

## 第5章 報知音の音圧レベル自動制御のための簡易回路

### 5-1 報知音をとりまく音環境

報知音の音圧レベルは、固定されたものではなく周囲の音環境に応じて実時間で能動的に制御されるべきであると考え、そこで、報知音の音圧レベルの制御方法を検討する。報知音の音圧レベルを制御する上で必要となる資料としては、生活環境音の周波数特性、および高齢者の聴力特性等が挙げられる。

生活環境音が200Hz～500Hzの周波数成分を多く含むことは第1章において既に述べた。また、テレビやラジオ等の音響信号がこのような周波数成分を持っていることについても既に第1章において述べた。

図5-1に、提案する制御回路の設計を行なう上で参考にしたFM全放送プログラムにおける音響成分の平均周波数スペクトルを示す。

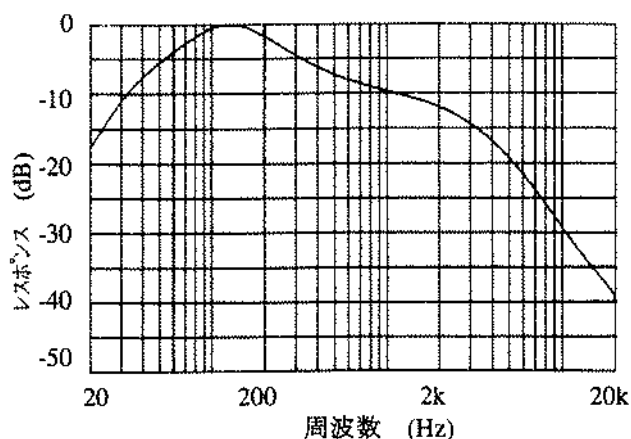


図5-1 生活環境音周波数スペクトルの一例(文献40より転写)

## 5-2 高齢者の聴力特性と報知音の音圧レベルとの関係

倉片らにより，高齢者の聴力特性を考慮したとき必要とされる報知音の音圧レベルが示されている<sup>48)</sup>．また，文献 22)を基に 1kHz 聴力レベルの加齢変化について作図した結果を図 5-2 に示す．文献 22)と文献 48)を基に，1kHz 聴力レベルと 1kHz 報知音に必要とされる音圧レベルとの関係を示したものが図 5-3 である．

図 5-2 から，聴力の低下は 40 歳程度から生じると考えられる．また，60 歳になると，25 歳のときに比べ約 9dB 聴力レベルが増加する（すなわち，約 9dB 聴力が低下する）．

音の大きさの変化は Stevens の関係で表すことができ，

$$S=2^{(P-40)/10}$$

となる<sup>20)</sup>．ここで， $P$  はラウドネスレベル[phon]， $S$  はラウドネス[sone]である．なお，1 sone は 1kHz，40 phon の音と定義している．

