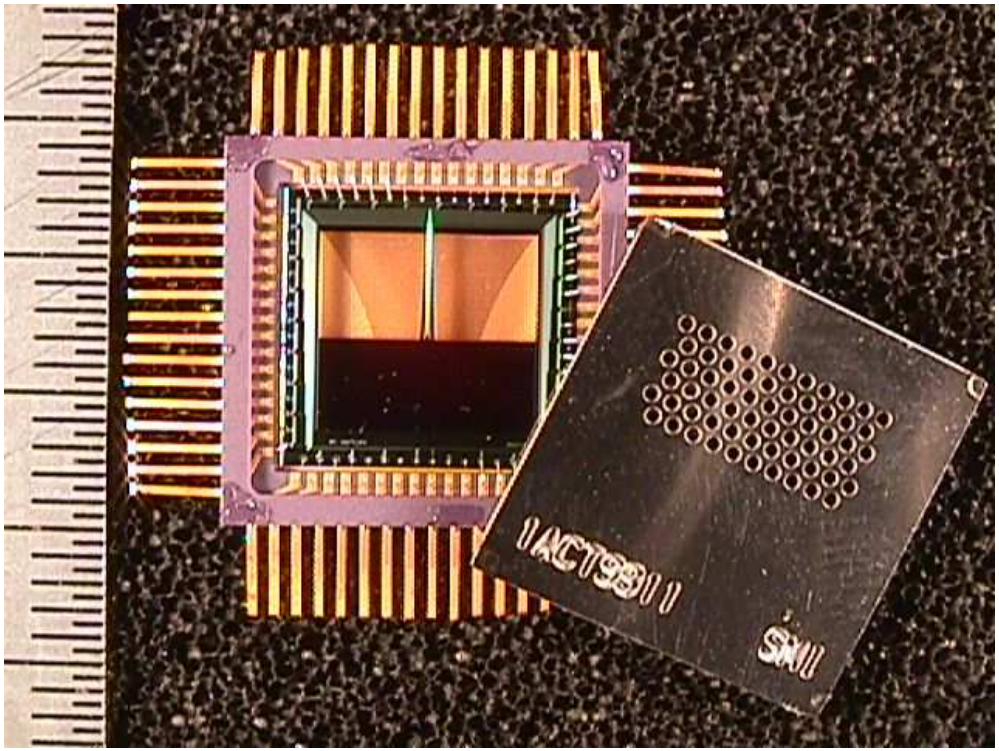
蝸牛基底膜への高効率伝達理論と その音響センサへの応用

安藤研究室　　荒木 章子

発表の流れ

1. 蝸牛基底膜と音響センサ
2. 問題設定
3. 蝸牛基底膜の最適な構造
4. fishbone 構造の入力端設計
5. まとめ



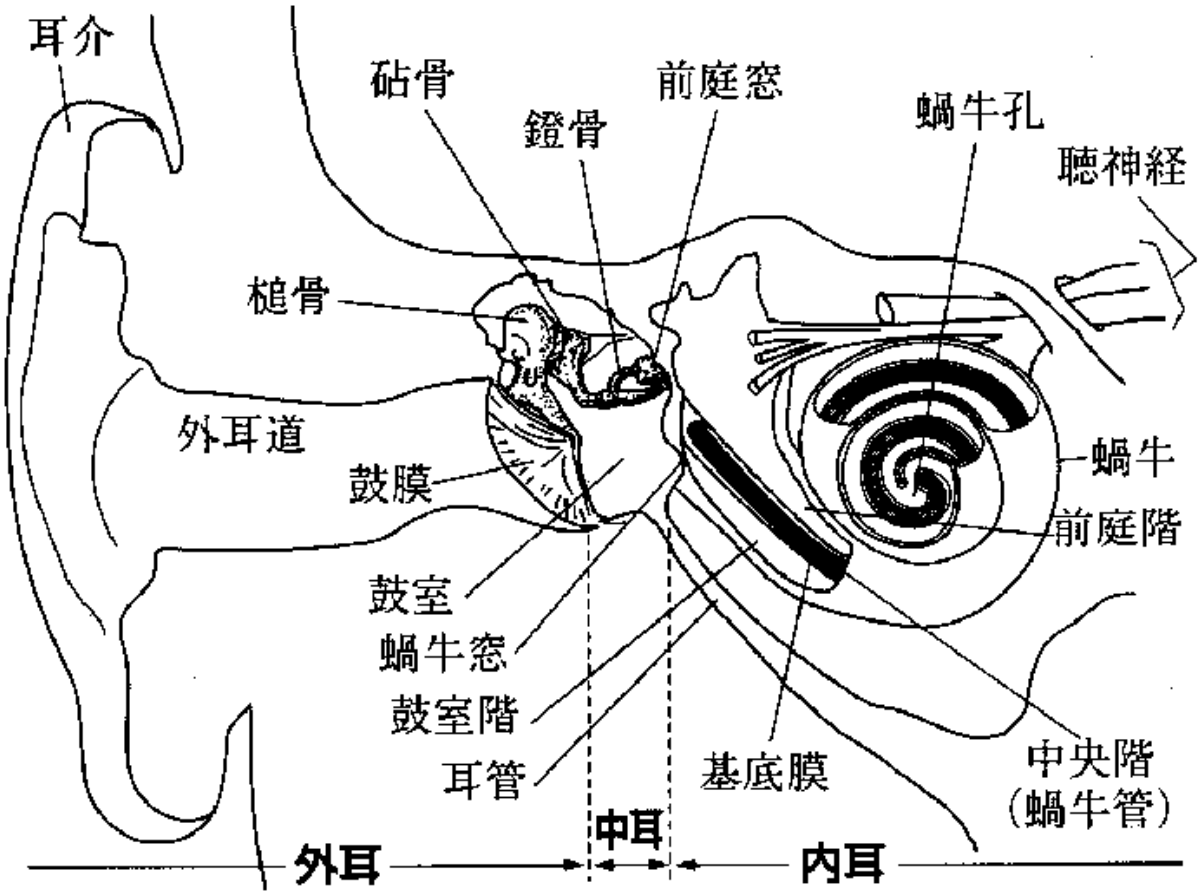
蝸牛基底膜への高効率伝達理論と その音響センサへの応用

安藤研究室　　荒木 章子

発表の流れ

1. 蝸牛基底膜と音響センサ
2. 問題設定
3. 蝸牛基底膜の最適な構造
4. fishbone 構造の入力端設計
5. まとめ

聴覚器官

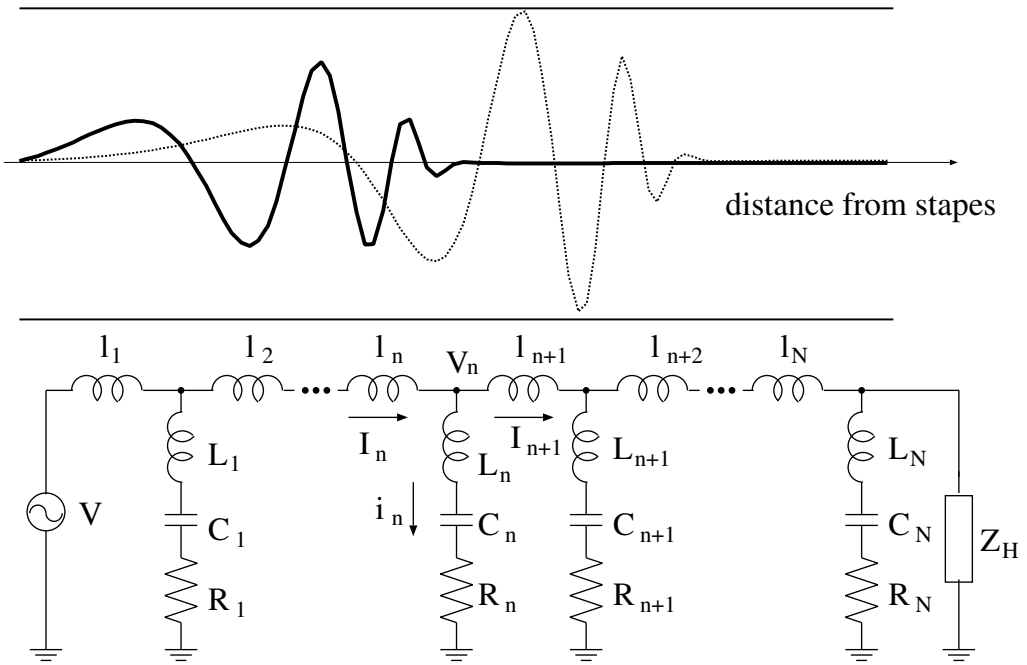


内耳 - 蝸牛基底膜　入力音の周波数分解

中耳　　空気と流体のインピーダンスマッチング

外耳　　入力音の集音、音源定位

基底膜

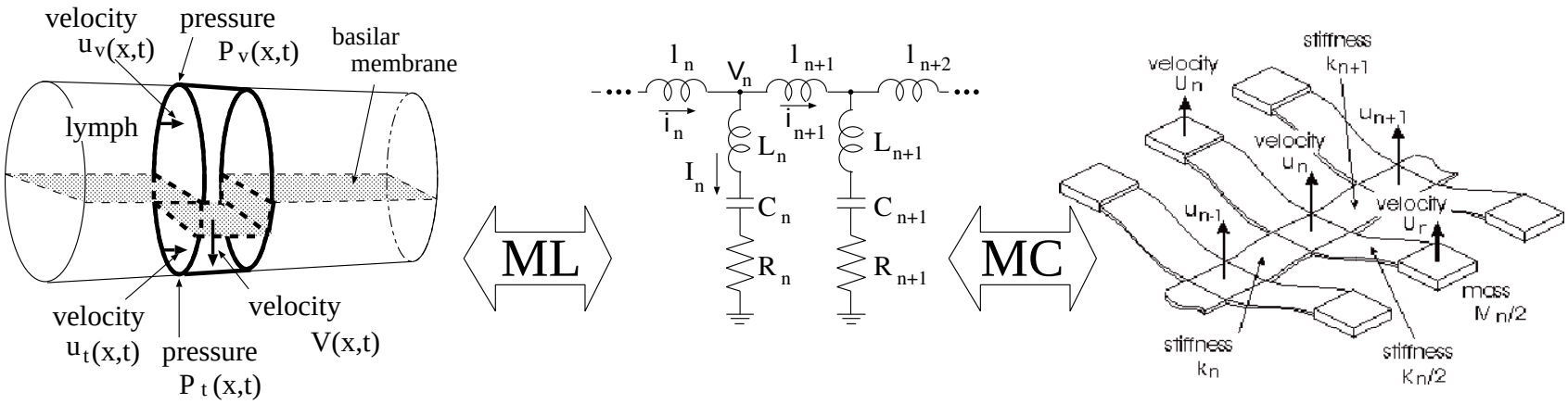


共振系が弱い相互作用を持って連なった構造

- 鐙骨 (左端) に入った音圧 (電圧) は、リンパ液 (l_n) を介して共振点まで伝達される
- ある位置における基底膜 (共振系) は、対応する共振周波数のエネルギーを吸収する。ほぼその位置で進行波はピークをとる。

蝸牛基底膜を模したセンサ -FISHBONE 構造-

Model of cochlea　　circuit model (by Zwislocki)　　fishbone stracture

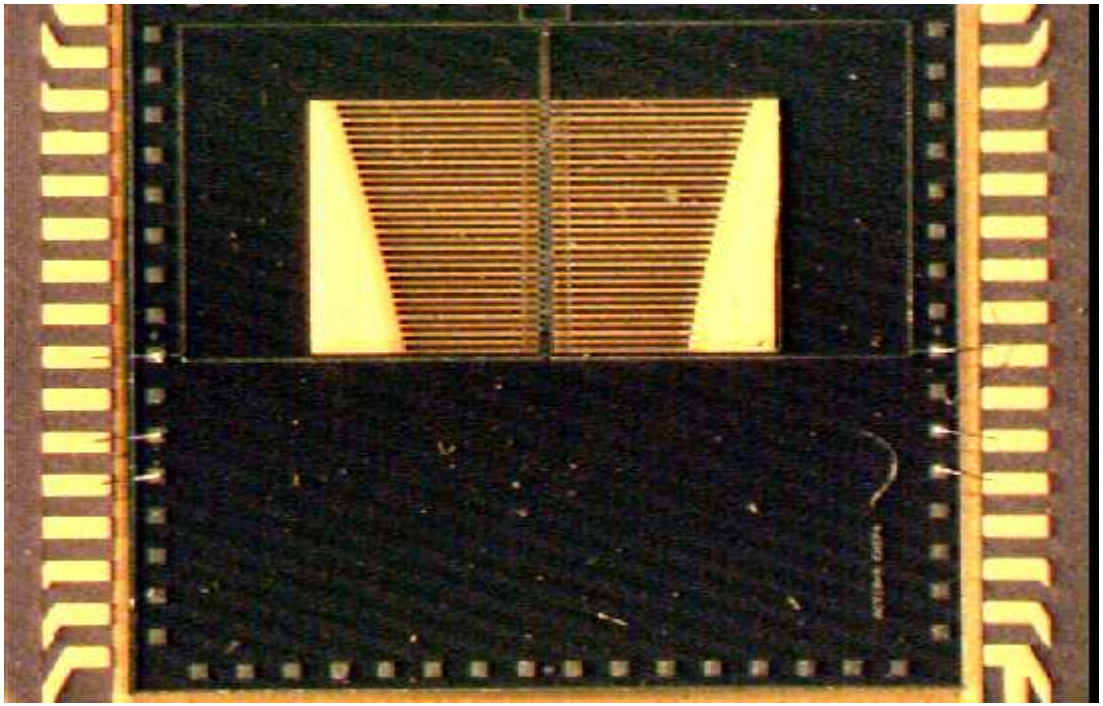


basilar membrane --- LCR resonator --- lateral beam

