標準 MCAP-CR 型 スピーカーシステムシミュレータ
複数ケース解析プログラム説明書

2015 年 1 月 2 日

鈴木　茂

0. 配布の目的

このプログラムは、バスレフ型スピーカーシステムの興味のある方のために配布します。

解析アルゴリズムは、ばねー質点系の運動方程式モデルで、振動板の変形を扱うような連続体モデルではありません。従って、このプログラムによる解析結果を評価するためには、物理学の基礎的な知識が必要になります。

このプログラムで音質を評価しようと考える方へのプログラムの使用は禁止します。

1. このプログラムの使用許諾条件

このプログラムを使用した場合は、以下の条件に同意したものと看做します。

i. このプログラムに使用されている数学的な制約があることを理解しその制約を許容する。
ii. プログラムに既知または未知のバグがあること。
iii. このプログラムを使用した結果生じた損害について意義を申し立てず、訴訟を提起しないこと。
iv. 別な契約がある場合を除き、このプログラムを商用目的に使用しないこと。
v. 著作権者の書面による許可なく、このプログラムを再配布したり、改変したプログラムを配布しないこと。
vi. このプログラムが特別なプラットフォームに依存せず、一貫性を有することが最も重要であることを理解していること。この目的のため、このプログラムを Microsoft Visual Studio のコードに変換しないこと。
vii. このプログラムを音質評価に使用しないこと。

2. 新しく追加した機能

この版では、下記の機能を追加しました。

i. 複数の設計条件について、周波数応答を順次計算する。
ii. 解析条件の入力ファイルは、スピーカーユニットのパラメータファイル、解析条件ファイル、設計条件ファイルに分割された。
iii. デバグ機能を追加した（まだ実用的ではない）。
iv. ダクトの損失係数が、パラメータひとつに集約され、各ダクトの損失係数が、径と長さの関数で表される（ただし、パラメータ決定のガイドラインはない）。

3. 不要になったが残置された機能

書き昨日は、複数ケース解析プログラムには必要ありませんが、残置しています。

i. 単一周波数入力応答
ii. ランダムノイズ入力応答
iii. スィープ入力応答

4. 出力ファイル

このバージョンには、新しい出力ファイルがあります。旧バージョンで使用した多くの出力ファイルが残されていますが、あまり利用することはないでしょう。

- case_out.csv
  このファイルは、1 行目が横軸となる周波数、2 行目以降に各ケースの応答 SPL が含まれています。
- dft_case_results.csv
  このファイルは、ケースごとの周波数応答、位相、音圧、フーリエ変換の実数部、虚数部を含みます。
- debuglog.txt
  デバグレベルは、analysis_option.txt に指定します。verbose レベルを選択すると、デバグファイルサイズが大きくなり、実行が低速化します。このデバグログは開発者向けのものなので、ユーザが使用することはあまりないでしょう。

4. プログラムの機能

- このプログラムは、MCAP-CR（ダブルバスレフ、シングルバスレフ、密閉、バッフルも可能）の質点（振動板および各ダクトの空気塊）の変位を計算します。
- （低速）離散フーリエ変換を実行します。
- 入力信号には、パワー、電流、電圧等ではなく、力を使用しています。信号形態は、サイン波、リニアスィープ、ランダムノイズから選択します。
- 計算結果を、ASCII ファイルに保存します。

プログラムの詳細は、ソースコードを参照してください。

注：ユーザによるプログラムの改変
第 1 章の許諾条件に従うプログラムの改変に制限はありません。

3. プログラムの標準的な使用方法

ソースコードは、コンパイルして使用してください。
プログラムコードは、C 言語（一部 C++の用法を含む）で記述されているので、適切なコンパイラを使用してコンパイル、ビルド（実行形式のマシン語に変換）できます。
このコードは、GCC(Linux GNU)コンパイラと Windows MinGW コンパイラでシンタックスと実行結果を確認しています。Mac OS を使用する場合には、GCC が使用できるそうです。
Microsoft C++ は、標準 C/C++ではない変なコードを勝手に付加するので推奨できません。
Free BSD, UNIX, VMS も使用できると思いますが、試験はしていません。