したがって，60 歳になると，25 歳のときと比較し，同じ音圧レベルの音でも約 1/2 の大

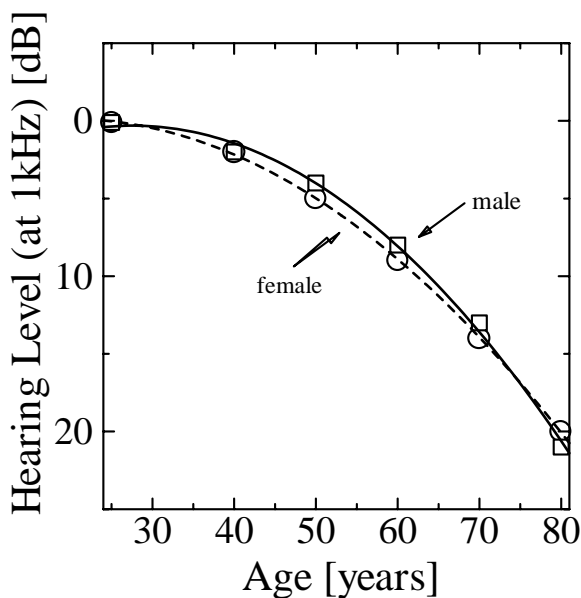


図 5-2 1kHz 聴力レベルの加齢変化

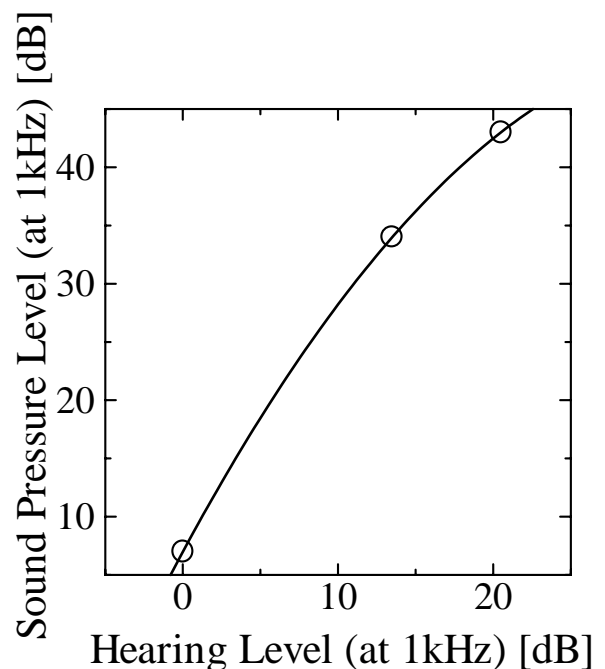


図 5-3 1kHz 聴力レベルと 1kHz 報知音の可聴音圧レベルとの関係

きさに聞こえることがわかる．そこで，制御回路における基準音圧レベルの可変ステップ数は 20 歳代用音圧レベル，60 歳代用音圧レベル，70 歳代用音圧レベル，80 歳代用音圧レベルの 4 ステップとなるように設計する．

ここで，図 5-2 および図 5-3 に基づき，生活環境音の音圧レベルが 0dB のときに必要となる報知音の音圧レベルを決定した．決定にあたっては，必要となる音圧レベルに対して約 5～10dB の余裕を設けた．決定した音圧レベルの値を具体的に示すと，20 歳代用基準音圧レベル：15dB，60 歳代用基準音圧レベル：30dB，70 歳代用基準音圧レベル：40dB，80 歳代用基準音圧レベル：50dB である．

提案回路は，この基準音圧レベルを基に，生活環境音の音圧レベルに応じて報知音の音圧レベル制御を行なうものである．提案回路の理想的な音圧レベル制御特性を図 5-4 に示す．制御特性は，老人性難聴のような感音性難聴の特徴の一つであるラウドネスの補充現象<sup>19, 23, 29, 45)</sup>も考慮し決定したものである．したがって，図 5-4 に示すとおり，各年代の可聴音圧レベル以上で報知音を出力するときは，その音圧レベル制御特性が 20 歳代の特性と同一となるようにした．これより，生活環境音の音圧レベルが 35dB 以上のときは，報知音の音圧レベルは年代に関係なく生活環境音の音圧レベルより 15dB の余裕を持って出力されることになる．

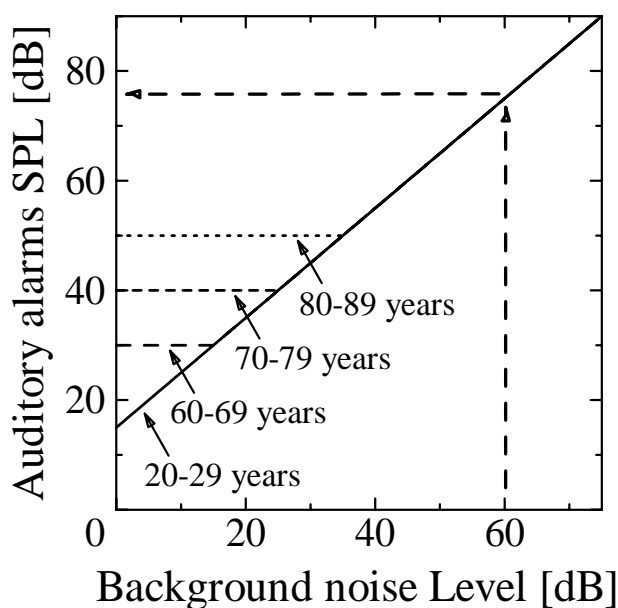


図 5-4 理想的な音圧レベル制御特性

なお，この 15dB の余裕があれば，第 3 章において述べた周波数掃引音等を用いることにより高齢者においても聞き取りやすい報知音を作成することは可能であると考えた．そのため，提案回路には高音域での音圧レベル補償機能は組み込まれていない．

