

空中超音波標準を実現するための計測技術に関する調査報告

高橋 弘宜*

(平成17年11月10日受理)

A Survey of Acoustic Standard for Airborne Ultrasound Especially Focused on Measurement Techniques

Hironobu TAKAHASHI

1. はじめに

ヒトが知覚できる音は20 Hzから20 kHzまでの周波数帯域と言われているが、近年では、その周波数帯域外、すなわち20 Hz以下または20 kHz以上の空中を伝搬する音についての関心が高まっている。

20 Hz以下の空気中を伝搬する音に関しては、例えば窓、家具が振動するといった物理的な苦情や、いらいらする、胸や腹を圧迫されるような感じがする、頭痛、耳鳴り、吐き気といった心理的、生理的な苦情として近年増加傾向にあり問題視されている¹⁾。これらの問題については、2004年に環境省が「低周波音問題対応の手引書」として、その対処法を公開している²⁾。

一方、20 kHzを超える空気中を伝搬する音、すなわち、空中超音波に関しては、空中へ超音波を放射する機器類が周辺に多数あるにもかかわらず、ほとんど関心をもたれることはこれまでなかった。主な理由としては、そもそも人間が空中を伝搬する超音波の存在を知覚できないため、日常生活において重大な影響を及ぼす事例がほとんどなかったためと考えられる。しかし、最近では、空中へ超音波を放射していると思われる機器が急速に増加しつつあり、それに伴って、空中超音波の安全性を明確にしようとする動きが高まりつつある。また、音響機器関連の話題として、SACD、DVD-Audioといった空中超音波帯域の音を含むメディアが市販されるようになり、聴覚知覚研究の立場からは、ヒトが知覚できないと考えられてきた20 kHz以上の音も音圧レベルが非常に大きければ認知できる可能性があることが示唆されている³⁾。

空中超音波帯域における音響計測技術を概観すると、そもそもヒトが知覚できないとされている音であり、ま

た、空中に超音波を放射するような機器は少数であったから、その計測技術が研究対象とされることはこれまであまりなかったと思われる。そのため、音響計測技術はもちろんのこと、音響標準の重要性は認識されてこなかったといっても過言ではない。

そこで、本稿では、空中超音波を取り巻く現状と法規制等を簡単に触れながら、空中超音波の計測ニーズを明示するとともに、空中超音波帯域におけるマイクロホン校正法およびその問題点を明らかにし、空中超音波帯域の音響標準開発及び今後の展開について述べる。

2. 国内における空中超音波を取り巻く現状

2.1 空中超音波の使用状況

空中超音波の使用状況についての詳細は前稿に記したので⁴⁾、本節では簡単に述べるに留める。空中超音波を放射する機器は、意図的に空中へ超音波を放射している機器と、本来超音波を放射するものではない機器の2つに分けることができる。空中へ超音波を放射している機器の例を表1に示す。

表1 空中へ超音波を放射している可能性のある機器の例

| 機器名 | 周波数帯域 |
|------------------------------|--------------|
| ディスプレイ | 18 ~ 100 kHz |
| 超音波洗濯機 | 20 ~ 200 kHz |
| 超音波加湿器 | 約 2.5 MHz |
| 超音波美容器 | 約 1 MHz |
| 超音波モータを利用した機器 例: 電動ハブラシなど | 20 ~ 160 kHz |
| スイッチング電源 インバータ | |

* 計測標準研究部門 音響振動科

意図的に空中へ超音波を放射している機器については、機器の仕様などから放射している超音波の特性をある程度は把握することが可能である。一方、本来超音波を放射するものではない機器については、設計上は空中へ超音波を放射する可能性はないから、放射されている超音波の特性が調べられることはほとんどない。そのため、放射されている超音波の特性についての予測は難しい。

最近では、電気機器の小型化、高効率化のためにスイッチング電源やインバータがいたるところで使用されているが、これらは空中超音波帯域の周波数に相当する高周波電気信号を使用しており、この高周波電気信号によって、例えばトランスなどが振動することによって、空中に超音波が放射されると言われている。具体的な事例として、電磁調理器からは、電磁波だけでなく超音波も発生しているとの報告や、PCのディスプレイから空中超音波が放射されているとの報告がある⁵⁾。

