

ハイドロホン感度の校正と不確かさ評価

吉岡 正裕*

(平成18年7月5日受理)

Calibration and uncertainty estimation of hydrophone sensitivity

Masahiro YOSHIOKA

Abstract

The hydrophone is a transducer that produces electrical signals in response to waterborne acoustic signals. The NMIJ has developed a hydrophone sensitivity calibration system in the frequency range from 0.5 MHz to 20 MHz, which is required for diagnosis and therapy in medical field. A hydrophone is calibrated in comparison with the reference hydrophone that is primarily calibrated by using laser interferometry method in the system. In this report, the calibration method and uncertainty estimation of hydrophone sensitivity using the system are described.

1. はじめに

超音波診断装置の生体安全基準への適合性評価のためには、超音波振動子から放射される超音波の音圧やその分布を測定することが重要である。超音波を伝搬させる生体部分は、音響的には水とほぼ同じと考えてよいので、超音波振動子の評価は水中で行われる。このとき、水中の音圧を測定するために用いられるのが、ハイドロホンである。ハイドロホンは、音圧を電気信号に変換するデバイスであり、その変換係数を感度と呼んでいる。産業技術総合研究所では、このたび依頼試験として超音波音圧標準の供給を開始し、ハイドロホン感度の校正を行っている。

本報告では、我々の開発したハイドロホン感度校正システムについて、校正方法とその不確かさの評価方法について述べる。本システムは、医療用として多く利用されている0.5 MHz～20 MHzの周波数帯を対象としており、レーザ干渉計方式によるハイドロホン感度絶対校正装置（1次校正装置）と、比較校正装置からなる。

2. ハイドロホン感度校正の概要

超音波が伝搬している音場中にハイドロホンを置くと、回折や反射によって音場は乱され、音圧は置く前の値から変化をする。音場の評価のためには、ハイドロホンによって乱される前の音圧値を知りたいため、ハイドロホン感度として次のような自由音場感度を定義する。以降では、自由音場感度を単に感度という。

自由音場感度 = (ハイドロホンを音場中に置いたときの出力電圧) / (ハイドロホンが置かれていないときの音場の音圧)

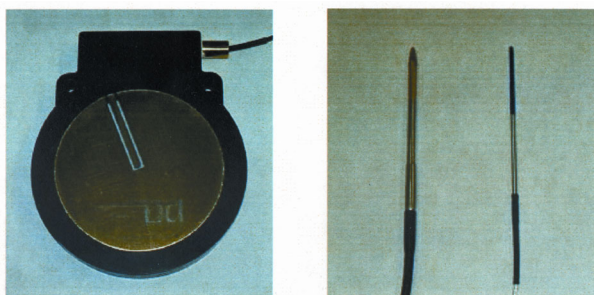
音圧計測用のハイドロホンには、安定性に優れるが高価なメムレン型ハイドロホンと、比較的安価なニードル型ハイドロホンが市販されている。図1にそれぞれの外観を示す。

我々は、絶対感度校正を行うためにレーザ干渉計を用いた校正技術を採用した。これは、原理上、メムレン型ハイドロホンの校正に適しており、不確かさの小さな標準供給が可能である。しかし、校正依頼の大部分を占めると考えられるニードル型ハイドロホンの校正には適していない。そこで、基準ハイドロホンとしてメムレン型ハイドロホンをレーザ干渉計方式で絶対校正¹⁾し、さらにこの基準ハイドロホン感度との比較によってユーザのハイドロホンを校正する標準供給形態とした。

校正の流れを図2に示す。

* 計測標準研究部門 音響振動科

本論文は当所における校正証明書等の不確かさ算出における一般的な考え方を記述したものであり、個別の校正証明書等に記載される不確かさ評価とは必ずしも一致しているわけではありません。



