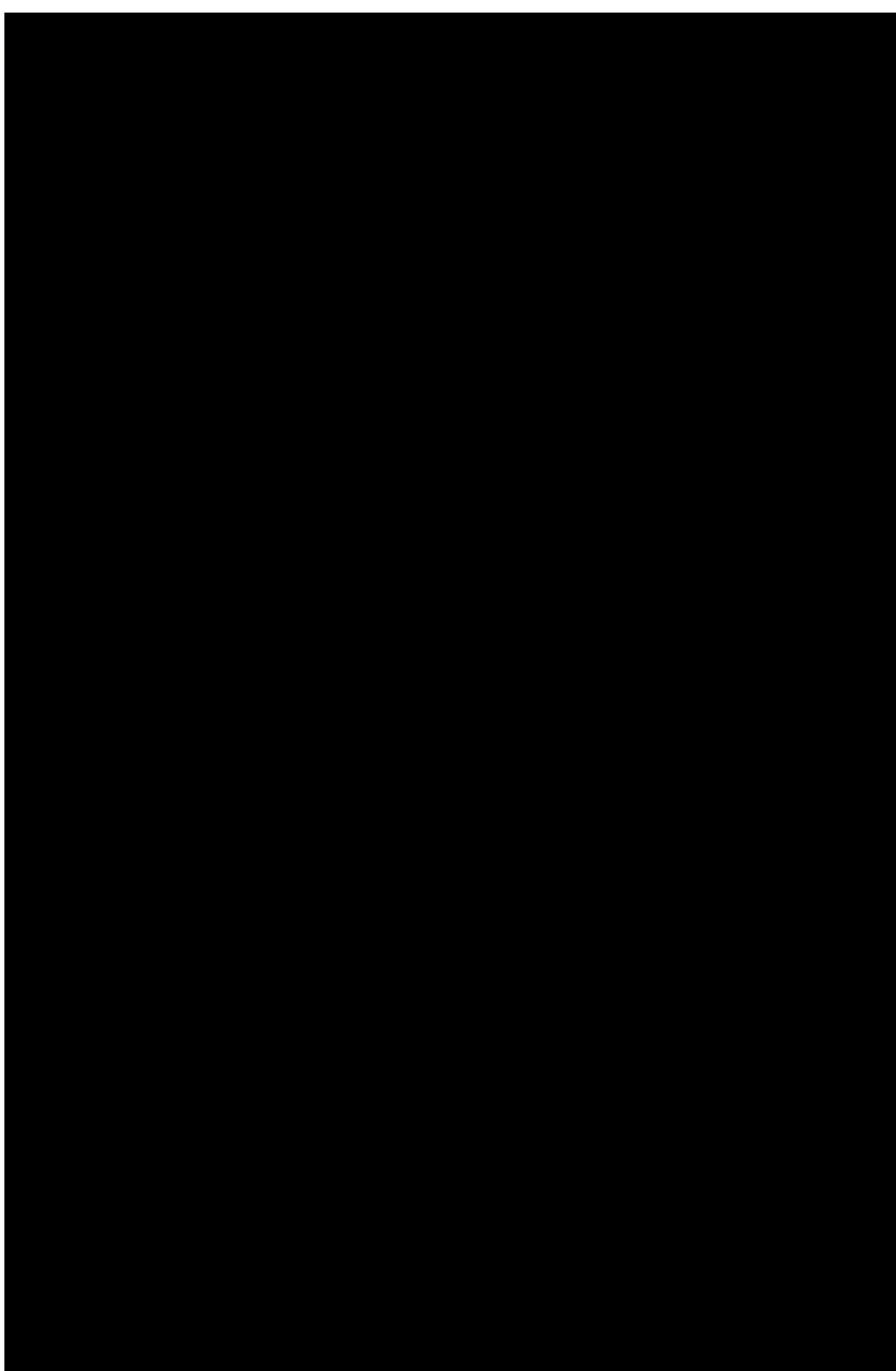


第10回 海外応用地質学調査団報告  
(ブラジル、ペルー)

平成13年8月

日本応用地質学会  
海外応用地質学調査団



## 目 次

1. はじめに 吉田鎮男 -----	1
2. 調査団メンバーおよび行程 秦野輝儀 -----	2
3. 第31回万国地質学会議 -----	6
3.1 IAEG 評議委員会報告およびIAEG 総会報告 井上大榮・秦野輝儀 -----	6
3.2 セッション22-1 地すべり研究の現状 藤本 瞳 -----	10
3.3 セッション22-2 Engineering and Environmental Geology 尾園修治郎-----	12
3.4 セッション22-3 Site Investigation Techniques and in situ Testing and Measuring 堀川滋雄 -----	14
3.5 セッション22-4 Engineering Geology Related to Large Civil Engineering Works 大村一夫 -----	15
3.6 セッション22-5 Geology in Large Urban Areas (大都市地域の応用地質) 丹羽 茂 -----	19
3.7 セッション26 Geological Education (地質教育) 有田正志 -----	21
3.8 コパカバーナの海岸砂 大村一夫 -----	22
4. ブラジル巡検 -----	23
4.1 イタイプダムの基礎地質について 神尾重雄 -----	23
4.2 イタイプダム築造の考え方 秦野輝儀 -----	26
4.3 ブラジルの電力事情とイタイプ発電所 高玉佳育 -----	29
4.4 イグアスの滝について 太田 保 -----	32
5. ペルー巡検 -----	34
5.1 ペルーの地震と活断層と地震予知と海外調査団のジンクスと 宇田進 -----	34
5.2 ペルー国の斜面災害 萩原博之 -----	36
5.3 インカの人々 大村一夫 -----	39
5.4 マチュピチュ遺跡の斜面問題 衛藤正敏 -----	42
5.5 遺跡保存と応用地質 熊倉 聰 -----	45
5.6 ナスカの地上絵 熊倉 聰 -----	49
5.7 ペルーの電力事情 秦野輝儀 -----	51
5.8 ペルー国の水資源開発 糸山 隆 -----	52
5.9 ペルーアンデスの地質 吉田鎮男 -----	55
6. おわりに 井上大榮 -----	85

## 1. はじめに

吉田鎮男(東電設計株)

地球の裏側のブラジルのリオデジャネイロで万国地質学会議(IGC)が開催されるということで、当初より私の研究テーマで有った氷河堆積物について発表する予定であったため、申し込みを行ない発表の準備をしていた。日本応用地質学会では第10回の海外応用地質学調査団がIGCに参加しながらアンデスの地質を巡検するとの会告が出されていることは承知していた。アンデス山脈のアンデシータ(スペイン語で安山岩)は私が世界で見たい地質の一つであった。

日本応用地質学会の井上国際委員長から団長で参加してもらえないかとの要請があり、団長とは一体どのようなことをすれば良いのかと質問をしたところ、食事の時に乾杯をしてもらえばいいんですよとの甘言に騙された形で団長を引きうけるはめになった。幸いにもこの調査団には私の大學にいた頃の教え子や社会で応用地質の分野で活躍している若者が参加しており、全く気の遣う必要の無いメンバーで非常に楽しい2週間であった。

聞く所によれば、この応用地質学会主催の海外調査団も今回が第10回とのことであり、その度に報告書を作成しているとのことであり、回を積み重ね、海外の経験を増やしたり、海外の活動を学び、それを報告書にして学会員に伝えることが重要である。

今回は、ブラジルのプレカンブリアンの地層、アンデス山脈の安山岩やイグアスの滝の大地形等の巡検に参加することが出来て、普段にはとても一人で出かけることができなく、この様な計画が企画されなければ、とても行くことが出来ない所である。

ペルーのアンデス山脈ではアンデシータという名前の由来の安山岩を目の前に見て、感動した。アンデス山脈をバスでどんどん登りつめ富士山より高い場所まで登り、アンデス山脈を深く心の中に刻んだ次第である。

団長としては団員の安全が最も肝要なことであったが、国情が全く異なった地球の裏側である遠い彼の地においても全員がまとまって行動し、大きな事故が無かったのがまず何より安心できたことである。

また、IGCの会場がリオデジャネイロからバスで出かけなければ成らないほどの時間かかる場所であったにもかかわらず、団員の多くが精力的に参加し、討論していた姿を見ると、わが国の応用地質学会の力をを見せた大会であると言えよう。

最後にこれらの計画を企画した日本応用地質学会国際委員会および裏方となって支えてくれた旅行社に感謝します。

## 2. 調査団メンバーおよび行程

秦野輝儀（電力中央研究所）

第10回海外応用地質学調査団は、表2-1に示す通り17名が参加し、平成12年8月5日から8月18日までの14日間、表2-2の行程でブラジルおよびペルーを訪問しました。今回の調査団では吉田鎮男先生に団長をお引き受けいただき、全行程に参加していただきました。なお、団員のうち4名はIAEG評議委員会出席等のため一日早く8月4日に成田を出発しました。

本調査団は、ブラジルのリオデジャネイロで開催された第31回万国地質学会議への参加およびイタイプダムおよびイグアスの滝の巡検、その後、ペルーに移動し、アマゾン川上流域に位置するクスコおよびマチュピチュの巡検およびアンデス山脈を深く刻むリマック川沿いの巡検を行いました。

今回の企画については、国際委員の尾園修治郎委員にご尽力いただいたところが大きく、また、現地では添乗員の勢田裕久氏により各種の段取りや安全確保が図られたことから、全員無事帰国することができました。

表 2-1 第10回海外応用地質学調査団 参加者名簿(敬称略、順不動)

H13/8/1現在

No.	氏名	所属
1	有田正志	広島大学附属高校
2	井上大榮	(財)電力中央研究所
3	太田保	(株)復建技術コンサルタント
4	尾園修治郎	(株)建設技術研究所
5	高玉佳育	北海道電力(株)土木部
6	丹羽 茂	ダイヤコンサルタント 東京事業部
7	大村一夫	(株)大和地質研究所
8	吉田鎮男 *	東電設計(株)第一土木本部
9	萩原博之	国際航業(株)東日本事業本部
10	熊倉聰	北海道開発コンサルタント
11	藤本 瞳	復建調査設計株式会社 地質調査部防災技術課
12	宇田進一	ネットワーク・地球
13	衛藤正敏	日本工営(株)コンサルタント国際事業部
14	堀川 滋雄	サンコーコンサルタント(株)関東支社地質部
15	糸山 隆	八千代エンジニアリング九州支店
16	神尾重雄	(財)ダム技術センター
17	秦野輝儀	(財)電力中央研究所
	勢田裕久	朝日サンツアーズ
	Antonio Guzman Martinez	INGEMMET
	German Valenzuela Ortiz	INGEMMET
	Jose Cardenas	クスコ大学

表 2-2 第 10 回海外応用地質学調査団 行程表 (1/2)

2000 年 8 月 5 日 (土) ~ 8 月 18 日 (金) · 14 日間

日	都市名	時 間	交 通	行動予定／宿泊／食事条件	
8 5 土	成田発 ロサンゼルス着 ロサンゼルス発	19:00 12:40 14:00	RG 837	・夜、ヴァリグブラジル航空にてロサンゼルス経由 リオデジャネイロへ。 (NRT/LAX 09:40分) (LAX/RIO 13:20分) 〔機内泊〕	機 機
8 6 日	サンパウロ着 サンパウロ発 リオデジャネイロ着	05:40 06:25 07:20	RG 837	・到着後、ホテルへ ・万国地質学会議のレジストレーションの実施 〔リオデジャネイロ泊〕	機 X X
8 7 月	リオデジャネイロ 滞在	終 日		・終日、コンgresに参加。(シャトル利用) ・夕方、国際応用地質学会 (IAEG) 総会出席 〔リオデジャネイロ泊〕	朝 X X
8 8 火	リオデジャネイロ発 イグアス着	朝	RG 168	・終日、空路イグアスへ。 着後、イグアスの滝とイタiapダムの巡査。  世界三大瀑布の一つであるイグアスの滝の巡査を 実施した。 イタiapダムはブラジルとパラグアイの間を流れ るパラナ川に位置し、世界最大の発電能力 (1260 万 kw) と世界最大の総コンクリート量 (1182 万 m <sup>3</sup> ) をもつダムであり、完成後における現地の地 形・地質状況を把握した。 〔リオデジャネイロ泊〕	朝 X X
8 9 水	リオデジャネイロ 滞在	終 日		・終日、コンgresに参加。(シャトル利用) 〔リオデジャネイロ泊〕	朝 X X
8 10 木	リオデジャネイロ 滞在	終 日		・終日、コンgresに参加。(シャトル利用) 〔リオデジャネイロ泊〕	朝 X X
8 11 金	リオデジャネイロ発 リマ 着	17:30 22:45	RG 886	・夕刻、空路リオデジャネイロよりリマへ。 ・着後、ホテルへ。 〔リマ泊〕	朝 昼 夕
8 12 土	リマ 発 クスコ着	朝 午前	TJ 233	・朝、リマよりクスコへ。 ・着後、クスコ周辺の地質巡査。  アンデス山脈東部山脈 (Cordillera Oriental) の中 心地における地質巡査を行った。巡査は、クスコ大 学の Dr. JOSE CARDENAS ROQUE 氏による案 内により、二疊紀から第三紀の堆積岩類から構成さ れるクスコ周辺の山地での巡査を行った。 〔クスコ泊〕	朝 昼 夕

表 2-3 第10回海外応用地質学調査団 行程表 (2/2)

日	都市名	時間	交通	行動予定／宿泊／食事条件	
9 8/ 13 日	クスコ発 クスコ着	終日	列車等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・列車とバスにてマチュピチ方面へ。</li> <li>・終日、アンデス山脈東部山脈の巡検。</li> </ul> <p>クスコからマチュピチの街道沿いにクスコ大学の Dr. JOSE CARDENAS ROQUE 氏の案内で巡検を行った。街道に沿って古生代から中生代の地層とそれらに貫入する花崗岩類が分布しておりアンデス山脈東部山脈の代表的な地質と地形を確認した。また、マチュピチは、第三紀の花崗岩の地山からなり、1995 年から斜面崩壊が発生しており、世界的に大きな問題となっている。この遺跡はユネスコの世界遺産であることからそのモニタリングと保全対策の必要性が検討されている。現地では、斜面崩壊の状況およびその周辺の地形・地質状況について応用地質学的観点から踏査を行った。</p> <p>[クスコ泊]</p>	朝 昼 夕
10 8/ 14 月	クスコ イカ リカ マ 着	午前 午後	TJ 232 チャーター機 チャーター機	<ul style="list-style-type: none"> <li>・空路クスコよりリマを経てイカへ。</li> <li>イカ近傍に拡がる砂漠とナスカの巡検</li> <li>・着後、リマ市内。</li> </ul> <p>電源開発会社渡部ペルー事務所長から情報収集</p> <p>[リマ泊]</p>	朝 昼 夕
11 8/ 15 火	リマ滞在		バス	<ul style="list-style-type: none"> <li>・終日、アタルヘアダムおよびチクリオ地質巡検の巡検。</li> </ul> <p>リマ市上下水道公社（アタルヘヤ）の施設見学およびアンデス山脈西部山脈を刻むリマック川沿いのチクリオ峠までの巡検であり、応用地質学的課題および地質学的現象の一端に触れることを目的に実施した。INGEMMET（ペルー共和国地質調査所）の Dr. ANTONIO GUZMAN MARTINEZ 氏の案内による巡査であった。</p> <p>アタルヘヤの施設は、リマの水資源開発において重要な位置を占めており、その見学を行った。その後、アンデス山脈を代表する西部山脈(Cordillera Occidental)の地質と地形について把握するため、サンマテオ(3439m)、チクラ(3795m)を通過して、その後、リマに引き返した。</p> <p>[リマ泊]</p>	朝 昼 夕
12 8/ 16 水	リマ ロサンゼルス着	01:55 08:30	LA 600	<ul style="list-style-type: none"> <li>・夜中、空路ランチリ航空機にてロサンゼルスへ。</li> </ul> <p>[ロサンゼルス泊]</p>	機 機 X
13 8/ 17 木	ロサンゼルス発	10:05	RG 836	<ul style="list-style-type: none"> <li>・午前、ヴァリグザジル航空機にて帰国の途へ。</li> </ul> <p>[機内泊]</p>	朝 機
14 8/ 18 金	成田着	13:35		<ul style="list-style-type: none"> <li>・着後、通関、解散。</li> </ul>	機

# 参 加 報 告 要 約 版

## 3. 第 31 回万国地質學會議

次頁以下には調査団にご参加いただいた方々にご執筆いただいた報告書の「要約版」を掲載しております。

この要約版は、国際委員会の編集担当者がその責任において要約したもの

です。

本文の全文、またここでは割愛させていただいた貴重な写真や図表などの  
全ては本編に収録しておりますので、どうかご理解のほどをお願いいたします。  
す。

### 3.1 IAEG 評議委員会報告および IAEG 総会報告

井上大榮・秦野輝儀（電力中央研究所）

#### 3.1.1 IAEG 評議委員会報告

##### (1) 日時・場所

日 時：2000年8月5日（土） 9：30 - 19：30

場 所：ブラジル連邦共和国リオデジャネイロ市カソリック大学

##### (2) 主な議案と討議内容

###### 1) 開会宣言

略。本編をご利用ください。

###### 2) 参加者の確認

略

###### 3) アグリーメントの確認

略

###### 4) 1999年カトマンズにおける評議委員会の議事の確認

昨年（1999年）ネパールで行われた評議委員会に関する報告書（事前に配布）について承認された。

###### 5) 会長報告

IAEGには、次の3つの問題がある。

第一の問題は、支払いを行わないナショナルグループの存在である。

2番目の問題は、コミッショナの仕事についてである。すなわち、次の2年間について、すべてのコミッショナにおいて、レポートと印刷物の出版をすべきである。さらに、コミッショナとワーキンググループは、その分野の最新の技術や手法を用いることでその分野において積極的役割を担うべきである。

3番目の問題は、IAEGの運営についての問題である。昨年の会議で、会則（STATUTES）と細則（BY LAWS）の改正について提案があった。これについては、本日の議題12において議論したい。

###### 6) 事務局長報告1（1999年9月から2000年7月）

王思敬 IAEG会長から代理として報告があり了承された。主な内容は以下の通り。

###### ①今回の表彰は以下の通りとなった。

Hans-Cloos Medalは、前会長の Prof. Paul G. Marinos に、Richard-Wolters Prizeは、Dr. Jean-Alain Fleurisson(フランス)、Dr. Tomochika Tokunaga (日本)、Dr. Jian Zhao(シンガポール)の3名がノミネートしたが、投票の結果、Dr. Jian Zhaoに決定した。

②コミッショナ (C1, C10, C14, C16, C17, C18) については、その目的を明確にして

再定義を行うこととなり、2002年のアフリカのダーバンで開催される第9回IAEG コングレスまでにそれを明らかにする方向となった。コミッショナの活動についてニュースレターVol. 28No. 1 (June 2000)にレポートを掲載した。

③会則 (STATUTES) と細則 (BY LAWS) の改正について、前会長から提案があり検討が行なわれ、中間の報告書が配布された。

7) 会計担当による 1999 年 会計報告 2000 年予算 2001 予算の予測

会費を 2002 年より EURO 建てとする検討では、フランス・フランとの関係について、フランス・フランの端数等が繰り上げられ、若干の下げとなる。

8) 副会長報告

各地区の Vice President から報告があった。アジア地区については以下の通り (I. Komoo)

アジアでの最大の話題は昨年 9 月、第 3 回アジア応用地質学シンポジウムをマレーシアで開催されたことと、同時期に、ネパールにおいて国際シンポジウムが開催されたことで、活発に活動している。また、来年 9 月には、インドネシアで第 4 回アジア応用地質学シンポジウムの開催が予定されている。活動報告は、日本、マレーシア、中国、シンガポールの 4 加国からあり、いづれも活発な活動が行なわれていることが報告された。

9) 各委員会ワーキンググループ報告

略。本編をご利用ください。

10) 編集委員長からの IAEG Bull の報告

ほとんどが英語での投稿が多いことから英語だけの論文集にすればより発行数が増やせると遠まわしの表現で報告された。引用文のインデックスを作成することとしたとの報告があった。

11) ニュースレターその他の刊行物の報告

特に質問等の議論なし。

12) 会則、細則の改正

以下の 3 項目について議論を行った。

① 名誉会員に関する条項の設置

② 地域別のシンポジウム開催に関する条項の設置

③ 会長の選挙は会長就任の 2 年前に実施し、前、現、次期会長の 3 人で運営していくきたい。

新たに設けられる①と②については、全会一致で了承された。また、③については次回のコングレスまでにワーキンググループでさらに内容を詰めることとなった。

13) IAEG スポンサーによる今後のシンポジウムの予定

略

- 14) IAEG に関係した IUGS 他の組織(AEG, ISRM, ISSMGE, IAH)  
略.
- 15) 各国ナショナルグループの活動報告:支払い状況など  
略.
- 16) その他  
略.
- 17) 次回の執行委員会と評議委員会  
  フィンランド（2001.8.6. -10, Helsinki, Finland）とロシア（2001.6.30-8.2, Ekaterinburg, Russia）から立候補があり、投票を行った結果、26対6でフィンランドにおいて開催することになった。

### 3.1.2 IAEG 総会 (GENERAL ASSEMBLY)

#### (1) 日時・場所

日 時：2000年8月7日（月）16：00－17：25

場 所：ブラジル連邦共和国リオデジャネイロ市リオセントロコンベンションセンター

#### (2) 議 事

王思敬 IAEG 会長と会計担当の Pierre Potherat 氏などから以下の報告があった

##### 1) 一般情報と活動報告

略。

##### 2) 次回コングレス

次の 2002 年 9 月開催の第 9 回 IAEG CONGRESS が南アフリカのドーバで開催される予定との報告があった。

##### 3) 評議委員会での会則改正

略。

##### 4) 活動成果

略。

##### 5) 今後の予定

略。

##### 6) 財政状況

IAEG の財政状況の報告があり、良好な状況であるとの報告があった。

##### 7) 地域報告

南アフリカ地域、北アメリカ地域、北・南ヨーロッパ地域、アジア地域（いくつかコンタクトできない問題）の報告があった。

特に注目すべき報告としては、北・南ヨーロッパ地域（33ヶ国）の動きである。

9月に開催されるハノーバーのシンポジウムにおいてオールヨーロッパに関する打ち合わせがもたれ、2から3年後に開催を予定している4年に1回のヨーロッパコンファレンスについて討議が予定されている。また、EU統合に関連した動きとして、ENGINEERING GEOLOGY の定義と位置付け、各種基準・規格への参画（CEN）、環境問題を含む大学教育等について議論する予定であり、興味ある人への参加を呼びかけていた。

##### 8) 褒賞の授与式

事務局長報告のとおり、本総会において褒賞がそれぞれ授与された。

### 3.2 セッション 22-1 地すべり研究の現状

藤本睦（復建調査設計株）

#### 3.2.1 発表論文の概要

##### (1) 地質データバンクとモニタリング網を応用した Pienontese 地域の管理（イタリア）

この発表では地質データと各種モニタリングの重要性を述べている。対象地域では、実験的なシステムとして、250地点の傾斜計や水位計、TDR、GSM、微小地震計などの新しい技術も取り込みながら観測を行っており、大きな成果を上げている。手法は日本と良く似ているようである。

##### (2) Eiblschrofen の岩盤崩壊におけるモニタリングと防止対策（オーストリア）

対象とされる崩壊規模は、約45万m<sup>3</sup>で、崩壊を完全に止めることは難しいと判断されたため、容量約60万m<sup>3</sup>の防止堰堤が建設されている。今後は、全体のマネジメントも含めた対策工評価が必要となろう。

##### (3) 三峡ダム貯水域における Huangtupo 地すべりの構造研究（中国）

この地すべりは高さが560m、地すべり土塊は4×107 m<sup>3</sup>にも及ぶものである。この巨大地すべりの機構解析には、「斜面を構成する地質の調査」と「変形の歴史の復元」が重要であるとの方針から調査・解析が進められた。その結果、多くの2次すべりによって形成されたものであることが明らかとなった。

##### (4) 地すべりおよび土石流を引き起こす降雨（ブラジル）

土砂災害を引き起こす限界降雨（実効降雨）についての研究である。降水量と降雨持続時間によって、災害が発生する限界ラインを提案している ( $P=21.1(t)^{0.48}$ : 降水量(mm) t: 降雨持続時間(h))。

##### (5) 巨大地すべりの地質的・水文的な管理（スペイン）

大規模な地すべりの変動を理解するためには、詳細な地質的、水文的情報を入手することが重要である。Benameli村での地すべりは、長さ1000mの区間で、何世紀も大災害が続いている。1997年の大災害を契機に始められた、本格的な調査・解析についての紹介。

##### (6) 地すべり変動定数の研究（ウズベキスタン）

12000以上の地すべり地域を持つウズベキスタンでの、黄土と粘土の地すべりにおける変動特性の研究である。それぞれのすべりの1日当たりの変動量について、特に降雨量と地下水位の関係から述べている。その特徴は、日本の地すべりに似ているように思われた。

全体を通して、世界各国で行われている研究は、対象は様々であるが、内容は日本のものと全く変わらない。特に新知見と思われるものはなかったが、モニタリン

グの重要性が強調されているようである。このことは単に地すべり機構を把握するためだけでなく、警戒・避難の目安としての利用も考えられている。

### 3.2.2 斜面災害についての考察

#### (1) 各国の動き

大規模な災害が予想される地域では、「防災」ではなく「避災」が重要視されており、今後の災害対策の主流となるものと思われる。

したがって、モニタリングにおいてもその精度向上と同時に、リアルタイムあるいは伝達方法の開発が進められている。

一方、どこで、何を測定すれば良いか、誰にどこまで、いつ伝えれば良いかなどの事項については、技術者の判断が必要である。特に、現場を良く観察し、適切な調査・対策工を提案するという意味では、応用地質学に通じた者の責務は重大である。

#### (2) モニタリングの課題

被災を軽減するためには、モニタリングに次のことが求められている。一連の流れの中でまとめてみる。

- ①現場を知ること（どこが危ないのか、何が起きるのか）。
- ②どのようにモニタリングするか。
- ③今後をどのように予測するか。
- ④どのように情報伝達するか。

現在は、ややもすれば②の技術に偏りすぎており、もう少し基本的な所をしつかり抑える必要がある。

#### (3) 応用地質学の役割

斜面災害に対する調査は、①機構を解明するアプローチと②動きを探り予測するアプローチの2つがある。これらを踏まえて、予知が進んでいくものと考えられる。応用地質学の役割としては次のようなことが考えられる。

- ①基礎調査
- ②災害の予測（モニタリング、予測解析）
- ③対策工の検討（発生前・後）
- ④情報伝達

現段階で我々に最も欠けているのは、伝達技術と伝達内容、伝達先の選定などを含めての「情報伝達」であろう。

### 3.2.3 コパカバーナ海岸砂の粒度分析

コパカバーナ海岸で採取した砂について粒度分析を行った結果は、最大粒子径 0.85mm、D<sub>50</sub> で 0.23mm、D<sub>10</sub> で 0.14mm、均等係数 1.9 を示し、よく分級された細砂であった。

### 3.3 セッション 22-2 Engineering and Environmental Geology

Legal Instruments to Control of Major Construction Projects , Land Use Planning ,  
and Exploitation of Construction Materials-

尾園修治郎(株建設技術研究所)

本セッションは副題にもあるように応用地質に関連した「建設（経済）活動に伴う環境へのインパクトを法的手段によってどのようにコントロールするか」という観点からの討議をねらったセッションであるが、必ずしも副題にある”法的手段”に関連したものばかりではなく、経済活動が地質環境に与えるインパクトについて応用地質学的見地から広く取り上げられているように思われる。ポスターセッションで取り上げられているインパクトの要因や対策を整理すると図 3.3-1 のようになる。次に口頭発表では以下のような発表があった。

Oliveiro R.A.M : 低開発地域にとって水資源の開発は非常に重要な問題である。そのような地域では単に環境へのインパクトをヒステリックに強調するのではなく、社会的・経済的な便益／コスト比を十分に検討する必要がある。

Arnold M. : 産業有害廃棄物、放射性廃棄物、鉱山廃棄物の処分場についての比較検討。

Marker B. : (発表タイトル変更) 「SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF SMALL SCALE MINERAL EXTRACTION OPERATION」

地質環境や生活環境へのインパクトを最小にするために、どこをどのように開発し、それを使用後にどのようにリハビリするのかということが問題になる。特に使用後にサイトが放棄される際のために、上記の検討に使用した基礎データの収集・蓄積・モニタリング・データ保存などを規制する、[INTEGRATED ENVIRONMENTAL INFORMATION SYSTEM]が必要である。

