

聴覚外耳道のアナログシミュレーション

石田 雅・江谷 幸一・吉田 隆*・副井 裕・戎谷 圭介

電気電子工学科 *日本電気エンジニアリング (株)

(1991年9月1日受理)

Analog Simulation of Ear Canal

by

Masamu ISHIDA, Kouichi ETANI, *Takashi YOSHIDA,
Yutaka FUKUI and Keisuke EBISUTANI

Department of Electrical and Electronic Engineering

* NEC Engineering Co.

(Received September 1, 1991)

This paper proposes a novel analog simulation of an ear canal. An canal generally has an acoustic gain of about 10 dB over the frequency range of 2-5 kHz. Considering the ear canal to be an acoustic tube, we can be described it in terms of the difference between sound pressure at the entrance of the canal and tympanic membrane. It is shown from the analogy between the acoustic and electrical system that the ear canal acts as an electrical lowpass filter. In particular, we deal three methods realizing the function of the ear canal, as shown below.

- 1) a method using cascaded modules of first order.
- 2) a method using biquad filter circuit.
- 3) a method using a lowpass and a highpass filter.

Key words : Analog simulation, Outer ear, Ear canal, Auditory physiology

1. まえがき

近年、ニューラルネットワークに代表される人間の脳並びに、感覚器官等の情報処理に関する研究が高まっている。こうした人間が行う情報処理手法を学ぶことにより、信号処理手法に何か新しい方法が見いだされるのではないかと考えられる。ここでは、感覚器官の一つである聴覚器官に注目し、特にそのうちの外耳を取り上げる。

一般に、聴覚器官⁽¹⁻³⁾は外耳、中耳、内耳に分けられる。音の信号は、外、中、内耳を伝播して大脳皮質の聴覚中枢へ到達して音として知覚される。外耳は耳介と外耳道によって構成されている。外耳道は音響工学的にみると一つの管（音響管）と見なされ、音響フィルタ⁽⁴⁾として取り扱われるのが一般的である。

聴覚器官に関する研究は、これまで数多くなされており⁽⁵⁻²⁰⁾、中耳、内耳に関するものが大多数である^(5-13, 16, 17, 20)。しかし、外耳に関してはあまり詳細に考察されていないようである。

本論文では、一つの音響フィルタと見なした外耳道に対し、機械系システムと電気系システムとの類推性（Analogy）⁽²¹⁾より、低域通過フィルタとして取扱いその実現回路について考察している。実現の方法として、生理学データ⁽¹⁻³⁾による外耳道の音圧特性にもとづいて、以下のような手法を検討している。

1. 折れ線近似⁽²²⁾による方法
2. バイカッド型フィルタ回路⁽²²⁾を用いる方法
3. 低域通過フィルタ特性と高域通過フィルタ特性を合成させる方法

上記の各々の方法に対し、計算機シミュレーションにより動作確認を行い、生理学データと特性比較して有効な動作領域並びに、特徴を明かにしている。

2. 聴覚外耳のあらまし

聴覚器官の構造は図1に示すとおりである。⁽²⁾聴覚器官の聴覚を司る部分は、外耳、中耳、内耳と大別される。本論文は、そのうちの外耳に注目したものである。外耳は、耳介（音の集音、方向感覚）と外耳道（音の伝音）

