

された。なお、LANDSAT TM 画像からヴィジュアルで抽出された変質帯を原則としてすべてカバーするマスクを作成することを目的としており、緩い制約条件によって変質帯候補地域を抽出した。

(1) 雪領域の除去

対象領域 : 全領域

使用処理画像 : ログレジデュアル処理(7バンド)+線形濃度変換処理

閾値と条件 : 以下の条件をすべて満たす画素を積雪領域として除去

バンド 1, 2 > 220

バンド 4~7 < 40

(2) 鹹湖堆積物

対象領域 : (1)以外の領域

使用処理画像 : ログレジデュアル処理(7バンド)+線形濃度変換処理

閾値と条件 : 以下の条件をすべて満たす画素を鹹湖堆積物領域として除去

バンド 1, 2 > 200

バンド 5, 6 < 40

あるいは

バンド 5 < 10

(3) ノイズ除去(主として応答遅れによるノイズ)

対象領域 : (1), (2)以外の領域

使用処理画像 : ログレジデュアル処理(7バンド)+線形濃度変換処理

閾値と条件 : 以下の条件をすべて満たす画素をノイズとして除去

バンド 3 < バンド 2

バンド 3 < バンド 5

バンド 4 < 40

(4) 変質帯の抽出

対象領域 : (1)~(3)以外の領域

使用処理画像 : 比演算処理画像(BGR=5/6, 5/7, 5/8)

ログレジデュアル(7バンド)+線形濃度変換処理

閾値と条件 : 以下の条件をすべて満たす画素を変質帯として抽出

5/6, 5/7, 5/8 > 125 (比演算処理)

バンド 4 > バンド 5 (ログレジデュアル処理)

以上の条件で抽出された変質帯候補地の位置を図 23 と 24 に示す。これら閾値の設定によって、LANDSAT TM 画像からヴィジュアルで判読・抽出された変質帯をほぼもれなく抽出することができた。これらの閾値によって抽出されなかった主な領域としては、L 画像の北部の変質帯(変質帯番号 : AA7044)がある。この変質帯は漸新世~中新世の火

山岩類中に位置するが、JERS-1 OPS フォールスカラー画像(BGR = 358)では淡褐色を呈し、また、比演算処理画像(BGR = 5/6, 5/7, 5/8)では暗青緑色を呈する。これらのことから、AA7044 に関しては変質帯ではないと考えられ、LANDSAT TM 画像解析における誤判読である可能性が高い。

なお、先に述べたように、本作業での変質帯抽出の制約条件は緩く設定されているために、変質帯候補地として抽出された領域は LANDSAT TM 画像からビジュアルで抽出された領域よりも広く抽出されている。特に、この現象は変質帯の下流に分布する崖錐部と沢沿いの地帯で認められ、U 画像の南部や L 画像の北東部などでは沢に沿った帯状の変質帯として抽出されている。

## 2.6.2 変質帯強調比演算処理

変質帯の抽出に用いた比演算処理画像(BGR = 5/6, 5/7, 5/8)は、変質帯と非変質帯の区別を目的としたゲインおよびバイアスの設定に基づいて作成された。したがって、多くの変質帯では輝度値が飽和しており、また、変質鉱物の違いによる変質帯の色調差はごく狭い階調差で表現されている。そこで、変質帯の分類を行うために変質帯の色調差を強調した変質帯強調比演算処理を実施した。

変質帯強調比演算処理は変質帯候補地として抽出された領域のみの比演算値からゲイン・バイアスを算出するものであり、変質帯の階調差を拡大して表現するものである。このため、このゲイン・バイアスで表現された非変質帯の輝度値はいずれのバンドでもかなり低い値となる。今回の解析では変質帯候補地のみについて強調比演算処理を実施し、これ以外の領域(非変質帯領域)についてはバンド 5 のモノクロ画像をほめ込んだ画像を作成した。このことにより変質帯候補地の位置関係を明確にすることができる。この変質帯強調比演算処理に用いたゲインおよびバイアスを以下に示す。

表 7 変質帯強調比演算処理係数

	変質帯強調比演算処理				比演算処理	
	平均	標準偏差	ゲイン	バイアス	ゲイン	バイアス
5/6	2.024553	0.170549	300.307	-479.785	113.302	-25.149
5/7	1.583126	0.178586	286.697	-325.877	260.159	-249.317
5/8	1.667580	0.186105	275.114	-330.746	166.347	-191.442

この表には、比較として比演算処理時のゲインおよびバイアスを表示した。もとの比演算処理画像と比較すると、5/6 では 2.65 倍、5/8 では 1.65 倍に階調が拡大されている。図 25 と 26 に、このゲイン・バイアスと上述の手法を用いて、U 画像および L 画像について強調比演算処理を実施した画像を示す。

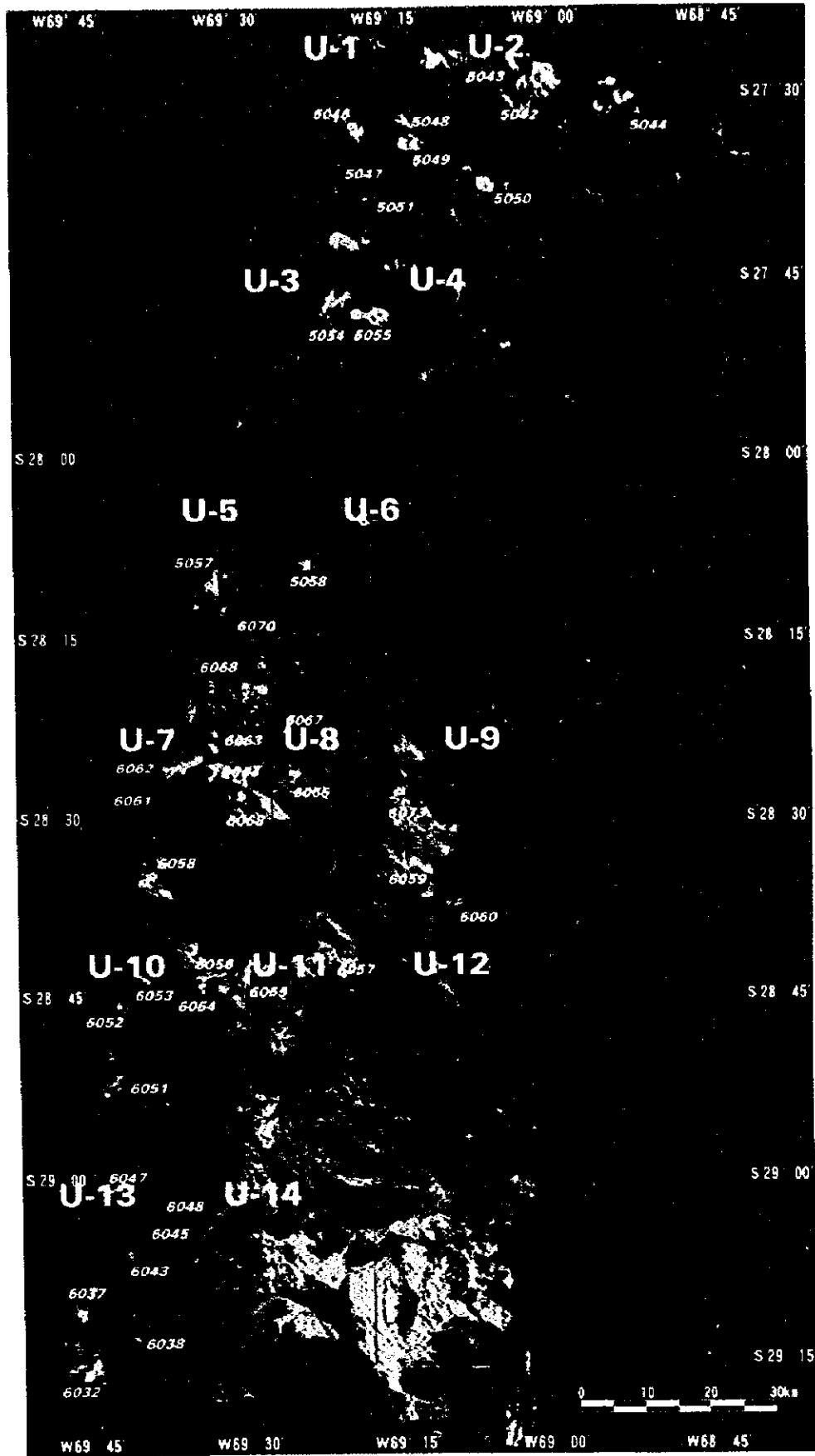


図 23 U 画像範囲における変質帯候補地の抽出結果と LANDSAT TM の変質帯判読結果

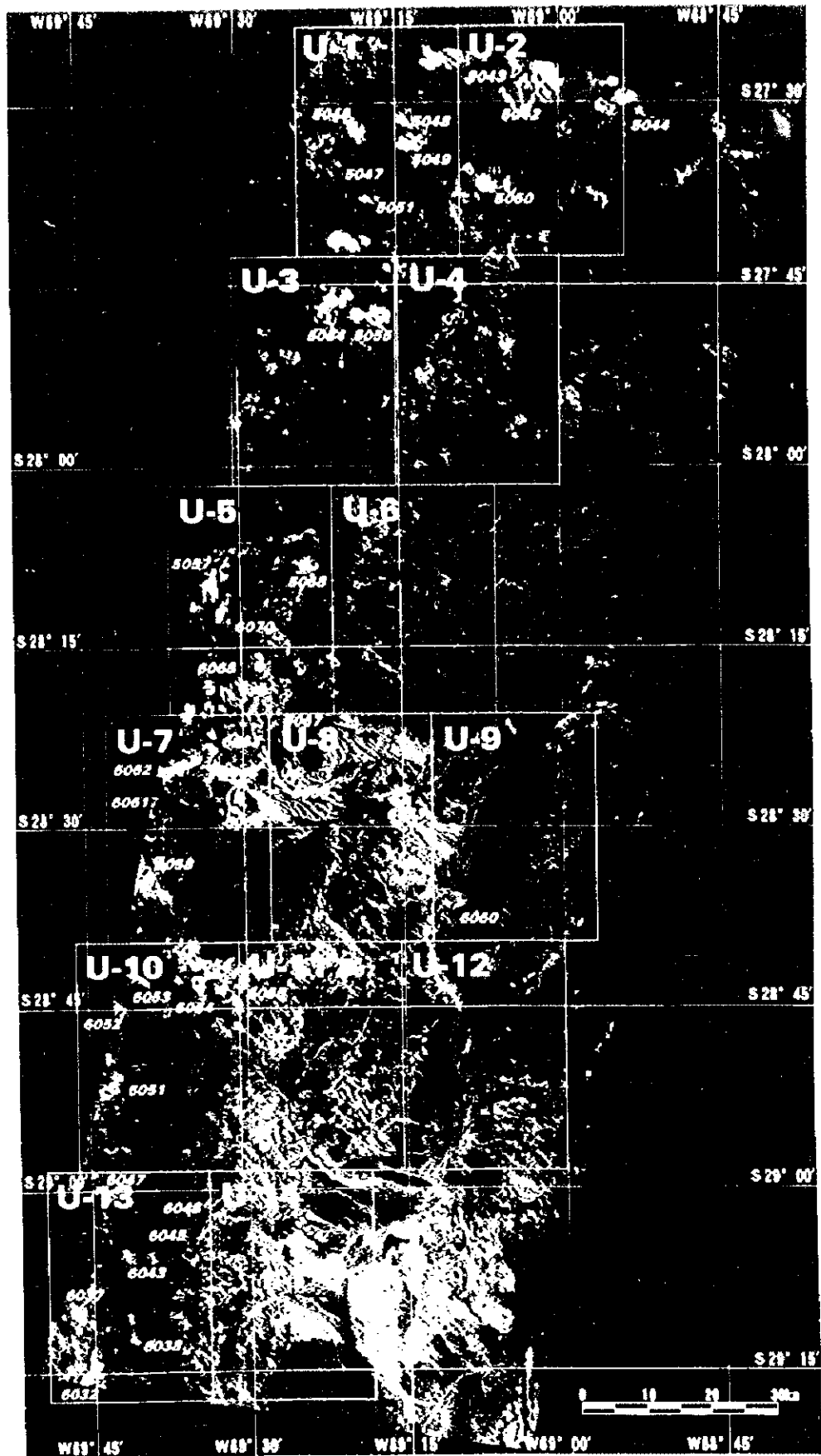


図 23 U 画像範囲における変質帯候補地の抽出結果と LANDSAT TM の変質帯判読結果



)



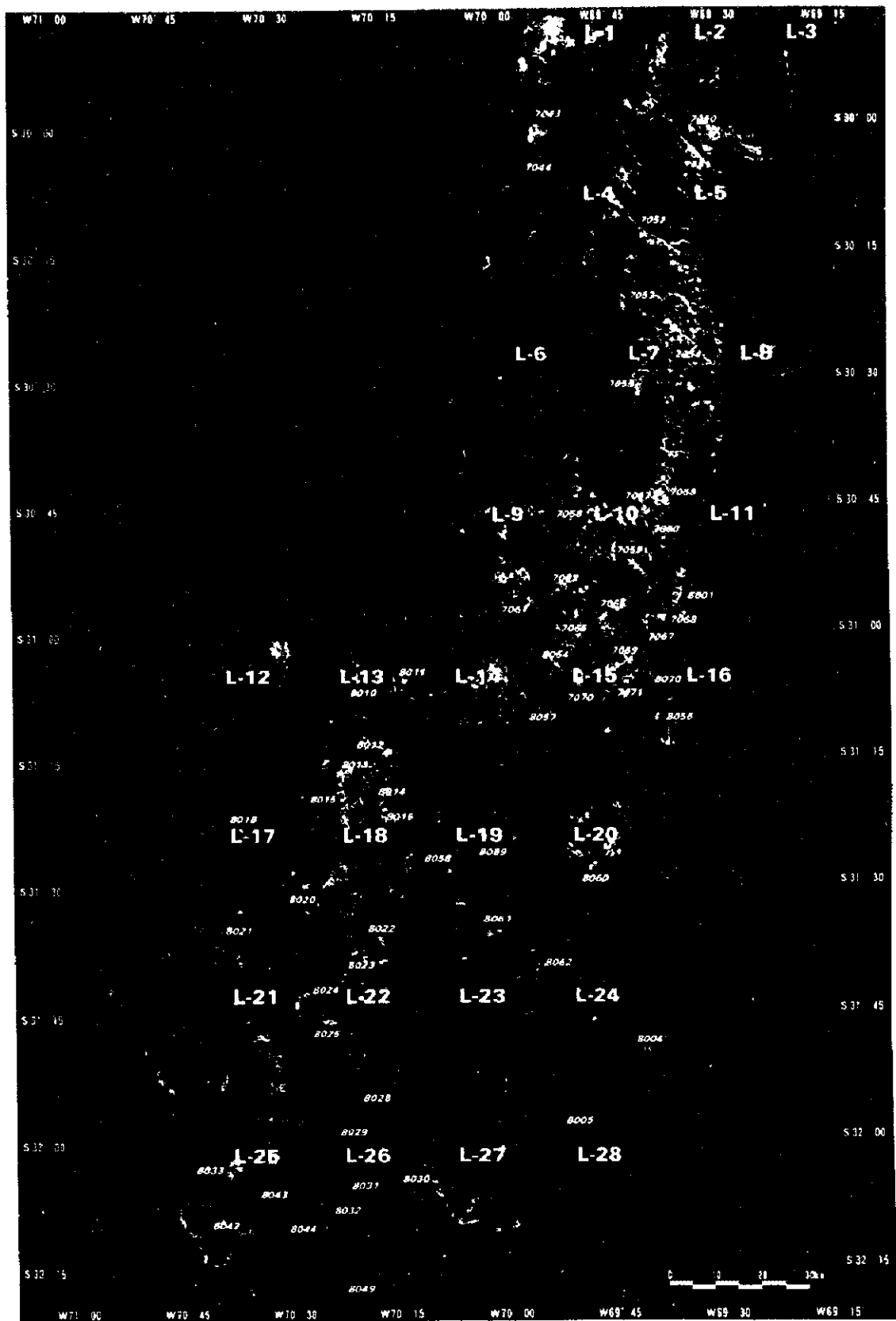


図 24 L 画像範囲における変質帯候補地の抽出結果と LANDSAT TM の変質帯判読結果

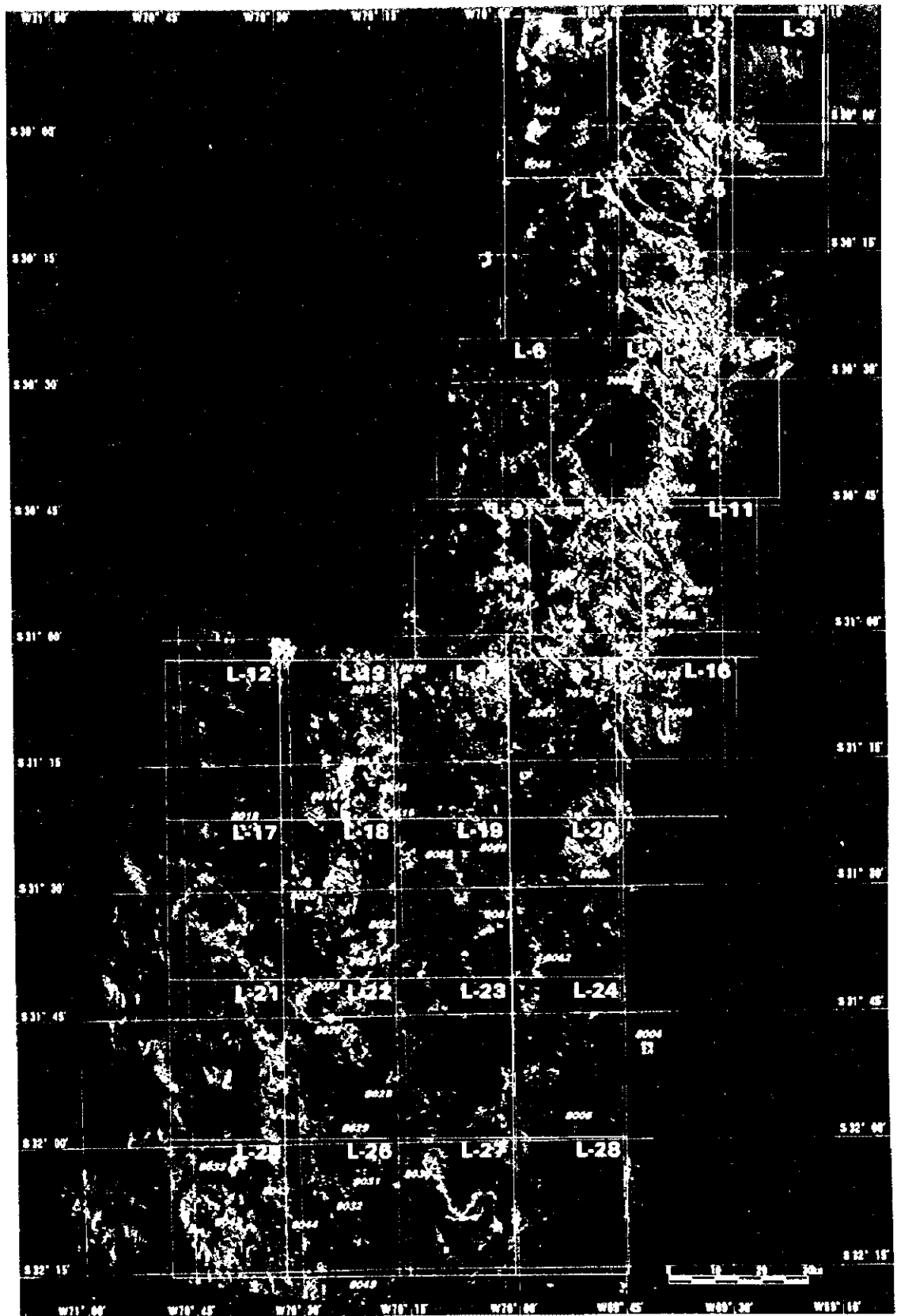


図 24 上画像範囲における変質帯候補地の抽出結果と (A) (B) (C) の変質帯判読結果





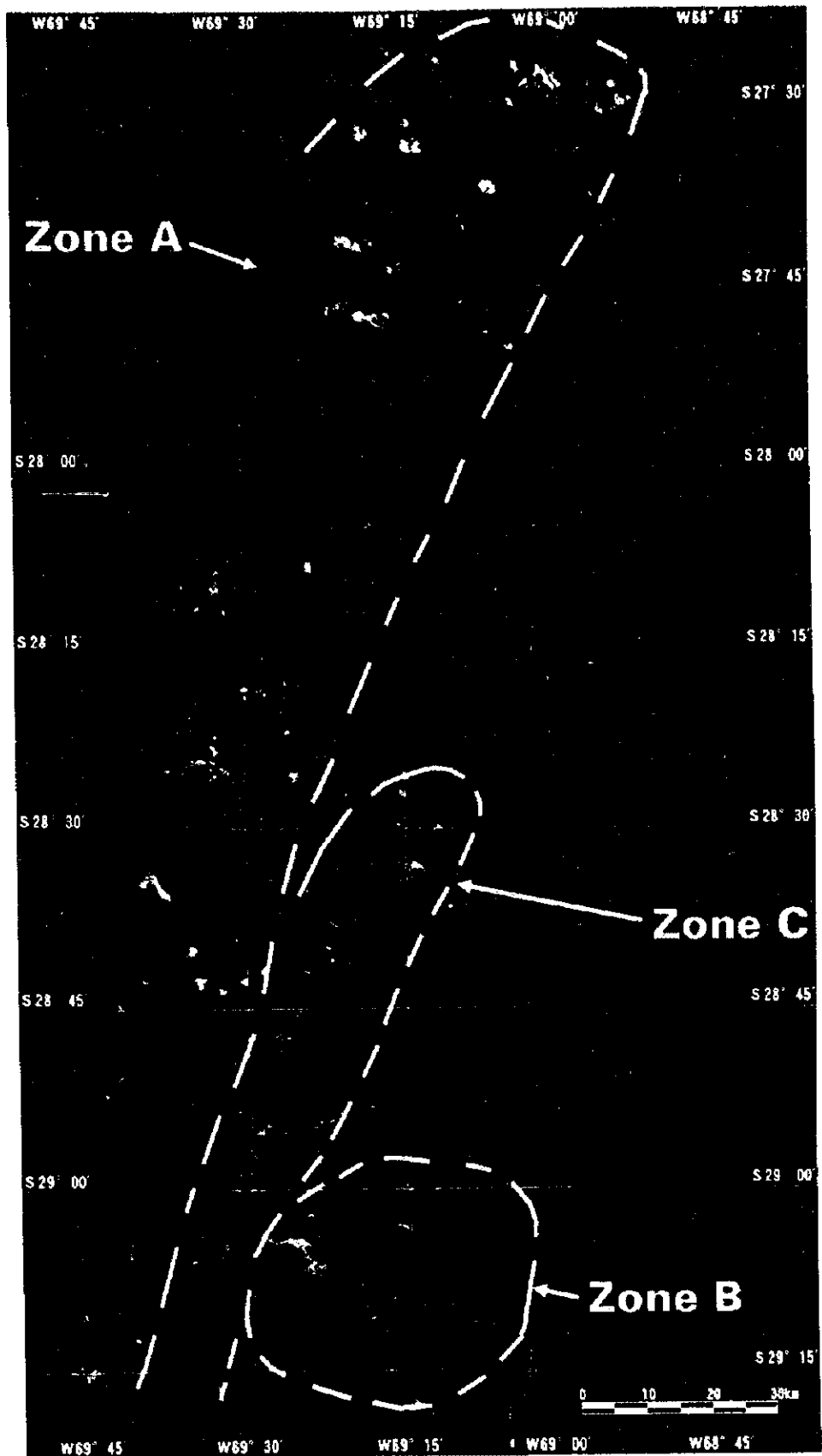


図 25 U 画像範囲の強調比演算処理

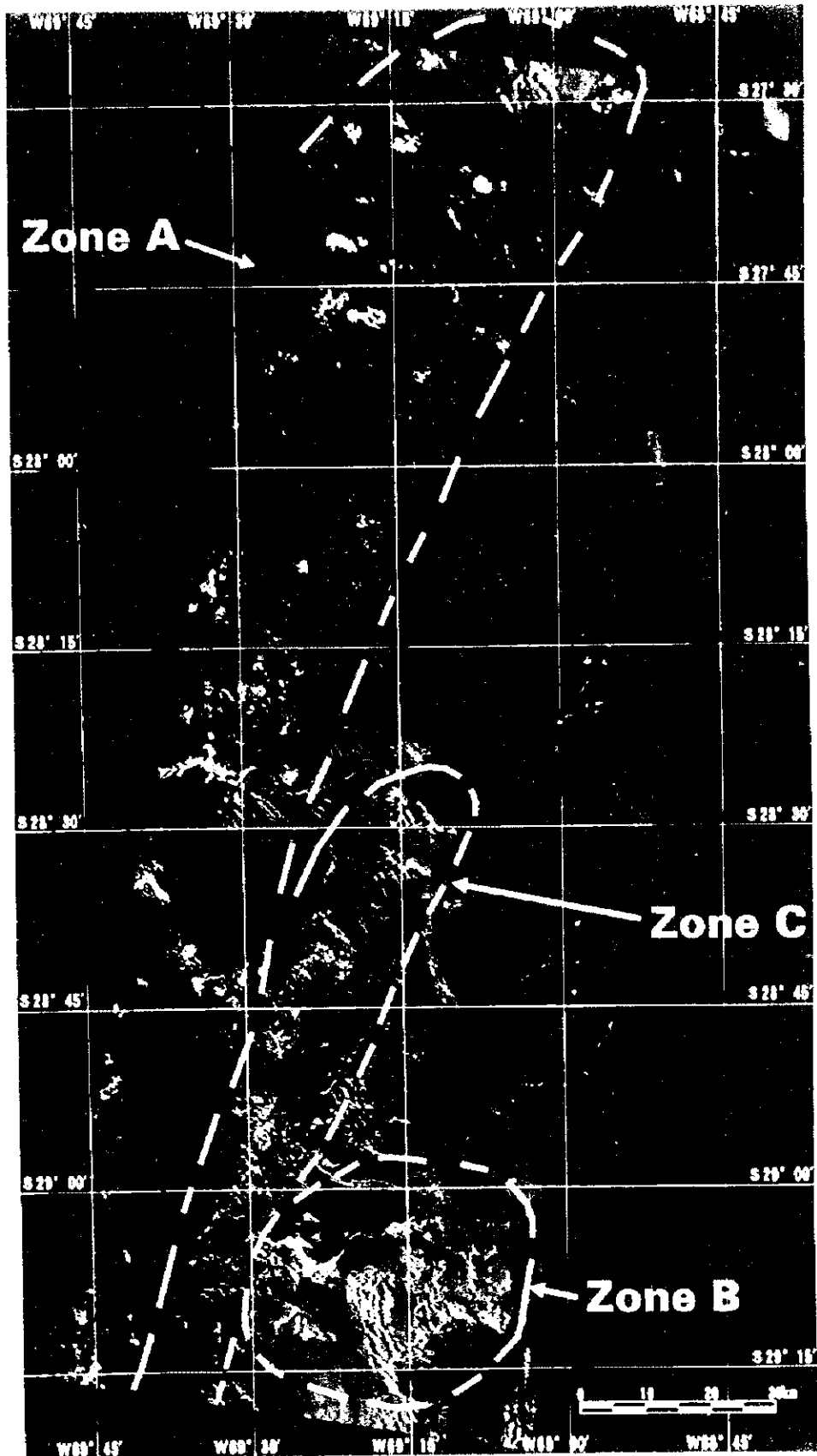


Figure 1. Satellite image of the study area.



