

	あ い だ た ひと
氏 名	會 田 田 人
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 9 年 3 月 2 5 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研 究 科、専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 子 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	遅 延 帰 還 型 光 共 振 器 の 非 線 形 現 象 と そ の 応 用 に 関 す る 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 伊 藤 弘 昌
論 文 審 査 委 員	主 査 東 北 大 学 教 授 伊 藤 弘 昌 東 北 大 学 教 授 澤 田 康 次 東 北 大 学 教 授 内 田 龍 男

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

内部に非線形媒質が挿入された非線形光共振器は、励起光強度の増加とともに多重安定振動モードからカオスの発生に至る非常に複雑な振動現象を発現する。本研究では、非線形光共振器と等価な遅延帰還型光共振器を製作し、この特異な振動現象の振る舞いを解明するとともに、この振動現象の特徴である「簡単な構造から生み出される複雑な振る舞い」を利用した新しい情報処理機能を提案し、その可能性を実験により明らかにした。

### 第 2 章 非線形遅延帰還系

非線形光共振器は一定の条件の下で、一変数遅延微分方程式で記述される遅延帰還型光共振器と等価である。遅延帰還型光共振器の性質を調べるため、この遅延微分方程式の解を正確に、しかも実時間で生成できるデジタル電子回路による遅延帰還系を設計・試作した。図 1 のように、このデジタルシステムは、遅延帰還型光共振器モデルを搭載し、その振動現象を正確にしかも実時間で再現できることが確認された。

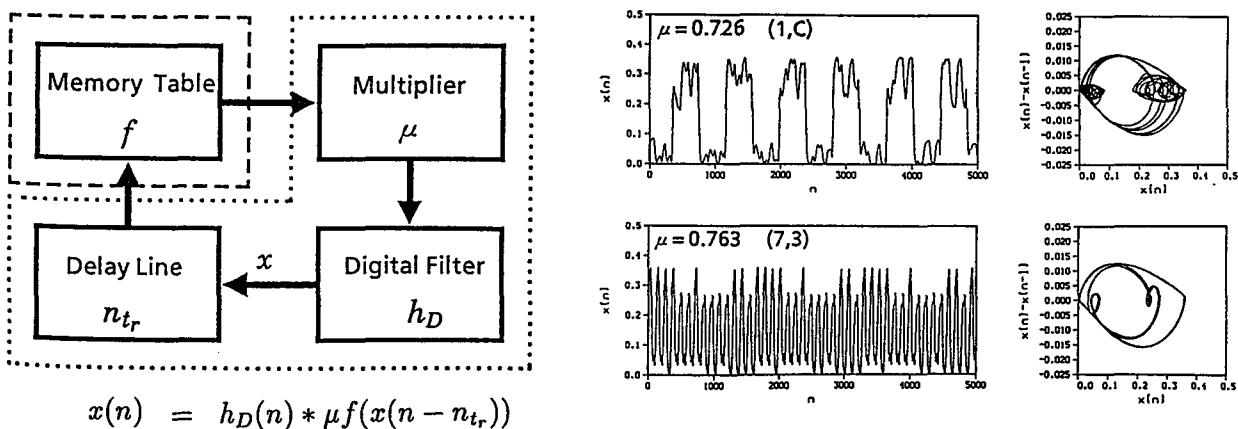


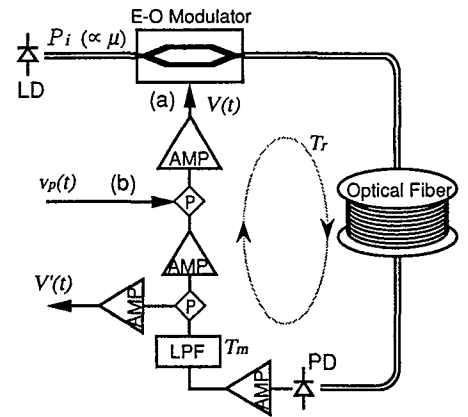
図 1 デジタル型遅延帰還系とその再現波形の例

このデジタルシステムを実時間シミュレータとして用い、有効値遅延の長い遅延帰還型光共振器の設計について検討した。その結果、多重安定振動モードからカオスの発生まで、振動モードの発生過程が階層的な分岐構造を示すような特性を得るには、帰還ループの特性として、非線形性と大きな有効遅延という要素に加えて、一次の緩和特性で表されるような単調減少的な周波数特性が必要であることを明らかにした。