### 5-3 音圧レベルの制御方法

#### 5-3-1 適応フィルタを用いたエコーキャンセラ<sup>53)</sup>による方法

報知音の使用周波数帯域は可聴周波数帯域である．また，生活環境音の周波数帯域も可聴周波数帯域である．したがって，マスキングにより報知音が聞き取れなくなることを回避するには，生活環境音の音圧レベルの増大にしたがって報知音の音圧レベルも大きくする必要があるのである．これを単純な帰還回路により実現しようとする正帰還となり発振する恐れがある．発振しないように報知音の音圧レベルを制御するためにはエコーキャンセラを使用する方法がある．図 5-5 にエコーキャンセラの構成図を示す．

エコーキャンセラの動作原理は以下のようなものである．

報知音信号  $x(k)$  をスピーカから発生させたとき，その報知音信号は室内において任意のインパルスレスポンス特性を持つ音響エコー経路  $h(k)$  を経て，マイクロフォンによってエコー  $y(k)$  として收音される．ここで， $y(k)$  は報知音信号  $x(k)$  と音響エコー経路  $h(k)$  との畳み込みで表現され， $y(k)=h(k)*x(k)$  と表される．

エコーキャンセラは，音響エコー経路のインパルスレスポンス特性を適応フィルタ  $\hat{h}(k)$

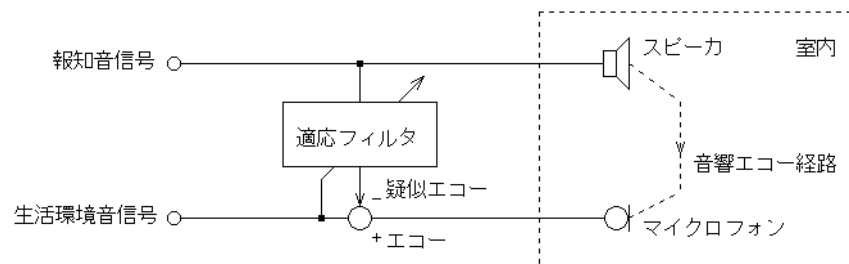


図 5-5 エコーキャンセラの構成

の特性によって模擬している．適応フィルタの特性  $\hat{\mathbf{h}}(k)$  は，個々の室内環境や人の移動等による音響エコー経路の特性変動に対応して実時間で変化する必要がある．したがって，適応フィルタ  $\hat{\mathbf{h}}(k)$  には，適応動作に安定性のある FIR フィルタが一般に使用される．適応フィルタのタップ数を  $L$  とし， $L$  個のフィルタ係数を  $\hat{h}_1(k), \hat{h}_2(k), \dots, \hat{h}_L(k)$  と表すと係数ベクトル  $\hat{\mathbf{h}}(k)$  は，

$$\hat{\mathbf{h}}(k) = [\hat{h}_1(k), \hat{h}_2(k), \dots, \hat{h}_L(k)]^T$$

と表される．ここで， $T$  は転置を示す．このときの報知音信号ベクトル  $\mathbf{x}(k)$  を，

$$\mathbf{x}(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-L+1)]^T$$

と定義する．疑似エコー  $\hat{y}(k)$  は

$$\hat{y}(k) = \hat{\mathbf{h}}^T(k)\mathbf{x}(k)$$

と計算される．なお，マイクロフォンで收音される信号  $y_{in}(k)$  には，エコー  $y(k)$  以外に生活環境音  $n(k)$  も混入する．したがって，

$$y_{in}(k) = y(k) + n(k)$$

となる．エコー  $y(k)$  から疑似エコー  $\hat{y}(k)$  を減算すると残差エコー  $e(k)$  は，

$$e(k) = y_{in}(k) - \hat{y}(k) = y(k) - \hat{y}(k) + n(k)$$

となる．適応フィルタの係数ベクトル  $\hat{\mathbf{h}}(k)$  の変更はこの残差エコーに基づいて行われる．

また，この残差エコーには，生活環境音  $n(k)$  も含まれている．この  $n(k)$  は一般的なエコーキャンセラのアプリケーションでは適応制御の性能を劣化させる信号となる．しかし，報知音の音圧レベル制御といったアプリケーションでは，残差エコー  $e(k)$  に生活環境音信号  $n(k)$  が含まれていることを利用し， $e(k)$  に基づいて報知音の音圧レベルを制御すれば良いと言える．

