

# 地磁気逆転開始期の地球磁場変動

望月伸竜\* 網川秀夫\*

## Geomagnetic Field Variations at the Beginning of the Polarity Reversal

Nobutatsu MOCHIZUKI\* and Hideo TSUNAKAWA\*

### Abstract

We report the paleomagnetic behaviors at the beginning of the latest geomagnetic polarity reversal (Brunhes-Matuyama reversal of 0.78 Ma age) recorded in Tahitian lava flows. We applied an improved paleointensity determination method (double heating technique of the Shaw method with low-temperature demagnetization, LTD-DHT Shaw method), and detected oscillation-like changes in virtual dipole moments (VDMs) with a large amplitude ranging from  $1.5 \times 10^{22}$  to  $10.9 \times 10^{22}$  Am<sup>2</sup> just prior to the directional reversal. The VDM changes are almost linearly correlated with the virtual geomagnetic pole (VGP) latitudes (60–90°S). We call this VDM-VGP latitude trend “reversal line”. Although the Thellier data reported for the Brunhes-Matuyama reversal are more scattered than our data, they also show a weak trend in the VDM-VGP latitude diagram, supporting the reversal line from a different locality. The scatter in the Thellier data may be caused by overestimated paleointensities due to methodological problems which are indicated in the recent studies of historical lavas. Therefore it appears that the reversal line from the Tahitian lavas in this study does not show a local change but represents a global-scale phenomenon in the geomagnetic reversal process.

**Key words** : geomagnetic polarity reversal, paleointensity, VDM, VGP, reversal line

**キーワード** : 地磁気逆転, 古地磁気強度, 仮想地磁気双極子モーメント, 仮想地磁気極, 逆転曲線

### I. はじめに

地磁気逆転は、地球磁場の極性の反転とともに地球磁場強度の大幅な減少（～数分の1）を伴う地球磁場最大の変動である。したがって、地球磁場の成因および中心核のダイナミクスの重要な情報を含んでいる可能性がある。堆積物や火山岩に対する古地磁気学的研究によって、地磁気逆転は平均して数十万年に1回の割合で起こること、逆転時の方位変化に要する時間は1000年～8000

年程度であることが明らかになってきている（たとえば、Merrill and McFadden, 1999）。また、逆転期の地球磁場変動については、次のような過程が指摘され、受け入れられつつある（たとえば、Jacobs, 1994; Merrill and McFadden, 1999）：  
（1）通常の磁場変動（永年変化）  
（2）地磁気強度が減少する（通常の数分の1程度）  
（3）地磁気方位が反転する。  
（4）地磁気強度が増加する。  
（5）通常の磁場変動（永年変化）に戻る。

\* 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

\* Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

図1にこのような逆転プロセスを模式的に表す。地磁気強度が減少している期間は方位の反転に要する期間を内包している。このことから地磁気強度変動は逆転現象において本質的であり、キーとなる変動であると考えてよいだろう。とくに通常の地球磁場において卓越している地軸双極子成分が、数分の1に減少するまでの期間(図1の斜線部分)には、逆転期の重要な特徴的変動が隠れている可能性がある。

最新の地磁気逆転すなわち現在とは逆向きの松山逆磁極期から現在まで続くブルン正磁極期への遷移(ブルン 松山地磁気逆転, 以下B-M逆転)は、K-Arおよび $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代等によって約78万年前に起きたことが示されている(たとえば, Singer and Pringle, 1996; Quidelleur *et al.*, 2003)。B-M逆転の火山岩記録はこれまでに世界の6地域で報告されている。しかし、時間的継続性のある絶対古地磁気強度データの報告は、カナリア諸島ラパルマ島の溶岩連続層を用いた2研究にとどまる(Quidelleur and Valet, 1996; Valet *et al.*, 1999)。逆転現象をより正確に把握するためには、他地域における古地磁気方位変動および強度変動の復元が必要である。

以上をふまえて、本研究はB-M逆転を記録しているソサエティ諸島タヒチ島の火山岩を採取し、逆転開始期の地球磁場変動(古地磁気方位変動および強度変動)の復元と解析を試みた。

