

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04139

研究課題名（和文）遅延結合を含む回路のトポロジーに基づく電磁場の幾何学的設計

研究課題名（英文）Geometrical design of electromagnetic fields based on topology of circuits with retarded coupling

研究代表者

久門 尚史（Hisakado, Takashi）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80301240

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：Maxwell方程式から系統的に導体構造と等しいトポロジーの等価回路を導出し、電磁場の遅延結合を考慮すると、複雑な構造における固有モードや周波数特性、放射・分散特性などが得られる。このことを利用して、明示的な帰路線の無い回路において、回路の外部に存在する電磁界との結合を回路としてグラフラプラシアンを用いて幾何学的に設計し、種々の電磁現象が設計できることを示した。具体的には、帰路線の無い伝送線路の終端設計や短絡、周波数特性の設計、ライトライン上の特異性を利用した単一モード励振、時間領域モデルの中立型遅延微分方程式による記述とその安定化、単導体線路の屈曲線路への拡張などを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常の回路も電磁現象のダイナミクスを扱うが、明示的な帰路線を持ち、基本的に回路の中で閉じた現象を扱うことが多く、回路の外部に存在する電磁界も意識しながら扱うことは少ない。それに対して、明示的な帰路線の無い構造に対して、遅延電磁結合を考慮すると同時に、そのトポロジーをグラフラプラシアンで表現することにより、離散的なダランベール演算子を用いて、離散的な波として回路における現象を表現し、電磁界の特性も考慮した種々の設計手法を提案した。このことは、従来の回路の適用範囲を大幅に拡張すると同時に、電磁界の設計にも回路を用いた設計手法が適用できることを示している。

研究成果の概要（英文）：By systematically deriving an equivalent circuit of topology equal to the conductor structure from Maxwell's equations and considering the retarded electromagnetic coupling of the electromagnetic field, we can obtain the intrinsic modes, frequency response, radiation and dispersion characteristics in complex structures. Using this fact, it was shown that various electromagnetic phenomena can be designed geometrically using the graph Laplacian as a circuit for coupling with electromagnetic fields existing outside the circuit in a circuit without an explicit return path. Specifically, we proposed the design of terminations, short circuits, and frequency response of transmission lines without return lines, single-mode excitation using singularities on light lines, the description of time-domain models by neutral-type delay differential equations and their stabilization, and the extension of single-conductor lines to bent lines.

研究分野：電気回路

キーワード：回路モデル 遅延電磁結合 トポロジー 幾何学的設計 等価回路 グラフラプラシアン 単導体線路
離散ダランベール演算子

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 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Maxwell 方程式から系統的に導体構造と等しいトポロジーの等価回路を導出し、電磁場の遅延結合を考慮すると、複雑な構造における固有モードや周波数特性、放射・分散特性などの表現が与えられることがわかってきた。その中で重要な役割を果たしているのは、素子間の結合に対して遅延を考慮した遅延電磁結合を用いた等価回路である。つまり、このような遅延電磁結合を含む等価回路を用いることで、電磁界の振る舞いも等価回路を用いて表現できていることを示している。

2. 研究の目的

遅延電磁結合を考慮した回路により、回路のトポロジーを考慮して、種々の電磁現象を設計することを目的とする。特に、明示的な帰路線の無いような回路は、従来の回路理論では扱いにくい。Maxwell 方程式と対応が取れる等価回路を用いることで、外部との結合を考慮できる。このような回路を設計することを可能にすると同時に、電磁界の設計も回路によって行うことを示すことを目的とする。

3. 研究の方法

回路のトポロジーはグラフラプラシアンを用いて表現される。また、回路方程式は連続的な時間微分を含めることで、時間連続、空間離散のダランベール演算子で記述される。つまり、回路における現象は離散的な波動方程式で記述されることになり、そこでの振動モードはグラフラプラシアン固有値と固有ベクトルによって表現される。そこで、グラフラプラシアン固有値や固有ベクトルが所望のものに近づくようなトポロジーを、グラフラプラシアン摂動のより求め、トポロジーを進化させる形で設計を行った。

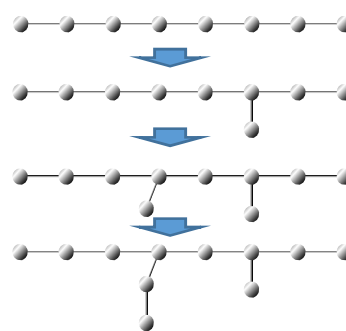


Figure 1 トポロジーの進化

明示的な帰路線の無い構造の代表的なものとして、単一導体構造をまず議論する。この回路に適切な構造を追加することにより、終端整合や短絡などの議論が可能になる。また、多数の共振器が結合した構造の回路も扱う。このような結合共振の構造も波としての特徴的なふるまいをする。一方で、過渡現象を扱うための時間領域のモデル化についても検討を行う。さらに、分布定数モデルとしての単導体線路を拡張し、屈曲構造も扱えるようなモデルを構築する。

