

音響システム特性測定・逆フィルタ生成ソフトウェア

I n v e r s e X

使い方

Nov. 7 2015

doku@newon.org

1. はじめに	1
2. 背景	1
3. 本ソフトの機能	1
3.1. 伝達関数の測定	2
4. インストールと起動	2
5. 操作の概要	2
6. 設定値の変更	2
7. クロスオーバー特性の生成.....	3
7.1. 準備.....	3
7.1.1. クロスオーバー周波数の設定	4
7.2. フィルタ次数の設定.....	4
7.3. 処理の実行.....	4
8. 測定信号の生成	6
8.1. 操作.....	6
8.2. システムの測定.....	7
9. 伝達関数と逆伝達関数の生成.....	7
9.1. 操作.....	8
9.2. 信号の極性.....	8
9.3. サンプリングオフセット.....	8
9.4. 電圧平均と電力平均.....	9
9.5. 逆関数計算時のガンマ.....	10
9.6. 伝達関数の平滑化.....	10
9.7. 処理の実行.....	10
9.8. 結果の表示.....	10
10. 逆フィルタの生成	12
10.1. 操作.....	13
10.2. 高域補正抑制.....	14
10.3. 電圧平均と電力平均.....	14
10.4. 粗い平滑化.....	14
10.5. ピークスライサ.....	14
10.6. 最大ゲイン.....	15
10.7. 処理の実行.....	15
11. トーンコントロールの生成.....	15
11.1. 低域遮断周波数.....	15
11.2. 低域調整.....	15
11.3. 特定帯域の増強.....	15

1 1.4. 高域調整.....	16
1 1.5. 処理の実行.....	16
1 2. FIR の生成.....	16
1 2.1. クロスオーバの設定.....	16
1 2.2. トーンフィルタの設定.....	16
1 2.3. 補償器の設定.....	16
1 2.4. 総合位相の設定.....	17
1 2.5. 処理の実行.....	17
1 3. フィルタの適用.....	18
1 3.1. テストデータの変換とレベル調整.....	18
1 4. 楽曲の変換.....	19
1 4.1. データの準備.....	20
1 4.2. 変換.....	20
1 5. PCを用いた楽曲の再生.....	20
1 5.1. ドライバのインストール.....	20
1 5.2. 装置の接続.....	20
1 5.3. 再生.....	20
1 6. GR-Peach を用いた楽曲の再生.....	20
1 6.1. GR-Peach の実行コード.....	21
1 6.2. 接続.....	21
1 6.3. USBDAC.....	21
FIR ファイルの準備.....	22
1 6.4. ゲイン調整.....	22
1 7. スピーカの選定.....	23
1 7.1. 補償音響システムに適したドライバ構成.....	23
1 7.2. 補償音響システムに適したフルレンジドライバ.....	23
1 7.3. 補償音響システムに適したウーハ.....	23

1. はじめに

本ソフトは実験目的にて作成中であるため、使い勝手が悪くだけでなく、動作の保障もありません。本ソフトの利用や利用結果及びその影響として生じるあらゆる事柄に対して、本ソフトの作成者は一切責任を負いません。

本ソフトはマルチウェイ、マルチアンプオーディオシステム（以下、マルチウェイシステム）のチャンネル（帯域）分割と、システム特性の測定、システム特性補償を行います。

分割と補償のための FIR 係数を出力することも、実際にステレオ音声データに FIR を作用させて、マルチチャンネル音声データを生成することもできます。

本ソフトが出力した FIR 係数を利用し、あらかじめ補償を施した信号をシステムに入力することで、平坦な特性が得られ、一般家庭に設置可能な小型のエンクロージャーでも可聴帯域全体を平坦にカバーすることが可能となり、スマートフォンやヘッドフォンオーディオを接続して、手軽に音楽を楽しむことができます。

2. 背景

一般にオーディオシステムは、各構成要素の特性を全て平坦にすることで、全体として平坦な特性を得ています。構成要素の中で電気回路は、十分な応答速度があるため、特性を容易に平坦化できます。しかしスピーカーは、質量のある発音体や空気を振動させるため、特性の平坦化が難しく、特別な工夫や材料、入念な組立が必要で、その結果、繊細で高額となりがちです。

そこで、逆の特性を持った要素（逆フィルタ）を挿入することで特性を平坦化する研究が古くから行われており、理論的には概ね確立しています。しかし、一般に逆フィルタは次数が大きく、アナログ時代には、十分な性能を得られませんでした。デジタル時代になって多少は改善したものの、それでも十分な性能を得るには大規模な回路を必要とし（高価となり）、軽便な機器においては、不完全な性能で満足せざるを得ませんでした。

今日デジタル技術が長足の進歩を遂げ、小規模な回路で、万全な特性を持った逆フィルタを構成することが可能になりました。その結果、テレビ受像機やスマートフォンの特性を改善するために、簡素なデジタルフィルタも利用されるようになりました。

本ソフトは、上記の技術的背景を受けて、万全なシステム特性の補償を行うことが可能な（32768 タップの）FIR 逆フィルタ係数を生成します。この係数は、名刺サイズのマイコン基板「GR-Peach」で利用することで、アナログオーディオ信号や、デジタルオーディオストリームを、補償した上で 1~3 ウェイに分割することができます。

また音声データに、逆フィルタを適用して、再生用のマルチチャンネル（マルチウェイ用の）音声データを生成することもできます。この場合、マルチチャンネル DAC を接続して PC で再生が可能です。

3. 本ソフトの機能

本ソフトの機能は次の通りです。

- ・チャンネル分割フィルタを生成する（1~3 ウェイに対応）
- ・音響システムの伝達関数を測定する
- ・伝達関数を平坦化するための逆フィルタを生成する
- ・チャンネル分割フィルタと逆フィルタを合成した再生用 FIR フィルタ係数を生成する
- ・再生用フィルタを音声データに作用させ、マルチチャンネル音声データを生成する

つまり、左右合計 6 チャンネルのマルチウェイ再生システム（1～3ウェイに対応可能）の各チャンネル用の帯域分割フィルタを生成し、その分割フィルタを利用して、各チャンネル用の測定信号を生成し、生成した測定信号を再生・録音した音響波形から逆フィルタを生成し、その逆フィルタと帯域分割フィルタを合成して各帯域の分割と補償に使う FIR フィルタ係数を生成し、また、そのフィルタを音声データに作用させて、マルチチャンネル音声データを生成します。

本ソフトが出力した「再生用 FIR フィルタ係数」を別途用意したデジタルチャンネルデバイスに設定したり、本ソフトが生成した「マルチチャンネル音声データ」を PC に接続したマルチチャンネル DAC に出力することで、マルチウェイシステムを駆動することができます。

3.1. 伝達関数の測定

システムの伝達関数はピンクノイズを用いて測定します。FFT の処理対象は繰り返し信号であるため、同一パターンのピンクノイズを 2 回繰り返して（チャンネル分割して）システム入力に与えます。そのうえで、繰り返しの 2 回目に対応して出力された信号を（マイクで測定して）システム出力とします。測定は、左右別々に行います。

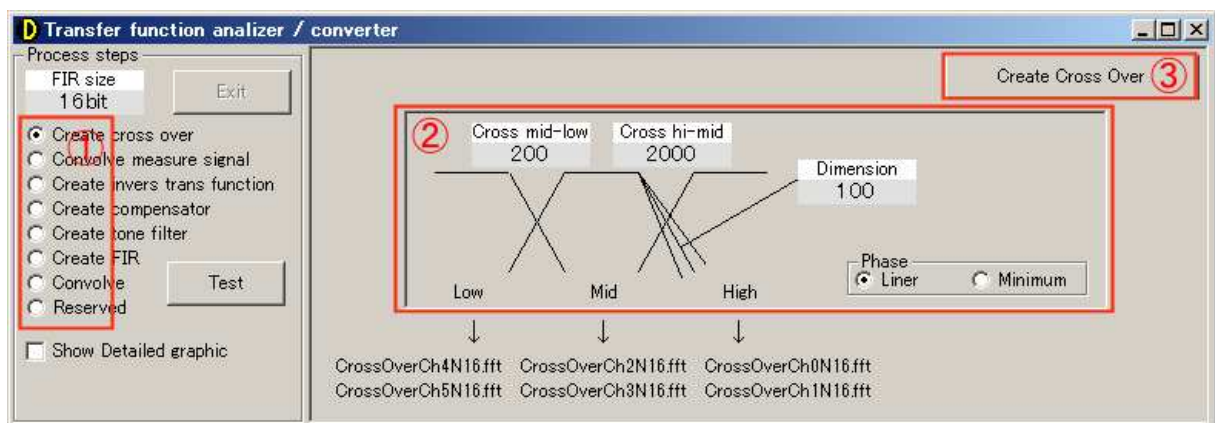
その後、システム出力の FFT 結果を、システム入力の FFT 結果で割って、システムの複素周波数応答を求めます。この複素周波数応答には、システムの周波数特性、位相特性、時間遅れ等の全ての応答情報が含まれます。

4. インストールと起動

setup.exe を実行し、画面の指示に従って本ソフトをインストールします。

スタートメニュー→プログラム→InverseX→InverseX を選択して、本ソフトを起動します。

5. 操作の概要



画面左上の①Process steps で上から順に処理ステップを選択し、選択したステップに対応して表示された、画面右側の②操作欄で希望の設定を行った後、画面右上の③実行ボタンを押して選択したステップの処理を実行します。Create cross over から Create FIR までの 6 つの処理ステップが終了すれば、チャンネル分割と逆フィルタを兼ねたフィルタファイル「FIR_Ch0.wav」～「FIR_Ch5.wav」が生成されています。その後、Convolve 処理ステップで希望の楽曲データ(16bit 2ch 48ksps)に生成された FIR を作用させてマルチチャンネル WAV データを生成して、PC に接続したマルチチャンネル DAC で再生したり、生成した FIR ファイルを別の再生装置に与えて、動作させることができます。

6. 設定値の変更

本ソフトでは、下図に示す「設定値コントロール」が多数表示されます。コントロール上部の文字(図

では Cross mid-low)が「設定値名」、下部の数字(図では 200)が「設定値」です。



「設定値名」をクリックすると、下図に示すエレベータボックスが現れて、ドラッグやクリックで値を変更できます。エレベータボックスは数秒操作しないとタイトル表示に戻ります。