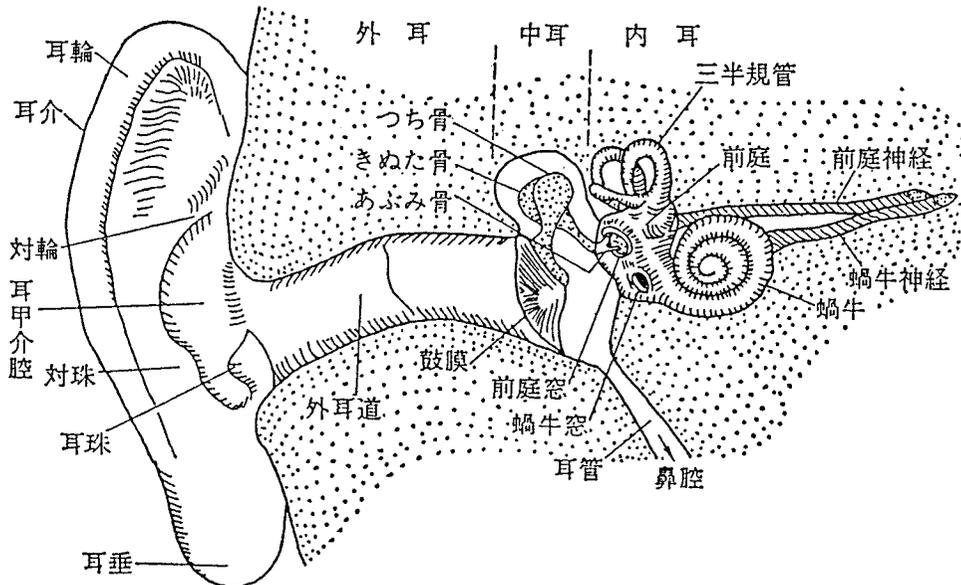


Fig. 1 聴覚の構造⁽²⁾

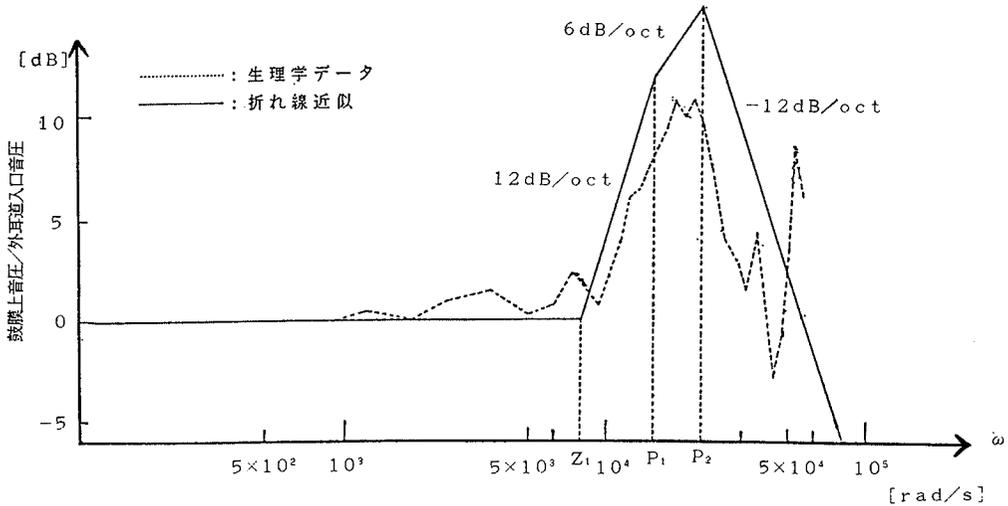


Fig. 2 鼓膜上音圧と外耳道入口音圧との音圧比及び折れ線近似

からなる管であり、空气中を伝わってきた音は外耳道（直径 7mm, 長さ 23-27mm, 容積約 1ml）を経て、外耳と中耳の境に位置する鼓膜（直径 9mm, 厚さ 0.1mm）を振動させる。

機械系システムと電気系システムとの類推性の関係を用いると、力（音響系では圧力）は電気系における電圧に対応している。すなわち、生理学データとして得られている 鼓膜上音圧/外耳道入口音圧 特性を電圧比特性と見なせば、それはフィルタ特性を表すことになる。上記の手法を用いて、機械系システムの音圧比特性を電気系システムにおけるフィルタ特性と見なして、以後取り扱うことにする。

3. 折れ線近似による実現法

図2に示す外耳道の生理学データの音圧特性を一次要素に分解し、一次のカスケードモジュールを使用して回路の設計を行う。ただし、図2の音圧特性を、 1.8×10^4 [rad/s] から 2.3×10^4 [rad/s] 付近で、最大 10dB 程度の共振特性を持つ低域通過フィルタ（LPF）とみなして設計する。本折れ線近似伝達関数 $T(S)$ は

$$T(S) = K \frac{(S+Z_1)^2}{(S+P_1)(S+P_2)^2} \quad (1)$$

となり、ここで

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= 8 \times 10^3 & P_1 &= 1.6 \times 10^4 & P_2 &= 2.4 \times 10^4 \\ K &= P_1 P_2^2 / Z_1^2 \approx 3.46 \times 10^6 \end{aligned} \right\} (2)$$

である。双一次伝達関数を満足するカスケードモジュールを用いるために式(1)を書き換えると

$$\begin{aligned} T(S) &= (V1/Vin)(V2/V1)(V3/V2)(Vout/V3) \\ &\equiv T_1(S) T_2(S) T_3(S) T_4(S) \\ &= \frac{1}{S+P_1} \frac{S+Z_1}{S+P_2} \frac{S+Z_1}{S+P_2} \frac{1}{S+P_2} \end{aligned} \quad (3)$$

となり、 $T_1(S), T_2(S), T_3(S), T_4(S)$ それぞれの回路を実現するために反転OPアンプ回路を選ぶと $T_1(S), T_2(S)$ は双一次の伝達関数であるが、 $T_3(S), T_4(S)$ は一次の低域通過関数であるので $T(S)$ の回路構成は、図3のようになる。また式(1)の伝達関数を計算機でシミュレートした結果は図4に示している。

一般に折れ線近似による実現は、設計は比較的容易であるが、遮断特性が急峻な場合特性関数が高次になるので実現する回路構成も複雑になる。今回は、 4×10^4 [rad/s] (約6500 [Hz]) 付近での零点は無視して 2×10^4 [rad/s] (約3500 [Hz]) 付近で最大 10dB 程度の共振特性を持つ低域通過フィルタとみなして設計している。

今回の結果の他にも多くの伝達関数を検討してみた結果、折れ線近似によるシミュレーションでは設計しやすいが、実現回路が複雑になりやすく、また、図4からもわかるように外耳道の音圧特性と比較すると、Q特性が満足できないことがわかった。そこで、次に、バイカッド型LPF回路により、Q特性を改善したシミュレーションについて検討する。

