

音声聴取能力評価に関する研究*

江川義之**

Evaluation of Audibility for Voice Sounds*

by Yoshiyuki EGAWA**

Abstract: Miss hearing for task information often would happen labor accidents. For example, work performances for working instructions between “*Tai \underline{k} i seyo*” and “*Tai \underline{h} i seyo*” are very different. By mistake in hearing between “ *\underline{k} i*” and “ *\underline{h} i*”, worker might be involved in accidents. So this study has dealt with the evaluation for the audibility of voice sounds. By the audiometer test for sound pressure level and resolution test for sound frequencies, subjects were examined for the audibility of vowel and consonant sounds.

For the audibility of vowel sounds, three type-groups of subjects were observed. The first type-group of the subjects, who had high threshold level for high frequency band of audiometer test, had the characteristics of low distinction between /i/ and /e/ of vowels. The second type-group of them, who had high threshold levels for high and low frequency bands of audiometer test, had the low distinction for the vowels of /i/, /u/ and /e/. The third type-group of them had the good measurement for audiometer test. However, this type-group was divided into two classes. One class of the subjects could distinguish the each vowel, and the other class couldn't. So the third type-group of subjects was examined for resolution test of sound frequencies. This test has examined the resolution of “360 vs 381 Hz”, “660 vs 670 Hz” and “1335 vs 1350 Hz”. These frequencies was formant frequencies constructed the vowels. As the result of this frequency test, the class which could distinguish the each vowel had good resolutions for this frequency test, and the other class had bad resolutions for the test.

For the audibility of consonant sounds, subjects were divided into two groups. One group could obtain 100% levels of hearing for consonant articulation and the other group couldn't obtain. On the subjects of less audibility for consonants, it was difficult to distinct /de/, /ba/, /ha/ and /ne/ of consonant sounds. These four consonants had very short time to discern themselves from other consonants. And, as the result of analysis for these four consonant waves, frequencies and sound pressure levels had changed rapidly at very short time. The subjects of less audibility for /de/, /ba/, /ha/ and /ne/ of consonant sounds couldn't perceive rapid change of frequencies and sound pressure levels.

As the result of this study, to evaluate of audibility for voice sounds, it was very important to carry out both audiometer test and frequency resolution test.

Keywords; vowel sounds, consonant sounds, audiometer test, frequency resolution test

* 平成 8 年 5 月 日本人間工学会第 37 回大会において本研究の一部を発表した。

**機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety Research Division
境界領域研究グループ Interdisciplinary Thematic Research Group

1. 緒 言

人間は高齢者になるに従い聴覚機能が低下する¹⁾。聴覚機能は伝音系、内耳、中枢系に分けられるが、高齢になると、伝音系において、鼓膜・耳小骨などが硬化し、外耳から内耳に伝えられる音響エネルギーの伝導率が低下する。内耳において、蝸牛にある有毛細胞の数が減少し、同時にラセン神経節の数も減少する。さらに中枢においても、神経核の細胞数が減少し、脳の側頭葉の第1次・第2次聴覚中枢の細胞数が減少する²⁾。このため加齢にともない、可聴周波数範囲も狭くなり最小可聴閾値（音として知覚できる最小の音圧レベル）も上昇するが、その程度は、45歳を過ぎる頃から10 dB以上の上昇が観察され、70歳代では4000 Hzで40 dBもの最小可聴閾値の上昇が生じる¹⁾。

聴覚機能が低下すると音声聴取能力も低下する。我々の社会生活において音声言語は、コミュニケーションの手段として重要な役割を果たしている。労働現場においてもコミュニケーションは重要であり、建設業においてはコミュニケーションが悪かったために生じている労働災害が多い³⁾。

たとえば「待機（タイキ）せよ」と「待避（タイヒ）せよ」という作業命令で、「キ」と「ヒ」の一語を聞き間違えたために、作業行動が全く異なり労働災害を生じる例も考えられる。

昨今、職場において高齢労働者が増加しているため、健康診断の重要性が指摘されており、そのための健康診断として雇用時健康診断と定期健康診断がなされている。常時騒音作業に従事した作業者に対しては難聴者の早期発見を目的として、健康診断に聴力検査が含まれている。この検査は、雇用時健康診断ではオーディオメータを用いて250, 500, 1000, 2000, 4000および8000 Hzにおける最小可聴閾値を検査している。また6ヶ月以内に1回行なう定期健康診断では、1000 Hzで30 dB, 4000 Hzで40 dBの純音が聴取可能であるかを検査している。

本研究では、これら聴力検査と音声聴取能力との関連性について研究を行なった。すなわち、健康診断で実施されている聴力検査は、音声聴取能力が低下した作業者を選定するために必要十分な検査であるかを検討し、必要であるが十分ではない場合においては、音声聴取能力を評価するための、新たな簡便な検査法を開発することを目的とした。

2. 母音聴取能力に関する実験

2.1 実験目的

- 1) まず、言葉としての母音の聴取能力を検査する。さらにオーディオメータによる純音聴力検査を行なう。そして純音聴力検査から母音聴取能力の推定の可能性について検討する。
- 2) 純音聴力検査から母音聴取能力を推定することが不可能な場合には、純音聴力検査と組合せて行なえる新しい簡便な検査法を検討する。

2.2 実験方法

1) オーディオメータによる純音聴力検査

オーディオメータ（リオン社製 AA-63BN）と気導受話器（リオン社製 AD 02）を用いて純音聴力検査を行なった。純音の検査周波数は250, 500, 800, 1k, 1.5k, 2kおよび3 kHzの7通りの周波数である。

2) 母音聴取能力検査

母音聴取能力検査は、日本オーディオロジー学会で制定された標準語音聴力検査用テープ（リオン社製 67-AB）を用いた。このテープには、まず校正用1000 Hz信号が、次に女性アナウンサーの声による語音（母音と子音）がランダムに録音されている。このテープから校正用信号と母音を抜き出し、新たなテープにダビングした。作成した母音聴取能力検査用テープは「ア」～「オ」に対応した5本あり、それぞれのテープには、校正用信号とひとつの母音が繰返し録音されている。

この検査用テープをテープレコーダ（SONY TC-D5M）で再生する際には、再生音圧レベルを調整する必要があるため、テープレコーダの出力端子をオーディオメータの外部入力端子に接続した。オーディオメータのスイッチをEXT. IN（外部入力）に設定し、テープレコーダより再生された母音をオーディオメータの気導受話器を通して聞くことができるようにしてから、テープの校正用信号がオーディオメータのレベル指示計のゼロレベルになるようにテープレコーダの音量を調節した。

このように設定することにより、オーディオメータを母音聴取能力検査に活用することが可能になる。検査者は5本の検査用テープをそれぞれ再生し、オーディオメータの聴力ダイヤルを回して音圧レベルを増加させ、被験者には母音が始めて判別できた時、応答スイッチを押させた。

3) 母音のフォルマント周波数の計測

音声分析装置（Kay社製 CSL Model 4300）を用いて、検査用テープに録音されている母音のフォルマント周波数の計測を行なった。

音声を構成する周波数はピッチ周波数とフォルマント周波数である⁴⁾。

ピッチ周波数とは声帯の振動する周波数であり、声の高さを決定する周波数である。女性の声は男性より高いが、それはピッチ周波数が高いためである。また同じ母音（たとえば「ア」）を高く発声することも、低く発声することも可能であるが、これは声帯のピッチ周波数を変えることによって行われる。