2.2 空中超音波に対する法規制

国内における空中超音波の規制は、1960年から1970年代にかけて発生した超音波融着機に絡む労働災害に起因する。超音波融着機による労働災害の事例としては、超音波融着機の溶接部に指または腕などを挟み込むことにより重度の火傷を負った、最悪の場合指の切断等の処置を施したというものがある。主として、労働安全衛生面から、生体内を伝搬する超音波による人体への影響が問題視されたが、それに関連して空中を伝搬する超音波の安全性の調査研究が行われた。国内では、興らによって労働安全衛生面から超音波の影響について調査が行われ⁶⁾、過度に強力な超音波は人体に有害であることが示されている。

国外では、Parrackら、Allen, Davis, Actonなどが、生体内を伝搬する超音波の有害性を指摘しており⁷⁾⁻¹⁰⁾、空中を伝搬する超音波についても、溶接作業に従事する者が、頭痛、耳内痛、吐き気などの症状を訴えているという報告例がある¹¹⁾。以上のような調査研究を通じ、過度に強力な超音波は人体に対して有害であることが明白となった。

日本国内における規制としては、昭和46年に「超音波溶着機による障害防止対策指針」(労働省基発 第326号通達 昭和46年4月17日)が発せられ、溶着以外の超音波技術を使用する事業所に対しても、本指針に準じて指導すること及び本指針によりがたい場合には、労働省へ報告することを求めている。また、労働安全衛生法第22条にも、騒音や超音波による健康障害を発生させないように対策をとることが義務づけられ、現在に至っている。

また、測定、制御及び研究室用電気機器に対しては、2005年度に改定されたJIS C1010-1:2005に超音波圧の記載があり、20 kHz以上の周波数で110 dB以下にすべき旨が記載されている¹²⁾。

しかし、空中超音波帯域における音響標準が開発されていないこと、また、音響計測技術が確立されていないことから、具体的な上限値を示したところで、その有効性、信頼性には問題があるといわざるを得ない。過度に強力な空中を伝搬する超音波は、人体に対して有害であることは明らかであり、なんらかの規制は必要であることから、早急なる空中超音波帯域における音響標準の供給および計測技術の確立が必須である。

2.3 放送音響機器

その他空中超音波を使用するものとしては、次世代オーディオと呼ばれる音響機器が挙げられる。CDの登場以降、新しいデジタルオーディオフォーマットとして、SACD、DVD-audioといったものが提案されているが、これらのフォーマットは、100 kHzまでの帯域での再生を目指している。それに伴い、放送用機器、音響機器メーカーも上述のオーディオフォーマットに対応した録音再生機器の開発を進めている。このような音響機器においても、その性能評価のためには、空中超音波帯域の音響計測技術および音響標準が必要であると思われる。

3. 空中超音波帯域におけるマイクロホンの校正手法

3.1 自由音場絶対校正法の位置づけ

マイクロホンの感度としては、以下の2つがある。

- ・音圧感度
マイクロホンの開放出力電圧を、マイクロホン膜面の音圧で除した値
- ・音場感度
マイクロホンの開放出力電圧を、マイクロホン膜面において、マイクロホンが存在しないときの音圧で除した値

計測用マイクロホン、騒音計など、計測の現場で必要とされるのは音場感度である。本節では、可聴周波数帯域および空中超音波帯域におけるマイクロホンの音場感度の求め方を対比しながら、自由音場絶対校正法の位置づけを述べる。

可聴周波数帯域におけるマイクロホンの自由音場感度は、図1に示すような音響カプラーを使用した、標準マイクロホン3個による相互相反校正法によって、音圧感度を測定することから始まる¹³⁾。次に、得られたマイクロ



図1 音圧校正に使用する音響カプラ

ホンの音圧感度に自由音場補正量と呼ばれる値を加えることによって、標準マイクロホンの音場感度を得る。なお、自由音場補正量は、マイクロホンの形状と振動膜の特性によって決まる値であり、IEC 60655によって規格化されている¹⁴⁾。計測用マイクロホンの音場感度は、音場感度が既知の標準マイクロホンを使用した音場比較校正によって値付けがされる。

