Reduction of Sound Distortion for a Magnetic Circuit in a Loudspeaker Based on Finite Element Analysis

Yasuhiro Shiraki Member (Mitsubishi Electric Corporation, Shiraki.Yasuhiro@db.MitsubishiElectric.co.jp)

Mikio Watanabe Non-member (Mitsubishi Electric Corporation, Watanabe.Mikio@dp.MitsubishiElectric.co.jp)

Masashi Okabe Member (Mitsubishi Electric Corporation, Okabe.Masashi@ce.MitsubishiElectric.co.jp)

Shiro Koga Non-member (Mitsubishi Electric Corporation, Koga.Shiro@dh.MitsubishiElectric.co.jp)

Keywords : finite element analysis, loudspeaker, magnetic circuit, incremental permeability, sound distortion

1. Introduction

Reduction of a sound distortion in loudspeakers has been required for high performance audio systems. The sound distortion induced by a drive system is caused by AC flux density generated by the voice coil current. It is known that the distortion is reduced by digging a hole at the upper surface of the pole piece. However there are few reports on the optimization of the pole piece for reducing the distortion. Using a finite element method and an experimental method, we have studied the optimization of the pole piece for reducing the distortion. We developed prototypes of loudspeaker, and measured the 2nd harmonics of their sound distortion.

2. Analysis Model and Analysis Method

The structure of a speaker unit is shown in Fig. 1. We investigated the AC flux density by the voice coil current which effects on the 2nd harmonic of the distortion. Figure 1 and Table 1 shows shape and dimension of the pole piece respectively.

AC flux density $|B_g|$ at the voice coil is calculated as follows.

[step1] Calculation of DC flux density distribution in magnetic materials by a nonlinear static magnetic field analysis.

[step2] Experiments to obtain the incremental relative permeability corresponding to DC flux density.

[step3] Calculation of $|B_g|$ by a linear dynamic magnetic field analysis using the obtained incremental relative permeability.

3. Results

Calculation results of AC flux density $|B_g|$ at 50, 100 and 200Hz are shown in Table 2. When the position of pole piece top is heightened as model 2, it is found that that $|B_g|$ become lower than that of model 1. When the pole piece has a hole as model 3

through model 6, $|B_g|$ become lower than those of the others. Model 6, whose hole bottom is located lower than the plate, is superior to the others.

Table 3 shows the measurement results of the 2nd harmonic of the sound distortions. When $|B_g|$ is low, the 2nd harmonics become low.

Table 1. Dimension of pole piece

	pole piece shape	dimension of pole piece (arbitrary unit)			
		a	b	c	d
model 1	without hole	0.16	—	—	—
model 2	without hole	0.67	—	—	—
model 3	with hole	0.67	2.00	1.67	1.44
model 4	with hole	0.67	1.56	1.67	1.44
model 5	with hole	0.67	2.00	1.44	1.56
model 6	with hole	0.67	1.56	2.11	1.44
model 7	with hole	0.44	1.64	1.89	1.44
model 8	with hole	0.16	1.60	1.60	1.44

Table 2. AC magnetic flux density $|B_g|$ ($\times 10^{-4}$ T)

model	50Hz	100Hz	150Hz
model 1	75	62	48
model 2	61	49	36
model 3	60	48	35
model 4	60	48	35
model 5	60	48	35
model 6	58	46	33
model 7	—	53	—
model 8	—	60	—

Table 3. 2nd harmonic in the sound distortion (dB)

model	50Hz	100Hz	150Hz
model 1	-24	-31	-42
model 2	-25	-33	-46
model 3	-25	-35	-48
model 6	-25	-36	-50

Fig. 1. Cross section of loudspeaker unit

有限要素法に基づくスピーカ磁気回路の音圧ひずみ低減

正員 白木 康博* 非会員 渡辺 幹男**
正員 岡部 正志* 非会員 古賀 士朗***

Reduction of Sound Distortion for a Magnetic Circuit in a Loudspeaker
Based on Finite Element Analysis

