

8) Cerro Katterfeld 地区

Chubut 州南西部には Cerro Katterfeld などの金を伴うベースメタル鉱徴地がジュラ紀～白亜紀マグマ弧分布域に位置している。ジュラ紀以降の時期に金鉱化作用が生じているものと考えられる。現地踏査によって鉱化状況を把握することが望まれる。

第2章 衛星画像解析

2-1 画像処理・作成

2-1-1 使用データ

本地域の地質・地質構造解析及び変質帯抽出作業に供するために、13シーンのフォールスカラー画像及び比演算画像を、さらに全域のフォールスカラー・デジタルモザイク画像及び比演算画像を作成した。使用したデータは、大部分が LANDSAT 5号により観測され (Path 231/Row 91については LANDSAT 4号により観測)、バルク補正された CCT(コンピュータ適合磁気テープ)であり、(財)リモート・センシング技術センターを通じ、米国地質調査所 EROS Data Center から購入した。13シーンの各画像の位置を Fig. II-2-1 に、観測年月日、太陽位置情報を Table II-2-1 に示す。

Table II-2-1 Path/Row, date of acquisition, sun azimuth and sun elevation of the Landsat TM image of 13 scenes.

No.	Name of the scene	Path	Row	Date of acquisition	Sun azimuth	Sun elevation
1	Malargue	232	85	Feb. 9, 1987	75°	44°
2	Chos Malal	232	86	Feb. 9, 1987	74°	44°
3	Zapala	232	87	Feb. 9, 1987	73°	43°
4	San Martin de Los Andes	232	88	Feb. 9, 1987	72°	42°
5	San Carlos de Bariloche	232	89	Feb. 22, 1986	65°	40°
6	Lago Menendez	232	90	Dec. 7, 1986	73°	50°
7	Plaza Huincaul	231	87	Jan. 1, 1987	80°	50°
8	Laguna Blanca	231	88	Oct. 29, 1986	63°	46°
9	Ojo de Agua	231	89	Oct. 29, 1986	62°	45°
10	Esquel	231	90	Jan. 27, 1985	71°	46°
11	Senguerr	231	91	Feb. 24, 1992	68°	34°
12	Colelache	230	90	Dec. 9, 1986	73°	50°
13	Buen Pasto	230	91	Dec. 9, 1986	72°	49°

データの入手に当たっては、財団法人リモート・センシング技術センターを通じてアメリカ EROS Data Center に対象地域の LANDSAT TM データの取得状況を問い合わせ、さらにデータ欠損の有無、雲量、積雪量及び観測時期などを考慮し、画像解析に最適と考えられるデータを選定した。なお、画像の地域名称については画像内に位置する代表的な地名を採用し、北西端から

