氏名	菅原　勉（すがわら　つとむ）
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成7年11月8日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和49年3月 山形大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了
学位論文題目	**非線形電子回路の定常応答解析とアナログ集積回路の設計に関する研究**
論文審査委員	東北大学教授　西関　隆夫　　東北大学教授　樋口　龍雄 東北大学教授　亀山　充隆

論文内容要旨

第1章　序　論

電子機器の内部には，増幅器，フィルター，A-D変換器，D-A変換器，標本化回路，変調器，復調期等の各種アナログ電子回路が用いられる。電子機器を高機能化，高性能化，小型化するためには，これらの電子回路の集積回路化が有効である。本論文では，このような電子回路をアナログ集積回路により実現するために，数値解析手法，回路設計の両面から課題の解決を図る。

変調器，復調器等の非線形アナログ信号処理回路については，周期的でない定常応答の効率的な数値解析手法について論じ，このような電子回路の数値解析における課題の解決を図る。

増幅器，能動フィルタ，標本化回路等の多くの電子回路は，線形信号処理を目的として用いられる場合が多いため，その入出力特性ができるだけ線形であることが求められる。そこで，非線形電子回路の入出力特性の線形化設計手法について論じ，次に，入出力特性の線形性が要求されるオーデイオ用の音量・音質制御ICおよび高分解能A-D変換器ICの具体的な設計と非線形性の解析を行い，このようなアナログ集積回路の実現を図る。

第2章　非線形電子回路の解析と設計の基礎

本章では，非線形電子回路の基礎となる理論，数値解析手法および集積回路の設計の背景について述べる。集中定数型の非線形電子回路は非線形微分方程式で表すことができる。まず，非線形微分式方程式の初期値問題および境界値問題の定理について述べ，この微分方程式の定常解を平衡点，周期解，概周期解，カオスに分類して定義し，数値解析の対象となる問題を明確にする。これらの基本的な理論に基づき，非線形電子回路の周期的定常応答の数値解析手法である，時間領域のシューティング法および周波数領域の調波平衡法の解析アルゴリズムを述べる。次に，集積回路の特徴，集積回路内のトランジスタの電気特性について述べ，これに基づきエミッタ結合対の基本特性を解析し，アナログ集積回路に適する電子回路設計の背景を明らかにする。

第3章　概周期定常応答の効率的な数値解析手法

変調器や復調器のように，互いに調波関係にない周波数成分を有する定常信号を加えて動作させる電子回路は，周期的でない定常応答を有するため，周期解の解析手法で解析することはできない。そこで，このような電子回路の概周期

定常応答を効率的に解析できる数値解析手法を提案する。

本手法では，非線形電子回路を代入理論に基づいて線形部分回路網と非線形部分回路網とに分割し，その分割点で決定方程式を導く。すなわち，分割点での解変数を$x(t)$とするとき，決定法定式は

$$L(x(t))+H(s(t))+f(x(t))=0$$

と表すことができる。ここで，Lは解変数$x(t)$を線形部分回路網の応答に変換する線形演算子，Hは独立電源$s(t)$を線形部分回路網の応答に変換する線形演算子，$f(x(t))$は非線形部分回路網の応答である。次に，この決定方程式を満たす概周期定常応答を，内部の繰り返しに緩和法を用いて求める，すなわち，主繰り返しにおける（$j+1$）回目の解を$x^{(j+1)}(t)=x^{(j)}(t)+\Delta x(t)$とするとき，決定方程式の解を求める繰り返し式は

$$L(\Delta x(t))+\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x=x^{(j)}(t)}\Delta x(t)=-\left[L(x^{(j)}(t))+H(s(t))+f(x^{(j)}(t))\right]$$

で与えられる。さらにこの式に緩和法を適用する。緩和法の（$m+1$）回目の繰り返しにおける解を$\Delta x^{[m+1]}(t)$とするとき，緩和法の繰り返しは

$$L\ (\Delta^{[m+1]}(t))+G^{(j)}\Delta x^{[m+1]}(t)=-\varepsilon^{(j)}(t)-\left[\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x=x^{(j)}}-G^{(j)}\right]\Delta x^{[m]}(t)$$