基準メンブレン型ハイドロホン

ニードル型ハイドロホン

図1 ハイドロホンの写真

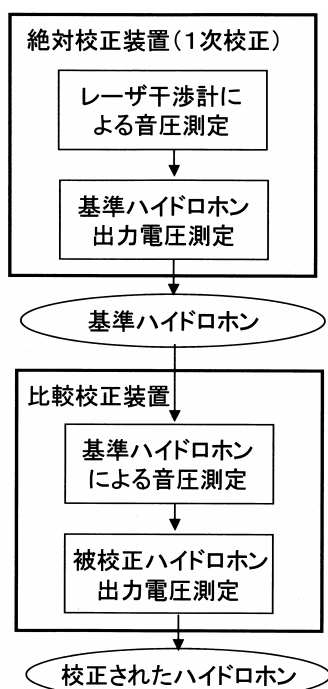


図2 ハイドロホン感度校正の流れ

- 1) 絶対校正装置の水槽内で超音波振動子から超音波を放射したとき、音場中に置かれた薄膜は音波の粒子速度で振動するので、レーザ干渉計を用いてその振動振幅を求める。さらに、粒子速度の測定値から音圧を計算する。なお、干渉計による測定に大きな影響を与える光検出器の周波数特性や薄膜の音圧透過率などは予め測定しておく。
- 2) 薄膜を基準ハイドロホンに置き換え、その時のハイドロホン電気出力を測定する。これにより、基準ハイドロホンの感度が求められる。
- 3) 比較校正装置の水槽内で、振動子から放射された超音波音場内の音圧を、基準ハイドロホンにより測定する。

- 4) 基準ハイドロホンを被校正ハイドロホンに置き換え、その電気出力を測定する。

3. レーザ干渉計方式による基準ハイドロホン感度の絶対校正

3.1 校正装置の概要

図3に示すレーザ干渉計方式による基準ハイドロホン感度絶対校正装置の構成と動作について説明する。水槽内において超音波を受ける薄膜は、片面に金の薄膜をコーティングした5 μm 厚のPETフィルムで、内径80 mmの亚克力製の枠に貼られている。薄膜の枠は、基準ハイドロホンと同じ形状・寸法に製作し、置き換えによって位置がずれないようにしている。水槽内に設置された超音波振動子を駆動した際の薄膜の振動は波長 632.8 nmのHe-Neレーザを光源とするマイケルソン干渉計で測定する。ただし、外部振動によって薄膜は数百Hz以下の低周波で大きく変動している。そこで、外部振動の影響を補償して干渉計の2光路の位相差を設定値に保つために、 piezo素子によって微動可能な参照光反射ミラーを用いたフィードバック回路を設けている。可動ミラーは、スイッチ1を切り換えることで、後述の干渉計出力最大値を求めるためにも使用する。スイッチ2は音圧測定時の光検出器出力と基準ハイドロホン出力の切替に使用する。両者の信号波形はアナログ-デジタルコンバータ(ADC)によって計算機に取り込み、信号振幅を測定する。

3.2 レーザ干渉計による超音波音圧測定の実理

超音波によって生じた薄膜の振動変位を a 、干渉計より検出される交流信号成分を V_i とすると両者の関係は式(1)で与えられる。

$$V_i = V_0 \cos(4\pi n^* a / \lambda - \phi) \quad (1)$$

ここで V_0 はレーザの光強度や光検出器の感度などで決まる干渉計出力変動の最大値、 λ は真空中の光波長、 ϕ は干渉計の光路長差に対応する位相差である。また n^* は実効的な水の屈折率で、超音波音場中を光ビームが通過する構成となっている測定系においては1に近い値をとることが報告されている^{2),3)}。 $\phi = \pi/2$ かつ a が λ に比べて十分に小さいときには、式(1)から