一方、空中超音波帯域におけるマイクロホンの自由音場感度は、可聴周波数帯域とは若干異なる手順を踏む。そもそも、空中超音波帯域においては、音響カプラを用いた相互相反校正法は非常に困難である。それは、校正しようとする周波数に対応した音響カプラ、すなわち音の波長に比べて十分小さな寸法の音響カプラを作ることが難しいからである。そのため、空中超音波帯域においては、計測用マイクロホン3個を用いて、自由音場中で相互相反法による校正、すなわち、自由音場絶対校正法が唯一の一次校正法となる。また、絶対校正によって音場感度既知の計測用マイクロホンがあれば、その他のマイクロホンの音場感度は、音場比較校正によって値付けが可能となる。

したがって、空中超音波帯域におけるマイクロホンの校正法において一義的に確立すべきことは、自由音場絶対校正法である。

3.2 自由音場絶対校正法の校正原理

自由音場絶対校正法の校正原理を述べる。図2のように自由音場内にマイクロホンを対向させて設置する。校正に使用するマイクロホンは、可逆電気音響変換器であるから、音源マイクロホンに加える入力電圧を e_t 、受信マイクロホンの出力電圧を e_r とすると、受信マイクロホンと音源マイクロホン間の伝達特性 T_e は、

$$T_e = \frac{e_r}{e_t} = \frac{1}{Z_e} M_t Z_a M_r \quad (1)$$

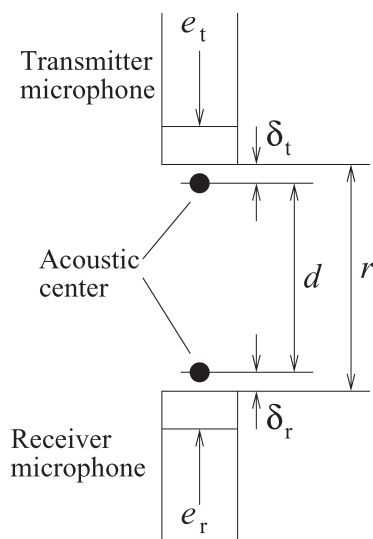


図2 自由音場絶対校正法におけるマイクロホンの配置

と書くことができる。ここで、 M_t 、 M_r は、それぞれ音源マイクロホンおよび受信マイクロホンの音場感度である。 Z_e は、音源マイクロホンの電気インピーダンスである。

Z_a は、マイクロホン音響端子間の伝達音響インピーダンスであり、自由音場条件下においては、

$$Z_a = j \frac{\rho f}{2d} \exp\{-(\alpha + jk)d\} \quad (2)$$

と書くことができる。なお、 f は周波数、 ρ は空気の密度、 α は空気中における音の減衰係数、 k は波数である。

r をマイクロホン間距離とすると、 d は、

$$d = r - (\delta_t + \delta_r) \quad (3)$$

として与えられるものであり、音響中心間距離と呼ばれる値である。式(2)は、音源および受信マイクロホンは点であることを仮定した上で成り立つ式であるが、実際のマイクロホンは振動面を持つから厳密な意味での点ではない。そのための補正項に相当するものが、式(3)中の δ_t 、 δ_r である。

式(2)において、減衰係数 α はJISによって規格化されており¹⁵⁾、密度 ρ 、波数 k に関しては、周波数、気圧、気温、湿度の値から算出できる。したがって、校正においては、音源マイクロホンの電気インピーダンス、音響中心距離の和 $(\delta_t + \delta_r)$ 、マイクロホン音響端子間の伝達音響インピーダンス T_e を測定することによって、マイクロホンの感度積すなわち $M_t M_r$ を得ることができる。

相互相反校正法では、3個のマイクロホンを用いて校正を行う。そのマイクロホンをそれぞれ、マイク1、マイク2、マイク3とする。測定手順としては、上述した式に

したがって、マイク1-マイク2、マイク1-マイク3、マイク2-マイク3の感度積を求めることになる。未知数である各マイクロホンの感度3つに対して、測定した感度積が3つあることから、それぞれのマイクロホンの感度が得られる。

3.3 校正時において留意すべき点

自由音場絶対校正において、留意すべき点はいくつかある。1つ目の問題点としては、感度積測定時におけるSN比を高くすることが難しい点が挙げられる。可聴周波数帯域においても、自由音場絶対校正は可能である。しかし、測定時におけるSN比を高くすることが難しく、高度な測定技術を要することから、通常は、比較的容易にSN比の高い校正が可能な音圧校正を行い、得られた音圧感度に自由音場補正量を加えるといった方法で、マイクロホンの音場感度を値付けしている。

