

東北大学審査博士 学位論文

光学的測定に基づく標準マイクロフォン
高精度校正法の研究

東北大学大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻
徐 載甲

緒言

近年、産業発展に伴い、電気・電子部品に限らず音響素材の種類もますます多彩になってきている。その中で、マイクロフォンについても、次々に新しい機能とデザインが開発されつつある。マイクロフォンは、その物理的な意味から“音の音圧変化の波形を電気信号に変換する変換機である”といった表現で、簡単かつ正確に定義ができる。即ち、マイクロフォンは、空気中の波動である音波を受けて、それを電気信号に変換する機器であり、その構造は

- (1) 音波を受ける部分
- (2) 音を電気信号に変換する部分
- (3) 電気出力を取り出す部分

の3段階に分けられる。また、その種類としては、電磁型、カーボン型、圧電型、コンデンサ型、ダイナミック型、コンデンサ型など、数多くの例がある。

マイクロフォンは、一般的には物理特性が決まればその性能も決まってしまうように思われるが、そうではない面もある。マイクロフォンの物理的な特性を決める種々の要因のうち、一番重要な特性は感度と周波数応答である。マイクロフォンの感度は、音圧の大きさを正確に定量化する物理的な特徴であり、単位音圧の入力に対する出力電圧の比で定義される。この感度を求める方法は、国際標準規格で定義され、標準化されている(IEC61094-2, IEC61094-3, IEC61094-5)。ここで言う測定の標準とは、科学技術分野で物の状態の量に対し、その単位または特定の量の値を定義し、顕示、保存、および再現するための基準として使用される物理的尺度を指す。即ち、測定機器、標準物質、測定方法、または測定システムのことであり、国家計量標準と関連する量の他の標準に対する値を付与するための基準として、国家的に公認された測定基準のことを言う。

精密な音響測定では、音圧測定精度を確保するために、マイクロフォンの感度レベルを正確に校正する必要がある。音響測定分野の国際標準は、標準マイクロフォンの感度を国際基準によって決定し、国際比較を介して測定値の同等性を確認するのみならず、定期的に感度の値を追跡・維持している。このとき使用するマイクロフォンを、標準マイクロフォンと言う。国際規格によるマイクロフォンの感度校正は、音圧測定のための精度を確立するため、感度レベルを正確に校正する必要がある。音響測定のための国際基準に基づいて、音響測定のトレーサビリティ(traceability)と同等性を維持するために、実験室標準(Laboratory standard, LS)マイクロフォンの感度が使用される。

LS マイクロフォンの感度を測定する方法として、可逆校正法が最も優れたマイクロフォン感度測定法として国際標準規格化されており、0.1 dB 以下の不確度水準の高い精度を実現することができる。可逆校正法は、3つの標準マイクロフォンを用い、そのうち2つずつ全部で3種類の組み合わせについて音響カップラと呼ばれる器具を用いて結

合させ、1つは送信機(音源)、他の1つは收音受信機として使用し、送信機の入力電流に対する受信機の出力量の比である電気伝達インピーダンスを測定する方法である。その後、音響伝達インピーダンスを求めたうえで、3種の組み合わせについて測定を繰り返しマイクロフォンの感度を求める。

音響分野の標準である可逆校正方法は、多くの時間と細心の注意を要するため、必要に応じ、この方法を適用して感度を決定することは容易ではない。従って、時間的に安定している標準器を対象に、年に一度またはそれ以上の特性を把握した後、これを対象にサブ標準機の校正を介して標準を普及することになる。このように、標準マイクロフォンが持つべき最も重要な要素の一つが音圧感度の経時安定性である。しかし、この方法は、3つのマイクロフォンを用いた測定法であり、単一のマイクロフォンでの測定は不可能である。また、理想的な圧力場の条件を満たすため、マイクロフォンの間に閉じたボリュームを作成するために使用されるマイクロフォンペアとカプラの組み合わせが多数回必要であり、手続きが複雑な上、測定時間が長いと言う問題点もある。更に、周波数が低くなるにつれ、特に20 Hzより低い帯域の不確度(uncertainty)が増加する問題点もある。これらの問題点は音響分野の標準を広げていく上で壁となっており、一部の先進国や会社のシステムに依存せざるを得ない傾向にある。また、音響センサの適用周波数帯域が可聴領域から非可聴領域に拡大しているが、従来の方法は適用周波数の帯域を拡大するのが難しいという問題点がある。したがって、従来の可逆校正方法を代替することが可能な新たなマイクロフォン校正法の検討が必要である。

以上を踏まえて本研究では、可聴周波数帯域だけではなく、超低周波数から可聴周波数帯域までの広範囲・高精度校正が可能なマイクロフォン校正システムの実現を目標に掲げた。そのために、レーザによる計測に着目した。レーザを使用して、マイクロフォン振動膜の振動形態を直接計測することにより、従来方式で採用した受信機と送信機といったマイクロフォンペアの使用がなくなり、マイクロフォン単体での測定が可能になると考えた。また、レーザ干渉計でマイクロフォンダイヤフラムの振動を測定することにより、信号対雑音比を高め、適用周波数帯域の下限を可聴領域から非可聴領域まで広範囲に拡大できると考えた。即ち、本研究では道具と対象を分離し、その対応性を広げることが可能なマイクロフォン校正法の確立を目指していく。

以下に、本論文の構成を示す。

第1章は序論である。ここでは、本研究の背景となる標準マイクロフォンの感度校正について概観し、標準マイクロフォンの感度校正に関する従来方式である可逆校正法の問題点を取り上げるとともに、本研究の必要性と目的を述べる。

第2章では、従来の可逆校正法について詳細に述べ、従来方式における問題点が発生する原因、その精度向上と効率化を図るために講じた一連の対策について述べる。また、従来方式の限界と新しい手法の必要性についても述べる。

第3章では、第2章で示された既存手法の問題点を受け、新しい光学的測定方法を提案する。具体的には、マイクロフォンの振動膜の振動を、レーザ計測法によって直接測定する方式を提案し、マイクロフォンの振動膜の中心から測定された応答を1回の測定で求められる新たな手法を提案し、実験を通しその効果を検討する。

第4章では、第3章における低周波領域での校正精度の問題点を取り上げ、その対策として、空間内部の体積変化をレーザ干渉計を用いて測定し、マイクロフォンの感度を取得するレーザピストンフォンシステムについて、新たなシステムの構成を提案し、既存の可逆校正法の結果と比較しながら、提案方法の有効性を検討する。

第5章では、前章までの検討に基づいて、可聴周波数以下の超低周波数から20 kHzまでの広帯域にわたるマイクロフォン感度を、容易かつ高精度に測定できる方法を提案する。第4章で提案されたレーザ干渉計システムは、第3章の表面振動測定へ適用することが可能であり、このシステムを適用することで他に校正された振動測定機器を使わずとも、マイクロフォンの感度と位相を簡単に測定できると考えられる。ここでは、提案方法の妥当性を検証するため、計算機シミュレーションにて既存の可逆校正法と比較し、その有効性を検討する。

第6章は結論であり、本論文の主要な成果と今後への展望を記す。

目次

緒言

第 1 章 序論

- 1.1 はじめに 1
- 1.2 標準マイクロフォン 2
 - 1.2.1 コンデンサマイクロフォンの特性と構成
 - 1.2.2 標準マイクロフォンの仕様と特性
 - 1.2.3 標準マイクロフォン校正の必要性
- 1.3 標準マイクロフォンの感度校正法 11
 - 1.3.1 音圧感度の絶対校正としての可逆校正法
 - 1.3.2 レーザピストンホンシステム
- 1.4 本研究の目的 14

第 2 章 標準マイクロフォンの感度決定に関する従来の方式とその問題点

- 2.1 はじめに 17
- 2.2 可逆校正法による標準マイクロフォンの感度決定方法 18
 - 2.2.1 可逆校正法の理論的背景
 - 2.2.2 感度校正方法
 - 2.2.3 従来可逆校正法の問題点
 - 2.2.4 本研究の基本的な考え方
- 2.3 伝達関数測定による可逆校正法の効率化 27
 - 2.3.1 伝達関数を用いた可逆校正法の定式化
 - 2.3.2 時間引き延ばしパルスの利用と設計
 - 2.3.3 時間引き延ばしパルスを用いた可逆校正法による測定
 - 2.3.4 実験および考察
- 2.4 まとめ 38

第 3 章 マイクロフォン振動膜の振動測定によるマイクロフォン感度決定法の提案

- 3.1 はじめに 39
- 3.2 マイクロフォン振動膜の振動と感度間の関係 41
- 3.3 共振周波数と減衰係数の決定法 48
 - 3.3.1 マイクロフォンの共振周波数と減衰係数
 - 3.3.2 測定システムの構成

3.3.3 実験結果	
3.4 体積速度平均モデルを用いた感度測定手法	55
3.4.1 体積速度平均モデルの導出	
3.4.2 感度測定結果	
3.4.3 考察	
3.5 まとめ	64
第4章 レーザ干渉計を用いた低周波数領域のマイクロフォン感度決定法の提案	
4.1 はじめに	65
4.2 レーザピストンフォンシステムのご概念	67
4.3 正弦近似法によるピストンの複素変位測定	69
4.4 測定システム構成	72
4.5 実験結果及び考察	74
4.6 まとめ	80
第5章 標準マイクロフォンの広帯域高精度校正法の提案	
5.1 はじめに	81
5.2 レーザ干渉計を基盤とする音圧校正法の提案	83
5.3 提案法の測定システムと具体的測定手順	85
5.3.1 提案法を実現するシステム構成	
5.3.2 感度校正手順	
5.4 提案法の妥当性の考察	90
5.5 まとめ	93
第6章 結論	94
謝辞	97
参考文献	99

第1章 序論

1.1 はじめに

マイクロフォンは、音を電気信号に変換する装置であり、携帯電話や放送、音声録音、映像など、現代社会のあらゆる分野に幅広く使用されている。マイクロフォンは、電磁型、ダイナミック型、コンデンサ型など数多くの種類があり、その物理特性には、感度、周波数応答、指向性、出力インピーダンスや最大許容入力音圧、固有雑音等々がある。この中で一番重要な特性は、感度と周波数応答である [1]。

マイクロフォンの感度は、音圧の大きさを正確に定量化する物理的特性であり、単位音圧の入力に対する出力電圧の比で定義される。マイクロフォンの感度を求める手法は、数多くの研究者によって研究されており [2, 3]、提案された測定手法もマイクロフォンの種類ごとに異なっている。このことから、様々な対象や環境に適用可能な、安定で高精度な測定法の確立が必要である [4]。音響測定分野では、高精度な音圧校正を行い、定期的に感度の値を追跡・維持したマイクロフォンを準備し、それを音圧校正の中核として用いる [5]。このようなマイクロフォンは標準マイクロフォンと呼ばれており、時間的な安定性と平坦な周波数特性、更には使いやすい感度を持つことから、コンデンサマイクロフォンが用いられる。

標準マイクロフォンの感度校正法として、絶対校正法の研究 [6]が行われている。また、自由音場校正法 [7, 8]や、拡散音場校正法 [9, 10]に関する研究、校正精度を高めるための研究も活発に行われている。マイクロフォンの感度を測定する方法として、その測定精度の高さと安定性から可逆校正法が最も優れた方法と考えられ、標準マイクロフォン校正の国際標準として規格化されている [11, 12, 13]。しかし、可逆校正法は、多くの時間と細心の注意を要するため、必要に応じこの方法を適用して感度を決定することは容易ではない。そのため、この問題点を改善する手法の確立は極めて重要である。

以上を踏まえて、本章では本研究の背景を確立するため論述を行う。まず、1.2 節では、標準マイクロフォンであるコンデンサマイクロフォンの特性と構造について述べるとともに、標準マイクロフォンの仕様について概観する。また、標準マイクロフォンの校正が必要な理由について考察を行う。

1.3 節では、マイクロフォンの校正手法に関する先行研究を概観し、標準マイクロフォンの国際標準である可逆校正法について論じる。

最後に 1.4 節では、本研究の目的を明らかにする。

1.2 標準マイクロフォン

標準マイクロフォンは[11, 12, 13], 時間的に安定している標準器として, 年に一度またはそれ以上の頻度で特性を確認している. その後, これを用いて次の水準の校正を行い, マイクロフォンの感度校正を広げて行く. したがって, 標準マイクロフォンが持つべき重要な要素は, 感度特性と経時安定性である.

これまでに, 様々な種類のマイクロフォンが開発・使用されているが, 時間的な安定性の面ではコンデンサマイクロフォンが最も優れており, 従来から標準マイクロフォンとして用いられている. コンデンサマイクロフォンは, 精密音響計測用としても広く使われている. 本節では, 標準マイクロフォンとして用いられているコンデンサマイクロフォンの概要, 標準マイクロフォンの特性, 及び標準マイクロフォンの校正の必要性について述べる.

1.2.1 コンデンサマイクロフォンの特性と構造

コンデンサマイクロフォンの等価回路図を, Fig. 1-1 に示す[14].

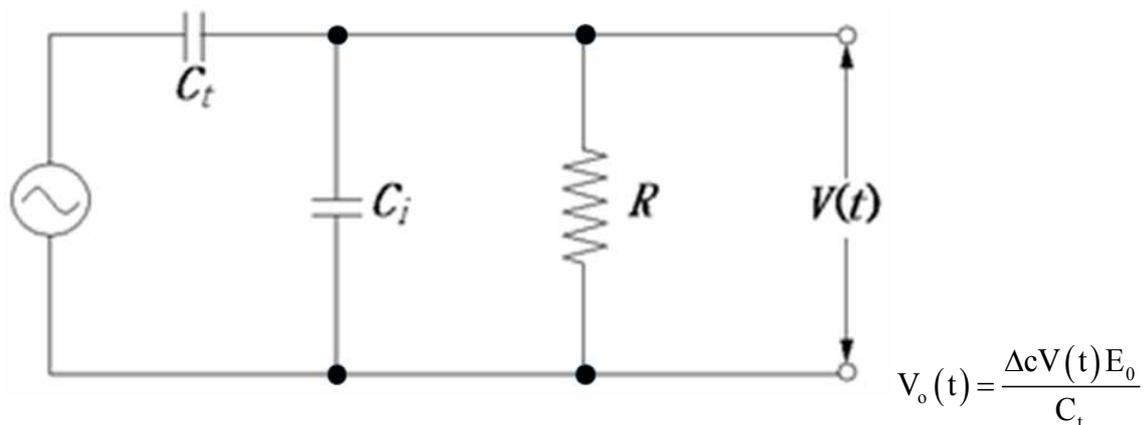


Fig. 1-1. Equivalent circuit diagram of the condenser microphone and preamplifier

Fig. 1-1 で, 分極電圧 E_0 と電荷 Q は, 次の関係式を持つ.

$$E_0 = \frac{Q}{C_t} \quad (1-1)$$

ここで, C_t はコンデンサマイクロフォンに入力がない場合の容量である. また, コンデンサマイクロフォンに負荷がない場合の開放出力電圧 $V_o(t)$ は次式のようになる.

$$V_0(t) = \frac{\Delta C(t) E_0}{C_s + \Delta C(t)} \approx \frac{\Delta C(t) E_0}{C_s} \quad (1-2)$$

式(1-2)の $\Delta C(t)$ は、コンデンサマイクروفオンの容量の変化量を表している。これによって、出力電圧 $V(t)$ は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{\Delta C(t) E_0}{C_s} \frac{C_s}{C} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \\ &= \frac{\Delta C(t) E_0}{C_s} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \end{aligned} \quad (1-3)$$

ここで ω は角周波数、すなわちマイクروفオンに入射される音波の各周波数であり、 $C = C_i + C_t$ である。入射された音波の時間に応じた音圧の変化量 $\Delta p(t)$ は、マイクروفオンの容量の変化量 $\Delta C(t)$ と、次の関係式を持っている。

$$\Delta p(t) = K_1 \Delta C(t) \quad (1-4)$$

ここで、 K_1 は時定数である。

したがって、マイクروفオンの感度 S (入力音圧と出力電圧の比)は、次のように得られる。

$$S = \frac{V(t)}{\Delta p(t)} = \frac{\Delta C(t) E_0}{C_t \Delta p(t)} \frac{\Delta C(t) E_0}{1 + j\omega RC} \quad (1-5)$$

上式を簡単化し再整理すると、次式のようなになる。

$$S = K_2 \frac{E_0}{C_t} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \quad (1-6)$$

K_2 は定数である。この式から、マイクロフォンの感度が角周波数に比例して影響を受けることが分かる。また、コンデンサマイクロフォンは、Fig.1-2 と Fig.1-3 に示すように、薄い金属振動膜(diaphragm)と固体背面板(back plate)で構成されており、その距離は一般的に $20\ \mu\text{m}$ ($\pm 0.8\ \mu\text{m}$) である。この二つの金属板が、空気層をはさんでコンデンサ(capacitor)の電極を形成し、その静電容量(capacitance)は一般的に $2\ \text{pF} \sim 60\ \text{pF}$ である。直流電圧(分極のためのバイアス電圧)によってコンデンサに一定の電荷が供給され、薄い振動膜に加わる入力音圧による膜の間隔の容量変化によって、最終的に電圧の変化が発生することになる。

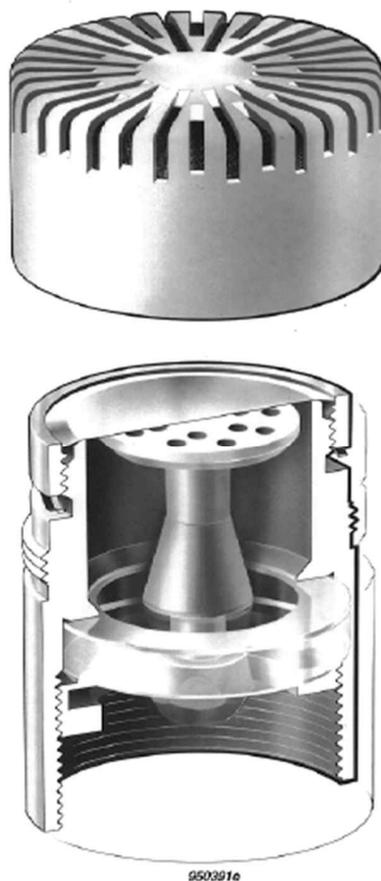


Fig.1-2. Classic design of a condenser measurement microphone

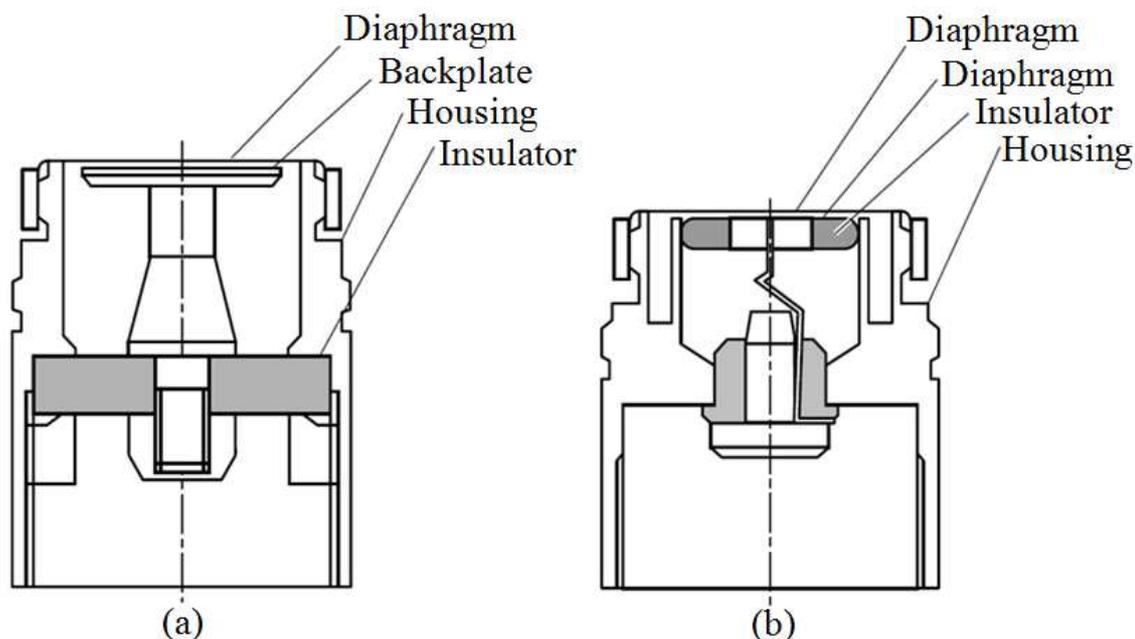


Fig.1-3. Cross-sectional view of different microphone types: (a) the classic type is assembled by screwing the parts together and (b) the new type is assembled by pressing the components together [14]

このようなコンデンサマイクロフォンは、高い信頼性と広い周波数帯域に渡るフラットな周波数特性を持ち、また、比較的高い感度と小さな内部雑音といった特性を持っている[14]。更に、音場への影響も比較的少ない構造で設計されているため、精密音響測定において有効に使用可能である。

1.2.2 標準マイクロフォンの仕様と特性

コンデンサマイクロフォンで作られる標準マイクロフォンには、実験室標準 (Laboratory standard, LS) マイクロフォンと現場標準 (Working standard, WS) マイクロフォンの2種類 (Fig. 1-4 参照) があり、その条件と仕様は IEC 規格にて規定されている[11]。

実験室標準マイクロフォンは、次のうちの少なくとも一つによって校正可能なマイクロフォンのことである。

- a) 表 1-1 に示す仕様に適合すること。
- b) 可逆校正法で校正可能なマイクロフォンであること。
- c) 機械的寸法とフラットな周波数特性を持つこと。

即ち、厳しい電気音響特性を満たすことと、高感度で長時間の安定性を有するなどといった条件を満たす必要がある。

現場標準マイクロフォンとは、次のうち少なくとも一つによって校正可能なマイクロフォンである。

- a) 表 1-1 に示す仕様に適合すること。
- b) 校正された実験室標準マイクロフォンと比較できること。
- c) IEC60942 に記載されている騒音校正に標準マイクロフォンを校正することができること。また、機械的寸法および電気音響特性を満たすこと、特に、時間安定性と環境条件に適合する必要がある。Fig.1-4 に、実験室標準マイクロフォンと現場標準マイクロフォンの一例を示す。

Table 1-1. Rate parameters of microphones

Name Parameter description	Microphone type number					
	Laboratory standard microphone		Working standard microphone			
	4160	4180	4144	4145	4133	4134
Outside diameter (mm)	25.4	12.5	25.4	25.4	12.5	12.5
Sound field: (P:Pressure, F:Freefield)	P	P	P	F	P	F
Capacitance(P_F)	25	18	25	25	18	18



Fig. 1-4. Practical microphones used as laboratory standard (4160, 4180) and working standard (4144/45, 4133/34) microphones

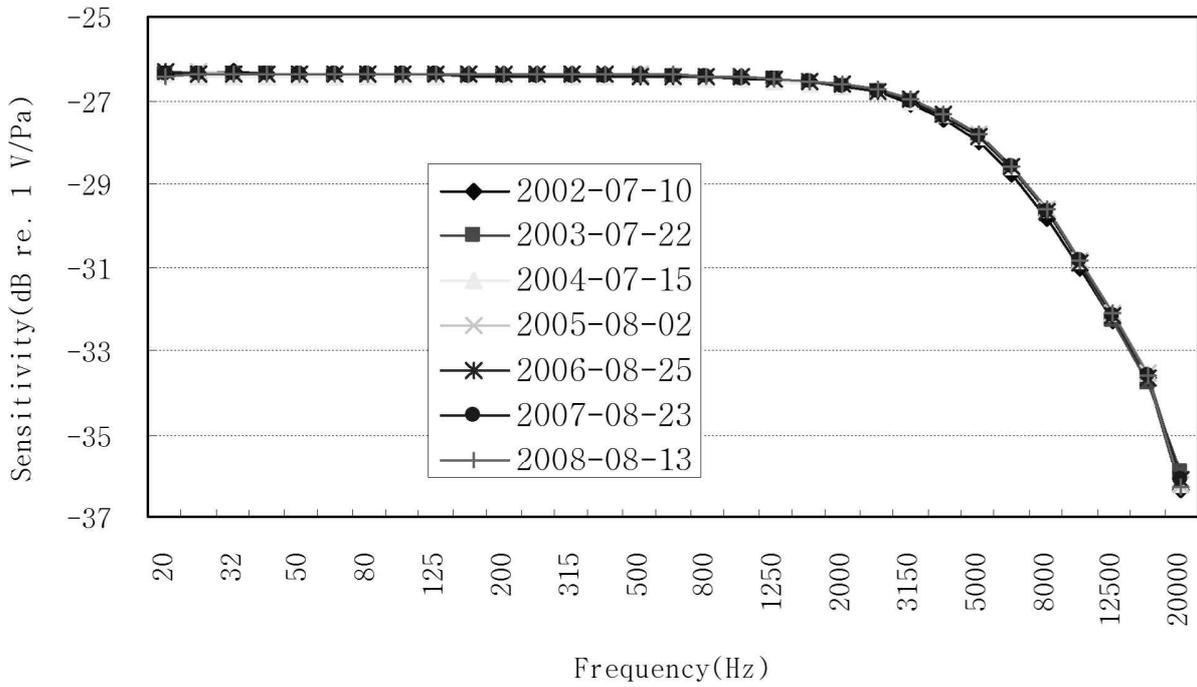
また、マイクロフォンの直径が 1 インチ、1/2 インチと 1/4 インチが典型的であり、国際標準 (IEC61094) でもこの 3 種類について規定されている [11]。この中、グリッドはメーカーによって少し変えることができる。つまり、B&K, GRAS および BSWA, 3 社の 1/2 インチマイクロフォンはすべて同じ寸法であるが、いずれのマイクロフォンも音圧校正器を用いて校正可能である必要がある。表 1-2 に、B&K マイクロフォンの代表的な音響パラメータを示す [14]。

Table 1-2. Characteristic parameters of microphones

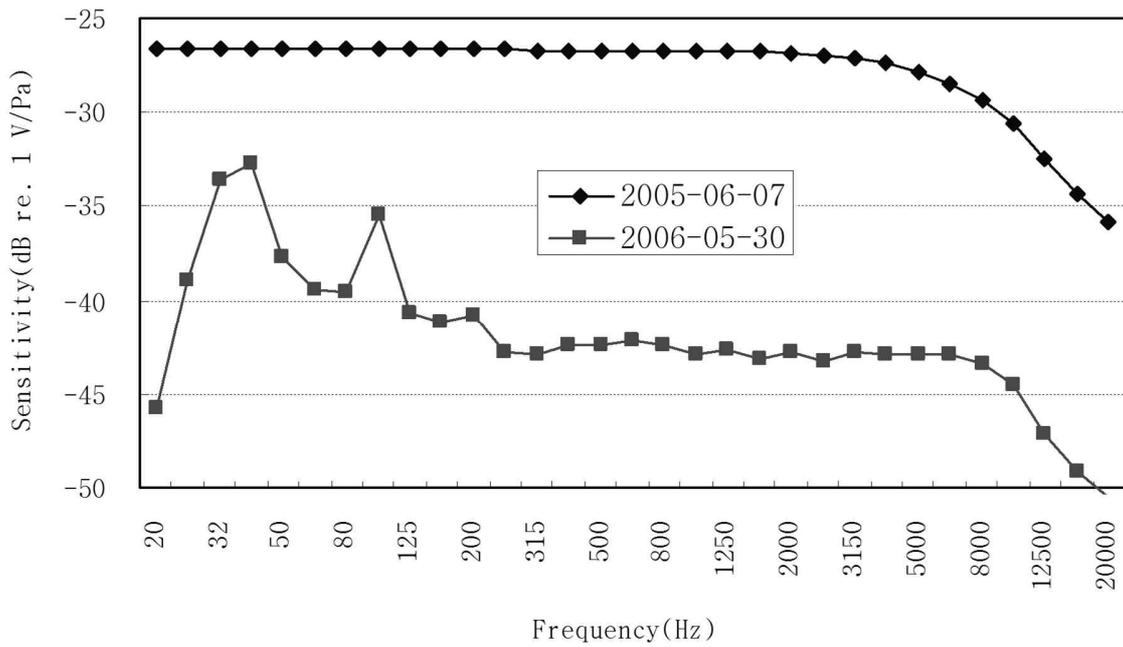
Name	Parameter description	Microphone type number					
		Laboratory standard microphone		Working standard microphone			
		4160	4180	4144	4145	4133	4134
V_F	Front cavity volume	535 mm ³	34 mm ³	570 mm ³	570 mm ³	34 mm ³	34mm ³
L_F	Length of front cavity	1.95 mm	0.50 mm	1.95 mm	1.95 mm	0.50 mm	0.50mm
V_e	Equivalent diaphragm volume	136 mm ³	9.2 mm ³	136 mm ³	120 mm ³	10 mm ³	10mm ³
f_o	Resonance frequency	8.2kHz	22kHz	8.2kHz	11kHz	22kHz	22kHz
D	Damping Factor (Loss factor)	1.05	1.05	1.05	3.15	3.05	1.15
E	Effective diaphragm diameter	17.9 mm	8.95 mm	17.9 mm	17.9 mm	8.95 mm	8.95 mm

1.2.3 標準マイクロフォン校正の必要性

標準マイクロフォンの感度は [14]、定期的に点検しなければならない。マイクロフォンの感度は、刺激及び時間に応じて少しずつ変化する。即ち、Fig. 1-5 (b) に示したように、標準マイクロフォンの感度は刺激などによって変化する。Fig. 1-5 で (a) は、感度が安定した状態に維持されたマイクロフォンの測定結果を示しており、(b) と (c) は、衝撃や外部影響などで破損されたことを表す。縦軸は周波数を、横軸は感度を表している。また、刺激などが無い場合でも、感度を変更する場合がある。したがって、常にマイクロフォンを検査 (観察) または校正する必要がある。



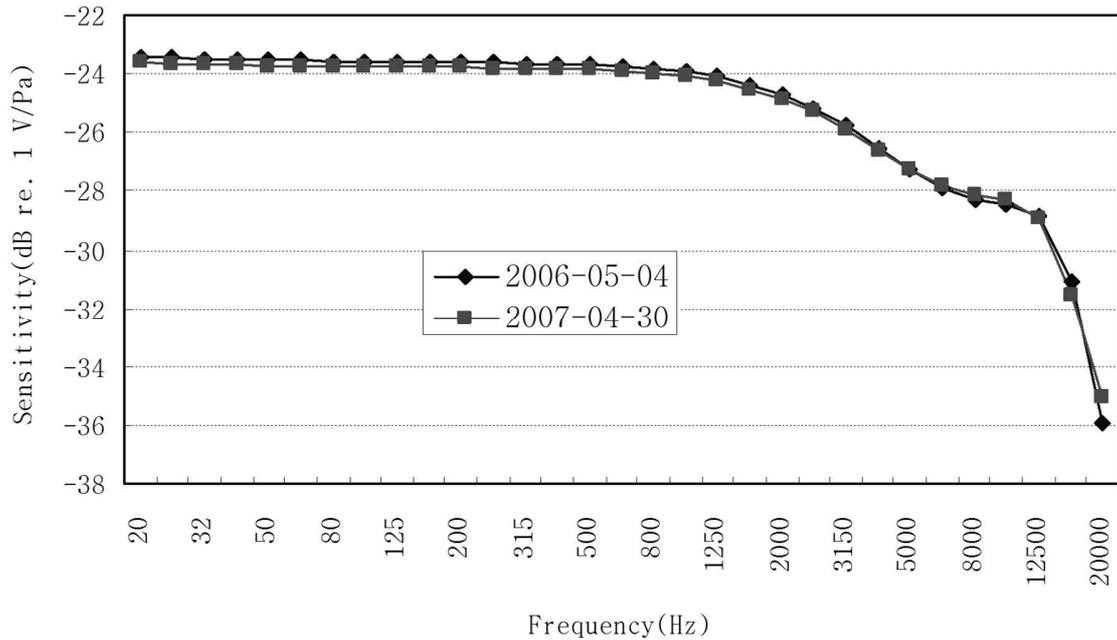
(a)



(b)

(次ページに続く)

(前ページから続く)



(c)