「設定値」をクリックすると、下図に示すテキストボックスが現れて、キーボードで値を変更できます。テキストボックスは改行すると元に戻ります。

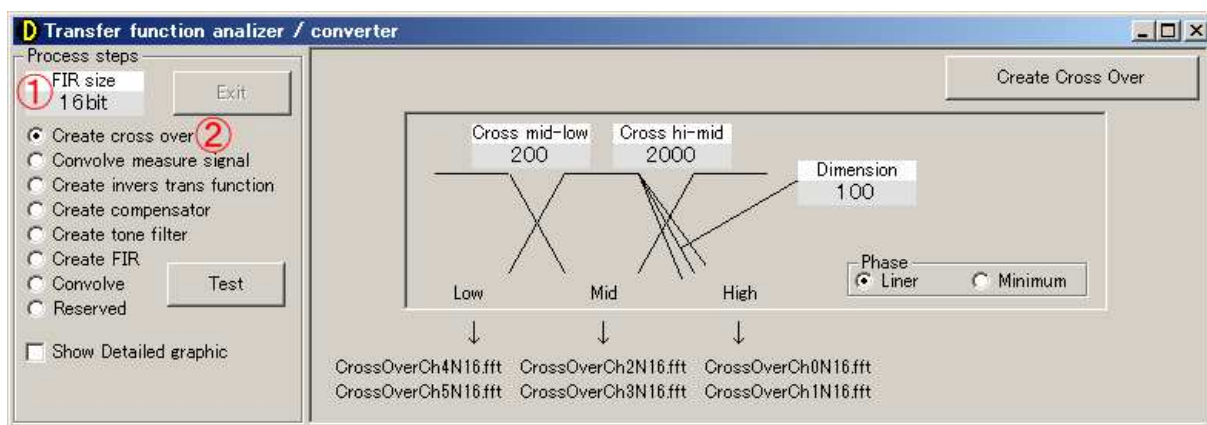


7. クロスオーバー特性の生成

3系統の(1系統や2系統も可能)スピーカーに割り当てる周波数帯域を指定して、指定したクロスオーバー特性を記録した特性ファイル「CrossOverCh0N16.FFT~CrossOverCh5N16.FFT」を生成します。これらのファイルは「C:\Program Files\InverseX\Data」に配置されます。この特性ファイルは、システム測定用信号「MesSrc.wav」に適用されて、各チャンネルの測定信号の生成に利用されます。また、システムの応答を補償する逆フィルタと合成されて、各チャンネルの再生用 FIR 係数の生成に利用されます。

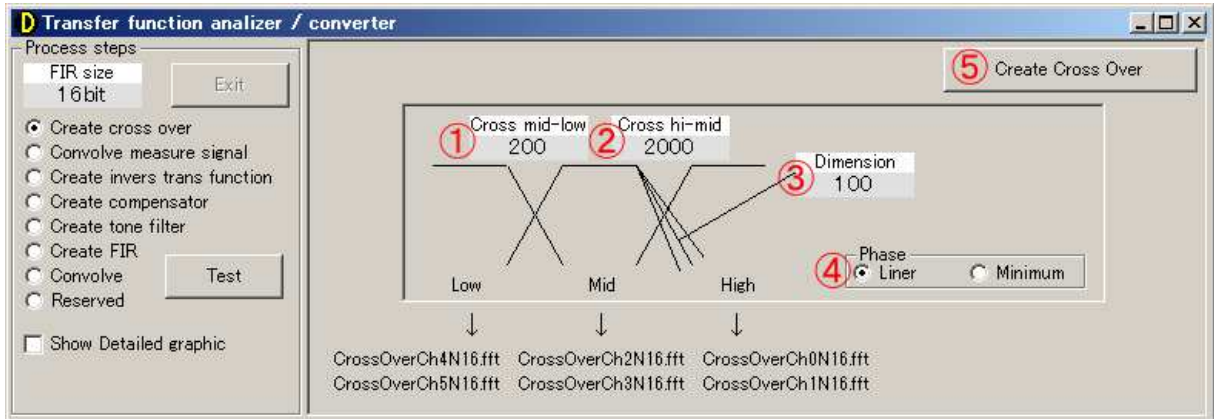
7.1. 準備

Process steps フレームで①FIR size を標準の 16bit に設定します。(FIR size は常に 16bit で使用してください)この場合、FFT 演算のバッファサイズが 65536 サンプルに指定されます。次に、②「Create cross over」を選択し、下図に示す画面を表示します。



上図の状態が(クロスオーバー以外は)推奨設定です。

7.1.1. クロスオーバー周波数の設定



①Low と Mid、②Mid と High の間の2つのクロスオーバー周波数を指定します。2ウェイの場合は、Cross mid-low を1Hzに設定することで、Midにウーハの信号が出力されます(Lowは未使用となります)。1ウェイ(フルレンジ)の場合は、Cross mid-low と Cross hi-mid の双方を1Hzに設定することで、Highに全信号が出力されます(Low と Mid は未使用となります)。

7.2. フィルタ次数の設定

③Dimension でクロスオーバーフィルタの次数を指定します。フィルタ特性は、単純CRフィルタを連結しただけの、リンクウィッツ風のフィルタです。上図のように、次数を100と大きく設定すると、ガウシアンフィルタに近似します。④位相特性は「線形位相 Liner」と「最小位相 Minimum」を選択できます。但し、最小位相は未検査で専ら線形位相で試験しています。

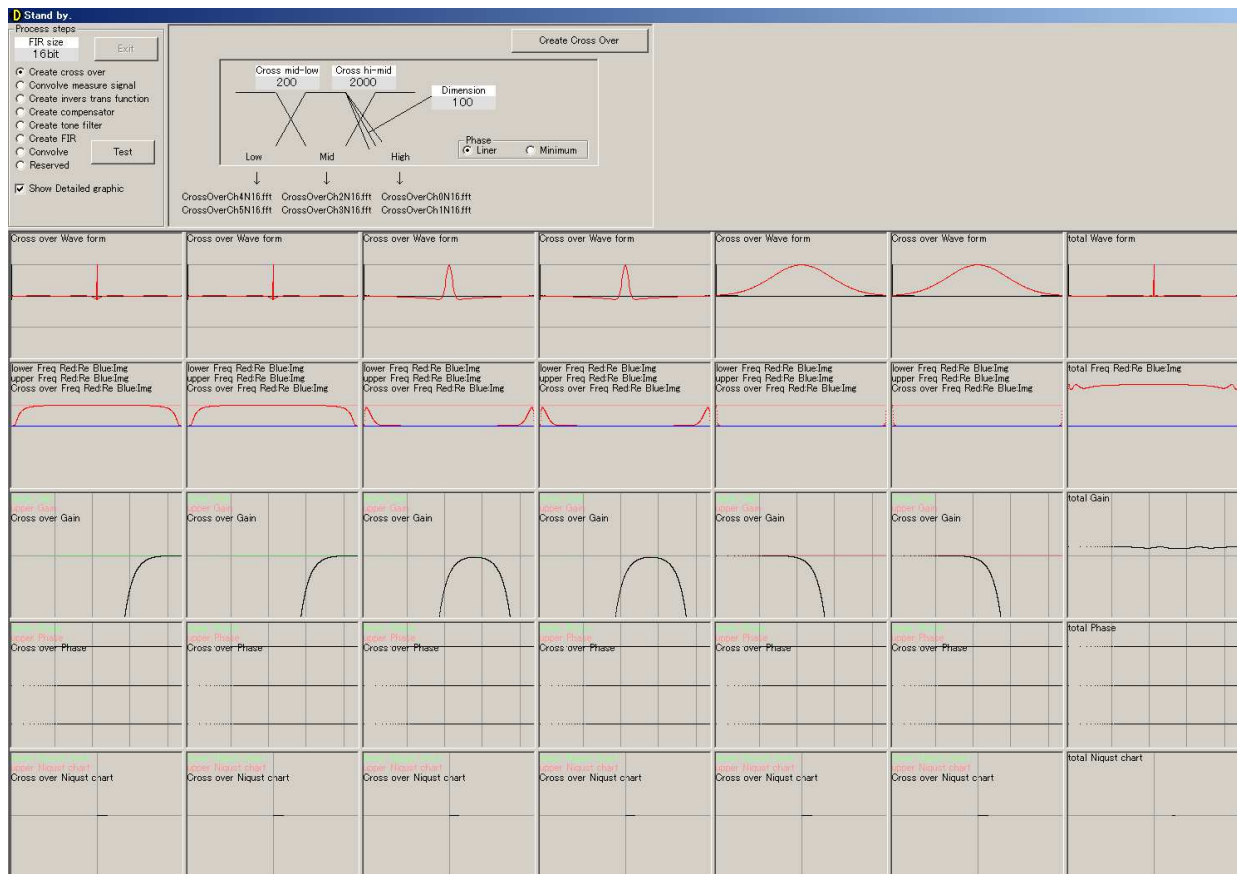
例えばバタワースフィルタは、良好な肩特性を得るために、2次の共振要素を含んでおり、使いこなすに経験が必要です。そのため本ソフトでは、共振要素の無いフィルタを使用し、次数を十分に確保することで、肩特性を向上させています。

クロスオーバーの設定では、クロスする帯域の合成ゲインが気になります。しかし本ソフトでは、そのような増減も含めて最終的には逆フィルタで平坦に補償されるため、ここではあまり留意していません。(線形位相なら、だいたいフラットになります)

7.3. 処理の実行

設定が完了したら、⑤Create Cross Over をクリックします。フィルタが計算されファイル(data¥CrossOverCh0N16.FFT～data¥CrossOverCh5N16.FFT)に保存されます。これらのファイルは「C:¥Program Files¥InverseX¥Data」に配置されます。処理には1分弱要し、この間は操作を受け付けません。場合によっては、Exit ボタンだけは操作を受け付け、処理を中断することができます。

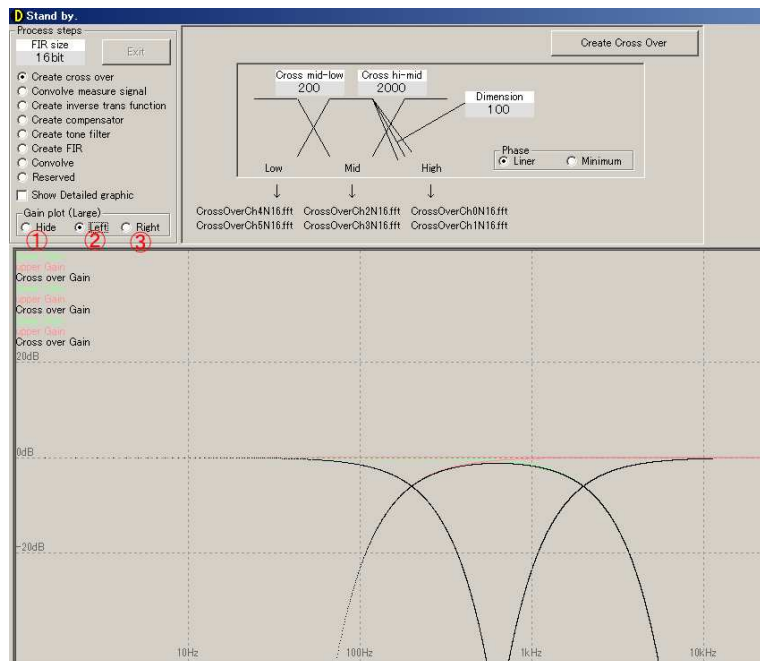
ウィンドウを全画面化すると、フィルタの特性が表示されます。



グラフは上から「波形」「周波数領域(FFT)の状態」「ゲイン特性」「位相特性」「ナイキスト線図」です。また、左から「High(L)」「High(R)」「Mid(L)」「Mid(R)」「Low(L)」「Low(R)」「合成特性」です。

Show detailed graphic をチェックして Create Cross Over を実行すると、上図のようにグラフは緻密に描かれますが、処理時間を要します。チェックを外すとグラフは概要だけが描かれますが、描画時間が短縮されます。

下図の「Gain plot (Large)」の「②Left」をクリックすると ch0 (左) の、「③Right」をクリックすると、例えば下図のように、ch1 (右) の周波数特性が拡大して表示されます。「①Hide」をクリックすると、拡大図が消えて、元の表示に戻ります。

