

# 音響標準と音響計測の研究

## ( Research on Acoustic Standard and Measurement )

基礎計測部

佐藤宗純, 藤森 威, 桐生昭吾, 蘆原 郁, 堀内竜三

### 1. まえがき

ヒトの可聴周波数範囲はほぼ20Hz～20kHzといわれている。この範囲の音を可聴音とよび、主として騒音公害問題に関連して可聴音に関する標準(音響標準)が必要とされている。現在、音圧レベルの一次標準は標準コンデンサマイクロホンの音圧感度で与えられている。絶対校正された標準マイクロホンあるいはそれを用いて校正された騒音計などの音響計測器や計測用マイクロホンを用いて各種の音響計測を行うことになる。ここでは、音響標準ラボ、音圧レベル標準ラボ、音響計測ラボに関する研究の現状と今後の研究の方向について述べる。

### 2. 音響標準の世界的情勢

音響計測器に関する標準化は、国際的にはIEC/TC 29(電気音響)で話し合われてきた。TC 29では、標準マイクロホン、騒音計、音響校正器、フィルタやその他の音響計測器について、形状・寸法、性能とともに、その校正方法についても規格化の検討を行っている。標準マイクロホンの規格を作成するときには、校正方法の妥当性の検討のため国際比較を実施した実績をもつ。なお、騒音関係の測定方法(環境騒音や機械騒音)の規格化はISO/TC 43(音響)で行われている。しかし、最近になって国際的な計量に関する相互承認の必要性とともに、基幹となる量については国際比較によって各国の校正技術レベルを確かめる必要がでてきた。音響関連も例外ではなく、1999年にメートル条約に基づく国際度量衡委員会の下に、超音波標準や振動標準も加えた音響・超音波・振動諮問委員会(CCAUV)が新たに設立された。諮問委員会の最初の仕事は、音響に関しては標準コンデンサマイクロホンの音圧感度の国際比較である。英国NPLがパイロットラボとなり、2年計

画で作業が進んでいる。日本は1999年9月に校正を行った。また、APMP関連でも音響・超音波・振動技術委員会(TCAUV)を設立することとなっている。

このような情勢のもとで、音響標準のトレーサビリティを整備する必要があり、校正技術の開発、校正システムの整備、高精度化、不確かさの評価を行うとともに、新しい標準に結びつく計測技術の開発を行っている。

### 3. 音響の一次標準とそれに関する研究の現状

可聴音に関する音の標準(音圧レベル標準)は、標準コンデンサマイクロホンの音圧感度で与えられている。これは、正確な音圧を発生させる標準音源の実現が難しい一方、標準音源なしにマイクロホンの感度を高精度で絶対校正できることによる。すなわち、電気音響変換器の相反定理に基づき、小容量密閉形の音響結合器(カプラ, Fig.1)を用いて相互校正法によってマイクロホンの音圧感度を絶対校正している。