4. 研究成果

4.1 離散的単導体伝送線路の設計

帰路線の無い構造として Figure 2 のような導体球と導体線の構造で行った。このような線路は空間離散、時間連続の離散的な波動方程式で記述できる。この構造の分散特性は、LC 梯子型回路と同様になり、各モードの特性インピーダンスも定義できる。したがって、モードごとに対応する特性インピーダンスで終端すれば、離散的単導体伝送線路を整合終端できる。ここでは、終端を導体球と導体線の共振器を用いて設計した場合を示している。

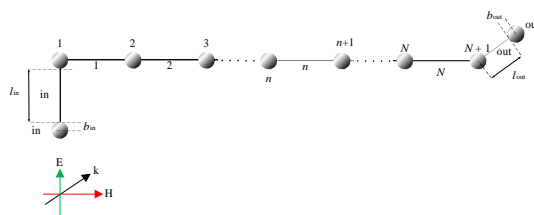


Figure 2 離散的な単導体線路

Figure 3 は、導体球の代わりに導体円盤を用いて、実際に回路を構成し、定在波比から反射係数を求めた結果である。図中、黒線は回路モデル、赤線が実験、青線が電磁界シミュレーションによる結果である。実験において、励振には電流プローブ、電流測定には磁界プローブを用い、ネットワークアナライザを用いて各導体線の電流を測定した。300MHz 程度において反射係数が小さくできており、設計通りの結果が得られている。

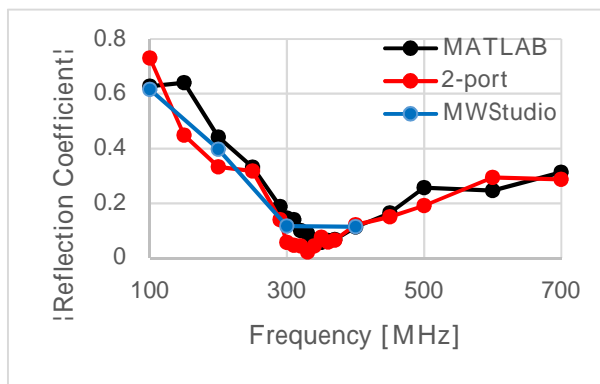


Figure 3 反射係数の周波数特性

また、他にも離散的な単導体線路の短絡の設計や、分岐において周波数に応じて分岐先を変えるような分岐構造もトポロジ

ーに基づいて設計できることを示した。

4.2 単一モード励振の手法

Figure 4 に示す共振器が並列に結合した形の線路について検討を行った。このような線路は離散単導体線路と同様に1次元の伝送線路を構成するが、そのトポロジーが大きく異なる。離散単導体線路ではワイヤのトポロジーにより結合した1次元構造であるが、並列結合線路の場合は、トポロジーとしては分離し、遅延電磁結合によって、電磁界が伝搬する。

遅延電磁結合を含む形で、各波数の振動モードに対するインピーダンスを表現すると、Figure 5 のように実部と虚部が表現できる。インピーダンスの実部は、ライトラインにおいて不連続になることを示しており、これはライトラインよりも波数が小さい場合は外部と結合する一方、波数が大きい場合は外部と結合しない波であることを示している。また、虚部が0になるところが、分散特性に対応しており、ライトラインの部分で大きく湾曲することがわかる。

周波数を固定して励振した場合、ライトラインのすぐ右側において、局所的に小さなインピーダンスの振動モードが存在する。そのモードを利用することにより、1個の共振器を励振するだけで、すべての共振器が励振され、ライトラインに近いことから、指向性の大きな励振ができることを確認した。このように、結合により伝搬する回路の設計も可能になることを明らかにした。

