

3-8-2 パラナベースン周辺のアルカリ玄武岩類と周辺の鉱徴地

(1) パラナベースン周辺におけるアルカリ岩類の分布と貫入時期

キンバーライト (kimberlite)、カーボナタイト (carbonatite)、フォノライト (phonolite) などのアルカリ貫入岩体は一般に先カンブリア紀の楕状地での隆起断裂帯に多く分布することが知られている。最近、Siberian trap や Deccan Trap などの分布域の中や周辺にもアルカリ貫入岩が分布することから、少なくとも中生代以降のアルカリ岩の貫入はマントル プルームと関係があるのではないかと考えられるようになってきた (Superplume Workshop 2002, Tokyo)。

ブラジルにおけるキンバーライトの分布の特徴は DNPM/CPRM (1991, vol.IV, p.70) にまとめられている。それによれば、キンバーライトは NW-SE 方向の 125° Lineament、NNE-SSW 方向の Transbrasilian Lineament、および NE-SW 方向の Blumenau Lineament に沿って分布すると説明されている (Fig.II-3-8-37 (a), (b))。

Lages 地域のアルカリ貫入岩は、NE-SW 方向の Blumenau Lineament に関係があると考えられており、岩体の中の断層も NE-SW 方向のものが卓越している。Lages 地域のアルカリ岩体は 30 km×30 km の分布面積をもち、縮尺 1/2,500,000 地質図にも表示されているほどの大規模な貫入岩体であり、Scheibe (1986) が詳しく記載している。

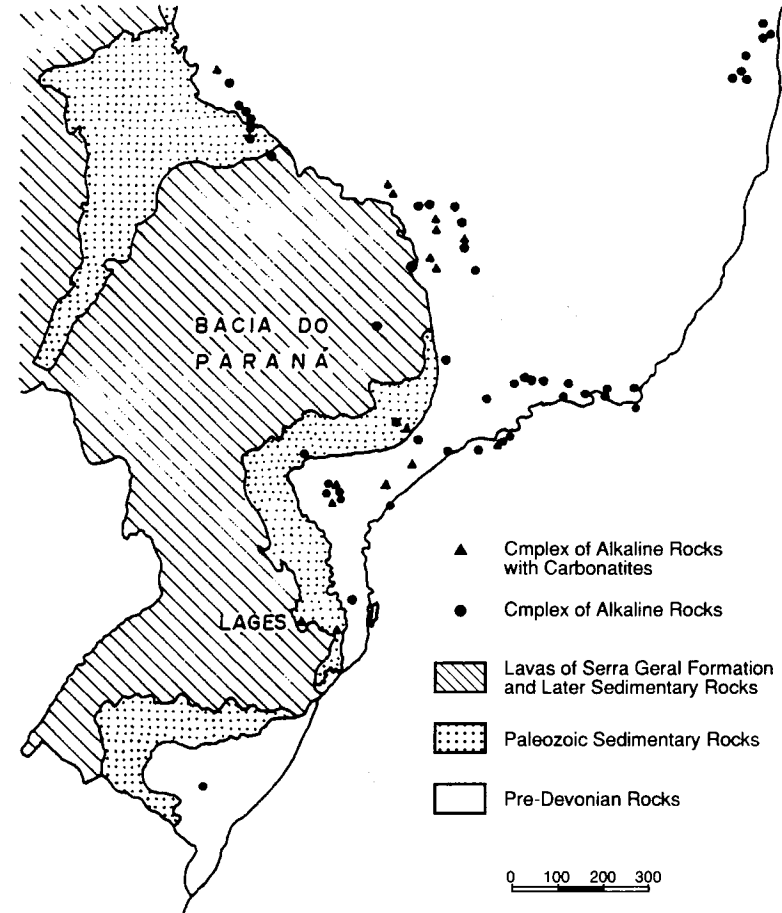
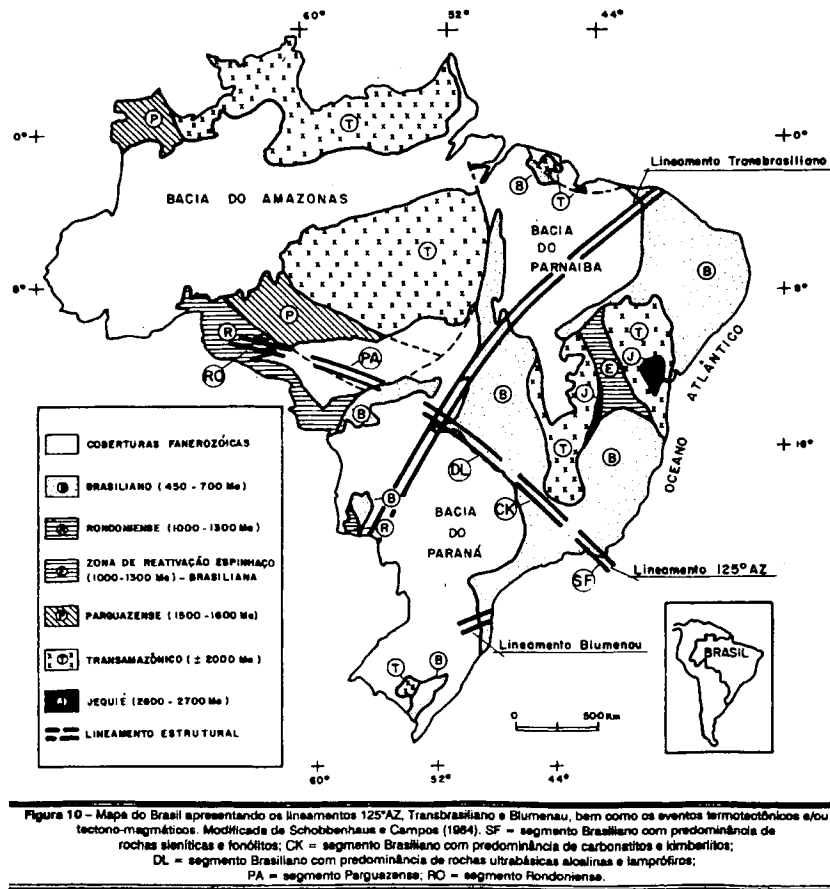
Scheibe (1986) による Lages 地域の地質図を Fig.II-3-8-38 に示す。これらアルカリ岩類の年代として、Janjão Kimberlite: 62.9 Ma、Olivine Melilitite: 63.5 Ma、Phonolites: 65.7-74.2 Ma、チムニー Breccia (phlogopite): 69.4-74.3 Ma、Nepheline sienite porphyry: 74.6-78.3 Ma の K-Ar 年代が得られている (Scheibe, 1986 など)。

