

氏名(本籍)	熊谷幸雄(宮城県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第87号
学位授与年月日	昭和41年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)電気及通信工学専攻
学位論文題目	アクティブ線路に関する基礎的研究
論文審査委員	(主査) 教授 大泉充郎 教授 喜安善市 教授 西沢潤一 教授 佐藤利三郎 助教授 野口正一

論文内容要旨

第一章 アクティブ線路とニューリスタ

(本研究の歴史的背景)

アクティブ線路とはその中を波が伝播するとき伝播とともに成長するような線路と定義する。アクティブ線路における波の成長には必ず何らかの制限があり波の振幅が無限に大きくなることはあり得ないから振幅がある値に達した後では一定振幅で伝播するのが当然である。従ってこの種の非減衰線路もアクティブ線路に含まれる。

従来の通信工学では主としてlinearな増幅が用いられていた。しかし近年PCMを代表とするパルス通信が盛んになるに従いパルスを最も能率的に伝送する線路が要求されるようになった。

た。アクティブ線路のもつ広帯域性と小型性とは斯かる要請に十二分に貢献しうるものと考えられ喜安・佐藤により積極的な研究が行なわれている。

一方近年に於ける情報処理組織は極めて高度化しその機能的面に生物系神経線維のもつ情報処理方式を積極的にとり入れ超高速・超小型の情報処理装置を構成しようとする機運が急速に高まってきた。H・D・Craneによって提案されたニューリスタはかかる機運のもとになされたものでありこの問題に対処するための積極的な試みの一つと考えられる。(1960年)

さてこのCraneによるニューリスタは以下に示す四つの基本的性質を有する一次元線路として定義されT接合、S接合、T-S接合などの基本的接合をもとにしてこの面からの新しい情報処理方式の研究がなされた。

- (1) 伝播する信号は減衰しない。
- (2) 伝播する信号の伝播速度は一定である。
- (3) 入力信号に対して一定の閾値をもつ。
- (4) 一定の不応期をもつ。従って反対方向から伝播してくる二つのパルスは衝突により消滅する。

しかしこのニューリスタそのものに関しては単なる仮想的なモデルとしての立場がとられただけで物理的実現性の問題は仮定として残された。一方西沢は集中定数素子エサキダイオードの分布化によりその小型化と広帯域化を同時に解決できる点を指摘し第一段階として模擬分布型エサキダイオードを開発しその研究に着手した。(1959年)また南雲は神経線維の諸性質を定量的に記述するのに成功したホジキンハックスレイの方程式を電子計算機によりシミュレートし電工学的に神経線維の実現可能であることを示唆した。(1960年)

然してCrane、西沢、南雲の之等の研究は各々個々の立場から独立になされていたのであるが著者は本研究の主題であるアクティブ線路の研究の発端を之等の研究に求め近年における情報処理の問題に対処するため超高速・超小型の情報処理装置を構成するためのニューリスタをアクティブ線路によって実現することを目的とし、アクティブ線路に関する基礎的研究を行うに到った。

第二章 アクティブ線路の基本的性質の解析ならびに シミュレーション

まず超高速超小型論理演算素子ニューリスタを構成するため新しく二つの代表的なアクティブ線路、即ち並列にインダクタンスを持つNKアクティブ線路とそれをもたないNKKアクティブ

線路を提案する。NKアクティブ線路は南雲のニューロンモデルを非常に高い周波数領域で使用する目的からその直列方向の構成を抵抗からインダクタンスに置きかえたもので(図2-1)

NKKアクティブ線路はNKアクティブ線路で指摘された技術的問題を容易にするため並列インダクタンスを抵抗で置きかえたものである(図2-2)。

NKアクティブ線路、NKKアクティブ線路の電圧 $V(Z, t)$ の挙動を支配する方程式は各々次のように与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} v_0^2 \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial I(V)}{\partial t} + r^2 V, \quad I(V) = V(r - \lambda V + V^2) \\ \text{或は} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + \mu \frac{\partial I(u)}{\partial \tau} + u, \quad I(u) = u(1 - \frac{1}{2} \cdot u + \epsilon/3 \cdot u^2) \end{array} \right.$$

$$\text{ここで } v_0^2 = 1/LC, \quad r^2 = 1/L'C, \quad \sigma = 1/C,$$

$$u = (2\lambda/r)V, \quad x = \sqrt{L'/L} Z, \quad \tau = (1/\sqrt{LC})t, \quad \mu = \sqrt{L'/C} \cdot r, \quad \epsilon = 3r/4\lambda^2$$