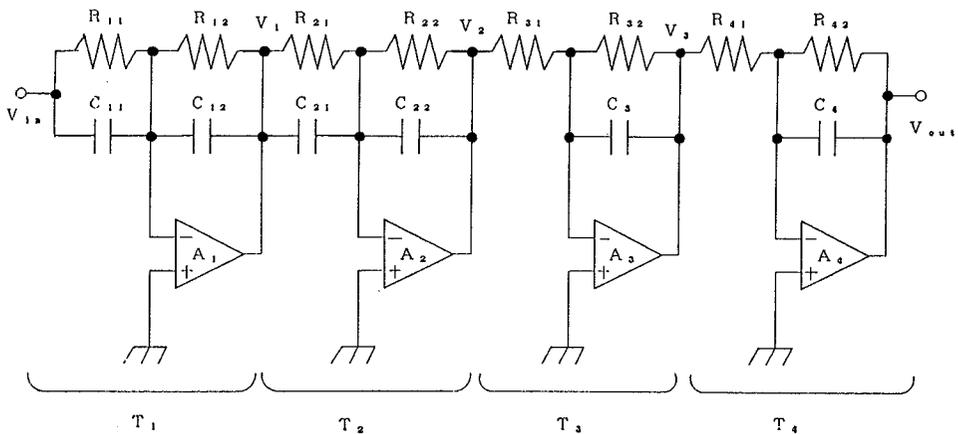


Fig. 3 折れ線近似による実現回路

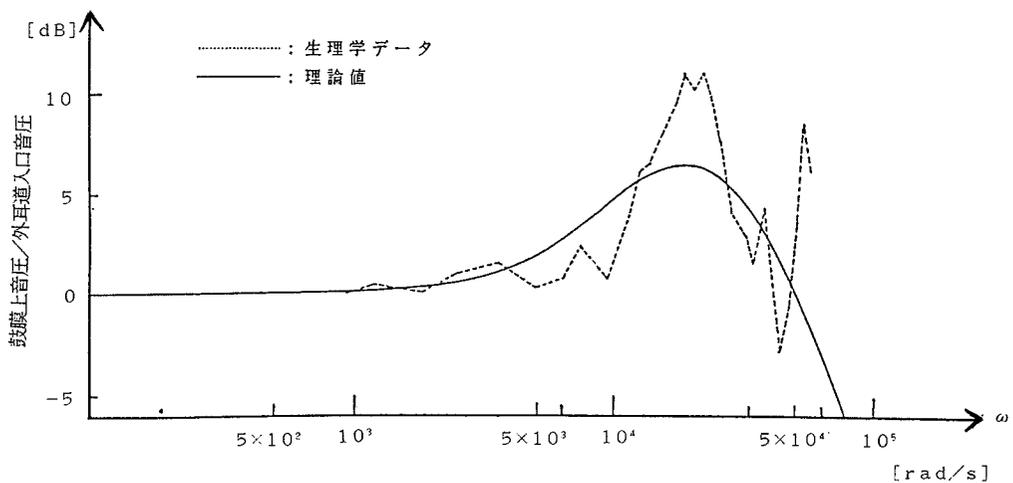


Fig. 4 折れ線近似によるシミュレーション結果

4. バイカッド型低域通過フィルタ回路による実現

例えば、 $C_1=C_2=1, R_4=1$ また周波数を $\omega_0=1$ とすれば、式(5)から

4. 1 バイカッド型低域通過フィルタ回路

$$R_1=1/H, R_2=Q, R_3=1 \tag{6}$$

図5は、バイカッドLPF回路を示している。ここで、伝達関数 $T(S) (= V_{out}/V_{in})$ は

$$T(S) = \frac{-1/R_1 R_4 C_1 C_2}{S^2 + (1/R_2 C_1)S + 1/R_3 R_4 C_1 C_2} \tag{4}$$

$$= \frac{\omega_0^2}{S^2 + (\omega_0/Q)S + \omega_0^2}$$

となり、バイカッド回路の重要な特徴である直交調整法ができる。

- 1) R_3 によって与えられた周波数 ω_0 に調整できる。
- 2) R_2 によって、すでに調整された ω_0 を変化させずに、与えられた Q の調整ができる。
- 3) すでに調整されている ω_0 や Q に影響を与えないで、 R_1 によって回路の利得 H を調整できる。

