

第 7 章

結論

本研究は、複素フィルタについて二つの内容について検討を行った。一つは複素フィルタの構成に関するものであり、もう一つはその周波数特性測定法に関するものである。以下に各章ごとのまとめを示す。

第 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に触れると共に、その応用例を示し、従来の構成法、周波数特性測定時の問題点を指摘した。複素フィルタは正や負の周波数といった従来の実フィルタにない概念を取り入れることができる、という特徴をもつ。この特徴を活かした複素フィルタの応用例を示し、その有効性を説明した。また、従来の実信号処理のために複素フィルタを用いるためには実信号を解析信号に変換するための位相差分波器が必要となることを述べた。このことは回路規模の増大を招くが、その周波数特性の測定においてその使用はやむを得ない。さらに複素フィルタの素子感度は、整合点において虚数抵抗を含めリアクタンス素子の素子値変動に対して零となることを明らかにした。

第 3 章では、受動素子を用いた複素フィルタの構成を提案した。前半ではジャイレータを用いた従来の虚数抵抗の実現方法について述べ、後半では、理想トランスを用いた虚数抵抗の新しい実現法について述べた。従来回路と提案回路は共に、実部回路と虚部回路がジャイレータや理想トランスで結合された形となる。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から構成されているといえる。本論文では、このような受動素子を広義の受動素子と呼び、狭義の受動素子、すなわち現実の素子で実現可能な受動素子と区別した。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狭義の受動実現の可能性がより高いといえる。しかし理想トランスは 1 次側と 2 次側の自己インダクタンスが無限大であ

るから、本章の段階においては狭義の受動実現は、実際には困難といわざるを得ない。一方、この回路を能動回路によりシミュレートすることで新しい能動シミュレーションが可能となった。結果として、二つの回路実現を提案した。すなわち、一つは広義の受動素子から構成された回路であり、もう一つは演算増幅器をもちいてシミュレートされた回路である。二つの提案回路の素子感度は従来のフィルタのそれと同じか、僅かに高いことを示した。また、演算増幅器を用いてシミュレートされた回路について実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

第4章では、実際の受動素子による複素フィルタの構成法を提案した。第3章で提案した回路構成に注目し、受動実現に有利な実ローパスフィルタ-複素バンドパスフィルタへの新しい周波数変換方法を提案した。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ことを示した。このことにより、実際の受動素子、すなわち狭義の受動素子による複素フィルタの実現がはじめて可能となった。この回路を受動素子により実現し、実験を行うことで提案手法の有効性を確認した。提案回路は受動素子だけで構成されるため、使用可能な周波数帯は演算増幅器等のGB積等の制約を受けない。その結果、提案回路は比較的高周波領域に適用することができる。さらに受動素子だけにより構成されていることを考慮すれば、提案回路は非常に低雑音であるから通信機のフロントエンド等の微弱信号を扱う分野への応用も可能であるといえる。

第5章では、虚数抵抗リアクタンス素子の一種であることに着目し、実バンドパスフィルタに含まれる幾つかのリアクタンス素子を直接虚数抵抗に置き換えることで得られる4つの複素フィルタの性質について述べた。このうち2つの複素フィルタは、従来の周波数シフト法およびELHT法の特殊な場合として含まれる。さらに、残りの2つの複素フィルタは等リップルとならないが、インダクタまたはキャパシタの一方を全く含まない R^1CR 、 LR^1R フィルタとなった。このフィルタは、従来の周波数シフト法などから得られた複素フィルタと比較すると、能動実現において必要となるジャイレータの数を低減することができる。また、提案する4つの複素フィルタの周波数特性例を示し、それらが全て複素伝達特性を有していることを確認すると共に、それらの感度特性が全て同程度であることを示した。

第6章では、複素フィルタの周波数特性測定に用いられる位相差分波器の位相誤差の影響について定量的評価を行った。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示した。また、位相差分波器を用

いることなく、複素フィルタの周波数特性を測定する方法について述べた。提案する測定法は間接的な方法ではあるが、位相差分波器や直角位相発振器などを用いることなく、従来の実フィルタのための測定系を用いて複素フィルタの周波数応答を測定することができる。また、例示したフィルタの周波数特性を従来の方法および提案する測定法を用いて実測した。提案測定法で推定される測定誤差の範囲が -1.3dB ~ $+1.1\text{dB}$ であるのに対し、実際の測定誤差は $\pm 0.3\text{dB}$ 以下と非常に小さい値となった。これは提案手法の測定誤差が、測定値の相対誤差に大きく依存しているためである。一般にこの種の測定に用いられる測定器の相対誤差は絶対誤差よりも小さくなる傾向にあり、このことは提案測定法に好都合な結果をもたらす。実際に筆者の実験室において幾つか位相差分波器を製作したが、実験の度に位相差分波器を準備することは煩雑な作業であった。新しい測定法を導入することで実験は簡素化され、より高精度な測定結果を手軽に得ることができるようになった。

以上、複素フィルタに関する研究として、幾つかの知見が得られた。しかしながら、まず、虚数抵抗を含む複素フィルタをジャイレータや理想トランスを用いて等価実現した回路の感度特性については、まだ数学的な解析がなされていない。この回路の感度特性は、虚数抵抗を含む二端子対の複素フィルタの場合と異なり、整合点においてかなり低くなるが零とはならない。このことは複素フィルタのさらなる低感度化の可能性を示していると考えられる。

次に、複素フィルタの構成として、密結合トランスを用いない複素フィルタの受動実現が挙げられる。提案回路に含まれる密結合トランスの製作に当たっては、結合係数を上げるため透磁率の高いフェライトコアを使用する必要があると考えられる。市販されているフェライトコアを用いたインダクタの損失係数は 10MHz 程度から急速に上昇 [44] するから、提案回路の使用可能な上限周波数もこの程度となる考えられる。このことから、集中定数回路で実現可能な上限の周波数まで複素フィルタを受動実現するためには、インダクタ、キャパシタ、抵抗だけを用いて回路を構成することが望まれる。

また、インダクタまたはキャパシタを全く含まない R^iCR 、 LR^iR フィルタについては等リプルとする方法の確立が望まれる。このフィルタを得るためには、周波数変換に基づいた従来の設計でなく、核関数の設計からはじめる動作パラメータ法に基づいた設計が必要となる。この場合、複素フィルタの設計手順は、従来の実フィルタのそれとほぼ同じとなると推測される。但し、複素フィルタの振幅自乗関数は、実フィルタのそれとは異なり、付録 A.1 で示した $T(s)T^*(-s)$ となる

ことに注意が必要である。さらにフィルタの入力インピーダンスが求められた場合、その入力インピーダンスから、回路の各素子を抜き出すことが必要となる。これはそれ程容易ではない。なぜなら、従来の実フィルタには含まれない虚数抵抗が回路内に含まれるため、フィルタの入力インピーダンスからどのように素子を抜き出すかということについて再検討を要するからである。

さらに複素フィルタの周波数特性測定においては、提案測定法は被測定フィルタが線形動作をすることを前提としているため、歪率やダイナミックレンジなどに代表される、回路の非線形性に関する測定が困難なことなどが挙げられる。

最後に、本文で示された提案手法が今後のアナログフィルタ理論の発展に貢献できれば何より幸いである。