

# 耳と音響実験機器のエイジング

平原 達也

富山県立大学工学部 〒939-0398 富山県射水市黒河 5180

E-mail: hirahara@pu-toyama.ac.jp

**あらまし** 音響実験機器の諸特性は、使用期間が長くなると変化する。かつて、新しい機器はエイジング（慣らし運転）を行い、使いこんだ機器も電源投入時にはエイジング（暖機運転）を行うことが普通であった。ところが、今日では、電源投入とともに受聴実験や音響測定を始めることが少なくないように思う。デジタル音響機器のエイジングはもはや不要なのだろうか？耳の諸特性も、使用期間が長くなると変化する。高齢者の耳は、そのフロントエンドの感度が低下するだけでなく、バックエンドのさまざまな機能が低下する。これは高齢者だけの問題なのだろうか？本稿では、このような音響実験機器と耳のエイジングについていくつかの事例を紹介する。

**キーワード** 音響機器、聴覚、慣らし運転、暖機運転、エイジング

## Ageing of acoustic experimental equipment and ears

Tatsuya HIRAHARA

Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University, 5180 Kurokawa, Imizu, Toyama, 930-0398 Japan

E-mail: hirahara@pu-toyama.ac.jp

**Abstract** Various characteristics of acoustic experimental equipment change while using for a long time. My mentors taught me that we must perform pre-conditioning interim operation, or aging operation when we start using new equipment and that even equipment that are used for a long period need to be warmed up before starting the experiment. Nowadays, listening tests or acoustic measurements, however, are often started immediately after turning on the equipment. Is it no longer necessary to perform aging operation with the modern digital audio equipment? In the ears of the aging people, not only the sensitivity of the front end decreases but also various functions of the back end are deteriorated. Various characteristics of ears change while using for a long time. Is this a problem only for aging people? In this article, I introduce some examples of aging of acoustic experiment equipment and ears.

**Keywords** acoustic experimental equipment, ears, pre-conditioning interim operation, warm-up operation, aging

### 1. はじめに

エイジング（ageing）とは、時を経るという意味である。このエイジングという言葉には、新しい機器の慣らし運転という意味もある。その昔、新車は、千キロくらい走るまではエンジンの回転数を抑えた慣らし運転が必要であると教わった。新品のスピーカーやイヤホン、エッジなどの振動系の動作を滑らかにするために、大音量で音楽などを長時間再生しつづけるエイジングが必要といわれている。新品のアンプなども、電子部品に電流を流して接合部やコンデンサの化学変化を促進するために、長時間電源を入れたままにして、エイジングをしたほうがよいといわれている。

エイジングという言葉は、起動時の暖機運転という意味でも用いられることがある。その昔、朝に自動車のエンジンをかけたときは、水温計の針が動きだすまでアイドル状態待ち、エンジン各部やオイルの温度がある程度上げる暖機運転は必要であると教わっ

た。また、測定機器は、電圧や DC バランや機器内部の温度を安定させて所定の測定精度を確保するために、電源投入後は必ず暖機運転をせよと教わった。

機構部品の加工精度が高くなった現在、新車の慣らし運転の必要はなくなったともいわれる。また、大気汚染防止や省エネルギーの観点から、暖機運転は推奨されなくなった。電気自動車には暖機運転を必要とする内燃機関は無い。デジタル機器が全盛となった現在、音響実験機器の電源を投入した直後に受聴実験や音響計測を始める学生諸君が少なくない。さらに、エイジングは「都市伝説」である、と話す計測工学の専門家にも出会うようになった。

生物にとってのエイジングとは、歳をとるということである。歳をとると機能が衰える。機能が衰え、性能が低下した工業製品は、部品を交換して性能を回復させたり製品自体を交換したりできる。生物を構成する部品も IPS 細胞で再生する可能性はあるが、感覚系

