

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：53601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04521

研究課題名(和文) 低損失高速伝送のための負透磁率材料を用いた伝送線路設計理論の確立

研究課題名(英文) Establishment of Transmission Line Design Theory using Negative Permeability Materials for Low-Loss and High-Speed Transmission

研究代表者

中山 英俊 (Nakayama, Hidetoshi)

長野工業高等専門学校・機械ロボティクス系・教授

研究者番号：10390452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、強磁性共鳴周波数を超えた超高周波領域の透磁率応用分野を新たに開拓する研究として、負透磁率特性を活用した表皮効果抑制線路を提案するものであり、高速伝送線路の低損失化・低遅延化を目的として実施した。表皮効果損失抑制の有効性を示すため、負透磁率材料を用いた円形および矩形の多層構造伝送線路の設計理論を確立できた。矩形多層構造では、プリント配線の銅箔表面粗化に対する有効性を検証できた。円形多層構造では、負透磁率材料の異方性磁界の変化に対して、同軸ケーブルの各種損失を加味して、Sパラメータの周波数特性の算出が可能となった。以上の成果により、今後の研究開発に必要な設計理論を確立できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、負透磁率材料を用いた表皮効果抑制線路の有効性を示すことができ、強磁性共鳴周波数を超えた超高周波領域の透磁率応用分野を新たに開拓する研究として、実用化に必要な設計方法を確立できた。矩形多層伝送線路では、Cu導体/NiFe磁性体の3層構造で、本電磁界理論の適用により従来理論の設計と比較して、表皮効果による損失を80%まで低減できる効果を示すことができた。円形多層伝送線路では、同軸ケーブルのSパラメータを評価できるようになった。本研究成果は、従来抑制困難であった表皮効果損失を低減する低損失伝送線路の研究開発に資するものであり、高周波回路の更なる低損失化が期待される。

研究成果の概要(英文)：This research is a new field of application of magnetic permeability in the ultra-high frequency region beyond the ferromagnetic resonance frequency. This project proposes a skin effect suppression line that utilizes negative magnetic permeability characteristics, and was implemented with the aim of reducing loss and delay in high-speed transmission lines. In order to demonstrate the effectiveness of skin effect loss suppression, we have established a design theory for circular and rectangular multilayer transmission lines using negative permeability materials. In the rectangular multilayer structure, we were able to verify the effectiveness of printed wiring against surface roughening. In the circular multilayer structure, it is now possible to calculate the frequency characteristics of S-parameters by taking into account various losses in the coaxial cable. As a result of the above results, we were able to establish a design theory necessary for future research and development.

研究分野：高周波磁気応用

キーワード：表皮効果 高周波伝送線路 低損失 負透磁率材料 Cu導体 NiFe磁性体 矩形多層伝送線路 円形多層伝送線路

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

様式 C-19、F-19-1 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

伝送線路では、周波数が高いほど表皮効果が発生し、線路表面にしか電流が流れないため、抵抗が高くなり、損失が大きくなる。例えば、銅線の表皮厚さは、1GHz で約  $2.1\mu\text{m}$  であり、これ以上の寸法で断面積を大きくしても、抵抗低減効果は少ない。低周波でも、線路の断面積が大きい場合は、同様であり、表皮効果による影響はあらゆる機器に関わる。表皮効果を抑制できれば、さらに断面積を大きくできるため低損失化が図れ、省エネ効果が得られる。

この表皮効果を抑制する技術として、負透磁率材料と導体との積層構造による表皮効果抑制線路が提案されており、表皮効果の根本的な原因である線路内部の磁束を相殺することができ、負透磁率材料も電流通路となるため、断面積として有効に機能し、大幅な低損失化が期待できる革新的な研究である。従来の導体のみの伝送線路と比較して大きな損失低減効果が得られることが確認されている。

上述した負透磁率特性を活用した表皮効果抑制線路は、強磁性共鳴周波数を超えた超高周波領域の透磁率応用分野を新たに開拓する研究として学術的に重要である。また、高速伝送線路の低損失化・低遅延化を図ることにより、人工知能や IoT 技術を活用した近未来の技術革新に資することが期待される。

