

論文 Article

高忠実音再生に必要なスピーカ特性の検討

—磁石の方式によるトランジェント特性の違い—

原稿受付 2010年5月13日

ものづくり大学紀要 第1号 (2010) 14~21

三井 実^{*1}, 石川 智治^{*2}, 宮原 誠^{*3}^{*1}ものづくり大学 技能工学学部 製造技能工学学科^{*2}宇都宮大学 大学院工学研究科^{*3}中央大学 研究開発機構

Discussion of Speaker Characteristics for High Fidelity Reproduction

—Physical Characteristics Difference of Speaker Magnet—

Minoru MITSUI^{*1}, Tomoharu ISHIKAWA^{*2}, Makoto MIYAHARA^{*3}^{*1} Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} Faculty of Engineering, Utsunomiya University^{*3} Dept. of science and engineering, Chuo University

Abstract

In this paper, we have clarified experimentally that the field coil magnet loud speakers have higher quality than ordinary ferrite loud speakers. Firstly, we evaluated both type loud speakers under the condition that only magnet were different. We have obtained "+2" rank better in the seven grade scale on field coil magnet loudspeakers. As a result of the measurements, we proved that field coil magnet loud speakers have large amplitude and better damping.

Key Words : Sound Evaluation, Ferrite Loudspeakers, Field Coil Magnet Loudspeakers, Alnico Magnet Loudspeakers, Damping Force

1. はじめに

これからの“ものづくり”には、経験則やノウハウなどの伝承のため、技能の定量化が必要である。高忠実再生を目指した音響録音再生装置の開発もまた、理論や技術だけでなく、筐体作成、素子選び、回路基板の作成など、機械加工から電子回路設計・実装に至るまで、経験則・ノウハウおよびその定量化が必要となる。

音響機器の究極の目的は、生の音楽演奏の質感、更には演奏者・作曲者が伝えたかった情報や心の忠実再現である。演奏者は楽曲を自分の演奏とするために、作曲家の人物像や、生活環境、歴史なども調査し、“楽曲の解釈”まで深く考慮する。

このことから、演奏者の心を再現するためには、音響録音再生装置において、音楽信号に含まれている、演奏音の質感や情報を全て再生する必要がある。

一方で、従来の音響機器開発は、振幅周波数特性など既知の物理要因・特性を満足することが目的とされ、現状では、ほぼ歪無い再生が可能となっている。しかしながら、演奏の凄みや実在感、演奏音の空気感など人間の深い感性に訴えかけるような情報が再現されているかという観点¹⁻³⁾から、従来装置の再生音を評価すると、まだまだ改善の余地がある。また、音楽を実際に聴いて観察すると、我々人間は、音の立ち上り・立ち下り、つまり過渡特性や非線形特性に現れやすい部分を

敏感に聴いていることが解る。故に信号の定常・線形が前提の振幅周波数特性をはじめとする既知の物理特性では、音楽演奏の質感再現に必要な要因・特性を記述し切れておらず、音質改善のためには未知の物理特性の向上が必要と考える。

したがって、現状の音響録音再生機器の音質の更なる向上のためには、人間の感性側からのアプローチ（音質評価実験）と、未知の物理要因・特性の発見（過渡・非線形特性の測定）が必要不可欠である⁴⁻⁶⁾。

そこで、音響録音再生機器において、時間波形の立ち上り・立ち下り部分の測定・非線形解析を行う。同時に、多くの音質評価実験を行い、その評価結果と測定結果を関連付け、新しい物理量を発見することを究極の目的として研究を進める。これは“ものづくり”に必要な不可欠な未知の物理要因の定量化が可能な手法であると考ええる。

本報告では、音楽再生における質の観点から、音楽愛好家の間でも評価の高い電磁石スピーカに注目し、深い感性に関連する物理要因・特性を測定と分析により明らかにする。具体的には、同一形式、同一口径の（磁気回路のみ異なる）電磁石スピーカとフェライト磁石スピーカを用意し、それぞれの音質を深い感性と関連する音質評価語群を用いた主観評価により追求し、評価に深く関連している物理特性を測定分析した⁷⁾。更に、前述のスピーカとは違う種類だが、同一形式、同一口径のアルニコ磁石スピーカと、フェライト磁石スピーカを用意し、測定分析する。以上のことより、スピーカにおける磁石の違いを心理物理学的に考察・検討する。

