

高音用スピーカの歪み発生要因の検討

Investigation of the causes of distortion generated by a tweeter

小谷野 進司

Shinji Koyano

要 旨 音楽信号の広帯域化に伴い、スピーカ再生時に可聴帯域外の信号により発生する混変調歪みの影響が指摘されている。しかし、スピーカの特性を決定するパラメータの何が寄与しているかは明らかでない。今回、スピーカの非線形により発生する混変調歪みの要因を、簡易的な等価回路により解析し検討した。その結果、力係数の非線形性、特に非対称性の影響が大きいことが明らかになった。

Summary In case of reproduction of a wide band musical signal, the influence of intermodulation distortion from the tweeter generated by a signal with frequencies outside the audible band is indicated. However, it is not clear which parameters are affecting loudspeaker distortion characteristics. The author investigated causes of the intermodulation distortion generated by nonlinearities of the loudspeaker by calculating nonlinear differential equations based on an equivalent circuit. The result revealed that nonlinearity in the force factor, especially its asymmetry, is the prominent factor.

キーワード: スピーカ, 可聴帯域, 混変調歪み, 非線形

1. まえがき

DVDフォーマットの登場により従来のCDを上回る帯域での音声収録が可能となった。20kHzを上回る帯域を持つ音声収録についてはその聴覚的な影響について様々な検討が現在行われている^{(1),(2),(3)}。蘆原らは、可聴帯域外の収録を行うことで、スピーカの持つ非線形性により発生する混変調歪みが可聴帯域に影響しているのではないかと指摘している^{(1),(2)}。しかし、市販のスピーカにおいては殆どが混変調歪み特性について公表されておらず実験に当たって低歪みなスピーカを選択することが困難であり、十分な検証を行うことが出来ない。混変調歪みを発生

させる要因をシミュレーションにより検討しその要因を推定すると共に混変調歪みの少ないスピーカの実現性について検討する。

2. スピーカの歪み

標準的な動電型スピーカの構造を図1に示す。導電型スピーカの歪み発生の変数となる要素は表1が考えられる。

これらの要因についてスピーカの再生帯域内においてどの周波数領域で顕著に影響するかを模式的に示したのが図2である。

ほとんどの歪みは振幅、または速度依存性があるために再生帯域の低域側に発生するこ

とが解るが、力係数Aについては駆動力となるため再生帯域全体に渡り影響が出る事が予想される。

また、ドップラ効果については広帯域信号が入力されたときに低域側の信号で高域の信号が変調されることにより発生が予想される。本検討ではこれら要素の中から、機械系による歪みとして力係数、スティフネスについてその影響を検討した。

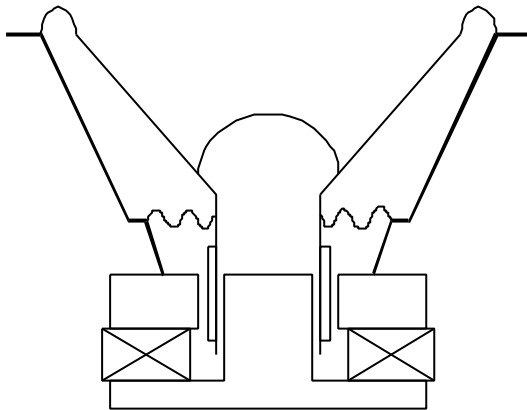


図1 動電型スピーカ構造

表1 非線形項目

- ・ コイルインダクタンス
- ・ 力係数
- ・ 支持系スティフネス
- ・ 機械抵抗
- ・ 振動板共振
- ・ 体積速度
- ・ ドップラ効果

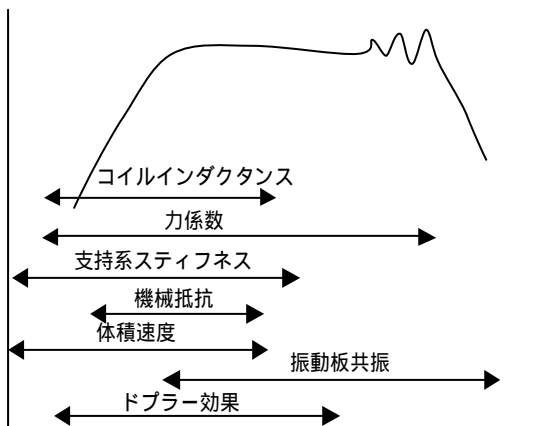


図2 各スピーカ歪み発生周波数

3. 解析

3.1 モデル化

スピーカの機械系等価回路は1次共振系として表現できる。各要素の内、力係数Aおよびスティフネスkを変位xの関数として表現することで非線形要素を含んだ運動方程式(1)を仮定した。

$$M_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + R \frac{dx}{dt} + k(x)x = A(x)I(t) \quad (1)$$