一方、音波の持つ特性として、周波数が高くなるにつれて、距離による減衰が大きくなる。つまり、音源側のマイクロホンから出力される音圧が同じでも、受信側のマイクロホンで測定される出力電圧は、周波数が高くなるにつれて小さくなる。さらに、空中超音波用のマイクロホンの感度は、可聴音用に比べて小さい。したがって、空中超音波帯域における感度積の測定は、可聴周波数帯域における感度積測定よりも、測定時におけるSN比が低下すると考えられる。それゆえ、測定時におけるSN比をいかに高く保つかが問題となる。

2つ目の問題点として、マイクロホンの設置環境に関連する問題が挙げられる。式(2)に示すように、感度積を測定する際に必要なマイクロホン間の伝達特性 Z_d にはマイクロホン間隔が含まれている。空中超音波帯域では、間隔 d は、S/N比との関係から狭くする必要があり、位置決め精度が測定結果に大きく影響してくる。また、周波数が高くなるにつれて、指向性が鋭くなる傾向もある。したがって、空中超音波帯域における校正では、マイクロホンの位置決めには相当の注意を払う必要がある。また、温度や湿度の変動による影響も周波数が高くなるにつれて顕著に現れることから、校正時においては温度や湿度をできるだけ一定に保つよう、注意が必要である。

その他留意すべき点としては、マイクロホン固定の際に用いる治具、ケーブルなどの影響をできるだけ小さくしなければならない点が挙げられる。100 kHzの音の波長は約3.4 mmに相当するが、100 kHzでのマイクロホンの校正をする際には、波長との関係から言うと直径が3 mm程度のケーブルによる反射や回折の影響は無視できない。したがって、治具、ケーブル等による影響につい

ても十分に注意する必要がある。

4. 諸外国における音響標準の現状と取り組み

4.1 音響標準の供給状況

国内外の標準研究所では、若干の周波数帯域の違いがあるものの、概ね20～20000 Hzまでのいわゆる可聴周波数帯域を対象とした音圧レベル標準は供給されている。

表2は、これまで行われた、または今後行われる予定の国際基幹比較を示したものである。計量標準総合センター(NMIJ)では、これらすべての国際基幹比較に参加、あるいは参加予定である。可聴周波数帯域に関しては、LS1P形マイクロホンの音圧絶対校正としてCCAUV.A-K1の国際基幹比較が実施されている。日本も、この国際基幹比較に参加し、標準の同等性を示した。また、LS2P形マイクロホンの絶対校正として、CCAUV.A-K3の国際基幹比較が実施され、現在、そのドラフトが作成中である。LS2P形マイクロホンの絶対校正法については、現時点では直接的に標準の同等性は示されていないが、LS1形マイクロホンとの比較校正という形を取ることで、トレーサビリティ体系は維持されている。可聴周波数帯域に関しては、LS1P形、LS2P形マイクロホンともに、JCSSおよび基準器検査を通じ、産業界へ標準を供給している状態にある。

一方、可聴周波数帯域外においては、CCAUV.A-K2、CCAUV.A-K4の国際基幹比較があり、空中超音波帯域の国際基幹比較となるCCAUV.A-K4においては、LS2F形マイクロホンの自由音場絶対校正が予定されている。ただし、40 kHz以上の国際基幹比較は今のところ予定されていない。

4.2 空中超音波帯域における標準開発状況

過度に強力な空中超音波は人体に対して害を及ぼす危険性があることが明らかになったことから、IRPA/WHOは1970年代前半から超音波に対する調査を始め、その結果を整理集約して1982年にレポートとしてまとめた¹⁶⁾。このレポートを受けて、International Radiation Protection Association (IRPA)は、表3に示すような空中

表2 CCAUVによる国際基幹比較

| | 型式 | 周波数 (Hz) | 時期 |
|------------|-------|------------|---------------|
| CCAUV.A-K1 | LS1P | 63~8000 | 1999-2001 |
| CCAUV.A-K2 | LS1P | 2~250 | 2004-2005 |
| CCAUV.A-K3 | LS2aP | 31.5~31500 | 2003 |
| CCAUV.A-K4 | LS2F | 2000~40000 | 2005-2007(予定) |