フォルマント周波数とは、声帯から口腔を通して唇に至る声道とその形を決める顎・舌などが作り出す周波数であり、5つの母音が区別できるのは、このフォルマント周波数が異なることによる。

ピッチ周波数は男性と女性で異なり、個人差もある。また同じ母音（たとえば「ア」）でも発声する人により違って聞えるように、フォルマント周波数にも個人差によるバラツキがある。

ところで、ひとつの母音は、2つのフォルマント周波数の組合せで作られており、これらを第1および第2フォルマント周波数という。本実験では、母音聴取能力検査用テープに録音された女性アナウンサーの音声による「ア」～「オ」について、前述した音声分析器を用いて、第1および第2フォルマント周波数を調べた。

被験者は、コントロール群10名（平均年齢は22.5歳、標準偏差は0.85歳）と高齢者群10名（平均年齢は68.1歳、標準偏差は9.8歳）である。女性はコントロール群に1名、高齢者群に4名含まれていた。なお高齢者群に補聴器の使用者は含まれていない。

2.3 実験結果

オーディオメータによる純音聴力検査結果について述べる。

検査に用いた純音の周波数は、母音を構成する周波数が含まれている、250, 500, 800, 1k, 1.5k, 2k および 3 kHz⁵⁾であるが、検査結果を、250, 500 Hzが「低音域」、800, 1k, 1.5 kHzが「中音域」、2k, 3 kHzが「高音域」となるように集計した。

Fig. 1がコントロール群、Fig. 2が高齢者群に含まれている全被験者の純音聴力検査結果である。

コントロール群は、最小可聴閾値が最も高い被験者は30 dB(A)である。さらに高齢者群に比較して、「低音域」「中音域」「高音域」の閾値バランスが良い。高齢者群はコントロール群に比較して最小可聴閾値が高く、30～65 dB(A)と広い範囲にわたっている。そして「低音域」「中音域」「高音域」の閾値バランスが悪い。

母音聴取能力は、各音域すなわち「低音域」「中音域」「高音域」に含まれるフォルマント周波数をバランス良

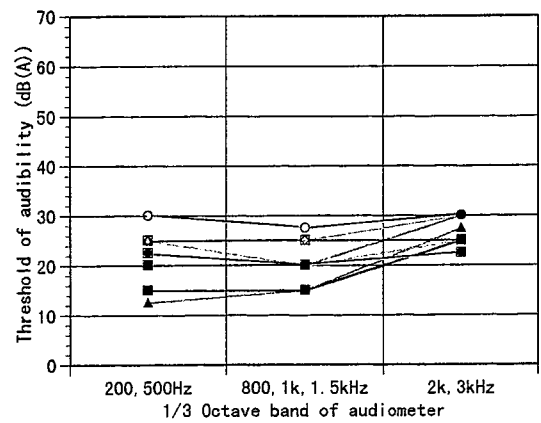


Fig. 1 Threshold level of 1/3 octave band for control group.
コントロール群の1/3オクターブ帯域における最小可聴閾値

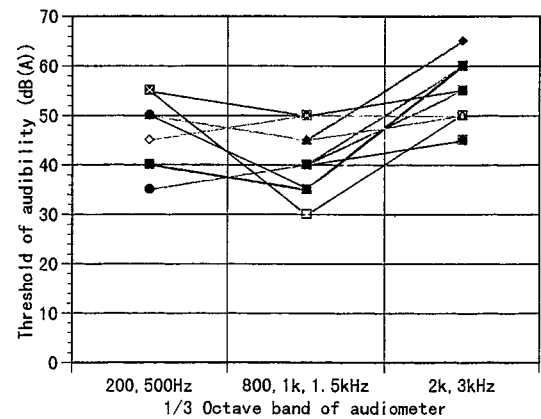


Fig. 2 Threshold level of 1/3 octave band for elderly group.
高齢者群の1/3オクターブ帯域における最小可聴閾値

く知覚することである。そこでコントロール群および高齢者群に含まれる被験者を閾値バランスから次のように分類した。

コントロール群におけるAグループ（以下Aグループという）。これは、「低音域」「中音域」「高音域」の各閾値のバランスが良いグループである。

コントロール群におけるBグループ（以下Bグループという）。これは、「低音域」「中音域」に比較し、「高音域」の閾値が10 dBほど高い（悪い）グループである。

高齢者群におけるCグループ（以下Cグループという）。これはAグループ（コントロール群）に比較して各音域の最小可聴閾値は高いが、「低音域」「中音域」「高音域」の各閾値のバランスが良いグループである。

高齢者群におけるDグループ（以下Dグループという）。これは、「低音域」「中音域」に比較し、「高音域」

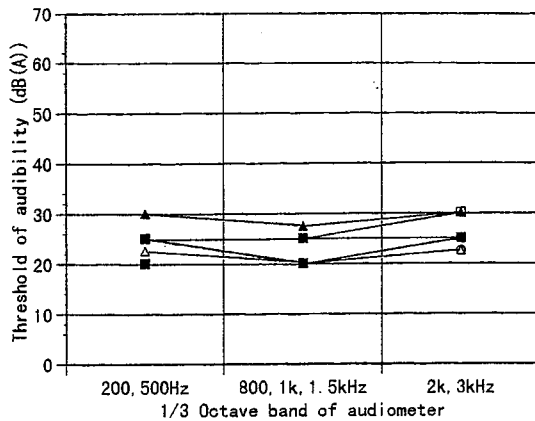


Fig. 3 These subjects included in control group (hereinafter group "A"). Their audio-characteristics are the same threshold level for each 1/3 octave band.
Aグループに属する被験者の1/3オクターブ帯域における最小可聴閾値

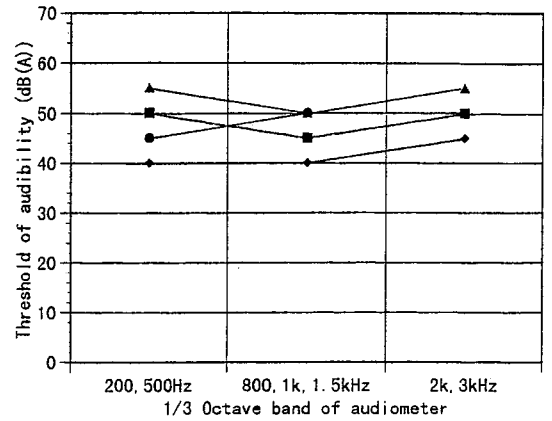


Fig. 5 These subjects included in elderly group (hereinafter group "C"). Their audio-characteristics are the same threshold level for each 1/3 octave band.
Cグループに属する被験者の1/3オクターブ帯域における最小可聴閾値

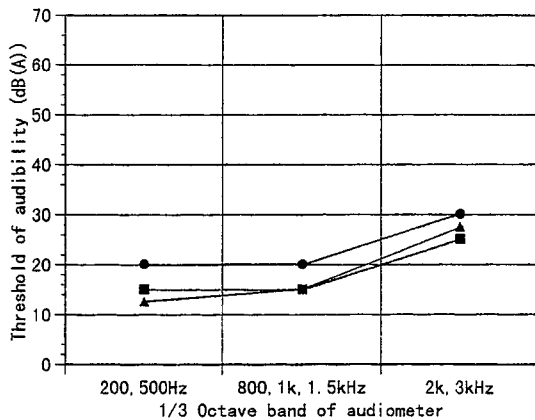


Fig. 4 These subjects included in control group (hereinafter group "B"). They have audio-characteristics which are high threshold level for 2k and 3 kHz frequency band.
Bグループに属する被験者の1/3オクターブ帯域における最小可聴閾値

