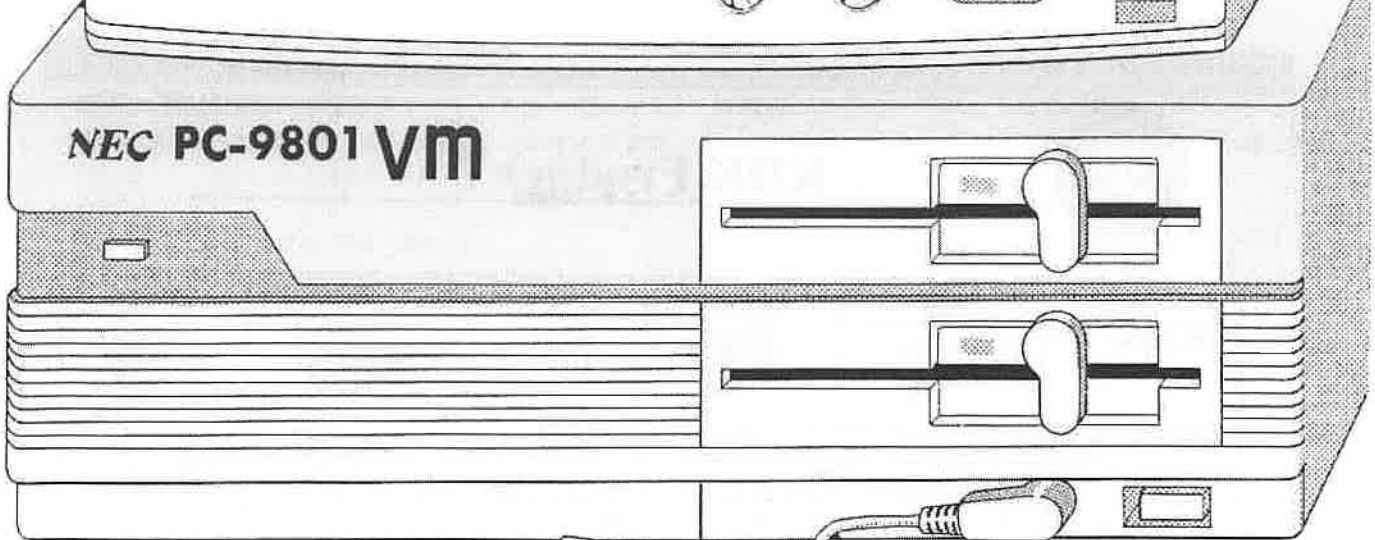
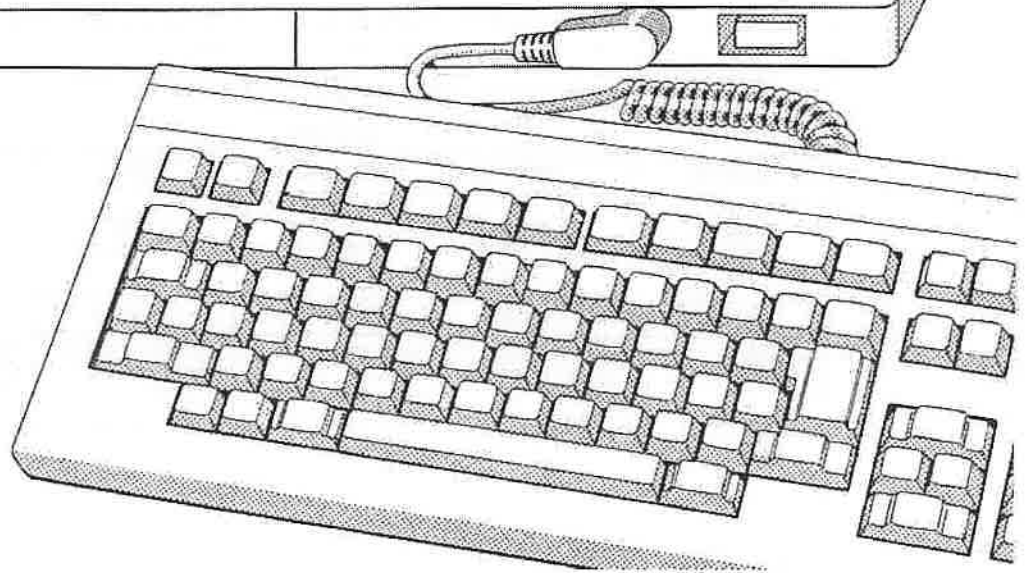




PC-1990



NEC PC-9801 VM



自由自在な設計ができ、実践的な

# フィルター設計支援ソフト

私たちがさまざまな電子回路を設計するとき、絶対に必要な要素の中にフィルターがあります。ところが、回路構成は簡単なものの、いざその定数を決めようとすると、ちょっとした計算が必要になります。パワースペクトル特性は、3次などの低次なら、まだ電卓片手に計算できます。それ以上複雑になってくると、もう、どこかの本に載っている数表を使って計算するか、コンピューターに頼るしかありません。そうして設計しても、実際の周波数特性や波形応答特性がわからないと、結局はカット&トライになったりします。

そこで、身近にあるパソコンを使ってできる（といってもPC-98シリーズのみですが）、「フィルター設計支援ソフト」を作ってみました。フィルターの設計はもちろんのこと、周波数特性解析や、波形応答特性解析を含む統合化ソフトとしました。これがあれば、使いたいときに気軽にフィルターを使うことができます。

## フィルターの基礎知識

いくらフィルター支援ソフトで、簡単に設計ができるといっても、ある程度はフィルターに対する基礎知識がないとスマートな設計はできません。そこで、ま

ず、フィルターの基礎を勉強してみます。

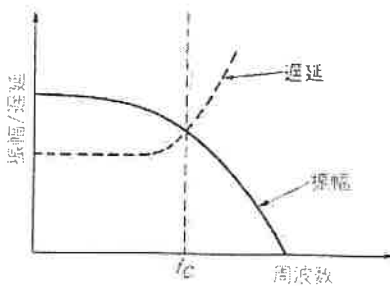
ローパス・フィルターのいくつかの種類を第1図に示します。ここで重要なことは、これから設計するフィルターは、周波数振幅特性だけに注目すればいいのか、あるいは波形特性に注目しているのかということです。

