

平成10年10月10日発行

国際協力事業団

金属工業事業部

衛生環境部

平成10年10月

JICA LIBRARY



J1143265 (S)

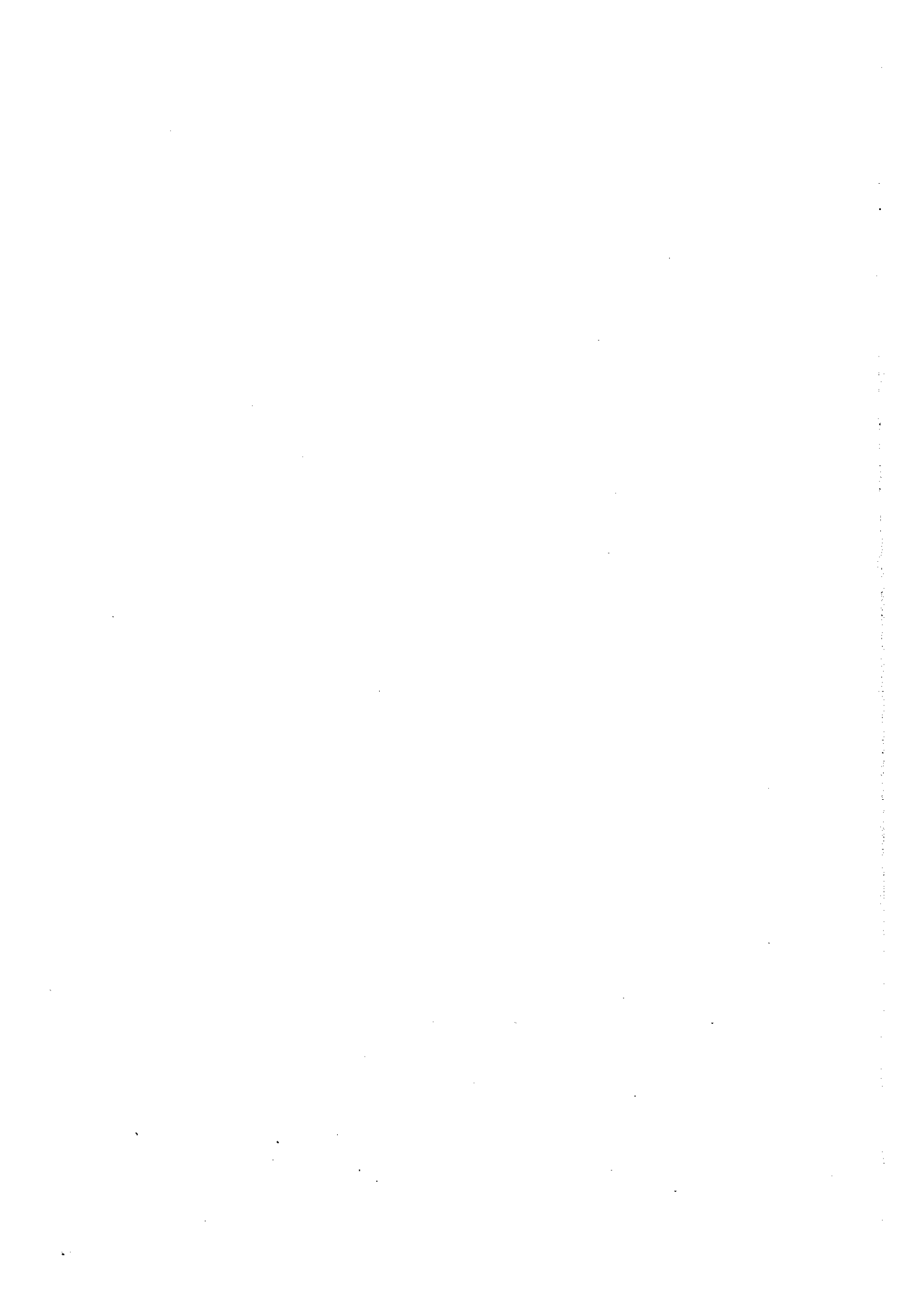
国際協力事業団

金属工業事業部

10/10

01 (S)

10/10



平成9年度 アルゼンティン共和国

資源開発協力基礎調査

鉍物資源広域調査

衛星画像解析報告書

平成10年2月

国際協力事業団
金属鉍業事業団



1143265 (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年度が第1年次にあたり、金属鉱業事業団は4名の調査団を編成して平成9年10月6日から平成9年12月13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、本年次の調査結果を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10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

1. 解析概要

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、ボリビア共和国の南端部からアルゼンティン共和国メンドーサに至る広大な範囲を対象に、有望地域選定に資することを目的として、ランドサット TM 画像を使用した写真地質学的判読作業を実施し、得られた判読結果及び種々の既存データを合わせ、地質、鉱床、鉱微地の賦存状況等を総合的に検討した。対象地域はランドサット TM 画像 23 シーンでカバーされ、その面積は約 65 万 km²である。

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、23 シーンのフォールスカラー合成画像及び比演算処理画像を、さらに全域をカバーするフォールスカラー・デジタルモザイク画像をそれぞれ作成した。

これらのフォールスカラー合成画像、比演算画像を用いて、地質・地質構造の判読・解析と変質帯の抽出を行い、それらを総合的に解釈して鉱床賦存有望地域の検討を行った。

2. 地質・地質構造解釈の結果

対象地域の基盤を構成し種々の変成岩類からなる原生界は、チリ側には認められず、主としてアルゼンティンの領土内に露出している。この基盤配置の特徴は南緯 27° 付近を境にその北側と南側とで異なっている。

Jujuy や Salta が位置する北側(対象地域の北東部)では基盤岩類のブロックは山地の中核部を形成している。それらは一般に N-S~NNE-SSW 方向に連続しており、ほかの地質ユニットとは同方向の大規模なリニアメントによって境されている。この地域の基盤岩類の分布域は南緯 24.5° 付近の Jujuy と Salta 間を境にさらに北半部と南半部とに 2 分される。すなわち、南半部では 40~50km の分布幅を有し、2 列からなる基盤ブロックが連なっているが、これに対して北半部の基盤は主要な 1 列に収れんして分布幅が急激に狭くなる。基盤岩類は南緯 22° 以北には露出していない。Salta の南東方と北西方には画像の判読によって NW-SE 方向のリニアメントが抽出されており、それらが基盤の配置を強く規制していることから、付近には NW-SE 方向の基盤構造線の存在が推定される(以下、Calama 構造線と呼ぶ)。

南緯 27° 付近より南側(対象地域の南東部)では、基盤岩類は独立した地塁状の山地を構成しており、断続して N-S~NNW-SSE または NW-SE 方向に配列している。これらの山地の東西外縁部はほぼ直線で画されており、画像の判読でリニアメントが抽出されていない部分にも大規模な断裂が形成されていると考えられる。この地域で注目すべき構造の特徴は南緯 30° 付近に位置する NW-SE 方向の基盤ブロックの配列である。南緯 30°~31° 付近の原生界山地の南西縁には顕著な急崖部が形成されていることから、この地域にも

NW-SE 方向の基盤構造線の存在が推定される。また、その北方(南緯 29° 付近)に位置する複数の原生界山地も巨視的には NW-SE 方向に配列しており、その山地列に沿って同方向の断裂が伏在している可能性が考えられる (La Rioja 構造線と仮称する)。

対象地域の北東部であるアルゼンティンとボリビアとの国境地帯(南緯 24° 付近以北)においては、古生界の分布域は多数のリニアメントを伴う N-S 方向の広大な褶曲山地となっている。この地域のオルドビス系は深海相を示す厚い泥質岩で特徴づけられ、前期古生代の時期には大規模な深い堆積盆が存在していたと考えられる。対象地域の南半部に相当する南緯 27° 付近より南側では、古生界はアルゼンティンとチリとの国境付近に分布する。これら南北 2 つの地域に挟まれた南緯 27° 付近から南緯 24° 付近までの地域では、古生界の分布範囲はごく限られており、その時期の堆積盆地が小規模であったと解釈される。この地域の南北両端部は基盤構造線の推定位置とほぼ一致しており、原生代以降の相対的な隆起帯になっていると考えられる。

古生代の花崗岩質岩類は対象地域全体において概ね N-S 方向に配列している。個々の岩体も一般に同方向に伸長している。中生代及び第三紀に生成した花崗岩質岩類の分布域は主としてチリ領土内にあり、古生代の岩体列の西側において N-S 方向に配列している。個々の岩体の形態は多様に変化しているが、巨視的な伸長方向は、南緯 26° 付近を境にその北側では NNE-SSW、南側では NNW-SSE である。アルゼンティンの領土内では北東部の一部でしか岩体の露出が認められない。

暁新世～始新世の火山活動は対象地域の西端部に限られており、その噴出物はチリ領土内の南緯 24° から 28.5° までの範囲に N-S 方向で分布している。その分布範囲内では第三紀に生成した花崗岩質岩体に随伴して産する。一方、中新世及び鮮新世の火山活動は概ね南緯 27° 付近以北で卓越している。主要な火山列は脊梁部において N-S 方向で配列する 1 列と考えられるが、アルゼンティン領土内では、その主列から派生し NW-SE～WNW-ESE 方向を示す 4 列の分岐列が約 100km の間隔でほぼ平行に配列している。中新世から鮮新世の時期には、N-S 方向の大きな構造的弱線のほかに、それら分岐列の位置に火山活動を引き起こした NW-SE～WNW-ESE 方向の構造的弱線も存在したと考えられる。

第四紀の火山活動の範囲は南緯 28° 付近の以北の北部地域に限られ、主列をなす噴出物の分布範囲は中新世及び鮮新世のそれとオーバラップしている。ただし、分岐列は上述したうちの北から 3 番目の列(南緯 26° 付近)の位置にしか認められない。

3. 変質帯抽出の結果

変質帯の分布をみると、中新世～鮮新世前期鉱床区のものほぼ南緯 27° 以北と以南と

で分布形態が異なる。南緯 27° 以北では全体に広く変質帯が分布しているのに対して、以南での変質帯は偏在している。

La Rioja 構造線の北側の中新世～鮮新世前期鉱床区に分布する変質帯は、その分布形態から、南緯 24° 付近を NW-SE 方向に走る Calama 構造線を挟む南北 2 つの変質帯群に分けられる。La Rioja 構造線より南側の地域(中新世～鮮新世前期鉱床区)における変質帯は南緯 31° 付近までは西部に密集するが、南緯 31° 以南ではまとまりを欠く。

4. 総合解釈の結果

総合解釈の結果として、次の鉱床賦存有望地域を抽出した。

(a) ポーフイリーカップパー鉱床

- ・対象地域北部の始新世後期～漸新世前期ポーフイリーカップパー・ベルトの既知鉱床の近傍及び南北に分布する変質帯。
- ・中新世～鮮新世前期鉱床区の Los Pelambres-El Pachon, Paramillos Sur などのポーフイリーカップパー鉱床を含む変質帯群。
- ・Calama 構造線と La Rioja 構造線とのほぼ N-S 方向に配列する変質帯群(Bajo de la Alumbreira 鉱床に延びる変質帯群)。

(b) 浅熱水金・銀鉱床

- ・マリクンガ・ベルト及びエル・インディオ・ベルトの変質帯群(大規模金・銀鉱床の近傍)。
- ・エル・インディオ・ベルト東方の Castano Nuevo Belt の変質帯群(エル・インディオ・ベルトの東方に位置し、同じ方向の延びを有する)。

(c) 多金属鉱脈鉱床

ポリピア及びアルゼンティン北部に分布する変質帯群。



目 次

はしがき	i
要 約	ii
目 次	v
図表一覧・巻末資料・添付図・添付画像	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	6
第2章 地域概要	7
2.1 一般情勢	7
2.2 交 通	9
2.3 地形・水系	10
第3章 対象地域の地質鉱床	13
3.1 地質概要	13
3.2 地質層序	23
3.3 地質構造	27
3.4 鉱 床	28
第4章 画像処理・作成	37
4.1 フォールスカラー合成画像の作成	37
4.2 比演算理画像の作成	43
4.3 モザイク画像の作成	45
第5章 画像の判読・解析	47
5.1 Alota 地区	47
5.2 Atacama 地区	56
5.3 Imilac 地区	65
5.4 Salvador 地区	74
5.5 Francisco 地区	84
5.6 Puntilla 地区	94

5.7	Vicuna 地区	103
5.8	Illapel 地区	113
5.9	Santiago 地区	123
5.10	Tupiza 地区	132
5.11	Susques 地区	140
5.12	Pocitos 地区	149
5.13	Antofagasta 地区	157
5.14	Belen 地区	165
5.15	Chilecito 地区	173
5.16	San Jose 地区	181
5.17	San Juan 地区	189
5.18	Mendoza 地区	198
5.19	Tarija 地区	207
5.20	San Ramon 地区	215
5.21	Salta 地区	223
5.22	Rosario 地区	231
5.23	Tucuman 地区	238
第 6 章	対象地域の広域画像解釈	247
6.1	地質・地質構造の広域的な特徴	247
6.2	変質帯と鉍床区	257
6.3	鉍床賦存有望地域の抽出	259
第 7 章	結 論	263
参考文献		266

図表一覧

- 図 1 対象地域位置図
- 図 2 使用した画像の位置図
- 図 3 対象地域の地質概略図(UNESCO, 1978 を改変)
- 図 4 対象地域の地形構造区(Sillitoe, 1981 他から作成)
- 図 5 地質構造発達史(Coira et al., 1982 を改変)
- 図 6 対象地域の地質柱状図(Boric et al., 1991 他から作成)
- 図 7 対象地域の鉱床区(Sillitoe, 1991 を改変)
- 図 8 方向性反射率による輝度値変化
- 図 9 Alota 地区地質図
- 図 10 Alota 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 11 Alota 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 12 Atacama 地区地質図
- 図 13 Atacama 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 14 Atacama 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 15 Imilac 地区地質図
- 図 16 Imilac 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 17 Imilac 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 18 Salvador 地区地質図
- 図 19 Salvador 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 20 Salvador 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 21 Francisco 地区地質図
- 図 22 Francisco 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 23 Francisco 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 24 Puntilla 地区地質図
- 図 25 Puntilla 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 26 Puntilla 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 27 Vicuna 地区地質図
- 図 28 Vicuna 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 29 Vicuna 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 30 Illapel 地区地質図
- 図 31 Illapel 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 32 Illapel 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 33 Santiago 地区地質図
- 図 34 Santiago 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 35 Santiago 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像