## II. タヒチ島 B-M 逆転記録溶岩

タヒチ島プナルウ渓谷北側に露出する溶岩連続層において、標高125-175 mの21枚の玄武岩質溶岩から定方位試料を採取した。プナルウ渓谷の露頭については、標高差700 mにわたる溶岩連続層の古地磁気方位測定結果の報告がある(Chauvin *et al.*, 1990)。今回採取した21溶岩とほぼ同じ標高にあたる渓谷南側には、Chauvin *et al.* (1990)の報告したB-M逆転の中間方位を記録する3溶岩がある。ただしB-M逆転の古地磁気強度データとしては、中間方位を記録する2溶岩とこれらの下位にある逆磁極期の1溶岩の報告にとどまっていた。

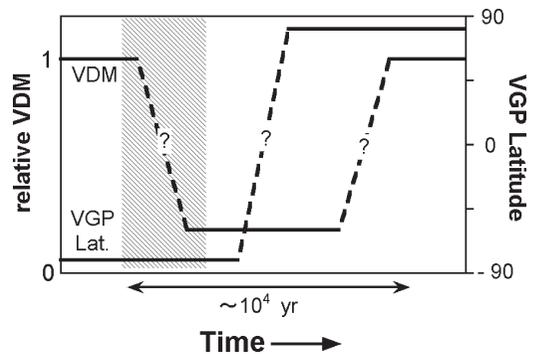


図1 地磁気逆転期の地球磁場変動の模式図。縦軸は仮想地磁気双極子モーメント(VDM)の強さおよび仮想地磁気極の緯度(VGP latitude)を表す。横軸は時間を表す。

Fig. 1 Schematic diagram showing paleomagnetic field variations during a polarity reversal. Vertical axis indicates the virtual dipole moment (VDM) and the virtual geomagnetic pole (VGP) latitude.

今回採取した21溶岩の岩石磁気学的な特徴を次にまとめる。振動試料型磁力計(VSM MicroMag 3900, Princeton Meas. Corp.)によって各溶岩試料の熱磁気分析を行った結果、試料の主な相のキュリー温度は500-580および100-200であった。前者はチタンに乏しいチタノマグネタイト、後者はチタンに富むチタノマグネタイトに対応する。同じく振動試料型磁力計によって測定した磁気履歴特性パラメータ(飽和磁化, 飽和残留磁化, 保磁力, 残留保磁力)に基づいて作成したグラフ(Day plot: Day *et al.* 1977)上で、21溶岩の試料はある帯状領域に分布した<sup>1)</sup>。歴史溶岩による測定によれば、この領域の試料は、従来の古地磁気強度測定法(テリエ法: Thellier and Thellier, 1959)を適用すると真の値よりも数十%以上の強い値を与える可能性がある(Oishi *et al.*, 2005)。そこで本研究では、従来の測定法ではなく、低温消磁2回加熱ショー法(Tsunakawa *et al.*, 1997; Yamamoto *et al.*, 2003)を適用することにした。この測定法については、既知の地球磁場のもとで噴出・冷却した溶岩(大島1986年溶岩, ハワイ1960年および1970年溶

