

# 騒音計測の信頼性をいかに確保するか

## — 音の標準の開発と新しい供給体制 —

堀内 竜三

騒音計測をはじめ音響分野での計測結果に対する信頼性を確保するため、産総研は必要となる要素技術を開発し、我が国の計量法に基づいて標準マイクロホンを頂点としたトレーサビリティ体系を整備した。この体系のもとで、新たな音の標準の供給サービスを開始したことにより、我々の日常生活の安全・安心を支えるために社会が必要としている、不確かさの小さな騒音計測が可能となった。

キーワード：騒音計測、標準マイクロホン、音圧感度、カプラ校正法、計測用マイクロホン、騒音計、自由音場感度、無響室

## How the reliable environmental noise measurement is ensured

### – Development of acoustic standards and a new calibration service system –

Ryuzo Horiuchi

To ensure the reliable results in acoustic measurement such as environmental noise measurement, NMIJ/AIST has developed essential calibration techniques and established a traceability system based on the Japanese Measurement Law with acoustic standards at the highest level of accuracy. A new calibration service for reliable acoustic measurements under this system realized a minimum uncertainty in the environmental noise measurements, indispensable to sustain high quality of our daily life.

**Keywords:** Environmental noise measurement, laboratory standard microphone, pressure sensitivity, coupler reciprocity method, measurement microphone, sound level meter, free-field sensitivity, anechoic chamber

### 1 はじめに

我々は日常、何らかの音に曝されて生活している。会話の妨げになる音、不快さをもたらす音は騒音とみなされる。騒音は、睡眠の妨害や作業効率の低下をはじめ様々な形で我々の日常生活に悪影響を及ぼし、場合によっては聴力損失という重大な健康被害を招く。

我が国の環境基本法では、国民の健康かつ文化的な生活の確保と、人類の福祉への貢献を目的とし、環境保全の基本理念と、その実現に必要な施策が定められている。騒音は、大気汚染などとともに取り組むべき公害の一つに挙げられ、環境騒音の規制や基準値が定められている。騒音規制法では特定の工場や建設機械、自動車から出される騒音が規制の対象となっている。また道路交通騒音、航空機騒音、新幹線騒音については、政府の達成目標値である環境基準が定められている。環境騒音の観点から我々の日常生活の安全・安心を維持するために、産総研に求められてきたことは環境騒音の計測における信頼性の確保であり、そのために必要な技術的課題の解決である。

音を物理現象として捉えると、音波とは音源の振動によって周囲の媒質（空気）が振動し、その振動が空間的に伝播していく現象のことである<sup>[1]</sup>。振動の伝播に伴って媒質の密度は時間的・空間的に変化し、圧力変化をもたらす。音波の発生による、静圧からの圧力変化を音圧という。音圧は音に関する主要な物理量であり、音圧の計測が音響分野での計測の基本になっている<sup>[2]</sup>。

多くの場合、音圧の大きさは音圧レベル<sup>[1]</sup>で表され、音圧レベルの単位はデシベル、記号は dB である。人間の聴覚は周波数特性をもつため、音圧レベルが同じであっても周波数（音の高さ）が違えば違う大きさの音に聞こえる。聴覚の特性を模した周波数重み付け特性を A 特性といい、A 特性で補正した音圧レベルを A 特性音圧レベル、あるいは一般に騒音レベルという。騒音レベルの単位も音圧レベルと同じデシベルである（騒音レベルの単位として従来はホンも使われていたが、現在は国際的にデシベルに統一されている）。騒音レベルは環境騒音や機器から発生する騒音の評価に用いられる<sup>[3]</sup>。

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3  
National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan E-mail: ryuzo.horiuchi@aist.go.jp

Original manuscript received June 18, 2009, Revisions received September 24, 2009, Accepted September 25, 2009

音圧レベルや騒音レベルの計測には、図1に示す計測用マイクロホン<sup>[4]</sup>や騒音計(最近では、サウンドレベルメータと称することが推奨されているが、本論文では一般的に用いられてきた名称を用いる)<sup>[5][6]</sup>が音響測定器として用いられる。音圧のセンサである計測用マイクロホンを用いれば、その出力電圧から音圧を測定できる。あるいは音圧センサと演算の機能を合わせもった騒音計を用いれば、計測量である音圧レベルや騒音レベルを直接表示できる。

騒音計を用いて計測を行う代表的なユーザーとしては、次のものが挙げられる。①騒音レベルの計量値を公的に証明書に記載できる環境計量証明事業者、あるいはその要員として計量管理を行う環境計量士、②各地域で環境騒音測定を行う地方自治体、③開発した製品の音響特性を計測する必要のあるメーカー、④音響計測を行う大学や研究機関。

適正な計量の実施を確保するため、従来から我が国の計量法では、取引・証明行為に用いる重要な計量器を「特定計量器」として定め、特定計量器に求められる構造や測定精度に関する試験(検定という)の項目とその合格基準を定め、法的な規制を行ってきた。騒音計も特定計量器の一つに指定されており、検定が行われてきた。現在我が国では、約5万台の騒音計が検定に合格し、公的な騒音計測に用いられている。

騒音計の検定において、騒音レベルの表示値の正しさを評価するには、騒音計のマイクロホンに加わる音圧を精密に計測する必要がある。このため、標準マイクロホンと呼ばれる、安定性に優れた特殊な計測用マイクロホンが別途必要である(図2)<sup>[7][8]</sup>。別の言い方をすれば、標準マイク

ロホンの音圧センサとしての感度(入力音圧に対する出力電圧の比)が音響計測におけるいわば「基準の物差し」、すなわち「音の国家標準」(音響標準)となる。検定で基準として用いる標準マイクロホンを「騒音基準器」という。産総研は、旧工業技術院時代(電気試験所や電子技術総合研究所)を含めるとほぼ半世紀にわたって騒音基準器の感度校正サービスを行ってきた<sup>[9][10]</sup>。

検定に合格した騒音計のみが取引・証明行為への使用を許されるという、我が国の検定制度は今後も継続される。しかし一方で、近年国際的にしばしば使われるようになった不確かさの概念が検定には含まれておらず、騒音基準器としての標準マイクロホン感度の校正値には不確かさの値が明記されていない。また特定計量器としての騒音計の検定においても、騒音基準器による測定値との差が許容範囲内にあるかどうかだけで合否を判定している。

現在、測定器の仕様や校正法を規定するISOやIECの国際規格やJISには不確かさの考えが導入されるようになってきた。科学的な見地から言えば、本来、測定には多かれ少なかれ不確かさがつきまとう。人々が測定の結果を相互に信頼できるためには、測定結果の不確かさを適切に表明することが必須である。さらには、世界貿易機構における貿易の技術的障壁に関する協定(WTO/TBT協定)が、1995年に我が国も含めて締結された。このようにして、測定器の国際規格への適合性が、どの国でも同じように保証される体制作りが必要になった。このために、各国で当該測定器のトレーサビリティ<sup>[11][12]</sup>が確保され、かつ各国の国家標準同士の技術的な同等性が検証されていることが不可欠となった。