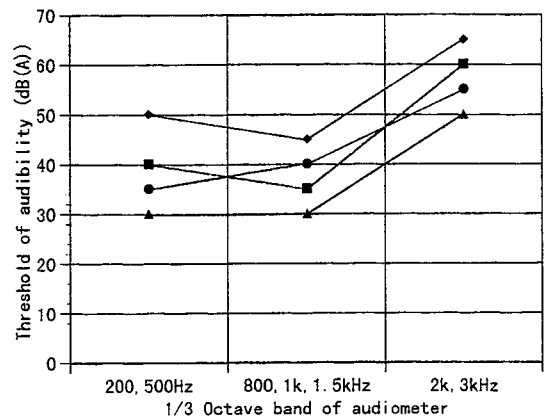


Fig. 6 These subjects included in elderly group (hereinafter group "D"). They have audio-characteristics which are high threshold level for 2k and 3 kHz frequency band.
Dグループに属する被験者の1/3オクターブ帯域における最小可聴閾値

の閾値が15~25 dBほど高い(悪い)グループである。
高齢者群におけるEグループ(以下Eグループという)。これは「中音域」に比較し、「低音域」と「高音域」が15~20 dBほど高い(悪い)グループである。

Fig. 3~Fig. 7にA~Eグループに含まれる各被験者の純音聴力検査結果を示した。

次に母音聴取能力検査について、A~Eグループに含まれた各被験者が示した検査結果を述べる。

母音聴取能力検査は、「ア」~「オ」の各母音の音圧レベルを徐々に増加させて、音として知覚できた時ではなく、始めてある母音として判別できた閾値(母音判別閾値)を調べた。Fig. 8~Fig. 12に、A~Eグループの母音聴取能力検査結果を示した。

Fig. 8は、「低音域」「中音域」「高音域」の各閾値の

バランスが良いAグループ(コントロール群)7人の検査結果である。「ア」~「オ」の各母音判別閾値についてもバランスの良い結果が得られている。

Fig. 9は、「低音域」「中音域」に比較して「高音域」の閾値が10 dBほど高いBグループ(コントロール群)3人の検査結果である。「ア」「ウ」「オ」に比較して「イ」「エ」の母音判別閾値が若干高い結果が得られている。

Fig. 10は、「低音域」「中音域」「高音域」の各閾値のバランスが良いCグループ(高齢者群)4人の検査結果である。高齢者群であるためコントロール群に比較して、母音判別閾値の高い結果が得られている。しかし5つの判別閾値のバランスにおいては、このCグループの4人に共通した傾向は示されていない。

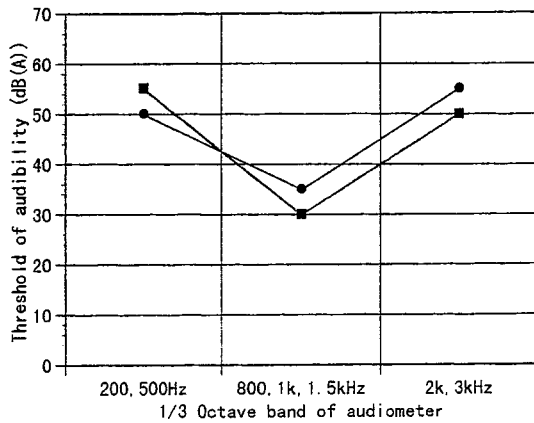


Fig. 7 These subjects included in elderly group (hereinafter group "E"). Their audio-characteristics have higher threshold level for high and low frequency bands than it for middle frequency band.
Eグループに属する被験者の1/3オクターブ帯域における最小可聴閾値

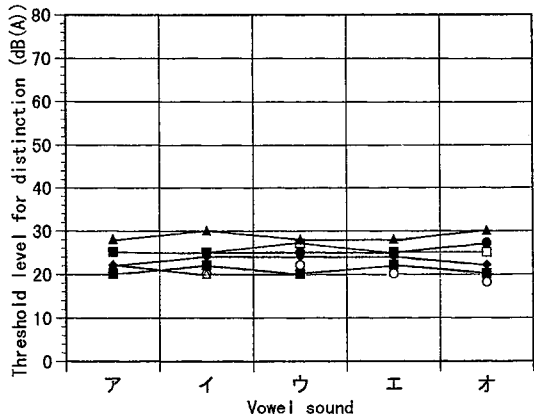


Fig. 8 Results of threshold level for vowel sound distinction (group "A").
グループAの母音聴取能力結果

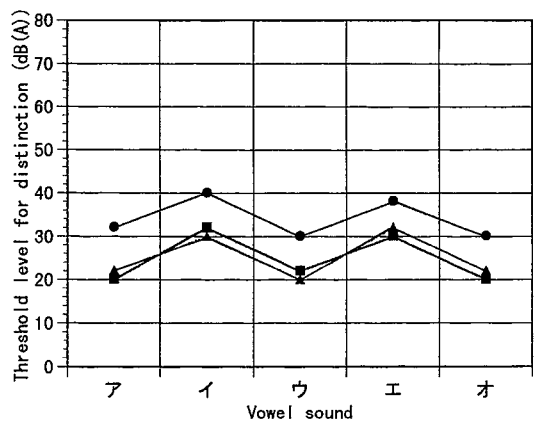


Fig. 9 Results of threshold level for vowel sound distinction (group "B").
グループBの母音聴取能力結果

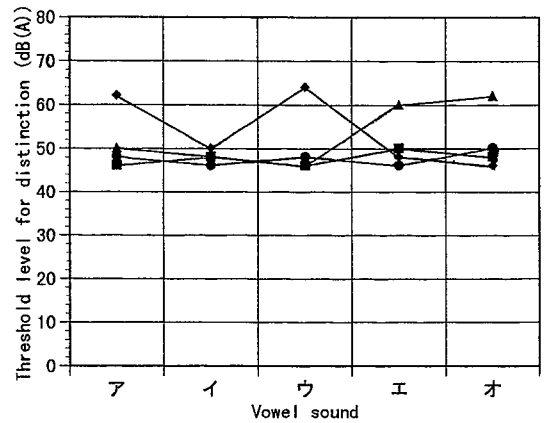


Fig. 10 Results of threshold level for vowel sound distinction (group "C").
グループCの母音聴取能力結果

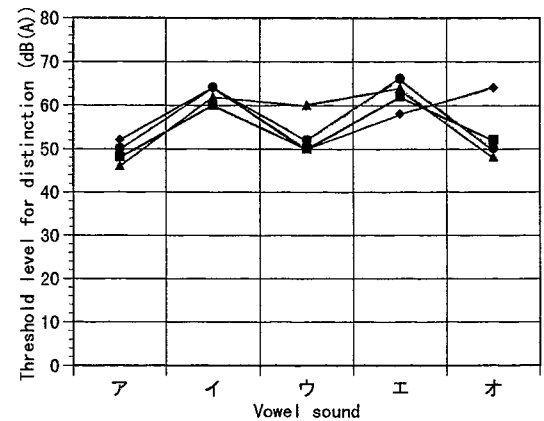


Fig. 11 Results of threshold level for vowel sound distinction (group "D").
グループDの母音聴取能力結果

Fig. 11は、「低音域」「中音域」に比較して「高音域」の閾値が15~25 dBほど高いDグループ（高齢者群）4人の検査結果である。このグループもCグループと同様の結果を示している。すなわち、各母音判別閾値のバランスにおいて、4人に共通した傾向は示されていない。