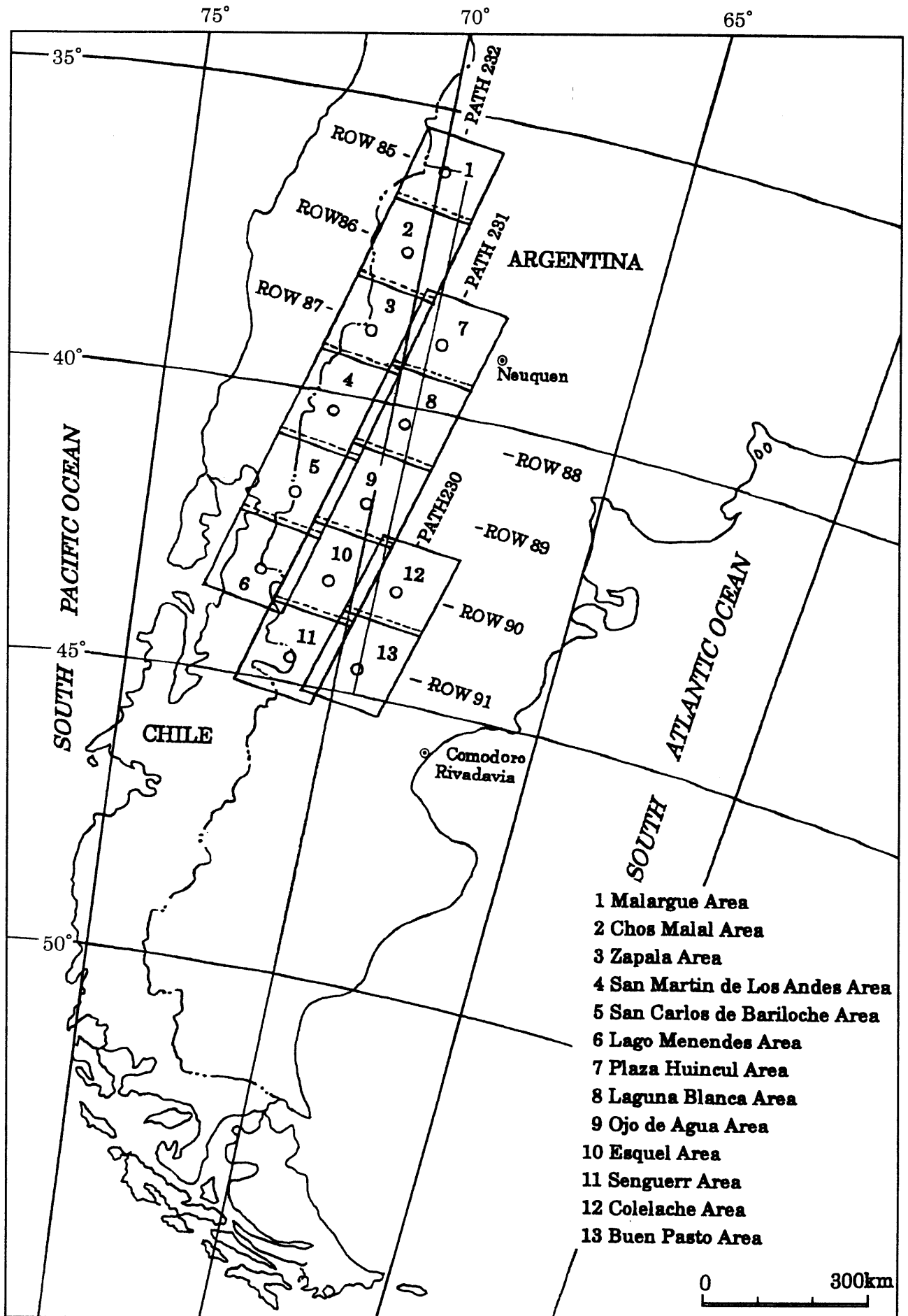


Fig. II -2-1 Index map of 13 scenes of Landsat TM image over the survey area

南東端に向かって通し番号を与えた。

フォールスカラー画像及び比演算画像の作成に当たっては、異なるシーンであっても同じ岩相及び同じ変質帯は同じ色調で表現されるような手法を開発した。また、フォールスカラー画像と同じバンド組み合わせにより、全地域をカバーする13シーンのデジタルモザイク画像を作成した。モザイク作成に当たり、隣接する画像間に色調の違いを生じさせないようにした。それぞれの画像作成方法について以下に述べる。

2-1-2 フォールスカラー合成画像の作成

前述のとりのフォールスカラー合成画像を作成するためには、入射光量補正、大気補正及び方向性反射係数補正からなる放射量補正が必要である。以下に補正が必要な理由と補正方法について述べる。

1) 放射量補正が必要な理由

LANDSAT に搭載されている TM (Thematic Mapper) と呼ばれるセンサの観測波長域は、可視～近赤外域に4バンド、短波長赤外域に2バンド及び熱赤外域に1バンドの合計7バンドである。観測したアナログ画像データは、1画素毎に0～255の256階調のデジタル値に変換される。

LANDSAT TM のような光学センサで得られた輝度値は、可視～近赤外域においては地表からの太陽光の反射を反映しているものであり、地表の対象物に固有の分光反射率の違いにより地表物質を識別することが可能である。衛星のセンサに入射する分光放射輝度は、太陽からの光が地表で反射され、さらに衛星まで到達する間に大気層を通る。このためセンサに到達する放射輝度は地表からの反射光の他に、パスラジアンズと呼ばれる大気からの放射光・散乱光・太陽光が大気中で散乱され全方位から入射してくる天空光と呼ばれる散乱放射が含まれている。したがって、センサが直下を波長 λ で観測している場合の分光放射輝度は、

$$L(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} K(\lambda) [\tau a(\lambda) \{U(\lambda) + P(\lambda)\} \rho(\lambda) + b(\lambda)] d\lambda$$