コンパイラの入手先

GNU Compiler Collection	http://gcc.gnu.org/
MinGW Projects	http://www.mingw.org/

3.1 コンパイルの準備

Linux (推奨)

GNU C Compiler (GCC) は、通常は標準でプリインストールされています。
RPM 系ディストリビューションでは、下記のコマンドでインストールされているか確認できます。インストールされていない場合には、自身でインストールしてください。deb 系ディストリビューションでも同様ですが、コマンドが違います。

```
$ rpm -qa|grep gcc⏎
```

Windows

コンパイルのために、MinGW が必要です。情報はインターネット上に十分にあります。
Windows x86 上で実行できる実行ファイルも同梱しています。MinGW を使用せずに実行ファイルを使用する場合には、実行ファイルと同じフォルダに、同梱の ibgcc_s_dw2-1.dll を保存してください。

3.2 プログラムソースコードのコンパイル

Linux (X-Window システム)

- ディストリビューションに限らず共通 -

プログラムソースファイル（拡張子 cpp)を作業フォルダに保存します。
ターミナル ウィンドウ(X Term など)を起動し、作業ディレクトリに移動する。
gcc コマンドでソースコードをコンパイルする。

- 例 -

OpenSuse (13.1)の例
$ g++ multi-case_r01.cpp⏎

実行ファイル“a.out”が生成されます。ファイル名は、OS の制約の範囲内で、好きに変更することができます。

Windows
作業フォルダに、ソースファイルをコピーします。
コマンドプロンプトを起動し、作業フォルダに移動します。

MinGW の例
g++ multi-case_r01.cpp⏎
MinGW コンパイラが実行ファイル“a.exe”を生成します。

3.3 プログラムの実行(Linux/Windows)

3.3.1 入力ファイルの準備

テキストエディタ等をしようし、作業フォルダに、下記の入力ファイルを作成し、保存します。

a) driver_parameters.txt
b) analysis_option.txt
c) cases.txt.

これらのファイルは、プログラムの実行に必要です。これらの入力ファイルは、以前のバージョンのものと完全にことなるので、注意してください。

a) スピーカーユニット定数 driver_parameters.txt の例
このパラメータファイルは、スピーカーユニットのパラメータを与えます。
注:
入力値の前には、いかなる文字も置くことはできません。
改行コードの指定はありません。Windows のメモ帳を使用して作成することができます。
各値の間に、改行してください。
ASCII 文字のみを使用することができます。
すべての値は、倍精度実数として扱われます。

6.0	1 行目	振動板の実行質量 m0 (g)
4.0	2 行目	振動板の実行振動半径 r0 (cm)
80	3 行目	スピーカーユニットの最低共振周波数 f0 (Hz)
0.5	4 行目	機械的 Q : Qm (無次元数)

b) 解析条件 analysis_option.txt の例
解像度の最大値は 10 ビット (11 以上は、10 となります)
Cp/Cv : 1(等温条件)以外は、1.4 (断熱条件)となります
摩擦定数 f_c: $c_j = f_c \frac{l_j}{d_j^2}$ (推奨値はまだありません)
解像度(整数)を除き、倍精度実数です

7	1 行目	解像度(ビット単位) (この場合、resolution =T/2^7)
1.4	2 行目	比熱比 Cp/Cv (1.4: 断熱条件; 1.0 等温条件)
1	3 行目	入力の振幅 [N]
0	4 行目	ダクトの摩擦定数
0		

25 1	5 行目 6 行目 7 行目	内部ダクトの影響 (0: 考慮; 1: 無視) スィープ速度 [Hz/s] デバグレベル (1: 標準; 2: 詳細; 3: デフォルト)

c) 設計条件 cases.txt の例

左から右へタブ区切りで入力する

条件番号 (任意の整数)
副空気室数 (整数;最大 24)
各空気室の容量 (単位ℓ;倍精度実数)
各ダクトの断面積 (単位 cm^2; 倍精度実数)
各ダクトの長さ (単位 mm; 倍精度実数)
データ終了印 (1: 下の行も読込む; 0: ここまでで終了)

