

地球磁場と地球進化と生命

小田 啓邦¹⁾

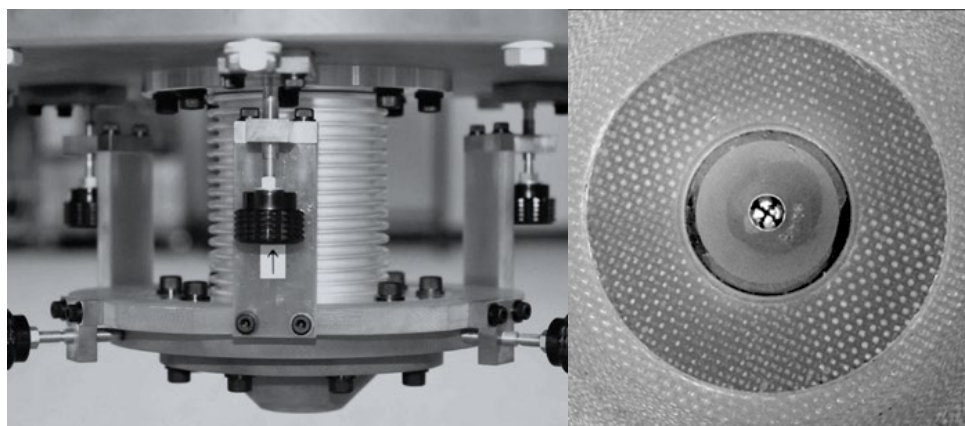
1. はじめに

現在の地球磁場は方位磁石のN極が北を指すことから北極がS極となる磁石(磁気双極子)で近似される。実際には、近似される磁気双極子の軸は地球の回転軸とは若干ずれており、その位置は年々変化している。また、過去に地球磁場の極性が何度も反転したことが知られている。地球磁場の極性が反転していることを発見したのは、フランスのBernard Brunhes(Brunhes, 1906)と日本の松山基範(Matuyama, 1929)である。最も新しい地球磁場逆転は約77万年前に起こったことが知られており、この地球磁場逆転以降の地質年代がチバニアン、房総半島千葉セクションが国際模式地(国際標準模式層断面とポイント: GSSP)となることが2020年1月17日に承認された(産業技術総合研究所, 2020)。

現在の地球は外側から地殻・マントル・核の層構造になっている。核は外核と内核から構成され、外核は液体、内核は固体の鉄を主成分とする導電性物質からなる。地球磁場は外核の流体鉄が対流運動を起こしながら電流と磁場がダイナミックに相互作用するダイナモ(発電機)として維持されていると考えられている。この複雑な物理現象は大型計算機でシミュレーションもされており、地磁気逆転現象なども再現されている(例えば Glatzmaiers and Roberts,

1995; Takahashi *et al.*, 2005)。

著者と共同研究者(以下、我々)は、科研費補助金などの支援により、地質試料が記録している微弱な過去の地球磁場の記録を高感度・高分解能で復元することを目的として、超伝導量子干渉素子(Superconducting Quantum Interference Device; SQUID)を用いた走査型 SQUID 磁気顕微鏡(第1図)を開発し(Kawai *et al.*, 2016; Oda *et al.*, 2016)、分析を行ってきた。走査型 SQUID 磁気顕微鏡では、液体ヘリウム温度(4.2 K)で超伝導を示すNbを用いた SQUID 素子を磁気センサーとして用いており、200 μm \times 200 μm の微小な検出コイルによって試料表面の微弱な表面磁場を分解能約100 μm で画像化できる。走査型 SQUID 磁気顕微鏡は半導体や超伝導物質の分析、機械部品の非破壊検査などにも用いられるが、我々の開発した装置は薄いサファイアウィンドウを用いて、SQUID 素子から約200 μm の距離で常温常圧に置いた試料を高感度・高分解能で分析することを可能にした。この装置を用いたこれまでの研究成果には、野島断層の断層岩(Fukuzawa *et al.*, 2017)、海底鉄マンガンクラスト(Noguchi *et al.*, 2017)、マントル起源の岩石(Pastore *et al.*, 2018)などがある。本報告では、地球創生期の地球磁場強度について最近我々が発表した研究(Tarduno *et al.*, 2020)と、その意味について最新の研究成果を交えながら紹介する。



第1図 産業技術総合研究所の走査型 SQUID 磁気顕微鏡の写真。左と右はそれぞれ、試料分析部を横および下から見たもの。右写真の中央にサファイアウィンドウ(開口部 直径3 mm, 厚さ40 μm)内部の SQUID センサと配線のための4つの電極が見える。

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

キーワード: 走査型 SQUID 磁気顕微鏡, 古地磁気, 地球磁場強度, ジャックヒルズ, ジルコン, 太陽風

2. 地球形成史と世界最古の鉱物粒子

太陽系における星間分子雲から地球・月の形成初期までの歴史は、主に隕石および地球・月の岩石の同位体研究によって明らかにされてきたが、これらは坂本(2000)によってわかりやすくまとめられている。まず、分子雲が45.7億年前に形成され、その後の微粒子形成を経て、45.63億年前に微惑星が形成された。さらに、45.58億年前に微惑星から原始惑星が形成され、45.55億年前には原始惑星から地球を含めた惑星が形成された。地球形成後、地表は天体衝突と放射壊変の熱で溶けてマグマオーシャンに覆われるようになった。その後、約45億年前に地球への巨大天体衝突によって月が形成され、地球はドロドロに熔融するとともに、鉄・ニッケルを主成分とする液体金属がコアとして分離したとされる。アポロ14号が持ち帰った岩石のジルコン粒子の同位体分析により、月の形成は45.1億年よりも前であると推定されている(Barboni *et al.*, 2017)。