2. スピーカ用磁石の推移

電磁石は1920年代から1950年代まで、永久磁石が高価であったため、その代用品としてスピーカに使用されてきた。しかしながら、電磁石をスピーカに用いる場合、電磁石の励磁用の電源が別途必要となってしまう理由から、昨今では、あまり用いられなくなった。その後、高性能な永久磁石の開発が進められ、1960年代には、アルニコ磁石を使用したスピーカが主流となり、今でも高級

なスピーカの磁石として人気が高い。更に1970年代後半には、より安価なフェライト磁石が開発され、広くスピーカに使用されるようになった。その後、高性能な希土類磁石（ネオジム等）も実用化されている。現在、コバルトやネオジムが希少のため、コスト面からも、一般的なスピーカ用磁石はほとんどがフェライト磁石となっている。

これまでのスピーカ用磁石の変遷⁸⁾をみると利便性、コストの改善に着目され開発が進められてきたといえよう。しかし、少数ながら、音楽愛好家からは、音楽再生における“質”の観点から、電磁石スピーカは、これまで開発されてきた他のスピーカよりも優れているのではないかと言われてきた。そこで次章では、電磁石スピーカの音質の良さを、人間の深い感性に関連する音質評価語を用いて主観評価により確認する。

3. 音質の主観評価実験

3.1 評価用スピーカの諸元

表1に評価用の2種のスピーカの諸元を示す。なお、表1から、この2種類のスピーカは磁気回路のみが異なり、他の条件は全く同じである。表中、 F_0 はスピーカユニットの共振周波数を表す。また、 Q_0 はインピーダンス特性のピーク部分の先鋭度を表し、スピーカの感度を表す指標となっている。更に、 m_0 は、ボイスコイルとコーンを含めた可動部の重さを表している。

Table1 : A spec sheet of loudspeakers

Item	field coil magnet loudspeaker	Ferrite loud speaker
Model Type	Full range	Full range
Diameter	16cm	16cm
F_0	63.6Hz	64.1Hz
Q_0	0.275	0.307
m_0	7.70 g	7.78 g
Magnetic flux density	approx. 13,000Gauss	approx. 13,000Gauss
Excitation Electric Power	12W	none
Box Type	bass reflex	bass reflex

3.2 音質主観評価実験の条件

音質主観評価は ITU-R⁹⁾の 7 段階評価の方法 (+3:非常に良い, +2:良い, +1:やや良い, 0:変わらない, -1:やや悪い, -2:悪い, -3:非常に悪い) により, フェライト磁石スピーカの再生音を基準として電磁石スピーカの再生音を評価した。

評価項目は人間の深い感性に関連する 25 語の音質評価語 (高度感性情報に関する評価語とキー評価語)¹⁻³⁾で行った。評価者は音質評価語の意味の説明を受け, これらの意味を十分に理解している音質評価経験者 5 名で行った。テストソースは名演奏, 名録音, 高品質などで名高い CD の中から以下の 6 曲を選定し¹⁰⁾使用した。用いたテストソースを表 2 に示す。再生に使用した機器は高忠実再生システム: Extra HI System M¹¹⁻¹²⁾を用いた。次節, 3.3 節において, 総合音質評価の結果, 評価語毎の評価結果と考察を示す。

Table2 : The list of musical source

Source	Musical Source
Source 1	PIANOCONCERTO No5 "EMPEROR"(Beethoven): (conductor) Zubin Mehta, (piano) Vladimir Ashkenazy, LONDON,FOOL-23016,No2
Source 2	Les Larmesu Jacqueline(Offenbach):(violoncello)Werner Thomas,ORFEO,C131851A,No1
Source 3	Watermark : Enya, WEA MUSIC 25p2-2465,No8
Source 4	GOING HOME THE L.A.FOUR : L. Almeida(g), R Brown(b), S. Manne(d), B. Shank(s,f), "GOING HOME", EASTWIND EJD-3045, No1
Source 5	Croonin' : Anne Murray, EMI TOCP-8167,No1
Source 6	HOOKED ON DIXIE:Joe Webster & His River City Jazzmen,K-TEL 678-2,No1

