

連載：一録音エンジニアの回顧録～アナログからデジタルへ～ 第5回  
音質劣化要因「コムフィルター効果」他の改善について  
日本オーディオ協会諮問委員 穴澤 健明

V-1. はじめに

前号では、前々号まで続けてきた音質改善に関する回顧を中断し、2015年9月に独立行政法人国立科学博物館が新たに登録した重要科学技術史資料（通称未来技術遺産）でのオーディオ関係の案件について解説を加えた。本号では、音質改善の回顧に戻り、重大な音質劣化要因である「コムフィルター（Comb Filter）」による音質劣化の改善について説明を加え、併せて現在話題になっているハイレゾで改善が望まれている変調雑音についても説明を加える。

図1に、コムフィルターの作成方法とその出力特性を示す。この図からわかる通り、正弦波信号を入力に加え、これに遅延を加えた同じ信号を加算すると出力に櫛歯状の特性を持つコムフィルター（櫛歯型フィルター型）が構成される。図1の入力に可聴帯域内の信号を加えた場合、その出力では、ビート音にも似た独特の異音が発生し、録音での解決が難しい厄介な音質劣化要因となっている。

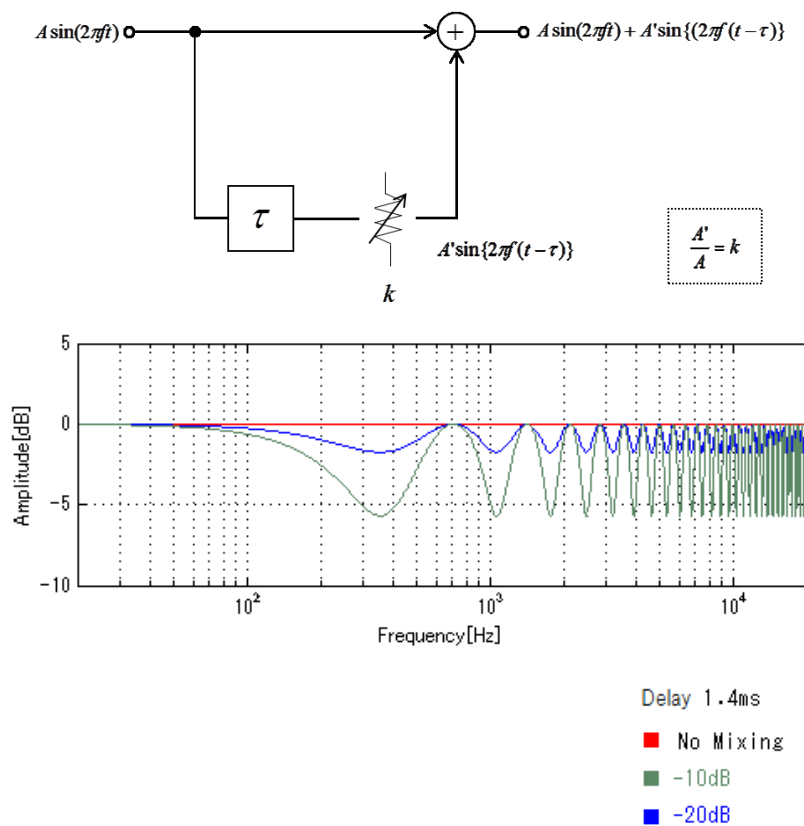


図1. コムフィルター（櫛歯型フィルター）の作成方法例とその出力特性

AES (Audio Engineering Society) など専門の学会の文献では、この音質劣化を他の音質劣化と区別して「コムフィルター効果」(Comb Filter Effect)と呼び、その発生による音質劣化とその抑制の必要性を訴えている。筆者も40年以上前にこの効果に気づき、その有効利用について仲間の音響技術者と相談した記憶があるが、結果は有効利用どころか40年以上この音質劣化に悩まされ続けている。効果というからには音質改善要因のように思うのだが、その実、大変悩ましい音質劣化要因なのである。

