加齢による聴覚特性に基づいた福祉機器警報音の設計*

柴野 純一^{*1}, 但野 茂^{*1}, 金子 浩孝^{*2}Design of Alarm Sound of Home Care Equipment
Based on Age-related Auditory SenseJun-ichi SHIBANO^{*3}, Shigeru TADANO and Hirotaka KANEKO^{*3} Hokkaido University, Graduate School of Engineering,
Kita-13 Nishi-8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

A large number of home care equipment has been developed to support the independent living and the care of the elderly person. Almost equipments have a alarm to call a care person or to sound a warning in case of emergency. Physiological characteristics of human will be getting weaker with age. The alarm sound must be designed with considering a hearing loss of the elderly person. Since the alarm is usually used indoor, it is also necessary to evaluate the relation between the basic characteristic of sound and the room layout. In this work, we investigated the alarm sound of the home care equipment based on both the age-related hearing characteristic of the elderly person and the propagation property of indoor sound. As a result, it was clear that the hearing characteristic of the elderly person is highly sensitive to the sound which has the frequency from 700 Hz to 1 kHz. In addition, the indoor absorption ratio of the sound is the smallest when the frequency is 1 kHz. Therefore, the frequency of 1 kHz is good for the alarm sound of the home care equipment. The flow chart to design the alarm sound of home care equipment was proposed taking the age-related auditory sense into account.

Key Words: Human Engineering, Recognition, Noise, Home Care Equipment, Alarm Sound, Hearing Loss, Auditory Sense

1. 緒 言

高齢化福祉社会が到来し、高齢者の自立生活を支援する福祉機器の開発が盛んである。ほとんどの福祉機器には緊急事態を知らせたり介助者を呼ぶためのアラームが備え付けられている。このようなアラーム音は周囲の人に迅速かつ正確に認知されなければならない。高齢者にとって加齢に伴う聴覚能力の低下が著しく⁽¹⁾、アラーム音が高齢者に聞き取りにくい機器もある。また、在宅福祉機器は狭い室内空間で使用され、音の室内伝播は間取りや壁材・床材などに大きく影響される。高齢者にも聞き取りやすい最適なアラーム音を設計することが望まれている。そのためには、音の室内伝播と認知特性の関連を調査することが重要である。

本研究では、若年者から高齢者まで検知可能な福祉機器の警報音について、加齢による聴覚特性と室内音

の伝播特性を考慮した検討を行う。まず、現有機器の警報・報知音を測定する。次に高齢者と若年者による騒音と認める音の音圧レベルの周波数特性を調査する。そして高齢者の聴覚状態を再現するため、加齢による聴力損失特性を定式化する。その式から年齢毎の最小可聴音曲線を作成し、高齢者が最も聞き取りやすい音の周波数域を明らかにする。さらに、純音を用いて室内における音の伝播特性を調査する。音が室内の壁やレイアウトなどによって減衰する現象を室内減少率で定義し、室内で通りやすい音の周波数域を探る。以上の結果を基に、室内において高齢者にも認知しやすい福祉機器警報音の設計手法を提案する。

2. 現有機器の警報音

2・1 測定対象機器 ウェルフェアテクノハウス札幌⁽²⁾を利用し、介護ベッドの呼び出し音、玄関のインターフォンとリモコン式警報器の音を測定した。さらに、携帯型防犯ブザーを3機種、家庭用ナースコール、ドア開閉報知器3機種、住宅用火災警報器、電動車椅子クラクションの音を測定した。また、福祉機器ではないが、救急車と消防車のサイレン音も測定した。

* 原稿受付 2000年7月3日。

^{*1} 正員、北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)。^{*2} 学生員、北海道大学大学院。