- 図 36 Tupiza 地区地質図
- 図 37 Tupiza 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 38 Tupiza 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 39 Susques 地区地質図
- 図 40 Susques 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 41 Susques 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 42 Pocitos 地区地質図
- 図 43 Pocitos 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 44 Pocitos 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 45 Antofagasta 地区地質図
- 図 46 Antofagasta 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 47 Antofagasta 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 48 Belen 地区地質図
- 図 49 Belen 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 50 Belen 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 51 Chilecito 地区地質図
- 図 52 Chilecito 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 53 Chilecito 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 54 San Jose 地区地質図
- 図 55 San Jose 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 56 San Jose 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 57 San Juan 地区地質図
- 図 58 San Juan 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 59 San Juan 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 60 Mendoza 地区地質図
- 図 61 Mendoza 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 62 Mendoza 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 63 Tarija 地区地質図
- 図 64 Tarija 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 65 Tarija 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 66 San Ramon 地区地質図
- 図 67 San Ramon 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 68 San Ramon 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 69 Salta 地区地質図
- 図 70 Salta 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
- 図 71 Salta 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
- 図 72 Rosario 地区地質図

- 図 73 Rosario 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
 図 74 Rosario 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
 図 75 Tucuman 地区地質図
 図 76 Tucuman 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像
 図 77 Tucuman 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像
 図 78 対象地域 LANDSAT TM フォールスカラー・モザイク画像
 図 79 対象地域地質判読コンパイル図
 図 80 対象地域広域解釈図

表 1 各地区の画像座標・観測年月日・太陽位置

巻末資料

- 巻末資料 1 既知鉱床・鉱化帯一覧表
 巻末資料 2 地質判読結果一覧表
 巻末資料 3 地質単元分布の特徴一覧表
 巻末資料 4 変質帯一覧表

添付図

- 添付図 1 Alota 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 2 Alota 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 3 Atacama 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 4 Atacama 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 5 Imilac 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 6 Imilac 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 7 Salvador 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 8 Salvador 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 9 Francisco 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 10 Francisco 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 11 Puntilla 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 12 Puntilla 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 13 Vicuna 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 14 Vicuna 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
 添付図 15 Illapel 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)

- 添付図 16 Illapel 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 17 Santiago 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 18 Santiago 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 19 Tupiza 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 20 Tupiza 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 21 Susques 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 22 Susques 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 23 Pocitos 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 24 Pocitos 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 25 Antofagasta 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 26 Antofagasta 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 27 Belen 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 28 Belen 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 29 Chilecito 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 30 Chilecito 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 31 San Jose 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 32 San Jose 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 33 San Juan 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 34 San Juan 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 35 Mendoza 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 36 Mendoza 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 37 Tarija 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 38 Tarija 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 39 San Ramon 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 40 San Ramon 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 41 Salta 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 42 Salta 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 43 Rosario 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 44 Rosario 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 45 Tucuman 地区地質判読図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 46 Tucuman 地区総合解釈図(縮尺 25 万分の 1)
- 添付図 47 対象地域地質判読コンパイル図(縮尺 200 万分の 1)
- 添付図 48 対象地域広域解釈図(縮尺 200 万分の 1)

添付画像

- 添付画像 1 Alota 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 2 Alota 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 3 Atacama 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 4 Atacama 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 5 Imilac 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 6 Imilac 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 7 Salvador 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 8 Salvador 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 9 Francisco 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 10 Francisco 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 11 Puntilla 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 12 Puntilla 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 13 Vicuna 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 14 Vicuna 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 15 Illapel 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 16 Illapel 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 17 Santiago 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 18 Santiago 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 19 Tupiza 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 20 Tupiza 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 21 Susques 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 22 Susques 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 23 Pocitos 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 24 Pocitos 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 25 Antofagasta 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 26 Antofagasta 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 27 Belen 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 28 Belen 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 29 Chilecito 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 30 Chilecito 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 31 San Jose 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 32 San Jose 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 33 San Juan 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
- 添付画像 34 San Juan 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)

- 添付画像 35 Mendoza 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 36 Mendoza 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 37 Tarija 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 38 Tarija 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 39 San Ramon 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の
1)
添付画像 40 San Ramon 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 41 Salta 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 42 Salta 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 43 Rosario 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 44 Rosario 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 45 Tucuman 地区 LANDSAT TM フォールスカラー合成画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 46 Tucuman 地区 LANDSAT TM 比演算処理画像(縮尺 25 万分の 1)
添付画像 47 対象地域フォールスカラー・モザイク画像(縮尺 200 万分の 1)

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、解析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、鉱徴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する。

1.2 解析範囲

本解析の対象地域は、図 1 に示すように、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に延び、チリ共和国サンチャゴ及びアルゼンティン共和国メンドーサに至る広大な範囲である(以下、「対象地域」と略称する)。対象地域は、ランドサット TM 画像 23 シーンでカバーされ(図 2)、その面積は約 65 万 km²である。

1.3 使用データ

(1) ランドサット TM 画像

使用したデータは、いずれもランドサット 5 号により観測され、バルク補正された CCT(コンピュータ適合磁気テープ)であり、(財)リモート・センシング技術センターを通じ、米国 EOSAT 社(Earth Observation Satellite Company)及び米国地質調査所 EROS Data Center から購入した。23 シーンの各画像の観測年月日、太陽位置情報は表 1 のとおりである。

購入に当たり、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 EOSAT 社及び 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。

表 1 に示したように、観測時期は主として夏季のものを使用した。が、雲量、データ欠損の状況から Vicuna 地区、Santiago 地区、San Juan 地区、Mendoza 地区、Tarija 地区、San Ramon 地区、Salta 地区、Rosario 地区及び Tucuman 地区の 9 地区については冬季のデータを用いなければならなかった。

なお、画像名称は画像内に位置する地名を採用したが、画像名称が冗長すぎるがあるので、本報告書では表 1 に示した地区名を使用する。

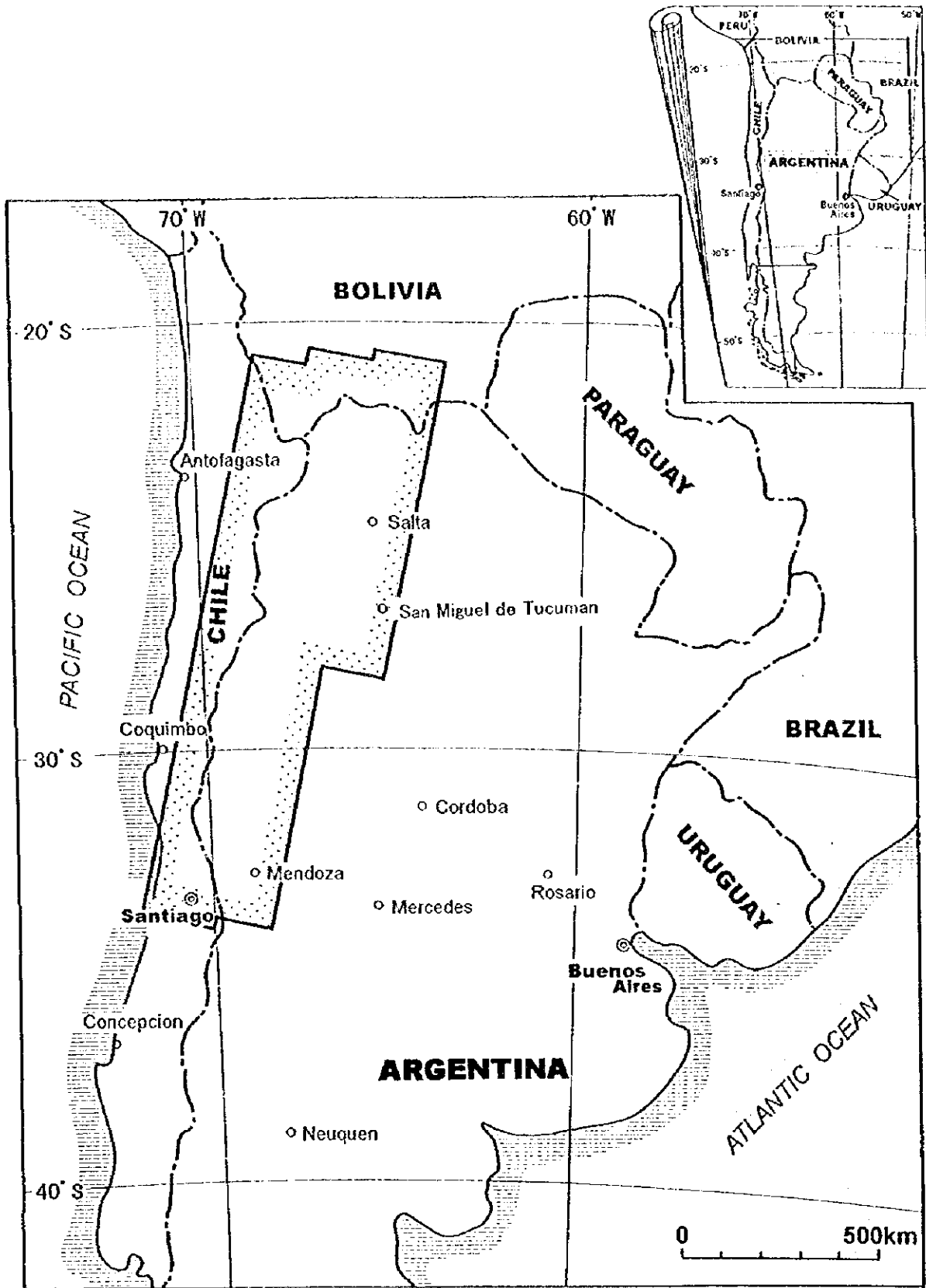


图1 对象地域位置图

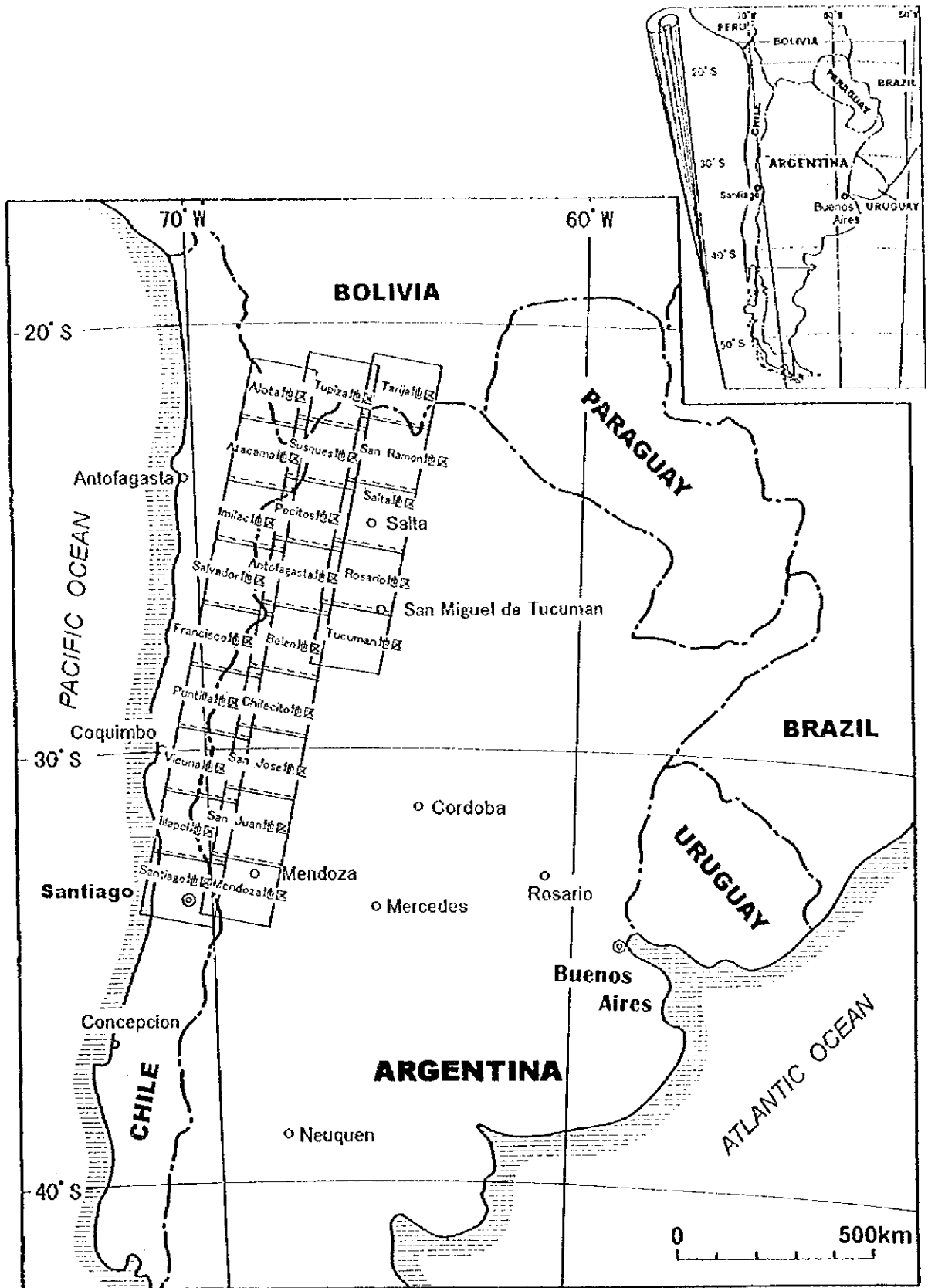


図 2 使用した画像の位置図

表1 各地区の画像座標・観測年月日・太陽位置

地区名	画像名称	Path	Row	観測年月日	太陽方位	太陽高度
Alota	Alota	233	75	1987年3月4日	N76°E	46°
Atacama	San Pedro de Atacama	233	76	1987年3月4日	N75°E	45°
Imilac	Imilac	233	77	1989年12月4日	N85°W	57°
Salvador	El Salvador	233	78	1987年3月4日	N73°E	44°
Francisco	Laguna del Francisco	233	79	1989年12月14日	N89°W	57°
Puntilla	La Puntilla	233	80	1987年1月31日	N84°E	48°
Vicuna	Vicuna	233	81	1989年7月7日	N40°E	25°
Illapel	Illapel	233	82	1987年1月31日	N82°E	47°
Santiago	Santiago	233	83	1989年7月7日	N40°E	22°
Tupiza	Tupiza	232	75	1990年4月22日	N53°E	38°
Susques	Susques	232	76	1991年2月4日	N89°E	48°
Pocitos	Salar de Pocitos	232	77	1991年2月4日	N87°E	48°
Antofagasta	Antofagasta de la Sierra	232	78	1987年2月9日	N84°E	47°
Belen	Belen	232	79	1987年2月9日	N82°E	47°
Chilcito	Chilcito	232	80	1987年2月9日	N81°E	46°
San Jose	San Jose de Jachal	232	81	1987年2月9日	N80°E	46°
San Juan	San Juan	232	82	1989年6月30日	N40°E	23°
Mendoza	Mendoza	232	83	1989年6月14日	N39°E	22°
Tarija	Tarija	231	75	1986年9月11日	N59°E	44°
San Ramon	San Ramon de la Nueva Oran	231	76	1986年9月11日	N58°E	43°
Salta	Salta	231	77	1986年9月11日	N57°E	42°
Rosario	Rosario de Frontera	231	78	1986年9月11日	N57°E	41°
Tucuman	San Miguel de Tucuman	231	79	1986年9月11日	N57°E	40°

