

技術資料



ループアンテナを用いた電磁波シールド効果測定法の構築

湯浅康佑^{*1}, 齋藤章彦^{*2}, 高林宏之^{*1}, 西方敦博^{*3}

Construction of an Electromagnetic Wave Shielding Effect Measurement Method Using a Loop Antenna

Kosuke YUASA, Akihiko SAITO, Hiroyuki TAKABAYASHI
and Atsuhiko NISHIKATA

Synopsis

In this study, we constructed a shielding effectiveness measuring system for metal plate in the wide frequency band. When designing the equipment, we analyzed wraparound magnetic field from the edge of material, and determined antenna placement and shield dimension based on this analysis. The experimental values and the theoretically calculated values agree, confirming the validity of the measurement method.

1. 緒言

平板試料の電磁波遮蔽特性を測定する方法はこれまでにいくつか提案されている^{1), 2)}が、本質的には MIL-STD285 で規定されている電波暗室を用いたシールド効果測定法と同じ方法である。Fig. 1 にシールド効果測定法の模式図を示す。平板遮蔽材を 2 つの円形ループアンテナの間に配置し、遮蔽材設置前後のアンテナ間の結合度を比較することで、シールド効果を求めることができる。

しかし、有限の大きさを持つ平板遮蔽材を試料とする際には密閉状態の電波暗室と異なり、試料端から回り込む磁場を考慮する必要がある。特に高周波域でシールド

効果が高い金属試料を測定する際には、透過波が回り込み磁場に比べ小さな値となり、正しい値を出力することができない。

そこで、本研究では測定装置設計にあたり、事前検討として有限要素法 (FEM 法) を用いた電磁界解析を実施し、回り込み磁場とアンテナ配置および材料形状との関係を求めた。また、解析結果を基に測定装置を作製し、Cu 箔のシールド効果測定値と平板遮蔽材の理論計算結果を比較することで、測定値の妥当性を確認した。構築した測定方法を用いて大同特殊鋼(株) (以下、当社という) 軟磁性金属箔材料 STARPAS[®]-30PC2S のシールド効果について評価したので、その結果も併せて報告する。

2024年4月24日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 東京工業大学 工学院, 工博 (Dr. Eng., School of Engineering, Tokyo Institute of Technology)

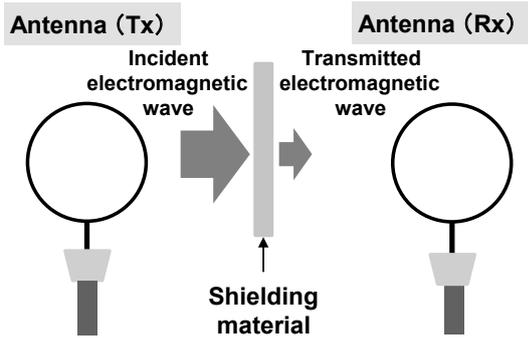


Fig. 1. Schematic diagram of shield measurement method.

2. シールド効果測定装置設計

本研究では、市販の電磁界解析ソフト CST Studio Suite[®]の FEM ソルバーを用いてシールドドッドループアンテナ (Shielded Loop Coil, 以下, SDL という) の解析モデルを作成し、各周波数域での放射磁場およびアンテナ対の結合度を求めた。また、ループアンテナ間に完全導体 (以下, PEC という) の平板遮蔽材を設置し、端部から回り込む磁場を評価した。アンテナ結合度と回り込み磁場の値から、シールド効果測定装置として最適なアンテナ形状およびその配置を決定する。

2. 1 ループアンテナモデル

本研究では、アンテナ径による電磁波結合度および回り込み磁場の変化を調査するため、Table 1 に示す3つの形状のループアンテナについて、電磁界解析用のアンテナモデルを作成した。

Table 1. Loop antenna shape.

| No. | Antenna diameter (mm) |
|-----|-----------------------|
| 1 | 22 |
| 2 | 100 |
| 3 | 250 |