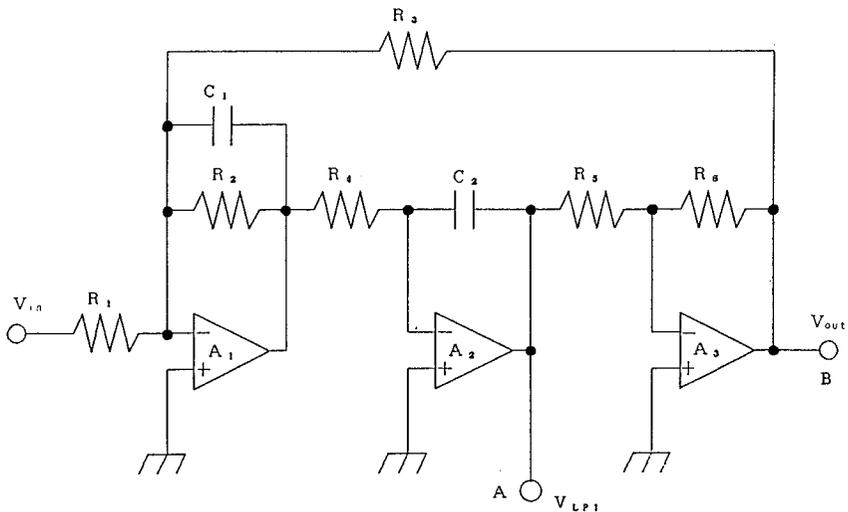
となり、ここで

このように与えられた特性から ω_0, Q, H が得られれば、簡単にバイカッド形LPF回路による実現ができる。

$$\omega_0^2 = 1/R_3 R_4 C_1 C_2$$

$$Q = \sqrt{\frac{R_2^2 C_1}{R_3 R_4 C_2}} \tag{5}$$

$$H = R_3/R_1$$



$R_1=R_3=R_4=5$ [K Ω] $R_2=15$ [K Ω]
 $R_5=R_6=1$ [K Ω] $C_1=C_2=10$ [nF]
 A_1, A_2, A_3 : LF356 (電源電圧15 [V])

Fig. 5 バイカッド型LPF回路による実現回路

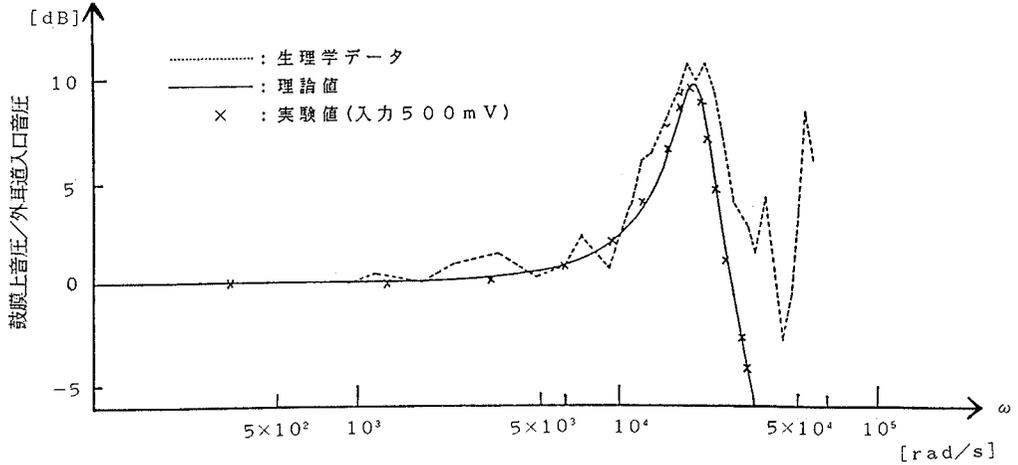


Fig. 6 バイカッド型LPF回路によるシミュレーション結果

4. 2 能動素子を用いた実現

ここでは、図2と比較して、式(4)において $\omega_0 = 2 \times 10^4$, $Q=3, H=1$ とした。このときの伝達関数 $T(S)$ は

$$T(S) = - \frac{(2 \times 10^4)^2}{S^2 + [(2 \times 10^4)/3]S + (2 \times 10^4)^2} \quad (7)$$

となり、この伝達関数を計算機でシミュレートした結果が図6である。式(4)と式(7)により図5の回路の各素子値を決定すると、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 50 [K\Omega], R_2 = 150 [K\Omega] \\ C_1 = C_2 = 1000 [pF] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

図6で示されるように、バイカッド型LPF回路では折れ線近似による実現と比較すると、Q特性の改善がみられ実現回路の素子数も減少した。次に、 4×10^4 [rad/s] (約6500 [Hz]) 付近での零点と可聴周波数である 20 [KHz] 付近までを考慮するために、双二次の伝達関数とそれを満足するバイカッド回路による実現方法を検討する。

5. 双二次伝達関数とバイカッド回路による実現

一般に位相反転型の双二次伝達関数は次式で表される。

$$\frac{V_2}{V_1} = - \frac{1S^2 + mS + n}{S^2 + aS + b} \quad (9)$$

式(9)において、

- $l=m=0$ のとき、低域通過関数
- $l=n=0$ のとき、帯域通過関数
- $m=n=0$ のとき、高域通過関数
- $m=0$ のとき、伝送零点をもつ関数

である。

式(9)と生理学データの音圧特性より、各係数を以下のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} l=1, m=\omega_0=2 \times 10^4, n=b=\omega_0^2=4 \times 10^8 \\ a=\omega_0/Q=2 \times 10^4/3.2 \approx 6.25 \times 10^3 \end{aligned} \right\} (10)$$