## 2. 研究の目的

本研究は、強磁性共鳴周波数を超えた超高周波領域の透磁率応用分野を新たに開拓する研究として、負透磁率特性を活用した表皮効果抑制線路により、高速伝送線路の低損失化・低遅延化を図ることを目的とし、次の3つの観点により系統的研究を行うことで目的の達成を試みた。

①多層構造伝送線路の電磁界設計理論に基づき、負透磁率材料による低損失効果を明らかにし、設計面から材料開発に必要な特性を提示する。②10GHz 以上の周波数帯で負透磁率が得られる電気めっき製膜技術を開発し、磁性体/導体の多層構造の超低損失伝送線路を試作する。③高速伝送プリント配線における銅箔表面粗化に対する有効性を示すことにより、産業界が抱える表面粗化(密着性)と損失のトレードオフによるジレンマにブレークスルーを与える。

以上より、負透磁率材料特性と伝送線路の構造設計による損失抑制効果との関係を整理し、超高周波領域の磁気応用の学術的知見に資することを目指した。

## 3. 研究の方法

上述の研究目的達成のため、主に次の3項目について研究を実施した。

### (1) 多層構造伝送線路の電磁界設計理論の確立：

円形および矩形の多層構造伝送線路の電磁界設計理論に基づき、負透磁率材料による低損失効果を明らかにし、設計面から材料開発に必要な特性を提示できるようにする。

### (2) 負透磁率特性を有する磁性体を用いた多層構造伝送線路の試作：

10 数 GHz 帯で負透磁率が得られる電気めっき製膜技術(基板上またはケーブル上)を開発し、磁性体/導体の多層構造の超低損失伝送線路を試作する。

### (3) 銅箔表面粗化に対する本技術の有効性の検証：

産業界が抱える表面粗化の課題に対して、本研究の電磁界設計理論に基づき、表面粗化を模した伝送線路の損失改善に対する有効性を検証する。

各実験方法とその結果を次項に記載する。

## 4. 研究成果

### (1) 多層構造伝送線路の電磁界設計理論の確立

本項では、多層伝送線路構造として、同軸ケーブルのような円形状導体の多層伝送線路と、プリント基板のような矩形形状導体の多層伝送線路をそれぞれ対象として、異なる材料を積層して構成される伝送線路の電磁界理論を整理して、種々の損失を算出する理論を構築し、線路構造を最適化できる設計理論を検討した。

図1に円形多層伝送線路構造の模式図、式(1)～式(9)に同構造に基づく電磁界理論計算式を示す。

図2に矩形多層伝送線路構造の模式図、式(10)～式(24)に同構造に基づく電磁界理論計算式を列挙する。矩形多層伝送線路の電磁界理論に関する詳細は、文献(1)を参照されたい。

図1の円形多層伝送線路では、導体内部の銅損および磁性損失を算出することができる。本研究の成果として、これに加えて、導体周囲の誘電体材料の寸法および材料特性を追加することにより、伝送線路の分布抵抗、分布インダクタンス、分布キャパシタンスおよび分布コンダクタンスを計算することができ、対象とする伝送線路の S パラメータを算出することができるように電磁界理論の拡張を図ることができた。

一方、図2の矩形多層伝送線路構造では、導体内部の損失を求めるまでしかできていないが、既存の導体のみの伝送線路と負透磁率材料を用いた多層伝送線路を比較することにより、導体における損失を比較することができる。

$$i_{z1}(r) = \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (1)$$

$$i_{z2}(r) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot \frac{J_0(k_1 r_1)}{J_0(k_2 r_1)} \cdot \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (2)$$

$$i_{z3}(r) = \frac{J_0(k_2 r_2)}{J_0(k_1 r_2)} \cdot \frac{J_0(k_1 r_1)}{J_0(k_2 r_1)} \cdot \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (3)$$

$$i_{z4}(r) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot \frac{J_0(k_1 r_3)}{J_0(k_2 r_2)} \cdot \frac{J_0(k_2 r_2)}{J_0(k_1 r_2)} \cdot \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (4)$$

