★★ 論文・報告 ★★

磁硫鉄鉱の磁性と鉱床について* (第1報)

正 会 員 武 中 俊 三**

On the Relation between the Magnetism
of Pyrrhotite and Ore Deposits (1st Report)

Syunzo TAKENAKA

In this report, the author gives the results of measurement of magnetic susceptibilities of pyrrhotite from the following ore deposits by the apparatus using alternating current;

i.e. Chichibu Mine (Saitama Pref.), Yanahara Mine (Okayama Pref.), Kawayama Mine (Yamaguchi Pref.), Komori Mine (Kyoto Pref.) and Futaba Mine (Hyogo Pref.).

The main results obtained from measurements of solid test pieces using A. C bridge method, are as follows:—

(1) The magnetic susceptibilities of pyrrhotites from these mines measured by the above method range from 18000×10^{-6} to 280000×10^{-6} , and are greater than the values obtained by ordinary magnetometer method with powdered samples.

(2) The range of the values of magnetic susceptibility of pyrrhotite is almost constant within the limited range of frequency, irrespective of their types of deposit or their occurrence.

(3) Generally, magnetisms of the samples from the Chichibu mine and the Kawayama mine have the wide distributions from weak to strong.

(4) On the other hand, pyrrhotite from the hydrothermal deposits such as Yanahara, Komori, and Futaba mine show narrower range of magnetic susceptibility.

(5) It seems that there is no relation between the variation of magnetism and the difference of level height except the Yanahara mine.

(6) The values of magnetism of pyrrhotites which associate with pyrite are strong as described by Dr. Kiskyras, and those accompanied by magnetite, arsenopyrite and skarn minerals are weak.

(7) At the Chichibu and Kawayama mines, pyrrhotites near the copper and zinc rich zones have the tendency to show a special distribution of magnetic susceptibility and always have a stronger mean value.

(8) In the hydrothermal deposits, pyrrhotites which associate with chalcopyrite or sphalerite, seem to have a characteristic distribution of magnetic susceptibility.

(9) The above mentioned facts- (3)(4)(6)(7) and (8)-suggest that the strength of magnetism is related to the associated minerals, and therefore, it can be said that magnetism of pyrrhotite relates to the types of deposit and their occurrences.

1. 緒 言

磁硫鉄鉱の磁性は探査方面でもまた選鉱上でも、實際採業に際して広くその性質が利用されて来ているのに拘らず、従来この方面の研究は主として単結晶に対する物性論的研究、純粹理学的立場からの研究面に取り上げられ、鉱床中におけるその強弱の程度、共生鉱物との関係、特に磁鉄鉱やキューバ鉱のような強磁性鉱物との関係、微量成分の影響、さらに鉱床型式並びに生成過程との関連性、他の物理的性質との相互関係等についての研究は

あまり行われず、近年早瀬博士¹⁾²⁾³⁾によつて、初めてこの方面の組織的な研究が行われた程度であつて、まだ充分な資料が整つていゝとは云い難い現状である。

筆者は先に顕微鏡的研究、熱的研究及び分光分析的研究によつて本邦磁硫鉄鉱々床の鉱床学的特性⁴⁾⁵⁾に関して若干の考察を試みたが、今回さらに上記の目的を達成し、鉱床生成機構解明の一過程として、本邦の主要な各種型式の鉱床より産する磁硫鉄鉱について交流ブリッジによる磁気測定を行い、同時に一部の試料については顕微鏡視察及び分光分析を行つて検討を加えたのでここに報告する次第である。⁷⁾⁸⁾⁹⁾

磁硫鉄鉱の磁性に関する物性論的研究は 20 世紀頭初

*昭和 30 年 4 月 28 日受理

**姫路工業大学付属高等学校教諭

第 1 表

鉱山名	試料採取鉱床	所在地	鉱床の種類	鉱床の形状
秩父鉱山	大黒鉱床	埼玉県	接触交代	塊状
河山鉱山	本鉱床、久木、下谷、下棚原、2号跡、3号跡、新脈	岡山県	高温熱水	塊状
河守鉱山		京都府	熱水	塊状
双葉鉱山	5号跡	兵庫県	熱水	板状

