

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14302

研究課題名（和文）電磁ポテンシャルを用いた電気回路の伝導・放射複合解析による放射ノイズの起源解明

研究課題名（英文）Investigation of the Origin of Radiation by using Combined Conduction and Radiation Analysis of Electric Circuits in terms of Electromagnetic Potentials

研究代表者

神野 崇馬（Jinno, Souma）

大阪工業大学・工学部・講師

研究者番号：70885508

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電気回路内に発生する電磁ノイズ現象の解明に向け、電気回路内の伝導と電気回路外部へと放射する現象を同時に扱う理論と数値計算法の開発に取り組んだ。その結果、電磁気学の基本変数である電磁ポテンシャルを用いた電気回路の数値計算法を開発した。また、汎用的な手法であるFDTD法のシミュレーション結果を再現することを確認し、電磁ポテンシャルを変数とした新たな回路シミュレーション手法の開発を実現した。さらに、実証実験でもプリント基板を用いた実験結果と良好な一致を示したことから、本手法が製品設計の現場においても実用可能であることを実証できた。

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、電気回路内を伝導する現象と外部へと放射する現象を共通の変数で記述する新たな回路シミュレーション手法を開発することができた。これにより、電気回路から放射する要因やメカニズムを解明するための新たなアプローチを提案することができる。本手法を製品設計に応用することで、製品開発のプロセスを大幅に短縮することができると期待される。本研究で開発された手法は、電磁ノイズ問題に悩まされている電気・電子機器の設計者にとって、非常に有用なツールとなり得る。

研究成果の概要（英文）：In this study, I developed a theory and numerical method to simultaneously handle the phenomena of conduction within an electric circuit and radiation to the outside of an electric circuit in order to elucidate the electromagnetic noise phenomena that occur in electric circuits. As a result, I developed a numerical method for electric circuits using the electromagnetic potential, which is a fundamental variable in electromagnetism. I also confirmed that the method reproduced the simulation results of the FDTD method, a general-purpose method, and realized the development of a new circuit simulation method using electromagnetic potentials as variables. Furthermore, the experimental results showed good agreement with the experimental results using printed circuit boards, demonstrating the practical applicability of this method in product design.

研究分野：電磁ノイズ

キーワード：電磁ノイズ 放射ノイズ 伝導ノイズ コモンモード 電磁ポテンシャル

1. 研究開始当初の背景

電磁気学現象を利用して我々の生活は飛躍的に便利になってきた。それは約 150 年前に Oliver Heaviside により電信方程式が考案され、ケーブルを使った伝導現象の実用化が進み、さらに Maxwell 方程式は扱いやすい 4 つのベクトル形式で表されたことで、電磁場の放射現象の産業応用が進んだ。このような Heaviside の功績を起点に、電気回路内の伝導と外部へと放射する現象を表す理論は実用上、切り離されて発展してきた。実際、伝導現象は伝送線路理論、放射現象はアンテナ理論などの異なる理論体系の発展が進んだ。しかし近年、放射を考慮しない伝導解析によって設計された回路からの予期しない放射が電磁ノイズの原因となっており、伝送線路理論と FDTD 法を組み合わせた計算手法など[1]、電磁場の放射を考慮した計算手法の開発が進んでいる。実際は、電気回路の伝導と放射現象は同じ電磁気学現象であり、それらは等価に扱われべきであるが、それらの現象を統一して記述したシミュレーション手法は確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では、電気回路の伝導と放射現象は同じ電磁気学現象であるにも関わらず、なぜ等価に扱われていないのかという問いのもと、伝導と放射の基本的な変数である電磁ポテンシャルを用いて、それらの現象を統一して記述したシミュレーション手法を確立することを目的とした。

電気回路内外の物理現象を記述する際、図 1 に示すように、集中定数回路の枝電圧 (V_l)、電気回路内部の伝導電圧 (V)、外部への放射電磁場 (E, B) など異なる物理量で記述されている。これにより、それぞれの物理現象の影響が無視され、予期しない電磁ノイズの原因となっている。

本研究では、上記の物理量の共通の変数である電磁ポテンシャル (U, A) を用いて、物理的に矛盾なく接続するための理論と数値計算手法を考案することで、回路の伝導と放射を同時に考慮した電磁回路シミュレーションを実現し、回路内の伝導による放射ノイズの起源を解明する。

具体的には、電気回路に接続された集中定数回路、電気回路を構成する導体及び外部の誘電体や空気などの絶縁体を含む全ての空間における電磁ポテンシャルを数値計算する手法を考案することで、導体内の伝導と外部への放射、さらには集中定数回路を統一した新しい計算手法を開発し、電気回路に流れる信号と外部への放射の複合解析手法を考案し、放射ノイズのメカニズムを解明することである。

