

超低損失多層同軸ケーブル開発に向けた透磁率測定装置用の外部磁場印加システムの開発

代表研究者 中山 英俊 長野工業高等専門学校 工学科機械ロボティクス系 教授

1 はじめに

本研究は、負の透磁率材料による表皮効果抑制技術を適用した「超低損失多層同軸ケーブル」の実現のため、同軸状磁性薄膜の高周波透磁率測定装置の開発を目的とし、重要な構成要素となる外部磁場印加システム部分の開発を研究調査目標とした。

正／負の透磁率材料を用いた多層伝送線路は、表皮効果損失を抑制可能であるため、高周波伝送線路の大幅な損失低減が期待されているが、同軸形状による多層伝送線路の試作実績はまだ無い。超低損失多層同軸ケーブルの最適膜厚設計には、磁性薄膜の形状による磁気異方性の影響を考慮した同軸状磁性薄膜の高周波透磁率測定が不可欠であるが確立されていないため、新たにその開発に着手している。

上述した同軸状磁性薄膜の高周波透磁率測定装置を新たに開発するには、測定時にケーブルの長手方向に均一な外部磁場を印可する電磁石システムが必要であるため、本研究調査により1年間で、その設計・試作・測定評価を実施した。

以上を通じて、負の透磁率材料を用いた超低損失多層同軸ケーブルの実現を目指し、情報通信技術によるカーボンニュートラル実現に向けて、産業界の喫緊の課題解決を図るものである。

2 研究調査内容

本研究調査では、下記の研究調査項目に基づき、以下に詳述する各項目を実施した。図1に、本研究調査で開発する外部磁場印加用電磁石を使用した多層同軸ケーブルの伝送特性評価装置(兼・透磁率測定装置)の全体イメージ図を示す。

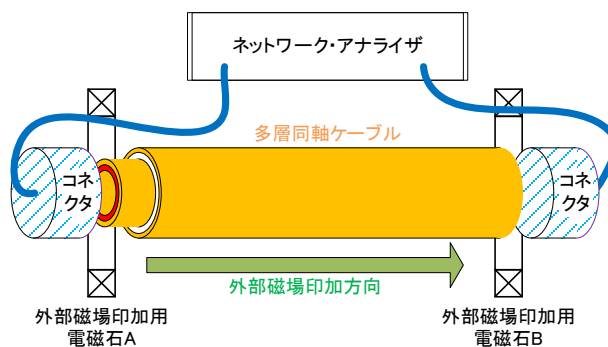


図1 外部磁場印加用電磁石を使用した多層同軸ケーブルの伝送特性評価装置の全体像

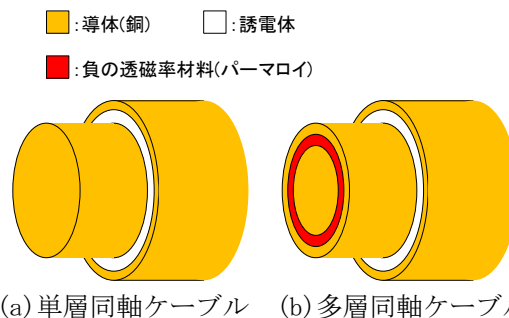


図2 従来の単層同軸ケーブル構造に対して負の透磁率材料を適用した多層同軸ケーブルの構造例(同軸状磁性薄膜の高周波透磁率を評価する必要がある)

図2に、本研究調査を通じて実用化を目指している「超低損失多層同軸ケーブル」の構造例を示す。同多層同軸ケーブルは、正／負の透磁率材料を交互に積層した心線導体を有する多層伝送線路であり、表皮効果損失を抑制可能であるため、高周波伝送線路の大幅な損失低減が期待されている。