3.3 音質の主観評価結果と考察

表 3 に音質の主観評価結果を示す。これは, テストソース, 被験者をひとまとめた平均値・分散の結果を, 音質評価語ごとに示している。こ

の実験結果より, 総合評価をはじめ, 25 種類の評価語全てにおいて良好な結果を得た。

具体的には, 音質の総合評価の結果の平均は "+1.88", 分散は "0.323" となった。すなわち, 電磁石スピーカはフェライト磁石スピーカに比して, 約 "2" ランクほど, 音質が良いことが明らかになった。

Table3 : The result of evaluation experiment

Evaluation words	Average	Variance
総合評価	+1.88	0.32
力強さ	+2.33	0.66
音の締まり	+2.20	0.74
のり	+2.20	0.92
胸にしみ込む	+1.80	1.07
厚み・こく	+1.80	0.40
緊張感	+1.73	0.78
安定感	+1.72	0.29
躍動感・生命感	+1.72	1.13
響き	+1.70	0.23
温かさ	+1.70	0.68
空気感	+1.68	0.49
凄み	+1.60	0.27
重心の低さ	+1.60	0.39
抜け	+1.60	0.67
透明度	+1.60	0.30
深々さ	+1.56	0.90
気品	+1.53	1.12
自然さ	+1.47	0.70
細かい表情の再現	+1.44	1.17
実在感	+1.30	0.49
Holographic 音場感	+1.30	0.70
静寂感	+1.30	0.96
まとまり	+1.24	0.26
繊細感	+1.20	1.17
柔らかい	+1.13	0.55

各評価語の評価結果においては, いずれの評価語の場合でも "+1.13" 以上の評価となり, 電磁石スピーカの再生音質の方が "+1" ランク以上,

明らかに良いことが示された。特に、評価が高かった評価語は、“力強さ”（評価+2.33），“音の締まり”（同+2.20），“のり”（同+2.20）であり、音楽再生の評価に重要なキー評価語も、“胸にしみ込む”（評価+1.80），“緊張感”（同+1.73），“空気感”（同+1.68），“凄み”（同+1.60），“重心の低さ”（同+1.60）といずれも高い評価値となっている。

また、表 3 の結果を踏まえて、評価語ごとに t 検定（両側，有意水準 $\alpha=0.05$ ）を行ったところ，被験者 5 名，全テストソースの評価結果において，両側確率はいずれの評価語の場合も 0.05 以下となり，有意差が確認された。

以上の結果より，単に高音・低音が出ている，歪み感が少ないと言った音質の評価ではなく，緊張感を伴うような厳しい演奏や，熱気のこもった音楽再生等の感性的価値に関して，電磁石スピーカはフェライト磁石スピーカより明らかに優れていることが示された。次章では，得られた音質の差に深く関連する物理要因・特性を測定などから考察する。

4. 物理特性の測定と考察

本章では，得られた音質の差に関連する物理特性を明らかにする。まず，そのために従来理論の基本的な物理特性；振幅周波数特性・群遅延特性の測定を行ったが，3.3 節で示した評価結果（“+2”ランク）程の大きい差として現れているとは言い難い結果となった（付録参照）。一方，これまでの感性的観点から行ってきた種々の主観評価実験や測定などの結果から，人間の深い感性に働きかける情報の再現に関連する音の特徴は，過渡・非線形特性を含めた時間的性質に注目するべきであるということも得られている。

そこで本章では，時間的，動的な特性に注目して，心理物理学的観点から，音質差に関連する物理的要因・特性を推測し，実際の測定と結果（4.2 節）を求め，考察（4.3 節）を行う。

