.7 \mu\text{m}$ の4、5バンドの可視領域では水分があると土壌は黒ずんで反射レベルが低くなり、 $0.8 \sim 1.1 \mu\text{m}$ の6、7バンドの近赤外領域では水分があると赤外領域は吸収されるため反射レベルは低くなる。地下水位が高ければ土壌水分も多く、地下水位が低ければ土壌水分も少ないであろうから、地盤から地下水位面までの距離 (目的変量) とランドサットデータ (説明変量) との相関を求めているので、相関は正の相関となり、ランドサットデータの値が大きくなると地下水位は低く、逆にランドサットデータの値が小さくなれば、地下水位は高くなる関係が成立する。各シーンのバンド別相関を表4.3に示す。

表4.3 各シーンのバンド別相関

日付	4バンド	5バンド	6バンド	7バンド
1980-2-8	0.3751	0.5402	0.6518	0.5712
1980-3-15	0.5767	0.6267	0.6952	0.6483
1980-12-1	0.2546	0.2909	0.6293	0.8572
1981-3-19	0.7571	0.4167	0.5199	0.4178

各シーンとも正の相関となっている。1981-3-19の4バンドでは相関係数が0.7571と高く次に1980-3-15が0.5767と2-8, 12-1のシーンより高く出ている。

3). 地下水位レベル図の結果と考察

ランドサットMSSデータはあくまでも地表面反射レベルのデータであり、これと地下水位観測値との相関を求めていることから、今回の地下水位レベル図は地下水位というよりも土壌水分と見た方が良いと思われる。このことについては7).土壌水分を取り入れた地下水位把握モデルで述べるが一応考察してみる。図-4.19に1980-9-2, 図4.20に1979-11-1, 図4.21に1980-2-8, 図4.22に1980-3-15, 図4.23に1980-12-1, 図4.24に1981-3-19のランドサットMSSデータにより求めた地下水位レベル図を示す。

i) 1980-9-2のデータ

1980-9-2の高須輪中の上流部については、1979-9-8の結果と比較して地下水位が高く(地盤から地下水位面までの距離が小さい)になっている。これは地下水位観測井番号12, 11, 2, 3の値が1979-9-8の値より高く観測されていることによるものであろう。

高須輪中の平田町から下流の海津町までは1979-9-8と同様な傾向を示している。長島輪中と桑原輪中は観測井がないが、1979-9-2より地下水位が高く表現されている。1979-9-8のデータで観測値とよく一致しているケースは1/×7で相関係数は0.7541, 1980-9-2は1/×7で0.8897で同じような傾向を示しているが、1980-9-2のシーンは全体的に地下水位が高くなっている。

ii) 1979-11-1のデータ

相関係数もあまり高くなく、物理的な意味付けもとれていないデータではあるが、桑原輪中と高須輪中の上流部は同じ程度の地下水位である。高須輪中では下流にいくに従って地下水位は高くなり、長島輪中については松陰付近が地下水位が高くなっている。

iii) 1980-2-8, 1980-3-15, 1980-12-1, 1981-3-19のデータ

1980-12-1と1980-2-8の高須, 長島, 桑原輪中の地下水位の傾向は比較的同じように表現されている。1980-2-8の高須輪中の上流部が表現されていないのは雲の影響により消されているためである。1980-2-1のデータは他のデータより観測値とよく一致し $5\text{米} \times 7 / \times 4$ で相関係数は0.8710となっている。1981-3-19の高須輪中では海津町より、沼新田から帆引新田付近の方が地下水位は高くなり、長島輪中では他のデータより地下水位が低く表現されている。1980-3-15の高須輪中の地下水位レベル図の傾向は比較的1980-2-8の表現に近く、平田町から下流の長島輪中にかけて地下水位が20~40cm(地盤から地下水位面まで)と一様に表現されている。

4). 観測井に対するランドサットデータ抽出の領域

観測データである地下水位面までの距離を目的変量とし、ランドサット座標上の位置を標定し説明変量との相関を求めているが、ランドサット座標上の位置は観測井を中心とする 3×3 のデータの平均値と 5×5 のデータの平均値として求めた場合、1980-9-2の例では相関係数 r は表4.4のような結果となった。

