

## 第 II 部

## 第II部 各 論

### 第1章 衛星画像解析

#### 1.1 目的及び解析対象範囲

衛星画像解析の目的は写真地質学的判読作業により、調査対象地域の広域的な地質構造の把握及び岩相区分をすることである。

解析対象範囲は表4の緯度・経度を囲む図5に示す範囲であり、解析対象面積は550km<sup>2</sup>である。

本画像解析では写真地質学的判読作業が容易となるよう、リニアメント抽出及び地質区分を目的としたデータ処理を行った。各データ処理については後節で記述する。

表4 解析対象範囲の緯度・経度

Corner	Longitude	Latitude
Upper Left	9° 40' 10.3" E	36° 39' 05.0" N
Upper Right	9° 43' 02.6" E	36° 36' 13.9" N
Lower Left	9° 03' 10.4" E	36° 16' 03.4" N
Lower Right	9° 10' 24.6" E	36° 10' 44.6" N

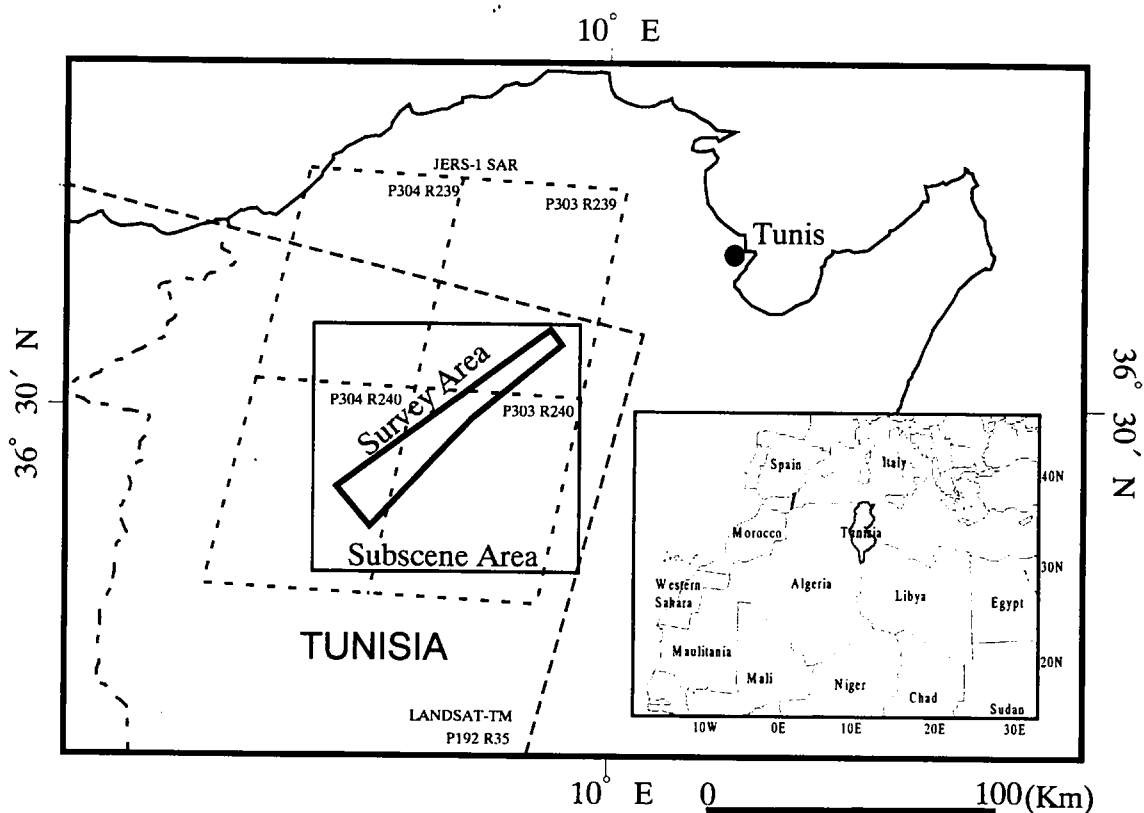


図5 画像位置及び解析範囲図

## 1.2 LANDSAT-TM画像解析

### 1.2.1 岩石及び鉱物の識別原理

岩石及び金属鉱床を構成する多くの鉱物は太陽光線に照射されると、可視域(VIR)、短波長赤外域(SWIR)及び熱赤外域(TIR)において、それぞれの鉱物独自のスペクトル特徴を示す。したがって、太陽光線の電磁エネルギーと岩石・鉱物との相互作用によって生成されるスペクトルを観測することによって、理論的には岩石・鉱物の識別が可能である。