$$k_n^2 = -j\omega\sigma_n\mu_n \quad (5)$$

$$J_n(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!(n+m)!} \left(\frac{z}{2}\right)^{(n+2m)} \quad (6)$$

$$Loss_{con} = \int_{r_{n-1}}^{r_n} \frac{|i_{zn}(r)|^2}{\sigma_n} \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (7)$$

$$Loss_{mag} = \int_{r_{n-1}}^{r_n} \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \mu_n'' \cdot H(r)^2 \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (8)$$

$$Loss_{all} = Loss_{con} + Loss_{mag} \quad (9)$$

$$E_{zn}(y) = A_n e^{+k_n y} + B_n e^{-k_n y} \quad (10)$$

$$J_{zn}(y) = \sigma_n E_{zn}(y) \quad (11)$$

$$H_{xn}(y) = -\frac{k_n}{j\omega\mu_n} (A_n e^{+k_n y} - B_n e^{-k_n y}) \quad (12)$$

$$k_n^2 = j\omega\sigma_n\mu_n \quad (13)$$

$$Loss_n = \int_{y_{n-1}}^{y_n} \frac{|J_{zn}(y)|^2}{\sigma_n} dy + \int_{y_{n-1}}^{y_n} \frac{1}{2} \omega \mu_n'' |H_{xn}(y)|^2 dy \quad (14)$$

$$Loss = \sum_{i=1}^n Loss_i \quad (15)$$

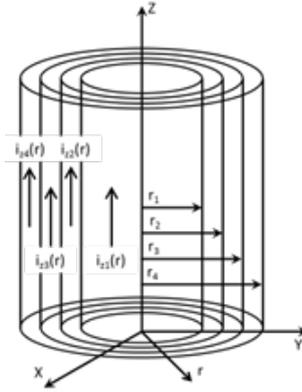


図1 円形多層伝送線路構造の模式図

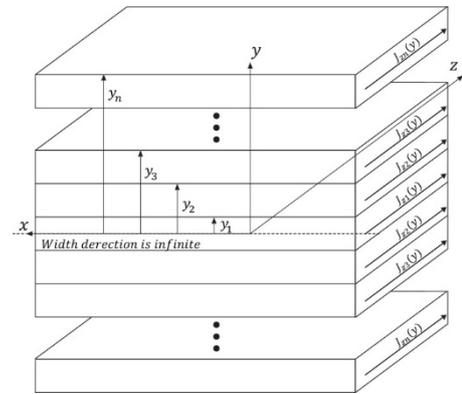


図2 矩形多層伝送線路構造の模式図

矩形多層伝送線路において、負透磁率材料による低損失効果を明らかにするため、Cu 導体と NiFe 磁性体を想定した多層伝送線路の最適化設計を検討した。

一例として、Cu 導体と NiFe 磁性体を交互に積層し、合計膜厚 12.67  $\mu\text{m}$  で 33 層の伝送線路において、従来理論に基づき一定比率(膜厚を透磁率の逆数比とする比率)で積層した伝送線路と、本理論に基づいて損失が最も小さくなる最適な膜厚条件を検討した結果、表皮効果による損失(導体損失および磁性損失)を約 80%に低減できる効果を得ることができた。なお、Cu 導体のみの伝送線路と比較すると、損失を約 53%に低減できることを示しており、大幅な低損失効果を得られることが分かった。

加えて、積層数を半減した 17 層の伝送線路で最適化を検討した結果、上述の従来理論の 33 層に対して、損失を約 84%に低減できることが分かり、33 層での最適化には及ばないが、積層数を半減しても大きな低損失効果を確認することができ、製作工程を削減して低コスト化を図れるため、実用化に有効な成果を示すことができた。

以上の電磁界理論に基づき、種々の条件で最適化設計を進めることにより、設計面から負透磁率材料の開発に必要な透磁率特性を提示することができ、今後の研究推進に有効な理論を構築することができた。