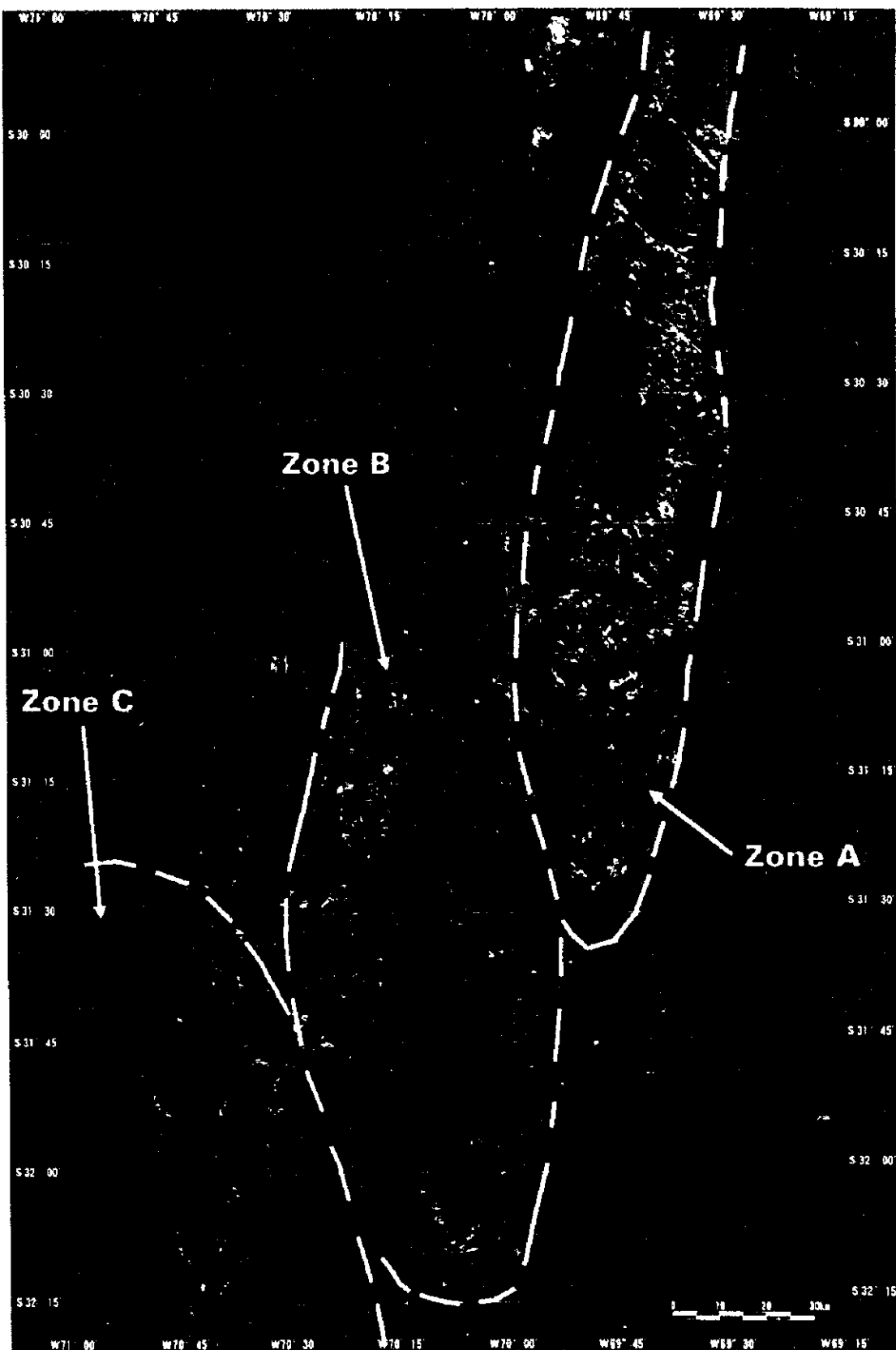


図 26 L 画像範囲の強調比演算処理

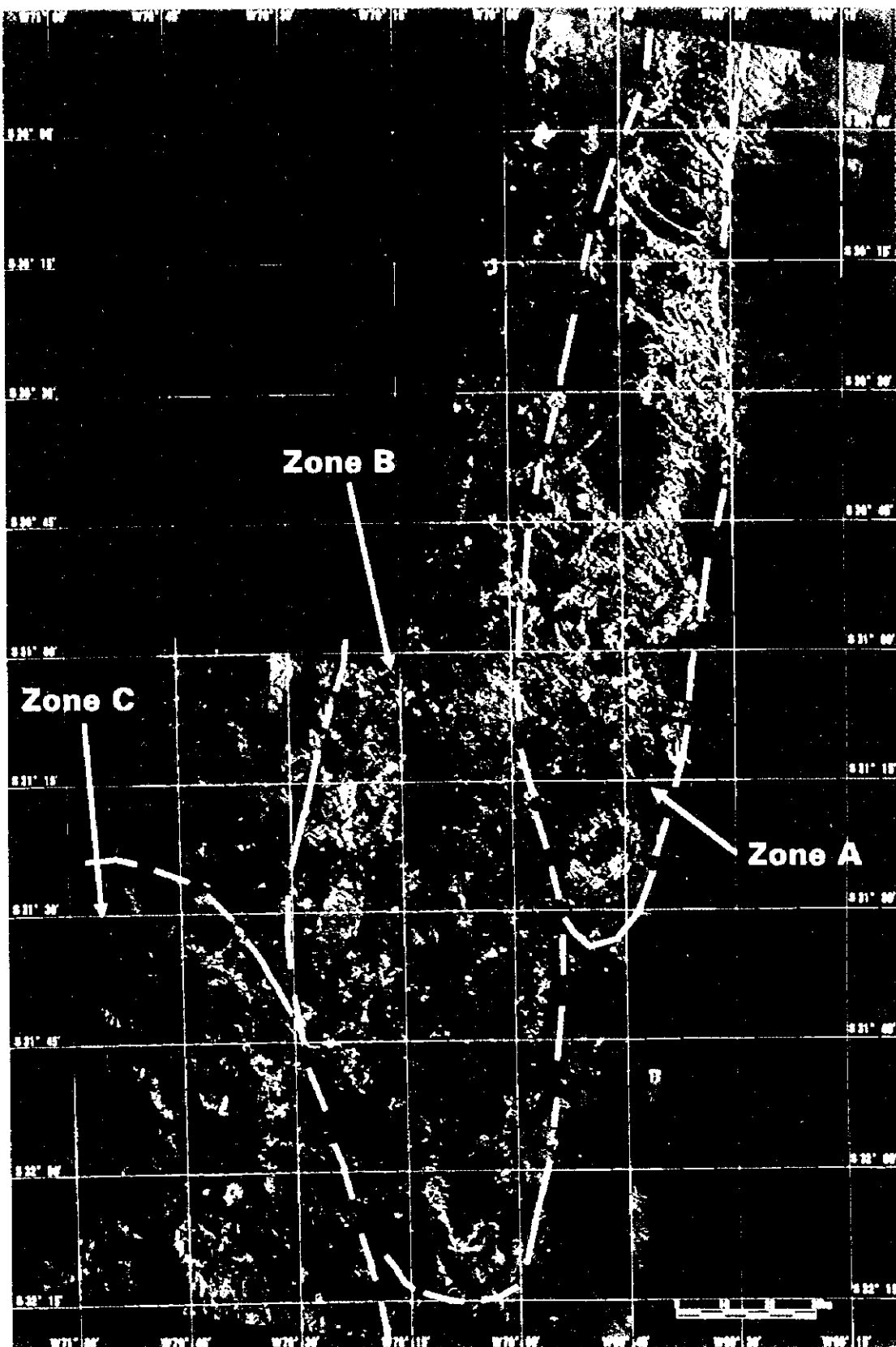
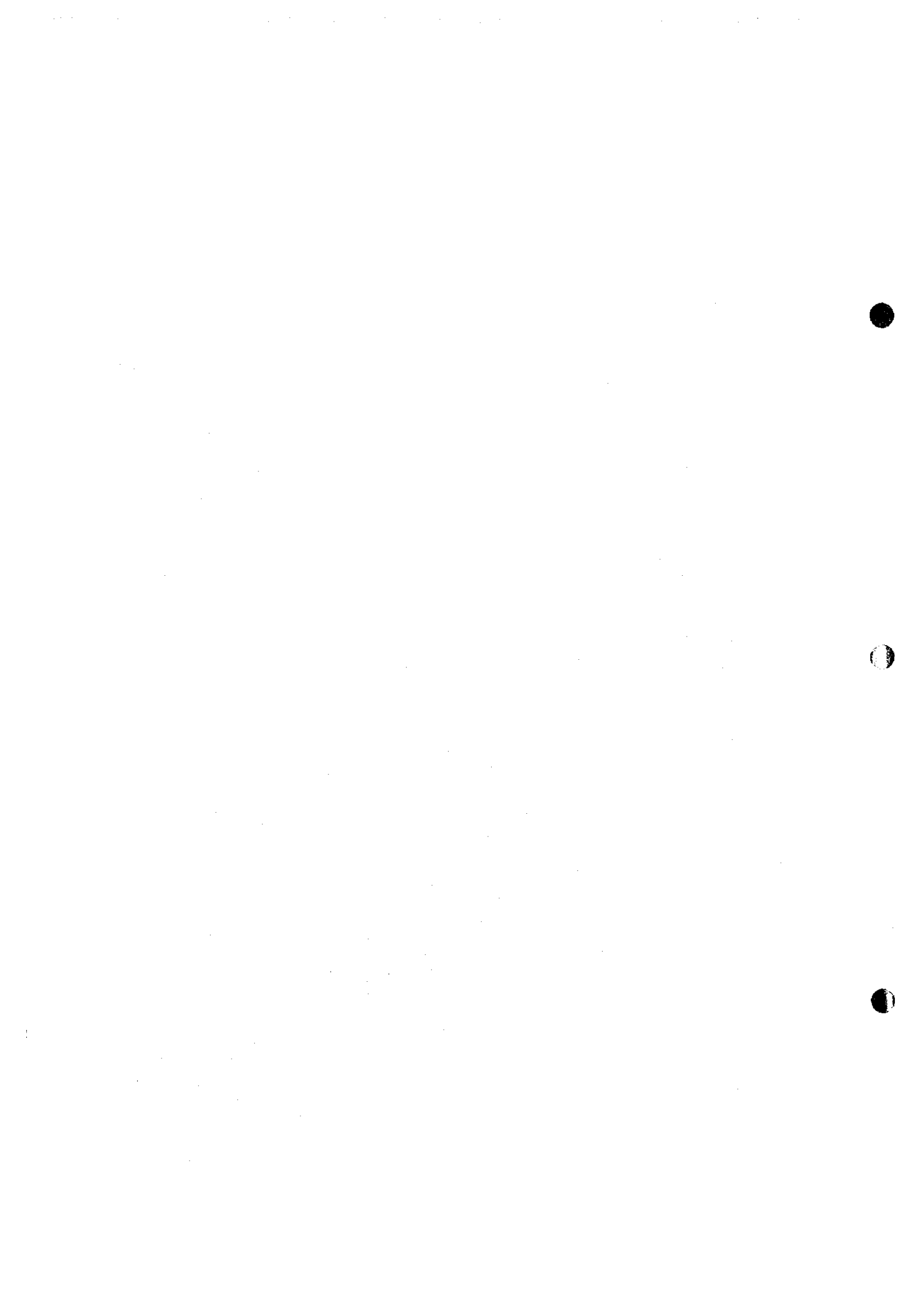


Figure 1. Aerial photograph of the study area.



### 2.6.3 強調比演算処理画像の変質帯分布と色調

#### (1) U 画像(図 25)

U 画像についての変質帯強調比演算処理画像から、変質帯の特徴はそれらの外形と色調に基づいて以下の 3 つのゾーンに大きく分類できる。

ゾーン A は中軸部の西部一带に帯状で認められる変質帯群であり、色調は青白色～黄白色からなるものが多い。これらの変質帯の外形は一般に明瞭な境界を有し、変質帯の広がりが大きなもの(直径 1 km 程度)が多い。これらの変質帯の下流側には、やや彩度が低く(鮮やかさが低く、くすんでいる)、同系統の色調からなる長さ 5 km 程度の領域が連続する。これらは上流の変質帯からもたらされた物質からなる崖錐部や河床堆積物であると推定される。これらの変質帯候補地は主として花崗岩類および第三紀火山岩類中に位置する。

ゾーン B は U 画像の南東部一带に認められ暗赤色を呈する地帯である(風化花崗岩地帯)。これらの地帯は比較的広い範囲を占めており、図 17 のフォールスカラー画像において白色で表現される南東部の花崗岩類の分布域内に位置する。フォールスカラー画像では変質帯が淡緑色を呈するが、これらの花崗岩類中では明るい灰白色を呈する。また、ログレジデュアル処理画像(図 19)や比演算画像(図 21)でもほかの変質帯とは色調が異なっている。したがって、これらの暗赤色部が集中した U 画像の南東部では、変質帯ではない地帯が抽出された可能性が高い。

これらの現象に対し、U 画像の中央部の花崗岩類地帯中に認められる暗赤色部では状況が少し異なる。この暗赤色部は LANDSAT TM 画像のヴィジュアル判読によって変質帯(AA6059)とされている。この地帯はフォールスカラー画像(図 17)では淡緑色、比演算処理画像(図 21)では淡黄色、およびログレジデュアル処理画像(図 19)では薄い紫色を呈し、変質帯の特徴と類似した特徴を有する。これらのことから、この暗緑色部は変質帯である可能性が高いと判断される。

ゾーン C は U 画像の中軸部の南部一带に分布する淡青色の地帯である。これらの部分は外形が不明瞭であり、個々の変質帯の大きさが数 100 m と小さい。これらの地帯は主としてデボン紀あるいは石炭紀の堆積岩類中に認められる。これらの堆積岩類には石灰岩が含まれており、抽出された変質帯候補地が層理に沿った分布を示すものがあるので、石灰岩に反応した可能性もある。

#### (2) L 画像(図 26)

U 画像における変質帯候補地の色調と比較して L 画像に分布するそれらの色調はやや異なっている。U 画像では、明確な輪郭を有し比較的大きな広がりを示す変質帯は黄色を帯びたものが多い。これに対して、L 画像で抽出された変質帯は外形が不明瞭なものが多く、大きな広がりを持つものが少ない。また、色調は青みの強いものも多く、U 画像で認められた黄色みを帯びた色調を示すものが少ない。これら L 画像内で抽出された地帯の色調から、それらを大きく 3 つのゾーンに分類することができる。

ゾーン A は L 画像の北東部の盆地西側に隣接する山岳部に分布する一群である。これらのうち山間部に分布するものは明るい青白色を呈した不規則な外形を有するものであり、L 画像の北東部から東部付近に分布する。これらは東部の盆地境界付近では赤みを帯びた色調を呈し、両者の色調は漸移する。なお、北東部ではこれらに隣接して河川に沿う白色からなる筋状の地帯が認められる。これら山間部に分布する青白～赤紫色を呈する地帯は石炭紀～二畳紀の堆積岩類中(図 18 で緑色を呈する地帯)に分布し、これらの堆積岩類の西側に隣接する漸新世～中新世の火山岩類中(図 18 で紫色を帯びた地帯)にはほとんど認められない。LANDSAT TM 画像を使用したヴィジュアルな変質帯抽出作業においてもこの分布域の特徴は現れており、ヴィジュアル判読によって石炭紀～二畳紀の堆積岩類中に多くの変質帯が抽出されている。この判読によって抽出された変質帯は今回の抽出作業によってもほぼ網羅されている。

これらの変質帯候補地はフォールスカラー画像(図 18)では淡緑色を呈し、周囲の非変質と考えられる岩石よりもやや明るい色調を呈する。また、比演算処理画像(図 22)ではこれらの変質帯候補地はいずれも黄白色を呈する。これら抽出された変質帯候補地はいずれも変質帯特有の特徴を有していることから、変質帯である可能性が高いと判断される。

ゾーン B は L 画像の中軸部付近に分布する変質帯候補地であり、これらはやや暗い緑色あるいは黄白色を呈する。これらのうち、北部には直径 5 km 程度の広がりを持つ 2～3 の地帯があり、比較的明瞭な外形を示す。これらのうち北端部に位置する変質帯候補地はこの L 画像では最大の広がりを持つが、LANDSAT TM 画像からの判読では変質帯とは識別されていない。この理由は、この地帯を含む P233/R081 のデータが冬季に観測され、積雪に覆われていることによる。比演算処理画像やフォールスカラー画像およびログレジデュアル処理画像でもこの地帯は変質帯の特徴を有しており、変質帯である可能性は高い。これら北端部に位置する変質帯候補地は漸新世～中新世の火山岩類中に分布することを特徴とする。なお、第三紀火山岩類は中軸部に N-S 方向で細長く分布する。これらの地帯では第 1 年次の解析においてわずかな部分しか変質帯と判読されなかった。このことは、変質帯強調比演算処理画像(図 26)における中軸部の空白地帯と対応している。

ゾーン C は西部のチリ領土内に分布する変質帯候補地であり、それらの多くは赤紫色系統の色調で表現されている。この色調を呈するものは U 画像および L 画像の範囲全体においてこの領域のみに分布しており、特異なグループを形成している。このグループはすべて白亜紀～第三紀の火山岩類中に分布する。白亜紀～第三紀の火山岩類はフォールスカラー画像(図 18)では青緑～緑色で表現されており、フォールスカラー画像から変質帯を区別する事は困難である。また、比演算処理画像(図 22)でもこの白亜紀～第三紀火山岩類が淡桃～黄白色を呈し、かつ変質帯と類似した色調を示すので、変質帯を区別することは困難である。したがって、変質帯候補地の多くは、単に非変質の火山岩類の一部に相当する可能性もある。



#### 2.6.4 2つの画像間の色調差

U 画像と L 画像を概観すると、変質帯候補地の多くは U 画像では黄白～青白色で表現されており、L 画像では青白色で表現されている。このように両画像間では変質帯の色調に違いが生じている。U 画像と L 画像における大局的な色調差の原因については 2 つの点が考えられる。1 つは変質帯の性格が 2 つの画像間で異なることであり、もう 1 つは両画像間での輝度補正が正しく行われていないことである。

まず変質帯の性格によって色調が異なる可能性について検討する。U 画像の西部に認められる変質帯は、第三紀の火山岩類(主として漸新世～中新世)や花崗岩類中に認められる。この変質帯群は画像北西部から画像南東端にかけて NNE-SSW の連続性の良いベルトであり、El Indio 帯の一部に相当する。LANDSAT TM 画像のヴィジュアル判読による変質帯の分布からこの El Indio 帯は今回の L 画像の北部まで延びていると考えられ(図 27)、比較的類似した色調の変質帯候補地を北部(図 26)に認めることができる。

次に、U 画像と L 画像間の輝度補正が正確になされていない可能性について検討する。2.3.3 の項で述べたように、両画像モザイクの間には重複部がないために画像を用いた輝度補正を行うことができなかった。このため、両者のセンサ応答特性や大気の透過率などに変化がないと仮定した上で画像モザイクを作成した。しかしながら、観測日の異なる画像を図 13 のような散布図を用いて観測輝度の比較を行うと、回帰直線は必ずしも 45°の傾斜とならない。この現象はセンサ応答特性および大気の透過率が変化するためである。大気の透過率はバンド 1, 2 の短波長域でより大きな影響を受け、短波長赤外域ではその影響が比較的小さいと考えられる。この場合には短波長赤外域における大気の透過率の変動が可視域に比較して小さくなるため、短波長赤外域の観測輝度の散布図は傾斜 45°付近に集中することが期待される。しかしながら、図 13 のような観測輝度の散布図を作成すると、短波長域での回帰直線の傾きは可視域と同程度の変動幅がある。以上の点から、観測時期が異なった場合には、同一物質を観測していてもバンド間の比は一定ではなくなり、同一のゲイン・バイアスを用いても同じ色調にはならないことを意味している。U 画像と L 画像についての変質帯強調比演算処理画像を比較すると、U 画像の南東部と L 画像の北東部とでは変質帯の色調がやや異なる。特に、U 画像での暗赤色部と、L 画像におけるやや明るい紫色を帯びた赤色部とではやや色合いが異なる。比演算処理では赤に 5/8 を割り当てており、U 画像のバンド 8 に比べ、L 画像のバンド 8 の観測輝度値が相対的に低い可能性がある。

#### 2.6.5 変質帯強調比演算処理の意義

比演算処理画像の特徴は地形効果による陰影を消去し、反射スペクトルの強弱を強調できる点にある。しかしながら、比演算処理の欠点は色彩を絶対的に評価できない点にある。つまり、各比演算値の平均値を 128 に割り当て、比演算値の標準偏差から 256 階調になる

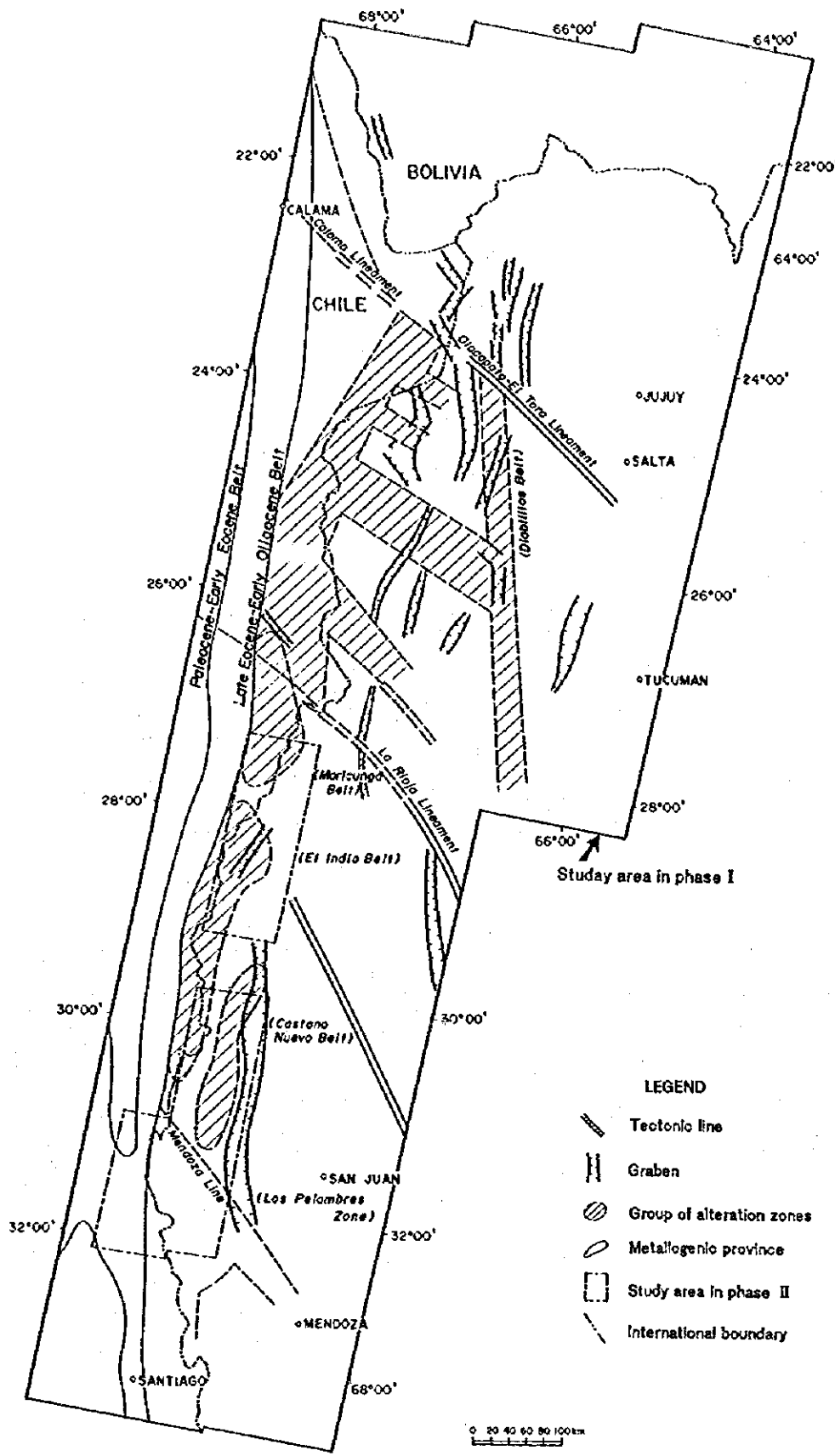


図 27 LANDSAT TM 画像のヴィジュアル判読による変質帯の配列

ように画像の鮮鋭化を行っている。したがって、これらの色調は比演算値を統計処理した地域に分布する物質の反射スペクトル特性に依存する。このことは変質帯が単純な比演算画像と変質帯強調比演算処理画像とで異なる色調で表現されることから理解できる。このため、色調から特定の変質鉱物の推定を行うことは一般に難しい。

図 28 に抽出された変質帯で 7 種類の変質鉱物が同程度の存在率であったと仮定した場合の比演算値の関係を示す。変質鉱物の種類は石膏、明礬石、カオリナイト、褐鉄鉱、石英、絹雲母および方解石とした。なお、ここでは単純化のために鉱物を混合した場合の反射率の変化を考慮していない。また、画像は BGR = 5/6, 5/7, 5/8 の組合せで作成されたものとする。

上述のように仮定すると各変質鉱物は以下に示す色調を呈すると推定される。

明礬石	: 明るい青緑色
石膏	: 明るい桃色
カオリナイト	: やや暗い黄白色
方解石	: やや暗い赤色
絹雲母、石英、褐鉄鉱	: やや暗い青緑色

このように比演算を 5/6, 5/7, 5/8 として変質帯を強調する処理を加えることで、変質鉱物によって色調に差が生じることが理解できる。ただし、図 28 で明らかのように、絹雲母、石英および褐鉄鉱では色調にほとんど差が生じておらず、比演算処理によっても判別は不可能といえる。さらに、混合する変質鉱物の種類とその量比によって反射スペクトルは非線形的に変化する。特に、明礬石の反射スペクトルは、ほかの変質鉱物を少量混入しただけでも(例えば 10 %), その変質鉱物の反射スペクトルに類似したものに变化してしまう。したがって、何らかの手法によって特定の変質鉱物の存在比がわかったとしても、比演算処理の色調による変質鉱物の推定は困難である。

#### 2.6.6 代表的な変質帯強調比演算処理画像

比演算処理の色調差による変質鉱物の推定は困難でも、色調差によって変質帯の分類を行うことは可能である。ここでは、変質帯強調比演算処理によって変質帯に現れている色調と分布域について検討する。

図 29 は U 画像の西部に位置する Los Mogotes(AA6058)付近のフォールスカラー画像(BGR = 358)に LANDSAT TM 画像からヴィジュアル判読した変質帯を合成したものである。判読した変質帯を黄色の実線で表現した。ただし、変質帯の境界は変質帯が分布する領域を大まかに囲んだものであり、変質帯の外形とは一致しない。変質帯はこの画像では白～淡青緑色で表現されている。また、変質帯から下流の崖錐地帯や、さらに下流の沢沿いの地帯はややくすんだ青緑色で表現されている。

図 30 は同地帯の変質帯強調処理画像(BGR = 5/6, 5/7, 5/8)である。既に述べたように、閾値分解によって非変質帯に分類された地帯はモノトーンの暗い画像で表現されている。また、変質帯は多彩な色調で表現されており、変質鉱物の種類の差を反映している。

変質帯強調処理画像で変質帯が表現されている色調は、以下のように大きく 3 つに分けることができる。

#### (1) 白～黄白色～橙色

Los Mogotos 付近の変質帯付近で認められ、これと類似した色調は AA6064(S28°26' W69°33')付近および AA6063 の中央部付近(S28°23' W69°33')に現れている。また、これらの下流部には同系の色調で彩度の低い(鮮やかさが低く、くすんでいる)色調の地帯が連続する。これらの彩度の低い地域は、図 29 のフォールスカラー画像では LANDSAT TM 画像から判読した変質帯の崖錐部あるいは下流部に相当し、変質帯を構成する物質が降水や岩石の破壊によって地形的低所へ移動したものであると考えることができる。これら変質帯下流部の次に沿った地帯は、その下流側を 5~10 km 程度下るとその連続性がなくなる場合が多い。この理由としては、ほかの河川から土砂供給され、その混合によって変質鉱物が希釈されたものと考えられる。

2.6.5 で述べたような仮定(変質帯全域において 7 種の変質鉱物が同量存在する)が成立したとすれば、この色調が示唆する鉱物としては石膏、カオリナイトが候補として上げられる。

#### (2) 青白色～青緑色

El Potro 付近および変質帯 AA6065 の北西方約 1 km(S28°27', W69°32')に位置する円弧状の地域などで認められる。色調は山間部の露頭から下流部に移るに従って、彩度が低下している。Los Mogotos 付近では露岩地帯の北部がこの色調を呈し、南部は白～黄白色を呈しており、同一の変質帯であっても南部と北部とでは構成する変質鉱物の種類に差があることがわかる。また、この下流部の崖錐地域は北側が青白色を、南側が黄色を呈しており、両者の礫が下流部でも完全に混合していないことが理解できる。なお、色調からみてこれらの地帯では明礬石が卓越する可能性がある。

#### (3) 暗青緑色～暗赤色

この色調を呈する地帯は El Potro 付近から東方へ流下する河川上の堆積物あるいは AA6065 東方の崖錐部に認められる。彩度・明度が低いこれらの地帯の変質鉱物を推定することは(1)や(2)に較べてさらに困難である。つまり、彩度・明度の低いこれらの地帯は反射スペクトルに明瞭な特徴がないことを意味しており、このような反射スペクトルは単純に考えても 2 つの解釈で説明できる。

1 つは比演算処理の彩度・明度が低い変質鉱物から構成されると解釈できる場合であり、この場合は褐鉄鉱、石英、絹雲母および方解石などから構成されていると推定される。も

