

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

フィルタの発見は、有線通信において遠距離まで信号を送るために 1899 年 M. I. Pupin により提案された、インダクタを線路の適当な間隔に装荷する方法までさかのぼるといわれている。この方法によると伝送損失をある周波数まで少なくすることができるが、その周波数を越えると急激に増大するローパス作用があることが明らかにされた。フィルタ理論に関する研究は 1915 年、ドイツの K. W. Wagner と G. A. Campbell によってほぼ同時に始められた。その理論は映像パラメータフィルタ理論として知られており、これは後にバタワース形やチェビシェフ形フィルタの構成理論として知られる動作パラメータフィルタ理論に発展した。この理論に基づくフィルタは、抵抗 R 、インダクタ L 、キャパシタ C 、トランス M 、(ジャイレータ GY) を用いて構成される受動フィルタである。このフィルタは、広い周波数範囲で良好な特性を有する、低雑音である、低素子感度である等の理由から、通信機のフロントエンドや中間周波処理回路など、おもに高周波領域において賞用されている。しかしながら、音声帯域など低周波域にカットオフ周波数を持つ受動フィルタを構成した場合、それらに含まれるインダクタの素子値が非常に大きくなってしまう。この場合、受動部品としてのインダクタは、巻線で実現されるので、その寸法や質量が大きくなるばかりでなく、コスト高になる等の問題点を含んでいる。これらの問題を解決するため、インダクタを含まない能動 RC フィルタの構成法が数多く提案されている。[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]。

能動 RC フィルタとしては、1938 年 H. H. Scott によって発表された RC 狭帯域増幅器が最初であるが、フィルタ理論の立場から能動 RC フィルタが注目されるようになったのは、1954 年 J. G. Linvill が NIC(Negative Immittance Converter) を用いたフィルタを発表して以来である [1]。翌 1955 年には 1 個の帰還増幅器と RC 回路で 2 次伝達関数を実現することのできる、いわゆる

Sallen-Key 回路が R. P. Sallen と E. L. Key によって発表された [2]。1965 年に発売されたモノリシック演算増幅器が大量生産され低価格で入手できるようになると、この回路を基本とした能動 RC フィルタが普及するに至った。能動 RC フィルタの構成法は、二つに大別される。そのうちの一つは縦続形構成法である。この方法は希望伝達関数を一次または二次等の低次の式に因数分解し、これを低次の伝達関数をもつ Sallen-Key 回路に代表される回路で実現し、これらの縦続接続によって所望特性を実現する方法である。この回路は必要となる能動素子数が少ないが、一般に素子感度が比較的高くなるという問題点がある。二つめの方法は、LC シミュレーション形構成法である。この方法は、さらに直接形構成法と間接形構成法に分けられる。まず直接形構成法は受動フィルタに含まれるリアクタンス素子を能動 RC 回路で等価的に実現する方法である。この回路実現のためには、GIC[4] を用いて実現される FDNR(Frequency-dependent Negative Resistor)[3] や等価インダクタ、あるいは、OTA(Operational Transconductance Amplifier) により実現されたジャイレータを用いた等価インダクタが用いられる。また間接形構成法は受動フィルタの各素子の枝電流と節点電圧を能動回路によりシミュレートする方法である。その代表的手法としてはリープフロッグシミュレーション等が挙げられる。以上で述べた LC シミュレーション法により得られた回路は、前述の縦続形構成法による回路と比較して多くの演算増幅器を必要とするが、LC フィルタの低素子感度性を受け継ぐことが期待されるという特徴をもつ。以上のように、能動 RC フィルタに関して、これまで様々な構成法が提案されている。しかしながら、能動 RC フィルタ回路は演算増幅器の有限 GB 積等の影響を受けるため、使用可能な周波数帯は比較的低い周波数に限られる。したがって、受動フィルタと能動 RC フィルタは相補的な立場で利用されているといえる。

以上のようにフィルタは、その発見から現在までおよそ 100 年の歴史があり、放送・通信分野をはじめとする多くの分野において欠かすことのできない重要な要素となっている。例えば、ラジオ、テレビ、携帯電話などに代表される無線通信においては電波資源の有効活用のため送信時の不要輻射を抑えたり、受信時の隣接信号を除去するためにフィルタは必要不可欠であるし、近年、需要が高まっているデジタル通信の分野においては、不要輻射や隣接信号を除去するためのフィルタだけでなく、伝送波形そのものを問題とするコサインロールオフフィルタ [11] も必要不可欠となる。