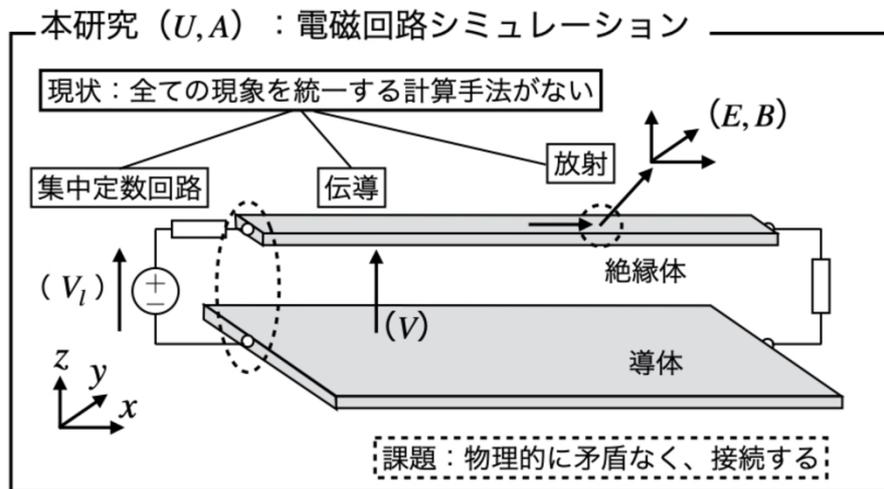


図 1 : 本研究で実現する電磁回路シミュレーション。集中定数回路と導体内の伝導と導体外への放射現象を統一して計算する理論と数値計算手法を考案する。

3. 研究の方法

本研究では、電気回路の伝導現象と放射現象を同時に考慮するために、集中定数回路、伝送線路、電磁場を矛盾なく接続する電磁回路シミュレーション手法を考案する。特に下記の3つの事項に取り組んだ。

1: 集中定数回路と導体の接続条件の導出

集中定数回路は大きさの概念がないため、導体の境界でローレンツゲージや連続の式などの保存則が成り立たない。集中定数回路が接続される入力端や出力端の境界で、矛盾なく接続するための条件を導出する。具体的には、集中定数回路の節点電位を導体空間のスカラーポテンシャルと等価とみなすことで、集中定数回路と電磁ポテンシャルの波動方程式を同時に満たす条件を導出する。

2: 導体と絶縁体の境界における分極が伝導と放射に及ぼす影響の解明

導体と絶縁体は電氣的性質が全く異なり、これらの境界の取り扱いが重要になる。これらの境界では分極によって分極電荷と分極電流が存在し、周りの電磁ポテンシャルに影響を与えている。よって、導体内の伝導と外部への放射を接続するためには、分極を考慮した計算が必要になる。本研究では、分極を考慮した Maxwell 方程式から得られる電磁ポテンシャルの偏微分方程式を計算することで、導体周囲の空間を誘電体などの分極を発生する媒質へと適応可能にする。この数値計算を実現し、導体とその周りの誘電体が伝導と放射現象に与える影響を明らかにする。

3: 実証実験のための実験系の考案

本研究で考案した計算手法の妥当性を実験により明らかにする。伝導現象は時間領域反射 (TDR) 計測によりナノ秒以下の現象を観測することができる。本実験手法で測定できる現象は伝導現象であるため、放射が大きくなるプリント基板の構造を用いることで、放射による伝導現象の影響を観測し、理論計算と比較する。

4. 研究成果

本研究成果として、当初目標としていた電気回路内外の現象を電磁ポテンシャルを用いて定量化することを実現した。後述する本研究成果に関する内容は学術論文誌 IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility に公開済みである [2]。3 で述べた研究の方法に沿って研究成果の詳細を説明する。