2-1 電磁石用コイルの設計

上述した装置に必要な電磁石性能の仕様(コイル中心軸上で 12.5mT の均一磁場)を定め、満たすコイルを設計する。巻き数・巻き方などを検討した。

ソレノイドコイル形状を基本として、巻き数・巻き方の検討により、コイル中心軸上に外部磁場 12.5 mT をできるだけ均一に印加できるように、設計・シミュレーションを行った。

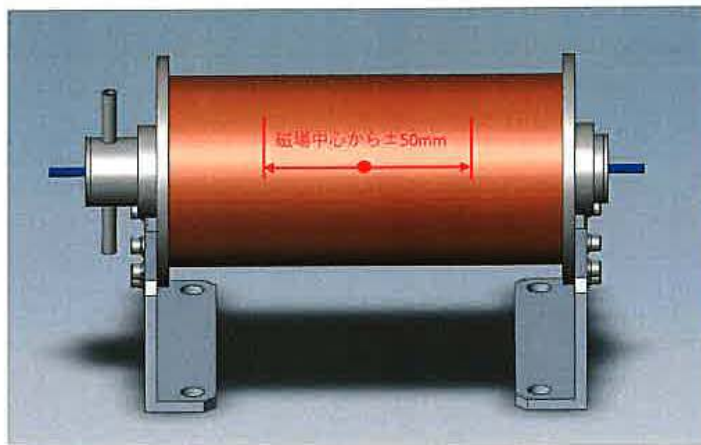
研究計画当初は、磁場強度を 12.5 mT と想定していたが、高周波磁性薄膜の最新の研究動向調査により、異方性磁界が 40 mT (400 Oe) 程度の材料も開発されていることから、磁場強度を 50 mT (500 Oe) に増強させることを検討した。

結果として、空冷・連続使用の条件での使用は難しいが、水冷または断続使用の条件であれば、設計可能であることが分かり、水冷機構を有し、磁場強度 50 mT のコイルの設計を行った。

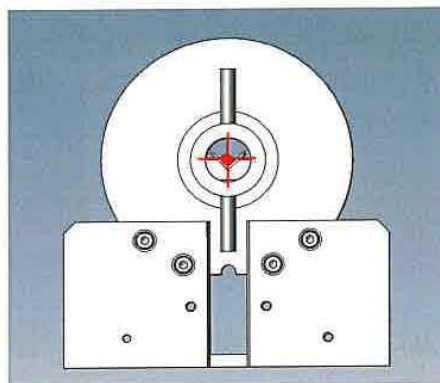
基本仕様は、磁場強度を 50 mT (※印可時間：約 1 分)、磁場均一性を長さ $L = 100$ [mm] で磁場変化 $\Delta H = \pm 10\%$ 、設計電流を 8 A、設計電圧を 7 V、コイル冷却機能として、通常時は空冷であるが、状況に応じて水冷ができる機構付きとした。

図3に、設計したソレノイドコイルの外観図を示す。

なお、同コイルの設計に関しては、高周波透磁率測定装置に関するコイルの製作実績を有する株式会社東栄科学産業の協力を得て、設計を行った。



(a) 正面図



(b) 側面図

図3 製作したソレノイドコイルの外観図

2-2 電磁石用コイルの試作

上記の設計に基づき、固定用治具に導線を巻き付け、電磁石用コイルを試作した。

上記の設計・シミュレーションにより決定した電磁石用コイルを試作し、その中心軸上に高周波同軸ケーブルを実装するための治具を製作した。

2-3 試作した電磁石用コイルによる磁場分布測定

試作した電磁石用コイルに電源を接続して、所望の外部磁場がどれだけ均一に印加されているか、磁場分布を実測して確認した。磁力計を用いて磁場分布を計測し、磁場性能を確認した。磁力計は、LakeShore 製のガウスメータ (455 Gauss meter) を使用し、電磁石電源には、TAKASAGO 製の直流電源 (KX-S-100-L) を使用した。

