

§ 16 磁石と地球磁場

人類が古くから磁石や磁力に興味を持ったのは、地球磁場が存在し、磁石としての磁鉄鉱が地球表層に分布しているからである。「地球は一つの巨大な磁石」と述べた William Gilbert (1544~1601)は、その著書『磁石論』で、静電気力や磁力を生じさせ、規則的な天体の運行や地球の自転を支配するものは、「創造主が与えた霊魂の力」と述べた。この『磁石論』が Johannes Kepler (1571~1630)に衝撃を与え、近代西洋科学成立の礎が作られた。そして、「霊魂の力」は重力、電気力、磁力の「遠隔力」として承認されてゆく。これは山本義隆氏が「磁力と重力の発見」²⁹⁾で説く Gilbert 論であり、その著書の結論でもあるようだ。磁石と地球磁場に対する人類の興味がどのような歴史を生み出したのか、山本氏の著書も手がかりにして概観し、磁場を考える序章としよう。

1) 磁石としての鉱物：磁鉄鉱

磁石としての磁鉄鉱 (magnetite, Fe_3O_4) が示す不思議な性質は、古代から知られており、ギリシャ時代の文献にも、マグネシア (Magnesia) と呼ばれる地域に産する鉱物 (磁鉄鉱 magnetite) が、鉄片や指輪を引きつけ、これらを鎖のようにつなげて引きつけるとの記述がある²⁹⁾。この地名マグネシアが現在の英語の磁石 (magnet) の語源とされる。ただし、マグネシアと呼ばれた地域が、小アジアあるいはマケドニアの何処なのかは判然としないとも記されている²⁹⁾。一方、マグネシアの地名は元素のマグネシウム (Mg) にも関連している。現在でもマグネシアはマグネシウム酸化物 (MgO) の意味で使用する。Weeks と Leicester の『元素発見の歴史』³⁰⁾ のマグネシウムの項には該当する記述は見当

たらないが、手元の辞書³¹⁾には、MgO のマグネシアも元素名マグネシウム(Mg)も、ギリシャ Thessaly 地方の金属鉱床が分布する地域の地名マグネシア (Magnesia) に由来するとの記述がある。地名マグネシア (Magnesia) が Fe_3O_4 と MgO を結びつけていることになるが、両者の共通の語源が産出地名であることは、自然界で両者が共存する事実を反映した結果であるように思える。

ところで、地球は外側に大気と海洋を持つが、これらのガスや水の流体層を除いた部分は固体地球と呼ばれる。固体地球は球体で近似され、その半径は 6400km である。固体地球はほぼ半径方向に成層した構造を持っている。表層部は地殻(crust)と呼ばれ、様々な種類の岩石が 30~50km の深さまでを占めている。地殻の下の部分はマントル(mantle)と呼ばれ、地表から約 2900km の深さまでをケイ酸塩岩石が占める。その更に深部は核(core)と呼ばれる Fe・Ni を主体とする部分で、この核が地球の中心部を占めている。

固体地球のマントル上部を構成する主たる物質は、カンラン石(olivine) と呼ばれる Mg に富むケイ酸塩鉱物であると考えられている。通常は、 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ として 10% 足らずの Fe_2SiO_4 を固溶する。カンラン石など苦鉄質(Mg,Fe)鉱物からなる火成岩は超苦鉄質岩と呼ばれ、上部マントルを構成するケイ酸塩岩石であると信じられている。これら超苦鉄質岩では、しばしば、 Mg_2SiO_4 に富むカンラン石が磁鉄鉱 (Fe_3O_4) と “共存” している。カンラン石が変質して蛇紋石 (serpentine, $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) となる際に、カンラン石の Fe_2SiO_4 成分が磁鉄鉱 (Fe_3O_4) に変化する反応が起こるからである。また、火成活動の過程で上部マントル物質が熔融し、その高温ケイ酸塩マグマから Mg に富むカンラン石や輝石と共に磁鉄鉱も晶出したと考えられる場合もある。その場合は純粋の磁鉄鉱で

はなく、かなりの TiO_2 を含むみチタン磁鉄鉱(titanomagnetite)であることが多い。マグネシア (Magnesia) と呼ばれた地域には、このような産状の超苦鉄質あるいは苦鉄質岩が分布していたものと筆者は想像する。比重の大きな磁鉄鉱だけを磁石として選別するのは容易である。