Fig. 1-5. Change in sensitivity of standard microphones: (a) steady-state (6 years calibration result), (b) and (c) damage by impact

なお、標準マイクロフォンの感度は、国際比較を介して定期的に感度値を追跡・維持することが大事である。即ち、時間的な安定性と平坦な周波数特性に適した感度や、標準機として重視される高い安定性を持たなければならない。Fig. 1-6 に、B&K4160 標準マイクロフォンを長時間 250 Hz の周波数で定期的に測定し、31.5 Hz ~ 10 kHz まで 20 年間測定した結果を示す[14]。

One-inch Calibrations



Type 4160
No. 873982
IEC 61094-1
LS1p

Calibrations
at 250 Hz

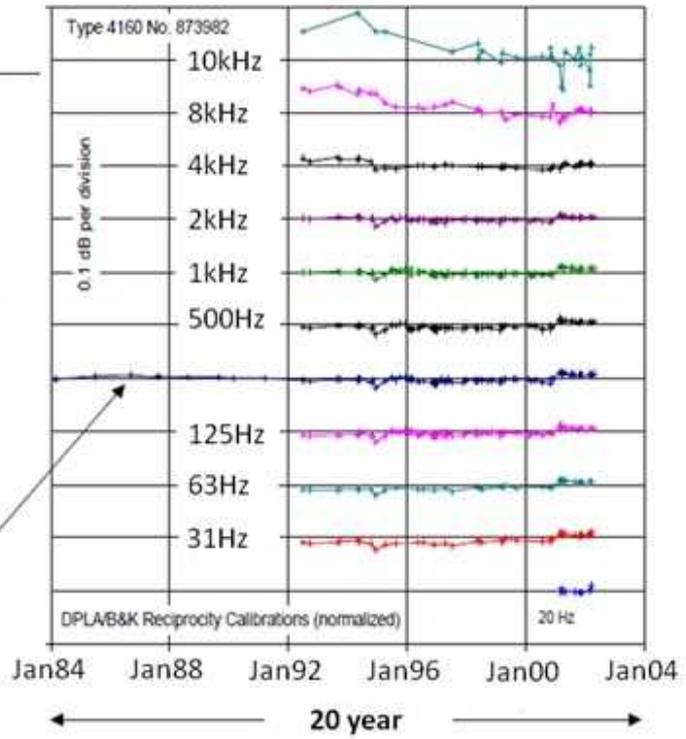


Fig. 1-6. Long-term stability of LS microphones

1.3 標準マイクロフォンの感度校正法

標準マイクロフォンは音響標準器として利用されている。可聴周波数帯域の音圧標準に関する研究としては、1940年代に校正原理が確立した後、日本[15]と米国[16]などで標準マイクロフォンの絶対校正法の規格化作業が行われていた。また、カプラ校正[3]や自由音場校正法[7, 8]、拡散音場校正法[9, 10]等、校正精度に関する研究も活発に行われた。その後、これらの成果を活用した感度校正法の研究のために、1968年に国際電気標準会議(IEC)の技術委員会(TC29:Electroacoustics)の作業委員会(WG)において、日本を含む7カ国による、1インチ型マイクロフォンであるWE640AAやECL MR103, B&K4132などについてラウンドロビンが実施された。その際に、各国における様々な校正法が使用されたが、校正結果は予想以上に一致していた。特に20ccカプラを利用した場合には[3]、 ± 0.1 dB以内の誤差で測定値が一致していることが分かった。これらの成果をもとに、IECは1979年までに1インチI型マイクロフォンの校正法として4つの国際規格[17, 18, 19, 20]を制定した。

標準マイクロフォンの感度校正法は、トレーサビリティや基準機に依存せず感度が決定されるものである。標準マイクロフォンは、国家の基準機に使用され、国家校正機関にて測定用マイクロフォンの感度を比較・チェックするために使用されている。本節では、研究の基になる音圧感度の絶対校正や、標準マイクロフォンの感度を測定する方法として国際標準規格化されている可逆校正方法について述べる。

1.3.1 音圧感度の絶対校正としての可逆校正法

特定物理量に対する測定量を定量化する最初の段階で使われる一次標準では、直接関連している物理量に対する基準物に依存しない絶対校正法を適用する必要がある。音響の場合、単位は音圧をデシベルで表現した音圧レベルを使用しているが、それを直接定義するのではなく、標準マイクロフォンの感度によって間接的に定義する[21, 22]。従って、音響の一次標準は、標準マイクロフォンの感度を既知の音響センサと比較せずに決定する絶対校正法である。

標準マイクロフォンの絶対校正においては、音圧感度を求めるために音響カプラ(以下カプラと記す)と呼ばれる音響結合機を用いて音圧校正を行う。コンデンサマイクロフォンは、電圧を加えることによって音の発生が可能な可逆性を持っており、音源として使用した場合の音源感度とマイクロフォンとして使用した場合の受音感度が等しい性質を持つ。この性質を利用した絶対校正法が、可逆校正法である。以下にその原理を述べる。

まず、可逆校正法ではマイクロフォンの感度を求めるため、Fig. 1-7に示したように3個のマイクロフォンと一つのカプラが必要になる。

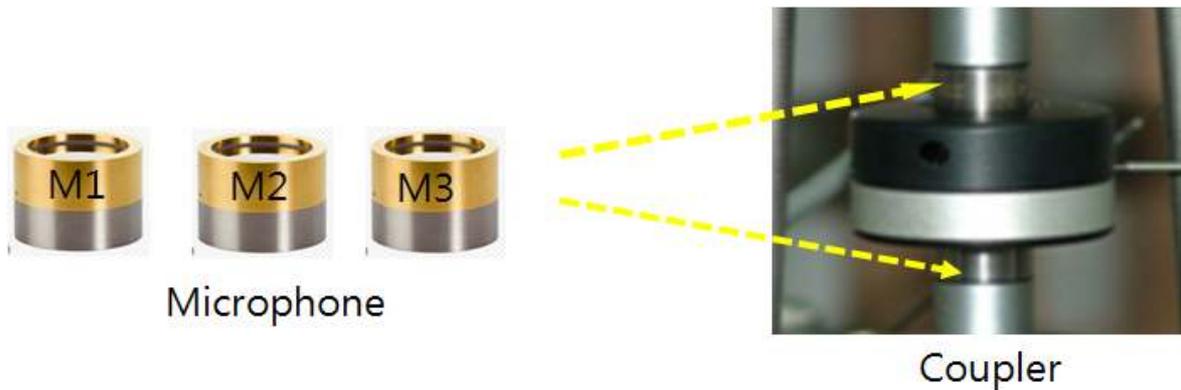


Fig. 1-7. 3 Microphone and coupler

次に、Fig.1-8に示すように、2つのマイクロフォンをカプラに取り付け、一方を送信機、他方を受信機として使用し、送信機によりカプラ内で音を発生させ受信機側でそれを受音する。電気音響学の可逆定理により、音響的に結合した2つのマイクロフオンの間で、受信機として使用するマイクロフォン振動膜面に作用する音圧と、送信機として使用する振動膜の体積速度との比で決まる電気伝達インピーダンス (electrical transfer impedance) が求めれば、両マイクロフオンの音圧感度の積が得られる。

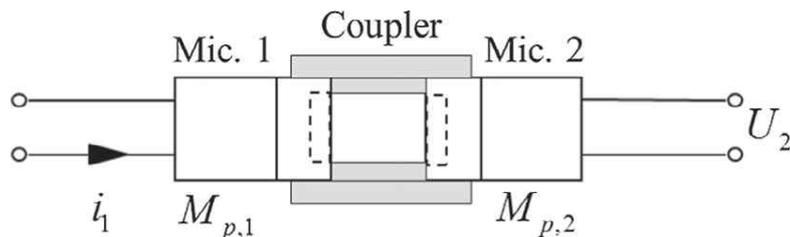


Fig.1-8. Schematic configuration of the microphones and coupler for the reciprocity calibration[18]

即ち、可逆校正法では、3個のマイクロフォンを用意して、3通り (M1-M2, M1-M3, M2-M3) のマイクロフオンの組み合わせについて音圧感度の積を測定し、これから個々のマイクロフオンの音圧感度を算出する (詳しくは2.2節を参照)。その後、求められた3組の電気伝達インピーダンスを利用して音圧感度を計算し、各種補正を介して最終的にマイクロフオンの感度を決定する。このように、可逆校正法はマイクロフオンの間に閉じたボリュームを作成するために使用されるマイクロフォンペアとカプラの組み合わせが必要であり、手続きが複雑、測定時間が長い問題点がある。また、周波数が低くなるにつれ、特に20 Hzより低い帯域の不確度が増加する問題点や、適用周波数の帯域を可聴閾まで拡大するのが難しい問題点もある。

1.3.2 レーザピストンフォンシステム

低周波数帯域での低い信号対雑音比問題を克服するために、レーザピストンフォンシステムが提案されている [23]。この手法の基本的な概念は、信号対雑音比を高めるために音源をマイクロフォンで動くピストンフォンに変えることである。即ち、ピストンの動きをレーザ干渉計で測定して、相対的な方法で変位を測る手法である。このシステムは、以前イギリス国立物理学研究所 (National Physical Laboratory) にて実施され、国際比較にも参加されたものである [24, 25]。

その後、いくつかの国の計測機関で同様の光学測定システムの開発を行っている [26]。これらのシステムの多くは、一般的にフリッジの計算方法に基づいたホモダイン干渉計を使用することで、振動や衝撃コンバータの 1 次補正にも適用されている [27]。しかし、運動の方向を得ることができないため、補正された装置の位相応答を決定し算出することができない問題点がある。

1.4 本研究の目的

前述のように、精密な音響測定では、音圧測定精度を確保するためにマイクロフォンの感度レベルを正確に校正する必要がある。音響測定のトレーサビリティと同等性を維持するために[27, 28]、前節までに示した最も優れているとされている可逆校正法を用いて実験室標準マイクロフォン (LS マイクロフォン) の感度が定められる。

しかし、前節までの検討から明らかのように、この可逆校正法は、次のような問題点を持っている。

- (1) 一つのマイクロフォンで測定することが不可能である。
- (2) 測定の手続きが複雑である。
- (3) 測定時間が長い。
- (4) 20 Hz より低い周波数帯域の測定が不可能である。

また、適用周波数帯域が可聴領域から非可聴領域に拡大しているが、従来法では適用周波数帯域を拡大するのが難しい問題もある。これらの問題点は、音響分野の標準補給の大きな壁となっている。従って、従来の可逆校正法を代替することが可能な、新たな測定方法の検討が極めて重要であると考えられる。

そこで本研究では、まず、先に述べた(1)～(3)までの問題点を解決するために、レーザ振動計を用いた、ダイヤフラム振動測定に基づくマイクロフォンの感度を測定する方法を提案する。レーザ測定によるマイクロフォン感度の校正については、数値解析モデルとの合成によるハイブリッド方法が提案されている[24]。しかし、この方法は自由音場と拡散音場間の感度を補正するための係数を求めることを目的としており、この測定だけで感度を導出する方法は提案されていない。ダイヤフラムの表面振動測定によって感度を導くことができれば、1個のマイクロフォンで感度を決定することが可能となる。また、表面振動は音信号に比べて SN 比が高く、カプラ等を用いなくても再現性が高い測定ができると期待できる。

次に、(4)に取りあげた問題点を解決するために、レーザ干渉計を用いて低周波数領域におけるマイクロフォンの感度を求める方法を提案する。低周波数帯域における低信号対雑音比問題を克服するために、光学測定システムが開発されている。これらのシステムの多くは、フリッジの計算方法に基づいてホモダイン干渉計を使用することで、振動や衝撃コンバータの1次補正を適用している。しかし、この手法は運動方向が取得できておらず、補正されている装置の位相応答を決定・算出することができないという問題点がある。これらの欠点を明らかにするため、正弦波近似法基盤レーザ干渉計を用いた低周波数領域のマイクロフォンの感度を求める方法について検討する。

現行の音響標準法である可逆校正法は、測定対象と道具が同様で他の基準物に依存せずに絶対校正が可能となるという面では意味を持つと言える。しかし、測定においては

決められた基準器から始めなければならない事から、拡張性の面を含め制限が多い問題点がある。そこで、提案手法を拡張し、可聴周波数帯域だけではなく、低周波数から高周波数までの広範囲にわたり標準マイクロフォンの高精度校正が可能なシステムについて、その可能性も含め検討する。

Fig. 1-8 に、本論文の流れ及び本論文の章構成を示す。第 1 章は本章であり、序論として本研究の背景となる標準マイクロフォンの感度校正について概観し、本研究の必要性和目的を述べてきた。

第 2 章では、従来の可逆校正法について詳細に述べ、従来方式における問題点が発生する原因と、その精度向上と効率化を図るために講じた対策について述べる。また、従来方式の限界と新しい手法の必要性について述べる。

第 3 章では、第 2 章で示された既存手法の問題点を克服するための手段として、マイクロフォン振動膜の振動をレーザ計測法によって直接測定する新しい光学的測定方法を提案する。ここでは、マイクロフォン振動膜の中心から測定された応答を 1 回の測定で求め、実験を通しその効果を検討する。実際の標準マイクロフォンの振動膜の境界条件は理想的な条件ではなく、理論式の応答と完全には一致しないため、理論式で求められた数値と実システムでの偏差、および実測モデルの必要性についても検討する必要がある。そこで、体積速度平均モデルを用いた感度測定を目指し、振動膜中心の表面速度と振動膜表面振動による音響体積速度との関係を検討する。この関係に基づいて、表面速度分布を測定し経験的モデルを構築する。

第 4 章では、第 3 章における低周波領域での校正精度の問題点を取り上げ、その対策として、空間内部の体積変化をレーザ干渉計を用いて測定し、マイクロフォンの感度取得するレーザピストンフォンシステムについて新たなシステム構成を提案し、既存の可逆校正法の結果と比較しながら提案方法の有効性を検討する。

第 5 章では、第 3 章と第 4 章の検討に基づき、広帯域での標準マイクロフォン感度を高精度に測定できる方法を提案する。これにより、他に校正された振動測定機器を使わずとも、マイクロフォンの感度と位相を広周波数帯域にわたり簡単に測定できると考えられる。ここでは、提案方法の妥当性について、計算機シミュレーションにより既存の可逆校正法と比較し、その有効性を検討する。第 6 章は、総合的な結論である。

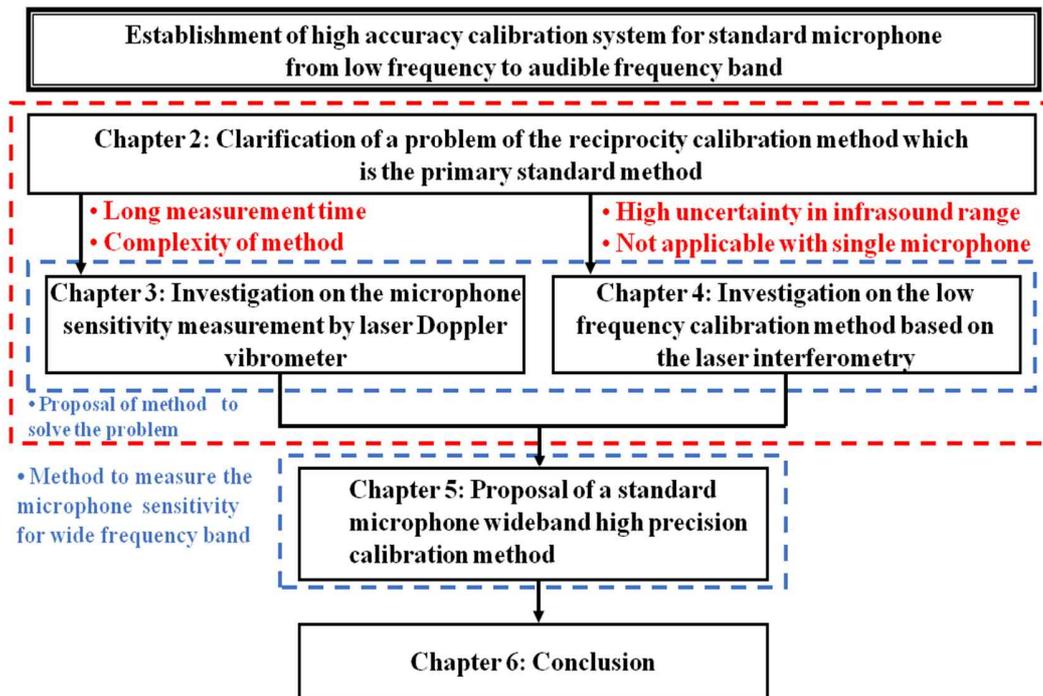


Fig. 1-8. The layout of the thesis

第2章 標準マイクロフォンの感度決定に関する従来の方式とその問題点

2.1 はじめに

序論で論じたように、現在、標準マイクロフォンの感度決定に最も使われている可逆校正法は3つの標準マイクロフォンを使用している。そのうち、2つのマイクロフォンに対して、異なる組み合わせであるカプラによって結合させ、1つは送信機とし、もう1つは收音受信機として使用している。即ち、送信機の役割として使用するマイクロフォンの入力電流に対する受信機側マイクロフォンの出力電圧の比（電気伝達インピーダンス）を測定する。

しかし、この方法は、3つのマイクロフォンを用いて測定し、理想的な圧力場の条件を満たすために必要なマイクロフォン間に、閉じたボリュームを作成する目的で使用されるマイクロフォンペアとカプラの組み合わせが多くなってしまふ。そのため、測定手続きが複雑で測定時間が長いという問題点がある。また、周波数が減少するにつれ、特に20 Hzより低い帯域の不確度のレベルが増加する問題点もある。

本章では、従来の標準マイクロフォンの感度校正である可逆校正法を概観し、この手法が持っている問題点及びそれが発生する原因について述べる。その上、本研究の考え方を論じ、既存の方法の精度向上と効率化について講じた対策を述べる。

まず、2.2節では、可逆校正法の理論的な背景を概観し、感度校正法を説明する。これを踏まえ、既存の可逆校正法の問題点を述べた後、本研究に導入する概念を論じ本章の位置付けを行う。

2.3節では、既存の可逆校正法で求めている音響伝達関数の代わりに、音響系の伝達関数を求める手法として広く用いられている時間引き延ばしパルスを導入し、全周波数帯域の測定を一気に行う手法について検討する。

最後に2.4節は、本章のまとめとする。

2.2 可逆校正法による標準マイクロフォンの感度決定方法

2.2.1 可逆校正法の理論的背景

序論で論じたように、マイクロフォンの音圧感度の絶対校正では、Fig. 2-1のように、3つのマイクロフォンを用いて測定を行い、そのうち2つのマイクロフォンをカプラ(結合器)で結合した後、一つは送信機、他の一つは受信機として使用している。一つの送信側マイクロフォンに電流を入力し、片方のマイクロフォンの出力電圧を測定し、結合器内の音響伝達インピーダンスを計ることで、マイクロフォンの感度を求める [18].

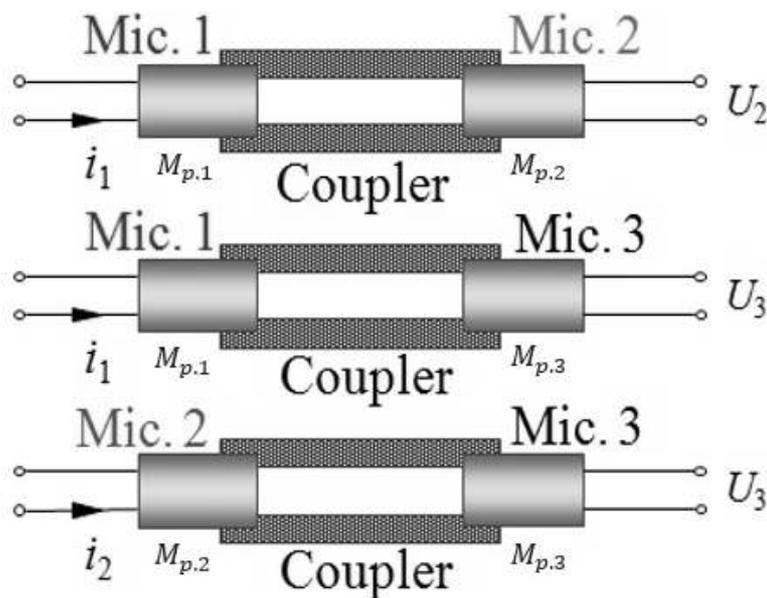


Fig. 2-1. Schematic configuration of the microphones and coupler for the reciprocity calibration

この図で、

i_n : 送信機マイクロフォンに供給される電流

U_n : 受信マイクロフォンの i_1 によって誘導された開回路電圧の出力

$M_{p,n}$: n^{th} マイクロフォンの圧力感度

を表している。

図に示したように、3つのマイクロフォンのうち2つのマイクロフォンをカプラの両端に装着し、一つを送信、他を受信にして、次式のように電気伝達インピーダンス (electrical transfer impedance) を測定する [18].

$$Z_{e,12} = U_2 / i_1 \quad (2-1)$$

ここで、 i_1 は入力電流、 U_2 は出力電圧である。測定された電気伝達インピーダンスとマイクロフォンの感度 $M_{p,n}$ は、次のような関係を持つ。

$$M_{p,1} M_{p,2} = \frac{1}{Z_{a,12}} Z_{e,12} \quad (2-2)$$

$Z_{a,12}$ は両マイクロフォン間の音響伝達インピーダンスであり、次のように求められる。

$$\frac{1}{Z_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,v}} + \frac{1}{Z_{a,1}} + \frac{1}{Z_{a,2}} = j\omega \left(\frac{V}{\kappa P_s} + \frac{V_{e,1}}{\kappa_r P_{s,r}} + \frac{V_{e,2}}{\kappa_r P_{s,r}} \right) \quad (2-3)$$

式 2-3 の $Z_{a,v}$ は、カプラ内での音響伝達インピーダンス、 $Z_{a,1}$ と $Z_{a,2}$ は、各マイクロフォンの前面体積 (frontal cavity volume) による音響伝達インピーダンスを意味する。また、 κ は測定条件での比熱比、 P_s は大気圧、 V はカプラの内積、 $V_{e,1}$ と $V_{e,2}$ は各マイクロフォンの前面の等価体積、 $P_{s,r}$ と κ_r は基準条件での大気圧や比熱比である。

上の測定過程を3つのマイクロフォンの全ての組み合わせに対し交互で測定し、電気伝達インピーダンスと音響伝達インピーダンスが求めれば、次式を用い感度を得ることができる。

$$|M_{p,1}| = \left[\left| \frac{Z_{e,12} Z_{e,31}}{Z_{e,23}} \right| \left| \frac{Z_{a,23}}{Z_{a,12} Z_{a,31}} \right| \right] \quad (2-4)$$

この関係式は、カプラの寸法が波長よりも十分に小さいと仮定しているため、高周波範囲にマイクロフォン振動板のような直径を有する円筒形カプラ内部の音響伝達インピーダンスは、伝送線路理論に基づいて次のように推定することができる。

$$\frac{1}{Z'_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,0}} \left[\left(\frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \cosh \gamma l_0 + \left(1 + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \sinh \gamma l_0 \right] \quad (2-5)$$

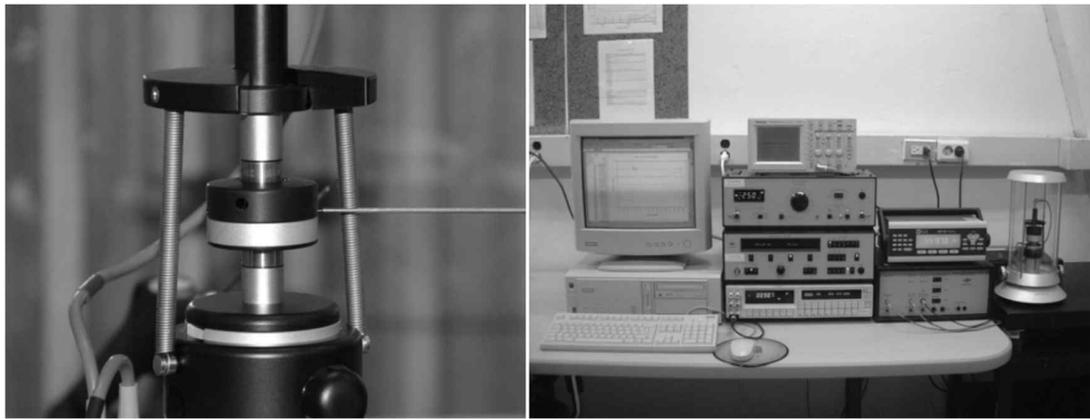
ここで、 $Z_{a,0}$ は平面波カプラの音響インピーダンスであり、 l_0 はカプラの長さ、 γ は複素伝搬係数である。また、熱伝導および毛細管補正の考慮も必要となる。したがって、マイクロフォン感度の最終式は、次式のように与えられる。

$$|M_{p,1}| = \left[\frac{Z_{e,12} Z_{e,31}}{Z_{e,23}} \left\| \frac{Z''_{a,23}}{Z''_{a,12} Z''_{a,31}} \right\| \frac{\Delta_{C,12} \Delta_{C,31}}{\Delta_{C,23}} \right]^{1/2} \quad (2-6)$$

ここで $Z''_{a,xy}$ は、音響伝達インピーダンス、 $\Delta_{C,xy}$ は毛細管の補正係数である。さらに、高周波の範囲では放射状波動を無視できない、本論文では、提案する方法の妥当性を検証するために、可逆校正による結果を参考値として使用していく。

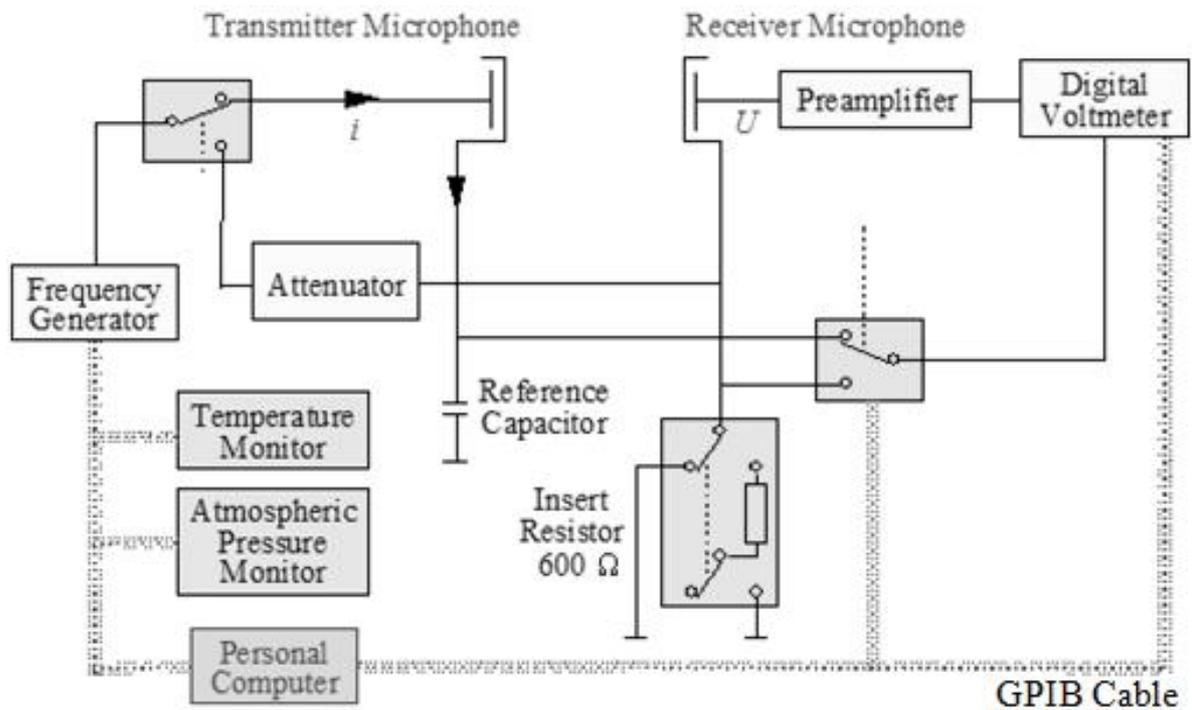
2.2.2 感度校正方法

可逆校正法でマイクロフォンを校正するためのシステムとブロック図を、Fig. 2-2 に示す。この図で(a)は、カプラによってマイクロフォンを結合した装置を、図(b)は、測定システムで使用する計測器らを、図(c)はシステムブロック図を表して示す。この装置は、可逆校正システムの雑音を除去するための帯域通過フィルタ (B&K1617)、受信マイクロフォン出力端子の電圧を測定するための電圧計 (Wavetek1281)、および各種制御機能と挿入電圧法 (insert voltage technique) による開回路電圧 (open circuit voltage) を測定するための可逆校正装置 (B&K5998) で構成されている。これらはすべて GPIB (general purpose interface bus) に接続され、パーソナルコンピュータを利用して順番に測定を行う。また、測定された資料を収集して感度の計算と補正に必要な計算を自動的に処理するようになっている。



(a)

(b)



(c)

Fig. 2-2. Example of a microphone reciprocity calibration system (B&K9699): (a) photograph of the entire measurement system, (b) close-up view of the microphone part and (c) schematic block diagram of the measurement system

音響分野で国際標準機関同士間の同等性を確認するため，国際比較は基本的に可逆校正法を採用し，1999年からスタートして，CCAUV.A-K1から5回進行されて行われた．CCAUV.A-K1は1インチマイクロフォンに対して63 Hz～8 kHz範囲で実行されており，Fig. 2-3は最終算出された基準値に対し，各機関別測定結果の差を比較した結果を示している．また，Fig. 2-4は主な周波数(250 Hz, 1 kHz)での不確度を示している．この結

果を見ると、各機関別基準値対比偏差はほとんど 0.05 dB 以内の水準となっており、拡張不確度も 0.05 dB 以内の比較的低い水準を示していることが分かる。

しかし、2 ~ 250 Hz 帯域で遂行された CCAUV. A-K2 では、このような偏差と不確度が大きく増加した。Fig. 2-5 は基準値に対する機関別偏差、Fig. 2-6 は 10 Hz での機関別拡張不確度を示している。結果から見れば、基本的に低周波数の帯域へ行くほど偏差が急激に増えており、不確度も 2 倍以上増加していることが分かる。

このように、従来の可逆較正方法は、マイクロフォンの共振周波数以下の可聴周波数帯域では非常に正確で安定的な結果が得られるが、低周波数の帯域に下がる場合、限界があることが分かる。

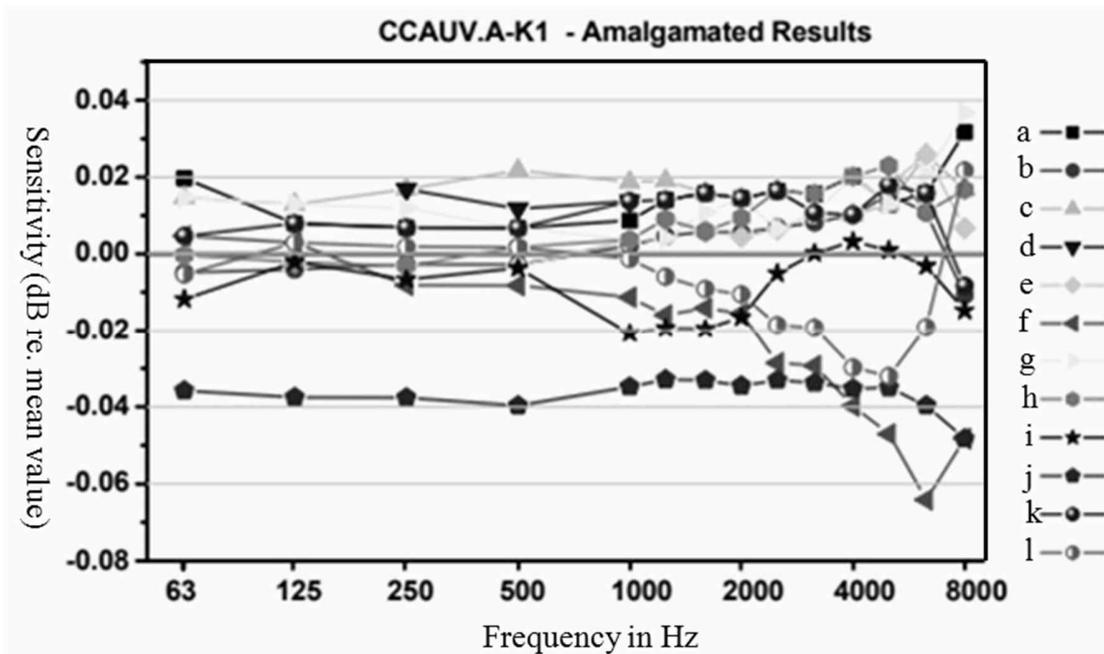


Fig. 2-3. Deviation of sensitivity measurement results from different participating NMIs (CCAUV.A-K1, country names omitted) [25]