表 1 に、製作したソレノイドコイルの印可電流に対する中心磁場の測定結果を示す。図 4 に印可電流と中心磁場の関係を示す。同図より、印可電流と中心磁場の関係は線形性が得られていることが確認でき、印可電流 8.0 A の場合に、中心磁場 526 Oe (52.6 mT) が得られていることが確認することができた。

表 2 に、印可電流 8 A の条件における製作したソレノイドコイル内部の磁界分布の測定結果、図 5 に同磁界分布を示す。同図より、設計通り、コイル中心位置の距離 $X = \pm 50$ [mm] の範囲 (長さ $L = 100$ [mm]) において、中心位置の磁場との差が 10 % 以内に収められており、目標性能を満たしていることが確認できた。

表 1 製作したソレノイドコイルの印可電流と中心磁場の測定結果

電流 (A)	磁場※1 (Oe)	磁場※2 (Oe)	電源電圧 (V)	
0.00	-1.80	0	0.00	
0.50	31.2	33.0		
1.00	64.1	65.9		
1.50	97.1	98.9		
2.00	130	132		
2.50	162	164		
3.00	196	198		
3.50	228	230		
4.00	262	264		
4.50	293	295		
5.00	326	328		
5.50	359	361		
6.00	392	394		
6.50	425	427		
7.00	458	460		
7.50	491	493		
8.00	524	526		7.63

※1 環境磁場を含みます

※2 環境磁場差し引いた値

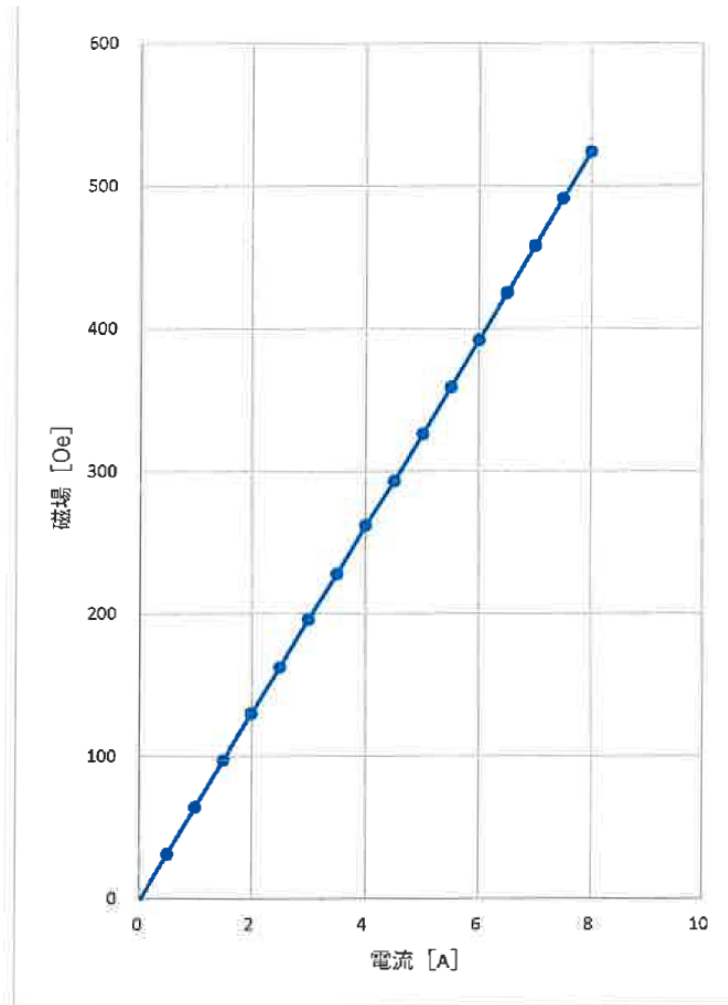


図4 製作したソレノイドコイルの印可電流と中心磁場の関係

表2 製作したソレノイドコイル内部の磁界分布の測定結果(電流：8 A の場合)

