

# 太古代の地球磁場

吉 原 新\*

## The Earth's Magnetic Field during the Archean

Arata YOSHIHARA \*

### Abstract

Knowledge of the Earth's magnetic field during Archean and Proterozoic times can provide important sources of information for understanding the internal and environmental evolution of the Earth. The long-term variation in field intensity and reversal rate is considered to reflect mode changes in powering the geodynamo. Several recent efforts to reconstruct the magnetic field of the early Earth have reported relatively low to moderate field accompanied by occasional polarity reversals. The volume of reliable paleomagnetic data, however, is still insufficient to characterize its long-term nature. Here, recent paleointensity and paleodirectional studies on Archean and Proterozoic rocks including our new findings are reviewed, and their problems and further perspectives are argued.

**Key words** : Archean, Proterozoic, evolution of the Earth, paleointensity, geomagnetic field reversal

**キーワード** : 太古代, 原生代, 地球進化, 古地磁気強度, 地磁気逆転

### I. 初期地球における古地磁気研究の意義

太古代や原生代といった非常に古い地質時代における地球磁場の諸相を明らかにすることは、古地磁気研究の大きなフロンティアである。初期地球における古地磁気研究の重要性は、1) 固体地球内部の構造進化、2) 地球表層環境と生命との共進化、という2つの面で近年広く認識されるようになってきている。

固体地球内部の進化に関係した地球磁場の進化为重要視されるきっかけとなったのは、Stevenson *et al.* (1983) が提唱した地球熱史モデルである。彼らは、地球の熱史計算に基づいて内核の誕生と成長を考慮し、外核中で地磁気ダイ

ナモを駆動するのに使用されるエネルギーの大きさがオーム散逸に等しいとして、それを“磁場強度”と見なした場合の時間発展を計算した(図1A)。結果は以下のとおりである。まず、内核の存在しないごく初期の地球(冥王代)には活発な熱対流によって強い磁場が存在し、それが地球の冷却とともに次第に減少する。その後、内核が成長を開始すると(モデルでは22-15億年前)、それともなう軽元素と潜熱の放出および重力エネルギーの解放によって得られる浮力が外核中で組成対流を駆動し始め、ダイナモ作用が現在と同程度まで急激に回復する。Hale (1987a) は独自の古地磁気強度データセットを用いて約27億年前から約21億年前にかけて磁場強度が急増してい

\* 富山大学理学部地球科学科

\* Department of Earth Sciences, Toyama University

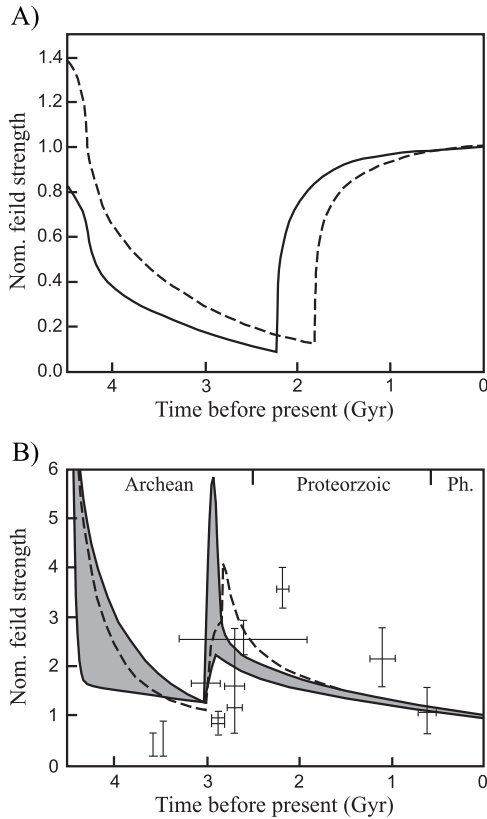


図1 地球の熱史モデルから見積もられた磁場強度の時間発展。

現在の値を1として規格化されている。ここでの磁場強度とはダイナモ作用に利用できるエネルギーの大きさであり、必ずしも地表で観測される磁場を意味するものではない。

- A) 内核の成長による組成対流を考慮したモデル (Stevenson *et al.*, 1983 を一部改変)。実線と破線はパラメータの異なる2つの計算結果(内核の誕生がそれぞれ22億、18億年前)を示す。
- B) マントルオーバーターンを考慮したモデル (Breuer and Spohn, 1995)。グレーの領域はパラメータの異なるいくつかの計算結果の範囲を示す。Hale (1987a) のコンパイルによる古地磁気強度データもプロットされている。

Fig. 1 Nominal geomagnetic histories given by thermal evolution models of the Earth.

Variations in nominal field strength scaled to the present day value are evaluated by equating the energy available for dynamo to the ohmic dissipation in the core.

- A) The model considering inner core growth accompanied by chemical convection (modified from Stevenson *et al.*, 1983). Solid and dashed curves are for two models with different parameters (e.g., onset of inner core nucleation at 2.2 and 1.8 Ga, respectively).
- B) The model considering a breakdown of two layer mantle convection (Breuer and Spohn, 1995). The shaded area brackets the results with various parameters, and is compared with paleointensity data (Hale, 1987a).

