

平成23年 5月27日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20700047

研究課題名（和文） 電荷と電流を変数とする回路表現に基づくEMC解析の実現

研究課題名（英文） EMC analysis based on circuit model of charge and current

研究代表者

久門 尚史 (Hisakado Takashi)

京都大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80301240

研究成果の概要（和文）：電気回路は身の回りの電気製品を設計するために不可欠な要素であるが、その高速化と高密度化を進めた結果として、従来の回路モデルではあまり考慮されなかった空間的な電磁結合を考慮したモデルが必要になってきている。本研究では、空間結合を単純に表現できる回路モデルとして、従来の電圧と電流ではなく電荷と電流を変数として用い、単導体線を基本要素とする素子を定義することにより、新しい回路モデルとその基礎理論の構築を行った。

研究成果の概要（英文）：In order to design high frequency electric circuits, it is important to consider the electromagnetic space coupling. To describe such phenomena and to design circuits easily, we propose a novel circuit model. The existing circuit models use voltages and currents for describing phenomena in the circuit. However, because the voltages are the integral of electric fields, the voltages depend on the path of the integration. We adopt the charge instead of the voltage and construct a novel circuit theory based on single conductor lines using the charge and current.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：回路モデル、単導体線路、EMC、分布定数線路、電荷、電流

1. 研究開始当初の背景

(1) 電気回路の動作周波数の高速化と微細化・高密度化にともない、空間的な電磁結合を考慮せずには設計ができなくなってきている。しかし従来の回路モデルは、このような電磁結合を考慮するうえで必ずしも有効ではないため、高周波回路の設計には多くの試行錯誤が必要となっている。

(2) 代表的な回路モデルとして集中定数の電

気回路モデルではインダクタやキャパシタを用いて電磁結合を表現できるが、結合が多くなると素子数が膨大になり、モデル化が困難になるとともに、解析により計算された現象のメカニズムも不明確になる。

また、この回路モデルは電圧と電流を変数としているが、電圧は電界の積分という大域的な物理量であるため、積分経路によって値が異なり、電磁現象を表現する変数として必ず

しも適切とは言えない。この問題に対して節点電位をスカラーポテンシャルにとって経路依存性をなくす方法も提案されているが、結果の解釈には注意を要する。

(3) 一方で高周波伝送線をモデル化した分布定数線路は、無限長の伝送線路に基づいたモデルであるため、1次元伝送線路のモデル化には極めて有効であるが、構造が3次元的になると、モデル化が困難になり、一般的な複雑な構造の電気回路のモデル化には十分でない。

(4) このように、現在のところ空間的に電磁結合した導体系に対して、あまり適切なモデルが存在しないために、設計現場では必要に応じて基礎方程式である Maxwell 方程式に立ち戻って、FDTD法や有限要素法などの電磁界解析が行われる。これは任意の形状を扱えるという一方で、膨大な計算になり、シミュレーションに時間がかかるとともに、設計に利用するにはメカニズムの把握が難しい。

(5) このような中で、電磁的な空間結合を考慮でき、メカニズムの把握が容易な回路モデルというものができるれば、現在の電気回路の設計に対して極めて有効なアプローチを提供することになると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 上記背景のもと、空間的な電磁結合が効率的に表現可能で、電磁現象のメカニズムが容易に把握できる回路モデルを定義し、その基礎理論を構築することをこの研究の目的とした。

(2) このようなモデルのためには、大域的な変数である電圧は使用せず、Maxwell 方程式において波源となる電荷密度と電流密度を導体中で積分した電荷と電流が変数として適切であると考えられた。したがって、電荷と電流を変数とした回路モデルの構築が目的とした。

(3) また、回路設計において電磁現象の把握が重要となる応用としては、近傍電磁界とともに放射電磁界を扱う EMC 解析があげられる。そこで、EMC 解析が可能なモデルを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 基本的な素子として単導体線路を考える。これを考えることにより、従来の分布定数線路のような明示的な帰路線を固定する制約を解消できる。また、単導体線路の場合は電圧をどこに定義するかが難しいが、電荷と電流を変数に採用することにより、大域的な変数である電圧を使うことなく局所的な変数だけ

で状態の記述が可能になる。

(2) まずは無限長の単導体素子における基本的なモードを考察し、そのモードが作る電界を解析的に算出する。この電界に対する境界条件を考えることによって、提案モデルの回路方程式を構成する。

(3) 過渡現象のメカニズムも容易に把握できるようにするために、周波数領域だけでなく時間領域における逐次解析アルゴリズムを可能にする。

(4) 簡易的な計算ができるように、手計算によって現象が把握できるようなモデルを考える。また、分布定数線路の理論と対応をとることにより、モデルの理解が容易にできるようにする。