- M0: 振動系質量
- R: 機械抵抗
- k(x): 支持系スティフネス
- A(x): 力係数
- I(t): 入力電流

力係数Aは変位xの関数として次式(2)で与えられる。

$$A(x) = \int_{x-\frac{L}{2}}^{x+\frac{L}{2}} B(x) dl dx \quad (2)$$

- L: ボイスコイル巻き幅
- l: 単位巻き幅当たりの線長
- B(x): 磁束密度分布

ボイスコイルの抵抗値を一定としたときの磁束密度と力係数の関係は図3のようになる。また、支持系による変位 - 力の関係は式(3)のように表され、

$$F(x) = k(x)x \quad (3)$$

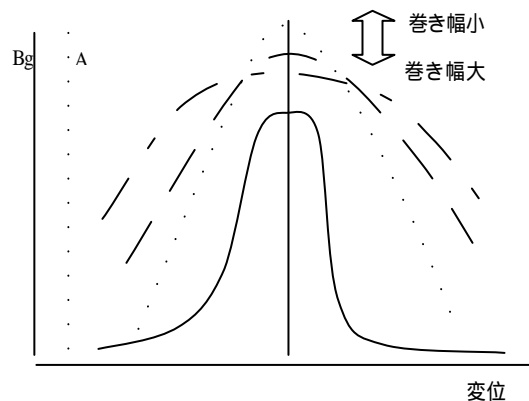


図3 変位 - 力係数特性

一般的に図4に示すように奇数次の関数特性となる。従ってスティフネスは変位の偶数次関数として多項式で近似できるが実験的には2次関数での近似が可能である⁽⁴⁾。また、図3から力係数においても偶数次での表現が可能であり同様に2次関数で近似する。

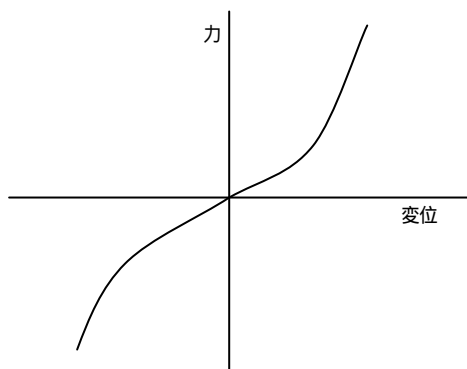


図4 変位 - 力特性

式(4)、(5)において各項の係数は非線形特性に応じて任意に設定する。

$$k(x) = k_2x^2 + k_1x + k_0 \quad (4)$$

$$A(x) = A_2x^2 + A_1x + A_0 \quad (5)$$

このようにして記述された微分方程式に対して数値解析を行い振幅および速度の時間応答波形を求め評価を行う。数値解析は2次Runge-Kutta法により解析を行った。求めた速度の時間応答波形から十分に定常状態となった部分の波形を切り出しFFTにより速度特性のスペクトルを求める。式(6)により音圧特性を算出する。FFTはサンプリング周波数257kHz、4096点で行った。

$$P = \frac{rWS}{2pr} ve^{j(\omega t - kr)} \quad (6)$$

P：音圧

：空気の密度

S：振動板面積

r：受音点までの距離

v：粒子速度

3.2 解析条件

歪みを評価するモデルとして表2のような線形パラメータを持つスピーカを仮定する。このパラメータは標準的な高音用ドームスピーカを想定している。

図5に無限大バツフルに取り付けられた本パラメータを持つスピーカのシミュレーション特性を示す。音圧レベル約90dBと高音用ドーム型スピーカに相当する特性となっている。高域限界は設けず100kHzまでフラットな特性とした。この時の振幅は10kHz以上では約10E-6メートルのオーダーとなる。

