



スピーカー再生技術研究会2013

多自由度バスレフ型システム
数値解析シミュレーション紹介

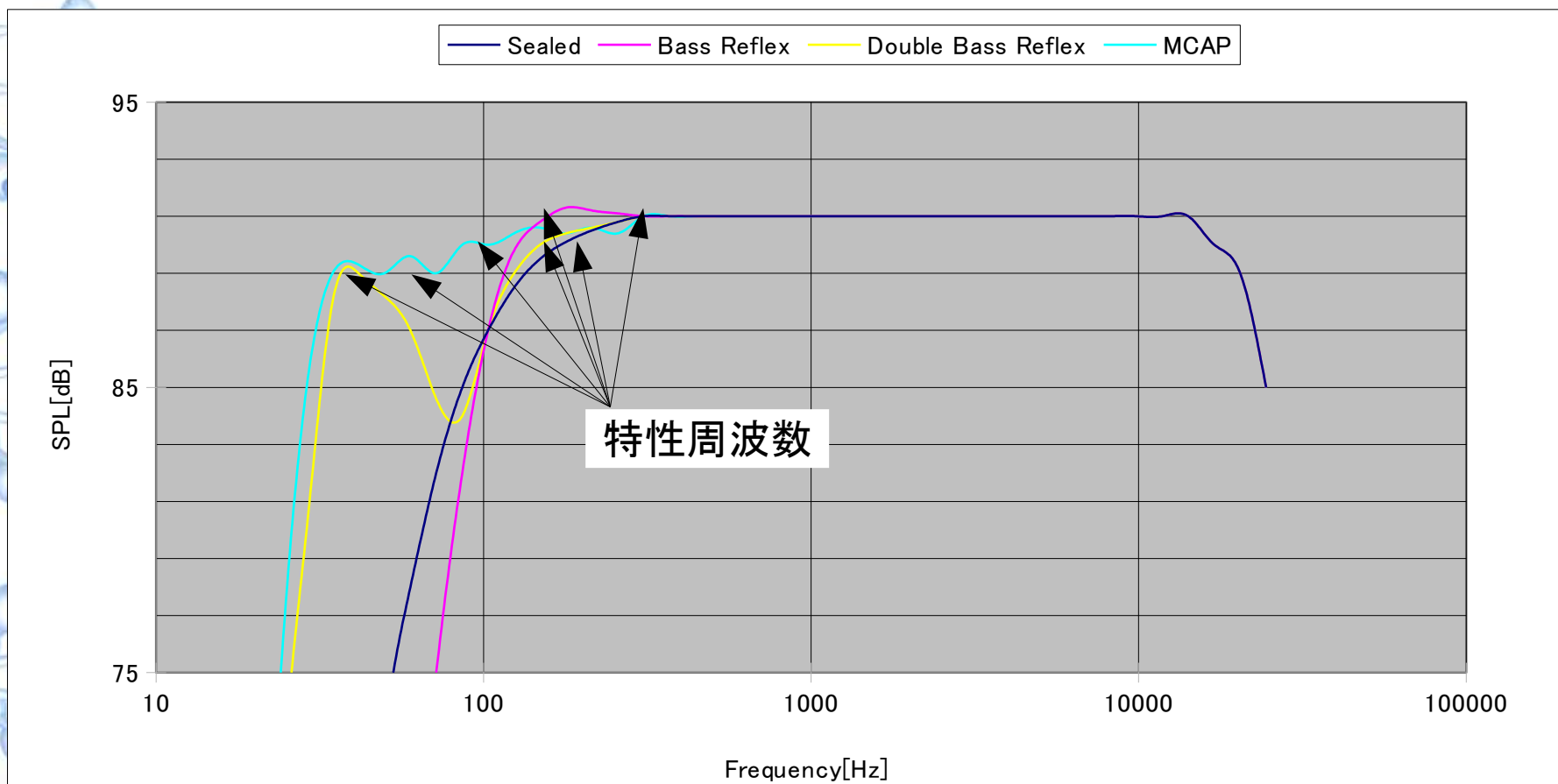
2013/10/13
鈴木 茂



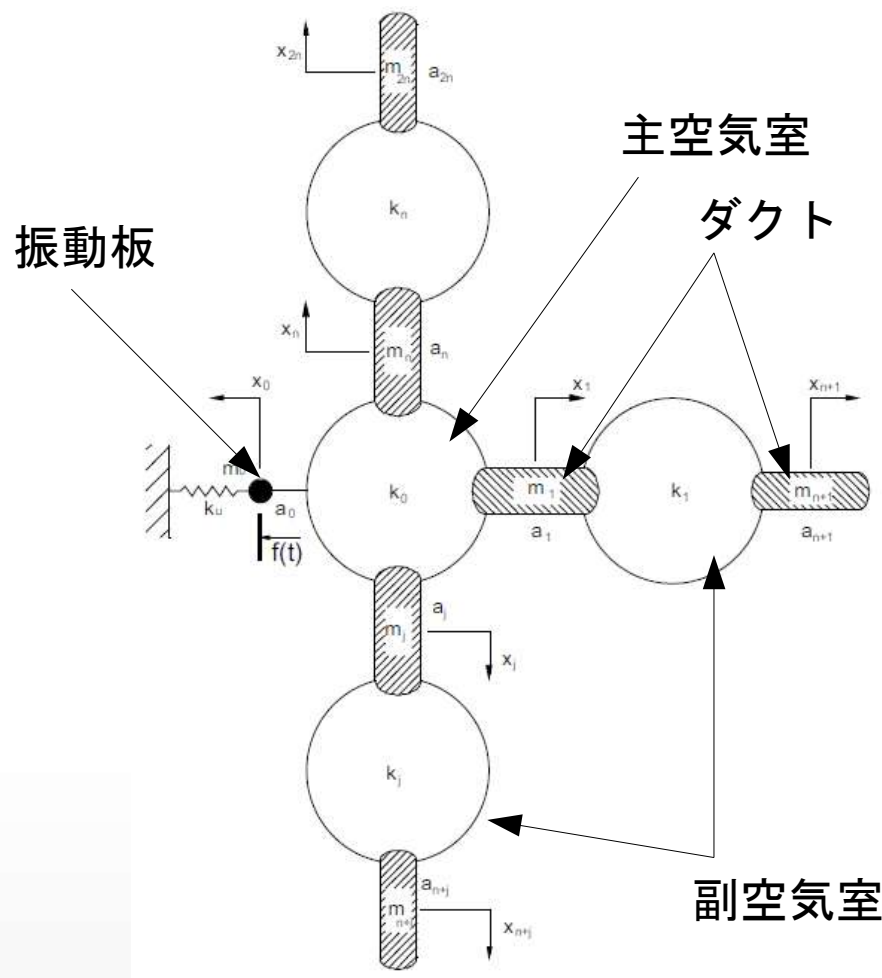
多自由度バスレフ型とは


- ・ バスレフ型スピーカシステムのうち、同じ動作をしないダクトが複数あるもの。
- ・ 一般のシングルバスレフ型の自由度は、振動板+ダクトの2自由度となる。
- ・ ダブルバスレフ以外は今のところマイナーな方式。
- ・ 設計の自由度が高い。
- ・ 単純な運動方程式モデルに落とし込むのが容易なので、計算しやすい。
- ・ 数式モデルは、単純多自由度の離散型（デジタル型）で、バックロードホーンのような連続体の方程式を解く必要がない。

多自由度バスレフ型の狙い(イメージ)



MCAP-CR型の単純モデル(自由度7の場合)





多自由度バスレフ型の運動方程式一般形


運動方程式は、質点変位のベクトル $\mathbf{x}(t)$ 、質量行列 \mathbf{M} 、損失係数行列 \mathbf{C} 、剛性行列 \mathbf{K} 、外力ベクトル $\mathbf{f}(t)$ で表される。