1: 集中定数回路と導体の接続条件の導出

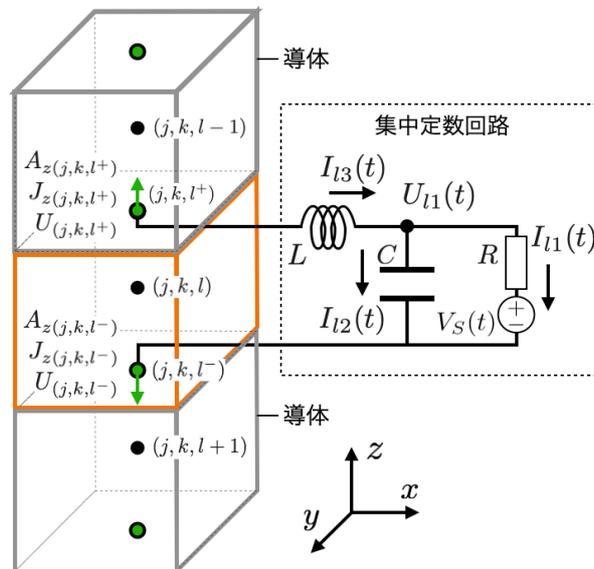


図2 集中定数回路と導体との接続で用いる変数

図2は本研究で導出した集中定数回路と3次元導体の接続に関する概略図である。左側の直方体が3次元の導体を離散化したときの有限体積である。数値計算では、FDTD法と同じ有限差分法を用いているので、空間のずれた位置で変数が定義されている。本研究では図のように導体の境界の点と集中定数回路の節点を一致させて条件式を作成した。導体の中心など、その他の点での接続での条件式も作成したが数値計算が発散したため、図2に示す方法が適切だと判断した。これにより、任意の受動素子の集中定数回路を接続することが可能になった。

2: 導体と絶縁体の境界における分極が伝導と放射に及ぼす影響の解明

$$\begin{aligned}
 & -\nabla^2 \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) + \mu_0 \varepsilon_0 (1 + \chi_e(\mathbf{r})) \frac{\partial^2 \mathbf{A}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \\
 & = \mu_0 \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) - \mu_0 \varepsilon_0 \chi_e(\mathbf{r}) \frac{\partial \nabla U(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \\
 & -\nabla^2 U(\mathbf{r}, t) + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 U(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \\
 & = \frac{q(\mathbf{r}, t)}{\varepsilon_0} - \nabla \cdot (\chi_e(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)).
 \end{aligned}$$

図 3: 誘電率の空間分布を考慮した、スカラーポテンシャル (U) とベクトルポテンシャル (A) の波動方程式

誘電体の影響を考慮するために、分極ベクトルを考慮したマクスウェル方程式から、ローレンツゲージを用いて、図 3 に示す電磁ポテンシャルの波動方程式を導出した。 χ_e は電気感受率であり、 $1 + \chi_e$ が比誘電率となり、空間に分布した値になっている。図 3 で示した式の右辺を見ると、第 1 項が電磁ポテンシャルの源である電流密度と電荷密度であり、第 2 項が誘電率の空間分布の影響により新たに表れた項である。本研究では、この 2 階の偏微分方程式を離散化するアルゴリズムを考案し、導体や誘電体、空気などの媒質中の計算を実現した。これにより、電気回路とその周囲で生じる現象を共通の電磁ポテンシャルの変数を用いて定量化することができるようになった。

次に、図 4 に示すマイクロストリップ線路を用いて、電磁場を変数とした FDTD 法と比較した。図 5 がその結果の比較であり、マイクロストリップ線路の中央に流れるノーマルモード電流とアンテナモード電流の時間変化が同じ結果を得られていることがわかる。また、誘電率を変化させた結果も一致していることがわかる。