モデムなどの波形を伝送するものは、群遅延がフラットなトムソン（ベッセル）・フィルターがぴったりです。一方、人間の声などの音声を中心に伝送するのは、位相特性はあまり気にしなくてもいいでしょう。そんな場合は、連立チェビシェフ・フィルター（楕円フィルター）が似合っています。テレビなどの映像信号を伝送するときには、周波数特性、位相特性ともに重要で、TBTフィルターや連立チェビシェフ・フィルター+オールパス位相補償フィルターなどが必要になってきます。

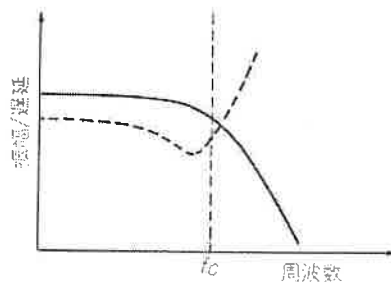
ハイパス・フィルターは、基本的にローパス・フィルターを座標変換して計算されます。ここで注意しなければならないのは、座標変換の際、周波数0からカットオフ周波数までの有限の周波数範囲を、ハイパス・フィルターのカットオフ周波数から無限周波数に写像することです。すなわち高域の周波数特性が延びた特

第1図 ローパス・フィルターの種類

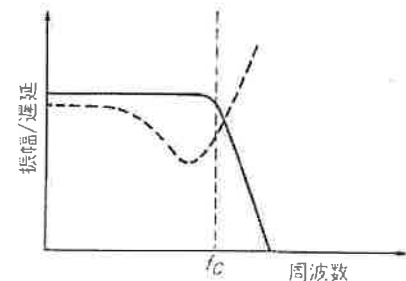
① 遅延平坦フィルター



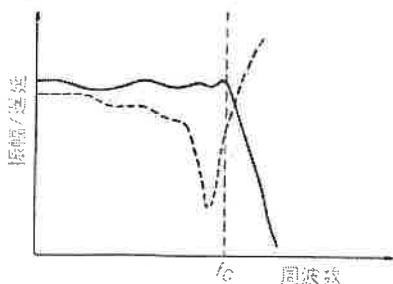
② TBTフィルター



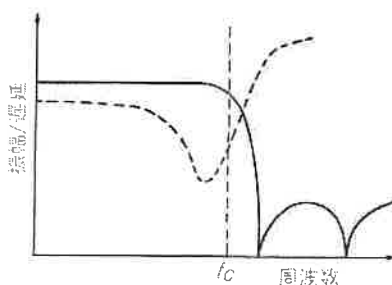
③ 振幅平坦フィルター



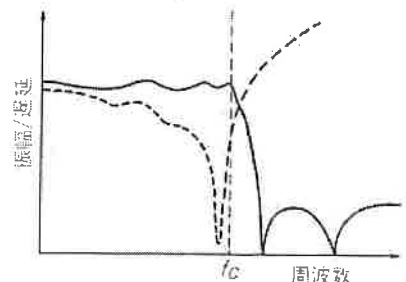
④ 通過域波状フィルター



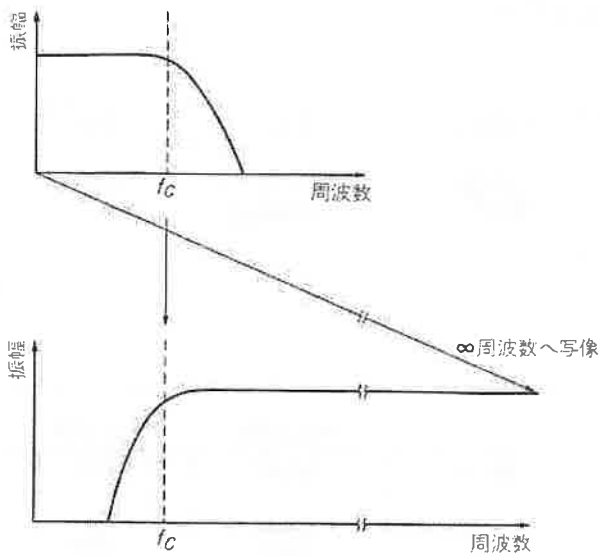
⑤ 阻止域波状フィルター



⑥ 通過域波状、阻止域波状フィルター



第2図 標準ローパス・フィルターのハイパス変換



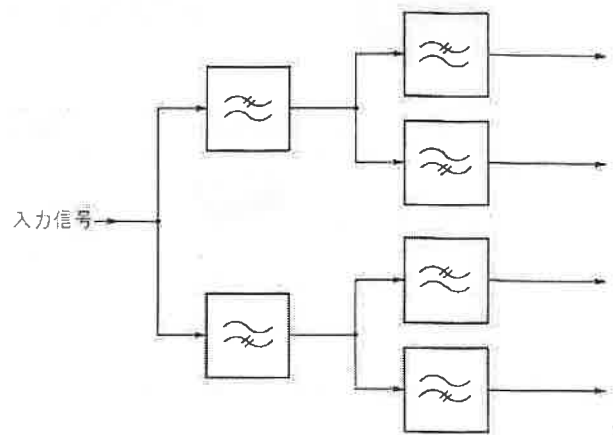
性になってしまうことです。そのことは、位相が直線な低域フィルターであったとしてもその高域変換されたフィルターは、位相直線にならないことです(第2図参照)。

バンドパス・フィルターは、ローパス・フィルターとハイパス・フィルターを組み合わせたものや、ローパス・フィルターの座標変換でできますが、ハイパス変換と同じように線形な写像とならないために問題があります。つまり、中心周波数に対して、高域および低域方向に対称な周波数特性や、群遅延がフラットなバンドパス・フィルターとして設計する必要があります。今回のソフトは、残念ながらバンドパス・フィルターの設計はできません。自分で作ってみたい人は、参考文献1や2を参考にして頑張ってみてください。プログラムができれば、ぜひどなたか発表してください。