(5) 提案モデルの妥当性を評価するために FDTD法による結果との比較を行う。

4. 研究成果

(1) x 軸上に無限長完全単導体がある状態を考え、そこに線電荷密度と電流が存在するとすると、ローレンツゲージにおいて、以下のような線電荷密度と電流を波源とする電界の波動方程式が得られる。

$$\square^2 E_x = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial \lambda_0}{\partial x} - \mu_0 \frac{\partial I_0}{\partial t}$$

この方程式の右辺が 0 の場合は、波源がないので x 軸方向の電界が存在せず、導体半径によらず導体表面における接線方向の境界条件を満足することになる。一方電荷保存則から、

$$\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial \lambda_0}{\partial x} = -\mu_0 \frac{\partial I_0}{\partial t}$$

が満たされる。これら 2 式を連立させることにより、次のような線電荷密度と電流に関する波動方程式がそれおれ得られる。

$$\begin{aligned} \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \lambda_0}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \lambda_0}{\partial x^2} &= 0 \\ \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 I_0}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 I_0}{\partial x^2} &= 0 \end{aligned}$$

これらの式は、単導体線路において光速で伝搬するモードが存在することを示している。本研究ではこのモードに注目することにより、単導体素子における現象を考え、回路モデルを構成することを試みた。

つまり、電荷と電流が $I = c \lambda$ の関係を満た

してともに進行するモードを基本にして、波長に縛られない大きさの素子における伝搬を考慮することができる。この点が、通常のモーメント法などの微小要素における構成と提案モデルの異なる点である。

(2) 実際の回路の素子として考える場合は、有限長の導体に対して考えておく必要がある。進行する波源が発生する電界を端点がある場合について考える。原点から x 軸の正方向に伸びる半無限長単導体に対して原点から線電荷密度と電流を注入し、それらが光速で伝搬する場合に発生する電界は、原点からの作用球が到達した後は一定の値になり、以下のように解析的に与えられる。

$$E_{//}^f(x, r) = -\frac{I^f}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{r^2 + x^2}}$$

$$E_{\perp}^f(x, r) = \frac{I^f}{4\pi r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \left\{ 1 + \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} \right\}$$

第一式が x 軸方向、第二式が半径方向である。提案モデルではこの端点のつくる電界に注目することにより、端点だけに注目した回路モデルを考える。つまり、有限長単導体の場合も、端点に注目した電界の表現が得られるため、各素子の端点に基づいて算出される電界をすべて考慮することにより、空間の電界が算出され、これらが境界条件を満足するという条件から回路方程式を構成する。

ここで、導体の断面形状が円形でない場合も等価的な半径を考えることによってモデル化できる。つまり、この等価半径の物理的な意味は、2つの単導体素子について、導体間距離と等価半径の比が、導体表面にできた電界に対して誘導される電流の量を決めることができる。

(3) 各有限長単導体の中に前進波と後進波を考え、それらが満たす境界条件と電荷保存の式から次のような遅延方程式が得られる。

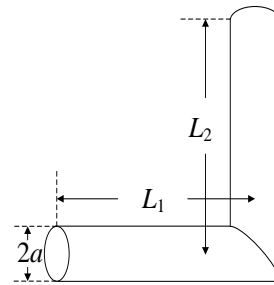
$$I_m^f(t) = I_{m-1}^f\left(t - \frac{l}{c}\right) + 2\pi \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} (\sum_{m \neq n} E_{mn} + E_{m,in})$$

$$I_m^b(t) = I_{m+1}^b\left(t - \frac{l}{c}\right) + 2\pi \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} (\sum_{m \neq n} E_{mn} + E_{m,in})$$

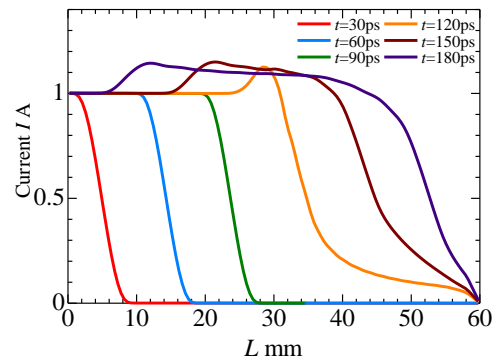
この式は光円錐上の過去の情報に基づいて次のステップを反復的に計算できる形になっているために、時間領域における解析が可能となっている。