$$a \cong \frac{\lambda V_i}{4\pi n^* V_0} \quad (2)$$

と a が近似式として得られる。

実際に干渉計の光検出器出力電圧から薄膜の振動変位を求める際には、光検出器及び電気信号が伝達される回

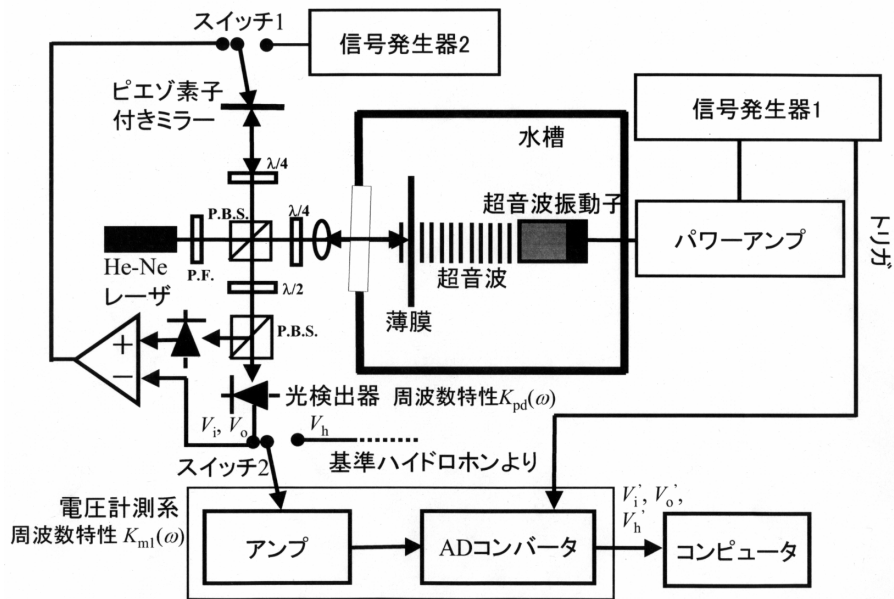


図3 レーザ干渉計方式によるハイドロホン感度絶対校正装置のブロック図

路の周波数特性の影響を考慮する必要がある。 V_i, V_o と、これらが周波数特性の影響を受けた結果として測定される電圧 V'_i, V'_o との関係は、

$$V_i = \frac{V'_i}{K_{pd}(\omega)K_{mi}(\omega)} \quad (3)$$

$$V_o = \frac{V'_o}{K_{pd}(\omega_0)K_{mi}(\omega_0)} \quad (4)$$

と書くことができる。ここで $K_{pd}(\omega)$ は光検出器の周波数特性、 $K_{mi}(\omega)$ は光検出器を除く電圧計測系の周波数特性、 ω_0 は V'_o を測定するために参照光ミラーを変位させたときに測定される信号の角周波数、 ω は超音波角周波数である。

平面波音場中に置かれた波長に比べて非常に薄い膜は透過する音波の粒子速度で振動する。平面波音場における音圧と粒子速度の関係から、水の密度を ρ 、音速を c 、薄膜の音圧透過率を t_p としたとき、薄膜がないときの音圧の値 p は次の式で与えられる。

$$p = \frac{\omega \rho c \lambda}{4\pi t_p} \frac{K_{pd}(\omega_0)K_{mi}(\omega_0)}{K_{pd}(\omega)K_{mi}(\omega)} \frac{V'_i}{V'_o} \quad (5)$$

音圧透過率 t_p は、別途測定する。

3.3 基準ハイドロホンの感度校正

薄膜を基準ハイドロホンに取り替えて、薄膜と同じ位置に設置し、ハイドロホン出力電圧 V_h を測定する。電圧計測系の周波数特性によって、 V_h と実際に測定される値

V'_h との関係は、

$$V_h = \frac{V'_h}{K_{mi}(\omega)} \quad (6)$$

と書ける。従って、式(5)と式(6)から、基準ハイドロホンの音場感度 S_r は式(7)で得られる。

$$S_r = \frac{V_h}{p} \cong \frac{V_h V_o}{V'_i} \frac{4\pi n^* t_p}{\omega \rho c \lambda} = \frac{V'_h V'_o}{V'_i} \frac{1}{K_{mi}(\omega_0)} \frac{K_{pd}(\omega)}{K_{pd}(\omega_0)} \frac{4\pi n^* t_p}{\omega \rho c \lambda} \quad (7)$$

ハイドロホン出力の測定に当たっては、振動子出力波形、信号回路系統、信号処理方法などを干渉計の出力 V_i の測定時と同一にしているため、測定系の周波数特性の影響を表す $K_{mi}(\omega)$ はキャンセルされている。

式(7)から、 S_r は基準ハイドロホン出力 V'_h 及び干渉計の光検出器出力 V'_i, V'_o を測定して算出されることが分かる。 V'_h は基準ハイドロホン出力波形をADCにより計算機に取り込み、FFT演算によって振幅を求める。光検出器出力電圧 V'_i は図3のスイッチ1をフィードバック回路に接続して外部振動の影響を補償した状態で計算機に取りこみ、 V'_h と同様FFT演算により算出する。また、 V'_o は、スイッチ1を信号発生器2に接続して参照光反射ミラーを光波長程度以上の振幅で振動させた際の光検出器出力のpeak to peak値から得られる。

この V'_o 測定時の光検出器出力信号の角周波数 ω_0 に対する電圧計測系の周波数特性 $K_{mi}(\omega_0)$ は式(7)のとおり基準ハイドロホンの音場感度 S_r に直接影響するため予め測定し

ておく． $K_{m1}(\omega_0)$ は信号発生器から発生させた角周波数 ω_0 の電気信号を，電圧標準にトレーサブルなACデジタルボルトメータで測定した値と，感度校正装置の電圧計測系で測定したものを比較して得られる．なお V_o' の周波数 $\omega_0/2\pi$ は，ACボルトメータにより測定可能でかつ外部振動に比べて充分高い1.5 kHz程度となるように，信号発生器2の周波数や振幅を調節してある．また，光検出器の周波数特性の比 $K_{pd}(\omega)/K_{pd}(\omega_0)$ は付録に示す方法で測定する．その他の値については5節で述べる．