これらの線形パラメータに対し非線形性を与え、数種類の信号に対しての影響を検討した。解析は表3の条件について行った。

各特性を図6、図7、図8に示す。

表2 スピーカ線形パラメータ

パラメータ	値
最低共振周波数 f0	3000 [Hz]
力係数 A	
振動系質量 M0	0.11 [g]
機械系共振鋭度 Q0	2
振動板径	30 [mm]

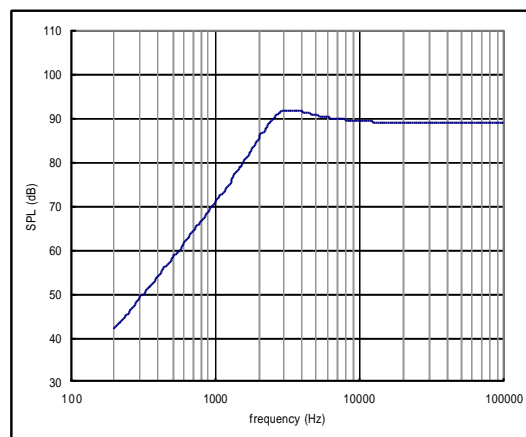


図5 解析スピーカ音圧特性

4. 結果

4.1 非線形性の評価

一般的なスピーカの歪みの評価方法として行われている高調波歪みの発生について各要素の

非線形性を变化させたときの状態について2次高調波についての特性を図9に示す。

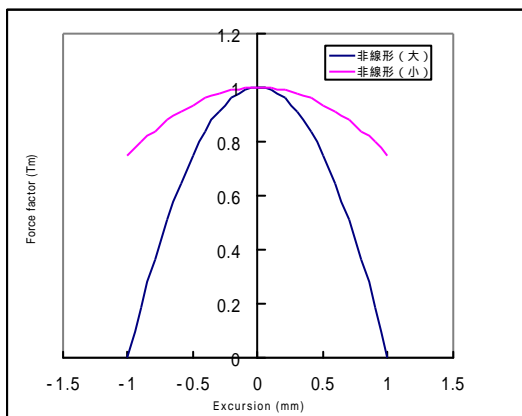
力係数Aの非線形性,特に非対称性が大きく寄与していることが解る。また,ステイフネスの非線形性は低域側すなわち大振幅領域で影響が出ることを解る。

4.2 2周波数入力による歪み

4.1で解析した非線形要素において2周波数20kHz, 30kHzを入力したときのスペクトルを解析した。結果を図10に示す。力係数のオフセットが有る場合に差周波数歪みの発生が顕著になることが解る。

表3 実験項目

入力信号	実験項目	パラメータ
単一正弦波入力		
	力係数非線形	大/小
	力係数中心ズレ	有り/無し
	ステイフネス非線形	大/小
2周波数入力		
20kHz, 30kHz	非線形性	最小/最大
狭帯域信号入力		
帯域幅 10, 20kHz	非線形性	最小/最大
位相 同相, ランダム	非線形性	最小/最大
入力パワー	非線形性	最大
1, 4, 16, 64 W		



(a) 力係数非線形(1)

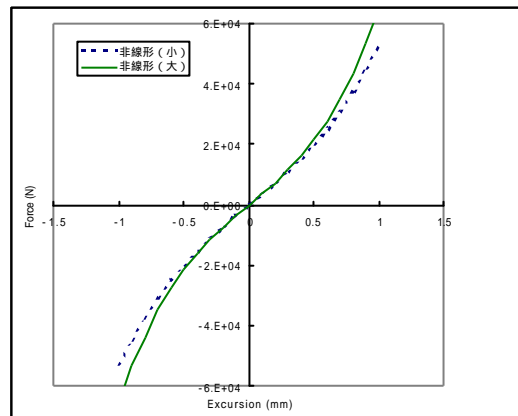
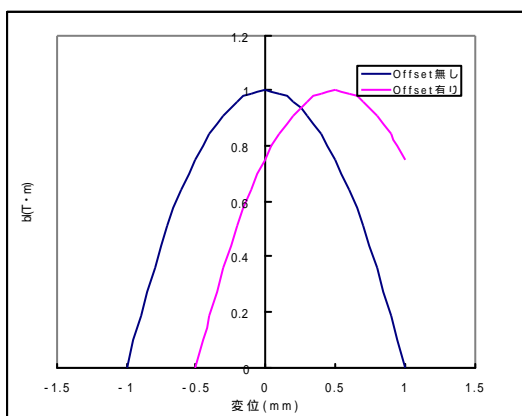