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{x}}{d t^2} + \mathbf{C} \frac{d \mathbf{x}}{d t} + \mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{f}$$

参考：

1自由度の運動方程式は、質点変位 x 、質量 m 、損失係数 c 、剛性 k 、外力ベクトル $f(t)$ で表される。

$$m \frac{d^2 x}{d t^2} + c \frac{d x}{d t} + k x = f$$



シミュレーション解法

1. 運動方程式を離散化(中央差分)
2. 離散方程式を漸化式化
3. 初期条件の設定
4. 漸化式計算(以上変位計算)
5. 過渡変位を速度に変換
6. 各質点の速度を重み付け(面積比)
7. 速度和を計算
8. 離散フーリエ変換(CUIプログラムのみ)

注：共振点（固有値）計算のアルゴリズムは組込んでいません。



運動方程式の離散化と漸化式化

運動方程式(マトリックス表示)

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{x}}{d t^2} + \mathbf{C} \frac{d \mathbf{x}}{d t} + \mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{f}$$

離散化した運動方程式(マトリックス表示)

$$\mathbf{M} \frac{\mathbf{x}^{j+1} - 2 \mathbf{x}^j + \mathbf{x}^{j-1}}{\delta^2} + \mathbf{C} \frac{\mathbf{x}^{j+1} - \mathbf{x}^{j-1}}{2 \delta} + \mathbf{K} \mathbf{x}^j = \mathbf{f}^j$$

漸化式(マトリックス表示)

$$\mathbf{x}^{j+1} = (2 \mathbf{M} + \delta \mathbf{C})^{-1} [2(2 \mathbf{M} - \delta^2) \mathbf{x}^j - (2 \mathbf{M} - \delta \mathbf{C}) \mathbf{x}^{j-1} + 2 \delta^2 \mathbf{f}^j]$$



初期条件の設定

- ・ 初期変位 = 0
- ・ 初速度 = 0

$$\begin{cases} x_j^0 = 0 \\ v_j^0 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x_j^0 = 0 \\ x_j^1 = 0 \end{cases}$$



漸化式計算/過渡変位を速度に変換

$j=0, 1, 2, 3, \dots$, 1周期の分割数 \times サイクル数+1

x_j を順に計算


過渡変位

$$x^{j+1} = (2\mathbf{M} + \delta \mathbf{C})^{-1} [2(2\mathbf{M} - \delta^2)x^j - (2\mathbf{M} - \delta \mathbf{C})x^{j-1} + 2\delta^2 f^j]$$

過渡変位を速度に変換

$$v_j = \frac{x_j - x_{j-1}}{\delta}$$

$$\delta = \frac{\text{Term}}{\text{Resolution}} = \frac{1}{\text{Frequency} \cdot \text{Resolution}}$$



各質点変位・速度を重み付加算

振動板面積を1として正規化

$$x_{\text{total}} = \sum_{j=0}^N r_j x_j$$

$$x_j^* = r_j x_j = \frac{a_j}{a_0} x_j$$

$$v_{\text{total}} = \sum_{j=0}^N r_j v_j$$

$$v_j^* = r_j v_j = \frac{a_j}{a_0} v_j$$

Fourier係数計算

空気の動圧を計算(質点の場所での動圧)

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Fourier係数

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} p_k e^{\frac{-2\pi i}{n} jk}$$

複素数計算なので
位相も同時計算

Fourier係数をdB値に変換



シミュレーションプログラム

- ・ 解法はC++で記述(ソースコード公開済)
- ・ GUIは、Qt 4.7.4で作成(公開済)
- ・ モデルとアルゴリズムは公開済
- ・ URL :
 - http://mcap.web.fc2.com/software_jp.html