4. ハイドロホン比較校正装置

4.1 比較校正の概要

図4は基準ハイドロホン感度と比較してユーザのハイドロホンを校正する装置のブロック図である．被校正ハイドロホンと基準ハイドロホンを超音波振動子に対向させて配置する．被校正ハイドロホンと基準ハイドロホンは並置されているが，校正時には超音波振動子の主軸と各ハイドロホンの受波部を合わせるように，順に振動子を移動させる．同じ大きさの超音波音圧を照射したときの被校正ハイドロホンと基準ハイドロホンの出力電圧 V_{ht} ， V_{hr} の比に，式(7)で得られた基準ハイドロホン感度を乗じて，被校正ハイドロホン感度 S_t を決定する．基準ハイドロホン感度校正の場合と同様 V_{ht} ， V_{hr} とも電圧計測系の周波数特性 $K_{m2}(\omega)$ の影響を受ける．実際に測定される電圧 V_{ht}' ， V_{hr}' は，

$$V_{ht} = \frac{V_{ht}'}{K_{m2}(\omega)} \quad (8)$$

$$V_{hr} = \frac{V_{hr}'}{K_{m2}(\omega)} \quad (9)$$

となるが，振動子出力波形，信号回路系統，信号処理方法などを同一にしているため，被校正ハイドロホン感度 S_t からは $K_{m2}(\omega)$ の影響は除かれている．

$$S_t = \frac{V_{ht}'}{V_{hr}'} S_r \quad (10)$$

V_{ht}' ， V_{hr}' はハイドロホン出力電圧をADCにより計算機に取り込み，FFT演算によって求める．

基準ハイドロホンとして使用するメムレン型ハイドロホンにはプリアンプが組み込まれており，その出力インピーダンスは50Ωである．またハイドロホン出力端子を接続する電圧計測系の入力インピーダンスもこれに合わせて50Ωとしている．これは絶対校正装置においても同じである．従ってプリアンプが付属された被校正ハイドロホンを，50Ω終端のプリアンプ込みの感度を校正する場合には，電圧測定に関する問題はない．しかし，ハイドロホン単体の開放端子感度を校正する場合には次節の方法で測定する必要がある．

4.2 被校正ハイドロホン開放電圧の測定

被校正ハイドロホンの開放電圧を測定するため，図5に示す挿入電圧回路を使用する．この回路はハイドロホンの出力インピーダンス及び校正時に補助的に用いるプリアンプの入力インピーダンスやゲインが不明であっても，ハイドロホンの開放電圧を求めることができる．

図5のように出力インピーダンス Z_{ht} の被校正ハイドロホンを回路に接続する．信号発生器の出力が0の状態では，超音波を受波した際の開放電圧 V_{htOpen} に対するプリアンプの出力電圧 V_{htZa} はプリアンプの入力インピーダンス Z_a とそのゲイン G ，抵抗値 R_1 を用いて，式(11)のように示される．

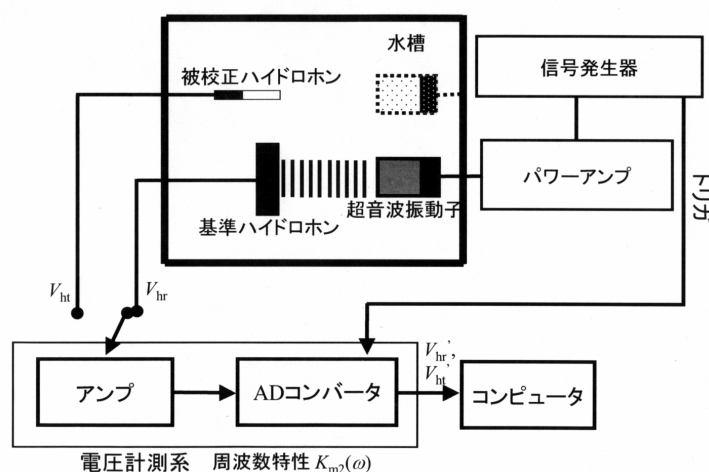
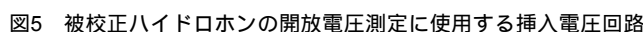


図4 ハイドロホン感度比較校正装置のブロック図



ただし, $R_2 + R_3 \gg R_1$ として, R_2 より左のインピーダンスの影響を省略した.