X(mm)	H (Oe)	中心磁場との差
-50	475	90.6%
-40	492	93.9%
-30	505	96.4%
-20	514	98.1%
-10	520	99.2%
0	524	100.0%
10	524	100.0%
20	521	99.4%
30	514	98.1%
40	501	95.6%
50	475	90.6%

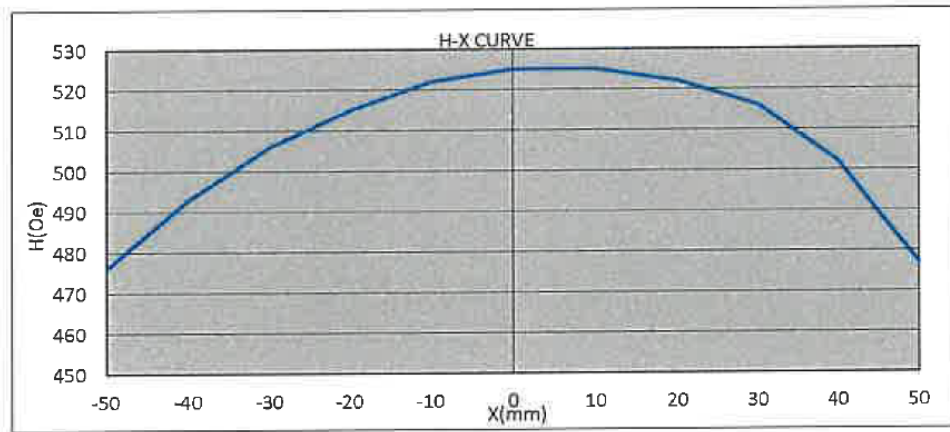


図5 製作したソレノイドコイル内部の磁界分布(電流：8 A の場合)

2-4 多層同軸ケーブル(磁性材料を使用した同軸ケーブル)の伝送特性の測定

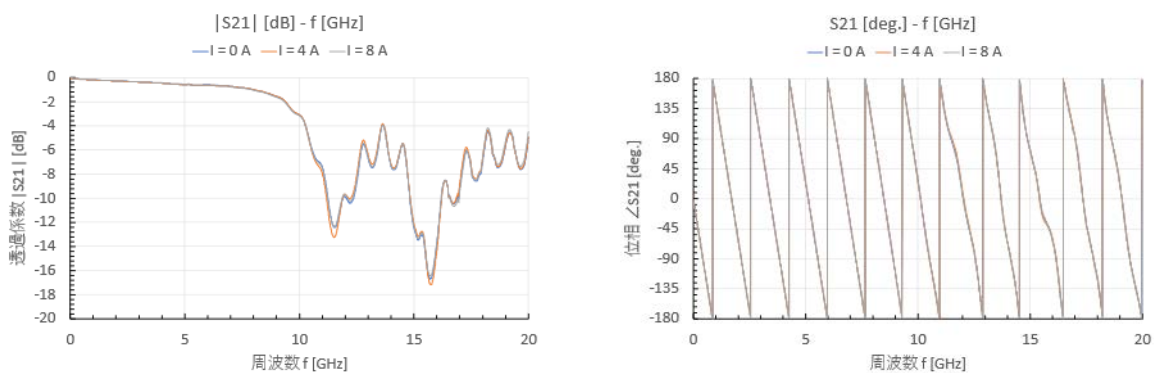
別途開発を試みた多層同軸ケーブル(磁性材料を使用した同軸ケーブル)が試作できたため、上記で製作したソレノイドコイルを用いて、長野高専所有のネットワーク・アナライザ(N5222A)により伝送特性を測定して、外部磁場印可に対する伝送特性の変化の検証を行った。

磁性薄膜を使用した多層同軸ケーブルは、長さ 100 mm 程度であり、導体/磁性体の 2 層構造の心線構造を有するものである。導体には Cu を、磁性体には NiFe を用いた。