このようなスペクトル特徴は紫外域と可視域では電子エネルギー準位の遷移、短波長赤外域と熱赤外域では鉱物を構成する分子の伸縮振動、遠赤外域とマイクロ波領域では分子の回転による効果によるものである。

可視域では、Fe, Mn, Cu, Ni, Crなど遷移金属の電子エネルギー準位の遷移に伴う反射スペクトルが現れる。3価の鉄の吸収スペクトルは0.35, 0.45, 0.55~0.65及び0.75~0.95  $\mu\text{m}$ 帯に現れ、2価の鉄の吸収スペクトルは1.0~1.1と1.8~2.0  $\mu\text{m}$ 帯に現れる。

短波長赤外域(1.2~3.0  $\mu\text{m}$ )では、上述したように鉱物を構成する分子の伸縮振動に起因するスペクトルが現れる。鉱物の吸収スペクトルは結晶構造中のAl-OH基, CO<sub>3</sub>基, Mg-OH基, Fe-OH基などの化学構造に依存している。すなわち、Al-OH基は2.16~2.24  $\mu\text{m}$ 帯, CO<sub>3</sub>基は2.3~2.39  $\mu\text{m}$ 帯, Mg-OH基は2.3~2.39  $\mu\text{m}$ 帯, Fe-OH基は2.24~2.27  $\mu\text{m}$ 帯にそれぞれ吸収特徴を有する。表5に短波長赤外域に吸収特徴を有する代表的な鉱物を示し、その吸収波長帯を示す。図6に代表的な鉱物(鉄酸化物と粘土鉱物)の分光スペクトルパターンを示す。

表5 短波長赤外域に吸収特徴を示す鉱物

Constituent Responsible for Absorption Spectrum	Wavelength Range of Absorption Spectrum	Typical Mineral and Mineral Group
Al-OH	2.16-2.24 $\mu\text{m}$	Kaolinite, Pyrophyllite Montmorillonite, Alunite Muscovite/Sericite, Gypsite
Mg-OH	2.30-2.39 $\mu\text{m}$	Serpentinite, Talc, Biotite Chlorite, Hornblende
Fe-OH	2.24-2.27 $\mu\text{m}$	Jarosite
CO <sub>3</sub>	2.30-2.39 $\mu\text{m}$	Carbonates
H <sub>2</sub> O	2.00-2.50 $\mu\text{m}$	Gypsum, Zeolite

熱赤外域(7.0~15.0  $\mu\text{m}$ )は太陽光による放射エネルギーよりも地表からの熱放射エネルギーを主とする波長域である。本波長域では分子の変角振動に起因するスペクトルが現れ、主要造岩鉱物である石英、長石などの珪酸塩鉱物が吸収特徴を示す。熱赤外域における珪酸塩鉱物のスペ

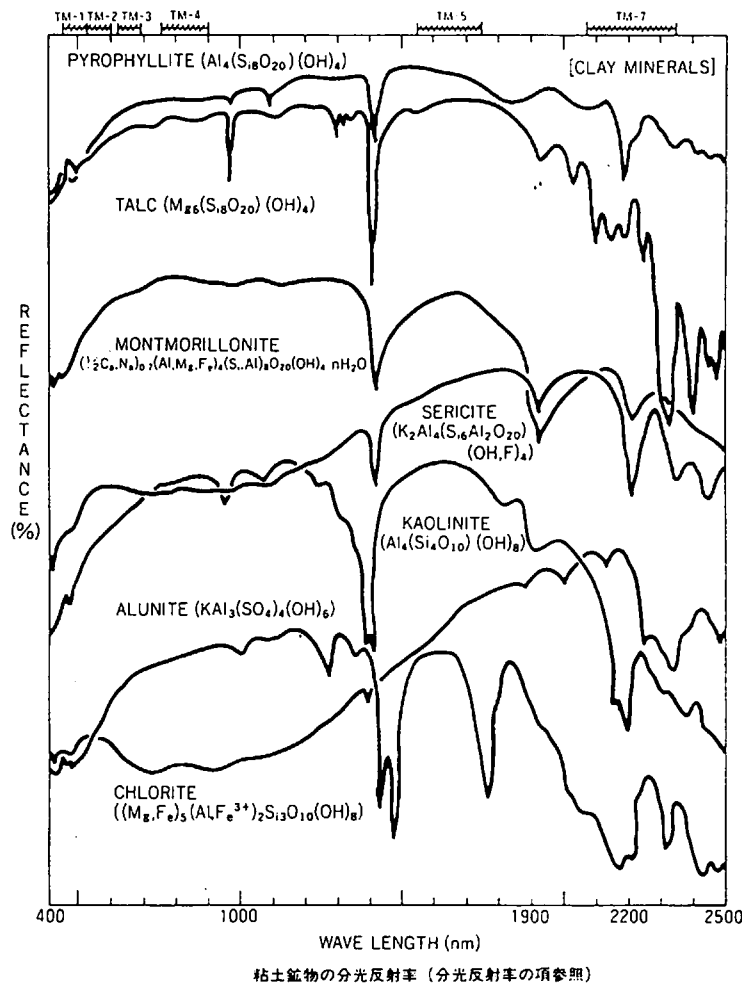
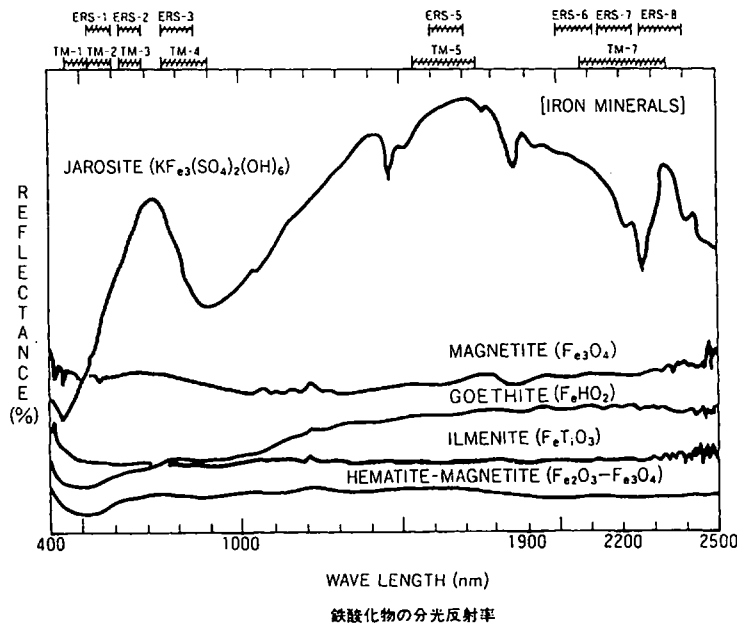


