CAS89－142

内耳基底膜にもとづく音声信号処理に関する一考察

A Study on the Speech Signal Processing Based on the Basilar Membrane

江村 美彦　　石田 雅　　副井 裕　　戎谷 圭介

Yoshihiko EMURA　Masaru ISHIDA　Yutaka FUKUI　Keisuke EBISUTANI

鳥 取 大 学　　工 学 部

Faculty of Engineering ,Tottori University

1. まえがき

人間の聴覚系は、情報処理の形態から二つに大別することができる。一つは、内耳に代表される機械的な情報処理が行なわれる部分であり、もう一つは、内耳から大脳へと続く神経回路網で、電気的な処理が行なわれる部分である。

前者は、内耳の蝸牛内に満たされたリンパ液中に生ずる流体進行音波と基底膜の相互作用により、ブロード(Broad)な周波数弁別を行なうものであることが、人間の蝸牛の直接観測から明らかになった[1]。

その後の研究から、通常レベルの音圧に対する蝸牛内の周波数弁別作用はかなり精密なものであることが分かってきた[2]。

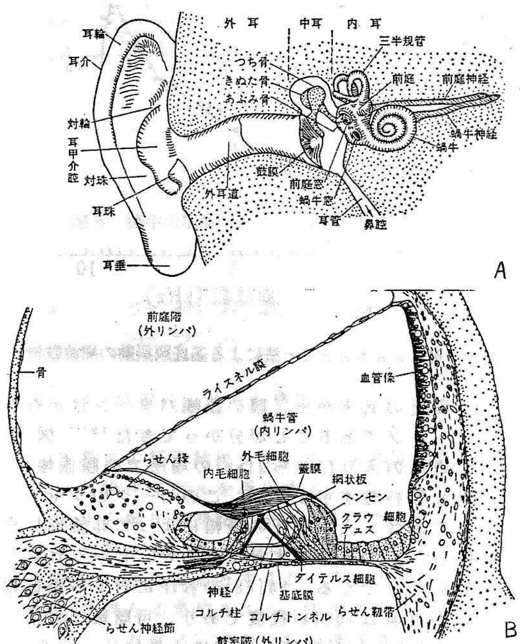
本論文では、蝸牛の簡略化モデルについて流体の波動方程式を求め、蝸牛内において共鳴が生ずることを示している。

次に、蝸牛の簡略化モデルをもとに、分布定数回路モデルを仮定し、解析を行なう。

最後に、本モデルをディジタル化し、計算機でシミュレーションを行なうことから、実際の基底膜における信号処理形態を推察し、本モデルの音声信号処理への適用の可能性を考察する。

2. 内耳及び蝸牛の概要[3-4]

人間の聴覚器官の概要を、図１(a),(b)に示す。蝸牛は、基底膜を含む仕切りによって二分されており、その内部は外リンパ液によって満たされている。又、蝸牛内部は２重構造になって、内リンパ液によって満たされる蝸牛管がある。蝸牛管は基底膜を底とし、ライスネル膜と呼ばれる薄膜で上側の外リンパ液腔と接している。



A：聴覚器官
B：蝸牛の断面
図1 聴覚系の概要

る。この上側の腔を前庭階、下側の腔を鼓室階と呼び、前者は前庭窓により、後者は鼓室窓により薄膜をもって中耳と連なっている。この両階は蝸牛先端で小孔、すなわち蝸牛孔で連絡する。

基底膜は、蝸牛入り口付近での膜幅が、0.04[mm]、最奥部で 0.5[mm]、全長が35[mm]の薄膜で、前庭窓で駆動された音波は、流体進行音波となりこの膜に沿って伝搬する。音波の周波数に対して特定の部位が定まり、進行音波はあ

