

## 第4章 衛星画像解析

### 4-1 LANDSAT TM 画像処理・作成

今回の調査では ASTER センサーを利用して画像解析を行ったが、ASTER 画像未取得の地域については平成9年度アルゼンティン共和国資源開発協力基礎調査鉱物資源広域調査で作成したランドサット5号による10シーンのモザイク画像を利用した。モザイク画像の範囲については Fig.II-4-1-1-1 に、各画像の観測年月日、太陽位置情報は Table II-4-1-1 のとおりである。

なお、モザイク画像は、中性火山岩類中の地質構造判読に適した BGR=145 の組み合わせによるフォールスカラー画像で、共一次内挿法により16画素(4×4)を1画素とする幾何変換法を用いて圧縮を行ったものである。

画像に使用した投影法は以下のとおり。

Projection: Transverse Mercator (UTM)

Spheroid: International 1909

Central Meridian: -69

False easting 500000

False northing 10000000

Table II-4-1-1 Path/Row, data acquisition, sun azimuth and sun elevation of the Landsat TM image

地区名	画像名称	Path	Row	観測年月日	太陽方位	太陽高度
Tupiza	Tupiza	232	75	1990年4月22日	N53°E	38°
Susques	Susques	232	76	1991年2月4日	N89°E	48°
Pocitos	Salar de Pocitos	232	77	1991年2月4日	N87°E	48°
Antofagasta	Antofagasta de la Sierra	232	78	1987年2月9日	N84°E	47°
Belen	Belen	232	79	1987年2月9日	N82°E	47°
Tarija	Tarija	231	75	1986年9月11日	N59°E	44°
San Ramon	San Ramon de la Nueva Oran	231	76	1986年9月11日	N58°E	43°
Salta	Salta	231	77	1986年9月11日	N57°E	42°
Rosario	Rosario de Frontera	231	78	1986年9月11日	N57°E	41°
Tucuman	San Miguel de Tucuman	231	79	1986年9月11日	N57°E	40°

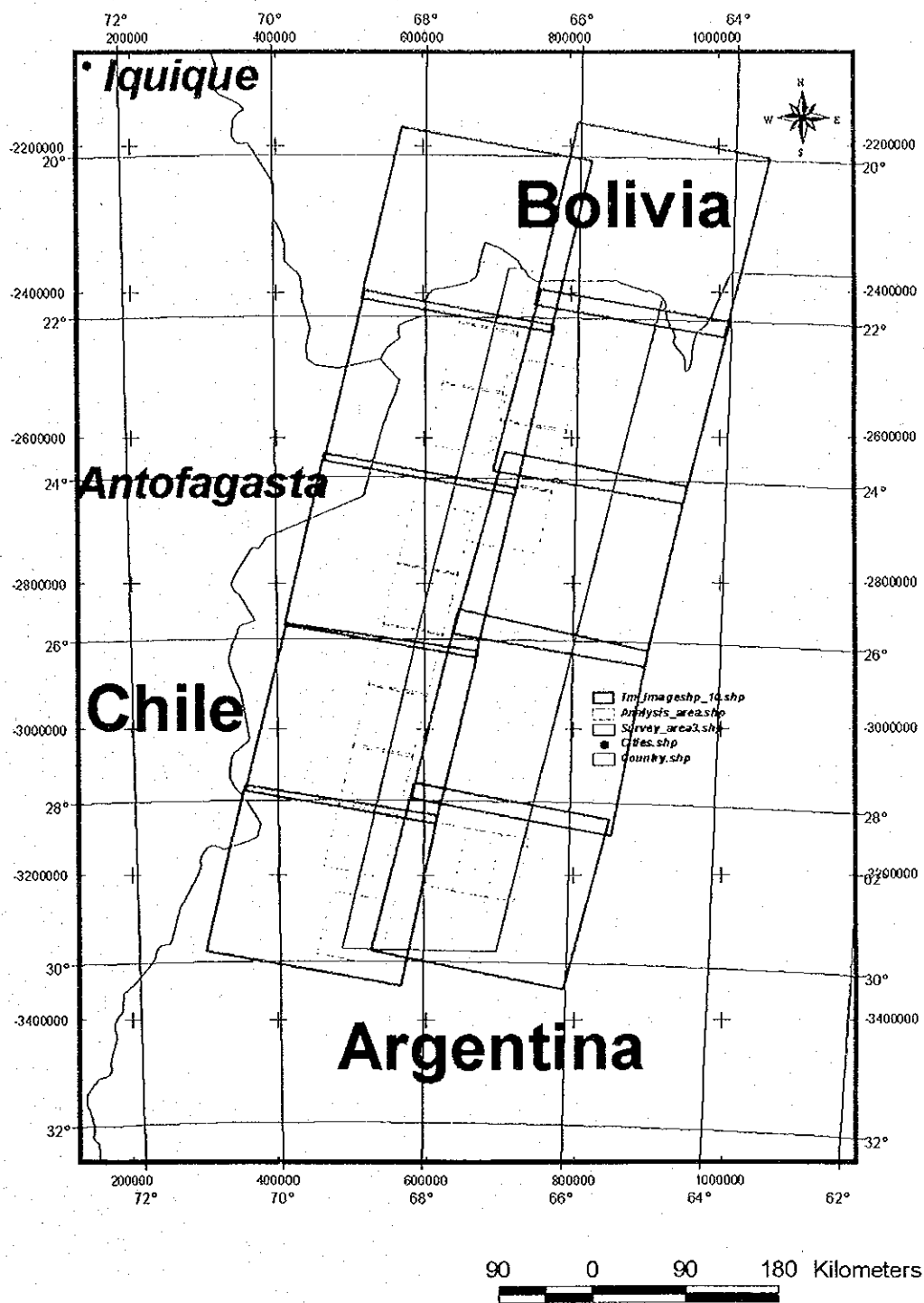


Fig.II-4-1-1-1 Image analysis area of Landsat TM

## 4-2 LANDSAT TM 画像判読・解析

平成9年度アルゼンティン共和国資源開発協力基礎調査鉱物資源広域調査で行った解析ではボリビア共和国の南端部からアルゼンティン共和国メンドーサに至る広大な範囲を対象に、有望地域選定に資することを目的として、ランドサットTM画像を使用した写真地質学的判読作業を実施し、得られた判読結果及び種々の既存データを合わせ、地質、鉱床、鉱徴地の賦存状況等を総合的に検討している。対象地域はランドサットTM画像23シーンでカバーされ、フォールスカラー合成画像、比演算処理画像及び全域をカバーするフォールスカラー・デジタルモザイク画像をそれぞれ作成して地質・地質構造の判読・解析と変質帯の抽出を行い、それらを総合的に解釈して鉱床賦存有望地域の検討を行っている。

本年度の調査はこの23シーンのうち北東側10シーンの中に含まれており、平成9年度の結果からモザイク画像、変質帯及びリニアメントの情報をGIS化して総合解析の検討に利用した。

## 4-3 ASTER 画像処理・作成

### 4-3-1 解析概要

乾燥露岩地域を対象とした本解析は、金属鉱床探査に衛星データを有効に活用できるASTERで取得された実データを用い、鉱床に伴う変質帯の変質鉱物同定を同定することを目的とする。

解析に先立ち、画質評価および望遠鏡内/間に生じるピクセルずれを補正するバンド間レジストレーションを実施した。その結果、VNIR間ではバンド間の画像が正確に一致していたが、SWIRのバンド間およびVNIR/SWIRの望遠鏡間には数画素の画像ずれを確認した。このため、面積相関法を用いたテンプレートマッチングにより、マッチングベクトルを算出後、2次元の2次多項式を用いた最小二乗法によって画像のずれを補正した。

次に、現地サンプルの分光反射率から校正した疑似反射率変換係数(経済産業省,2001)を利用し、対象地域に分布するパンパの分光反射率特性から対象とした15地域の疑似反射率変換を実施した。本手法は、本解析で開発した手法であり、パンパの表層物質のバンド間比が地域によらずほぼ一定となることを利用している。鉱物同定は本解析の主目的であり、分光反射率の特徴を利用するものである。したがって、疑似反射率変換の精度が解析精度を決定する重要な補正であると言える。

対象地域は露岩地域であるが、対象地域東側では山間部に少量ではあるが植生が認められる。土壌あるいは露岩域にまばらに植物が生えている地域の反射スペクトルには、植物の反射スペクトルが影響している。この植物の情報が混入した反射スペクトルを利用して鉱物同定を実施した場合には明礬石やカオリナイトが多量に検出され、正しい解析結果とはならない。植物の情報が混入した分光反射スペクトルは、露岩や土壌などの反射スペクトルと植物の反射スペクトルの面積比に応じた合成和とすることができる。この面積比にSAVI(Soil Adjust Vegetation Index)を利用し、SAVI値が植被率のインデックスとなる事を利用して植物の反射スペクトルを除去した。その結果、植被率50%までの地域について概ね満足すべき結果を得ることができた。以上の手法によって、対象地域のASTERデータを疑似反射率に変換した。

変質鉱物の同定および半定量解析には、等粒子モデルを用いた。一般に地表に露出する風化面は複数の鉱物種からなる混合物であり、鉱物粒子間の反射・吸収を考慮した等粒子モデルはこれら混合物の反射スペクトル変化を理論的に説明することが可能である。本解析では、広汎に認められる9種の鉱物を選択し、これら鉱物を混合した分光反射率のデータベースを等粒子モデルによって作成した。次に1画素毎に、画像データと分光反射率データベースとを比較することによって、地表面の鉱物同定および半定量解析を行い、鉱物マッピングを実施した。同定鉱物種は9種とし、これまで使用してきたモンモリロサイトを同定鉱物種からはずし、新たに赤鉄鉱を加えて解析を実施した。

また、ASTERの特徴の1つである熱バンドのデータについて大気補正と温度・放射率分離を実施し、平成11年度資源衛星データ解析（経済産業省2000）で提唱された変換式を使用してSiO<sub>2</sub>含有量のマッピングを実施した。

#### 参考 ASTER について

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)は経済産業省(METI)により開発された多バンド高分解能センサーで、米国航空宇宙局(NASA)主導により進められている国際協力プロジェクト EOS 計画の最初の衛星である地球観測衛星 Terra に搭載され、平成11年12月に打ち上げられた。

ASTER は、従来の JERS-1 搭載光学センサ OPS の後継機として開発されたもので、OPS に比べて短波長赤外域 (SWIR) に2バンド、熱赤外域 (TIR) に5バンドが追加されている。このため従来では不可能であった詳細な熱水変質帯の区分及び珪酸塩岩類の区分が可能となり、また熱赤外域における珪酸塩のスペクトル吸収帯を把握することにより岩石中の珪酸塩含有量の推定が可能となってきた。特に TIR は人工衛星に搭載される初の本格的熱赤外センサーで岩石識別に大きく貢献するものとして注目されている。

#### 4-3-2 使用データ

使用した 15 シーンは、以下に示した (Fig.II-4-3-2-1)。データは財団法人資源・環境観測解析センターの画像検索システム (ASTER GDS) より検索を行い、その時点 (2001 年 8 月) で雲量等の少ない最良の画像を選び同財団法人から提供を受けたものである。

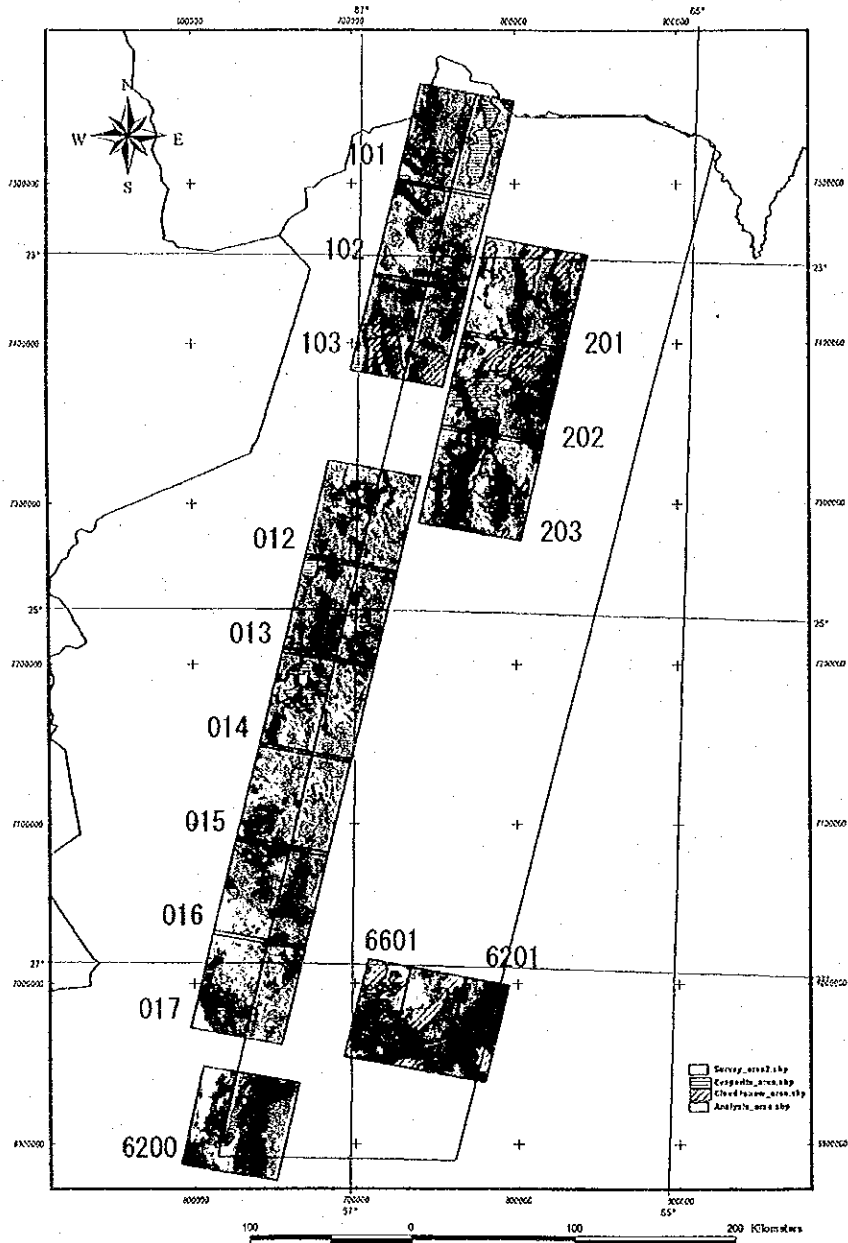


Fig.II-4-3-2-1 Index map of ASTER image over the survey area

Table II-4-3-1 Acquisition data of ASTER image

地域番号	グラニューールID#	中心緯度	中心経度	観測日	備考
12	ASTL1B0009091451200010125801	-24.24'	-66.37'	2000/9/9	良好(一部積雪)
13	ASTL1B0009091451290010125787	-24.56'	-66.45'	2000/9/9	良好(一部積雪)
14	ASTL1B0009091451380010125788	-25.28'	-66.53'	2000/9/9	良好
15	ASTL1B0009091451470010125789	-26.00'	-67.02'	2000/9/9	良好
16	ASTL1B0009091451560010125790	-26.32'	-67.10'	2000/9/9	良好
17	ASTL1B0009091452040010125791	-27.04'	-67.18'	2000/9/9	良好
101	ASTL1B0009091450450010125800	-22.16'	-66.06'	2000/9/9	一部雲有り
102	ASTL1B0009091450450010125802	-22.48'	-66.13'	2000/9/9	一部雲有り
103	ASTL1B0101061455470101190033	-27.50'	-67.21'	2000/9/9	南部雲有り
201	ASTL1A0008311457080012281005	-23.07'	-65.41'	2000/8/31	霧・雲有り
202	ASTL1A0008311457160012281006	-23.39'	-65.48'	2000/8/31	霧・雲有り
203	ASTL1A0008311457250012281007	-24.11'	-65.56'	2000/8/31	霧・雲有り
6200	ASTL1B0101061455470101190033	-27.50'	-67.21'	2001/1/6	一部雲有り
6201	ASTL1B0101311449070102230750	-27.15'	-66.04'	2001/1/31	一部雲有り
6601	ASTL1B0103201447450103301315	-27.12'	-66.20'	2001/3/20	一部雲有り

