

砂鉄の磁気共鳴吸収

竹 本 將・篠 田 茂

1. 緒 言

島根県出雲地方は古来砂鉄の産地として有名である。我が國製鉄の起源は遠く神代に始まり砂鉄の利用によるもので史実によると出雲地方に其の端を發しているものと言われている。砂鉄の製鉄、冶金に関する實際利用の問題は多くの人によつて研究され一応解決されていると見てよい。筆者は砂鉄が手近に豊富に有り而も其の物理的基本性質が殆ど研究されていないと考へたので之を磁気共鳴吸収の立場から調べてみた。

言うまでもなく砂鉄は各種の鉱物成分（主として磁鉄鉱，チタン鉄鉱，赤鉄鉱）が固溶体、単体又は内部共晶をなして複雑に集合したものであるから測定結果は其等の綜合特性を示し砂鉄特有の性質を表わす。砂鉄の成分中磁鉄鉱，赤鉄鉱等はフェリ磁性体と言はれ、其の磁気発生機構が従来の強磁性物質と異なるので理論的関心の中心となつてゐることに注意して置こう。又最近フェライトが高周波磁心として工業的に画期的な分野を開拓しつつあるが、砂鉄も一種の天然のフェライト（不純物が多くて後述の如く性能は良くない）とも考へられる。筆者は波長約3糎のマイクロ波を使つて数種の砂鉄、其の成分鉱物の粉末、及び某優秀フェライト製品の粉末に就き磁気共鳴吸収の測定を行い比較検討を試みた。

2. 測定理論

今 Z 方向の直流磁場 H で試料を磁化し其の磁束密度が B になつたとする。これに Z と直角の方向 x から入射する周波数 f_0 のマイクロ波を当て、其の高周波磁場の方向を y 方向になる様にする。この場合 H を連続的に變化して電波の吸収を測定すると、次の關係式を満足する H の値で吸収が極大になる。

$$2\pi f_0 = \frac{ge}{2mc} (BH)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

茲に g : Landé の分裂係数。 m : 電子の質量。
 e : 電子の電荷。 H : 試料中の有効磁場。
 c : 真空中の光速度。 B : 試料中の磁束密度。

この式は強磁性共鳴吸収に関する有名な Kittel の式である。

先ず空洞の窓の大きさを適当にして導波管と空洞の結合が Under-coupling をなす様にする。此の場合 V. S. W. R. を $\rho = E_{max}/E_{min}$ とすると次の關係が成立する。

$$\rho = \frac{Q_E}{Q_0} \quad (2)$$

茲に Q_E は external Q, Q_U は Unloaded Q である。loaded Q を Q_L とすると一般に

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_U} + \frac{1}{Q_E} \quad (3)$$

$$\frac{1}{Q_U} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_m} \quad (4)$$

但し, I/Q_0 : 壁面上の l_{oss} I/Q_m : 試料の磁気吸収による l_{oss} 。今直流磁場を掛けない時及び掛けたときの共振時の $V.S.W.R.$ を夫々 ρ_0, ρ_H とすると

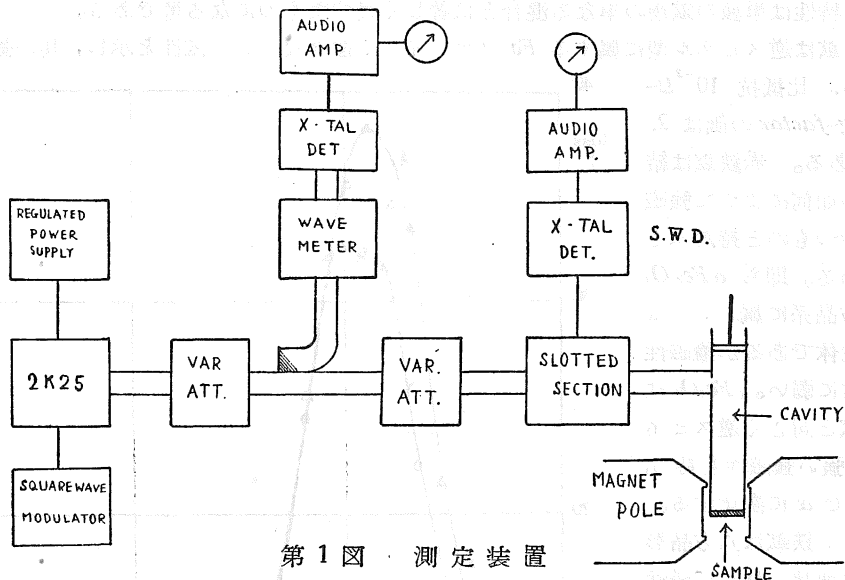
$$\rho_0 = \frac{Q_E}{Q_U} = \frac{Q_E}{Q_0} \quad (5)$$