下記サンプルは、上からダブルバスレフ、副空気室 2 の標準 MCAP-CR、副空気室 3 の標準 MCAP-CR の例です。

1	1	6.0	6.0	16.0	12.0	50.0	80.0	1					
2	2	6.0	6.0	6.0	16.0	16.0	12.0	12.0	50.0	80.0	60.0	120.0	1
3	2	6.0	6.0	6.0	16.0	16.0	12.0	12.0	80.0	20.0	80.0	160.0	0

3.3.2 プログラムの実行

ソースコードをコンパイルすると、同じ OS の他の PC でも実行できます。

コマンドプロンプトから作業ディレクトリに移動し、下記の通り、実行ファイルを起動します。

Linux (実行ファイル名が、“a.out”であると仮定します)
$ ./a.out⏎

Windows (実行ファイル名が、“a.exe”であると仮定します)
a⏎

解析オプション

解析には以下の選択肢があります。

(1) 入力信号とシーケンスの選択
“SINE WAVE（単一周波数のサイン波）”, “LINEAR SWEEP（リニアスィープ）”, “RANDOM（ランダムノイズ）” , “SEQUENCE OF SINE WAVES WITH DIFFERENT FREQUENCIES（10～400Hz の間でサイン波を 1Hz おきに解析を実施）から選択します。

```
CHOOSE SIGNAL INPUT OPTION

        0:SINE WAVE
        1:LINEAR SWEEP
        2:RANDOM NOISE
        3:SEQUENCE OF SINE WAVES WITH DIFFERENT FREQUENCIES
Your choice =
```

0～2は、プログラムの以前のバージョンの説明書を参照してください。

1. 10Hz のサイン波に対する応答の DFT 解析の 10Hz の係数を“dft_case__results.csv”およ

び”case_out.csv”。に

2. 10+1(=11)Hz で上記と同等の処理を実行します。
3. 更に+1Hz を加え、400Hz まで同様の処理を実行します。

(2) 入力信号の選択

信号の種類は、サイン波、リニアスィープ、ランダムノイズの 3 種類です。

0: 指定周波数のサイン波
1: 特定周波数レンジでのリニアスィープ
2: ランダムノイズ
3: 10Hz から 400Hz の周波数範囲でのサイン波の順次計算

1: Linear Sweep（リニアスィープ）

スィープ周波数の終点を Hz で指定、スィープ速度を Hz/s で指定します。
終点は、100 ～ 200 で選択できます。200 が推奨値です。スィープ速度は 25 から変更しないでください。

2: Random（ランダムノイズ）

これを選択すると、サンプリング周波数は、100×解像度(2^{bit})となります。

他の条件で解析する場合には、プログラムコードを修正してください。

3.3.3 解析結果の確認

出力ファイル

Table-1 のファイルは、ASCII 文字で記述されています。

Table-1 List of Output Files

ファイル名	詳細説明	Note
case_out.csv	1 行目：周波数 2 行目以下: ケース番号、SPL [dB]	オプション“3”選択時のみ
dft_case_results.csv	ケース番号 周波数[Hz], SPL[dB], 音圧 8Pa[, 位相[degree], DFT の実部, DFT の虚部, ...	オプション“3”選択時のみ
dft_result.csv	周波数[Hz], SPL[dB] , 音圧 8Pa[, 位相[degree], DFT の実部, DFT の虚部	オプション“0” ～ “2”の場合のみ
normalized_x_vectors.csv	時刻[s], 変位の加重和[mm], 振動板の変位[mm], ダクトの空気塊変位の加重値[mm],...	下記注記参照。オプション“3”を除く
normalized_v_vectors.csv	時刻[s], 速度の加重和[m/s], 振動板の速度[m/s], ダクトの空気塊速度の加重値[m/s],...	下記注記参照。オプション“3”を除く
dftv.txt	1 行目: データ点数 2 行目: 時間解像度 3 行目: 速度の加重和	DFT に使用