フィルターを構成する場合、T型と $\pi$ 型がありますが、一般的には、インダクターが少なくなるように構成します。それは、インダクターは実際に基板などに実装する場合に問題があるからです。複数のインダクターは、うまく配置しないとどうしても相互インダクタンスをもってしまいます。もちろん接近したキャパシターも結合容量を持ってしまいますが、空心コイルがあったりして、インダクターのほうが深刻です。またインダクターは、どうしても大型になってしまったり、目的値の素子を実際に探すのは、キャパシターに比べて、はるかに大変です。

分波フィルター(フィルター・バンク)は、第3図のようにハイパスとローパス・フィルターを組み合わせるのことが多いように思います。ところがこの場合は、最小インダクター型に選ぶと問題があります。それぞれの入力インピーダンス特性が影響しますので、それぞれの阻止バンドでは、入力インピーダンスが他

第3図 分波フィルター



になるべく影響を与えないように、ハイ・インピーダンスになるように選ばないといけません。またそれぞれのカットオフ領域では、影響が大きく出てしまいますので、一般的には、第4図のように、入力に直列共振回路を入れて補正します(参考文献3参照)。

## 理論と実際が近い世界

ここで、例題としてひとつのフィルターを設計してみます。まず

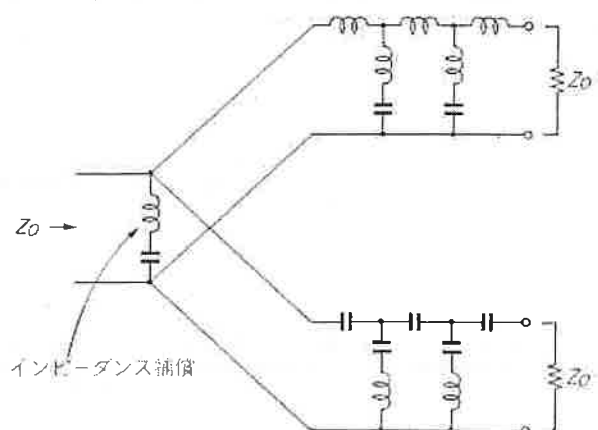
### >DESIGN

と、MS-DOSのプロンプトラインからタイプして、ソフトを立ち上げます。するとオープニング・メッセージとともに、メイン・メニューが表示されます。カーソルは「設計」のところにありますからそのままリターンを押すと、設計メニュー(写真1)の表示になります。

カーソル移動キーを使って、「連立チェビシェフ高域通過」を選んでみます。そうすると設計パラメーターのウィンドウが開きます。設計パラメーターを次のように決めて設計をさせると、写真2のように結果が表示されます。

・次数=9

第4図 分波フィルターのインピーダンス補償



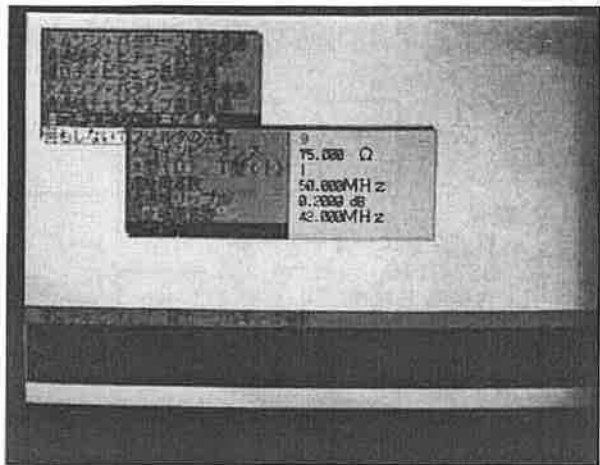


写真1 設計メニュー表示

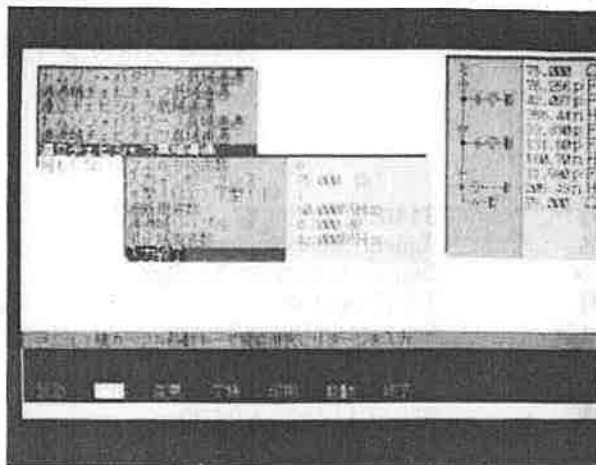


写真2 計算結果の例

- 入力インピーダンス=75Ω
- 通過域リップル=0.2dB
- バスバンド遮断周波数=50MHz
- ストップバンド遮断周波数=42MHz
- フィルターの形=T型

インダクターは、7角のポビンに自分で巻くとして、キャパシターはE24シリーズを使うため、いちばん近い値に変更します。「変更」のメニューを使い素子値を変更し、「F特」のメニューで周波数特性を確認すると、第5図のようになります。

次に、インダクターを作ります。高価なLCメーターがあれば簡単でしょうが、アマチュアの場合は、そういうわけにもいきませんので、第6図のような簡単な方法で測定しながらLを作りました。とくに使用する周波数を、できるだけ実際使う周波数で行うといいのですが、ここではオシロスコープの関係もあって10MHzで行いました。

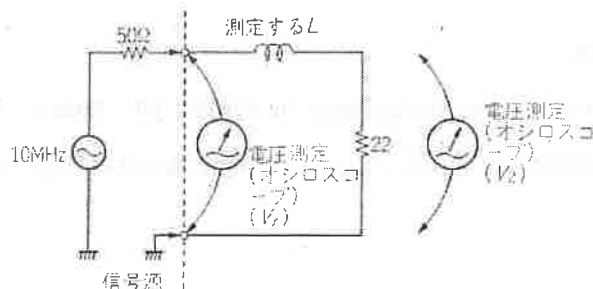
実際に組み立てたフィルター・ユニットを写真3に示します。またネットワーク・アナライザーで周波数特性を測定してみると、写真4のようになります。これくらいの周波数になると、フィルター・ユニットに手を近づけるだけで、特性が変わってしまいます。計