(4) 式から
$$\rho_H = \frac{Q_E}{Q_0} + \frac{Q_E}{Q_m}$$

故に
$$\frac{Q_E}{Q_m} = \rho_H - \rho_0 \quad (6)$$

Q_E は一定とみてよいかから(6)式から ρ_H, ρ_0 を測定することに依つて相対的吸収の程度 $\frac{Q_E}{Q_m}$ を知ることが出来る。此の方法から分ることは Q の変化に基づく resistive l_{oss} であつて, reactive l_{oss} は別に周波数の変化から求めなければならない。

3. 測定装置



第1図 測定装置

測定装置の Block Diagram を第1図に示す。方向性結合器は Schwinger Type。Wavemeter は円筒吸収型空洞共振器で TE_{011} mode を使用, 周波数統取精度は有効数字4桁, 8500MC から 9700 MC まで較正してある。

測定用空洞共振器は導波管と同じ寸法の矩形型, 対称な窓を通して導波管と結合し, TE_{109} mode が励起される。窓の大きさは $11.4\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ の矩形をなし, 空洞との結合は Under-coupling をなしている。これは resonance 及び far off resonance に於て定在波の min の位置が変化しないことで判定することが出来る。空洞の下端中央に試料粉末をポリスチレン高周波絶縁塗料と混じて押し固め, この部分を電磁石の磁極片の間に入れる。磁極片の直径8mm, 其の周縁に磁場均一用の突起部を設けた。磁場はコイルに 10 amp 流すことによつて約 7000 ガウス まで直線的に出すことが出来る。磁場測定の精度は ± 10 ガウスの程度である。空洞上部の可動ピストンは相当精巧な choke 型 にしないと実験中 trouble があきて

困るものである。筆者の場合にも最初摺動型にした所共振が不安定であり又定在波の波形にこぶが出来たりなどして色々苦心したが、結局 choke 型にして解決することが出来た。

4. 砂鉄

砂鉄の起源は地球の中心から噴出した火成岩で、普通 0.1~0.3mm の大きさの粒状をなして産出し、容易に雨水、河水、海波等に洗はれて自然選別を受けている。色が黒色に近い程品質優良とされ、全鉄分 40% 以下のものは貧鉄と見做されている。砂鉄の化学成分は一般的に見て Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MnO , MgO , TiO_2 , P , S , K , 等であるが此等の含有量の関係は後記試料の項を参照されたい。尙此等の成分が如何なる鉱物組成から成立っているかを分析推論すると微小部分を無視して大体、 Fe_3O_4 (磁鉄鉱), Fe_2O_3 (赤鉄鉱), $FeTiO_3$ (チタン鉄鉱) の三成分から成立つものと考へられる。この中の大部分は磁鉄鉱でチタン鉄鉱、赤鉄鉱が 40% を越えることは極めて少い。砂鉄には此等の成分が固溶体、共晶、をなしているもの或は単体として在存するもの等色々あるであろう。従つて砂鉄としての総合特性は単独の鉱物の単なる混合とは著しく異つたものになる筈である。