る部分まで達すると、膜を進行方向と垂直に振動させる。

膜振動の振幅パターンを周波数を変えて測定したのが図2である。このような振幅パターンの変化にもとづき、周波数の弁別が行なわれる。

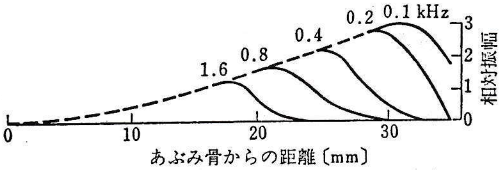


図2 基底膜の振幅パターン

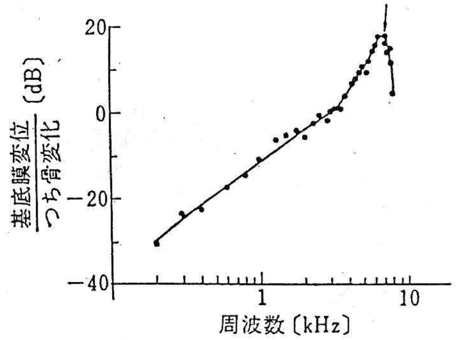


図3 Mössbauer法による基底膜振動の周波数特性

最近の研究から、膜の振幅パターンはかなりシャープであることが分かってきた[2]。図3に蝸牛の入り口から2[mm]の場所での膜振幅の周波数特性を示す。又、このピークのシャープさは、入力音圧の振幅によって非線形に変化し、入力音圧が大きくなると、ピークは緩やかになってくる。80[dB]の音圧に対する膜振幅の絶対値は100[Å]程度であり、可聴最小音圧では0.01~0.1[Å]程度と非常に小さい。

基底膜の特徴の主な点をまとめると、以下のようになる。

2-1)あぶみ骨底によって駆動された音波は、蝸牛内では流体進行音波となり、基底膜に沿って伝搬する。

2-2)蝸牛管内の流体進行音波は、ある特定の場所まで達すると振幅が極大値を示しそれ以降は急激に減衰していく。

2-3)蝸牛管内の流体進行音波は進行波のみ存在し、反射波は生じない。

2-4)基底膜の可聴音圧における振動振幅は非常に微少レベルである。

3. 蝸牛の簡略化モデルの解析

前述の膜振幅が非常に微少レベルであること、又、膜振幅が入力振幅に対して非線形性を有すること、あるいは、生体であるため物理的パラメータの導出が困難であるという点で、基底膜の厳密なモデルを仮定するのは困難である。そこで、簡略化した蝸牛モデルについて解析を行ない、波動方程式、並びに伝搬定数を求める。

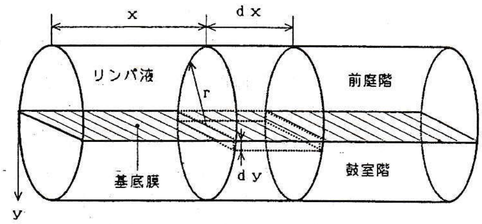


図4 蝸牛の簡略化モデル

簡略化を行なったモデルを図4に示す。実際の蝸牛は、螺旋状であるがこれを直線的に延ばし、半径 r の円柱として扱う。また、リンパ液と壁面との摩擦はないものとする。

実際の蝸牛内を伝搬する波動は、基底膜の垂直振動、すなわち、横波として伝搬される。しかし、前述のように可聴音圧印加時の膜振幅はおよそ0.01~100[Å]程度であり、非常に微少レベルであることから、膜振動による弾性の変化を密度変化の項に含め、縦波として扱う。蝸牛の入り口から距離 x 離れた場所にある、微少体積 $\pi r^2 dx/2$ について、弾性方程式、運動方程式、連続方程式を求め、波動方程式を導出する。各々の式は以下のようになる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\pi \cdot r \cdot Z_m}{4\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \qquad (1)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} \qquad (2)$$

$$-\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial x} \qquad (3)$$

但し、ρ_0 はリンパ液の密度、u はリンパ液の x 方向の粒子速度、Z_m は膜振動に対して生ずる機械インピーダンスである。以上の式から、波動方程式を求めると、次式のようになる。

$$\frac{4\rho_0}{\pi \cdot r \cdot Z_m} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \qquad (4)$$