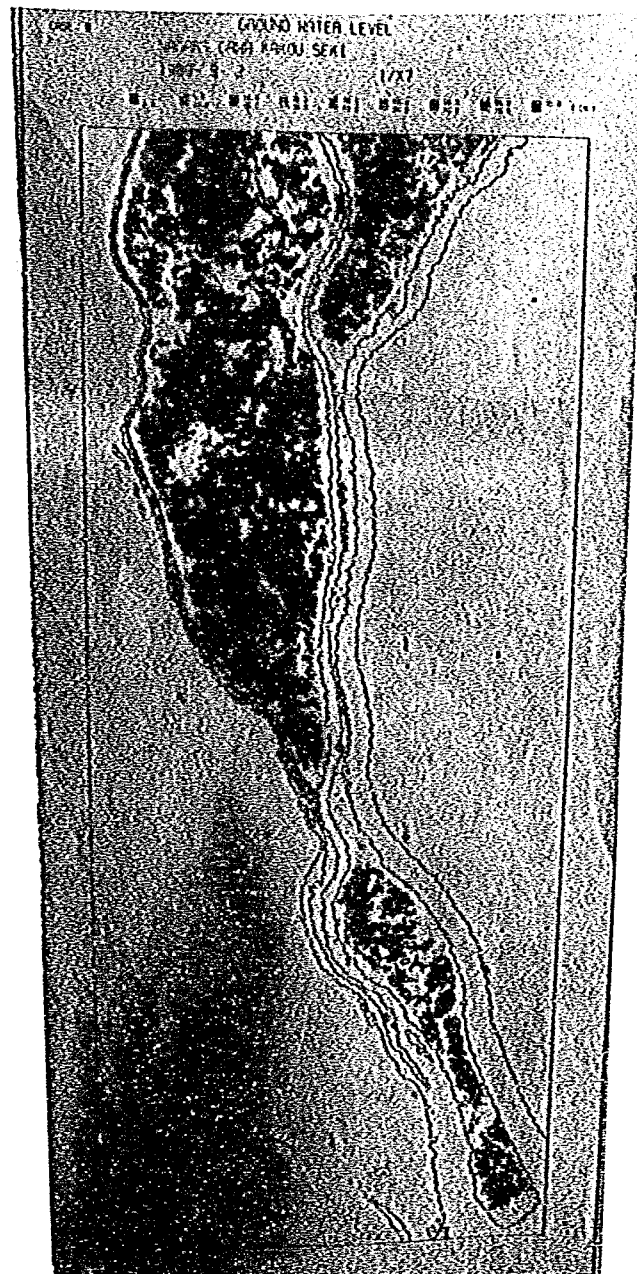


图 4.19

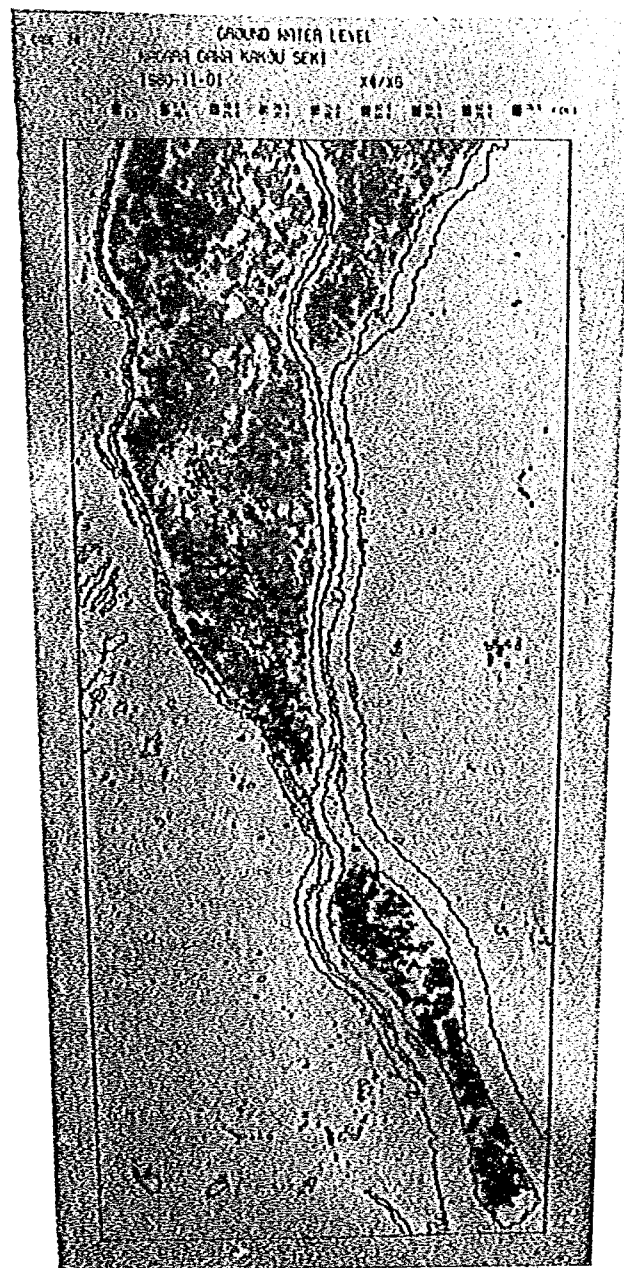


图 4. 20

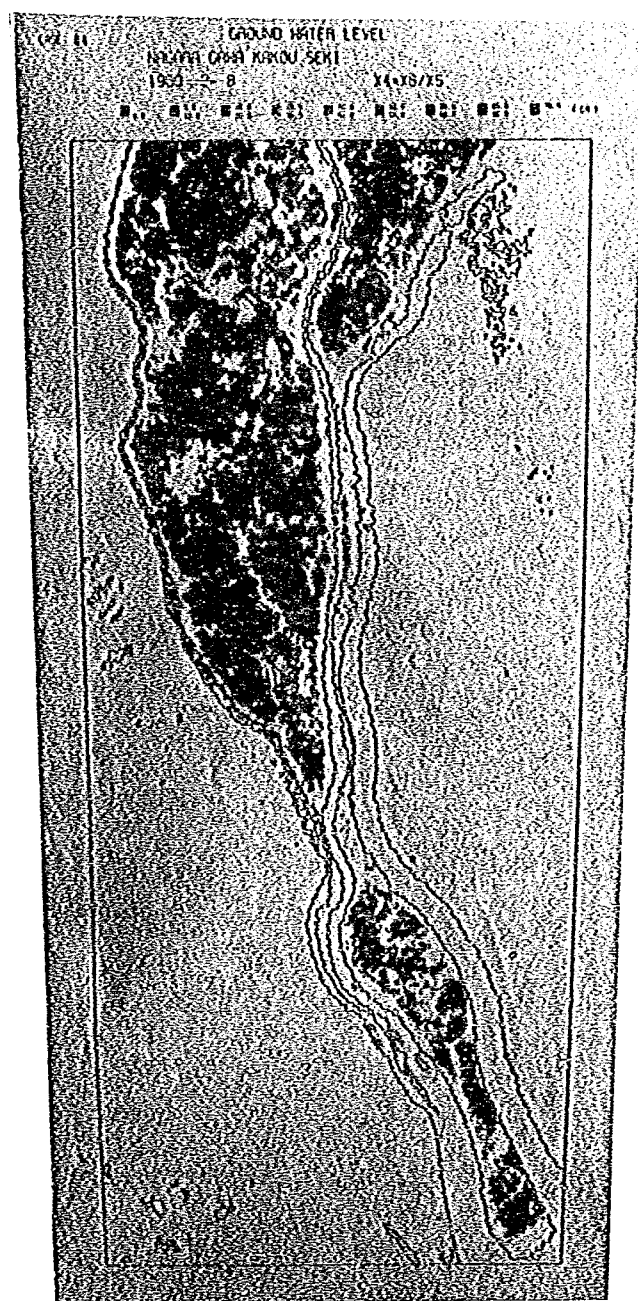


图 4.21

