

平成10年度 国際労働事務官研修報告書

第5号

国際労働事務官研修報告書

第5号

平成11年2月

JICA LIBRARY



J1149074(5)

国際労働事務官
研修報告書

0000
01
99-074

平成10年度 アルゼンティン共和国

東部アンデス地域

資源開発協力基礎調査

衛星画像解析報告書

平成11年2月

国際協力事業団
金属鉱業事業団



1149074 {5}

は し が き

日本国政府はアルゼンティン共和国政府の要請に応え、同国のラリオハ州、サンファン州、メンドーサ州のチリとの国境よりに位置する東部アンデス地域の鉱物資源賦存の可能性を確認するため衛星画像解析、地質調査などの鉱床探査に関する諸調査を実施することとし、その実施を国際協力事業団に委託した。国際協力事業団は本調査の内容が地質及び鉱物資源の調査という専門分野に属することから、調査の実施を金属鉱業事業団に委託することとした。

本調査は、平成9年度より2年間の予定で開始され、平成10年度が第2年次にあたり、かつ最終年次にあたる。金属鉱業事業団は4名の調査団を編成して平成10年10月5日から平成10年12月11日まで現地に派遣した。現地調査は、アルゼンティン共和国政府機関、経済公共事業省・鉱山庁の協力を得て予定どおり完了した。

本報告書は、本年次の調査結果のうち衛星画像処理・解析についてとりまとめたもので、最終報告書の一部となるものである。

おわりに、本調査の実施にあたってご協力いただいたアルゼンティン共和国政府関係機関ならびに外務省、通商産業省、在アルゼンティン共和国日本国大使館及び関係各位の方々に衷心より感謝の意を表するものである。

平成11年2月

国際協力事業団
総裁 藤田公郎

金属鉱業事業団
理事長 檜山博昭



要 約

本解析は、資源開発協力基礎調査・鉱物資源広域調査の一環として、アルゼンティン共和国のラリオハ州、サンファン州、メンドーサ州のチリとの国境よりに位置する東部アンデス地域を対象に、鉱床賦存の有望地域選定に資する地表の情報を提供することを目的とした。その目的を達成するために、第 1 年次の解析で抽出された変質帯について、JERS-1 OPS データを用いた特殊な処理・解析によって、変質帯を鉱物組合せで細分し、有望な変質帯を抽出した。対象地域は、JERS-1 画像 9 シーンでカバーされ、その面積は北部で約 17,100 km²、南部で約 30,400 km²、合計約 47,500 km² ある。

画像データの検索の際には、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が、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、実際には、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。次に、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。

輝度補正を行った 9 シーンについて画像重複部から 2 画像間の対応関係を算出し、シームレスモザイク手法を用いて画像接合を行った。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。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。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。今回の解析作業ではすべてこの空間分解能を用いた。

本解析の目的は、変質帯の詳細な分類であり、解析のためにフォールスカラー画像を作成したほか、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には全バンドを使用した。

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、LANDSAT TM 画像から変質帯として判読された部分をほぼ完全に抽出した。

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を明度・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。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、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り、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。

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り、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実施した。

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、さらに、分類結果に疑似反射率を反映させ、11 個のグループへ統合した。それら 11 個のグループの平均的な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。これら 2 つのグループはログレジデュアル値から明礬石およびカオリナイトを主とする酸性変質帯と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。

以上の手法による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。

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。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できない。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、変質鉱物反射スペクトルのデータベースを作成した。

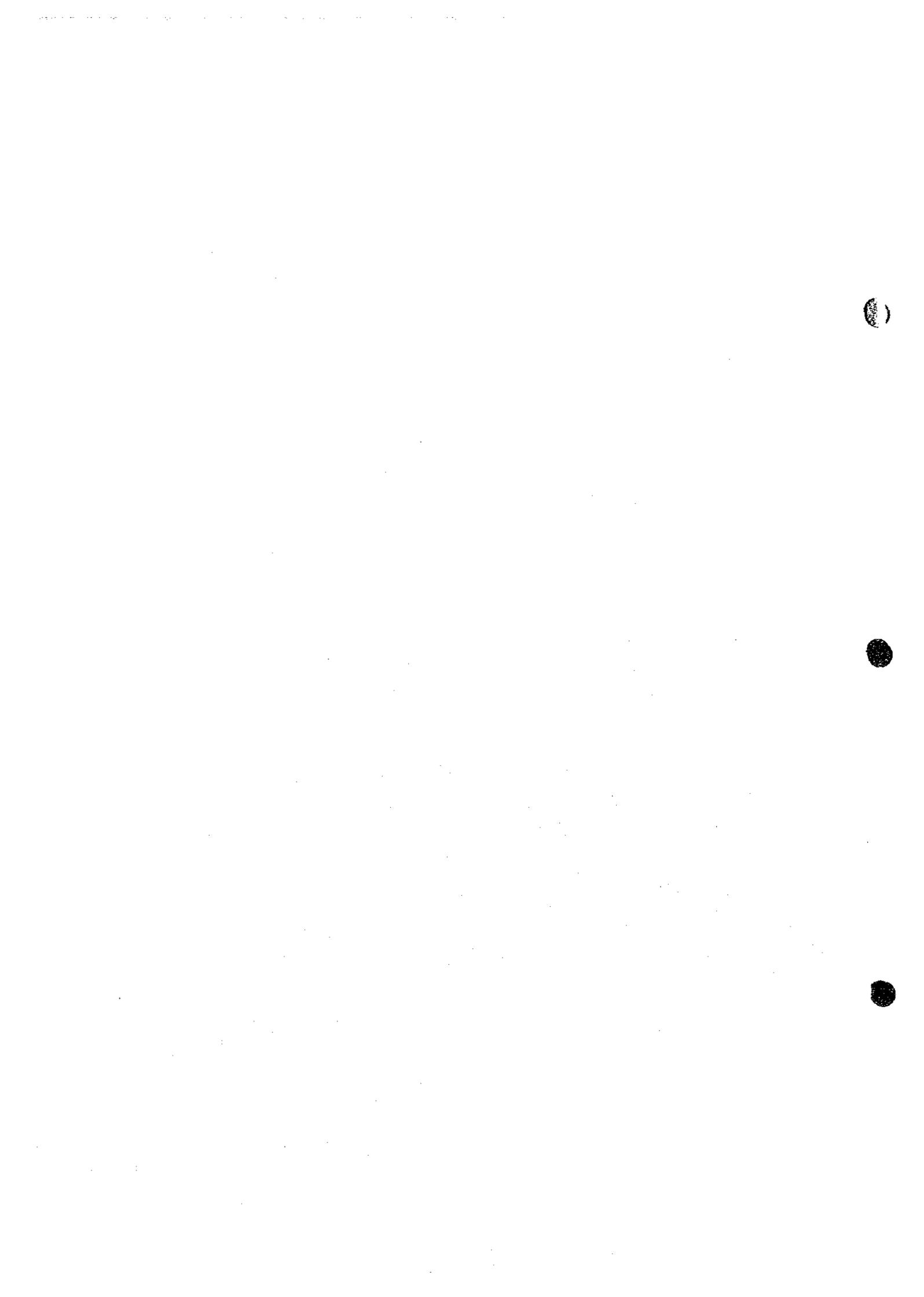
次に、作成したデータベースを活用するためには、画像データを疑似反射率に変換する必要がある、この疑似反射率への変換精度が変質鉱物推定の信頼性に直結する。今回の解析では露岩地帯の風化岩がもつ反射スペクトルの普遍性に注目し、それから算出されるソイルラインを応用した疑似反射率変換の手法を使用した。

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。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。

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、いくつかの問題点は残るものの、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。

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。本年に打ち上げが予定されている ASTER では、短波長赤外域に5バンドを有する設計がされており、今回の解析手法を応用・発展させることで、鉱物同定を含めたさらに詳細な解析ができるものと期待される。



目 次

はしがき	i
要 約	ii
目 次	v
図表一覧・巻末資料・別冊の添付図	vii
第 1 章 序 論	1
1.1 解析目的	1
1.2 解析範囲	1
1.3 使用データ	1
1.4 解析方法	4
1.5 解析者	5
第 2 章 画像処理と解析	7
2.1 一般概要	7
2.1.1 解析の経緯	7
2.1.2 変質鉱物の推定方法	7
2.2 使用画像の検討	13
2.2.1 積雪・雲の状況	13
2.2.2 画質の検討	13
2.3 システム補正と放射量補正	14
2.3.1 システム補正	14
2.3.2 放射量補正	14
2.4 シームレスモザイクと幾何変換	29
2.4.1 幾何変換	29
2.4.2 シームレスモザイクの手法	30
2.4.3 幾何補正	32
2.4.4 U画像およびL画像のパスラジアンズ補正	34
2.5 スペクトル解析画像の作成	34
2.5.1 雲の領域の除去とログレジデュアル値	34
2.5.2 フォールスカラー画像	38
2.5.3 ログレジデュアル処理画像	38
2.5.4 比演算処理画像	44
2.6 変質帯の抽出と変質帯強調比演算	50
2.6.1 変質帯抽出の閾値	50
2.6.2 変質帯強調比演算処理	56

2.6.3	強調比演算処理画像の変質帯分布と色調	65
2.6.4	2つの画像間の色調差	67
2.6.5	変質帯強調比演算処理の意義	67
2.6.6	代表的な変質帯強調比演算処理画像	69
2.7	変質帯の分類	77
2.7.1	カテゴリの作成	77
2.7.2	パターンマッチングによる画像分類	85
2.7.3	グループの変質鉱物推定	86
2.8	パターンマッチングによる鉱物推定	95
2.8.1	等粒子モデルの原理	95
2.8.2	反射スペクトルインデックスの作成	100
2.8.3	2相混合時の反射スペクトルの変化	101
2.8.4	疑似反射率変換の手法	101
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	111
2.8.6	変質帯の鉱物分類図	112
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	119
2.8.8	鉱物判定結果の信頼性	119
2.9	解析のまとめ	129
2.9.1	システム補正と放射量補正	129
2.9.2	シームレスモザイクと幾何変換	129
2.9.3	スペクトル解析画像の作成	130
2.9.4	変質帯の抽出と変質帯強調比演算	130
2.9.5	変質帯の分類	131
2.9.6	パターンマッチングによる鉱物推定	132
2.10	結 論	133
参考文献		134
あとがき		x
巻末資料		

図表一覽

- 図 1 対象地域位置図
- 図 2 使用した画像の位置図
- 図 3 画像処理・解析作業全体のフローチャート
- 図 4 第 1 年次解析の対象地域位置図
- 図 5 短波長赤外域における粘土鉱物のスペクトル曲線と JERS-1 のバンド分布
- 図 6 JERS-1 の観測波長域での粘土鉱物のスペクトルパターン
- 図 7 JERS-1 OPS の画質検討図
- 図 8 JERS-1 OPS の重みフィルタ結果
- 図 9 モザイク画像作成作業のフローチャート
- 図 10 月の玄武岩の方向性反射率補正曲線
- 図 11 方向性反射率の定義
- 図 12 画像の輝度勾配測定結果
- 図 13 画像重複部の画像間輝度分布
- 図 14 中心投影による射影歪み
- 図 15 LANDSAT TM 画像と TPC(縮尺 1/50 万地形図)の比較
- 図 16 ログレジデュアル画像および比演算処理画像作成作業のフローチャート
- 図 17 U 画像範囲のフォールスカラー画像(BGR = 358)
- 図 18 L 画像範囲のフォールスカラー画像(BGR = 358)
- 図 19 U 画像範囲のログレジデュアル処理画像(BGR = 678)
- 図 20 L 画像範囲のログレジデュアル処理画像(BGR = 678)
- 図 21 U 画像範囲の比演算処理画像(BGR = 5/6, 5/7, 5/8)
- 図 22 L 画像範囲の比演算処理画像(BGR = 5/6, 5/7, 5/8)
- 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 25 U 画像範囲の強調比演算処理
- 図 26 L 画像範囲の強調比演算処理
- 図 27 LANDSAT TM 画像のヴィジュアル判読による変質帯の配列
- 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 30 Los Mogotes 付近の強調比演算画像
- 図 31 変質帯の分類作業のフローチャート
- 図 32 再分類したグループのログレジデュアル値
- 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
- 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

- 図 36 サンプル補正後のグループ別ログレジデュアル値
- 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
- 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
- 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)
- 図 45 2相混合系の反射スペクトルの変化-2
(明礬石・カオリナイト, セリサイト・方解石, 明礬石・石膏, カオリナイト・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
- 図 49 U画像データの変質鉱物含有量マップ
- 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
- 図 52 明礬石が卓越する地帯の判定結果
- 図 53 カオリナイトが卓越する地帯の判定結果
- 図 54 セリサイト/方解石が卓越する地帯の判定結果
- 図 55 各カテゴリ別の疑似反射率比較

- 表 1 使用データ一覧
- 表 2 U画像でのGCP変換誤差
- 表 3 バスラジアンズ(最小輝度値)
- 表 4 ログレジデュアル処理係数(概算時)
- 表 5 ログレジデュアル処理係数(露岩地帯)
- 表 6 比演算処理係数(露岩地帯)
- 表 7 変質帯強調比演算処理係数
- 表 8 教師と出現頻度(上位20)
- 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
- 表 10 等粒子モデルに使用した光学パラメータ
- 表 11 バンド間散布図の傾斜係数
- 表 12 疑似反射率変換係数

巻末資料

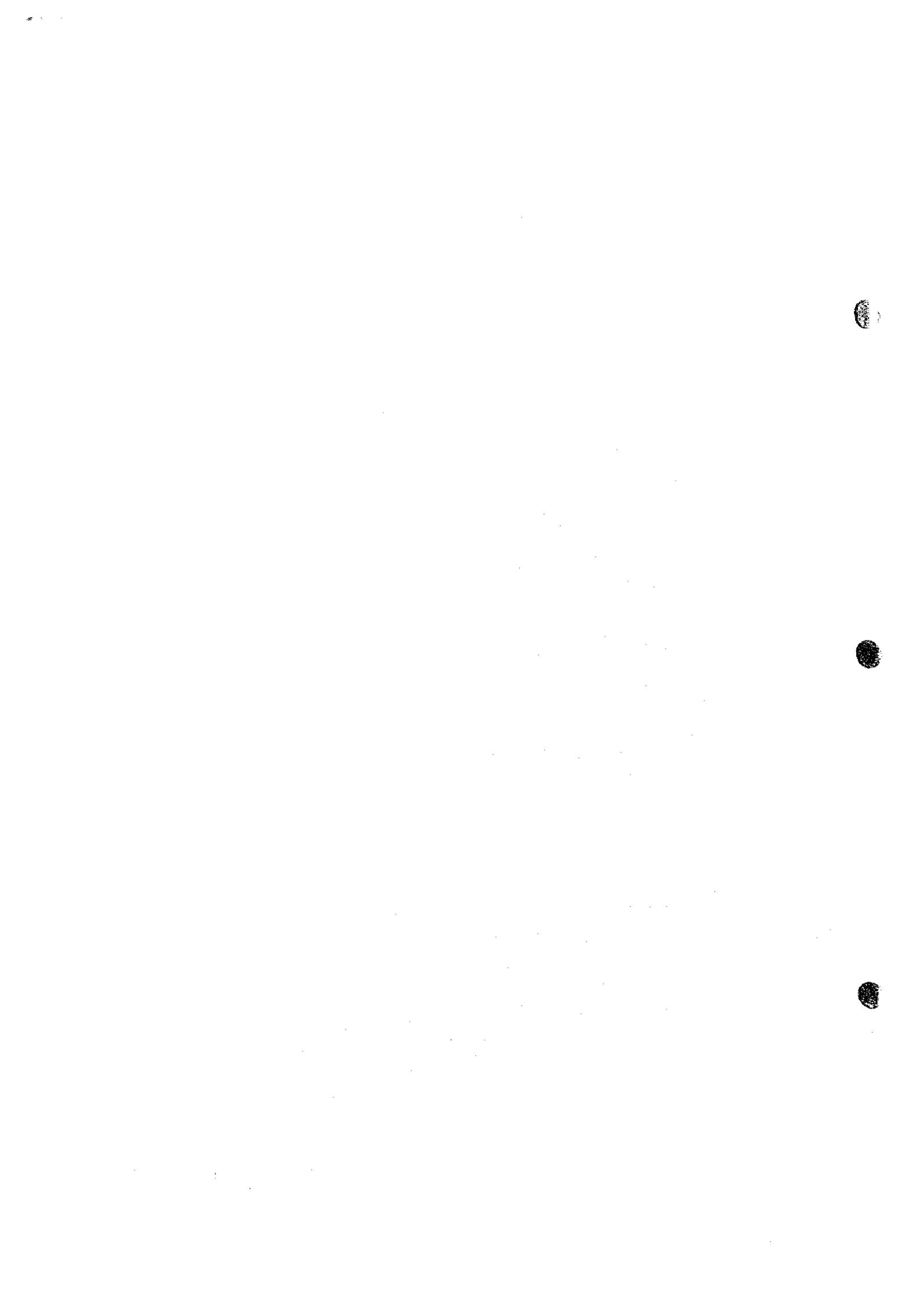
巻末資料 1 抽出された変質帯の対比表(LANDSAT TM 画像と JERS-1 OPS 画像)

巻末資料 2 アルゼンティンにおける衛星画像解析結果の報告資料およびリモートセンシング・セミナーの講義資料

別冊の添付図

- ・ U 画像範囲のエリア配置図
- ・ 変質帯分類凡例と鉱物分類凡例
- ・ U-1~U-14 地区の添付図
 - フォールスカラー画像(358)
 - 変質帯強調比演算処理画像(ratio)
 - 変質帯分類図(classification)
 - 変質帯の鉱物分類図(mineral)

- ・ L 画像範囲のエリア配置図
- ・ 変質帯分類凡例と鉱物分類凡例
- ・ L-1~L-28 地区の添付図
 - フォールスカラー画像(358)
 - 変質帯強調比演算処理画像(ratio)
 - 変質帯分類図(classification)
 - 変質帯の鉱物分類図(mineral)



第 1 章 序 論

1.1 解析目的

本解析は資源開発協力基礎調査・鉱物資源広域調査の一環として、第 1 年次の解析で抽出された変質帯について、JERS-1 OPS のデータを用いて変質帯の鉱物組合せを把握するために、変質帯をさらに細分し、有望な変質帯を抽出することを目的とする。

1.2 解析範囲

本解析の対象地域は第 1 年次の解析範囲から選択された(図 1)。図 1 に示すように、アルゼンティン共和国とチリ共和国の国境沿いにほぼ南に延び、南緯 27°20′から 29°20′の範囲と南緯 29°5′0 から 32°20′の範囲に分けられる(以下、この範囲全体を「対象地域」と略称する)。対象地域は、JERS-1 画像 9 シーンでカバーされ(図 2)、その面積は北部で約 17,100 km²、南部で約 30,400 km²、合計約 47,500 km²ある。

1.3 使用データ

(1) JERS-1 OPS 画像

今年度の画像解析では LANDSAT TM で抽出した変質帯についてより詳細な変質帯分類と鉱物組成の推定を行うために、2.0~2.4 μ m の短波長赤外域に 3 バンドのセンサを有する JERS-1 OPS 画像を用いた。

使用したデータは、いずれも「地球資源衛星 1 号(ふよう 1 号)」(JERS-1: Japanese Earth Resources Satellite-1)により観測され、バルク補正されたコンピュータ適合磁気テープ(CCT: Computer Compatible Tape)であり、宇宙開発事業団(NASDA: National Space Development Agency of Japan)経由で(財)資源・環境観測解析センター(ERSDAC: Earth Remote Sensing Data Analysis Center)から取得した。最終的に実際の解析に使用した 9 シーンのほかに、それらの周辺の 4 シーンを含めた 13 シーンの画像の観測年月日、太陽位置などの情報を表 1 に示す。

解析に適する画像を取得するため、ERSDAC を通じて NASDA に対象地域の JERS-1 データの取得状況を問い合わせ、P421 と P422 の R347~354 までの範囲について検索を行った。画像の選定に際しては、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するため、夏季に Normal Gain で観測され、かつ雲量の少ないものを優先順位の高い画像として選択した。しかしながら、これら以外の観測条件でも、P421/R350 および P422/R351~352 については画像が観測されてお

