

# 磁化率 (magnetic susceptibility) を巡る雑感

森尻理恵<sup>1)</sup>・中川 充<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

Magnetic susceptibility を日本語では、帯磁率または磁化率という。筆者らは「帯磁率」として教えられてきたので、何の疑問も持たずに「帯磁率」を使ってきた。ところがある時、地球科学の論文で「磁化率」に改めるようにという査読意見が付いたことがあった。その時は、論文の中身には全く影響がないので素直に査読意見に従って「磁化率」に改めたのであるが、後から少々気になって自分の手持ちの日本語の教科書を調べてみたのが第1表である。それほど多くを持っているわけでもないし、並べてみたところで、科学的には何も変わらないが、強いてあげれば、物理学の教科書では磁化率と書かれることが多く、地球物理学、地質学の教科書では、帯磁率と書かれることが多いかもしれない。近年は両方紹介するものが増えたが、和名の付け方にも流派と時代の影響があるものと思った。

日本でよく使われている測定器の日本語カタログを見ると、イギリスの Bartington 社の MS2/MS3 は「帯磁率計」と呼ばれ、カナダの Scintrex 社の SM5 も「携帯型デジタ

ル帯磁率計」、チェコの ZH 社の SM20/SM30 も「携帯型帯磁率計」と呼ばれている。これらの「帯磁率計」で測定した値の話であるが、ここでは時代の流れに沿って「磁化率」を使うことにする。ちなみに金谷・大熊 (2003, 2007, 2010, 2011) を見ると、いずれも帯磁率計を用いて磁化率を測定したと表現している。

地球電磁気学の分野では、伝統的に cgs-emu 単位系が用いられてきたが、1970 年代に国際単位系 SI への切り替えがなされた。しかしながら古い測定器では cgs-emu が使われており、ある年齢よりも上の世代では、単位換算表を作って机に置いていた方も多いと思われる。筆者らもそのような世代で、第2表は鳥居雅之氏 (元岡山理科大学) がまとめたものを小田啓邦氏 (産総研 地質調査総合センター) からいただいたもので、大変便利に使わせていただいている。地球科学では古い論文も貴重な資料となる場合が多いので、磁化強度や磁化率を参照する場合には、単位を確認することを忘れてはならない。

従来物理探査では、地球磁場を表現するのに、磁束密度 (B) の単位である  $\gamma$  (ガンマ) が用いられてきた。

第1表 いくつかの教科書における磁化率と帯磁率の用語の使われ方。

表記	書名
磁化率	近角 (1978) 強磁性体の物理 (上)
	宇野他 (1978) キッテル 固体物理学入門 (上)
	中島・夏原 (1986) 考古地磁気年代推定法
帯磁率	力武 (1972) 地球電磁気学
	小嶋・小嶋 (1972) 岩石磁気学
	河野 (1982) 岩石磁気学入門
	地学団体研究会編 (1996) 地学事典
	小玉 (1999) 古地磁気学
	渋谷 (2015) Paleomagnetism (by R. Butler) 日本語版 ver. 0.8.1
磁化率または帯磁率	大熊 (1998) 物理探査ハンドブック
	山部 (2006) 磁石のふしぎ 磁場のなぞ

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

2) 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：磁化率，帯磁率計，単位系，マグネタイト，蛇紋岩化

第2表 磁性関連の単位系変換早見表、鳥居雅之氏の取りまとめによる。

Quantity	SI	cgs	SI×f→cgs	cgs×f→SI
Magnetic induction(B)	T	G	1[T]=1[Wbm <sup>2</sup> ]×10 <sup>4</sup> →[G]	1[G]×10 <sup>-4</sup> →1[T]
Magnetic field(H)	A/m	Oe	1[A/m]×(4π/10 <sup>3</sup> )→[Oe]	1[Oe]×(10 <sup>3</sup> /4π)→[A/m]
Magnetic moment (Mv)	Am <sup>2</sup>	emu	1[Am <sup>2</sup> ]×10 <sup>3</sup> →[emu]	1[emu]×10 <sup>-3</sup> →[Am <sup>2</sup> ]
Volume magnetization (M)	A/m	emu/cc	1[A/m]×10 <sup>-3</sup> →[emu/cc]	1[emu/cc]×10 <sup>3</sup> →[A/m]
Mass magnetization	Am <sup>2</sup> /kg	emu/g	1[Am <sup>2</sup> /kg]×1→[emu/g]	1[emu/g]×1→[Am <sup>2</sup> /kg]
Bulk susceptibility	m <sup>3</sup>	emu/Oe	1[m <sup>3</sup> ]×(10 <sup>6</sup> /4π) →[emu/Oe]	1[emu/Oe]×(4π/10 <sup>6</sup> )→[m <sup>3</sup> ]
Volume susceptibility (κ)	[SI]	[G/Oe]	1[SI]×(1/4π)→[G/Oe]	1[G/Oe]×4π→[SI]
Mass susceptibility (χ)	m <sup>3</sup> /kg	emu/(Oe*g)	1[m <sup>3</sup> /kg]×(10 <sup>3</sup> /4π) →[emu/(Oe*g)]	1[emu/(Oe*g)]×(4π/10 <sup>3</sup> ) →[m <sup>3</sup> /kg]