$$V_{sR1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{R_4 + R_5}{R_5} V_{sR5} \quad (12)$$

$$V_{\text{sZa}} = \frac{GZ_{\text{a}}}{Z_{\text{ht}} + Z_{\text{a}}} V_{\text{sR1}} \quad (13)$$

$$V_{\text{htOpen}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{R_4 + R_5}{R_5} \frac{V_{\text{sR5}}}{V_{\text{sZn}}} V_{\text{htZn}} \quad (14)$$

$$V_{sR5} = \frac{V_{sR5}'}{K_{\omega 5}(\omega)} \quad (15)$$

$$V_{\text{htZa}} = \frac{V_{\text{htZa}}'}{K_{m2}(\omega)} \quad (17)$$

$$S_{\text{tOpen}} = \frac{V_{\text{htOpen}}}{V_{\text{hr}}} S_r = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{R_4 + R_5}{R_5} \frac{V_{\text{sR5}}'}{V_{\text{zr}}'} \frac{V_{\text{htZa}}'}{V_{\text{hr}}'} S_r \quad (18)$$

5. 不確かさ要因とその評価方法

5.1 基準ハイドロホン感度絶対校正の不確かさ

5.1.1 電圧測定

ADCのリニアリティ u_1 は仕様に示された不確かさから評価する．また，ADCの垂直分解能の不確かさ u_2 は，電圧測定の最小ステップと V_i ， V_0 ， V_1 測定値との比から算出する． u_3 は V_0 を求める際に行う平滑化処理用の移動平均フィルタの周波数特性と V_0 波形の周波数変動により生じる不確かさである． V_0 の電圧計測系の周波数特性 $K_{m1}(\omega_0)$ を測定する際に用いるACデジタルボルトメータは電圧標準にトレーサブルであるため，その不確かさ u_4 には校正

表1 ハイドロホン感度校正の不確かさ要因
の欄に●がついた要因は、被校正ハイドロホンにより不確かさが異なる

不確かさ要因	タイプ	分布	※ 不確かさ要因の概要
1次校正			
電圧測定 $U_A = (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2)^{1/2}$	B	一様	u_1 : ADCのリニアリティ
	B	一様	u_2 : ADCの垂直分解能
	B	一様	u_3 : 移動平均フィルタの周波数特性
	B	正規	u_4 : $K_{m1}(\omega_0)$ 測定用ボルトメータの不確かさ
	B	一様	u_5 : $K_{m1}(\omega_0)$ 測定時のターミネーション
超音波音場 $U_B = (u_6^2 + u_7^2 + u_8^2)^{1/2}$	B	一様	u_6 : 超音波の伝搬方向に対する位置あわせ
	B	一様	u_7 : 超音波の伝搬方向に対する角度あわせ
	B	一様	u_8 : ハイドロホン受波面積による音圧空間平均
光検出器の周波数特性 U_C	B	正規	
実効屈折率 U_D	B	一様	
薄膜の音圧透過率 U_E	B	正規	
ρc の水温依存性 U_F	B	一様	ρc : 水の密度と音速の積
感度の直線補間 U_G	B	一様	
校正装置の安定性 U_H	B	正規	
比較校正			
電圧測定 $U_I = (u_9^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2)^{1/2}$	B	一様	u_9 : ADCのリニアリティ
	B	一様	u_{10} : ADCの垂直分解能
	B	一様	u_{11} : ADCの電圧レンジ
ターミネーション $U_J = (u_{12}^2 + u_{13}^2)^{1/2}$	B	一様	u_{12} : 1次校正と比較校正における基準ハイドロホンのターミネーションの違い
	B	一様	● u_{13} : 比較校正時と校正依頼者による測定時における被校正ハイドロホンのターミネーションの違い
超音波音場 $U_K = (u_{14}^2 + u_{15}^2 + u_{16}^2 + u_{17}^2 + u_{18}^2)^{1/2}$	B	一様	u_{14} : 基準ハイドロホンの測定位置あわせ
	B	一様	u_{15} : 基準ハイドロホンの角度あわせ
	B	一様	u_{16} : 被校正ハイドロホンの測定位置あわせ
	B	一様	● u_{17} : 被校正ハイドロホンの角度あわせ
	B	一様	● u_{18} : ハイドロホン受波面積による音圧空間平均
超音波振動子の安定性 U_L	B	一様	
S/N $U_M = (u_{19}^2 + u_{20}^2)^{1/2}$	A	正規	u_{19} : 基準ハイドロホン出力信号のS/N
	A	正規	● u_{20} : 被校正ハイドロホン出力信号のS/N