音響分野においても状況は同じであり、音響測定器の規格適合性判定において不確かさ評価が不可欠となったため<sup>[11]</sup>、測定のトレーサビリティ体系(図3)を構築しないと、ユーザーが用いる音響測定器の規格適合性を保証

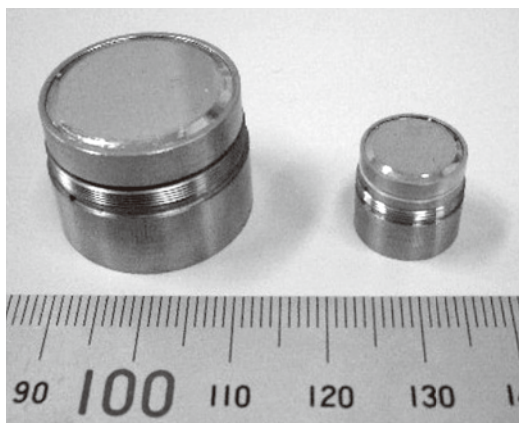


図1 計測用マイクロホン(左)と騒音計(右)

計測用マイクロホンは、振動膜(図では円形の上端面)に作用する音圧に比例した出力電圧を発生する音圧のセンサである。可聴周波数範囲(20 Hz ~ 20 kHz)で用いるタイプとしてI形とII形があり、筐体の外径と使用できる周波数範囲が異なる。左側の大きい方がI形計測用マイクロホンである。

騒音計は、先端(図では左端)に取り付けられた計測用マイクロホンで測定された音圧値から、計測量である音圧レベルや騒音レベルを演算して表示する機器である。マイクロホン、増幅器、周波数重み付け回路、演算回路、表示機構から構成される。

できない状況になった。

また最近では、環境騒音の測定だけでなく、家電製品（冷蔵庫、洗濯機、掃除機など）や情報機器（コピー機、パソコン、プリンタなど）から発生する騒音の測定が重要視されるようになった。これらの機器が出す騒音の測定には、音響測定器として計測用マイクロホンが使用される<sup>[12][13]</sup>。

国際規格やそれと同等のJISに適合した音響測定器が供給されることではじめて、家電・情報機器メーカーは自社製品について測定した音響特性データの信頼性を確保し、製品の品質を国際的に保証できるようになる。産業界が今後の技術開発ロードマップに描いている、環境にやさしく安全・安心で、付加価値の高い製品を開発するためには、音響測定器のトレーサビリティ体系の整備が必須の基盤技術となった。こうした社会的ニーズの変化により、従来の検定制度とは異なる音響標準の供給体系を整備することとした。

ユーザーが信頼性の高い騒音計測を行うには、こうした測定器の性能確保はもちろんのこと、測定環境条件（温度、気圧、風）や、周囲からの反射音という測定現場に特有な要因の影響を評価することが不可欠である。しかし反射音の影響については、音場（音波が存在する空間）の不確かさ評価が未解決の技術的課題となっていた。反射音の影響は、音を反射する地面や建物と測定器との位置関係に依存する。この性質を利用して従来は、測定器の位置を変えて測定したデータを平均化する対策がとられていた。この方法では不確かさを減らすことはできるが、実際に不確かさがどの程度低減されたかを定量的に評価することはできず、データの信頼性は十分ではなかった。

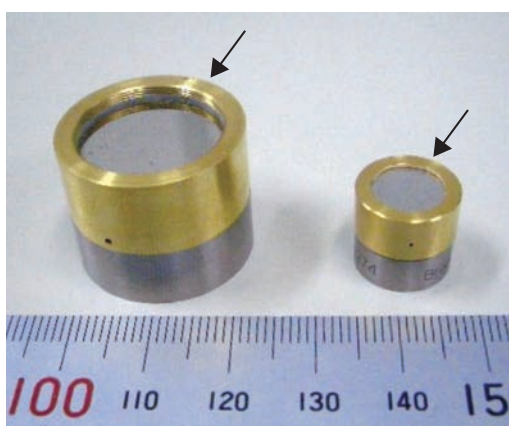


図2 標準マイクロホン

標準マイクロホンも計測用マイクロホンの一つであるが、音響標準としての信頼性を確保する必要があるため、感度の安定性について一般の計測用マイクロホンに比べて厳しい条件が課されている。また後述するようにカプラという治具に取り付けて感度校正を行うので、振動膜がカプラに触れて損傷しないよう、振動膜の外周には土手のような構造（図では矢印で示した、金色の部分）を備えている。左がI形標準マイクロホン、右がII形標準マイクロホンである。

全く同じことが音響測定器の校正においても課題となっていた。音響測定器の校正は通常、反射音の影響が少ないように設計された無響室の中で行われるが、高性能な無響室であっても全く反射音のない空間を実現することは極めて難しく、反射音の存在が音響測定器の校正における大きな不確かさの要因となっていた。この問題への対応として騒音計のJIS<sup>[6]</sup>では、無響室の中で音源や騒音計の位置を変えて測定をくり返し、不確かさを減らすことが要求されている。しかしこの方法は騒音計の仕様が規格に適合するかを判定するための手順の一つに過ぎず、不確かさが適切に評価されていないことが依然問題として残っていた。産総研は、このような状況に鑑み反射音が存在する音場の不確かさを評価する技術を開発し、技術的課題の解決を図った。

また音響測定器の校正に関しては、もう一つの技術的課題が残されていた。これまでに実現してきた音響標準ではその不確かさの値が大きく、そのままでは一部の音響測定器の規格適合性が評価できない状況にあったため、音響標準の高度化（高精度化）による不確かさの低減が課題であった。

本論文では以降に、これらの課題を解決して騒音計測の信頼性を確保するために行った研究について述べる。

## 2 要素技術と研究シナリオ

騒音計測の信頼性確保という研究目標を達成するには、前章で挙げた二つの技術的課題を解決するための要素技術が必要である。

第一の要素技術は、標準マイクロホン感度の校正不確か

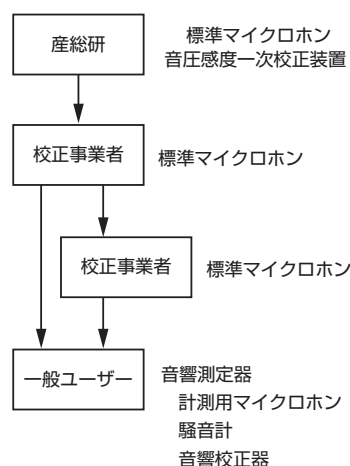


図3 音響計測におけるトレーサビリティ体系図

上位の校正事業者がもつ標準マイクロホンは、産総研が開発した一次校正装置によって校正される。下位の校正事業者がもつ標準マイクロホンは、上位の校正事業者の標準マイクロホンとの比較によって二次校正される。一般ユーザーの音響測定器は、校正事業者の標準マイクロホンとの比較によって二次校正される。