であり L, L', C はそれぞれNKアクティブ線路の単位長当りの直列インダクタンス、並列インダクタンス、並列容量である。

$$\left\{ \begin{array}{l} v_0^2 \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial I(V)}{\partial t}, \quad I(V) = V(r' - \lambda V + V^2) \\ \text{或は} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + \mu \frac{\partial I(u)}{\partial \tau}, \quad I(u) = u(\nu - \frac{1}{2} \cdot u + \epsilon/3 \cdot u^2) \end{array} \right.$$

$$\text{ここで } v_0^2 = 1/LC, \quad \sigma = 1/C, \quad r' = r + G,$$

$$u = (2\lambda/r')V, \quad x = Z, \quad \tau = (1/\sqrt{LC})t, \quad \mu = \sqrt{L/C} \cdot r', \quad \epsilon = 3r'/4\lambda^2, \quad \nu = 1 + G/r'$$

であり L, C はそれぞれNKKアクティブ線路の単位長当りの直列インダクタンス、並列容量である。

初期・境界条件は両者共通に $V(Z, 0) = (\partial/\partial t)V(Z, 0) = 0$ 、 $V(0, t) = \phi(t)$ とする。上式に関して数式による理論的解析、電子計算機によるシミュレーションを行い、各々のアクティブ線路について上記の仮定と近似の下で次の性質の保有せられていることを本章での研究の結果見いだした。

2.1 NKアクティブ線路について；

2.1.1 NKアクティブ線路は謂ゆる自己整形作用を持ち信号の高さは或る一定の値に、且つ信号の幅も或る一定の値にそれぞれ漸近する。そしてその時信号の正負の変化量は相等しく、且つこの自己整形化された信号が一定の伝播速度をもって伝播する。

漸近する信号の高さ V_s は、非線形素子の電圧電流特性を $I(V) = V(r - \lambda V + V^2)$ とすると $V_s = (1/3) \cdot [2 + \sqrt{\lambda^2 - 3r}]$ と与えられ、漸近する信号幅 W は

$$W_Z = \frac{1}{\sqrt{1+LC}} \sqrt{\frac{L'}{C}} \cdot r \left\{ \ln \frac{\lambda + 2\sqrt{\lambda^2 - 3r}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 3r}} - \frac{1}{r} \sqrt{\lambda^2 - 3r} (2\sqrt{\lambda^2 - 3r} - 3r) \right\}$$

$$W_t = \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{1+LC}} \sqrt{\frac{L'}{C}} r \left\{ \ln \frac{\lambda + 2\sqrt{\lambda^2 - 3r}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 3r}} - \frac{1}{r} \sqrt{\lambda^2 - 3r} (2\sqrt{\lambda^2 - 3r} - 3r) \right\}$$

と与えられる。(ただし W_Z は線路上で観測される幅、 W_t は時間軸上で観測される幅である。) シミュレーションの結果を図2-3に示す。

2.1.2 NKアクティブ線路は閾値作用を有し入力信号を $(A/2)(1 - \cos 2\pi t/t_0)$ とすると、 t_0 の大きい領域では $A_{thr} \approx (4/7)\lambda [1 - \sqrt{1 - (28/5)(r/\lambda^2)(3/4 + \sqrt{C/L'} \cdot t_0/4r})]$ と与えられ t_0 の増大に伴い閾値は高くなる傾向を示し、 t_0 の小さい領域では $A_{thr} \approx (4/7)\lambda [1 - \sqrt{1 - (28/5)(r/\lambda^2)(3/4 + \sqrt{C/L'} \cdot m_0^2/t_0})]$ と与えられ t_0 の減少に伴い閾値は高くなる。即ち t_0 について閾値 A_{thr} は極値を有しこの値を与える t_0 は整形幅 W_t と本質的な関係をもつことがシミュレーションより明らかにされた。(図2-4)

2.1.3 NKアクティブ線路では衝突によるパルス消滅が可能であり言葉をかえていえば無反射伝送が可能である。シミュレーションによる実験の一例を図2-5に示す。

2.2 NKKアクティブ線路について；

2.2.1 NKKアクティブ線路は謂ゆる自己整形作用は存在し得ず伝送特性は次の三つに分けられる。

- (イ) パルス幅が伝送の過程で逐次減少するもの
- (ロ) パルス幅が伝送の過程で常に一定のもの
- (ハ) パルス幅が伝送の過程で逐次増大するもの

この伝送特性は非線形素子の電圧電流特性にのみ依存し $I(V) = V(r' - \lambda V + V^2)$ とすると

- (i) $\lambda^2 < (9/2)r'$ のときは(イ)の伝送特性

(ii) $\lambda^2 \leq (9/2) r'$ のときは(ロ)の伝送特性

(iii) $\lambda^2 > (9/2) r'$ のときは(ハ)の伝送特性

に一義的に決定される。(図2-6)

