

複合電波吸収材料の開発と評価

Development and Evaluation of Electromagnetic Wave Absorber Made of Composite Ferrite

上野秀典・近藤隆俊・吉門進三

同志社大学工学部, 京田辺市多々羅都谷 1-3 (〒610-0321)

H. Ueno, T. Kondo, and S. Yoshikado

Department of Electronics, Doshisha University, Kyotanabe 610-0321

We developed a composite metal-backed single-layered electromagnetic wave absorber of (spinel-type Ni-Zn-ferrite, SiO₂) composite materials, which operates in the frequency region from 1 to 4 GHz. A composite ferrite with a suitable thickness has the higher absorption frequency range than a Ni-Zn ferrite absorber, and the center absorption frequency can be changed by changing the mixing ratio. There are a few changes in the absorption band due to the change in the thickness in the composite ferrite.

Key words: composite ferrite, electromagnetic wave absorber, SiO₂ added Ni-Zn ferrite, complex permittivity, complex permeability, high absorbing frequency, wide absorbing bandwidth

1. はじめに

最近、移動体通信の発展にはめざましいものがある。しかし電磁波利用の多様化によりいろいろな電磁波障害が起こってきている。そこで、高周波領域で吸収特性の良好な電波吸収体の開発が求められている。おもな電波吸収体には誘電体電波吸収体と磁性体電波吸収体がある。磁性体を用いた電波吸収体は磁気損失を利用して電磁波を吸収される。従来フェライトは損失の少ない磁性材料として特徴づけられていてその方面で広く用いられている。しかし一方でフェライトのような強磁性体には共鳴現象があり、共鳴周波数付近では磁気損失が大きくなるという性質がある。この大きな磁気損失を積極的に利用するのが磁性体電波吸収体である。代表的な磁性体電波吸収体としてはスピネル構造のNi-Znフェライトと六方晶構造のBaフェライトがある^{1)~3)}。Ni-Znフェライトはおもに1 GHz以下の吸収に優れていて吸収帯域幅も広いという特徴がある。しかし現在必要とされている吸収帯域(1 GHz以上)の吸収には適していない。Ni-Znフェライトは周波数変化に対して自然磁気共鳴を起こして透磁率が減少するが、スネックの限界線を超えることはない^{4), 6)}。この限界線のために1 GHz以上での吸収が困難なのである。一方、Baフェライトはこの限界線を超える周波数特性を示すために1 GHz以上での吸収が可能であるが、吸収帯域幅が狭くなるという欠点がある⁴⁾。近年の電波吸収体の研究には大きく分けて構造的な観点からの改良と物質そのものの観点からの改良という2種類の研究がある。しかし、電波吸収体の構造や形状を変化させると加工精度に問題が生じ、つねに一定の吸収量を保持するのが困難になってくる。我々は実用的観点からも形状は単層型で材料そのものの物性を評価することによってより良好な電波吸収体の作製を目的としてい

る。そこで、従来のNi-ZnフェライトにSiO₂を混合することによって吸収帯域を1 GHz以上に伸ばすことを試みた。その結果Ni-ZnフェライトにSiO₂を混合した電波吸収体は1 GHz以上の周波数帯域で良好な吸収特性が得られたので報告する。

2. 実験原理

磁性体電波吸収体は金属を裏打ちして用いる。これは金属を裏打ちすることによって電磁波を後方に透過させず、また吸収体材料にかかる磁界を大きくするためである。この場合吸収体材料内で電磁波は多重反射する。フェライトの複素比誘電率、複素比透磁率をそれぞれ $\mu_r^* (= \mu_r' - j\mu_r'')$, $\epsilon_r^* (= \epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ 、試料の厚さを d とし、裏面を金属で短絡する。このとき、電磁波垂直入射に対する規格化インピーダンス z は次式で与えられる。

$$z = \left(\frac{\mu_r^*}{\epsilon_r^*} \right)^{1/2} \tan \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} d (\mu_r^* \epsilon_r^*)^{1/2} \right\} \quad (1)$$