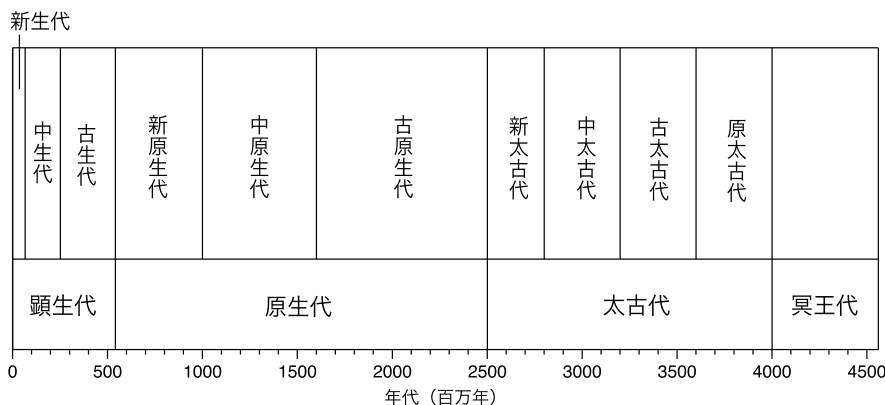
最近になって、マグマオーシャンで覆われた地球に巨大天体衝突が起こって月が形成されたシナリオについて、力学的にも矛盾が無いことが計算で示された(Hosono *et al.*, 2019)。地球大気が形成され始めたのは月形成直後の45億年前からであり、44.8億年前には大気成分元素の約80%が地球を覆っていたとされる(坂本, 2000)。さらに、月のクレーターの年代分布が約39億年前に集中していることから、この時代に月や地球を含む内惑星に多くの隕石が衝突したと考えられ、この時期が後期重爆撃期(Late Heavy Bombardment)と名付けられた。その後の研究により、隕石衝突頻度が39億年前に増加せずとも、月や地球ができてから隕石衝突の頻度が減少し続けることでも説明可能と示された(例えば Morbidelli *et al.*, 2018)。なお、

地質年代表では地球形成から40億年前までが非公式に冥王代(Hadean)とされている(第2図)。

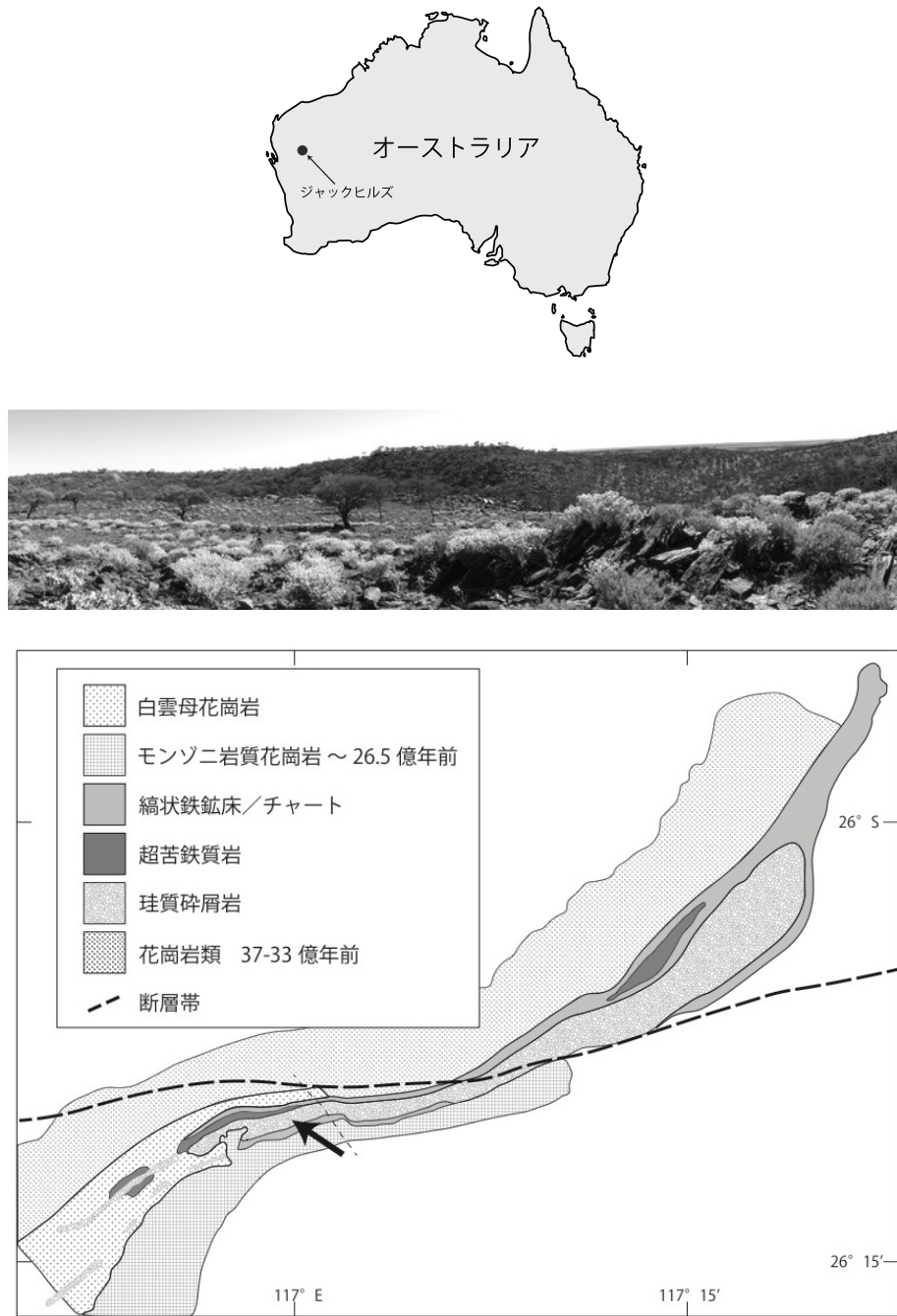
現在、地球上で最も古いとされる鉱物は、オーストラリア西部のジャックヒルズ(第3図)のジルコン結晶であり、そのうち最も古いものは約44億年前の年代を示すことが2001年に報告された(Wilde *et al.*, 2001)。また、このジルコン結晶の酸素同位体比から、約44億年前には地球上に大陸地殻と海が存在したとされた。ジルコン($ZrSiO_4$)はケイ酸塩鉱物の一種で、火成岩中に微小な結晶として広く産する風化変質に強い鉱物で、砂岩などの堆積岩にも広く見られる。ジルコンはウランに富み、鉛に乏しいので、ウラン・鉛法の放射年代測定が有効である。ウラン・鉛年代測定法は天然の放射性物質であるウランが崩壊して最終的に鉛となることを利用する。ウラン238(半減期約45億年)は鉛206に壊変し、ウラン235(半減期約7億年)は鉛207に壊変する。ジルコン結晶中の4種類の同位体を分析することでジルコンが形成されたときの年代推定が可能である。また、最初の鉛がゼロであるとして鉛同位体のみを使っても年代推定が可能である(鉛モデル年代; 坂本, 2000)。