## (2) 負透磁率特性を有する磁性体を用いた多層構造伝送線路の試作

本項では、Cu 導体と NiFe 磁性体を用いて、中心導体を直径 0.4mm の Cu ワイヤをコアとして、その表面に約 1  $\mu\text{m}$  厚を目標として NiFe 磁性膜を電気めっきで製膜した積層導体を試作した。さらに、この積層導体の周囲に厚さ 0.49mm の PE 絶縁体層を形成し、その外側を銀メッキ軟銅線による GND シールド層を形成して長さ 100mm の同軸ケーブルを試作した。ただし、試作に用いた NiFe 磁性膜は開発途中であるため、負透磁率特性を有することが確認できていない。そのため、外部磁場印加用のソレノイドコイルを開発し、同軸ケーブルに外部磁界を与えながら実験

を行うことにより、NiFe 磁性膜に磁気異方性を作用させて、負透磁率特性を確認できるか試みた。

図3に、ソレノイドコイルに流す電流を0~8Aに変化させた場合における、試作した多層同軸ケーブルの伝送特性(透過係数  $S_{21}$  の周波数特性)を示す。なお、ソレノイドコイルの電流が8Aの場合、外部磁界が約500 Oe(約40 kA/m)に相当する。

図3より、外部磁界(ソレノイドコイルの電流)を変化させることにより、伝送特性が若干変化する傾向がみられたが、使用している磁性膜が薄いため、伝送特性に与える影響が小さく、十分な検証を得ることができなかった。

現状では、電気めっき製膜によるNiFe磁性膜の開発が十分では無いため、負透磁率特性が得られているか確認できていないが、本研究で開発した外部磁場印加用ソレノイドコイルを用いることにより、試作した多層同軸ケーブルに任意の外部磁場を印加することができるため、本研究の円形多層伝送線路の電磁界理論を併用すると、使用している磁性材料の透磁率特性を推定することが可能であり、本研究結果が負透磁率特性を有する磁性材料の開発にも有効なツールとなることを期待できる。

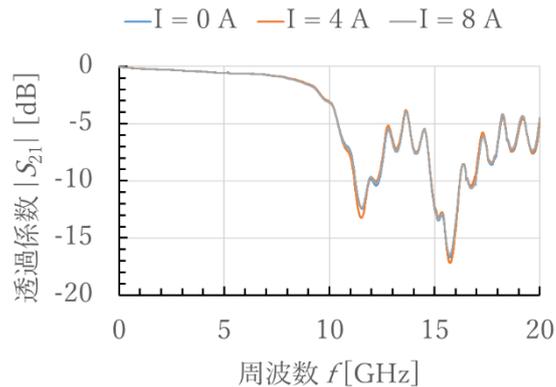


図3 試作したCu/NiFe積層導体による同軸ケーブルの伝送特性の測定結果

### (3) 銅箔表面粗化に対する本技術の有効性の検証

本項では、高周波プリント基板などの産業界が抱える銅箔表面粗化の課題に対して、本研究の矩形多層伝送線路の電磁界理論を適用し、表面粗化を模した伝送線路について検証を行った。

従来研究では、負透磁率材料の比透磁率を-1、導電率をCuと同等の仮想材料を想定して、表面粗化に与える影響を評価していたが、本研究では、負透磁率材料にNiFe磁性膜を想定し、高抵抗で磁性損失を含む負透磁率材料を適用しても、表面粗化に対して効果が得られるか検証した。

図4に示す矩形多層伝送線路構造を想定して検証を行った。同構造は、前述した33層のCu導体/NiFe磁性体による積層線路に加え、上下の最外層が表面粗化処理されたと仮定して、最外層にCu導体の抵抗率に対して1~1000倍の抵抗率の材料を0~200 nmの厚さで積層した場合について、検討を行った。周波数  $f$  は、先行研究のNiFe膜が負透磁率を有して最もQ値が良い、16 GHzにおいて検討を行った。伝送線路全体の厚さは、先行研究と比較するため合計12.67  $\mu\text{m}$ に設定した。中心から奇数番目の各層にCu(比透磁率  $\mu_{r, \text{Cu}} = 1$ 、抵抗率  $\rho_{\text{Cu}} = 1.72 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ )を想定し、中心から16層目までの偶数番目の各層にNiFe(比透磁率  $\mu_{-(r, \text{NiFe})} = -6.38 - j2.10$ 、抵抗率  $\rho_{\text{NiFe}} = 16.7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ )を負透磁率材料として想定した。最表面層は、厚さ  $t$  を0~200 nmに変化させ、その抵抗率をCuの抵抗率の1~1000倍に変化させて、様々な表面粗化層の状態を模擬した。