の部品を交換することは、現時点では、容易ではない。

聴覚では、一般的に、歳をとると音が聴こえにくくなる。この主因は、蝸牛の基底膜に載る外有毛細胞が衰えて基底膜が能動的な振動をしなくなり、聴覚系のフロントエンドの感度が下がるとともに、聴覚フィルタの幅が広がるためである。なお、歳をとらずとも、音響被曝などによって同様のことは起きる。「六十而耳順」という聖人もいるが、歳をとると聴きたくないことは聴こえ（聴か）なくなることもしばしばある。この主因は、聴覚・音声系のバックエンド機能の問題である。なお、「人は自分の聴きたい言葉しか聴かない、自分の見たいものしか見ない」というのは歳によらないのかもしれない。

本稿では、このような音響実験機器と耳のエイジングについての事例を紹介する。

## 2. 音響機器のエイジング

本章では、いくつかの音響実験機器のエイジングに関わるいくつかの事例を紹介する。

### 2.1. ヘッドホン

筆者の研究室では、聴覚実験には密閉型の耳覆い型ヘッドホン HDA200 (Sennheiser) を用いている。HDA200 はすでに廃品種だが、実耳装着時の周波数特性が IEC カプラ装着時とよく一致すること、遮音量が大きいこと、音響クロストークが少ないことなどから、長い間使い続けている。

最小可聴閾値を測定すべく、学生が刺激音の音圧レベル調整していた。実験室に立ち寄った筆者は、オーディオアナライザ (B&K, 3560C/3100) の画面を見て、125Hz の刺激音のスペクトルが多くの高調波成分を含んでいることに気づいた。「これはなあに？」と学生に訊くと「こんなものかと思っていた」とのことだった。

研究室にある 6 台の HDA200 を持ち出し、12 個のドライバの歪特性を比較した。図 1 に示すように、学生が使っていた HDA200 #1 の左ドライバでは、100 Hz の出力スペクトルには大量の高調波が含まれ、1 kHz の出力スペクトルには低レベルの第二・第三高調波しか含まれていなかった。その結果、他のドライバと比べて 550 Hz 以下の高調波歪率は 20 dB も高かった。

6 セットの HDA200 の内、#1 と #2 は使用期間が 13 年と最も長く、かつ、頻繁に使用している。しかし、高調波歪率特性が劣化していたのは #1 の左ドライバだけで、他は以前に測った特性<sup>[1]</sup>と同様であった。HDA200 #1 の左ドライバの特性劣化は、乱雑な扱いを含めた、経年変化 (エイジング) の結果と考えられる。もちろん、このヘッドホンは使用禁止にした。

本件は、実験に用いるヘッドホンの基本特性をときどき確認する必要があることと、実験に用いる刺激音は常に確認する必要があることを思い出させてくれた。

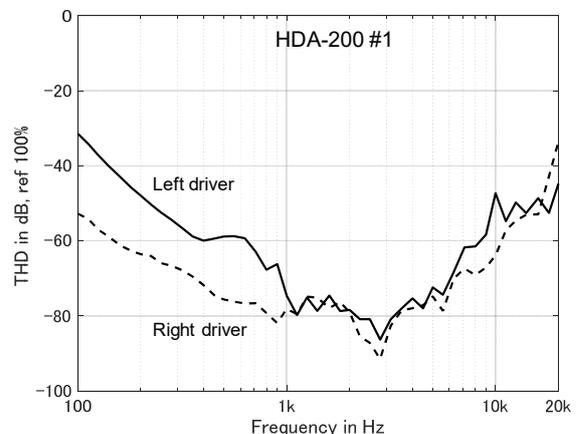
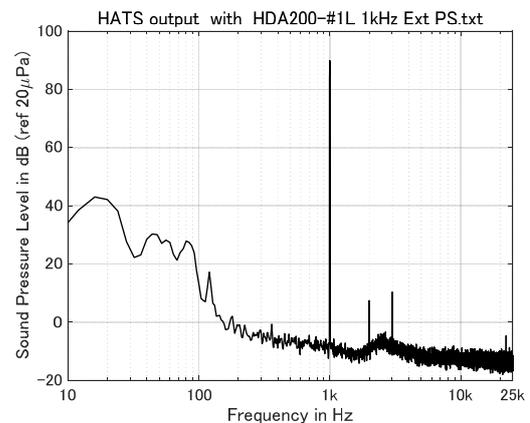
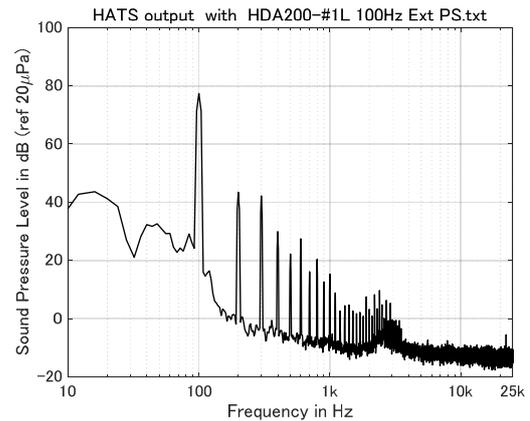


