磁性リボン被覆ケーブルのノイズ放射特性

Noise Emission from Cables Covered with Magnetic Ribbons

中村真貴・堀越伸介・今井睦貴・神戸士郎・石井修・荒井康子

山形大学, 山形県米沢市城南 4-3-16 (〒992-8510)

M. Nakamura, S. Horikoshi, Y. Imai, S. Kambe, O. Ishii, and Y. Arai

Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510

This paper describes the use of an Fe-based nanocrystalline alloy ribbon annealed at 550°C for 10 min as a noise filter. An Fe-based nanocrystalline alloy ribbon wound around an input section of a cable exhibited higher noise attenuation than a conventional magnetic ribbon (Co-based amorphous alloy). Further improvement in noise attenuation was achieved by covering the whole cable with the Fe-based nanocrystalline alloy ribbon. This confirmed that an Fe-based nanocrystalline alloy ribbon is a superior candidate for use as a noise filter and cable shielding material.

Key words: noise attenuation, magnetic ribbon, cable, noise filter

1. はじめに

近年、電気通信システムのデジタル化、高周波化、高速化、高密度集積化が急速に進んでいる。これらの発展に伴い、電磁波障害（EMI）が問題になっている。従来、ケーブルから発生する電磁波を除去するためには、フェライトコアが使用されていた。しかし、体積が大きいため、機器の高密度集積化を困難にしていた。

一方、Co系アモルファス合金リボンなどの金属磁性体をケーブルに被覆し、その渦電流損失を利用した EMI ノイズフィルタが研究されている^{1)~3)}。磁性リボンを用いたノイズフィルタは、フェライトコアの 1/10 以下の体積でフェライトコアと同程度のノイズ減衰特性を示す⁴⁾。しかし、製品化に際しより高性能かつ安価なノイズフィルタが望まれる。Co 系磁性リボンより安価な材料として Fe 系微結晶磁性リボンがあげられる。Fe 系微結晶磁性リボンは熱処理を施すことにより透磁率が増加し、ケーブルの根元に被覆した場合、大きなノイズ減衰量が得られる⁵⁾。本研究では熱処理を施した Fe 系磁性リボンをケーブル全体に被覆した場合とケーブルの根元に被覆した場合のノイズ減衰量を検討する。また、各磁性リボンの抵抗(R)とノイズ減衰量を比較し、放射ノイズの減衰を理論的に明らかにした。

2. 実験方法

2.1 磁性リボンの仕様

Table 1, 2 に本実験で用いた Co 系アモルファス磁性リ

ボン、および、Fe 系磁性リボンの出発原料である Fe 系アモルファス磁性リボンの仕様を示す。また、Table 3 に Fe 系微結晶磁性リボンを得るために施した熱処理条件を示す⁵⁾。

2.2 リボンの被覆方法

本実験では磁性リボンをケーブルの根元に被覆した場合、およびケーブルの全体に被覆した場合について検討する。未熱処理の Fe 系磁性リボンを Fe-1、熱処理済みの Fe 系磁性リボンを Fe-2 と記す。また、Co 系磁性リボンは Co と示す。

使用するリボンの体積を一定とするため長さ 76cm の Fe-1、Fe-2 あるいは長さ 54.2cm の Co を内径 2.3mm の円筒に成形し、ケーブルの根元に 1 個被覆した場合を根元被覆と呼ぶ。ここで、根元被覆の場合の被覆範囲はリボン幅である 1.25cm である。また、長さ 2cm の Fe-1、Fe-2 あるいは長さ 1.4cm の Co を内径 2.3mm の円筒形リボン

Table 1 Specifications of Co-based magnetic ribbon.

Composition	Co _{68.59} Fe _{1.28} Mo _{2.57} Mn _{3.7} Si _{14.6} B _{9.2}
Production method	Roll cooling method
Shape	Width: 1.25 cm, thickness: 14 μ m
Specific resistance	120 μ Ω $\cdot$ cm

Table 2 Specifications of Fe-based magnetic ribbon.

