

# 空中超音波標準に関するニーズと課題

高橋 弘宜\*, 藤森 威\*, 佐藤 宗純\*

(平成16年6月25日受理)

## Needs and problems of acoustic standard for airborne ultrasound

Hironobu TAKAHASHI, Takeshi FUJIMORI, Sojun SATO

### Abstract

Recently, equipments which radiate airborne ultrasound are increasing in our life. Except for the equipments which utilize its physical characteristics, there may be a lot of equipments emitting airborne ultrasound secondarily. In terms of emitted sound pressure level, rules and regulations have already enacted from 20 to 20000Hz, however, there are almost no regulations and guidelines over 20kHz. Under this background, the guidelines for airborne ultrasound are being considered in foreign countries. To determine the upper limit of sound pressure level for airborne ultrasound, an acoustic standard for airborne ultrasound is necessary. However, the acoustic standard for airborne ultrasound is not established now. In this report, electric equipments which may radiate airborn ultrasound and its guidelines on airborne ultrasound are investigated. In addition, this report describes the technical problems of establishing the airborne ultrasound standard and points out the future work.

### 1. はじめに

ヒトが知覚できる音の周波数帯域, すなわち可聴周波数帯域は, 20 Hzから20000 Hzとされている. 近年, 可聴周波数帯域を越えた周波数帯域の音 (空中超音波) を放射している機器が増加している. 空中超音波を放射している機器としては, 例えば, 感应式信号器に用いられている車両検知器のように, 空中超音波の持つ物理的な特性を積極的に応用した機器以外にも, ディスプレイのようないわゆる副次的に空中に超音波を放射しているものがある. 特に近年では, 副次的に空中へ超音波を放射している機器が増加しつつあるが, このような機器から放射される空中超音波の周波数帯域や音圧レベルは, ほとんど把握されていない.

国内における音に関する規制およびガイドラインを概観すれば, 可聴周波数帯域に対しては, 環境基本法や騒音規制法などに基づいた騒音公害に対する規制があり, 実際に運用されている. 一方, 空中超音波に対しては, 労働安全衛生法に, 作業環境における超音波について言及されているものの, この法律およびこれに係る政令, 省令などに, 具体的な数値が掲げられてはいない. ヒトが知覚できない音であること, こ

れまで空中に超音波を放射する可能性のある機器が少なかったこと, そして空中超音波による公害, 健康被害等の報告が全くといってよいほどなかったことなどの理由により, 空中超音波に対する規制はあまり重要視されてこなかったためと考えられる.

しかし, 急速に身の回りに空中超音波を放射している可能性のある機器が増加している現状を考えると, 知らず知らずのうちに長時間にわたって空中超音波帯域の音を浴びている可能性は高い. 今のところ, 空中超音波による公害などはほとんど報告されていないが, 今後, 空中超音波に対してなんらかの指針や規制を策定されることも十分に考えられる. 既に, 空中超音波に対するガイドラインとして, International Radiation Protection Association (IRPA) が, 空中超音波の音圧レベルの上限値を示している<sup>1)</sup>. 具体的な数値を掲げて指針や規制を策定する場合はもちろんのこと, 空中超音波に関する研究を行う場合でも, 空中超音波帯域の音響標準や空中超音波帯域の音圧を正確に計測する技術が必要不可欠である.

そこで, 本稿では, はじめに空中に超音波を放射する機器の現状について, その周波数帯域と音圧レベルを調査し, 空中超音波に対する各国の規制の現状を調査した. また, 空中超音波標準開発について, 現在抱えている問題と今後の方針について述べる.

\* 計測標準研究部門 音響振動科

表1 空中超音波の持つ物理的な特性を利用した  
民生用機器が放射する空中超音波

機器名	周波数帯域	インテンシティ or 音圧レベル
● 車両検知		
信号器の自動車感知センサ	25 kHz	
踏切障害物検出装置	38 kHz	132 dB(1 m)
● 障害物検知		
自動車のバックソナー	17 ~ 19 kHz	
侵入者検知器	18 ~ 50 kHz	mW/cm <sup>2</sup> order
自動ドア		
● 害虫小動物駆除		
害虫駆除器	18 ~ 50 kHz	mW/cm <sup>2</sup> order
● その他 (汎用超音波トランスジューサを使用)		
コピー紙の検知	20 ~ 300 kHz	125 dB以下 (1 m)
ATM用紙幣検出器	20 ~ 300 kHz	125 dB以下 (1 m)

