

# 第1部 総論

## 第1章 序論

### 1-1 調査実施の経緯

プラチナ族元素（以下、「PGE」と称す）は経済的、戦略的に見て非常に重要である。最近、PGE は宝飾品としての用途に加えて、各種工業分野、特にエレクトロニクス分野や環境汚染を規制する製品（自動車用触媒）などへの用途が重要性を増している。世界の PGE 資源は南アフリカとそれに次ぐロシアに極度に偏在しており、両国の PGE 資源は世界の 98.5% を占めている。ブラジルにおける PGE の消費量（94 年、約 3 トン）も自動車用触媒などへの用途（全体の 77.8%）が飛躍的に伸びている。現在、ブラジルは自動車用触媒として必要な PGE を全量輸入している。

PGE 資源の重要性にもかかわらず、ブラジルは 1990 年まで PGE に関するデータをほとんど所有していなかった。このような背景から、地質調査所（以下、「CPRM」と称す）は PGE 資源貯存有望地域の抽出を目的として、1990 年から 1995 年までブラジル全土を対象に「PGE 国家計画」を実施した。

「PGE 国家計画」に引き続き、MMAJ と CPRM は 2001 年 6 月、ブラジル南部のパラナベーンズンにおいて技術協力に基づく、Cu-Ni-PGE 鉱床に関する広域調査の実施を決定した。ブラジル側はこの調査の結果を利用して、この地域における国内外企業の探鉱促進を意図している。

PGE 鉱床は 3 つのタイプの塩基性-超塩基性複合岩体、例えば、層状貫入岩体（南アの Bushveld）、洪水玄武岩に関係する貫入岩体（ロシアの Noril'sk）、グリーンストーンに関係する貫入岩体（オーストラリアの Kambalda）に伴う鉱床がその大部分を占める。本 PGE 調査はブラジル南部のパラナベーンズの洪水玄武岩に関係した Noril'sk タイプの Cu-Ni-PGE 鉱床の貯存状況を把握するためのものである。

ブラジルでは 1980 年度以降、以下の 5 地域で調査が実施されている。

Anta Gorda 地域（資源開発調査）	1980～1983 年度
Ribeira 地域（地域開発計画調査）	1984 年度
Palmeiropolis 地域（資源開発調査）	1986～1988 年度
Currais Novos 地域（資源開発調査）	1989～1991 年度
Currais Novos 地域（フォローアップ調査）	1992 年度
Alta Floresta 地域（資源開発調査）	1998～2000 年度

## 1-2 第1年次調査の概要

### 1-2-1 調査目的

本調査はブラジル国南部パラナ地域を対象として、Cu-Ni-PGE 鉱床賦存有望地域を抽出することを目的とし、既存データ解析、衛星画像解析およびグラントルース（現地踏査）を実施し、さらに得られた結果を総合的に解析し、広範囲の中から効率的に鉱床賦存有望地域を抽出することを目的とする。

### 1-2-2 調査地域

調査地域はブラジル国南部に位置し、南北方向に南緯 15° から 34° まで東西方向に西経 46° から 60° の範囲にあり、面積は 1,400,000km<sup>2</sup>である (Fig. I-2-1-1)。調査地域の地形は大部分、標高 500m前後の高原、草原地帯となっている。しかし調査地域中東部は標高 1,000 mから 1,800 mの山岳地帯となっている。

### 1-2-3 調査方法

本年度の調査は既存データ解析、衛星画像解析およびグラントルース調査からなる。各々の調査量、室内試験の項目・数量は Table I-1-1 に示される。

#### (1) 既存データ解析

パラナベズンについては、地質学、地球化学に関する論文、報告書および図面、空中磁気、重力のデータ、カナダとブラジルの PGE 探査報告書、石油探査ボーリングデータなど多数の既存データがある。これらの資料は CRPM、州の地質調査所、大学、鉱山・石油会社などから収集され、解析またはコンパイルされる。この作業にあたっては、衛星画像解析の結果も利用する。

#### (2) 衛星画像解析

衛星画像解析は調査地域中部の約 250,000km<sup>2</sup>の範囲で実施される。JERS-1/SAR データのモザイク画像を作成し、それを地質学的に判読し既存データと合わせて解釈する。リニアメント、環状構造など鉱床生成に関係する地質構造を SAR 画像上で把握し、鉱床賦存有望地域の抽出に資する。

#### (3) グラントルース調査

既存データ解析および衛星画像解析の結果を基にグラントルース調査が実施される。岩石試料は溶岩、貫入岩などから収集され、室内試験に供される。これらの調査結果は全て総合的に検討され、鉱床賦存の可能性が考察され、更に将来の探査手法が提案される。

#### 1-2-4 調査団の編成

(日本国側)

中村 研治	(財) 国際鉱物資源開発協力協会 (Japan Mining Engineering Center for International Corporation (JMEC))
渋谷 明貫	(財) 国際鉱物資源開発協力協会 (JMEC)
升田 健三	(財) 国際鉱物資源開発協力協会 (JMEC)
村上 尚義	(財) 国際鉱物資源開発協力協会 (JMEC)

(ブラジル国側)

Wilson WILDNER	ブラジル地質調査所 (Geological Survey of Brazil (CPRM))
Adalberto DIAS	ブラジル地質調査所
Carlos ALBERTO	ブラジル地質調査所
Norberto LESSA	ブラジル地質調査所

#### 1-2-5 調査期間および調査量

##### (1) 衛星画像解析

2001年7月17日～8月8日

##### (2) 既存データ解析・グランドツルース

2001年8月9日～11月2日

##### (3) 室内試験・総合解析

2001年11月3日～2002年3月15日

**Table I-1-2-1 Laboratory test**

Item	Amount
Thin section	189
Polished thin section	3
Polish chip	5
X - ray diffractometer	4
Whole rock analysis and minor element analysis (61 elements)	198
Stream sediment analysis (30 elements)	316
Water analysis (69 elements)	182
Panning sample analysis (11 elements)	5
Radiometric age determination (Ar-Ar method)	16
Isotopic measurement (Sulfur)	4
Isotopic measurement (Strontium, Neodymium)	34
EPMA	10

## 第2章 調査地域の地理

### 2-1 位置

Fig.I-2-1-1 に調査地域の位置図を示す。本調査地域は、ブラジルの中央部から南部にかけて位置しており、西経 45° から 57°、そして南緯 15° から南緯 35° の範囲である。調査地域の東側は大西洋で、西側はパラグアイおよびアルゼンチン、そして南側はウルグアイと国境で接する。

### 2-2 地形

調査地域の地形は、パラナベズンの縁にあたる海岸山脈から中央部にかけてやや険しく、南西方向に向かって、なだらかな高原から平原へと変化する。この平原は、南アメリカ大陸中央部のパンパス (pampas) と呼称される大草原へ続いている。調査地域の標高は、最高でも約 1500m 前後である。特に調査地域中央部から南部にかけては起伏の少ない丘陵地が広がっており、主に放牧や麦の作付けが行われている。

調査地域東側の海岸には砂丘の発達が見られず、調査地区南部の海岸では、干潟やラグーンが発達する。

### 2-3 水系

調査地域の主要な水系は Paraguai 川水系、Paraná 川水系そして Uruguay 川水系に分けられる。Paraguai 川水系は、Mato Grosso 高原を源とし、南下して Paraná 川に合流する。

Paraná 川は、Brasília 周辺の高原を源とし、São Paulo 州、Paraná 州を通り、海岸山脈の内陸側を平行に流下する。そして、Paraguai 川と合流し、アルゼンチンとウルグアイの国境を流れる La Prata 川に流入して大西洋に至る。支流には、Iguaçu の滝で有名な Iguaçu 川などがある。

その他に調査地域南部には、Porto Alegre 市を西から東へ流れる Jacuí 川を本流とする河川が流れ、大西洋岸のラグーンである Patos 湖に流入する。

### 2-4 気候

ブラジルの気候は、国土の大半が熱帯または亜熱帯に属する。調査地域の北部は、亜熱帯に属するが、調査地域の中央から南部の Paraná 州、Santa Catarina 州、Rio Grande do Sul 州の 3 州は温帯に属する。地理的な位置と起伏で気温の差が大きいが、最も気温が高いのは、Santa Catarina 州の海岸や Paraná 川周辺で、約 20℃～25℃である。最も低いのは、中央部・最南部で 17℃前後である。降雨量は、年間を通じて規則的であり、8月～9月にかけては、梅雨のような雨期がある。また、冬季には標高の高い場所で、降雪が見られる。



## 2-5 植生

調査地域北西部、特に Mato Grosso 州西部は、低湿地に発達する低木・藪・草原が複合して、複雑に入り交じる地域である。

調査地域東側の海岸沿いは、泥土地帯に繁茂する植生が特徴的であり、調査地域北部から中部の海岸には、マングローブが生育している。海岸から少し内陸に発達する海岸山脈は湿潤なため、常葉樹の密林が分布している。

調査地域中央から南部の平坦な場所には、イネ科の草原植物が繁茂し、樹木の少ない草原をなしている。

また、調査地域の Paraná 州、Santa Catarina 州、Rio Grande do Sul 州には、材木・食用（種子のみ）となり、経済性の高いパラナ松（アラウカリア）が繁茂している。その他にナッツやマテ茶を産する。

### 第3章 調査地域の地質、鉱床、鉱業事情

#### 3-1 ブラジルの鉱業事情

##### 3-1-1 鉱業生産

ブラジル連邦共和国は、鉄鉱石（埋蔵世界第6位、生産世界第2位）のほか、ニオブ、ルチルについて世界第1位の埋蔵を誇るとともに錫第2位、ポーキサイト第3位、さらにはマグネシウム、マンガン、タンタル、金など多くの鉱物資源を産出している。一方、生産量についても世界第4位のポーキサイト、錫鉱石・地金およびマンガン鉱石のほか、希土類など多くの非鉄金属の主要生産国でもある。ブラジルは、我が国アルミニウム地金総輸入量の約17%を供給するとともにニッケル地金、マンガン鉱石等の重要な供給国となっている。

同国では、1995年の憲法改正による鉱物資源の探査・開発に対する外資規制の撤廃により、外資導入、国営企業の民营化が進展している。国営鉱山企業であったリオセド社（CVRD）は1997年に民营化された。

ブラジルの主要鉱物生産量および企業別生産量を Table I-3-1-1 および Table I-3-1-2 に示す。

**Table I-3-1-1 Production of main minerals of Brazil**

Commodity	Unit	1997	1998	1999	99/98(%)	2000	00/99(%)
Copper	Metal (t)	39,952	34,446	31,371	-8.9	31,786	1.3
Zinc	Metal (t)	152,634	87,485	98,590	12.7	100,254	1.7
Tin	Metal (t)	18,291	14,238	13,202	-7.3	14,200	7.6
Nickel	Metal (t)	31,936	36,764	41,522	12.9	45,317	9.1
Niobium	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (t)	25,688	33,795	31,352	-7.2	31,190	-0.5
Tantalum	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (t)	153	377	390	3.4	419	7.4
Chromium	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	112,274	209,596	207,123	-1.2	276,105	33.3
Gold	total (kg)	52,335	46,031	51,422	11.7	52,420	1.9
	company (kg)	41,062	37,787	42,367	12.1	42,025	-0.8
	garinpeiro (kg)	11,273	8,244	9,055	9.8	10,395	14.8
Iron	ore (1,000 t)	184,970	197,500	194,000	-1.8	210,000	8.2
Fluorite	1,000 t	78	72	45	-37.5	43	-4.4
Manganese	conc. (1,000 t)	2,124	1,940	1,656	-14.6	2,192	32.4
Aluminum	Bauxite (1,000 t)	11,671	11,961	13,839	15.7	13,846	0.1
Kaolin	1,000	1,165	1,374	1,517	10.4	1,735	14.4

Data from SUMARIO MINERAL 1999 and 2000(DNPM)



**Table I-3-1-2 Mineral production of main companies of Brazil**

Commodity/Company	Unit	1996	1997	1998	1999	98/99(%)
<b>Aluminum</b>	1,000 t	1,197.40	1,189.00	1,208.00	1,249.60	3.4
Albras		339	338	344.7	361.2	4.8
Alcan		93.4	93.3	102.5	102.4	-0.1
Alcoa		283.4	279.7	281.4	289	2.7
Aluvale		50.2	50.6	51.5	50.2	-2.5
Billiton		210.7	206.5	206.9	212.9	2.9
CBA		220	221	221	233.9	5.8
<b>Copper</b>	t	172,075	177,060	167,205	193,014	15.4
Caraiba		172,075	177,060	167,205	193,014	15.4
<b>Tin</b>	t	18,361	17,525	14,342	11,989	-16.4
Paranapanema		15,242	14,763	11,429	10,112	-11.5
Cesbra		1,611	1,739	1,347	1,396	3.6
Best		1,085	1,023	853	481	-43.6
<b>Nickel</b>	t	16,432	18,200	25,748	32,268	25.3
Codemin		6,223	6,751	6,891	6,503	-5.6
Niquel Tocantis		7,849	8,849	13,008	16,430	26.3
Morro do Niquel		2,360	2,600	1,184	0	-100
Fortaleza		-	-	4,665	9,335	100.1
<b>Zinc</b>	t	186,339	185,701	176,806	187,010	5.8
CMM		100,016	95,556	104,714	109,398	4.5
Inga		22,914	19,445	1,224	0	-100
Paraibuna		63,409	67,690	70,868	77,612	9.5

Data from Brazil Mineral, May 2000

### 3-1-2 鉱業政策

ブラジル政府は、1964年にブラジルの鉱物の評価と言う観点から「総合10ヶ年計画」を策定し鉱山動力省鉱物生産局（Departamento Nacional da Producao Mineral : DNPM）を直接担当官庁として実施した。

その主な内容は、

- (1) 縮尺 1/100 万地質図幅の作成プロジェクト
- (2) 基礎的広域地質調査プロジェクト
- (3) 資源開発のための特定プロジェクト

さらに、特別プロジェクトとして、

- (1) RADM プロジェクト：アマゾンを含む全土のレーダ影像により縮尺 1/25 万でカバー
- (2) ガンマースペクトル調査の空中物探プロジェクト
- (3) 大陸棚調査プロジェクト

などが実施された。

この他に、ブラジル政府とカナダ政府の協力調査による空中物理探査（磁力探査、放射能探査）プロジェクト Projeto Geofisico Brasil-Canada（PGBC、1975-79）がパラ州からゴイアス州にかけての広大な地域で実施され多大な成果をあげた。このプロジェクトの結果は、今日のカラジャアス地域周辺からゴイアス州中央部にかけての各種鉱床の発見につながった。

1970 年 CPRM（Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais：鉱物探鉱公社）が設立されて以降、DNPM のプロジェクトは全て同公社が実施していた。同社は鉱山動力大臣の管轄下に置かれた政府公社である。この「総合 10 年計画」も CPRM によって実施され、4～5 年遅れて 1979 年に終了した。

さらに、1980 年から「第 2 次総合 10 年計画」として基礎地質調査計画（1980-1989）が策定されて、地質図幅作成（5-25 万分）、物探・地化探、地質鉱床総合図作成、水理地質図作成などのプロジェクトが実施されているが、その後の経済の停滞に伴って作業の実施が遅れている。

現在、政府の組織改革も進んでおり、DNPM は独立行政法人化に伴い、鉱区管理、鉱山保安、鉱害防止対策等を業務の主体とした組織に転換した。また CPRM は 2000 年からは独自の探鉱事業をやめ、地質調査所としての役割に特化しようとしている。

かつて各州はそれぞれ資源探査開発公社を所有し、州内の資源探査に当たっていた。ミナス・ジェライス州の METAMIG 社、ゴイアス州の METAGO 社、バイア州の CBRM 社などが活発な探査を実施していたが、現在多くは廃止され、所有鉱区などは州政府が管理している。

### 3-1-3 探鉱・開発動向

活発な探査活動をしている民間企業としては、INCO 社、Utah/BHP グループ、SHELL の子会社 Billiton 社、RTZ 社他などの外資系グループおよび CVRD 社、Parapanema 社などの内資系グループが鉱物資源探査、特に金鉱床を中心とした探査活動に活躍している。

特に、RTZ 社は Paracatu 市の Morro do Ouro 金鉱床を 1987 年に開発したほか、BP 社から受け継いだ多数の鉱区を積極的に探査し、さらに、CVRD 社のサロボ銅鉱床開発 J/V プロジェクトに参加を希望するなどその活躍が目立つ。

日本の民間企業としては、青木建設（株）が Nova Astro 社に資本参加（49 %）して同社所有のアマパ州、Lorenco 地域の Saramangore 金鉱山の開発操業を 1986 年から行い、年間約 800-350 kg の金を生産していたが撤退した。

そのほか、住友商事 MRD 社は Salvador 南方の海浜砂鉱床、トカンチンス州のレア・メタル、レア・アース探査などを実施・計画した。また、三井金属鉱業（株）は 1991 年ゴイアス州でレア・アースの探査を実施した。

#### 3-1-4 最近の鉱業事情

多様な鉱物資源に恵まれながら、鉄鉱石やニオブ等の一部の鉱種を除いてブラジルの鉱業生産は近年伸び悩んでいる。周囲の南米各国が次々と外資導入により新たな鉱山開発に成功し、鉱業生産や輸出を増加させる中、ブラジル政府も外資導入による鉱業生産拡大に本腰を入れ始めた。伸び悩むブラジルの鉱業生産 順調に増加する国内銅需要に対応して、国内唯一の Caraiba 銅製錬所では製錬量の倍増を計画している。