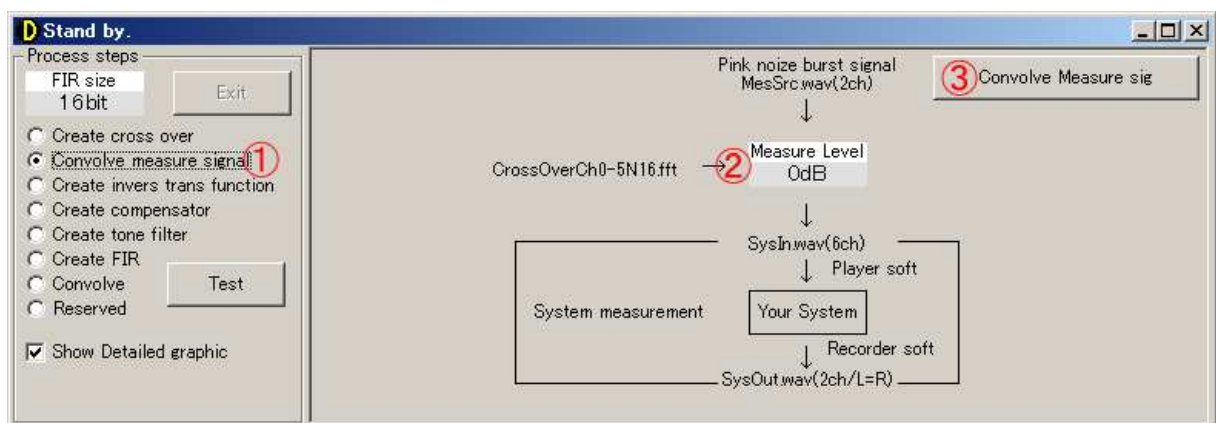


8. 測定信号の生成

マルチチャンネルシステムの音響測定を行うので、各スピーカーに対応した測定信号が必要です。このステップでは、「クロスオーバー特性の生成」で出力した特性ファイル「CrossOverCh0N16.FFT~CrossOverCh5N16.FFT」を、ピンクノイズ繰り返し信号「C:\Program Files\InverseX\MesSrc.wav」に作用させて、システム入力音声ファイル（6ch 音声 wav ファイル）「C:\Program Files\InverseX\Measure\SysIn.wav」を生成します。

8.1. 操作

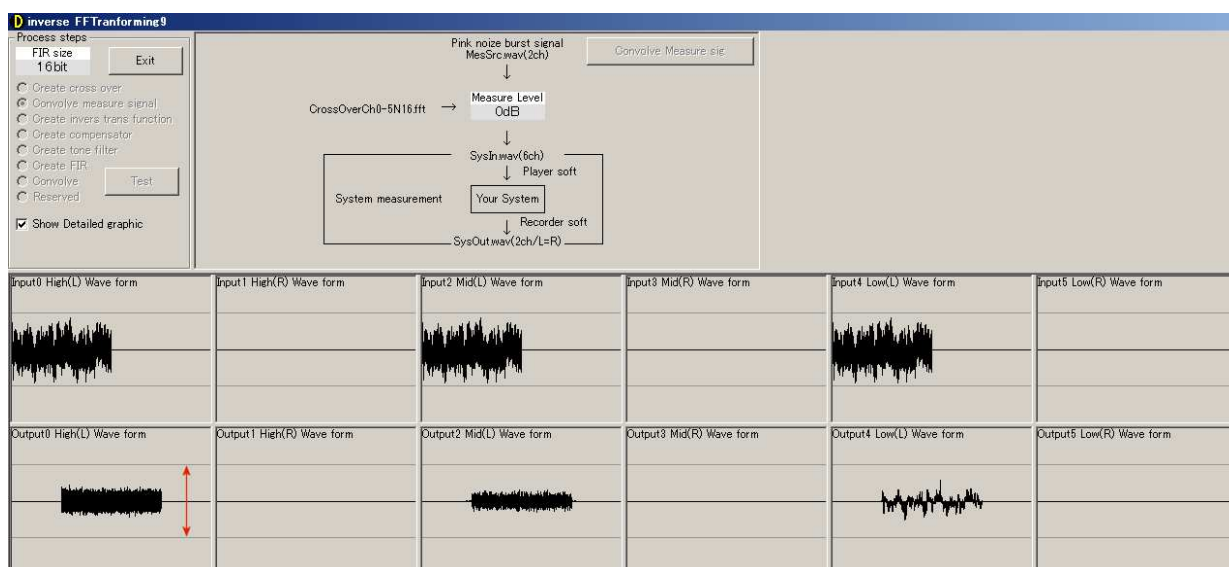
Process steps フレームで①Convolve measure signal を選択し、下図に示す画面を表示します。



上図の状態が推奨設定です。

最初は、②Measure Level は推奨の 0dB とし、ウィンドウを最大化して③Convolve Measure sig ボタンをクリックすると、信号の生成が開始されます。

下図に示す上から 2 列目のグラフが、生成中の測定信号です。もし、Show detailed graphic を ON にした状態で、生成中の各信号（ch0～ch5）の振幅が下図に赤い矢印で示す範囲を超えるようであれば、②Measure Level を小さくして（-3dB 等）やりなおします。Show detailed graphic が OFF であると、グラフの振幅が不正確に表示されます。（処理時間は短縮されます）



測定用マルチチャンネル音声ファイル「SysIn.wav」は、6ch の音声ファイルです。このため、3ch 以上の音声ファイルに対応していないサウンドエディタ（例えば、Goldwave5.55）で開くと、エディタがエラーを起こす場合があります。

8.2. システムの測定

生成した「SysIn.wav」を再生して、システムの特性を測定します。「SysIn.wav」は、PC にマルチチャンネル DAC（上海問屋 DN-USBSA6CHOPT や、ルートアール RA-AUD51BO 等）が導入されていれば、メディアプレーヤー等で再生することができます。機器の接続は後述の「装置の接続」を参照してください。

再生した音声を良好な特性のモノラルマイクで録音して、WAV ファイル（16bit 2ch 48ksps 但し左右同一信号 タグ情報無し）に録音し、「C:\Program Files\InverseX\Measure\SysOut.wav」に配置します。この記録信号を用いて、次のステップでシステムの伝達関数を計算します。

このとき、録音データの先頭に多少の無音部分があっても、ピンクノイズが現れるまで読み飛ばしますから、問題ありません。また、録音データの末尾に無用なデータがあっても、利用しませんから、問題ありません。

但し、背景ノイズがあまりに大きかったり、再生音あまりに小さかったりすると、信号の開始位置が判定できないので、次のステップで失敗します。また、再生音に犬の鳴き声が混入する等すると、再生音全体に裏返った犬の鳴き声の味が付きますから、背景のノイズは出来るだけ小さくします。

9. 伝達関数と逆伝達関数の生成

マイクで録音した信号「SysOut.wav」とその大元の信号「MesSrc.wav」を比較して、システムの伝達関数を求め、その逆数である逆伝達関数を求めます。この処理は、本ソフトの中で最も時間を要します。

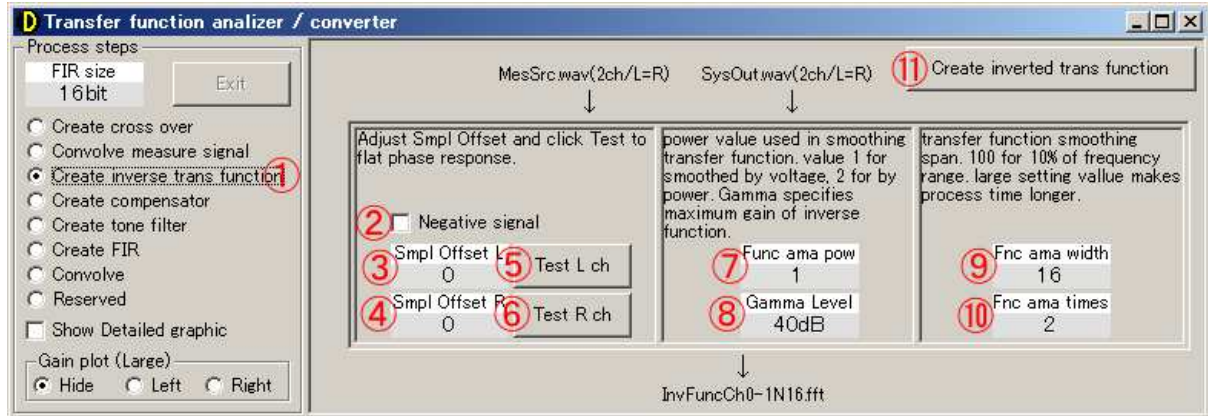
システムの伝達関数にゼロに近い値があると、逆伝達関数には極めて大きな値が表れ、計算が不正確になります。このため予め、伝達関数をオーバーサンプリングして滑らかにしたり、ウィーナフィルタで処理します。本ソフトでは、ウィーナフィルタの結果が主観的に気に入らなかったため、伝達関数の平滑化を行っています。この結果、通常は 65536 ポイントで処理しているデータを、逆関数の処理では 1048576 (1M) ポイントに増大させており、FFT は早いのですが、適合化移動平均 (AMA) の処理にかなりの時間を要します。

伝達関数を対数周波数軸上で平滑化する場合、高い側のサンプル数が多くなるため、単純移動平均

(SMA)では正しい結果が得られません。このため、移動平均する幅と各サンプルの重み付けを調節した適合理化移動平均 (AMA) を用いています。

9.1. 操作

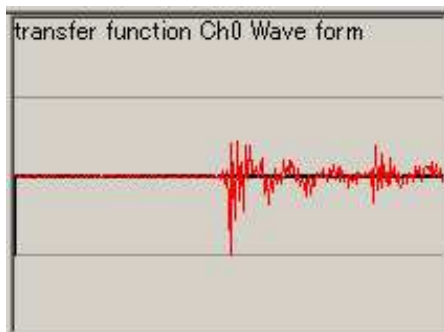
Process steps フレームで①Create inverse trans funtion を選択し、下図に示す画面を表示します。



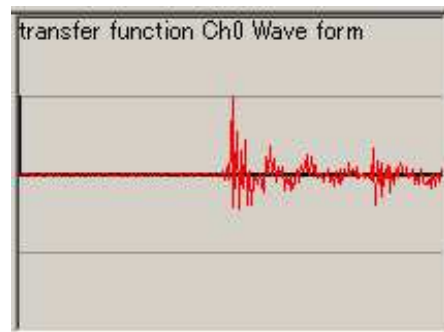
上図の状態が推奨設定です。

9.2. 信号の極性

機器によっては、信号の極性が反転している場合があります。後で説明する「Test L ch」や「Test R ch」を行なった際、伝達関数のインパルスが下方向に出た場合（下図左）は②Negative singal をチェックすることで、信号を反転する（下図右）ことができます。但し、信号の極性が逆でも、フィルタのインパルスが逆極性になるだけで、動作には影響はありません。