このバージョンでは “case_out.csv” および “dft_case_results.csv” が重要です。

正規手法

正規化は次式の通り実施しています。

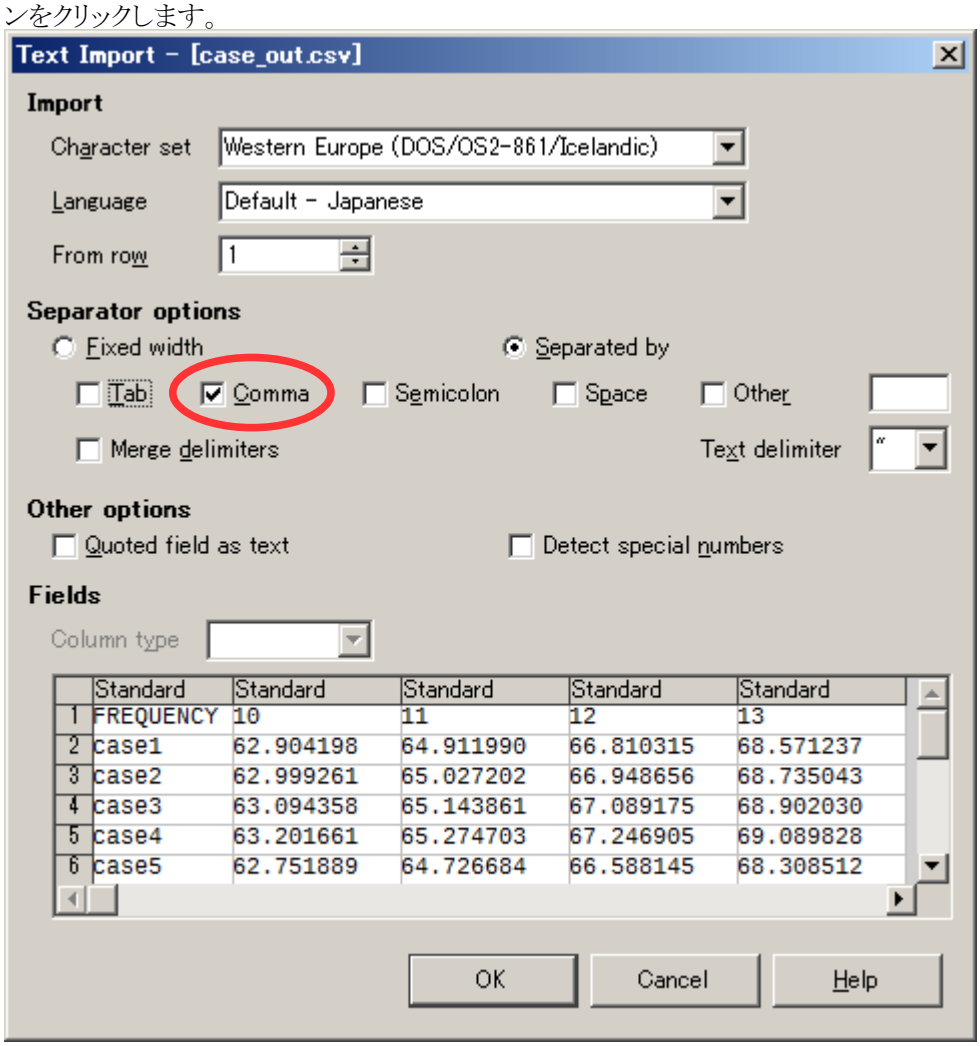
$$x_j^* = r_j x_j = \frac{a_j}{a_0} x_j \quad \text{変位} \qquad\qquad v_j^* = r_j v_j = \frac{a_j}{a_0} v_j \quad \text{速度}$$

