

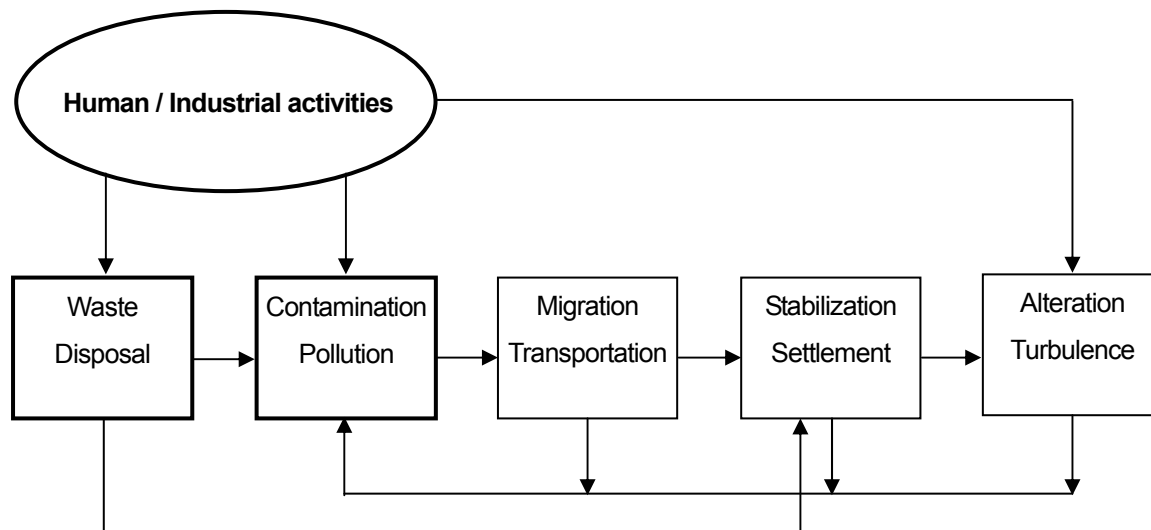
## 環境磁気学的方法は環境汚染調査に貢献しうるか？

吉田充夫（島根大学汽水域研究センター客員研究員）

鄭 重（総合開発株式会社地球科学事業部）

### 1. はじめに

土壌・表層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（濃集の程度）に依存する。これらのファクターはいずれもその運搬・堆積・圧密・風化・変質等の過程における周辺環境に左右されるものであり、従って、磁氣的性質を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; Thompson and Oldfield, 1986）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、なかでも第四紀の古気候変遷の解析などに関連して多くの成果が生みだされてきた。こうした古環境を解析する手法としての環境磁気学的方法は、人間の生産活動や生活によってもたらされる自然環境の改変や廃棄物による環境汚染（Anthropogenic pollution; Figure 1）の解明に対しても応用することが期待される。以下では、環境汚染分野での環境磁気学的方法について概観し、今後の展望について述べる。



**Figure 1:** Schematic diagram showing anthropogenic environmental pollution process that can modify magnetic mineral phases associated with pollutants. Each aspect shown can be investigated using the techniques of environmental magnetism.

### 2. 磁氣的パラメータ

環境磁気学において用いられる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、それぞれ対象となる堆積物や物質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)

すべての土壌・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。土壌・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。しかし実際には、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)

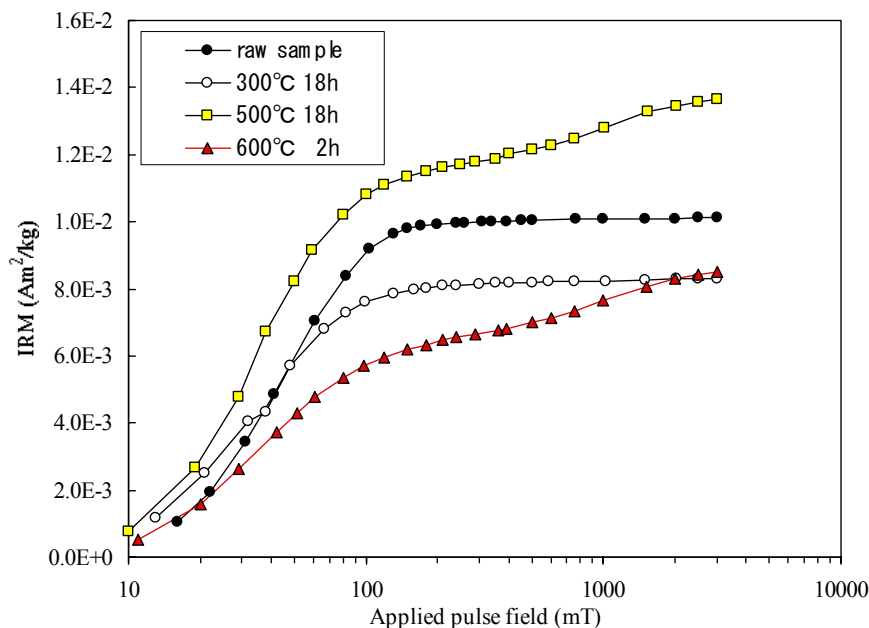
上述の磁場を増大させた場合、磁化はそれとともに徐々に増加し、最後には飽和に達する(飽和磁化  $M_s$ )。次に、磁場を減少させると磁化も減少し、磁場ゼロの状態でも磁化が残留する(飽和残留磁化  $M_r$ )。更に、逆方向に磁場を与えるやがて磁化はゼロとなる。この磁場の強さを抗磁力 ( $H_c$ ) と呼ぶ。また残留磁化がゼロとなる磁場の強さを残留抗磁力 ( $H_{cr}$ ) と呼ぶ。この磁場を更に増大すると逆方向の飽和磁化に達し、再び磁場を順方向に与えると、やがて最初の順方向の飽和磁化に戻る。この一連のプロセスによって形成される曲線を、磁気ヒステリシス・ループと呼ぶ。磁気ヒステリシ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

