

## 負の透磁率材料を用いた高周波線路の表皮効果抑制メカニズムの考察

森山竜太、黒川勇太、中山英俊、清野雄貴、湯澤凌芽  
(長野高専)

Consideration of Skin Effect Suppression Mechanism in RF Transmission Line  
with Negative Permeability Material

R. Moriyama, Y. Kurokawa, H. Nakayama, Y. Kiyono, R. Yuzawa

(Nat. Ins. Tech. Nagano Coll.)

### はじめに

高周波線路では表皮効果により損失が増大するため、低損失化の大きな課題である。表皮効果を解決する革新的手法として、負の透磁率材料による表皮効果抑制に関する研究<sup>1),2)</sup>が進められ、山口らの先行研究により、その抑制効果が実証された<sup>1)</sup>。同研究では、薄膜積層構造による矩形断面線路の表皮効果抑制の設計指針を示したが、矩形線路は複雑な電磁界メカニズムで解析が難しいため、詳細な設計は有限要素法解析等に頼らざるを得ない。本研究では、負の透磁率材料の適用効果の原理的検証のため、円形断面線路を対象に理論検証を行い、そのメカニズムを理解することにより、設計における有効な指針を得ることを試みた。

### 負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路理論

本研究では原理検証のため、最も単純な円形断面構造の線路を対象に、Fig.1 に示す電磁界モデルで検討した。同心円状の多層線路の電流密度分布は、電磁界理論式の導出により式(1)で求められる<sup>3)</sup>。半径  $a$ [m] の第1層に正の透磁率材料(導電率 $\sigma_1$ 、透磁率 $\mu_1 > 0$ )を、半径  $b$ [m] の第2層に負の透磁率材料(導電率 $\sigma_2$ 、透磁率 $\mu_2 > 0$ )を想定した場合、それぞれの内部の電流密度  $i_{z1}(r)$  および  $i_{z2}(r)$  は式(1)により算出できる。

$$i_{z1}(r) = \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi a J_1(k_1 a)}, \quad i_{z2}(r) = \frac{\sigma_2 J_0(k_2 a) k_1 I_1 J_0(k_2 r)}{\sigma_1 J_0(k_2 a) 2\pi a J_1(k_1 a)} \quad \dots(1)$$

ここで、 $k_1$  および  $k_2$  は各材料特性に基づく係数であり、 $J_0$  および  $J_1$  は Bessel 関数を示す<sup>3)</sup>。

### 結果と考察

Fig.2 に2層構造の円形断面線路における電流密度分布の一例を示す。設定条件は、第2層の半径  $b = 7\mu\text{m}$ 、周波数  $f = 3\text{GHz}$  とし、2つの材料の導電率を Cu と同等( $\sigma_1 = \sigma_2 = 5.81 \times 10^7 \text{S/m}$ )とし、比透磁率の大きさが1である正/負の透磁率材料( $\mu_{r1} = +1$ ,  $\mu_{r2} = -1$ )を想定した。第1層の半径を  $a = 0 \sim 7\mu\text{m}$  に変化させた場合、Fig.2(b)のように電流密度の位相  $\angle i_z(r)$  が層の境界面で変曲する結果が得られた。以上より、単位電流を流す場合に、損失を小さくするには、特に位相に配慮して、電流密度の偏りが少なくなるように積層厚さを設計すれば良いことが分かった。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 26820135 および総務省 SCOPE 若手ワイヤレス研究者等育成型 165104001 の助成を受けており、ここに感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) Yamaguchi et al.: MWE 2008 Microwave Workshop Digest, 207-210 (2018).
- 2) Nakayama et al.: Digest of the 37th Annual Conf. Magn. Jpn., 37, 381 (2013).
- 3) Mizuno et al.: The Papers of Technical Meeting on Magn., IEE Jpn., MAG-06-82~87, 7-15 (2006).

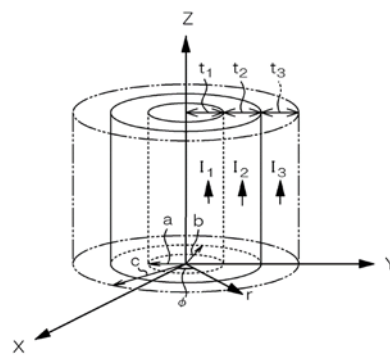
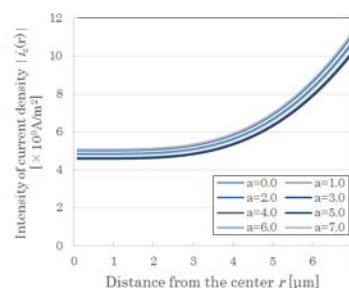
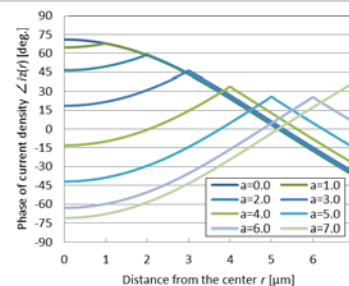


Fig. 1 Structure of cylinder transmission line.



(a) Intensity of current density



(b) Phase of current density

Fig. 2 Current density vs. distance from the center ( $f = 3\text{GHz}$ ,  $b = 7\mu\text{m}$ ).