算によると80dBくらい取れるのですが、測定器のS/Nが追いつかないのと、先ほどの測定時の周囲の影響で、70dB程度しか表示できませんでした。

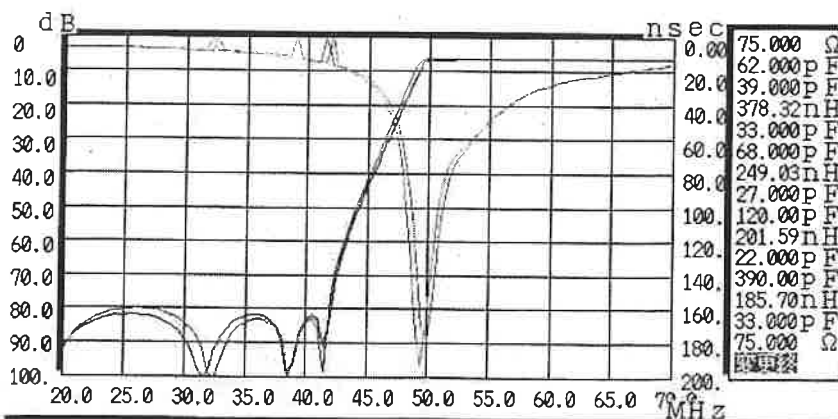
まあ多少計算値との違いがありますが、大きな狂いはありません。しかも、Lは計算値の値に設定しただけで、ほかにコアの再調整などは行っていません。

このように、実際設計した値を、実際の素子で忠実に再現してあげると、測定器がなくとも比較的理論にあった特性が得られます。電子回路の中で、理論と実

第6図 インダクタンスの測定



- ① オシロスコープのプロープの容量が22pFとすると、10MHzでのインピーダンスは723Ω。測定系のインピーダンスは低くおさえられているので、誤差は少ない
- ② V1とV2からLを計算する



第5図 設計理論値特性とキャパシターのみ実際の値に即した値に変更した特性を重ねたもの

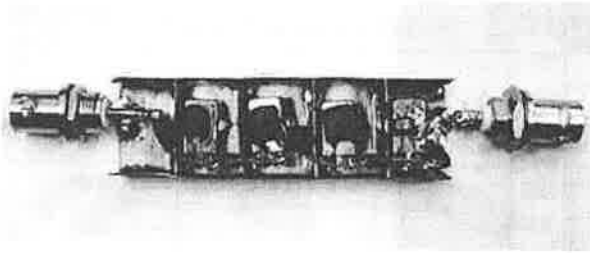


写真3 計算結果から作ったフィルター

際が合う少ない例のひとつでしょう。ここでいちばん重要なことは、インダクターをいかにうまく作るかです。コンデンサーは、周波数にあった適当な種類を使えば、まず問題ありません。ところが、インダクターは使用する周波数帯をうまく考えて作らないと、Lを作っているのか、LC共振器を作っているのかわからなくなってしまいます。

アマチュアの場合は、高価な測定器は誰からか借りてこないと使うことはできません。したがって、測定機なしでフィルターを作るのは、いかにあり合わせの測定機で計算したLを作るか、もしくは見つけてくるかです。

## 「フィルター設計支援ソフト」の機能

### 1. メイン・メニュー

MS-DOSのプロンプトラインからたとえば、  
A>DESIGN  
とタイプするとソフトが立ち上がります。まずバージョンなどのオープニング・メッセージの後、メイン・メニューが表示されます。左右のカーソル・キーを使って、項目を選びます(写真1の画面)。

- ・設計：各種の低域通過フィルター、または高域通過フィルターの設計を行います

- ・F特

設計した、あるいは定数を変更したフィルターの周波数対振幅特性や群遅延特性がプロットされます

- ・変更

理論値として設計された定数を、現実存在するE24シリーズなどの素子値に変更し、その後「F特」、「T特」などによりその特性を確認します

- ・T特

設計したフィルターに、ステップ信号や、SIN自乗で立ち上がるパルス信号を入力し、その過渡応答を調べます(トランジェント応答)。また波形伝送時の伝送系の評価によく使われる、アイパターンを表示させることができます

- ・印刷

現在表示されているCRT上のイメージをプリントアウトします

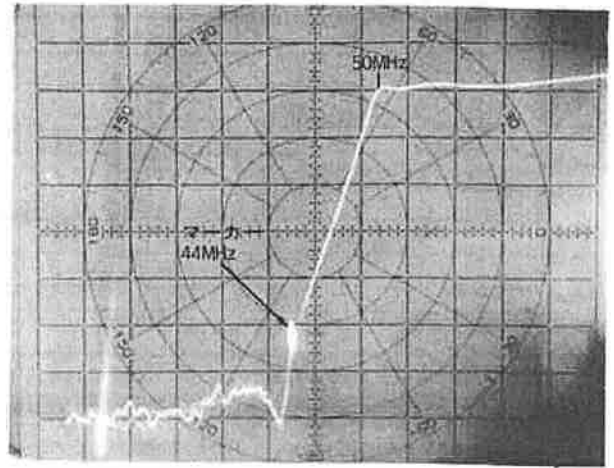


写真4 製作したフィルターの特性 (10dB/Div)

- ・能動

T型梯型フィルターを、FDNRタイプのアクティブ・フィルターに変換しその回路を表示します

- ・終了

このソフトを終了しMS-DOSに戻ります

### 2. 設計

メイン・メニューで「設計」を選ぶと、設計するフィルターの種類選択のウィンドウが開きます(写真2)。上下のカーソル・キーを使って、設計するフィルターの種類を選びます。それから、設計するためのパラメーターを設定するための、ウィンドウが開きます。

- ・トムソン・パワース

トムソン(ベッセル)・フィルターは、群遅延がフラットになるように設計された低域通過フィルターです。MFD(最大平坦遅延フィルター)とも呼ばれます。ステップ応答に、リングがないのが大きな特徴で、波形伝送用のフィルターとしてよく利用されます。