東北部のバイア州内陸に位置する Caraiba 鉱山は 1998 年に 102,416 トンの銅精鉱（銅量で 34,446 トン）を生産したが、露天掘りの鉱量がほぼ枯渇しており、1999 年には銅量で 3 万トンを超える見通しである。

DNPM の資料によれば、ブラジル国内の 1998 年における銅供給量は、Caraiba 製錬所の生産量 167,205 トンの他に、54,150 トンの銅スクラップを回収している。また銅カソードを 128,781 トン輸入しており、その大部分はチリか来ている。これらを合計して 1998 年の銅供給量はほぼ 35 万トンとなる。ここでブラジルにおける銅生産量と国内銅需要を比較した場合、Caraiba 鉱山の生産量とスクラップ回収量の合計約 9 万トンの生産に対して、国内需要は 31 万トン以上となり、差し引き年間 22 万トンの不足となる。

年間 20 万トン以上の銅を他国から輸入しなければ国内需要を賅えないブラジルは、パラ州のカラジャス地域に膨大な銅資源が開発を待っている。これらの銅鉱床は、世界最大の鉄鉱石生産者で 1997 年に一応の民営化を果たしたりオドセ社（CVRD）の所有であり、今後、開発は同社の動向による。世界最大の銅生産会社であるチリの銅公社 CODELCO が、ブラジルの銅資源開発に関して CVRD と交渉を行っており、注目される。

亜鉛についても、国内需要の半分強の鉱石生産しか無く、不足分は主にペルーから精鉱を輸入している。ニッケルは 98 年に生産を開始した Rio Tinto Brazil 社の Fortaleza 鉱山が順調に立ち上がり、ニッケルの他に銅、コバルト、プラチナ等を含むマットを年間 2 万 t 程度 Outokumpu 社に輸出している。また世界生産の 9 割以上を独占するニオブ（鉱物生産局(DNPM)、Mineral Summary 2000 による）については、うち 8 割を占める CBMM 社が製造工程強化のためのプラント建設を完了している。

ブラジルでは軍政から民政に移管後、1988 年に公布された現行憲法では外資を差別し（外資は 49%以下）、内国企業を優遇するものであった。そのため、現在ブラジル政府は、"ブラジル鉱業セクターの改革 (Remorma do Sector Mineral Brasileiro)" と呼ばれる一連の改革法案パッケージ

を作成し、2001年7月頃までに議会の承認を得て各種改革を断行する予定である。改革法案の中には、投機目的の鉱区所有を防止するための鉱区管理の近代化、鉱山開発にインセンティブを与える税制改革、鉱山保安や鉱山閉山規制の確立、および政府機関の組織改革等を含んでいる。

### 3-1-5 鉱業関連法規

1988年度ブラジル新憲法は、外資系企業規制の一環として、ブラジルで鉱業に携わる外資系企業は、現地側パートナーが過半数を出資する合弁会社としなければならないと定めた。新憲法制定後、ブラジルの鉱業界は大きく変化した。ブラジル政府としてはブラジルにとっても外国資本はなくてはならない存在であり、外資系企業の進出を極端に抑制する措置はとるわけにはいかないようである。

また、新憲法は、個人採掘業者（ガリンペイロ）を優遇している。新憲法の下では、従来不法採掘者とされていたガリンペイロが原始的な方法で採掘する鉱物に関しては、採掘許可を申請することができるようになった。

### 3-2 ブラジルの地質・鉱床概要

#### 3-2-1 地質概要

##### (1) ブラジルの先カンブリア界

ブラジルの始生界および原生界の地質分布については、平成4年度のプロジェクト選定調査報告書(MMAJ, 1993)に詳細にまとめられている。ここでは Jenks, W.F. (勝井義雄訳, 第4章 南アメリカの地質, 13巻 世界の地質)により、簡単に概要を述べる。

南アメリカ台地(South American Platform)という語は Almeida (1971)によって提唱されたもので、南アメリカの先カンブリア時代の安定大陸域を意味している。この安定大陸の周縁では、顕生累代に次ぎつぎに発生した構造運動と火成活動により大陸成長がおこなわれている。南アメリカ大陸の主要な地質事変を Table I-3-2-1 に、ブラジルにおける主要な構造運動と火成活動の時代を Fig.I-3-2-1 に示す。

構造地質および放射年代測定などのデータから、Almeida(1971)は南アメリカの先カンブリア時代を次のように3分している：

先カンブリア時代後期	570~1800Ma
先カンブリア時代中期	1800~2600Ma
先カンブリア時代前期	>2600Ma

南アメリカ台地は Fig. I-3-2-2 に示すように5つの主要な台地(ギアナ、グアポレ、サンルイス、サンフランシスコ、ラプラタ(La Prata)川、イマタカ複合岩体)を含んでいる。

このうち最大の安定地塊はギアナ盾状地(Guiana Shield)であって、ブラジルのアマゾン盆地北方およびベネズエラのオリノコ川南東域を含む。つぎにグアポレ台地(Guapore Craton)は、アマゾン盆地の南方に分布、アマゾン盆地の基盤をなしており、おそらくギアナ盾状地と同一の構造单元に属する。その他の盾状地は、ブラジルのミナスゼラエスおよびバイア両州にまたがるサンルイス(São Luis)地域、ウルグァイと北部アルゼンチンのラプラタ(La Prata)川地域などに分布している。

これまで測定された最古の年代は、おもにギアナ盾状地、特にベネズエラのイマタカ(Imataca)複合岩体から得られており、3000 Ma またはそれより古い。一方ブラジルのギアナ盾状地では、このような最古の岩石の報告が殆どない。以上の岩石はもちろん、南アメリカ北部におけるその他変成岩類の全岩分析による放射年代は3000~2700 Ma である。

以上の大陸塊の中核または始原台地は、その後の主要な造山運動により切り裂かれるか、または被覆されている。その最初の運動はトランスアマゾン造山輪廻(Transamazonian orogenic cycle)として知られるもので、2000~1800 Ma 前におこった。

現在のアンデス山脈東方にみられる南アメリカ台地の大部分は、このトランスアマゾン造山輪廻の終りに固化し、その頃、南アメリカの大陸地殻は少なくとも1,000万平方キロの面積をもつ

**Table I-3-2-1 Major geological events in the South America**

Western Marginal Belt	Platform District:
(No record remains)	3400-3000 Primitive platform (North Guiana Shield)
(No record remains)	3000-2700 Imataca Orogenic Cycle
(No record remains)	2000-1800 Trans-Amazon Orogenic Cycle gave impact to the entire platform
(No record remains)	1800-1700 Roraima formation became a plain. (continental sediment, marine sediment in part)
~1300 Metamorphism in fragments of the platform (the northeastern part of Colombia)	1400-1100 Uruacuan orogenic cycle (the eastern part of Brazil)
750~600 Brazilian Orogenic Cycle (Gneiss on the southwestern coast of Peru, etc.)	750-500 Brazilian orogenic cycle -- destruction and re-welding of the old platform
550~350: Thick continental shelf and slope sediments of the lower Palaeozoic	550-350 Marine sediment (Amazon, Parunaiba and Parana basin)
~280 Glaciogenic deposits (the southern part of Bolivia, the western part of Argentine and Chile)	~280 Gondwana continental glacier (the southern part of Brazil and Argentine)
~200 Volcanic activities of andesite in the Triassic period (Chile and coasts in Peru)	~200 Mafic volcanic movement (Guiana Shield)
~180 Development of volcanic island arcs and intrusion of western Marginal belt batholith (convergent plate boundary)	~180 Large-scaled extrusion of Parana basalt, etc. (with its peak in 130 ~ 120 Ma)
↓	↓
~40	~110
~118-88 Long and large marginal basin arose in the southern part of Chile and	~140-80 Contrary to the state in Africa, rapid clockwise revolution in South America
~150-80 Subduction of Caribbean plate (Colombia, Venezuela)	Basin formation on the continental edge through trench forming
~60-10 Caribbean plate and South American plate were lateral fault to the right and transformed — migration fault. Probably lateral fault to the left in the southern end of South America	Continuation of thick sediment activities
~20-0 Upheaval of Andes Mountains, continuation of subduction, neutral/felsitic volcanic activities	~80-0 Continuation of sediment activities on the continental shelf

(Figures represent ages. Unit: Ma)

Figura 4.1

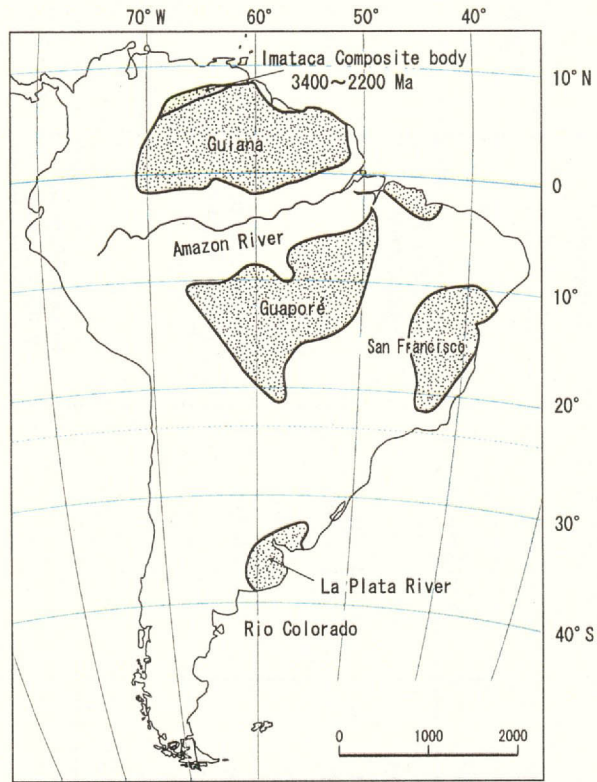
**Cronologia dos principais eventos tectônicos e magmáticos**

Idade (Ma)	Unidades geocronológicas	Principais eventos		
		Extensional (anorogênico)	Compressional (orogênico)	Ciclos tectonogeológicos
65	FANEROZÓICO	CENOZÓICO		
		MESOZÓICO		
		PALEOZÓICO	Sul-atlantiano	
235				
460				
570		Pós-brasiliano	Brasiliano 600 ± 100Ma	Ciclo Brasiliano
1.000	PROTEROZÓICO	Rondoniano ± 1.000Ma	Uruçuano/K'Mudku 1.200 ± 100Ma	Ciclo Uruçuano
1.800	MESO	Parguazense ± 1.500Ma		
	PALEO	Uatumã ± 1.800Ma	Transamazônico 1.900 ± 100Ma	Ciclo Transamazônico
2.600	ARQUEANO		Jequié/Aroense 2.700 ± 100Ma	

*Obs.:* Os principais eventos geotectônicos pré-cambrianos do Brasil são aproximadamente sincrônicos através do País, mas nem sempre se correlacionam perfeitamente com os eventos pré-cambrianos em outras partes do mundo.  
As subdivisões do Proterozóico (Paleo, Meso e Neo), como aqui usadas, não correspondem necessariamente às subdivisões internacionais (propostas por Cowie et al., 1989).

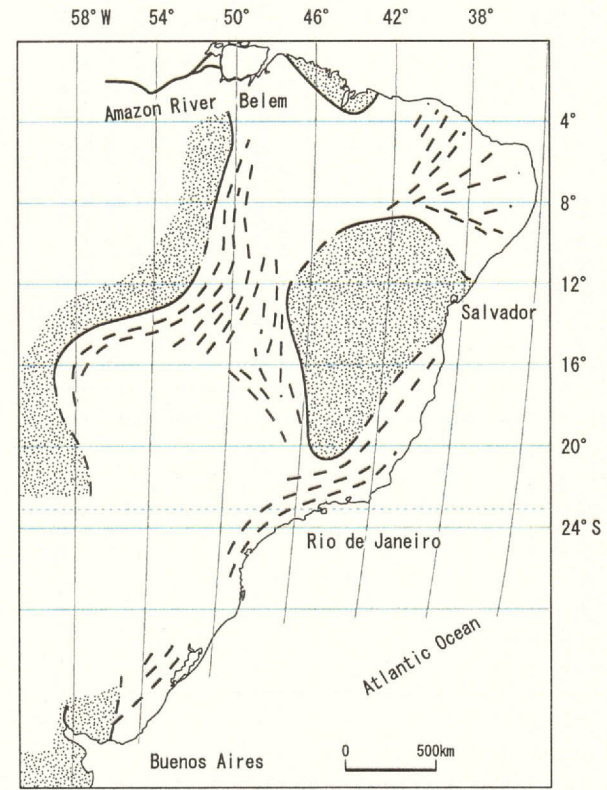
Fontes: US Geological Survey; CPRM, 1995.

**Fig. I-3-2-1** Ages of major tectonic movements and igneous activities in Brazil



Distribution of Precambrian major stable craton in the South America.  
After Cordani et al.(1972), Hurley & Rand(1973)

**Fig. I-3-2-2 Major old stable continental blocks in Precambrian age of South America**



Direction of folding or metamorphic belts (broken line) at east of South America.  
Dotted area shows old stable massif. After Cordani et al. (1972).

**Fig. I-3-2-3 Directions of orogenic belts in orogenic cycles in Brazil**



ていたと推定される。

放射年代測定値はこのあと 1400~900 Ma (Uruacuan 造山輪廻) に集中しており、おそらくブラジルのミナスゼラエスおよびゴイアス両州や、コロンビアの Siera Nevada de Santa Marta 山地などでは、もう 1 つの主要な造山運動があったと思われる。

その後さらに広範な先カンブリア造山運動が 750~450 Ma 前におこっている。この運動はブラジル造山輪廻 (Brazilian orogenic cycle) と呼ばれ、曲線状の変成・火成岩帯が、トランスアマゾン造山輪廻の影響を受けた台地を切断して包みこむような形で発達している (Fig.I-3-2-3)。この造山輪廻の継続期間は、先カンブリア時代後期と一般に考えられているが、さらにオルドビス紀におよんでいる。

このブラジル造山輪廻の時代に、先カンブリア台地の中核は分断されて大幅に拡大されたと考えられる。

上述のように、先カンブリア時代の南アメリカ台地の発達は、ブラジル造山輪廻をもって終わっている。多くの変動時カコウ岩質深成岩体の年代は約 650 Ma である。その後、終末期~後期変動が 650~500 Ma 前まで続き、このうち特に大きく広範な変動が約 540 Ma 前におきている。この変動により、台地周縁および台地間の堆積岩層は、強く褶曲し、断層で切られ、場所によっては高度の変成作用と多数の中性~酸性深成岩の貫入を受けている。

DNPM (1995a)によるブラジルの先カンブリア紀の主要地質構造区分を Fig.I-3-2-4 に、顕生代堆積盆の分布を Fig. I-3-2-5 に示す。

## (2) 古生界

南アメリカでは古生代にアマゾン (Amazon)、パルナイバ (Parnaiba) およびパラナ (Paraná) の 3 つの主要な台地間堆積盆が出現した。これらの堆積盆は、いずれも古生代前期に活発化して堆積作用が行なわれたもので、中生代まで引き続き堆積物や火山岩などの供給を受けている。

### a) アマゾン盆地

盆地 (Amazon Basin) では、古生代堆積岩の下位の基盤岩類については未だよく判っていない。

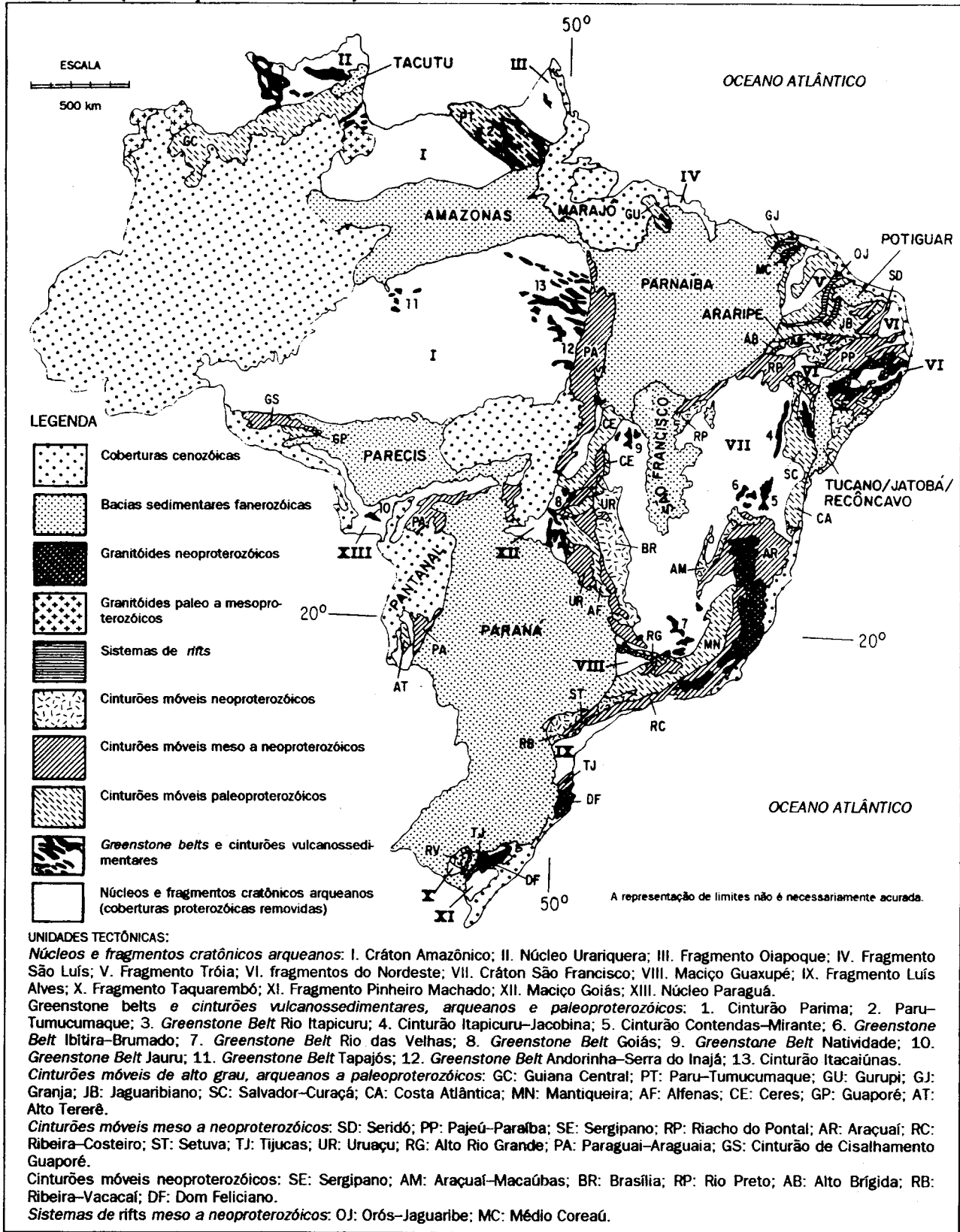
アマゾン盆地における最初の含化石層はシルル系である。

マゾン盆地のデボン系は厚く発達していて、その一部は深海相で、部分的に化石に富んでいる。下部デボン系の Maceuuru 累層は、露頭地域ではシルル系を不整合に被覆している。しかし盆地中軸部で試錐した結果では、海成堆積作用がシルル紀からデボン記を通じてかなり連続的に行なわれたことが判っている。盆地の東部では、堆積物の供給源の方向にむかって沈降量が大きく、堆積物も厚くなっている。一方、盆地の南および北縁では、堆積物が局地的な不整合を伴って尖滅している。