Janjão Kimberlite にはダイヤモンドを伴うほか、Phonolites の風化による小規模なボーキサイト鉱床の存在が知られている。

(2) Lages 地域における鉱化作用

サンタ・カタリーナ州 Lages はパラナ ベースンの南東縁に位置し、パラナ洪水玄武岩は島状に分布するにすぎない。Lages の東方地域では、1930 年代にプラチナ・パラジウム合算 300 g/t の鉱徴地が発見されたとの現地でのうわさがあるほか、Lages-Painel 間の河川では樹枝状の砂銀 (dendritic placer silver) が産出することが知られている。また、この地域では 1973 年頃、米国人が PGE/Cu/Zn/Ag 等の調査を行ったといわれている。

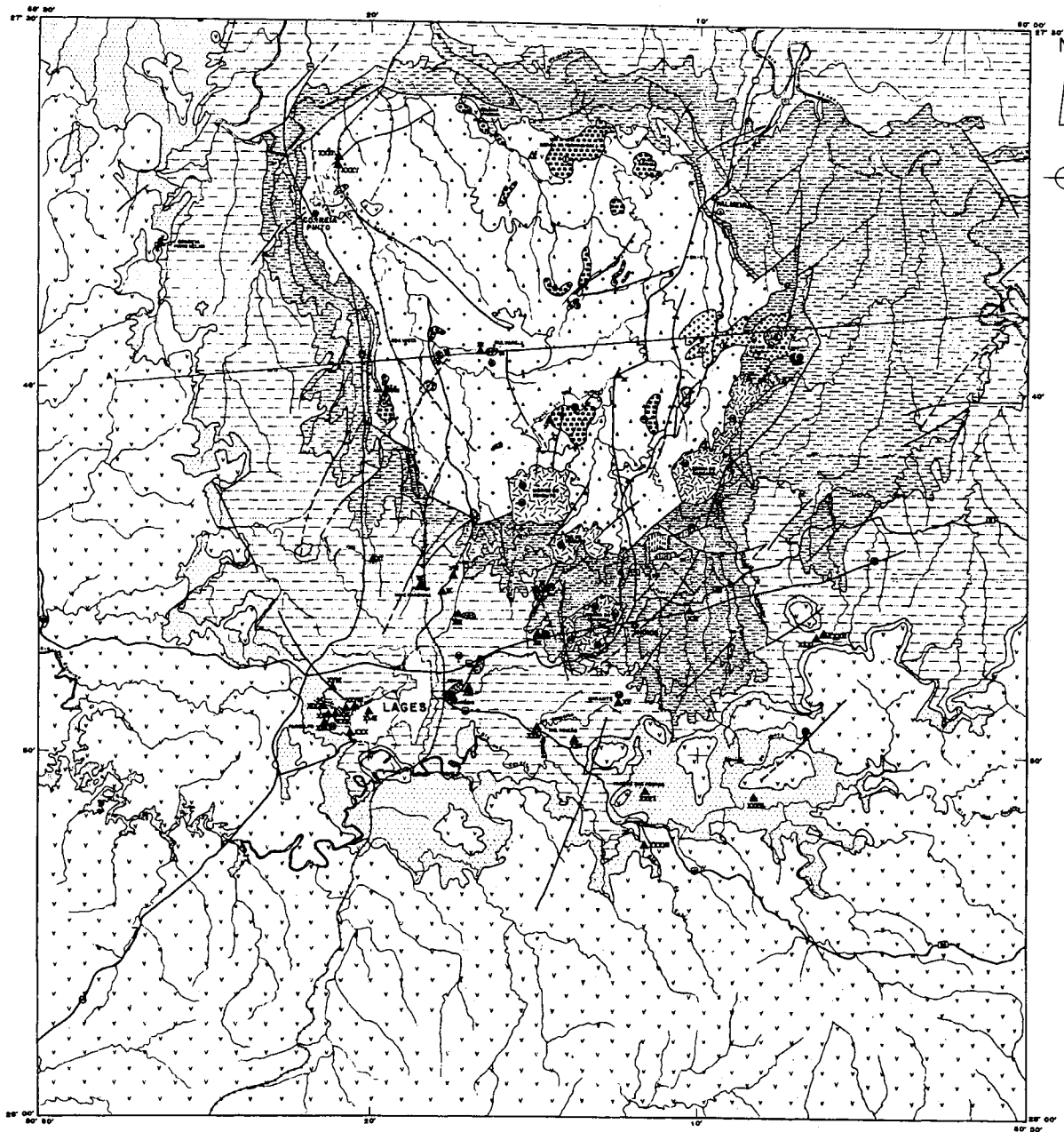
1986 年には São Paulo 大学の Luiz Fernando SCHEIBE が博士論文を出版した (Scheibe, L.F. (1986) *Geologia e petrologia do distrito alcalino de Lages, SC. Universidade de São Paulo instituto de geociências; Tese de doutoramento, 224 p*)。さらに 1987 年には SCHEIBE の論文を参考に、アメリカ企業が Lages 地区の地化学探査を実施し、金・銀などの地化学異常はアルカリ岩の活動に伴うものと結論づけられたといわれる(当時の日系調査担当者からの伝聞)。我々の今回の調査中も現地では個人鉱区の設定や探査など、小規模ながら活発な鉱業探査活動がみられた。



(a) Map of Kimberlite Distribution along 125° Lineament, Transbrasilian Lineament, and Blumenau Lineament (By DNPM/CPRM, 1991)

(b) Distribution of Alkaline Intrusions near Parana Basin (By Sheibe; 1986 after Ulbrich e Gomes; 1981)

Fig. II-3-8-37 Alkaline intrusion distribution in Brazil

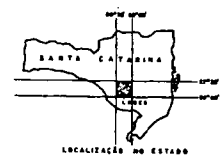


SEÇÃO GEOLÓGICA SEQUÊNCIA A-B - TRANSVERSA VERTICAL 1 e 2



BASE CARTOGRÁFICA: FOLHA 56-22-Z-C-V, LAGES, 1956, 1975















GEOLÓGIA DAS FORMAÇÕES SONORÉNICAS ADAPTADA DE
GUAZZELLI E FELIO, 1970; ARIGLI, 1970; ZIMBERT E VERRADA, 1975



LOCALIZAÇÃO DO ESTADO

Fig. II-3-8-38 Geological map of Lages district (by Sheibe, 1986)