一方、パワース・フィルターは、特性関数 $T(P)$ の二乗振幅特性 $T(P) * T(-P)$ が $P$ の2乗で表されることからわかるように、振幅特性がフラットになるように設計されたフィルターで、ポピュラーなのでどなたでもご存じでしょう。MFA(最大平坦振幅フィルター)とも呼ばれます。

ここでは、これら特徴的な2種類のフィルターの、中間的な特性のフィルターを設計することができるのが大きな特徴です。TBT(トランジショナル・パワース・トムソン・フィルター)とも呼ばれます(参考文献4参照)。

この性質は結合係数と呼ばれるパラメーターで決定され、1から0までの値を取り、1のときがMFD、0のときがMFAとなります。0から1の間の係数の特性は、2つの中間的な特性になり(たとえば0.5のときはちょうど中間の特性です)よくテレビジョンの

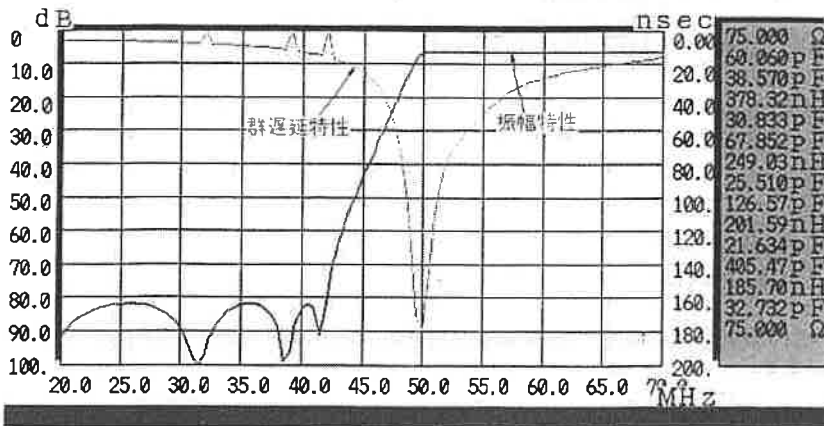


写真5  
群遅延特性などのグラフの画面

信号などに使われます。

・通過域チェビシェフ

通過域等リップル・フィルターとも呼ばれ、信号通過域特性が、等リップル特性のフィルターです。パワースペクトル特性より急峻な遮断特性が得られますが、位相特性はますます歪みます。

・連立チェビシェフ

楕円関数を使うので楕円フィルターとも呼ばれ、少ない次数で、非常に急峻なフィルターを作ることができます。しかしその一方、位相歪みが激しく、そのまま使うにはテレビジョン信号などには向きません。オーディオ信号をA/Dする際の、アンチ・エイリアシング・フィルターなどに使われました。また、オールパスの位相補償フィルターと組み合わせられて使われ、デジタル化には欠かせないフィルターです。

パラメーターとして、入出力インピーダンスを指定しますが、連立チェビシェフ・フィルター以外は、入出力を異なる値にして設計することができます。パラメーターを入力すると、設計を始め、写真4のようにフィルターの回路とともに設計された値が表示されます。

設計のパラメーターは、直接設定したいパラメーターとなっていない場合もあります。その場合は、「F特」、「T特」と組み合わせての試行錯誤が必要です。そのため、「F特」と「T特」の処理時間を短くするように考えられており、思考の中断がないようにしています。

3. F特

「設計」もしくは「変更」で決められた回路定数に対して、周波数定常解析を行います。周波数対振幅特性と周波数対群遅延特性を計算し表示することができます。メイン・メニューで「F特」のところにカーソルを移動し、リターン・キーを押すと、表示するグラフの桁取りに関するパラメーターのウィンドウが開きます。必要なパラメーターをセットし計算させると、

写真5のように特性を表示させることができます。

「変更」の後では、前の表示（たとえば「設計」で計算された理想的な特性がプロットされている）に重ねてプロットすることができます。

4. 変更

「設計」された理想的な定数を、たとえばE24シリーズなどの実際にある素子値に変更することができます。また、単にAC解析やトランジェント解析を使うためだけに、解析したい回路定数を入力することができます。

こうして設定された回路は、メイン・メニューの「F特」や「T特」を使って特性解析が可能です。

5. T特

「設計」もしくは「変更」で決められた回路定数に対して、過渡応答特性の解析を行います。また、波形伝送系の特性評価によく使われる「アイパターン」を計算し表示させることができます。入力波形としては、ステップ、SIN二乗で立ち上がるステップそれにM系列のパルスを選ぶことができます。SIN二乗波形とアイパターンに関しては、立ち上がり時間を指定することができます。

メイン・メニューで「T特」のところにカーソルを移動し、リターン・キーを押すと、入力波形を選ぶウィンドウが開きます。その中からひとつを選び計算させると、写真6のように入力波形および出力波形をプロットし表示させることができます。

いちばん初めにこの表示をさせるときには、スケールリングはオートのみですが、写真6が表示されている間にもう一度「T特」を実行させると時間軸の設定を自由に変更することができます。いわば、オシロスコープの遅延掃引して波形を見るような機能です。