(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

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。

- (1) 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)。
- (2) 画像処理・作成。
- (3) 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)。
- (4) フィールドチェック調査とそれに基づく再判読。
- (5) 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、(4)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(tone)：白，灰目，灰，青灰，灰緑，緑，暗緑，灰紫など
- ・肌合(texture)：細粒，中粒，粗粒，滑らかなど

(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(cross 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されており，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

上述した判定のキ一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)及び(c)の地形が多く、(d)、(e)、(f)、(g)及び(h)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。

1.5 解析者

藤岡 洋介	写真地質判読、総合解釈、報告書作成(財団法人 国際鉱物資源開発協力協会)
谷 藤吉郎	写真地質判読、総合解釈、報告書作成(＃)
大地 正高	写真地質判読、総合解釈、報告書作成(＃)
小原 賢	写真地質判読、総合解釈、報告書作成(＃)
武田 進	写真地質判読、総合解釈(＃)
佐藤 哲男	写真地質判読、総合解釈(＃)
俣野 米治	画像処理(＃)
飯田 幸平	画像処理(＃)
宮石 修	画像処理(＃)
鎌田 治朗	画像処理(＃)
三箇 智二	画像処理(＃)

第2章 地域概要

2.1 一般情勢

対象地域は LANDSAT TM の 23 シーンがカバーする概略南緯 21°~34°, 西経 64°~72° の範囲で, アルゼンティン, チリ, ボリビアの 3ヶ国に跨る。以下, 3ヶ国に分けて一般情勢を述べる。

(1) アルゼンティン

国の地理的特徴: 正式名称はアルゼンティン共和国 (Republica Argentina/Argentine Republic)。南米大陸南東部の共和国。1810 年独立宣言, 1816 年独立, 国名をアルゼンティンとする(憲法は 1853 年制定)。西部にアンデス山脈が南北に走り, 山麓にステップと砂漠の地帯が続く。北東部はチャコ, 中東部はパンパ, 南部はパタゴニアと呼ばれる。

国土, 人口: 面積 2,766,890km²。人口 3,467 万人(1996)。首都はブエノス・アイレス (Buenos Aires; 人口 296 万人, 1991)。

州: 全国は 23 州 (Provincia) と 1 連邦地区 (Distrito Federal) に分かれている。それらのうち, 対象地域は, Salta, Jujuy, Catamarca, Tucuman, La Rioja, San Juan, Mendoza の 7 州に跨る。

民族構成: 白人(主としてスペイン人, イタリア人)85%, 先住のインディオ, メスティーソ 15%。

宗教: ローマカトリック(国教)90%。プロテスタント 2%, ユダヤ教 2%, その他 6%。

言語: スペイン語(公用語)。

産業一般: 農業, 牧畜が行われ, 小麦, トウモロコシが主産物。農林・漁業就業者比率 11.0%(1995)。肉類の輸出では世界有数。羊毛, カゼインなども輸出する。近年工業化が進められている。GDP に占める割合は, 農業 6%, 工業 31%, サービス業 63%(1992)。

鉱業: 鉱業としては, 鉛, 亜鉛, 錫, 銅, 鉄鉱石, マンガン, 石油, ウランなどを産出する。主要な金属生産量は, 鉛 10,521 t, 亜鉛 32,104 lb, 金 837 kg, 銀 47.8 t である(1995)。稼行中の鉱山としては, El Aguilar(Jujuy 州, 鉛・亜鉛, 銀), Farallon Negro(Catamarca 州, 金)がある。

気候: 内陸部の乾燥地帯と南部の南極よりの地域を除くと全般的に気候に恵まれる。

(2) チリ

国の地理的特徴: 南米南部, 太平洋岸の共和国。もとインカ帝国の一部であったが, 1541 年スペインの植民地となった。18 世紀後半から独立運動が高まり, 1810 年自治政府が樹立され, 1818 年サン・マルティンの援助でオヒギンスの率いる独立軍はスペイン軍を破

り独立を宣言。国土はアンデス山脈の太平洋側斜面を占め、南北に細長く、長さ 4,480km、幅 74~320km。北部は乾燥・砂漠地帯。中部のチリ渓谷は温暖な地中海式気候。南緯 42°線以南は、冷涼湿潤気候。正式名称はチリ共和国(Republica de Chile/Republic of Chile)。アンデス山脈中にオーホスデルサラド山、ツブンガト山などの高峰がある。

国土、人口：面積 756,950km²。人口 1,433 万人(1996)。首都サンチアゴ(Santiago；人口 508 万人, 1995)。

州：国土を 13 州(Region)に分けている。対象地域は、それらのうち、Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaiso, Santiago の 5 州に跨る。

民族構成：スペイン系白人及び白人と原住民インディオ(アラウカノなど)との混血 95%、インディオ 3%、その他 2%。

宗教：ローマカトリック 89%、プロテスタント 11%、ユダヤ教徒他少数。

言語：スペイン語(公用語)。

産業一般：農業は中部の渓谷地帯で行われ、小麦、ジャガイモ、トウモロコシ、テンサイが主産物。南部には森林資源が多く、漁業も盛ん。牧畜は牛と羊。農林・漁業就業者比率 17.2%(1995)。GDP に占める割合は、農業 7.4%、鉱業 8.0%、工業 28.4%、サービス業 56.2%(1985)。輸出に占める鉱産物は総額で 49.6%である(1995)。その他の輸出品目は木材(7.1%)、漁業製品(9.8%)、果物(8.4%)など。

鉱業：北部の銅、チリ硝石、南部の石油、石炭のほか金、銀、マンガンなどの鉱産物があり、銅が主要輸出品で輸出額の 41%を占め、その他の鉱産物も 8.7%を占める。銅、金、銀の総生産量はそれぞれ 2.5 百万 t, 44.6t, 1,041t である(1995)。

気候：北部は乾燥・砂漠地帯。中部のチリ渓谷は、いくつかの盆地に分かれ、温暖な地中海式気候。南緯 42°線以南は、冷涼湿潤気候。全体が太平洋岸の寒流ペルー海流の影響を受ける。

(3) ボリビア

国の地理的特徴：南米中西部の内陸共和国。もとインカ帝国の一部だったが、1533 年ピサロに征服されスペイン植民地となった。1545 年ポトシで銀が発見されると、スペインはインディオを徴発して採掘し、ヨーロッパに運んだ。スクレ將軍の率いる軍により解放され、1825 年独立、名は独立の指導者ボリーバルにちなむ。西部はチリ、ペルーと国境を接し、平均標高 3,962m のボリビア高原が広がり、チチカカ湖、ポーボ湖がある。ボリビア高原の東側は標高 5,000~6,000m の山脈をなし、その北東部はアマゾン川支流の低地、中部~東部はブラジル及びパラグアイまで広がる平原に続く。正式名称はボリビア共和国(Republica de Bolivia/Republic of Bolivia)。

国土、人口：面積 1,098,580km²。人口 717 万人(1996)。首都はスクレ(Sucre；人口 13 万人, 1992)。政府所在地はラパス(La Paz；71 万人, 1992)。

州：全国を 9 州(Departamento)に分けている。対象地域は、それらのうち、Potosi 及び Tarija の 2 州に跨る。

民族構成：インディオ(ケチュア、アイマラ)55%、メステイソ 32%、白人 13%。

宗教：ローマカトリック 95%、プロテスタント、その他 5%。

言語：スペイン語 40%、インディオは主としてケチュア語、アイマラ語(以上公用語)。

産業一般：産業は農漁業と鉱業が主。農業ではサトウキビ、ジャガイモを主産、羊、牛、アルパカの畜産も行われる。農林・漁業就業者比率 44.6%(1995)。主要輸出品目は、鉱物 39%、天然ガス 9%、宝石 11%、大豆 11%、木材 9%。

鉱業：鉱業は盛んで、錫、鉛、銅、金、銀、亜鉛、アンチモン、タングステン、石油、天然ガスなどに富み、輸出の上位を占めている。

気候：気候は高原地帯が寒冷、アンデス東斜面は亜熱帯性、アマゾン川支流の低地は熱帯性で高温多湿。

2.2 交通

(1) アルゼンティン

アルゼンティンの首都ブエノスアイレスへはアメリカ経由で国際航空便がある。ブエノスアイレスから、対象地域の都市 Jujuy, Mendoza などへは国内線を用いる。最寄りの都市から現地へは道路網が一般にあり、車で到達できる。

以下、アルゼンティンの交通・通信関係の諸数字を挙げる。

鉄道線路総延長：37,910km

道路総延長：215,578km, 内舗装道路 61,440km。

飛行場数：1,253ヶ所

電話加入者数：2.7百万人

ラジオ局、テレビ局数：171(AM), 231(TV)

(2) チリ

対象地域へのアクセスは次のとおりである。首都サンチャゴへは、国際航空便がアメリカ経由(ニューヨーク、マイアミ経由など、日本から通常 20 数時間)で毎日ある。サンチャゴからは、国内航空路が発達しており、対象地域の最寄りの町まで行き、車をチャーターして、現場近くの町に至る。そこからアンデス山中あるいはアタカマ砂漠の現地には、4 輪駆動車、または馬、ロバなどを仕立てて到達する。

以下、チリの交通・通信関係の諸数字を挙げる。

鉄道線路総延長：6,782km

道路総延長：79,593km, 内舗装道路 10,984km。

飛行場数：344ヶ所

電話加入者数：1.5 百万人

ラジオ局，テレビ局数：159(AM), 131(TV)

(3) ボリビア

対象地域へのアクセスは次のとおりである。ラパスへは，国際航空便がアメリカ経由である。ラパスからは，国内航空路で Potosi まで行き，車をチャーターして，現場近くの町に至る。そこから現地には，4 輪駆動車，または馬などを仕立てて到達する。

以下，ボリビアの交通・通信関係の諸数字を挙げる。

鉄道線路総延長：3,691km

道路総延長：46,311km, 内舗装道路 1,940km。

飛行場数：1,017 ヶ所

電話加入者数：14 万人

ラジオ局，テレビ局数：129(AM), 43(TV)

2.3 地形・水系

(1) アルゼンティン

国土の北東部はパンパと呼ばれる平原地帯をなす。南部のパタゴニア地域は平坦な準平原であり，西部のチリ国境沿いはアンデス山脈の一部をなす山地である。対象地域の北西部 7 州は，アンデス山脈の東側斜面を西端とし，パンパの西側を南北に走るグランチャコ低地(低湿な草原地帯)を東端とする主として山地，高原(Puna de Atacama)及び山間の低地からなる。アンデス山脈は 5,000m を超す高山が南北に連なり，対象地域の最高峰は 6,960m(Cerro Aconcagua)である。対象地域の水系は，北から順番に，Rio Bermejo(Rio Teuco), Rio Salado, Rio Bermejo, Rio Colorado などである。前 2 者はアンデスの東斜面を南東に流れ，やがて Rio de la Plata に合流して大西洋に注ぐ。後 2 者は，アンデスの東山麓を南東に流れ合流して大西洋に注ぐ。

(2) チリ

南北に細長い国であるため，東西方向に地形が激変する。西の太平洋岸は低地とそれを走る海岸山脈とからなる。中央部は山間の肥沃な盆地，高原，峡谷である。東側は標高 5,000m を超すアンデスの山脈部である。対象地域の北部はアタカマ砂漠とその東側のアンデス山脈部からなり，南部はアンデス山脈とその西側の高原地帯からなる。対象地域の水系は，全てアンデス山中にその源を発し，西に流れて太平洋に注ぐ。アンデスの東側のような大河はなく，いずれも比較的短い河川である。

(3) ボリビア

国土の西をアンデス山脈(Cordillera Occidental)が、中央部にはアンデスの支脈(Cordillera Central)が通る。両山脈に挟まれた地域は標高 3,000~4,000m の高原地帯(Altiplano)をなす。東のアマゾン川寄りには、熱帯雨林に覆われた丘陵地~低地である。対象地域の Potosi 州は Cordillera Occidental と Cordillera Central 及びそれらに挟まれた Altiplano からなる山地・高原地域にある。Cordillera Occidental は標高 5,000m を超す高山が連なる。また、その東に位置する Tarija 州は Cordillera Central の東側のアマゾン上流地域に位置する。

Potosi 州の水系は、アンデス山脈及びその支脈を源流とし、Altiplano を主として北に流れて高原の湿原(Salar de Uyuni)に流れ込む。Tarija 州の水系は、Cordillera Central を源にし、東に流れて Rio Pilcomayo 川に流れ込む。Rio Pilcomayo は大西洋に注ぐ Rio de la Plata の支流である。



第3章 対象地域の地質鉱床

3.1 地質概要

対象地域を、統一した見方で表現した地質資料としては南アメリカ地質図(図3)とその説明書(UNESCO, 1978)がある。この地質図では対象地域は地質構造上大きく3分され、先カンブリア時代の褶曲帯、古生代の褶曲帯、及び中生代・新生代の褶曲帯に区分されている。

近年の論文(Mpodozis and Ramos, 1989 など)は火山活動の分布、地質単元の分布をプレート動きに基づき解釈している。すなわち、古生代初期、ゴンドワナ大陸西縁は炭酸塩岩が分布するプラットフォームであった。中生代において南アメリカがアフリカから分離し、火山列島の生成と陸棚域の出現が続いた。さらに、中生代から新生代にかけてナスカプレートが南アメリカプレートの下に沈み込み、この相対運動の速度及び方向の変化により地質構造及び火成活動の変化が生じた。

(1) 広域地質

ここでは、対象地域全域の地質概要を明らかにするため、UNESCO(1978)に基づきその大略を述べる(図3)。地質構造的にみて、対象地域は台地及び褶曲帯に大きく2分される。褶曲帯はさらに細分される。以下にそれぞれの構成岩石及び地向斜形成に伴う深成岩類について記す。