$L(\lambda_1, \lambda_2)$: センサに入力する波長 λ_1 から λ_2 までの分光放射輝度
$K(\lambda)$: センサの応答特性
$\tau a(\lambda)$: 反射光に対する大気の透過率
$U(\lambda)$: 太陽直達光の放射輝度
$\rho(\lambda)$: 地表反射率
$b(\lambda)$: センサと対象物間の大気放射及び散乱光
$P(\lambda)$: 太陽光の下方散乱光である天空光の放射輝度

と近似される。これらのうち、 $b(\lambda)$ はセンサに入力する輝度の加法因子となり、 $U(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot \tau a(\lambda)$ は乗法因子となる。これらの因子による影響は、大気中の水蒸気量やエアロゾル量などに

よって異なるため、観測時期が異なれば同一物質を観測したとしても同じ値とはならない。また、これらの吸収光・散乱光の影響は波長依存性があるため、ある物質の分光反射率のバンド比は時期の異なる画像では一定値をとらない。このため各バンドの放射量を未補正のまま画像処理を実施した場合には、同一の物質が異なる色調で表現されるため、物質の比較・判別ができなくなる。

今回解析に用いた画像データは多時期にわたり、画像全体として同じ物質を同じ色調で表現するため、以下の仮定をもとに放射量補正を実施した。

- ・ センサの応答特性は入射輝度に対して 1 次線形式、すなわち、 $y = ax$ で出力される。
- ・ 反射光に対する大気の透過率は 1 画像内のどの地域においても等しい。
- ・ センサと対象物間の大気放射及び散乱は、1 画像内のどの地域においても等しい。
- ・ 天空光の放射輝度は 1 画像内のどの地域においても等しい。

2) 入射光量補正

ある単位面積に入射する太陽直達光の放射輝度は 1 画像内でも場所により異なる。つまり南半球において太陽が北側から照射している場合には、1 画像内での単位面積に入射する直達光は画像北側で大きく、南側で小さくなる。このため画像に与えられた各ピクセルの地理的座標位置と太陽の方位角、高度から太陽高度 60° となるように入射光量補正を行った。

3) 大気補正

大気補正は $\tau a(\lambda)$ 及び $b(\lambda)$ の補正を行うものである。この補正を行うためには、入射光量 $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ 及び地表反射率 $\rho(\lambda)$ が求められていなければならない。

入射光量補正は画像内の対象物がすべて平面であることを前提としている。しかしながら、現実には地形起伏があるため、異なる時期に取得した画像では太陽位置が異なることにより、同一地点においても $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ は異なる。この $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ を補正するためには精度の良い DTM (数値地形モデル) を用いて補正することが考えられるが、現状では精度の良い DTM を利用できる地域が限られていることから現実的な方法とは言えない。そこで 2 画像間で対応するピクセルを多数用い、画像重複部を統計処理することで地形起伏による依存性を除去する手法を用いた。

一般に用いられる手法としては、画像重複部全体の統計量を用いた輝度平均値、標準偏差一致法であり、

$$P'_{ij} = (P_{ij} - P_{av}) / \sigma_p \times \sigma_q + Q_{av}$$

P'_{ij} : 濃度変換値

P_{ii} : 輝度変換画像の任意の点

P_{av} : 輝度変換画像の輝度平均値

σ_p : 輝度変換画像の輝度標準偏差

Q_{av} : 基準画像の輝度平均値

σ_q : 基準画像の輝度標準偏差

として算出される。この場合には画像重複部で地表被覆物に大きな変化が無く、2 時期の $\rho(\lambda)$

が等しいと仮定している。しかしながら、今回のように異なる時期(季節)に取得された画像では、画像重複範囲の植生・積雪・雲・霧・湖・河川の流路・地表構造物などが変化しているため、輝度平均値及び標準偏差法を用いることができない。本解析では画像間重複範囲にこの様な地表の変化が多数認められるため、次に述べる方法を用いた。