本研究の電磁界理論計算に基づき、多層線路の損失を算出した。図5にCu/NiFe33層構造を適用した場合の損失低減率(例: 損失低減率40%は、Cu単体に対して損失が60%に減少したもの)との関係を示した。図5より、Cu/NiFe33層構造を適用すると、約37~47%の損失低減率が得られることが分かったが、最表面層の厚さやその抵抗率が大きいほど、損失低減率が小さくなり、Cu/NiFe多層構造の効果が小さくなるが、Cu単体に表面粗化が生じた場合よりもCu/NiFe33層構造に表面粗化が生じた場合の方が、総合的に損失を低減できることが分かり、銅箔表面粗化に対しても本技術が有効であることを確認できた。

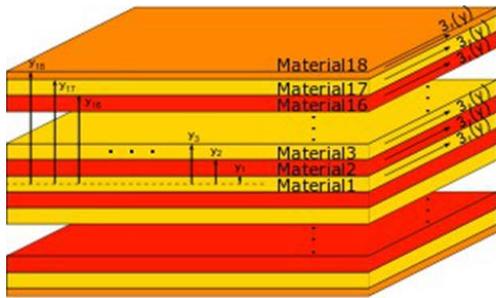


図4 矩形多層伝送線路(35層)の構造模式図

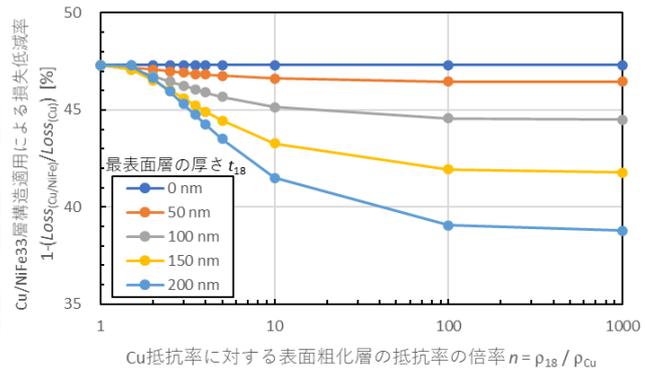


図5 表面粗化層の抵抗率と損失低減率の関係

#### (4)まとめ

本研究により、次のことを実施することができた。

円形多層伝送線路および矩形多層伝送線路において、電磁界理論を整理して、任意の積層構造に対する損失計算ができるようになった。特に、円形多層伝送線路では、中心導体の周囲の誘電体材料の寸法および材料特性を考慮して、伝送線路の S パラメータを算出できるように拡張することができた。

本研究の電磁界理論を用いることにより、矩形多層伝送線路では、Cu 導体/NiFe 磁性体の 33 層積層伝送線路において、従来理論に基づく設計に対して損失を約 80%に低減できることが明らかとなり、加えて、積層数を半減した 17 層積層伝送線路においても損失を約 84%に低減できることが分かり、低コスト化を考慮した実用化に有効な成果を示すことができた。

Cu 導体および NiFe 磁性体を用いて、積層同軸ケーブルを試作して伝送特性を評価したが、磁性膜の材料開発が十分ではなかったため、期待される損失低減効果を実証することはできなかった。

矩形多層伝送線路の電磁界理論を用いて、高周波プリント基板の表面粗化を想定した損失を検証した結果、本研究の負透磁率材料を用いた場合に、約 37~47%の損失低減効果を得ることが見積もられ、表面粗化のある伝送線路に対する本技術の有効性を確認することができた。