lymph --- connecting inductance --- transversal beam

圧力	P	電圧	V	速度	v
変位	x	電流	i	モーメント	M
リンパ液質量	m	インダクタンス	l	スティフネス	k^{-1}
基底膜質量	M	インダクタンス	L	スティフネス	K^{-1}
スティフネス	K^{-1}	キャパシタンス	C	質量	k^{-1}
粘性抵抗	D	抵抗	R	粘性抵抗	D^{-1}

FISHBONE 構造



蝸牛基底膜と完全等価な構造

特長

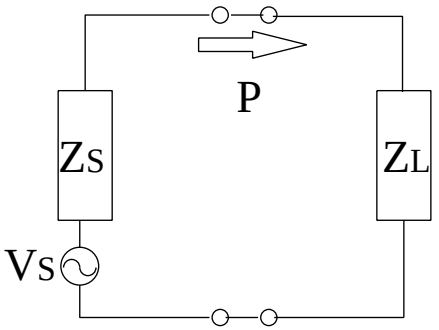
- 小型：平板一枚による構造のためシリコン微細加工に向く
- 高効率：共振現象を利用した高効率のセンシングが可能
- 聴覚との整合性：ヒトの基底膜の持つフィルタ特性を再現

目的

- 蝸牛と等価な構造を持つ fishbone 型音響センサに、最も効率よくエネルギーを伝える方法を提案する

考える問題

蝸牛基底膜	fishbone 型音響センサへの要求
非常に広帯域	広帯域
ダイナミックレンジが広い	高感度
	広帯域で周波数特性が平坦



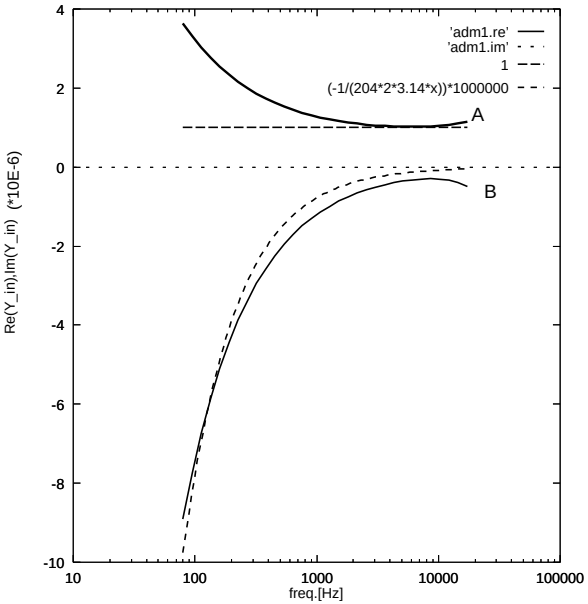
$$\max_{Z_L} P = \Re[Z_L]\frac{|V_s|^2}{|Z_S + Z_L|^2}$$

$$(Z_S = R_S + jX_S \ \ , \ \ Z_L = R_L + jX_L)$$

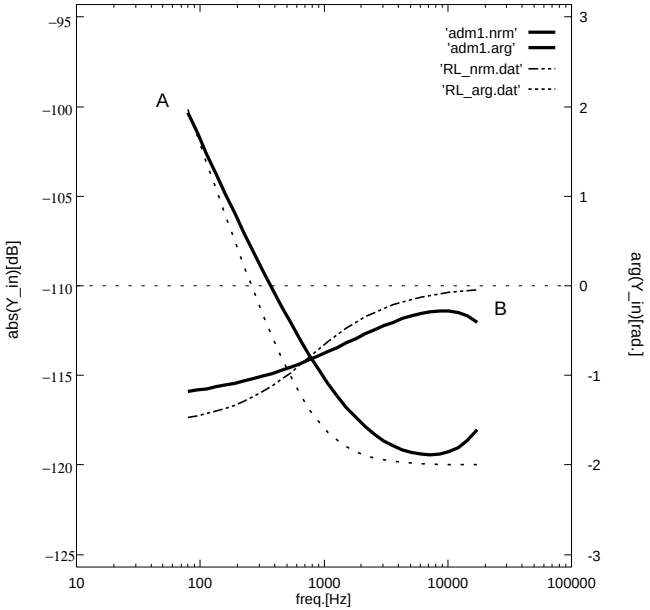
$R_L = R_S$ ， $X_L = -X_S$ $\rightarrow$ 負荷が純抵抗のとき