さの低減である。産総研が実現できる標準マイクロホン感度の校正不確かさは、これまでは0.1 dB程度が限界であった。しかしJISでは、騒音計の点検に用いるハイグレードの音響校正器<sup>[14]</sup>（一定音圧を発生できる可搬型の校正用音源）の校正不確かさが0.1 dB以下と定められており、感度の不確かさが0.1 dBの標準マイクロホンでは音響校正器の性能を評価するための基準として使えないという問題があった。標準マイクロホン感度の校正装置を高度化することが不可欠になったため、デジタル信号処理技術の導入によるS/Nの改善などを行い、不確かさを0.04 dBにまで低減した。

第二の要素技術は、音響測定器の校正に用いる音場の不完全性（反射音の影響）に起因する不確かさの評価方法の開発である。反射音の影響を可視化して不確かさを定量的に評価するとともに、デジタル信号処理技術を駆使して反射音を除去する方法を開発した。

これらの研究成果を社会に還元するために必要になるのが、音響測定器のトレーサビリティ体系である。トレーサビリティ体系の構築によって、標準マイクロホンや音響測定器の校正技術を、エンドユーザーの測定結果の信頼性向上に結びつけることが可能になる。産総研がトレーサビリティ体系の頂点として音響標準を供給し、校正事業者はこれを基準にしてユーザーの音響測定器を校正するという体系を作り上げた。

さらにトレーサビリティ体系の階層ごとに、各組織（産総研および各校正事業者）の測定能力の妥当性確認が必要になってくる。このため産総研は、各国の国家計量標準研究所との間、ならびに校正事業者との間で各々持ち回り試験を行った。なおかつ各組織は、自らが実施する校正の手順や不確かさの評価方法について第三者機関による審査を受けることにより、測定能力の妥当性を客観的に証明した。

個々の要素技術を開発し、トレーサビリティ体系という形で統合したことにより、ユーザーが行う騒音測定結果の信頼性を国際的に確保するスキームを確立した。

### 3 国家標準としてのマイクロホン

#### 3.1 音圧感度の一次校正

国家標準としてのマイクロホン（標準マイクロホン）は、その音圧感度<sup>用語3</sup>が安定であること、ならびに音圧感度の絶対値を高精度に校正（一次校正）できる方法が確立されていること、の2点が要件である。標準マイクロホンの音圧感度の一次校正にはカブラ校正法<sup>[15]</sup>を用い、音波を小容積の空洞（音響カブラ）内に閉じ込めた状態で校正を行う（図4）。これ以外の適用可能な校正法については、可聴周波数範囲（20 Hz～20 kHz）全てをカバーできない<sup>[16]</sup>ことや、不確かさの点で劣る<sup>[14][17]</sup>ことが理由で採用しなかった。

カブラ校正法による校正技術の改良のため、デジタル信

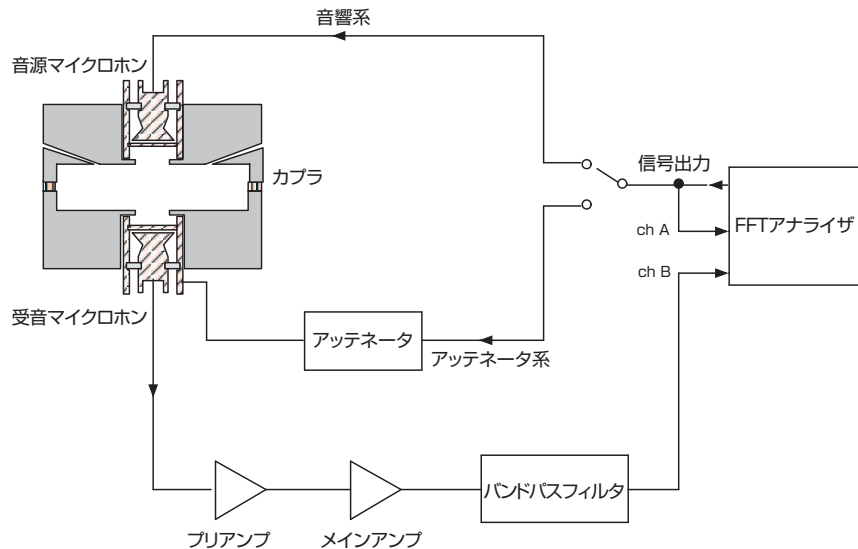


図4 カブラ校正法による校正システムのブロック図

カブラ校正法では、標準マイクロホンをまず2個用意し、一方は音源として、他方は受音用として用いる。音源側に入力電圧を加えた時に振動膜から発生する音波は、カブラ内の空洞を経て受音側の振動膜に到達し、出力電圧が発生する。音源として用いた時の感度が受音用として用いた時の感度に等しくなるという電気音響変換器の特性を利用すれば、音源側入力電圧と受音側出力電圧の比やカブラの内容積から、両マイクロホンの音圧感度の積が求められる。個々のマイクロホン感度を求めるには、標準マイクロホンをもう1個用意し、3通りの音源・受音マイクロホンの組合せについて同様に測定すれば、各々の感度を算出できる。

カブラ校正法では、受音マイクロホンの開放出力電圧を精密に測定するために、受音マイクロホンの出力インピーダンスや後段のアンプのゲインの影響を取り除く必要がある。このため音響系、アッテネータ系という二つの信号伝達経路を使用し、各経路で得られる出力電圧の比をとることにより、これらの影響をキャンセルする。

号処理技術を導入し、ノイズ除去法、アッテネータの校正法ならびにクロストークについて高度化を図った<sup>[18]</sup>。

ノイズ除去法に関しては、従来の狭帯域フィルタによるアナログ信号処理ではフィルタの安定性が問題であったため、新たにFFTアナライザ<sup>[19]</sup>によるデジタル信号処理を採用した。FFTアナライザの内蔵信号源を用いた同期加算法により、主要周波数範囲での測定再現性を0.02 dBから0.007 dBに、測定時間も従来の約半分までに改善できた。

また信号レベルの調整に用いるアッテネータの出力電圧(0.1～0.8 mV程度)を小さな不確かさで絶対測定する<sup>[19]</sup>ことは難しいという問題があった。そのためアッテネータの減衰比をあらかじめ精密校正できれば、信号レベルの大きなアッテネータ入力電圧の測定だけで済むことに着目し、FFTアナライザを用いた精密校正法を開発した。その結果、減衰比の不確かさを従来の0.01 dBから0.001 dBにまで低減させた。

さらに不確かさ要因の一つであるクロストーク(信号が本来の経路以外の経路を通過して混入する現象)が極力小さくなるように測定回路を設計した。高周波回路並みの厳密な対策をとったことで、クロストークによる不確かさを従来の0.01 dBから0.001 dBにまで低減させた。

### 3.2 音圧感度の不安定性

しかし校正システムを高度化してもなお音圧感度にばらつきが見られたため、校正対象であるマイクロホン自体に不安定性の原因があるのではないかと考え、様々な要因について検討した。その結果、マイクロホンとカプラの接触面をグリースで密着させる際に、マイクロホンに物理的な歪みが生じるため音響特性の変化が起こり、音圧感度が不安定になることを感度変化の周波数特性に着目して理論的に解明した<sup>[20]</sup>。