COLUNA ESTRATIGRAFICA

PERIODO	GRUPO	FORMACAO/LITOLOGIA	SIMBOLO
TERCIARIO/ CRETACEO	DISTRITO ALCALINO DE LAGES	BRECHA DE CHAMINE	▲ ⁱ
		CARUONATITO	
		ANALCITA TRAQUITO	
		FONOLITO	
		FONOLITO PORFIRTICO	
		NEFELINA SIENITO PORFIRTICO	
		OLIVINA MELILITITO	
JURO-CRETACEO	SAO BENTO	SERNA GERAL	
		BOTUCATU	
PERMIANO	POSSA DOIS	RIO DO RASTO	
		TEREZINA	
		SERRA ALTA	
		IRATI	
PERMOCAR BONIFERO	GUATA		
	ITARARE		

CONVENCOES GEOLOGICAS

CONTATO	
FALHA	
ZONA DE BRECHA	
PONTO DE AMOSTRAGEM	

CONVENCOES TOPOGRAFICAS








CIDADE	
SEDE MUNICIPAL	
SEDE DISTRITAL	
ESTRADA FEDERAL	
ESTRADA MUNICIPAL	
ESTRADA FERRO	
DRENAGEM	

Fig. II-3-8-38 (continued) Legend of geological map of Lages district

a) パラナ洪水玄武岩中の地化学異常

すでに述べたように Lages 地区では金・銀などの地化学異常があるといわれているが、これらはすべて個人あるいは民間企業の調査によるもので、公表された記載はない。今回の調査では沢砂などの地化学探査は実施していないが、岩石の化学分析で一部のパラナ バサルトが高い金 (Au)異常を示すことが判明した。Table II-3-8-3 において、Gramado タイプおよび Esmeralda タイプでの Au 平均値が 3 から 4 ppb に過ぎないのに対し、岩石試料 AS021 (Gramado タイプ) の Au 含有量は Au: 69 ppb を示す。2000 年に実施したプロジェクト ファインディング調査 (MMAJ,2000)では Lomba Grande ピクライト岩体の最下で Au: 1,000 ppb の異常をしめしたのが、いままでの Au 異常の最高である。

銀 (Ag) に関しては検出限界が 5 ppm とが高いため、この地区のパラナ洪水玄武岩が Au と同様な地化学異常を示すかどうかは不明である。

Table II-3-8-3 Comparison of chemical composition between Lages basalts and average of some magma types

SAMPLE	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	Total
Gramado average (56)	54.73	13.47	13.20	0.19	4.20	7.90	2.91	1.64	1.54	0.21	100.00
Esmeralda average (9)	52.31	13.31	14.33	0.21	5.04	9.41	2.66	0.97	1.57	0.19	100.00
Gramado-Esmeralda unclassified average(15)	53.85	12.99	14.73	0.21	3.91	7.90	2.83	1.61	1.73	0.24	100.00
AS021	54.52	13.84	12.37	0.18	5.15	7.77	3.33	1.47	1.21	0.17	100.00
AS023	53.02	12.59	15.90	0.22	3.92	8.24	2.99	0.89	1.98	0.25	100.00
AS024A	51.66	13.82	12.76	0.22	6.43	10.64	2.51	0.49	1.35	0.13	100.00

SAMPLE	LOI %	Ag ppm	Cu ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm	S (3 dig) %	Pd ppb	Pt ppb	Au ppb	Mg #
Gramado average (56)	0.80	-0.3	132	33	19	96	0.142	6	5	4	0.21
Esmeralda average (9)	0.76	-0.3	186	44	7	100	0.085	11	9	3	0.23
Gramado-Esmeralda unclassified average(15)	0.53	-0.3	186	27	18	105	0.031	11	14	4	0.19
AS021	1.15	-0.5	110	48	10	93	-	5	6	69	0.26
AS023	1.61	-0.5	214	40	11	130	-	14	15	6	0.18
AS024A	0.13	-0.5	140	63	-5	74	-	12	6	3	0.30

SAMPLE	Magma Type
Gramado average (56)	Gramado
Esmeralda average (9)	Esmeralda
Gramado-Esmeralda unclassified average(15)	Gramado-Esmeralda
AS021	Gramado
AS023	Esmeralda
AS024A	Esmeralda

Mg #: Magnesium Number Minus value means under detection limit

b) 硫化鉱物を伴う粘土化帯

Lages 東方でのプラチナ・パラジウム合算 300 g/t の鉱微地があったといわれる地区では (Lages の東方 15 km に位置する農場 Fazenda do Fortunato)、黄鉄鉱の鉱染とネットワークを伴う白色粘土化帯を対象にピット調査がおこなわれており、現地を観察する機会があった。

位置・座標 :

50 meter southwest along bushy creek from the point which UTM shows 22J 583,981; 6,919,263; height 1072m.

地形・地質 :

本地区は 130-137 Ma の年代を示すパラナ洪水玄武岩分布域の南東端に位置し、粘土脈は下位の風成層 (Botucatu Formation、石英質砂岩) 中にある。この地域には 70 Ma のアルカリ岩(サイアナイト、フォノライト、キンバーライト)の貫入が 30×30 km の範囲にまとまってみられ、下位の古生層が地窓状に分布している。このアルカリ複合貫入岩体の南半部およびその南側 10 km の範囲にはキンバーライトのチムニーが散在している。本地区はアルカリ複合貫入岩体の南縁から南 5 km の位置にあり、近傍にはキンバーライトのチムニーの分布が記載されている。Scheibe (1986)の地質図をもとに現地踏査の結果で修正・加筆した地質図を Fig.II-3-8-39 に示す。

粘土脈の規模と構造 :

走向 N30-40° E、傾斜垂直、幅 5 m の規模をもち、小規模な河川に沿って分布し、延長は 1.5 km と推定される。空中写真では、この粘土脈は河川に沿う明瞭な NNE-SSW 方向のリニアメントとして把握され、近傍にも 2 本の類似方向のリニアメントが認められる。この NNE-SSW から NE-SW のリニアメントはアルカリ複合貫入岩体内の主要な断裂方向と一致する。