Composition	Fe _{78.9} Cu ₁ Ni _{2.15} Si _{15.4} B _{6.03}
Production method	Roll cooling method
Shape	Width: 1.25 cm, thickness: 10 μ m
Specific resistance	110 μ Ω $\cdot$ cm

Table 3 Annealing conditions.

Annealing temperature	550 $^{\circ}$ C
Atmosphere	N ₂ flow
Annealing time	10 min
Cooling method	Natural cooling

に成形し、ケーブル全体を覆うように 38 個被覆した場合を全体被覆と呼ぶ。

2.3 ノイズ測定法

ノイズ放射量測定系を Fig.1 に示す。ネットワークアナライザのポート 1 に整合器を介してツイストペアケーブルを接続する。本整合機は抵抗網からなる回路を使用しており広帯域でのマッチングが可能である。ケーブル長は 50cm とし、110 Ω の終端抵抗によって終端する。ポート 2 にはループアンテナを接続し、透過係数、 S_{21} 、即ちノイズ放射量を測定する。ループアンテナの位置は、ケーブルの midpoint、つまり根元から 25cm の位置にケーブルから 1 cm 離し設置する。測定周波数は、10 MHz から 1000 MHz である。

Fig.2 にノイズ減衰量の定義を示す。実線はケーブルのみのノイズ放射量であり、破線はケーブルに Fe-2 を根元被覆した場合のノイズ放射量である。約 120 MHz において一次ピークが現れている。磁性リボンを被覆した場合、この一次ピークで最も高いノイズ吸収効果を示す。これは、ケーブルが 120MHz 奇数倍の周波数に対してアンテナとして作用しノイズ電力の放出が強められると同時に、フィルタを装荷した場合のノイズ減衰量も増加する事を示している²⁾。従って、本研究では 120 MHz におけるケーブルのみ及び、ケーブルに各磁性リボンを被覆した場合のノイズ放射量の差をノイズ減衰量と定義した。

2.4 インピーダンス測定

インピーダンス ($Z=R+jX$) の測定は、ネットワークアナライザを用いた。測定周波数は 1MHz から 1000MHz である。各磁性リボンの Z は、フィクスチャ (直径 1 mm、長さ 17 mm の銅線に直径 4.4 mm のプラスチックチューブを介したもの) に各磁性リボンを巻きつけた時の Z とフィクスチャのみの Z との差である。インピーダンスの測定に用いる磁性リボンの長さは、体積を一定にするためノイズ減衰量の測定と同様に Fe-1 及び、Fe-2 を 76cm (幅 12.5mm、厚さ 10 μ m)、Co を 54.2cm (幅 12.5mm、厚さ 14 μ m) とした。インピーダンス測定用試料は内径 5.04mm、平均厚さ 0.442mm、高さ 1.25cm の円筒である。

3. 実験結果及び考察

Fig.3 に Fe-2 の $|Z|$ 、 R 、 $|X|$ の周波数特性を示す。120MHz では、 $|X|$ に対し R は非常に大きく、 $|Z| \approx R$ である事がわかる。他のリボンに対しても $|X|$ に対し R は非常に大きいため、以降 $|Z| \approx R$ とし、 R とノイズ減衰量の相関について検討する。120MHz における R は、Fe-2(39.8 Ω) が最も高く続いて Co(35.3 Ω)、Fe-1(11.3 Ω) であった。未熱処理の Fe 系磁性リボンである Fe-1 に対し熱処理済みの Fe 系磁性リボンである Fe-2 が大幅に R が増加した。この結果は、石井らが報告している Fe 系磁性リボンに熱処理を施した場合の R の挙動と合致する⁵⁾。即ち、Fe 系アモルファス磁性リボンに熱処理を施す事により Fe の微

Fig. 1 Radiated noise measurement setup.

Fig. 2 Graph of the noise attenuation.

Fig. 3 Frequency dependence of $|Z|$, R and $|X|$ of Fe-2.