これらの応用例のうち、デジタル通信をはじめとする直交変復調装置において、複素係数フィルタ（以下、複素フィルタ）が要望されている [12, 14]。本論文では、従来のフィルタと複素フィ

ルタを区別するため、従来のフィルタを特に実係数フィルタ（以下、実フィルタ）と呼ぶ。本論文で扱うフィルタは複素フィルタである。このフィルタには、周波数に無関係に一定の虚数の抵抗値を持つ仮想的な素子（虚数抵抗）が含まれる。虚数抵抗は D. S. Humpherys によって 1970 年に提唱された素子である [15]。この素子は当初、超狭帯域実バンドパスフィルタの回路変形を容易に行うために考え出されたものである。この方法によって最終的に得られるフィルタは実バンドパスフィルタとなるが、複素フィルタは虚数抵抗を近似のためでなく、その性質を積極的に用いたものである。その結果、複素フィルタの周波数特性は正と負の周波数特性が直流に対して非対称となり、実フィルタでは実現不可能な周波数特性を実現することができるようになる。

複素フィルタは、その入力信号が解析信号となるため、入出力端子を実部と虚部にわけ、見かけ上 4 端子対の回路とすることにより、実信号処理系を用いて等価的に実現される。G. R. Lang と P. O. Brackett は複素伝達関数の概念を導入し、所望するフィルタ仕様を狭帯域バンドパスフィルタの設計問題に変換する手法を提案している [16]。この方法では帯域通過形の伝達関数しか構成できないほか、不要な極を打ち消すための零点を挿入しなければならない欠点を有している。W. M. Snelgrove と A. S. Sedra らにより状態空間形の複素アナログフィルタの構成法が提案されている [17] が、これは実信号を入力する回路であり、実信号を帯域制限された複素信号に変換するフィルタと考えることができる。また P. A. Regalia と S. K. Mitra は、両抵抗終端形の実アナログフィルタを二つの複素全域通過関数の和に分解して構成する方法を提案している [18]。これは虚数抵抗を用いた回路のウェーブ形構成法である。この方法により得られた回路は実入力信号に対し、実部および虚部の出力信号は互いに相補となるが、複素信号処理のためのフィルタではない。一方、デジタルフィルタの分野において、1968 年、T. H. Crystal と L. Ehrman は、従来の実デジタルフィルタの周波数応答を周波数軸方向にシフトすることによって複素デジタルフィルタを構成する方法を提案している [19]。一方、1992 年、武藤と神林は、この方法をアナログフィルタ分野に適用し、実アナログフィルタの周波数応答を周波数軸方向にシフトすること（周波数シフト法）によって得られる複素アナログフィルタを複素共振器により構成する方法を提案した [20]。この方法により、複素フィルタを実アナログ信号処理のためのそれだけでなく、複素アナログ信号処理系のためのそれとして扱うことが可能となった。それ以来、周波数シフト法に基づいた複素フィルタの構成法が、幾つか報告され [21, 22]、また周波数シフト法によらない新しい周波数変換に基づいた複素フィルタの構成法も幾つか提案されてきた [23, 24, 25, 26, 27]。

複素フィルタの実現に関しても、実フィルタの場合と同様に能動実現と受動実現に分けることができる。能動 RC 複素フィルタに基づいたものから分類すれば、まず縦続形構成法に属する構成法が挙げられる [20, 24, 25]。この構成法は、希望複素伝達関数を一次式に因数分解し、前述の複素共振器に代表される回路ブロックを縦続接続することにより所望特性を実現するものである。さらに、LC シミュレーション形構成法に属する構成法のうち間接形構成法に相当するものとして、複素リープフロッグシミュレーション法 [21, 22] がある。この方法は、虚数抵抗を含んだ複素フィルタの各節点電圧と枝電流の関係を能動 RC 回路によりシミュレートし、複素フィルタを間接的に実現するものである。また、直接形実現法としては、虚数抵抗をジャイレータにより等価実現できることを利用して、ジャイレータを能動 RC 回路により等価実現し、複素フィルタを直接実現する方法 [28, 29] がある。以上の LC シミュレーション形構成法に基づくフィルタは、実フィルタと同様に低素子感度性を有するから、能動素子を用いて実現した複素フィルタも、その低素子感度性を受け継ぐことが期待される。しかしながら、上記の方法のうち、ジャイレータの能動実現は大きな課題の 1 つである。ジャイレータを OTA [30] を用いて実現した回路は、比較的良好な特性を有し、また集積化に適しているという特徴をもつ [27] が、ディスクリート部品として市販されている OTA は殆どない。演算増幅器によりジャイレータを実現する場合には、負性抵抗を用いる必要があるが、このことにより素子感度が高くなるという問題が発生する。その結果、この回路を用いた複素フィルタの素子感度も非常に高くなってしまう。