#### (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。しばしば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、magnetite と hematite/goethite の識別が可能となる(Figure 2)。飽和度を数量的に表現するために、S-ratio とか、HIRM といったパラメータがしばしば用いられ、これらはフェリ磁性粒子の含有量の推定にも利用することができる (Table 1)。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。

**Table 1:** Useful Parameters for Environmental Magnetic Studies

k (initial magnetic susceptibility)
SIRM (Saturation IRM)
$B_{CR}$ (Coercivity of SIRM) Applied field for completely cancellation to SIRM
$IRM_{LR}/SIRM$ (Oldfield et al., 1985)
$IRM_{20mT}/SIRM + IRM_{40mT}/SIRM$ (Oldfield et al., 1985)
$IRM_{HR}/SIRM$
$IRM_{100mT}/SIRM + IRM_{200mT}/SIRM$ (Oldfield et al., 1985)
S ratio (Blomendal et al., 1988)
$S = -IRM_{300mT}/IRM_{100mT}$
$S' = -IRM_{300mT}/SIRM$
HIRM ("hard" IRM) (Blomendal et al., 1988)
$(SIRM + IRM_{0.3T})/2$
$(SIRM - IRM_{0.3T})/2$
$SIRM/\chi$
SIRM/ARM (Oldfield et al., 1985)
ARM (DC 0.05mT + AC 100mT peak)



**Figure 2:** Example of IRM acquisition curves in different mineral phases. The raw sample contains titanomagnetite, but an assemblage of magnetite and ilmenohematite appears within the same sample after thermal treatments. Decrease of saturated IRM at 300°C 18h treatment is possibly due to incomplete mineralization (amorphous state), while that at 600°C 2h treatment is due to mineralization of hematite (Zheng, 1999 unpublished).

#### (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。

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。

### 3. 環境汚染と磁性鉱物相

環境汚染における磁性鉱物の生成、変化、消滅は、Figure 1 に概観した環境汚染プロセスにおいて、その物理的な濃集と拡散、化学的変化や結晶化・溶脱として起こる。すなわち、環境汚染の最初の段階における発生源での物質は、産業廃棄物、排水、汚泥、焼却灰、煤煙といった形態によって、自然界に放出される(waste, pollution)。これらは放出後、自然界での運搬や拡散の過程で、濃集・分散・変質を繰り返し(transportation, migration)、やがてこれらの磁性鉱物は堆積・沈殿・吸着・吸収され自然界に安定的に固定される(stabilization, settlement)。また最後の段階または途中段階において、人為的な営力や攪乱による変化をこうむる可能性もあり(turbulence, alteration)、その過程で一部は再び汚染物質として自然界に放出・拡散されうる。

汚染物質の発生源の段階での磁性鉱物の種類、量、粒度は、汚染物質の特徴づけ(characterization)に有効である。その後の夫々のプロセスは、磁性鉱物の種類・量・粒度を変化・変態させることになり、各プロセスの特徴づけに有効である。よって、環境磁気学的方法によって発生源やその後の環境汚染プロセスを解析することが可能である。こうした磁氣的に追跡されうるプロセスが、単に磁性鉱物のみならず、環境汚染における有害物質、例えば重金属類、の挙動との連関で把握されるとき、環境汚染調査への環境磁気学的方法の応用が現実的となってくる。

磁性鉱物やその集合体そのものが、汚染物質として存在し環境汚染を引き起こすケースでは、磁気パラメータは環境汚染を解析するうえで、欠くことのできない情報を提供する。大気中の塵埃や浮遊粒子状物質 (SPM) は磁氣的性質を示すことが知られており、地域によって磁氣的性質に明瞭な差異を示す (Oldfield et al.,1985 など)。自然起源の SPM (塵埃の風による巻き上げ) と人工起源の SPM (煤煙、自動車排気ガスなど) で全く異なることが明らかになっている (Yoshida et al.,1998)。これは SPM 中の magnetite (主として人工起源) と hematite/goethite (主として自然起源) が関与していると考えられ、人工起源の大気汚染が帯磁率や SIRM の増加によってモニタリングすることができる。また、こうした大気中の人工起源磁性粒子が連続的に混入しうる表層堆積物 (泥炭層や表層土壌など) においては、磁氣的な変化によって産業活動の盛衰や環境汚染・大気汚染の歴史を読み取ることも可能である (Heller et al.,1998 など)。