石炭紀後期には、侵食と無堆積の期間のあと、比較的薄く広く分布する砂岩層 (Monte Alegre 累層) の堆積がみられる。石炭紀最後期の Nova Olinda 累層の分布は、大部分がアマゾン盆地の中央部に局限されている。マナウスの東では、岩塩や硬石膏などからなる蒸発療留岩の地層が地表下に分布し、その最大層厚は約 500 m と報告されている (Bigarella, 1973)。同じくマナウスの

Mapa 4.1

**Brasil: principais feições tectônicas pré-cambrianas**



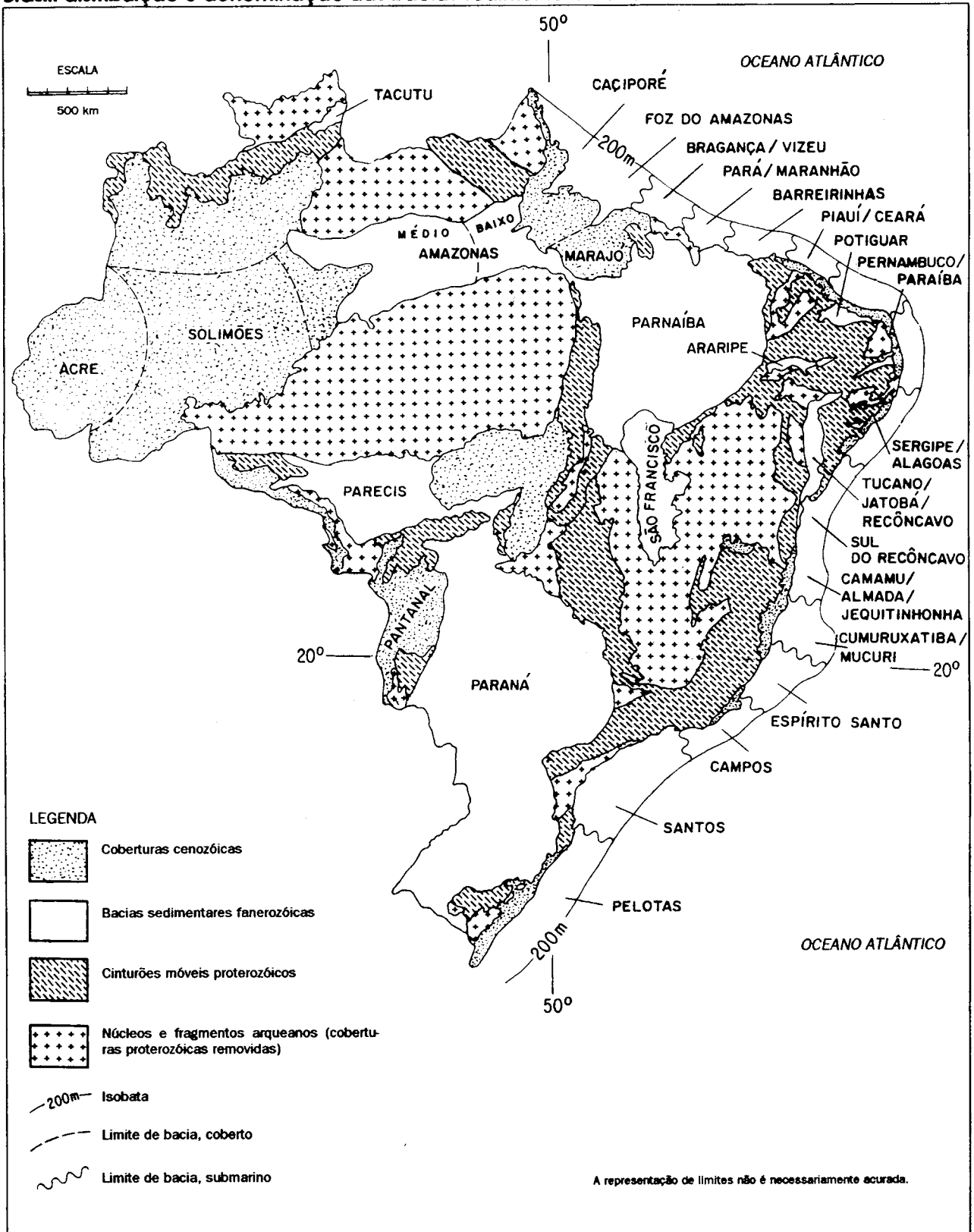
Fontes: USBM e DNPM, 1995.

Fig. I-3-2-4

Major geological structure sections in Precambrian age in Brazil

Mapa 4.2

**Brasil: distribuição e denominação das bacias sedimentares fanerozóicas**



Fontes: USBM e DNPM, 1995.

**Fig. I-3-2-5**      **Distribution of sedimentary basins in the Phanerozoic eons in Brazil**

東では、その上位におそらくペルム系の蒸発残留岩を夾在する砂岩が地表下に存在し、その層厚は最大 645 m に達している (Bigarella, 1973)。以上の古生界の全層厚は、アマゾン盆地中央部で 7000 m、西部で 3000 m におよぶと推定される。アマゾン盆地では、これまで石炭紀後期の氷河作用の証拠は発見されていない。

#### b) パルナイバ盆地

パルナイバ盆地 (Parnaiba Basin) はグアポレ台地とサンフランシスコ台地の間に発達したもので、アマゾン盆地と同様な古生代の地史をもつ。パルナイバ盆地は、長く伸びたアマゾン盆地とちがってほぼ円形を示し、最大の沈降および堆積がその中心部でおこなわれている。

ここでは、シルル系およびオルドビス系の海成層が、先カンブリア基盤岩を明瞭な不整合で覆っている。これらの地層は、さらにデボン系の化石にとむ砂岩、シルト岩、頁岩層によって整合的に覆われている。

下部石炭系の上位には小規模な不整合があって、上部石炭系およびペルム系の地層が堆積しており、その層厚は堆積盆の中央部で最大 700m に達している。

#### c) パラナ盆地

パラナ盆地 (Paraná basin) は、古生代の間はごく浅い凹地にすぎなかったが、中生代に入って大きな構造盆地として発達した。その分布は、ブラジル中南部からパラグアイ東部およびアルゼンチン北東部に広がっている。

パラグアイ東部における盆地縁辺部では、先カンブリア変成岩類を覆って、オルドビス系と考えられる海成砂岩層が分布し、西方のパラナ盆地側へ緩く傾斜している。

ウルグアイにおける最古の古生界は下部デボン系の海成層であるが、パラグアイではデボン系を欠いている。

パラナ盆地周縁では、上述の下部古生界の地層を不整合に覆って、陸成の上部石炭系の地層が各所にみられる。パラナ盆地における古生代層の堆積作用は、下部ペルム系の陸成碎屑物の堆積をもって終わっている。

### (3) 中生代—ゴンドワナ大陸の解体

古生代の終りまでは、南アメリカ台地は巨大なゴンドワナ大陸の一主要部分として統合されていた。このように、本質的に安定した状態でゴンドワナ大陸の解体が始まった。中生代におきた地溝の開口と広大なプレート運動によってゴンドワナ (Gon-dwana) 大陸が解体される以前は、南アメリカとアフリカは 1 つの大陸塊であった。

アンデス山脈の東側では、3 つの大きな古生代堆積盆 (アマゾン、パルナイバ、パラナ) にすら、三疊紀前・中期の堆積岩が認められない。しかし、三疊紀後期になると、パラナ盆地は世界で最も広大な古砂漠の 1 つとなり、南アフリカ産のものと同様な爬虫類や両生類の動物化石が、広大な砂岩層の下の湖底または河床堆積物中に保存されている。

三疊紀後期には、アンデス山脈の東側で、大規模な火成活動がはじまった (Fig.I-3-2-6)。ギアナ盾状地では三疊紀後期の粗粒玄武岩の岩脈が広く分布し、それらの走向は西部で NNE-NE、東部で NNW を示し、K-Ar 年代は約 220 Ma である。アマゾン盆地でもほぼこの年代の苦鉄質貫入岩体があり、ここでは最古の中生代苦鉄質岩の平均年代が 181 Ma である。

ジュラ紀後期にはいると、南アメリカ台地は玄武岩質溶岩の大規模な流出の舞台となり始める。パラナ玄武岩 (または Serra Geral basalt) として知られるこれらの溶岩流は、白亜紀前期 (130 ~ 120 Ma 前) に最大の規模に達する。この時期は、ちょうど南大西洋の海洋底拡大が始まった時期とほぼ一致している。

現在これらの溶岩流がおもに露出しているところは、ブラジル南部、パラグアイおよびアルゼンチン北部にかけて広がるパラナ盆地であるが、北部とパラグアイ西部にまたがる Chaco 盆地の若い堆積物の下からもこのような溶岩流が発見されている。また、同時代の玄武岩は、ブラジル南西部のマトグロソ州にもみられる。さらに、ラ プラタ (La Plata) 川の河口から沖合でもパラナ玄武岩にほぼ対比される溶岩流が知られている。

これらの溶岩流の大部分はソレイト質玄武岩で、明らかに上部マントルから由来し、地殻物質の混染をほとんどうけていない。溶岩流の分布域およびその周縁には、無数の輝緑岩 (ドレライトと同義) のシルおよび岩脈が発達しており、これらの年代は玄武岩類と同じである。

これらの膨大な苦鉄質物質の噴出は、ゴンドワナ大陸分裂の 1 つの重要な証拠であり、おそらく、多数の深い割れ目がパラナ盆地の下や周縁ばかりでなく、さらに北方のギアナ盾状地にかけても発達したと考えられる。

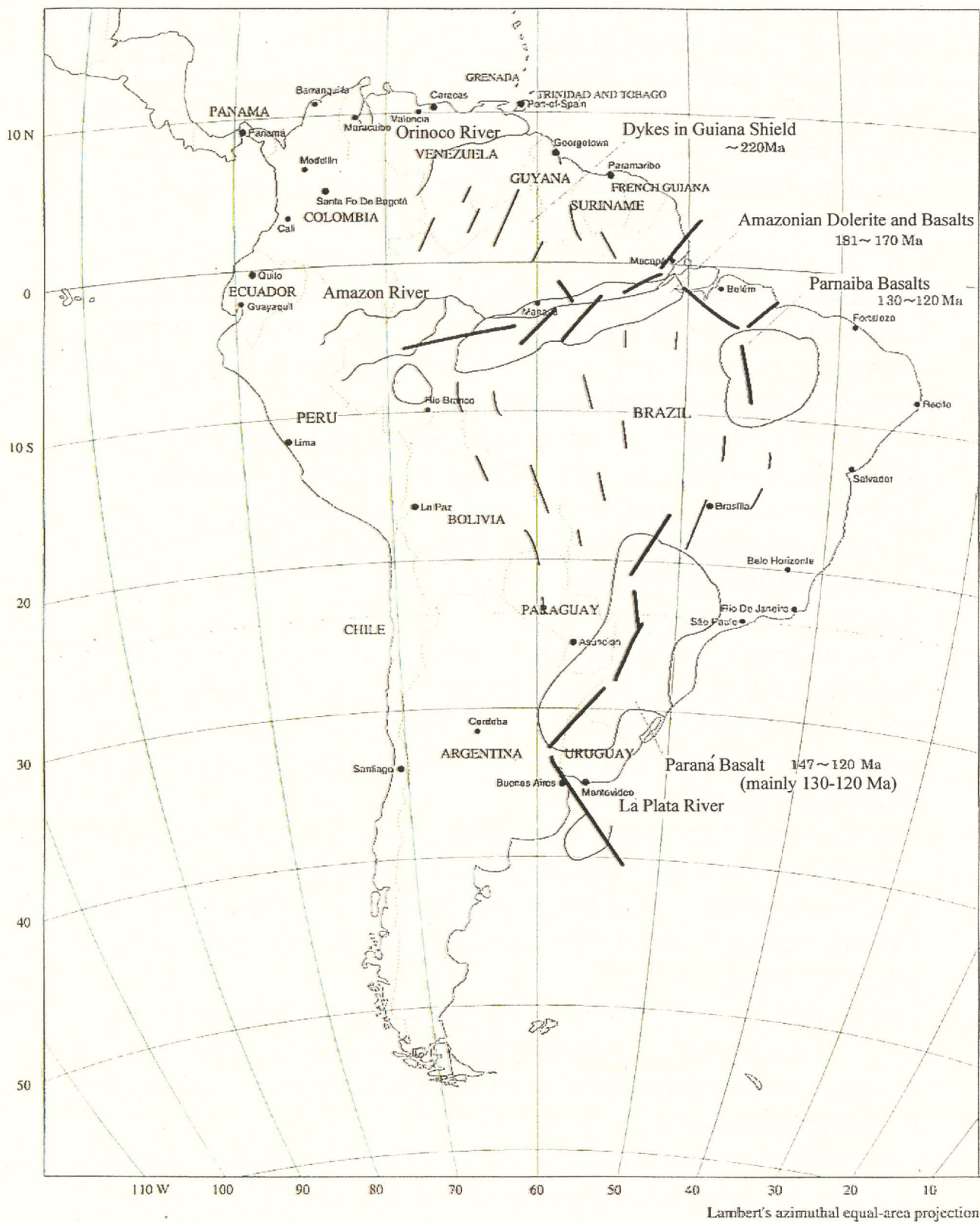
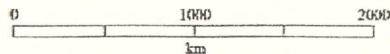
アマゾン盆地ではドレライトのシルや岩脈が広く発達しており、シルは盆地中央の地下で厚さ 600 m に達している。これらのうち最も若い年代測定値は 170 Ma (ジュラ紀前期) で、この年代はパラナ盆地の大部分の玄武岩より古い、パラナ盆地のドレライトのシルおよび岩脈は Cordani によって 127 Ma と測定されている。パラナ盆地の中心では、これとほぼ同時代の玄武岩溶岩流が 10 万 km<sup>2</sup> の面積を占めている。

南アメリカ大陸およびその東縁における断層と割れ目のパターンから、大陸は次ぎつぎにモザイク状の盾状地ブロックに破壊されたのであるが、このような裂け目の 1 つは南部で開き、ここからパラナ盆地の膨大なソレイト質玄武岩の噴出がおこった。一方、北および北東部で開かれた裂け目からは、アマゾン・パルナイバ両盆地および周辺の台地域でドレライトや玄武岩の貫入と噴出がおこっている。

白亜紀前期をつうじて、ブラジルの北東および東部の海岸地方では、強い造海溝運動がおこった。いくつかの沈降帯では、ジュラ紀後期の非海成の碎屑性砂岩・頁岩が認められている。これらの地層は下部白亜系の陸成堆積物によって覆われているが、この堆積物も分布は地溝に極限され、局地的には厚さ 5 km におよんでいる。

最初の海浸がおこったのは Aptian 期であって、狭く伸びた湾からブラジルの海岸を氾濫していった。はじめ、この始原海湾は構造凸地にはばまれて南部でしか拡大接合できなかった。このため内陸では乾燥気候が続き、厚い蒸発残留物の地層が堆積した (Ponte et al., 1977)。そのご Albian 階からは、台地型の炭酸塩岩が堆積し、ついで海側への傾動がおこり、厚い大陸縁堆積物