一方、我が国の山陰地方を中心に発展した古代 “たたら” 製鉄では、磁鉄鉱を大量の木炭で還元し鉄を作った³²⁾。磁鉄鉱は“岩鉄”と呼ばれ、この地域に広く分布する花崗岩に少量含まれる磁鉄鉱がその原料であった。花崗岩は地表の風化で変質し、その構成物は降雨により水流懸濁物となって河川を經由して沿岸海域へ運搬される。この過程では、花崗岩に含まれていた磁鉄鉱粒子は比重が他のケイ酸塩鉱物より大きいため、河川堆積物の特定層準や部分に濃集しやすい。このような磁鉄鉱の濃集した堆積物（砂鉄）が“たたら”製鉄の鉄鉱石原料であった。島根県東端の安来市(やすきし)は、民謡「安来節」の発祥の地である。「安来節」のユーモラスな踊りは「どじょう（泥鰻）をすくい取る姿」を表現するとされている。しかし、本当の起源は「土壌すくい」にあり、「すくった土壌を水中で洗うことで砂鉄の磁鉄鉱を選り分ける作業姿」に由来することである。このような砂鉄層は、山陰地域のみならず、韓国南部、九州にも分布しており、この争奪は古代国家の盛衰とも関連するに違いない。“たたら”製鉄以来の伝統は歴史に名を残す有能な刀工を輩出させた。また、結果として、19世紀以降の我が国が西洋式製鉄法を受容し、それを発展させることにもつながったに違いない。しかし、自らの自然観を自信をもって開陳する William Gilbert のような人物を生まなかつたのも事実である。

2) 羅針盤, 地磁気, 磁力の逆二乗則

山本氏の「磁力と重力の発見」²⁹⁾によれば, 磁石(磁鉄鉱)で擦られた鉄製の針(磁針)が地理上の南北を示すことは, 中国・宋の時代(1088年頃)の文献に記述があるものの, 磁針が航海用羅針盤としてヨーロッパではじめて利用された年代は明確ではない。しかし, 少なくとも12世紀末以前のヨーロッパでは航海用の羅針盤として利用されていたのは確からしい。そして, 磁針を利用した航海用羅針盤は, 15世紀末から16世紀にかけての南ヨーロッパ人の大航海時代を準備する。その一つの結果として, 1543年, ポルトガル人が種子島に上陸した。この翌年の1544年, 後の1600年に『磁石論』を著し, 地球自体が一つの巨大な磁石であると指摘した William Gilbert (1544~1601)がイギリスで生まれている。彼はエリザベス女王の侍医となる医者であったが, 電気力と磁力の研究にも強い関心を持った。そして, 死去する前年の1600年に出版した『磁石論』において, 次のような地球の運動像を記した。“創造主の驚くべき知性によって, 本源的な靈魂の力が地球に植え付けられているのであり, かくして地球は決まった方向をとり, 両極はそれを両端とする軸のまわりに日周運動が可能となるように正しく相対して置かれている。両極は本源的な靈魂の支配によって一定の方向に維持されているのである。” このように, ギルバートの「磁気哲学」は, 「靈魂の力」として地球の磁力・重力を理解する²⁹⁾。この書は, プラトン流の幾何学的宇宙に共感するものの, コペルニクスの地動説を擁護し, 惑星運行の秘密を知りたいと願っていた新教徒の青年ヨハネス・ケプラー(1571~1630)に一つの精神的衝撃を与える。

「精神的衝撃」の意味を明確にする為に, 別の例を挙げることにする。シュ

シュレディンガー方程式を発見し、1933年、ノーベル物理学賞を授与されたシュレディンガーは、それから10年後の1943年、アイルランド・ダブリン高等研究所で『生命とは何か?』と題する一般向け講演を行う。その内容は直ちに出版され、各国語に翻訳された。第二次世界大戦後、解放的な気分が回復した社会にあつて、科学者を志す世界の多数の若者に対し、この小冊子は大きな精神的衝撃を与えた。我が国でも、1951年に岩波新書の一冊として出版され、今日に至っている。そして、更に10年後の1953年、ワトソンとクリックによる「DNAの二重らせん構造」の発見に至る。これはシュレディンガーの著書「生命とは何か?」が与えた精神的衝撃の一つの結果である。時代の隔たりはあるが、ヨハネス・ケプラーにとってのギルバートの『磁石論』は、ワトソンとクリックにとってのシュレディンガー著『生命とは何か?』と同じような役割を果たしたものである。