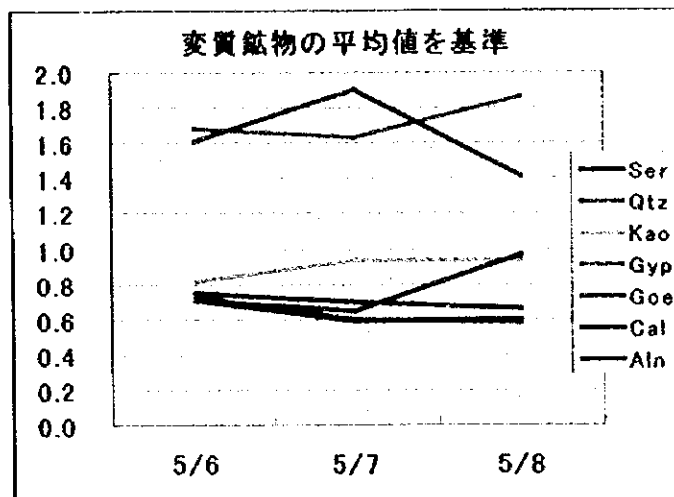


図 28 比演算で現れる色調と鉱物の関係





図 29 Los Mogotes 付近のフォールスカラー画像と LANDSAT TM の変質帯判読結果



図 29 Los Mogotes 付近のフォールスカラー画像と DEM の生成結果





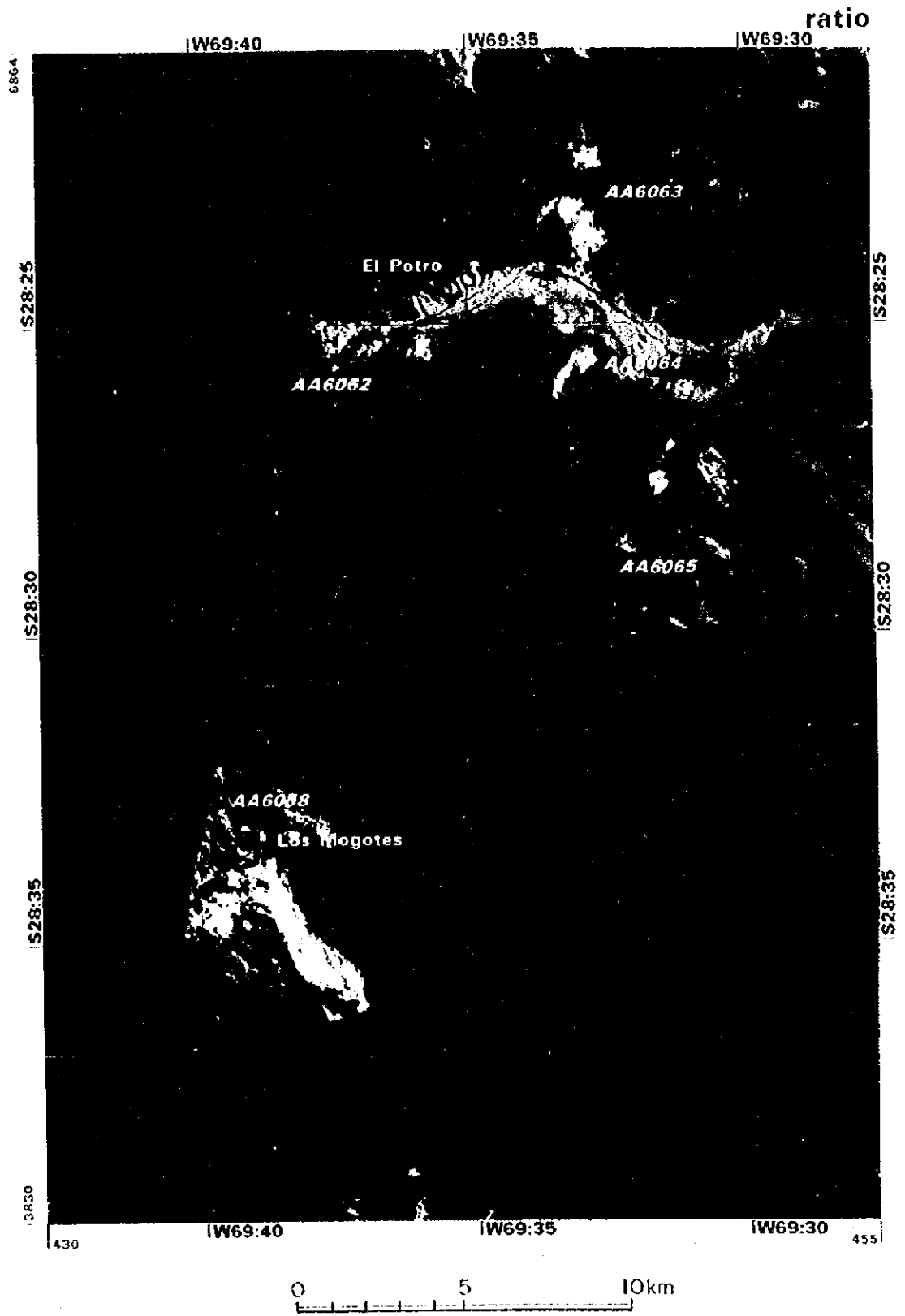
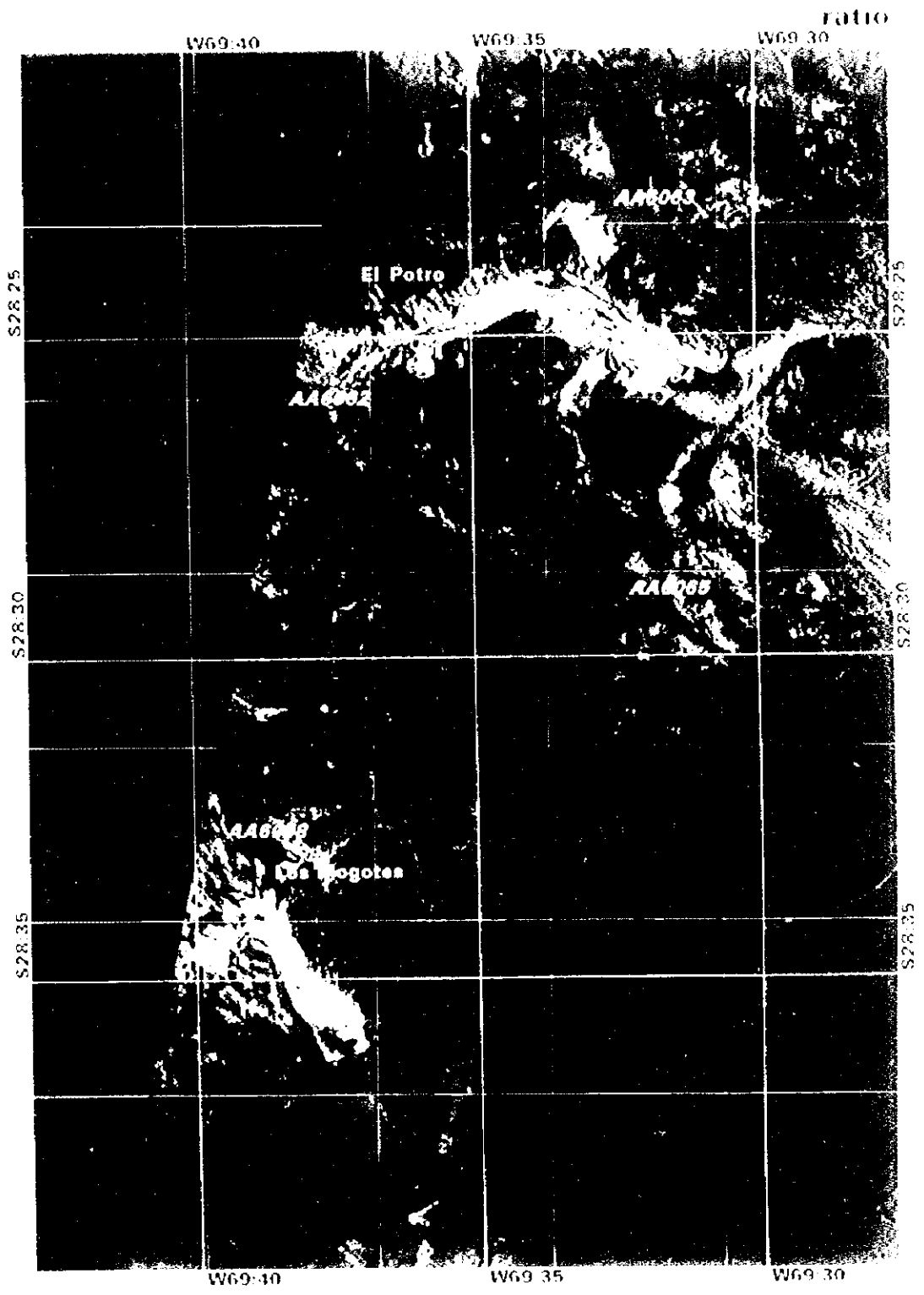
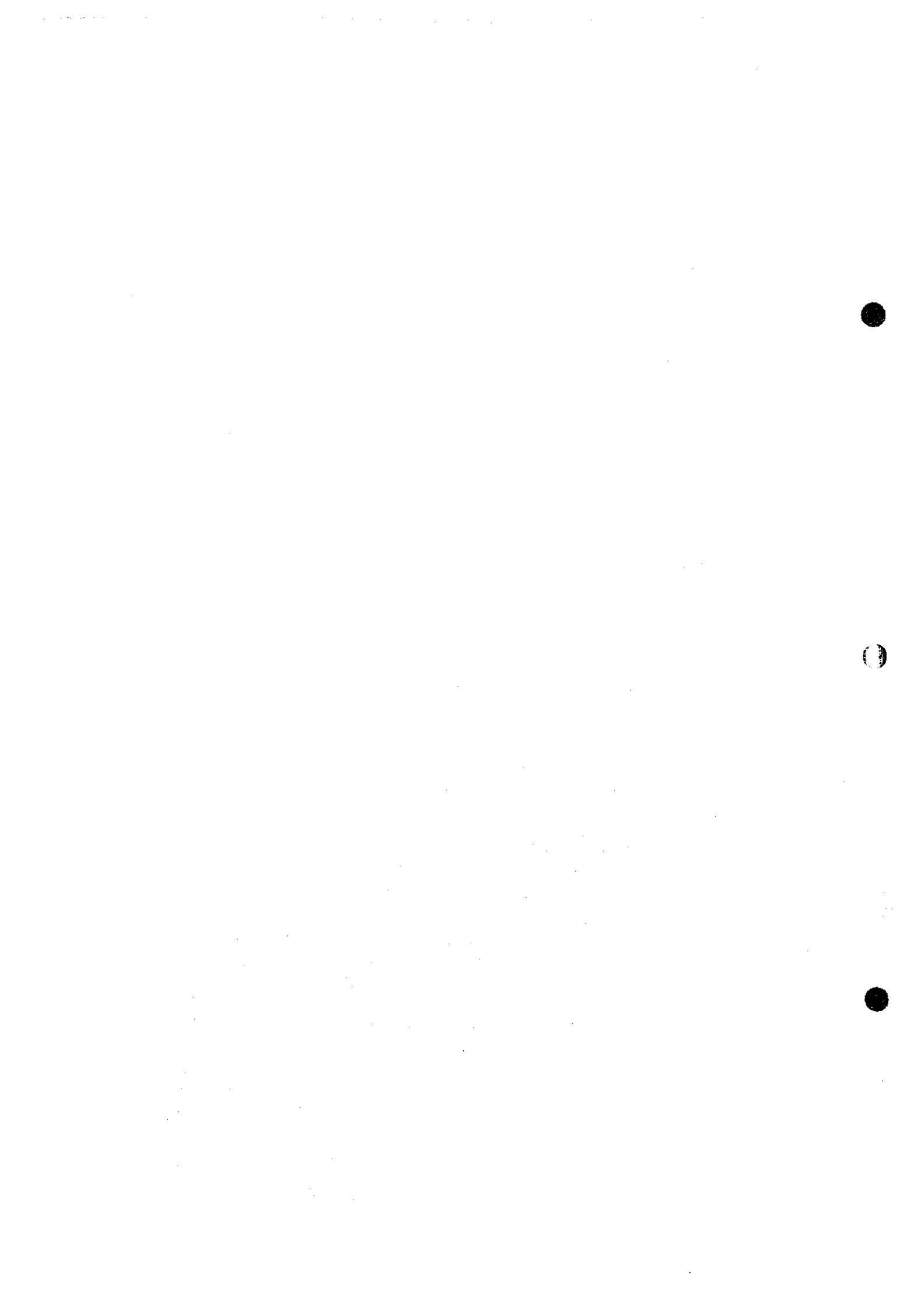


図 30 Los Mogotes 付近の強調比演算画像





う 1 つは石膏、明礬石およびカオリナイトからなる変質鉱物と非変質の岩石類からなる礫との混合にるとも解釈することができる。この場合には、非変質岩類の混入率の低い上流部では彩度・明度が共に高く、周囲から非変質岩類の混入が増える下流部では彩度・明度は徐々に低下すると予測される。

これらの識別を画像データだけで行うことはできない。なお、後者の場合には画像のヴィジュアル判読を合わせて行うことで、非変質岩類の混入によってこのような色彩を呈すると判断することができる場合もある。ただし、このような色調を呈する地帯が独立して分布する場合には一般にこれらを判別することができない。

## 2.7 変質帯の分類

抽出した変質帯候補地のみ比演算処理を施すことによって、その地帯の反射スペクトル特性を色調の差によって表現できた。ここでは、この色調差とログレジデュアル値から変質帯の分類を行う手法と分類結果について述べる。

なお、図 31 に変質帯の分類作業のフローチャートを示す。

### 2.7.1 カテゴリの作成

#### (1) クラスタ分析の不適合性

一般に、画像分類では最尤法、クラスタ分析法および閾値分解法が用いられることが多い。本解析では教師エリアを設定する際に十分な量の情報が欠如していたため、まず、最初にクラスタ分析を行った。クラスタ分類に使用したデータは、(1) ログレジデュアル値、(2) 強調比演算処理値、(3) ログレジデュアル値+強調比演算値の 3 種類である。

変質帯候補地として選択された地域から 4,000 点のデータが無作為にサンプリングされた。次に、クラスタ分析の計算方法として、クラスタの距離計算には原データのユークリッド距離を用い、クラスタ合併後の距離計算には群平均法を用いた。また、最終的なクラスタ数を 20 として処理した。解析には 3 種類の原データを用いたが、いずれの場合においても 1 クラスタにデータの 90 %以上が集中し、不適切な分類法であることが明らかとなった。残り 10 %のクラスタのうち出現頻度がごく低いクラスタのデータは、鹹湖堆積物中や短波長赤外線センサの応答遅れ部などに認められた。つまり、これらのごく少数の特異な反射スペクトルを示すデータ(反射スペクトル)が存在し、計算上、これらを独立したクラスタとして分類したために、分類されるべきデータ群が融合されてしまう結果が引き起こされたと考えられる。

#### (2) 最尤法

強調比演算処理を行うことにより、変質帯と考えられる地帯は多様な色調で表現された。

したがって、この色調差を利用して以下に述べる手順で最尤法による分類を試みた。

(a) 教師の作成と出現頻度

最尤法を用いる場合には、現地調査によって正確な既知の教師エリアを複数箇所設定することが一般的である。しかしながら、本解析では既知の教師エリアを複数箇所設定することができなかつたため、比演算処理で現れる色調を教師とした。次に、ユークリッド距離を用いて最尤法による分類を行い、各教師の出現頻度を検討した。

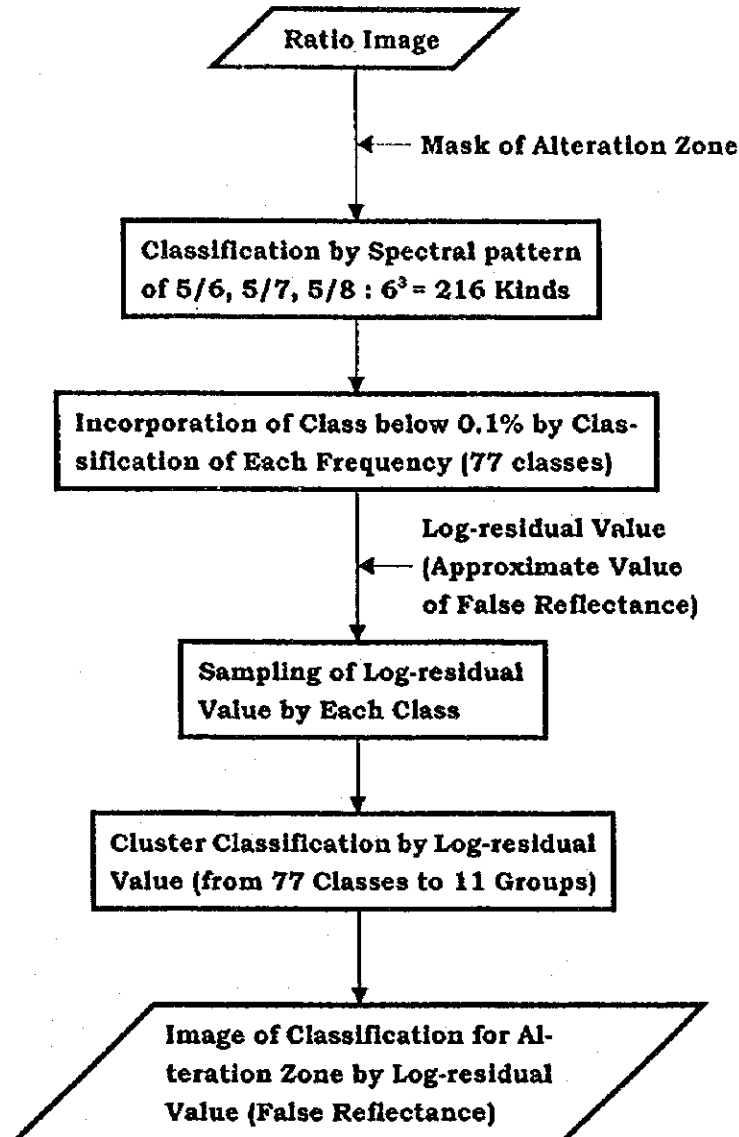
画像データとしては強調比演算画像(BGR = 5/6, 5/7, 5/8)を用いた。次に、各バンド毎に6段階の基準輝度値(95, 127, 159, 191, 223, 255)を設定し、3バンドの組合せによって216個( $6^3=216$ )の教師を作成した。なお、変質帯として抽出した全てのデータについて最尤法による分類を行った。表8に分類結果の一部を示す。

表 8 教師と出現頻度(上位 20)

順位	強調比演算値			出現率	累積頻度
	5/6	5/7	5/8		
1	95	95	95	18.7887	18.7887
2	127	95	95	14.8567	33.6454
3	95	127	127	7.0302	40.6755
4	127	127	127	5.9003	46.5759
5	127	127	95	4.2987	50.8746
6	159	95	95	3.9315	54.8062
7	95	127	95	3.6121	58.4183
8	159	127	95	3.3805	61.7988
9	95	95	127	2.9387	64.7376
10	159	127	127	2.3534	67.0909
11	127	159	159	2.1514	69.2423
12	127	159	127	2.1160	71.3583
13	159	159	127	1.8091	73.1674
14	95	159	159	1.6108	74.7782
15	127	95	127	1.3631	76.1413
16	159	159	159	1.2507	77.3920
17	95	159	127	1.0225	78.4144
18	191	127	95	1.0152	79.4296
19	159	191	159	0.8455	80.2751
20	191	159	127	0.8236	81.0988

表8には出現頻度20位までの教師の基準輝度値、出現率および累積出現頻度を示した。上位20位までで累積頻度は80%を超えていることがわかる。なお、最尤法の実行時に218個(216クラス+非変質帯+画像範囲外)にクラス分類された画像を作成した。

### Classification of Alteration Zone



**“ Classification of Alteration Zone with Special Emphasis on Reflectance Spectrum ”**  
( Rough Estimation of Mineral Assemblages, Relative Quantity Unknown )

図 31 変質帯の分類作業のフローチャート

(b) ログレジデュアル値によるクラスター分類

最尤法によって分類されたクラスは 216 個であり、このままでは分類数が多すぎるので分類方法としては不適當である。また、出現率が 0.1 %未満のクラスについては画像ノイズの可能性が高いと判断し、それらのクラスを削除した。その結果、出現率 0.1 %以上のクラスは 77 個であり、出現頻度の合計は 97.8 %であった。

この 77 個でも分類数としてはかなり多い。このため、さらに再分類を行う必要がある。ここでは再分類を行うに当たり、反射スペクトルを反映させた分類手法とするためにログレジデュアル値を併用した。最初に(a)で作成した分類画像と輝度変換画像およびログレジデュアル変換係数を用いて、クラス毎に各バンドのログレジデュアル値の平均値を算出した。次に、77 個のクラスのログレジデュアル値をもとに、最終クラスターが 10 個(以下、10 個に統合したものをグループと呼ぶ)となるようにクラスター分類を行った。なお、クラスターの距離計算には原データのユークリッド距離を使用し、クラスター合併後の距離計算には群平均法を用いた。

なお、2 番目のグループは統合数が 39 と最も多く、また、出現率も 18 %と高い値を示した。このグループの特徴はバンド 7 に吸収をもつことであるが、このバンド 7 の吸収の強さについては、クラスによってかなり差が認められた。このため、このグループについてはクラス毎のログレジデュアル値から人為的に 2 つのグループ(B および B')に細分した。この結果、分類数は 11 グループとなった。

この作業によって得られた 11 個のグループの出現頻度を表 9 に、各グループの平均的なログレジデュアル値を図 32 に示す。

表 9 グループとそれらの出現頻度およびログレジデュアル処理値

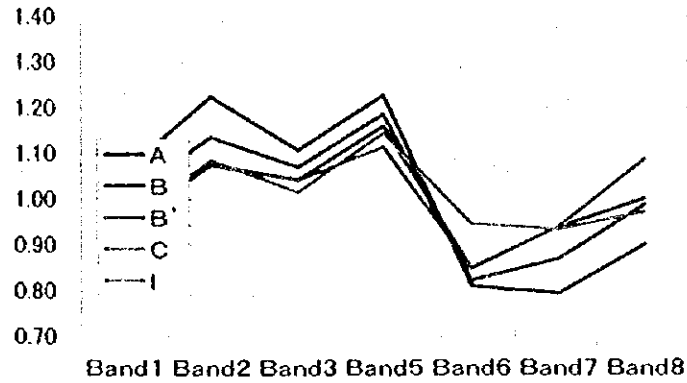
グループ	頻度	統合数	ログレジデュアル値(平均)						
			Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
A	1.59	7	1.063	1.226	1.109	1.228	0.812	0.796	0.902
B	9.44	29	1.009	1.136	1.072	1.186	0.824	0.871	0.989
B'	8.85	10	0.983	1.077	1.044	1.161	0.851	0.940	1.002
C	15.02	9	0.953	1.073	1.043	1.114	0.848	0.940	1.087
D	7.96	8	0.931	1.032	1.001	1.184	0.950	1.002	0.957
E	5.17	3	1.012	1.060	1.001	1.084	0.944	1.019	0.911
F	21.72	2	0.962	1.033	1.017	1.059	0.890	1.031	1.039
G	10.19	2	0.944	1.028	1.000	1.113	0.919	1.009	1.024
H	16.48	2	0.967	1.011	1.011	1.092	0.909	1.053	0.989
I	1.26	3	0.949	1.086	1.016	1.145	0.947	0.935	0.972
J	0.27	2	0.979	0.859	1.128	1.320	0.817	1.026	0.978
合計	97.9%	77							

次に、A~J のグループについてログレジデュアルの変動を明確にするため、ログレジデュアル処理画像作成時に用いた係数からログレジデュアル処理画像値を算出した。図 33



ログレジデュアル値

分類項目	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
A	1.063	1.226	1.109	1.228	0.812	0.796	0.902
B	1.009	1.136	1.072	1.186	0.824	0.871	0.989
B'	0.983	1.077	1.044	1.161	0.851	0.940	1.002
C	0.953	1.073	1.043	1.114	0.848	0.940	1.087
I	0.949	1.086	1.016	1.145	0.947	0.935	0.972



ログレジデュアル値

分類項目	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
D	0.931	1.032	1.001	1.184	0.950	1.002	0.957
E	1.012	1.060	1.001	1.084	0.944	1.019	0.911
F	0.962	1.033	1.017	1.059	0.890	1.031	1.039
G	0.944	1.028	1.000	1.113	0.919	1.009	1.024
H	0.967	1.011	1.011	1.092	0.909	1.053	0.989
J	0.979	0.859	1.128	1.320	0.817	1.026	0.978

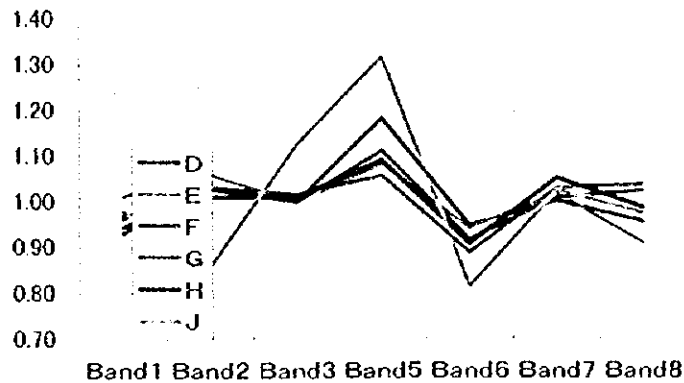
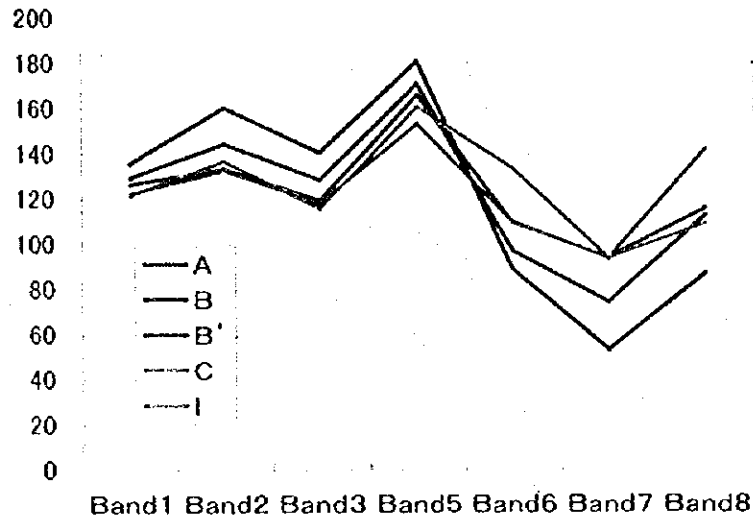


図 32 再分類したグループのログレジデュアル値



ログレジデュアル画像値

分類項目	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
A	135.8	160.5	140.7	181.2	89.1	53.3	87.2
B	129.5	144.5	128.7	171.0	97.1	74.4	112.7
B'	126.6	133.4	119.6	166.1	109.7	93.8	115.8
C	122.4	132.7	118.4	153.3	110.1	93.7	141.6
I	121.6	136.8	115.9	161.0	133.9	93.9	108.9



ログレジデュアル画像値

分類項目	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
D	119.6	126.7	109.8	171.4	139.1	112.6	103.9
E	130.2	132.6	112.0	145.3	132.4	118.7	90.4
F	124.1	125.1	109.6	140.1	127.9	118.9	127.1
G	121.5	125.4	107.8	153.5	132.2	113.9	123.7
H	125.0	121.2	107.1	148.9	136.0	125.0	112.5
J	166.3	152.0	111.7	164.5	98.3	76.7	66.7