Fig. 12は、「中音域」に比較して、「低音域」と「高音域」が15~20 dBほど高いEグループ（高齢者群）2名の検査結果である。「ア」「オ」に比較して「イ」「ウ」「エ」の母音判別閾値が高い結果が得られている。

Table 1は検査用テープに録音されている女性アナウンサーの発声による「ア」~「オ」の各母音のフォルマント周波数計測結果を、オージオメータによる純音聴力検査周波数との関連で示した。フォルマント周波数とは前述したように、各母音を判別するのに必要な周波数であり、声帯から口腔を通して唇に至る声道と、その形を決める顎・舌などにより作り出される。

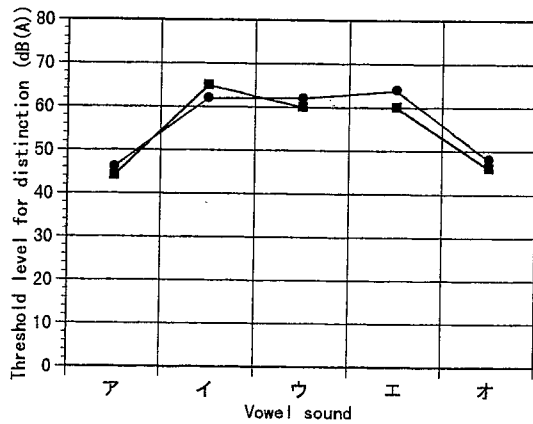


Fig. 12 Results of threshold level for vowel sound distinction (group "E").
グループ E の母音聴取能力結果

Table 1 Formant frequency for each vowel.
各母音のフォルマント周波数

	純音聴力検査による周波数		
	250, 500 Hz	0.8, 1, 1.5 kHz	2, 3 kHz
ア		1025 Hz, 1335 Hz	
イ	360 Hz		3100 Hz
ウ	381 Hz	1350 Hz	
エ		670 Hz	2700 Hz
オ		660 Hz, 960 Hz	

この表によると、「ア」と「オ」は中音域の周波数で構成され、「イ」は低音域と高音域の周波数、「ウ」は低・中音域の周波数、「エ」は中・高音域の周波数で構成されている。

次に Fig. 3~Fig. 7 に示した A~E グループに含まれる各被験者の純音聴力検査結果と、Fig. 8~Fig. 12 に示した同グループの母音聴取能力検査結果の関連性について検討する。

A グループはコントロール群であり、純音聴力検査結果において各音域の閾値のバランスが良く、かつ母音聴取能力検査でも各母音判別バランスが良いグループである。すなわち純音聴力検査の閾値バランスが良いため、各母音のフォルマント周波数もバランス良く知覚可能であり、その結果各母音判別バランスも良いと考えられる。

B グループもコントロール群であるが、純音聴力検査で「高音域」の閾値が悪く、そのため高音域にフォルマント周波数のある「イ」「エ」の母音判別閾値が高い(悪い)グループと考えられる。

C グループは高齢者群であり、純音聴力検査結果において各音域の閾値のバランスは良いが、母音聴取能力検査では、各母音判別閾値のバランスが良い被験者と悪い被験者が含まれている。その点において A グループとの相違が観察され、各被験者ごとに考察する必要がある。

D グループも高齢者群であるが、純音聴力検査で「高音域」の閾値が悪く、そのため高音域にフォルマント周波数のある「イ」「エ」の母音判別閾値が高い(悪い)被験者が含まれている。しかしそれ以外の被験者が2名含まれており、C グループと同様に各被験者ごとに考察する必要がある。

E グループも高齢者群であるが、純音聴力検査で「低音域」と「高音域」の閾値が悪く、そのため低音域と高音域にフォルマント周波数のある「イ」「ウ」「エ」の母音判別閾値が高い(悪い)グループと考えられる。

以上、A, B, E グループについては、純音聴力検査結果と各母音のフォルマント周波数特性から、母音聴取能力検査結果の説明が可能であった。しかし、C グループと D グループについては、次の理由から各被験者ごとに考察する必要性が生じた。

すなわち、C グループの被験者は A グループと同様に純音聴力検査による閾値のバランスは良いが、各母音判別閾値のバランスが悪い被験者が2名含まれていた。また D グループの被験者は B グループと同様に「高音域」の閾値が悪く、そのため「イ」「エ」の母音判別閾値が高い(悪い)と思われるが、それ以外の被験者が2名含まれていた。そこで C グループの2名と D グループの2名について、より詳細な考察を行なった。

Table 2 に C グループで母音判別のバランスの悪い被験者2名 (C1, C2 と記す)、さらに D グループで同様な被験者2名 (D1, D2 と記す) について、母音聴取能力が低かった母音およびそのフォルマント周波数、さらに各帯域の純音聴力検査結果の良否が○と×で示してある。

C グループの高齢被験者 C1 および C2 は、純音聴力検査において閾値バランスが良く、各音域の音が同程度の音圧レベルで聴取可能である。しかし母音聴取能力において、C1 は「エ」「オ」の判別が悪く、C2 は「ア」「ウ」の判別が悪い。そこでこれらの結果について、母音を構成するフォルマント周波数からの考察を試みた。

すなわち、「エ」「オ」を構成するフォルマントで近接する周波数は、670 と 660 Hz である。さらに「ア」「ウ」を構成するフォルマントで近接する周波数は、1335 と 1350 Hz である。

そこで、C1 は音の高さ(周波数)の弁別能力が低下

Table 2 The vowel of high threshold level for distinction(Subjects C1, C2, D1& D2).
被験者 C1, C2, D1, D2 において判別閾値の高かった母音

Subject C1			
	250, 500 Hz	0.8, 1, 1.5 kHz	2, 3 kHz
	○	○	○
エ		670 Hz	2700 Hz
オ		660 Hz, 960 Hz	

Subject C2			
	250, 500 Hz	0.8, 1, 1.5 kHz	2, 3 kHz
	○	○	○
ア		1025 Hz 1335 Hz	
ウ	381 Hz	1350 Hz	

Subject D1			
	250, 500 Hz	0.8, 1, 1.5 kHz	2, 3 kHz
	○	○	×
イ	360 Hz		3100 Hz
ウ	381 Hz	1350 Hz	
エ		670 Hz	2700 Hz

Subject D2			
	250, 500 Hz	0.8, 1, 1.5 kHz	2, 3 kHz
	○	○	×
イ	360 Hz		3100 Hz
エ		670 Hz	2700 Hz
オ		660 Hz, 960 Hz	

していたため、670 と 660 Hz の高さの区別ができず、それが原因で「エ」「オ」の判別が悪かったと推定される。同様に C2 は 1335 と 1350 Hz の周波数弁別能力が低く、そのため「ア」「ウ」の判別が悪かったと推測される。

同様の考察を D グループについても試みた。高齢被験者 D1 および D2 は、純音聴力検査で「高音域」の閾値が悪いため、「イ」「エ」の母音判別閾値が高いことは理解可能である。しかし D1 は「イ」「エ」以外に「ウ」の判別閾値も悪い。これは「イ」と「ウ」の第 1 フォルマントが近接しており、360 Hz と 381 Hz の周波数弁別能力が低かったことに原因があると推定される。同様に D2 は「イ」「エ」以外に「オ」の判別閾値も悪い。これも「エ」と「オ」の第 1 フォルマントが近接しており、670 Hz と 660 Hz の周波数弁別能