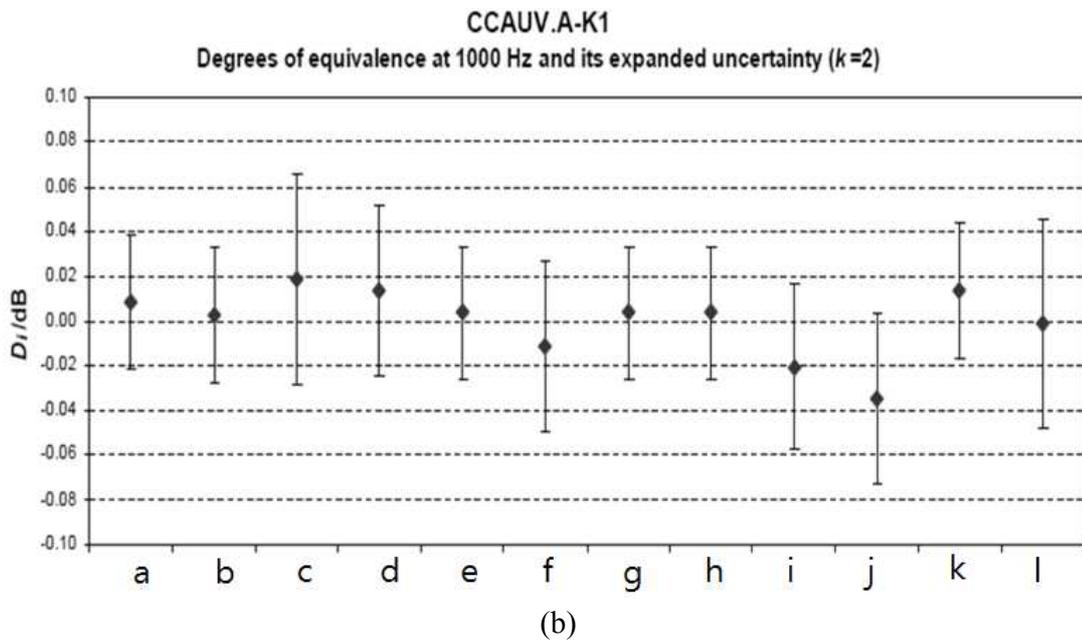
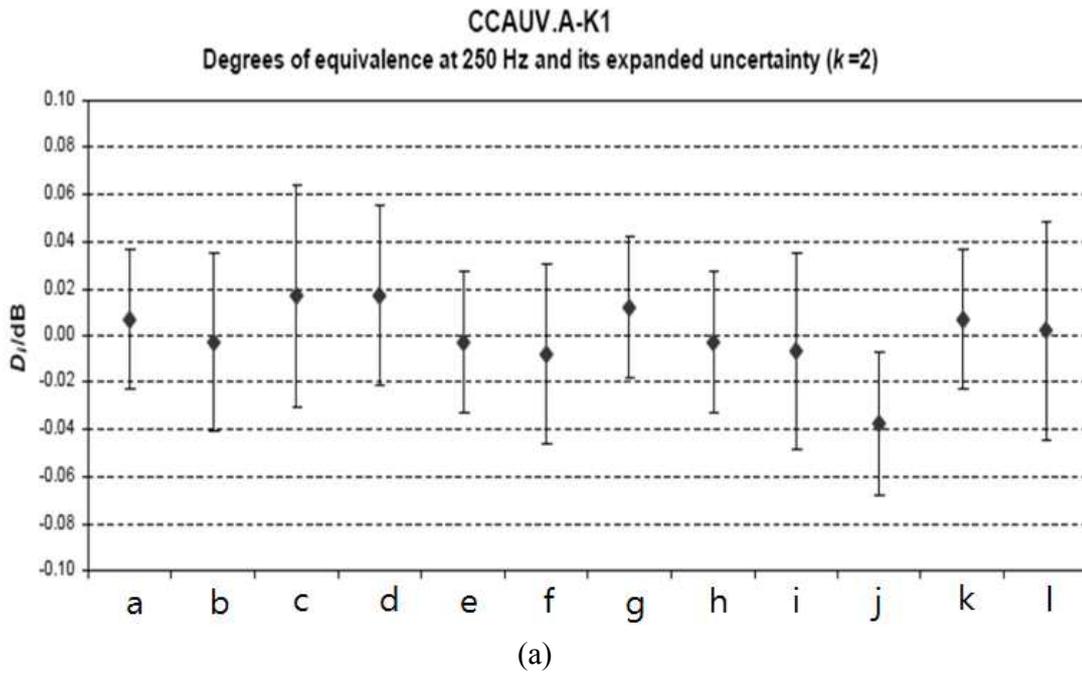


Fig. 2-4. Measurement uncertainties from different participating NMIs at two frequencies (CCAUV.A-K1, country names omitted): (a) 250 Hz and (b) 1 kHz [25]

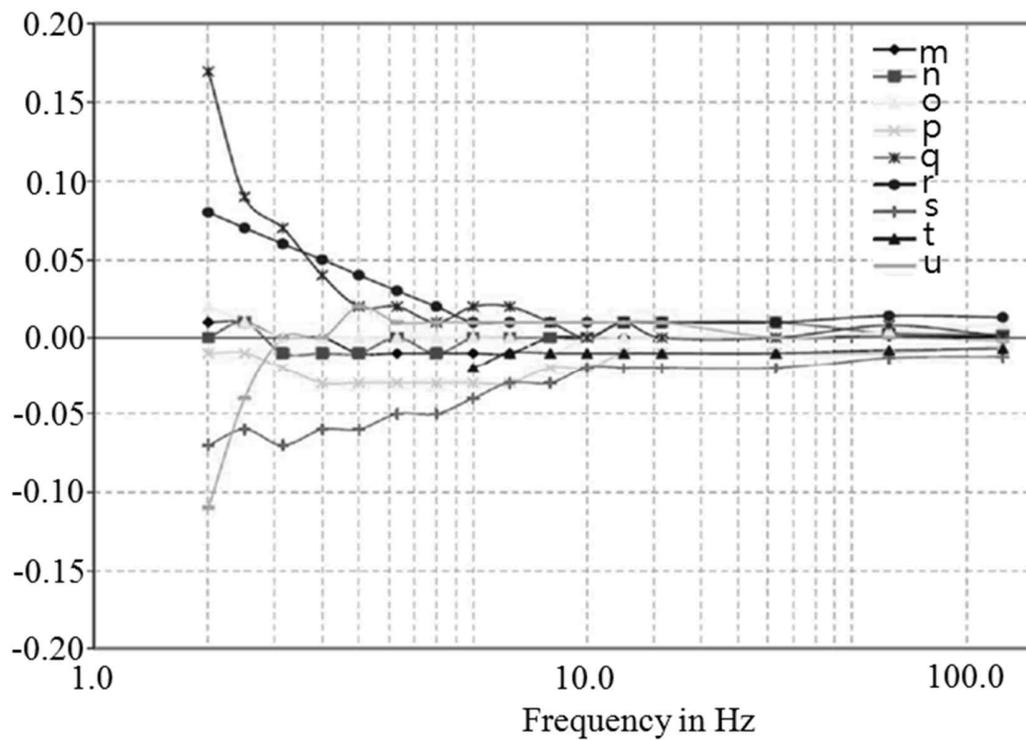


Fig. 2-5. Measurement uncertainties from different participating NMIs (CCAUV.A-K2, country names omitted) [26]

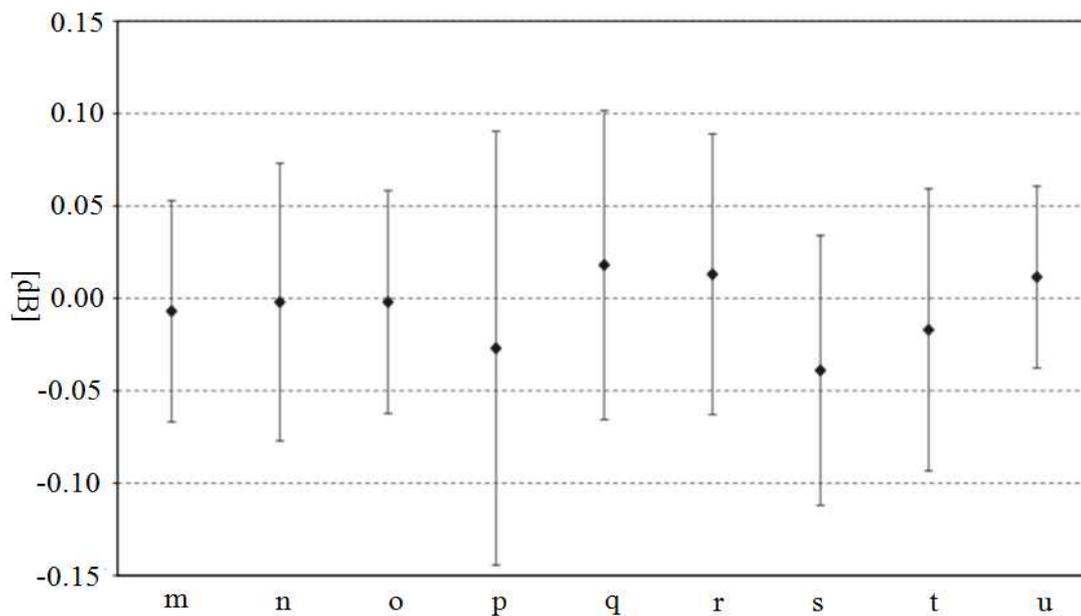


Fig. 2-6. Measurement uncertainties from different participating NMIs (10Hz, CAUV.A-K2, country names omitted) [26]

2.2.3 従来の可逆校正法の問題点

前節で述べたように、既存の可逆校正方法は高い精度を持つ感度校正であり、音響測定のための国際基準にて使用されている。この方法は、LSマイクロフォンの感度を測定する方法として、相反性に基づいて0.1 dB以下の不確度水準の高い精度を実現することができた[15]。可逆校正法は、3つの標準マイクロフォンを用い、そのうちの2つを異なる組み合わせであるカプラによって結合し、1つは音源、他の1つは収音受信機として使用し、送信機の入力電流に対する受信機の実出力電圧の比である電気伝達インピーダンスを測定する方法である。音響伝達インピーダンスが求められた上、3つの組み合わせで測定を繰り返すことでマイクロフォンの感度を求めている。

この方法は、3つのマイクロフォンを用いて測定しているため、まず、以下に示す一番目の問題点が生じる。

(1) 単一のマイクロフォンで測定を行うことが不可能である。

また、理想的な圧力場の条件を満たすため、マイクロフォンの間に閉空間を形成するために使用されるマイクロフォンペアとカプラの組み合わせが多数必要であるため、二番目の問題点が発生する。

(2) 手続きが複雑である。

また、測定の際に、入力信号に1/3オクターブバンドごとに何回繰り返して測定し、得られた値の平均を取って使用するとともに3組を反復するため、三番目の問題点が生じてしまう。

(3) 測定時間が長い。

また、前節で述べたよう、測定するとき周波数が低くなるにつれ、不確度が増加してしまう。その原因は、マイクロフォン自体が音源の役割を担うためであり、更に、低周波数での信号対雑音比が減少するため、四つ目の問題点が生じる。

(4) 低周波数、特に20 Hz以下の測定が不可能になる。

以上のように、可逆校正法は測定に多くの時間と細心の注意を要するため、必要に応じこの方法を適用して感度を決定することは容易ではない。具体的には、可逆校正法を用いて校正したときの測定時間は1回で約20時間近くかかるうえ、2～10 Hz付近での信号対雑音比は約40 dB程度で、1 kHz付近における85～90 dBより大幅に小さい。20 Hz以下の精度低下は測定の大い壁となっており、一部の先進国や会社のシステムに測定を依存する原因となっている。また、音響センサの適用周波数帯域が可聴領域から非可聴領域に拡大しているが、従来の方法は20 Hz以下に適用周波数帯域を拡大するのが難しい現状である。

2.2.4 本研究の基本的な考え方

そこで、本研究では、特に前で論じた 4 つの問題に着目し、それらを改善する手法を研究する。

(A) 可逆校正法の伝達関数を用いた定式化による測定時間の短縮

既存の可逆校正法が持っている問題点の中、(3)測定時間が長いという問題点が発生する原因は、音響伝達関数を求めるときに 1/3 オクターブバンドごとに繰り返し測定する必要があるためであった。音響系の伝達関数を求める手法として、時間引き延ばしパルスという広く用いられている方法がある [29, 30]。この方法は、全周波数帯域の測定を一気に行うことにより時間短縮が図られ、音響伝達関数を迅速に測定できると考えられる。そこで、この信号を可逆校正法の伝達関数を測定するときに用いることで測定時間が短縮できると判断し、その可能性を検討した。

(B) レーザドップラ振動計の導入

次に、可逆校正法が持っている問題点の中、特に、(1)単一のマイクロフォンでの測定が不可能、(2)手続きが複雑である、という 2 点を克服するため、レーザドップラ振動計 [31] を導入することを検討する。

レーザドップラ振動計は自由音場と拡散音場の感度の補正係数を得るために適用されたものであり、マイクロフォン感度の正確な数値を得るためのものではない。例えば、振動膜の振動測定による感度の測定が可能であれば、一つのマイクロフォンにてマイクロフォンの感度を決定することも可能となり、測定手続きの簡素化につながる。更に、表面振動の信号対雑音比がマイクロフォンの振動膜の振動から誘導された音響の信号対雑音比よりもかなり高いため、カプラの使用も必要としないものと予想できる。

以上を踏まえ、本研究では表面振動を測定して標準マイクロフォンの感度を決定する過程を提供し、振動膜中心の表面速度と振動膜表面振動による音響体積速度との関係を検討する。

(C) レーザ干渉計の導入

最後に、先述した既存方法の問題点の中、特に、(4)低周波数帯域での低い信号対雑音比問題を解決するために、レーザ干渉計 [23, 24, 25] を用いる手法について検討する。また、この手法を拡張し、可聴周波数帯域だけではなく、低周波数から高周波数までの広範囲にわたり標準マイクロフォンの高精度校正が可能なシステムについて検討する。レーザ干渉計システムの多くは、一般的にフリンジの計算方法に基づいてホモダイン干渉計を使用することで、振動や衝撃コンバータの 1 次補正に適用されている。しかし、この手法は運動の方向が取得できないため、補正されている装置の位相応答を決定・算

出ることができない。これらの欠点を明らかにするため、正弦波近似法基盤レーザ干渉計を用いた低周波数領域のマイクロフォンの感度を求める方法について検討する。

2.3 伝達関数測定による可逆校正法の効率化

2.2 節で論じたように、標準マイクロフォンの感度決定に使われている可逆校正法は、三つのマイクロフォンを用い、2 つの異なる組み合わせであるカプラによって結合させ、音響伝達関数を測定した後、これを用いてマイクロフォンの感度を導いている。このとき、入力信号に 1/3 オクターブバンドごとの周波数をマイクロフォンに入力させ、出力される信号の平均値を測定している。このような方法は外部雑音に頑健であるが、数多くの周波数に対し長時間にわたる反復測定が必要となる。従って、精密な測定が可能で測定時間を短縮する方法について検討することが必要になる。

そこで、全周波数帯域の測定をいっぺんに行うことにより時間短縮をはかるため、伝達関数の考え方を導入する。そのため、インパルス応答を迅速かつ高精度に測定できる時間引き延ばしパルス (Time Stretched Pulse, 以下 TSP と呼ぶ。) を用い、かつ、可逆校正法の伝達関数を用いて定式化する [30]。

2.3.1 伝達関数を用いた可逆校正法の定式化

従来の可逆校正法は 1/3 オクターブバンドごとに測定するため、音響伝達関数を求めるとき、測定時間が長くなる欠点があった。測定する広帯域をいっぺんに測れば、音響伝達関数を迅速に測定できると期待できる。そこで本節では、音響伝達関数を用いた可逆校正法の定式化を行う。

可逆校正法では標準マイクロフォンの感度を決定するとき、3 つのマイクロフォンの全ての組み合わせに対し交互に測定し、電気伝達インピーダンスと音響伝達インピーダンスを求めれば、次式を用い感度を得ることができる [18]。

$$|M_{p,1}(\omega)| = \left[\left| \frac{Z_{e,12}(\omega)Z_{e,31}(\omega)}{Z_{e,23}(\omega)} \right| \left| \frac{Z_{a,23}(\omega)}{Z_{a,12}(\omega)Z_{a,31}(\omega)} \right| \right] \quad (2-7)$$

この関係式は、熱伝導および毛細管補正を推定の過程で考慮すべきである。従って、マイクロフォン感度の最終式は、次式のように与えられる。

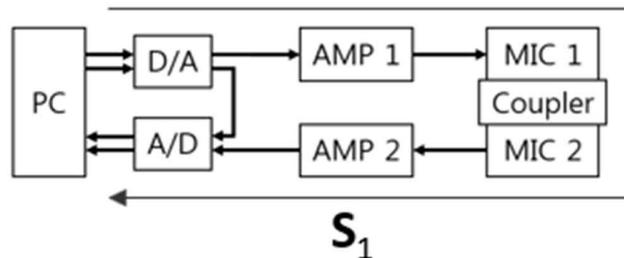
$$|M_{p,1}(\omega)| = \left[\left| \frac{Z_{e,12}(\omega)Z_{e,31}(\omega)}{Z_{e,23}(\omega)} \right| \left| \frac{Z_{a,23}''(\omega)}{Z_{a,12}''(\omega)Z_{a,31}''(\omega)} \right| \left| \frac{\Delta_{C,12}\Delta_{C,31}}{\Delta_{C,23}} \right| \right]^{1/2} \quad (2-8)$$

ここで $Z_{a,xy}''(\omega)$ は音響伝達インピーダンス， $\Delta_{C,xy}$ は毛細管の補正係数である。

従来法では，式(2-7)の伝達関数を測定するために，1/3 オクターブバンドの純音を用いて測定する周波数ビンの数に伴って測定時間が長くなる問題点があった．その一方，TSP を用いることで全周波数帯域の音響伝達関数を一気に測定することが可能である．

以下に，TSP 信号を用いて式(2-8)の伝達関数を測定する手順を述べる．最初に，Fig. 2-7 のように測定システムを構築する．PC では D/A から TSP 信号を再生し，また，マイクロフォンペアを通じて戻ってくる信号を録音する．録音された信号に逆 TSP 信号を畳み込むと経路のインパルス応答となり，また，インパルス応答を周波数領域に変換すると伝達関数 (S_1) が得られる． S_1 には，式(2-8)のマイクロフォンペアの特性以外にも D/A, A/D, アンプ 1, 2 の特性が含まれている．そこで，以下の Fig. 2-7 のように D/A と A/D のみを通じた経路の伝達関数 (S_2) を測定し，式(2-8)のように S_1 から S_2 を逆フィルタリングすることで取りぬけ処理を行う．一方，現在の実験装置ではアンプ 1 と 2 をつなげることができないため，それらの特性は取りぬける方法がない．そして，次式のように本研究で用いたアンプがほぼフラットな特性を持つものであるため，アンプ 1, 2 の特性が内在する影響は無視できると考えられる．

$$M_1 C_1 M_2 \approx S_1 - S_2 \quad (2-9)$$



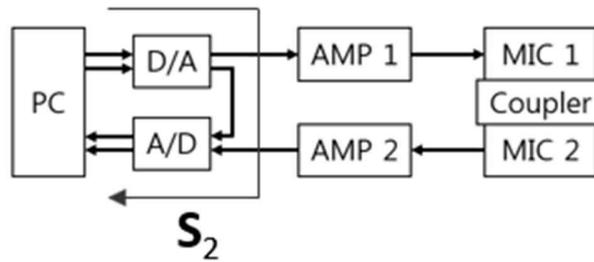


Fig. 2-7. Measurement of transfer functions

2.3.2 時間引き延ばしパルスの利用と設計

音響系が線形時不変であるならば，その系への任意の入力信号に対する応答は，入力信号と系のインパルス応答 (Impulse Response) との畳み込み演算によって計算することができる．しかし，音響系の伝達関数は一般に，ダイナミックレンジが広くインパルス応答が長いという特徴をもっている．また，音響系の伝達関数を測定する場にはかなりの暗騒音が存在することが多い．このため，持続時間の短い矩形パルスのようなクレストファクタの大きな信号を用いて伝達関数の測定を行うと，伝達関数の谷の部分で十分な信号対雑音比をとるためには同期加算回数が非現実的な大きさになってしまう．短時間に安定したインパルス応答を測定する方法として，Aoshima により TSP が提案されている [30]．これはインパルスの位相を周波数の 2 乗に比例して変化させることにより，時間軸を引き伸ばした信号である．

ある周波数までのスイープを行ったアナログのチャープ信号には，周波数変調の側波帯のために周波数を超える周波数成分を含むことになる．よってしつぽとくちばしは，周波数 0 と $f_s/2$ の外側に広がった側波帯が折り返され，この折り返しも含めて周波数スペクトルを平坦にしたことによるものと考えられる．できる限り側波帯を小さく抑えることにより，このようなしつぽやくちばしを小さくできると考えられる．これを踏まえ式 (2-10) を見ると， k の値にかかわらず $H(N/2)$ を常に実数と置いているため位相の不連続が生じていることが分かる．これは，チャープ信号を作るための変調波が不連続であることを意味する．このため，変調波は高い周波数成分を含むことになり， $f_s/2$ を超える部分に大きな側波帯が生じることになる．したがって， $H(N/2)$ を実数ではなく，自動的に実数になるよう k を設定すればよい．そこで，新しい整数のパラメータ m を導入し，

$$k(N/2)^2 = m\pi \quad (2-10)$$

にして置く．これにより前述のような不連続を取り除くことが可能となる．式(2-10)により k は

$$k = m\pi / (N/2)^2 \quad (2-11)$$

となる．この式(2-11)を式(2-10)に代入し，次式で定義される ATSP を提案した[30]．

$$\begin{aligned} H(n) &= a_0 \exp(j4m\pi n^2 / N^2) & (0 \leq n \leq N/2) \\ H(n) &= H^*(N-n) & (N/2+1 \leq n < N) \end{aligned} \quad (2-12)$$

この式を逆離散フーリエ変換 (inverse discrete fast Fourier transformation, IDFT) すれば，実際に時間関数の TSP 信号が得られる．上の式で m は TSP の幅を決める整数のパラメータであり，この値が大きければ TSP の幅が広がる． $m=N/2$ のとき直流成分に対応する部分と $fs/2$ に対応する部分がちょうど重なるので，通常 m は $N/2$ より小さくとることになる．このような TSP は最適化 Aoshima's TSP (Aoshima's Time Stretched Pulse, OATSP) と呼ばれ，音響系のような長いインパルス応答を持つシステムの高精度計測に広く用いられている．

この OATSP をある測定系に加え，その応答を次式で定義される $H(n)$ の逆関数 $H^{-1}(n)$ を IDFT したものと畳み込めば，時間引き伸ばしが逆に圧縮されて被測定系のインパルス応答が求められる．OATSP の逆フィルタ $H^{-1}(n)$ は，次式で与えられる．

$$\begin{aligned} H^{-1}(n) &= a_0 \exp(-j4m\pi n^2 / N^2) & (0 \leq n \leq N/2) \\ H^{-1}(n) &= 1/a_0 * H^*(N-n) & (N/2+1 \leq n < N) \end{aligned} \quad (2-13)$$

上記の実験準備から TSP で可逆校正用マイクロフォンを駆動させ、その応答と時間軸を反転させ、駆動信号との回線によってインパルス応答を求めればよい。

2.3.3 時間引き延ばしパルスを用いた可逆校正法による測定

OATSP 信号を用い、可逆校正用マイクロフォンの音響伝達関数を測定する実験を行う。実験のため、構成された測定システムを Fig. 2-8 に示す。図中の PC は Microsoft Window パーソナルコンピュータを登載した実験コントロール用 PC を、D/A と A/D は M-AUDIO ProFire 610 を利用する。また、実測実験に使用する AMP 1, AMP 2, MIC 1, MIC 2, カプラは、KRISS(韓国標準研究院)にある装置を利用した。AMP 1 は MIC 1 に入力される信号を増幅するアンプであり、AMP 2 は MIC 2 により出力される信号を増幅するものである。また、MIC 1 と MIC 2 はカプラで結合されている。OATSP 信号の再生及び録音信号処理は MATLAB を利用し、サンプリング周波数は 48 kHz である。

測定実験の手順は以下の通りである。まず、PC 上で D / A のチャンネル 1 に OATSP 信号を出力する。この信号は、AMP 1 を介して増幅され、カプラに接続されたマイクロフォンを経て AMP 2 で再増幅された後、A / D を介して PC に入力される。この過程を経て得られた OATSP 信号には測定システムの音響伝達関数特性が含まれており、この信号に逆 OATSP 信号を畳み込み演算することにより測定システムのインパルス応答が得られる。測定された信号の時間同期を合わせるため、D / A と A / D のチャンネル 2 を直接接続させ、OATSP 信号をチャンネル 1 だけでなくチャンネル 2 で同時に出力して測定する。

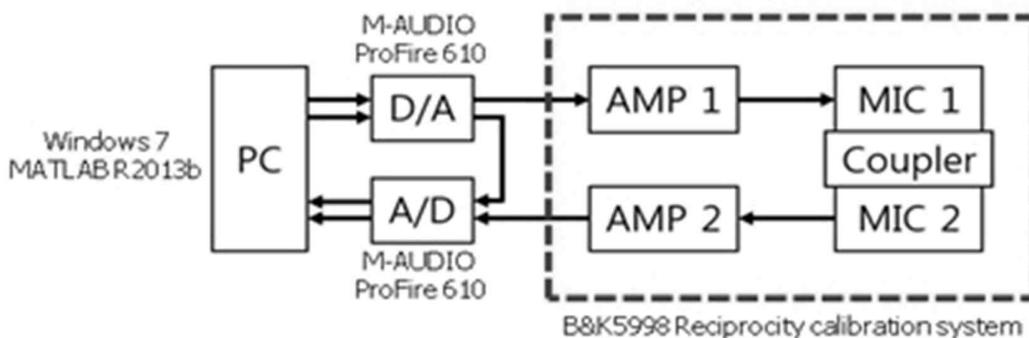


Fig. 2-8. Block diagram of the transfer function measurement system

2.3.4 実験および考察

実験は三つの方法で行っている。

実験 1

ここでは、同期加算回数による周波数振幅特性の影響を調べる。この実験条件と実験方法は次の通りである。

実験条件

- OATSP 信号の長さを 2^{16} (=65, 536) に固定する。
- 同期加算回数を 200 回まで行う。
- サンプル周波数は 48 kHz に設定する。

実験方法

- OATSP 信号を 202 回再生し、最初と最後を除く 200 回分のデータを収録する。
- 200 回分のデータを用いて同期加算回数を変えその結果を比べる。
- データの最初から 100 回分までのデータで計算した結果と、200 回分までのデータ全部で計算した結果を比べる。

実験 1 の実験結果を、Fig. 2-9 に表す。

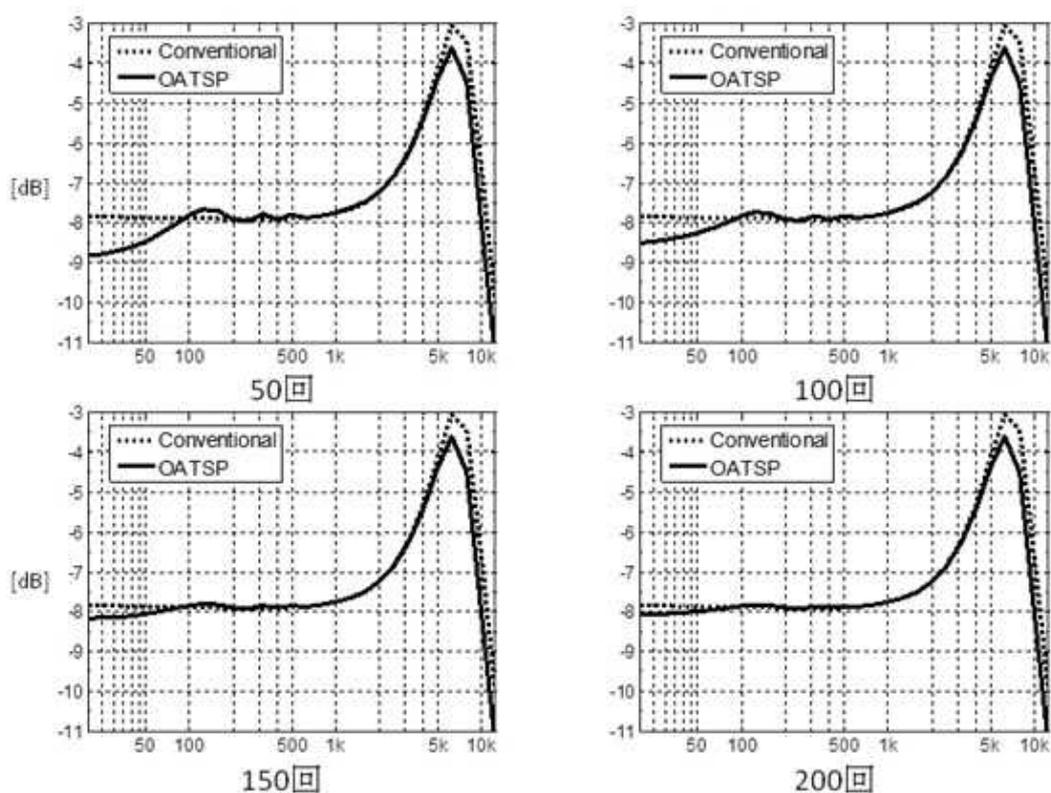


Fig. 2-9. Comparison of frequency amplitude characteristics depending on the number of synchronous additions.

