

〔研究〕

カブラ校正法におけるマイクロホン間電圧減衰量の測定誤差の要因 - I 形標準コンデンサマイクロホンの安定性について -

Causes of a Measurement Error of a Voltage Attenuation between Two Microphones in a Coupler Calibration Method – On the Stability of Type I Standard Condenser Microphones –

堀内 竜三 藤森 威 佐藤 宗純
R. HORIUCHI T. FUJIMORI S. SATO

In a coupler calibration method, when we measure the voltage attenuation between an input terminal of a source microphone and an output terminal of a receiver microphone, there are some cases where the measured value is deviated from the mean value.

In this paper, we examined causes of the fluctuation by a lot of experiments in detail and concluded that the unstableness is due to either a change of a distance between a microphone's diaphragm and a back-plate or the tension of the diaphragm.

§ 1 はじめに

当所では、可聴周波数範囲での音圧標準として採用されている標準コンデンサマイクロホン¹⁾(以下標準マイクと呼ぶ)の音圧感度の校正精度向上のため、標準マイクのカブラ校正システムを順次改良してきた^{2)~4)}。校正システムの中で増幅器、減衰器等の電気回路部分の改良によって測定精度が段階的に向上した結果、従来は困難であったマイクやカブラに関わる音響的精度の詳細な検討が可能となった。

音響的精度に関わる問題点の一つは、マイクをカブラに装着後数時間にわたって電圧減衰量と呼ばれる測定値が周波数10kHz以上で特に大きく時間変化することである。筆者らはこの現象について実験的に検討を行い、マイクをカブラに装着時に用いるグリスが時間変化を引き起こすことを明らかにし、時間的に安定な測定値を得る方法を見出した⁵⁾。

もう一つの問題点は、同一条件で電圧減衰量を測定した場合であっても測定値が一時的に平均値から大きく変動する場合が見られることである。

本論文は校正システムの音響伝達系の安定性に起因する測定精度向上のために行った研究をまとめたものであり、

特に後者の電圧減衰量の変動の要因に関する実験的検討の結果について報告する。

§ 2 電圧減衰量の測定条件および経時変化

カブラ校正法の測定原理と校正システムの構成・性能についてはすでに報告済みであるので⁴⁾、ここでは要点のみを述べる。図1にカブラ校正法で用いるカブラおよび標準マイクの模式図を示す。本校正法では標準マイクの音圧感度を校正するため電圧減衰量なる量を測定しているが、電

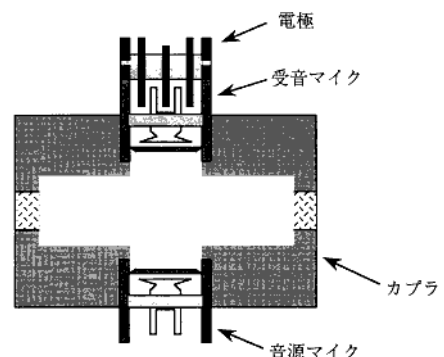


図1 音源・受信マイクのカブラへの装着状態(断面図)

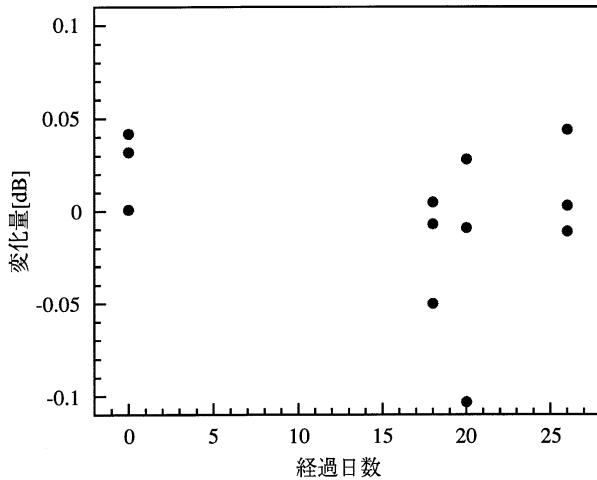


図2 電圧減衰量の経時変化
(MR103 マイクの組合せ(A, C))

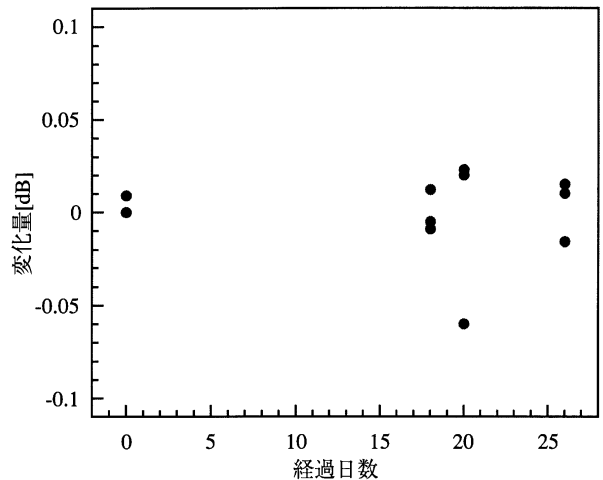


図4 電圧減衰量の経時変化
(MR103 マイクの組合せ(B, C))