表3 IRPA が示した空中超音波の音圧レベルの上限値

| 1/3 oct. 中心周波数 (kHz) | 音圧レベル (dB) (勤務作業時) | 音圧レベル (dB) (勤務作業以外) |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| 20 | 75 | 70 |
| 25 | 110 | 100 |
| 31.5 | 110 | 100 |
| 40 | 110 | 100 |
| 50 | 110 | 100 |
| 63 | 110 | 100 |
| 80 | 110 | 100 |
| 100 | 110 | 100 |

超音波に対するガイドラインを示した¹⁷⁾。このガイドラインに従えば、25 kHz以上での音圧レベルの上限値は勤務作業時で110 dB、それ以外では100 dBになる。

諸外国における動向としては、近年になって、IRPAのガイドライン¹⁷⁾やその他空中超音波に対する独自の調査結果を踏まえ、民生用機器に対する規制を行いつつある^{18), 19)}。それに伴って、空中超音波帯域の音響標準の早期確立が望まれるようになった。

現時点では、国外においては、空中超音波帯域の音響標準は確立・供給されていない。音圧レベル標準の確立にむけて動きはじめたというのが現状である。日本における現状は既に述べたので、CCAUVにおいて報告のあった国々について、開発状況を以下に示す。

・PTB (ドイツ)

20～150 kHz程度の周波数範囲を目標として、自由音場絶対校正法の予備実験を実施している。その結果、ある程度の精度で校正ができることを確認している²⁰⁾。

・DPLA (デンマーク)

20～150 kHz程度までを目標として、WS3形マイクロホンについて自由音場絶対校正法の研究を開始している²¹⁾。

ここに示した標準研究所以外においても、空中超音波帯域の音響標準の開発が進められている。進捗状況としては、ある特定の標準研究所が突出している状態ではなく、ほぼ横一線というのが現状である。

5. NMIJにおける今後の展開

5.1 空中超音波帯域の音響測定のための無響箱

自由音場絶対校正を行うには、反射音が存在しない空間である無響室が必要である。反射音の存在は、感度積の誤差要因となるからである。一般に、無響室は壁全面にグラスウール製のくさびを設置することによって反射を防いでいる。くさびの大きさは吸音しようとする周波

数の下限によって定まる。産総研には、大小2つの無響室があるが²²⁾、大無響室は、高さ7.2 m、幅9.5 m、奥行き8.0 mにもおよぶ大規模な建築構造物である。壁面からの反射を防ぐための吸音くさびは、長さが約2.0 mあり、40 Hz以上の周波数帯域で99%、100 Hz以上では99.9%以上の吸音率を実現している。低周波の音響計測を目的として、高吸音率を実現しようとするれば、無響室は大規模化する傾向にあるが、大規模な無響室は、扉の開閉による無響室内の環境の変動が安定するまでに長い時間がかかることや、無響室内の温度や湿度を長時間一定に保つことが難しいといった欠点も有している。

空中超音波帯域における校正においては、温度や湿度の影響を極力抑える必要があるため、現有の無響室の使用はあまり好ましいものではない。また、空中超音波帯域の校正対象となる周波数の下限は20 kHzであることから、吸音のためのくさびの長さは数cmでも問題はなく、波長との関係を考えて場合、無響室そのものの大きさは、原理的には10 cm程度の箱でも差し支えない。しかし、マイクロホンの取り付けなどの取り扱い易さを考えると、ある程度の大きさが必要である。

そこで、現在、空中超音波帯域における校正を行うための無響箱を製作中である。無響箱の概要を図3に示す。無響箱は、床面からの振動を防止するため、箱を防振ゴム4点で支えている。無響箱の大きさは、使い勝手などを考慮して縦横1600 mm、高さ1500 mmである。また、くさびの材質はグラスウールで、長さは150 mmである。また、上部に取り付けたマイクロホンは500 mm移動できるようにしてある。