ここで、 λ は真空中での入射電磁波の波長である。金属で裏打ちした電波吸収体が完全吸収体となる条件は $z=1$ である。この関係式を満たす周波数変化をする物質が全周波数を吸収する理想的な吸収体であるが、このような吸収特性を示す物質は存在しない。(1)式はさらに整理すると以下の近似式が導かれる⁶⁾。

$$\mu_r' = \frac{\epsilon_r'}{3} \quad (2)$$

$$\mu_r'' = \frac{\lambda}{2\pi d} \quad (3)$$

電磁波を完全吸収するためにこの二つの式が同時に満たされなければならない。(2)式は、まず複素比誘電率の実数部の1/3の複素比透磁率の実数部があれば吸収が可能であることを示している。フェライトの複素比誘電率の実数部は約12で一定である。フェライトに低い誘電率をもつ材料を混合した場合、混合体の誘電率、透磁率の算定にLichteneckerの対数混合式^{7), 8)}を用いると混合体の誘電率は減少し、透磁率は平坦化し、Ni-Znフェライトよりも1 GHz以上ではむしろ値が大きくなる。したがって、(2)式を満たすようにフェライトの誘電率を小さくすることによって吸収帯域を1 GHz以上の周波数帯域まで推移させることができる。

3. 実験方法

Ni-Znフェライト、Ni_{0.5}Zn_{0.5}O・Fe₂O₃(NZ11):NiO, ZnO, およびFe₂O₃(純度99.99%)の粉末をNiOとZnOのモル比が

Table 1 Mixing ratio of (Ni-Zn ferrite, SiO₂) composite materials

Sample	Mixing ratio	
	NZ11 (mol%)	SiO ₂ (mol%)
ZS91	90	10
ZS73	70	30
ZS64	60	40
ZS55	50	50
ZS46	40	60
ZS37	30	70

1:1 になるように電子天秤で計量し湿式混合を行った後、加圧成形 (320 MPa) をして直径 20 mm のペレットを作製し、電気炉で 800℃、5 時間空気中で仮焼成を行う。冷却後粉砕をし、粒径を均一化させた後再び加圧成形 (320 MPa) をして直径 20 mm のペレットを作製し、電気炉で 1000℃、10 時間空気中で本焼成を行う。冷却後粉砕する。

複合材料 (Ni-Zn フェライト, SiO₂): この粉末と SiO₂ (純度 92.88%) を Table 1 に示すモル比で電子天秤で計量して湿式混合を行った後加圧成形 (320 MPa) をして直径 20 mm のペレットを作製し、電気炉で 1200℃、2 時間空気中で焼成を行う。焼結したペレットをトロイダルコア状 (外径: 7 mm, 内径: 3 mm) に加工し、ベクトルネットワークアナライザー (HP8752C) を用いて 300 kHz~6 GHz の周波数範囲で反射係数を測定し、複素比誘電率、複素比透磁率、およびリターンロスを出した。また、X 線回折装置 (Philips, MPD1880) を用いて混合体の構造評価を行った。

4. 実験結果および考察

Fig. 1 に Ni-Zn フェライトに SiO₂ を混合した電波吸収体の複素比誘電率の実数部の周波数特性を示す。Ni-Zn フェライト単体の誘電率に対して SiO₂ を混合すると、混合比に比例して誘電率が減少した。これは SiO₂ の誘電率が約 3.8、Ni-Zn フェライトが約 12 であるために平均の誘電率が低下したためである。

Fig. 2 に複素比透磁率の周波数特性を示す。Ni-Zn フェライトに SiO₂ を混合した電波吸収体は SiO₂ の混合比に比例して複素比透磁率の実数部、虚数部ともに平坦化した。XRD の結果は Ni-Zn フェライトと SiO₂ がこの組成の固溶体をつくらず、混合体であることが確認された。SiO₂ の混合体が多い場合は Ni-Zn フェライトのまわりに SiO₂ が存在するために粒成長が抑えられ、結晶粒子径は小さくなり、数 GHz 付近では周波数変化に対する磁壁の移動による損失が小さくなったためと考えられる。