Marinos P. : 建設請負契約の面からみた、トンネル建設に際しての地山の応力解析と掘進方法の検討。

West T.R. : 法令によって原石山、炭坑、固体廃棄物処理場などの棲み分け (ゾーニング) を行うことにより地域生活環境へのインパクトを避けることができるが、生活圏の拡大に伴い棲み分けが難しくなりつつある。このため、地域に Zoning Board を設けて検討している例などの紹介。

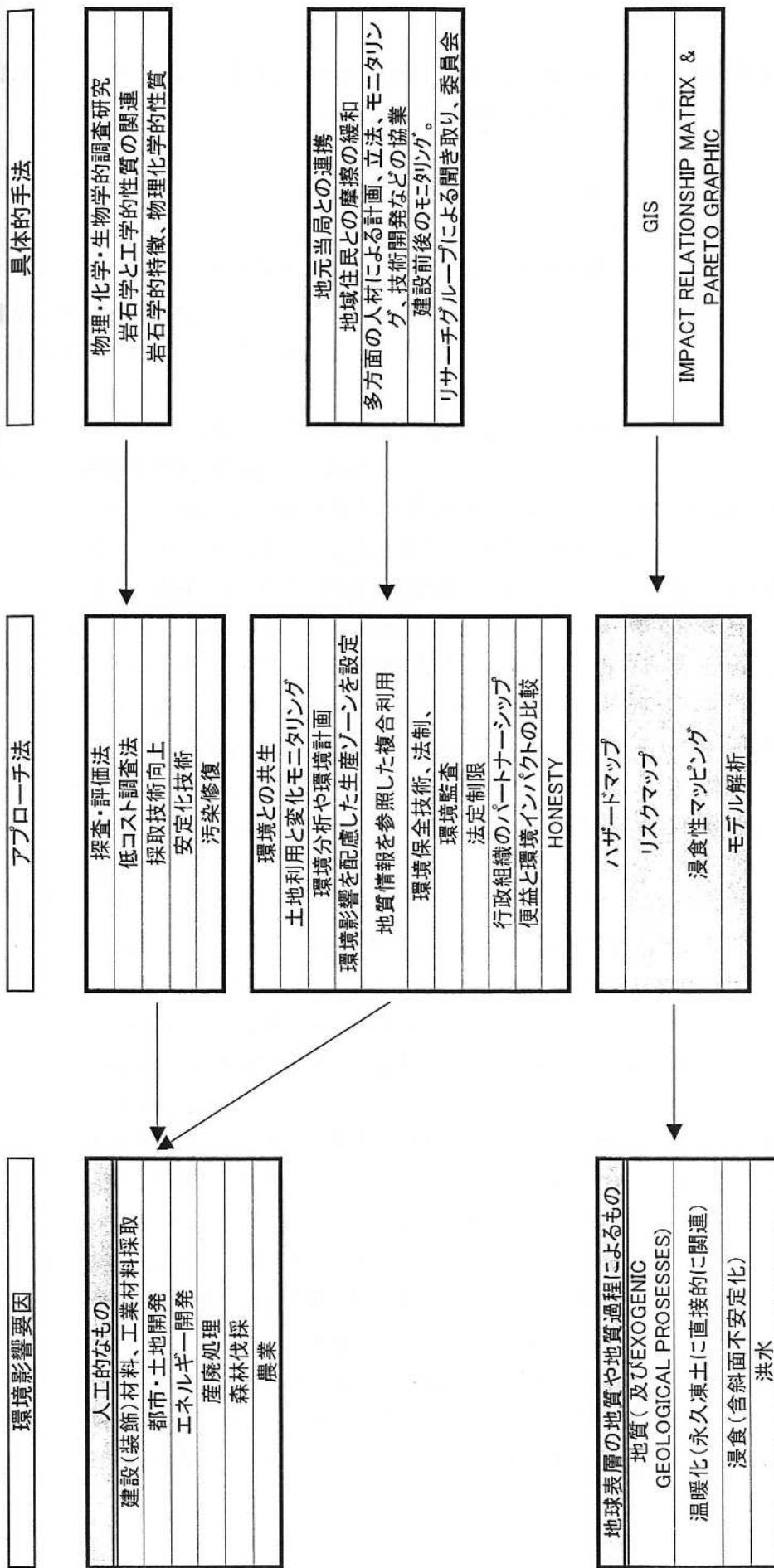


図3.3-1 セッション22-2の内容(地質環境への影響要因と保全)

### 3.4 セッション 22-3 Site Investigation Techniques and in situ Testing and Measuring (現場での調査技術及び孔内原位置試験・計測)

堀川 滋雄 (サンコーコンサルタント(株))

このセッションは、土木地質の話題が中心となり、口頭発表 5 編、ポスターセッション 36 編が登録されていた。

以下に口頭発表における概要、感想を述べる。

- (1) ポルトガル中央部、CONDEIXA の KARSTIFIED LIMESTONE TUFFS 上に計画された建築物の敷地調査法(ポルトガル)

三階建て構造物の基礎部分を掘削した際、大小数ヶ所の溶食空洞が見つかったため、踏査・貫入試験を実施して対策を施した事例報告である。

地中に分布している空洞部分の調査は、一般にはレーダー探査、電気探査、重力探査等の実施が考えられる。日本ならば、面的な結果が得られる探査とともにボーリング、サウンディング等の線的情報を組み合わせるところである。しかし今回は、費用対効果の面から踏査と貫入試験を採用した、との事であった。

地表面からの探査は、空洞規模が小さければ絞り込みが難しい。今回の場合は空洞が建物の基礎部分に分布することから、その位置を正確に(三次元的に)求めるには、クロスチェックを必要とする面的情報よりも、実際に確認できる線的情報を優先させたのだろう。

- (2) 大深度孔内での地質実験 (ロシア)

本発表は、Kola 半島内及び Vorotilov における大深度掘削孔を利用して、様々な検層(温度、電気、比抵抗、音波、放射能、キャリパー)を実施した結果報告である。

時代によってそれぞれ異なる堆積物の物理特性(温度、音波、電磁波、放射能等)及び化学特性が把握できたが、最も有効なパラメーターは孔内温度と泥の組成、との事であった。

大深度掘削は、日本でも世界との共同研究として、種々実施されているが、本発表のような数 Km の掘削を伴う基礎研究は、日本の最近の社会・経済情勢と規模からして、なかなか実現できない内容であると感じた。

- (3) サンパウロ盆地の堆積物を対象とした表面波のスペクトル解析適用事例 (ブラジル)

本発表は、地表面から表面波のスペクトル解析を実施し、ボーリング孔内における検層結果、あるいは孔間検層結果と比較した事例報告である。

検層と比較して地表面で作業できることから費用、時間、手順が節約でき、各土層の層厚や動的剪断変形特性を容易に把握できる手法である、との事であった。

日本では表面波に着目したアレー探査方式による地下構造調査(S 波)が実施され

ている。探査深度は数十mから最大数千m程度まで適用可能であり、S波速度構造の推定がなされている。

本発表のように、地表面からの面的探査とボーリング孔を利用した検層とのクロスチェックを経験的に重ねる事で、表面波スペクトル解析の精度は向上していくものと考えられる。

(4) リゾート開発敷地内における活断層調査（カリフォルニア州、U.S.A.）

本発表は、1,200ha の開発予定地に伏在する活断層の分布が推定されていたが、ボーリング調査、トレンチ調査等で活断層ではないことを証明した事例報告である。

調査は、反射法地震波探査、オールコアボーリング、コーンペネトロメーター（CPT）などにより断層の分布上限範囲を規定し、最後に延長 60m、深さ 11m のトレンチによって少なくとも 3 万年以降は活動していないことが明らかにした。このようにして 6 千万円の本調査費用をかけて “非活断層” で有ることを証明した結果、土地の価値は 2,000 万ドル（¥24 億円）に増加した、との事であった。

要は、地質調査に掛かる費用は実利の 40 分の 1 なのだから、開発業者は我々の潜在能力をもっと活用して土地利用に生かすべきであり、地質技術者としてもひとつの進むべき商売の方向性がそこにある、という重要な実例の紹介であった。

(5) 地震による道路の損害評価（コロンビア）

本発表は、地震によって道路に隣接する地すべりが滑動して被害が生じたため、今後の対応策として、道路の規格を考慮（幹線道路、地方道）して隣接する地すべりブロックの大小と、必要となる対策工事を 3 段階に評価し、20 万分の 1 の図面に記載した事例報告である。

一般市民に周知させ、注意を促す目的を有するハザードマップの作成・公表は防災の面で重要であるが、恒久的な対策を危険度の高い順に施すには、その定量化が必要であり、今回の発表でもそれが伺われた。

本セッションは現場における調査技術が主要テーマであった。発表者の国籍はそれぞれ異なるが、技術的な中身・調査手法は日本で通常実施されている業務内容と大差なく、特に目新しい機器等を使用した調査事例等の内容は見あたらなかった。日本では通常業務においても新開発機器・手法の導入が盛んであり、研究発表会等では、合理的な結論が得られる手法の一つとして、結果的に成功した事例の発表が多いが、本発表会はいずれもオーソドックスな内容であった。

### 3.5 セッション 22・4 Engineering Geology Related to Large Civil Engineering

大村一夫(株)大和地質研究所)

8月6日(日)、会場で登録を済ませました。そして、厚いプログラムを受け取りました。まずはセッション 22-4 をみるため、プログラムを聞きました。私の受け持ちがセッション 22-4 でした。8月11日(金)の午前中にセッション 22-4 の個人講演があるはずです。どれだけの講演を聞かねばならぬのか、どういう内容であるかが気になっていました。

ところが、そこにはコンビナー2人の名前が出ているだけで、講演者の名前も講演題目も無く、Keynote speakers to be appointed by Conveners と記されているだけでした。拍子抜けとは正にこの様な場合に使う言葉であったようです。

8月11日(金)は、17時30分リオデジャネイロ発のヴァリグブラジル航空機でリマへ出発する日なのです。13時30分に荷物を室外に出さねばなりません。朝6時45分起床、7時朝食を済ませ小雨が降る中、7時45分会場に向かうバスに乗車しました。モタモタしていると飛行機に乗り遅れそうです。私が一人で会場に向かうのを心配した太田保氏が同室のよしみで同行してくれました。バスは8時45分会場に着きました。外は豪雨となっており、雨音が会場広場の屋根を打ち、話し声も聞こえぬほどでした。

会場のG7室に出向いたら、会場変更で1A室に変更っていました。1A室がどこにあるのか分からず、プログラムの会場案内図を見ながら探しました。A1室はあったのですが1A室は見当たらないのです。案内図にもなく、1AとA1が同一であるのかどうかも分かりません。あちこち歩き回った結果、展示会場の奥の中二階に1A室を見つけ、講演開始(9時)の5分前に入室しました。

会場入口に講演者リスト及び講演題目が、A4版の紙にワープロ打ちで張り出されているだけでした。太田・大村の二人の日本人を除くと、会場係らしい人1人とコンビナーらしき人1人がいるだけでした。定刻を過ぎても人が集まりません。カメラマン2人とそのスタッフ1人と受付1人を含めて7人になった9時25分に講演が始まりました。

私は、遅くとも13時にはホテルに到着しておらなければならず、そのためにはバスは11時45分に会場をスタートしていくれねばならず…逆算を開始しました。

バスの出発時刻は、多分、その頃にホテルへ戻る人は少ないので、定刻になんて、ある程度人数が集まるまでは出発しないだろうと判断し、遅くとも11時には会場を出ることに決めました。10時30分から11時まではコーヒーブレークです。コーヒーブレークになってから消えれば人目につかないだろうと思ったのです。

講演者は5名です。プログラムでは9時講演開始で10時30分から11時までのコーヒーブレークをはさんで、12時まで講演が続くとなっていました。

講演が始まるとポツリポツリと人が増え、私たちが退室する頃（11時）には16名に増えました。遅れてきた人は1A室を探すのに手間取ったのだと思いました。

最初の講演者は、コンビナーの一人であるポルトガル人で里斯ボン港のバスコダガマ橋建設の話でした。変動帶上に建設する橋なのに、基礎は基盤を覆う砂層（平均深度は底面下7.5m～8mと言っていました。）に設けたという話でした。未固結堆積物の厚さは大したもので無いのに、どうして基盤まで掘らないのだろうか、大丈夫なのだろうかと思いながら聞いていました。基礎はNPTの値で決められたようでした。太田氏に、NPTという語がN値のことだと教えてもらいました。聴衆が少ないと時間がありすぎたのでしょうか、講演者がコンビナーの内の一人であったためなのか、質問なのか雑談なのか分からぬ様なやりとりが続きました。2人目はギリシア人でアテネの地下鉄建設の話でした。事前調査で遺跡が地表下10mまであるのでその下をトンネルマシンで掘る事にしたとのことで、遺跡を保存するため立坑の位置の選び方等に配慮し、コースも変更したといった話があったので、感心していましたが、スライドではトンネルマシンが地表に突き抜けたシーンや地表が陥没し建物がトンネル内に落ち込み、その中にトンネルマシンが見えているシーンが次々に写し出されたのには唖然とさせられました。

遺跡が眠る地表下10mまでの区間は人の手が加わり埋め戻された部分だから、その直下に空洞をあければ、当然天盤は自重で落下するでしょうし、埋め戻した部分と自然状態の部分との境界付近をトンネルマシンで掘れば、マシンは抵抗力の弱い埋め戻した部分の方へとずり上がってゆくのも当然でしょう。

地質屋が遺跡を含む部分の深さを求め、掘削深度やルート変更さらには立坑の位置選択などに活躍したとしても、埋め戻し部分直下にトンネルを掘らせた以上、雑な仕事をした土建屋を非難してみても、おまえも同罪と言われるのが関の山を感じました。

コンビナーはコーヒーブレークも関係なく、質問なのか雑談なのか分からぬ様な話を次々に取り上げていました。時間つぶしだったのかも知れません。時計は刻々と11時に近づきますが席を立つきっかけがつかめません。聴衆は少ないので、私たちの座った列では、出口との間に数人の人が座り、こっそり抜け出すことが出来ない状況でした。

3人目はアメリカ人で原子力発電所建設などでは第四紀地質学が役に立っているといった話でした。スライドには、写真に後から書き込んだのか、手を加えない写真なのかは分かりませんが、銀色に光って相接して並ぶ、底の丸い金属製のコップを伏せたような2つの建造物が写っており、それを中心に何百mかのトレントが掘られていました。説明ではそのトレントの両端部分に活動性の高い断層が発見されたので、この原子力発電所の建設設計画は中止されたといっていました。本当なのだろうか、あの2つの銀色のコップを伏せた様な建造物は何だったのだろうか、まさかリアクターではなかろう、などと不思議に思いました。この話が終わり、会場がザワザワした感じになったので席を立ち、バスに急ぎました。

外は土砂降りで雨音が屋根に反響していました。バスはなかなか発車しません。11時20

分になって、やっと出発しました。大雨なのでバスはルートを変え、乗客をそれぞれのホテルに降ろしてゆきました。ホテルに戻った13時には雨もあがっていました。どうにか間に合ったと、太田氏と二人で胸をなで下ろしました。

付け加えますと、8月9日（水）の午後はセッション22-4のポスターセッションでした。プログラムを見るとIブースを中心に23の展示があることを知り、出かけてみて驚きました。23の展示の内に18がキャンセルになっていました。また、Iブースは全部で49の展示がなされるスペースがあったのですが、そこに展示されていたのはセッション22-4の展示物5つだけだったので。Iブースは表側に1~24番が裏側に25~49番が配置されていたのですが、5つの展示は表側にあり、裏側には1つの展示もありませんでした。

これがブラジル風なのでしょうか？いや、現代風なのでしょうか？郷に入れば郷に従えと言う諺を思い出させてくれて、一件落着と致します。

### 3.6 セッション 22-5 Geology in Large Urban Area(大都市地域の応用地質)

丹羽 茂 (株ダヤコンサルント)

アブストラクトの内容からテーマ別に整理すると次のようになる。

- ・大都市地下の地質（概論）：1編
- ・都市計画（道路、地下鉄、駅、産廃など）：6編
- ・環境地質（沿岸変化、地下水化学など）：8編
- ・地質関連災害（沈下、斜面崩壊、地すべりなど）：11編
- ・地震関連災害（リスク、災害調査）：5編
- ・地下構造調査（物理探査など）：3編
- ・都市地盤図（地盤構造など）：3編

以下に、ポスター SESSION で議論（実際には教えてもらったことが多い）した内容等を含め、地震リスク評価と地震災害評価に関する 2つの内容について概要と感想を記述する。

#### (1) 都市部の地震被害評価とリスク評価（ロシア）

震度 9（気象庁震度階 6 弱～6 強に相当）以上の地震が想定されているコーカサス地方北部、サハリン、カムチャッカ半島、千島列島とバイカル湖西岸の地域の主要な都市部を対象とした地震被害の予測とリスク評価の実施例。

リスク評価は、次の要因 (factor) から構成されている（図 3.6-1）。

- 1) 自然的要因 (natural)
- 2) 人工的要因 (technogenic)
- 3) 社会的要因 (social)

上記の要因には、直接的あるいは間接的リスクが想定されている。それぞれの直接的リスクと間接的リスクの構成（総合的リスク；これにはコスト損失まで含まれる）は、社会的システムと自然一人工システムから導き出され、それぞれの損害 (vulnerability) から見積もられるとしている。

応用地質学を専門とする研究者・技術者にとっては、総合的リスク評価へ至る全体系の中で、地質・地盤の情報や構造物の情報の整備など幅広い領域で寄与していくことが重要であると考えられる。

#### (2) 都市周辺の地震災害早期評価の手法例（コロンビア）

1999 年 1 月に首都ボゴタ東方約 150km に位置する Armenia 市（Cordillera 中軸部にあたる）近郊を震源とする地震（M6.2、震源の深さは 10km～20km）が発生し、同市及び周辺地域に多くの被害が発生した。

被害状況の早期把握と早期復旧の方針と計画の決定のため、地盤工学や応用地質学の専門家等からなるチームを編成し、地震発生後直ちに被害状況（構造物の状況、道路斜面の状況など）の調査を開始した。

道路沿い等斜面の影響評価では、次の 3 zone に判定区分された。

- Red Zone; 割れ目や地すべりが発生していて、危険な状況にある zone。
- Yellow Zone; 不安定であるが、一時的な立ち入りが可能な状況にある zone。
- Green Zone; 安定した斜面で、十分に安全が確保できる zone。

構造物の状況は、全壊 (full collapse)、強被害 (severe damage)、弱被害 (minor damage) に 3 区分された。

最終評価は、道路沿いの斜面状況と構造物の状況との組み合わせから地震の影響評価を行い、都市部における安全地域の認定も合わせて行った。

なお、道路沿い等斜面の影響評価は、広い範囲のデータが収集されており、ゾーニングされた図面では、震源を中心として、Red Zone、Yellow Zone がほぼ北北東 - 南南西方向に長軸をもつ楕円状の分布を示している。

担当者は、地震被害状況の早期の把握と的確な危険箇所の指摘などで、復旧活動の早期実施や二次災害の最小化をはかったことを強調していた。コロンビアの国情を十分に理解していないが、今回の地震で初めて、地震直後の対応が応用地質学の専門家をはじめとする関係者のチーム編成により、的確な災害管理の行動をとったものと理解できる。

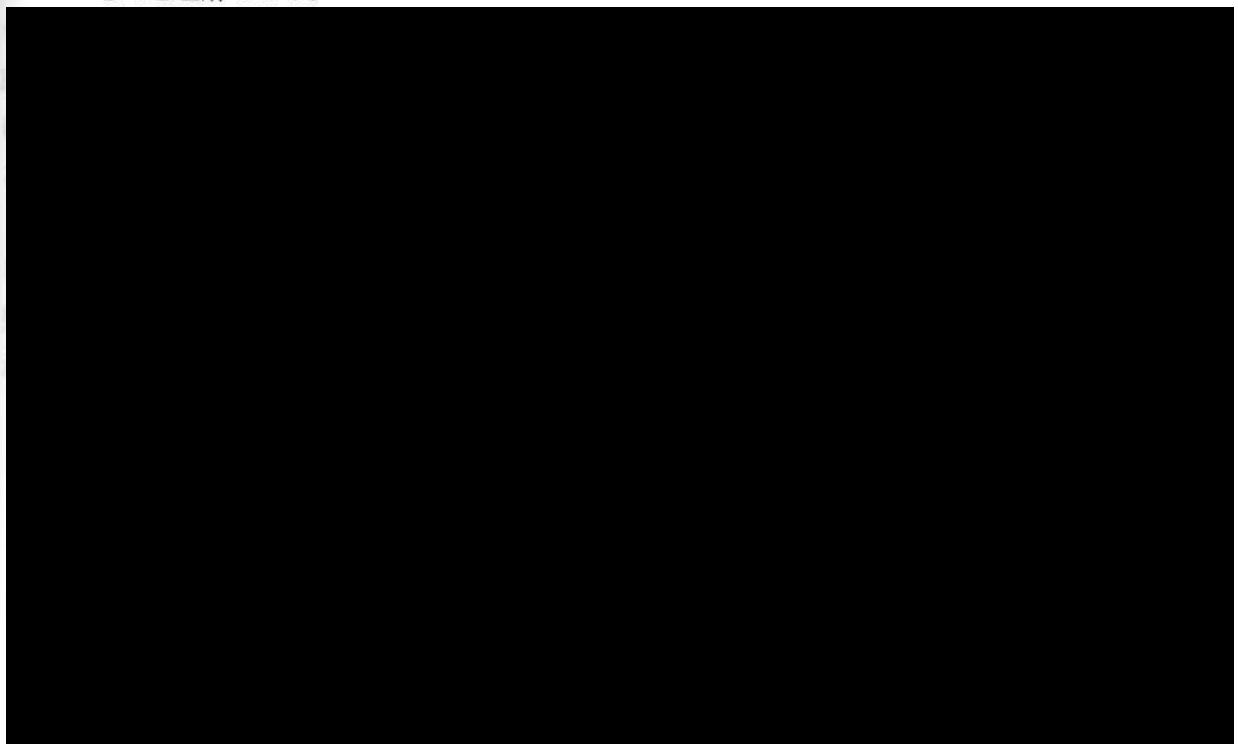


図 3.6-1 リスク評価の全体スキーム

### 3.7 セッション 26 Geological Education (地質教育)

有田正志(広島大学附属高校)

応用地質学とは畠違いの教育畠から参加した有田です。と言うわけで、万国地質学会における、geological education のセッションについて簡単に報告します。

日本では、高校理科が選択となり、地学の履修者が減少しております。地学への関心が無いというわけではありません。しかし、まだ、進路に迷いのある高校生にとって、地学を選択することは、進学できる大学が限定されるために敬遠されます。また、文系の生徒にとっては非常に有利であるにもかかわらず、地学を開講していない高校、あるいは地学教師の不足（選択者の少なさと裏腹の関係か）のため、開講していないなど、様々な理由で地学を履修している生徒は非常に少ない現状です。

このような地学教育の危機的状況の日本から参加した私にとって、他の分野と同列に扱われ、そしてその発表数の多さに驚きました。地震、火山、台風など、自然災害の多い日本（最も地学教育、あるいは災害教育の必要な国）の学会と比べて、何という違いでしょうか。

さて、このセッションは6つの柱があったのですが、リオ滞在中には、日程とプログラムの関係で8月7日午後の Geoethics と The influence of geoscience education on the development of third world countries の2つのポスターセッションしか見ることができませんでした。しかも、ポスターを貼っていないブースの方が多く（これは、他のセッションも同様みたいでしたが、）まともなポスターはロシアを含めて3つぐらいでした。個人的には Pre-collage science education curricula や Geological curricula for the 21st century に関心があったのですが、残念ながら14日以降のプログラムということで見ることも聞くことができませんでした。

地学教育の最初の柱に、Geoethics がありました。直訳すれば地球倫理学とでもいうのでしょうか。新版地学事典にも載っていませんが、いずれ日本に入ってくるでしょう。自然開発や、防災に深い関わりのある応用地質の方でも今後関わりがでてくるのではないでしょうか。

### 3.8 コパカバーナの海岸砂

大村一夫(株)大和地質研究所)

ホテル・ルクソール リジエンテ 懐かしい名前ではありませんか。初めて地球の裏側に行き、コパカバーナという発音しにくい海岸のアイボリーホワイトの長さ 4 km（帰国後開いた書物によると 3 km）の美しい砂浜を見たとき、有孔虫かサンゴ砂の浜だろうと思いました。しばらく見ていて、それにしては白すぎると感じました。しかし、石英砂のような冷たい感じがせず、不思議に思ったのです。石英粒に長石粒が大量に混じっているに違いないという結論でひとまず安心。時間をとって、4 kmを歩き砂を採取しようと心に決めました。

同室の太田保氏を誘い、8月10日（木）朝食を済ませ、9時30分にホテルを出発しました。カメラや大金を持っていると、襲われると散々脅かされていたので、Tシャツ短パンにウォーキングシューズ、ポケットにはインスタントカメラが買え、昼飯が食べられる程度のリアルを入れ、背には砂を入れるビニール袋を入れたナップザックという姿でした。時計とカメラは宿に置きました。どう見ても”カモ”には見えないだろうと思ったのですが…。

本編に続く

## 4. ブラジル巡検

## 4.1 イタイプダムの基礎地質について

神尾重雄（ダム技術センター）

### 4.1.1 パラナ川流域の玄武岩

パラナ川は、ブラジル南部にその源を発し、パラグアイの東縁に接し、下流はアルゼンチンを流下し、ラプラタ川として大西洋に注ぐ大河川である。

パラナ川流域の玄武岩はジュラ紀白亜紀の境界に当たる 141 Ma を中心に噴火活動が行われたものとされ、上流域では泥岩シルト岩礫岩を伴う白亜系砂岩に薄く覆われる。下流は南緯 30 度付近まで、上流は南緯 19 度付近まで非常に広範な分布を示す。

### 4.1.2 イタイプダムの地質

イタイプダムの地質も基本的にこの玄武岩により構成される。

ダム建設上考えられる問題点としては玄武岩噴出の時間間隙に形成された赤色ないし赤褐色を示す自破碎部、一部に粘土化（青緑色）あるいは杏仁状の白色ゼオライト等を伴う熱水変質部、節理沿いの透水性などを挙げることができる。

### 4.1.3 イタイプダムのダム形式と地形地質

イタイプダムは各種のダム形式から構成される長大な複合ダムである。これらはダムサイトの地形地質を巧みに利用することに基づき、決定された。

またダムサイトは地形的にバランスのいい現サイトが選定されたと思われる。

主ダム：発電管路が乗る最大断面部分は中空重力ダム、中間部はバットレス形式のコンクリートダムの形式が採用され、主ダムは基本的にはこれらの繰り返しで構成されている。最大ダム高は 196m に達する。

ダム基礎下の緻密な玄武岩中には自破碎部（角礫岩）が 3 層発達する。これらの厚さは最大で 10 m 以上に達する。またその下盤側に熱水変質部（杏仁状の沸石やセラドナイト）が発達する。特に最大断面となる中心部の下では破碎されたシームが局部的に分布し、特殊基礎処理が行われた。

右ウイングダム：主ダムと右岸側の余水吐との連結部となる曲線のダム軸を持つバットレス形式のコンクリートダムである。

余水吐：重力式コンクリートダム（越流部）で構成されるが、導流部（シュート部）は 3 つに分割されている。ダム高さ（非越流部断面）は左岸側で約 40 m。断面図からは余水吐ダム本体ではキープロックで浸透流の抑制を図っている。また導流部では道路トンネル（ボックスカルバート？）周辺など重要な部分でコンソリデーショング ラウトが 2 ステージの深度まで施工されている。

余水吐きと主ダムの位置を分離した理由は掘削量を押さえつつ、かつダム全体として掘削量と材料採取のバランスの均衡をはかったこと、放流時下流の減勢状況を考慮

したこと（洪水流量が大きいため、洪水吐放流時も発電機下流水位の変動を避ける）等が考えられる。

右岸側アースフィルダム：高さは30m以下、玄武岩風化粘土の不透水性に着目しこれを基礎地盤として利用することにより、ほとんど基礎処理なしでフィルダム部を施工したかもしれませんと推測される。