Fig. 2-9 の横軸は周波数，縦軸は相対的な振幅特性を示す．比較のため，両方の方法による 1 kHz の振幅値が等しくなるように，結果を全周波数帯域で同じように増加した．点線が従来の方法，実線が OATSP による結果を表している．この図を見ると，同期加算回数を増加することにより，低周波数特性の差がだんだん小さくなるのが分かる．即ち，同期加算回数を増やすことで，より正確に低周波数領域の特性を測定することができることを分かる．ただし，5 kHz 以上で見られる周波数特性の大きな差が生じた理由は不明である．

Fig. 2-9 の従来法の結果と，OATSP 法の結果との引き算を Fig. 2-10 に示す．また，同期加算回数を増やしながら伝達関数を求めた結果を Fig. 2-11 に示す．

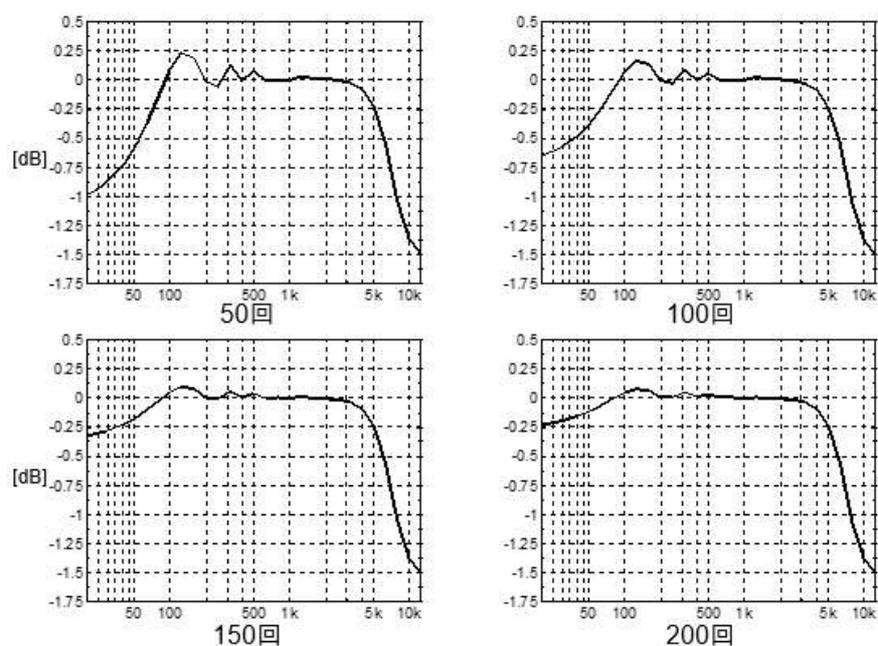


Fig. 2-10. Difference between the results of the conventional method and the OATSP method. (Conventional-OATSP)

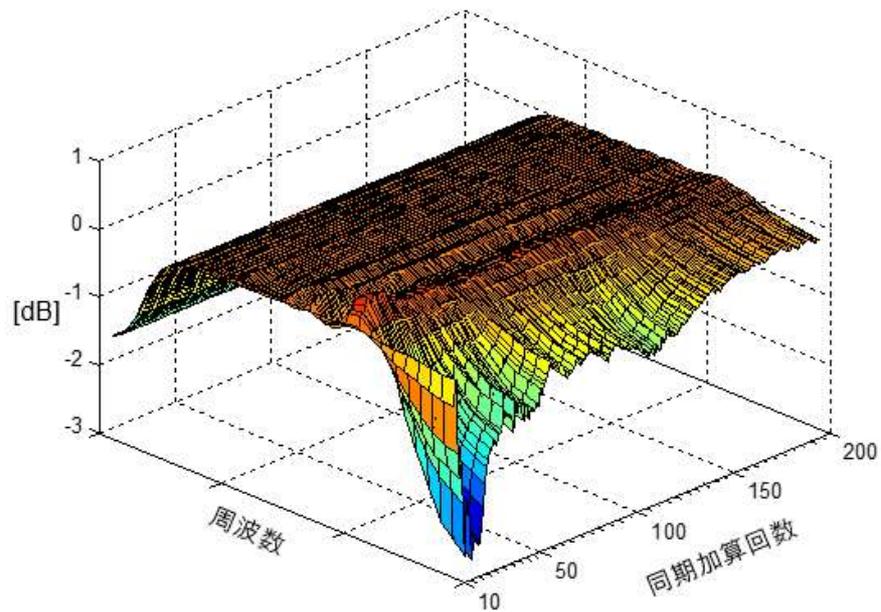


Fig. 2-11. Difference between the results of the conventional method and the OATSP method

実験 2

実験 2 では、OATSP 信号の長さによる影響を調べることを目的とする。実験条件と実験方法は、次の通りである。

実験条件

- OATSP 信号の長さを 2^{17} (=131, 072), 2^{18} (=262, 144) に変えて測定を行う。
- 同期加算回数を 100 回まで行う。
- サンプリング周波数は実験 1 と同様である。

実験方法

- 実験 1 と同様

実験 2 の結果を Fig. 2-12. に示す。

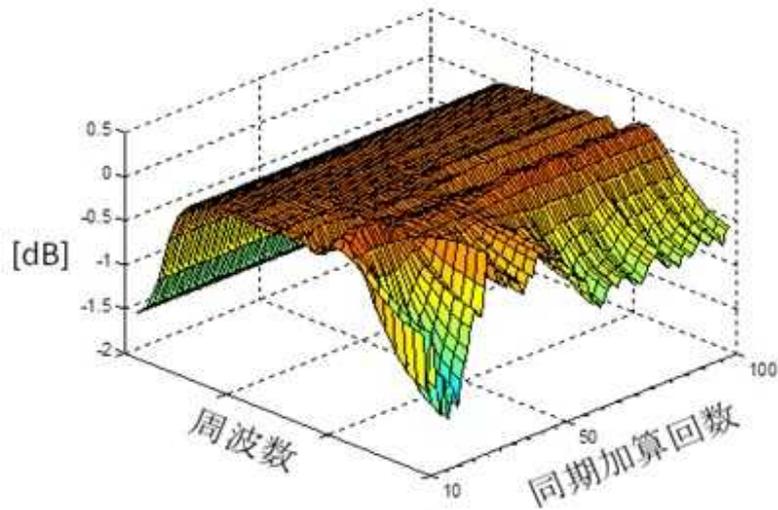


Fig.2-12. Difference between Conventional method and OATSP, when the length of OATSP signal is 2^{17} (= 131,072).

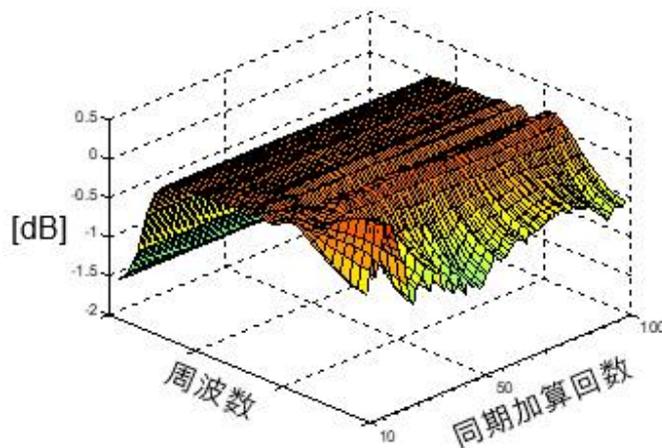


Fig. 2-13. Difference between Conventional method and OATSP, when the length of OATSP signal is 2^{18} (= 262,072).

この図で、横軸は同期加算回数を、縦軸は相対的な振幅特性の差を示している。この図をみると、実験1で同期加算回数による明らかな改善は回数が約150回以上の場合であったが、実験1の結果のような明らかな改善は見られていない。また、実験1では同期加算回数を200回まで増やしたが、実験装置のメモリ不足のため、実験2では100回以下にした。そのため、実験2では明らかな改善を見るための最大同期加算回数が足りなかった可能性がある。

実験 3

実験 3 では、マイクロフォンペアの伝達関数の測定を OATSP 信号を用いて行う際に、サンプリング周波数の変化による低周波数領域における測定特性の改善を確かめる。その実験条件と実験方法は次の通りである。

実験条件

-OATSP 信号の長さは 2^{16} (=65, 536) に固定する。

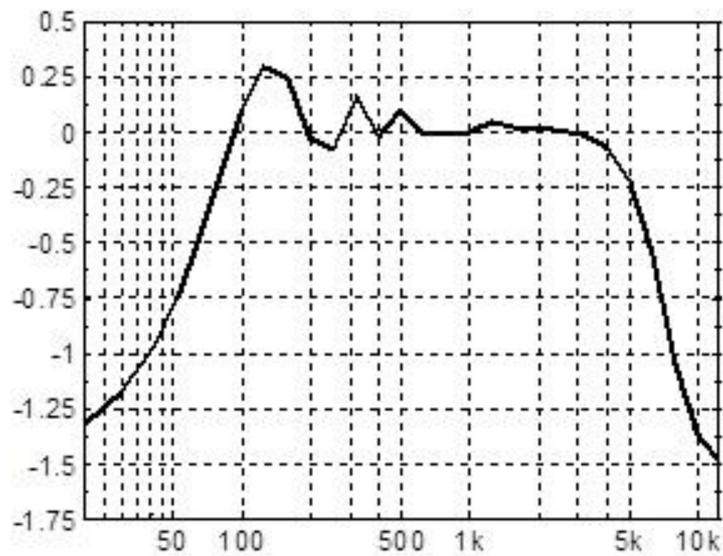
-同期加算回数を 30 回に固定する。

-サンプリング周波数を 48 kHz, 16 kHz, 8 kHz に変えて測定を行う。

実験方法

実験 1 と同様である。

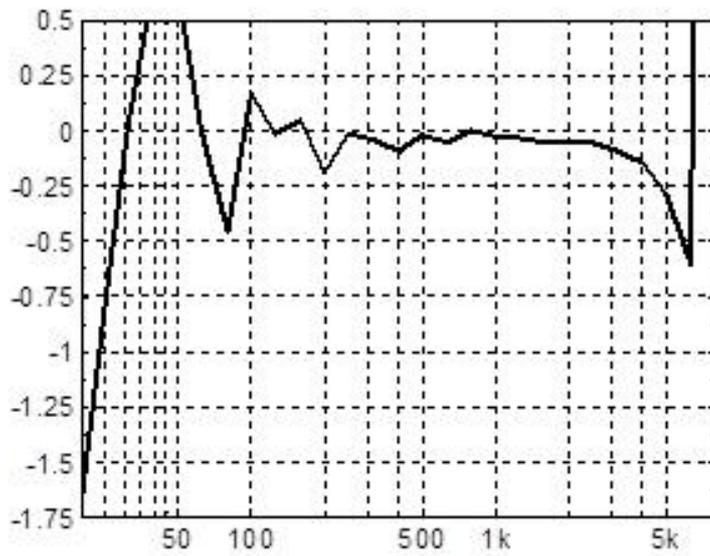
実験 3 の実験結果を Fig. 2-14 に示す。



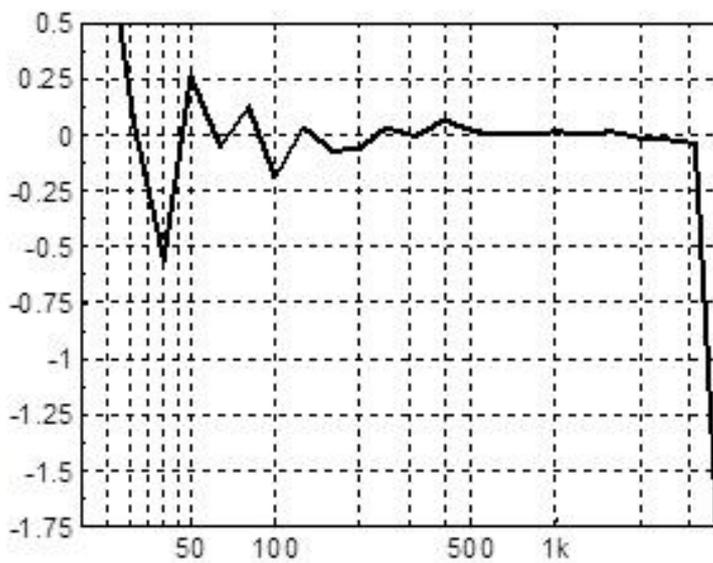
(a) Sampling frequency 48 kHz

(次ページに続く)

(前ページから続く)



(b) Sampling frequency 16 kHz.



(c) Sampling frequency 8 kHz.

Fig. 2-14. Deviation (OATSP method-existing method) from the existing method for different sampling frequencies: (a) 48 kHz, (b) 16 kHz and (c) 8 kHz

この図で、横軸は周波数を、縦軸は従来方式と OATSP の差を表す。この図を見ると、サンプリング周波数の変化による低周波数領域における測定特性の改善は見られない。また、実験 2 の考察で述べたように、低周波数領域における測定特性の改善を見るための最大同期加算回数が足りなかった可能性がある。ここで同期加算回数を 30 回に固定した理由は、サンプリング周波数を小さくするほど測定時間が長くなるためであった。

従来法では、純音を用いて周波数特性を測定するため、測定する周波数ビンの数に伴って測定時間が長くなる。一方、時間引き伸ばしパルスを用いることで全周波数帯域の特性を一気に測定することが可能である。しかし、本節で行った予備実験の結果から、低周波数領域における精度の劣化問題や最適化のための問題等、多様な検討課題があると考えられる。

2.4 まとめ

本章では、まず、既存の可逆校正法を概観し、その方法が持っている問題について明らかにした。その上、既存の可逆校正方法が持っている大きな四つの問題点、(1) 単一のマイクロフォンで測定することが不可能である、(2) 手続きが複雑である、(3) 測定時間が長い、(4) 低周波数領域、特に 20 Hz 以下の測定が不可能である、等のことについて述べた。

これらの問題点を改選する手法として、可逆校正法を伝達関数の形で定式化し、広い周波数帯域の測定をまとめて行うことにより迅速に測定し、測定時間が長いという問題点を解決できると考えた。また、単一のマイクロフォンで測定不可能である問題点、及び、測定手続きが複雑である問題点を克服するために、レーザドップラ振動計を導入することを検討した。更に、問題点の中、特に低周波数帯域での低信号対雑音比の問題点を解決するために、レーザ干渉計を用いる手法について検討した。最後に、この手法を拡張し、可聴周波数帯域だけではなく低周波数から高周波数までの広範囲にわたり標準マイクロフォンの高精度校正が可能な方法について検討した。

本章ではさらに、可逆校正法の伝達関数を用いた定式化に基づく測定を、時間引き伸ばしパルスを利用して可逆校正法の音響伝達関数を求めることにより、測定時間の短縮を図るための実験を実施した。その結果、時間引き伸ばしパルスを用いて測定時間を大幅に短縮できることを確認した。また、同期加算回数を増加させることにより、低周波数特性の誤差が小さくなることが分かった。しかしながら、5 kHz 以上では既存方法との周波数特性の差が生じた。その改善策として、信号長を変化させて測定を行ったが、明らかな改善は見られなかった。即ち、サンプリング周波数の変化による低周波数領域における測定特性の改善は見られなかった。ここで行った予備実験の結果から、低周波数領域における精度の劣化問題や、最適化のための多様な検討課題が残されていると考えられる。

第 3 章 マイクロフォン振動膜の振動測定 によるマイクロフォン感度決定法の提案

3.1 はじめに

可逆校正法では、二つのマイクロフォンをカプラによって結合し、一つは送信機、他の一つは受信機として使用し、送信機の入力電流に対する受信機の出力開回路電圧の比である電気伝達インピーダンスを測定する。また、システムの音響伝達インピーダンスを求め、3つのマイクロフォンそれぞれの圧力感度を定める。しかしながら、第2章で記述したように、測定手続きと拡張性の面で幾つかの問題点がある。

そこで、本章では、従来の可逆校正法の問題点として取り上げる測定手続きが複雑で長時間を要する点と、マイクロフォン1個での測定が不可能である問題点を克服する方法として、マイクロフォン表面の振動膜測定に基づく測定法を提案する。マイクロフォンの振動膜は非常に薄くて繊細であるため、その振動を測定するためには非接触方法[32, 33]が有効と考えられる。そこでレーザドップラ振動計(Laser Doppler Vibrometer, LDV)を使用することが適切と考えた。

LDVについては、振動膜振動の測定を境界要素法の数値解析に基づいた方法に適用した先行事例がいくつか報告されている[34, 35, 36]。しかし、この方法はマイクロフォン感度の正確な値を得るためのものではない。振動膜の振動測定によるマイクロフォンの感度が測定できれば、一つのマイクロフォンで感度を決定することが可能となる。なお、表面振動の信号対雑音比がマイクロフォンの振動膜の振動から誘導された音響の信号対雑音比よりもかなり高いため、カプラを必要としないものと予想できる。

以上を踏まえ、3.2節では、マイクロフォン振動膜の振動と感度間の関係を理論的な解析を通して解明する。また、実際の標準マイクロフォンの振動膜の境界条件は、理想的な条件ではなく理論式の応答と完全には一致しないため、理論式で求められた数値と実システムでの偏差、および実測モデルの必要性についても検討する。

3.3節では、マイクロフォン振動膜の共振周波数と減衰係数を決定するため、レーザドップラ振動計を導入し、境界要素法の数値解析に基づいたハイブリッド方法に適用することについて検討する。また、測定システムを構成して実験を行い、従来の可逆校正法との結果と比較し、提案方法の妥当性を明らかにする。

3.4節では、感度を決定するための、振動膜中心の表面速度と振動膜表面振動による音響体積速度との関係を与えるモデル(体積速度平均モデル)について検討する。そのため、表面速度分布を測定し、経験的モデルとして構築する。また、提案方法と可逆校正

方法によって得られた結果とを比較することで、その有効性を確認する。3.5 節は、まとめである。

3.2 マイクロフォン振動膜の振動と感度間の関係

振動膜表面の振動測定からマイクロフォンの感度を決定するには、表面音圧と表面振動との関係を定義する必要がある。受信機の場合、振動膜を動かすための音源が必要であり、マイクロフォン振動膜に到達する音圧の正確な量を取得しなければならないが、それは簡単ではない。したがって、送信機としてマイクロフォンを使用することが好ましいと考えられる。さらに、供給された電気信号は比較的高い精度で測定することができる。振動膜の振動分布による体積速度は、マイクロフォンを送信機として用いた場合、入力電流によって発生する体積速度を次式のように求められる [37, 38, 39].

$$-\frac{q}{i} = M_p \frac{Z_a}{Z_a + Z_{rad}} \quad (3-1)$$

ここで、 q は振動膜振動による媒質の体積速度、 i はマイクロフォンへの入力電流である。 Z_a , Z_{rad} はそれぞれ音響インピーダンスと放射音響インピーダンスであり、次の式で求められる [40].

$$Z_a = -j \frac{\rho c}{\pi a_c^2} \tan kl_0 \quad (3-2a)$$

$$Z_r = \rho c \left(\frac{1}{4} (ka_c)^2 + 0.6ika_c \right) \pi a_c^2 \quad (3-2b)$$

上式で、 ρ は媒質の密度、 c は音速、 a_c は振動膜の半径、 k は波数、 l_0 はマイクロフォンの前面の深さである。標準マイクロフォンの振動膜は、均等に引っ張られた膜と仮定することができる。その場合、表面の振動速度の分布は次式のような理論式で表現される [41, 42].

$$u_t(t) = u_0 \left(1 - \frac{J_0(k_t r)}{J_0(k_t a_t)} \right) \quad (3-3a)$$

$$k_t a_t = 2.405 \frac{f}{f_{res}} \quad (3-3b)$$

ここで、 u_0 は振幅、 J_0 は第1種ベッセル関数、 f は周波数、 f_{res} は振動膜の1次共振周波数である。振動膜振動による媒質の体積速度は、表面速度に面積を掛けることで求められる。半径による表面速度の主な分布は Fig. 3-1 の通りであり、体積速度は式(3-4)で求められる[43].

$$|q| = \sum_{n=1}^N \left[\frac{|u(r_n)| - |u(r_{n-1})|}{2} \pi (r_n^2 - r_{n-1}^2) \right] \quad (3-4)$$

しかし、実際の標準マイクロフォン振動膜の境界条件は理想的な条件ではなく、理論式の応答と完全には一致しない。そのため、理論式で求められた数値と実システムとの偏差、および実測モデルの必要性について検討を行う。

マイクロフォンの振動膜は数 μm の薄い膜であり、その振動を測定するためには非接触法を用いる必要がある。そのため、ここではレーザドップラ振動計(Laser Doppler Vibrometer, Polytec OFV-5000)を用いて表面測定を行う。測定システム構成のブロック図を Fig. 3-2 に示す。マイクロフォンはトランスミッタとして用いるため、トランスミッタ用のプリアンプ(Brüel & Kjær ZE 0796)に装着し、Fig. 3-3 のように固定している。レーザの送受信部は、マイクロフォンの表面に垂直方向およそ 50 cm の距離において、半径方向に 0.01 mm 単位で動くことが可能なステージに固定している。測定周波数は 20 Hz から 12.5 kHz までで、1/3 オクターブバンドの中心周波数ごとに測定を行っている。

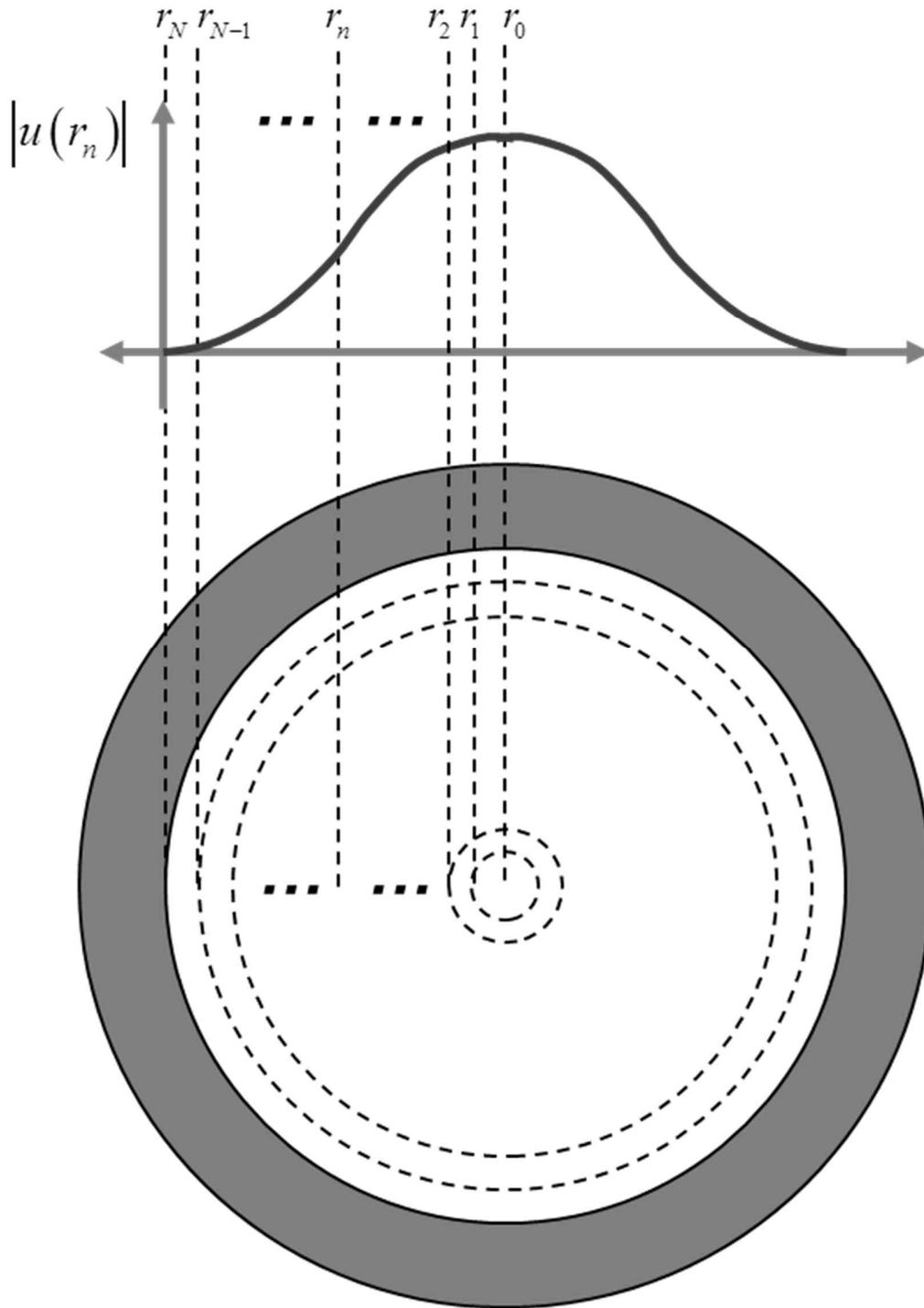


Fig. 3-1. Surface velocity distribution on the diaphragm and the area having same surface velocity

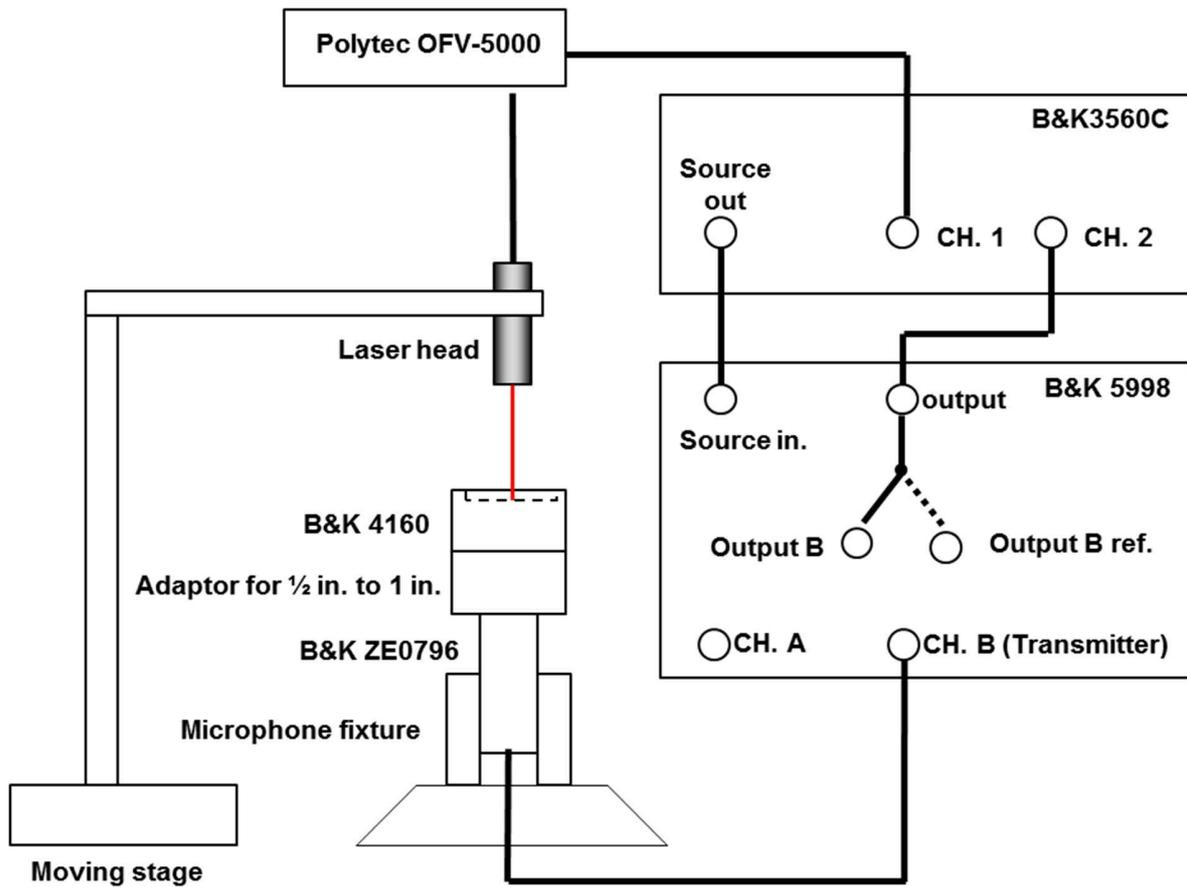


Fig. 3-2. Block diagram configuration of the measurement system based on the laser Doppler vibrometer for measuring the vibration of the microphone surface.

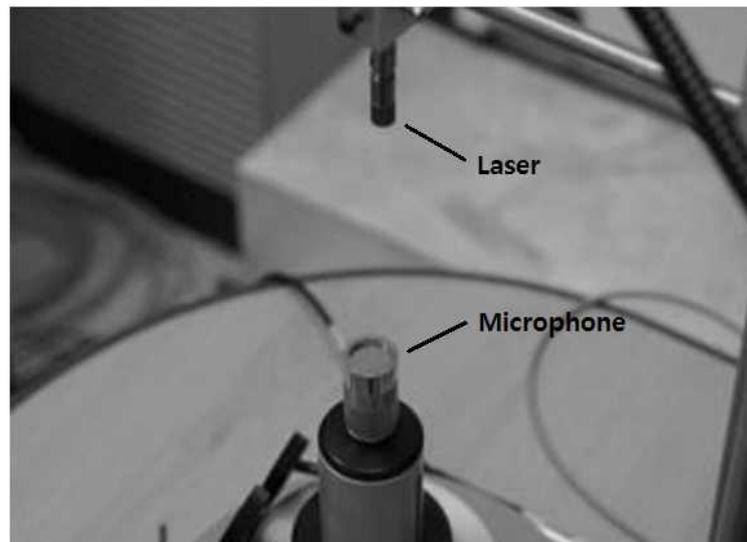


Fig. 3-3. Experimental setup of the microphone and the emitter of the laser Doppler Vibrometer.