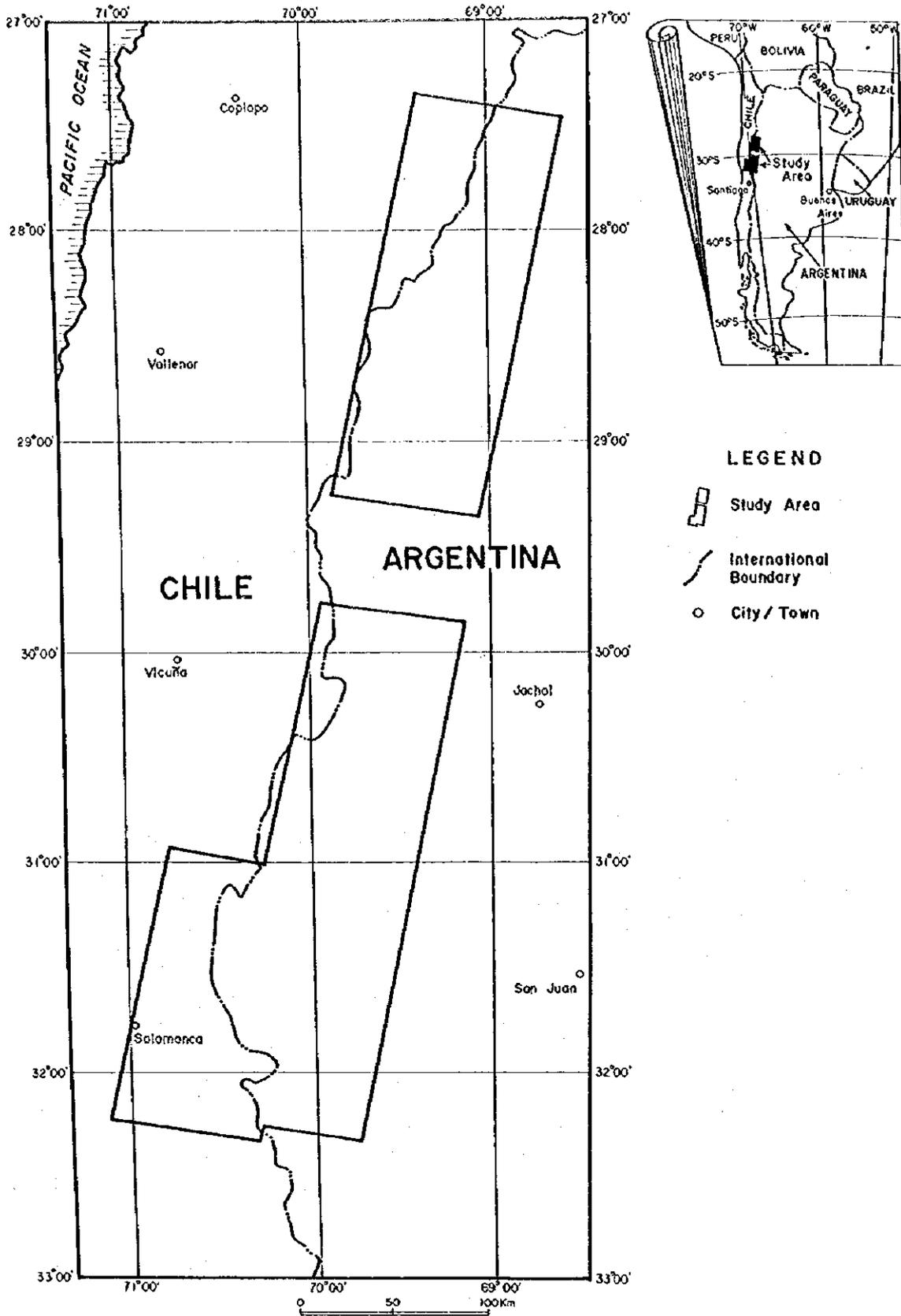


图 1 对象地域位置图

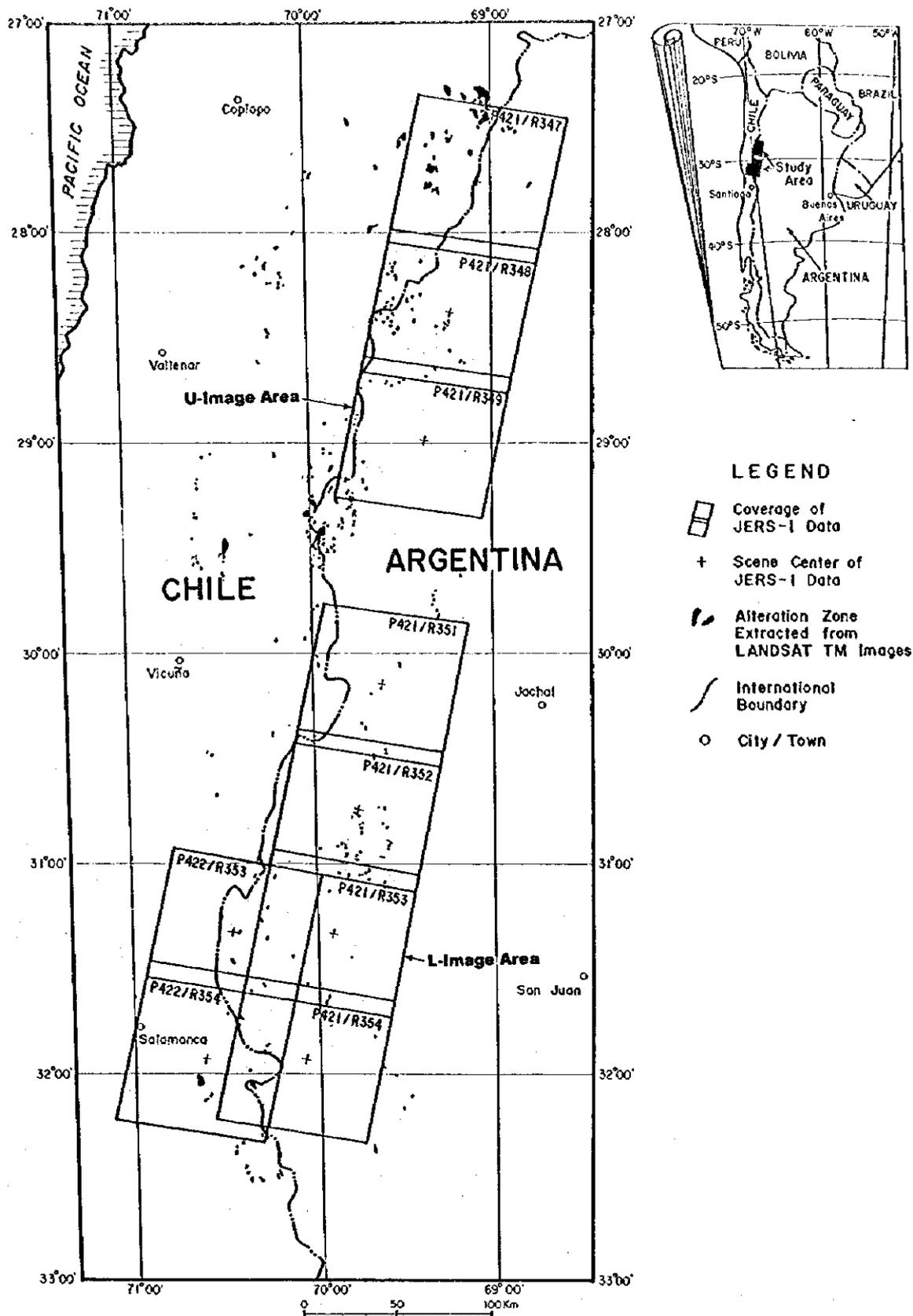


図 2 使用した画像の位置図

らず、今回の解析に使用することができなかった。

表1 使用データ一覧

地区名	軌道位置		観測年月日	雪量 (%)	雲量 (%)	太陽位置	
	バス	ロウ				高度	方位角
Cerro Nacimiento del Jague	421	347	1993/01/24	10	7	62	77
Cerro Fandango	421	348	1993/01/24	5	3	62	76
Rio Santa Rosa	421	349	1993/01/24	5	13	62	75
Todcum	421	351	1993/11/28	10	9	67	72
Villa Nueva	421	352	1993/11/28	5	9	67	70
Rio Calingasta	421	353	1993/11/28	20	17	67	69
Rio Blanco	421	354	1993/11/28	20	12	66	68
	422	347	1993/06/06	90	7	34	27
	422	348	1993/06/06	85	6	33	27
	422	349	1993/06/06	90	18	33	27
	422	350	1993/06/06	90	20	32	27
Laguna Chica	422	353	1993/11/29	15	0	67	70
Salamanca	422	354	1993/11/29	15	0	66	68

地区名称のない画像は冬季に観測されたものを示す。

高度：画像中心位置での太陽高度(単位°)

方位角：画像中心位置での太陽方位角(北を0°とし時計回りに算出)

冬季に観測された P422/R347~R350 の 4 シーンについては、これら以外に夏期(1992/12/12)に High Gain で取得された画像がある。これらのデータを取得し解析を試みたが、High Gain で取得されているため 20~50%程度のデータが飽和していること、画像中軸部が明らかに暗くなっておりセンサ感度補正が正確に実施されていないこと、および短波長赤外画像中の高輝度画素でのセンサの応答遅れによる光線引き現象が顕著であることから、解析に耐えうる画像品質を有していないことが明らかとなった。このため High Gain で取得された画像を使用することを断念した。したがって、今回はこれらの冬季に観測されたデータを使用した。

なお、P422/R349 のデータには部分的にラインの欠損が認められた。

(2) 既存資料

本報告書の末尾に掲げた主要参考文献(地質図・鉱床分布図を含む)をレビューし、総合解析及び報告書の作成の際に活用した。

1.4 解析方法

JERS-1 OPS データを利用した本解析は、通常次の 8 段階の作業によって構成される。

一般に、解析に使用可能な衛星データを検索するには少なからずの時間を要するが、この検索作業は解析の最初の必須作業として扱い、以下の項目には含まれていない。

- (1) システム補正と放射量補正
- (2) シームレスモザイクの作成と幾何変換
- (3) スペクトル解析画像の作成
- (4) 変質帯の抽出と変質帯強調比演算
- (5) 変質帯の分類
- (6) パターンマッチングによる鉱物推定
- (7) フィールドチェック調査とそれに基づく再解析
- (8) 報告書の作成

今回実施した画像処理・解析作業全体のフローチャートを図 3 に示す。なお、(1)～(6)の各解析の方法については、第 2 章の各節で詳細に記述する。

1.5 解析者

俣野 米治	データ処理・画像作成(財団法人 国際鉱物資源開発協力協会)
大地 正高	解析・報告書作成(＃)
三箇 智二	データ処理・画像作成, 解析・報告書作成(＃)
鎌田 治朗	データ処理・画像作成(＃)

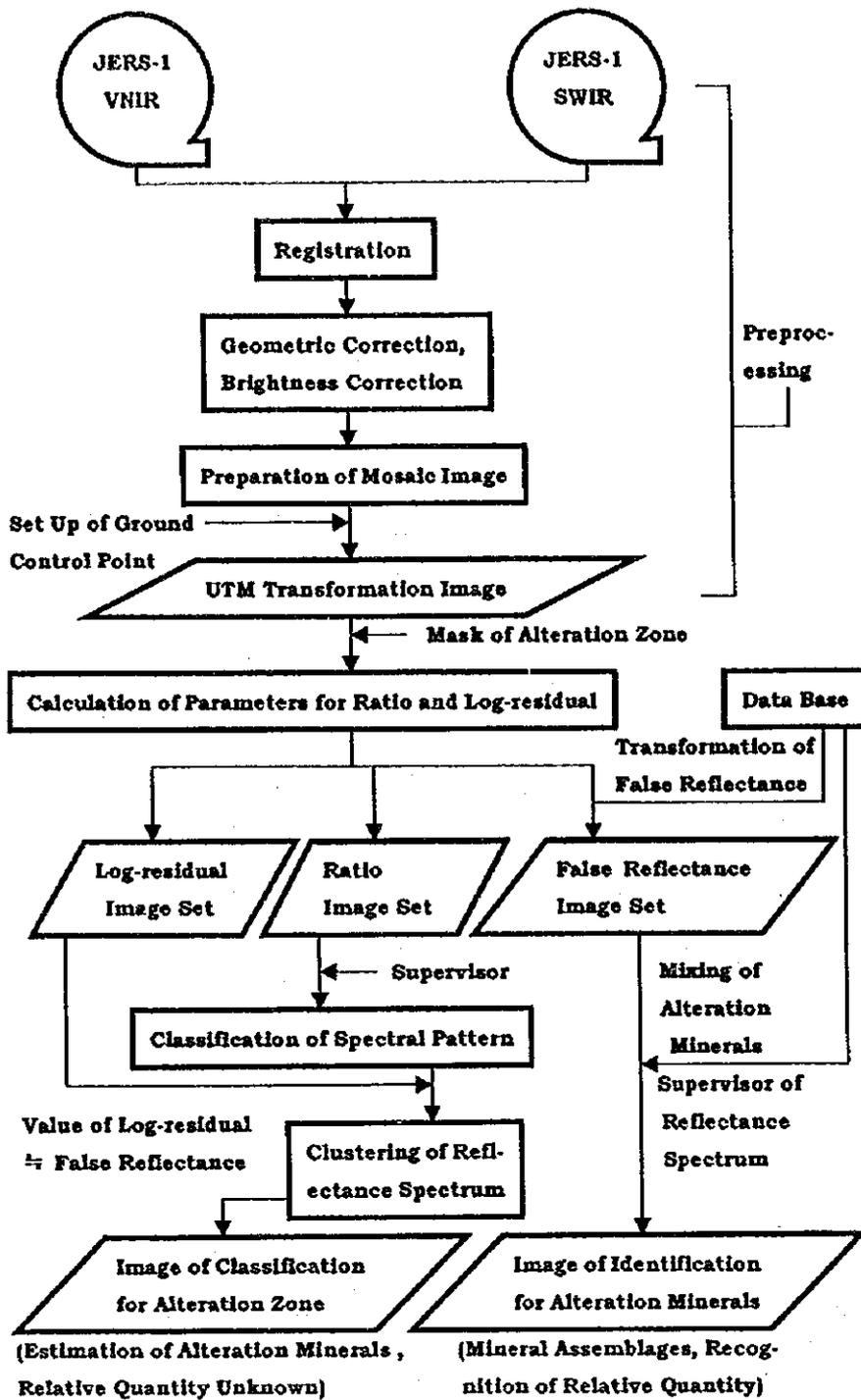


図 3 画像処理・解析作業全体のフローチャート

第2章 画像処理と解析

2.1 一般概要

2.1.1 解析の経緯

第1年次に実施した画像解析は、ボリビア共和国の南端部から、アルゼンティン共和国とチリ共和国の国境沿いにほぼ南北に延び、チリ共和国のサンチャゴとアルゼンティン共和国メンドーサに至る広大な範囲(面積約65万km²)を対象とした(図4)。この第1年次の解析は、対象地域についてランドサット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、鉱微地の賦存状況などを総合的に検討し、有望地域を抽出することを目的とした。

この目的を達成するため、対象地域の地表地質状況を考慮し、地質・地質構造解析および変質帯の抽出を主要な解析作業項目としてLANDSAT TMの画像データを用いた。これらの画像について縮尺1/25万のフォールスカラー画像(BGR = 145)と比演算画像(BGR = 3/1, 5/4, 5/7)を作成し、地質判読を実施した。また、広域的な地質構造の解釈のために、各画像を1/4に縮小し、23シーンの広域モザイク画像(フォールスカラー画像、比演算画像)を作成した。

2.1.2 変質鉱物の推定方法

変質帯を構成する鉱物は図5に示すように1.0~2.5 μ m付近の短波長赤外域に特徴的な吸収スペクトルを示すものが多い。このことは水分子(H₂O)、水酸イオン(OH)、炭酸イオン(CO₃)および硫酸イオン(SO₄)の基準振動の調和振動および混合振動が原因となっている。このためこの吸収スペクトルの特徴からカオリナイト、明礬石などのような変質鉱物を推定することができる。この短波長赤外域に観測波長を有する光学センサとしては、LANDSAT TM(バンド5, 7)およびJERS-1 OPS(バンド5, 6, 7, 8)がある。しかしながら、LANDSAT TMのバンド7の観測波長域では2.08~2.35 μ mの広い波長域をカバーしているため、炭酸塩鉱物と粘土鉱物の判別はできても粘土鉱物種を推定することはできない。これに対して、JERS-1 OPSではバンド6が2.01~2.12 μ m、バンド7が2.13~2.25 μ mおよびバンド8が2.27~2.40 μ mをカバーしており、吸収の位置と深さ(吸収のパターン)から粘土鉱物のある程度識別することができる。代表的な変質鉱物をJERS-1 OPSの観測波長域に合わせて反射率を計算したものを図6に示す。この図から明らかのように、石膏、明礬石、カオリナイトおよびセリサイトなどには吸収のパターンに明瞭な差が生じている。