2.2.2 NKKアクティブ線路は閾値作用を有し入力信号を $(A/2)(1 - \cos 2\pi t/t_0)$ とすると t_0 の大きい領域では $A_{thr} \approx (1/2)\lambda [1 - \sqrt{1 - 4r/\lambda^2}]$ と与えられ t_0 には大略無関係にトリガすることができる。しかし t_0 の小さい領域では $A_{thr} \approx (4/7)\lambda [1 - \sqrt{1 - (28)(r/\lambda^2)(3/4 + \sqrt{C/L} n_0^2/4t_0)}]$ と与えられ t_0 の減少に伴い閾値は高くなる。(図2-8)

2.2.3 NKKアクティブ線路でも衝突によるパルス消滅が可能である。言葉をかえていえば無反射伝送が可能である。(図2-8)

第三章 集中定数回路によるアクティブ線路の近似

3.1 集中定数回路としての取り扱いには分布定数線路の挙動をおおむね把握できるという観点のみならず現今の技術的問題からも極めて重要なものである。分布定数線路を集中定数回路によって近似する方法はいろいろ考えられるがその中で梯子型集中定数回路はその近似度という点で若干の問題はある。しかし実現性が一番容易であるという立場から本章では梯子型集中定数回路をとりあげた。

NKKアクティブ線路を梯子型集中定数回路で近似したものについては西沢等により模擬分布型エサキダイオードとして早くからその解析が行なわれている。それ故著者は主にNKアクティブ線路を梯子型集中定数回路で近似しその伝送特性を電子計算機によりシミュレートし理論的考察を行なった。

3.2 その結果この梯子型集中定数回路は分布定数線路と似た伝送信号幅に関する整形作用の存在することが確かめられ、この解析の結果から分布定数線路上での幅に関する整形過程をSchematicに推論する理論的根拠が確立された。シミュレーションは10段接続の梯子型集中定数回路でなされ図3-1、3-2にその代表的例を示した。前者は並列インダクタンス L' が非常に大きい場合の例でこれが小さくなると後者のような伝送特性を示す。

3.3 このことから梯子型集中定数回路では回路構成パラメータの全領域に亘ってその整形作用が営まれるとは限らず並列インダクタンスが小さくなると伝播するにつれて減衰する可能性も生れてくることが明らかとなった。この点は分布定数線路が閾値を越した全ての伝播波

形に対して増幅整形作用が営まれたのに比して大きく異なる点であり分布定数系と集中定数系との相違点として注意しなければならない。

第四章 アクティブ線路の工学的応用

アクティブ線路には種々の工学的応用が考えられるがその一つは通信線路としてであってアクティブ線路のもつ広帯域性と小型性を特にパルス通信に応用しようとするものである。また一方アクティブ線路のもつ波形整形性・衝突によるパルス消滅などの機能を利用して之を情報処理装置用の超高速・超小型論理回路に応用しようとする試みである。前者については喜安・佐藤により積極的な研究が進められているが著者は特に後者の問題を取り上げ超高速超小型論理回路を構成するためニューリストによる論理回路構成の問題を検討した。アクティブ線路はそれのもつ小型性広帯域性ならびに波形整形性などの故に情報処理装置用論理回路素子として極めて有望なものであり、非同期回路も積極的に応用することができる。問題は金物による実現の点である。しかし西沢は積極的に之を研究しており、これらの研究成果が結果しアクティブ線路が通信工学の分野に実際に応用されたとき限りない技術的発展の約束せられることを確信する。

第五章 結 言

本論文は超高速超小型論理回路ニューリストを構成することを目的としてアクティブ線路について研究したものである。その結果アクティブ線路のもつ本質的特性を広く検知することができたが、その中特に重要なものを列挙すれば次のようである。

本論文で行なわれた仮定と近似の下では

- (1) NKアクティブ線路NKKアクティブ線路はいずれもニューリストとして必要な特性を有する。
- (2) パルスの衝突による消滅が実験的に初めて確認された。
- (3) NKアクティブ線路ではパルス幅の整形作用が営まれるがNKKアクティブ線路では営まれない。このことから並列インダクタンスが存在しないとパルス幅整形作用が行われなことが確認された。