(a) 南アメリカ台地

南アメリカ台地の被覆層(三疊紀以降の地層)が東縁部に分布する。

(b) 褶曲帯

対象地域の褶曲帯は、先カンブリア紀褶曲帯、古生代褶曲帯、及び中生代～新生代褶曲帯の3つに分けられる。

・先カンブリア時代の褶曲帯

1,000Ma以降のブラジル造山による褶曲帯であり、地域南東部に分布する。図3では、この時代の花崗岩類はγ7として図示されている。

・古生代の褶曲帯

古生代の褶曲帯は古生代前期褶曲帯と古生代中～後期褶曲帯に分けられる。

古生代前期褶曲帯は対象地域の南部にほぼ南北方向に分布する。

古生代中～後期褶曲帯は、デボン紀後期の褶曲帯(未区分褶曲帯を含み、地域南部に南北方向に分布する)とペルム紀～三疊紀・ジュラ紀の褶曲帯(地域北部に南北方向に分布し、カンブリア系～オルドビス系の炭酸塩岩、泥岩、シルル系～石炭系のフリッシュ、石炭系～三疊系のモラッセなどからなる)からなる。

・中生代及び新生代の褶曲帯

中生代及び新生代の褶曲帯は広く分布し、周クラトン帯(Pericraton:pA)及びクラトン内部(Intracraton:iA)に区分され、それぞれ時代により 3 区分(上部暁新統:pA1, アルビアン～セノマニアン:pA2 及びオックスフォードアン-キムメリヂアン:pA3)及び 4 区分(中部中新統～下部鮮新統:iA1, 中部暁新統:iA2, セノニアン～暁新統:iA3 及び上部白亜系:iA4)されている。また、サブアンデアン前弧盆の堆積物(fA1)が対象地域北東部に分布する。

アンデス造山の後期造山運動及び後造山運動のモラッセ及び火山岩類(tA)は主として第三紀(一部暁新世, 始新世)のモラッセ・火山岩類(tA1)及び第四紀(一部鮮新世)のモラッセ・火山岩類(tA2)からなる。

先カンブリア時代の核(pC)が新世代及び中生代の褶曲帯に露出している。

(2) 地形構造区ごとの地質

対象地域の地質構造は地形区分に基づいて説明されることが多い。ここでは Sillitoe(1981)及び Pincock, Allen & Holt, Inc.(1993)に基づき作成した対象地域の地形構造区(Morphostructural Province)ごとにその地質の特徴について述べる。この部分の地質記載は Pincock, Allen & Holt, Inc. (1993), Mpodozis and Ramos(1989)などに基づく。

対象地域の地形構造区は西から東へ、海岸山脈、山間盆地(Chilean Longitudinal Valleyの一部)、プリンシバル山脈、フロントル山脈、プーナ・アルチプレーノ、プレコルディジェラ、トランスパンペアン山脈、オリエンタル山脈、パンペアン山脈及びサブアンデアン山脈に区分されている(図 4)。

海岸山脈は、古生代後期以降、ゴンドワナ大陸とこれに合体したマイクロコンティネントの下に沈み込むプレートの運動により付加された堆積物及び古生代後期～中生代前期の火成弧に生じた花崗岩類、流紋岩類から主として構成される。

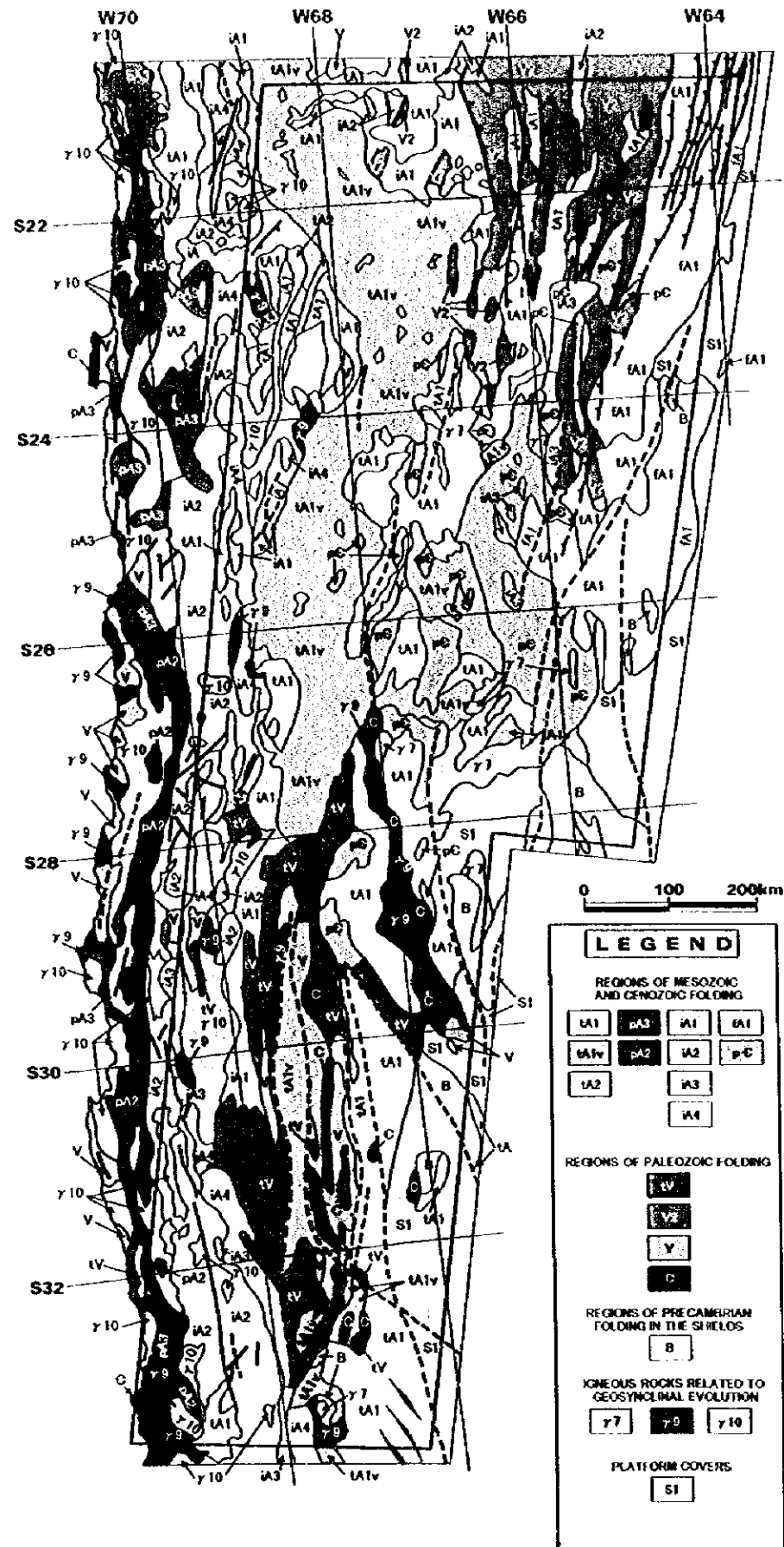
本報告書でいう山間盆地は海岸山脈とプリンシバル山脈にはさまれた地域で、白亜紀後期～始新世までの安山岩、流紋岩及び陸成の赤色砂岩から主として構成される。

プリンシバル山脈は白亜紀後期～第三紀の火成活動と変形作用で特徴づけられ、この西部は火成岩類、東部はジュラ紀後期から白亜紀前期の堆積岩から構成される西傾斜のスラストシートからなる褶曲帯である。

フロントル山脈は南緯 26°以南においてプリンシバル山脈の東に隣接する構造区で、古生代後期の火山岩類、堆積岩類からなり、オフィオライトが認められる。フロントル山脈の基盤はマイクロコンティネントと考えられているが、先カンブリア系が露出していないので、詳細は不明である。

プーナ・アルチプレーノはアルゼンティン北部及びボリビアにわたる一連の高原につけられた名称で、古生代の堆積岩類、第三紀の陸成層が分布する。中新世後期以降、Farallon-Nazca リッジ拡張が終わり東太平洋海膨におけるリフト拡張が始まったのと同様にアルゼンティンのアルチプレーノでも火成活動が広く知られるようになった。

地質概略図凡例



中生代～新生代褶曲帯

後期アンデス造山～後アンデス構造盆地堆積物(海成層および火山噴出物を一部含む)

- tA1 第四紀(一部鮮新世)堆積物
- tA1v 第四紀～鮮新世の塩基性～中性の火山岩類
- tA2 新第三紀、一部古第三紀の堆積物

クラトン縁辺部の褶曲帯

- pA3 ジュラ紀後期オックスフォード期～キンメリッジ期の堆積物(Araucanian相)
- pA2 白亜紀オーブ期～セノニアン期の堆積物

クラトン内部の褶曲帯

- iA1 中新世中期～鮮新世前期の堆積物(Quenches相)
- iA2 始新世中期～漸新世前期の堆積物(Inca相)
- iA3 白亜紀セノニアン期～晩新世の堆積物
- iA4 白亜紀後期(先マーストリヒアン期)の堆積物

fA1 サブアンデス前強盆堆積物

pC 先カンブリア時代の岩石(特に先カンブリア時代後期の岩石)

古生代褶曲帯

古生代中～後期褶曲帯

- tV ベルム紀～三疊・ジュラ紀の堆積物(造山運動末期もしくは後造山運動堆積物)
- V2 デボン紀後期～ベルム紀中期の褶曲作用を受けた堆積物
- V 未区分の地向斜堆積物

古生代前期褶曲帯

- C 未区分の地向斜堆積物(一部は古生代およびアンデス褶曲作用を蒙っている)。チリにおいては先カンブリア紀(?)の褶曲域を一部含む。

橋状地における先カンブリア紀褶曲帯

- B 1,000Ma±50Ma～500Maの褶曲作用を蒙った堆積物

地向斜形成に伴う深成岩類

- γ7 500～1,000Maの花崗岩類
- γ9 古生代中期～三疊紀の花崗岩類
- γ10 中生代～新生代の花崗岩類

台地被覆層(南アメリカ台地)

- S1 三疊紀以降の被覆層

図3 対象地域の地質概略図(UNESCO, 1978を改変)

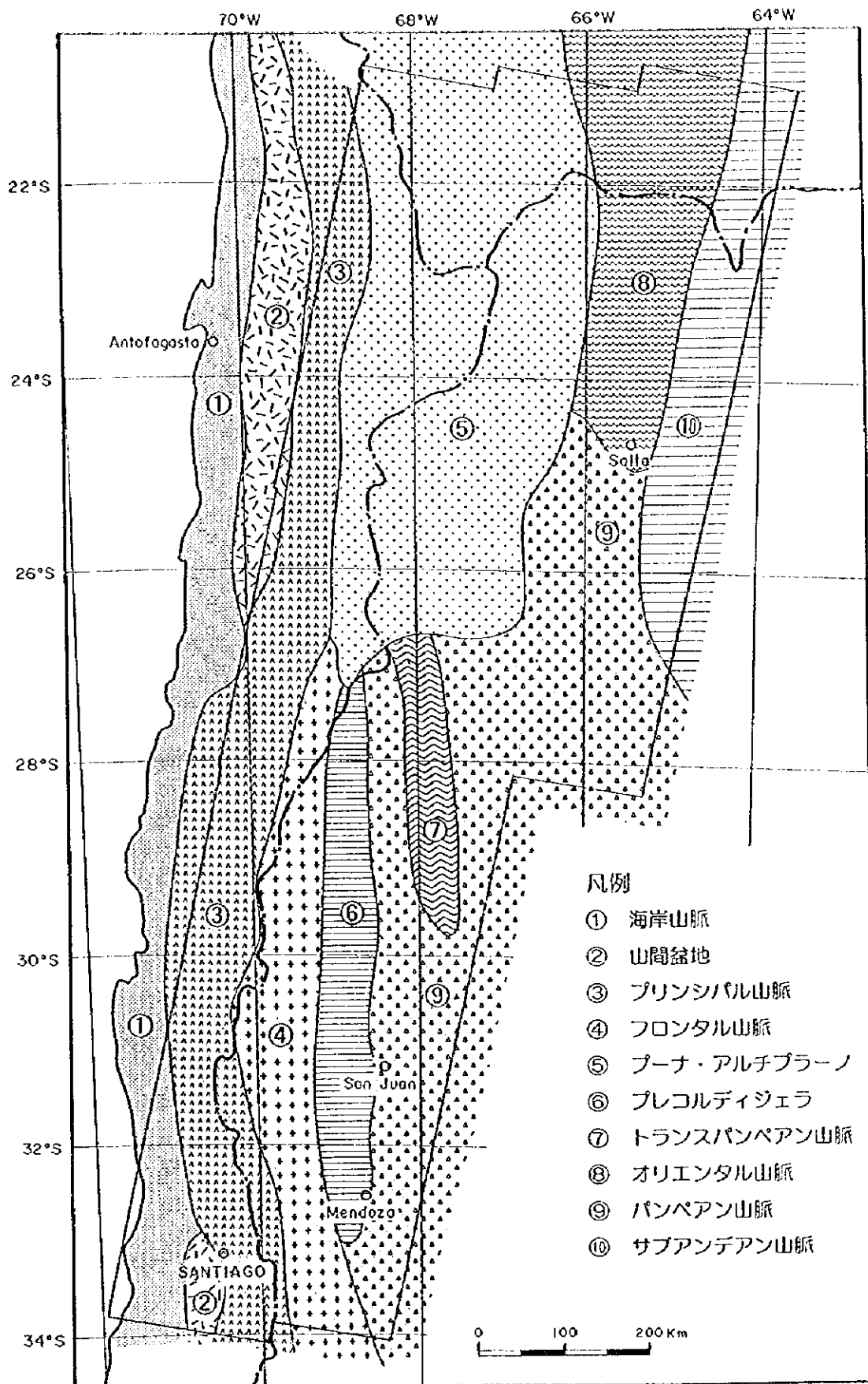


図4 対象地域の地形構造区 (Sillitoe, 1981 他から作成)

プレコルディジェラはフロンタル山脈の東、南緯 27°～33°に位置する。このプレコルディジェラは、古生代には Gondwana 大陸の西に位置し、炭酸塩岩が堆積するプラットフォームであった。プレコルディジェラとバンペアン山脈の間にはメランジェ帯が発達し、これは、プレコルディジェラ・テレーンとバンペアン・テレーンとのプレート境界を示している。

