

3-2-2 室内試験

各分析項目、数量および分析内容は、下記のとおりである。また、室内試験の結果を巻末資料に掲載する。

- ・薄片作成・鑑定：189 件
- ・研磨薄片作成：3 件
- ・鉍石研磨片作成：5 件
- ・全岩化学分析：198 件、61 元素 (Major elements: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅; Trace elements: Ag, As, Au, Ba, Be, Bi, Br, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Hf, Ir, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Tl, V, W, Y, Zn, Zr, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, U, Th; Platinum group elements: Pt, Pd, Au)
- ・Rb および Nd 同位体比分析：34 件
- ・Ar-Ar 法年代測定：16 件
- ・EPMA 分析：10 件 (定量分析)
- ・粉末 X 線回折試験：4 件
- ・S 同位体比分析：4 件
- ・パンニング試料分析：5 件、11 元素 (Ag, Cd, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn, S, Pd, Pt)
- ・沢砂分析：316 件、30 元素 (Ag, Cu, Cd, Mn, Mo, Pb, Ni, Zn, S, As, Ba, Sb, W, Al, Be, Bi, Ca, Co, Cr, Fe, K, Mg, Na, P, Sc, Sn, Ti, V, Y, Zr)
- ・沢水分析：182 件、69 元素 (Li, B, Be, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Au, Pt, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U, (Sulphate ion))

3-3 パラナベーズンの洪水玄武岩層序

3-3-1 化学組成による洪水玄武岩類の分類

(1) パラナ洪水玄武岩の地化学的特徴

a) 玄武岩類の分類

パラナ洪水玄武岩は、ソレアイト玄武岩もしくは玄武岩質安山岩が全体の 90 vol%を超える。Rüegg (1975)は、TiO₂ の含有量で、玄武岩を2つのグループに分けた。後に微量元素や同位体の検討により、2つのグループを2つの起源マグマから説明した (Atalla et al., 1982; Bellieni et al., 1984; Mantovani et al., 1985)。

このような2つのマグマグループは、Karooにも認められた (Erlanket et al., 1986)。また、南大西洋の各 LIP においても同様の報告がなされている。この様な、微量元素や同位体の特徴は Dupal 異常として、Hart (1984)が定義している。

Piccirillo et al. (1988)は、広範囲に採取したパラナ洪水玄武岩の分析値から、パラナベーズンを3つの主要なセクターに分けた。

- ・Uruguai 川の南側：岩石は、ソレイト玄武岩・安山岩および流紋岩質デイサイトから流紋岩 (Palmas タイプ) で、 TiO_2 含有量が2%未満である (低 Ti タイプ)。
- ・Piquiri 川の北側：岩石は、ソレイト玄武岩および流紋岩質デイサイトから流紋岩 (Chapecó タイプ) で、 TiO_2 含有量が2%を超える (高 Ti タイプ)。
- ・両者の漸移帯： TiO_2 含有量が中間的なもの。

しかし、 TiO_2 含有量のみで玄武岩マグマを分類することには、無理があったため、いくつかの元素を取り入れて、判別法が作られた (Davis, 1986; Peate et al, 1988)。この方法によって、玄武岩マグマは6つのタイプに分類された。使用された元素は、変質を受けても移動し難い HFS 元素の Ti, Zr, Y と Sr および Ba である。これらの元素は、不適合元素のため、分別結晶作用により濃集していく特徴があり、さらにこれら元素の比をとることで、各マグマタイプの化学的な差違をより明瞭なものとした。

その分類によると、パラナベーズンの北部には、3つのマグマタイプが認められ、特に2つのタイプが集中する。高 Ti タイプの Pitanga, Paranapanema、そして Ribeira である。高 Ti タイプの中でも Pitanga は、 SiO_2 , TiO_2 , K_2O が乏しいが、 Fe_2O_3 total に富むという特徴を有する。また、微量元素では Sr 含有量が低い特徴を示す。Pitanga と Paranapanema を分類するには、Sr- Fe_2O_3 によるダイアグラムで判定する。

中間的な Ti 含有量を示すタイプは TiO_2 が 2-3 wt% である。Piccirillo et al. (1988)では、パラナベーズン中央部の玄武岩を形成したマグマにその分類が適用されており、高 Ti から低 Ti へ移り変わる漸移帯だと考えられている。Peate et al. (1992)の分類では、Ti/Y と Zr/Y 比が Pitanga に比べて Paranapanema は低いため、別のマグマタイプに分類されている。

パラナ洪水玄武岩のマグマの分類において低 Ti タイプを初めて記載したのは、Fodor et al. (1983)である。その後、低 Ti タイプの玄武岩マグマは、Peate et al. (1988)において、Gramado および Esmeralda と名称が付けられた。

Petrini et al. (1987)は、小規模に分布する低 Ti タイプのマグマを、Sr 同位体比の違いから、1つのマグマタイプとして提案した。このマグマタイプは、比較的、不適合元素に富んでおり、Peate et al. (1988)では、Ribeira に対比される。

Gramado と Esmeralda の2つの低 Ti タイプマグマは、MgO 含有量が Ribeira と同じだが、 TiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 そして Sr に富み、 SiO_2 が低い特徴を示す。また、Gramado と Esmeralda は、Ribeira に比べて Ti/Y 比と Zr/Y 比が、低い特徴を有する。中間的な Ti 含有量の Ribeira と Paranapanema は、MgO- TiO_2 ダイアグラムで分類することができる。

パラナ洪水玄武岩の岩石化学的な検討では、玄武岩マグマは、Esmeralda を除いてすべて同一のものと考えられており、その化学組成と海洋域の玄武岩の化学組成は明らかに異なる。

以上のことから、パラナ洪水玄武岩溶岩は、パラナベーズンの中心と北部が最も厚く、そし

てパラナベーズン北部には、3つの主要な玄武岩マグマから形成した溶岩が分布する。すなわち Pitanga、Paranapanema そして Ribeira である。これらのマグマの違いは、同じソースマントルからの部分熔融の程度の違いで説明されている。

パラナベーズンの南部に分布する溶岩の主要なマグマタイプである Gramado は、化学組成が他のマグマタイプと非常に異なっている。これは、地殻物質の混染の影響が大きいためと考えられている。また、Gramado の高い Rb/Sr 比と低い U/Pb 比は、古い富化したソースを示唆していると指摘されている。一方、Esmeralda は大陸の分裂の際に噴出したと考えられる。これは、Esmeralda がアセノスフェアの特徴をよく有しているためである。

Pitanga と Urubici は高 Ti タイプで Paranapanema は Intermediate Ti タイプである。Urubici を形成したマグマは、北部に分布する高 Ti マグマと類似している。従来の報告が Paranapanema を高 Ti タイプに分類しているのは、化学組成が、高 Ti タイプとよく類似しているためである。

低 Ti マグマタイプは、南部によく分布し、分布の規模は、Gramado に次いで、Ribeira と Esmeralda である。パラナ洪水玄武岩の活動後期のマグマタイプは、微量元素に乏しい特徴があり、高い Nd 同位体比を示す。Ribeira は、Paranapanema や Pitanga と Ti/Zr 比などの微量元素比が類似している。また、空間的にも関連する。

b) 酸性岩の分類

パラナベーズンの南東部では、南米大陸の縁辺部に近接して、火成岩層序の上位に多量の酸性岩が認められる。酸性岩の SiO₂ 含有量は 60-64 wt% を示し、パラナ洪水玄武岩の分類に使用されている。概して SiO₂ 量が 64 % を超えるのは流紋岩で、60 wt% 未満を玄武岩類として取り扱っている。酸性岩の存在は、パラナベーズン南東部の Serra Gaúcha で際だっており、北に向かうにつれて酸性岩の存在量は減少する。

酸性岩について Mantovani et al. (1985) は、不適合元素を使用して、初めて2つのマグマタイプに分けた。次に Bellieni et al. (1986) が分類を行った。1つは、不適合元素含有量が低い Palmas、そしてもう1つは、不適合元素に富む Chapecó である。Chapecó は、Palmas に比べて、SiO₂ 含有量が低いが、TiO₂ と P₂O₅ に富む傾向がある。

c) パラナ洪水玄武岩の Sr および Pb 同位体比の特徴

パラナベーズン北部に分布する高 Ti タイプのマグマから形成した玄武岩は、Sr 同位体比の初生値が 0.7055 - 0.7060 である。Urubici がやや高い傾向がある (Mantovani, 1985; Peate, 1989; Cordani et al., 1989)。

低 Ti タイプのマグマから形成した玄武岩の同位体比の特徴は、富化していることである。これは、地殻物質の混染の影響によると考えられている。そして大陸下部の、古く、不適合元素に富む上部マントルを起源とすると推定されている。

パラナベーズン北部に分布する高 Ti タイプのマグマから形成された玄武岩は富化が少ない。そして、たいいていの海洋地殻よりも、La と K に対して、低い Nb, Ta の含有量を示す。

これらは、低 Ti タイプと同様に、活動初期に大陸下部マントルの富化しているソースから分

離生成したものかもしれない。例外は、Esmeralda で、パラナベーズン南部の流紋岩よりも形成年代が新しく、そして海洋地殻の特徴を強く有している。

Pb 同位体比では、すべてのパラナ洪水玄武岩は、北半球のリファレンスライン上に並ぶ。Dupal 異常から、インドと南大西洋のデータも同じリファレンスライン上に並ぶ。

高 Ti タイプのマグマは、1.8 Ga のマントルアイソクロンと一致する。Gramado の Pb 同位体比がばらつくのは、別のマグマの同化と分別結晶作用によるものと考えられていたが、Mantvani and Hawkesworth (1990)は、リソスフェアを起源とする物質の混染を提案した。

