

技術資料：FVN（周波数領域 velvet noise）ツール群

河原 英紀

10:21am, 2020年1月6日

(Start date: July 10, 2019, 7/11, 8/16, 8/18, 8/19,
restart data: 12/18 2019, 12/20, 12/21, 12/24
01/04 2020, 01/05, 01/06)

目 次

1	はじめに	1
2	allInOneFVNmeasurement:FVNによる音響測定	2
2.1	説明	2
2.2	使い方	2
2.2.1	対象とする音響系	2
2.2.2	較正：規定値での使用	2
2.2.3	測定：規定値での使用：(8/19手順を更新)	3
2.2.4	分析と資料化	5
2.3	規定値以外での較正と測定	5
2.3.1	非線形成分の計測が不要な場合：簡易測定	6
2.3.2	非線形成分を調べる場合：較正音圧の設定	6
2.3.3	その他の引数	7
2.4	関数の Help	7
2.4.1	呼び出し方	7
2.4.2	入力引数の説明	8
2.4.3	出力の説明	8
3	oneThirdSpecDisplayForFVN:測定状況の表示	10
3.1	説明	10
3.2	使い方	10
3.2.1	関数の呼び出し方	12

4	standingWvViewer:対話的実時間音響特性計測、ステレオ用	13
4.1	測定系の設定と動作の説明	13
4.2	操作法	14
4.2.1	マイクロフォンの感度の較正	15
4.2.2	測定時のマイクの動かし方と、妨害音について	15
4.3	表示される情報	15
4.3.1	振幅周波数特性：1/3 オクターブ平滑化：左上のグラフ	16
4.3.2	インパルス応答：14 msまで：左下のグラフ	16
4.3.3	インパルス応答：全体、dB表示：右下のグラフ	17
4.3.4	室内音響（定在波）確認用応答表示：右上のグラフ	17
4.4	操作ボタン	17
4.5	記録されるデータ	18
5	rtFVNRespToolPinkEx:対話的実時間音響特性計測：18/Dec./2019	20
5.1	測定系の設定と動作の説明	20
5.2	操作法	21
5.2.1	マイクロフォンの感度の較正	22
5.2.2	測定中の画面	24
5.2.3	測定時のマイクの動かし方と、妨害音について	25
5.3	線形成分、非線形成分、暗騒音の影響の測定と記録	26
5.4	測定の終了とログファイル	28
5.5	表示される情報	28
5.5.1	入力レベル	28
5.5.2	インパルス応答と平滑化されたパワーの応答	29
5.5.3	振幅周波数特性	30
5.5.4	操作パネル	31
5.6	ソースコードの確認と MATLAB 非依存版	32

図 目 次

1	測定結果の表示例。青線：インパルス応答から求められた振幅周波数特性。線形成分に対応する。赤線：振幅周波数特性に含まれる暗騒音の影響。黄色の破線：システムの非線形性により生じた成分。これらの値は、1/3オクターブ幅の矩形関数により平滑化されている。自乗平均値。	5
2	簡易測定の結果。非線形成分の測定が省略されている。	7
3	非線形成分の音圧レベル依存性。	8
4	上左：A特性で重みづけられた音圧レベルの軌跡。上右：試験信号と暗騒音のパワースペクトル。縦軸はFFT-bin毎の音圧レベル。下：試験信号と暗騒音の平滑化されたパワースペクトル。縦軸は、横軸の周波数を中心とする1/3オクターブの範囲に含まれる成分の音圧レベル。	11
5	実時間対話的音響計測ツールを使用する際の、機器の接続。	13
6	実時間対話的音響計測ツールの起動時の画面。右端の上にある棒グラフは、MSBを0dBとした、入力レベル表示。9秒後から下のように測定結果が表示され始める。	14
7	実時間対話的音響計測ツールの測定実行中の画面。左上は、1/3オクターブで平滑化した伝達特性と誤差、左下は、インパルス応答、右上のグラフは、350Hzまでの、平滑化なしの伝達特性と誤差。右下は、長時間のインパルス応答の絶対値(dB表示)、右端の上にある棒グラフは、MSBを0dBとした、入力レベル表示。	16
8	実時間対話的音響計測ツールを使用する際の、機器の接続例。ステレオスピーカとマイクが内蔵されているPCの場合には、外部機器を用いずに動作させることもできる。	20
9	起動時の画面。ツールのGUIと、作業ディレクトリ選択用のダイアログが表示されている。	21
10	背景のダイアログを全面に出し、それを使って作業ディレクトリを選択する。	22
11	マイクロフォンの感度較正時の画面。	23
12	マイクロフォンの感度較正を行った直後の画面。この例では、マイクロフォンの位置でA特性で80dBであったとして較正した。	24

13	通常の測定中の実時間対話的音響計測ツールの画面の例。左側上部にある棒グラフは、入力レベルを表示している。左側は、左チャンネルのマイク入力、右側は、右チャンネルの基準となる入力のレベルを表示する。左下の部分は、操作用のボタン類を集めたパネルであり、測定結果は、右側の三枚のパネルに表示される。上から順にインパルス応答、平滑化されたパワーの応答、振幅周波数特性を実時間で更新し続ける。それぞれの表示で、青は左にあるスピーカからマイクまでの応答、赤は右側のスピーカからの応答を示す。振幅周波数特性に表示される黄色は、暗騒音、非線形性などによる測定誤差の大きさを表す。	25
14	リアルタイム計測の停止時の画面。	26
15	測定結果の例。	27
16	入力レベル表示部分。左に較正前、右に較正後の状態を示す。	29
17	インパルス応答と、平滑化されたインパルス応答のパワー。青線が左チャンネル、赤線が右チャンネルからの応答。	30
18	振幅周波数特性。左側は、インパルス応答からそのまでパワースペクトルを求め、右側は、 $1/6$ オクターブ幅でパワースペクトルを平滑化している。青線が左チャンネル、赤線が右チャンネル。	31
19	操作のためのパネル。	31
20	日本語環境での AppDesigner によるツールの表示。画面は、コードビュー。	32

表 目 次

1 FVN の個数と計測応答の長さによる、測定に要する時間（単位：秒）の変化。 6

1 はじめに

ここでは周波数領域 velvet noise[1, 2] を用いたツール群 [3] と、その基盤となる関数群について説明する。最初のリリースでは主に音響測定への応用 [4, 3] について説明する。

2 allInOneFVNmeasurement:FVNによる音響測定

FVNに基づいた音響測定に必要な、較正、測定、分析、記録を一括して行う関数。

2.1 説明

この関数は、音響システム（例えばスピーカーからマイクまで）のインパルス応答と、測定時の暗騒音と、暗騒音による測定結果への影響、線形成分では説明できない成分（システムの非線形性により生ずる入力信号に依存する成分）を測定する。また、そのために必要な録音系の感度の較正と、測定結果の分析と資料化を行う。これらが、一つの関数としてまとめられている。

2.2 使い方

MTLAB の command window で、関数の名前（`allInOneFVNmeasurement`）を打ち込んでリターンキーをタイプすると、以下の説明 2.4 にある関数の Help 情報が表示される。

2.2.1 対象とする音響系

マイクとスピーカーが、MATLAB が動作するマシンに接続されている系。正しく較正できるためには、測定対象のマイクに、較正に用いる装置のマイクを近づけることができる構造になっている必要がある。（較正しない場合には、不要）マイクとスピーカーは、同一の内部クロックで A/D 変換と D/A 変換が動作している必要がある。（クロックの同期を確認するためのツールを用意してある。）

2.2.2 較正：規定値での使用

ここでは、予め設定されている条件で使用する場合について説明する。MTLAB の command window で、以下をタイプしリターンキーをタイプする。

```
allInOneFVNmeasurement('calibration')
```

すると、以下が表示されて、11秒間、雑音のように聴こえる試験信号がスピーカーから出力される。

```
Test signal plays 13 seconds.  
Adjust the test signal level to 80 dB at the microphone
```

この試験音が出ている最中に、測定対象のマイクに、較正に用いる装置のマイクを近づけて音圧レベルを測定する。音圧レベルの測定は、A-weight fast の設定 [5, 6] で行う。(特に指定しなければ、この設定になっている装置が多い)

この較正用の装置の音圧レベルの値が 80 dB となるように、マシンあるいは、マシンに接続されているオーディオインターフェースの volume つまみを操作する。

試験音が終わると、以下のいずれかのメッセージが出力される。

マイクの感度が適切な場合

```
OK! MaxValue: XXXX
```

(XXXX には、マシンに取り込まれた信号の絶対値の最大値が表示される。信号は-1 と 1 の間の値を取る) また、この後には閾数からの戻り値が表示される。戻り値は無視してかまわない。

マイクの感度が低すぎる場合

```
Increase the mic sensitivity. MaxValue: XXXX
```

マイクの感度が高すぎる場合

```
Reduce the mic sensitivity. MaxValue: XXXX
```

なお、音圧レベルの調整が終わる前に試験音が終わってしまう場合には、もう一度以下をタイプしリターンキーをタイプして試験音を再生して、音圧レベルの調整を続ける。

```
allInOneFVNmeasurement('calibration')
```

標準の設定では、試験音の長さが 13 秒で、かなり短い。まず、最初はスピーカーから出る音の音圧レベルを調整する。音圧レベルを設定した後で、メッセージを確認し、必要な場合には、マイクの感度を調整するとよい。

2.2.3 測定：規定値での使用：(8/19 手順を更新)

ここでは、予め設定されている条件で使用する場合について説明する。MTLAB の command window で、以下をタイプしリターンキーをタイプする。

```
allInOneFVNmeasurement('XXXXXXXX')
```

ここで、“XXXXXXXX”には、“calibration”以外の任意の文字列を書き込む。書き込んだ文字列は、出力される図のタイトル欄に表示される。

上記の命令をタイプすると、以下が表示されて、11秒間、雑音のように聴こえる試験信号がスピーカーから出力される。

```
Measurement starts. Be quiet for 16 seconds. Please.
```

測定が終わって、数秒後に図 1 に示すようなグラフが表示される。(以前の版では試験音の後で暗騒音を計測していた。この手順は分かり難く、測定時間も不要に長い。8/19 の版では、試験音の直前の無音区間を使い、暗騒音を測定している。)

```
fvnFile: 'fvnMin200ms'
averagedThirdOctaveResponse: [1 × 16384 double]
averagedThirdOctaveNonlinearComp: [1 × 16384 double]
averagedThirdOctaveBackground: [1 × 16384 double]
averagedResponseWaveform: [15876 × 1 double]
individualResponseWaveform: [15876 × 4 double]
averagedBackgroundWaveform: [15876 × 1 double]
individualBackgroundWaveform: [15876 × 4 double]
memoText: 'test'
number_of_FVNs: 4
responseLength: 0.3000
soundPressureLevel: 80
signalRange: [294135 310010]
backgroundRange: [792464 808339]
samplingFrequency: 44100
modeOfOperation: 'measurement'
creationDate: '10-Jul-2019 23:46:27'
levelStructure: [1 × 1 struct]
elapsedTime: 37.1656
recordedWaveform: [1510400 × 1 double]
```

測定が終了すると、命令を実行したディレクトリに、以下のようなファイルが出力される。

```
-rw-r--r--    1 kawahara  staff    961551 7 10 23:46 fvn44k20190710T234626.eps
-rw-r--r--    1 kawahara  staff    4531244 7 10 23:46 fvn44k20190710T234626.wav
-rw-r--r--    1 kawahara  staff    93931780 7 10 23:46 fvn44k20190710T234626.mat
```