ることを示し、この計算結果を引用して磁場急増の原因を内核の成長開始に求めた。さらに、内核の誕生と太古代/原生代境界における火成活動の活発化との間には何らかの関係があるのではないかと論じている。しかし、核内の対流運動の活発化がマントル対流を活発化するという考えは、両者の熱容量の違いから考えて現実的でない。また、内核の年齢についても、最近、Labrosse *et al.* (2001) が熱史計算に基づいて約10億歳という非常に若い見積もりを発表しているが、この種の計算結果は不確定性のあるパラメータに強く依存するので、今後も議論が続きそうである。

太古代から原生代にかけて起こったと考えられるもう一つの地球内部の構造進化は、マントル対流パターンの変化である。Ida and Maruyama (1992) は、初期地球ではレイリー数が大きいために2層対流であったマントル対流が、太古代/原生代境界において全マントル対流へと遷移し、それが約27億年前や約19億年前の活発な火成活動を引き起こしたと考えた。熱容量という観点から言えば、マントル対流様式の変化が核内の対流運動に大きな影響を及ぼすことは十分ありそうなことである。Breuer and Spohn (1995) はこの対流パターンの遷移を考慮した熱史モデルを構築し、Stevenson *et al.* (1983) と同じ方法(組成対流は考慮していない)で磁場強度の時間発展を計算した(図1B)。それによると、マントルオーバーターン(モデルでは30億年前)が核表面の冷却を促進し、核内の対流を活発化することで、磁場強度がやはり急激に増加する。数億年周期の磁場変動は、マントルが主役となって引き起こしている放熱活動変動のアウトプットとして捉えることができるだろうという認識がなされるようになってきたわけである。

初期地球の磁場研究に期待されているもう一つの大きな貢献は、生命と地球の共進化に関する制約を提供することである。地球磁場がつくる磁気圏は、太陽風や宇宙線が直接地表に到達するのを妨げるバリアーとして働いている。磁気圏の有無や規模は、高エネルギー宇宙線によるDNAの擾乱や太陽風プラズマによる大気の散逸を通じて、

生物圏とその進化に大きな影響を与えてきた可能性がある(例えば, Kamide, 2001)。Hale(1987a)が提示した太古代末期の磁場強度の急増は, 世界各地に広くストロマトライト化石が産出し始める時期(約27億年前)とほぼ一致する。そのために, この強い磁場の生成開始が光合成をおこなうシアノバクテリアの浅海への進出を可能にし, 大気中における酸素濃度の急増をもたらしたというシナリオ(例えば, 丸山, 2002)が提唱されるにいたった。磁場の存在は, より初期的な段階の生命史を考える上でも重要である。約38億年前までさかのぼる有機炭素などの物証(Mojzsis *et al.*, 1996)やゲノム情報による最近の分子時計解析(Hodges *et al.*, 2001)から, 40-35億年前にはすでに生命活動が存在したと理解されている。全生物の共通祖先ではないかとして近年注目されている好熱性細菌の生息域は海底下熱水系で, 光合成はおこなっていなかったと考えられている(例えば, 上野, 2003; 山岸, 2003)。約35億年前(Schopf, 1993)あるいは約27億年前(Buick, 1992)には酸素発生型の高度な光化学系を発達させたシアノバクテリアが現れたとされている。そしてそれ以前にも, より原始的な光合成システムを備えた生命が存在したはずであるから, 当時の地球磁場がどれだけ光合成生物を高エネルギー宇宙線からシールドし得たかを知ることは非常に興味深い。また, 生命の起源に関しても, 地球表層環境の酸化還元状態が本質的に重要であるとする立場(カーシュピンクほか, 2003)から, 太陽風による大気散逸効果を大きく抑制する固有磁場の有無を明らかにすることは極めて重要であろう。

最近の火星探査と火星起源隕石の古地磁気研究によって, 現在ではほとんど磁場を持っていない火星が約40億年前以前にはかなり強い磁場を持っていたことが明らかになりつつある(Acuna *et al.*, 1999; Weiss *et al.*, 2001)。これは, 太古代や原生代といった初期地球の古地磁気研究が, 地球型惑星の進化を含む比較惑星学的な見地からなされるようになる一つの強い動機付けになると予想される。しかしながら, 岩石の持つ自然残留磁

化はその生成年代が古ければ古いほど, さらされている環境の変化による再加熱や化学変化, 落雷の影響などによって複雑な履歴を持っている場合が多く, 安定な磁化成分の抽出や初生磁化の判別が困難になる。これらの時代における信頼性の高い古地磁気データがこれまでほとんど得られてこなかったのはそのためである。筆者とその研究グループは, 太古代の磁場強度, 逆転を含めた磁場変動などを明らかにするために, 太古代の火山岩, 堆積岩試料を世界各地で採集し, 古地磁気測定をおこなってきた。また, ここ数年で, 他の研究グループからも太古代の古地磁気データが数例出始めてきている。次章以降では, 筆者の研究グループによる成果を中心に, 現在までに明らかになっている太古代の古地磁気について概説し, それらの結果の意味について考えてみたい。

## II. 太古代の地球磁場強度

### 1) これまでの描像

地球史上最古の磁場強度データとされてきたのは, Hale and Dunlop(1984)およびHale(1987b)によって報告された約35億年前の火山岩を用いた測定結果である。これは南アフリカのバーバートン地域に産するコマチアイトから得られたもので, その値は仮想磁気双極子モーメント(VDM)にして $(2.1 \pm 0.4) \times 10^{22} \text{Am}^2$ (現在の約4分の1)とかなり小さい。太古代末期に磁場強度の急増があったとするHale(1987a)の主張には, それ以前の磁場は原生代以降に比べてかなり弱かったという前提があるが, その根拠となっているのはこのデータだけであった。その後, Morimoto *et al.*(1997)がグリーンランドの約28億年前の粗粒玄武岩質貫入岩を用いて磁場強度の推定をおこなっており, Hale(1987b)の結果と同様, 現在の強度の約4分の1という小さな値を得ている。確かに, これら2つの結果は古地磁気データが豊富な顕生代における磁場強度の特徴的な変動範囲(Prevot and Perrin, 1992)の下限に近い。しかし, 磁場強度は1億年よりもはるかに短いスケールで大きく変動し得るので, これら2つのデータだけから27億年前より古い