図6 鉄酸化物及び粘土鉱物の分光反射率

クトル特徴を以下にまとめる。

①7.0~9.0  $\mu\text{m}$ の波長域では Christiansen Peakと呼ばれる放射率の極大値の位置(波長)が  $\text{SiO}_2$ 含有量が少なくなるにつれて短波長側から長波長側へ移動する。すなわち, 7.0  $\mu\text{m}$ (酸性)から9.0  $\mu\text{m}$ (超塩基性)へ移動する。

②8.5~12.0  $\mu\text{m}$ の波長域では,  $\text{Si-O}$ の振動に起因する吸収スペクトルが現れる。放射率が極小となる波長は $\text{SiO}_4$ の縮合度が高いテクト珪酸塩では短く(9.0  $\mu\text{m}$ 付近), 縮合度が低いソロ珪酸塩・ネソ珪酸塩では長くなる(11.5  $\mu\text{m}$ 付近)。

③12.0~15.0  $\mu\text{m}$ の波長域では, テクト珪酸塩だけが吸収スペクトルを示し, 他の珪酸塩鉱物は吸収を示さない。

リモートセンシングにおける岩石・鉱物の識別についての理論的背景は上述のとおりであるが, LANDSAT-TMデータの鉱物識別への適用にはスペクトル分解能に限界がある。例えば, 短波長赤外域のバンド7はスペクトル分解能が0.27  $\mu\text{m}$ であり, 上述のような粘土鉱物識別は不可能であるが, "Total clay"として他の地質单元と識別可能となる。



## 1.2.2 使用データ及び画像処理

### (1) 使用データ

本画像解析に使用したLANDSAT-TMデータの諸元を表6に、LANDSAT-TMの観測波長域及び地表分解能を表7に示す。なお、LANDSAT-TMデータは解析対象地域において植生の活性度がもっとも低い乾季(9月)のデータを使用した。

表6 LANDSAT-TMデータ諸元

センサー	パス(Path)	ロウ(Row)	データ取得日
LANDSAT-TM	192	35	1987.09.13

表7 LANDSAT-TMの観測波長域及び地表分解能

バンド	波長帯( $\mu\text{m}$ )	分解能(m)	走査幅(km)
1	0.45~0.52	30	185
2	0.52~0.60	30	185
3	0.63~0.69	30	185
4	0.76~0.90	30	185
5	1.55~1.75	30	185
6	10.40~12.50	120	185
7	2.08~2.35	30	185

LANDSAT-TMデータは可視近赤外域に4バンド(バンド1~4)、短波長赤外域に2バンド(バンド5・7)、熱赤外域に1バンド(バンド6)を持つ多バンドデータである

