

磁氣的パラメータによる環境の復元とモニタリング

吉田充夫（東京支部・ジオサイエンス（株）地質分析センター）

Environmental Analysis and Monitoring by Rock-magnetic Parameters

Mitsuo Yoshida (Geoscience Co.,Ltd., Tokyo, myoshida@mtci.or.jp)

堆積物の岩石磁氣的性質は、堆積物中に含有される磁性鉱物の種類、粒子サイズ、含有量（濃集度）に依存する。これらのファクターはいずれも堆積物の形成時の環境に左右されるものであり、従って、古環境の指示者として捉えることが可能である。環境磁気学（Environmental magnetism）と呼ばれるこの種のアプローチは、近年機器測定技術の向上やデータの蓄積とあいまって、急速に研究が進んだ分野であり、「第四紀環境変動の高精度復元」を展望するにあたって欠くことのできない情報を提供すると期待される。本講演では、筆者らがこれまで行ってきたパキスタンでのレス（黄土堆積物）の環境磁気学的分析などの例（Akram et al., 1998）を用いて、磁氣的パラメータによる環境復元の現状と問題点についてレビューし、また、第四紀堆積物のみならず現世堆積物による環境モニタリングの可能性についても検討したい。

I. 磁氣的パラメータ

堆積物の環境解析に用いることのできる岩石磁氣的パラメータを測定手法の観点から大別すると、①帯磁率（magnetic susceptibility）に関わるもの、②磁気ヒステリシス（magnetic hysteresis）に関わるもの、③残留磁化（remanent magnetization）に関わるもの、④温度・磁気特性（thermomagnetic property）に関わるもの、がある。これらは、それぞれ堆積物中の磁性鉱物の種類、含有量、粒子サイズ、によって変化する。

（1）帯磁率（magnetic susceptibility）

すべての堆積物は磁場中において、なんらかの磁化（magnetization; M ）を示す。磁場（ H ）が小さい場合には、 $M=kH$ で表わされる単純な比例関係が成立し、この比例係数 k を「帯磁率」、厳密には「初帯磁率」（initial magnetic susceptibility）または「初磁化率」と呼ぶ。

堆積物の初帯磁率は、一般にその中に含まれ

る広義の強磁性鉱物（フェリ磁性鉱物の磁鉄鉱、寄生強磁性鉱物の赤鉄鉱など）の含有量を示すパラメータであると解釈されている。しかし、この解釈は必ずしも正しくなく、堆積物中に含まれる磁性鉱物の種類毎の粒度組成と含有量に規定されている個々の帯磁率の総和を測定しているのが現実である。こうした帯磁率の複合的な要素を分析するために、周波数依存性により粒子サイズを推定したり、常磁性帯磁率とフェリ磁性帯磁率を分離したり、後述の飽和磁化や飽和残留磁化により規格化する方法が提唱されている。

（2）磁気ヒステリシス（magnetic hysteresis）

上述の磁場を増大させた場合、磁化はそれともなつて徐々に増加し、最後には飽和に達する（飽和磁化 M_s ）。次に、磁場を減少させると磁化も減少し、磁場ゼロの状態でも磁化が残留する（飽和残留磁化 M_r ）。更に、逆方向に磁場を与えるやがて磁化はゼロとなる。この磁場の強さを抗磁力（ H_c ）と呼ぶ。また残留磁化がゼロとなる磁場の強さを残留抗磁力（ H_{cr} ）と呼ぶ。この磁場を更に増大すると逆方向の飽和磁化に達し、再び磁場を順方向に与えると、やがて最初の順方向の飽和磁化に戻る。この一連のプロセスによって形成される曲線はループを描き、ヒステリシス・ループと呼ぶ。

磁気ヒステリシスの特徴はとりわけ粒子サイズに強く依存している。抗磁力比（ H_{cr}/H_c ）と飽和磁化比（ M_r/M_s ）の X-Y プロット（Day-Fuller-Schmidt ダイアグラム）により、単磁区・疑似単磁区・多磁区サイズの識別が可能となる。但しこの場合も異なる磁性鉱物集団の混合である堆積物では挙動は単純ではなく、ヒステリシス・ループの形状の解析により、その識別が試みられている。