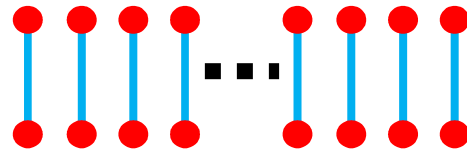


Figure 4 並列結合線路

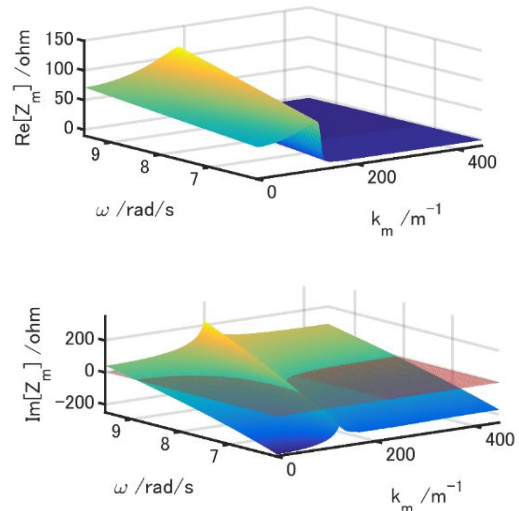


Figure 5 インピーダンスの実部と虚部

4.3 時間領域の解析手法

電磁界の過渡現象を設計するためには、遅延電磁結合を含む回路において、過渡現象を扱う必要がある。これまでラプラス変換やフーリエ変換を用いて扱っていたが、直接過渡現象をモデル化するには微分方程式として記述できる方が望ましい。この遅延を含む等価回路の回路方程式の時間領域表現として、中立型の遅延微分方程式の導出法を提案した。単純な共振器において、Figure 6 に示すように、遅延が無い場合は損失が無いため過渡現象が無限に続くが、遅延を考慮することによって、有限積分法による電磁界解析 (FIT) とよく一致した結果が得られることが確認できる。

一方で、インダクタンスの遅延電磁結合において、周波数依存性が大きい場合は、時間領域では不安定になる。そのような場合には、遅延時間を分割することにより、安定性を保った時間領域表現が得られることを示した。Figure 7 は単純な構造においてその効果を確認したものである。この方法では、素子数は変更することが無いので、計算時間はほとんど増加することなく、安定な過渡現象の計算が可能になる。

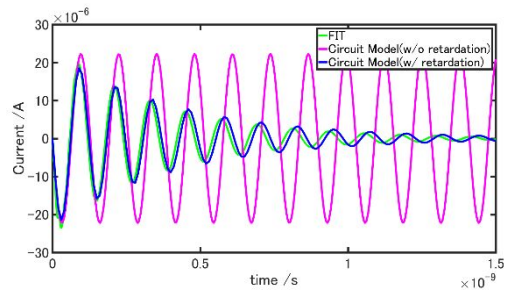


Figure 6 共振器の過渡特性

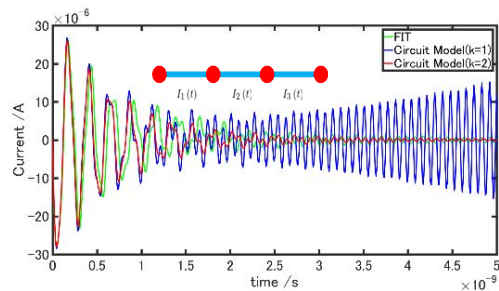


Figure 7 遅延の分割による安定化

4.4 単導体線路の拡張

アンテナのような単導体の構造を扱うモデルとして、帰路線の無い分布定数線路モデルである、単導体線路を構成した。光速 c として、導体上の線電荷密度 Q と電流 I の波動方程式 (Sommerfeld の主波) において、入射電界に加えて自身が作る電界をフィードバックとして入れると次式になる。

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} cQ \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -jk \\ -jk & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cQ \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_m \frac{j\chi(k_m)}{Z_0} \left\{ \hat{E}_{ex}(k_m) + \hat{E}_{tr}(k_m) - \hat{E}_{fin}(k_m) \right\} e^{-jk_m z} \\ 0 \end{bmatrix}$$

ここで、 z は導体長手方向の空間座標、 k は自由空間波数、右辺第二項にある3つの電界は、それぞれ入射波の z 成分(ex)、進行波の作る放射の反作用(tr)、有限長効果(fin)の電界である。このモデルにより、線路上の電流は Figure 8 のように、入射波により発生する散乱波のソース電流(I_{sc})、線路上の進行波電流(I_f, I_b)、進行波が端点で作る放射の反作用による電流(I_{re})の3つの成分に分けられ、入射波に対する散乱と再放射の違いも明確になる。また、この3つの成分に分けることにより、Figure 9 に示す斜め入射で励振された一見複雑な遠方界の分布(中図)が、物理的な意味が明確な3つの成分に分けられる(右図)。