## 2. 超音波を放射している機器の現状

空中へ超音波を放射していると思われる機器について、その周波数帯域と音圧レベルあるいはインテンシティを、過去に発表された論文、調査報告、製品パンフレット、ウェブサイト等に記されている情報をもとに調査、整理した。超音波の利用の歴史を見ると、古くから超音波洗浄器や溶接器などの産業的な用途、超音波診断装置に代表される医療用途に利用されてきた。そして、近年では、民生用機器へと超音波の利用が拡大している。そこで、超音波を放射している代表的な機器について、民生用機器、医療用機器、産業用機械の3つに分類してまとめた。なお、周波数帯域、音圧レベル、インテンシティについては、その製品を製造するメーカーごとに違いがあること、測定方法が統一されていないこと、測定方法に疑問があるものが含まれている。そのため、ある程度の目安であることに注意されたい。

### 2.1 民生用機器

民生用機器において、空中に超音波を放射する機器のほとんどは、物体の存在を検知するもの、害虫を駆除するものの2つに分類できる。表1に、このような機器類から放射される空中超音波の例を示す。

超音波を放射する機器としては、汎用電子部品として市販されている超音波トランスジューサを組み込んでいるものも多い。いくつかの組み込み向け汎用超音波トランスジューサの仕様を見ると、放射する音の周波数帯域は20 kHzから300 kHzで、トランスジューサから1m離れた位置での音圧レベルは、最大で約125 dBである。したがって、これを組み込んだ製品から放射される空中超音波の周波数は超音波トランスジューサの仕様と同等、音圧レベルに関しては125 dB以下と推察される。なお、一部の特殊用途向けでは、125 dB以上の例もある。

また、最近では空中超音波に対するヒトの聴覚に関する研究が盛んに行われており、これまで聞こえない音とされてきた20 kHz以上の空中伝搬音も、120 dBを越える非常に大き

表2 副次的に空中超音波を放射している可能性のある  
民生用機器が放射する空中超音波

機器名	周波数帯域	インテンシティ or 音圧レベル
ディスプレイ	18 ~ 100 kHz	
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	
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	

な音であれば聞こえるという報告<sup>2)</sup>や、20 kHz以上の周波数成分がヒトの聴感に影響を与えているといった報告などともあいまって、次世代のオーディオフォーマットや放送用規格では、100 kHz程度にまで及ぶ周波数帯域を有することが提案されている<sup>3)</sup>。また、空中超音波を用いた工学的な応用としては、非常に強力な超音波を空气中へ放射することで発生するひずみを積極的に利用して可聴周波数帯域の音を発生させるパラメトリックスピーカ<sup>4)</sup>などがある。

民生用機器では、表1に示した超音波の持つ特性を積極的に利用した機器のほかに、副次的に空中超音波を放射している機器が数多く存在している。機器の小形化、高能率化のためにスイッチング電源やインバータが広く使用されているが、これらは空中超音波帯域に相当する電気信号を生成する。この高周波電気信号による、例えばトランスなどの振動により、空中に超音波が放射される可能性がある。また、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もある<sup>5)</sup>。さらには、超音波加湿器のように超音波トランスジューサ部を直接空中に晒していない機器でも、空中に超音波を放射している可能性がある。このような、副次的に空中超音波を放射している可能性のある機器を、表2に示す。副次的に空中超音波を放射している可能性のある機器については、放射される空中超音波の周波数帯域は、ある程度は把握できるが、音圧レベルは不明である。

### 2.2 医療用機器

超音波を利用した代表的な医療用機器を、表3に示す。医療用機器の分野では、医療用機器から放射されるエネルギーを定量的に示す指標がいくつかあるが、ここでは、インテンシティを記す。超音波を利用した医療用機器のほとんどは、トランスジューサ部を皮膚に密着させて使用するものであり、使用している周波数はMHzオーダーである。国内においては、医療用機器の大部分は、放射される超音波のパワーの上限がJISによって定められており<sup>6)</sup>、使用する周波数帯域まで規制されているものもある<sup>7)</sup>。トランスジューサ部を皮膚に密着させる機器では、超音波の大部分は生体へと放射されるが、空中へも極めて微小ではあるが音波が放射されている可能性は捨て切れない。JISによって規制されている超音波診断装置などの医療用機器については、放射されるエネ

