Title	<大学の研究・動向> 電気電子回路システムの基礎研究
Author(s)	奥村, 浩士; 久門, 尚史; 市川, 哲
Citation	Cue : 京都大学電気関係教室技術情報誌 (2002), 10: 2-6
Issue Date	2002-12
URL	http://dx.doi.org/10.14989/57849
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

大学の研究・動向

電気電子回路システムの基礎研究

工学研究科　電気工学専攻　電気システム論講座　電気回路網学分野
教授　奥　村　浩　士
kohshi@kuee.kyoto-u.ac.jp
助教授　久　門　尚　史
hisakado@kuee.kyoto-u.ac.jp
助手　市　川　　　哲
ichikawa@kuee.kyoto-u.ac.jp

１．はじめに

電気回路網学は電気工学、電子工学の基礎分野に属している。近年の超集積回路の発展、コンピュータの高速化とメモリーの飛躍的増大、電力や通信システムの高度化と大規模化と共に、電気回路網学は理論面、実際面で日進月歩の状態にある。多様化する電気電子回路システムの中で、当研究室では非線形電気電子回路、分布定数回路および分布集中混在型回路などの回路システムにおける実際問題の解決を目的として、生起する現象の解明、有用な解析法とそのアルゴリズムの基礎的研究をソフト面だけでなく、ハード面においても地道に行っている。ここでは、最近の当研究室の主な研究の課題とその成果について、その概要を簡単に説明する。

２．基礎理論とその応用に関する研究

２．１　インタバルアナリシスの応用［１，２］

非線形回路の解析では振動モードの個数を求めることが重要であるが、近年インターバルアナリシスの理論の発展により振動の振幅と位相を定める連立非線形方程式のすべての解を求めることが可能になってきたことにより、この理論を応用した非線形回路のモード解析の研究を行っている。とくに、当研究室が長年行ってきている非線形三相回路の数学モデルが非線形特性を指数関数で近似すると、ソリトンで有名な戸田格子の方程式で表現され、厳密解すなわちcnoidal波が存在することを明らかにした。

２．２　グレブナ基底の応用［３，４］

数式処理ソフトの飛躍的な発展によりグレブナ基底の理論が使えるようになってきた。グレブナ基底の理解にはイデアルの概念を理解しなければならない。ある有限個の多変数多項式に多項式を乗じて和をとった多項式の集合をイデアルという。この場合、有限個の多項式を基底といい、この基底のなかで特に数式処理ソフトで求められる標準基底がグレブナ基底である。この基底の理論は非線形回路網の分類やトランスリニア回路の入出力特性の算出に応用できることを明らかにしてきた。ここでは、新たな応用として提案した非線形回路系の大域分岐現象のモード分解について説明する。

次のような結合係数Dでカップリングされた結合ロジスティック写像を考える。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} cx_1(1-x_1) & +D(x_2-x_1) \\ cx_2(1-x_2) & +D(x_1-x_2) \end{bmatrix}.$$