E-mail: jshibano@eng.hokudai.ac.jp

2・2 測定方法 警報音等の録音には、パーソナルコンピュータ (PCG-XR7G, SONY) とエレクトレットコンデンサーマイクロホン (ECM-MS957, SONY) を使用した。収録時のマイクロホン位置は、携帯型機器からは約5cm, ベッド等の室内機器はスピーカーから約100cm, 救急車及び消防車では約3mとした。周波数解析には、周波数解析ソフト (サウンドモニター-FFTWave, E.N. Software) を使用した。FFT解析

(a) sound pattern a

(b) sound pattern b

Fig. 1 Power spectrum of alarm sound of care bed

(a) sound pattern a

(b) sound pattern b

Fig. 2 Power spectrum of sound of door buzzer

のためのサンプリング周波数は44.1kHzとした。

2・3 結果と考察 警報・報知音の代表的な例を図1, 2に示す。特徴を明らかにするため波形分布を、特にパワースペクトルとの関係で表示する。図1の(a)と(b)は介護ベッドアラーム音の周波数特性を示す。図から、アラーム音は周波数が約2300Hzで強度が違う2音を合成していることがわかる。玄関インターフォンの周波数特性を図2の(a)と(b)に示す。周波数が670Hzと840Hzの異なる2音の合成である。その他の機器の警報・報知音も、周波数の異なる2音か、同一周波数で強度の異なる2音の合成からなるものが多かった。調査した全機器の警報・報知音の周波数域を図3に示す。2000Hz～3000Hzが5機種ともっとも多かった。参考値として測定した救急車と消防車のサイレン音の周波数は、ともに500Hz～1000Hzであった。

図4にロビンソン-ダットソンによる音の等感曲線⁽³⁾を示す。これは、聴覚健全者が感覚的に同じ大きさに聞こえる音圧レベルと周波数の関係を示している。図の最も下の曲線が最小可聴音の音圧レベルとなる。この図から、3000Hz～5000Hzで聴力感度が高いことがわ

Fig. 3 Peak frequency of alarm sound of home care equipments

Fig. 4 Equivalent-loudness contours⁽³⁾

かる。人の外耳道の構造が、これら周波数域の音の共鳴管になるためといわれている⁽⁴⁾。今回測定した機器の警報音等では2000Hz～3000Hzの周波数特性を持つ機器が多く、聴覚健常者にとって聞き取りやすい音に設定されていることがわかる。

3. 騒音レベルの感性評価

3・1 実験方法 通常、感覚的な室内騒音レベルは、図5に示すNC(Noise Criteria)値⁽⁵⁾で評価される。このNC値は、空調音のような広い周波数域を有する音を用いて、聴覚健常者の感覚的なうるさを調査した結果に基づいている。例えば、NC値55は電話が困難なほどの室内騒音と評価される。図から明らかなように、同一音圧レベル[dB]でも高周波数ほど騒音と感ずることになる。NC値は、以下のように決められる。騒音をオクターブ分析して、その結果を図5にプロットした時、すべての周波数の音圧レベルを上回るNC曲線の最下限値がその騒音のNC値となる。しかしながら、聴力の低下した高齢者において、アラーム音のように限られた単一周波数の合成音に対する感覚的なうるささの評価には適用できない。そこで、単一周波数からなる純音を用いて、高齢者と若年者の感覚的な騒音レベルをモニター調査した。実験に用いた測定システムを図6に示す。周波数発振器(AG-204D, Kenwood)をアンプ(SU-Z360, 松下電機)に接続し、純音を発生させた。純音は単一周波数(125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000Hz)の正弦波とした。実験中、オシロスコープ(DS-8606, 岩崎通信機)で純音周波数を確認した。被験者は両耳でヘッドフォンから純音を聴いた。各周波数毎に被験者自身が音圧レベルを上げ、「非常にうるさい」

Fig. 5 NC (Noise Criteria) curve⁽⁵⁾

と感じた時点で止めてもらい、その時の音圧レベルを騒音計(LA-2110, 小野測器)で測定した。聴覚の習熟性による測定周波数の増減方向の影響を考慮し、純音を低周波数から高周波数へ順次上げた場合とその逆の場合を測定した。表1に被験者構成を示す。