Yasuhiro Shiraki*, Member, Mikio Watanabe**, Non-member, Masashi Okabe*, Member,
Shiro Koga***, Non-member

A new magnetic circuit for a low distortion loudspeaker has been studied using a finite element analysis considering a minor hysteresis loop. The magnetic materials in the vicinity of the voice coil are magnetized by fields both AC currents and a permanent magnet. A minor hysteresis loop is induced by this magnetization. The incremental permeability of minor hysteresis loop effects on the sound distortion. We calculated the flux distribution of the magnetic circuit using a finite element method, considering the incremental permeability of the minor hysteresis loop obtained by an experimental method. It is clarified the relation between the sound distortion caused by the flux distribution and the magnetic structure. The developed magnetic circuit has a pole piece which has a hole at the upper surface and which is located higher than the plate.

キーワード：有限要素法，スピーカ，磁気回路，増分透磁率，音圧ひずみ，マイナーループ

Keywords : finite element analysis, loudspeaker, magnetic circuit, incremental permeability, sound distortion, minor loop

1. まえがき

オーディオ機器の性能向上のために，スピーカ音圧ひずみの低減が要求されている。音圧ひずみの発生系は振動系と駆動系に大別されるが，本論文では駆動系に起因するひずみ（以下，駆動ひずみ）に関する解析方法とその検討結果について述べる。駆動系は永久磁石と磁性ヨークから構成される直流磁気回路の空隙部にコーンに直結されたボイスコイルを配置して，交流信号電流（以下，ボイスコイル電流）を印加させることにより駆動する構造となっている⁽¹⁾。駆動系に起因するひずみとして，①ボイスコイル部が置かれた空隙部（以下，ボイスコイル部）における直流磁束密度の不均一が影響する駆動ひずみ，②ボイスコイル電流に

より磁化される磁性体のヒステリシス性に基づくボイスコイル電流の波形ひずみ，③ボイスコイル電流から発生する交流磁束による駆動ひずみ，等がある^{(1)~(4)}。

駆動ひずみを低減させる方法として，ボイスコイル近傍の磁性体に積層した方向性けい素鋼板を用いて，交流磁束の通る方向の磁気抵抗を増加させること⁽¹⁾，ボイスコイル近傍の磁性体に銅製のショートリングを付加して，うず電流による交流磁束の打ち消し効果を利用すること⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾，動作時の磁束密度で直流的に十分飽和する低飽和磁束密度部材を使い，マイナーループの線形化をはかること⁽¹⁾，ボイスコイル近傍のポールピースに切れ込みを入れる方法⁽¹⁾などがよくおこなわれる。このうち，ポールピースに切れ込みを入れる方法は，コスト低減と軽量化の点で他の方法よりも有利である。ポールピースに切れ込みを入れると，ボイスコイル近傍の磁性体が飽和状態となり，交流信号に対しヒステリシス曲線を直線化かつ傾きを小さくして，交流磁束の発生とボイスコイル電流の波形ひずみを防ぐことができる。

駆動系の磁気回路設計のうち，ボイスコイル部の直流磁束密度の不均一分布およびボイスコイル電流から発生する交流磁束による駆動ひずみについて，有限要素法を用いた検討がおこなわれている⁽²⁾⁽³⁾。しかし，文献(2)では交流磁束

* 三菱電機(株) 先端技術総合研究所
〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1
Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp.

** 三菱電機(株) 群馬製作所
〒370-0403 太田市岩松町 800
Gunma Works, Mitsubishi Electric Corp.
800 Iwamatucho, Oota 370-0403

*** 三菱電機(株) モバイルターミナル製作所
〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1
Mobile Terminal Works, Mitsubishi Electric Corp.,
8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661-8661

による駆動ひずみを低減するために有限要素法を用いているが、交流磁束を非磁性体のうず電流で減少させることを目的としており、直流磁束密度に対応して変化する増分透磁率を考慮していない。増分透磁率を考慮して、平滑チョークコイルを有限要素解析する方法が文献(5)に示されている。しかし、増分比透磁率の測定ではLCRメータを用いているのでマイナーループのヒステリシス性を考慮していない。