なお、空中超音波帯域の音響計測を主たる目的とした無響箱は、これまで製作されたことはないため、無響箱

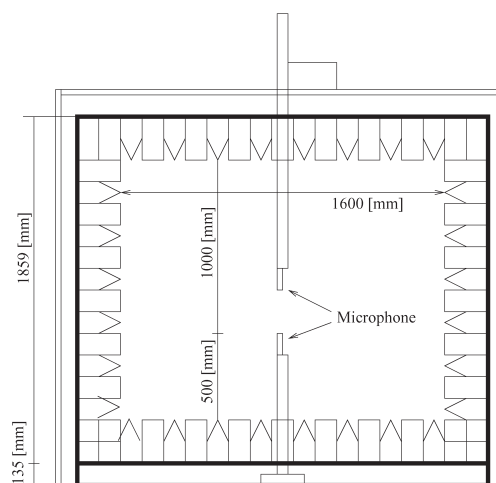


図3 空中超音波計測のための無響箱の概念図

の性能評価をしながら逐次改良していく予定である。

5.2 静電アクチュエータを利用したマイクロホンの感度付け

簡便なマイクロホンの感度校正法としては、図4に示すような静電アクチュエータを利用した校正法がある。静電アクチュエータを利用した校正法は、不確かさはやや大きいものの、任意の周波数におけるマイクロホン感度を非常に簡便に得ることができる方法として、測定現場でよく利用されている。静電アクチュエータを利用したマイクロホンの感度校正の手順を以下に示す。

図5のように、被校正マイクロホンの上面にアクチュエータを設置して電圧 U を加えたとき、マイクロホンの膜面に働く静電力 F は、

$$F = -\frac{\epsilon S}{2d^2} U^2 \quad (4)$$

となる。ここで、 ϵ は、空気の誘電率、 d は、アクチュエータとマイクロホン膜面との間隔、 S は、マイクロホン膜面の面積である。測定時には、角周波数 ω 、実効値 e の正弦波電圧に、直流電圧 E を重畳した電圧をアクチュエータに印加する。したがって、静電力 F は、

$$F = -\frac{\epsilon S}{2d^2} \{E^2 + e^2 + 2\sqrt{2} E e \sin(\omega t) - e^2 \cos(2\omega t)\} \quad (5)$$

であるから、マイクロホン膜面に働く角周波数 ω の単位

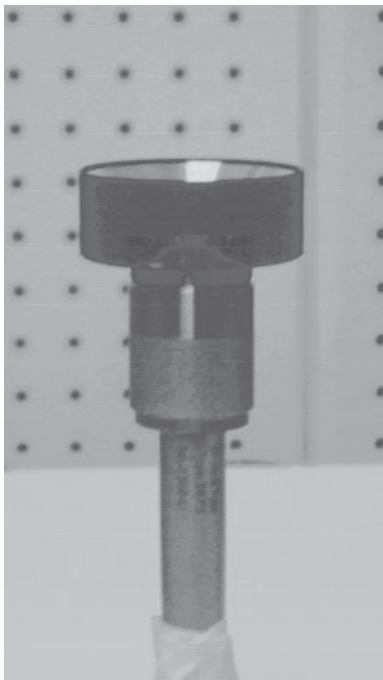


図4 静電アクチュエータ電極とマイクロホン

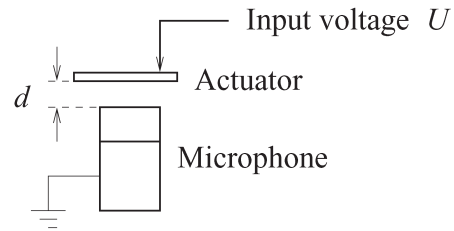


図5 静電アクチュエータとマイクロホンの模式図

面積当たりの静電力の実効値 p は、

$$p = \frac{\epsilon}{d^2} Ee \quad (6)$$

となる。マイクロホンの周波数応答は、 p とマイクロホン出力との関係から得られる。

静電アクチュエータによる方法²³⁾では、マイクロホンの周波数応答しか得られない。そのため、測定した周波数応答をマイクロホン感度へと変換する操作が必要である。また、空中超音波帯域では、電極がマイクロホン振動面の近傍に配置されているので、放射インピーダンスの影響が顕著に現れるため、自由音場絶対校正法による校正と比べ、不確かさの評価が難しい。空中超音波帯域における静電アクチュエータによる感度付けの不確かさは十分に検討されていないが、可聴周波数帯域においては、不確かさが0.2 dB程度であることが知られている²³⁾。これは、実際の計測現場において必要とされる精度とほぼ等しいことから、実用的な精度で校正できると考えられる。以上のような観点から、自由音場校正法以外の、実用的な精度で簡便な校正法の開発も進めていく必要があると思われる。

