インド亜大陸のラジマールヒルとマハナディ地溝帯における古地磁気研究と $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代—ゴンドワナ大陸の復元—

Paleomagnetic study with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Rajmahal hills and Mahanadi graben in India
—reconstruction of Gondwanaland—

Abstract

酒井英男* 船木 實**
佐藤友紀* 瀧上 豊***
酒井治孝**** 広岡公夫*

Hideo Sakai*, Minoru Funaki**,
Tomonori Sato*, Yutaka Takigami***
Harutaka Sakai**** and Kimio Hirooka*

1996年9月2日受付.

1997年1月27日受理.

* 富山大学理学部地球科学科.
Department of Earth Sciences, Faculty of
Science, Toyama University

** 国立極地研究所.
National Institute of Polar Research

*** 関東学園大学.
Kanto Gakuen University

**** 九州大学大学院比較社会文化研究科.
Graduate School of Social and Cultural
Studies, Kyushu University

Paleomagnetic study was made on basaltic rocks of the Rajmahal trap, and granite and charnokite of the Mahanadi graben in India.

The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the Rajmahal trap was determined to be 125-130 Ma which is older than the formerly assigned age of 100-117 Ma. The comparison of the VGP position of the Rajmahal trap with the APWP of India as a part of Gondwanaland, supports the age of 125-130 Ma for the trap. Previous study suggests that the Kerguelen Plateau, situated between India and Antarctica was formed during 100-115 Ma. The paleomagnetic inclination data of the Kerguelen Plateau were examined by the VGP position of India between 130 to 110 Ma. The results indicate that the Plateau is also possibly magnetized (formed) around 125-130 Ma. The analysis of the seafloor magnetic lineaments shows that break up of the East Gondwanaland occurred around 130 Ma. This study indicates that the Rajmahal trap and Kerguelen Plateau were formed in similar age, connecting with break up of the East Gondwanaland.

The VGP position determined from the Mahanadi site with an $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of 544 Ma is concordant with VGPs obtained from the Cambrian rocks of Pakistan and Antarctica. These similar VGPs should be the VGP of Gondwanaland during Early Cambrian trace.

Key words : Rajmahal trap, Mahanadi graben, APWP of Gondwanaland, paleomagnetic study, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating

はじめに

インド亜大陸の北上, アジア大陸との衝突, それに伴うヒマラヤの隆起という一連の歴史を考える際に, ゴンドワナ大陸の主要部であったインドの位置の変遷および分裂の過程についてのデータは重要であるが, まだ十分に解明されていない. 本稿ではインド亜大陸から新たに得た古地磁気データと $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代を用いて, ゴンドワナ大陸におけるインドの位置と分裂の過程を, 特に南極との関係から検討したので, その結果を報告する.

ゴンドワナ大陸の復元モデルには, Tarling (1971), Du Toit (1937), Smith and Hallam (1970), Lawver and Scotese (1987) の代表的な4種類がある. Thompson and Clark (1982) によれば, 古地磁気学的には, Smith and Hallam (1970) のモデルが最近では受け入れられる傾向にある. 4種類のモデルでは, インド東部が東南極と接続する復元が共通して示されている. 200 Ma より若い時代については, 最近, インド洋の縞状磁気異常の解析も取り入れた, さ

らに詳しい研究 (Besse and Courtillot, 1991; Veevers et al., 1991; Muller et al., 1993; Storey, 1995 など) が行われており, ゴンドワナの分裂の時期と過程が議論されている.

近年, 東南極の地質学研究が進み, クイーンモッドランド東部からエンダービーランドに続く海岸地域には先カンブリア時代の岩石が広く分布し, ほとんどの地域はパンアフリカン変動末期の変成作用を受けていることが判明した. Shiraishi et al. (1994) は, 同変成作用が520~550 Ma に起きたことを報告している. 一方, ベンガル湾沿いのインド南部の先カンブリア代の岩石にもパンアフリカン末期の変成作用が認められ, 東南極との接続が指摘されている.

ベンガル湾と東南極の対比は, マハナディ地溝帯と南極ランバート地溝帯など地溝帯のつながりという観点からも検討されている. ODP Leg119 ではランバート地溝帯につながるプリッツ湾の掘削から, マハナディ地溝帯のペルム系に対比できるペルム紀の赤色砂岩層が出現し (Turner, 1991), 地溝帯の接続は海洋底のデータからも示唆されている. Fig. 1 は Funaki et al. (1990) に示された図をもとに, プリッツ湾に

Fig. 1. Reconstruction of Gondwanaland. In the detailed view, the sedimentary basin formed by the Mahanadi graben is situated opposite Prydz Bay. Modified from Funaki et al. (1990).