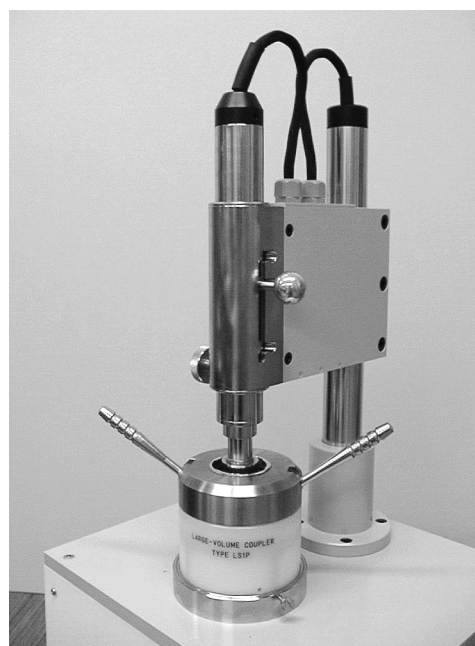


Fig.1 校正装置のカプラ部分

**KEY WORDS:** 音響標準, 標準コンデンサマイクロホン, 感度校正, 音圧レベル, 音響計測

カプラを用いた相互校正法の原理について簡単に述べる。コンデンサマイクロホンは電圧を加えることで音を出すことができる可逆の電気音響変換器である。このような2つのマイクロホンを小容量の空間を介して音響的に結合させ、一方を音源として他方で受音する。このような可逆の変換器を含む系では電気回路理論で言う相反定理が成立している。マイクロホンについては、受波感度=(開放出力電圧)/(受波音圧)と送波感度=(体積速度)/(駆動電流)が等しい。このため、2つのマイクロホンの受波感度を $M_1, M_2$ とおき、音響系の伝達インピーダンス(音源の体積速度に対する受音点の音圧の比)を $Z_a$ とすれば、電気端子間の伝達インピーダンスは $Z_a = M_1 \cdot Z_a \cdot M_2$ と表される。 $Z_a$ の値は、容積が小さくその中の音圧が一定であると見なせるようなカプラを用いた時には、

$$Z_a = \gamma P_0 / j \omega V$$

で与えられる。ここに $\gamma$ は伝搬媒質の比熱比、 $P_0$ は気体圧力、 $\omega$ は信号角周波数、 $V$ はカプラの体積であり、全て既知の量である。そこで、3個のマイクロホンを用意して、マイクロホンを取り替えて電気伝達インピーダンスを3回測定すれば、未知数である3個のマイクロホンの受波感度に対して3個の測定値が得られるので、各マイクロホンの感度が算出できることになる。

実際のカプラ校正では、カプラ内に生じる音圧分布、振動膜のインピーダンス、カプラ材質の熱伝導、カプラ内圧力と大気圧のバランスあるいは媒質の入れ替え(カプラによっては高い周波数における音圧分布を一様にするために媒質を空気より音速の大きな水素に交換する必要がある)のための細管などの影響を補正して感度を算出する。JISやIEC規格では外径がほぼ1インチのI形および1/2インチのII形マイクロホンのそれぞれに対して大小2種のカプラとそれらを使用した時のカプラ補正量を載せている。

相互校正法はこのように確立された技術である<sup>1)</sup>。しかしながら、校正システムの電気系の精度の向上を図った結果<sup>3)</sup>、従来あまり表面に出てこなかった音響系の不安定さ、すなわちマイクロホンをカプラに装着する状態やマイクロホン自体の状態変化などが見えてきた。そこで、この原因を追及して校正精度を向上させるために以下の研究を行ってきた。

### 3.1 校正時の不安定さの原因追及<sup>4)</sup>

10kHz以上の高い周波数帯においてカプラ校正時に校正値が時間とともに変化し、その変動がしばしば0.1dBを越える現象が見られるため、原因を追及した。その結果、第1は、マイクロホン装着時に手からの熱がマイクロホンやカプラに伝わり、その温度が室温と平衡するまで測定値が変化をすることが分かった。第2はグリスの影響である。I形マイクロホンの校正のために容積が約20ccのカプラを用いて数kHz以上の高い周波数で校正を行う場合、カプラ内の媒質を空気から音速の大きな水素ガスに置換する。このときガスが漏れないようにマイクロホンとカプラの接触部分にグリスを塗る必要がある。また低周波数での音漏れ防止にもグリスが必要である。原因は不明であるが、このグリスが数時間に及ぶ時定数をもって測定値に影響を与えることが分かった。グリスの使用をやめるには、媒質が空気のままで校正可能な容積の小さなカプラ(2.6ccや3cc)を用いる必要があるが、この場合は、マイクロホンの寸法の違いによるカプラ容積の変化が全周波数帯にわたる校正誤差を増大させる。現在、良い解決策は見いだされていない。

この他、マイクロホンの中心電極を押す接触圧が校正結果に影響することや、マイクロホン運搬に際して感度が変わってしまう現象が見られる。これは、マイクロホンの構造自体に不安定さの原因があると考えられる。

### 3.2 安定な標準マイクロホンの開発

現在日本で用いられているI形標準マイクロホンMR103とII形のMR112はチタンやその合金で作られている<sup>2)</sup>。またその組み立てはほとんど手作業で行われ、マイクロホンの特性に大きな影響を与える振動膜の張り上げやエージングは経験に頼ってきた。これらのマイクロホンは長年にわたる使用実績があるものの、温度や気圧など既知の一時的な変動原因以外に、永久的な変化をもたらす何らかの不安定要因のあることが明らかになってきた。