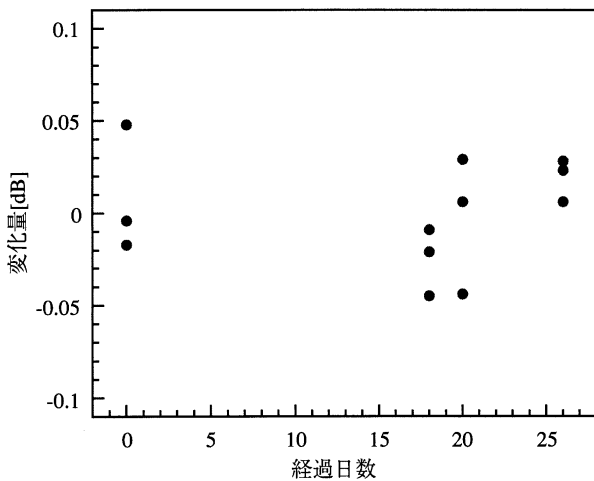


図3 電圧減衰量の経時変化
(MR103 マイクの組合せ(A, D))

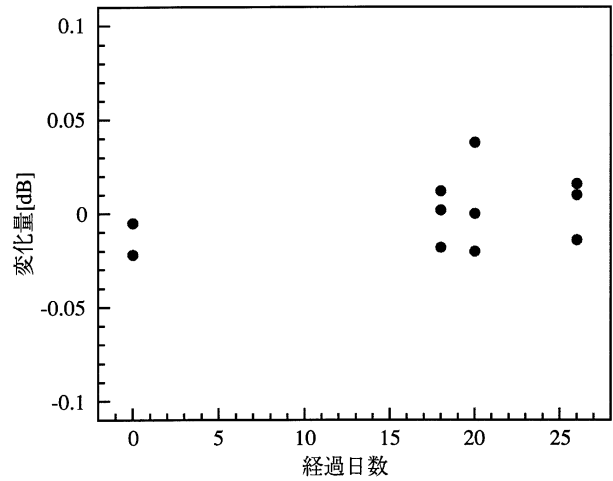


図5 電圧減衰量の経時変化
(MR103 マイクの組合せ(B, D))

圧減衰量とは音源マイク入力端子と受信マイク出力端子間の電圧伝達関数 (dB 値) の符号を変えたものである。この電圧伝達関数から二つのマイクの音圧感度の積が求められるので、音圧感度の校正精度を向上させるためには電圧減衰量を高精度に測定することが必要不可欠である。

次に電圧減衰量の測定条件について述べる。マイクは。形のMR103およびBK4160を用いた。MR103は我が国で主に。形標準マイクとして使用されてきたものである。一方BK4160は世界的に。形標準マイクとして普及しているもので、MR103と比較して音圧感度が2~3dB高く、また材質・構造にも違いがある。

カプラは。A形¹⁾(内容積20cc)のものをを用い、カプラ内媒質は空気とした。音源マイクに加える信号波形は測定時間を短縮するため正弦波ではなくマルチサイン波とし、信号周波数は212.5, 262.5, 312.5, 512.5, 712.5, 1012.5, 1512.5Hzの7点とした。これらの信号周波数は高調波や

商用電源周波数の影響が除去できるような組合せを選択している。

またノイズ除去のためFFTアナライザによって受信マイク出力電圧の加算平均を行っているが、その際サンプリング周波数は5.12kHz、サンプリング点数4096点、加算回数60回とした。

電圧減衰量の経時変化測定にはMR103を4個用意し、A, B, C, Dと名付けた。A, Bは音源マイクとしてのみ、C, Dは受信マイクとしてのみ用いたので、電圧減衰量測定時の音源・受信マイクの組合せは(A, C)(A, D)(B, C)(B, D)の4通りとなる。BK4160についても全く同様にして4個(E, F, G, H)用いた。

測定の手順としては、まず受信マイクに電極を装着後、両マイクをカプラへ装着して電圧減衰量を測定した。この手順で4通りの組合せ各々について1日の間に2~3回ずつ測定し、さらに測定日を変えて約1ヵ月にわたって4回

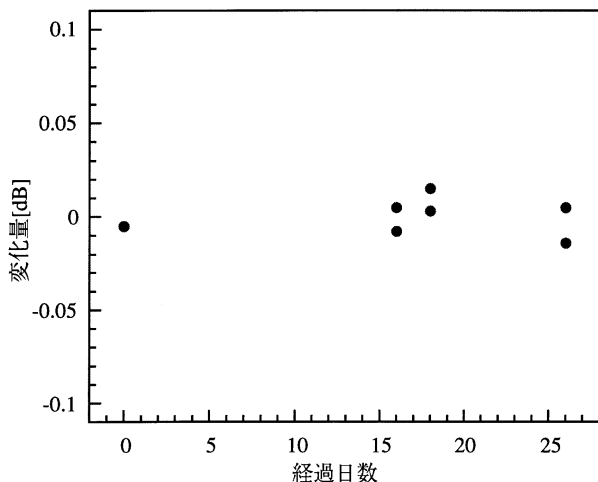


図6 電圧減衰量の経時変化
(BK4160 マイクの組合せ (E, G))