前節で述べたように、可視近赤外域のバンド1~4には遷移金属の電子エネルギー準位の遷移に伴う反射スペクトルが現れ、特に、赤鉄鉱、鉄明ばん石、針鉄鉱、褐鉄鉱などの鉄酸化物の吸収をバンド1(0.45~0.52 $\mu\text{m}$ )で観測可能である。また、短波長赤外域のバンド7(2.08~2.35 $\mu\text{m}$ )で各種粘土鉱物及び炭酸塩鉱物の吸収を観測可能である。

### (2) 画像処理

本画像解析に使用したデータを画像化する際に使用した地図投影パラメータを表8に示す。

LANDSAT-TMフルシーンから解析対象範囲を含む2,685ピクセル×2,628ラインを切り出し、表8に示す地図投影パラメータによって、各種フォールスカラー画像及び主成分圧縮画像を作成した。

表8 地図投影パラメータ

Coordination	U T M
Zone	32
Projection	Transverse Mercator
Earth Model	WGS84
Center Longitude	9.00000
Upper Left	500,000.000E;4,057,938.798N
Lower Right	575,277.425E;3,984,270.969N

### 1.2.3 フォールスカラー画像

#### (1) RGB=3・2・1(図7)

(財)リモートセンシング技術センター(RESTEC)がトゥルーカラー画像として提供するバンド組合せである。このバンド組合せは肉眼に近いイメージを表現することが知られている。解析対象地域の画像では、植生地域が黒色又は暗褐色を呈し、裸地は白色、淡緑色、淡褐色を呈し、耕作地において褐色、淡褐色、淡灰色を呈する。この画像では、地形、地質構造を読み取ることは可能であるが、岩相を識別することは困難である。

#### (2) RGB=4・3・2(図8)

RESTECがフォールスカラー画像として提供するバンド組合せである。このバンド組合せは一般に植生、地形、地勢などを良く表現することが知られている。解析対象地域の画像では、山地、河川沿い及び集落で赤褐色～赤色を呈し、植生が多いことを示している。また、この画像では、植生、地形、地質構造を読み取ることは可能であるが、岩相を識別することは困難である。

#### (3) RGB=7・4・1(図9)

金属鉱床に伴われる粘土化変質帯・炭酸塩岩類及び鉄酸化帯の抽出をねらったバンド組み合わせのフォールスカラー画像である。すなわち、バンド7によって粘土化変質帯・炭酸塩岩類、バンド1・4によって鉄酸化帯の識別を目的としている。本画像では可視近赤外域のバンド1・4に短波長赤外域のバンド7(2.08～2.35 $\mu$ m)の情報が加わったことによって、可視近赤外域だけのフォールスカラー画像(図7・8)に比べて色彩のバラエティーに富む画像となった。画像上では山地において緑色、暗緑色、紫色、黄色、淡緑色、淡灰色などを呈し、岩相の違いを表しているものと考えられる。また、地形、地質構造、土地利用状況なども読み取ることが可能である。

### 1.2.4 主成分圧縮画像

主成分分析を画像解析に使用する目的は多バンドデータの情報を圧縮し、同時に複雑な情報を整理・選択して解釈することである。例えば、フォールスカラー画像上には3バンドの情報しか反映させることができないが、主成分分析によって得られた3つの主成分をカラー合成することによって、多バンドの情報(複数の鉱物のスペクトル特徴)をまとめて反映することができ、かつ必要な情報だけを選択することができる。本画像解析においては、主成分分析の入力成分としてバンド1・2・3・4・5・7の6バンドを使用した。

表9に主成分分析の結果得られた各主成分の固有値及び寄与率を示し、表10に各主成分の固有ベクトルを示す。表9から明らかなように、第1主成分の累積寄与率が91%に達しており、第1主成分で6バンドのデータの特徴を91%を表している。したがって、主成分の数は1つで充分であるが、ここではより詳しくみるため、第5主成分までとりあげることとする。各主成分はそれぞれ以下のように解釈される。



図7 フォールスカラー画像 (RGB=3・2・1)