本論文では、ボイスコイル電流から発生する交流磁束による駆動ひずみを低減する磁気回路構造について検討した。そのために、直流磁束密度に応じたマイナーループを測定し増分透磁率やヒステリシス性を検討した⁽⁶⁾。さらに、これらの増分透磁率特性を有限要素解析に反映させてスピーカ磁気回路の最適化をおこなった⁽⁶⁾。

第2章では振動板がコーン形で磁気回路の外周部にフェライト磁石を配置したスピーカの構造を示す。また、駆動系の音圧ひずみの要因について述べる。

第3章ではボイスコイル部の直流磁束密度を検討する。磁気回路構造として、ボイスコイル近傍のポールピース上部の切れ込み形状とポールピース高さを検討する。文献(6)では、ポールピース高さ一定条件下で、切れ込み形状についての検討がおこなわれている。本論文ではポールピースの高さを変えた場合の最適な切れ込み形状について検討する。有限要素法を用いた非線形静磁界解析を用いて、ボイスコイル部の直流磁束密度を計算して、実測値と比較する。

第4章では音圧ひずみに影響を与える交流磁束の検討をおこなう。まず、直流磁束に重畳した交流磁束のマイナーループを測定する。次に有限要素法を用いて、有限要素毎にマイナーループの増分透磁率を与えて、ボイスコイル部の交流磁束密度を解析し、最適な磁気回路形状を検討する。最後に駆動ひずみを最も低減できる磁気回路を用いたスピーカを試作して、音圧ひずみを検討する。

2. スピーカの構造および駆動系に起因する音圧ひずみの検討

図1に示すように、本論文で検討をおこなう振動板がコーン形で、磁気回路の外周部に永久磁石（フェライト磁石）を配置した外磁形のものである。そして、永久磁石、プレートおよびポールピースから成る磁気回路部分、およびボイスコイルの振動を音にするためのコーン、ダンパおよびフレームから成る振動部分で構成されている。

ボイスコイル電流によって発生する交流磁束が駆動力Fに及ぼす影響について述べる。ボイスコイルの駆動力Fは(1)式で表される。

$$F = B_g \cdot d \cdot i \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 B_g はボイスコイルに鎖交する半径方向の磁束密度、 i はボイスコイルに流れる電流、 d はボイスコイルの有効長である。

ボイスコイルに鎖交する半径方向の磁束密度 B_g は、図2

図1 スピーカの構造

Fig. 1. Cross section of loudspeaker unit.

図2 スピーカ磁気回路の磁束分布

Fig. 2. Flux distribution of loudspeaker unit.

に示すように永久磁石から発生する直流磁束密度 B_{gDC} に、ボイスコイル電流によって発生する交流磁束密度が重畳するので、次式で表される。

$$B_g = B_{gDC} + |\Delta B_g| \sin(\omega t + \alpha) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $|\Delta B_g|$ はボイスコイルに鎖交する半径方向の交流磁束密度の振幅、 α は電流と交流磁束密度の位相角である。

一方、ボイスコイル電流を正弦波とすると、次式で表される。

$$i = i_m \cdot \sin(\omega t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

(2)および(3)式を(1)式に代入し、変形すると(4)式が得られる。

$$F = B_{gDC} \{ d \cdot i_m \cdot \sin(\omega t) + 0.5 \cdot (|\Delta B_g| / B_{gDC}) \cdot d \cdot i_m \cdot \cos(\alpha) - 0.5 \cdot (|\Delta B_g| / B_{gDC}) \cdot d \cdot i_m \cdot \cos(2\omega t + \alpha) \} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式の第2項はボイスコイルの振動中心が移動する原因となり、第3項は二次ひずみの一因となる。

第2項および第3項のひずみは、 $|\Delta B_g|$ に比例し、 B_{gDC} に反比例するために、本論文では $|\Delta B_g| / B_{gDC}$ を低減する磁気回路について有限要素法を用いて検討する。