トランスバンペアン山脈は先カンブリア紀～カンブリア紀の変成岩類を基盤とし、オルドビス紀の陸棚堆積物及びこれらを貫く花崗岩類、ペルム紀の陸成堆積物、白亜紀以降の陸成堆積物とそれらに挟在する火山岩類からなる。

オリエンタル山脈はプーナ・アルチプレーノの西、南緯 25°以北に位置する。先カンブリア紀～カンブリア紀の基盤の上に、オルドビス系、シルル系・デボン系、石炭系及び白亜紀以降の堆積岩類・火山岩類が分布する。この地区では古生界が褶曲、断層による変形作用を強く受けている。

バンペアン山脈は先カンブリア紀～カンブリア紀の変成岩類と古生代の花崗岩類、石炭紀～ペルム紀の陸成堆積物及び新生代の堆積岩類からなる。

サブアンデアン山脈は対象地域の東部に広がる先カンブリア紀～カンブリア紀の変成岩類、古生代の堆積岩類からなり、西傾斜のスラストに規制されている。これらは西向き沈み込みにより形成された。新生代後期から現在にかけて、沈み込みによる変形作用は現在のオリエンタル山脈から東に移動しサブアンデアン山脈におけるスラスト褶曲帯となっている。

(3) 造山運動の概要

Mpodosis and Ramos(1989), Coira et al.(1982)などに基づき、対象地域を含むアンデス地域の地質構造発達史概要を以下にまとめる。

対象地域の古生代以降の地質構造は、Gondwana 大陸の西縁部に起こった沈み込みに伴う造山運動による火成作用、変成作用及び断層により特徴づけられる。すなわち、

・バンペアン造山運動

先カンブリア紀後期からカンブリア紀前期(一部オルドビス紀)まで継続した造山運動により現在のプーナからオリエンタル山脈及びバンペアン山脈に分布する火成岩・変成岩からなる基盤が形づくられた。これらの岩石は後述のアンデス造山運動により断層運動を受け、ブロック化した。

・ファマティナ造山運動

カンブリア紀後期からデボン紀にかけての造山運動により現在のアルゼンティン西部に当たるブラジル台地の周縁の海盆が発達し、厚い堆積物が堆積した。これらの堆積物はボリビアからアルゼンティン北部に分布する。また、アルゼンティン西部に露出する玄武岩溶岩及び超塩基性岩は古生代の海洋底地殻であり、古生代末までに南アメリカ大陸に付加

されたものである。

・ゴンドワナ造山運動

古生代後期から中生代にかけての造山運動でデボン紀後期から中生代初期に付加された石灰岩、遠洋性堆積物からなり、青色片岩相の変成作用を蒙っている。また、フロントル山脈及び海岸山脈にはこの造山運動に関連して生成された花崗岩及び流紋岩・イグニブレイトが分布する。

・アンデス造山運動

中生代～新生代に起こった造山運動であり、現在のアンデスを最終的に形づくったもので現在も続いている。南緯 27° を境に南北に分けた地域でその地質構造が異なる。アンデス造山運動については項を改めて詳述するが、南・北 2 地区の地質の概要は以下のとおりである。

南緯 27° 以北のチリ北部～アルゼンティン北西部のうち、海岸山脈の火成弧はジュラ紀初期から白亜紀前期にかけて活動し、背弧海盆には三畳紀後期～白亜紀初期の海成及び陸成堆積物が堆積した。大陸性の地殻を有するこの背弧海盆は白亜紀中期に変形を受け、プロトドメイコ山脈(Proto-Cordillera de Domeyko)を形成した。白亜紀後期から第三紀にかけて火成活動の中心は東へ移動した。また、造山フロントは東方のサブアンデアン山脈まで移動し、そこでは衝上断層・褶曲運動が依然として活発であった。

南緯 27° 以南の地質は第四紀火山活動の欠如と山間盆地(Central Valley)で特徴づけられる。南緯 27° 以北とは対照的に、アンデス造山による変形は海溝から東側に 1,000km 以上も離れた範囲に見られる。それはパンペアン山脈の断層によってブロック化した基盤が分布する地域である。このような広域変形作用は低角度ベニオフ帯に関係している。

(4) 南緯 27° 以北のアンデス造山運動

アンデス造山運動は次のごとく時代により変遷してきた(図 5)。

・三畳紀～白亜紀前期

中生代に、現在のドメイコ山脈(チリ北部)に沿って小規模の盆地が形成された。これらの盆地には、西側の高地からもたらされた赤色礫岩や角礫岩が堆積した。

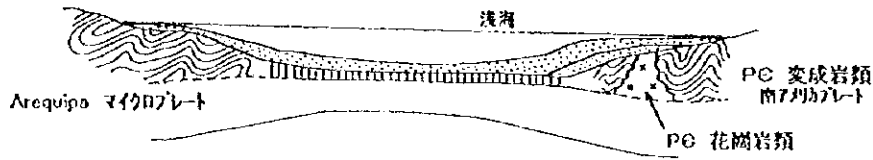
ジュラ紀前期には、現在のドメイコ山脈を覆っていた海は、細長く深い Tarapaca 海盆を形成して北方に拡大した。これら海盆中には厚さ数 1,000m に及ぶ炭酸塩岩類と陸源性堆積物が堆積した。ジュラ紀後期からジュラ紀末までは引き続き海域に覆われていた。一部はさらに白亜紀前期まで海域に覆われていた。白亜紀前期に背弧海盆には La Negra 火成弧からもたらされた陸性の赤色砂岩が堆積した。

海岸山脈ではジュラ紀前期の海成堆積物と火山砕屑岩の互層が三畳紀後期の陸成堆積物の上に累重している。旺盛な火成・火山活動(La Negra 火成弧)の産物が現在の海岸山脈

1、フアマチナ造山運動 [南緯25°付近を模式化]

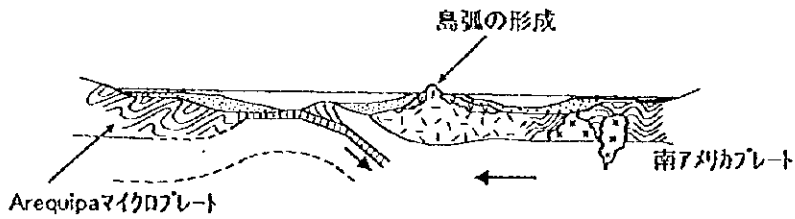
a、後期カンブリア紀～前期オルドビス紀

プーナ、コルディジェラ オリエンタルでの堆積



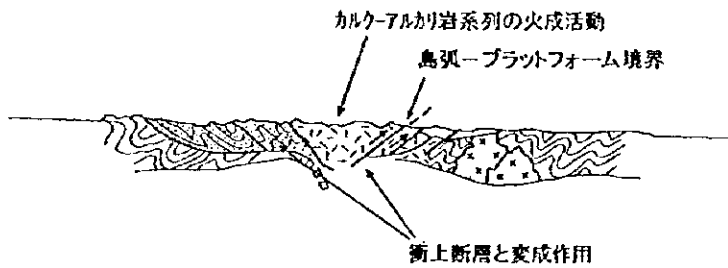
b、中期オルドビス紀

南アメリカプレートとArequipaマイクロプレートの衝突
島弧の形成



c、後期オルドビス紀 (オクロイカ造山運動)

カルクールカリ岩系列の火成活動
衝突による下部古生界の変成作用



d、後期デボン紀～前期石炭紀

カルクールカリ岩系列の火山岩
花崗岩類の大規模な貫入
両翼での褶曲活動

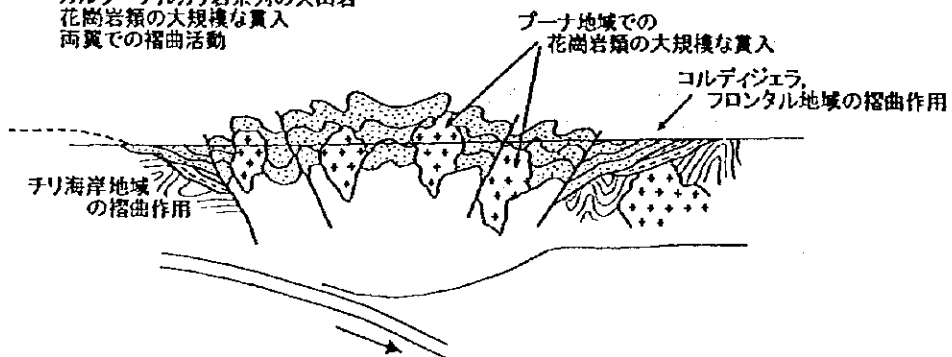
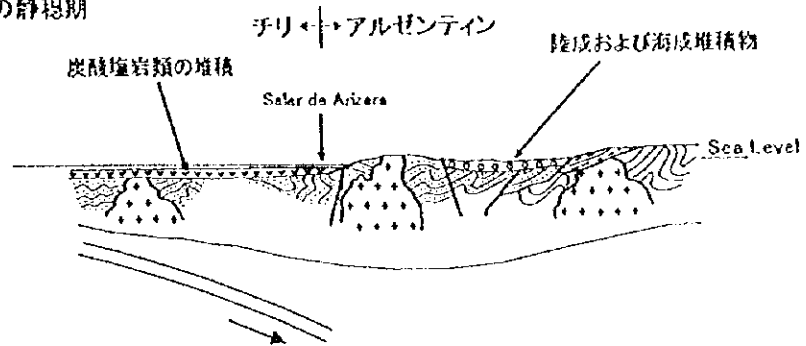


図5 地質構造発達史(1) (Coira et al., 1982 を改変)

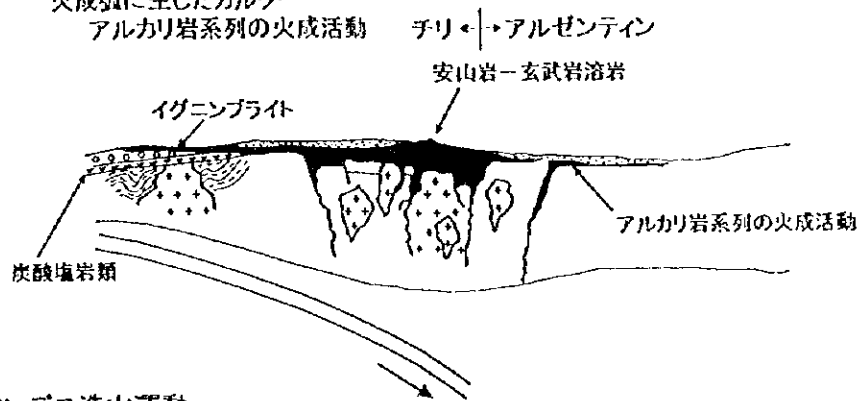
2、 Gondwana造山運動

- a. 石炭紀～前期ペルム紀
 プーナ地域での陸成、海成堆積
 チリでの炭酸塩岩類の堆積
 火成活動の静穏期



- b. 後期ペルム紀～前期三畳紀

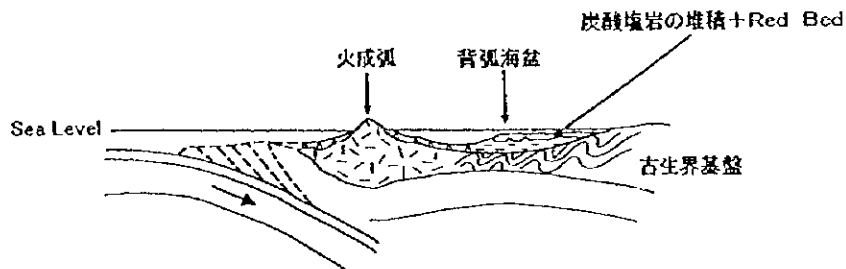
火成弧に生じたカルクー
 アルカリ岩系列の火成活動



3、 アンデス造山運動

- a. ジュラ紀～前期白亜紀

火成弧の発達
 背弧海盆の形成と炭酸塩岩類およびRed Bedの堆積



- b. 後期白亜紀～第三紀

スラブの低角化
 火成活動の東方への移動
 地溝帯の形成

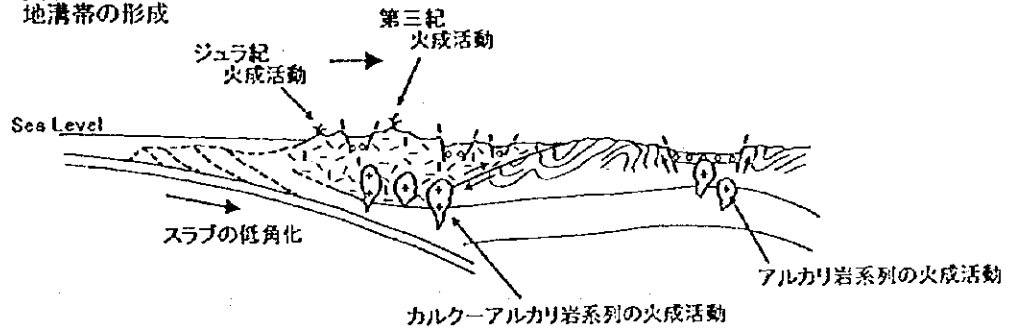


図5 地質構造発達史(2) (Coira et al., 1982 を改変)

に沿って Chanaral(南緯 26°)付近まで約 1,000km 以上の範囲に細長く分布している。これらの地層(La Negra 層)は厚さ 1,000m 以上の安山岩、玄武岩からなり、海成及び陸成堆積物を断片的に挟む。いわゆるマントタイプの層状銅鉱床はこれらの地層(La Negra 層など)の溶岩中に認められている。さらに一連の堆積物は白亜紀初期まで認められる。190~115Ma を示す大規模なハンレイ岩質~花崗岩質の貫入岩体が海岸山脈に分布する。

対象地域の西方を南北に走るアタカマ断層は、1,000km の延長を持つ走向断層であり、La Negra 火成弧と関係し白亜紀前期に活動を開始した。また、アントファガスタ南方で白亜紀前期にアタカマ断層沿いにいくつかの深成岩体が貫入している。

・白亜紀中期

白亜紀中期には、大陸性地殻が隆起したことにより、プロトドメイコ山脈の地形的高まりが形成された。海岸山脈と今日のプーナ・アルチプレーノが分離し、背弧海盆の堆積物は変形作用を受けた。白亜紀中期以降、プロトドメイコ山脈の東側に堆積盆(Purilactis Basin)が発達し、赤色砂岩が堆積した。さらに東には前地堆積盆(Grupo Salta Basin)が形成され、礫岩、赤色砂岩、アルカリ系火山岩類が堆積・噴出した。この火山岩類及び関連する半深成岩類は 130~100Ma, 80~75Ma, 65~60Ma の 3 時期に活動し、これは堆積盆を形成したリフトの形成・堆積作用と同時期に生成した。