左連結ブロック：右ウイングダムと同様のバットレス形式のコンクリートダムであるが、ダム軸は主ダムと同じ直線軸。ロックフィルダムとの境界の位置は、ロックフィルの盛り立てを先行しているため、基礎岩盤の状況に関係なくヤードの確保等施工計画上決定したと推察される。

ロックフィルダム：高さは60m程度か。基礎は弱風化岩まで掘削、コア材は強風化粘土を使用したと推定される。リップラップ材には同様に未風化の玄武岩が使用されている。

#### 4.1.4 イタイプダム（主ダム）の基礎処理

- ①ダウエーリング：ダム底面（EL 40m）から約20mの岩盤内部にほぼ水平なシェアゾーンといわれる薄い破碎層が分布しているため、このゾーンのせん断強度を改良するために、この部分を対象にしたダウエーリング（トンネル置き換え工）が実施された（図4.1-1）。
- ②上下流位置でのカーテングラウチング：主ダムでは上流だけでなく下流の水位も高いため、堤体の上下端付近でカーテングラウチングが実施された。またこれに伴い堤体内部側の岩盤中にドレーントンネル、ドレンホールが施工されている。

#### 4.1.5 コイナダムとの地質的な類似点と相違点

コイナダムはインド西部の海岸地帯に近い山地に位置し、1962年に完成した高さ103m堤頂長854m のコンクリート重力式ダムである。貯水池誘発地震との関連で有名なダムで1967年にはM6.3のコイナ地震が発生している。

周辺の地質はデカントラップといわれる玄武岩で、凝灰角礫岩や自破碎状部あるいは沸石などを含有する杏仁状玄武岩を層状に挟み込んでいる（図4.1-2）など、イタイプダムのそれと類似している。

コイナダムはほとんど地震のない安定盾状地に立地するといわれるが、西海岸沿いには既往の地震活動も報告されている。またインド西海岸の地震活動はモルジブ諸島に沿って分布するチャゴス海溝の延長部に関係するという指摘もある。

両地域ともゴンドワナ古大陸で広大な玄武岩台地を形成したが、その後の地質構造発達史が異なることも大規模な貯水による地震発生応答の差に関係するのかもしれない。両ダムの比較はその意味で興味深い。

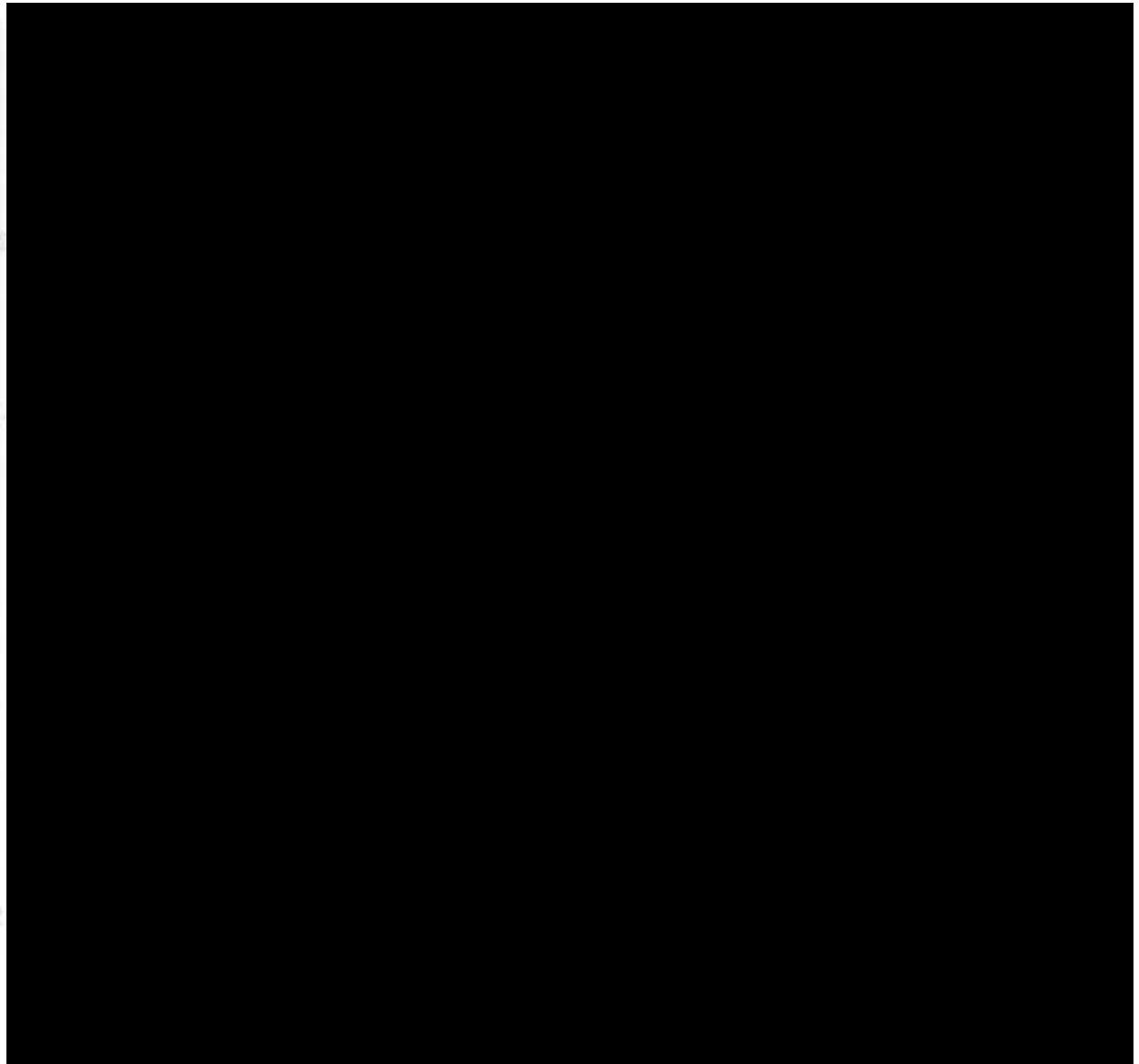


図 4.1-1 イタイプダム基礎処理概念図  
(パンフレットより引用)

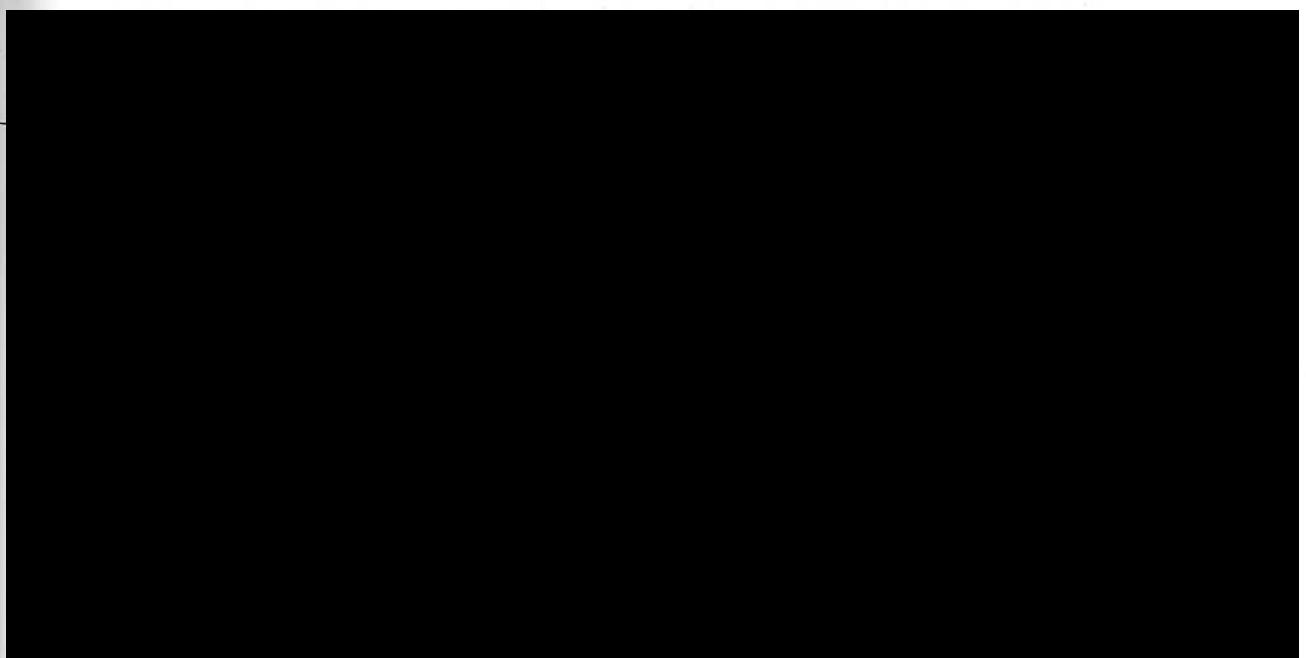


図 4.1-2 Koyna ダムの地質断面図

## 4.2 イタイプダム築造の考え方

秦野輝儀（電力中央研究所）

### 4.2.1 イタイプダム基礎の特徴

イタイプダムは、ブラジルとパラグアイ国境のラプラタ川上流のパラナ川に築造された世界最大の発電能力（1280万kW）と総コンクリート量（1,230万m<sup>3</sup>）をもつ発電用ダムである。

その基盤は、白亜紀の the Serra Geral Formation に属する玄武岩（気泡のある部分を含む）からなり、5枚以上のフローユニットから構成されている。全般に堅硬で緻密であるが、柱状節理の発達と各フローユニット上部には、亀裂の多い部分が見られる。

また、主ダムの直下の岩盤には、水平に広がる破碎部（弱層部）があったため、コンクリートによる置き換えがなされている。

玄武岩の透水性（ルジオン値）については、ダムに設けられたギャラリーを含む全湧水量（漏水量を含むポンプアップの水量で約 133m<sup>3</sup>/sec）からすると自然状態における玄武岩の透水性はやや大きく、かなりのグラウチングが行われたと考えられる。

### 4.2.2 ダム地点の選定

Water Power 誌によれば、F/S 時点で行なわれたイタイプ地点の評価は、米国の IECO 社（International Engineering Co. Inc.）とイタリアの ELC 社（Electroconsult SpA）によって3年間の検討がなされ、パラナ川沿い2カ国の国境のうち、最下流地点となるイタイプ地点において単一のダムを構築するケースが最も kWh 単価の安い開発計画として推薦された。

また、発電所のレイアウト、仮締切ダムのレイアウト、掘削ズリの面利用、洪水吐からの洪水と発電所放流との干渉が少ないと、左右岸ともほぼ同様の地形で差がないことなどの点において有利である。

### 4.2.3 ダムタイプの決定

イタイプダムは、図 4.2-3 に示される通り左岸（東端）から、アースフィルダム、ロックフィルダム、バットレスダム（主ダムの一部：左岸コネクティングダム）、重力式ダム（主ダムの一部：仮排水路部分の構造物）中空重力式ダム（主ダム）、バットレスダム（右岸ウイングダム）、洪水吐け、アースフィルダムの配置となっている。また、右岸の下流側に洪水吐け、左岸に仮排水路（明かり）を配置することにより掘削量を低減させている。

主ダムに関しては、通常の重力式と中空重力式について詳細に検討され最終的にはコンクリート量が少なくコストが低いこと、揚圧力が低いことから、中空重力式が選択された。

左岸の台地には、仮排水路からの掘削ズリが有効利用できるため、ロックフィルダム

が採用された。このロックフィルダムの東側から自然の尾根に至る部分は、15mを超える風化残留土が分布するため、アースフィルダムが採用された。

右岸の主ダムと洪水吐け間のウィングダムは、普通のコンクリートダムより30%少ないコンクリート量のバットレスダムが選定された。

以上述べた通り、ダム式発電所であるイタイプダム地点は、玄武岩層が水平的に一様に分布し地質不良が起因する制約条件が少ないとから、洪水吐けや発電所を含む主用部分にはコンクリートダムを配置すると同時に、両アバットメントのダムは、地形条件を考慮した掘削ずりの有効利用と切り盛りによる土量バランスをはかってコスト低減を行なうことができるフィルダムとなったと言える。さらに、コンクリートダムには、中空式やバットレスタイプを採用して、コンクリート量低減によるコストダウンをはかっている点が興味深い。

#### 4.2.4 感想

このような2国間の関係する国際河川でのプロジェクトへの援助や協力は、日本のODAでは紛争に巻き込まれることを嫌って行なわれていない。こうした大プロジェクトに積極的に参画して成し遂げていくことができる欧米の技術者はまことに羨ましいと感じた。

ブラジルの水力発電は、国内エネルギー生産量の1/3を占め、包蔵水力2億kW(開発可能水力1億kW)、既開発5700万kWであり、まだまだ開発の余地が残されており、日本も積極的に関与しつつ新たなフロンティアを目指すべきであろう。

Water Power & Dam Construction (October 1977)より引用

### 4.3 ブラジルの電力事情とイタイプ発電所

高玉佳育（北海道電力株）

#### 4.3.1 ブラジルの概観

ブラジルの国名は、ポルトガル語で「赤い」の意味で、赤色染料の原料「パウ・ブラジル」という名の木を多く産出したことに由来する。

国土面積は 851.2 万 km<sup>2</sup>（日本の約 23 倍）で世界第 5 位、南米の約半分を占める。

人口は 1 億 6,110 万人（日本の 1.3 倍）で日系人約 128 万人を含む。

言語はポルトガル語であり、宗教はカトリックが約 90% で、その他はウンバンダ等アフリカ系の宗教である。

産業は、農業と鉱工業が主体である。農業は輸出戦略産業の一つであり、特にファゼンダとよばれる大農園で収穫されるコーヒーは、生産・輸出とも世界第 1 位である。

鉱工業は、鉄鉱石・ボーキサイト・すずなどの鉱産資源が豊富であり、カラジャス鉱山・イタピラ鉱山を中心とした鉄鉱石の産出が世界第 1 位である。近年、外貨獲得政策で重化学工業が発展し、中南米最大の工業国に成長した。

#### 4.3.2 電力事情

ブラジルのエネルギー自給率は 77.4%（1998 年）であり、エネルギーの国内生産量は水力が全体の 43% を占め、石油（25%）、バイオマス（24%）の順となっている。住宅の電化率は 93% であり、LPG・都市ガスの普及率は 96% である。

エネルギー消費の 39% を占める電力の供給については、鉱山エネルギー省（MME）が責任を有し、外局の国家電力規制庁（ANEEL）が規制機能を果たしている。主な電気事業者は、MME の監督下にある連邦の持ち株会社である Eletrobrás グループ（5 社：Eletrobras、CHESF、FURNAS、ELETRONUCLER、Elertrosul）、イタイプ水力公社、外資系（LIGHT 社、CERJ 社、REDE グループ）などである。

ブラジルにおける発電電力量の約 60% は Eletrobrás グループとイタイプ水力公社（発電電力量の 95% 以上がブラジル向け）により、約 40% は州営や地方公共団体の発電事業により賄われている。1998 年の総発電電力量は 3,216 億 kWh（日本の約 40%）であり、これを電源別にみると水力は 89.1%、火力 3.6%、原子力 1.0%、自家発 6.3% となっている。総発電設備量は 65,209MW（日本の約 34%）であり、電源別には水力 85.6%、火力 7.4%、原子力 1.0%、自家発 6.0% である。ちなみに原子力発電所は ELETRONUCLER の Angra 1 号（675MW：リオデジャネイロ州）のみである。

#### 4.3.3 イタイプダム発電所

1966 年 6 月、ブラジル、パラグアイ両国はパラナ川の水力資源を調査する声明に調印した。水力調査の結果を受けて、1973 年 4 月にブラジルとパラグアイはイタイプ協

定を調印、翌年の 1974 年 5 月には、水力開発と運営の主体としてイタイプ水力公社が設立された。

イタイプ発電所及び貯水池の諸元を表 4.3-1 に示す。イタイプ発電所は 1975 年に着工以来、1984 年に最初のユニット（2 機：140 万 kW）が運転を開始し、その後、毎年増設され 1991 年 4 月には最終の 18 号機が運転開始した。総出力は世界最大の 1,260 万 kW であり、アメリカ土木学会（ASCE）によると、この発電所の建設事業は、英仏海峡のユーロトンネルとともに現代世界の 7 大建設事業の一つとされている。イタイプ発電所で発電した電力は、ブラジル（60Hz 系）、パラグアイ（50Hz 系）、それぞれ半分ずつ分け合うことになっているが、パラグアイ国内の電力需要が少ないため、パラグアイ向け電力の約 90% がブラジル側へ輸出されている。

表 4.3-1 イタイプダム発電所の諸元

河川名	パラナ川
発電方式	ダム式
最大出力	1,260 満 kw (70 万 kw × 18 台)
最大使用水量	11,610m <sup>3</sup> /sec (645m <sup>3</sup> /sec × 18)
有効落差	118m

表 4.3-2 イタイプ貯水池

名称	イタイプ湖
河川名	パラナ川
流域面積	820,000 km <sup>2</sup>
ダム形式	コンクリート・アースフィル・ロックフィル混合式
ダム高さ	196m
堤頂長	7,760m
堤体積 (コンクリート部)	12.3 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
(ロック・アースフィル部)	31.7 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
満水移	EL.220m
総貯水容量	29 × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>
満水時湛水面積	1,350 km <sup>2</sup>
湛水距離	170 km

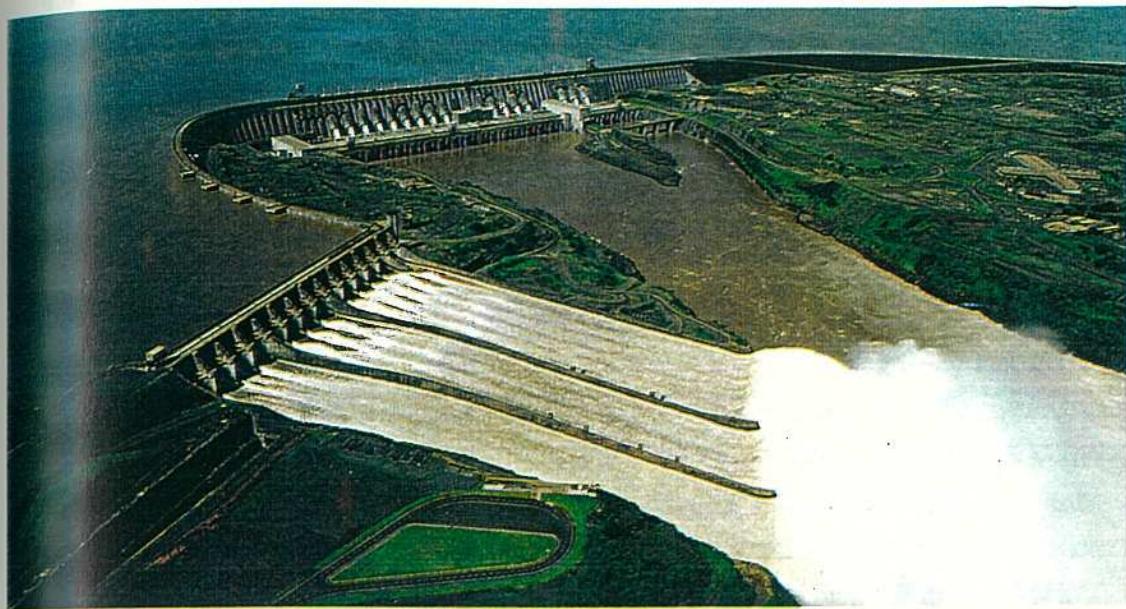


写真 4.3・1 イタイプ発電所

#### 4.4 イグアスの滝について

太田 保(株復建技術コンサルタント)

この滝の見学はブラジルのリオ到着後3日目のオプショナルツアーとして実施され団長を除く全員が参加した。

滝は、ほぼ平坦な玄武岩の溶岩台地が落差80mで切られる様に断崖を形成し、多くの滝が見られ、断崖の延長は4kmもあり、世界最大だそうである。

この滝を詳細に観察すると、50mの上段と30mの下段の上下2段に分かれており、上下の間には不規則な規模で平坦面が認められる。この平坦面は上下の分離面と滝の上端部の2面が認められ、上端面は上流側に広く分布している。この広く分布している平坦面のアルゼンチン側には観光用の桟橋が設置され、上流から滝を観けるようになっている。

イグアスの滝の成因についての資料は乏しく、また現代の武器インターネット上にも地質的な資料は見あたらない。そこで既存データに頼らず地質家は現場第一と考え検討して見ることとした。

この玄武岩はブラジルの安定地塊の花崗岩を被覆して中生代白亜紀の時代に広く、厚く覆った溶岩である事がイタイプダムの配布資料から読みとれる。この玄武岩は対岸からの観察や遊歩道上の露頭観察から、黒色硬質な溶岩で柱状節理や板状節理の間隔は1m程度と大きく面は褐色の砂状に風化し、大きなブロック状となっている。中間部の平坦面はガラス質になっており緩く凹凸に富み不整合面である事が推定される。

滝の分布は下流側ではアルゼンチン側に多く認められ、悪魔の喉笛付近で河川を横断した滝となり中央部の浸食前線最先端部では一気に80mを落下するものも存在する。

詳細な地形図がないため、どのような河川勾配で流れているのか、上下流部でどのように蛇行しているのか判らないが、日本ほどの河川勾配では無い様に感じた。

このような状況からこの滝の成因について考えてみる。

やはりこれを考えるには比較的新しい氷河期や間氷期による地球規模の海水準の変化を考える必要がある。氷河期の時代に海水準が下がり河川の勾配が急になり、河川の浸食が進み、現在の位置より下流に滝が形成され、時間と共に後退して現在の滝の位置になった。中間部の平坦面は不整合面のため大きな分離面となっている他、表層部の風化の違いで平坦面の規模が異なっている。また、節理間隔も大きい事は滝の形成スピードにも影響している可能性が大きく、スピードは遅かったと推定される。左岸側に滝が多く認められるのは右岸側の隆起量がやや大きかったためか、悪魔の喉笛付近で大きくこの河川は左岸側に蛇行している事も影響していると考えられる。悪魔の喉笛付近の大瀑布はこの河川の攻撃部となっているため水量が多いとも言える。下流側の左岸部で河川と平行していた滝が上流側のこの大瀑布付近で横断する方向に変化する原因については断層等の弱線の存在も考えられるが詳細はハンマーを振り回しての踏査が出来ないので不明であるが大きな間違いはないと考えられる。



写真 4.4・1 中流部左岸側の滝と柱状節理状況



写真 4.4・2

この昼食はガイド氏の手作り弁当でおいなりさんや煮染めなどの入った純日本食で、日本を離れてまだ1週間と経っていませんが全員大感激でした。私は写真におさめてしまいました。味も抜群です。

## 5 . ペルー巡検

## 5.1 ペルーの地震と活断層と地震予知と海外調査団のジンクスと

宇田進一（ネットワーク・地球）

ナスカプレートが南アメリカ大陸の下に潜り込んでいるためペルーは日本同様地震大国である。USGSによれば、1513年からこれまでに59の大地震 ( $M \geq 7.0$ ) が発生している。なかでもM8以上が26もあり、巨大地震の巣とも言えよう。

これらの内、現地で案内してくれたクスコ大学の Jose Cardenas 先生のお話で出たのは  
1650年 M8.1, これでクスコは全滅。

1950年 M7.9, クスコ全滅、盆地の両側に 5m の落差の断層が生じた。断層の長さは  
100~200km で、上下のみで横ずれはなし。

1986年 M6?, 2m の落差の断層が生じた、などであった。

またリマの鉱山局の Guzman さんによれば、リマの Callao 港はサンロレンソ (San Lorenzo) 島とは地続きであったが 1774 年の地震で陥没し分かれたと言うことだったが、USGS の記録に 1774 年の大地震はなく、南緯 12 度、西経 77 度の Callao 近くでは多くの M8 クラスが発生しており、該当する可能性のある大地震は少なくない。

これらの地震の多くはプレート境界で起きているが、クスコ大学の Jose Cardenas 先生のいうように内陸部の活断層によっても起きている。この点において注目すべきは図 5.1-1 にあるように、アンデスの中にアルティプラノと呼ばれる高原がありこれが正断層（グレーベン）によって形成されていると言う事だ。このような伸張場はチベットでも報告されており、極端な地形的な隆起を補償するために発生しているとしている (Cabrera 1987)。

われわれの訪れたクスコ周辺は、Cabrera et al.(1987)によって研究されており、図 5.1-2 に示すような Cuzco fault system が報告されている(我々はこのうち Tambomachay fault の地形を遠望している (写真 5.1-1))。この Cuzco fault system はほぼ東西にのび、全長は約 100km で 3~18km の長さの 6 つのセグメントからなっている正断層。この地域では N-S 方向の伸張場となっていることが前記の 1986 年 4 月 5 日の地震のメカニズム解によって判明している。トレンチによれば完新世に少なくとも 2 回の活動があり、最大活動間隔は 5000 年で、1 回の変位量は 1~2m としている。

アンデス山中に一つまり日本と同じ圧縮場と思っていた一正断層があり、震源となることは思いもよらなかったが、これでひとつ長生きした甲斐があった。



図 5.1-1 Zeil (1979) より

Fig. 12 - Sections observed in trenches excavated across the Tambomachay and Tamboray normal faults. 1, Recent soils; 2, Debris slope; 3, Quaternary fluvio-glacial and torrential deposits. See locations of sites 2 and 4 on Figure 6.