(4) 例として次の図に示すような長さ 60 ミリメートルの屈曲導体に対して端点から電流

を注入した場合の電流伝搬の様子を解析した。

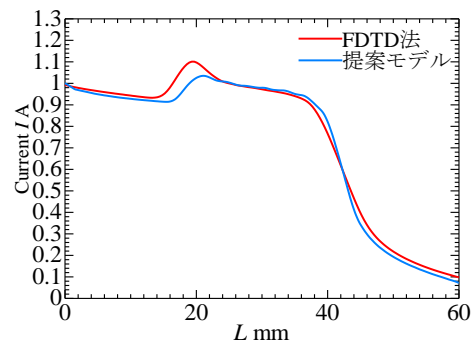


その結果得られた各時刻における波形を次に示す。



この図から屈曲点付近で反射と透過のような現象がみられることがわかる。屈曲部に到達したときに波頭が前方に伸びるのは、電源から空間を伝搬した電界による誘導を示している。

これらの現象を理想化した提案モデルで理解すると、屈曲後の部分に誘導された電流が前後に分かれて伝搬することにより、このような現象が現れていることが説明可能になる。また、妥当性を検証するために FDTD 法との比較を行った結果を次の図に示す。

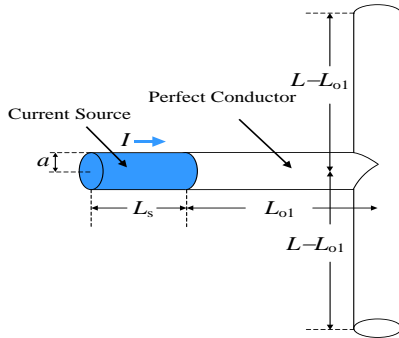


このように、FDTD法と比較的よく一致しており、提案手法の妥当性が確認できた。

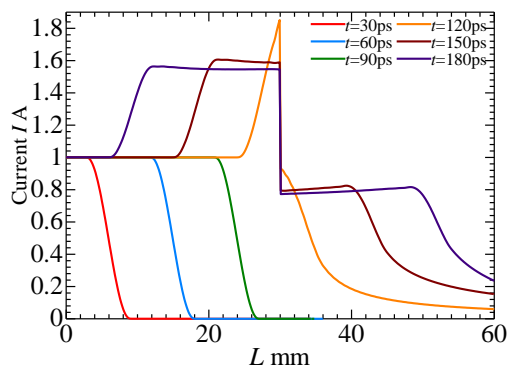
(5) 提案手法の単導体線路は、特性インピーダ

ンスに相当する電流と電荷の比が光速になるために、分岐のない場合には、従来の分布定数線路理論における反射や透過現象は起きない。しかし、分岐が発生するとそのような現象も観察できる。

例として次のような分岐のある線路について考える。

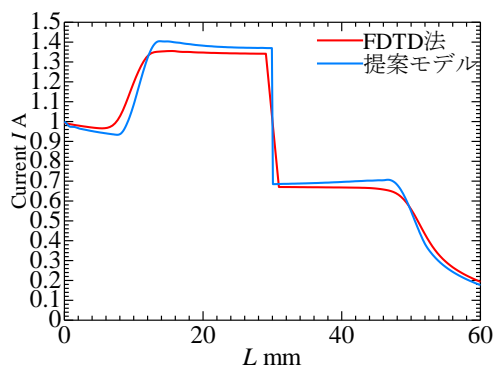


このような線路に左から電流を注入した場合に得られる波形を次に示す。



この図から反射と透過のような現象がみられることがわかるが、この現象は単導体の場合にも反射係数、透過係数が定義でき、そのメカニズムを説明することができる。

この場合も結果の妥当性を検証するために、FDTD法との比較を行った結果を次に示す。



このように、分岐のある場合も提案手法とF

DTD法は、比較的良い一致を確認できた。

(6) 提案手法は明示的な帰路線を持たない場合にも回路モデルが自然に導出でき、そこからの放射電磁界がモデル化できることから、EMC解析だけでなく、メタマテリアルのモデル化などにも有効であることが考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

① T. Sokooshi, T. Hisakado, U. Paoletti, O. Wada, Analysis of Current Propagation on Single Conductor Line Using Point Charge and Propagation Currents, Proc. PIERS Moscow 2009, pp.1562-1566, 2009

② T. Hisakado, N. Takayama, O. Wada, Reflection and Transmission Analysis on Single Conductor Line, Proc. EMC' 09/Kyoto, pp. 481-484, 2009.

③ 底押辰弥, 久門尚史, 和田修己, " 伝搬線電流及び静止点電荷を用いた単導体の解析," 信学技報, Vol.109, CAS2009-77, pp. 77-82, June, 2009.

④ 和田善信, 久門尚史, 和田修己, " 伝搬線電流を用いた単導体線路の時間領域における解析," 信学技報, Vol. 110, EMCJ2010-29, pp. 55-60, July, 2010.

⑤ 生駒圭司, 久門尚史, 和田修己, 単導体素子を用いた三次元線構造の時間領域における電流伝搬解析、輻射研究会資料 RS11-03, 2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久門 尚史 (Hisakado Takashi)
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：80301240

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：