Negative signal OFF



Negative signal ON

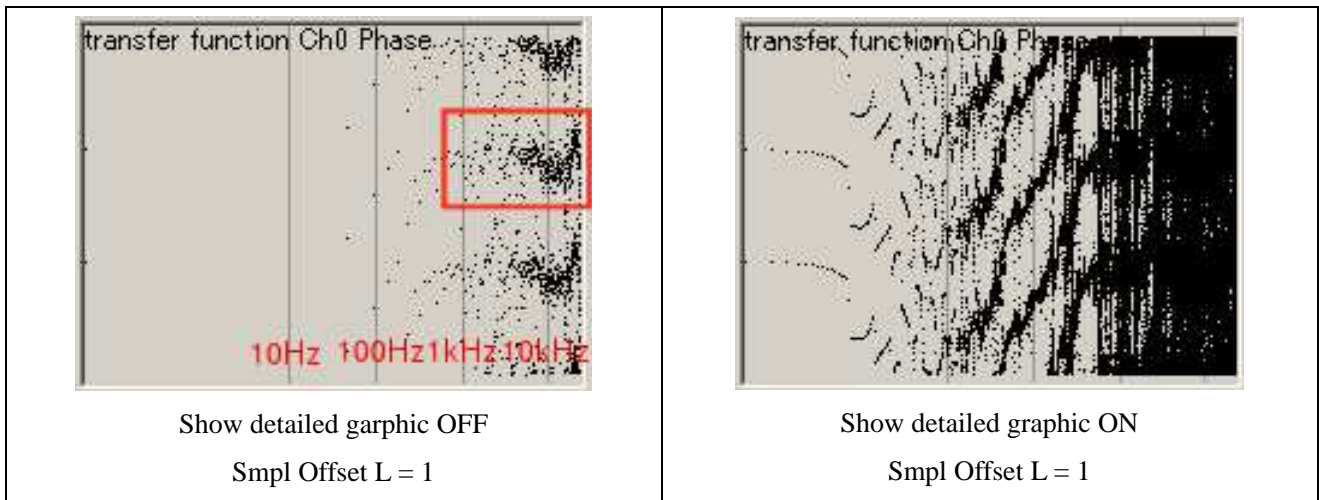
9.3. サンプリングオフセット

ここでは測定に用いたピンクノイズの最初の立ち上がりを信号の開始位置として利用します。このため、③Smpl Offset L と④Smpl Offset R の設定値は 0 が推奨されます。

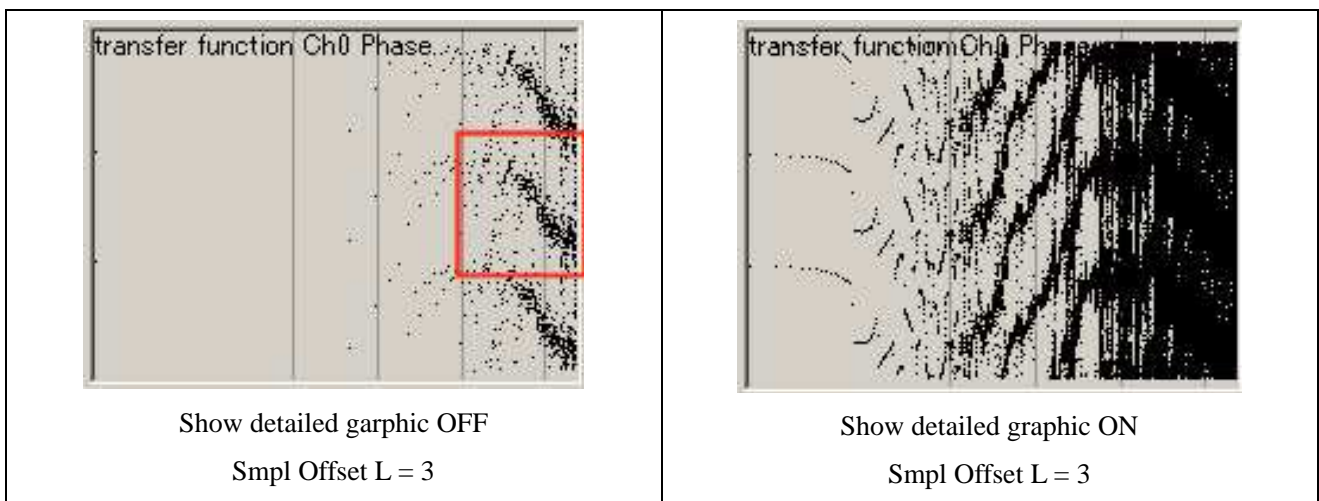
ただし、マルチウェイシステム等でユニットによる時間のズレがあり、信号の開始位置を調整した方が良い伝達関数が得られる場合があります。（とはいえ、たとえ時間ズレのある信号をそのまま処理しても、最終的に生成される FIR のインパルス位置が多少前後するだけで、大きな問題は発生しません。せっかくだから、できるだけ正確な伝達関数を計算したいというだけの事です）

下図は⑤Test L ch をクリックして、左チャンネルの伝達関数を表示させた例です。いずれも Smpl offset を 1 に設定していますが、左は Show detailed graphic を OFF に、右は ON に設定しています。つまり、左右に同じグラフが表示されているのですが、右側はデータが詳細すぎて、高域の位相図が潰れて判読

できません。左側のグラフを見れば、現在の③Smpl offset L 設定値 (1) で高域の位相が正しく測定されていることが分かります。また、右側のグラフを見れば、約 300Hz から下は位相がズれて行くことが分かります。低い周波数はエンクロージャの都合で位相が大きく狂うので、1kHz より上の位相が平坦であれば設定は問題ありません。



ここで、③Smpl offset L の設定値を3に変更して、⑤Test L ch をクリックして、左チャンネルの伝達関数を表示させると、下図のグラフが表示されます。下図に赤枠で示す部分で位相が回っており、測定信号に時間差が生じていることが分かります。ここでも、Show detailed graphic を ON にしたグラフは詳細すぎて潰れてしまい、高域の様子が判別できません。



9.4. 電圧平均と電力平均

伝達関数の計算では、FFT 結果を適合化移動平均して滑らかにする（平滑化）計算を行います。このとき、スピーカー各部から放射された振動が合成されて鼓膜を揺らす（信号がコヒーレントである）と考えれば、振幅（電圧）で平滑化すべきですし、スピーカー各部から放射されたエネルギーが耳に到達する（信号にコヒーレンスが無い）と考えれば、エネルギー（電力）で平滑化すべきです。実際にはそれなりのコヒーレンスがあると思われます。

⑦Func Ama pow は上で説明した平滑化の次元を指定するパラメータで、1 に設定すれば振幅で、2 に設定すればエネルギーで平滑化を行います。結果には大きな違いはありませんが、振幅 (1) が推奨です。

9.5. 逆関数計算時のガンマ

伝達関数がゼロになる箇所があると、その逆関数は（無限大になるので）計算できません。そこで、たとえ伝達関数がゼロであっても、逆関数が⑧Gamma Level で設定した値より大きくならないように計算します。逆関数の最大値が⑧Gamma Level の設定値でクリップされるので、通常は 40～50dB の大きな値を設定します。

9.6. 伝達関数の平滑化

伝達関数の計算時に発生した周波数領域の高調波成分を抑制するために、逆伝達関数の計算に先立って、適合化移動平均によって伝達関数を平滑化します。伝達関数の計算は周波数の分解能を 16 倍にして行なっているため、高調波を取り除いても情報は失われません。

⑨Func ama Width は伝達関数を適合化移動平均する幅を指定し、⑩Func ama Times は移動平均処理を行う回数を指定します。通常の移動平均と同様で、幅の狭い移動平均を何度も繰り返す方が、望ましい平滑化が得られます。ただし、⑨や⑩の値を大きくすると、途方もなく処理時間が必要となるので、⑨は 10、⑩は 2 が推奨値です。

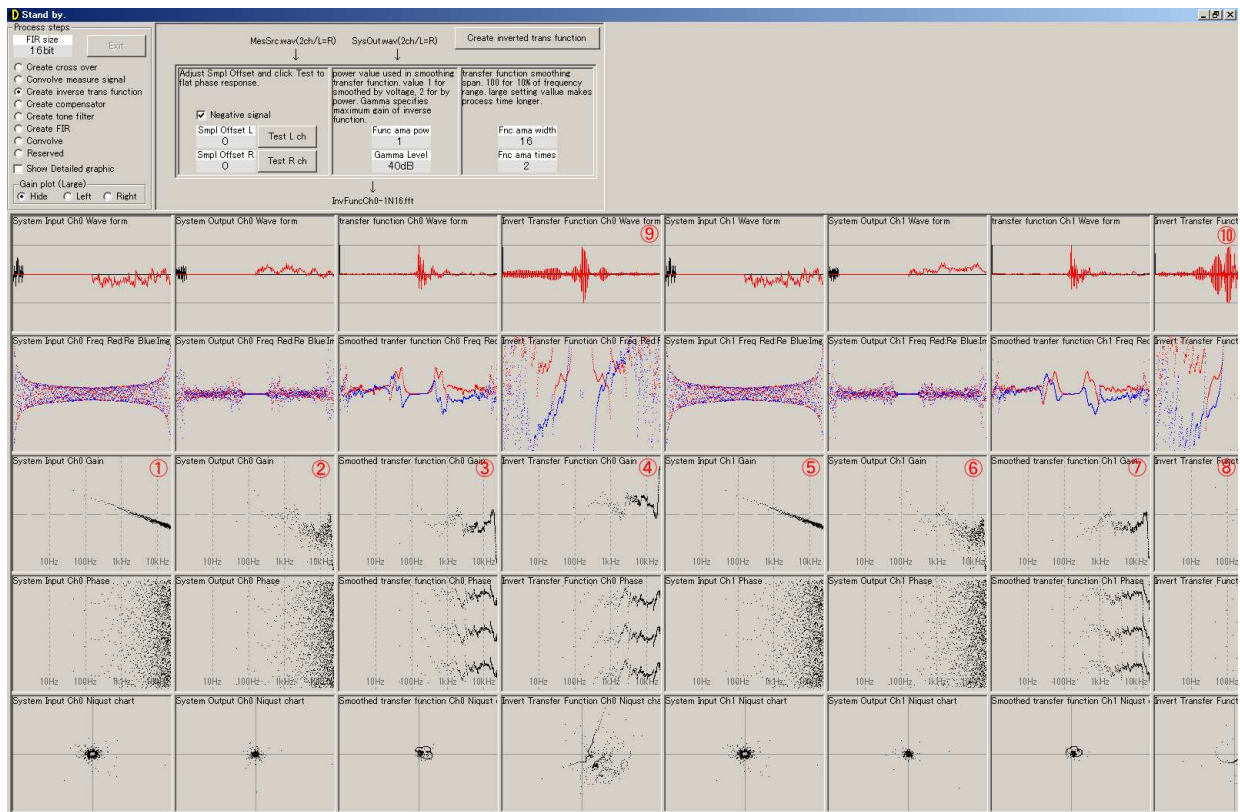
伝達関数の平滑度は、次のステップで微調整可能なので、ここでは、逆伝達関数の計算に支障が出ない程度（つまり、推奨設定値）で問題ありません。

9.7. 処理の実行

設定が完了したらウィンドウを最大化し、⑪Create Inverted trans function をクリックして逆伝達関数を計算します。この計算は推奨設定でも PC によっては 10 分程度要します。また計算中は操作にตอบสนองしなくなります。