図 5.1-2 Cabrera et al. (1987) より



写真 5.1-1 Tambomachay 断層を遠望す (撮影 宇田) 矢印のケルンコルの連続している辺り

## 5.2 ペルー国の斜面災害

萩原博之（国際航業株）

### (1) はじめに

本調査団では、8月12日から15日の4日間、ペルー国に滞在し国内の地質等の巡検を行った。ここでは12日のクスコ周辺、および15日のリマック川沿いの地質巡検について、斜面災害に焦点を当てて報告する。

### (2) クスコ周辺

クスコ周辺の地質巡検は、図5.2-1に示すようにクスコから北西のウルバンバへ向かい、ウルバンバ川沿いを遡上し、ピサクから南下してクスコへ戻る全行程約130kmのコースで、全てチャーターバスで走破した。標高差は、最低2,400m（ピサク）、最高3,790m（コラオ付近の峠）、約1,400mである。

クスコからウルバンバ川にかけては白亜紀から古代三紀の堆積岩類からなり、ウルバンバ川の北側には古生代の花崗岩類や堆積岩類が分布する。今回の巡検ルートはほとんどが前者の堆積岩類からなる。

クスコでは雨期と乾期が明瞭であるが、年間降水量は約800mmで日本の長野と同程度である。災害の誘因はそれほど変わらないものと考えられる。今回の巡検ルートに見られた災害地形は、いずれも白亜紀から古第三紀の堆積岩類分布域に発生しているものであり、ウルバンバ川北側の古生界分布域とは対照的である。堆積岩類は紫赤色の特徴的な色調をなすだけでなく、青緑色～白色の粘土状の堆積物が挟在している。こうした粘土層が存在すること、また「マラスの塩田」（写真5.2-1）のように蒸発残留鉱物が多量に含まれていること等が、地すべりや崩壊を発生しやすくしているものと推定される。

### (3) リマック川周辺

標高約100mのリマから3,850mのベラビスタまで、約150kmを往復する行程で、全てチャーターバスで走破した。

巡検ルートはアンデス西山脈を横断するルートであり、リマック川下流部には白亜紀の花崗岩類、上流部には第三紀の安山岩質火山岩類が分布する。なお、標高3,000mより上では、氷河性堆積物が緩斜面を形成して分布する。

リマック川沿いでは、クスコ周辺とは異なり、落石や岩石崩壊等の斜面災害の危険性が高く、地すべりが少ない。年間降水量30mm程度の乾燥気候であることが、こうした災害形態が多くなっている一因であろう。なお、集落の背後や道路・鉄道沿いには対策工らしきものは確認されない。案内者の言うように「めったに災害は発生しない」ということであろうか。

#### (4) おわりに

以上、ペルー国内の地質巡検に関して、特に斜面災害に焦点を当てて述べた。斜面災害の形態は日本国内で見られるものと変わりはないが、気候・風土の違いが、斜面災害の特徴や住民の災害に対する認識の違いに如実に現れていることを感じた。

日本国内では、道路防災総点検をはじめ様々な斜面点検が行われている。こうした技術を国外、特に開発途上国へ技術移転し、住民の生命・財産を斜面災害から守る努力が必要であることを痛感したが、住民の災害に対する意識、国の経済状況等を考えると、まだまだ時間が必要であると思われる。

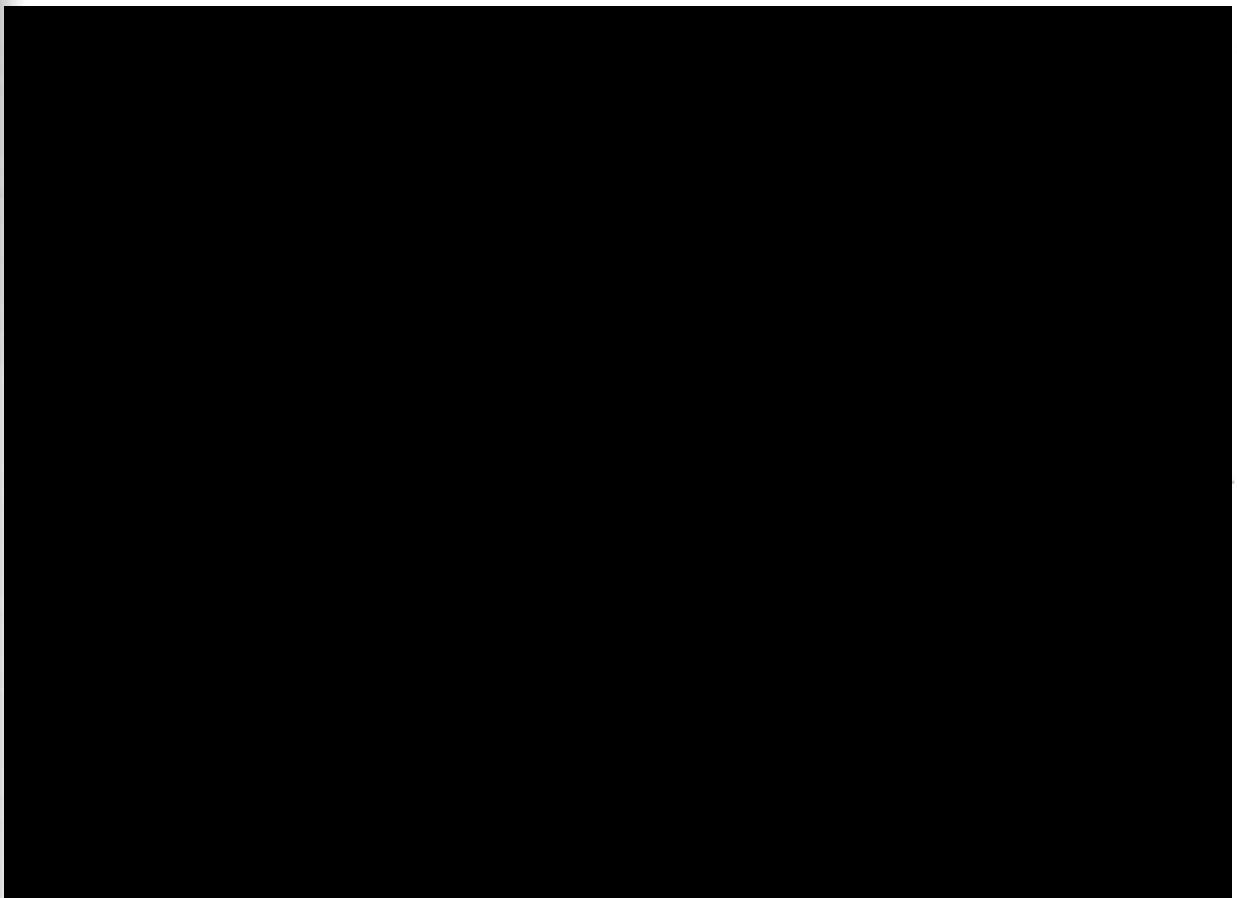


図 5.2-1 クスコ周辺の地質巡検ルート図

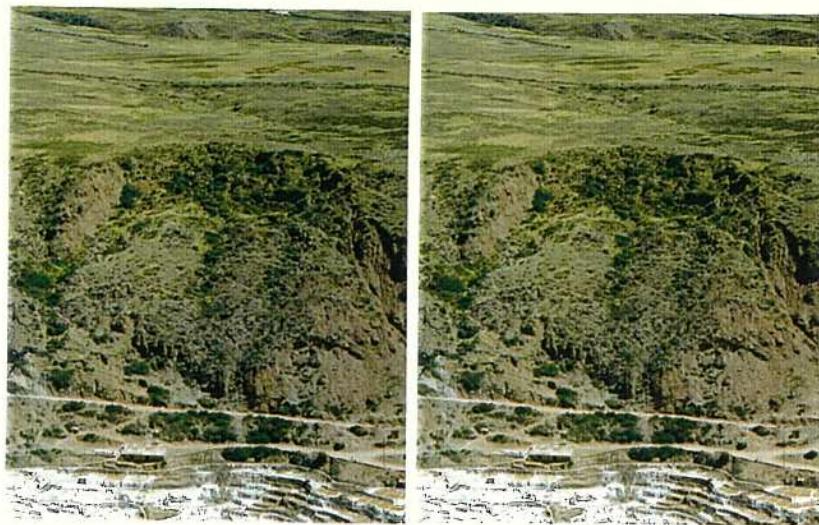


写真 5.2-1 ウルバンバ川沿い巡検—マラス塩田背後の地すべり

「マラスの塩田」として有名なところである。ピューレ・マラス平原を下刻する河川沿いの急斜面である。地質は白亜紀の堆積岩からなる。岩塩等の蒸発残留鉱物が地下水に溶解して流出し、塩田を形成しているものと推定される。

急斜面には、幅 100~200m、長さ 300m程度の地すべり地形が数多く認められる。写真はその中の一つであるが、背後に馬蹄形の明瞭な滑落崖が発達し、円弧すべり状の形状を示す。



写真 5.2-2 リマック川沿い巡検—チョシカ周辺の落石斜面

全山植生がなく、露岩地と落石堆が斜面全体に広がっている。地質は白亜紀の閃緑岩ないし花崗閃緑岩からなる。溪流部には約 5 m 近い巨岩塊が累積しており、土石流堆を形成している。案内者によれば、地震時以外には落石は発生しないと言うことである。リマ周辺では降水量が非常に少なく、年間降水量は 30mm 程度である。乾燥気候のために、地盤が固くなってしまっており、めったに崩れないと言うことであるが、斜面中腹まで民家が建ち並び、落石等の斜面災害に対しては非常に危険な状態にあるように思える。

### 5.3 インカの人々

—なぜ、インカの人々は空中都市に住み、そして、空中都市を捨てたのか—

大村一夫(株)大和地質研究所

#### 謎—プロローグ

謎が解けたと思えたのは、帰国し、2～3週間が過ぎてからであった。

#### 住処

石造りの住居で生活できたのは1,500人居たという貴族だけであろう。その貴族でさえここでの生活は、正真正銘の山小屋生活であったように思われる。個人のプライバシーなど、貴族であってもないに等しかったのではなかろうか。それでも、彼らは恵まれていた。その7～8倍は居たであろう貧しい人々は、どこに住んでいたのだろうか。

#### 水

川がない。井戸を掘っても水が出るはずがない。岩陰にミイラを置いても、腐敗することのない乾燥地である。

ところが遺跡を回るうちに、飲料水は尾根伝いに引かれていて、地中に埋められた人工のパイプで導かれていたことが分かった。プレインカの時代に、上下水道完全分離が実現していたのである。

では、農作物が必要とする水はどうしたのだろうか。生活用水を除いた上水道の水に、リサイクルで得られた水量を加えても、あの段々畑を潤すに十分であるはずがない。しかも、農業用水路がない！ここでゆき詰まった。

#### 雲

ある女性から高値で買わされてしまったビデオテープを帰国して見た。2～3回見ているうちに、そうか！と、思い当たることがあった。雲間に浮かぶ空中都市の姿に、である。雲を形成するのは水滴であることに気づいたのだ。そしてインカの石積みの段々畑は、急傾斜の山腹斜面を這い上がっていったのではなく、尾根筋から下方へと拡がっていた、と、思い出した。段々畑は、雲のかかる位置にあったに違いない！

#### 肥

空中都市は馬の背状の尾根に築造された石造りの都市である。肥沃であるはずがない。

インカの作物のうち、主食になりそうなのは、ジャガイモ・トウモロコシである。ジャガイモは連作ができないし、トウモロコシは肥料を大量に必要とする。しかし地味はやせ、土壌の厚さも厚いはずがないあの山腹斜面では、家畜のえさになる下草の量も大

したことはなかっただろう。ということは、家畜の数も制限されよう。ならば、肥料は人糞以外頼るものはないことになる。

#### リサイクル

空中都市では、人々の排泄物とその量に見合った農作物との間にリサイクルが完結していたに違いない。人糞の量が作物の生産量を規制し、作物の量が人口を規制し、人口が人糞の量を規制していたとすれば、人糞は大切に扱われ、畑に完全に鋤き込まれたであろう。ならば、住環境は清潔であり、空中都市にゴミ問題は存在しなかったのではないかろうか。

空中都市には、貴族達の居住区間と畑以外に平坦地がない。これは、湿地が存在しないことを意味し、土壌流出が無いことは、適度に乾燥していたことを意味する。これに、上下水道の完全分離、排泄物・農作物のリサイクルの完結度の高さが加わるのだから、空中都市は、風土病の発生を防ぎ、極めて衛生的な住環境を実現させるには、申し分ないものであったと思えた。なるほど、インカの指導者は賢明であった！と納得した（ような気分になった）。

#### 火

地球上の古代文明発祥地のほとんどが、乾燥気候に変じ、砂漠化しており、その文明国家は滅亡している。その原因是、燃料を得るために、木々を伐採しすぎたことにある、というのが定説化している。

空中都市においても、この定説は成立したのではなかろうか。空中都市を維持する多くの人々が必要とする燃料を供給し続ける再生産能力を、そこに自生している木々に求めるのは、無茶な相談だったのではなかろうか。

空中都市の維持には一定の人数が必要である。人数を規制するのは食料の生産能力ではなく、実は周辺の木々の燃料供給能力であったと思い至った。そして、空中都市を捨てて、インカの人々が他所へ移住した原因もまた、周辺の木々をすべて伐採し尽くした（燃料が枯渇した）ことにあるに違いない、ととりあえず納得した。また1つ、謎が解けた。と、感じられた。

もし、インカに、日本の炭焼きの技術が伝えられていたら、そして、炭焼き技術を核とした燃料生産のための森林管理技術が完成していたら、人々はもっと長い期間、衛生的な住環境下で生活できたであろうに・・・と、残念に思えた。

#### 谷底

スペイン人はインカの人々に空中都市から谷底への移住を強制した。そしてスペイン

人が持ち込んだ病気が、インカの人々の活力を減退させたと言われている。

もちろん、スペイン人が持ち込んだ病気はあったであろう。しかし、それがインカの人々の活力を減するまで猛烈な勢いで拡大したとすれば、それは生活環境の急変に対処しきれなかったことが原因ではないか。水、排泄物、農作物のリサイクルが完成した極めて衛生的な住環境から、湿地、風土病、毒蛇、ありとあらゆる害虫、そして何より極めて不衛生な飲料水……といった劣悪な住環境への移住こそがインカ人を衰退へと追いやったのではないか。

しかし、スペイン人の強制がなかったとしても、インカの人々は、早晚、空中都市を放棄して谷底へ移住せざるを得なかつたのではなかろうか。それは、マチュピチに限らず、空中都市では、近傍の木々が伐採され尽くすのに、そう長い時間を必要としなかつたと考えられるからである。

#### エピローグ

ペルー滞在中もそう思っていたが、帰国して、空中都市についての疑問が解けたと感じてからもその感を強くしたのは、ペルーの様な厳しい国土条件下で、人々が衛生的な、そして、豊かな生活を営むためには、住環境の大幅な改善（造り替え）と収入増を急ぐ必要があるのだから、フジモリさんのような、カリスマ性があり指導力のある、強い人が必要なのではないかということであった。だが、その人も、私達が帰国してまもなく、日本に来て失脚してしまった。そして、今でもペルーに戻れそうもない。

インカでは、階層社会の頂点に立つ人の扱いは独特であったらしい。例えば、神官の場合は、通常は権勢を振るっていたが、一旦旱魃になると、神に対する祈りが不足した結果と考えられ、職務怠慢とされ、処刑された（と案内人は言っていた）。故に、ややもすると、権力者の末路は、悲劇になりがちであるという。これもまた、現代にひきつがれているのだろうか。

インカの人々に提供できればよかった、と思えたのが、日本の炭焼き技術である。これに代わる何物かを、インカの末裔でもある現在のペルーの人々に、日本から発信できればなあ！と思う。それは何なのだろうか。現在の私には思い当たらない。

## 5.4 マチュピチュ遺跡の斜面問題

衛藤正敏(日本工営株式会社)

### 5.4.1 マチュピチュ遺跡の斜面問題

この遺跡は 15 世紀にインカ帝国により建設されたものであるが、1911 年エール大学 Prof. Hiram Bingham の学術調査隊により発見されその存在が世界中に知られるようになった。

この遺跡は極めて狭小な細尾根とそれに続く急斜面状に建設されたものであり、遺跡のかなりの部分が傾動し不安定な状態になっている。そのため、この遺跡の保全には古くから関心が持たれていたようである。この報告では、この斜面問題に関するこれまでに発表されている主な 4 つの見解を紹介し、巡検で現地観察した感想を述べる。

### 5.4.2 マチュピチュ遺跡の斜面安定性に関する見解

#### (1) Kalafatovich (1963)

マチュピチュ遺跡の乗る斜面は 2 つの大きな断層に囲まれていると考えている。

(図 5.4-1) また、斜面を構成する岩盤中には、斜面の傾斜方向に平行なジョイントが発達する構造であり、図 5.4-2 に示すように 5~6 千万立方 m の大崩壊が起こる可能性があると推定している。

#### (2) R.Carreno&C.Bonnard (1997)

1995 年および 1996 年に、遺跡に向かう急峻な道路で発生した斜面崩壊をきっかけとして、遺跡周辺の大規模崩壊の危険性を広く認識させた。

#### (3) 佐々 他 (2000)

現地観察及び空中写真判読研究からマチュピチュ遺跡の斜面の地溝状地形は過去の大崩壊により形成されたものであるとの見解が発表された。(2000 Landslide News No.13) また、7 つのブロックのうち岩盤滑りのポテンシャルが高いブロックについて調査及びモニタリング方法を提案している。

#### (4) Prof.Jose Cardeas 他

今回の巡査案内をしていただいたクスコ大学地質学教室の Prof.Jose Cardeas によれば、斜面全体は崩壊性の斜面であるが、崩壊は小規模なものが逐次的に発生し現在の斜面が形成されたものであり、城址は崩壊して堆積した岩塊をうまく利用して建設したものである。従って、1995、1996 年の崩壊はこれまでに繰り返された小崩壊と同様の現象であり、大崩壊の予兆とは考えないとの見解が述べられた。

### 5.4.3 巡査での感想

R.Carreno によればマチュピチュ遺跡及びその周辺地域の基盤岩はパーミアンのバ

ソリス花崗岩類で形成されている。遺跡の案内を聞きながらの巡検であったが斜面の不安定化に関する事項として、①断層や断層に起因する線状模様を認識する事が出来るか、②不安定化を示唆する露頭はあるか、③大規模崩壊のすべり面はどうして形成されたか等の現象に留意しつつ歩いた。

まず、断層は見ることが出来なかった。また文献に示されているNE方向の線状模様は遺跡のある尾根から対岸をみると、ほぼ、同じ方向に認識できた。あまり破碎を伴っていないようなシャープな線状模様である。また、対岸の急崖ではこの線状模様とほぼ直交する走行で対岸に向い30~40度で傾斜する比較的規則正しい頻度で分布する節理を観察することが出来る。この組み合わせで図5.4-2の断面をイメージできる。また、遺跡の乗る尾根の北側に同様の節理系がセットになった小露頭があり、やや谷側に傾動しつつクリープし始めている様子が見られた。

これらの事実から崩壊しやすい地質構造をもった斜面であることは認識できた。ただし、節理面は地表近くでも比較的新鮮であり地下深くですべり面の形成がイメージされる地質現象ではない。したがって、私の見解はProf.Jose Cardeasと同様のものとなった。（小規模な崩壊が逐次的に発生し地溝状の地形が発達した）また、同行した何人の方からも伺ったが同様の感想であった。

このマチュピチュの斜面問題の他、クスコ周辺の巡検やマチュピチュに向かう車窓から多くの大地滑り地形や土石流堆積物が見られた。緩傾斜となった場所は生活の場となっているところが多く、日本の地滑り地帯と同様の風景である。

今年の4月から、海外の業務を担当するようになったが、発展途上国からの要請に斜面災害に関するものが多くなつたように見える。世界中で人間の活動の場が急激に広がりつつあることの現われであろう。この巡検を通じて、日本の高度成長時代の斜面問題に関する経験・ノウハウをこれらの国々で生かすことが出来るのではないかと感じた次第である。

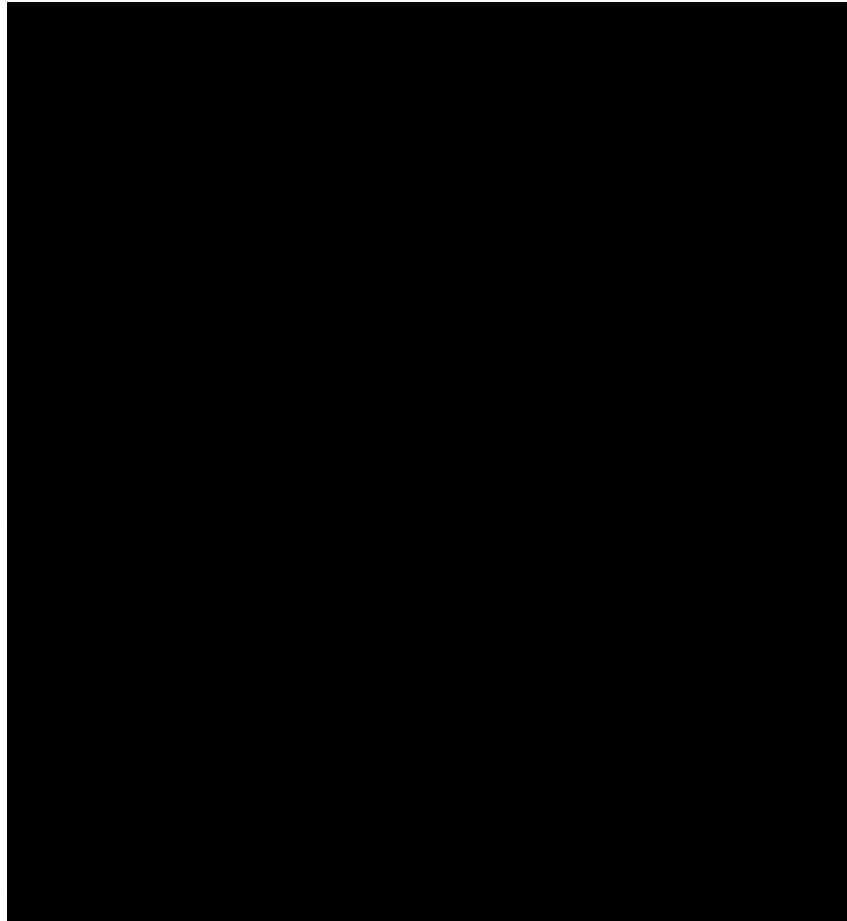


図 5.4-1 Location of Machupicchu Inca citadel and Geological map of Machupicchu and approximate configuration of slope instability phenomena of December 1996 (from geological map by Kalafatovich, 1963).

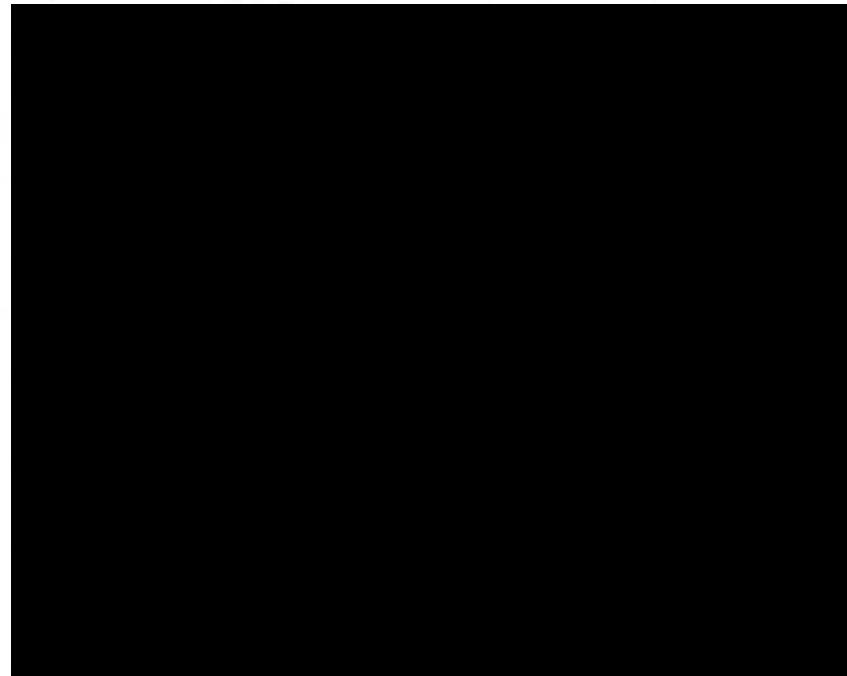


Fig. 3b Probable profile of the large landslide of Machupicchu.

図 5.4-2

## 5.5 遺跡保存と応用地質・マチュピチュ遺跡

熊倉 聰(北海道開発コンサルタント株)

### 5.5.1 マチュピチュ遺跡の変状状況

#### (1) 地形状況

マチュピチュは、ウルバンバ川の岸から 600m 標高 2,350m の山上に築かれた石造の都市で地形学的、植物学的にセハ デ セルバ (ジャングルの入り口) と呼ばれる地域にある。斜面は急峻で、植生が濃く生い茂り、降雨が年間通して常にあるため、とても湿度が高い。年平均気温は 18°C で、曇っていることが多い。降雨水は斜面傾斜 50° もしくはそれ以上の斜面を流れる。

マチュピチュ遺跡はウルバンバ川が流れる細い渓谷の約 450m 上の崖に位置し、段々畑が広がっている。インカは段々畑を作物の安定的供給と斜面崩壊を防止するための補強を目的に数多く作った。

マチュピチュの平面図を図 5.5-1 に示す。

#### (2) 地質状況

マチュピチュの山、ワナビチュ周辺の山は古生代に形成した貫入岩からなっている (図 5.5-1 参照)。材質や構造 (目、割れ目) から、容易にさまざまな大きさの四角いブロックに加工することができたため、インカの人々はこの花崗岩を建築材料として使った。

蛇紋石を含むタルクは平石やペグに使われており、いまでも現地の民芸品作家はこの石を彫刻材料にするために探している。

花崗岩の表面はその風化生物で覆われている。厚さは場所によって数 cm～数 m である。

崩積土は町の周辺部分に見られ、特に東側に小岩塊の堆積や古い崩積土が分布する。段々畑の大部分はこのような場所の安定を図るために作られた。

インカがやってくるまでマチュピチュは巨大な花崗岩のブロック (花崗岩カオス) が多く分布していたとされている。そして彼らは不安定な岩塊を取り除き、くぼみ (地溝) を埋め、段や壁を作ってカオス状の斜面を安定させた。

#### (3) マチュピチュの遺跡変状

マチュピチュの町とその周辺で地表面や遺跡の変状が見られる (図 5.5-2 参照)。インカの建築物へ影響を与えている主要なものは、地盤沈下、ブロックの移動、土砂崩れ、岩の崩落、表面の風化である。

これらの全てが水 (雨水、表面の流れ、地下での循環) による重大な影響を受けて生じている。

マチュピチュの保存の問題は水によるものであり、よく言われているような断層によるものではない。断層はこの地形を形作るのに重要な役割を果たしたが、現在活動はしていないため、遺跡保存に関して問題とはならない。同様に地震の危険もある。水が主要な原因であるので、遺跡全域とインカの道に適切な排水路をつくることが薦められる。

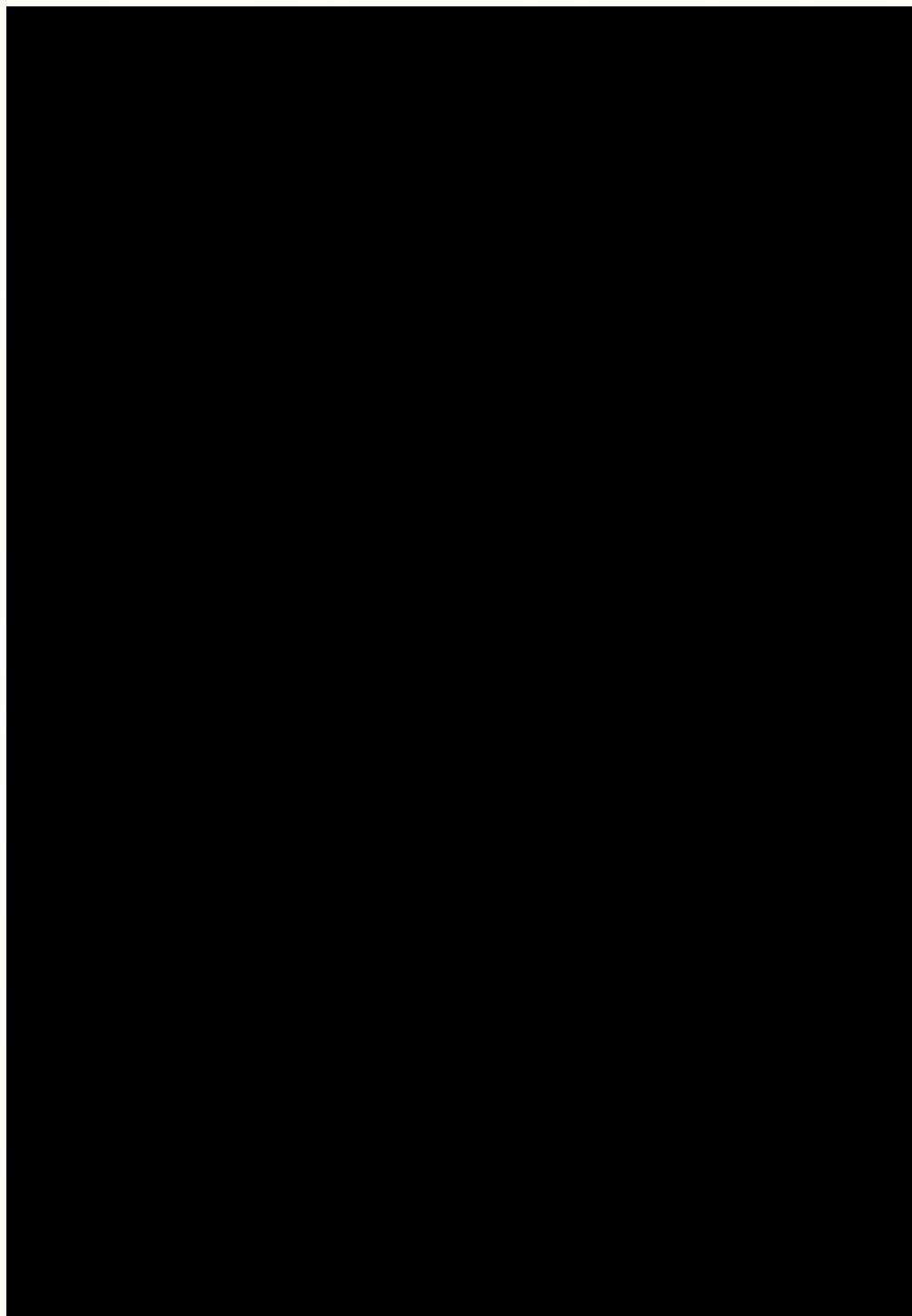


図 5.5-1 Geología de la Ciudadela de Machupicchu, tomado de Carlotto & Usselman (1989) modificado

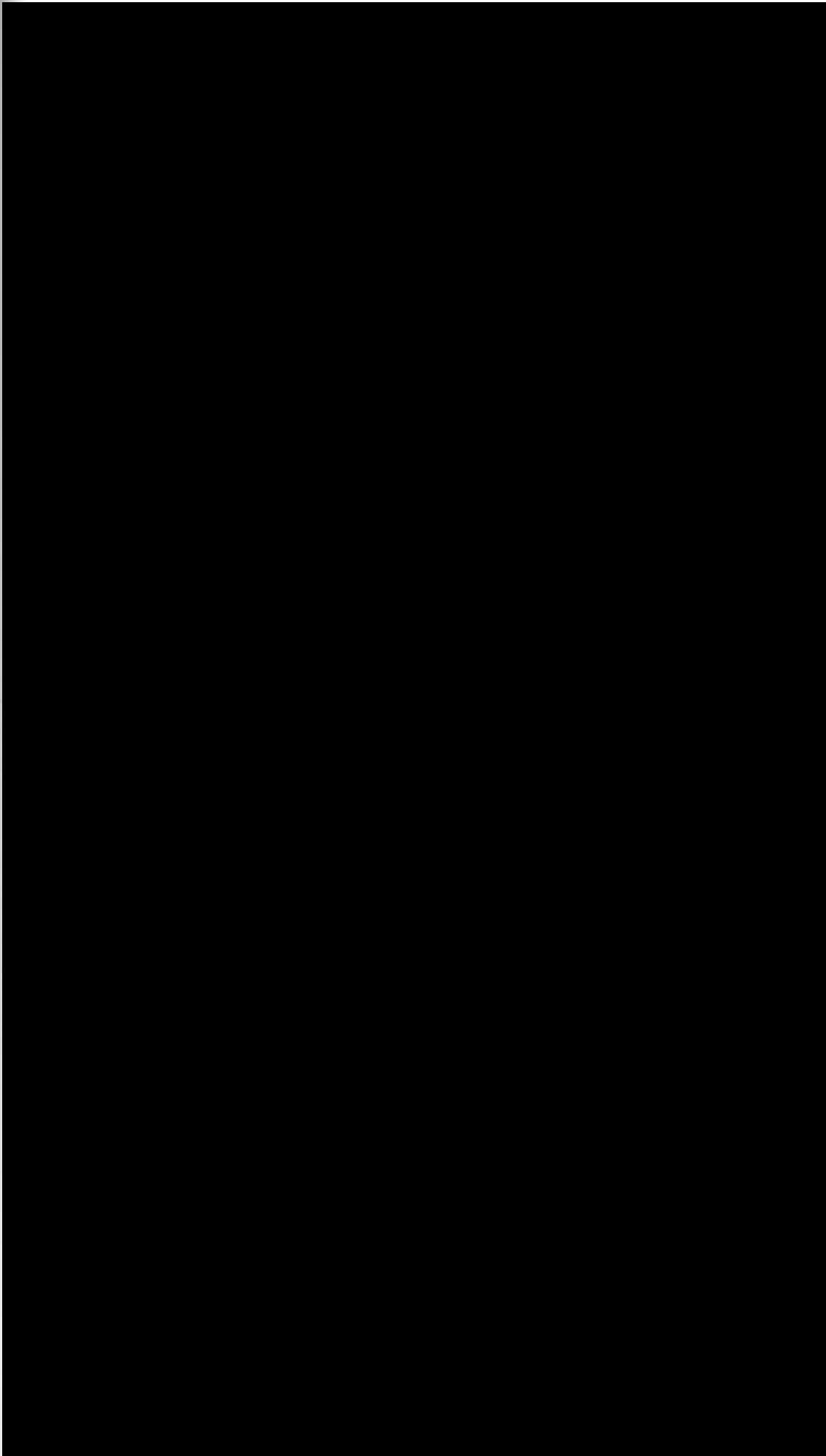
FIG 5.5-2 Áreas con problemas de geodinámica externa de la ciudadela de Machupicchu  
(tomado de Carlotto, 1993).