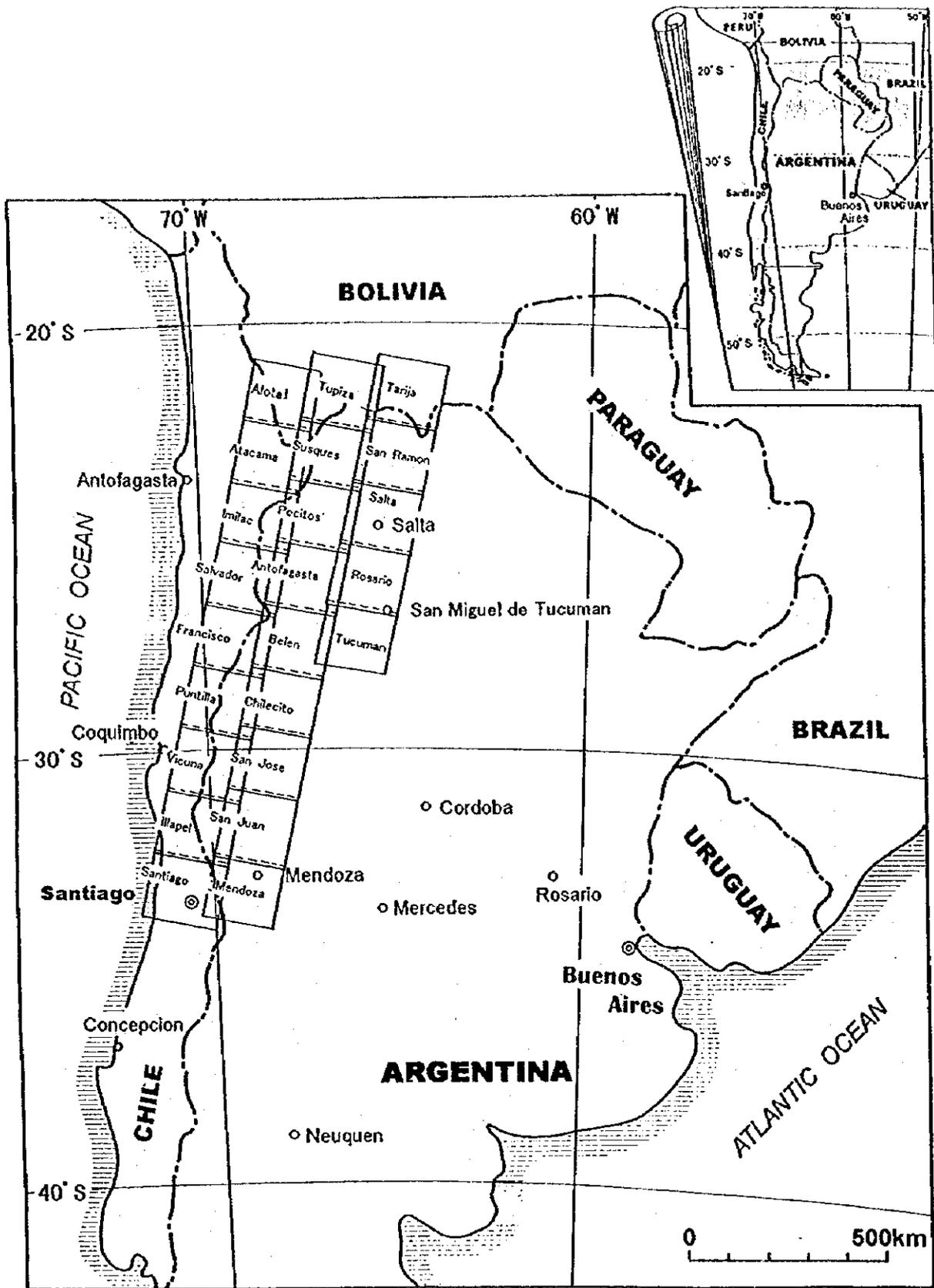


図 4 第 1 年次解析の対象地域位置図

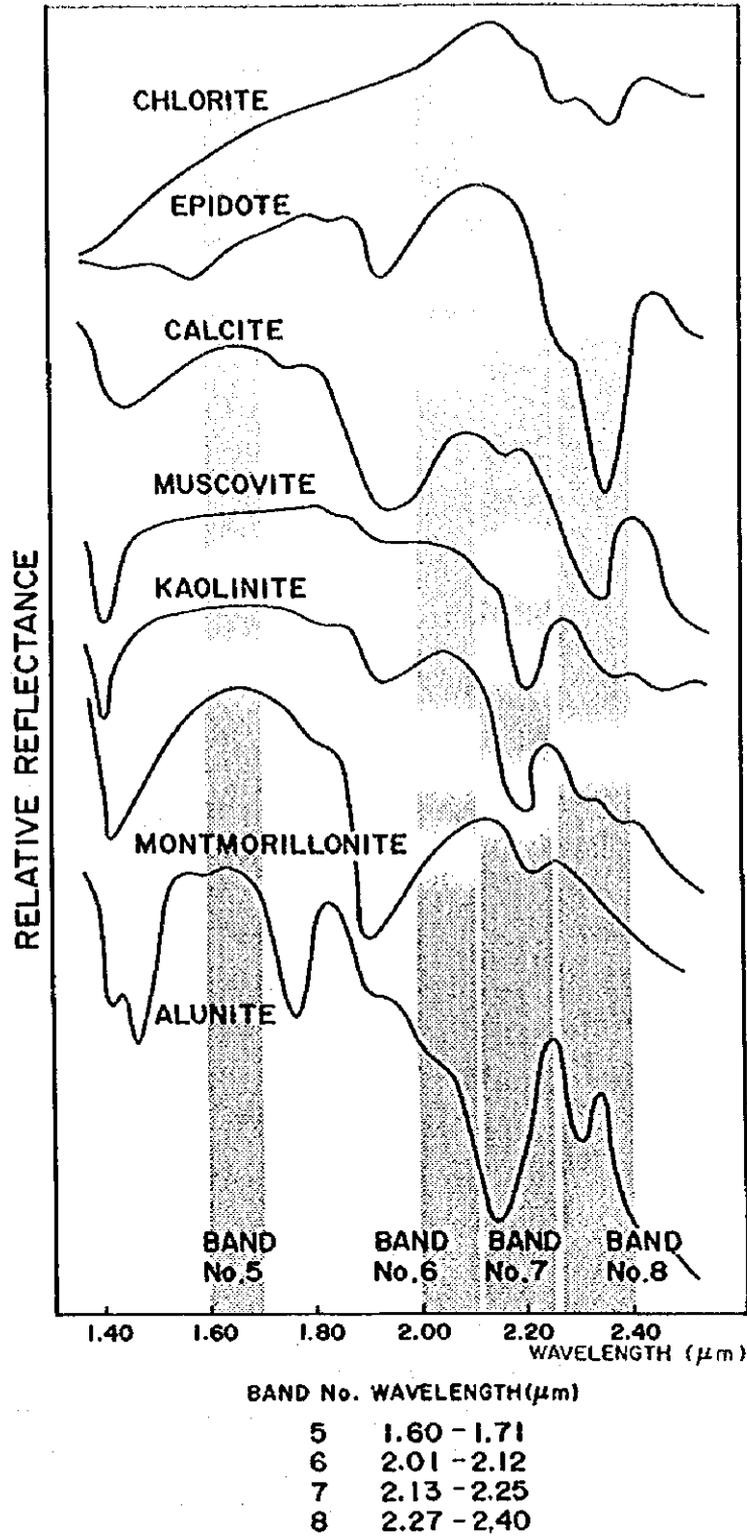


図 5 短波長赤外域における粘土鉱物のスペクトル曲線と JERS-1 のバンド分布



鉱物種	反射率(%)						
	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

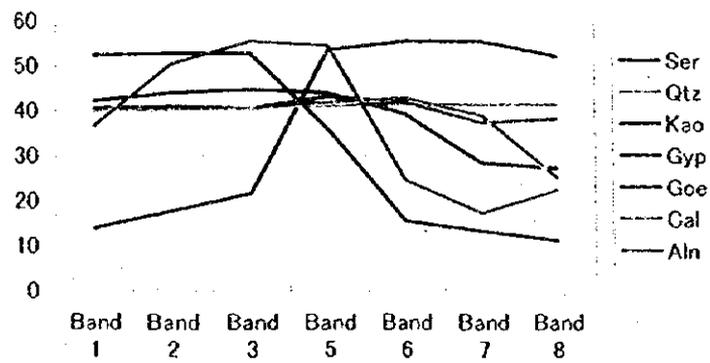
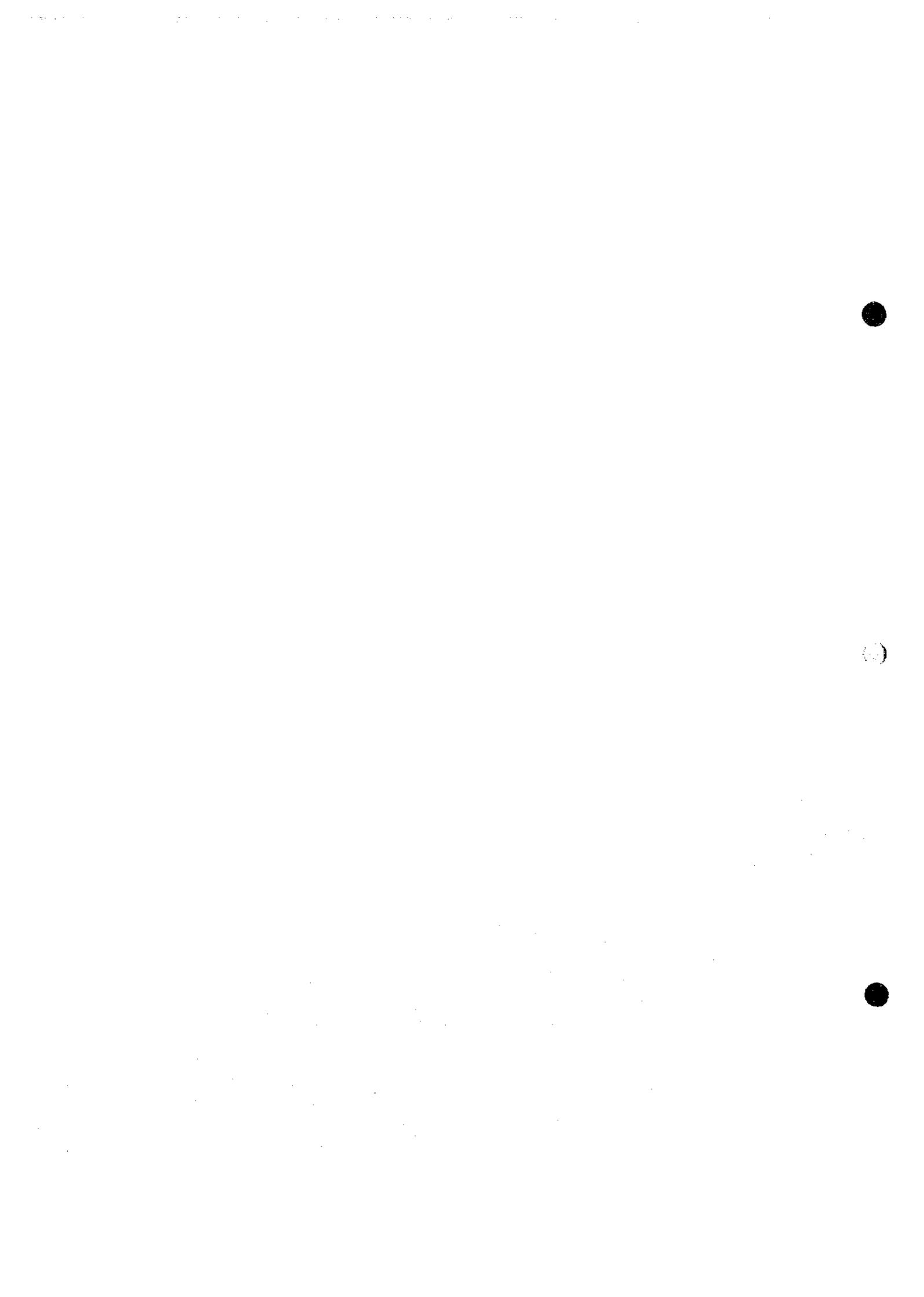


図 6 JERS-1 の観測波長域での粘土鉱物のスペクトルパターン



2.2 使用画像の検討

2.2.1 積雪・雲の状況

表 1 に示したシーンについて画質、雲量および積雪状況を確認するため、シーン別にフォールスカラー画像(BGR = 358)を作成した(別冊の添付図参照)。このバンド組み合わせのフォールスカラー画像では雲の反射率がすべての波長において高いため明るい白色で表現される。また、雪はバンド 3 よりも長波長側で大きな吸収を示すため暗青色～青色で表現される。これらの画像は変質帯・地質の判読に有効なバンドの組み合わせであるが、雪と雲の判別にも有効である。

この作業の結果、P422/R347～R350 を除く 9 シーンには雲がほとんど認められないことが判明した。また、P422/R347～R350 については画像中央部付近(チリ・アルゼンチン国境付近)に淡い雲が認められた。積雪状況は、P422/R347～R350 の冬季の画像を除いて、10 %程度の面積を占める地形的高所において認められた。

P422/R347～R350 については相当量の面積(約 60 %以上)が積雪で覆われている。次に、これらの地域について雪を敏感に反映するログレジデュアル画像(BGR = 678)を作成した。この画像では積雪が無いと考えられた地域でも、反射スペクトルがバンド 3 よりも長波長側で大きな吸収を示す特徴的な反射スペクトルを示すことが明らかとなった。このことは積雪がないと考えられた地域でも少量の積雪があることを意味しており、積雪の影響が画像全域に渡って生じていることを示している。このため、これら冬季に観測された P422/R347～R350 の画像についてはスペクトル解析が不可能であることが判明した。

2.2.2 画質の検討

JERS-1 OPS の可視近赤外領域では、その画質は良好であり、約 4 ライン毎の周期的なバイアス変動もみられない。

短波長赤外領域では、図 7 に示すようにバンド 5 は概ね良好であるが、バンド 6～8 で不良となっている。この不良の主原因は高輝度ピクセルの下側で尾を引く現象であり、センサの応答遅れによるものである。また、この応答遅れの程度は左右のセンサー系で異なっているため、奇数番目のピクセルと偶数番目のピクセルで尾を引く長さが異なり、画質の細部を読みとることを一層困難なものにしている。

なお、P422/R349 の画像には短波長赤外域で画像水平方向の画像欠損が認められた。この画像欠損は 5 ライン程度であり、見かけ上画像を良好にするため欠損ラインの上下の画素値から線形補間を実施した。

2.3 システム補正と放射量補正

2.3.1 システム補正

JERS-1 OPS 画像には JERS-1 特有の 2 つの問題点がある。1 つは短波長赤外域センサの応答遅れにより、高輝度画素が尾を引く現象である。また、この短波長赤外域センサは 2 系統から構成され、両センサを 1 画素ごとに交互に配置することで短波長赤外域の画像を作成している。この両系統センサでは応答遅れの程度が異なり、偶数配列よりも奇数配列の CCD においてこの現象が顕著である(宇宙開発事業団, 1993)。このため両者を交互に合成した画像では、図 8 の様に高輝度部から低輝度部への境界において下に向いた櫛歯状のノイズが発生している。幾何補正がなされていないレベル 0 画像ではこの櫛歯状のノイズはセンサ配列に従うため下に向く。これに対し、レベル 2 以上の幾何補正がなされている画像では、図 8 に示すような斜め縞が発生する。この理由は、レベル 2 の画像がレベル 0 の画像を平行四辺形に歪める画像再配列処理が実施されるためである。

この短波長赤外域の応答遅れに伴う櫛歯ノイズやこれに起因する斜め縞ノイズは、重み付きのフィルタを実施することで、図 8 に示すように縞を効果的に除去できる(金属鉱業事業団, 1995, 1996)。なお、レベル 0 から画像処理を行う場合には、偶数画素データから奇数画素を補間し、1 シーンの画像を作成した画像の方が良好な画像となる。しかしながら、今回の解析ではレベル 2 画像を使用したため、この処理を行うことができなかった。

JERS-1 OPS 画像のもう 1 つの問題は、短波長赤外域のバンド間画像およびこれらと可視近赤外域の画像とが正確に一致していないことである。JERS-1 OPS 画像は可視近赤外域と短波長赤外域の 2 種類の放射計から構成されている。前者はプリズム分光方式で、同一時刻には直下の同一地点を撮像しているのに対し、後者は分光フィルター方式のため同一時刻にはそれぞれのバンドは異なる地点を撮像している。本来の補正が良好であればこれら画像のピクセルずれは生じないが、この補正が完全では無いため画素ずれが生じている。

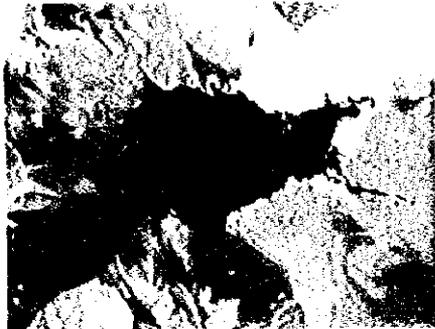
上述した 1~3 画素程度の画素ずれはフォールスカラー画像では大きな影響を及ぼさないが、バンド間輝度比を用いる比演算処理画像などでは物質境界部や日向と日陰の明暗境界部に色調が大きく異なる帯を形成してしまう。このため、バンド間視差を補正する手法として、テンプレートを用いた面積相関法によるレジストレーション手法の開発を行ってきた(金属鉱業事業団, 1995)。本解析についてもこの手法を用いて画素ずれの補正を実施した。なお、図 9 にモザイク画像作成作業のフローチャートを示す。

2.3.2 放射量補正

JERS-1 OPS のような光学センサー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、地表にある対象物に固有な分光反射率

P421/R347

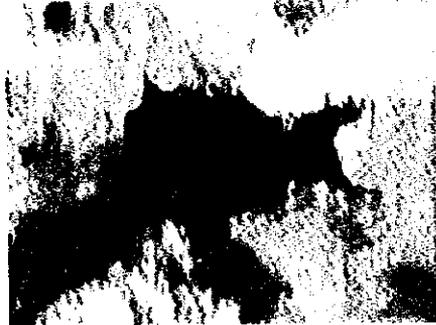
Band 5



BGR 123



Band 6



Band 1



Band 7



Band 2



Band 8



Band 3



0 10km

図 7 JERS-1 OPS の画質検討図



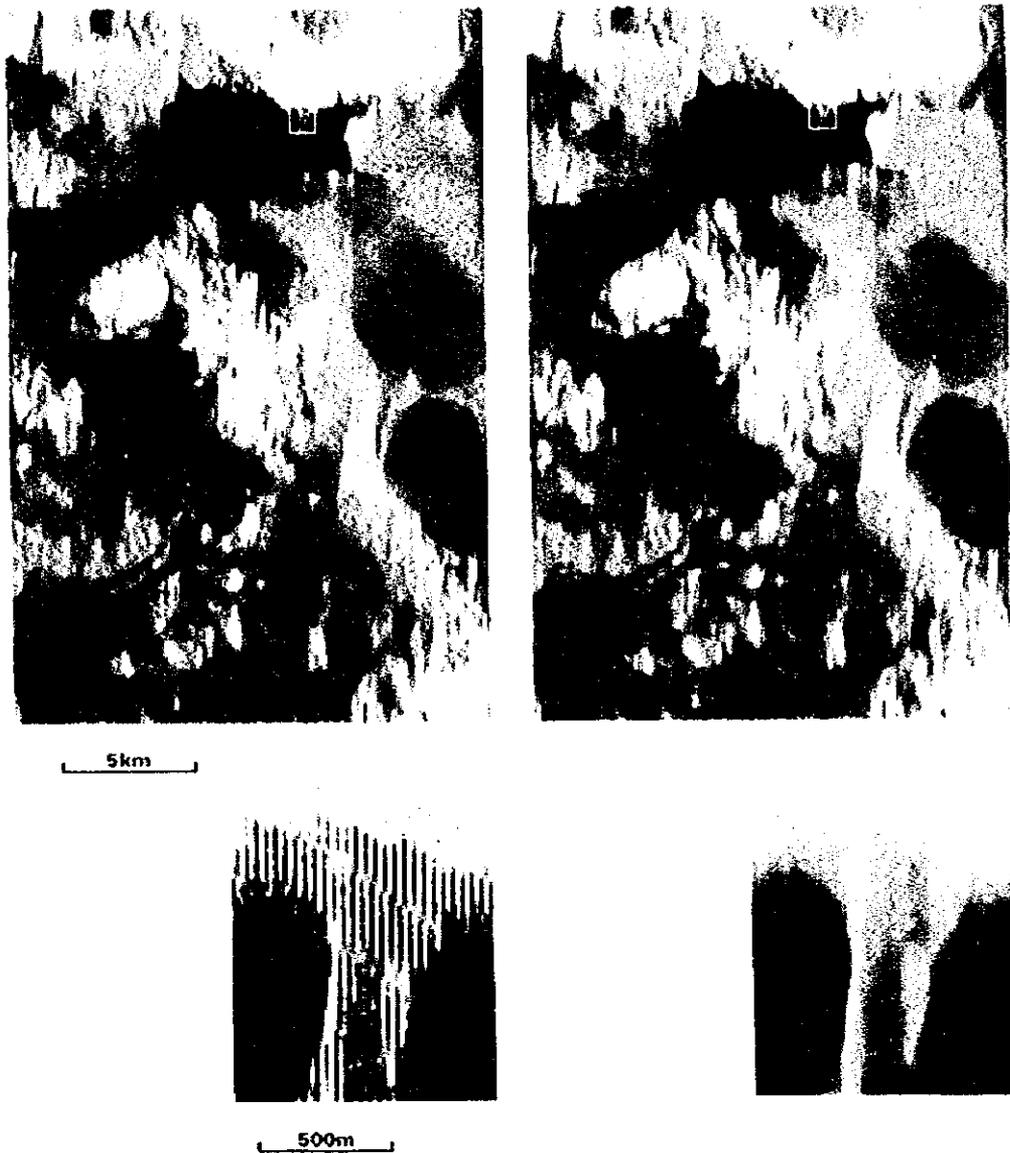
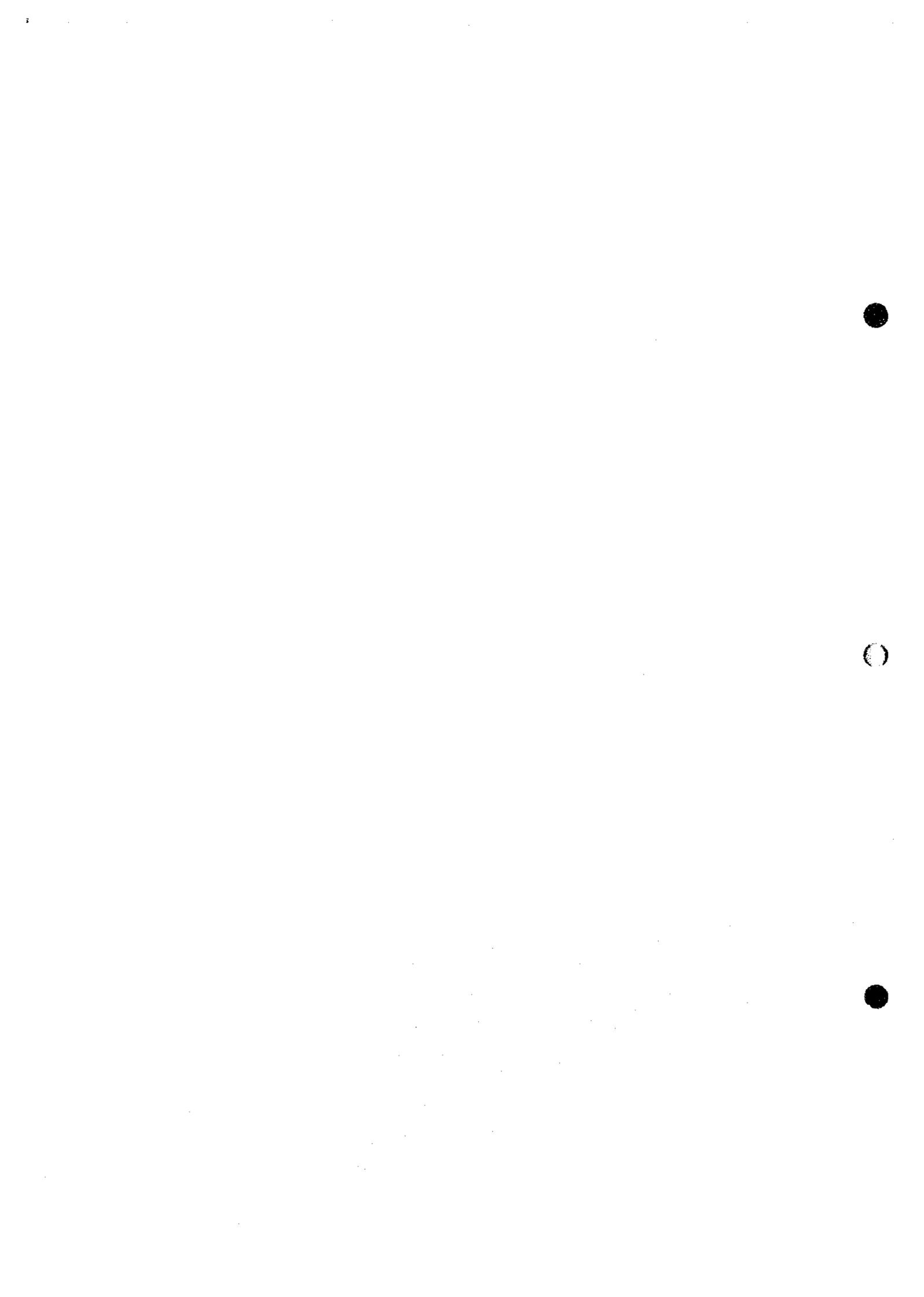