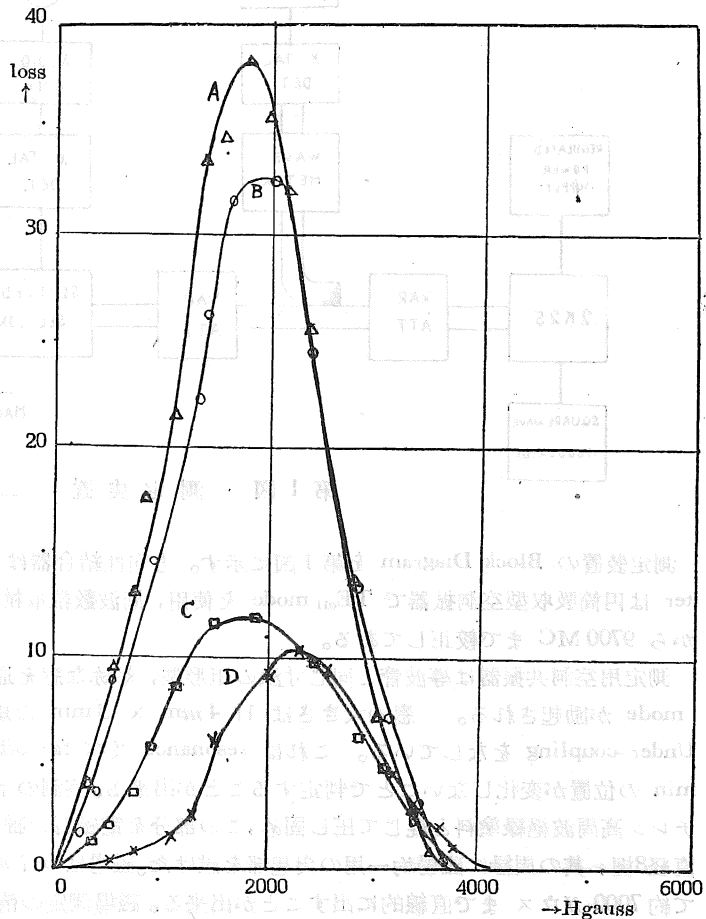
磁鉄鉱は逆スピネル型に属する Fe フェライトで顕著なフェリ磁性を示し、其の強磁性も大きい。比抵抗 $10^{-2} \Omega$ -

cm, g-factor の値は 2.20 である。赤鉄鉱は結晶形の如何によつて強磁性を持つものと持たぬものがある。即ち αFe_2O_3 は斜方晶系に属し、フェリ磁性体であるが強磁性は非常に弱い。 γFe_2O_3 は磁鉄鉱と同じく逆スピネル型、強い強磁性を持ち、 $600^\circ C$ で α に変化する。

チタン鉄鉱は六方晶形鉄黒色塊状、微かに磁性を持つ。此等鉱物の単独の場合の吸収の様子も参考のため後に掲げておいた。

5. 試料及び測定結果

第 2 図及び第 5 図に示した試料の化学成分は第 1 表の如くである。

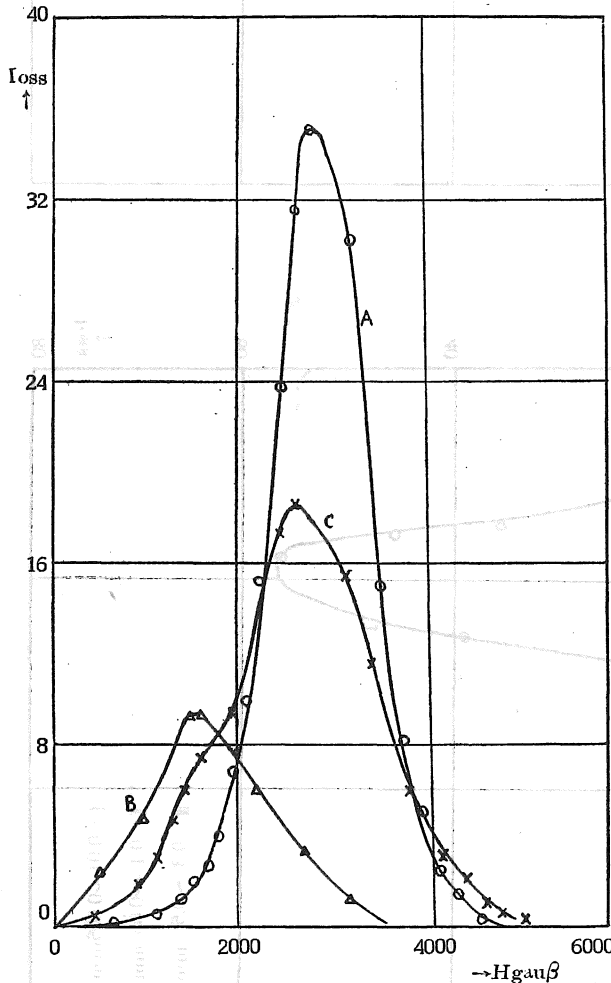


第 2 図 各地の砂鉄の吸収曲線

図表	Total Fe	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	CaO	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃
第2図	A	69.96		3.20	0.96	0.76	0.55	2.90
	B	63.72		5.10	1.40	3.81	1.15	3.10
	C		69.52	21.5	3.08	0.74	1.58	?
	D		38.28	24.64	11.30	2.36	8.84	1.89
第5図		63.52		3.60	0.98	5.38	0.68	3.15