昨年、大学の研究室時代からの友人である千葉工業大学情報科学部情報ネットワーク学科の柳川教授と柳川教授の研究室の卒論生であった海老原涼氏と会い、この「コムフィルター効果」に関するディスカッションを行い、被験者に若い千葉工業大学の学生を用いた評価実験や測定を行っていただいた。「コムフィルター効果」に関する本誌読者の知見を増すため、その結果を以下に転載させていただく。

「コムフィルター効果」の測定評価に加え、千葉工業大学情報科学部情報ネットワーク学科の柳川教授には、今注目を集めている可聴限界帯域の上限付近で発生する変調雑音に関する味見的な測定もお願いし、その結果も本稿に転載させていただく。

現段階での最大の音質劣化要因とも考えられる「コムフィルター効果」と高音域での変調雑音の改善について述べた後で、今後取り組むべき課題について検討させていただきたい。

## V-2. 「コムフィルター効果」に関連するこれまでの経緯と経験

ステレオが本格的に始まった1950年代末から、ステレオとモノラルのコンパチビリティ(互換性)が問題にされ、收音方法によって互換性の程度が変化することが知られていた。特に無指向性のマイクロフォン2本を数十センチの間隔を開けて置くAB方式と呼ばれる收音方法では、雰囲気をよく伝え、臨場感に富んでいるとの高い評価が得られる反面、モノラルとの互換性という観点では左右の信号を加算すると「コムフィルター効果」が発生し、著しく音が濁ることが経験された。AB方式では左右間の時間差があるもののレベル差が少ないため、モノラル再生時には左右信号を加算することなく、左右どちらかの信号を使えば音が濁らないことが経験されたのである。これは、同一音場内に複数のマイクロフォンを置き、その出力を電氣的に単純に加算すると「コムフィルター効果」が発生し、音が濁る可能性があることを示している。ここで起きた「コムフィルター効果」による音質劣化は、今でも多くのワンポイントマイクロフォン録音作品の左右信号を加算したモノラルを聴くと経験できる。

同一音場内に多数のマイクロフォンを置いて集音を行うマルチマイク録音では、この「コムフィルター効果」による音質劣化に関する注意を怠ると、迫力はあっても濁った音に悩まされることとなる。

1960年代後半になると、4チャンネルオーディオに注目が集まり、既存の2チャンネル信号とコムフィルターを組み合わせる4チャンネル伝送路を確保してはどうだろうかということで実験を行ったことを覚えている。この実験では「コムフィルター効果」による音質劣化に悩まされ、実験は失敗に終わり、通常の録音での「コムフィルター効果」の改善の必要性のみがクローズアップされた。

その後1970年代になってデジタル録音が導入されると、磁気テープの走行ムラなどの改善に

より、信号のゆらぎ成分が減少したため、「コムフィルター効果」はより顕著に目立つこととなった。

1985年2月には、当時東独のドレスデンで1945年2月のドレスデン空襲で廃墟となっていたゼンパーオペラが再建され、その復興記念公演の録音に参加し、世界各国への中継放送を行う機会を得た。この歴史的な録音で何とか「コムフィルター効果」による音質劣化を改善したいということで、複数のマイクロフォン間で生じる遅延を補正する遅延補正ミキシングに関する論文

”Digital Time-coherent Recording Technique” Preprint 2493(H-2)、the 83rd AES Convention 1987 October 16-19, New York (参考文献1) 参照) を1987年にAESで発表した。

この論文の発表後の反響は思いのほか大きく、論文発表後にカナダをはじめ欧米各国の大学で遅延補正ミキシングに関する研究が始まった。

またこの論文を執筆する際に行った評価実験に使用したコンテンツについては、1988年に日本オーディオ協会より発売された“オーディオテスト用ビデオディスク「オペラ魔弾の射手」ハイライト”(参考文献2))を参照されたい。遅延補正を行う前の段階での多チャンネル再生の一般状況については、1989年日本オーディオ協会発行の“4チャンネル再生のいろいろ”AVガイド(参考文献3))を参照されたい。