上記の場合、 $1-a-m < 0$ となるので、回路構成は、
図7の点線のようになる。

各素子値は、図7において、

$$\left. \begin{aligned} R_1=16 [K\Omega], R_2=R_9=R_{10}=1 [K\Omega], R_3=500 [\Omega] \\ R_4=R_8=10 [K\Omega], R_5=5 [K\Omega], R_6=100 [\Omega] \\ R_7=145 [\Omega], C_1=C_2=10 [nF] \end{aligned} \right\} (11)$$

である。シミュレーション結果は図8に示されている。

双二次伝達関数とバイカッド回路による実現方法は、
今までの実現方法と比較すると、Q特性を満足でき、また
可聴周波数である20KHz付近までも考慮に入れた周波数
特性が得られることがわかった。

しかし、生理学データの音圧特性と比較してみると、
 2×10^4 [rad/s] と 5×10^4 [rad/s] 付近の二箇所で共振特
性を示していることがわかる。次に、 2×10^4 [rad/s] 付

近の共振特性をLPFで実現し、 5×10^4 [rad/s] を
HPFで実現して、それを加算した回路によって実現す
る構成について検討する。

6. 低域通過フィルタ回路と高域通過フィルタ回路の
加算による実現

6. 1 低域通過フィルタ回路と高域通過フィルタ回
路

図2で示される生理学データの音圧特性を実現するた
めに、図9(a)のようなLPF特性と、同図(b)のHPF
の特性を加算すれば、同図(c)のような特性が得られるこ
とが推測される。そこで、LPF回路とHPF回路を
図10の回路による実現を考える。なお、LPF回路と
HPF回路はバイカッド回路で実現し、それぞれ図11、
図12のようになり、それぞれの伝達関数 $T_1(S)$ 、
 $T_2(S)$ は以下のものである。

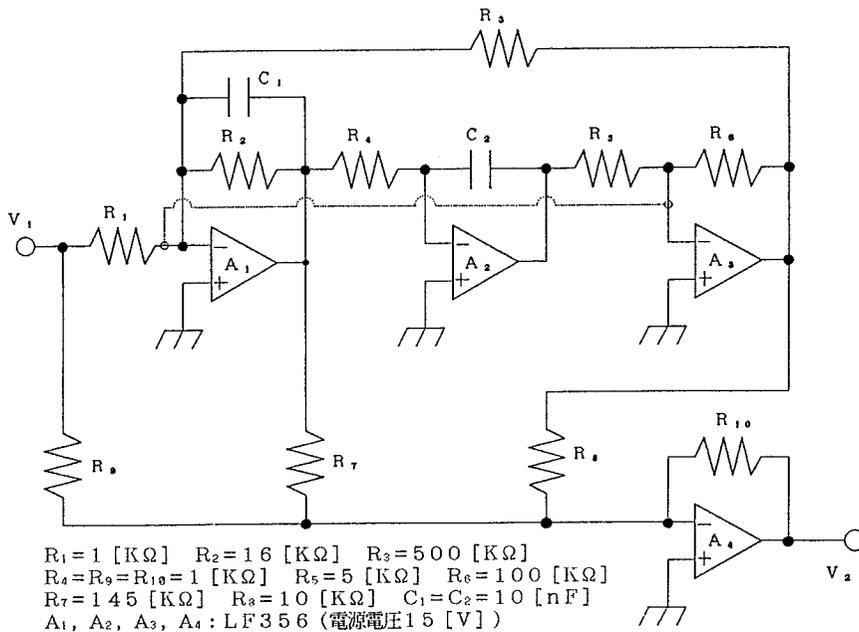


Fig. 7 双二次伝達関数とバイカッド回路による実現回路

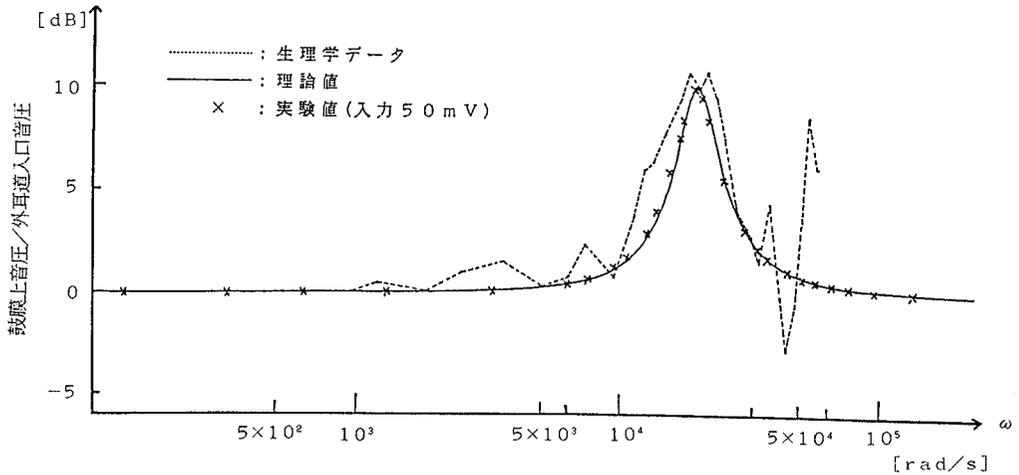


Fig. 8 双二次伝達関数によるシミュレーション結果

$$T_1(S) = \frac{V_1}{V_i} = \frac{-H\omega_1^2}{S^2 + (\omega_1/Q_1)S + \omega_1^2}$$