写真 5.5-1 塔（太陽の神殿）と陵墓、接合部の分離が見られる。北側から。

(INGEMMET(1999):GEOKOGIA DE LOS COADRANGULOS DE QUILLABAMBA Y MACHUPICCHU  
から引用)



写真 5.5-2 東側の部分に沈下の問題を抱える“主神殿”。南東側から。

(INGEMMET(1999):GEOKOGIA DE LOS COADRANGULOS DE QUILLABAMBA Y MACHUPICCHU  
から引用)

## 5.6 ナスカの地上絵

熊倉 聰(北海道開発コンサルタント株)

### 5.6.1 ナスカの地上絵の概要

ナスカ市はペルー南部の太平洋とアンデス山脈にはさまれた砂漠地帯で、首都のリマから400kmほど南下した地点に位置する。アンデスから太平洋に流れるグランデ川の支流インヘニオ川とナスカ川の間の砂漠の台地にナスカの地上絵はある(図5.6-1参照)。

飛行機から見下ろすと長い直線や曲線のデザインが明瞭に認められる。これらの線の形は、平行線、交差した線、渦巻き、放射線、あるいは鳥や動物の形をしている。

線は帶状に石を取り除き、その石を帶に沿って積み上げ、明るい地肌を露出させたものである。溝は深さ10cm、幅20cm程度である。

図形の直線部の長さは182mが多く、場合によってこの2分の1、4分の1であり、このほか16mの単位が用いられている。

### 5.6.2 ナスカの疑問

#### (1) 絵の目的

##### ①天文説

1941年にアメリカの地理・歴史学者のポール・コソックが打ち出した説。夏至の日に地上絵の一本の線の示す方向に太陽が沈んだ現場に居合わせたことから、古代天文観測に使われた暦、農業カレンダーのようなものと定義した。

この考えはドイツの女性數学者マリア・ライへに継承されたが、アメリカの天文学者ホーキンズによって、地上絵は必ずしも天体の運行を示す図形ばかりでないことが立証された。

##### ②宗教的な行事の巡礼地説

1989年にイリノイ大学のシルバーマン女史によって発表された説。

##### ③宇宙船発着場説

1968年にデニケンが発表した説。

##### ④雨神へのある種の贈り物として描かれたという説

2000年5月に発表された説。発表者不明。

#### (2) 絵の製作時期

地上絵の近くで発見された土器の破片から、ナスカ人が活躍した紀元前2世紀から紀元6世紀の内、比較的早い時期で歴史上、前期中間期と考えられている。

また、地上絵の長い直線が終わる地点に打ち込まれた木杭の放射性元素<sup>14C</sup>年代測定で紀元525±80年と判明した。

#### (3) 絵の作製者

ナスカ文化を代表する土器の絵が地上絵にある動物や模様と一致していることから、

地上絵を描いるのはナスカの土器を造った人々で、現在谷間で生活するナスカの人々の先祖と推定できる。

#### (4) 絵の作製方法

マリア・ライへは小サイズの絵を中心に置き、杭やロープなどを使って相似形に比例拡大して造ったと推定した。

#### 5.6.3 地上絵の保存

ナスカの地上絵が描かれてから、約 2000 年もの長い間、消えずに現在まで残っている要因を以下に示す。

- (1) 気象的要因＝極端に雨が少ないとこと
- (2) 地質的要因

ナスカの絵が集中する南緯  $15^{\circ}$  、海岸からの距離約 50km、海拔 500m は、関東地方ほどの広さを持つテーブル状の台地である。

緩やかな傾斜の台地は硬い岩盤とその表面を覆う砂礫層からなる。地上絵は砂礫層を手でかきわながら 4~5cm 挖って描かれているが、雨が降ると、降雨水は砂礫層をすぐに浸透して硬質な岩盤と砂礫層の間を流下するため、浸食されずに現在まで残ったと考えられる。

このような地質条件をナスカ人は知っていて絵を描いたのかは不明である。

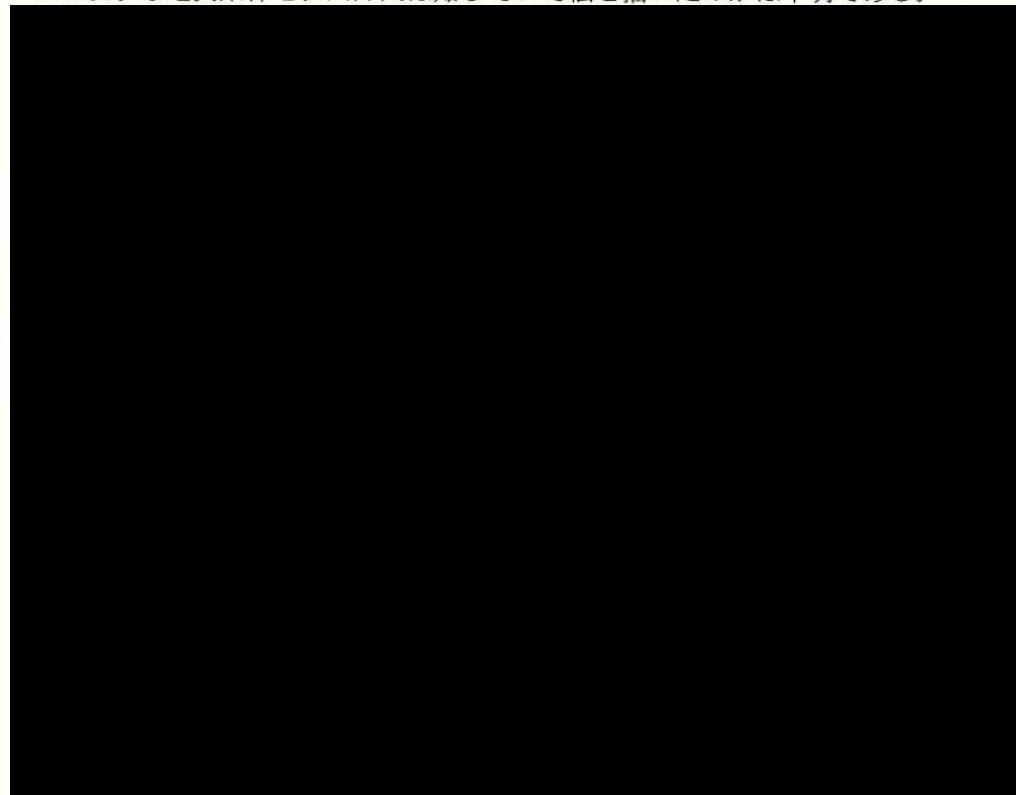


図 5.6-1 ナスカの地上絵が描かれた台地の状況

(増田義郎監修、クオーク編集部編(2000)：沈黙の古代遺跡マヤ・インカ文

明の謎 講談社+α文庫、講談社から引用)

## 5.7 ペルーの電力事情

秦野輝儀(電力中央研究所)

### 5.7.1 ペルー概観

ペルー共和国は 1821 年にスペインから独立し、国旗は、建国の英雄サンマルティン将軍が見た翼が赤く胸が白い鳥に由来し、白と赤は自由を象徴する。国土面積は 128.52 万 km<sup>2</sup> (日本の約 4 倍)、人口は 2,566.2 万人 (2000) で、インディオと混血が大半を占める。言語は、スペイン語が中心である。カトリック教徒が 89% を占めている。政治体制は立憲共和制をとっている。GDP は、494 億米ドル (1997) である。

西部地域は南北にアンデス山脈が走り、国土の 27% を占める。一方、密林に覆われているアマゾン川流域は国土の 50 % に達し、高温多湿。一般にアンデス地帯は雨量が多く、太平洋岸は乾燥している。

### 5.7.2 ペルー電力事情

ペルーは、基本的にはエネルギーを自給自足していたが、近年低下し、自給率は、86.2% (1995) まで低下している。エネルギーの国内消費量 (1995) は石油換算で 904 万トン/年で、一人当たり消費は 384kg/年である。1998 年の発電電力量は 185 億 kWh(前年比 3.5% 増) であり、水力が約 74% を占める。電気事業者の販売電力量は、124 億 200 万 kWh で、工業用 48%、商業用 14%、家庭用 27%、公衆街路灯 4%、その他 7% となっている。ペルーの電力需要は、近年の経済成長および銅鉱山の開発・拡大によって過去数年間年平均 10% 以上と急激に伸びている。1996 年の電化率は 60% に達している。

電力の供給については、エネルギー鉱山省 (MEM) が統括責任を有しており、さらに、電気料金に関して規制権限をもつ電気料金委員会 (CTE) と系統運用を行なう機関として電力系統経済運用委員会 (COES) がある。現在電気事業の民営化が進められており、発電設備の 50% が国営または部分民営化企業として運営されており、30% が鉱山会社の自家発電設備、20% が民間発電会社という構成になっている。1998 年末において電気事業者が所有する発電設備のうち水力設備は、Electroperu 社が 41% を所有しており、次いで Edegel 社、Egenor 社の順となっている。また、火力設備は Etevensa 社が 25%、Edegel 社が 22%、Enersur 社が 12% の順となっている。ペルーにおける電気料金 (小売) は、平均で 8.2 米セント/kWh (1997 年) となっている。

なお、今回の調査団は、リマ滞在中、電源開発会社渡部ペルー事務所長よりアマゾン川支流で建設中の Yuncan 水力発電プロジェクト (新設 130MW、日本はスパー・イザーとして参画) の説明およびペルーの社会情勢についての説明を聞くことができた。

## 5.8 ペルー国の水資源開発

糸山 隆（八千代エンジニアリング）

### (1) 地形

ペルーは地形的に大きく3つの地域に分けられている。それらは、①狭長な海岸地帯（コスタ）、②海岸地帯の内陸側に連なるアンデス山脈（シエラ）および③これらの東側に拡がる広大なアマゾン雨林地帯（セルバ）である。

### (2) 気候

ペルーはその国土が赤道から南緯18°に位置する。

首都リマを含む海岸地域（コスタ）では、フンボルト寒流が発生させるgaruaと呼ばれる霧が年間の大半に渡ってたちこめ、太陽はまれにしか見られない。

内陸部に入ると霧の上に至る。このため、内陸部は年間に渡って暑く天気も晴れている。ナスカは60km内陸に位置し、標高も600mであり、周辺には砂漠が拡がっている。このコスタ地域の年間降雨量は北部で400mm、中、南部で150mmと少ない。

アンデス山脈地域（シエラ）は雨期（4～8月）と乾期（5～9月）があり、年間雨量は700mm程度である。降雨が雨期に集中し、これが、海岸地域の洪水を招くクスコはこの地域に位置する。マチュピチュはクスコ（標高3395m）からウルバンバ川を2500mまで下った所に位置する。クスコ周辺の高山（低草木）地域から列車でウルバンバ川を下るに従って、車窓から緑葉樹が広がり、植生の変化が観察された。マチュピチュはアマゾン雨林地帯の入り口といった感がする。

アマゾン雨林地帯（セルバ）の年間雨量は約2400mmと言われている。

### (3) 水資源開発

#### 1) 現状

ペルーの流域系は大きく次の3つに大別される。

- ①太平洋側流域系
- ②大西洋側流域系
- ③チチカカ湖流域系

太平洋流域系は、ペルー全流域面積の約2割を占める。コスタ、シエラ地域からなる。この流域は主にシエラ地域の降雨に依存している。大西洋流域系は全体の7割強を占め、セルバ地域からなる。チチカカ湖流域系は全体4%弱を占めるに過ぎない。

ペルーの水需要は824m<sup>3</sup>/秒と推計（1993年）されている。このうちの75%がコスタ地域である。また、水需要の92%が農業用水であり、生活用水の需要はわずかである。

コスタ地域の中心であるリマ首都圏は、生活用水、農業用水、工業用水等のほとんどを河川と地下水に頼っている。コスタ地域における水源として、シエラ地域の豊富

な水資源を有効に利用するため、シエラ地域からコスタ地域への導水計画が検討されているが、アンデス山脈からコスタ地域を横断する川は流路が短く急流であり、夏季に降水の3分の2が集中すること、流路が安定しないこと等から表流水の計画的な利用の障害となっている。

セルバ地域の水資源はアマゾン川流域系に統合され、流域河川の水資源量は豊富であり、年間を通じて安定しているが、大西洋側の水消費量は太平洋側の7分の1に過ぎない。水資源は主に水運やレクリエーションに利用されている。

地下水については、利用可能量  $2.74 \times 10^9 \text{m}^3$  と推定され、現在の年間揚水量は  $1.51 \times 10^9 \text{m}^3$  と算定されている(ペルー政府, 1987)。

リマでは、リマ首都圏上下水道公社(SEDAPAL)がリマック川からの取水とともに、地下水を揚水して浄水および給水を行っている。SEDAPAL 以外にも工業、農業灌漑として民間でも揚水されている。

リマで地下水取水対象となる帶水層は、チジョン川、リマック川およびルリン川の流域に発達する扇状地堆積物である。

リマを中心とするコスタ地域の水供給を確保するための、シエラ地域における水資源開発として、天然湖の嵩上げが挙げられる。ペルーでは河川本流におけるダム築造の事例はなく、全て天然湖の嵩上げによって水資源の開発が行なわれている。天然湖はアンデス山脈の比較的平坦な高標高に多数分布している。幾つか天然湖をアースダムによって嵩上げし、貯水容量を増大させ、それらを導水路等によって連結し、アンデス山脈にトンネルを掘削しリマック川に導水している。

4日目のリマ周辺の巡査では、SEDAPAL が管理するアタルヘア浄水施設を見学し、その後、リマック川沿いにバス巡査を行った。バス巡査では標高 3900m 地点までリマック川遡った。時間切れで 4000m 目前で引き返すこととなつた。この間のリマック川はリマ周辺の扇状地からアタルヘアの上流で山間部に入る。河川の両岸には希にコンクリート製の護岸工が設置されていたが、ほとんどの区間は自然状態のままの感があった。また、上流域にはダム適地となりそうな狭窄部も見られ、治水、利水対策には、リマック川流域でのダム築造も有効ではないかと思われた。

## 2) 課題

水資源開発の課題として以下の点が指摘されている。

- ①利用可能な水がシエラ、セルバ地域に偏在し、コスタ地域では都市人口の増加に伴い水需要が増大している。こたため、コスタ地域の水資源確保と持続的な利用が重要課題となっている。
- ②コスタの都市部では給水制限に対して、自家製井戸が多く掘られているが、リマック川流域では民間の井戸の開発が進み、地下水位の低下、海水進入による塩水化が問題視されており、地下水に新たな水源を求めるのは妥当ではない。このため、既設の給水施設の改善等による効率利用、河川水の管理と利用が課題となる。
- ③生活用水については、水質の確保と適正処理という質的側面が課題としてあげられる。SEDAPAL によって供給される上水であっても飲料に適さないというのが現状である。

## 5.9 ペルーアンデスの地質

吉田鎮男(東電設計(株))

### 5.9.1 南米大陸の地形・地質概要

アンデスは南米大陸の太平洋側を太く縁取るように走る世界一の長大山脈である。アンデス山脈は、北緯 $10^{\circ}$ ～南緯 $55^{\circ}$ に亘り、長さ8500km、幅最大700km(南緯 $20^{\circ}$ 付近)で、最高峰アコンカグア(6960m)をはじめ5000m～6000m級の高峰が連なる。ペルーでの最高峰はワスカラーン6768mである。アンデス山脈は北部アンデス・中部アンデス・南部アンデスに大分けされるが、ペルーを走る部分は中部アンデスに属する。後述するが、アンデス山脈は一列の山脈ではなく4～5列の並走する山系からなり、各列は相異なる地質によって特徴づけられる。アンデスは、規模からいっても、日本列島を3～4列並べたようなものである。アンデス山脈には日本同様プレート運動に伴う火山帯があるが、アンデスの高峰は必ずしも火山とは限らず、花崗岩や堆積岩などからなる高峰もある。ちなみに、アコンカグアは白亜紀の火山岩類、ワスカラーンは白亜紀の花崗岩、オホス・デル・サラド(6908m)はアコンカグアと同列の山系にありながら火山で、火山では世界最高峰である。

南米大陸の地質区は、図5.9-1に示すように、大きく四分される。

#### (1) 安定地塊(cratons) :

図5.9-1の[I]-赤・黄緑。大陸中央部から東部にかけて広く分布する。先カンブリア時代の花崗岩類・変成岩からなる。図-赤(AM)はAmazonian Cratonと呼ばれ、その代表である。これらは年代・岩種・構造によって約20の構造区・地質区に細分されているが、それらの生成年代は近年Sm-Nd法によって明らかになりつつあり、大部分が1.5-3.5Gaの範囲にある。ちなみに、リオデジャネイロ地域はこれに属し、そこの海岸のマイロナイトは後期始生代(2.5-3.0 Ga)の構造帶に属する。

#### (2) 前縁盆地(foreland basins) :

図5.9-1の[IV]-黄色。前縁盆地と呼ばれているが、島弧の前縁盆地とは成因が全く異なる。この盆地は、主に古生代・中生代の陸成～浅海成堆積岩および中生代の火山岩が、上記[I]を広く被覆した地域である。一部では新第三系も堆積している。全層厚は、盆地中心部で5000～6000mに達する。一部にカンブリア系およびオルドビス系があるが、主にシル系～白亜系の地層からなる。火山活動としては、アマゾン川流域のAmazonas Basinでは三疊紀～ジュラ紀の玄武岩質火山岩(北大西洋の開離に関係)が、パラナ川流域のParana Basinでは前期白亜紀の玄武岩質火山岩(南大西洋の開離に関係)が顕著である。またParana Basinには、石炭紀・二疊紀のGondwana氷河堆積物(南アフリカのそれに連なる)

が広く分布する。地質構造は単純で、波長 100km 規模のごく緩やかな波曲はあるが、大局的にみて水平な地層である。

(3) パタゴニア地塊(Patagonian Massif) :

図 5.9-1 の[II]-茶色。地形的にはアンデス山脈の続きで、南部アンデスと呼ばれるが、構成岩種や地質構造が北部～中部アンデスとは大きく異なる。すなわち、主に後期古生代の陸成および浅海成堆積物からなり、火山はその西縁にごく少数分布し、北～中部アンデスと異なり、海嶺の潜り込みに伴うとされる未進化の玄武岩質溶岩によって特徴づけられる。

(4) アンデス造山帯(Andean Orogenic Belt) :

図 5.9-1 の[III]-茶色。中生代以降現在まで、ナスカ(Nazca)プレートの潜り込みに伴う火成活動と地殻変動を被った地域である。しかしここに分布する地層は中生代以降の地層に限られるわけではなく、図 5.9-1 に示すように、南部アンデス(パタゴニアアンデス)を除いて、その全域に先カンブリア時代の地層(変成岩や火成岩)が点在している。また古生代の地層も全域に散在する。このことは、アンデス山脈の火成活動と地殻変動は、南米大陸の他の地質区に分布している安定地塊的基盤(cratonic basement)と同じ基盤の上に重なったものであることを示す。この点で、日本列島とアンデス山脈は大きく異なる。アンデス山脈の地形・地質の概要については、次に節を改めて述べる。

## 5.9.2 アンデス山脈の地形・地質の概要

図 5.9-2 に示すように、アンデス山脈の地形区分とアンデス造山帯の地質構造区分は密接に関係している。すなわち、西から東へ、海岸山系、西山系、中央山系、アルチプラノ、東山系、サブアンデスである。なお、東山系より東の山系は図のように細区分されることもあるが、一般にサブアンデスと呼んでいるようである。これらの山系全部がアンデス山脈を通して揃っているわけではなく、北部・中部・南部で異なる。ペルー・アンデスを含む中部アンデスではこれらがほぼ揃っている。数列の山系(脈)があるというと、山系と山系の間には深い谷があると思いがちだが、実はそうではなく、図 5.9-4 のアンデス山脈を横切る二つの代表的断面図に見られるように(この断面図は縦横比が 1 : 1)、むしろ緩やかに起伏した高原状の地形断面を成している。

図 5.9-3、図 5.9-4 に示すように、プレート運動に伴う火成活動は西山系から東山系に亘るが、その分布は時代によって異なる。第四紀火山は西山系に限られる。図 5.9-3 に示すように、マグマが上昇する位置は和達・ベニオフ帯(潜り込むプレートの上面)の角度によって異なり、その角度は時代によって、また場所によって異なる。図 5.9-4 は、このことを現在のナスカプレートの潜り込み角度との関係で示したものである。図 5.9-4 の平面図に示されているように、アンデス山脈の現世の火山列は連続的に分布するのではなく、1・3・

5 の帯に分布し、2・4 の帯には分布しない。図の和達・ベニオフ帯の等深線および図 5.9-4 の断面図から知られるように、帯-1・-3・-5においてはその角度が約 30°、帯-2・-4 では約 15° である。帯-3 における A 断面では現世の火山があるが、帯-4 における B 断面では中生代の貫入岩はあるが、現世の火山はない。図 5.9-5 は、新生代の火山分布が海嶺の潜り込みの位置とも関係していることを示したものである。

地質構造について概観すると、図 5.9-4 の断面図に示されるように、また後述するよう(図 5.9-15)、東山系および西山系では、どの時代にも一般にスラスト・褶曲構造が卓越する。他方西山系においては場所毎に、また時代毎に変化し、正断層、スラスト、横すべり断層が複雑に分布する。海岸山系～アルチプラノの間では、新生代に所々に正断層に伴うグーラーベンが生じている(図 5.9-5)。プレート運動の圧縮力によるアンデス山脈の東西方向の短縮およびそれに伴う地殻の肥厚がアンデス山脈各地で見積もられている。その量は、当然、正面衝突の場合のほうが、斜めに潜り込む場合より大きい。もっとも大きな短縮と肥厚は中部アンデスの中央地区付近(20° S 付近)で、新生代の短縮量は約 320km、そこでの地殻の厚さは 70~74km と見積もられている。大陸の平均的地殻の厚さの 2 倍に近い厚さである。

厚い地殻は火山岩の組成や噴出様式にも影響を与える。厚い地殻を貫いて上昇するマグマは地殻物質を多量に取り込むために、本源マグマに由来する化学組成から大きくかけ離れる。化学組成に加え、Sr<sup>87</sup>/Sr<sup>86</sup> 比や Pb 同位対比などによる見積もりによれば、地殻からマグマに取り込んだ量は 35~70%におよぶとされている。中部アンデスのペルー南部～チリ北部付近の西山系における火山岩では、安山岩質溶岩およびデイサイト質溶岩が卓越している。加えて、膨大な量のデイサイト質 ignimbrites(熔結凝灰岩等の火碎流堆積物のフィールド用語)が鮮新世～更新世に噴出している。これとは別に、中新世には和達・ベニオフ帯の傾斜が急になった時期があり、この時期に広範に流紋岩質～デイサイト質のカルデラが生じ、ignimbrites が噴出している。以上のような理由により、アンデス山脈においては、火山活動の場や様式、プレートの潜り込む角度や衝突する角度(斜め潜り込みなど)、それに規制される断層の種類、等々が複雑に絡み合って、それぞれの地区において特徴的な地質構造が形成されてきている。

### 5.9-3 ペルーアンデスの地質

ペルーアンデスは第 1 節で述べた中部アンデスの北半を占め、海岸山系、西山系、中央山系、アルチプラノ、東山系、サブアンデスの全山系が揃っている。その意味でアンデス山脈の模式地と言え、アンデスの代表的な地層・岩種が広く分布している。ただし、その北部では海岸山系とアルチプラノを欠き、南部では中央山系を欠く。

#### (1) 地質分布

図 5.9-6 にペルーの地質図を示す。この図を見てすぐ分ることは、図 5.9-2 に示した各

山系と地質分布が必ずしもはっきりと分れておらず、2つ～3つの山系に亘って分布する地層もあるということである。このことは、或る時代の地層がいくつかの山系に亘って堆積した、あるいは火成活動がいくつかの山系に亘って起ったということを示している。日本列島のように、中央構造線・仏像構造線のような大断層が有って、それによって地質系統が大きく変るということはない。各山系の地質は、概略以下のようである。

海岸山系：イカ付近より南部の海岸沿いの地域で、先カンブリア時代～古生代の火成岩類を基盤とし、これに中生代の火成岩が貫入し、さらにこれらを第三紀の陸成層が覆っている。

西山系および中央山系：ペルーでは西山系と中央山系は地形的にも地質的にも明瞭には区別できない（図5.9-13の断面図参照）。大きく3種の地層群が山系の延びにほぼ平行に帯状分布する；すなわちその西部に白亜紀～古第三紀の花崗岩質岩が、その中央部に第三紀～第四紀の安山岩・デイサイト・流紋岩が、その東部に白亜紀の浅海成堆積物が分布する。北部では帯状分布が乱され第三紀の浅海成堆積物が広く覆う。

アルチプラノ：ペルー南端のチチカカ湖からその北西部がアルチプラノの地形、すなわち高地平原をなすが、そこに分布する地層は東山系のそれらとほぼ同じである。ただしここでは帯状分布が乱れている。