そこで、マイクロホンの構造、すなわち振動膜の材質や調整・固定方法、絶縁体の材質や固定方法等と、マイクロホンの安定性との関係を、多数の試作品の測定データから検討を行った。その結果、振動膜の固定方



Fig.2 試作したI形マイクロホン

法やその調整機構、絶縁体の固定方法などに関する知見が得られた。これにより、周囲環境以外が原因と見られる不安定要因のほとんどを除くことができると考えられる。現在、良好な温度安定性や感度の周波数特性を持つマイクロホンを製作するため主として材質面から研究している。またII形マイクロホンについてもI形についての結果を踏まえて研究を行い、MR103、MR112に代わる標準マイクロホンを開発する予定である。

#### 4. 音場校正

現在、可聴音の音響標準は標準マイクロホンの音圧感度校正が基本となっており、一般の音響測定で必要とされる自由音場感度(以下、音場感度と称する)を直接に絶対校正することは行われていない。音場感度の絶対校正は高性能無響室を用いた相互校正法で行うことになる。しかし装置が大がかりなうえ、測定に長時間を要し、また高精度測定が困難であるなど、一般的ではない。一方、カプラを用いることで音圧感度は比較的容易に高精度測定が可能である。音圧感度と音場感度の比(自由音場補正量)は、マイクロホンによる反射や回折の影響であるので、ほとんどマイクロホン形状だけに依存すると考えられる。そこでマイクロホンの型式ごとに標準値を決めておき、音場感度にこの標準値を乗じて音場感度を算出するのが現状の音場感度校正法である。自由音場補正量の標準値は理論的に算出され、I形についてはIEC規格やJISに定められている。この標準値の正しさは、実験的に検証する必

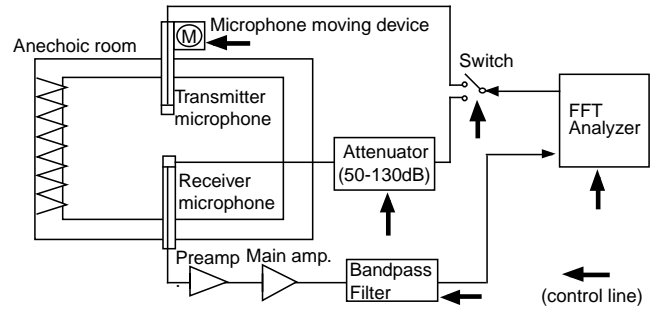


Fig.3 音場校正システムのブロック図

要があり、I形マイクロホンについては0.1dB程度で一致していることが報告されている。しかしII形マイクロホンについては、まだ信頼できる結果が得られていない。このため我々は、自由音場補正量の確認の目的も含めて、II形標準マイクロホンの音場絶対校正の実用化を研究している。まず、標準マイクロホンの音場絶対校正技術において必要とされるマイクロホンの音響中心を精度よく求める研究を行った<sup>5)</sup>。Fig.3に校正システムのブロック図を示す。

#### 4.1 反射波の除去

無響室内においても、吸音くさびや網床からのわずかな反射が伝達特性の測定結果に1~2%のばらつきを生じさせる。マイクロホン間隔を変えて得た伝達特性から音響中心間隔を算出すると、比較的測定精度が高く取れる10kHz付近においても反射波の影響により±2mm程度のばらつきを生ずることが分かった。そこで反射音を分離除去するために仮想パルス法を適用し、その有効性を実験的に検討した。この場合、S/Nを上げるためには狭帯域信号が望ましいが、反射波の到達時間の制約から帯域幅には下限がある。最適な帯域幅を用いることで、音響中心の測定については、S/Nの悪い低域の周波数でも0.5mm、中域では0.2mmの精度が得られた。高域の周波数ではマイクロホン端面間の反射誤差が大きくなるが測定帯域幅を広げパルス幅を1ms程度に短くすることで解決できた。

#### 4.2 温度分布の影響

数時間、空調を停止させて無響室内部の空気が十分に安定した状態での測定値と、内部の空気が少しでも乱れている状態での測定値には明確な違いが生じ、その差は10~20kHzにおいて0.5~2mmに達し、かつ再現