$$= \frac{-C}{S^2 + aS + b} \tag{12}$$

$$T_h(S) = \frac{V_h}{V_i} = \frac{-HS^2}{S^2 + (\omega_h/Q_h)S + \omega_h^2}$$

$$= \frac{-fS^2}{S^2 + dS + e} \tag{13}$$

また、図11, 図12と式(12), (13)より、各係数 a, b, c, d, e, fは

$$a = 1/R_1 C_1, \quad b = \frac{R_6/R_5}{R_2 R_3 C_1 C_2}, \quad c = \frac{R_5/R_5}{R_2 R_4 C_1 C_2}$$

$$d = 1/r_1 C_1, \quad e = \frac{r_6/r_5}{r_2 r_3 C_1 C_2}, \quad f = -r_{10}/r_9 \tag{14}$$

である。

6. 2 低域通過フィルタ回路と高域通過フィルタ回路による実現

式(12), (13)の両式と生理学データの音圧特性から

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= 2 \times 10^4, \quad Q_1 = 3 \\ \omega_h &= 5 \times 10^4, \quad Q_h = 2, \quad H = 1 \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

とおくことができ、各素子値を

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= 15 \text{ [K}\Omega\text{]}, \quad R_2 = R_3 = R_4 = 5 \text{ [K}\Omega\text{]}, \quad R_5 = R_6 = 1 \text{ [K}\Omega\text{]} \\ C_1 = C_2 &= 10 \text{ [nF]}, \quad r_1 = r_4 = 4 \text{ [K}\Omega\text{]}, \quad r_2 = r_3 = 2 \text{ [K}\Omega\text{]} \\ r_5 = r_6 = r_7 = r_8 = r_9 = r_{10} &= 1 \text{ [K}\Omega\text{]}, \quad c_1 = c_2 = 10 \text{ [nF]} \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

と決定する。図10の実現回路の周波数特性は図13に示されている。

図13で示されているように、このLPF回路とHPF回路の加算による実現方法は、今までの実現方法と比較すると、Q特性も満足でき、可聴周波数を考慮にいた、外耳道の音圧特性に近い周波数特性が得られた。