4.1 実験 1: 電磁石スピーカとフェライト磁石スピーカのステップ電流応答測定及び解析

4.1.1 ステップ電流応答の測定条件

電磁石スピーカと，フェライト磁石スピーカの時間的，動的特性を観測するため，ステップ電流応答を観測した。図 1 に測定システムを示す。信号発生器は，ソニーテクノロジクス社製 AFG-320 デジタルファンクションジェネレータを使用した。電流測定において，電流プローブは，Tektronix 社製 AM503B，波形観測器は，横河電機社製の DL-750 を使用した。アンプは音質評価に使用した Musical Fidelity 社製 A-1 改造品を用いた。入力信号は，10Hz 矩形波（スピーカ出力端子で Peak to Peak 1V）とした。これは，過渡応答が収束するのに十分な時間を持たせることである。測定精度は，サンプリング周波数 50kHz，量子化ビット数 16 ビットで行い，アベレージングは 32 回とした。

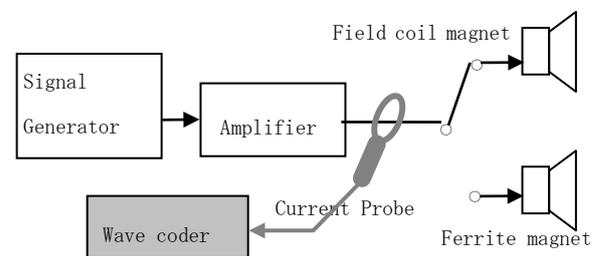


Fig.1 Equipment of measurement1

4.1.2 電磁石型とフェライト型スピーカのステップ電流応答測定結果

図 2 に電磁石スピーカとフェライト磁石スピーカのステップ電流応答の測定の結果を示す。

(1) A 部（波形の立ち上がり部分）では，スピーカのボイスコイル電圧が瞬時上昇するのに従い，電流は増加する。次にボイスコイルの動きに伴い発生する逆起電力により電流は減少に転じ，ボイスコイルが一定の振幅に達すると，逆起電力が減少し電流が再び増加する。(2) B 部（収束部分）ではボイスコイルの停止に伴い，電流が一定値に収束することを示している。

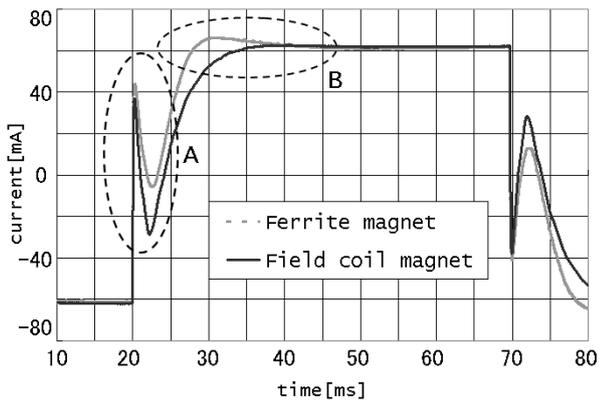


Fig. 2 Current Step-response of measurement 1

図 2 より、A 部では電磁石スピーカの方がフェライト磁石スピーカより逆起電力が大きく、反応時間が短いことが観測される。すなわち、逆起電力最大時のボイスコイル速度と振幅に違いがあるのではないかと考えられる。なお、反応時間は、電磁石スピーカが 2.42 [ms]、フェライト磁石スピーカが 2.94 [ms]であり、電磁石スピーカの方が 0.52[ms]短かった。逆起電力最大時の振幅は、電磁石スピーカの方が 20.5 [mA]多かった。また、B 部では、電磁石スピーカの方がフェライト磁石スピーカより、オーバーシュート後の収束時間が短いことが観測された。このことから、両者の磁石による音質差はボイスコイルの駆動力と、制動力の違いがあるのではないかと考えられる。

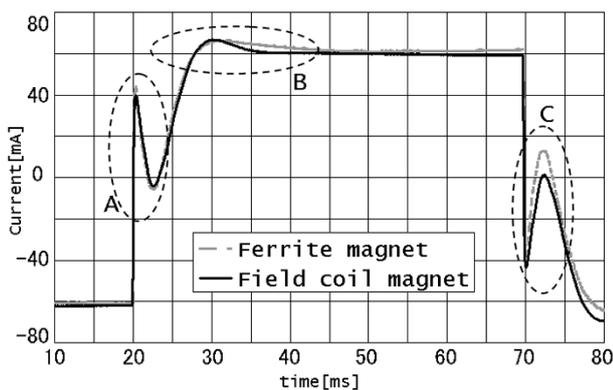


Fig. 3 Adjusted current step response of measurement 1

図 2 の B 部より、電磁石スピーカは、オーバーシュート後の収束時間が短いことが観測されたが、A 部の電流立ち上り振幅の影響があることも考えられる。そこで、フェライト磁石スピーカの逆起