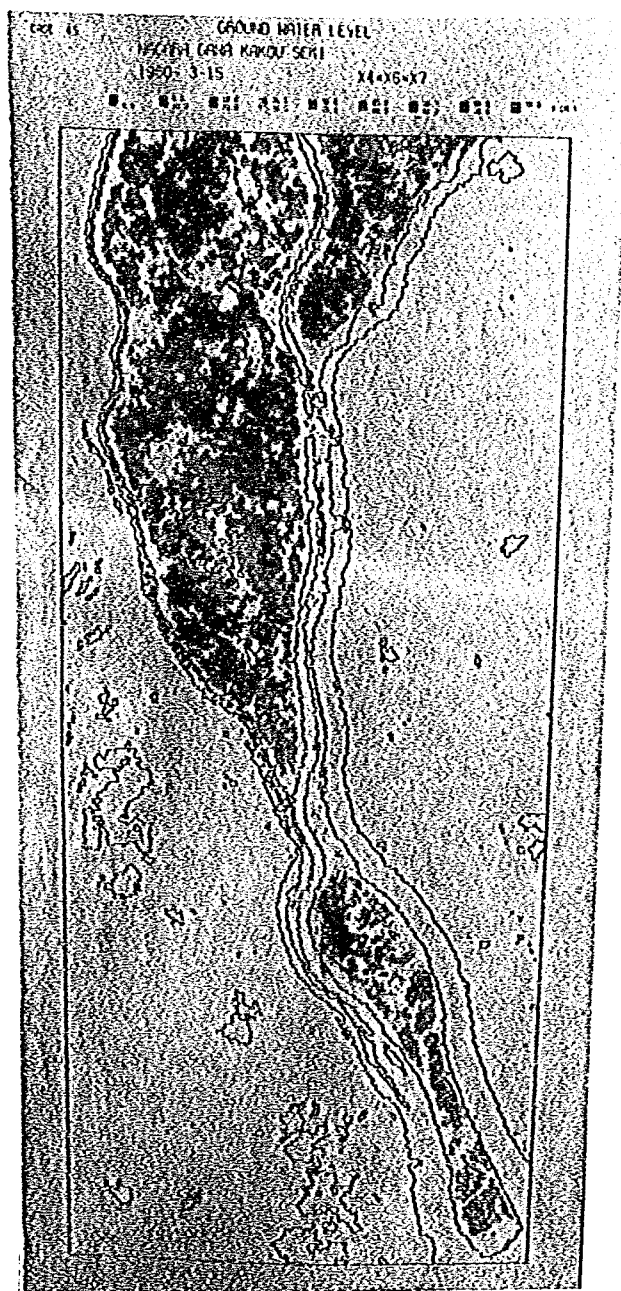


図 4. 22

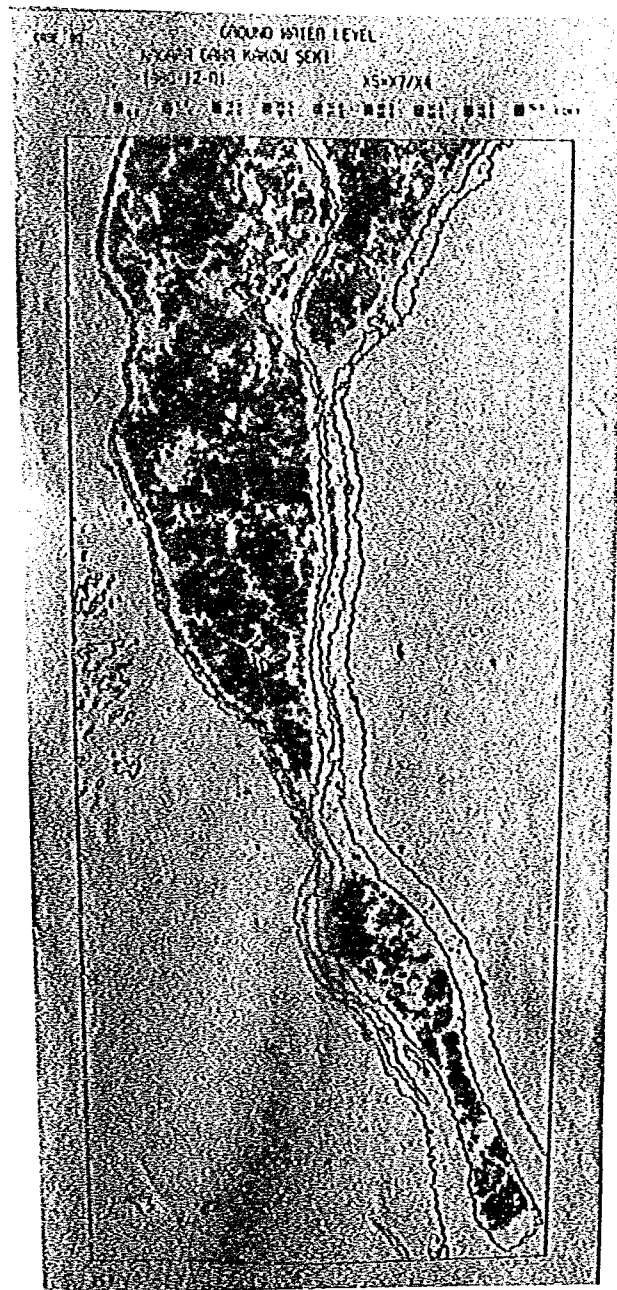
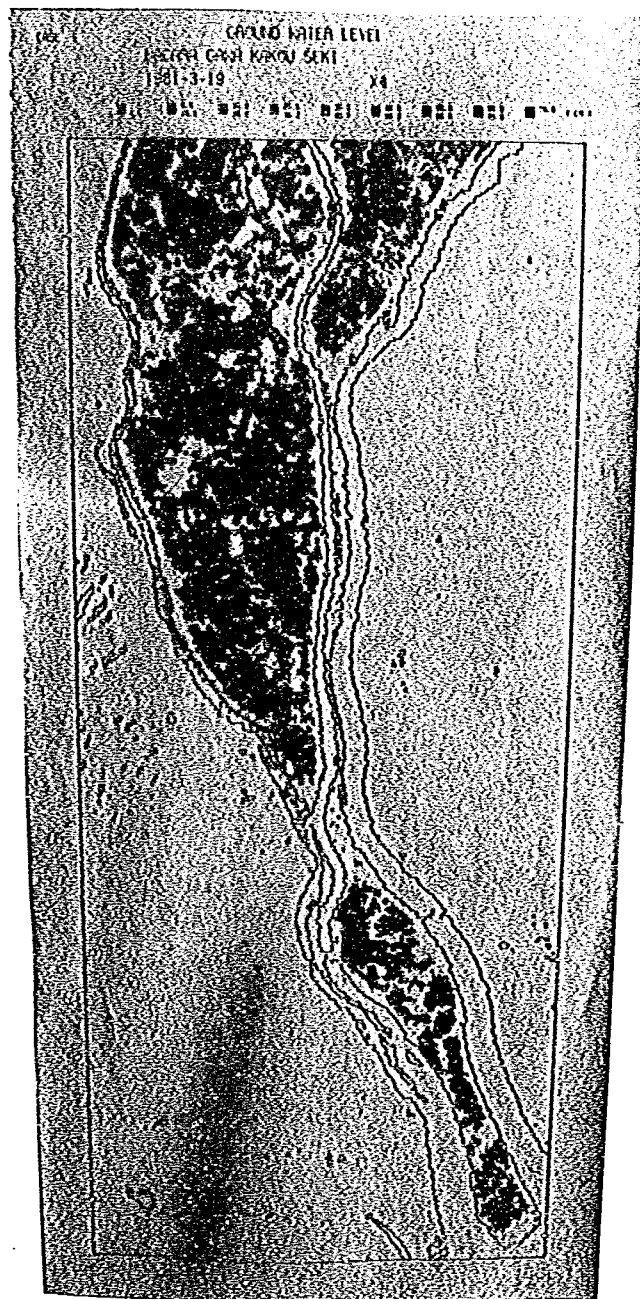


図 4. 23



☒ 4. 24

表 4.4 1980 年 9 月 2 日の 3×3 と 5×5 のデータの平均値

バンド \ 相関	3 × 3 の平均値	5 × 5 の平均値
4 バンド	− 0.1231	− 0.1415
5 バンド	− 0.0810	− 0.0647
6 バンド	− 0.5170	− 0.7402
7 バンド	− 0.8725	− 0.8472