著者は本研究全般を通じその解析を簡易にするため非線形アクティブ素子の電圧電流特性の三次曲線表示、寄生素子の省略等の理想化を行っているが特に(3)の結論は今後のアクティブ線路の

研究に重大な示唆を与えるものと思われこれを一つの足がかりとして今後の研究が積み重ねられることを信ずる。

最後に本研究を全面的に支持ご指導下さった大泉教授、野口助教授、ご協力いただいた大泉研究室の関係各位に深謝し、有益な示唆と討論の場を与えて下さった本学アクティブ線路研究会ならびに電気通信学会非直線理論研究会の諸氏に厚くお礼申し上げます。

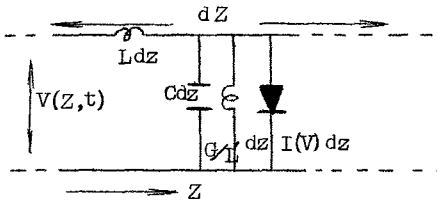


図 2-1 NKアクティブ線路

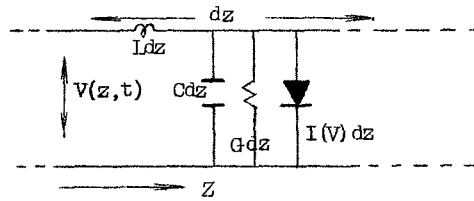


図 2-2 NKKアクティブ線路

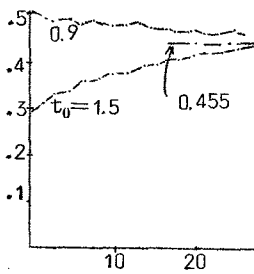


図 2-3 パルス巾の時間的变化
 $\mu=1.5 \quad \epsilon=1/8$

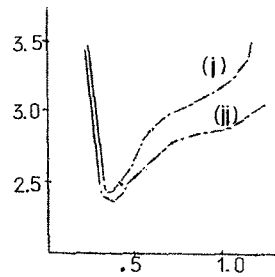


図 2-4 τ_0 に対する閾値の変化
(i) $\mu=2.5 \quad \epsilon=9/64$
(ii) $\mu=2.5 \quad \epsilon=1/8$

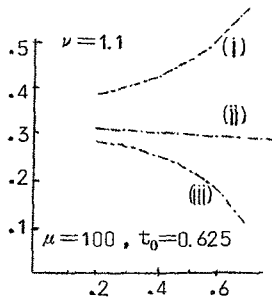


図 2-5 パルス巾の時間的变化
(i) $\epsilon\nu < 1/6$
(ii) $\epsilon\nu = 1/6$
(iii) $\epsilon\nu > 1/6$

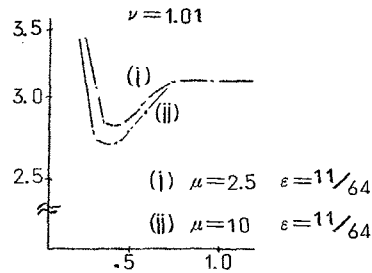


図 2-6 τ_0 に対する閾値の変化

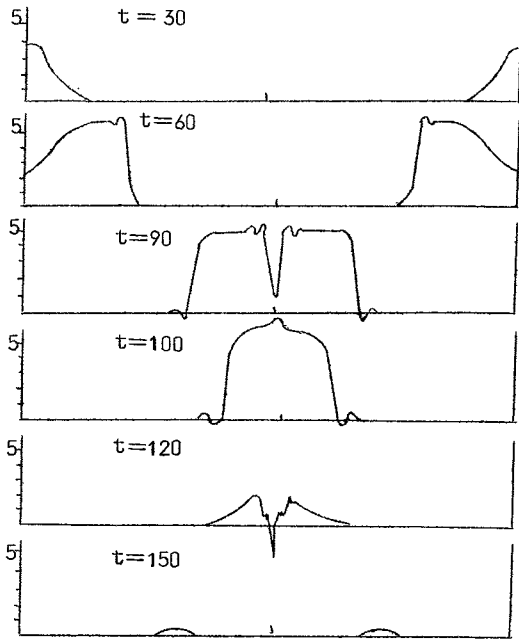


図 2-7 衝突点の近傍におけるパルスの変化
 (NKアクティブ線路; $\mu=50$,
 $\epsilon=11/64$)