また解析モデルの妥当性を検証するため、以下に示す。ループアンテナの放射磁場に関する理論式を用いた。印加電流 I_0 の角周波数は ω 、波数 $k = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ とする。 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m, $\mu_0 = 1.256 \times 10^{-6}$ H/m である。解析モデルの模式図を Fig. 2 に示す。

$$H_x = -\frac{za}{4r^3} I_0 \frac{1}{\cos(ka\pi)} \left[\frac{\sin(ka+1)\pi}{(ka+1)\pi} + \frac{\sin(ka-1)\pi}{(ka-1)\pi} \right] (1 + jkr) e^{-jkr}$$

$$H_y = 0$$

$$H_z = \frac{a^2}{2r^3} I_0 \left[\frac{\tan(ka\pi)}{ka\pi} \right] (1 + jkr) e^{-jkr}$$

ここで、 a は Table 1 のアンテナ径、 r は測定点とループアンテナの距離を示す。この理論式では、電流分布を線状アンテナの解析でよく使用される正弦関数と仮定している (式(1))。

$$I(\varphi) = I_0 \frac{\cos(ka(\varphi-\pi))}{\cos ka\pi} \quad (1)$$

ループ中心から測定点までの z 軸方向の距離 d に対する、放射磁場の電磁界解析値と理論式 (式 (1)) の計算値を比較すると両者は一致しており、モデルの妥当性を検証できた (Fig. 3)。

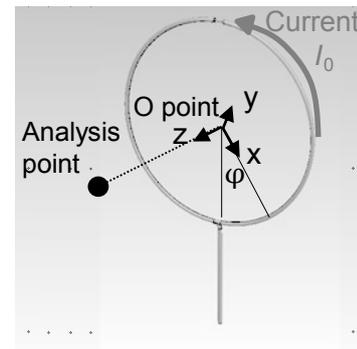


Fig. 2. Electromagnetic analysis model.

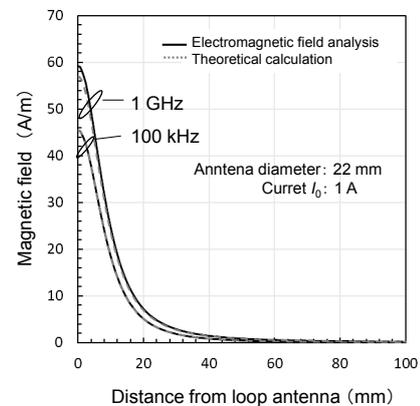


Fig. 3. Validation of analysis model.

2. 2 ループアンテナ対の結合度解析結果

ループアンテナ対の配置方法として、ループ面を同軸配列した場合と共平面配置した場合の、2パターンでの電磁界解析を行った (Fig. 4)。

アンテナ間の結合度は S パラメータを用いて評価し、入力、出力ポートは特性インピーダンス 50Ω でそれぞれのアンテナに接続している。アンテナ径を $\phi 22$ mm, 100 mm, 250 mm と変化させた時の結合度解析結果を Fig. 5 に示す。すべての水準において低周波域 (10 Hz

～1 MHz) で、入力ポートから出力ポートへの透過係数 S_{21} が、周波数の対数に対して線形に増加する傾向となる。周波数が 1 MHz 以上となり、各アンテナの共鳴周波数 (f_c) を境に、 S_{21} は単調増加的な挙動から外れ減少に転じている。大きなループ径のアンテナを使用する場合、アンテナ面を鎖交する磁束が多くなるため結合度は増加する一方で、共鳴周波数が低くなるため高周波域での使用が困難であることが分かった。

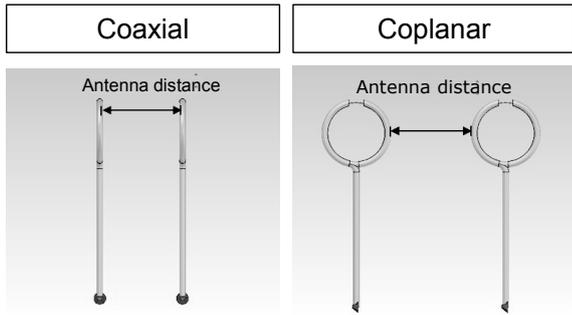


Fig. 4. Loop antenna pair arrangement.

