

水を用いた周波数可変型電波吸収体の検討

村瀬正恭, 土屋明久 (電子技術部電磁環境グループ)

1. はじめに

Beyond 5G や 6G といった次世代通信規格では, 利用周波数のマルチバンド化が進み, 電磁環境はより複雑なものへと変化している. 電波干渉の抑制や通信品質の向上を実現するためには, 不要な電波を取り除く電波吸収体が不可欠であるが, 従来の電波吸収体は「固定型制御系」であり, 一度設置するとその特性を後から変更することが困難である. 近年, 電波の吸収と反射を電氣的に制御する動的制御系の開発も進められている[1], 微細な回路構造を必要とする点が実用上の課題となっている. そのため, 設置後においても特性を動的に制御できる新たな電磁環境制御手法の確立が求められている.

しかし, 一般的な電波吸収体材料は吸収特性を決める比誘電率や比透磁率を変化させられず, 従来の手法では厚さを変えることでしか吸収周波数を制御できないため, 動的な特性制御を実現することは困難である.

そこで本研究では, 比誘電率を動的に制御して吸収周波数を自在に変化させるための材料として「水」に着目した. 水は極性分子であり, 温度変化によって誘電特性を変化させることが知られている. このような水の温度による比誘電率の変化を活用し, 吸収周波数を可変とする電波吸収体の特性を数値計算により評価したので報告する.

2. 数値計算手法

はじめに, 一般的な電波吸収体として知られる「1層型電波吸収体」の設計手法について述べる. 1層型電波吸収体は図1に示すように吸収体層と金属面が一体となった構造を持ち, 簡易的な等価回路で表すことができる.

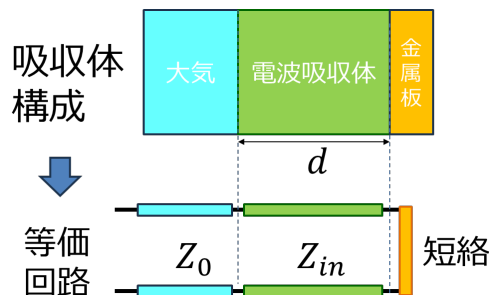


図1 1層型電波吸収体の構造と等価回路

自由空間 (大気) のインピーダンスを

$$Z_0 = 377 \Omega \quad (1)$$

電波吸収体の入力インピーダンスを

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon \mu}) \quad (2)$$

としたとき, $Z_0 = Z_{in}$ となる条件において電波吸収体は最大の吸収性能を示す. これを無反射条件[2]といい,

$$1 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon \mu}) \quad (3)$$

を満たすようになる (ϵ : 複素比誘電率, μ : 複素比透磁率, j : 虚数, d : 吸収体厚さ, λ : 波長). この式に吸収したい電磁波の波長を代入することで, 電波吸収体として機能させるために必要な比誘電率・比透磁率・厚さが定まる.

次に水の比誘電率について述べる. 水の比誘電率は温度に依存し, 低温域では分子の熱運動が小さいため, 外部電場に対して分子が整列しやすく, 比誘電率は大きくなる. 一方, 高温域では熱運動が激しくなるため整列が妨げられ, 比誘電率は小さくなる. 実際に, 水の比誘電率はデバイの式

$$\epsilon(\omega, T_{\text{water}}) = \epsilon_{\infty}(T_{\text{water}}) + \frac{\epsilon_0(T_{\text{water}}) - \epsilon_{\infty}(T_{\text{water}})}{1 - j\omega\tau(T_{\text{water}})} \quad (4)$$

で表され, 図2に示す通り温度の上昇に伴って比誘電率が低下していく特性を持つ.