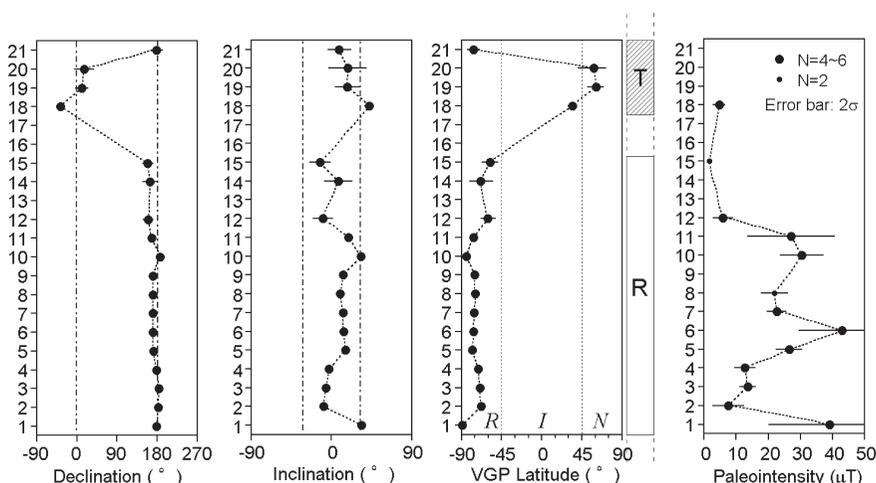


図 2 タヒチ島プナルウ渓谷の溶岩連続層から復元した古地磁気方位および古地磁気強度変動。

縦軸は溶岩の ID (Unit No.) を表し、下方から上方に向かって順に名付けた。横軸は左から順に各溶岩の平均古地磁気方位の偏角・伏角、平均古地磁気方位から計算した仮想地磁気極 (VGP) 緯度、平均古地磁気強度を表す。図中の誤差は、方位に関しては 95% 信頼限界、強度に関しては  $2\sigma$  ( $\sigma$ : 標準偏差) を示す。偏角・伏角の図における点線は地軸双極子磁場方位を示す。

Fig. 2 Paleomagnetic results from the lava sequence in the Punaruu valley, Tahiti Island. Vertical axis indicates unit numbers of lavas in the stratigraphic order. Error bars in the diagrams for declination, inclination and VGP latitude denote 95% confidence limits, and those in the diagram for paleointensity denote two standard deviations. Dashed lines in the diagrams for declination and inclination indicate GAD field directions.

岩) から当時の磁場強度を  $\pm 10\%$  の確度で復元できることが確認されている (Yamamoto *et al.*, 2003; Mochizuki *et al.*, 2004; Oishi *et al.*, 2005; 山本・綱川, 2005, 本特集)。

### III. 古地磁気方位変動および強度変動

採取した 21 溶岩のうち 18 溶岩については、それぞれ 3 ~ 15 試料に基づいて古地磁気方位を得た (図 2)。古地磁気方位から計算される仮想地磁気極 (virtual geomagnetic pole, VGP) の緯度も図 2 に示した。相対的に下位の 14 溶岩は、逆磁極 (reversed, R) を記録していた。その上に位置する 4 溶岩は、中間的な磁極 (intermediate, I) 正磁極 (normal, N) 逆磁極 (R) という不安定な方位変動を記録していた。B-M 逆転は逆磁極から正磁極への遷移であり、逆転完了後には現在と同じ正磁極になるはずである。した

がって、本研究において未採取のより上位の溶岩がブルン正磁極期 (N) を記録していると推定される。Chauvin *et al.* (1990) は、プナルウ渓谷の南側に露出する溶岩連続層の古地磁気測定を行い、逆磁極 (R) 中間的な磁極 (I) 正磁極 (N) という方位変動を報告した。本研究で得られた方位変動は、Chauvin *et al.* (1990) の結果と全体的な方位変動シーケンスは似ている。ただし、異なる点として、本研究の測定結果はタヒチにおいて少なくとも 2 回の方位反転 (R N R) が起きたことを示している。複数回の方位反転は、タヒチ島以外の地域の堆積物や火山岩からも報告されている (たとえば, Tsunakawa *et al.*, 1999; Coe *et al.*, 2004)。以上の方位変動をまとめると、相対的に下位の 14 溶岩は逆磁極 (R) を示し (以下では方位安定期と呼ぶことにする)、これは松山逆磁極期に対応すると考えられる。相対的に上