ファイル名(例えば“fvn44k20190710T234626”的部分)は、日付と時刻から自動的に生成され、重複しない。拡張子“eps”は、図 1 に対応する画像ファイルを表す。拡張子“wav”は、この測定で録音された信号のオーディオファイルを表す。規定値では WAVE 形式、44100 Hz、24 bit で記録されている。拡張子“mat”は、測定条件などと分析結果全てを含んだ MATLAB の“mat”形式のファイルであることを表す。このファイルには、録音された信号は含まれていない。

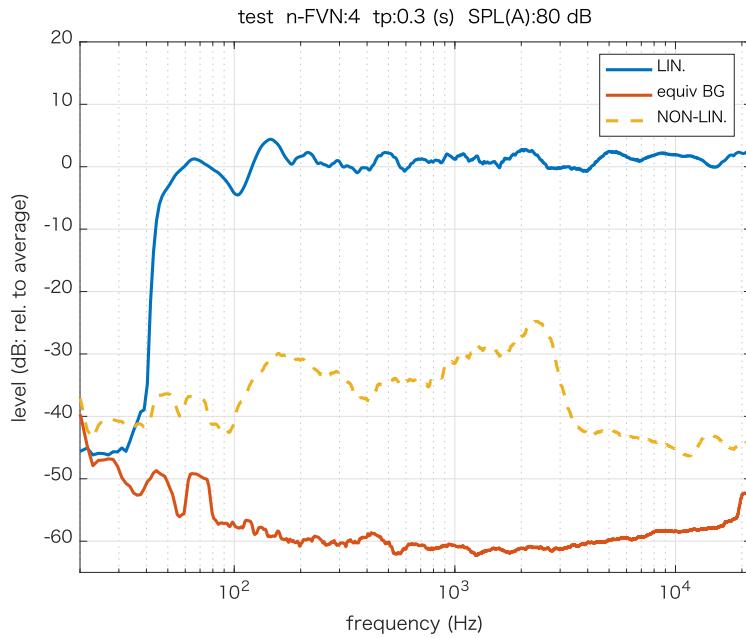


図 1: 測定結果の表示例。青線：インパルス応答から求められた振幅周波数特性。線形成分に対応する。赤線：振幅周波数特性に含まれる暗騒音の影響。黄色の破線：システムの非線形性により生じた成分。これらの値は、 $1/3$ オクターブ幅の矩形関数により平滑化されている。自乗平均値。

2.2.4 分析と資料化

規定値での測定では、簡単な資料として拡張子 “eps” を持つ図が outputされる。測定条件などと分析結果全てを含んだ MATLAB の “mat” 形式のファイルと、録音された信号のオーディオファイルを読み込んで詳細な資料を作成することができる。詳細な資料化のためのツールは別に用意する。

2.3 規定値以外での較正と測定

関数 “allInOneFVNmeasurement” は、以下の引数を用いて呼び出すことができる。

```
output = allInOneFVNmeasurement(memoText, number_of_FVNs, response_length, spl, exmode)
```

実際の測定に用いる際には、最初の引数以外は省略することができる。目的に応じて、これらの引数を設定することができる。

表 1: FVN の個数と計測応答の長さによる、測定に要する時間（単位：秒）の変化。

response length	#FVN=2	#FVN=3	#FVN=4	#FVN=5	#FVN=6
0.3 (default)	18	24	34	55	98
0.2	10	14	21	35	63
0.1	5	7	10	17	31

2.3.1 非線形成分の計測が不要な場合：簡易測定

非線形成分の測定が不要な場合には、短時間で測定を終えることができる。まず、引数 “number_of_FVNs” の値として “2” あるいは “3” を設定する。この場合には、非線形成分の測定を行わない。また、引数 “response_length” の値を規定値の 0.3 秒よりも短くする。通常の室内でスピーカーとマイクの距離が数 m 以内であれば、0.1 秒としても問題は無い。これらの値の組合せと、測定に要する時間を表 1 に示す。表では、非線形成分の計測を行う場合についても記した。

図 2 に、簡易測定の例を示す。振幅周波数特性は、いずれもほとんど同じである。暗騒音の影響は、FVN の個数を 3 とした方が少なくなっている。これは、実質的な同期加算回数が多いいためである。

2.3.2 非線形成分を調べる場合：較正音圧の設定

非線形成分は入力に依存して変化する。その影響を調べるためにには、異なった音圧レベルでの測定が必要となる。引数 “spl” を設定することで、影響を調べることができる。

ここでは、スピーカーの軸上 50 cm での音圧レベルが 70 dB の場合と 85 dB の場合について測定した。まず、以下の命令で試験信号を再生して音圧レベルを較正する。

```
allInOneFVNmeasurement('calibration', 4, 0.3, 70)
```

音圧レベルが設定できたら、以下の命令で測定を実行する。

```
allInOneFVNmeasurement('test', 4, 0.3, 70)
```

実際の実験では、“test” の部分に、実験の条件などのメモを記す。音圧レベル 85 dB についても、同様に較正し、測定する。

図 3 に、測定結果を示す。70 dB の場合と比較すると、85 dB では、非線形成分が 10 dB 以上も増加している。なお、著者が音楽を鑑賞する通常の音圧レベルは 65 dB から 70 dB 程度である。スピーカーからの距離は、ほぼ 1 m である。

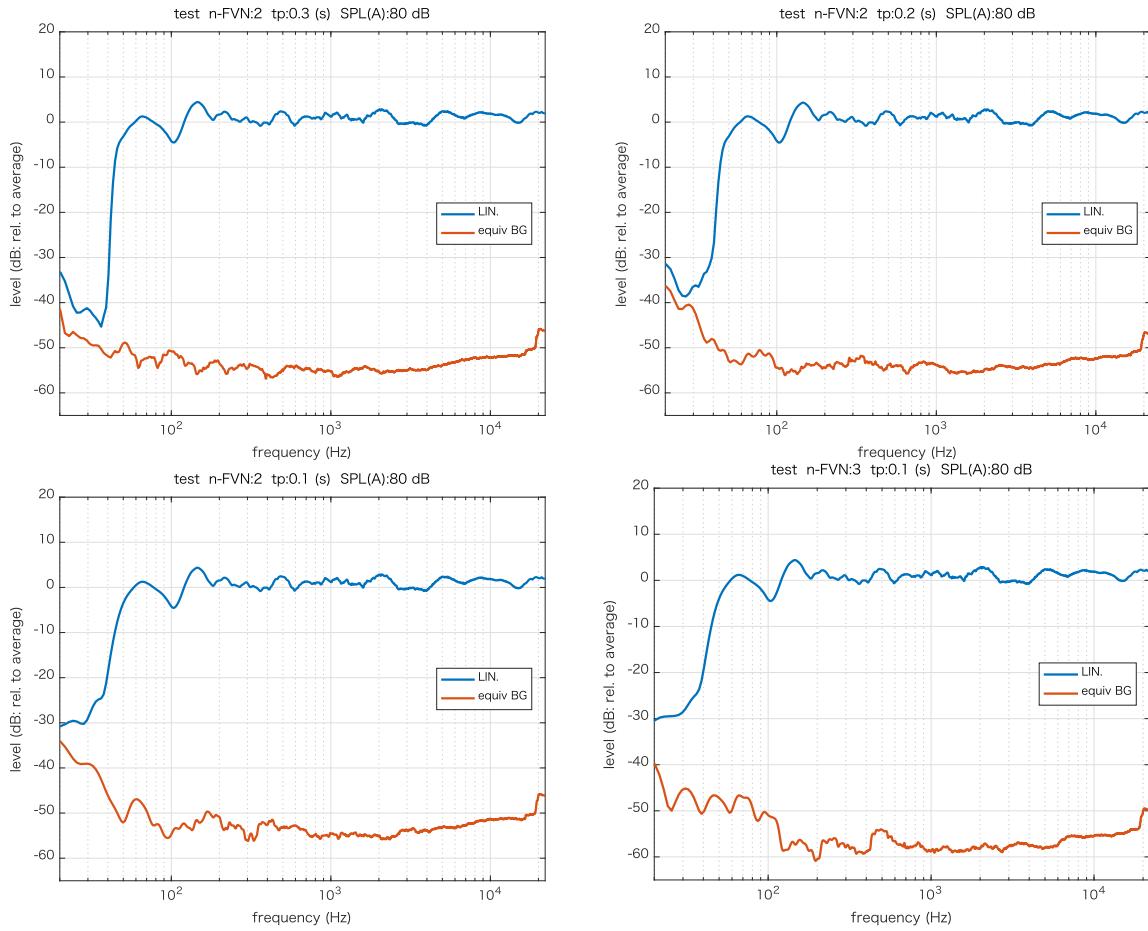


図 2: 簡易測定の結果。非線形成分の測定が省略されている。

2.3.3 その他の引数

引数 “exmode” は、測定の拡張条件を設定するための部分であり、現在は、“measurement2ch”だけが実装されている。この条件では、右チャンネルも同時に記録される。例えば、信号をスピーカーに送ってからマイクに届くまでの時間を測定するために用いることができる。

2.4 関数の Help

2.4.1 呼び出し方

```
% Acoustic impulse response and nonlinear component measurement
```

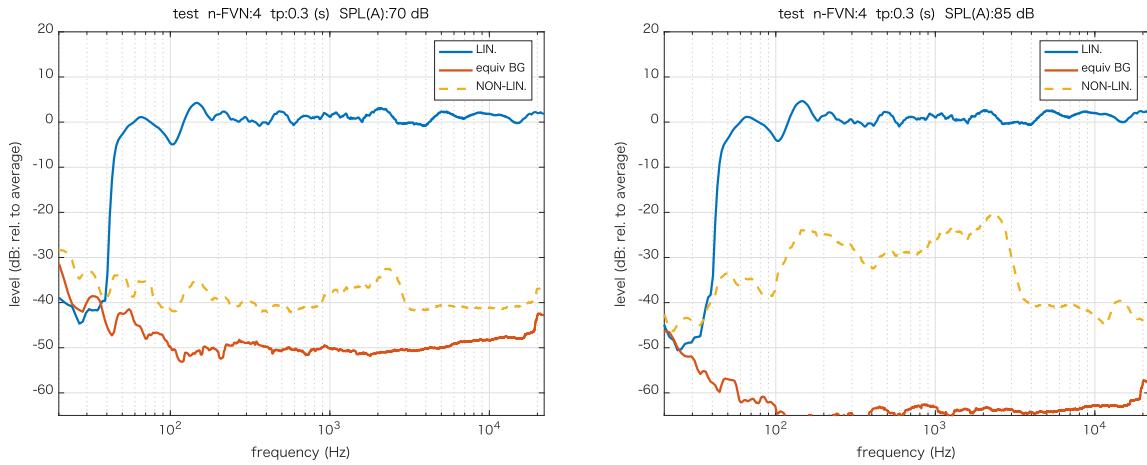


図 3: 非線形成分の音圧レベル依存性。

```
% How to call
% output = allInOneFVNmeasurement(memoText)
% output = allInOneFVNmeasurement(memoText, number_of_FVNs)
% output = allInOneFVNmeasurement(memoText, number_of_FVNs, response_length)
% output = allInOneFVNmeasurement(memoText, number_of_FVNs, response_length, spl)
% output = allInOneFVNmeasurement(memoText, number_of_FVNs, response_length, spl, exmode)
```

