

第2章 衛星画像解析

2-1 序 論

2-1-1 解析目的

本解析の目的は、解析対象地域について LANDSAT TM 画像を使用した写真地質学的判読作業を行い、得られた判読結果及び種々の既存データを総合的に検討することにより、広域的な地質構造を把握し、鉱床賦存有望地域の抽出に資することである。

2-1-2 解析範囲

本解析の対象地域は、チリ共和国最北部の第I州に位置し、Fig. 2-2-1 に示すように、北はペルー共和国、東はボリビア共和国との国境をなす。本地域は、南緯 17° 30′ から南緯 21° 15′ に至る南北に延びる広大な範囲である(以下、「対象地域」と呼称する)。対象地域は、LANDSAT TM 画像 6 シーンでカバーされる。

2-1-3 使用データ

(1) LANDSAT TM 画像

使用したデータは、LANDSAT 5 号により観測され、バルク補正されたものであり、(財)リモート・センシング技術センターを通じ、米国地質調査所 EROS Data Center から購入した。6 シーンの各画像の観測年月日、太陽位置情報は Table 1 のとおりである。

データの入手に当たっては、財団法人リモート・センシング技術センターを通じてアメリカ EROS Data Center に対象地域の LANDSAT TM データの取得状況を問い合わせ、さらにデータ欠損の有無、雲量、積雪量及び観測時期などを考慮し、画像解析に最適と考えられるデータを選定した。

なお、画像名称については画像内に位置する代表的な地名を採用した。本報告書では Table 2-2-1 に示した地区名を使用する。

Table 2-2-1 Coordinates, Acquisition Date and Sun Elevation of TM Image of Each Area

| No. | Area | Name of Image | Path | Row | Acquisition Date | Sun Azimuth | Sun Elevation |
|-----|------------------|------------------|------|-----|------------------|-------------|---------------|
| 1 | VOLCAN TACORA | VOLCAN TACORA | 002 | 072 | 1987.01.13 | 103.35° | 51.51° |
| 2 | ARICA | ARICA | 002 | 073 | 1987.01.13 | 101.61° | 51.60° |
| 3 | SALAR DE SURIRE | SALAR DE SURIRE | 001 | 073 | 1987.02.07 | 92.41° | 49.73° |
| 4 | IQUIQUE | IQUIQUE | 002 | 074 | 1987.01.13 | 99.84° | 49.73° |
| 5 | MAMIÑA | MAMIÑA | 001 | 074 | 1987.01.13 | 90.79° | 49.54° |
| 6 | SARAL DE LLAMARA | SARAL DE LLAMARA | 001 | 075 | 1987.02.07 | 89.21° | 49.32° |

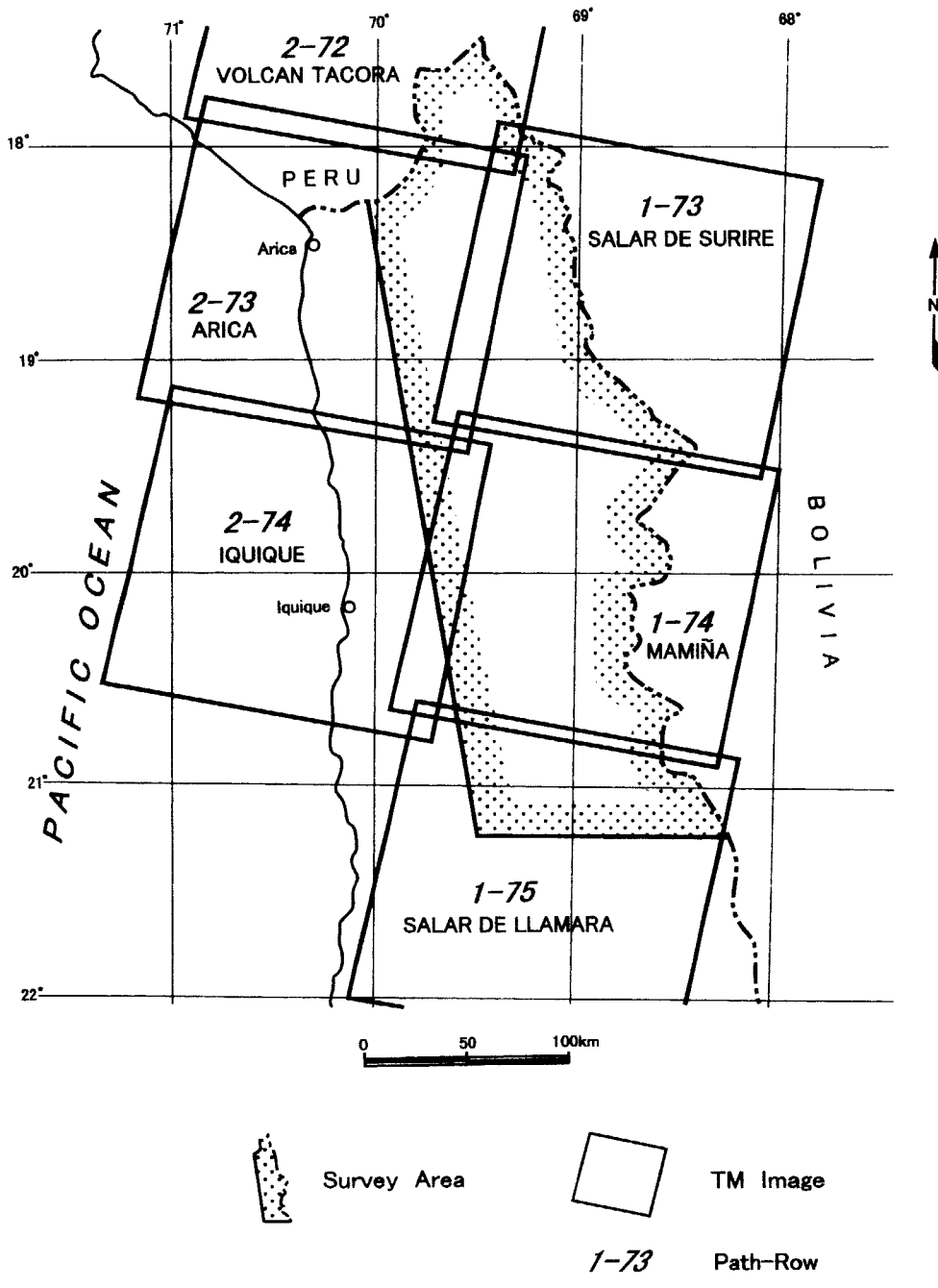


Fig. 2-2-1 Location Map of Satellite Images

2-1-4 画像処理・作成

対象地域の地質・地質構造解析及び変質帯抽出作業に供するために、6 シーンのフォールスカラー画像及び比演算画像を、さらに全域のフォールスカラー・デジタルモザイク画像を作成した。

フォールスカラー画像及び比演算画像の作成に当たっては、異なるシーンであっても同じ岩相及び同じ変質帯は同じ色調で表現されるような手法を適用した。また、フォールスカラー画像と同じバンド組み合わせにより、全地域をカバーする 6 シーンのデジタルモザイク画像を作成した。モザイク処理に当たっては、隣接する画像間に色調の違いを生じさせないようにした。それぞれの画像作成方法について以下に述べる。

(1) フォールスカラー合成画像の作成

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

(イ) 放射量補正が必要な理由

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

LANDSAT TM のような光学センサで得られた輝度値は、可視～短波長域においては地表からの太陽光の反射を反映しているものであり、地表の対象物に固有の分光反射率の違いにより地表物質を識別することが可能である。衛星のセンサに入射する分光放射輝度は、太陽からの光が地表で反射され、さらに衛星まで到達する間に大気層を通る。このためセンサに到達する放射輝度は地表からの反射光の他に、パスラジアンズと呼ばれる大気からの放射光、散乱光、及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、センサーに入射する分光放射輝度は、

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

で近似できる。ここで、

$L(\lambda_1, \lambda_2)$: センサに入力する波長 λ_1 から λ_2 までの分光放射輝度

| | |
|-------------------|------------------------|
| $K(\lambda)$ | : センサの応答特性 |
| $\tau a(\lambda)$ | : 反射光に対する大気の透過率 |
| $U(\lambda)$ | : 太陽直達光の放射輝度 |
| $\rho(\lambda)$ | : 地表反射率 |
| $b(\lambda)$ | : センサと対象物間の大気放射及び散乱 |
| $P(\lambda)$ | : 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、 $U(\lambda)$ 、 $P(\lambda)$ 及び $\tau a(\lambda)$ 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比は時期の異なる画像では一定値をとらない。このため各バンドの放射量を未補正のまま画像処理を実施した場合には、同一の物質が異なる色調で表現されるため、物質の比較、判別ができなくなる。

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

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

(ロ) 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。

(ハ) 大気補正

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

(ロ)の入射光量補正は、画像内の対象物がすべて平面であることを前提としている。しかしながら、現実には地形起伏があるため、異なる時期に取得した画像では太陽位置が異なることにより、同一地点においても $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ は異なる。この $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ を補正するためには精度の良いDTM(数値地形モデル)を用いて補正することが考えられるが、現状では精度の良いDTMを利用できる地域が限られていることから現実的な方法とは言えない。そこで

2 画像間に対応するピクセルを多数用い、画像重複部を統計処理することで地形起伏による依存性を除去する手法を用いた。

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

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

P'_{ij} :濃度変換値

P_{ij} :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 ρ (λ) が等しいと仮定している。しかしながら、今回のように異なる時期(季節)に取得された画像では、画像重複範囲の植生、積雪、雲・霧、湖・河川の流路及び地表構造物などが変化しているため、輝度平均値及び標準偏差法を用いることができない。

本解析では、画像間重複範囲にこの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。

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

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

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

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

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

これらの項は正確には、取得時のセンサのゲインが異なるため、 $\tau a(\lambda)$ 及び $b(\lambda)$ にそれ

ぞれ $K(\lambda)$ を乗じた値となるが、この手法ではセンサ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、6 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(Row072 又は Row073)を基準画像とした。
- (b) 各画像の大気補正は南側に向かって順次実施した。
- (c) 2 つの Path 間の大気補正は東の Path(001)を基準とした。

このような処理を加えることで、画像全体の大気の状態を画像北東端(Path001/Row073)の大気の状態と合わせたものにすることができる。

(e) 方向性反射係数補正

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

LANDSAT TM 画像の横方向(ほぼ東西方向)の視野角は約 16° である。このため画像右側から太陽光が照射している場合には、太陽-対象物-観測者のなす角は画像の右側と左側で約 16° 異なる。このような場合には、角度を変えて完全拡散反射体を観測した場合と同様の現象が生じる。この方向性反射率は物質及び波長によって異なり、また、地形に依存するため、各画素毎に補正を加えることが不可能である。しかしながら、1画像内での画像東端と西端を比較した場合には(太陽は画像東側、方位角 90° 、高度 60° から照射し、地表に起伏が無く、月の玄武岩と同一の物質が分布していたと仮定)、太陽-観測物-観測者のなす角が大きくなる画像右(東)側で約10%の輝度低下を生じる。このため東西方向に3つの画像を接合した場合には、接合画像西端の輝度を1とすると東端では約27%(=0.9³)の輝度低下を生じることとなり、画像の東側が明らかに暗い画像となってしまう。

このため、大気補正を行った画像をもとに、画像全体の輝度値がどのように変化しているかについて統計量を用いて検討した。統計量を用いた理由は、起伏による影響と地表物質の差による影響を除くためである。各列の統計には約 13,000 個のデータを用いている。画像の各画素の輝度値を行列式として扱い、各行及び列の平均値、標準偏差を算出した。ただし、各画像は平行四辺形であるため、西端の画像取得開始位置を横方向にシフトさせ、取得位置をそろえた行列とした。

これらの行列から求められた画像横(東西)方向と画像縦(南北)方向の平均値の変動を

直線で回帰し、方向性反射係数補正を実施した。

(ホ) フォールスカラー画像の作成

前述の放射量補正手法により、全てのシーンの輝度値は P001/R073 を基準としたものに統一されている。しかしながら LANDSAT TM 画像データの統計量(平均値, 標準偏差, 歪度)は各バンド毎に異なり、データの分散は 20~30(256 階調)と一般に小さい。このため、そのまま用いた場合には色バランスのとれていない、かつ、データの分散が小さく色調差の乏しい、画像判読に不適な画像となる。

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

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

フォールスカラー画像のバンド組み合わせとしては、バンド 1, 4, 5, バンド 1, 4, 7, バンド 4, 5, 7 などの組み合わせを検討した。一部画像でバンド 1 のデジタル値の分散が小さくなっていることがあり、画像化に適さないと判断されたので、バンド 4, 5, 7 の組み合わせを選定し、バンド 4, 5, 7 に青色、緑色及び赤色を割り当てた画像を作成した。

(ハ) 幾何補正

作成したフォールスカラー画像と地形図(縮尺 1/250,000)を用いて画像の UTM 座標への幾何変換を実施した。入手可能な最も精度の高い地形図が 1/250,000 と小縮尺であること、及び、対象地域のほとんどが人工物の少ない山岳及び砂漠地域であり目印となる河川が発達していないことから、精度の高い GCP(Ground Control Point)を選択することが困難であった。そこで目印となる河川分岐点、道路交点などを GCP として用い、各画像とも 15~20 点を選択した。内挿法としては疑似アフィン変換を用い、最小自乗法による再計算結果との誤差が 30 画素以内(約 1km)となるよう、精度の悪い GCP は削除した。幾何変換には共一次内挿法を用い、1 画素のサイズを 30m としてリサンプリングを実施した。