における ODP 掘削地点を加筆しており (Keating and Sakai, 1991), 上図に示すゴンドワナの復元は Yoshida and Kizaki (1983) を参照したものである。

従来の古地磁気学的研究では, 調査が行われて東ゴンドワナの各地域を共通して議論できる (岩石が得られる) 時代は大きく 2 つに限られる。それはパンアフリカン造山運動の時代および, ゴンドワナ分裂直前のジュラ紀後期から白亜紀初頭にかけての時代である。

東南極の古地磁気は, パンアフリカン変動末期の変成時に再磁化した岩石およびジュラ紀のフェラードライトから報告されている (Funaki and Saito, 1992)。インド亜大陸のゴンドワナに関連する古地磁気については, 絶対年代が得られ, 磁化の信頼性も十分に吟味されたデータは非常に少ない。

東ゴンドワナにおける各大陸の位置関係の理解のためにインドの古地磁気データが望まれており, 文部省国際学術調査“インド半島マハナディ地溝帯およびゴダバリ地溝帯の地史とプレートテクトニクス研究” (代表者: 広岡公夫) がインド地質調査所との共同研究として 1991 年から 3 年間行われた。本研究では, 1991 年と 1992 年の調査のうち, カルカタ北方のラジマールヒルおよびベンガル湾岸沿いのマハナディ地溝帯で採取した岩石から得た古地磁気と $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代の

Fig. 2. Sampling location at Mahanadi graben and Rajmahal hills area.

Fig. 3. Site-mean paleomagnetic directions of 8 sandstone sampling sites plotted by equal-area net projection.

Table 1. Formation, rock, age and magnetic mineral at the 14 sites used for paleomagnetic analysis.

site	formation or location	rock	age	magnetic mineral	
(Mahanadi graben)					
38	East Ghat Form.	granite	Cambrian	Mt	C
39	East Ghat Form.	charnokite	Cambrian	Mt	C
106	Talchir Form.	sandstone	L-Permian	Imt, Hmt	A
115	Dhadh Pathar Form.	sandstone	Proterozoic	Hmt	A
124	Jotpara Form.	sandstone	M-Permian	Hmt	A
(Rajmahal hills)					
80	Rajmahal Trap 3rd Flow	basalt	Cretaceous	Mt, Imt, Fs	B
82	Rajmahal Trap 2nd Flow	basalt	Cretaceous	Mt, Imt, Fs	B
84	Dubrajpur Form.	sandstone	Cretaceous	Hmt	A
88	Barakar Form.	sandstone	Permian	Hmt	A
93	Talchir Form.	sandstone	L-Permian	Hmt	A
94	Dubrajpur Form.	sandstone	Jurassic	Hmt	A
97	Barakar Form.	sandstone	Permian	Hmt	A
101	Rajmahal Trap 1st Flow	basalt	Jurassic	Mt, Imt, Fs	B
104	Rajmahal Trap 2nd Flow	basalt	Jurassic	Mt, Imt, Fs	B

site=sampling site; age=estimated age

Mt=Magnetite; Hmt=Hematite; Imt=Ilmenite; Fs=Iron Sulphide

M=Middle; L=Lower; Paleomagnetic data of the sites assigned to A, B, C
in right column are shown in Table 2, Table 3 and Table 4, respectively.

調査結果を報告し、従来の研究との対比から東ゴンドワナ大陸におけるインドの位置とその変遷を考察する。

古地磁気調査

Fig. 2 に示す、ビハール州のラジマールヒルとマハナディ川流域のマハナディ地溝帯において、先カンブリア代、古生代、中生代の岩石の調査を行い、32 サイトの露頭において古地磁気試料を採集した。

ラジマールヒルの地質は、ラジマールトラップと呼ばれる450~600 m 厚の溶岩流と15以上の介在する地層から構成される。トラップはおもに長石とピジョン輝石の班晶をもつ玄武岩や粗粒玄武岩からなる。地層は45以上の属の植物化石を含んでいる。こうした植物群から、ラジマール累層はジュラ紀後期から白亜紀前期の地層と考えられている。

ジュラ紀のゴンドワナ分裂以前に形成された地溝帯が、いくつかの地域から報告されている。その典型的な一つにマハナディ地溝帯がある。同地溝帯には、石炭紀から三畳紀の砂岩層を主体にした厚いゴンドワナ堆積岩が認められる。また周辺には先カンブリア代の片麻岩が広く分布している。

古地磁気試料の採取は主としてエンジンドリルを用いて行い、一部試料はハンドサンプリングで採取した。磁化測定にはスピナー磁力計(夏原技研 SMM85)とスクイッド磁力計(CCL-GM 401 および ScT-C110)を用いた。