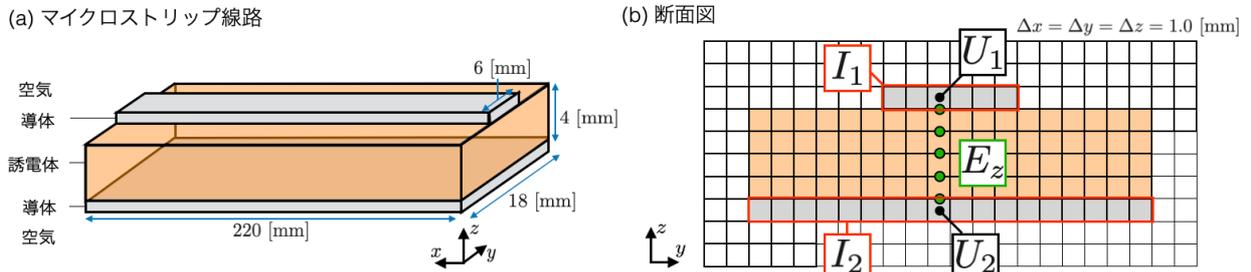


図 4: 考案した数値計算手法のシミュレーションの概略図。マイクロストリップ線路とその周りの空間を立方体のメッシュで分割した。

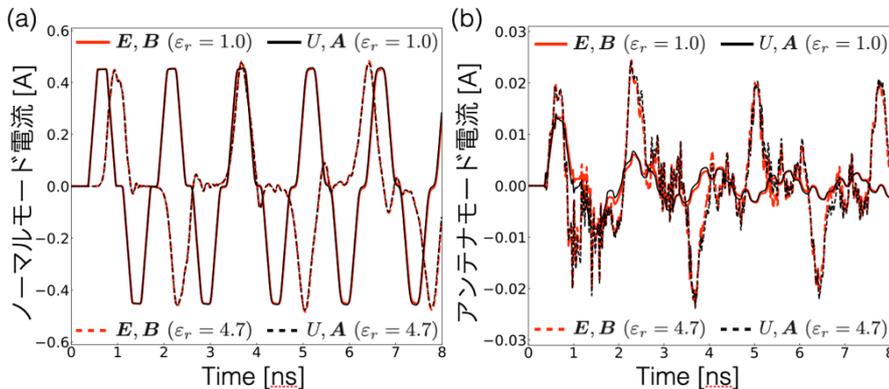


図 5: 本研究で開発した電磁ポテンシャルを変数とした手法 (黒線) と既存の手法である電磁場を変数とする FDTD 法を用いて得られた結果 (赤線) を比較した。(a) が図 4 に示したマイクロストリップ線路の中央を流れるノーマルモード電流 ($0.5(I_1 - I_2)$) であり、(b) がアンテナモード電流 ($I_1 + I_2$) である。実線と点線はそれぞれマイクロストリップ線路の誘電率を変えたときの結果を表している。

3: 実証実験のための実験系の考案

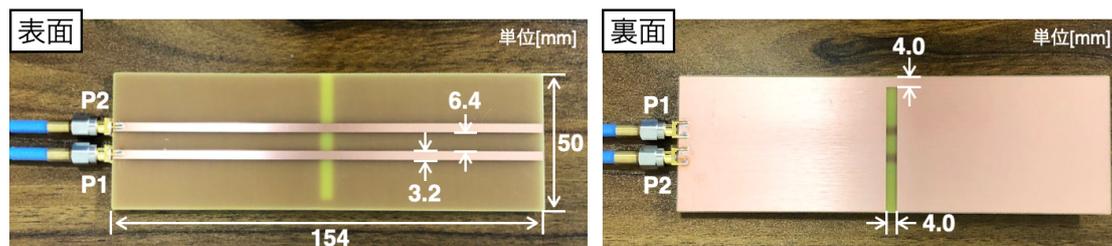


図 6：本研究で用いた実験系。差動配線基板のグランドに不連続部を設けた基板を用いた。P1、P2 は入力するポートを表し、それぞれのポートからステップ電圧を印加して反射波を観測した。入力にはノーマルモード電圧（P1 と P2 に逆相のステップ電圧）とコモンモード電圧（P1 と P2 に同相のステップ電圧）を印加した。

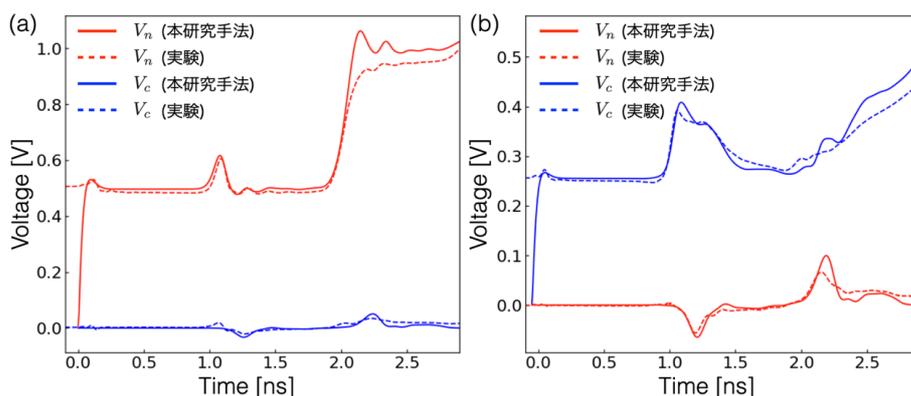


図 7：図 6 の基板に 0.0 ns にステップ信号を入力したときのノーマルモード電圧 ($V_1 - V_2$) とコモンモード電圧 ($0.5(V_1 + V_2)$) の反射波の時間変化。実線が本研究手法で得られた数値計算の結果であり、点線は実験で得られた結果である。(a) はノーマルモード電圧を印加した場合の結果。(b) コモンモード電圧を印加した場合の結果である。