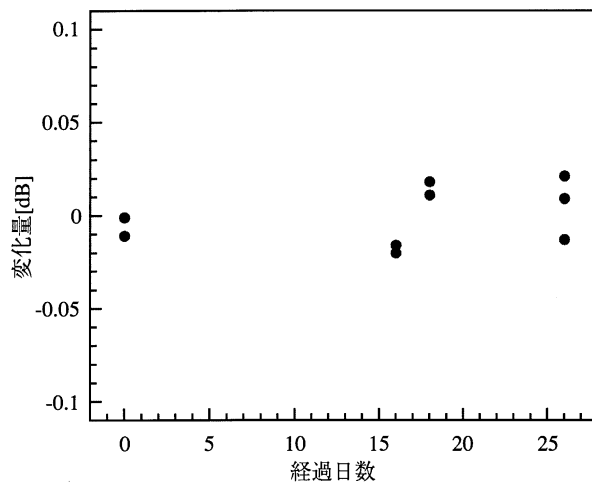


図8 電圧減衰量の経時変化
(BK4160 マイクの組合せ (F, G))

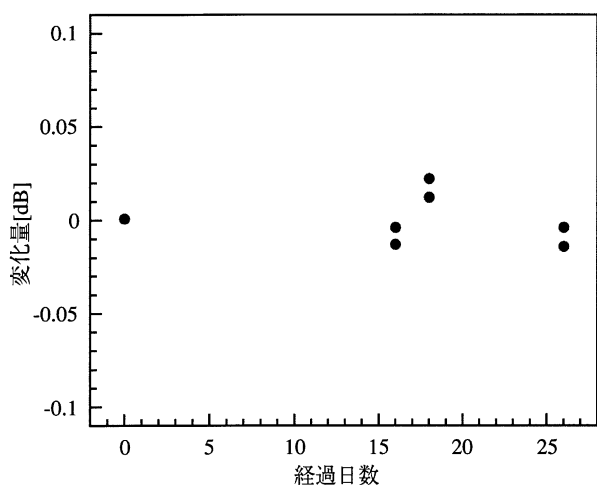


図7 電圧減衰量の経時変化
(BK4160 マイクの組合せ (E, H))

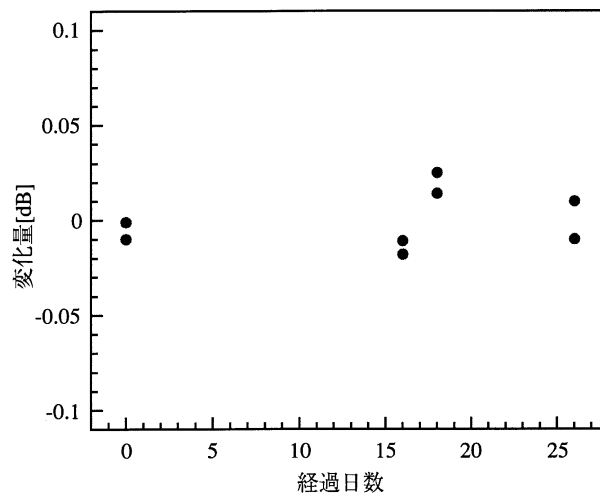


図9 電圧減衰量の経時変化
(BK4160 マイクの組合せ (F, H))

測定した。なお測定するたびに両マイクをカプラから外して再装着するとともに、受音マイクから電極を取り外して付け直している。

MR103の1ヵ月にわたる電圧減衰量の経時変化を各組合せについて図2～図5に示す。測定周波数についてはどの周波数でもほとんど同じ傾向が見られたので、1012.5Hzについてのみ表示した。横軸は経過日数であり、経時変化測定開始日をゼロとした。縦軸は各々の組合せにおける電圧減衰量測定値の平均値と各測定値との差である。なお測定日が変わると実験室の温度と気圧が ± 0.5 、 $\pm 10\text{hPa}$ 程度変動するが、マイクの音圧感度は温度や気圧に依存するため電圧減衰量の測定値を音圧感度の温度係数および圧力係数で補正し、24、1013.25hPaにおける値に換算した。図2～図5よりMR103では $\pm 0.1\text{dB}$ 程度の変動があることがわかる。同様にBK4160の場合を図6～図9に示す。変動そのものは $\pm 0.03\text{dB}$ でありMR103に比