データのプロット

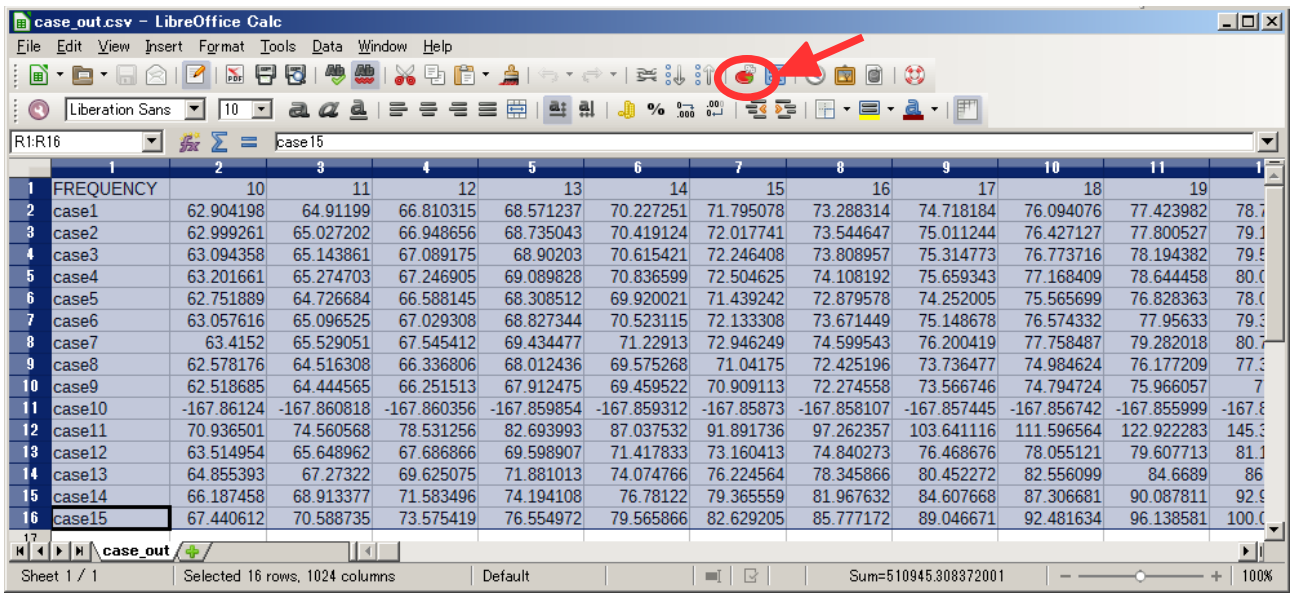
このプログラムには、プロット機能はありません。LibreOffice Calc などのソフトウェアでプロットしてください。

LibreOffice Calc の使用例

X Window Dolphin (Linux)やウィンドウズエクスプローラなどで作業ディレクトリを開きます。
“case_out.csv”をダブルクリックすると、下記のウィンドウが開きます。区切り文字をコンマに指定して OK ボタンをクリックします。