### 5-3-2 エコーキャンセラを使用しない簡易回路の提案

前節で述べたエコーキャンセラには適応フィルタが使用されている。この適応フィルタのフィルタ係数決定には種々のアルゴリズムが存在し、報知音の音圧レベル制御にはどのアルゴリズムが適しているかといった検討はなされていない。

また、一般にエコーキャンセラはデジタル信号処理系によって構成される。したがって、機器にデジタル信号処理装置（DSP）が搭載された製品、例えば電話機等においてはその処理系を用いることで直ちに報知音の音圧レベル制御を行なうことができる。しかし、DSP の搭載されていない機種においては報知音の音圧レベル制御のためだけに DSP を搭載する必要が生じる。近年、携帯電話等の普及により、DSP デバイス自体は非常に安価に入手できると考えられるが、DSP を使用するには制御ソフトウェアを開発する必要もある。

そこで、ソフトウェアの開発を必要とせず、必要最低限の報知音音圧レベル制御を行なうことができる回路について検討した。提案する回路のブロック図を図 5-6 に示す。

提案回路は、第 1 章で述べた生活環境音の周波数成分は低域を中心としたものであるという報告をもとに設計したものである。生活環境音の周波数スペクトルは、図 5-1 を参考にした。

生活環境音は、マイクロフォンにより受音され、A 特性フィルタと遮断周波数 280Hz の 6 次チェビシェフローパスフィルタ（リップル：0.25dB）を組み合わせたバンドパスフィルタにより処理される。提案回路は、この信号レベルをもとに、生活環境音の音圧レベルを推定し、電圧制御増幅器（VCA）により報知音の音圧レベル制御を行なうものである。

なお、 $k$  値は任意に設定されるが、これは図 5-3 に示した各年代に必要とされる報知音の音圧レベル；20 歳代用音圧レベル：15dB，60 歳代用音圧レベル：30dB，70 歳代用音圧レベル：40dB，80 歳代用音圧レベル：50dB に基づき決定する。具体的には、音圧レベルとして 20 歳代：0dB，60 歳代：15dB，70 歳代：25dB，80 歳代：35dB に相当するように設定する。

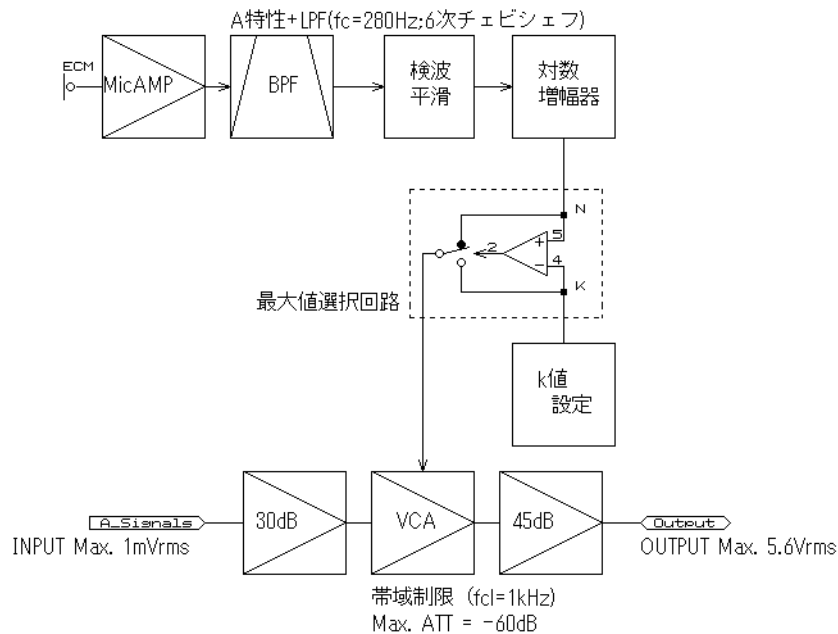


図 5-6 提案する報知音音圧レベル自動制御回路

### 5-3-3 提案回路の利点と欠点

提案回路の特徴は、帰還経路を持たない開ループ回路となっていることである。これは、帰還回路の安定性といった検討を設計時に行なう必要がないという利点がある。一方で、有効な報知音音圧レベル制御が行なえるか否かは、生活環境音検出回路の設計、とくにバンドパスフィルタの設計にかかっていると見える。また、バンドパスフィルタの特性は固定であるので、あらゆる実使用環境で有効な制御が行なえるという保証はないという欠点がある。さらに、正帰還による発振を防止するため、制御可能な報知音の周波数帯域を 1kHz 以上とするとといった制限も設けられている。