ソフトウェア仕様

	GUIバージョン	CUIバージョン	備考
副空気室の数	1~3**	1~24	**現状の制限
時間解像度	5-10bit	制限なし	1周期につき
熱力学条件	断熱 or 等温	断熱 or 等温	
グラフ表示	有	無	
DFT計算機能	無	有	
外力信号	単一周波数 リニアスweep ランダム	単一周波数 リニアスweep ランダム 周波数漸増*	
ライセンス	GPL	使用許諾条件	
配布形態	ソースコード Win32実行形式	ソースコード	
Platform	Linux, Windows	C++コンパイラがあれば使用可能	

シミュレーション対象

DU050x4a型



$V0=3.0L$

$V1=2.6L$

$V2=3.3L$

$d1=\phi 50(19.6\text{cm}^2) \times 49$

$d2=\phi 50(19.6\text{cm}^2) \times 79$

$d3=\phi 40(12.6\text{cm}^2) \times 96$

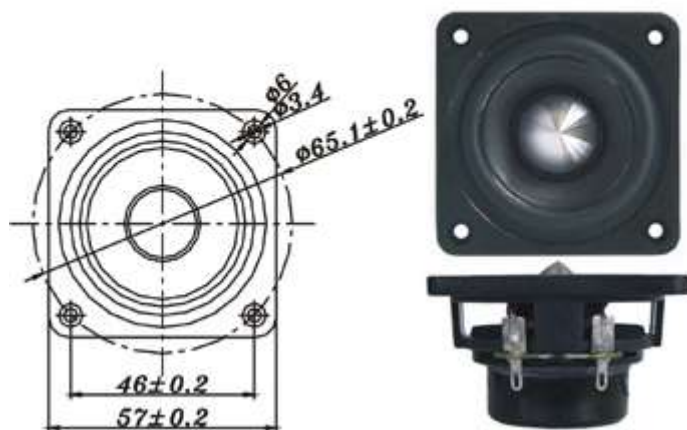
$d4=\phi 40(12.6\text{cm}^2) \times 126$

http://mcap.web.fc2.com/drawings_jp.html

ドライバの詳細

2" POLYCONE FULL RANGE

W2-802SE



- TB社の2インチモデルW2-802SE
- 片チャンネル4本をシリパラ接続
- $m_0=1[g]$
- 振動板実効面積=13[cm²]
- $f_0=160[Hz]$
- $Q_{ms}=3.68$

$$c_0 = \frac{\omega_n m_0}{Q_{ms}} = \frac{2\pi f_0 m_0}{Q_{ms}}$$

DIAPHRAGM MTL	PPM
SURROUND MTL	TPR
NOMINAL IMPEDANCE	8 W
DCR IMPEDANCE	6 W
SENSITIVITY 1W/1m	86 dB
FREQUENCY RESPONSE	160-20K Hz
FREE AIR RESONANCE	160 Hz
VOICE COIL DIAMETER	20.4 mm
AIR GAP HEIGHT	3 mm
RATED POWER INPUT	8 W
MAXIMUM POWER INPUT	16 W
FORCE FACTOR, BL	3.49 TM
MAGNET WEIGHT (oz)	Neodymium
MOVING MASS	1 g
FERRO FLUID ENHANCED	No
SUSPENSION COMPL.	1294 μMN^{-1}
EFFEC.PISTON AREA	0.0013 M ²
Levc	0.039 mH
Zo	60 ohm
X-max	1 mm
Vas	0.31 Litr.
Qts	0.36
Qms	3.68
Qes	0.40