構成システムを用いて、1 インチ標準マイクロフォン (LS1) の直径方向の振動分布を測定した結果を、Fig. 3-4 に示す。この図で横軸は中心からの距離を表しており、縦軸は正規化速度を表している。測定点の間隔は 0.25 mm である。この図を見ると、中心付近では比較的類似した値となり、境界では差が大きくなる傾向が見られる。観察周波数内での振幅は中心付近が大きいが、外側の方は面積が広いため、どちらの寄与量が大きいかは一概では言えない。この結果から体積速度を求めた結果を、Fig. 3-5 に示す。横軸は周波数を示しており、縦軸は正規化した速度を表している。図を見ると、全体的に理論値に基づいた結果が大きくなっている事が見て取れる。

Fig. 3-6 に、理論値と測定値に基づき感度を推定した結果を、可逆校正法の結果と合わせて示す。横軸は周波数を示しており、縦軸は標準マイクロフォンの感度を表している。また、図中の実線は理論値、×は測定値、点線は可逆校正法から得られた値を示している。この結果から、理論値と測定値から推定した感度は 1.5 dB の差が存在することが分かる。可逆校正法の結果と比較すると、理論値を用いた場合は測定周波数範囲内で平均 1.2 dB、実測値を用いた場合は 0.3 dB 高い値を示していることが分かる。この結果は理論式に基づいた推定は誤差が大きく適切ではないことを示している。一方、実測値に基づく振動分布から求めた体積速度分布を、モデルとして用いることは可能であると考えられる。

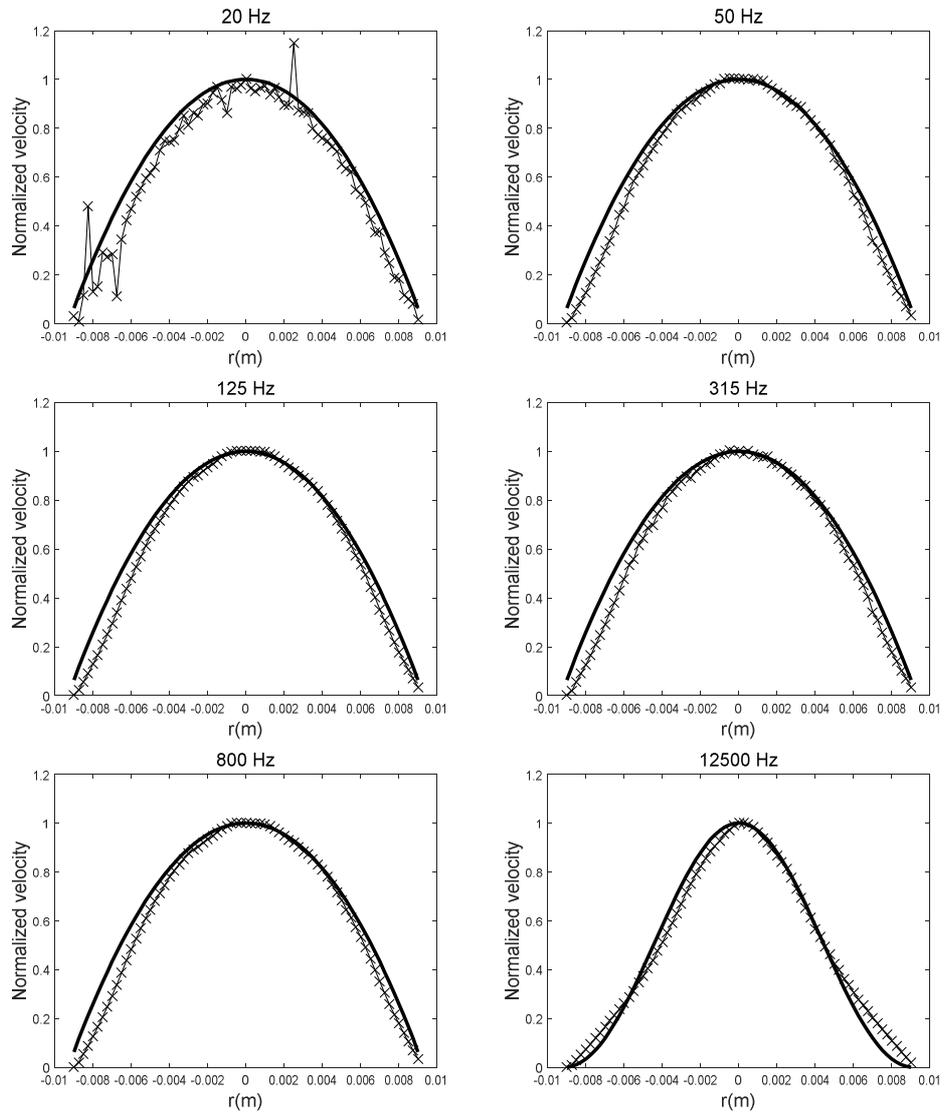


Fig. 3-4. Measured and theoretical comparison of the surface velocity distributions along the radial direction, with values normalized at $r = 0$ m (solid lines: theoretical values and crossed lines: measured values)

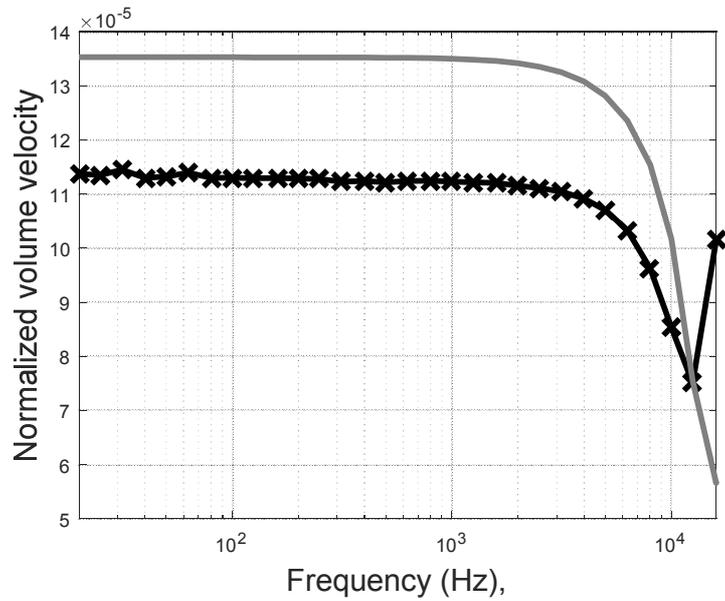


Fig. 3-5. Comparison of the volume velocity induced by the diaphragm vibration (solid line: theoretical value and crossed line: estimation from measured values)

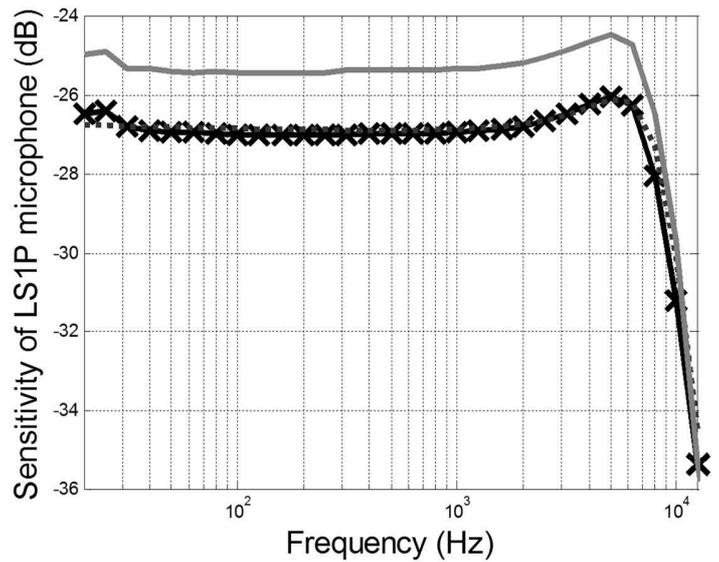


Fig. 3-6. Comparison of the sensitivity of 1" LS microphone (solid line: theoretical value, -x-: estimation from measured value and dashed line: measured value with the reciprocity method)

3.3 共振周波数と減衰係数の決定法

3.3.1 マイクロフォンの共振周波数と減衰係数

振動膜上の相対的な振動分布が一定である場合、その平均を取ることで、振動分布あるいは体積速度の近似モデルを求めることができる。ここで、振動膜の振動分布は振動モードによって決まるため、1次システムと仮定する場合[44]の振動分布は、共振周波数に対する相対周波数が同じで場合と一致すると考えられる。しかし、マイクロフォンの共振周波数は個体ごとに異なるため、応答を平均するには周波数軸を共振周波数に対する相対値に変換してから行う必要がある。したがって、各マイクロフォンの共振周波数を測定する必要がある。

マイクロフォン振動膜の共振周波数と減衰係数を決定するために広く使用されている方法として、静電アクチュエータ法[45, 46]がある。この方法では、振動膜の周波数応答を測定し、位相変化が 90° となる周波数として共振周波数を定める。また、減衰係数は、共振周波数付近の応答曲線から決定される。しかし、静電アクチュエータの応答は、正確な圧力応答を提供していない。結果的にこの方法を使用すると、振動膜とアクチュエータシステムの音響放射質量の影響により、圧力条件下で共振周波数より若干低い値となる。

近年、Rasmussen[47, 48, 49]は、いくつかの他のカプラを使用して得られたデータの適合を基礎に、新たな手法を提案した。この手法では、各マイクロフォンの感度校正に使用されたカプラと独立であると仮定し、共振周波数と減衰係数を調整しながらマイクロフォンの感度を求めている。この方法は、マイクロフォンの可逆校正を含んでおり、結果的に測定時間が可逆校正法とほぼ同じになる。

コンデンサマイクロフォンの等価体積は、マイクロフォンの振動膜のコンプライアンスまたはインピーダンスと同じ空気の量である。振動膜の音響コンプライアンスは、次式に従う。

$$C_d = \frac{V_e}{\gamma P_s} \quad (3-5)$$

ここで、振動膜のインピーダンスと等価体積との関係は、一般的に次式のようになる。

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (3-6)$$

したがって、振動膜の等価体積は次の式で求められる。

$$V_e = \frac{\gamma P_s}{j\omega Z_d} \quad (3-7)$$

ここで、 V_e は複素数であるため、 Z_d も複素数である。周波数依存等価体積を求めるために広く使用されている方法では、次式に示す近似式を用いている [50, 51, 52].

$$V_e = V_{e0} \left(1 - \frac{f^2}{f_0^2} + j \frac{f}{f_0} D \right)^{-1} \quad (3-8)$$

上式で、 f は周波数、 V_{e0} は低周波等価体積、 f_0 と D は振動膜の共振周波数と減衰係数である。周波数に応じた等価体積量を得るために、マイクロフォン振動板の共振周波数と減衰係数を知るべきである。マイクロフォンの複素感度が決定されると、共振周波数は位相変化が 90° となる値を示される。

マイクロフォン振動膜の振動モデルは、粘性減衰を有する単一の自由度振動系に簡素化できる。この振動システムに正弦駆動力 $f(f) = F_0 \cos 2\pi ft$ が適用されると、振動板の振動変位は次の運動方程式を満たす。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos 2\pi ft \quad (3-9)$$

ここで、 m は質量、 c は減衰係数であり、 k は等価振動システムの剛性である。このシステムの振動変位は、次式で与えられる [53, 54, 55, 56].

$$x(f) = \frac{F_0 / k}{\sqrt{[1 - (f / f_0)^2]^2 + [2\zeta(f / f_0)]^2}} \quad (3-10)$$

式(3-10)において、振動項は単純化のために無視することができる [57]。したがって、変位応答を測定する場合、未知のパラメータは最小二乗法で当てはめる方法を用いて決定することができる [58].

3.3.2 測定システムの構成

測定システムは、3.2 節で使われたシステムと同じ構成で構築できる。マイクロフォンは、校正に使用されたものと同じ寸法で特殊設計されたカプラに装着して圧力を受ける。このカプラでは、透明な光学ガラスで覆われたレーザ振動計を使用して振動膜の振動を測定する。

Fig. 3-7 と Fig. 3-8 は、それぞれ実験システムのブロック図と、機器の設定を示している。マイクロフォン振動膜の周波数応答は、ダイナミック信号分析機 (HP35670A) を使用して測定する。ダイナミック信号分析機の実出力信号は、可逆校正装置 (B&K4143) を介してマイクロフォンに供給される。マイクロフォンの駆動 AC 電圧は約 3.5 V で、室内環境条件は次の通りである。

- 温度 : 22.1 ± 0.2 °C,
- 相対湿度 : 63 ± 1 % RH,
- 大気圧 : 1003 ± 0.2 hPa.

マイクロフォン振動板の振動変位は、レーザドップラ振動計 (Polytec OFV-5000) で測定され、その出力信号を動的信号アナライザに送る。

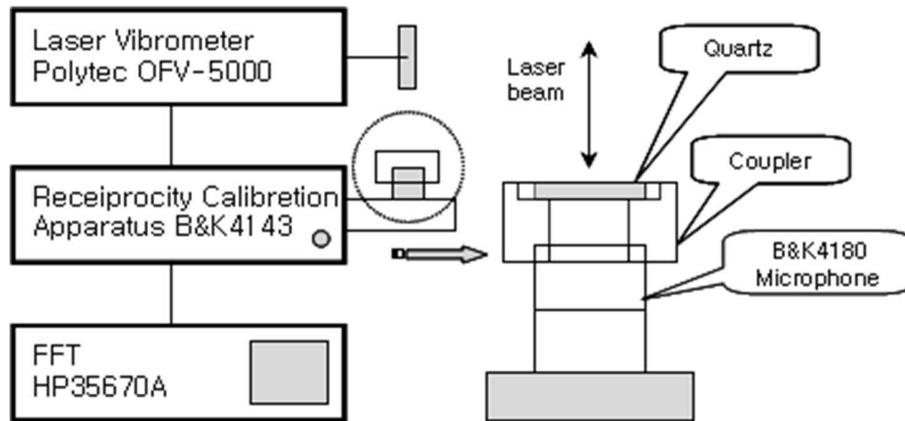


Fig. 3-7. Block diagram of the experimental system for measuring frequency characteristic of a microphone.

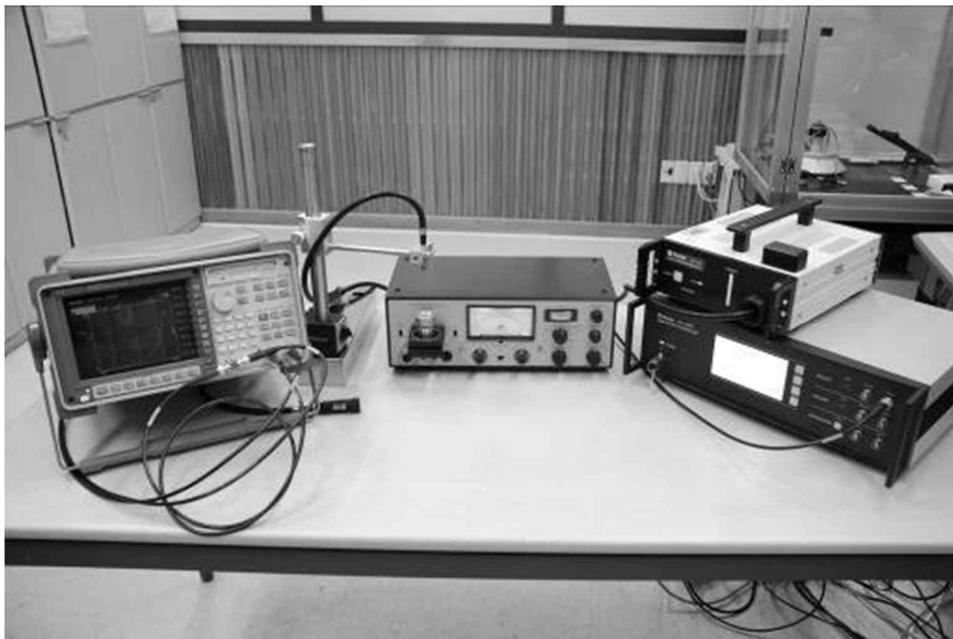


Fig. 3-8. Measurement system for measuring the diaphragm vibration using the laser Doppler vibrometer: from left, Dynamic Signal Analyzer (HP35670A), Reciprocity Calibration Apparatus (B&K4143) and Laser Doppler Vibrometer (Polytec OFV-5000)

3.3.3 実験結果

変位応答曲線から共振周波数と減衰係数を求めるには、共振周波数付近の値が重要である。1/2 インチ実験室標準マイクロフォンの公称共振周波数がほぼ 22,000 Hz であるため、15,000 ~ 30,000 Hz の周波数範囲で周波数応答曲線をデータフィッティングに用いる。この周波数範囲の 100 点値を式(3-10)に代入し、式(3-11)を用いて共振周波数と減衰係数を最小二乗法により求める。

$$E = \sum_{i=1}^{100} (x_i - M_i)^2 \quad (3-11)$$

ここで、 x_i は式(3-10)を使用して計算された振動変位であり、 M_i は i 番目の周波数で測定された値である。最小二乗法による結果の値を Fig. 3-9 に示す。横軸は共振周波数、縦軸は減衰係数を表している。図は、共振周波数と減衰係数の関係を等高線で表したものである。レーザドップラ振動計による測定に基づく共振周波数は 20,000 Hz、減衰係数は 1.06 であるが、最小二乗法によって推定した値は、共振周波数の 20,303 Hz、減衰係数は 1.063 である。

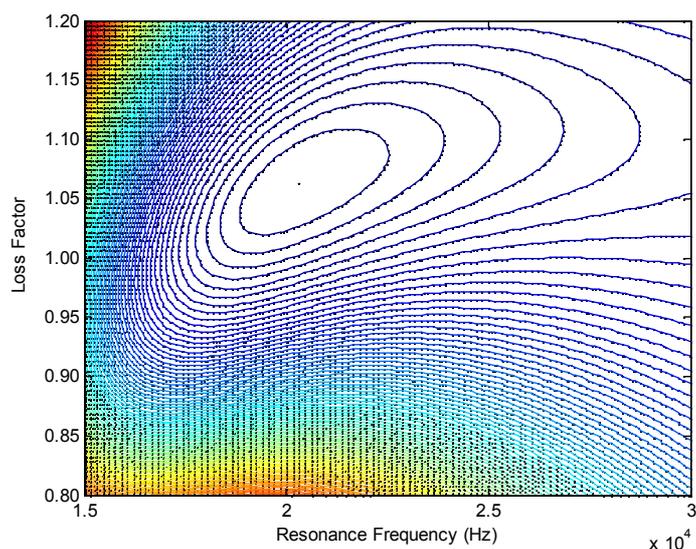


Fig. 3-9. Variation of the squared sum of deviations between the measured and calculated responses near the nominal values of the resonance frequency and loss factor

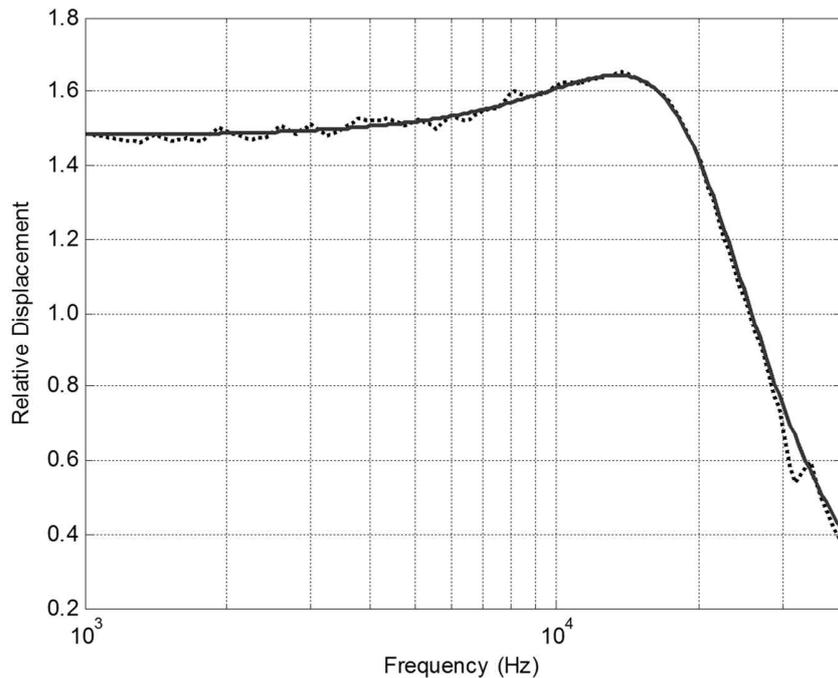


Fig. 3-10. Frequency response functions measured using the laser doppler vibrometer (dotted line) and calculated by Eq.(3-10) (solid line)

レーザドップラ振動計によって測定された周波数応答（点線）と、式(3-10)によって計算された値（実線）を、Fig. 3-10. に示す。横軸は周波数、縦軸は相対的な変位を表す。図を見ると、共振周波数付近の測定結果と理論結果がほぼ一致していることが見て取れる。

Table 3-1 は、4 つの 1/2 インチの実験室標準マイクロフォンの測定結果を示している。この値は、各マイクロフォンごとに 10 回測定した結果を平均したものである。表から分かるように、この方法を使用して測定された共振周波数と減衰係数は、使用された 1/2 インチ標準マイクロフォンの公称値に近い。また、測定結果の標準偏差は、最大で約 1.3 % であるため、この測定は再現性が極めて高いと言える。更に、この方法を用いると、10 回の測定時間が 30 分未満であるが、既存の方法を用いると測定時間が数十時間も必要となる。

Table 3-1. Measured resonance frequency and loss factor for 1/2” laboratory standard microphones.

Trial No.	Microphone 1		Microphone 2		Microphone 3		Microphone 4	
	fo (Hz)	D	fo (Hz)	D	fo(Hz)	D	fo(Hz)	D
1	22273	1.099	19394	1.010	20303	1.063	20303	1.026
2	22424	1.111	19394	1.010	20000	1.042	20303	1.018
3	21818	1.075	19545	1.018	20303	1.063	20303	1.018
4	21667	1.083	19545	1.018	19848	1.026	20455	1.026
5	21818	1.091	19545	1.010	20152	1.051	20455	1.018
6	21818	1.087	19394	1.014	20000	1.046	20303	1.018
7	21818	1.079	19394	1.006	20152	1.063	20303	1.014
8	21970	1.095	19545	1.014	20000	1.051	20606	1.026
9	21970	1.095	19545	1.010	19848	1.030	20455	1.030
10	21970	1.087	19545	1.014	20000	1.034	20455	1.022
Average	21955	1.090	19485	1.013	20061	1.047	20394	1.022
Std. Dev.	231	0.011	78	0.004	163	0.014	106	0.005

3.4 体積速度平均モデルを用いた感度測定手法

3.4.1 体積速度平均モデルの導出

同一型のマイクロフォンでは、表面の振動分布が各マイクロフォンに対して同一の場合、中心から速度に合わせて正規化された体積速度は同一型のマイクロフォンに対して一致する。振動膜の幾何学的な形も同じであるため、振動膜モードの形態は、正規化された周波数とモード周波数の面で同一であると仮定できる。したがって、音響体積速度に対する経験的モデルは、正規化された周波数に対して測定された分布の平均をとることで取得できる。そのためには各マイクロフォンの共振周波数が必要であり、前節で提案した方法が適用できる。

体積速度の経験的モデルを得るために、6個のLS1Pマイクロフォンを使用して平均モデルを導いた。各マイクロフォンについて、応答を5回測定し平均値を計算した。その上で、Fig. 3-11のように共振周波数と減衰係数を変更させながら、測定値と式(3-10)の差を最小化する共振周波数と減衰係数の値を選択した。Fig. 3-11は6個の値を表しており、横軸は共振周波数、縦軸は減衰係数を表している。その結果はTable 3-2の通りであり、追加負荷を発生させるカプラなしに測定を行ったため、推定共振周波数は公称値(8.2 kHz)よりやや低くなっている。

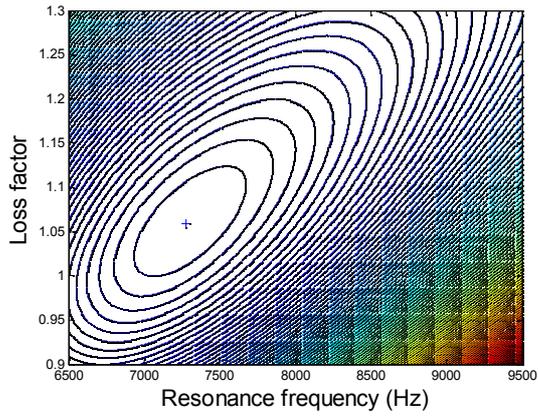
次に、各マイクロフォンの速度の半径方向の分布を測定し、中心の変異で正規化された体積速度を求めた後、Fig. 3-12に示すように各マイクロフォンの共振周波数の相対周波数の関数として再調整した。再配置された値の平均は、Fig. 3-13に示されており、この結果は、経験的モデルの正規化された体積速度 $q_n(f/f_0)$ に使用できる。この結果では、 $f/f_0 = 0.004$ 以下の周波数で比較的偏差が大きくなっている。これは、この帯域における低い信号対雑音比によるものと考えられ、モデルの有効範囲は31.5 Hz以上とする。このモデルからマイクロフォンの感度は次のように求められる。

$$q = q_n u(r_o) \quad (3-12a)$$

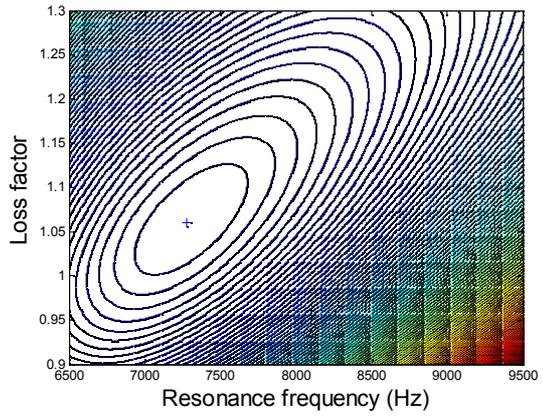
$$M_p = q_n u(r_o) Z_a + Z_{rad} / i * Z_a + Z_{rad} / Z_a \quad (3-12b)$$

Table 3-2. Estimated resonance frequency of the microphones

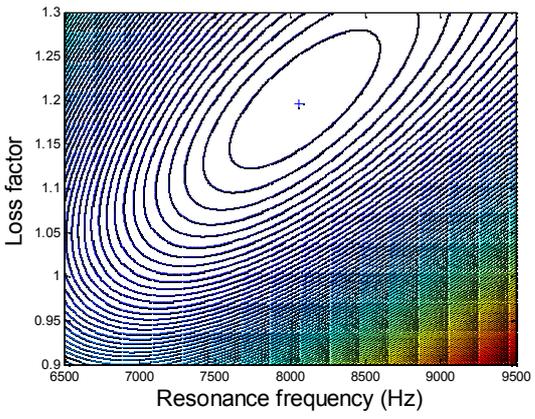
Microphone	Resonance frequency (kHz)	
	Average	Standard deviation
1792662	7.26	0.02
1792671	7.28	0.01
2302546	8.05	0.02
2796465	7.73	0.02
2796466	7.79	0.02
2620599	7.72	0.02



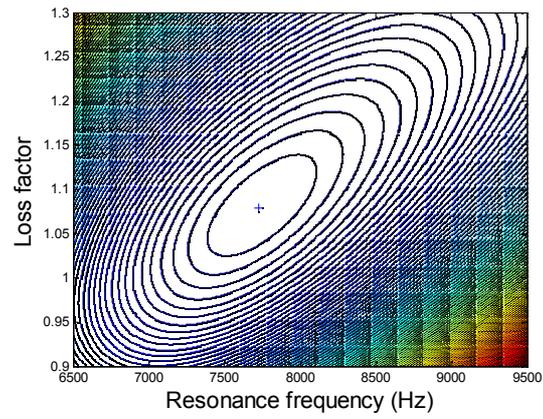
(a)



(b)



(c)



(d)

(次ページに続く)

(前ページから続く)

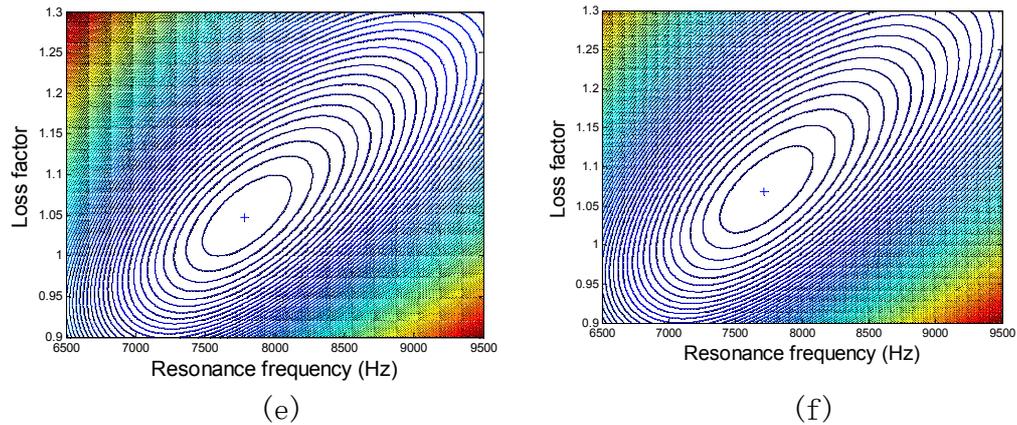


Fig. 3-11. Variation of the squared sum of difference between the measured and estimated responses for different microphone devices by the single degree-of-freedom model according to the resonance frequency and loss factor (+: point of minimum difference): (a) S/N 1792662, (b) S/N 1792671, (c) S/N 2302546, (d) S/N 2796465, (e) S/N 2796466, (f) S/N 2620599.

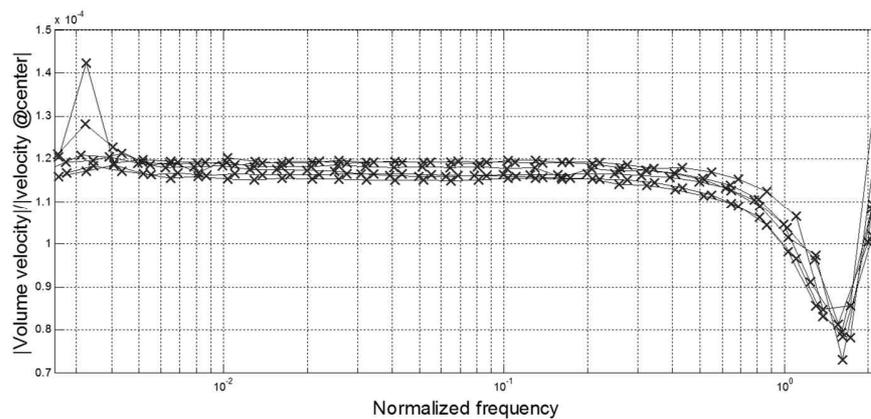


Fig. 3-12. Measured volume velocity normalized to the velocity at diaphragm center for six different microphones as a function of relative frequency to the resonance frequency of each microphone

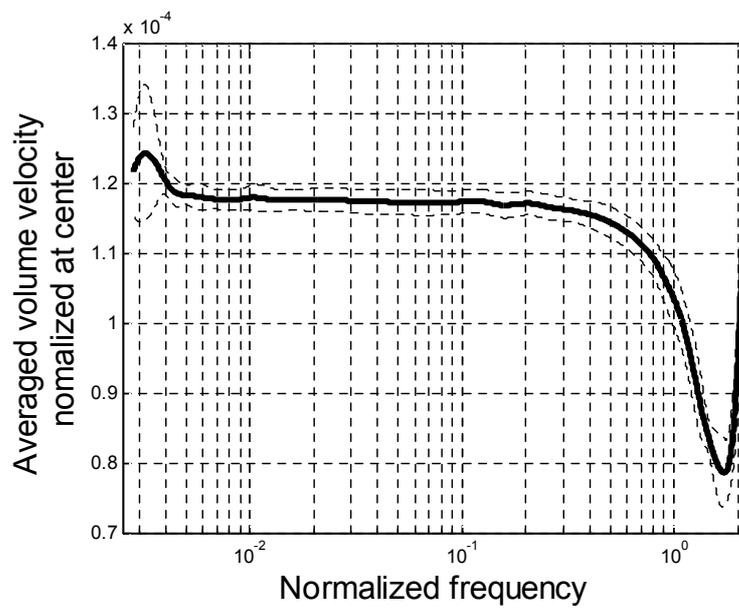


Fig. 3-13. Empirical model for volume velocity normalized to the surface velocity at center derived from the average of five LS1 microphones (solid line, averaged value with 6 samples; dashed line, standard deviation)

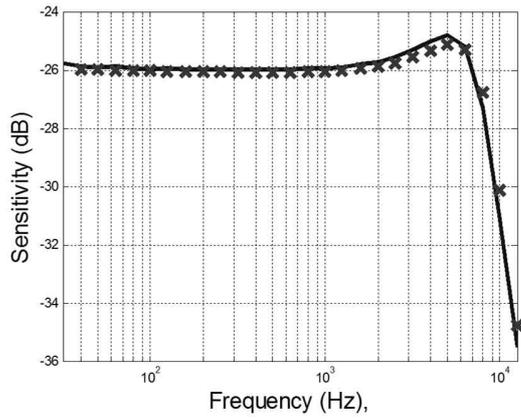
3.4.2. 感度測定結果

提案法の妥当性を検証するため、前の節で使用された 6 つのマイクロフォンの感度を求め、可逆校正法で得られた結果と比較した。ここでは、モデルの普遍性を確認するために、leave-one-out 法に基づく誤差検証を実施した。

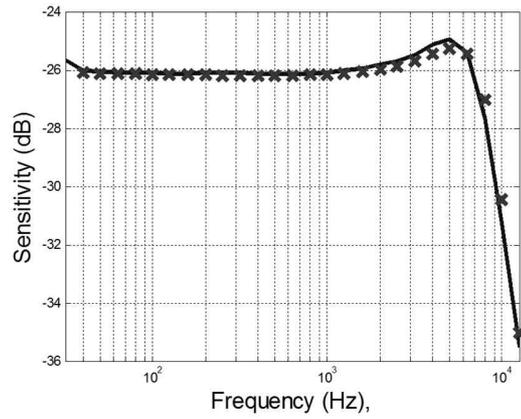
各マイクロフォンの感度は、自分以外の 5 つのサンプルから求められた体積速度モデルを使用して推定した。Fig. 3-14 は、leave-one-out 法を用いた各マイクロフォンの感度を示している。提案された経験的体積速度モデルは、可逆校正法で得た値と似た傾向を見せていることが分かる。共振周波数以下の帯域における提案法で得られた感度と可逆校正法の結果との差を Table 3-3 に示す。その結果、各方法から求められた感度の差の平均値は、共振周波数以下で 0.07 ~ 0.13 dB であり、標準偏差で約 0.04 ~ 0.10 dB である。

Table 3-3. Difference between the estimated sensitivity by the proposed method and the reciprocity method.