表3 空中超音波を放射する可能性のある医療用機器

機器名	周波数帯域	インテンシティ
腹部超音波診断装置	1 ~ 10 MHz	~ 1W/cm <sup>2</sup> (生体内)
温熱医療用機器		~ 5W/cm <sup>2</sup> (生体内)
結石破壊	10 kHz~1 MHz	
超音波メス	数 10 kHz	
歯科用ドリルなど		
ネブライザー	1 ~ 1.4 MHz	

ルギーの大部分が生体中に入ること考えると、空中に漏洩される超音波のインテンシティは、表3に挙げた数値以下と推察される。

一方、皮膚に密着させないような機器で、かつJISによる規制がないもの、例えば、組織破壊が目的である超音波メス、歯石を取り除くために使用される歯科用ドリルやネブライザーなどが放射する空中超音波の放射特性は不明である。

### 2.3 産業用機器

超音波を利用した産業用機器は、被照射物に対し物理的な変化を与える高出力のもの、被照射物に物理的な変化を与えない低出力のものに大別できる。超音波を利用した産業用機器について、高出力のを表4に、低出力のを表5に示す。

高出力の産業用機器で使用される超音波の周波数は、20 kHzから10 MHz程度と広帯域であるが、大部分の機器は20 kHzから1 MHzの周波数帯域を使用している。放射される超音波の出力は、機器の用途によって大きく異なるが、形状が大型の機械になるにつれて、使用する周波数は低く、かつ、大出力になる傾向がある。高出力の超音波を放射する機器のほとんどは、空中に超音波を放射することを主目的とするものではないが、出力が大きいゆえ空中へも放射されている可能性は極めて高い。

一方、低出力の機器は、ほとんどが計測用途であり、意図的に空中へ超音波を放射している。表5に小出力の超音波を使用する機器の例を示す。表5に示した機器以外にも、汎用電子部品の超音波トランスジューサを組み込んだ機器が多数あるが、これについては、2.1節で述べたとおりである。

産業用機器でも、スイッチング電源やインバータなど、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する機器が数多く存在している。放射される空中超音波は、2.1節で述べた通りであるが、民生用機器と比べ、高電圧、大電流であるため、副次的に放射される空中超音波の音圧レベルは民生用機器と比べるとかなり大きいことが予想される。

### 3. 空中超音波に対する規制の現状

可聴周波数帯域では、高い音圧レベルの音に長時間晒されることで、難聴になる危険性が知られているが<sup>8)</sup>、空中超音波帯域の音が聴覚に及ぼす危険性は、よくわかっていない。空中超音波が及ぼす聴覚以外の部位への影響についても、超

表4 被照射物に対し物理的な変化を与える目的で高出力の超音波を使用する産業用機器

機器名	周波数帯域	インテンシティ
工業用超音波洗浄器	20 ~ 200 kHz	約 1 ~ 6W/cm <sup>2</sup> (媒質中) 場所により 50W/cm <sup>2</sup>
プラスチック溶接	約 20 kHz	約 100W/cm <sup>2</sup> (媒質中)
金属溶接	10 ~ 60 kHz	約 2000W/cm <sup>2</sup> (媒質中)
超音波モータ	20 ~ 100 kHz	
超音波カッター	20 ~ 100 kHz	
液体の霧化	0.02 ~ 2.5 MHz	
薬品の溶解・拡散 乳化、脱気		

表5 低出力(被照射物に対し物理的な変化を与えない程度)の超音波を使用する産業用機器

機器名	周波数帯域	インテンシティ or 音圧レベル
レベルメータ	~ 100 kHz	
カウンタ	40 kHz	
ガス洩れ警報器	36 ~ 44 kHz	
密度計測	~ 50 kHz	
温度計測	~ 30MHz	
厚さ計測	2 ~ 10 MHz	
圧力計測	0.5 ~ 1 MHz	