デジタル信号処理系により構成されたエコーキャンセラは、確実に報知音の音圧レベル制御を行なうことができると考えられる。しかし、それを用いるには、機器に DSP を搭載する必要があり、さらに制御ソフトウェアも開発する必要があった。しかしながら、本提案回路はアナログ信号処理系のみによって構成されたものであり、ソフトウェアは一切必要としない。また、回路自体を集積化すれば、容易に報知音音圧レベル制御が行なえるデバイスを提供できるようになると考えられる。

## 5-4 回路構成

図 5-6 の具体的な実現例を図 5-7 に示す .OP アンプを主要デバイスとして設計したため、とくに集積回路化する上での検討等はなされていない。設計には、電子回路シミュレータ (Micro-Cap /CQ 版, Spectrum Software) を使用し、各機能ブロックごとに設計・検証を行なった。ただし、VCA は、デバイスモデル作成が困難であったため検証を行なわなかった。

なお、生活環境音の音圧レベルは、回路内部では直流信号に変換され等価的に取り扱われている。実際の生活環境音の音圧レベルは、

$$20[\text{dB/V}] \times (\text{ボリュームコントロール電圧}[\text{V}] + 5[\text{V}]) \quad [\text{dB}]$$

という計算により求めることができる。20[dB/V]は変換係数である。なお、0dB は、回路内部では-5V として取り扱われる。

試作回路において生活環境音収録のために使用したコンデンサマイクロフォン (KUF3323, ホシデン) の感度は -49dB/Pa である。マイクロフォンにより収録された生活環境音は、増幅され、A 特性フィルタと遮断周波数 280Hz の 6 次チェビシェフローパスフィルタ (リップル: 0.25dB) を組み合わせたバンドパスフィルタにより処理される。このローパスフィルタには OP アンプにより構成した周波数依存負性抵抗 (Frequency Dependent Negative Resistance, FDNR) を使用した。バンドパスフィルタにより処理された信号は、検波・平滑され直流電圧となり、さらに対数増幅器により対数圧縮が施される。その後、対数増幅器からの出力電圧と基準電圧 (k 値電圧) は最大値選択回路により比較され、より高い電圧の方がボリュームコントロール電圧として VCA デバイスへ入力される。VCA デバイスとしては、TA7630P (東芝) を採用した。このデバイスのボリュームコントロールレンジはデータ・シート上では 80dB であるが、ボリュームコントロール電圧とボリューム減衰量の特性図から逆対数特性とみなせる範囲はほぼ 60dB 程度であると考えた。したがって、提案回路のボリュームコントロールレンジは 60dB とした。また、VCA の前段と後段にそれぞれ約 30dB と約 45dB の増幅器を設け、回路の最低利得はボリュームコントロ



ール電圧-5V のときの約 15dB，最大利得はボリュームコントロール電圧 0V のときの約 75dB となるように設計した．増幅回路利得が音圧レベルに対応するとすれば，提案回路による最低音圧レベルは約 15dB，最大音圧レベルは約 75dB となる．また，正帰還による発振防止のため，VCA へ入力される報知音信号は遮断周波数 1kHz の 6 次チェビシェフローパスフィルタ（リップル：0.25dB）により帯域制限を施した．このローパスフィルタには多重帰還型を使用した．

ところで，生活環境音のうち比較的大きな音圧レベルを持つ音に掃除機の動作音がある．水谷らの報告から，掃除機の動作音は 70dB 程度の音圧レベルを持つと考えられる<sup>28)</sup>．もし，生活環境音の音圧レベルが 70dB であるとするれば，報知音の音圧レベルが 75dB では聴取不可となる可能性がある．しかし近年，掃除機の静音化が進められており，50dB 程度の低騒音化を実現した例もある<sup>31)</sup>．今後も掃除機等，大きな騒音源となる機器は改良され静音化が進められていくと考えられることから，一般家庭における報知音の最大音圧レベルとしては 75dB で十分ではないかと考える．