5.3 静電形マイクロホンの限界と音響計測のための新規デバイス

中・長期的な観点から見たとき、校正器物となるマイクロホンの問題がある。図6に、標準マイクロホンおよび計測用マイクロホンを示す。各マイクロホンについて測定可能な周波数範囲を表4に示す。現時点において、規格化されているマイクロホンのうち、最も高い周波数まで計測可能なマイクロホンは、WS3形マイクロホンである。表4には、WS3形マイクロホンの一例として、B&K 4939を示したが、その他のWS3形マイクロホンの測定可能な公称上限周波数は、概ね100 kHz前後である。100 kHzを超える周波数まで測定可能なマイクロホンとしては、マイクロホンの直径が約3.18 mmの、いわゆる1/8インチマイクロホンと呼ばれるものがあるが、このマイクロホンは規格化されたものではない。したがって、計測用マイクロホンで測定できる周波数の上限は、規格化

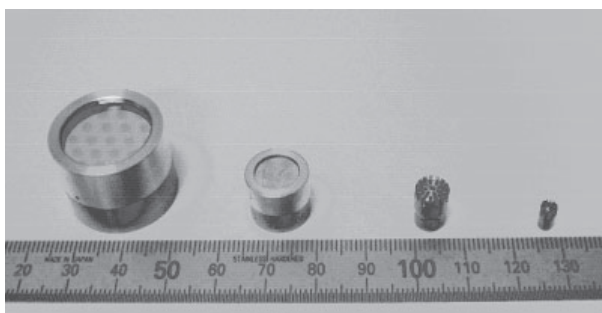


図6 標準マイクロホンと計測マイクロホン
左からLS1形, LS2形, WS3形, 通称1/8インチマイクロホン(規格外)

表4 各マイクロホンとその公称周波数

| 型式 | 規格 | 周波数 (Hz) |
|--------|------|------------|
| BK4160 | LS1P | 2.6~8000 |
| BK4180 | LS2P | 4~20000 |
| BK4939 | WS3 | 4~100000 |
| BK4138 | - | 6.5~140000 |

されているもので100 kHz, 市販されているもので140 kHzである。これらは、すべて静電形マイクロホンである。

静電形マイクロホンでは、現時点において140 kHz以上の周波数における標準の供給ができないこと、さらにはマイクロホンそのものによる反射や回折の問題をどのようにするかが問題となる。これらの点は、将来的には大きな障害となることは明らかである。

このような問題を避けるため、MEMSによる超微細なマイクロホン²⁴⁾や、光の干渉を用いた非接触な音圧測定法^{25), 26)}などが提案されているが、現時点においては安定性、精度の面で問題が山積している。NPLも小形マイクロホンを研究しているが²⁷⁾、現状では、まだ試作の段階である。少なくとも、140 kHz以上の周波数の音を市販のマイクロホンで測定するには無理があることは明らかであるから、新規の音響計測デバイスについての研究が必須となる。

5.4 今後必要とされる音響標準

ここまでは、音圧レベル標準について述べてきたが、機器に対する規制という点から考えると、新たな音響量の標準供給が今後の展開として考えられる。機器から放射される音は、音を放射する部分が局部に集中していたり、放射される音が指向性を持つことが多いので、音圧レベルによる評価よりは放射されるエネルギーによる評価が好ましい。実際、機器に対する規制として、放射され

るエネルギーに着目した規格、すなわち、音響インテンシティによるものがある。音響インテンシティとは、単位時間内に単位面積を通過する音響エネルギーを示すベクトル量である。音響インテンシティによる騒音測定法は、JISで規格化されているが²⁸⁾、国内においては、音響インテンシティに関する標準はまだ十分に整備されているとはいえない。このようなことから、音響インテンシティに関する標準などを含め、社会の動向を踏まえながら新たな標準を供給していく必要がある。

6. まとめ

本報告では、空中超音波の安全性、規制に着目して空中超音波を取り巻く現状について触れ、空中超音波標準の重要性を指摘した。また、空中超音波標準を開発するにあたり、校正手法とその問題点を具体的に述べた。空中超音波に関する音響標準は、生体に対する安全性評価の観点から早急なる標準の供給および計測技術の確立が望まれている。今後は、本調査研究で指摘した校正手法の問題点を改善し、早急に空中超音波帯域の音響標準を供給していく所存である。