より行われ、その強磁性の原因については金属の強磁性からの類推、或いは Wilson 模型による解釈等が行われていたがとても満足なものではなかった。第2次大戦後 L. Néel の理論 (1948) その他によつて Ferrimagnetism という新しい考え方が導入され、かなりその機構が明瞭となつて来たがなお半導体強磁性については未解決のものが多く。

磁硫鉄鉱の磁化はC軸方向に限られ、C軸に直角な方向では磁化しない。またそのキュリー点は 348°C である。

したがつて結晶軸の方向を制約するような物理的條件や生成温度^{*}、生成後に受けた熱変質等^{**}は磁性にかなり大きい影響を与えるものと思われる。

2. 動的帯磁率の測定

従来の測定方法は直流を使用した磁力計法または弾動¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾ガルバー法によつて静的導磁率または静的帯磁率を測定しているが、それ等はいずれも結局静磁界中における1つの線輪の自己インダクタンスを測定するものであつていわゆる静的測定であり、偏位法である。

この場合外部磁場の影響を受け、また試料の脱磁が必要であり、測定が偏位法であるため、測定法そのものに欠点があり、特に今回目的とした周波数特性を検討する事は全く出来ない。

これに反し、交流測定ではそれ等の欠点を充分補い得ると共に磁性体の動的性質について検討する事が出来る等多くの長所を有しているが、他方表皮効果、巨視的、微視的うず電流、ヒステレンス、磁気余効果、自然共鳴等複雑な現象が入ってくるので、これ等にもとづいてインダクタンスの値もまた異なってくる事を考慮しなければならない。

しかし磁硫鉄鉱のような半導体でかつ多結晶のものが多く、しかも周波数が $300\sim 10,000\sim$ という比較的低い範囲ではうず電流は無視出来るし、また目的とする初導磁率範囲では磁場の強さも極めて弱く、発振器の出力を制御すればヒステレンスにもとづくインダクタンスの変化を抑える事も可能であると考え、一応実験によつてこれ等の影響を検討した。測定に際しては低周波発振器、陰極線オシログラフおよび交流ブリッジを組合せた帯

第 1 図 CR低周波発振器回路図

A: 定電圧装置 B: MA-3型CR低周波発振器 C: 横河製音1号直読インピーダンス測定器 D: MC-75型75mmブラウン管オシロスコープ E: 試料 T_1, T_2 : 変圧器

第 2 図 帯磁率測定用交流ブリッジ回路

磁率計を使用した。その電気回路は第1図及び第2図に示す通りである。

次に試料についても従来は粉末または単結晶が使用されており、固型試料はその成型が困難という理由で用いられていない。

しかし鉱床の生成機構と磁性との関連性や、物理探査の基礎資料としての鉱物の磁性やその分布状態を解明するにはどうしても天然多結晶質の固型試料¹⁸⁾を使用しなければ正しい結果を得る事は出来ない。

粉末による測定では鉱物の真の帯磁率を得る事は出来ず、粉末状における見掛けの帯磁率であり、帯磁率の傾向の比較に止まり、今回の目的には不十分と考えられるので従来使用されなかった円筒状固型試料を使用した。

すなわち第3図に示すように磁硫鉄鉱鉱塊を岩石切断器によつて棒状に切断し、研磨機によつて径 $10\sim 15\text{mm}$ 、長さ $30\sim 50\text{mm}$ の円筒状試料に成型し、さらに琢磨機によつて完全な円柱になるように表面を仕上げ、これにトレーシングメーパーを1~2回巻き、その上に径 0.15mm のエナメル線を $100\sim 250$ 回巻いた。

なおインピーダンスメーターに直接試料を挿入して、 Z 及び θ を測定すると、試料のインダクタンスが極めて小さく、測定に誤差を生じやすいので感度を上げるため、変圧器 T_1 および T_2 を入れた。このため幾分計算が複雑になったが、良好な測定結果を得る事が出来た。

^{*}, ^{**} J.J. Jakoskey: Exploration Geophysics 1940. p.61~ p.65

第 3 図

3. 計 算 方 法

第 4 図

変圧器 T_1 の漏洩インダクタンスは試料のインピーダンスに比して極めて小さいので T_1 を挿入した結果は試料と並列に T_1 の励磁インピーダンス z_0 が入ったものと見做し得る。