Data012～017は一部積雪が認められるが、良好な画像である。Data101～103はData012～017と同じ日に取得されており、一部に青みがかった筋状の雲が認められる。また、この雲に対応して影の領域ができています。これらは9月に撮影されており、現地の冬に相当する。太陽高度は約45度と比較的低高度であり、山間部の日の当たらない南西斜面は極めて暗い。

Data201～203一部に青みがかった筋状の雲が認められ、これに対応した影ができています。また、撮影時期が8月末であることから同様に太陽高度が低く、南西斜面は極めて暗い。よって、これら3地域では相当の面積で解析不能となっている。

Data6200はData017の南側に位置し、1月に撮影されている。現地の夏であることから太陽高度が高く、解析に適した時期に撮影されている。画像北西部に帯状の雲が認められ、山間部には植物が認められる。

Data6201はData6200の北東方に位置する。一部に帯状の雲が認められ、また山間部の多くは植物に厚く覆われている。

Data6601はData6201の西側に位置し、約半分の領域がData6201と重複する。Data6201の約半分の地域は雲に覆われているが、Data6201との重複部ではいずれか一方のデータが利用できる。この地域も山間部に植物が繁茂している。

Data6602はData6601が雲および植物によって広く覆われ、疑似反射率変換に十分な統計量を算出できないことから、統計値算出のための参考データとして利用した。

#### 4-3-3 バンド間レジストレーション

バンド1～3の空間分解能は15m(4980×4200画素)であり、バンド4～9での空間分解能は30m(2490×2100画素)である。従って、バンド1～3の画像をSWIRの画像サイズと同じものとし

1/2 の画像に縮小した。縮小には 2×2 画素の平均値として与える方法とした。したがって、データ量は 2490×2100×9 バンド≒45MByte となる。

今回利用した Aster 1B データではバンド間に画像のずれが認められる。特に VNIR/SWIR と SWIR 間で画素ずれが大きく、このままでは鉱物同定処理が実施できないことからバンド間レジストレーションを実施した。バンド間レジストレーションの基準バンドはバンド 2 とし、バンド 1,3 および 4 をバンド 2 の画像と一致させた。バンド 5 はレジストレーションによって変形したバンド 4 を基準としてマッチングを行い、これ以降のバンドはすべて 1 つ前の処理で変形したバンドの画像を基準としてレジストレーションを行った。

レジストレーションには 401×401 のテンプレートを利用し、テンプレート内の全点において画像間輝度値の相関係数を計算する面積相関法を用いた。探索領域は初期の点から上下左右それぞれ 12 画素の範囲(合計 25×25 領域、625 回の繰り返し)とし、1 点ずらす毎に、テンプレート内全点で面積相関係数を算出する方法を用いた。以上の操作によって 625 個の面積相関係数が得られ、このうち面積相関係数が最大値となった位置をマッチング位置として算出した。

マッチングベクトルを 500 点毎に算出し、左右方向で 5 点、上下方向で 4 点、合計 20 点でマッチングベクトルが算出される。これを 2 次元 2 次多項式として最小二乗法によって幾何変換係数を算出し、変形を実施した。変形には最近隣内挿法を用いた。幾何変換式は以下である。

$$u=a_1x^2+b_1xy+c_1y^2+d_1x+e_1y+g_1$$

$$v=a_2x^2+b_2xy+c_2y^2+d_2x+e_2y+g_2$$

$a_1\sim g_2$  は係数、 $x,y$  は変形前の画像位置、 $u,v$  は移動ベクトル

なお、幾何変換後、再度同じ方法でマッチングベクトルを算出し、変形結果のチェックを行った。Table II-4-3-2 は変形前のマッチングベクトルを、Table II-4-3-3 は変形後のマッチングベクトルである。表で示したように、バンド間レジストレーションは正確になされている。

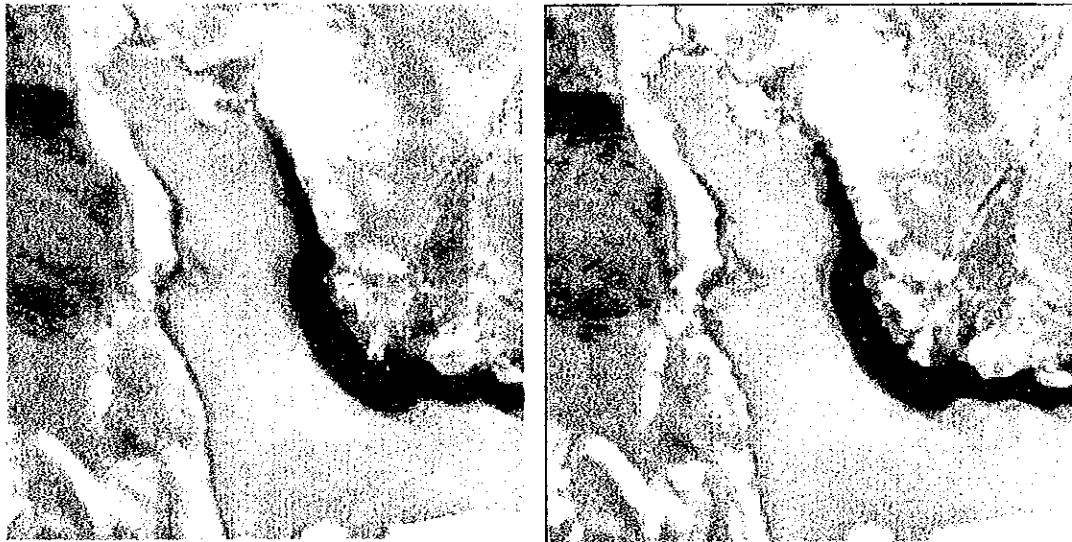
Table II-4-3-2 Data012 Pixel location error between band4 and band5(before registration)

		X方向				
		250	750	1250	1750	2250
Y 方向	250	-2,-2 0.9468	-2,-3 0.9805	-2,-2 0.9498	-1,-2 0.9529	-1,-2 0.9479
	750	-2,-2 0.9310	-2,-2 0.8838	-2,-20.9582	-1,-3 0.9817	-1,-2 0.8998
	1250	-2,-3 0.9369	-2,-2 0.9646	-1,-2 0.9584	-1,-2 0.9311	+3,-1 0.8264
	1750	-2,-2 0.9686	-2,-2 0.9368	-1,-1 0.8819	-1,-1 0.9432	-----

コラム内の最初の数字は横方向、縦方向の移動量、実数は面積相関係数

Table II-4-3-3 Data012 Pixel location error between band4 and band5(after registration)

		X方向				
		250	750	1250	1750	2250
Y 方向	250	0,0 0.9468	0,1 0.9805	0,0 0.9498	0,0 0.9529	0,0 0.9479
	750	0,0 0.9310	0,0 0.8838	0,00.9582	0,1 0.9817	0,0 0.8998
	1250	0,0 0.9369	0,0 0.9646	0,0 0.9584	0,0 0.9311	-3,1 0.8264
	1750	0,0 0.9686	0,0 0.9368	0,1 0.8819	1,1 0.9432	-----



(a)

(b)

Fig.II-4-3-3-1 A processing step for band to band registration



#### 4-3-4 疑似反射率変換

ASTERデータの輝度値は、バンド毎に独立にゲイン、バイアスをかけ量子化された256階調の数値である。この数値はバンド内での相対的な反射率の強度比を表すが、バンド間での数値の比較は意味をなさない。したがって、バンド1~9のパターンで鉱物同定を行う場合には、何らかの手法でバンド間の輝度値を比較できる数値に変換する必要がある。これが疑似反射率変換であり、この変換を行えば、バンドの吸収パターンなどから鉱物の同定を行うことができる。

これまで提唱されてきた疑似反射率補正手法としては、ログレジデュアル法などがある。これは画像の統計量を用いたものであり、次の仮定の上でログレジデュアル値が疑似反射率の良い近似となるとされている。

[仮定]

- ・画像全体で各バンドの輝度値の平均値が一定（疑似反射率は水平）
- ・画像全体で各バンドの輝度値の標準偏差が一定

ただし、この条件を満たす地表物質が明確にされておらず、また、この仮説の検証には、広大な面積の分光反射率を測定する必要があることから不可能である。したがって、ログレジデュアル法は仮説条件を検定できない、あいまいな疑似反射率変換手法であると考えて良い。事実、経済産業省(1997)では、乾燥域でのログレジデュアル値から求めた疑似反射率が現地検証の実測値と大きく異なっていることを示している。

また、疑似反射率変換の変換係数は衛星ごとに一定の数値で固定されているものではない。これは大気の状態によって大気の透過率が日によって変化するためである。大気の影響はVNIR域で大きく、波長が短い領域ほど大気の状態によって透過率が大きく変動する。このことは遠くの山が見えなかったり、青くかすんで見えたりする現象を考えるとわかりやすい。

経済産業省(2001)では、現地でサンプリングしたパンパの礫の反射率を屋内で測定し、この反射率に合わせて疑似反射率変換を実施した。この方法は、大気補正が不必要な疑似反射率変換手法の1つである。しかしながら最大の欠点はサンプルを必要とする点であり、今回のようにサンプルがない地域ではこの手法を利用することはできない。

このため、本解析ではパンパの表層物質の光学特性を利用し、疑似反射率に変換する手法を開発した。手法は以下である。

- ① 分光反射スペクトルに特徴のない物質の抽出、主としてパンパ
- ② 抽出した物質のバンド間強度比の算出
- ③ 疑似反射率が既知の地域における分光反射率に特徴のない物質の抽出(主としてパンパ)
- ④ ③で抽出した物質のバンド間強度比の算出
- ⑤ ②と④の強度比の関係を一致させる変換係数の算出

以上の操作によって、対象地域のバンド間輝度比を疑似反射率変換係数がすでに解っている地域のバンド間輝度比に補正することができる。よって、③の地域では疑似反射率変換係数が既知であるので、この値を乗ずることによって対象地域のデータを疑似反射率に変換することができる。

なお、この手法では疑似反射率変換係数として既知のデータが必要であり、これには経済産業省(2001)の解析結果を利用した。よって、このデータの疑似反射率変換係数が誤っていれば、本解析も同様に誤っていることになるが、経済産業省(2001)の解析結果が良好であったことから、概ね正しい補正係数であると考えられる。

#### (1) 画像全領域のバンド間特性

乾燥域において同一日で連続して取得されたデータは、大気の状態がほぼ一定であると考えられる。これらから、シーン毎にバンド間比の散布図を作成すると、非常に興味深い事実がわかる。

Fig.II-4-3-4-1はData012~017のバンド2-3の散布図をシーン間で比較したものであり、この散布図は画像全領域から作成したものである。散布図ではデータの出現頻度の高い部分を暖色系の、低い部分を寒色系の色で表現した。このようにすると植生のない地域での散布図は非常に狭い領域にある傾きを持った形状でプロットされている事がわかる。このことは、岩石の明度は様々であるが、色調はほぼ類似していることを表している。事実、現地調査などでも露岩域はほぼ類似した茶褐色を呈することが知られている。重要なことは、シーンによって卓越する岩石種が異なっているにもかかわらず、散布図に認められるデータ集中域の伸張方向はいずれのシーンでもほとんど変化しない点にある。

異なる日に取得された同一地域の画像ではこの傾きは一般に一致しない。これは波長毎の透過率が、大気の影響によって変化することにある。しかしながら、分布する岩石種が変化してもバンド間比の傾きがほぼ一定であるという事実がどのバンドでも成立するならば、異なるシーンでもバンド間比を有る一定の値になるように補正することによって、バンド間の関係が一定となるデータに変換することができる。

Fig.II-4-3-4-2はData102のバンド間散布図を示したものである。この散布図によれば、SWIR域の隣接バンド間の散布図はバンド2/3比よりもさらにデータが集中し、SWIR域ではほとんどの岩石が同じような反射スペクトルの特徴を持つことを表している。また、シーンが異なっても、散布図の集中する領域の最大伸張方向はほとんど変換していない。