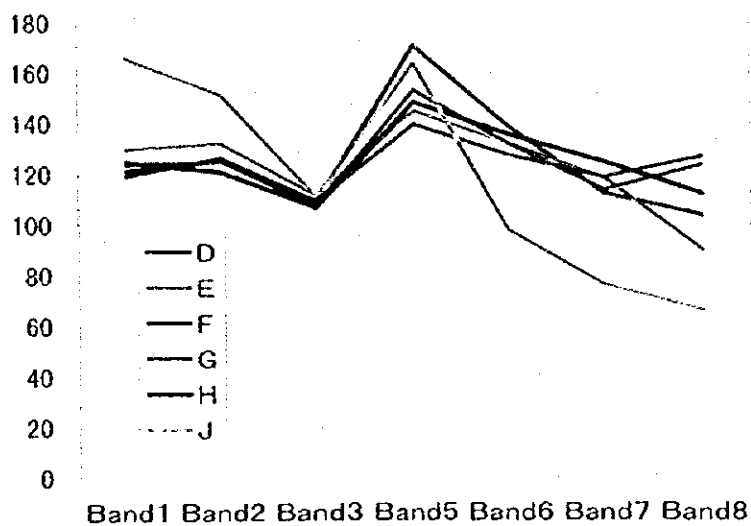
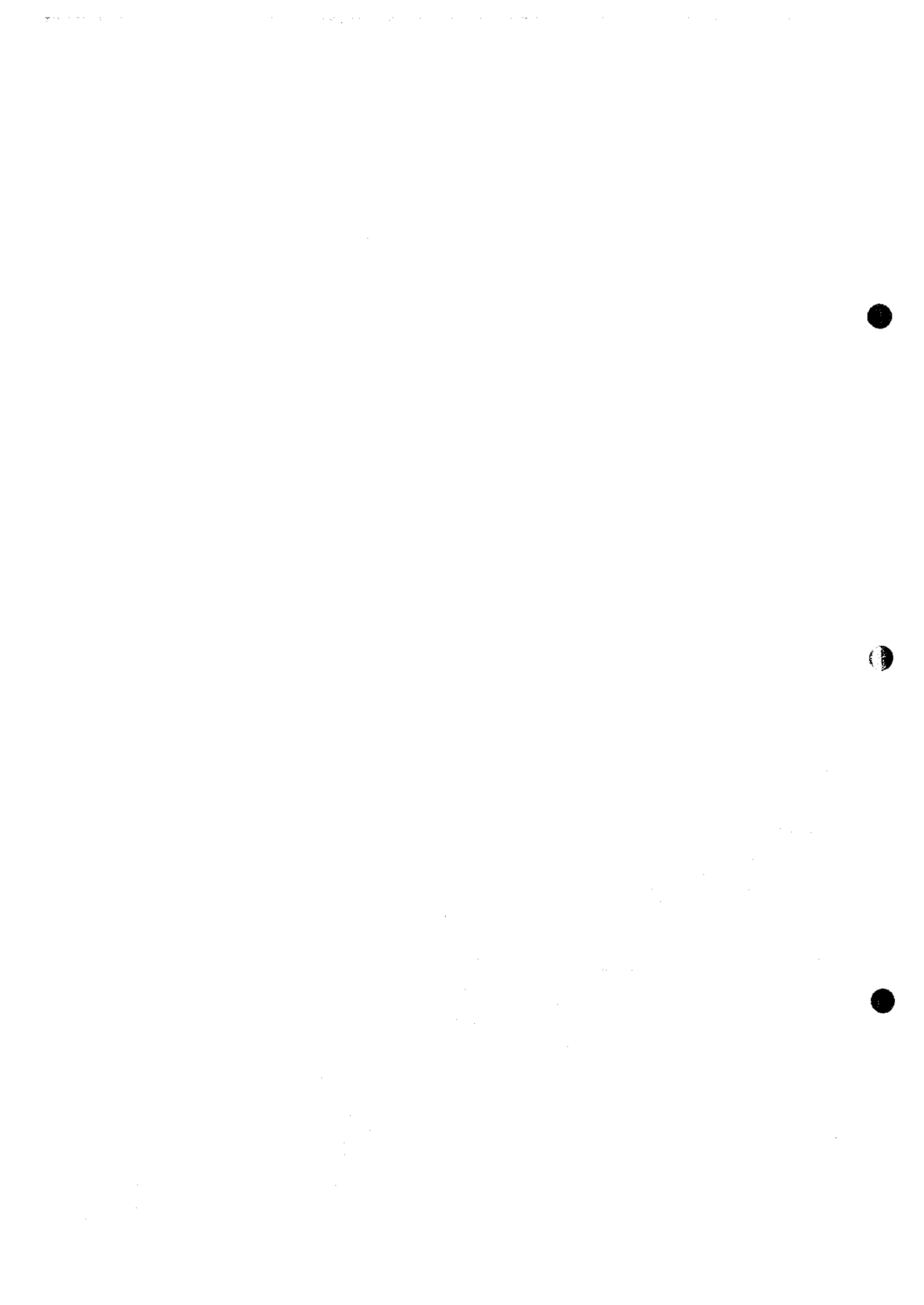


図 33 再分類したグループのログレジデュアル処理画像輝度値および変質鉱物反射率



にグループ別のログレジデュアル処理画像値を示す。次に、これらのグラフから反射スペクトルにおける吸収の位置の違いから、以下のように大きく 2 つのタイプ(タイプ I と II) に分類した。

#### [タイプ I]

基本：バンド 7 に極小値をもつ。

A：バンド 5 で高く、バンド 6 で急激に落ち込む。バンド 7 で最小値を示し、バンド 8 ではバンド 6 の場合と同程度の値を示す。

B：A と類似するがバンド 7 での落ち込みがやや小さく、バンド 8 でやや大きい。

B'：B よりもさらにバンド 7 での落ち込みが小さい。グループ II との区別はバンド 6 での屈曲の有無による。

C：バンド 6 での屈曲が上に凸となるが、バンド 7 での落ち込みが大きい。

I：B' と類似したパターンであり、バンド 5 でやや低い。

#### [タイプ II]

基本：バンド 5→6→7→8 に移行するに従って順次低下する。

D：バンド 5 から 8 へ単調に減少する。

E：D と類似するが、バンド 8 での落ち込みが大きい。

F：バンド 7 で最小となるが、バンド 6 では屈曲が認められず、バンド 8 での上昇が小さい。

G：F と類似するが、バンド 5 でやや大きい。

H：F と類似するが、バンド 5 以降の全体でやや高い。

J：バンド 1 と 2 で高く、バンド 5→8 へ移行するに従って減少する特異なタイプ。

### 2.7.2 パターンマッチングによる画像分類

前項で述べた 11 グループに基づいて、U 画像および L 画像の範囲について画像分類を行った。分類の基準となる教師は 11 グループに分類する前の 77 クラスのログレジデュアル値とした。この理由は、分類したログレジデュアル値のパターンから変質鉱物の推定を行うためである。したがって、77 クラスのログレジデュアル値と 77 クラスが再分類される 11 グループを記したテーブルを作成した。

分類に用いた画像データは U 画像および L 画像の輝度変換画像と変質帯抽出マスクである。分類では抽出した変質帯に関し全ての画素のログレジデュアル値を算出し、上述の教師テーブルと逐次比較し、各バンドにおけるログレジデュアル値の差の自乗和が最小となるクラスが属するグループを分類結果とした。この分類結果を図 34 と 35 に示す。

これらの分類した画像から、カテゴリは大局的に 3 帯に分類される。

### (1) タイプ I が卓越する地帯

U 画像の西部および L 画像の中軸部に分布し、タイプ I のうちグループ A, B, B' および C が卓越する地帯である。U 画像ではこれらが明瞭な外形を示し、また、規模が大きいことが特徴である。L 画像ではこれと類似した特徴を有する地帯が北部に分布するが、一般には外形が不明瞭で、規模が小さいものが多い。なお、グループ A は変質帯強調比演算画像では黄白色部に対応しており、グループ B および B' は青白色部に対応するものが多い。また、グループ C はやや暗い青白色部に対応している。このタイプ I が卓越する地帯の中でさらにタイプ II が卓越する部分は、U 画像の西部に位置する El Potro 付近から東方へ流下する河川を中心とした領域である。

### (2) タイプ II が卓越する地帯

U 画像の東部および L 画像の東部でタイプ II に属するカテゴリーが卓越している。これらのうち 2.6.3 で述べた強調比演算画像で暗赤色部として表現された地帯(花崗岩分布域内で非変質帯の可能性が高い地帯)にはグループ E が卓越する。このグループ E はほかの地帯ではほとんど認められず、特異な存在となっている。この地帯以外で、U 画像の東部および L 画像の東部はグループ D, F, G, H から構成される場合が多い。なお、L 画像の南東部にはグループ B および B' のタイプ I からなる地帯が認められる。

### (3) グループ F が卓越する地帯

L 画像の南西部(白亜紀～第三紀の火山岩類分布域)ではタイプ II のうちのグループ F のみが卓越する特異な地帯となっている。この地帯は変質帯強調比演算画像では赤紫～ピンク色を呈する地帯であり、強調比演算画像ではこの色のみがこの地域に現れるという特徴がある。これに対し変質帯分類のグループ F はこの地域以外でも認められ、強調比演算処理画像の色彩特徴をこのグループは反映していない。この現象については、最終的な分類に用いたデータがログレジデュアル値であり、強調比演算画像値ではないことが影響している。なお、このグループ F は反射スペクトルの特徴がもっとも不明瞭なグループである。

## 2.7.3 グループの変質鉱物推定

変質帯はログレジデュアル値の特徴に基づいて 11 個のグループに分類された。今回の解析では、変質帯の分類にとどまらず、ログレジデュアル値によって分類された変質帯についてそれらを構成する変質鉱物の推定を行った。

ログレジデュアル処理の原理として、対象地域の平均反射率がほとんどスペクトル特徴を示さないという仮定の上で、ログレジデュアル値は反射スペクトルに近似される。

図 33 にグループ別のログレジデュアル値と 7 種の変質鉱物の反射スペクトルを比較して示す。ログレジデュアル値の仮定が成立し、変質帯が同一の変質鉱物で構成されているならば、ログレジデュアル値と変質鉱物の反射スペクトルは相似形を示すはずである。し

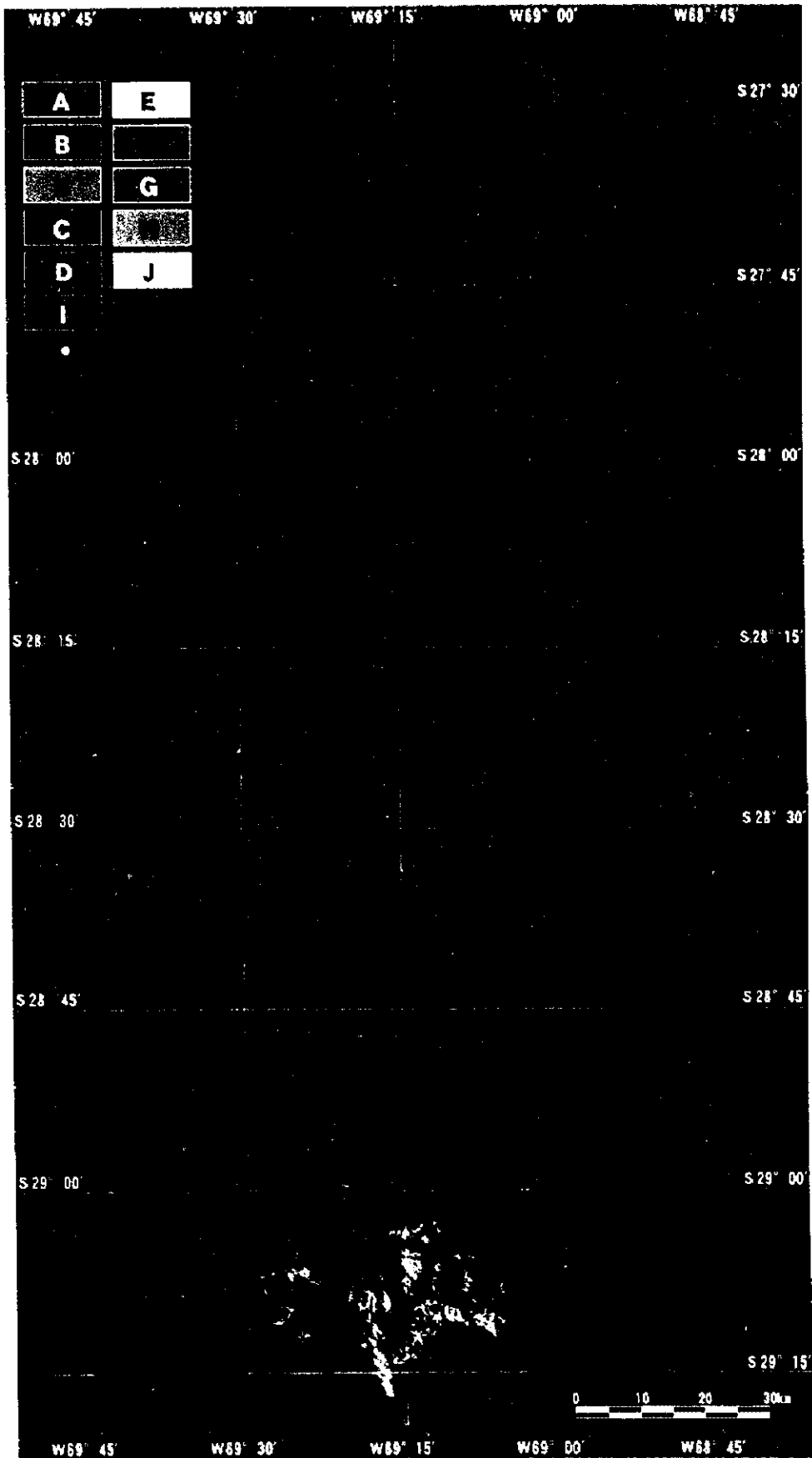
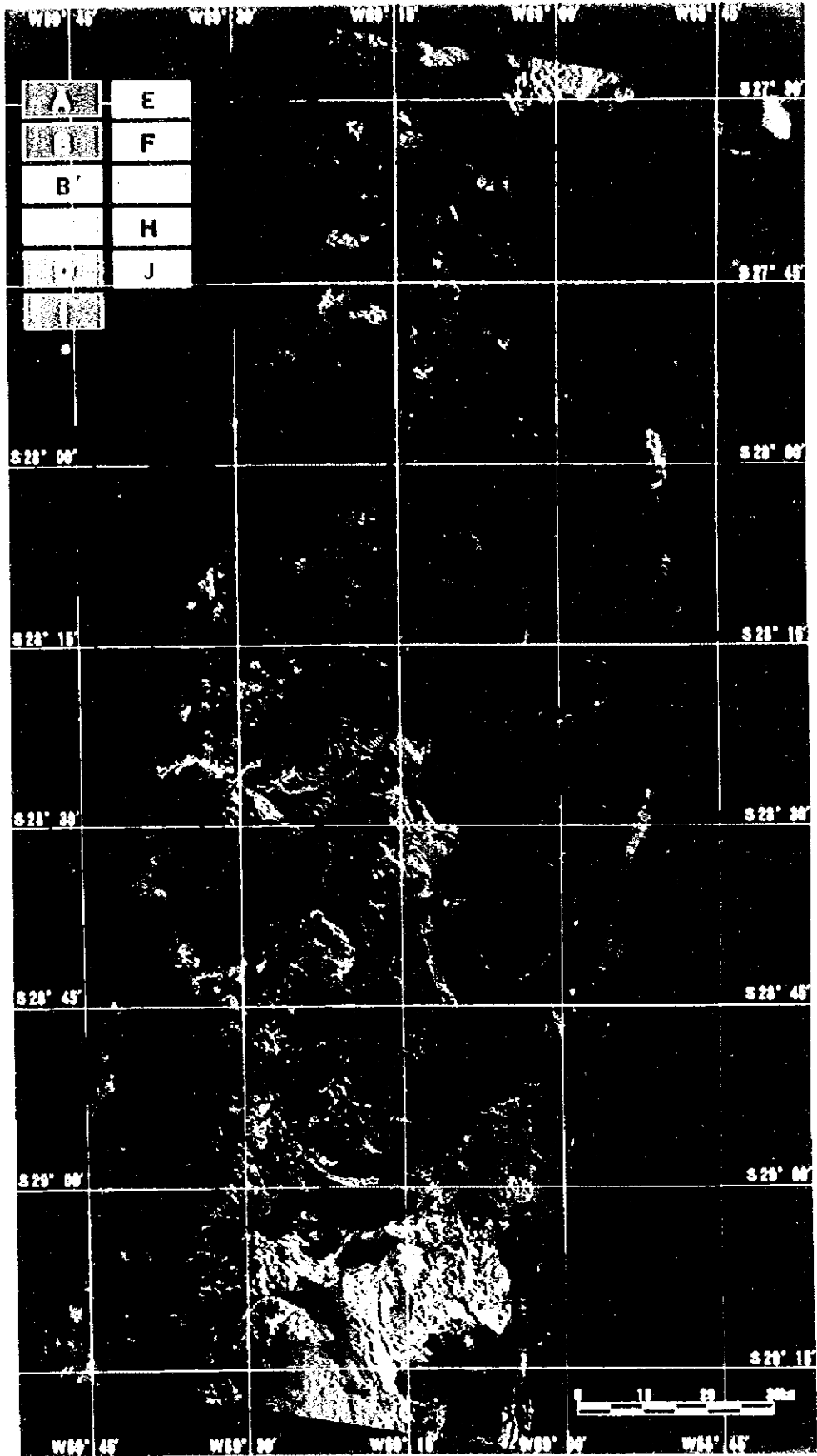


図 34 U 画像範囲の変質帯分類結果







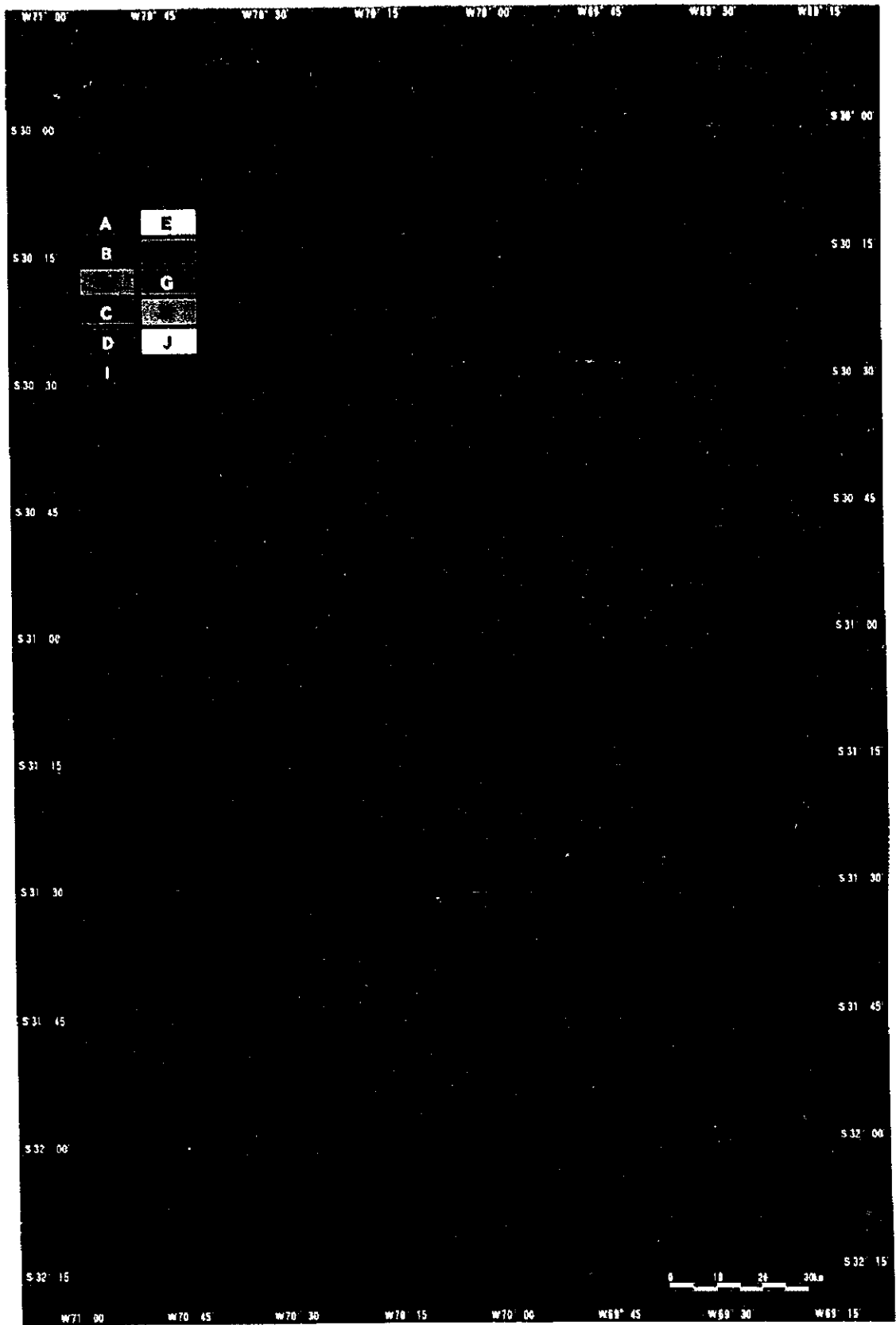
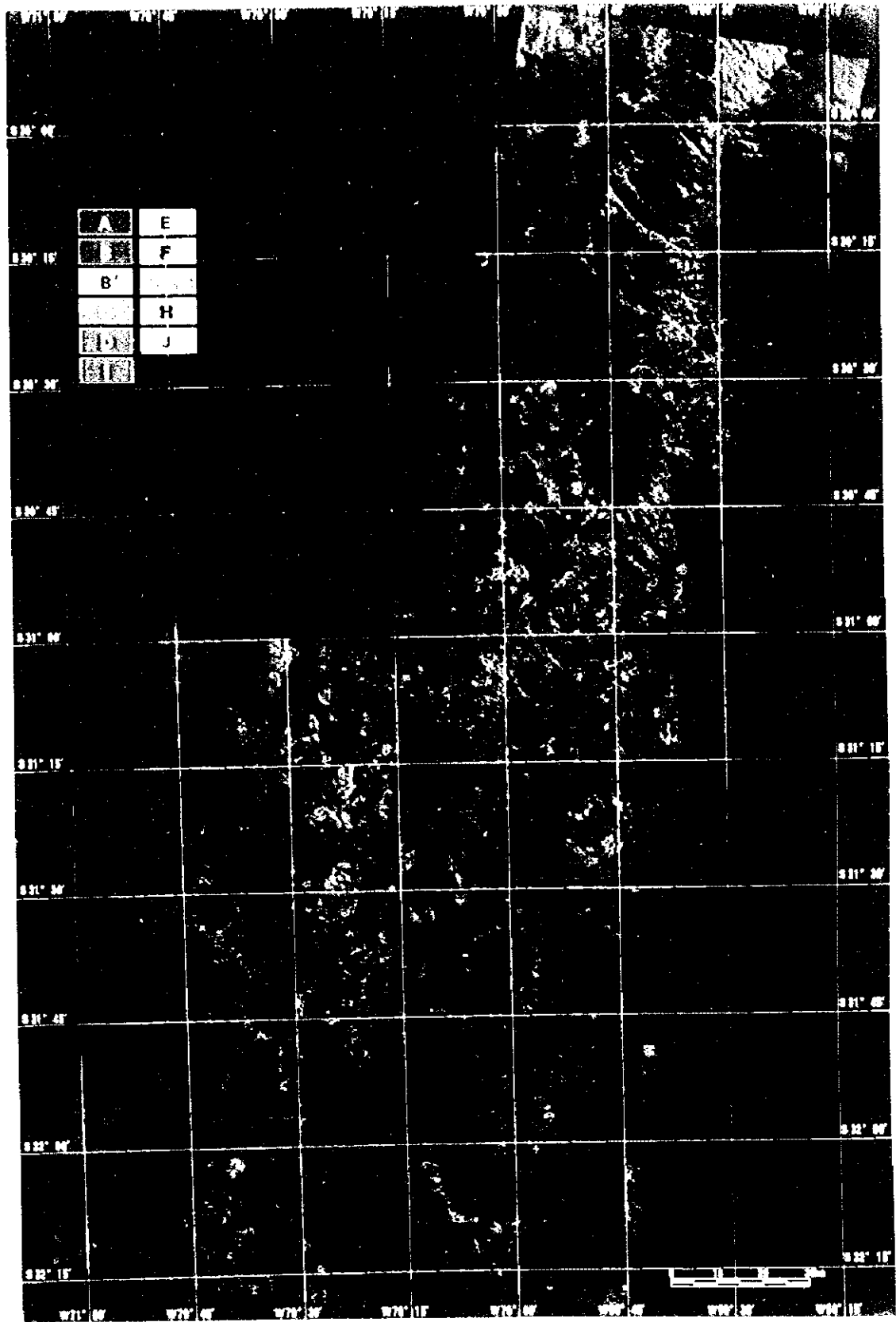
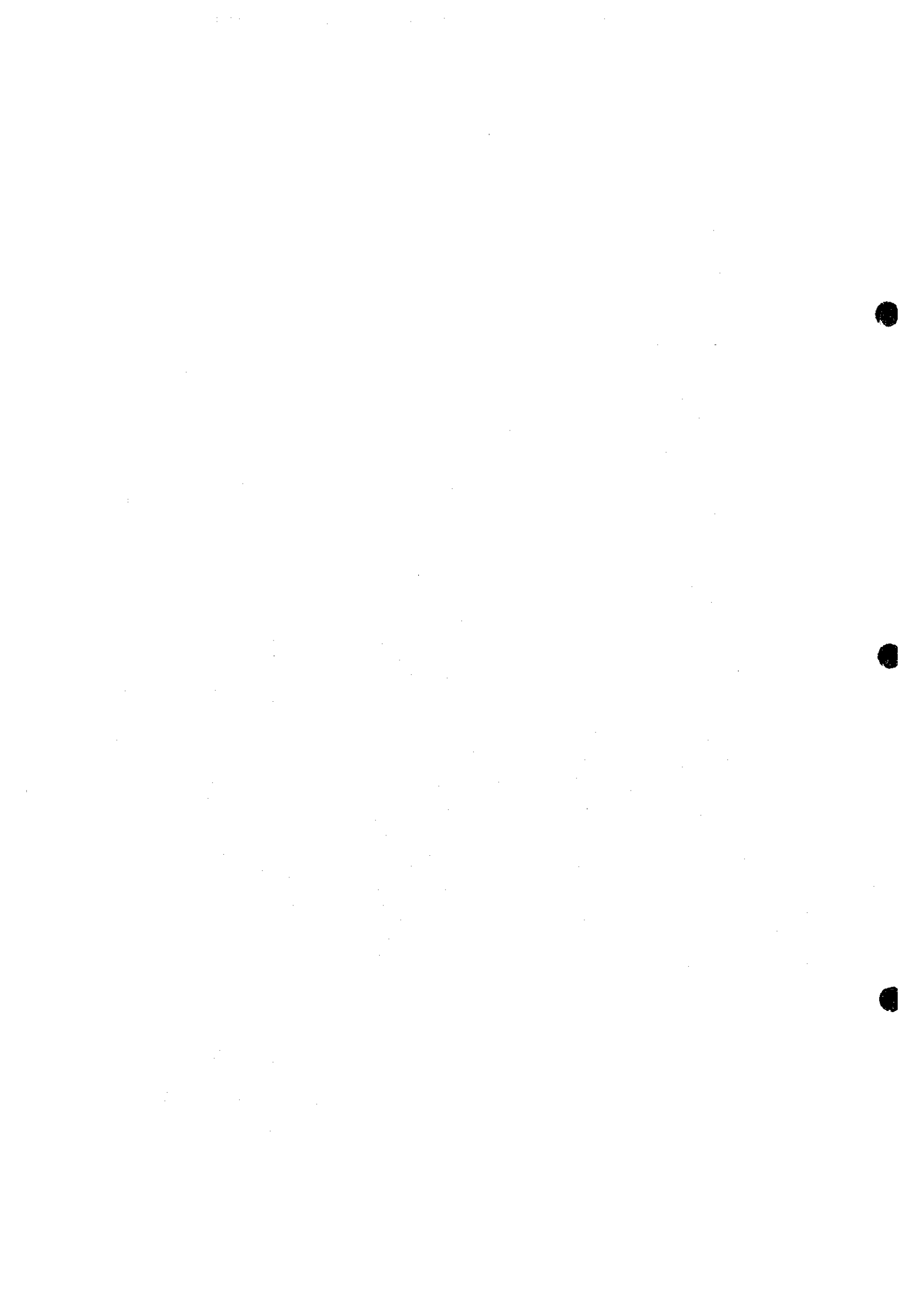


図 35 L 画像範囲の変質帯分類結果





かしながら、図 33 に示したグループ別のログレジデュアル値のパターンは、少なくとも 7 種の変質鉱物が有する反射スペクトルのパターンとは類似していない。このように、ログレジデュアル値が変質鉱物の反射スペクトルと類似しない理由としては以下の 4 つの点が考えられる。

- (1) 変質帯を構成する鉱物が比較した変質鉱物と別種のものである。
- (2) 変質帯を構成する変質鉱物は単一鉱物種から構成されていない。
- (3) ログレジデュアル処理の仮定が成立していない。
- (4) OPS センサの感度特性による(特に、ダイナミックレンジが小さい)。

(1)については：比較した 7 種類の変質鉱物は明礬石、カオリナイト、セリサイト、方解石、石英、褐鉄鉱および石膏であり、それらは変質帯を形成する比較的一般的な変質鉱物であること、および現地調査では変質帯が石膏、カオリナイトおよびセリサイトなどから構成されていることが明らかであることから、この理由は考えにくい。

(2)については：2 種類の鉱物を混合した場合には、混合率によって反射スペクトルが変化する。しかしながら、混合した鉱物の反射スペクトルは必ずエンドメンバーを端点として、その範囲内のみで変動し、混合によってエンドメンバーと極端にパターンの異なる反射スペクトルが現れることはない。したがって、混合によって図 33 のような全く異なる反射スペクトルを説明することができない。

(3)については：ログレジデュアル値の係数を算出する際に用いたエリアは、雪、雲、鹹湖堆積物、植物および変質帯といった特殊な反射スペクトルからなる地帯を含んでいない。しかしながら、露岩地帯において反射スペクトルに特徴がある岩石類が卓越していれば、露岩地帯の輝度値平均はログレジデュアル処理の仮定からはずれることとなる。

(4)については：JERS-1 OPS のレベル 0 画像は 6 ビット(64 階調)で量子化されている。Normal Gain で観測された画像では、一般に、輝度分散値が小さく、標準偏差は 2~3 程度でしかない。特に、日陰の部分ではこの分散がさらに小さくなる。したがって、これらのデータはある程度の誤差を含まざるをえない。