3. ボイスコイル部の直流磁束密度分布

〈3・1〉 ポールピース形状 ポールピースに切れ込みを入れると、ボイスコイル部の直流磁束密度 B_{gDC} が低下することや不均一になることが考えられる。そこで、有限要素法を用いた軸対称非線形静磁界解析をおこない、ボイスコイル部の直流磁束分布を検討した。

図3および表1にポールピースの形状を変えた8種類のスピーカ磁気回路を示す。なお、表1に示す寸法はプレートの高さを1とした相対値として示す。

モデル選定では、ポールピース部の加工コストおよび強度面を考慮するとともに、切り込みなしに比べてボイスコイル部の直流磁束密度の低下割合が少なくなるようなモデルを中心に選定した。モデル1と2はポールピースの上部を平面にして、プレート上面に対するポールピースの高さを変えた場合である。モデル3～8はポールピース上部に切れ込みを入れた場合である。モデル3, 4, 6, 7および8ではプレート下面と同一高さのポールピース部の断面積をプレート内径部の表面積と同一にして、プレート下面と同一高さのポールピース部の直流磁束密度とプレート部の直流磁束密度が同一になるようにした。モデル3および4はプレート下面とポールピース切れ込みの下面を同一高さとして、切れ込み角度を変えた場合である。モデル5および6はそれぞれモデル3および4の切れ込み深さを変えた場合

図3 ポールピース形状

Fig. 3. Pole piece shape.

表1 ポールピース寸法

Table 1. Dimension of pole piece.

	pole piece shape	dimension of pole piece (arbitrary unit)			
		a	b	c	d
model 1	without hole	0.16	—	—	—
model 2	without hole	0.67	—	—	—
model 3	with hole	0.67	2.00	1.67	1.44
model 4	with hole	0.67	1.56	1.67	1.44
model 5	with hole	0.67	2.00	1.44	1.56
model 6	with hole	0.67	1.56	2.11	1.44
model 7	with hole	0.44	1.64	1.89	1.44
model 8	with hole	0.16	1.60	1.60	1.44

である。モデル7および8はポールピースの高さをモデル6に比べて低くした場合である。

〈3・2〉 磁性体の初磁化曲線の実測 ポールピースとプレートの材質はそれぞれ機械構造用炭素鋼と熱間圧延軟鋼である。ポールピースとプレートの磁気特性は加工時の応力によって変化する。そこで、図1に示すポールピース部3箇所、プレート部1箇所をリング上に加工して、初磁化曲線を実測した。図4に磁性体の初磁化曲線を示す。プレート材のRING-4の透磁率が最も高く、以下ポールピース材のRING-2, RING-1, RING-3の順になる。

〈3・3〉 静磁界解析と実測を用いた直流磁束密度の検討

プレート部をRING-4、ポールピースの初磁化曲線を最も透磁率の低いRING-3として、表1に示す8種類のポールピース形状について、有限要素法を用いて軸対称三次元で非線形静磁界解析をおこなった。

表2にボイスコイル部の磁束密度分布の最大値とボイスコイル部の平均磁束密度に関する解析結果を示す。図5に図3に示すy軸上の直流磁束密度分布を示す。表2よりポールピースの切れ込みの有無に関係なく、モデル2～6のようにポールピースをプレート上面より高くすると、モデル1, 7および8に比べて直流磁束密度がやや低下するがその低下度合いは4%以内である。また、モデル3～6のようにポールピースの高さが同じであれば、切れ込みの形状に関係なく直流磁束密度はほぼ同じである。図5に示すように直流磁束密度の解析結果と実測結果はほぼ一致する。

図4 初磁化曲線

Fig. 4. Initial magnetization curve.

表2 ボイスコイル部の直流磁束密度

Table 2. DC flux density at the voice coil portion.

model	DC flux density (T)	
	maximum	average
model1	1.020	0.778
model2	0.976	0.758
model3	0.974	0.756
model4	0.974	0.756
model5	0.975	0.757
model6	0.970	0.753
model7	0.984	0.768
model8	1.020	0.774

図5 ボイスコイル部の直流磁束密度の実測と解析結果

Fig. 5. DC flux distribution at the voice coil portion.