(2) 比演算処理画像の作成

(イ) 比演算の原理

LANDSAT TM は可視～近赤外、中間赤外域の 7 つの波長域(バンド)においてセンサへ入力する分光放射輝度を観測している。センサから見た地上物体の放射輝度 N_i (単位 $mW/cm^2 sr$)は次式で表現されると仮定する。

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

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

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

比演算処理はデジタル値の最小値を大気のパスラジアンズとし、各バンドのデジタル値から最小値を差し引いた値を求め、これらの値のバンド間比を求める。バンド間比(比演算値)は、通常、0 から 10 程度の値をとるが、バンド間比を画像として表現するためには前項(フォールスカラー合成画像の作成)で述べた濃度変換が必要となる。濃度変換には、以下の手順によって行った。

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

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

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 及び b は実際の比演算値分布から求める。

(ロ) 画像の作成

対象地域にはポーフィリクッパー型などの熱水性鉱床が分布し、それらは特有の熱水変質帯を伴っている。これらの熱水変質帯を LANDSAT TM データから抽出するには、3/1、5/4 及び 5/7 の比演算処理が有効であることをチリ共和国エスコンディエーダ地域及びベルグワ・

プログレッション地域などの類似業務で確認している。

今回は既知変質帯が分布する P001/R074 及び P001/R075 の 2 地区において 5/7, 5/4, 3/1, 及び 5/7, 4/7, 4/5 の 2 つの組み合わせによる比演算処理画像を比較した。この結果、変質帯抽出に最も有効な組み合わせは 5/7, 5/4, 3/1 を R, G, B に割り当てた比演算画像であることが解った。この組み合わせでは、変質帯は赤桃色及び白桃色で表現される。なお、それら以外の地区の画像処理では、これら 2 地区で最適となったゲイン及びバイアスの平均値を用いた。なお、幾何補正はフォールスカラー合成画像の作成(1.4.1 節)で行った幾何補正と同じ GCP を用い、同様な手法で UTM 座標系へ幾何変換した。

(3) モザイク画像の作成

(イ) 画像圧縮と幾何変換

6 シーンのフォールスカラー・モザイク画像を作成するために、画像サイズを縮小する圧縮処理を行った。その理由は、圧縮処理を行わずモザイク画像を作成した場合には、モザイク作成後の画像が 14,000 画素×23,600 画素×3 バンド=1 ギガバイトと膨大なデータ量となり、さらに、フィルム出力の物理的制限を超えるデータ量となるためである。

既に述べた各シーンの放射量補正後の画像から、共一次内挿法により 16 画素(4×4)を 1 画素とする幾何変換法を用いて圧縮を行った。次に 2 画像の重複範囲から 10~20 点の対応点を目視によって選択し、最小自乗法を用いたヘルマート変換によって幾何変換係数を算出した。なお、この過程で再計算後の誤差が 1 画素以内に収まるように誤差の大きなデータを削除し、ヘルマート変換の変換係数を求めた。幾何変換は共一次内挿法を用いて実施した。

(ロ) 画像接合

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

画像の接合は各 Path の一番北側の画像を基準に順次接合していくもので、P001/R073~075 及び P002/072~074 の縦に長い 2 つのモザイク画像を作成した。次に、P001 のモザイク画像を基準として、西側の画像との対応点を取り、ヘルマート変換による幾何変換後、上述の手法により画像接合を行った。2 つの Path を接合した画像は約 3,500 画素×5,900 画素の画像サイズとなった。

(ハ) 幾何変換

接合したモザイク画像は西経67~70°, 南緯16° 30' ~20° 30' の範囲のものである。

この範囲は, UTM19帯に収まることから, 各画像と同じく, モザイクもUTM座標へ幾何変換した。

(4) 解析方法

衛星画像を用いた写真地質判読解析は, 通常次の5段階の作業によって構成される。

- (イ) 準備(衛星データの入手・標定, 既存の地質・鉱床資料の収集とレビュー)。
- (ロ) 画像処理・作成。
- (ハ) 写真地質判読と総合解釈(総合解釈図の作成: 既存資料との対比を行う)。
- (ニ) フィールドチェック調査とそれに基づく再判読。
- (ホ) 報告書の作成。

今回の解析では, 上述した5段階の作業過程のうち, (ハ)の総合解釈及び(ニ)の調査と再判読を実施していない。

写真地質学における判読基準(diagnostic criteria)と, それらの表現方法は以下のとおりである。

(A) 写真的特徴 (Photo-characteristics)

- ・色調(color tone): 白, 灰白, 灰, 青灰, 灰緑, 緑, 暗緑, 灰紫, 褐色など
- ・肌合(texture): 細粒, 中粒, 粗粒, 滑らかななど

(B) 地形的特徴 (Morphological expression)

- ・水系パターン(drainage pattern): 樹枝状, 平行状, 格子状, 羽毛状など
- ・水系密度(drainage density): 極低, 低, 中, 高, 極高
- ・抵抗度(岩石の風化・侵食に対する程度; rock resistance): 極低, 低, 中, 高, 極高
- ・断面(section): 斜面の形態
- ・ベディングの発達度(development of bedding): 発達, 一部で発達, 塊状など

(C) 地表被覆 (Superficial cover)

- ・植生(vegetation): 密, 中, 疎
- ・耕作地化(cultivation): 密, 中, 疎

一方, 衛星画像から判読・抽出されるリニアメントは, 地表または地下浅所の断裂を反映

したものといわれており、一般に写真地質学の手法では次に掲げる地形現象の認識に基づいている。

- (a) 断層崖(fault-scarp)の存在
- (b) 直線的な広い谷(断層谷：fault valley)の存在
- (c) 河川の流路が著しい直線状を示す場合
- (d) ケルンコル(断層鞍部：kerncol), ケルンバット(断層突起：kernbut)の存在
- (e) 山腹斜面の傾斜変換点が直線的に連続する場合
- (f) 緩傾斜を示す堆積岩類が急激に急傾斜層に変化し、それが直線的に連続する場合
- (g) 稜線や川の流路にズレがある場合
- (h) 水系アノマリー(格子状の1次水流が直線状に配列する場合、または角状水系など)
- (i) 湖沼、温泉、火口、湧水地点、崩壊、あるいは地すべりなどが一直線上に配列している場合
- (j) 扇状地ズレがある場合
- (k) 河成段丘面(一般には平坦面)が直線的な境界をもって落差もしくは水平ズレを生じている場合

上述した判定のキーとなる地形現象は、対象地域に分布する岩石や地質構造、または地質時代などの差によって地域特性があり、地域ごとに現れる程度が異なる。対象地域では、(a)、(b)、(c)及び(e)の地形が多く、(f)、(g)、(h)及び(i)も部分的に認められた。なお、(i)、(j)、(k)の地形を判定するためには大縮尺の画像を使用するか、スポットHRV画像や航空写真を立体視する必要がある。

2-2 画像の判読・解析

本節においては、各地区ごとに画像からの地質、地質構造判読結果及び変質帯抽出結果を述べる。各地区ごとの小節は、地質判読による地質単元区分、変質帯分布、リニアメント、褶曲構造・環状構造についてそれぞれ分けて記述する。

各地区ごとの地質、地質構造判読及び変質帯抽出の結果を、地質判読図としてまとめた(Figs. 2-2-2, 2-2-3, PL. 1~5)。

地質層序については、チリ地質図(縮尺 1:1,000,000)、Arica(縮尺 1:300,000)、Collacagua(縮尺 1:250,000)、Ollagüe(縮尺 1:250,000)、Calama(縮尺 1:250,000)とを対比し(Table 1-3-1)、これらの結果を判読結果表(Table 2-2-2~2-2-12)に記載した。

2-2-1 VOLCAN TACORA 地区

(1) 地質単元

本地区に分布する岩石と堆積物は、合計で 6 種類の地質単元に区分された。(PL. 1 及び Table 2-2-8 参照)。それらのうち、1 種類の単元は白亜紀の火山岩類、3 種類の単元は、第三紀～第四紀の火山岩類に、また、2 種類の地質単元は第四紀の未固結ないし半固結堆積物に対比可能である。

白亜紀の火山岩類に対比される地質単元 K は、NW-SE 方向に延びて分布し、ペルー国境を越えて連続する。

(2) 変質帯

本地区では、20 箇所の変質帯(変質帯 VT 001～020)が抽出された(PL. 1 及び Table 2-2-8 参照)。このうち、4 箇所(VT 015, 016, 017, 020)は、ARICA 地区の Ar 001, 002, 003, 004 と重複する変質帯であり、2 箇所の変質帯(VT 018, 019)は、SALAR DE SURIRE 地区の SS 001, 002 の変質帯と重複する変質帯である。これらの変質帯は、概ね NW-SE 方向で、並列的に 2 帯に分かれた分布傾向を示している。変質帯の形態は、一般に楕円状または不規則塊状を呈している。これらのうち、最も規模の大きいものはペルーとの国境に分布する VT 001 変質帯 (4km+α×6.5km) でペルーの国境の先まで連続している。次いで VT 013 変質帯 (3.7km×2.0km) が、さらに VT 007 変質帯 (3.2km×1.5km) がこれに次ぐ規模を有する。これらの変質帯はいずれも地質単元 K に分布している。

(3) リニアメント

2-1-4 (4)項で述べた基準に従って判読・抽出を行った結果、PL. 1 に示すようなリニアメントが抽出された。判読図に示した実線部は、判読・抽出の基準となる地形現象が明瞭かつ連続しているものであり、破線部はそれらが不連続ないしやや不明瞭なものである。

本地区から判読・抽出されたリニアメントは非常に少ないが、その分布や方向については、北部、東部域及び西部域の 3 帯に区分され、地区ごとに以下のような特徴が認められた。

(イ) 北部域

この地域は、主として第三紀の火山岩類及び白亜紀の火山岩類から構成され、リニアメントの本数はわずか 7 本に過ぎない。その方向は、NW-SE 系が 3 本、NNW-SSE 系が 2 本である。いずれも連続性に乏しく、リニアメントの長さは 5～7km 程度である。

(ロ) 東部域

この地域には、白亜紀の火山岩類と第三紀から第四紀の火山岩類が主として分布する。NW-SE 系及び E-W 系のリニアメントが判読される。連続性はいずれも 5km 内外で、最も長いものでも 8km 程度である。なお、変質帯 VT 018 及び VT 019 の変質帯周辺には NW-

SE系のリニアメントが認められる。

(ハ) 西部域

本地区で最もリニアメントが発達している地域である。その方向性は、NW-SE系及びNNE-SSW系である。連続性はいずれも2~3km程度で、長いもので7km程度である。なお、変質帯VT 002, 006, 007, 008の周辺にはNW-SE系及びNNE-SSW系のリニアメントが認められる。

(4) 褶曲構造・環状構造

(イ) 褶曲構造

本地区は、火山岩類及び新期堆積物の分布域で褶曲構造は判読されない。

(ロ) 環状構造

本地区に環状構造は抽出されなかった。

2-2-2 ARICA 地区

(1) 地質単元

本地区に分布する岩石と堆積物は、合計で13種類の地質単元に区分された(PL. 2及びTable 2-2-9参照)。それらのうち、1種類の地質単元はジュラ紀の堆積岩類に、2種類の地質単元は白亜紀から第三紀までの火山岩類に、5種類の地質単元は第三紀~第四紀の火山岩類もしくは堆積岩類、4種類の地質単元は未固結ないし半固結堆積物にそれぞれ対比可能である。また、1地質単元は白亜紀から第三紀に生成した貫入岩体に対比可能である。なお、本地区の北東部の山間は雲に覆われているため、隣のSALAR DE SURIRE地区の画像をもとに判読した。

(2) 変質帯

本地区では、20箇所の変質帯(変質帯Ar 001~020)が抽出された(PL. 2及びTable 2-2-9参照)。これらのうち3箇所の変質帯(Ar 001, 002, 003)は、北部のVOLCAN TACORA地区の変質帯VT 015, 016, 017と重複し、10箇所の変質帯(Ar 007, 011, 012, 013, 014, 015, 016, 017, 018, 019, 020)は、東隣のSALAR DE SURIRE地区の変質帯SS 003, 005, 006, 007, 008, 009, 010, 011, 004, 058)と重複している。これらの個々の変質帯の伸びの方向は多岐にわたるが、全体的には、NNW-SSE~NW-SE方向に配列している。変質帯の形態は、一般に楕円状または不規則状を呈している。これらの変質帯うち、最も規模の大きいものは、Ar 007で4.5km×2.0kmの規模を有し、NE-SW方向に伸長し、周辺は地質単元Tv1に覆われている。次いで、Ar 014が3.5km×2.0km、Ar 013が3.0km×2.0km

の規模を有し、ほぼ NW-SE 方向に伸長する。これらの変質帯はいずれも白亜紀～第三紀の火山岩類中に抽出される。

(3) リニアメント

本地区から判読・抽出されたリニアメントの分布や方向については、北東端部と西部で若干の差が認められる。

(イ) 北東端部

この地域は、主として、白亜紀から第三紀の火山岩類及び堆積岩類から構成され、全般に NW-SE 系のリニアメントが卓越するが、 NNE-SSW 系のリニアメントも認められる。最も長いリニアメントは NW-SE 系のリニアメントで、18km 程度である。