伝送線モデルでの蝸牛の入力インピーダンス

蝸牛の入力インピーダンスは純抵抗になっているだろうか



実部 (A) と虚部 (B)



振幅 (A) と位相 (B)

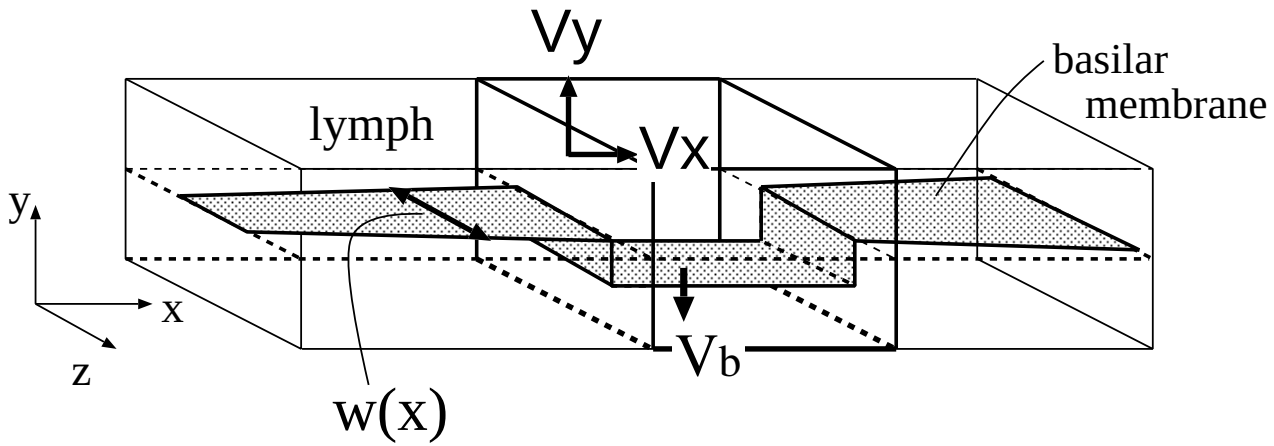
伝送線モデルによる入力アドミッタンス→リアクタンス分発生

文献値 $R = 600[\Omega]$、 $L = 22[\mathrm{mH}] \rightarrow$ 抵抗的

伝送線モデルに問題があるのか？

二次元流体モデルでの蝸牛の入力インピーダンスの検証

より正確なモデルによりリアクタンス成分の解消は見られるか



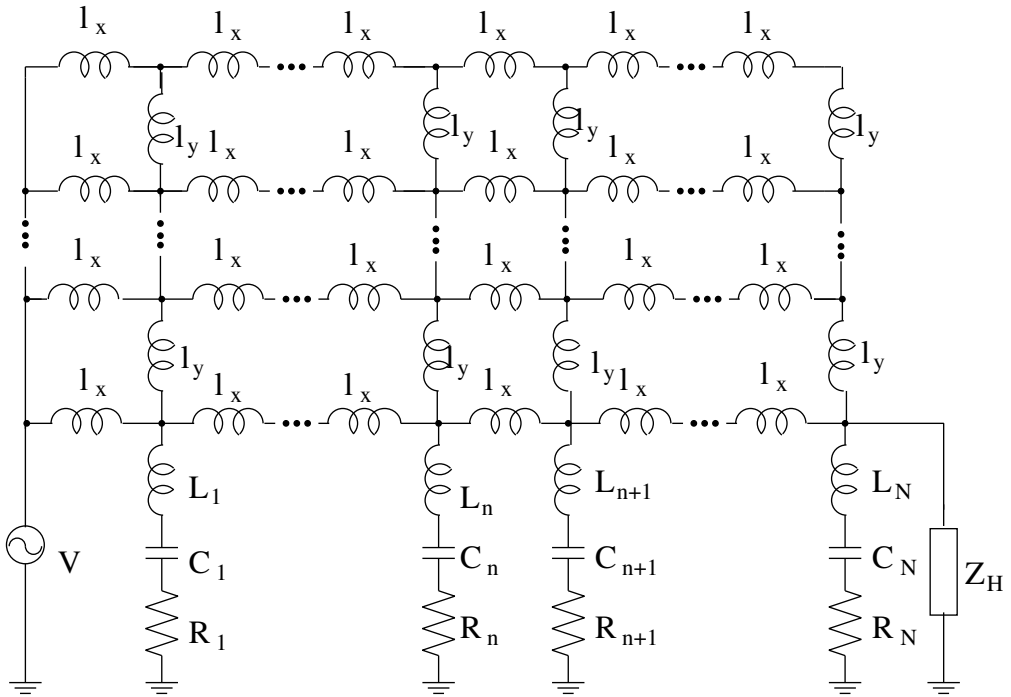
リンパ液の y 方向の運動も考慮する

流体のx方向，y方向の運動方程式 ： $-\rho\dfrac{\partial v_x(x,y)}{\partial t}=\dfrac{dP(x,y)}{dx},\quad -\rho\dfrac{\partial v_y(x,y)}{\partial t}=\dfrac{dP(x,y)}{dy}$

流体の連続条件 ： $\dfrac{\partial v_x(x,y)}{\partial x}+\dfrac{\partial v_y(x,y)}{\partial y}=0$

基底膜の運動方程式 ： $w(x)P(x,0)=M(x)\dfrac{\partial v_b}{\partial t}+r(x)v_b+k(x)\int v_b dt$

蝸牛の二次元流体モデルの等価回路

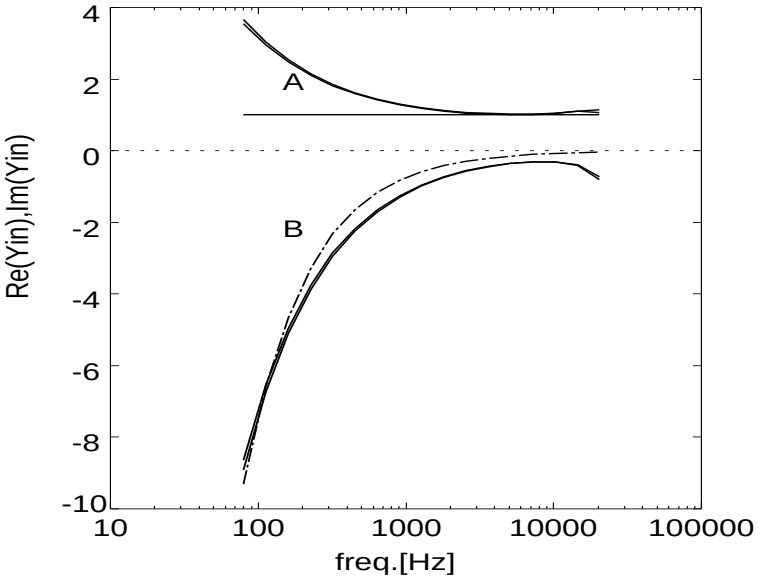


回路定数と物理量との対応

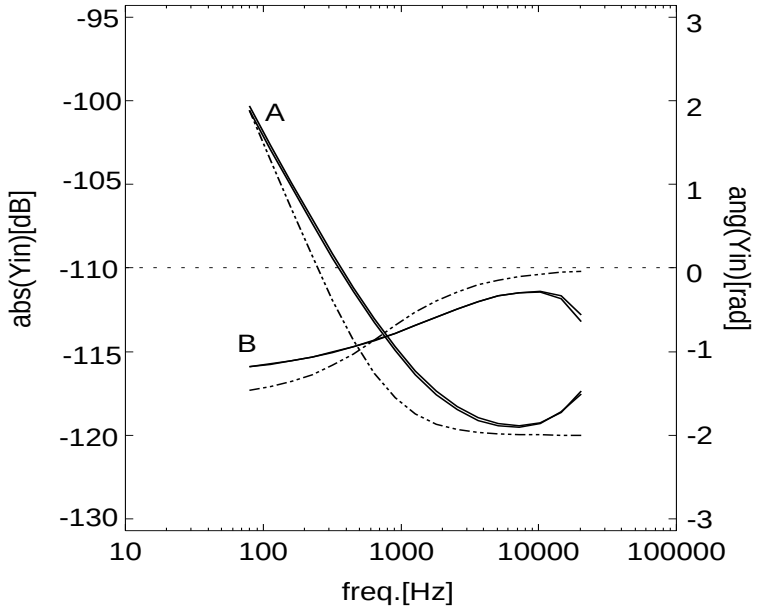
$$l_x = \frac{\Delta x \rho}{W \Delta y}, \qquad l_y = \frac{\Delta y \rho}{W \Delta x}$$