（3）残留磁化（remanent magnetization）

磁場中で誘導された磁化は、物質が常磁性または反磁性の場合外部磁場を除去すると消滅するが、多かれ少なかれ広義の強磁性鉱物を含む

堆積物では、残留磁化が認められる。自然残留磁化(NRM)は、良く知られているように古地磁気を解析する場合のソースである。環境磁気学的アプローチでは、実験室内で人工的に残留磁化を付与し、これにより解析を行う。よく用いられるのは等温残留磁化 (IRM) 及び非履歴性残留磁化 (ARM) である。

等温残留磁化は常温で極めて強い磁場を試料に与えることにより獲得される残留磁化であり、0.3T 付近で飽和に達するか否かで、フェリ磁性粒子と寄生反強磁性粒子の識別が可能となる。飽和度を数量的に表現するために、S-ratio ($S = \{-IRM_{0.3T}/SIRM\} + 1/2$) とか、HIRM ($HIRM = \{-IRM_{0.3T} + SIRM\}/2$) といったパラメータが用いられ、フェリ磁性粒子の含有量の推定に利用することができる。また、SIRM の消磁曲線や抗磁力により、粒子サイズの推定も可能である。

非履歴性残留磁化は粒子サイズに対する依存性が高く、その磁化率 (非履歴性残留磁化率) を飽和残留磁化で規格化したパラメータ ($\chi_{ARM}/SIRM$) は、極微粒の超常磁性粒子の存在を検討するのに役立つ。

(4) 温度-磁気特性

温度による磁化や残留磁化の変化は鉱物種により特徴的である。キュリー点や磁気的変態点により、含有する広義の強磁性鉱物の同定が可能である。また、等温残留磁化の低温から室温への昇温による消磁曲線により超常磁性粒子の含有量を推定する方法も提唱されている。

以上の磁気的パラメータを総括すると、基本的に3つの異なる条件、磁性鉱物の含有量 (飽和磁化、飽和等温残留磁化)、磁性鉱物の組成 (キュリー温度、低温特性、等温残留磁化)、磁性鉱物粒子のサイズ (ヒステリシス特性、非履歴性残留磁化率など)、に依存するパラメータとして分類することができ、初帯磁率はこれらの複合的なものといえる。

2. レス-古土壌における古環境解析の例

アジア大陸内部に分布するレスは新第三紀から第四紀にかけての連続的な堆積物であり、この時代の古環境の変遷を研究する上で絶好の対象である。中国黄土高原に分布するレス-古

土壌堆積物の初帯磁率変化曲線が古土壌部分で大きな値を示し、この変化パターンが深海底堆積物の酸素同位体比変化パターンと良く似たパターンを示すという Heller らの発見は、初帯磁率の変化を気候変動の指示者として用いる可能性を示した。初帯磁率の変化のメカニズムについては、前述の様々な磁気的パラメータを駆使し総合的な解析が進み、最近では土壌化による極微粒の強磁性鉱物の形成が初帯磁率増加の主要な原因ということではほぼ意見の一致を見てきている。すなわち、温暖湿潤気候による土壌化の進行が初帯磁率の増加に反映している。

筆者らの行ったパキスタンのレスでは、しかしながら、必ずしも古土壌における初帯磁率の相対的増加は認められない。磁気的パラメータは、古土壌において土壌化に由来する極微粒強磁性鉱物粒子の一定の増加を示すが、この変化以上に、ローカルな気候要因が支配的であるのである。パキスタンのレスの場合、ヒマラヤ・カラコルム山脈の前面に位置しモンスーンの影響が内陸部とは異なる反面、中近東に繋がる乾燥地帯に位置するため、土壌化の程度が弱い。同様の初帯磁率変化の現象はアラスカやポーランドのレスにおいても報告されている。従って初帯磁率変化を、中国黄土高原の例を一般化して一律に気候変化の proxy とみなすのは危険である。

とはいえこのような地域的差異から、同一時間面でのローカルな環境変化をも推定することも逆に可能となってくる。初帯磁率の地域変化などから、古降水量の推定といった試みも行われており古モンスーンの復元といったことも可能となりつつある。

更には、環境モニタリングのトレーサーとして応用することも可能である。現世の浮遊粒子状物質(SPM)のモニタリングへの応用を例として述べ結びとしたい。

<引用文献>

Akram, H., M. Yoshida, and M. N. Ahmad (1998) Rock magnetic properties of the late Pleistocene Loess-Paleosol deposits in Haro River area, Attock basin, Pakistan: Is magnetic susceptibility a proxy measure of paleoclimate? *Ear. Planets Space*, 50, 129-139.