東山系：古生代の変成岩類を中心とし、その両側に石炭紀～二疊紀の石灰岩を主とする浅海成堆積物、さらにその両側に三疊紀～ジュラ紀の石灰岩を主とする浅海成堆積物が分布する。変成岩分布域の中に先カンブリア時代の花崗岩質岩が小分布をもって散在する。

サブアンデス：第三紀の陸成層が三疊紀～ジュラ紀の石灰岩等浅海成堆積物を広く覆つて分布する。

## (2) 火成岩類の分布と特徴

図5.9-7にペルーにおける火成岩類の分布を示す。これらは堆積岩類に比べより明瞭な帯状分布を示す。西山系にはその西半に後期白亜紀～第三紀の花崗岩質岩が、その東半に白亜紀～中新世の火山岩類が分布する。南部ではこれらを広く覆つて第三紀～現世の火山岩類が分布する。これら火成岩類がきれいな帯状分布をするのは、火成活動が潜り込むプレートの形態と関係しているからである。第2節で述べたように、この第三紀～現世の火山岩類が南部にのみ分布しその北に分布しないのは、和達・ベニオフ帯の角度の相違による。

図5.9-8にクスコ周辺の後期二疊紀花崗岩の分布を示す。この花崗岩の分布域は東山系に属する。これらは同時期の火山岩類と共に分布する。その産状はちょうど日本の領家花崗岩と濃飛流紋岩のようなものである。マチュピチュの花崗岩はこの図の[11]の岩体である。

図5.9-9に中部アンデス、ペルー南部～チリ・アルゼンチン北部地域における新生代（主として中新世～現世）の火山岩類の分布を示す。ペルー側には主として“Rhyolite Formation”が、チリ・アルゼンチン側には“Andesite Formation”を軸とし、その両側に

“Rhyolite Formation”が分布している。ここでの火山活動には、概して、流紋岩の噴出、次いで安山岩の噴出という密接な連携があり、マグマ生成機構を知る上で重要とされている。しかし、この反対の噴出順もしばしば認められてる。第2節で述べたように、中部アンデスの中でこの地域はもっとも地核の厚さのが厚いところで（70～74 km）、膨大な“Andesite Formation”的噴出はそれと密接に関係していると考えられている。

### (3) ペルーアンデスの古地理変遷

図5.9-10にペルーアンデスにおける後期三疊紀～後期ジュラ紀の古地理図を示す。この期間約9千万年間に、海陸分布や火山分布が、現在の「海岸山系～西山系～中央山系～東山系」に亘る地域で徐々に変遷したことが示されている。この時期には現在の山系のような山脈地形はなく、緩やかな起伏をもった大陸プラットフォーム的な地形であったことが分る。図5.9-11にペルーにおける中生代の堆積岩の東西層相変化と地層の厚さの変化を示す。大局的に、東側で陸成層が卓越し、西側で海成層が卓越すること、および西から東に向って徐々に地層の厚さが厚くなることが分る。

図5.9-12には、ペルーアンデス地域との比較のために、チリアンデスにおける三疊紀から現世までの東西の層相変化、および火山活動の位置の変化を示す。ペルー同様、海岸山系～サブアンデスは一連の大陸プラットフォーム的な地形から現在の山脈地形に徐々に変遷したことが伺える。

### (4) ペルーアンデスの地質構造

アンデスの地質構造の解釈は研究者によってかなり異なる。山脈を横切る断面図も多数提案されているものの、定説はない。また、北部・中部・南部アンデスで地質構造が異なり、それぞれの地区の中でも火成活動の有ったところ、無かつたところで構造が異なる。このような複雑さ・多様性は、プレート運動の様式、すなわちプレートの潜り込み角度、ナスカプレートと南米プレートの衝突する角度（正面衝突～斜め潜り込み）、潜り込む海嶺の位置、潜り込む速度などが場所により時代により変化したことに起因する。

アンデスの地質構造をごく大掴みに捉えると、海岸山系では正断層や横すべり断層が卓越、西山系～東山系で高角の正・逆断層と褶曲が卓越、サブアンデスで表層数kmの低角スラスト・褶曲が卓越、ということであろうか。

図5.9-13～図5.9-18にペルーアンデスを含むいくつかの断面図を示す。図5.9-13はリマを通る東西断面とエクアドルアンデスの東西断面である。サブアンデスの低角スラストが高角に描いてあるのは縦横の縮尺を考慮に入れたためである。我々海外調査団が巡検したのは、リマ断面中、西山系の5000m地点の少し西までである。リマから東へ順に、白亜紀～古第三紀の花崗岩類、次に漸新世～中新世および鮮新世の安山岩～流紋岩類、次に中生代のよく成層した石灰岩と砂岩および石炭紀～二疊紀の余り成層していない石灰岩を交互に、そしてその中におそらく断層で挟み込まれた古生代のスレートを見学した。この

巡査ルート間では、この断面図にも示してあるように、褶曲や断層は少なく、地層は緩やかに傾斜している。

図 5.9-14～図 5.9-15 はアンデスの北から南の 7 断面を示す。非常に簡略化・模式化した断面ではあるが、要素となる地質系統と代表的構造を示してあり、北から南の構造の変化、および地形的特徴を掴みやすい。図 5.9-16 の表は、図 5.9-15 の断面の位置での主要なテクトニックイベントの時代変遷を示している。全アンデスを通じて、場所により時期の多少の異同はあるものの、三疊紀後期～ジュラ紀に島弧火山活動と背弧海盆の形成、ジュラ紀末期～白亜紀中期にアンデスの主要地殻変動の開始、第三紀に入ってからの褶曲一断層帯の形成という変遷が読みとれる。主要変動の開始時期が北ほど早いのは、大西洋の開離が北ほど早かったことと関係している。

図 5.9-17～図 5.9-18 はエクアドル、ペルー中央、チリ北～ボリビアの 3 断面（縦横比 = 1 : 1）での表層地質構造および下部地殻～マントル構造の相違を対比し、加えて各山系との関係を示したものである。大胆なモデルではあるが、大アンデスの全体像をイメージするのに役立つであろう。

図 5.9-19 はアンデスの基盤、すなわち先カンブリアおよび初期古生代の地層・岩石の分布を示し、ゴンドワナ大陸の西縁がどのようなものであったかを示したものである。今回の 31st-IGC のオルドビス紀のテクトニクスのセッションでは、オルドビス紀には南米大陸西岸と北米大陸東岸とが連結していたとの発表があった。その大きな根拠の一つはオルドビス紀のグラプトライト（筆石）動物群の一一致とその世界分布である。

図 5.9-20～図 5.9-22 はペルーアンデス、およびチリ北部～ボリビアの中部アンデスにおける、中生代以降の構造発達史モデルである。両地域におけるプレート潜り込み角度の違いによる地質構造の違いをモデル的に示してある。図 5.9-21 と図 5.9-22 はほぼ同位置での断面であるが著者によって大きく解釈が違う。また、図 5.9-18-B, -C の現世の断面と図 5.9-21 の中新世～現世の断面は、ほぼ同位置で断面を切ってあるが、両者はやはり大きく異なる。

以上のように、アンデスの地質構造の解釈は、現時点ではモデル提出の時代といえよう。アンデス山脈は、5000～6000m 級の高山が連なり、また中部アンデスの大半は非常に乾燥地帯であり、南部アンデスには氷河が発達している。これらのため道路が未発達であり、人口も少なく、調査のためのアプローチが非常に困難である。これから考えると、アンデスの地質調査は未だ“探検”的な域を出ないように思われる。

### (5) ペルーの鉱物資源

ペルーアンデスには多くの鉱物資源がある。それらの多くは火成活動に伴うものである。

図 5.9-23 にペルーの鉱物資源分布を示す。それらの多くは西山系の第三紀火山岩に伴うもので、銅・鉛・亜鉛・銀がもっとも多い。サブアンデスには石油を産出する。

## 引用文献

- Cordani, U.G. and Sato, K., 1999, Crustal evolution of the South American platform, based on Nd isotopic systematics on granitoid rocks: *Episodes*, v. 22, p. 167-173.
- Jaillard, E. et al., 2000, Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northernmost Chile: in Cordani, U.G. et al., eds., *Tectonic evolution of South America*, p. 481-559, Rio de Janeiro 31<sup>st</sup> IGC, 2000.
- Kay, S. M. and Mpodozis, C, 2001, Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust: *GSA Today*, v. 11, no. 3, p. 4-9.
- Moores, E.M. and Twiss, R.J., 1995, *Tectonics*, W.H. Freeman and Co., 415 p.
- Ramos, V. A. and Aleman, A., 2000, Tectonic evolution of the Andes: in Cordani, U.G. et al., eds., *Tectonic evolution of South America*, p. 635-685, Rio de Janeiro 31<sup>st</sup> IGC, 2000.
- Windley, B.F., 1995, *The evolving continents*, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons, 526 p.
- Zeil, W., 1979, *The Andes --a geological review--*, Gebruder Borntraeger, 260 p.

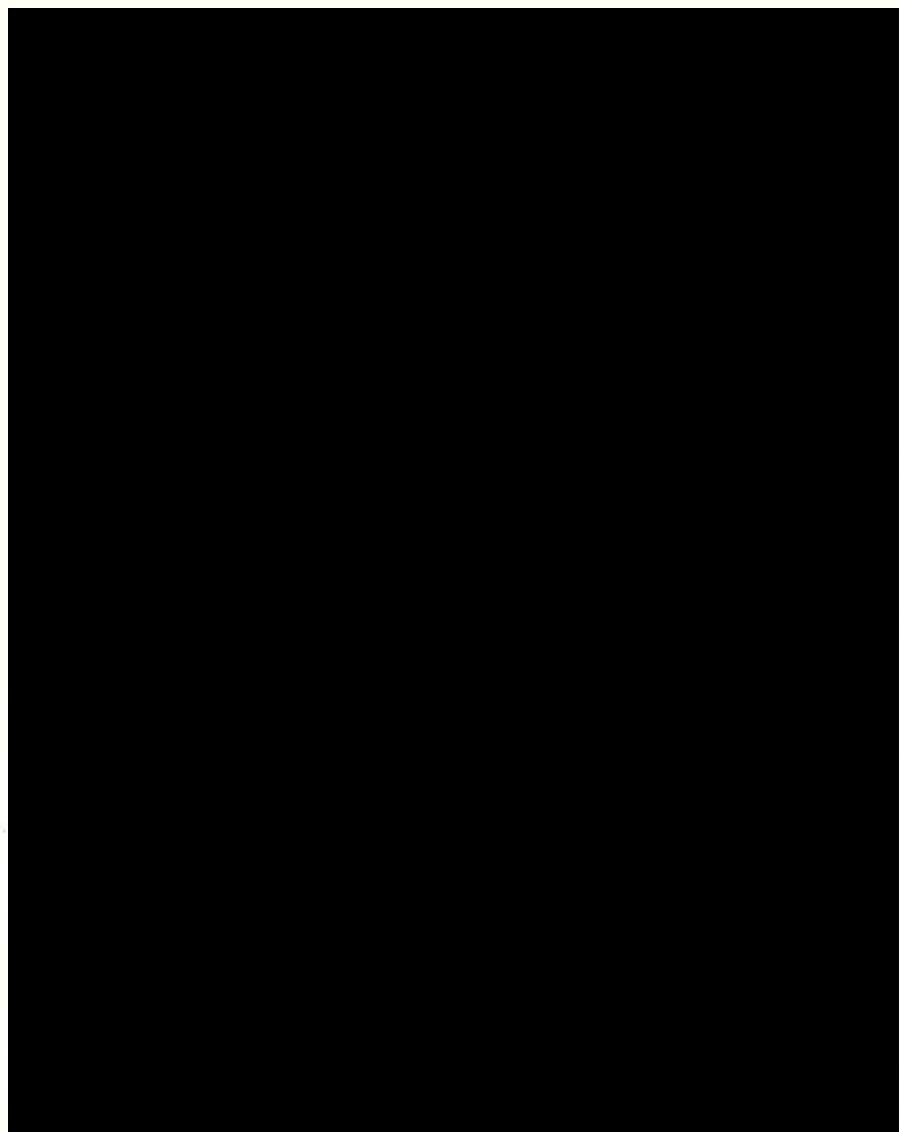


Figure 1 Crustal provinces of South America.

図 5.9-1 Cordani, U. G. and Sato, K. (1999) より

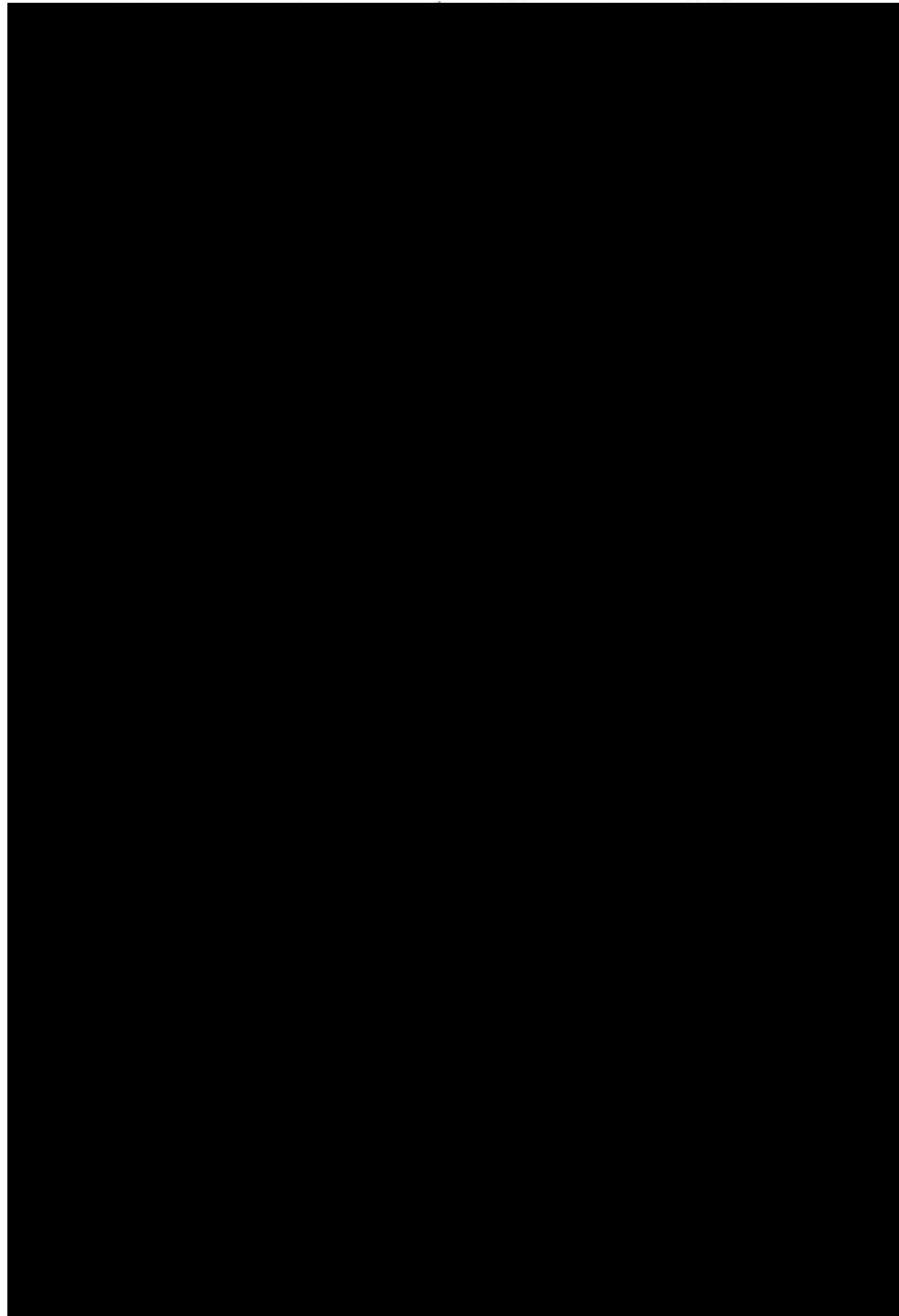
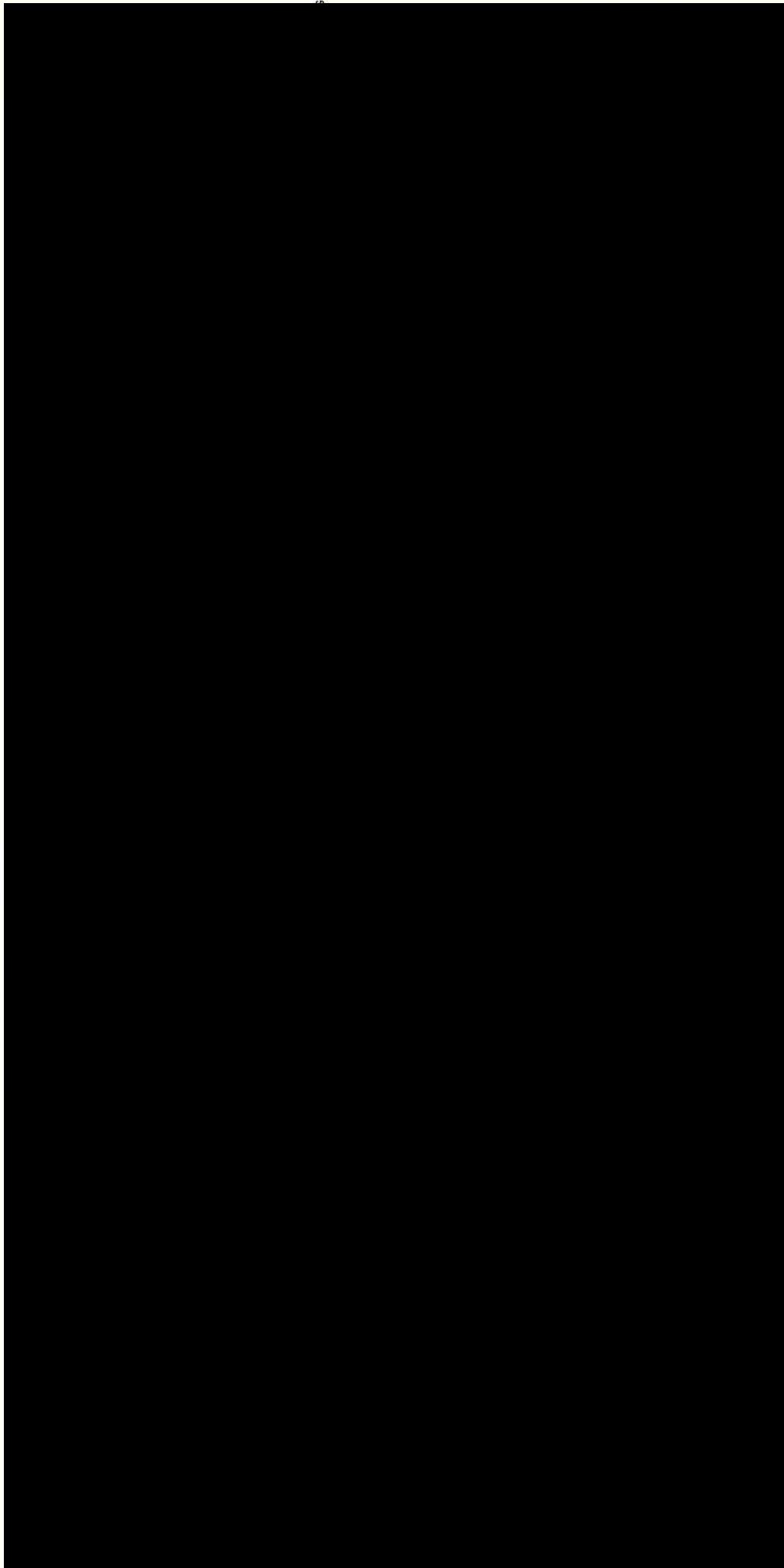


図 5.9-2 Zeil, W. (1979) より





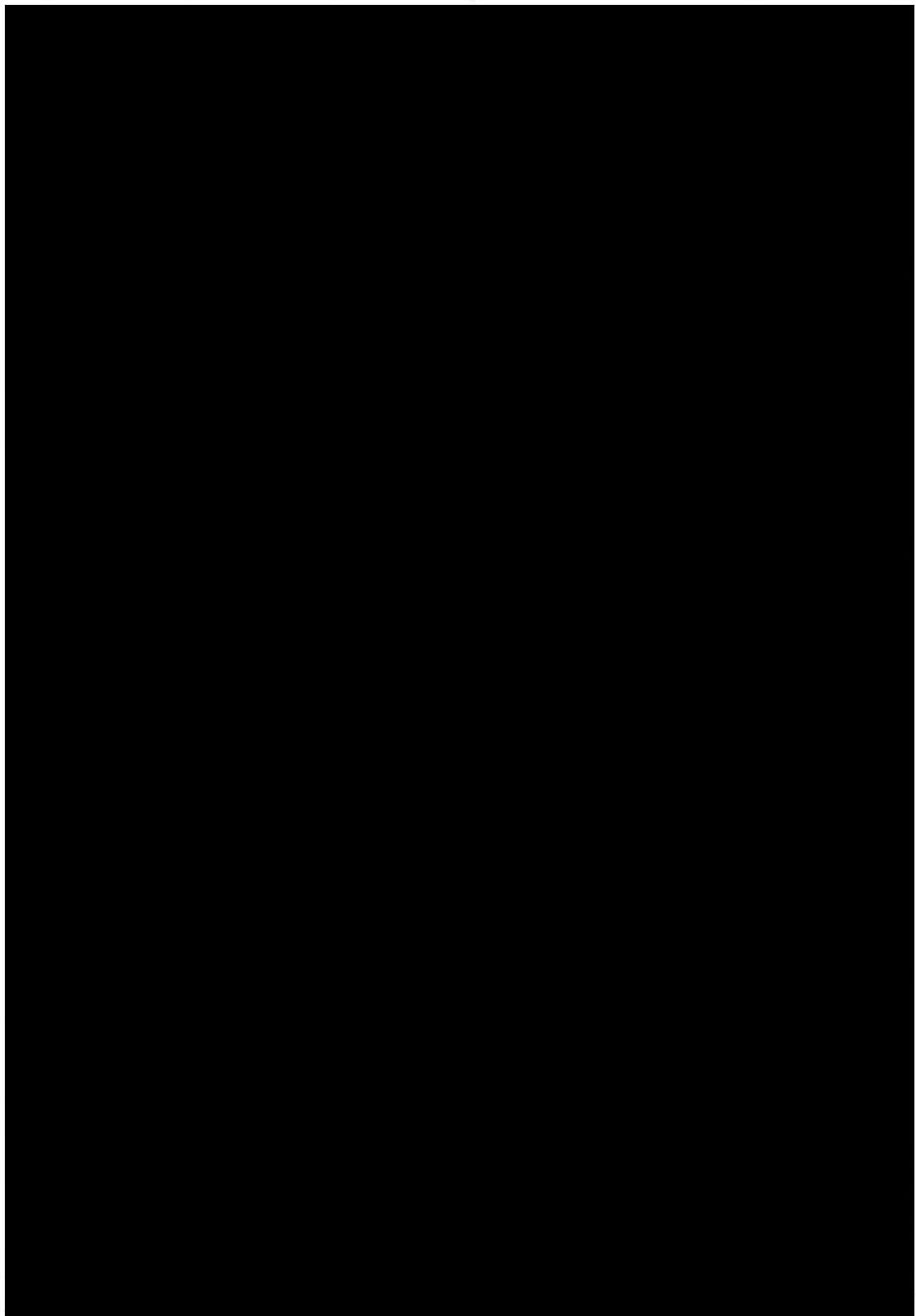


図 5.9-5 Zeil, W. (1979) より



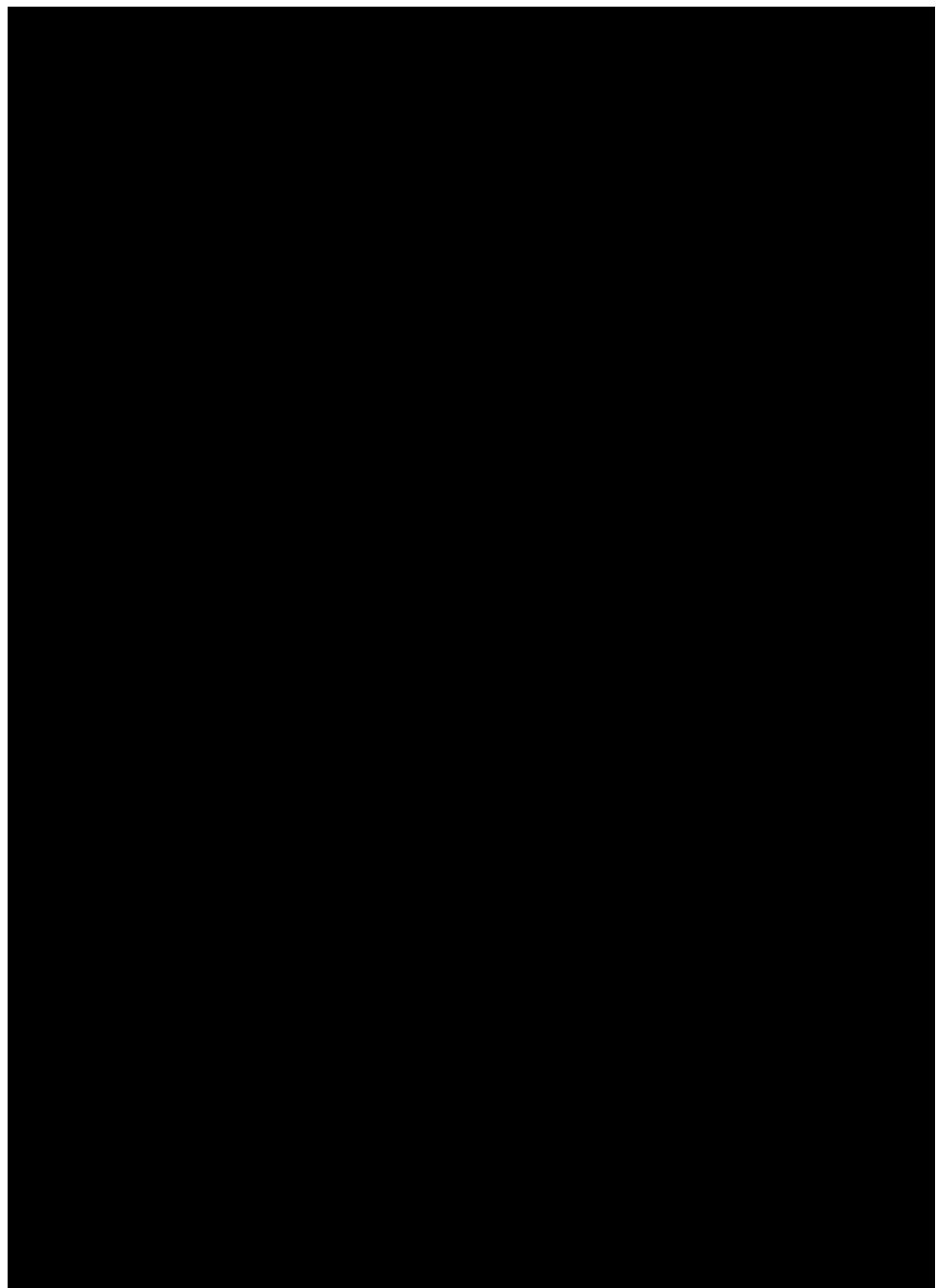


Fig. 25. Distribution and age of plutonic and volcanic rocks in Ecuador and Peru. Sketch map based on various data given in the literature.