3. 地球創生期の地球磁場強度

Tarduno *et al.* (2015)によってジャックヒルズのジルコン結晶を用いた過去の地球磁場の最初の研究が行われ、約42億年前から地球磁場が存在した可能性が示唆された。それまで約35億年前以降に発生したと考えられていた地球磁場が(Biggin *et al.*, 2011)、さらに約7億年過去に遡ったことになる。Tarduno *et al.* (2015)の結果に対して、その信頼性に疑問があるとの反論が示されたが、これについ



第2図 地質年代表. 国際地質科学連合 (IUGS) の国際層序委員会 (ICS) による国際年代層序表 (v 2020/01) に基づく日本地質学会作成の日本語版による (http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor/name/ChronostratChart_jp.pdf 閲覧日: 2020年3月13日)



第3図 (上) 西オーストラリア、ジャックヒルズの位置を示した地図。(中) ジャックヒルズの露頭写真 (Tarduno 教授提供)。(下) ジャックヒルズ周辺の地質図。Cottrell *et al.* (2016) をもとに日本語に改変。矢印が Tarduno *et al.* (2015, 2020) による試料採取サイト。

では後に詳しく述べる。Tarduno *et al.* (2020) はジャックヒルズのジルコンから得られた地球磁場推定値が信頼できることを示し、約 42 億年前には地球磁場が存在した可能性が高いことを示した。以下に Tarduno *et al.* (2015) による初期の結果も含めて、地球磁場強度推定方法について述べる。

ジルコン結晶を用いた地球磁場強度推定のメリットは、結晶一粒ごとに地球磁場強度と年代を推定できることであ

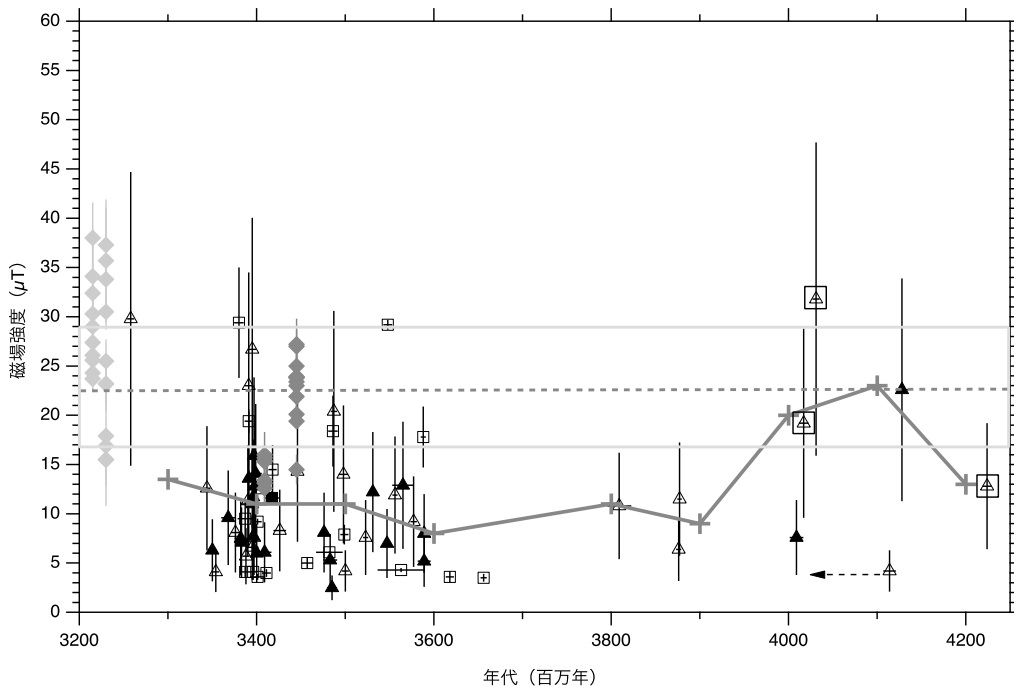
る。ジルコン結晶の年代値は既に述べたウラン・鉛年代測定法によって求める。岩石およびそれに含まれる鉱物は、岩石冷却時の地球磁場を記録している。これが自然残留磁化である。火成岩の場合は、その中に含まれる磁性鉱物がキュリー温度以下 (例えば磁鉄鉱 Fe_3O_4 の場合は $585\text{ }^{\circ}\text{C}$) になると、その時の地球磁場の方向が自然残留磁化として記録される。実際に磁場が記録される温度は、キュリー温度よりも低く、その温度は磁性鉱物の粒子サイズによって