ただし、バンド3/4は散布図の集中がやや悪く、全領域で作成した散布図では、バンド間比が一定となるような特定の傾向を見いだせない場合もある。

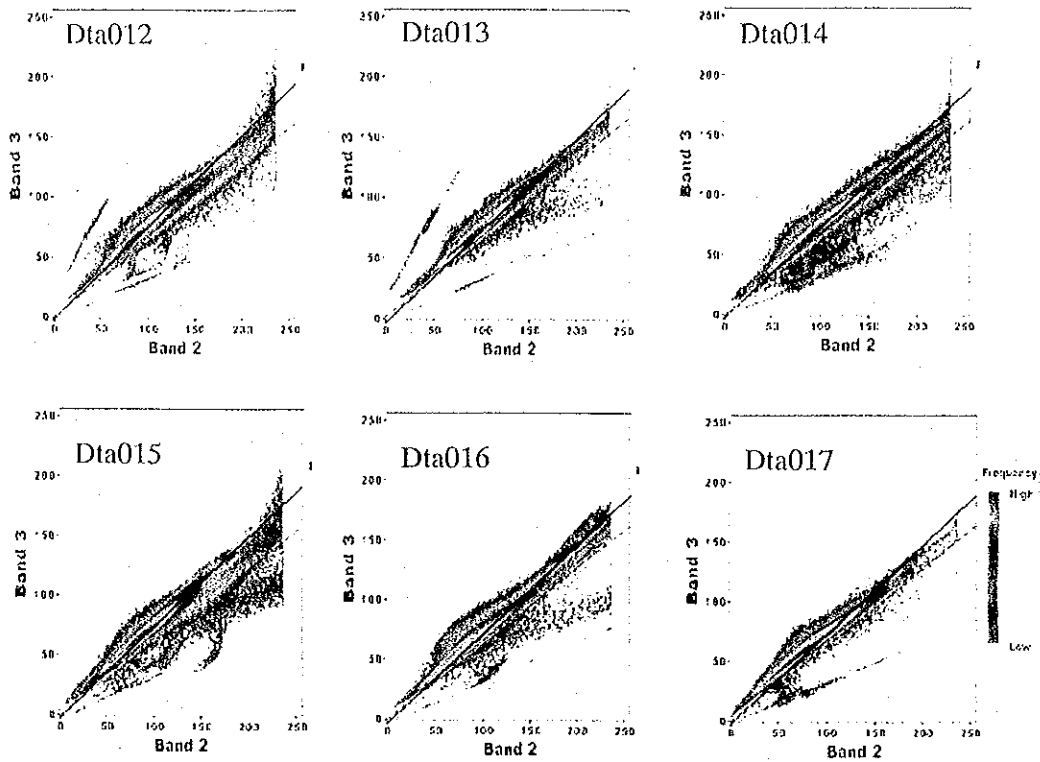


Fig.II-4-3-4-1 Dispersion diagrams of DN between Data012~017

グラフは Data012~017 の 6 シーンのバンド 2/3 の輝度値の散布図である。散布図の色はデータの粗密を表し、暖色系の色はデータが密に分布する領域を意味する。

図中の黒の実線は Data012 の散布図で、輝度値の分布の最大伸張方向から求めた傾きを他のシーンの散布図に示した。グラフから解るように、同一取得日の画像間では地表物質(地質单元)が変化しても散布図の分布形状はほぼ変化しないことが解る。

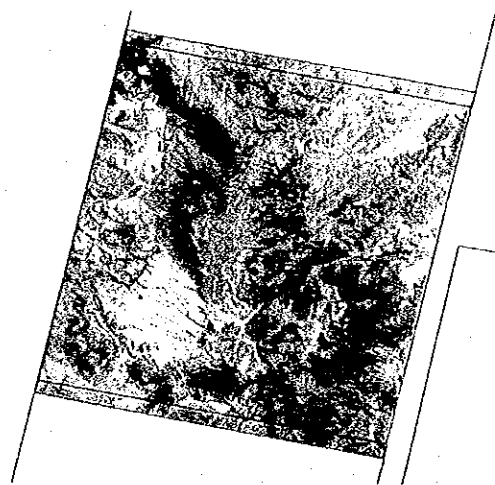
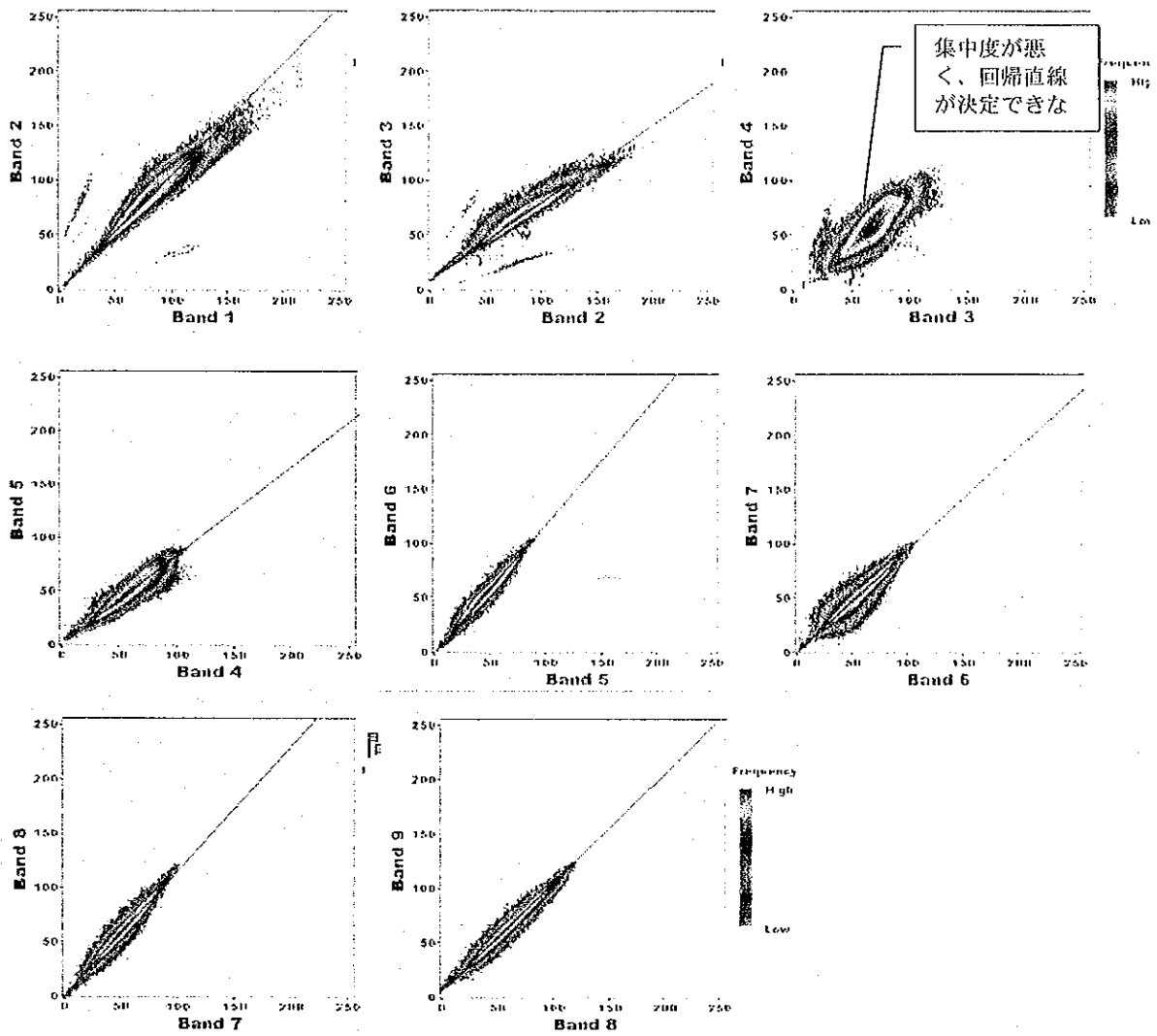


Fig.II-4-3-4-2 Dispersion diagrams of DN, Data102

(バンド 3/4 では散布図がブローし、比が一定となるような関係を見いだせない)

## (2) 高相関領域のバンド間特性

SWIR 域の隣接バンド間では、Fig.II-4-3-4-2 で示したようにバンド間の相関は極めて高く、同一日付のシーン間でもその傾きはほぼ不変である。日付が異なれば大気の状態が変化するため隣接バンド間の勾配も変化してしまうが、この傾きを一致させればバンド間の強度比を統一することができる。

バンド 3/4 を除く隣接バンド間では集中度の良い散布図を作成する事ができ、その集中する領域の形状と分布から傾きを決定することができる。ここでは経済産業省(2001)で使用したデータを用いて、散布図から引いた直線のごく近傍の物質がどのような地域に分布するものかを検討した。

散布図から抽出する物質は、散布図は 1/2,2/3,4/5~8/9 の 7つの回帰式を利用し、7つすべての直線式から輝度差が±5 の範囲に収まる画素を抽出した。ここではこれを高相関領域と呼ぶ。Fig.II-4-3-4-3a は BGR=247 のフォールスカラー画像であり、緑色で表現された地域は変質鉱物が分布する領域である。

Fig.II-4-3-4-3b は上の条件で高相関領域のみを抽出し、比演算処理で色調変化を強調した図である。黒い領域は条件を満たさない領域であり、変質鉱物が含まれている領域が完全に除かれていることが解る。さらに、露岩の領域の多くも除かれており、高相関領域は主としてパンパ(礫漠)で有ることが解る。また、この解析では 6 シーンを対象としたが、この条件で抽出された領域は主としてパンパ(上流部に 変質鉱物などが分布しない地域のパンパ)が抽出されており、パンパの物質の反射スペクトル特性はどの地域でもほぼ変化していないことが明らかとなった。したがって、対象地域を変更しても、このような物質を抽出できれば、バンド間の関係を一定の関係に変換することができると思われる。

これらの高相関領域の反射スペクトルは、波長が長くなるにつれ反射率が単調に上昇する無特徴の反射スペクトルパターンを示している。以上のことから、抽出された高相関領域の物質は、様々な岩石の混合物であり、表面が酸化鉱物によって被覆された物質であると考えられる (Fig.II-4-3-4-4)。

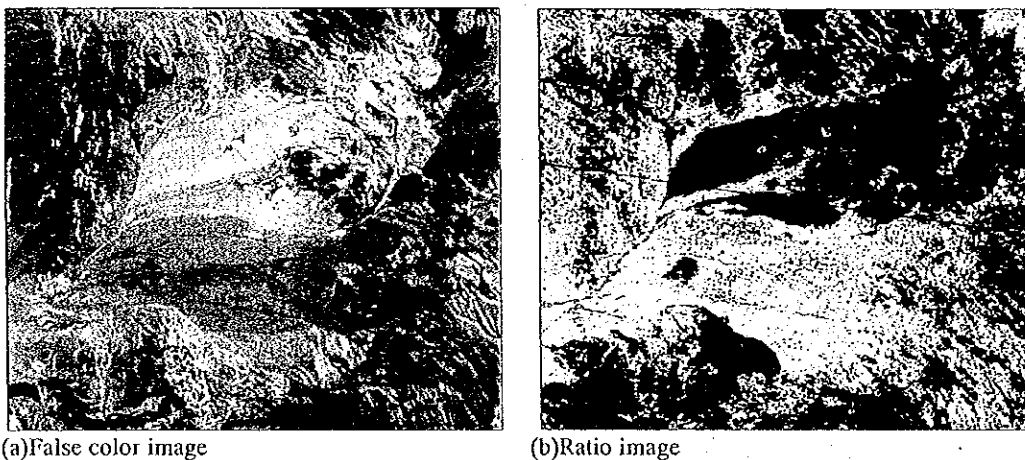


Fig.II-4-3-4-3 Distribution of surface materials selected by high correlation value



Fig.II-4-3-4-4 An example of "Pampa" area selected by high correlation pixels of ASTER bands  
(El Salvador, Chile)

高相関領域の抽出は以下の手順で実施した。

- ① シーン毎に隣接バンド間の散布図を作成する
- ② 散布図の分布形状から、最大伸張方向の直線を引く。このとき、判断に悩むバンド間散布図では直線を引かない。なお、このときの直線は原点を必ず通す。このため事前にパスラジアンズを求め、輝度値に補正を加えておく。
- ③ 直線の傾きを算出し、条件式を設定する
- ④ 条件にかなう画素を抽出して画像化し、パンパが抽出されていることを確認する

以上の作業によって、反射スペクトルに特徴のない標準的な物質を抽出することができる。次に高相関領域のみで再度バンド間散布図を作成する。ただし、これまでの作業では隣接バンド間のみで散布図を作成したが、ここでは、すべてのバンド間について散布図(36個の組み合わせ)を作成する。

### (3) 疑似反射率変換

高相関領域のデータのみから作成した散布図は全領域で作成した散布図と比較し、集中度が高く、狭い領域に分布するものとなる。離れたバンドで全領域から散布図を作成すると、プロットされるデータは集中度が悪く、直線を引くことが困難である。これに対し、高相関領域のデータから作成した散布図ではバンド 1/9 の様にバンドが離れていても、比較的集中度の高い散布図を作成することができる。よって、バンド 1 を基準としてバンド 2~9 の回帰直線を引くことができる。回帰直線が正確に求められていれば、バンド 1/2~1/9 の回帰式と、経済産業省(2001)で用いたデータの高相関領域の回帰式とを一致させることで、経済産業省(2001)で使用したデータと同じ大気条件・センサ・ゲインの画像データへ変換することができる。

ただし、バンド 1/2~1/9 のみでは、信頼が置けないことからバンド 2~8 を基準として求めた回帰直線も求めた。これらのデータから連算によって隣接バンド間比も間接的に求めることができ、バンド 1~8 を基準として求めた隣接バンド間比がほぼ一定の値を示すならば、回帰直線が正しく求められていることになる。

Table II-4-3-4 Regression coefficients of band to band registration based on band 1 to 3

[バンド 1 基準]

	4/3	5/3	6/3	7/3	8/3	9/3
Dat012	0.831	0.788	0.836	0.822	0.919	0.933
Dat013	0.773	0.723	0.760	0.755	0.836	0.869
Dat014	0.731	0.720	0.793	0.749	0.857	0.886
Dat015	0.773	0.731	0.869	0.802	0.935	0.971
Dat016	0.682	0.665	0.729	0.711	0.804	0.840
Dat017	0.848	0.799	0.883	0.807	0.869	0.909
平均	0.773	0.738	0.812	0.774	0.870	0.901
標準誤差	<b>0.062</b>	<b>0.049</b>	<b>0.061</b>	<b>0.043</b>	<b>0.050</b>	<b>0.047</b>

[バンド 2 基準]

	4/3	5/3	6/3	7/3	8/3	9/3
Dat012	0.747	0.702	0.758	0.731	0.814	0.840
Dat013	0.711	0.689	0.731	0.705	0.796	0.820
Dat014	0.685	0.650	0.697	0.705	0.784	0.791
Dat015	0.702	0.676	0.764	0.720	0.833	0.868
Dat016	0.705	0.705	0.744	0.718	0.807	0.820
Dat017	0.747	0.758	0.810	0.770	0.851	0.880
平均	0.716	0.697	0.751	0.725	0.814	0.836
標準誤差	<b>0.025</b>	<b>0.036</b>	<b>0.038</b>	<b>0.024</b>	<b>0.025</b>	<b>0.033</b>

[バンド 3 基準]

	4/3	5/3	6/3	7/3	8/3	9/3
Dat012	0.959	0.890	0.950	0.939	1.072	1.095
Dat013	0.948	0.901	0.974	0.956	1.085	1.085
Dat014	0.933	0.898	0.982	0.956	1.085	1.110
Dat015	0.898	0.872	0.935	0.930	1.076	1.065
Dat016	0.959	0.942	0.989	0.968	1.110	1.120
Dat017	1.030	0.974	1.033	0.977	1.124	1.154
平均	0.954	0.913	0.977	0.954	1.092	1.105
標準誤差	<b>0.043</b>	<b>0.038</b>	<b>0.034</b>	<b>0.017</b>	<b>0.020</b>	<b>0.031</b>