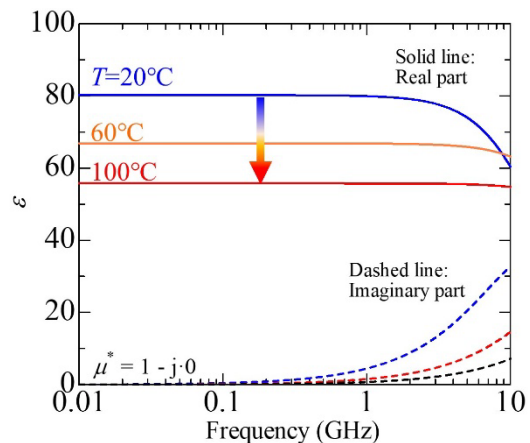


図2 温度変化に伴う水の比誘電率周波数依存性

この温度変化による水の比誘電率を制御し,

水を用いた1層型電波吸収体の吸収特性を計算する。電波吸収体の吸収特性 RL は次式で定義される。

$$RL = -20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (5)$$

これより、式(1), (2), (5)を用いて RL の数値計算を行った。

3. 数値計算結果

温度 $T = 18^\circ\text{C}$ における吸収体厚さ d ごとの周波数特性を算出した (図3)。

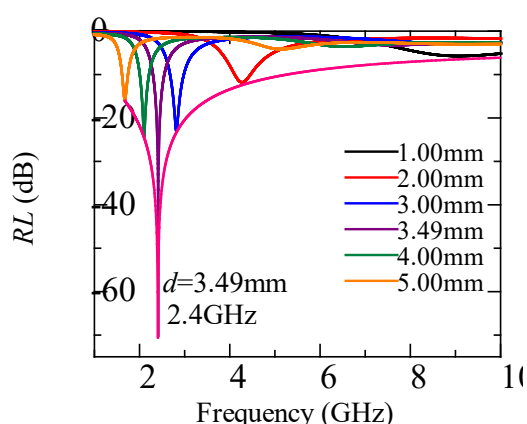


図3 $T = 18^\circ\text{C}$ における吸収特性周波数依存性

計算の結果、厚さを変化させることで RL は大きく変化し、特に $d = 3.49\text{ mm}$ において、通信周波数として広く用いられる $F = 2.4\text{ GHz}$ 付近で $RL = -70\text{ dB}$ を示すことが確認された。一般的に $RL = -30\text{ dB}$ 程度あれば電波吸収体として十分に機能するとされるため、水 ($T = 18^\circ\text{C}$, $d = 3.49\text{ mm}$) は極めて優れた吸収性能を持つと言える。

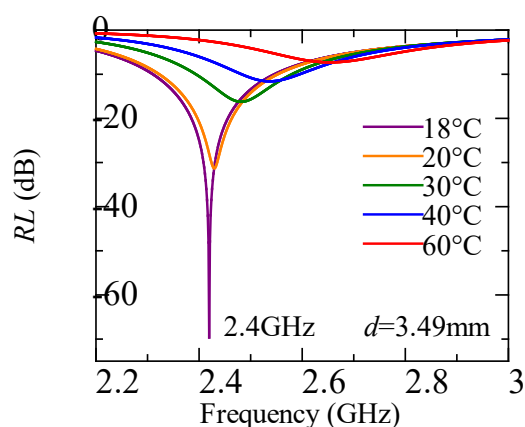


図4 $d = 3.49\text{ mm}$ における $F = 2.4\text{ GHz}$ 付近の温度変化に伴う吸収特性

さらに、 $d = 3.49\text{ mm}$ で温度変化させたときの吸収特性周波数依存性を算出した結果を図4に示す。温度上昇とともに RL のピーク値が低下し、 RL のピーク位置が高周波数側へ遷移していく様子が確認された。この結果から、温度制御によって電波吸収体としての機能を「ON/OFF」させたり、吸収する周波数帯をシフトさせたりできることが判明した。

4. まとめ

本研究では、Beyond 5G/6G 時代の複雑な電磁環境に適応可能な手法として、水を用いた周波数可変型電波吸収体の提案を行い、数値計算による特性評価を実施した。得られた主な成果は以下の通りである。

- ・水による動的制御の可能性: 水の比誘電率が持つ温度依存性を利用することで、微細な回路構造を付加することなく、温度制御という比較的簡便な手法で吸収特性を動的に変更できることを確認した。
- ・高い吸収性能の確認: 数値計算において、特定の厚さと温度条件 ($d = 3.49\text{ mm}$, $T = 18^\circ\text{C}$) において $RL = -70\text{ dB}$ という極めて高い吸収特性が得られ、水が電波吸収体として非常に有望であることを示した。
- ・温度による機能制御: 温度変化に伴い吸収周波数のピークが遷移することを確認した。これにより、外部環境や通信状況に合わせて、吸収する周波数を柔軟にチューニングできる可能性が示唆された。

今後は、実際に水を使った電波吸収体による検証実験を行い、数値計算結果との比較を行うとともに、より広帯域な周波数制御に向けた構造の最適化を検討してまいります。

【参考文献】

- [1]北川真也 他, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J97-C, 12, 542 (2014).
- [2]橋本 修, 電波吸収体入門, 森北出版, 第4章, 第2節, pp.29-31, Oct. 1997.
- [3]A. Andryieuski et al., *Scientific Reports.*, 5, 13535 (2015).

【外部発表】 口頭発表 1件