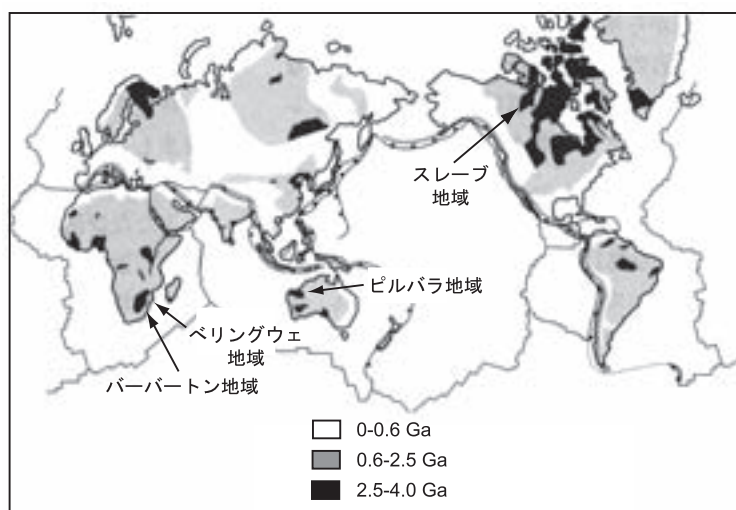


図 2 筆者の研究グループが太古代岩石試料を採取し、古地磁気データを得た 4 つの地域 .  
世界に分布する太古代と原生代のクラトンがそれぞれ黒とグレーで示されている (丸山, 1999 を一部改変) .

Fig. 2 Location of four cratons from which the authors collected Archean rock samples and obtained paleomagnetic data.  
Black and shaded areas show Archean and Proterozoic cratons, respectively (adopted from Maruyama, 1999) .

時代全体を弱い磁場強度で特徴付けるのには無理がある。

## 2) 筆者の研究グループによる古地磁気強度データ

筆者とその研究グループは、太古代における磁場強度の新たなデータの蓄積を目的として、カナダ、南アフリカ、ジンバブエ、オーストラリアの 4 地域 (図 2) で太古代の火山岩試料を採取し、地球磁場強度の測定を試みてきた。その結果を以下に紹介したい (図 3)。

まず、Yoshihara and Hamano (2000) は太古代末期に起こったとされる磁場強度の急増を検証するに足る信頼性の高いデータを求めて、カナダ・スレーブ地域に産する太古代末期の火山岩による磁場強度の推定をおこなった。用いられた試料はイエローナイフ緑色岩帯に貫入している約 26 億年前の粗粒玄武岩質貫入岩である (MacLachlan and Helmstaedt, 1995) 。試料の

特徴的残留磁化は、逆転テストや熱接触テストなどから、初生的な熱残留磁化であることが強く示唆される。テリエ法 (Thellier and Thellier, 1959) による古地磁気強度測定の結果、2 本の貫入岩から磁場強度を求めることに成功し (図 3A) 、磁気双極子モーメントにして  $(6.3 \pm 0.2) \times 10^{22} \text{Am}^2$  および  $(9.0 \pm 0.2) \times 10^{22} \text{Am}^2$  という値を得た。この 2 つの値は現在の磁場強度 ( $8 \times 10^{22} \text{Am}^2$ ) に非常に近く、少なくとも約 26 億年前のコアではすでに現在と同程度の地磁気ダイナモが機能していたことを示唆するものである。

次におこなったのは、Hale and Dunlop (1984) および Hale (1987b) が報告した地球史上最古のデータの見直しである。彼らが用いた南アフリカ・バーバートン地域に産出する約 35 億年前のコマチアイト (Kamo and Davis, 1994) は顕著な蛇紋岩化作用を受けていることがよく知られており (Viljoen and Viljoen, 1969) 、その残留磁

化の起源が変質時の化学残留磁化である可能性 (Prévot and Perrin, 1992) が指摘されてきた。Yoshihara and Hamano (2004) は同地域のコマチアイトを新たに採取し、さらにジンバブエ・ベリングウェ地域でも岩石学的性質の類似した約 27 億年前のコマチアイト (Chauvel *et al.*, 1993) を採取して、より詳細な古地磁気研究をおこなっ

た (図 3B)。バーバートン, ベリングウェ両地域のコマチアイトから得られたテリ工法結果は、それぞれ平均値にして  $(1.8 \pm 1.3) \times 10^{22} \text{Am}^2$  および  $(1.1 \pm 0.9) \times 10^{22} \text{Am}^2$  である。これらの測定結果は現在の磁場強度の 4 分の 1 に満たない小さな値で、とくにバーバートン地域から得られた結果は Hale (1987b) による報告と矛盾しない。電子顕微鏡観察の結果、Yoshihara and Hamano (2004) は、これらの試料に含まれる磁鉄鉱が噴出直後の熱水循環にともなう蛇紋岩化作用によってカンラン石から二次的に晶出したものであることを明らかにし、変成鉱物の組合せから考えて残留磁化のほとんどの成分が磁鉄鉱の結晶成長にと