粘土脈の形態 :

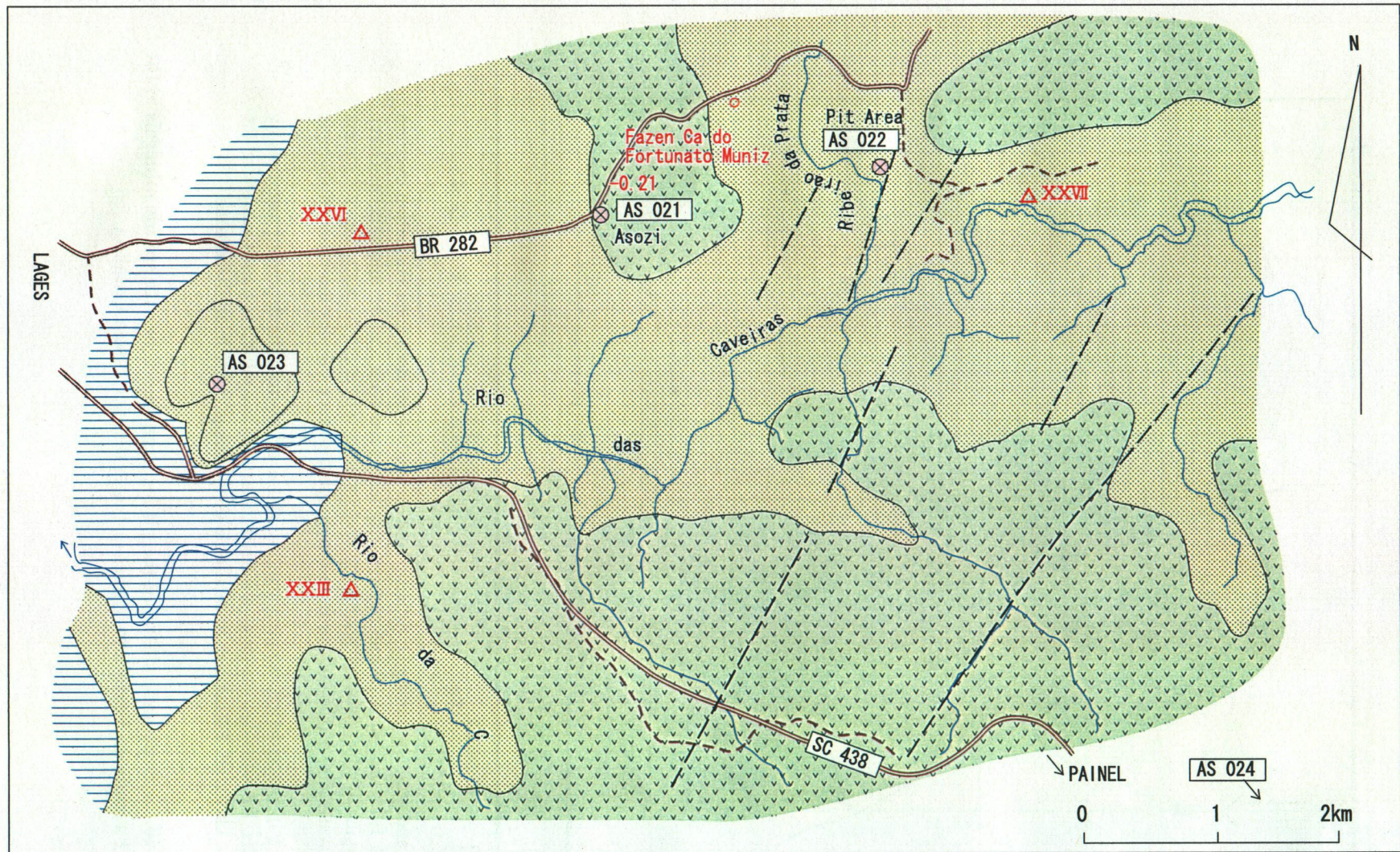
現地で掘削中であつたピットのスケッチを Fig.II-3-8-40 に示す。

粘土脈は累帯配列をなし、中心から 3.0-3.5 m は緑色粘土で、径 0.5-1.0 mm の白色斑晶状組織がみられる。硫化鉱物は殆どみとめられない。その両側には幅 1m 程度の白色粘土が発達し、中量の黄鉄鉱の鉱染と微細なネットワークがみられる。乾燥した箇所では黄鉄鉱のネットワークを伴った泥岩のような様相をしめす。観察しうる東側の盤際母岩は黄鉄鉱を伴う珪化した砂岩 (Botucatu Formation) からなり、著しく堅硬で、表面は酸化鉄で汚染されている。

粘土脈の鉱物組成と化学組成 :