### V-3. 千葉工業大学によるコムフィルター効果に関する測定評価結果

千葉工業大学柳川研究室で行ったコムフィルター効果による異音の検知限の評価結果を以下に示す。

測定は、手間はかかるが、楽しんで精度の良い測定が可能な自分でボリュームをコントロールして聞こえる限度を探る調整法で行った。

#### 1) ホワイトノイズでの「コムフィルター効果」による異音の検知限

音源にホワイトノイズを使い、後続音のレベルと遅延量を変えた場合の「コムフィルター効果」による異音の5人の学生被験者による検知限の測定結果を図2に示す。ここでの後続音の遅延時間2.5ms、5ms、10ms、20msは、マイク間の距離で表すと85cm、1.7m、3.4m、6.8mに相当する。

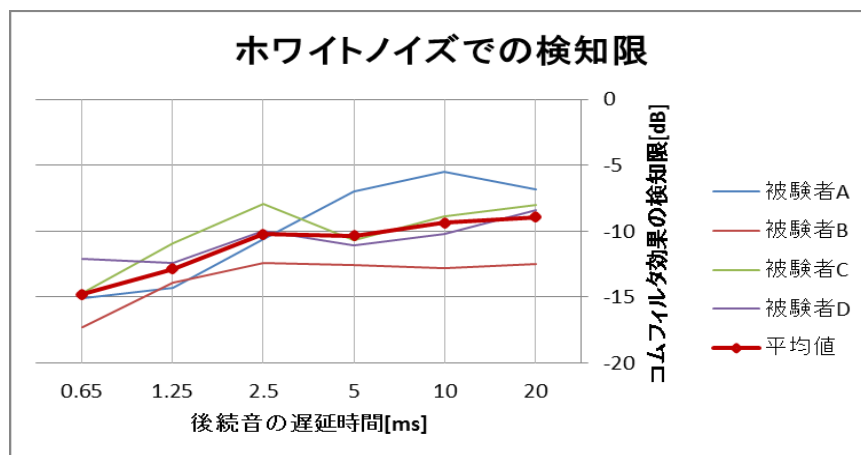


図2. ホワイトノイズでの「コムフィルター効果」による異音の検知限に関する実験結果

ホワイトノイズでは、「コムフィルター効果」の検知が容易な人と難しい人との差が大きく、両者の差は7dBにも及び、遅延時間が短くなると感度が良くなり、長くなると感度が下がる傾向がある。これはホワイトノイズという音源特有の性質によるものと思われる。