性もあることが判明した。この現象を解明するため、マイクロホン距離や方向、無響室中での測定位置、マイクロホンやプリアンプの種類等、種々の条件を変えた実験を行い、その結果、プリアンプのケースの僅かな発熱(約 $1^{\circ}\text{C}$ )により、マイク近傍の空気が温められたことによる音波の屈折現象が主な原因であることが分かった。その対策として、プリアンプ先端に数10cmの延長ロッドを設けた。

以上の対策およびシステムの電子回路部について湿度対策やクロストーク及びノイズの小さな回路構成等に関する改良を行い、II形マイクロホンの音場校正を0.01dB程度の精度で行えることを実証した。

今後は、測定対象を増やして、測定の不確かさの確認を行うとともに、多くのマイクロホンについて音場感度を求めてJISやIEC規格に書かれた音場補正量の値の確認を行う予定である。

## 5. 電気音響変換器の特性測定と高周波化

現在、分解能24ビット、周波数帯域100kHzにも及ぶハイビット・ハイサンプリングを特徴とする次世代オーディオ技術が実用化されようとしている。これについては、20kHz以上の音が人に検知できるか、あるいは影響があるかを心理実験によって明らかにする研究<sup>7,8)</sup>を行うとともに、必要とされる音響計測技術について研究を行っている。その結果、スピーカの非線形ひずみの影響や雑音信号の混入等、品質管理にも問題があることを明らかにした<sup>9,10)</sup>。Fig.4はスピーカの混変調歪みにより可聴周波数を越えた成分の存在により可聴周波数の信号が現れることを示したものである。

そこで、各種の音響実験においても問題となる電気音響変換器、特にスピーカの非線形性を、信頼できる精度で測定する手法について検討した。その結果、帯

域除去フィルタと同期加算法を用いることにより、-60dB程度の非線形ひずみ(混変調ひずみ)を可聴周波数帯域のほぼ全域にわたって計測できることが確認された<sup>11)</sup>。これに関する一連の研究は、1999年11月発足の電子情報通信学会の第2種委員会「ハイデフィニションオーディオ研究会」の活動に貢献している。

今後の課題として、低域でのSN比の改善、測定時間の短縮などが残されている。また、ヘッドホンや補聴器、電話機等への応用技術の開発も課題として残されている。また、信頼性の高い計測を行う上で必要とされるのが20kHz以上の周波数におけるマイクロホンやスピーカの感度校正技術の開発である<sup>12)</sup>。現在の音響標準でカバーしているのはII形マイクロホンを用いた20kHzまでであり、これより高い周波数を扱う1/4インチや1/8インチマイクロホンの校正技術は確立されていない。

## 6. 今後の音響計測・標準研究の方向

可聴音に関する音圧レベル標準は安定な標準マイクロホンが実現すれば、当初の目的を達したことになる。一方、自由音場校正については、無響室における音場絶対校正技術が完成すれば一次標準を確立したことにはなるが、トレーサビリティ体系を構築するには実用的で高精度な音場比較校正技術についてさらに研究する必要がある。また、マイクロホン以外の電気音響変換器の校正技術についての研究を進める必要がある。

可聴音を超えた周波数についての音響標準も重要である。20Hz以下のいわゆる超低周波音は、公害問題に関係して信頼性の高い計測技術が求められている。また20kHz以上の超音波領域も、次世代オーディオ技術に関連して同様に信頼性の高い測定技術が求めら

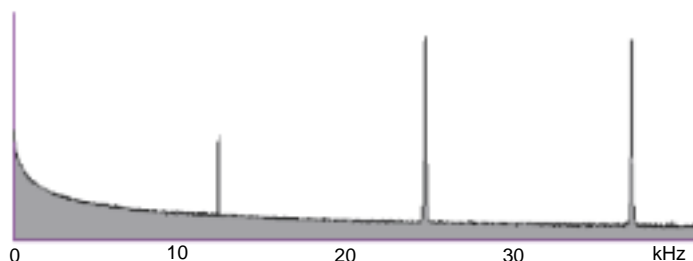


Fig.4 超音波の信号(24kHzと36kHz)をスピーカに入力したときの音響出力信号のパワースペクトル。可聴音の出力(12kHz)が現れている。

れている。これらの周波数領域については、適切な電気音響変換器の実現や計測技術の開発とともに、音響標準の確立が必要とされる。

音をエネルギーの流れとしてとらえる音響インテンシティ計測、遮音や吸音のための音響材料の測定、機械などから放射される音響パワーレベルの測定などについての研究も音響トレーサビリティ制度と関連を持つ研究課題である。