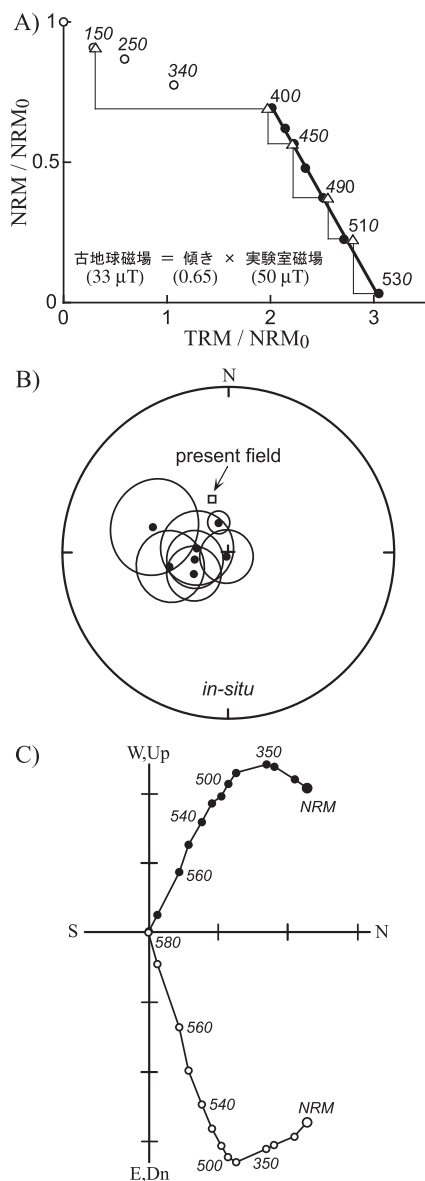


図 3 筆者の研究グループによる古地磁気データの例。

- A) カナダ・スレーブ地域の玄武岩質貫入岩 (約 26 億年前) を用いたテリ工法結果 (Yoshihara and Hamano, 2000)。古地磁気強度は自然残留磁化と実験室の既知の磁場中で印加した熱残留磁化の大きさの比 (グラフ中の直線の傾き) から見積もられる。
- B) 南アフリカ・バーバートン地域のコマチアイト (約 35 億年前) から得られた古地磁気方位 (Yoshihara and Hamano, 2004)。黒は下半球, 白色は上半球への等積投影図。
- C) オーストラリア・ピルバラ地域の枕状玄武岩 (約 35 億年前) を用いた熱消磁結果 (吉原, 2001)。磁化ベクトルの先端を水平面 (黒丸) と南北を含む鉛直面 (白丸) に投影したもの。数字は消磁温度を示す。

Fig. 3 Examples of paleomagnetic results by the authors.

- A) A successful example of Thellier experiments for 2.6 Ga diabase dike samples from Slave, Canada (Yoshihara and Hamano, 2000). Paleointensity values are evaluated from intensity ratios of laboratory induced TRM to NRM.
- B) Paleomagnetic directions of 3.5 Ga komatiite samples from Barberton, South Africa (Yoshihara and Hamano, 2004). Solid (open) symbols are plotted on the lower (upper) hemisphere by an equal area projection.
- C) An example of thermal demagnetization curves for 3.5 Ga pillow basalts from Pilbara, Australia (Yoshihara, 2001). Solid (open) symbols represent the vector endpoints projected onto the horizontal (vertical) plane. Numbers beside points show temperatures ( ).

もなう化学残留磁化の生き残りである可能性が高いと結論した。一般に、化学残留磁化は熱残留磁化に比べて磁化の獲得効率が悪いことが知られており（例えば、Stacey and Banerjee, 1974; McClelland, 1996）化学残留磁化に対してテリ工法が適用された場合、得られる結果は実際の磁場強度の数分の1程度の値を示している可能性が高い。したがって、これらのテリ工法結果はおそらく、約35億年前および約27億年前の磁場強度の下限を制約していると解釈するべきであり、27億年前以前の磁場が原生代以降に比べて常に弱かったという従来の見方を否定する可能性をほらんでいる。

さらに、西オーストラリア・ビルバラ地域の火山岩類を用いて、広い年代範囲にわたる新たな磁場強度データを獲得する試みが進行中である。ビルバラ地域の岩石に顕著に見られる最大の問題は、落雷にともなう強磁場によって古地磁気記録が消去されている試料が多いということである。落雷の影響を受けていない試料を選別することができた2種類の玄武岩類（図3C）を用いて磁場強度の見積もりをおこない、約28億年前のマウント・ロー洪水玄武岩（Arndt *et al.*, 1991）からは $(2.4 \pm 1.5) \times 10^{22} \text{Am}^2$ （現在の約3割）、サルガッシュ亜層群に属する約35億年前の枕状玄武岩（Thorpe *et al.*, 1992）からは $(5.3 \pm 1.9) \times 10^{22} \text{Am}^2$ （現在の約7割）という予察的結果が得られている（吉原, 2001）。サルガッシュ亜層群から得られたデータは太古代前期の磁場強度として現在と同程度の値を示すはじめてのデータであり、南アフリカのコマチアイトが示す結果が当時の磁場強度の下限を押さえているという議論と矛盾しない。しかし、この枕状玄武岩中には海嶺近傍の熱水変質による大規模な鉱物置換が観察されているため（中村・加藤, 2000）試料中の磁鉄鉱が二次的な鉱物である可能性が否定できず、さらなる検討が必要である。

また、Sumita *et al.* (2001) はビルバラ地域のハマスレー盆地から得られたフォーテスキュー層群に属する玄武岩類を用いて原生代前期（約21億年前）の磁場強度を推定した。これらの玄武岩

類は約27億年前の形成年代を示すが（Arndt *et al.*, 1991）約20億年前の変成年代も求められており（Nelson *et al.*, 1992）これは当時この地域が大陸衝突にともなう埋没変成を被った結果であると解釈されている。実際、これらの試料では中温部に安定な残留磁化成分が分離できるが、過去の研究（Schmidt and Embleton, 1985）との比較から、それが埋没変成にともなう再加熱による熱残留磁化であると解釈できる。この磁化成分にテリ工法およびショウ法を適用して得られた磁場強度は平均値にして $(2.2 \pm 0.8) \times 10^{22} \text{Am}^2$ で、これは現在の磁場の約3割に相当する小さい値である。

### 3) その他の新しい古地磁気強度データ

近年、磁化測定技術の進歩にともなって、ケイ酸塩鉱物やガラス中に取り込まれたわずかな磁性鉱物を用いた古地磁気学測定結果が報告され始めている（例えば、Pick and Tauxe, 1993; Tarduno *et al.*, 2001）。これらの手法は、「試料がその履歴の中で化学的な変質を免れている可能性が高い」「実験中の加熱による試料の磁氣的性質の変化が少ない」といった理由から、古い時代の古地磁気学にも非常に有効なアプローチとして注目されている。Selkin *et al.* (2000) は、約27億年前の斜長岩中で溶離した針状磁鉄鉱を用いた古地磁気強度測定をおこなって $(4.1 \pm 0.5) \times 10^{22} \text{Am}^2$ （現在の約半分）という結果を得ている。また、Smirnov *et al.* (2003) は、約25億年前の貫入岩から取り出した斜長石単結晶を用いてテリ工法を試みた。用いた単結晶中にはインクルージョンとして磁鉄鉱粒子が含まれている。得られた平均古地磁気強度は $(8.4 \pm 2.1) \times 10^{22} \text{Am}^2$ で、現在とほぼ同じ値である。これら2つの結果はどちらも太古代のデータとしては相対的に大きな磁場強度の部類に入ることに注意されたい。