7 バンドではあまり変化がなく、6 バンドでは 5 × 5 の方が高く出ているが、1979-11-1、1981-3-19 については 5 × 5 が各バンドとも低くなった。この原因としては、1980-9-2 の時期のように対象領域が稲で一様におおわれている場合は平滑化された値となるが、1979-11-1 の時期では刈入れ後の露出している土地と稲が混合された値となり相関は低く、1981-3-19 では地面が露出しているため他の物体を含めてしまい平均値が高くなっていると思われる。また、湖沼のような水面（霞ヶ浦の例）での相関は 5 × 5 の方がよい相関となった。逆にあまり小さな範囲を設定すると 1 画素の位置ずれでも他の物体の反射をそのままとる可能性があるため今回の地下水位観測井のような固定された所との相関を求めるための抽出領域は 3 × 3 の平均値が最適と考えられる。

5). 普遍回帰モデルの検討

回帰モデルは普遍的な回帰モデルの作成が望まれる。今年度までに 9 シーンのデータを処理解析したが、各バンドの相関を表 4.5 に示す。

表 4.5 各バンドの相関係数

日付 \ バンド	4 バンド	5 バンド	6 バンド	7 バンド
1979-5-23	0.8240	0.7111	0.9408	0.9358
79-9-8	0.0225	0.1097	− 0.4443	− 0.7310
79-10-23	− 0.0538	− 0.5136	− 0.2212	− 0.1683
79-11-1	− 0.4696	− 0.2838	0.1636	0.2221
1980-2-8	0.3751	0.5402	0.6518	0.5712
80-3-15	0.5767	0.6267	0.6952	0.6483
80-9-2	− 0.1231	− 0.0810	− 0.5170	− 0.8725
80-12-1	0.2546	0.2909	0.6293	0.8572
81-3-19	0.7571	0.4167	0.5199	0.4178

これを見ると回帰モデルの物理的意味も異なり、相関が高くなるバンドも違っているが、対象領域が

水田ということに着目すれば現在まで処理したシーンを表 4.6 のように季節的にモデルの分類が可能となる。このモデル毎の普遍回帰モデルの確立は、今後、他データの積重ねを待たなければならないが、例えば稲のある季節のモデルについては、2 シーンであるが 7 バンドが最も相関が高くなり、物理的な意味付けもできるので

$$1979-9-8 \text{ では } y = 51.74 \frac{1}{\times 7} - 0.8530 \quad \text{又は} \quad y = -0.0191 \times 7 + 1.14$$

$$1980-9-2 \text{ では } y = 83.90 \frac{1}{\times 7} - 1.6047 \quad \text{又は} \quad y = -0.0346 \times 7 + 1.83$$

$$\text{となるので、普遍回帰モデルは } y = 67.82 \frac{1}{\times 7} - 1.2289$$

$$\text{又は } y = -0.0269 \times 7 + 1.49 \quad \text{となる。}$$

他のモデルについては、各シーンの相関がバンドごとに異なるためデータの積重ねが必要となろう。

表 4.6 回帰モデルの分類

モデル	日 付
稲がある季節のモデル	1979-9-8, 1980-9-2
土壌が露出している季節のモデル	1980-3-15, 1981-3-19, 1980-2-8, 1980-12-1
刈入れ後の季節のモデル	1979-10-23, 1979-11-1
水田に水が入っている季節のモデル	1979-5-23

6). 誤差容因

ランドサットデータによる地下水位（土壌水分）解析を行う上で考えられる誤差の要因としては

i) 自然要因

ランドサットデータはあくまでも地表面反射レベルのデータであるという限界が各種の誤差要因を内包する。例えば、降雨等により地表面に水分が供給されれば土壌水分および地下水位による地表面に対する影響が消される。また、降雨後数時間で土壌は表面から乾燥してくれるので、降雨後ある程度時間を経過したデータでなければ使用できない。

ii) 人工要因

天然要因と同様に人工的に地表面に対して地下水位と相関を打消すような操作が行われていれば、その地域は誤った推定がなされる。例えば、極端な灌漑、地下水位のポンピング等