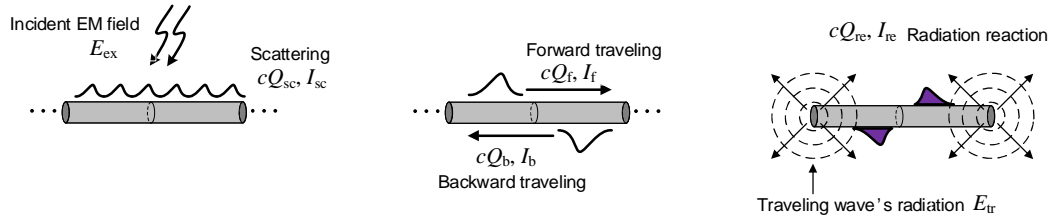


Figure 8 単導体伝送線路の3つの電流要素(入射波の散乱のソース、進行波、端点による放射の反作用)

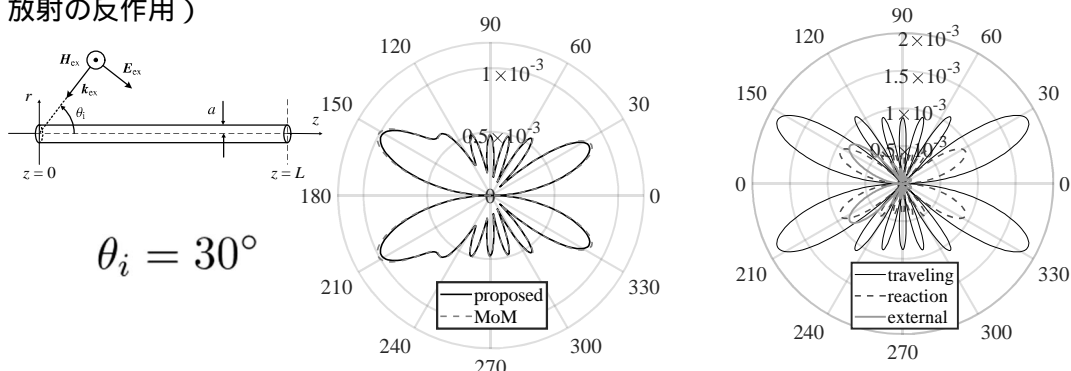


Figure 9 斜め入射で励振された場合の遠方界とその3成分への分解(MoMはモーメン)

また、このモデルの屈曲した単導体線路へ拡張も行った。

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 1件）

1. 著者名 K. Ohishi, T. Hisakado, T. Matsushima, O. Wada	4. 巻 E101-C
2. 論文標題 Equivalent-Circuit Model with Retarded Electromagnetic Coupling for Meta-Atoms of Wired Metallic Spheres	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Electronics, Vol.E101-C, No.12, 2018.	6. 最初と最後の頁 923-930
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.E101.C.923	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 D.Tashiro, T.Hisakado, T.Matsushima, O.Wada	4. 巻 2021
2. 論文標題 Single-Conductor Transmission Line Model Incorporating Radiation Reaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Trans. EMC	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TEMC.2020.3041468	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 A. Hasegawa, T. Hisakado, M. Islam and O. Wada
2. 発表標題 Topological Tuning of a Dispersion Curve by Controlling Locations of Impurities with Equivalent Circuit Model
3. 学会等名 Metamaterials 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田代大貴 久門尚史、松嶋徹、和田修己
2. 発表標題 有限長単導体線路モデルにおける放射の反作用と散乱の定式化
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋丸大甫 久門尚史、マーフズル、和田修己
2. 発表標題 伝搬遅延を含む等価回路モデルの遅延微分方程式を用いた時間領域解析
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋丸大甫、久門尚史、イスラムマーフズル、和田修己
2. 発表標題 並行導体で構成されるメタマテリアルの遅延電磁結合を含む回路モデルを用いた時間領域解析
3. 学会等名 2020 年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Hasegawa, T. Hisakado, T. Matsushima and O. Wada,
2. 発表標題 Topological Estimation of Resonant Frequencies by Equivalent Circuit for Star Meta-Atoms
3. 学会等名 APMC (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Tashiro, T. Hisakado, T. Matsushima and O. Wada,
2. 発表標題 Formulation of Single-conductor Transmission Line Model with Feedback Electric Fields by Terminal Discontinuity
3. 学会等名 APMC (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久門尚史、仲田涼馬、松嶋徹、和田修己
2. 発表標題 伝搬遅延を含む等価回路による放射と共振のモデル化
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川 確 久門尚史 和田修己
2. 発表標題 グラフラプラシアン の 摂動 を 用いた メタ原子 の トポロジー の 設計
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鮫島佳奈 久門尚史 和田修己
2. 発表標題 単導体線路モデルにおける放射の反作用の時間領域評価
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Akimaru, T. Hisakado, M. Islam and O. Wada
2. 発表標題 Excitation of the Light Line Mode with Metamaterials Composed of Parallel Conductors Based on Equivalent-Circuit Model Including Retarded Electromagnetic Coupling
3. 学会等名 Metamaterials 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------