式(4)より、伝搬定数 γ を求めると、以下のようになる。

$$\gamma = \sqrt{(j\omega)^2 \frac{4\rho_0}{\pi \cdot r \cdot Z_m}} \qquad (5)$$

ここで、膜の変位に対する粘性抵抗を R 、膜自身の質量とリンパ液の実効質量を M、膜のスティフネスを Q とすると、Z_mは次式で表わされる。

$$Z_m = Q + j\omega R + (j\omega)^2 M \qquad (6)$$

式(5)、(6)から、減衰定数 α、位相定数 β は次式のようになる。

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{2\rho_0}{\pi \cdot r}} \sqrt{-a + \sqrt{a^2+b^2}} \qquad (7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{2\rho_0}{\pi \cdot r}} \sqrt{a + \sqrt{a^2+b^2}} \qquad (8)$$

但し、a 、b は次式で表わされる。

$$a = \frac{(Q-\omega^2 M)}{(Q-\omega^2 M)^2 + \omega^2 R^2} \qquad (9)$$

$$b = \frac{\omega R}{(Q-\omega^2 M)^2 + \omega^2 R^2} \qquad (10)$$

式(7)において、パラメータを適当に選んだときの α の周波数特性を図5に示す。同図から、α は特定の周波数でピークを持つローレンツ型特性であることが分かる。このような特性は、光学などでは、誘電体がある特定の波長の光波に対して吸収を示す、共鳴吸収の現象として知られている。また、機械インピーダンス Z_m は、蝸牛内の場所によって指数関数的に変化するので、共鳴周波数は場所によって変化することになる。

以上から、蝸牛内のリンパ液中に生ずる流体進行波は、その周波数に依存して定まる、ある特定の部分において、共鳴吸収が生じることが分かる。

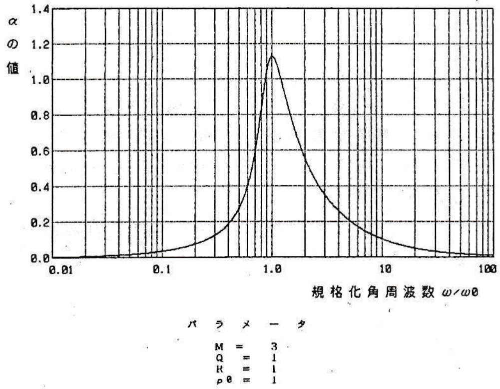


図5　蝸牛の簡略化モデルのαの周波数特性

4. 分布定数回路モデル

4. 1 単位ユニットの導出

３章での解析結果をもとに、分布定数回路を用いた蝸牛モデルを導出する。

図４の蝸牛の簡略化モデルを、Ｎ個のユニットに分割する。各々のユニット内部では、伝搬定数は一定であるとすると、本モデルはＮ個の特性の異なる単位ユニットのカスケード接続であるとみなせる。また、2-3)を考慮に入れ、単位ユニット間では反射は生じないものとする。

以上から、本モデルの単位ユニットの特性を考察すると、以下のようになる。

4-1)単位ユニットは固有周波数において共鳴吸収を生ずる。

4-2)モデルには反射波は存在しない。すなわちユニット間のインピーダンスは整合している。

4-3)上記条件よりユニットは反射無しにエネルギーを吸収する必要がある。すなわちユニットは抵抗を含む。

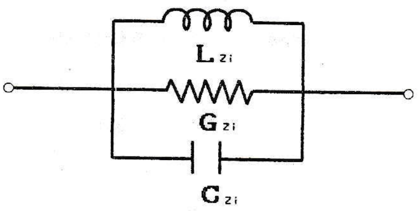
但し、条件 4-2)は2-3)にもとづく条件である。

以上の条件にもとづき、同様の特性を有する単位ユニットを、分布定数回路を用いて実現することを考える。分布定数回路モデルのi番目に接続される単位ユニットの直列インピーダンスおよび、並列アドミタンスを 各々 Z_i、Y_i で表わすと、条件4-3)から任意の i に対し以下の条件が導出される。