図 8 JERS-1 OPS の重みフィルタ結果



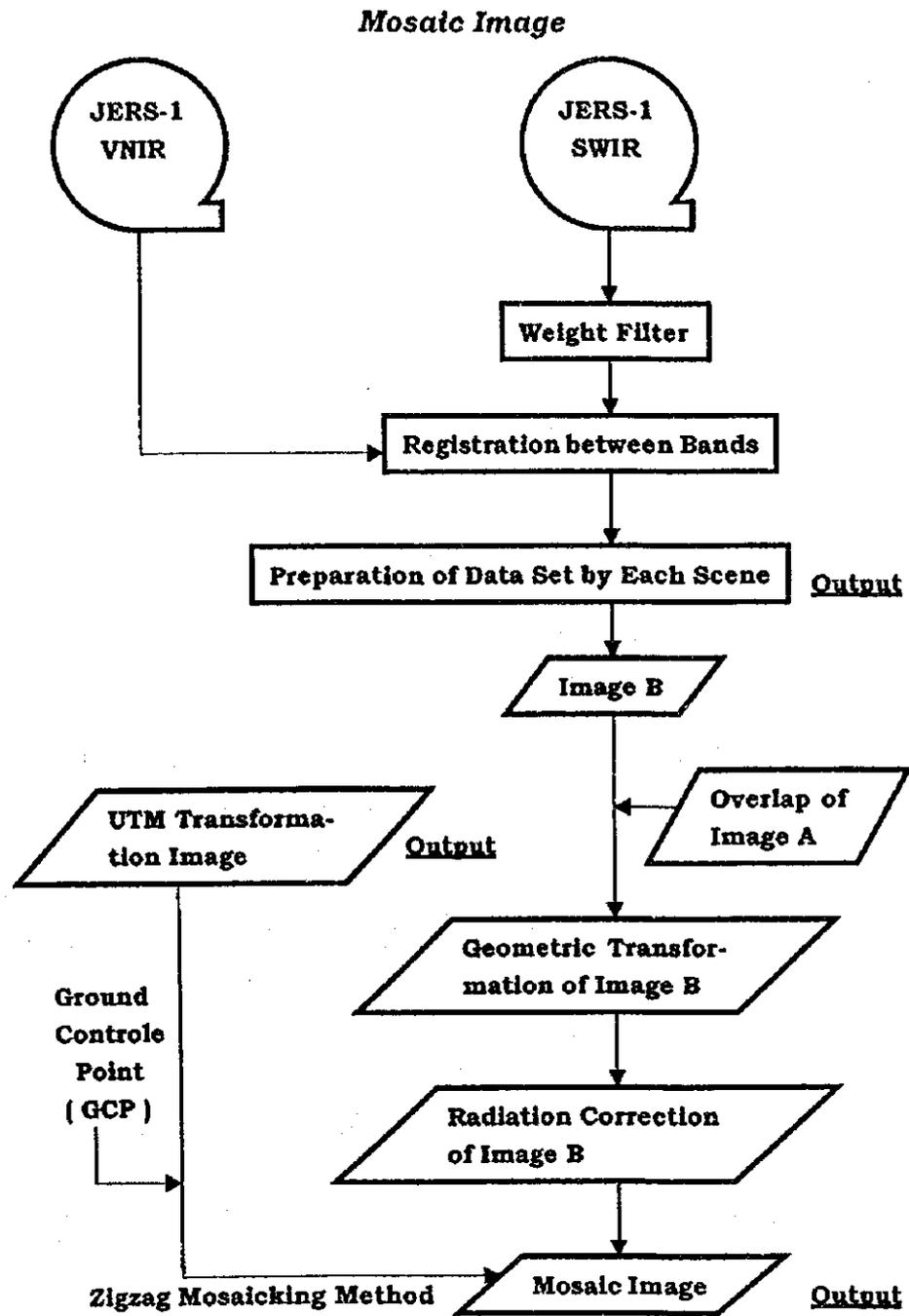


図 9 モザイク画像作成作業のフローチャート

の差から地表形態(物質)を識別する。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の間を通る。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、バスマジアンと呼ばれる大気からの放射光、散乱光および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光が含まれている。したがってセンサが直下を波長 λ で観測している場合には、

$$L(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K(\lambda) \{ \tau_a(\lambda) \{ U(\lambda) + P(\lambda) \} \rho(\lambda) + b(\lambda) \} d\lambda \quad (3-1)$$

と近似される。ここで、

$L(\lambda_1, \lambda_2)$: センサに入力する 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および散乱
$P(\lambda)$: 太陽光の下方散乱光である天空光の放射輝度

である。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、 $U(\lambda)$ 、 $P(\lambda)$ および $\tau_a(\lambda)$ 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間輝度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、物質の比較や判別ができない。

今回の解析に用いた画像データは多時期にわたっているため、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($y = ax$)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および散乱は、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。

(1) 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、高度から太陽高度が 60° となるように入射光量補正を行った。

(2) 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。図 10 は月の玄武岩の方向性反射率補正係数を画像から算出した例である。図 10 中には 0.415 、 0.90 および $1.00\mu\text{m}$ の波長の補正係数曲線が表現されている。同図から明らかなように、天頂角 30° の位置から月の玄武岩を観測した場合の観測輝度は、垂直方向から観測した場合に比較して 55 %程度まで低下してしまう。

JERS-1 OPS1 画像の横方向の視野角は約 7.4° である。このため、図 11 のように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(フェーズ角)は画像の右側と左側で約 7.4° 異なる。このような場合には、完全拡散反射体を対象に角度を変えて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および波長によって異なる。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)、フェーズ角が大きくなる画像右(東)側で約 4 %の輝度低下を生じる。このため東西方向に 2 つの画像を接合した場合には、接合画像最西端の輝度を 1.0 とすると最東端では約 8 %の輝度低下を生じることとなり、画像東側が西側に較べて暗い画像となってしまふ。

この問題を解決するため、大気補正を行った画像から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被覆物質の差による影響を除くためである。統計量は縦(南北)方向に 1 列に配列する画素値の輝度平均値を算出し、これを東西方向のすべての配列について算出した。次に、東西方向の輝度平均値をグラフ化し、輝度勾配を最小 2 乗法によって一次線形式に回帰させた。図 12 は東西方向の輝度平均値のグラフである。このグラフでは、第 1 年次の解析において LANDSAT TM で実施した時よりも明瞭な右(東)下がりの傾向は認められない。この理由は、今回計算した範囲の面積が小さく地表物質の偏在性が統計量に影響していることが考えられる。この原因は、計算に用いた画像では、N-S 方向の構造が卓越しているため地質はこの構造に支配されているためである。例えば、画像西側のチリ側では白亜紀～第三紀の火山岩類が分布するのに対し、中軸部東側のアルゼンティン側では二疊紀の堆積岩類、さらに最東部では第四紀の崖錐が南北に広く分布する。また、中軸部付近のチリ・アルゼンチン国境付近は高地からなり、積雪に覆われている。このように地表物質の分布が南北構造に規制されているため、方向性反射率の影響が統計量に反映されなかったと推定される。

第 1 年次の解析で使用した LANDSAT TM 画像では、輝度勾配は画像左端を 1.0 とする

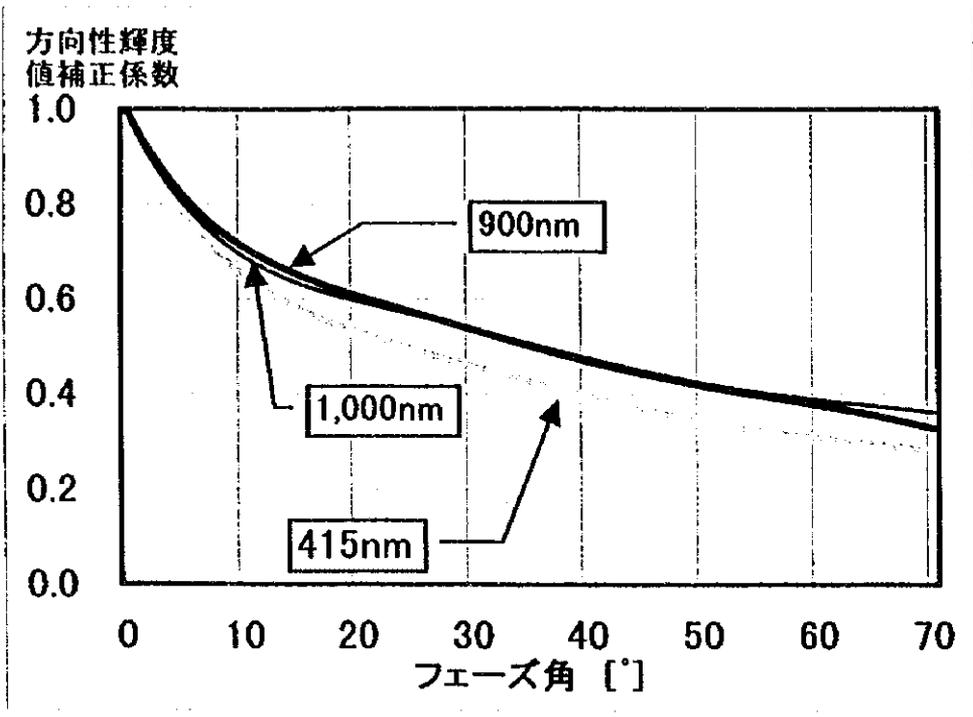


図 10 月の玄武岩の方向性反射率補正曲線

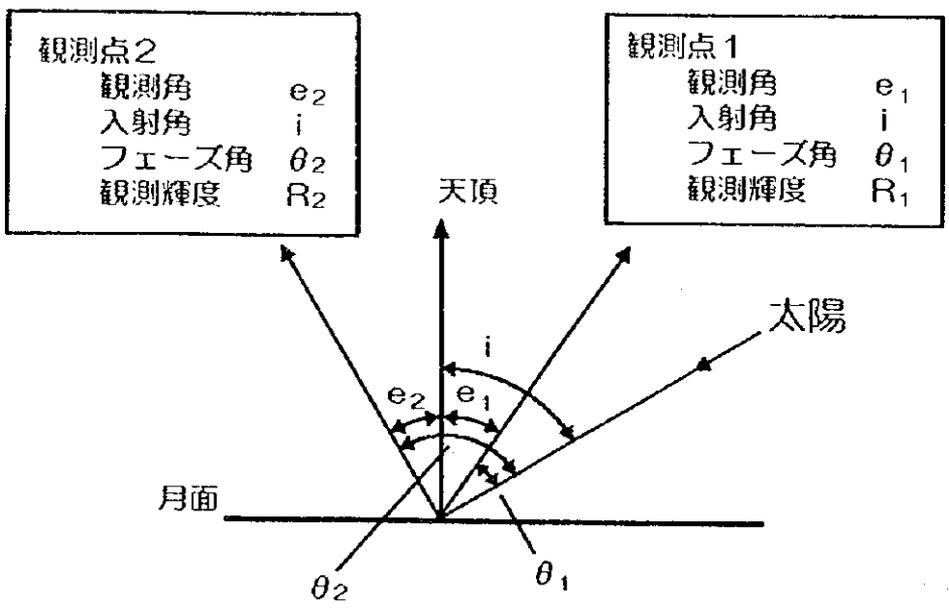


図 11 方向性反射率の定義

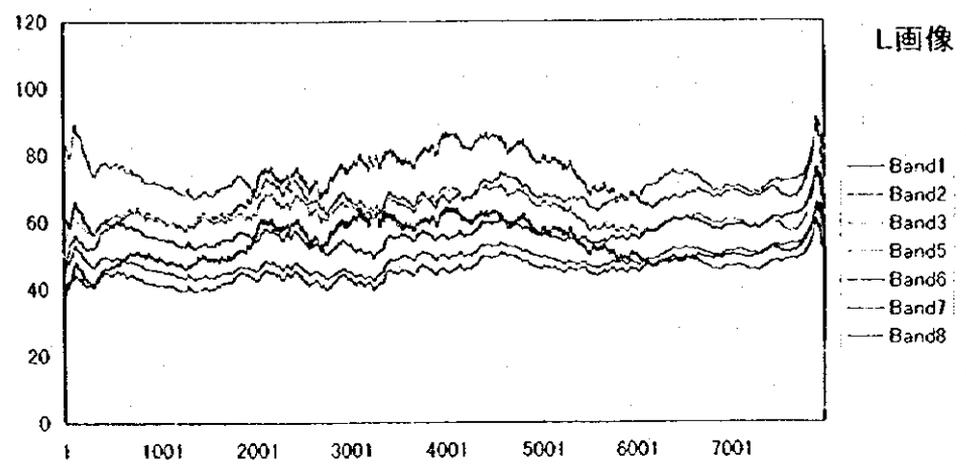
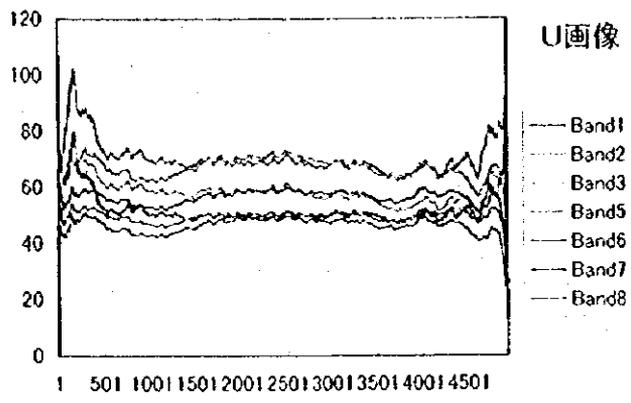
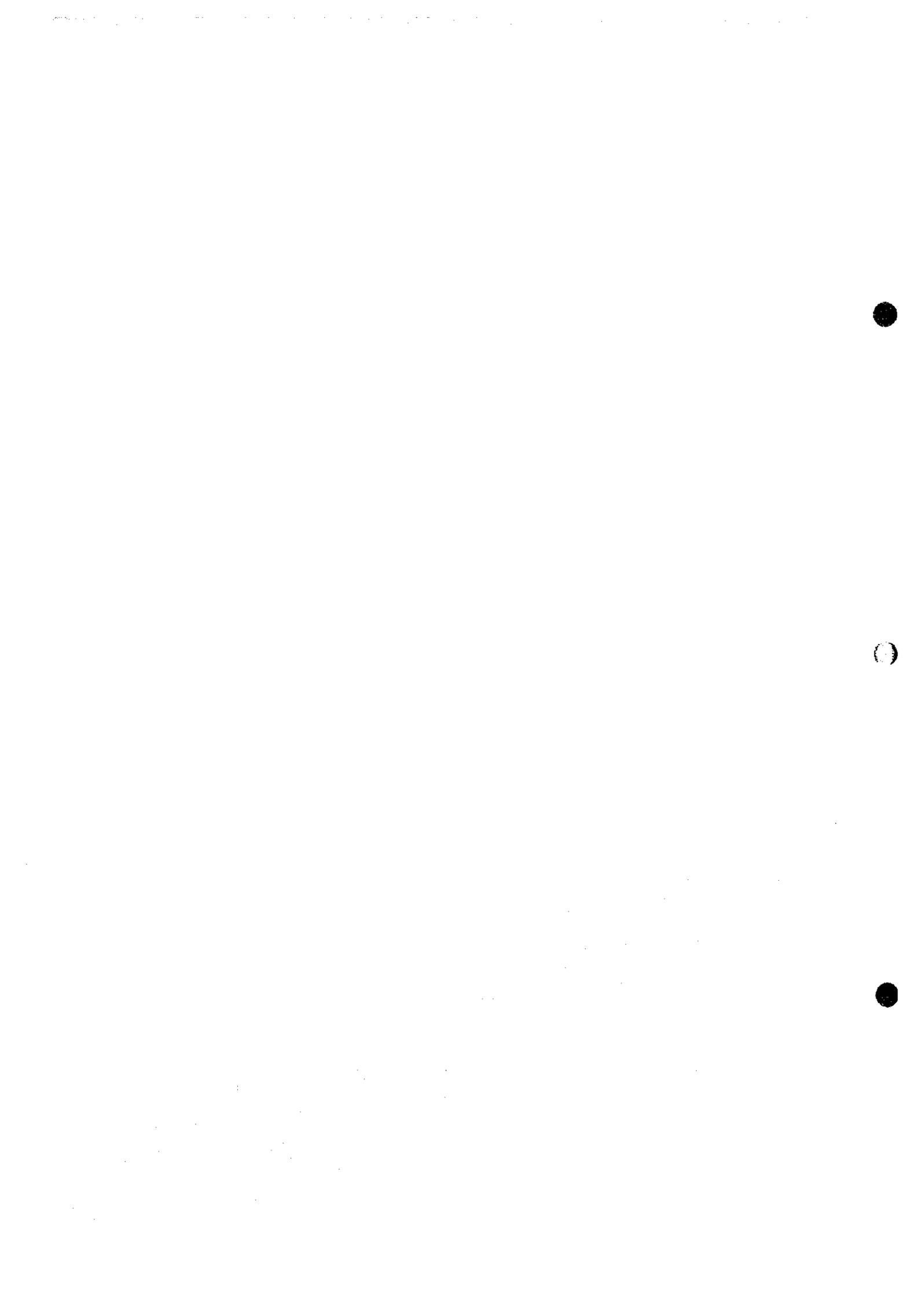


図 12 画像の輝度勾配測定結果



と画像右端では約 7 %の輝度低下が認められた。月の玄武岩の方向性反射率を用いて理論値計算した場合には、画像右端で輝度が約 10 %低下した。実測値ではこの理論値よりもやや輝度低下の程度は低い、実測値は予測通りの結果となった。今回は統計的手法によって方向性反射率の推定ができないため、理論値計算から方向性反射率を算出しこの補正を行った。

方向性反射率補正計算は以下の式で与えられる。

$$C_{\text{phot}}(i, e, \theta) = \frac{C_{\text{dir}}(30^\circ) \cdot \cos 30^\circ / (1.0 + \cos 30^\circ)}{C_{\text{dir}}(\theta) \cdot \cos \theta / (\cos e + \cos i)} \quad (3-2)$$

i : ある画素での太陽の天頂角・・・入射角
 e : ある画素での観測角(天頂とのなす角)・・・観測角
 θ : 太陽-物質-観測角がなす角・・・フェーズ角
 C_{dir} : 方向性反射率補正係数

ここで、 $C_{\text{dir}}(\theta)$ は物質・波長依存性があり、月の玄武岩で波長 1.0 μm の値を用いると、以下の近似式で与えることができる(三箇ほか, 1998)。

$$C_{\text{dir}}(\theta) = a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3 + e\theta^4 + f\theta^5 + g\theta^6 \quad (3-3)$$

ここで、 $a = 0.9937$, $b = -5.182\text{E}-2$, $c = 2.954\text{E}-3$, $d = -9.465\text{E}-5$,
 $e = 1.584\text{E}-6$, $f = -1.312\text{E}-8$, $g = 4.249\text{E}-11$

また、(3-1)式で与えるフェーズ角は観測画素の位置によって異なり、この値は観測画素での衛星からの方位角、伏角、太陽方位角および太陽高度から算出することができる。なお、太陽方位角と太陽高度は、厳密には画素の位置によって異なるが、観測範囲が東西約 80 km と狭いことから画像中央でのノミナル値を用いている。また、観測角の算出には衛星の姿勢のふれを考慮しておらず、画像中軸部の観測画素では、衛星は天頂方向に位置するとした。この場合には、画像左端では方位角 90°, 天頂角 3.7°, 画像右端では方位角 270°, 天頂角 3.7°に衛星は位置する。

以上の各パラメータから、各画素に対して方向性反射率補正を実施した。

(3) 大気およびセンサー感度の補正

大気補正は $\tau_a(\lambda)$ および $b(\lambda)$ 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 $\{U(\lambda) + P(\lambda)\}$ および地表反射率 $\rho(\lambda)$ が求められていなければならない。

(1)で述べた入射光量補正は、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、異なる時期に観測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おり、現実的な方法とは言えない。このため、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した。

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、

$$P'_{ij} = (P_{ij} - P_{av}) / \sigma_p \times \sigma_q + Q_{av} \quad (3-4)$$

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)に観測された画像では、画像重複範囲の植生、積雪、雲、霧、湖、河川の流路および地表構造物などが変化しているため、輝度平均値およ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よう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。

2 つの画像における重複範囲内の全ての対応点について、横軸に基準画像の輝度値を、縦軸に対応画像の輝度値をプロットした散布図を作成する。これらの散布図では地表被覆物や太陽の位置などに変化がなければ、ある勾配をもつ直線付近に高い密度でプロットされる。これに対して、植生、影、雪および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。

図 13 は観測日の異なる P421/R353, 354 と P422/R353, 354 による画像重複部の画像間輝度分布図である。散布図の横軸には東側画像(P421/R353, 354)を、縦軸には西側画像(P422/R353, 354)の輝度値をプロットした。バンド 1 の散布図の中で上辺付近あるいは右辺付近に分布する点群は一方の画像のみに積雪がある場合であり、右上隅の点群は両画像に積雪が認められる地域を表している。図中の色は出現頻度を意味し、紫→青→水色→黄色→赤の順に出現頻度が高くなることを意味する。

次に、積雪地域以外の大部分の対応点では $\rho(\lambda)$ に大きな変化がなく、プロットした点はある直線の近傍に高い密度で分布することが予想される。図 13 のバンド 1 では出現頻度の高い点群が赤い色調で表現されており、この出現頻度の高い部分は勾配 45°の直線付近に分布している。なお、プロットした点群の出現頻度はこの直線からはずれるに従って急速に減少する。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 2 乗法によって一次回帰させることで