Table II-4-3-4 は Data012~Data017 の高相関領域から算出したバンド 1~3 を基準とするバンド間回帰式の係数である。また、間接的に隣接バンド間の回帰式に変換すると Table II-4-3-5 が作成できる。

Table II-4-3-5 Regression coefficients of band to band registration based on band 1 to 3 for neighbor bands

[バンド 1 基準]

	5/4	6/5	7/6	8/7	9/8
Dat012	0.949	1.061	0.984	1.117	1.015
Dat013	0.936	1.051	0.993	1.108	1.040
Dat014	0.985	1.101	0.944	1.143	1.034
Dat015	0.947	1.188	0.922	1.167	1.038
Dat016	0.976	1.095	0.975	1.132	1.045
Dat017	0.942	1.105	0.914	1.077	1.046
平均	0.956	1.100	0.955	1.124	1.036
標準誤差	0.020	0.048	0.033	0.031	0.011
隣接バンド比	0.954	1.098	0.966	1.133	1.028
絶対誤差	0.001	0.002	0.011	0.009	0.008

[バンド 2 基準]

	5/4	6/5	7/6	8/7	9/8
Dat012	0.941	1.078	0.965	1.113	1.032
Dat013	0.969	1.062	0.964	1.129	1.029
Dat014	0.950	1.072	1.012	1.111	1.009
Dat015	0.963	1.130	0.942	1.157	1.041
Dat016	1.000	1.055	0.965	1.125	1.015
Dat017	1.015	1.069	0.951	1.106	1.034
平均	0.973	1.078	0.967	1.123	1.027
標準誤差	0.029	0.027	0.024	0.019	0.012
隣接バンド比	0.954	1.098	0.966	1.133	1.028
絶対誤差	0.019	0.020	0.001	0.010	0.001

[バンド 3 基準]

	5/4	6/5	7/6	8/7	9/8
Dat012	0.928	1.068	0.988	1.142	1.021
Dat013	0.951	1.081	0.982	1.135	1.000
Dat014	0.963	1.094	0.973	1.135	1.023
Dat015	0.971	1.073	0.994	1.157	0.990
Dat016	0.983	1.050	0.979	1.146	1.009
Dat017	0.946	1.060	0.946	1.151	1.027
平均	0.957	1.071	0.977	1.144	1.012
標準誤差	0.019	0.015	0.017	0.009	0.015
隣接バンド比	0.954	1.098	0.966	1.133	1.028
絶対誤差	0.003	0.027	0.011	0.011	0.016



さらに、バンド 1/2 と 2/3 を利用すれば、バンド 2,3 を基準とした回帰係数をバンド 1 を基準としたものへ、Table II-4-3-6 の様に変換できる。

Table II-4-3-6 Regression coefficients for band to band registration based on band 1

基準バンド	2/1	3/1	4/1	5/1	6/1	7/1	8/1	9/1
バンド 3	1.093	0.818	0.781	0.747	0.799	0.781	0.893	0.904
バンド 1	1.093	0.818	0.773	0.738	0.812	0.774	0.870	0.901
バンド 2	1.093	0.818	0.783	0.762	0.821	0.792	0.890	0.914
平均	1.093	0.818	0.779	0.749	0.811	0.782	0.884	0.906

経済産業省(2001)のデータから高相関領域を抽出し作成した散布図から、隣接バンド間の回帰係数は Table II-4-3-7 の様に求められている。Table II-4-3-7 と Table II-4-3-6 を比較すると Table II-4-3-6 では 1 前後の係数となっているが、Table II-4-3-7 ではバンド 3 以降の輝度値が低く、2 を越える係数が算出されている。このように撮影時期が異なれば、グラフの傾きが大きく変化し、撮影条件によってバンド間の関係が大きく変化していることが解る。

Table II-4-3-7 Regression coefficients for band to band registration based on METI(2001)

2/1	3/1	4/1	5/1	6/1	7/1	8/1	9/1
1.318	1.741	1.851	1.894	1.983	1.930	2.058	2.132

Table II-4-3-6 の回帰係数を、Table II-4-3-7 の回帰係数に一致させることで経済産業省(2001)で使ったデータと同じ取得条件のデータに変更できる。また、経済産業省(2001)では現地サンプルの反射スペクトル測定値があることから、疑似反射率変換係数が算出されている。従って、対象地域の回帰係数を Table II-4-3-7 の値に補正し、さらに疑似反射率変換係数を乗ずれば対象地域の疑似反射率変換が可能となる。

#### 4-3-5 植生補正

Data012～017ではほとんど植生は認められないが、Data201～203、Data6200、6201およびData6601では植生が認められ、特にData6201と6601では広く植物が分布している。このような半植生地域では、個々の画素の輝度データから植物の反射スペクトルの影響分を除去する必要がある。補正後のデータで鉱物同定を実施しなければならない。また、複数種の鉱物が混合した物質の分光反射スペクトルは、複数回の鉱物表面の散乱や鉱物の吸収を考慮しなければならない。ところで、分光反射スペクトルの変化は鉱物の量比とは非線形に変化する。これに対し、土壌・露岩と植物とが共存する場合には、土壌や露岩と植物との間が十分離れていることから散乱・吸収の影響は極小さく、岩石や土壌と植物の面積比から反射スペクトルを線形で合成することができる。この場合、厳密には土壌・露岩や植物の反射スペクトルおよびその量比を知っておく必要がある。しかしながら、現実にはこれらの情報を個々の点において知ることは不可能であることから、何らかの仮定が必要である。

ここでは、SAVI(Soil Adjust Vegetation Index)が植被率のインデックスとなる事を利用し、植物の反射スペクトルを1つの分光反射スペクトルで代表できると仮定した上で、植生の影響の除去を行った。適用したのは植生がほぼ認められないData012～017を除くすべてのシーンである。

なお、SAVIは以下の式で定義され、式中で用いる値の単位はアルベド(albedo)(0～1)である。

$$SAVI = (NIR-red)/(NIR+red)*(1+L)$$

red:ASTERバンド2 NIR:ASTERバンド3 L:インデックス(0～1、通常は0.5)

#### 4-3-6 フォールスカラー画像及び比演算画像処理

##### (1) フォールスカラー画像

ASTER データは VNIR 3 バンド(後方視画像を除く)、SWIR 6 バンドおよび TIR 5 バンドからなる。これらのバンドから解析目的に応じて3種類の適当なバンド組み合わせによりフォールスカラー画像を作成する。本作業では以下の2種類のフォールスカラー画像を作成した。

①BGR=123

②BGR=147

①は VNIR の3バンドを用いたフォールスカラー画像であり、特徴は高分解能(15m/pixel)であることから現地調査の地形図に換わるマップとして利用できる。特に、地形図の更新が頻繁になされない地域では、地形図上にない道路、あるいは地形図上に記載があっても実際の道路の位置とは大きく異なる場合がある。なお、このフォールスカラー画像では露岩、砂漠などは茶系統の色調で表現され、岩石の識別など地質学的な解析には向いていない。

②は VNIR 1 バンド、SWIR 2 バンドの組み合わせによるフォールスカラー画像であり、地質学的な判読、特に変質帯を含めた解析に有効である。変質帯は石英、セリサイト、明礬石、カオリナイトあるいは緑泥石などの変質鉱物から構成される。このうちセリサイト、明礬石およびカオリナイトは SWIR 域に特徴的な吸収を示し、特に SWIR バンド7での吸収が大きい。また、セリサイト、カオリナイト、明礬石は一般にバンド5で高い反射率を示すことから、バンド5から7への反射率の低下が著しい。したがって、バンド5,7を用いたフォールスカラー画像では変質帯を周囲とは明瞭に異なる色調で表現することができる。このフォールスカラー画像では変質帯は、緑に割り当てたバンド5の輝度値が高く、赤に割り当てたバンド7の輝度値が低いことからやや青みがかった緑色で表現される。これに対し、非変質岩はバンド7に吸収がないことから赤に割り当てたバンド7の輝度値が高く、非変質岩は一般に黄色から茶系統の色調として表現される。なお、変質帯の抽出を目的とせず岩石の識別を目的とする場合には、無相関ストレッチなどのフォールスカラー画像を利用する場合もある。

##### (2) 比演算処理

###### ①比演算の原理

光学センサでは分光放射輝度を観測し、センサから見た地上物体の放射輝度  $N_i$  (単位  $mW/cm^2$  sr) は次式で表現される。

$$N_i = (1/\pi)(H_i R_i T_i A_i) + N_{p_i}$$

ここで、 $H$  は太陽照射光の放射照度、 $R$  は地上物体の反射率、 $T$  は大気の透過率(垂直方向)、 $A$  は太陽と地表物体を結ぶ線が地表となす角度および地表物体とセンサがなす角度の両者により決まる係数、 $N_p$  は大気のパスラジアンズ、 $i$  はセンサのバンドである。

$N_p$ が推定できれば、Aはチャンネルに関わらず一定値をとり、HおよびTはチャンネルごとに一定値をとると考えられるので、2チャンネル間の比を求めることで分光的な特徴を強調できる。すなわち、ある鉱物の反射スペクトル・パターンにおいて極大値をとるチャンネルと極小値をとるチャンネルとの比をとれば、その鉱物が存在するピクセルは比の値が大きくなるので、存在しないピクセルとの区別が容易になる。

この特性を利用して特定の鉱物が分布する範囲を画像中で強調して表現するのが比演算処理の基本的な考え方である。

比演算処理はデジタル値の最小値を大気のパラジアンズとし、各バンドのデジタル値から最小値を差し引いた値を求め、これらの値のバンド間比を求める。バンド間比（比演算値）は、通常、0から10程度の値をとるが、バンド間比を画像として表現するためにはフォールスカラー画像と同様に濃度変換が必要となる。濃度変換は、比演算値の標準偏差と平均値を算出し、比演算値の平均値が128、3 $\sigma$ が128階調となるようにバイアス、ゲインを算出した。

## ②比演算処理

比演算処理による変質帯の抽出にはLANDSAT TMでは、RGB=5/7、5/4及び3/1の比演算処理が比較的良好に利用される。この計算の場合には、変質帯が2 $\mu$ 付近に吸収を示し、変質帯では比演算値の5/7が大きな値を示すことから、変質帯がやや赤みを帯びた白色で表現される。LANDSAT TMでは波長2 $\mu$ 付近に1バンド(バンド7)しかセンサが無いため、変質帯の細分はできない。しかしながら、ASTERセンサには波長2 $\mu$ 付近にバンド5~9の5バンドを備えており、変質帯の吸収特徴からより詳細な識別が可能である。

今回の作業では2種類の比演算処理を実施した。1つは変質帯の抽出を目的とした方法であり、もう1つは変質帯の変質帯の差を色調の差として表現する強調比演算処理である。両者とも比演算処理の組み合わせは同じであり、BGR=4/5、4/6、4/7を用いた。

前者は変質帯の抽出を目的としたものであることから、比演算値を1シーン全体で計算し、平均値・標準偏差を算出した後、濃度変換に使用するゲインを決定した。後者の場合には、変質帯として抽出した領域内のみ(より類似した岩石が分布する領域)で比演算値を計算し、濃度変換に使用するゲインを決定している。したがって後者は前者よりも大きなゲインが与えられている。

比演算処理に利用する計算式は4/5,4/6,4/7である。変質帯として明礬石、カオリナイト、セリサイトを考えた場合に、その反射スペクトル特徴はバンド4を最大値として、より長波長側で反射率が低下することにある。これに対し地表で普遍的に認められる石英あるいは赤鉄鉱または針鉄鉱などは、バンド4~5付近で最大値となるが、これよりも長波長側で反射率はほとんど低下しない。したがって、3つの比演算計算とも分子にバンド4を設定した計算では、変質帯はいずれも分母が小さくなることから、比演算値は大きな値を示し、非変質帯は小さな値を示すことになる。よって、全域から算出したゲインを乗じた比演算処理画像では変質帯は明るい白色を呈し、画像から明瞭に変質帯を分離・識別することが可能である。

強調比演算処理を行うためには何らかの方法で事前に変質帯と推定される領域を抽出しておく必要がある。この処理には、閾値分解法と呼ばれる方法が一般に用いられ、前述の比演算処理画像などを用いて、有る一定の値以上を示す領域だけを抽出する方法などがある。ここでは、疑似反射率変換手法で抽出した標準物質（パンパなどの崖錐堆積物からなる領域であり、反射スペクトルの特徴がほぼ類似する物質）の抽出手法を用いた。これら抽出された標準物質は反射スペクトルに明瞭な吸収特徴がない非変質帯である。したがって、これ以外の地域には変質帯を含んでいることになる。

標準物質を除いた地域で比演算処理を実施した濃度変換画像では、変質帯を構成する変質鉱物種によって鉱物種の違いを色調差として表現することができる。たとえば明礬石の反射スペクトルはバンド4>>バンド5<バンド6<バンド7の関係となることから、明るい青白色を呈すると推定され、また、カオリナイトの反射スペクトルはバンド4>>バンド5=バンド6<バンド7の関係となることから、明礬石よりはやや緑色を帯びた青白色を呈すると推定される。セリサイトの反射スペクトルはカオリナイトの反射スペクトルとやや類似するが、バンド4から5への反射率の低下が小さいことから、カオリナイトよりは明度の低い色調となると推定される。緑泥石の場合にはバンド4>バンド5>バンド6>バンド7と単調に反射率が低下することから、赤みを帯びた暗色を呈すると考えられる。

以上のように、変質帯を含む領域のみで比演算処理を実施すれば卓越する変質鉱物種の差を色調差で表現した画像を作成することができる。ただし、強調比演算処理ではその色調から卓越する鉱物種の差を表現できるものの、鉱物種を推定することはできない。なぜならば強調比演算処理はバイアス・ゲインの算出に統計量を用いており、ある変質鉱物種のみが卓越している場合には、上述したような色調は呈さない。つまり明礬石以外の鉱物も分布する場合にのみ、明礬石の反射スペクトルは”相対的”に上述した特徴を示すといえる。さらにシーン間で変質帯を比較する場合には、そのシーン毎に分布する変質鉱物種・量比が等しくなければ、色調差によって鉱物を推定することができず、現実的にこの仮定を立証することは不可能である。この仮定が成立したにしても、表層は一般に複数の鉱物種から構成されている。したがって、色調差から卓越する鉱物種は推定できるとしても、同時に存在する鉱物種の推定や量比を知ることができないことが比演算等の欠点である。

#### 4-3-7 変質鉱物同定

前章までの処理によって、疑似反射率への変換と植生情報の補正を実施した。次に、この疑似反射率データから等粒子モデルを利用した高感度鉱物同定処理を実施した。本解析では等粒子モデルを用いたシミュレーションによって合成反射スペクトルを算出している。この解析では、複成分系における任意の混合比の反射スペクトルが計算でき、実測値の反射スペクトルがほぼ正確にシミュレートできることが最大の特徴である。