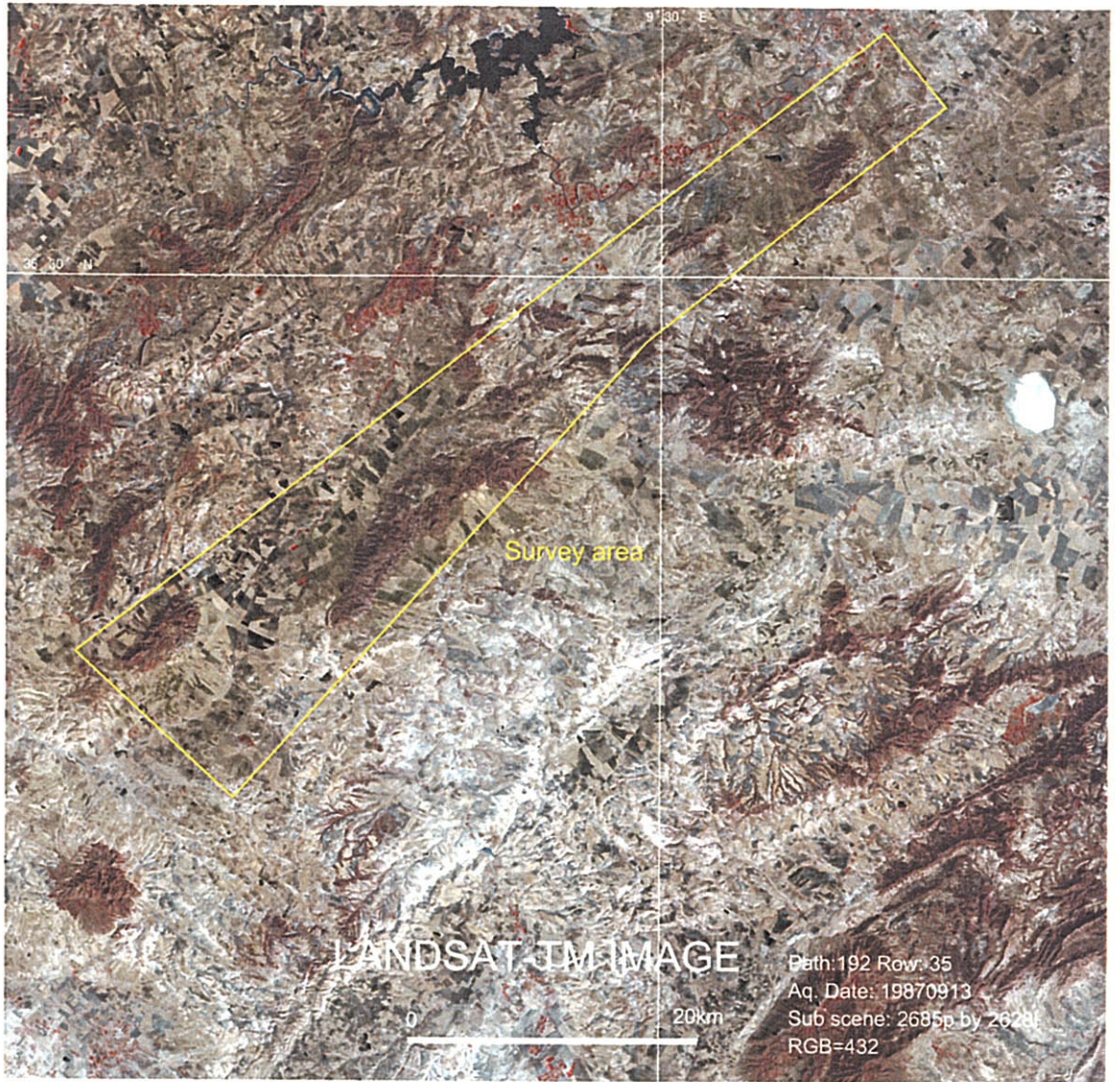


図8 フォールスカラー画像 (RGB=4・3・2)



