

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 8日現在

機関番号：15301  
 研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22360115  
 研究課題名（和文） 複合システムにおけるコモンモードノイズ解析のための等価モデルに関する研究  
 研究課題名（英文） Equivalent Model for Estimating Common-mode Noise in Complicated Systems  
 研究代表者  
 古賀 隆治 (KOGA LIUJI R.)  
 岡山大学・大学院自然科学研究科・教授  
 研究者番号：20027147

## 研究成果の概要（和文）：

複合システムにおいて新たに発現する問題、特に、コモンモードノイズに関する問題の原因解析や対策に利用可能な等価モデルを構築した。モデル構築では線路の平衡度に着目し、平衡度の変わる位置で生じるモード変換が制御電源で表現できることを明らかにした。さらに、平衡度差とモードの特性インピーダンスを用いてモード変換パワーを記述した。この成果は、特性インピーダンスに加えて平衡度が設計パラメータとして有効であることを示唆しており、多線条線路理論を拡張した、現代の電機・電子システムを取り扱うための新たな理論体系構築に寄与する。

## 研究成果の概要（英文）：

As for the issues of common-mode noise in complicated systems, we developed an equivalent model to use for analyzing the issues and consider countermeasures effectively. The model was developed focusing on the imbalance factor of the transmission line: mode conversion, which occurs at the interface where the imbalance factors change, is expressed by controlled sources; the power of mode conversion is expressed using modal characteristic impedance and the difference of the imbalance factors. This suggests that the imbalance factor be available as a design parameter as well as characteristic impedance. The model, which is an expansion of the multi-conductor transmission-line theory, will contribute to develop a new theoretical scheme for treating the present electrical and electronic systems.

## 交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2010年度 | 7,700,000  | 2,310,000 | 10,010,000 |
| 2011年度 | 3,200,000  | 960,000   | 4,160,000  |
| 2012年度 | 3,200,000  | 960,000   | 4,160,000  |
| 総計     | 14,100,000 | 4,230,000 | 18,330,000 |

研究分野：環境電磁工学

科研費の分科：電気電子工学 細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：コモンモードノイズ，モード等価回路，モード変換，平衡度，EMI，電流配分率，等価モデル，共振抑制

## 1. 研究開始当初の背景

情報機器から電力機器に至るまでデジタル電子装置となり、これらの装置に起因する電磁障害 (Electromagnetic Interference : EMI) が問題となっている。これらが通信線や電源線などでつながれて形成される複合システムでは、個々のシステム単独では見られなかった問題が新たに発現するため、より問題は複雑となる。

この電磁障害の原因である不要電磁放射の取り扱いでは、従来モデル、すなわち、計算機の能力向上に伴い一般的となった3次元電磁界シミュレーションの計算モデル、システムの開発に向けた電気回路モデルとも実用的ではない。なぜなら、前者は精緻かつ可視化により現象の確認には役立つが現象の解明には不適當で、また、複合システムのように規模が大きくなると必要な情報を得るのに膨大な時間を要するためである。一方、後者では精度を保証する条件を現実の電子装置が満足していない。

研究開始時までに『平衡度不整合モデル』を提案し、伝送線路のコモンモード発生において定量的にコモンモード励振源 (電圧源モデル) を算出する手法を確立するなど、物理に基づく等価モデルの開発や、これを用いたノイズ低減手法を検討してきた。このモデルをベースとして不要電磁放射の取り扱いに有効な実用的なモデルの開発、さらに、複合システムの設計に有効な理論構築が次の課題であった。

## 2. 研究の目的

コモンモードノイズを取り扱うための等価モデルを構築し、電子機器開発の初期段階で複数の回路や線路を接続した複合システムのEMI低減設計を効率的に実施できる環境を実現することが必要である。回路内で発生するノイズと異なり、コモンモードノイズは筐体

や大地などの他の導体やグラウンドが関係したノイズであり、複合システムにおける取り扱いは未確立で、原因解析は困難を極める。そこで、原因解析や対策を効率よく行うため、物理を加味した等価モデルを開発し、電力変換システムや高速デジタルシステムなど現代の電機・電子システムに合った新たな理論体系の構築を行うことが目的である。