2) トランペットでのコムフィルター効果の発生による異音の検知限

音源にトランペットを使い、後続音のレベルと遅延量を変えた場合の「コムフィルター効果」による異音の5人の学生被験者による検知限の測定結果を図3に示す。

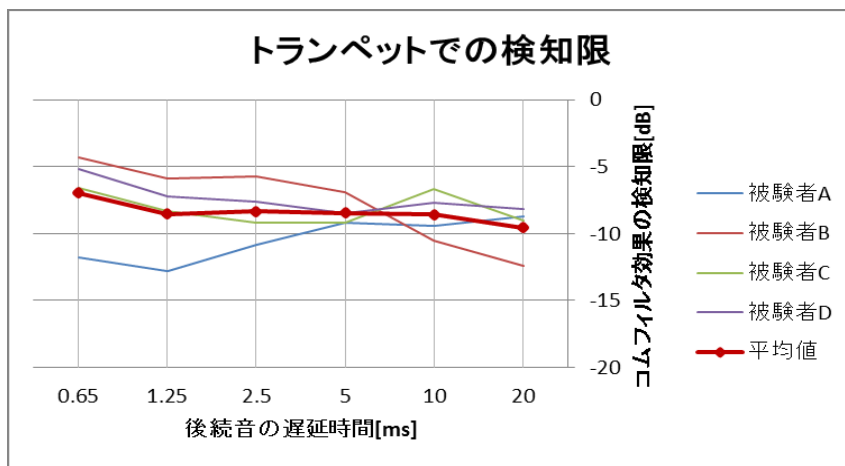


図3. トランペットでの「コムフィルター効果」の検知限に関する実験結果

トランペットでもホワイトノイズと同様、「コムフィルター効果」の検知が容易な人と難しい人との差は7dBにも及び、遅延時間が短い場合に顕著である。

3) ウッドベースでの「コムフィルター効果」による異音の検知限

音源にウッドベースを使い、後続音のレベルと遅延量を変えた場合の「コムフィルター効果」による異音の5人の学生被験者による検知限の測定結果を図4に示す。

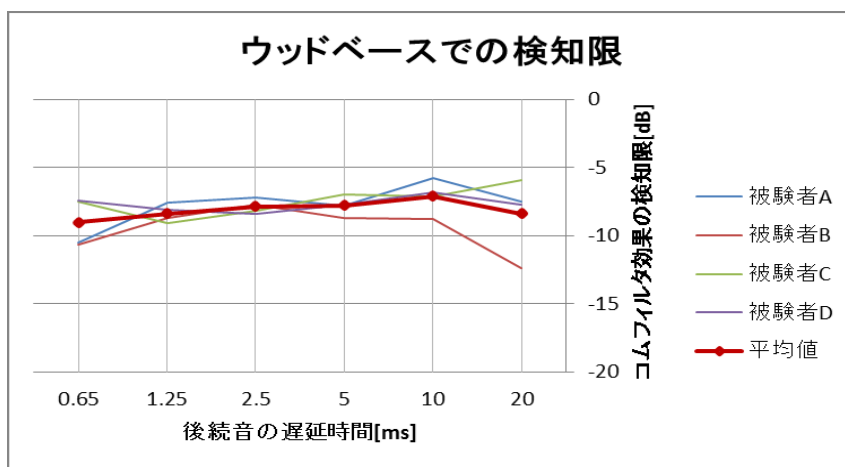


図4. ウッドベースでの「コムフィルター効果」による異音の検知限に関する実験結果

ウッドベースでも、「コムフィルター効果」の検知が容易な人と難しい人との差は大きくその差は7dB近くにも及び、遅延時間が長い場合に顕著である。

4) 女性ボーカルでの「コムフィルター効果」による異音の検知限