(ロ) 西部

この地域は、第三紀の火山岩類から構成される。本地域は比較的リニアメントの分布密度が高い地域である。リニアメントの分布方向は特徴的であり、ほとんどが NW-SE もしくは NNW-SSE 方向を示す。最も長いリニアメントは NNW-SSE 方向を示し、延長 30km に達する。

なお、変質帯 Ar 008, 009, 010, 013, 014, 020 などの周辺には NW-SE～NNW-SSE 系のリニアメントが認められる。

(4) 褶曲構造・環状構造

(イ) 褶曲構造

本地区に褶曲構造は判読されない。

(ロ) 環状構造

本地区には 1 箇所の環状構造が抽出された。これは東隣の SARAR DE SURIRE 地区と重複するものである。本構造は、第三紀～第四紀の火山の火口壁と推定される。大きさは直径 5km 以上を有する。

2-2-3 SALAR DE SURIRE 地区

(1) 地質単元

本地区に分布する岩石と堆積物は、合計で 12 種類の地質単元に区分された(PL. 3 及び Table 2-2-5 参照)。それらのうち、1 種類の地質単元は白亜紀から第三紀までの火山岩類に、5 種類の地質単元は第三紀～第四紀の火山岩類もしくは堆積岩類に、5 種類の地質単元は未固結ないし半固結堆積物に対比可能である。また、1 地質単元は白亜紀から第三紀に生成し

た貫入岩体に対比可能である。白亜紀の火山岩類に対比される地質単元 K は NW-SE 方向の延びを示し、北部の VOLCAN TACORA 地区に連続する。

(2) 変質帯

本地区では、58 箇所の変質帯(変質帯 SS 001～058)が抽出された(PL. 3 及び Table 2-2-10 参照)。これらのうち 2 箇所の変質帯 (SS 001, 002) は、北部の VOLCAN TACORA 地区の変質帯 VT 018, 019 と重複し、10 箇所の変質帯 (SS 003, 004, 005, 006, 007, 008, 009, 010, 011, 058) は、東隣の ARICA 地区の変質帯(SS 007, 018, 011, 012, 013, 014, 015, 016, 017, 020)と重複している。これらは北部及び中央部では NW-SE 方向に配列している。南部では、大局的には NW-SE 方向に配列するよう見られるが、比較的集中して分布し、集中箇所の分布密度は非常に高い。変質帯の形態は、一般に楕円状または不規則なアメーバー状を呈している。これらの変質帯うち、最も規模の大きいものは、SS 007 で、不規則的な形態ではあるが 5.5km×3.5km 程度である。次いで、SS 023 が若干不規則であるがほぼ NW-SE 方向に伸長する。これらの周辺には SS 024, 030, 033 等比較的規模の大きい変質帯が分布する。

これらの変質帯は、北部及び中央部では白亜紀～第三紀の火山岩類中に、また、南部地域では、第三紀～第四紀の火山岩類中に分布する。

(3) リニアメント

2-1-4 (4)項で述べた基準に従って判読・抽出を行った結果、PL. 3 に示すようなリニアメントが抽出された。

本地区から判読・抽出されたリニアメントの分布や方向については、中央部から北部域と南部で若干の差が認められる。

(イ) 中央部から北部域

この地域は、白亜紀～第三紀の火山岩類が中央部及び北部で若干認められる以外は、広範囲にわたって第三紀～第四紀の火山岩類、未固結堆積物及び半固結物が分布し、全般に NW-SE 系のリニアメントが卓越する。最も長いリニアメントは 30km に達する。

変質帯 SS 001, 002 の近傍には NW-SE 系のリニアメントが認められ、また、変質帯 SS 007, 008, 009, 057, 058 などの近傍には WNW-ESE 系もしくは NW-SE 系のリニアメントが認められる。

(ロ) 南部地域

この地域は、ほとんどが第三紀～第四紀の火山岩類から構成され、リニアメントの分布密度が非常に高い地域である。

この地域の南部域では、中央部から東部にわたって 15km 程度の間隔で NW-SE 方向のリニアメントが断続的にほぼ平行に発達し、それらに斜交するような形で N-S 方向もしくは NNW-SSE 系のリニアメントが発達する。平行する NW-SE 系のリニアメントは約 50km 程度断続する。ほとんどのリニアメントは NW-SE もしくは NNW-SSE 方向を示す。最も長いリニアメントは NNW-SSE 方向を示し、延長 30km に達する。

一方、西部域のリニアメントは、NE-SW 方向が卓越するが、一部 ENE-WSW 方向のリニアメントも認められる。連続性は、NE-SW 方向のもので 20km 程度の長さを有するが、ほとんどは 5km 程度である。

なお、変質帯 SS 015, 016, 017, 018, 020, 022, 023, 024, 025, 026, 029, 030, 033, 034, 042, 050 などの周辺には NW-SE もしくは N-S 系のリニアメントが認められる。

(4) 褶曲構造・環状構造

(イ) 褶曲構造

本地区の中央部に分布する白亜系から第三系中で背斜構造が 1 箇所判読される。褶曲軸の方向は、NNW-SSE を示し、NNW 方向にブランチしている。

(ロ) 環状構造

本地区には 5 箇所の環状構造が抽出された。このうち 1 箇所は西に隣接する ARICA 地区と重複するものである。第三紀～第四紀の火山のカルデラ壁と思われる。中央部に発達する環状構造は直径 7.5km 以上の規模を有し、その内側及び周囲には変質帯が発達する。

2-2-4 MAMIÑA 地区

(1) 地質単元

本地区に分布する岩石と堆積物は、20 種類の地質単元に区分された(PL. 4 及び Table 2-2-6 参照)。それらのうち、6 種類の地質単元は古生代から白亜紀までの火山岩類及び堆積岩類に、8 種類の地質単元は第三紀～第四紀の火山岩類もしくは堆積岩類に、3 種類の地質単元は未固結ないし半固結堆積物に対比可能である。また、1 地質単元は古生代の深成岩もしくは半深成岩に対比され、2 種類の地質単元はジュラ紀～第三紀に生成した貫入岩類に対比可能である。

本地区の地質の特徴は、中央部に第三紀の火山岩類(地質単元 Tvs)が広範囲に分布し、フォールスカラー画像上で黄色に発色されるのが特徴的である。また、西部には新期末固結堆積物、東部には第三紀～第四紀の火山岩類が広く分布し、前者は灰褐色を呈し、流れたような肌理を示すが、後者は褐色を呈し、ごつごつした肌理を示す。

(2) 変質帯

本地区では、63箇所の変質帯(変質帯 Ma 001~063)が抽出された(PL. 4 及び Table 2-2-11 参照)。これらのうち2箇所の変質帯 (Ma 001, 010) は、北部の SALAR DE SURURE 地区の変質帯 SS 047, 053 と重複し、8箇所の変質帯 (Ma 047, 0048, 0049, 0050, 051, 053, 060, 062) は、南部の SALAR DE LLAMARA 地区の変質帯 SL 001, 003, 004, 006, 005, 008, 002, 009 と重複している。これらの変質帯は北部及び南部に多く分布し、北部では散点的な分布を示すが、南部では比較的まとまって N-S 方向に配列する傾向がある。中央部の黄色に発色する特徴的な第三紀の火山岩類中では、変質帯はほとんど抽出されない。変質帯の形態は、一般に楕円状または不規則な形状を呈している。これらの変質帯うち、最も規模の大きいものは、Ma 002 で 7.0km×2.0km 程度である。次いで、Ma 055 で 3.5km×3.0km、さらに Ma 040 が不規則な形態であるが 3.5km×1.5km でこれに次ぐ。その他、Ma 020, 052, 053, 054 等が比較的規模の大きい変質帯である。

これらの変質帯は、北部では白亜紀の火山岩類、白亜紀～第三紀の火山岩類及び白亜紀～第三紀の花崗岩類中に主として分布するが、第三紀～第四紀に対比される火山岩類(地質単元 Tv1) 中にも 12 個ほどの変質帯が抽出されるのが注目される。南部ではジュラ紀の堆積岩類、白亜紀の火山岩類、白亜紀～第三紀の花崗岩類、古生代の火山岩類中に抽出される。

変質帯 Ma 061 は Mocha 鉱徴地の変質帯、Ma 031 は Cerro Colorado 鉱山、Ma 022, 023 は Queen Elizabeth 鉱徴地、Ma 052 は Copaquire 鉱徴地、Ma 054 は Collaguasi 鉱山にそれぞれ一致する。

(3) リニアメント

2-1-4 (4)項で述べた基準に従って判読・抽出を行った結果、PL. 4 に示すようなリニアメントが抽出された。

本地区から判読・抽出されたリニアメントの分布や方向については、北部、中央部、南部の各地域間で若干の差が認められる。

(4) 北部

この地域には、白亜紀～第三紀の火山岩類、白亜紀～第三紀の花崗岩類及び第三紀～第四紀の火山岩類が分布する。この地域の東部では、その方向を NW-SE から NNW-SSE に転じて北部の SALAR DE SURURE 地区に連続するリニアメントが最も連続性がよく、その長さは 40km に達する。その他のリニアメントは、中央部に 1 箇所 10km 程度のものが判読されるほかはいずれも数 km 程度の連続性に乏しいリニアメントである。リニアメントの方向性は、中央部では N-S 系が卓越するが、その他の地域では NW-SE 及び NE-SW 方向を示す。

なお、変質帯 Ma 002, 014, 024, 027 の近傍には NW-SE 方向のリニアメントが発達し、

また、Ma 008, 022, 063 の近傍には NE-SW 系のリニアメントが、さらに Ma 019, 023 の近傍には N-S 系のリニアメントが認められる。

(ロ) 中央部

この地域は、ほとんどが第三紀の火山岩類から構成される。本地区で最もリニアメントの分布密度が高い地域である。全体的な分布範囲は、10km 程度の幅を持ち、リニアメントの卓越方向は、南部では N-S、中央部では斜交する N-S と NE-SW、北部ではまた N-S にとこの具合に変化し、全体として逆 S 形状に分布する。中央部の N-S 及び NE-SW 方向のリニアメントが斜交するところは特徴的である。最も連続性に富むリニアメントは、N-S 系で、長さは 40km に達する。NE-SW 系のリニアメントは一般に連続性に乏しい。

(ハ) 南部

この地域は、主として、古生代～白亜紀の火山岩類及び堆積岩類及び第三紀～第四紀の火山岩類から構成される。本地区全域から見ればリニアメントの発達が少ない地域である。リニアメントの卓越方向は N-S である。中央部に発達するリニアメントは、南側ではほぼ N-S 方向を示すが、北方に向かうにつれ、その方向を NNW-SSE 方向に転じ、断続的ながら 45km も連続する。

なお、変質帯 Ma 037, 039, 053 は、N-S 系のリニアメントの近傍、変質帯 Ma 038, 051, 055 は NW-SE 系のリニアメントの近傍に抽出される。

(4) 褶曲構造・環状構造

(イ) 褶曲構造

本地区の南部に分布するジュラ系及び白亜系中に向斜構造が 1 箇所判読される。褶曲軸の方向は、N-S を示している。

(ロ) 環状構造

本地区に環状構造は抽出されない。

2-2-5 SALAR DE LLAMARA 地区

(1) 地質単元

本地区に分布する岩石と堆積物は、17 種類の地質単元に区分された(PL. 5 及び Table 2-2-7 参照)。それらのうち、5 種類の地質単元は古生代～白亜紀までの火山岩類及び堆積岩類に、6 種類の地質単元は第三紀～第四紀の火山岩類もしくは堆積岩類に、3 種類の地質単元は未固結ないし半固結堆積物にそれぞれ対比可能である。また、1 地質単元は古生代の深成岩もしくは半深成岩類に対比され、2 種類の地質単元はジュラ紀～第三紀に生成した貫入

岩類に対比可能である。

本地区の地質の特徴は、中央部に第三紀の火山岩類（地質単元 Tvs）が広範囲に分布し、フォールスカラー画像上で黄色または灰白色に発色されていることである。また、西部には新期末固結堆積物、東部には第三紀～第四紀の火山岩類が広く分布し、前者は灰褐色を呈し、流れたような肌理を示すが、後者は褐色のごつごつした肌理を示す。

(2) 変質帯

本地区では、36箇所の変質帯(変質帯 SL 001～036)が抽出された(PL. 5 及び Table 2-2-12 参照)。これらのうち7箇所の変質帯 (SL 001, 002, 003, 004, 005, 006, 008) は、北部の MAMIÑA 地区の変質帯 Ma 047, 060, 048, 049, 051, 050, 053 に重複している。これらの変質帯は、中央部及び東部に分布する。東部では6箇所にまとまった分布を示し、中央部ではほぼ南北方向に配列する傾向がある。変質帯の形態は、一般に楕円状または不規則な形状を呈している。これらの変質帯うち、最も大きいものは、SL 004(Ma 049 と同一)で 2.5km×2.0km 程度の規模を有する。次いで SL 0014 が 2.5km×1.5km の規模を示す。また、SL 008(Ma 053 と同一)は 3.5km×0.7km の規模を有し、E-W 方向に伸長している。本地区に抽出される変質帯は全般に小規模である。