図 1 HDA200 #1 の L ch ドライバの 100 Hz の出力音スペクトル (上段)、1 kHz の出力音スペクトル (中段)、左右ドライバの高調波歪率特性 (下段)

### 2.2. ヘッドホンアンプ

聴覚実験用のヘッドホンアンプとしては AT-HA20 (Audiotechnica) を 13 年間使い続けている。これは TEA2025 (Unisonic) を使用したステレオアンプで、電氣的なチャンネル間クロストークが -40 ~ -60 dB 程度しかないので片チャンネルずつ使う必要があるが、使いやすいヘッドホンアンプである。電源電圧は 12V

で、附属の AC アダプタから供給される。

オーディオアナライザ (B&K, 3560C/3100) を用いて HDA200 の歪特性を測るとき、AT-HA20 の出力電圧信号にハム雑音が重畳していた。

図 2 は、1 kHz, -20 dBV (100 mV) の正弦波信号を入力したときの、43 Ω の抵抗負荷を接続した AT-HA20 出力電圧信号のスペクトルである。同図に示されるように、1 kHz とその第 2 高調波である 2 kHz の他に、120 Hz と 240 Hz にスペクトルが出現している。

これらのハム雑音成分は、AT-HA20 の電源 DC12V を、10 年前に購入したシリーズ・レギュレータ方式の定電圧電源 (菊水電子, PMC 18-3) から供給すると消失した。すなわち、図 2 のハム雑音成分は AC アダプタに起因したもので、経年変化 (エージング) による整流回路のキャパシタの容量抜けが原因と推測される。

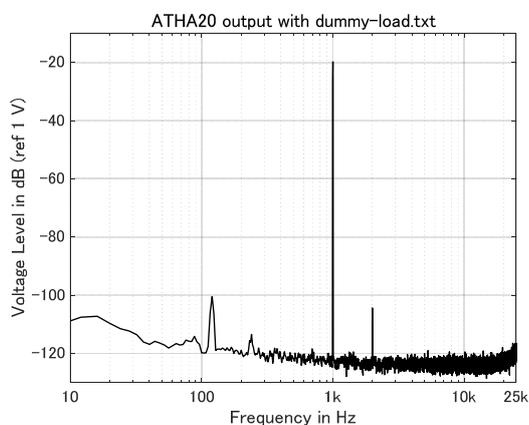


図 2 AC アダプタから給電した AT-HA20 の 1 kHz 正弦波信号の出力スペクトル

### 2.3. ラウドスピーカ

実験用のラウドスピーカを交換することに伴い、スピーカのエージングの効果の有無を確認した。ラウドスピーカは Microsatellite (Anthony Gallo) で、直径 10cm の球形エンクロージャー内に 7.6 cm (3 inch) のフルレンジ・ドライバが入っている密閉型のラウドスピーカである。