iii) 土地利用分類の誤分類

回帰モデルは水田においてのみ成立すると仮定しており土地利用分類で水田以外のものを水田と誤

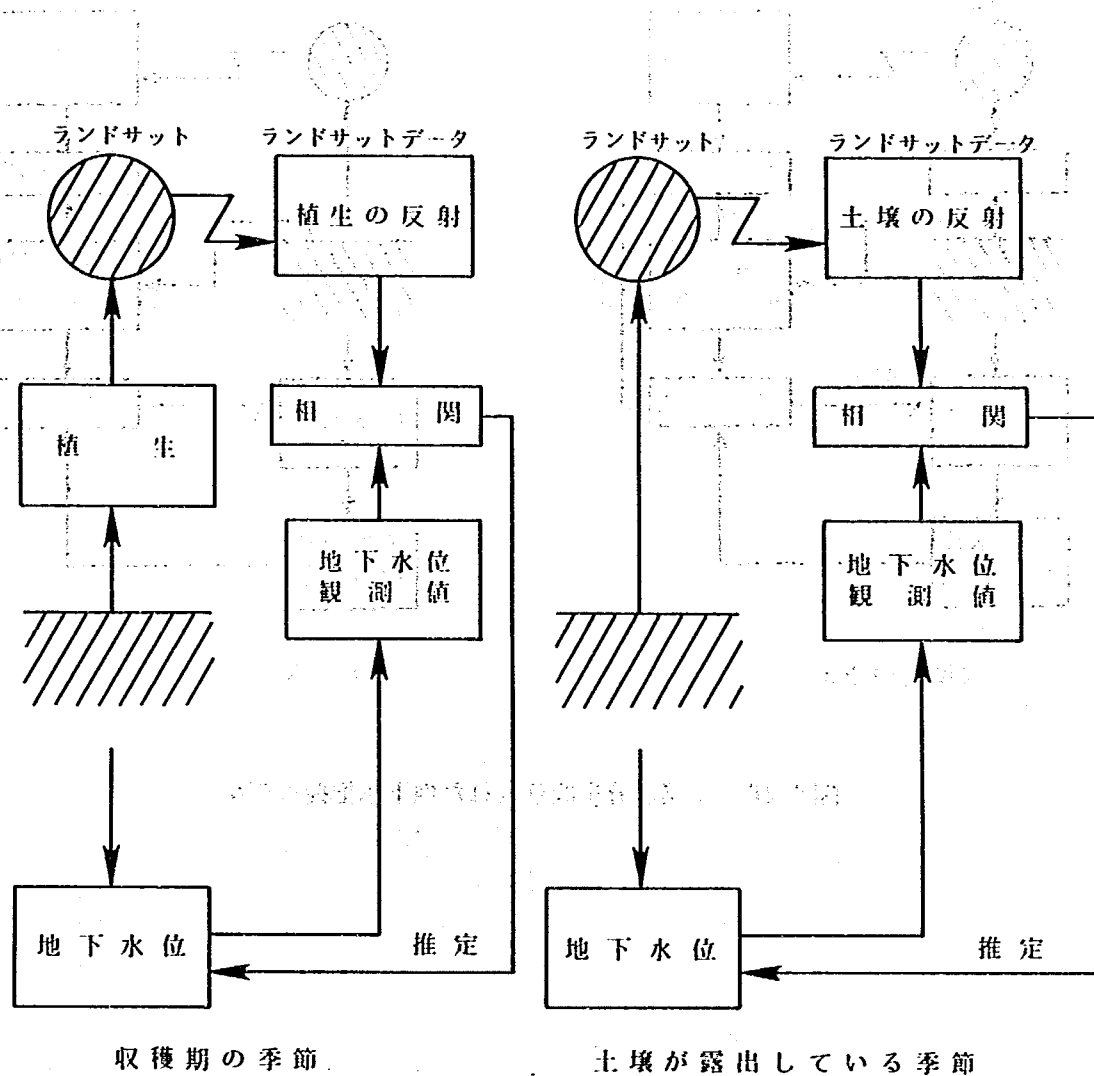
分類すれば当然誤った推定となる。

iv) ランドサットデータの誤差

放射線系補正誤差, 幾何学的補正誤差

7). 土壌水分を取り入れた地下水位把握モデル

今年度までの調査解析では収穫期の季節は植生を通して地下水位との関係を求め, 土壌が露出している季節では土壌を通して地下水位を面的に把握するモデルである。これらのモデルは図 4. 25 のようになる。



収穫期の季節で植生から地下水位を推定するモデルは植生と地下水位の相関を求めているため「植生が強い場所は土壌水分も多い」「地下水位が高ければ、土壌水分も多い」という仮定に立ち、土壌が露出している季節のモデルでは土壌と地下水位の相関を求めているため「地下水位が高ければ土壌水分も多い。」という仮定に立って地下水位を推定している。この仮定を検証し、モデルを改良して地下水位環境を把握するためには、土壌水分の現地測定、地下水位と土壌水分の関係を把握する必要がある。また、土壌水分の現地測定により地下水位環境を把握するためのランドサットデータ解析による図 4.26 のようなモデルが考えられる。