シミュレーションに使用するパラメータ

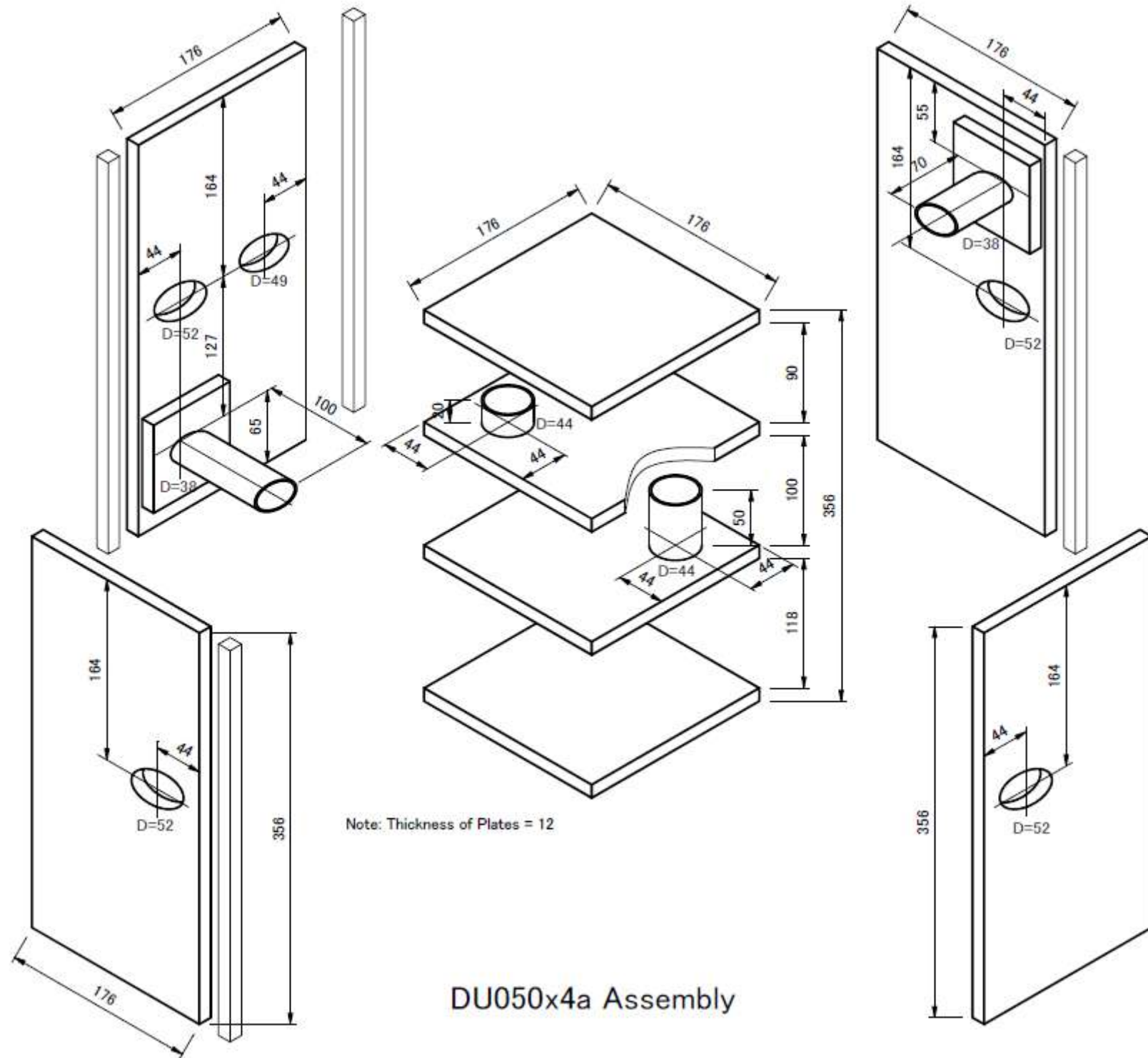
・ エンクロージャ

- 箱の数・容積(剛性項(K)の設定)
- ダクトの面積・長さ(質量項(M)の設定)