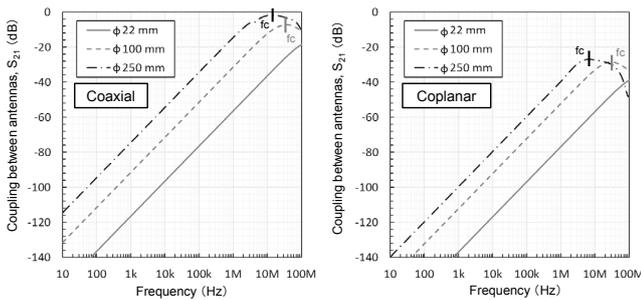


Fig. 5. Coupling between antennas in coaxial and coplanar arrangement.

また、アンテナ間距離を 3 mm, 10 mm, 30 mm, 100 mm と変化させた際の結合度についても併せて解析を行った。Fig. 6 に代表例として $\phi 22$ mm の解析結果を示す。アンテナ間距離が小さくなるほど結合度が増加していることが確認された。本研究では測定装置作製時のクリアランスを確保するため、以後の解析および測定ではアンテナ間隔を 10 mm に固定した。

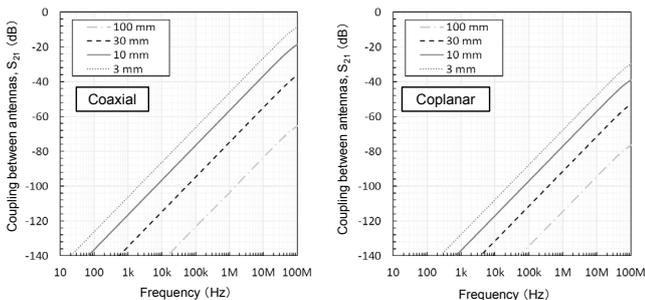


Fig. 6. Coupling when changing the distance between antennas.

2. 3 回り込み磁場解析

ループアンテナ対の間に電磁波遮蔽材（以下、シールドという）を設置し、結合度解析を実施した。シールドとして PEC を用いると、理想的には電磁波は透過することなく受信 SDL に届くことはないが、試料の大きさが有限であるため試料端から回り込む。電磁界解析時に得られる S_{21} は回り込み磁場の大きさを示す。Fig. 7 に、シールド形状を $\square 100$ mm, $\square 300$ mm, $\square 1000$ mm と変更した際の S_{21} を示す。ここでは代表例として、アンテナ径 $=\phi 22$ mm, 周波数 10 Hz-100 MHz の結果を示している。

シールド形状が大きくなるほど結合度は低減し、また、シールドのない場合では、共平面配置に比べ同軸配列は回り込み磁場が小さくなっている。

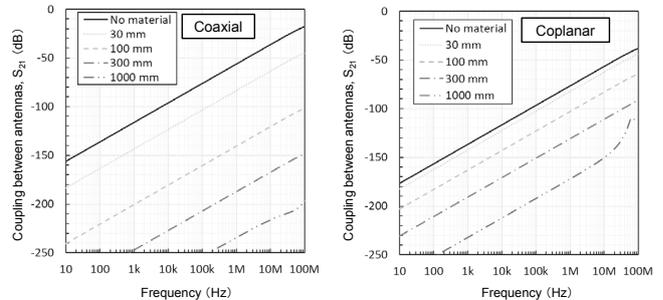


Fig. 7. S_{21} change when installing PEC shielding material.

2. 4 アンテナ形状の決定

各配置に対して、PEC シールド形状とアンテナ径を変化させた際の解析結果（シールド有の時の S_{21} とシールド効果）を Table 2 に示す。PEC シールド有の時の S_{21} は回り込み磁場の大きさ、PEC のシールド効果は測定ダイナミックレンジを示している。

Table 2. Shield and loop antenna shape selection.