全岩試料を用いたデータも Macouin *et al.* (2003) によって新たに報告されている。彼らは、カナダ・スペリオール地域に分布する6つの年代の異なる原生代貫入岩群（約25-11億年前）についてテリ工法実験をおこなった。その結果、6つの貫入岩群はすべて非常に小さい古地磁気強

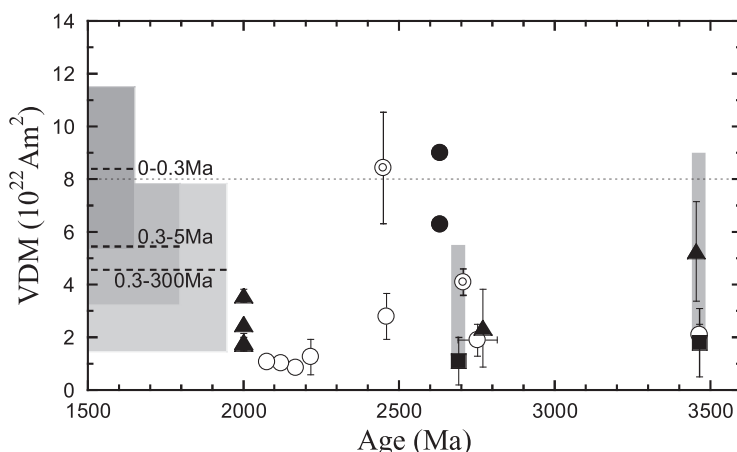


図 4 15 億年前以前の古地磁気強度データ (1980 年代以降のもの)。  
 黒は筆者の研究グループによる結果 (▲ : カナダ・スレーブ地域, ● : 南  
 アフリカ・バーバートン地域およびジンバブエ・ベリングウェ地域, ○ :  
 オーストラリア・ピルバラ地域)。南アフリカおよびジンバブエのコマチ  
 アイトを用いた結果 (○) については、実際の磁場強度が取り得る値の範  
 囲として平均値の 5 倍までをグレーで示した。白丸はその他のデータ (Hale,  
 1987b; Morimoto *et al.*, 1997; Macouin *et al.*, 2003) で、ケイ酸塩鉱物中の磁鉄  
 鉱粒子を用いた測定結果 (Selkin *et al.*, 2000; Smirnov *et al.*, 2003) は二重丸  
 (○) で示した。点線は現在の磁気双極子モーメント。破線とグレーの領域  
 は 0-0.3 Ma, 0.3-5 Ma, 0.3-300 Ma の期間の古地磁気強度データの平均値  
 と標準偏差の範囲 (Selkin and Tauxe, 2000; Juarez and Tauxe, 2000) を示す  
 (Macouin *et al.*, 2003 を参考にした)。

Fig. 4 Paleointensity determinations for the period of 3.5-1.5 Ga (since 1980).  
 Solid symbols show the authors' results (▲ : Salve, Canada, ● : Barberton, South  
 Africa, and Belingwe, Zimbabwe, ○ : Pilbara, Australia). Shaded bars on the  
 mean values from South Africa and Zimbabwe indicate plausible ranges of the  
 actual field strength. Open symbols show the other reports (Hale, 1987b; Morimo-  
 to *et al.*, 1997; Macouin *et al.*, 2003), and the results obtained from magnetite  
 grains armored by silicate minerals (Selkin *et al.*, 2000; Smirnov *et al.*, 2003)  
 are represented by doubled circles (○). The dotted line indicates the present  
 dipole moment. Dashed lines with shaded areas show the averaged VDM values with  
 their standard deviations for the periods of 0-0.3 Ma, 0.3-5 Ma, and 0.3-300 Ma  
 (Selkin and Tauxe, 2000; Juarez and Tauxe, 2000; Macouin *et al.*, 2003).

度を与え、貫入岩群ごとの平均双極子モーメントは、 $0.9 \times 10^{22} \text{Am}^2$  -  $2.8 \times 10^{22} \text{Am}^2$  (現在の約 3 分の 1 以下) という範囲に収まる。

#### 4) 議論

図 4 に、本章で紹介した 15 億年前以前の全ての古地磁気強度データ (1980 年代以降のもの) をプロットした。南アフリカおよびジンバブエのコマチアイトから得られた結果 (Yoshihara and Hamano, 2004) については、化学残留磁化の可能性が高いことをふまえて、テリ工法結果の平均

値とともに理論的、実験的見地 (例えば, Stacey and Banerjee, 1974; McClelland, 1996) から実際の磁場強度が取り得る妥当性の高い範囲として平均値の 5 倍までをグレーで示した。図 4 からすぐに読み取れるデータ分布の大きな特徴は 2 つある。まず第一に、太古代/原生代境界 (約 25 億年前) 近傍にのみ現在と同程度の値を示すデータが存在し, Selkin *et al.* (2000) や Smirnov *et al.* (2003) も指摘しているように、太古代末期に磁場強度の急増があったとする Hale (1987a) の主

張に一致するような外観を与えている。確かに、28億から25億年前にかけて増加傾向を示すデータ分布は、図1Aの内核成長モデル(Stevenson *et al.*, 1983)でも、図1Bのマントルオーバーターンモデル(Breuer and Spohn, 1995)でも説明可能に見える。とくに、マントルオーバーターンモデルとの類似性は顕著で、30-28億年前の造山運動の停滞と氷河の発達、28-25億年前の大規模火成活動と光合成生物の浅海への進出、22-20億年前の造山帯の形成停止と大規模氷河の発達、といったマントル活動度の指標となる地質学的証拠(例えば、丸山, 2002)と古地磁気強度の変動傾向が概ね矛盾しないという点でも非常に興味深い。しかし、繰り返しになるが、磁場強度は1億年よりもはるかに短いタイムスケールで大きく変動し得るので、これが実際に数億年スケールの長期変動を示していると言える段階にはまだない。

