

5G 用移動通信端末に供する電磁干渉抑制材料の電磁波吸収メカニズム に関する研究

Microwave Absorption Mechanism of Electromagnetic Interference Materials for 5G Mobile Communication Devices

岡本 聡^a, 五十嵐 利行^b, 菊池 伸明^a, 藤原 万里子^b, 中村 哲也^a,
小谷 佳範^c, 大沢 仁志^c, 大河内 拓雄^c, 鈴木 基弘^c

Satoshi Okamoto^a, Toshiyuki Igrashi^b, Nobuaki Kikuchi^a, Mariko Fujiwara^b, Tetsuya Nakamura^a,
Yoshinori Kotani^c, Hitoshi Osawa^c, Takuo Ohkochi^c, Motohiro Suzuki^c

^a 東北大学, ^b(株)トーキン, ^c(公財)高輝度光科学研究センター
^aTohoku University, ^bTOKIN Corporation, ^cJASRI

第 5 世代移動通信システム用移動通信端末に供する電磁干渉抑制材料の電磁波吸収メカニズム
解明を目的としたものである。これまでの研究成果では、電磁干渉抑制材料を構成する扁平単一
粒子の磁気渦とよばれる特殊な磁化状態が電磁干渉抑制材料の複素比透磁率の磁気損失スペクトル
に起因していることを示す結果を得ていたが、その明確な証拠を得るには至っていない。今回、
SPring-8 BL25SU で開発された軟 X 線 MCD 顕微分光装置を用いて扁平単一粒子の磁区構造を観
察した。XMCD 像の解析結果から、扁平単一粒子内には複数の還流磁区が存在し、そのサイズ分
布が電磁干渉抑制材料の複素比透磁率スペクトルを決定づけるものであることが本研究より明ら
かとなった。

キーワード： 電波吸収材料、軟磁性扁平粒子、2次元 XMCD、磁気渦状態

背景と研究目的：

本研究は第 5 世代移動通信システム(5G)の通信端末に供する電磁干渉抑制材料の電磁波吸収メ
カニズム解明を目的とするものである。電磁干渉抑制材料は現在の移動通信端末の信号品質向上
に不可欠なものであり、5G 通信用に向けた開発が急務となっている。しかしながら、本製品は広
く流通しているにもかかわらず、その電磁波吸収メカニズムには不明な点が多く、今後の 5G 対
応に向けた研究開発が停滞していた。そのためトーキンと東北大で共同研究を開始し、構成要素
である扁平磁性粉が磁気渦と呼ばれる特殊な磁化状態に起因するものであることを示す結果を得
た[1]。しかし、その明確な証拠は未だ得るには至っていない。SPring-8 BL25SU で技術開発された
軟 X 線 MCD 顕微分光装置を用いれば、電磁波吸収メカニズム解明に直結する扁平磁性粉内部の
磁気渦構造を明瞭に観察可能であり、産業応用・物質科学の両面において重要な成果となること
が期待される。

実験：

試料はアトマイズ法により工業的に製造された Fe 粒子を素原料として使い、マイクロ鍛造法
[2]により平均粒径約 100 μm 、平均厚み約 1 μm の扁平磁性粉を作製した。粒径分布は比較的大き
く、実体顕微鏡を見ながら数 10 μm 径から約 150 μm 径までの粒径の異なる粒子を複数個選別し、
試料ホルダーに張り付けたカーボンテープ上に配列させた状態でビームラインに持ち込んだ。透
磁率測定の実験は、Fe 扁平単一粒子の複素比透磁率の周波数特性は産業技術総合研究所で開発さ
れたトランス結合型透磁率測定装置[3]を用い、複素比透磁率の定量測定を行った。粒子径 $D=146$
 μm の Fe 扁平単一粒子の複素比透磁率スペクトルに磁気ボルテックスコアの Gyration mode の理
論モデル[4, 5]を適用した結果、見積もられた Vortex 径(D_v)は 32 μm であり、扁平粒子径(D)の約
1/5 程度のサイズの磁気渦が存在していることが複素比透磁率の定量測定の実測値から計算され
た[1]。2次元 XMCD の実験は、BL25SU の B-branch の最下流に設置した軟 X 線 MCD 顕微分光装
置[6]を用いた。出射スリットを仮想光源としてフレネルゾーンプレート(FZP)を用いてビームを
 $\phi 100$ nm 以下まで集光し、試料の局所計測およびイメージングを行った。これは、磁気渦中心の

サイズが 100 nm 程度と推定しており、これを測定するのに適合したビームサイズである。Fe L_{2,3} 吸収端を用い、X 線吸収強度の測定は全電子収量法によって行った。

結果および考察：

Fe 扁平単一粒子は面内磁化と考えられるため、図 1 に示すような X 線の入射に対して 45°傾いたジグに単一粒子試料を取り付けた。したがって得られた像は縦に $\sqrt{2}$ 倍することで、扁平単一粒子を面直から観察した粒子サイズと同じになる。