異なる。より高温で記録される自然残留磁化が長期的に安定であり、後の加熱による変成作用などの影響を受けにくい。記録されている自然残留磁化から、当時の地球磁場の強さを推定することも可能である。岩石および鉱物が記録する残留磁化から形成時の地球磁場強度を求める基本原理としては、実験室無磁場中において一定温度で試料を加熱して失われた磁化を調べ、その後実験室の一定磁場中で試料を同じ温度で加熱して獲得された磁化を調べる。一定磁場中で獲得される磁化は磁場強度に比例すると仮定して、加熱で失われた自然残留磁化と実験室で獲得される磁化の比率から過去の地球磁場強度を推定することが可能である。

岩石の磁性は弱いため、SQUID センサーを用いた超伝導岩石磁力計によって分析する。本研究では、共同研究者の Tarduno 教授が所属するロチェスター大学の小口径型超伝導岩石磁力計と産業技術総合研究所の走査型 SQUID 磁気顕微鏡の 2 種類の高感度磁力計を用いた。一般的に岩石の自然残留磁化測定に使用される超伝導岩石磁力計の

ほとんどは 1 インチ径の岩石試料など比較的大きな試料の測定のためのものであるが、鉱物粒子 1 個の自然残留磁化強度を分析するには感度が十分でない。ロチェスター大学の保有する小口径型超伝導岩石磁力計の測定空間は直径 6.4 mm で検出コイルと試料の距離が近いために、ジルコン結晶など直径 1 mm 以下の微少試料を高感度で測定できる。残留磁化測定は XYZ 方向に配置された 3 つのピックアップコイルで同時に行われる。一方、走査型 SQUID 磁気顕微鏡は試料面に垂直上向きの磁場成分を検出するが、感度が 0.05 nT (ナノテスラ) 程度であり、石英ガラス板にジルコン結晶を埋め込んで、ジルコン結晶から 0.3 mm 程度離れたところで磁場のマッピングを行う。得られた磁場マップについて、最小自乗法で磁気双極子モデル磁場を当てはめ、ジルコン結晶の保持する磁気モーメント (方位と強度) を計算する。いずれの装置を用いた実験についても、加熱は CO₂ レーザー装置を用いた。

分析で得られた 42 ~ 32 億年前の地球磁場強度の推定値を第 4 図に示す。白と黒のシンボルが、それぞれ



第 4 図 約 42 億年前から 32 億年前までの鉱物結晶から得られた地球磁場強度変化を示した図。Tarduno *et al.* (2007, 2010, 2015, 2020) のデータから Tarduno *et al.* (2020) の図 8 を再構成。黒が Tarduno *et al.* (2020) による地球磁場推定値。黒三角が 565 °C での加熱、黒四角がテリエ法 (*) によるもの。白のシンボルが Tarduno *et al.* (2015) による地球磁場推定値。白三角が 565 °C での加熱、白四角がテリエ法によるもの。薄灰色と濃灰色のダイヤモンドは、それぞれ Tarduno *et al.* (2007) と Tarduno *et al.* (2010) による南アフリカのデータで赤道での磁場強度に換算してある。1 億年毎の移動平均値を灰色の大きなプラスで示す。三つの黒いボックスで囲んだ白抜き三角形はリチウム分析によって信頼性が確保された試料で、黒矢印はリチウム分析によって加熱の影響が見られた試料。灰色の水平破線は過去 80 万年の赤道における平均磁場強度。エラーバーについては Tarduno *et al.* (2020) を参照のこと。
* テリエ法: 無磁場中での加熱、磁場中での加熱を、温度を段階的に上げながら複数回行い、残存自然残留磁化を縦軸、獲得熱残留磁化を横軸にとってデータを直線近似したときの傾きと実験室での磁場強度から過去の地球磁場強度を推定するもの。一回加熱による推定値よりも信頼性が高い。

Tarduno *et al.* (2015) と Tarduno *et al.* (2020) によってジャックヒルズのジルコン結晶から得られたデータを示す。また、南アフリカの岩石中鉱物から得られたデータも一緒に示してある。これら鉱物中に含まれる磁性鉱物が保持する地球磁場記録は、鉱物に包まれているために後の風化や変質に強いと考えられ、特に 30 億年以上前の試料について、単独の磁性鉱物を分析する場合よりも信頼性が高い地球磁場強度データが得られると考えられる。これらデータについて 1 億年毎に移動平均をとったものを灰色のプラスで示してある。42 億年前には現在の地球磁場の半分程度であった地球磁場強度が、41 ~ 40 億年前には現在の地球磁場程度となり、再び 39 ~ 33 億年前に現在の地球磁場の半分程度となり、その後長期にわたって同じ地球磁場強度で推移する。次に、ジャックヒルズのジルコン結晶から得られた地球磁場強度の信頼性について述べる。