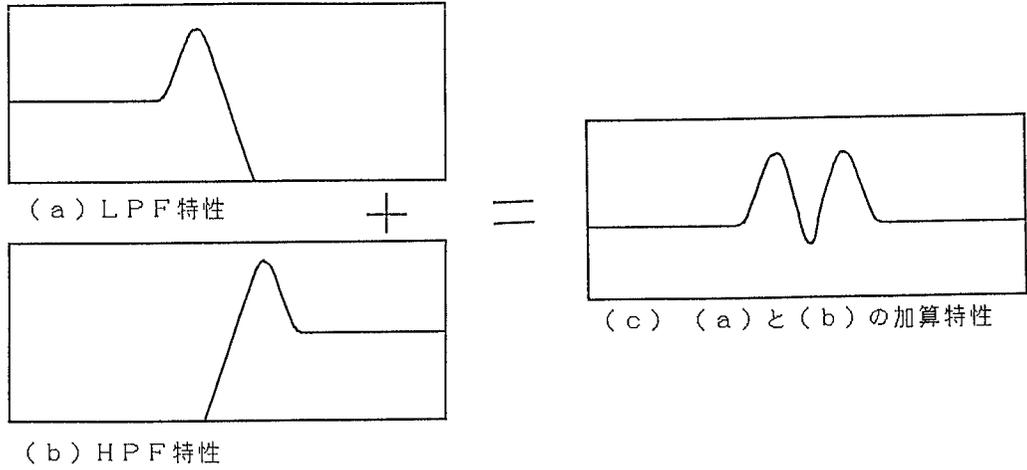


Fig. 9 LPFとHPFの加算

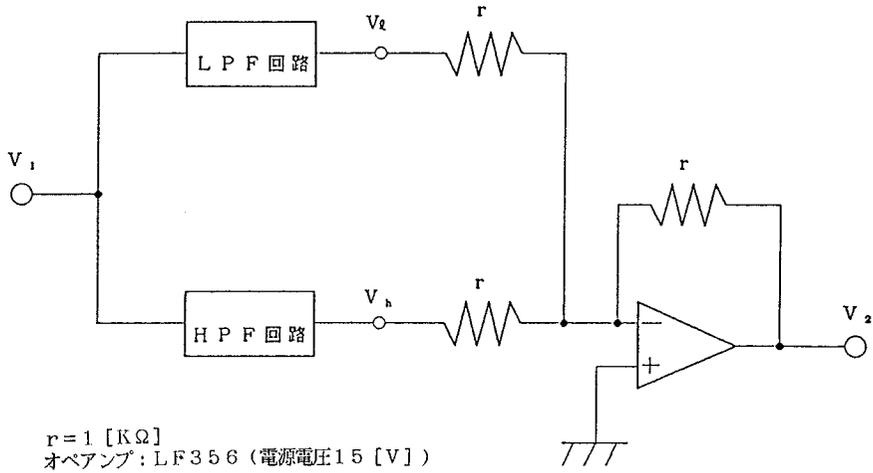


Fig. 10 LPF回路とHPF回路による回路構成

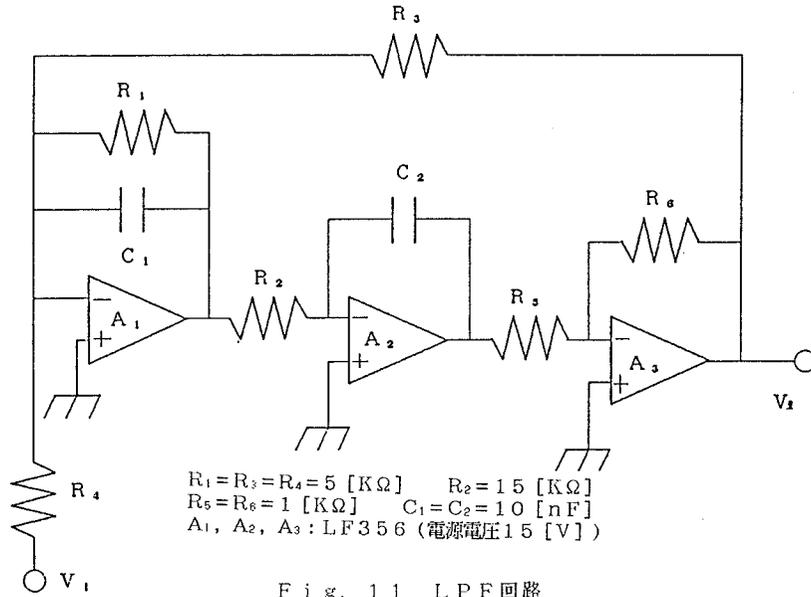


Fig. 11 LPF回路

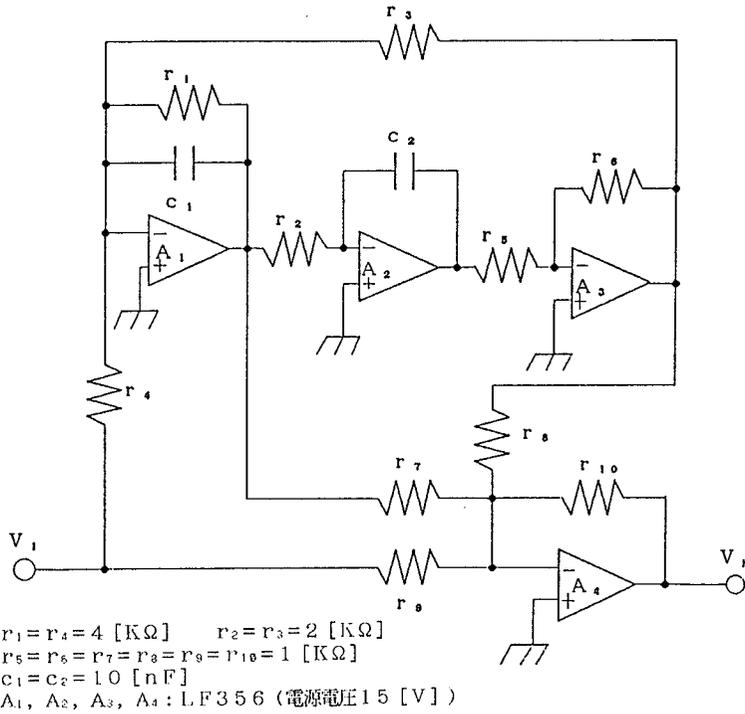


Fig. 12 HPF回路

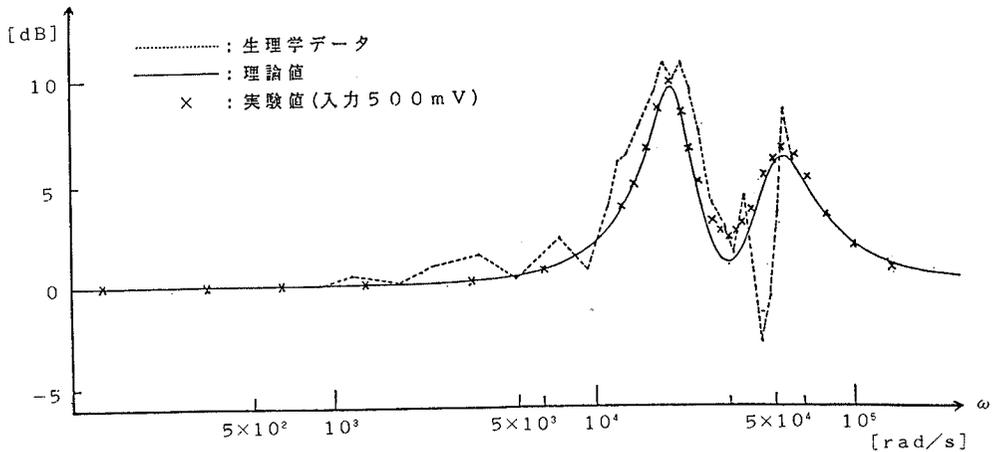


Fig. 13 LPF回路とHPF回路の加算によるシミュレーション結果

7. むすび

以上、聴覚器官の一つである外耳道のアナログシミュレーションについて述べた。本論文で考察、検討した事項についてまとめると以下のようになる。

- 1) 折れ線近似による実現方法は、設計は容易であるが特性関数の次数が高い場合は、実現回路の素子数も多くなる傾向がある。
- 2) バイカッド型LPF回路による実現方法は、折れ線近似による実現方法と比較すれば、回路の素子数は少なく、Q特性も改善され第1次共振周波数付近までは満足される。
- 3) 双二次の伝達関数を実現するバイカッド形回路の実現方法では、第1次の共振特性は満足される。バイカッド型LPF回路による方法との相違は、第1次共振周波数以降の領域まで考慮している点である。

- 4) 外耳道の音圧特性は、生理学データより二箇所共振特性がみられる。本特性を実現するためのLPFとHPFの合成による実現方法は、Q特性並びに、第1次、第2次の共振特性を満足している。

今後は、生理学データ上から得られる特性関数をもとに等価電気回路を導出するとともに、より新しい等価回路について検討する。さらに、中耳、内耳等の聴覚器官のアナログシミュレーションについても考察していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 切替, 野村 共著: “新耳鼻咽喉科学”, 南山堂 (1989).
- 2) 三浦 種敏他: “聴覚と音声”, コロナ社 (電子通信学会編) (1987)..
- 3) 境, 中山: “聴覚と音響心理”, コロナ社 (日本音響学会編) (1988).

- 4) 城戸他：“基礎音響工学”，コロナ社（日本音響学会編）（1990）。
- 5) J.J.Zwislocki: “Some impedance measurements on normal and pathological ears”, J. Acoust.Soc. Am., Vol.29, No.12, pp.1312-1317(1957).
- 6) J.L.Flanagan: “Models for approximating basilar membrane displacement”, BSTJ, 39, No.5, pp.1163-1191 (1960).