べてかなり安定であるが、測定日が変わるとマイクの組合せによらず測定値がシフトする傾向が見られた。

§ 3 電圧減衰量の測定誤差に関する実験的検討

3.1 測定誤差の要因

§ 3では電圧減衰量の不安定性の要因が測定誤差によるものではないことを確認した。測定誤差の要因としては！校正システムの電気回路(増幅器・減衰器等)部分に関する安定性、"バイアス電圧の変動、#室温・気圧の変動、\$受音マイクと電極の接触不良、%マイクの絶縁不良、等が挙げられる。以下各要因について実験的に検討した。なお§ 3および§ 4では不安定性の原因追究のため、標準マイクとしては変動が比較的大きいMR103を使用した。

3.2 電気回路の安定性

電気回路部分をこれまで用いてきたシステム⁴⁾とは別のもに変わった時に変動の様子が変わるかどうかを調べるため、従来とは全く別系統の校正システムを試作した。新システムの構成および電氣的測定精度は従来と同程度である。

測定の手順としてはまず、受音マイクに電極を装着後、マイクをカブラへ装着する。その後は音響回路部分(カブラ、音源・受音マイクおよび電極)はそのままにし、電気回路部分のみを替えて接続し順次測定を行った。測定条件は§2とほとんど同じであるが、変動の様子は1.5kHz以下の周波数領域では周波数にほとんど依存しないことがわかっているので、信号波形は1012.5Hzの正弦波とした。両システムにより測定した電圧減衰量の経時変化を図10に示す。なお平均値はほぼ安定に測定できたと考えられる値から求めている。図10からいずれのシステムにおいても電圧減衰量はほとんど同じように変動していることがわかり、電気回路の影響はないといえる。

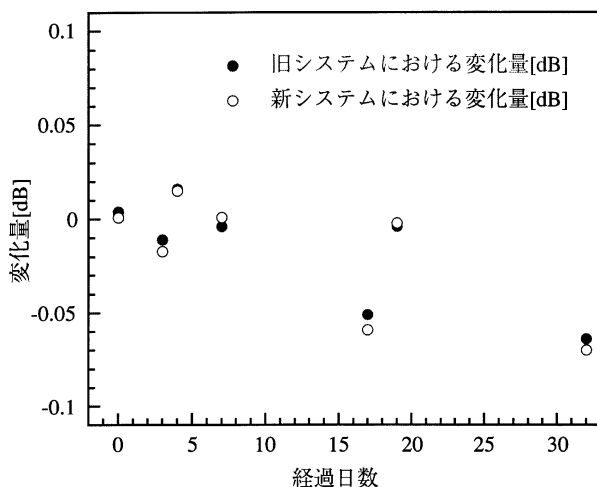


図10 独立した二測定系による電圧減衰量の経時変化

3.3 バイアス電圧の変動

マイクに加えるバイアス電圧が変動すると音圧感度そのものが変化してしまうが、本システムで使用した直流電源の電圧変動は $\pm 0.01V$ 以下であり、これによる音圧感度の変動は $\pm 0.001dB$ 以下である。したがってバイアス電圧の変動による影響はない。

3.4 室温・気圧の変動

前述の通り、電圧減衰量の測定値は温度・気圧補正を行っているが、音圧感度の温度係数・圧力係数を実測する際、室温は空調で調整し気圧は自然の変化に任せているため、係数を十分な精度で測定するには三日間という長時間を要する。この間に温度・気圧以外の要因で電圧減衰量が

変動する可能性もあるので実測値の妥当性確認のため理論値⁶⁾と比較し、図11に示す。両者は非常に良く一致しており、温度・気圧の変動の影響は正しく補正されていると考えられる。

3.5 受音マイクと電極間の接触不良

接触不良が起これば音圧感度は見かけ上小さく測定されるはずである。しかし図10から明らかなように電圧減衰量の測定値が0.05dBを超えて大きく変動する場合は電圧減衰量は小さくなっており、これは逆に音圧感度が大きくなったことを意味している。

3.6 マイクの絶縁不良

湿度等の影響でマイクの絶縁抵抗が低下すれば、マイクに加わるバイアス電圧が小さくなって音圧感度は見かけ上小さく測定されるはずであり、やはり変動の原因とは考えられない。

§4 MR103の不安定性に関する実験的検討

4.1 1.5kHz以上における変動の周波数特性

以上の結果より、マイク自身に不安定性の原因があるものと考えられる。ところで電圧減衰量の変動は1.5kHz以上の周波数領域では周波数特性を持つことがこれまでの測定結果からわかっている。不安定性の原因特定のため変動の周波数特性を求めた。

測定条件について述べると、信号波形は1512.5, 2012.5, 3012.5, 4012.5, 5012.5, 6012.5, 7012.5, 8012.5Hzの8点の周波数を含むマルチサイン波を用いた。カブラはA形、カブラ内媒質は空気の代わりに水素を用いてカブラ内波動の影響を小さくした。加算平均時のサンプリング周波数、サンプリング点数、加算回数は各々51.2kHz, 4096点, 200回とした。

