

# 有限要素法を用いたスピーカー磁気回路の電流歪評価

Current distortion evaluation of loudspeaker magnetic circuit using finite element method

寺田 隆洋<sup>1)</sup>

Takahiro Terada

1) ヤマハ株式会社 (〒430-8650 静岡県浜松市中央区中沢町10-1, E-mail: takahiro.terada@music.yamaha.com)

Loudspeaker sound distortion is largely influenced by current distortion caused by the electrical and magnetic properties of the soft magnetic materials used in magnetic circuits. In this research, we will use finite element method to simulate how the voice coil current of a speaker magnetic circuit changes in current distortion due to the electrical and magnetic properties of the soft magnetic materials, and present the results of a comparison with experiments. We also discuss the mechanism of current distortion based on simulation results.

**Key Words :** Current distortion, Jiles-Atherton model, Hysteresis loss

## 1. はじめに

スピーカーは、電気信号を空気の振動に変えて音を発する機器で、ダイナミック型が最も一般的に普及している。ダイナミックスピーカーの断面模式図を図1に示す。動作原理は、磁気回路のギャップに配置したボイスコイルに交流電流を流すことで、ボイスコイルに取り付けた振動板が電磁力で動き、音を出す仕組みとなる。しかしながら、非線形な磁気特性を持つ軟磁性材が使用されるため、振動板の駆動力のもととなる電流は非線形となり、音の歪(高調波歪)が発生する[1]。高調波歪とは、入力周波数のn倍(nは2以上の自然数)の周波数が outputされる現象であり、原音に忠実な音の再生の妨げとなる。

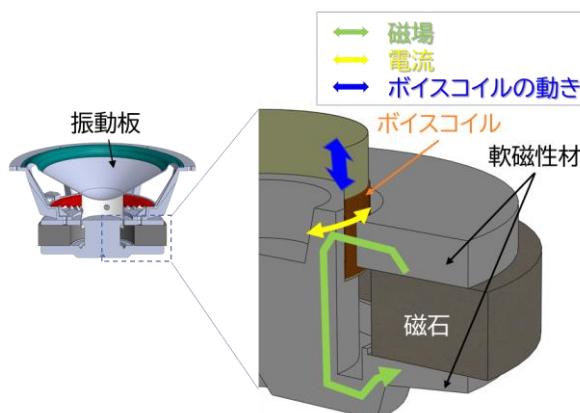


図1 ダイナミックスピーカーの断面模式図

本研究の目的は、ダイナミックスピーカーの部品や磁気回路に起因する電流歪を、実験とシミュレーションで比較し、電流歪を予測できる様にすることである。この目的を達成できれば、磁気回路中の磁性材配置や磁気特性が、電流歪に与える影響を試作無しに評価できると期待される。

## 2. 評価方法

### (1) 概要

実験とシミュレーションの電流歪評価を行い、周波数特性を比較した。電流歪は、直流磁場の有無、構造の違い、磁性材の物性の違いなどで変化することが予想される。直流磁場が無い部品と、直流磁場が有る磁気回路の2通りで評価した。加えて、磁性材の物性の違い、Cuリングの有無の条件を変え比較を行った。シミュレーションは、形状や磁気物性などの違いを確認するため、有限要素法による計算が可能な市販ソフトウェア COMSOL Multiphysics[2]を用いた。

### (2) 実験方法

電流歪評価に用いた回路を図2に示す。交流電圧源、ボイスコイル、抵抗を直列接続した回路となっている。ボイスコイルは、図3の様に配置した。部品評価ではボイスコイル内側に部品を配置した。磁気回路ではボイスコイルをギャップ部に配置し、電磁力による振動を抑えるためエポキシ接着剤で固定した。