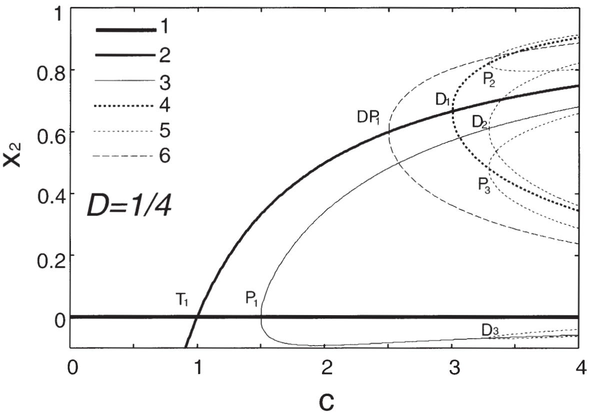

図１　２回反復不動点の分岐図

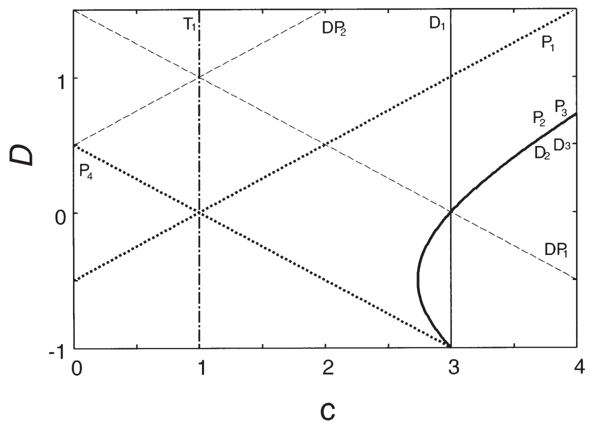

図２　分岐集合

この写像はx_1とx_2を交換しても写像の形がかわらないという対称性をもつ。この写像を２回反復したときの不動点を考える。不動点の集合は代数方程式で表現され、代数多様体となる。この代数多様体を不動点の対称性や周期に基づいて分解することは、代数多様体に対応するイデアルのイデアル商を用いて表現できる。上の写像の２回反復不動点を表す連立代数方程式のグレブナ基底を求め、イデアル商を用いて分解すると、次のように６個に分解されたイデアル基底が得られる；$\langle x_2\rangle$, $\langle cx_2 - c + 1\rangle$, $\langle c^2x_2^2 + (-c^2 + (2D+1)c)\ x_2 - Dc + 2D^2 + D\rangle$, $\langle c^2x_2^2 + (-c^2 - c)x_2 + c + 1\rangle$, $\langle c^8x_2^8 + \cdot\cdot\cdot\rangle$, $\langle c^2x_2^2 + (-c^2 + (2D-1)c)\ x_2 + (-D+1)c + 2D^2 - 3D + 1\rangle$。これらのイデアル基底に対応する代数多様体はパラメータ空間での大域的な分岐図を表している。$D = 1/4$のときの分岐図を図１に示す。太線、細線はそれぞれ$x_1 = x_2$と$x_1 \neq x_2$の対称、非対称解に対応し、実線、点線はそれぞれ１周期点、２周期点に対応する。これはグレブナ基底を用いたイデアル分解により、大域的な分岐図がモード分解できることを示している。

分岐図において異なるモードに対応する代数多様体の交点を分岐点と呼ぶ。分岐点の集合である分岐集合はイデアル和で表され、グレブナ基底を用いて計算できる。図１に現れる各分岐点の分岐集合は、次のようなイデアルで表現される。P_1：$\langle c - 2D + 1\rangle$, P_2, P_3, D_2, D_3：$\langle c^2 - 2c - 4D^2 - 4D - 3\rangle$, D_1：$\langle c - 3\rangle$, T_1：$\langle c - 1\rangle$, DP_1：$\langle c + 2D - 1\rangle$, P_4：$\langle c + 2D - 3\rangle$, DP_2：$\langle c - 2D + 1\rangle$．図２は実際に分岐集合を描いたものである。従来分岐集合は数値計算によって求められてきたが、上に述べたようにグレブナ基底を用いることにより、分岐集合を代数的により明確に表現することが可能になった。

２．３　数値逆ラプラス変換［５］

逆ラプラス変換は複素関数論の応用として線形回路やシステムの理論でよく用いられているのは周知の通りであるが、実際に数値計算でこれを求めて満足できる手法はなく、この課題については長年研究してきた。時間区間［0,T］の逆変換のデータが欲しいにもかかわらず、［0,T/2］の時間区間しか得られず、残りの半分の区間に対しては変換値の誤差が極めて大きいため、利用可能なソフトはほとんどなかった。最近、当研究室ではこの困難を克服した実用に耐える手法を開発し、またこのハード化も完成したので、関西TLOを通じて特許出願しているところである。

図３，４はそれぞれ従来法、提案した手法によって変換された矩形波を示している。従来法では後半で振幅が増大するとともに、各不連続点でギブスの現象が大きく現れている。一方提案手法で変換した場合、時間区間全体にわたって正しい値が得られている。