このように、直流磁束密度の大きさはポールピースの高さに影響され、ポールピース上部に切れ込みを入れる場合、プレート下面と同一高さのポールピースの断面積をプレート内径部の表面積より大きくすれば、切れ込みの形状変化はボイスコイル部の直流磁束密度の大きさには影響を及ぼさない。

4. ボイスコイル部の交流磁束分布

〈4・1〉 マイナーループの測定 ボイスコイル近傍の磁性体には、永久磁石で発生する直流磁界による直流磁束と、ボイスコイル電流に比例した交流磁界による交流磁束が重畳する。この交流磁界と交流磁束が描く軌跡はマイナーループを形成する。さらにポールピース部の形状により直流磁束密度が変化して、それに伴ってマイナーループが変化する。そのため、ボイスコイル電流によって発生する交流磁束の影響を磁界解析するためには、直流磁束密度に応じたマイナーループの特性が必要となる。

そこで、図6に示すような測定装置を用いて60Hzのマイナーループを実測した。一次巻線、三次巻線にはそれぞれ直流磁束密度に対応するメジャーループ、交流磁束密度に対応するマイナーループを測定するための励磁電流を流す。二次巻線メジャーループとマイナーループに相当する出力電圧が重畳して誘起されるが、交流結合の差動入力付増幅器を用いることにより、マイナーループを測定できる。

図7にポールピース材とプレート材のマイナーループの実測結果を示す。直流磁束密度が高くなるほど、磁性体の増分比透磁率、マイナーループのヒステリシス性は小さくなる。今回の検討対象であるポールピースのヒステリシス性は設計上の直流磁束密度である1.2Tを超えると、ほとんど無視することができる。図8に直流磁束密度と増分比透磁率の関係を示す。ただし、増分比透磁率 $\Delta\mu$ は次式で定

図6 マイナーループ測定装置

Fig. 6. Measurement equipment for minor loops.

(a) pole piece(ring-3)

(b) plate(ring-4)

図7 マイナーループの測定結果

Fig. 7. Measurements of minor loops.

図8 磁性体の直流磁束密度と増分比透磁率の関係
Fig. 8. Relation between incremental relative permeability and DC flux density.

義した。

$$\Delta \mu = \Delta B / (\mu_0 \cdot \Delta H) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 ΔB は交流磁束密度の最大変化量(T)、 ΔH は交流磁界の最大変化量(A/m)、 μ_0 は真空の透磁率とした。図8より、直流磁束密度が等しい場合、プレート材の増分比透磁率はポールピース材より大きいことがわかる。

〈4・2〉 スピーカ動作時の交流磁束の磁界解析 磁性体の増分比透磁率は〈3・3〉節で計算した磁性体の直流磁束密度に応じた図8の増分比透磁率とし、有限要素毎に与えた。なお、マイナーループのヒステリシス性は前章で検討したように、最適形状を検討するポールピースでは直流磁束密度が1.2T以上ではほぼ零であるので、無視した。ポールピースおよびプレートの導電率は 8.0×10^6 (S/m)とした。永久磁石の比透磁率は1とした。直流抵抗が1.6Ωのボイスコイルに1.4Vの交流電圧を印加して、その周波数を50, 100, 200Hzと変えて、有限要素法を用いて軸対称三次元で交流線形計算をおこなった。解析モデルは図3および表1に示す8種類のポールピース形状とした。

表3にボイスコイル部の交流磁束密度の振幅 $|B_g|$ の計算結果を示す。表4にポールピース表面の交流磁束密度の振幅 $|B_{g2}|$ の計算結果を示す。モデル1をモデル2のようにポールピースをプレート上面より高くすると、表4に示すポイント1と2で $|B_{g2}|$ の差異が少なくなる。そのため、互いに位相が逆であるボイスコイル上部と下部の交流磁束が打ち消し合うことから、表3に示す $|B_g|$ が小さくなる。ポールピース高さが高いモデル3~6では、モデル6のように切り込み深さをプレート下面より深くすると、さらにポイント1と2で $|B_{g2}|$ の差異が少なくなる。また、モデル6ではポイント3および4で $|B_{g2}|$ が最も小さくなり、交流磁束が磁性体に浸入できにくくなるために交流磁束の発生