電流歪は、部品評価、磁気回路評価とともに、ボイスコイルへ入力する交流電圧源の周波数を変化させ、抵抗に流れれる電流の時間波形をFFTすることで、入力周波数の3倍

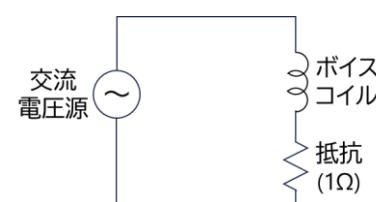


図2 電流歪評価の回路図

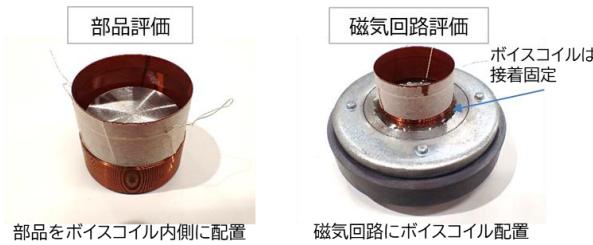


図3 ボイスコイルの配置

の周波数の電流歪(3次歪)を測定した。なお、電流歪は、入力周波数のピークを0dBとしたときの相対値を評価している。

### (3) シミュレーション方法

電流歪のシミュレーション方法は、実験と同等の系をモデリングし行った。

部品と磁気回路の構造は、それぞれ2種類を用いた。図4に部品評価での断面模式図、図5に磁気回路での断面模式図を示す。部品及び磁気回路は、回転対称構造となるため、軸対称でモデリングしている。形状2及び形状4は、Cuリングを配置するため、磁性材に段差を付けた構造とした。磁性材は、導電率と磁気特性が異なる2種を用いた。各材料の導電率を表1に示す。磁性材Aと磁性材Bは、実測結果をもとに3桁異なる値を設定した。磁気特性は、ヒステリシスのないBH曲線と、ヒステリシスのあるJiles-Athertonモデルを用いた。図6に各磁性材のBH曲線を示す。BH曲線は実験で得られた各磁性材の直流BH特性の初磁化曲線を使用した。Jiles-Athertonモデルは、5個のパラメータを用いることでヒステリシス、非線形を含む磁気特性を表すことができる[3]。5個のパラメータは、トロイダ

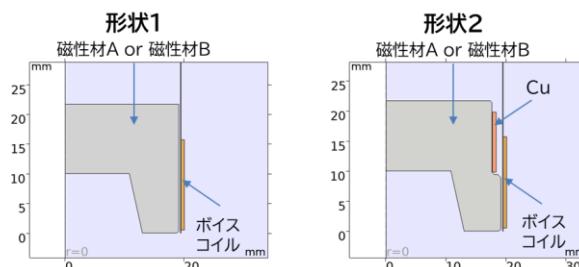


図4 部品評価の断面模式図

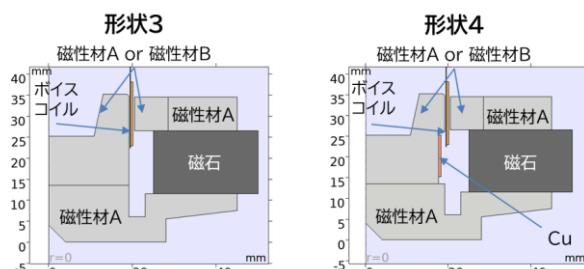


図5 磁気回路評価の断面模式図

表1 各材料の導電率

材料	導電率 [S/m]
磁性材A	6.76E+06
磁性材B	6.71E+03
Cu	1.00E+07
磁石	0
空気	0

ルコアの直流BH特性を実験で測定し、シミュレーションで各パラメータを変化させたときの直流BH特性が、実験で得られた直流BH特性と重なる様に設定した。設定したJiles-Athertonモデルのパラメータを表2に示す。