・第三紀

第三紀には火成活動と変形作用は東方へ移動した。火成活動は白亜紀後期に始まり、始新世まで続いたもので、今日の山間盆地(Chilean Longitudinal Valley)に広く分布する。これらの火山岩類は主として安山岩及び流紋岩からなり、火山岩類及び斑岩類の K-Ar 年代は 72~39.9Ma を示している。漸新世にはこの地域の火成活動は衰えた。チリ及びアルゼンティンのプーナには赤色の陸成堆積物及び蒸発塩岩が堆積した。

次の火成活動は始新世後期から漸新世(48~28Ma)にかけてプロトドメイコ山脈中軸沿いに生じ、大規模なポーフイリーカッパー鉱床の関係火成岩が貫入した。漸新世の火山活動は静穏で、アルゼンティン北西部における漸新世の複合岩体(Nevado de Acay 花崗岩及びこれと関連する火山岩)が唯一の大規模な火山活動である。この火成活動の静穏期は、ナスカプレートが南アメリカプレートに斜めに沈み込む時期に相当する。漸新世のポーフイリーカッパー鉱床は、プロトドメイコ山脈中軸の、走向移動断層(チュキカマタの"West Fissure"など)によって特徴づけられる地殻の弱線部に沿って形成された。

中新世初期には、ナスカプレートの沈み込み方向の変化とともにその速度が加速し、ドメイコ山脈の変成作用が生じた。その結果、始新世後期から漸新世の地層が褶曲を受け、また、逆断層が再生した。それと同時に活発な火成活動が始まり、カルデラタイプの流紋岩質火山活動が南緯 22° 以北で活発になり、イグニンプライトが広範囲に生成した。安山岩質の成層火山は南緯 25° 以南の地域に卓越する。この火成活動は新しい変形作用(Quechua Phase)の後、中新世後期に広範囲に拡大した。圧縮による変形作用の先端は新生代後期に

東方に移動し、サブアンデアン山脈の東端では衝上断層・褶曲運動が現在でも活発である。

(5) 南緯 27°以南のアンデス造山運動

・ジュラ紀～白亜紀前期

三畳紀中期～後期には海進と火山活動が起こっている。ジュラ紀初期の火山活動は対象地域南部の海岸(南緯 32°以南)に見られ、そこには流紋岩質火山砕屑岩が分布する。これは石灰岩を挟在することから、火山活動の一部は海底で生じていたことを示す。同時に花崗岩質～ハンレイ岩質の深成岩類が海岸山脈地域に貫入した。これら貫入岩類は 191～138Ma の年代を示している。

東側の背弧海盆では、ジュラ紀前期～中期の海進により、フロントル山脈に位置する古生代後期の火成岩基盤の上に砕屑岩・炭酸塩岩が堆積するプラットフォームが形成された。その後、ジュラ紀後期の海退により石膏など厚い蒸発塩岩が堆積し、それらは同じ時期の陸成赤色砂岩に被覆された。赤色砂岩の後背地は海岸山脈で、火山岩の削剥によって本岩がもたらされている。これらは東方で薄化し、チリ側では火山岩を挟む扇状地堆積物を主体とし、アルゼンティン側では河成の細粒砂岩を主体とする。

白亜紀前期には、チリ・アルゼンティン国境付近では溶岩が石灰岩と指交することから、再び広く海に覆われていたと推定されている。

白亜紀前期の火山活動は、海洋底地殻が発達せず、薄化した大陸地殻の弱線を通し、大量の安山岩・玄武岩が縁海に噴出した、と解釈されている。

白亜紀前期末には溶岩、石灰岩を挟む粗粒赤色礫岩が堆積している。

・白亜紀後期～第三紀

白亜紀後期～第三紀には変形作用が漸進し、火成活動の中心が東部へ移動した。白亜紀後期に縁海に堆積した岩石は花崗岩類の貫入をうけている。その後、この火成活動は中新世まで継続し、新しいものほど東部に分布している。

火山活動は白亜紀後期にプリンシバル山脈の西部で生じた。22～11Ma の中新世初期の安山岩質～流紋岩質溶岩及び同質火山砕屑岩はさらに東方に分布している。これら深成岩及び火山岩を形成した活動は、この地域のベニオフ帯が浅くなり、大陸地殻と沈み込む海洋プレート間のアセノスフェアのくさびが消失した結果、休止した。

3.2 地質層序

対象地域に分布する地質層序を一括した文献は見あたらないが、参考文献をまとめて、図 6 のような層序図を作成した。参照した文献は、Boric et al.(1990), Franca(1995), Mon and Salfity(1995)などである。

(1) 先カンブリア時代の岩石

対象地域に分布する先カンブリア時代の岩石は、ブラジル造山運動をうけた岩石からなり、対象地域の東部から東南部のパンペアン山脈などに露出している。ブラジル造山運動はカンブリア紀まで継続し、変成岩類は花崗岩類(1,000~500Ma)の貫入をうけている。

(2) カンブリア系~オルドビス系

カンブリア系~オルドビス系は、対象地域南部の海岸山脈、プレコルディジェラ及びトランスパンペアン山脈に分布し、超塩基性岩を伴う玄武岩類、遠洋性堆積物及び炭酸塩岩から構成されている。同じ時期のプーナの堆積物はタービダイトからなる。これらは古生代の褶曲作用及びアンデス造山運動による褶曲作用をうけている。一方、オリエンタル山脈は背弧であり、3,000m以上の厚い陸棚堆積物からなる。この堆積盆はオルドビス紀の末、おそらく西側のアレキーパ台地と東のアントファージャ台地(Antofalla)との衝突(オクロイコ造山運動)により閉じたものであろう。

(3) シルル系~デボン系

シルル系は先シルル系を不整合に覆い、ポリビアから北部アルゼンティンのプーナ・アルチプレーノ、オリエンタル山脈及びプレコルディジェラに分布し、砂岩、頁岩からなり、オリエンタル山脈には砂岩、頁岩のほかダイアミクタイトが分布する。

デボン系はチリ北部~アルゼンティン北部に分布し、砂岩、頁岩及び石灰岩など浅海の堆積物及びタービダイト砂岩や火山岩類から構成され、著しい褶曲作用をうけている。

(4) 石炭系~下部三畳系

石炭系はポリビアからアルゼンティン北部に分布し、ゴンドワナ氷河の影響をうけた堆積物、タービダイト砂岩、頁岩からなる。なお、石炭紀中期には顕著なハイエイタスがあり、石炭系中部~上部は砂岩など珪質砕屑岩からなる。

ペルム系はチリ・アルゼンティン国境付近に分布し、砂岩、石灰岩からなる。

これらの石炭系~ペルム系は背弧の堆積物であるがオリエンタル山脈などでは層序がはっきりしない。下部三畳系は対象地域のチリ側に分布し、礫岩、砂岩からなる。

(5) 中生界

三畳紀後期からジュラ紀の堆積物は海岸山脈付近及びチリ・コピアボ付近で南北に分布する。海岸山脈付近では礫岩、砂岩から、その東方では礫岩、砂岩、石灰岩、火山岩類からなり、花崗岩類が貫入している。

ジュラ系~下部白亜系は海岸山脈に分布し、厚い安山岩質溶岩を主体とし、砂岩、石灰岩を挟む。また、上部白亜系はナスカプレート沈み込みに伴って形成された安山岩類・石灰岩及び前弧堆積盆の堆積物である赤色砂岩などの陸源堆積物からなる。

(6) 新生界

対象地域の新生界は白亜紀から続いたアンデス造山に伴う火山岩類で特徴づけられ、現在の山間盆地には礫岩、砂岩及び蒸発塩岩の堆積が続いている。

第三紀の火山岩の分布は南緯 27° 以北、27°~33° 及び 33° 以南で大きく異なる。これはナスカプレートの沈み込み角度が南緯 27°~33° で緩傾斜となっているためであると説明されている。

南緯 27° 以北では白亜紀末に小康状態であった火山活動が暁新世に再開され、また火山活動の中心は海岸山脈から東に移動した。その結果、暁新統~始新統及び上部漸新統から第四系に属する火山岩からなる現在のアンデス山脈が生成した。

南緯 27°~33° では第三紀初期の火山岩類は 27° 以北と同様に認められる。その後、漸新世後期~中新世前期、中新世中期、中新世後期の火山岩類が噴出した。このゾーンでは第四紀の火山堆積物は欠如している。

南緯 33° 以南では第三紀前期の火山岩は欠如しており、白亜系の上位に中新世の火山岩が直接覆う。第四紀の火山岩類は広く分布している。

対象地域の北東部には上部中新統~鮮新統が分布する。これらはサブアンデアンの前弧に堆積した、いわゆる後造山運動の堆積物(モラッセ)である。

(7) 貫入岩類

花崗岩類は先カンブリア紀から第三紀までのものが知られている。これらは、既述のとおり造山運動に伴って貫入し、以下のように大きく区分されている。

先カンブリア時代~古生代前期の花崗岩類

古生代中期~三疊紀の花崗岩類

中生代中期~第三紀花崗岩類

3.3 地質構造

地質構造については地形構造区の節や層序の節で述べてきたとおりで、ここでは Mon and Salfity (1995)や Coira et al.(1982)などから概略をまとめる。

対象地域は南アメリカ台地の西縁からアンデス山脈にまたがる。南アメリカ台地はカンブリア紀以前の基盤とその被覆層からなり、その周縁は後期先カンブリア紀以降の造山運動を受けている。アンデス山脈には後期先カンブリア時代以降の地層が分布する。しかし、アンデス山脈の南北に延びる構造は古生代までの構造とは異なる。

すなわち、アルゼンティン北西部のトランスパンペアン山脈、オリエンタル山脈、プレコルディジェラ及びプーナ地域にはほとんど非変成の下部古生界が傾斜不整合をもって変堆積岩及び変火山岩を覆っている。

一方、アンデス山脈中央部では陸成層に移化する白亜紀後期とみられる地層が下位層を不整合で覆っている。この構造はインカ(Inca)相と呼ばれる暁新世前期から始新世中期の褶曲作用、ケチュア(Quechua)相と呼ばれる中新世中期から鮮新世前期にかけての褶曲作用及び逆断層運動をうけている。

アンデス造山運動によって形成された地形区のうち、最も西部に位置するのがプーナで、そこでは先カンブリア紀の基盤と古生界とが第三系の陸成堆積物に衝上している。プーナの東のオリエンタル山脈は、先カンブリア時代の岩石の tectonic stack であり、古生界がサブアンデアン山脈に東向きに衝上している。サブアンデアン山脈はアンデス造山運動の最も東側のゾーンであり、断層で切られた背斜構造からなる。

既述のごとく、南緯 27°以南ではアンデス山脈の構造はその北方と異なる。サブアンデス山脈とオリエンタル山脈にみられる構造は顕著ではなく、先カンブリア時代の変成岩からなる基盤と断層帯に貫入した古生代の花崗岩類がパンペアン山脈を形成している。

3.4 鉱床

3.4.1 鉱床概要

対象地域に分布する鉱床は鉱種、成因タイプが多岐にわたる。鉱種については金・銀、銅、鉛・亜鉛、錫・タングステン及び水銀・アンチモニーを主とするタイプがある(巻末資料 1)。

総合解釈図には上述した鉱種ごとに区分して各鉱床の位置を示している。これらの鉱床は成因的にはポーフィリー銅・鉛・亜鉛鉱床、浅熱水金・銀鉱床、マント型銅鉱床、層状の鉛・亜鉛鉱床がその主なものである。これらのうち、チリ側では前 3 者が重要で、アルゼンティン側では、チリとの国境付近のポーフィリー銅・鉛・亜鉛・銅鉱床(Aguilar)が著名である(図 7)。

3.4.2 アルゼンティンの鉱床

Petersen(1989)によればアルゼンティンの金属鉱床は次のように分類される。

- (1) 先カンブリア時代の堆積性マンガング床、縞状鉄鉱床及びベグマタイト鉱床
- (2) 前期石炭紀の鉱床
 - 2a. 堆積岩に伴われる同成の鉄鉱床
 - 2b. 鉛・亜鉛・タングステン鉱床
 - 2c. 層準規制型のニッケル・コバルト鉱床
 - 2d. 層準規制型の銅・鉛・亜鉛鉱床
- (3) 中生代の火山性の銅鉱床
- (4) 白亜紀後期～第三紀の鉱床

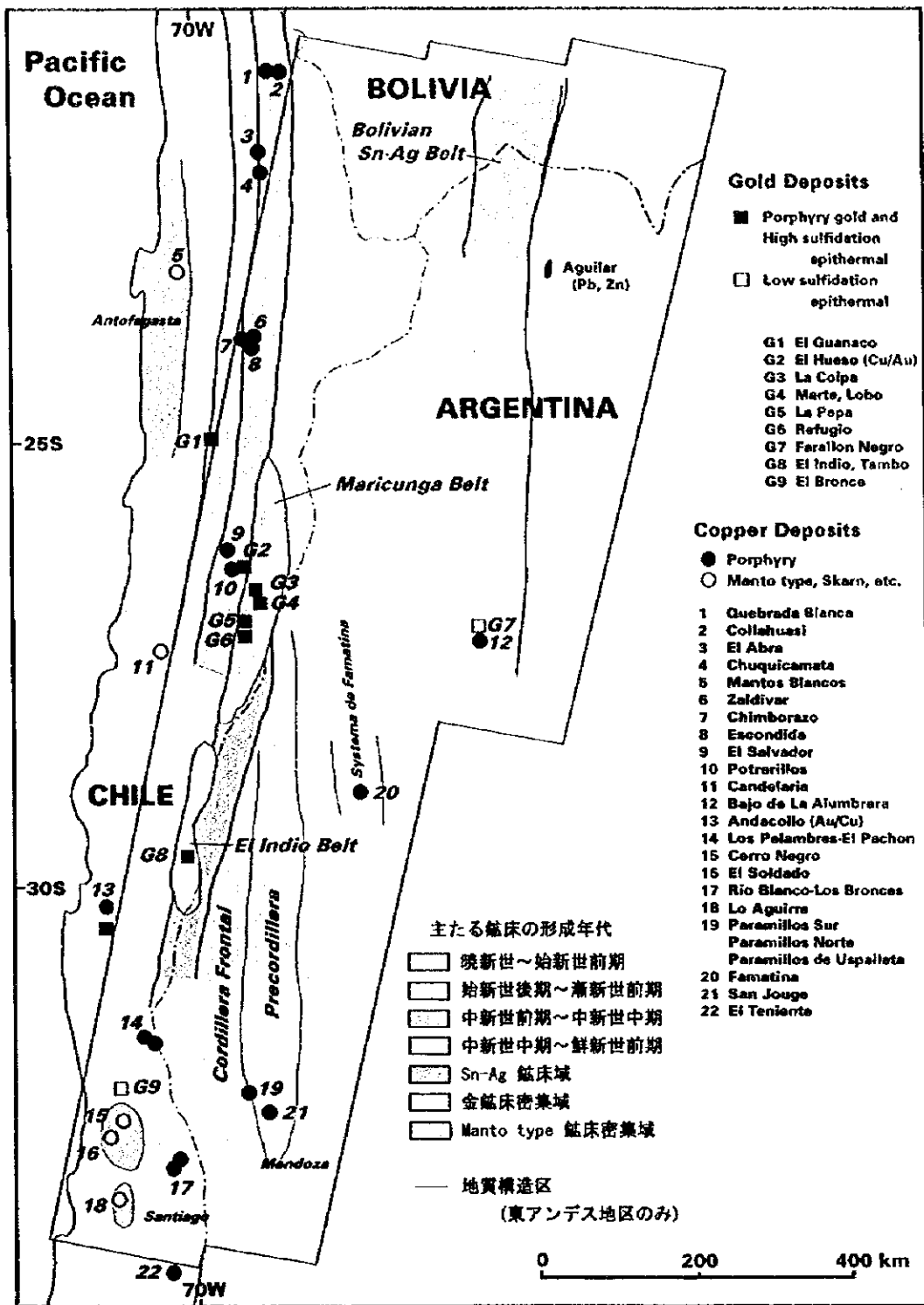


図7 対象地域の鉱床区 (Sillitoe, 1991 を改変)