9.8. 結果の表示

処理が終了すると、例えば下図のようなグラフが表示されます。

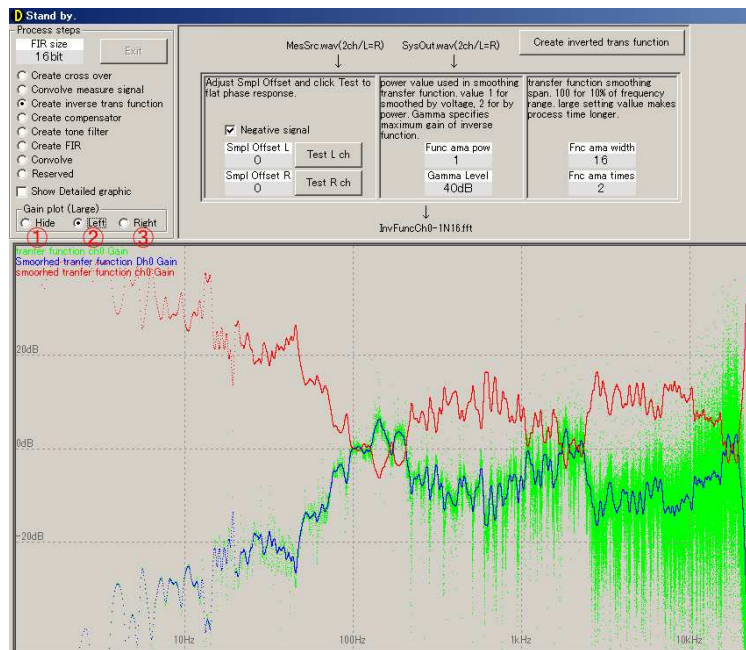


上図の①⑤が元になった信号（ピンクノイズ）の周波数特性、②⑥がスピーカーから出た再生音の周波数特性、③⑦が伝達関数、④⑧が逆伝達関数です。逆伝達関数は一見このままでも補償に使用そうですが、⑨⑩の波形を見ると、長い過渡現象生じており、プリエコーも存在するため、このままでは逆フィルタに使用できないことが分かります。

各種のインパルス応答は、次表のファイルに保存されるため、音声として再生して、確認することができます。

ファイル名	内容
RawTransFuncCh0.wav RawTransFuncCh1.wav	システム入出力から計算した生の伝達関数のインパルス応答
SmoothedTransFuncCh0.wav SmoothedTransFuncCh1.wav	周波数特性を平滑化した伝達関数（上図③⑦）のインパルス応答
InvFuncCh0.wav InvFuncCh1.wav	平滑化した伝達関数から生成した、逆伝達関数（上図④⑧）のインパルス応答

下図の「Gain plot (Large)」の「②Left」をクリックすると ch0（左）の、「③Right」をクリックすると、例えば下図のように、ch1（右）の周波数特性が拡大して表示されます。「①Hide」をクリックすると、拡大図が消えて、元の表示に戻ります。



10. 逆フィルタの生成

あらかじめ逆フィルタを通した音声をシステムに入力すると、平坦な特性と正しいインパルス応答が得られます。ここでは、既に生成した逆伝達関数を元に、逆フィルタを生成します。

逆フィルタは理論上は伝達関数の逆数ですが、既に述べたように、多くの場合逆フィルタは大変不安定で、不快な聴感上の特性を持ちます。

逆フィルタが不安定となる理由は、たとえば、ある周波数（1 kHzとしましょう）でシステムの入力が0になる場合を想像すれば、容易に理解できます。このとき、システムには信号を入力しているのに、出力が出ていません（ゼロです）。ですから逆フィルタはゼロの入力に対して、出力を出さねばなりません。つまり、逆フィルタのゲインは無限大となります。つまり、逆フィルタは1 kHzでゲインが無限大となる大きなピークを生じ、当然1 kHzで発振し、不安定となります。このような現象は、室内の反射によって生じる無数の周波数ディップに対応して、無数に生じます。つまり、逆フィルタには多数の周波数ピークが発生し、不安定で聴感上望ましく無いものとなります。

従って、無用なピークを生じないように逆フィルタの特性をなめらかにし、フィルタを安定させることが、初歩的な手法です。しかし、この初歩的な手法ではシステム特性の細かな凹凸が解消できず、簡易な補償しかできません。そこで、フィルタが安定性を失わない方法で、可能な限り細かな凹凸を逆フィルタに反映することが必要です。

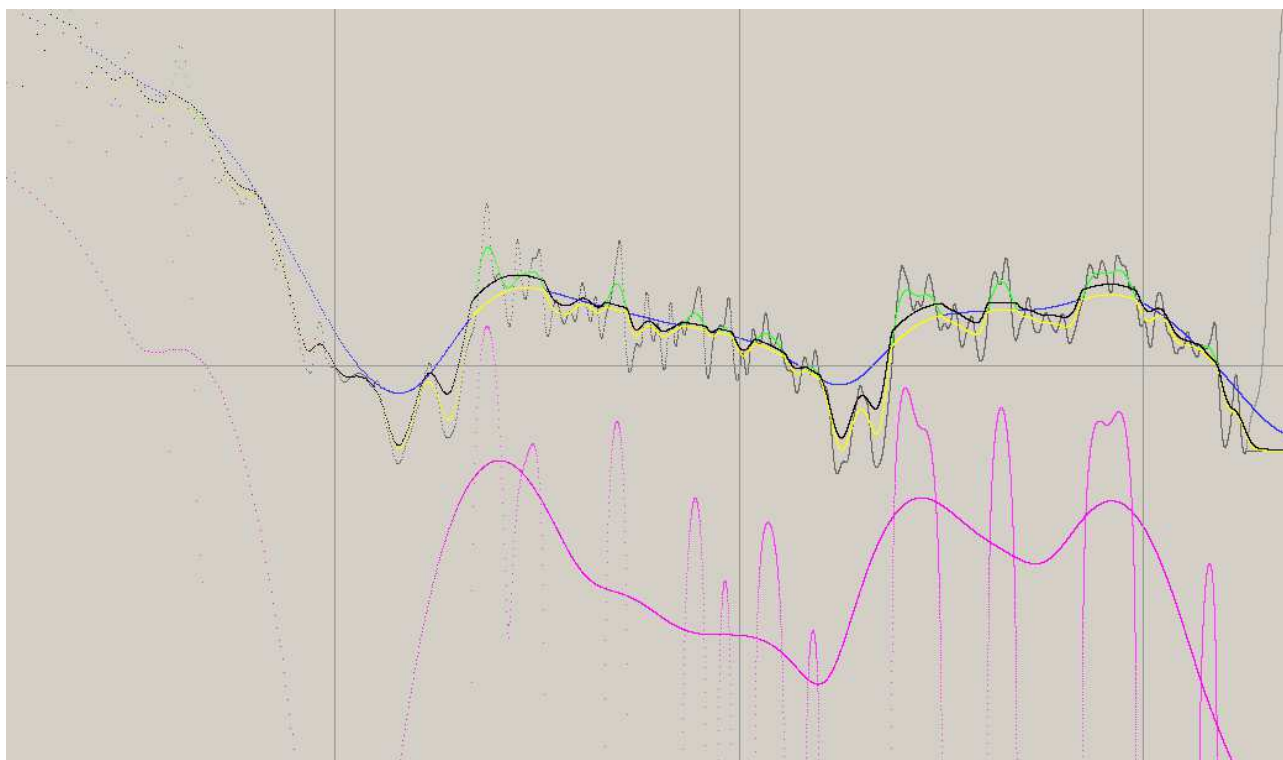
実は人間は、特性のピーク（特性の山：共鳴現象）には大変敏感です。共鳴によって物の大きさや、重さを察知し、さらには話者を特定したりしているからです。逆に人間は、ディップ（特性の谷）には鈍感です。なぜなら、常日頃聴いている様々な音は、周囲の物体の反射によって、色々な長さの経路で耳に届いています。このため、それぞれの時間差によって、自然と数多くのディップを生じています。つまり、ピークは音源の大きさや重さを識別する重要情報なので、敏感に感じ取りますが、ディップは話者の識別等には不要な上、常に音に付随する現象であるため、あまり感じません。

ここで、今一度逆フィルタを考えますと、システム特性のピーク（とても気になる）は、逆フィルタのディップで解決できます。ディップはフィルタとして安定で、聴感上も気になりません。また、システム特性のディップ（あまり気にならない）を、無理に補償すれば、逆フィルタのピークを生じ、フィルタが不安定となります。しかし幸い、ディップはあまり気にならないので、細かに補正する必要はあ

りません。

つまり音響補正用の逆フィルタでは、システムのピークを逆フィルタのディップによって細かく補正しつつ、システムのディップについては（逆フィルタのピークとなるので）大まかな補正に留めることで、フィルタの安定性と聴感上望ましい特性を得ることができます。

逆フィルタ生成の過程

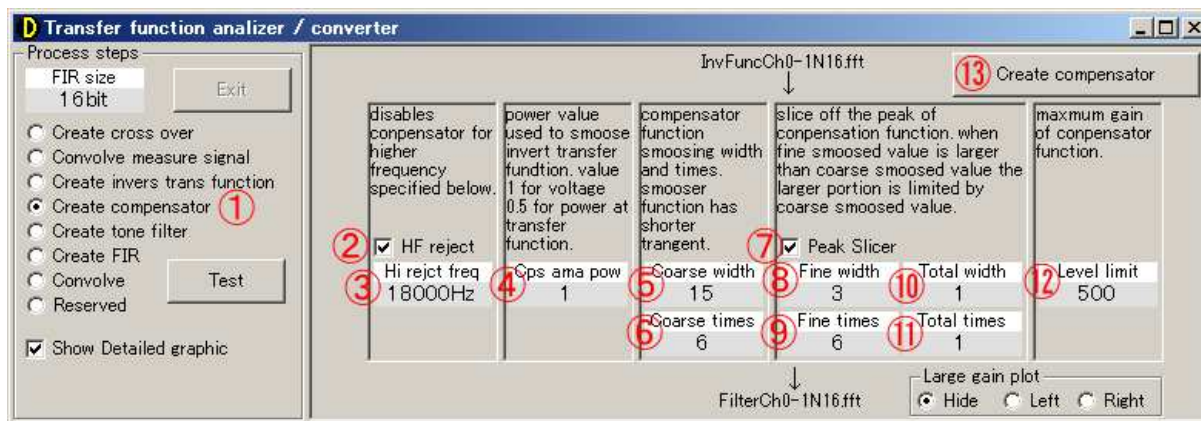


これらを含めて、本ソフトでは例えば上図に示す手順で逆フィルタを生成します。システム特性の逆数、つまり純粋な逆フィルタには極めて細かい凹凸があるため、先ず、軽い平滑化を行い、上図に薄い灰色で示す特性を得ます。さらに、高い周波数の無用な補正（ノイズにしかならない）を避けるため、右端のピークを切り落とします。（濃い灰色のグラフ）このグラフには、こまかなピークが沢山あり、逆フィルタは不安定です。そこで特性全体に粗い平滑化を行い滑らかにします（上図青線）。この状態で逆フィルタとして用いることも可能です。しかし、システム特性の細かなピークは放置されたままとなり、補償も大づかみなものになります。

そこで、粗い平滑化前のフィルタに存在する細かなディップだけを、抽出して加えます（上図黄線）。これにより、システム特性で気になる細かなピークが除去されます。しかしこのままでは、逆フィルタのピークの部分（上図緑色）のエネルギーが失われています。そこで、ピーク部分だけを取り出して、滑らかにし（上図紫色）、先ほど求めた逆フィルタ（黄色）に加えます。このようにして完成した逆フィルタが、上図黒色のグラフとなります。黒色のグラフを見ると、ディップはあるが、ピークのない特性であることが分かります。再生システムの細かな特性ピーク（気になる共振音）は取り除き、逆フィルタの安定性が確保され、聴感上も不快感の無いものとなります。