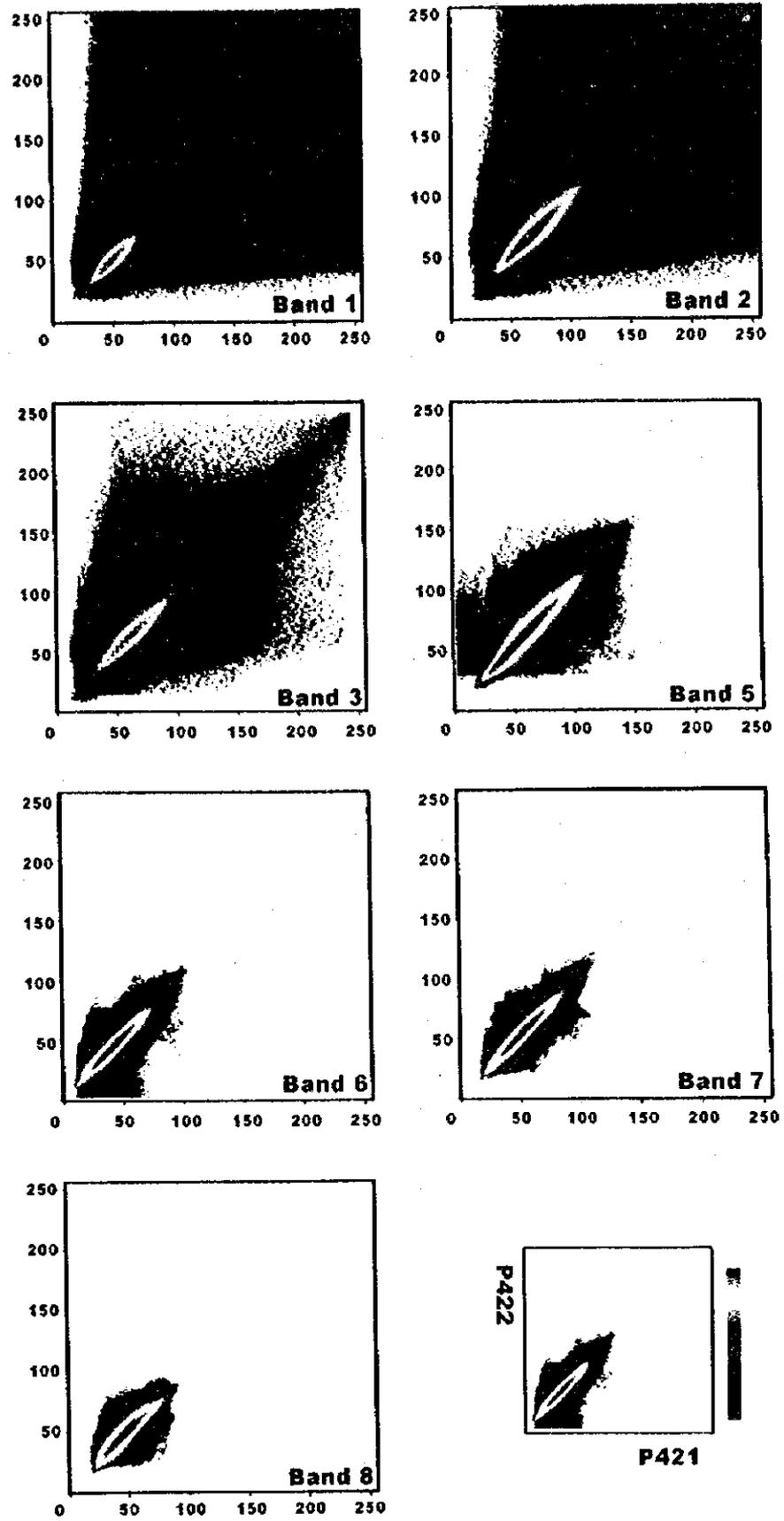
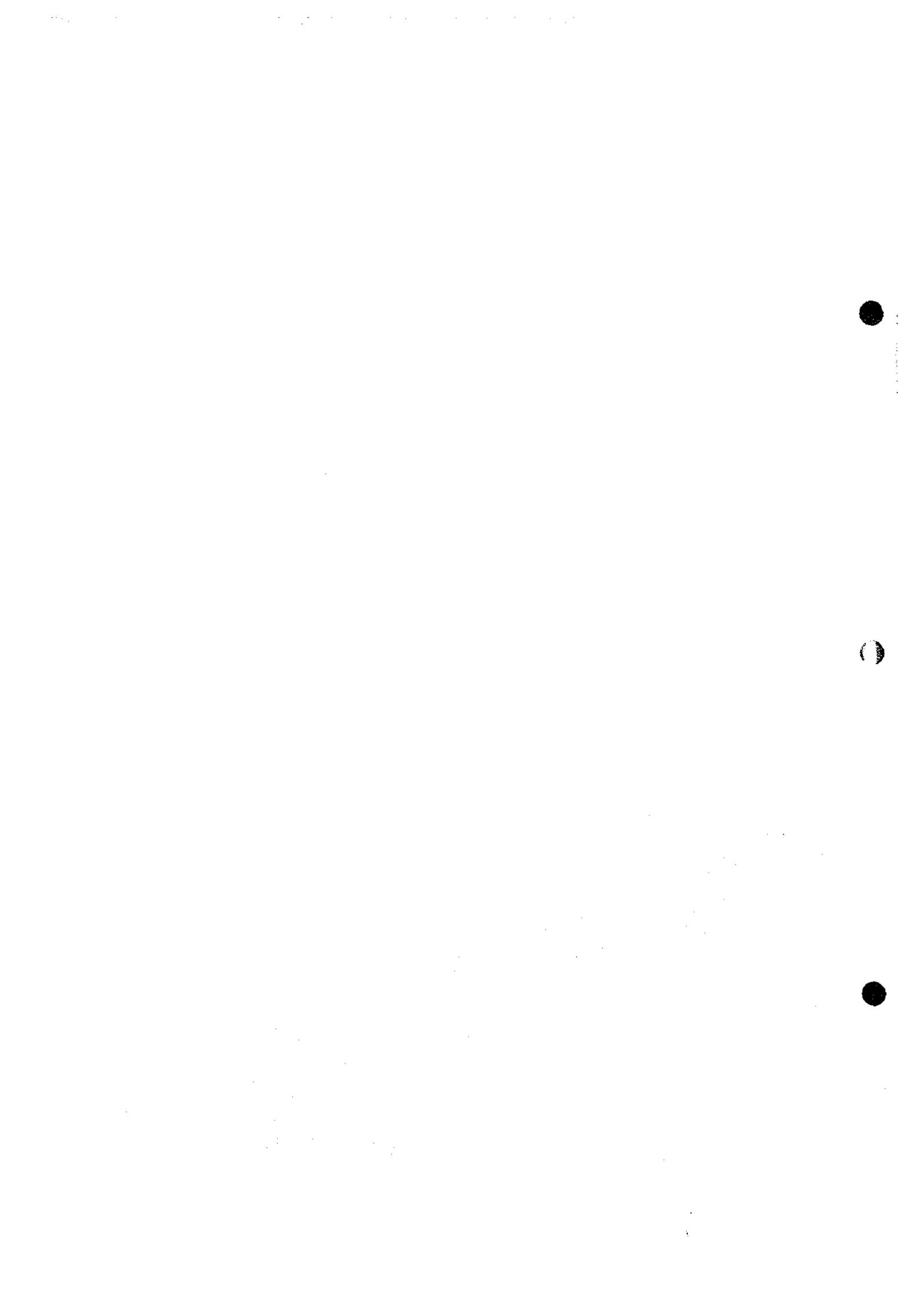


図 13 画像重複部の画像間輝度分布



地形による影響を除去した。このようにして求めた $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ および $\rho(\lambda)$ の補正済み一次回帰式から、2 画像間の $\tau_a(\lambda)$ および $b(\lambda)$ 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、同一観測日に撮像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 $\tau_a(\lambda)$ 、大気放射および散乱 $b(\lambda)$ 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、この場合には係数 $a = 1.0$ を取らない場合が多い。これは大気の透過率 $\tau_a(\lambda)$ 、大気放射および散乱光 $b(\lambda)$ が等しくないことを表している。この一次回帰式によって両画像の大気透過率 $\tau_a(\lambda)$ と大気放射および散乱光 $b(\lambda)$ を一致させることができる。

これらの項は正確には観測時のセンサのゲインが異なるため、 $\tau_a(\lambda)$ および $b(\lambda)$ 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、P422/R347~R350 を除く 9 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。よって、今回は P421/R347~R349(3 シーン)、P421/R351~R354(4 シーン)および P422/R353~R354(2 シーン)の 3 組の放射量補正を最初に実施する。
- (b) 各画像の大気補正は南側に向かって順次実施する。
- (c) P421/R351~R354 と P422/R353~R354 の東西 2 組の画像は両者の画像重複部を用いて実施し、P421/R351~R354 の画像(東側)を基準とした。

なお、P421/R347~349 の画像と P421/R351~P421/R354 の画像間には画像重複部がないため両者間の大気補正を行うことができなかった。このため、P421/R347~349 の画像モザイクと P421/R351~R354 および P422/R353~R354 の画像モザイクは異なる基準で作成されており、輝度値を直接比較することはできない。

また、2.4 以降も記述では、記載の煩雑さを避けるために、原則として、上述した対象地域の北部 3 シーンの"画像モザイクそのもの"と"画像モザイクの範囲"のことを一貫して「U 画像」と呼び、同様に、南部 6 シーンについては「L 画像」と呼ぶ(図 2 参照)。

2.4 シームレスモザイクと幾何変換

2.4.1 幾何変換

2.3.3 の作業により U および L 画像内では、統一した基準で輝度変換がなされている。

同一日に観測された連続する 2 画像の接合の場合、2 画像間で一方の画像を平行移動することで 2 画像を一致させることができる。これは画像が連続したストリップとして観測され、このストリップからロウ番号に応じた位置で画像が切り出されるためである。しかしながら、JERS-1 OPS の場合には平行移動だけでは接合できず、拡大/縮小および回転が必要となる場合がある。今回の同一日に観測された画像についても 2 画像の位置関係を検討し、拡大/縮小および回転が必要であることが判明した。このため、ヘルマート変換(相似変換)を用いて幾何変換を実施した。

なお、今回は空間解像度を 18 m/1 画素とし、オリジナルの解像度を保持させた。

2.4.2 シームレスモザイクの手法

異なる時期に観測された画像では、地表被覆物の変化、影の位置および雲などによって、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ビジュアルな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。また、OPS 画像には視差による歪み(中心投影による射影歪み、図 14)が含まれている。この歪み量は標高と衛星の位置によって異なるため、線形式でこの歪みを除去することはできない。このため、画像の視差歪みの比較的小さな箇所や地表被覆物に変化のない箇所を縫って画像接合を行うシームレスモザイク手法を用いた。

ここでは、シームレスモザイク(第 1 年次の報告書では、“千鳥足接合法”と呼んだ)手法について簡単に説明する。シームレスモザイクは当初、SAR 画像のモザイク画像接合のために開発された手法である。SAR 画像ではその特性により Near 側と Far 側で同じ標高の山であっても“倒れ込み”(フォアショートニング、レイオーバー)量が異なる。このため、モザイク合成時には 2 つの問題点が発生する。

1 つは東西に隣接する画像の重複領域では Far 側と Near 側の倒れ込み量が異なるため、重複する地域の画像が異なる形状で表現されていることである。

もう 1 つの問題点は、画像対応点に信頼性がおけないことである。つまり、画像の対応点には同一地点と考えられる画像座標が与えられるが、この画像座標には倒れ込み量による歪みが含まれている。このため画像対応点を数点しか取得していない場合には、倒れ込み量の歪みが影響し、幾何変換係数を正しく求めることができない。したがって、このような不正確な幾何変換係数を用いてモザイク画像を作成した場合には、画像周囲に歪みが生じてしまう。特に、多数の枚数を接合する広域モザイクではこの影響が大きく、幾何変換誤差が累積し、モザイク画像周辺部に歪みが蓄積する。

SAR の倒れ込みに類似した現象が LANDSAT TM および JERS-1 OPS 画像の光学センサにおいても発生する。いずれの観測衛星でも画像の左右両端は衛星から地表を斜めに見下ろすこととなり、起伏がない場合を除いて画像両端では必ず視差が発生する。例として LANDSAT TM において東西 2 画像の重複部に 2,500 m 程度の孤立した山頂が存在している場合を考える。西側の画像では、この頂上は本来の位置よりも約 200 m 程度東側に

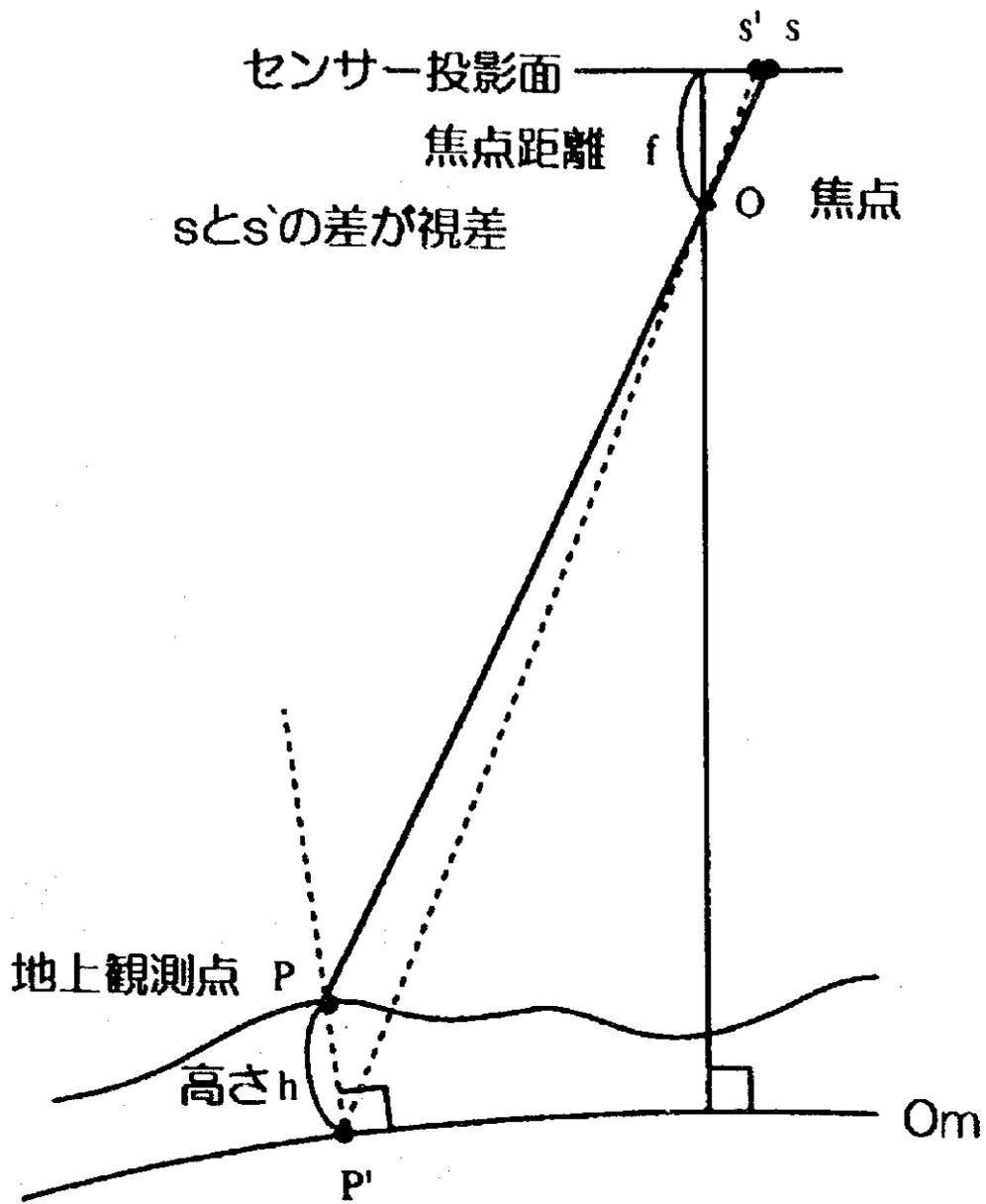


図 14 中心投影による射影歪み

移動した位置に投影され、逆に東側の画像では、山頂は西側に同量移動して投影される。このように画像重複部では東西方向で合計約 400 m の視差を含む画像を接合しなければならない。

このような倒れ込み歪みや視差歪みを含んだ画像の接合を以下の手順で実施した。

- (1) 目視あるいは衛星の姿勢情報(ノミナル値)から 2 画像を概略一致させる幾何変換式を算出する。この時の幾何変換式としてはヘルマート変換式を用いる。なお、今回の JERS-1 OPS では目視によって与えた。
- (2) 画像重複領域で小ウィンドウ(15×15 画素程度)を設定し、面積相関係数を用いたテンプレートマッチング手法によってこのウィンドウのマッチング位置を検出する。
- (3) 上述の作業を上下、左右適当な間隔(今回は 20 画素)で繰り返し、画像重複部全体のマッチング位置の移動ベクトルを求める。
- (4) これらの面積相関係数が閾値以上(本解析では 0.5 以上)の移動ベクトルから最小 2 乗法によってヘルマート変換の幾何変換係数を算出する。これらの対応点の中には倒れ込み量あるいは視差の大きな地域の移動ベクトルも含まれており、これらを除いて(閾値を $+1\sigma$ とした)最小 2 乗法によってヘルマート変換の幾何補正係数を算出する。
- (5) (4)で求めた幾何変換係数をもとに幾何変換を行う。
- (6) 画像重複部の 1 ライン目において小ウィンドウを設定し、面積相関係数を用いたテンプレートマッチングを行う。両画像がもっとも正確に一致している箇所(視差歪みあるいは倒れ込み量の差がもっとも小さい地域)を検索し、この位置をこのラインの画像縫合部とする。なお、地表被覆物に変化がある地域や、雲に覆われている地域では面積相関係数が小さくなるため画像縫合部にはならない。
- (7) 同様の作業を 1 ラインずつ下方へ移動させ、2 画像が最も良く一致した縫合位置を求める。この結果、視差の大きな箇所あるいは倒れ込み量の大きな箇所や、地表被覆物に変化している箇所、影の位置が変化している箇所および雲や雪などの地域を避けた位置で縫合線を作成することができる。
- (8) 2 画像を縫合線で接合する。

以上の手法による画像のモザイク合成を実施することで、つなぎ目のないモザイク画像(シームレスモザイク画像)を作成することができる。なお、以降の記述では、これに輝度補正までを行ったモザイク画像を”輝度補正画像”と呼ぶ。

2.4.3 幾何補正

2.4.2 までの手法によって、空間解像度 18m の 2 つのモザイク画像(U 画像および L 画像)を作成した。次に、縮尺 1/50 万の TPC(Tactical Pilotage Chart)を用いて各単位画像

ごとに約 10 点(U 画像の範囲では約 30 点, I 画像の範囲では約 60 点)の GCP(Ground Control Point)を選定し, UTM 座標系へ幾何変換した。なお, GCP は人工物(道路の交点など)が最も選定しやすいが, 対象地域には明瞭な人工物が少ないため, 山間部の沢の合流点で選定したものが多し。

表 2 に U 画像の範囲で GCP 再計算時の誤差を求めた結果を示す。

表 2 U 画像での GCP 変換誤差

番 号	X方向			Y方向		
	読みとり	再計算	誤差	読みとり	再計算	誤差
1	2641.00	2639.91	1.09	1342.00	1332.82	9.18
2	4236.00	4244.27	-8.27	506.00	509.54	-3.54
3	3220.00	3233.96	-13.96	1492.00	1497.68	-5.68
4	994.00	984.70	9.30	2994.00	2997.59	-3.59
5	2936.00	2921.47	14.53	2860.00	2865.98	-5.98
6	4326.00	4305.53	20.47	3412.00	3415.48	-3.48
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
24	2054.00	2045.42	8.58	10656.00	10664.22	-8.22
25	802.00	797.59	4.41	11212.00	11224.78	-12.78
26	3175.00	3176.22	-1.22	11384.00	11381.46	2.54
27	4059.00	4059.41	-0.41	11017.00	11010.18	6.82
平均誤差			10.11			6.97

これら GCP の再計算の結果, GCP の位置には最大 20 画素(約 400 m)程度の誤差を含んでいた。この原因の 1 つは TPC 地形図の不正確さにある。図 15 に第 1 年次の解析で作成した LANDSAT TM 画像と TPC 地形図との比較を示す。同図で明瞭なように, 山間部の沢の位置が画像と一致せず, また, 沢の形自体も異なっていることがわかる。もう 1 つの誤差の原因は 2.4.2 で述べた視差による影響がある。既に述べたように, OPS センサで観測された画像は中心投影画像であるため, 図 14 の様に必ず視差が発生している。したがって, 地形図上の点 P は画像上で S' に投影されなければならないが, 点 P に対応する画像上の点 P' は画像上では視差によって S に投影されている。つまり, GCP 座標には標高による視差誤差(S-S')が含まれている。この視差誤差は標高と画像位置によって異なるため, 一様な誤差にはならない。また, 対象地域東部の盆地では標高が 2,000 m 以下であるのに対し, アルゼンティンとチリとの国境付近の山岳地帯では標高が 5,000 m を超えており, 対象地域は高低差の極めて大きい地域である。このため, この視差誤差も変動幅が他の地域に較べて大きい。これらのことから, 画像を正確に UTM 座標系へ投影することができなかつた。なお, デジタル地形データを手に入れば, 衛星の軌道情報から画像上で選定した GCP の座標における視差を算出することができる。また, 画像についても 1 画素ごとに視差量を算出し, 視差補正を実施できるため地形図に対応した正射投影画像を作成することができる。

2.4.4 U画像およびL画像のバスラジアンズ補正

U画像とL画像に画像重複部がないため、両者の輝度補正を正確に行うことができなかった。このためU画像とL画像では大気の透明度が一定であったとして取り扱ったが、大気の散乱光(バスラジアンズ)については、画像重複部が無くとも画像最低輝度値を与えることで補正することができる。表3にU画像とL画像のバスラジアンズを示す。

表3 バスラジアンズ(最小輝度値)

画像	バンド 1	バンド 2	バンド 3	バンド 5	バンド 6	バンド 7	バンド 8
U画像	11	13	7	8	8	14	16
L画像	14	14	5	14	9	16	18

2.5 スペクトル解析画像の作成

これまでの作業によって、対象地域の北部画像群(U画像)と南部画像群(L画像)の輝度補正画像を作成することができた。次に、これらを用いて変質帯の抽出・分類を行うためにフォールスカラー画像、比演算画像およびログレジデュアル画像を作成した。

図16にログレジデュアル画像および比演算処理画像作成作業のフローチャートを示す。

2.5.1 雪の領域の除去とログレジデュアル値

本作業のスペクトル解析では露岩地域や変質帯を対象としている。画像には露岩地域のほかに雪や雲および鹹湖堆積物などスペクトル解析に悪影響を及ぼす地域が含まれている。このような場合、解析に先立ちこれらの地域を除去するマスキング処理が必要となる。このマスキング処理では、除去したい物質の輝度特性がその他の物質と大きく異なる場合に明確に閾値を用いて分離することができる。このため分離に適した処理を加えた画像を別途作成する必要がある。

今回使用したU画像内には雲が認められず、L画像の南部にごくわずかに認められるに過ぎない。また、この雲の地域には目的とする変質帯が認められないことから雲の除去を目的とした閾値は設定していない。

雪の領域ではバンド1~3で反射率が高いが、バンド5~8で吸収が生じ反射率が低いことが特徴である。輝度補正画像の積雪部の輝度値はバンド1,2では220を超え、バンド3では150程度の高い値を示す。ただし積雪部境界付近では輝度値が徐々に変化するため、輝度補正画像から閾値を一意的に決めることは難しい。このため、積雪境界が明瞭となるログレジデュアル処理を用いて積雪地域の閾値を決定した。