測定手順については、まずマイクをカブラに装着しそのまま2時間程度放置して、装着時に測定者の手からマイクやカブラに伝わる熱的な影響を除いた。次にマイクにバイアス電圧を印加して十分安定した状態で、カブラ内媒質を空気から水素に置換して電圧減衰量および音源マイクの静電容量を測定した。この測定サイクルを同一のマイクの組合せについて測定日を変えて約1ヵ月にわたり5回測定した。

電圧減衰量の変動の周波数特性を図12に示す。室温・気圧の影響は補正済みである。同時に測定した音源マイクの静電容量の変動の周波数特性を図13に示す。

図12より、変動の周波数特性には二つの特徴が見られる。すなわち、1) 3.5kHz付近で変動がほぼゼロとなり、そ

の前後では変動が大きくなる場合(図12の実線および印),周波数とともに変動が小さくなり,8kHzではほぼゼロとなる場合(印),である。

ここで!はマイクの極板間(振動膜と背極間)距離の変化,"ではマイクの振動膜張力の変化,によって音圧感度が変化したと説明できることを以下に示す。

4.2 マイクの極板間距離の変化の影響

極板間距離を通常の20μm程度から1%(0.2μm)だけ短くした場合の音圧感度の変化量を理論的に求め,図14に示す⁶⁾。変化量の符号は3kHzと4kHzの間に入れ替わり,!のケースに対応していることがわかる。

次に1512.5Hzにおける偏差と8012.5Hzでの偏差との差に等しい感度の変化分が得られるように極板間距離の変化分を推定した。この変化分は音源・受音マイクにおける変化の和と考えられる。図12の電圧減衰量の変動から極板間距離の変化による音圧感度の変化分の計算値を差し引いた後,図13の音源マイクの静電容量の変動分を補正した結果を図16に実線および印で示す。その結果周波数特性は非常に小さくなった。

4.3 マイクの振動膜張力の変化の影響

一般に振動膜の張力 T と共振周波数 ω_0 の間には, J_{0l} をBessel関数の零点, b を膜半径, σ を面密度とすれば,

$$\omega_0^2 = \frac{j_{0l}^2 T}{b^2 \sigma} \quad (1)$$

という関係があるので σ を一定とすれば T の変化分 ΔT と ω_0 の変化分 $\Delta \omega_0$ の関係は,

$$\Delta \omega_0 = \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T} \omega_0 \quad (2)$$

となる。

ここでは張力を通常の $2.9 \times 10^3 \text{N/m}$ 程度から0.6%,共振周波数については8000Hzから0.3%増やした場合の音圧感度の変化量を理論的に求め,図15に示す。

4.2の場合と同様にして,1512.5Hzにおける偏差に等しい感度の変化分が得られるように張力と共振周波数の変化分を推定した。音圧感度の変化分および音源マイクの静電容量の変動分を補正した結果を図16に印で示す。やはり周波数特性は小さくなることがわかる。

4.4 音源マイクの静電容量の変動の周波数特性

図13から明らかなように変動の周波数特性はほとんどなく,また変動幅も0.01dB以下とかなり小さいことがわかる。この変動は測定誤差とも考えられるため,音源マイクの代わりに温度に対して極めて安定な空気コンデンサ

(GenRad社製,Type1422)の静電容量を測定した結果,測定値の変動は0.001dB以下であった。したがって図13の変動は音源マイクの静電容量すなわち極板間距離が変化したものと考えられる。

§5 BK4160の不安定性に関する実験的検討

MR103の場合と全く同様にしてBK4160についても検討を行った。まず音圧感度の温度係数・圧力係数の実測値と理論値⁷⁾を図17に示す。両者は良く一致し,測定値の妥当性が確認された。次に電圧減衰量および音源マイクの静電容量の変動の周波数特性を図18,図19に示す。図12,図18の比較よりB&K4160はMR103に比べ変動が小さいことがわかる。ただしB&K4160の変動についても0.02dB程度の周波数特性が見られた。

さらに極板間距離および張力の変化による音圧感度の変化量を理論的に求め,図20,図21に示す⁷⁾。なおパラメータを変更した割合はMR103の場合と同じである。図18に見られる電圧減衰量の変動の周波数特性の中で実線と印のデータについて,極板間距離の変化による音圧感度の変化分および図19の音源マイクの静電容量の変動分で補正した結果を図22に示す。MR103と同様に周波数特性は小さくなった。なお今回の測定データからは張力の変動が生じたとして説明できるケースは見られなかった。

§6 おわりに

本論文ではカブラ校正法における問題点の一つである,電圧減衰量が測定日によっては大きく変動する原因について実験的に検討した。マイクの極板間距離あるいは振動膜張力の変動が不安定性を引き起こす可能性が示唆された。

また室温や気圧といった環境条件の変化,受音マイクと電極の接触不良,マイクの絶縁不良は原因でないことを明らかにした。

今回,型標準マイクとして使用したMR103,BK4160に共通する不安定性は,マイクの製造方法,例えば振動膜の張り方に原因があるとも考えられる。標準マイクの振動膜は匡体にネジ止めすることによって張力をかけているが,これに対して一般の音響計測に用いられる計測用マイクでは振動膜を匡体に溶接しており,張り方が異なっている。今後は計測用マイクについても検討を行う予定である。