同様に、Herget et al. (1991)は、タスマニアに分布する玄武岩類の類似した同位体比の特徴から、パラナ洪水玄武岩の化学組成は、先カンブリア時代の沈み込みにより運ばれた堆積物の影響を受けていると考えた。また、Hawkesworth et al.(1994)では、パラナ洪水玄武岩の低い U/Pb 比と高い Rb/Sr 比をもたらす富化作用は、大陸のリソスフェアに影響されたものと考えた。従って、Pb と Sr の同位体比データは、異なったテクトニクス環境によるもので、リソスフェアとアセノスフェアからの物質の混合の割合を示している可能性が考えられた。つまり、パラナ洪水玄武岩の高 Ti タイプの玄武岩マグマは、ゴンドワナ大陸の下方で生成したため、リソスフェア浅部の物質との混合が起こらなかったとされる (Hawkesworth et al., 1988)。対して、大陸の拡大に伴い、低 Ti タイプマグマは、高 Ti タイプマグマに比べて浅部で生成したため、リソスフェア物質の混染を受けたと考えられている。

(2) Peate et al. (1992)による洪水玄武岩類の分類方法の適用

分析値の検討にあたり、Peate et al. (1992)の分類に従って、採取した玄武岩溶岩を分類した。Peate et al. (1992)による分類を Table II-3-3-1 に示す。また、本調査の分析結果を、Table II-3-3-2 に示す。

高 Ti タイプは、Pitanga と Urubici で、低 Ti タイプは、Gramado と Esmeralda である。ただし、Peate et al. (1992)の分類方法では分類しきれない高 Ti タイプと低 Ti タイプの中間的なタイプの Paranapanema-Ribeira を、“Intermediate Ti タイプ”としてを分類した。

前述の方法による分析試料の分類結果を Fig.II-3-3-1 に示す。本調査で採取した玄武岩溶岩試料を分類したところ、平面的な分布は、従来の報告とほぼ一致した。

(3) 主成分元素による検討

Mg# (Mg number: $100 \text{ Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}_{\text{total}})$, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} = 0.85$) を横軸に、それぞれ SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O_3 , K_2O を縦軸にとったダイアグラムを Fig. II-3-3-2 に示す。

各ダイアグラムとも、結晶分化によるトレンドが明瞭である。特に Al_2O_3 と CaO のダイアグラムにおける低 Ti タイプマグマの結晶分化トレンドは、かんらん石の晶出から輝石+斜長石の晶出によるコントロールへと変化する様子が見られる。

結晶分化に関係なく、異なったマグマタイプの存在が推測されるのは、 SiO_2 , TiO_2 , K_2O のダイアグラムである。Peate et al. (1992)に基づいて分類された3つのマグマタイプは、それぞれ異なった分化トレンドを示す領域にプロットされ、同一のマグマからの結晶分化による説明は困

Table II-3-3-1 Classification criteria for basalt magma types (Peate et al.,1992)

	"High-Ti"			"Low-Ti"		
	Urubici	Pitanga	Paranapanema	Ribeira	Esmeralda	Gramado
SiO ₂	> 49	> 47	48 - 53	49 - 52	48 - 55	49 - 60
TiO ₂	> 3.3	> 2.8	1.7 - 3.2	1.5 - 2.3	1.1 - 2	0.7 - 2.0
P ₂ O ₅	> 0.45	> 0.35	0.2 - 0.8	0.15 - 0.50	0.15 - 0.50	0.05 - 0.40
Fe ₂ O ₃ total	< 14.5	12.5-18	12.5 - 17	12 - 16	12 - 17	9 - 16
Sr	>550	>350	200 - 450	200 - 375	<250	140 - 400
Ba	>500	>200	200 - 650	200 - 600	90 - 400	100 - 700
Zr	>250	>200	120 - 250	100 - 200	65 - 210	65 - 275
Ti/Zr	> 57	> 60	> 65	>65	>60	
Ti/Y	>500	>350	>350	>300	<330	<330
Zr/Y	> 6.5	> 5.5	4.0 - 7	3.5 - 7.0	2.0 - 5.0	3.5 - 6.5
Sr/Y	> 14	> 8	4.5 - 15	5 - 17	< 9	<13
Ba/Y	> 14	> 9	5 - 19	6 - 19	< 12	<19

Table II-3-3-2 Analytical results of major, trace and metal elements for Paraná flood basalts in this survey

Lava type	Low-Ti				Intermediate-Ti		High-Ti			
	Gramado		Esmeralda		Parapanema-Ribeira		Pitanga		Urubici	
Number of samples	19		9		32		5		1	
	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range
Major elements (wt%)										
SiO ₂	54.11	52.25-57.63	51.94	50.81-53.48	50.79	49.65-52.64	49.96	49.33-50.85	51.60	---
Al ₂ O ₃	13.86	12.28-15.85	13.84	13.16-14.92	13.19	12.35-13.96	12.51	11.81-12.83	13.31	---
Fe ₂ O ₃	12.60	10.16-15.90	13.10	11.78-14.54	14.62	12.62-16.16	15.61	15.31-15.91	13.42	---
MnO	0.18	0.15-0.22	0.21	0.19-0.22	0.21	0.18-0.24	0.22	0.21-0.24	0.17	---
MgO	5.03	3.10-6.70	5.78	4.26-6.43	5.50	4.09-6.47	4.95	4.13-6.82	4.15	---
CaO	8.57	6.75-10.15	10.17	8.22-10.99	9.68	8.38-10.76	8.71	8.20-9.40	8.07	---
Na ₂ O	2.62	2.25-3.33	2.56	2.44-2.76	2.51	2.32-2.87	2.62	2.33-2.71	2.56	---
K ₂ O	1.49	0.84-2.84	0.88	0.49-1.43	1.10	0.75-1.45	1.47	1.20-1.64	1.89	---
TiO	1.35	0.99-1.98	1.36	1.21-1.72	2.16	1.67-2.60	3.45	2.69-3.77	4.22	---
P ₂ O ₅	0.18	0.13-0.27	0.16	0.12-0.21	0.25	0.18-0.33	0.50	0.32-0.58	0.61	---
Mg #	64.55	48.26-75.10	67.10	57.72-70.95	63.47	54.12-70.52	59.16	55.67-66.74	59.04	---
Trace elements (ppm)										
Ba	337	202-685	194	112-296	312	238-363	465	376-559	683	---
Sr	208	123-243	179	162-213	313	229-381	400	378-412	801	---
Y	34	22-105	29	26-37	31	23-42	35	28-38	38	---
Zr	142	92-183	115	82-93	156	120-198	223	196-250	343	---
Nb	11	7-17	7	5-10	14	10-19	24	19-26	31	---
Ti/Zr	57	40-75	73	62-98	84	75-96	93	82-110	74	---
Ti/Y	259	97-313	280	257-311	426	358-497	594	569-651	665	---
Zr/Y	5	1.5-5.8	4	3.2-4.5	5	4.6-5.7	6	5.9-7.1	9	---
Sr/Y	7	2-10	6	5-8	11	6-16	12	11-14	21	---
Ba/Y	11	3-20	6	4-9	10	8-13	13	13-15	18	---
Cu	139.41	58-250	165.92	132-204	230.94	172-308	185.08	152-209	226.13	---
Ni	48.29	23-117	50.31	28-63	53.17	26-87	39.92	22-73	40.26	---
Pd (ppb)	6.95	0.16-14.09	9.92	6.31-13.46	15.50	6.24-22.35	0.48	<0.1-1.26	6.95	---
Pt (ppb)	6.36	0.31-15.17	5.10	2.31-11.96	9.67	4.04-18.11	0.44	0.15-0.62	3.68	---
Au (ppb)	7.71	0.75-68.59	2.81	1.35-4.10	5.03	1.34-9.06	1.14	<1-2.68	5.19	---
Isotope										
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.51219	0.51213-0.51226	0.51233	0.51226-0.51241	0.51227	0.51225-0.51233	0.51227	---	0.51228	---
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.70928	0.70815-0.71022	0.70633	0.70619-0.70643	0.70582	0.70560-0.70602	0.70548	---	0.70512	---
ε Nd	-8.7	-7.5 - -9.8	-6.0	-4.4 - -7.4	-7.2	-7.6 - -6.0	-7.2	---	-6.9	---
ε Sr	67.9	51.8-81.2	26.0	23.9 - 27.4	18.8	15.6 - 21.6	13.9	---	8.8	---