# SOUTH AMERICA



**Fig. I-3-2-6 Mesozoic mafic igneous activity in eastern South America**  
 (compiled from Rezende, 1972; Bigarella, 1973; McConnell, 1975; Zamborano & Urien, 1974; Cordani et al., 1967)

が累積した。

### 3-2-2 鉱床概要

ブラジルの鉱床位置は Mapa Geologico do Brasil 1/2,500,000 (DNPM, 1995b) に記載されているほか、CPRM (1995)の付図 (1/7,000,000) に主要な鉱床の位置・概要がまとめられている。MMAJ の平成 12 年度プロジェクト選定調査報告書 (MMAJ, 2000) ではプラットフォームの年代別に鉱床を区分し、以下のようにまとめている。

#### (1) 始生代の鉱床

この時代の鉱床として、グリーンストーン・ベルト型の volcano-sediments 火山・堆積岩類に伴った金、銅、マンガン、鉄鉱床や塩基性-超塩基性複合岩類に伴ったニッケル、銅、クロム、石棉鉱床などが知られている。

グリーンストーン・ベルトに関係する初生金鉱床としては、ミナス州の Morro Velho 鉱床、ゴイアス州の Mara Rosa 鉱床、Crixas 鉱床、Pilar de Goias 鉱床などがあり、それらの一部には銅の鉱化作用を伴っているものもある。

アマゾン地域の砂金鉱床分布地帯として Tapajos、Madeira、パラ州南東部地域が代表的であるが、それらの金の供給源は Complexo Xingu の変塩基性岩類や角閃岩類に胚胎する含金石英脈であることが知られている。これらの塩基性岩類の一部は今日ではグリーンストーン・ベルトに属すと考えられている。

これらのベルトは Salobo 地域では volcano-sediments、Tapajos 地域では Jacareacanga 変成岩類として分布し、アマパ州からパラ州北東部地域では Grupo Vila Nova などが鉱床母岩となって分布している。

金の再移動によって生成された含金石英脈や原生代の花崗岩類の貫入に伴って生成された金鉱床などは NW-SE、NE-SW 方向の破碎帯に胚胎する事が多い。

#### (2) 下部原生代の鉱床

始生代から原生代に移行するこの時代の鉱床としては、グリーンストーン・ベルトに胚胎する初生金鉱床の他に砂岩タイプの金鉱床、堆積型の金、銅、マンガン鉱床及び鉄鉱床さらに塩基性-超塩基性岩類に伴った鉱床や火山性多金属鉱床などが知られている。

砂岩タイプの鉱床として Witwaters Rand タイプや Blind River タイプと呼ばれる砂岩層に胚胎する含金・ウラン鉱床がある。その代表的なものには、バイア州の Grupo Jacobina、ミナス州の Supergrupo Minas、ゴイアス州の Cidade de Goias 変礫岩層に胚胎する鉱床がある。

堆積型の鉱床としては、カラジャス山地周辺に分布する Rio Fresco 層タイプの海進堆積相に胚胎する Serra Pelada 金鉱床、Baia 銅鉱床、Azul マンガン鉱床などがある。

鉄鉱床は、縞状鉄鉱層または Superior タイプの BIF 鉄鉱層に胚胎するものでミナス州鉄四角地帯の Supergrupo Minas やパラ州カラジャス地域の Grupo Grao Para などに胚胎する鉄鉱床が代表

的である。

塩基性－超塩基性貫入岩類に伴った Ni-Cu-Co 鉱床としては、ゴイアス州の *Americano do Brasil* 鉱床、*Mangabal* 鉱床やバイア州の *Campo Alegre de Lurdes* 斑れい岩－アノーサイト複合岩体に胚胎する Ti-Fe-V 鉱床がある。

火山性多金属鉱床としては、バイア州の *Boquira Pb(-Zn-Ag)* 鉱床、パラナ州の *Barra do Perau Pb(-Ag-Zn)* 鉱床やトカンチンス州の *Palmeiropolis Zn(-Pb-Cu)* 鉱床などが代表的である。

### (3) 中部原生代の鉱床

この時代の主な鉱床は、スズ鉱床である。他に、ニッケル、クロム、石綿鉱床などが知られ、一部ダイヤモンド鉱床もある。

この時代は台地性堆積盆の発達と共に造構運動が行われ、酸性－中性火山岩類、同質火山砕屑岩類を伴った堆積物が広く厚く堆積しており、さらにこれらを買いて花崗岩類が発達し、これに伴ってスズ鉱床が生成されている。ブラジルのスズ鉱化作用はほとんどこの時期のもので代表され、特に、アマゾン地域からゴイアス地域にかけて多く分布する。

褶曲帯周辺部ではアルプス型の超塩基性岩類が貫入し、ニッケル、クロム、石綿などの鉱床を胚胎している (*Morro Feio* 鉱床、*Dois Irmao* 鉱床、*Quatipuru* 鉱床など)。

ブラジルで最初のダイヤモンドの鉱化作用を伴ったキンバライトの貫入はこの時代のもので、その後の各時代の古漂砂鉱床 (*palaeo-placer deposits*) の源となっている。

### (4) 上部原生代の鉱床

この時代の鉱床としては *Brasiliano* 造山運動の構造帯に貫入した花崗岩やペグマタイトに伴ったペグマタイト鉱床、褶曲帯の堆積岩類に胚胎する非鉄金属鉱床、火山・堆積岩類に胚胎する銅鉱床、アマゾン・クラトン周辺部の Fe-Mn 鉱床などがある。

ペグマタイト鉱床は、ミナス州、バイア州、ブラジル北東部などに分布しベリル、スズ、ニオブ、タンタル、リチウムなどの鉱床である。

堆積岩類に胚胎する非鉄金属鉱床には、パラナ州の *Panelas Pb (Au, Ag)* 鉱床、*Sete Barra* 螢石鉱床、*Perau Pb-Zn* 鉱床、サン・パウロ州の *Itapeva Cu* 鉱床などがあり、さらに、ミシシッピー・ヴァレー型鉱床としてミナス州の *Vazante Zn* 鉱床、*Morro Agudo Pb-Zn* 鉱床などが代表的である。

また、火山・堆積岩類に胚胎する Cu 鉱床として、セアラ州の *Pedra Verde* 鉱床やセルジッペ州の *Canidade de Sao Francisco* 鉱床がある。

鉄・マンガン堆積型鉱床としてはマト・グロッソ・ド・スル州の *Corumba* 地域の鉱床が代表的である。

### (5) 顕生代の鉱床

原生代末期から古生代初期には、ブラジル南部のリフト地帯でモラッセ型の堆積物が発達し、リオ・グランデ・ド・スル州の *Camaqua Cu* 鉱山や *Caninde de Sao Francisco Pb-Zn* 鉱床などが鉱染状または脈状鉱床として胚胎している。



クラトンのブロック化に伴って生成された堆積盆には、様々な堆積型の鉱床が生成されている。パラナベースンでは、ゴイアス州のデボン紀の地層にウランの鉱化作用が認められ、石炭紀の堆積層中にはリオ・グランデ・ド・スル州からパラナ州にかけて石炭層や泥炭層が胚胎している。アマゾンベースンでは、石炭-ペルム紀の地層に岩塩、カリ-ギブサイトなどの鉱床が知られ、石炭紀の砂岩層にはガス田が発見されている。

パルナイバベースン周辺部では、セルジッペ(Sergipe)-ゴイアス(Goias)州にかけて岩塩、カリ、硫黄、石油、ガス、パライトなどの鉱床が生成されている。

Gondwana大陸分裂の時期に一致した火成活動と考えられているアルカリ岩体、カボナタイト岩体、キンパライト岩体などに伴った鉱化作用としてリン、ニオブ、チタン、ニッケル、ウラン、ジルコン、ダイヤモンドなど多種多様の鉱物が生成されている。

一方、新生代から現世にかけて生成された風化残留鉱床や漂砂鉱床にも経済価値の大きいものがある。アマゾン地域のボーキサイト、カオリン、砂金、砂錫鉱床などが代表的である。この種の鉱床が存在するアマゾン地域は、これらを供給した鉱源となる初生鉱床賦存の可能性も大きく、ブラジル政府はこの地域の探査・開発に力を入れている。

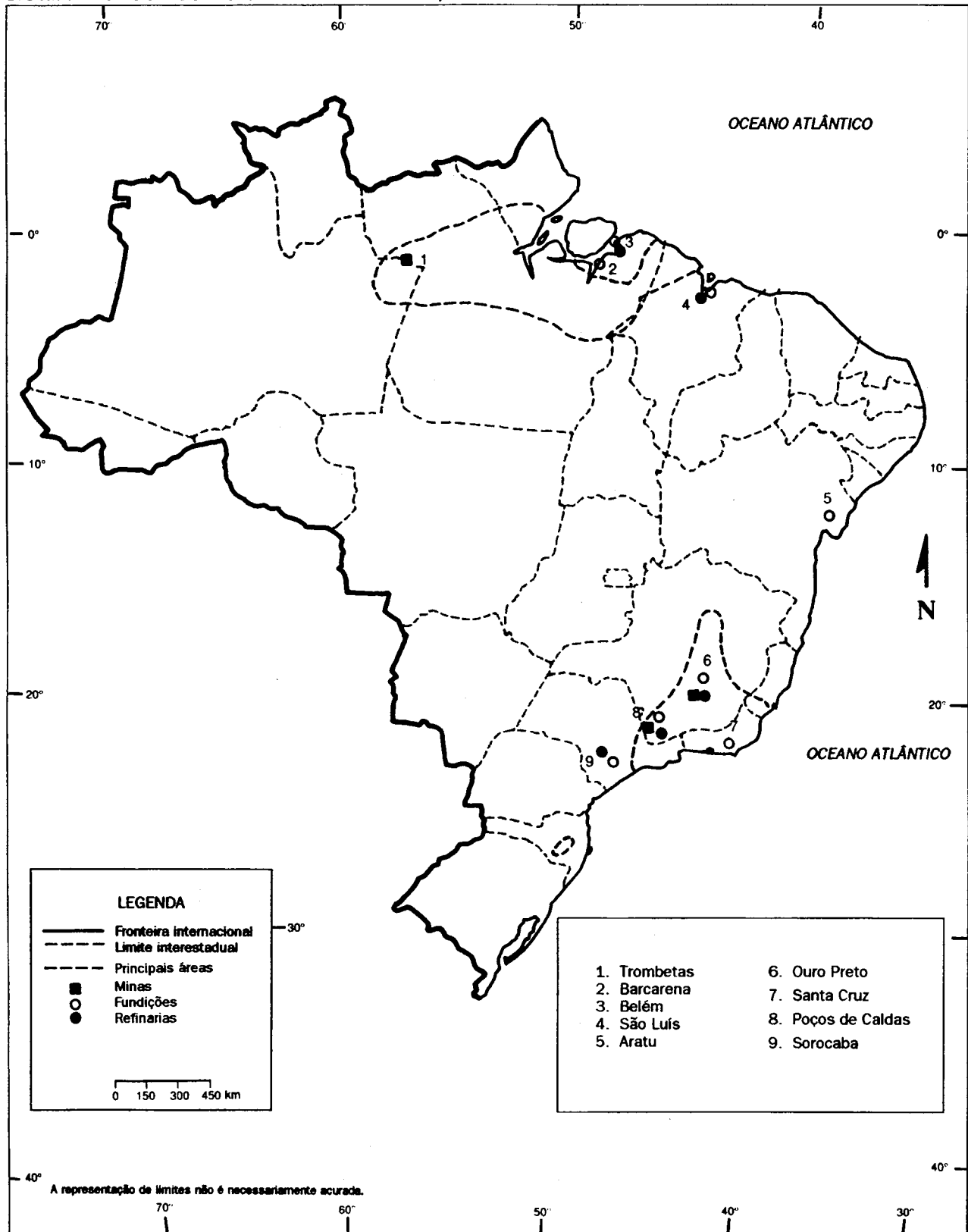
### 3-2-3 鉱山・鉱床・鉱徴

ブラジルの主要な鉱山・鉱床の位置は鉱種別にまとめられ、その概要も表としてDNPM(1995)に記載されている。本報告書では鉱種別の位置図を示した(Fig.I-3-2-7, Fig.I-3-2-8, Fig.I-3-2-9, Fig.I-3-2-10)。

主要な鉱床についての記載はDNPM and CVRD(1986, 1988, 1991)にまとめられており、日本語では平成4年度プロジェクト選定調査報告書(MMAJ, 1993)にその要約があるので参考にされたい。

Mapa 6.1

**Brasil: minas de bauxita e usinas de alumina/alumínio**

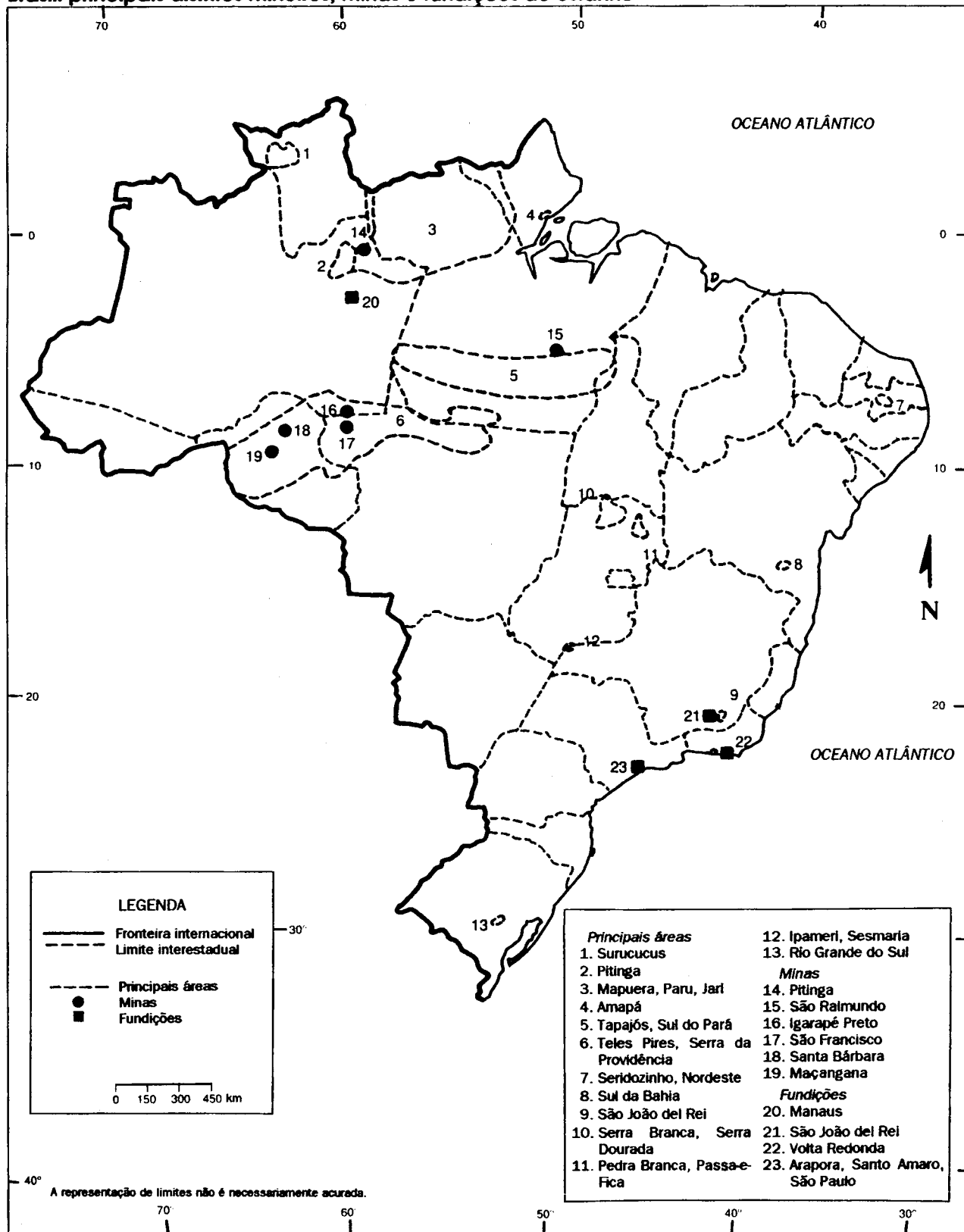


Fontes: USBM e DNPM, 1995.