実証実験では、時間領域反射法（TDR 法）を用いてプリント基板に信号を印加し、反射波を観測した。図 6 は実験で用いた基板であり、放射が発生した際に伝導現象に及ぼす影響を観測するために、グランド面に不連続部を設けた。一般的にグランドに不連続部があると、放射することがわかっている。また、この基板は差動配線を模擬しており、ノーマルモード（逆相）とコモンモード（同相）でステップ電圧を印加し、ノーマルモード電圧 ($V_1 - V_2$) とコモンモード電圧 ($0.5(V_1 + V_2)$) の反射波の時間変化を観測した。これにより、それぞれのモードにおける伝導現象の違いを確認した。

図 7 は実験と本研究手法により得られた数値計算結果である。0.0 ns にステップ電圧を入れ、その後の反射波を観測している。1.0 ns 付近の波形の歪みがグランドの不連続部が原因で発生した反射波である (a) と (b) のそれぞれのモード伝導現象を比較すると、コモンモード電圧の方が 1.0 ns 付近の反射波が大きいことから、グランドの不連続による影響を大きく受けていることがわかる。また、2.0 ns 付近の終端からの反射波を見ると、コモンモード電圧が大きく減衰していることから、グランドの不連続による放射から信号が減衰していることを確認した。

以上の結果から、本研究により、電磁ポテンシャルを用いて回路内の伝導現象を計算し、実際の現象を再現することを確認した。また、同時に回路の周りの空間も電磁ポテンシャルで定量化できている。今後は、本研究手法で定量化した電磁ポテンシャルを用いて伝導現象から放射現象へと変換するメカニズムを解明することで電磁ノイズの起源を明らかにする。

参考文献

- [1] B. Li, Y. Du, M. Chen, and Z. Li, “A 3-D FDTD Thin-Wire Model of Single-Core Coaxial Cables With Multiple Conductive Layers,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 3, pp. 762–771, Jun. 2021, doi: 10.1109/TEMC.2020.3037939.
- [2] S. Jinno, S. Kitora, H. Toki, and M. Abe, “A Time-Domain Three-Dimensional Numerical Method for Comprehensive Common-Mode Analysis of Electric Circuits in Inhomogeneous Media,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 64, no. 6, pp. 2189–2197, 2022, doi: 10.1109/TEMC.2022.3199473.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jinno Souma, Kitora Shuji, Toki Hiroshi, Abe Masayuki	4. 巻 64
2. 論文標題 A Time-Domain Three-Dimensional Numerical Method for Comprehensive Common-Mode Analysis of Electric Circuits in Inhomogeneous Media	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility	6. 最初と最後の頁 2189 ~ 2197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TEMC.2022.3199473	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abe M., Yamashita H., Jinno S., Custance O., Toki H.	4. 巻 93
2. 論文標題 Reduction of noise induced by power supply lines using phase-locked loop	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 113704 ~ 113704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0124433	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 神野崇馬, 木虎秀二, 土岐博, 阿部真之
2. 発表標題 スカラーポテンシャルを用いたコモンモードノイズ解析手法の検討
3. 学会等名 環境電磁工学研究会 (EMCJ), キャンパスプラザ京都 (ハイブリッド), 2022.5.20.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神野崇馬, 木虎秀二, 土岐博, 阿部真之
2. 発表標題 電磁ポテンシャルを用いた3次元回路シミュレーション手法
3. 学会等名 電磁環境技術委員会 (IEE-EMC), 秋田大学 地方創生センター2号館(2階)大セミナー室, 2022.10.13-14.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神野崇馬, 木虎秀二, 土岐博, 阿部真之
2. 発表標題 電磁ポテンシャルを用いた不均一媒質中のノーマルモード・COMMONモードの時間領域解析
3. 学会等名 2022年電信情報通信学会 B-4-9, オンライン, 2022.3.15-18.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大原佑介, 神野崇馬, 木虎秀二, 土岐博, 阿部真之
2. 発表標題 平行 2 本線路における放射を考慮したノーマル・COMMONモード方程式とカップリングメカニズムの解明
3. 学会等名 2022年電信情報通信学会 B-5-59, オンライン, 2022.3.15-18.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神野崇馬, 木虎秀二, 土岐博, 阿部真之
2. 発表標題 導体線路の不連続部におけるノーマルモード・アンテナモードのカップリング解析
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-4-8, オンライン, 2022.9.6-9.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神野崇馬, 山口冬生, 森智之, 三浦宏之, 土岐博, 阿部真之
2. 発表標題 COMMONモード等価回路モデルの作成に向けたブリッジダイオードの接合容量の評価
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 阿部真之、木虎秀二、土岐博、神野崇馬、他	4. 発行年 2024年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 556
3. 書名 電磁波吸収・シールド材料の開発と電磁ノイズの対策	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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
---------	---------