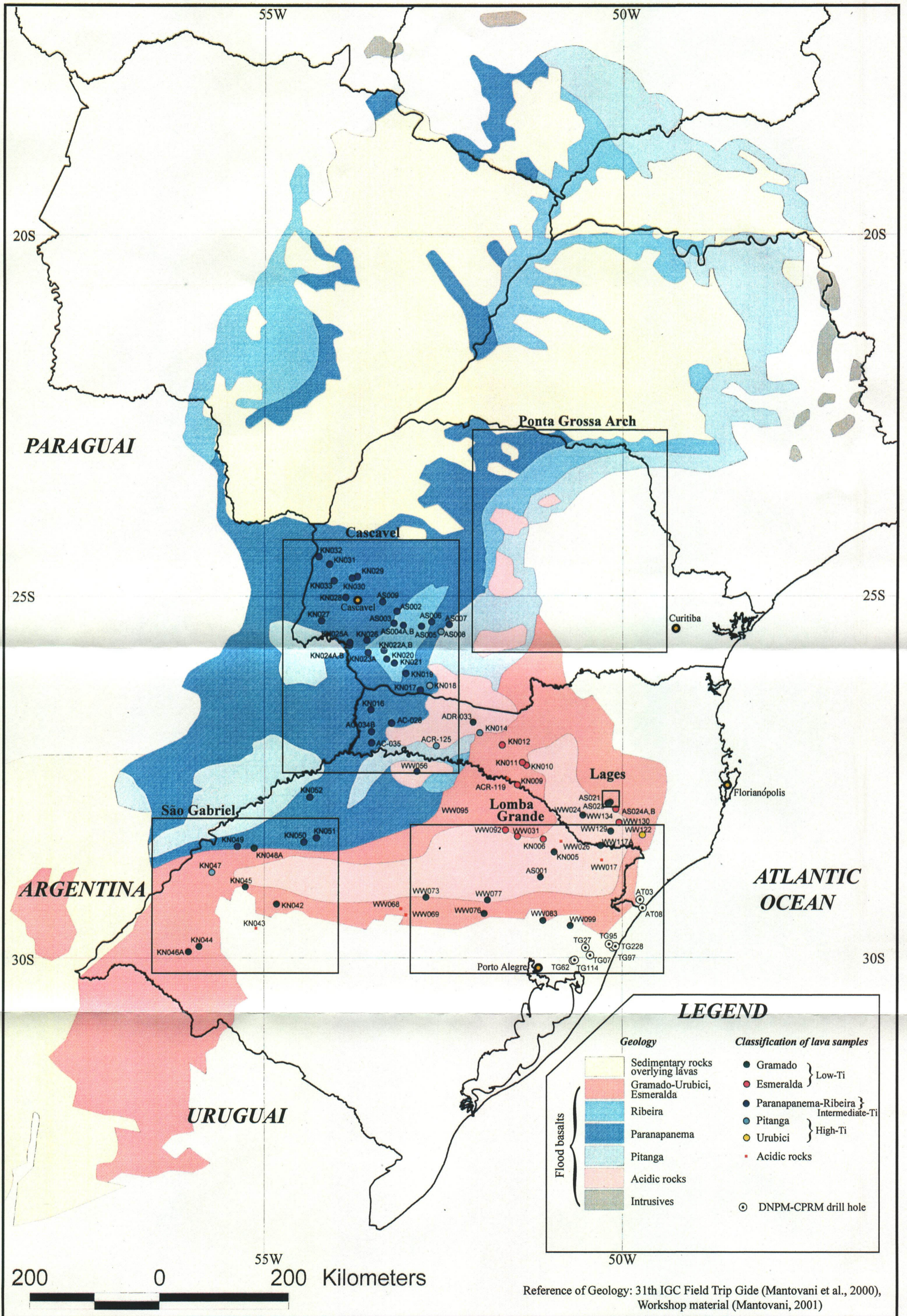
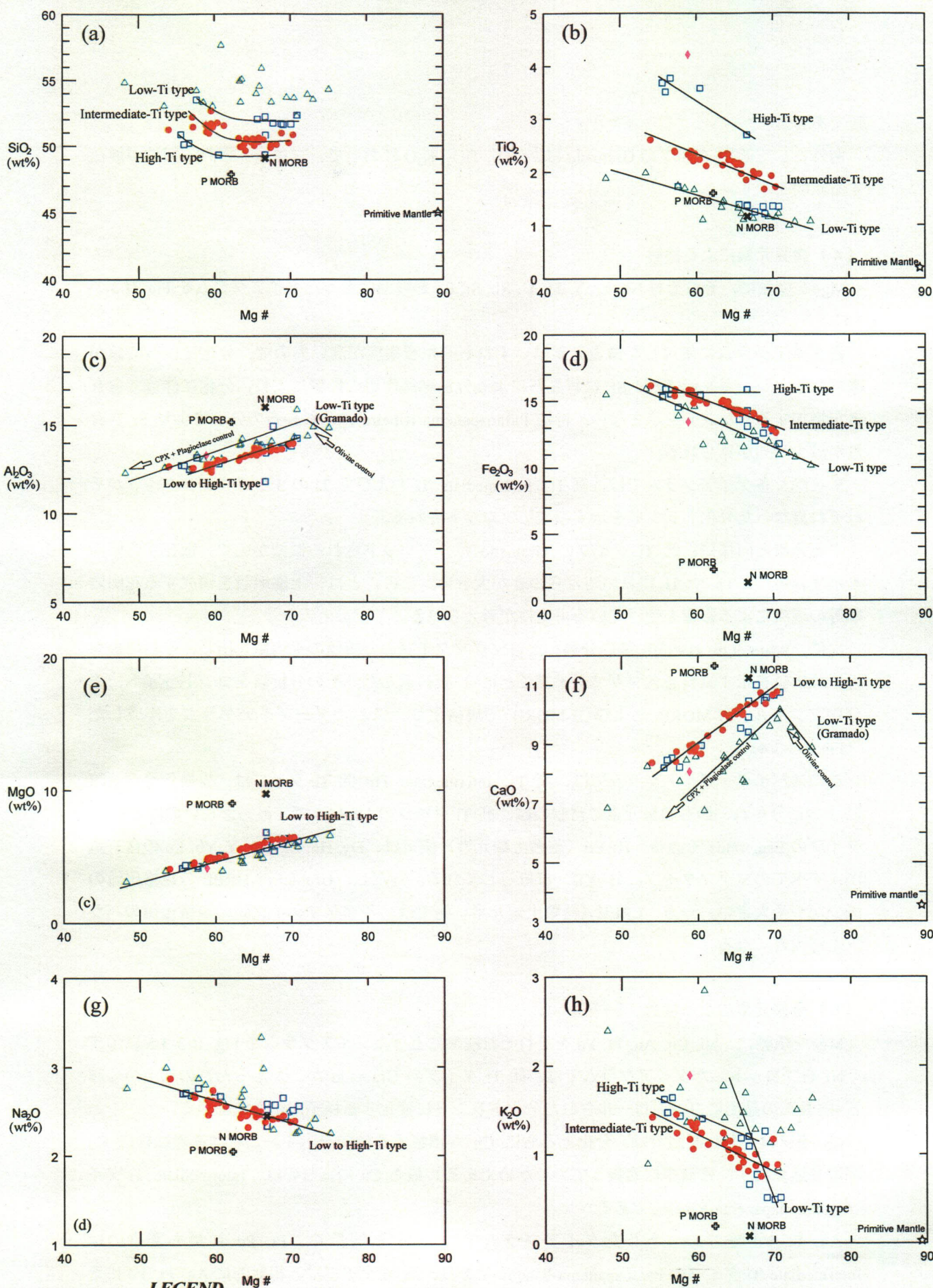


Fig. II-3-3-1 Distribution of classified lava samples and Paraná flood basalts



LEGEND

△	Gramado	} Low-Ti type
□	Esmeralda	
●	Parapanema-Ribeira	} Intermediate-Ti type
□	Pitanga	
◆	Urubici	} High-Ti type

N MORB and PMORB: Schilling et al. (1983)
 Primitive Mantle: McDonough and Sun (1995)

Fig. II-3-3-2 Selected variation diagrams of major elements for lava samples
 (a) Mg# vs SiO₂, (b) Mg# vs TiO₂, (c) Mg# vs Al₂O₃,
 (d) Mg# vs Fe₂O₃, (e) Mg# vs MgO, (f) Mg# vs CaO,
 (g) Mg# vs Na₂O, (h) Mg# vs K₂O.

難である。

例外として低 Ti タイプの Gramado は、 SiO_2 、 TiO_2 、 K_2O において、プロットされる領域が散在する傾向を示す。

(4) 微量元素による検討

Mg#を横軸に、それぞれ Nb, Zr, Y, Th, U, Rb, Sr, Ba を縦軸にとったダイアグラムを Fig. II-3-3-3 に示す。

各ダイアグラムに使用した微量元素はいずれも液相濃集度が高いもので、分化に伴って値が高くなるトレンドを示すが、Sr は斜長石による分別結晶作用の影響により、分化に伴って含有量が増加するトレンドを示さない。特に Paranapanema-Ribeira は、斜長石の分別により Sr 含有量が減少傾向が見られる。

Y を除く各ダイアグラムでは、高 Ti、Intermediate Ti および低 Ti の 3 つのマグマタイプがそれぞれ異なった分化トレンドを示す領域にプロットされる。

主要元素と同様に、低 Ti タイプの Gramado は、プロットされる領域が広く、散在する傾向を示す。特に、Th や U においてばらつきが大きい。このことは、上部地殻を構成する花崗岩類等の混染による影響を受けている可能性が考えられる。

次に、Peate et al. (1992) に従い分類した各マグマタイプの分析値の平均値を出し、それに最も近い分析値を示す試料を各マグマタイプごとに 1 試料選んだ。その分析値をコンドライト、未分化マントル、N-MORB および E-MORB で規格化し、スパイダーダイアグラムを作成した (Fig. II-3-3-4)。

このスパイダーダイアグラムでは、高 Ti、Intermediate Ti、低 Ti タイプは、規格化値が明瞭に 3 つに分かれ、最も微量元素に富むのは、高 Ti タイプの Urubici で、最も乏しいのは、低 Ti タイプの Esmeralda である。HREE (重希土類元素) 側では、Dy, Ho, Er, Tm, Y, Yb, Lu の含有量が、すべてのマグマタイプにおいて、ほぼ等しくなる。ただし、Urubici は HREE の規格化値の減少がやや大きい。一方、LREE (軽希土類元素) 側では、各マグマタイプ間の規格化値のバラツキが大きくなる。