## 3. 研究の方法

現象の解明や対策には回路論的アプローチが有効であるため、本研究では多線条線路理論をベースとする。すなわち、系に生じる電磁界はTEMモードで近似できるとする。この前提では電磁界は複数の独立モードに分割して取り扱うことになる。この手法の利点は、3次元電磁界シミュレーションに比べて計算コストが格段に小さい回路シミュレーションを利用できることにある。

複合システムの検討対象は、異なる平衡度の線路が接続された通信系と筐体に金属ネジで接続された回路基板とする。物理に基づいたモデルの構築を行い、この妥当性の評価は、実測結果や3次元電磁界シミュレーションの結果と比較することにより行った。

## 4. 研究成果

研究の主な成果として、モード変換に着目し、多線条線路理論の拡張を目指したモデル化について説明する。

平衡度の異なる線路の接続では、図1に示すように、その接続位置においてのみモード変換が生じ、一様な線路部分では独立したモー

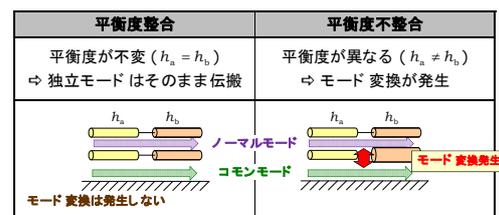


図1 線路の平衡度整合/平衡度不整合接続

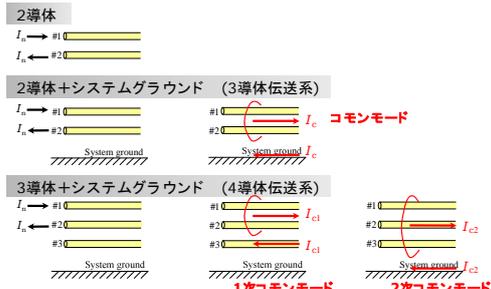
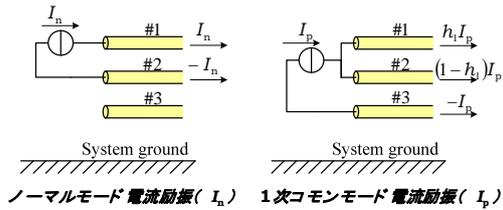
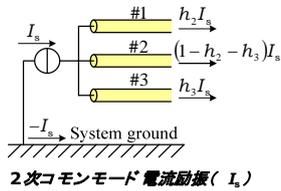


図2 多線路伝送とコモンモード



ノーマルモード 電流励振 ( $I_n$ ) 1次コモンモード 電流励振 ( $I_p$ )



2次コモンモード 電流励振 ( $I_s$ )

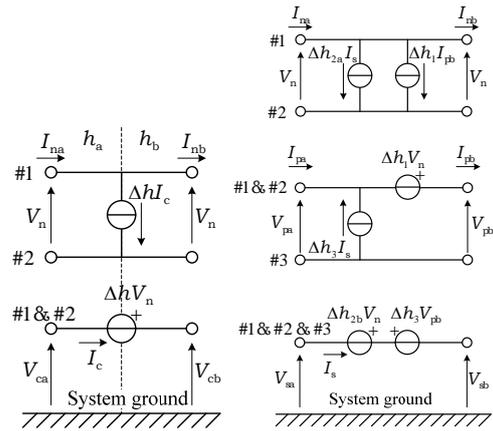
図3 4導体伝送系の直交モード

ドで伝搬するモデルを考えた。図2に示すように、2本線路に信号伝送する場合であっても近接導体が存在すると、コモンモードは複数存在する。いわゆる伝送線路理論は2導体の場合にのみ適用できるモデルであり、3導体、4導体伝送系には適用することはできない。本研究ではこれらの伝送系にも適用できる理論を新たに構築することに成功した。