騒音測定は聴覚との関連が深いので、音の大きさの感覚に関するヒトの聴覚の心理学的な研究も進める必要がある。同様に音響信号の物理的な分析技術、すなわちFFT分析やウイグナー分布、ウェーブレット変換などの時間周波数分析技術の研究も続けていく必要がある<sup>13)</sup>。

## 7. まとめ

音響標準にかかる計測技術については、現在までに標準マイクロホンの音圧校正、音場校正の高精度化を中心に研究してきた。今後は、残された課題について研究を行うとともに、今後の音響標準のあり方、人の聴覚との関係などを考えながら研究を進めていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 高橋, 三浦: 標準コンデンサマイクロホンの音圧校正法の校正精度に関する研究, 電総研研究報告, 902号 (1990)
- 2) 鈴木, 吉川: チタン合金を用いた広帯域標準コンデンサマイクロホン, 日本音響学会誌, 28-9, p.475 (1972)
- 3) 堀内, 藤森, 佐藤: 標準コンデンサマイクロホン・カプラ校正システムの電氣的精度の向上, 電総研彙報, 第60巻, 第7号, pp.411-420 (1996)
- 4) 堀内, 藤森, 佐藤: 標準コンデンサマイクロホン・カプラ校正システムの音響系測定精度の向上—10kHz以上における電圧減衰量の時間的変化の原因—, 電総研彙報, 第61巻, 第9号, pp.459-467 (1997)
- 5) 藤森, 堀内, 佐藤: II形標準マイクロホンの音場絶対校正, 音響学会春期講論集, 1-6-4 (2000)
- 6) 蘆原, 桐生: 可聴周波数帯域外成分に対するスピーカの混変調歪, 日本音響学会誌, Vol.55, No.4, pp.265-

274 (1999)

- 7) 蘆原, 桐生: 複合音中の超音波成分の知覚及び広帯域信号聴取時の可聴周波数上限の測定, 日本音響学会誌, Vol.55, No.12, pp.831-820 (1999)
- 8) 蘆原: 周波数掃引音による差音及び結合音の可聴域測定, 日本音響学会誌, Vol.55, No.12, pp.838-844 (1999)
- 9) 桐生, 蘆原: ハイサンプリングソフトの品質評価, 信学技報, EA99-37 (1999)
- 10) 桐生, 蘆原: 次世代オーディオにおける課題, 信学技報, EA99-10 (1999)
- 11) 蘆原, 桐生: 周波数掃引帯域除去フィルタと同期加算法を用いたスピーカの非線形歪測定法, 日本音響学会誌, Vol.56, No.2, pp.69-77 (2000)
- 12) 桐生, 蘆原, 佐藤, 吉川: 次世代高品質オーディオと計測技術, 日本音響学会誌, Vol.56, No.9 (2000)
- 13) 堀内, 佐藤: 断面の直径が一樣でない棒鈴の振動モード解析, 日本音響学会誌 (投稿中)

## 関連ラボ及び研究項目・研究期間

### 1. 音響標準ラボ

(Acoustic Standards Lab.)

騒音計

(平成12年度)

ラボ構成員: 佐藤宗純, 藤森 威, 堀内竜三

### 2. 音圧レベル標準ラボ

(SPL Standard Lab.)

標準マイクロホン絶対校正技術の高度化に関する研究

(平成9年度～13年度)

ラボ構成員: 藤森 威, 佐藤宗純, 堀内竜三, 蘆原 郁

### 3. 音響計測ラボ

(Sound Measurement Lab.)

電気音響変換器の測定技術の研究

(平成12年度～17年度)

ラボ構成員: 桐生昭吾, 佐藤宗純, 蘆原 郁