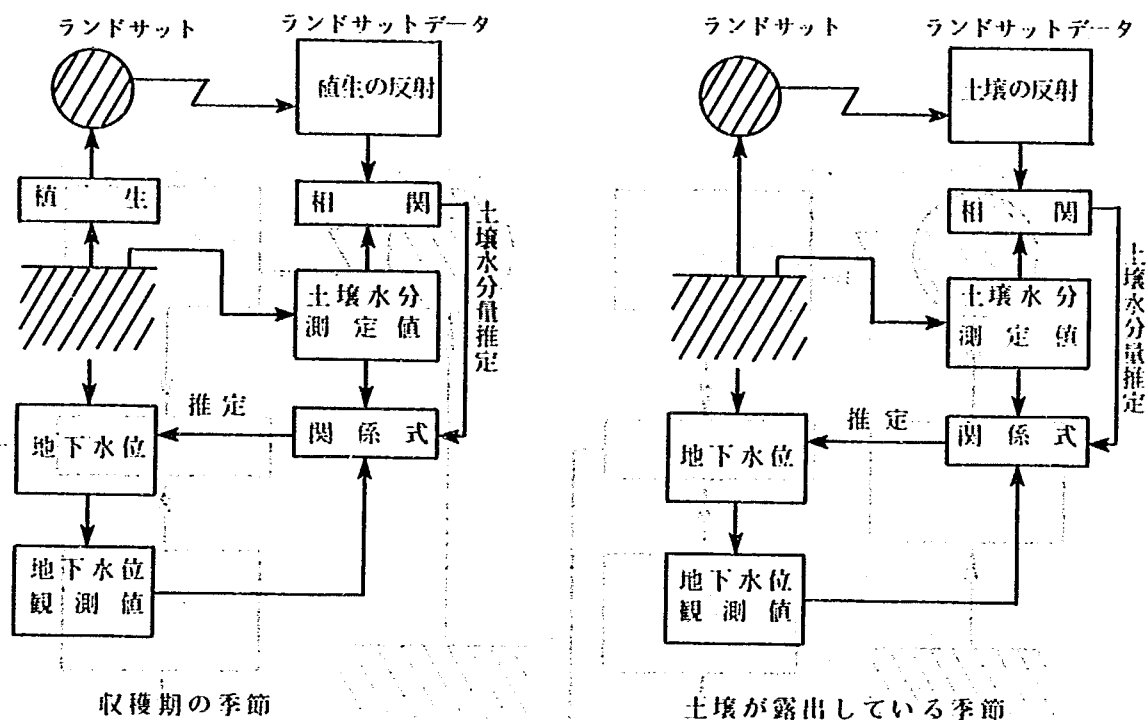


図 4.26 土壌水分を取り入れた地下水把握モデル

5. 地下水位と土壌水分

1). 毛管作用と土中毛管水の上昇高

液体表面では表面張力が働く。従ってガラスのような水に濡れる性質の細管を水中に入れると水が上昇し、表面は凹んだ曲面（メニスカス）を呈する。その上昇高 h はよく知られているように

$$h = \frac{2T \cos \alpha}{r_w \cdot d}$$

ここに T : 表面張力 $0.0759/\text{cm}$ (15°C)

d : 毛細管半径

α : 接触角

r_w : 比重

で与えられる。

この上昇によって毛管内頂部のメニスカス直下の水圧 P は大気圧 P_0 より低くなり両者の間に

$$P = P_0 - r_w h = P_0 - \frac{2T}{d}$$

の関係がある。すなわち大気圧を標準にとると、 P は負圧になる。明らかに、下端水面より Z の位置での圧力は $-r_w z$ となる。

土粒子も水に対し、ガラスと同様な親水性をもち、しかも土の間を網状に通る空隙路は毛細管状を呈するから、地下水面から水は吸い上げられて、ある高さまで昇り、ここに毛管水帯ができる。実際の空隙はもちろん円管状ではなく、局部的にみた空隙径もいろいろ変わるから毛管上昇高は一様ではないが平均的にみた土中毛管水の上昇高 h_c は

$$h_c = \frac{c}{e D_{10}}$$

ただし e : 間隙比

D_{10} : 有効径

c : $0.1 \sim 0.5 \text{ cm}$ の定数

であらわされる。

2). サクション

毛管水帯内の圧力は表面張力のため大気圧より低い。この負圧の絶対値をサクションと称するが、含水比が下がると、サクションが増すことは明らかである。

炉の中で乾かしたわずかな含水比の状態では、サクションが数百 kg/cm^3 にも達するといわれる。含水比に対して、このようにサクションが大幅に変化するため常用対数表示法が便利である。

サクションを水頭 (cm単位) であらわしたものの常用対数をPFと呼び、サクションの大きさの尺度と考える。すなわちサクションをSとかくと

$$PF = \log_{10} (S / rw)$$

で定義される。例えばサクションが $1 \text{ kg}/\text{cm}^3$ であれば $PF = 3$ である。又毛管水帯内では S / rw は地下水面からの高さZに等しいから

$$PF = \log_{10} Z$$

である。細粒土では最大毛管上昇高も大きいから、毛管水帯における限界のPF値も大きい。

実験室でサクションを測定する方法には、測定範囲によって土柱法 (PF 0 ~ 1.5)、吸引法 (PF 0 ~ 2.7)、遠心法 (PF 2.5 ~ 4.2)、加圧膜法、蒸気圧法 (PF 4.2 ~ 6.5) などがある。詳細については「土壌物理性測定法」(土壌物理性測定法委員会編1976, 養賢堂)のP134~159を参照されたい。

3). 水分特性曲線

サクションと平衡含水比の関係は土によって異なる特性を有している。この両者の関係をあらわす曲線を水分特性曲線という。ところで地下水面より上の土壤水帯で水の動きがない場合には、土壤水帯の任意の点における圧力水頭は地下水面からその点までの高さの負号をつけた値に等しい。従ってある土壌について、水分特性曲線が既知であれば、平衡状態における地下水面上の含水比の分布を推定することが可能である。図4.27は4種類の土についての平衡水分分布の例である。

さて、野外で水分特性曲線を測定する方法として、

同一地点でいろいろな含水量のときをねらって含水量と圧力水頭を同時測定するという方法がある。この場合の含水量測定には中性子水分計が適しており、圧力水頭はテンシオメーターで測定する。この方法は土壌構造を破壊することがないという利点がある。

4). 地下水位と地表部土壤水分

1). で述べたように、土中毛管水の上昇高は土壌の有効径の関係としてあらわされるが、その値は砂の20~30 cm から、壤土や埴土の数mまで変化する。3). で述べたことより、地下水面と地表面の距離がこの毛管上昇高以下である場合には、地表部での土壤水分は、地下水位に影響され、その影響の度合は土壌の水分特性曲線によって規定されていると考えられる。