2.4.2 入力引数の説明

```
% Argument
% memoText      : text string
% number_of_FVNs : number of FVN sequences for nonlinearity measurement
%                  must be equal or larger than 4.
%                  The default value is 4.
% response_length : observation length of the impulse response (s)
%                  The default value is 0.3 (s)
% spl           : sound pressure level at microphone in A-weighting (dB)
%                  The default value is 80 dB
% exmode        : execution mode selector
%                  'measurement', 'measurement2ch', 'calibration', 'diagnosis'
%                  default 'measurement'
```

2.4.3 出力の説明

```
% Output
```

```
% output : structure with the following fields
%
% Field name explains itself
%
% averagedThirdOctaveResponse: 1-d vector double
%
% averagedThirdOctaveNonlinearComp: 1-d vector double
%
% averagedThirdOctaveBackground: 1-d vector double
%
% averagedResponseWaveform: 1-d vector double
%
% individualResponseWaveform: matrix
%
% averagedBackgroundWaveform: 1-d vector double
%
% individualBackgroundWaveform: matrix
%
% memoText: text string
%
% number_of_FVNs: integer
%
% responseLength: double (s)
%
% soundPressureLevel: double (dB)
%
% signalRange: indecies of start and end
%
% backgroundRange: indecies of start and end
%
% samplingFrequency: double (Hz)
%
% creationDate: text string
%
% levelStructure: structure with calibration info.
%
% elapsedTime: double (s)
%
% recordedWaveform: 1-d vector double
```

3 oneThirdSpecDisplayForFVN:測定状況の表示

FVN による音響測定の関数 “allInOneFVNmeasurement” で録音された信号の音圧レベルと暗騒音の音圧レベル、パワースペクトルを表示する。

3.1 説明

A 特性の周波数重み付けを信号に行い、fast と slow の軌跡を表示する。また、パワースペクトルそのものと、1/3 オクターブで平滑化した、試験信号と暗騒音を表示する。

3.2 使い方

以下のように、“allInOneFVNmeasurement” により記録されたファイルを読み込み、関数に信号と標本化周波数、較正を行なった音圧レベルを与えて実行させる。

```
>> [x,fs] = audioread('fvn44k20190710T234626.wav');  
>> oneThirdSpecDisplayForFVN(x, fs, 80)
```

ここで、“>>” は、MATLAB からのプロンプトである。

すると、すぐに以下の出力と図 4 に示すようなグラフが表示される。¹

```
sigWavePower: 2.3887e+08  
time_axis: [1510400 × 1 double]  
fastSPLdB: [1510400 × 1 double]  
slowSPLdB: [1510400 × 1 double]  
rawLevelAnalysisStructure: [1 × 1 struct]  
signalPowerSpectrum: [1048576 × 1 double]  
backgroundPowerSpectrum: [1048576 × 1 double]  
frequencyAxisPowerSpec: [1048576 × 1 double]  
fftl: 1048576  
samplingFrequency: 44100  
signalOneThirdDB: [524288 × 1 double]  
backgroundOneThirdDB: [524288 × 1 double]  
frequencyAxisOneThird: [524288 × 1 double]  
calibrationFactor: 113.3825
```

¹ この測定は、閑静な住宅街で家人が寝た後にエアコンなどの騒音を出す機器を止めて行われた。用いたマイクは DPA-4066 で、等価入力雑音レベルは 26 dB である。図 4 の時系列とスペクトルを見ると、1 kHz 以上の暗騒音は、マイクから発生する固有雑音によると考えられる。

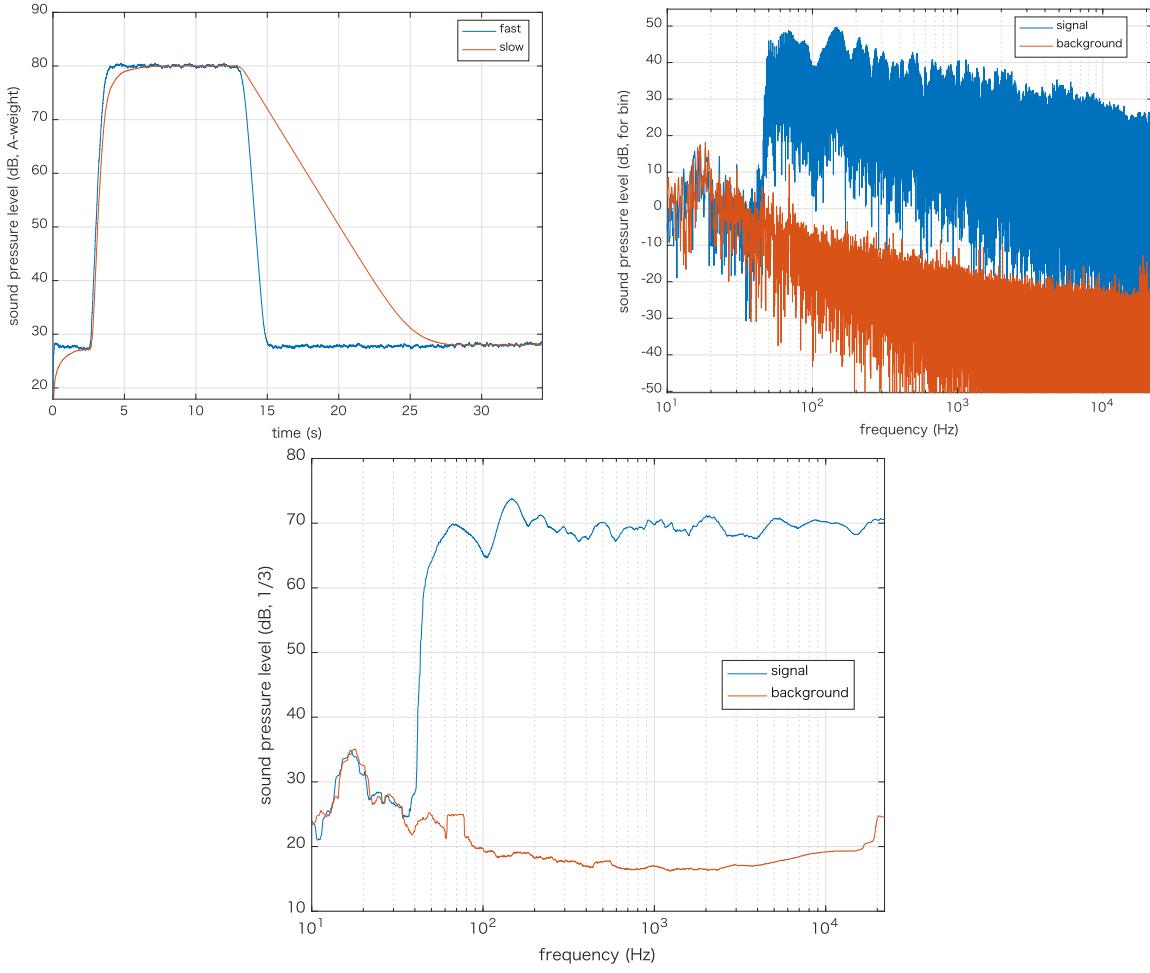


図 4: 上左：A 特性で重みづけられた音圧レベルの軌跡。上右：試験信号と暗騒音のパワースペクトル。縦軸は FFT-bin 每の音圧レベル。下：試験信号と暗騒音の平滑化されたパワースペクトル。縦軸は、横軸の周波数を中心とする 1/3 オクターブの範囲に含まれる成分の音圧レベル。

これらの情報を用いると、図 4 に示すグラフと同じものを描くことができる。また、最後のフィールド “calibrationFactor” に示された値 $c_{f\text{dB}} = 113.3825$ を用いると、記録された信号の値 $x(t)$ を物理的に意味のある単位 (Pa) で表された信号の値 $p(t)$ に換算することができる。(音圧レベルの基準となるレベルである 0 dB は、20 μPa である。) そのためには、

信号の値に係数 $10^{c_{f\text{dB}}/20}$ を掛ける。

$$p(t) = 10^{c_{f\text{dB}}/20}x(t) \quad (1)$$

これらの図は表示されるだけなので、必要に応じてファイルに記録する。

3.2.1 関数の呼び出し方

関数 “oneThirdSpecDisplayForFVN” の呼び出し方を以下に示す。

```
output = oneThirdSpecDisplayForFVN(x, fs, spl, displayOn, msgText)
```

引数 “x” は、記録された信号を表す一次元のベクトル, 引数 “fs” は、標本化周波数を表すスカラー, 引数 “spl” は、較正された音圧レベルを表すスカラーである。これらは省略できない。以下の引数は省略できる。

引数 “displayOn” は、図を表示するかを指示するスイッチで “1” の場合には表示し、“0” の場合には表示しない。規定値は “1” である。引数 “msgText” は、図のタイトルに表示される文字列。規定値は空白である。

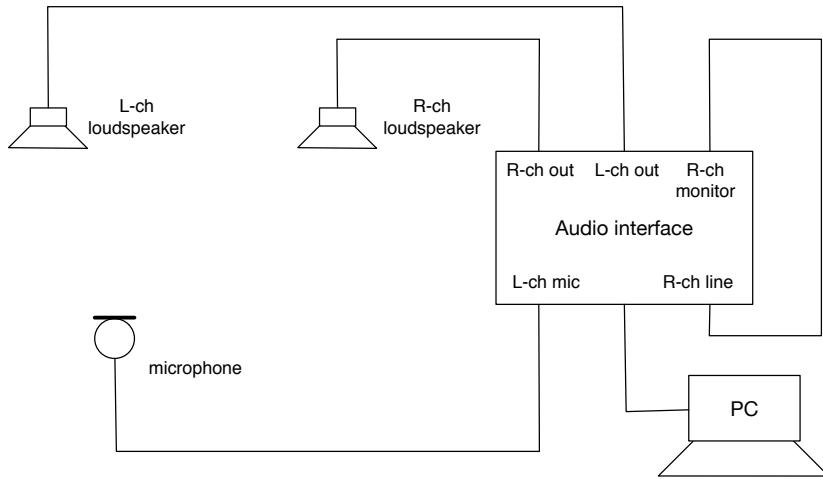


図 5: 実時間対話的音響計測ツールを使用する際の、機器の接続。

4 standingWvViewer:対話的実時間音響特性計測、ステレオ用

FVNによる室内音響の実時間での対話的計測を行うアプリケーション。

4.1 測定系の設定と動作の説明

対話的に二つのスピーカからマイクまでの伝達特性、インパルス応答、低域の特性、残響、レベルを測定し、表示する。本ツールを使用するための装置の設定を図に示す。

同時に複数のチャンネルのインパルス応答を求めるために、二つの直交系列（左チャンネルは、同一の極性、右チャンネルは、交番する極性）を用いて異なったFVNの極性を設定した二系列の試験信号を、それぞれ左と右のスピーカから再生する。スピーカから再生された音は、左チャンネルのマイク入力に接続した一個のマイクで収録している。また、時間軸の基準として、モニター出力の右チャンネルを、ライン入力の右チャンネルに加えている。オーディオインターフェースは、ステレオのモニタ出力と、二系統のマイクあるいはライン入力があれば良い。今回は、44,100 Hz の標本化周波数を用いている。