| Antenna diameter (mm) | Arrangement | Shield side length (mm) | | | | |
|-----------------------|---|-------------------------|--------|---------|---------|---------|
| | | 30 | 100 | 300 | 1000 | |
| 22 mm |  | Without Shield | -38 dB | | | |
| | | With Shield | -44 dB | -65 dB | -91 dB | -112 dB |
| | | Shield effect | 6 dB | 27 dB | 53 dB | 74 dB |
| |  | Without Shield | -17 dB | | | |
| | | With Shield | -44 dB | -101 dB | -148 dB | -184 dB |
| | | Shield effect | 27 dB | 84 dB | 131 dB | 167 dB |
| 100 mm |  | Without Shield | -33 dB | | | |
| | | With Shield | -42 dB | -59 dB | -77 dB | |
| | | Shield effect | 9 dB | 26 dB | 44 dB | |
| |  | Without Shield | -10 dB | | | |
| | | With Shield | -27 dB | -105 dB | -156 dB | |
| | | Shield effect | 17 dB | 95 dB | 146 dB | |
| 250 mm |  | Without Shield | -47 dB | | | |
| | | With Shield | -61 dB | -69 dB | | |
| | | Shield effect | 14 dB | 22 dB | | |
| |  | Without Shield | -22 dB | | | |
| | | With Shield | -71 dB | -139 dB | | |
| | | Shield effect | 49 dB | 117 dB | | |

Table 2で解析をしたシールド形状とアンテナの組合せから、以下の条件を満たす水準をハッチングした。

1. PECのシールド効果^{*1} > 60 dB
2. シールド有の時の $S_{21} < -110$ dB^{*2}

※ 1 シールド効果 = S_{21} (シールド無) - S_{21} (シールド有) (Table 2下段に記載)

※ 2 シールド有の時の S_{21} はノイズフロア(-80 dB)以下の値とするために設定 (Table 2中段に記載)

Table 2の結果の中でも同軸配置、共平面配置ともに上記

の条件を満たす装置構成は以下のとおりである。

- ・アンテナ径：φ22 mm
- ・アンテナ間距離：10 mm
- ・シールド形状：□ 1000 mm

本節で決定した内容を基にシールド効果装置を作製し、シールド効果測定に用いた。

3. 測定装置構成および測定条件

3. 1 測定装置構成

2章の検討内容を基に作製した測定装置の外観写真および装置構成模式図をそれぞれ Fig. 8, 9 に示す。

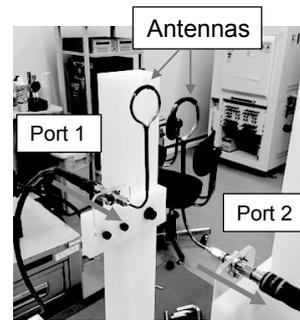


Fig. 8. Measuring device external view.

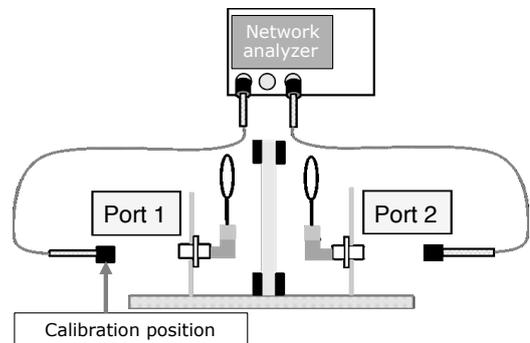


Fig. 9. Measuring device schematic diagram.

ネットワークアナライザとしてE5061B (Keysight製)を使用し、Fig. 9の矢印で示している位置でSOLT (Short-Open-Load-Through) 校正を実施している。

3. 2 Baffle板について

回り込み磁場を低減させるためにCu箔の外側にアルミ板 (以下、Baffle板という)を設置する。Baffle板の外観写真をFig. 10に示す。Baffle板とCu箔は電氣的に接続されており、Baffle板の外形は2. 4節で決定した□ 1000 mmとした。

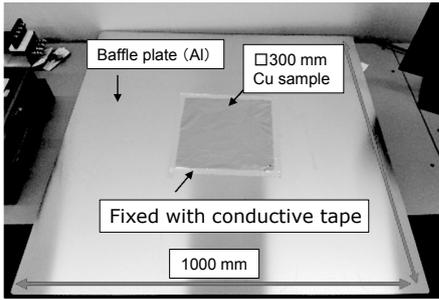


Fig. 10. External view of baffie plate.