なお、「アイパターン」の様子を写真7に示します。「変更」の後では、前の表示（たとえば「設計」で計算された理想的な特性がプロットされている）に重ね

写真6  
入力/出力波形の表示画面

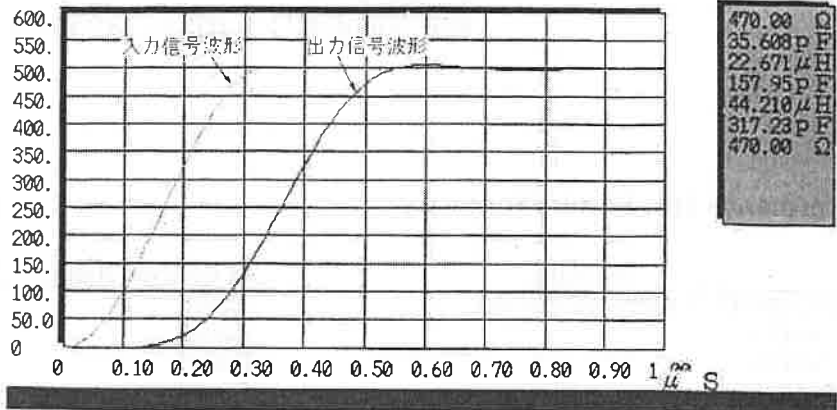
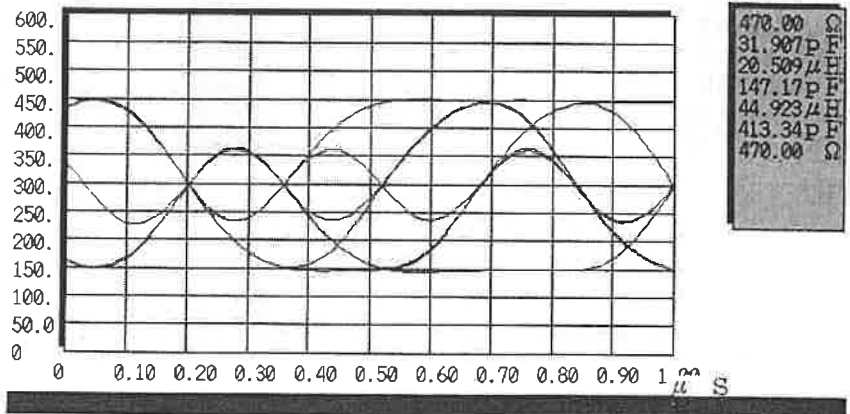


写真7  
アイバターン表示画面



てプロットすることができます。

## 6. 印刷

計算されたグラフとか定数を取っておきたいようなときに、この「印刷」の機能を使ってCRT画面上のグラフィックをそのままプリンターにダンプすることができます。

## 7. 能動

T型梯形フィルターを、FDNRタイプのアクティブ・フィルターに、変換することができます。写真8に計算された結果を示します。

### フィルター設計ソフトの舞台裏

使用言語は、「Mind」と「アセンブラ」をつかいました。NDP（80287など）を使っての浮動小数点の計算は行いませんでした。計算速度に関係する部分は、すべてアセンブラで書いています（コンパイラの浮動小数点演算は使っていません）。

なお使用される言語は何を使っても問題ないのですが、注意を必要とするのは、大変高次の因数分解を必要とするだけに、倍精度（8バイト）の浮動小数点演算が絶対必要です。単精度では、低次のフィルターしか設計できません。

計算とはとくに関係ないのですが、使いやすいソフトにするには、どうしてもユーザー・インターフェースをグラフィックにする必要があります。ソフトを作るうえでは、むしろこの部分が大変時間と労力を必要とします。私の場合は、アセンブラで直接BIO Sをコールするモジュールを作りそこから組み立てて、グラフィックを作りました。

自分でこのようなソフトを作りたい人のために、どのように計算されているのかを簡単に説明します。ただし、具体的なプログラムリストに添って説明して

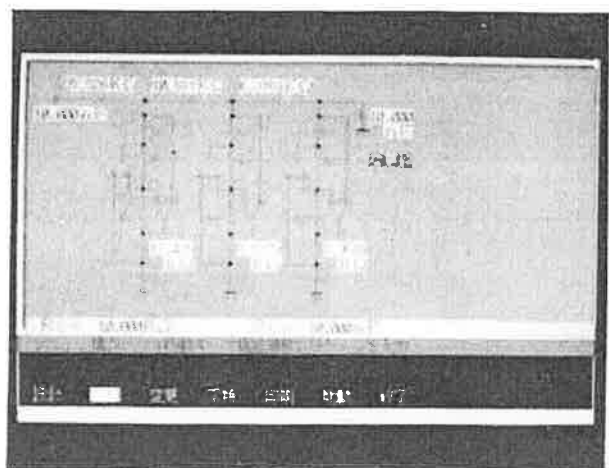
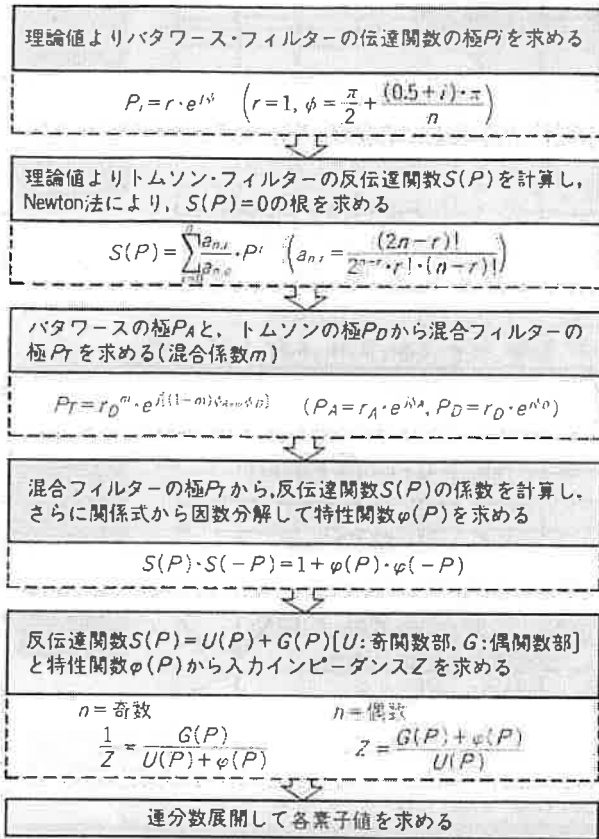


写真8 アクティブ・フィルターへの変換

第7図 バタワース/トムソン混合フィルターの設計



も、あまり意味がないと思いますので、アルゴリズムのみを説明します。

計算は参考文献1の計算方法をほぼそのまま使っています。違いは、入出力のインピーダンスが異なる場合でも設計できるようにしたことです(ただし連立チェビシェフ・フィルターの場合は除きます)。

1. フィルターの設計

三種類のフィルターの設計手順を、それぞれ第7図、第8図、第9図に示します。計算で面倒なのが、因数分解です。因数分解は結局、高次多項式方程式を解くことに帰着します。ニュートン法を使って、高次多項式方程式を解きます。