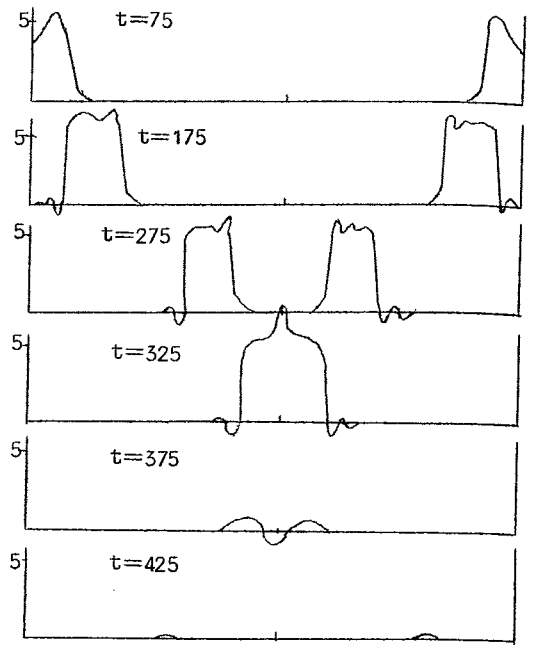


図 2-8 衝突点の近傍におけるパルスの変化
 (NKKアクティブ線路; $\mu=100$,
 $\epsilon=11/64$, $\gamma=1.1$)

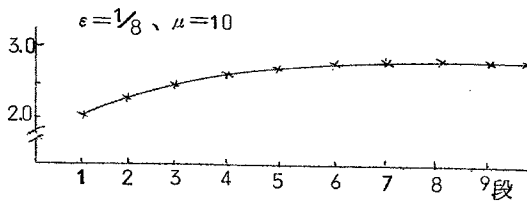


図 3-1 多段接続時のパルス巾の変化

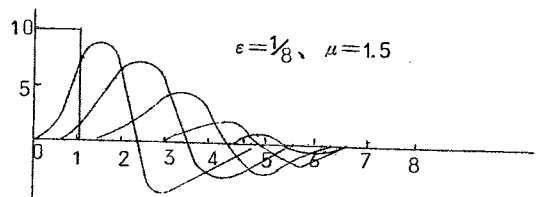


図 3-2 パルス巾の整形性のみられぬ例

審査結果の要旨

近年、電子計算機を中心とする情報処理組織に対する要求は加速度的に厩大化しつつあり、これに対処するための新しい情報処理方式の開発は甚だ緊急を要する課題となっている。中でも超小型、超高速の論理回路を構成するための研究は、その中心的な役割りを占めるものである。

著者はこの見地から、生体の神経組織がもつ情報処理方式をモデルとした新しい超小型、超高速の論理回路を構成することを目標として、いわゆるニューリスタをアクティブ線路を用いて構成するための基礎的研究を行った。まずアクティブ線路に於ける波の伝播について数式による解析を行い、また、電子計算機によるシミュレーションからこれら解析の結果を確かめ多くの成果を得た。

本論文はそれらをまとめたもので次の五章よりなる。

第一章では本研究の意義および歴史的背景について述べている。

第二章では代表的な二つのアクティブ線路、即ち並列にインダクタンスを持つNKアクティブ線路と、それを持たないNKKアクティブ線路をとりあげ、非線形素子の特性を三次曲線で近似して偏微分方程式論の立場から、両線路の性質を研究し、さらに電子計算機を用いて詳細な検討を行っている。その結果このシミュレーションの近似の範囲内では(1)NKアクティブ線路、NKKアクティブ線路はいずれも神経線維のモデルであるニューリスタとして必要な性質を持つこと。その一条件であるパルスの衝突による消滅は電子計算機による実験的研究から確認された。(2)NKアクティブ線路ではパルス巾の整形作用が営まれるが、NKKアクティブ線路では、営まれないこと。この結果から回路構成の上で並列インダクタンスが存在しないとパルス巾整形が行われないことが確認された。以上の結果はニューリスタを電子工学的立場から構成する可能性を与えたものとして極めて重要な知見である。

第三章では集中定数回路の立場からアクティブ線路の近似を試み分布定数線路の挙動がこれにより、おおむね把握できることを示した。又、ここでの知見はアクティブ線路を実験的に研究する上に重要なものである。

第四章では論理回路への応用が示され、情報処理装置構成のための多くの論理回路方式をまとめて示している。

第五章は全体の結論である。

以上、本論文は理論的ならびに電子計算機による実験的研究により、ニューリスタをアクティブ線路で工学的に実現できることと、そのための方針を与えたもので、本研究により神経組織を

モデルとする超小型、超高速論理回路を実現するための基礎が築かれた。従って、本研究は情報工学ならびに通信工学上寄与する所が少ない。

よって本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。