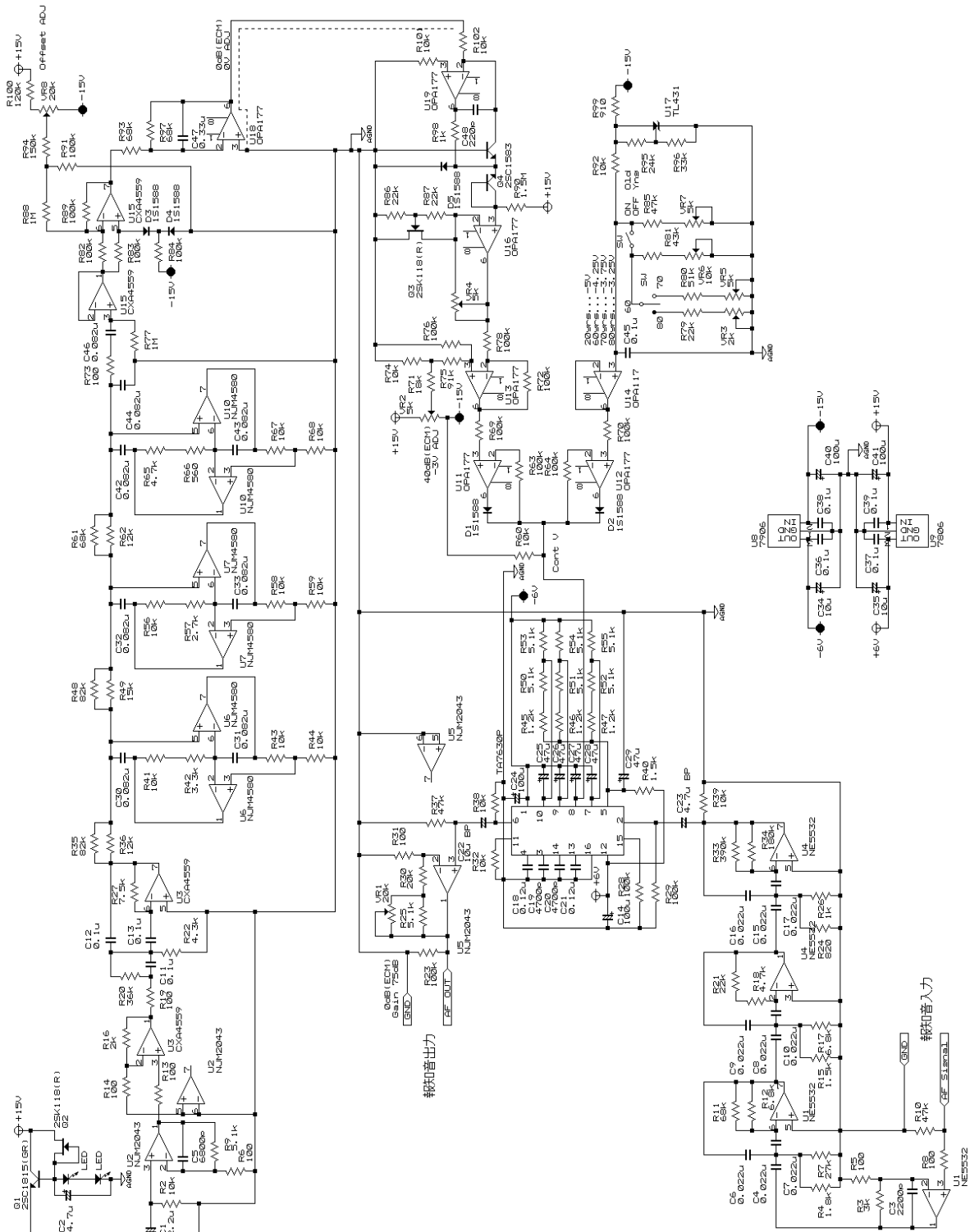


図 5-7 試作した報知音圧レベル自動制御回路

## 5-5 回路特性

提案回路の報知音信号に対する利得-周波数特性を実測した結果を図 5-8 に、利得-ボリュームコントロール電圧特性を実測した結果を図 5-9 に示す。さらに、実測した音圧レベル制御特性を図 5-12 に示す。

図 5-12 の実測にあたっては、生活環境音の代替音として 260Hz 正弦波信号、およびピンクノイズを使用した。音圧レベルは騒音計(LA-215, 小野測器)を用いて測定した。また、測定環境における暗騒音レベルが 40dB(A)程度であったため、生活環境音の音圧レベル 40dB(A)以下の特性は測定していない。