証明書の記載値を用いる。この $K_{mi}(\omega_0)$ 測定時とハイドロホン感度校正時のそれぞれの終端抵抗値の不確かさが $K_{mi}(\omega_0)$ 測定の不確かさ要因 u_5 となる。

5.1.2 超音波音場

この不確かさは、超音波振動子の主軸の方向誤差や放射される音圧が一般的な平面波ではないことに起因する。 u_6 は、校正装置に基準ハイドロホンと薄膜を取り替えた際に生じる超音波伝播方向の測定位置の差で、それにより生じる超音波音圧の差を理論計算して評価する。また、ハイドロホンの指向性に基づく角度依存性 u_7 や、測定音圧が受波面積で空間平均される影響 u_8 についても理論計算により求める。

5.1.3 光検出器の周波数特性

光検出器の周波数特性 $K_{pd}(\omega)/K_{pd}(\omega_0)$ は、付録に示した方法で測定される。この測定の主な不確かさ要因のひとつはADCの周波数特性を補正するために使用する信号発生器出力電圧の周波数特性の不確かさである。その他、音響光変調器の位置、角度決めの影響や、光検出器出力の繰り返し波形測定のばらつきなどがある⁴⁾。

5.1.4 実効屈折率 n^*

超音波による屈折率変動を受けた場所を音軸に沿って光が透過する影響で屈折率は実効的に1に近い値をとる。 n^* の値と不確かさは文献3)に述べられている。

5.1.5 薄膜の音圧透過率 t_p

超音波振動子とハイドロホンからなる超音波伝搬経路途中に薄膜が無いときと置いたときのハイドロホン出力の比から薄膜の音圧透過率を測定している。この繰り返し測定の標準偏差から不確かさを算出する。

5.1.6 水の密度 ρ 、音速 c の水温依存性

水の音速と密度は、水温との関係が示された文献5)の表を用いて、水槽内の水温測定値から算出する。校正中の水温変化および温度計の校正不確かさから、水温測定値の不確かさを見積もる。

5.1.7 感度の直線補間

基準ハイドロホン感度をレーザ干渉計方式による校正装置を用いて校正する周波数は、測定手順の関係から0.5 MHzおよび1 MHzから1 MHzステップで20 MHzまでの、21点のみである。被校正ハイドロホンでそれ以外の周波数を校正する場合、基準ハイドロホン感度を直線補間す

る。この直線補間の不確かさは、2次関数補間から得られた感度との差から算出する。

5.1.8 校正装置の安定性

振動子出力の安定性、干渉計のフィードバック回路による位相補正の安定性、S/Nなどの校正ごとに生じるランダムな校正值の変動は、多数の基準ハイドロホン感度校正結果の標準偏差として評価して不確かさを算出する。

5.2 ハイドロホン比較校正の不確かさ

5.2.1 電圧測定

V_{hi} , V_{hr} 測定時のADCのリニアリティ u_9 、垂直分解能の不確かさ u_{10} は基準ハイドロホン感度校正時の不確かさ u_1 , u_2 と同様の方法で評価する。基準ハイドロホン感度校正の場合には V_i , V_h とも同じADCの電圧レンジで測定しているが、比較校正の場合には、被校正ハイドロホンからの出力に応じて電圧レンジを変えている。レンジ切換に伴う不確かさ u_{11} は、一定振幅の電気信号を、電圧レンジを変えて測定した値のばらつきから算出する。

5.2.2 ターミネーションに関する補正值

レーザ干渉計方式による校正と比較校正で基準ハイドロホンを接続する終端抵抗が異なるために生じる不確かさ u_{12} は、それぞれの50Ω終端抵抗値の不確かさから算出する。被校正ハイドロホンに関する u_{13} も、50Ω終端感度校正の場合と同様である。一方、開放端子感度校正の場合は、4.2節に示した挿入電圧回路に使用されている各抵抗値の不確かさや、式(18)に示される V_{sR5}/V_{sZa} の繰り返し測定のばらつきなどから算出する。

5.2.3 超音波音場

比較校正装置では、決められた超音波伝播距離においてハイドロホン出力電圧が最も大きくなるように、超音波振動子に対するハイドロホンの位置と角度を調節する。有限のステップ幅で調整を行った場合に、音圧分布の理論計算値から位置あわせのステップ間隔で生じる基準ハイドロホン及び被校正ハイドロホン出力のばらつき u_{14} , u_{16} を、角度依存性の理論計算値から角度あわせのステップ間隔で生じるハイドロホン出力のばらつき u_{15} , u_{17} を評価する必要がある。また、2つのハイドロホンの受波面の面積の差から生じる、音圧分布空間平均の影響 u_{18} も音圧分布の理論値から算出する。