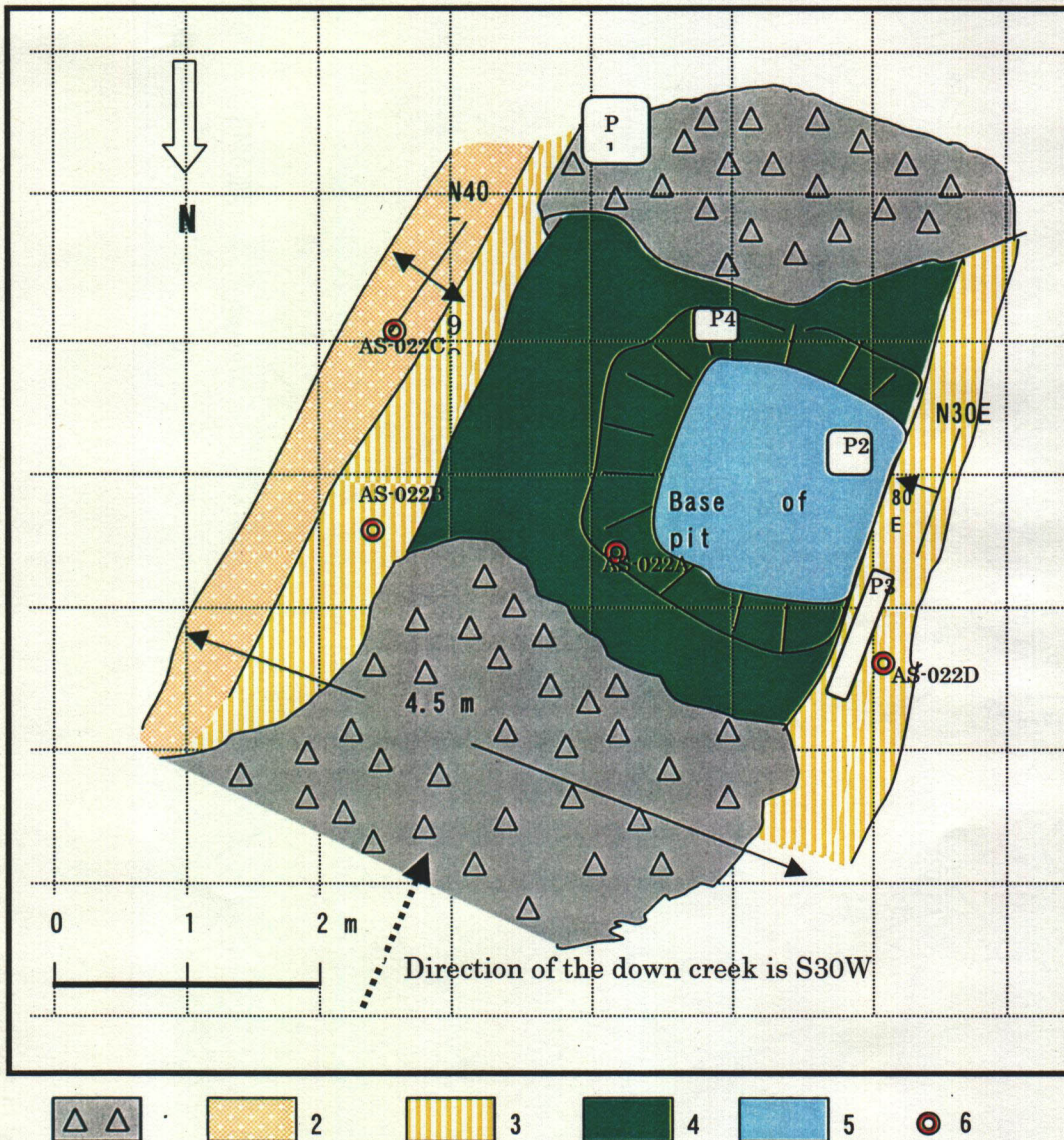
Table II-3-8-4 に X 線回折結果を示す。ピット中心を占める緑色粘土はカオリン鉱物とスメクタイト/緑泥石混合層鉱物を主とする。また、ピット東側の白色粘土はカオリン鉱物を主とし、少量のスメクタイト/緑泥石混合層鉱物を伴うものである。

ピット内の 4 試料の化学組成から粘土鉱物を主とする試料の NORM 鉱物組成を Igarashi(1983)



- Serra Geral Formation (Parana Basalt)
- Botucatu Formation (Eolean sandstone)
- Paleozoic Sedimentary Rocks
- Kimberlite Chimney (number is same as in the text by Sheibe;1986)
- Sheibe;1986

Fig. II-3-8-39 Location of altered area and its surrounding geology
 (geological distribution is compiled after Sheibe; 1986)



1: Debris and waste by pitting, 2: Silicified eorian sandstone, Botu Catu Formation overlain by Paraná flood basalt, 3: White colored argilized zone with sulfide minerals, 4: Green colored argilized zone, 5: water pool at the bottom of the pit, depth from the top is 3 meters from the waste dump or 5 meters from topographic surface besides the creek, 6: Sample location

P1 to P4: Pan concentrated sample locations; (P1 is taken from the deposited materials by waste water, P2 is the deepest green argilized material in the pit, P3 is trench sample on the west white clay wall, P4 is taken from middle deep sample in green argilized zone.

Fig. II-3-8-40 Schematic sketch of the pit for argillized vein with sulfide minerals at the area in Fazenda do Fortunato Muniz in Lages district, Santa Catalina

Table II-3-8-4 X-ray diffraction result of argillized samples

	Serial number	1	2	3	4
	Sample name	KN035C	AS022A	AS022B	AS028C
Silica minerals	Quartz	tr	tr	1	
	Cristobalite				
	Tridymite				
Feldspar	Plagioclase	5			1
	Potassic feldspar				5
	albite				
Clay minerals	Sericite				
	Chlorite				
	Kaoline minerals		1	5	3
	Smectite group (Saponite)	5			1
	Broad sericite				
	Halloysite	tr			
	Sericite/Smectite				
Zeolite minerals	Chlorite/Smectite		5	3	
	Clinoptilolite				
	Mordenite				
	Lawmontite				
	Stilbite				
	Analcime				
Others	Wirakite				
	Hornblende				
	Augite				
Sulfate minerals	Biotite				
	Alunite				
	Gypsum				
	Barite				
Carbonate minerals	Jarosite				
	Calcite				
	Ankerite	tr			tr
	Siderite				
Other minerals	Magnesite	tr			
	Pyrite				
	Hematite				
	Anataze (TiO ₂)		1	3	
	Rutile (TiO ₂)				
	Goethite (alpha-FeOOH)				
Marcasite (FeS ₂)					

5 : common 3 : medium 1 : little tr: trace ? : uncertain

の計算プログラムを用いて算出し、Table II-3-8-5 に示した。このプログラムでは多種の混合層鉱物の存在を考慮していないので、それぞれカオリン鉱物とセリサイト/緑泥石、カオリン鉱物とセリサイト/スメクタイト、およびカオリン鉱物のみからなると仮定した場合の計算結果を示した。これらの結果から、盤際の AS022C はおそらく珪化と黄鉄鉱化を受けた砂岩、粘土化岩のうち中心部の緑色粘土化岩はおそらく Gramado タイプの玄武岩を起源とするものであり (Table II-3-8-3)、両側の白色粘土化岩は塩基性岩が著しく酸性変質と若干の珪化をうけたものと推定される。なお AS022A、AS022C は Peate et al. (1992) の判別基準では Gramado タイプに分類されるが変質を考慮にいれていない。