音波を使用している機器の近くで作業を行っている人が吐気やめまいなどを訴える場合があるといった報告があるものの<sup>9)</sup>、いまだ不明な点が数多く残っている。一方、皮膚など直接的に人体へ及ぼす影響については、Allenら、Parrack, Davis, Actonらなどによって調査され<sup>10-13)</sup>、超音波の音圧レベルによって図1に示すようなことを生じることがわかっている。

このように、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から、IRPA/WHOが1970年代前半から超音波に対する調査を始め、その結果を1982年にレポートとしてまとめた<sup>14)</sup>。このレポートを受けて、International Radiation Protection Association(IRPA)は、表6に示すような空中超音波に対するガイドラインを示している<sup>1)</sup>。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。

諸外国の規制およびガイドラインを見ると、医療用機器については、WHOのレポート<sup>14)</sup>などを参考にして、FDAによる指針<sup>15)</sup>など、人体へ影響がないよう限度値が定められている。産業用機械については、一部の国で規制やガイドラインが示されているが、民生用機器では、ほとんどの国で規制もガイドラインもない。以下に、日本および諸外国の空中超音波に対する規制およびガイドラインの現状を示す。

#### ・日本

空中超音波の規制は、労働環境に対する規制と機器に対する規制の2つに大別できる。労働環境に対する規制としては、労働安全衛生法 第22条で、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ている。また、「騒音障害防止のためのガイドライン」

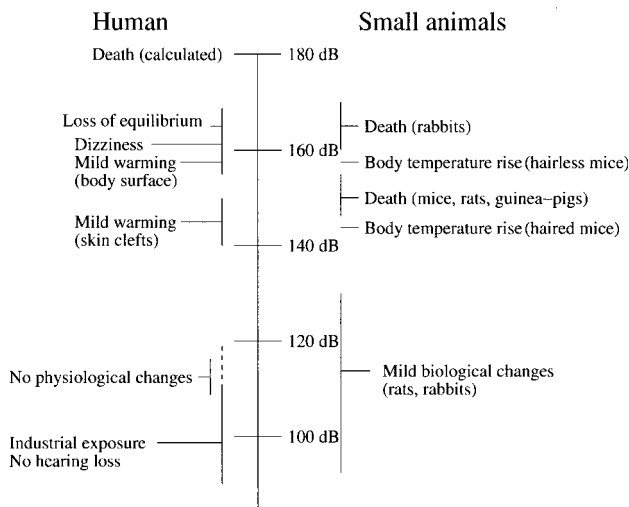


図1 空中超音波が及ぼす人体への影響 (Acton et al., 1974)

表6 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

があるが、具体的な数値による上限値は示されていない。

機器に対する規制は、実験、制御用機器に属する産業用機器に対して、JIS C1010 (IEC 61010-1と同等)に、機器から1mの距離における20 kHzから100 kHzの空中超音波の音圧レベル限度値として110 dBという記述があるが<sup>20)</sup>、この限度値は考慮中とされている。家庭用機器に対しては、家庭用機器が準拠しなければならないJISの一般的要求事項に、空中超音波に関する項目はない。

#### ・カナダ

WHOのレポート以前から空中超音波に対するガイドラインが定められており、WHOのレポートをまとめる際に、カナダのガイドラインを参考にした経緯がある。現在、WHOのレポート、IRPAのガイドライン、その他新たな問題点を考慮し、新たなガイドラインが策定されている<sup>21)</sup>。カナダの空中超音波に対するガイドラインで特筆すべき点は、空中超音波を放射する可能性のある機器全てに適用される点である。

#### ・アメリカ

労働環境および一部の機器に対して規制がある<sup>18)</sup>。なお、

一部の軍用機器では、IRPAのガイドラインよりもさらに厳しく20 kHz以上で85 dB以下となるように規定されている<sup>20)</sup>。

#### ・スウェーデン

労働環境に関する空中超音波の規制がある<sup>20)</sup>。対象となっている空中超音波の周波数帯域が20 kHzから200 kHzまでになっているのが特徴である。

#### ・ロシア

労働環境に関する空中超音波の規制がある<sup>21)</sup>。

#### ・イギリス

12 kHzから20 kHzの周波数帯域、および20 kHzを越える空中超音波帯域の音が聴覚に及ぼす影響についてまとめ、ガイドライン<sup>22)</sup>を作成しつつある。