1 γ = 10<sup>-5</sup> G (ガウス) である。そこで大熊 (1999) では、磁気異常解析などでの実用的な読み替えを紹介している。すなわち、cgs-emu 単位系の 1 G は国際単位系 SI の 10<sup>-4</sup> T (テスラ) に等しいので、従来使われてきた 1 γ (=10<sup>-5</sup> G) は 1 nT (10<sup>-9</sup> T) に相当し、γ を nT に呼びかえる。また単位体積当たりの磁化強度も、従来 10<sup>-3</sup> emu/cc を 1 単位として用いられてきたが、これはそのまま 1 A/m に置き換えればよい。磁化率については、単位体積当たりの磁化率 κ はどちらの系でも無次元量なので、emu ではないことを示すために (SI) などと付記することが多い。

単位系の換算は、個人的には大いに混乱した。多くの方が解説を書いているのでここで説明する必要はないと思うが、定義する系が違えば、換算係数も違ってくるので、従来使われていた cgs-emu 系の磁性に関する諸量の定義を山部 (2006) に倣って簡単におさらいする。

- 磁荷 magnetic charge (m) : 真空中、1 cm の距離で 1 dyne の力を及ぼし合う等量の磁気量を 1 cgs-emu 単位の磁荷という。
- 磁場の強さ magnetic field (H) : 1 cgs-emu の磁荷に作用して 1 dyne の力を生じる磁場の強さを 1 Oe (エルステッド) という。
- 磁化 (J) : 棒状物体が磁化され、その両端に +m, -m の磁荷が現れているとき、端面の面積を S とすると J=m/S を磁化の強さとし、gauss で表す。磁束密度(B) も gauss なので混同を避けるために emu とすることもある。また、棒状物体の長さを l とすれば m × l = M としてこの M を磁気モーメントという。J = m/S =

M/S l であるから、磁化の強さは単位体積当たりの磁気モーメントと見なせる。

- 磁化率 susceptibility (κ) : 磁場中で磁化された時、常磁性体では磁化 (J) と磁場 (H) の比例定数をいい、強磁性体では磁場の各値における勾配 (∂ J / ∂ H) をいう。無次元数で単位体積当たりの磁化率。
- 磁束密度 magnetic induction (B) : 磁場に垂直と見なせる断面に現れる単位面積当たりの磁気量を磁束密度と言い gauss で表す。
- 透磁率 permeability (μ) : 磁場 (H) と磁束密度 (B) の比例定数。強磁性体では勾配 (∂ B / ∂ H) となる。無次元数で体積当たりの透磁率。

一方、国際単位系 SI では、cgs-emu 系では 1 であった真空中の透磁率 (μ<sub>0</sub>) を 4 π × 10<sup>-7</sup> H/m と定義している。

ここで山部 (2006) に紹介されていた電磁石の性能の比較についての記事を引用する。

『電磁石が発生できる磁場の強さが磁場 H (A/m) で表記されたり磁束密度 B (T) で表記されたりしている。この対応をつけるには、通常の換算ではなく、対応する性能を比較すると考える。すなわち、真空中では B = μ<sub>0</sub>H であるから、1 A/m = 4 π × 10<sup>-7</sup> T となる。これは 1 A/m の磁場は 4 π × 10<sup>-7</sup> (~ 1.2 × 10<sup>-6</sup>) T に「対応する」ことを意味する。』

これに従うと、古地磁気の実験などで交流消磁装置に表示された 500 Oe の磁場は、SI 系では (5 × 10<sup>5</sup>) / 4 π A/m となり、50 mT の磁束密度に対応することになる。

## 2. 一般的な測定法

地質学の分野で、磁化率が多く用いられるのは、「岩石の磁化率が岩石の単位体積中に含まれる磁性の強い鉱物の含有量に比例する」と見なされるからであろう（例えば Ishihara, 1979）。しかしながら、測定された岩石（または堆積物）の磁化率（厳密には初期磁化率, initial magnetic susceptibility）は、磁性の強い鉱物の含有量だけでなく、種類、鉱物ごとの粒径分布、測定温度など多くの変数に支配されたパラメーターとなる。よって多くの研究例に示されているように、磁化率データの解釈には注意が必要である。

磁化率は小嶋・小嶋（1972）の記述に従い再度定義すると（ただし帯磁率を磁化率と筆者らによって言い換えられている）、火山岩を完全に消磁した状態（磁化  $J=0$ ）から出発し、次第に磁場  $H$  を強くする。このとき磁化率は  $\kappa = J/H$  と定義される。このとき  $\kappa$  は単位体積当たりの量となる。単位質量あたりの磁化率  $\chi$  は、単位質量あたりの磁化を  $I$  として

$$\chi = I/H$$

となる。磁場を強くしていくと磁化曲線はヒステリシスループを描くようになるので、初期磁化率は正しくは

$$\kappa = \left( \frac{\partial J}{\partial H} \right)_{H=0}$$

となる。ただし、地球磁場程度の弱い磁場範囲であれば、初期磁化曲線は直線と見なせるので、単純に  $\kappa = J/H$  と考えてよい。

磁化率は単位体積当たりの値として定義されている場合が多いが、単位質量あたりの値で示されていることもある。これは、単位体積当たりの磁化率に密度の逆数をかけて単位質量あたりの磁化率に換算するので、国際単位系 SI であれば、 $\text{m}^3/\text{kg}$  で表される。cgs-emu 系では、単位質量当たりの磁化率の次元は  $\text{cm}^3/\text{g}$  となるが  $\text{emu}/\text{g}$  と表示されることもある（金谷, 1987）。