$$Z_i/Y_i = \mathrm{const} \qquad (11)$$

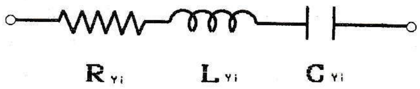
条件4-1)~4-3)と、式(11)を満足する単位ユニットの構成要素として、図6、7 のような直列インピーダンス Zi と並列アドミタンス Yi を選ぶ。
但し、式(11)の条件から各素子は以下の条件を満足しなければならない。

$$\frac{L_{Yi}}{C_{Zi}} = \frac{L_{Zi}}{C_{Yi}} = \frac{G_{Zi}}{R_{Yi}} \qquad (12)$$



(i=1, 2, 3, ・・・N)

図6　直列インピーダンス Zi



(i=1, 2, 3, ・・・N)

図7　並列アドミタンス Yi

4．2　基底膜振動と分布定数回路モデルの対応

前節で導出した単位ユニットを用いた分布定数回路モデルと、実際の基底膜の膜振幅との対応を検討する。

蝸牛の簡略化モデルでは、進行波は縦波として伝搬すると考えているので、基底膜振動の変位に対応するのは密度 ρ である。x 方向の圧力の微少変化 δPと密度の微少変位 $\delta\rho$ との関係から、 δP と、微少変位 δy の関係は、次式で表わされる。

$$\delta y = \delta P/Z_m \qquad (13)$$

単位ユニットの入り口部分の圧力を P_1、出口部分の圧力を P_2 とすると、

$$\delta P = P_1 - P_2 \qquad (14)$$

のようになる。単位ユニットの共振の Q 値が大きく、また、膜振動が定常状態の場合は、機械インピーダンス Z_m は、抵抗成分が主となる。膜変位と圧力の間の位相を無視すると、式(13)、(14)から次式を得る。

$$y = \frac{(P_1 - P_2)}{\omega_0 R} \qquad (15)$$

但し、ω_0はユニットの共振周波数である。式(15)から、蝸牛の簡易化モデルの膜振動は、単位ユニットの入り口部分の圧力と、出口部分の圧力差に比例することは明らかである。

このことから、分布定数回路モデルにおいて、膜振動に対応するものは、単位ユニットの入出力電圧の差に比例定数を乗じたものであると考えられる。

以上から、分布定数回路モデルのブロック図は図8のようになる。

4．3　分布定数回路モデルの解析

分布定数回路モデルの i 番目の単位ユニットの伝達関数 $T_i(S)$は反射波が存在しないという条件から次式で与えられる。

$$T_i(S) = \exp\{-\gamma_i(S)L\} \qquad (16)$$

但し、 L は単位ユニット長であり、$S=j\omega$である。また、伝搬定数 $\gamma_i(S)$ は、以下の式で表わされる。

$$\gamma_i(S) = D\,\frac{S/L_{Yi}}{S^2 + S\cdot R_{Yi}/L_{Yi} + 1/(L_{Yi}C_{Yi})} \qquad (17)$$