交流消磁および熱消磁実験を行い、磁化の安定性を検討した。Table 1 には、消磁後の磁化方位の統計処理により、方位の集中度を示す95%の信頼円角(α_{95})が10°以内であった

14 サイトの、地層名、岩石、年代、金属顕微鏡で観察された磁性鉱物を示している。

得られた14サイトの磁化方位は3つのグループに分けられる。現在の地磁気方位に近い8サイト(Table 1の右コラムでAと記したサイト)、西偏の深い上向きの伏角を示すラジマールヒルの玄武岩(ラジマールトラップ)の4サイト(Table 1のB)および西偏で浅い下向きの伏角を示すカンブリア紀のマハナディ地溝帯の2サイト(Table 1のC)である。

現在の地磁気方位に近い磁化は、ペルム紀~ジュラ紀の7サイトの砂岩層および原生代の1サイトの砂岩層から得られたものである。Fig. 3 は、これら各サイトの交流消磁後の平均磁化方位と α_{95} の範囲を等積ネットにより、下半球投影している。実線の信頼円は下向きの磁化方位を、波線の信頼円の場合は上向きの磁化を示す。Table 2 には、平均磁化方位と α_{95} の値、磁化強度を示している。磁化方位はほぼ北で下向きの伏角を示しており、地軸双極子から推定される調査地域の磁化方位に近い。この結果からみて、これらの岩石はごく最近に再磁化している可能性が高いので、本稿ではこれらのサイトについてこれ以上の議論は行わない。

1. ラジマールトラップの古地磁気と $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代

ラジマールトラップは1st flow から3rd flow までの3ステージのフローユニットからなり、各ステージから試料を採集して古地磁気調査を実施した。熱消磁と交流消磁実験の結果、サイト80, 82, 101, 104の試料から安定な磁化方位が得られた。Fig. 4 に、消磁実験の例をザイダーベルト図

Table 2. Site-mean paleomagnetic data of sandstone sampling sites.

site	N	Demag.	I (°)	D (°)	α_{95} (°)	Jn (Am ² /kg)
84	18	15mT	34.7	5.4	5.1	6.7×10^{-6}
88	12	15mT	33.4	2.1	8.8	5.4×10^{-6}
93	11	20mT	55.8	10.9	7.3	8.9×10^{-6}
94	24	20mT	30.2	1.1	2.9	5.1×10^{-5}
97	14	25mT	37.7	1.7	9.2	2.5×10^{-5}
106	18	25mT	48.6	6.1	9.5	3.2×10^{-6}
115	7	15mT	33.7	352.3	9.0	2.9×10^{-6}
124	15	15mT	45.0	353.3	5.8	4.8×10^{-5}

N=Number of samples; Demag.=demagnetization level

I,D=inclination and declination; Jn=intensity of NRM;

 α_{95} =radius of 95% confidence circle. **Fig. 4.** Typical results of progressive demagnetization experiment for the samples of Rajmahal trap. THD : thermal demagnetization. AFD : alternating field demagnetization.

Fig. 5. Thermomagnetic curve of Rajmahal trap.

(Zijderveld, 1967) で表わしている。図中の黒丸は磁化方位の水平面への投影を、白丸は鉛直面への投影を示している。また、振動型磁力計による熱磁気分析を、磁場 (1.0 T, T: テスラ), 真空度 ($4.2 \sim 7.4 \times 10^{-3}$ Pa) の条件で行った。Fig. 5 の 3 試料の分析結果で認められるように、加熱と冷却過程が可逆的に対応しており、キュリー温度からトラップに含まれる磁性鉱物はチタノマグネタイトと示唆された。各サイトについて数試料の段階熱消磁実験の結果をもとに、最適消磁温度段階を求めて他試料の消磁を行い、各サイトの信頼できる磁化方位を求めた (Table 3)。Fig. 6 に、4 サイトの磁化の平均方位と α_{95} の範囲を等積ネットの下半球投影で示した。磁化は西偏で伏角 $-63^\circ \sim -65^\circ$ の方向に集中している。

従来、ラジマールトラップの放射性年代として、McDougal and McElhinny (1970) が報告した 100~105 Ma の K-Ar 年代値が用いられていたが、最近 Bakshi (1995) は

Fig. 6. Site-mean paleomagnetic directions of 4 sites of Rajmahal trap.