$$L_n = \frac{M(n\Delta x)}{2\Delta x w(n\Delta x)}, R_n = \frac{r(n\Delta x)}{2\Delta x w(n\Delta x)}, C_n = \frac{2\Delta x w(n\Delta x)}{k(n\Delta x)}$$

二次元流体モデルの入力アドミッタンス



実部 (A) と虚部 (B)

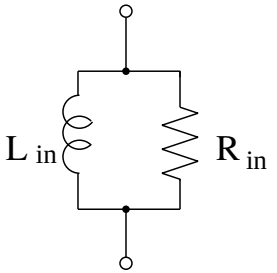


振幅 (A) と位相 (B)

入力アドミッタンスの近似等価回路

$$R = 1.0[\mathrm{M}\Omega]$$

$$L = 217.3[\mathrm{H}]$$



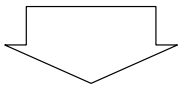
二次元モデルにおいても入力インピーダンスに リアクタンス成分発生

蝸牛の入力端

モデルでは入力インピーダンスにリアクタンス成分発生

(伝送線モデルの不備ではない)

- 広帯域でのマッチングが困難
- 蝸牛へのエネルギー供給効率の低下
- 反射による周波数特性の異常
- 能動性により発生するエネルギーの共鳴



- 蝸牛にリアクタンス成分の解消機構が存在するのではないか
- モデルとなっている伝送線モデルをより広くとらえ、
  純抵抗になる構造を見つけられないか

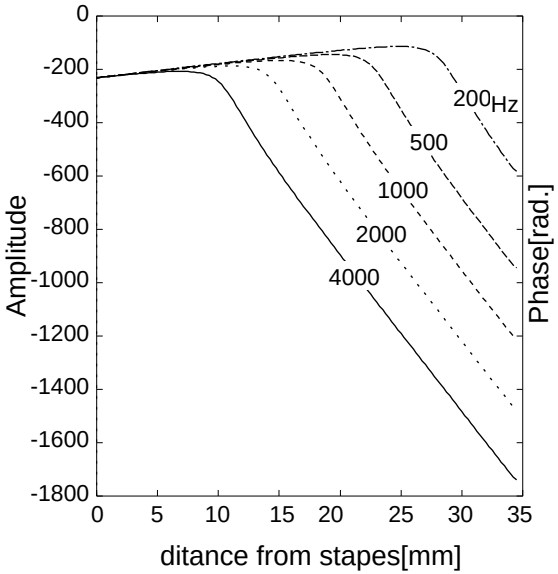
基底膜の性質

共振周波数と位置→対数線形の関係

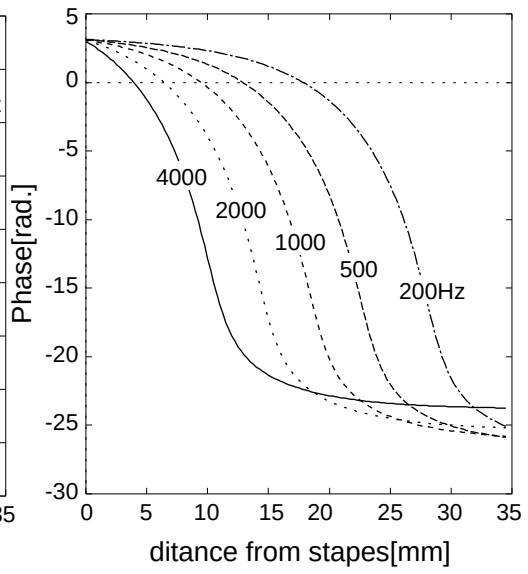
$$f = f_0 e^{\lambda x}$$

周波数領域・空間領域での相似性

○基底膜の振幅分布

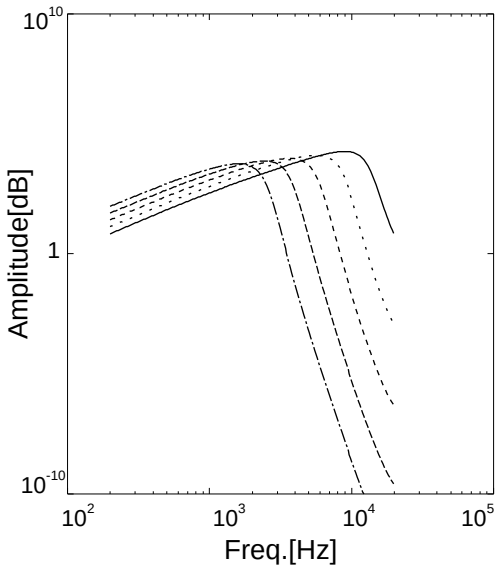


振幅

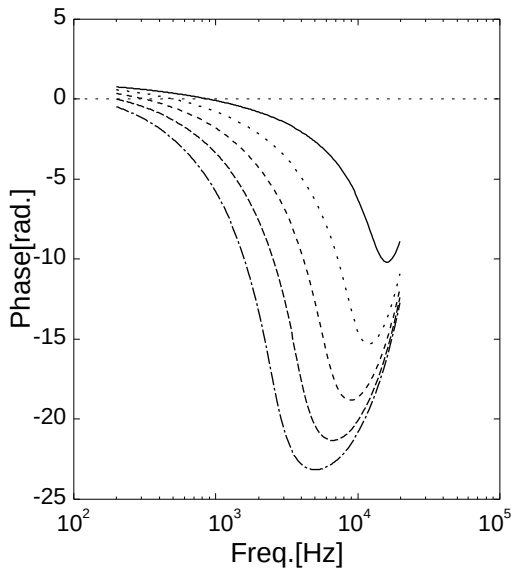


位相

○基底膜の周波数特性

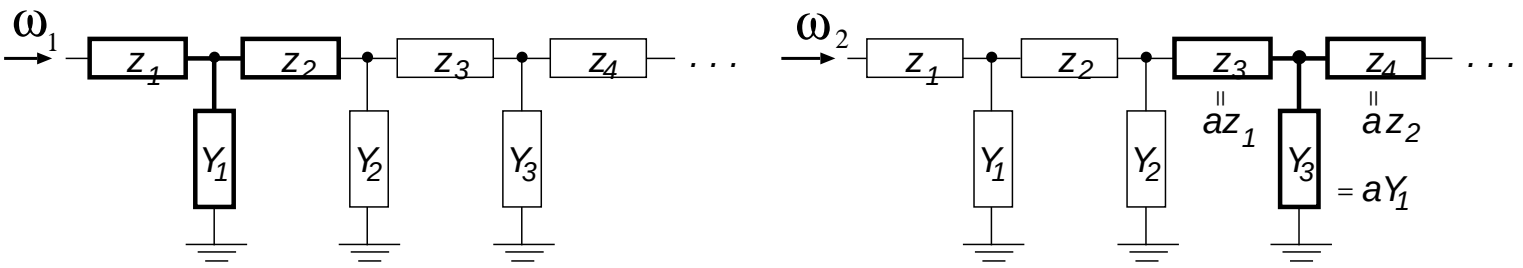


振幅



位相

対数線形構造



- 条件 1: 回路定数が対数線形な関数で書かれる

$$l(x) = l(0)e^{\alpha x} = l_0 e^{\alpha x} \qquad L(x) = L(0)e^{\beta x} = L_0 e^{\beta x}$$

$$C(x) = C(0)e^{\gamma x} = C_0 e^{\gamma x} \qquad R(x) = R(0)e^{-\zeta x} = R_0 e^{-\zeta x}$$