これらの変質帯は、東部ではジュラ紀～白亜紀の火山岩類、中央部ではジュラ紀の火山岩類・堆積岩類、白亜紀の火山岩類、古生代の花崗岩類及び第三紀の花崗岩類中に主として分布する。

(3) リニアメント

2-1-4 (4)項で述べた基準に従って判読・抽出を行った結果、PL. 5 に示すようなリニアメントが抽出された。

本地区から判読・抽出されたリニアメントの分布や方向については、東部と中央部で若干の差が認められる。

(イ) 東部

この地域は、ジュラ紀～白亜紀の火山岩類、古生代～白亜紀の花崗岩類及び第三紀～第四紀の火山岩類で構成される。全般にリニアメントの発達は少ない。また、リニアメントの方向性は NNW-SSE 及び N-S が卓越し、長さは一部で 7～8km を示すが、全般的には 2～3km 程度が多い。

なお、変質帯 SL 032, 036 の近傍には NW-SE 方向のリニアメントが発達する。

(ロ) 中央部

この地域は、主として、古生代～白亜紀の火山岩類・堆積岩類及び第三紀の火山岩類から

構成される。本地区全体から見ればリニアメントの分布密度が高い地域である。リニアメントの方向は、中央部で N-S が卓越するが、西側に向かうにつれ NE-SW が多くなる。連続性は、N-S 方向のものが長さ 25km に達し、北部の MAMIÑA 地区に連続する。NE-SW 方向のリニアメントは全般に連続性に乏しく 10km 程度である。

なお、変質帯 SL 005, 014 は NW-SE 方向のリニアメントの近傍に、変質帯 SL 008, 019, 021, 025, 026, 027, 028, 029 はほぼ N-S 方向のリニアメントの近傍に、また、変質帯 SL 009, 015, 017, 018 は NE-SW 方向のリニアメントの近傍にそれぞれ抽出される。

(4) 褶曲構造・環状構造

(イ) 褶曲構造

本地区中央部のジュラ紀の堆積岩類では非常に明瞭にベッディングが判読され、画像上で容易に褶曲構造が抽出される。その結果、6 箇所で褶曲構造が判読された。これらの内訳は背斜構造、向斜構造ともに 3 箇所ずつである。これらは 3~5km の間隔で繰り返して発達する。褶曲軸の方向は概ね NNE-SSW である。

(ロ) 環状構造

本地区に環状構造は抽出されない。

2-2-6 IQUIQUE 地区

本地区の解析範囲は、北部の ARICA 地区及び南部の MAMIÑA 地区のオーバーラップ部分の範囲内にあるため、本地区の判読はこれら両画像の判読でカバーされている。

Table 2-2-2 Photogeological Interpretation of TM Images

| Area (Name of Image) | Alteration Zone | | | | Lineament | | | | | Folding / Annular Structure | |
|----------------------|--|--|--------------------------|--|----------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------|------------------------------------|--|
| | Number | Wall Rock Formation | Arrangement Direction | Shape (extension direction) | Size (km x km) | Number | Wall Rock Formation | Direction | Length (km) | | Direction of Lineament near Alteration Z. |
| VOLCAN TACORA | 7 | | NW-SE (2 rows) | elliptic, irregular (NNW-SSE ~ NNE-SSW, ENE-WSW) | max. 4 x 6.5 | Northern: 7 | Cret.-T. volc. | NW-SE, NNW-SSE | 5~7 | none | none |
| | duplicate: 3 (ARICA) 2 (SALAR D. S.) | 20 Cret. volc. | | | | Eastern: 6 | Cret. volc. T-Q. | NW-SE, E-W | 5~8 | NW-SE | |
| | A: 1 | | | | | Western: 15 | Cret. volc. Cret.-T. volc. | NW-SE, NNE-SSW | 2~7 | NW-SE, NNE-SSW | |
| ARICA | 14 | | NNW-SSE ~ NW-SE | elliptic, irregular (NE-SW, NNW-SSE ~ N-S, NNW-ESE) | max. 4.5 x 2 | Northeastern most: 4 | Cret.-T. volc./sed | NW-SE, (NNE-SSW) | max. 18 | none | 1 annular str. : T-Q. crater rim (Ø 5km) |
| | duplicate: 3 (V. TACORA) 10 (SALAR D. S.) | 20 Cret.-T. volc. | | | | Western: 95 | T. volc. | NW-SE ~ NNW-SSE | max. 30 | NW-SE, NNW-SSE | |
| | J. sed: 1 Cret.-T. volc: 2 T-Q. volc./sed: 5 Q. sed: 4 Cret.-T. int: 1 A: 1 | | | | | Central-Northern: 53 | T-Q. volc./sed., (Cret.-T. volc) | NW-SE | max. 30 | NW-SE, NNW-SSE, NNW-ESE | 1 anticlinal str. with NNW-SSE axis, 5 annular str.: T-Q. crater rim (max. Ø 7.5km) with Alt. Z. |
| SALAR DE SURIRE | 13 | | NNW-SSE | elliptic, irregular - amoebic (NNW-ESE, NNW-SSE ~ N-S, NW-SE, NE-SW) | max. 5.5 x 3.5 | Southern: 117 | T-Q. volc | NW-SE, N-S, NNW-SSE, NE-SW | 5~30 | NNW-ESE ~ NW-SE, NNW-SSE ~ NNE-SSW | |
| | duplicate: 2 (V. TACORA) 10 (ARICA) 2 (MAMIÑA) | 58 Cret.-T(?) volc. T-Q. volc. | | | | Northern: 96 | Cret.-T. volc./gr, T-Q. volc. | N-S, NW-SE, NE-SW | max. 40 | NW-SE, NE-SW, N-S ~ NNW-SSE | 1 synclinal str. with N-S axis in J. & Cret. |
| | P-Cret. volc./sed: 6 T-Q. volc./sed: 8 Q. sed: 3 P. pluton/hypabyssal: 1 J-T. int: 2 A: 1 | | | | | Central: 132 | T. volc. | N-S, NE-SW | max. 40 | N-S, NNW-SSE, NE-SW | |
| MAMIÑA | 21 | | Northern: N-S ~ sporadic | elliptic, irregular (NW-SE, NE-SW, NNW-SSE ~ NNE-SSW) | max. 7 x 2 | Southern: 47 | P-Cret. volc./sed., T-Q. volc. | N-S | max. 45 | N-S ~ NNE-SSW, NNW-SSE | |
| | duplicate: 2 (SALAR D. S.) 8 (SALAR D. LL.) | 63 Northern: Cret.-T. volc., Cret.-T. gr., T-Q. volc. | | | | Eastern: 22 | J-Cret. volc., P-Cret. Gr., T-Q. | NNW-SSE, N-S | 2~8 | NW-SE | 3 anticlinal & 3 synclinal str. with NNE-SSW axes in J. sed. |
| | P-Cret. volc./sed: 6 T-Q. volc./sed: 8 Q. sed: 3 P. pluton/hypabyssal: 1 J-T. int: 2 A: 1 | | | | | Central: 61 | volc./sed., T. volc. | N-S, NE-SW | 10~25 | NNW-SSE ~ N-S, NNE-SSW | |
| SALAR DE LLAMARA | 18 | | N-S | elliptic, irregular (E-W, NW-SE, N-S) | max. 2.5 x 2 | Eastern: 22 | J-Cret. volc., P-Cret. Gr., T-Q. | N-S | 10~25 | NNW-SSE ~ N-S, NNE-SSW | |
| | duplicate: 8 (MAMIÑA) | 36 Eastern: J-Cret. volc., Central: J. volc./sed., Cret. volc., P. gr., T. gr. | | | | Central: 61 | volc./sed., T. volc. | N-S, NE-SW | 10~25 | NNW-SSE ~ N-S, NNE-SSW | |
| | P-Cret. volc./sed: 5 T-Q. volc./sed: 6 Q. sed: 3 P. pluton/hypabyssal: 1 J-T. int: 2 | | | | | | | | | | |

Abbrev.

P=Paleozoic, J=Jurassic, Cret=Cretaceous, T=Tertiary, Q=Quaternary, A=Alteration, volc=volcanics, sed=sedimentary rock, int=intrusive, gr=granitic rock, str=structure, Alt. Z.=Alteration Zone

Table 2-2-3 Characteristics of Photo-geologic Units of the VOLCAN TACORA Area

| Unit | Photo-Characteristics | | Morphologic Expression | | | | Superficial Cover | | Probable Lithology (Correlation with available Geologic Map) | |
|------|-----------------------|-----------|------------------------|---------|--------------------|---------|-------------------|------------|--|-------------|
| | Tone | Texture | Drainage Pattern | Density | Rock Resistance | Section | Bedding | Vegetation | | Cultivation |
| | | | | | | | | | | |
| Qd | gray, purplish gray | very fine | dichotomic | high | low | | none | none | Unconsolidated sediments composed of talus deposits (Fluvial, Glacial, Alluvial, Mudflow) | |
| TQ1 | purplish red | very fine | sub-parallel | low | low | | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, talus deposits (Pleistocene, Pliocene: Decitic ignimbrite, tuff, intercalated with continental sediments) | |
| Tv3 | brown | fine | radial | medium | high | | none | none | Volcanic rocks (Pliocene - Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) | |
| Tv1 | brown | fine | dendritic | medium | high | | none | none | Volcanic rocks (Pliocene - Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) | |
| Tvs | whitish yellow | very fine | dendritic | low | medium | | none | none | Acidic Volcanic rocks (Pliocene - Miocene: Rhyolitic - basaltic flow, pyroclastic rocks, ignimbrite intercalated with continental sediments) | |
| Jv | right brown | fine | dendritic | medium | high | | none | none | Volcanic rocks (Late - Middle Jurassic: Sandstone, calcareous sandstone) | |
| K | brown | rough | dendritic | high | medium | | none | none | Volcanic rocks (Early Tertiary - Late Cretaceous: Andesite - rhyolitic flow, pyroclastic rocks, dacitic - rhyolitic ignimbrite) | |
| A | light green | fine | none | low | low | | none | none | Alteration Zone (Hydrothermal alteration zone) | |

Table 2-2-4 Characteristics of Photo-geologic Units of the ARICA Area

| Unit | Photo-Characteristics | | Morphologic Expression | | | | | Superficial Cover | | Probable Lithology (Correlation with available Geologic Map) |
|------|-----------------------|---------------|------------------------|-----------|-----------------|---------|---------|-------------------|-------------|---|
| | Tone | Texture | Drainage | | Rock Resistance | Section | Bedding | Vegetation | Cultivation | |
| | | | Pattern | Density | | | | | | |
| Qa | gray | fine | meandering | very low | very low | | none | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay (Fluvial, Alluvial, Colluvial, Glacial, Lacustrine) |
| Qa1 | purplish gray | very fine | parallel | high | low | | none | none | partly | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay, talus deposits (Fluvial, Alluvial, Colluvial) |
| Qd1 | purplish brown | fine | parallel | medium | medium | | none | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay and talus deposits (Fluvial, Alluvial, Colluvial) |
| TQ1 | brown | fine ~ coarse | dendritic | medium | medium | | none | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, (Pleistocene - Pliocene: Dacitic ignimbrite, tuff, intercalated with continental sediments) |
| Ts2 | gray brown | rough | parallel | very high | medium | | none | none | none | Fine to medium grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) |
| Ts1 | brown | fine | pinnate | very high | medium | | none | none | none | Fine grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) |
| Tv3 | brown | fine | radial, | medium | high | | none | none | none | Fine to medium grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) |
| TV1 | brown | fine | dendritic | high | high | | none | none | none | Volcanic rocks (Pliocene - Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) |
| Tvs | yellow | coarse, rough | parallel | very high | high | | none | none | none | Acidic Volcanic rocks (Pliocene - Miocene: Rhyolitic to basaltic flow and pyroclastic rocks, ignimbrite, intercalated with continental sediments) |
| K | brown | rough | dendritic | high | medium | | none | none | none | Volcanic rocks (Early Tertiary - Late Cretaceous: Andesite to rhyolitic flow and pyroclastic rocks, dacitic to rhyolitic ignimbrite) |
| Kv | brown | rough | dendritic | high | medium | | none | none | none | Volcanic rocks (Early Cretaceous : Andesite to rhyolitic / trachytic flows and pyroclastic rocks, ignimbrite intercalated with sediments) |
| Jv | brown | rough | dendritic | low | medium | | none | none | none | Volcanic rocks (Late - Middle Jurassic: andstone, calcareous sandstone) |
| Kg | brown | rough | dendritic | low | medium | | none | none | none | Igneous rocks (Late Jurassic - Early Tertiary : Plutonic rocks) |
| A | right green | fine | none | none | low | | none | none | none | Alteratio Zone (Hydrothermal alteration zone) |