ただし土壤水帯の水は地下水と完全な平衡状態に達することは珍しく、常に蒸発や蒸散による上向きの流れや浸透による下向きの流れが存在している。

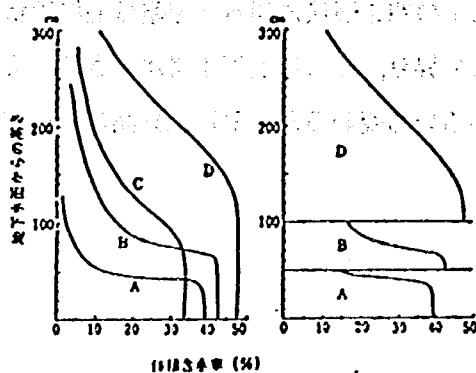


図4.27 平衡水分分布図

粗砂(A), 粒のそろった細砂(B), 粒のそろっていない細砂(C), 粘土(D) についての地下水面より上の平衡水分分布 (左図), 右図は物質A, B, Dが層をなしているときの平衡水分分布図, いずれも模式図

これらの影響がどれくらいのものであるのかは、現場での地下水位、地表部土壌水分の実測に基く解析に待たねばならない。

5). まとめ

上記の観点より、土壌水分に関して今後必要とされる調査事項をとりまとめると次のようになる。

① 現地土壌における毛管上昇高の推定

→ 算定式 及び できれば室内実験

② 現地土壌の水分特性曲線の作成

→ 室内実験 及び 現地測定

③ 地下水位と現地地表部土壌水分の関係の実測

→ テンシオメーター、中性子水分計、水分密度計等による実測

6. まとめと今後の問題点

今年度までにランドサット MSS (CCTテープ) の9シーンを解析しえられた知見を以下にまとめる。

(1) 秋季データの1979-9-8, 1980-9-2では植生から土壌水分、地下水位を把握するモデルで単相関式がよく7バンドが相関係数が高く、「植生が強い場所は土壌水分も多く」「地下水位が高ければ、土壌水分も多い」という仮定に立って土壌水分、地下水位を把握できる。

(2) 冬季データの1980-2-8, 1980-3-15, 1980-12-1, 1981-3-19では露出している土壌から土壌水分、地下水位を把握するモデルでは、各シーンごとに相関が高くなるバンドが違う。「地下水位が高ければ土壌水分も多い」という仮定に立って土壌水分、地下水位を把握できる。

(3) 1979-10-23, 1979-11-1のデータは負の相関が出て、物理的な意味付けは得られていない。また、各バンドとも相関係数は低く出る。

(4) 観測井に対応するランドサットデータ抽出の領域は 3×3 の9個の平均値が最適である。

(5) 普遍的な回帰モデルの作成は、対象領域が水田ということに着目すれば季節的にモデルの分類が可能となる。

(6) (1), (2)の仮定を検証し、モデルを改良して土壌水分、地下水位環境を把握するため、土壌水分の実測データ、地下水位と土壌水分の関係を明らかにする必要がある。

(7) 土壌水分に関して今後必要とされる調査事項は

i) 現地土壌における毛管上昇高の推定

ii) 現地土壌の水分特性曲線の作成

のようになる。また、ランドサット MSS データ解析上の今後の問題点としては、

① 土壌水分を取り入れた回帰モデルの検討

② 土壌水分を含めた時系列モデルの検討

③ 土壌水分から地下水位環境を把握するための検討

④ 航空機 MSS を利用した土壌水分、地下水位環境把握のための可能性の検討

等がある。

おわりに

今後、分解能がよい新しいランドサットを打ち上げる計画もあり、分解能は80 mから30 mへとこれがさらに小さくならう。これによりランドサットデータは土木の分野で現在分解能が悪いため未利用の分野（河川の水質、ダム貯水池の水質、水温調査等）においても利用され、新しい計測技術として取り入れられる可能性を持っている。

おわりに、本解析にあたり元システム課二階堂義則氏（浅瀬石川ダム工事事務所電気通信係長）に多大な御教示をいただいた。また、種々御配慮頂いた水資源開発公団中部支社長良川河口堰建設所の内野調査設計課長、橋係長はじめ関係各位に感謝の意を表します。

地下水位把握のためのランドサット
データ解析報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 1832 号
昭和57年3月(1982)
池村雅司・野口 正
中沢保雄・寺川 陽

キーワード：リモートセンシング、ランドサット、地下水位

要 旨 長良川河口堰建設による上流側水位の上昇は輪中という特殊な条件のもとで漏水量の増加、地下水位の上升、土壤の湿潤化等の影響が考えられその対策が必要となっている。このため現在、観測井により、地下水位の常時観測を行い地下水の把握に努めているが、観測井によるデータはあくまで一次元のデータであること等により対象地域全体の面的な把握は不可能である。

本報告書はランドサットデータ解析により現状の輪中内の地下水環境(土壤含水量)を把握するため、できる限り四季を通じた時期のデータ解析を行い、普遍回帰式の抽出等に努めた結果をとりまとめたものである。

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十円切手
をはって下
さい

茨城県筑波郡

豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

企画部システム課 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第1832号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印