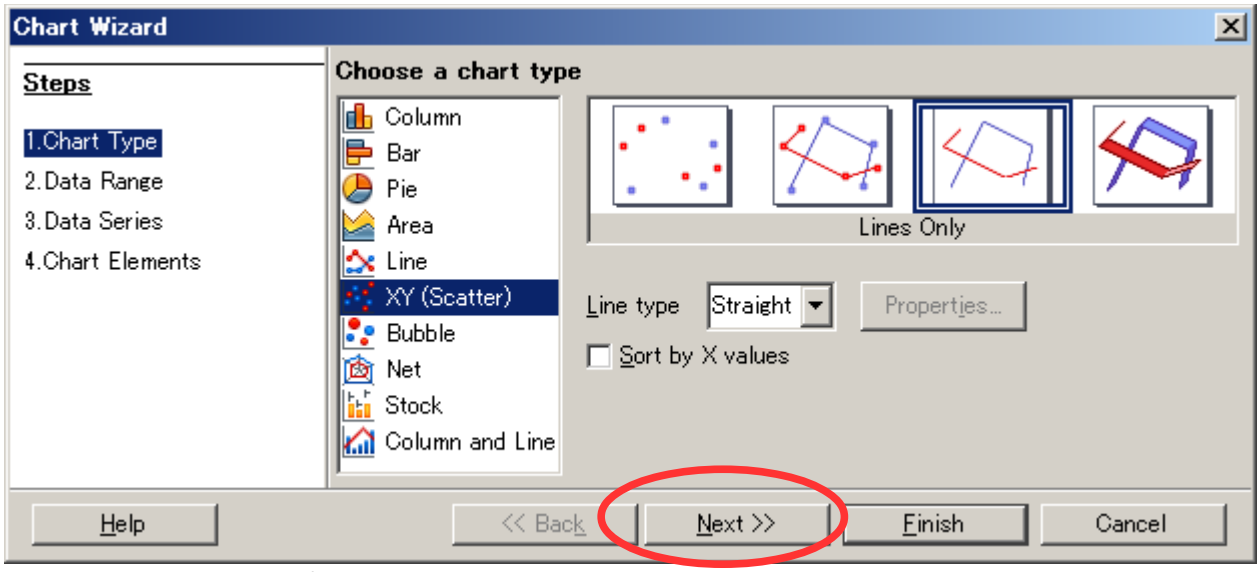


以下の画面が開いたら必要な行をハイライトしてください。

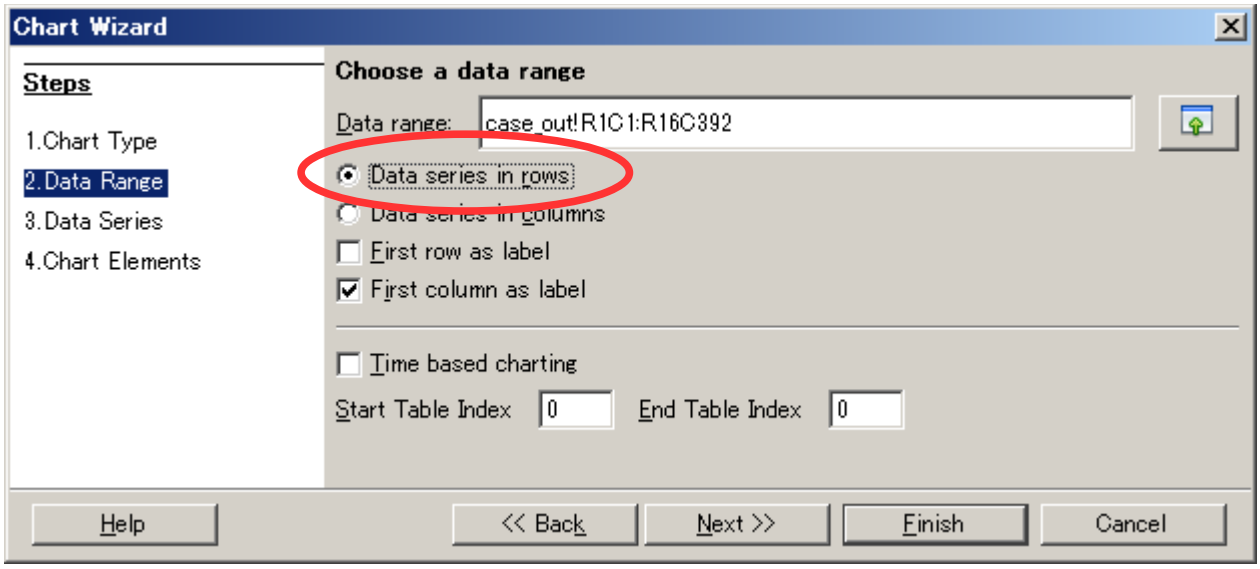


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	FREQUENCY	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	case1	62.904198	64.91199	66.810315	68.571237	70.227251	71.795078	73.288314	74.718184	76.094076	77.423982
3	case2	62.999261	65.027202	66.948656	68.735043	70.419124	72.017741	73.544647	75.011244	76.427127	77.800527
4	case3	63.094358	65.143861	67.089175	68.90203	70.615421	72.246408	73.808957	75.314773	76.773716	78.194382
5	case4	63.201661	65.274703	67.246905	69.089828	70.836599	72.504625	74.108192	75.659343	77.168409	78.644458
6	case5	62.751889	64.726684	66.588145	68.308512	69.920021	71.439242	72.879578	74.252005	75.565699	76.828363
7	case6	63.057616	65.096525	67.029308	68.827344	70.523115	72.133308	73.671449	75.148678	76.574332	77.95633
8	case7	63.4152	65.529051	67.545412	69.434477	71.22913	72.946249	74.599543	76.200419	77.758487	79.282018