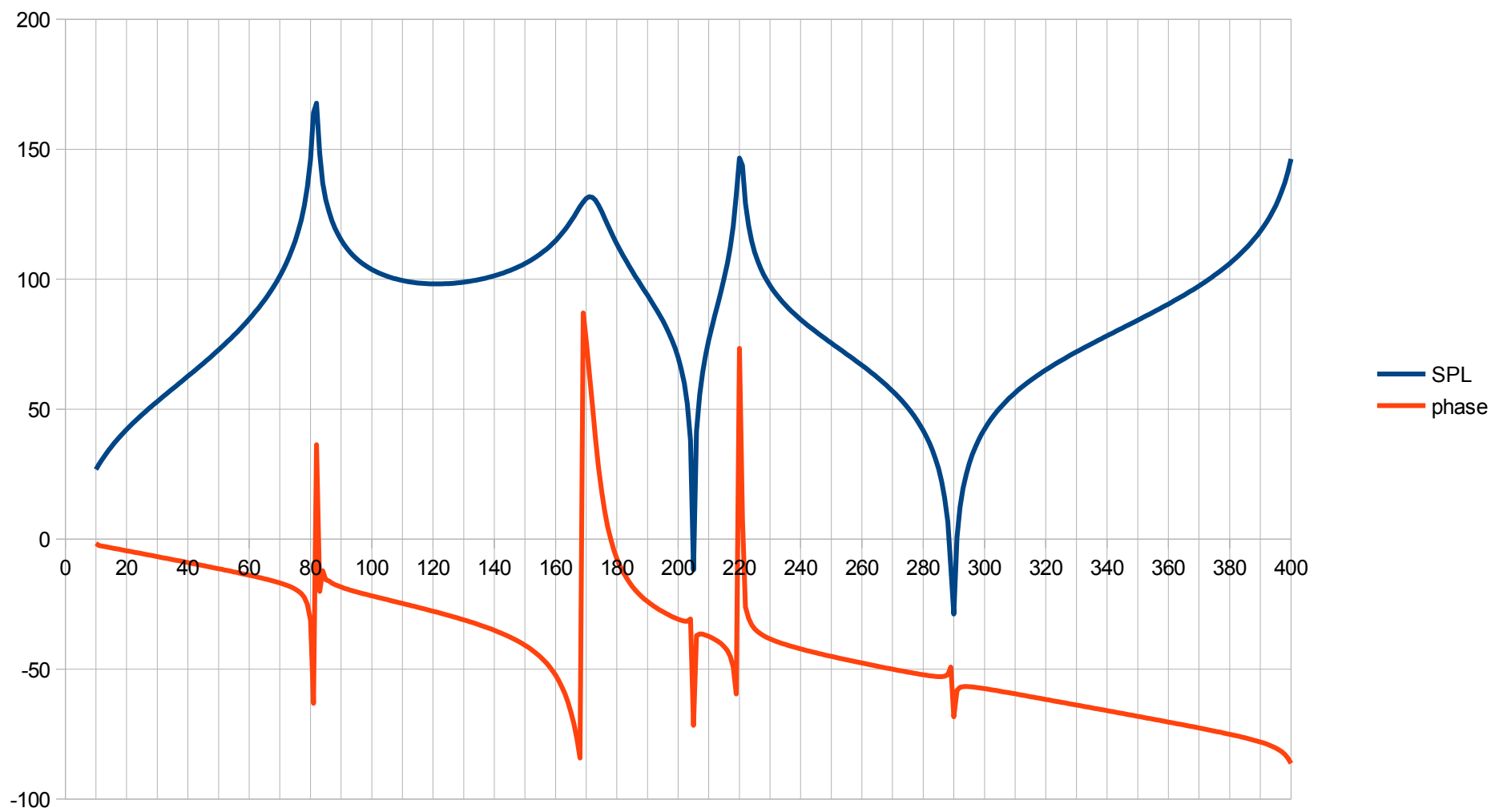
・ ドライバー

- **BIファクタ**、インピーダンス
 - ・ 加振力(f)を決めるのに使用する
- 実効振動板面積、実効質量、最低共振周波数
 - ・ 運動方程式の質量項(M)、剛性項(K)の設定に使用する
- **機械的Qファクター(Q_{ms})**
 - ・ 運動方程式の損失項(C:ドライバーのみ)の設定に使用する

注：BIファクタおよび機械的Qファクタは、Fostexの仕様書には記載がない



シミュレータでの周波数応答結果



実際にはダクトの摩擦損失があるので、もう少し滑らかな曲線になります。