これまでの解析手法では、ログレジデュアル値に注目し、その吸収位置から最も卓越する鉱物種を同定する手法が用いられてきた。この手法では1成分のみしか検知し得ず、変質帯といえども風化層表面は通常 Hematite や Goethite が含まれているはずであり、端成分で同定することは論理的

に矛盾を含んでいる。さらに、Goethiteに20%程度のSericititeを加えた合成反射スペクトルは、Fig.II-4-3-7-1の破線内で示すように端成分であるGoethiteの特徴を示しており、Sericititeの端成分の特徴を有していないことが解る。このことは、変質鉱物をわずかにしか含まない変質帯で、端成分の特徴からその存在を推定することが不可能であることを示している。

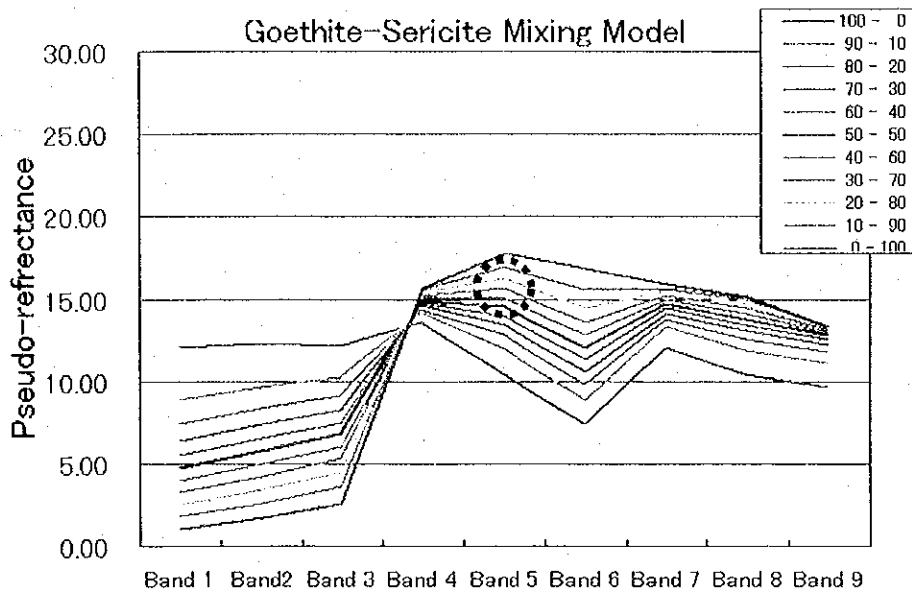


Fig.II-4-3-7-1 Spectral pattern of mixed phase of Goethite - Sericite

### (1) 等粒子モデル

一般に風化物質は複数の鉱物から構成され、風化物質の反射スペクトルはその構成鉱物に固有な反射スペクトルを合成したものからなる。各鉱物の反射スペクトルと風化物質の反射スペクトルとは非線形の関係にあるが、この関係を明確に説明するのが「等粒子モデル」である。

等粒子モデルでは粒状物質からの反射を一連の光の粒子相互作用として取り扱う。このモデルは光学定数(屈折率及び吸収係数)と、垂直および水平方向それぞれの散乱能と吸収能を決める2つのパラメータ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$ )とを結合させるものである。粒子サイズと形状は混合比の計算結果精度に影響を与えるが、有効粒子サイズ概念を導入することによりモデル化することができる。

詳しくは経済産業省(2001)を参照のこと。

簡単に言えば、等粒子モデルとは、鉱物毎に波長毎の表面反射率、吸収率を与え、粒子サイズを仮定すれば、複数成分の混合比を与えることによって合成スペクトルが計算できる点にある。

### (2) 同定鉱物種とシミュレーションのデータベース

経済産業省(2001)では同定鉱物種を9種とし、以下の9成分によって同定した。

①Alunite ②Kaolinite ③Gypsum ④Sericitite ⑤Montmorillonite

⑥Calcite ⑦Chlorite ⑧Quartz ⑨Goethite

ただし、Montmorilloniteがほとんど検出されないこと、合成スペクトルのマッチング誤差がやや大きいこと(マッチングが最も良いものでも3%程度の平均誤差が生じている)から、Montmorilloniteを除き、その変わりとしてHematiteを加えた以下の9成分でデータベースを作成した。なお、代表的な変質鉱物および酸化鉄鉱物を Fig.II-4-3-7-2 に示した。

①Alunite ②Kaolinite ③Gypsum ④Sericite ⑤Hematite

⑥Calcite ⑦Chlorite ⑧Quartz ⑨Goethite

鉱物の混合反射率データベースは 10%刻みの複成分で作成(例えば、Aln20%、Kao20%、Ser30%、Goe20%、Qtz10%など、100%となるようなあらゆる組み合わせを考える)した。

既に述べたように、2 種の変質鉱物を混在させたときの反射スペクトルは容積率に対して非線形に変化する。Fig.II-4-3-7-3 は9種類の変質鉱物から2種類を選択し、混合率を10%ごとに変えた時の反射スペクトルの変化である。この図のうち、混合比に対してスペクトルがほぼ線形に変化するものとしては、セリサイト-カオリナイトがある。これに対して、明礬石-セリサイト、カオリナイト-明礬石は明礬石に少量のセリサイトあるいはカオリナイトが混入しただけで、反射スペクトルは大きく変化してしまう。また、緑泥石-針鉄鉱で針鉄鉱が少量混入することにより、明礬石と同様に反射スペクトルは大きく変化する。

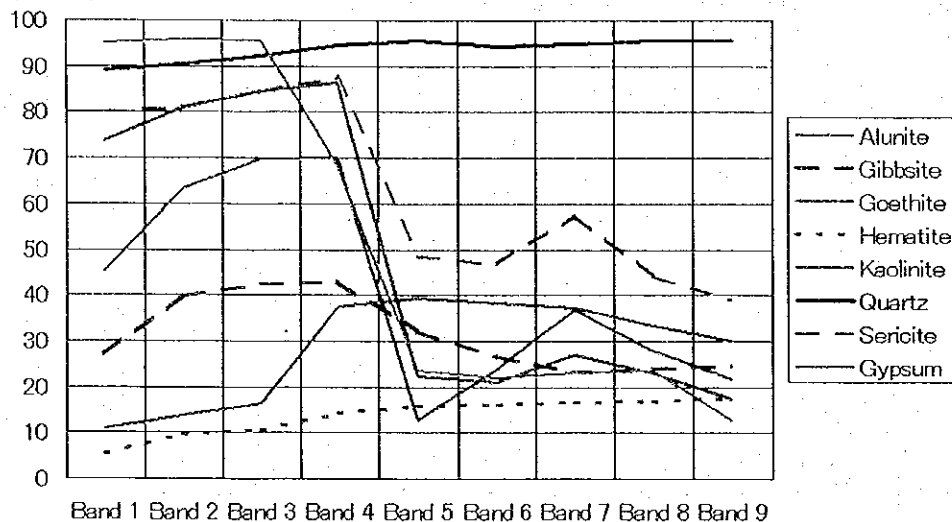


Fig.II-4-3-7-2 Spectral pattern of alteration minerals and ferro-oxide minerals in acidic alteration zone

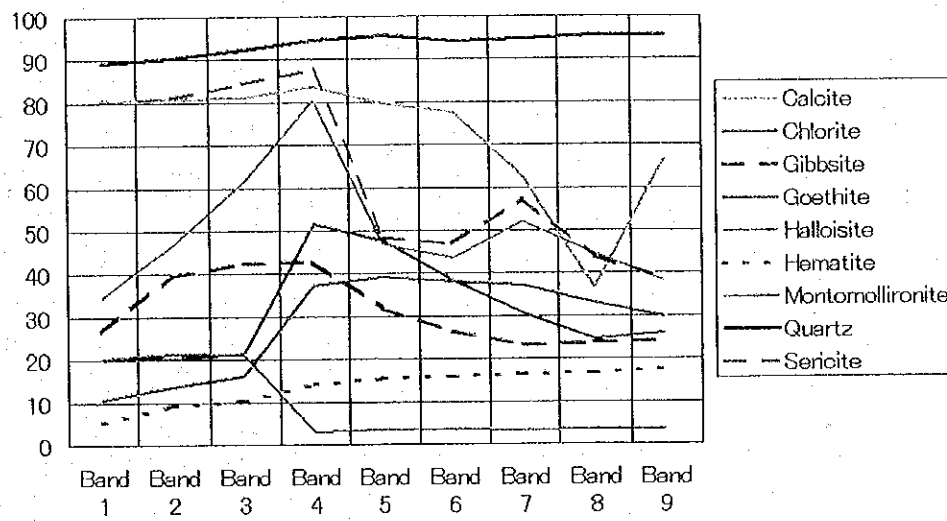


Fig.II-4-3-7-3 Spectral pattern of alteration minerals and ferro-oxide minerals in intermediate-alkali alteration zone



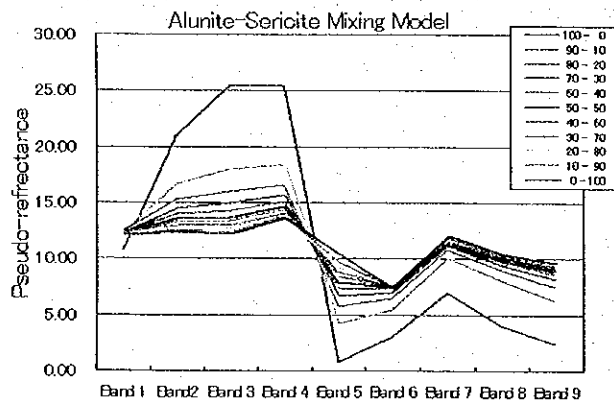
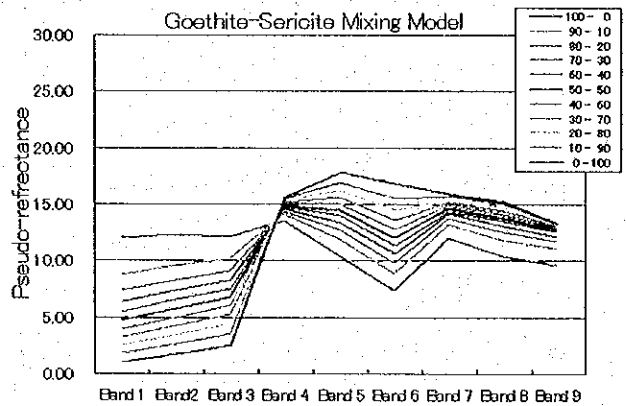
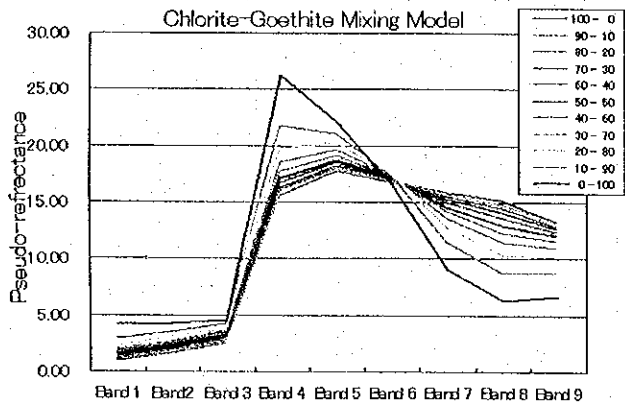
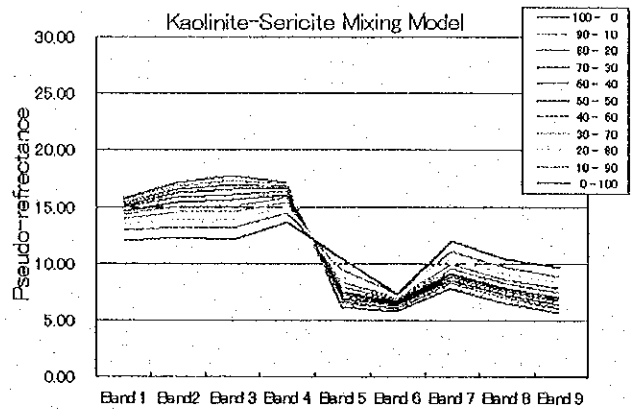
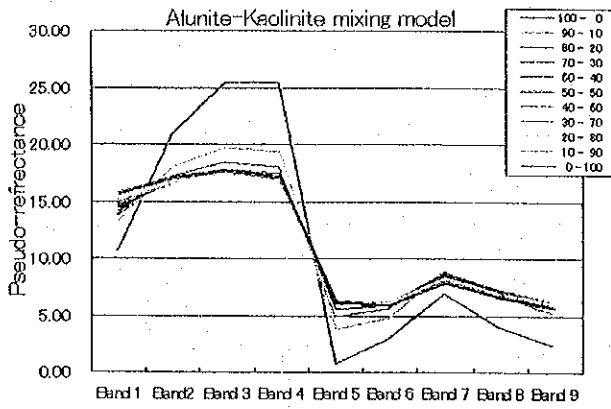


Fig.II-4-3-7-4 An example of spectral pattern mixing of two minerals

### (3) 鉱物同定処理

鉱物を様々な容積比によって混合させた疑似反射率を計算したデータベースを事前に作成し、このインデックスと各画素の疑似反射率を対比させることで鉱物種の同定を実施した。同定は画像から算出した疑似反射率と、データベースで作成した合成反射スペクトルの疑似反射率とを逐次比較し、もっとも各バンドの誤差の二乗和が最小となる合成反射スペクトルを解とする。実際の作業では、最も良く一致するデータとの標準誤差と2番目、3番目のデータとの標準誤差はわずかな差でしかない。現在の疑似反射率の変換精度、鉱物種の粒度の仮定、および同定鉱物種を1つの分光反射率で代表させているなどの仮定から、鉱物同定では、このような小さな標準誤差の違いを識別できる精度は有していない。従って、ここでは上位3つを解とし、上位3つの鉱物含有量の平均値を出力値とした。このようにしても、Table II-4-3-8に示すように選択された上位3つは類似した鉱物組み合わせ、組成を示していることが解る。

鉱物混合比を10%刻みでインデックスを作成したが、プログラムを高速化しても1シーンの処理には約1週間を要する計算となった。このため、今回は20%刻みのインデックスを使用して処理時間の短縮(約1/50の処理時間)を行った。

Table II-4-3-8 Result on the most fitted pseudo-reflectance of pixel(top three score)