Table 2-2-5 Characteristics of Photogeologic Units of the SALAR DE SURIRE Area

| Unit | Photo-Characteristics | | Morphologic Expression | | | | Superficial Cover | | Probable Lithology (Correlation with available Geologic Map) | |
|------|-----------------------|-------------|------------------------|-----------|--------------------|-----------|-------------------|------------|--|-------------|
| | Tone | Texture | Drainage Pattern | Density | Rock Resistance | | Bedding | Vegetation | | Cultivation |
| | | | | | Resistance | Section | | | | |
| Qa | brown | very fine | meandering | low | low | low | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay (Fluvial, Glacial, Alluvial, Colluvial, Mud flow) | |
| Qa1 | gray, purplish gray | very fine | sub-parallel | high | low | low | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay (Fluvial, Alluvial, Colluvial) | |
| Qd | brown | fine | parallel | medium | low~medium | medium | none | none | Unconsolidated sediments composed of talus deposits (Fluvial, Glacial, Alluvial, Mudflow) | |
| Qd1 | purplish brown | fine | sub-parallel | medium | medium | medium | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay (Pleistocene : Fluvial, talus deposits) | |
| TQ1 | brown | fine~rough | dendritic | medium | medium | medium | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, (Pleistocene - Pliocene: Dacitic ignimbrite, tuff intercalated with continental sediments) | |
| Ts2 | gray, brown | rough | parallel | very high | medium | medium | none | none | Fine to medium grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) | |
| Ts1 | brown | fine | pinnate | very high | medium | medium | none | none | Fine grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) | |
| Tv3 | brown | fine | radial | medium | very high | very high | none | none | Volcanic rocks (Pliocene - Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) | |
| Tv1 | gray, brown | fine~coarse | dendritic | high | medium ~high | medium | none | none | Volcanic rocks (Pliocene - Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) | |
| Tvs | yellow | coarse | dendritic | very high | high | high | none | none | Acidic Volcanic rocks (Pliocene - Miocene: Rhyolitic to basaltic flow and pyroclastic rocks, ignimbrite intercalated with continental sediments) | |
| K | brown | rough | dendritic | high | medium | medium | none | none | Volcanic rocks (Early Tertiary - Late Cretaceous: Andesite to rhyolitic flow and pyroclastic rocks, dacitic to rhyolitic ignimbrite) | |
| Kv | light brown | rough | dendritic | high | medium | medium | partly | none | Volcanic rocks (Early Cretaceous : Andesite to rhyolitic / trachytic flows and pyroclastic rocks, ignimbrite intercalated with sediments) | |
| Kg | brown | rough | dendritic | low | medium | medium | none | none | Ineous rocks (Late Jurassic - Early Tertiary : Plutonic rocks) | |
| A | green, light green | fine | none | none | low | low | none | none | Alteration Zone (Hydrothermal alteration zone) | |

Table 2-2-6 Characteristics of Photogeologic Units of the MAMIÑA Area (1)

| Unit | Photo-Characteristics | | Morphologic Expression | | | | | Superficial Cover | | Probable Lithology (Correlation with available Geologic Map) |
|------|-----------------------|------------|--------------------------|-----------|-----------------|---------|-------------|-------------------|-------------|--|
| | Tone | Texture | Drainage | | Rock Resistance | Section | Bedding | Vegetation | Cultivation | |
| | | | Pattern | Density | | | | | | |
| Qa | gray | very fine | meandering, sub-parallel | very low | very low | | none | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay (Fluvial, Glacial, Alluvial, Colluvial, Mudflow) |
| Qa1 | gray | very fine | sub-parallel | high | low | | none | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay (Fluvial, Alluvial, Colluvial) |
| Qd | purplish gray | fine | parallel | medium | low~medium | | none | none | none | Unconsolidated sediments composed of talus deposits (Fluvial, Glacial, Alluvial, Mudflow) |
| Ts3 | brown | fine | dendritic | high | high | | none | none | none | Fine to medium grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) |
| Ts2 | gray, brown | fine~rough | parallel | very high | medium | | none | none | none | Fine to medium grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) |
| Ts1 | brown | fine | pinnate | very high | medium | | none | none | none | Fine grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) |
| Ts | brown | fine | dendritic | low | medium | | none | none | none | Coarse grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) |
| Tv3 | brown | fine | radial | medium | very high | | none | none | none | Volcanic rocks (Pliocene-Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) |
| Tv2 | brown | fine | radial | high | very high | | none | none | none | Volcanic rocks (Pliocene-Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) |
| Tv1 | brown | fine | dendritic | high | medium~high | | none | none | none | Volcanic rocks (Pliocene-Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) |
| Tvs2 | dark gray | fine | sub-parallel | high | medium | | none | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, (Pleistocene -Pliocene : Dacitic ignimbrite, tuff, intercalated with continental sediments) |
| Tvs | yellow | fine | parallel | high | medium-high | | none | none | none | Acidic Volcanic rocks(Pliocene-Miocene : Rhyolitic to basaltic flow and pyroclastic rocks ignimbrite, intercalated with continental sediments) |
| K | brown | rough | dendritic | high | medium | | none | none | none | Volcanic rocks (Early Tertiary-Late Cretaceous: Andesite-rhyolitic flow, pyroclastic rocks, dacitic to rhyolitic ignimbrite) |
| Kv | light brown | rough | dendritic | high | medium | | partly | none | none | Volcanic rocks (Early Cretaceous : Andesite to rhyolitic / trachytic flows and pyroclastic rocks, ignimbrite, intercalated with sediments) |
| Js2 | greenish brown | rough | dendritic | high | medium | | well bedded | none | none | Medium grained sedimentary rocks and Volcanic rocks (Late-Middle Jurassic: Sandstone, calcareous sandstone, limestone, marl, shale, conglomerate, chert) |

Table 2-2-6 Characteristics of Photogeologic Units of the MAMIÑA Area (2)








| Unit | Photo-Characteristics | | Morphologic Expression | | | | | | Superficial Cover | | Probable Lithology (Correlation with available Geologic Map) |
|------|-----------------------|---------|------------------------|---------|---|-------------|------------|-------------|-------------------|---|---|
| | Tone | Texture | Drainage | | Section | Bedding | Vegetation | Cultivation | | | |
| | | | Pattern | Density | | | | | Rock Resistance | | |
| Js1 | dark brown | rough | dendritic | high |  | well bedded | none | none | none | Medium grained sedimentary rocks and Volcanic rocks (Late-Middle Jurassic: Sandstone, calcareous sandstone, limestone, marls, shale, conglomerate, chert) | |
| Jv | light brown | fine | dendritic | medium |  | none | none | none | none | Volcanic rocks(Late-Middle Jurassic: Sand stone calcareous sandstone) | |
| P | purplish brown | rough | dendritic | medium |  | none | none | none | none | Volcanic rocks and Sedimentary rocks (Dacite, rhyolite, tuff, intercalated with sediments) | |
| Ti | brown | rough | dendritic | medium |  | massive | partly | none | none | Igneous rocks (Tertiary: Plutonic rocks and hypabyssal rocks) | |
| Kg | brown | rough | dendritic | high |  | massive | none | none | none | Igneous rocks (Late Jurassic-Early Tertiary: Plutonic rocks and hypabyssal rocks) | |
| Pg | brown | fine | dendritic | medium |  | massive | none | none | none | Igneous rocks (Paleozoic: Plutonic rocks and hypabyssal rocks) | |
| A | green, light green | fine | none | none |  | none | none | none | none | Alteration Zone (Hydrothermal alteration zone) | |

Table 2-2-7 Characteristics of Photo-geologic Units of the SALAR DE LLAMARA AREA (1)







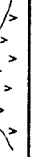








| Unit | Photo-Characteristics | | Morphologic Expression | | | | | Superficial Cover | | Probable Lithology (Correlation with available Geologic Map) | | |
|------|-----------------------|-----------|------------------------|-----------|---------|---|-------------|-------------------|--|---|------------|-------------|
| | | | Texture | Drainage | | Section | Bedding | | | | Vegetation | Cultivation |
| | | | | Pattern | Density | | | | | | | |
| Qa | gray | fine | dichotomic | medium | low |  | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay (Fluvial, Glacial, Alluvial, Colluvial, Mud flow) | | | |
| Qa1 | purplish gray | very fine | parallel | high | low |  | none | none | Unconsolidated sediments composed of gravel, sand, silt and clay (Fluvial, Alluvial, Colluvial) | | | |
| Qd | gray, purplish gray | very fine | dichotomic | high | low |  | none | none | Unconsolidated sediments composed of talus deposits (Fluvial, Glacial, Alluvial, Mudflow) | | | |
| Ts2 | brown | fine | parallel | very high | medium |  | none | none | Fine to medium grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) | | | |
| Ts1 | brown | fine | pinnate | very high | midium |  | none | none | Fine grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) | | | |
| Ts | brown | fine | dendritic | low | medium |  | none | none | Coarse grained sedimentary rocks (Tertiary: Conglomerate, sandstone, mudstone) | | | |
| Tv3 | dark brown | fine | radial | medium | high |  | none | none | Volcanic rocks (Pliocene - Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) | | | |
| Tv1 | brown | fine | dendritic | high | high |  | none | none | Volcanic rocks (Pliocene - Pleistocene : Andesite, basaltic flow, pyroclastic rocks) | | | |
| Tvs | whitish yellow | very fine | dendritic | low | medium |  | none | none | Acidic Volcanic rocks (Pliocene - Miocene: Rhyolitic - basaltic flow, pyroclastic rocks, ignimbrite intercalation of continental sediments) | | | |
| Kv | brown | rough | dendritic | high | medium |  | none | none | Sedimentary rocks (Lower Jurassic: Marine and continental sedimentary rocks, Pitricuitron Formation etc.) | | | |
| Js2 | greenish brown | rough | dendritic | high | medium |  | well bedded | none | Medium grained sedimentary rocks and volcanic rocks (Late-Middle Jurassic: Sandstone, calcareous sandstone, limestone, marl, shale, conglomerate, chert) | | | |
| Js1 | dark brown | rough | dendritic | high | medium |  | well bedded | none | Medium grained sedimentary rocks and Volcanic rocks (Late-Middle Jurassic: Sandstone, calcareous sandstone, limestone, marl, shale, conglomerate, chert) | | | |
| Jv | brown | fine | dendritic | medium | high |  | none | none | Volcanic rocks (Late-Middle Jurassic: Sandstone, calcareous sandstone) | | | |
| P | purplish brown | rough | dendritic | medium | medium |  | none | none | Volcanic rocks and Sedimentary rocks (Dacite, rhyolite, tuff, intercalated with sediments) | | | |
| Ti | brown | rough | dendritic | medium | high |  | massive | none | Igneous rocks (Tertiary : Plutonic rocks and hypabyssal rocks) | | | |

Table 2-2-7 Characteristics of Photogeologic Units of the SALAR DE LLAMARA AREA (2)




| Unit | Photo-Characteristics | | Morphologic Expression | | | | | | Superficial Cover | | Probable Lithology (Correlation with available Geologic Map) |
|-----------|-----------------------|---------|------------------------|---------|-----------------|---|---------|------------|-------------------|--|---|
| | Tone | Texture | Drainage | | Rock Resistance | Section | Bedding | Vegetation | Cultivation | | |
| | | | Pattern | Density | | | | | | | |
| Kg | brown | rough | dendritic | high | high |  | massive | none | none | igneous rocks (Late Jurassic-Early Tertiary : Plutonic rocks and hypabyssal rocks) | |
| Pg | brown | fine | dendritic | medium | high |  | massive | none | none | igneous rocks (Paleozoic : Plutonic rocks and hypabyssal rocks) | |
| A | right green | fine | none | none | low |  | none | none | none | Alteration Zone (Hydrothermal alteration zone) | |

Table 2-2-8 Alteration Zones of the VOCAN TACORA Area

| No. of Alteration | Nearby Units | Size (km) | Extension | Ore Deposit |
|-------------------|--------------|-----------|-----------|---------------|
| VT001 | K | (4+a)×6.5 | NE-SW | |
| VT002 | K | 1.0×0.5 | NW-SE | |
| VT003 | K | 7.5×1.8 | NW-SE | |
| VT004 | TQ1 | 1.0×1.0 | — | |
| VT005 | K | 1.5×0.5 | NE-SW | |
| VT006 | K | 1.5×0.7 | N-S | |
| VT007 | K | 3.2×1.5 | NNE-SSW | |
| VT008 | K | 2.2×1.5 | N-S | |
| VT009 | TV1 | 0.7×0.7 | — | |
| VT010 | K | 1.5×0.7 | NNW-SSE | |
| VT011 | K | 1.3×0.7 | WNW-ESE | |
| VT012 | K | 1.0×0.7 | NW-SE | |
| VT013 | K | 3.7×2.0 | NE-SW | |
| VT014 | K | 1.5×0.7 | NW-SE | |
| VT015 | K | 3.0×0.5 | N-S | Same as Ar001 |
| VT016 | K | 1.5×0.7 | NE-SW | Same as Ar002 |
| VT017 | K | 2.0×1.0 | N-S | Same as Ar003 |
| VT018 | K | 3.0×1.0 | NNE-SSW | Same as SS001 |
| VT019 | K | 1.5×1.0 | NE-SW | Same as SS002 |
| VT020 | K | 1.0×1.0 | — | Same as Ar004 |