前述の帯磁率計は、機種によって差はあるが、測定に用いる交流磁場は、およそ 100 A/m 程度（1 Oe）の強度で 1 ~ 10 kHz 程度の周波数であることが多い（地学団体研究会編, 1996）。帯磁率計は室内実験用と野外の露頭で使用するものがある。例えば、Bartington 社の MS2B は室内実験時に古地磁気の円筒形サンプル（直径、高さ共に約 20 ~ 25 mm）等を測定するのに用いられている。MS2B は強度 80 mT 程度の交流磁場を用いており、出力周波数は低周波モードで 0.465 kHz、高周波モードで

4.65 kHz である。MS2B のマニュアル ([http://bartington.jp/Literaturepdf/Operation Manuals/om0408 MS2.pdf](http://bartington.jp/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf), 2015 年 9 月 14 日確認) には、 $10 \text{ cm}^3$  を仮定した磁化率が表示されるので、実際の体積で換算せよと書いてある。円筒形サンプルの場合、およそ  $12 \text{ cm}^3$  になる。岩石を円筒形サンプルに成型するときの精度には当然のことながら作業の熟練度に差が出るので、上面と下面が水平でなかったり、エンジンドリルで岩石を抜くときに端が欠けてしまったり中ほどが膨れてしまったりする経験は、多くの方がお持ちだろう。これをノギスで直径と高さだけを測って体積を計算するのは、その程度の精度であると認識して値を使用することが大切である。さらにガス置換式の密度測定装置は、岩石試料の場合、経験上実際の値よりも密度が大きく出る傾向にあるらしい。おそらく岩石内部の微小な亀裂の有無などが影響していると予想される。一方で、大熊・金谷（2011）で採用されている密度測定方法は、データベースとして値を残すためのものである。かなり厳密に行われている。しかし手間がかかり、体積の測定は簡単ではないことがよくわかる。そこで、単位体積当たりの磁化率ではなく、単位重量当たりの磁化率が選択されている場合もある。

堆積物の磁化率を測定するための容器として、日本では、1 辺約 2.2 cm のポリカーボネイト製のキューブ容器（内容積  $7 \text{ cm}^3$ ）を用いることが多い。堆積物のキューブへの充填率や試料の含水率のばらつきがそのまま磁化率の誤差となる。堆積物の磁化率については、鳥居・福間（1998）のレビューに、基本事項から測定上の注意も含めて詳しく述べられているので、参照されたい。

一方、ZH 社の SM30 や Kappameter KT-9 は野外の露頭に当てて磁化率を測定するのに用いられる。測定に用いる交流磁場は、SM30 は 9 kHz（機器付属マニュアルより）、KT-9 は 10 kHz ([http://www.qsl.net/k/kOff/01 Manuals/Exploranium/KT9/Manuals/ KT\\_9\\_KAPPAMETERREV1.pdf](http://www.qsl.net/k/kOff/01%20Manuals/Exploranium/KT9/Manuals/KT_9_KAPPAMETERREV1.pdf), 2015 年 9 月 14 日確認) とある。星・亀井（2003）では、静岡県浜名湖周辺に露出する更新世の堆積物を研究対象にした研究で、KT-9 を用いて露頭で磁化率を測定し、そこから試料を採取して実験室に持ち帰り、Bartington 社の MS2 でも磁化率を測定した。その結果、2 つのデータセットの間に大きな差が無いことを示した。

金谷（1987）は、3 種類の可搬型帯磁率計（BISON 社 Model3101, GEOFYZIKA BRNO 社 Kappameter KT-3, SCINTREX 社 SM-5）による測定のカロスチェックを行った。そのうち、地質標本館の屋外展示標本の普通輝石かんらん石玄武岩（写真 1）の体積当たりの磁化率測定値では、





写真1 産総研地質調査総合センター地質標本館前にある屋外展示標本の普通輝石かんらん石玄武岩（長崎県佐世保市，GSJ R19505）。

論文に示されている値をSI系に変換するとBISON Model 3101が $26.9 (\times 10^{-3})$  SI, SCINTREX SM-5が $28.9 (\times 10^{-3})$  SI, Kappameter KT-3が $27.0 (\times 10^{-3})$  SIとなっている。同じ場所で測定しても機種間でこの程度の差は見込まれる。さらに、この標本はかなり大きなものであるから、測定する部分により磁化率に数倍の変化が見られたとある。

試しにSM30を用いてこの標本の磁化率を測定した。測定日は晴天であった。写真1の手前側の石の左端からほぼ20 cmおきに上面を測るとその値は、 $20 \sim 30 (\times 10^{-3})$  SIとなった。センサー部分との距離が微妙に違えば、磁化率も変わってしまう。写真奥の標本は、位置はおよそで、センサーとフィットする面を選んで測定してみた。その結果、右端を3カ所測定して平均すると $25 (\times 10^{-3})$  SI, 中央部も同様に測定して $27 (\times 10^{-3})$  SI, 左端は $25 (\times 10^{-3})$  SIとなった。金谷(1987)がどの部分で測定したのか定かではないが、測定されてから28年以上経っており、その間にこの標本は雨風にさらされていることを考えると、およそこの程度だろうと思われる。