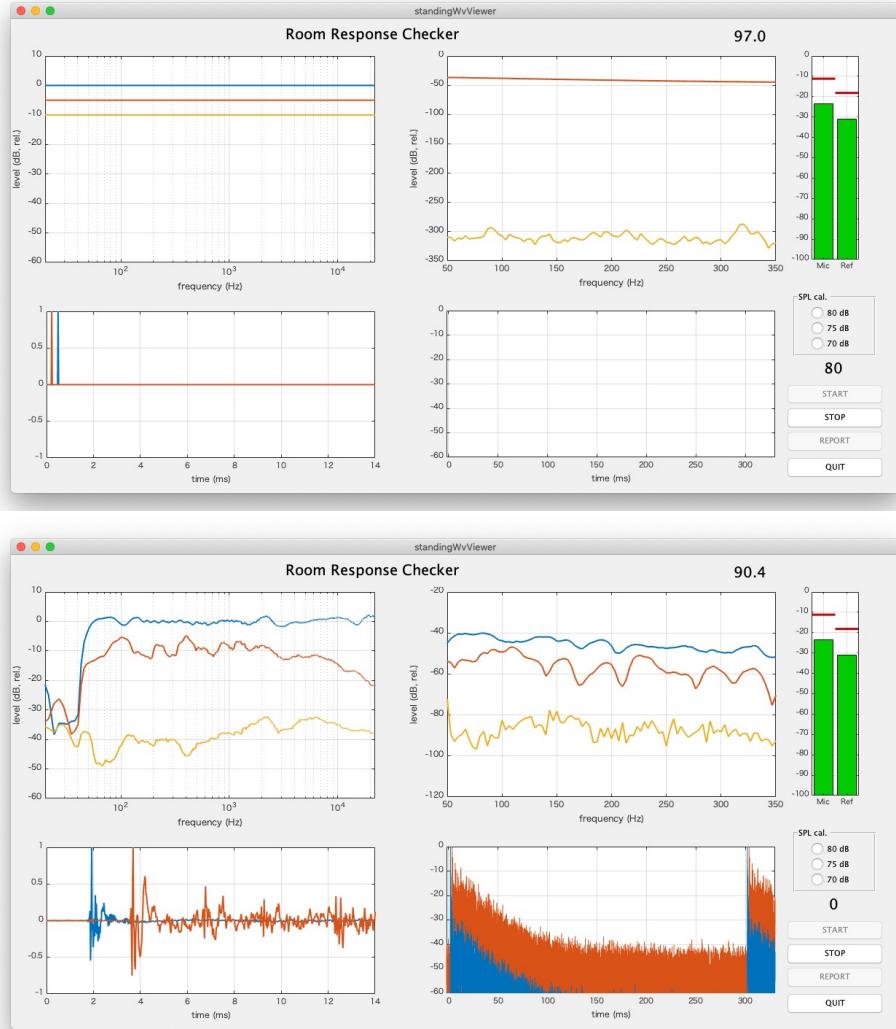


図 6: 実時間対話的音響計測ツールの起動時の画面。右端の上にある棒グラフは、MSB を 0 dB とした、入力レベル表示。9 秒後から下のように測定結果が表示され始める。

4.2 操作法

図 5 のように接続したシステムで MATLAB を起動し、command window で以下の命令を入力することによりアプリケーションを起動する。

standingWvViewer

起動すると、図 6 の上に示すインターフェースが表示されて数秒後から測定用の信号（雑音のように聴こえる）が始まり、9 秒後から、図 6 の下に示すような測定結果が表示され始め

る。ここで、右端の中段にある“SPL cal.”と記されたパネルを利用して、使用するマイクロフォンの感度を較正し、測定を開始する。“Mic.”と書かれた棒グラフが、L-ch mic の入力を表し、“Ref.”と書かれた棒グラフが、R-ch line の入力を表す。棒グラフの長さは、入力の最大値を 0 dB と定義した表示での入力の自乗平均値（RMS: Root Mean Squared）を表す。赤い横棒は、画面の更新周期ごとの入力の絶対値の最大値を表す。

4.2.1 マイクロフォンの感度の較正

この段階では、レベル表示だけを使う。インターフェースの他の表示は無視する。まず、入力レベルが過大になっていないことを確認する。目安は、赤い横棒が-6 dB を超えないことである。そのような状態で、緑の棒の長さは、長い方が良い。

使用しているマイクのすぐ近くに、音圧レベルの測定に用いることのできる騒音計（IEC レベル 1、あるいは 2）のマイクを保持して音圧レベルを監視する。ここで、再生系の音量を調整して、騒音計が示す音圧レベル（A 特性での dB）が、80 dB, 75 dB, 70 dB のいずれかになるようにする。また、マイクの感度も、この節の最初で説明したように調整する。調整を終え、音圧レベルが安定した時点で、“SPL cal.”と記されたパネルの該当するレベルのラジオボタンをクリックする。すると、画面の表示が図 7 のように変化し、測定が開始される。この例では、音圧レベルを 80 dB と設定した。

4.2.2 測定時のマイクの動かし方と、妨害音について

このツールでは、測定対象が線形時不变システムであることを前提としている。インパルス応答を求める際に用いる一個の FVN の長さは、求めるインパルス応答の長さの 10 倍以上になる。そのため、このツールの既定値として用いている 300 ms というインパルス応答の場合、正しく応答を測定するには、マイクが 4~5 秒以上静止している必要がある。マイクの移動が無視できない場合には、誤差が増加する。

L-ch, R-ch に加えた FVN に基づく試験信号は、FVN の配置間隔の逆数の $1/2$ のみに成分を有する。これらの成分を取り除いた信号には、暗騒音と、システムの線形時不变性からの外れによる成分が含まれる。これらを逆フィルタ（FVN およびピンクノイズ）処理した結果は、計測結果に含まれる誤差の目安を与える。

4.3 表示される情報

図 7 に示した測定中の画面には、以下のような情報が表示され、リアルタイムに更新される。具体的な更新内容は、ツールの MATLAB の関数 `stadingWaveViewer` のソースコードの 255 行目から始まる内部の関数 `update_display` に記述されている。

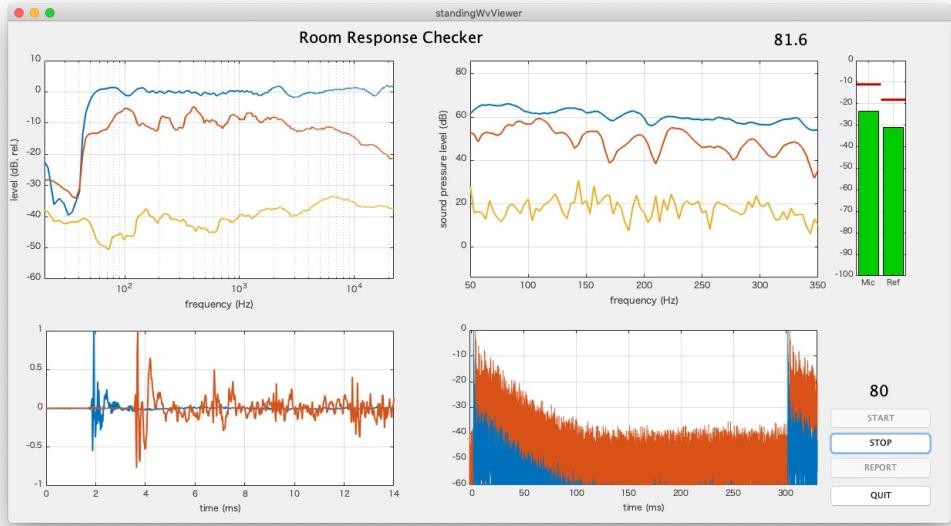


図 7: 実時間対話的音響計測ツールの測定実行中の画面。左上は、 $1/3$ オクターブで平滑化した伝達特性と誤差、左下は、インパルス応答、右上のグラフは、350Hzまでの、平滑化なしの伝達特性と誤差。右下は、長時間のインパルス応答の絶対値(dB表示)、右端の上にある棒グラフは、MSB を 0 dB とした、入力レベル表示。

4.3.1 振幅周波数特性： $1/3$ オクターブ平滑化：左上のグラフ

図 7 の左上に表示される。求められたインパルス応答から各周波数でのパワーを求め、 $1/3$ オクターブ幅の矩形の平滑化関数により平滑化した結果を表示している。青線が左チャンネル、赤線が右チャンネル、黄色の線が誤差成分を表す。

ここでは、表示を見易くするために、振幅伝達特性の平均値が大きな方のチャンネルの平均値が 0 となるように、全ての表示に同一のバイアスを加えている。振幅伝達特性の平均値は、100 Hz から 10 kHz までの $1/24$ オクターブ毎の、平滑化された振幅伝達特性の値の自乗平均値を用いる。図 7 に示した例では、左チャンネルの平均値が 0 dB となるように設定されている。

4.3.2 インパルス応答：14 ms まで：左下のグラフ

図 7 の左下に表示される。左右の各チャンネルのインパルス応答を、それぞれの最大振幅で正規化して表示している。ここでも、青線で左チャンネル、赤線で右チャンネルの応答を

示す。この例では、マイクに近い位置（距離 26 cm）にある左チャンネルのスピーカからの応答では、直接波が支配的であり、反射波の影響はほとんど見えない。一方、マイクから遠い位置（距離 85 cm）にある右チャンネルのスピーカからの応答では、直接波に比べて反射波が大きいため、直接波の応答が減衰した部分に多数の波が見える。インパルス応答は、加えたインパルスの時刻を 0 として表示している。

4.3.3 インパルス応答：全体、dB 表示：右下のグラフ

図 7 の右下に表示される。ここでは、横軸の範囲を FVN の配置間隔よりもやや広く設定して、インパルス応答全体（と次のインパルスに対する応答の最初の部分）を表示している。ここでも、青線で左チャンネル、赤線で右チャンネルの応答を示す。インパルス応答は指数関数的に減衰するため、ここでは、インパルス応答の絶対値を、片対数（縦軸を dB）で表示している。ここでも、それぞれのチャンネルの応答の最大値が 0 dB となるように設定している。

4.3.4 室内音響（定在波）確認用応答表示：右上のグラフ

図 7 の右上に表示される。FVN によりパルス圧縮された信号は、左チャンネルは nf_0 に、右チャンネルは $(n - 1/2)f_0$ の成分から構成されている。ここで f_0 は、FVN の配置間隔の逆数である。それぞれの成分の中間で値が 0 となるような窓関数を用いて信号を分析し、成分の周波数を中央とする f_0 幅の区間で積分したパワーを表示している。その際、マイク感度の較正結果を用いて、 $0 \text{ dB} = 20\mu\text{Pa}$ とする音圧レベルを縦軸として表示している。ここでは正の周波数と負の周波数のパワーを合計してあり、標本化周波数の半分までの成分を合計すると、波形のパワーと一致する。

ここでも、青線で左チャンネル、赤線で右チャンネルのパワーを示す。黄色の線は、誤差成分のパワーを示す。この例では、マイクに近い左側のスピーカの音は、ほぼ直接音に支配されており、ほぼ平坦な特性を示すのに対し、マイクから遠い右側のスピーカの音は、部屋の定在波を反映した間接音に支配されている様子が認められる。

4.4 操作ボタン

この GUI は、右の最上部にあるカウンターが正の間、動き続ける。この状態で操作できないボタンは、薄い色になり操作できない状態であることを示している。以下のボタンがある。

START 停止している状態から再起動する。

STOP 動作中に動作を停止する。

REPORT 停止時の画面を EPS ファイルとして記録し、得られたデータをファイルに記録する。ファイル名は、日時に基づいてユニークに設定される。

QUIT ツールを終了する。

4.5 記録されるデータ

以下にファイルに記録される構造体変数と内容を示す。

```
measuredData =
```

フィールドをもつ struct:

```
recordedWave: [308701 × 2 double]
    x10rg: [79380 × 1 double]
    x20rg: [79380 × 1 double]
    x30rg: [79380 × 1 double]
        x1: [79380 × 1 double]
        x2: [79380 × 1 double]
        x3: [79380 × 1 double]
    x_ref: [79380 × 1 double]
reference_location: 27780
zero_idx: 88
calLevel: 80
levelBias: 111.1546
samplingFrequency: 44100
```