Table 2-2-9 Alteration Zones of the ARICA Area

| No. of Alteration | Nearby Units | Size (km) | Extension | Ore Deposit |
|-------------------|--------------|-----------|-----------|---------------|
| Ar001 | K | 3.0×0.5 | N-S | Same as VT015 |
| Ar002 | K | 1.5×0.7 | NE-SW | Same as VT016 |
| Ar003 | K | 2.0×1.0 | N-S | |
| Ar004 | K | 1.0×1.0 | — | Same as VT020 |
| Ar005 | K | 1.0×1.0 | — | |
| Ar006 | K | 2.0×1.5 | NE-SW | |
| Ar007 | K | 4.5×2.0 | NE-SW | Same as SS003 |
| Ar008 | K | 2.0×0.5 | — | |
| Ar009 | K | 1.5×1.0 | — | |
| Ar010 | K | 2.0×0.7 | N-S | |
| Ar011 | K | 2.5×1.7 | NNW-SSE | Same as SS005 |
| Ar012 | K | 1.5×1.0 | NW-SE | Same as SS006 |
| Ar013 | K | 3.0×2.0 | NW-SE | Same as SS007 |
| Ar014 | K | 3.5×2.0 | NW-SE | Same as SS008 |
| Ar015 | K | 2.0×0.5 | WNW-ESE | Same as SS009 |
| Ar016 | Tv3 | 2.0×1.2 | NW-SE | Same as SS010 |
| Ar017 | Tv3 | 1.0×0.7 | NE-SW | Same as SS011 |
| Ar018 | Tv1 | 1.3×0.5 | NW-SE | Same as SS004 |
| Ar019 | Kg | 1.0×0.3 | NW-SE | |
| Ar020 | Tv3 | 0.7×0.2 | NW-SE | Same as SS058 |

Table 2-2-10 Alteration Zones of the SALAR DE SURIRE Area

| No. of Alteration | Nearby Units | Size (km) | Extension | Ore Deposit |
|-------------------|--------------|-----------|-----------|---------------|
| SS001 | K | 3.0×1.0 | NNE-SSW | Same as VT018 |
| SS002 | K | 1.5×1.0 | NE-SW | Same as VT019 |
| SS003 | K | 2.0×4.5 | NE-SW | Same as Ar007 |
| SS004 | Tv1 | 1.3×0.5 | NW-SE | Same as Ar018 |
| SS005 | K | 2.5×0.8 | NNW-SSE | Same as Ar011 |
| SS006 | K | 1.5×1.0 | NW-SE | Same as Ar012 |
| SS007 | K | 3.0×2.0 | NW-SE | Same as Ar013 |
| SS008 | K | 3.5×2.0 | NW-SE | Same as Ar014 |
| SS009 | K | 2.0×0.5 | WNW-ESE | Same as Ar015 |
| SS010 | Tv3 | 2.0×1.2 | NW-SE | Same as Ar016 |
| SS011 | Tv3 | 1.0×0.7 | NE-SW | Same as Ar017 |
| SS012 | Tv1 | 0.7×0.3 | NW-SE | |
| SS013 | Tv1 | 4.5×1.5 | NW-SE | |
| SS014 | Tv1 | 1.5×1.2 | NE-SW | |
| SS015 | Tv1 | 3.5×1.0 | NW-SE | |
| SS016 | K | 5.5×3.5 | NW-SE | |
| SS017 | K | 1.5×1.0 | N-S | |
| SS018 | K | 1.5×0.5 | NW-SE | |
| SS019 | K | 2.0×1.0 | NW-SE | |
| SS020 | Tv1 | 1.5×0.7 | N-S | |
| SS021 | Tv1 | 1.5×0.7 | N-S | |
| SS022 | Tv1 | 2.5×1.0 | NW-SE | |
| SS023 | K | 5.0×2.5 | NW-SE | |
| SS024 | K | 3.0×3.0 | — | |
| SS025 | K | 0.7×0.5 | N-S | |
| SS026 | Tv1 | 2.0×0.7 | — | |
| SS027 | K | 1.0×0.7 | — | |
| SS028 | K | 1.2×0.5 | E-W | |
| SS029 | K | 2.3×0.5 | E-W | |
| SS030 | K | 3.5×2.0 | — | |
| SS031 | Tv1 | 2.5×0.5 | NNW-SSE | |
| SS032 | Tv1 | 2.0×0.5 | E-W | |
| SS033 | Tv1 | 4.0×2.0 | NW-SE | |
| SS034 | Tv1 | 0.5×0.2 | E-W | |
| SS035 | Tv1 | 1.0×0.5 | NE-SW | |
| SS036 | Tv1 | 1.5×0.5 | NW-SE | |
| SS037 | Tv1 | 2.0×1.0 | NW-SE | |
| SS038 | Tv1 | 0.7×0.5 | N-S | |
| SS039 | Tv1 | 2.5×0.7 | N-S | |
| SS040 | Tv1 | 1.0×0.7 | N-S | |
| SS041 | Tv1 | 1.0×0.5 | NW-SE | |
| SS042 | Tv1 | 2.0×0.5 | N-S | |
| SS043 | Tv1 | 2.5×1.0 | NE-SW | |
| SS044 | Tv1 | 3.0×1.0 | E-W | |
| SS045 | Tv1 | 1.0×1.0 | — | |
| SS046 | Tv1 | 2.5×1.5 | E-W | |
| SS047 | Tv1 | 3.5×1.0 | NE-SW | |
| SS048 | Tv1 | 1.5×0.5 | N-S | |
| SS049 | Tv1 | 2.0×0.5 | NW-SE | |
| SS050 | K | 0.5×0.5 | — | |
| SS051 | Tv1 | 0.7×0.7 | — | |
| SS052 | Tv1 | 0.8×0.5 | N-S | |
| SS053 | Tv1 | 1.0×0.7 | N-S | |
| SS054 | K | 0.7×0.5 | E-W | |
| SS055 | K | 1.3×1.0 | E-W | |
| SS056 | K | 1.0×0.5 | N-S | |
| SS057 | K | 1.5×0.7 | N-S | |
| SS058 | Tv3 | 1.0×0.3 | NE-SW | Same as Ar020 |

Table 2-2-11 Alteration Zones of the MAMIÑA Area

| No. of Alteration | Nearby Units | Size (km) | Extension | Ore Deposit |
|-------------------|--------------|-----------|-----------|-----------------|
| Ma001 | Tv1 | 3.5×1.0 | NE-SW | Same as SS047 |
| Ma002 | K | 7.0×2.0 | NW-SE | |
| Ma003 | Tv1 | 0.5×0.3 | NW-SE | |
| Ma004 | Tv1 | 1.5×0.5 | NE-SW | |
| Ma005 | Tv1 | 2.0×1.0 | NE-SW | |
| Ma006 | Tv1 | 2.0×1.5 | NMW-SSE | |
| Ma007 | Tv1 | 2.0×1.2 | NNE-SSW | |
| Ma008 | Tv1 | 1.5×0.7 | NW-SE | |
| Ma009 | Tv1 | 1.7×1.0 | NE-SW | |
| Ma010 | Tv1 | 1.2×0.7 | NE-SW | Same as SS053 |
| Ma011 | K | 2.5×1.5 | NME-SSW | |
| Ma012 | Kv | 1.5×1.0 | NE-SW | |
| Ma013 | Tv1 | 0.5×0.5 | — | |
| Ma014 | Kv | 1.0×0.5 | N-S | |
| Ma015 | Kv | 1.0×0.7 | E-W | |
| Ma016 | Kv | 2.3×0.7 | N-S | |
| Ma017 | Tv1 | 1.0×0.5 | NE-SW | |
| Ma018 | Kg | 2.5×1.5 | NE-SW | |
| Ma019 | Kg | 2.0×1.0 | NE-SW | |
| Ma020 | Kv | 2.0×2.0 | — | |
| Ma021 | Kv | 1.0×0.5 | N-S | |
| Ma022 | Kg | 1.0×0.7 | NE-SW | Queen Elizabeth |
| Ma023 | Kg | 1.0×0.7 | NW-SE | Queen Elizabeth |
| Ma024 | Kv | 1.0×0.5 | N-S | |
| Ma025 | Kv | 1.7×0.5 | NW-SE | |
| Ma026 | Kv | 1.0×0.7 | NE-SW | |
| Ma027 | Kv | 0.7×0.7 | — | |
| Ma028 | Kv | 1.2×0.7 | E-W | |
| Ma029 | Kv | 1.5×1.0 | — | |
| Ma030 | Kv | 1.5×1.0 | E-W | |
| Ma031 | Kv | 1.5×1.0 | NE-SW | Cerro Colorado |
| Ma032 | Ts2 | 1.5×1.0 | NE-SW | |
| Ma033 | Tv1 | 1.7×0.5 | NW-SE | |
| Ma034 | J | 1.5×1.0 | N-S | |
| Ma035 | Js1 | 1.3×1.0 | NE-SW | |
| Ma036 | Js1 | 0.7×0.5 | N-S | |
| Ma037 | Kv | 2.0×1.0 | N-S | |
| Ma038 | Kv | 1.5×0.8 | NE-SW | |
| Ma039 | Kv | 2.5×0.8 | N-S | |
| Ma040 | Kv | 3.5×1.5 | — | |
| Ma041 | Kv | 1.5×0.7 | NW-SE | |
| Ma042 | Kv | 1.0×0.7 | NE-SW | |
| Ma043 | Ti | 0.7×0.5 | NE-SW | |
| Ma044 | Kv | 1.0×0.7 | — | |
| Ma045 | Kv | 0.7×0.6 | E-W | |
| Ma046 | Kv | 2.0×1.0 | NE-SW | |
| Ma047 | Js2 | 2.0×1.0 | NW-SE | Same as SL001 |
| Ma048 | Js2 | 1.5×0.7 | NW-SE | Same as SL003 |
| Ma049 | Js2 | 2.5×2.0 | — | Same as SL004 |
| Ma050 | Js2 | 1.8×0.7 | NW-SE | Same as SL006 |
| Ma051 | Ti | 3.0×0.3 | NNW-SSE | Same as SL005 |
| Ma052 | Js2 | 3.2×1.5 | NE-SW | Copquire |
| Ma053 | P | 3.5×1.5 | E-W | Same as SL008 |
| Ma054 | P | 3.0×0.7 | E-W | Collaguasi |
| Ma055 | P,Pg | 3.5×3.0 | — | |
| Ma056 | P | 1.5×0.5 | NE-SW | |
| Ma057 | Tv1 | 1.0×0.5 | NW-SE | |
| Ma058 | P | 0.7×0.5 | NW-SE | |
| Ma059 | P | 1.0×0.5 | E-W | |
| Ma060 | Js2 | 1.5×0.7 | N-S | Same as SL002 |
| Ma061 | Kv | 1.3×1.0 | N-S | Mocha |
| Ma062 | Ts | 1.0×0.7 | NW-SE | Same as SL009 |
| Ma063 | Kg | 1.7×0.5 | — | |

Table 2-2-12 Alteration Zones of the SALAR DE LLAMARA Area

| No. of Alteration | Nearby Units | Size (km) | Extension | Ore Deposit |
|-------------------|--------------|-----------|-----------|---------------|
| SL001 | Js2 | 2.0×1.0 | NW-SE | Same as Ma047 |
| SL002 | Js2 | 1.5×0.7 | N-S | Same as Ma060 |
| SL003 | Js2 | 1.5×0.7 | NW-SE | Same as Ma048 |
| SL004 | Js2 | 2.5×2.0 | — | Same as Ma049 |
| SL005 | Ti | 3.0×0.3 | NNW-SSE | Same as Ma051 |
| SL006 | Js2 | 1.8×0.7 | NW-SE | Same as Ma050 |
| SL007 | Js2 | 2.0×1.0 | NW-SE | |
| SL008 | P | 3.0×0.7 | E-W | Same as Ma053 |
| SL009 | Ts | 1.0×0.7 | NW-SE | |
| SL010 | Js2,Ti | 2.0×2.0 | — | |
| SL011 | Js2 | 0.7×0.5 | NE-SW | |
| SL012 | Js2 | 0.3×0.2 | E-W | |
| SL013 | Js2 | 1.0×0.5 | NE-SW | |
| SL014 | Js2,Ti | 2.5×1.5 | N-S | |
| SL015 | J | 0.5×0.3 | N-S | |
| SL016 | Js1 | 0.7×0.5 | N-S | |
| SL017 | Pg | 0.7×0.5 | N-S | |
| SL018 | Pg | 0.7×0.5 | NW-SE | |
| SL019 | Ti | 1.5×0.7 | N-S | |
| SL020 | Js1 | 1.0×0.3 | N-S | |
| SL021 | Js1 | 1.7×0.7 | N-S | |
| SL022 | Qa | 1.0×0.3 | NW-SE | |
| SL023 | Js1 | 0.5×0.3 | NE-SW | |
| SL024 | J | 0.6×0.3 | NW-SE | |
| SL025 | Ti | 0.7×0.3 | NW-SE | |
| SL026 | Js1 | 1.5×0.3 | N-S | |
| SL027 | Js1 | 0.5×0.3 | NW-SE | |
| SL028 | Js1 | 0.7×0.5 | NE-SW | |
| SL029 | Js1 | 0.7×0.5 | NE-SW | |
| SL030 | Js1 | 0.5×0.3 | NW-SE | |
| SL031 | Kv | 1.5×1.0 | E-W | |
| SL032 | Jv | 0.7×0.5 | NW-SE | |
| SL033 | Kv | 1.5×0.5 | E-W | |
| SL034 | Kv | 1.5×1.5 | — | |
| SL035 | Jv | 1.5×0.5 | NW-SE | |
| SL036 | Jv | 1.0×0.5 | NW-SE | |