位の 4 溶岩が記録する方位反転(I N R)は、ここでは方位不安定期として取り扱うことにし、強度測定結果に話を進めることにする。

古地磁気方位が得られた 18 溶岩のうち 13 溶岩からは、それぞれ 2 ~ 6 個の古地磁気強度を得ることができた。各溶岩について平均値を求め図 2 に表した。VGP 緯度と古地磁気強度は対照的な変動を示す。まず、方位安定期(逆磁極)では、強度が  $5.9 \mu\text{T} \sim 42.9 \mu\text{T}$  の範囲で大きく振動するように変動している。続いて、方位不安定期においては、強度データは少ないものの  $4.7 \mu\text{T}$  と弱い。また、方位安定期の終わり( Unit No.12, 15 の溶岩)にはすでに強度が方位不安定期と同じレベルまで減少していたと考えられ、方位不安定期に入る前に強度が数分の 1 に減少するという従来の研究結果( I 章参照)と整合的である。本研究で採取した 21 溶岩は、強度が増減している逆磁極の期間があり、強度が減少した後、方位が不安定になったという変動を記録している。以上の古地磁気方位および強度変動を総合すると、今回測定した 21 溶岩は B-M 逆転期の開始期における磁場変動の記録と考えられる<sup>2)</sup>。

#### IV . 逆転開始期の磁場変動の特徴

ここでは、方位安定期の地磁気方位変動および強度変動に着目してデータ解析を行う。縦軸に地磁気の強さを表す仮想地磁気双極子モーメント(VDM)、横軸に仮想地磁気極(VGP)の緯度を示した図を作成した(図 3a)。この図によると、(1 データを除いて) VDM と VGP 緯度には直線の変化とも見える強い相関がある。この VDM-VGP 緯度ダイアグラムにおける直線的相関を、本論文では逆転曲線(reversal line)と呼ぶことにする。逆転曲線は、VGP が極に近づくとつれて VDM は大きくなり、VGP が極から離れるにしたがって VDM が小さくなる関係を表しており、地球磁場はこの逆転曲線上を振動するように変動したのちに方位不安定期に入ったことになる。

同様にこれまで報告された B-M 逆転期の開始期の火山岩データに基づく VDM-VGP 緯度デー

タを図 3a に示した<sup>3)</sup>。本研究の逆転曲線と似たトレンドが見えるが、データは逆転曲線よりも上側(高 VDM 側)にばらついている。最近の研究によれば従来から広く使われてきたテリ工法は試料の岩石磁気学的性質によっては真値よりも数十%から 2 倍という高い強度値を与える場合がある(たとえば, Calvo *et al.*, 2002; Biggin and Thomas, 2003; Yamamoto *et al.*, 2003; Mochizuki *et al.*, 2004; Oishi *et al.*, 2005)。このように縦軸の精度の違いからはっきりとはしないものの、従来の研究で得られたデータの 8 割以上を占めるカナリア諸島ラパルマ島の火山岩データ(図 3a の三角形, 逆三角形, 正方形)もタヒチ島火山岩から得た逆転曲線と似た弱いトレンドを示している。これらのことから、本研究においてタヒチ島火山岩から得た逆転曲線は、従来の測定では判然としなかった逆転開始期の地球磁場変動を明確に捕捉したものと考えられる。

逆転曲線の物理的意味、つまり地磁気ダイナモ作用の特徴について、VDM と VGP の表す物理量に戻って検討する。まず VDM-VGP 緯度ダイアグラムは地球磁場を仮想的に磁気双極子で近似したときの強さ(縦軸)と向き(横軸)を表している。VGP 緯度は南緯  $60 \sim 90^\circ$  であることから、仮想地磁気双極子の地軸からの傾きは比較的小さく、VDM の約 87% 以上は地軸双極子成分(地磁気ガウス係数の  $g_1^0$ ) により説明可能である。一方、VGP の南極からの余緯度は、非地軸双極子成分(地軸双極子成分以外の磁場成分;  $g_1^1, h_1^1, g_2^0, g_2^1, \dots$ ) の地軸双極子成分に対する割合として近似できる(Kono and Tanaka, 1995)。以上のことから、逆転曲線は「地軸双極子成分」と「非地軸双極子成分の地軸双極子成分に対する割合」との相関を示すと考えられる。すなわち、地球磁場の地軸双極子成分と非地軸双極子成分はある一定の関係を保ちつつ変化したと考えられ、この相関は逆転開始期における地磁気ダイナモ作用の特徴と考えられる。詳細は研究中であるが、地軸双極子成分の減少と非地軸双極子成分の増加(あるいは減少)が同時に起きるモデルが最も直線的な VDM-VGP 変動を示し、逆転曲線に近いもの