いずれにせよ、露頭では岩石の不均質性を意識して磁化率を複数点で測定し、対比を行う場合は同じ機種で測定した値を用いるほうが良いだろう。また、これは以前地質ニュースに書いたが、露頭の岩面とセンサー面の間に水が薄く入ってしまうと大きく値が狂ってしまうため、センサーを当てる前に乾いた雑巾で岩面の余分な水分を抑えること、そういう、ちょっとした手間が測定精度を支えてい

るのだと故・金谷 弘氏(元産総研 地質調査総合センター)から教えられた(森尻, 2007)のを思い出した。

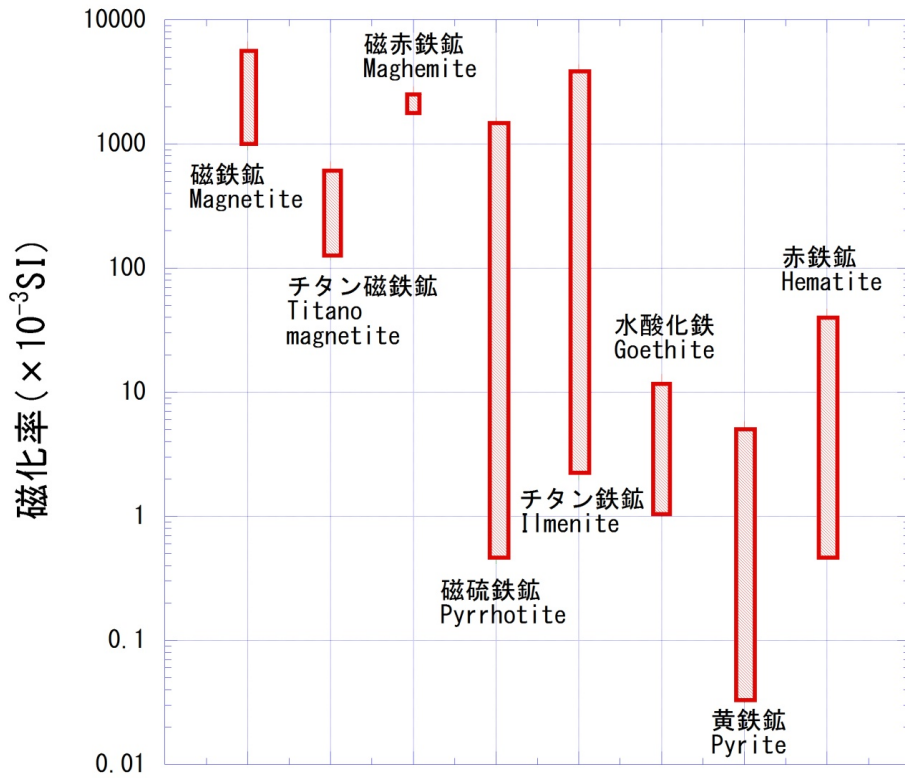
### 3. 地質の分野での測定例

地質試料の初期磁化率測定の大きな利点として、非破壊測定が可能であることがあげられる。比較的測定が簡便に行え、しかも非破壊測定ということで、文化財に使用されている石材の調査等にも適用されている(例えば先山, 2005など)。

堆積物を主な対象とした研究に、環境磁気学(environmental magnetism)という分野がある。これは堆積物中の磁性粒子を感度の良い天然のトレーサーとして利用して、堆積層が形成された当時の環境要素を知る手がかりを得ることができるからである。磁化率は重要なパラメーターの1つであり、他の磁気パラメーターと組み合わせられることによって、さらに多くの情報を引き出している。鳥居(2005)で行き届いたレビューがなされているが、近年注目されている分野である。

その一方で、岩石を対象とした磁気の研究は、地球科学の中では少し分が悪いようである。斎藤(2005)でMagnetic Petrologyの火山学への適用がレビューされているが、鉄チタン酸化物を細かく解析することで、ケイ酸塩鉱物の研究からはわからなかった噴出物の成因や噴火のメカニズムが理解できるとある。

高磁化率をもたらす磁性の強い鉱物の代表格はマグネタ



第1図 主要鉄物の単位体積あたりの磁化率. Hunt *et al.* (1995) より抜粋したものを図化.

イトと言えるが、マグネタイトのほかにも磁性の強い鉄物はある。Hunt *et al.* (1995) から抜粋した鉄物の磁化率を第1図に示す。また、Maher (1988) にもあるように同じマグネタイトでも粒子サイズによって磁化率が変わってくる(第2図)。野外で可搬型磁率計を使って測定を行う程度の精度を議論するのであれば、あまり神経質にならなくても良い(その他の要因で値がばらつく方が大きい)かもしれないが、可能であれば室内実験用の試料も採取するほうが良いだろう。