音源に女性ボーカルを使い、後続音のレベルと遅延量を変えた場合の「コムフィルター効果」による異音の5人の学生被験者による検知限の測定結果を図5に示す。

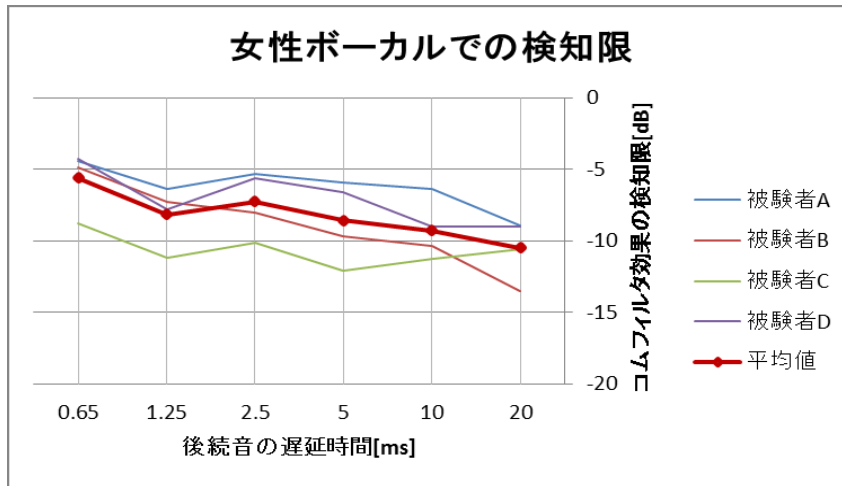


図5. 女性ボーカルでの「コムフィルター効果」による異音の検知限に関する実験結果

女声ボーカルでは、「コムフィルター効果」の検知が容易な人と難しい人との差は、遅延時間には依存せず5dB程度である。

5) 女性アナウンスでの「コムフィルター効果」による異音の検知限

音源に女性アナウンスを使い、後続音のレベルと遅延量を変えた場合の「コムフィルター効果」による異音の5人の学生被験者による検知限の測定結果を図6に示す。

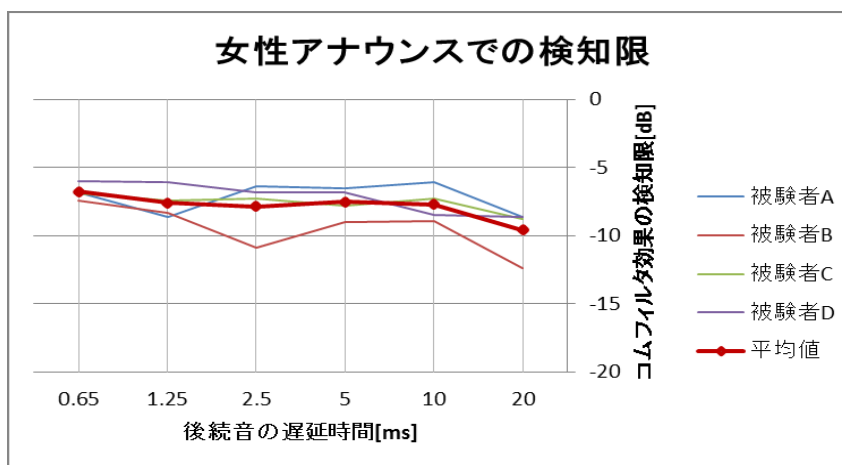


図6. 女性アナウンスでの「コムフィルター効果」による異音の検知限に関する実験結果

女性アナウンスでは、「コムフィルター効果」の検知が容易な人と難しい人との差は、遅延時間とは無関係に、ほぼ 4dB 以内に収まっている。

6) 男性アナウンスでの「コムフィルター効果」による異音の検知限

音源に男性アナウンスを使い、後続音のレベルと遅延量を変えた場合の「コムフィルター効果」による異音の 5 人の学生被験者による検知限の測定結果を図 7 に示す。