鉱物量比									疑似反射率									
									Band1	Band2	band3	Band4	Band5	Band6	Band7	BAnd8	Band9	ERROR
Al	Cl	Ch	Ge	Gp	Hm	Ko	Qz	Sr	10.57	12.08	12.42	13.38	9.31	9.82	11.1	10.61	10.71	
40	0	0	0	0	40	20	0	0	11.11	12.29	12.59	13.20	9.48	9.69	11.27	10.51	9.87	1.09
20	0	0	0	0	40	20	20	0	10.98	12.02	12.28	12.86	9.95	9.97	11.25	10.61	10.1	1.14
20	0	0	0	20	20	0	40	0	11.09	12.55	12.92	13.54	9.46	9.85	10.96	10.67	9.53	1.21
26	0	0	0	6	33	13	20	0	← 同定結果の出力値									

1行目：画像の疑似反射率 2~4行目：データベースの組成と疑似反射率

5行目：上位3つの平均組成 ERROR：差の二乗和の平方根(標準誤差)

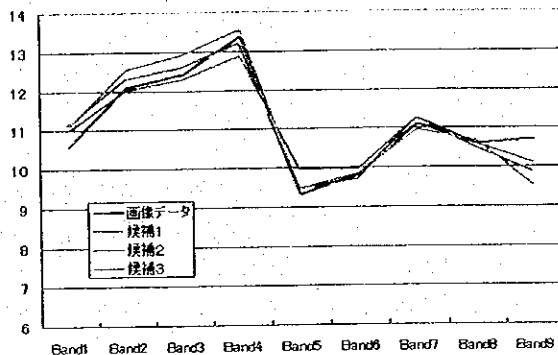


Fig.II-4-3-7-5 An example of mineral identification

(画像の疑似反射率とデータベースを比較し、上位3つを解とする。なお、組成は上位3つの平均値を出力する。)

#### (4) 解析結果

解析結果は9成分の含有量で出力される。これらの出力データの1成分を濃度で表現すれば濃度分布図が作成され、任意の3成分をRGBで表せば、3成分の分布図が作成できる。また、Aln+Kaoを合算し、1成分として扱い、RGB=Aln+Kao, Ser, Chlと表現すれば、Advanced Argillic, Phyllic, Propyliticの変質帯分布図を作成できる。さらに、本解析ではHematiteとGoethiteの2成分としたことから、両者から酸化鉄の分布図を作成することができる。

ここでは以下の4種類の変質鉱物分布図を作成した。

①RGB = Alunite, Kaolinite, Sericite

②RGB = Alunite, Goethite, Sericite

③RGB = Alunite+Kaolinite, Sericite, Chlorite

④RGB = Goethite, Hematite, Quartz

本解析で使用了画像には雲や雲の影、および鹹湖堆積物が多数分布する。雲の領域では、雲の濃淡によって変質鉱物が誤って同定される場合があり、影の部分では非常に低い輝度値であることから、ノイズの影響を受け同様に誤った結果を出力する場合がある。また、鹹湖堆積物では同定鉱物種に入っていない岩塩が分布することからGypsumとともにAluniteやKaoliniteが同定されてしまう。これら誤同定された領域は、フォールスカラー画像を合わせて用いることで識別できるが、煩雑な作業となる。ここでは目視によって雲および雲の影、および鹹湖堆積物が分布する領域をデジタル化し、これらを同定結果の上に表示することで解析結果の解釈を容易に判断できるものとした。

また、AluniteやKaoliniteを含む変質帯は比演算処理画像(BGR=4/5, 4/6, 4/7)では明白色に、フォールスカラー画像(BGR=147)では淡緑色に表現される特徴があることから、鉱物同定結果と合わせて目視によって変質帯の抽出を実施した。比演算処理画像やフォールスカラー画像で変質帯として識別される領域のほとんどは、鉱物同定結果でAlunite, KaoliniteおよびSericiteが同定されており、現段階では概ね良好な解析結果となったと推定される。なお、Sericiteが卓越する変質帯ではフォールスカラーや比演算処理画像では明瞭な特徴は示さず、その判別が一般に難しい。

Chloriteの同定はそのスペクトル特徴が不明瞭であることから、同定の難しい鉱物種の1つであった。Chloriteに関する本解析の結果が正しいものであるとすれば、これまでの解析例から見て画期的とも言える解析結果であると考えられる。

本解析では酸化鉄鉱物としてGoethiteとHematiteの2つを使用した。これまで衛星データから酸化鉄鉱物の分布図が作成されたことはほとんどなく、本解析結果が正しければ鉱床探査に重要な指針をもたらすものとする。さらに、本解析では簡易法ではあるが植生情報の除去を試みた。本手法は幾つかの仮定を含み、まだ完成したものではないがData6201で植生中に同定された変質帯の同定結果が良好であれば、本手法を半乾燥域にまで広げることが可能となる。なお、Data6601について解析結果をFig.II-4-3-7-6, 7に示した。

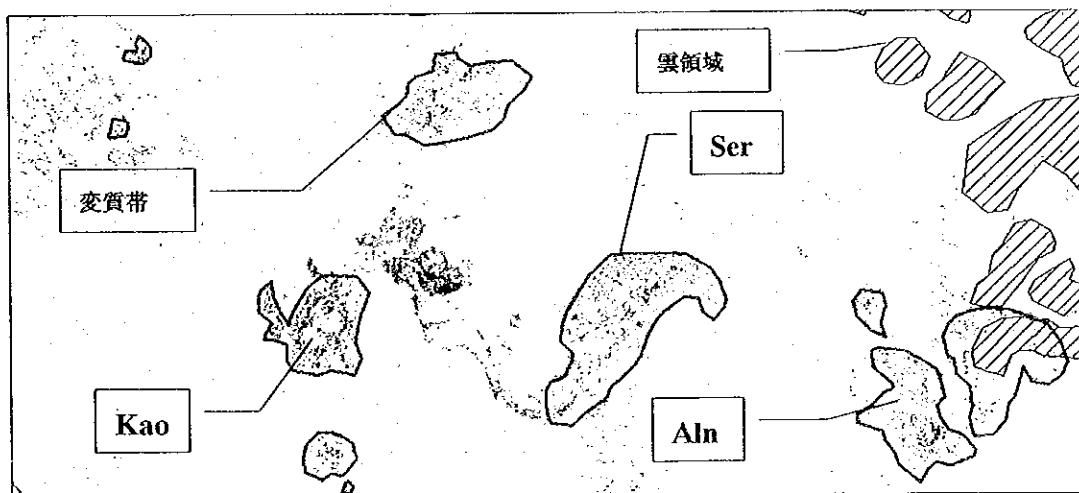
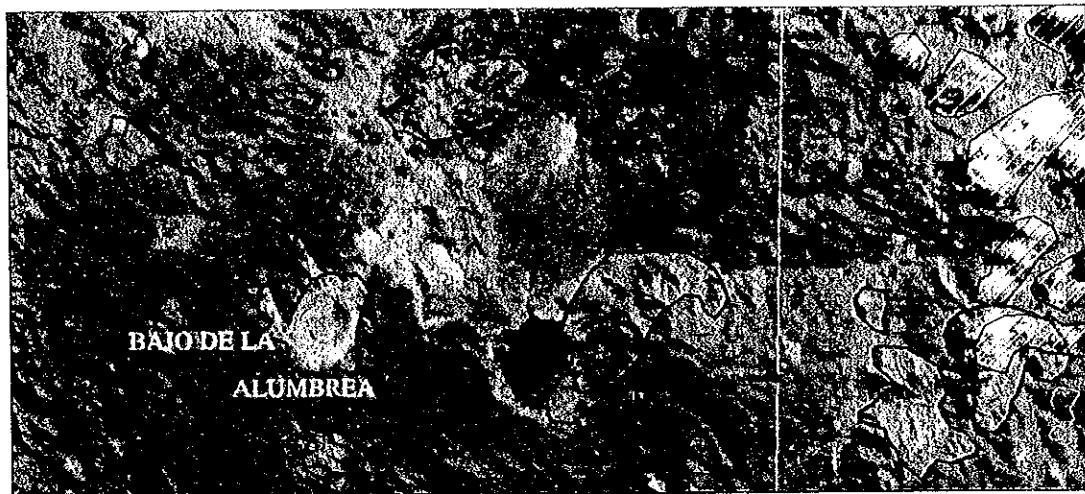


Fig.II-4-3-7-6 Mineral identification(top: BGR=247, middle: ratio image, bottom: RGB=Aln,Kao,Ser)

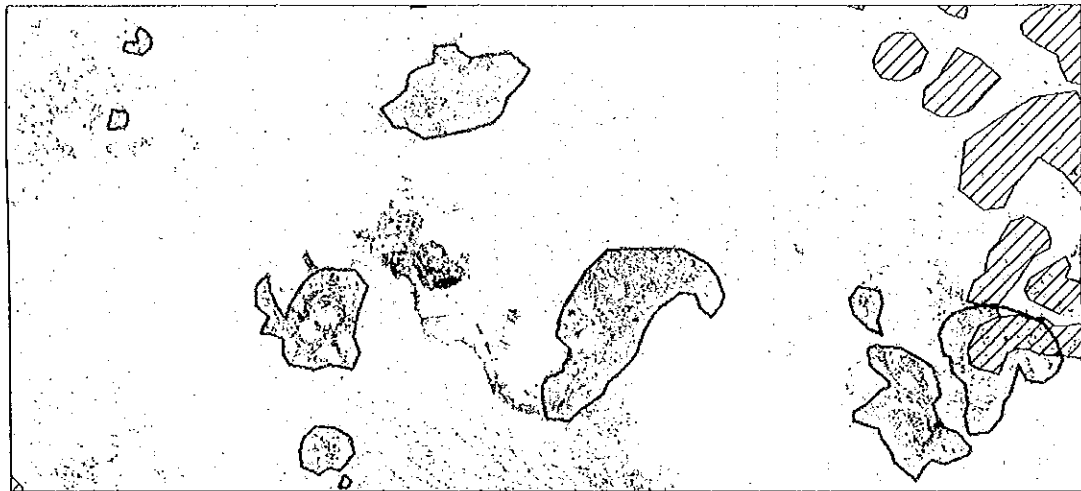
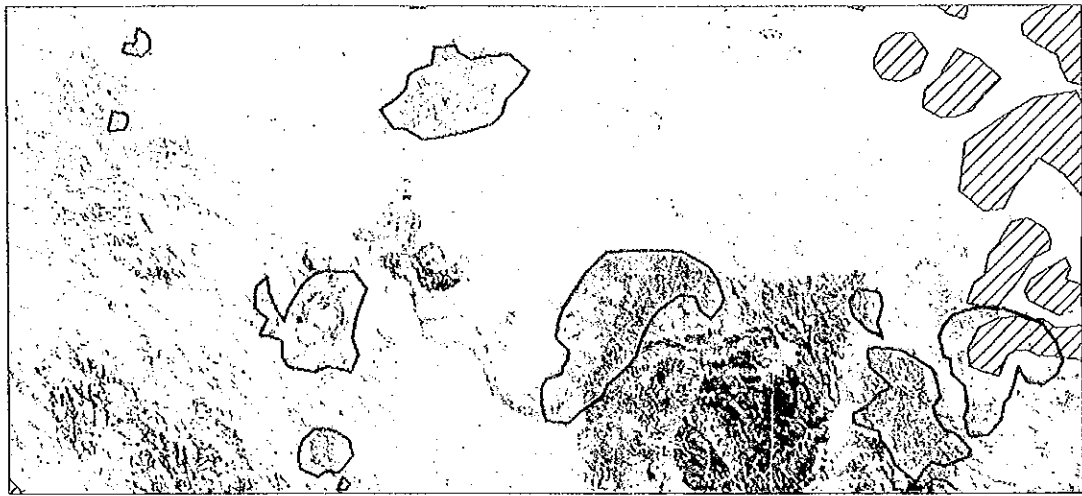


Fig.II-4-3-7-7 Mineral identification(top: RGB=Aln,Goe,Ser, middle: RGB=Aln+Kao,Ser,Chl, bottom: RGB=Goe,Hem,Qtz)

#### 4-3-8 SiO<sub>2</sub>含有量マップ

ASTER センサの特徴の1つは、熱赤外領域に5バンドを有することにある。経済産業省(1998～2000)や(財)資源・環境観測解析センター(1991,1992)によれば、ASTERのTIR領域において、Si-O-Si振動に起因する吸収特性(8.3～12.5 μm)によって、火成岩のSiO<sub>2</sub>含有量を推定する研究事例が報告されている。特に、経済産業省(2000)では、ASTERのバンド10～13の4バンドから以下のSiO<sub>2</sub>推定式が提案されている。

$$\text{SiO}_2(\%) = 56.20 - 271.09 \times \text{Log}((\text{Ems}[10] + \text{Ems}[11] + \text{Ems}[12]) / 3 / \text{Ems}[13])$$

Ems[n]=ASTERバンドnの放射率

しかしながら、同時に経済産業省(2000)では、上述の算定式による推定量の95%信頼区間が±15%にもおよぶことから、デザートバーニッシュが放射率特性に及ぼす影響(小川ほか,1999)の問題を含め、SiO<sub>2</sub>精度を再検討する必要があることを示した。

ここでは、上述したSiO<sub>2</sub>算定式を用いてASTERのTIRによるSiO<sub>2</sub>含有量のマッピングを試みた。

##### (1) 大気補正

熱赤外域(8～13 μm)において地表から射出されてセンサに達する放射輝度は、大気の影響を無視すると次式で表される。

$$R_\lambda = \varepsilon_\lambda B_\lambda(T)$$

ここで、λは波長、ε<sub>λ</sub>は地表面の分光放射率、Tは地表面の絶対温度である。また、B<sub>λ</sub>(T)は温度Tの黒体の放射輝度であり、下式で表される。

$$B_\lambda(T) = c_1 / (\pi \lambda^5) / (\exp(c_2 / (\lambda T)) - 1)$$

B: 黒体放射輝度 [W / m<sup>2</sup> / sr / μm]

$$c_1: 2\pi hc^2 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$$

$$h: \text{プランク定数} = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$c_2: hc/k = 1.44 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{K}$$

λ: 波長 [μm]

T: 温度 [°K]

$$c: \text{光速} = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$k: \text{ボルツマン定数} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Js/}^\circ\text{K}$$

センサの観測放射輝度には大気の影響が含まれているので、航空機や衛星に搭載された熱赤外域センサで観測される放射輝度は次式で表される(外岡他, 1997)。

$$R_\lambda = \{ \varepsilon_\lambda B_\lambda(T) + (1 - \varepsilon_\lambda) R_{d\lambda} \} \tau_\lambda + R_{u\lambda}$$

ここで、 $\tau_\lambda$ は大気分光透過率、 $Rd_\lambda$ は地表における大気の下向き分光放射輝度(天空輝度)、および $Ru_\lambda$ は光路中の大気からの上向き分光放射輝度(光路輝度)である。