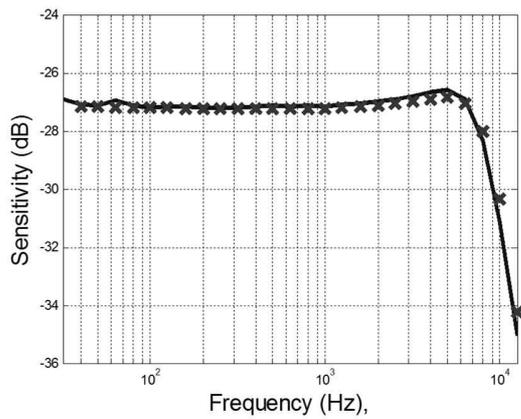
Microphone serial number	Sensitivity difference of the leave-one-out model (dB)	
	Average	Standard deviation
1792662	0.13	0.08
1792671	0.11	0.10
2302546	0.11	0.07
2796465	0.07	0.09
2796466	0.10	0.08
2620599	0.13	0.04



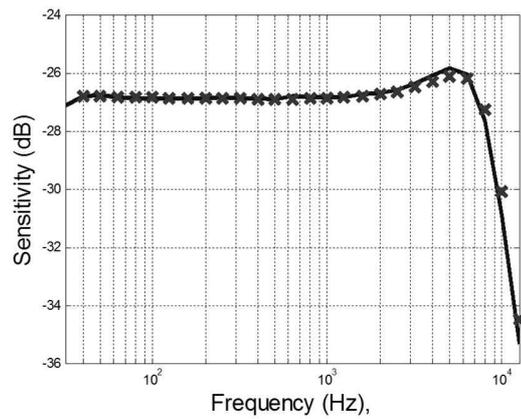
(a)



(b)



(c)



(d)

(次ページに続く)

(前ページから続く)

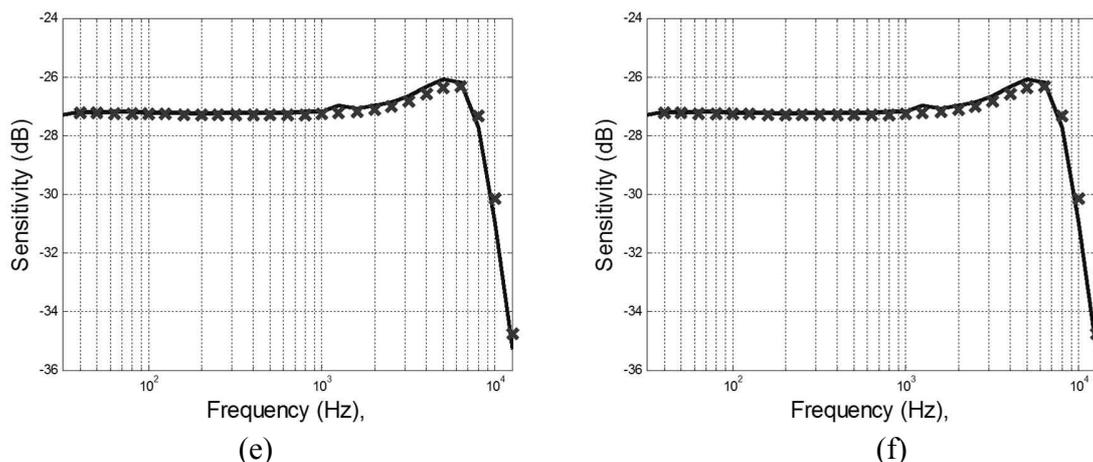


Fig. 3-14. Comparison of the measured sensitivities of the five LS1 microphones used to estimate the empirical model for volume velocity. Solid line: proposed method, x: reciprocity method. (a) S/N 1792662, (b) S/N 1792671, (c) S/N 2302546, (d) S/N 2796465, (e) S/N 2796466, (f) 2620599.

3.4.3. 考察

3.4.1 で提案した体積速度モデルを使うことで、マイクロフォン振動膜中心の一点の表面速度測定から感度を求めることができる。その手続きは、Fig.3-15 のようにまとめられる。まず、中央の表面速度と送信機に供給される電圧を測定する。次に、マイクロフォンの共振周波数を、3.3 節で提案した手続きにより測定する。その上で、測定された共振周波数に合わせて、体積速度モデルを与えるパラメータを調整し、式(3-12)にて感度を求める。このように、3.3 節の共振周波数を測定過程に用いれば、一回の測定で必要な測定値を得ることができる。

本章では、商用のレーザドップラ振動計を用いて振動膜の表面振動を測定している。ここで使用したシステムは、振動標準から追跡 (Traceable) 可能な 2 次比較方法とみなすことができる。2 次比較の場合、方法の不確度は基準センサによって異なる。例えば、ドイツ国立度量研究所 (Physikalisch-Technisch Bundesanstalt) では、レーザドップラ振動計の校正の不確度として 10 kHz 以下で 0.1 %との値を示している。この場合の感度への影響は 0.01 dB 未満である。この値は、Table 3-3 と比較して見ると小さい値である。したがって、レーザドップラ振動計の不確度の寄与は全体の不確度と比べて充分小さいと言える。

また、提案された方法は、LS マイクロフォンのための新しい一次校正方法として拡張できる可能性がある。レーザドップラ振動計で行ったマイクロフォンの表面振動を測定する過程は、振動標準の1次校正方法で採択された干渉計による測定で代替できるものと考えられる[59]。この干渉計システムは、SI 基本単位の長さから直接追跡可能なので、レーザドップラ振動計が干渉計に代替できれば、提案法を絶対較正法として使うことが可能である。精度面での可逆校正方法との違いは、国家計測機関で示した不確度よりやや高い[60]。しかし、ピストンホン及びレベル校正機のような二次校正装置の校正に適用できる程度に正確であると考え[61]。

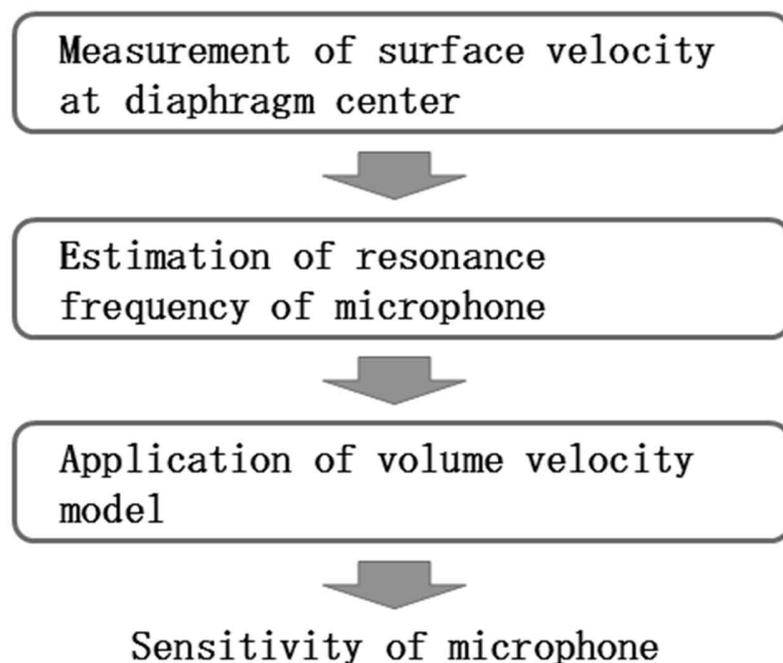


Fig. 3-15. Procedure to measure the microphone sensitivity by single point measurement with the empirical model for volume velocity

3.5 まとめ

既存の可逆校正法では、3 個のマイクロフォンが必要となる。これらのマイクロフォンは2つずつ3ペアにし、そのうち1つのマイクロフォンペアをカプラによって結合し、1つは送信機、他の1つは受信機として使用し、送信機の入力電流に対する受信機の比である電気伝達インピーダンスを測定して、システムの音響伝達インピーダンスを3ペアで求める。この方法から、3つのマイクロフォンの各々の感度が定められる。そのため、第2章で論じたように、測定過程と拡張性の面において幾つかの問題点がある。

本章では、これらの問題点を克服するために、レーザドップラ振動計を用いたマイクロフォンの表面振動の測定を基盤にした新たな感度計測法を提案した。まず、マイクロフォン振動膜の共振周波数と減衰係数を決定するため、レーザドップラ振動計を導入し、振動膜の振動測定を境界要素法の数値解析に基づいて求める方法を提案した。

提案法の有効性を示すために、測定システムを構築し実験を行った。その結果、測定された共振周波数と減衰係数は、使用された1/2インチ標準マイクロフォンの公称値に近い値が得られた。また、測定結果の標準偏差は最大で約1.3%であり、再現性が極めて高いと言える。更に、この方法を用いると10回の測定時間が30分未満で行えるが、既存の方法を用いると測定時間が20時間も必要となる。

次に、振動膜中心の表面速度と、振動膜表面の振動によって生じる音響体積速度との関係を検討し、表面中心の振動から体積速度を与えるモデルを開発した。ここでは、6つのサンプルで推定された1インチ実験室標準マイクロフォン(LSマイクロフォン)の体積速度平均モデルを求めた。このモデルを用いて推定されたマイクロフォンの感度は、従来の可逆校正法によって求めた結果と約0.1dBの差にととまり、高精度の測定を実現できた。

一方、本章で提案した手法は可聴周波数領域に限定されたものであり、20Hz以下の帯域での低信号対雑音比の問題を克服するための新たな手法の検討が必要となる。

第 4 章 レーザ干渉計を用いた低周波数領域のマイクロフォン感度決定法の提案

4.1 はじめに

現在、音響測定で最も高い精度が要求される実験室標準 (LS) マイクロフォン [11] の校正には可逆校正が用いられている [12]. この方法は、可聴周波数範囲 [25] で、0.1 dB 未満の不確度で LS マイクロフォンの感度を測定することができる. しかし、不確度の水準は、周波数が低くなるにつれて大きくなり、特に 20 Hz 以下の超低周波数 (Infrasound) 帯域ではより低くなる [26]. これは主に、マイクロフォンが音源として機能するとき、信号対雑音比が低周波数では低くなることによるものである.

超低周波帯域における低い信号対雑音比の問題を克服するために、レーザピストンフォンシステムが提案されている [23, 24]. その基本概念は、信号対雑音比を増大させるための音源を、マイクロフォンの代わりに移動ピストンに切り替え、ピストンの移動をレーザ干渉計で測定することで音圧変化を測る方法である. レーザ干渉計は絶対変位を測定できるため、音圧変化の絶対値も測定できる. このシステムを開発したイギリスの NPL (National Physical Laboratory) では、このシステムで国際比較に参加しその妥当性を検証した例がある [24, 26]. その後、いくつかの国家標準に関わる研究機関が類似の光学測定システムを提案している [62, 63]. それらのシステムでは変位を求めるために、フリンジカウント法に基づくホモダイン干渉計を使用しており、この方法は振動および衝撃トランスデューサの一次校正にも適用されている [64]. しかし、この方法は移動方向を得ることができないため [65, 66], 位相情報を決定することが不可能であるという欠点を持っている.

以上を踏まえ、本章では、ピストンフォンを使用して超低周波騒音測定用マイクロフォンの感度を測定する方法について、2 つのテーマに分けて検討する. 一つは、マイクロフォン可逆校正に使用される振動膜の共振周波数と減衰係数を簡単に求められる方法で、これを利用したマイクロフォンの感度測定方法である. もう一つは、ピストンフォンを利用したマイクロフォンの低周波帯域の感度測定方法である.

4.2 節では、レーザピストンフォンシステムの基本概念について概観し、ピストン運動による体積内の圧力変化を測定するための設計と、ピストン運動による体積内の圧力変化について述べる. 4.3 節では、光学系により直交信号を取得して変位を測定する方法について検討する. 即ち、測定した変位値を用い、ピストンの変調位相振幅と位相角を求める方法について詳しく論じる. 4.4 節では、提案したレーザ干渉計を用いた低

周波数領域のマイクロホン感度決定法の性能評価と，実験装置の構成を述べる．4.5節では，提案システムを用いた実験結果と考察について論じ，提案手法の効果を検証する．4.6節はまとめである．

4.2 レーザピストンフォンシステムの概念

Fig. 4-1 に、レーザピストンフォンシステムの概略図を示す。基本システムは可動ピストン、空洞、および干渉計で構成される。可動ピストンは、空洞の容積を変化させることで音圧を発生させる。ここでは、ピストン運動による体積内の圧力変化を測定するための設計と、ピストン運動による体積内の圧力変化について述べる。次式により、断熱条件でピストン運動によって誘導された圧力変化を求められる [23, 24].

$$p = \frac{\gamma P_0 (\pi r^2) d}{V} \quad (4-1)$$

ここで γ は空気の比熱比、 P_0 は正圧、 r はピストン半径、 V はピストンが運動の中心にあるときの空洞の体積、 d はピストンの変位である。ピストンの変位を確実に測定できれば、空洞内部の音圧を決定することもできる。

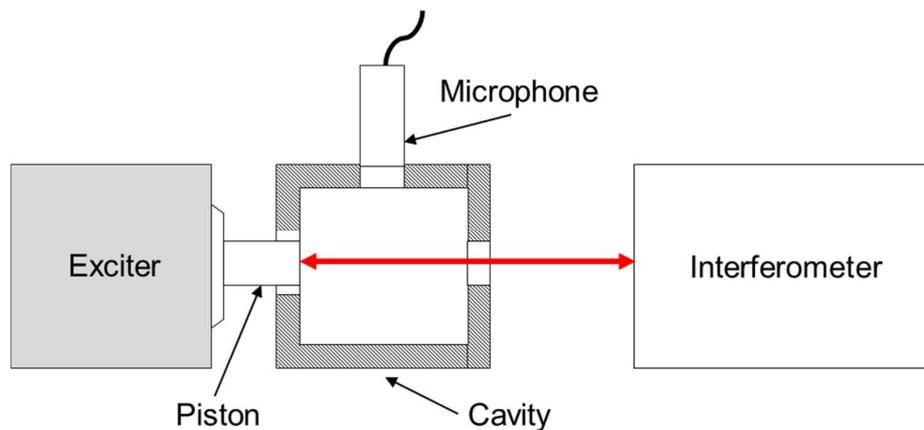


Fig. 4-1. Conceptual configuration of the laser pistonphone.

式(4-1)は、熱伝導と圧力漏れによる損失を考慮していないため、実際の音圧は式の値よりも小さくなる。このため、式(4-1)の数値から補正を適用する必要がある。ピストンと空洞の間の摩擦を避けるために、円筒形ピストンと空洞に接する穴の半径は、ピストンの半径よりも若干大きくする必要がある。この間隔による音圧の漏れに対する補正係数は、次式によって与えられる [24].

$$\Delta_{LC} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega T_a}} \quad (4-2)$$

ここで、 T_a は圧力が排出される時間に対する時定数であり、 ω は周波数である。断熱条件での時定数は、[67]によって推定される。

$$T_a = \frac{6\mu l V}{\gamma P_0 \left(1 + 1.5 \left(\frac{e}{\delta}\right)^2\right) \pi r \delta^3} \quad (4-3)$$

上の式で、 μ は動的粘度、 l は間隔の深さ、 e はピストン偏心量、 δ は間隔の内径と外径の差である[67]。

もう 1 つの重要な補正係数は、空洞内の熱伝導補正である。国際標準に関する研究 (IEC61094-2)では、2 つの異なる熱伝導モデル、低周波および広帯域解が提案されている[12]。低周波帯域での補正係数は次式で与えられる。

$$\Delta_{HC} = \frac{1 + (\gamma - 1) E_v}{\gamma} \quad (4-4)$$

ここで、 E_v は温度伝達関数である。Geber の解[68]に基づいて 20 Hz 以上の周波数での単純なモデルが提案された。しかし、この簡略された解は超低周波では誤差が大きくなり、Geber の厳密解を適用する必要があると報告されている [69, 70]。

4.3 正弦波近似法によるピストンの複素変位測定

干渉計によるピストンの移動変位の大きさと移動方向を決定するために、直交出力に基づく正弦波近似法 (sine approximation method) を適用することができる [64, 66]. Fig. 4-2 は、直交信号を得るための光学系の概念的な構成を示している .

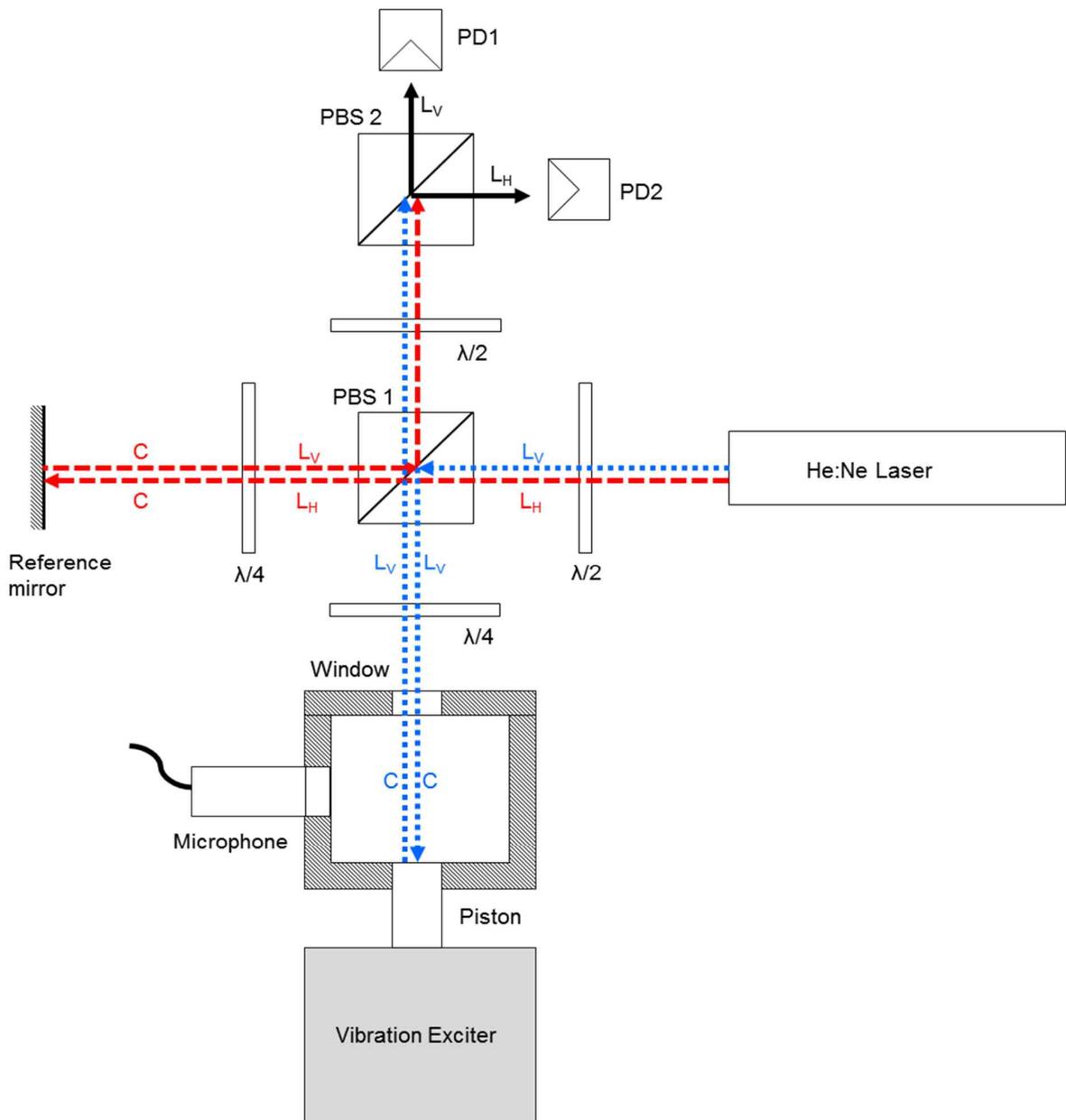


Fig. 4-2. Configuration of the optical system to obtain the quadrature output signal: PD, photo detector; PBS, polarized beam splitter; $\lambda/2$, half wave plate; $\lambda/4$, quarter wave plate.

光源としては、633 nm の波長と 1.6 mW の光学パワーを持つ He-Ne レーザを使用した。差出されたレーザは、偏光ビームスプリッタ (photo beam splitter : PBS1) によって 2 つに分割される。基準経路は固定された鏡に向かつての測定であり、もう一つの経路は往復するピストンに向かう経路になる。二つの経路の反射面から反射されたビームはまた同じ経路で重なり、第 2 の偏光ビームスプリッタ (PBS2) を通過する。ここで、重なったビームが直交に偏光された二つのビームに分割され、二つの光検出器に向かうことになる。各光検出器の出力は次のようになる。

$$V_1(t) = \widehat{V}_1 \cos[\varphi_0 + \widehat{\varphi}_M \cos(\omega t + \varphi_s)] \quad (4-5)$$

$$V_2(t) = \widehat{V}_2 \sin[\varphi_0 + \widehat{\varphi}_M \cos(\omega t + \varphi_s)] \quad (4-6)$$

式(4-5)と式(4-6)で、 \widehat{V}_1 と \widehat{V}_2 は両方の信号の振幅、各 φ_0 は信号の位相角、 φ_s はピストン運動の位相であり、次式によって与えられた $\widehat{\varphi}_M$ は変調位相振幅である。

$$\widehat{\varphi}_M = \frac{8\widehat{d}\pi}{\lambda} \quad (4-7)$$

ここで、 \widehat{d} はピストンの変位の振幅であり、 λ はレーザ光源の波長である。直角位相出力信号から、変調位相値は次式のように推定することができる

$$\varphi_M(t_n) = \arctan \frac{V_2(t_n)}{V_1(t_n)} + m\pi \quad (4-8)$$

上式で、 m は不連続性を防止するための定数である。従って、光信号の振幅が同じである場合、文献[64]を用いて次式のように変調位相を求めることができる。

$$\varphi_M(t) = \widehat{\varphi}_M \cos \varphi_s \cos \omega t - \widehat{\varphi}_M \sin \varphi_s \sin \omega t + \varphi_0 \quad (4-9)$$

式(4-7)と式(4-8)を使用すると、次式のような行列式で表現できる。

$$\begin{bmatrix} \varphi_M(t_1) \\ \vdots \\ \varphi_M(t_n) \\ \vdots \\ \varphi_M(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t_1 & -\sin \omega t_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \omega t_n & -\sin \omega t_n & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \omega t_N & -\sin \omega t_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{\varphi}_M \cos \varphi_s \\ \widehat{\varphi}_M \sin \varphi_s \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

上の行列は、 $Y = AX$ と表すことができる。ここでベクトル X の最小二乗解は、次の擬似逆行列式で解を求めることができる [71]。

$$X = (A^H A)^{-1} A^H Y \quad (4-11)$$

式(4-11)の解を求めると、ピストンの変調位相振幅と位相角は次のように求めることができる。

$$\widehat{\varphi}_M = \sqrt{X_1^2 + X_2^2} \quad (4-12)$$

$$\varphi_s = \arctan \frac{X_2}{X_1} \quad (4-13)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widehat{\varphi}_M \cos \varphi_s \\ \widehat{\varphi}_M \sin \varphi_s \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

したがって、ピストンの変位は次式のように推定することができる。

$$d = \frac{\lambda \widehat{\varphi}_M}{8\pi} \cos(\omega t + \varphi_s) \quad (4-15)$$

4.4 測定システム構成

前節まで論じた理論に基づいて製作されたレーザピストンフォンシステムを Fig. 4-3 に示す. 重力の影響によるピストンの非対称な動きを取り除くために, システムは垂直プレート上に設置した. また, 光学部品への振動の伝達を最小化するため, Fig. 4-3 (b) に示すように, 加振機 (Brüel & Kjær Mini-shaker タイプ 4810) とピストンを別のテーブルに設置し, 光学部と駆動部を切り離れた.

空洞内部の直径と長さは 60 mm であり, マイクロフォンは空洞の中心に挿入される. レーザをピストンに写すため, 小さな光学窓を空洞の上のプレートに作った. ピストンの直径は 15.97 mm で, 空洞の穴の間隔は 0.285 mm である. ピストン中心と穴の中心が同じ軸にあると仮定した.

この空洞の熱伝導及び音圧漏えい補正係数は, Fig. 4-4 のように求められる. この図では熱伝導の影響が漏洩補正より相対的に小さいが, LS マイクロフォンの圧力較正の不確度水準を考慮するとその影響は無視できない.

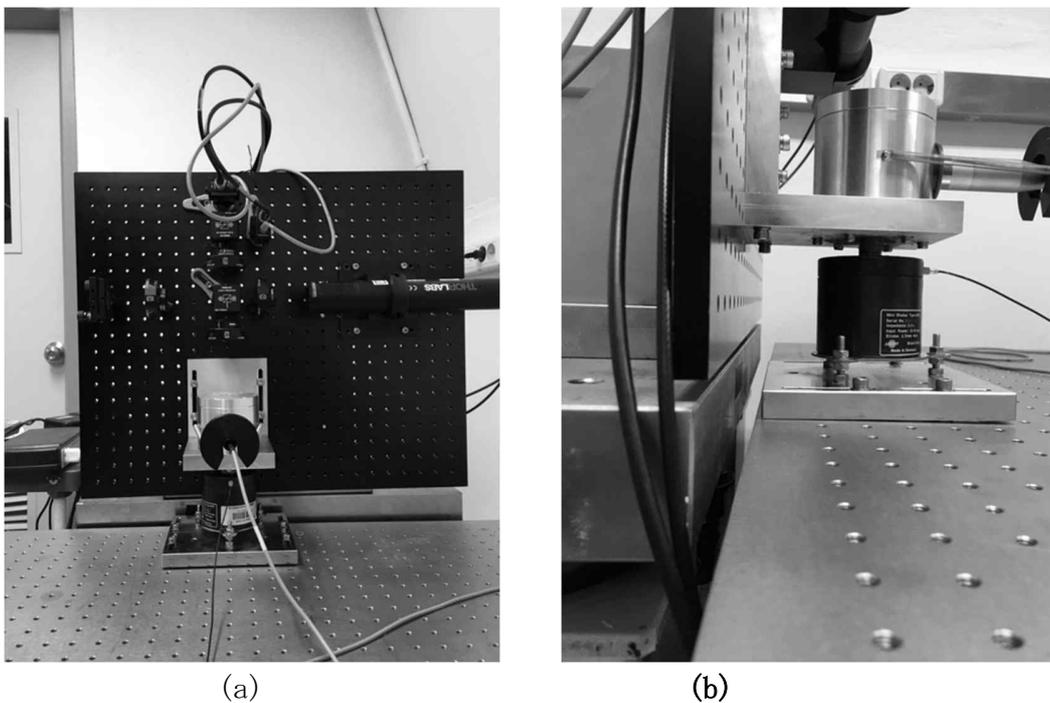
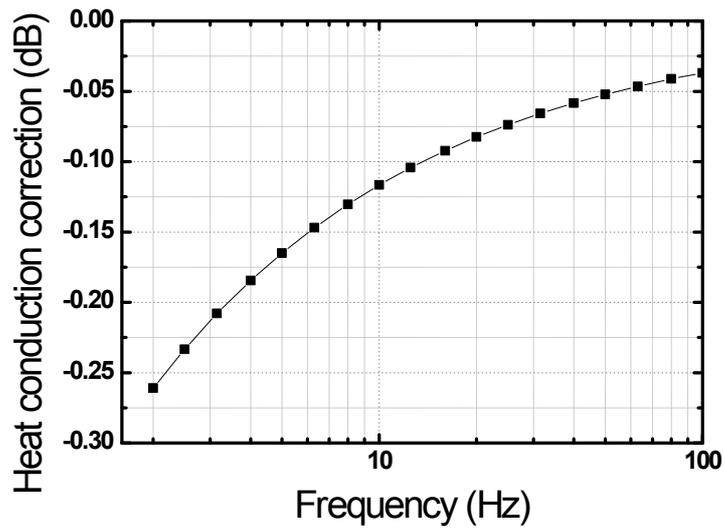
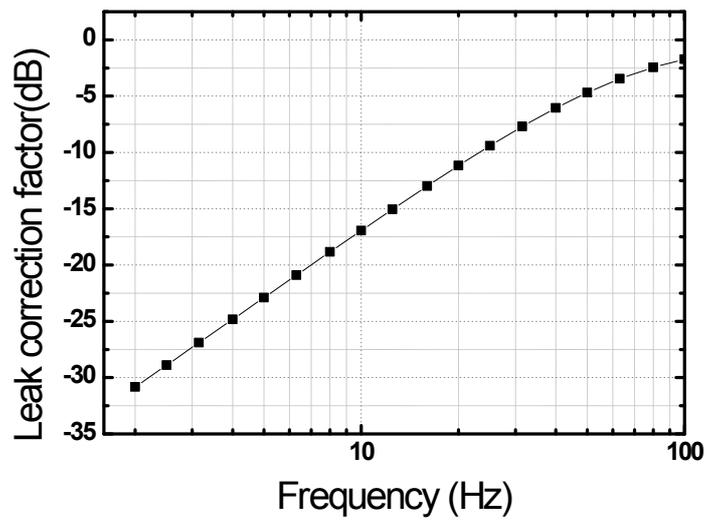


Fig. 4-3. Measurement system: (a) front view, (b) coupling component between chamber and piston.



(a)



(b)

Fig. 4-4. Correction factors of the designed chamber and piston: (a) heat conduction correction, (b) leak correction.

4.5 実験結果及び考察

測定対象の試料として 1 インチ LS タイプマイクロフォン (LS1P, Brüel&Kjær4160) を使用した. 2 つのフォトダイオードとマイクロフォンの信号は, 2.5 MHz/s のサンプリングレートでオシロスコープ (LeCray HD06034) に同時に記録した. 測定は 1/3 オクターブ帯域ステップで 2 ~ 40 Hz 範囲内で実行された. 周波数が 2 Hz 未満加振機の仕様の限界であったため安定的な加振ができなかった [72].

Fig. 4-5 は, 2 つの光検出器とマイクロフォンによる測定された信号の例を示している. 高周波ノイズの影響を除去するために, ローパスフィルタ処理を各信号に適用する必要がある. ここでは, ナイキスト周波数の 0.2 倍の係数で, カットオフを有する 2 次バターワースフィルタを使用した. Fig. 4-6 は, 式 (4-8) によって推定された変調位相の結果と, 位相アンラッピングの適用前後の結果を示している.

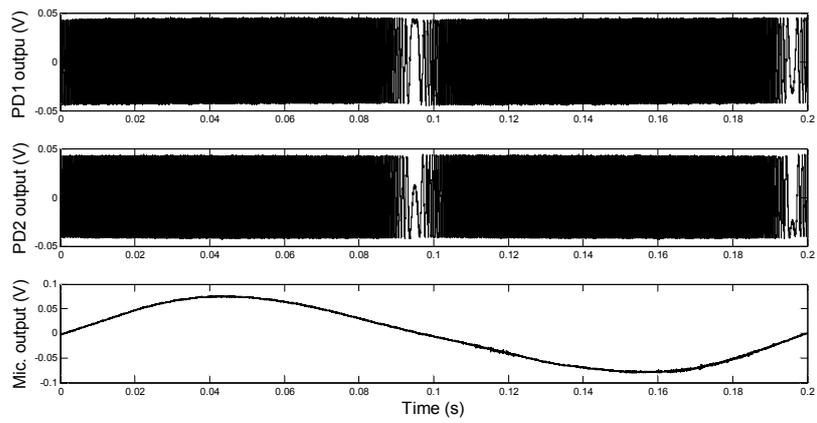
本章で提案した方法の有効性を確認するため, 可逆校正によって得られた感度と比較を行った. Fig. 4-7 は, 提案されたレーザピストンホンによる測定結果と可逆校正方法により測定した結果を比較したものである. 2 Hz 未満の周波数の場合には, 振動加振システムが十分かつ適切な (振幅の面で) 信号を生成することができなかった. Fig. 4-7 で, レーザピストンフォンを使用した場合は 6 回反復測定した結果の平均値 (記号) と拡張不確度 (誤差棒) を示しており, 詳細な数値は Table 4-1 に示されている. 不確度は測定値を合理的に推定した数値の散布特性を示す因子であり [54], ここで拡張不確度は包含係数 $k = 2$ の 95 % の信頼水準で推定したものである. 可逆校正の結果については, 国際比較の CCAUV A-k5 で評価された拡張不確度を引用したものであり [72], レーザピストンフォンによる結果からは, 反復測定による A 型不確度 [73] を求めて比較を行った. A 型不確度は観測 (測定) によって統計的に求める不確度であり, その他の方法によるものを B 型不確度と区分する [54]. B 型不確度の例としては, 第 3 者から発行された成績表や仕様による測定に使われた機器の不確度が挙げられる. Fig. 4-7 のレーザピストンホンの A 型不確度の値は B 型構成要素を含めた合成不確度よりは小さくなるが [73], A 型の寄与度は, 電圧測定及び電気構成要素のような B 型構成要素より大きいため, 全体的な傾向を観察できる.