$$= \alpha_i(S) + j\beta_i(S)$$

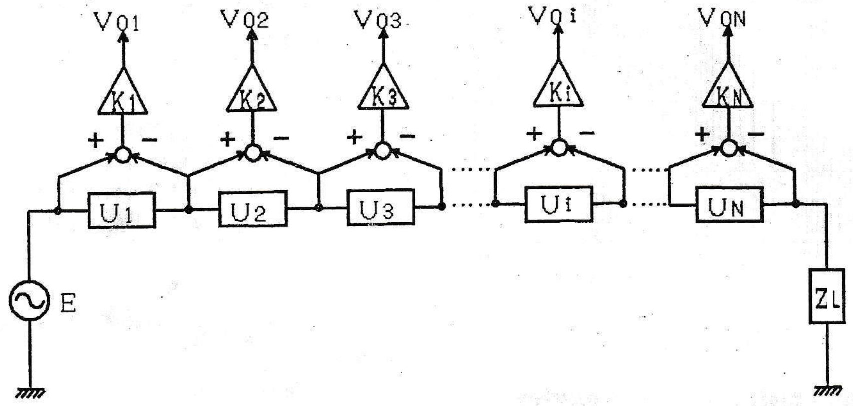


図８　分布定数回路モデルのブロック図

また、減衰定数および、位相定数は、$j\omega$を用いて以下の式で表わされる。

$$\alpha_i(j\omega)=D\,\frac{\omega^2 C_{Yi}{}^2 R_{Yi}}{(1-\omega^2 L_{Yi} C_{Yi})^2+\omega^2 C_{Yi}{}^2 R_{Yi}{}^2} \quad (18)$$

$$\beta_i(j\omega)=D\,\frac{j\omega C_{Yi}(1-\omega^2 L_{Yi} C_{Yi})}{(1-\omega^2 L_{Yi} C_{Yi})^2+\omega^2 C_{Yi}{}^2 R_{Yi}{}^2} \quad (19)$$

但し、$D=1/R_{Yi}$ である。新たなパラメータ ω_0、Q を導入すると、式(18)、(19)は以下のようになる。

$$\alpha_i(j\omega)= K\cdot\frac{(\omega\omega_{0i}/Q_i)^2}{(\omega_{0i}{}^2-\omega^2)^2+(\omega\omega_{0i}/Q_i)^2} \quad (20)$$

$$\beta_i(j\omega)= K\cdot\frac{\omega\omega_{0i}(\omega_{0i}{}^2-\omega^2)/Q_i}{(\omega_{0i}{}^2-\omega^2)^2+(\omega\omega_{0i}/Q_i)^2} \quad (21)$$

但し、Q、ω_0は以下の式で表わされる。

$$Q=\omega_0 L_{Yi}/R_{Yi} \quad (22)$$

$$\omega_0=1/(L_{Yi}\cdot C_{Yi})^{1/2} \quad (23)$$

また、モデルの入力電圧に対する、i 番目の単位ユニット出力電圧の伝達関数$T_{ai}(S)$ $\{=V_{oi}/E\}$を求めると、次式のようになる。

$$T_{ai}(S)=\frac{\exp\{(-\gamma_1\cdots-\gamma_{i-1})L\}\times\{1-\exp(-\gamma_i L)\}}{\omega_{0i}R_{Yi}} \quad (24)$$

α_iの周波数特性を図９に示す。また、式(24)にもとづき、単位ユニット数 N を140[個]に選んだとき、モデルの70番目のユニットにおける出力の周波数特性を図１０に示す。

ピーク周波数付近までは緩やかに振幅が増加し、ピークを過ぎると急激に減少するようすは、Rhode 等が Mössbauer 法を用いて、実際の基底膜を測定した図３の特性とよく似ている。

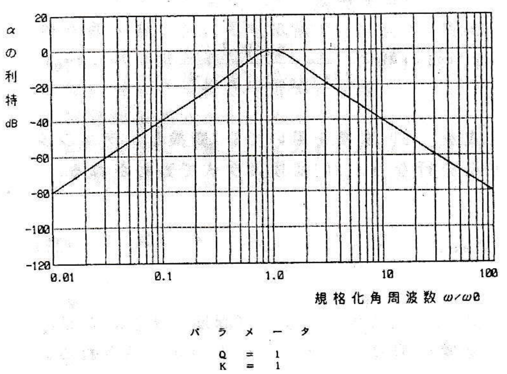
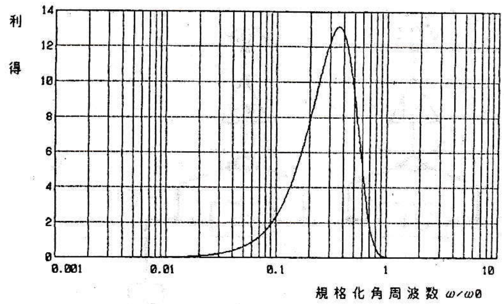