第1表 砂鉄の化学成分

成分によつて吸収曲線の形（高さ及び半値巾）に著しい差異が見られる。A, Bの試料では



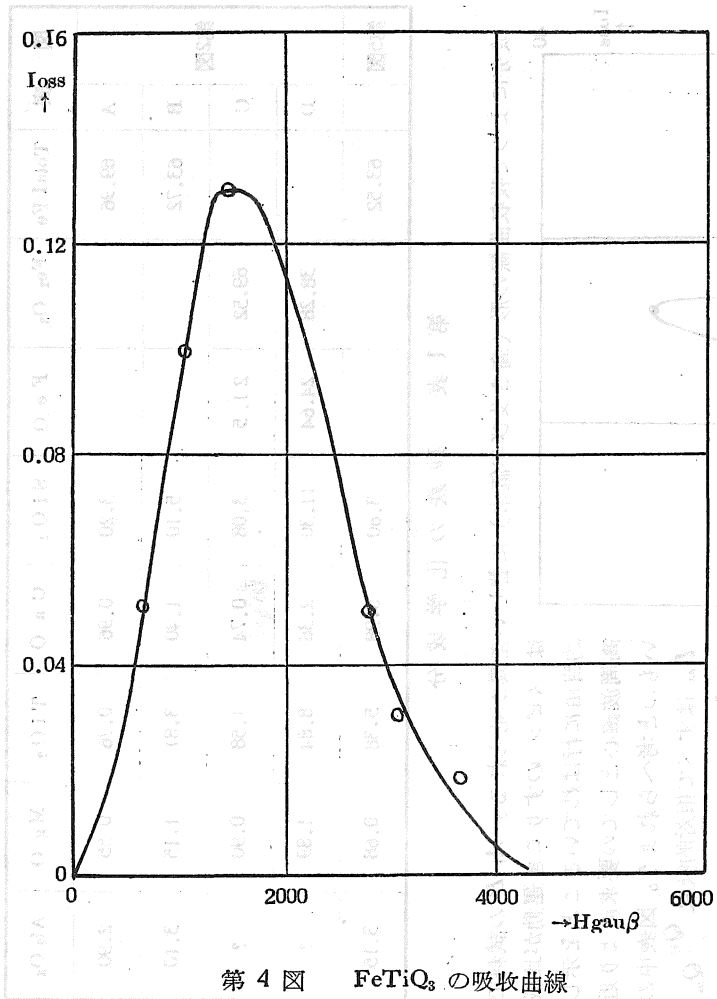
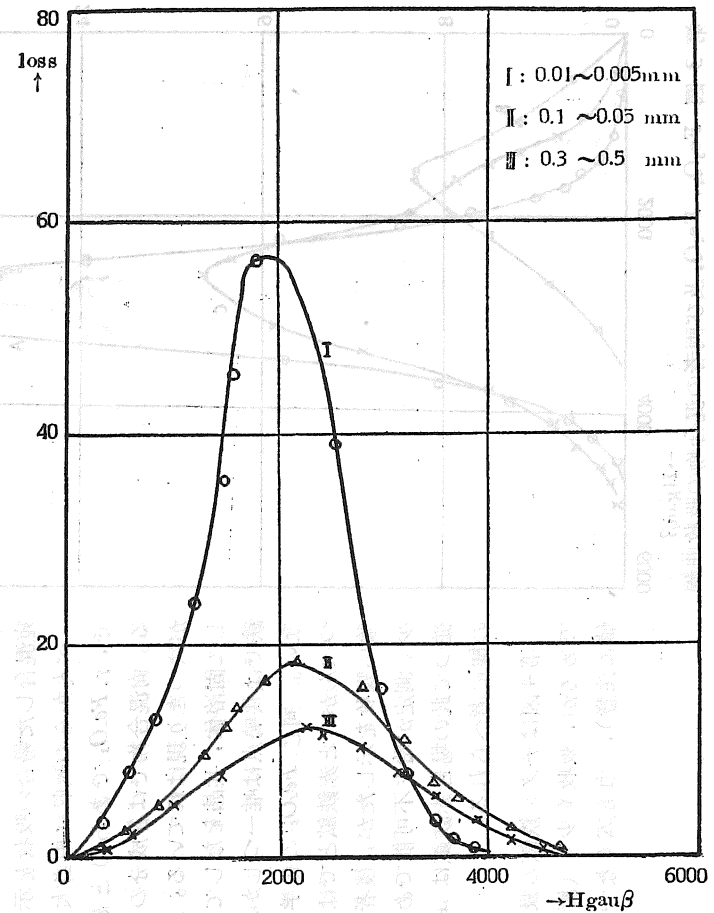
はスピンのすりこぎ運動が比較的自由に行はれていることを示し高周波磁心としての要求により近いものと考えられよう。図表中の I_{loss} はすべて相対的吸収 Q_r/Q_m の値を示す。