110~117 Ma の年代の可能性を指摘した。

本研究で採取したラジマールトラップの試料について、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代を実施した。Fig. 7 に、3 試料について得た測定結果 (Age spectrum) を示している。各結果を検討すると、上図のステージ 1 試料では、温度範囲 $700^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ においてプラトー的部分があり、 125 ± 3 Ma の年代が求められる。中図のステージ 2 試料では、 $700^\circ\text{C} \sim 1200^\circ\text{C}$ の温度範囲で、130 Ma 近傍の年代が推定される。ステージ 3 試料は過剰 Ar があって誤差が大きいが、他の 2 試料で示唆された値は Age spectrum に認められる。以上の結果から、本論文では 125~130 Ma をラジマールトラップの $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代として採用した。

2. マハナディ地溝帯のカンブリア紀の岩石の古地磁気と $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代

Fig. 8 A と 8 B は、マハナディ地溝帯で採集されたカンブリア紀の花崗岩 (Site 38) とチャーノカイト (Site 39) の熱消磁実験の例を、ザイダーベルト図に示している。両サイトの試料はほとんどが安定な一成分の磁化を示した。Fig. 8 C は、チャーノカイト試料について、ラジマールトラップと同じ条件で行った熱磁気分析の結果を示す。熱消磁実験と熱磁気分析から含まれる磁性鉱物はマグネタイトと考えられ、顕微鏡観察の結果とも矛盾しない。花崗岩とチャーノカイトの熱消磁から得た安定な磁化方位を Table 4 にまとめている。両サイトの磁化方位は、Fig. 9 の等積ネットに下半球投影で表わしたように、西偏で浅い伏角の一致した方位を示した。地質調査から両サイトは同時代の露頭と考えられている。花崗岩の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定から、Fig. 10 に示す Age spectrum が得られ、 $840^\circ\text{C} \sim 1500^\circ\text{C}$ のプラトー的な温度範囲で、 544 ± 6 Ma の年代値が求められた (Takigami et al., 1995)。

Fig. 7. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectrum for the sample of Rajmahal trap.

考 察

1. ラジマールトラップの磁化方位とジュラ紀・白亜紀における古地理

ラジマールトラップの古地磁気研究として従来, Klootwijk (1971) 等の調査が報告されている。本研究で3ステージのフローユニットから得た平均の磁化方位と従来の結

果 (Piper, 1990 のデータベースを引用, ユニット番号は不明) は, Fig. 11 に示すように調和的である。

Fig. 12 では, これらの結果を合わせて計算したラジマールトラップの仮想磁極 (VGP: virtual geomagnetic pole) を, Besse and Courtillot (1991) による白亜紀以降のインドの極移動 (APWP: Apparent Polar Wander Path) と比較した。インドの APWP は, 縞状磁気異常の解析とアフリカの古地磁気データを用いて求められている。本研究でラジマールトラップから得た VGP は, 同トラップの年代と考えられていた 100~117 Ma に対応する APWP の位置とは有意にずれており, 120 Ma の APWP をさかのぼった位置と調和するようにみえる。ラジマールトラップの VGP と APWP の不一致は, Besse and Courtillot (1991) も示唆していた。古地磁気学的な検討では, ラジマールトラップの年代は, 従来報告された年代より古く, 本研究で得た 125~130 Ma が妥当であることを示している。

Smith and Hallam (1970) は Gondwana 大陸に属する各大陸の回転極と回転角を計算している。彼らによる, インドの南極に対する回転極 ($1^\circ\text{N}, 7.7^\circ\text{E}$) と回転角 ($\omega = -88.9^\circ$) を用いてラジマールトラップの回転後の VGP (S 極) を求めた (Fig. 13 A)。同図には, Thompson and Clark (1982) による Gondwana の APWP のマスターカーブから得た, 南極の 550 Ma から 160 Ma の期間における APWP も示している。

ラジマールトラップの VGP は APWP の 160 Ma の位置から外挿される位置として調和的であり, これはラジマールトラップの 125~130 Ma の形成時にインドは東 Gondwana として存在したことを示唆する。また縞状磁気異常の解析から南極プレートとインドプレートは, 130 Ma 頃に分裂したと考えられる (Veevers et al., 1991)。以上のことは, ラジマールトラップが Gondwana の分裂前後に形成されたことを示し, 当時の貴重な噴出物として同トラップを位置づけることができる。

南極とインドの間に位置するケルゲレン海台の ODP 738 地点 (水深 2,263 m) では, 上部白亜系チューロニアン階の石灰岩層の下位から玄武岩が掘削された。玄武岩の K-Ar 年代は 100~115 Ma (Schlich, Wise et al., 1989) と得られ, 浅海で形成された玄武岩の存在は, 海台南端部が 1 億年間で 2,000 m 以上沈降したことを示している。石灰岩層の磁化 (Sakai et al., 1990) は南緯 53° の古緯度に対応し, 玄武岩の信頼度の高い 3 サイトから求められた古緯度は, それぞれ南緯 $33^\circ, 43^\circ, 45^\circ$ であった (Inokuchi and Heider, 1992)。玄武岩の古緯度から計算された余緯度の平均値 49.5° を用いて, 南極を固定する座標系からケルゲレン海台の古地理を考えた。