粘土脈の地化学異常：

粘土脈中の親銅元素 (Chalcophile elements)、硫黄 (S) および PGE の値を Table II-3-8-6 に示す。これらの値の中で注目すべき元素は Ni で、バルク試料の AS022B (白色粘土化岩) で 400 ppm、パンニング試料では AS022P-4 (緑色粘土化岩中の重鉱物) で 1,161 ppm を示し、硫黄の量とは無関係であることが注目される。すなわち、硫黄のほとんどはおそらく黄鉄鉱中のもので、ほとんどの場合親銅元素との間には相関がみとめられない。ただし、試料 AS022P-4 中の Ni は重鉱物という前提からは硫化物あるいは砒素化合物の可能性はある。しかし、PGE の含有量が Pd 5 ppb、Pt 6 ppb と低く、未変質岩中の Ni が相当の品位を示さない限り探査の対象にはならないであろう。

形成モデル：

風成層である石英質砂岩に幅 5 m 程度の塩基性岩(おそらくパラナ玄武岩)が断層中に岩脈として貫入した。

貫入した玄武岩は Ni 含有量が高いことから以下の値をもつ高マグネシウムタイプの玄武岩に近い組成のものと推定される。

High Magnesian rock average (16 samples mainly from drill samples near Lomba Grande area)

Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Pd (ppb)	Pt (ppb)
88	608	12	66	2	2

しかし、試料 AS022A および AS022B の Pd + Pt 値は 17-25 ppb と比較的高いので、Rio Grande do Sul の高マグネシウムタイプの玄武岩とは性質が少し異なり、初生的に Pd および Pt が Ni 硫化物中に入っていた可能性もある。

白亜紀のアルカリ岩類の火成活動に関係した、断層運動に伴う酸性熱水溶液によりカオリンを主とする粘土化、黄鉄鉱化、珪化が生じた。

Table II-3-8-5 Normative calculation of clay mineral assemblage for Lages argillized rocks

	AS022A			AS022B			AS022C			AS022D		
	Se/Ch	Se/Mo	Ka	Se/Ch	Se/Mo	Ka	Se/Ch	Se/Mo	Ka	Se/Ch	Se/Mo	Ka
Quartz	21.61	17.36	18.92	23.66	21.31	21.38	77.99	78.07	76.80	39.48	39.70	39.13
andalusite							1.25	1.26	2.15	2.87	3.87	2.71
microcline			0.30			1.18			3.31			0.06
albite	3.30		3.30	3.55		3.55	3.64	3.29	3.64	3.81	2.85	3.81
anorthite	2.96	2.96	2.96	1.81	1.81	1.81				0.17	0.17	0.17
kaoline	36.47	27.08	39.49	54.48	48.64	57.41	1.05	0.23	2.79	37.63	35.37	38.21
sericite	0.42	0.42		1.69	1.69		4.74	4.74		0.08	0.08	
montmorillonite		25.34			17.44			0.94			2.59	
chlorite	5.93			4.08			0.22			0.61		
limonite	20.02	20.02	20.02	5.21	5.21	5.21						
hematite							6.60	6.60	6.60	0.56	0.56	0.56
pyrite	0.03	0.03	0.03	0.11	0.11	0.11	0.01	0.01	0.01	0.06	0.06	0.06
ilmenite	1.54	1.54	1.54									
rutil	1.15	1.15	1.15	2.88	2.88	2.88	0.66	0.66	0.66	1.52	1.52	1.52
apatite	0.04	0.04	0.04	0.12	0.12	0.12	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
enstatite			5.36			3.69			0.20			
others	6.13	4.37	6.50	2.38	1.07	2.56	4.34	4.34	4.34	7.02	7.02	7.02
total	99.60	100.31	99.61	99.97	100.28	99.90	100.55	100.19	100.55	93.86	93.84	93.30

The calculation is resulted by Dr. Sudo H. in Geological Survey of Japan by using computer program by Igarashi(1)
 The calculation is independently done in each three cases such as Sericite/Chlorite mixed layer,
 Sericite/Montmorillonite mixed layer, and Kaolin only as clay mineral in each samples. The original program
 has not the case that mixed layered clay minerals exsised.

Table II-3-8-6 Assay results of bulk and pan concentrated samples at Lages area

SAMPLE	Cu	Ni	Pb	Zn	S	Pd	Pt	Au
Bulk Sample	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppb	ppb	ppb
AS022A	142	70	9	134	0.018	8	9	4
AS022B	251	400	18	138	0.246	14	11	5
AS022C	-10	-20	9	-30	4.295	2	2	3
AS022D	29	48	8	-30	7.055	4	5	3
Pan concentrates								
AS027P	68	45	7	68	0.006	1	1	
AS022P-1	79	51	6	75	3.966	-1	4	
AS022P-2	75	109	6	66	9.976	3	3	
AS022P-3	130	105	5	50	10.026	3	3	
AS022P-4	53	1161	14	86	3.192	5	6	

Sample location see on the pit skech

第4章 調査結果の考察

Noril'sk タイプの Cu-Ni-PGE 硫化物鉱床がパラナ洪水玄武岩に期待できるか、という命題で本プロジェクトは始まった。しかし、厳密な意味での Noril'sk タイプの鉱床は他にまだ発見されておらず、いわば例外的存在ともいえる。また、このタイプの鉱床をもたらした洪水玄武岩を含めた LIP (Large Igneous Province) に対する研究は 1995 年以降急速に進展した分野であり、その特徴や起源に関する議論はいま正に発展中の段階にあり、当然研究者による意見の違いがある。

このような状況により、第1年次調査では、既存文献から世界の洪水玄武岩の特徴とその成因に関する、Noril'sk 鉱床およびシベリアントラップの地化学層序と構造などのレビューから開始した。つぎに現地調査により採取した岩石試料などの主要化学組成、Pt, Pd, Au, REE を含む微量成分、および同位体分析などを実施した。

4-1 洪水玄武岩の成因論と PGE 硫化物鉱床

洪水玄武岩の生成に関して、マンテルプリュームの積極的な関与説、大陸分裂時のアセノスフェアの上昇を強調するなどの説があるほか、一般化された定説はいまだ成り立っていない。また、1995 年以降には、ほぼ 1 Ma の短時間に大量の溶岩を噴出させた洪水玄武岩のマグマを、マンテルに大量に沈み込んだ海洋地殻 (スラブ) が混入し、低温で溶融する玄武岩質成分をもつ部分とマンテルから上昇した peridotite 成分とからなる、いわば不均質プリュームにもとめるモデルが生まれている。さらには、洪水玄武岩のマグマ活動に地域差があるため、洪水玄武岩の成因論から PGE 鉱床の賦存を一義的に検討することも困難である。