第二に、この時代の古地磁気強度データが現在に比べて全体的にかなり小さい値を示すということである。図4には、世界各地の古地磁気強度データをコンパイルして得られた、0-0.3 Ma, 0.3-5 Ma, 0.3-300 Maの期間の平均値が示されている(Selkin and Tauxe, 2000; Juarez and Tauxe, 2000)。これは、時代が古くなるとともに小さな値を示すデータが相対的に増えていく傾向を示しており、図にプロットした15億年前以前のデータの多くは過去3億年間の平均値よりもさらに小さい。Macouin *et al.* (2004)は、最新の古地磁気強度データベースを用いた統計的研究の中で、磁場強度が過去30億年間にわたって時間軸に対し対数線形的に増大してきていると述べている。しかし、ここで注目すべきは、ケイ酸塩鉱物中の磁鉄鉱粒子を用いた測定結果(Selkin *et al.*, 2000; Smirnov *et al.*, 2003)がともに相対的に大きな磁場強度を与えていることである(図4中の)。これらの試料は磁気的変質を受けにくいとされている。翻って考えれば、古い時代のデータの中には、アフリカのコマチアイト(Yoshihara and Hamano, 2004)のように、その複雑な履歴の中で二次磁性鉱物や化学残留磁化の影響を受け、磁場強度を実際よりも小さく見積

もってしまっている例が少なからず含まれている可能性があるのではないかと筆者は想像している。

以上のことを考慮すると、太古代や原生代において、統計的にロバストな数億年スケールの長期変動を確立するのはまだまだ難しく、データの増加とともに議論が発散していく恐れもある。まずは、顕生代における磁場強度の特徴的な変動範囲に比してどのような古地磁気強度が得られるかという観点で研究成果を蓄積していくことが重要であろう。

### III . 太古代の地磁気逆転

地磁気の逆転間隔(数十万年)や逆転頻度の変動周期(おそらく数億年程度)の時間スケールはコアの対流運動の特徴的時間スケール(数千年)よりもはるかに長い。白亜紀スーパークロンとマントルブルームの関係において示唆されてきたように(例えば、Larson, 1991)、地磁気逆転、とくにその頻度の変化はマントルを中心とした地球内部のダイナミクスに強く支配されている可能性がある。さらに、電気伝導度の高い内核の存在は逆転を起こりにくくするという理論的な予測(Hollerbach and Jones, 1993)もある。地磁気逆転の有無や頻度を初期地球にまでさかのぼって明らかにしていくことは、磁場強度と同様、地球内部の構造とダイナミクスの進化を知る上で非常に意義深い。ここでは、太古代の地磁気逆転に関する最近の知見を紹介する。

太古代の地磁気逆転に関する最初の報告は、Layer *et al.* (1996)によるものである。彼らは、南アフリカのカープバレー花崗岩体(約32億年前)の中心部と周縁部で残留磁化の極性が反転しているのを発見し、岩体が周縁部から冷却していく間に磁場が逆転したことを記録したものだとして解釈した。また、Strik *et al.* (2003)は西オーストラリア・ピルバラ地域のフォーテスキュー層群(約28-27億年前)の古地磁気測定をおこない、デイサイト質斑岩層とその上下の洪水玄武岩層との間に2回の逆転を認めている。これは年代のよく知られた火山岩を用いた例であり、古地磁気

方位の曖昧さも少ないという点で信頼性の高い報告であるといつてよい。

堆積岩を用いて逆転の間隔や頻度に関する情報を得ようという試みとしては、Hatakeyama *et al.* (1999)による太古代の縞状鉄鉱床(約33-32億年前)の古地磁気研究がある。彼らは、ビルバラ地域に産する赤鉄鉱とチャートを主体とする厚さ1.7 m分の地層について連続的な古地磁気測定をおこない、20回に及び磁化極性の反転を発見した。縞状鉄鉱床の堆積機構についてはまだよく分かっていないが、この地層が遠洋性堆積物であることを考慮して1 mm/1000年という堆積速度を適用すると、平均的な逆転頻度はおよそ10万年に1回ということになる。これは、第三紀以降の平均逆転頻度(およそ20万年に1回)よりも幾分高い。この時代には内核がまだ存在していなかった可能性が高く(例えば、Labrosse *et al.*, 2001)、この見積もりは内核が逆転を起こりにくくするという予測(Hollerbach and Jones, 1993)を支持する(Hatakeyama *et al.*, 1999)。

Hatakeyama *et al.* (1999)が用いたビルバラ地域の縞状鉄鉱床の磁化の起源については、初生磁化ではなく、第三紀の風化による二次磁化だという解釈(Schmidt and Embleton, 1976)も成り立ち、議論が収束していない。しかし最近、Suganuma *et al.* (2004)が同じくビルバラ地域のチャート層(約35億年前)を含む250 mのボーリングコア試料の予備的古地磁気測定をおこなって、地磁気逆転を示す1層準を発見している。このチャート試料は著しい風化を免れており、堆積構造が非常によく保存されていることが顕微鏡観察によって明らかにされている。このボーリング試料によって、より信頼性の高い連続的な磁気層序が得られるかどうか、今後の研究の発展が期待される。

#### IV. おわりに

本稿では、初期地球における磁場研究の意義と、最近10年間に発表された太古代の古地磁気データを中心に紹介した。太古代の地球磁場について現在言えることは多くはなく、はじめにも述

べたように、明らかにすべきことがまだ多く残された挑戦的な領域である。近年、測定技術の進歩とともに古地磁気学の手法も変化しつつある。とくに、斜長石単結晶を用いた磁化測定に代表されるように、特定の磁化キャリアーに狙いを定め、よりミクロスコピックな磁氣的観察と電子顕微鏡などによる直接観察おこない、その実体を明らかにした上で古地磁気記録を読み取ろうという試みは、試料や露頭状態の乏しさから統計的確からしさを必ずしも証明できない場合が多い初期地球の古地磁気学に大きな進展をもたらすかもしれない。