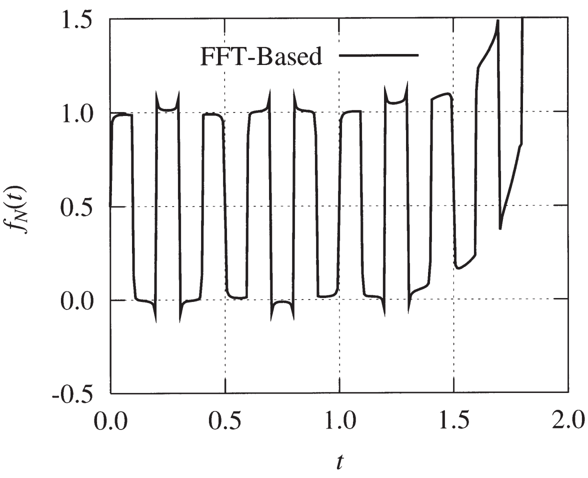

図３　従来法によって変換された矩形波

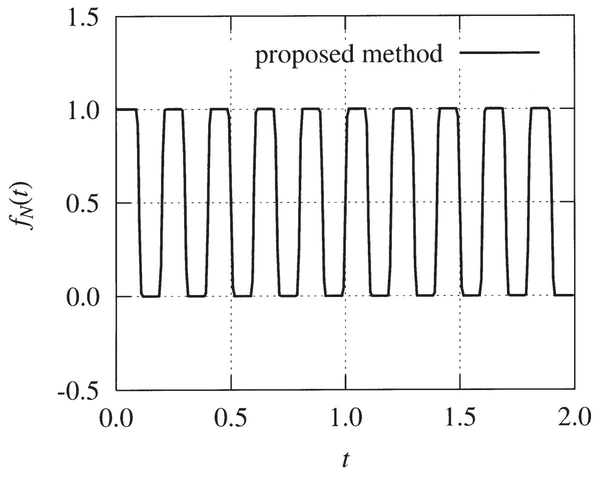

図４　提案手法によって変換された矩形波

３．アルゴリズムのハード化に関する研究

CMOS ICが登場し大規模LSIの時代となった今日では、ハードウエア記述言語によりLSI設計ができるようになってきている。このような時代の趨勢のなかで、これまで行ってきた計算アルゴリズムの研究成果をハードウエアで実現しようというのがこの研究課題である。

３．１　Krawczyk-Moore-Jonesのアルゴリズムのハード化［６］

FPGA（Field Programmable Gate Array）は再構成可能（Reconfigurable）な集積回路であり、チップ上に瞬時に論理回路を構成できる。このチップを用いることにより、これまでソフトウェアとしてCPUに計算させていた様々なアルゴリズムを回路として実現し、高速に実行することが可能になる。当研究室では、このチップをAT互換機のPCIバス上に実装することによって、リアルタイムシステムを構築している。

連立非線形方程式のすべての実数解を求める方法として、区間演算を用いたKrawczykのアルゴリズムが知られている。しかしこの方法は膨大な数の区間演算を必要とする。そこで当研究室では大規模並列アルゴリズムを提案し、さらにこのアルゴリズムをFPGAを用いてハード化した。図５はアルゴリズムとハードウエアの構成、図６はFPGA上に円と放物線の交点をKrawczykのアルゴリズムを回路として実装する概念図である。

３．２　ウエーブレット変換のハード化による伝送線路の故障点標定［７］

当研究室ではウェーブレット変換と自己相関関数を用いることにより、これまで30～50ミリ秒必要としていた電力ネットワークの故障点検出が、１ミリ秒でできる方法を提案した。そこで、このアルゴリズムを実際にハード化し、電力ネットワークの故障点を検出するシステムの試作機を作成した。このシステムは１個のウェーブレット変換プロセッサと２個の自己相関プロセッサをAT互換機のPCIバス上に実装することにより実時間処理を実現している。