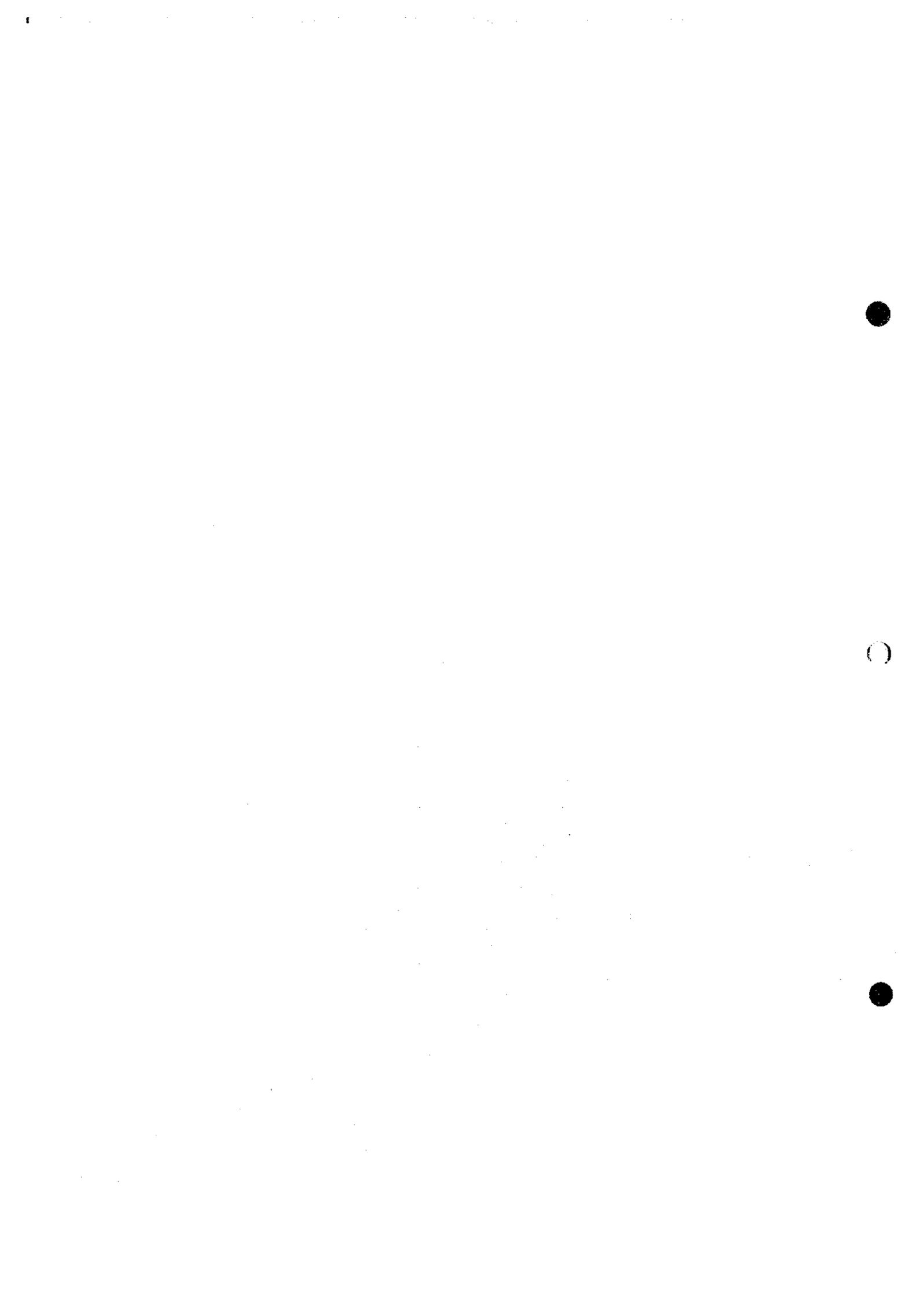
LANDSAT TM



Tactical Pilotage Chart

10 km

図 15 LANDSAT TM 画像と TPC(縮尺 1/50 万地形図)の比較



Logarithmic Residual Image and Ratio Image

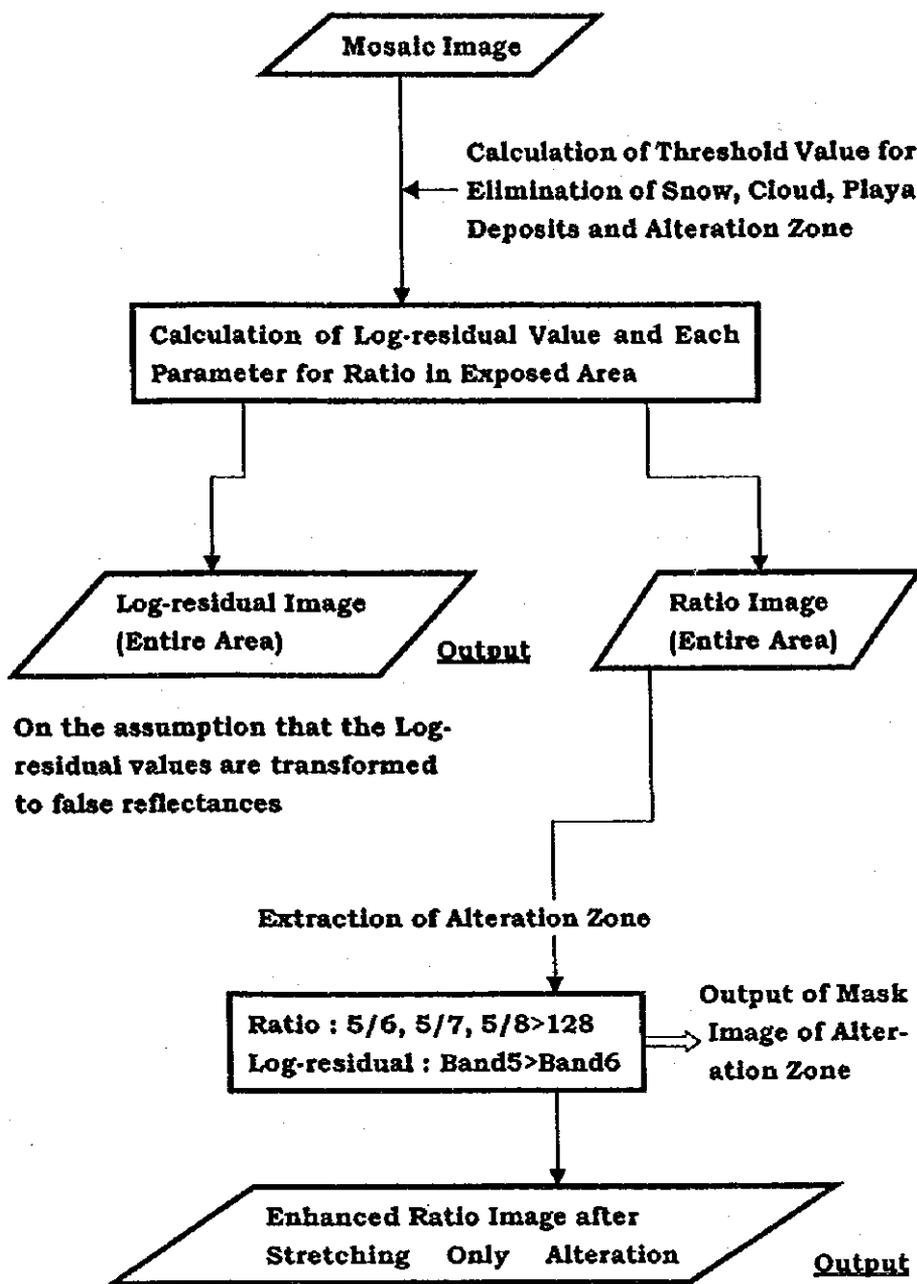


図 16 ログレジデュアル画像および比演算処理画像作成作業のフローチャート

2.5.2 フォールスカラー画像

前項で作成したマスク画像と輝度補正画像から、積雪地域以外の輝度統計量を算出し、フォールスカラー画像(BGR = 358, 図 17 および 18)を作成した。なお、U および L 画像の両者に対して、画像の鮮鋭化には共に同じ係数を使用しており、大気の透過率などに変化がなければ同じ物質は同じ色調で表現される。この画像では雪が濃青色に表現され、変質帯は淡青～淡緑色に表現される。これに対して、露岩地域では褐色～淡黄色など様々な色調で表現されている。しかしながら、L 画像の南西部に位置するアルゼンティンの領土内では変質帯と第三紀火山岩類が同系統の色調で表現されており、この画像のみで変質帯の分類を行うことはできない。また、変質帯の色調の違いは不明瞭であり、フォールスカラー画像からの分類はできない。なお、図中の番号は第 1 年次に実施した画像解析で抽出された変質帯に与えた番号である。

フォールスカラー画像の特徴として以下の点がいえる。

- ・ 露岩地域が多様な色調で判読できる。
- ・ 変質帯の判別が比較的容易であるが、変質帯と露岩地域とが類似した色調となる場合がある。
- ・ 変質帯の細分ができない。
- ・ 積雪部の境界を判別することが難しい場合がある。
- ・ 鹹湖堆積物と積雪部の判別ができない。
- ・ 地形により光の当たり方が異なる(逆に地形が判読できる)。

2.5.3 ログレジデュアル処理画像

多チャンネルのスペクトルデータを反射率に変換する方法は、これまでに開発された 2 つの手法に分けることができる。

1 つは対象地域のスペクトルデータを観測しこれと衛星データとを比較する手法である。例えば、衛星から識別できる範囲が均質な物質で覆われている地域において、地表物質の反射スペクトルを実測する方法がある。この方法は絶対反射率への変換が可能であるが、実測データが必要なこと、均質な物質が分布する地域を特定することが困難であることなどから、一般的な変換手法とはいえない。

これに対してもう 1 つの方法は、衛星データのみから推定する方法であり、この場合には疑似反射率を求めることができる。これまで考えられている手法としてログレジデュアル(Log-Residual)処理やグレイスケールログレジデュアル法があるが(通商産業省・資源エネルギー庁, 1996), これらの手法はある条件を仮定した上で成立する。対象地域では反射スペクトルの実測値データが得られないこと、露岩地域であり、多様な岩石が露出する地

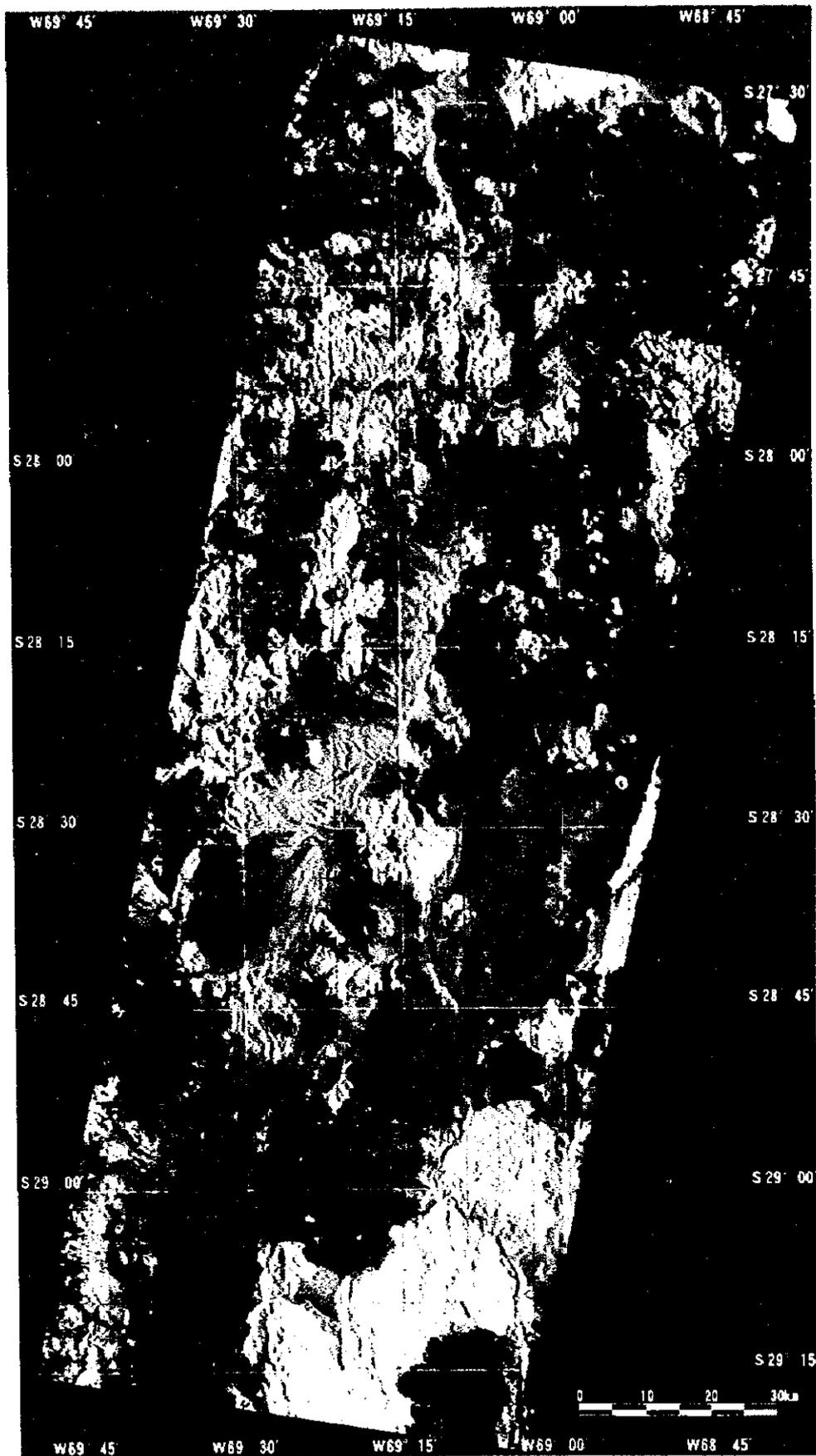


図 17 U 画像範囲のフォールスカラー画像 (BGR = 358)

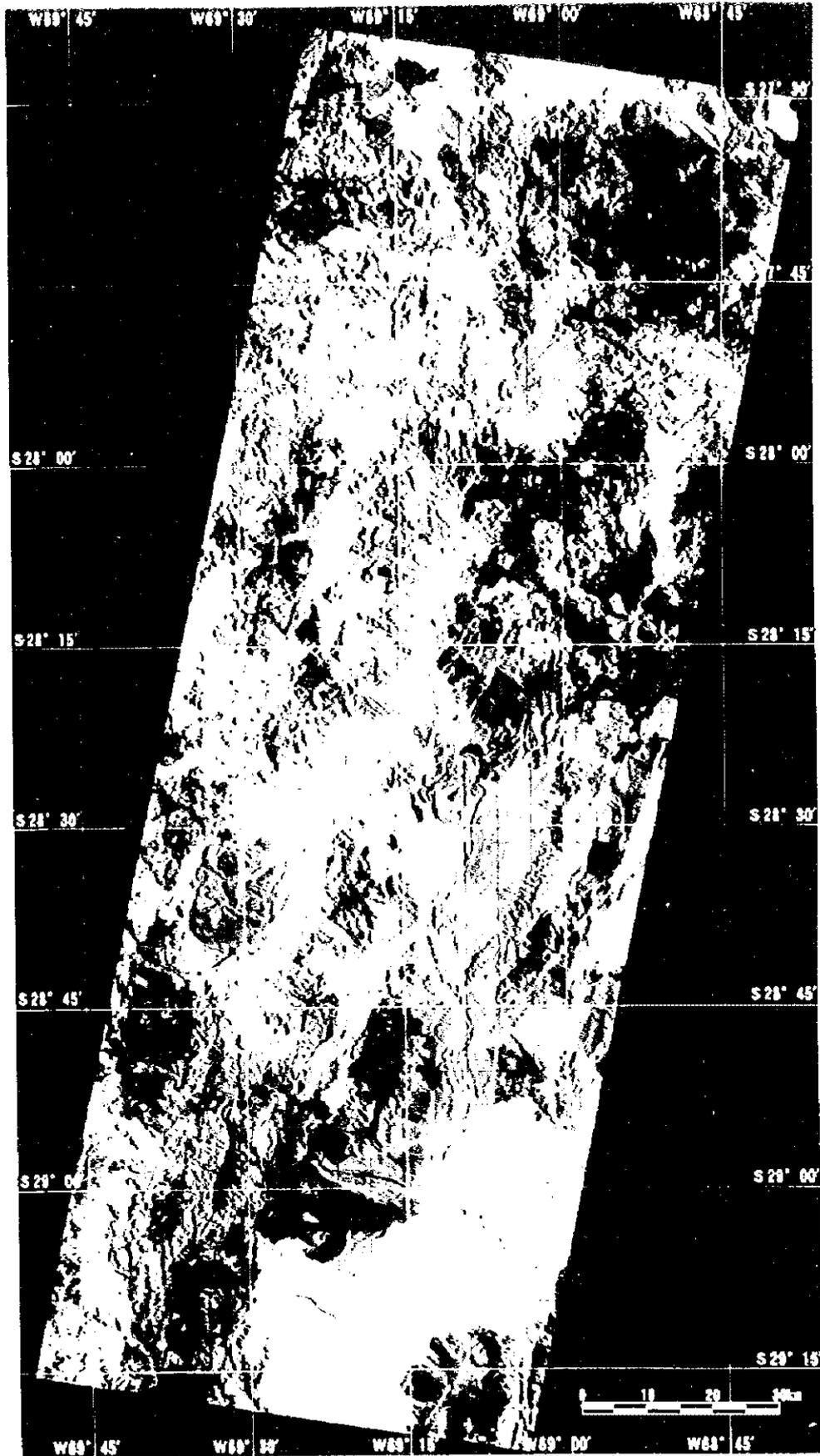


図 17 リ雨停範囲のフォールスカラー画像(BGR - 358)





図 18 L 画像範囲のフォールスカラー画像 (BGR = 358)

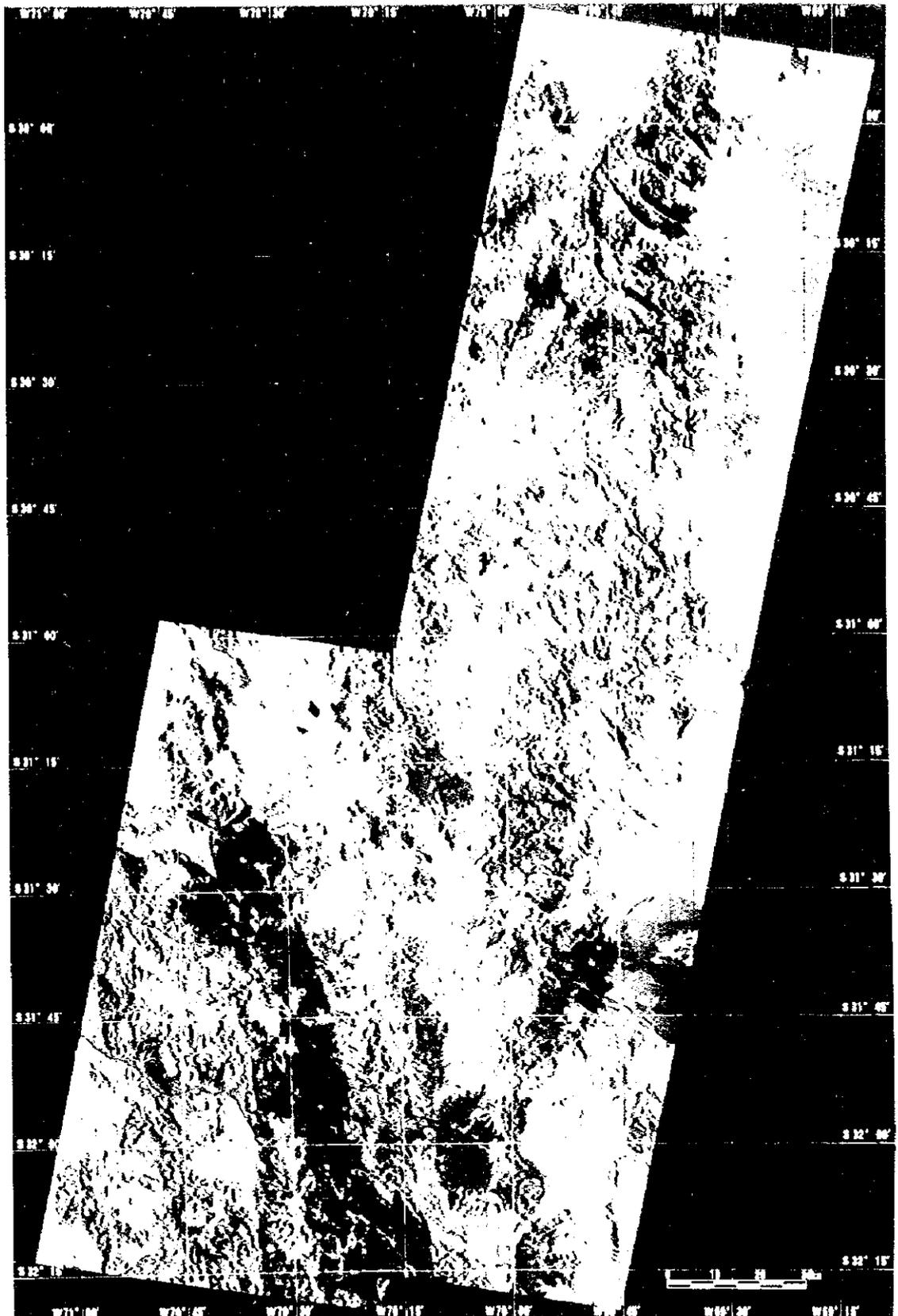


図 13 古俣範圍のフォールスカラー地帯の地形図



域であるのでログレジデュアル処理を用いた疑似反射率の変換および画像作成を行った。

(1) ログレジデュアル処理の原理

ログレジデュアル処理はセンサで観測されたラジアンスが、地表物質の反射率、地形効果、照射効果の3要素の積で表されるとの仮定に基づき、各バンドと各ピクセルの幾何平均によりラジアンスを正規化し、バンド間の応答パターンを反射率パターンに類似したものに交換するものである。しかし、この手法には加法的因子が加味されておらず、可視域においては大気の散乱(特にレイリー散乱)の影響を除去する必要がある。