画像重複範囲内の全ての対応点に対し、横軸に基準画像の輝度値を、縦軸に対応する画像の輝度値をとり、対応点間の輝度差の解析を実施した。これらを散布図に描くと植生・影・雪・雲のように対象物の分光反射率 $\rho(\lambda)$ が大きく変化する対応点の分布は、ランダムあるいは特異点群となり識別することができる。

これらを除去した大部分の対応点では $\rho(\lambda)$ に大きな変化がなく、点群はある直線の近傍に高い相関で分布する。このような広がりを持った分布は、地形起伏による $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ の差を反映して生じたものである。そこで、これらを最小自乗法によって一次回帰させることで地形による影響を除去した。

このようにして求めた $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ 及び $\rho(\lambda)$ の補正済み一次回帰式から、2画像間の $\tau_a(\lambda)$ 及び $b(\lambda)$ による大気補正係数を算出することができる。

この一次回帰式は、同一日に観測されたものであれば、原点を通る直線に近似することができる。このことは2画像間の大気の透過率 $\tau_a(\lambda)$ 、大気放射及び散乱 $b(\lambda)$ が等しいことを示している。

観測日の異なる画像の場合には、この一次回帰式は一般に原点を通らない $y=ax+b$ で表すことができる。これは大気の透過率 $\tau_a(\lambda)$ 、大気放射及び散乱光 $b(\lambda)$ が等しくないことを表しており、この一次回帰式によって両画像の大気透過率 $\tau_a(\lambda)$ と大気放射及び散乱光 $b(\lambda)$ を一致させることができる。

これらの項は正確には、取得時のセンサーのゲインが異なるため、 $\tau_a(\lambda)$ 及び $b(\lambda)$ にそれぞれ $K(\lambda)$ を乗じた値となるが、この手法ではセンサーのゲインを一括して補正することができる。

同一観測日間の大気補正は精度が高いため、13シーン全体の大気補正を以下の手順で実施した。

- (a) 大気補正は各Path毎に行うものとし、各Pathの一番北側を基準画像とした。
- (b) 各画像の大気補正は南側に向かって順次実施した。
- (c) 3つのPath間の大気補正は中央のPath(P231)を基準とした。

このような処理を加えることで、画像全体の大気の状態を画像中央北端(P231/R087)の大気の状態と合わせたものにすることができる。

4) 方向性反射係数補正

完全拡散反射体において、物質に垂直に入射した反射光を垂直に観測した場合の反射率を1であると定義する。この状態で観測位置を垂直から水平方向に変化させた場合に、反射率は1から0まで徐々に低下する。

LANDSAT TMの1画像の横方向(ほぼ東西方向)の視野角は約 16° である。このため画像右側から太陽光が照射している場合には、太陽-対象物-観測者のなす角は画像の右側と左側で約 16° 異なる。このような場合には、角度を変えて完全拡散反射体を観測した場合と同様の現象が生じる。

この方向性反射率は物質及び波長によって異なり、また、地形に依存するため各画素毎に補正を加えることが不可能である。しかしながら、1画像内での画像東端と西端を比較した場合には（太陽は画像東側、方位角 90° 、高度 60° から照射し、地表に起伏が無く、月の玄武岩と同一の物質が分布していたと仮定）、太陽-観測物-観測者のなす角が大きくなる画像右（東）側で約10%の輝度低下を生じる。このため東西方向に3つの画像を接合した場合には、接合画像西端の輝度を1とすると東端では約27% ($=0.9^3$)の輝度低下を生じることとなり、画像の東側が明らかに暗い画像となってしまう。

このため、大気補正を行った画像をもとに、画像全体の輝度値がどのように変化しているかについて統計量を用いて検討した。統計量を用いた理由は、起伏による影響と地表物質の差による影響を除くためである。各列の統計には約 3,000~10,000 個のデータを用いた。画像の各画素の輝度値を行列式として扱い、各行及び列の平均値・標準偏差を算出した。ただし、各画像は平行四辺形であるため、西端の画像取得開始位置を横方向にシフトさせ、取得位置をそろえた行列とした。

Fig. II-2-2 は列（南北）方向に算術平均を求めた輝度平均値の変動を横（東西）方向に示している。この図の東西方向は3シーン分（P232~230）を表しており、画像東側において明らかに輝度低下していることが解る。過年度に実施したアルゼンティン共和国東部アンデス地域の解析では、1シーンの東側で約7%の輝度低下が観測された。今回はこの係数を用いて1シーンあたり7%の輝度低下を補正した結果、画像左端（雪及び海のある領域）およびデータ数の少ない右側の領域を除き、ほぼフラットな平均輝度曲線を得ることができた。