9 個のスピーカの真正面 25cm に、エレクトレット・コンデンサ・マイクロフォン WM64AY (Panasonic) を設置し、logTSP 信号<sup>[2]</sup>を用いてインパルス応答を測定した。再成・録音系の AD/DA コンバーターは Fireface UC (RME)、パワーアンプは CR-N755 (ONKYO)、マイクロホンアンプは Fireface UC 内蔵のものを用い、サンプリング周波数は 48 kHz とした。エージングとして白色雑音を 90 dB で約 9 時間連続して鳴らし、その前後でラウドスピーカのインパルス応答を測定した。

図 2 に示すように、エージング前後でインパルス応答波形はすこし異なっているが、そのスペクトルに大

きな変化は認められず、ほぼ重なっている。エージング前後のスペクトルの差は ±1 dB 以内であった。

約 9 時間の白色雑音によるエージングは、この再成・録音系に大きな効果を与えなかった。±1 dB 以内のスペクトルの差は、室温やマイクロホンの位置を含めた測定誤差の範囲といえる。また、ラウドスピーカの周波数特性の個体差は大きいですが、これは逆フィルタをかけることで補正している。

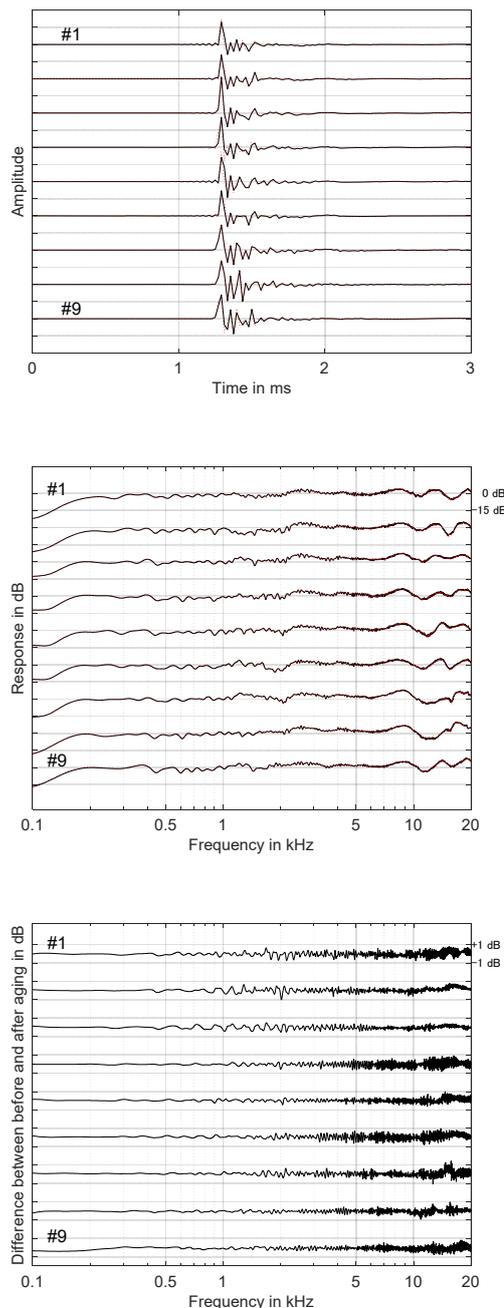


図 3 エージングの前後で測定したインパルス応答波形 (上段)、インパルス応答のスペクトル (中段)、およびインパルス応答のスペクトルの差 (下段)

## 2.4. USB オーディオインタフェース

聴覚実験やインパルス応答計測用の A/D, D/A コンバーターには、USB-AIF (USB-audio interface) 装置を使っている。筆者の研究室では、数年前までは UA101 (Edirol) を、それ以降は Fireface UC と UFX (RME) を、昨年は ADI-2 Pro (RME) を試用し、今年から Fireface UFX II (RME) を使い始めた。

防音室でインパルス応答を測っている学生の様子を見に立ち寄ったときに、表示されたスペクトログラムの 18 kHz 辺りに一本の帯が出現していることに気づいた。当該学生に「これなあに？」と訊くと、存在は認知していたが、なぜ現れるのかよくわからない、ということだった。