またこの不安定現象は、国産の特定の型式の標準マイクロホンに顕著に現れることがわかったため、この型式の採用を極力避けることとした<sup>[21]</sup>。現状では、マイクロホン感度の不安定性による不確かさはI形標準マイクロホンでは0.012 dB、II形では0.008 dBである(I形とII形の違いについては図1を参照)。

### 3.3 音圧感度の不確かさ

高度化の結果、改善可能な不確かさ要因については、その寄与が無視できる程度にまで低減できた。主要な不確かさ要因として残るものは、マイクロホン感度の不安定性とカプラの内容積である(I形標準マイクロホン用のカプラ(内容積20 cm<sup>3</sup>)では0.008 dB、II形用カプラ(同1 cm<sup>3</sup>)では0.015 dB)。このためI形、II形標準マイクロホンとも、主要周波数範囲における音圧感度の不確かさ(95%信頼

区間)は0.04 dBとなっているが、従来に比べて半分程度にまで低減された<sup>[22]</sup>。

## 4 音場の評価

### 4.1 反射音

音響測定器の二次校正では、基準となる標準マイクロホンと音響測定器との比較校正を行う。これらの校正は通常無響室の中で行うが、無響室の内壁(天井や底面も含む)には音の反射を防ぐため多数の吸音くさびを取り付けてある。また測定器を無響室内に運び込むための作業用床面でも反射が起こるため、網床<sup>[23]</sup>構造を採用している<sup>[23]</sup>。産総研の大無響室(図5)では、吸音くさびや網床による反射音は直接音に対して1～2%程度存在する。それ以外にも基準マイクロホン(自由音場感度<sup>[24]</sup>が既知の標準マイクロホン)や校正対象の音響測定器を保持するための治具による反射音加わる。反射音の存在による、音場の理想状態からのずれを理論的に評価することは非常に難しいため、不確かさの評価は実験的に行わざるを得ない。

### 4.2 音響測定器の二次校正

4章では以下、計測用マイクロホンの校正を対象として記述するが、騒音計についても同様に考えることができる。

音響測定器の二次校正法には置換法と並置法がある<sup>[24]</sup>。どちらの方法も、スピーカーの前方に配置した基準マイクロホンと被校正マイクロホン(校正すべき計測用マイクロホン)の出力電圧比、すなわち感度比を測定し基準マイクロホンの感度を乗じて被校正マイクロホンの感度を求める点では同じである。違いはマイクロホンの設置方法である。

置換法では、基準マイクロホンを被校正マイクロホンに置き換え、出力電圧を順次測定する。この間、どちらのマイクロホンにも等しい音圧が作用すると仮定するが、実際にはスピーカーの特性が発熱で変化し、発生音圧が時間的

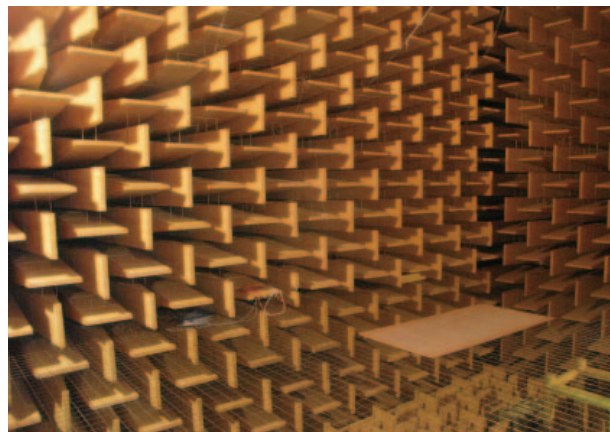


図5 産総研の大無響室  
無響室の内壁には、グラスウール製の吸音くさびを多数取り付けてある。網床の上には、見やすさのためにベニヤ板を載せて撮影した。

に変動するため、それが校正の不確かさの要因になる。

一方、並置法では両マイクロホンを並べて配置し、同時に音場に曝す。両マイクロホンの出力電圧比をとれば音圧変動の影響はキャンセルされるため、スピーカーの不安定性の問題はなくなり、測定時間も半分で済む。しかし二つのマイクロホンが音場内の異なる位置にセットされるため、音圧分布の影響や他方のマイクロホンの存在によって音場が乱される影響が生じ、後述の音場に関係する不確かさが増大してしまう不都合がある。

置換法の問題点である発生音圧の変動は、変動をモニタするための第三のマイクロホンをスピーカーの前面に設置して補正することで解決できる。モニタ用マイクロホン導入のメリットを生かして、本研究では不確かさの評価がより確実に行える置換法を採用した。図6に置換法による計測用マイクロホンの二次校正法の概念図を示す。

#### 4.3 反射音の影響の可視化

反射音は直接音とは異なるパスを經由してマイクロホンに到達し、干渉するので、周波数によって音圧に強弱が生じる。このためマイクロホンに反射音が作用すると、直接音だけであればなめらかであるはずの周波数特性に、細かな波打ちが現れるようになる。反射音の影響の大きさはスピーカーとマイクロホン、反射物体の相対的な位置関係に依存し、マイクロホンに一番近い物体からの反射音が支配的になる。

基準マイクロホンと被校正マイクロホンの感度比を測定すると、マイクロホンの形状や設置位置のわずかな差によっても反射音の影響は異なるため、例えば図7のように。波打ちの振幅は反射音の存在による不確かさに相当し、また波打ちの周波数間隔は反射物体とマイクロホンの距離

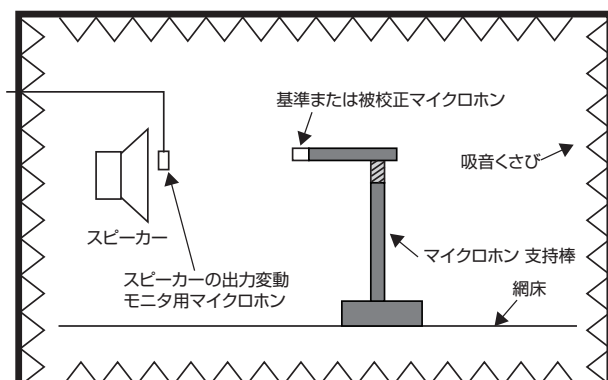


図6 置換法による計測用マイクロホンの二次校正法の概念図  
無響室の内壁（図では測定系を囲む太枠）には、音の反射を防ぐために多数の吸音くさびを取り付けてある。しかし高性能な無響室であっても、全く反射音のない空間を実現することは極めて難しく、後述するように基準または被校正マイクロホンに一番近い物体からの反射音の影響が支配的になる。本測定系では、マイクロホン支持棒の垂直部分の上端（斜線で表示）からの反射音の影響が支配的である。

に対応する。感度比の周波数特性を調べることで、影響の大きな反射物体を特定し反射音の低減対策を行うことが可能になる。

従来は、周波数軸上において測定周波数の近傍で感度比を平均化し、反射音の影響を低減させる方法が用いられる場合もあったが、校正値、不確かさのどちらの観点からも適切な方法とはいえなかった。