表3 ボイスコイル部の交流磁束密度の振幅

$|B_g|$ の解析結果

Table 3. Maximum value of AC magnetic flux density, $|B_g|$, at the voice coil portion.

model	50Hz		100Hz		150Hz	
	$ B_g $ ($\times 10^{-4}$ T)	$ B_g $ / B_{gDC}	$ B_g $ ($\times 10^{-4}$ T)	$ B_g $ / B_{gDC}	$ B_g $ ($\times 10^{-4}$ T)	$ B_g $ / B_{gDC}
model 1	75	0.0096	62	0.0080	48	0.0062
model 2	61	0.0081	49	0.0065	36	0.0047
model 3	60	0.0079	48	0.0063	35	0.0046
model 4	60	0.0079	48	0.0063	35	0.0046
model 5	60	0.0079	48	0.0063	35	0.0046
model 6	58	0.0077	46	0.0061	33	0.0044
model 7	—	—	53	0.0069	—	—
model 8	—	—	60	0.0075	—	—

表4 ポールピース表面の交流磁束密度の振幅

$|B_{g2}|$ の解析結果

Table 4. Maximum value of AC magnetic flux density, $|B_{g2}|$, on the surface of pole piece.

model	$ B_{g2} $ ($\times 10^{-4}$ T)			
	point 1	point 2	point 3	point 4
model 1	476	565	518	442
model 2	627	635	566	469
model 3	464	477	414	332
model 4	487	495	433	345
model 5	467	482	420	341
model 6	482	480	414	319

量自体が減少する。よって、モデル6では表3に示す $|B_g|$ が最も小さくなる。また、モデル6は直流磁束密度に対する交流磁束密度 $|B_g|/B_{gDC}$ も最小となり、モデル1に比べて、50Hzで約20%改善できる。また、モデル6で切れ込み形状において、ポールピース高さを変えたモデル7および8では、直流磁束密度に対する交流磁束密度 $|B_g|/B_{gDC}$ がモデル6より大きくなり、駆動ひずみが増加する。これらの傾向は周波数に関係なく、ほぼ同じである。

以上の結果より、ポールピースの高さをプレート上面より高くして、ポールピースの切れ込み深さをプレート下面より深くした磁気回路が最も交流磁束による駆動ひずみを低減することがわかった。

〈4・3〉 音圧ひずみの実測 前節で示した磁界解析結果を検証するために、4種類のポールピース形状を試作して、音圧ひずみを実測した。表5に周波数が50, 100, 200Hzの音圧ひずみの実測結果を示す。モデル2のようにポールピースをプレート上面より高くすると、モデル1に比べて音圧ひずみは低減する。さらに、モデル5および6のよう

表 5 高調波音圧ひずみの 2 次および 3 次成分
Table 5. 2nd and 3rd harmonic in the sound distortion.

model	2nd harmonic (dB)			3rd harmonic (dB)		
	50Hz	100Hz	150Hz	50Hz	100Hz	150Hz
model 1	-24	-31	-42	-17	-31	-52
model 2	-25	-33	-46	-18	-32	-53
model 5	-25	-35	-48	-18	-32	-53
model 6	-25	-36	-50	-18	-33	-54

にポールピースに切れ込みを入れると、モデル 2 より音圧ひずみを小さくできる。また、モデル 6 のようにポールピースの切れ込みを深くするとモデル 5 より音圧ひずみを小さくできる。これらの傾向は周波数に関係なくほぼ同じであり、二次ひずみの低減効果が三次ひずみより大きい。このように直流磁束密度に対して、最もボイスコイル部の交流磁束密度が小さいモデル 6 がモデル 1 に比べて、最大 8dB (200Hz の二次ひずみ) 改善でき、ポールピースの高さおよび切り込みに関する最適形状であることがわかった。