**Fig. I-3-2-7 Distribution of aluminum ore deposits and smelting factories**

Mapa 6.2

**Brasil: principais distritos mineiros, minas e fundições de estanho**



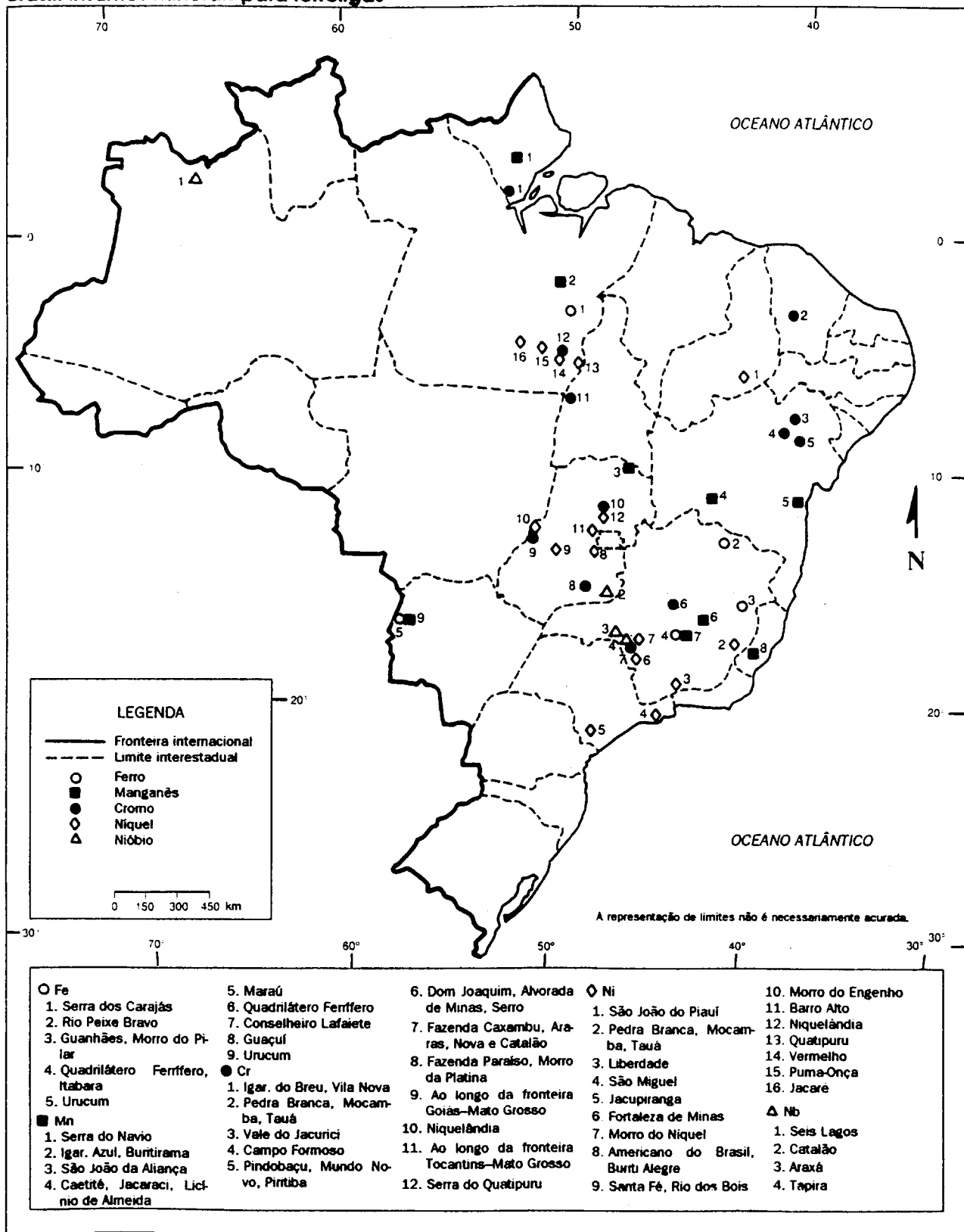
Fontes: USBM e DNPM, 1995.

**Fig. I-3-2-8**

**Distribution of tin ore deposits**

Mapa 6.3

Brasil: insumos minerais para ferroligas



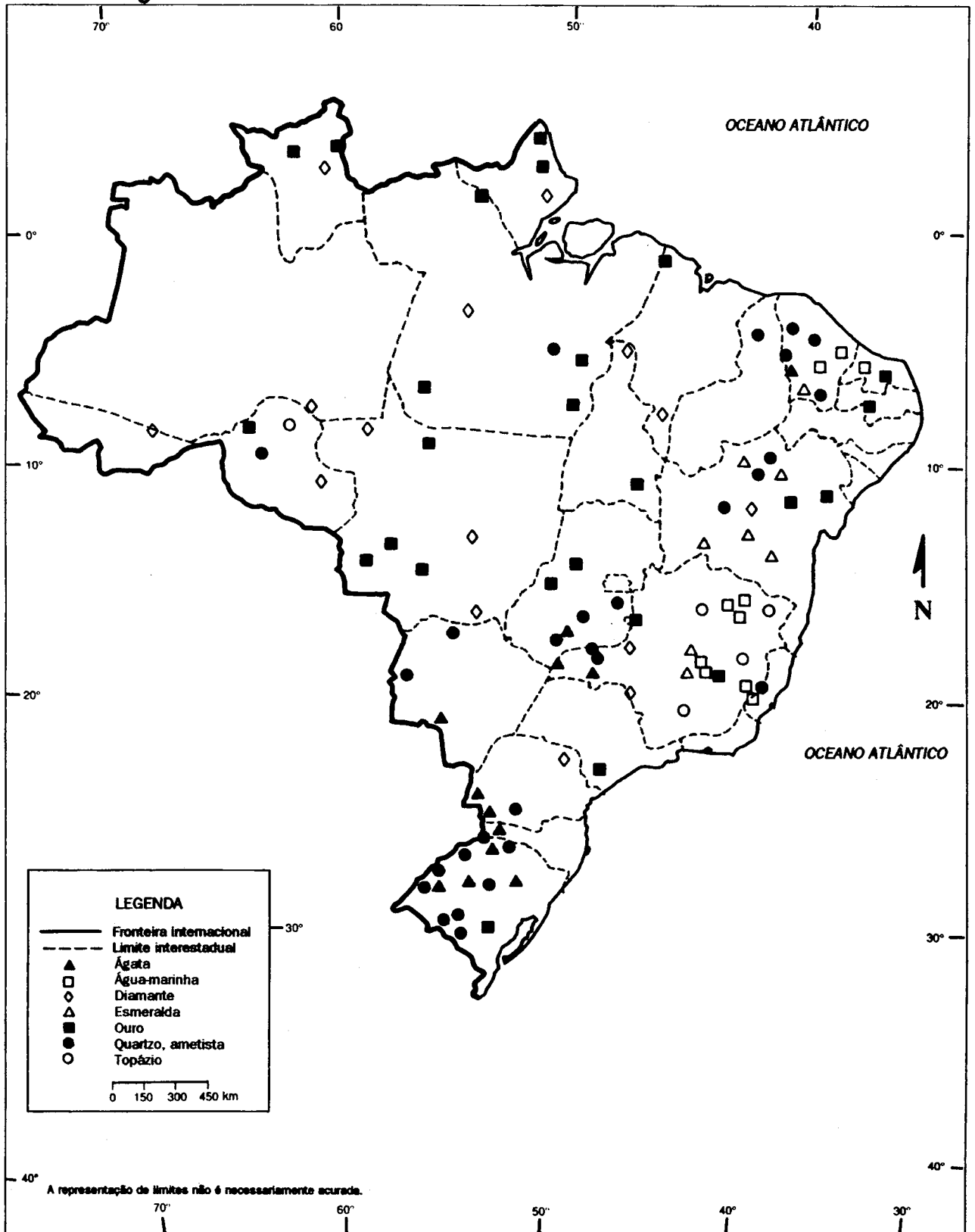
Fontes: USBM e DNPM, 1995.

Fig. I-3-2-9

Distribution of Fe/Mn/Cr/Ni/Nb ore deposits

Mapa 6.4

Brasil: ouro e gemas



Fontes: USBM e DNPM, 1995.

Fig. I-3-2-10 Distribution of gold and gem stone deposits

### 3-3 CPRM の PGE 国家プログラム

#### 3-3-1 経緯

プラチナグループ金属 (PGM) あるいは同グループ元素(PGE)は、プラチナ (Pt)、パラジウム (Pd)、ロジウム (Rh)、ルテニウム (Ru)、オスミウム (Os)、イリジウム (Ir) の 6 元素からなる。これらは物理的・化学的性質が類似し、天然では組み合わせられて産出し、銀と同じく貴金属として知られる。これらは高温でも溶融しにくく、化学的に多くの元素に対して活性がなく、優れた触媒能力がある。これらは非常に比重が大きく、イリジウムは自然界で最高の 22.65 の比重をもつ。また、融点はオスミウムが 3,045℃、プラチナが 1,769℃と極めて高い。これらの白金族元素は つねに塩基性—超塩基性岩に化合物あるいは天然の合金として含まれる。

化合物のなかで、PGM は、酸素、硫黄、砒素、アンチモン、ビスマス、テルル、錫、鉛などの陰イオンと結合して陽イオンとしてはたらく。また、天然合金として PGM はチタン、鉄、金、水銀と合金をつくる。もっとも一般的な鉱物として、スペリライト (Sperrylite; PtAs<sub>2</sub>)、ブラッグイト (Braggite; (Pt, Ni)S)、コーペレート (Cooperete; (Pt, Pd)S)、自然白金、自然パラジウム、自然オスミウムがあげられる。

白金族金属の用途はその物理的・化学的特性にある。宝石や投資資産に加え、多種の工業分野、例えば電子部品や公害規制物質 (例: 車の排気ガス触媒) としても重要である。また新技術としては燃料電池、新しい電子産業や医療向けにも用いられる。

世界の白金族資源は南アフリカに集中し、第二位はロシアである。この 2 国で世界の埋蔵量の 98.5% を占める。この状況は生産量でも同じである。この偏在性のため、将来にわたる安定供給を不安視する向きがある。

この点に着目したブラジル政府は、1990 年代に入り、自国の白金族資源のポテンシャルについて基礎的スタディーを開始し、この中で、特にブラジル南西部を広く覆う中生代の洪水玄武岩に着目した (Fig.I-3-3-1 Geological Map of Parana Basalt area)。

この様な背景の下、ブラジル政府の動きと連動する形で、パラナ州鉱山公会社 (MINEROPAR) も積極的姿勢を示し、1994 年に政府組織と共同で、パラナ州内において、広域の河川堆積物地化学調査 (面積約 16 万 km<sup>2</sup>、試料数約 700 個) を行った。この調査は、採取密度が極めて粗い (約 230 km<sup>2</sup> に 1 個) 概査であったが、これにより州の南西部地域で、プラチナ、パラジウムの他、ニッケル、クロム、銅などの地化学異常を把握した。その後、MINEROPAR は異常域で独自の調査を行い、複数箇所を確認したシル状の粗粒玄武岩質岩を分析し、一部でパラジウムの地球化学的高異常を得ている。

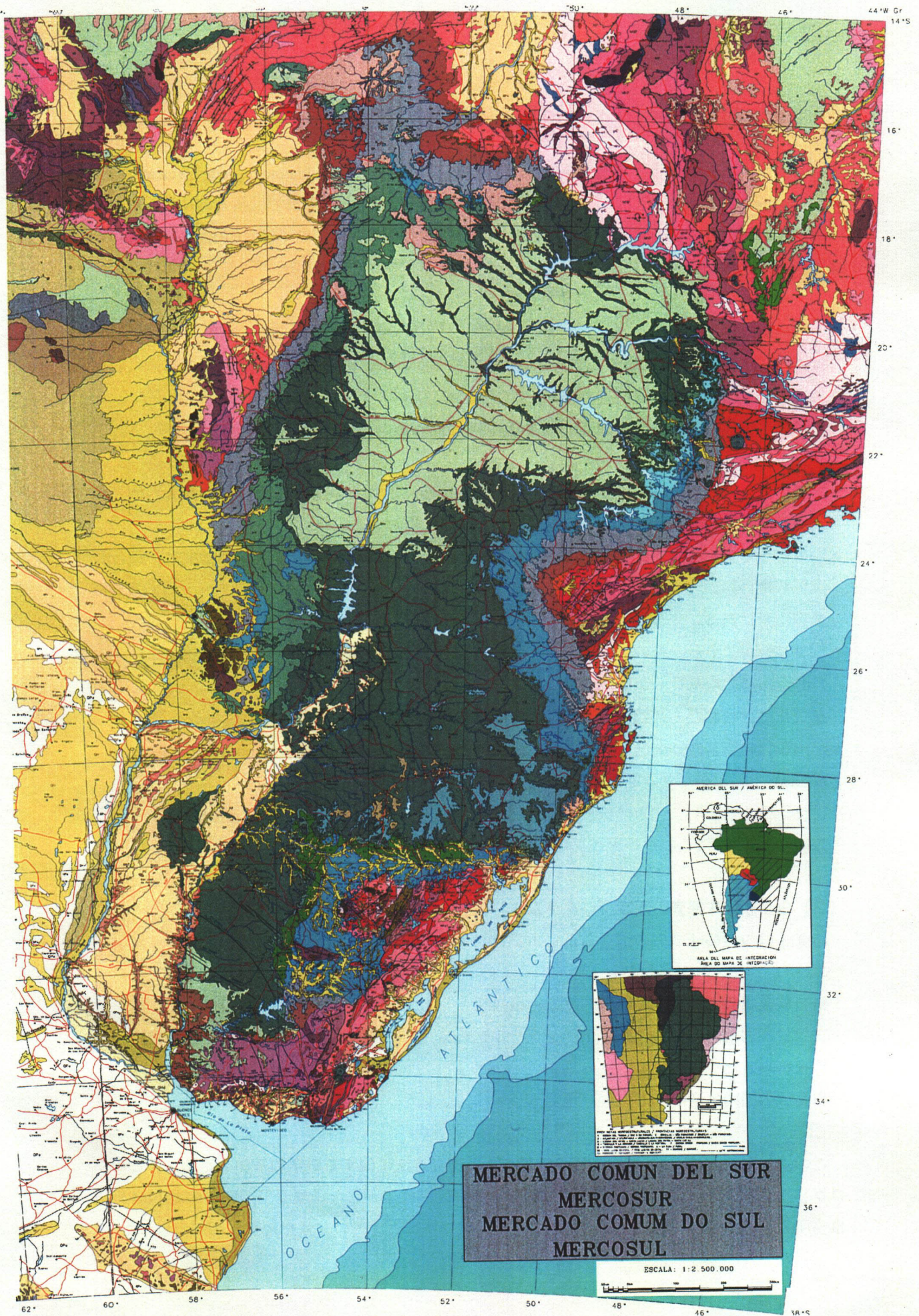


Fig. I-3-3-1 Geological map of Paraná basalt region

### 3-3-2 CPRM のプラチナプロジェクトの概要

CPRM が主導したブラジル全土を対象にした PGE (PGM) (PGE; Platinum group element, PGM; Platinum group mineral) プロジェクトは、1995 年までの第一フェーズまでは精力的に行なわれていたらしいが、その後の進捗状況に関してはあまり情報がない。ここでは、CPRM の 1990 年から 1995 年までの活動成果について、Farina, M. (1996) に従ってまとめる。

#### (1) 地質条件

PGM の鉱床はいろいろな地質環境で形成され得るが、ほとんど塩基性-超塩基性岩体に限定されている。これら地質環境を Farina (1988) は 15 のカテゴリーに分類し、その中で以下の 3 つのタイプが世界の埋蔵量の 99% を、生産量の 98% 占めるとした。

- a) 層状貫入岩体 (LI: Layered Intrusion) : 大陸内環境における塩基性-超塩基性の貫入岩体。洪水玄武岩と関係がなく、プレート内あるいは非造山帯にある。
- b) 主としてシルなどの貫入岩体 (FB: Flood Basalt) : 大陸内でのリフティングと洪水玄武岩に関係した、ドレライトから斑れい岩成分の層状貫入岩体(主としてシル)。プレート内あるいは非造山帯にある。
- c) グリーンストーン帯のコマチアイト成分の溶岩と層状貫入岩体 (GB: Greenstone Belt)
- d) 非造山帯の塩基性-超塩基性貫入岩体 (AI: Anorogenic Mafic-ultramafic Intrusions) : このタイプに区分されたものは後の調査で、重要なものは分類しなおされる可能性がある。
- e) 未区分の塩基性-超塩基性貫入岩体 (MU: (complex or Mafic and / or ultramafic Unclassified bodies)) : 鉱床タイプの定義に合わないが重要なもの。

Table I-3-3-1 にはこれらのタイプの世界における資源量と生産量を示す。

#### (2) 白金族鉱床探査の国家プログラム

CPRM はつぎの 4 つの事情をもとに本プログラムを開始した。

- ・白金族金属のもつ高度の経済的・政治的重要性。
- ・ブラジル国土が地質的に高いポテンシャルをもつ。とくに塩基性-超塩基性岩体に富む。
- ・探査がまったく行われていない。
- ・白金族の国内生産がない。

このプログラムは 1990 年に開始し、ゴールと探査方法に関する科学的基礎を定めた。このプログラムは永久的な性格をもつが、1995 年を第一段階終了とした。ブラジル国内の CPRM 地方事務所の支援で 10 プロジェクトを 11 人の常勤地質技師と 3 人の非常勤地質技師が担当した。



**Table I-3-3-1 Type of PGE deposits in the world and their reserve and production**

Type	Examples	World Reserve Base(1988) %	World Production Base(1988) %
LI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bushveld (South Africa)</li> <li>• Sudbury (Ontario, Canada)</li> <li>• Stilwater (Montana, USA)</li> <li>• Great Dike (Rodesia)</li> </ul>	90.2	50
FB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Noril'sk, Talnakh, Mairk e Taymir (Siberia, Russia)</li> </ul>	8	37
GB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thompson, Manitoba (Canada)</li> <li>• Kambalda (West Australia)</li> <li>• Fortaleza de Minas (Minas Gerais, Brazil)</li> </ul>	1.2	11
Others		0.6	2
Total		100	100

LI: Layered Intrusion, FB: Flood Basalt, GB: Greenstone Belt

このプログラムは政府の活動に属し、広域探査活動を行っている民間企業を支援・助成しようとするものである。しかし、鉱床そのものを開発しようとする精査段階のものや経済性評価をおこなっているものは対象としない。本プログラムの作業は、鉱業権が誰に属していても、プラチナのポテンシャルが高い地域であれば実施される。すなわち、本プロジェクトは鉱区とは関係がなく、CPRM の名前で鉱石の保証などを求めるものではない。