SiO₂ を混合した電波吸収体の複素比透磁率は Lichtenecker の対数混合式^{7), 8)}を用いると次式となる。

$$\mu_r^* = \frac{\mu_{r0}^\delta}{(1 + i\omega\tau)^\delta} \quad (4)$$

ここで、 μ_{r0} は Ni-Zn フェライトの低周波の透磁率、 τ は緩和時間、 δ は Ni-Zn フェライトの体積混合比である。(4) 式による μ_r^* の周波数特性の計算値は今回作製した試料の δ 値による

μ_r^* の周波数特性とほぼ一致することが確かめられた。この関係式に示されるように、粒界が非磁性体であるため磁気抵抗が大きくなったことにより複素比透磁率の実数部が高周波領域で周波数特性が Ni-Zn フェライト単体のときと比較して平坦化したと考えられる。

Fig. 3 に Ni-Zn フェライトに SiO₂ を混合した電波吸収体の試料厚が 7 mm についての吸収特性を示す。このグラフより Ni-Zn フェライトに SiO₂ を混合した電波吸収体は SiO₂ の混

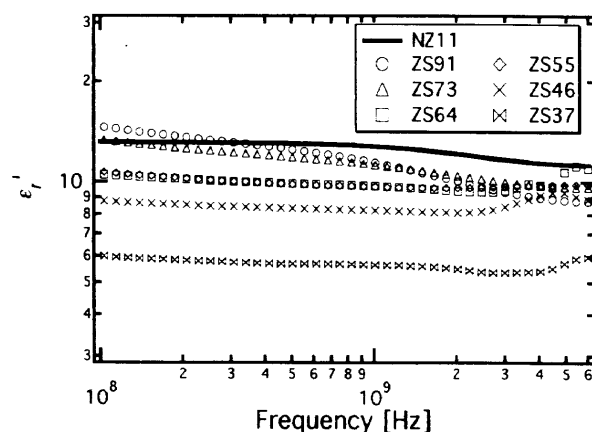
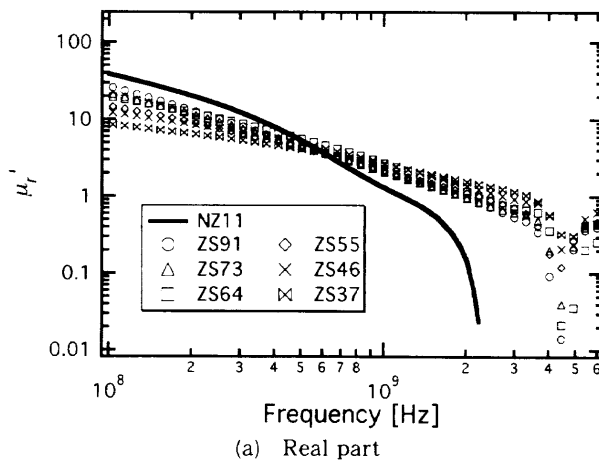
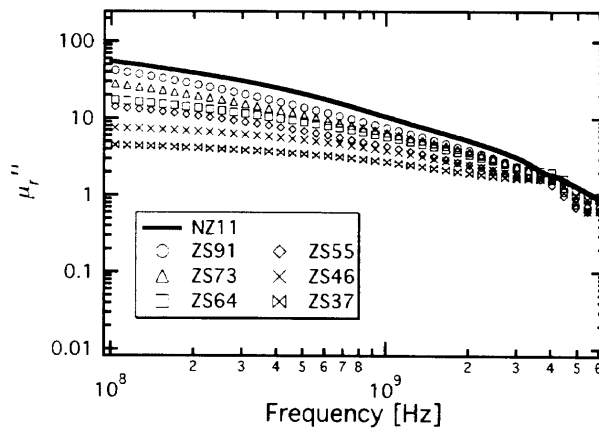


Fig. 1 Frequency dependence of the real part of the complex permittivity for the composite.