図 33 では J を除く全てのグループがバンド 3 で吸収を示し、一般的な変質鉱物ではこの波長域で吸収がないことから、少なくともバンド 3 については正しく疑似反射率に変換されていないこと(実際の露岩地帯ではバンド 3 の反射スペクトルがほかのバンドよりも高い)が予想される。また、タイプ II のグループ全てについて、バンド 7 で反射の小さなピークがあり、この特徴を有する変質鉱物がないことから、このバンドについても正しく疑似反射率に変換されていない(実際の露岩地帯ではバンド 7 における反射スペクトルがほかのバンドの場合より低い)ことが予想される。

これらのことから、本解析においては少なくともログレジデュアル値は疑似反射率の近似値とはならず、ログレジデュアル値から直接鉱物推定を行うことが困難であることが明らかとなった。そこで、疑似反射率に類似したログレジデュアル補正值を算出することを

試みた。ただし、この仮定を検証することは本解析ではできないため、結果の妥当性については疑問がある。

抽出された変質帯のうち、ログレジデュアル値に明瞭な特徴のないグループ D~H の平均値を算出する。次に、これらの平均値が反射スペクトルに特徴のない方解石、石英、セリサイトおよび褐鉄鉱の平均的な反射スペクトルに対応していたと仮定する(ただし、この仮定の検証はできない)。この両者の値を方向余弦値へ変換し、両者が一致するようにログレジデュアル補正係数を算出する。図 36 にこの作業によって変換されたグループのログレジデュアル値を示す。タイプ I ではまだバンド 3 に吸収は認められるが、タイプ II では実際の反射スペクトルに類似したパターンを示す。この仮定が正しいとすれば、以下の 2 点を推定できる。

(a) タイプ I のグループではバンド 7 に吸収がある。この特徴を有する変質鉱物はカオリナイト、明礬石である。明礬石とカオリナイトの反射スペクトルの違いは、バンド 6 の反射率とバンド 7 からバンド 8 へ移行する際に、反射率に変化があることである。明礬石の場合では、バンド 5 からバンド 6 へ移行する際、反射率が著しく低下し、バンド 7 に吸収があり、バンド 6 と 8 で反射率がほぼ等しいことである。これに対して、カオリナイトではバンド 5 からバンド 6 へ移行する際、反射率の低下は明礬石ほど大きくなく、バンド 7 と 8 でほぼ等しい反射率となる。また、バンド 6, 7, 8 の反射率が低い変質鉱物は石膏である。しかしながら、石膏はバンド 1, 2, 3 で高く、バンド 5 以降単調に反射率が低下するという特徴がある。これらのことから、タイプ I は酸性変質帯に認められる明礬石を主とするものと推定できるが、補正によりバンド 8 の反射率がわずかに下がればカオリナイトの特徴を有していると判断されてしまう。したがって、タイプ I については明礬石、カオリナイトと予測することが妥当である。

(b) グループ J を除くタイプ II のグループは、バンド 5 をピークとして長波長側に緩やかに反射率が低下するパターンで特徴づけられる。この特徴を有する変質鉱物にはセリサイトや方解石がある。また、モンモリロナイトはセリサイトと類似したパターンを示す。これらの点から、これらのグループは酸性~中性の熱水活動に伴う変質鉱物を反映していると推定できるが、既に述べたように、タイプ I と非変質岩類との混合によって形成された反射スペクトルであるとの解釈も成立する。また、グループ間のパターンの違いはわずかであり、それに基づいてグループの変質鉱物を推定することはできない。

なお、中性の変質作用で認められる緑泥石はバンド 5 よりもバンド 6~8 での反射率が高いという特徴がある。変質帯の抽出に用いた比演算バンドの組合せは 5/6, 5/7, 5/8 であり、この値が大きいものを変質帯候補地としたため、緑泥石については今回の解析では特定できない。

ログレジデュアル値

	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
D-H 平均	0.963	1.033	1.006	1.106	0.922	1.023	0.984
方向余弦	36.16	38.77	37.77	41.54	34.62	38.40	36.94

反射率(%)

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Ser	40.58	41.04	40.69	43.15	41.94	37.33	38.24
Qtz	39.97	40.27	40.69	41.19	41.48	41.31	41.41
Goe	13.95	17.77	21.68	53.58	55.42	55.47	52.26
Cal	40.24	40.42	40.54	41.83	42.87	38.93	25.23
平均	33.68	34.87	35.90	44.94	45.43	43.26	39.29
方向余弦	31.92	33.05	34.02	42.58	43.05	40.99	37.22

D-Hの平均とSer+Qtzの平均した方向余弦が等しいと仮定

方向余弦値

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
D-H 平均	36.16	38.77	37.77	41.54	34.62	38.40	36.94
平均	31.92	33.05	34.02	42.58	43.05	40.99	37.22
補正	0.883	0.852	0.901	1.025	1.243	1.068	1.008

方向余弦値

分類項目	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
A	35.17	39.14	37.43	47.17	37.83	31.83	34.07
B	33.54	36.47	36.36	45.82	38.58	35.02	37.53
B'	32.69	34.59	35.45	44.84	39.86	37.83	38.05
C	31.67	34.45	35.38	43.02	39.70	37.81	41.25
I	31.39	34.69	34.32	44.00	44.14	37.40	36.74

方向余弦値

分類項目	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
D	30.61	32.76	33.61	45.23	43.99	39.85	35.93
E	33.61	33.99	33.90	41.80	44.16	40.94	34.53
F	32.00	33.18	34.51	40.89	41.69	41.46	39.44
G	31.25	32.87	33.80	42.81	42.84	40.41	38.73
H	32.06	32.36	34.21	42.06	42.44	42.23	37.43
J	31.87	27.01	37.47	49.92	37.47	40.40	36.36

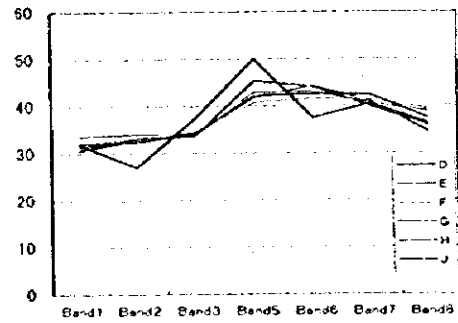
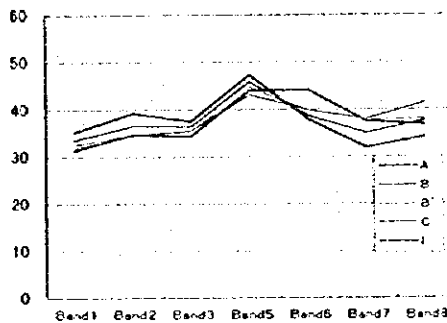
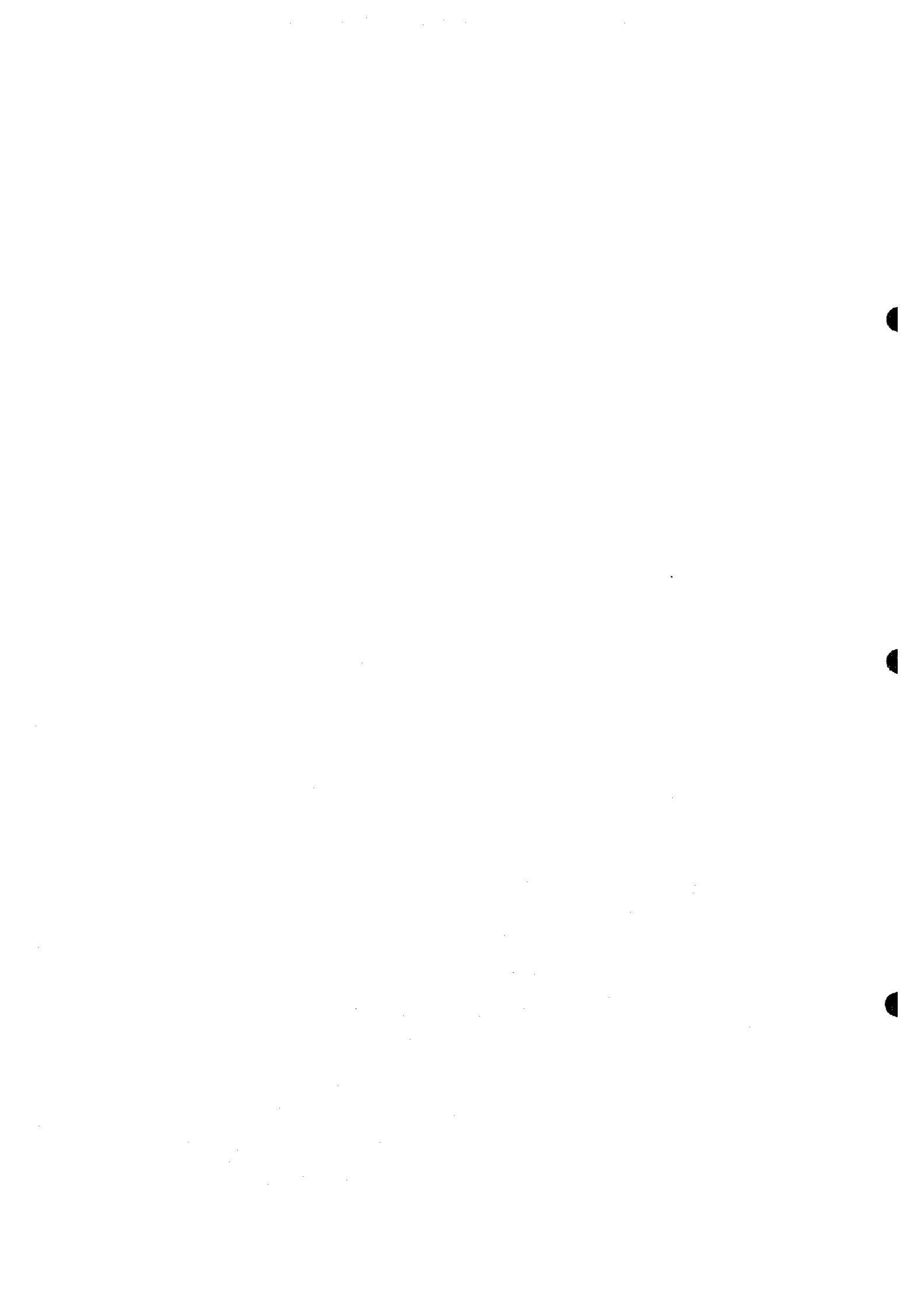


図 36 サンプル補正後のグループ別ログレジデュアル値





## 2.8. パターンマッチングによる鉱物推定

ログレジデュアル値の特徴に注目した変質鉱物の推定における問題点は、変質鉱物を厳密に特定することと、2種類以上の変質鉱物が混合している場合の変質鉱物の推定や量比の推定ができないことにある。今回の解析では、この欠点を克服するために等粒子モデル (Hiroi et al., 1985, Hiroi and Takeda, 1989, Hiroi and Pieters, 1992) による疑似反射スペクトル合成とパターンマッチング法を応用した変質鉱物の半定量化手法の開発を試みた。これまでに、この手法については LANDSAT TM での適応例はあるが、JERS-1 OPS での応用は初めてである。この手法の最も重要な点は輝度値を疑似反射率へ正確に変換する手法の確立にある。なお、本節では等粒子モデル、疑似反射率変換手法、パターンマッチングおよび解析結果について述べる。図 37 に変質鉱物の同定作業のフローチャートを示す。

### 2.8.1 等粒子モデルの原理

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( $\omega_1$ ,  $\omega_2$ )とを合体させるものである。粒子サイズと形状は混合比の計算結果精度に大きな影響を与えるが、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。

図 38 に示すように等粒子モデルでは、粉末試料が無数の数の等価層からなると仮定する。この多層の反射率  $R_\infty$  は各層の反射率  $R$  と透過率  $T$  を用いて表現される。

$$R = R_\infty / (B + (B^2 - R^2)^{1/2}), \quad B = (1 + R^2 - T^2) / 2 \quad (8-1)$$

図 39 に等粒子モデルで使われる各粒子のパラメーターを示す。一層中の全ての粒子は平均粒子サイズ  $d$  を有し、各々の粒子は散乱能  $s$  と透過能  $t$  を有するものとする。これらの散乱能と透過能は物質の光学的性質に従う。上層からの単位入射光は  $t$  だけ透過し下層へ至る。また、 $\omega_1 s$  だけ上層へ散乱し、 $(1 - \omega_1)s$  だけ層内へ散乱する。同様に層内からの単位入射光は  $t$  だけ層内へ透過し、上層及び下層へ  $\omega_2 s$  だけ散乱し、 $(1 - 2\omega_2)s$  だけ層内へ散乱する。 $\omega_1$  と  $\omega_2$  は粒状物質ごとに一定であり、 $s$  と  $t$  は波長の関数となる変数であるとする。

図 40 に 1 つの粒子の  $s$  と  $t$  から一層の反射率  $R$  と透過率  $T$  を計算する過程を示す。粒子間の水平光の強さ  $x$  が一層内で一定であるとすると、出入りする全ての水平光の強さは

### Identification of Alteration Minerals

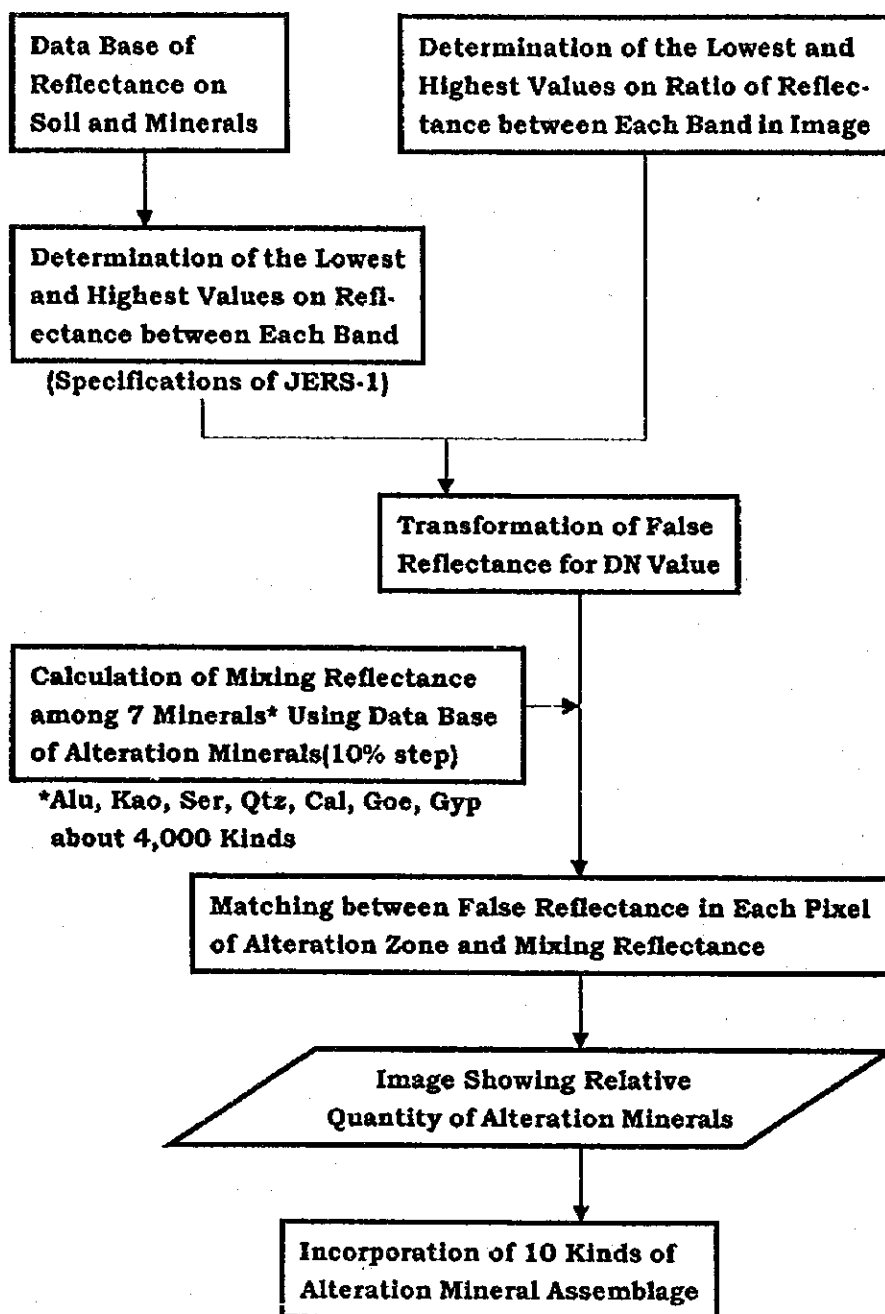


図 37 変質鉱物の同定作業のフローチャート

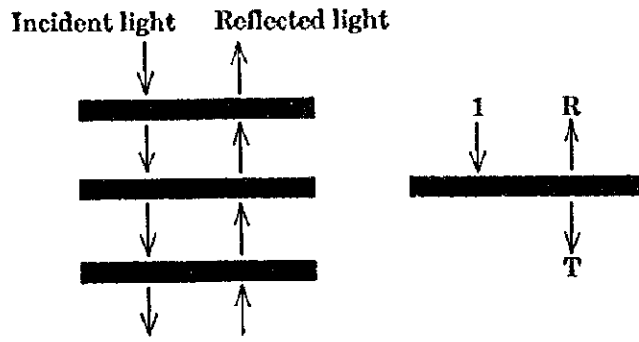


図 38 等粒子モデルの多層構造概念図

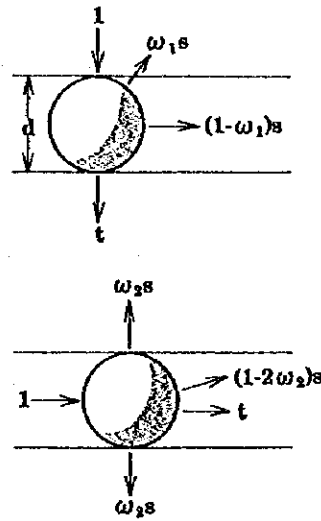


図 39 各粒子の光学パラメータ

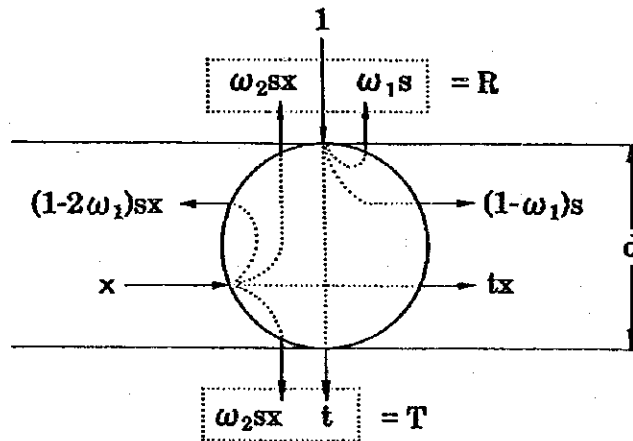


図 40 粒子の散乱能・透過能と一層の反射率・透過率の関係

バランスがとれているはずである。したがって、次の式が成り立つ。

$$(1 - \omega_1)s + tx + (1 - 2\omega_2)sx = x$$

ここで、 $x$  を求めると、

$$X = (1 - \omega_1)s / [1 - t \cdot (1 - 2\omega_2)s] \quad (8-2)$$

結果として、

$$R = \omega_1 S + \omega_2 sX \quad (8-3)$$

$$T = t + \omega_2 sX \quad (8-4)$$

となる。

図 41 に物質のフレネル(Fresnel)反射率、吸収係数( $\alpha$ )と  $s$ ,  $t$  との関係を示す。粒子サイズについては、粒子をあらゆる方向からみた時の粒子の厚さを平均することにより、有効粒子サイズ  $d_e$  が計算できる。 $s$  と  $t$  は厚さ  $d_e$  の等方的平板物質に対して計算される。物質境界に向かう等方的放射(radiation)に対して、外面反射率( $r_E$ )と内面反射率( $r_I$ )が、フレネル理論により屈折率( $n$ )から計算される。 $n$  と等方的  $r_E$ ,  $r_I$  との関係を図 42 に示す。(粉体の)一層内の表面へ入射する光及び各粒子内の光が等方性を有すると仮定すると、 $s$  と  $t$  は無限等比級数の和で表せる。

$$s = r_E + (1 - r_E)(1 - r_I)r_I p^2 / (1 - r_I^2 p^2) \quad (8-5)$$

$$t = (1 - r_E)(1 - r_I)p / (1 - r_I^2 p^2) \quad (8-6)$$

$$p = \exp(-\alpha d_e) \quad (8-7)$$

式(8-1)~(8-7)から、鉱物粉末の反射スペクトルは、比較的透明感がある鉱物では  $n$ ,  $\alpha$  の 2 変数及び  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $d_e$  の 3 定数により表現される。一方、不透明鉱物については、 $t = 0$  であるため、変数  $s$  と 2 定数  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  により表現される。

この一般モデルは、異なる光学的特性をもつ粒子の混合にまでたやすく拡張される。図 43 は散乱能が  $s_1$ ,  $s_2$ , 透過能が  $t_1$ ,  $t_2$ , 混合比が  $c_1$ ,  $c_2$  ( $c_1 + c_2 = 1$ ) からなる 2 つの鉱物の混合を示している。混合比は各々の鉱物の相対散乱断面積(measurement of relative scattering cross section)であり、粒子サイズ、粒形が同じならば容積比に比例する。

式(8-1)~(8-4)は、

$$X = (1 - \omega_1)s_M / [1 - t_M \cdot (1 - 2\omega_2)s_M] \quad (8-8)$$

$$R = \omega_1 S_M + \omega_2 S_M X \quad (8-9)$$

$$T = t_M + \omega_2 S_M X \quad (8-10)$$

と、

$$S_M = C_1 S_1 + C_2 S_2 \quad (8-11)$$

$$t_M = C_1 t_1 + C_2 t_2 \quad (8-12)$$

となり、ここで  $s_M$ ,  $t_M$  は混合試料の散乱能、透過能を表す。式(8-2)~(8-4)と式(8-8)~(8-

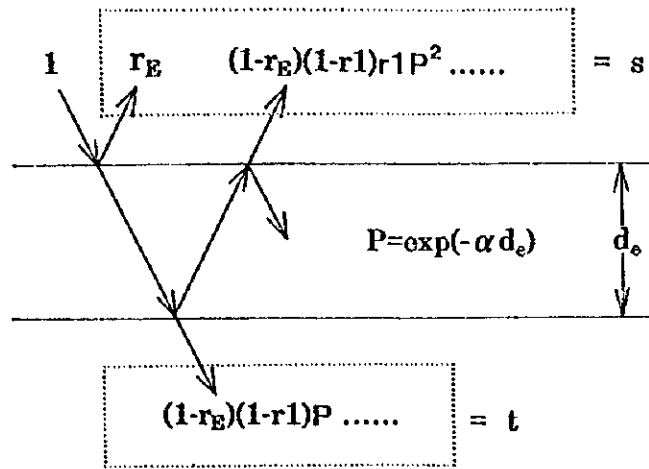


図 41 境界反射率および吸収係数と反射能-透過能の関係

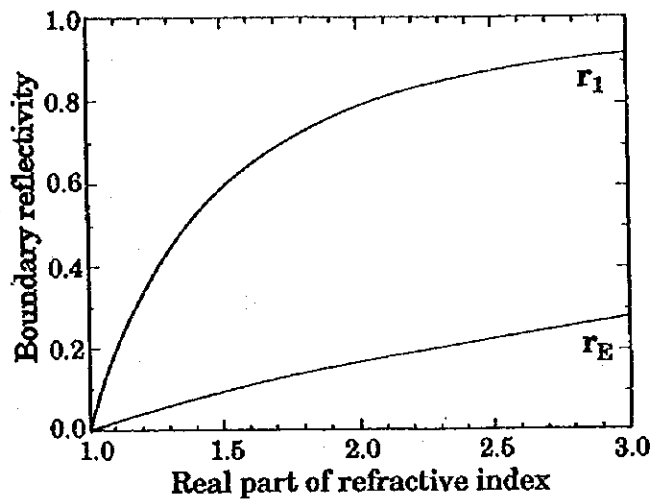


図 42 外面反射率, 内面反射率と屈折率の関係

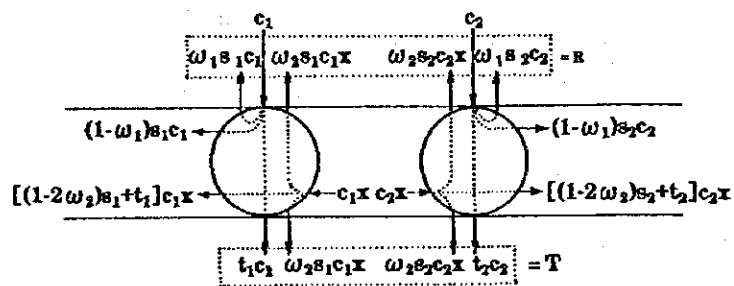


図 43 異なる光学性をもつ粒子の混合物への等粒子モデルの拡張

12)を比較すると, s, tは混合比に比例して線形で結ばれていることがわかる。

### 2.8.2 反射スペクトルインデックスの作成

等粒子モデルではある鉱物群の波長帯ごとの表面反射率および吸収率が与えられれば、各波長での計算反射率は次のような鉱物の容積比と鉱物の粒子サイズの関数として表現される。

$$X_{\lambda} = f_{\lambda}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n, d_1, d_2, d_3, \dots, d_n) \quad (8.13)$$

ここで、 $X_{\lambda}$ は波長 $\lambda$ での計算反射率、 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ は各鉱物の容積比、 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ は各鉱物の粒子サイズである。そこで、粒子サイズを仮定すると観測波長数が $n$ 個であれば波長数の方程式を解くことで $n$ 個の鉱物の容積率を求めることができる。しかしながら、個々の画素についてこの計算を行うと長時間が必要であり、有効な手法とは言えない。このため、今回は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インデックスを事前に作成し、このインデックスと各画素の疑似反射率を対比することで鉱物判定を行う手法を開発した。

この手法の特徴は、検索時間が比較的短いこと、また、方程式を解く必要がないため鉱物数を波長数の制限なく設定できる点にある。しかしながら、波長数に対して多くの鉱物数を変数として与えた場合には検索結果の信頼性が低下することから、今回の解析では波長数と同じ7種類の変質鉱物とした。なお、計算に用いた各パラメータは以下のとおりである。

表 10 等粒子モデルに使用した光学パラメータ

鉱物名	有効粒子サイズ( $\mu$ )	散乱能, 吸収能パラメータ		屈折率の一次式パラメータ	
		$\omega_1$	$\omega_2$	傾斜	接片
明礬石	195.0	0.33	0.33	-0.050600	1.722170
カオリナイト	5.7	0.40	0.10	-0.050600	1.704170
石膏	131.0	0.33	0.33	-0.050600	1.665090
セリサイト	5.6	0.40	0.10	-0.050600	1.727170
石英	186.0	0.33	0.33	-0.050190	1.689630
方解石	166.0	0.33	0.33	-0.051000	1.716310
褐鉄鉱	25.0	0.22	0.22	-0.050190	1.689630

また、これらのほかに波長帯ごとの表面反射率および吸収率を与える必要がある。

各鉱物の混合率は20%刻みとした結果、変質鉱物を混合させた計算反射スペクトルのインデックスは約6,000件のデータとなった。

### 2.8.3 2相混合時の反射スペクトルの変化

既に述べたように、2相の変質鉱物を混入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。図44と45は7種類の変質鉱物から2種類を選択し、混合率を20%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線形に変化するものとしては、セリサイト・褐鉄鉱、カオリナイト・褐鉄鉱および明礬石・石膏がある。これに対して、カオリナイト・石膏およびカオリナイト・明礬石はわずかにカオリナイトが混入しただけで、反射スペクトルはカオリナイト100%の反射スペクトルパターンに近いものへと変化してしまう。また、明礬石・褐鉄鉱では褐鉄鉱が少量混入することにより、褐鉄鉱100%に近い反射スペクトルに変化することがわかる。

明礬石はカオリナイトや石膏あるいは褐鉄鉱などと共に変質帯を構成すると考えられる。図44と45に示した結果から、明礬石と混合しても明礬石の反射スペクトルパターンが大きく変化することのない変質鉱物は石膏のみである。したがって、明礬石特有の反射スペクトルが現れる地帯はあまり多くはないと予想される。しかしながら、2.7.3項のログレジデュアル値のうち、タイプ1の反射スペクトルは多くが明礬石と類似したパターンを有している。このことは、ログレジデュアル値への変換でバンド7が正しい疑似反射率に変換されていないことを意味し、ログレジデュアル値のみから鉱物推定を行うことは危険であることがわかる。

### 2.8.4 疑似反射率変換の手法

以上述べたように、鉱物推定あるいは半定量的解析を行う場合に、輝度値を疑似反射率に変換するプロセスが非常に重要である。しかしながら、今回のように現地の反射スペクトルの実測データが欠如している場合には、何らかの方法で画像のみから疑似反射率への変換を行う必要がある。ここでは、土壌・露岩地帯の反射スペクトル特性に基づいた疑似反射率変換の手法について述べる。