5) フォールスカラー画像の作成

前述の放射量補正手法により、全てのシーンの輝度値は P231/R087 を基準としたものに統一されている。しかしながら LANDSAT TM 画像データの統計量(平均値, 標準偏差, 歪度)は各バンド毎に異なり、データの分散は 20~30 (256 階調)と一般に小さい。このため、そのまま用いた場合には色バランスのとれていない、かつ、データの分散が小さく色調差の乏しい、画像判読に不適な画像となる。

これらを改善して、全シーンの放射量補正画像が適切に表現されるように、非線形ストレッチを用いて全シーンに対して同一の輝度補正を実施した。今回用いた手法は、輝度値が 115 付近 (256 階調)に平均値を持ち(同じ階調差であっても暗い領域の階調差のほうが判別しやすい)、正規分布に近い分布形態となるように非線形にストレッチを行うものである。なお、正規分布の形態は、標準偏差の 2.5 倍が 115 階調となるように算出した。また、全域の統計量算出にあたっては雲・雪・水域を除いて行った。

画像を鮮鋭化する手法は、ラプラシアンやガウシアンフィルタあるいは局所鮮鋭化処理など様々な手法がある。しかしながら、ガウシアンフィルタや局所鮮鋭化処理などは、周囲の物質との差を強調するため、領域によって異なるストレッチ手法を用いている。その結果、例え同じ物質であったとしても領域によって異なる色調で表現されることがある。そこで、今回の画像鮮鋭化にあたってはこのような現象が生じないラプラシアンフィルタのみを用いた。

フォールスカラー画像のバンド組み合わせとしては、バンド 1, 4, 5、バンド 1, 4, 7、バンド 4, 5, 7 などの組み合わせを検討した。対象地域には中性火山岩類が広く分布しているが、中性火山岩類中の地質構造判読にはバンド 1, 4, 5 の組み合わせが適するので、バンド 1, 4, 5 に青色、緑色および赤色を割り当てた画像を作成した。

6) 幾何補正

作成したフォールスカラー画像と地形図(縮尺 1/500,000)を用いて画像の UTM 座標への幾何変換を実施した。入手可能な最も精度の高い地形図が 1/500,000 と小縮尺であること、および対象地域のほとんどが人工物の少ない山岳及び砂漠地域であり目印となる河川が発達していないことから、精度の高い GCP (Ground Control Point) を選択することが困難であった。そこで目印となる河川分岐点、道路交点などを GCP として用い、各画像とも 15~20 点を選択した。内挿法としては疑似アフィン変換を用い、最小自乗法による再計算結果との誤差が 30 画素以内(約 1km)となるよう、精度の悪い GCP は削除した。

この 30 画素以内という誤差は 1/500,000 の地形図では約 2mm となり、地形図の精度と地域性を考慮した場合の幾何補正誤差の限界に近い値であると考えられる。なお、幾何変換には共一次内挿法を用い、1 画素のサイズを 30m としてリサンプリングを実施した。

2-1-3 比演算処理画像の作成

1) 比演算の原理

LANDSAT TM は可視~近赤外、中間赤外域の 7 つの波長域(バンド)においてセンサへ入力する分光放射輝度を観測している。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。

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

H : 太陽照射光の放射照度、R は地上物体の反射率

T : 大気の透過率(垂直方向)

A : 太陽と地表物体を結ぶ線が地表面となす角度、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 : 大気のパスラジアン

i : センサのバンド

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 及び 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