(a) Real part



(b) Imaginary part

Fig. 2 Frequency dependence of the complex permeability for the composite ferrite.

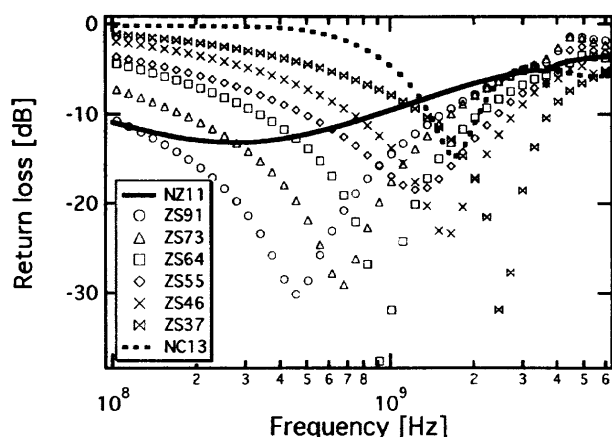


Fig. 3 Frequency dependence of the return loss for the composite ferrite (sample thickness 7 mm).

Table 2 Density of composite ferrite

Sample	Density (g/cm ³)	Weight of 1x1m ² (g)
NZ11	4.3	17.2 (4mm)
ZS91	4.8	28.8 (6mm)
ZS73	4.74	28.5 (6mm)
ZS64	3.83	26.8 (7mm)
ZS55	3.84	30.7 (8mm)
ZS46	3.43	24.0 (7mm) 27.4 (8mm)
ZS37	3.36	20.2 (6mm) 23.5 (7mm)
NC13	4.09	16.4 (4mm)

合量に比例して吸収帯域が高周波側に推移する結果が得られた。これは吸収体の誘電率が減少し、かつ透磁率が平坦化したため複素比誘電率の実数部と複素比透磁率の実数部の比が3:1になる周波数帯がGHz帯に現れたためであると考えられる (Fig. 1, 2)。また、混合比による吸収周波数の変化が得られた。これは、混合比を変えることにより複素比誘電率の実数部、複素比透磁率の実数部を変化させることが可能であるために、(2)式を満たす関係の周波数帯も変化させられるためである。また、Ni-Zn フェライトと SiO₂ の混合比が4:6および3:7に関しては1 GHz以上の吸収特性に優れている六方晶構造のBa フェライト (NC13) とほぼ同じ吸収周波数をもつことが確認された。ここで吸収最適厚がどの混合比に対しても5~11 mmである。従来の電波吸収体と今回開発された複合電波吸収体の密度を Table 2 に示す。この表にはNi-Zn フェライト、Ba フェライト、および混合比別の複合電波吸収体の密度と最適厚による1×1 m²のタイルにおける電波吸収体の重量を示してある。従来の電波吸収体の厚みに比べて厚さが約2倍以上の厚みを最適厚とする複合電波吸収体は重量が従来のものと比べると約1.5倍程度と厚みの増加に対して重さは比較的小さい増加であることがわかった。従来の電波吸収体よりも最適厚が厚くなるが、電波吸収体は金属を裏打ちして使用されるために電波吸収体がビルなどの外壁材として使用されることを考えるとむしろ5~11 mm くらいの厚さを必要とするのではないかと考える。

Ni-Zn フェライトと SiO₂ の比が3:7の電波吸収体の混合比で最も良好な吸収特性が得られることがわかった。吸収特性を Fig. 4 に示す。Fig. 5 に吸収中心周波数、-20 dBのリターンロスにおける吸収帯域幅をその中心周波数で割って規格