である。ここで，$\varepsilon(t)\equiv L(x(t))+H(s(t))+f(x(t))$である。$G$は$\dfrac{\partial f}{\partial x}$の平均値（直流成分）である。また$\rho$は収束性の改善に用いる定数である。

以上に述べた緩和法による繰り返し式は，周波数領域で効率的に計算できる。すなわち，左辺はフェーザ法を用いて計算でき，右辺の各周波数成分は概周期離散フーリエ変換により計算できる。また，各繰り返しにおいて，各周波数の応答を独立に計算することができる。この手法の具体的アルゴリズムについて論じると共に，例題によりその有効性を示す。本手法を用いて振幅変調回路を解析した結果，8回の繰り返しで収束が得られた。本手法は，完全なニュートン法に比較して計算量が少ない手法であり，変調器等の非線形信号処理回路の効率的な解析に適すると共に，弱非線形回路の解析にも適している。

第4章　非線形電子回路の入出力特性の線形化設計

非線形電子回路の入出力特性を多項式で表し，その入出力特性を線形化する設計手法について論じる。

まず，ある非線形関数を動作点でテイラー展開して得られる多項式を非線形伝達関数と定義し，この非線形伝達関数を組み合わせた並列構成，線形負帰還構成，作動接続構成等の各種構成の総合非線形伝達関数を係数比較法により解析的に求める。この結果より種々の知見が得られる。特に線形負帰還構成では，非線形伝達関数の3次の係数を零にできることが示される。すなわち，非線形伝達関数Gに線形な帰還βを施した場合，その総合伝達関数Hとの関係は

$$H(x)-G(x-\beta H(x))=0$$

で表される。ここでxは入力である。この式よりHの各係数（$h_{[1]}$，$h_{[2]}$，$h_{[3]}$）は，$h_{[1]}=g_{[1]}/K$，$h_{[2]}=g_{[2]}/K$，$h_{[3]}=(g_{[3]}-\dfrac{2\beta g_{[2]}^{2}}{K})/K^{4}$であることが示される。ここで（$g_{[1]}$，$g_{[2]}$，$g_{[3]}$）は$G$の各係数，$K\equiv 1+g_{[1]}\beta$である。よって帰還量を$\beta=\dfrac{g_{[3]}}{(2g_{[2]}^{2}-g_{[1]}g_{[3]})}$とすれば3次の係数を零にできる。

この結果に基づき，エミッタ接地増幅器の非線形伝達関数の3次の係数を零にできることを示し，この回路の数値解析および実験から線形化が実現可能であることを検証する。以上のように，多項式で非線形性を表して各種構成の総合非線形伝達関数を解析的に求めておき，この結果を用いて非線形電子回路の入出力特性の線形化を行う手法は，設計段階での見通しが良い。

第5章　オーディオ用の音量・音質制御回路の設計

オーディオ機器には音量および音質を遠隔制御する機能が必要とされる。この機能を実現するためには，歪みの少ない電子制御形の可変利得増幅回路および可変周波数特性フィルタ回路が必要である。そこで，このような電子回路を集積回路として実現するために，音量・音質制御ICの設計および非線形性の解析について論じる。

まず，音質制御に適する時定数制御形の可変周波数応答フィルタを提案し，このフィルタは5つの電圧入力電流出力形の可変利得増幅回路と2つのキャパシタを用いて構成できることを示す，本フィルタは，低域周波数帯および高域周波数帯の利得を平坦特性に対して対称に増減することができ，音質制御に要求される制御特性を満たす。

次に，可変利得増幅回路の非線形伝達関数を第4章で述べた手法により求めると共に，フィルタの歪み特性を第3章の数値解析手法により解析することにより，音質制御回路の設計について述べる。

本設計により試作した音量・音質制御IC（チップ面積2.2㎜×2.33㎜）は，所望の音質制御特性，音量制御特性を示した。また本ICの主な性能は，全高調波歪み率0.2%以下（標準入力レベル），信号対雑音比57*dB*（標準入力レベル），利得制御範囲80*dB*以上であり，本設計の有効性を示している。この集積回路は，音量および音質制御の全ての機能を示している。この集積回路は，音量および音質制御の全ての機能を電子制御でき，さらに必要な外付け部品が少ないため，小型で低廉な遠隔制御形のオーディオ機器に適している。