#### 謝 辞

本稿で紹介した筆者とその研究グループによる一連の研究に対し様々な形で援助を頂いた文部省科学研究費重点領域研究「全地球史解読」(No.259, 平成79年)プログラムとその多数の共同研究者各位に感謝する。査読者からは本論文を改善する上で有益な助言を頂いた。筆者はこれらの研究遂行に際し、日本学術振興会特別研究員として援助を受けた。また、オーストラリア・ビルバラ地域の古地磁気研究の一部に富山第一銀行奨学財団助成金を使用させて頂いた。

#### 文 献

- Acuna, M., Connerney, J., Ness, N., Lin, R., Mitchell, D., Carlson, C., McFadden, J., Anderson, K., Reme, H., Mazelle, C., Vignes, D., Wasilewski, P. and Cloutier, P. (1999) Global distribution of crustal magnetization discovered by the mars global surveyor MAG/ER experiment. *Science*, **284**, 790-793.
- Arndt, N.T., Nelson, D.R., Compston, W., Trendal, A.F. and Thorne, A.M. (1991) The age of the Fortescue Group, Hamersley Basin, Western Australia, from ion microprobe U-Pb zircon results. *Australian J. Earth Sci.*, **38**, 261-281.
- Breuer, D. and Spohn, T. (1995) Possible flush instability in mantle convection at the Archaean-Proterozoic transition. *Nature*, **378**, 608-610.
- Buick, R. (1992) The antiquity of oxygenic photosynthesis: Evidence from stromatolites in sulphate-deficient Archean lakes. *Science*, **255**, 74-77.
- Chauvel, C., Dupr, B., Todt, W. and Arndt, N.T. (1993) Pd and Nd isotopic correlation in Belingwe komatiites and basalts. In Bickle, M.J. and Nisbet, E.G. eds.: *The Geology of the Belingwe Greenstone Belt, Zimbabwe-A Study of the Evolution of Archaean Continental Crust*. Geol. Soc. Zimbabwe Spec. Pub., **2**, 167-174.

- Hale, C.J. (1987a) Paleomagnetic data suggest link between the Archean-Proterozoic boundary and inner-core nucleation. *Nature*, **329**, 233-237.
- Hale, C.J. (1987b) The intensity of the geomagnetic field at 3.5 Ga - Paleointensity results from the Komati Formation, Barberton Mountain Land, South Africa. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **86**, 354-364.
- Hale, C.J. and Dunlop, D.J. (1984) Evidence for an early Archean geomagnetic field - A paleomagnetic study of the Komati Formation, Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 97-100.
- Hatakeyama, T., Sumita, I. and Hamano, Y. (1999) Paleomagnetic reversals in an Archean banded iron formation and possibilities of their origin. *Abstracts of the 22nd International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) Assembly, Birmingham, UK*, B.324.
- Hodges, S.B., Chen, H., Kumar, S., Wang, D.Y.-C., Thompson, A.S. and Watanabe, H. (2001) A genomic timescale for the origin of eukaryotes. *BMC Evolutionary Biology*, **1**, 4.
- Hollerbach, R. and Jones, C. (1993) Influence of the Earth's inner core on geomagnetic fluctuations and reversals. *Nature*, **365**, 541-543.
- Ida, S. and Maruyama, S. (1992) Drastic change of mantle convection from two-layered to whole mantle convection at 1.9 Ga. *Abstracts of Evolving Earth Symp.*, 89.
- Juarez, M.T. and Tauxe, L. (2000) The intensity of the time-averaged geomagnetic field - The last 5 Myr. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **175**, 169-180.
- Kamide, Y. (2001) Our life is protected by the Earth's atmosphere and magnetic field. What aurora research tells us. *Biomed. Pharmacother.*, **55**, 21-24.
- Kamo, S.L. and Davis, D.W. (1994) Reassessment of Archean crustal development in the Barberton Mountain Land, South Africa, based on U-Pb dating. *Tectonics*, **13**, 167-192.
- カーシュピンク, ジョセフ L.・ワイス, ベンジャミン P. 著, 磯崎行雄訳 (2003) 火星, パンスペルミア, そして生命の起源 すべてはどこで始まったのか? . 地学雑誌, **112**, 187-196.
- Labrosse, S., Poirier, J.P. and Le Mouél, J.L. (2001) The age of the inner core. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **190**, 111-123.
- Larson, R.L. (1991) Latest pulse of Earth - Evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, **19**, 547-550.
- Layer, P.W., Kröner, A. and McWilliams, M. (1996) An Archean geomagnetic reversal in the Kaap Valley Pluton, South Africa. *Science*, **273**, 943-946.
- MacLachlan, K. and Helmstaedt, H. (1995) Geology and geochemistry of an Archean mafic dike complex in Chan Formation - Basis for a revised plate-tectonic model of the Yellowknife greenstone belt. *Can. J. Earth Sci.*, **32**, 614-630.
- Macouin, M., Valet, J.P., Besse, J., Buchan, K., Ernst, R., LeGoff, M. and Scharer, U. (2003) Low paleointensities recorded in 1 to 2.4 Ga Proterozoic dykes, Superior Province, Canada. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **213**, 79-95.
- Macouin, M., Valet, J.P. and Besse, J. (2004) Long-term evolution of the geomagnetic dipole moment. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **147**, 239-246.
- 丸山茂徳 (1999) 変動する地球 中心核から海の水まで . 第 13 回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会編 : 生きている地球の新しい見方 . 21-44.
- 丸山茂徳 (2002) 地球史概説 . 熊澤峰夫・伊藤孝士・吉田茂生編 : 全地球史解説 . 東京大学出版会, 18-54.
- McClelland, E. (1996) Theory of CRM acquired by grain growth, and its implications for TRM discrimination and palaeointensity determination in igneous rocks. *Geophys. J. Int.*, **126**, 271-280.
- Mojzsis, S.J., Arrhenius, G., Mckeegan, K.D., Harrison, T.M., Nutman, A.P. and Friend, C.R.L. (1996) Evidence for life on earth before 3,800 million years ago. *Nature*, **384**, 55-59.
- Morimoto, C., Otofujii, Y., Miki, M., Tanaka, H. and Itaya, T. (1997) Preliminary paleomagnetic results of an Archean dolerite dyke of west Greenland - Geomagnetic field intensity at 2.8 Ga. *Geophys. J. Int.*, **128**, 585-593.
- 中村謙太郎・加藤泰浩 (2000) 太古代初期 (3.5 Ga) の海底熱水活動による海洋地殻の炭酸塩化作用とその CO<sub>2</sub> シンクとしての重要性 (I 鉱物記載 . 資源地質, **50**(2), 79-92.
- Nelson, D.R., Trendall, A.F., de Laeter, J.R., Grobler, N.J. and Fletcher, I.R. (1992) A comparative study of the geochemical and isotopic systematics of late Archean flood basalts from the Pilbara and Kaapvaal Cratons. *Precambrian Res.*, **54**, 231-256.
- Pick, T. and Tauxe, L. (1993) Holocene paleointensities - Thellier experiments on submarine basaltic glass from the East Pacific Rise. *J. Geophys. Res.*, **98**, 17949-17964.
- Prévoit, M. and Perrin, M. (1992) Intensity of the Earth's magnetic field since Precambrian from Thellier-type paleointensity data and inferences on thermal history of the core. *Geophys. J. Int.*, **108**, 613-620.
- Schmidt, P.W. and Embleton, B.J.J. (1976) Palaeomagnetic results from sediments of the Perth Basin, Western Australia, and their bearing on the timing of regional lateritisation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **19**, 257-273.
- Schmidt, P.W. and Embleton, B.J.J. (1985) Prefolding and overprint magnetic signatures in Precambrian (~2.9-2.7 Ga) igneous rocks from the Pilbara craton and Hamersley Basin, NW Australia. *J. Geophys. Res.*, **90**, 2967-2984.
- Schopf, J.W. (1993) Microfossils of the early Archean