それぞれのフィールドを、以下に説明する。

recordedWave 録音されたデータ。

x10rg, x20rg, x30rg 対応する FVN によりパルス復元された、左、右、誤差信号。

x1, x2, x3, x_ref パルス復元された信号を pink noise (LPC により近似した IIR) の逆フィルタにより白色化した、左、右のインパルス応答、誤差信号と、LINE 入力の右チャンネルに記録された、モニターの右チャンネルの信号。

reference_location モニター信号から求めた、インパルスの開始位置。

zero_idx 表示用の定数。2 ms に対応するサンプル数。

calLevel 較正した際に用いた音圧レベル。A 特性。dB

levelBias 信号を較正された音圧レベルに換算するための係数。dB。 $10^{\text{levelBias}/20}$ 倍し、さらに 2×10^{-5} 倍することで、信号を物理的に意味のある圧力の単位 Pa を用いて表すことができる。

samplingFrequency 標本化周波数。Hz

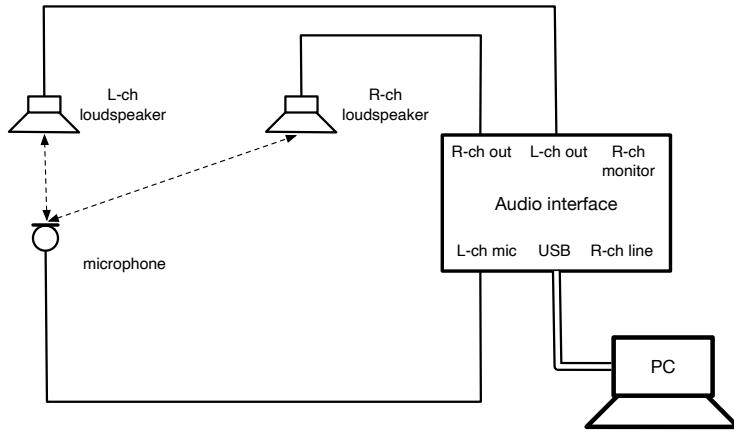


図 8: 実時間対話的音響計測ツールを使用する際の、機器の接続例。ステレオスピーカとマイクが内蔵されている PC の場合には、外部機器を用いずに動作させることもできる。

5 rtFVNRespToolPinkEx:対話的実時間音響特性計測:18/Dec./2019

MATLAB R2019 Update 2 で、Audio 関連の入出力が Mac OS Catalina に正規に対応した。この機会に、サポート終了が予告されている GUIDE に基づく開発は終了し、今後は、App Designer を用いることとした。また、Audio 関連処理のために用意されている Audio System Toolbox を使用することとした。結論としてこの開発環境の変更は適切であった。プログラムの構造が整理され、開発に必要とするコードの量も激減した。今後は、App Designer と Audio System Toolbox を用いて開発を続けることとする。また、Audio System Toolbox をインストールしていない利用者のために、MATLAB 非依存版を用意することとする。

5.1 測定系の設定と動作の説明

対話的に二つのスピーカからマイクまでの伝達特性、インパルス応答、低域の特性、残響、レベルを測定し、表示する。本ツールを使用するための装置の設定を図に示す。

同時に複数のチャンネルのインパルス応答を求めるために、二つの直交系列（左チャンネルは、同一の極性、右チャンネルは、交番する極性）を用いて異なった FVN の極性を設定した二系列の試験信号を、それぞれ左と右のスピーカから再生する。スピーカから再生された音は、左チャンネルのマイク入力に接続した一個のマイクで収録している。なお、レポート

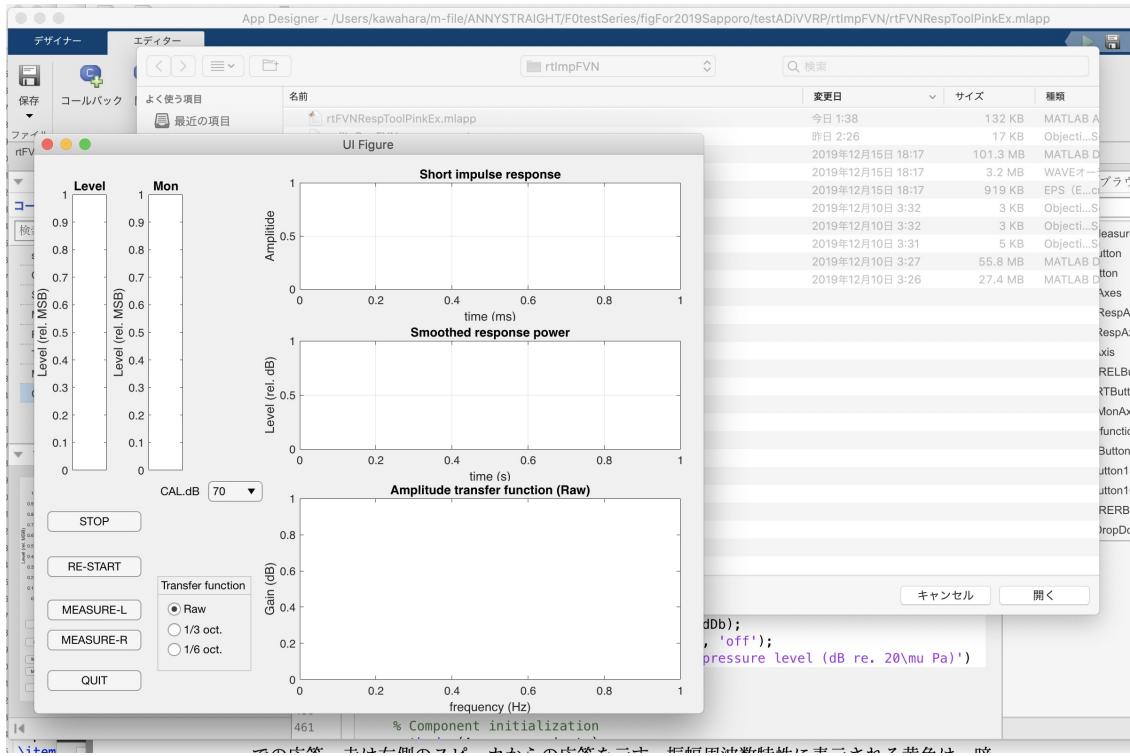


図 9: 起動時の画面。ツールの GUI と、作業ディレクトリ選択用のダイアログが表示されている。

用の分析では、時間軸の基準として、モニター出力の右チャンネルを、ライン入力の右チャンネルに加えている。その他の場合は、内部で出力に加えられる信号を基準として用いている。オーディオインターフェースは、ステレオのモニタ出力と、二系統のマイクあるいはライン入力があれば良い。今回は、44,100 Hz の標本化周波数を用いている。

5.2 操作法

図 8 のように接続したシステムで MATLAB を起動し、command window で以下の命令を入力することによりアプリケーションを起動する。

```
standingWvViewer
```

スタンドアロンアプリでは、アプリのアイコンをクリックすることで起動する。なお、スタンドアロンアプリは、初めて使う場合には MATLAB Runtime などの動作環境の初期化を行うため、多くの時間が必要な場合がある。

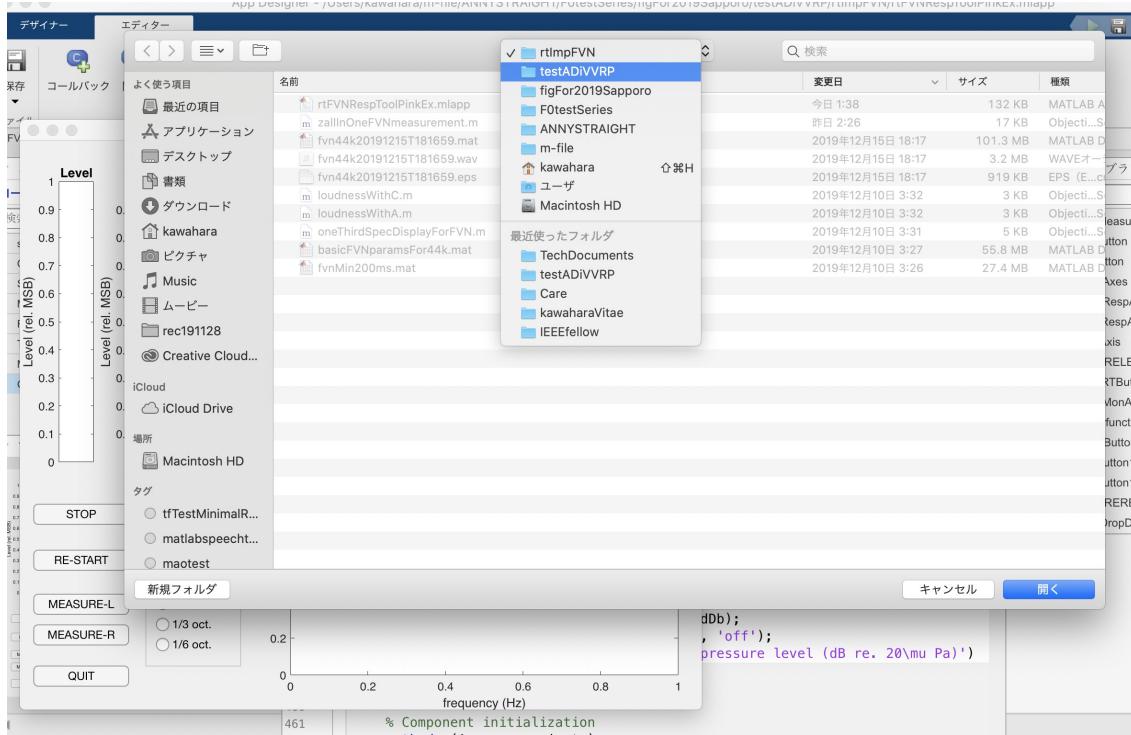


図 10: 背景のダイアログを全面に出し、それを使って作業ディレクトリを選択する。

図 9 に起動時の画面を示す。手前が空白の GUI、背景が、作業用ディレクトリを選択するためのダイアログである。ここで背景のダイアログをクリックして選択し、前面に出す。

図 10 に、作業用ディレクトリを選択する際のスナップショットを示す。この例では、『開く』をクリックすることにより、`testADiVVRP` というディレクトリが作業ディレクトリとして選択される。

5.2.1 マイクロフォンの感度の較正

作業用ディレクトリを選択するとツールによる測定が始まる。数秒の過渡状態の後で、画面は、図 11 に示すように変化し、マイクロフォン（入力系）の感度較正が始まる。

この段階では、レベル表示だけを使う。インターフェースの他の表示は無視する。まず、入力レベルが過大になっていないことを確認する。目安は、赤い横棒が-6 dB を超えないことである。そのような状態で、棒グラフの長さは、長い方が良い。

左側の棒グラフは、マイクへの入力をモニターしている。青い棒が二乗平均値、赤い横線が、瞬時値の最大値を示している。測定中に遭遇する可能性がある様々な条件を試して、どの条件で測定しても、入力の最大値が 0 dB に触れることが無いように、オーディオインタ