10.1. 操作

Process steps フレームで①Create compesator を選択し、下図に示す画面を表示します。



上図の状態が推奨設定です。

1 0.2. 高域補正抑制

アンチエリアスフィルタやユニットの特性によって、高い周波数で急激にシステムのゲインが低下し、その逆である逆伝達関数のゲインが急上昇します。ナイキスト周波数付近での急激なゲイン上昇は不安定の原因となるので、一定の周波数以上は逆フィルタでの補正を抑制します。

③Hi reject freq で抑制を開始する周波数を指定し、②HF reject チェックボックスを ON に指定すると、高域の補正が抑制されます。

1 0.3. 電圧平均と電力平均

逆フィルタを安定にするため、ゲインを移動平均します。このとき、電圧で（振幅で）移動平均する考え方と、電力で（エネルギーで）移動平均する考え方があります。④Cpc ama pow を 1 に設定すると電圧で、2 に設定すると電力で平均化されます。

1 0.4. 粗い平滑化

逆フィルタの生成に先立って、適合化移動平均によって粗い平滑化を行い、逆伝達関数の極めて大ぶかみなゲイン形状を作り出します。この結果をそのまま逆フィルタに使うことも、さらに細かな凹凸を反映させることもできます。

⑤Coarse width で移動平均の幅を、Coarse times で移動平均の回数を指定します。移動平均の幅や回数を大きくすると、処理時間が長くなります。

1 0.5. ピークスライサ

逆フィルタのピークはフィルタを不安定にし、聴感上も不快です。このため、逆伝達関数のピークを検出して除去し、逆に伝達関数のディップ（システム特性のピークの抑制に必要な）を残します。

逆フィルタに反映する細かな凹凸の程度を設定するために、逆伝達関数に細かな平滑化を行います。⑧Fine width はこの移動平均の幅を、⑨Fine times 移動平均の回数を指示します。値を小さくすると、細かな凹凸が逆フィルタに反映されます。

その後、細かな平滑化によって得られたゲインが、粗い平滑化で得たゲインより大きな部分をピークと検出して除去します。ただし、ピークの除去でスペクトラムのバランスが変化しないように、除去したピークだけを集めて再度粗い平滑化を行って、逆フィルタに加えます。

これらの処理を行った後、全体を軽く平滑化します。⑩Total width はこの平滑化の幅を、⑪Total times はこの平滑化の回数を指定します。粗い平滑化と細かな平滑化の繋ぎ目の「角」を丸める処理です。

10.6. 最大ゲイン

特に低域では、スピーカーの応答が低下するため、逆フィルタのゲインが極めて大きくなります。スピーカーに 1W が加わっている場合に、ウーハに 100W が加わることも稀ではありません。⑫Lefel limit で最大のゲインを指定し、指定した以上のゲインが生じないようにします。

10.7. 処理の実行

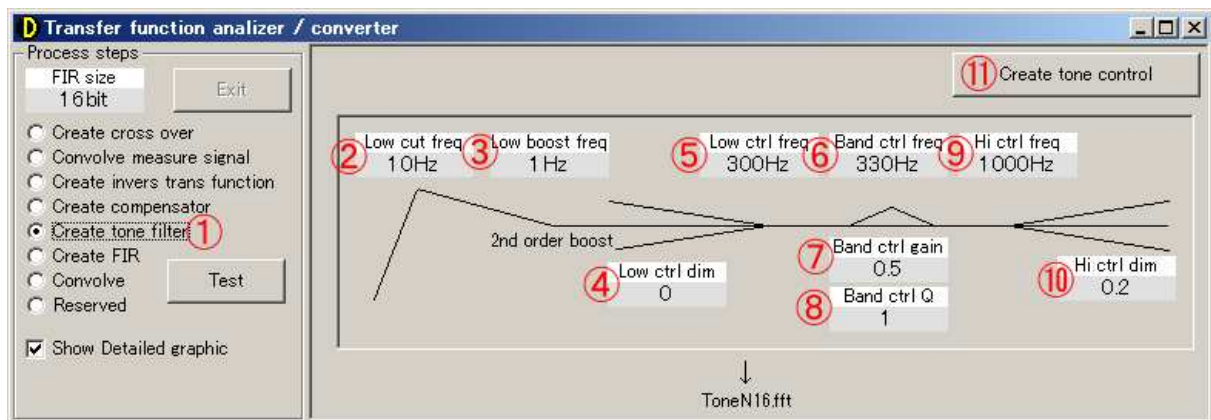
設定が完了したらウィンドウを最大化し、⑬Create compensator をクリックして逆伝達関数を計算します。まず左が、次に右が計算されます。計算中に、逆フィルタのゲイン特性の拡大図が表示されます。グラフの内容については「逆フィルタの生成」を参照してください。

フィルタの生成後、Large gain plot の Left で左チャンネルのゲイン特性を、Right で右チャンネルのゲイン特性を拡大表示することができ、Hide で通常表示に戻ります。

11. トーンコントロールの生成

Process steps フレームで①Create tone filter を選択し、下図に示す画面を表示します。

指定した帯域の応答を增強したり、抑制したりできます。普通はあまり必要の無い機能ですが、FIR の生成時にファイルを開きまので、この機能を使わない場合も、処理だけは実行しておきます。この場合、デフォルト設定のまま⑪Create tone control をクリックします。



上図の状態が推奨設定です。もちろん、後の設定でトーンコントロールを OFF した場合は、これらの設定はフィルタに一切反映されません。

11.1. 低域遮断周波数

②Low cut freq で指定された以下の周波数を遮断します。

11.2. 低域調整

③Low boost freq で指定された周波数から、④Low ctrl dim で指定された次数で低域を增強あるいは抑制します。④Low ctrl dim が 1 なら 6dB/oct で抑制、-1 なら 6dB/oct で增強、0 なら作用しません。次数には、0.12 等の少数も指定できます。

11.3. 特定帯域の增強

⑥Band ctrl freq で指定された周波数を中心に、⑦Band ctrl gain で指定されたゲインだけ、信号を增強あるいは抑制します。⑦Band ctrl gain が正なら增強、負なら抑制、0 なら作用しません。增強や抑制する帯域幅は、⑧Band ctrl Q で指定します。

1 1.4. 高域調整

⑨Hi ctrl freq で指定された周波数から、⑩Hi ctrl dim で指定された次数で高域を増強あるいは抑制します。⑩Hi ctrl dim が 1 なら 6dB/oct で抑制、-1 なら 6dB/oct で増強、0 なら作用しません。次数には、0.12 等の少数も指定できます。

1 1.5. 処理の実行

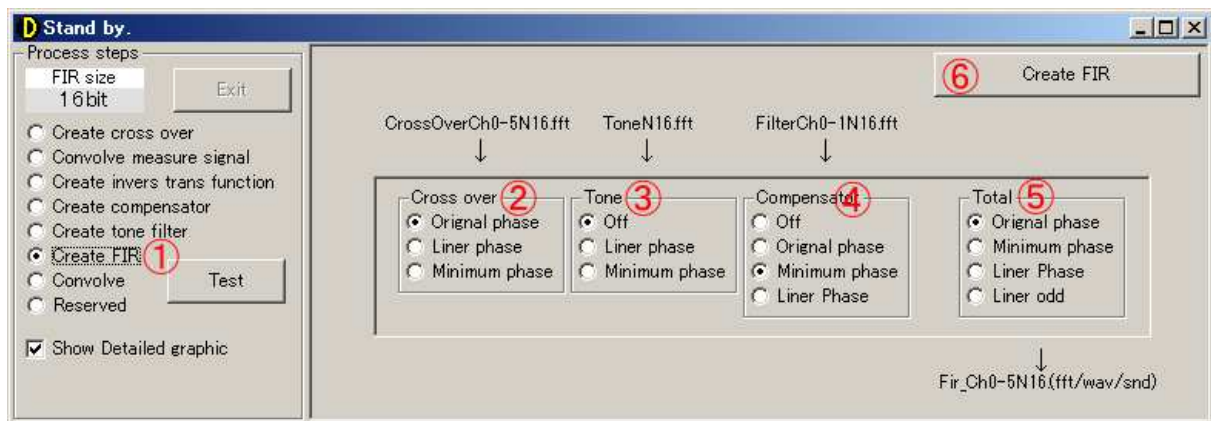
設定が完了したらウィンドウを最大化し、⑪Create tone control をクリックしてトーンコントロールを計算します。

Large gain plot の Left で左チャンネルのゲイン特性を、Right で右チャンネルのゲイン特性を拡大表示することができ、Hide で通常表示に戻ります。

1 2. FIR の生成

クロスオーバー特性、トーンコントロール特性、補償特性を合算して、各チャンネル用の信号を生成する FIR 係数を生成します。ここで生成した FIR 係数を、このツール上で利用したり、別途容易したデジタルフィルタに設定して、楽曲データを補償してチャンネル分割することができます。

Process steps フレームで①Create FIR を選択し、下図に示す画面を表示します。



上の状態が推奨設定です。

1 2.1. クロスオーバーの設定

②Cross over はクロスオーバーフィルタの位相特性を指定します。Original phase であれば、作成したフィルタをそのまま、Liner phase であれば、フィルタを強制的に線形化して、Minimum phase であれば、作成したフィルタを強制的に最小位相化して使用します。

1 2.2. トーンフィルタの設定

③Tone はトーンコントロールの有無と位相特性を設定します。Off であればトーンコントロールは適用されず、Liner phase であれば、線形位相で適用され、Minimum phase であれば最小位相で適用されます。

1 2.3. 補償器の設定

④Compensator は補償の有無と位相特性を指定します。Off であれば補償は適用されず、Original phase であれば、生成したままの位相が、Minimum phase であれば強制的に最小位相化して、Liner pahse であれば強制的に線形位相化して適用されます。

1 2.4. 総合位相の設定

⑤Total では、上記の調整を行って作成されたフィルタ全体に対する位相処理を指定します。Original pahse であれば作成されたフィルタをそのまま出力し、Minimum phase であれば強制的に最小位相に変換して、Liner pahse であれば強制的に線形位相に変換して、Liner odd であれば、強制的に週関数に変換して出力します。(Liner odd は実験用で、理論的にも聴感的にも意味はありません)

1 2.5. 処理の実行

設定が完了したらウィンドウを最大化し、⑥Create FIR をクリックして FIR 係数ファイルを生成します。いずれも「C:¥Program Files¥InverseX¥Data」に配置されます。