防音室内を覗いてみると、床に置かれた FireFace UC とパワーアンプに反射防止のための吸音材が被せてあった。吸音材をどかし、二段重ねにしてあった FireFace UC に触ると、その筐体上面はかなり熱くなっていた。あれこれとノイズ対策を試しているうちに、このノイズは FireFace UC 自身から出ている電気的なノイズであること、また筐体の温度が下がるとノイズの周波数も下がることが判った。

USB-AIF のマイク入力端子 1 に ECM のバイアス回路を接続して直流阻止用コンデンサの両端の電圧を、マイク入力端子 2 は出力端子 1 と不平衡ケーブルで接続し、ゼロ信号を出力したときの入力信号を録音し、スペクトルを算出した。このとき、マイクアンプのゲインは 50 dB とした。USB-AIF の入出力は電子式の平衡回路で、不平衡信号を入出力することもできる。

図 4 に示すように、ECM のバイアス回路を接続した FireFace UC のマイク入力端子 1 で収録した信号には、レベルは低い、複数のノイズ成分が含まれているのに対し、適切に終端されているマイク入力端子 2 で収

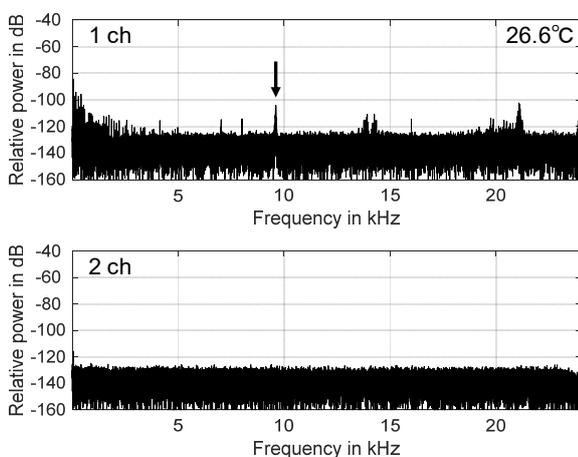


図 4 FireFace UC のマイク入力端子 1, 2 の入力信号スペクトル。ECM のバイアス回路を接続した 1 ch には多数の微弱なノイズ成分が出現する。

録した信号にはそれらが含まれていなかった。そして、筐体に吸音材を被せて、筐体上面の温度を 41°C まで上げると、温度上昇とともに 9.6 kHz にあったノイズ成分の周波数が徐々に上昇し 19.2 kHz に移動した。ただし、他のノイズ成分の周波数は変わらなかった。

なお、平衡出力を持つマイクロフォンを入力端子 1 に接続した場合は、このようなノイズ成分は出現しなかった。また、FireFace UFX II で同じ条件で信号を収録すると、22.6 kHz にだけ弱いノイズ成分が出現するだけだった。

次に、FireFace UC の電源を投入してから 4 時間にわたって、筐体上面の温度と 1 kHz の正弦波信号の出力電圧と周波数を測定した。温度は、放射温度計 (シンワ, 7310) で、電圧と周波数は、十分にエージングしたデジタル・マルチメータ (Keysight, U3401a) で測定した。このとき、1 時間ほど筐体に吸音材を被せて、熱負荷を与えた。

図 5 に示すように、筐体上面の温度は電源投入直後から上昇し、約 1 時間で 37°C の平衡状態に達し、筐体に吸音材を被せると温度は約 1 時間で 47°C に達したが、その間、出力電圧はほぼ 10.69 dBV (3.425 V) で、周波数は 1.000 kHz 一定であった。