第6章　HiFiオーディオ用の高分解能A-D変換器の設計

HiFiオーディオ機器の信号処理には，信号帯域約20*kHz*，信号対雑音比80*dB*以上，歪み率0.01%以下，の性能が求められる，したがってHiFiオーディオ用のPCM符号化器には，標本化周波数40*kHz*以上，量子化分解能2^{14}以上のA-D変換器および標本化回路を集積回路として実現するための設計と非線形性の解析について論じる。

まず，2段積分方式を用いた高分解能のA-D変換器の実現手法について検討し，分解能14ビット，変換時間20μsecのA-D変換を40*MHz*のクロック周波数で実現できることを示す。このためには，線形性の優れた積分器，1対64の電流比の電流を発生する電流源，および高速ロジック回路の集積化が必要であり，これらの回路の設計について述べる。次に標本化回路の設計と非線形性の解析について論じる。標本化回路をバイポーラ集積回路に集積化するために，バイポーラトランジスタのみで構成できる標本化回路を提案する。さらに，この回路の主な非線形性はトランジスタのベース蓄積電荷に起因することを示し，標本化回路の非線形性を明らかにする。

本設計により試作した集積回路（チップ面積3.35㎜×3.5㎜）は，2チャンネルのオーディオ信号を標本化周波数50*kHz*，量子化分解能2^{14}で標本化およびA-D変換することができる。この集積回路の変換特性は，歪み率0.01%以下（最大入力レベル），信号対雑音比84*dB*以上（最大入力レベル）であり，本設計が有効であることを示している。この集積回路は，製造においてトリミング工程を必要としないため量産に適し，さらにHiFiオーディオ用として十分な性能を有するため，民生用デジタルオーディオ機器のPCM符号化器に適している。

第7章　結　　論

本章では，非線形電子回路の定常応答解析とアナログ集積回路の設計に関して得られた成果を要約して述べると共に，今後の課題について述べている。

審査結果の要旨

電子機器を経済的に高性能化，高機能化するために，各種の電子回路を集積化することが望まれ，アナログ集積回路の設計技術を確立することが重要な課題となっている。著者は，非線形電子回路の概周期定常応答の数値解析手法，入出力特性の線形化手法，およびそれらを応用したアナログ集積回路の設計について研究を行った。本論文はその成果を取りまとめたもので，全編7章からなる。

第1章は序論である，

第2章では，非線形電子回路の定常応答の数値解析およびアナログ集積回路の設計に関する基礎的な事項について論じている。

第3章では，概周期定常応答の効率的な数値解析手法として，代入法を用いて回路方程式を導出し，その解を緩和法により求めるという周波数領域の解析手法を提案している。また，この手法は従来のニュートン法を用いた手法より計算量が少なく，多くの非線形電子回路の解析に適し，しかも概周期定常応答および周期的定常応答を統一的に解析できることを示した。

第4章では，非線形電子回路の入出力特性を線形化する手法について論じている。まず，個々の回路の入出力特性を入力信号の多項式で表し，いくつかの回路を組合せて得られる回路の総合入出力特性を解析的に求める手法を与えている。次に，この手法を用いて，線形負帰還によって3次の非線形性を打ち消す手法を提案し，エミッタ接地増幅器に適用してその効果を実証している。これは重要な知見である。

第5章では，入出力特性の線形性が求められるオーデイオ用の音量・音質制御ICの設計およびその非線形性を第3章，第4章の手法を適用して解析している。さらに，音量制御部を含めたオーディオ用の音量・音質制御ICを試作し，本設計法の実用性を検証するとともに，この集積回路がオーディオ用電子機器の高機能化，小型化，低価格化に有効であることを示した。

第6章では，オーディオ用の高分解能A-D変換器の設計と非線形性の解析について論じている。まず，集積回路に適する高分解能A-D変換方式を与えている。次に，線形性の優れた標本化回路を提案し，その非線形性を解析している。さらに，14ビットもの高分解能A-D変換器および標本化回路を内蔵した初めての集積回路を作製し，民生用のデイジタルオーディオ機器として有用であることを実証している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は，非線形電子回路の定常応答の数値解析手法，入出力特性の線形化手法などの設計手法を与え，さらにそれらを具体的なアナログ集積回路の設計に応用し，いくつかの重要な成果を得たもので，電子情報工学に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。