### 第3章 電気光ハイブリッド型遅延帰還型共振器

一変数遅延微分方程式に基づいた、遅延帰還型光共振器と等価な電気-光(E-O)ハイブリッド型遅延帰還型共振器の設計と試作、並びに、その振動現象について述べた。本研究の主要なテーマである振動モードの性質を利用した情報処理機能の検証実験を行うためには、振動モードの多様さと共振器パラメータの高速制御性が必要である。本研究では、光通信の部品を採用することで、従来に無い大きな有効遅延と帰還利得の高速制御性を実現し、実験に要求される性能を備えた遅延帰還型光共振器を製作した。図2に共振器の構成を示す。

一般に非線形振動現象を解析的に扱うことは困難であるが、微小振幅の振動に対しては、線形安定性解析を適用することにより、図3のように振動周波数とモード利得との関係、並びに、周波数同期現象を解析的且つ、定量的に解明できることを示した。



$$T_m \frac{dV(t)}{dt} = -V(t) + v_p(t) + V_o + \mu F(V(t - T_r))$$

図2 E-Oハイブリッド型遅延帰還型共振器の構成

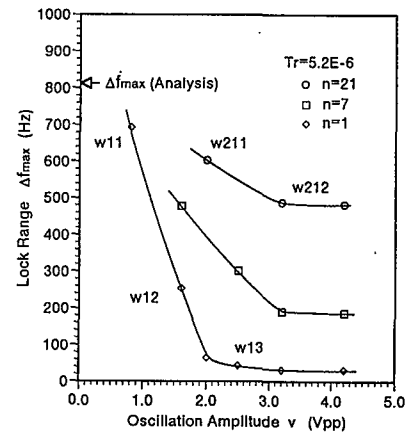
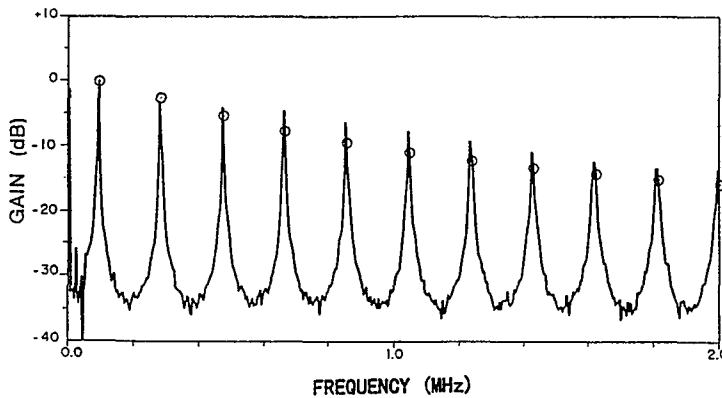


図3 固有振動モードの共振現象（丸印は共振点の理論値）と周波数同期現象

### 第4章 多重安定振動モードを利用した情報記憶

振動モードの多重安定性を利用した、ダイナミカルメモリと名付けられた情報記憶機能について述べた。遅延帰還型光共振器には、振動波形の振幅変調パターンが異なる多数の安定な振動モードが発振する。一般に、 $n$ 次高調波2次分岐( $\xi_{n,2}$ )モードには、位相を特定する場合、 $2^n$ 通りの安定な振動波形が存在する。これらの振動波形を2値コードによって分類した。ダイナミカルメモリでは、記憶すべき2値情報より作成した種信号を共振器ループに注入し、所望の振動モードを選択的に励起することによって情報を記憶する。図4は、E-Oハイブリッド型遅延帰還型共振器の $\xi_{7,2}$ モードと $\xi_{21,2}$ モードを選択励起して、7ビットと21ビットの情報を記憶するダイナミカルメモリの検証実験の結果を示す。