#### (1) ソイルライン

ほとんどの土壌や岩石の反射率が、可視域の赤(JERS-1 OPSのバンド2)と近赤外域(JERS-1 OPSのバンド3)の間では、なだらかな分光反射率のパターンを示す。この2バンド間で散布図を作成すると、植物はレッドエッジ(0.68~0.75 $\mu$ 帯の反射率の急激な変化)の存在により近赤外域に近い側にプロットされる。これに対して、土壌や岩石は2バンド間の相関が非常に高いため、傾きがほぼ1の回帰直線の周囲に著しく集中する。土壌・岩石が示すこのような直線状のパターンをソイルラインと呼ぶ。土壌・岩石の反射率はJERS-1 OPSのバンド2と3の間以外でもなだらかな分光反射率パターンを示し、バンド間の散布図では類似したソイルラインを引くことができる。ただし、相関はやや低くなるため、バンド3と4の間のソイルラインのようには明瞭な直線とはならない。

ソイルライン法とは上述したような土壌・岩石の特徴を応用した新しい疑似反射率変換の手法である(齊藤ほか, 1998)。この手法は LANDSAT TM データを疑似反射率に変換するために開発されたが, 原理的には同一であるため JERS-1 OPS への適応を試みた。

室内分光分析により実測した土壌と風化岩の反射率データを収集し(約 200 サンプル), JERS-1 OPS の観測波長諸元に合わせた波長帯において反射率の平均値を求めた。次に, このデータから 2 バンド間の反射率散布図を作成した。この 2 つのバンド組み合わせのうち, 観測波長が比較的近接した組み合わせの散布図では図 46 のようにプロットされた点の分布域が原点を通る下限線あるいは上限線によって明瞭に認識できる場合がある。

## (2) 画像における土壌・露岩地帯のバンド間輝度比と反射強度変換係数

次に, 同様な作業を画像データについても行った。画像から雪, 雲, 変質帯, 植生を除去した画素を用いて, 図 47 と 48 に示すようなバンド間比の散布図を作成した。なお, この図に関しては, 積雪の影響がなく, 明瞭な変質帯が含まれない地帯の画像データを用いて作成した。これらの図から JERS-1 OPS の輝度値散布図においても, 図 46 に対応した上限あるいは下限線を認識することができる。

このように多様な岩石(土壌・露岩)から求めたバンド間反射率比の上, 下限線とバンド間輝度比の上, 下限線が一致するとすれば, 両散布図の傾斜を一致させることで輝度値を疑似反射強度に変換することができる。ここで傾斜を一致させるためには,

$$\text{変換係数} = \text{バンド間反射率比} / \text{バンド間輝度比}$$

とする。

しかしながら, この上, 下限線をバンド間輝度比の散布図から正確に求めることはかなり困難である。特に, 図 47 と 48 のバンド 3-5 比で下限線の位置を非常に曖昧な基準で引かざるを得ず, 本手法にも明らかに限界がある。

表 11 バンド間散布図の傾斜係数

バンド間散布図の傾斜係数						
バンド比	2/1	3/2	5/3	6/5	7/6	8/7
実測値	1.097	0.957	0.700	1.000	1.069	1.102
U画像	1.655	0.806	0.558	0.618	1.226	0.952
L画像	1.622	0.820	0.595	0.542	1.265	0.820

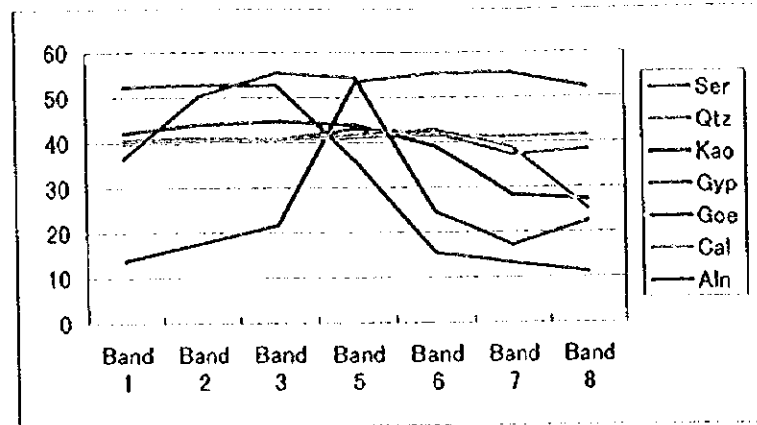
表 12 疑似反射率変換係数

疑似反射率変換係数							
バンド	1	2	3	5	6	7	8
U画像	1.000	0.663	0.787	0.987	1.598	1.394	1.685
L画像	1.000	0.676	0.789	0.929	1.713	1.448	1.946

変換係数は全てバンド 1 を基準とした。



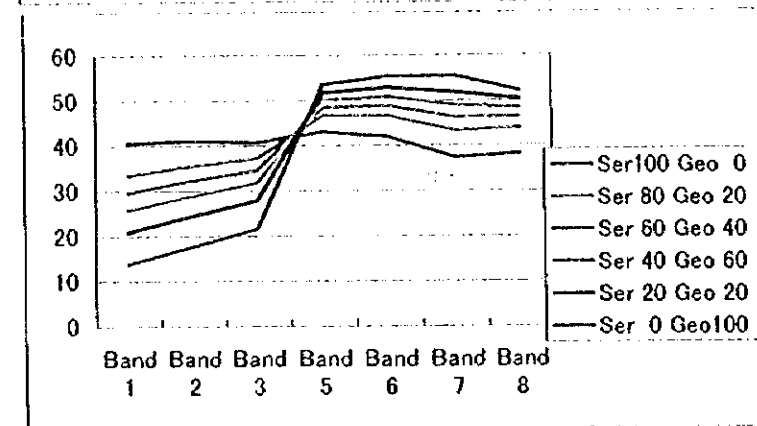




教師とした鉱物の反射スペクトル

Aln	Cal	Goe	Gyp	Kao	Qtz	Ser
0	0	0	0	0	0	100
0	0	0	0	0	100	0
0	0	0	0	100	0	0
0	0	0	100	0	0	0
0	0	100	0	0	0	0
0	100	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	100
100	0	0	0	0	0	0

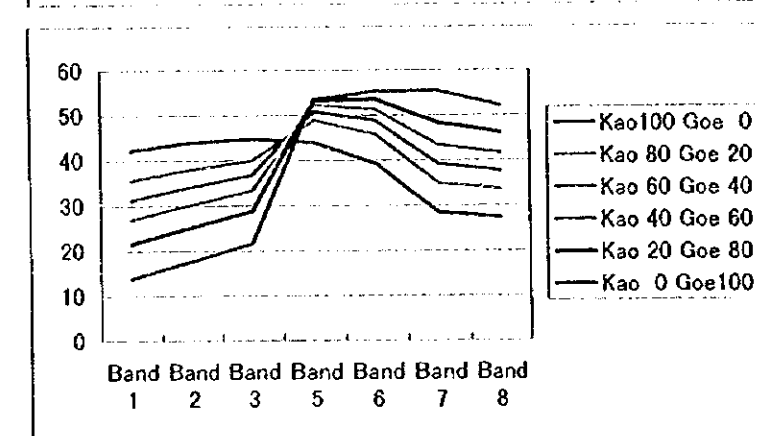
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Ser	40.6	41.0	40.7	43.1	41.9	37.3	38.2
Qtz	40.0	40.3	40.7	41.2	41.5	41.3	41.4
Kao	42.2	44.0	44.8	43.9	39.2	28.4	27.3
Gyp	52.4	52.8	52.7	35.7	15.5	13.2	11.2
Goe	13.9	17.8	21.7	53.6	55.4	55.5	52.3
Cal	40.2	40.4	40.5	41.8	42.9	38.9	25.2
Aln	36.6	50.5	55.5	54.4	24.6	17.3	22.4



セリサイト-褐鉄鉱混合系

Ser	Geo
100	0
80	20
60	40
40	60
20	80
0	100

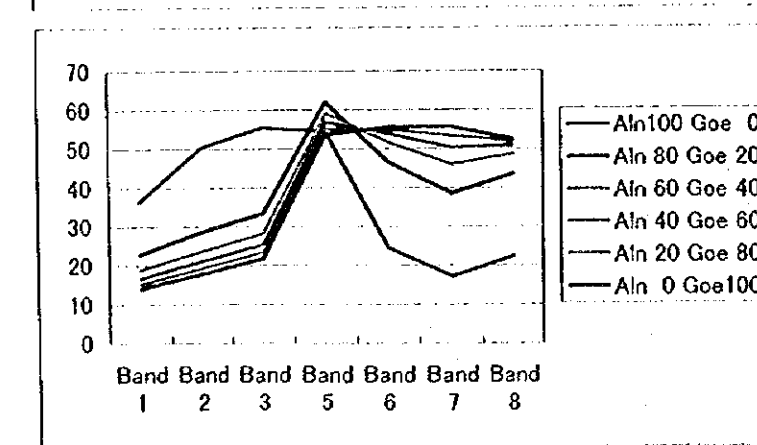
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Ser 100 Geo 0	40.6	41.0	40.7	43.1	41.9	37.3	38.2
Ser 80 Geo 20	33.5	35.6	37.2	46.7	46.6	43.3	43.9
Ser 60 Geo 40	29.7	32.3	34.6	48.5	48.8	46.3	46.4
Ser 40 Geo 60	25.8	28.9	31.8	50.1	50.8	49.0	48.4
Ser 20 Geo 80	21.0	24.6	28.0	51.8	52.9	51.9	50.4
Ser 0 Geo 100	13.9	17.8	21.7	53.6	55.4	55.5	52.3



カオリン-褐鉄鉱混合系

Kao	Goe
100	0
80	20
60	40
40	60
20	80
0	100

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Kao 100 Goe 0	42.2	44.0	44.8	43.9	39.2	28.4	27.3
Kao 80 Goe 20	35.5	38.0	40.0	48.9	45.7	34.9	33.6
Kao 60 Goe 40	31.2	34.2	36.8	50.8	48.8	39.1	37.7
Kao 40 Goe 60	26.9	30.3	33.4	52.3	51.3	43.4	41.7
Kao 20 Goe 80	21.6	25.3	28.9	53.4	53.6	48.4	46.3
Kao 0 Goe 100	13.9	17.8	21.7	53.6	55.4	55.5	52.3



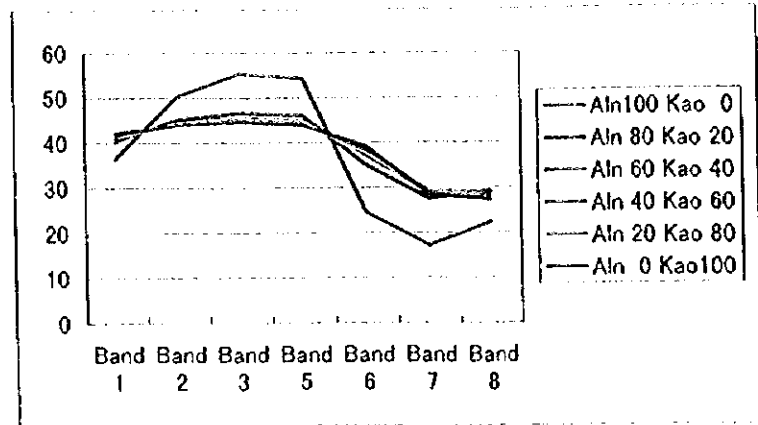
明礬石-褐鉄鉱混合系

Aln	Goe
100	0
80	20
60	40
40	60
20	80
0	100

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Aln 100 Goe 0	36.6	50.5	55.5	54.4	24.6	17.3	22.4
Aln 80 Goe 20	23.0	28.7	33.5	62.1	46.7	38.6	43.6
Aln 60 Goe 40	18.9	23.7	28.2	59.1	51.7	46.0	48.6
Aln 40 Goe 60	16.7	21.1	25.3	56.8	53.8	50.2	50.7
Aln 20 Goe 80	15.2	19.2	23.3	55.0	54.8	53.1	51.7
Aln 0 Goe 100	13.9	17.8	21.7	53.6	55.4	55.5	52.3

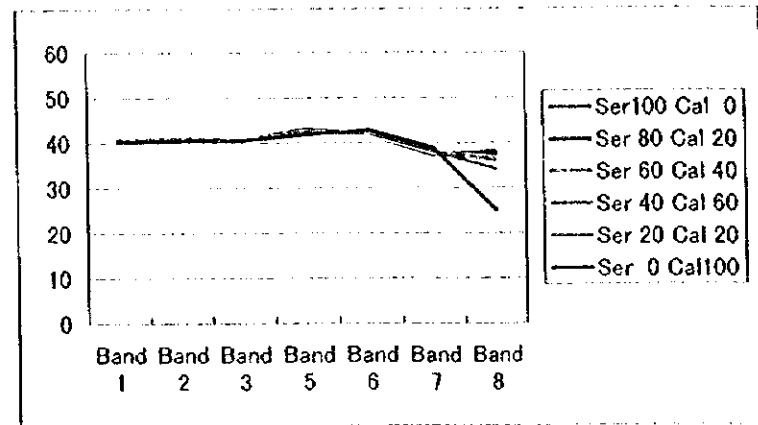
図 44 2 相混合系の反射スペクトルの変化-1

(エンドメンバー, セリサイト-褐鉄鉱, カオリナイト-褐鉄鉱, 明礬石-褐鉄鉱)



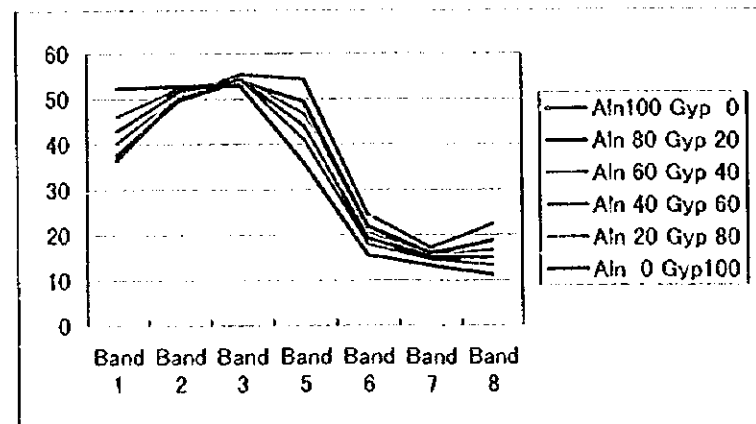
明礬石-カオリン混合系

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
100 0 0 0 0 0 0 Aln100 Kao 0	36.6	50.5	55.5	54.4	24.6	17.3	22.4
80 0 0 0 20 0 0 Aln 80 Kao 20	40.5	45.2	46.8	46.1	35.2	27.6	29.0
60 0 0 0 40 0 0 Aln 60 Kao 40	41.3	44.5	45.5	44.9	37.2	29.0	29.3
40 0 0 0 60 0 0 Aln 40 Kao 60	41.7	44.2	45.0	44.3	38.2	29.3	29.0
20 0 0 0 80 0 0 Aln 20 Kao 80	41.9	44.0	44.8	44.0	38.9	29.1	28.4
0 0 0 0 100 0 0 Aln 0 Kao100	42.2	44.0	44.8	43.9	39.2	28.4	27.3



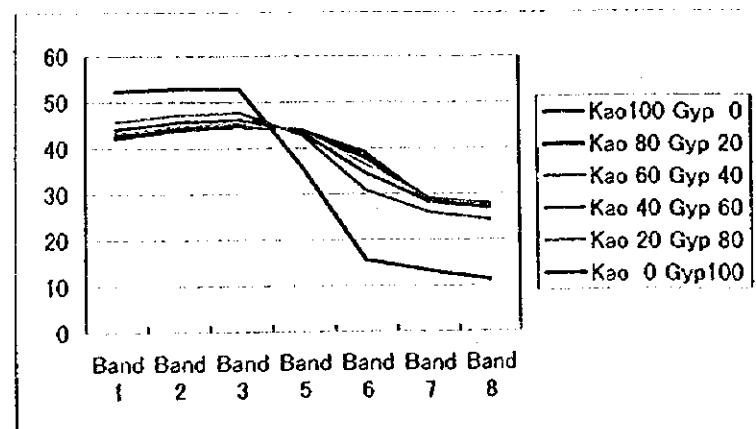
セリサイト-方解石混合系

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
0 0 0 0 0 0 100 Ser100 Cal 0	40.6	41.0	40.7	43.1	41.9	37.3	38.2
0 20 0 0 0 0 80 Ser 80 Cal 20	40.6	41.0	40.7	42.9	41.9	37.7	37.9
0 40 0 0 0 0 60 Ser 60 Cal 40	40.7	41.0	40.8	42.7	41.8	37.8	37.2
0 60 0 0 0 0 40 Ser 40 Cal 60	40.7	41.0	40.8	42.5	41.9	38.0	36.2
0 80 0 0 0 0 20 Ser 20 Cal 20	40.7	41.0	40.8	42.3	42.0	38.1	34.3
0 100 0 0 0 0 0 Ser 0 Cal100	40.2	40.4	40.5	41.8	42.9	38.9	25.2



明礬石-石膏混合系

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
100 0 0 0 0 0 0 Aln100 Gyp 0	36.6	50.5	55.5	54.4	24.6	17.3	22.4
80 0 0 20 0 0 0 Aln 80 Gyp 20	37.8	49.8	54.0	49.5	22.0	16.0	18.8
60 0 0 40 0 0 0 Aln 60 Gyp 40	40.3	50.8	54.3	46.7	20.5	15.5	16.7
40 0 0 60 0 0 0 Aln 40 Gyp 60	43.0	51.6	54.4	44.0	19.2	15.1	14.9
20 0 0 80 0 0 0 Aln 20 Gyp 80	46.2	52.3	54.2	40.9	17.7	14.5	13.3
0 0 0 100 0 0 0 Aln 0 Gyp100	52.4	52.8	52.7	35.7	15.5	13.2	11.2



明礬石-石膏混合系

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
0 0 0 0 100 0 0 Kao100 Gyp 0	42.2	44.0	44.8	43.9	39.2	28.4	27.3
0 0 0 20 80 0 0 Kao 80 Gyp 20	42.7	44.3	45.0	43.7	38.0	29.0	27.9
0 0 0 40 60 0 0 Kao 60 Gyp 40	43.2	44.8	45.4	43.5	36.5	28.9	27.7
0 0 0 60 40 0 0 Kao 40 Gyp 60	44.1	45.5	46.1	43.3	34.5	28.2	26.8
0 0 0 80 20 0 0 Kao 20 Gyp 80	45.7	47.1	47.6	42.6	30.7	25.9	24.2
0 0 0 100 0 0 0 Kao 0 Gyp100	52.4	52.8	52.7	35.7	15.5	13.2	11.2

図 45 2相混合系の反射スペクトルの変化-2 (明礬石-カオリン, セリサイト-方解石, 明礬石-石膏, カオリン-石膏)



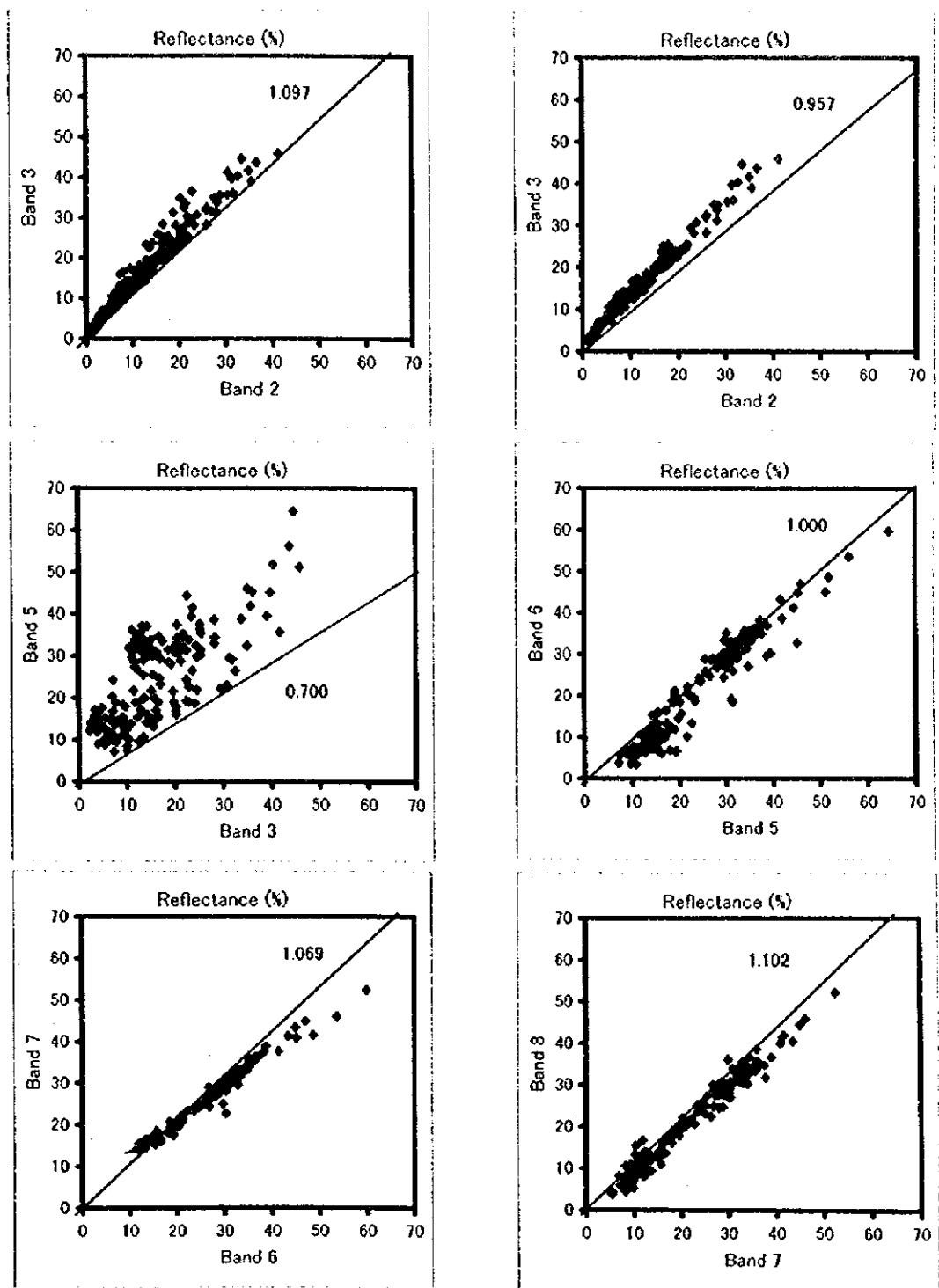


図 46 土壌・風化岩の 2 バンド間の反射率散布図



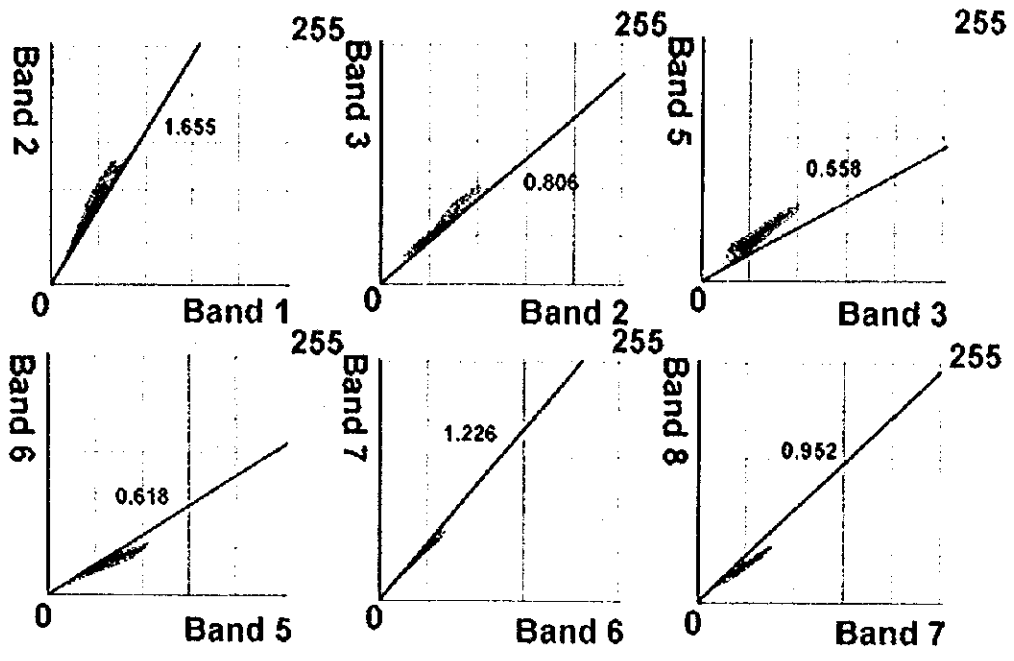


図 47 U 画像データによる 2 バンド間の観測輝度比

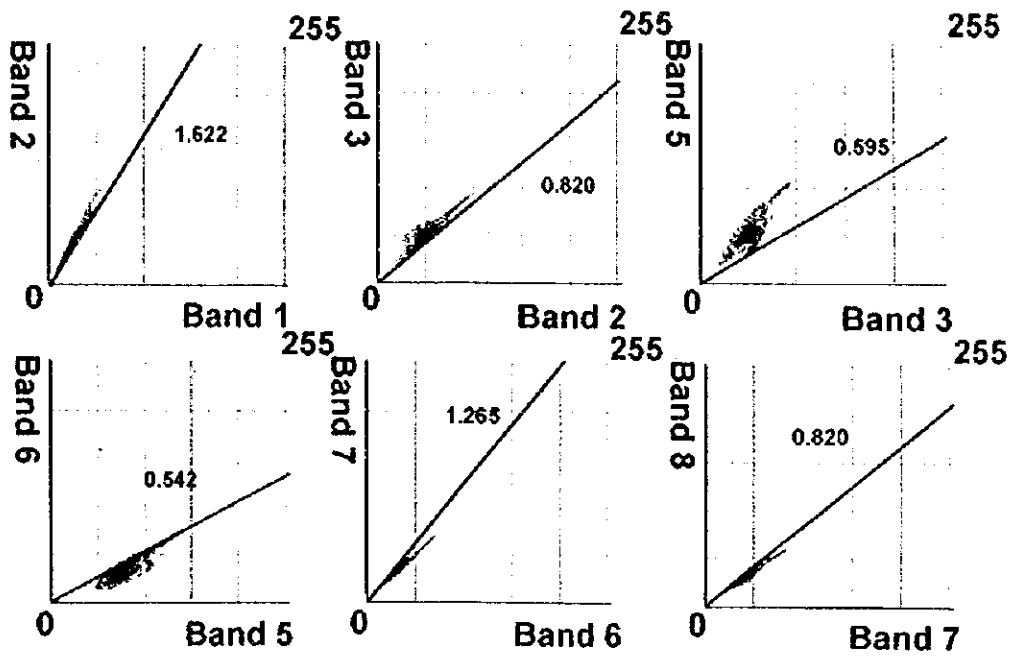


図 48 L 画像データによる 2 バンド間の観測輝度比





## 2.8.5 パターンマッチングによる変質鉱物半定量解析の手法

前項で求めた変換係数はバンド間輝度比の補正を行うためのものであり、絶対反射率への変換係数ではない。つまり、変換された輝度値はバンド 1 の輝度値を基準とした相対的な関係のみを示している。地形起伏によって地表面に対する入射光量が異なるため、同一物質であっても観測輝度値は異なる。したがって、画像輝度値へ係数を乗じて直接インデックスとの比較はできない。このような制約条件があるため、疑似反射強度を方向余弦へ変換することで疑似反射率への変換を行った。疑似反射率への変換は、

$$R\lambda_m = (I\lambda_m^2 / \sum (I\lambda_n^2))^{1/2} \quad (8-14)$$

$R\lambda_m$  : 波長(m)の疑似反射率

$I\lambda_m$  : 波長(m)の反射強度

で表される。

このように疑似反射率へ変換することで、2.8.2 項で作成した変質鉱物を混合させた計算疑似反射率と直接比較することができる。

ある画素の輝度値を疑似反射率へ変換し、これと変質鉱物の組合せから作成した反射スペクトルと逐次比較して判定を行った。両者の疑似反射率を比較し、バンドごとの誤差の自乗和が最小となるものを適合スペクトルとした。次に、この反射スペクトルを計算した変質鉱物含有量(%)をバイナリデータとして出力した。図 49A は Los Mogotes 付近の変質鉱物含有量マップ(変質鉱物含有量バイナリデータを加工したもの)である。本図では白い部分ほどその変質鉱物の含有量が高いことを示している。また、右下にはログレジデュアル値で分類した結果を比較のため示した。さらに、図 49B は明礬石を赤で、カオリナイトを青で、方解石とセリサイトを合算した含有量マップを緑で表現したマップである。Los Mogotes 付近は明礬石を主とし、南部はカオリナイトを主としていると判定されている。また、同図から、この変質帯の周囲には方解石あるいはセリサイトを主とする変質帯が広がっていることが理解できる。