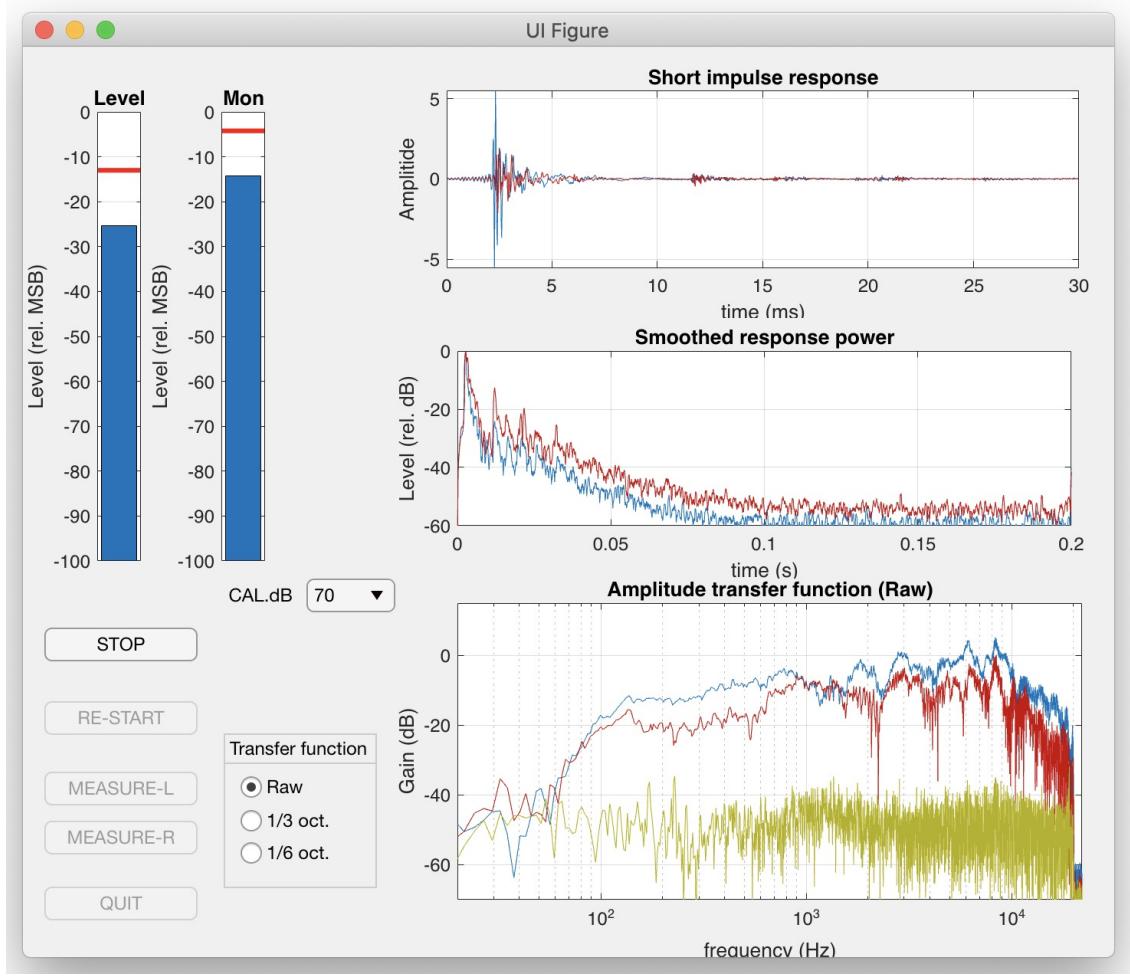


図 11: マイクロフォンの感度較正時の画面。

フェースのマイク入力を調整する。目安としては、青い棒が-10から-30 dB の間にあるようにすれば良い。感度を高くしておいた方が、オーディオインターフェースやプリアンプなどによる内部雑音の影響を軽減できる。しかし、実用上は、それらが問題になることは無い。むしろ、最大値が0 dB を超える危険に注意した方が良い。スピーカから出力される音の大きさは、測定の目的に応じて、オーディオインターフェースの出力つまみを調整すれば良い。具体的には、使用しているマイクのすぐ近くに、音圧レベルの測定に用いることのできる騒音計（IEC レベル 1、あるいは 2）のマイクを保持して音圧レベルを監視する。マイク位置での音圧レベルが A 特性で、60, 70, 80, 90 dB のいずれかになるように設定し、その値を、CAL.dB のドロップダウンメニューを使って、設定する。

図 12 に、較正直後の画面を示す。左上の入力レベル表示が、MSB を基準とするものから、

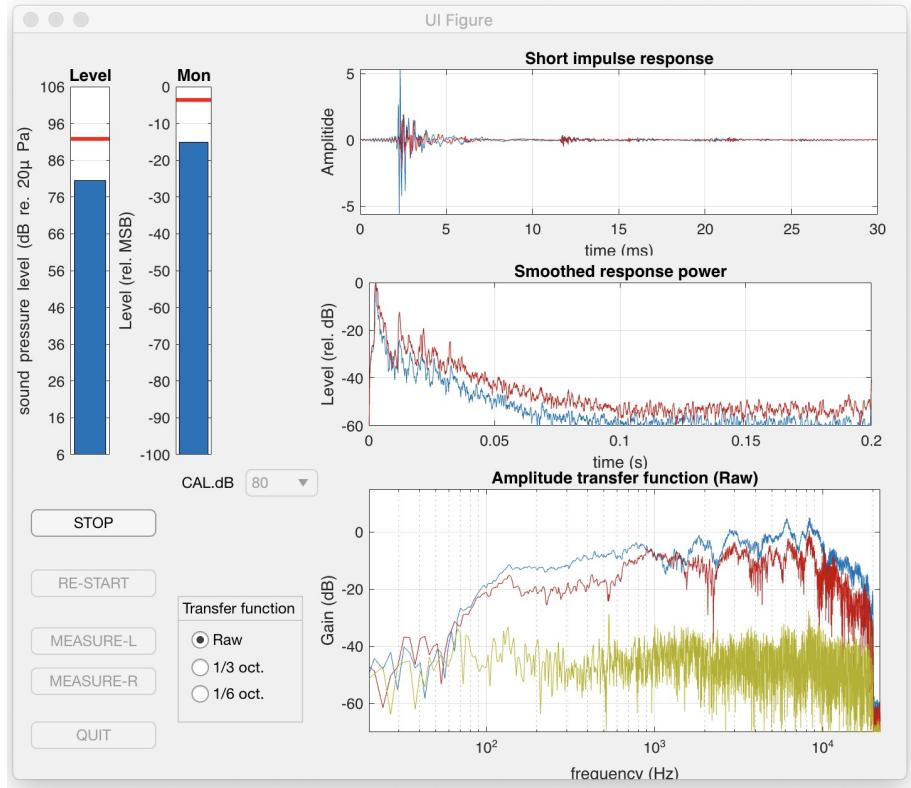


図 12: マイクロフォンの感度較正を行った直後の画面。この例では、マイクロフォンの位置で A 特性で 80 dB であったとして較正した。

音圧レベル（ $20\mu\text{Pa}$ を 0dB とする）に変更されている。表示する棒グラフの範囲は、起動時と同じであり、目盛りだけが、音圧レベルに変更されている。

これでツールの較正が終わった。CAL.dB のドロップダウンメニューは、固定され、操作できないように不活性状態になる。この後、このツールを使って測定を続けている間は、オーディオインターフェースなどの、入力レベルを変更してはいけない。入力レベルを変更したい場合には、『QUIT』ボタンを使ってツールを終了し、改めて起動して、新しい測定のセッションを開始する。

5.2.2 測定中の画面

図 13 に、測定中の画面の例を示す。ここでは、操作部分にある Transfer Function の表示選択ボタンで、伝達特性などを見やすくするために、1/6 オクターブでの平滑化を選んでいる。

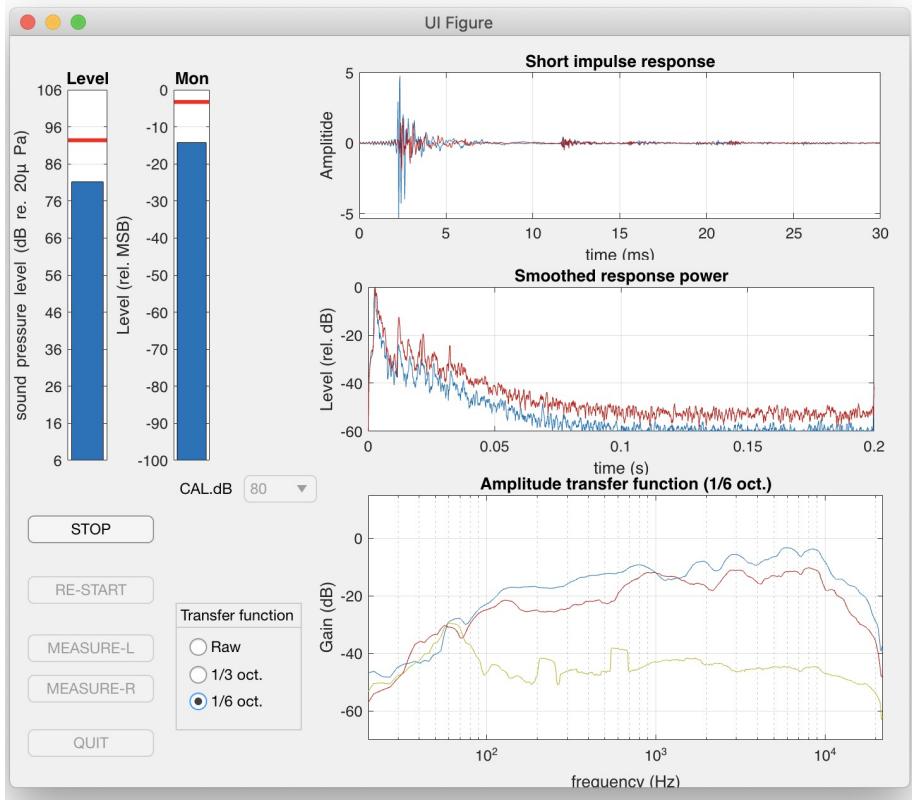


図 13: 通常の測定中の実時間対話的音響計測ツールの画面の例。左側上部にある棒グラフは、入力レベルを表示している。左側は、左チャンネルのマイク入力、右側は、右チャンネルの基準となる入力のレベルを表示する。左下の部分は、操作用のボタン類を集めたパネルであり、測定結果は、右側の三枚のパネルに表示される。上から順にインパルス応答、平滑化されたパワーの応答、振幅周波数特性を実時間で更新し続ける。それぞれの表示で、青は左にあるスピーカからマイクまでの応答、赤は右側のスピーカからの応答を示す。振幅周波数特性に表示される黄色は、暗騒音、非線形性などによる測定誤差の大きさを表す。

5.2.3 測定時のマイクの動かし方と、妨害音について

このツールでは、測定対象が線形時不変システムであることを前提としている。インパルス応答を求める際に用いる一個のFVNの長さは、求めるインパルス応答の長さの10倍以上になる。そのため、このツールの既定値として用いている200 msというインパルス応答の場合、正しく応答を測定するには、マイクが4~5秒以上静止している必要がある。測定中のマイクの移動が無視できない場合には、誤差が増加する。

このツールでは、L-ch, R-chに加えたFVNに基づく試験信号と（処理後に）直交するような、第三のFVN系列を想定して、求められる応答から測定誤差の周波数特性を推定して