４．分布定数回路システムの解析法の研究

この研究課題においては、電磁界理論に基づく雷サージ現象の研究の一環として、複雑な形状をもつ送電鉄塔の直撃雷による電位上昇を計算する方法を研究している。さらに、近年の大規模集積回路（VLSI）における高速伝搬信号波形の解析が重要な問題となっている現状を考え、ここでは、当研究

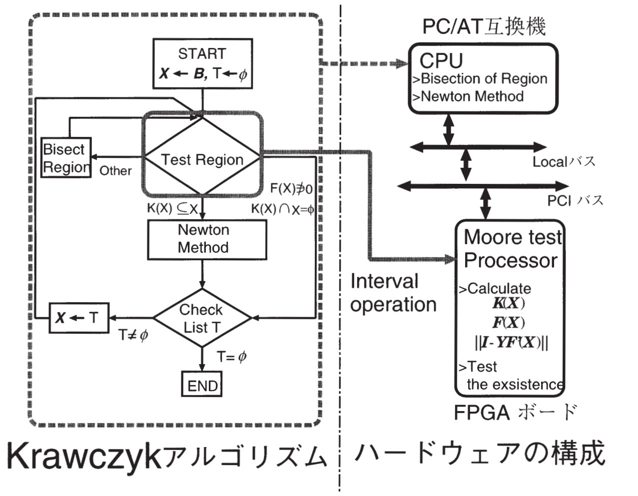

図５．アルゴリズムにおいてソフトで実行する部分とハードで実行する部分を分離。

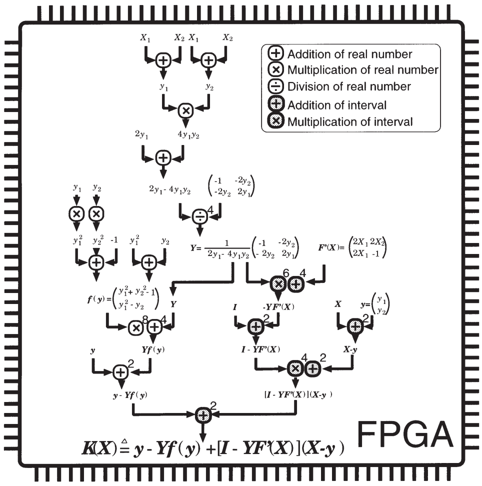

図６．FPGAの再構成可能性を利用し、対象とする方程式もFPGA上に回路として実装。

室で行っている分布集中定数系混在回路の研究を紹介する。

４．１　分布集中定数系混在回路の数値解析法に関する研究

大規模集積回路（VLSI）における高速伝搬信号波形を解析するにあたっては、以下のような問題点に対応できる汎用性のある解析方法が要請される。

・VLSI回路を線形及び非線形素子からなる集中定数回路部分と分布定数回路である多相伝送線路から構成される複雑、大規模な分布集中定数系混在回路として取り扱う。

・伝送線路においては周波数依存性を有する損失まで考慮するとともに、配置上の制約から生じる形状の不均一性までを考慮する。

・電源としては集中電源のみならず線路上の電圧、電流の初期分布や外部からの入射電磁界に起因する分布電源まで考慮する。

回路の過渡応答を求める場合、解析的な手法に基づいた解法には限界があり、上に述べたような複雑、大規模な回路に対しては数値的な解法に頼らざるを得ない。その場合の数値解法としては大きく分けて、時間領域のみでの解析法、周波数領域のみでの解析法、時間、周波数混成領域での解析法の3通りがある。それぞれの領域での数値的な解法はこれまでに種々提案されているが、上に示した全ての要求に対応するには難がある。そこで本研究室では分布集中定数系混在回路網に対する効率のよい高精度な汎用的数値解析法の構築を目的とした研究を行っている。

例として分布電源のある伝送線路の過渡応答の数値逆ラプラス変換による解析をとりあげる。分布定数回路で表される伝送線路部分については、時間領域での解析よりもラプラス変換による複素周波数領域での解析が有効であることがこれまでの研究で明らかになっている。集中定数回路部分が線形時不変素子のみで構成されていればラプラス変換によりs関数に数値逆ラプラス変換法を適用し時間領域での解を求める方法は汎用性の高い方法である。適用例として、図７に示す平行２導体伝送線路