#### ・オーストラリア、ニュージーランド

上述のWHOのレポート<sup>14)</sup>やIRPAのガイドライン<sup>9)</sup>をふまえた規格がある<sup>23)</sup>。現在、一部改定中である。

このように、空中超音波に対するガイドラインや規制は各国ともまちまちであるが、労働環境に対して限度値が定められている国では、概ね20 kHz以上の周波数帯域における音圧レベルの上限は110から115 dBになっている。機器全般に対して、放射される空中超音波の限度値が明記されているのはカナダのみであり、カナダ以外ではほぼ制約がないといえる。

## 4. 空中超音波の測定

### 4.1 騒音レベル測定における空中超音波の影響

諸外国のガイドラインを見ると、空中超音波帯域の音圧レベルは110から115 dBが限度値とされているが、一方でその音圧レベルの計測が正しくできているかを考えたとき、いくつかの問題が挙げられる。

第1に、騒音レベル測定における空中超音波帯域の音の取り扱いに一般的な基準がないことである。種々の周波数成分を含む音の大きさを簡便に測定するため、一般の環境騒音測定では、人間の聴覚特性を考慮した、A特性と呼ばれる周波数重み特性を使用している。A特性はIEC 61672によって規定されている周波数重み特性であり、可聴周波数帯域、すなわち、20 kHzを上限とする重み関数である<sup>24)</sup>。言い替えると、現行のA特性では、20 kHz以上の周波数帯域については考慮されていない。

そのため、20 kHz以上の周波数成分をどのように取り扱うかが問題となるが、空中超音波帯域の影響を軽減することを目的としたAU特性およびU特性と呼ばれる周波数重み特性が1990年にIEC 61012として規格化されている<sup>25)</sup>。A、U、

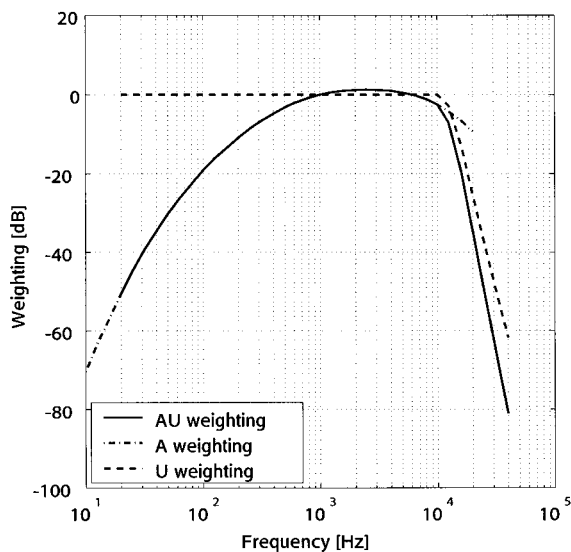


図2 A, U, AU特性の周波数重み関数

AU特性の周波数重み関数を図2に示す。AU特性は、A特性とU特性を合わせたもので、20 Hzから40 kHzまでの周波数帯域の重み関数である。イギリスでは、空中超音波を含む音の計測法が既に規格化されており<sup>26)</sup>、EUでも、A特性に代わり、空中超音波領域の周波数成分を考慮したAU特性を用いる動きがある。しかし、現状では、AU特性やU特性は一般の騒音測定では、それほど普及していないため、空中超音波を含む音の計測に統一性があるとはいえない。

騒音レベルではなく、音圧レベルを測定する目的においても、サウンドレベルメータの周波数特性が規定されているのは20 kHzまでである<sup>29)</sup>。したがって、現行のIEC規格に適合したサウンドレベルメータを用いても、空中超音波の音圧レベルの正確な測定はできない。

#### 4.2 空中超音波測定に関する問題

音波は、その周波数が高くなるにつれて、

- ・ 波長が短くなる。
- ・ 距離による減衰が大きくなる。
- ・ 気圧、温度、湿度など測定環境の影響を受けやすい。

といった特性を持つ。空中超音波の音圧レベルの定量的な測定では、計測用マイクロホンを使用せざるを得ないが、波長が短いゆえマイクロホンの形状による反射や回折の影響が顕著に現れる。また、指向性が鋭いことや、測定環境の影響を受けやすいため、測定位置のわずかなずれが、測定結果に大きな違いをもたらす。