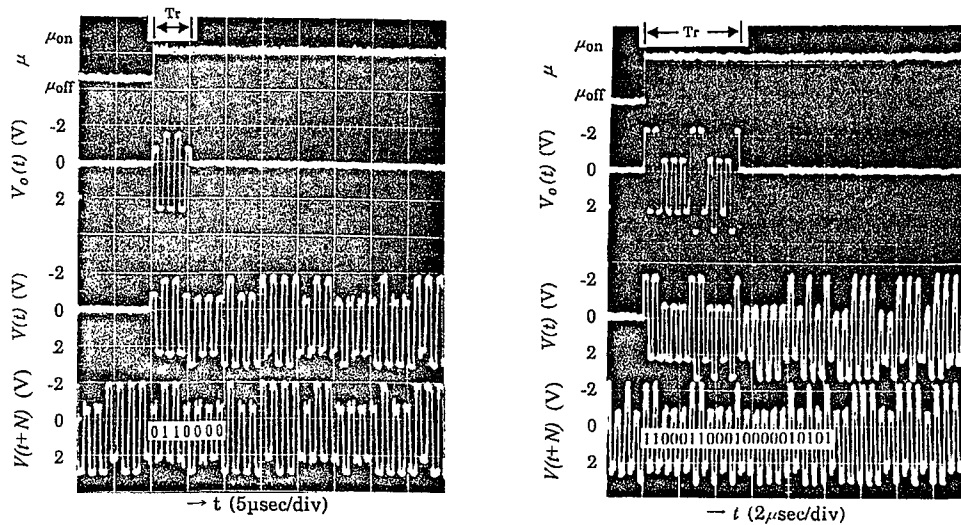


図4 種信号注入による $\xi_{7.2}$ モードと $\xi_{21.2}$ モードの選択励起

### 第5章 光パルスメモリへの応用

記憶機能の具体的応用形態として、新しい原理に基づく光パルスメモリを提案し、このメモリ機能をE-0ハイブリッド型遅延帰還型共振器を用いた実験システムで実証した。図5は光パルスメモリの形態と実験結果を示す。この光パルスメモリの長は、情報の書き込みを光2値パルス列で実行できることと、 $\xi_{n,2}$ モードの性質を利用した消去機能が実現されていることである。また、情報を安定振動モードとして記憶するため、記憶された情報を保持するための特別な再生機構が不要である。以上の結果から、光ファイバープに非線形媒質を挿入しただけの簡単な構造の中に、高速な光パルス列が記憶できる可能性があることを述べた。