ヨハネス・ケプラーは、ギルバートの『磁石論』が出版された1600年、プラハ天文台のチコ・ブラーエ（1546~1601）の門下に入り、火星軌道を決定する課題に取り組むことになる。同時に彼は、出版されたばかりのギルバート著『磁石論』が説く「霊魂の力」としての地球の磁力・重力論に自らの問題解決の糸口を直感する。翌年の1601年、チコ・ブラーエは死去し、チコ・ブラーエによる20年間以上にわたる天体軌道観測結果の検討は、ギルバートの『磁石論』に共感するケプラーに委ねられる。そして、よく知られているように、ケプラーはその観測記録を第一法則（楕円軌道）、第二法則（面積定理）に結晶化させ、Newton力学の礎を築く。結果として、ギルバートの「霊魂の力」は、17~18世紀に於けるNewton力学の「遠隔力」に姿を変えて認知されてゆく²⁰⁾。万有引

力と同様に，静電気力も磁極間に作用する磁気力も距離の逆二乗に比例する「遠隔力」として理解される．クーロン(Coulomb, C. A., 1736~1806) は，遠隔力の逆二乗則に導かれ，静電気力と同様に磁極間に作用する磁力にも，逆二乗則が成立することを測定により示した．正電荷に当たる“正の磁荷”を N 極，負電荷に当たる S 極を“負の磁荷”とすると，静電気力に対するクーロン則と同様な結果になる．1785 年のことである．

しかし，棒状磁石を二つに分割しても，分割部分から N 極と S 極の対が新たに生じる．更に分割しても同じである（図 16-1）．これは古くから知られてい

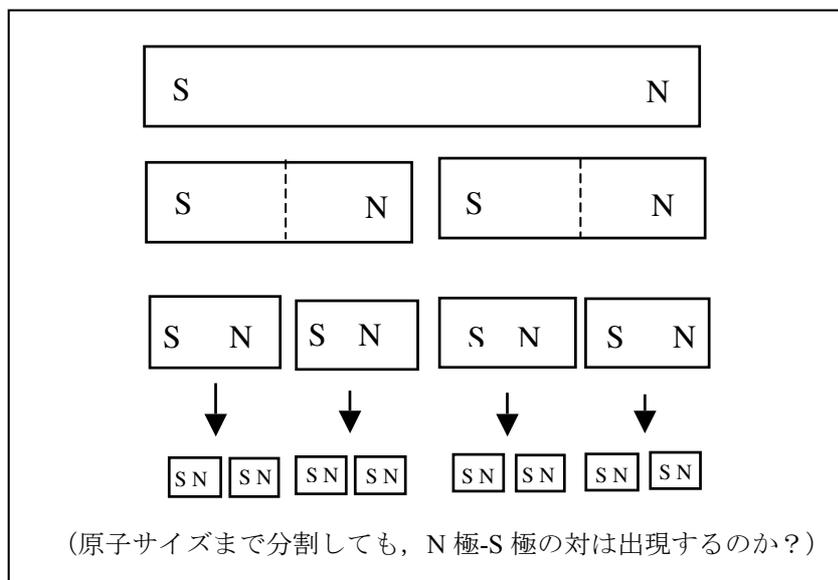


図 16-1. 棒磁石を分割しても N 極と S 極を分離することは出来ない．

た事実である²⁹⁾．N 極だけ，S 極だけが単独では存在しないことを意味する．正電荷と負電荷が単独に存在できることとは事情が異なる．棒状磁石には符号だけが異なる“磁荷”が N 極と S 極にあると考えるなら，棒状磁石の“磁荷”の和は常に 0 である．棒状磁石のように，ある距離だけ隔てて置かれた“正負の磁荷”の対は磁気双極子(magnetic dipole)と呼ばれる (§ 19-3)．これは，正負

の電荷の同様な配置の電気双極子(electric dipole) (§ 6-9, 10) に対応している。

§ 19-3 で議論するように、電気双極子が遠方に作る電場は、磁気双極子がつくる同様な遠方磁場に正確に対応する。しかし、磁気双極子を“正負磁荷の対”で考えるものの、“磁荷”が実在する訳ではない。磁性物質を構成原子のサイズまで分割を続けても N 極と S 極が残るとすれば (図 16-1), 原子を文字通り“それ以上分割できない粒子”と考える限り、磁気双極子は原子の何らかの特性に起因することになる。その手掛かりは、電流が磁場を作る事実の発見であった。そして、磁気双極子は原子における電子の定常運動、即ち、原子サイズの環状電流に帰着される (§ 19-4)。