(但しヒトの蝸牛で $\alpha, \beta, \gamma, \zeta$ が正)

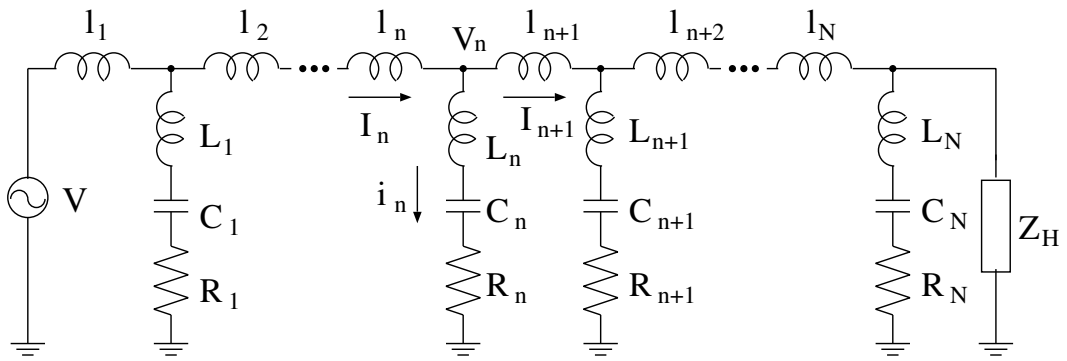
- 条件 2: 共振要素の $\mathbf{Q}$ 値一定

$$Q_n = \frac{1}{R_n}\sqrt{\frac{L_n}{C_n}} = \text{一定} \Rightarrow \beta - \gamma + 2\zeta = 0$$

- 条件 3: インダクタンスの比が一定

$$\frac{l_n}{L_n} = \text{一定} \Rightarrow \alpha = \beta$$

対数線形構造の３形式



$$
\begin{aligned}
l(x) &= l_0 e^{\alpha x} \\
L(x) &= L_0 e^{\beta x} \\
C(x) &= C_0 e^{\gamma x} \\
R(x) &= R_0 e^{-\zeta x} \\
w(x) &= w_0 e^{-\eta_0 x}
\end{aligned}
$$

1. 定インダクタンス (定 l あるいは定 L) 構造

$$\alpha = \beta = 0, \quad \gamma = 2\eta_0, \quad \zeta = \eta_0$$

2. 定抵抗 (定 R) 構造

$$\alpha = \beta = \gamma = \eta_0, \quad \zeta = 0$$

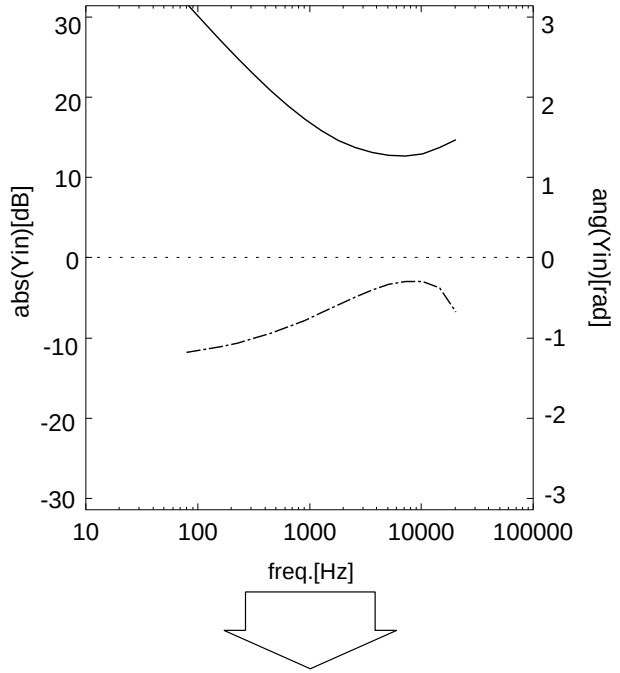
拡大率が $l(x), L(x), C(x)$ について等しい→　完全対数線形構造

3. 定キャパシタンス (定 C) 構造

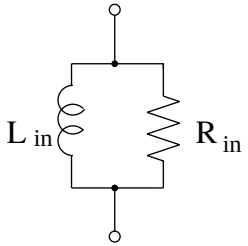
$$\alpha = \beta = 2\eta_0, \quad \gamma = 0, \quad \zeta = -\eta_0$$