3・2 評価結果と考察 本実験では「非常にうるさい」と感じた音圧レベルをSN (Serious Noisy) 値と定義する。図7と図8に純音を低周波数から高周波数へ順次上げて測定した場合の若年者と高齢者のSN値をそれぞれ示す。逆方向の測定結果は、若年者と高齢者ともに2～4dBの差で有意差は見られなかった。図中の記号で平均値と標準偏差を示す。両図を比較すると、若年者に比べ高齢者のデータにばらつきが大きい。これは高齢被験者の年齢層に差が大きいことにもよる。若年者と高齢者ともに各周波数のSN値はNC値で評価すると70以上となる。若年者のSN値は低周波数域から高周波数域にかけて減少するが、2000Hz付近で一旦高くなる。高齢者のSN値は、2000Hz付近まで若年者と同様の傾向を示したが、高周波数域でほとんど減少しない。SN値に対する高齢者と若年者の違いを明らかにするため、両者の単純差を図9に示す。図より、2000Hzまでは若年者と高齢者のSN値に差は見られなかった。このことから、うるさく感じる音圧レベルは2000Hz以下では高齢者も若年者とほぼ同じであることがわかる。

Fig. 6 Experimental set up of noisy level

Table 1 Volunteer group for sensory test of noise

(a) younger person group

age (y.o.)	male	female	total
20 ~ 29	20	0	20
average (y.o.)	23.2	----	23.2

(b) elderly person group

age (y.o.)	male	female	total
60 ~ 69	6	1	7
70 ~ 79	7	6	13
80 ~	1	0	1
total	14	7	21
average (y.o.)	71.6	72.1	71.8

4. 室内における音の伝播特性

4・1 実験方法 実験は図10に示すウエルフェアテクノハウス札幌で行った。単一周波数の純音を室内の各位置（図中①～⑨）で発生させ、その音圧レベルを図中のリビングルームで測定した。純音は、ファンクションジェネレーターをアンプ内蔵のスピーカーに接続して発生させた単一周波数(125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000Hz)の正弦波である。騒音計とスピーカーの高さは、人が椅子に座った時の耳の位置を想定して床から110cmとした。発生音圧レベルは、スピーカーと騒音計の水平距離を70cmにとり、1/1オクターブ分析で測定した時の各純音の音圧レベルが、それぞれ70, 60, 50dB(Flat特性)となるように設定した。測定時間は5秒とし、3回測定の前平均を測定値とした。

Fig. 7 Noisy level for younger person

Fig. 8 Noisy level for elderly person

Fig. 9 Difference of noisy level between elderly person and younger person

4・2 測定結果と考察

図10に、各位置①～⑨における音圧レベル70dBの純音に対する測定音圧レベル(Flat特性)を示す。純音発生位置による測定音圧レベルが異なるのは、室内レイアウトや壁・床などによる各周波数の音の吸音・遮音率が異なるためである。各位置の測定音圧レベルは、発生音圧レベル

Fig. 10 Sound pressure level (SPL) measured at living room in Welfare-Techno-House Sapporo

(70, 60, 50 dB) によらずほぼ同様のパターンを示した。

音圧レベルの室内減少率を $AR[\%]$ とし式(1)で定義する。これにより各周波数の室内減衰特性を評価する。

$$AR = \frac{GP - MP}{GP} \times 100 \quad \text{..... (1)}$$

ここで、 $GP[\text{dB}]$ は発生音圧レベル、 $MP[\text{dB}]$ は測定音圧レベルである。室内の各位置で発生させた音の周波数毎の音圧レベル減少率を式(1)で求めた平均値を表2に示す。表2から、1000Hz付近の音がウエルフェアテクノハウス札幌の室内では最も減少しにくい、すなわち通りやすい音であることがわかる。