3) 電流による磁場, 電磁誘導, 電子のスピン

電流が磁場を作ることは、1819 年、エルステッド (H. C. Oersted) が発見した。これを端緒に定常電流によって静磁場が生じることが判った (アンペールの法則, ビオ・サバールの法則)。閉曲線を流れる電流は、棒状磁石と同様の磁気双極子を作り出す。電流の磁化作用とは逆に、磁場の変化が電流を生じる現象、電磁誘導、が 1831 年にマイケル・ファラデーによって発見された。電磁誘導では、時間とともに変化する磁場・電流が問題となる。磁石がつくる静磁場や N 極と S 極の示す引力、同種極の反発力の意味することは、電流の磁化作用と電磁誘導の発見を経て理解され、Maxwell 方程式として結実し、Hertz の電磁波の発見を導く。同時に、電磁誘導の現象は運動の相対性とこれを表現する座標系の問題、「真空空間を満たすエーテル」の存否の問題、につながって行く。そして、Einstein の「特殊相対性原理」(1905)に至る (§ 27)。

しかし、磁石・磁性の究極的原因は物質を構成する電子の定常的運動と電子が持つ固有のスピン磁気モーメントに由来するとの理解が得られるには、量子力学の発展を待たねばならなかった。それはクーロン則の提唱から更に 140 年以上の年月を要した。1925 年、Goudsmit, S.A. と Ulenbeck, G. E. は、電子がその軌道運動の角運動量他に、電子自身がスピン角運動量を持つとの仮説から、アルカリ金属元素のスペクトル線の微細構造を説明した。さらに、1928 年にディラック (Dirac, P. M.) は、電子の相対論的量子論からこの電子のスピン磁気モーメントを導出することに成功する。「古典的電磁気学」の枠組みの中で、磁場、磁性の記述は可能になった。だが、これらの存在理由の説明はこの学問の枠組みの外側に求めねばならない。しかしながら、物質電子のミクロな挙動から物質の磁性が全て解明された訳ではない。高温超伝導物質が示す電気的特性や磁性の問題はそのような例であろう。磁性物質は多様でその基礎・応用研究の幅は広くその奥行きも大きい。

4) 地磁気のダイナモ・モデル

一方、ギルバートが“創造主の驚くべき知性によって、本源的な靈魂の力が地球に植え付けられている”とした地球磁場はその後どのように理解されるに至ったのだろうか？ 地磁気については、N 極と S 極が突然入れ替わる「地磁気の逆転」現象が地球の歴史の中で何回も起こっていることが判った。“創造主は驚くべき気まぐれな仕掛け”を設けていたのである。「地球磁場」が双極子磁場で近似でき、地球内部にその原因があることは確かであるが、棒磁石のような永久磁石が地球内部存在する訳ではない。高温の地球内部では永久磁石も

その磁性を失うからである。双極子磁場は様々な時間スケールで変動している。比較的緩慢な経年変化も存在するので、地磁気の偏角も伏角も変化することが判っている。

上述のように地球の半径は約 6400 km で、地表から 2900 km 以浅の部分は地殻とマントルと呼ばれ、この部分はケイ酸塩の岩石で構成されている。一方、2900 km 以深の地球中心部は核(core)と呼ばれ、Ni を含む金属 Fe から成ると信じられている。核は外核(outer core)と内核 (inner core) にさらに区分されるが、外核は地震波の S 波が伝播しないため、液体状態にあると考えられる。しかし、内核は S 波が伝播するので固体である (§ 24-4)。液体 Fe の外核も固体 Fe の内核も十分な電気伝導度を持つことが期待できる。従って、もし核に定常的な電流を維持する何らかの機構があれば、「地球磁場」が維持される可能性が考えられる。電流が流れれば、ジュール熱となって電流は減衰するので、この減衰量を補う電流が「発電機(dynamo)に類似する機構」で供給される必要がある。その為の力学的エネルギー供給源は、多分、液体 Fe の外核での流体運動であろうと考える。このような考え方は「ダイナモ・モデル」と呼ばれ、超高温(~5000K)・超高压(~1.5Mbar)での Fe の電磁流体論となる。これは難問で^{33, 34)}、様々な「ダイナモ・モデル」が検討されているが、地磁気の逆転、双極子磁場の永年変化などの観測量を十分に再現する具体的なモデルは確定していない。ギルバートが夢想した“創造主が地球に植え付け靈魂の力の仕組み”地球磁場の問題は依然として未解決である。今日でも多くの研究者がこの問題に挑戦している。