#### 4.4 反射音の影響の低減—吸音材の適用—

反射物体の周囲に吸音材を取り付けることにより、簡便に反射音を低減した。基準マイクロホンと被校正マイクロホンの型式が同じであれば、吸音材によって反射音を効果的に低減できたが、型式が違くと吸音材の効果は限定的であった。

#### 4.5 反射音の影響の低減—信号処理技術の適用—

反射音が直接音よりも時間的に遅れてマイクロホンに到達することを利用して反射音を時間軸上で分離・除去できれば、反射音による不確かさを低減できる。しかし持続時間の短いパルス波形を用いたのでは、波形の性質上、測定周波数以外にもエネルギーが分散されてしまうため、十分なS/Nの確保が難しいという問題があった。そこで本研究では十分なS/Nを確保できる連続波形を用いた測定結果から、計算機シミュレーションによってパルス信号を入力したときに得られるはずの時間応答を求めるという仮想パルス法を考案した<sup>[25]</sup>。仮想パルス法は、FFTアナライザによるデジタル信号処理の導入によって実現可能となった技術である。

仮想パルス法では、図7の青色のグラフで表される伝達特性をもった系に、仮想的なパルス信号を加えたときの時間応答を計算する。得られたパルス応答波形から、時間

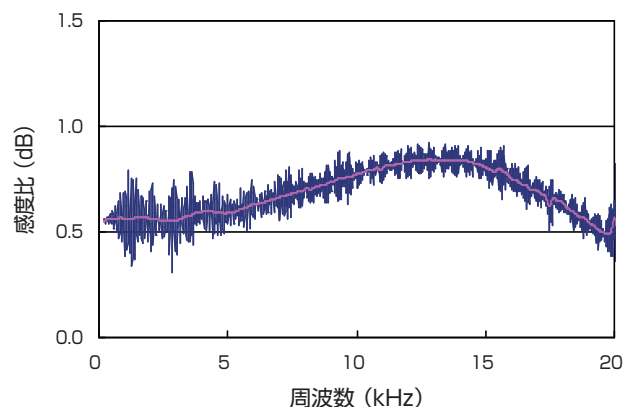


図7 基準マイクロホンと被校正マイクロホンの感度比の周波数特性  
青色のグラフにおける、縦軸方向の細かな波打ちが反射音の影響を表す。桃色のグラフは後述する計算機処理によって反射音を除去したものであり、なめらかな周波数特性になっている。

窓を用いて直接音のみを切り出した後、周波数領域に変換すれば反射音を含まないなめらかな周波数特性が得られる（図7に桃色で表示したグラフとなる）。

信号処理技術を用いれば反射音をほぼ除去できるが、パルス波形の周波数帯域幅、反射音を切り出す時間窓の持続時間や中心位置、といった信号処理に用いるパラメータのわずかな違いによる影響は、信号処理にともなう不確かさとして評価した。

## 5 計量標準供給制度による音響測定器のトレーサビリティ体系の整備

1章で述べたように、騒音計の検定制度に基づく計量管理体制とは異なる音響標準の新たな供給体系が不可欠となった。新たな供給体系を構築するため、計量法の計量標準供給制度（JCSS：Japan Calibration Service System）に則った<sup>[26]</sup>。具体的には、産総研が国家標準としてのマイクロホンを校正した場合の不確かさを評価し、それを用いて校正事業者の標準マイクロホンを校正する。校正事業者は後者を基準としてユーザーの音響測定器を校正することにより、国家標準へのトレーサビリティを確保する。体制の整備に当たっては、以下の点に留意した。

- ・校正事業者の主体的な計量管理体制の構築を可能にした。産総研から標準マイクロホンの供給を直接受ける以外に、上位の校正事業者を介して国家標準にトレーサブルな音響測定器の供給を受けることも可能である。また校正事業者は、標準マイクロホン以外の音響測定器を日常の校正業務に用いる基準器として管理を行うことも可能である。
- ・校正事業者が認定を受ける際に要件となる技術的な要求事項を随時見直すことにより、新しい技術の導入にも比較的迅速に対応できる体制とした。
- ・検定では騒音計の試験周波数範囲は20 Hz～12.5 kHzに限られていたが、計量標準供給制度では、可聴周波数範囲（20 Hz～20 kHz）全てで音響測定器の性能を担保することとした。
- ・校正事業者には、トレーサビリティ体系の担い手としてふさわしい技術力を備えていることを要求する。現在登録されている校正事業者は、騒音計の指定検定機関、あるいは指定製造事業者として長年の実績がある。

## 6 測定能力の妥当性検証

### 6.1 国家標準の国際的同等性の検証

1999年に計量標準の国際相互承認協定が結ばれ、我が国も署名した<sup>[27]</sup>。この協定では各国の国家計量標準研究所が、互いの開発した国家計量標準の同等性を認め

合い、各々が発行する校正証明書を相互に承認しようとするものである。署名国の研究所は自らの測定能力を客観的に示すため、国際的に共通のルールであるISO/IEC 17025<sup>[28]</sup>を満足する品質システム<sup>用語7</sup>を構築し、かつ国際比較（いわゆる持ち回り試験）に参加して測定能力を証明することが求められるようになった。

産総研は、自らが開発した音響標準について品質システムを構築し、独立行政法人製品評価技術基盤機構の実施するASNITE-NMI（国家計量標準研究所認定サブプログラム）によって、規格適合性の審査を受け2003年1月に認定を取得した。

国際比較については、国際度量衡委員会音響・超音波・振動諮問委員会（CCAUV；Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration）が標準マイクロホンに関する4つの国際比較を計画し、産総研はそれら全てに参加した。I形およびII形標準マイクロホンの音圧感度の国際比較はすでに終了したが、主要研究所の宣言する不確かさ（95%信頼区間）は主要周波数範囲で0.03～0.05 dBの範囲にあり、産総研も同様の不確かさである<sup>[29][30]</sup>。また測定結果に関しては、産総研の校正値は他研究所とも不確かさの範囲内で一致しており、国家標準の同等性を実証できた。

音響・超音波・振動諮問委員会が行う国際比較に参加できる機関の数は10前後に限定されており、世界中の国立標準研究所を網羅できない。このため世界をいくつかの地域に分割して、地域ごとに同種の国際比較が行われた。我が国が属するアジア太平洋地域（APMP；Asia Pacific Metrology Programme）内では、I形標準マイクロホンの音圧感度の国際比較が最初に行われたが、産総研が幹事研究所を務め国際比較のプロトコルの策定、伸介器（標準マイクロホン）の安定性の確認、校正結果の分析、ならびに対応する音響・超音波・振動諮問委員会の国際比較の結果とのリンク方法の開発を行った<sup>[31]</sup>。I形標準マイクロホンの音圧感度の国際比較の結果を図8に示す。図8は、全ての参加研究所の測定結果が、各研究所が宣言する不確かさの範囲内で一致していることを示しており、このデータをもとにして参加各国の音響標準が相互に同等であることが確認された。

### 6.2 校正事業者の測定能力の検証

産総研は、ISO/IEC 17025に規定された技術的要求事項を音響精密計測に適用するための指針<sup>[32]</sup>の策定を技術的にサポートしており、校正事業者はこれをもとに品質システムを整備している。また校正事業者の測定能力を担保するために技能試験が実施され、産総研は判定の基準となる参照値を提供している。製品評価技術基盤機構による