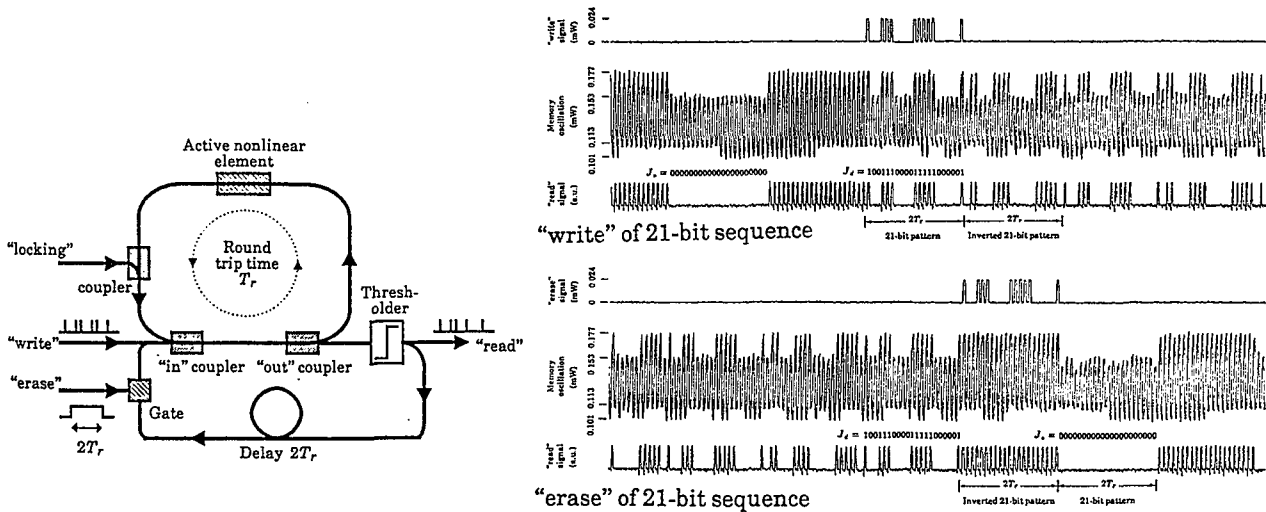


図5 光パルスメモリの形態、並びに、書込と消去の実験結果

### 第6章 光カオス現象と振動モード検索

遅延帰還型光共振器に発生する多数の振動モードは、共振器を励起する光強度の増加とともにそれぞれが不安定化し、振動モード間を飛び移るような光カオス現象が発現する。一般に、このような高次元カオスの振る舞いは解析が困難とされているが、第4章で導入した振動波形の2値コードをカオス状態の振動波形にも

適用し、2値コードの時系列データから遷移確率行列や振動モード滞在時間などを計算することにより、カオスの振る舞いを定量化することに成功した。さらに、ピーク値の時系列データにFloquet理論を適用し、カオスによる振動モード間遷移がタイプIIIに近い間欠性を示すことを明らかにした。また同時に、これらの結果から、カオスによる振動モード間遷移の程度が励起光強度のみで制御できることを明らかにした。

このような振動モード間遷移を利用した振動モードの検索法を提案し、実験によってその可能性を示した。図6の実験結果には、指定した条件に適合する振動モードの出現率が、この検索法によって増加する様子が表れている。この検索法をカオス検索と名付けたが、カオスを積極的に利用した情報処理の可能性を示すものである。