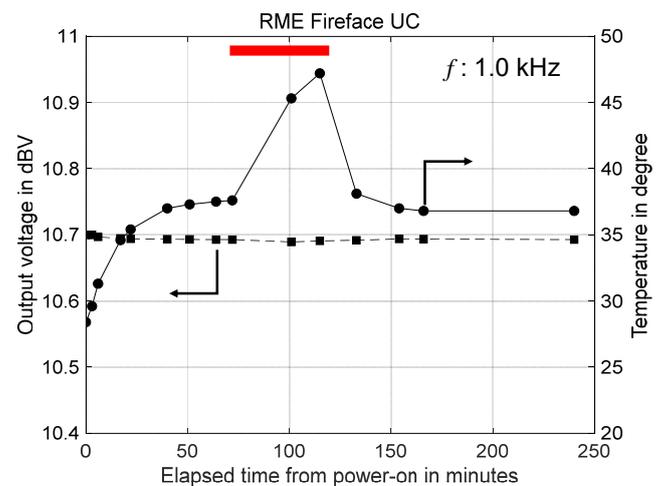


図 5 FireFace UC の 1 kHz 正弦波信号出力電圧と筐体上面温度との関係

## 2.5. 体導音センサ

ダイアフラムを露出したエレクトレット・コンデンサ・マイクロホンを用いた円筒筐体に収納し、上面にウレタンエラストマーを充填した体導音センサは、体表面に到達する体内伝導音を高感度で検出できる<sup>[3]</sup>。

2008-2009 年に作成した体導音センサのうち、薄型のもはウレタンエラストマーが溶解し、小型のもはウレタンエラストマーが硬化していても使用不能になっていた。加水分解や酸化が起きたため、あるいは溶剤混合時に硬化剤の配分量が不適切だったた

めと考えられる。一方、30φ, 4 mm 厚の体導音センサは、以前とほぼ同じ感度を保っており、さまざまな体導音を検出できた



図 6 2008-2009 年に作成した体導音センサたち

### 3. 耳のエイジング

本章では、著者の耳の経年変化の実例について紹介する<sup>[1,2]</sup>。

#### 3.1. 最小可聴閾値

耳の感度は加齢とともに衰える。通常は、高域周波数の最小可聴閾値が高くなる。1990 年台には、テレビカメラの水平同期信号の周波数である 15.7 kHz の音はかすかに聴こえていた。2005 年ごろに登場したモスキート音は聴こえなかった。また昨年くらいから、ラジオやステレオを聴くときには、音量を以前よりも約 8 dB 上げて聴くようになっている。

マスキングの研究に取り組んでいた 1984 年にはプローブ音である持続時間 15 ms の 1/3 oct 帯域雑音パーストの最小可聴閾値を自ら毎日測っていた<sup>[4]</sup>。当時の AD/DA 変換器のサンプリング周波数は 10 kHz、量子化精度は 12 bit、ヘッドホンは STAX の SR-5 だった。横須賀通研の防音室の暗騒音レベルは 28 dB で、防音室外から音の混入がありしばしば測定を中止した。当時の研究ノートに残されている数値からデータは再現できる。

その後、ATR と厚木通研で静かな実験室<sup>[5]</sup>をつくったが、いずれでも最小可聴閾値の測定は行わなかった。富山県立大に着任した翌年から、研究室では卒研配属された 4 年生の卒論導入課題の一つとして、持続時間 1 s の純音の最小可聴閾値の測定を行っている。著者もこれまでに 3 回測定しているが、測定には数時間かかるので毎年測定していない。

図 7 にこれらの最小可聴閾値を描いたものを示す。1984 年の閾値は持続時間 15 ms の 1/3 oct 帯域雑音パーストのものであり、そのラウドネスレベルは 1 s の持続時間ものと比較して約 10 dB 小さくなる<sup>[6]</sup>。この値を補正すると、当時の最小可聴閾値は、ISO 389-8:2004 とほぼ同じかそれ以下になる。