Fig. 13 B には, Besse and Courtillot (1991) によるインドの 110 Ma と 120 Ma の VGP, および本研究による 125~130 Ma の VGP を Smith and Hallam (1970) のモデルで変換し, 南極からみた VGP を示している。Veevers et al. (1991) などの最近の Gondwana 復元の研究から, 130 Ma 頃に始まるインドと南極の分裂は, 118 Ma においても両大陸の距離

Table 3. Paleomagnetic data of Rajmahal trap.

Site	stage	N	Demag.	I (°)	D (°)	α_{95} (°)	J_n (Am ² /kg)	
80	3rd	25	25mT	-63.6	294.5	2.2	2.4×10^{-3}	this study
82	2nd	27	20mT	-65.0	319.5	1.6	8.7×10^{-4}	this study
101	1st	17	20mT	-63.5	288.0	2.3	2.1×10^{-3}	this study
104	2nd	11	350°C	-64.8	301.4	3.1	1.3×10^{-3}	this study
(Average 4sites)				-64.7	300.5	6.7		
				-65	316	3		Piper(1990)
(Average 5sites)				-65	304	6		

VGP N-pole (PLat; 3°N, PLong; 303°)

VGP S-pole after rotation by the model of Smith and Hallam(1970)

(PLat; 66°S, PLong; 191°)

Fig. 8. Typical results of progressive thermal demagnetization of (A) granite and (B) charnokite of Mahanadi graben. (C) thermomagnetic curve of charnokite.

は500 km程度(緯度で4°)であり、急速な分裂は100 Ma以降に起きたと考えられている。つまり Fig. 13 B の操作で Gondwana 分裂に伴う VGP の位置の違いは数度と考えられる。南極に変換した 110 Ma, 120 Ma の VGP を中心に、ケルゲレン海台で得た余緯度を半径とした曲線は、現在のケルゲレン海台の位置に良く対応している。すなわち、古地磁気学的に海台は、110~120 Ma に磁化を獲得したとして矛盾は無く、Inokuchi and Heider (1992) が示唆するようにケルゲレン海台の形成以降、南極と海台の間に相対運動が無いとの解釈も可能である。この場合、ケルゲレン海台はインドと南極が分裂を始めてから 10~20 Ma ほど後に形成されたことになる。

また別の解釈として、Fig. 13 B をみると、ケルゲレン海台の古緯度はラジマールトラップの 125~130 Ma の VGP を中心とする曲線の位置としても矛盾は無い。この場合には、海台の玄武岩は東 Gondwana の分裂からそれほど時間を経ないで形成されたことになる。ケルゲレン海台はホットスポットとして固定され、この後、インドの北上が生じたとの考えも可能である。

従来、ケルゲレン海台とラジマールトラップの形成は 100~115 Ma の同時事象である可能性が示唆されていたが、本研究の古地磁気と年代測定から、この説は受け入れられず、少なくともラジマールトラップの活動は、より古い時代の、Gondwana 大陸の分裂にも大きく関与した南インド洋の重要な鍵となる事象であることを示唆している。

2. マハナディ地溝帯のカンブリア紀の古地磁気と5億年前の Gondwana

マハナディ地溝帯において、544 Ma の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代を示す花崗岩とチャノカイトから古地磁気データが得られた。同時代の古地磁気データは従来インドでは報告がない。そこで、磁化方位から VGP を計算した後、Smith and Hallam (1970) のモデルにより南極に対して回転したマハナディ地溝帯の VGP を求めて、Piper (1990) のまとめにあるカンブリア紀前期と中期のパキスタンの砂岩から得られた VGP (Table 4, 構造補正後の磁化方位を使用) と比較した。パキスタンの古地磁気調査は Wensink (1972) および McElhinny (1970) による。Fig. 14 B に示すように、両地域から得た VGP (S 極) は、東経 20°~30°で浅い北緯の位置と

Table 4. Paleomagnetic data of the Cambrian sites from Mahanadi graben and data from Pakistan.