本研究では、線路の平衡度には電流配分率をパラメータとして用いた。例えば、4導体伝送系は図3で示すノーマルモード、1次コモンモード、2次コモンモードという3つの直交モードに分割できるが、電流配分率  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  の3つがそのパラメータである。ちなみに、3導体伝送系を特徴づける電流配分率は  $h$  の1つのパラメータのみである。

本検討では、以下の3点が成果として挙げられる。

(1) まず、モード変換が制御電源を用いて回



(a) 3導体伝送系 (b) 4導体伝送系

図4 制御電源を用いたモード変換の等価表現

路で表現できることを明らかにした。図4は制御電源を用いたモード変換の等価表現を示しており、(a)が3導体伝送系の場合(上から順にノーマルモード、コモンモード等価回路)、(b)が4導体伝送系の場合(上から順にノーマルモード、1次コモンモード、2次コモンモード等価回路)である。

提案モデルの妥当性の評価は、実測結果や3次元電磁界シミュレーションの結果と比較し、よく一致することを確認した。一例として、図5のシールド付きツイストペア (Shielded Twisted Pair: STP) ケーブル評価系におけるピグテールを用いた接地問題を一例として取り上げる。この評価系は4導体伝送系である。線路断面内の配置に基づく2次元電磁界シミュレーションにより得られた電流配分率やモードの特性インピーダンスなどの諸パラメータを用いて表1に示すu1, b1, b2, b4の4通りのピグテール接地条件で回路シミュレーションを行ったところ、得られたモード変換解析結果はu1, b1, b2, b4の順に小さくなり、これは実測結果と一致した。表1で示されるように電流配分率の差の大小とモード変換量はよい相関があり、提案手法の観点から複合システムの設計を行うことは理にかなっていることを確認した。

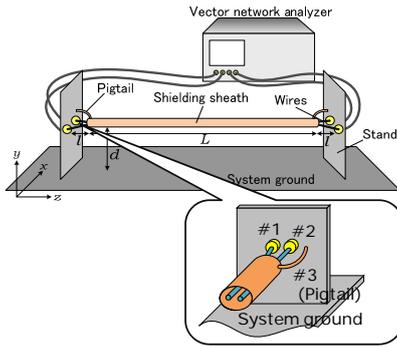


図5 ピグテールを用いた接地に注目したSTPケーブルの評価系

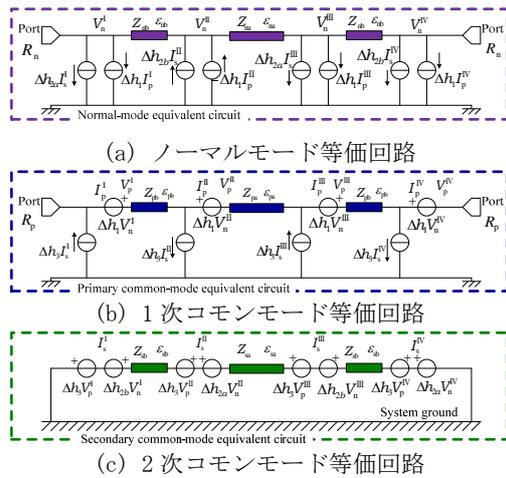


図6 図5の評価系のモード等価回路

表1 ピグテールを用いた接地条件

|       | 不平衡 (unbalance) |      | 平衡 (balance) |      | STP ケーブル |
|-------|-----------------|------|--------------|------|----------|
|       | u1接地            | b1接地 | b2接地         | b4接地 |          |
| $h_1$ | 0.37            | 0.5  | 0.5          | 0.5  | 0.5      |
| $h_2$ | 0.37            | 0.34 | 0.20         | 0.10 | 0        |
| $h_3$ | 0.36            | 0.33 | 0.60         | 0.79 | 1        |