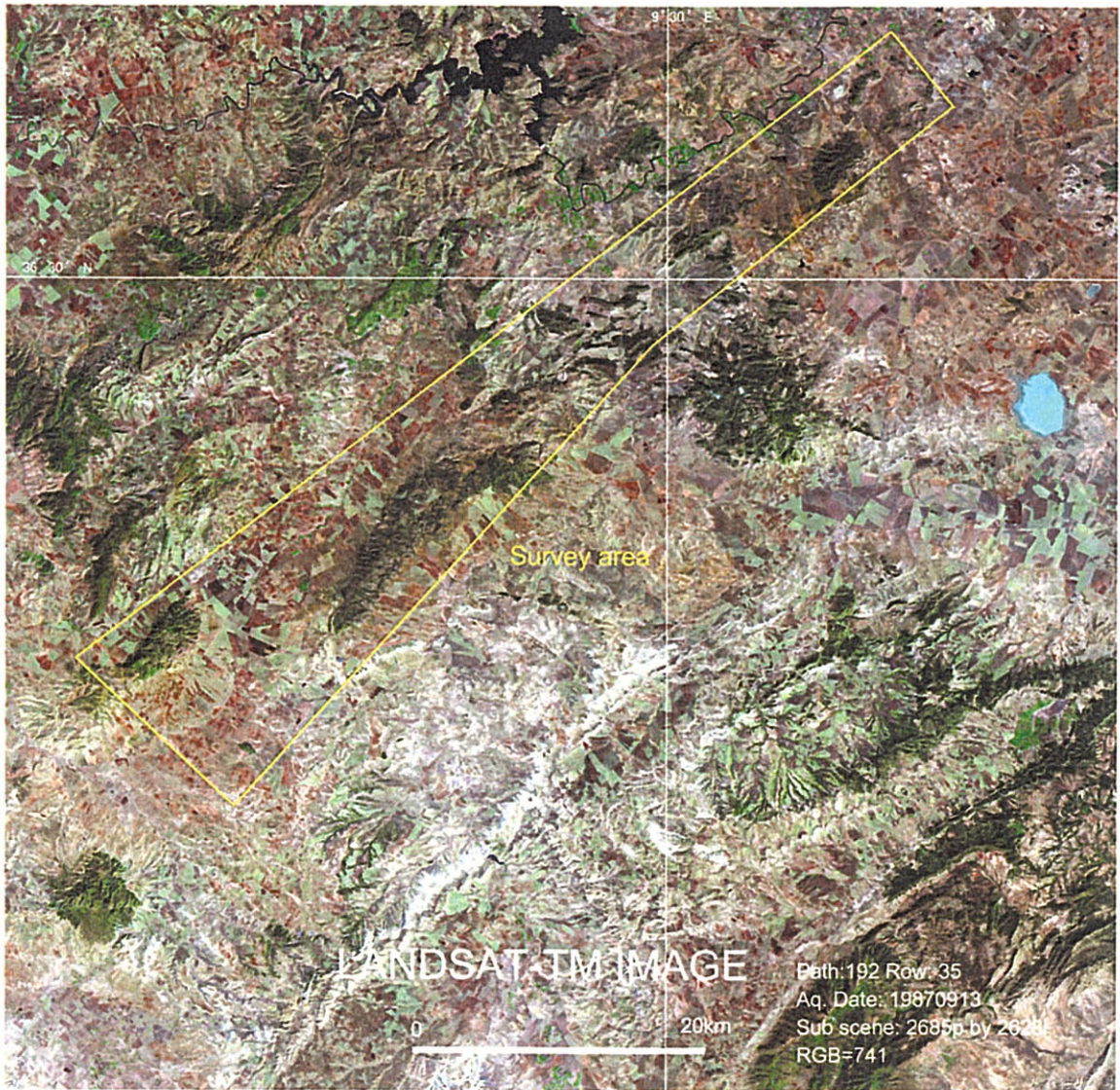


図9 フォールスカラー画像 (RGB=7・4・1)

表9 各主成分の固有値及び寄与率

Eigenchannel	Eigenvalue	Deviation	Contribution
PC1	3308.2209	57.5171	90.84%
PC2	224.3998	14.98	6.16%
PC3	71.4512	8.4529	1.96%
PC4	22.8297	4.778	0.63%
PC5	12.4711	3.5314	0.34%

表10 各主成分の固有ベクトル

	Band_1	Band_2	Band_3	Band_4	Band_5	Band_7
PC1	0.31187	0.23429	0.42717	0.3041	0.65672	0.37633
PC2	0.49195	0.33167	0.38159	0.29643	-0.51948	-0.38032
PC3	-0.40257	-0.18396	-0.06769	0.75454	0.20107	-0.43562
PC4	-0.14969	-0.00997	0.46023	-0.49694	0.36215	-0.62256
PC5	0.60781	-0.03198	-0.61225	-0.04084	0.34804	-0.36318

第1主成分(PC1) 固有ベクトルの係数はいずれも正で、0.4前後の値になっており、どの変量の値が大きくなっても、この主成分の値は大きくなることから、6バンドの波長帯(0.45~2.35 μm)全域の反射スペクトルの大小を表しており、アルベドを表す主成分と解釈される。

第2主成分(PC2) バンド7及びバンド5の固有ベクトルが高い負の値を示すことから、主にこれらのバンドに吸収を示す炭酸塩鉱物や粘土鉱物に起因する主成分であると考えられる。

第3主成分(PC3) バンド4の固有ベクトルが高い正の値を示し、バンド1及びバンド7の固有ベクトルが高い負の値を示すことから、主にこれらのバンドに高反射及び吸収を示す植物及び鉄酸化物に起因する主成分であると考えられる。

第4主成分(PC4) バンド7の固有ベクトルが高い負の値を示すことから、主にこのバンドに吸収を示す粘土鉱物及び炭酸塩鉱物に起因する主成分であると考えられる。

第5主成分(PC5) バンド1とバンド3の固有ベクトルの絶対値が高い値を示すことから、主にこれらのバンドに高反射及び吸収を示す鉄酸化物に起因する主成分であると考えられる。