感度の振幅の場合は, Fig. 4-7(a) に示すように, 20 Hz より低い周波数では, 両結果が拡張不確度以内にある. 20 Hz 以上の周波数では, ピストンの連結器と横方向運動で高次モードの影響が増加するため差も増加する. 感度の位相の場合は大きさの場合よりその差が大きく, 周波数による変化も安定的でないが, この場合でも各方法の結果は拡張不確度以内である.

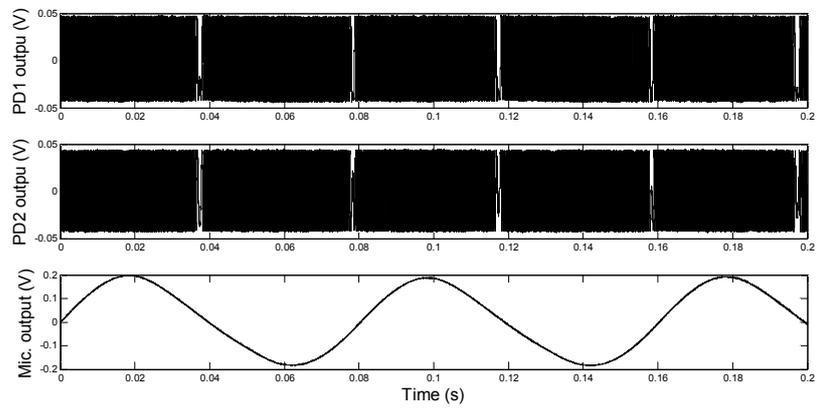
この結果では, 提案したシステムでマイクロフォンの複素感度を校正が可能であることを示している. しかし, 周波数応答は相反性に比べて不安定な傾向が観察された. 特に位相感度の場合, 入力波形の品質が大きな理由の一つといえる. 歪のない正確な正弦

波信号を得るためには、長いストロークと制御部を持つ加振機が必要である [63, 73]. 劣化のもう一つの原因は空洞の漏出である. この測定で使用されるシステムは空洞とピストンの間隔が 0.285 mm であり, これによる音圧レベルの減少は 2 Hz で 30 dB 以上と大きくなる. このため, マイクロフォンで検出する十分な音圧を得るためには大きな変位が必要となる. したがって, 結果を向上させるためには加振部の変更が必要であり, これは周波数範囲を 1 Hz 以下に拡張するためにも不可欠である.

提案したシステムは現状ではいくつかの限界もあるが, 提案方法の概念は, 振幅感度と位相測定に適用可能であることが確認できた. 提案方法の適用範囲は LS 型マイクロフォンに限られないため, マイクロ気圧計のようなマイクロフォンに基盤していない超低周波音響センサに対する 1 次校正方法としても使用できると期待される [74, 75].



(a)



(b)

Fig. 4-5. Examples of the captured signal measured by the two photodetectors and microphone:
 (a) 5 Hz and (b) 12.5 Hz.

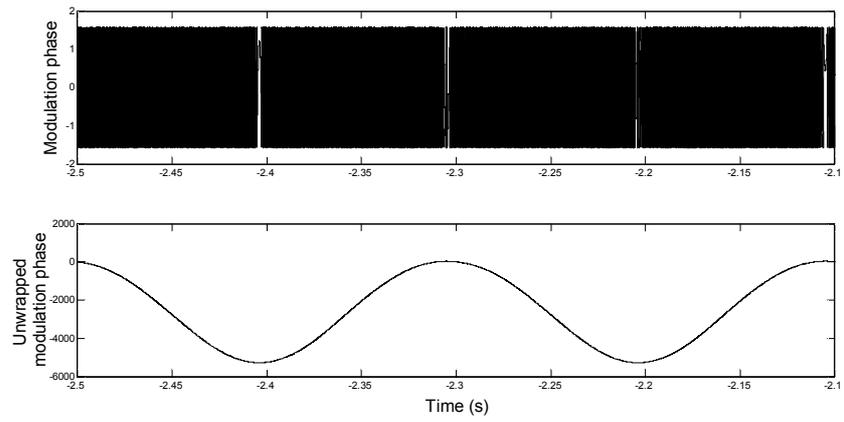
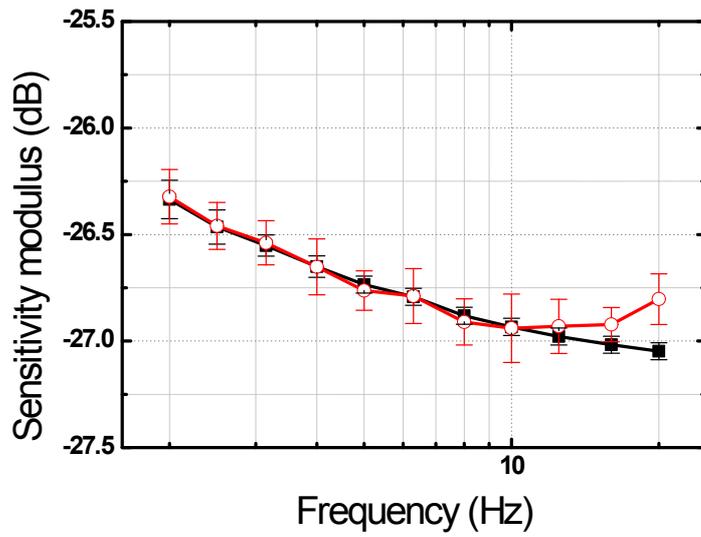
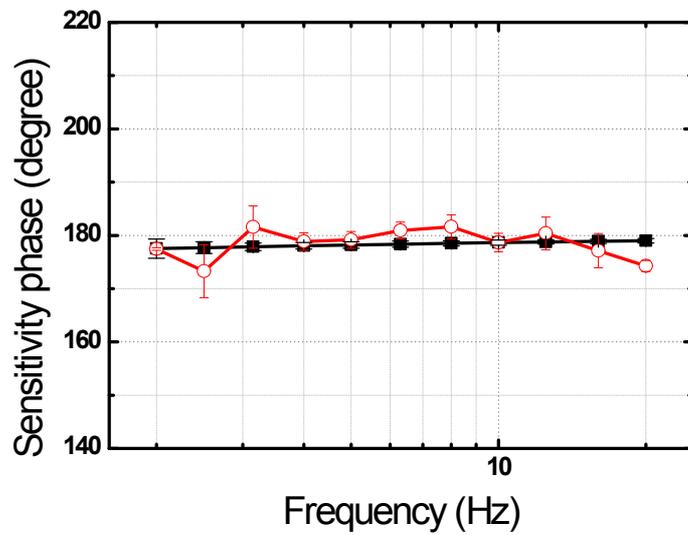


Fig. 4-6. Example of the unwrapped modulation phase (5 Hz).



(a)



(b)

Fig. 4-7. Measured sensitivity modulus of the LSIP microphone by the lase pistonphone (open circle, average of 6 repeated measurements; vertical line, Type A uncertainty of 6 repeated measurements with 95 % confidence level) and result of the reciprocity method (solid square, sensitivity; vertical line, expanded uncertainty with 95% confidence level [72]): (a) sensitivity modulus, (b) sensitivity phase.

Table 4-1. Measured sensitivity modulus of the LS1P microphone by the proposed laser pistonphone and result of the reciprocity method: (a) sensitivity modulus and (b) sensitivity phase

(a)

Frequency (Hz)	Reciprocity		Laser pistonphone	
	Sensitivity modulus (dB)	Expanded uncertainty, $k=2$ (dB)	Sensitivity modulus (dB)	Type A uncertainty, $k=2$ (dB)
2	-26.34	0.09	-26.32	0.10
2.5	-26.46	0.08	-26.46	0.09
3.15	-26.55	0.05	-26.54	0.08
4	-26.65	0.05	-26.65	0.11
5	-26.73	0.04	-26.76	0.08
6.3	-26.79	0.04	-26.79	0.11
8	-26.88	0.04	-26.91	0.09
10	-26.93	0.04	-26.94	0.13
12.5	-26.98	0.04	-26.93	0.10
16	-27.02	0.04	-26.92	0.07
20	-27.05	0.04	-26.80	0.10

(b)

Frequency (Hz)	Reciprocity		Laser pistonphone	
	Sensitivity phase (°)	Stated uncertainty, $k=2$ (°)	Sensitivity phase (°)	Type A uncertainty, $k=2$ (°)
2	177.5	1.8	177.5	0.2
2.5	177.7	1.1	173.3	5.0
3.15	177.9	0.7	181.6	4.0
4	178.0	0.6	178.9	1.6
5	178.2	0.6	179.2	1.6
6.3	178.4	0.6	180.9	1.6
8	178.5	0.5	181.6	2.3
10	178.6	0.5	178.7	1.7
12.5	178.8	0.4	180.4	3.1
16	178.9	0.4	177.1	3.2
20	179.0	0.4	174.3	1.0

4.6 まとめ

本章では、従来の可逆校正法の問題点のうち、低周波帯域の測定が不可能であることに着目し、それを改善する手段としてレーザ干渉計を用いた低周波数領域のマイクロフォンの感度を求める手法を提案した。

提案方法は、低周波数に対するマイクロフォンの感度の大きさおよび位相を較正するために、直交信号による正弦近似法に基づくレーザピストンフォンシステムを用いた。このシステムは、光学部品と可動ピストンと構成されており、設計システムの関連する補正係数を適合した。測定実験は、1/3 オクターブ帯域ステップで 2 ~ 40 Hz の範囲内で実行された。実験結果、2 ~ 20 Hz の周波数範囲では、提案方法で測定された感度が、不確度と標準偏差の範囲内で可逆校正法の結果と一致していることを確認した。しかし、20 Hz 以上の周波数では、空洞内部における高次モードの影響と、ピストンの横移動が増えることにより差が大きくなった。この結果から、提案システムでマイクロフォンの複素感度を校正できることを確認した。

一方、周波数応答は相反性と比較して不安定な傾向も観察された。特に位相感度の場合、入力波形の品質が大きな理由の一つといえる。これらを考えると、歪のない正確な正弦波信号を得るためには、長いストロークの制御部を持つ加振機が必要である。劣化のもう一つの原因は空洞の漏出であり、これによる音圧レベルの減少は 2 Hz で 30 dB 以上と大きくなった。このため、マイクロフォンから検出するのに十分なレベルを得るためには大きな変位が必要であることを確認した。したがって、性能を向上させるためには、加振部をもっと精密に設計する必要がある。以上のことから、周波数範囲を 1Hz 以下から可聴周波数領域まで拡張するためには、加振部の精密な設計、および測定システムの変更が不可欠であると考えられる。

提案システムは現状ではいくつかの限界をもっているが、提案法の概念は、感度の大きさと位相の測定に適用可能であると考えられる。また、提案法の適用範囲は LS 型マイクロフォンに限られないため、マイクロ気圧計のようなマイクロフォンを基盤としていない超低周波音響センサに対する 1 次校正方法としても使用できる可能性がある。

第 5 章 標準マイクロフォンの広帯域高精度校正法の提案

5.1 はじめに

既存の可逆校正法は、標準マイクロフォンのように極めて高い精度が要請される校正を行うための方法として、測定方法とシステムが単純で、他の基準物に依存せずに絶対校正が可能であるという面で優れた方法である。しかし、可逆校正法は第 2 章で示したように、測定に多大な時間を必要とするだけでなく、低周波数帯域では測定における SN 比が低下するという問題点がある。そこで、本研究では、社会的に関心が高まっている超低周波音帯域(可聴周波数の下限される 20 Hz 以下の周波数)から上限周波数付近までの、広範囲にわたりマイクロフォンの高精度校正が可能なシステムの実現を目指してきた。

第 2 章では、従来の可逆校正法における測定時間が長いという問題点を克服するために、時間引き延ばしパルスを利用して可逆校正法の音響伝達関数を求める方法を提案した。検討の結果、時間引き延ばしパルスを用いることで測定時間が大幅に短縮できることが確認された。また、同期加算回数を増加させることにより、低周波数特性の誤差が小さくなることが示された。しかしながら、5 kHz 以上の周波数帯域では誤差が大きく、サンプリング周波数の変化による測定特性の改善は見られなかった。

第 2 章の問題点を踏まえて、第 3 章ではレーザドプラ振動計を用いた校正法を提案した。この方法は、短い測定時間で測定が可能で良好な精度が得られるものの、精度がレーザドプラ振動計の精度に支配されるとともに、20 Hz 周波数以下では信号対雑音比の低下により十分な精度が得られないという問題が残った。そこで第 4 章では、低周波数帯域の高精度測定を可能にするため、校正にピストンフォンを用いるとともに、その膜面の振動振幅をレーザ干渉計により絶対校正する方法を提案した。これにより、2 Hz 以上で高い精度を実現できることを示した。しかし、20 Hz 以上の周波数では、ピストンフォンの連結器と横方向運動で高次モードの影響が増加するため誤差も増加した。しかしながら、以上の結果は、第 3 章で開発した方法と、第 4 章で開発した方法を合わせて用いれば、研究の目的にかなった測定が可能であることを示している。できるだけ簡便に測定を行うには、統一的な方法で高精度かつ広帯域な測定を実現すべきと考えられる。

そこで本章では、第 4 章で提案されたレーザ干渉計システムを、第 3 章で検討したマイクロフォン表面測定に適用することにより広帯域化を図ることを考える。第 4 章で

用いたレーザ干渉計は，他の物理量で校正された測定機器や基準物に依存しないことから，ダイアグラムの振動振幅の絶対測定が可能である．ただし，ダイアグラムの振動から音圧を推定するには，体積速度を与える必要がある．これにはダイヤフラム全面の振動振幅が必要となるため，レーザを用いた測定でこれを行うのは極めて複雑かつ長い測定時間を要する．この問題の解決には第 3 章で提案した方法が適用できる．そこで本章では，レーザ干渉計を用いたマイクロフォンダイアグラムの変位計測に，第 3 章で提案した体積速度平均モデルを用いた感度測定手法を組み合わせることにより，広い帯域にわたって高い精度が期待できる新しい方法を提案する．

5.2 節ではレーザ干渉計を用いたマイクロフォン表面振動測定に基づいた感度校正システムの基本的な設計方針，設計手順を提案する．5.3 節では提案法のシステム構成と具体的な処理手順について論ずる．5.4 節では第 3 章で求めたダイヤフラム振動振幅の測定結果を援用し，計算機シミュレーションにより提案法の妥当性を検討する．5.5 節は本章のまとめである．

5.2 レーザ干渉計を基盤とする音圧校正法の提案

本節では、本章で提案するレーザ干渉計を用いたマイクロフォン表面振動測定に基づく感度校正法を導入する校正法について、提案，考察を行う。表 5.1 に従来から用いられている可逆校正法と、第 3 章，第 4 章で提案した校正法の測定可能な周波数帯域，精度，及び超低周波数帯域への拡張性を示す。

Table 5.1 Comparison of the calibration methods for 1'' microphone

Items	Measure frequency range	Precision	Capability to extend for lower frequency
Reciprocity method	2 Hz ~ 12.5 kHz	High	Low
Laser Doppler Vibrometry (Chapter3)	20 Hz ~ 12.5 kHz	High	Low
Interferometry + Piston (Chapter4)	2 Hz ~ 20 Hz	High	High

表が示すように、第 3 章で提案したシステムは、マイクロフォンダイアフラムの振動を測定するためにレーザトップラ振動計を適用したものである。レーザトップラ振動計はその精度が高く、振動面に影響を与えないため精密測定が可能である。この方法は、レーザトップラ振動計から直接音圧が計れる訳ではなく、別の過程で校正された誘導単位の測定機を使用することから、相対校正法の一つである。しかし、第 3 章で提案した、絶対校正済みのマイクロフォン(標準マイクロフォン)を用いてダイアフラムの振動姿態のモデルを構築し、ダイアフラムの中心の振動振幅から振幅体積速度を推定する方法は、ダイアフラム中心の振動振幅さえ正しく与えれば、高い精度が期待できる。

第 4 章で提案したレーザピストンフォンシステムは、ピストンの変位を測定するためにレーザ干渉計を用いており、他に校正を必要とする誘導単位の測定や基準器を必要としない絶対校正法である。そこで、第 3 章の提案で用いたレーザトップラ振動計をレーザ干渉計に置き換えることにより、振動振幅については別の過程で校正された誘導単位の測定機を使用しない方法が成立することになり、本質的な高精度化が期待できる。加えて、レーザ干渉計は広い周波数帯域にわたって、マイクロフォン表面の振動を測定できることから、低域の高精度化も期待される。

以上を踏まえ、Fig. 5-1 に、本章で提案するレーザ干渉計を用いたマイクロフォン表面振動測定に基づいた感度校正法の基本的な設計手順を示す。図に示したように、本章で提案するマイクロフォンの感度を求める流れは次のようになる。まず、第 4 章で提案

したように，レーザ干渉計を用いて光検出器で検出される信号を取得し，その信号から第3章の結果に基づいてダイヤフラムの変位分布を求める．次に，得られた変位から振動膜の体積速度を推定する．最後に，第3章で提案した手法によって，推定した体積速度からマイクロフォンの感度を求める．

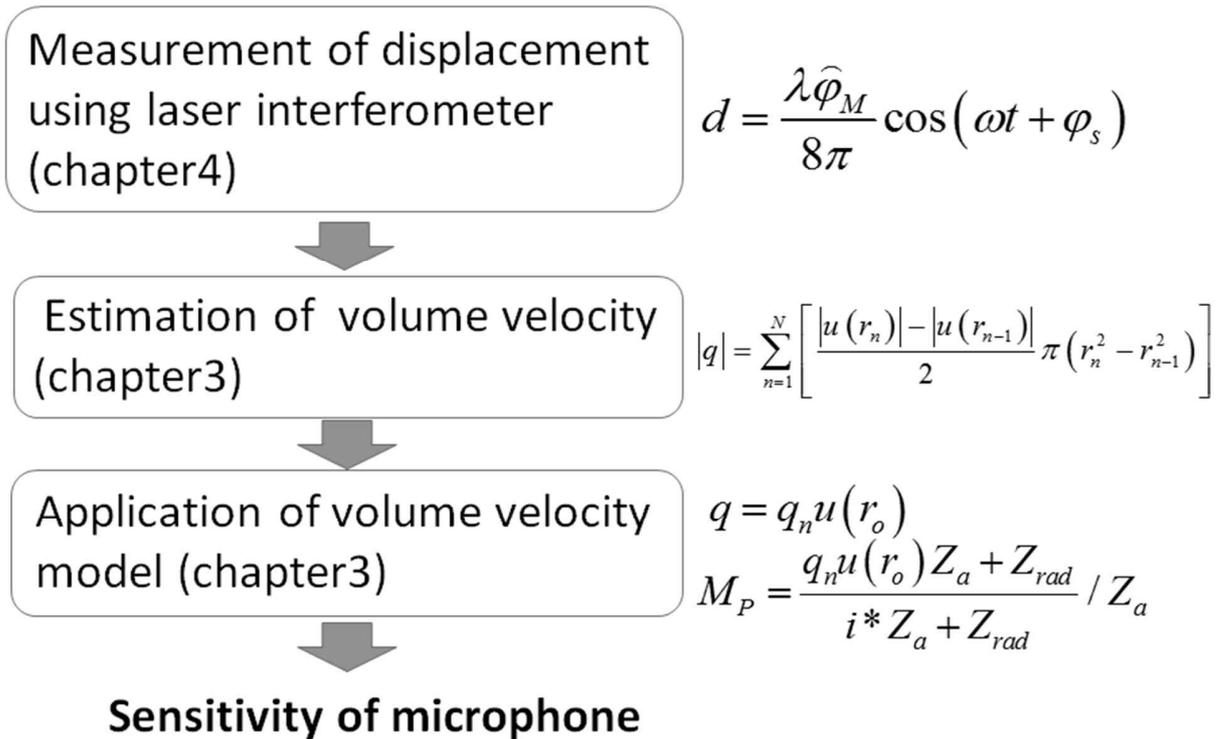


Fig. 5-1. Proposed procedure Fo measure the microphone sensitivity by p86

最終的に本章で提案するシステムの構成を Fig. 5-3 に示す. このシステムの光学部は第 4 章で使用されたものと同じで, 2つの光検出器から得られた直交出力に基づく変位を測定することが可能である. また, 変位も測定可能である. マイクロフォンは, 第 3 章と同じくトランスミッタとして使う. さらに, 提案する干渉計システムは, 長時間のスタンドタイムから直接的に追跡可能であるため, レーザトップラ振動計を干渉計で置き換えることで, 高精度かつ広帯域にすることができる.

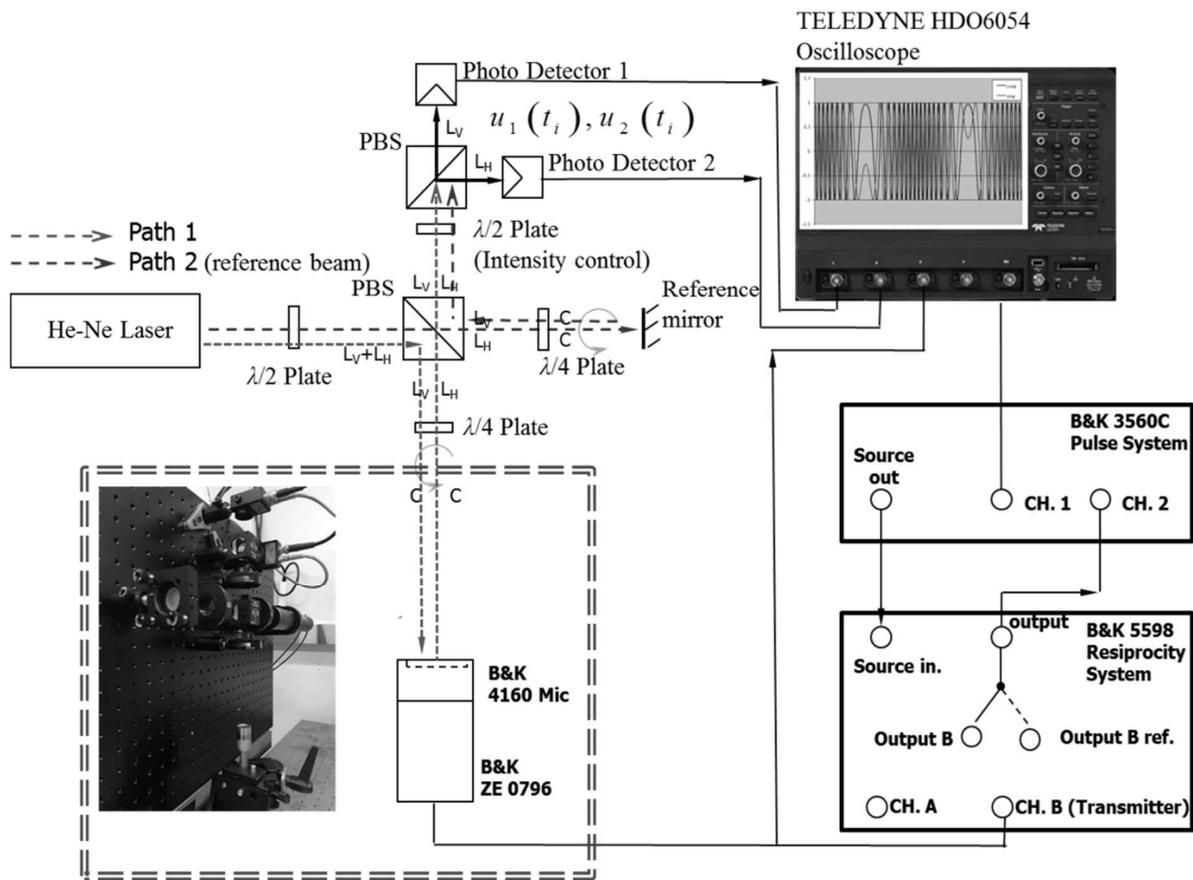


Fig. 5-3. The proposed system configuration for LS microphone calibration based on the laser interferometer with quadrature output

5.3.2 感度校正手順

Fig. 5-3 に示すように、提案したシステムを用いて得られた信号から、高精度、広帯域に感度を求める手順は次の通りである。

(1) 変位測定

正弦波によって発生する干渉信号は、第4章の式(4-5)と(4-6)から予測することが可能であり、式(4-7)を代入すれば、Fig. 5-3 の二つの光検出器で検出される信号は次式のようになる。

$$V_1(t) = \hat{V}_1 \cos \left[\varphi_0 + \frac{8\hat{d}\pi}{\lambda} \cos(\omega t + \varphi_s) \right] \quad (5-1)$$

$$V_2(t) = \hat{V}_2 \sin \left[\varphi_0 + \frac{8\hat{d}\pi}{\lambda} \cos(\omega t + \varphi_s) \right] \quad (5-2)$$

上式で、 \hat{V}_1 と \hat{V}_2 は両方の信号の振幅、各 φ_0 は信号の位相角、 φ_s はピストン運動の位相であり、 $\hat{\varphi}_M$ は変調位相振幅である。上の二つの式を用い、第4章で論じた手法を適用し、ピストンの変位を次式のように推定することができる [64]。

$$d = \frac{\lambda \hat{\varphi}_M}{8\pi} \cos(\omega t + \varphi_s) \quad (5-3)$$

(2) 体積速度推定

前で求めた変位による振動膜振動媒質の体積速度は、表面速度に面積を掛けることで求められる。半径方向の表面速度の分布は第3章 Fig. 3-1(Fig. 5-4 として再掲)のようにモデル化させ、Fig. 5-4 に示すように、体積速度は式(5-4)から求められる [43]。

$$|q| = \sum_{n=1}^N \left[\frac{|u(r_n)| - |u(r_{n-1})|}{2} \pi (r_n^2 - r_{n-1}^2) \right] \quad (5-4)$$

しかし、実際のマイクロフォンの振動膜の境界条件は理想的な条件ではなく、理論式の応答と完全には一致しない。そのため、理論式で求められた数値と実システムでの偏差、および実測したモデルが必要になる。

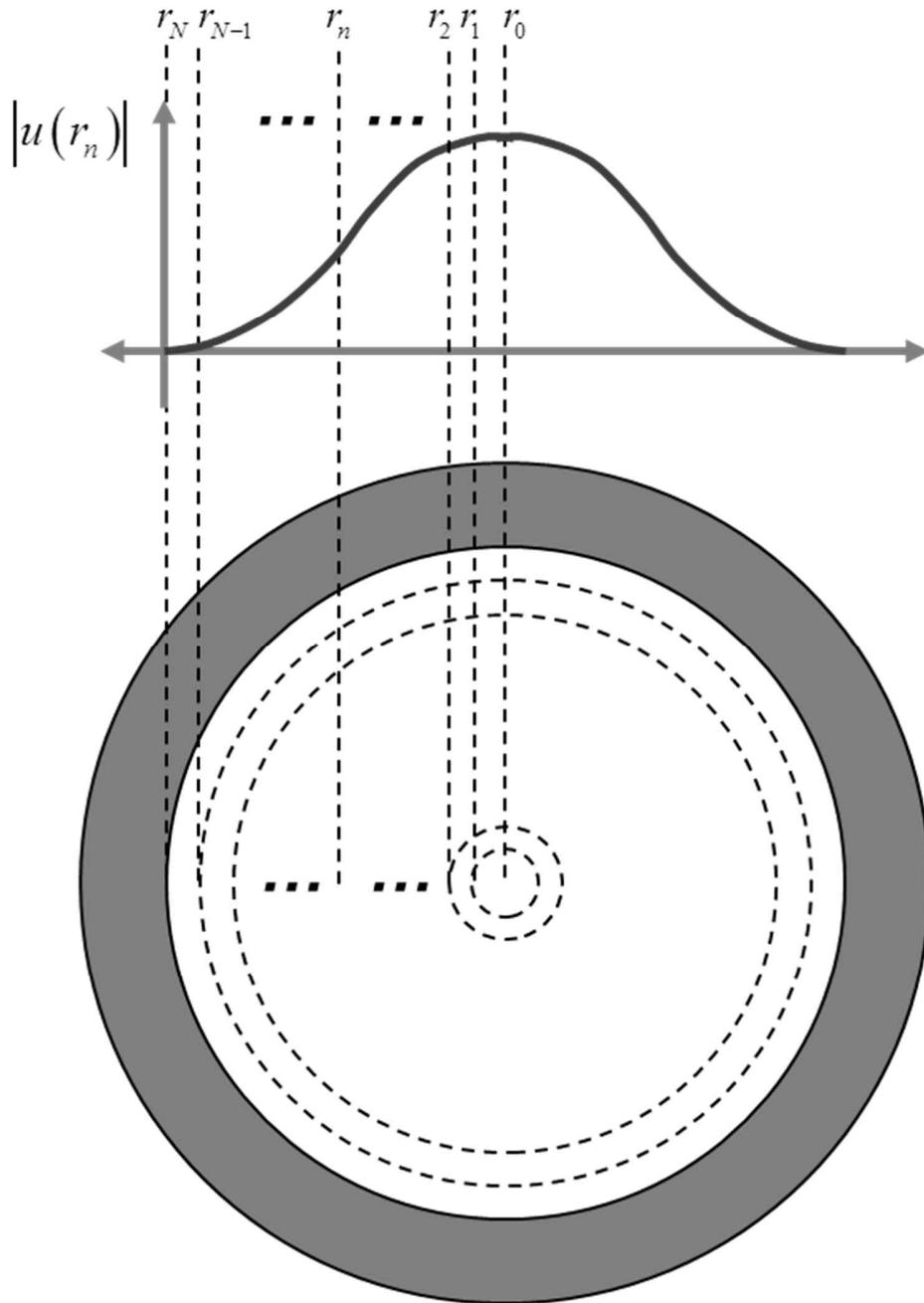


Fig. 5-4. Surface velocity distribution model of standard microphone diaphragm as same shows area to having the same surface velocity

(3) 体積速度平均モデルを用いた感度推定

第3章で論じたように、表面の振動分布が各マイクロフォンに対して同一の場合、中心から速度に合わせて正規化された体積速度は、同一型のマイクロフォンではなく一致している。したがって、音響体積速度に対する経験的モデルは、正規化された周波数に対する測定された分布の平均をとることで取得できる。このモデルを用いて、マイクロフォンの感度を次式で求められる。

$$q = q_n u(r_o) \quad (5-5a)$$

$$M_p = q_n u(r_o) Z_a + Z_{rad} / i^* Z_a + Z_{rad} / Z_a \quad (5-5b)$$

以上の手続きにより、レーザ干渉計でマイクロフォンの変位が測定できれば、マイクロフォンの感度が求められることになる。

5.4 提案法の妥当性の考察

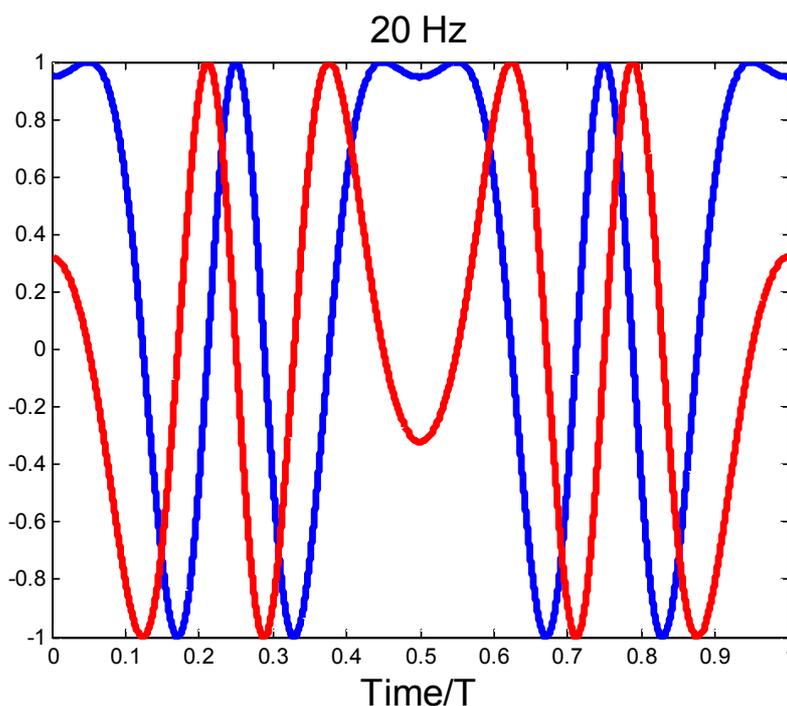
本章で提案する方法をマイクロフォン校正に使うためには、マイクロフォン振動膜変位の範囲が、測定可能な範囲に含まれる必要がある。これを検証するために、測定された振動膜の変位値を求め、正しい値が得られるかを検証する。