Site	Rock	N	Demag. (° C)	I (°)	D (°)	α 95 (°)	Jn(Am ² /kg)	VGP1		VGP2	
								pLat	pLon	pLat	pLon
<Mahanadi graben>											
38	granite	6	340	32.7	286.6	8.8	4.7x10 ⁻⁵	20.6° N	3.9°	4.9° N	27.2°
39	charnokite	8	310	33.8	294.5	9.7	6.1x10 ⁻⁵	28.1° N	3.1°	5.5° N	34.7°
<Pakistan>											
				VGP1		VGP2					
				α 95 (°)	pLat	pLon	pLat				
Camb. L	sandstone	16		26° N	346°	21° N	34°				
Camb. M	sandstone	5		28° N	346°	21° N	36°				

VGP1: ordinary VGP

VGP2: VGP(S-pole) after rotation by Smith and Hallam(1970)

Fig. 9. Site-mean paleomagnetic direction of Cambrian charnokite and granite sites at Mahanadi graben.

して調和的である。

Fig. 14 A は, Thompson and Clark (1982) による Gondwana の APWP を Smith and Hallam (1970) のモデルにより南極に対して回転した APWP と, 南極のカンブリア紀の岩石から得た VGP を示している。この APWP は, アフリカの APWP を基に, 各大陸の VGP をできるだけ符合するように併せている。データ数も多い Gondwana 分裂前頃の復元は, 他研究者の復元図と調和的であるが, 同論文でも示唆されているように, 400 Ma より古い時代では利用した VGP の個数は少なく年代の誤差も大きいと考えられる。

Fig. 14 A に示されている, 南極のパナフリカン変動末期の VGP (東偏 20°で南緯 10°の近傍) は, クイーンモッドランド東部からエンダービーランドにかかる地域から求められた (Funaki and Saito, 1992)。同地域は, 従来 420~520 Ma の年代が推定されていたが, 最近, リュッツホルム湾において Shrimp によるジルコン U-Pb 法の研究は, 520~550 Ma の年代値を示した (Shiraishi et al., 1994)。

ここで Fig. 14 の結果を解釈する。インド亜大陸の 544 Ma

Fig. 10. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectrum for granite of Site 38 at Mahanadi graben.

の VGP は南極の VGP と経度は等しく, 緯度の違いはあるが誤差の範囲で一致している。また, 南極の VGP を得た地域の Shrimp U-Pb 法年代も 520~550 Ma と得られたことから, 東経 20~30 度の低緯度に, 南極からみた東 Gondwana の 520~550 Ma 頃の VGP が位置すると考える。この VGP は, Thompson and Clark (1982) の APWP における同年代の位置と異なるので, データ数を増やしてさらに検討する必要がある。

ま と め

インド亜大陸のラジマールヒルとマハナディ地溝帯の古地磁気調査を行い, 白亜紀のラジマールトラップと, カンブリア紀のマハナディ地溝帯のチャノカイト, 花崗岩から Gondwana の APWP および分裂過程を議論できる古地磁気データを得た。その他に調査を行ったペルム紀とジュラ紀の砂岩は再磁化している可能性が高い。

ラジマールトラップの玄武岩の年代は従来 100~117 Ma と考えられていた (Klootwijk, 1971; Bakshi, 1995)。本研究では, 玄武岩は 125~130 Ma の ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代を示した。この

Fig. 11. Paleomagnetic direction of Rajmahal trap obtained in this study and that by Piper (1990).

Fig. 12. VGP of Rajmahal trap plotted by equal-area net projection and APWP of India by Besse and Courtillot (1991).

Fig. 13. (A) VGP(S-pole) of Rajmahal trap after rotation to Antarctica by using the model of Smith and Hallam (1970) and the APWP of Antarctica in Gondwanaland (Thompson and Clark, 1982). (B) Paleoposition of Kerguelen Plateau examined by both the VGPs (130-125 Ma, 120 Ma and 110 Ma) of India and paleolatitude of Kerguelen Plateau (Inokuchi and Heider, 1992).

年代を古地磁気から検討した。古地磁気方位から換算したVGPの位置は、地磁気縞の解析によるインドのAPWP (Besse and Courtillot, 1991) と比較すると、100~120 Maの位置とは有意に異なっていた。地磁気縞の解析では、APWPは120 Maより古くはさかのぼることができないが、ラジマールトラップのVGPはAPWPと滑らかにつながる位置にある。つまり、古地磁気の研究結果は100~117 Maの年代

を否定し、より古く125~130 Maの年代値を支持する。東ゴンドワナの分裂は130 Ma頃と考えられており、ラジマールトラップはゴンドワナの分裂に関連する活動を示唆する。

インドと南極を結ぶ中間に位置する世界最大のケルゲレン海台は100~115 Maのホットスポットの噴出物であり、ラジマールトラップと同時代のスーパープレューム的な噴出物の可能性も示唆されていた。しかし、本研究でラジマールト

EARLY PALEOZOIC VGP's OF EAST ANTARCTICA

Fig. 14. (A) APWP of Gondwanaland (Thompson and Clark, 1982) and Cambrian VGPs of Antarctica summarized by Funaki and Saito (1992). (B) VGPs of Mahanadi charnokite and granite sites in India after rotation to Antarctica by the Gondwana reconstruction model of Smith and Hallam (1970).