- 7) A.R.Moller: “Network model of the middle ear” J. Acoust. Soc. Am., Vol.33, No.2, pp.168-176 (1961).
- 8) J.L.Flanagan: “Part.2: Models for approximating basilar membrane displacement”, BSTJ, 41, No.3, pp.959-1009 (1962).
- 9) J.J.Zwislocki: “Analysis of the middle-ear function .Part.1: Input impedance”, J. Acoust. Soc. Am., Vol.34, No.8, pp.1514-1523(1962).
- 10) J.J.Zwislocki : “Analysis of some auditory characteristics”, Handbook of Mathematical Psychology, Vol.3, Chap.15, John Wiley & Son (1965).
- 11) 境：“基底膜の回路モデルとその応答”，音響学会講演論文集，pp.39-40(1965)。
- 12) 鈴木，中津井：“聴覚のアナログシミュレーション”，電波研究所季報，Vol.12, No.62, pp.313-324(1966)。
- 13) 河原田，亀井，中西：“基底膜のデジタル回路モデル”，電子通信学会論文誌（D），Vol.J61-D, No.4, pp.237-244(1978)。
- 14) 石田，江村，岡川，副井，戎谷：“聴覚外耳道の等価電気回路について”，電気関係学会中国支部連合大会講演集，p.253（平成元年）。
- 15) 石田，江村，吉田，副井，戎谷：“聴覚外耳道のアナログシミュレーション”，電気関係学会中国支部連合大会講演集，p.254（平成元年）。
- 16) 石田，江村，副井，戎谷：“分布定数回路モデルを用いた内耳基底膜のシミュレーション”，電気関係学会中国支部連合大会講演集，p.255（平成元年）。
- 17) 江村，石田，副井，戎谷：“内耳基底膜に基づく音声信号処理に関する一考察”，電子情報通信学会技術研究報告，CAS89-142, PP.17-24(1990)。
- 18) 石田，江谷，吉田，副井，戎谷：“能動フィルタを用いた聴覚外耳道のシミュレーション”，電気関係学会中国支部連合大会講演集，p.273（平成2年）。
- 19) 石田，岡野，江村，副井，戎谷：“鼓膜のインピーダンスを考慮した聴覚外耳道のシミュレーション”，電気関係学会中国支部連合大会講演集，p.275（平成2年）。
- 20) 石田，江村，副井，戎谷：“内耳基底膜の機能にもとづく信号処理の一手法”，電気関係学会中国支部連合大会講演集，p.276（平成2年）。
- 21) 末武国弘：“基礎電気回路1”，培風館
- 22) M.E.Van Valkenburg：“アナログフィルタの設計”，産業報知センター。