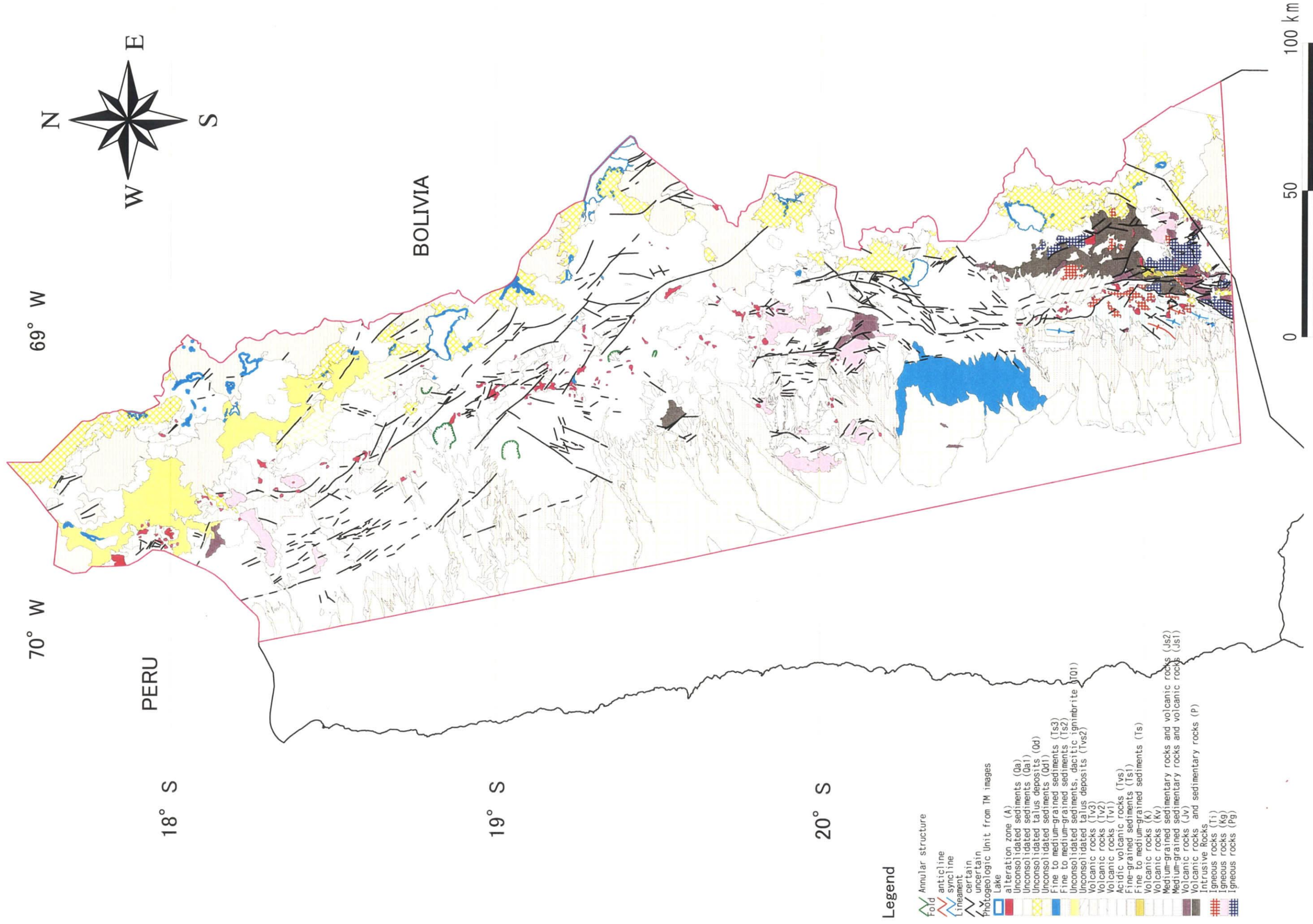


Fig. 2-2-2 Photogeologic Interpretation Map of TM images

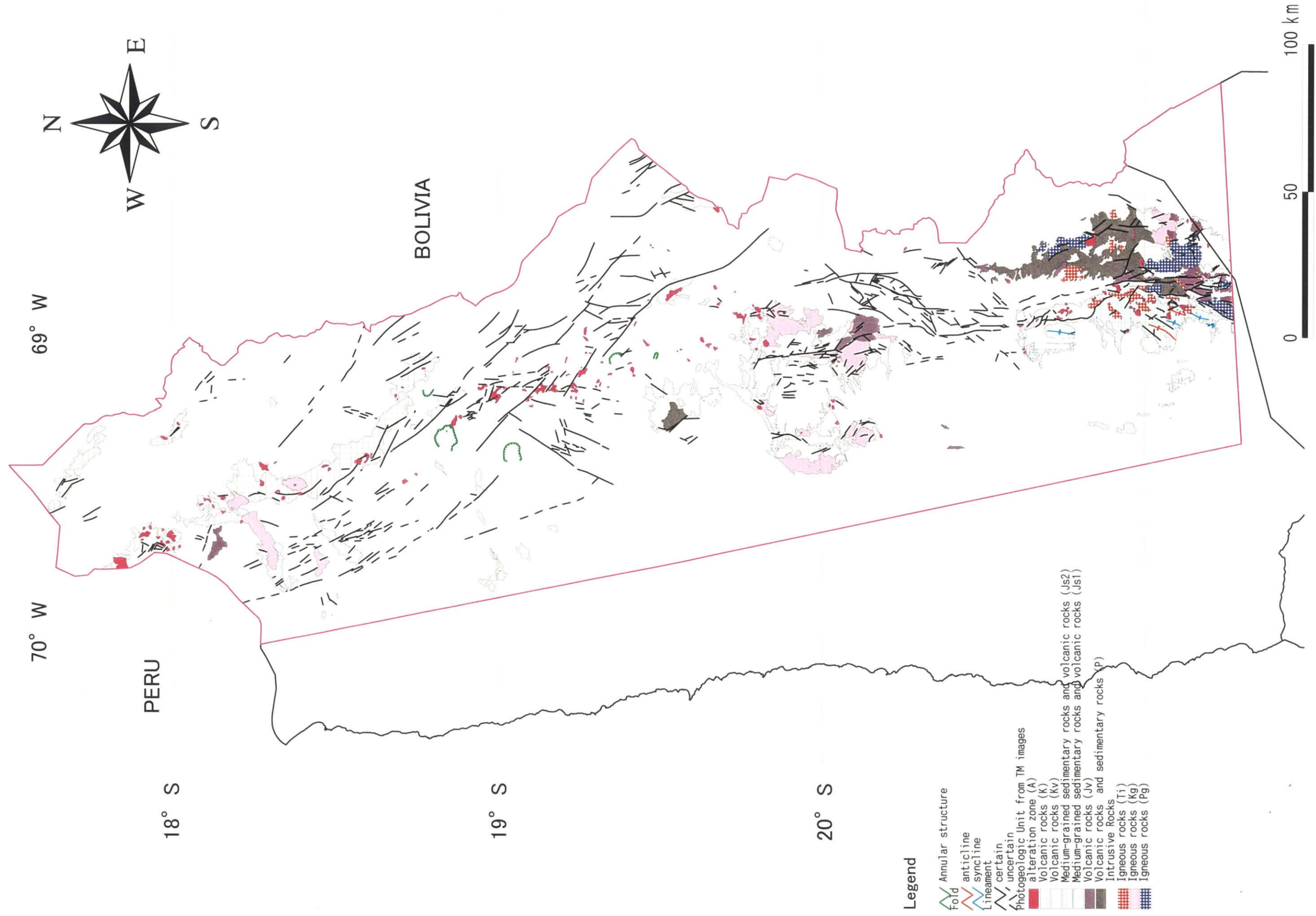


Fig. 2-2-3 Photogeological Structure of the Study Area

第3章 地質調査・地化学探査

或る程度広域(約 100km² 以上)な範囲を地質調査・地化学探査のターゲットとして選定する際、既存データから得られた鉱徴地や衛星画像解析から抽出された変質帯は、広域的に見て点状の分布としてしかとらえられない。従って、或る程度まとまった範囲を鉱床賦存高ポテンシャル域として抽出するには、鉱徴地や変質帯それ自身に、それらの周辺域を加えた範囲を対象とすべきと考えた。斑岩銅型の大鉱床(Cerro Colorado, Collaguasi)は鉱徴地または画像から抽出された変質帯とは必ずしも一致しない。また、リニアメント・断層発達域と鉱床分布は密接な関係にあるとみられるが、斑岩銅型の大鉱床は断層発達域の中心部若しくは周縁部付近に存在し、断層-鉱床分布の関係から鉱床有望地を特定することはできない。従って、これらの鉱床と上記鉱徴地・変質帯との距離関係を考慮し、鉱徴地や変質帯から 4km 離れた周辺域までを鉱床賦存の高ポテンシャル域と考えた。最終的に、Cu, Mo 及び Au 各鉱徴地を含む高ポテンシャル域と変質帯を含む高ポテンシャル域が重複する地域を斑岩銅鉱床の賦存有望地とした(Fig. 2-3-1)。

このようにして抽出された鉱床賦存有望地及び既知斑岩銅型鉱徴地の一部に対し、地質構造、鉱化作用及び変質帯を検証するための概査を行い、分析用試料を採取した。現地調査地域の位置は Fig. 2-3-2 に示した。また、本調査で採取された室内試験試料の数量は、Table 1-1 に示した。

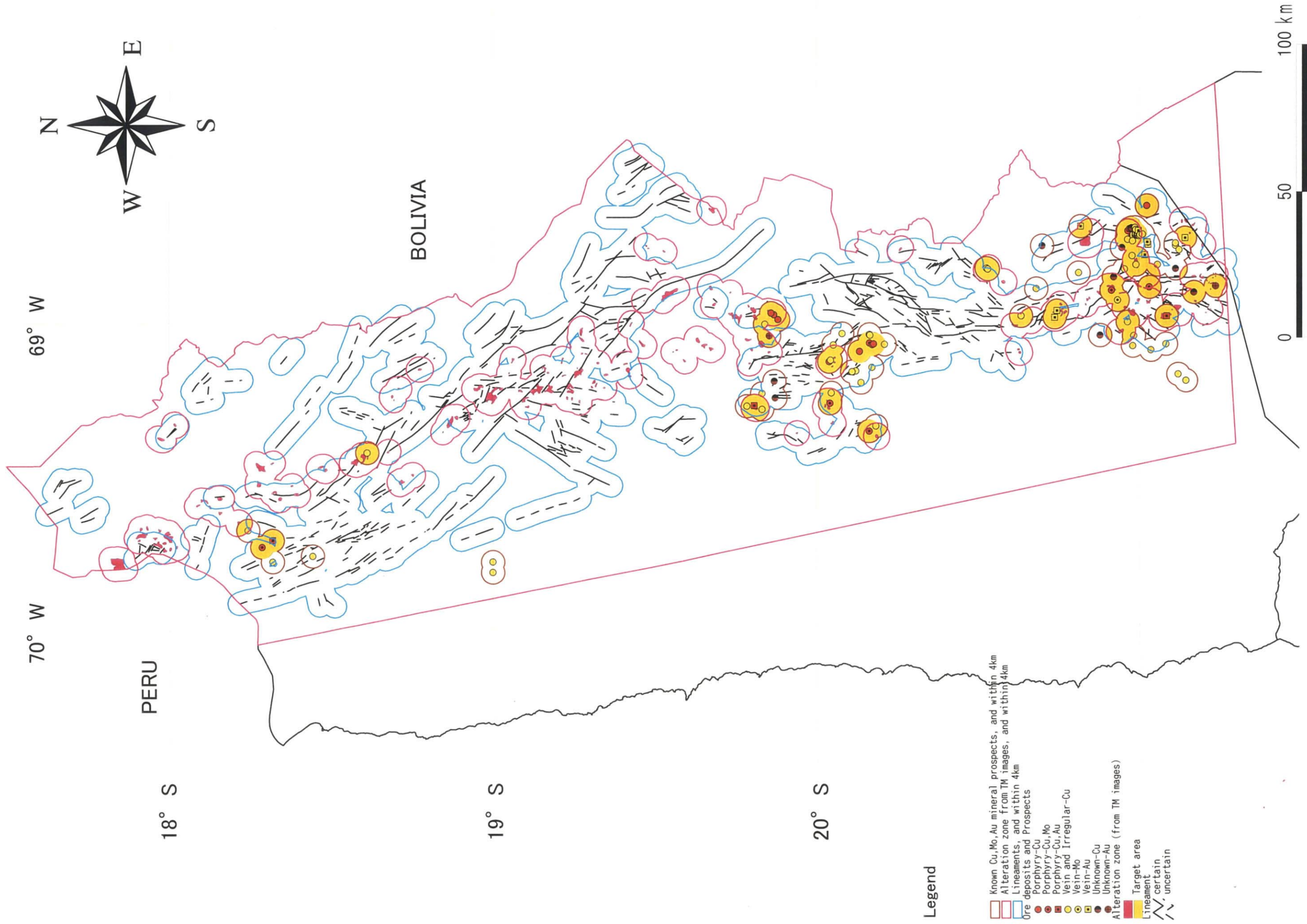


Fig. 2-3-1 Target Areas Plotted from Analysis of Satellite Images and Existing Data