対数線形構造を持つ伝送線の入力アドミッタンス

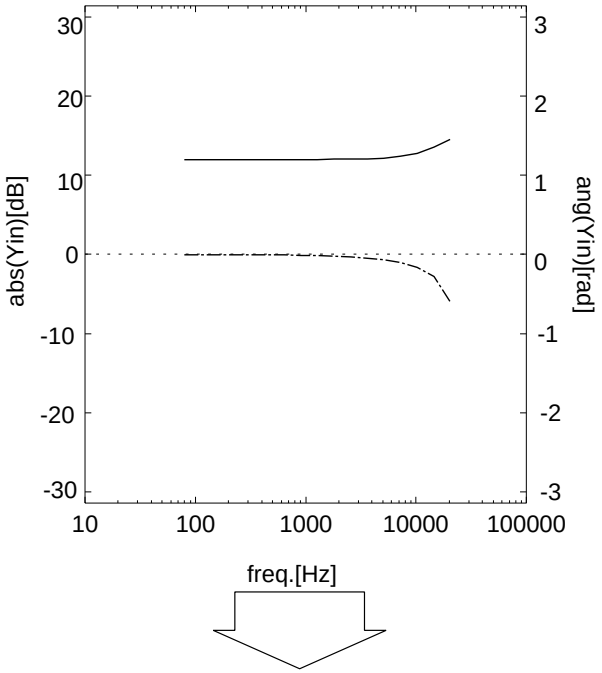
定インダクタンス構造



リアクタンス発生

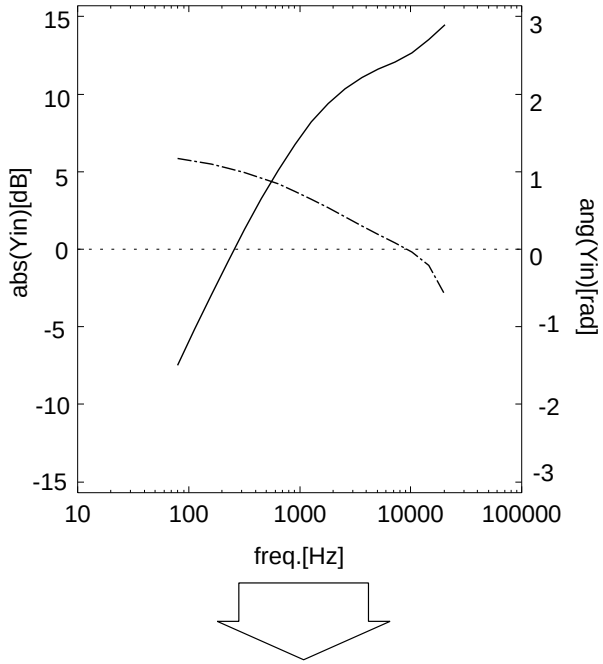


定抵抗構造



純抵抗

定キャパシタンス構造

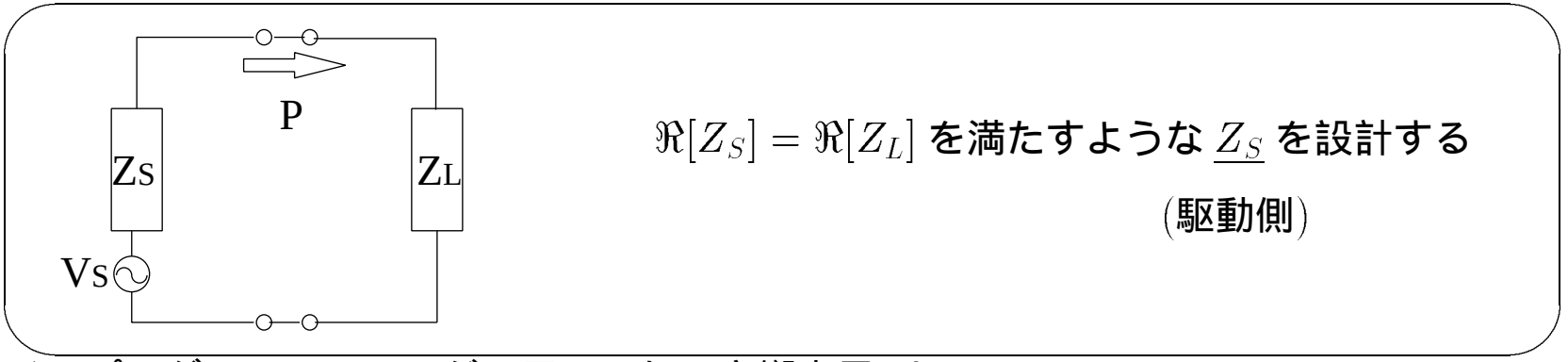


リアクタンス発生

完全対数線形構造のとき、入力インピーダンスは純抵抗となる

fishbone 入力端設計への応用

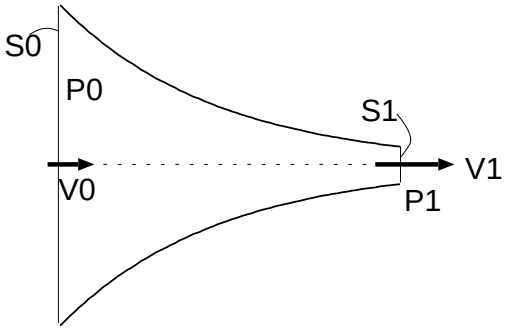
fishbone 構造は伝送線モデルと等価 →完全対数線形構造で実現可



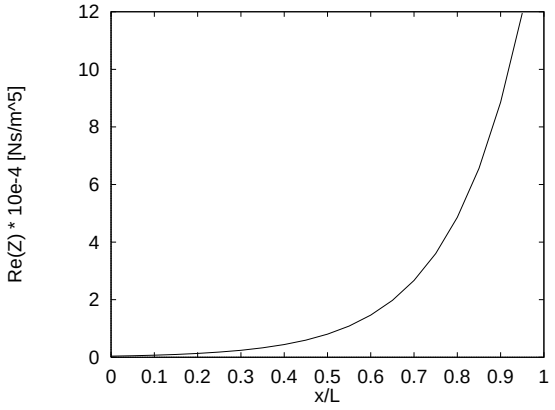
$\Re[Z_S] = \Re[Z_L]$ を満たすような $\underline{Z_S}$ を設計する

(駆動側)

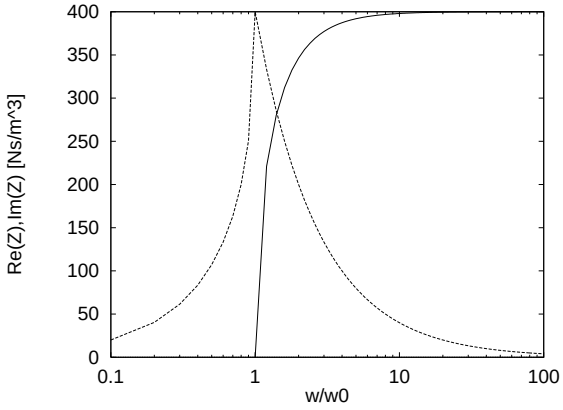
インピーダンスマッチングに用いられる音響素子: ホーン



$S(x) = S_0 e^{-mx} \quad (m > 0)$



音響インピーダンス



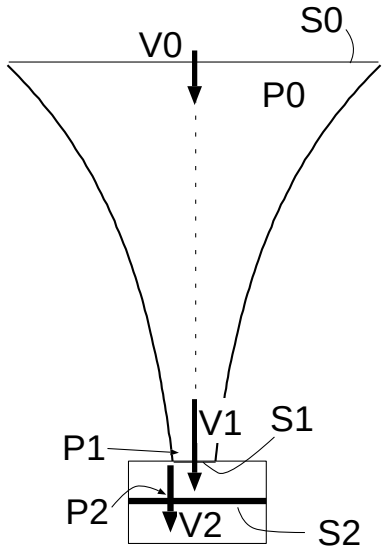
周波数特性

Cut-off Freq. $f_c = \dfrac{mc}{4\pi}$ 以上で ほぼ純抵抗 とみなせる

音響 - 機械系におけるインピーダンスマッチング

インピーダンスの定義 ： 音響系 $Z_a = \dfrac{\text{圧力 } P}{\text{体積速度 } SV}$ 機械系 $Z_m = \dfrac{\text{力 } SP}{\text{速度 } V}$

比音響インピーダンス： 空気 $Z_{air} = \dfrac{\text{圧力 } P_1}{\text{速度 } V_1}$ fishbone $Z_{fish} = \dfrac{\text{圧力 } P_2}{\text{速度 } V_2}$



- 音響系と機械系の間での仮定
  - 体積速度が一定 $S_1V_1 = S_2V_2 \quad (1)$
  - 間隙において P 一定 $P_1 = P_2 \quad (2)$
- マッチング成立時

$$Z_a = \frac{P_1}{S_1V_1} = \frac{Z_{air}}{S_1} \quad , \quad Z_m = \frac{S_2P_2}{V_2} = S_2 \cdot Z_{fish} \quad (3)$$

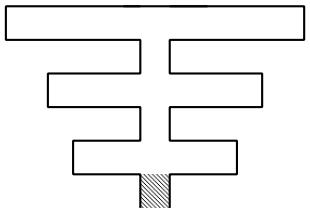
⇩

インピーダンスマッチング $\dfrac{P_1}{S_1V_1} = \dfrac{P_2}{S_2V_2}$ が成立する S_1, S_2

$$S_1 : S_2 = Z_{air} : Z_{fish}$$

fishbone 構造におけるインピーダンスマッチング

$$S_1 : S_2 = Z_{air} : Z_{fish} = Z_{air} : \frac{Z_m}{S_2}$$



fishbone の根本部分を入力端と考えると、

空気のインピーダンス　Z_{air}　　$400\ [\mathrm{Ns/m^3}]$

fishbone 入力端のインピーダンス　Z_{fish}　$1.6 \times 10^6 [\mathrm{Ns/m^3}]$

4000 倍のインピーダンスマッチングが必要

$$S_1 : S_2 = Z_{air} : Z_{fish} \quad \text{より}$$

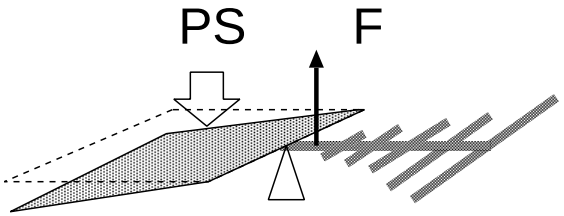
$$S_1 : S_2 = \frac{1}{4000} : 1$$

極端に出口の細いホーンを設計せねばならず実現は困難

- 機械的てこによるインピーダンス変換
- S_2 を大きくとる

ダイアフラムの設計

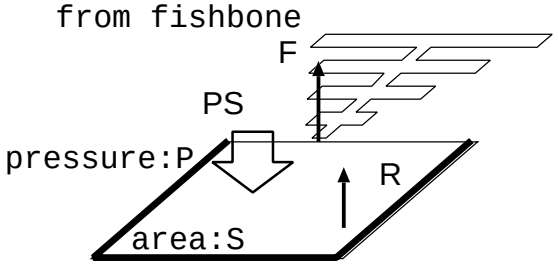
機械的てこによるインピーダンス変換



⇓

- 周波数によらないインピーダンス変換が可能
- 構造を支える手段がなく非現実的

Z_m を保存するダイアフラム



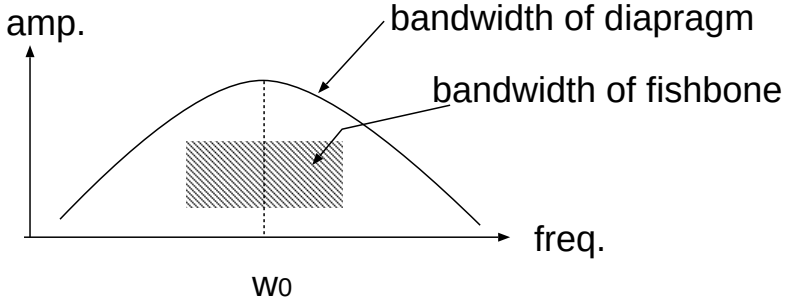
重心の運動方程式より、

$$M\frac{\partial \dot{z}}{\partial t} + Z_m \alpha \dot{z} + k\int \dot{z}dt = PS$$

$$\uparrow \quad \uparrow$$

$$F \quad R$$

(M：質量、 Z_m： fishbone、 k：バネ定数)