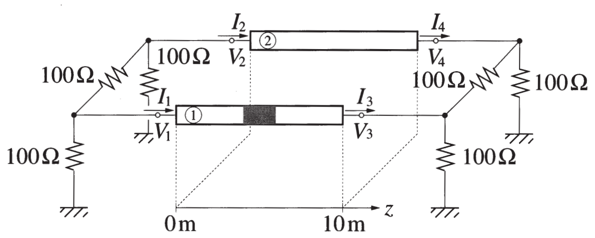

図7　2導体伝送線路

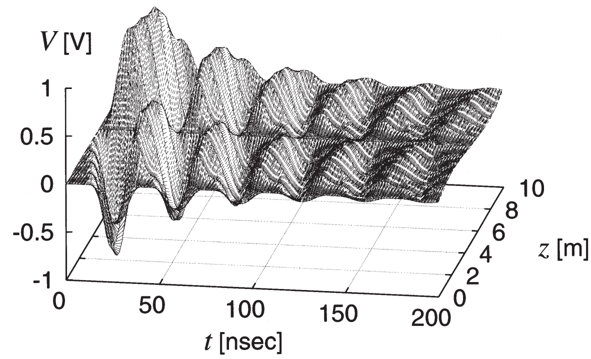

図8　導体1上の電圧分布

の導体1のハッチングで示した4m≦z≦6mの区間に単一のパルス状入射電界が印加されたとき、本研究室で開発した方法［9］、［10］により求めた線路上での電圧分布を図8に示す。

5　おわりに

当研究室が行っている最近の研究内容の一部についてその成果とともに紹介した。電気回路網学の分野では多くの基礎的な課題が存在する。時代の進歩を意識し、実際問題への対処を常に視野に入れながら、回路に付随する電磁現象までも含めて、今後もこの分野の基礎研究を着実に発展させていく。

参考文献

［1］奥村浩士：“最近の回路網解析の話題―区間演算の応用について”，システム/制御/情報，Vol.40, No.9, pp.393-400, 1996.

［2］T. Hisakado and K. Okumura: “An Approach to Parallelization of Krawczyk's Method,” Trans. ISCIE, Vol.15, No.9, pp.495-501, 2002.

［3］K. Okumura: “Classifying nonlinear circuits by Groebner base,” Proc. NDES, pp.276-270, 1998.

［4］T. Hisakado and K. Okumura: “Mode Decomposition of Global Bifurcation Diagram with Gröbner Bases,” Physics Letters A, Vol.292, pp.263-268, 2002.

［5］A. Yonemoto, T. Hisakado and K. Okumura: “An Improvement of Convergence of FFT-based Numerical Inversion of Laplace Transforms,” IEEE, Proc. ISCAS, Vol.V, pp.769-772, 2002.

［6］T. Hisakado, T. Nishimura and K. Okumura: “Hardware Implementation of Moore Test on FPGA,” IEEE, Proc. ISCAS, Vol.I, pp.653-656, 2002.

［7］久門尚史、田中宏司、奥村浩士: “ウェーブレット変換による伝送線路の故障点標定システム,”電学論B, Vol.121, No.9, pp.1139-1148, 2001.

［8］S. Ichikawa: “Investigation on the analysis of transmission line with frequency dependent lossy term”, Proc. ITC-CSCC, July 2002.

［9］S. Ichikawa and R. Tanaka: “Transient analysis of hybrid system composed of linear lumped elements and frequency dependent lossy transmission lines with distributed sources”, Proc. APCCAS, Oct. 2002.

［10］S. Ichikawa and R. Tanaka: “Scattering matrix method for transient analysis of hybrid system composed of linear/nonlinear lumped elements and frequency dependent lossy transmission lines with distributed sources”, Proc. NOLTA, Oct. 2002.