### (3) 探査方法

方法論はプロジェクトの成否を支配するもので、本プロジェクトの開始時に以下のように決定された。

#### トレーニング:

- 以下の項目についてワークショップを開いて、各チームをトレーニングする。
- 超塩基性岩及び塩基性岩の地質学、岩石学
- プラチナ鉱床の鉱物学
- グリーストーン帯の超塩基性岩
- ラテライトおよびゴッサンについての概要
- 地化学探査法の実習
- PGE 鉱床とその探査論

#### ターゲットの選定：

ターゲットは以下の要素を検討して選定された。

- ・既存地質図で塩基性～超塩基性岩体を抽出する。特に大きい岩体について。
- ・空中磁気探査の情報
- ・Ni, Cu, Co (Cr)の地化学異常
- ・Ni, Cu (Co)の硫化物鉱床
- ・鉱床タイプ (LI: Layered Intrusion, FB: Flood Basalt, GB: Greenstone Belt, AI Anorogenic Intrusions, MU: Unclassified intrusion) の定義

#### Selective Geological Mapping 特殊地質図の作成・編集：

これは既存の地質図を基に改編し、プラチナ探査に利用の照準を絞った特殊地質図を作成・編集しようとするものである。

#### Mineralogical Pan-Concentrate Prospecting 重鉱物探査：

白金族元素の密度は極めて大きいので、沖積堆積物をパンニングにより分離した重鉱物の探査は重要と考えられる。方法はルーチン化し、素試料は15～20リットルとする。特殊な場合は土壌試料も試験の対象とする。

#### 地化学探査：

ルーチンとして、試料は2種類採取する。同一個所で重鉱物試料と河川堆積物試料を採取する。場合によっては土壌試料も含める。

#### 地上物理探査：

特殊な場合磁気探査およびIP探査をおこなう。

#### 試錐探査：

場合により試錐探査をおこなう。

#### 室内試験：

ルーチンとして以下の試験をおこなう。

- ・岩石：岩石記載。
- ・硫化物を伴う岩石：岩石記載、銅鉱物などの記載、Pt, Pd, Au, Cu, Co, Ni, Mgの分析
- ・ゴッサン：Cu, Co, Zn, Niの分析。場合によりPt, Pd, Auの化学分析
- ・重鉱物（パンニング濃集物）：実体鏡および電子顕微鏡による鉱物の同定。Pt, Pd, Au, Cr ときにIrの分析
- ・河川堆積物，土壌：Cu, Ni, Co, Zn, Au, Crの分析

また、必要に応じ岩石に対し主要 13 酸化物、REE, S, Ba, Sr, Rb, H<sub>2</sub>O+, H<sub>2</sub>O-の分析を行う。

データ処理：

すべての試料に対するファイルを作成し、座標・地質などのデータを盛り込む。

図幅とレポートの作成：野外および試験室でのデータを検討・解析し、年次報告書および図を作成する。

#### (4) 実施済み作業

1992 年から 1995 年 6 月までの探査実績を Table I-3-3-2 に示し、また、各岩体の位置をタイプ別にわけたものを Fig.I-3-3-1 に示す。

**Table I-3-3-2 Samples already collected and analyzed by CPRM PGE project**

Project	Pan Concentrate		Stream Sediments		Soils		Rocks		Totals	
	Sampled	Analysed	Sampled	Analysed	Sampled	Analysed	Sampled	Analysed	Sampled	Analysed
Platina - RS/SC	41	41	0	0	0	0	359	162	400	203
Platina - SP/PR	419	210	440	440	48	48	278	207	1,185	905
Platina - MG	4,572	1,633	3,030	1,352	3,372	3,124	954	590	11,928	6,699
Platina - BA/SE	342	163	315	315	8	8	234	112	899	598
Platina - PA/AP	3,160	62	2,101	2,063	0	0	165	97	5,426	2,222
Platina - AM/RR	258	247	133	123	27	27	382	162	800	559
Platina - RO	895	167	621	454	433	375	599	497	2,548	1,493
Platina - GO/TO	1,469	1,029	408	388	1,128	826	710	710	3,715	2,953
Platina - MT	129	0	4	0	0	0	34	0	167	0
Platina - PI/MA	152	37	12	0	33	19	72	38	269	94
Total	11,437	3,589	7,064	5,135	5,049	4,427	3,787	2,575	27,337	15,726

Abbreviations of state names; AP: Amapa State, BA: Bahia State, GO: Goias State, MA: Maranhao State, MG: Minas Gerais State, MT: Mato Grosso State, PA: Para State, PI: Piaui State, PR: Paraná State, RO: Rondonia State, RR: Roraima State, RS: Rio Grande do Sul State, SC: Santa Catarina State, SE: Sergipe State, SP: São Paulo State, TO: Tocantins State.

#### (5) 結果

##### a) 層状貫入岩体 - LI 型

- 1) Serra da Onça 岩体 (Para 州) : 36 試料で Pt 40-800 ppb, 42 試料で Pd: 10-400 ppb。
- 2) Serra da Puma 岩体および Igarape Carapanã 岩体 (Para 州) : Serra da Onça 岩体に類似。詳細未調査。
- 3) Cacoal 岩体 (Rondonia 州) : パン試料で Pt: 10-20 ppb, Pd: 30 ppb, Au: 10-1,450 ppb。土壤試料で Cu: 450-900 ppm, Ni: 1,600-3,000 ppm。
- 4) Serra do Colorado 岩体 (Rondonia 州) : 興味ある岩体であるが未調査。
- 5) Barro Alto 岩体 (Goias 州) : Pt: 440 ppb。ほとんど未分析。
- 6) Tapuruquara 岩体 (Amazon 州) : 調査は初期段階にある。

PROGRAMA NACIONAL DE PROSPECÇÃO DE METAIS DO GRUPO DA PLATINA

MAPA DE CARACTERIZAÇÃO DAS  
ÁREAS DE TRABALHO



■ PRECAMBRIAN LAYERED ANOROGENIC MAFIC-ULTRAMAFIC INTRUSIONS	□ - SELECTED POTENTIAL AREAS FOR FUTURE FIELD WORK
■ GREENSTONE BELT	◇ - AREAS WITH PROSPECTING WORK IN PROGRESS AND WITH GOOD RESULTS
■ UNCLASSIFIED MAFIC- ULTRAMAFIC BODIES	□ - AREAS WITH PROSPECTING WORKS IN PROGRESS AND RESULTS TO BE DEFINED
■ MAFIC INTRUSIONS ASSOCIATED WITH PLATEAU BASALTS	△ - AREAS WHERE PROSPECTING WORK HAS BEEN STOPPED DUE TO UNSTIMULATING RESULTS
■ PRECAMBRIAN ANOROGENIC MAFIC-ULTRAMAFIC INTRUSIONS	⊕ - AREAS WHERE PROSPECTING WORK HAS BEEN STOPPED BUT WITHOUT DEFINITIVE RESULTS
	☼ - Ni-Cu DEPOSITS WITH PGM AS BY-PRODUCT

Fig. I-3-3-2 Target areas and bodies for PGE Prospecting by CPRM

## b) FB 型—洪水玄武岩

調査はパラナ ベースンとパラナイバベースンでの中生代ドレライトのシル・不規則貫入岩体に対して行なわれた。硫黄源として、パラナイバベースンでは Pedra do Fogo 層および Motuca 層からの石膏層、デヴォン紀の頁岩中の黄鉄鉱、石炭紀の石炭層が、パラナ ベースンでは石膏層は極めてまれでわずかに Irati 層にみられる。ブラジルのベースンと Noril'sk を含むロシアのベースンは多くの点で類似しているが、以下の点で異なる。

- 1) 塊状硫化鉱と塩基性岩: 多くは黄鉄鉱の鉱染にすぎず、黄銅鉱を伴うものはまれで、Total S が 1-2% を越えるものは少ない。
- 2) ニッケルと銅の大規模濃集: 黄銅鉱と孔雀石が点状にみられるのみで、量的に意味をなしていない。
- 3) Magmatogenic layering
- 4) かんらん石の存在とピクライト質岩: かんらん石はほとんどのシルで欠けている。例外として Porto Alegre 州都、パラナ州の Jose Fernandes の岩体が挙げられ、今後の調査対象となろう。
- 5) 母岩の同化と再結晶作用: 箇所低温の熱変成作用が知られている。
- 6) パン濃集物中でのプラチナ鉱物の存在

Porto Alegre 州都城—ピクライト質岩は Lombo Grande とよばれる 6 km<sup>2</sup> の岩体にある。カンラン石の量はドレライト・斑れい岩とよべる 17-36% (最大 50%) を占める。鉱物学的興味程度の量であるが、斑状黄銅鉱と微量の自然銅、モーシェライト(NiAs) が検出されている。条件 "a"、"b"、"c"、"e"、"f" は認められない。

Jose Fernandes 斑れい岩体—パラナ州の Adrianapolis 郡に位置し、5 km<sup>2</sup> の広がりをもち不規則な形をもつ。かんらん石は 15-20% である。母岩は先カンブリア紀の各種地層である。パラナベースン以外での中生代岩脈としては唯一のもの。研磨片では少量の磁硫鉄鉱、黄銅鉱、ペントラント鉱、キューバ鉱、閃亜鉛鉱、マッキーノ鉱がみられる。パン濃集物には金粒がみられる。条件 "a"、"b"、"e"、"f" は認められない。

## c) GB 型—グリーンストーン帯の超塩基性岩

### 1) Fortaleza de Minas (Minas Gerais 州)

これは Ni/Cu 鉱床であり、鉱業権者からの情報では Ni: 2.6%, Cu: 0.4 %, Co: 0.06 %, Pt: 0.32 ppm, Pd: 0.47 ppm, Rh: 0.06 ppm, Ir: 0.1 ppm, Os: 0.09 ppm, Ru: 0.2 ppm, Au: 0.09 ppm, PGE+Au: 1.33 ppm である。

鉱床の酸化帯での品位は Ni: 0.74 %, Cu: 0.48 %, Co: 0.03 %, PGE+Au: 1.76 ppm である。鉱量は硫化鉱で 5.3×10<sup>5</sup> トン、酸化鉱で 445×10<sup>3</sup> トンである。探査上は広く分布するゴッサンが重要である。鉱化帯の平均厚は 3 m に過ぎない。

## 2) Serro および Morro do Pilar (Minas Gerais 州)

古くからミナスジェライス州では、Pilar 郡の Ribeirão Limeira と Serro 郡の Corrego Bom Sucesso では沖積層中にプラチナ鉱物が産することが知られている。パン濃集試料 89 試料を採取した結果、13 試料が Pt: 6~3,550 ppb, 24 試料が Pd: 10~10,000 ppb が常に Au とともに検出された。Corrego Bom Sucesso からの 1 粒は EPMA 分析により Pt: 92.2%, Pd: 5.9%、Ti: 2%であった。同じ地区でのもう 1 粒は Pt: 40~83%, Pd: 13~56%を示した。

## 3) Guajeru 地区(Bahia 州)

本地区は Guajeru、Malhada das Pedras、Janio Quadros 郡に位置する。いくつかのパン濃集物は Pt+Pd が 40~720 ppb を示し、Au を 10~1380 ppb 伴う。

### d) AI 型-非造山帯貫入岩

非造山帯貫入岩の多くはまだ未調査であるか調査初期段階にあるに過ぎない。興味ある岩体は主として Rondônia、パラ、ロライマの各州にある。

## 1) Pedra Preta および Cotingo シル (Roraima 州)

原生代の非造山帯貫入岩で主としてドレライトからなる。ブラジル領土内で長さ 100 km 以上に達するが、ヴェネゼイラとガイアナでさらに延び、厚さ 2 km に達する。

### e) MU 型-未区分超塩基性岩体

#### 1) Rio Branco/ Alta Floresta 地区(Rondonia 州)

本地区は Rondonia 州の Alta Floresta D'Oeste 郡と Sao Migueil do Guapore 郡に位置する。主たる岩相は、ガプロ、トロクトライト、メタガプロ、角閃岩からなる。変成作用とシアゾーンがみられる。メタガプロはペントランド鉱、黄銅鉱、黄鉄鉱、磁硫鉄鉱、硫砒鉄鉱、bravoite、violaraite、閃亜鉛鉱とおそらくプラチナグループの組合せを示す。パン濃集物中には EPMA で Pt: 64~95 %、Pd: 1.8 %、Rh: 4.7 %のプラチナ鉱物が同定されている。同じメタガプロのなかでパン濃集物 8 試料は Pt: 30~660 ppb、Pd: 10~220 ppb を示した。また細粒河川堆積物試料は Cu と Ni の明瞭な異常を示している。

#### 2) Sao Felipe/ Santa Lizia 地区 (Rondonia 州)

ガプロ、ノーライト、かんらん石ガプロ、角閃岩、メタガプロの岩体があり、黄銅鉱、ペントランド鉱、violaraite、bravoite、黄鉄鉱、磁硫鉄鉱とおそらくプラチナグループの組合せが知られている。細粒河川堆積物試料に Cu と Ni の異常があるのもかわらず、パン濃集物中にプラチナ鉱物はみだされていない。

#### 3) Nova Brasilândia 岩体

細粒から粗粒の変塩基性岩、メタガプロ、角閃岩の岩体で一部変成を受け、熱水変質を伴うシ

アゾーンもある。

メタガブロ中の鉱石鉱物として黄鉄鉱、磁硫鉄鉱、黄銅鉱、ペントランド鉱、bravoite、violaraité、硫砒鉄鉱が識別されている。パン濃集物 44 試料は Pt: 60~21,890 ppb, Pd: 10~7,890 ppb の値を示す。パン濃集物中には Pt: 59.7 %をもつ鉱物粒が少量であるが知られている。細粒河川堆積物試料は最大 Ni: 270 ppm, Cu: 120 ppm, Co: 175 ppm の異常をしめす。硫化鉱帯（25%が硫化鉱）中の IP 異常地に 2 本のテストボーリング（94m, 181 m）が実施された。黄鉄鉱、磁硫鉄鉱は認められたが PGE 鉱化は認められなかった。

## 第4章 調査結果の概要

### 4-1 既存データ解析

#### 4-1-1 世界の洪水玄武岩の特徴・成因とPGE 鉱化作用

洪水玄武岩の生成に関して、マントルプリュームの積極的な関与、もしくは大陸分裂時のアセノスフェアの上昇など、一般化された定説は成り立っていない。また、洪水玄武岩を形成するマグマ活動にも地域による特徴があるため、洪水玄武岩の成因から、PGE 鉱床の賦存を検討することは困難である。

PGE はその大部分が地球創生期に核に濃集しており、さらに、基本的に固相に濃集するため、分化が進んだ大陸地殻にはほとんど含まれていない。従って、洪水玄武岩中のPGE の起源は、マントルに求めるのが妥当である。また、洪水玄武岩形成時には通常の火成活動と比べて大量のマグマを発生するため、大規模な溶融が起こり、通常は固相に濃集するPGE も、生成するメルト中に比較的多量に含まれる可能性が高い。

以上のことから、PGE 鉱化作用をもたらす洪水玄武岩の起源マグマとしては、マントルプリュームを起源とし、且つプリュームや周囲のマントル物質を大規模に部分溶融して発生したものが望ましいと考えられる。

ただし、前述の条件は巨大火成岩岩石区（LIP）全般に言えることであり、PGE 鉱床の形成には、地殻の混染による珪酸塩成分および硫黄の供給や地域的なテクトニック・セッティングなどの、PGE 濃集を左右する要素の方が重要だと思われる。

#### 4-1-2 Noril'sk Cu-Ni-PGE 鉱床とその探査指針

パラナベズン地域で調査対象にしている正マグマ性 Cu-Ni-PGE 鉱床の探査指針を考察するため、ロシア Noril'sk 鉱床、その他正マグマ正鉱床の特徴・成因に関する文献収集・解析を行った。その結果、Noril'sk 鉱床の生成に関与したマグマは、ピクライト質～玄武岩質の組成で、硫黄に不飽和なPGE に富んだマグマであると考えられた。このようなマグマが地殻物質の混染作用を受けたことが原因で、不混和となった硫化物メルトが珪酸塩マグマから分離し、それがマグマ活動の中心域において大量の珪酸塩マグマと反応することにより銅、ニッケル、PGE を不混和硫化物メルト中に濃集したことが Noril'sk 鉱床の成因と考えられた。このことから Noril'sk タイプの鉱床の生成条件として、次の3点が掲げられた。

- (1) 硫黄に不飽和なマグマの発生と地殻浅部への上昇
- (2) 地殻物質の混染作用による不混和硫化物メルトの生成
- (3) 不混和硫化物メルトが大量の珪酸塩マグマと反応すること



そして、このような条件を満たした鉱床の探査指針として、以下が掲げられた。

- (1) 低 Ti タイプで PGE に富んだマグマが、溶岩または貫入岩として存在すること
- (2) このようなマグマと関連して、地殻物質の混染作用の影響がみられ、かつ PGE に枯渇したマグマが溶岩または貫入岩として存在すること
- (3) 地殻の弱線が発達し、大量の珪酸塩マグマが地下から供給される火山活動の中心域であること
- (4) 地殻物質の混染を起こしやすい高温のピクライト質マグマが溶岩または貫入岩として存在すること。しかしながら Noril'sk 鉱床の生成に関わったマグマの大部分が玄武岩質マグマであることを考えると、ピクライト質マグマの存在が必須であるか否かについては疑問が残る。