図９　分布定数回路モデルの単位ユニットのα_iの周波数特性



パラメータ
K = 1
Q = 1
L = 1

図１０ 分布定数回路モデルの$T_{ai}(S)$の周波数特性

5． 分布定数回路モデルのディジタル化とその応答

5．1 分布定数回路モデルのディジタル化

ここでは、実時間処理を行なうため、分布定数回路モデルのディジタル化について検討する。

分布定数回路モデル単位ユニットの伝達関数{式(16)}において、$\gamma_i(S)\cdot L \ll 1$ となるようにパラメータを設定し、マクローリン展開したものを２項で近似すると次式を得る。

$$T_i(S) \fallingdotseq 1-\gamma_i(S) \tag{25}$$

式(17)と式(22)、(23)を用いると、式(25)は次式のように書き換えられる。

$$T_i(S)=1-D\frac{(\omega_0/Q)S}{S^2+(\omega_0/Q)S+\omega_0^2} \tag{26}$$

上式を、BDI変換を用いてS-Z変換し、ディジタル化を行なう。BDI変換は次式で表わされる。

$$S_{BDI}=\frac{2}{T_s}\frac{1-Z^{-1}}{1+Z^{-1}} \tag{27}$$

但し、Tsはサンプリング周期、また、Z は Z 変換の演算子であり、以下の式で示される。

$$Z=e^{j\omega T_s} \tag{28}$$

式(26)の中の S を、S_{BDI} で置換すると以下のようになる。

$$T(Z)=1-D\frac{\left[\frac{2\omega_0}{T_sQ}\frac{1-Z^{-1}}{1+Z^{-1}}\right]}{\left[\frac{2}{T_s}\frac{1-Z^{-1}}{1+Z^{-1}}\right]^2+\left[\frac{2\omega_0}{T_sQ}\frac{1-Z^{-1}}{1+Z^{-1}}\right]+\omega_0^2} \tag{29}$$

式(29)を展開すると、IIR フィルタの伝達関数を得る。

以上の解析から得られた、単位ユニットのブロックダイアグラムを図１１に示す。また、フィルタ係数を以下に示す。

$$a_{i2}=\frac{\left[\frac{2}{T_s}\right]^2-(1-K)\frac{2\omega_{0i}}{Q_iT_s}+\omega_{0i}^2}{\left[\frac{2}{T_s}\right]^2+\frac{2\omega_{0i}}{Q_iT_s}+\omega_{0i}^2} \tag{30}$$

$$a_{i1}=\frac{2\omega_{0i}^2-2\cdot\left[\frac{2}{T_s}\right]^2}{\left[\frac{2}{T_s}\right]^2+\frac{2\omega_{0i}}{Q_iT_s}+\omega_{0i}^2} \tag{31}$$

$$a_{i0}=\frac{\left[\frac{2}{T_s}\right]^2+(1-K)\frac{2\omega_{0i}}{Q_iT_s}+\omega_{0i}^2}{\left[\frac{2}{T_s}\right]^2+\frac{2\omega_{0i}}{Q_iT_s}+\omega_{0i}^2} \tag{32}$$

$$b_{i2}=\frac{\left[\frac{2}{T_s}\right]^2-\frac{2\omega_{0i}}{Q_iT_s}+\omega_{0i}^2}{\left[\frac{2}{T_s}\right]^2+\frac{2\omega_{0i}}{Q_iT_s}+\omega_{0i}^2} \tag{33}$$

$$b_{i1}=a_{i1} \tag{34}$$

以上のモデルに対し、計算機を用いてシミュレーションをおこなった。各単位ユニットの共振周波数を0.1~1[KHz]に選び、200[Hz]の正弦波に対するモデルの応答を 、図１２に示す。V は各単位ユニットの出力電圧、t は時間、x は蝸牛入り口からの距離（X番目のユニットを表わす）を示す。また、Page n は解析開始からの表示画面数 nを示している。振幅パターンは、各ページにおける膜振幅の t 軸からの投射図である。また、入力波形は、各 Page n における、モデルへの入力波形を示している。
さらに、図１２のパラメータを用い、400 [Hz]の正弦波に対する応答を図１３に示す。