5.2.4 超音波振動子の安定性

超音波振動子の安定性による測定値のばらつきが $\pm$

0.5 %以内であることを確認するため、校正開始前と終了後に同じ周波数と振幅の入力信号で駆動する超音波振動子からの放射音を基準ハイドロホンで測定し、校正の前後で出力の変化が1 %以内であることをチェックしている。不確かさの値として、この限界値を用いる。

5.2.5 S/N

基準ハイドロホンおよび被校正ハイドロホンの出力信号に重畳されるノイズによる不確かさ u_{19} 、 u_{20} は、出力波形振幅の繰り返し測定の標準偏差から算出する。

5.3 不確かさのバジェット表の例

5.1, 5.2節に示した不確かさ評価方法を用いて、外径0.6 mmのニードル型ハイドロホンに30 dBのプリアンプを接続した場合の50 Ω 終端感度を校正した場合のバジェットの一例を表2に示す。

6. まとめ

超音波音圧標準の供給のために開発したハイドロホン感度校正システム、すなわちレーザ干渉計方式による0.5 MHzから20 MHzのハイドロホン絶対感度校正装置（1次校正装置）と比較校正装置の概要と、測定の不確かさの評価方法について述べた。さらに算出された不確かさの一例を示した。

1次校正に関しては、「校正装置の安定性」という、原因を特定できない不確かさ要因が大きな割合を占めている。これについては、今後も原因追及を続ける必要がある。一方、比較校正に関しては、解析によって得た各要因についての不確かさの合成値は、経験から予想される値と差のない結果となっている。

今後、国際比較など、他機関との間で校正値の比較を行って、不確かさ評価の妥当性を確認する必要がある。

表2 ハイドロホン感度校正の相対不確かさバジェット表（単位：%）

不確かさ要因		0.5MHz	1MHz	2MHz	3MHz	4MHz	5MHz	6MHz	7MHz	8MHz	9MHz	10MHz	11MHz	12MHz	13MHz	14MHz	15MHz	16MHz	17MHz	18MHz	19MHz	20MHz
1次校正																						
電圧計測系	U_A	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
超音波音場	U_B	0.22	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.14	0.16	0.20	0.24	0.29	0.35	0.41	0.47	0.54	0.62	0.69	0.78	0.87	0.96	1.06
光検出器の周波数特性	U_C	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
実効屈折率	U_D	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
薄膜の音圧透過率	U_E	0.16	0.22	0.22	0.26	0.26	0.26	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
ρc の水温依存性	U_F	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
感度の直線補間	U_G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1次校正装置の安定性	U_H	3.40	3.40	3.05	2.70	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35
1次校正の合成不確かさ		3.61	3.61	3.28	2.96	2.64	2.64	2.89	2.89	2.89	2.90	2.90	2.98	2.98	2.99	3.00	3.02	3.21	3.23	3.25	3.28	3.31
比較校正																						
電圧計測系	U_I	0.58	0.59	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
ターミネーション	U_J	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
超音波音場	U_K	0.48	0.18	0.19	0.20	0.21	0.24	0.28	0.33	0.39	0.46	0.55	0.64	0.75	0.86	0.94	1.13	1.27	1.43	1.59	1.77	1.95
超音波振動子の安定性	U_L	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
S/N	U_M	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
比較校正の合成不確かさ		1.30	1.22	1.22	1.22	1.22	1.23	1.24	1.25	1.27	1.29	1.32	1.37	1.42	1.48	1.53	1.65	1.75	1.87	2.00	2.14	2.30
合成不確かさ		3.84	3.81	3.50	3.20	2.91	2.91	3.14	3.15	3.16	3.17	3.19	3.27	3.30	3.34	3.37	3.44	3.66	3.73	3.82	3.92	4.03
拡張不確かさ($k=2$)		7.7	7.6	7.0	6.4	5.8	5.8	6.3	6.3	6.3	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.7	6.9	7.3	7.5	7.6	7.8	8.1

参考文献

- 1) M. Yoshioka, J. Ohto, S. Sato and T. Kikuchi: Hydrophone Calibration System Using Laser Interferometry at NMIJ, AIST, Proc. 18th Int. Cong. Acoustics (Science Council of Japan, Acoustical Society of Japan and Institute of Noise Control Engineering of Japan, Kyoto, April 2004) 667-670.
- 2) D. R. Bacon: Primary Calibration of Ultrasonic Hydrophones Using Optical Interferometry, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. & Freq. Control, 35-2 (1988) 152-161.
- 3) D. R. Bacon: The Improvement and Evaluation of a Laser Interferometer for the Absolute Measurement of Ultrasonic Displacements in the Frequency Range up to 15 MHz (National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex TW11 0LW, UK, 1986) 49-51.
- 4) M. Yoshioka, S. Sato, and T. Kikuchi: A Method for Measuring the Frequency Response of Photodetector Modules Using Twice-Modulated Light, J. Lightwave Technol. 23-6 (2005) 2112-2117.
- 5) IEC 61102:1991, Measurement and characterisation of ultrasonic fields using hydrophones in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz, CEI (1991) 80-81.