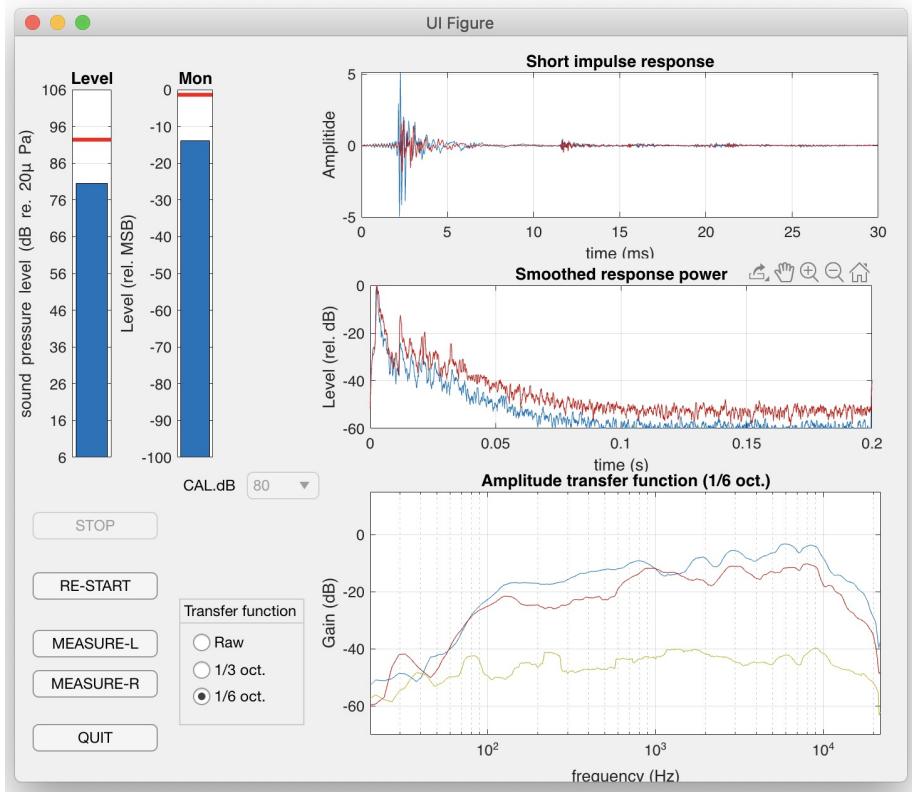


図 14: リアルタイム計測の停止時の画面。

いる。第三の信号は、L-ch, R-ch に加えた信号と直交しているので、システムの応答が線形成分のみであれば、応答は存在しない。しかし、暗騒音や、L-ch, R-ch に加えた信号により生じた非線形性による影響は、完全にランダムであれば、直交しない成分を含んでいるため、この第三の信号と若干の相関を有することになる。完全にランダムな成分であれば、L-ch, R-ch に加えた信号との相関（の大きさ）は、この第三の信号との相関（の大きさ）と同程度になると期待して良い。したがって、この第三の信号との相関の大きさを、L-ch, R-ch の測定に伴う誤差の大きさと見積もっても良い。（計算能力に余裕があれば、直交する第四、第五などの系列を追加し、相関の絶対値の二乗平均値を求めて良いと思う。）

5.3 線形成分、非線形成分、暗騒音の影響の測定と記録

『STOP』ボタンをクリックすると、リアルタイムの計測が停止し、画面が図 14 に示すように変わる。ここで、『MEASURE-L』あるいは『MEASURE-R』のボタンをクリックすることで、それぞれ、左チャンネルと右チャンネルの線形成分、非線形成分、暗騒音の影響を測定することができる。クリックすると、最初の一秒間は無音区間が出力される。この区

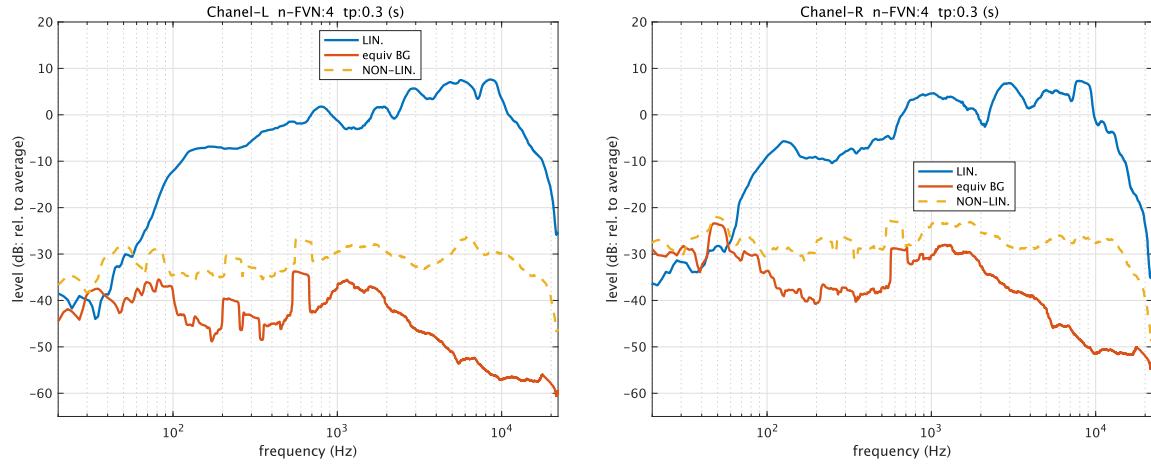


図 15: 測定結果の例。

間で入力される信号を用いて、暗騒音の影響が推定される。続いて、4本の（処理後に）直交するFVNに基づく系列を混合した信号が出力されてシステムの応答が記録される。なお、この計測用信号の長時間スペクトルはpink noiseと同じく-3 dB/octであるため、1/3オクターブ分析機能を持つ騒音系があれば、システムの振幅伝達特性を概観することができる。この信号は、15秒ほど継続して停止する。その後、5秒程の処理の後で測定結果が表示され、その図と、測定結果が、それぞれEPSFファイルとmatファイルとして記録される。また、マイクロフォンで採取された信号もwavファイルとして記録される。

図15に、測定終了時に表示される結果の例を示す。左の図が左チャンネル、右の図が右チャンネルからマイクロフォンへの特性である。この例では、MacBook Proの内蔵スピーカーとマイクロフォンを用いている。マイクロフォンは、左チャンネルのスピーカーの近くに設置されている。

それぞれの図の一番上の青線が線形成分の振幅周波数特性を示し、赤線は、暗騒音による影響（pink noise特性の等化とFVNによるパルス圧縮後）を示す。黄色の波線は、非線形成分による影響と暗騒音による影響が合成された結果を示す。これらの特性は、線形成分の振幅周波数特性が、対数周波数重み上で100 Hzから10000 Hzの間の二乗平均値が0 dBになるように正規化して表示している。左右の暗騒音による影響が異なるのは、このように正規化している結果である。

これらの測定結果は、ファイルとして記録される。測定ごとにユニークな名前が作られ、三種類のファイルが記録される。以下の例では、fvn44k20191224T125747が、左チャンネルの測定結果、fvn44k20191224T125822が右チャンネルの測定結果に対応している。

```
-rw-r--r-- 1 kawahara staff 918775 12 24 12:57 fvn44k20191224T125747.eps
-rw-r--r-- 1 kawahara staff 2777132 12 24 12:57 fvn44k20191224T125747.wav
-rw-r--r-- 1 kawahara staff 68724810 12 24 12:57 fvn44k20191224T125747.mat
```

```
-rw-r--r-- 1 kawahara staff 919529 12 24 12:58 fvn44k20191224T125822.eps  
-rw-r--r-- 1 kawahara staff 2777132 12 24 12:58 fvn44k20191224T125822.wav  
-rw-r--r-- 1 kawahara staff 68693293 12 24 12:58 fvn44k20191224T125822.mat
```

5.4 測定の終了とログファイル

『QUIT』をクリックすると、ログファイルへの書き出しが終了し、ファイルが閉じられる。ログファイルには、以下のような情報が記録されている。

```
Start: 24-Dec-2019 12:56:15  
Cal.Level = 80.0 dB, Cal.bias 105.5 dB  
Lch output file: fvn44k20191224T125714  
Lch output file: fvn44k20191224T125747  
Rch output file: fvn44k20191224T125822
```

この例では、マイクロフォンの較正は、80 dB で行われ、そのときの較正のためのバイアスが 105.5 dB であることが分かる。記録された信号の wav ファイルを読み込み、105.5 dB のレベルのバイアスを加えることで、信号を、 $20\mu\text{Pa}$ を 0 dB と定義した音圧レベルとすることができる。また、その値を 20×10^{-6} 倍することで、物理的に意味のある圧力の単位 Pa で表した値とすることができます。

このログファイルは、この測定のセッションで、三回の測定が行われたことを表している。最後の二回の結果を、図 15 に示した。

5.5 表示される情報

測定中の画面には、以下のような情報が表示され、リアルタイムに更新される。以下の例では、2020.1.5 に更新された版の画面を使っている。スピーカーは、IK Multimedia の小型のパワードモニタースピーカ iLoud Micro Monitor、マイクロフォンは、Shure の無指向性のミニチュアヘッドセットマイクの MX153T/O-TQG をアダプタである RK100PK と組み合わせ、オーディオインターフェースは、PreSonus の STUDIO 2|6 USP を用いた。スピーカーは、136 cm のマイクスタンドに取り付け、マイクロフォンは、左チャンネルのスピーカーの正面 25 cm に、スピーカーと正対して設置した。右チャンネルのスピーカーとマイクロフォンとの距離は、86 cm であった。

5.5.1 入力レベル

ツールの GUI の右上の部分に、入力レベルを監視するための情報が表示される。図 16 に、その部分を拡大して示す。二つの表示のそれぞれにある二本の棒グラフの右側のものは、今

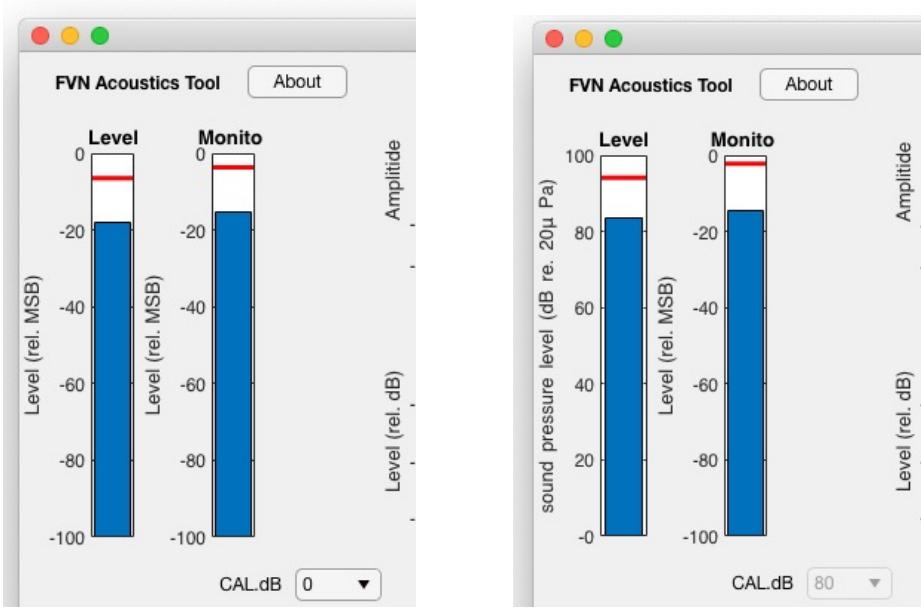


図 16: 入力レベル表示部分。左に較正前、右に較正後の状態を示す。

後の拡張で用いる。今回は無視する。左側には、ツールの起動後の初期状態での表示を示す。この状態での縦軸の目盛りは、入力レベルを、入力できる最大値を 0 dB として表している。