5. 福祉機器警報音の設計

5・1 年齢と聴力損失の関係 25歳を基準とした、加齢による聴力損失と周波数の関係⁽¹⁾を図11に示す。図11の曲線から、聴力損失 $\Delta I[\text{dB}]$ と周波数 $f[\text{kHz}]$ 、年齢 y の関係を定式化する。まず、図11から、各年齢の聴力損失と周波数の関係を年齢の関数で表した。これを図12に示す。次に、図12の曲線を多項式近似し、係数を周波数の関数とした。アラーム音に通常用いられる周波数 f の範囲 ($250\text{Hz} \leq f \leq 6000\text{Hz}$) で、より正確に近似できるように定式化を行った。その結果、年齢と周波数を変数とする聴力損失関係式(2)が得られた。

$$\Delta I = a(f)y^2 + b(f)y + c(f) \quad \text{..... (2)}$$

ここで、

$$a(f) = -8 \times 10^{-5}f^4 + 0.0008f^3 - 0.0017f^2 - 0.0019f - 0.0054$$

$$b(f) = 0.0038f^4 - 0.0232f^3 - 0.0632f^2 + 0.3373f + 0.2191$$

$$c(f) = -0.049f^4 + 0.0973f^3 + 2.7992f^2 - 7.8307f - 2.109$$

式(2)の近似誤差は4000Hzで平均1.6dBである。

5・2 加齢による聴力特性の再現 式(2)を用いて、加齢により損失した可聴音を再現するための式を導出する。

Table 2 Indoor reduction ratio of sound pressure level

Sound pressure level	Frequency				
	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
50 dB	38.5	18.9	19.5	23.5	33.2
60 dB	36.3	32.3	26.3	31.9	42.7
70 dB	33.7	21.3	15.3	26.8	37.0
average(%)	36.2	24.2	20.4	27.4	37.6

一般に、基準音圧 $P_0 (=20 \mu\text{Pa})$ ⁽⁶⁾ に対する音圧 P の音圧レベル $I_p[\text{dB}]$ は式(3)となる。

$$I_p = 10 \log_{10} \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad \text{..... (3)}$$

いま、聴力損失のない若年者が高齢者(年齢 Y_E)の聴こえる音を再現する場合を考える。同じ音(最大音圧 P)を聴いた時に、若年者と高齢者の聴こえる音を再現するための音圧をそれぞれ $P_Y (=P)$ と P_E とすると、それぞれの音圧レベル (I_Y と I_E) は、式(3)から次式となる。

$$I_Y = 20 \log_{10} \left(\frac{P_Y}{P_0} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad \text{..... (4)}$$

$$I_E = 20 \log_{10} \left(\frac{P_E}{P_0} \right) \quad \text{..... (5)}$$

このとき、若年者を基準とした場合、高齢者の聴力損失 ΔI_{EY} は式(6)で得られる。

Fig. 11 Relation between hearing loss and frequency at each age⁽¹⁾

Fig. 12 Relation between hearing loss and age at each frequency

$$\Delta I_{EY} = (I_E - I_Y) = 20 \log_{10} \left(\frac{P_E}{P_Y} \right) \quad \text{..... (6)}$$

式(6)から、若年者が高齢者の聴こえる音を再現するための音圧は次式となる。

$$P_E = P_Y \cdot 10^{\frac{\Delta I_{EY}}{20}} \quad \text{..... (7)}$$

若年者が聴いている音 $\tilde{p}_Y$ を、 N 個の波形の合成として式(8)で表すとする。

$$\tilde{p}_Y = \sum_{i=1}^N \left[P_{Yi} \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t) \right] \quad \text{..... (8)}$$

ここで、 f [Hz] は周波数、 t [s] は時間である。このとき、高齢者が聴いている音 $\tilde{p}_E$ は、式(7)、(8)より式(9)で再現できる。

$$\tilde{p}_E = \sum_{i=1}^N \left[10^{\frac{\Delta I_{EYi}}{20}} \cdot P_{Yi} \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t) \right] \quad \text{..... (9)}$$