空中超音波帯域の音を測定するためのマイクロホンとしては、マイクロホン自身の反射や回折を軽減するために、直径が約3 mmまたは7 mmの計測用マイクロホンを使用することが望ましいとされている。直径が3 mmのマイクロホンの場合、その直径を波長に換算すれば約90 kHzに相当する。

つまり、90 kHz以上の周波数の音を測定するには、市販されている最小径の計測用マイクロホンである直径が約3 mmのものでも、十分に大きいことになる。マイクロホンの形状に起因する反射、回折の影響を取り除くための一般的な指針は今のところなく、このような影響を全く考慮せずに測定が行われているのが現状である。

### 5. 空中超音波に対する計量標準

#### 5.1 標準の必要性と現状

これまで述べてきたように、現在、さまざまなところで空中超音波が着目されているが、計測技術が追い付いていないというのが実情である。CCAUVのレポート<sup>27)</sup>でも空中超音波帯域の標準を供給する必要性についての言及もあることから、空中超音波帯域の標準の供給および計測技術を早急に確立する必要がある。

##### 5.1.1 可聴周波数に対する音響標準

可聴周波数帯域の音響標準は、直径が約24 mmのLS1P形マイクロホンと13 mmのLS2P形マイクロホンの標準マイクロホンの音圧感度で維持されている。これら標準マイクロホンの音圧感度は、音響カプラを用いた相互校正法により、絶対校正することができる。国内においては、国家標準からのトレーサビリティ体系が構築され、JCSSや基準器検査を通じ、LS1P形マイクロホンで20 Hzから12.5 kHz、LS2P形マイクロホンでは20 Hzから20 kHzまでの音響標準が供給されている。

しかし、実際の音場計測で必要なのは、自由音場感度である。自由音場感度の絶対校正は、無響室中での相互校正法により可能であるが、実際にはほとんど行われていない。その理由は、高性能な無響室や大掛かりな設備が必要であること、S/N比が極端に悪く、種々の誤差要因を伴うため精度良い測定が困難であるからである。自由音場感度と音圧感度の差は自由音場補正量と呼ばれ、低い周波数では、両者の差はほとんどないが、周波数が高くなるにつれて、その差が大きくなる傾向を示す。この補正量は個々のマイクロホン感度によらず、その形状のみによって決まるとされ、マイクロホン型式ごとに標準値を決めることができる。したがって、通常、LS1P形およびLS2P形の標準マイクロホンの自由音場感度は、音圧感度の絶対校正、または、比較校正によって得られた値に自由音場補正量を加えることによって算出している<sup>28)</sup>。また、自由音場での比較校正によっても一般の計測用マイクロホンの自由音場感度が求められる。

このようにして、可聴周波数帯域では、実用的には十分な精度で標準マイクロホンの感度校正が行われ、これを用いて一般の計測用マイクロホンや音響機器を校正することが可能になっている。

### 5.1.2 空中超音波帯域に対する音響標準の問題点

可聴周波数帯域における相互校正法による絶対校正法をそのまま応用することにより、40 kHz 程度までの校正は可能とされているが、40 kHz を超える周波数の絶対校正技術は確立されていない。

校正技術に関して抱えている問題点としては、4.2 節で指摘した測定環境に起因する問題のほかに、標準マイクロホンが挙げられる。マイクロホン自体の形状に起因する反射や回折の影響は、その周波数が高いほど顕著になるので、空中超音波の計測ではマイクロホンの直径が小さいほど、その影響を軽減できる。現在、直径が約 3, 7, 13, 24 mm の計 4 種類の計測用マイクロホンが市販されているが、最も高い周波数まで測定できるのは 3 mm のもので 140 kHz 程度 (B&K 4138) である。空中超音波帯域における標準の供給目標は 200 kHz であるが、現在、200 kHz での全帯域をカバーできるマイクロホンは存在しない。一方、計測用マイクロホンの構造は、IEC 61094 によって定められており、直径が 24, 13, 7 mm のものはそれぞれ WS1, WS2, WS3 形マイクロホンとして規格化されているが、直径が 3 mm のマイクロホンは規格化もされていない。したがって、マイクロホンそのものの規格から決める必要がある。