図 5.9-7 Zeil, W. (1979) より

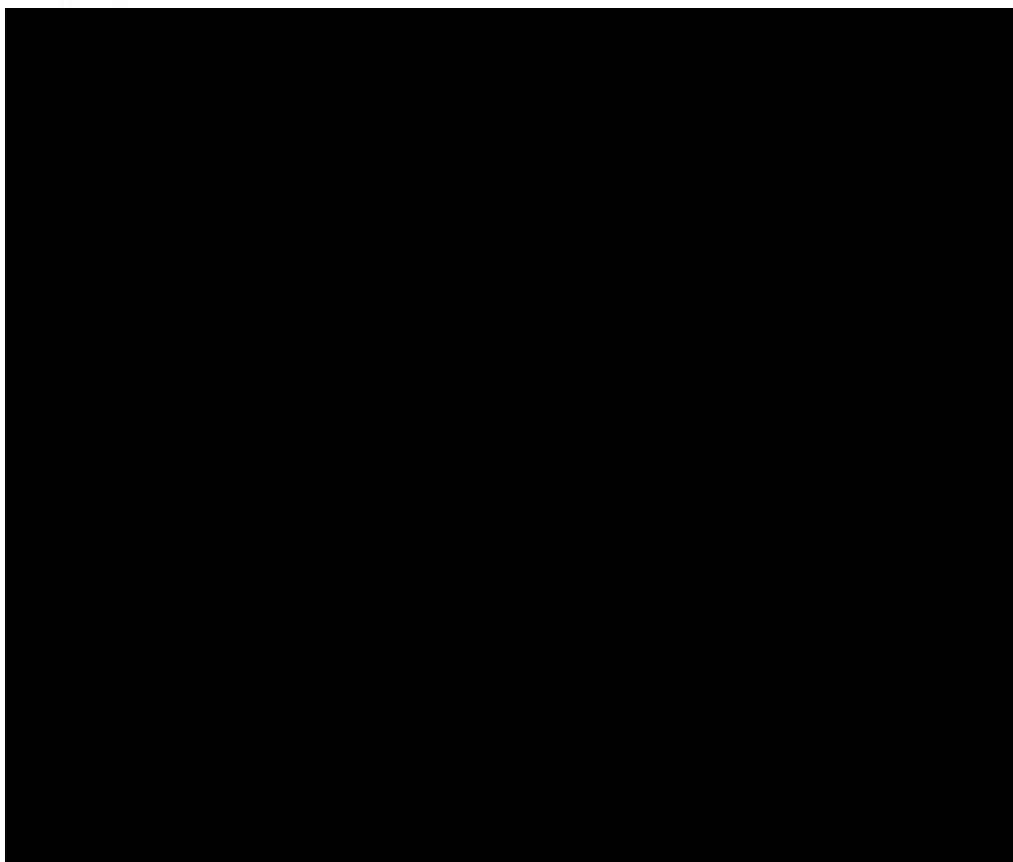


Fig. 27. Distribution of Upper Paleozoic volcanic and plutonic rocks in the Andes of southern Peru.  
According to LANCELOT, LAUBACHER, MAROCCHI & RENAUD (1978).

図 5.9-8 Zeil, W. (1979) より

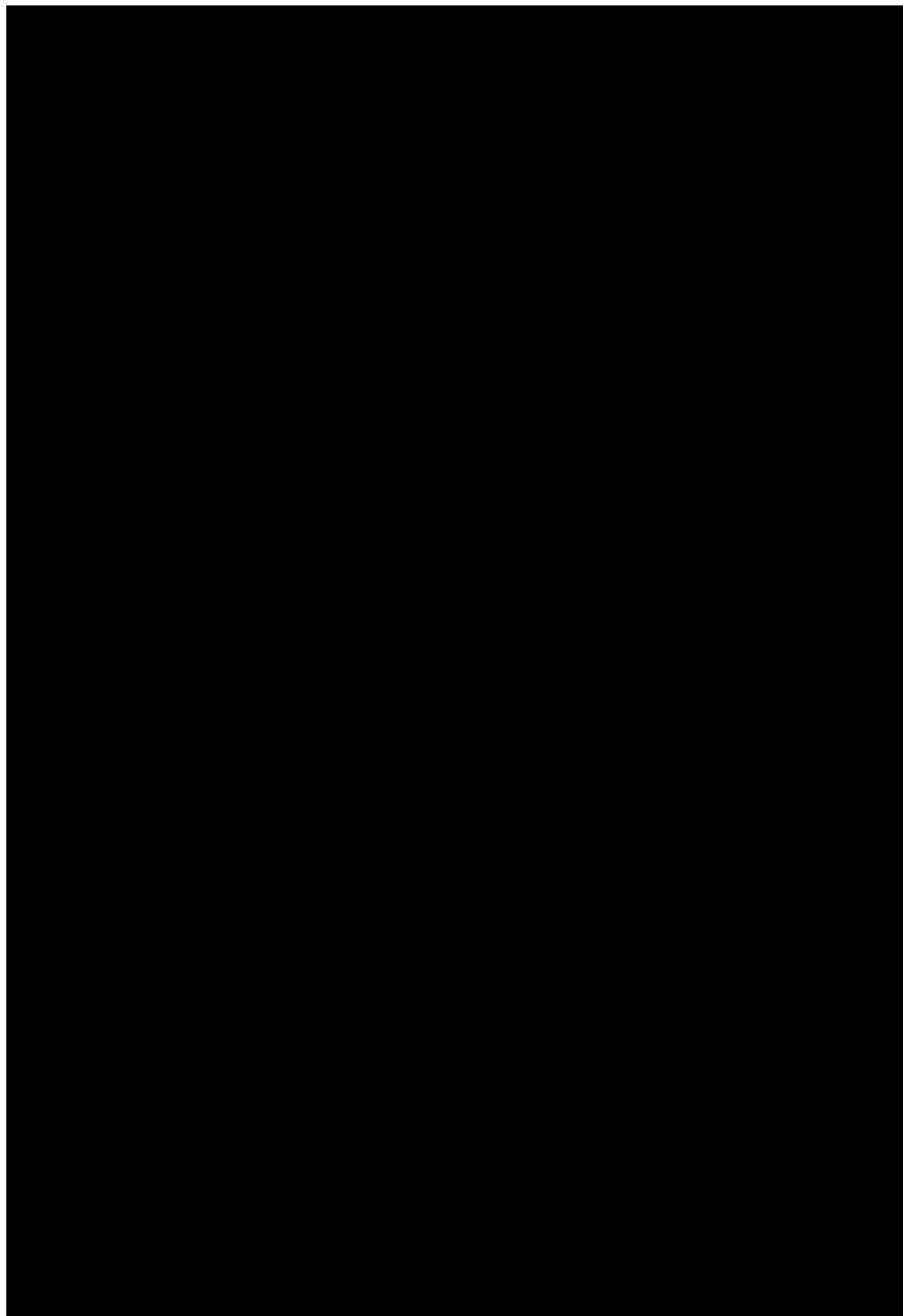


Fig. 41. Distribution of Cainozoic volcanism in the central section of the Andes. For the sake of comparison the inset map shows the size of the area covered by the Federal Republic of Germany.

図 5.9-9 Zeil, W. (1979) より

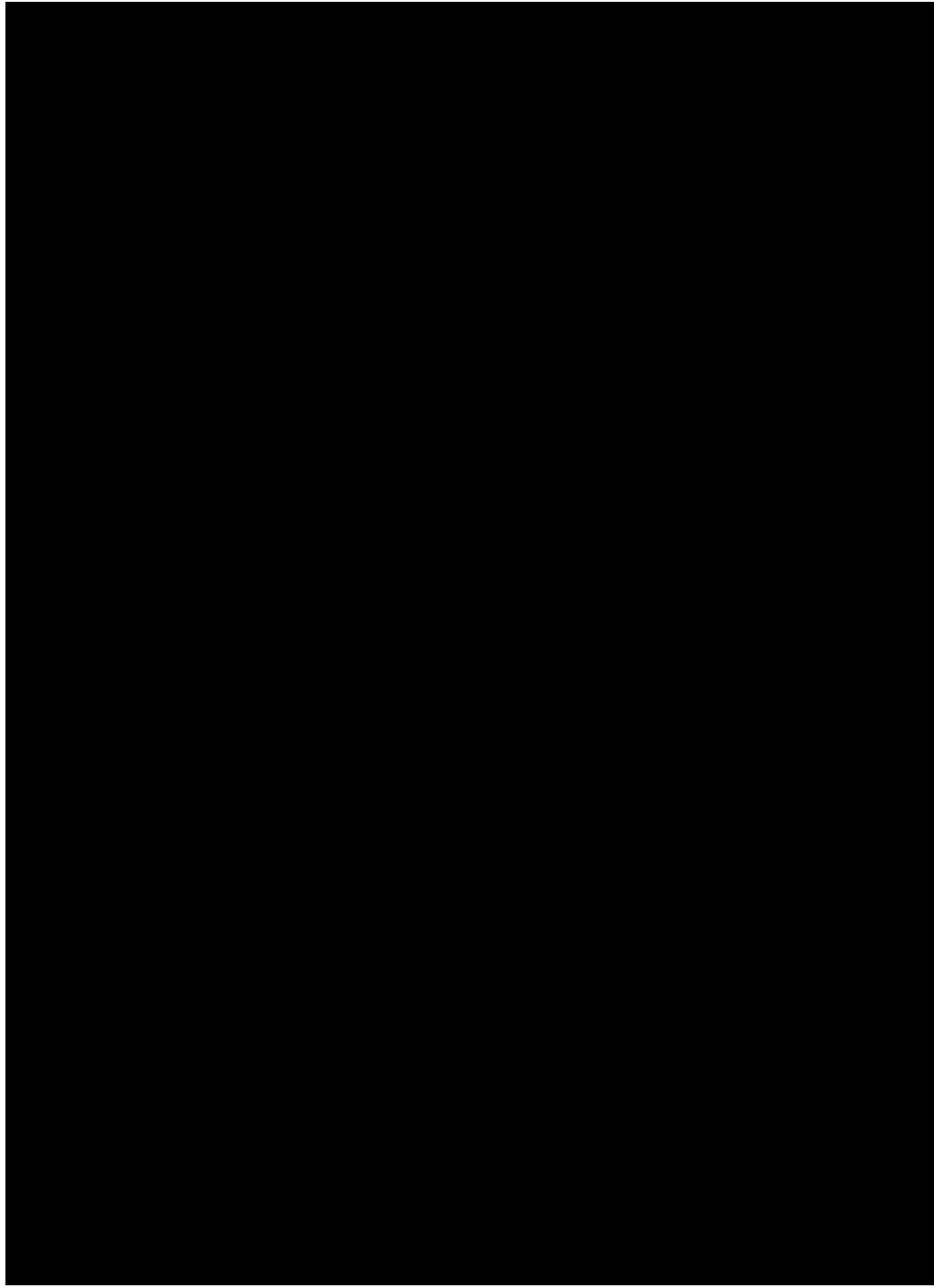


Fig. 88. Schematic general view of the facies of the Peruvian Andes from the Upper Triassic to the Upper Jurassic. According to AUDEBAUD et al. (1973).

図 5.9-10 Zeil, W. (1979) より

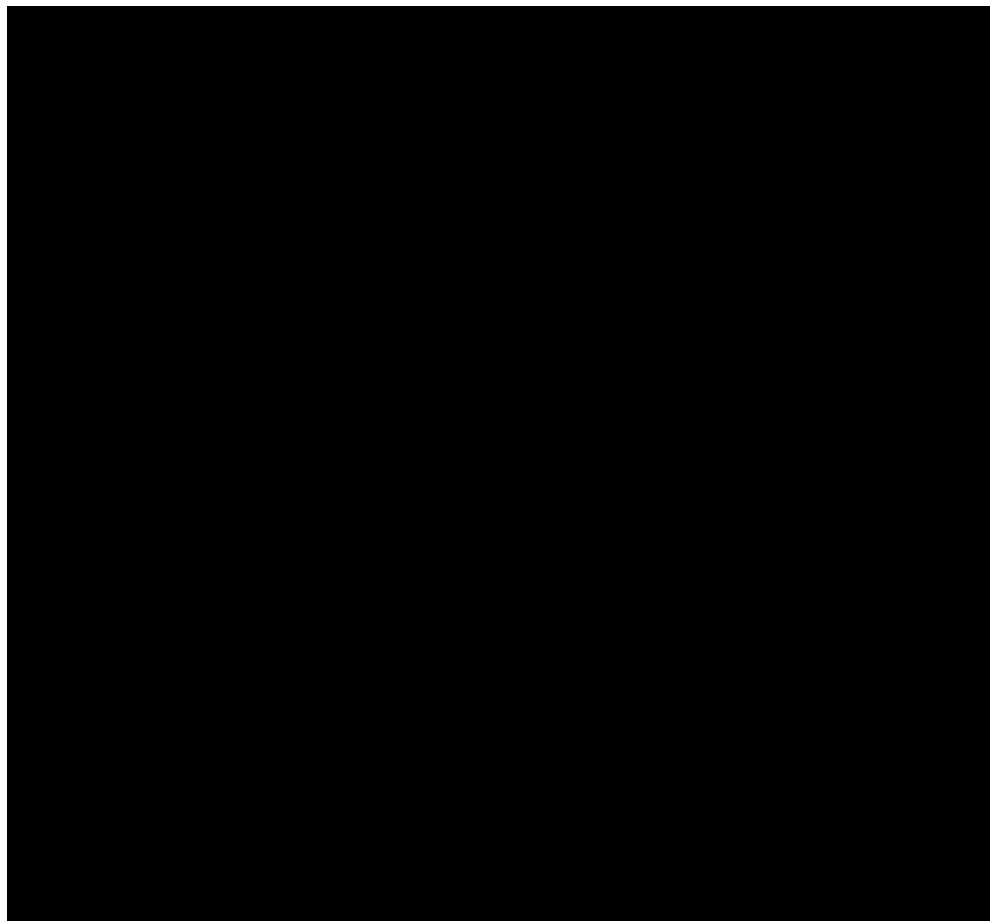


Fig. 89. Facies and thicknesses of the Mesozoic in Peru. According to GERTH (1960).

図 5.9-11 Zeil, W. (1979) より

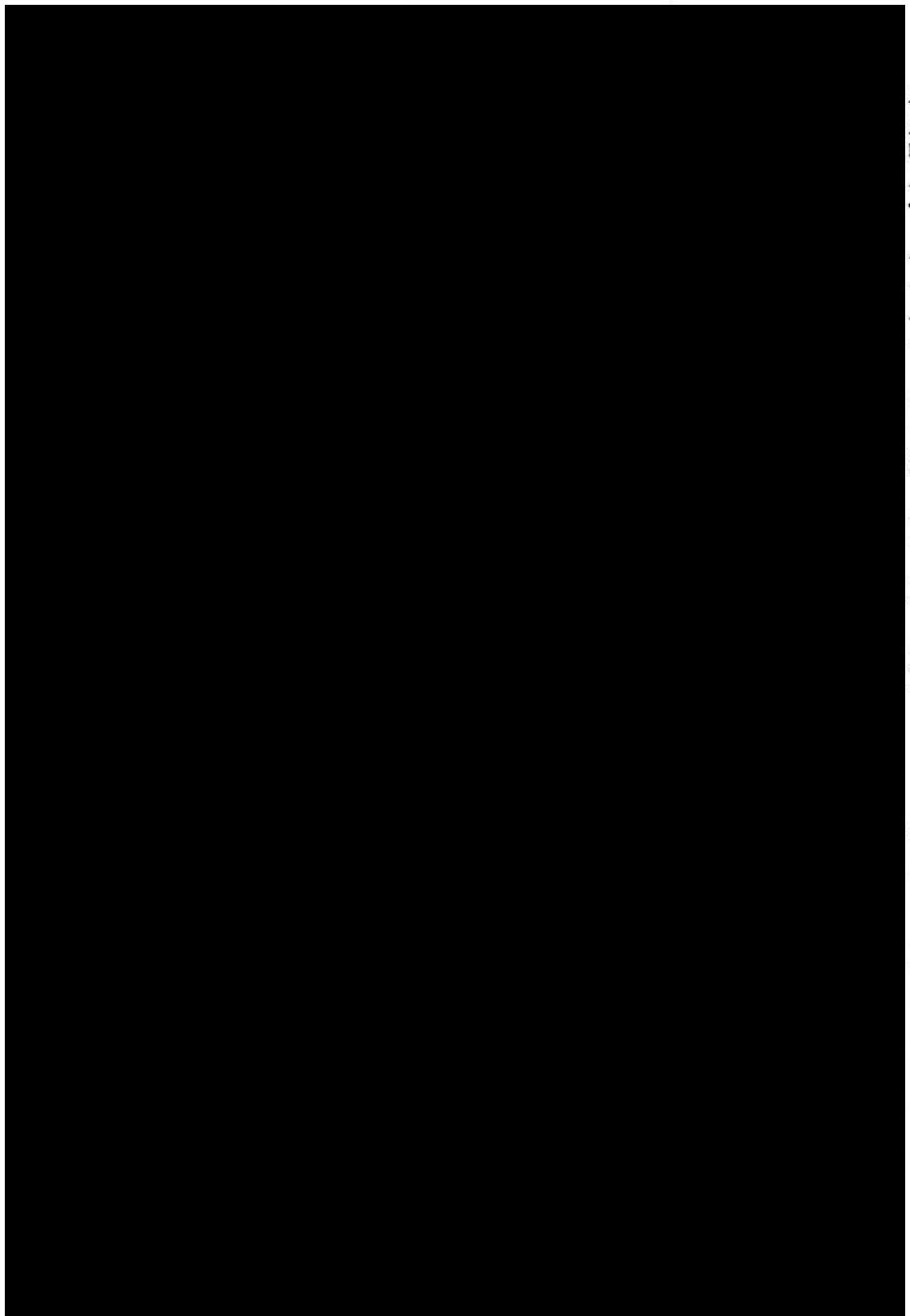


Fig. 90. Diagrammatic view of the stratigraphic structure and facies of the Andes of Peru since the beginning of the Triassic.  
According to AUDEBAUD, LAUBACHER & MAROCCHI (1976).

☒ 5.9-12 Zeil, W. (1979) ↗

図 5.9-13 Zeil, W. (1979) 6

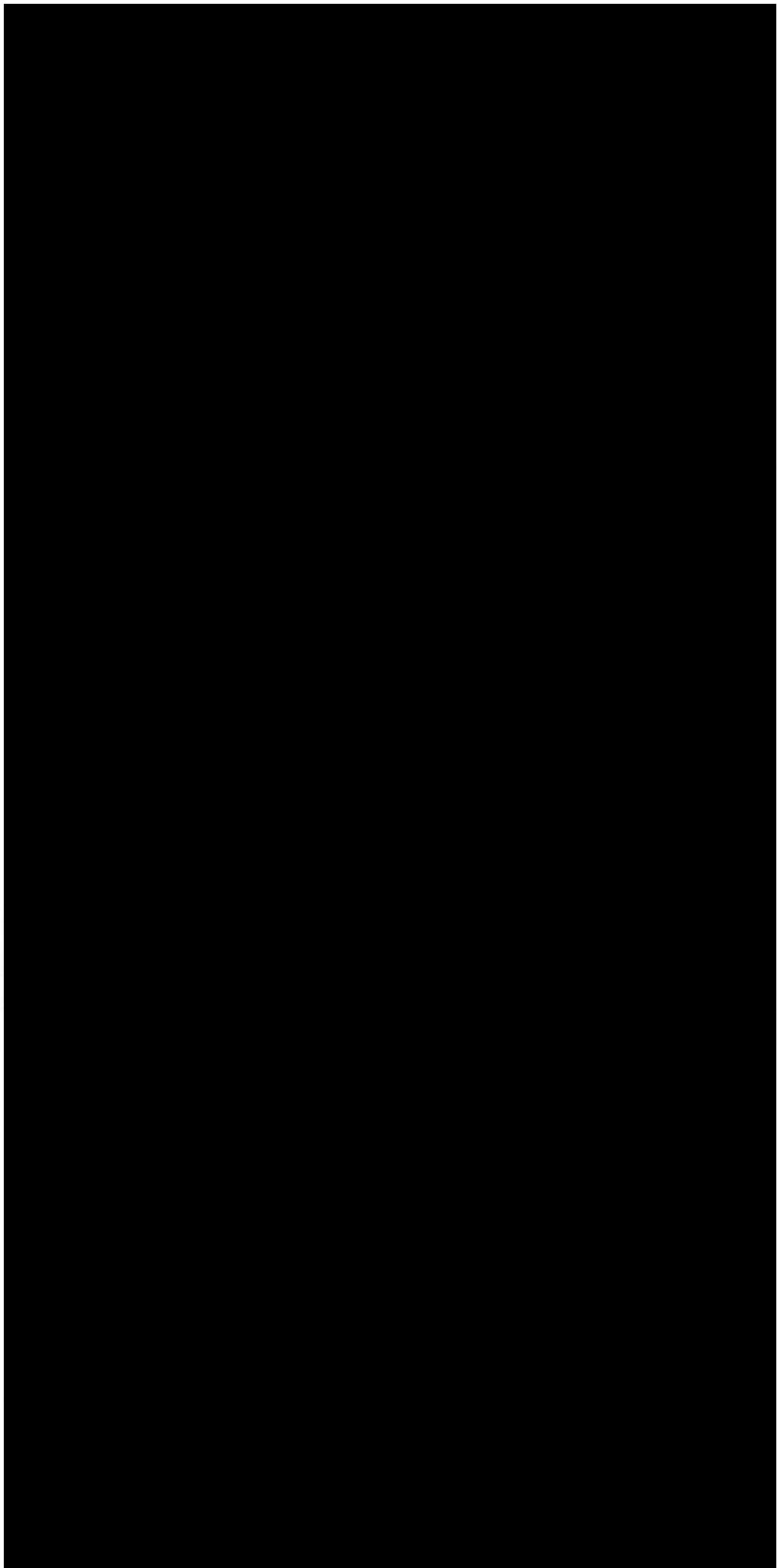


図 5.9-14 Moores, E. M. and Twiss, R. J. (1995) 57

Figure 12.12 Map of Andes, South America, showing principal tectonic features. (After Mégard, 1989; Mpodozis and Ramos, 1989)

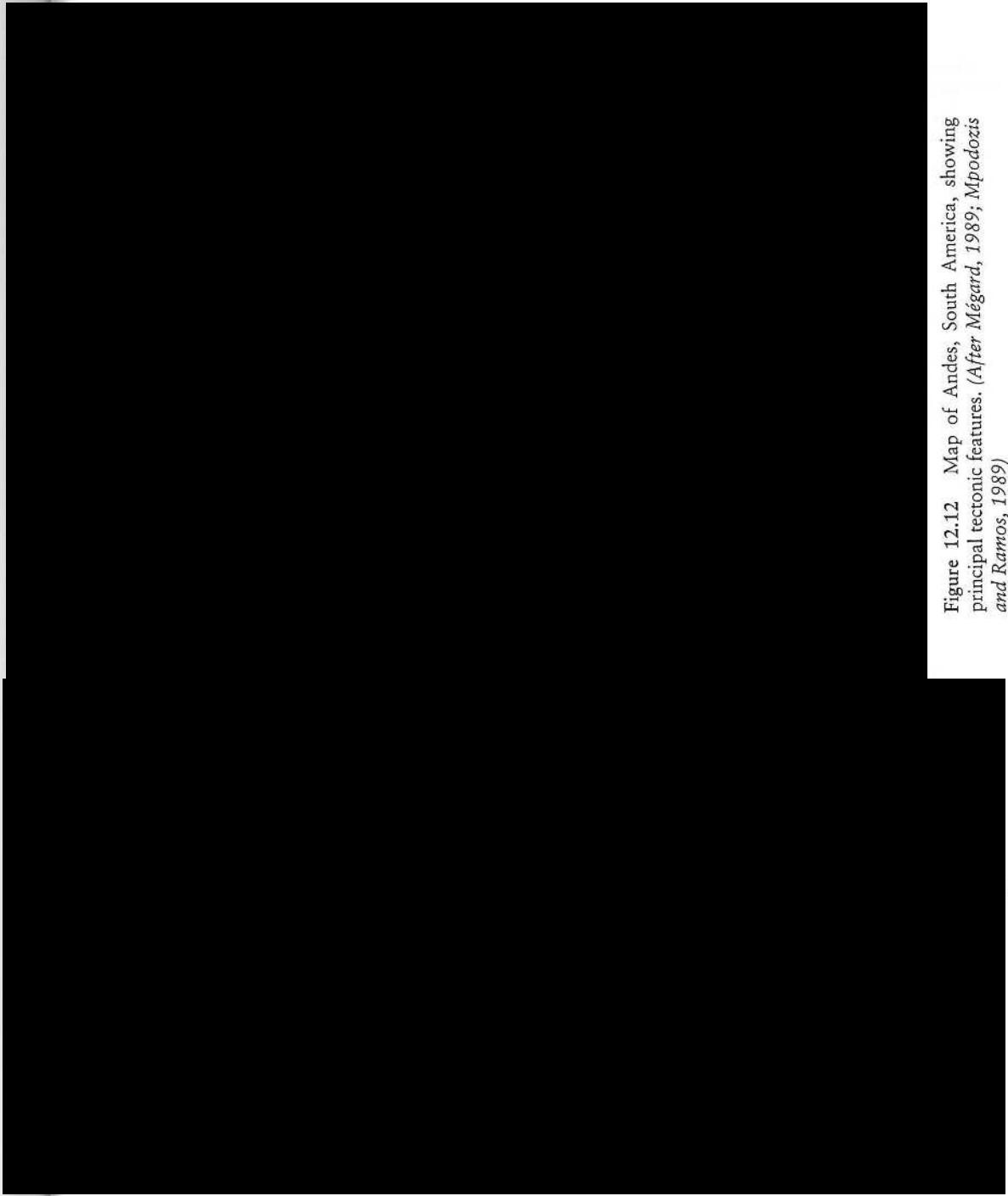


図 5.9-15 Moores, E. M. and Twiss, R. J. (1995) 75

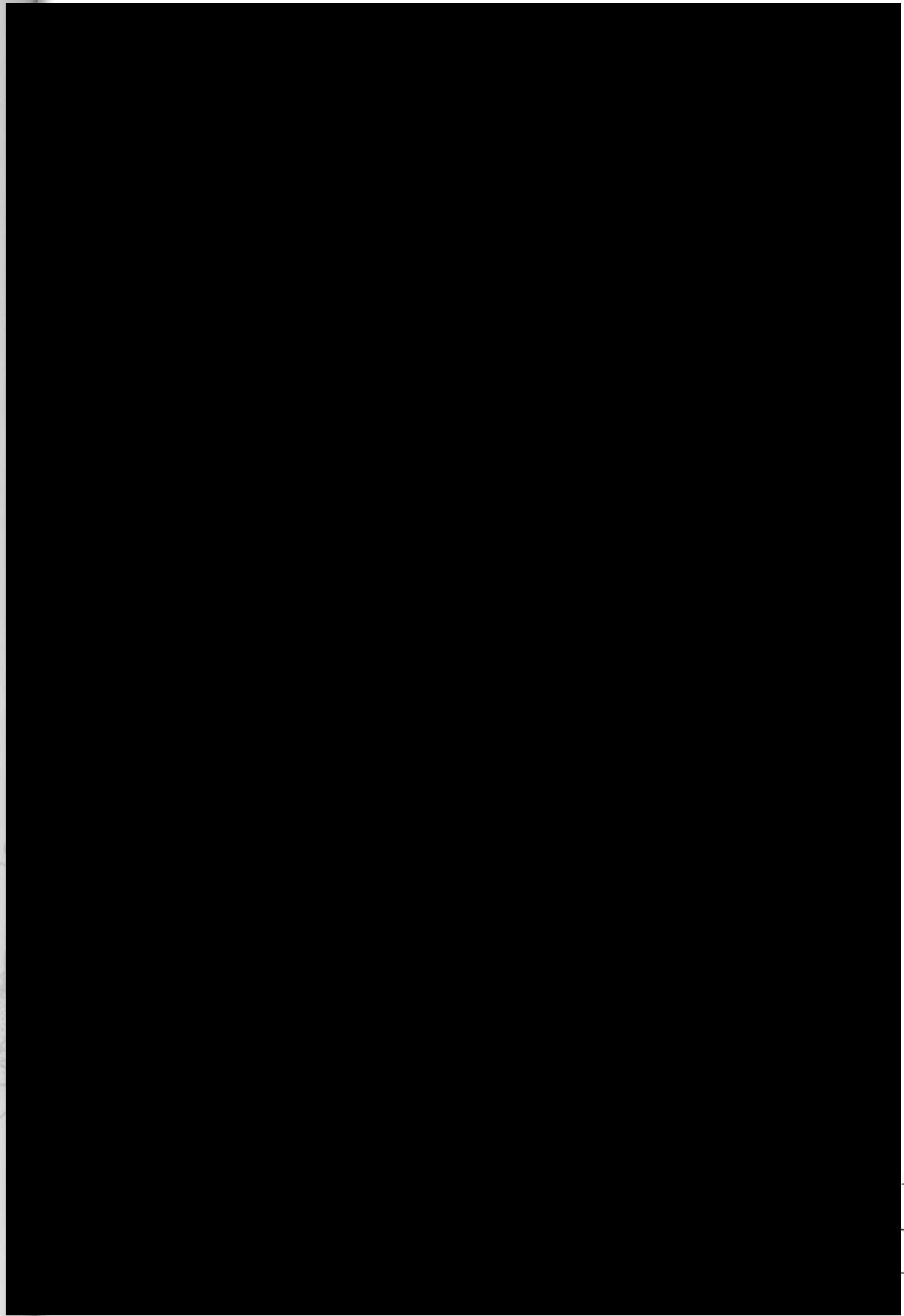


Figure 12.13 Cross sections of the Andes. (A. after Vicente, 1989; B. after Roeder, 1988, and Vicente, 1989; C-G. after Mpodozis and Ramos, 1989)