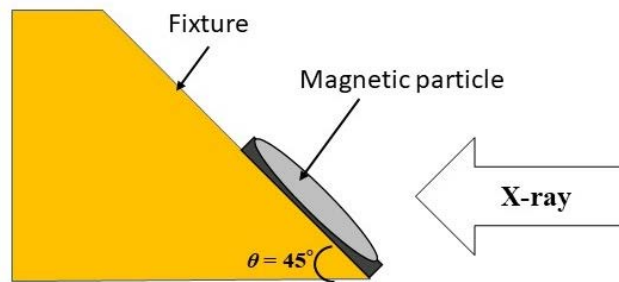


図 1. 観察試料の取り付け方法

図 2 に今回得られた Fe 扁平単一粒子の観察像を示す。図 2-1 は XAS 像、図 2-2 は XMCD 像、図 2-3 は磁区解析像であり矢印は磁化の向きである。これらの像は縦方向に $\sqrt{2}$ 倍しており、扁平粒子面直方向から観察した粒子サイズと一致している。

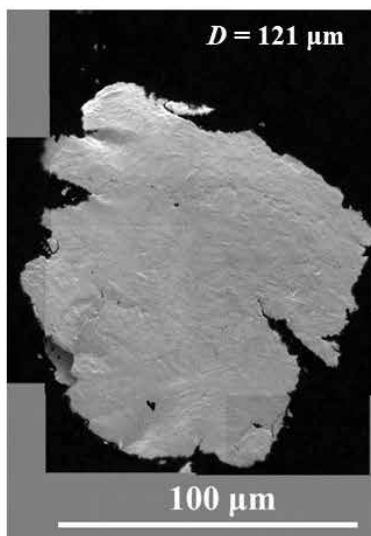


図 2-1. XAS 像

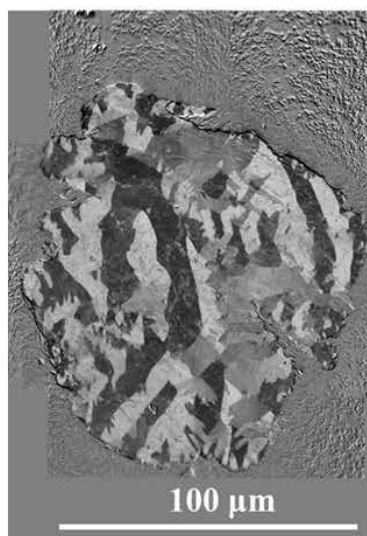


図 2-2. XMCD 像

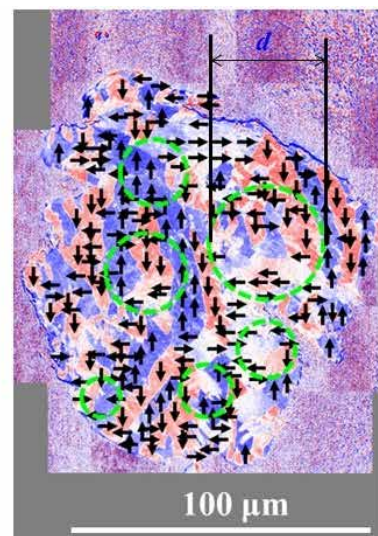


図 2-3. 磁区解析像

図 2. Fe 扁平単一粒子の観察像

図 2 に示す Fe 扁平単一粒子は複素比透磁率測定した試料と同程度の $D = 121 \mu\text{m}$ のサイズである。図 2-1 に示す XAS 像は SEM と同様の粒子形態が観測出来ている。一方、図 2-2 に示す XMCD 像では複数の磁区パターンが複雑に形成している様子を明瞭に確認することができた。図 2-3 に示す磁区解析像では、扁平単一粒子内に緑の線で囲んだサイズの異なる還流磁区を 6 か所確認できた。表 1 に図 2-3 にて観測された 6 か所の還流磁区サイズ(d)、ならびに還流磁区サイズと粒子サイズとの比率 d/D を示す。単一扁平粒子内に観測された還流磁区サイズは $12.9 \mu\text{m} \sim 37.4 \mu\text{m}$ であり、 d/D は $10.7\% \sim 30.8\%$ と分布している。 d/D の算術平均は 18.5% であり、幾何平均は 17.5% であった。これは、複素比透磁率測定から求めた Vortex 径が粒子径の約 25% であるという値に近い。

表 1. Fe 扁平単一粒子内に観測された還流磁区サイズ(d)と粒子サイズ($D = 121 \mu\text{m}$)の比率 d/D

還流磁区	還流磁区サイズ, d (μm)	d/D
No. 1	21.8	18.0 %
No. 2	26.1	21.5 %
No. 3	12.9	10.7 %
No. 4	37.4	30.8 %
No. 5	19.0	15.6 %
No. 6	17.4	14.3 %

以上より、この扁平単一粒子内の複数の還流磁区とそのサイズ分布が電磁干渉抑制材料の複素比透磁率スペクトルを決定づけるものであることが本研究より明らかとなった。

今後の課題：

扁平単一粒子内に存在する複数の還流磁区について、微小振幅の高周波磁場下におけるダイナミクスを観測し、扁平粒子の集合組織である電磁干渉抑制体が有する複素比透磁率の双峰型磁気損失スペクトルに関するメカニズムを解明することが課題である。

参考文献：

- [1] 五十嵐利行, 東北大学博士論文 (2021).
- [2] 吉田栄吉 他, 日本応用磁気学会誌, **26**, 850 (2002).
- [3] S. Tamaru *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **501**, 166434 (2020).
- [4] K. Y. Guslienko *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 24, 3848 (2001).
- [5] K. Y. Guslienko *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **91**, 10, 8037 (2002).
- [6] Y. Kotani *et al.*, *J. Synchrotron Rad.*, **25**, 1444 (2018).