ログレジデュアル値は以下の方法によって計算され、

$X_{i\lambda}$: サンプルポイント i におけるチャンネル λ の観測輝度

$X \cdot \lambda$: λ チャンネルの全対数平均値

$X_{i \cdot}$: サンプルポイント i での全チャンネル対数平均値

X : 全サンプル, 全チャンネル対数平均値

とすると、ある点の波長 λ でのログレジデュアル値 (Y_i) は、

$$Y_i = \log X_{i\lambda} - X_{i \cdot} - X \cdot \lambda + X \quad (5-1)$$

で表される。

(2) ログレジデュアル処理

前項で述べたように、ログレジデュアル処理では大気散乱を含めた加法因子を推定しなければならない。ここでは、2.4.5 で求めた最小値をパスラジアンスとして用いて、ログレジデュアル値の算出を行った。なお、ログレジデュアル値の算出は2段階の作業からなり、まず最初、雪・植生のない小領域からログレジデュアル処理の係数を算出した。この理由は、ログレジデュアル処理画像 (BGR = 678) で積雪境界が明瞭となり、この値を用いて積雪領域の閾値が決定できることである。

次に、このマスクを用いて、植生のない U 画像および L 画像の東側 (P421/R351 ~ R354) から対象地域全体のログレジデュアル処理に使用する係数の算出を行った。

1 回目の小領域でのログレジデュアル処理の係数を以下に示す。

表 4 ログレジデュアル処理係数 (概算時)

	バンド 1	バンド 2	バンド 3	バンド 5	バンド 6	バンド 7	バンド 8	全バンド
$X_{i\lambda}$	3.7175	4.0355	4.0235	4.0688	3.7899	3.7153	3.4489	3.8285

次に、視覚的に各バンド間の輝度変化を明瞭に捉えるため、バンドごとにログレジデュアル値の標準偏差を算出し、 $\pm 2.5\sigma$ を 256 階調に割り当ててログレジデュアル処理画像

を作成した。このストレッチ処理はバンド毎に実施するため、バンド間の輝度の関係は正しくなくなる反面、バンド間の特徴を明瞭にすることができる。

ログレジデュアル処理画像から閾値を バンド 1~3>220, かつ、バンド 5~8<40 とし、この条件に該当するものを積雪地域と判別した。

次に、この閾値を用いてU画像とL画像の東側(植生のほとんどない地域)のログレジデュアル値の算出を行った。ログレジデュアル処理の係数を以下に示す。

表 5 ログレジデュアル処理係数(露岩地帯)

	バンド 1	バンド 2	バンド 3	バンド 5	バンド 6	バンド 7	バンド 8	全バンド
$X_{i\lambda}$	3.699	4.0179	4.0148	4.0778	3.7973	3.7246	3.4525	3.8265

次に、これらの値を用いて全バンドのログレジデュアル処理画像を作成した。図 19 および 20 にログレジデュアル処理画像(BGR = 678)を示す。この画像では雪に吸収があるため、積雪地域は黒に近い色調で表現されており、積雪地域の境界を明瞭に読みとることができる。また、フォールスカラー画像では淡緑色で表現されていた変質帯が、この画像では薄紫色で表現されている。さらに、この画像では変質帯以外の露岩地域も適正な色調で表現されている。したがって、変質帯種類の差を反映する微妙な階調差を表すことができないため、この画像を用いて変質帯分類を行うことはできない。そのような理由で、この処理を反射スペクトルパターン(ログレジデュアル値)を求めるために使用した。

ログレジデュアル画像(BGR = 678)の特徴として以下の点を指摘できる。

- ・疑似反射スペクトルと推定されるログレジデュアル値を得ることができる。
- ・地形の影響を受けず、同じ物質が分布しておれば斜面の日向、日陰とも同じ色で表現される。
- ・積雪境界が明瞭である。
- ・露岩地域は単調な色調で表現され、地質の違いは不明瞭である。
- ・変質帯の判別は比較的容易であるが、露岩地域と類似した色調で表現される場合がある。
- ・変質帯の細分ができない。

なお、このログレジデュアル処理画像で積雪境界が明瞭であることから、この画像を用いて積雪地域のマスク画像を作成した。

2.5.4 比演算処理画像

(1) 比演算処理の原理

JERS-1 OPS 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

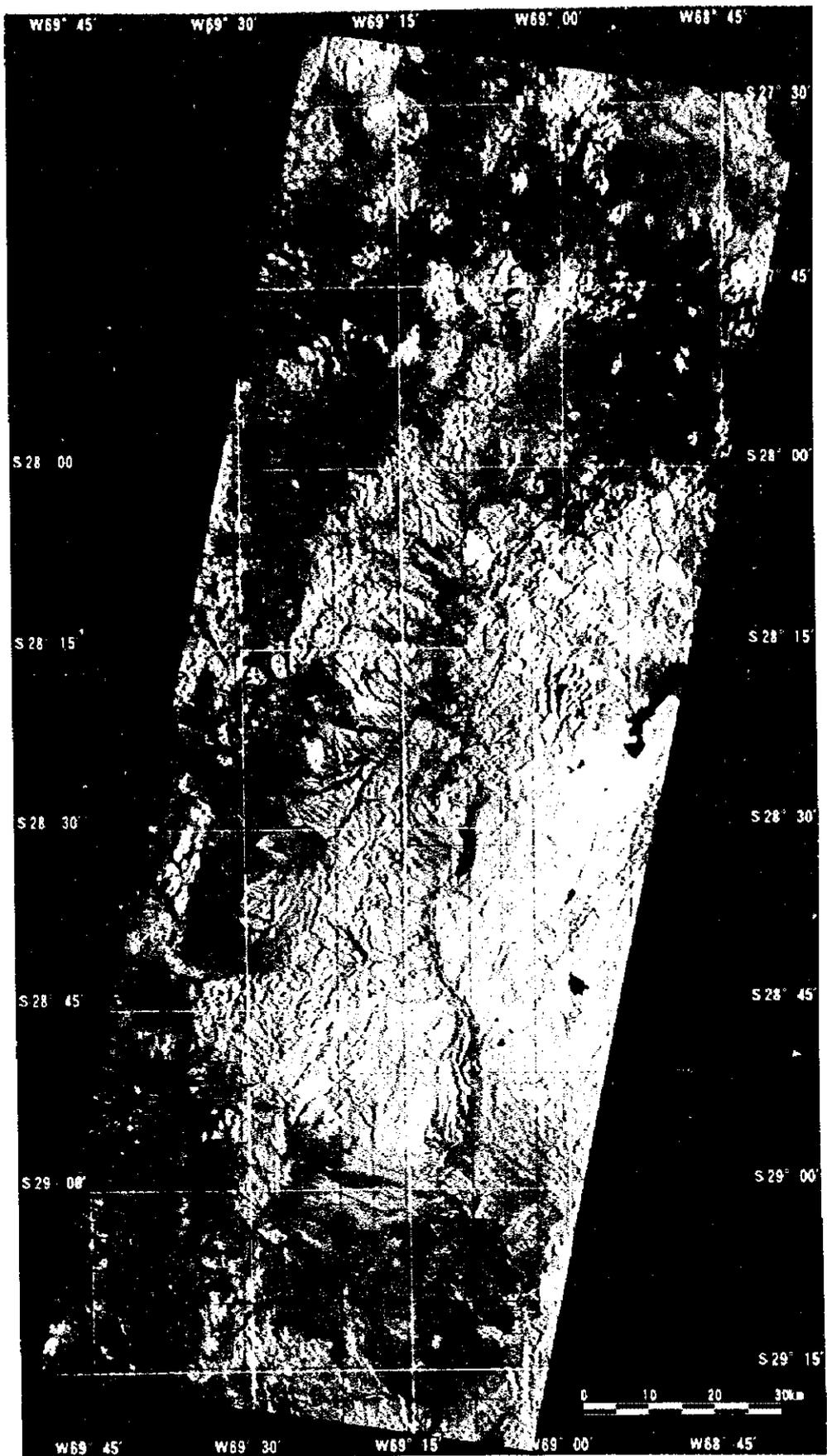


図 19 U画像範囲のログレジデュアル処理画像(BGR = 678)

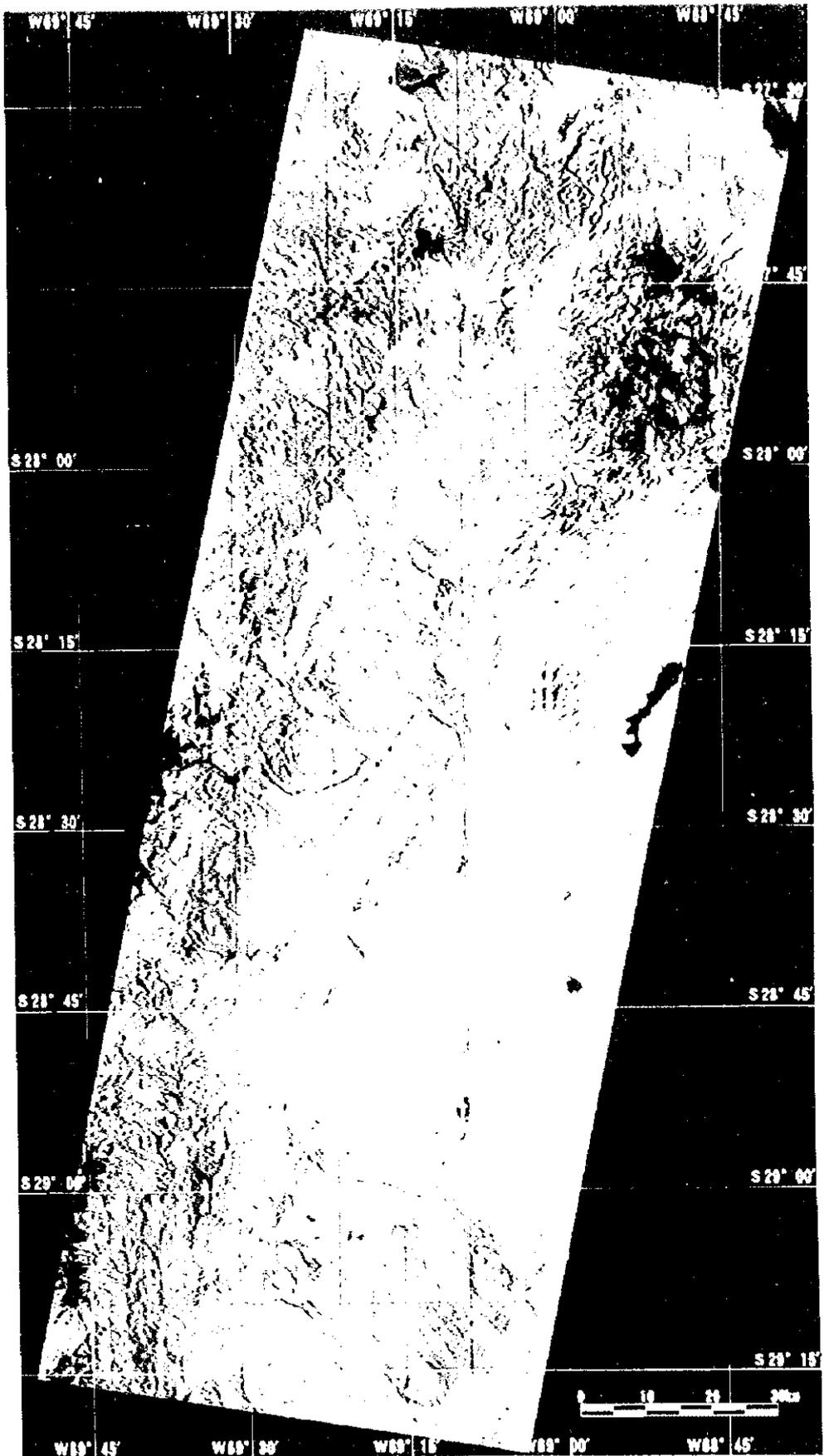


図 19 3 視像範囲のロクレンテュアル処理画像(002) 5/10





図 20 L 画像範囲のログレジデュアル処理画像 (BGR = 678)

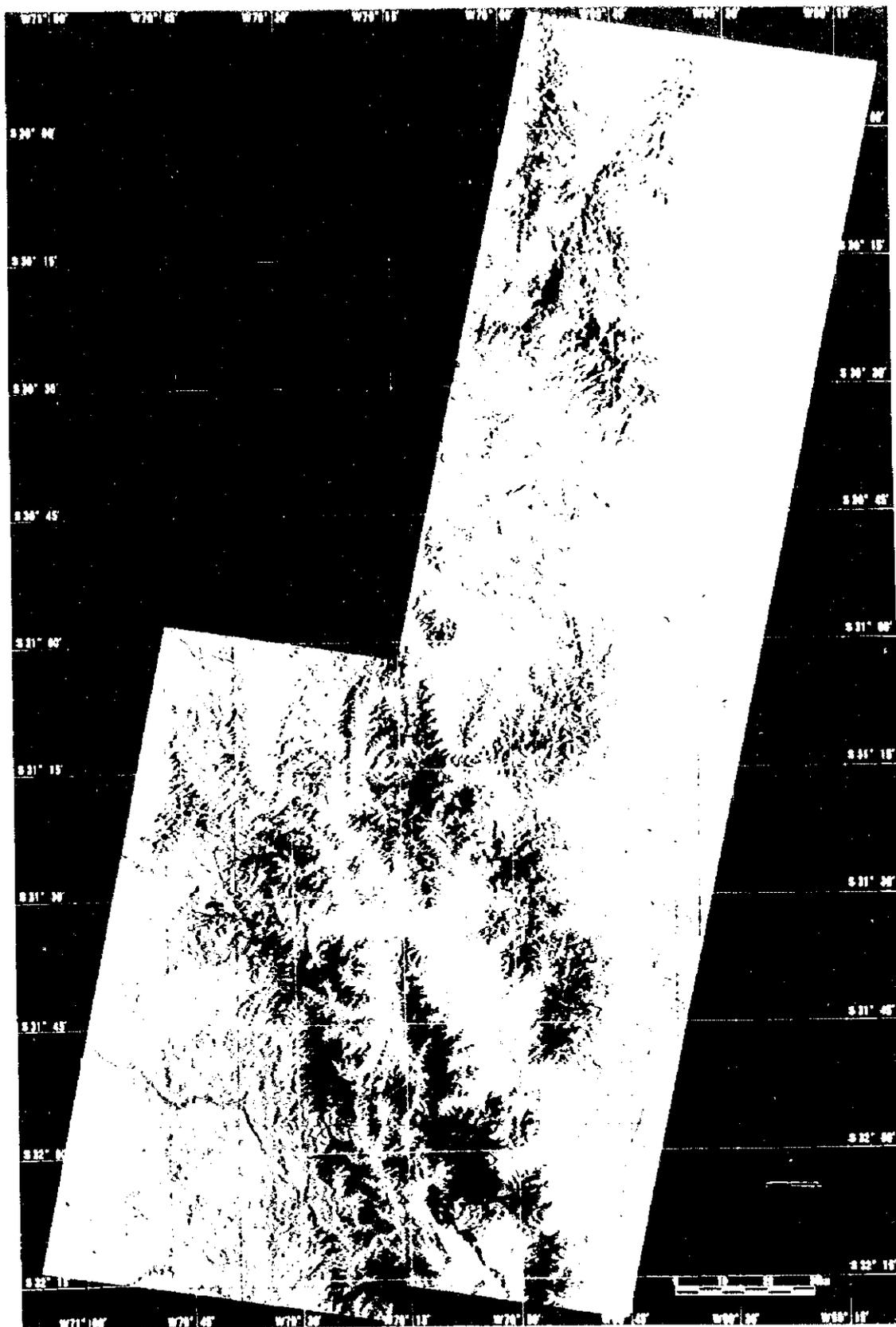
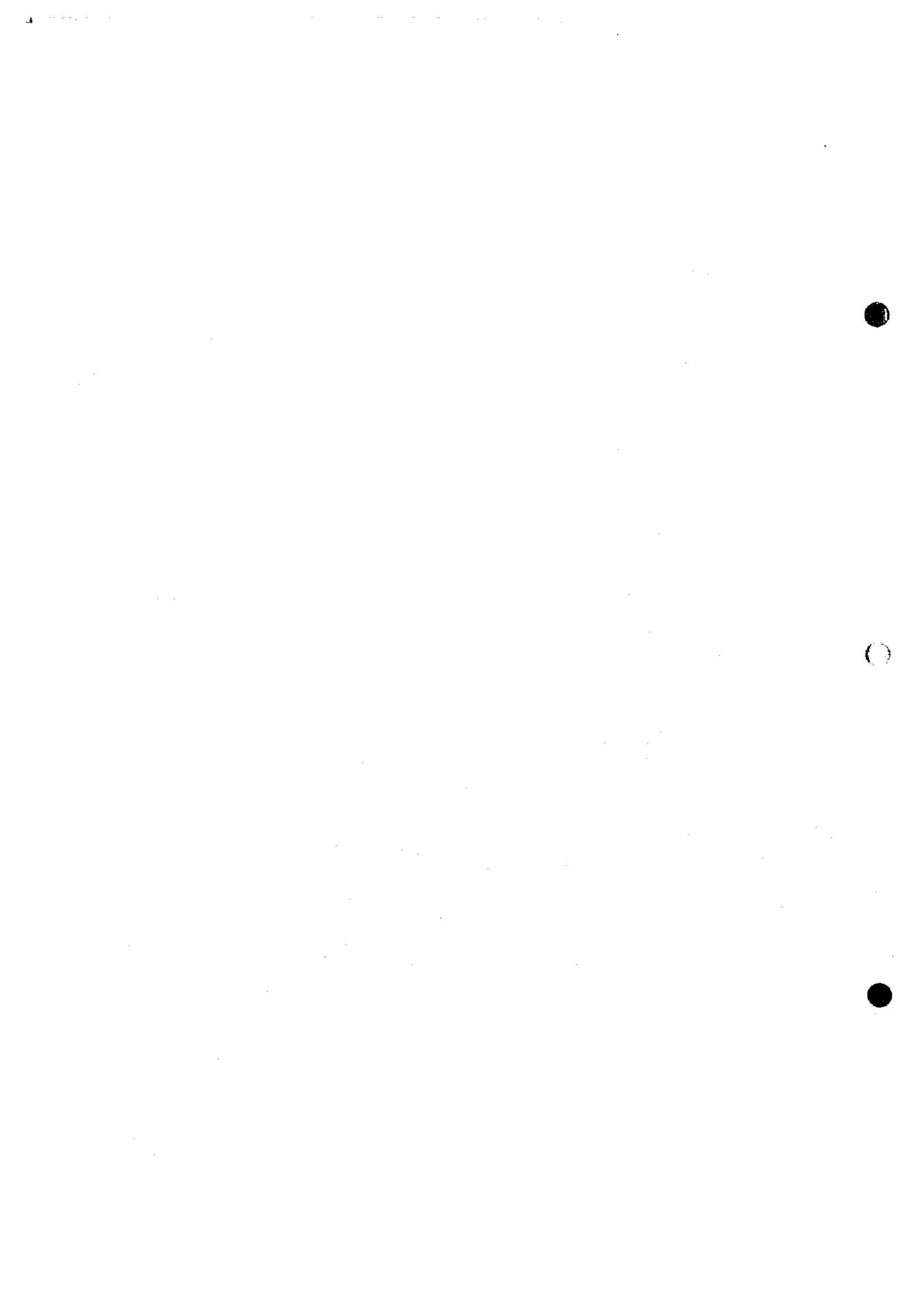


图 10 尼泊尔喜马拉雅山地区地形图(1:50,000)



れる。

$$N_i = (1/\pi)(H_i R_i T_i A_i) + N_{p_i} \quad (5-2)$$

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 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、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。

(2) 比演算処理

比演算処理においてもパスラジアンズの推定は必要である。今回の解析ではログレジデュアル処理と同じ値を用いてパスラジアンズの補正を行った。比演算処理の目的は $2\mu\text{m}$ 付近に吸収を持つ変質鉱物を分類することであるので、比演算処理のバンド組合せは特殊なもの(BGR = 5/6, 5/7, 5/8)とした。すべての比演算処理の分子にバンド5を配した理由は、変質帯を明瞭に抽出できること、変質鉱物の組合せによる変質帯の差を視覚的に捉えることができる点にある。つまり、変質作用を受けていない、あるいはごく弱い変質作用を受けた岩石は短波長赤外域では反射率が緩やかに上昇するのに対し、変質作用を受け、絹雲母、カオリナイト、あるいは明礬石化した変質岩体ではこの波長域の反射率が低下するため、変質帯は明るく表現される。また、図5で示したように変質鉱物の吸収位置とパターンは変質鉱物ごとに特徴があり、変質鉱物の組合せの差を色調差として表現することができる。