電力最大値と同量になるように電磁石スピーカの励磁電流を減少させて、オーバーシュート後の収束時間を比較した。その結果を図 3 に示す。なお、この時の励磁電流は通常時の電流値 (0.6[A]) を 45%も減少させた値 (0.33[A]) となった。

図 3 の A 部より、電流波形の立ち上がり部分では、フェライト型も電磁石方も B 部より、オーバーシュートの最大値から収束値に対して 70%落ち込むまでの時間を比較すると、電磁石スピーカは 6.0[ms]、フェライト磁石スピーカは 9.6[ms]であり、励磁電流を 45%も減じたにもかかわらず、電磁石スピーカの方が 3.6[ms]も速いことが明らかになった。また、立下り部分である C 部を観測すると、フェライト磁石型の方が、逆起電力による電流が 15.3 [mA]多く流れており、立下り部分において、駆動がなされていないことが解る。これらのことから、人間の深い感性に働きかける情報の再現における電磁石スピーカの音質の良さに関連する物理特性は、ボイスコイルの駆動力・制動力の強さであることが明らかになった。

4.2 実験 2: アルニコ磁石スピーカとフェライト磁石スピーカのステップ電流応答測定及び解析

前節では電磁石スピーカとフェライト磁石スピーカの電流ステップ応答波形を比較し、立ち上がり時間、収束時間、逆起電力の大きさなど、スピーカの駆動力・制動力に関係する特性と、音質差の関係が示唆された。これを確認するため、本章では、同一口径、同一形式のアルニコ磁石スピーカと、フェライト磁石スピーカの電流ステップ応答波形を実験 1 と同様に観測する。

4.2.1 ステップ電流応答の測定条件

図 4 に測定システムを示す。信号発生器は、HP 社製 3312A ファンクションジェネレータを使用した。電流測定において、電流プローブは、横河電機社製の 700937 と、波形観測器は、横河電機社製の DL-750 を使用した。その他条件は前節で述べた実験 1 と同様である。

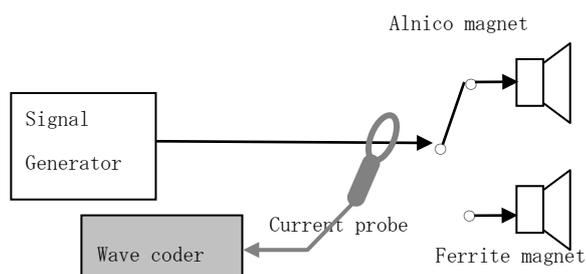


Fig. 4 Equipment of measurement2

4.2.2 アルニコ磁石型とフェライト磁石型スピーカのステップ電流応答測定結果

図5にアルニコ磁石とフェライト磁石スピーカのステップ電流応答波形を示す。これらの波形は、ピークをあわせるために、各データを波形データの最大値で割り、基準化している。実験1の結果と同様に、立ち上がり部分で、電流は一度増加するが、ボイスコイルの動きに伴い発生する逆起電力により電流は減少に転じ、ボイスコイルが一定の振幅に達すると、逆起電力が減少し電流が再び増加する。また、収束部分ではボイスコイルの停止に伴い、電流が一定値に収束する様子が観測できる。

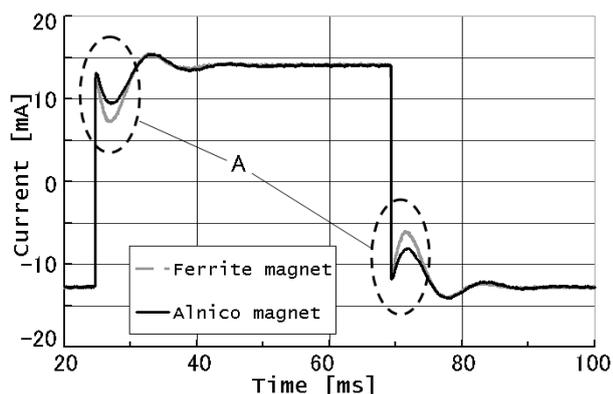


Fig. 5 Current step response of measurement2

図5より、立ち上がりや収束部分での反応時間に関しては、両者に差異は見られなかった。したがって、スピーカの制動力にはあまり差が無いと考えられる。しかしながら、図5のA部より、立ち上がり、立ち下り応答のピーク部分を見ると、アルニコ磁石スピーカの応答波形の方が、逆起電