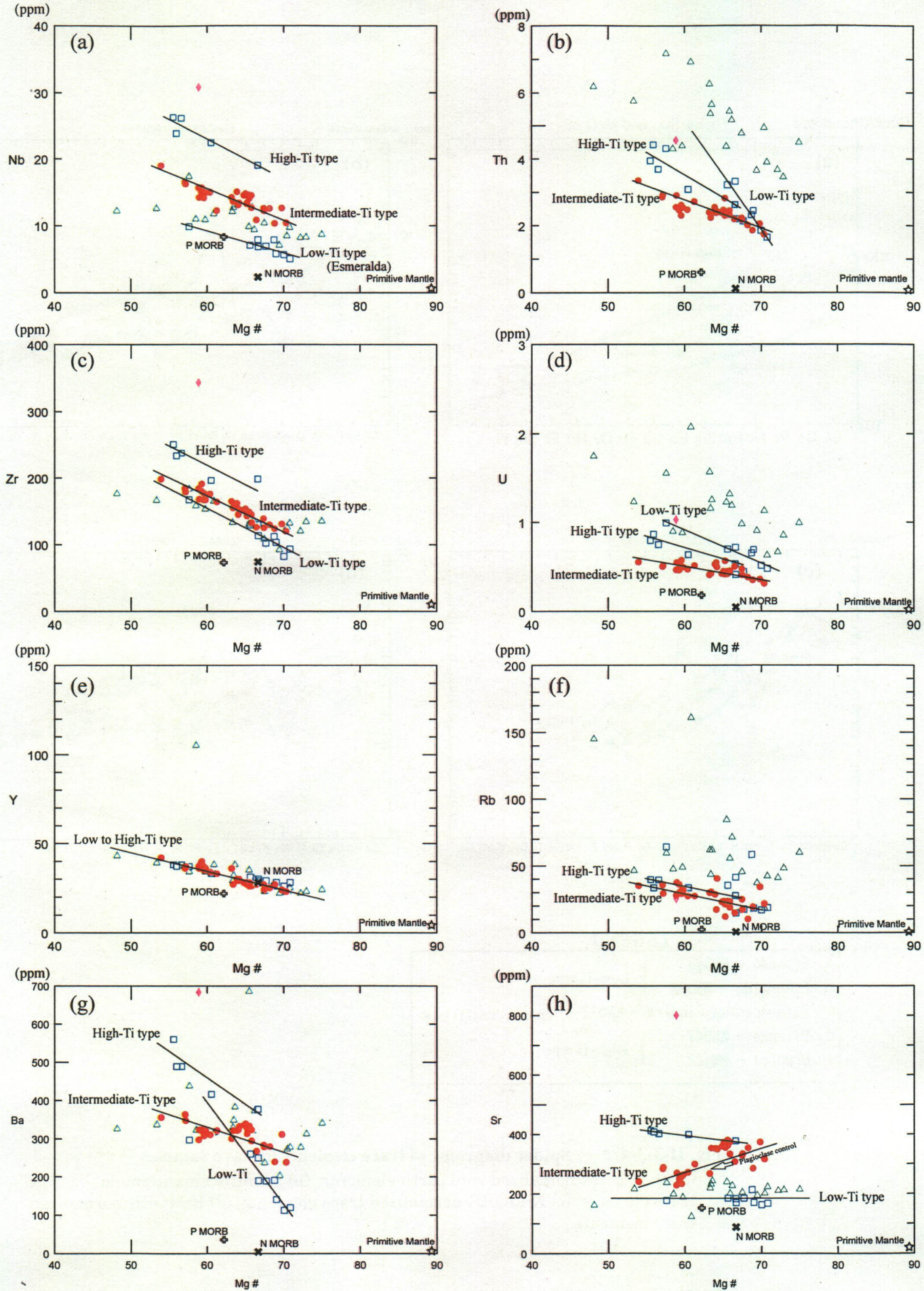
(5) 金属元素による検討

Mg#を横軸に、Ni, Cu, Au, Pt, Pd をそれぞれ縦軸にとったダイアグラムを Fig. II-3-3-5 に示す。

Ni をプロットしたダイアグラムでは、低 Ti タイプの Gramado が、かんらん石の晶出から輝石+斜長石の晶出にコントロールされた分化トレンドに変化する様子が示されている。

Cu をプロットした図では、分化とともに Cu が濃集する傾向を示す。これは造岩鉱物に Cu が取り込まれず、残液中に濃集していくためである。最も Cu に富むのは、Intermediate Ti タイプの Paranapanema-Ribeira である。

Au, Pt, Pd をプロットしたダイアグラムでは、Cu と同じく、Pt, Pd に最も富むのは Intermediate Ti タイプの Paranapanema-Ribeira であり、高 Ti タイプは、相対的に Au, Pt, Pd に乏しい。Pitanga は、その特徴が特に明瞭である。また、Gramado の Pt, Pd 値は、分化とは関係な



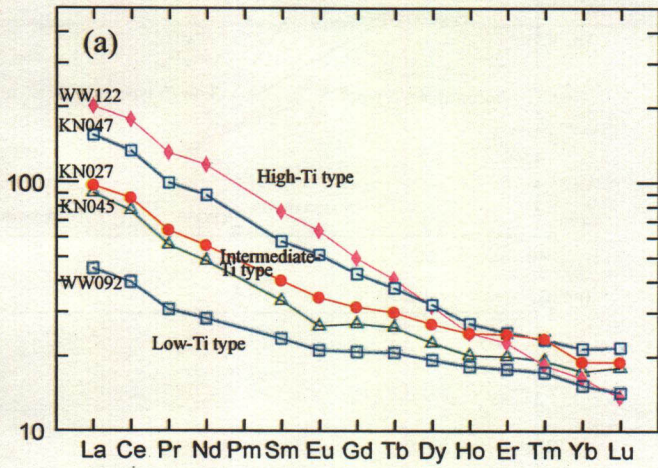
N MORB and PMORB: Schilling et al. (1983)
 Primitive Mantle: McDonough and Sun (1995)

Fig. II-3-3-3 Selected variation diagrams of trace elements for lava samples

(a) Mg# vs Nb, (b) Mg# vs Th, (c) Mg# vs Zr,
 (d) Mg# vs U, (e) Mg# vs Y, (f) Mg# vs Rb,
 (g) Mg# vs Ba, (h) Mg# vs Sr.

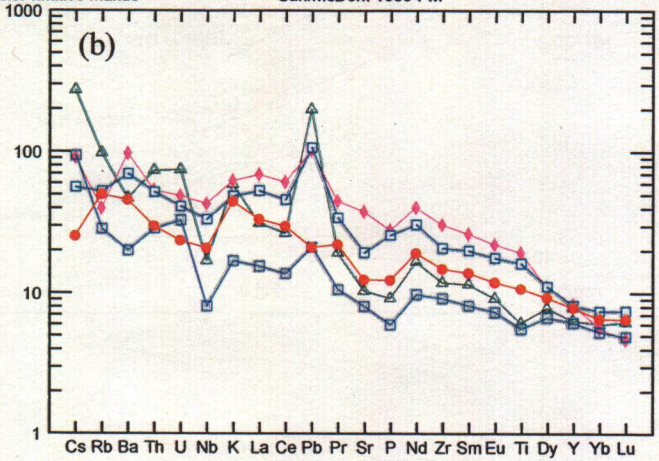
Rock/Chondrites

REEs-Sun and McD 89



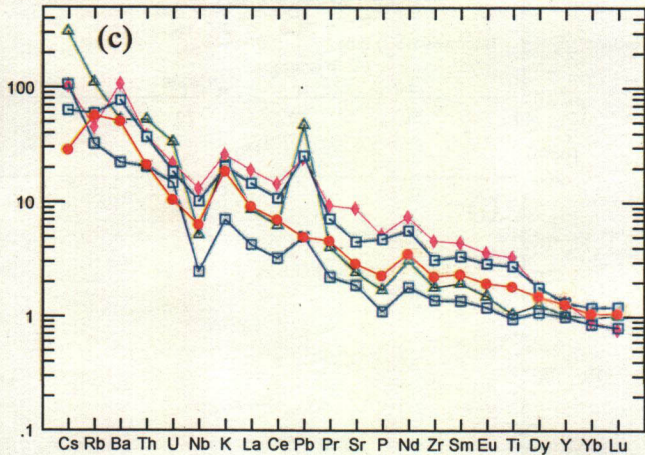
Rock/Primitive Mantle

Sun/McDon. 1989-PM



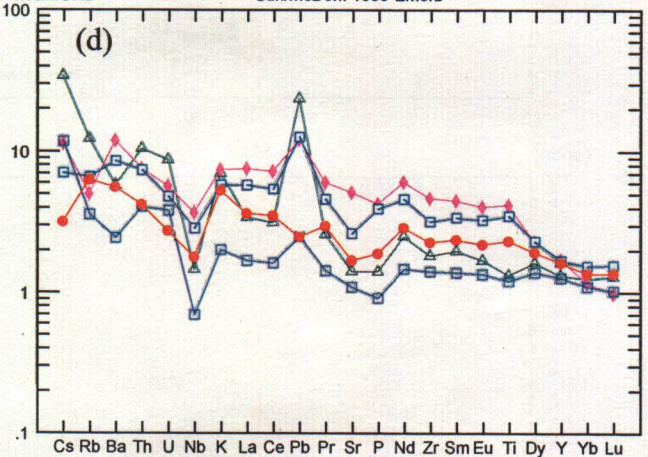
Rock/NMORB

Sun/McDon. 1989-NMorb



Rock/EMORB

Sun/McDon. 1989-EMorb



LEGEND

△ Gramado - KN045	} Low-Ti type
□ Esmeralda - WW092	
● Paranapanema-Ribeira - KN027	} Intermediate-Ti type
□ Pitanga - KN047	
◆ Urubici - WW122	} High-Ti type

Fig. II-3-3-4 Spider diagrams of trace elements for lava samples
 (a) chondrites-normalized rare earth elements, (b) primitive mantle-normalized trace elements, (c) N-MORB-normalized trace elements, (d) E-MORB-normalized trace elements.