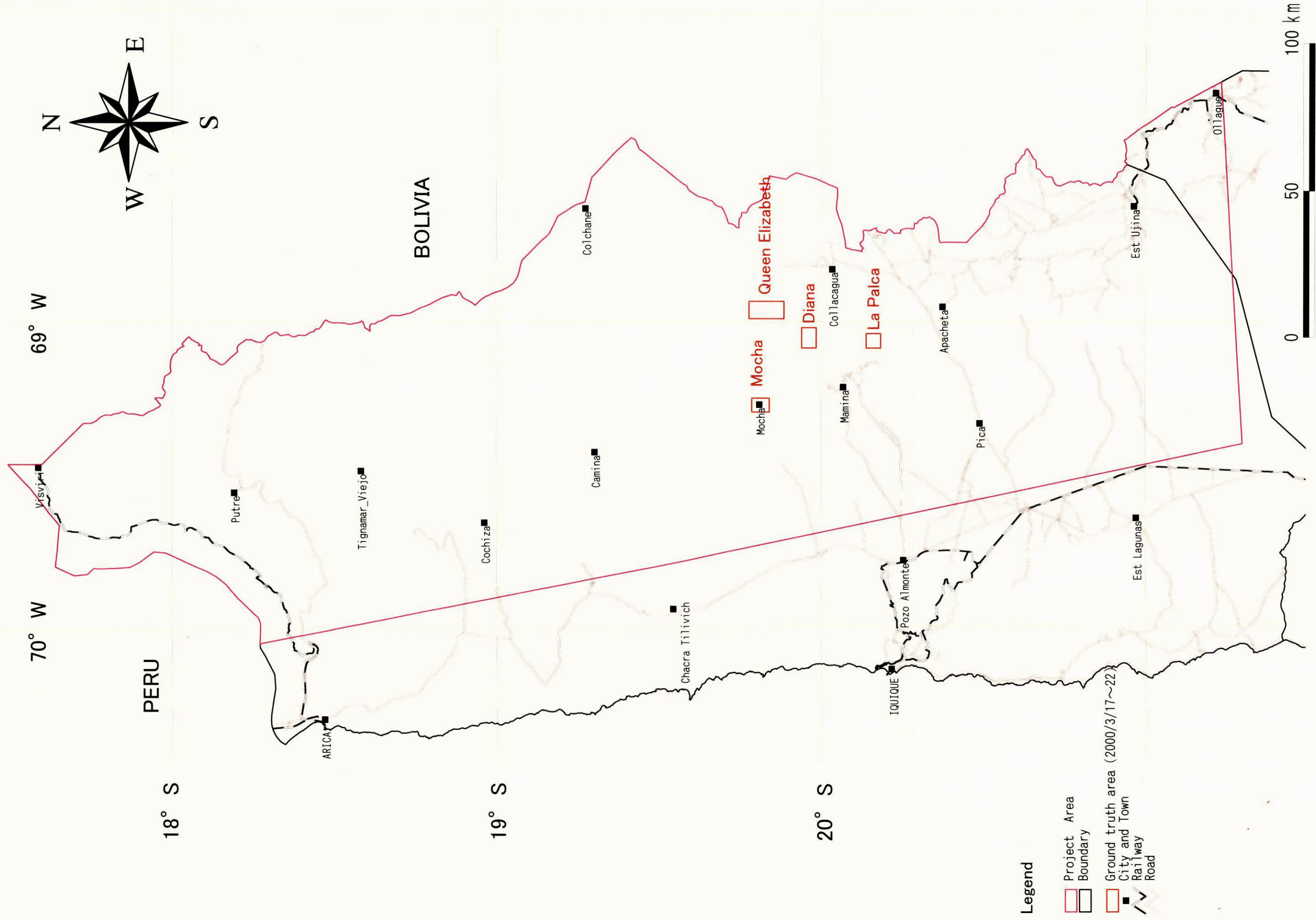


Fig. 2-3-2 Location Map of the Ground Truth Area

第Ⅲ部 結論及び提言

第Ⅲ部 結論及び提言

第1章 結論

第Ⅰ州地域における第1年次調査として GEOSCAN 画像解析を含む既存データ解析，衛星画像解析及び地質調査・地化学探査が実施され，以下の結論が得られた。

1. 衛星画像(TM)解析の結果，古第三紀以前の地層の分布域とその周辺及び新第三紀中新世～第四紀火山岩類分布域に多数の変質帯が抽出された。変質帯は北部地域では NW-SE～NNW-SSE 方向に，また，中央～南部地域では N-S～NNW-SSE に配列する。変質帯の配列方向は，変質帯の周辺に発達するリニアメントの卓越方向に調和的である。
2. GEOSCAN データから作成した可視近赤外域～短波長赤外域，短波長赤外域及び熱赤外域の各種画像を解析した結果，詳細な地質構造が把握され，また，Tignamar, Palca, Queen Elizabeth, Cerro Colorado, Copaquiri, Collahuasi の各地域におけるセリサイト，カオリン，明礬石及び珪酸からなる変質帯と Mocha 地域におけるセリサイト化変質帯が抽出された。
3. 地質・鉱床に関する既存データ解析により，調査地域の既知鉱床・鉱徴地の鉱化作用がタイプ分けされ，斑岩銅型鉱化帯とそれに密接する可能性を有する鉱徴地(鉱脈型 Mo，不規則形型 Cu，鉱脈型 Cu，形態不明型 Cu，鉱脈型 Au，形態不明型 Au)が選定された。
4. 斑岩銅型鉱化帯とそれに密接する可能性を有する鉱徴地は，北部地域では暁新世～始新世前期の斑岩銅型鉱床ベルトに多く分布し，中央～南部地域では暁新世～始新世前期及び始新世後期～漸新世前期の両斑岩銅型鉱床ベルト中に分布する。北部～中央地域には中新世～第四紀の火成活動に関連して生成した浅熱水性の鉱化帯が存在し，その一部は斑岩銅型鉱化帯に重複していると考えられる。
5. 斑岩銅型鉱化帯とそれに密接する可能性を有する鉱徴地は，白亜紀～第三紀の貫入火成岩体(深成岩類・半深成岩類)及びその周辺に分布する。
6. 斑岩銅型鉱化帯は，北部及び中央地域では白亜紀～第三紀の貫入火成岩体又は白亜紀火山岩類中に，また，南部地域では古生代堆積岩類・火山岩類又は白亜紀火山岩類又は古生代花崗岩類又は白亜紀～第三紀の貫入火成岩体中に胚胎する。
7. 地質図上の断層及び TM 画像判読から抽出したリニアメントで表される断裂構造と鉱床・

鉱徴地の分布は全般に密接な関係にあり、近傍に鉱床・鉱徴地を伴うリニアメントの方向は多岐にわたる。斑岩銅鉱化帯は、リニアメント発達域の周縁部に位置するもの(Cerro Colorado, Collahuasi 等)とリニアメントの相対的高密度域の中心部付近に位置するもの(Quebrada Blanca, Copaquire 等)に分かれる。

8. 中央地域及び南部地域では、斑岩銅型鉱化帯を含む多くの鉱徴地が変質帯及びその周辺に分布するが、北部地域では、斑岩銅型鉱化帯及びそれに密接する可能性を有する鉱徴地の多くは、変質帯が抽出されない地域に分布している。

9. 変質帯及び鉱床・鉱徴地と、これらから 4km 離れた周辺地域からなる範囲を鉱化作用に関連した熱水活動範囲と仮定した場合、熱水活動域は、全体的に NNW-SSE 方向に分布するが、北部、中央部及び南部の各地域には、NNW-SSE 方向を切るような E-W 系の熱水活動域が推定される。既知の斑岩銅型鉱化帯は、この E-W 系熱水活動域中に分布している。熱水活動域は、中央地域及び南部地域ではリニアメント発達域にほぼ一致するが、北部地域では中央地域や南部地域に比べてリニアメント発達域との対応が悪く、むしろ中新世-第四紀の火山分布と良い対応を示す。

10. 斑岩銅鉱床賦存の有望地域として次のいずれかに該当する箇所が選定された。

(1) 斑岩銅鉱床型の鉱徴地及びその周辺 4km の範囲

(2) 漸新世前期以前の地層中に存在し斑岩銅型鉱化帯に密接する可能性を有する鉱徴地(鉱脈型 Mo, 不規則形型 Cu, 鉱脈型 Cu, 形態不明型 Cu, 鉱脈型 Au, 形態不明型 Au)と変質帯(GEOSCAN 画像解析により抽出された酸性変質帯・セリサイト化変質帯及び TM 画像解析により抽出された変質帯)それぞれの周辺 4km の範囲が重複する部分

第 2 章 第 2 年次への提言

1. 斑岩銅鉱床賦存の有望地域として第 1 年次に選定された箇所のうち、第 1 年次に現地検証調査が実施されなかった箇所について現地検証調査を実施する。

2. 中央アンデスにおける横断性磁気異常と斑岩銅鉱化帯の分布は密接な関係を有する可能性がある。しかし、既存の空中磁気探査結果図は鉱床賦存有望箇所を抽出するには精度が粗すぎる。従って、高精度空中磁気探査を実施し、上記横断性磁気異常の詳細を把握することにより、斑岩銅鉱床賦存の有望地域として第 1 年次に選定された箇所に対し、さらなる絞り込みを行うとともに、新时期層に覆われているため変質帯が抽出されなかった地

域における潜頭型鉍化帯の賦存有望地域を選定する。

3. 画像解析と高精度空中磁気探査の結果から抽出された斑岩銅鉍床の賦存有望地域のうち、潜頭型の鉍化帯が推定される地域に対しては、重力探査を実施し、鉍化帯を覆う被りの厚さを推定する。
4. 画像解析と高精度空中磁気探査の結果から抽出された斑岩銅鉍床の賦存有望地域に対し、地質概査を実施する。

Reference

- Clark, A. H., Archibald, D. A., Lee, A. W., Farrar, E., and Hodgson, C. J., 1998. Laser Probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages of Early- and Late-stage Alteration assemblages, Rosario Porphyry Copper-Molybdenum deposit, Collahuasi District, I Region, Chile, *Econ. Geol.*, 93, p.326-337.
- Davidson, J., and Mpodozis, C., 1991. Regional Geologic Setting of Epithermal Gold Deposits, Chile, *Econ. Geol.*, 86, p.1174-1186.
- Kahle, A. B., and Goetz, A. F. H., 1983 : Mineralogic Information from a New Airborne Thermal Infrared Multispectral Scanner, *Science*, vol. 222, p.24-27.
- Mpodozis, C., and Ramos, V., 1989. The Andes of Chile and Argentina, Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, vol. 11, p.59-89.
- Metal Mining Agency of Japan, 1978. Overseas Geologic Structure Survey Report: Northern Chile
- Metal Mining Agency of Japan, 2000. Research and Development on Satellite Data Analysis
- Olivier, C. G., and Dingman, R. J., 1962. Carta Geologica de Chile, Cuadrangulos Pica, Alca, Matilla y Chacarilla, Provincia de Tarapaca, Escala 1:50,000, Institute de Investigaciones Geologicas, Chile, vol. III No.2, 3, 4 y 5.
- Olivier, C. G., 1968. Carta Geologica de Chile, Cuadrangulo Juan de Morales, Provincia de Tarapaca, Escala 1:50,000, Institute de Investigaciones Geologicas, Chile, Carta No.18.
- Ramirez, C.,F.,R., and Huete, C. L.,1981. Carta Geologica de Chile, Escala 1:250,000, Hoja Ollague Region de Antofagasta, Institute de Investigaciones Geologicas, Chile, Carta No.40.
- Salas, R. O., Kast, R. F., Montecinos, F. P. and Salas, I. Y., 1966. Geologia y recursos minerales del departamento de Arica, Provincia de Tarapaca, Institute de Investigaciones Geologicas, Chile, Boletin No.21.
- Sillitoe, R. H., 1991. Gold Metallogeny of Chile –an Introduction, *Econ. Geol.*, 36, p.1187-1205.
- Sillitoe, R. H., 1992. Gold and Copper Metallogeny of the Central Andes-Past, Present, and Future Exploration Objectives, *Econ. Geol.*, 87, p.2205-2216.
- Skarmeta, J. M., and Marinovic, N. S., 1981. Carta Geologica de Chile, Escala 1:250,000, Hoja Quillagua Region de Antofagasta, Institute de Investigaciones Geologicas, Chile, Carta No.51.
- Thomas, A. N., 1967. Carta Geologica de Chile, Cuadrangulo Mamiña, Provincia de Tarapaca, Escala 1:50,000, Institute de Investigaciones Geologicas, Chile, Carta

No.17.

Vergara, H. L., and Thomas A.N., 1984. Carta Geologica de Chile, Escala 1:250,000, Hoja Collacagua, Region de Antofagasta, Servicio Nacional de Geologia y Minería, Chile, Carta No.59.

Yamaguchi, Y., Urai, M., Honey, F. A., 1989. Distinguishing Lithology by Spectral Characteristics – An example in Australia by Geoscan AMSS MkI – Jour. JPN Remote Sensing Society, vol.9, no.3, 19-29.