- 4a. ポーフイリー・カッパー・モリブデン鉱床
- 4b. 銅・鉛・亜鉛・金スカルン鉱床
- 4c. 銅・鉛・亜鉛・銀鉱脈～交代鉱床
- 4d. 硫砒銅鉱・貴金属鉱床

ただし, Sillitoe(1977)は, アルゼンティンのポーフイリー・カッパーとして石炭紀前期(またはオルドビス紀:Taca Taca), 石炭紀後期～ペルム紀前期(Alcaparrosa, 三疊紀:Yalguaraz), 白亜紀(74Ma, 対象地域外であるが Campa Mahuida)のものを記載している。

アルゼンティンの鉱床区については, Zappettini(1996)が造山運動との関連で以下のように解説している。

(a) 原生代後期のパンペアン造山運動に関連して形成された鉱床

原生代後期に生じた造山帯がパンペアン山脈東部にあり, 塩基性及び超塩基性岩を伴う。この地域は 2 つのプレートの衝突による原生代後期のマグマ弧であった。この地域は少なくとも 2 つの島弧系によって特徴づけられる。この時期の鉱化作用は島弧-背弧系に関係するソレイト玄武岩に関係している。この時期の鉱床は Catamarca 州の Novillo Muerto 地域にある。

(b) カンブリア紀からデボン紀のファマティナ造山運動に関連して形成された鉱床

カンブリア紀からデボン紀にかけてパンペアン山脈地域において沈み込みが起こり, マグマ弧において花崗岩が貫入し, これに伴う錫・ビスマス・タングステン鉱床が形成された。

プーナ地域ではオルドビス紀に Gondwana 大陸からアレキパ台地が分離して, この間に 2 列の火山列が発達した。この造山運動の時期に Jujuy 州 Pirquitas 錫鉱床, Rinconada 金鉱床が形成された。この台地側には堆積性鉱床(例 Jujuy 州 Aguilar 鉱床, La Rioja 州 Helvecia 鉱床)がある。背弧の塊状硫化物鉱床としては Salta 州の銀・鉛・亜鉛の La Colorada 鉱床及び San Juan 州の Santa Elena 鉱床がある。

Aguilar 鉱床は南米で最大の鉛・亜鉛鉱床で, 過去の生産量を含め鉱量は 30 百万 t(Pb+Zn+Cu 18 %)である。本鉱床は噴気・堆積鉱床起源とされているが, 白亜紀花崗岩の貫入による交代作用を蒙っている。

シルル紀の海成層中の鉄鉱層として, Jujuy 州の Zapla 鉱床の例がある。

プレコルディジェラ及びフロントアル山脈にはオフィオライトに伴う同成鉱床として, クロム, 磁鉄鉱及び塊状硫化物鉱床がある。

(c) ペルム紀から三疊紀の Gondwana 造山運動に伴う鉱床

古生代の終わりまでにパングア大陸が分裂を始め、流紋岩の噴出が起こり鉱床が生成した。すなわち、ペルム紀～三畳紀のマグマ弧に関連する多金属鉱床がパンペアン山脈、プレコルディジェラ及びフロントアル山脈に分布する。その例は San Juan 州の Caledonia 及び Albion 金・鉛・亜鉛鉱床、Mendoza 州の Santa Clara, El Portillo 及び Infiernillo 銅・モリブデン鉱床などである。なお、層準規制型のウラン鉱床が Sierra Pintada に露出している。

(d) ジュラ紀から白亜紀のパタゴニア造山運動に伴う鉱床

この時期には、アンデス山脈地域の張力場にある前弧あるいは台地に層準規制型の鉱床が形成された。このうち対象地域では火山岩を母岩とする鉱床として鉱脈型の銅鉱床があり、Mendoza 州の San Jose 及び El Burrero 鉱床がその例である。なお、この時期の鉱床として Jujuy 州、Salta 州にはカーボナタイトに伴うレアアース鉱床が知られている。

(e) 白亜紀後期以降のアンデス造山に伴う鉱床

この時期の鉱床はポーフイリーカッパー鉱床をはじめ経済的に重要な鉱床を含む。これらについては、チリ側の鉱床の項でまとめて述べる。そのほかでは、白亜紀後期から第三紀前期には銅・鉛・亜鉛・銀鉱脈～交代鉱床や陸側に形成された赤色砂岩層中に胚胎する層準規制型の銅・ウラン・バナジウム鉱床などがある。

これらのうち、Catamarca 州から Salta 州にかけては多くの鉛・亜鉛鉱床が分布し、それらは第三紀生成の浅熱水性の鉛・亜鉛を伴う多金属鉱脈鉱床である。代表的な鉱床としては Diabillos 鉱床が挙げられる。そのほかでは、同州の Hoyada 鉱床は浅成火山性の鉱床である。

3.4.3 チリの鉱床

(1) チリにおける鉱床概説

チリの主要鉱床は、古生代後期のヘルシニア造山運動及び白亜紀後期以降のアンデス造山運動と関連して生成している。ヘルシニア造山運動は鉄、クロム及びニッケル鉱床の生成と関連し、アンデス造山運動はポーフイリーカッパー鉱床及び浅熱水鉱床の生成と関連がある。これらの鉱床は南アメリカプレートの西縁における造構運動に関係するマグマ活動により形成された。この結果、東西方向に分帯される鉱床区が形成された。その最西部には鉄・燐灰石接触交代鉱床及び層準規制型銅鉱床が発達する。この東にはポーフイリーカッパー・モリブデン鉱床及び銀・鉛・亜鉛などの多金属鉱床から成るゾーンが位置する。さらに東のポリビアのアルチプラーノには錫・ビスマス・タングステン帯が位置する。

これら鉱床分布の帯状構造は、アンデス造山帯が進化する間の地質的位置及びマグマの変化を反映している。マグマの活動は初期のカルク・アルカリ岩系及び一部のソレイト岩系から中間組成そして後期のカリに富むカルクアルカリ岩系へと変化している。

金鉱化作用はアンデス造山の全サイクルを通じて認められる。Camus(1990)はチリの金鉱産地として 20 地区を掲げているが、それらのうち 6 地区が対象地域に位置する。すなわち、時代の古い順に、

(a) ジュラ紀から前期白亜紀：Las Vacas

(b) 後期白亜紀から前期第三紀：El Bronce

(c) 中新世から完新世：El Indio, La Coipa, Marte, El Hueso

に区分されている。

なお、ジュラ紀から前期白亜紀の金鉱床は低硫化系タイプに、また、中新世から完新世の金鉱床は高硫化系タイプのものが多いようである。

(2) ポーフイリー・銅・銀鉱床

数少ない例を除けば、対象地域内の主要なポーフイリー・銅・銀鉱床は以下の 4 時代に区分される。これらは生成時期により区分され、西から東へ帯状に配列し、暁新世～始新世前期、始新世後期～漸新世、中新世前期～中期、中新世中期～鮮新世前期の鉱床区に区分される。

すなわち、対象地域の西部からその西方の対象地域外にはペルーから南に延びる暁新世～始新世のポーフイリー・銅・銀鉱床区が分布するが、対象地域内に関しては、大きなポーフイリー・銅・銀鉱床は知られていない。その東のチリ・アルゼンティン国境に位置する N-S 方向の帯状のゾーンには始新世～漸新世のポーフイリー・銅・銀鉱床が多数分布する。さらにその東側の中新世前期～中期鉱床区には Los Pelambres などが対象地域南部に分布する。さらに東の中新世～鮮新世のポーフイリー・銅・銀鉱床区は広い幅を有して南北に伸長し、対象地域東部に位置する Bajo de la Alumbrela 鉱床が著名である。

(3) マント型銅・銀鉱床

ポーフイリー・銅・銀鉱床の西側にはいわゆるマント型の銅・銀鉱床が知られており、El Soldado などの鉱床が対象地域に分布する。

(4) 浅熱水金鉱床

(a) 概要

チリの浅熱水性金鉱床は Davidson and Mpodozis(1991)にまとめられている。

始新世後期～中新世前期のポーフイリー・銅・銀ベルトの東に浅熱水性の金・銀鉱床の分布が知られている。これらのうち、特に La Coipa 及び Marte などの鉱床が分布するマリクンガ・ベルト(Maricunga Belt)及びエルインディオ・ベルト(El Indio Belt)には多数の鉱床が知られている。

浅熱水性鉱床は白亜紀～新生代に生成した。鉱床の関係火成岩は大洋-大陸の非衝突収斂型プレート境界付近にある NNE-SSW 走向の長いマグマ弧に貫入した。鉱床の多くは火山の中心に位置する Subvolcanic な斑岩類に伴う。

白亜紀後期に、El Bronce 地区などの鉱脈、熱水変質帯が形成された。南緯 21° ~ 26° の、暁新世から始新世の火山岩中には浅熱水性の貴金属鉱床及びポーフイリー銅床が形成された。

チリ北部では始新世後期から漸新世前期に火山活動が衰退もしくは休止した。

漸新世の鉱床としては、走向断層に沿う Transensional Zone に胚胎するポーフイリー銅床(Potrerrillos 鉱床)及び貫入岩のプラグに伴う浅熱水性の鉱床(El Hueso)が知られている。

チリの中部～北部では、漸新世後期から中新世中期のマグマ区は現在のチリ側のアンデス山脈に位置する非火山性ゾーン(プレートの緩傾斜セグメント)と一致し、多くの浅熱水性の鉱床を胚胎する。El Indio, Tambo, Nevada, La Pepa, Lobo, Marte 及び La Coipa 鉱床は漸新世～中新世の火山岩を母岩とする。

より若い時代の鉱化変質作用は中新世中期の複合火山の中心部を母岩としている。Refugio 及び La Laguna 鉱床がその例である。主たる変質作用は 23Ma に開始し、18Ma から 16Ma までの変形作用を主とする時期の後まで続き、11～8Ma 頃に終止した。

漸新世～中新世の鉱床、鉱化帯は中新世後期の火山活動の東への移動が終止した後に削剥の対象となった。

後期中新世と完新世の間のマグマ活動は、ベニオフゾーンの傾斜が急である 2 つのセグメントで起こっている。それらは 27° S 以北(中部火山帯)及び 33° 以南(南部火山帯)である。中部火山帯は複合火山、カルデラ、半深成岩の貫入及び活動的な地熱地帯に係する広範囲の新生代熱水変質作用及び硫黄鉱床で特徴づけられ、漸新世～中新世の変質作用にオーバーラップしている。これらは非常に浅い削剥レベルを示すものとみられる。

(b) エルインディオ・ベルトの浅熱水鉱床

エルインディオ・ベルトはチリ-アルゼンティン国境に沿って南緯 29° から 31° にかけて約 200km 連続する。このベルトには連続性の良い熱水変質帯群が分布し、これらの変質帯は Argillic Alteration(粘土化)、Advanced Argillic Alteration(高度粘土化)及び珪化変質作用によって特徴づけられる。変質作用は古生代の貫入岩及び火山岩から漸新世や中新世中期の火山岩類にまで及んでいる。これらの変質帯は高角逆断層に限られた地溝に位置しており、削剥を免れている。ほとんどの変質帯は浅所貫入のストックに関連する。高硫化浅成の鉱化作用は石英・金及び硫砒銅鉱脈(El Indio)、重晶石・金を含む角礫(El Tambo)あるいは明礬石・金を含む角礫(Sancarron)などからなる。変質作用は 17～16Ma 及び 11～8.7Ma の時期に起こった。

(c) マリクンガ・ベルトの金・銀鉱床

マリクンガ・ベルトでは貫入岩がエルインディオ・ベルトほど露出していない。削剥が少なく、このベルトの東半分は中新世後期から現世までの火山岩が厚く覆っている。例外的に Aldebaran 鉱床では深く開析をうけた中新世中期の火山岩類が高低差 1km にわたっ

て熱水変質している。Aldebaranの北方にある多くの鉱床は、漸新世後期～中新世前期、中新世中期の半深成斑岩類のストックが母岩となっている。そのほかでは古生代後期の花崗岩類と流紋岩類、三疊紀の陸成堆積岩、ジュラ紀前期～中期の海成堆積岩も母岩となっている。

マリクンガ・ベルトの全体的な構造は、両側を高角南北系断層で限られた地塁と地溝によって特徴づけられる。

マリクンガ・ベルトに位置する鉱床のうち、規模の大きい La Coipa で広範囲に認められる割れ目は、始新世～漸新世前期に形成された褶曲の脚部に発達している。鉱化・変質作用は三疊紀の頁岩とこれを覆う中新世前期の変質凝灰岩中に生じている。なお、中新世後期の Cerros Bravos コンプレックス(16～14.7Ma)は鉱化作用の後に貫入・噴出している。