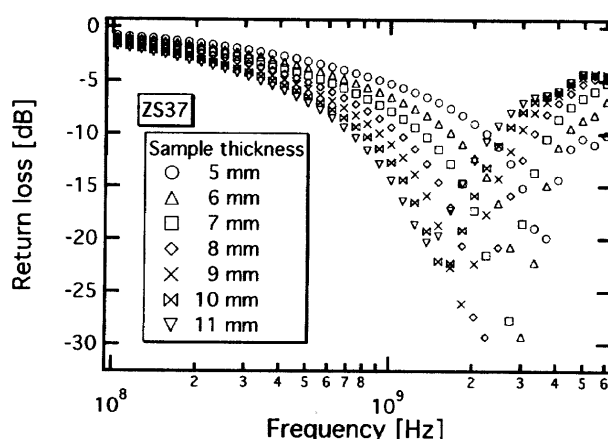


Fig. 4 Frequency dependence of the return loss for the composite ferrite (sample thickness 5-11 mm).

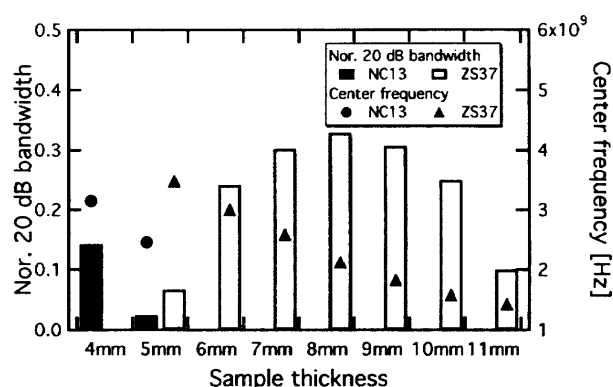


Fig. 5 Normalized -20 dB bandwidth and absorbing center frequency of the composite ferrite and Ba ferrite.

化した帯域幅の厚み依存性を示す。-20 dBの吸収量は5~11 mmの試料厚で見られた。また、この試料厚においてはすべて1 GHz以上の周波数帯域で吸収が確認された。また-20 dB吸収帯域幅は1 GHz以上の吸収特性が良好なBa フェライトよりも帯域幅が広いという結果を得た。特にBa フェライトにおいて吸収最適厚である4 mmの試料厚に着目してみると、4 mmにおける吸収中心周波数は約3 GHzで規格化した吸収帯域幅は約0.15である。この吸収中心周波数に対応する複合電波吸収体の試料厚(6 mm)の吸収帯域幅を見ると、約0.25とBa フェライトの吸収帯域幅よりも同じ吸収帯域で広いという結果を得た。これはベースがNi-Zn フェライトであるために複合電波吸収体の自然磁気共鳴周波数も数 MHzであるが、SiO₂ が混合しているために周波数特性がよくなり、高周波側まで透磁率を保持しているためであると考えられる。このために(2)および(3)式を近似的に満足する周波数領域が広がったため吸収帯域幅が広帯域化したものと思われる。また、各厚さに対しても吸収帯域が1 GHz以上であり、吸収帯域幅が広帯域な電波吸収体であることがわかった。

Fig. 6 にNi-Zn フェライト、Ba フェライト、および混合比を変化させた複合電波吸収体の各厚さに対する吸収中心周波数と-20 dB吸収周波数帯域をバーで表示したグラフである。ドットのみは吸収帯域幅がないことを示している。Ni-Zn フェライトについて、例えば5 GHz付近を吸収する物質を作

