



研究項目 A01：計画研究ウ

「構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光及び伝播制御」

研究分担者 久門 尚史（京都大学）

【単導体素子による回路モデルを用いた波動伝搬解析】

私は京都大学工学部電気電子工学科に入学した後、学部・修士・博士後期課程において電気回路網がご専門の奥村浩士先生から研究指導を受け、電力システムの基本モデルである三相回路における非線形振動の研究を行いました。この回路は対称性をもつ結合共振器と見ることもでき、非線形性による分数調波振動・高調波振動・カオスの振動に加え、可積分系のクノイダル波や局在振動(Intrinsic Localized Mode)に対応する振動も発生し、種々の分岐現象について研究を行ないました。この経験により電気回路のような位相的構造の中で発生する振動現象に対する多様な見方が身に付いたような気がします。

その後引き続き工学研究科電気工学専攻において、非線形現象に関する研究として、グレブナ基底を用いて分岐図を代数的に分解する話題や、電圧や電流などの状態変数を複素化することにより系統的に振動を探索するホモトピー法、不動点を不動ループに拡張した概周期振動の解析などに取り組みました。また、回路設計に関して、パストランジスタを用いた可逆演算回路や再構成可能なチップ (FPGA) を用いたグレイコード演算、またそのコードの位相的性質を利用した上位桁からの精度保証演算などの研究も行ないました。最近では、集積回路やプリント基板などの高周波回路（ギガヘルツ領域）における電磁現象のモデル化として、アンテナのような帰路線をもたない単導体線路を素子とした回路モデルの構築や、通常は時不変回路を考えるとところをスイッチ素子によりトポロジーを時変化して電力フローを設計するような研究も行なっています。

<研究紹介>

上に述べましたように集積回路やプリント基板などの複雑な 3 次元構造の中での電磁現象を把握するために、単導体線路素子を用いた電磁現象の表現を提案していますが、この考え方をメタマテリアルのような構造にも適用することを考えています。従来、回路における伝送線路構造はペアになった 2 本の導体（差動モード）を基本に考える場合が多いのですが、実際の集積回路やプリント基板では配線は複雑な 3 次元構造をしており、それらが互いに電磁的に結合しています。このような現象を表現するために、ペアとなった 2 本のうち 1 本のみを取り出して単導体線路素子とし、その組み合わせで電磁現象を表現することを考えたのが単導体線路モデルです。帰路線を持たないという意味ではアンテナのようなものを素子として考えているとも言えます。

このような素子を導入すると、回路に対して新しい見方が必要になります。例えば通常の回路は変数として電圧と電流を用いますが、単導体素子では電圧を定義しにくい

で電荷と電流を用います。そのため、キルヒホフの電圧則の代わりに導体表面における境界条件を使います。うまく境界条件を設定してやると、単導体線路の分岐点における反射係数や透過係数を考えることができます。また、帰路線とのペアで考えないために電磁界が広範囲に影響を与えますが、電荷と電流がペアになって伝播するモードに分解して考えると、生成される電磁界は線路の端からの影響のみを考慮すればよいことが言えるとともに、エネルギーの流れが明確になります。このような単導体素子モデルを使うと導体の線状構造における電磁現象を明確化でき、種々の電磁現象の設計が可能になります。

さらに、波長に比べて十分小さな構造の場合は、単導体線路を電荷と電流を変数とする集中定数の素子の回路（常微分方程式系）におくことも可能になります。キルヒホフの電圧則に対応するものは、電荷のつくるスカラポテンシャルが電流のつくる電位差とバランスする形になります。そのような回路モデルとして、例えば電荷の存在する導体球が電流の存在する導体線で結ばれた構造なども考えられます（図 1、2 参照）。また、このようなモデルではスカラポテンシャルに対応する電圧を用いた通常の電圧と電流の回路モデルへの変換も可能になります。最近ではスイッチ素子を導入して構造を時変化することにより、時不変な構造では難しい機能的な素子の設計についても取り組んでいます。

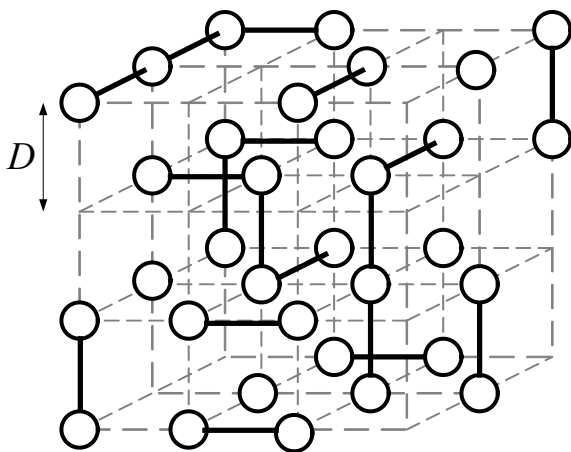


図 1 : 線で結ばれた導体球の構造
布

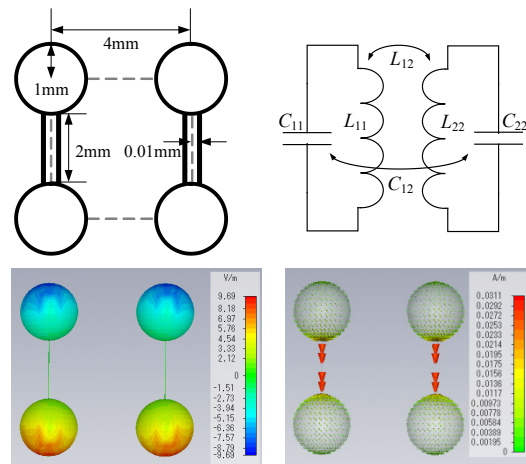


図 2 : 簡単な構造の等価回路と電荷・電流分