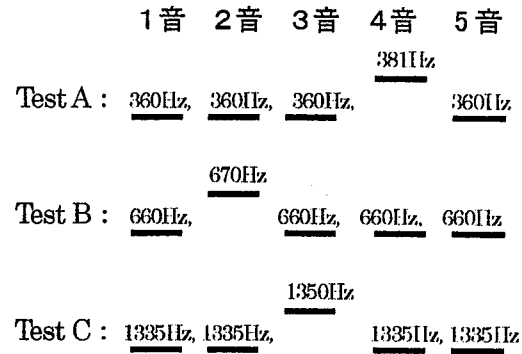


Fig. 13 Discrimination test for sound frequency. 周波数弁別能力検査法

力が低かったことに原因があると推測される。

2.4 周波数弁別能力検査

前節では、オーディオメータによる純音聴力検査結果において、「低音域」「中音域」「高音域」の閾値バランスが良くても、母音聴取能力検査結果が悪い被験者が存在することを述べた。そしてその被験者は母音を構成するフォルマント周波数のうち近接する周波数の弁別能力が低いことに原因があると考察した。

そこで本節では、母音を構成するフォルマント周波数のうち近接する周波数 (Table 1 を参照), すなわち 360 と 381 Hz (Test A), 660 と 670 Hz (Test B), 1335 と 1350 Hz (Test C) の 3 組について周波数弁別能力を調べる検査を考案し実験を行なった。

80 ms の長さの音を 60 dB(A) の音圧レベルで 5 つ、音と音の間に 1000 ms の休止を入れて、被験者に聞かせた。5 つの音のうち 1 つだけ周波数 (高さ) が異なる音が含まれている。被験者には何番目の音の周波数が異なるかについて答えさせた。

検査法が Fig. 13 に示してある。すなわち被験者が、Test A では 4 番目、Test B では 2 番目、そして Test C では 3 番目の音が、他の 4 つの音より高く聞えると答えれば正解である。被験者は Test A~C をランダムに各々 5 回づつ、計 15 回の検査を行った。

全被験者の周波数弁別能力の結果を Table 3 に示す。

コントロール群に属する被験者は Test A~C の 5 問すべてに関して正解である被験者が多く、B1 のみが Test C, すなわち周波数 1335 Hz と 1350 Hz の弁別において 1 問間違えたのみであった。

高齢者群に属する被験者は、コントロール群に比較すると若干正解が少ないが、多くの被験者が 4~5 問正解している。

しかし Test 条件によっては、高齢者群では極端に正解が低い被験者がおり、それは C1 被験者の Test B

Table 3 The result of discrimination test for sound frequency (Correct answers for all subjects).
周波数弁別能力検査結果 (全被験者の正解数)

群	グループ	被験者	Test A	Test B	Test C
コントロール群	A	A1	5	5	5
		A2	5	5	5
		A3	5	5	5
		A4	5	5	5
		A5	5	5	5
		A6	5	5	5
		A7	5	5	5
	B	B1	5	5	4
		B2	5	5	5
B3		5	5	5	
高齢者群	C	C1	5	1	4
		C2	4	5	0
		C3	5	5	4
		C4	5	5	5
	D	D1	1	4	4
		D2	5	1	4
		D3	5	5	5
		D4	5	5	4
	E	E1	5	5	5
		E2	4	5	4

(1問のみ正解), C2被験者のTest C(正解なし), D1被験者のTest A(1問のみ正解), D2被験者のTest B(1問のみ正解)であった。

Test Aは周波数360 Hzと381 Hzの弁別であり,これは母音のイとウを判別するのに必要なフォルマント周波数である。Test Bは周波数660 Hzと670 Hzの弁別であり,これは母音のエとオを判別するのに必要なフォルマント周波数である。そしてTest Cは周波数1335 Hzと1350 Hzの弁別であり,これは母音のアとウを判別するのに必要なフォルマント周波数である。

これをもとに,周波数弁別検査結果と母音聴取能力検査結果の関係を調べると,Test Aの結果の悪い被験者D1は,母音イとウの判別閾値が高い。Test Bの結果の悪い被験者C1とD2は母音エとオの判別閾値が高い。そしてTest Cの結果の悪い被験者C2は母音アとウの判別閾値が高い結果が得られている (Table 2参照)。

以上述べたように,オーディオメータによる純音聴力検査のみから母音聴取能力を推定することは不十分な

場合がある。純音聴力検査と周波数弁別検査とを組合せて母音聴取能力を推定する必要がある。

2.5 母音聴取能力実験結果のまとめ

第2章において母音聴取能力を調べるための実験を行ってきたが,その大要を述べると次の通りである。

- 1) コントロール群で純音聴力検査における低・中・高音域のバランスの良い被験者は,母音聴取能力における判別閾値のバランスも良い。
- 2) 純音聴力検査で高音域の閾値が高い被験者は,イ・エの母音判別閾値が高い。
- 3) 純音聴力検査で低・高音域の閾値が高い被験者は,イ・ウ・エの母音判別閾値が高い。
- 4) 高齢者群で純音聴力検査における低・中・高音域のバランスの良い被験者であっても,母音聴取能力における判別閾値のバランスが良いとは限らない。
- 5) 4)が生じる原因は,イとウを構成するフォルマント周波数(360,381 Hz),エとオを構成するフォルマント周波数(660,670 Hz),アとウを構成するフォルマント周波数(1335, 1350 Hz)の周波数の違いを弁別できない被験者がいることによる。
- 6) 母音聴取能力を調べる必要がある場合には,オーディオメータによる純音聴力検査と周波数弁別能力検査を組合せて行う必要がある。

3. 子音聴取能力に関する実験

3.1 実験目的

- 1) 子音聴取能力を調べるために,日本オーディオロジー学会で制定された標準語音聴力検査用テープを用いて子音弁別能力検査⁶⁾を行う。
- 2) 1)の検査結果より,多くの被験者が聴取できなかった子音を選定し,その波形分析を行い,これら子音に共通した傾向を調べる。
- 3) 2)の結果に基づき,子音聴取能力を推定できる新しい簡便な検査法を検討する。

3.2 実験方法

1) 子音弁別能力検査

子音の聴取能力を調べるためには,子音聴取閾値検査と子音弁別能力検査がある。子音聴取閾値検査は子音が聴取可能な閾値の音圧レベルを調べる検査であり,子音弁別能力検査は音圧レベルを段階的に増加させることにより,聴取できた子音の百分率(明瞭度%)を調べる検査である⁶⁾。

本実験では子音弁別能力検査を行う。その理由は,高齢者には音圧レベルを閾値以上に増加して子音を聴取

させた時、音として聞えるが子音として弁別できない被験者がいるためである⁷⁾⁸⁾。

テープからランダムに再生される子音を音圧レベル一定にして被験者に聴取させ、被験者は聞えたままを検査用紙に記入する。同様の検査を 10 dB ずつ音圧レベルを段階的に増加して数回行う。

検査結果は次の方法で分析した。

横軸に子音を再生した音圧レベル、縦軸にその条件で聴取可能であった子音の百分率（子音明瞭度%）を示したグラフ（スピーチオージグラム）を作成して、100%の子音明瞭度を達成した被験者と、そうでない被験者に分類する。そして、この被験者が弁別できなかった子音を選定する。