ニュートン法で注意することは、初期値の設定です。ここでは、複素平面で、単位円上を等間隔に区切った位置を初期値としました。そのためには、高次方程式を解く前に、その根がなるべく単位円上に来るように、係数を正規化してから解く必要があります。

チェビシェフ・フィルターの場合、通過域にリップルがあるために、とくに偶数次のフィルターの場合、縮退を行う必要があります。これが結構面倒な計算です。

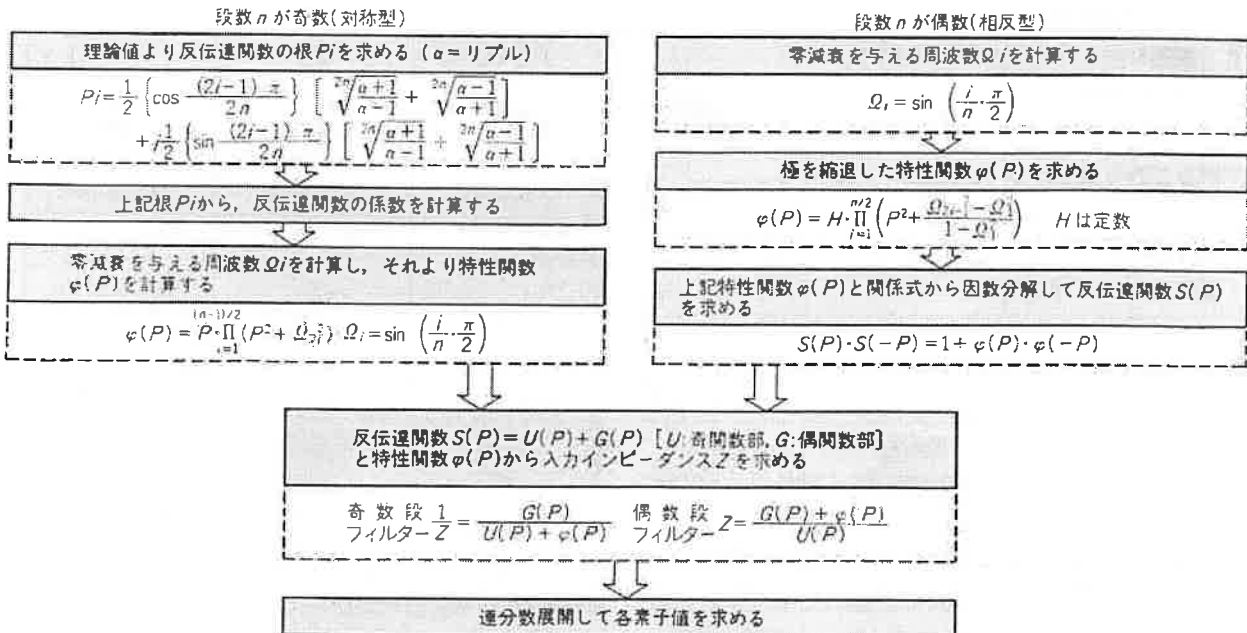
2. 周波数特性

梯型フィルターの終端抵抗の両端が1Vになるような、入力条件を求めることにより周波数特性を計算しています。いわば連分数展開を逆にやっていくようなもので、たいへん単純な繰り返しの計算ですみます。コンピューターの数値計算としてはもってこいです。ただしすべて複素数を使って計算しなければなりません。コンパイラ関数として、複素関数が必要です。