バンド間輝度比(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濃度変換が必要となる。この濃度変換は次の線形関数を用いて行う。

$$G_i = a \cdot F_i + b \quad (5-3)$$

ただし、 F_i は比演算値、 G_i は出力画像濃度値、 a はゲイン、 b はバイアスである。 a および b は実際の比演算値分布から求める。この比演算頻度分布はログレジデュアル処理と同様に積雪地域のマスク画像を用いて露岩地域を抽出し、U画像とL画像の東部から比演算処理の係数を算出した。これらのゲインとバイアス値を以下に示す。

表 6 比演算処理係数(露岩地帯)

比	平均	標準偏差	ゲイン	バイアス
5/6	1.351691	0.451890	113.302	-25.149
5/7	1.450332	0.196803	260.159	-249.317
5/8	1.920333	0.307791	166.347	-191.442

図 21 と 22 に、これらのゲインおよびバイアスを用いて処理した比演算画像(BGR = 5/6, 5/7, 5/8)を示す。これらの画像では変質帯が白で表現されており、非変質帯との判別が容易である。しかしながら、ゲインおよびバイアスを露岩地域全域について処理したため変質帯の輝度値は飽和しており、変質帯間の色調差はほとんど認められない。

この比演算処理画像(BGR = 5/6, 5/7, 5/8)の特徴として以下の点がいえる。

- ・変質帯が白色で表現されており、変質帯の判別が容易である。
- ・地形の影響を受けず、同じ物質が分布していれば斜面の日向、日陰とも同じ色で表現される。
- ・積雪境界は不明瞭である。
- ・鹹湖堆積物が特徴的な色(明るい黄緑)で表現される。
- ・変質帯に注目した比演算値であるため、露岩地帯は単調な色調で表現され、地質の違いは不明瞭である。
- ・全領域でのゲインおよびバイアス設定であるため変質帯に色調差が認められず、変質帯の分類ができない。

2.6 変質帯の抽出と変質帯強調比演算

これまでの処理によって変質帯を明瞭に区分できる比演算処理画像と疑似反射率に変換されたと推定されるログレジデュアル値を得ることができた。次に、変質帯の分類を行うため、変質帯を抽出し、かつ変質帯強調比演算処理画像を作成した。なお、変質帯の抽出に際しては、積雪領域の除去、鹹湖堆積物の除去、変質帯と類似する露岩地帯(L 画像の南西部)の除去、植生の除去およびノイズを除去する必要があるため、変質帯の抽出には輝度補正画像・ログレジデュアル処理画像・比演算処理画像を使用した。

2.6.1 変質帯抽出の閾値

変質帯と判断できる地域を教師とし、閾値分解法によって変質帯の抽出を行った。抽出に使用した教師は、第 1 年次の LANDSAT TM の画像解析による変質帯分布図から選定

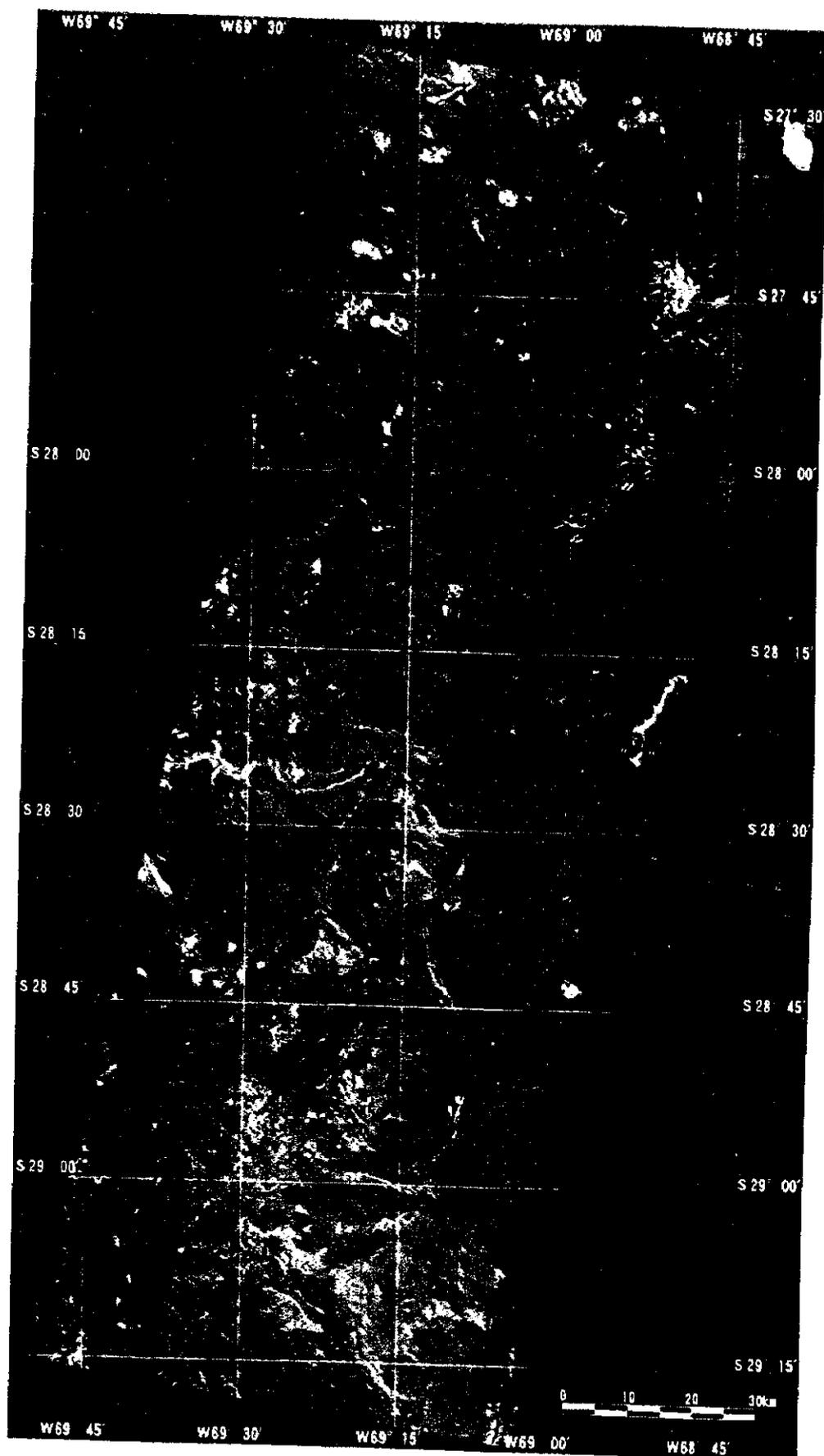


図 21 U 画像範囲の比演算処理画像 (BGR = 5/6, 5/7, 5/8)

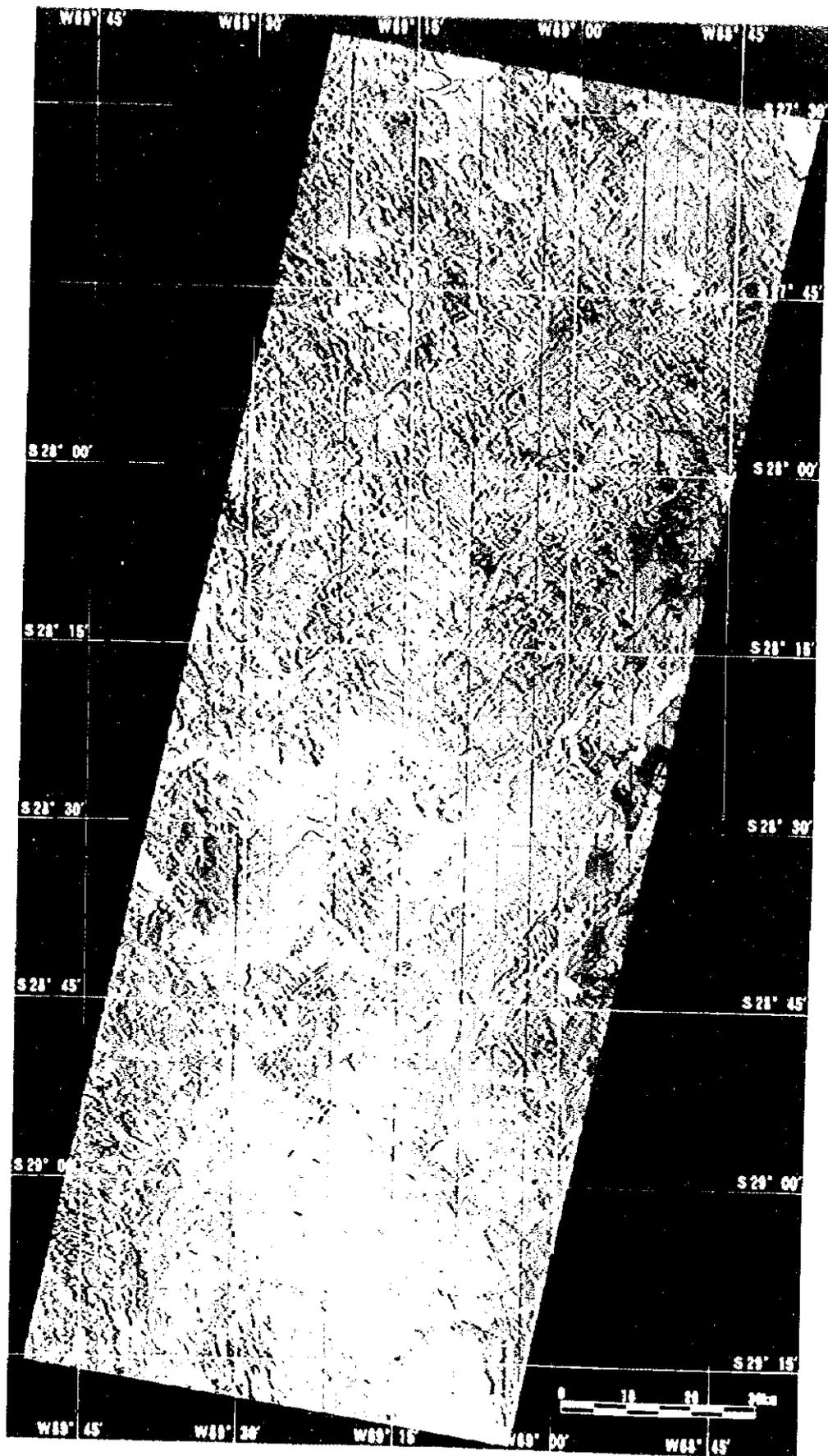
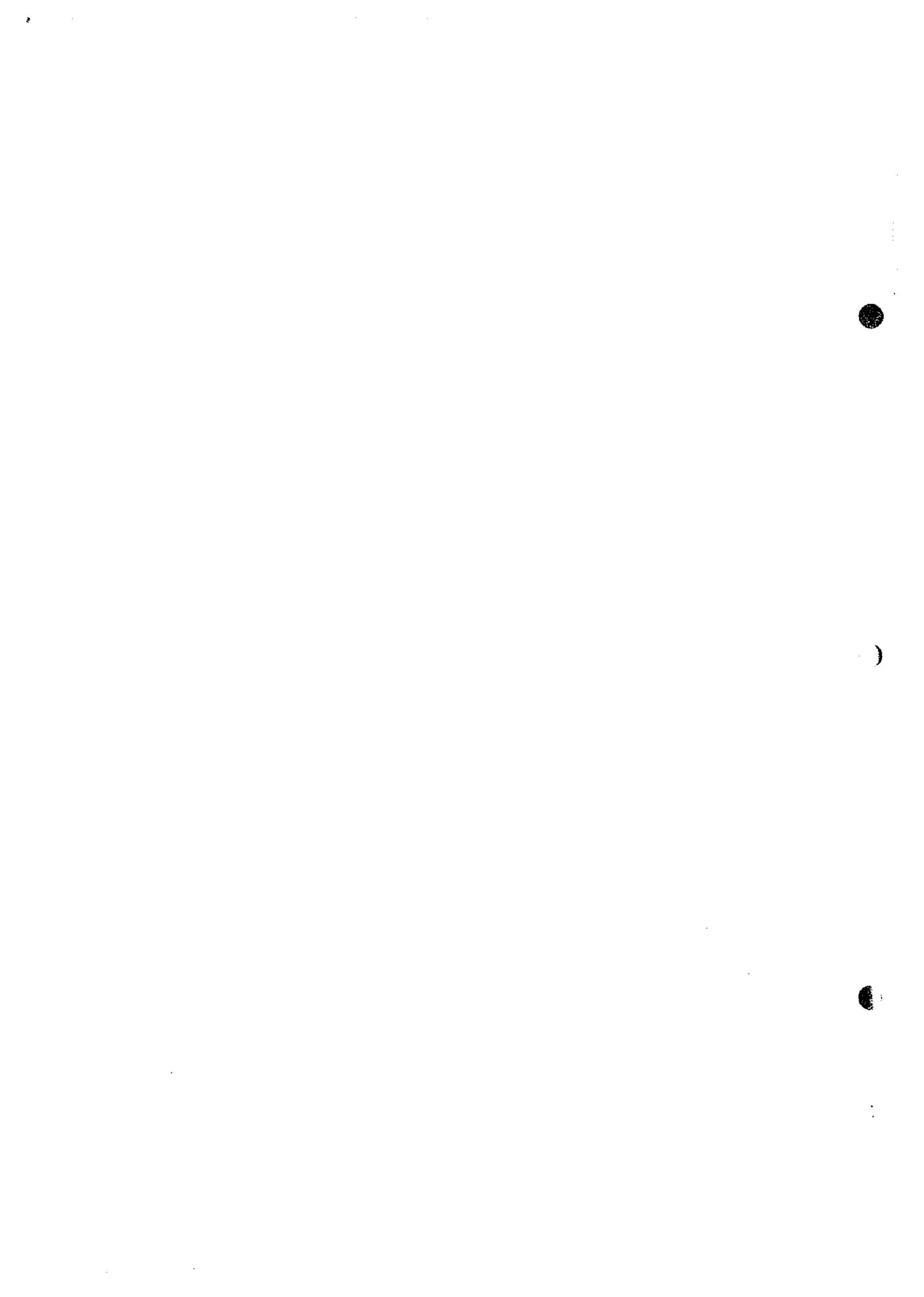


図 21-6 画像範囲の比較算処理画像 (BSP) (5.5.4.1.1.2)



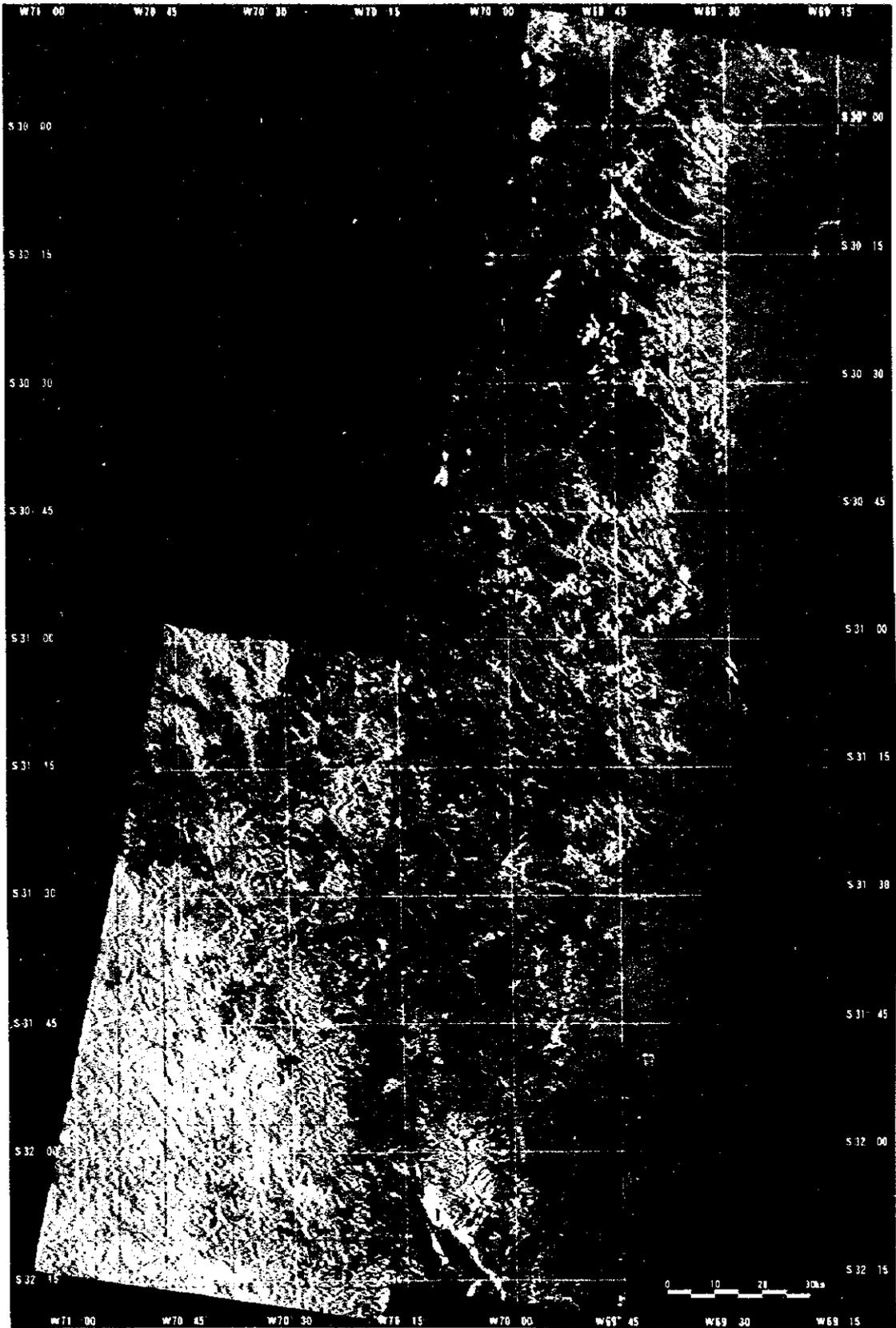


図 22 L 画像範囲の比演算処理画像 (BGR = 5/6, 5/7, 5/8)

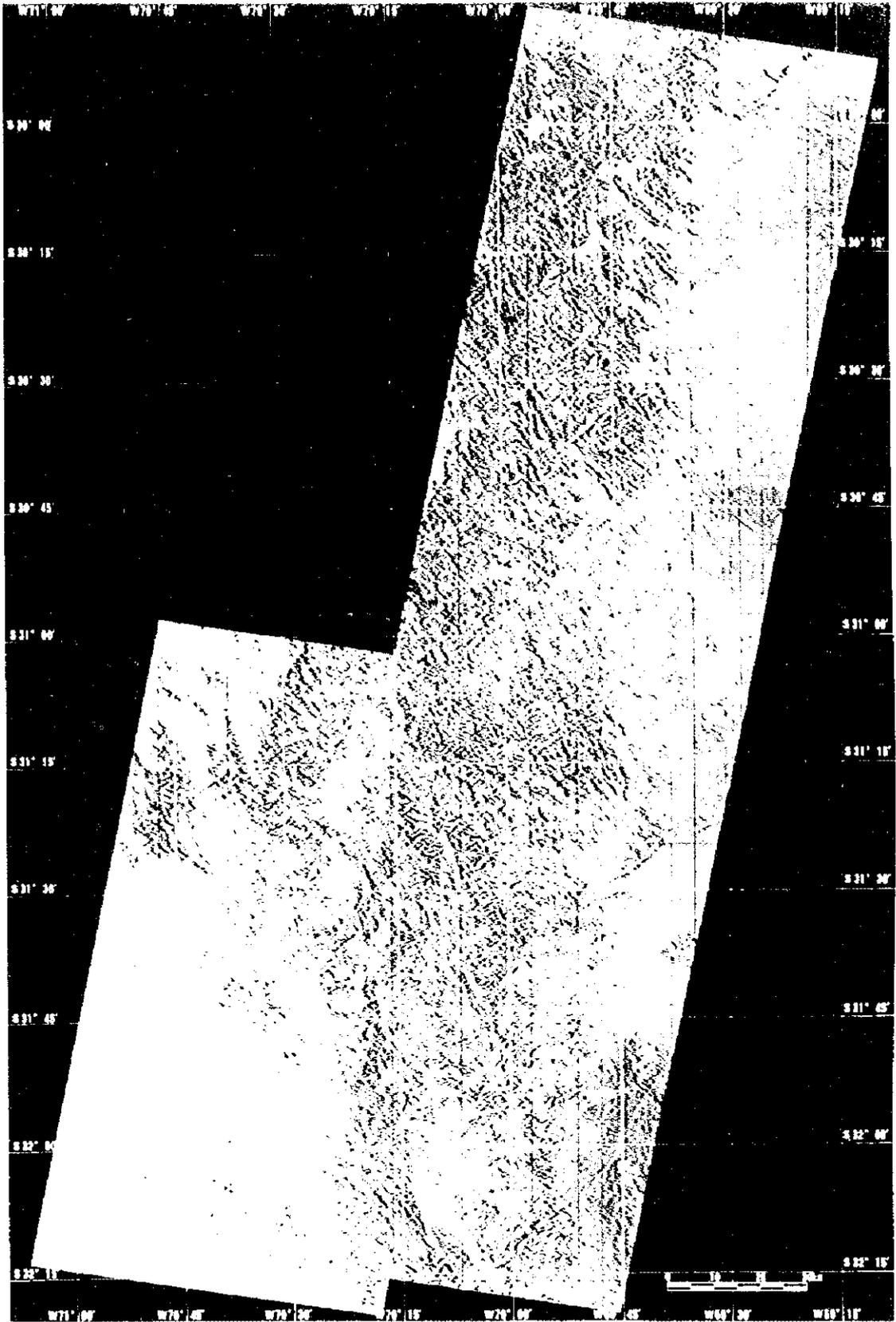


図 3 画像範囲の比較算処理画像 (左: 本画像、右: 比較画像)