結晶が析出し平均的な磁歪及び異方性が減少し、透磁率が増加したと考えられる。

Fig.4 に各磁性リボンをケーブルの根元に被覆した場合(黒塗り), および, ケーブルの全体に被覆した場合(白抜き)の R に対するノイズ減衰量を示す。また, ○および●は Fe-1, □および■は Co, △および▲は Fe-2 を示している。根元被覆した場合, 全体被覆した場合ともに, ノイズ減衰量は R に比例する事がわかる。この傾向はすでに報告されている結果と一致する⁵⁾。すなわち, 磁性リボンをケーブルの根元に被覆した場合, 最も高いノイズ減衰量を示したのは, Fe-2 であり 8.8dB であった。続いて Co の 7.9dB であり, 最も低いのは Fe-1 の 3.0dB であった。また, 全体被覆でのノイズ減衰量は Fe-2 は 10.7dB, Co は 9.2dB, Fe-1 は 5.1dB であった。

R に対しノイズ減衰量が比例関係となる理由は以下のように考えられる。2.3 で示したようにケーブルは 1/4 波長のモノポールアンテナとして共振している。この場合の放射抵抗は 36.6Ω であり, アンテナのインピーダンス, Z_a , は式(1)から求められる⁶⁾。

$$Z_a = Rr + R_c + R + jX_a \quad (1)$$

ここで Rr は放射抵抗, R_c はアンテナの導体抵抗(≈ 0), R はリボン被覆によって付加された抵抗, X_a はアンテナのリアクタンスである。また, ケーブルは共振しているため $X_a = 0\Omega$ である。つまり, ケーブルから放射されるノイズ電力は Rr と R の比で変化する。Fig.3 の結果から各磁性リボンを被覆することによって R は, Fe-1(11.3Ω), Co-2(35.3Ω), Fe-2(39.8Ω)増加した。

Fig.5 にそれぞれの磁性リボンをケーブルに被覆した場合のノイズ放射電力(N)を磁性リボンを被覆しない場合のノイズ放射電力(N_0)で規格化したグラフを示す。図中の実線は式(1)をもとに式(2)から算出した規格化ノイズ放射電力 N/N_0 である。

$$N/N_0 = Rr/(Rr + R) \quad (2)$$

この結果から R が増加すると共にケーブルから放射されるノイズ放射電力は減少する事, また, 本研究で付加した抵抗の範囲($11.3\Omega \sim 39.8\Omega$)では対数表示した N/N_0 は R にほぼ比例して減少することが明らかとなった。これは Fig.4 のノイズ減衰量(対数, dB, 表示)が, 付加した抵抗に対しほぼ比例することと合致する。

Table 4 Relative permeability of each type of magnetic ribbon at 1 MHz and 120 MHz.

		Co	Fe-1	Fe-2
1 MHz	μ'_r	2347	240	2870
	μ''_r	2848	22	6702
120 MHz	μ'_r	19	22	12
	μ''_r	115	37	130

Fig. 4 Loaded resistance dependence of the noise attenuation at 120 MHz when the magnetic ribbon is wound around the input section of a cable (closed symbols) and wound around the whole cable (open symbols). Where open and closed circles are Fe-1, open and closed squares are Co, open and closed triangles are Fe-2.

Fig. 5 Relation between loaded resistance measured at 120 MHz and the theoretical normalized noise radiation.

Fig. 6 Relation between magnetic ribbon roll length, l , and theoretical normalized resistance, R_a/R_0 .

Table 4に1MHz, 120MHzにおける各磁性リボンの複素比透磁率を示す。リボンの複素比透磁率は測定インピーダンス($Z=R+jX$)から式(3)に基づき算出した¹⁾。

$$Z = R + jX = j \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot l \cdot \log\{(t+r)/r\} \quad (3)$$

ここで、 f は周波数、 μ_0 は真空の透磁率、 μ_r はリボンの複素比透磁率、 l は円筒の長さ、 t は磁性体の肉厚、 r は円筒の半径である。また、 $t=0.442 \times 10^{-4}\text{m}$ 、 $l=1.25 \times 10^{-2}\text{m}$ 、 $r=2.52 \times 10^{-3}\text{m}$ であり、リボンをインピーダンス測定用の円筒に成形した際の寸法である。この結果から、透磁率においても熱処理を施したFe系微結晶磁性リボンは1MHz、および120MHzにおいてCo系磁性リボンより優れている事がわかる。