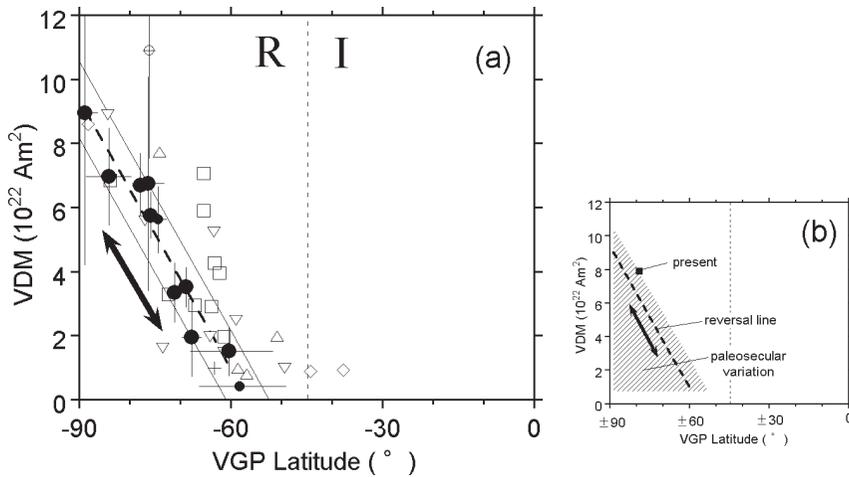


図 3 プルン 松山地磁気逆転における古地磁気強度と古地磁気方位の関係：逆転曲線。  
 (a) 仮想地磁気双極子モーメント (VDM) 仮想地磁気極 (VGP) 緯度ダイアグラム。本研究 (円形：タヒチ島) では古地磁気強度は低温消磁 2 回加熱ショー法によって測定した。一つのデータを除き、VDM と VGP 緯度の間に直線的な相関がある (逆転曲線)。これまでの研究では古地磁気強度はいずれもテリ工法によって測定されている。データはタヒチ島 (ダイヤモンド形：Chauvin *et al.*, 1990)、カナリア諸島ラバルマ島 (三角形、逆三角形：Quidelleur and Valet, 1996; 四角形：Valet *et al.*, 1999)、西インド諸島グアドループ島 (十字：Carlut and Quidelleur, 2000) の溶岩から得られている。  
 (b) 逆転曲線と古地磁気永年変化データ分布の模式図。後者は過去 500 万年間のソサエティ諸島火山岩から得られたデータ (山本・綱川, 2005, 本特集：本研究と同じ強度測定法による) を参考にして作成。現在の地球磁場も図中に示した。

Fig. 3 The relationship between the VDMs and the VGP latitudes of 0 90 °S in the Brunhes Matuyama reversal: reversal line.

- (a) VDM vs. VGP latitude diagram from the paleointensity and paleodirectional data in this study from the lavas on Tahiti Island (circles). Those paleointensities were determined by the LTD DHT Shaw method. Except for one data (open circle), a clear linear correlation (reversal line) can be found. The diagram also shows the reported data from the lava flows on Tahiti Island (diamonds: Chauvin *et al.*, 1990), La Palma Island, Canary Islands (triangles and inverse triangles: Quidelleur and Valet, 1996; squares: Valet *et al.*, 1999) and La Guadeloupe Island, French West Indies (cross: Carlut and Quidelleur, 2000). Those VDM data are based on the Thellier paleointensity data. The dashed line denotes the linear correlation observed for the Tahitian lavas in this study.
- (b) Schematic diagram of the reversal line and data distribution for the paleosecular variations. The latter data distribution is based on the paleomagnetic data from the past 5 Ma volcanic rocks in Society Islands (Yamamoto and Tsunakawa, this special issue). The data point for the present field is also shown.