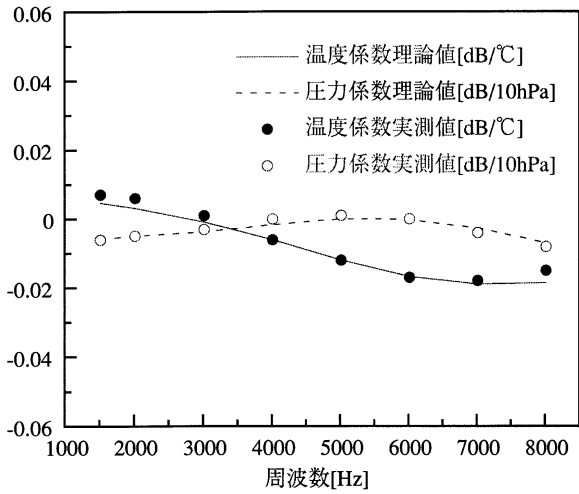


図 1.1 MR103音圧感度の温度・圧力依存性

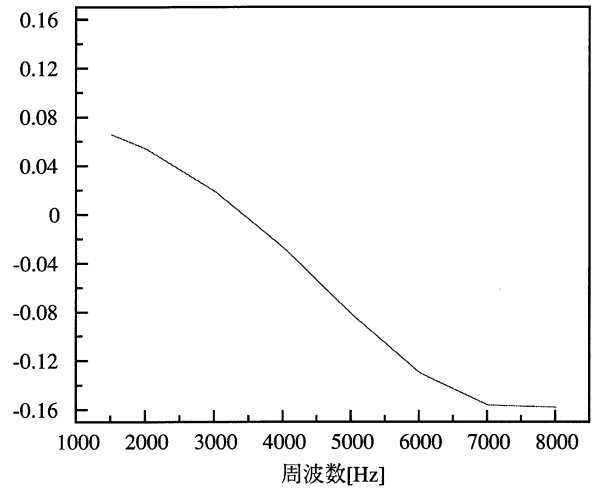


図 1.4 MR103 極板間距離の変化による音圧感度の変化

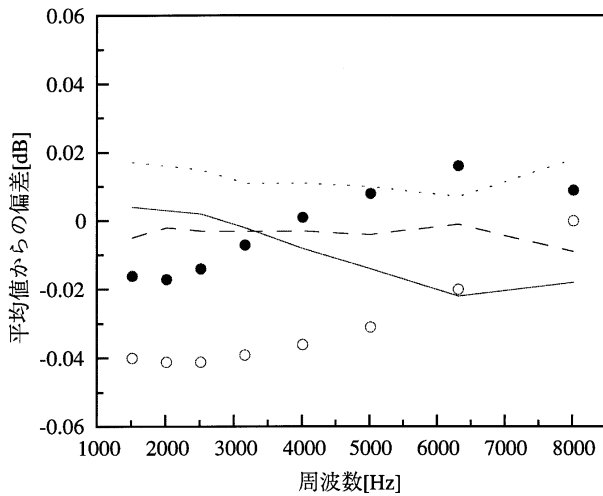


図 1.2 MR103電圧減衰量の変動の周波数特性

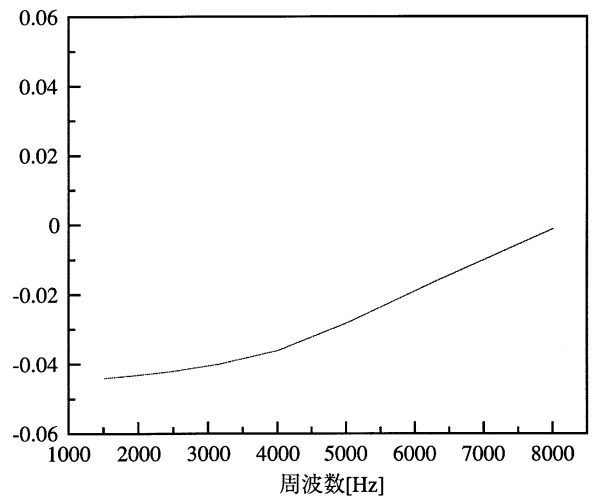


図 1.5 MR103 膜張力の変化による音圧感度の変化

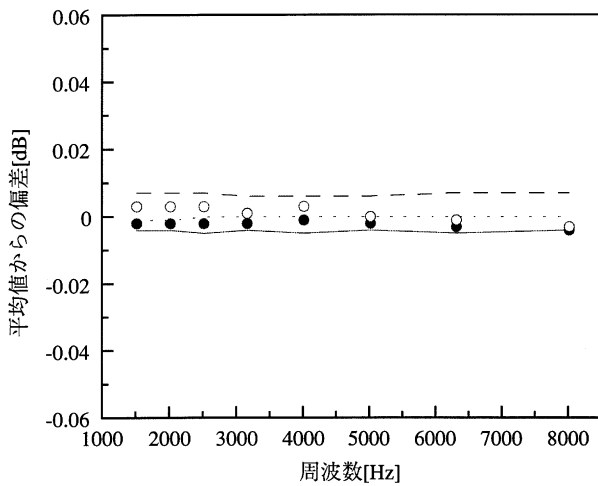


図 1.3 MR103音源マイク静電容量の変動の周波数特性

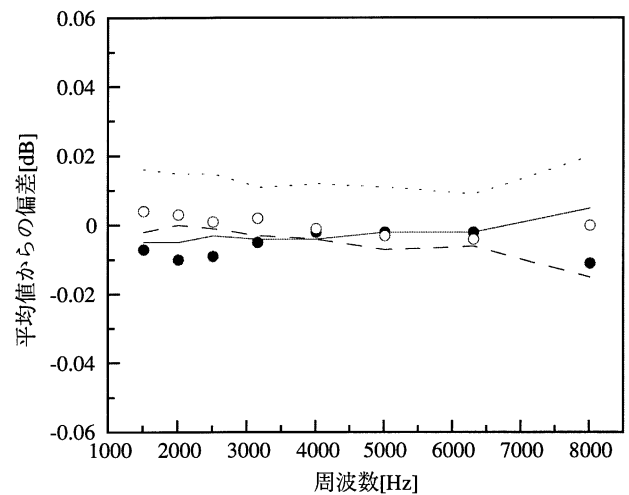


図 1.6 MR103, 補正後の電圧減衰量の変動

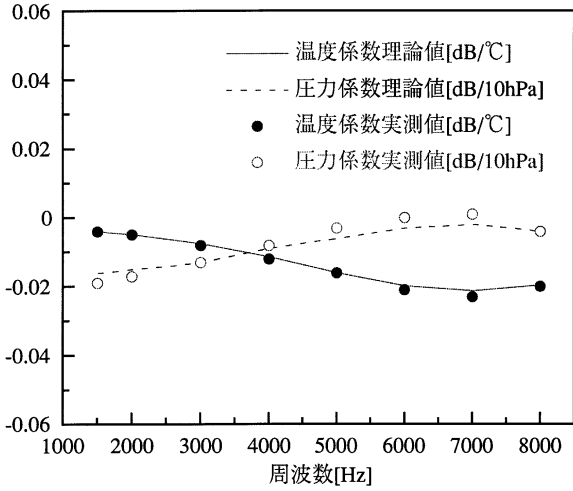


図 1 7 BK4160音圧感度の温度・圧力依存性

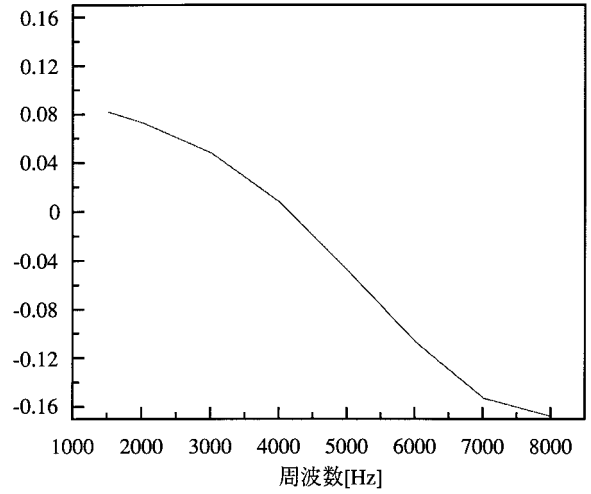