これから、同体積のリボンを使用した場合、熱処理を施したFe系微結晶磁性リボンはCo系アモルファス磁性リボンより高性能なノイズフィルタ材料であることが明らかとなった。

次に、Fig.4においてリボンをケーブルの根元に被覆した場合とケーブルの全体に被覆した場合のノイズ減衰量について比較した。すべてのリボンをケーブルの全体に被覆した場合の方がケーブルの根元に被覆した場合よりノイズ減衰量は増加する事がわかる。磁性リボンをケーブル全体に被覆した場合、根元被覆した場合よりCoでは1.16倍、Fe-1では1.7倍、Fe-2では1.14倍増加した。すなわち、ノイズ減衰量の増加率の平均値はおおよそ1.33倍である。

Fig.6にリボンをケーブルの根元に被覆した場合の抵抗を R_0 とし、リボンの体積を一定とした状態でケーブルが磁性リボンに被覆される範囲(l)を変化させた場合の抵抗 R_a の変化率(R_a/R_0)を示す。ここで、 R_a は式(3)において体積を一定の条件下で l と t を変化させて算出した。この結果から、 l の増加と共に抵抗は増加し、本実験の全体被覆($l=50\text{cm}$)では、根元被覆($l=1.25\text{cm}$)に比べ R_a/R_0 は約1.34倍の値となった。これはFig.4に示したとおりノイズ減衰量の増加率の平均値(1.33倍)とほぼ同等の値である。この事から磁性リボンをケーブル全体に被覆することにより、根元に被覆した場合より R が増加したためFig.5に示したようにノイズ放射電力が減少したと考えられる。

以上の実験では、全ての方位のノイズ放射量を検討しているわけではない。また、120MHzという限られた周波数のみのノイズ減衰量を検討している。しかし、Fig.3から磁性体の抵抗は1MHzから1000MHzまで漸増傾向認められる。また、本研究において同様の傾向がCoやFe-1でも認められた。従って、120MHz以外の周波数でもFe-2は

CoやFe-1に比べ相対的に高いノイズ減衰量が期待できることは明らかである。

4. まとめ

Fe系磁性リボンに熱処理を施す事により R が増加することが確認できた。これは熱処理を施す事によりリボンの磁歪及び異方性が減少し透磁率が増加したためであると考えられる。また、磁性リボンをケーブルの根元に被覆した場合、全体に被覆した場合共にノイズ減衰量は R に比例する傾向が明らかとなった。

以上の結果から、同体積のリボンを使用した場合、熱処理を施したFe系微結晶磁性リボンの方がCo系アモルファス磁性リボンより優れたノイズフィルタ材料であることを明らかにした。

磁性リボンはケーブルの根元に被覆するよりケーブル全体に被覆した方がノイズ減衰量は増加することがわかった。これは、リボンをケーブル全体に被覆することによって R が増加し、ケーブルから放射されるノイズ電力が減少したためと考えられる。

以上の結果、熱処理を施したFe系微結晶磁性リボンをケーブル全体に被覆することにより、ノイズ放射量を大幅に低減可能なケーブルを実現可能な見通しを得た。

謝辞 磁性リボンを提供して頂いた日立金属株式会社様、ケーブルを提供して頂いた東日電線株式会社様に感謝致します。

References

- 1) M. Senda, O. Ishii, and T. Mori: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **18**, 511 (1994).
- 2) O. Ishii, M. Senda, K. Takei, Y. Koshimoto, and T. Mori: *J. Appl. Phys.*, **79**, 5483 (1996).
- 3) K. Takei, O. Ishii, Y. Koshimoto, and M. Senda: *Proc.1996 IEEE Int. Symp. EMC, Santa Clara, USA*, 508 (1996).
- 4) O. Ishii, S. Yoshida, Y. Miyaguchi, and S. Kambe: *T. IEE. Japan. Mag.*, **MAG-97-162**, 43 (1997).
- 5) O. Ishii, Y. Miyaguchi, and S. Kambe: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, 1377 (1999).
- 6) R. J. Dinger, and D. J. White: *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **38**, 1313 (1990).

2004年4月30日受理, 2004年7月20日採録