ところで、設計時に想定した特性は 20 歳代用の音圧レベル制御特性を例に挙げると、

$$20[\text{dB/V}] \times (\text{ボリュームコントロール電圧}[\text{V}] + 5[\text{V}]) + 15 \quad [\text{dB}]$$

という式で表すことができた。この設計時に想定した特性と比較すると、図 5-9 の特性はボリュームコントロール電圧 -3V 以下の領域において +3dB ~ +5dB の誤差が見られ、-3V 以上の領域においては -5dB ~ -10dB の誤差が見られた。これは、VCA デバイス(TA7630P)の特性上の問題である。この誤差を軽減するための特性補正回路を図 5-10 に示す。この回

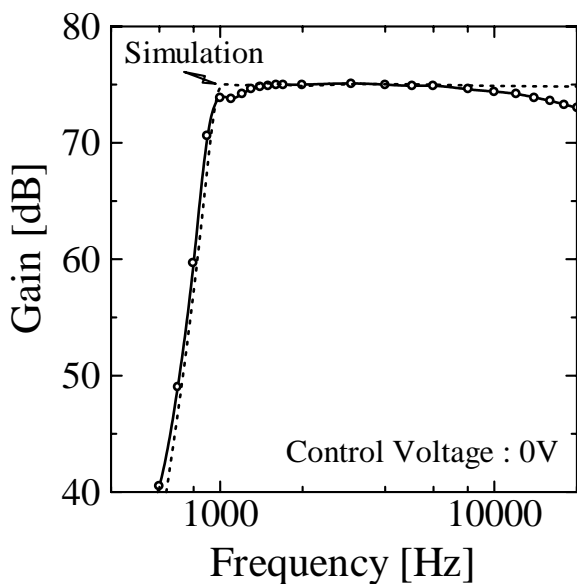


図 5-8 利得-周波数特性

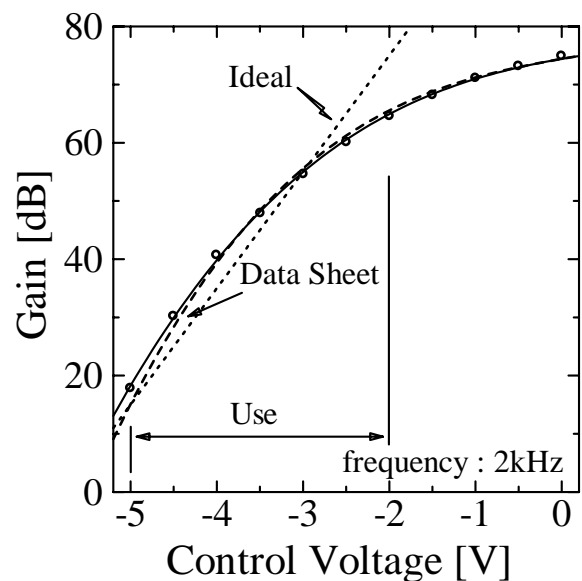


図 5-9 利得-ボリューム  
コントロール電圧特性

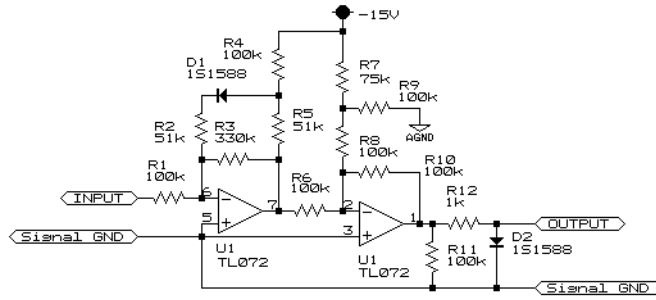


図 5-10 特性補正回路

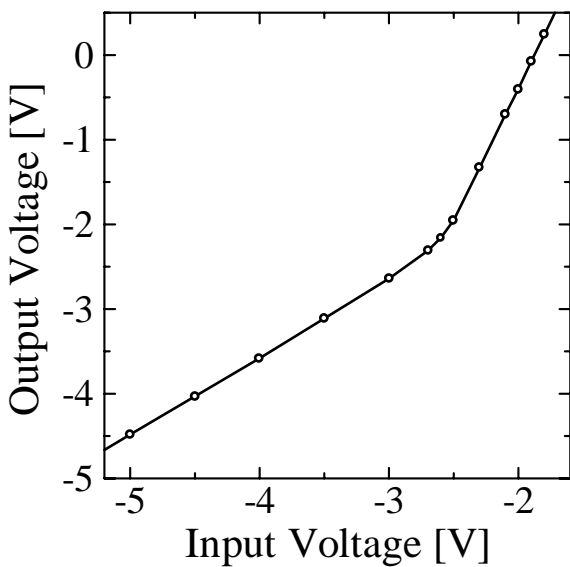


図 5-11 特性補正回路入出力特性

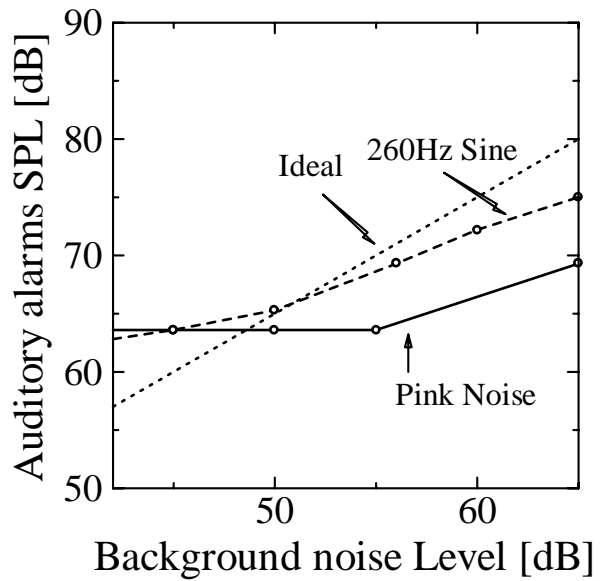


図 5-12 音圧レベル制御特性（20 歳代）

路は，図 5-7 の回路図に示した “Cont V” に挿入する．したがって，特性補正回路の出力信号が VCA デバイス（TA7630P）のボリュームコントロール電圧となる．

実測した試作回路の音圧レベル制御特性を図 5-12 に示した．理想的な音圧レベル制御特性と比較し，生活環境音の音圧レベル 50dB(A)以下の領域において最大 +5dB 程度，50dB(A)以上の領域においては -5dB ~ -10dB 以上の比較的大きな誤差が見られた．これは，OP アンプのオフセット電圧や特性補正回路の補正誤差が原因であると考えられる．