- Apex Chert - New evidence of the antiquity of life. *Science*, **260**, 640-646.
- Selkin, P.A. and Tauxe, L. (2000) Long-term variations in paleointensity; [Monograph] Geomagnetic polarity reversals and long-term secular variation. *Phil. Trans. R. Soc. London*, **A358**, 1065-1088.
- Selkin, P.A., Gee, J.S., Tauxe, L., Meurer, W.P. and Newell, A.J. (2000) The effect of remanence anisotropy on paleointensity estimates - A case study from the Archean Stillwater Complex. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **183**, 403-416.
- Smirnov, A.V., Tarduno, J.A. and Pisakin, B.N. (2003) Paleointensity of the early geodynamo (2.45 Ga) as recorded in Karelia - A single-crystal approach. *Geology*, **31**, 415-418.
- Stacey, F.D. and Banerjee, S.K. (1974) *The Physical Principles of Rock Magnetism*. Elsevier Scientific Pub. Co.
- Stevenson, D.J., Spohn, T. and Schubert, G. (1983) Magnetism and thermal evolution of terrestrial planets. *Icarus*, **54**, 466-489.
- Strik, G., Blake, T.S., Zegers, T.E., White, S.H. and Langereis, C.G. (2003) Paleomagnetism of flood basalts in the Pilbara Craton, Western Australia - Late Archean continental drift and the oldest known reversal of the geomagnetic field. *J. Geophys. Res.*, **108** (B12), 2551, 10.1029/2003JB002475
- Suganuma, Y., Niitsuma, S., Hoashi, M., Sugita, T., Ohno, K., Hisamitsu, T., Niitsuma, N., Kodama, K. and Nedachi, M. (2004) Paleomagnetism of Marble Bar Chert, Pilbara Craton, Western Australia. *International Journal of Astrobiology*, 10.1017/S14735500404001648, 39.
- Sumita, I., Hatakeyama, T., Yoshihara, A. and Hamano, Y. (2001) Paleomagnetism of late Archean rocks of Hamersley basin, Western Australia and the paleointensity at early Proterozoic. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **128**, 223-241.
- Tarduno, J.A., Cottrell, R.D. and Smirnov, A.V. (2001) High geomagnetic intensity during the mid-Cretaceous from Thellier analyses of single plagioclase crystals. *Science*, **291**, 1779-1782.
- Thellier, E. and Thellier, O. (1959) Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Géophys.*, **15**, 285-376.
- Thorpe, R.L., Hickman, A.H., Davis, D.W., Mortensen, J.K. and Trendall, A.F. (1992) Conventional U-Pb zircon geochronology of Archean felsic units in the Marble Bar region, Pilbara craton. *Precambrian Res.*, **56**, 169-189.
- 上野雄一郎 (2003) 西オーストラリア, ノースポール地域に産する熱水性岩脈中ケロジエンの炭素同位体組成. *地学雑誌*, **112**, 208-217.
- Viljoen, M.J. and Viljoen, R.P. (1969) An introduction to the geology of the Barberton granite-greenstone terrain. *Spec. Publ. Geol. Soc. S. Afr.*, **2**, 9-28.
- Weiss, B.P., Vali, H., Baudenbacher, F.J., Stewart, S.T. and Kirschvink, J.L. (2001) Records of an ancient Martian magnetic field in ALH84001. *Lunar and Planetary Science*, **XXXII**, 1244.
- 山岸明彦 (2003) 全生物の共通の祖先の実験的検証. *地学雑誌*, **112**, 197-207.
- 吉原 新 (2001) *Intensity of the Earth's Magnetic Field During Archean*. Doctoral Thesis, University of Tokyo.
- Yoshihara, A. and Hamano, Y. (2000) Intensity of the Earth's magnetic field in late Archean obtained from diabase dikes of the Slave Province, Canada. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **117**, 295-307.
- Yoshihara, A. and Hamano, Y. (2004) Paleomagnetic constraints on the Archean geomagnetic field intensity obtained from komatiites of the Barberton and Belingwe greenstone belts, South Africa and Zimbabwe. *Precambrian Research*, **131**, 111-142.

(2004年12月15日受付, 2005年1月19日受理)