3. 3 測定条件

測定条件は以下のとおりとした。

- ・ 測定周波数範囲：10 Hz-100 MHz
- ・ アンテナ：φ22 mmSDL
- ・ アンテナ配置：同軸配列，共平面配列
- ・ 印加電力：10 dBm

3. 4 ノイズフロアの確認

ノイズフロアは Fig. 11 に示すように、アンテナを接続していない状態での S_{21} 測定結果から評価する。



Fig. 11. Exterior photo during noise floor measurement.

ノイズフロアは -120 dB ~ -140 dB 程度で、周波数が低い程ノイズフロアの値が大きくなっている (Fig. 12)。10 Hz は、本試験に使用したネットワークアナライザの測定下限周波数であり、その付近ではノイズフロアが大きくなっている。

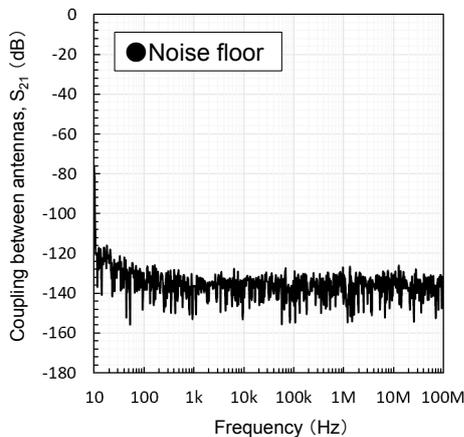


Fig. 12. Noise floor.

4. 測定結果

4. 1 アンテナの結合度測定

アンテナ間の結合度を測定し、2. 2 節で実施した電磁界解析結果と比較し、測定結果の妥当性を確認した。比較結果を Fig. 13 に示す。

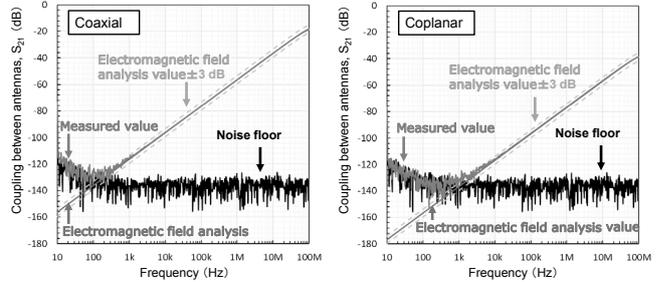


Fig. 13. Comparison of measured and analytical values of coupling between antennas.

測定値と解析値は ± 3 dB の範囲で一致していることから、電磁界解析モデルと同等の測定装置を作製できていると判断する。低周波域 (1 kHz 以下) での解析値と測定値の差は、φ22 mmSDL アンテナの結合度が低く、 S_{21} パラメータがノイズフロア以下となったためであると考えられる。このことから低周波域での φ22 mmSDL アンテナの使用は困難である。

4. 2 シールド効果測定時のデータ処理

平板遮蔽材のシールド効果は Fig. 14 のとおり、各アンテナ配置時の 4. 1 節での測定結果とシールドを測定した際の S_{21} の差分で定義する。また、3. 4 節のフロアノイズの測定結果を用い、本研究で構築した装置の測定限界レベルを定義する (Fig. 15)。

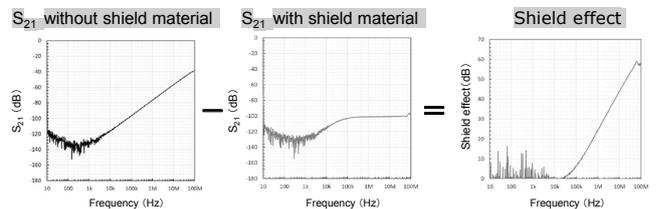


Fig. 14. Data processing method when measuring shielding effect.

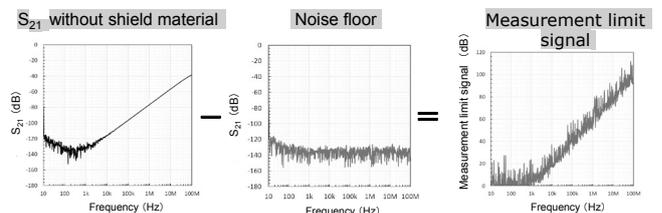


Fig. 15. Definition of measurement limit line.