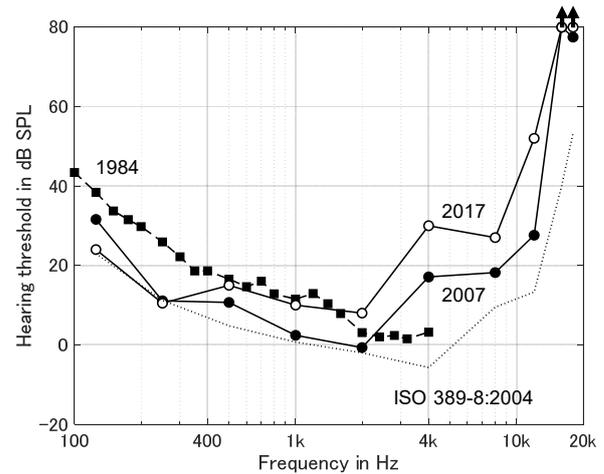


図 7 筆者の最小可聴閾値の推移

また、この 10 年で筆者の耳は、1 kHz 以上で 10 dB も閾値が上昇しており、いつからか 16 kHz 以上の音は全く聴こえなくなっている。

#### 3.2. ピッチ知覚

筆者は絶対音感はないが、音楽を聴いてメロディを鍵盤で弾いたり、採譜したりはある程度できていた。ところが、数年前から、それが怪しくなってきた。全体的に半音から全音、高い音名にずれて認知するようになってきた。そして、鍵盤で弾いた音と原音を鳴き合わせて音名のずれが判ると、すぐに音名は修正される。ピッチの知覚が変わるのではなく、ピッチと音名という記号との対応関係がすぐ変わるのである。

口笛を吹いて出した C6 から C7 までの音の周波数と平均律音階の周波数とは半音もズレていなかった。音を聴かずに吹いた C6 (1047 Hz) の口笛の周波数は 1056 ~ 1080 Hz、G6 (1568 Hz) の口笛の周波数は 1573 Hz といった具合である。耳のバックエンドでは一体何が起きているのだろうか？

その後、加齢に伴って絶対音感がシフトする現象<sup>[7]</sup>があることを知った。筆者は音楽家ではないので、このピッチのずれは致命的ではなく、楽譜を見たときや鍵盤を叩いたときにショックを受けるだけである。

高速道路を走行中に聴いている音楽で、よく知っている曲であるにもかかわらず、メロディを追えないものに遭遇するようになった。女性ヴォーカルの高い歌声のメロディは追えるが、ベースが奏でるイントロや男女声を問わず低ピッチの歌声は、メロディが追えない。ただし、音量を上げるとこの現象はなくなる。

この原因も、聴覚フィルタが広がっているからと考えられる。フロントエンドのフィルタの帯域幅が広がると、各帯域内に含まれる調波成分の S/N が低下し、場所情報も時間間隔情報も一次聴神経にきちんと符号

化されなくなるからである。残念ながら、これまで自分の聴覚フィルタの幅は測ったことがない。今更測っても愕然とするだけだから、今後も測る予定はない。

### 3.3. 音声知覚

ときどきスーパーのレジでの支払い金額を聞き間違えることが起こるようになってきた。昨年くらいからである。千二百何十円の二百の「に」を聴き損ねたこともある。これも聴覚フィルタが広がったことによる S/N 低下の影響と考えられる。

普段からよくラジオを聞いているが、しばらく前から、ニュースを読み上げるアナウンサーのアクセントパターンに引っかかることが多くなった。最初は聴き間違えかとも思ったが、何度も同じ読み方をするので、筆者の耳のバックエンドの問題ではないことが判った。

80年代後半に、音声合成装置のテキストを解析して適切な音韻とアクセントパターンを付与するプログラムを FORTRAN (!!) で書かされていた<sup>[8]</sup>。そのとき、アクセント規則は、日本放送協会の日本語アクセント辞典に基づいて作成していた。ところが、最近の放送局のアナウンサーは、カクミサイルカイハツを「カク (1型) ミサイル (0型) カイハツ (1型)」、シルバージンザイを「シルバー (1型) ジンザイ (0型)」と違和感のある複合語アクセントで読みあげる。

なお、後日、カクミサイルカイハツは「核ミサイル開発」ではなく「核・ミサイル開発」であると判り、納得した。

### 3.4. 音像知覚

立体音響分野に参入し、音像定位実験の被験者を幾度となく務めてきた。頭外定位と頭外定位の違いは明瞭に判るし、音像定位も苦もなくできる。高域の最小可聴閾値が高くなり、聴覚フィルタが広がった現在でも、問題なく音像定位はできる。音像定位の処理系は、これらの影響をあまり受けないのかもしれない。