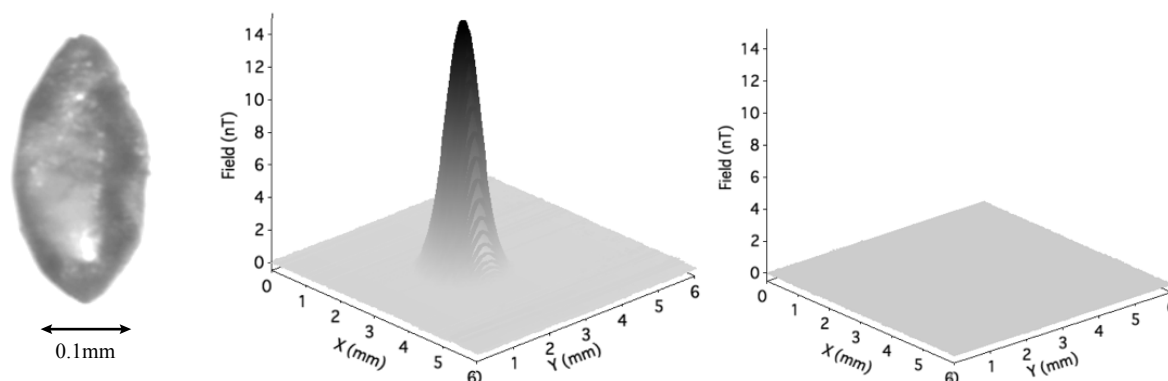
4. 地球磁場記録の信頼性確保

ジャックヒルズのジルコン結晶は約 26.5 億年前にモンゾニ岩質花崗岩 (第 3 図下図) の貫入によって最高到達温度が 420-475 °C の熱変成作用を経験したとされる (例えば Rasmussen *et al.*, 2011)。また、上記以外にも何度か熱変成の影響を及ぼす火成活動があったことが知られている (例えば Weiss *et al.*, 2015)。Tarduno *et al.* (2015) がジャックヒルズのジルコン結晶を用いて求めた地球磁場強度データについて、Weiss *et al.* (2015) は様々な古地磁気フィールドテストを行い、ジルコン結晶に含まれる磁性鉱

物は後の熱変成作用 (特に約 11 億年前の大規模火成活動) の影響を受けている可能性が高いとした。また、ジルコン粒子の表面と割れ目に沿って磁性鉱物が分布していること (Weiss *et al.*, 2018)、透過電子顕微鏡を用いて磁性鉱物と結晶欠陥の関係 (Tang *et al.*, 2019)、などから Tarduno *et al.* (2015) の結果は磁性鉱物が二次的に生成した可能性が高く地球磁場強度推定値の信頼性が低いとされた。これに対して、地球磁場強度推定値が信頼できるものであることを示すために、Tarduno *et al.* (2020) ではいくつかの検証実験を行った。

ジャックヒルズのジルコン結晶 (第 5 図左) は珪質碎屑岩 (第 3 図下部) に含まれるが、堆積年代は 30.5 億年よりも若く 26.5 億年よりも古いとされている (Rasmussen *et al.*, 2010)。Tarduno *et al.* (2015) では石英に含まれるジルコン結晶から地球磁場強度の推定を行ったが、熱変成作用による石英中の二次的磁性鉱物の影響の可能性が指摘されていた。この可能性を排除するために、産総研の CO₂ レーザー加熱装置を用いて微弱な磁化を持つジルコン結晶とそれを取り囲んでいる石英を地球磁場程度の磁場中で 575 °C まで加熱し、走査型 SQUID 磁気顕微鏡で分析したところ、ジルコンは磁化され (第 5 図中央)、石英は磁化されなかった (第 5 図右)。これにより、ジルコン結晶を取り囲んでいる石英には検出可能な量の磁性鉱物が含まれないことと、ジルコン結晶が地球磁場程度の磁場を記録しうる磁性鉱物 (磁鉄鉱) を含むことが確認できた。

また、ロチェスター大学で一つの石英に含まれる複数のジルコン結晶について 565-580 °C で分離できる自然残留磁化の方位を求めたところ、バラバラな方向を示した。こ



第 5 図 (左) ジャックヒルズの珪質碎屑岩から採取されたジルコン粒子の写真 (Tarduno 教授提供)。(中央) ジルコン粒子、および (右) 隣接する石英粒子を石英ガラス板の凹みに固定して地球磁場程度の鉛直上向き磁場中で CO₂ レーザーを用いて 575 °C で加熱した試料を走査型 SQUID 磁気顕微鏡で分析した磁気マップを 3 次元表示したもの。センサと石英ガラス板表面の距離は約 240 μm。日本周辺の地球磁場は約 47000 nT。分析に用いたジルコン粒子は左の写真とは異なる。

のことは、この温度で記録されたジルコン結晶中に残る地球磁場は、ジャックヒルズの岩石が 26.5 億年前に経験したとされる変成作用による熱の影響を受けていないことを示唆する。一方で、100-400 °C で分離できる中低温成分の自然残留磁化方位は大円上に並ぶ結果となったが、このことは中低温成分が 26.5 億年前の加熱時の地球磁場逆転を記録している可能性を示唆する。

ジルコン結晶中のウランが放射壊変した原子核およびヘリウム原子核 (α 粒子) は、結晶に欠陥を作る (メタミクト化)。ジャックヒルズのジルコン結晶は古いため、特に含まれるウランが多い場合はジルコン結晶の結晶格子のダメージは大きい。このような結晶欠陥が結晶の表面に出た場合、熱変成作用に伴う熱水によってさらにダメージが広がって結晶内部まで熱水が浸入する。このため、Tarduno *et al.* (2015) では厳格な評価基準を設けてダメージを受けたジルコン結晶を排除した結果、ジルコン結晶全体の 2% が分析すべき粒子として採択された。Tarduno *et al.* (2020) で新たに分析を行ったジルコン結晶も同じ評価基準で選んでいる。

特に、磁性鉱物の分布がジルコン結晶中の割れ目や結晶欠陥と関連している可能性について、光学顕微鏡、光学磁気顕微鏡、イオンビーム削剥と電子顕微鏡などを用いて観察し、ジルコン結晶中に安定な残留磁化を担う 200-300 nm の磁鉄鉱が分布すること、周辺の割れ目に鉄が分布しないことが確認された。さらに、磁気光学顕微鏡で確認された結晶内部の磁性鉱物をイオンビームで削剥後に電子顕微鏡で観察し、流体中に斜長石が存在すること、その斜長石に磁鉄鉱が含まれることが確認された。この流体の周囲に割れ目は存在しないため、これはジルコン結晶が成長したときのものであり、さらに斜長石中の磁鉄鉱はジルコン結晶ができたときのものであると思われる。