パラナベズン地域においては、以上の条件を満たす場所を捕捉することが重要であると提言された。

#### 4-1-3 パラナベズンの地質および地質構造

M. S. M. Mantovani et al. (2001)は、潮汐重力異常を用いて南米大陸のリソスフェアの厚さを求め、パラナベズンのリソスフェア（厚さ 68 km 以下）が始生代-原生代のクラトンや造山帯（72 km 以上）のリソスフェアより薄く、マントルプリュームが比較的浅所にあることを示した。この種のベズンは大陸内部ベズンと呼ばれている。大陸内部ベズンはマントルプリュームの胎動がリソスフェアの膨縮をもたらす堆積と浸食のサイクルを生み出し、プリュームの活動が活発になればリフトの形成、洪水玄武岩の噴出、大陸の分裂へと発展してゆく。

パラナベズンは Gondwana 大陸西部の大陸内部ベズンであった。Gondwana 大陸は断層でブロック化された始生代のクラトンとそれを取り巻く原生代後期の Brazilian- Pan African 変動帯からなる。基盤岩の構造方向は ENE-WSW および NW-SE が主方向である。その他、N-S 方向の Asuncion Arch などがある。ENE-WSW の構造方向は貫入岩を伴わないが、NW-SE の構造方向は Ponta Grossa Arch など多数のソレイト質ドレイト岩脈・シルを伴う場合がある。

マントルプリュームがリソスフェアに入り込むとリソスフェアが重くなり、リソスフェアがアイソスタシーにより沈降し、ベズンの形成が始まる (Fig. II-1-4-16)。パラナベズンの活動はオルドビス紀後期から白亜紀後期まで 390Ma 間続いた。E. J. Milani et. al. (1995)はパラナベズンの堆積岩層・火山岩層を6つのスーパーシーケンスにまとめた。Rio Ivai、Paraná、Gondwana I および Gondwana III スーパーシーケンスは Paraná 州西部から São Paulo 州南西部の Paraná 川沿いを中心に堆積した。Gondwana I はプリュームが活発に活動したためベズンの沈下量は大きく、その堆積物は Paraná 川を中心にベズン全体に広がっている。バックストリップング法による基盤の沈下曲線でも、Gondwana I に相当する 296-245 Ma（石炭紀後期～三畳紀前期）に顕著な沈下が見られる。この大きな沈下はヘルシニアン造山運動後、汎世界的に起こったリフトベ

ーズンに共通する現象でもある (M.C.L.Quintas, 1995)。

Gondwana III はプリュームの活動が活発であったためマグマが地表まで達し、ベーズン全体に大量の洪水玄武岩を噴出した。沈下曲線でも、Gondwana III に相当する 144-128Ma (ジュラ紀後期～白亜紀前期) に大きな沈下がみられる。

M.C.L.Quintas (1995) は Royden & Keen (1980) の熱力学モデルによりリソスフェアの収縮率 ( $\epsilon$ ) を計算した。ただし、アセノスフェアの膨張活動の始まりを観測沈下曲線から、第 1 期: オルドビス紀後期 (440 Ma)、第 2 期: 上部石炭系堆積前 (296 Ma)、活動第 3 期: ジュラ紀-白亜紀洪水玄武岩噴出前 (144 Ma) とした。第 1 期から第 3 期まで、高  $\epsilon$  帯は常にパラナ州西部から北西部を経て São Paulo 州南西部に至る NE-SW 方向の Paraná 川沿いにみられる。この地域ではリソスフェアの厚さが最も薄く、プリュームはこの Paraná 川沿いのエリアに侵入したと推定される。事実、Paraná 州北西部はシル、岩脈が最も多量に貫入している地域である。Rio Ivai、Paraná スーパーシーケンスの堆積もこの地域が中心である。第 3 期の最高  $\epsilon$  帯は São Paulo 州南西部にみられる。2-CB-1-SP ボーリングでは玄武岩溶岩の層厚は 1,723 m とパラナ最大である。 $\epsilon$  値も 1.26 と第 3 期では最大値を示す。恐らく、パラナ洪水玄武岩のマグマはこれらの高  $\epsilon$  帯をフィーダーとして噴出または貫入したものと推定される。

リフト帯はリソスフェアが薄いため、米国の Midcontinent rift の例にみられるように高重力異常になる。また、高重力異常は高  $\epsilon$  帯とほぼ同じ位置に大きな異常がみられる。これらのことから、Paraná 川沿いの高重力・高  $\epsilon$  異常帯は大きなマグマフィーダーの可能性があり、リフト型の Cu-Ni-PGE 鉱床が期待される。

#### 4-1-4 大陸性洪水玄武岩に伴う Cu-Ni-PGE 鉱床のテクトニクス

次に、マントルプリューム、ベーズン、パラナ洪水玄武岩および Cu-Ni-PGE 鉱床など一連の地質事象が、広域応力場の中でどのようなメカニズムで形成されるかについて、米国の Duluth 鉱床、ロシアの Noril'sk 鉱床およびパラナベーズンの例を基に検討した。

共役なせん断裂罅が横ズレ運動の進行により、その内部に斜行する雁行状の 2 次せん断面を形成すること、横ズレ運動が進行すると 2 次せん断帯は互いに繋がり Cymoid loop と呼ばれる、大きな引張裂罅が形成することはよく知られている。P.W.Weiblen (1982) は、この共役なせん断裂罅のひとつがリフト、他方がトランスフォーム断層に発展することを示した。

Duluth 鉱床の場合、重力異常および空中磁気異常から Midcontinent rift の形状とトランスフォーム断層の位置が把握できる。Duluth 鉱床は、2 つのトランスフォーム断層の横ズレ運動により形成された引張裂罅帯に Duluth 複合岩体が貫入し、Cu-Ni-PGE 鉱床が形成された。Duluth 地域の広域応力場は、中間圧縮主応力軸 ( $\sigma_2$ ) を垂直方向とすると、最大圧縮主応力軸 ( $\sigma_1$ ) は NE-SW 方向、最小圧縮主応力軸 ( $\sigma_3$ ) は NW-SE 方向になる。

Noril'sk 鉱床は NNE-SSW 方向の Noril'sk-Kharayelakh 断層沿いに存在する。この断層は鉱体の形から右横ズレのせん断性の断層とみられる。一方、Noril'sk 鉱床は NNW-SSE 方向の Kayerkansky-Pyasinsky 背斜の位置にある。NNW-SSE 方向は Gydansk-Omsk リフトの方向と一致

することから、最大圧縮主応力軸 ( $\sigma_1$ ) の方向を示すと推定される。最小圧縮主応力軸 ( $\sigma_3$ ) は  $\sigma_1$  の方向から North- Kharayelakh 断層に直角な ENE-WSW 方向と推定される。断層西側の Talnakh 鉱化帯は北西に伸びる三角形を示すが、引張裂罅帯で形成されたものとみられる。Noril'sk、Talnakh の両鉱床は NNE-SSW と NNW-SSE の両構造方向の交差部にあると同時に Nadezhinsky 玄武岩溶岩層の最も厚い部分、すなわち噴出中心 (volcano-center) に位置する。

パラナベズンの断層、裂罅群をみると、リフト帯におけるひとつの広域応力場として解釈できる。パラナベズン中北部の Paraná 川はほぼ NE-SW 方向に流れている。この方向は南米大陸とアフリカ大陸の破断面であるベズン東部の海岸線の方向でもある。パラナ川沿いには第 1 期～第 3 期の高  $\epsilon$  帯、高重力異常帯および厚いドレライトのシル・岩脈の貫入がみられる。ベズンの堆積岩、洪水玄武岩が Paraná 川沿いに最も厚く堆積している。これらのことから、Paraná 川はマントルに繋がる大きな引張裂罅、すなわち、リフトであると推定される。応力場の方向は NE-SW 方向のリフトを想定すれば、NE-SW 方向が最大圧縮主応力軸  $\sigma_1$  である。

パラナベズンでは ENE-WSW の構造方向も卓越している。この構造方向は基盤のクラトンと Brazilian- Pan African 変動帯を境しており、最大圧縮主応力軸  $\sigma_1$  と約  $30^\circ$  の角度で交わる。この構造方向は基盤岩中の 2 次せん断裂罅の方向から、 $\sigma_1$  の方向と調和的な左横ズレのせん断裂罅とみられる。このせん断裂罅はドレライトのシル・岩脈を伴わない。

NW-SE 方向の構造方向はリフトの構造方向に直角であり最小圧縮主応力軸  $\sigma_3$  となる。Duluth 地域と同じようにトランスフォーム断層と推定される。Paraná 川沿いおよび Ponta Grossa では多量のドレライトのシル・岩脈を伴う。基盤岩中の岩脈が示す 2 次せん断裂罅の方向から、右横ズレのせん断裂罅が推定される。右横ズレせん断裂罅は時計回りの Gondwana 大陸の分裂と調和的である。NW-SE 方向のせん断裂罅の中で、特に注目されるのは Ponta Grossa, Abreu- Mourao, Rio Piquiri など裂罅集中ゾーンである。このゾーンでは右横ズレ運動により、引張裂罅ゾーン (Cymoid loop) が形成され、多量のシル・岩脈ゾーンが貫入した。Paraná 州西部の引張裂罅ゾーンはトランスフォーム断層と NE-SW 方向のリフト帯、Ponta Grossa の引張裂罅ゾーンは ENE-WSW 方向のせん断裂罅との交点に形成されている。これらのように、トランスフォーム断層と他の構造との交点が大きな引張裂罅ゾーンの形成に重要であったと推定される。

パラナベズン北部には NW-SE 方向の Tiete 構造線、南部には NW-SE 方向の Torres Posadas 構造線があり、それぞれ高  $\epsilon$  帯、高重力異常帯、ドレライトのシル・岩脈の貫入がみられるが、いずれも規模が小さい。マグマ活動の強さを基準にすれば、Ponta Grossa, Abreu- Mourao, Rio Piquiri 裂罅集中ゾーン、特にリフト帯である Paraná 川沿いのシル・岩脈集中ゾーンが第 1 候補の鉱床胚胎ゾーンとして期待できる。

#### 4-2 衛星画像解析

パラナベズン中央部を東西方向に横断する範囲を対象に JERS-1 の SAR (Synthetic Aperture Radar: 合成開口レーダー) データを用いてデジタルモザイク画像を作成し、地質構造の判読・解析を行った。調査地域の面積は約  $500,000\text{km}^2$  で、これをカバーする JERS-1/SAR データ 131

シーンを使用した。調査地域はパラナベズンを東西方向に横断する地域であり、地域の大部分はジュラ紀から白亜紀にかけて噴出した洪水玄武岩が広く覆っている。また古生代の堆積岩類と基盤の花崗岩類が対象地域の北東部に分布する。地質構造の解析・判読では、リニアメント（断層を含む）と環状構造を抽出した。

調査地域北東部の Ponta Grossa Arch には古生代の堆積岩と基盤の花崗岩類が分布しており、洪水玄武岩のフィーダーと考えられている多数のドレライト質の岩脈群が存在する。岩脈群は NW-SE 系で最大 80 km 程度の走向延長を持っており、これらは判読画像上で明瞭なリニアメントとして抽出されている。これは相対的に浸食に対する抵抗性の弱い堆積岩中では岩脈群が尾根状の連続地形をなすためと考えられる。しかし、基盤の花崗岩類中に存在する岩脈群は抽出されていない。これは岩脈群と花崗岩類の浸食に対する抵抗性に大きな差がないため、岩脈群が尾根状地形を呈さないためであると考えられる。洪水玄武岩分布域については対象地域中央部において NE-SW 方向のまとまったリニアメント群が抽出された。これらは既存の地質図上では全く記載されていないものであり、注目すべきものである。洪水玄武岩分布域のリニアメント密度は、堆積岩区域に比べると非常に低い。特に、対象地域の中でパラナ川を中心とした低地においては、基盤中の NE-SW 系の地壘・地溝構造が空中磁気探査、重力探査によって推定されているが、これに対応するリニアメントは SAR 画像上では抽出されていない。これは、基盤構造は洪水玄武岩の分布に大きな構造的影響を与えておらず、また洪水玄武岩噴出以降、本地域においては大きな構造運動がなかったことを示している可能性がある。

環状構造に関しては、地質図上の環状構造と明確な対応を持つものとして、Lages 地区に存在するアルカリ複合岩体が明瞭に抽出された。

調査地域中央部を流れるパラナ川は非常に直線的で、またランドサット TM 画像を用いた超広域的な解析から、パラナ川に沿った NNE-SSW 系のリニアメントが抽出された。従って、パラナ川自体が大規模な断裂帯を示している可能性も考えられる。

#### 4-3 地質調査

従来、パラナベズン洪水玄武岩類は Peate et al. (1992)により低 Ti タイプ (Gramado, Esmeralda, Paranapaneme) と高 Ti タイプ (Pitanga, Urubici, Rebeira) とに分類されていたが、今回の調査では Paranapaneme と Ribeira が中間的な Ti 含有量を示し、また両者を地化学的に区分できなかったため、これらを Intermediate Ti タイプ (Paranapaneme-Ribeira) として、以下のように 3 区分した。3 タイプ間の Ti 含有量の差異は明確であり、Fig. II-3-3-2(b)の Mg#-TiO<sub>2</sub> 変化図上で各タイプは異なった分化トレンドを示す。

	Peate et al.(1992)	本調査
低 Ti タイプ	Gramado	Gramado
	Esmeralda	Esmeralda
	Ribeira	
Transitional タイプ	—	Paranapanema-Ribeira
高 Ti タイプ	Paranapanema	Pitanga
	Pitanga	Urubici
	Urubici	

区分された3タイプの溶岩は次のような地化学的特徴を有している。

- (1) 低 Ti タイプの Esmeralda は、Th、Ta、Y、Zr の含有量と Nd 同位体比から最も未分化である。
- (2) 低 Ti タイプに分類された Gramado と Esmeralda は相対的に Th、U、Rb 等の地殻濃集元素を多く含んでいる。この傾向は Gramado において特に著しい。このことから低 Ti タイプのマグマは、多かれ少なかれ大陸地殻上部物質の影響を受けたものであり、この影響は Gramado において最も顕著である。このことは Sr と Nd の同位体によっても示された。
- (3) 高 Ti タイプと Intermediate Ti タイプのマグマは、大陸地殻上部物質の影響は小さいものと考えられ、マントル起源のマグマが直接地表に噴出した可能性が考えられる。
- (4) 低 Ti タイプ、Intermediate Ti タイプおよび高 Ti タイプは、マントル物質の部分溶融の違いによって生成された可能性が高く、このうち最も部分溶融の程度の大い低 Ti タイプのマグマが大陸地殻上部物質をさまざまな程度に同化したものと考えられる。しかしながら、マグマソースの違いによる可能性も考えられるため、今後、分析試料数を増やして検討を進める必要がある。
- (5) PGE 含有量については Intermediate Ti タイプの Paranapanema-Ribeira が最も高い含有量を示す。このタイプの Pt と Pd の平均含有量はそれぞれ 9.7 ppb、15.5 ppb であり、この含有量は Noril'sk 鉱床の最も PGE に富んだ溶岩よりも大きい。低 Ti タイプのマグマ (Gramado、Esmeralda) は、これに次いで高い Pt と Pd 含有量を示しており、地殻物質混染の影響が大きい Gramado については、PGE に枯渇した試料と枯渇していない試料が存在する。一方、高 Ti タイプの Pitanga の Pt と Pd の含有量は非常に低い。このことから低 Ti タイプと Transitional タイプのマグマは、Noril'sk 鉱床の文献解析から考察された、Noril'sk 型鉱床の第1番目の生成条件「硫黄に不飽和なマグマの発生と地殻浅部への上昇存在」を満たすものと判断される。

以上のように溶岩の化学組成の検討から、パラナベズン地域には Noril'sk タイプの正マグマ性硫化物鉱床を生成し得る、高い PGE 含有量を有するマグマが存在することが明らかになった。

また、MINEROPAR が Paraná 州で実施した沢砂地化学探査により抽出された塩基性～超塩基性岩体の存在を示唆する地化学異常帯は、周囲の岩石に比べて高い PGE 含有量を有する Paranapanema-Ribeira の分布そのものを示しているものと考察された。

パラナベズン東縁域に分布する貫入岩類に関しては、主に調査地域南部の Lomba Grande 地区のシルと調査地域北部の Ponta Grossa Arch のシルと岩脈について地化学的な検討を行った。

主要成分、微量成分の分析結果から Lomba Grande 地区のシルの組成幅は広く、ピクライト質～デイサイト質のシルが存在し、一方、Ponta Grossa Arch のシルと岩脈の組成幅は狭くすべて玄武岩質であることが明らかになった。また溶岩類と同様に Mg#-TiO<sub>2</sub> 変化図により両者はそれぞれ低 Ti タイプと高 Ti タイプに分類され、前者は後者に比べて Th、U、Rb に富んでいた。これは溶岩類で示された低 Ti タイプのマグマの特徴と同じであった。従って Lomba Grande 地区のシルについてはピクライト質シルを除いて、大陸地殻上部物質の混染作用の影響が考えられた。このことは Lomba Grande 地区には低 Ti タイプの Gramado 溶岩や酸性岩が分布していることと調和的である。一方、Ponta Grossa Arch のシルと岩脈は地殻物質の影響の少ないマグマからもたらされたと考えられた。このような地殻物質関与の有無については Nd と Sr の同位体比によっても示された。