そのために、式(5.1)と式(5.2)の振幅 \hat{V}_1 と \hat{V}_2 を1と仮定し、位相角 φ_0 と表面の位相 φ_s も0と仮定し、次式のように簡略化処理を行った。

$$PD1(t) = \cos \left[\frac{8\hat{d}\pi}{\lambda} \cos(\omega t) \right] \quad (5-6)$$

$$PD2(t) = \sin \left[\frac{8\hat{d}\pi}{\lambda} \cos(\omega t) \right] \quad (5-7)$$

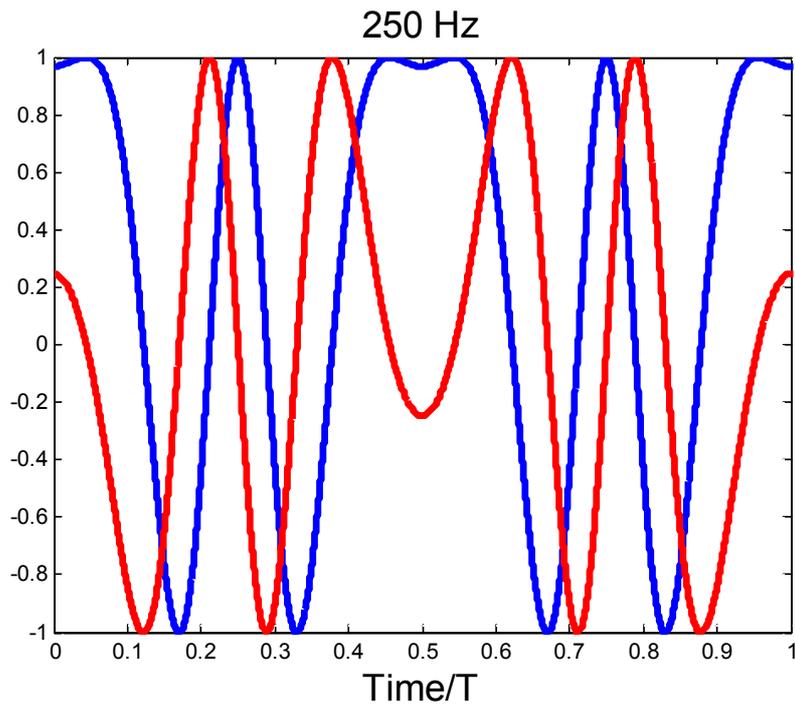
これらの式を用いて計算した干渉信号を Fig. 5-5 に示す。この図で、横軸は時間、縦軸は振幅を示している。図中の赤色と青色は各光検出器で得られるべき信号であり、代表的な三つの周波数(20 Hz, 250 Hz, 6300 Hz)の場合について描いてある。



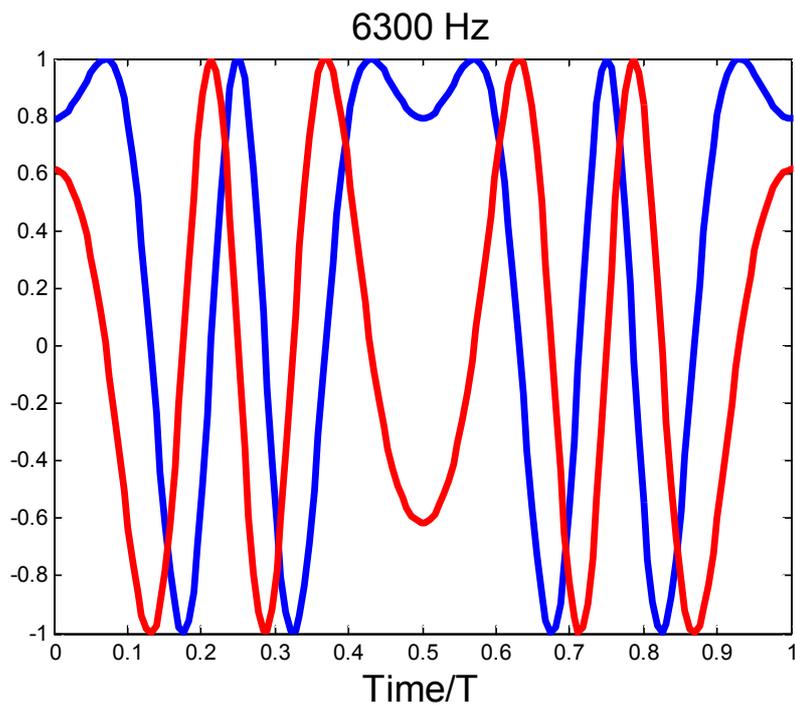
(a)

(次ページに続く)

(前ページから続く)



(b)



(c)

Fig. 5-4. Simulated interference signals of each photo detector with the displacement of Fig. 5-3:
(a) 20 Hz, (b) 250 Hz and (c) 6300 Hz

Fig. 5-5 に、Fig. 5-4で得られた信号を利用し、式 (5.3)を用いて計算した変位と、第 3 章で得られた変位を比較した結果を示す。横軸は周波数を、縦軸は変位を表している。また、実線は第 3 章で測定した変位値であり、点線は第 5 章で提案する方法を用いた上記の計算機シミュレーションにて得られた結果である。図から、二つの値がほぼ一致していることが分かる。したがって、本章で提案した方法が、高精度かつ広帯域な校正方法として用いるに適用できる可能性が考えられる。

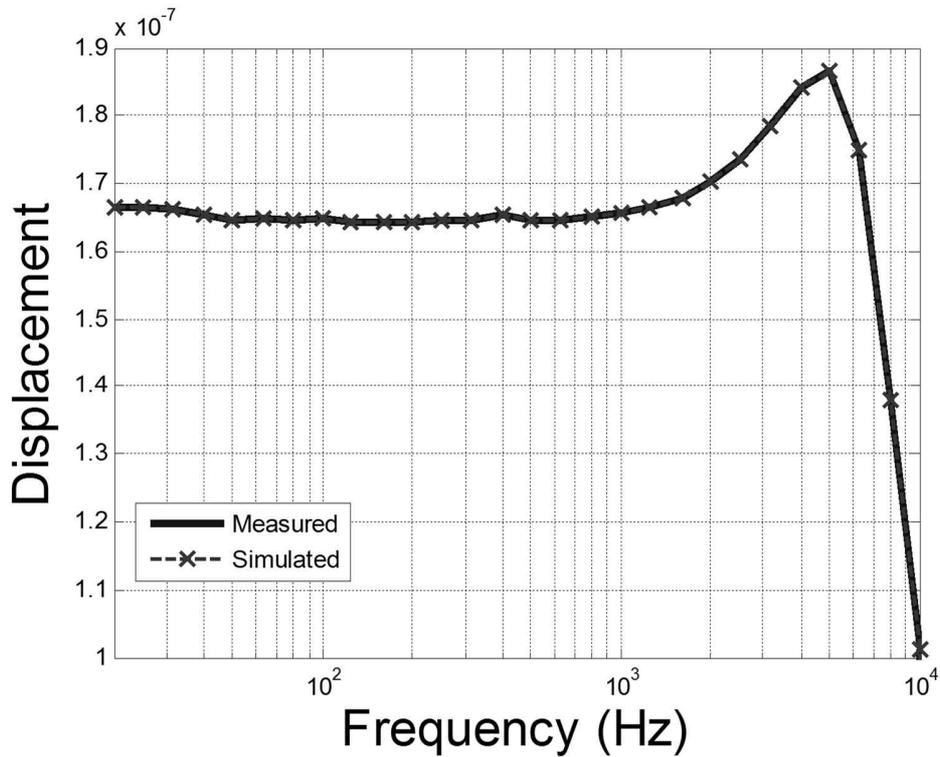


Fig. 5-5. Comparison of the measured and recalculated displacement by the sine approximation process with the simulated interference signals in Fig. 5-4

5.5 まとめ

標準マイクロフォンの校正に広く使用されている既存の可逆校正法は，第2章で示した通り，測定に多大な時間を必要とするだけでなく，低周波数帯域では測定における信号対雑音比が低下するなど，測定する周波数帯域を拡張する面で制限が多い．そのため，測定帯域を超低周波数から可聴周波数までの広い範囲にわたり高精度校正が可能なシステムが必要となる．

本章では，社会的関心の高まっている超低周波音のように，可聴周波数帯域の下限以下の周波数から上限周波数付近までの広範囲にわたり，マイクロフォンの高精度校正が可能なシステムの実現を目指した．そのために，第4章で提案した方法を第3章の校正手法の過程に適用する手法を提案した．即ち，第4章で提案したレーザ干渉計システムは，第3章の表面振動測定へ適用することが可能であり，このシステムを適用することで，他に校正された振動測定機器を使わずともマイクロフォンの感度を高精度かつ広帯域に測定することができるというものである．また，本章では，提案法の有効性を検証するために，第3章で求めたダイヤフラム振動振幅の測定結果を援用し，計算機シミュレーションにより提案法の妥当性を検討した．その結果，シミュレーション結果値は第3章で測定した変位値とほぼ一致していることが示され，提案法が妥当性を持つことを明らかにした．

以上のことから，本章の提案方法は，広帯域にわたって高い精度で校正可能な新しい方法となり得ると言える．しかしながら，本章の計算機シミュレーションの結果は，提案システムの妥当性と可能性を示したものであり，今後実システム上でその有効性を検討する必要があると考える．

第6章 結論

本研究では、光学的な測定手法に着目し、可聴周波数の下限以下の周波数(2 Hz)から可聴周波数帯域の上限周波数付近までの、広範囲にわたり標準マイクロフォンの高精度校正が可能な高精度標準マイクロフォン校正法の開発を目指した。

序論では、標準マイクロフォンの校正法として広くに使用されているコンデンサマイクロフォンの概要と特性、標準マイクロフォン校正の必要性、及び関連する先行研究について概観した。また、標準マイクロフォンの校正法として最も優れているとされ国際標準として用いられている可逆校正法を概観し、以下に示す4つの問題点を挙げた。

- (1) 1つのマイクロフォンでの測定が不可能である。
- (2) 手続きが複雑である。
- (3) 測定時間が長い。
- (4) 20 Hzより低い周波数帯域の測定ができない。

これらの問題点を解決し得る、新たなマイクロフォン校正法の検討は極めて重要である。前に述べた1～3番目の問題点を解決するために、ダイヤフラム表面の振動測定によって感度を導くことにより、1つのマイクロフォンでの感度決定が可能になると考えた。そのため、レーザ振動計を用いたダイヤフラム振動の測定に基きマイクロフォンの感度を測定する方法を検討した。4番目の問題点を解決するために、光学的な測定システムと正弦波近似法を組み合わせ、レーザ干渉計を用いて低周波数領域でのマイクロフォンの感度取得の可能性について述べた。また、周波数の拡張性を考慮して、レーザ干渉計を用いた手法を採用し、可聴周波数帯域だけではなく、低周波数から高周波数までの広範囲にわたり標準マイクロフォンの高精度校正が可能なシステムについて検討した。

第2章では、まず、序論で述べた既存の可逆校正法の理論的な背景について詳細に論じ、従来の可逆校正法において問題点が生じる原因を明らかにした。それを踏まえ、測定時間が長いという問題点を解決するために、音響伝達関数を用いて定式化することにより広い周波数帯域の測定をまとめて行うことを提案した。そのために、実際音響系のインパルス応答を求める際に広く用いられている時間引き延ばしパルスを導入し、可逆校正法の音響伝達関数を全周波数帯域にわたり一気に測定する手法について検討した。その結果、既存の可逆校正法に比べ、時間引き延ばしパルスを用いて感度を求めた方が測定時間が大幅に短縮できた。しかしながら、時間引き延ばしパルスの同期加算回数を増やせば、低周波帯域の感度差がだんだん小さくなるが、周波数が高くなるに連れその差は大きくなった。また、信号長とサンプリング周波数を変えながら検討を進めたが、大きな改善には至らなかった。即ち、測定時間の大幅な短縮は実現可能であったが、こ

の方法を標準マイクロフォン感度測定法として利用するには改善すべき問題点が多いことが示された。

第3章では、従来の可逆校正法の問題点の中、特に(1)単一のマイクロフォンでの測定が不可能、(2)手続きが複雑であるという2点を解決するために、レーザドップラ振動計を用いたマイクロフォンの表面振動の測定による新たな感度計測手法を提案した。提案法は、まず、レーザドップラ振動計を導入することによって、振動膜の振動測定値を用い、境界要素法の数値解析によりマイクロフォン振動膜の共振周波数と減衰係数を求める。提案法を用いて実験を行った結果、測定された共振周波数と減衰係数は標準マイクロフォンの公称値に近い値が得られ、提案法の有効性が確認できた。また、10回の測定に必要な時間はわずか30分未満であり、既存法(数十時間)より大幅な時間短縮を実現できた。

次に、振動膜中心の表面速度と、振動膜表面の振動によって誘導される音響体積速度との関係を検討し、表面の速度分布を測定することによるモデルを提案した。ここでは、6つのサンプルで推定された実験室標準マイクロフォンの経験モデルを求めた。このモデルを用いて推定されたマイクロフォンの感度は、従来の可逆校正法によって求めた結果と約0.1 dBの差があり、高精度の測定方法を実現できた。提案法は可逆校正法と比べて、手続きが簡単で、一つの校正プロセスに対して一つのハードウェアの設定のみが必要であり、マイクロフォンとカップラを入れ替える手間が省ける利点がある。しかしながら、本章で提案した手法は、可聴周波数領域に限定していたため、20 Hz以下の帯域での信号対雑音比が劣化し測定が不可能となる問題点が残っていた。

第4章では、第3章で述べた問題点を解決するために、レーザ干渉計を用いた低周波帯域マイクロフォン感度測定法を提案した。提案法は、低周波に対するマイクロフォン感度の振幅および位相を校正するものであり、レーザ検出器から得られた直交信号に正弦近似法を適用することによって感度を求める。提案法の性能評価を行うため、測定実験を実施した。1/3オクターブ帯域間隔で2~40 Hzまでの帯域に渡り実験を行った結果、2~20 Hzの周波数範囲で感度値の改善が求められた。しかし、20 Hz以上の周波数では、ピストンフォンの連結器と横方向運動で高次モードの影響が増加するため、誤差も増加した。位相の場合は大きさの場合よりその差が大きく、周波数による変化も不安定であるが、この場合でも各方法の結果は拡張不確度以内であった。この結果から、提案システム2~20 Hzまでの低周波数領域でのマイクロフォンの感度を校正できると考えられる。

一方、可逆校正法と比較して、周波数応答は不安定であった。特に位相の場合には、入力波形の品質が大きな理由の一つである。これらを考えると、歪のない正確な正弦波信号を得るためには、長いストロークの制御部を持つ加振機が必要であると考えられる。劣化のもう一つの原因は空洞の漏出であり、これによる音圧レベルの減少は、2 Hzで30 dB以上と大きくなった。このため、マイクロフォンで検出するのに十分な水準の音

圧を得るためには大きな変位が必要であると言える。即ち、性能を向上させるためには加振部をもっと精密に設計する必要がある。提案システムはいくつかの限界がある。提案法の概念は、感度振幅と位相測定に適用可能である。提案法の適用範囲は LS 型マイクロフォンに限られないため、マイクロ気圧計を用いた超低周波音響センサ等の 1 次校正方法としても使用できると期待される。

第 5 章では、マイクロフォンの校正帯域を可聴周波数帯域だけではなく、低周波数から可聴周波数帯域までの広範囲にわたり、マイクロフォンの高精度校正が可能なシステムについて検討した。測定区間の拡張性を考え、第 4 章で提案した方法を第 3 章の過程に適用することで、校正された測定システムや標準器に依存せず、高精度かつ低域から可聴周波数帯域までマイクロフォンの感度を容易に測定できると考えた。提案法の妥当性を検証するため、第 3 章で求めたダイヤフラム振動振幅の測定結果を援用し、計算機シミュレーションにより提案法の有効性を検討した。その結果、シミュレーションの結果は、第 3 章で測定した変位値とほぼ一致していることを確認した。このことから、レーザ干渉計を用いマイクロフォンダイヤフラムの変位に、第 3 章で提案した体積速度平均モデルを用いた感度測定手法を組み合わせるといふ提案法は、広帯域かつ高精度な測定が可能な新しいシステムとなり得ると考えられる。ただし、本章の計算機シミュレーションの結果は、提案システムの妥当性の検証にとどまり、提案法の可能性を示したものであり、今後実システム上でその有効性について更なる検討を進める必要があると考える。

第 5 章で提案した手法は、他の関連する物理量で校正された測定機器や基準物に依存しない、広帯域かつ高精度な校正手法であると言える。本研究で提案した手法は、各国の標準機関における標準マイクロフォンの校正手法として、今後、測定時間の短縮、手続きの簡単さ、更には 1 個のマイクロフォンで測定が可能な広帯域校正法として広く応用されることを期待し、本研究の結びとする。

謝辞

まず、この博士論文を私の救い主であるイエスキリストに捧げる。

本論文は、数多くの方々のご指導、ご援助なしにはまとめることができなかつたものである。ここにお世話になった方々への感謝の意を記す。

本研究を行うにあたって、東北大学電気通信研究所鈴木陽一教授には、社会人である私に対し、大学院博士後期課程入学を受け入れ、本研究に取り組む機会を与えていただき、また深い知識と理念をもって、研究に取り組む姿勢や研究方針など、示唆に富むご指導をいただいた。ここに深く感謝申し上げます。

東北大学大学院工学研究科川又政征教授には、本論文をまとめるにあたり、数々の貴重なご意見をいただいた。また、東北大学大学院工学研究科木下哲男教授には本論文の構成、審査に至るまで、熱心なご討論と貴重なご意見をいただいた。両先生には深く感謝する。東北大学電気通信研究所坂本修一准教授には、ゼミなどの場で研究の方向性や進め方、細部にわたる熱心なご討論、深い示唆に富む助言をいただいた。ここに深く感謝申し上げます。

東北大学電気通信研究所崔正烈助教には、研究の細部にわたる熱心なご討論から、社会人であるため普段研究室にはおらず勝手のわからない私に、資料の準備や発表の仕方に至るまで細やかな配慮とご助言をいただいた。深く感謝申し上げます。

東北大学電気通信研究所技術職員齋藤文孝氏には数々の心強い激励の言葉をいただいた。深く感謝申し上げます。研究室事務補佐員の小野 寺美紀さんには、私に機材の借用や郵便物の転送、旅費の処理など様々な事務的なご協力とご配慮をいただいた。ここに感謝する。

東北大学電気通信研究所の Jorge Treviño 助教, César D. Salvador 特任助教には、ゼミなどの場で色々な議論及び英語の校正をいただいた。ここに深く感謝する。研究室の学生のみなさんには、ゼミの場などで熱心にご討論いただくとともに、年齢が離れ普段研究室にいない私に対しても、快く話の輪の中に入れていただいた。

韓国標準科学研究院音響研究室の曹浣豪博士、徐相俊博士には、多忙を極めるなか、本研究を進めるに当たり熱心にご指導をいただいた。また、研究の進め方や発表についても数多くの助言を頂いた。ここに改めて深く感謝する。韓国標準科学研究院光学センターのセンター長及び光学センターの皆様には、社会人学生として博士課程への進学を許可いただき、業務上の配慮を頂いた。ここに深く感謝する。

清洲大学の金学胤教授には、多忙にも関わらず、研究を進めるにあたり数々の貴重なご指導、ご助言をいただいたさらに、これまで投稿した予稿や論文等の添削に多くの時間を割いていただいたここに心から深く感謝申し上げます。清洲大学の韓喆洙博士に

は、多忙にも関わらず、実験などを進めるにあたり数々の貴重なご指導、ご助言を頂いた。

私たちの家庭の柱であり、私を常に信じてくれた尊敬する 兄と、常に実践を通して愛を教えていただき、昼夜お祈りと応援を送ってくれた姉に感謝の念をささげる。

また、日常生活の中での大きな支えになった呉淵順様とその第も、私に温かい応援と激励をくださった。ここに深く感謝申し上げる。

最後に、私を精神的に支えてくれた妻、故梁熙英と私の帰りをいつも明るい笑顔で待ってくれる娘、銀一、燕華にも心からの深い感謝をささげる。

本研究は、多くの方々のご指導、ご協力の下で行なわれたものであり、ここに名前を挙げるができなかった方々も含め、重ねて感謝する。

参考文献

- [1] Wente E. C., "A condenser transmitter as a uniformly sensitive instrument for the absolute measurement of sound intensity," *Physical Review*, 10, pp.39-47, 1917.
- [2] Wente E. C., "Sensitivity of the electrostatic transmitter for measuring sound intensity," *Physical Review*, 19, pp.498-452, 1922.
- [3] 三浦甫, 松井英一, "標準マイクロホンの音圧校正におけるカプラ内波動の解析," *日本音響学会誌* 30, pp.639-648, 1974.
- [4] Ballantine S., "Technique of microphone calibration," *J. Acoust. Soc. Am.* vol 3, pp.319-327, 1932.
- [5] Burnett E. and Penzes W., "Calibration of Laboratory Condenser Microphones," *Tenth Transducer Workshop*, pp.27-36, June 1979.
- [6] H. Miura and E. Matsui, "On the analysis of the wave motion in a coupler for the pressure calibration of laboratory standard microphones," *J. Acoust. Soc. Jpn. (J)*, 30, pp.639-647, 1974.
- [7] Koidan W. and Siegel D. S., "Free-field correction for condenser microphones," *J. Acoust. Soc. Am.* vol 36. pp.2233-2241, 1964.
- [8] Jacobsen F., "Free-field calibration of one-inch standard condenser microphones," *Technical University of Denmark, The Acoustics Laboratory Technical Report No.15*, 1976.
- [9] Diestel H. G., "Reciprocity calibration of microphones in a diffuse sound field," *J. Acoust. Soc. Am.* vol 33, pp.514-522, 1964.
- [10] 中島隆之, "標準マイクロホンの拡散音場補正量に関する研究," *電気試験所研究報告* 第 706 号, 1970.
- [11] IEC 61094-1, *Measurement microphones - Part 1: Specifications for laboratory standard microphones*, 2000.
- [12] IEC 61094-2, *Measurement microphones - Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique*, 2009.

- [13] IEC 61094-3 Measurement - Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique, 2016.
- [14] Bruel & Kjaer, "Microphone Handbook," vol. 1, 1996.
- [15] 小林孝夫, "音響標準校正法," 電電公社研究実用化報告, pp. 38-41, 1952.
- [16] A. S. A., "American Standard Method for the Calibration of Laboratory Standard Pressure Microphones" Z24. 4, 1949.
- [17] IEC 327, Precision method for pressure calibration of one-inch standard condenser microphones by the reciprocity technique, 1971.
- [18] IEC 402, Simple method for pressure calibration of one-inch standard condenser microphones by the reciprocity technique, 1972.
- [19] IEC 486, Precision method for free-field calibration of one-inch standard condenser microphones by the reciprocity technique, 1974.
- [20] IEC 655, Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels for one-inch standard condenser microphones, 1979.
- [21] Jarvis D. R., "Realization of the Standard of Sound Pressure through the Calibration of Half-Inch Laboratory Standard Condenser Microphones," Ph. D. thesis, Kings College, University of London, 1989.
- [22] MacLean W. R., "Absolute measurement of sound without a primary standard," J. Acoust. Soc. Am. vol 12, pp.140-148, 1940.
- [23] R. Barham, "The NPL laser pistonphone," Journal of Low Frequency Noise Vibration 12, pp.36-38, 1994.
- [24] R. Barham and M. Goldsmith, "The application of the NPL laser pistonphone to the international comparison of measurement microphone," Metrologia 44, pp.210-216, 2007.
- [25] R. Barham, "Report on key comparison CCAUV.A-K1," Metrologia 40, 09002, 2003.
- [26] M. Sinojmeri, "Final technical report for key comparison CCAUV.A-K2," Metrologia 46, 09006, 2009.

- [27] Foldy L. L. and Primakoff H., "General theory of passive linear electroacoustic transducers and the electroacoustic reciprocity theorem," J. Acoust. Soc. Am. vol 17. pp.140-148, 1945.
- [28] Henriquez V. C. and Rasmussen K., "Final report on the key comparison CCAUV.A-K3," 2006.
- [29] 大賀寿郎, 山崎芳男, 金田豊, "音響システムとデジタル処理' 電子情報通信学会 pp.158-159, 1995.
- [30] Y. Suzuki, F. Asano, H. Kim, and T. Sone, "An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses," J. Acoust. Soc. Am. vol. 97, Issues 2, pp.1119-1123, 1995.
- [31] Barrera Figueroa, Salvador, "Sound field reconstruction using acousto-optic tomography," J. Acoust. Soc. Am. vol. 131(5), pp.3786-3793, 2012.
- [32] Suh JG, Kim HY, Suzuki Y., "Measurement of resonance frequency and loss factor of the microphone diaphragm by laser vibrometer," Applied Acoustics , vol 71, pp.258-261, 2010.
- [33] Rasmussen, K., "On the Calculation of Heat Conduction in Cylindrical Cavities," The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Internal Report PL-02,1990.
- [34] Frederiksen, E. and Christensen, J. I., "Pressure Reciprocity Calibration – Instrumentation, Results and Uncertainty," Tech. Rev., Bruel & Kjaer, No. 1, 1998.
- [35] Salava, T., "Measurement of the Acoustic Impedance of Standard Laboratory Microphones," The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Report No. 18, 1976.
- [36] Wong G. S. K. and Embleton, T. E. W., "AIP handbook of condenser microphones," AIP, New York, 1976.
- [37] Rasmussen, K., "Determination of Microphone Parameters by Data Fitting," DPLA Calibration Workshop Note, 2003.
- [38] Henriquez, V. C. and Rasmussen, K., "Final report on the key comparison CCAUV.A-K3," 2006
- [39] French, A. P., "Vibrations and waves," W. W. Norton & Co., New York, 1971.
- [40] Harris, C. M., "Shock and vibration handbook", 4th/ed., McGraw-Hill, New York, 1996.

- [41] Barrera-Figueroa S, Rasmussen K, Jacobsen F., “Hybrid method for determining the parameters of condenser microphones from measured membrane velocities and numerical calculations”, *J. Acoust. Soc. Am.*, pp.126-134, 1996.
- [42] T. Salava, “Measurement of the Acoustic Impedance of Standard Laboratory Microphones,” The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Internal Report PL-02, 1990.
- [43] T. F. W. Embleton and I. R. Dagg, “Accurate Coupler Pressure Calibration of Condenser Microphones at Middle Frequencies,” *J. Acoust. Soc. Am.* Vol 32, pp.320-326, 1960.
- [44] P. Riety and M. Lecollinet, “Le Dispositif d'Etalonnage Primaire des Microphones de Laboratoire de l'Institut National de Metrologie,” *Metrologia* 10, pp.17-34, 1974.
- [45] G. S. K. Wong and T. F. W. Embleton, “Arrangement for Precision Reciprocity Calibration of Condenser Microphones,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol 66(5), pp.1275-1280, 1979.
- [46] G. S. K. Wong, “Precise Measurement of Phase Difference and Amplitude Ratio of Two Coherent Sinusoidal Signals,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol 75(3), pp.967-972, 1984
- [47] M. E. Delany and E. N. Bazley, “Uncertainties in Realizing the Standard of Sound Pressure by Closed-coupler Reciprocity Technique,” Acoustics Report Ac. 99, National Physical Laboratory, United Kingdom, 1980.
- [48] Bruel & Kjaer, Technical documentation. Reciprocity calibration system; 1997.
- [49] Ballantine S., “Technique of Microphone Calibration,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol 3, pp.319-360, 1932.
- [50] Daniels F. B., “Acoustical Impedance of Enclosures,” *J. Acoust. Soc. Am.* 19, pp.569-571, 1947.
- [51] Biagi F. and Cook R. K., “Acoustic Impedance of a Circular Cylindrical Enclosure,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol 26, pp.506-509, 1954.
- [52] Jarvis D. R., “Acoustical Admittance of Cylindrical Cavities,” *J. Sound and Vib.* 117, pp.390-392, 1987.
- [53] Carslaw H. S. and Jaeger, J. C., “Conduction of Heat in Solids,” 2nd ed. Oxford University Press, London, 1959.

- [54] ISO/IEC Guide 98-1, "Introduction to the expression of uncertainty in measurement," 2009.
- [55] Avison J, Barham R., "Final report on key comparison CCAUV.A-K5: pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range 2 Hz to 10 kHz," *Metrologia* 51: Technical Supplement 09007, 2014.
- [56] Barrera-Figueroa S, Rasmussen K, Jacobsen F., "Hybrid method for determining the parameters of condenser microphones from measured membrane velocities and numerical calculations," *J. Acoust. Soc. Am.* vol 126, pp.1788-1795, 2009.
- [57] Jackett R., "The effect of heat conduction on the realization of the primary standard for sound pressure," *Metrologia* 51, pp.423-430, 2014.
- [58] Kinsler LE, Frey A, Coppens A, Sanders J., "Fundamentals of Acoustics," 4th ed., John Wiley and Sons, New York, 2000.
- [59] Rasmussen K., "Radial wave-motion in cylindrical plane-wave couplers," *Acta Acustical*, pp.145-151, 1993.
- [60] BE1499-11, "Reciprocity calibration apparatus type 9699 user manual," Brüel & Kjær, Nærum, 1998.
- [61] IEC 60942, Electroacoustics – Sound calibrators, 2017.
- [62] E Sadikoglu, E. Bilgic, and B. Karaboce, "A laser pistonphone based on self-mixing interferometry for the absolute calibration of measurement microphones," *Applied Acoustics* 65, pp.833-840, 2004.
- [63] W. He, L. He, F. Zhang, Z. Rong, and S. Jia, "A dedicated pistonphone for absolute calibration of infrasound sensors at very low frequencies," 2016.
- [64] IEC 16063-11, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers – part 11: primary vibration calibration by laser interferometry", 1999.
- [65] T. Bruns, G. Ripper, and A. Täubner, "Final report on CIPM key comparison CCAUV.V-K2," *Metrologia* 51, 09002, 2004.
- [66] M. Dobosz, T. Usuda, and T. Kurosawa, "Methods for the calibration of vibration pick-ups by laser interferometry: I. Theoretical analysis," *Measurement Science and Technology* 9, pp.232-239. 1998.

- [67] F. Zhang, W. He, L. He, and Z. Rong, "Acoustic properties of pistonphones at low frequencies in the presence of pressure leakage and heat conduction," *Journal of Sound and Vibration* 358, pp.324-333, 2015.
- [68] Gerber H., "Acoustic Properties of Fluid-Filled Chambers at Infrasonic Frequencies in the Absence of Convection," *J. Acoust. Soc. Am.* vol 36, pp.1427-1434, 1964.
- [69] R. Jalett, "The effect of heat conduction on the realization of the primary standard for sound pressure", *Metrologia* 51, pp.423-430, 2014.
- [70] W. He, F. Zhang, L. He, and Z. Rong, "A study on the pressure leakage correction of pistonphones at infrasonic frequencies," *Journal of Sound and Vibration* 335, pp.105-114, 2015.
- [71] P. C. Hansen, "Rank-Deficient and Discrete Ill-posed Problems," SIAM, Philadelphia, 1998.
- [72] J. Avison and R. Barham 2014 *Metrologia* 51, 09007. Final report on key comparison CCAUV.A-K5: pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range 2 Hz to 10 kHz.
- [73] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data- Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [74] S. Qiao, et al., "Final report of CCAUV.V-K3: key comparison in the field of acceleration on the complex charge sensitivity," *Metrologia* 54, Tech. Suppl., 09001, 2017.
- [75] J.-G, Suh, W.-H Cho, H.-Y. Kim, Z. Cui, and Y. Suzuki, "Sensitivity measurement of a laboratory standard microphone by measuring the diaphragm Vibration, " *Applied Acoustics*, vol.143, pp.38-47, 2019.