力の発生に対して、約3mAほど電流が多く駆動されているのがわかる。このことから、スピーカに重要な能力のひとつとして、駆動力が上げられることが解った。

4.3 考察

4.1節、4.2節で述べたように、実験1、実験2の結果より、人間の深い感性に訴えかける音響再生のためには、スピーカの駆動力・制動力に関係する時間的特性が重要なことが示唆された。

スピーカにおいて、強い駆動力・制動力を生み出すためには、磁束密度の大きな磁石が必要となることは自明である。しかしながら、実験1の結果から、ほぼ同じ磁束密度（約13,000[Gauss]）であっても、明らかな音質差が生じており、駆動力・制動力に関わる時間的特性に差異が認められた。更に電磁石スピーカは、励磁電流を45%も減少させたにも関わらず、フェライト磁石スピーカに比して収束時間が短いことから、ボイスコイルの駆動力・制動力が強いと考えられる。アルニコ磁石スピーカもフェライト磁石スピーカに比して、同一口径、同一形式にもかかわらず、駆動力に優れていることが示唆された。

これらの要因の一つとして、磁気回路の透磁率 μ の差が重要ではないかと考えている。透磁率 μ のおおよその比は、メーカーの諸元から、電磁石スピーカ：1000~10000、アルニコ磁石：5、フェライト磁石：1である。

本報告では、アルニコ磁石スピーカの主観評価は行ってはいないが、音楽愛好家の評価において、アルニコ磁石スピーカの方がフェライト磁石スピーカよりも高い評価を得られていることから、透磁率 μ の大きさが音質向上のポイントと考えられる。なお、これらの関係性等については今後実験を進めて明らかにしていきたい。

5. まとめ

本報告では、人間の深い感性に働きかける情報の忠実再現が可能な音響再生装置の実現に向けて、スピーカの磁石の違いに注目して、再生音の心理評価と、物理特性の測定・解析を行い、深い感性

に関連する物理特性を考察した。具体的には、電磁石スピーカがフェライト磁石スピーカより音楽再生能力が高いこと（7段階評価のうち“+2”）を明らかにした。また、音質向上に向けては、スピーカの駆動力・制動力に関する時間的特性との関連が深いことを心理物理学的に実証した。

今後は更に、電磁石スピーカの駆動力、制動力の強さが、どのような物理的パラメータ（透磁率 μ など）によるものかを、電磁石スピーカ、アルニコ磁石スピーカ、フェライト磁石スピーカ、それぞれの比較から、更に詳細に研究を進めていく。

今後、これらの成果を踏まえて、人間の深い感性に働きかける情報の忠実再現が可能な音響再生装置を開発研究していきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり評価用スピーカの借用、及び多大な技術的助言を頂きましたフォスター電機株式会社小原 林太郎様、利根川 寛様、フォステクス株式会社宮下 清孝様に深く感謝致します。また、本研究は「平成21年度ものづくり大学 製造技能工芸学科 研究費補助」の援助を受けて行いました。深謝いたします。

付録

音質の差に関連する物理特性を明らかにするために、電磁石スピーカとフェライト磁石スピーカの再生音に対して、従来理論の基本的な物理特性：振幅周波数特性・群遅延特性を測定した。図6にB&K Type2012 Audio Analyzerで測定した電磁石スピーカとフェライト磁石スピーカの振幅周波数特性、図7に群遅延特性を示す。若干のピークディップの違いは観測されるが、3.3節で述べた評価結果（“+2”ランク）程の大きい差が現れているとは言い難い。すなわち、振幅周波数特性は、電磁石スピーカとフェライト磁石スピーカとの大きな音質差を直接的に現してないと考えられる。