3. トランジェント解析

これも参考文献5の方法(ウェーブデジタル・フィルター)を使っています。このほかにもフーリエ変

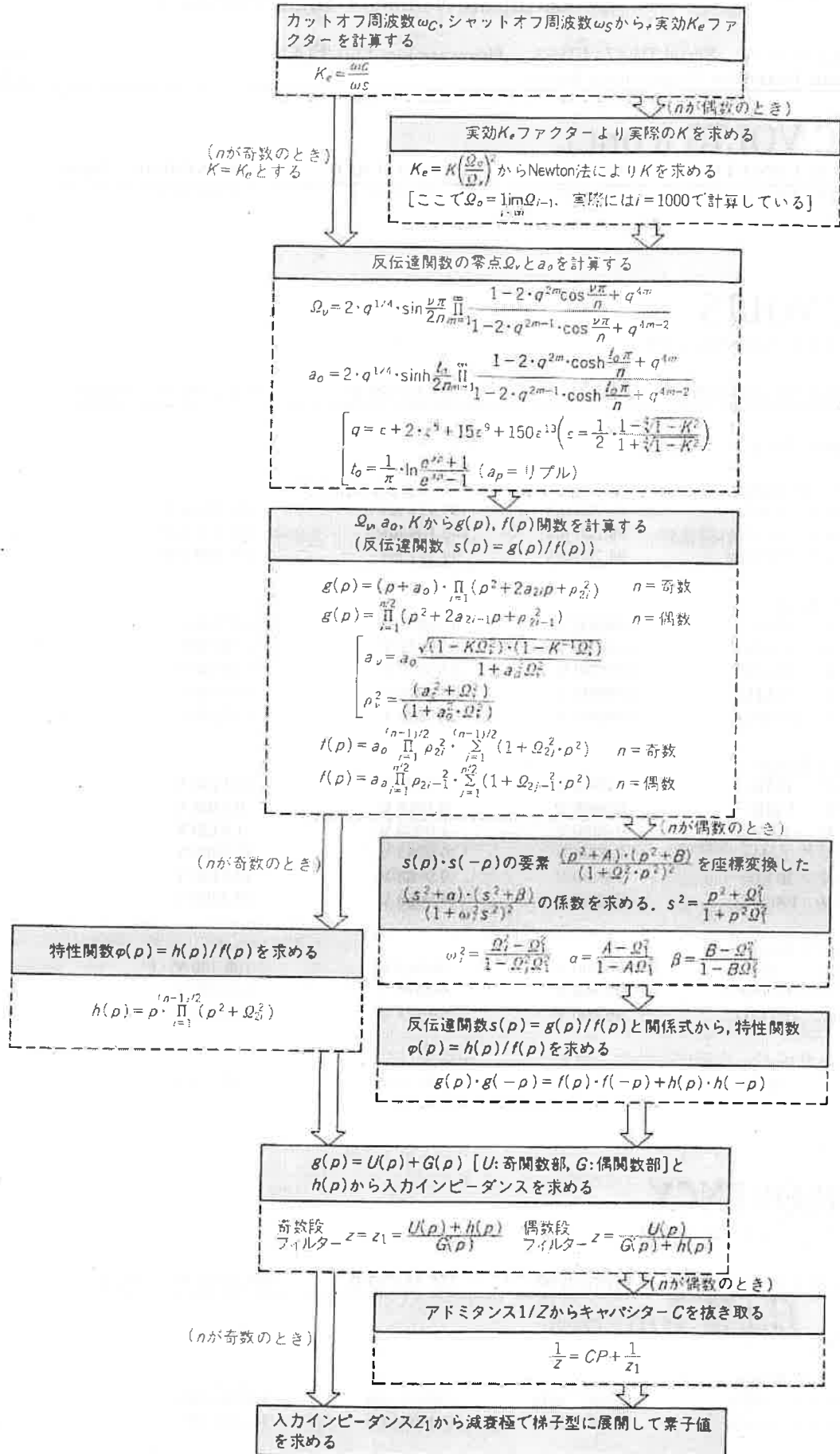
第8図 チェビシェフ・フィルターの設計



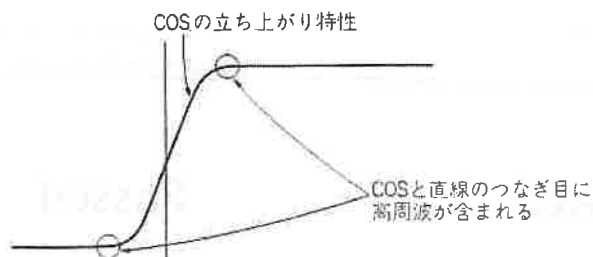


# 特集 パソコンによる電子回路設計

第9図  
連立チェビシェフ・フィルターの設計



第10図 COS波形のトランジェント



換を使ったもの(参考文献6), シミュレーション(参考文献7)などがあります。ここで本来は, シミュレーションで行いたかったのですが, すでに計算のアルゴリズムがあったことと, 実際の素子を変更した場合の計算しやすさから, この方法にしました。

#### 4. FDNR変換

これはおまけの機能として付けたもので, 参考文献8の簡単な計算を行っているだけです。むしろ回路を画面上に表示させるソフトを作るのが, おまけにしてはかなり大変な作業でした。

### 面白い使い方

単純にフィルターを設計するのに使っても, 十分役に立つと思います。そのほかに面白い使い方として, 二例ばかり紹介します。

#### ●波形をROMに入れてしまう

本誌No.67に, 間 幸久さんが, 「キー・クリック・フィルターの製作」という大変面白い回路を発表されています。その中で, トランジェントをCOS波形に選んでおられます。ところが, COS波形では第10図のように, トランジェント波形から直線波形に移行するところで, どうしても高調波が出てしまいます。また後の伝送回路が位相直線であっても, リンギングが発生する可能性もあります。

そこで, 波形の対称性を保ちながら, 高調波がなく, リンギングが出ないような波形はないのでしょうか。そのひとつの解決策に, トムソン・フィルターのステップ応答があります。しかも高次のトムソン・フィルターであれば, きれいな対称性を示します。

実際このソフトを使い, フィルターを設計しトランジェント解析した結果を, そのままROMの中に入れ

読みだせばこの目的にかなうはずですが, この場合は, 現実の素子のことを考えなくてもいいわけですから, 理想的な波形を得ることができます。

●コンピュータ上でアナログ信号処理をしてしまう  
コンピュータ上で, アナログ信号処理を設計し, シミュレートするうえでやっかいなことのひとつに, フィルターがあります。変調器, 増幅器などは簡単にできますが, アナログ・フィルターはやっかいです。そこで, シミュレーションのソフトの中に, そのままこのソフトを組み込めば, いろんなことをコンピュータ上で実験することができます。

### 最後に

このソフトもこれで終わったわけではなく, いろいろ拡張したいこともあります。とくに, 位相等価と, バンドパス・フィルターを追加したいところです。

広くこのソフトを使っていただくために, ご希望の方に頒布します(実行ファイルのみ)。ご希望の方は, 11月4日までに, その旨の往復はがきを直接, 下記の住所までお寄せください。タダとしたいところですが, 送料その他の経費のための費用をいただく予定です。はがきをいただいた方には, 追って詳しい連絡をいたします。

〒243-04 海老名市中新田117 えびな団地8-504

西村 芳一

#### ●参考文献●

1. 西川 清「遅延が最大平坦で振幅が平坦又は波状の帯域伝送関数」電気通信学会論文誌 74/9月 Vol57-A p663~670
2. H.J.ORCHARD "Maximally Flat Approximation Techniques" PROC. IEEE JAN. 1968 p65-66
3. 八坂 他「濾波回路」日刊工業新聞社
4. 矢崎, 武部「伝送回路網およびフィルター」電子通信学会
5. 西村 芳一「梯形LCRフィルター設計支援プログラムの作成」, 「トランジェント・アナライザの作成」インターフェース 1987年11月号 CQ出版社
6. 堀 敏夫「アナログ・フィルターの設計と解析」第12章 電波新聞社
7. 小池 慎一「連続系シミュレーション」p.140~146 PARADIGM BOOKS CQ出版社
8. 柳沢 ほか訳「アナログ・フィルターの設計」産業報知センター

## HAM Journal

原稿募集のお知らせ

本誌にふさわしい内容(製作・実験・技術解説など)の原稿を広く募集します。こんなことについて書きたい, というものがありましたら, その内容をレポート用紙1~2枚にまとめて「HAM Journal投稿係」までお送りください。検討のうえ, 追って採否をご通知いたします。なお, 採用の分には小社規定の原稿料を差しあげます。 ■HJ■