2) 選定された子音の波形分析

弁別しにくい子音を対象にして音声分析装置（Kay 社製 CSL Model 4300）を用いて波形を分析する。

分析方法は次に示す通りである。

- a) 各子音の波形の長さを計測する (ms)。
- b) 波形の部分再生法（子音波形の一部分のみを音声として再生し、その弁別可能性を判定する方法）を用いて、初めて子音として弁別できる限界の波形の長さを計測する。
- c) 弁別できた部分の波形（b で計測）を、ホワイトノイズでマスクして、子音として弁別できないことを再確認する。
- d) b) で計測した部分波形の周波数変位 (δ Hz) とその変位時間 (ms) を計測する。

3.3 実験結果

1) 子音弁別能力検査結果

Fig. 14 に子音弁別能力検査結果を示す。横軸に子音を再生した時の音圧レベル、縦軸に正しく弁別でき

た子音の百分率（子音明瞭度）が示してある。検査の結果、被験者は2つのグループ（以下 F グループと G グループという）に分類された。

Fig. 14 左図に示した F グループ（12 名）は、20 dB(A) で幾つかの子音の聴取が可能となり、音圧レベルを増加するに従い明瞭度が上昇し、60~70 dB(A) で 100%の子音明瞭度を達成できたグループである。

これに比較して Fig. 14 右図に示した G グループ（8 名：すべて高齢者）は、40 dB(A) で幾つかの子音の聴取が可能となり、60~70 dB(A) で 40~70%の明瞭度を達成し、80~90 dB(A) で明瞭度はピーク値を迎えた。しかし、それ以上音圧レベルを増加しても明瞭度は 100%にはならず、ピーク値と同じかあるいは低下したグループである。G グループの被験者に、検査終了後この時の聞こえ方について尋ねたところ、音圧レベルを増加し過ぎると耳の中がワンワンとして、逆に子音が弁別しにくくなると述べていた。

F グループは音圧レベルを増加すると 100%の子音明瞭度を得られており、明瞭度に関係する要因は音圧レベルであると推測する。G グループは音圧レベルを増加しても、100%の子音明瞭度を得られていないので、次にこの原因を考察する。

G グループの被験者が、音圧レベルを増加させても弁別できなかった子音を調べた。Table 4 にその結果を示す。この表中の聞き取り率とは、弁別できず答えられなかった、あるいは間違っただの子音を答えた率である。

聞き取り率が 35%以上の子音を挙げると、「デ」「バ」「ハ」「ネ」の 4 子音が挙げられ、特に「デ」の聞き取り率は 75%であった。

弁別しにくい子音、すなわち Table 4 で聞き取り率の高い子音が限定されることは、その子音の発声時間が

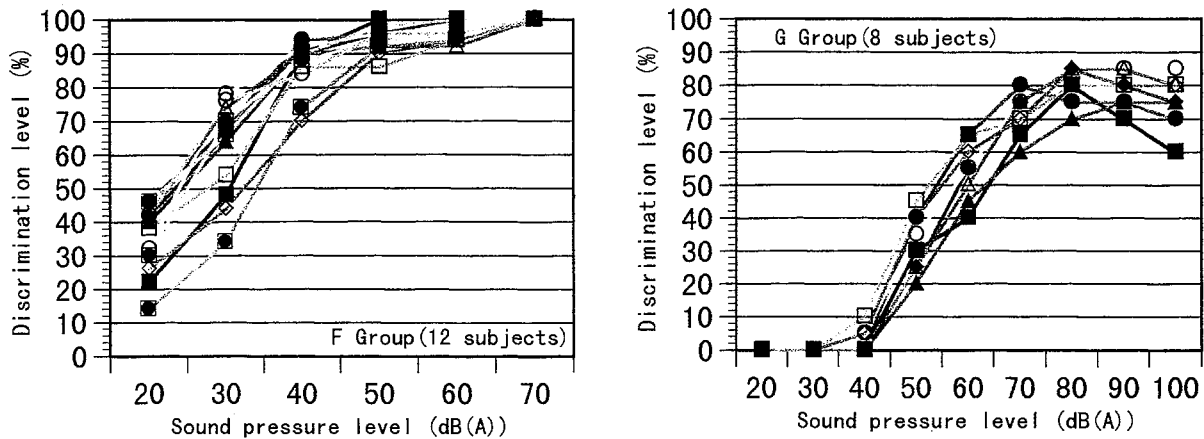


Fig. 14 Results of discrimination test for consonant sounds (F group and G group).
F グループと G グループの語音弁別能力検査結果

Table 4 The result of consonant discrimination test for G group (error rate of auditory %).
Gグループの子音に関する弁別能力検査結果 (聞誤り率%)

あ行	か行	さ行	た行	な行	は行	ま行	や行	ら行
ア 12.5	カ 0	サ 0	タ 18.8	ナ 18.8	ハ* 37.5	マ 25.0	ヤ 16.0	ラ 6.3
イ 12.5	キ 0	シ 25.0	チ 25.0	ニ 18.8	ヒ 18.8	ミ 18.8		リ 12.5
ウ 6.3	ク 0	ス 18.8	ツ 6.3	ヌ 0	フ 6.3	ム 31.3	ユ 0	ル 0
エ 12.5	ケ 12.5	セ 31.3	テ 6.3	ネ* 43.8	ヘ 0	メ 18.8		レ 25.0
オ 0	コ 0	ソ 6.3	ト 12.5	ノ 31.3	ホ 0	モ 25.0	ヨ 0	ロ 6.3
	ガ 6.3	ジ 18.8	ダ 18.8		バ* 43.8			
	ゴ 6.3	ズ 25.0	デ* 75.0					

Table 5 Utterance length of each consonant used discrimination test (ms).
弁別能力検査に用いられた各子音の発声時間 (ms)

155- 174ms	175- 194ms	195- 214ms	215- 234ms	235- 254ms	255- 274ms	275- 294ms	295- 314ms	315- ms
ア 155ms	エ 190ms	コ 202ms	ケ 217ms	イ 252ms	ス* 266ms	キ 276ms	ガ 309ms	ズ 346
カ 169	オ 176	サ 206	タ 216	ウ 237	ダ 265	ク 276	ゴ 298	ソ 346
テ 174	シ 189	ハ* 196	ミ 231	ニ 254	チ 262	デ* 286	ジ 312	
	ツ 184	ヒ 200	ロ 232	ノ 240	ナ 255	ド 282	セ 307	
	ト 190	ラ 205		ヤ 246	バ* 260	ネ* 286	フ 309	
	ホ 182			ル 236	マ 266	レ 287	ム 302	

短い、あるいはその波形に原因があると考え、これらの子音を対象に波形分析を行った。

2) 聞誤り率の高い子音の波形分析結果

検査用テープに録音されている各子音について、その発声時間を調べてみた。Table 5にその結果を示す。発声時間が最も短い子音は「カ」の169 msであり、最も長い子音は「ズ」「ソ」の346 msであった。

当初、聞誤り率の高い子音は、その発声時間が短いことが弁別できにくい原因と考えていたが、Table 5によると、「デ(286 ms)」「ネ(286 ms)」「バ(260 ms)」「ハ(196 ms)」であり、相対的に他の子音と比較して発声時間が長い子音であっても聞誤り率の高い子音が

あることが明らかになった。そこで、これら子音を対象にして波形の部分的再生を行った。

子音の部分再生法とは、音声分析装置(Kay社製 CSL Model 4300)を用いて、子音波形の一部分のみを音声として再生し、子音としての弁別可能な部分を判定する方法である。判定者はFグループに属した被験者のうち子音弁別能力の高い3名を用いた。