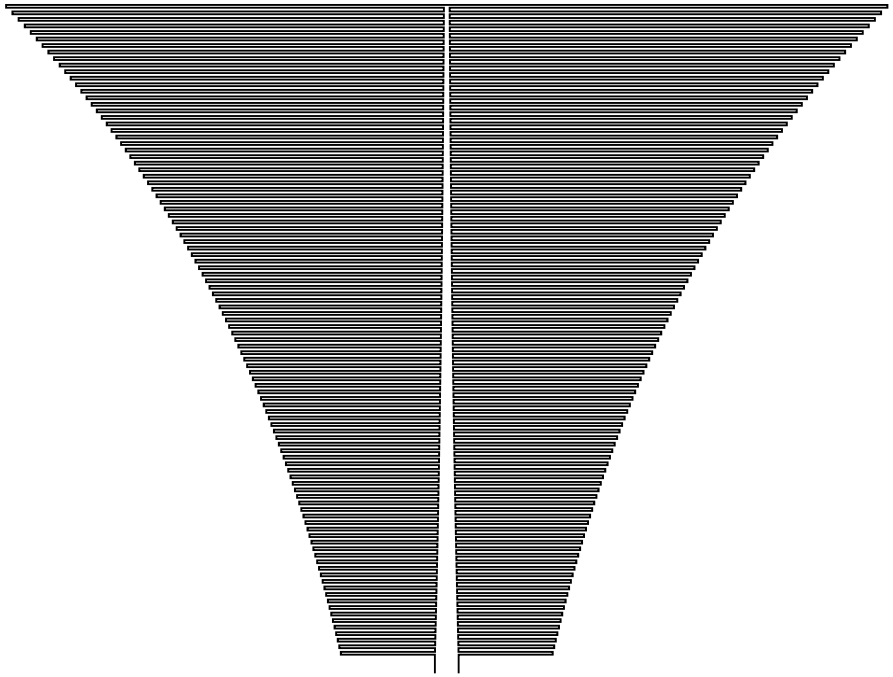


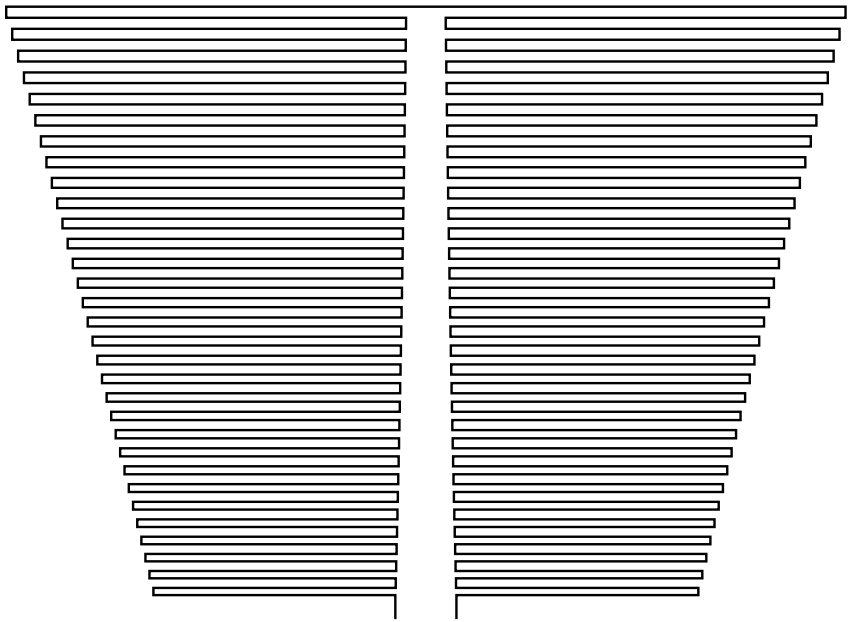
ダイアフラムの固有周波数を、

fishbone の帯域の真中に設定

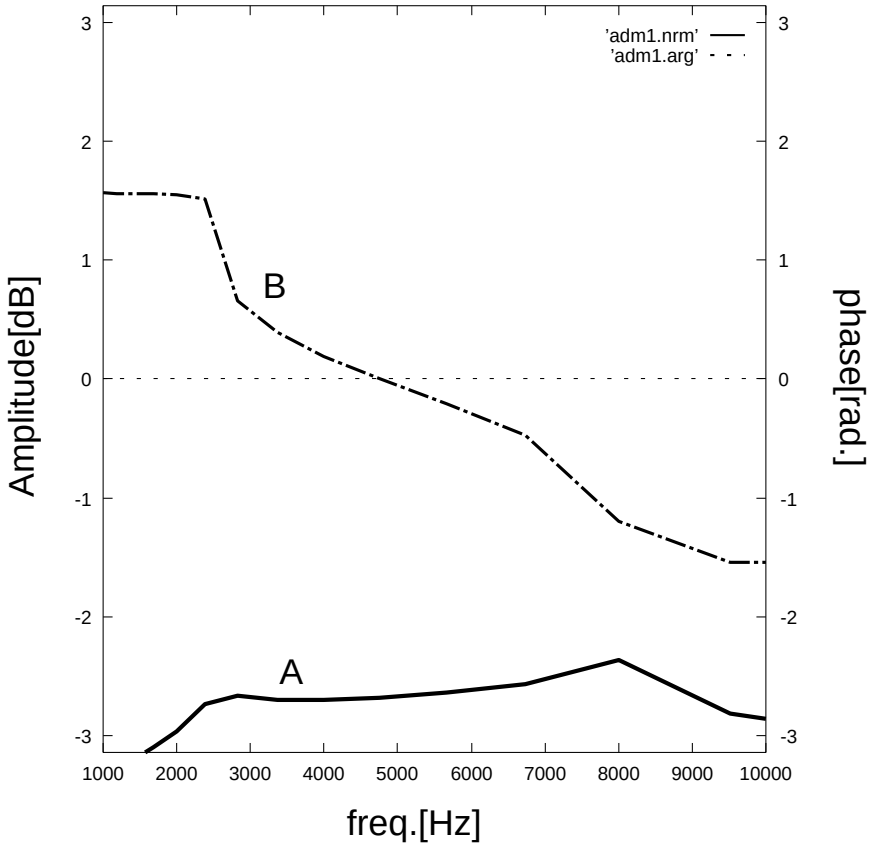
設計手順のまとめ

1. 完全対数線形構造を満たす fishbone を設計する
2. 固有周波数に注意しダイアフラムを決める
3. 音響 - 機械系のマッチングを考慮しホーン出口面積を決める
4. ホーンの Cutoff 周波数よりホーン形状を決定する





実験に用いた fishbone



入力アドミッタンス。 (A) 振幅 (B) 位相

共振ビーム長さ	$1135 \times r^{n-1}[\mu\mathrm{m}]$
共振ビーム幅	$30.0[\mu\mathrm{m}]$
共振ビーム間隔	$40.0[\mu\mathrm{m}]$
横断ビーム幅	$254.5 \times r^{-(n-1)}[\mu\mathrm{m}]$
$\alpha = 0.0144, \beta = 0.0432, \gamma = 0.0144$	
周波数帯域	3500 - $4000[\mathrm{Hz}]$
ビーム本数 n	31 本 (帯域内 25 本)
ダイアフラムサイズ	$3766 \times 1550[\mu\mathrm{m}^2]$
ダイアフラム固有振動数	7800 [Hz]