図 2 0 BK4160極板間距離の変化による音圧感度の変化

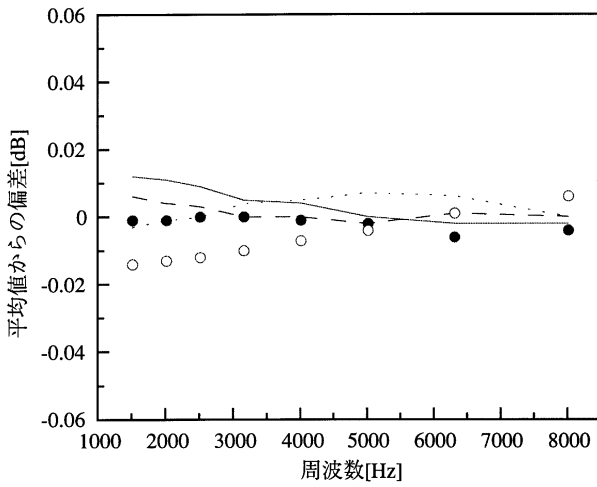


図 1 8 BK4160電圧減衰量の変動の周波数特性

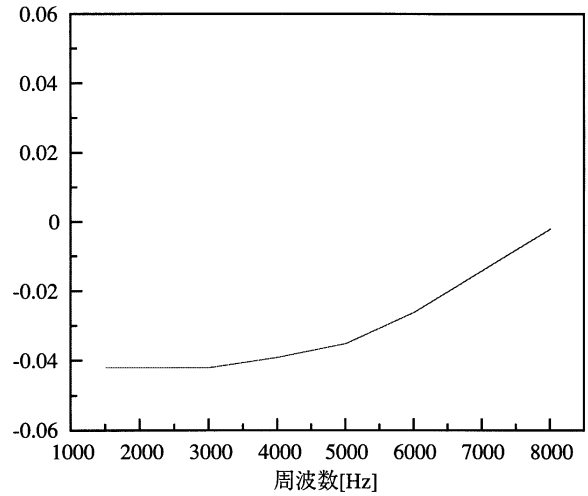


図 2 1 BK4160膜張力の変化による音圧感度の変化

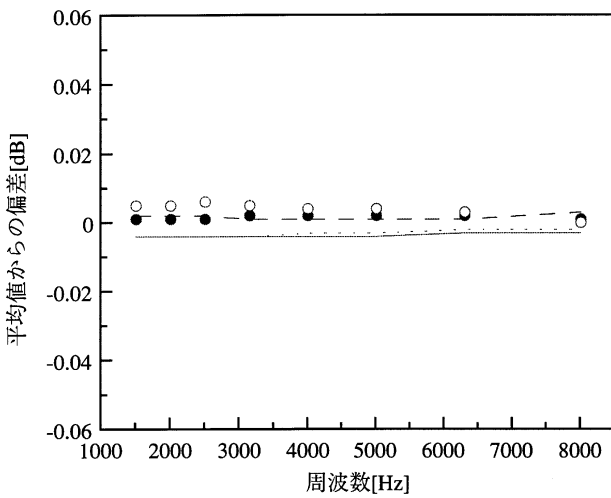


図 1 9 BK4160音源マイク静電容量の変動の周波数特性

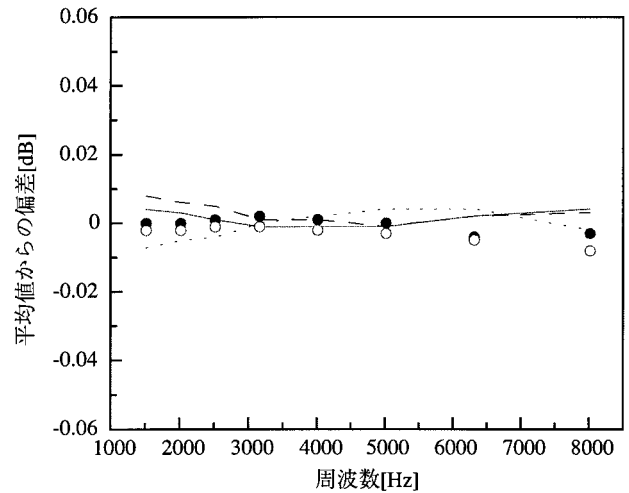


図 2 2 BK4160, 補正後の電圧減衰量の変動

謝 辞

日頃ご討論頂いた，日本品質保証機構，高橋多助氏（元音波技術研究室主任研究官）に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) JIS C 5515-1981 : 標準コンデンサマイクロホン
- 2) 高橋多助，三浦 甫：電総研新音響標準装置，音響学会電気音響研究会資料 EA-80-37 (1980)
- 3) 高橋多助，三浦 甫：標準コンデンサマイクロホンの音圧校正法の校正精度に関する研究，電子技術総合研究所研究報告第902号 (1990)