一方、複素フィルタの受動実現に関してはこれまで殆ど報告されていない。上記のジャイレータを用いた複素フィルタは、その唯一の受動実現方法と考えられる。このフィルタは、終端抵抗、キャパシタ、インダクタ、ジャイレータから構成される [28]。ジャイレータは受動素子であるから、この回路は複素フィルタの受動実現であると見ることができる。しかしながらジャイレータは非相反性を有するため、その受動実現はマイクロ波程度の非常に高い周波数帯を除いて非常に困難であることが知られている。近年、非常に GB 積の高い演算増幅器は入手可能となってきており、OTA に関しても数多くの研究の結果、高性能なものが考案されているため、応用可能な上限周波数帯は上がってきているが、前述のように能動素子には GB 積等の問題は必然であるから、高周波への応用は比較的困難となる。また特に、通信機のフロントエンド等の微弱信号を扱うような応用において雑音の問題は非常に深刻なものとなるから、能動素子の使用は増幅手段を除いて許されない。従って、このような用途へ適用できる複素フィルタは、受動実現された複素フィルタ

以外考えられない。

以上の複素フィルタの実現方法とは異なるが、複素フィルタにより実信号処理を行う際、入力信号を解析信号に変換するための位相差分波器 [31] が必要となる。位相差分波器は、多くの演算増幅器または LC 素子を用いた全域通過回路の縦続接続によって実現される。従って、位相差分波器の使用は回路規模をむやみに増大させるので、複素フィルタを実信号処理のために利用することは実用上好ましくない。しかしながら、従来の実フィルタ用の測定系を用いて複素フィルタの周波数特性の測定を行う場合には、位相差分波器もしくは直角位相発振器 [32] の使用はやむを得ないといえる。位相差分波器は等リプル近似に代表される近似理論により設計されるため、必然的に位相誤差をもち、これが測定誤差に大きな影響を与える。従って、位相誤差はなるべく小さいことが望ましいとされているが、その定量的な考察はこれまで報告されていない。

以上の観点から、本研究ではまず理想トランスを用いた虚数抵抗の新しい受動実現方法を提案し、複素フィルタの受動実現手法を示す。また、この方法により得られた回路を演算増幅器を用いてシミュレートすることによる、新しい能動シミュレーション方法を提案する。そして受動実現に適した周波数変換を導出し、実際に受動部品を用いて複素フィルタを構成する。次に、周波数変換を用いない複素フィルタを構成する方法を述べる。最後に、複素フィルタの周波数特性の測定の際、問題となる解析信号の位相誤差の影響を定量的に評価し、新しい測定方法を提案する。

1.2 各章の概要

本論文は以下の内容から構成されている。

2 章では、従来の実フィルタと複素フィルタの基本的性質を述べている。まず、従来の実フィルタについて正だけでなく負の周波数の概念も取り入れてその性質について述べている。さらに、最も基本的な周波数シフト法に基づいた複素フィルタの性質について述べ、その正と負の周波数特性が非対称となることを述べている。従来の実現法についてその概要を述べている。さらに、複素フィルタの周波数特性測定の従来法について述べている。また、複素フィルタの応用例を紹介することによって複素信号処理の必要性を説明している。最後に、複素フィルタの低感度性について述べている。

3 章では、周波数シフト法に基づいた能動 RC 複素フィルタの新しい構成法について述べている。従来のジャイレータを用いた虚数抵抗の等価実現法を用いれば、複素フィルタを両終端抵抗、

キャパシタ、インダクタ、ジャイレータにより構成することができる。本章では、この回路の虚部信号経路を構成する回路を、実信号経路を構成する回路の電流と電圧を入れ替えた回路、すなわち双対回路とすることによって、虚数抵抗を理想トランスによって等価的に実現する方法を提案している。この回路は始端、終端抵抗、インダクタ、キャパシタ、理想トランスから構成される。ジャイレータや理想トランスは受動素子であるから、両者の回路は受動素子だけで構成されているといえるが、実際の素子による受動実現（以下、狭義の受動実現）の観点から両者の回路を比較すれば、従来回路に含まれるジャイレータは非相反素子であることに対し、提案回路は全て相反素子で構成されるから提案手法の方がより高い狭義の受動実現の可能性を有しているといえる。本章ではさらにこの回路を原形回路とし、FDNR法により演算増幅器を用いてシミュレートする方法について述べる。このことにより、新しい能動シミュレーションが可能となる。最後に、計算機を用いた素子感度解析を行うと共に実験を行い、提案手法の有効性を確認している。