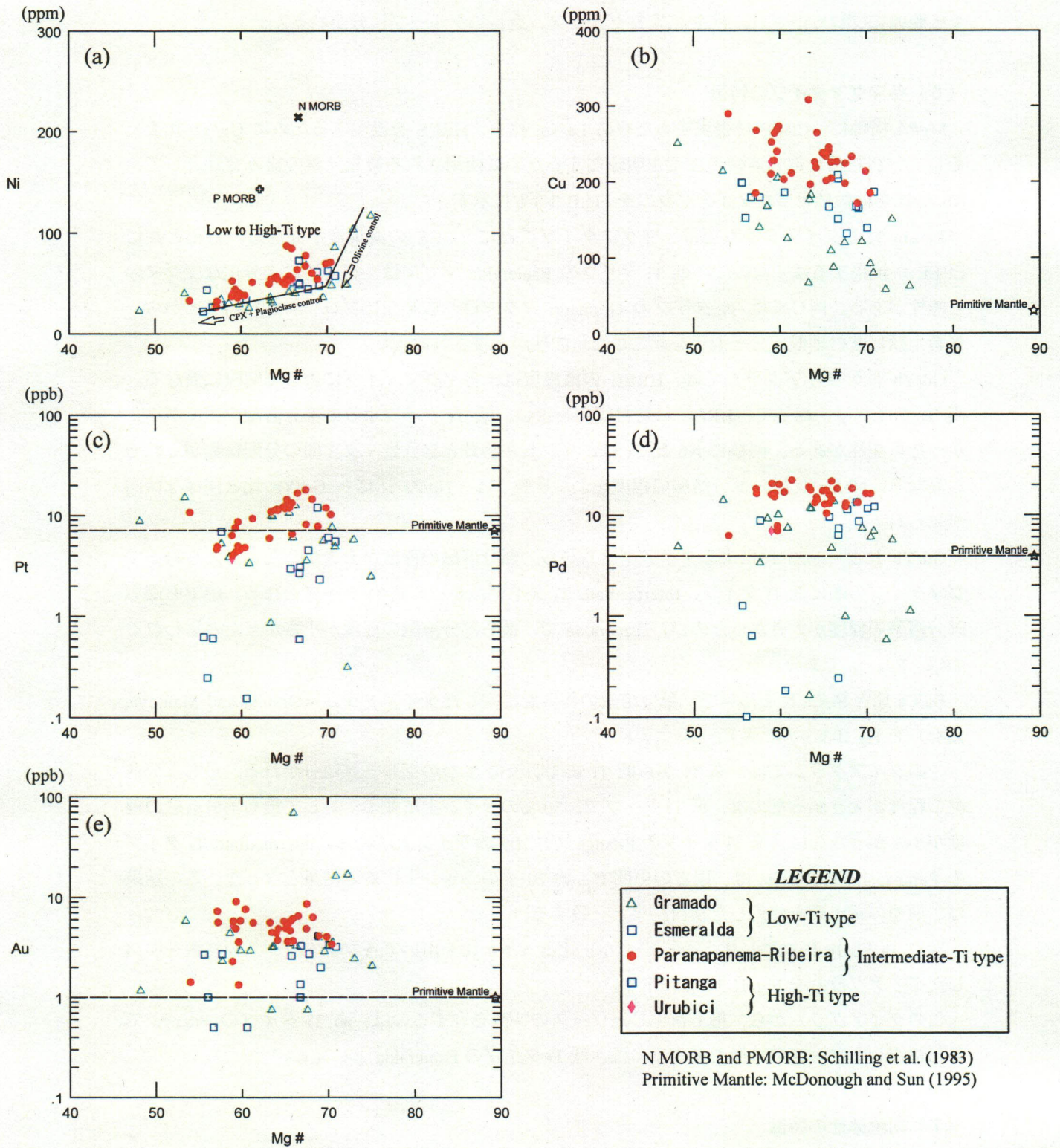


Fig. II-3-3-5 Selected variation diagrams of metallic elements for lava samples
(a) Mg# vs Ni, (b) Mg# vs Cu, (c) Mg# vs Pt, (d) Mg# vs Pd, (e) Mg# vs Au.

く広範囲にプロットされ、PGE に富むグループ、乏しいグループに分かれる。

(6) 各マグマタイプの特徴

Mg#を横軸に、LREE を表現するために La/Sm 比を、HREE を表現するために Gd/Yb 比を、そして分別結晶や部分溶融の程度を明瞭にするために使用される微量元素の組み合わせとして、Nb/Zr 比を縦軸にとったダイアグラムを Fig.II-3-3-6 に示す。

La/Sm 比のダイアグラムでは、マグマタイプごとに LREE の濃集度が異なる。分化と共に LREE が濃集するはずなので、低 Ti タイプの Esmeralda マグマは、相対的に未分化なマグマの可能性はある。同じく低 Ti タイプの Gramado マグマは、広範囲にプロットされることから、軽希土類に富む地殻成分と混染を起こした可能性が示唆される。

Gd/Yb 比のダイアグラムでは、HREE の濃集度は、各マグマタイプによって明瞭に異なる。高 Ti タイプは、総じて、HREE に富む傾向を示し、低 Ti タイプよりも部分溶融の程度が小さかった可能性がある。同様に Nb と Zr は、マントル物質と玄武岩マグマ間の分配係数がそれぞれ異なり、Nb/Zr 比は、部分溶融の程度をよく反映する。Nb/Zr 比にも Gd/Yb 比と同様な傾向が見られる。

Gd/Yb 比と Nb/Zr 比によるダイアグラムから、部分溶融の程度が大きかったと考えられるマグマタイプの順に低 Ti タイプ、Intermediate Ti タイプ、そして高 Ti タイプとなる。中でも最も部分溶融の程度が大きかったのは、Esmeralda で、最も部分溶融の程度が小さかったと思われるのは、Pitanga である。

Ba/Ca 比と Sr/Ca 比を用いて、部分溶融の程度を推定したダイアグラム (Onuma and Mantoya, 1984) を Fig.II-3-3-7 に示す。

このダイアグラムでは、高 Ti から低 Ti まで明瞭に 3 つのグループに分かれる。最も部分溶融の程度が大きかったのは、低 Ti タイプで、30 %のライン上に並ぶ、対して最も部分溶融の程度が小さかったのは、高 Ti タイプの Pitanga で、10%のライン上に並ぶ。Intermediate Ti タイプの Parapanema-Ribeira は、両者の中間で、約 20 %のライン上に並ぶ結果となった。この結果は、前述の希土類を使用した検討結果と一致する。

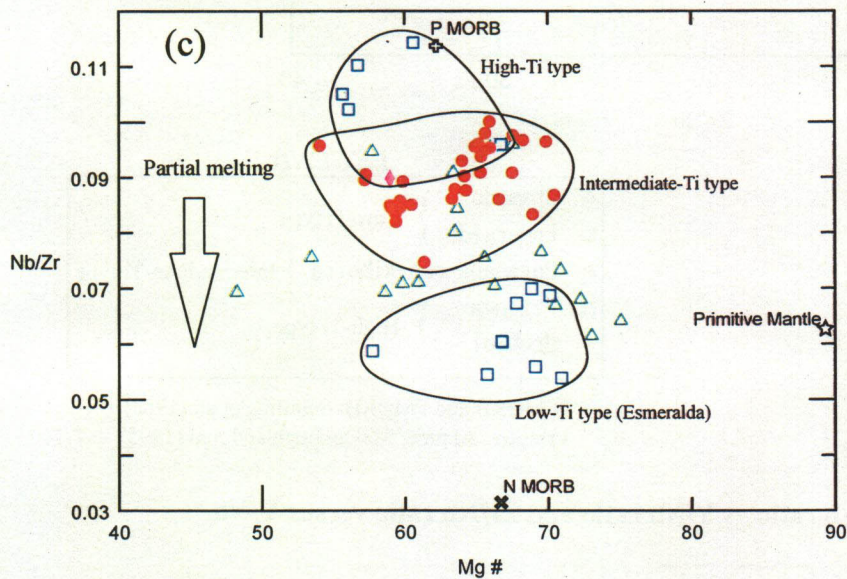
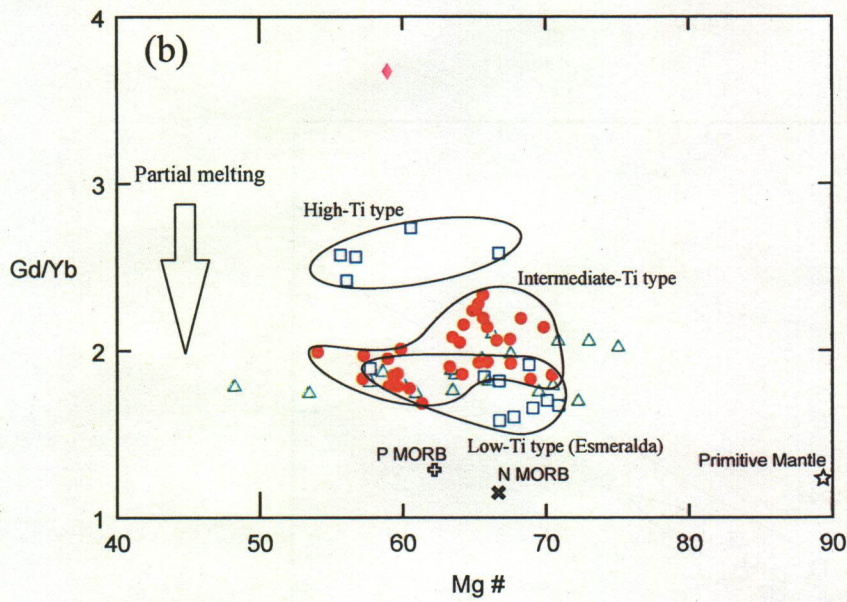
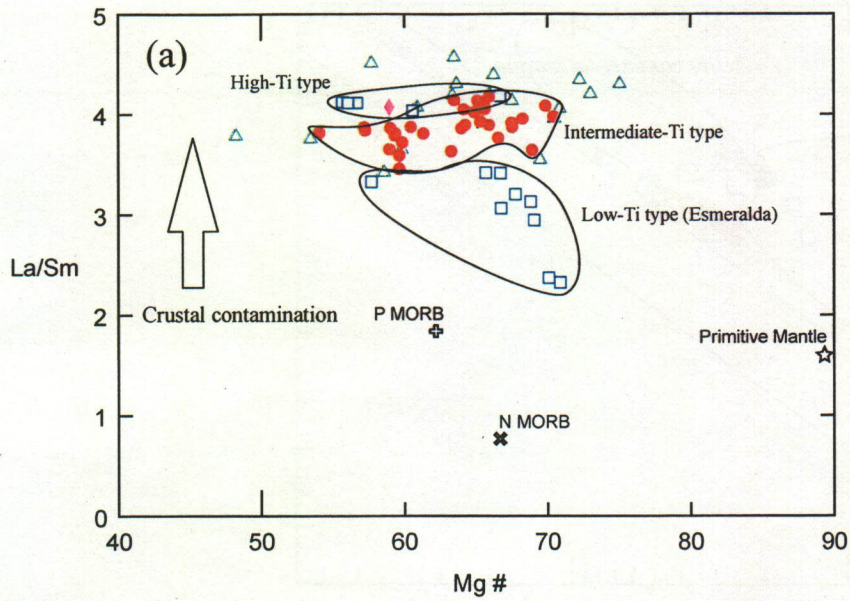
次に Ta/Yb 比と Th/Yb 比、そして Zr/Nb 比と Y/Nb 比を用いて各マグマソースの特徴を検討したダイアグラムを Fig. II-3-3-8 に示す。