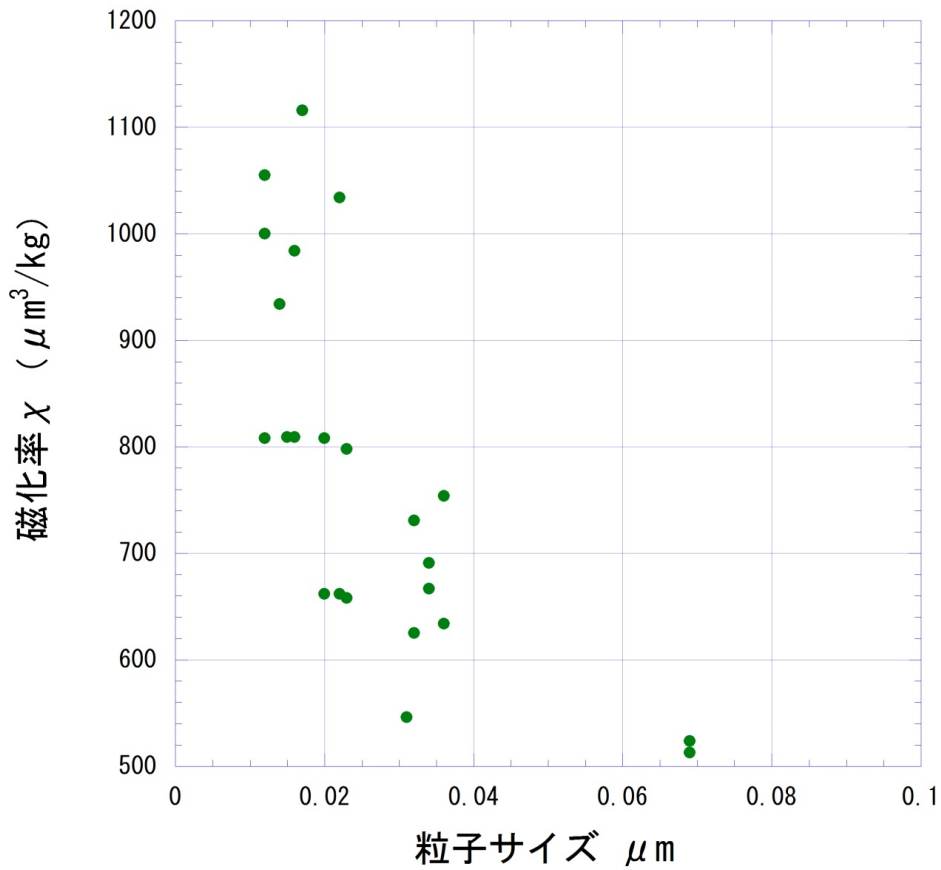
中井(2004)では磁化率を測定してわかることをコンパクトで紹介している。磁性の強い鉄物の種類がある程度分かっている場合は、磁化率の高低がその含有量に比例するとみなされる。この性質を使って、花崗岩の分類をしたり、堆積物コアから火山灰層を見つけ出ししたりする例が紹介されている。

森尻ほか(2008)は、愛媛県の中島の海岸で露頭の磁化率プロファイル測定を行った(第3図)。ここでは、花崗岩に安山岩が貫入したとみられる場所で、安山岩に接触している花崗岩のごく狭い部分(図中B及びC)の磁化率が高い。測定に使用したのはKappameter KT-3で、安山岩と花崗岩の境界部分ではおよそ10 cm間隔で測定されている。この露頭では磁化率の高い花崗岩部分は風化が進

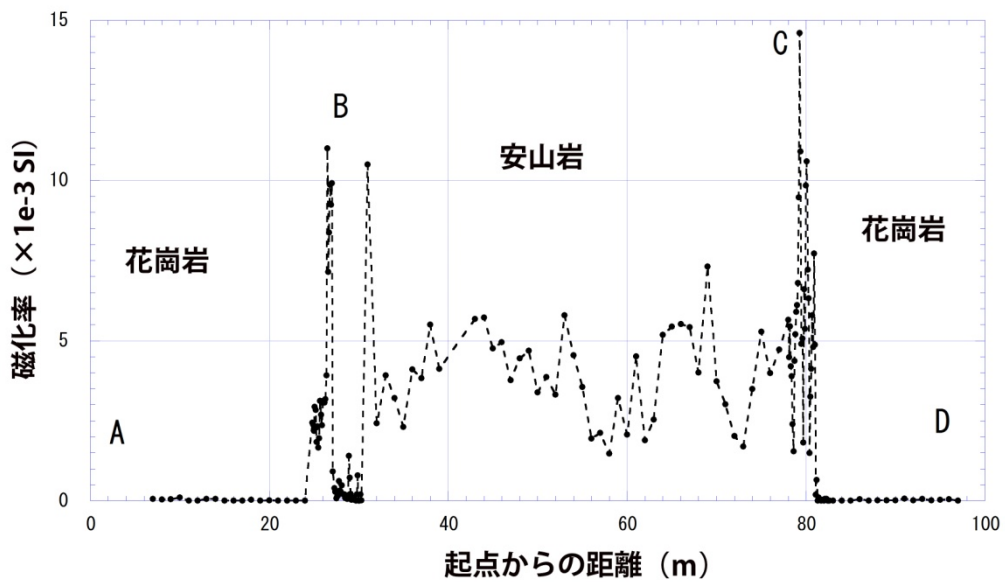
み試料採取ができなかったので、同じような状況を示す場所でも、試料を採取できたものについて薄片を作成してもらい顕微鏡観察を行った。その結果、磁化率が高く、磁化の強い花崗岩では、初生的に含まれる黒雲母がへき開に沿って細かいマグネタイトと混合層粘土鉄物に置換されていることが観察された。同様に、他の露頭で得られた磁化の強い花崗岩試料の黒雲母がSEM観察によって、極めて細かいマグネタイトと混合層粘土鉄物に置換されていることが確認された。つまり、花崗岩に安山岩が貫入することによってもたらされた熱によって黒雲母が分解されマグネタイトと粘土鉄物に置換された。その結果、接触部分の磁化率が高くなった例といえる。