### 5.2 産総研における空中超音波音響標準の取り組み

現在、産業技術総合研究所 (産総研) では空中超音波における音響標準の開発を進めている。CCAUV のレポートでは<sup>27)</sup>、20 kHz から 200 kHz の周波数帯域の音響標準の開発が必要であるとしている。現在、LS2 形マイクロホンによる 40 kHz までの国際比較が計画中である。産総研としては、国際比較に参加すべく開発を進めている。

空中超音波帯域における校正法に関しては、可聴周波数帯域では、カプラを使った音圧校正が主流であるが、空中超音波帯域は、カプラを使った音圧校正が困難であること、また、音響計測等で必要とされるのは自由音場感度であることを考慮して、無響室での相互校正法による自由音場絶対校正法および比較校正法の開発に着手した。

前節でも述べたように、自由音場での校正は種々の誤差要因を伴うが、特に計測環境の影響を非常に受けやすいことから、環境の影響を軽減するために小形の無響室を検討中である。可聴周波数帯域の自由音場校正は、音波の反射を防ぐために、壁全面にグラスウール製のくさびを設置した無響室で行われる。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。可聴周波数帯域を考えると、下限周波数を約 40 Hz とした場合、くさびの大きさは、1 m から 2 m になり<sup>28)</sup>、波長との兼ね合いを考慮すれば、無響室の大きさは一辺が 10 m 程度となる。このような大規模な無響室は、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り、そのうえ無響室内の温度や湿度を長時間一定に保つことも難しいため、空中超音波帯域の校正を行うには不向きである。空中超音波帯域の場合には、対象とする周波

数の下限は約 20 kHz であることから、吸音のためのくさびの大きさは数 cm であり、波長との関係を考えて、無響室そのものの大きさは、原理的には 20 cm 程度の箱でも問題はない。しかし、極端に小さすぎるものも操作性の面で難があるため、小型の無響室の大きさは、一辺が 1~2 m 程度を考えている。

また、校正時における不確かさの要因として、マイクロホンの位置ずれが挙げられる。空中超音波は、指向性が鋭いため、マイクロホンの向きのわずかなずれによってその校正值が大きく異なる可能性がある。さらに、マイクロホンを固定する治具による反射や回折の影響も十分に考慮しなければならない。したがって、校正時におけるマイクロホンの最適な設置方法についても、十分に検討する必要がある。

将来的な研究課題としては、簡便な比較校正法の開発が挙げられる。簡便な比較校正法として、静電アクチュエータによる方法がある<sup>29)</sup>。静電アクチュエータによる校正の原理は、静電力で受音側のマイクロホンを振動させ、その出力をもとにマイクロホンの校正を行うものである。この方法では、周波数によらず一定の音圧を受音側のマイクロホンへ与えることができる。ただし、静電アクチュエータによる校正は絶対校正ではないため、なんらかの方法で絶対校正されたものとの比較が必要である。また、静電アクチュエータは、その電極がマイクロホン上方に覆いかぶさるような構造になっている。そのため、音圧感度を求める際には、周波数が高くなるにつれて、静電アクチュエータの電極がある場合とない場合との放射インピーダンスの差が大きくなり、それゆえ、静電アクチュエータによって得られた感度と真の感度との間に差が生じるといった欠点がある。現在、静電アクチュエータの形状の規格が IEC において、IEC 61094-6 として審議中であるが<sup>30)</sup>、その対象は WS1 および WS2 形マイクロホンであり、また、対象とする周波数帯域の上限は 20 kHz である。以上のような点から、20 kHz 以上の周波数帯域の空中超音波帯域の校正に静電アクチュエータを用いるには問題がある。しかし、この方法は非常に簡便であり、魅力的な方法である。それゆえ、静電アクチュエータによって、どの程度の精度が実現できるのかを明らかにする。

さらには、現状で行われているような相反校正以外の新たな音圧あるいは粒子速度の絶対校正法や、現在では計測の難しさゆえほとんど行われていない 3 次元音場の把握技術、さらにはマイクロホン以外の新たな音圧センサの開発へと今後の研究を展開する必要がある。

## 6. まとめ

本稿では、空中超音波に関する標準の確立が望まれている背景として、空中に超音波を放射している機器について、周波数帯域と音圧レベルおよびインテンシティについて調査し、諸外国における空中超音波のガイドラインおよび規制を調べた。また、ガイドラインおよび規制を制定するにあたり