同様の鉱化変質作用は La Pepa でも認められ、漸新世～中新世前期の火山岩類が西傾斜の高角逆断層の下盤側に保存されており、金鉱脈-角礫岩を含む大規模な変質帯が胚胎している。中新世後期の溶結凝灰岩(10.1～8.6Ma)が La Pepa の変質帯を覆っている。

La Pepa, Refugio, Santa Cecilia 及び Caserones 鉱区は最も西側に位置し、マリクンガ・ベルトの中で最も古い鉱化変質帯である。

これらの東方 20～30km には、より若い鉱化変質帯である Marte, Lobo, Vally, Escondida, Pantanillos, Amalia, Cacique 及び Aldebaran が分布する。これらの鉱化変質作用は主として中新世後期の火山活動に伴って生じたものである。

(d) El Bronce 金鉱床

El Bronce 鉱床群は、上述のエルインディオ・ベルト及びマリクンガ・ベルトよりも太平洋側に位置する。El Bronce 鉱床群は東西約 3km、南北約 17km の範囲に分布する白亜紀前期の火山岩類を母岩とする浅熱水金鉱床である。

3.4.4 そのほかの鉱床

(1) アンチモン・水銀鉱床

アンデスには新生代の旺盛な火成活動に伴い、広い範囲にわたって水銀鉱床が分布するが、大規模なものは少ない。アンチモン鉱床についても小規模なものがチリ・アルゼンティンに多数分布する。

(2) 錫・タングステン鉱床

ポリビアのアルチプラーノの錫・タングステン鉱床区が対象地域に延びてきている。この錫・タングステン鉱床区の南部は錫・銀を主体としタングステン、ビスマス及び鉛を伴い、火山岩及び浅所貫入岩を母岩とするものが多い。鉱床のタイプとしては、アルゼンティンの北部には鉱脈鉱床やスカルトタイプの鉱床が分布する。



第4章 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、23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開発した。また、フォールスカラー画像と同じバンド組み合わせにより、全地域をカバーする23シーンのデジタルモザイク画像を作成した。モザイクに当たり、隣接する画像間に色調の違いを生じさせないようにした。それぞれの画像作成方法について以下に述べる。

4.1 フォールスカラー合成画像の作成

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

(1) 放射量補正が必要な理由

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

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

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

と近似される。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。

(2) 入射光量補正

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

(3) 大気補正

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

(2)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画像間で対応するピクセルを多数用い、画像重複部を統計処理することで

地形起伏による依存性を除去する手法を用いた。

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

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

P'_{ij} :濃度変換値

P_{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 $\rho(\lambda)$ が等しいと仮定している。しかしながら、今回のように異なる時期(季節)に取得された画像では、画像重複範囲の植生、積雪、雲・霧、湖・河川の流路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様な地表の変化が多数認められるため、次に述べる方法を用いた。

画像重複範囲内の全ての対応点に対し、横軸に基準画像の輝度値を、縦軸に対応する画像の輝度値をとり、対応点間の輝度差の解析を実施した。これらを散布図に描くと植生、影、雪及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の分布は、ランダムあるいは特異点群となり識別することができる。

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

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

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

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

これらの項は正確には、取得時のセンサ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、23 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(Row075)を基準画像とした。
- (b) 各画像の大気補正は南側に向かって順次実施した。
- (c) 3つの Path 間の大気補正は中央の Path(P232)を基準とした。

このような処理を加えることで、画像全体の大気の状態を画像中央北端(P232/R075)の大気の状態と合わせたものにすることができる。

しかしながら、順次南側に大気補正を加える手法は、南側に処理が進むに従い補正誤差が累積する可能性を含んでいる。すなわち、東西の2つの Path 間で大気補正を行う場合に、北部(Row075)と南部(Row083 あるいは Row079)で等しい一次回帰直線を用いては大気補正ができなくなる可能性がある。このため南北方向の3箇所(北部 Row075、中部 Row080 及び南部 Row083)において、一次回帰直線の比較(植生などの地表被覆物質が大きく異なる地域は既に述べた方法によって除去した)を行った。その結果、各地域とも補正誤差に起因する一次回帰直線の傾斜及び切片に有意の差は認められず、南北方向にほぼ正確に大気補正が行われていることを確認した。

なお、本手法は、重複部において一方の画像における大半の地域が積雪によって覆われている場合には適用できない。たとえば、P233/R080 と P233/R081 間では、後者の画像で積雪地域が極めて多いため、両者の大気補正を行うことができなかった。このため、P233/R081 については積雪のない画像東部地域を用いて大気補正済みの P232/R081 との間で大気補正を実施した。

(4) 方向性反射係数補正

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

LANDSAT TM1画像の横方向(ほぼ東西方向)の視野角は約 16° である。このため画像右側から太陽光が照射している場合には、太陽-対象物-観測者のなす角は画像の右側と左側で約 16° 異なる。このような場合には、角度を変えて完全拡散反射体を観測した場合と同様の現象が生じる。この方向性反射率は物質及び波長によって異なり、また、地形に依存するため、各画素毎に補正を加えることが不可能である。しかしながら、1画像内での画像東端と西端を比較した場合には(太陽は画像東側、方位角 90° 、高度 60° から照射し、地表に起伏が無く、月の玄武岩と同一の物質が分布していたと仮定)、太陽-観測物-観測者のなす角が大きくなる画像右(東)側で約10%の輝度低下を生じる。このため東西方向に3つの画像を接合した場合には、接合画像西端の輝度を1とすると東端では約27%($=0.9^3$)の輝度低

下を生じることとなり、画像の東側が明らかに暗い画像となってしまう。

このため、大気補正を行った画像をもとに、画像全体の輝度値がどのように変化しているかについて統計量を用いて検討した。統計量を用いた理由は、起伏による影響と地表物質の差による影響を除くためである。各列の統計には約 13,000 個のデータを用いている。なお、統計は地表被覆物が大きく異なる(植生によって被覆されている)東側の Tarija 地区、San Ramon 地区、Salta 地区、Rosario 地区及び Tucuman 地区のデータ(P231/R075~079)を除いた 18 シーンで求めた。画像の各画素の輝度値を行列式として扱い、各行及び列の平均値、標準偏差を算出した。ただし、各画像は平行四辺形であるため、西端の画像取得開始位置を横方向にシフトさせ、取得位置をそろえた行列とした。

図 8 中の左上図は列(南北)方向に算術平均を求めた平均値の変動を横(東西)方向に示している。縦軸は各バンドの平均値を 1 とした比で表現した。この図の東西方向は 2 シーン分を表しており、画像東側において明らかに輝度低下していることが解る。次に、図 8 中の右上図はバンド 1~5 及び 7 を平均したものを示しており、最小自乗法による一次回帰直線を図中に示した。この回帰直線では東西方向の中央を 1 とし、東西両端で輝度比が $\pm 7\%$ 程度変化していることが解る。月の玄武岩から理論値で算出した方向性反射率による輝度低下率の 10%よりはやや小さいが、ほぼ予測とおりの結果となった。

この方向性反射率を補正するため、この回帰直線を用いて各画像の輝度補正を行い、再度、統計量を算出し、図 8 中の中央図のような東西方向の輝度変化がほぼフラットとなる結果を得た。

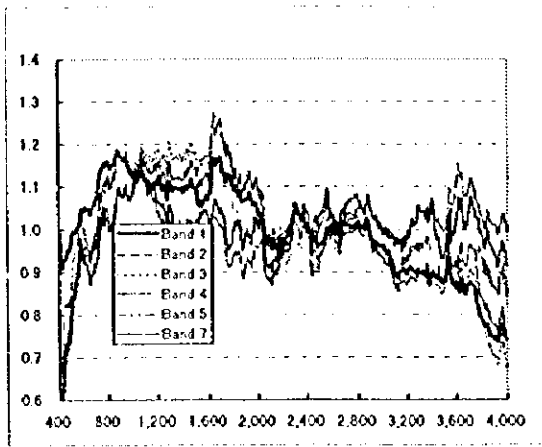
図 8 中の下図は行方向に算術平均したものであり、南北方向の輝度変化を表している。各行の統計量算出に用いたデータ数が約 4,000 個と少ないため、このグラフでは地形・物質の分布に影響され、やや凹凸の大きな平均値変動曲線となっている。このグラフでは図 8 中の右上のような明瞭な輝度勾配は認められず、南北方向に輝度変化が生じていないことが解る。

南北方向で平均値が変化する因子としては、緯度の差による入射光量差がある。この入射光量差については、既に述べたように各画像に対し地理的座標から入射光量補正を加えているため、ほぼ除去されていると考えられる。また、今回用いた画像の太陽方位角は $60 \sim 90^\circ$ であり、太陽は画像の東側に位置する。そのため緯度変化に応じた方向性反射率の変化は小さい。このような理由で方向性反射率による南北方向の変化を、検知することができなかったと考えられる。

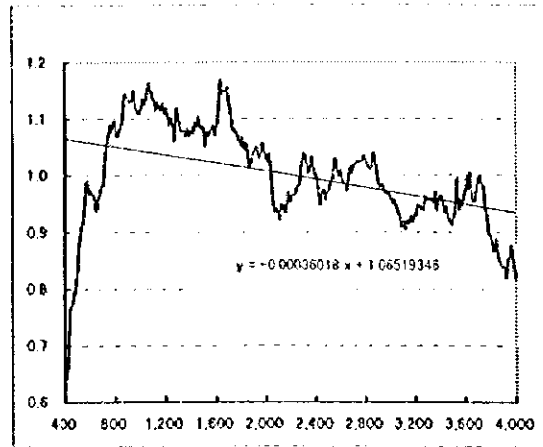
(5) フォールスカラー画像の作成

前述の放射量補正手法により、全てのシーンの輝度値は P232/R075 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。

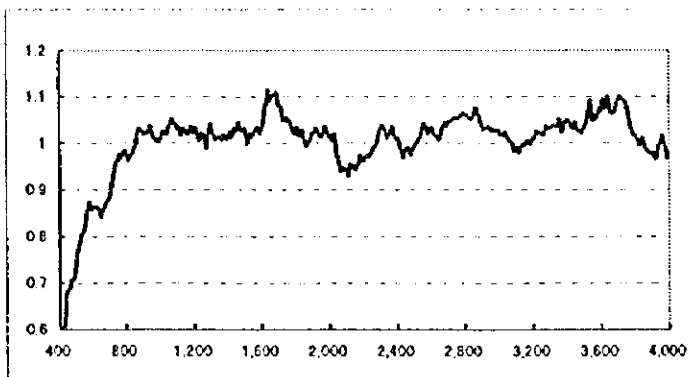
1. 輝度補正前 水平方向の輝度変化率【バンド別】



2. 輝度補正前 水平方向の輝度変化率【バンド平均】



3. 輝度補正後 水平方向の輝度変化【バンド平均】



4. 垂直方向の輝度変化【バンド平均】

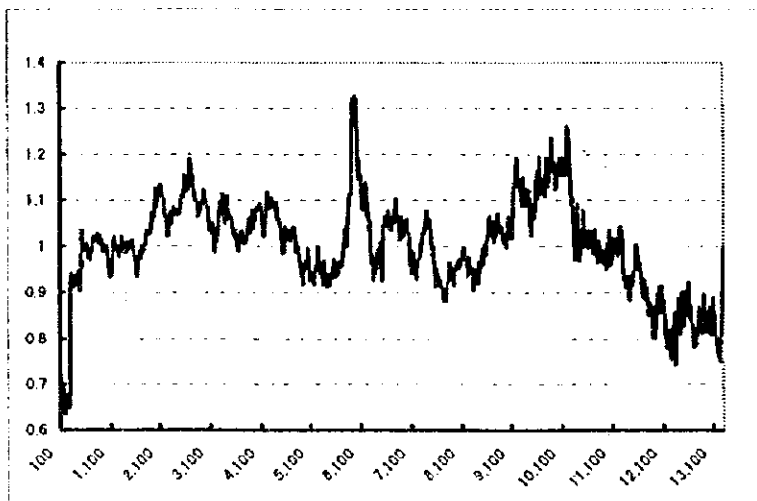


図 8 方向性反射率による輝度値変化

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、例えば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。対象地域には中性火山岩類が広く分布しているが、中性火山岩類中の地質構造判読にはバンド 1, 4, 5 の組み合わせが適するので、バンド 1, 4, 5 に青色、緑色及び赤色を割り当てた画像を作成した。

(6) 幾何補正

作成したフォールスカラー画像と地形図(縮尺 1/500,000)を用いて画像の UTM 座標への幾何変換を実施した。入手可能な最も精度の高い地形図が 1/500,000 と小縮尺であること、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。

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

4.2 比演算処理画像の作成

(1) 比演算の原理

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

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

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 4.1 の節(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。

(2) 画像の作成

対象地域にはポーフイリカ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、5/7、5/4 及び 3/1 の比演算処理が有効であることをチリ共和国エスコンディータ地域及びベルグワ・プログレッソ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 P233/R076 及び P233/R077 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。

(3) 主成分分析

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

地形特徴を表現するためには、地形特徴を反映するといわれているバンド 5 を用いる方法と、地形情報を反映するとされている主成分分析の第 1 主成分を用いる方法などがある。今回は主成分分析の第 1 主成分を用いた。

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

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

なお、幾何補正はフォールスカラー合成画像の作成(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。

4.3 モザイク画像の作成

(1) 画像圧縮と幾何変換

23 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 27,000 画素×52,000 画素×6 バンド=8.4GB と膨大なデータ量となり、さらに、フィルム出力の物理的制限を超えるデータ量となるためである。

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

(2) 画像接合

異なる時期に取得した画像では地表被覆物の変化、影の位置及び雲などにより、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、P231/R075～079、P232/075～083 及び P233/075～083 の縦に長い 3 つのモザイク画像を作成した。次に、P232 のモザイク画像を基準として、両側の画像との対応点を取り、ヘルマート変換による幾何変換後、上述の手法により画像接合を行った。3 つの Path を接合した画像は約 5,500 画素×13,000 画素の画像サイズとなった。

(3) 幾何変換

接合したモザイク画像は西経64～72°、南緯21～34°の大きな範囲のものであるため、地図投影にUTM系を用いることは不適當である。このため広範囲の中緯度地域の投影に適したランベルト正角円錐図法によって地図投影を行った。地図投影に当たり、地球楕円体はベッセル原子を用い、2標準緯線をS24°30'及びS30°30'、中央経線をW68°00'として地図投影を行った。なお、フィルム出力サイズの上限により、最終的に1画素を200mとして共一次内挿法によりリサンプリングを行った。