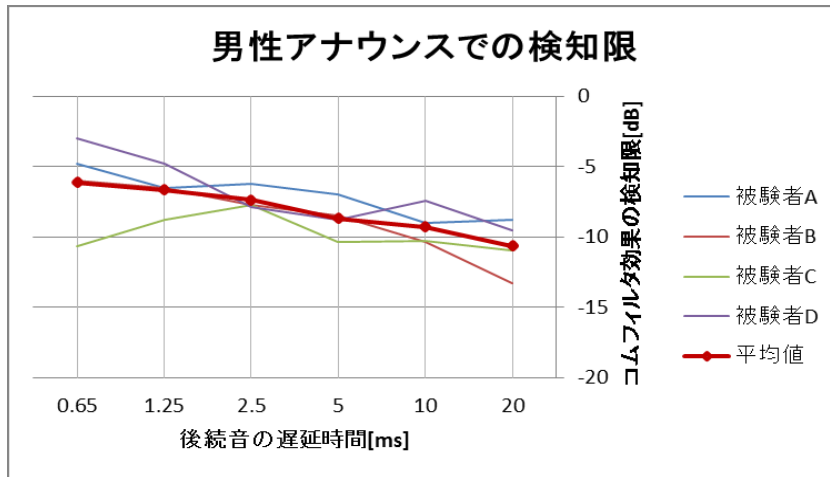


図 7. 男性アナウンスでの「コムフィルター効果」による異音の検知限に関する実験結果

男性アナウンスでは、「コムフィルター効果」の検知が容易な人と難しい人との差は、遅延時間が短くなると顕著になり、両者の差は 8dB 近くにも及ぶ。

7) 各種信号での「コムフィル効果」の発生による異音の検知限に関するまとめ

各種音源を使った場合の「コムフィルター効果」による異音の学生被験者 5 人の検知限の測定結果を図 8 にまとめて示す。

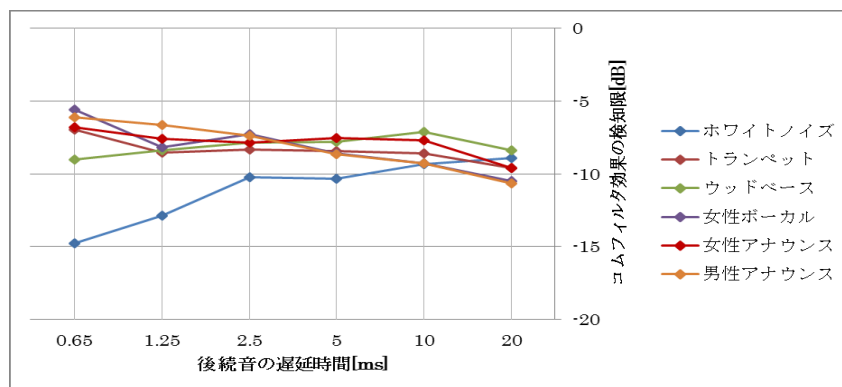


図 8. 各種信号でのコムフィル効果の発生による異音の検知限に関するまとめ

遅延時間の短い場合のホワイトノイズを除くと、本実験から得た楽音や声での後続音のレベルの検知限は、-7dB から-11dB 程度であり、余裕を見れば-15dB 程度を確保することが望ましいと

考えられる。

録音音場内の各所で「コムフィルター効果」発生するマルチマイク收音で、この実験での後続音に相当した音について-15dB という値を満足することは大変難しい。收音音場内での各楽器の最適配置、マイクの指向性の選択、マイクの本数削減、遮音壁や遮音ブースの利用などを行わない限りその実現は難しい。