9	case8	62.578176	64.516308	66.336806	68.012436	69.575268	71.04175	72.425196	73.736477	74.984624	76.177209
10	case9	62.518685	64.444565	66.251513	67.912475	69.459522	70.909113	72.274558	73.566746	74.794724	75.966057
11	case10	-167.86124	-167.860818	-167.860356	-167.859854	-167.859312	-167.85873	-167.858107	-167.857445	-167.856742	-167.855999
12	case11	70.936501	74.560568	78.531256	82.693993	87.037532	91.891736	97.262357	103.641116	111.596564	122.922283
13	case12	63.514954	65.648962	67.686866	69.598907	71.417833	73.160413	74.840273	76.468676	78.055121	79.607713
14	case13	64.855393	67.27322	69.625075	71.881013	74.074766	76.224564	78.345866	80.452272	82.556099	84.6689
15	case14	66.187458	68.913377	71.583496	74.194108	76.78122	79.365559	81.967632	84.607668	87.306681	90.087811
16	case15	67.440612	70.588735	73.575419	76.554972	79.565866	82.629205	85.777172	89.046671	92.481634	96.138581

下記の通り散布図を選択して Next をクリックしてください。

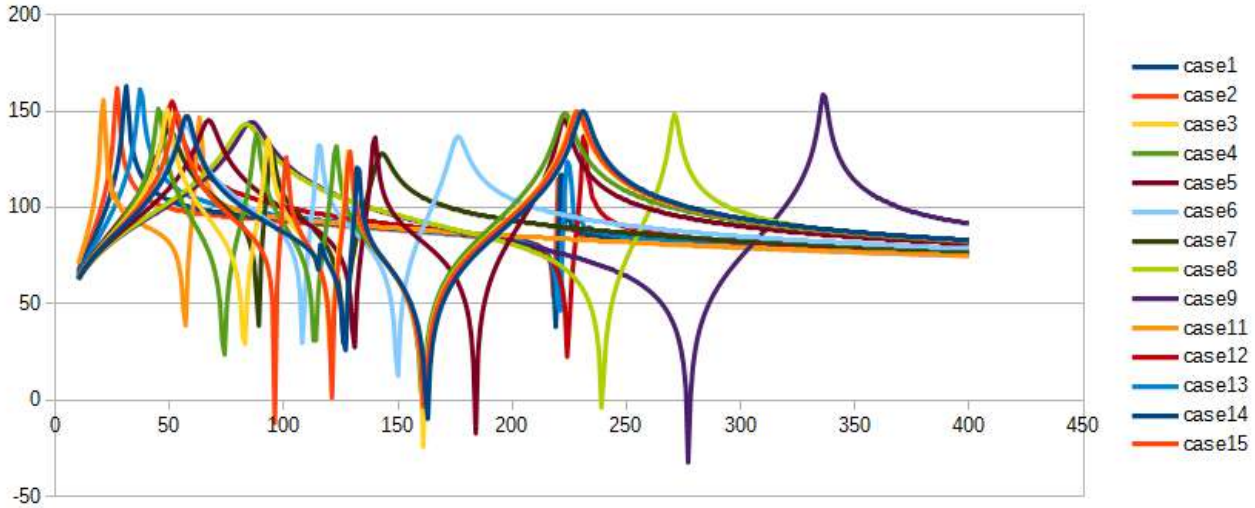


下記のウィンドウが現れます:

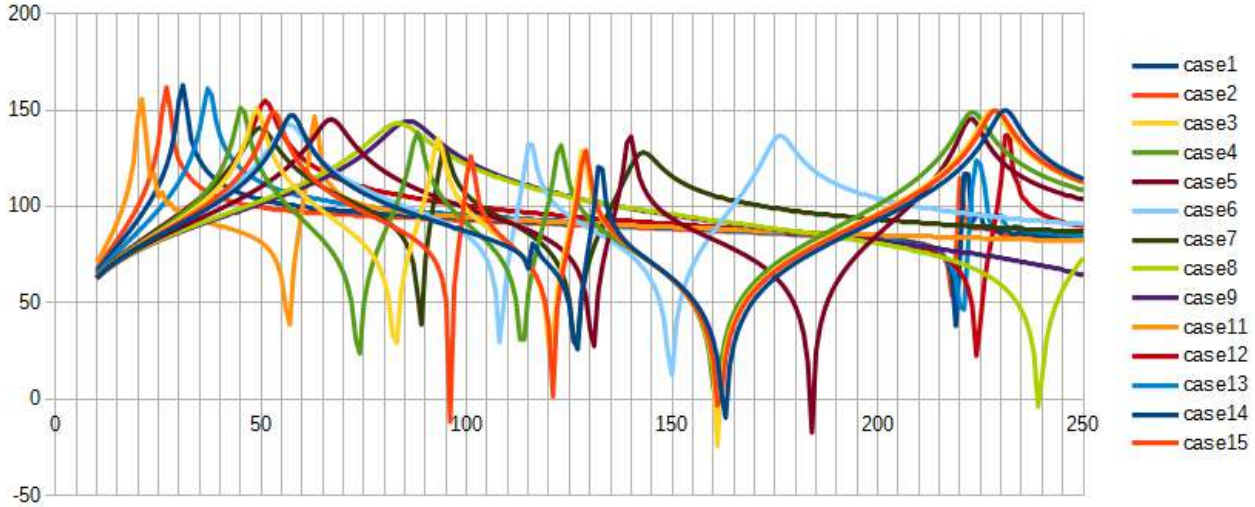


ここで Data series in rows (行系列)を選択し、Finish ボタンをクリックしてください。日本語表示で使用する場合には、見た目は違いますが、英語表示の場合と同じ順番です。

下記のような画面が現れます。



周波数レンジを調整し、必要であれば、補助目盛の線を入れてください。



注意：

このプログラムは、共振周波数の発見には有効ですが、周波数特性の推定には限界があります。摩擦定数に適切な数値を与えれば、もう少しまともな結果になるでしょうが、摩擦定数の適正値は今のところ不明です。また、別なモデルが必要になる可能性も高いと考えています。このプログラムは、従来のばねの振動モデルでよく使われる下記のモデルを使用しています。

$$\frac{d^2x}{dt^2}+2\zeta\omega_n\frac{dx}{dt}+\omega_n^2x=\frac{f}{m}$$

しかし、おそらく、空気の摩擦力は、速度の2乗に比例する下記モデルのほうが正確と思います。

$$\frac{d^2x}{dt^2}+2\frac{c_f}{m}\left(\frac{dx}{dt}\right)^2+\omega_n^2x=\frac{f}{m}$$

この場合は、プログラムの大きな修正が必要になります。ユーザ自身で、プログラムを修正した場合には、ご報告頂けますと、プログラムの完成が早まります。

バグ報告は歓迎いたします。

mcapspeakers@gmail.com