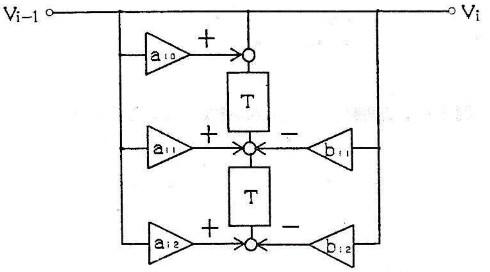
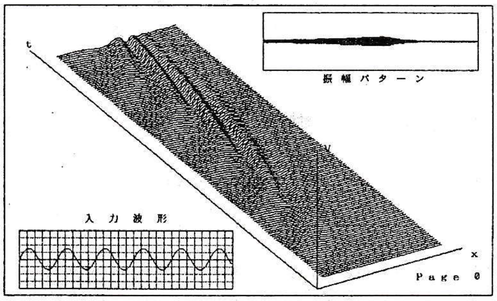


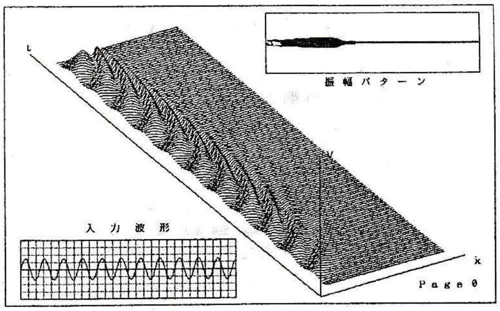
図１１　ディジタル化した分布定数回路モデル単位ユニットのブロック図



パラメータの設定値

ユニット数		１４０	[個]
ユニットの固有周波数	ω0	０．１～１	[ＫＨｚ]
ユニットの	Q	５	
ユニットの	K	１	
ユニットの	L	１	
サンプリング周波数	fs	５０	[ＫＨｚ]
入力信号	正弦波	２００[Ｈｚ]	振幅　０．５

図１２　基底膜のディジタル化モデルの正弦波応答



パラメータの設定値

ユニット数		１４０	[個]
ユニットの固有周波数	ω0	０．１～１	[ＫＨｚ]
ユニットの	Q	５	
ユニットの	K	１	
ユニットの	L	１	
サンプリング周波数	fs	５０	[ＫＨｚ]
入力信号	正弦波	４００[Ｈｚ]	振幅　０．５

図１３　基底膜のディジタル化モデルの正弦波応答

５．２　音声波形に対するディジタル化した分布定数回路モデルの応答

A/D 変換器を用いて人間の音声データを計算機に入力し、本モデルの応答を調べる。
各単位ユニットの共振周波数は、0.3~3[KHz]の周波数帯域 に設定した。また、サンプリング周波数は、ＢＤＩ変換のひずみを考慮し、ユニットの最大共振周波数(3[kHz])の4倍の12[KHz]に設定した。
また、エイリアジング防止のためのフィルタは、カットオフ周波数 3[KHz]の５次連立チェビシェフローパスフィルタを用いた。
本システムの構成を図.１４に示す。
男声’ア’および’イ’に対するモデルの応答を各々図１５、１６に示す。　両者の振幅パターンはかなり異なっている。同様にして他の母音に対しても応答を求めた結果、各々の母音に特有の振幅パターンを示すことが分かった。このことから、本モデルを音声処理の前処理として用いることは 有効 であると思われる。