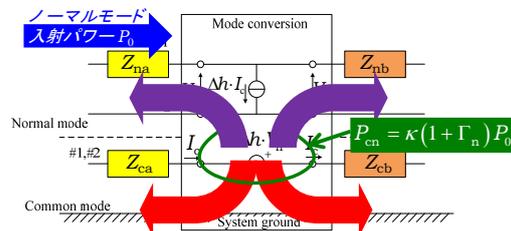


図7 ノーマルモードからコモンモードへのモード変換パワー

(2) 次に、このモデルに基づきモード変換パワーを導出した。図7は3導体伝送系におけるノーマルモードからコモンモードへのモード変換パワー $P_{cn}$ を示している。ここで、 $\kappa$ は、

$$\kappa = \frac{2x}{1+x}$$

であり、さらに、

$$x = (\Delta h)^2 \frac{Z_{na} // Z_{nb}}{Z_{ca} + Z_{cb}}$$

である。これより、モード変換の発生の有無は電流配分率の差 $\Delta h$ の有無で決まるが、モード変換の大きさはこれに加えてモードの特性インピーダンス $Z_{na}$ 、 $Z_{nb}$ 、 $Z_{ca}$ 、 $Z_{cb}$ が影響することを明らかにした。現時点においてコモンモード特性インピーダンスを考慮に入れた設計は行われておらず、今後の設計に影響を与える可能性がある。

(3) 最後に、このモデルの適用範囲を調べた。元となる多線路線路理論では一様媒質中伝搬が前提であるが、現実には、線路の被膜やマイクロストリップ線路の層間など、部分的に誘電体が存在する。非一様媒質中では必ずしも独立モードに分解できるとは限らないため提案法の実使用には、適用範囲が明確であることが望ましい。

3次元電磁界シミュレーションを用いた検討により、非一様媒質中のノーマルモードとコモンモードの実効比誘電率をそれぞれ $\epsilon_n$ 、 $\epsilon_c$ とすると、距離 $l$ の伝搬における適用範囲を示す周波数 $f$ に対する判定式

$$f < \frac{c}{8l(\sqrt{\epsilon_n} - \sqrt{\epsilon_c})}$$

を得た。ここで、 $c$ は光速である。

本研究で得られた上記の成果は、斬新であるが故に理解するのが容易でない、実際の設計にどのように役立てればよいかとの意見や質問が多い。設計の現場では即効性のある成果が望まれるためである。そこで、研究成果を実際の設計に反映させるため、研究成果について、エレクトロニクス実装学会の回路・実装設計技術委員会システムJisso-CAD/CAE

研究会において、多くの現場の技術者/設計者との意見交換を開始した。ここでの議論を起点に、理論に対する理解者を増やし、実際の設計に利用できる理論になるよう改良を加えることを考えている。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計1件)

①瀬島孝太, 豊田啓孝, 五百旗頭健吾, 古賀隆治, 渡辺哲史, モード等価回路を用いた非一様媒質中伝搬の回路シミュレーションとその適用範囲, 電子情報通信学会論文誌B, 査読有, J96-B, 2013, pp. 389-397.

〔学会発表〕 (計13件)

①K. Sejima, Y. Toyota, K. Iokibe, L. R. Koga, T. Watanabe, Experimental Model Validation of Mode-conversion Sources Introduced to Modal Equivalent Circuit, 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2012年8月8日, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

②Y. Toyota, K. Iokibe, L. R. Koga, Modal Equivalent Circuit with Mode-Conversion Sources for Investigating Cable Interconnection with Different Imbalance

Factors, 2012 Korea-Japan EMT/EMC/BE Joint Conference, 2012年5月19日, Seoul, Korea.

③豊田啓孝, 瀬島孝太, 五百旗頭健吾, 古賀隆治, 渡辺哲史, モード分解法に基づくモード等価回路を用いた信号伝送系の回路解析, 第26回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2012年3月8日, 東京都文京区.

④豊田啓孝, 渡辺哲史, 五百旗頭健吾, 古賀隆治, ケーブル接続された送受信機器のモード等価回路と同定, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, 2010年11月19日, 東京都港区.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

古賀 隆治 (KOGA RYUJI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 20027147

##### (2) 研究分担者

豊田 啓孝 (TOYOTA YOSHITAKA)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 20311798

##### (3) 研究分担者

五百旗頭 健吾 (IOKIBE KENGO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号: 10420499