校正事業者の登録審査においても、産総研は技術的立場から審査を支援しており、2009年8月末現在、6事業者が計量標準供給制度の登録事業者として認定され、測定能力が担保されている。

## 7 研究成果

本研究では、安全・安心な社会を支える騒音計測技術の信頼性確保に必要な技術開発を行った。まず国家標準である標準マイクロホン音圧感度の一次校正システムを高度化し、音響標準の新たな供給サービスとして開始した。校正システムの電気的特性に起因する不確かさを現時点における限界まで低減させたことにより、マイクロホン感度の不安定性が不確かさの大きな要因となること、ならびにマイクロホンの型式によって安定性に違いがあることを明らかにした。

つぎに標準マイクロホンを基準としてユーザーの音響測定器を二次校正する際に問題となっていた、音場の不確かさの評価技術を確立した。デジタル信号処理技術の導入により、反射音の影響を低減させる方法を開発した。

こうした技術開発に基づき、国内では計量法に基づく標準供給体制を整備し、トレーサビリティ体系を確立した。音響標準の供給、技術的要求事項適用指針の審議、技能試験参照値の提供、校正事業者の審査支援を通じて、校正事業者の測定能力を検証した。

産総研自らも、審査を受けて認定を取得するとともに、国際的には複数の国際比較に参加し、主要研究所との間で国家標準の同等性を検証した。アジア地域内で最初に行われた基幹比較では幹事研究所を務めた。

これらの成果は、音響測定器の性能の担保だけでなく、ユーザーが行う測定結果の信頼性向上にも大きく寄与している。反射音の評価技術の開発によって反射音の原因やその程度が明確になり、反射の影響の低減対策を立てやすくなったばかりでなく、その効果を定量的に評価できるようになった。その結果、測定者の技量によって測定結果の信頼性に差が出てくるという問題が解決され、経験の少ない者でも容易に信頼性の高いデータを得ることが可能になった。

## 8 おわりに

標準マイクロホンをトレーサビリティ体系の頂点とする、計量法に基づく音響標準の供給体制を新たに整備し、時代の要求に即した新たな校正サービスを開始した。

今後の課題としては、音響標準の校正周波数範囲を可聴帯域外へ拡張することが残されている。我々の身の回りには、20 kHz以上の超高周波音を発生する機器が増えてきている。しかし超高周波域では音響標準が確立されていないため、音圧レベルの定量的な評価ができない状況にある。人間が強力な空中超音波に曝された場合の安全性の是非を議論する上で、音響標準の整備は不可欠である<sup>[33]</sup>。

また20 Hz以下の超低周波域でも低周波音に関する苦情が増加してきている。低周波音の統一的な測定方法は策定されているものの、音響標準が供給されていないため測定結果の信頼性は確保されておらず、音響標準の整備はやはり不可欠である<sup>[34]</sup>。したがって、今後は周波数範囲の拡大をめざした音響標準や計測技術の研究開発を進めていく。

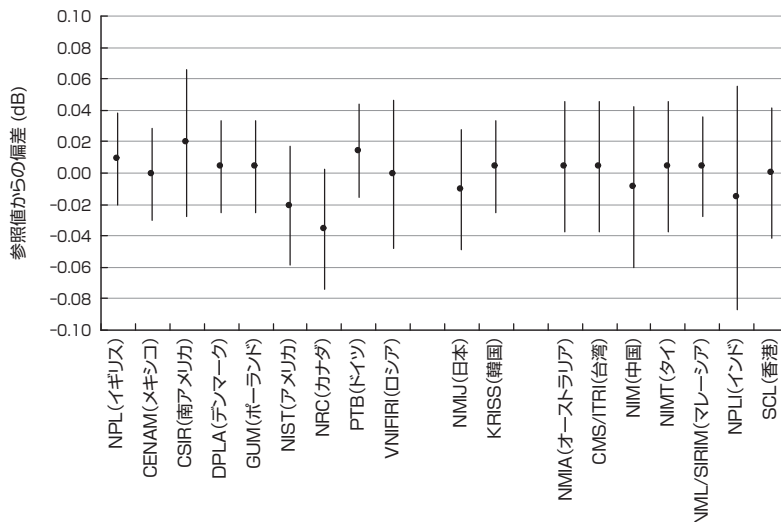


図8 国際比較の結果（周波数1 kHz）

横軸は参加した国家計量標準研究所の略称名、縦軸は国際比較で決定された参照値（参加研究所の校正值の算術平均値）に対する各研究所の校正值の差を表しており、この差が各研究所の宣言する不確かさ（95%信頼区間、バーで表示）内に入っていれば同等とみなす。



## 謝辞

本研究の遂行にあたり、多くの貴重なご助言を頂いた、藤森威氏(前計測標準研究部門)、秋田県立大学佐藤宗純教授(前計測標準研究部門)をはじめとする関係者の皆様に感謝の意を表します。

## 用語説明

用語1: 音圧レベル: 健康者に聞こえる音圧は広範囲にわたるため、基準音圧20 μPa (1 kHzの正弦音波に対する最小可聴値の代表値)で規格化し、レベル表示したものである。音圧実効値を $p$ 、基準音圧を $p_0$ 、音圧レベルを $L_p$ とすれば、

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$$

の関係がある。

用語2: トレーサビリティ: ある測定器の不確かさの根拠をたどっていったときに、国家標準とのつながりが明らかにされていることを表す。

用語3: 音圧感度: マイクロホンの振動膜に一樣に作用する音圧に対する開放出力電圧の比である。

用語4: FFTアナライザ: 入力信号の高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)を演算する機器であり、音響信号の周波数分析に必要な各種機能をもつ。

用語5: 網床: ピアノ線を格子状に編んだものに張力をかけて固定した、平面状の構造物である。音波は格子のすき間を通り抜けるので反射音を低減でき、かつその上を歩行可能なように強度が確保されている。

用語6: 自由音場感度: 平面波が進行する音場に置かれたマイクロホンの開放出力電圧に対する、マイクロホンを置く前のマイクロホン位置における音圧の比である。マイクロホンを音場内に置くと、マイクロホンの存在によって音波の反射や回折が生じ、マイクロホン位置における音圧が変化してしまう。自由音場感度がわかっているならば、マイクロホンの存在によって影響を受けないときの音圧を求めることができる。音響測定器の二次校正に必要な標準マイクロホンの感度は自由音場感度である。音圧感度と自由音場感度の比は、マイクロホンの形状や振動膜の音響特性で決まるため、マイクロホンの型式ごとに一定値となる。標準マイクロホンについては、比の実測値と不確かさが与えられている<sup>[35]</sup>。

用語7: 品質システム: 品質管理(校正結果の信頼性確保)のために、当該規格に準じて不確かさの算出根拠、校正の実施手順、校正に用いる機器の管理、校正要員、校正記録の作成について文書化したものである。