## 5-6 提案回路の課題

提案回路は、試作および特性の測定が終了したのみである。図 5-12 に示したとおり、試作回路の特性と理想的な特性との間には比較的大きな誤差が存在する。したがって、現段階では実用に耐えないであろう。また、生活環境音の音圧レベルが 40dB(A)以下の領域においては、OP アンプのオフセット電圧の影響が大きくなると考えられる。具体的なデータは示さないが、試作回路においてもその影響は見られた。したがって、オフセット電圧キャンセル回路を追加し対策する必要があると考える。この対策は今後の課題である。

また、実際の生活環境において有効な音圧レベル制御を行なうことができるか否かを調査することも今後の課題である。

## 5-7 まとめ

生活環境音や高齢者の聴力特性と報知音の音圧レベルとの関係に関する基礎的考察から、報知音の音圧レベル自動制御回路を提案した。

このような回路では、通常エコーキャンセラと呼ばれる技術が使用されることが考えられる。しかし、生活環境音は低周波成分を多く含むことに注目すれば、エコーキャンセラを使用しない制御回路が構成できるのではないかと考え、簡易的な報知音音圧レベル自動制御回路を提案した。簡易的な回路であるためいくつかの制限はあるが、エコーキャンセラと異なり、制御ソフトウェア等を必要としないという利点を持つ回路を構成できた。

また、現在の試作回路においては、理想的な音圧レベル制御特性との間に -10dB ~ +5dB 程度の比較的大きな誤差が見られた。この誤差は、回路定数の見直し等により改善可能である。また、40dB(A)以下の生活環境音存在下においては、OP アンプのオフセット電圧の影響が大きくなると考えられる。したがって、オフセットキャンセル回路の追加も必要であろう。このように、現段階において試作回路は実用に耐えないと考えられる。図 5-4 に示したような理想的な音圧レベル制御特性に試作回路の特性を近づけることは今後の課題である。