大気補正では、観測放射輝度から上記の大気の影響を除去して、地表面での分光放射輝度を求める。

本研究では、放射伝達計算プログラム MODTRAN3 を用いてバンド 10~14 での大気補正パラメータ( $\tau_\lambda$ ,  $Rd_\lambda$ ,  $Ru_\lambda$ )を求めた。MODTRAN3 は 6 種類の大気モデル、12 種類のエアロゾルモデルを持っているが、大気モデルとしては 1976 US Standard、エアロゾルモデルとしては Desert Extinction Model を採用した。なお、水蒸気に関しては本地域が乾燥~半乾燥気候であることを考慮して、米国標準 (1976 US Standard) の値(平均相対湿度: 19.36%)とした。

設定した大気モデルを使って、以下の値から大気補正パラメータ( $\tau_\lambda$ ,  $Rd_\lambda$ ,  $Ru_\lambda$ )を求める。

大気モデル: 1976 US Standard

エアロゾルモデル: Desert Extinction Model

センサ高度: 100km(設定できる最大値、実高度は 705km)

地表面高度: 2km とした

観測方向: 直下(Zenith Angle=18)

ASTER TIR の走査角は $\pm 2.44^\circ$ 、ポインティング角は $\pm 8.55^\circ$ であり、

最も傾いた観測と直下観測のパス長の違いは 2%程度と小さい。

バンド 10~14 における透過率、天空輝度及び光路輝度の値はそれぞれの波長に対して 50%(両端波長)~100%(中心波長)の重みをつけた加重平均値とした。

## (2) 放射率分離

熱赤外域における温度・放射率分離において、観測値より未知数の数が多いため、様々な方法により未知数を減らして温度と放射率を推定している。ASTER データ(バンド 10~14)では観測値が 5 つあるのに対し、未知数は温度と放射率(5 つ)の計 6 つである。

温度と放射率の代表的な推定方法を以下に示す。

### ・モデル放射率法

ある特定のバンドの放射率を対象シーン全体で一定値に仮定する方法である(Kahle, 1987)。

### ・正規化法

ピクセルの分光放射率の最大値が対象シーン全体で一定と仮定する方法である(Realmuto, 1990)。

### ・ $\alpha$ 残差法

ウィーンの式により放射式を近似し、その対数をとることによって温度の影響を除去して $\alpha$ 値と呼ばれる放射率のスペクトルパターンを求める方法である(Kealy et al, 1990)。

### ・比バンド法

隣接するチャンネルの大気補正後の放射輝度比を取ることで、分光放射率の比に近い値を得

る方法である(Watson, 1992)。

・平均値・最大差法

各チャンネルの放射率の平均値と最大差との間に線形関係を見出し、その関係式を用いる方法である(松永, 1994)。

本研究では下記の3手法を組み合わせた方法(Gillespie et. al, 1996)により、温度・放射率の分離を行った。

・最大放射率正規化法(Normalized Emissivity Method : NEM)

・比放射率法(Ratio Method : RAT)

・平均値・最大差法(Mean and Max-Min Difference Method : MMD)

この計算では最大放射率正規化法及び比放射率法によって地表面放射率を簡易推定し、推定値の波長方向のばらつきに対して経験式(平均値・最大差法)により波長平均放射率を求め、その値より地表面放射率の簡易推定値を修正するものである。

計算の流れを以下に述べる。なお、本計算の入力データは、光路輝度及び透過率の補正を施した地表面での上向き分光放射輝度  $L_{\lambda} = (\varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) Rd_{\lambda})$  と天空輝度  $Rd_{\lambda}$  であり、出力データは地表面温度  $T_s$  と分光放射率  $\varepsilon_{\lambda}$  である。

①バンド 10~14 の放射率の最大値を 0.97 と仮定する。

$$\varepsilon_{\max} = 0.97$$

②仮定した最大放射率と上向き分光放射輝度から地表面反射分を除いた輝度  $R_{\lambda}'$  (以下“補正済輝度”と呼ぶ)を求める。

$$R_{\lambda}' = L_{\lambda} - (1 - \varepsilon_{\max}) Rd_{\lambda}$$

③各バンドの補正済輝度  $R_{\lambda}'$  から温度  $T_{\lambda}$  を計算し、そのうち最も大きい値を推定温度  $T$  とする。

$$T_{\lambda} = c_2 / \lambda / \ln(c_1 \varepsilon_{\max} / \pi R_{\lambda}' \lambda^5 + 1)$$

$$T = \max(T_{\lambda})$$

④推定温度における各バンドの黒体放射輝度を求め、各バンド毎に補正済輝度と黒体放射輝度の比をとって放射率  $\varepsilon_{\lambda}$  を求める。

$$\varepsilon_{\lambda} = R_{\lambda}' / B_{\lambda}(T)$$

⑤この放射率から、②の手順で再度補正済輝度を求める。また、③の手順により放射率が最大のバンドでの推定温度をその点の地表面温度  $T_s$  とする。

$$R_{\lambda}' = L_{\lambda} - (1 - \varepsilon_{\lambda}) Rd_{\lambda}$$

$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon_{\lambda})$$

$$T_s = c_2 / \lambda / \ln(c_1 \varepsilon_{\max} / \pi R_{\lambda}' \lambda^5 + 1)$$

⑥求めた地表面温度  $T_s$  での各バンドの黒体放射輝度  $B_{\lambda}(T_s)$  の平均値を  $B_{\text{mean}}$ 、補正済輝度  $R_{\lambda}'$  の平均値を  $R'_{\text{mean}}$  としたとき、下式により比放射率  $\beta_{\lambda}$  を算出する。

$$\beta_{\lambda} = (R_{\lambda}' \times B_{\text{mean}}) / (B_{\lambda}(T_s) \times R'_{\text{mean}})$$

⑦比放射率の最大値  $\max(\beta_{\lambda})$  と最小値  $\min(\beta_{\lambda})$  の差を MMD としたとき、下式から各バンドの放射率  $\varepsilon_{\lambda}$  を求める。



$$MMD = \max(\beta_{\lambda}) - \min(\beta_{\lambda})$$

$$\varepsilon_{\min} = 0.994 - 0.687 \times MMD^{0.737}$$

$$\varepsilon_{\lambda} = \beta_{\lambda} \times (\varepsilon_{\min} / \min(\beta_{\lambda}))$$

⑧ 求めた放射率から、⑤と同様にして地表面温度を算出する。前に求めた地表面温度との差が小さくなるまで ( $\Delta Ts < 0.001$ )、②からの手順を繰り返す。

$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon_{\lambda})$$

$$Ts = c_2 / \lambda / \ln(c_1 \varepsilon_{\max} / \pi R_{\lambda} \lambda^5 + 1)$$

### (3) 処理結果

前項までの手法によって、各バンドの放射率画像と地表面温度画像を作成することができる。本解析に使用したデータは経済産業省(2001)に比較し、データのばらつきが非常に大きい特徴がある。とくに非常に小さい値があり、これらのデータをそのまま利用すると温度放射率分離の計算時に、誤った解析結果を導くおそれ大きい。異常に小さな値はおそらくは雲の影響と思われる、ここでは、バンド毎に平均値・標準偏差を算出し、5バンドのうち1つのバンドでも $\pm 3\sigma$ を外れたものは、処理から除外した。

なお、計算された最大・最小および平均値と、輝度値を Table II-4-3-9 に示した。

Table II-4-3-9 Emissivity value of TIR

シーンNO.		放射率					地表面温度
		band10	band11	band12	band13	band14	
Data012	最小値	0.3641	0.4167	0.4476	0.5953	0.5814	264.1
	最大値	1.0000	1.0000	0.9974	1.0000	1.0000	309.4
	平均値	0.8272	0.8194	0.7911	0.8552	0.8865	291.6
Data013	最小値	0.3368	0.3574	0.3727	0.5604	0.6526	260.7
	最大値	0.9999	1.0000	0.9997	1.0000	1.0000	307.7
	平均値	0.7728	0.7870	0.7851	0.8602	0.8838	288.7
Data014	最小値	0.3496	0.3772	0.3957	0.5632	0.6372	260.2
	最大値	0.9999	1.0000	0.9986	1.0000	1.0000	302.9
	平均値	0.7572	0.8288	0.8747	0.8986	0.8568	288.0
Data015	最小値	0.3430	0.3749	0.3804	0.5844	0.6475	259.6
	最大値	0.9999	1.0000	0.9954	1.0000	1.0000	306.9
	平均値	0.7941	0.7921	0.7815	0.8735	0.8652	289.0

シーンNO.		放射率					地表面温度
		band10	band11	band12	band13	band14	
Data016	最小値	0.3225	0.3579	0.3679	0.5525	0.6177	260.8
	最大値	1.0000	1.0000	0.9992	0.9998	1.0000	311.9
	平均値	0.7923	0.7957	0.7779	0.8701	0.8892	293.4
Data017	最小値	0.4041	0.4417	0.4640	0.6026	0.7000	268.4
	最大値	0.9997	0.9998	0.9936	0.9999	1.0000	315.9
	平均値	0.8103	0.8138	0.8049	0.8713	0.8871	294.2

Data101	最小値	0.6004	0.6097	0.5904	0.6476	0.5852	268.1
	最大値	1.0000	0.9994	0.9930	0.9940	0.9925	316.2
	平均値	0.8677	0.8593	0.8253	0.8641	0.8703	300.2
Data102	最小値	0.5832	0.5830	0.5530	0.6514	0.5973	267.9
	最大値	1.0000	0.9991	0.9935	0.9928	0.9997	314.4
	平均値	0.8639	0.8503	0.8183	0.8621	0.8713	298.2
Data103	最小値	0.5070	0.5680	0.5836	0.5031	0.3340	267.1
	最大値	1.0000	1.0000	0.9999	1.0000	0.9989	312.1
	平均値	0.8417	0.8443	0.8276	0.8482	0.8223	293.3
Data201	最小値	0.3534	0.3999	0.3992	0.6046	0.5950	249.8
	最大値	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	318.0
	平均値	0.8193	0.8066	0.7993	0.8777	0.8762	292.7
Data202	最小値	0.3434	0.3853	0.3757	0.6210	0.6343	257.9
	最大値	0.9990	1.0000	0.9999	1.0000	0.9995	313.7
	平均値	0.8209	0.8075	0.7998	0.8684	0.8874	293.5
Data203	最小値	0.3160	0.3677	0.3585	0.5829	0.5710	249.0
	最大値	0.9995	1.0000	0.9994	0.9998	1.0000	316.1
	平均値	0.8229	0.8156	0.8019	0.8717	0.8771	293.7
Data6200	最小値	0.5826	0.5461	0.6787	0.7126	0.6947	276.6
	最大値	0.9808	0.9990	0.9989	0.9974	0.9958	334.4
	平均値	0.8147	0.8725	0.8692	0.9058	0.9010	316.1
Data6201	最小値	0.5356	0.5647	0.5619	0.6728	0.6502	268.1
	最大値	0.9896	0.9996	0.9923	0.9983	0.9996	327.6
	平均値	0.8095	0.8584	0.8561	0.8943	0.8838	304.8
Data6601	最小値	0.4829	0.5558	0.5679	0.6690	0.6609	268.3
	最大値	0.9975	1.0000	0.9993	1.0000	0.9999	311.9
	平均値	0.8196	0.8331	0.8322	0.8815	0.8933	296.0
Data6602	最小値	0.6013	0.6118	0.6504	0.7299	0.7324	282.9
	最大値	0.9882	0.9933	0.9913	0.9991	0.9981	313.0
	平均値	0.7979	0.8418	0.8711	0.9075	0.8771	299.4

#### (4) SiO<sub>2</sub>含有量マッピング

放射率データ(バンド 10~13)と前出の SiO<sub>2</sub> 換算式を用いることで、SiO<sub>2</sub> 含有量マップを作成することができる。ただし、換算式が適用される岩石は珪酸塩岩にのみであるため、石灰岩などの炭酸塩岩を除く必要がある。Fig.II-4-3-8-1 に SiO<sub>2</sub> 含有量マップおよび地質図を示した。なお、SiO<sub>2</sub> 含有量の算定はまだ問題点が多く、デザートバーニッシュの問題を含めて検討する必要がある。