ところが、いつごろからか、頭内定位と頭外定位の区別ができない学生が多いことに気がついた。そこで、本実験を行う前に、訓練をするようになった。具体的には、開放型ヘッドホンを装着したままスピーカ・アレイの中心に座らせ、ヘッドホンから再生したモノ信号と一つのラウドスピーカから再生したモノ信号を聴かせて、それらが鳴っている位置の違い、すなわち音像距離の違いを確認させる。その後で、水平面の 30° 間隔 12 方向から出した刺激音を順に聴かせて、音が鳴っている方位が違うことを体験させる。

ここまで体験させて、多くの学生諸君は音が違った位置から聴こえてくることを再認識する。これは、日常的に音楽をイヤホンで聴いていることと関係しているのではないかと推測している。

本実験の 1 セッションでは 12 方向の音源位置から

ランダムに 5 回ずつ刺激音を呈示し、30 度ごとに区切った方位を頭内・頭外定位を区別して回答させる。

各被験者は 4 セッションの音像定位実験を行い、各音源方位から呈示された 20 回の刺激音の定位方位を得る。このときに、音色やラウドネスなどを手がかりに回答 (音源定位) せずに、聴こえた音の方位を素直に回答 (音像定位) するように繰り返し注意する。基本的に、結果のフィードバックは行わない。後知恵で、正答率を高めようとする、被験者として不適切な行動を防ぐためでもある。

訓練効果はないのかとしばしば質問されるが、ほとんどの被験者で 4 セッションの頭外定位正答率などに、有意差はない。ただし、実耳で水平面の実音源を聴かせたときの頭外定位正答率が 80% 以下の者や、実験中に居眠りをしてしまう者や、閉塞感があり実験を続けられないと申告した者は、その後の定位実験の被験者から除外する。

学生諸君を音像定位実験の被験者にする場合は、このようなスクリーニングを兼ねたバックエンドのエンジニアリングが必要なのである。

## 4. おわりに

音響実験機器のエンジニアリングは不可欠であると確信していたが、現代の機器については、そうでもなさそうである。しかし、必要に応じてエンジニアリングを行い、機器の特性を確認することは肝要であろう。一方、エンジニアリングによる筆者の耳の機能低下は隠すべくもない。いつまで健聴者として聴覚実験の被験者を務められるかは、時間の問題である。

謝辞 本研究の一部は科研費(17K00244)の助成を受けた。

## 文 献

- [1] T. Hirahara: "Physical characteristics of headphones used in psychophysical experiments," *Acoust. Sci. & Tech.* 25(4), 276-285, (2004).
- [2] 金田 豊, "インパルス応答測定信号と測定誤差," *日本音響学会誌* 69(10), 549-554, (2013)
- [3] 平原達也, 清水奨太: "小型体導音センサによる種々の体導音検出," *音講論*, 627-628, (2009.09).
- [4] T.Hirahara, "Internal speech spectrum representation by spatio-temporal masking pattern," *Acoust. Sci. & Tech.* 12(2), 57-68, (1991).
- [5] 福満英章, 榎本国次, 平原達也, "マイナス dB の無響室," *音響技術*, 31(4), 54-60, (2002).
- [6] 平原達也, 蘆原郁, 小澤賢司, 宮坂榮一, *音と人間* (コロナ社, 東京, 2013) p.138.
- [7] 津崎実, 松井淑恵, 入野俊夫, 竹島千尋, "加齢に伴う絶対音感のシフト: 音域の影響," *聴覚研究会資料* 44(2), 81-86, (2014).
- [8] K. Hakoda, K. Nagakura, T. Hirahara, and K. Kabeya, "Japanese Text-to-Speech Synthesizer," *Journal of the American Voice I/O Society*, 6, 1-16, (1989).