このダイアグラムから、最も富化したソースの特徴を有するのは、高 Ti タイプの Pitanga で、最も枯渇したソースの特徴を有するのは、低 Ti タイプの Esmeralda といえる。

(7) 同位体比の特徴

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比と $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比によるダイアグラム、Mg#と $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比および $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比によるダイアグラムを Fig. II-3-3-9 に示す。

このダイアグラムでは、各マグマタイプは、大きく 2 つのグループに分かれる。1 つは、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が比較的 low、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比がやや高いグループ、そしてもう一つは、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が比較的高く、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比がやや低いグループである。前者は、高 Ti タイプの Urubici および

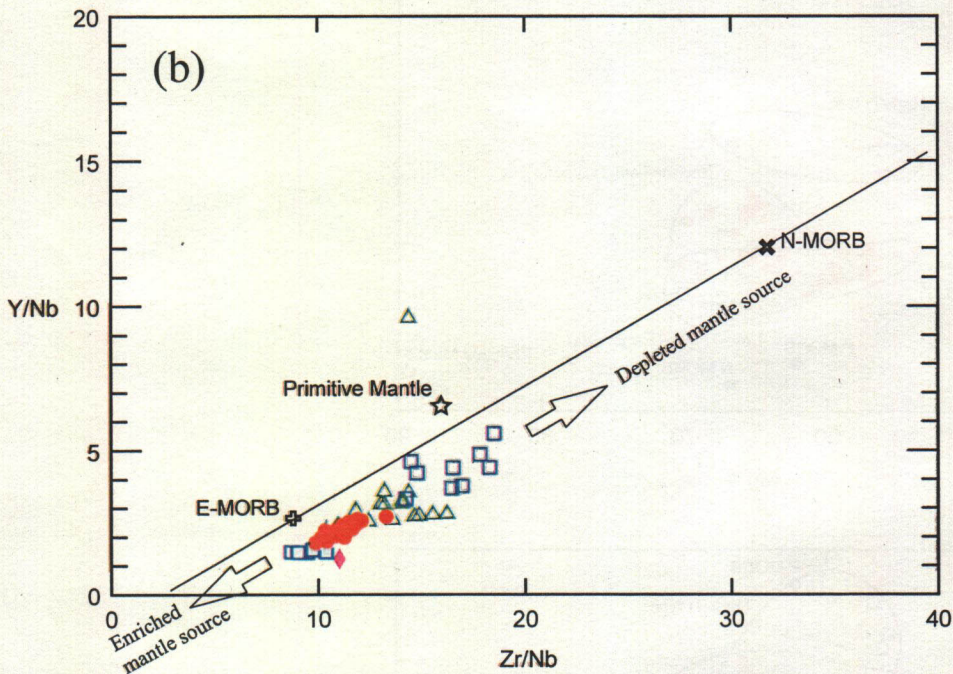
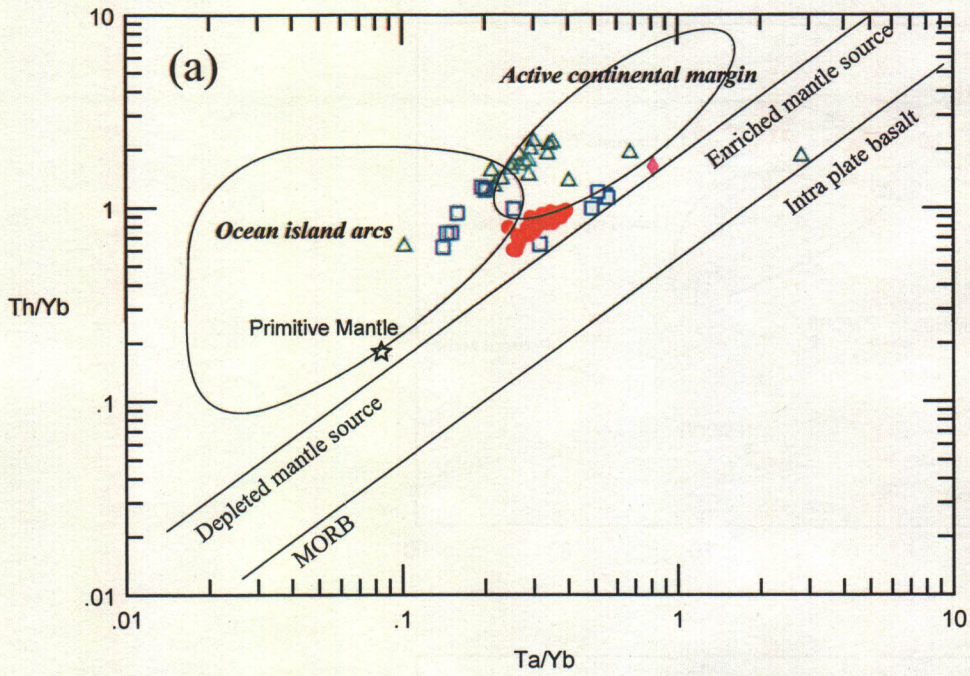


LEGEND

△	Gramado	} Low-Ti type
□	Esmeralda	
●	Parapanema-Ribeira	} Intermediate-Ti type
□	Pitanga	
◆	Urubici	} High-Ti type

N MORB and PMORB: Schilling et al. (1983)
 Primitive Mantle: McDonough and Sun (1995)

Fig. II-3-3-6 Plots of Mg# vs La/Sm ratio, Mg# vs Gd/Yb ratio and Mg# vs Nb/Zr ratio for lava samples