#### 4. 磁化率と蛇紋岩化度の問題

岩石の磁化率で、近頃注目されているのが蛇紋岩であろう。筆者らは、ほそぼそと蛇紋岩の磁化の問題に取り組んできた(例えばMorijiri and Nakagawa, 2005)。それは、野坂(2012)が言うように、『蛇紋岩は岩石学者にとって「腐った石」でしかなく、わざわざ野外から試料として持って帰るようなものではなかった』からである。また、強い磁化を持つが、古地磁気試料としてはふさわしくないこと



第2図 マグネタイトの粒子サイズと単位質量あたりの磁化率。Maher(1988)のデータより図化。



第3図 愛媛県松山市中島の海岸の露頭の磁化率プロファイル測定。縦軸はKappameter KT-3で測定した磁化率。横軸は露頭の起点からの距離。森尻ほか(2008)に加筆。

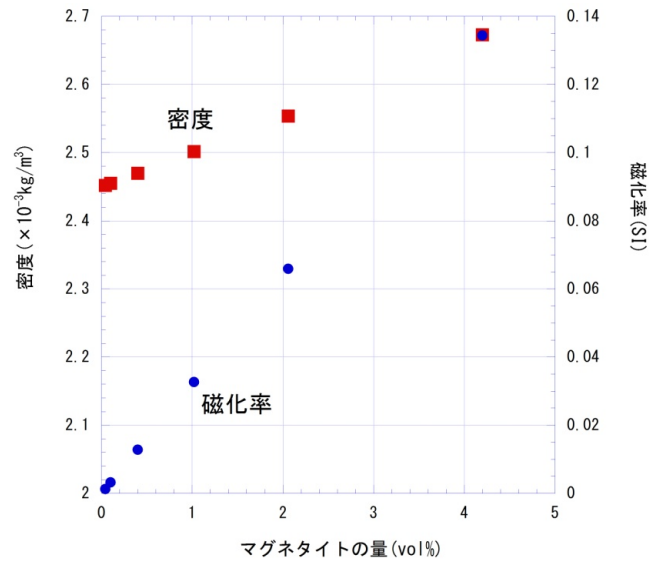


から、岩石磁気学の研究者からもあまり相手にされてこなかった、マイナーな石であった。それ故に、ほそぼそと研究するのに都合が良いだろうし、磁化も強く特別高性能な測定機器も必要ないだろう、と考えて測定を始めたのであった。そんなことやって何になるという批判も随分うけたが、それなりに手応えは感じていた。ほかの研究テーマの隙間にコツコツと測定と薄片観察を増やしていったわけだが、ふと気が付くと、蛇紋岩は大変注目を集める岩石となっていた。2012年に岩石鉱物科学誌で4号にもわたる特集が生まれ、その巻頭論文に「蛇紋岩・および蛇紋岩化は、現在地球科学の主要な研究テーマとなっている」(森下ほか, 2012)と紹介されていた。特に野坂(2012)では「蛇紋岩化作用によって生じる水素が注目を集めているので、蛇紋岩化のプロセスに対する関心が高まっている」と述べている。

蛇紋岩化は、単純な系を考えれば、かんらん岩の中のかんらん石と水が結びついて蛇紋石、ブルーサイト、マグネタイト、水素ができる作用とすることができる。Toft *et al.* (1990)ではかんらん石-斜方輝石-蛇紋石-鉄-マグネシウム、水酸基-マグネタイト-金属鉄の系についてのみ考え、文献をもとに35通りの反応式を示した。マグネタイトの量は磁化率と比例するので、磁化率がわかれば蛇紋岩化度がわかる、と期待される。さらに、Toft *et al.* (1990)では、多くの蛇紋岩体のデータから、磁化率(Kf; unit SI)はマグネタイトの体積比(F; volume %)と $Kf = 3.2F$ というほぼリニアな関係を導き出した。これに従って、Fo ( $Mg_2SiO_4$ )が90%、Fa ( $Fe_2SiO_4$ )が10%のかんらん岩(Fo90)の蛇紋岩化の場合の6つの反応式で理想的に蛇紋岩化が100%起きた場合のマグネタイトの体積比に対する密度と磁化率を示した(第4図)。元のかんらん岩が同じでも、反応する水の量によってこれだけの磁化率の差ができることになる。

筆者らが磁化率と蛇紋岩化度の問題を考えたときに研究対象にしたのは、北海道の三石蛇紋岩体と岩内岳であった。なぜこれらを選んだかという点、もともとのかんらん岩にチタンがほとんど含まれないからである。チタンが多いと、マグネタイトはチタノマグネタイトになる。チタノマグネタイトは、鉄とチタンの割合によって、磁化が大きく変化するので、磁化の違いが、磁性鉱物の量の違いとは言い難くなってしまふからであった。