以上より、従来理論の基本的な物理特性：振幅

周波数特性と群遅延特性では、音質の大きな差を直接的には、記述できておらず、制動力に関する時間的、動的な特性に注目する方が、直接的関係を表していると考ええる。

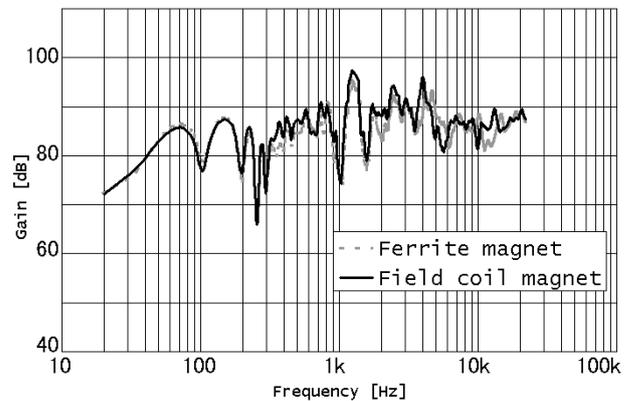


Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic of measurement1

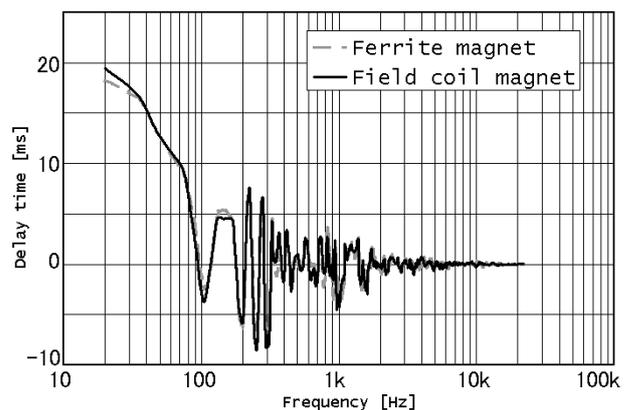


Fig. 7 Phase-frequency characteristic of measurement1

文献

- 1) 宮原・守田：音質を表現する評価語の調査分析，日本音響学会会誌，52，No. 7，pp.516-522，1996.07.
- 2) 石川・冬木・宮原：音質評価語の多次元空間におけるグルーピングと総合音質に重要な評価語，信学会論文誌，Vol.J80-A，No.11，pp.1805-1811，1997.11
- 3) T. Ishikawa, M. Miyahara：Hierarchical Structure of Assessment Words for the Evaluation of Information of High Order Sensations of Musical Sound, KANSEI2001, 2001.10.
- 4) 宮原・石川・小林：高度感知情報再現を目的としたスピーカの新設計法と実例，No.101，pp.9-15，2001.07.
- 5) 平野・篠田・三井・石川・宮原：スピーカの周波数特性に観測されない音質と関係する物理要因・特性—波面再生に注目した時間領域における検討—，信学技報，Vol.103，No.398，pp.49-54，2003.10.

- 6) 石川・三井・大谷・宮原：従来の代表的スピーカの音伝搬の特性と新・電気音響再生論に基づく音質改善，信学技報，Vol.105，No.37，pp. 19-24，2005.05.
 - 7) 三井・石川・宮原：深い感性に関連する電磁石スピーカの特性の考察，日本感性工学会研究論文誌，第8巻4号，pp. 1155-1160，2009.03.
 - 8) 日本オーディオ協会，スピーカー50年史，1986.04.
 - 9) Subjective assessment of sound quality, ITU-R BS.562-3, 1978.
 - 10) 宮原：高品位 Audio-Visual System -先端インフラの研究-，オーディオビジュアル複合情報処理，13-6，pp. 39-46，1996.06.
 - 11) 未来映像・音響の創作と双方向臨場感通信を目的とした高品位 Audio-Visual System の研究 Project，日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業，マルチメディア高度情報通信システム研究推進委員会中間報告，JPSP-RFTF97P00601，1997-2001.
 - 12) 石川・宮原：「深い感動を再現」の評価を得た芸大でのデモシステム Extra HI System M，映像情報メディア学会第3回深い感性のテクノロジー時限研究会資料，pp. 1-8，2004.01.
-