第3図Aは磁鉄鉱 (0.2 gr), Bはべんがら (0.2 gr) Cは両者を0.1 gr宛混合した場合の吸収を示す。

べんがらの吸収は相当大きいので、 γ -Fe₂O₃ であろうと思はれる。尚混合物では各成分の共鳴点のはつきり現はれている。之に反して固溶体、共晶をなしている砂鉄では共鳴点は唯一つしか現はれない。同じ Fe₂O₃ の化学式を持つべんがらと赤鉄鉱とでは前者は強い吸収を示したが、後者は吸収少く測定が殆ど不可能であつた。従つて此の場合赤鉄鉱は α -Fe₂O₃ の様に考へられる。

第4図はチタン鉄鉱の吸収曲線であるが、吸収も少く（縦軸の数値に注意）、巾も広がっている

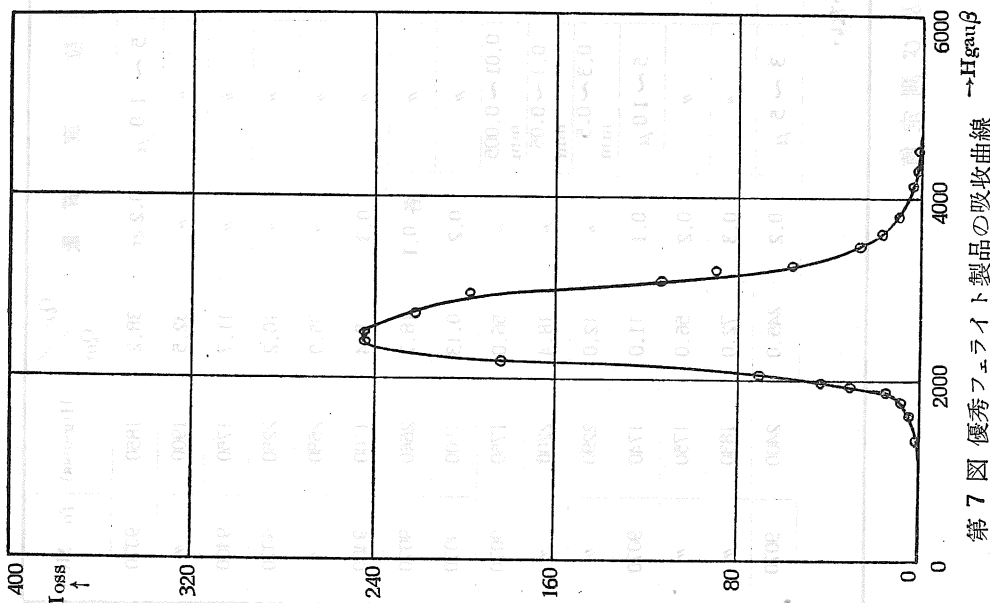
第3図 Fe₃O₄, Fe₂O₃ 及び両者の混合物の吸収曲線

第4図 FeTiO_3 の吸収曲線

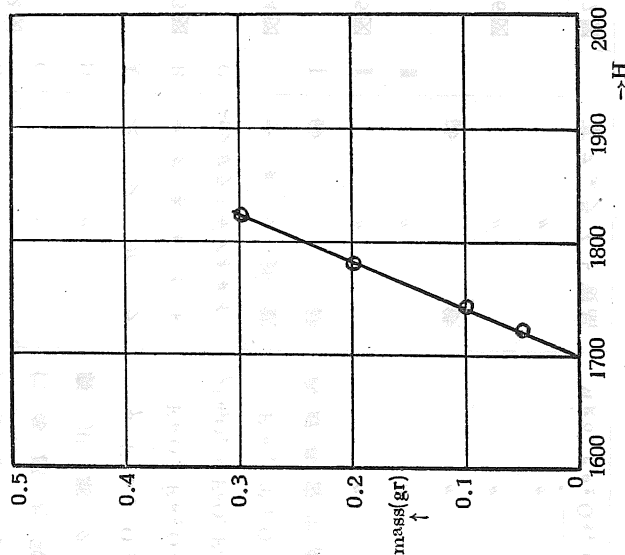
第5図 砂鉄の粒度と吸収曲線の関係

第5図は米子市外皆生温泉海岸の砂鉄である。粒子の大きさによつて吸収量が異り、且つ粒度と共に共鳴点が増加する。共鳴点のづれは粒子が大きくなるにつれて反磁場が増するためと考えられる。吸収量の減少の原因としては表面積の減少と skin depth の影響等が考えられよう。