ラップは 125~130 Ma の形成年代が得られたので、ケルゲレン海台の形成と 100~115 Ma 頃の同時代の形成説は成り立たない。さらに、ODP 掘削で得られたケルゲレン海台の玄武岩の磁化が示す古緯度および、インドの APWP とラジマールトラップの VGP を併せて検討すると、ケルゲレン海台の磁化方位は 110~130 Ma のどの時代にも対応しており、海台の活動はラジマールトラップの活動のすぐ後、つまり南極とインドの分裂という東 Gondwana の事件の前に対応づけることも可能である。Storey (1995) は、南アメリカとアフリカの分裂にスーパープレームが Parana-Etendeka basalt を中心に活動しており、その時代を 130 Ma と報告している。東 Gondwana と西 Gondwana に、125~130 Ma にほぼ同時期に生じた大きな火山活動があったのかも知れない。

古地磁気の成果が得られたマハナディ地溝帯の花崗岩では、信頼性の高い $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代が 544 Ma と得られた。従来、インドにおいて絶対年代も求められたカンブリア紀の古地磁気データは得られていない。花崗岩とチャノカイトから得た VGP はパキスタンのカンブリア紀の岩石から報告された VGP と調和的で、インド亜大陸の前期から中期のカンブリア紀の VGP として矛盾は無い。同結果はまた南極からみた VGP に変換して、南極のパンアフリカン造山運動の時代の岩石から得られた VGP と比較したところほぼ一致した位置を示した。インド・南極の統一的な VGP を南極からみた Gondwana の APWP (Thompson and Clark, 1982) と比べると、APWP の 520~550 Ma の位置から、はずれている。Gondwana のこの年代の VGP は誤差も大きいので、本研究から求めた VGP がより信頼できる APWP に貢献できると

考えるが、今後のデータの蓄積によりさらに検討が必要である。

Gondwana 大陸のカンブリア紀における復元を古地磁気から検討するには、精度良い年代値が付随した信頼できる VGP データを蓄積することが必要である。パンアフリカン造山運動の時期に Gondwana が集合したとの説もあり、精度の良い APWP による同説の検討も今後の興味深いテーマとなると考えられる。

謝 辞

議論をいただいた東京大学大学院理学研究科の原田 靖氏に感謝する。本研究は、文部省科学研究費補助金、国際学術研究（課題番号 03041034 および 04041051）の援助を受けて実施した。

文 献

- Baksi, A.K., 1995, Petrogenesis and timing of volcanism in the Rajmahal Flood basalt province, northeastern India. *Chem. Geol.*, **121**, 73-90.
- Besse, J.E. and Courtillot, V., 1991, Revised and synthetic polar wander paths of the African, Eurasian, North American and Indian plates, and true polar wander since 200 Ma. *Jour. Geophys. Res.*, **96**, 4029-4050.
- Du Toit, A.L., 1937, *Our wandering continents: A hypothesis of continental drifting*. Oliver and Boyd, London, 366 p.
- Funaki, M., Yoshida, M. and Vitanage, P.W., 1990, Natural remanent magnetization of some rocks from Southern Sri Lanka. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **4**, 231-240.
- Funaki, M. and Saito, K., 1992, Paleomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating studies of the Mawson charnokite and some rocks from the Christensen Coast. In Yoshida, Y. Kaminuma, K.