PGE はその大部分が地球の核に濃集しており、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、PGE 硫化物鉱床の起源はマンテルに求めるのが妥当であろう。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。この際プリュームの大規模な溶融が起こり、通常は固相に濃集する PGE も、マンテルから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と考えられる。

つまり、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、マンテルプリュームを起源とし、且つプリュームや周囲のマンテル物質を大規模に溶融して発生したものが望ましいといえるであろう。

これらは LIP の火成活動の特徴でもあり、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であろう。

4-2 Noril'sk 鉱床からの Cu-Ni-PGE 鉱床探査指針

ロシアの Noril'sk 鉱床は洪水玄武岩に伴うものであるのは確かであるが、鉱化作用を正マグマ性鉱床としてみた場合の特徴があるのではないかと仮説に基づき、正マグマ性鉱床の特徴・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、ピクライト質ないし玄武岩質の組成をもち、硫黄に不飽和な (unsaturated in sulfur)、PGE に富んだマグマであるといえる。このようなマグマが地殻物質の混染作用を受けることにより、不混和 (immiscible)¹ 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 鉱床の成因と考えた。このことから Noril'sk タイプの鉱床の生成条件として、(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が挙げられる。

洪水玄武岩地域で、このような条件を満たすには以下の探査指針が掲げられる。

- (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ははっきりしない。

4-3 パラナベーズンの地質および地質構造

潮汐重力異常から計算されるリソスフェアの収縮率からパラナベーズンのリソスフェアはクラトンや造山帯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と考えられている。Paraná 州西部から北西部を経て São Paulo 州南西部に至る NNE-SSW 方向の Paraná 川沿い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ている。また、噴出中心と考えられるリフト帯はリソスフェアが薄いため高重力異常になることから、Paraná 川沿いの高重力域は大きなマグマフィーターの可能性がある。

¹ 個溶体や液体において、ある一定温度、圧力条件下で 1 相よりも 2 相に分離した方が熱力学的に安定なこと。

4-4 大陸性洪水玄武岩に伴う Cu-Ni-PGE 鉱床のテクトニクス

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考察した。

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 tension zone に Duluth 複合岩体が貫入し、Cu-Ni-PGE 鉱床が形成されたと推定される。

Noril'sk 鉱床は NNE-SSW 方向の Noril'sk-Kharayelakh 断層沿いに存在し、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。断層西側の Talnakh 鉱化帯は北西に伸びる三角形を示し、tension zone で形成されたものとみられる。また、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、関係した玄武岩溶岩の最も厚い部分、すなわち噴出中心に位置する。

パラナベーズンにおけるリニアメントを断層、裂罅 (fracture) としてみると、リフト帯におけるひとつの広域応力場として解釈できそうである。ベーズン中北部の Paraná 川はほぼ NNE-SSW 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ーズン東部の海岸線の方向と一致する。Paraná 川沿いにはリソスフェアの高収縮率帯、高重力異常帯、および厚いドレライトシルの貫入がみられ、玄武岩溶岩が最も厚いパイルを形成している。これらの現象は Parana 川で表される NNE-SSW の構造はマントルにつがる大きな引張裂罅 (リフト) とみることができよう。

NW-SE 方向の構造方向はリフトと推定した NNE-SSW の構造方向に直交し、トランスフォーム断層と推定される。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。このゾーンではおそらく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した。このように、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、マグマ活動の中心あったと推定される。

4-5. 衛星画像解析

Ponta Grossa Arch の岩脈群は明瞭なリニアメントとして抽出されるが、この延長上で玄武岩台地のなかでも岩脈が抽出できるかどうかの検討が必要で、フィーダー岩脈である証拠を確認したい。

判読地域中央部にあたる玄武岩分布域において NE-SW 方向の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おらず、注目されるが地質的意味は不明で、現地での検証が必要である。Paraná 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、これに対応するリニアメントは SAR 画像上では抽出されていない。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、大きな構造運動がなかったことを示している。

4-6 パラナ洪水玄武岩の地化学的特徴

パラナ洪水玄武岩の6タイプの溶岩ユニットは Peate et al. (1992)により低 Ti タイプと高 Ti タイプに分類された。今回の調査では Paranapanema と Ribeira が中間的な Ti 含有量をもち、両者を地化学的に区分できないと判断した。そこで、これらを Intermediate タイプ (Paranapanema-Ribeira) として以下のように区分した。3 タイプ間の Ti 含有量の差異は明確であり、Mg#-TiO₂ ダイアグラム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	
Intermediate タイプ	—	Paranapanema-Ribeira
高 Ti タイプ	Paranapanema	Pitanga
	Pitanga	Urubici
	Urubici	

地化学的に検討した結果を Table II-4-6-1 にまとめた。地化学的特徴から各溶岩の起源・性質は以下のように考えられる。

- (1) Esmeralda は LREE が少なく、Nd 同位体比が小さいことなどから最も未分化 (primitive) なタイプ、すなわち、地殻との混染や結晶分化作用などの影響が少ないものと考えられる。
- (2) 低 Ti タイプに分類された Gramado は相対的に Th、U、Rb 等の地殻濃集元素に富み、Sr 同位体比が高く、Nd 同位体比が低いことから、大陸地殻上部の花崗岩質物質の影響を受けたことを示唆する。地殻との混染は、これらの溶岩が基盤岩の浅いパラナベズン南部に分布していることとおそらく関係があるであろう。
- (3) 高 Ti タイプと Intermediate タイプのマグマは、大陸地殻上部物質の混染は小さく、地殻と反応する時間がないほど急速急速に噴出した可能性が考えられる。すなわち、Paranapanema と Pitanga タイプの溶岩はパラナベズンの中心に厚いパイルをつくり、パラナ洪水玄武岩の中で最も噴出量が多い。これらの噴出年代が明確にされれば、パラナ洪水玄武岩の活動の形態・歴史がよりはっきりするであろう。
- (4) 3つの溶岩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との説明も可能