第6図は砂鉄（皆生海岸）の分量，言いかへれば試料の厚さと共鳴点の関係を示す。これから反磁場の大きさが分かる。此の度の実験に用いた砂鉄粉末の分量はすべて 0.2 gr であるから，砂鉄についての共鳴磁場の大きさは何れも約 100 ガウス宛左へづれることになる。



第7図 優秀フュライト製品の吸収曲線



第6図 砂鉄の質量（或は厚み）と共鳴磁場の関係

第7図は某フェライト製品 (MgO, Fe_2O_3 を主とするものと思はれる) 0.2gr 粉末 (大さ, 約 5μ) による吸収を示す。今迄のすべての試料に比べ, 桁違いに大きな吸収 (縦軸の数値に注意) を示すと同時に, 半値巾も小さく 1000 ガウス 以下で, 高周波磁心として非常に優秀な性質を持つている。尙この試料は殆ど絶縁物に近く, 堅牢で強い強磁性を有している。

このことから磁気共鳴曲線の形から高周波磁心の性能の判別が出来るように思はれる。最後に本研究に用いた試料と其の測定値の一覧表を掲げておく。

図表	試料	産地又は成分	粒 度	質 量	Q_r / Q_m	H (gauss)	fo (Mc)
第2図	A 砂 鉄	仁多郡 鳥上村	5 ~ 10 μ	0.2gr	38.2	1850	9070
	B "	仁多郡 三沢村	"	"	32.5	1900	"
	C "	仁多郡 大宮村	"	"	11.7	1750	9400
	D "	夔川 郡 久村	"	"	10.2	2250	9070
第3図	A ベンゾナグライト	γFe_2O_3	"	"	35.0	2580	"
	B マグネタイト	FeO, Fe_2O_3	"	0.3	9.4	1500	9400
	C ベンガラ+マグネタイト	$\gamma Fe_2O_3 + FeO, Fe_3O_4$	"	各 0.1	18.7	2660	9070
第4図	チタニウム 鉄 鉄	Fe, TiO ₂	"	0.2	0.13	1500	9070
	砂 鉄	鳥取県 皆生海岸	0.01 ~ 0.005 mm	"	56.0	1750	9070
第5図	I "	"	0.1 ~ 0.05 mm	"	18.4	2200	"
	II "	"	0.3 ~ 0.5 mm	"	12.0	2290	"
	III 砂 鉄	"	5 ~ 10 μ	0.1	11.0	1740	9070
第6図	"	"	"	0.2	56.0	1750	"
	"	"	"	0.3	72.0	1830	"
第7図	某フェライト製品	MgO, Fe ₂ O ₃ , (?)	3 ~ 5 μ	0.2	245.0	2400	9070

第2表 試料及び測定値

備考 H, fo は共振点の値。H には反磁場の補正はしていない

6. 結 言

以上マイクロ波 (3.3 cm) による磁気共鳴吸収の立場から砂鉄の磁気的性質の一部を調べた次第である。色々な成分を含んでいる関係上、磁気に関して原理的なことは何も言へないが、Fe, Mg, Mn 等のフェライトを含有している天然のフェライトとも考へられるので精製の如何によつては工業上への利用も考へられる。尙第7図の如く共鳴吸収線の形によつて高周波磁心としてのフェライトの品質を判定することが出来るように思はれる。尙砂鉄の粉末を強い圧力の下に圧縮成形した試料の性質についても興味ある結果が期待される。

終に本研究について色々御指導、御援助を賜つた京大高橋勲教授、日立製作所安来工場新持喜一郎博士に深甚なる感謝の意を捧げる次第である。

文 献

- (1) Rev. Mod. Phys: 25, 1, Jan. (1953).
- (2) Bozorth; Ferromagnetism.
- (3) D. D. King : Measurements at Centimeter WaveLength.
- (4) 長谷川熊彦著 : 砂鉄.
- (5) 小谷正雄編 : 分子構造の研究.
- (6) 日本物理学会編 : 物理学論文選集. 36.
- (7) 駒形作次編 : 電気材料便覧.

[昭和29年1月10日受理]