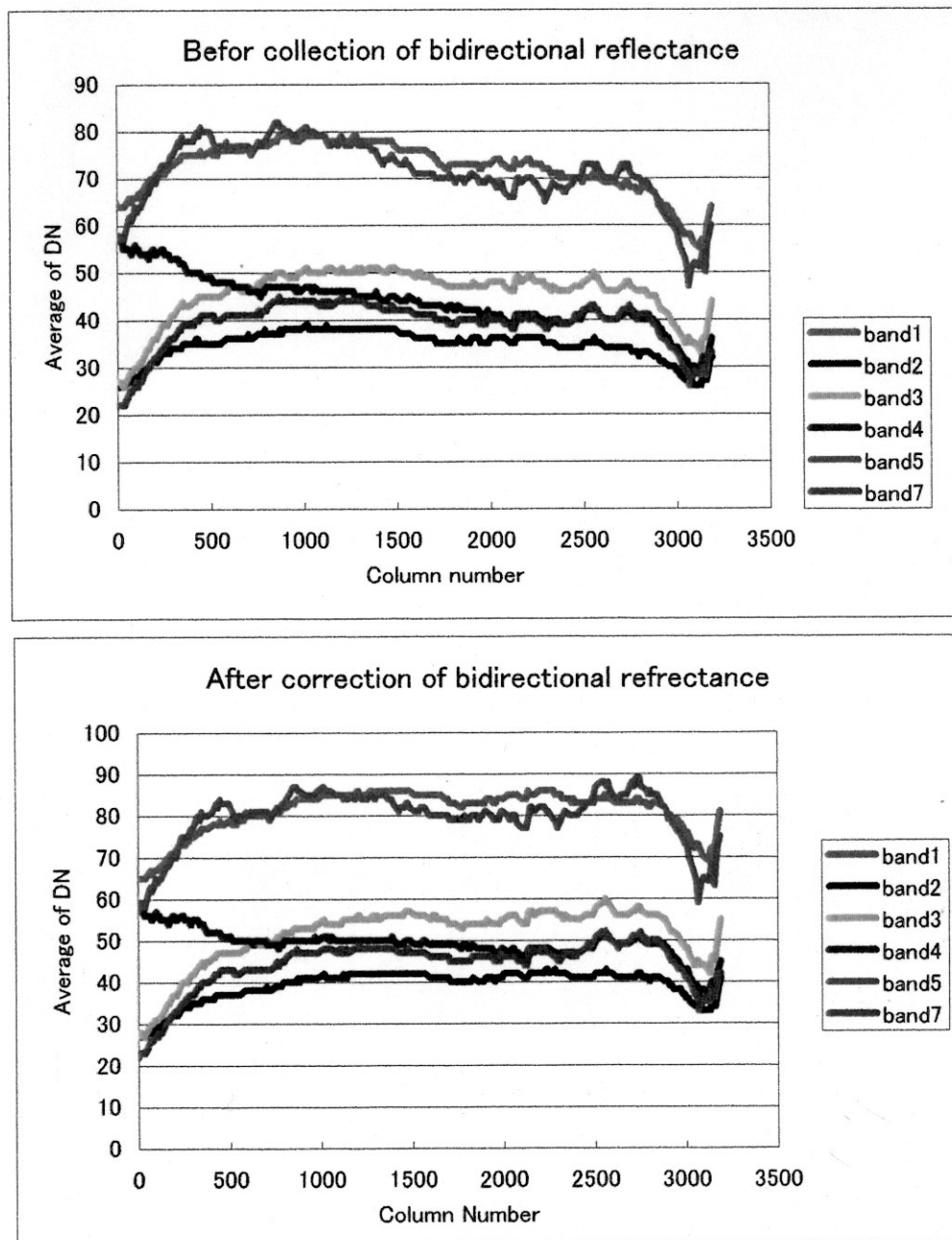


Fig. II-2-2 Lateral variation of the brightness due to directional reflectance
 (vertical axis: Average of digital number of brightness
 horizontal axis: Column number of lateral pixel)

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スラジアンズとし、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前節（2-1-2: フォールスカラー合成画像の作成）で述べた濃度変換が必要となる。濃度変換は以下の手順によって行った。

既存地質資料に記載されている既知変質帯を参考にして、変質帯上での比演算値の分布を求める。この比演算値の分布よりわずかに広い値の分布範囲を決め、この分布範囲から外れる比演算値を持つ画素に 0 の値を代入する。比演算値 0 を除くと、残りの比演算値の分散はもとの比演算値の分散に比べ小さなものとなるので、濃度変換すれば多様な濃度で表現することができる。濃度変換は次の線形関数を用いて行う。

$$G_i = a \cdot F_i + b$$

G_i : 出力画像濃度値	a : ゲイン
F_i : 比演算値	b : バイアス

a 及び b は実際の比演算値分布から求める。

2) 画像の作成

対象地域には斑岩銅鉱床や浅熱水性金鉱床が分布し、それらは特有の熱水変質帯を伴っている。これらの熱水変質帯を LANDSAT TM データから抽出するには、5/7、4/5 および 3/1 の比演算処理が有効であることを、チリ共和国エスコンディーダ地域やベラグワ・プログレソ地域などの過去の作業で確認している。