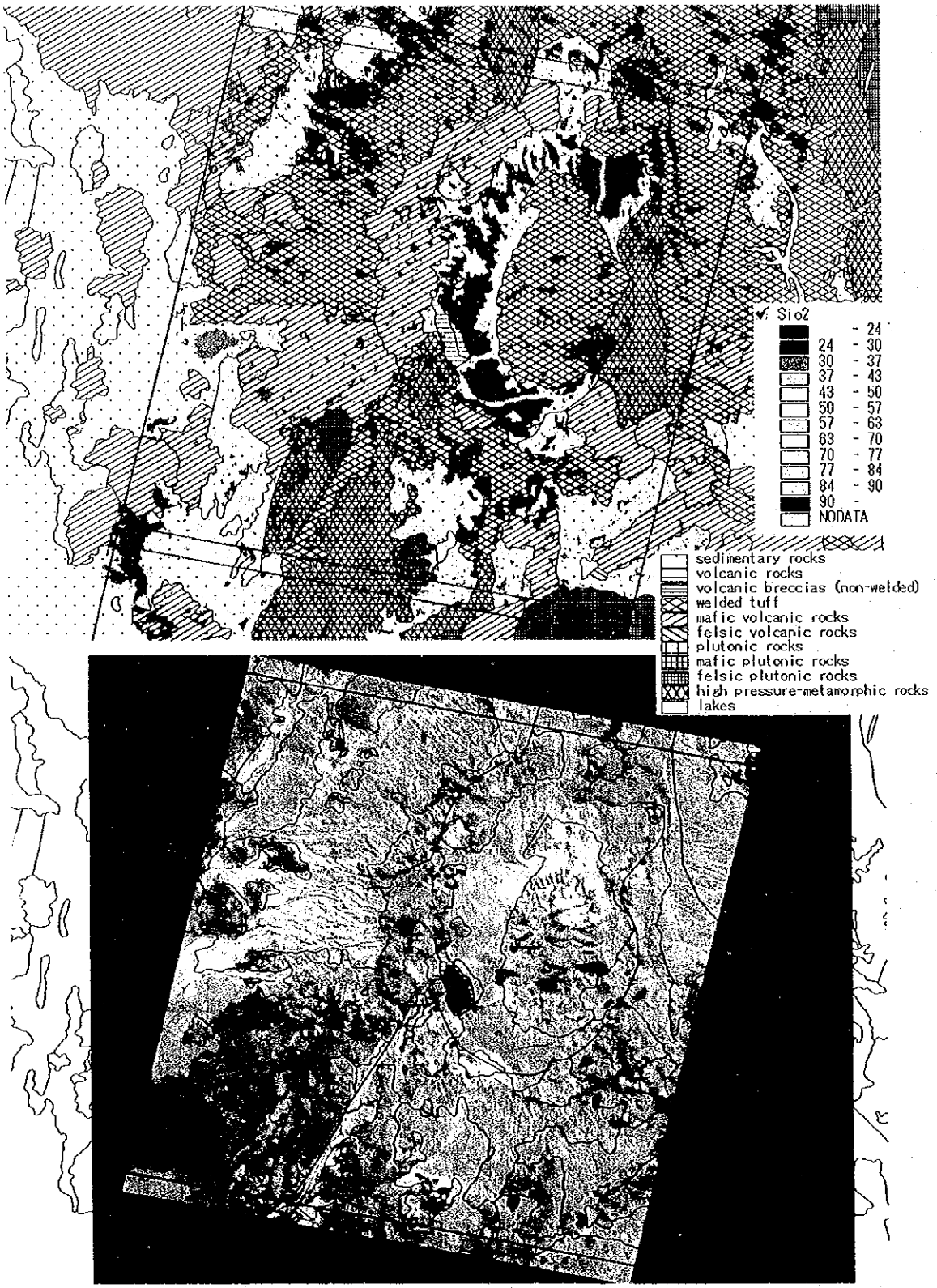


Fig.II-4-3-8-1 Comparison with SiO<sub>2</sub> map and geology

#### 4-3-9 DEM (デジタル標高モデル)

##### (1) DEM(Digital Elevation Model)

ASTER データには同一軌道から取得された後方視データ(VNIR 3B)が含まれている。これは同一軌道から後方視した画像データであり、直下視画像(VNIR 3N)を併用することで立体視する事ができる。この一組のステレオ画像間では、対応する地表物の位置は、基準標高からの差の分だけ位置ずれ(視差)を生じている。この位置ずれを計測することにより、逆に基準標高からの差、すなわち標高を求めることができる。位置ずれの量は、通常2つの画像の中で対応する付近の小領域の画像相関をとり、相関係数が最大となる位置から測定する。したがって、この画像相関がどれだけ正確に行われるかが、標高計測精度に直接影響する。ASTER の場合は、2つの画像の間での観測時間差が約 55 秒ときわめて短く、ほとんど同一時点の地表面を観測することになるので、光学的条件や大気の変動による画像の変化を小さく抑ええることができ、高精度の画像相関が期待できる。この画像相関を、取得された画像全体にわたって行うことにより、地表の標高を一定間隔のグリッドごとに面的に計測したデジタル標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) として作成することができる。

本作業では雲のない連続する 5 シーンの立体視データから DEM を作成した(Fig.II-4-3-9-1, 2)。作成した DEM の空間分解能は 30m とし、同時に VNIR および SWIR の各データについて空間分解能 30m の正射投影変換画像を作成した。

##### (2) DEM を利用した解析について

ASTER データにより比較的手軽に高精度の DEM を利用することが可能となった。DEM の単純な利用方法としては、解析結果の 3 次元鳥瞰図などがあり、解析結果をわかりやすく図示することができる。また、陰影図は対象地域の地形的特徴を明瞭にすると共に、構造盆地や断裂系あるいは火山など地質・地質構造の把握に優れている。

以上のような DEM の一次的利用法は重要であるが、地形学的な手法を取り入れることにより、地形情報が持つ本質的な情報を得ることもできる。たとえばトルコ共和国における塊状硫化物鉱床探査を目的として、ASTER DEM から高度分散量異常解析手法によって、断裂系あるいはプルアパ一ト的な構造盆地などの推定、また、広域変質作用が生じた地域の抽出などが行われている(三箇、佐藤 2002)。これら DEM による地形解析手法は主として植生地域の地質・構造解析のために開発されたものであるが、露岩が広がる乾燥域においてもその効果は変わらない。例えば、画像判読において時代の異なる岩相が直線的に接する場合に断層構造が推定され、その確実性は極めて高い。しかしながら類似した岩相が断層で接する地域では、植生域と同様に地形的なギャップの連続性を追跡して推定する場合もある。このような地域で地形的ギャップが小さい、あるいは太陽光源の関係から明瞭に地形ギャップを表現できていない場合もあり、DEM を用いた地形解析手法ではこれらの地域でも有効であると考えられる。

DEM および DEM によって正射投影変換した ASTER データが利用可能となれば、TIR データを利用したより高度な解析が可能となる。TIR は大気補正後、温度・放射率分離を実施することで、

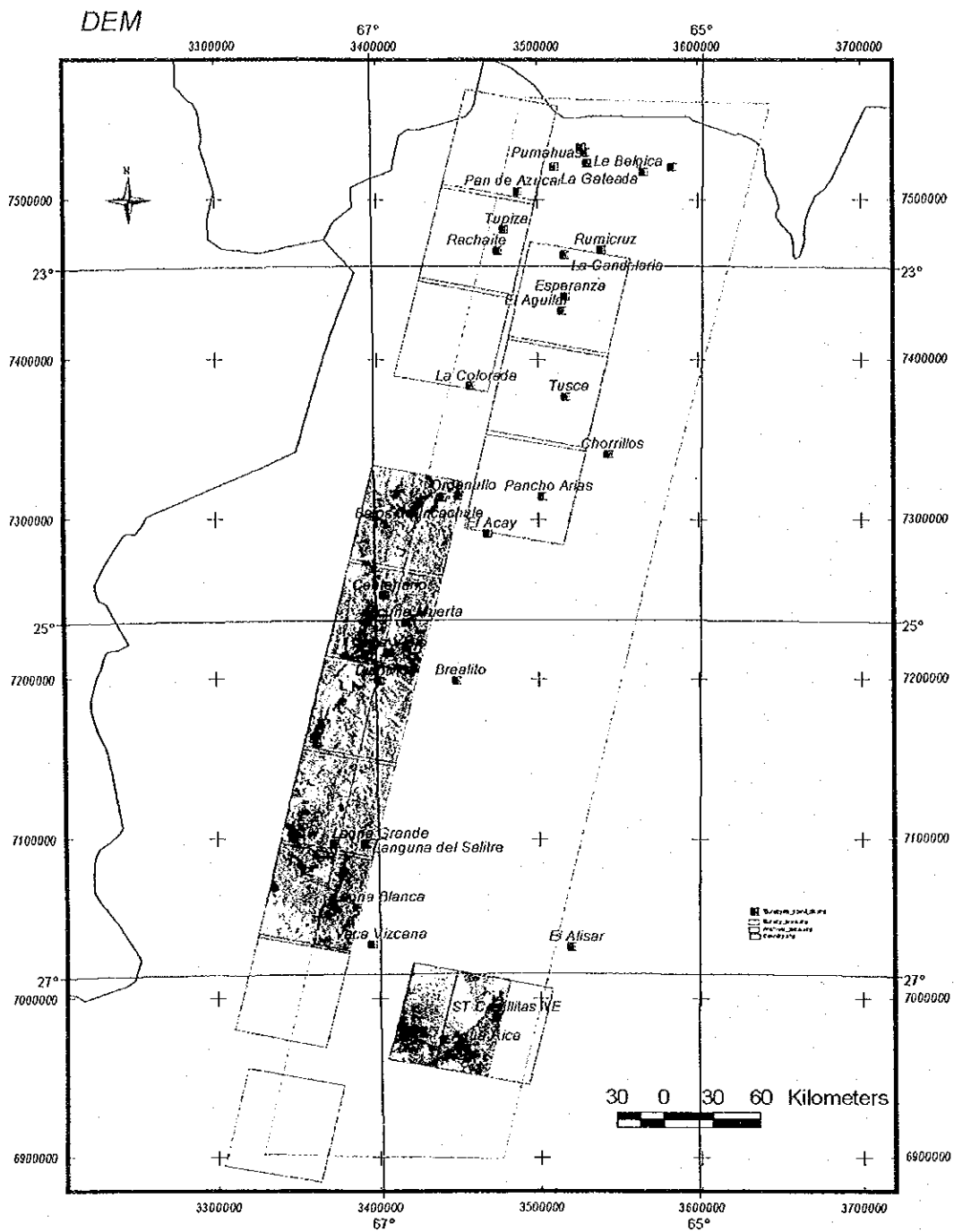


Fig.II-4-3-9-1 Index map of ASTER image area for DEM

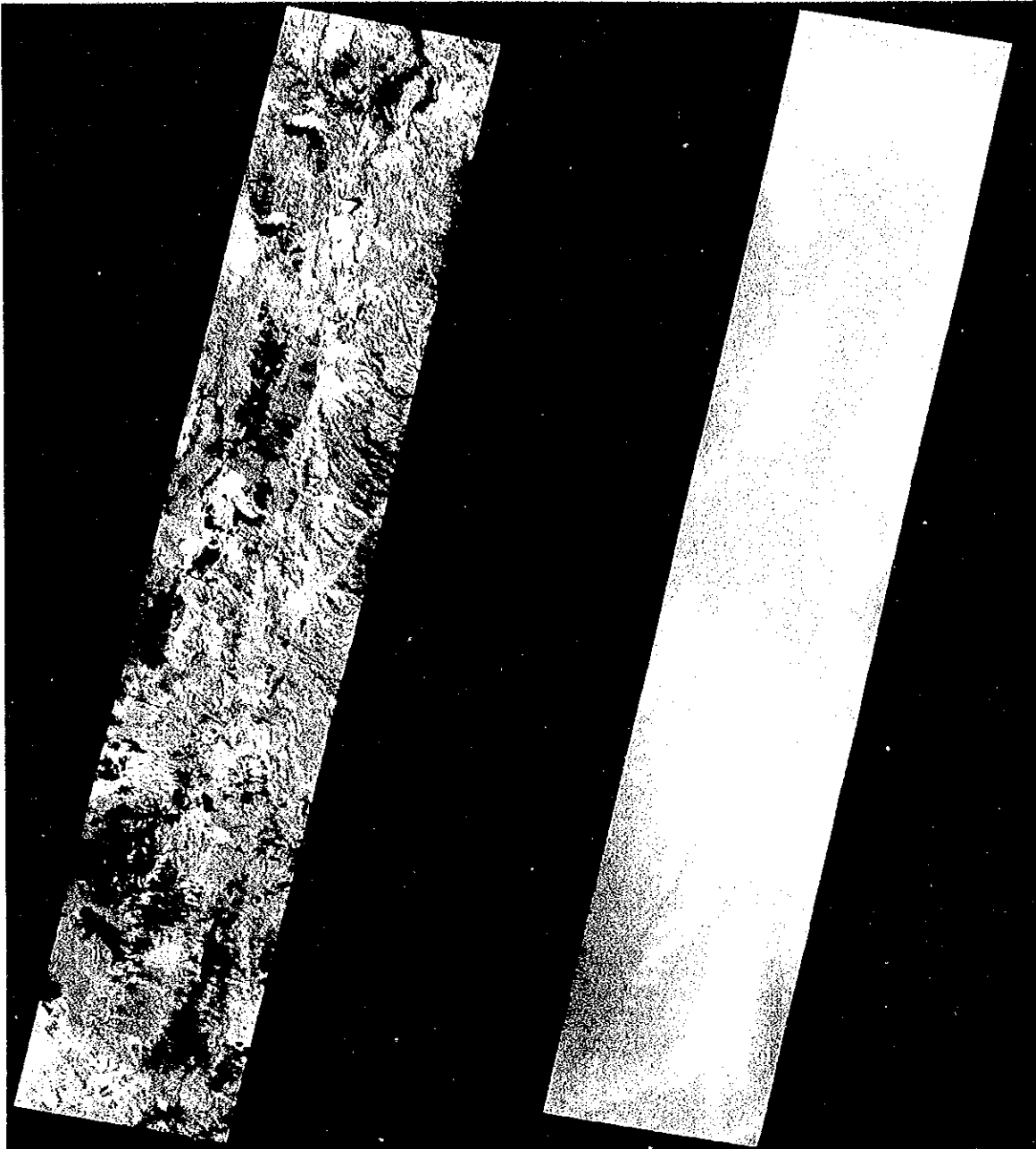


Fig.II-4-3-9-2 False color image(BGR=147) and ASTER DEM image(Sean 012-016)

TIR 域のフォールスカラー画像から岩石の識別ができるとされている。また、放射率特性から SiO<sub>2</sub> 含有量の推定を試みた例もある。ただし、これら解析に利用された大気補正は標高一定として解析されており、大気下層の厚さを含めた解析は実施されてこなかった。透過率は大気中の通過してきた放射の減衰率を表し、大気下層ほどその減衰率は大きい。また、この減衰率は波長によって異なり、その影響は岩石種によって変化する放射率特性の差よりも大きい。したがって、大気の厚さを無視して解析した場合には、岩石が本来持つ放射率特性の特徴が正しく求められないことから、岩石分類や SiO<sub>2</sub> 含有量推定などを正しく解析することができない。この問題は正射投影データと DEM があれば、1 地点毎の標高データから正確な大気補正が可能となると考えられる。

#### 4-3-10 本解析の今後の課題

本解析では SAVI を利用して植生情報の軽減を試み、植被率 30~40% 程度の地域にまで鉱物同定手法を適用することが可能となった。ただし、本解析では対象域南東部の一部地域にのみ本手法を適用しており、その他の地域では植生 0 と仮定して解析を実施した。しかしながら画像を詳細に観察すると、山間部などでわずかな植生が認められている。これらわずかな植生を伴う地域の反射スペクトルは、土壌と植物の反射スペクトルの合成であり、植生を考慮していない鉱物同定処理では、植生の影響によって明礬石あるいはカオリナイトなどとして誤判定されている地域が存在する。したがって、乾燥地域といえども鉱物同定処理前の植生除去は今後必須の作業となるであろう。

また、本解析で使用したデータの取得時期は現地の冬季に取得されたものが多い。冬季に取得されたデータは太陽高度が低く、地形特徴が明瞭となることから地質判読には利用しやすい。反面、山地の南斜面では影となることから低い輝度しか得られず、ノイズの影響が大きくなることから鉱物同定では誤った判定となる場合がある。また、対象地域北部には薄い雲が広がっている。このような淡い雲のかかった地域でも雲の影響によって誤った同定結果となっている。TERRA 衛星は現在も順調に作動しており、データ解析時に比較してデータが飛躍的に増加している。したがって、雲のない、かつ現地の夏期に取得されたデータを用いて再解析する必要がある。

本解析に使用した疑似反射率係数は十分な現地調査のデータが得られていない状態で決定されており、信頼性に欠けた推定値である。疑似反射率変換係数は鉱物同定に非常に重要な数値であり、この係数が正しくなければ誤って鉱物同定されてしまう。今年度の現地検証では地表反射率が測定されており、今後の解析ではこの地表反射率測定データで校正した疑似反射率変換係数を使用する必要がある。

本解析では酸化鉄鉱物として赤鉄鉱と針鉄鉱の 2 種類を同定鉱物に含めた。鉱床探査に重要な酸化鉄鉱物としては鉄明礬石があり、今後の解析に加える必要がある。