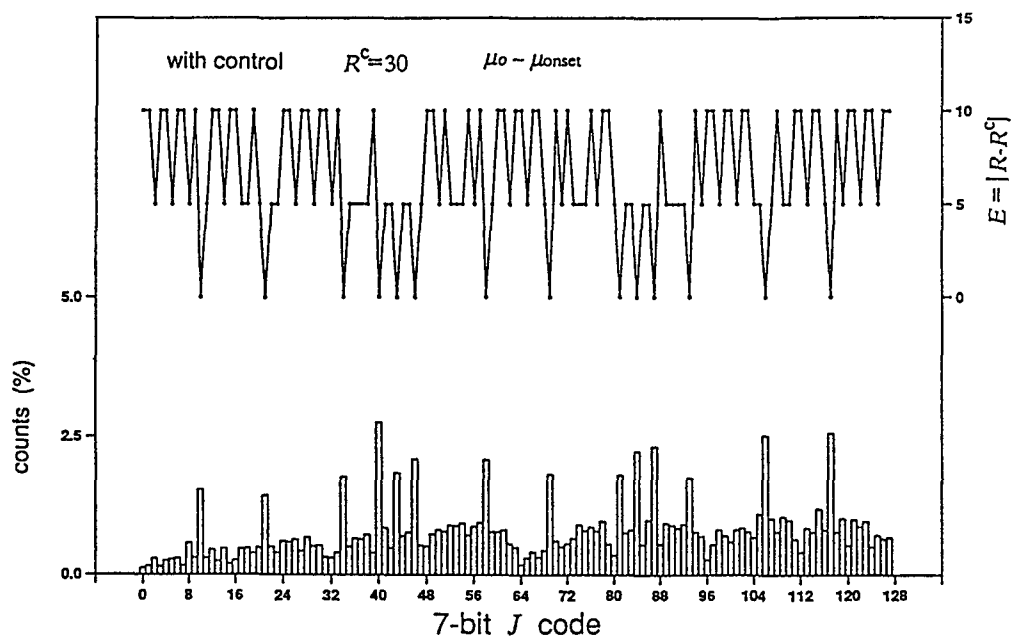


図6 光カオスによる振動モード間遷移を利用した振動モード検索の実験結果（モード局在化実験）

## 第7章 結論

本研究は、遅延帰還型光共振器における振動現象の「簡単な構造から生み出される複雑な振る舞い」という特徴に着目し、その性質を利用した新しい情報処理機能を開拓することを目指したものであり、その結果は次の3点に要約される。第1点目は、遅延帰還型光共振器の信号の流れを模倣するデジタル回路による実時間シミュレータを製作して、振動モードの発生と安定性のシステムパラメータ依存性を検討し、所望の性能を有する遅延帰還型光共振器を光通信用の部品を用いた電子-光ハイブリッド型のシステムで実現した。第2点目は、共振器の固有振動モードを線形安定性解析により求めるとともに、従来、表現が困難であったカオスの振る舞いを、Floquet行列、遷移確率行列、モード滞在時間分布などの客観的なデータによって定量化することに成功した。そして、第3点目は、振動モードの多重安定性を利用した情報の記憶機能と、カオスを利用した振動モードの検索機能を、試作した共振器を用いて実証するとともに、新しい原理に基づく光パルスメモリを提案した。

## 審査結果の要旨

非線形遅延帰還系において振動モードの分岐やカオス発生の理論および実験的研究が活発に行われているが、その応用を視野に入れた研究はあまりない。本研究は、カオスなどの非線形振動現象が有する機能の定量化を行い、その情報処理機能系への適用の提案と実証を行ったもので、全文 7 章より成る。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第 2 章は、遅延帰還型光共振器を実時間でシミュレートするデジタルシステムを試作し、多重安定振動モードからカオスまで、振動モードの発生過程が階層的な分岐構造を示すような共振器の設計指針を明らかにしている。

第 3 章では、前章の検討に基づいて有効遅延の大きな電気・光ハイブリッド型遅延帰還型共振器を設計・試作し、線形安定性解析と実験によってその振動特性を明らかにしている。弱い励起光で分岐が発現するような大きな非線形特性と大きな有効遅延の両方を実現することは、遅延帰還型光共振器を設計する上で相反する要求であるが、 $1.3\mu\text{m}$  帯光通信用の低損失光ファイバ遅延線と導波路型光変調器、並びに、高速電子素子を組み合わせた電気・光ハイブリッド型の構成が、この相反する要求をバランスよく満たすことができることを示した。

第 4 章では、ダイナミックメモリと名付けられた振動モードの多重安定性を利用した情報記憶機能を、試作した電気-光遅延帰還型共振器を用いた実験によって検証している。振動波形の変調パターンをコード化し、電気・光ハイブリッド型遅延帰還共振器を用いて 7 ビットと 21 ビットの情報記憶実験を行い、ダイナミックメモリの原理を実証している。これは応用上有用な知見である。

第 5 章では、記憶機能の具体的な応用形態として、新しい原理に基づく光パルスメモリを提案し、このメモリ機能を試作した電気・光ハイブリッド型遅延帰還型共振器を用いた実験システムで 21 ビットまでの記憶を実証している。また高速動作のテストでは、電気・光ハイブリッド系のシステムで、1.9GHz の振動モードが安定に励起されることを確認した。

第 6 章では、光カオス現象の振る舞いの解析を行い、カオスによる振動モード間遷移を利用したモード検索（カオス検索）機能を、実験によって検証した。これは新しい知見である。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、非線形遅延帰還型光共振器に発生する多様な振動現象に着目し、その振る舞いの解明と共に、その性質を利用した新しい情報処理機能の可能性を探求したものであり、量子電子工学の発展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。