出力ファイルの内容は次の通りです。

ファイル名	内容
FIR_Ch0N16.FFT ~ FIR_Ch5N16.FFT	本ソフトで楽曲に FIR を適用するための FIR 係数、48ksps 、64bit、浮動小数点形式 データの先頭にインパルスを持つ
FIR_Ch0.wav ~ FIR_Ch5.wav	他の装置で利用するための補償付の FIR 係数ファイル、48ksps 、16bit、符号付整数形式、wav ヘッダ付きファイル。但し、タグ情報なし。 16384 サンプル目にインパルスを持つ
FIR_Ch0.snd ~ FIR_Ch5.snd	他の装置で利用するための補償付の FIR 係数ファイル、48ksps 、16bit、符号付整数形式、raw 形式ファイル。ヘッダなし。 16384 サンプル目にインパルスを持つ。GR-Peach で使用。
FIR_Ch0NC.wav ~ FIR_Ch5NC.wav	他の装置で利用するための補償なしの FIR 係数ファイル、48ksps 、16bit、符号付整数形式、wav ヘッダ付きファイル。但し、タグ情報なし。 16384 サンプル目にインパルスを持つ
FIR_Ch0NC.snd ~ FIR_Ch5NC.snd	他の装置で利用するための補償なしの FIR 係数ファイル、48ksps 、16bit、符号付整数形式、raw 形式ファイル。ヘッダなし。 16384 サンプル目にインパルスを持つ。GR-Peach で使用。
FIR_Bypass.wav	入力信号をそのまま出力するための、デバッグ用係数ファイル。 16384 サンプル目に単一のインパルスを持つ。
FIR_Bypass.snd	入力信号をそのまま出力するための、デバッグ用係数ファイル。 16384 サンプル目に単一のインパルスを持つ。GR-Peach で使用。

チャンネル番号は次の通りです。但し、チャンネルと DAC 出力端子との対応は、機種やデバイスドライバ、設定状況で変化する可能性があります。

チャンネル番号	内容
---------	----

	3ウェイ	2ウェイ	1ウェイ
Ch 0	High Left	High Left	Full Range Left
Ch 1	High Right	High Right	Full Range Right
Ch 2	Mid Left	Low Left	N/A
Ch 3	Mid Right	Low Right	N/A
Ch 4	Low Left	N/A	N/A
Ch 5	Low Right	N/A	N/A

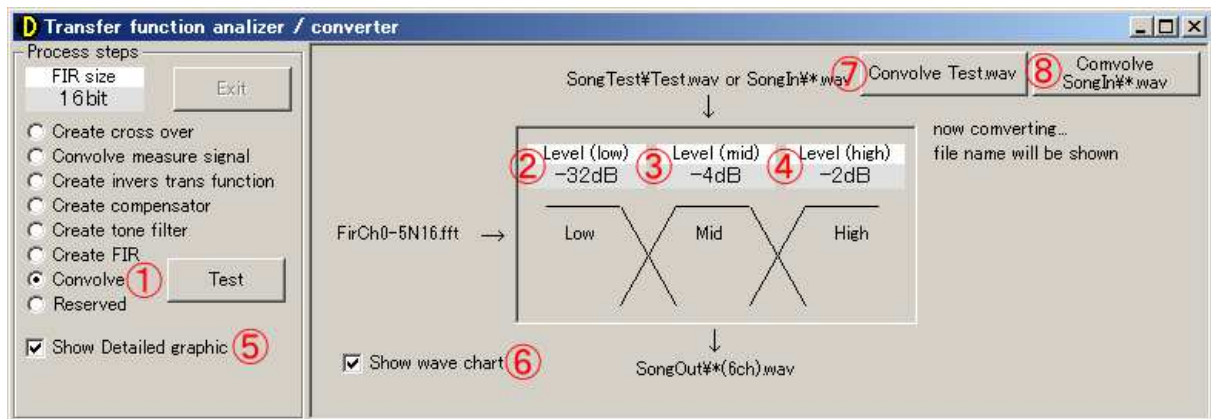
Large gain plot の Left で左チャンネルのゲイン特性を、Right で右チャンネルのゲイン特性を拡大表示することができ、Hide で通常表示に戻ります。

1.3. フィルタの適用

生成した FIR 係数を、音声ファイル（48ksps、16bit、stereo、wav 形式、タグ情報無し）に適用して、マルチチャンネルの音声ファイル（48ksps、16bit、6ch、wav 形式）を生成します。生成したファイルは、PC にマルチチャンネル DAC（上海問屋 DN-USBSA6CHOPT、ルートアール RA-AUD51 等）が導入されていれば、メディアプレーヤー等で再生することができます。

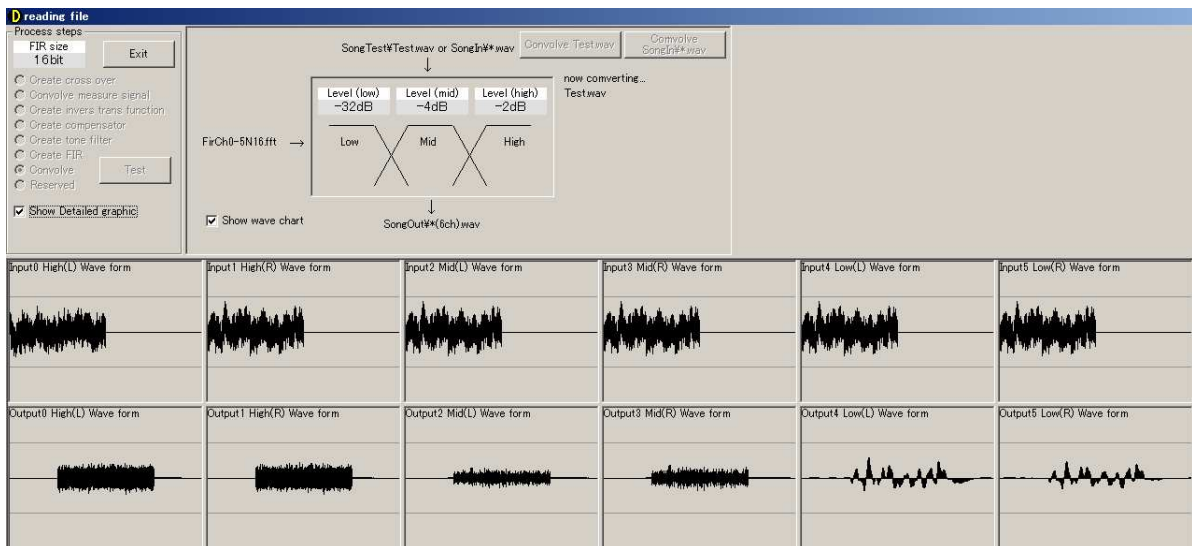
1.3.1. テストデータの変換とレベル調整

Process steps フレームで①Convolve を選択し、下図に示す画面を表示します。



上の状態が推奨設定です。

②Level(Low)、③Level(mid)、④Level (high)は次の手順で調節します。まず、⑤Show Detailed graphic と⑥Show wave chart を ON にし、ウィンドウを最大化して、⑦Convolve Test.wav をクリックします。

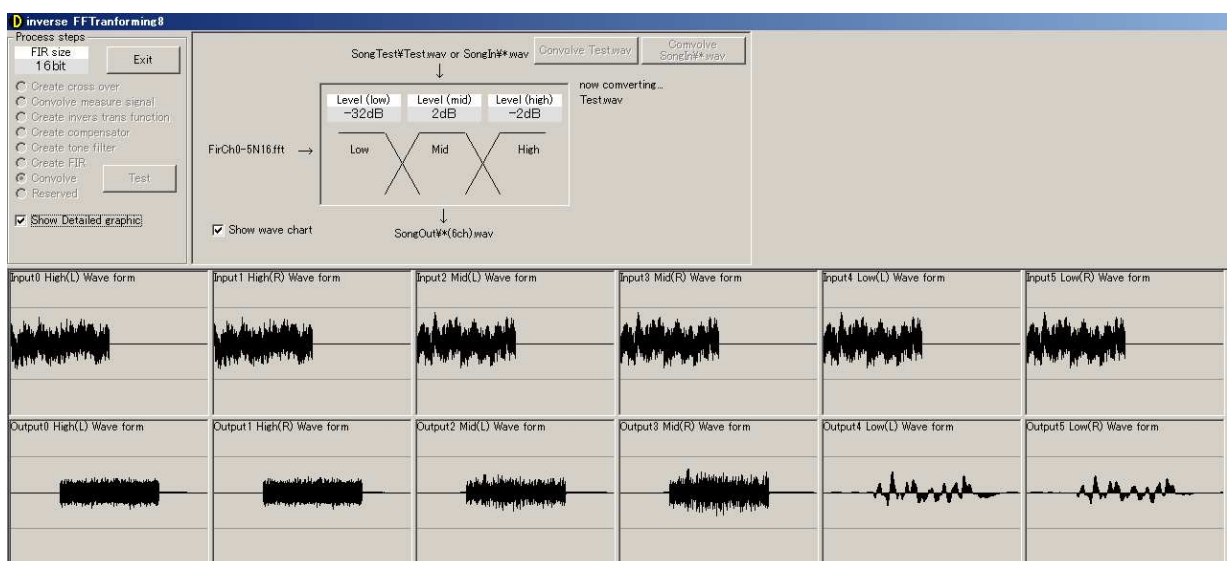


1 番上のグラフは入力波形、2 番目のグラフはフィルタ出力の波形です。チャンネルは左が ch0 です。2 ウェイの場合は左から4つだけ、1 ウェイの場合は、左から2つだけが表示されます。

Test.wav 音声ファイルは、音楽のスペクトル分布に比較的類似した、ピンクノイズです。この出力波形（上から2番目）を目安に、②Level(Low)、③Level(mid)、④Level (high)を調節します。

⑦Convolve Test.wav をクリックしてフィルタ処理している中でも、Exit ボタンで操作に戻ることや、⑤Show Detailed graphic や⑥Show wave chart を変更することができます。

上の例では、中央の mid がやや小さいようなので、③Level(mid)の値を大きくし、再度⑦Convolve Test.wav をクリックします。



上図のように mid の出力レベルが大きくなり、low、mid、high の振幅がだいたい揃いました。(最終的には音を聞いてレベル調整しますので、電氣的にだいたい似た振幅になれば問題ありません。

振幅は小さめに調節しておきます。楽曲によっては特定の周波数に大きな振幅が記録されており、フィルタ出力が振り切る場合があるからです。

1.4. 楽曲の変換

PC で楽曲を再生する場合は、楽曲ファイルを本ソフトで予め変換して、マルチチャンネル wav ファイルを生成し、このファイルをメディアプレーヤ等で再生します。

14.1. データの準備

まず、変換したい楽曲を所定の形式（48ksps、16bit、stereo、wav 形式、タグ情報無し）で SongIn フォルダに格納します。多くの場合このフォルダは「C:\Program Files\InverseX\SongIn」に配置されます。楽曲は複数格納することができます。

14.2. 変換

最初は、⑤Show Detailed graphic や⑥Show wave chart を ON に設定して、ウィンドウを最大化し、⑧ Convolve SongIn¥*.wav をクリックして変換を開始し、出力が振り切らない事を確認しながら変換します。しかし、波形を詳細表示すると時間が掛かるので、振り切らないと分かれば、まず⑤Show Detailed graphic を OFF にします。さらに、⑥Show wave chart を OFF すれば波形表示は無くなりますが、より早く処理されます。これらの設定は変換中に変更することができます。

変換済みの楽曲は「SongOut」フォルダに格納されます。多くの場合このフォルダは「C:\Program Files\InverseX\SongOut」に配置されます。

例えば「SongIn¥MySong.wav」を変換すると、「SongOut¥MySong(6CH).wav」が生成されます。

15. PCを用いた楽曲の再生

15.1. ドライバのインストール

マルチチャンネル DAC に付属のドライバを PC に導入します。

15.2. 装置の接続

次表を参考にアンプを接続します。

端子名	チャンネル番号	本ソフトの利用内容		
		3 ウェイ	2 ウェイ	1 ウェイ
Front (L/R)	Ch0/Ch1	High	High	Full range
Center / Sub woofer	Ch2/Ch3	Mid	Low	N/A
Rear (L/R)	Ch4/Ch5	Low	N/A	N/A