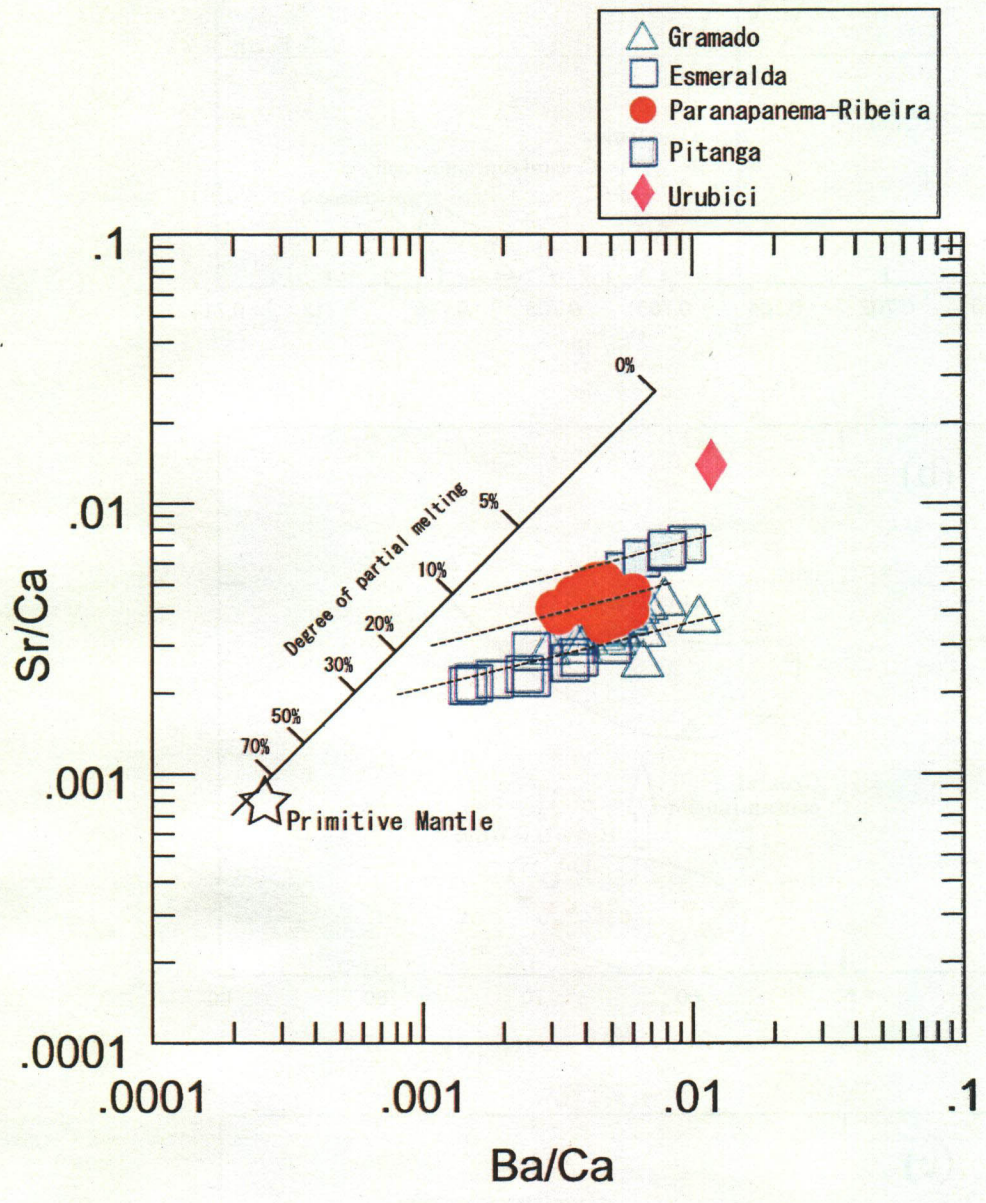


LEGEND

△	Gramado	} Low-Ti type
□	Esmeralda	
●	Paranapanema-Ribeira	} Intermediate-Ti type
□	Pitanga	
◆	Urubici	} High-Ti type

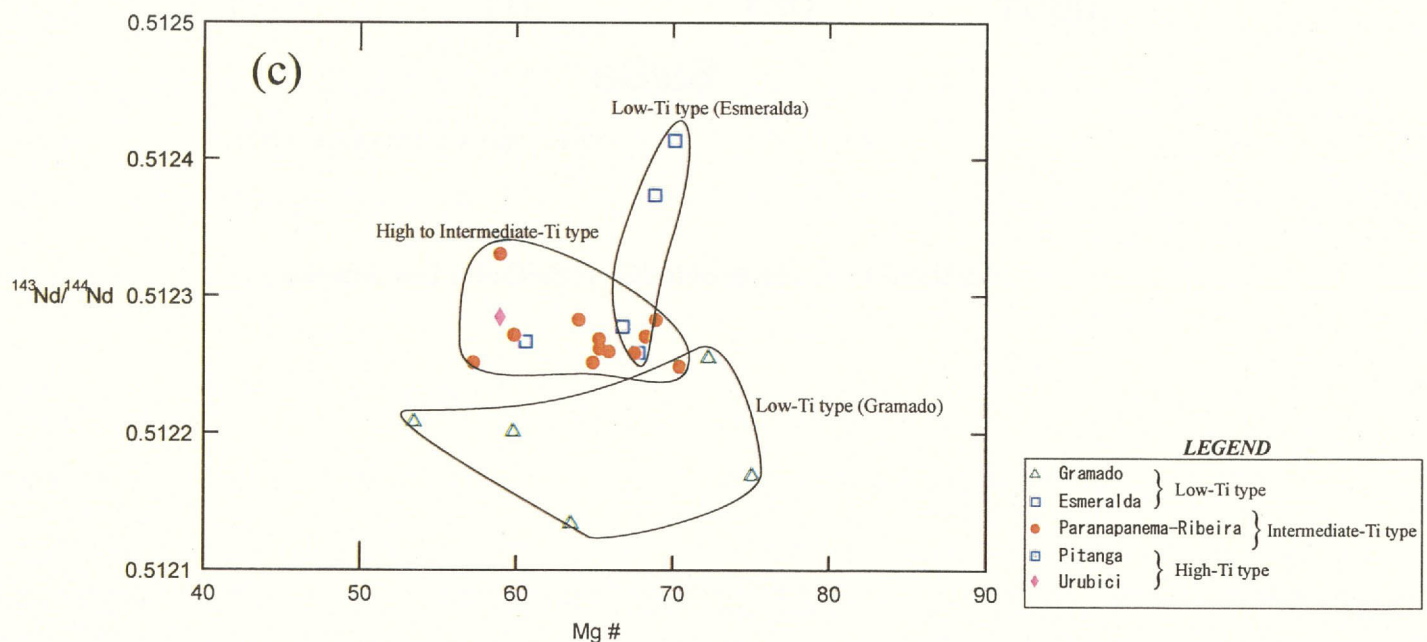
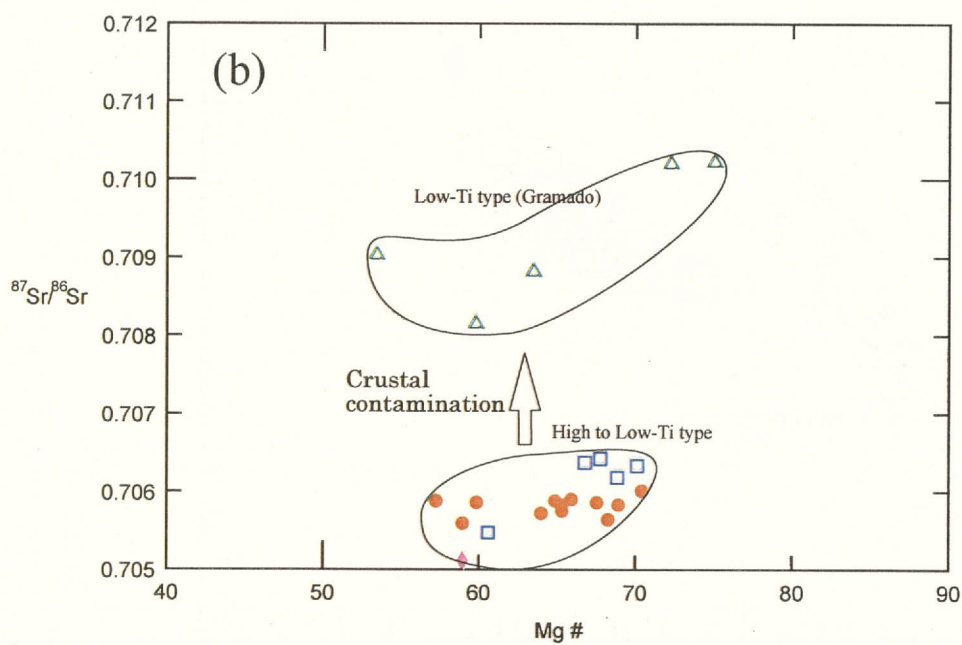
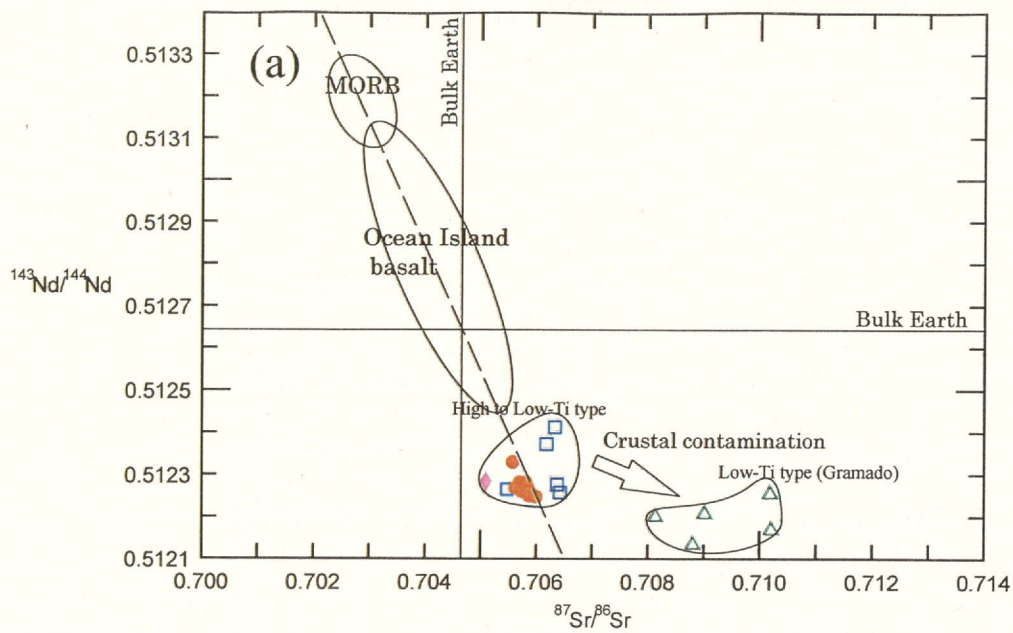
N MORB and PMORB: Schilling et al. (1983)
 Primitive Mantle: McDonough and Sun (1995)

Fig. II-3-3-7 Plots of Ta/Nb ratio vs Y/Nb ratio and Zr/Nb ratio versus Y/Nb ratio for lava samples



(From Onuma and Montoya, 1984)

Fig. II-3-3-8 Plots of Ba/Ca vs Sr/Ca for lava samples



LEGEND

△	Gramado	} Low-Ti type
□	Esmeralda	
●	Parapanema-Ribeira	} Intermediate-Ti type
■	Pitanga	
◆	Urubici	} High-Ti type

Fig. II-3-3-9 Plots of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio for lava samples
 (a) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, (b) Mg# vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, (c) Mg# vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$.