問題となる空中超音波帯域の音の計測法に関連する問題点、ならびに空中超音波帯域標準を確立するために現在抱えている問題点を述べた。

国内における空中超音波帯域の音響標準は、諸外国と比べて遅れていることから、上述の問題を解決しつつ、不確かさの小さい空中超音波帯域の音響標準を確立すべく研究を進める。

また、空中超音波の計測が必要とされる場として、例えばその安全性の評価で、医療や産業界が考えられる。それゆえ、空中超音波帯域の音響計測という点で、医療および産業界などとも協力しつつ研究を進めていきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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) 537-542.
- 3) 桐生昭吾, 蘆原郁, 佐藤宗純, 吉川昭吉郎: 次世代高品位オーディオと測定技術, 日本音響学会誌56-9 (2000) 653-656.
- 4) 鎌倉友男: パラメトリックスピーカ, 超音波TECHNO (1989) 61-66.
- 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) 例えばJIS T1503 Aモード超音波診断装置, 日本規格協会 (1984).
- 7) JIS T1506 超音波ドプラ胎児診断装置, 日本規格協会 (1981).
- 8) 日本音響学会編: 基礎音響工学 (コロナ社, 1990) 36-38.
- 9) H. Davis: Human response to measured sound pressure level from ultrasonic devices, American industrial hygiene association journal, 26 (1965) 132-136.
- 10) 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.
- 11) H.O. Parrack: Effect of air-borne ultrasound on humans, International Audiology, 5 (1966) 294-308.
- 12) H. Davis: Biological and psychological effects of ultrasonics, J. Acoust. Soc. Am., 20 (1948) 605-607.
- 13) W.I. Acton: Exposure criteria for industrial ultrasound, Annals occupational hygiene, 18 (1975) 267-268.
- 14) IRPA/WHO: Ultrasound, Environmental health criteria No.22 (1982).
- 15) Center for devices and radiological health, Food and drug administration, U.S.A: Information for manufacturers seeking marketing clearance of diagnostic ultrasound systems and transducers (1981).
- 16) JIS C1010-1 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 (1998).
- 17) Guidelines for the safe use of ultrasound: Part II Industrial and commercial applications safety code 24, Minister of national health and welfare, Canada (1991).
- 18) Threshold limit value for chemical substances and physical agents, biological exposure indices, American conference of governmental industrial hygienists (1998).
- 19) Hazardous noise exposure, United States Air Force, USAF regulation (1974) 161-35.
- 20) Infra and ultrasound in occupational life, The national board of occupational safety and health, Sweden (1978).
- 21) USSR health standards for occupational exposure, USSR state committee for standards (1975).
- 22) B. W. Lawton: Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic frequency, Health and safety executive, UK (2001).
- 23) AS/NZS 2243-5 Safety in laboratories, part 5: Non-ionizing radiations, Australian/New Zealand Standard (1993).
- 24) IEC 61672-1 Sound level meter part 1: specifications, International Electrotechnical Commission (2002).
- 25) ISO 61012 Filters for the measurement of audible sound in the presence of ultrasound, International Organization for Standardization (1990).
- 26) BS EN 61012 Filters for the measurement of audible sound in the presence of ultrasound, British Standards Institution (1998).
- 27) B. Zeqiri: Draft working group report on future needs for metrology in acoustics, ultrasound and vibration, Consultative committee for acoustics, ultrasound and vibration, CCAUV/02-33 (2002).
- 28) S. Sato, T. Fujimori and R. Horiuchi: Free-field correction for laboratory standard microphones of type LS2aP, Acoust. Sci. & Tech., 23-6 (2002) 350-352.
- 29) S. Sato, T. Fujimori and H. Miura: Design charts of a sound absorbing wedge using airflow resistivity of glass wool, J. Acoust. Soc. Japan (E), 12-2 (1991) 79-86.
- 30) D. R. Jarvis: The accuracy of the electrostatic actuator method of determining the frequency response of condenser microphones, J. Sound and Vib., 123-1 (1988) 63-70.
- 31) IEC 61094-6 Ed.1 Measurement microphones part 6: Electrostatic actuators for determination of frequency response, International Electrotechnical Commission (2003).