$$\frac{400}{S_1} = \frac{2850}{S_2}$$

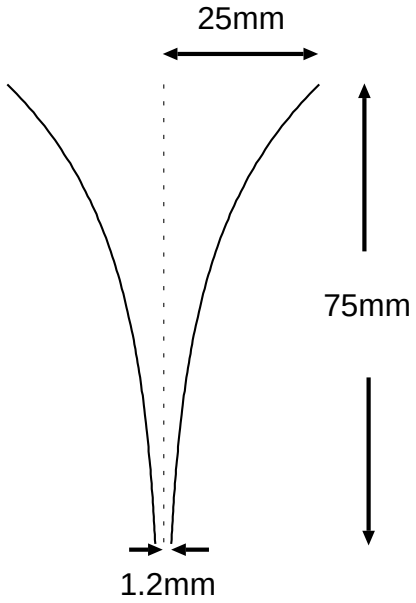
S_2 はダイアフラムの面積で既知より

$S_1 = 0.82[\mathrm{mm}^2]$ が得られる。

よってホーン出口の半径は $0.51[\mathrm{mm}]$

実験系

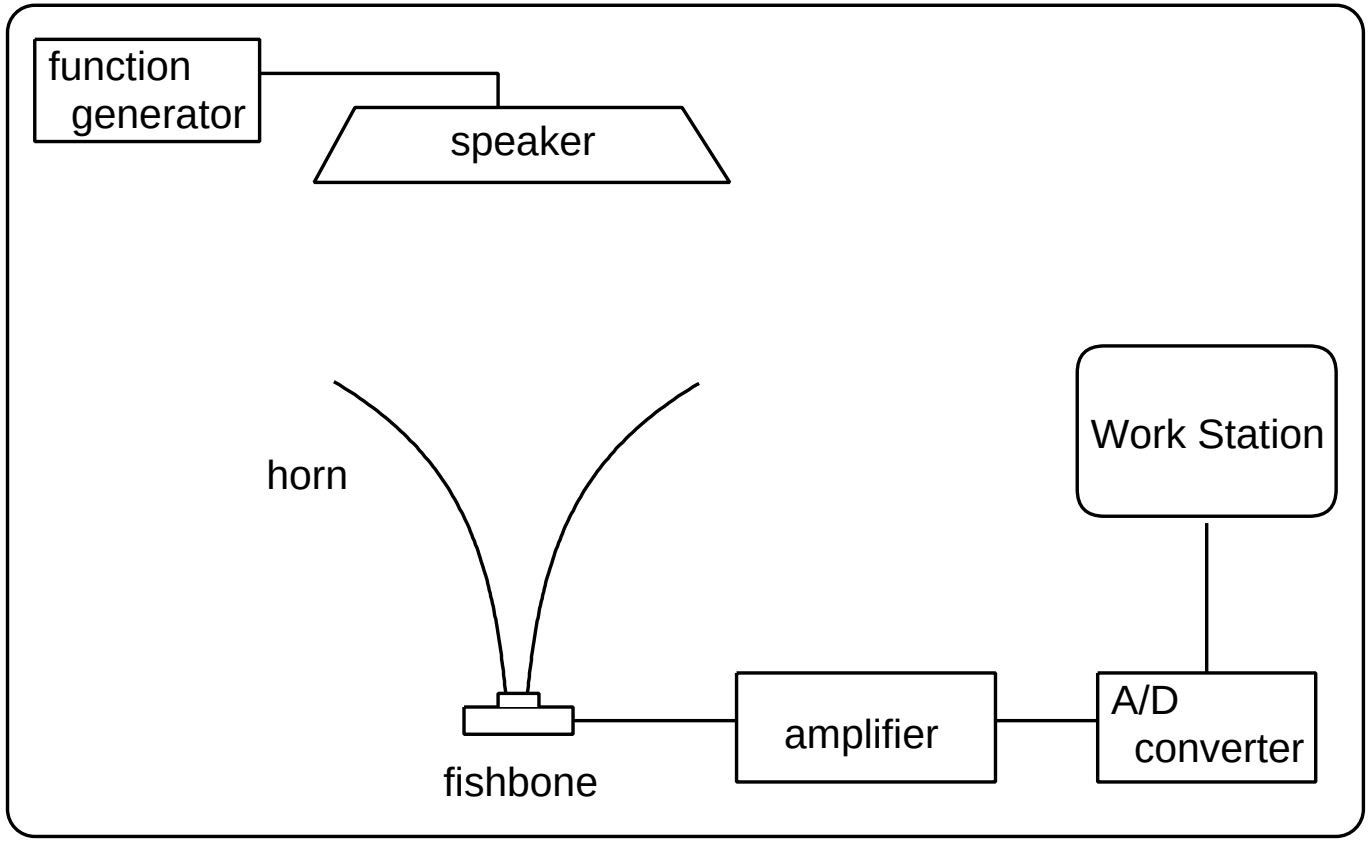
作成したホーン



$$r(x) = 25\exp(-0.04x)[\mathrm{mm}]$$

cut-off freq. 2200[Hz]

実験系

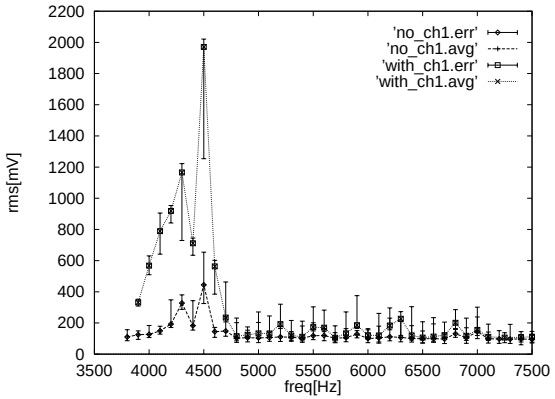


各ビームの根本に配置したピエゾ領域の抵抗変化により振動を検出。

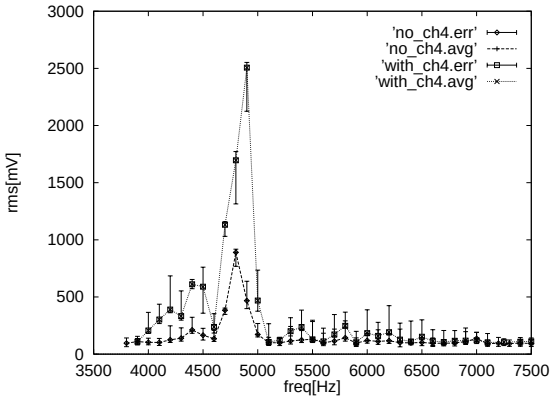
fishbone - スピーカー間距離 16cm

スピーカー駆動電圧を rms 80[mv] に固定

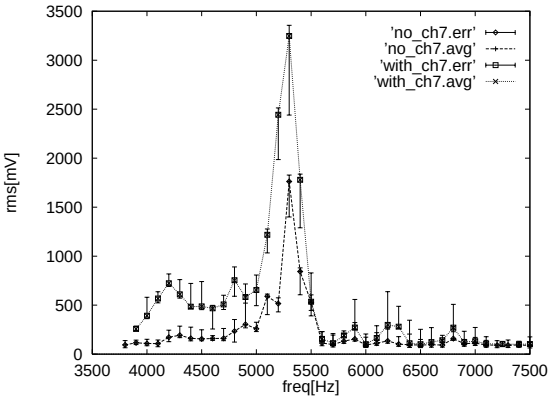
実験結果



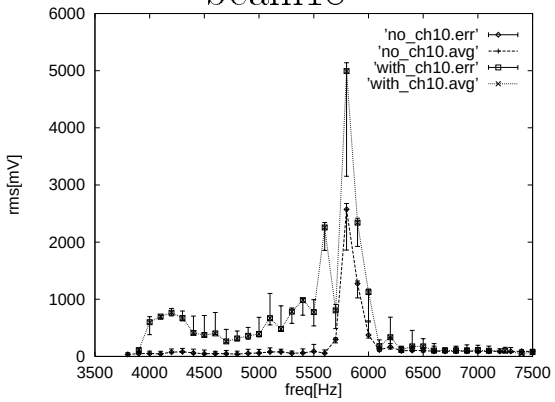
beam18



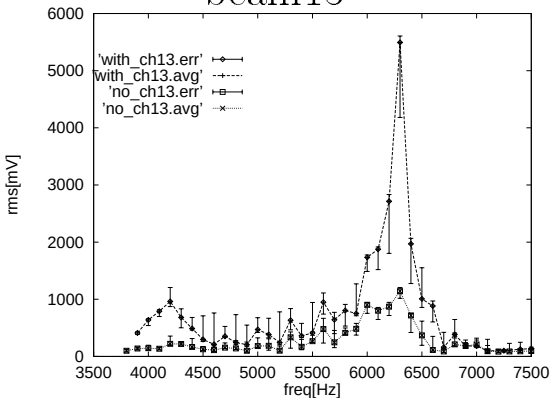
beam15



beam12



beam9



beam6

反射係数

Before $\Gamma = 0.753$

After $\Gamma = 0.276$

どのビームも振幅の増加が見られる。増加の程度は 6-14[dB]。

まとめ

- **fishbone** に最も効率的にエネルギーを伝える仕組みを考えた。
- 蝸牛基底膜の入力インピーダンスにリアクタンス分が生じることを指摘した。
- 蝸牛基底膜の構造について、対数線形構造として一般的に議論した。そして、定抵抗構造 (完全対数線形構造) のとき、入力インピーダンスが純抵抗になる理想的な構造になることを示した。
- **fishbone** 構造の入力端設計を以下により行った。
  - 完全対数線形構造による **fishbone** 構造
  - ホーン - ダイアフラムによる音響変成器

課題

- 入力インピーダンスのリアクタンス分の低減の仕組の究明
- 大音響への保護を考慮に入れた fishbone 構造の提案