図10に主成分圧縮画像(RGB=PC2・PC3・PC4)を示す。本画像は主に地形の陰影(アルベド)に起因する主成分であると考えられる第1主成分(PC1)を使用していないため、地形の陰影(アルベド)の影響が除去され、主に植生及び地質(岩相)の情報が反映された画像であると考えられる。

各主成分の解釈から画像上では、赤及び青系統の発色域は炭酸塩鉱物や粘土鉱物が分布し、緑系統の発色域は植物及び鉄酸化物が多く分布することを示している。





図10 主成分圧縮画像 (RGB=PC2・PC3・PC4)

### 1.2.5 写真地質学的判読

写真地質学的判読作業には、地質、地質構造、岩相などを最も反映した画像であると考えられるフォールスカラー画像(RGB=7・4・1)を使用した。判読結果の整理にあたっては、既存の縮尺1:500,000地質図(Ministere de L'economie Nationale Office National des Mines Departement de la Geologie Service Geologique National,1985)を参考とし、その結果を地質判読図にまとめた。表11に判読チャートを示し、図11に岩相区分図を示し、図12に地質構造解析図を示す。

判読の結果、地質単元は10に区分された。判読された各地質単元ごとに画像上での特徴を以下にまとめる。

#### (1) 単元T

解析対象地域内において、北東-南西方向に伸長するドーム状構造を呈し、他の地質単元と容易に区別できる。色調は暗緑色、暗褐色を呈し、肌合いは中程度で部分的に層理も認められる。既存の地質図では、三畳紀の堆積岩類、炭酸塩岩類、蒸発岩類(T)に対比される。

#### (2) 単元C1

色調は暗緑色、緑色、淡緑色、暗褐色、紫色を呈し、肌合いは中程度である。層理が発達し岩石の抵抗度が高い。既存の地質図では、白亜紀の堆積岩類(マールなど)、炭酸塩岩類(aC2, C1)に対比される。

#### (3) 単元C2

主に対象地域南東方に広く分布する。色調は淡緑色、紫色、白色、赤褐色を呈し、肌合いは細かい。層理は中程度認められ、単元C1に比べ岩石の抵抗度が低い。既存の地質図では、白亜紀の堆積岩類(マールなど)(C2-E1, C2)に対比される。

#### (4) 単元P

対象地域南西方に分布する。色調は淡緑色、淡褐色、淡黄色、桃色、白色を呈し、肌合いは中程度である。層理は稀に認められ、岩石の抵抗度が低い。既存の地質図では、暁新世の堆積岩類(Cm2-P)に対比される。

#### (5) 単元E

色調は褐色、赤褐色、緑色、暗褐色を呈し、肌合いは細かい。層理は稀に認められ、岩石の抵抗度は低い。既存の地質図では、始新世の堆積岩類(E2-3, aE2-3, E1, aE1)に対比される。

#### (6) 単元O

色調は暗緑色、暗褐色、紫色を呈し、肌合いは中程度である。層理は稀に認められ、岩石の抵抗度は中程度である。既存の地質図では、漸新世の堆積岩類(M1, O-M1, O, O1)に対比される。

#### (7) 単元M

色調は淡緑色、淡褐色、淡黄色、桃色、淡灰色を呈し、肌合いは中程度である。層理は中程度認められ、岩石の抵抗度は中程度である。既存の地質図では、中新世の堆積岩類(M3)に対比される。