Pitanga、Intermediate Ti タイプの Paranapanema-Ribeira、そして低 Ti タイプの Esmeralda である。後者は、低 Ti タイプの Gramado である。

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の違いは、地殻物質の混染による影響が考えられ、Gramado のみが、他のマグマタイプと比べて、地殻の混染の影響を強く受けていると言える。これは、前述の微量元素による検討結果と一致する。

また、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比が最も高いのは、低 Ti タイプの Esmeralda である。これは、Esmeralda が最も未分化であることを示している可能性があり、微量元素の特徴を支持する。

(8) 地化学的特徴のまとめ

パラナ洪水玄武岩を形成したマグマは、低 Ti、Intermediate Ti および高 Ti の大きく 3 タイプのマグマに分類される。この 3 つのマグマタイプは、部分熔融の程度の違いにより説明できると考えられるが、マグマソースの違いによる可能性も無視できないため、今後、分析試料数を増やして検討していく必要がある。

低 Ti タイプの Esmeralda は、相対的に最も未分化である。同じく低 Ti タイプの Gramado は、大陸地殻の混染が、他のマグマタイプに比べて大きかったと考えられる。

Cu, Au, Pt, Pd に最も富むマグマタイプは、Intermediate Ti タイプの Paranapanema-Ribeira で、高 Ti タイプは相対的に乏しい特徴を示す。低 Ti タイプの Gramado は、Pt と Pd において、富むグループと乏しいグループの 2 つに分かれる。これは、地殻物質の混染による PGE の枯渇の影響を示している可能性がある。

3-3-2 洪水玄武岩の火山層序

世界の洪水玄武岩のなかで、パラナ洪水玄武岩 (Paraná Basalt) 分布域はその後の隆起運動を伴わなかったために、その地形は平坦で、南東端の Serra Geral 地域を除いて、地表で火山層序を観察できる機会にほとんど恵まれていない。

一方、パラナ洪水玄武岩の岩石化学成分が高 Ti および低い Ti に比較的明瞭に区分され、地理的にも分布が南北にほぼ分かれることから 1980 年代の終わりまではその解釈に向けた研究が殆どであった。1990 年代に入って世界的に洪水玄武岩の研究が盛んになり、Peate et al. (1992) はパラナベーズンで実施された石油探査ボーリング (主として Petrobras による) の Drill Cuttings を入手し、その系統的な化学分析結果からパラナ洪水玄武岩の火山層序 (volcano stratigraphy)、すなわち地化学層序 (chemical stratigraphy) の概要を発表した。その中で、主要化学成分とその比率を用いて判別基準を提案し、従来の多様な分類・命名を与えられてきた溶岩類を彼らの判別基準 (Table II-3-3-1) に従って分類・整理しなおした (Table II-3-3-3)。

Peate et al. (1992) は chemical stratigraphy を打ち立てた基礎になる試錐コアの化学分析値を一部しか発表していないので、判別式の妥当性を確実に検証できないが、我々が採取した試料での判別結果は 80 % 程度の確率で溶岩タイプを分類することが判明している。今後、層序区分の妥当性の検証と、層序判別精度の向上のためには、地表試料のみならず、より多くの試錐孔を対象とした 3 次元的な化学分析が必要である。また、化学分析には微量成分をも含めることが望まれる。

Fig. II-3-3-10 は Peate et al. (1992) のデータをもとにパラナベーズンの 8 本の試錐における溶岩タイプの分布を示したものである。この図において縦軸はほぼ 1.5 km であるが横軸は 8 本の試錐を結ぶ距離は約 700 km に及ぶことに注意されたい。すなわち、ベーズンの南縁にあたり、基盤が浅い南側では、共に低 Ti に区分される Gramado タイプおよび Esmeralda タイプの溶岩が北のベーズン方向に 400 から 500 km 流れている。また、その上位に位置し、600 km 以上にわたって追跡される Pitanga タイプおよび Parapanema タイプは高 Ti に区分され、パラナベーズンの中心を占め、その一部は南に逸流しているような分布を示す。

一方 Stewart et al. (1996) はパラナベーズン内の 4 本の試錐試料および地表試料の Ar-Ar 年代値を発表し、パラナ洪水玄武岩の活動期間が 10 Ma にわたるとした。また、彼らは年代値の 3 次元的な分布から、火成活動が北西部から南東部に向かって移動し、大西洋の発生に結びついたと結論づけている。

Fig. II-3-3-10 には Stewart et al. (1996) による試錐試料の年代値すべてを Peate et al. (1992) の層序区分に重ねて示してある。この図で見る限り年代値のばらつきが大きく、かつ分析数も十分とはいえない。Stewart et al. はこの点に関して玄武岩の分布が広大であるために、diachronous な (ある同一の地層が、化石による分帯 (時代分け) からみればいくつかの異なる時代に属すること) 性質をもつと述べている。

Table II-3-3. Nomenclature scheme for the Praná magma types, and their relationship to previous groups from the Praná and Etendeka literature (Peate et al., 1992)

Bsalt magma types		
"Low-Ti"	<i>Gramado</i>	LTiB ¹ , LTi(S) ² , LPT ³ , sector II ⁵ , Tafelberg ⁹ , Albin ⁹
	<i>Esmeralda</i>	LTiB ¹ , LTP upper ⁴ , sector I ⁵
	<i>Ribeira</i>	LTiB ¹ , LTi(N) ² , group A ⁶
"High-Ti"	<i>Urubici</i>	HTiB ¹ , HTi(S) ² , HPT ³ , Khumib ¹⁰
	<i>Pitanga</i>	HTiB ¹ , HTi(N) ² , HPT ³ ,
	<i>Pranápanema</i>	HTiB ¹ , IPT ³ , ITi ⁷ , sector III ⁵
Rhyolite magma type		
<i>Palmas</i>		PAV ⁸ , LPT rhyolite ³ , Tafelberg and Springbok quartz latite ⁹ ,
	new subgroups:	Santa Maria, Caxias do Sul
<i>Chapecó</i>		CAV ⁸ , HPT rhyolite ³ , Sarusas quartz latite ¹⁰
	new subgroups:	Guarapuava, Ourihos (Paraná); Sarusas (Etendeka)

Sources: ¹ Bellieni et al. (1984a), ² Marques et al. (1988), ³ Hawkesworth et al. (1988), ⁴ Peates et al. (1988b), ⁵ Fodor et al. (1985), ⁶ Petrini et al. (1987), ⁷ Mantovani et al. (1988), ⁸ Bellieni et al. (1986), ⁹ Erlank et al. (1984), ¹⁰ Duncan et al. (1988)

しかし、Deccan トラップや Columbia River 玄武岩にもみられるように、1つの溶岩タイプが 500 km 以上にわたって追跡されることが洪水玄武岩の特徴である。したがって、火山層序と年代値との関係に関する議論、噴出量の年代による変化などの議論には今後のデータの集積と既存データの誤差の検討がひつようであろう。たとえば年代値の測定誤差に限らず、試料自体の変質状況も当然検討がなされるべきであろう。

Steve Self and Mike Rampino (2000)による洪水玄武岩の噴出年代と地質層序学的境界および主要な生物上の事変を Table II-3-3-4 に示した。この表から洪水玄武岩の多くはその主要な活動期間は 1 Ma あるいはそれ以内であることを示唆している。ただし、Madagascar (88.1±1、噴出期間～6 Ma?) および Serra Geral/ Etendeka (132±1 Ma、噴出期間～1 or ～5 Ma?) のみが噴出期間に疑問符がつけられている。

生物上の絶滅事変は少なくとも3つのケース（デカン、ニューアークおよびシベリアの洪水玄武岩）ではその年代が完全に一致し、その他のケースでも相関性があると見るべきであろう。

我々の今回の調査でも地表試料の Ar-Ar 年代測定を行っているが、第2年度で測定が望まれる試錐試料の年代値とあわせて、その評価をおこなう予定である。したがって、各タイプの溶岩の噴出量や噴出速度（effusive/explosion ratio）の推定は後日実施されるであろう。

Table II-3-3-4 Flood Basalt Provinces of the last 250 Ma and the estimated ages of stratigraphic boundaries involving significant biotic changes

Flood Basalt Province	Age (Ma)	Volume (10^6 km^3)	Paleolatitude	Duration (Ma)	Stratigraphic Boundary	Age
Columbia River	16 ± 1	0.25	45°N	~ 1 (for 90%)	Early/Mid-Miocene	16.4
Ethiopia	31 ± 1	~ 1.0	10°N	~ 1	Early/Late Oligocene	30
North Atlantic	57 ± 1	>1.0	65°N	~ 1	Paleocene/Eocene	54.8
					(Thanetian/Selandian)	57.9
Deccan	66 ± 1	>2.0	20°S	~ 1	Cretaceous/Tertiary	65.0 ± 0.1
Madagascar	88 ± 1	?	45°S	~ 6?	Cenomanian/Turonian	93.5 ± 0.2
					(Turonian/Coniacian)	(89 ± 0.5)
Rajmahal	116 ± 1	?	50°S	~ 2	Aptian/Albian	112.2 ± 1.1
Serra Geral/ Etendeka	132 ± 1	>1.0	40°S	~ 1 or ~ 5?	Jurassic/Cretaceous	142 ± 2.6
					(Hauterivian/Valangini)	(132 ± 1.9)
Antarctica	176 ± 1	>0.5	50-6°S	~ 1?	(Aalenian/Bajocian)	(176.5 ± 4)
Karoo	183 ± 1	>2.0	45°S	0.5 - 1	Early/Middle Jurassic	180.1 ± 4
Newark	201 ± 1	>1.0?	30°N	~ 0.6	Triassic/Jurassic	205.7 ± 4
Siberian	249 ± 1	>2.0	45°N?	~ 1	Permian/Triassic	248.2 ± 4.8

Steve Self and Mike Rampino(2000)

<http://www.geolsoc.org.uk/template.cfm?name=fbasalts>