図 5.9-15 Moores, E. M. and Twiss, R. J. (1995) より  
76

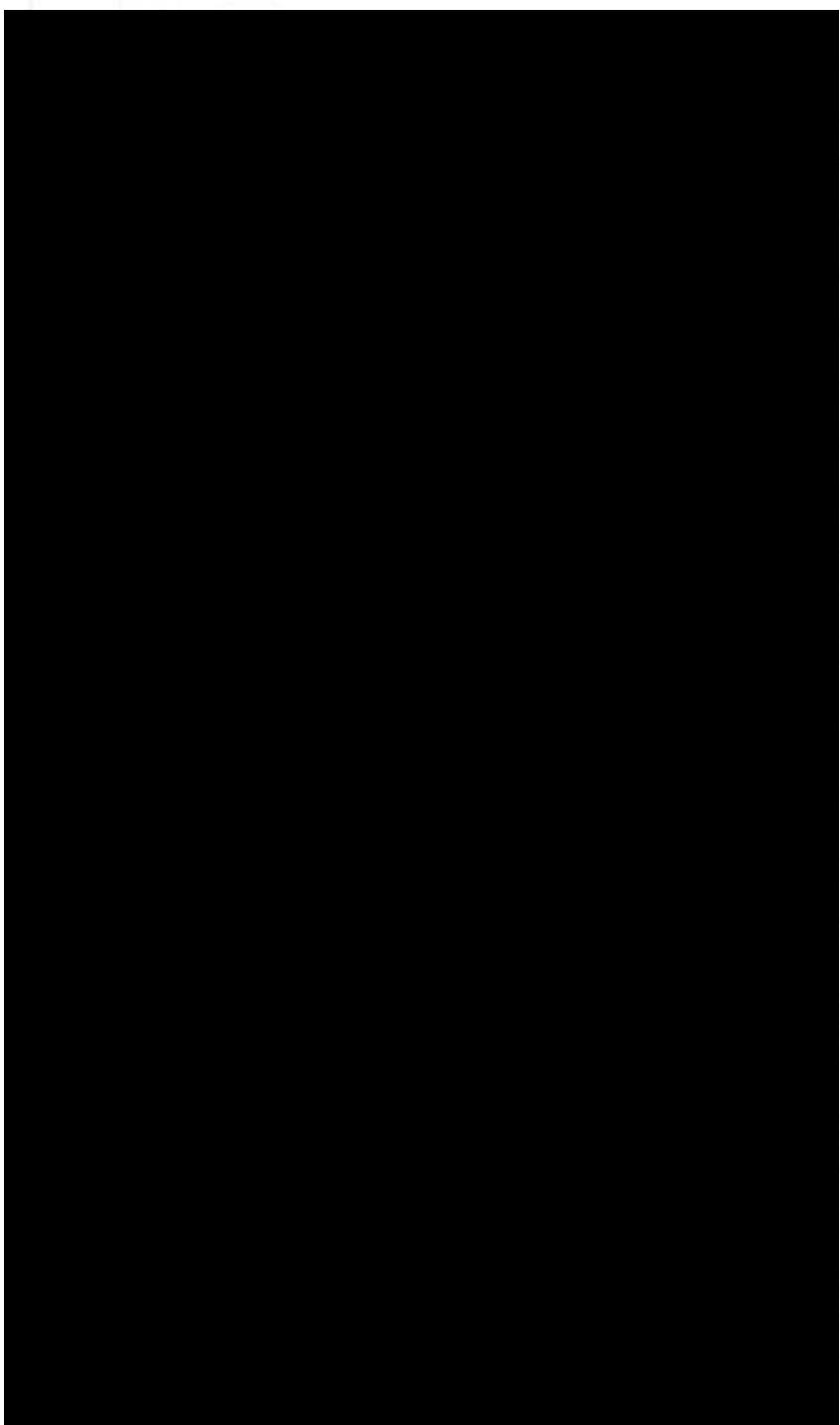


Figure 12.14 Time-space diagram showing principal tectonic events along length of Andes.  
Heavy dashed line is onset of main Andean deformation.

図 5.9-16 Moores, E. M. and Twiss, R. J. (1995) による

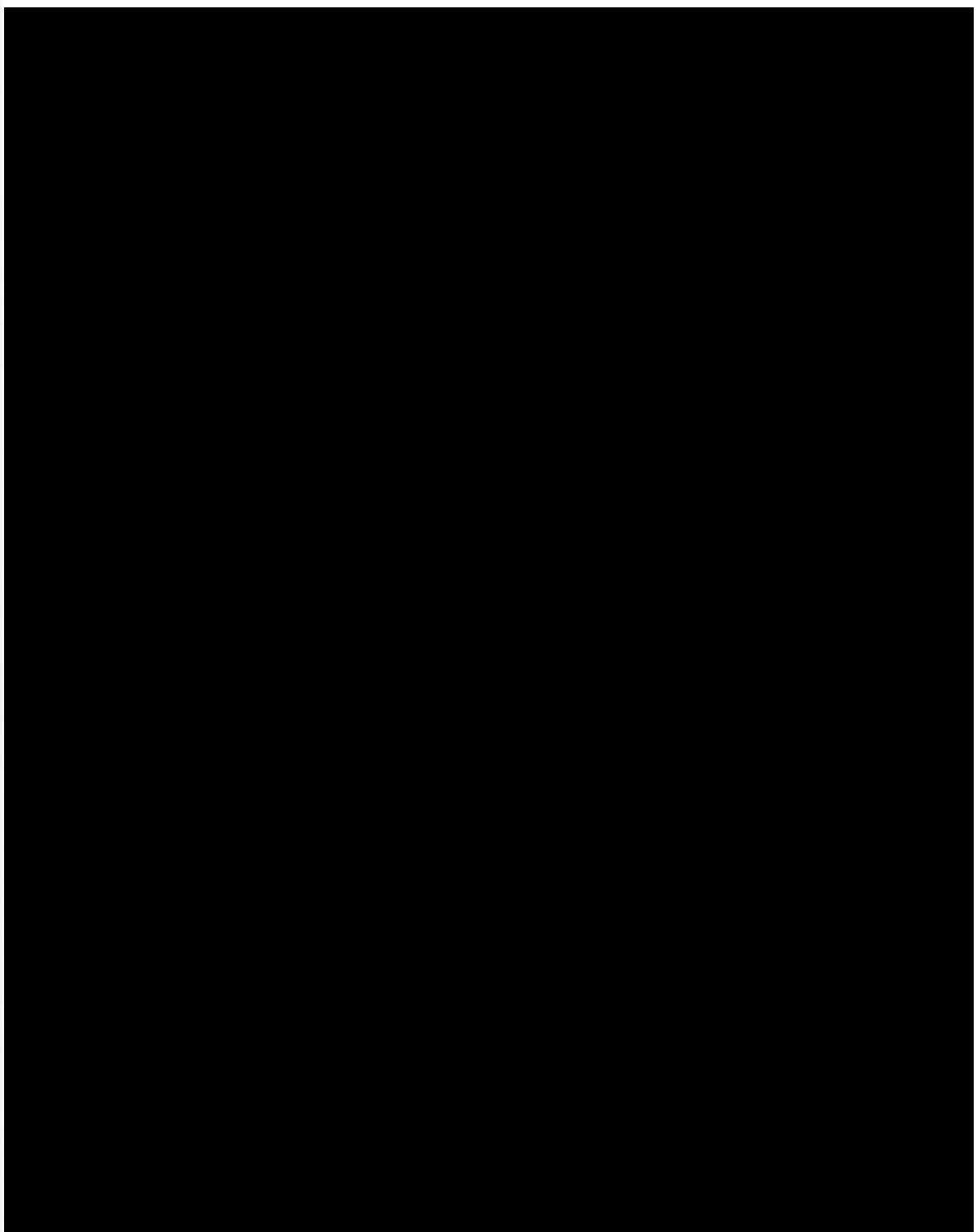
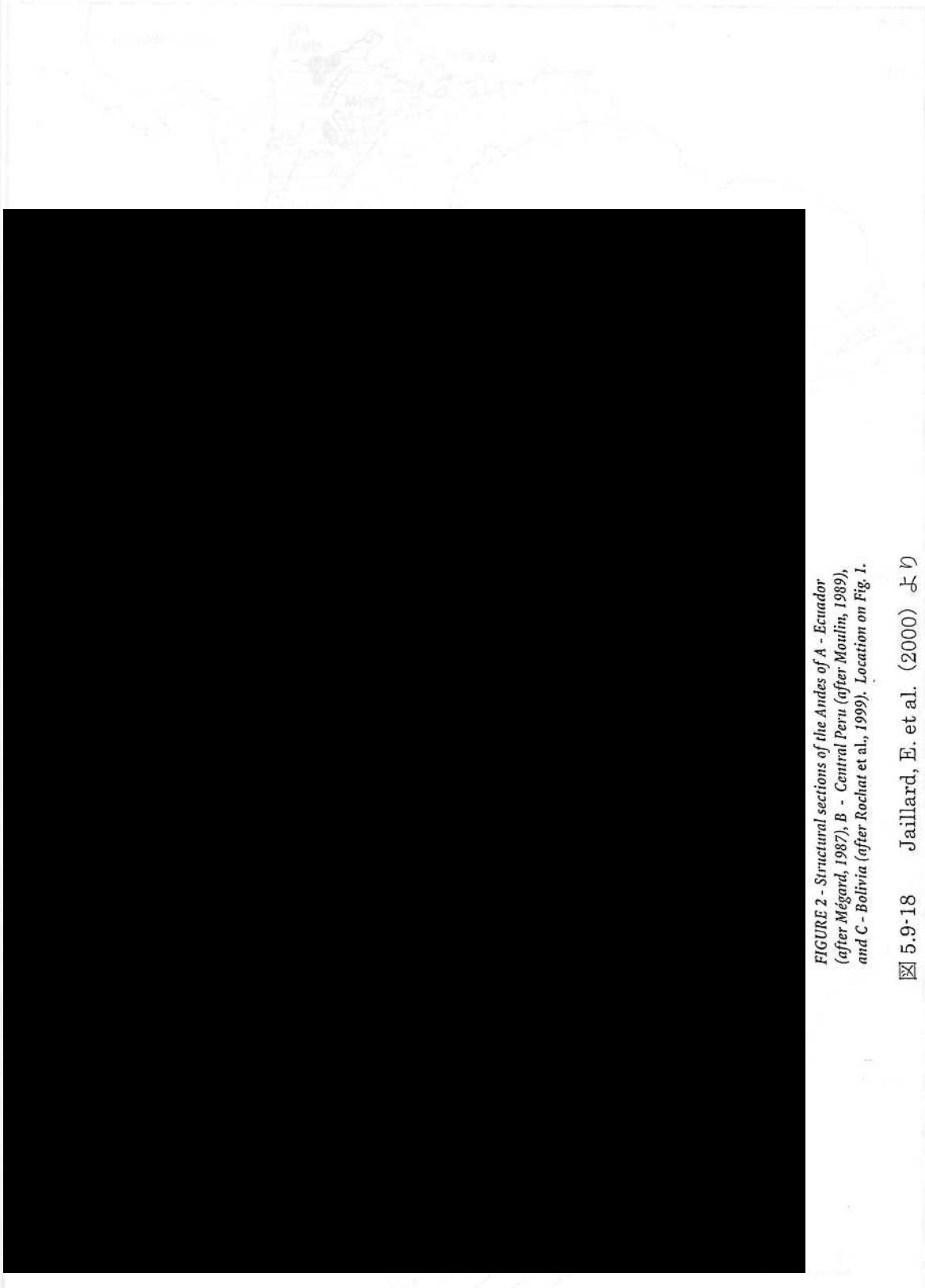


FIGURE 1 - Structural sketch of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northern Chile, showing the main morphostructural units. A, B, C is the location of profiles of Fig. 2.

図 5.9-17 Jaillard, E. et al. (2000) より

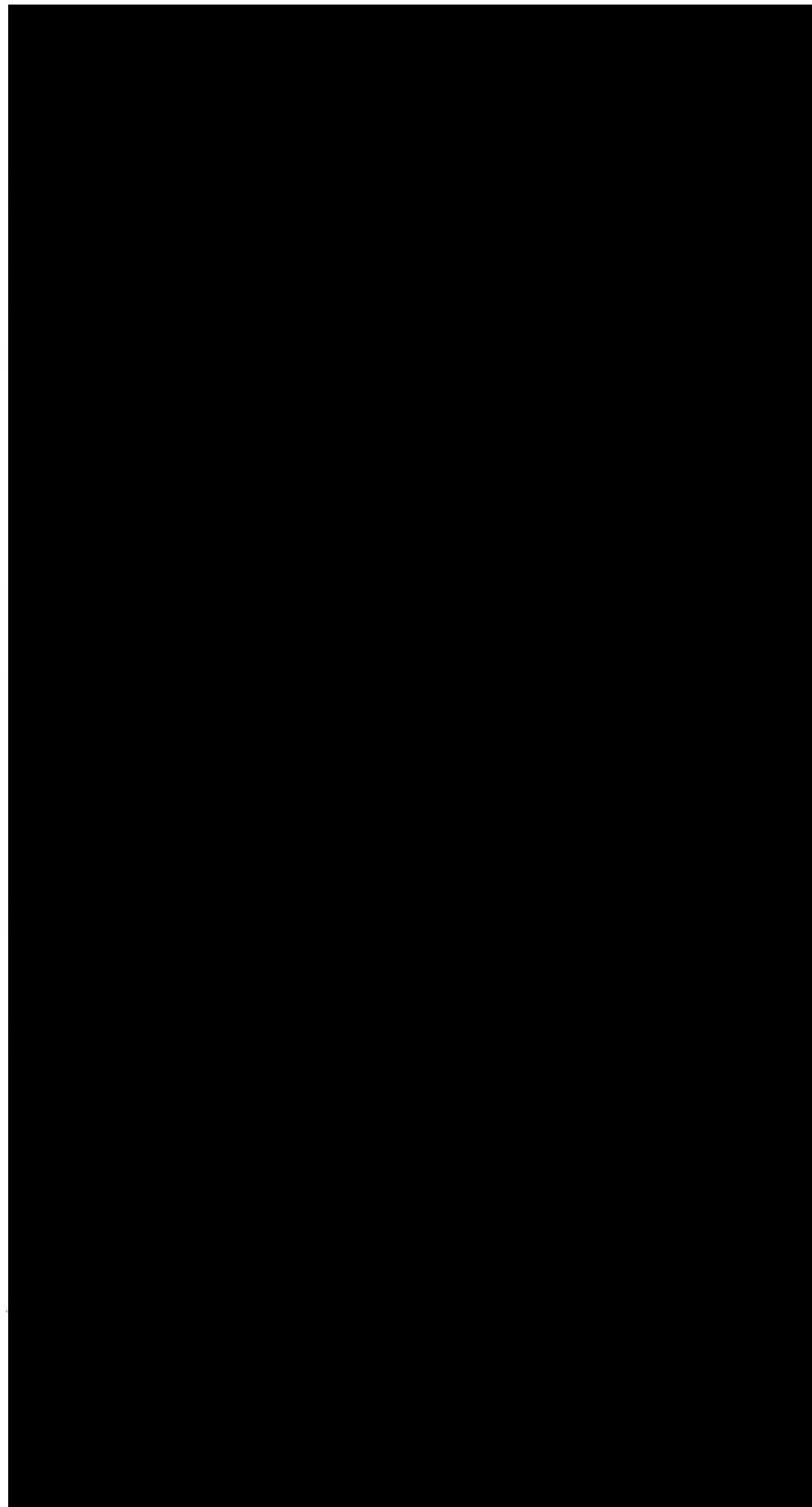
FIGURE 2 - Structural sections of the Andes of A - Ecuador  
(after Mégard, 1987), B - Central Peru (after Moulin, 1989),  
and C - Bolivia (after Rochat et al., 1999). Location on Fig. 1.

図 5.9-18 Jaillard, E. et al. (2000) 29



**FIGURE 2: Reconstruction of the proto-margin of western Gondwana with indication of the main Precambrian and Early Paleozoic blocks underlying the Andean cover (modified after Bellizzia and Pimentel, 1994; Restrepo-Pace, 1992; Restrepo-Pace et al., 1997; Keppie and Ortega Gutiérrez, 1999; Ramos, 1988a).**

図 5.9-19      Ramos, V. A. and Aleman, A. (2000) より



**FIGURE 15: a) to c)** Tectonic evolution of the Peruvian margin from an intra-arc setting and generalized rifting in the Early Cretaceous to a compressive regime in the Cenozoic; d) Late Cenozoic in Northern and Central Peru; e) Late Cenozoic in Southern Peru (modified after Soler and Bonhomme, 1990; Sébrier and Soler, 1991; Sandeman et al., 1995).

図 5.9-20 Ramos, V. A. and Aleman, A. (2000) より

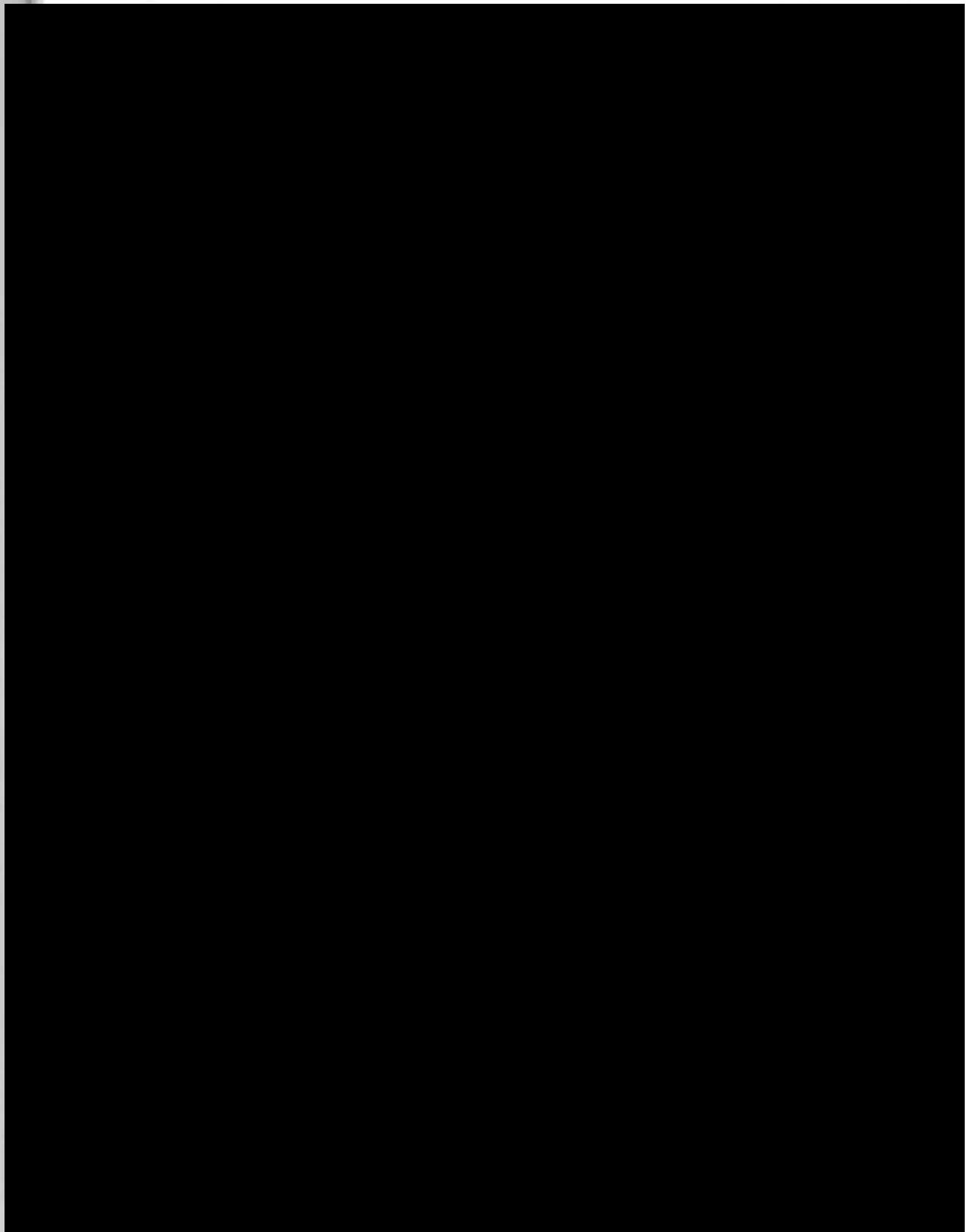


FIGURE 17: Tectonic evolution of the Central Andes since Mesozoic times (modified after Mpodozis and Ramos, 1990).

図 5.9-21     Ramos, V. A. and Aleman, A. (2000) より

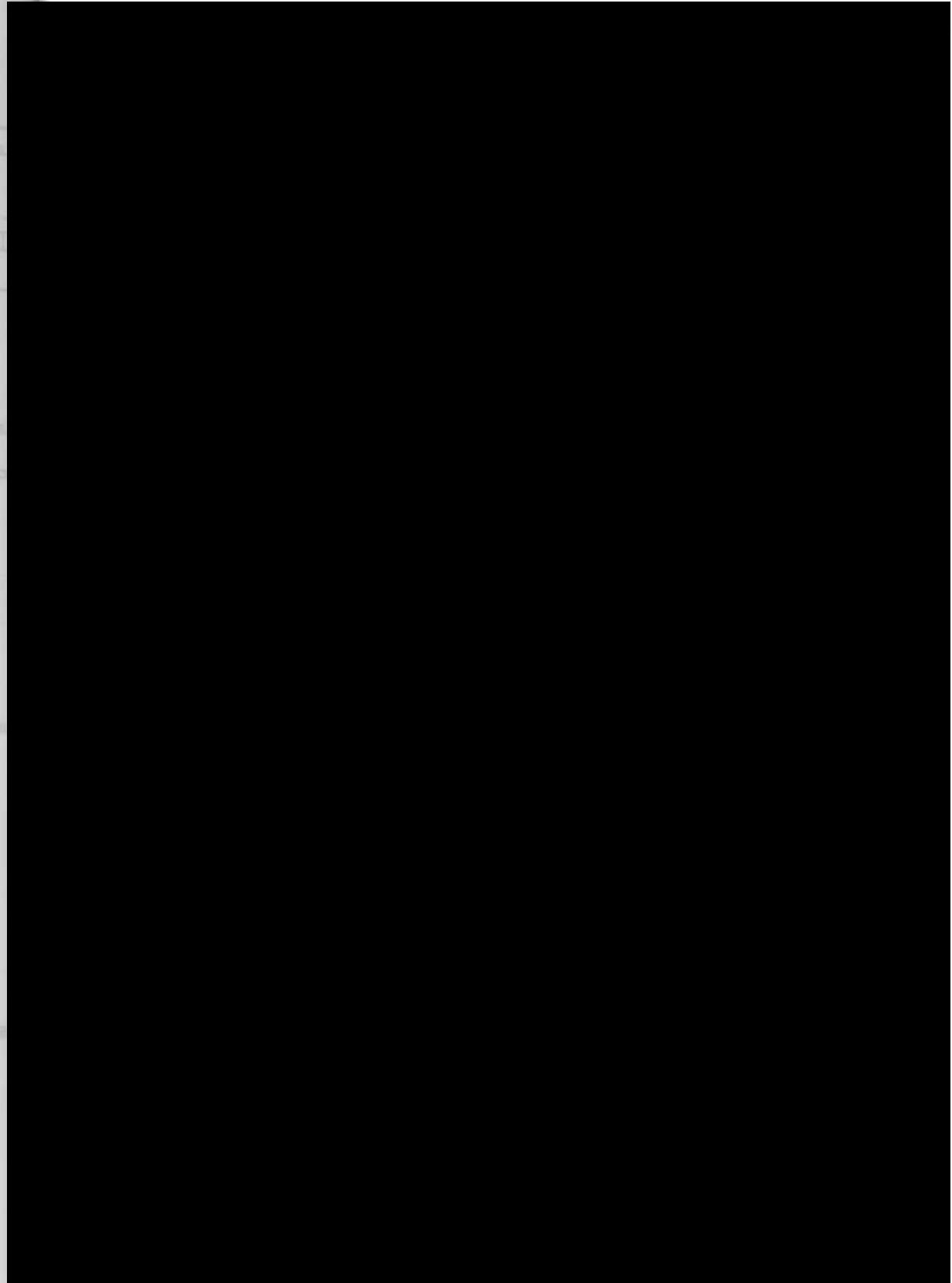


FIGURE 19: Different tectonic regimes in the southern Central Andes, showing the change between an extensional and compressional tectonic regime at about 115 Ma (modified after Ramos, 1988b; Mpodozis and Ramos, 1990; Somoza, 1995).

図 5.9-22     Ramos, V. A. and Aleman, A. (2000) より

図 5.9-23 Zeil, W. (1979) より  
84

## 6 おわりに

井上大榮(日本応用地質学会国際委員長)

わが日本応用地質学会海外応用地質学調査団も数を数えて、区切りの良い10回目を成功裏に終了し、報告書の最後のページを作る段階にまで達した。これまで振り返って見ると

- 第一回 マルパッセダムとバイヨントダム巡検
- 第二回 スエーデンのゴトランデアンとユーロトンネル巡検
- 第三回 モンペリエの国際応用地質学会シンポジウムとピレネー山脈巡検
- 第四回 リスボンの国際応用地質学会とケニア大地溝帯巡検
- 第五回 アイスランドの火山とイギリスの古生界巡検
- 第六回 北京の万国地質学会議とその巡検
- 第七回 アテネの国際応用地質学会シンポジウムとトルコアナトリア断層、スイスゴットハルトバシストトンネル巡検
- 第八回 バンクーバーの国際応用地質学会とアメリカテートンダム、セントヘレンズ火山巡検
- 第九回 クアルンプールのアジアシンポジウム、カトマンズの国際応用地質学会シンポジウムとヒマラヤ山脈巡検
- 第十回 リオデジャネイロの万国地質学会議とペルーのアンデス山脈巡検

とヨーロッパ、アフリカ、南北アメリカ、アジア大陸と制覇し、地質学的に有名で、地質家になったら、一度はどうしても見ておきたい名所を巡検するとともに、多くのシンポジウムに参加して来た。高さから言えばヒマラヤで4000mを越え、今回のアンデスでも富士山の高さを越えた。時代もプレカンブリアンから第4紀の火山まで見た。また、大學の地質学講座の初步で学ぶ、ゴットランデアンやイギリスのタイプロカリティも一流の先生の案内で見てきた。そして、応用地質学に大きく関連する事故の経験したダムを3個、世界でも有名な大トンネルを2つ見学している。

又、この調査団の特徴として国際的なシンポジウムに参加するということも大きな意義があった。このようなシンポジウムでわが国の応用地質学会はキーノートスピーカーを要請されて大きな反響を呼んだこともあり、また個々の発表においても他国にひけをとらない成果を報告しており、わが国の応用地質学の水準の高さを世界に広く示したものと言えよう。

この十年の間にわが国の政治や経済は大きく変わる変革の時期に直面しており、応用地質技術者も国内にのみ目を向けていた時代で無くなつて、広く世界に向かって発信して行かなければならぬ時代になりつつあることは間違ひ無い。応用地質学の分野は広く、世界の中でも応用地質学とは一体なにを目指すかと常に議論されている中で、しっかりと応用地質学の学問体系を作りながら学会として海外活動をすることは極めて重要なことである。

2001年である本年は海外応用地質学調査団は休団することとしているが、学会員個人個人

が国際的なシンポジウムに発表されたり、国際的なプロジェクトに参加されていることは喜ばしい限りである。

なお、第十回の海外調査団は国際委員会の尾園委員を中心に企画され、報告書は秦野委員を中心に作成された。上記二名とともに、多くの協力を賜った国際委員及び参加者に感謝の意を表する次第である。

## 卷末地質図集

1. CUZUCO~URUBAMBA
2. MACHUPICCHU
3. CHOSICA~MATUKANA
4. MATUKANA~BELLAVISTA
5. Tectono-Geological Map of BRAZIL