ただし、チャンネル番号とチャンネル名の対応には明確なルールが無いいため、信号が異なるチャンネルから出力される場合もあります。トゥイータにウーファの信号が入ると当然破損しますから、必ず出力される音声を確認しつつ作業します。

15.3. 再生

メディアプレーヤに本ソフトが出力したファイル（例えば、MySong(6CH).wav）を、ドラッグ・ドロップします。

16. GR-Peach を用いた楽曲の再生

FIR フィルタソフトを書き込んだ小型マイコン基板 GR-Peach に本ソフトが生成した FIR 係数ファイルを読み込ませることで、USB オーディオストリームや、アナログ LINE 信号をその場で補償し、6チャンネルのマルチチャンネル信号に分割して出力することができます。

予め変換する必要が無く、PC を使わず再生でき、様々な信号源が接続可能となり、利便性が向上し

ます。GR-Peach とアンプをスピーカーボックスに内臓することで、パワードスピーカーとして一層手軽に利用することもできます。

16.1. GR-Peach の実行コード

次に示す Mbed のページから、コードを入手して、Peach に書き込みます。

https://developer.mbed.org/users/dokunewon/code/Peach_AudioChannelDividerAndCompensator/

16.2. 接続

デバッグ用 USB か、電源端子から GR-Peach に給電し、上の図のように、USB0 には（できればセルフパワーの）USBHUB を接続し、HUB には、マルチチャンネル USBDAC と FIR 特性等を記録した USB メモリを接続します。

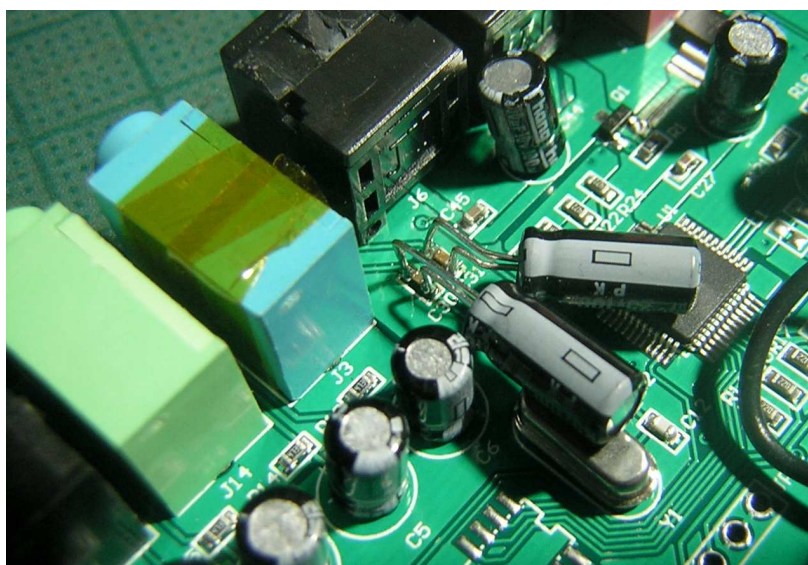
デジタルオーディオ信号を入力する場合は、USB1 端子に PC 等を接続します。USB1 端子に何も繋がなければ、USBDAC の LINE-IN 端子のアナログオーディオ信号が入力されます。

16.3. USBDAC

GR-Peach の実行コードは次表に記載の CM6206 を使用した USBDAC に対応しています。

機種名	取り扱い業者
DN-USBSA6CHOPT	上海問屋 http://www.donya.jp/site/item/item_20087.html
RA-AUD51	ルートアール http://www.amazon.co.jp/%E3%83%AB%E3%83%BC%E3%83%88%E3%82%A2%E3%83%BC%E3%83%AB-USB-to-5-1ch-%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%87%E3%82%A3%E3%82%AA%E3%82%A2%E3%83%80%E3%83%97%E3%82%BF-RA-AUD51/dp/B003M2WGFU

上記 USBDAC の DAC 出力は、値段を考えれば理解できる性能ですが、ADC 入力（LINE-IN）はオマケ程度の性能です。例えば、結合コンデンサに 0.1 μ F の MLCC が使われており、低域が通りませんし歪みます、ハイ側もイマイチです。下図のように、C30 と C31 に電解コンデンサをパラにすると低域だけは多少マシになります。（DAC 出力も、電解の極性が逆に実装されてるように思えてなりません）



FIR ファイルの準備

次表のファイルを USB メモリのルートフォルダに書き込みます。

内容	ファイル名
<p>補償付チャンネル分割用 FIR 係数ファイル</p> <p>本ソフトの「Create FIR」Process step で生成した、補償を施した FIR 係数ファイル。</p> <p>C:\Program Files\InverseX\Data\ に生成される。</p>	Fir_Ch0.snd ~ Fir_Ch5.snd
<p>補償無しチャンネル分割用 FIR 係数ファイル</p> <p>本ソフトの「Create FIR」Process step で生成した、補償を施さない FIR 係数ファイル。</p> <p>C:\Program Files\InverseX\Data\ に生成される。</p> <p>GR-Peach のユーザーボタンを押すところらのフィルタが使用され、補整の有無による違いを確認できる。</p>	Fir_Ch0NC.snd ~ Fir_Ch5NC.snd
<p>バイパス用 FIR 係数ファイル</p> <p>本ソフトの「Create FIR」Process step で生成した、入力をそのまま出力するための FIR 係数ファイル。(デバッグ用)</p>	Fir_Bypass.snd

上記の係数ファイルはいずれも FIR の時間領域の応答を記録した 16 ビット符号付整数形式のヘッダなしモノラル RAW 波形データです。特性ファイルには 65536 サンプルのフィルタ応答が記録されていますが、後ろ半分は重畳処理の都合でゼロとなっています。

16.4. ゲイン調整

「補償付」と「補償なし」の各チャンネル及び、バイパス時のゲインを記録したテキストファイル (gains.txt) を USB メモリのルートフォルダに書き込みます。

gains.txt

```
00.50000:HIGH(MID)L:COMPENSATED FILTERS
00.50000:HIGH(MID)R
00.03000:MID(LOW)L
00.03000:MID(LOW)R
01.00000:LOW(NONE)L
01.00000:LOW(NONE)R
00.50000:HIGH(MID)L:UNCOMPENSATED FILTERS
00.50000:HIGH(MID)R
00.01500:MID(LOW)L
00.01500:MID(LOW)R
01.00000:LOW(NONE)L
01.00000:LOW(NONE)R
01.00000:BYPASS:REFERENCE FILTER
```

Peachはこのファイルから、行の先頭の8文字の浮動小数点とそれに続く文字列を取り出します。文字列は存在していれば、内容は何でもかまいません。

上のファイルの値は、各チャンネルの値が様々な音楽で振り切らないように（ピンクノイズで半分くらい振るように）再生と調整を繰り返す必要があります。

17. スピーカの選定

どのような形式のスピーカであっても、補償を行なうことで特性の平坦さと再生帯域の改善が可能です。ただし、向き・不向きはあります。

本ソフトを利用した補償音響システムにはフルレンジとウーハによる2ウェイ構成が適します。また、フルレンジには比較的小口径のものが、ウーハには小容量でも密閉型のエンクロージャーを用いたものが適し、コラム（トーンゾイレ）構成のウーハはさらに適しています。以下にその理由を説明しますが、補償した音響システムが既存の愛好家に受け入れられない以上に、さらに加えて受け入れ難いものです。

17.1. 補償音響システムに適したドライバ構成

補償によってドライバの周波数特性が平坦化されるため、ユニットの数を増やす必要性は小さくなります。また、波長がドライバの間隔に比べて十分長くない周波数では、帯域を分割してドライバを駆動することは適切ではありません。角度によって到達距離に差が発生して、補償が困難になるからです。

従って、ウーハとフルレンジを用い、クロスオーバを低め（ウーハとスクーカの距離より十分長い波長となる周波数）に設定した2ウェイシステムが適します。

17.2. 補償音響システムに適したフルレンジドライバ

トゥイータの帯域までフルレンジが分担するので、あまり口径の大きなものは不向きです。しかし口径が小さすぎると、ウーハとのクロスオーバが高くなり、フルレンジとウーハの距離より十分長い波長の周波数でクロスオーバできなくなります。結果としてフルレンジには口径8~12cmの小型のものが適します。

17.3. 補償音響システムに適したウーハ

補償によって平坦な低域特性を得るには、密閉型のエンクロージャが適します。バスレフ型エンクロージャは、 f_0 以下で急速にゲインが低下するため、大電力を投入しても、音波が発生しないからです。

適切な密閉型のスピーカを補償して駆動することで、 f_0 以下の出力を得ることもでき、 f_0 以下で平坦な特性を得ることもできます。

スピーカは f_0 以下の周波数ではあまり利用されませんが、逆に、ロボット等に用いられるサーボモータは、もっぱら f_0 以下でだけ使用されます。なぜなら、 f_0 より高い周波数では制御性が悪く、希望の制御量が得られないからです。逆に f_0 より低い周波数では、たとえゲインが低下しても、正確な制御が可能です。同じ理由で、正しく補償してウーハを f_0 以下で使用することで、正確な音波を得ることができます。

問題はこの方法（補償によって f_0 以下で平坦な特性を得る方法）ではスピーカの駆動に大きな電力が必要な事です。しかし、これは制御方式の欠陥ではありません。問題は、スピーカの逆起電力をアンプが再生できない事にあります。この問題は、将来D級アンプが解決するものと思われます。

あえて言えば、エンクロージャーの共振やバスレフポートの共振を利用して低域の平坦な特性を得る方法こそが（昔はそのような方法しか無かったとは言え）入力波形の通りに空気を振動させる制御には適しません。（広帯域増幅器の広域特性を改善するために、ピーキングコイルを挿入していた過去の技術

と同じです)

また、小容積のエンクロージャで平坦な低域特性を得るには、ウーハに大きな耐入力が必要です。スクーカーが 1W で駆動されている時に、ウーハに 100W を超える電力が加わることも稀ではありません。

補償を行なうシステムでは、 f_0 は高くとも、高耐入力で正確に振動するウーハが必要です。このようなウーハとして、密閉型のコラム型（トーンソイレ）スピーカが理想的です。例えば 20W のドライバを 10 個使用したコラム型スピーカは、連続して 100W を超える電力に耐えることが出来る上、ボイスコイル 1 個あたりの振動板面積が小さく、正確で強力な駆動が可能です。小型装置向けに大量生産で安価に供給されており、たとえ安価なドライバの貧弱な磁器回路であっても、10 個分合算すれば大きな制動力を生じます。

結果としてウーハにはフルレンジと同じ口径 8~12cm のドライバを多数並べた密閉型スピーカが適します。

本書や本書が対象とするソフトウェア (InverseX) の部分や全体は、著者の承諾なしに、自由に改良や複写を行い、配布することができます。誤りの訂正やより分かり易くするための改良を歓迎します。但し、改良や複写を行なって作成した著作物には、本枠内のメッセージをそのまま転載し、著作物の部分や全体は、著者の承諾なしに、自由に改良や複写を行い、配布することを許さなくてはなりません。