5・3 聴力損失を考慮した最小可聴音 まず、聴覚健常者の最小可聴音（図4の最も下の曲線）を25歳の最小可聴音とする。次に、25歳から5歳毎の聴力損失を式(2)で計算し、25歳の最小可聴音に加える。これにより図13に示す各年齢の最小可聴音曲線が得られる。最小可聴音最低音圧レベルの周波数は、加齢により低周波数域に移動するのがわかる。

5・4 最適な福祉機器警報音の設計 図13から25歳～45歳代では3000Hz～4000Hzの音をもっとも認知しやすいが、50歳よりも高齢になるとその周波数は低周波数域へシフトし、700Hz～1000Hzの音が認知しやすくなることがわかる。したがって、加齢による聴力

Fig. 13 Relation between minimum audible sound and frequency

損失や聴覚の等感度曲線を考慮すると、高齢者用福祉機器の警報音には1000Hz前後の音が適している。この周波数域の音は、若年者にも決して聞き取りにくい音ではない。また、表2から、ウエルフェアテクノハウス札幌の室内における音圧レベルの減少率は周波数によって異なり、最も減衰しにくい1000Hz付近の音でも約20%減少することがわかった。これは、建物の構造や室内レイアウトによって変化するかも知れない。高齢者用福祉機器の警報音には、室内における音圧レベルの減少率も考慮すべきである。

以上の結果を基に、福祉機器警報音の設計フローチャートを図14に示す。process1で警報音製作に必要な設計条件として、警報音の周波数と音圧、想定高齢者の年齢を入力する。process2で高齢者の聴力損失を計算し、process3でprocess2で求めた聴力損失に室内

Fig. 14 Flow chart of design of alarm sound of home care equipment

における減衰の補正をする。process4は、若年者が高齢者の聴いている音を再現するための最大音圧を計算する。process5で高齢者の聴いている音圧波形を製作する。process6は製作した警報音を聴き、その認知性の良否を判定する。判定が否の場合、process1に戻り、設計条件を変更する。周波数の異なる2音や同じ周波数で強度の異なる2音からなる警報音を設計する場合は、process1～process4までを2音について行い、process5で2音を設定したい時間間隔で繰り返し再現すればよい。

6. 結 言

福祉機器警報音について、加齢による聴力損失と室内環境による音の伝播特性から検討した。その結果、以下のことが得られた。

(1) 現有機器の警告・報知音の周波数は、2000Hz～3000Hzが最も多く、聴力損失のない人を対象とした設計である。

(2) 感覚的な室内騒音レベルの指標として「非常にうるさい」音の音圧レベルをSN値で定義すると、高齢者と若年者は2000Hz以下のSN値に差はない。

(3) 加齢による聴力損失現象を最大音圧を変えて再現するための式を構築した。これによって、高齢者が聴こえる音を再現することが可能となった。

(4) 加齢による聴力損失を考慮すると、福祉機器の警報音には1000Hz前後の音が適している。

(5) 高齢者までも聴きやすい福祉機器警報音を設計するための手法を提案し、そのフローチャートを示すことができた。

文 献

- (1) ISO Recommendation R226-1961.
- (2) 例えば、新エネルギー・産業技術総合開発機構編、平成10年度ウエルフェアテクノシステム研究開発(札幌)成果報告書、(1999)。
- (3) Robinson, D.W. and Dadson, R.S., J. Acoust. Soc. Am., 29, (1957), 1284.
- (4) 例えば、伊福部, 音の福祉工学, (1997), 8, コロナ社。
- (5) Beranek, L.L., Noise and Vibration Control, (1971), 565, McGraw-Hill.
- (6) 例えば、境他編, 聴覚と音響心理, (1978), 136, コロナ社。