#### V-4. 高音域で発生する変調雑音に関する味見的な測定の結果

変調雑音は、コムフィルター効果と並ぶ音質劣化要因である。「コムフィルター効果」が主に録音側で発生するのに対し、高音域での変調雑音は主に再生側で発生する。

今回行った2種の市販小型スピーカーに端子電圧1Vの中心周波数16kHzのオクターブバンドピンクノイズを加え出力を測定した結果を図9と図10に示す。

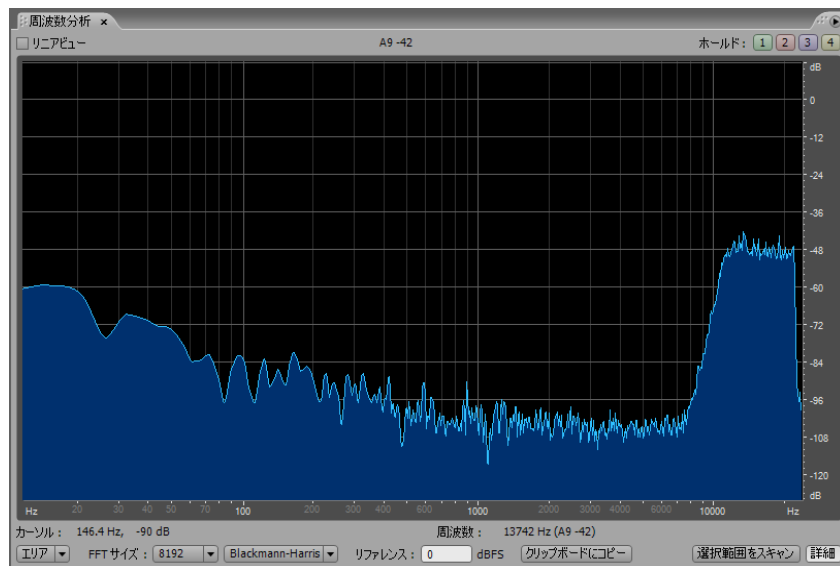


図 9. A 社小型スピーカーの特性

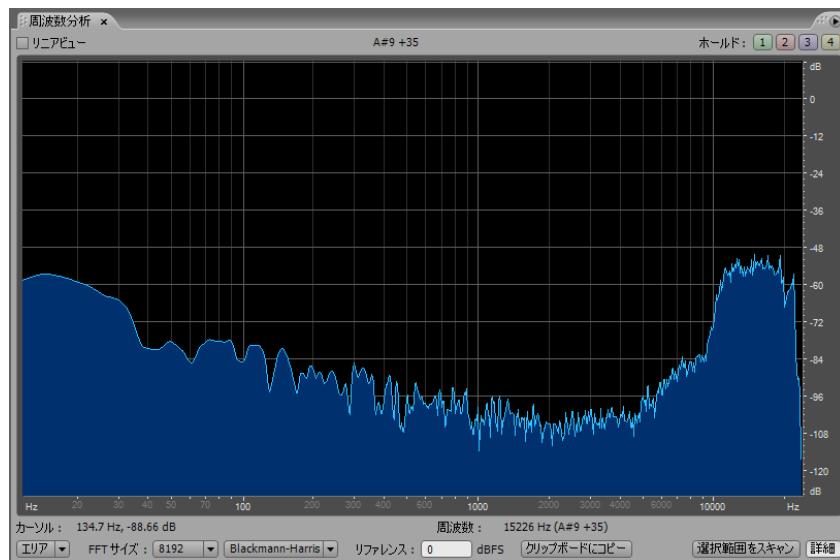


図 10. B 社小型スピーカーの特性

高音域を拡張することが音質改善につながると信じる人たちの間で、現在可聴限界周波数付近の高音域信号を伝送し、再生することが盛んにおこなわれている。中には音質劣化が生じる例も見られるので、今回行った味見的な測定の結果は興味深い。

図9と図10の2種の小型スピーカークの測定結果を比較すると16kHzの中心周波数を持つオクターブバンドノイズは、図9でも図10でもほぼ正常に出力されている。しかしながらほぼすべての人が聴くことのできる5kHzから9kHzの間で両者に顕著な差が出ている。図10に示すB社の小型スピーカーでは、16kHzがよく聞こえない筆者でさえも、入力にはない変調雑音をはっきりと聞こえる。この余計な変調雑音聞こえる状態では、元の楽音が変調雑音に妨害され音質が著しく劣化する。この傾向は20kHz、30kHz、40kHz、50kHzと言ったより高い周波数帯域になるとより顕著に現れるが、特性の優れたA社のスピーカーであっても、入力信号が30kHzを超えると変調雑音が可聴域内に発生する。このところ、市販のB社のようなスピーカーで、まともな音を聴くためには買い替える以外にどのような方法があるかと言う質問をいただくことが多いが、例えば、可聴帯域外の成分を多く含むコンテンツの使用を避け、フィルターを使って13kHz以上とか15kHz以上の信号を遮断し、高いレベルの高域信号を加えないことである。特性の優れたA社のスピーカーであっても、可聴域での変調雑音の発生を防ぐため、可能な限り30kHz以上の大レベルの高音域信号を加えないようにすると良い。

#### V-5. おわりに

本号では、二大音質劣化要因と考えられる「コムフィルター効果」と高音域における変調雑音の発生について測定結果を紹介した。この結果は単純で、2つの条件を満足することが重要であることを示している。マイクを多数（スピーカークの数より多く）使って収録し、その出力をスピーカーから出すために電的に加算する際には、検知限以上の「コムフィルター効果」が生じないように注意を払うことが必須である。そして高音域の大振幅信号をスピーカー等に加えて再生する際には、変調雑音特性を測定し、可聴帯域内で顕著な変調雑音が発生しないように配慮することが必須である。この2つの基本の基本が守られる必要がある。

本稿が今後の皆様の音質改善に役立つことを切に望んでいる。

次号1月号では音質改善の話を終え、いかにマイクロフォンに良い音、良い演奏を飛び込ませるかについて筆者の経験を述べさせていただく。

終わりに本号の紙面でご協力をいただいた千葉工業大学情報科学部情報ネットワーク学科の柳川教授と昨年度の柳川研究室の卒論生海老原涼氏に紙面を借り謝意を表させていただく。

#### 参考文献；

- 1) Takeaki Anazawa, Yukio Takahashi, and Almon H.Clegg  
“Digital Time-coherent Recording Technique” Preprint 2493(H-2)  
the 83rd AES Convention, 1987 October 16-19, New York
- 2) 日本オーディオ協会 “オーディオテスト用ビデオディスク「オペラ魔弾の射手」ハイライト” 1988年発売
- 3) 穴澤健明 “4チャンネル再生のいろいろ” AVガイド '89, p.101-105, 1989年10月  
日本オーディオ協会発行