６．むすび

蝸牛の簡易化モデルについて解析を行ない、蝸牛内において共鳴が生ずる可能性があることを示した。
この結果をもとに、分布定数回路モデルを仮定し、本モデルをディジタル化することによって、実時間処理が可能な蝸牛のモデルを導出し

た。また、実際の音声の応答を調べ、良好な結果を得た。

今後、神経回路網も含めた解析を行なう必要がある。

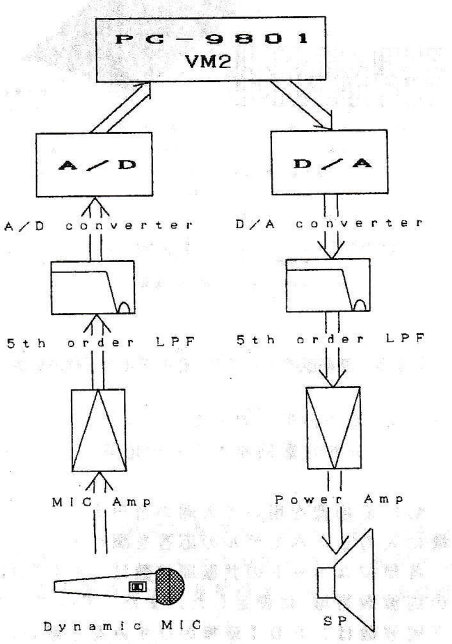
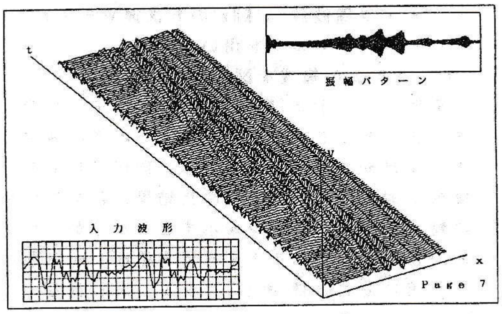


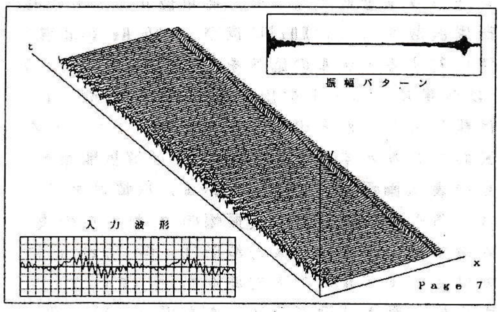
図14 システム構成



パラメータの設定値

ユニット数		140	[個]
ユニットの固有周波数	ω0	0.3〜3	[KHz]
ユニットの	Q	20	
ユニットの	K	1	
ユニットの	L	1	
サンプリング周波数	fs	12	[KHz]
入力信号	音声信号	男声	'ア'

図15 基底膜のディジタル化モデルの音声信号応答



パラメータの設定値

ユニット数		140	[個]
ユニットの固有周波数	ω0	0.3〜3	[KHz]
ユニットの	Q	20	
ユニットの	K	1	
ユニットの	L	1	
サンプリング周波数	fs	12	[KHz]
入力信号	音声信号	男声	'イ'

図16 基底膜のディジタル化モデルの音声信号応答

謝　辞

本研究をすすめるにあたり、協力いただいた本学学部生 吉田 隆君 並びに 岡川 謙二君 に感謝します。

また、本研究は、富士通テン㈱からの研究助成金によりなされたもので、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

(1) von.G.Békésy:"Experiments in Hearing", p.466, McGraw-Hill, New York, (1960).

(2) W.S.Rhode:"Observations of the vibration of the Basilar Membrane in squirrel monkeys using the Mossbauer technique", J.Acoust.Soc.Am., 49, 1218, (1971)

(3) 境、中山:"聴覚と音響心理", コロナ社, (1978).

(4) 勝木 他:"聴覚と音声", コロナ社, (1980).