今回は既知変質帯が分布する P232/R085 及び P232/R086 の 2 地域において 5/7、4/5、3/1 および 5/7、4/7、4/5 の 2 つの組み合わせによる比演算処理画像を比較した。この結果、変質帯抽出に最も有効な組み合わせは 3/1、4/5、5/7 に青色・緑色・赤色を割り当てた比演算画像であることが解った。この組み合わせでは、変質帯は赤桃色及び白桃色で表現される。なお、それら以外の地域の画像処理では、これら 2 地域で最適となったゲイン及びバイアスの平均値を用いた。

3) 主成分分析

比演算画像ではその特性により地形に起因する陰影を除くことができる。その一方、地形的特徴が失われるため、地域の特定がしにくい面がある。このため今回は地域を特定しやすくするため、比演算画像に地形情報を付加した画像を作成した。

地形特徴を表現するためには、地形特徴を反映するといわれているバンド 5 を用いる方法と、

地形情報を反映するとされている主成分分析の第 1 主成分を用いる方法などがある。今回は主成分分析の第 1 主成分を用いた。

各画像における第 1 主成分への各バンドの寄与率は、各バンドとも 0.37~0.43 の範囲に収まり、また、各バンド毎の画像間における寄与率の差は小さいものであった。このため、各バンド毎に寄与率の平均値を求め、第 1 主成分への寄与率とした。

地形情報は各バンド毎に寄与率を乗じ、合計した値（この合計の平均値は 0 になる）に適当なゲイン、バイアスを設定し、それらを地形情報係数とした。次に 2) で作成した比演算画像の輝度値に地形情報係数を乗じて、地形情報を付加した比演算画像とした。

なお、幾何補正はフォールスカラー合成画像の作成（2-1-2 参照）行った幾何補正と同じ GCP を用い、同様な手法で UTM 座標系へ幾何変換した。

2-1-3 モザイク画像の作成

1) 画像圧縮と幾何変換

13 シーンのフォールスカラー・モザイク画像を作成するために、画像サイズを縮小する圧縮処理を行った。その理由は、圧縮処理を行わずモザイク画像を作成した場合には、モザイク作成後の画像が 17,000 画素×41,000 画素×6 バンド=4.2GB と膨大なデータ量となり、さらにフィルム出力の物理的制限を超えるデータ量となるためである。

既に述べた各シーンの放射量補正後の画像から、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。次に 2 画像の重複範囲から 10~20 点の対応点を目視によって選択し、最小自乗法を用いたヘルマート変換によって幾何変換係数を算出した。なお、この過程で再計算後の誤差が 1 画素以内に収まるように誤差の大きなデータを削除し、ヘルマート変換の変換係数を求めた。幾何変換は共一次内挿法を用いて実施した。

2) 画像接合

異なる時期に取得した画像では地表被覆物の変化、影の位置及び雲などによ、2 画像の接合部において色調が明瞭に異なる地域が生ずる。この明瞭な色調差は地質判読の妨げとはならないが、モザイク画像の仕上がりに不完全な印象を与える。このため画像の色調差が小さい地域を探索しながら画像接合を行う「千鳥足式画像接合法」を新たに開発し、これを用いて接合を行った。この手法では、雲がある場合や影の位置が違う場合などの地域がある場合に、これらの地域を迂回して接合を行うことができる。

画像の接合は各 Path の一番北側の画像を基準に順次接合していくもので、P232/R085~090、P231/087~091 および P230/090~091 の縦に長い 3 つのモザイク画像を作成した。次に P231 のモザイク画像を基準として、両側の画像との対応点を取り、ヘルマート変換による幾何変換後、上述の手法により画像接合を行った。3 つの Path を接合した画像は約 4,400 画素×10,200 画素の画像サイズとなった。