5. 地球磁場強度と地球中心核における対流運動

現在、地球のコアでは内核が成長しており、これが外核での対流のエネルギー源であると理解されている。鉄・ニッケルに富む内核の成長によってコアに含まれる軽元素 (珪素・硫黄・酸素など; Zhang *et al.*, 2016) が放出され、マントルに向かって上昇することで対流が生じる。この組成対流 (組成の違いによる密度差が原動力) と熱対流 (熱による密度差が原動力) が地磁気ダイナモのエネルギー源であると考えられている。

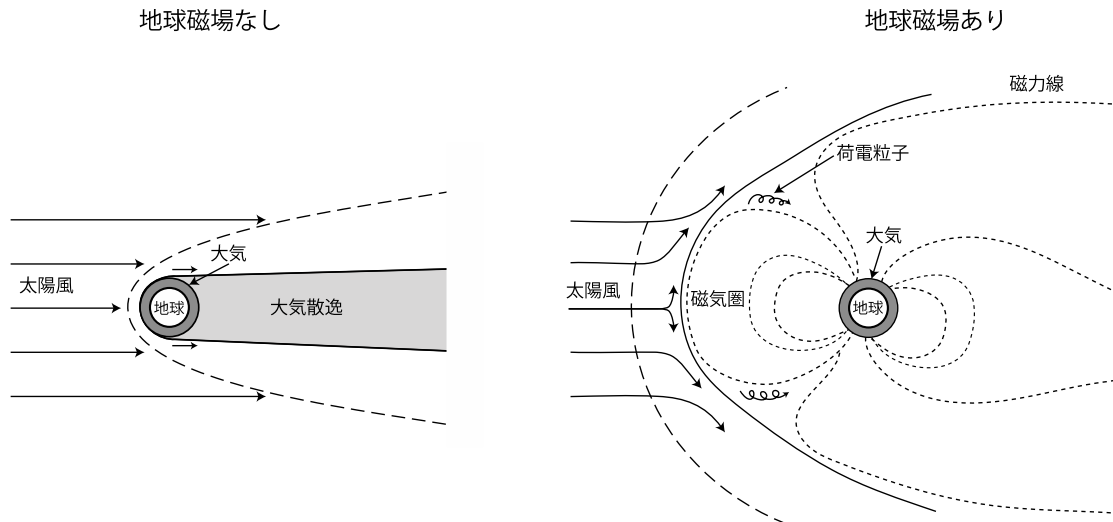
ところで、電気も熱も主に電子で運ばれるため、電気伝導度を知ることにより熱伝導度を知ることができる。

Ohta *et al.* (2016) はコアの温度・圧力条件での鉄の電気伝導度を実験によって求め、それから推定される熱伝導度から、内核が形成されたのは 7 億年前以降であると推定した。一方で、地球磁場記録から内核が形成されたのは 15 ~ 10 億年前頃 (Biggin *et al.*, 2015), あるいは 5.65 億年前以降 (Bono *et al.*, 2019) であるとされているが、後者は電気伝導度から推定された内核形成時期とよく一致している。

内核が形成される以前は内核成長に伴う組成対流が無いため、対流で供給される地磁気ダイナモのエネルギー源が小さい。しかし、特に月ができたときの巨大衝突直後の初期地球はコアの温度が高かったために、通常マントルに含まれるマグネシウムがコアに取り込まれ、その後地球全体が冷却されて酸化マグネシウムとしてコアからマントル下部に付け加わった可能性が示された (例えば Badro *et al.*, 2016)。彼らは、この酸化マグネシウムの上昇による組成対流が、内核形成される以前の流体核において地磁気ダイナモの大きなエネルギー源になったとしている。Tarduno *et al.* (2020) では、40 ~ 41 億年前に現在の地球磁場程度の磁場強度を示すことから、この頃の磁場発生メカニズムとして酸化マグネシウムの上昇に起因する組成対流が地磁気ダイナモの駆動力であった可能性を示唆した。また、その後長い間地球磁場強度が現在の地球磁場の半分程度と低めになっているのは、その後酸化マグネシウムの上昇が止まり、地磁気ダイナモの駆動エネルギーが低くなった可能性にも触れている。

6. 地球磁場による太陽風からの保護と生命活動

太陽からは高温の荷電粒子 (プラズマ) からなる太陽風が常時流れ出し地球まで到達しているが、現在の地球では地球磁場 (磁気圏) がこれら荷電粒子の地表への侵入を食い止めている (第 6 図)。地球磁場が無かったり弱かったりすると、高速の荷電粒子が地球大気に侵入して酸素や窒素などの大気分子が宇宙空間にはじき飛ばされて急速に失われるが、これを大気散逸と呼ぶ。大気散逸の程度は大気分子の種類によって異なるため、過去から現在までの地球磁場の状況によって惑星大気の組成も影響を受ける。現在の火星大気は 0.006 気圧とされているが、40 億年前の火星の大気は約 0.5 気圧以上の厚い大気で覆われていたとされている (Kurokawa *et al.*, 2017)。火星の質量は地球の約 10 分の 1 で、火星表面の重力は地球の 40% なので、地球に比べると大気が宇宙空間に流出しやすい。さらに、ダイナモ作用による火星磁場は約 40 億年前には存在してい



第6図 太陽風による大気散逸の様子。左と右は、それぞれ地球磁場が存在しない状態（地球創世直後）と存在する状態（現在および地磁気ダイナモによる地磁場発生後）に対応する。

たとされるが (O'Rourke and Shim, 2019), 現在, 火星磁場は失われて火星表面の岩石が磁化しているのみである。このため, 太陽風の侵入による大気散逸が起こって, 火星大気圧が低くなっていると考えられている。