## 参考文献

- [1] D. R. Raichel: *The science and applications of acoustics*, AIP Press, New York (2000).
- [2] JIS Z 8106, 音響用語 (2000).
- [3] 橘 秀樹, 矢野博夫: *環境騒音・建築音響の測定*, コロナ社, 東京 (2004).
- [4] IEC 61094-4, *Measurement microphones Part4: Specifications for working standard microphones* (1995).
- [5] JIS C 1509-1, サウンドレベルメータ(騒音計)-第1部: 仕様 (2005).
- [6] JIS C 1509-2, サウンドレベルメータ(騒音計)-第2部: 型式評価試験 (2005).
- [7] JIS C 5515, 標準コンデンサマイクロホン (1981).
- [8] IEC 61094-1, *Measurement microphones Part1: Specifications for laboratory standard microphones* (2000).
- [9] 高橋多助, 三浦 甫: 電総研新音響標準装置, 音響学会電気音響研資, EA-80-37 (1980).
- [10] 高橋多助, 三浦 甫: 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 (1990).
- [11] 佐藤宗純, 藤森 威: 音響測定器の適合性判定における測定の不確かさの扱い, 音響学会誌, 59 (10), 628-633 (2003).
- [12] JIS Z 8732, 音圧法による騒音源の音響パワーレベルの測定方法-無響室及び半無響室における精密測定方法 (2000).
- [13] JIS Z 8736-1, 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-第1部: 離散点による測定 (1999).
- [14] JIS C 1515, 音響校正器 (2004).
- [15] IEC 61094-2, *Measurement microphones Part2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique* (2009).
- [16] R. Horiuchi, T. Fujimori and S. Sato: Development of a laser-pistonphone for an infrasonic measurement standard, *4th joint meeting of acoustical society of Japan and acoustical society of America*, 4aEA4 (2006).
- [17] IEC 61094-6, *Measurement microphones Part6: Electrostatic actuators for determination of frequency response* (2004).
- [18] 堀内 竜三, 藤森 威, 佐藤 宗純: 標準コンデンサマイクロホン・カブラ校正システムの電氣的精度の向上, 電総研彙報 60 (7), 7-16 (1996).
- [19] G. S. K. Wong and T. F. W. Embleton: *AIP handbook of condenser microphones: Theory, calibration and measurements*, AIP press, New York (1995).
- [20] R. Horiuchi, T. Fujimori and S. Sato: Instability of the voltage transfer function for an MR103 microphone in a coupler calibration technique, *Journal of Sound and Vibration*, 266-5, 981-991 (2003).
- [21] 堀内 竜三, 藤森 威, 佐藤 宗純: カブラ校正法におけるマイクロホン間電圧減衰量の測定誤差の要因(第7報), 日本音響学会秋季研究発表会, 643-644 (2001).
- [22] R. Horiuchi, T. Fujimori and S. Sato: Uncertainty analysis for pressure sensitivities of laboratory standard microphones, *Acoust. Sci. & Tech.*, 25 (5), 354-363 (2004).
- [23] 藤森 威, 三浦 甫: 電総研音響実験棟について, 信学技報 EA-80-19 (1980).
- [24] IEC 61094-8, *Measurement microphones Part8: Methods for free-field calibration of working standard microphones by comparison Working Draft 5* (2008).
- [25] 藤森 威, 堀内 竜三, 佐藤 宗純: II形標準マイクロホンの音響中心位置の測定, 音響学会誌, 58 (9), 579-585 (2002).
- [26] 堀内竜三, 藤森 威: JCSSにおける音響計測分野のトレーサ

- ビリティ, *騒音制御*, 30 (5), 381-383 (2006).
- [27] 瀬田勝男: 計量標準国際相互承認へ向けての活動, *AIST Today*, 1 (6), 26 (2001).
- [28] ISO/IEC 17025 (JIS Q 17025), *試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項* (2005).
- [29] R. Barham: Report on key comparison CCAUV.A-K1, *Metrologia*, 40-09002 (2003).
- [30] V. C. Henriques and K. Rasmussen: Final report on the key comparison CCAUV.A-K3, *Metrologia*, 43-09001 (2006).
- [31] R. Horiuchi, H. Takahashi, T. Fujimori and S. Sato: Final report on key comparison APMP.AUV.A-K1, *Metrologia*, 44-09001 (2007).
- [32] JCT 21500-05, *計量法校正事業者認定制度 技術的要求事項適用指針 音圧レベル* (2009).
- [33] 高橋 弘宜, 藤森 威, 堀内 竜三: 空中超音波帯域における音響標準の開発, *日本音響学会誌*, 65 (1), 34-39 (2009).
- [34] 堀内 竜三, 藤森 威, 佐藤 宗純: 超低周波領域における音響標準の開発の現状, *日本音響学会誌*, 62 (4), 338-344 (2006).
- [35] IEC TS 61094-7, *Measurement microphones Part7: Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphones* (2006).

#### 執筆者略歴

堀内 竜三 (ほりうち りゅうぞう)

1989年、早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了。1990年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年より産業技術総合研究所計測標準研究部門音響振動科音響超音波標準研究室主任研究員。研究分野は音響標準の開発をはじめとする音響精密計測。2000年～2001年、NPL(英国物理学研究所)において低周波音響標準の開発に従事。工学博士。



#### 査読者との議論

##### 議論1 カブラ法以外の一次校正法

質問 (小野 晃: 産業技術総合研究所)

一次校正法に関して本論文ではカブラ法以外は採用しなかったわけですが、他の一次校正法としてはどのような原理のものがありますか。また、国際比較に参加した他の国の標準研究所では、どのような一次校正法を採用しているのでしょうか。カブラ法以外のものを採用している国があれば、どのような校正法をどのような考え方で採用しているかご教示願います。

回答 (堀内 竜三)

音響測定器の二次校正において基準となる標準マイクロホンの自由音場感度は、通常は直接一次校正せず、カブラ校正法で一次校正した音圧感度に補正項を乗じて求めます(「音場」の読み方としては、「おんじょう」、「おんば」のいずれも使われています)。これは音圧感度の方が自由音場感度よりも容易に高精度な校正を行えるためです。自由音場感度を一次校正する場合には、カブラの代わりに無響室内で2個の標準マイクロホンを向かい合わせに配置し、カブラ校正法と同様の測定を行います。しかしこの方法では、低周波域でS/Nが極端に悪くなるため、長時間測定に加えて、より厳密なクロストークの低減対策が不可欠です。また無響室内での測定であるため反射音の影響の低減も必須です。こうした理由により、ルーチ的な校正サービスに適した方法とはいえ、通常は用いられません。他国の標準研究

所においても、カブラ校正法が標準マイクロホンの一次校正に用いられています。

なお低周波域に限定すれば、レーザーピストンホンという、音圧感度の一次校正法もあります。この方法では、加振器に取り付けたピストンを音源として使用し、カブラ内に音圧を発生させます。ピストンの振動変位を光学的に測定して音圧に換算するとともに、音圧に曝した標準マイクロホンの出力電圧を測定し、音圧感度を求めます。産総研は、超低周波域での一次校正装置として、レーザーピストンホンの開発を行っています。