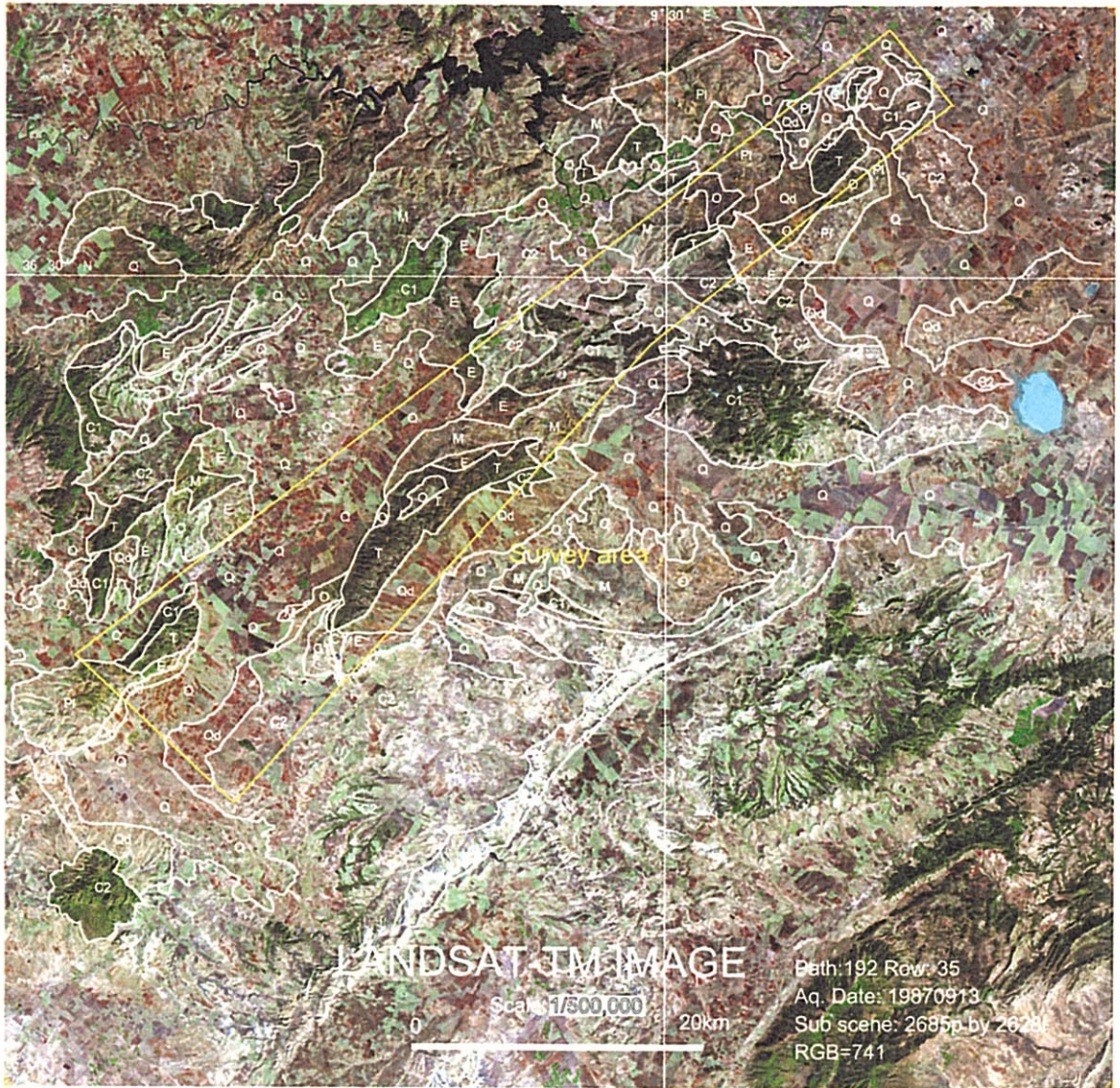


图11 LANDSAT-TM岩相区分图





## (8) 単元 P L

色調は淡緑色，黄色，淡黄色を呈し，肌合いは中程度である。層理は稀に認められ，岩石の抵抗度は中程度である。既存の地質図では，鮮新世の堆積岩類(P1, M-P1)に対比される。

## (9) 単元 Q D

山地の斜面に分布する。色調は褐色，淡緑色を呈し，肌合いは非常に細かい。岩石の抵抗度は非常に低い。既存の地質図では，第四系の砂堆(dQ)に対比される。

## (10) 単元 Q

河川沿いの平地に広く分布し，耕作地として利用されている。色調は褐色，桃色，緑色，淡緑色，紫色を呈する。既存の地質図では，第四系(aQ)に対比される。

表11 判読チャート

Photogeologic units	Image characteristics		Geomorphological features				Correlation with Geologic map (1/500,000)*
	Tone	Texture	Drainage		Rock resistance	Bedding	
			pattern	Density			
Q	brown, pink, green, light green, violet	none	---	---	---	none	aQ
Qd	brown, light green	very smooth	parallel	low	very low	none	dQ
Pl	light green, yellow, light yellow	intermediate	pinnate	high	moderate	rare	Pl, M-Pl
M	light green, light brown, light yellow, pink, light grey	intermediate	dendritic	moderate	moderate	moderate	M3
O	dark green, dark brown, violet	intermediate	dendritic	moderate	moderate	rare	M1, O-M1, O, O1
E	brown, reddish brown, green, dark brown	smooth	dendritic	low	low	rare	E2-3, aE2-3, E1, aE1
P	light green, light brown, light yellow, pink, white	intermediate	dendritic	moderate	low	rare	Cm2-P
C2	light green, violet, white, reddish brown	smooth	dendritic	moderate	low	moderate	C2-E1, C2
C1	dark green, green, light green, dark brown, violet	intermediate	dendritic	moderate	high	well	aC2, C1
T	dark green, dark brown	intermediate	dendritic	high	high	moderate	T

\*: MINISTERE DE L'ECONOMIE NATIONALE OFFICE NATIONAL DES MINES DEPARTEMENT DE LA GEOLOGIE SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL(1985); CARTE GEOLOGIQUE DE LA TUNISIE ECHELLE 1:500,000