多層同軸ケーブルに外部磁場を印可した場合の伝送特性をネットワーク・アナライザにより実測・評価を行った。

図 6 に多層同軸ケーブルの伝送特性の測定結果を示す。測定周波数は、0.1 GHz から 20 GHz までとし、印可電流を、0 A、4 A および 8 A に変化させた場合の結果を示した。今回の測定では、印可電流による大きな違いは得られていないが、測定値を拡大して検証すると、印可電流(印可磁場)による伝送特性の差が見られた。

従って、同システムにより多層同軸ケーブルの伝送特性の評価を行えば、測定時にケーブルの長手方向に均一な外部磁場を印可することができるため、今後、完成した外部磁場印可システムを組み入れた高周波透磁率測定装置を開発して、超低損失多層同軸ケーブルの実現を目指す予定である。



(a) 透過係数の大きさ $|S_{21}|$

(b) 透過係数の位相 $\angle S_{21}$

図6 多層同軸ケーブルの伝送特性の測定結果例

3 負の透磁率材料を用いた表皮効果抑制法に関する国内外の動向

負の透磁率材料を用いた表皮効果抑制法に関する研究は、2004年にデルフト工科大の Rejaei らが理論的に発案し (B. Rejaei and M. Vroubel, J. Appl. Phys. 96, 6863, 2004)、同グループと東北大の山口らが共同で、スパッタ法による NiFe 磁性体と Cu 導体との多層積層導体でコプレーナ伝送線路を微細加工し、原理検証実験に成功した。これを通して基本原理が世界的に認知された (N. Sato, Y. Endo, and M. Yamaguchi, J. Appl. Phys., Vol. 111, No. 7, 07A501-07A501-3, 2012)。

その後、研究調査代表者らが電磁界分布や磁性損失まで考慮して従来よりも低損失な伝送線路構造を提唱して発展させてきた。これまでに、矩形断面構造の多層薄膜伝送線路の試作と伝送特性評価は実績があるが、円形断面構造の多層同軸ケーブルは、電磁界解析理論を用いたシミュレーション評価のみで、試作実績は未だ無い。同軸状の試作技術の課題もあるが、設計段階に必要な同軸状磁性薄膜の透磁率評価技術が確立していない点が最大の課題である。

4 高周波透磁率測定装置に関する国内外の動向

高周波透磁率測定装置に関する研究は、特に GHz 帯を超える高周波透磁率測定装置において、東北大の山口らが凌和電子(株)と共同開発した9GHzまで測定可能な超高周波透磁率測定装置(PMM-9G1)が2002年に世界初となり、日本が世界を牽引している。その後、東北大の藪上らが(株)東栄科学産業との共同開発により、ウェハ上の磁性薄膜を切り出さずに40GHzまで測定可能な高周波薄膜透磁率測定装置を提案した。

一方、本研究の対象とする多層同軸ケーブルの開発に必要な、同軸状の磁性薄膜をそのままの形状で測定する透磁率測定装置は未開発であるため、本研究調査において開発が期待される。

5 まとめ

以上より、本研究調査では、当初の目的に従い、目標としていた外部磁場印可システムの中のソレノイドコイルを完成させることができ、これらを用いて、試作した多層同軸ケーブルに対して、均一な外部磁場を印可しながら、高周波伝送特性を測定することができた。

今後は、同ソレノイドコイルおよびこれらを用いた高周波透磁率測定装置の開発を目指し、次なる研究課題に着手する予定である。

謝辞

本研究は、公益財団法人電気通信普及財団 2021 年度研究調査助成の助成を受けたものであり、ここに感謝申し上げます。

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
負の透磁率材料を用いた伝送線路の表皮効果損失抑制に対する異方性磁界の影響	JPCA Show 2022/2022 マイクロエレクトロニクスショー 2022 アカデミックプラザ講演論文集	2022年6月