- (1) z : 試料のインピーダンス
 x : κ のアドミッタンス
 g : κ のコンダクタンス
 s : κ のサッセプタンス
- (2) z_0 : 変圧器 T_1 のインピーダンス
 y_0 : κ のアドミッタンス
 g_0 : κ のコンダクタンス
 s_0 : κ のサッセプタンス
- (3) Z : (1)および(2)の合成インピーダンス
 Y : κ のアドミッタンス
 G : κ のコンダクタンス
 S : κ のサッセプタンス

測定によつて求めるものは合成インピーダンス Z である。

$$\dot{Y} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R+jX} = \frac{R}{R^2+X^2} - j \frac{X}{R^2+X^2} = G-jS \quad (1)$$

全く同様にして $\dot{y}_0 = g_0 - js_0$, $\dot{y} = g - js$ (1)'

$$\left. \begin{aligned} R^2 + X^2 &= Z^2 \\ R &= Z \cdot \cos \theta \\ X &= Z \cdot \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(1)および(2)より

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{R}{R^2+X^2} = \frac{Z \cdot \cos \theta}{Z^2} = \frac{\cos \theta}{Z} \\ S &= \frac{X}{R^2+X^2} = \frac{Z \cdot \sin \theta}{Z^2} = \frac{\sin \theta}{Z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

全く同様にして

$$\left. \begin{aligned} g_0 &= \frac{\cos \theta_0}{z_0} \\ s_0 &= \frac{\sin \theta_0}{z_0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

また $Y = y + y_0$ $\therefore y = Y - y_0$ (5)

(1)および(1)'を(5)に代入すると

$$y = Y - y_0 = (G - g_0) - j(S - s_0) \quad (6)$$

また $y = g - s$

(6)に(3)および(4)を代入すると

$$\left. \begin{aligned} g &= G - g_0 = \frac{\cos \theta}{Z} - \frac{\cos \theta_0}{z_0} \\ s &= S - s_0 = \frac{\sin \theta}{Z} - \frac{\sin \theta_0}{z_0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

また一方

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \frac{1}{y} = \frac{1}{g-jS} = \frac{g-jS}{g^2+s^2} = \frac{g}{g^2+s^2} - j \frac{s}{g^2+s^2} \\ z &= R + j\omega L \\ \therefore \omega L &= \frac{s}{g^2+s^2} \\ \therefore L &= \frac{1}{\omega} \frac{s}{g^2+s^2} = \frac{1}{2\pi f} \frac{s}{g^2+s^2} \quad (8) \end{aligned}$$

(8)に(7)を代入すれば

$$L = \frac{1}{2\pi f} \frac{\frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{Z} \frac{z_0}{z_0}}{\left(\frac{\cos \theta - \cos \theta_0}{Z} - \frac{\cos \theta_0}{z_0}\right)^2 + \left(\frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{Z} - \frac{\sin \theta_0}{z_0}\right)^2} \quad (9)$$

ただし f : 周波数

z_0 および θ_0 : 変圧器 T_1 のみの場合のインピーダンスと位相角

Z および θ : 試料を入れた場合の合成インピーダンスと位相角

f , z_0 , θ , θ_0 は以上の場合それぞれ測定値である。したがつてこの測定値を(9)式に代入すれば試料のインダクタンス L を求める事が出来る。

第 5 図

第 6 図

第 7 図

第 8 図

以上の測定および計算によつて試料のインダクタンスの周波数特性を求めた。第5図～第8図はこれを示したものであつて 2,000～10,000 の範囲ではほぼいずれの鉱山産のものでもすべて一定した値を示す事が判明した。

なお 1,000 以下で周波数の減少と共に L が増加する様な結果が出たが、これは交流ブリッジの性質として周波数が下るとコイルに通る電流が大となり、磁界が強くなるためにこの部分では初導磁率範囲を外れるので μ が大となるものと考えられ、1,000 附近より初導磁率範囲の磁界になるものと考えられる。帯磁率の算定にはこの一定となつたインダクタンスの値を使用した。