になる。また、山本・綱川 (2005, 本特集) のソサエティ諸島火山岩の過去 500 万年間データ (古地磁気永年変化時のデータ) と比較した場合、逆転曲線はそのデータ分布領域のほぼ最上部に沿う変動であると位置付けられる (図 3b)。今後の研究が必要だが、このことから逆転曲線が地磁気永年変化とは本質的に異なる可能性がある和我々は

考えている。

## V. 現在の地球磁場

最後の地磁気逆転から 78 万年が過ぎた地球磁場は、この 2000 年間に強度が数十%減少しており、過去約 200 年間でも 100 年あたり数%の割合で減少し続けている。このことから、現在の地

球磁場が逆転期に入っている可能性についての議論があるが、これまでは地磁気逆転と地磁気永年変化とを識別できるまでの知見がなく、空想科学的な範疇を抜け出るものではなかった。しかしながら、ここでは本研究の結果に基づき現在の地球磁場（地磁気極緯度：79°N，地磁気双極子モーメント： $7.8 \times 10^{22} \text{Am}^2$ ）はVDM-VGP緯度ダイアグラムにおいてB-M逆転開始期のトレンド（逆転曲線）に近いことを指摘する（図3b）。当然のことながら、現在の地球磁場は逆転期に入っているのか、それとも通常の永年変化をしているのかを判別するためには、

- (1) 逆転期の古地磁気強度・方位変動データ
- (2) 逆転期でない古地磁気永年変化の古地磁気強度・方位変動データ
- (3) 過去数千年間の古地磁気強度・方位変動データ

を取得して、3と1・2の結果を比較することが必要であり、今後の古地磁気学的研究の重要な指針の一つと考えられる。

## VI. ま と め

タヒチ島火山岩を採取し、約78万年前に起きたブルン松山地磁気逆転の古地磁気方位および強度を復元した。測定した21溶岩のうち下方に位置する14溶岩は逆磁極を記録していて、その上位に位置する4溶岩は中間的な磁極正磁極逆磁極という不安定な方位変動を記録していた。方位安定期（逆磁極）において、地磁気強度は $5.9 \mu\text{T} \sim 42.9 \mu\text{T}$ の範囲を振動するように変動していた。その後続く方位不安定期においては、強度は $4.7 \mu\text{T}$ に減少していた。方位安定期のVDMとVGP緯度には、強い相関（逆転曲線）がある。これは、地球磁場の地軸双極子成分と非地軸双極子成分の間に相関があることを示唆するもので、逆転開始期における特徴的変動と考えられる。

## 謝 辞

産業技術総合研究所の小田啓邦、山崎俊嗣、宇都浩三、石塚 治諸氏にタヒチ島において火山岩試料を採取し

て頂きました。東京工業大学の蔵田真彦氏には、古地磁気方位測定に協力して頂きました。査読者の小田啓邦氏と松島政貴氏には本稿の改善に有益なコメントを頂きました。以上の方々に感謝いたします。

## 注

- 1) Day plot (Day *et al.*, 1977) 上において、単磁区磁性粒子と多磁区磁性粒子の混合比を変えたときに描かれる理論的曲線付近に分布する傾向があった。
- 2) 本研究で得られた古地磁気変動のタイムスケール見積り・他の地域の試料から得られた古地磁気変動との対比を行うためには、タヒチ島火山岩の年代測定を行う必要がある。たとえば、世界に分布する12の海洋底堆積物の研究によれば、B-M逆転だけでなくその約1.5万年前にも同程度の相対古地磁気強度の減少が起きたとされている（precursor, たとえば、Hartl and Tauxe, 1996）。
- 3) 図3aの三角形および逆三角形のデータ（Quidelleur and Valet, 1996）については：多くの古地磁気強度測定結果は室内加熱による熱変質の影響を受けており、補正が適用されている。