5. まとめ

本論文では、スピーカの音圧ひずみ低減のために磁性体のマイナーループの増分透磁率特性を有限要素解析に反映させて、スピーカ磁気回路の交流磁束密度分布を計算する手法を確立した。さらに、本手法を用いて、音圧ひずみを低減するスピーカ磁気回路の最適設計ができることを示し、スピーカ磁気回路に関する設計上の知見が得られたので以下に示す。

(1) ポールピースをプレート上面より高くして、ポールピースの切れ込み深さをプレート下面より深くすると、ボイスコイル電流から発生する交流磁束による駆動ひずみを低減することができ、音圧ひずみが低減する。

(2) ポールピース高さをプレート上面より高くすると、ボイスコイル部の直流磁束密度は低下するが、直流磁束密度に対する交流磁束密度が低減するので、音圧ひずみを低減できる。

(3) ポールピース上面に切れ込みを入れる場合には、プレートと同一高さのポールピースの断面積をプレート内径の表面積より大きくすれば、ボイスコイル部の直流磁束密度には影響を及ぼすことなく、交流磁束密度を低減できる。

(平成 17 年 7 月 22 日受付, 平成 17 年 10 月 21 日再受付)

文 献

- (1) 佐伯多門：スピーカ&エンクロージャー百科，正文堂新光社 (1981)
- (2) T. Omura, M. Okabe, M. Okumura, and M. Yajima : "A High-Quality Speaker System", *Mitsubishi Denki Giho*, Vol.63, No.10, pp.853-857 (1989-10) (in Japanese)

大村俊次・岡部正志・奥村正富：「高性能スピーカシステム」，三菱電機技報，**63**, No.10, pp.853-857 (1989-10)

- (3) H. Tsuchiya, M. Okada, H. Ikeda, T. Nomura, and T. Saeki : "The Reduction of Nonlinear Distortion Due to the Driving Mechanism in Loudspeakers", *Mitsubishi Denki Giho*, Vol.50, No.12, pp.670-674 (1976-12) (in Japanese)
土屋英司・岡田 将・池田英男・野村達衛・佐伯多門：「スピーカの駆動系による非直線ひずみの低減」，三菱電機技報，**50**, No.12, pp.670-674 (1976-12)
- (4) H. Tsuchiya, M. Okada, H. Ikeda, T. Nomura, and T. Saeki : The Role of the FN Ring in the Development of a Low-Distortion
- (5) 平野芳生・岩田圭司・佐藤 駿：「直流重量特性の計算方法」，平成 4 年電気学会全国大会，No.1656 (1992)
- (6) 白木康博・渡辺幹男・岡部正志・古賀士朗：「ポールピースの最適設計によるスピーカ音圧ひずみの低減」，電気学会マグネティックス研究資料，MAG-95-188, pp.29-37 (1995)

白 木 康 博

(正員) 1989 年 3 月岡山大・工・電気卒。1991 年同大学院修士課程了。同年三菱電機 (株) 入社。以来、電磁界解析を用いた電気・電子機器の研究・開発に従事。現在、同社先端技術総合研究所勤務。電気学会会員。電子情報通信学会会員。

渡 辺 幹 男

(非会員) 1981 年 3 月慶応義塾大・工・機械卒。1983 年同大学院修士課程了。同年三菱電機 (株) 入社。以来、宇宙機器、電気摺動機器、磁気デバイス、暖房機器、電気給湯機に関する研究・開発に従事。現在、同社群馬製作所勤務。日本機械学会会員、日本金属学会会員、日本トライボロジー学会会員

岡 部 正 志

(正員) 1976 年 3 月岡山大・工・電気卒。1978 年同大学院修士課程了。同年三菱電機 (株) 入社。以来、電気・電子機器の開発に従事。現在、同社先端技術総合研究所勤務。電気学会会員。

古 賀 士 朗

(非会員) 1978 年 3 月九州芸工大 芸術工学部 音響設計科卒。同年三菱電機 (株) 郡山製作所入社。家庭用ハイファイスピーカ、業務用スピーカ (放送用モニター等)、車載用純正スピーカ、携帯電話用音響部品の開発に従事、現在、モバイルターミナル製作所勤務