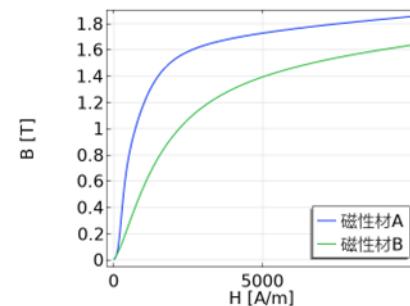


図6 各磁性材のBH曲線

表2 各磁性材のJiles-Athertonモデルパラメータ

	磁性材A	磁性材B
$M_s$ [MA/m]	1.6	1.52
$a$ [A/m]	1000	1900
$k$ [A/m]	320	320
$c$	0.3	0.3
$\sigma$	0.0017	0.002

### 3. 実験とシミュレーションの比較例

#### (1) 部品評価

部品の電流歪レベル評価結果を図7に示す。シミュレーションでは、磁性材の磁気特性をBH曲線とした場合とJiles-Athertonモデルとした場合で、電流歪のレベル及び周波数特性が同等の結果となった。実験とシミュレーションの比較では、電流歪のレベルは3dB～12dBの差が確認され、大きく乖離した。一方、電流歪の周波数特性は、63～2kHzの範囲で、実験とシミュレーションが同等となることを確認した。以上より、部品のシミュレーションでは、磁性材の物性の違い及びCuの有無による電流歪レベルの相対比較が可能と判断した。

#### (2) 磁気回路評価

磁気回路の電流歪レベル評価結果を図8に示す。シミュレーションでは、磁性材の磁気特性をBH曲線とした場合とJiles-Athertonモデルとした場合で、電流歪のレベル及び周波数特性が、大幅に乖離することが分かった。一方、シミュレーションと実験の比較では、磁性材の磁気特性を