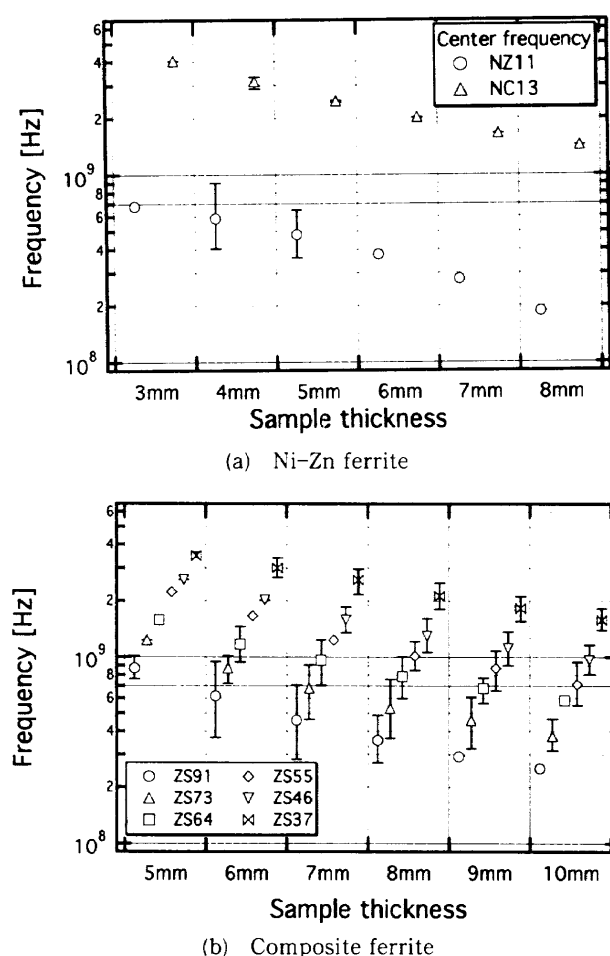


Fig. 6 -20 dB absorbing frequency of ferrites.

製するときに最適厚が4~5 mmになる。また、Ba フェライトについてみると3 GHz 付近を考えると最適厚が4 mm となって、どちらの物質も吸収帯域に対しての厚みによる自由度が小さいことがわかる。一方、Ni-Zn フェライトに SiO₂ を混合した電波吸収体はどの試料に対しても吸収帯域に対する試料

厚の自由度が大きいことがわかった。Ni-Zn フェライトと SiO₂ の比が9:1 および7:3 に対しては同じ帯域を吸収帯域とする Ni-Zn フェライトよりも、4:6 および3:7 に対しては同じ帯域を吸収帯域とする Ba フェライトよりも試料厚の自由度が大きいことがわかった。このことにより、精度の高い試料厚の吸収体が要求されず、実用的な電波吸収体であると考えられる。

5. 結 論

Ni-Zn フェライトに SiO₂ を混合した複合電波吸収体について以下の結果が得られた。

- 1) 吸収中心周波数が高周波化し、1~4 GHz の周波数帯に適した材料である。
- 2) 混合比を変えることによって任意に吸収周波数を変えることができる。
- 3) 厚みの変化による吸収帯域の変化が小さい。
- 4) 低コストで軽量電波吸収体である。

謝 辞 本研究の一部は、泉科学技術振興財団および同志社大学 RCAST の助成のもとで行われた。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 内藤, 末武, 藤原: 信学論誌, **52-B**(1), 26 (1968).
- 2) 内藤: 信学論誌, **52-B**(1), 21 (1968).
- 3) 小塚: 日本応用磁気学会誌, **21**, 1159 (1997).
- 4) G. H. Jonker, H. P. J. Wijn, and P. B. Brawn: *Philips Tech. Rev.*, **18**, 145 (1956).
- 5) 平賀, 奥谷, 尾島: 電子材料シリーズ フェライト, pp. 82-93 (丸善, 東京, 1986).
- 6) 関: 電波吸収体と電波暗室, pp. 148-154 (シーエムシー, 東京, 1985).
- 7) 森田, 小西: 信学技報, **MW-97-80**, 1 (1997).
- 8) W. Lichtenecker: *Phys. Z.*, **32**, 255 (1931).

1997 年 10 月 27 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録