- 4) 堀内竜三，藤森 威，佐藤宗純：標準コンデンサマイクロホン・カプラ校正システムの電氣的精度の向上，電子技術総合研究所彙報第60巻7号 (1996)
- 5) 堀内竜三，藤森 威，佐藤宗純：標準コンデンサマイクロホン・カプラ校正システムの音響系測定精度の向上 - 10kHz以上における電圧減衰量の時間変化の原因 - ，電子技術総合研究所彙報第61巻9号 (1997)
- 6) 山本武夫：コンデンサ・マイクロホンの円環分割形背極の機械インピーダンス，電子情報通信学会誌43，(1960) 567-573
- 7) 山本武夫：薄流体層と均一に分布した多数の孔でできた音響系の等価回路，電子情報通信学会誌48，(1965) 1183-1189

著 者 紹 介



堀 内 竜 三
Ryuzo HORIUCHI
基礎計測部 音響標準ラボ
標準コンデンサマイクロホンの音圧校正等の研究に従事。



藤 森 威
Takeshi FUJIMORI
基礎計測部 音響標準ラボ
音響精密計測，マイクロホン校正法に関する研究に従事。



佐 藤 宗 純
Sojun SATO
基礎計測部 音響標準ラボ
E-mail: sosato@etl.go.jp
吸音材料の評価等の音響精密計測技術の研究に従事。