ただし、この判定は、抽出された変質帯が選択した 7 種類の変質鉱物からのみ形成されているという仮説に基づいている。したがって、変質帯に非変質岩類が混入している場合や、それら以外の変質鉱物が卓越している場合には、正しい結果を示さない。あくまでも疑似反射率と合成した反射スペクトルとが最も一致する場合の変質鉱物組合せを表しているに過ぎない。

## 2.8.6 変質帯の鉱物分類図

2.8.5 項で述べた作業で作成した 7 種類の変質鉱物の含有量図だけでは、成分が多すぎるため変質帯の特徴がわかりにくい。そこで、変質鉱物の組合せと含有率から U 画像および L 画像について変質帯分類図を作成した(図 50, 51)。

この変質分類図の作成に際しては以下の条件を設定した。

### (1) 明礬石が卓越する地帯

明礬石およびカオリナイトの合計含有量が全体の 50 %を超え、かつ、カオリナイトよりも明礬石が多い場合。

### (2) カオリナイトが卓越する地帯

明礬石およびカオリナイトの合計含有量が全体の 50 %を超え、かつ、明礬石よりもカオリナイトが多い場合。

### (3) セリサイト/方解石>カオリナイト帯

セリサイト、方解石および石英の合計含有量が全体の 50 %を超え、かつ、カオリナイトあるいは明礬石の合計含有量が 20 %を超える場合。

### (4) 褐鉄鉱が卓越する地帯

褐鉄鉱の含有量が 50 %を超える場合。

### (5) セリサイトが卓越する地帯

(1)~(4)の条件以外。

図 49C は上述の判定条件に基づいて分類した変質帯分類図である。図 49B の明礬石、カオリナイト、方解石/セリサイトの含有量図と類似した変質帯分類図を作成することができる。この分類図では、明礬石が卓越する地帯は、Los Mogotes 付近の変質帯の北縁部に、カオリナイトが卓越する地帯は変質帯の南縁部を中心として広がっている。カオリナイトが卓越する地帯の周囲には、カオリナイトを含むセリサイト/方解石の卓越する地帯が広がり、さらに変質帯縁辺部にはセリサイト/方解石の卓越する地帯が分布している。また、Los Mogotes の南方あるいは北方に位置するやや小さな変質帯ではセリサイト/方解石の卓越する地帯および褐鉄鉱を含むセリサイト/方解石帯が判定されている。これら明礬石、カオリナイトおよびセリサイト/方解石の分布の違いを図 49B でも認めることができるが、RGB を用いた変質鉱物含有量マップでは 3 成分のみしか表現できないことが欠点である。

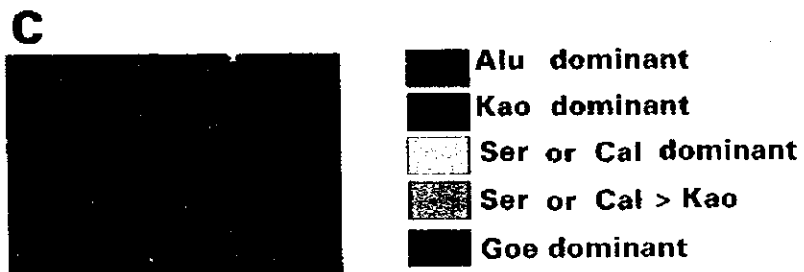
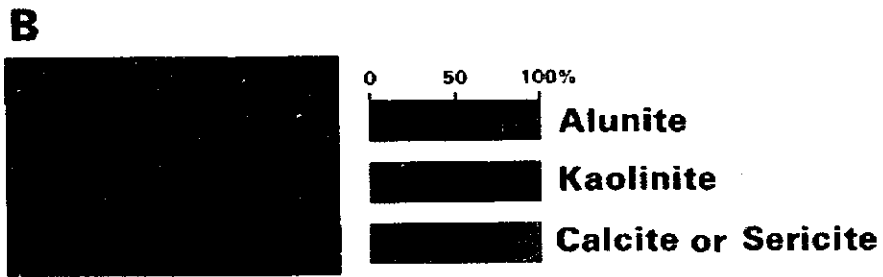
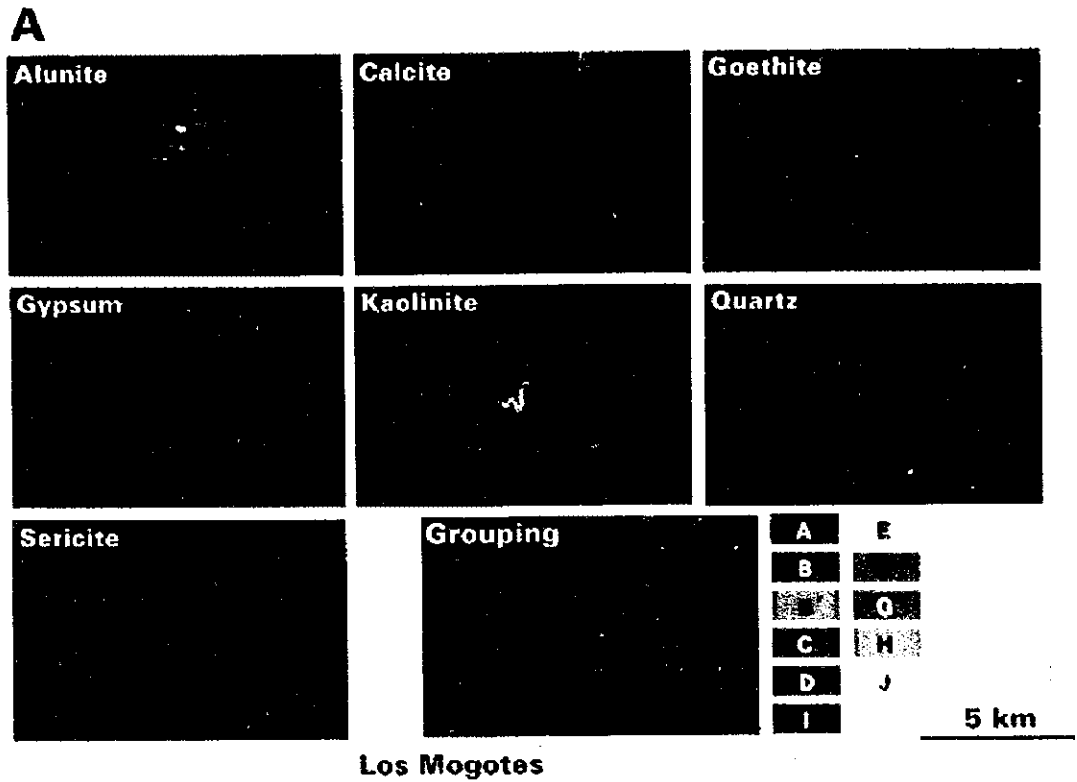
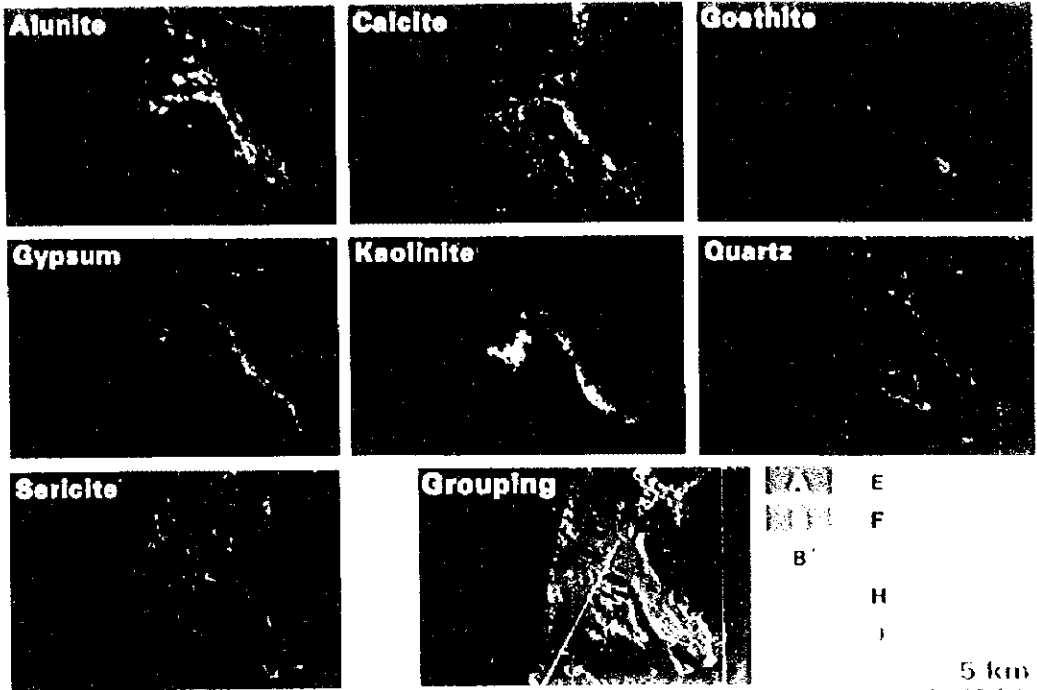


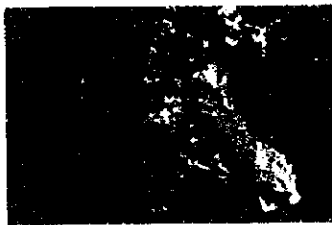
図 49 U 画像データの変質鉱物含有量マップ

**A**

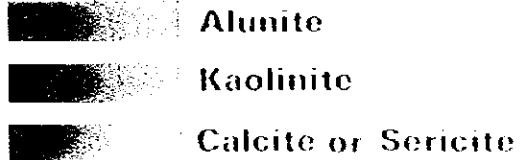


Los Mogotes

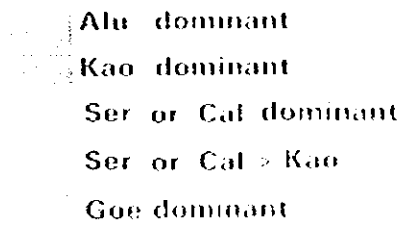
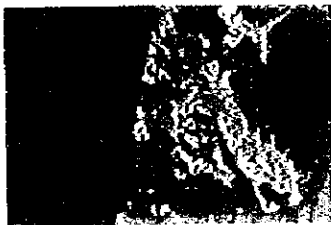
**B**



0 50 100



**C**





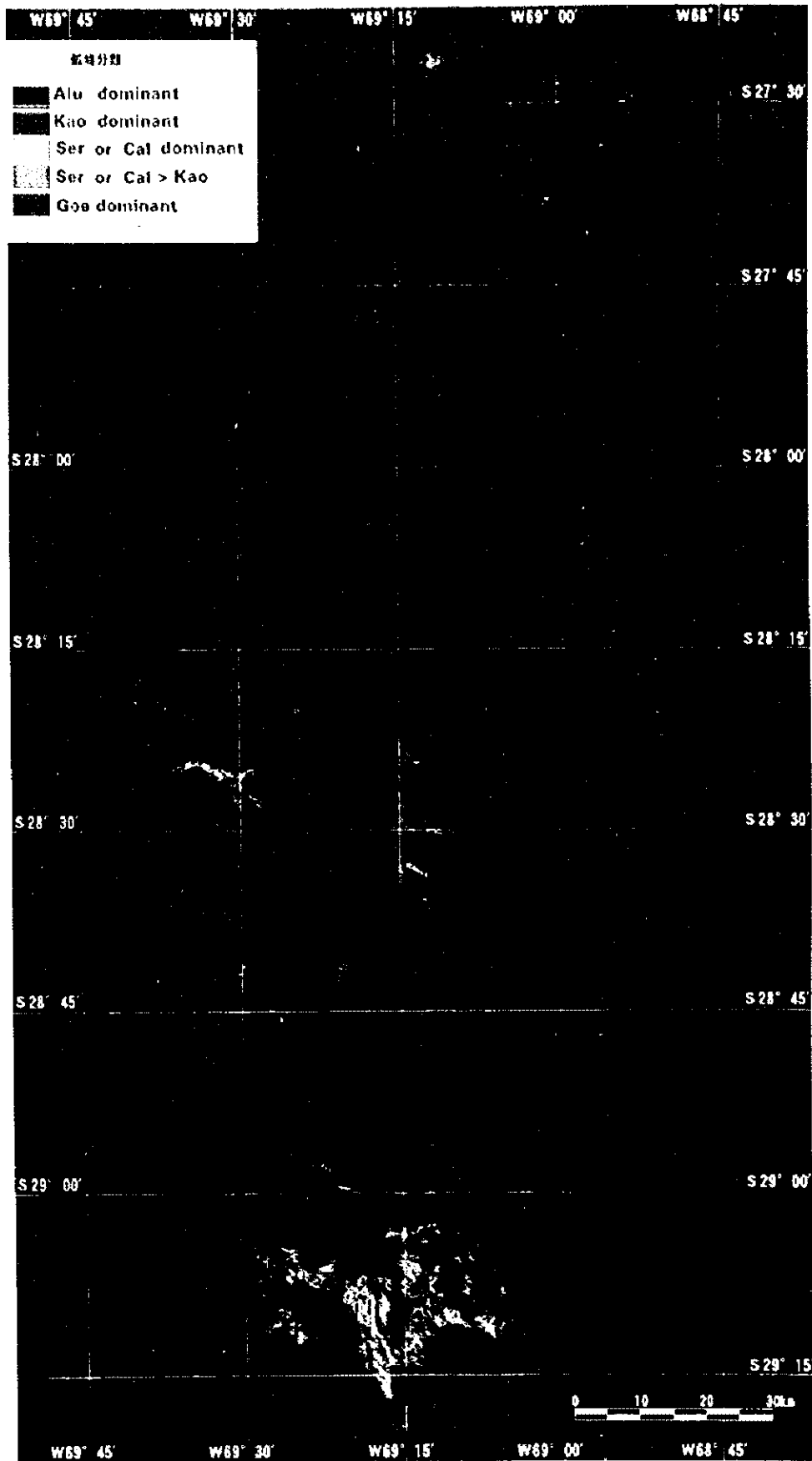
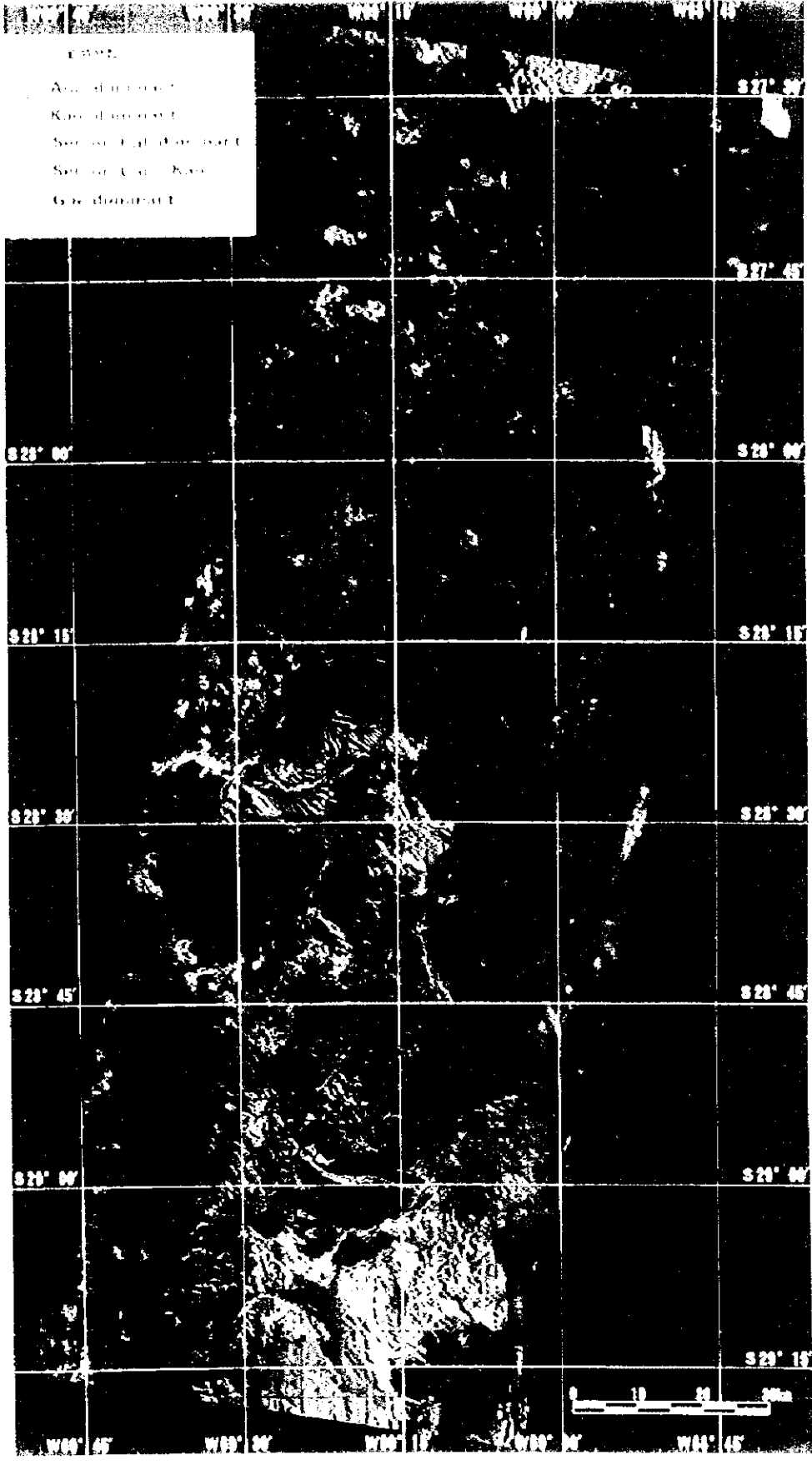


図 50 U 画像範囲の変質鉱物判定結果







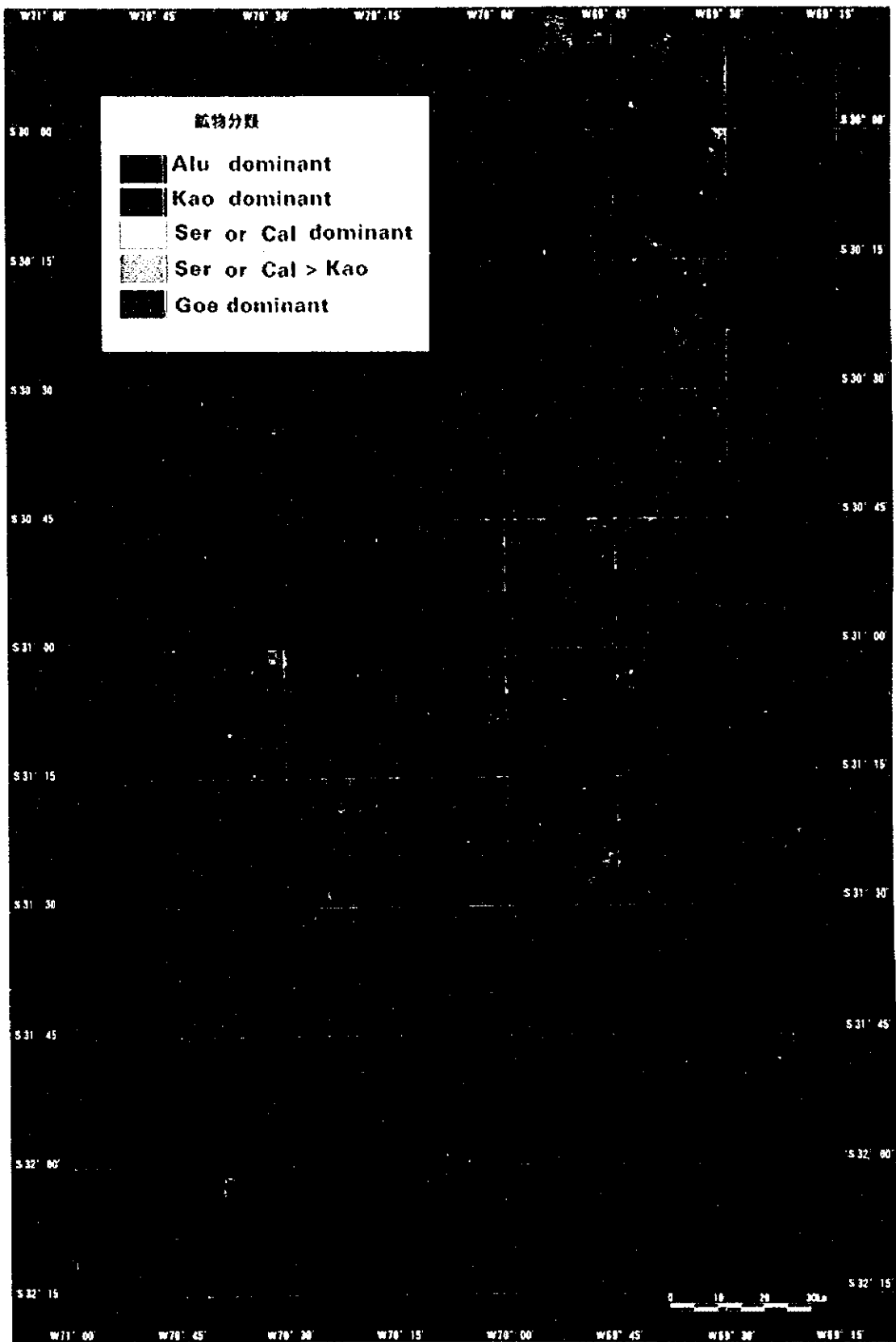
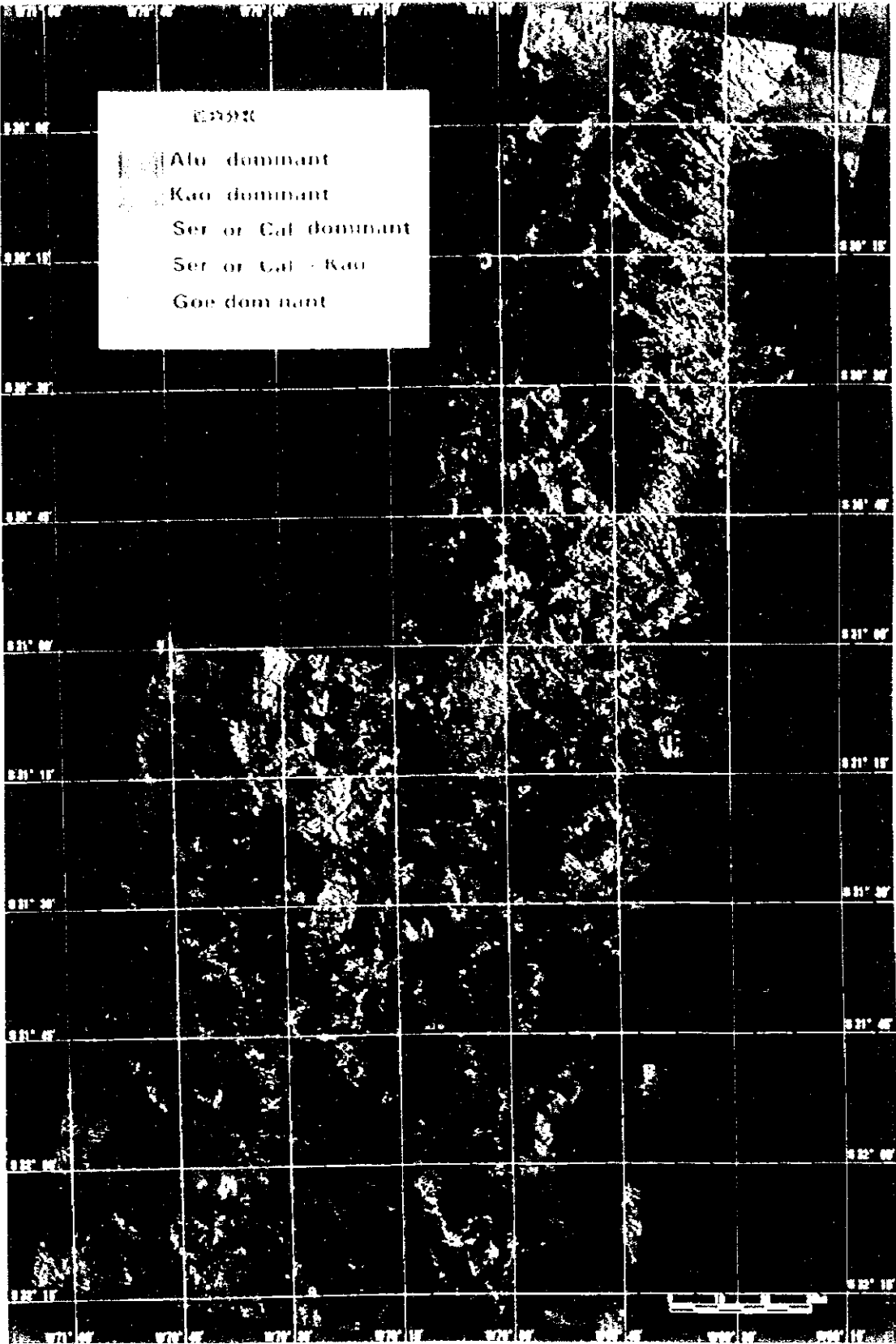
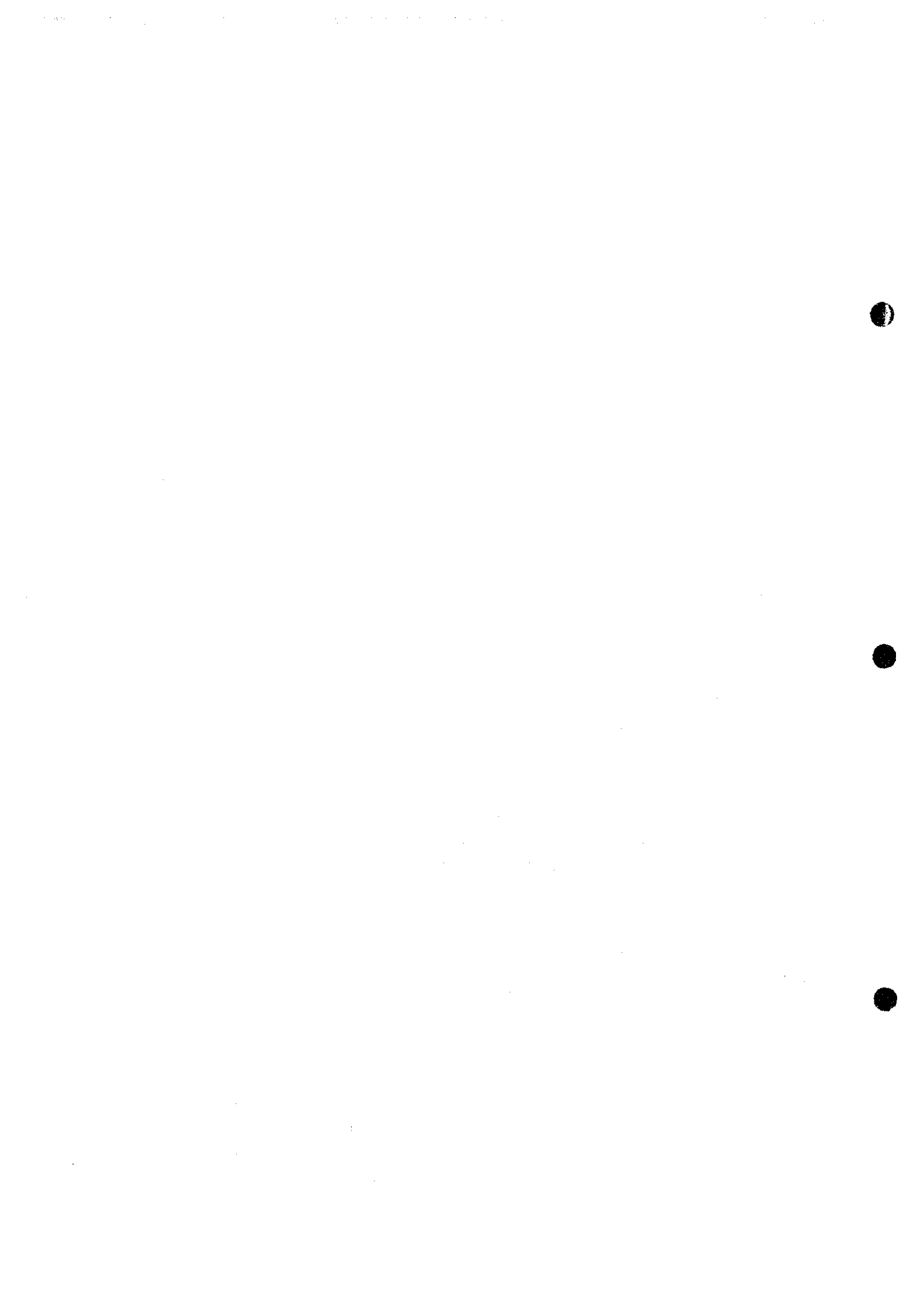


図 51 L 画像範囲の変質鉱物判定結果





## 2.8.7 ログレジデュアル値による変質帯分類図との対比

2.7 節ではログレジデュアル値に基づいて算出した疑似反射率のスペクトルパターンから変質帯を 11 個のグループに分類した。本節ではグループと変質鉱物含有量マップおよび変質鉱物分類図との比較と検討を行う。