北海道の三石蛇紋岩体と岩内岳は、地質学的にはほぼ同じかんらん岩体をもとにしていて考えられている。ところが、磁化率は三石蛇紋岩体が有意に高く、どちらもマグネタイトが磁化を担っていると考えられる(森尻・中川,



第4図 かんらん石 (Fo90) の6つの反応式で、それぞれ蛇紋岩化100%の場合のマグネタイトの体積比に対する密度と磁化率。Toft *et al.* (1990)の反応式から計算。

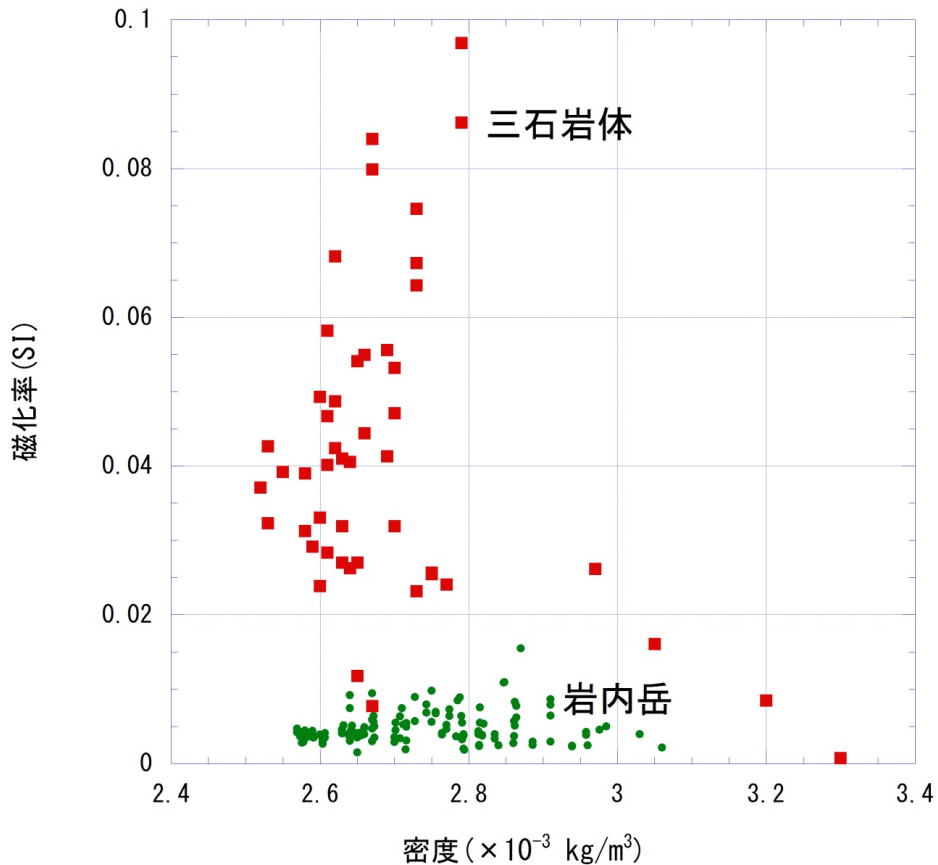
2009)。第5図に森尻・中川(2009)のデータを使って、密度(ガス置換式の密度測定装置で測定)に対して磁化率(MS3を使用)をプロットしたものを示す。これは、それぞれの岩体が蛇紋岩化をするときに、反応の仕方が異なるためと予測されるが、事例が増えないと結論付けるのは難しいので、今後の研究に期待したい。

## 5. おわりに

磁化率は、測定が簡便で多くの情報をもたらしてくれるが、いくつか気をつけなければいけないことがある。いろいろな分野で磁化率が測定されていて、なるほどと思うことも多いが、時折、少々不安に思う話もないわけではない。そこで、非力も顧みず、筆者らが先輩方から教えていただいていたものを紹介しようと思い立った。筆者らの研究については、学会で口頭発表をただけのデータもいくつかあるので、機会を見て誌上で公表できるようにしたいと考えている。

## 文献

- 近角聡信(1978) 強磁性体の物理(上). 裳華房, 東京, 299p.  
 地学団体研究会編(1996) 地学事典. 平凡社, 東京, 1443p.  
 星 博幸・亀井春美(2003) 陸上に露出する無層理堆積



第5図 三石蛇紋岩体（北海道新ひだか町）と岩内岳（北海道日高町）で得られた岩石試料の密度と磁化率。森尻・中川（2009）のデータから図化。

物の初磁化率（帯磁率）による対比：静岡県，更新統佐浜泥部層の例。地質学雑誌，109，697-709.

Hunt, C. P., Moskowitz, B. M. and Banerjee, S. K. (1995) Magnetic properties of rocks and minerals. In Ahrens, T. J., ed., *Rock physics and phase relations: a handbook of physical constants, vol. 3*. AGU, Washington DC, 189-204.

Ishihara, S. (1979) Lateral variation of magnetic susceptibility of the Japanese granitoids. *Journal of Geological Society of Japan*, 85, 509-523.

金谷 弘 (1987) 岩石帯磁率についての2-3の問題—測定における問題点と表示方法—. 地質調査所月報, 38, 203-216.