4章では、受動実現に適した複素伝達関数の構成法とその受動実現について述べている。3章で提案した原形回路には理想トランスが含まれる。理想トランスは、1次側と2次側の自己インダクタンスが無限大の密結合トランスであると捉えることができる。従って、このトランスは、1次側と2次側の自己インダクタンスを、回路内に含まれるインダクタよりも十分に大きくすることにより近似的に実現することができる。このことは、トランスの1次側と2次側の巻き数比を保ったままそれぞれの巻き数を十分に大きくしなければならないことを意味している。実際にこのようなトランスを製作した場合、長い巻き線のために損失や寄生容量が大きくなることが予想されるので、良好な特性は期待できないと考えられる。

そこで本章では、まず、3章において提案した理想トランスを含んだ回路の構成に着目し、受動実現に有利な回路構成が得られるよう工夫された周波数変換を提案している。この変換は、従来の周波数シフト法と実ローパス-ハイパス変換を組み合わせた新しい変換となっている。この変換によりインダクタを理想トランスに含めることが可能となり、これらは有限の自己インダクタンスを有する密結合トランスで実現することができるようになる。その結果、本章で提案する回路は、両終端抵抗、キャパシタ、密結合トランスだけから構成され、はじめて狭義の受動実現が可能となる。最後に、計算機を用いて、この回路の素子感度特性を解析すると共に実験を行い、提案手法の有効性を確認している。

5章では、従来の複素フィルタが周波数変換によって得られていたことに対し、少々強引な方法

ではあるが、実バンドパスフィルタに含まれるリアクタンス素子の幾つかを直接虚数抵抗に置き換えることにより得られる複素バンドパスフィルタについて述べている。提案手法により4種の複素フィルタが得られている。これらのうち2つは、周波数変換を考慮していないにも拘わらず、3章で用いた従来の周波数シフト法と4章で用いた新しい周波数変換によって得られる複素バンドパスフィルタと等価であることが示されている。

さらに、残りの2つは等リプル特性は持たないが、インダクタまたはキャパシタの一方を全く含まない複素フィルタとなることを述べている。これらのうちインダクタを含まない複素フィルタを従来のジャイレータを用いて実現した場合、少数のジャイレータにより複素フィルタを実現することができる。このことは、OTAを用いた能動実現において大変魅力的であるといえる。最後に周波数特性例および素子感度特性を示している。

6章では、まず従来の位相差分波器がもつ位相誤差により発生する測定誤差を定量的に評価している。その結果、位相誤差による影響は通過域付近においては比較的少ないが、負の周波数における遮断域ではその影響が非常に大きいことを明らかにしている。このことは、負の周波数における周波数特性を測定する場合には、位相差分波器の位相誤差を非常に小さくする必要があることを示している。

そこで本章では、位相差分波器を必要としない測定法について述べている。この方法は、被測定回路の線形性に注目することから発想を得ている。提案手法は、実部および虚部入力信号として、同相および逆相、または片方を接地し他方入力だけとし、そのときに現れる出力信号に簡単な重ね合わせを施すことにより容易に実現される。この測定法に自動ゲイン・フェーズ測定器を用いる場合、従来法と比較して2つの伝送特性を測定するために、2倍の測定時間が必要となるが、その測定誤差は、ゲイン・フェーズ測定器の測定誤差だけに依存する。通常、ゲイン・フェーズ測定器の測定誤差は、製作が比較的容易な範囲における位相差分波器の位相誤差よりも小さい。また、測定誤差は、絶対精度と相対精度に分けることができる。このうち提案手法は、相対誤差に大きく依存している。通常この種の測定器は、絶対誤差よりも相対精度の方が小さくなる傾向にある。このことは、かえって提案測定法に非常に有利である。そこで実際に、例示した回路の周波数特性を従来法および提案手法を用いて実測し、両者の比較を行っている。その結果、提案手法の測定誤差は従来法のそれと比較して、かなり少ないことが示されている。

7章では、各章のまとめと今後の課題について述べ、総括する。