図 49A の右下にログレジデュアル値(疑似反射率パターン)に注目して分類した変質帯分類図をしめす。図 49B と C とを比較すると、変質鉱物の含有量・組合せとグループとが一致しない場合があることがわかる。例えば、Los Mogotes 付近にみられる明礬石とカオリナイトが卓越する地帯はグループ A に概ね対応するが、両鉱物の分類はできていない。また、下流部でも図 49B と C では分布に差が認められるが、図 49A ではグループ B として一括されている。さらに、図 49B と C では変質帯構成する変質鉱物組合せが中心から、

明礬石、カオリナイト→セリサイト/方解石+カオリナイト→セリサイト/方解石

のように配列しており、グループがある程度まとまって分布する。これに対し、図 49A ではこのような配列は認められず、かつ、グループの集中度も前者に比べてまとまりがない。

これらのことから、輝度値を疑似反射率に適切な状態に変換できさえすれば、変質鉱物の半定量解析の手法が有効であるといえる。

## 2.8.8 鉱物判定結果の信頼性

鉱物判定では各バンドでのサンプル疑似反射率(方向余弦値)と画像の疑似反射率(方向余弦値)を比較し、両者の差の 2 乗和が最も小さくなるものをその画素の鉱物判定結果とした。この鉱物判定結果の信頼性をチェックするために、画像データと疑似反射率の誤差が小さい上位 10 個の変質鉱物組合せについて、どの程度のバリエーションがあるのかを検討した。つまり、上位 10 個の鉱物組合せが、様々な変質鉱物組合せから構成され、これらの誤差が極めて接近しているものであるとする。この場合には、画像輝度値のわずかな差によって鉱物判定結果が大きく異なることを意味し、判定結果を信頼することはできない。逆に、誤差の差が大きな場合や、誤差がわずかな差であっても鉱物組合せが類似したものであれば、判定結果にある程度の信頼性をおくことができる。

図 52 に明礬石が卓越する地帯と判断された画素の疑似反射率およびこれと類似する上位 10 個の変質鉱物組合せの疑似反射率を示す。上位 10 個と画素の疑似反射率パターンは完全には一致しないものの、ほぼ平行したパターンとなっている。また、誤差の差はわずかであるものの、判定された結果は明礬石、カオリナイトの含有量に差があるものの、そのほかの変質鉱物の含有量に大きな変動がないことから、画像輝度値に誤差を含んでいたとしても判定結果に大きな差がないことを示している。図 53 と 54 にカオリナイトが

卓越する地帯およびセリサイト/方解石が卓越する地帯として判定された両素の上位 10 個の判定結果を示す。いずれの場合でも誤差は上位 10 個の間で 0.03 程度のごく小さなものであるが、鉱物組合せに大きな変動はなく、判定結果にはある程度の信頼性をおける。図 55 に 2.8.6 項で述べた(1)~(8)の 8 つのカテゴリーに分類された両素値の疑似反射率を示す。バンド 5~8 において、反射率および反射率パターンに明瞭な差が生じていることがわかる。以上のことから、疑似反射率への変換が適切であり、インデックス作成時の変質鉱物組合せが適切であれば、JERS-1 OPS を用いた鉱物判定にはある程度の実用性があるといえる。

なお、変質鉱物インデックス作成に際しては、7 種類の変質鉱物を 10 %ごとに混合させて疑似反射率を作成した。この際に、変質鉱物形成時の生成条件から変質鉱物組合せを現実的なものに制限する方法もあるが、今回の解析が JERS-1 データへの初めての応用例であることから、事前の人為的操作を排除するため、変質鉱物の混合を機械的なものとした。

Aln Richと判定された画素の疑似反射率と反射率辞書による検索結果

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Dn値	59	102	89	108	58	60	51
最小値	14	14	5	14	9	16	18
疑似反射率変換	1.000	0.663	0.787	0.987	1.598	1.394	1.685
疑似反射率	24.91	32.28	36.59	51.36	43.38	33.96	36.40

							Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	誤差
Aln	Cal	Goe	Gyp	Kao	Qtz	Ser	24.91	32.28	36.59	51.36	43.38	33.96	36.40	
40	0	20	30	10	0	0	30.29	34.39	37.76	55.09	44.62	38.06	37.86	1.19
50	0	20	20	10	0	0	29.97	34.15	37.55	55.12	45.09	38.12	38.64	1.19
30	0	20	40	10	0	0	30.60	34.61	37.97	55.03	44.16	38.02	37.13	1.20
30	10	20	30	10	0	0	30.14	34.10	37.43	54.64	45.11	38.82	37.88	1.20
20	10	20	40	10	0	0	30.47	34.33	37.63	54.60	44.64	38.78	37.13	1.21
40	10	20	20	10	0	0	29.83	33.87	37.20	54.67	45.61	38.86	38.66	1.21
60	0	20	10	10	0	0	29.65	33.92	37.33	55.14	45.59	38.19	39.47	1.21
40	30	10	10	0	10	0	28.36	33.32	37.26	57.92	43.89	37.63	37.90	1.22
20	40	10	20	0	10	0	28.83	33.28	37.02	56.77	43.96	39.19	36.30	1.22
40	20	10	10	0	20	0	29.05	33.82	37.56	56.93	43.82	37.96	38.86	1.23

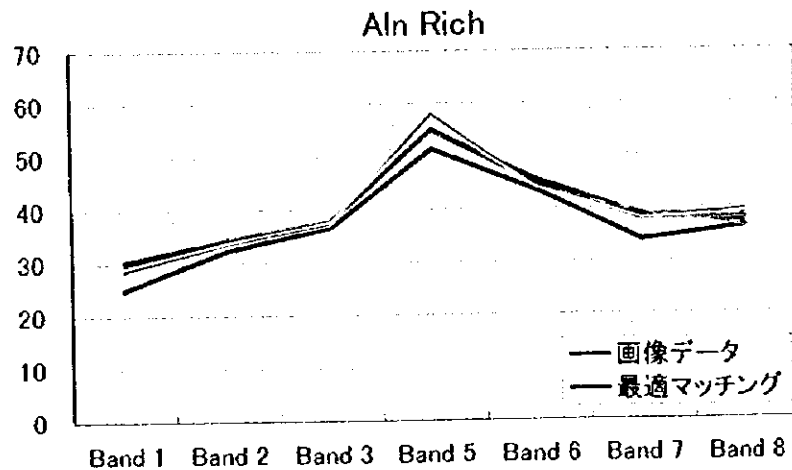


図 52 明礬石が卓越する地帯の判定結果



Kao Richと判定された画素の疑似反射率と反射率辞書による検索結果

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Dn値	80	108	89	110	62	63	58
最小値	14	14	5	14	9	16	18
疑似反射率変換	1.000	0.663	0.787	0.987	1.598	1.394	1.685
疑似反射率	34.03	32.12	34.09	48.86	43.70	33.79	34.77

							Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	誤差	
	Aln	Cal	Goe	Gyp	Kao	Qtz	Ser	34.03	32.12	34.09	48.86	43.70	33.79	34.77	
0	0	30	0	70	0	0	0	33.32	36.07	38.38	49.95	47.40	37.07	35.70	1.12
0	0	30	10	60	0	0	0	33.13	35.93	38.30	50.18	47.03	37.60	36.17	1.13
10	0	30	0	60	0	0	0	32.96	35.82	38.19	50.16	47.35	37.59	36.45	1.14
10	20	20	10	40	0	0	0	33.95	36.73	38.98	49.75	45.91	37.36	35.97	1.15
0	20	20	30	30	0	0	0	33.51	36.41	38.84	50.55	45.24	37.97	35.93	1.15
0	0	30	20	50	0	0	0	32.79	35.69	38.15	50.55	46.74	38.16	36.61	1.15
0	20	20	20	40	0	0	0	34.16	36.87	39.11	49.75	45.53	37.38	35.59	1.15
20	20	20	0	40	0	0	0	33.74	36.57	38.84	49.75	46.31	37.37	36.36	1.16
0	30	20	10	40	0	0	0	33.83	36.51	38.73	49.49	46.32	37.78	35.94	1.16
20	10	20	10	40	0	0	0	34.06	36.92	39.21	50.00	45.51	36.99	35.99	1.16

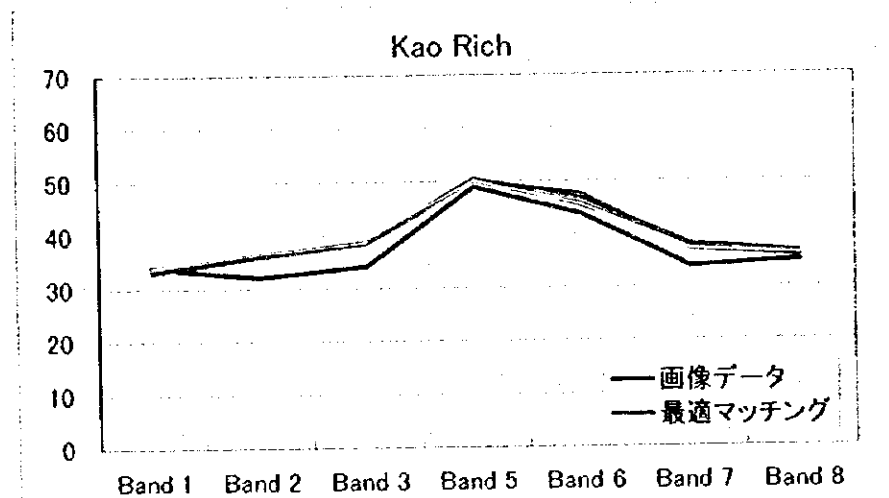


図 53 カオリナイトが卓越する地帯の判定結果





Ser Richと判定された画素の疑似反射率と反射率辞書による検索結果

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Dn値	76	98	81	92	60	69	59
最小値	14	14	5	14	9	16	18
疑似反射率変換	1.000	0.663	0.787	0.987	1.598	1.394	1.685
疑似反射率	33.96	30.49	32.76	42.17	44.67	40.47	37.86

							Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	誤差
Aln	Cal	Goe	Gyp	Kao	Qtz	Ser	33.96	30.49	32.76	42.17	44.67	40.47	37.86	
0	70	10	0	0	0	20	32.76	34.95	36.75	46.71	46.96	44.37	41.17	1.35
0	60	10	0	0	0	30	33.94	35.90	37.47	46.15	46.24	43.45	41.37	1.36
0	60	10	0	10	10	10	33.65	35.97	37.87	47.65	46.84	40.93	38.24	1.37
0	70	10	0	10	0	10	33.55	35.90	37.82	47.75	46.94	40.89	37.89	1.37
0	50	10	0	10	20	10	33.73	36.04	37.91	47.56	46.76	40.96	38.61	1.37
0	60	10	0	0	10	20	32.85	35.03	36.80	46.63	46.87	44.37	41.60	1.37
0	40	10	0	10	30	10	33.82	36.09	37.95	47.48	46.68	40.99	38.98	1.37
0	30	10	0	10	40	10	33.90	36.16	37.99	47.39	46.60	41.02	39.35	1.38
0	60	10	10	0	0	20	33.61	35.87	37.71	47.54	45.42	42.87	39.95	1.38
0	30	10	0	10	50	0	32.44	35.04	37.24	48.46	47.59	41.49	39.10	1.38

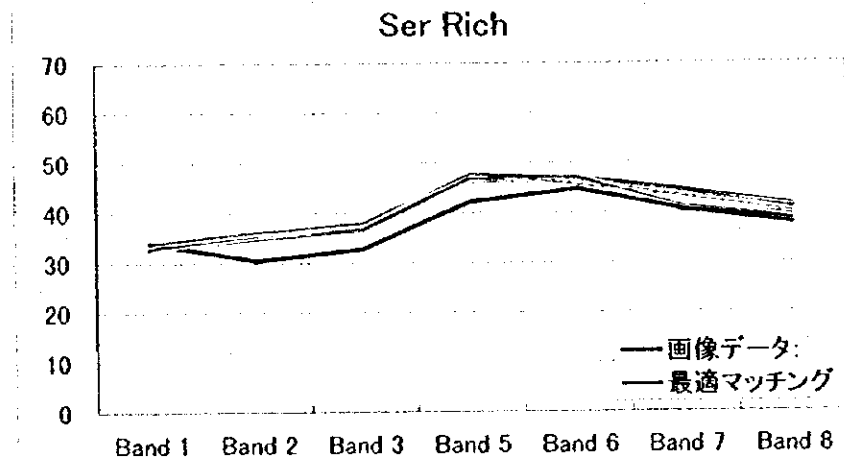


図 54 セリサイト/方解石が卓越する地帯の判定結果



鉱物分類別の画像の疑似反射率(方向余弦値に変換)比較

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Aln	Cal	Goe	Gyp	Kao	Qtz	Ser
Aln Rich	24.91	32.28	36.59	51.36	43.38	33.96	36.40	40	0	20	30	10	0	0
Aln Rich	30.92	33.45	35.78	51.61	41.44	31.07	36.03	70	10	10	0	10	0	0
Kao Rich	34.03	32.12	34.09	48.86	43.70	33.79	34.77	0	0	30	0	70	0	0
Kao Rich	34.94	32.60	34.37	48.55	42.64	34.61	34.10	0	10	20	40	30	0	0
Ser>Goe	28.68	28.51	31.15	45.87	47.70	40.79	36.75	0	70	20	0	10	0	0
Ser>Aln,Kao	41.31	38.83	37.15	44.52	39.77	29.39	31.27	0	0	0	0	40	0	60
Ser >Rich	33.96	30.49	32.76	42.17	44.67	40.47	37.86	0	70	10	0	0	0	20
Goe>Aln,Kao	27.98	29.81	32.81	46.03	46.49	38.26	38.85	0	40	30	0	30	0	0

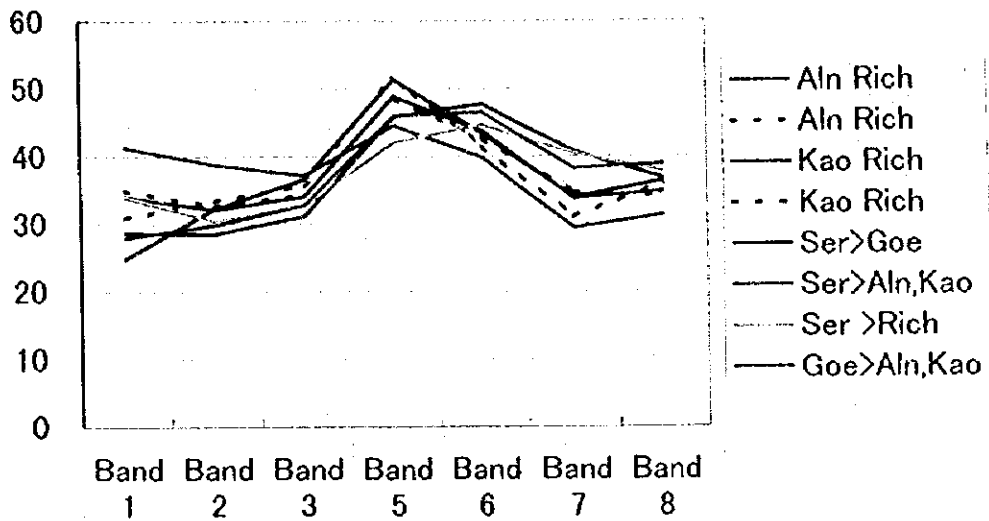


図 55 各カテゴリ別の疑似反射率比較



## 2.9 解析のまとめ

### 2.9.1 システム補正と放射量補正

対象地域について JERS-1 OPS 画像 13 シーンを解析対象の画像として選定した。実際には、これらのうちの冬季に観測された 4 シーンでは積雪の影響が大きく、変質帯の詳細な解析が不可能であったため残りの 9 シーンについて解析を実施した。

システム補正としては JERS-1 OPS データの特徴である短波長赤外域でのセンサ応答遅れによる影響の軽減や、可視近赤外域と短波長赤外域画像のバンド間レジストレーションを行った。

実際の解析に使用した 9 シーンの観測日は異なっており、同一の物質であっても同じ輝度値として表現されておらず、そのままでは解析結果を同一の基準で評価することができない。このため、衛星の姿勢情報と画像重複部の情報を利用して、入射光量・方向性反射率・大気の透過度・パスラジアンズおよびセンサ感度補正をシーンごとに行った。しかしながら、使用した画像には重複部をもたない地域があるため、大気の透過度については対象地域の北部と南部の画像群の間で補正を行うことができなかった。

### 2.9.2 シームレスモザイクと幾何変換

輝度補正を行った 9 シーンについて画像重複部から 2 画像の対応関係を算出した。次に、最小 2 乗法によって画像の幾何変換を行った。なお、画像重複部には、視差による影響のため画像が一致しない地域があり、これらの地域を避けて画像を接合するシームレスモザイクの手法を用いた。この手法の特徴は画像接合部での視差によるずれを解消できるほか、地表被覆物の変化した地域を避けて画像縫合ができる点にある。この結果、画像縫合部には画像のずれがなく、色調が不自然ではない良好なモザイク画像を作成することができた。なお、モザイク画像は北部の U 画像(3 シーン)と南部の L 画像(6 シーン)の 2 つに分かれている。この理由は両画像の間に画像重複部がないことによる。

次に、両モザイク画像について、地形図から GCP を選定し、UTM 座標系へ幾何変換を行った。この時の投影誤差は約 400 m であった。この投影誤差の原因は使用した地形図の精度と画像観測時の視差によるものであり、現状ではこの程度の投影誤差が発生することはやむを得ない。なお、空間分解能は 18m/1 画素とし、オリジナル画像の品質を保持させた。以降の解析作業ではすべてこの空間分解能を用いている。このため、U 画像では 7 バンドで合計 500 MByte、L 画像では合計約 1 Gbyte という大容量のデータセットとなった。

### 2.9.3 スペクトル解析画像の作成

本解析の目的は、変質帯の詳細な分類であり、解析のためにはフォールスカラー画像を作成したほか、各作業の目的に応じて比演算処理、ログレジデュアル処理および疑似反射率変換処理を行った。

フォールスカラー画像では岩相分類に適した  $BGR = 358$ 、比演算では変質帯の抽出に適した  $BGR = 5/6, 5/7, 5/8$  の組合せからなる画像を作成した。また、ログレジデュアル処理では全バンドを使用した。これら3種類の画像を作成する際には、いずれも積雪による影響をなくするために、事前に露岩地帯のみを抽出したマスク画像を作成して、係数などを算出した。

### 2.9.4 変質帯の抽出と変質帯強調比演算

変質帯の解析に先立ち、輝度値変換画像、フォールスカラー画像および比演算処理画像を用いて変質帯の抽出を行った。変質帯抽出のために使用した教師は、第1年次の解析で実施した LANDSAT TM による変質帯判読結果から選定された。なお、変質帯の抽出では閾値分解法を応用し、変質帯をもれなく抽出するために閾値をやや低く設定した。その結果、LANDSAT TM 画像から変質帯としてヴィジュアル判読された部分をほぼ完全に抽出することができた。その反面、変質帯の下流側にある崖錐地帯や沢沿いの地帯も変質帯として抽出された。

抽出された変質帯をマスク画像として保存し、それらの領域について分類や変質鉱物の同定を行った。変質帯の分類に先立ち、変質帯を構成する変質鉱物の差を明確にするため、変質帯として抽出される領域のみのデータを用いて変質帯強調比演算処理画像 ( $BGR = 5/6, 5/7, 5/8$ ) を作成し、変質帯をいくつかの特徴的な色調で表現した。この画像では、酸性変質作用で生成する明礬石やカオリンは明度・彩度の高い色調で表現することができた。また、中性～酸性変質作用で生成するセリサイトなどは明度・彩度が低い色調で表現された。さらに、変質帯の下流側にある崖錐部や沢沿いの地帯では非変質岩類が混入することによって明度・彩度が低下することが期待された。これらの作業結果を総合して、大局的な変質鉱物の推定や変質帯と崖錐部の判別を行うことができた。

上述した変質帯強調比演算処理画像を検討した結果、抽出された変質帯は大きく3つのグループに分類された。1つはチリとアルゼンティンの国境付近に分布する変質帯候補地であり、彩度・明度共に高い色調で表現され、酸性変質作用で生成した明礬石、カオリナイトあるいは石膏を主とする変質帯であると推定された。2つ目は国境東方の古生界が露出する地帯に広く分布する変質帯候補地である。それらの多くは暗赤色で表現されており、酸性～中性変質作用で生成するセリサイトを主とする変質帯とその崖錐部であると推定された。3つ目はチリ領土内の南部に露出する白亜紀～第三紀の火山岩類中に分布する変質帯候補地である。これらの変質帯候補地はほかの地帯では認められない色調を呈し、火山

岩中に不定型な外形を有することから、非変質の火山岩類あるいはごく弱い変質作用を受けた火山岩類を抽出した可能性が高いと判断された。

ただし、ある特定の変質鉱物が卓越する場合には、この変質鉱物を基準として色調が表現されるため、比演算画像の色調による推定には危険が伴う。このため、分類では疑似反射率に基づいて分類することが望ましく、以下に述べるように、最尤法による分類とパターンマッチングによる変質鉱物の分類を行った。

## 2.9.5 変質帯の分類

強調比演算処理画像で表現された色調から変質帯をいくつかに分類できることが明らかになった。したがって、まず、教師を設定せずに分類できるクラスター分析によって強調比演算処理画像を作成し、ログレジデュアル値から変質帯の分類を行った。しかしながら、クラスター分類はノイズや少数の特異値による影響に弱く、分類の対象となる大多数のデータが同一のクラスターに含まれてしまう結果となった。このため、ノイズや特異値に比較的強い最尤法とパターンマッチングを組合せて変質帯の分類を試みた。

最尤法では既知の教師が必要となるが、本解析では教師となる領域について十分な情報が得られていないので、強調比演算処理で現れる色調を教師とした。これらを教師とした分類を行い、出現数が0.1%未満の教師をノイズとして除去(約2%の領域)した結果、色調から77個のクラスに分類することができた。次に、分類結果に疑似反射率を反映させるため、ログレジデュアル値を用いて77個のクラスを11個のグループへクラスター分析を用いて統合した。それら11個のグループのログレジデュアル値と画素のログレジデュアル値を逐次比較し、最もパターンが類似するグループへ変質帯を分類した。

各グループのログレジデュアル値を検討した結果、それらのグループは大きく2つに分類されることが判明した。1つはバンド7に極小の吸収を示すものであり、もう1つは長波長側で反射率が順次低下するものである。これらの疑似反射率スペクトルパターンと変質鉱物の反射スペクトルパターンとは完全に一致するものではないが、それらの特徴から、前者は明礬石およびカオリナイトを主とする酸性変質帯であり、後者はセリサイトを主としカオリナイトを含む酸性～中性の変質帯と判断された。これら両者の分布位置は強調比演算処理で現れた色調の分類結果と調和的であった。

本解析の分類では疑似反射率としてログレジデュアル値を用いた。しかしながら、変質帯で得られた疑似反射率はいずれのグループもバンド3に吸収をもつパターンとなった。このようなパターンは風化岩や変質鉱物には認められるものではなく、少なくとも対象地域ではログレジデュアル値が疑似反射率に近似できるものではないことが明らかとなった。以上のことから、ログレジデュアル値を用いた反射スペクトルパターンによる変質鉱物の推定には危険が伴うことが理解できた。さらに、このログレジデュアル値のパターンから変質鉱物の組合せを推定することや、量比を推定することは現状として不可能に近い作業であることが明らかになった。



## 2.9.6 パターンマッチングによる鉱物推定

2 種類の変質鉱物を混合した場合の反射スペクトルパターンの変化は、量比に対して非線形に変化する。特に、明礬石の反射スペクトルパターンは、少量の褐鉄鉱やカオリナイトを混合することにより混合した変質鉱物の反射スペクトルパターンに近いものへ変化する。したがって、変質鉱物の反射スペクトルをエンドメンバーとし、これらエンドメンバーの線形結合によってサンプル(画像データ)の鉱物推定や定量解析を行うことは不可能である。この鉱物量比と反射スペクトルとの関係を明確に説明するのが「等粒子モデル」であり、今回の解析ではこの理論に基づいて変質鉱物の反射スペクトルを合成した。エンドメンバーは7種類(明礬石、カオリナイト、石膏、方解石、セリサイト、石英および褐鉄鉱)であり、これらの各鉱物を10%きざみで変化させ、合計で約6,000件の変質鉱物反射スペクトルのデータベースを作成した。

次に、作成したデータベースを活用するためには、画像データを疑似反射率に変換する必要がある、この疑似反射率への変換精度が変質鉱物推定の信頼性に直結する。これまでに疑似反射率に変換する普遍的な手法は確立されておらず、今回の解析では露岩地帯の風化岩がもつ反射スペクトルの普遍性に注目し、それから算出されるソイルラインを応用した疑似反射率変換の手法を使用した。この手法によって疑似反射率変換係数を算出したが、この新手法はまだ普遍的なものといえず客観性に乏しい。これらのことはケーススタディを増やすことで解決できる可能性があり、今後、ほかの地域で検討する必要がある。

本解析では、疑似反射率変換係数が正しく変換されたものとして変質鉱物の同定と半定量解析を実施した。解析手法は、変質鉱物の反射スペクトルのデータベースと画像の疑似反射率とをパターンマッチングさせ、最も良く一致するパターンをその画素の同定結果とするものである。なお、適用地帯を変質帯として抽出された部分に限定し、画素ごとに7種類の変質鉱物の含有量を算出することができた。次に、変質鉱物の含有量についてその組み合わせと量比から5つの変質帯グループ(明礬石が卓越する地帯、カオリナイトが卓越する地帯、セリサイト+カオリナイト帯、セリサイトが卓越する地帯、および褐鉄鉱が卓越する地帯)に再分類した。

このような分類を行った結果、チリとアルゼンティンの国境付近に分布する変質帯はカオリナイトあるいは明礬石が卓越する酸性変質帯であり、国境東方の古生代の堆積岩類中に分布する変質帯の多くは、セリサイト+カオリナイト帯あるいはセリサイトが卓越する地帯からなることが明らかとなった。

次に、パターンマッチングによる同定作業の信頼性を確認するため、最も良く一致したパターンを含めた上位10個をデータベースから検索した。この結果、上位10個のパターン一致度の差はごくわずかであるが、その組合せはほぼ同じであり、また量比の変化は小さなものであることが明らかとなった。つまり、最も良く一致したデータに対する信頼性は低い、選択される変質鉱物の組合せや量比に大きな変化がなく、解析結果を変質帯の分類に用いる場合には大きな影響を及ぼさないことが判明した。

## 2.10 結 論

パターンマッチングによる鉱物推定の手法を用い、全画像データから変質鉱物を推定することは原理的には可能である。ただし、精度の高い解析をするには、航空機によって観測されるようなより詳細な多バンドのスペクトル情報からなるデータを使用し、かつ、多数のエンドメンバーによる膨大な反射スペクトルのデータベースを構築する必要があり、これを実行させるには膨大な量の時間を要することになる。したがって、現状としては地域を限定し、その範囲内に現れる変質鉱物の種類を推定した上で解析を行う必要がある。このため、抽出した(変質帯)地域に別な種類の変質鉱物が卓越する場合や、非変質鉱物が混在する場合には判定結果が正しいものにならない。このことは、明礬石あるいはカオリナイトが卓越する変質帯の崖錐部あるいは周辺部がセリサイト+カオリナイトあるいはセリサイトと判別されることから明らかである。この点に関してはフォールスカラー画像を使用したビジュアル判読によって現地性のものであるか異地性のものであるかを判断する必要がある。また、等粒子モデルに基づいて合成した反射スペクトルデータベースでは変質鉱物の粒子サイズを仮定している。このため、粒子サイズが仮定したものと大きく異なっていれば、同定される結果は必然的に異なる。ただし、この場合には、主として量比が異なると同定され、変質鉱物の組合せが大きく変化することはないと推定される。

このように等粒子モデルによるパターンマッチングによって変質鉱物を推定する際には、いくつかの前提条件を考慮した上で推定しなければならない。

今回の解析結果の妥当性を対象地域の全変質帯について詳細に検証することは困難であるが、主要な変質帯の評価を目的として、本解析後に行った現地調査では、明礬石とカオリナイトを主体とする酸性変質帯と、セリサイト系変質を主体とする中性変質帯の2種に大別した場合、ある程度の実用性があることを認めている。したがって、疑似反射率への変換法について経験に基づく向上の余地はあるものの、現時点においても変質帯の分類には本解析手法が有効なものであると結論づけられる。

2.0  $\mu\text{m}$  帯に3つのバンドを有する JERS-1 OPS データは変質帯の分類や変質鉱物の同定に有効な唯一の衛星画像情報である。しかしながら、JERS-1 OPS データに内在するデータ観測上のノイズによって、これまで有効利用されてきたとは言い難い。今回の解析作業では、ノイズの問題、ダイナミックレンジが狭いこと、必要な波長帯でのバンド数が十分でないことなどに起因する各種の障害があることを前提としながらも、画像がもつ情報を低く評価することなく最大限活用していくことで、変質帯の詳細な解析を行うことができた意義は大きい。