分析装置により子音を部分的に再生した結果、次のことが明らかになった。

子音は前・中・後部の3部分に分けられ、子音として弁別可能な部分は中間部のみであった。すなわち、前部は子音として聞き取れず、中間部において始めて子音と

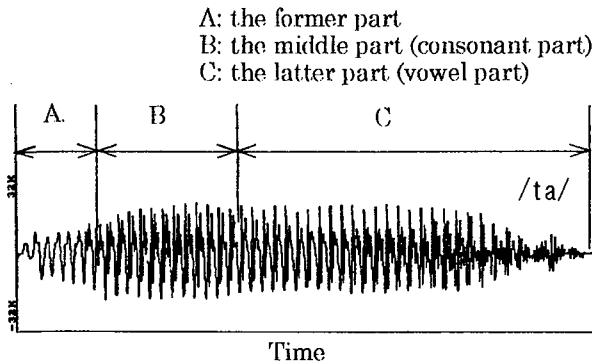


Fig. 15 Consonant wave for /ta/.
「タ」の子音波形

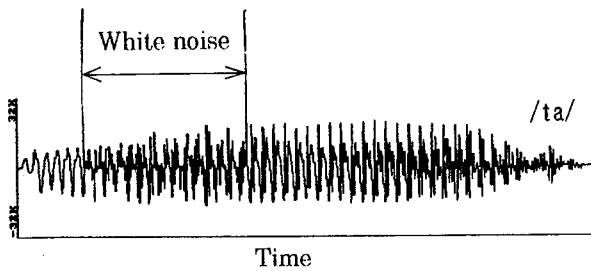


Fig. 16 Replacement of the middle part for /ta/ by white noise.
ホワイトノイズによる子音中間部の置換

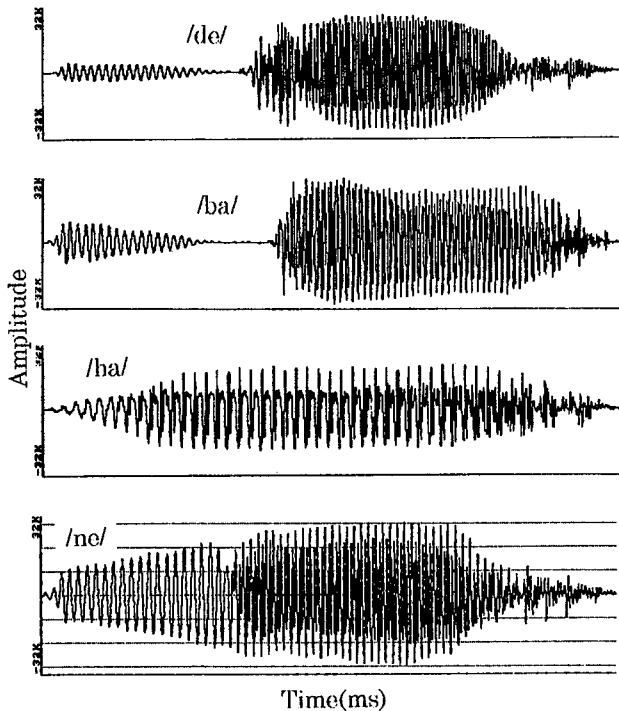


Fig. 17 Consonant wave for mis-discrimination.
聞誤り率の高い子音波形

して弁別可能になり、後部は子音でなく母音として聞えることが明らかになった。これを「タ」で説明すると、初めは「トゥ」で子音として聞き取れず、中間が

Table 6 Hearing for consonant sound of high mis-discrimination.
聞誤り率の高い子音の聞こえ方

	前半部	中間部	後半母音部
/de/ (ms)	0~90	90~116	116~296
聞こえ方	「ン」	デ	エ
2 kHz 以上カット	聞えない	デ+エ	聞えない
/ba/ (ms)	0~100	100~128	128~260
聞こえ方	聞えない	バ	ア
2 kHz 以上カット	聞えない	聞えない	ア
/ha/ (ms)	0	0~30	30~196
聞こえ方	……	ハ	ア
2 kHz 以上カット	……	聞えない	ア
/ne/ (ms)	0	0~60	60~286
聞こえ方	……	ネ	エ
2 kHz 以上カット	……	ン	聞えない

「タ」で子音として弁別可能になり、後半は「ア」という母音に聞える過程をとる (Fig. 15 参照)。

そこで音声分析装置を用い、子音として弁別できた中間部のみをホワイトノイズでマスクしてみた (Fig. 16)。この処理を施すことにより、今度はFグループ3名の判定者すべてが全く子音として弁別できなくなかった。すなわち、子音として弁別できる部分は、子音波形の全体ではなく、前部と後半母音部が混ざり合う、極めて短い中間部のみであることが明らかになった。

3) 聞誤り率の高い子音の特徴

聞誤り率が高い子音を対象にして、その弁別が可能である中間部分の長さを調べるため波形分析を行った (Fig. 17 参照)。

分析の結果、聞誤り率の高い子音には2つの特徴があった。ひとつは「デ」「バ」のような有声破裂音⁹⁾、破裂音を作るために息をタメている時間が長く、そのため子音として弁別できる中間部分が短い。

他のひとつは「ハ」のような無声摩擦音⁹⁾あるいは「ネ」のような鼻音⁹⁾であるが、いずれも弁別できる中間部分が短い子音である。これら子音の中間部分においては短い時間内に周波数が変化しており、これが高齢者にとって聞誤り率の高い子音の特徴であると考察する。

Table 6 に前述した子音の部分再生法を用いて、

前部・中間部・後部における子音の音としての聞こえ方を擬音語で示した。さらにこの表では高齢者の聴覚を模したフィルターで2000 Hz以上の音をカットした時の子音の聞こえ方についても示した。

Table 6によると、弁別しにくい子音とは、発声（前半部+中間部+後半母音部）時間が300 ms近くある子音でも、子音として弁別できる中間部の時間は極めて短く、30~60 ms程度で、子音全体の1/10~1/5であることが明らかになった。さらに、高齢者の聴覚を模して2000 Hz以上の周波数帯域をカットして聴取してみると、他の子音に聞えたり、全く弁別が不可能であることが分かった。

これらの結果より、Gグループに属する8名の被験者が、子音の音圧レベルを増加しても100%の明瞭度が得られなかった原因は、子音中間部分の極めて短時間における周波数変化が検知できなかったこと、さらに高齢者の聴覚特性である2000 Hz以上の閾値レベルが高いことに原因があると考えられる。

3.4 周波数変化速度テスト

1) テスト方法

音圧レベルを増加しても100%の子音明瞭度が得られなかった理由のひとつは、極めて短時間の周波数変化を検知できないことによることを考え、周波数変化速度テストを考案した。

60 dB(A)の音圧レベルで音と音の間に1000 msの休止を入れ、5つの音を被験者に聞かせた。5つの音のうち1つだけ周波数が変化する音が含まれている。実験者は音の変化時間 (δ ms) と周波数のシフト幅 (δ Hz) を変化させ、何番目の音が他の4つの音と異なるかについて答えさせ、検知可能な閾値を調べた。

第2章4節で述べた周波数弁別能力検査と本テストの相違は、Fig. 13とFig. 18で示した通り、周波数弁別能力検査は360 Hzから381 Hzに不連続に周波数が変化する。しかし本テストはある時間 (ms) 内、例えば40 msで周波数が1000から1040 Hzに滑らかにシフトし、再び1000 Hzに戻るようなテストである。