金谷 弘・大熊茂雄 (2003) 物理定数から見た白亜紀—古第三紀花崗岩類—その1 東北地方北部. 地調研報, 54, 221-233.

金谷 弘・大熊茂雄 (2007) 物理定数から見た白亜紀—古第三紀花崗岩類—その2 東北地方南部. 地調研報, 58, 239-252.

金谷 弘・大熊茂雄 (2010) 物理定数から見た白亜紀—

古第三紀花崗岩類—その3 足尾帯（関東地方北部）. 地調研報, 61, 1-15.

金谷 弘・大熊茂雄 (2011) 物理定数から見た白亜紀—古第三紀花崗岩類—その4 西南日本内帯. 地調研報, 62, 211-233.

小玉一人 (1999) 古地磁気学. 東京大学出版会, 東京, 244p.

河野 長 (1982) 岩石磁気学入門. 東京大学出版会, 東京, 146p.

Maher, B. A. (1988) Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. *Geophys. J. Int.*, 94, 83-96.

森尻理恵 (2007) シリーズ地質調査のパートナー (1) 携帯型帯磁率計. 地質ニュース, no. 629, 68.

Morijiri, R. and Nakagawa, M. (2005) Small-scale melange fabric between serpentinite block and matrix: magnetic evidence from the Mitsuishi ultramafic rock body, Hokkaido, Japan. *TECTONOPHYSICS*, 398, 33-44.

森尻理恵・中川 充 (2009) 磁性からみた蛇紋岩化度：



## 参照ウェブサイト

- 北海道岩内岳超苦鉄質岩体を例として. 地調研報, **60**, 381-394.
- 森尻理恵・中川 充・牧野雅彦 (2008) 愛媛県北部の中新世火山岩頸周辺部における岩石磁気物性の変化. 地調研報, **59**, 171-189.
- 森下知晃・阿部なつ江・水上知行・小澤一仁・高橋栄一 (2012) 特集号「マントル起源物質解説: 知りたいこと, 読めること, 読みたいこと」緒言. 岩石鉱物科学, **41**, 171-173.
- 中井睦美 (2004) ジオロジストのための岩石磁気学 — 帯磁率から古地磁気・AMS まで —. 地学団体研究会, 東京, 181p.
- 中島正志・夏原信義 (1986) 考古地磁気年代推定法. ニューサイエンス, 東京, 95p.
- 野坂俊夫 (2012) 蛇紋岩化作用における水素の発生に対する岩石学的制約条件. 岩石鉱物科学, **41**, 174-184.
- 大熊茂雄 (1998) 物理探査ハンドブック 手法編 第9章 磁気探査 2. 基礎事項. 物理探査学会編, 477-480.
- 小嶋 稔・小嶋美都子 (1972) 岩石磁気学. 共立全書, 東京, 220p.
- 力武常次 (1972) 地球電磁気学. 岩波書店, 東京, 472p.
- 斎藤武士 (2005) マグネティックペトロロジー: 火山学への適用. 地学雑誌, **114**, 296-308.
- 先山 徹 (2005) 近畿地方西部~中国地方東部における白亜紀~古第三紀火成岩類の帯磁率一帯状配列の検討と歴史学への適用—. 人と自然, No.15, 9-28.
- Toft, P.B., Arkani-Hamed, J. and Haggerty, S.E. (1990) The effect of serpentinization on density and magnetic susceptibility: a petrophysical model. *P.E.P.I.*, **65**, 137-157T.
- 鳥居雅之 (2005) 環境磁気学—レビュー—. 地学雑誌, **114**, 284-295.
- 鳥居雅之・福岡浩司 (1998) 黄土層の初磁化率: レビュー. 第四紀研究, **37**, 33-45.
- 宇野良清・津屋 昇・森田 章・山下次郎 (訳) (1978) キッテル 固体物理学入門 (上). 丸善, 東京, 269p.
- 山部恵造 (2006) 磁石のふしぎ 磁場のなぞ. けやき出版, 東京, 206p.
- 大熊茂雄・金谷 弘 (2011) PB-Rock 21 (日本列島基盤岩類データベース). 産業技術総合研究所地質調査総合センター. ([https://gbank.gsj.jp/pb-rock21/index\\_J.html](https://gbank.gsj.jp/pb-rock21/index_J.html), 2015年9月17日確認)
- 渋谷秀敏 (2015) Paleomagnetism (by R. Butler) 日本語版 ver.0.8.1 (<http://www.sci.kumamoto-u.ac.jp/earthsci/shibuya/ButlerJ.html>, 2015年9月8日確認)
- Bartington 社 Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System ([http://bartington.jp/Literaturepdf/Operation Manuals/om0408 MS2.pdf](http://bartington.jp/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf), 2015年9月14日確認)
- Exploranium G.S. 社 User's Guide KT-9 Kappameter ([http://www.qsl.net/k/kOff/01 Manuals/Exploranium/KT9/Manuals/ KT\\_9\\_KAPPAMETERREV1.pdf](http://www.qsl.net/k/kOff/01%20Manuals/Exploranium/KT9/Manuals/KT_9_KAPPAMETERREV1.pdf), 2015年9月14日確認)

---

MORIJIRI Rie and NAKAGAWA Mitsuru (2015) Some impressions of magnetic susceptibility measurements on rocks

---

(受付:2015年10月16日)