研究期間全体を通じた研究実績として、査読論文 1 件、国際会議発表 2 件、その他、国内学会等での研究発表 9 件を実施することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Y. Aizawa, H. Nakayama, K. Kubomura, R. Nakamura, H. Tanaka   | 4. 巻<br>10               |
| 2. 論文標題<br>Theoretical study on lowering loss of skin effect suppressed multi-layer transmission line with positive/negative (Cu/NiFe) permeability materials for high data-rate and low delay-time I/O interface board | 5. 発行年<br>2020年          |
| 3. 雑誌名<br>AIP Advances  | 6. 最初と最後の頁<br>015124-1~4 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/1.5130003  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-                |

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>三浦旺太, 平栗健次, 中山英俊, 網谷健児, 田中秀登, 北山光也 |
| 2. 発表標題<br>負透磁率を有する高周波磁性材料を用いた積層線路の伝送特性の検討    |
| 3. 学会等名<br>令和5年度電気学会東海支部学生発表会                 |
| 4. 発表年<br>2024年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中山英俊, 大谷圭亮, 田中隼, 田中秀登                                  |
| 2. 発表標題<br>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                   |
| 3. 学会等名<br>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 |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>久保村航大, 原瑠偉, 鮎澤祥史, 中村玲於奈, 中山英俊, 田中秀登                    |
| 2. 発表標題<br>表面粗化に対する正 / 負透磁率材料による積層伝送線路の損失低減効果の検討                  |
| 3. 学会等名<br>JPCA Show 2021/2021 マイクロエレクトロニクスショー 2021アカデミックプラザ講演論文集 |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中山英俊                           |
| 2. 発表標題<br>左手系伝送線路デバイスおよびそれを応用したデバイスの開発状況 |
| 3. 学会等名<br>令和3年度電気学会東海支部若手セミナー講演資料(招待講演)  |
| 4. 発表年<br>2022年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大谷圭亮, 田中隼, 中山英俊, 田中秀登            |
| 2. 発表標題<br>負の透磁率材料を用いた伝送線路の損失低減に対する透磁率特性の影響 |
| 3. 学会等名<br>令和3年度電気学会東海支部学生発表会概要集            |
| 4. 発表年<br>2022年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>K. Kubomura, Y. Aizawa, H. Nakayama, R. Hara, H. Tanaka   |
| 2. 発表標題<br>Consideration on Lowering Loss Design of Skin Effect Suppressed Multi-Layer Transmission Line With Positive/Negative (Cu/NiFe) Permeability Materials for High Data-Rate and Low Delay-Time I/O Interface Board |
| 3. 学会等名<br>65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials ABSTRACTS (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>原瑠偉, 久保村航大, 中山英俊, 田中秀登           |
| 2. 発表標題<br>Cu/NiFe矩形多層伝送線路による表面粗化損失低減に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>令和2年度電気学会東海支部学生発表会(第2回)          |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>鮎澤祥史, 久保村航大, 中山英俊, 田中秀登                          |
| 2. 発表標題<br>負の透磁率材料を用いた矩形多層伝送線路の表皮効果損失低減の検討                  |
| 3. 学会等名<br>JPCA Show 2019/2019マイクロエレクトロニクスショー 2019アカデミックプラザ |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>鮎澤祥史, 久保村航大, 中村玲於奈, 中山英俊, 田中秀登    |
| 2. 発表標題<br>正 / 負透磁率材料による積層伝送線路の損失低減に関する理論的検討 |
| 3. 学会等名<br>第43回日本磁気学会学術講演会概要集                |
| 4. 発表年<br>2019年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>H. Nakayama, Y. Aizawa, K. Kubomura, R. Nakamura, H. Tanaka  |
| 2. 発表標題<br>Theoretical Study on Lowering Loss of Skin Effect Suppressed Multi-layer Transmission Line with Positive/Negative (Cu/NiFe) Permeability Materials for High Data-Rate and Low Delay-Time I/O Interface Board |
| 3. 学会等名<br>64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>鮎澤祥史, 久保村航大, 中村玲於奈, 中山英俊, 田中秀登 |
| 2. 発表標題<br>表面粗化の影響を考慮した正/負透磁率多層伝送線路の設計    |
| 3. 学会等名<br>令和元年度電気学会東海支部学生発表会             |
| 4. 発表年<br>2020年                           |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap  
<https://researchmap.jp/read0202721>

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|