円筒形ソレノイドの半径(r)長さ(l)巻数(N)の知れている場合、インダクタンス L は

$$L = K \frac{\mu \pi r^2 N^2}{l} \dots\dots\dots (9)$$

ただし K : 長岡係数 μ : 心物質の導磁率

一般に(9)式は円筒形ソレノイドの自己インダクタンスを表わす式であるが、本来心物質の導磁率 μ を一定とした場合に限つて適用される式であり、強磁性物質の導磁率 μ は一般に初導磁率範囲外では一定でないから、測定が初導磁率範囲で行われる事が必要である。前の測定値より μ を求めるために

(8)および(9)式より

$$L = \frac{1}{2\pi f} \left(\frac{\sin \theta}{Z} - \frac{\sin \theta_0}{z_0} \right) + \left(\frac{\sin \theta}{Z} - \frac{\sin \theta_0}{z_0} \right)^2$$

$$= K \frac{\mu \pi r^2 N^2}{l} \therefore \mu = \frac{\alpha}{2\pi f} \frac{l}{K \cdot \pi \cdot r^2 \cdot N^2} \dots\dots\dots (10)$$

(M・K・S単位)

ただし

$$\alpha = \left(\frac{\cos \theta}{Z} - \frac{\cos \theta_0}{z_0} \right)^2 + \left(\frac{\sin \theta}{Z} - \frac{\sin \theta_0}{z_0} \right)^2$$

$$\text{また一方 } \mu = \mu_0 \mu_s \dots\dots\dots (11)$$

μ_0 : 真空の導磁率 ($4\pi \times 10^{-7}$)

μ_s : 比導磁率

したがつて帯磁率を k とすれば

$$k = \frac{\mu_s - 1}{4\pi} \dots\dots\dots (12)$$

(e・m・u)

(10), (11) および (12) 式より試料の帯磁率(電磁単位)を求める事が出来る。

測定は各試料について第1回目は 2,000, 3,000 および 4,000 の各周波数で行い、第2回目は逆に 4,000, 3,000, 2,000 と周波数を減らしつつ、都合 6 回の測定を行いおのおの計算によつて比導磁率 μ_s を求め、これを平均して、帯磁率に換算した。

参 考 文 献

- 1) 早瀬喜太郎・原田種臣; 磁硫鉄の特性について (1)
日本鉱業会誌 67 巻 754 号 昭和 26 年 3 月
- 2) 早瀬喜太郎・原田種臣; 磁硫鉄の特性について (2)
日本鉱業会誌 68 巻 769 号 昭和 27 年 7 月
- 3) 早瀬喜太郎・原田種臣; 磁硫鉄の特性について (3)
日本鉱業会誌 68 巻 773 号 昭和 27 年 11 月
- 4) 武中俊三; 磁硫鉄鉱床中の鉄石鉄物の共生について
岩石鉱物鉱床学会誌 37 巻 6 号 昭和 28 年 12 月
- 5) 武中俊三; 磁硫鉄鉱床中の閃亜鉛鉱-黄銅鉱共生体の熱的研究について、岩石礦物礦床学会誌 38 巻 4 号 昭和 29 年 8 月
- 6) 武中俊三; 磁硫鉄鉱中の微量成分について
岩石礦物礦床学会誌 38 巻 6 号 昭和 29 年 12 月
- 7) 伴野雄三; 最近の磁気理論の進歩
電気学会雑誌 73 巻 775 号 昭和 28 年 4 月 pp.351~357
- 8) 茅誠司; 強磁性 岩波全書 1952. pp.53~54 pp.200~202
- 9) 桐山良一; 構造無機化学(Ⅲ) 共立全書 (89) 昭和 29 年 11 月 pp.109~113
- 10), 13) 中村清二; 物理実験法 岩波全書 pp.224~226.
- 11) J. J. Jakosky; Exploration Geophysics; 1940 pp.65
- 12) W. M. Barret; A Method for Determining Magnetic Susceptibility of Core Samples.
A.L.M.E. Geophysical Prospecting 1932 pp. 216~233
- 17) R. Becker-W. Döring; Ferromagnetismus Berlin 1939 pp. 224~225
- 18) 熊谷直一・竜神正夫; 塊状資料と粉状資料の比導磁率の相違.
物理探鉱 5 巻, 2 号 昭和 27 年 7 月