先述したとおり, 地球大気は約 45 億年前から形成され始めたとされる。Tarduno *et al.* (2020) により, 約 42 億年前には地球磁場が存在した可能性が高いことが示されたが, このことは当時から太陽風による大気散逸を地球磁場が防いでいたことになり, 現在の地球の大気組成に大きな影響を与えてきたことになる。また, 地球磁場は宇宙線粒子の侵入を防ぐことによって生命の維持に貢献している。さらに, 紫外線は成層圏のオゾン層で吸収されるが, 地球磁場は宇宙線粒子の侵入を防ぐことでオゾン層が破壊されることも防いでいる。最近, 約 40 億年前の生命の痕跡が報告されたが (Tashiro *et al.*, 2017), その頃から地球磁場が存在したことが, 生命の維持に大きな役割を果たしたであろうと推察される。

謝辞: なお, 本研究は, 日本学術振興会の外国人招聘研究者 (短期) (2017 年度) 「SQUID 顕微鏡を用いたジルコン単結晶による地球磁場強度の高信頼度推定」(ロチェスター大学 John Tarduno 教授) による支援を受けた。また, 分析に用いた SQUID 磁気顕微鏡は日本学術振興会の科学研究費補助金基盤研究 (A) (2013 ~ 2016 年度) 「SQUID 顕微鏡による惑星古磁場の先端的研究の開拓」による支援を受けて開発した。

文献

- Badro, J., Siebert, J. and Nimmo, F. (2016) An early geodynamo driven by exsolution of mantle components from Earth's core. *Nature*, **536**, 326–328, doi:10.1038/nature18594.
- Barboni, M., Boehnke, P., Keller, B., Kohl, I. E., Schoene, B., Young, E. D. and McKeegan, K. D. (2017) Early formation of the Moon 4.51 billion years ago. *Science Advances*, **3**, e1602365, doi:10.1126/sciadv.1602365.
- Biggin A. J., de Wit, M. J., Langereis, C. G., Zegers, T. E., Voûte, S., Dekkers, M. J. and Drost, K. (2011) Palaeomagnetism of Archaean rocks of the Onverwacht Group, Barberton Greenstone Belt (southern Africa) : Evidence for a stable and potentially reversing geomagnetic field at ca. 3.5 Ga. *Earth and Planetary Science Letters*, **302**, 314–328, doi:10.1016/j.epsl.2010.12.024.
- Biggin, A. J., Piispa, E. J., Pesonen, L. J., Holme, R., Paterson, G. A., Veikkolainen, T. and Tauxe, L. (2015) Palaeomagnetic field intensity variations suggest Mesoproterozoic inner-core nucleation. *Nature*, **526**, 245–248, doi:10.1038/nature15523.
- Bono, R.K., Tarduno, J.A., Nimmo, F and Cottrell, R. D. (2019) Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity. *Nature Geoscience*, **12**, 143–147, doi:10.1038/s41561-018-

- 0288-0.
- Brunhes, B. (1906) Recherches sur la direction de l'aimantation des roches volcaniques. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 4ème série, 5, 705–724.
- Cottrell, R. D., Tarduno, J. A., Bono, R. K., Dare, M. S. and Mitra, G. (2016) The inverse microconglomerate test: Further evidence for the preservation of Hadean magnetizations in metasediments of the Jack Hills, Western Australia. *Geophysical Research Letters*, 43, 4215–4220, doi:10.1002/2016GL068150.
- Fukuzawa, T., Nakamura, N., Oda, H., Uehara, M. and Nagahama, H. (2017) Generation of billow-like wavy folds by fluidization at high temperature in nojima fault gouge: microscopic and rock magnetic perspectives. *Earth, Planets and Space*, 69, 54, doi:10.1186/s40623-016-0493-2.
- Glatzmaiers, G. and Roberts, P. (1995) A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature*, 377, 203–209, doi:10.1038/377203a0.
- Hosono, N., Karato, S., Makino, J. and Saitoh, T. R. (2019) Terrestrial magma ocean origin of the Moon. *Nature Geoscience*, 12, 418–423, doi:10.1038/s41561-019-0354-2.
- Kawai, J., Oda, H., Fujihira, J., Miyamoto, M., Miyagi, I. and Sato, M. (2016) SQUID Microscope With Hollow-Structured Cryostat for Magnetic Field Imaging of Room Temperature Samples. *IEEE Transactions of Applied Superconductivity*, 26, 1–5, doi:10.1109/TASC.2016.2536751.
- Kurokawa, H., Kurosawa, K. and Usui, T. (2017) A lower limit of atmospheric pressure on early Mars inferred from nitrogen and argon isotopic compositions. *Icarus*, 299, 443–459, doi:10.1016/j.icarus.2017.08.020.
- Matuyama, M. (1929) On the direction of magnetization of basalt in Japan, Tyosen and Manchuria. *Proceedings of the Imperial Academy (Tokyo)*, 5, 203–205.
- Morbidelli, A., Nesvorný, D., Laurenz, V., Marchi, S., Rubie, D. C., Elkins-Tanton, L., Wieczorek, M. and Jacobson, S. (2018) The timeline of the lunar bombardment: Revisited. *Icarus*, 305, 262–276, doi:10.1016/j.icarus.2017.12.046.
- Noguchi, A., Oda, H., Yamamoto, Y., Usui, A., Sato, M. and Kawai, J. (2017) Scanning SQUID microscopy of a ferromanganese crust from the northwestern Pacific: Submillimeter scale magnetostratigraphy as a new tool for age determination and mapping of environmental magnetic parameters. *Geophysical Research Letters*, 44, 5360–5367, doi:10.1002/2017GL073201.
- Oda, H., Kawai, J., Miyamoto, M., Miyagi, I., Sato, M., Noguchi, A., Yamamoto, Y., Fujihira, J., Natsuhara, N., Aramaki, Y., Masuda, T. and Xuan, C. (2016) Scanning SQUID microscope system for geological samples: system integration and initial evaluation. *Earth, Planets and Space*, 68, 179, doi:10.1186/s40623-016-0549-3.
- Ohta, K., Kuwayama, Y., Hirose, K., Shimizu, K. and Ohishi, Y. (2016) Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions. *Nature*, 534, 95–98, doi: 10.1038/nature17957.
- O'Rourke, J. and Shim, S. - H. (2019) Hydrogenation of the Martian Core by Hydrated Mantle Minerals With Implications for the Early Dynamo, *Journal of Geophysical Research - Planets*, 124, 3422–3441, doi: 10.1029/2019JE005950.
- Pastore, Z., McEnroe, S. A., ter Maat, G. W., Oda, H., Church, N. S. and Fumagalli, P. (2018) Mapping magnetic sources at the millimeter to micrometer scale in dunite and serpentinite by high-resolution magnetic microscopy. *Lithos*, 232, 174–190, doi:10.1016/j.lithos.2018.09.018.
- Rasmussen, B., Fletcher, I. R., Muhling, J. R. and Wilde, S. A. (2010) In situ U-Th-Pb geochronology of monazite and xenotime from the Jack Hills belt: Implications for the age of deposition and metamorphism of Hadean zircons. *Precambrian Research*, 180, 26–46, doi: 10.1016/j.precamres.2010.03.004.
- Rasmussen, B., Fletcher, I. R., Muhling, J. R., Gregory, C. J. and Wilde, S. A. (2011) Metamorphic replacement of mineral inclusions in detrital zircon from Jack Hills, Australia: Implications for the Hadean Earth. *Geology*, 39, 1143–1146, doi:10.1130/G32554.1.
- 産業技術総合研究所 (2020) 地層「千葉セクション」の I U G S (国際地質科学連合) における審査結果について.