貫入岩体の Pt、Pd 含有量に関しては、Lomba Grande 地区北東部と東部に存在する厚さ 130 m 以上の 2 つの大規模シル（玄武岩質～安山岩質）が比較的高い含有量を示し、特に北東部シルでは Pt 20 ppb 以上の試料も認められた。これに対し同じ Lomba Grande 地区中央部に存在するピクライト質～玄武岩質および安山岩質～デイサイトシルは Pt、Pd に枯渇しており、特に安山岩質～デイサイトシルは Pt、Pd をほとんど含まない。Ponta Grossa Arch のシルと岩脈の Pt、Pd ははばらついた値を示し、Pd: 20 ppb を越えるものから非常に枯渇したものまで存在する。

以上のように本年度実施した溶岩、貫入岩の地化学的検討から、パラナベズン地域には Noril'sk タイプの正マグマ性硫化物鉱床を生成し得る、高い PGE 含有量を有するマグマ

(Paranapanema-Ribeira など) が存在することが明らかになった。さらに低 Ti タイプの Gramado の一部の試料では地殻物質の混染と PGE の枯渇が認められた。また Ponta Grossa Arch の一部の岩脈、シルでは、地殻物質の混染作用は明確ではないものの、PGE の枯渇が認められた。

EPMA の結果からは、Ponta Grossa Arch と Lomba Grande 地区北東部のシル、岩脈に微量ながら黄銅鉱が含有されることが明らかになった。特に Ponta Grossa Arch のシル試料から微量の閃亜鉛鉱とニッケルを含有するコバルト砒素鉱物が検出されており、興味深い。

今後の調査方針としては、各溶岩タイプの噴出中心を把握するとともに、その付近で地殻物質の混染作用と PGE の枯渇減少が認められるか否かを明らかにすることが重要と考えられる。

## 第5章 結論および提言

### 5-1 結論

パラナ洪水玄武に伴う Cu-Ni-PGE 鉱床の広域探査を行うため、本年度は既存データ解析、衛星画像解析および地質調査を実施した。既存データ解析では洪水玄武岩、Noril'sk 鉱床および基盤岩の地質構造、衛星画像解析では JERS-1 の SAR 画像などが解析された。地質調査では主にパラナ洪水玄武岩の全岩分析、微量成分分析および同位体分析などの結果が解析された。

#### 5-1-1 既存データ解析

洪水玄武岩については、白金族元素（PGE）はその大部分が地球創生期に核に濃集しており、さらに、基本的に固相に濃集するため、分化が進んだ大陸地殻にはほとんど含まれていない。従って、洪水玄武岩中の PGE の起源はマントルに求めるのが妥当である。また、洪水玄武岩形成時には通常の火成活動と比べて大量のマグマを発生するため、大規模な熔融が起こり、通常は固相に濃集する PGE も、生成するメルト中に比較的多量に含まれる可能性が高い。これらのことから、PGE 鉱化作用をもたらす洪水玄武岩の起源マグマはマントルプリュームを起源とし、かつプリュームや周囲のマントル物質を大規模に部分熔融して発生したものが望ましいと考えられる。ただし、前述の条件は巨大火成岩岩石区（LIP）全般に言えることであり、PGE 鉱床の形成には、地殻の混染による珪酸塩成分および硫黄の供給や地域的なテクトニック・セッティングなど PGE 濃集を左右する要素の方が重要だと思われる。

Noril'sk 鉱床については、そのマグマはピクライト質～玄武岩質の組成で、硫黄に不飽和な PGE に富んだマグマであると考えられる。このようなマグマが地殻物質の混染作用を受けたことが原因で、不混和となった硫化物メルトが珪酸塩マグマから分離し、それがマグマ活動の中心域において大量の珪酸塩マグマと反応することにより銅、ニッケル、PGE を不混和硫化物メルト中に濃集したことが Noril'sk 鉱床の成因と考えられる。これらのことから、Noril'sk タイプの鉱床の生成条件として次の3点が掲げられる。（1）硫黄に不飽和なマグマの発生と地殻浅部への上昇、（2）地殻物質の混染作用による不混和硫化物メルトの生成、（3）不混和硫化物メルトが大量の珪酸塩マグマと反応すること。

更に、このような条件を満たす鉱床の探査指針として、以下の条件が掲げられる。（1）低 Ti タイプで PGE に富んだマグマが、溶岩または貫入岩として存在すること、（2）このようなマグマと関連して、地殻物質の混染作用の影響がみられ、かつ PGE に枯渇したマグマが溶岩または貫入岩として存在すること、（3）地殻の弱線が発達し、大量の珪酸塩マグマが地下から供給される火山活動の中心域であること、（4）地殻物質の混染を起こしやすい高温のピクライト質マグマが溶岩または貫入岩として存在すること。

パラナベズンの地質については、パラナベズンは Gondwana 古大陸西部に形成された大陸内部ベズンのひとつであり、潮汐重力異常からリソスフェアが薄く、マントルプリューム

が比較的浅所にある。パラナベズンはオルドビス紀後期から白亜紀後期に堆積し、その堆積層は Rio Ivai、Paraná、Gondwana I、Gondwana II、Gondwana III および Bauru スーパーシーケンスに区分される。Gondwana I はヘルシニアン造山運動直後の堆積層、Gondwana III は洪水玄武岩溶岩であり、厚い層厚を示す。ベズンの堆積層の大部分は Paraná 州西部から San Paulo 州南西部の Paraná 川沿いを中心に堆積している。

大陸内部ベズンはマントルプリュームがリソスフェアに入り込むと、リソスフェアは一瞬、縮み、プリュームの重さにより沈降し、ベズンの堆積が始まると考えられている。ボーリングデータなどの解析からリソスフェアの収縮率 ( $\varepsilon$ ) が計算された。高  $\varepsilon$  帯はパラナ州西部から北西部を経てサンパウロ州南西部に至る NE-SW 方向のパラナ川沿いにみられる。これらの地域では多量のドレライトシル・岩脈の貫入、厚い玄武岩溶岩の噴出および厚いベズンの正規堆積物がみられる。一方、重力異常については大陸内部ベズンではリソスフェアが薄いため、米国の Midcontinent rift の例にみられるように高異常帯となる。パラナベズンでは高残差重力異常が高  $\varepsilon$  帯とほぼ一致する地域にみられる。

パラナベズンのテクトニクスについては Noril'sk、米国 Duluth 鉱床およびパラナベズンについて考察した。共役なせん断裂罅は横ズレ運動の進行により、雁行状の 2 次せん断面からなる引張裂罅帯 (Cymoid loop) を形成し、引張裂罅帯のせん断裂罅のひとつがリフト、他方がトランスフォーム断層に発展する。Duluth 鉱床の場合、重力異常および空中磁気異常から、2 つのトランスフォーム断層の横ズレ運動により形成された引張裂罅帯に Duluth 複合岩体が貫入し、Cu-Ni-PGE 鉱床が形成された。その広域応力場は最大圧縮主応力軸 ( $\sigma_1$ ) が NE-SW 方向、最小圧縮主応力軸 ( $\sigma_3$ ) が NW-SE 方向とみられる。Noril'sk 鉱床の場合、鉱床は NNE-SSW 方向の右横ズレの Noril'sk-Kharayelakh 断層と NNW-SSE 方向の Kayerkansky-Pyasinsky 背斜に規制されている。NNW-SSE 方向は Gydansk-Omsk リフトの方向と一致することから、 $\sigma_1$  の方向とみられる。 $\sigma_3$  は  $\sigma_1$  の方向から Kayerkansky-Pyasinsky 背斜に直角な ENE-WSW 方向と推定される。Noril'sk 鉱床は NNE-SSW と NNW-SSE の両構造方向の交差部にあると同時に Nadezhinsky 玄武岩溶岩層の最も厚い部分、すなわち噴出中心に位置する。

パラナベズンの断層、裂罅群をみると、リフト帯におけるひとつの広域応力場として解釈できる。Paraná 州西部から São Paulo 州南西部にかけての Paraná 川沿い地域は、NE-SW 方向に高  $\varepsilon$  帯、高重力異常帯、厚いドレライトシル・岩脈の貫入および厚いベズンの堆積岩・洪水玄武岩の噴出がみられることから、リフト帯と推定される。応力場の方向は NE-SW 方向が  $\sigma_1$  である。NW-SE 方向の構造方向はリフトに直角であり  $\sigma_3$  となり、右横ズレのトランスフォーム断層とみられる。NW-SE 方向のせん断裂罅の中で、特に注目されるのは Ponta Grossa, Abreu-Mourao, Rio Piquiri など裂罅集中ゾーンである。このゾーンでは右横ズレ運動により引張裂罅ゾーン (Cymoid loop) が形成され、多量のシル、岩脈が貫入したものと推定される。パラナ川西部の引張裂罅ゾーンはトランスフォーム断層と NE-SW 方向のリフト帯、Ponta Grossa では ENE-WSW 方向のせん断裂罅との交点にシル、岩脈群が形成されている。その他、パラナベズンでは ENE-WSW の構造方向も卓越している。この構造方向は基盤のクラトンと Brazilian-Pan African 変動帯を境しており、最大圧縮主応力軸  $\sigma_1$  と約  $30^\circ$  の角度で交わり、左横ズレの



せん断裂罅とみられる。このせん断裂罅は一般にドレライトのシル・岩脈を伴わない。

### 5-1-2 衛星画像解析

パラナベズン中央部を東西方向に横断する範囲を対象にし JERS-1 の SAR (Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダー) データを用いてデジタルモザイク画像を作成し、地質構造の判読・解析を行った。調査地域の面積は約 500,000km<sup>2</sup> で、これをカバーする JERS-1/SAR データ 131 シーンを使用した。調査地域はパラナベズンを東西方向に横断する地域であり、地域の大部分はジュラ紀から白亜紀にかけて噴出した洪水玄武岩が広く覆っている。また古生代の堆積岩類と基盤の花崗岩類が対象地域の北東部に分布する。地質構造の解析・判読では、リニアメント (断層を含む) と環状構造を抽出した。

調査地域北東部の Ponta Grossa Arch には古生代の堆積岩と基盤の花崗岩類が分布しており、洪水玄武岩のフィーダーと考えられている多数のドレライト質の岩脈群が存在する。岩脈群は NW-SE 系で最大 80km 程度の走向延長を持っており、これらは判読画像上で明瞭なりニアメントとして抽出されている。これは相対的に浸食に対する抵抗性の弱い堆積岩中では岩脈群が尾根状の連続地形をなすためと考えられる。しかし、基盤の花崗岩類中に存在する岩脈群は抽出されていない。これは岩脈群と花崗岩類の浸食に対する抵抗性に大きな差がないため、岩脈群が尾根状地形を呈さないためであると考えられる。洪水玄武岩分布域については対象地域中央部において NE-SW 方向のまとまったりニアメント群が抽出された。これらは既存の地質図上では全く記載されていないものであり、注目すべきものである。洪水玄武岩分布域のりニアメント密度は、堆積岩区域に比べると非常に低い。特に、対象地域の中でパラナ川を中心とした低地においては、基盤中の NE-SW 系の地塁・地溝構造が空中磁気探査、重力探査によって推定されているが、これに対応するりニアメントは SAR 画像上では抽出されていない。これは基盤構造は洪水玄武岩の分布に大きな構造的影響を与えておらず、また洪水玄武岩噴出以降、本地域においては大きな構造運動がなかったことを示している可能性がある。

環状構造に関しては、地質図上の環状構造と明確な対応を持つものとして、Lages 地区に存在するアルカリ複合岩体が明瞭に抽出された。

### 5-1-3 地質調査

今年度の調査により、パラナベズン洪水玄武岩類は低 Ti タイプ (Gramado, Esmeralda)、Transitional タイプ (Paranapaneme-Ribiera) および高 Ti タイプ (Pitanga, Urubici) に分類された。3 タイプの溶岩は次のような地化学的特徴を有している。

(1) 低 Ti タイプの Esmeralda は、Th、Ta、Y、Zr の含有量とネオジウム同位体比から最も未分化である。(2) 低 Ti タイプの Gramado と Esmeralda は相対的に Th、U、Rb 等の地殻濃集元素を多く含んでいる。この傾向は Gramado において特に著しい。このことはストロンチウムとネオジウムの同位体によっても示された。(3) 高 Ti タイプと Transitional タイプのマ

グマは、大陸地殻上部物質の影響は小さいものと考えられ、マントル起源のマグマが直接地表に噴出した可能性が考えられる。(4) 各タイプのマグマは、マントル物質の部分熔融の違いによって生成された可能性が高い。このうち、低 Ti タイプのマグマが最も部分熔融の程度が大きく、大陸地殻上部物質をさまざまな程度に同化したものと考えられる。(5) Transitional タイプの Paranapanema-Ribeira の Pt と Pd の平均含有量はそれぞれ 9.7 ppb、15.5 ppb であり、各タイプのうち、最も高い含有量を示す。この含有量は Noril'sk 鉱床の最も PGE に富んだ溶岩よりも大きい。低 Ti タイプのマグマ (Gramado, Esmeralda) は、これに次いで高い Pt、Pd 含有量を示しており、地殻物質混染の影響が大きい Gramado については、PGE に枯渇した試料と枯渇していない試料が存在する。一方、高 Ti タイプの Pitanga の Pt、Pd の含有量は非常に低い。以上のように溶岩の化学組成の検討から、パラナベズン地域には Noril'sk タイプの正マグマ性硫化物鉱床を生成し得る、高い PGE 含有量を有するマグマが存在することが明らかになった。

貫入岩類に関しては、主要成分、微量成分の分析結果から Lomba Grande 地区のシルの組成幅は広く、ピクライト質～デイサイト質のシルが存在する。一方、Ponta Grossa Arch のシルと岩脈の組成幅は狭くすべて玄武岩質であることが明らかになった。また溶岩類と同様に、前者は後者に比べて Th、U、Rb に富んでいた。これは溶岩類で示された低 Ti タイプのマグマの特徴と同じである。Pt、Pd 含有量に関しては、Lomba Grande 地区北東部と東部に存在する厚さ 130m 以上の大規模シル (玄武岩質～安山岩質) が比較的高い含有量を示し、特に北東部シルでは Pt 20ppb 以上の試料も認められた。これに対し同じ Lomba Grande 地区中央部に存在するピクライト質～玄武岩質および安山岩質～デイサイトシルは Pt、Pd に枯渇しており、特に安山岩質～デイサイトシルは Pt、Pd をほとんど含まない。Ponta Grossa Arch のシルと岩脈の Pt、Pd はばらついた値を示し、Pd: 20ppb を越えるものから非常に枯渇したものまで存在する。

以上のように本年度実施した溶岩、貫入岩の地化学的検討から、パラナベズン地域には Noril'sk タイプの正マグマ性硫化物鉱床を生成し得る、高い PGE 含有量を有するマグマ (Paranapanema-Ribeira など) が存在することが明らかになった。さらに低 Ti タイプの Gramado の一部試料では地殻物質の混染と PGE の枯渇が認められた。また Ponta Grossa Arch の一部の岩脈、シルでは、地殻物質の混染作用は明確ではないものの、PGE の枯渇が認められた。

EPMA の結果からは、Ponta Grossa Arch と Lomba Grande 地区北東部のシル、岩脈に微量ながら黄銅鉱が含有されることが明らかになった。特に Ponta Grossa Arch のシル、岩脈から微量の閃亜鉛鉱とニッケルを含有するコバルト砒素鉱物が検出されており、興味深い。

## 5-2 第2年次調査への提言

第1年次調査は洪水玄武岩分布域の主に中央部で調査が実施された。第1年次の調査により、洪水玄武岩の溶岩および貫入岩の分析値を基に、それらのマグマの地球化学的な特徴が明らかにされた。また Noril'sk 鉱床および Duluth 鉱床の例を念頭に、どのようなマグマおよび地質的条件が Cu-Ni-PGE 鉱床をもたらすかについても考察された。

第2年次の調査は第1年次調査に引き続き、地域全域を対象に調査を実施するが、特に分析

試料が十分でない地域北部および南部で、地質調査と分析試料の採集を行う。分析試料は地表および石炭探査ボーリングの溶岩、貫入岩から採集する。分析項目および元素は第 1 年次との継続性を考慮しほぼ同じ内容とする。

Paraná 州の MINEROPAR および Rio Grande do Sul 州の CPRM は沢砂地化学探査を実施している。両調査の分析結果は洪水玄武岩の化学的組成を比較的、良く反映している。沢砂地化学探査は露頭の少ない地域に対して有効であり、露頭調査の補助的方法として適宜、実施する。

パラナベズンおよび基盤岩の地質および地質構造の調査から、洪水玄武岩の活動が広域的応力場に支配されていると推察された。ベズン堆積物および基盤岩の地質構造については第 1 年次に引き続き調査を行い、鉍床貯存が期待される洪水玄武岩の噴出位置について解析を行う。

衛星画像解析は第 1 年次に引き続き、パラナベズンの地質および地質構造を明らかにするため、JERS-1 の SAR 画像および TM 画像の解析を行う。

PETROBRAS が所有するボーリングコアおよび物理探査資料については引き続き、関係方面に働きかけ、その入手に努めることとする。

第 2 年次の調査結果は、第 1 年次の調査結果とまとめて総合的に解析する。結論として、パラナベズンにおける Cu-Ni-PGE 鉍床貯存の可能性を考察し、その探査指針を提示し、更に探査有望地を抽出する。