## 文 献

- Biggin, A. and Thomas, D.N. (2003) The application of acceptance criteria to results of Thellier palaeointensity experiments performed on samples with pseudo-single-domain-like characteristics. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **138**, 279-287.
- Calvo, M., Prévot, M., Perrin, M. and Riisager, J. (2002) Investigating the reasons for the failure of palaeointensity experiments: a study on historical lava flows from Mt. Etna (Italy). *Geophys. J. Int.*, **149**, 44-63.
- Carlut, J. and Quidelleur, X. (2000) Absolute paleointensities recorded during the Brunhes chron at La Guadeloupe Island. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **120**, 255-269.
- Chauvin, A., Roperch, P. and Duncan, R.A. (1990) Records of geomagnetic reversals from volcanic Islands of French Polynesia 2. Paleomagnetic study of a flow sequence (1.2-0.6 Ma) from the island of Tahiti and discussion of reversal models. *J. Geophys. Res.*, **95**, 2727-2752.
- Coe, R.S., Singer, B.S., Pringle, M.S. and Zhao, X. (2004) Matuyama-Brunhes reversal and Kamikatsura event on Maui: Paleomagnetic directions,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages and implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **222**, 667-684.
- Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V.A. (1977) Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **13**, 260-267.
- Hartl, P. and Tauxe, L. (1996) A precursor to the Matuyama/Brunhes transition-field instability as recorded in pelagic sediments. *Earth Planet. Sci.*

- Lett.*, **138**, 121-135.
- Jacobs, J.A. (1994) *Reversals of the Earth's Magnetic Field*. Cambridge Univ. Press.
- Kono, M. and Tanaka, H. (1995) Mapping the Gauss coefficients to the pole and the models of paleosecular variation. *J. Geomag. Geoelectr.*, **47**, 115-130.
- Merrill, R.T. and McFadden, P.L. (1999) Geomagnetic polarity transitions. *Rev. Geophys.*, **37**, 201-226.
- Mochizuki, N., Tsunakawa, H., Oishi, Y., Wakai, S., Wakabayashi, K. and Yamamoto, Y. (2004) Palaeointensity study of the Oshima 1986 lava in Japan: Implications for the reliability of the Thellier and LTD-DHT Shaw method. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **146**, 395-416.
- Oishi, Y., Tsunakawa, H., Mochizuki, N., Yamamoto, Y., Wakabayashi, K. and Shibuya, H. (2005) Validity of the LTD-DHT Shaw method and Thellier palaeointensity methods: A case study of the Kilauea 1970 lava. *Phys. Earth Planet.* **149**, 243-257.
- Quidelleur, X. and Valet, J.-P. (1996) Geomagnetic changes across the last reversal recorded in lava flows from La Palma, Canary Islands. *J. Geophys. Res.*, **101**, 135,755-13,773.
- Quidelleur, X., Carlut, J., Soler, V., Valet, J.-P. and Gillot, P.-Y. (2003) The age and duration of the Matuyama-Brunhes transition from new K-Ar data from La Palma (Canary Islands) and revisited  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **208**, 149-163.
- Singer, B.S. and Pringle, M.S. (1996) Age and duration of the Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity reversal from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  incremental heating analyses of lavas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **139**, 47-61.
- Thellier, E. and Thellier, O. (1959) Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Geophys.*, **15**, 285-376.
- Tsunakawa, H., Shimura, K. and Yamamoto, Y. (1997) Application of double heating technique of the Shaw method to the Brunhes epoch volcanic rocks (abstract) 8th Scientific Assembly IAGA, Uppsala.
- Tsunakawa, H., Okada, M. and Niitsuma, N. (1999) Further application of the deconvolution method of post-depositional DRM to the precise record of the Matuyama-Brunhes reversal in the sediments from the Boso Peninsula, Japan. *Earth Planets Space*, **51**, 169-173.
- Valet, J.-P., Brassart, J., Quidelleur, X., Soler, V., Gillot, P.-Y. and Hongre, L. (1999) Paleointensity variations across the last geomagnetic reversal at La Palma, Canary Island, Spain. *J. Geophys. Res.*, **104**, 7577-7598.
- Yamamoto, Y., Tsunakawa, H. and Shibuya, H. (2003) Palaeointensity study of the Hawaiian 1960 lava: Implications for possible causes of erroneously high intensities. *Geophys. J. Int.*, **153**, 263-276.
- 山本裕二・網川秀夫 (2005) 絶対古地磁気強度測定法の進展と新方法による過去500万年間の平均地球磁場強度 現在の地磁気は異常に強い? . 地学雑誌, **114**, 161-173.
- (2004年12月13日受付, 2005年2月15日受理)