Table II-4-6-1 Summary of geochemical interpretation

Lava type	Variation of major elements		Variation of minor elements		Spider diagram (chondrite normalized) of trace elements		Metallic elements		REE			Degree of partial melting from primitive mantle	Ta/Nb-Y/Nb and Zr/Nb-Y/Nb correlation		Nd, Sr Isotope ratio				
	Plot-Diagram	Major elements	TiO2 content (wt %)	Nb,Zr,Y, Ba,Th,U-Mg#	Sr-Mg#	Light REE	Heavy REE	Ni-Mg#	Cu,Au,Pt,Pd-Mg#	LREE (La/Sm-Mg#)	HREE (Gd/Yb-Mg#)	Nb/Zr-Mg#	Ba/Ca-Sr/Ca	Ta/Nb-Y/Nb systematics	Zr/Nb-Y/Nb systematics	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd- ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr-Mg#	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd-Mg#	
Urubici		>3.3	High-Ti	Increase by crystallization differentiation	Sr slightly increase by fractionation	Highest	strictly low	Decrease toward smaller Mg# side	Poor in Cu, Au, Pt, Pd	High	High	Medium	<5% ?	Nearest to enriched mantle source	Nearest to enriched mantle source	Low ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr and high ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (on the line connect MORB and OIB)	Low ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Medium ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	
Pitanga	Elements (Al ₂ O ₃ , MgO, CaO) decreasing by differentiation	>2.8				High					High	High (low partial melting)	High (low partial melting)						on 10% line
Paranapema-Ribiera	Elements (TiO ₂ , K ₂ O, Na ₂ O) increasing by differentiation	1.5-3.2	Intermediate-Ti			Medium					Medium	Medium	Medium						on 20%(15-25) line
Esmeralda		1.1-2.0	Low-Ti			Low	Almost same level				Most enriched in Cu, Au, Pt, Pd	Low and increase toward lower Mg# (near primitive magma)	Low (high partial melting)						Low (high partial melting)
Gramado	Al ₂ O ₃ , CaO increasing at high (75 to 70)Mg# range in Gramado type (olivine control)	0.7-2.0			Almost same value in Sr	Medium		Very high at Mg# >70 side, and decrease at smaller Mg# side	Widely variable in Cu, Au, Pt, Pd on any degree of differentiation	Widely dispersed (Highest to Medium) (may be contaminated by the crust)	Medium to low	Medium to low	on 30% line	Far from depleted mantle source	Far from depleted mantle source	High ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr and low ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (may shows crustal contamination)	High ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr (crustal contamination)	Low ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd and wide Mg# range	
Comment				Incompatible elements (Nb, Zr, Y, Ba, Th, U) having large ionic radius enrich toward crystallization differentiation.				This corresponds to crystallization differentiation of olivine or pyroxene + plagioclase.	We have no answer why the intermediate magma type is enrich in PGE, Cu, Au.	Each magma type show different level of La/Sm ratio. High La/Sm ratio generally means high degree of crustal contamination. Gramado has wide variation of La/Sm ratio which means distinct crustal contamination.	Low Gd/Yb ratio may mean high degree of partial melting. May be caused by difference of fractionation coefficients for mantle and basalt magma.	Low Nb/Zr ratio means high degree of partial melting. May be caused by difference of fractionation coefficients for mantle and basalt magma.	Degree of partial melting from primitive mantle	Parana basalts are nearer to MORB than OIB(Ocean Island Basalt). The systematics must be interpreted in future with other continental flood basalts and OIB.	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ratio is high in granitic crust		High ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd may mean near primitive mantle source.		

である。このうち最も部分溶融の程度の大きい低 Ti タイプ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、マグマソースの違いによる可能性も考えられ、単純ではない。

- (5) PGE 含有量は Intermediate タイプの Paranapanema-Ribeira が最も高い。このタイプの Pt と Pd の平均値はそれぞれ 9.7 ppb、15.5 ppb であり、Noril'sk 地域で最も PGE に富んだ溶岩よりも大きい。Paranapanema(-Ribeira)が PGE に富む現象は部分溶融の程度では説明が難しく、マグマの発生場所が異なるなどの可能性も考慮に入れる必要があるだろう。Intermediate タイプの Paranapanema-Ribeira の中で不混和硫化物メルトの分離による PGE の枯渇が発見できれば、PGE 鉱床の可能性を期待できるであろう。
- (6) 低-Ti タイプのマグマは、Intermediate タイプに次いで高い Pt、Pd 含有量を示す。地殻混染の影響が大きい Gramado タイプには、PGE に枯渇した試料と枯渇していない試料が存在する。また、高 Ti タイプの Pitanga の Pt、Pd の含有量は非常に低く、PGE に初生的に乏しいものと推定される。
- (7) パラナ州西部に見られる PGE、Ni、Cu などの地化学異常 (MINEROPAR により実施された沢砂地化学探査の結果) は高い PGE 含有量を有する Paranapanema-Ribeira の分布そのものを示している可能性があり、今後のデータの蓄積が望まれる。

4-7 パラナ洪水玄武岩に関係した貫入岩類

南部の Lomba Grande 地区のシルの組成幅は広くピクライト質～デイサイト質で、中央東部の Ponta Grossa Arch のシルおよび岩脈の組成幅は狭くすべて玄武岩質である。Grande 地区のシルは Th、U、Rb に富み、Nd と Sr の同位体比からも地殻物質の混染作用の影響が考えられる。一方、Ponta Grossa Arch のシル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る。

貫入岩体の Pt、Pd 含有量は、Lomba Grande 地区北東部から東部に存在する厚さ 130 m 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す (最高 Pt: 20 ppb 以上)。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～デイサイトのシルは Pt、Pd に枯渇している。また、Ponta Grossa Arch のシルと岩脈の Pt、Pd 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。

4-8 今後の課題および調査方法

今後の課題および調査方法を以下に掲げる。

- ・パラナベーン全域にわたる 3 次元的な Chemical Stratigraphy の確立 (主として試錐試料)
- ・各溶岩タイプのなかで地殻物質の混染と Cu-Ni-PGE の枯渇がみられる地区の抽出
- ・溶岩および貫入岩中の硫化物の量と、マグマの分化、硫黄同位体比などとの関係の把握

- ・年代測定データの蓄積と既存年代値データの評価 による各マグマタイプの活動年代
- ・溶岩噴出量および噴出速度の算出
- ・他の洪水玄武岩を含めた地化学データの検討
- ・Noril'sk 鉱床を含め、正マグマ性 Cu-Ni-PGE 硫化物鉱床試料の地化学データの集積と検討