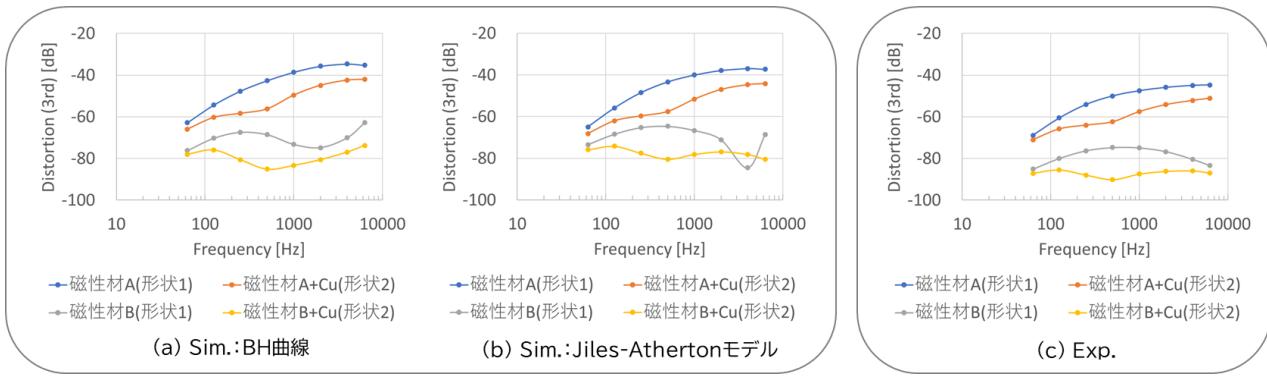


図7 部品評価におけるシミュレーションと実験の電流歪レベルの周波数特性

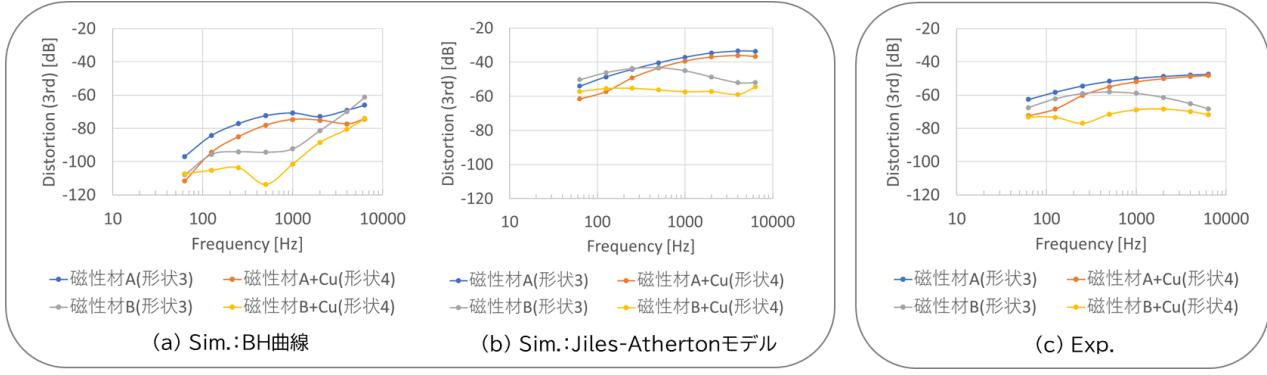


図8 磁気回路評価におけるシミュレーションと実験の電流歪レベルの周波数特性

Jiles-Athertonモデルとしたシミュレーション結果が、実験結果と電流歪レベルは乖離するものの、周波数特性は良い一致が見られた。以上より、磁気回路でのシミュレーションにおいて、磁性材の磁気特性の違いは、電流歪レベル及び周波数特性に大きな影響を与えることが分かった。

#### 4. 考察

部品における電流歪レベルのシミュレーションは、BH曲線とJiles-Athertonモデルで周波数特性の違いはほとんど生じなかった。一方、磁気回路では、BH曲線とJiles-Athertonモデルで電流歪レベルの周波数特性が大きく異なった。この要因は、磁気回路の場合、磁石による直流磁場が重畳することにより、マイナーループがBH曲線とJiles-Athertonモデルで大幅に異なり、電流歪レベルの周波数特性の違いが生じたと考えられる。シミュレーションで磁気回路の電流歪レベルの周波数特性を評価するためには、Jiles-Athertonモデルの様なヒステリシスを表現できる磁気特性を用いる必要があると考えられる。磁気回路において、ヒステリシス損を低減できる磁性材を適用できれば、電流歪レベルの更なる低減が可能と期待される。

#### 5. まとめ

本研究では、ダイナミックスピーカーの部品及び磁気回路で発生する電流歪レベルをシミュレーションし、実験と比較した。

部品の電流歪シミュレーションでは、磁性材の磁気特

性がBH曲線とJiles-Athertonモデルで、電流歪レベルの周波数特性は同等であることを確認した。また、シミュレーションと実験の電流歪の比較では、レベル差はあるが、周波数特性は63~2kHzで良い一致を確認した。

磁気回路の電流歪シミュレーションでは、磁性材の磁気特性がBH曲線とJiles-Athertonモデルで、電流歪レベルの周波数特性が大幅に異なることを確認した。シミュレーションの磁気特性としてJiles-Athertonモデルを用いた場合、電流歪レベルの周波数特性が実験と概ね合うことを確認した。これらの結果から、電流歪レベルの周波数特性の相対比較には、シミュレーションの磁気特性にJiles-Athertonモデルを適用することが有効と考えられる。また、磁気特性の違いにより、電流歪のレベルや周波数特性が大幅に異なったことから、磁性材のヒステリシス損が電流歪の発生に大きく寄与していると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 上野孝文, 高橋賢一, 石井伸一郎, 福山立夫:スピーカの駆動力歪の解析と低減法, 日本音響学会誌, Vol.39, No.7, pp.444-451, 1983.
- [2] COMSOL Multiphysics: <https://www.comsol.jp/> (参照日 2024年3月28日)
- [3] 藤原徹: 非線形磁気特性を考慮した変流器の動作解析と設計に関する研究, 東北大学, 1996, 博士論文