- https://www.aist.go.jp/aist_j/news/pr20200117_2.html
閲覧日：2020年3月13日。
- Takahashi, F., Matsushima, M. and Honkura, Y. (2005) Simulations of a Quasi-Taylor State Geomagnetic Field Including Polarity Reversals on the Earth Simulator. *Science*, **309**, 459–461, doi:10.1126/science.1111831.
- Tang, F., Richard J. M. Taylor, Josh F. Einsle, Cauê S. Borlina, Roger R. Fu, Benjamin P. Weiss, Helen M. Williams, Wyn Williams, Lesleis Nagy, Paul A. Midgley, Eduardo A. Lima, Elizabeth A. Bell, T. Mark Harrison, Ellen W. Alexander and Richard J. Harrison (2019) Secondary magnetite in ancient zircon precludes analysis of a Hadean geodynamo. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**, 407–412, doi:10.1073/pnas.1811074116.
- Tarduno, J. A., Cottrell, R. D., Watkeys, M. K. and Bauch, D. (2007) Geomagnetic field strength 3.2 billion years ago recorded by single silicate crystals. *Nature*, **446**, 657–660, doi:10.1016/j.precamres.2010.03.004.
- Tarduno, J. A., Cottrell, R. D., Watkeys, M. K., Hofmann, A., Doubrovine, P. V., Mamajek, E. E., Liu, D., Sibeck, D. G., Neukirch, L. P. and Usui, Y. (2010) Geodynamo, solar wind and magnetopause 3.45 billion years ago. *Science*, **327**, 1238–1240, doi:10.1126/science.1183445.
- Tarduno, J., Cottrell, R., Davis, W., Nimmo, F. and Bono, R. (2015) A Hadean to Paleoproterozoic geodynamo recorded by single zircon crystals. *Science*, **349**, 521–524, doi:10.1126/science.aaa9114.
- Tarduno, J. A., Cottrell, R. D., Bono, R. K., Oda, H., Davis, W. J., Fayek, M., van 't Erve, O., Nimmo, F., Huang, W., Thern, E. R., Fearn, S., Mitra, G., Smirnov, A. V. and Blackman, E. G. (2020) Paleomagnetism indicates that primary magnetite in zircon records a strong Hadean geodynamo. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **117**, 2309–2318, doi:10.1073/pnas.1916553117.
- Tashiro, T., Ishida, A., Hori, M., Igisu, M., Koike, M., Méjean, P., Takahata, N., Sano, Y. and Komiya, T. (2017) Early trace of life from 3.95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada. *Nature*, **549**, 516–518, doi:10.1038/nature24019.
- Weiss, B. P., Maloof, A. C., Tailby, N., Ramezani, J., Fu, R., Hanus, V., Trail, D., Watson, E. B., Harrison, T. M., Bowring, S. A., Kirschvink, J. L., Swanson-Hysell, N. L. and Coe, R. S. (2015) Pervasive remagnetization of detrital zircon host rocks in the Jack Hills, Western Australia and implications for records of the early geodynamo. *Earth and Planetary Science Letters*, **430**, 115–128, doi:10.1016/j.epsl.2015.07.067.
- Weiss, B. P., Fu, R., Einsle, J.F., Glenn, D. R., Kehayias, P., Bell, E. A., Gelb, J., Araujo, J. F.D.F., Lima, E. A., Borlina, C. S., Boehnke, P., Johnstone, D. N., T. Mark Harrison, T. M., Harrison, R. J. and Walsworth, R. L. (2018) Secondary magnetic inclusions in detrital zircons from the Jack Hills, Western Australia, and implications for the origin of the geodynamo. *Geology*, **46**, 427–430, doi:10.1130/G39938.1.
- Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H. and Graham, C. M. (2001) Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, **409**, 175–178.
- 坂本尚義 (2000) 太陽系の年代学, 天文月報, **93**, 121–133.
- Zhang, Y., Sekine, T., He, H., Yu, Y., Liu, F. and Zhang, M. (2016) Experimental constraints on light elements in the Earth's outer core. *Scientific Reports*, **6**, 22473, doi:10.1038/srep22473.
-
- ODA Hirokuni (2020) Geomagnetic Field, Evolution of Earth and Life.
-
- (受付：2020年3月13日)