付録 光検出器の周波数特性測定

光検出器の周波数特性は、我々の考案した二重に強度変調した光を用いる校正方法を用いて求める⁴⁾。測定装置のブロック図を図6に示す。He-Neレーザ光源からの一定強度 I_0 の光を変調深さ $m_1(\omega)$ 、 $m_2(\omega)$ の2つの音響光変調器(AOM)を通して、順に異なる周波数 ω_1 、 ω_2 で強度変調させたとき、変調光強度 $I(t)$ は式(19)で表わされる。

$$\begin{aligned} I(t) &= I_0 \{1 + m_1(\omega_1) \cos \omega_1 t\} \{1 + m_2(\omega_2) \cos \omega_2 t\} \\ &= I_0 \left\{ 1 + m_1(\omega_1) \cos \omega_1 t + m_2(\omega_2) \cos \omega_2 t \right. \\ &\quad + \frac{m_1(\omega_1)m_2(\omega_2)}{2} \cos(\omega_1 - \omega_2)t \\ &\quad \left. + \frac{m_1(\omega_1)m_2(\omega_2)}{2} \cos(\omega_1 + \omega_2)t \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)から分かるように $I(t)$ には、原理的に等しい振幅 $I_0 m_1 m_2 / 2$ を持つ二つの周波数成分 $\omega_1 + \omega_2$ 、 $\omega_1 - \omega_2$ が含まれる。この変調光を光検出器に入力する。光検出器の出力電気信号を周波数分析して得られる周波数 $\omega_1 + \omega_2$ 、 $\omega_1 - \omega_2$ の振幅 V_H 、 V_L は式(20)、(21)のようになる。

$$V_H = \frac{K_{pd}(\omega_1 + \omega_2) I_0 m_1(\omega_1) m_2(\omega_2)}{2} \quad (20)$$

$$V_L = \frac{K_{pd}(\omega_1 - \omega_2) I_0 m_1(\omega_1) m_2(\omega_2)}{2} \quad (21)$$

ここで、3.2、3.3節で示された超音波角周波数 ω 、 V_0 測定時の光検出器出力信号の角周波数 ω_0 に対して ω_1 、 ω_2 を $\omega = \omega_1 + \omega_2$ 、 $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$ となるように決めると $K_{pd}(\omega)/K_{pd}(\omega_0)$ は式(22)のように V_H 、 V_L の比として与えられる。

$$\frac{K_{pd}(\omega)}{K_{pd}(\omega_0)} = \frac{K_{pd}(\omega_1 + \omega_2)}{K_{pd}(\omega_1 - \omega_2)} = \frac{V_H}{V_L} \quad (22)$$

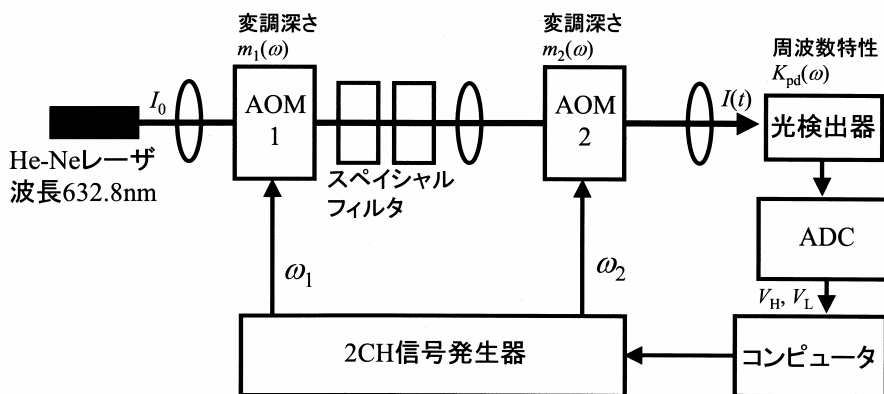


図6 二重に強度変調した光を用いる光検出器の変調周波数特性測定装置のブロック図