4. 3 平板遮蔽材のシールド効果測定結果

平板遮蔽材 Cu 箔 (W100 × L300 × t0.01 ~ 0.10 mm) を重ね合わせて□300 mm の試料を作製し、シールド効果測定を行った (Fig. 16). 両配置ともに 1 kHz 以下の範囲でシールド設置時の信号がフロアノイズ程度しかないので、Cu 箔のシールド効果の評価は困難である。1 kHz 以上の範囲においては、同軸配置に比べダイナミックレンジの狭い共平面配置では、シールド設置後の測定結果にノイズが含まれている。また、共平面配置の数 MHz において、-120 ~ -100 dB 程度で右肩上がりの傾向が確認される。これは 2. 4 節で電磁解析によって求めた平板試料□1000 mm 時の S_{21} の値、-112 dB と同程度であることから、試料形状由来の回り込み磁場であると考えられる。

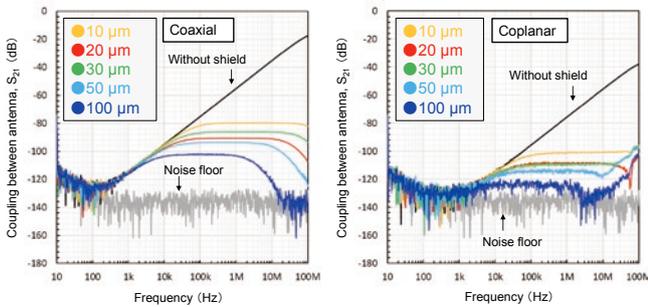


Fig. 16. Shielding effect measurement results of flat shielding material.

4. 4 理論計算値との比較

4. 3 節で測定した Cu 箔のシールド効果の妥当性を確認するため、理論計算式^{3), 4)}による解析を行った。理論計算ではループアンテナの円周上で均一な磁界を発生しており、シールドは無限平板を仮定している。理論計算は Fig. 17 に示すようなフローで進めており、シールドの入力物性値に関し、電気伝導率は 4 端子法で測定し、比透磁率はシールドが非磁性体であるため 1 としている (Table 3)。理論計算値と測定値の比較結果を Fig. 18 に示す。

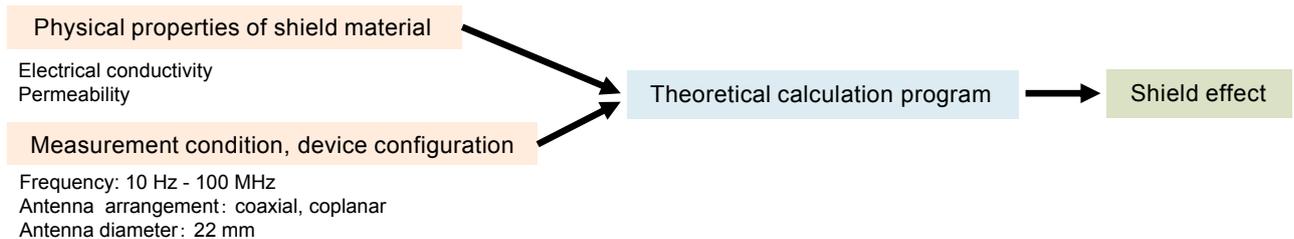


Fig. 17. Theoretical calculation flow.

Table 3. Input physical property values of flat shielding material.

| Material | Thickness (mm) | Conductivity (S/m) | Relative permeability |
|----------|----------------|--------------------|-----------------------|
| Cu | 0.01-0.1 | 4.30×10^7 | 1 |

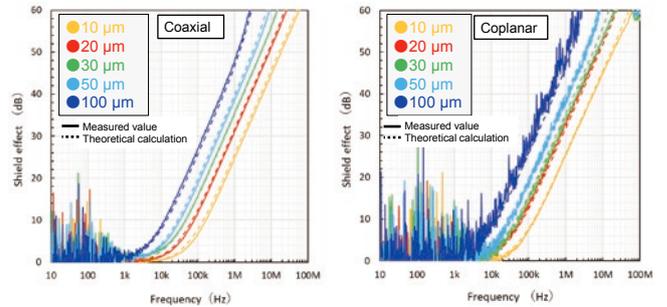


Fig. 18. Comparison of measured values and theoretical calculation values.