参考文献

- 1) 環境省大気環境局：低周波音の測定方法に関するマニュアル，環境省(2000)。
- 2) 環境省環境管理局大気生活環境室：低周波音問題対応の手引書，環境省(2004)。
- 3) 蘆原郁，倉片憲治，水浪田鶴，松下一馬：“高校生を対象とした高周波純音に対する自由音場閾値の測定，”日本音響学会聴覚研究会，H-2003-91(2003)537-541。
- 4) 高橋弘宜，藤森威，堀内竜三，佐藤宗純：“空中超音波標準に関するニーズと課題，”産総研計量標準報告，3-3(2004)475-481。
- 5) Center for devices and radiological health, Food and drug administration, U.S.A: “An evaluation of radiation emission from video display terminals,” *HHS Publication (FDA)81-8153*, (1981)
- 6) 奥貴美子：“工業的超音波応用機器の人体への影響，”労働衛生，(1970)4-57。
- 7) C.H. Allen, H. Frings, and I. Rudnick: “Some biological effects of intense high frequency airborne sound,” *J. Acoust. Soc. Am*, 20(1948)62-65。
- 8) H.O. Parrack: “Effect of air-borne ultrasound on humans,” *International Audiology*, 5(1966)294-308。

- 9) H. Davis : "Biological and psychological effects of ultrasonics," *J. Acoust. Soc. Am*, 20(1948)605-607.
- 10) W.I. Acton : "Exposure criteria for industrial ultrasound," *Annals occupational hygiene*, 18(1975)267-268.
- 11) H. Davis : "Human response to measured sound pressure level from ultrasonic devices," *American industrial hygiene association journal*, 26(1965)132-136.
- 12) JIS C1010-1 : 2005 測定, 制御及び研究室用電気機器の安全性第1部 : 一般要求事項, 日本規格協会(2005).
- 13) 堀内竜三, 藤森威, 佐藤宗純 : "標準コンデンサマイクroh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*, 60-7(1996)7-16.
- 14) IEC 60655 : 1979 Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels for oneinch standard condenser microphones, International Electrotechnical Commission(1979) (IEC/TS 61094-7として改定予定).
- 15) JIS Z8738 野外の音の伝搬における空気吸収の計算, 日本規格協会(1999).
- 16) IRPA/WHO : Ultrasound, Environmental health criteria No.22,(1982).
- 17) International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association : "Interim guidelines on limits of human exposure to airborne ultrasound," *Health Physics*, 46-4(1984)969-974.
- 18) Health Canada : Guidelines for the safe use of ultrasound : Part II industrial and commercial applications safety code 24, EHD-TR-158, Minister of national health and welfare, Canada,(1991).
- 19) ACGIH : Threshold limit value for chemical substances and physical agents, biological exposure indices, American conference of governmental industrial hygienists,(1998).
- 20) CCAUV/04-03 : Report on the PTB national standards, Consultative committee for acoustics, ultrasound and vibration,(2004).
- 21) CCAUV/04-21 : Danish primary laboratory of acoustics short report on activities, august 2004, Consultative committee for acoustics, ultrasound and vibration,(2004).
- 22) 藤森威, 三浦甫 : "電総研音響実験棟について," *信学技報*, EA80-19(1980)1-10.
- 23) IEC 61094-6 : 2004 Measurement microphones part 6 : Electrostatic actuators for determination of frequency response, International Electrotechnical Commission(2004).
- 24) R. Gao and L. Zhang : "Micromachined microsensors for manufacturing," *IEEE Instrumentation & measurement mag.*, 7(2004)20-26.
- 25) O. B. Matar, L. Pizarro, D. Certon, J. P. Remenieras, and F. Patat : "Characterization of airborne transducers by optical tomography," *Ultrasonics*, 38(2000)787-793.
- 26) 田中啓一, 野上暁一, 園田義人 : "レーザー光による可聴音波の計測," *電気学会論文誌*, 122-E-7(2002)362-368.
- 27) CCAUV/04-23 : The acoustical metrology programme at NPL, Consultative committee for acoustics, ultrasound and vibration,(2004).
- 28) JIS Z8736 : 1999 音響インテンシティによる騒音源の音響パワーレベルの測定方法, 日本規格協会(1999).