こうした、pollutants としての磁性鉱物は、それ自体による汚染のみならず、随伴する(しうる) 有害物質の汚染と一定の相関を示すことが知られており、人間の健康といった観点では、より重要な情報となる。

磁性鉱物のいくつか (goethite, hematite, magnetite など) は条件によっては有害重金属を吸着する性質があることが知られており (Rose and Bianchi-Mosquera,1993; Petrovsky and Ellwood,1999 など)、重金属の濃集と拡散のプロセスに一定の役割を果た

している可能性が高い。汽水湖湖底のヘドロ中の重金属溶出特性と帯磁率の負の相関（吉田ほか,1999）は、この種のメカニズムによって説明できるかもしれない。このことは、重金属汚染調査において磁性鉱物がトレーサーとして果たしうる役割や、重金属の難溶出化処理への応用の可能性を、示唆している。

## 5. まとめ

環境磁気学的方法は、環境汚染調査に応用することが可能である。磁氣的性質の測定は、環境汚染調査分野で一般的な化学的方法などに比べて、非破壊で比較的容易に行え、短時間に多量のデータを得ることができる、という利点がある。今後有害汚染物質の挙動と磁性鉱物相（すなわち磁氣的性質）の相関関係がより詳しく明らかにされれば、環境汚染調査の不可欠のツールとして発展していくことが、期待される。

**謝辞** 岩石磁気測定を行うにあたって、総合開発株式会社地球科学事業部分析室を使用させていただいた。記して感謝する。

## 引用文献

- Bloemendal, J., Lamb, B. and King, J.W. (1988) Paleoenvironmental implications of rock-magnetic properties of late Quaternary sediment cores from the eastern equatorial Atlantic. *Paleoceanography*, 3, 61-87.
- Heller, F., Strzyszczyk, Z. and Magiera, T. (1998) Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland. *J. Geophys. Res.*, 103, B8, 17767-17774.
- Oldfield, F., Hunt, A., Jones, M.D.H., Chester, R., Dearing, J.A., Olsson, L. and Prospero, J.M. (1985) Magnetic differentiation of atmospheric dusts. *Nature*, 317, 516-518.
- Petrovsky, E. and Ellwood, B.B. (1999) Magnetic monitoring of air-, land- and water-pollution. In: B.A. Mahar and R. Thompson (eds.), *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. 279-322, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Rose, A.W. and Bianchi-Mosquera, G.C. (1993) Adsorption of Cu, Pb, Zn, Co., Ni, and Ag on goethite and hematite: a control on metal mobilization from red beds into stratiform copper deposits. *Econ. Geol.*, 88, 1226-1236.
- Thompson, R. and Oldfield, F. (1986) *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin, Winchester.
- Verosub, K.L. and Roberts, A.P. (1995) Environmental magnetism: Past, present, and future. *J. Geophys. Res.*, 100, B2, 2175-2192.
- Yoshida, M., Khadim, I.M., Ahmad, M.N. and Akram, H. (1998) Magnetic properties of suspended particulate matter (SPM) in atmosphere. Proc. 8<sup>th</sup> Symp. Geo-Environ. Geo-tech., 235-240.
- 吉田充夫・鄭重・新谷加代・高安克己(1999) 中海湖底表層堆積物の磁氣的性質と重金属等の溶出特性について. 第9回環境地質シンポジウム論文集 (本巻).

## Environmental Magnetism for Anthropogenic Pollution Studies

*Mitsuo Yoshida\* and Zheng Zhong\*\**

(Abstract)

This paper outlines applications of environmental magnetism method to the studies of anthropogenic environmental pollution. Impacts of human activities on the environment and related environmental processes are schematically shown in Figure 1, where five process-components, waste disposal, contamination-pollution, migration-transportation, stabilization-settlement, and alteration-turbulence, are discriminated. Each process is characterized by its own chemical, mineralogical, and mechanical features, which can be applied in environmental magnetism field. The occurrence of magnetic minerals in contaminated soils, sediments, wastes, and dusts in each process can be easily detected using magnetic methods, especially with magnetic susceptibility, magnetic hysteresis, remanent magnetization, and thermal property measurements. We summarize here various magnetic parameters obtained from these magnetic measurements (Table 1). We also review recent results in atmospheric pollution study and heavy metals contamination study by magnetic methods. Environmental magnetism is capable of providing important data for studies of impact of humans on the environment including anthropogenic pollution, and in future more broad applications, such as screening, monitoring, and remedial treatment are expected.

Keywords: Magnetic susceptibility, IRM, Magnetic minerals, Pollution, Heavy metals

---

\* Research Fellow, Research Center for Coastal Lagoon Environment, Shimane University,  
1402, Kameari 3-28-1, Katsushika, Tokyo 125-0061. (e-mail: myoshida@mteci.ne.jp)

\*\* Geoscience Division, Sogo Kaihatsu Co.,Ltd., Nishikoiwa 1-30-16, Edogawa, Tokyo 133-0057  
(e-mail: z\_zheng@kd5.so-net.ne.jp)