1 kHz 以上の範囲では同軸配列、共平面配列ともに、± 3 dB の範囲で測定値と理論計算値が一致していることが確認された。低周波域 (1 kHz 以下) では φ22 mm アンテナの結合度が低く、ノイズを多く含む測定結果となっており、アンテナ種類の変更、または高増幅率アンプの使用により改善が見込まれる。

十分にアンテナ結合度が大きな周波数範囲において、板厚を変更した Cu 箔の測定値と理論計算値が一致していることから、本研究で構築した測定手法の妥当性が確認された。

4. 5 軟磁性箔のシールド効果測定

今回開発した平板試料のシールド効果測定装置を用い、当社の軟磁性箔製品 STARPAS[®]-30PC2S⁵⁾ のシールド効果を測定した。試料の詳細は Table 4 のとおりである。

Table 4. Physical properties of soft magnetic foil product STARPAS[®]-30PC2S.

| Material | Thickness (mm) | Conductivity (S/m) | Relative permeability |
|------------------------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| STARPAS [®] -30PC2S | 0.03 | 1.82×10^6 | 10300 |

本研究で用いたアンテナでは低周波域で結合度が小さくなり、測定ダイナミックレンジが狭いものの、Cu箔が10 kHz以下でシールド効果がほとんど0 dBに近づくのに対し、STARPAS[®]-30PC2Sは透磁率を持っているため、磁気シールドとして機能し、20 dB以上の高いシールド効果を有していることが分かる (Fig. 19)。

また、軟磁性金属シールドは10 kHz以上の高周波域においても、電磁波シールドとして同じ厚みのCu箔に比べ、高いシールド効果を示している。

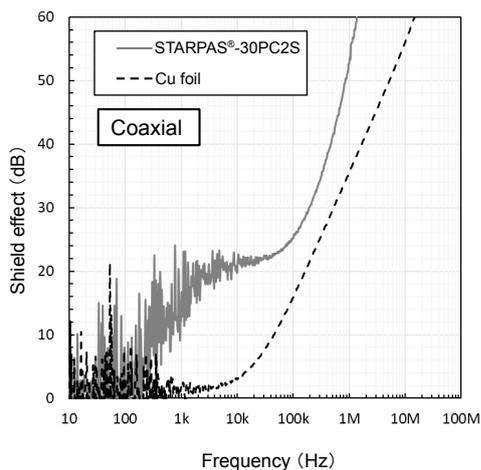


Fig. 19. Comparison of shielding effects between soft magnetic metal and Cu foil.

5. 結 言

本研究では、ループアンテナを用いた単板試料のシールド効果測定手法を開発した。装置作製の事前検討として、有限要素法 (FEM 法) を用いた電磁界解析を実施し、アンテナ配置および材料形状を決定した。Cu箔のシールド効果測定結果と理論式から得られる解析結果を比較したところ、 ± 3 dB 以内で両者は一致しており、構築した測定手法の妥当性が確認された。また、当社の軟磁性金属箔材料 STARPAS[®]-30PC2S を評価したところ、同じ厚みのCu箔に比べ優位な特性が確認された。

本手法により、単板試料のシールド効果を定量的に測定することができ、この技術を利用することで、低減すべき電磁ノイズの周波数に応じた、適切なシールド材料の選定が可能となる。

※ STARPASは大同特殊銅(株)の登録商標です。

(文 献)

- 1) 清水康敬編：電磁波の吸収と遮蔽，日経技術図書，1989，454.
- 2) J. R. Moser: IEEE Trans. EMC, 9(1967), 6.
- 3) A. Nishikata and A. Sugiura: IEEE Trans. EMC, 34 (1992), 284.
- 4) 西方敦博: 信学技報, (2022), EMCJ2022-44.
- 5) 大同特殊銅(株)ホームページ: <https://www.daido.co.jp/products/permalloy/index.html>



湯浅康佑



齋藤章彦



高林宏之



西方敦博