- and Shiraishi, K., eds., *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Terra Scientific Publ. Com, 191-201.
- Inokuchi, H. and Heider, F., 1992, Paleolatitude of the southern Kerguelen Plateau inferred from the paleomagnetic study of upper Cretaceous basalts. *Proc. ODP, Sci. papers*, **120**, 89-96.
- Keating, B.H. and Sakai, H., 1991, Amery Group red beds in Prydz Bay, Antarctica. *Proc. ODP, Sci. papers*, **119**, 795-809.
- Khramov, A. N., 1982, *Paleomagnetology*. Springer-Verlag, 308 p.
- Klootwijk, C. T., 1971, Paleomagnetism of the upper Gondwana Rajmahal traps, northeast India. *Tectonophysics*, **12**, 449-467.
- Lawver, L. A. and Scotese, C. R., 1987, A revised reconstruction of Gondwanaland. In McKenzie, G. W., ed., *Gondwana Six: Structure Tectonics and Geophysics*. Washington, D. C., Am. Geophys. Union Geophys. Mon. 40. 17-23.
- MacDougall, I. and McElhinny, M. N., 1970, The Rajmahal traps of India-K-Ar ages and paleomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **9**, 371-378.
- McElhinny, M. W., 1970, The paleomagnetism of the Cambrian purple sandstone from the Salt Range, western Pakistan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **8**, 149-156.
- Muller, R. D., Royer, J. Y., Lawver, L. A., 1993, Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hotspot tracks. *Geology*, **21**, 275-278.
- Piper, J. D. A., 1990, *Paleomagnetic database*. Open University Press, 264 p.
- Sakai, H., Funaki, M., Keating, B. H. and ODP Leg 119 Shipboard Scientific Party, 1990, Paleomagnetism of ODP Leg 119-Kerguelen Plateau and Prydz Bay. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **4**, 201-212.
- Schlich, R., Wise, S. W., Jr., et al., 1989, *Proc. ODP, Init. Repts.*, **120**: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 942 p.
- Shiraishi, K., Ellis, D. J., Hiroi, Y., Fanning, C. M., Motoyoshi, Y. and Nakai, Y., 1994, Cambrian orogenic belt in East Antarctica and Sri Lanka: Implications for Gondwana Assembly. *Jour. Geol.*, **102**, 47-65.
- Smith, A. G. and Hallam, A., 1970, The fit of the southern continents. *Nature*, **225**, 139-144.
- Storey, B. C., 1995, The role of mantle plumes in continental breakup: case histories from Gondwanaland. *Nature*, **377**, 301-308.
- Takigami, Y., Sakai, H., Rao, V., Funaki, M., Sakai, H., and Hirooka, K., 1995, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and paleomagnetic data for metamorphic and igneous rocks from Mahanadi and Godavari grabens, East India. *Proc. NIPR Symp. on Antarctic Geoscience*, **8**, 277.
- Tarling, D. H., 1971, Gondwanaland: palaeomagnetism and continental drift. *Nature*, **229**, 17-21.
- Thompson, R. and Clark, R. M., 1982, A robust least-squares Gondwanan apparent polar wandering path and the question of palaeomagnetic assessment of Gondwanan reconstructions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **57**, 152-158.
- Turner, B., 1991, Depositional environment and petrography of preglacial continental sediments from Hole 740 A, Prydz Bay, East Antarctica. *Proc. ODP, Sci. papers*, **119**, 45-56.
- Veevers, J. J., Powell, C. M., and Roots, S. R., 1991, Review of seafloor spreading around Australia. *Jour. Australian Earth Sci.*, **38**, 373-389.
- Wensink, H., 1972, The paleomagnetism of the Salt Pseudomorph beds of middle Cambrian age from the Salt Range, western Pakistan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **16**, 189-194.
- Yoshida, M. and Kizaki, K., 1983, Tectonic situation of Lützow-Holm Bay in East Antarctica and its significance in Gondwanaland. In Oliver R. L. et al., eds., *Antarctic Earth Science*. Canberra, Aust. Acad. Sci., 36-39.
- Zijderveld, J. D. A., 1967, AC demagnetization of rocks: Analysis and result. In Collinson, et al., eds., *Method in paleomagnetism*. New York, 254-286.

(要 旨)

酒井英男・船木 實・佐藤友紀・瀧上 豊・酒井治孝・広岡公夫, 1997, インド亜大陸のラジマールヒルとマハナディ地溝帯における古地磁気研究と $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代—ゴンドワナ大陸の復元—. *地質雑*, **103**, 192-202. (Sakai, H., Funaki, M., Sato, T., Takigami, Y., Sakai, H. and Hirooka, K., 1997, Paleomagnetic study with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Rajmahal hills and Mahanadi graben in India —reconstruction of Gondwanaland—. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **103**, 192-202)

インド半島東部のラジマールトラップとマハナディ地溝帯のカンブリア紀の岩石について古地磁気と $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代の研究を行った。ラジマールトラップの $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代は、従来報告より古い 125~130 Ma と得られた。同トラップから求めた VGP は、インド・ゴンドワナの APWP との照合から、この年代を支持する結果であった。またインドと南極の VGP を用いて、インド洋南東部に位置するケルゲレン海台の古緯度を古地磁気学的に検討したところ、ラジマールトラップと同海台は東ゴンドワナの分裂直後の同時代に形成された可能性が示された。

マハナディ地溝帯の花崗岩とチャーノカイトから、544 Ma という $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代と VGP が求められた。南極で報告されているパンアフリカン造山運動の時代の VGP との比較から、これらは、ゴンドワナ大陸のカンブリア紀前期の位置を復元できるデータであると判明した。