ここでマイクロフォンの位置での音圧レベルを測定し、表示されている部分の右下のドロップダウンのツールを使って、音圧レベルを設定する。(90, 80, 70, 60 dB の中から選択する) 音圧レベルを設定すると、このドロップダウンのツールは操作できなくなる。（“enable”属性が “off” になる）

右側には、音圧レベルを較正した後の表示を示す。測定は、この状態で行う。この状態での縦軸の目盛りは、マイクロフォンの位置での音圧レベル (20 μ Pa を 0 dB とする) を表している。棒グラフの中にある太い赤線は、瞬時値の最大値を示し、青い棒は、(重み付けられていない信号そのものの) 二乗平均値 (RMS: Root Mean Square) を示す。ここでは、44100 Hz で標本化された 2048 個のサンプル (区間長 : 46.44 ms) の二乗平均値を表示している。なお、較正に用いる音圧レベルは A 特性で重み付けられたものを想定している。(安価に入手できる騒音計では、A 特性の重みのみが設定されているものが多いいため。)

5.5.2 インパルス応答と平滑化されたパワーの応答

インターフェースの右上の表示を図 17 に示す。上は求められたインパルス応答の最初の 30 ms、下は、インパルス応答を二乗した信号を平滑化したもの（平滑化されたパワー）の

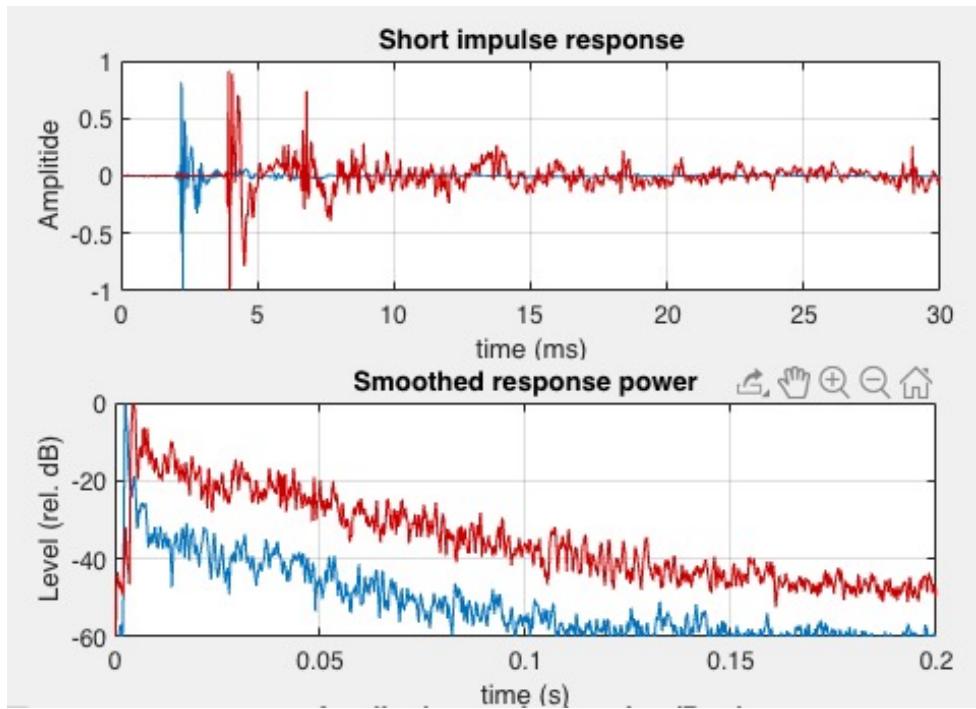


図 17: インパルス応答と、平滑化されたインパルス応答のパワー。青線が左チャンネル、赤線が右チャンネルからの応答。

最初の 200 ms を表示している。

インパルス応答の表示では、左右それぞれの応答の最大振幅で正規化している。平滑化したパワーの表示では、インパルス応答の振幅が指数関数的に減衰するため、下の平滑化したパワーの縦軸には、対数変換である dB を用いている。ここでも同様に、最大の値で正規化しているため、最大値は 0 dB になっている。なお平滑化には 22 点（約 0.5 ms）の移動平均を用いている。

5.5.3 振幅周波数特性

こうして求められた線形時不変成分に対応するインパルス応答から、振幅周波数特性を求めた。また、暗騒音と非線形成分による影響をパワースペクトルとして求めた。

インターフェースの右下の表示を図 18 に示す。左側の図は、インパルス応答からそのまま FFT により求めた振幅周波数特性を示す。赤線は、左チャンネルからの特性、青線は、右チャンネルからの特性、黄色の線は、暗騒音と非線形成分による影響を示す。室内の物体か

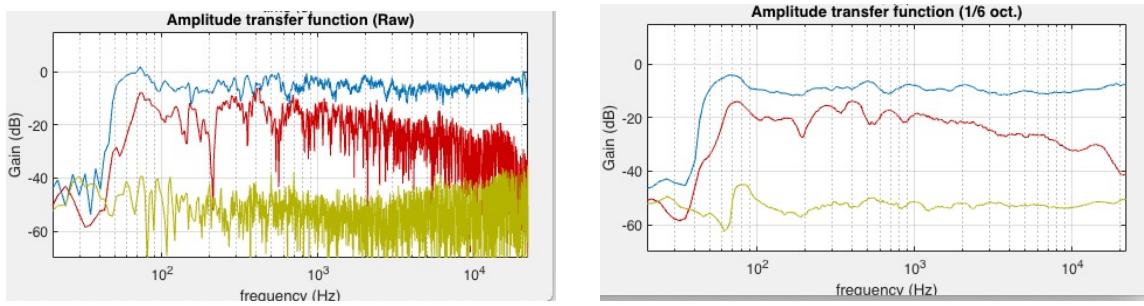


図 18: 振幅周波数特性。左側は、インパルス応答からそのまでパワースペクトルを求め、右側は、1/6 オクターブ幅でパワースペクトルを平滑化している。青線が左チャンネル、赤線が右チャンネル。

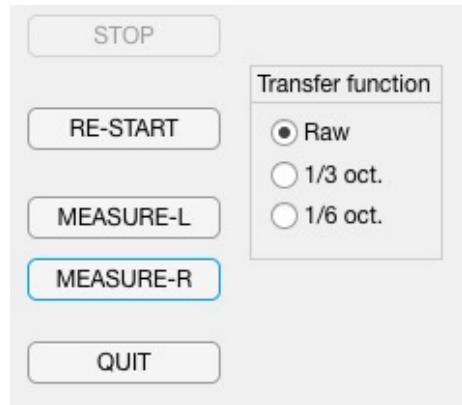


図 19: 操作のためのパネル。

らの反射や残響により、それらの特性には多数の山谷が認められる。右側の図は、パワースペクトルの次元を持つそれらの特性を1/6オクターブ幅の矩形で平滑化したものであり、細かな山谷は除去されている。

5.5.4 操作パネル

インターフェースの下には 19 に示すように操作のためのボタン類が配置されている。動作の状況に応じて、その状態で適切な操作に対応するもののみが操作可能にされている。

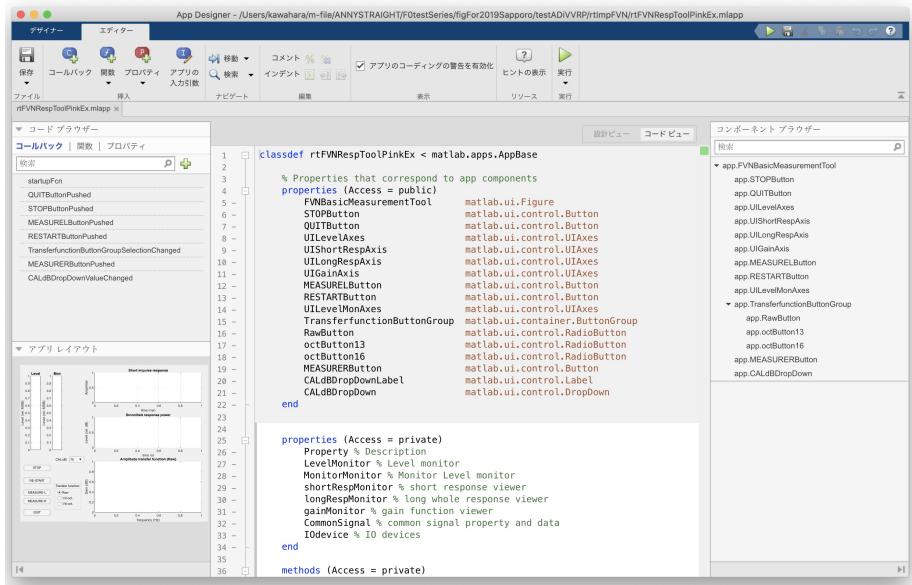


図 20: 日本語環境での AppDesigner によるツールの表示。画面は、コードビュー。

5.6 ソースコードの確認と MATLAB 非依存版

具体的なソースコードは、App Designer で、アプリケーション `rtFVNRespToolPinkEx` を開き、確認できる。図の表示に用いられている計算の内容は、『コードビュー』で、ユーザが作成した『関数』`updateLoop(app)` に記載されている。図 20 に、日本語環境での AppDesigner の画面の例を示す。

このツール `rtFVNRespToolPinkEx` の MATLAB 環境での実行には、Audio System Toolbox と DSP Toolbox が必要である。それらを購入していない場合には、以下にあるインストラーで、MATLAB に依存しないコンパイル済みのアプリケーションをインストールすることができる。

- Mac (mac OS Catalina 10.15.2 で確認 : 2020.Jan.06)
以下のリンクから `MyAppInstaller_web.app` をダウンロードし、実行する。
<https://drive.google.com/open?id=1zYNlcgK-JO8LVCCzhKjgaphQLdXAlx7W>
- Windows (Microsoft Windows 10 Pro 10.0.19014 で確認 : 2020.Jan.06)
以下のリンクから `MyAppInstaller_web.exe` をダウンロードし、実行する。
<https://drive.google.com/open?id=1GgbTPcTHP6qDvDflooPhokWyh9QvI-Zg>

参考文献

- [1] 河原英紀, 津崎実, 坂野秀樹, 森勢将雅, 松井淑恵, and 入野俊夫, “velvet noise とその変種の聴覚心理・生理研究への応用可能性について,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. IEICE-117, no. 470(HIP), pp. 99–104, 2017.
- [2] H. Kawahara, K.-I. Sakakibara, M. Morise, H. Banno, T. Toda, and T. Irino, “Frequency domain variants of velvet noise and their application to speech processing and synthesis,” in *Proc. Interspeech 2018*, Hyderabad, India, 2018, pp. 2027–2031.
- [3] 河原英紀, 楠原健一, and 水町光徳, “周波数領域 velvet noise を用いた音響計測手順の拡張について,” 電子情報通信学会技術研究報告（応用音響）, vol. IEICE-119, no. 115, pp. 77–82, 2019.
- [4] 河原英紀, 森勢将雅, and 水町光徳, “周波数領域 velvet noise とパワースペクトルの静的表現を用いた音響計測の可能性について,” 電子情報通信学会技術研究報告（応用音響）, vol. IEICE-118, no. 190, pp. 89–96, 2018.
- [5] 日本規格協会, 電気音響-サウンドレベルメータ（騒音計）－第一部：仕様, 2019, JIS C 1509-1:2017, (IEC 61672-1:2013).
- [6] 日本電気計測器工業会. 5-3 騒音・振動計測器. (Access:10-July-2019). [Online]. Available: <https://www.jemima.or.jp/tech/5-03.html>