音声の中心周波数が1000 Hzであることから、1000 Hzを基準にして上下に周波数をシフトさせた。

2) テスト結果

Fig. 19にテスト結果を示す。横軸に周波数をシフトさせた時間 (ms)、縦軸にシフトさせた周波数 (δ Hz) が示してある。例えば40 msで δ Hzが80 Hzの場合、20 msで1000~1080 Hzにシフトし、さらに20 msで1080~1000 Hzにシフトしたことを現わしている。グラフには各グループ被験者の閾値平均と標準偏差を示した。

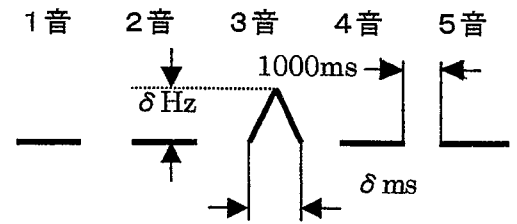


Fig. 18 Threshold level test for shift in sound frequency. 周波数変化検出テスト法

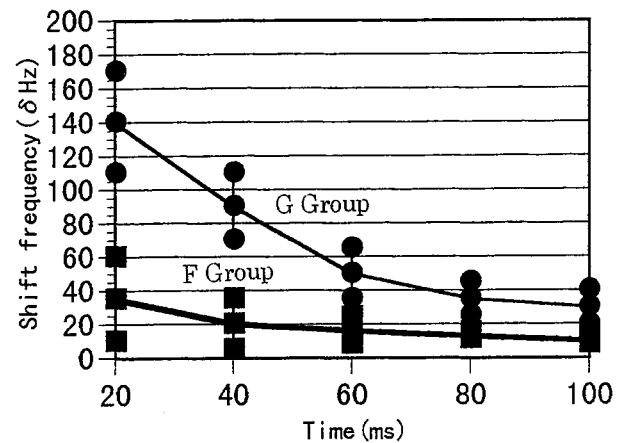


Fig. 19 The result of threshold level test for shift in sound frequency. 周波数変化検知テスト結果

子音明瞭度100%が得られたFグループは、シフト時間40 msで20 Hz、20 msで40 Hzの周波数変化の検知が可能であった。これに対して100%の子音明瞭度が得られなかったGグループは、40 msで90 Hz、20 msで140 Hzの周波数変化の検知しかできなかった。この結果より、40 msで20 Hz、20 msで40 Hzの周波数変化の検知が可能であれば、100%の子音明瞭度が得られることが明らかになった。

子音の発声時間が300 ms程度であっても、子音として弁別できる中間部の時間は極めて短く、30~60 ms程度で、子音全体の1/10~1/5であることを前述したが、この時間における20~40 Hzの周波数変化を検知できないと100%の子音明瞭度が得られないと考えられる。

次に第2章4節で述べた周波数弁別能力検査（以下A検査という）と本テスト（以下Bテストという）の難易度を比較する。

A検査結果もBテスト結果も良好であった被験者は12名であり、残り8名の被験者はすべてBテストの結果が悪かった。そしてこの8名のうちA検査結果は良

Table 7 Comparison of difficulties between A examination and B test.
A 検査と B テストの難易度比較

群	グループ	被験者	A 検査	B テスト	
コン ト ロ ー ル 群	A	F	A1	良好	良好
			A2		
			A3		
			A4		
			A5		
			A6		
	B		B1		
			B2		
			B3		
高 齢 者 群	C	G	C1	悪い	悪い
			C2		
		F	C3	良好	良好
			C4		
	D	G	D1	悪い	悪い
			D2		
			D3	良好	
			D4		
	E		E1		
			E2		

かった被験者が4名おり、残りの4名がA検査・Bテスト共に結果が悪かった。

以上の結果より、周波数変化速度テスト (Bテスト) は周波数弁別能力検査 (A検査) より難しいこと、すなわち 80 ms における周波数の相違は検知できても、80 ms における周波数変化は検知できない被験者がいることが明らかになった。

3.5 子音聴取能力実験結果のまとめ

第3章において子音聴取能力を調べるための実験を行ってきたが、その大要を述べると次の通りである。

- 1) 子音弁別能力検査の結果、音圧レベルを増加するに伴い、100%の子音明瞭度が得られたグループと、そうでないグループに分類された。100%の子音明瞭度が得られなかったグループに属する被験者は、すべて高齢被験者であった。
- 2) 音圧レベルを増加しても弁別できない子音は限定されており、それらは「デ」「バ」「ハ」「ネ」であった。
- 3) 2) で示した弁別できない子音を対象に波形分析を

行った。その結果、他の子音と比較して発声時間が長い子音であっても聞き取り率の高い子音があることが明らかになった。

- 4) 部分再生法により、子音波形で弁別可能である部分を調べた。その結果、子音は前・中・後部の3部分に分けられた。そして、前部は子音として聞き取れず、中間部において始めて子音として弁別可能になり、後部は子音でなく母音として聞えることが判明した。
- 5) 高齢被験者に弁別できにくい子音は、4) で述べた中間部の短い子音であることが明らかになった。すなわち子音中間部の極めて短時間における周波数変化が検知できなかったため、子音の弁別ができないことを明らかにした。
- 6) 5) で述べたことをもとに、周波数変化速度テストを考案した。その結果、40 ms で 20 Hz、20 ms で 40 Hz の周波数変化が検知可能であれば100%の子音明瞭度が得られるが、40 ms で 90 Hz、20 ms で 140 Hz 程度の検知では、100%の子音明瞭度は得られないことが明らかになった。

4. まとめ

音声聴取能力を評価するため、母音聴取能力検査と子音弁別能力検査を行った。さらに音の大きさと高さについての知覚能力を調べるために、オーディオメータによる検査、周波数弁別能力検査そして周波数変化速度テストを行った。その結果、音声聴取能力を評価するためには、すでに健康診断などで実施されているオーディオメータによる検査以外に、周波数変化速度テストを行うことが必要であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 岡本ら：老人性難聴と視聴器，日本医学会誌，Vol. 101, No. 5, (1992).
- 2) 中村 章，宮坂栄一：高齢者の聴覚特性～聴力は年とともにどう変化するか？～，NHK 技研 R&D, 通巻 18, pp. 27-35, (1992).
- 3) 鈴木芳美，白井伸之介ら：建設工事における墜落災害の人的要因に関する多変量統計解析，労働省産業安全研究所研究報告，NIIS-RR-97, pp. 17-26, (1998).
- 4) 中田和男：音声，日本音響学会編 7 音響学講座，pp. 18-47, コロナ社，(1980).
- 5) 電子通信学会：新版 聴覚と音声，pp. 311-322, コロナ社，(1980).
- 6) 中村賢二監修：オーディオメータによる聴力検査法 (改訂版)，pp. 21-26, リオン株式会社，(1985).
- 7) 鈴木 郁，林 嘉男：騒音下における無意味語の若年者

- および高齢者による聴取について, 人間工学, Vol. 27, No. 1, pp. 25-33, (1991).
- 8) 鈴木 郁, 林 嘉男, 武田正治: 騒音下における音声聴取能力の加齢劣化の補償に関する一考察, 人間工学, Vol. 30, No.3, pp. 147-155, (1994).
- 9) 城戸健一: 音声の合成と認識, 新 OHM 文庫, pp. 10-13, オーム社, (1993).

(平成 11 年 1 月 20 日受理)