##### 議論2 外国の標準研究所における反射音評価方法

質問 (小野 晃)

二次校正における反射音の影響評価は優れた成果と思います。外国の標準研究所でも同様の方法をすでに採用しているのでしょうか。あるいは日本と異なる評価方法をとっているのでしょうか。

回答 (堀内 竜三)

音響測定器の二次校正における反射音の低減・評価方法として、他国の標準研究所では別の方法も用いられています。反射音の時間遅れに合わせて動作時刻を設定した狭帯域フィルタを用いて反射音を除去する方法(TDS; Time Delay Spectrometry)や、パルス応答を高速に求めるため特殊なランダム信号を用いる方法(MLS; Maximum Length Sequence法)があります。いずれの方法も、時間軸上で直接音と反射音を分離し、直接音のみを取り出すという点では共通ですが、国際的に統一された方法はありません。現在審議中の計測用マイクロホンの二次校正法の国際規格では、産総研が開発したFFTアナライザによる仮想パルス法をはじめ、複数の方法が取り入れられる予定です。

##### 議論3 音響標準の世界水準と今後の日本の方向

質問 (小野 晃)

国際比較の結果の図を見ますと、国際度量衡委員会が主催した主要国の測定値と、アジア太平洋地域の国の測定値とで、ばらつきや不確かさにほとんど違いがないように見えます。むしろ、主要国には平均値からの偏差が大きいところがある一方、アジア太平洋地域の国々は平均値からの偏差が小さいとも見えます。これは音響の国家標準の技術が成熟して途上国にも十分に行き渡り、国の間の技術の差が小さくなったと見るべきなのでしょうか。ご意見をいただければ幸いです。

また日本が今後、音響計測の信頼性において世界で抜け出すためには、どのようなことに努めたらよいと考えますか。トレーサビリティの中流域(校正事業者)から下流域(計測現場)にかけて、あるいは音響計測器の製造事業者に対してサジェスションはあるのでしょうか。

回答 (堀内 竜三)

ご指摘のように、国際比較の結果である図8は、音響標準の開発を先導してきた主要国の標準研究所と、後発のアジア諸国の研究所との差が小さいことを表しています。この背景には、音響標準に特殊な事情が影響しています。多くの研究所が所有する標準マイクロホンの一次校正装置は、ある特定の音響機器メーカーが製造したものです。校正手順を習熟すれば再現性の良い校正値が得られますし、不確かさの評価に必要な技術情報の収集もそれほど難しくはありません。このため経験の比較的浅い研究所でも、一次校正装置を自力で開発した研究所と同等の音響標準を比較的容易に実現できます。同じメーカーの一次校正装置を用いていれば、国際比較における校正結果のばらつきが小さいのは自然な結果です。これに対して一次校正装置を開発できるだけの技術力をもった研究所は世界に5機関ほどしかなく、アジア地域では我が国(産総研)だけです。これらの研究所が開発した一次校正装置の構成は、当該音響機器メーカー製のものと異なりますので、国際比較への参加が唯一の同等性の検証方法です。異なる一次校正装置による校正結果は、現状ではよく一

致しているといえますが、今後は偏差の原因を追究していくことも、さらなる信頼性向上のためには必要と考えます。

我が国が今後、音響計測の信頼性の点で世界から頭一つ抜け出すためには、産総研が新しい標準の開発などによって技術的に先導していくことが必要です。本文で述べたように、我々の直近の課題は音響標準の校正周波数範囲の拡大です。空中超音波による健康被害や低周波公害のない社会の実現のための基盤を整備しています。

同時に、測定結果の信頼性を様々な角度から追究し続け、研究成果として発信していくことも不可欠です。同一の校正原理に基づいて国際比較を行い、同等性を検証することだけでなく、異なる校正方法による測定結果の整合性を検証していくことも必要です。例えば、一次校正されたI形標準マイクロホンを用いた測定結果とII形による結果の整合性の確認は、現状では十分になされているとはいえません。

音響測定器の校正事業者や製造メーカー、エンドユーザーに対しては、自らの測定結果の信頼性確保のために、国家標準へのトレーサビリティの確保だけでなく、測定方法に内在する様々な不確かさ要因の評価が不可欠であることを訴え続けることが必要です。反射音の影響はまさにその良い例といえます。

#### 議論4 産総研の今後の国際的・社会的役割

質問（工藤 勝久：産業技術総合研究所評価部）

「音の標準」を必要とする多数の産業、学術・技術分野があり、その裾野には非常に多数のユーザーが存在しています。今後の技術的トレンドに関して、産総研が今後果たすべき「音の標準」に関する国際的・社会的な役割について、その展望をお聞かせください。

回答（堀内 竜三）

本文でも述べたように、最近では、家電製品や情報機器から発生する騒音の測定が重要視されるようになりました。これらの機器が出す騒音を評価する場合、従来の音圧レベルや騒音レベルに代わって、音響パワーレベルが測定されるようになってきています。騒音レベルは、測定点での騒音の状態を直感的に理解しやすいのですが、音響パワーレベルを求めておけば、騒音源が放射する音響出力全体を評価することができます。

音響パワーレベル測定の信頼性を確保するには、基準となる「基準音源」の精密校正技術の開発が不可欠です。基準音源とは、広帯域騒音を安定に発生できる、音響パワーレベル測定専用の音源です。校正済みの基準音源があれば、被校正機器との比較校正によって音響パワーレベルを求めることができます。今後産総研が基準音源の精密校正技術を開発し、音響パワーの標準として確立することで、ユーザーは測定結果の信頼性を確保できるようになります。

#### 議論5 最も長い時間がかかった課題

質問（工藤 勝久）

これまでの標準開発から供給に至るプロセスで、最も時間を費やした課題とその解決に向けて行った取組みについてお聞かせください。

回答（堀内 竜三）

音響標準の開発において最も時間を費やした技術課題は、標準マイクロホンの音圧感度の不安定性の原因究明です。標準マイクロホンの一次校正システムを高度化し、校正システムの電気的特性に起因する不確かさを現時点における限界まで低減させたことで、マイクロホンそのものの感度が不安定なのではないかという疑いをもつようになり、その原因を追究しました。別の言い方をすると、システムの高度化によってはじめて、マイクロホン感度の不安定性を観察できるようになったということです。

不安定性の原因になり得ると考えた項目は、本文で述べた物理的な歪みの影響のほか、感度の環境条件（温度、静圧）依存性、マイクロホンの絶縁不良、マイクロホンとして動作させるために必要な直流電圧の印加、マイクロホンをプリアンプに接続したときにマイクロホンに加わる物理的な力です。しかし物理的な歪みの影響以外の項目は、いずれも測定結果を説明できるものではありませんでした。

この不安定現象は、測定を数回くり返せば必ず出現するというものではなく、通常は安定であったものが、あるときに値が大きく変化するという特徴をもっています。このため、ある測定条件で一連のデータを取得し、かつ測定条件を試行錯誤的に変えながら測定を完了するまでに膨大な時間がかかり、結論に到達するまでに3～4年の期間を要しました。