図7 変位 - 力特性



(b) 力係数非線形(2)

図6 力係数非線形

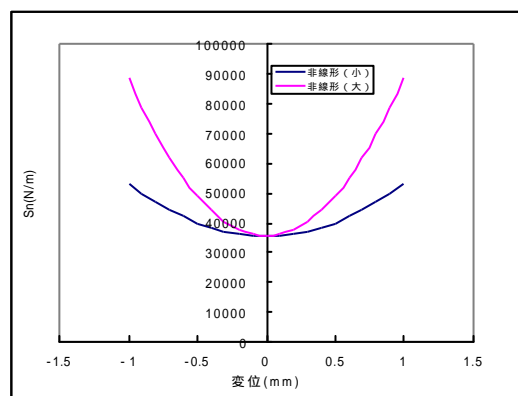


図8 ステイフネス非線形

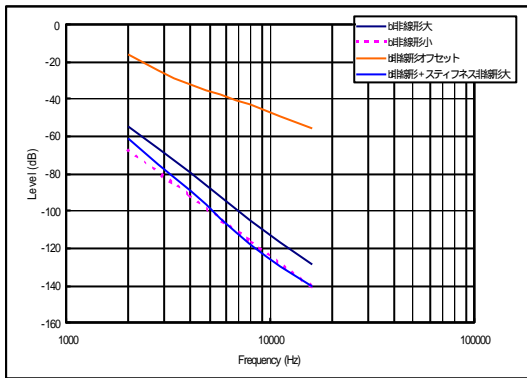
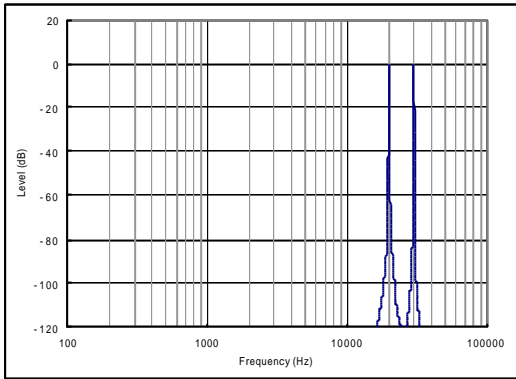


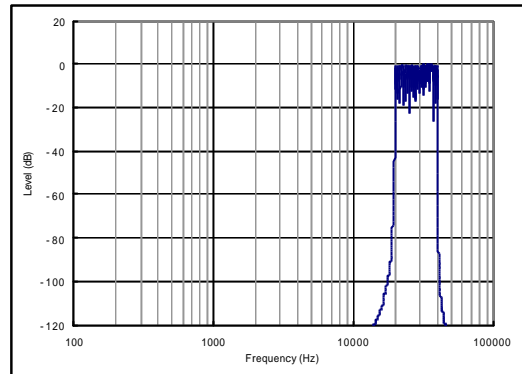
図9 2次歪み特性

実際の楽音において全てのスペクトルが同相であることは殆ど無いと考えられるため両極端の信号での変化を見るために設定した。入力信号の位相特性により歪みの発生が変化することが解る。狭帯域信号の場合は混変調歪みが低域側に多く発生することが解る。さらに使用するスピーカの低域特性に依存した特性となっている。

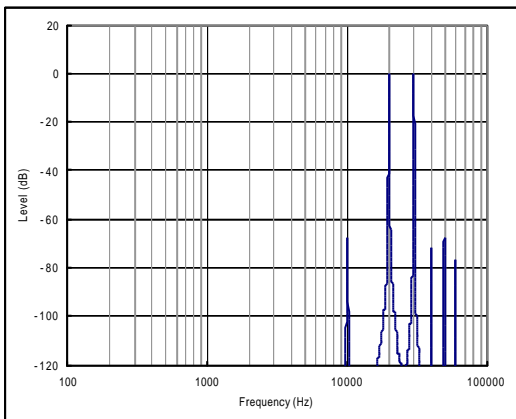
参考に実際のトイータでの特性を図12に示す。これは、公称口径25mmのソフトドーム



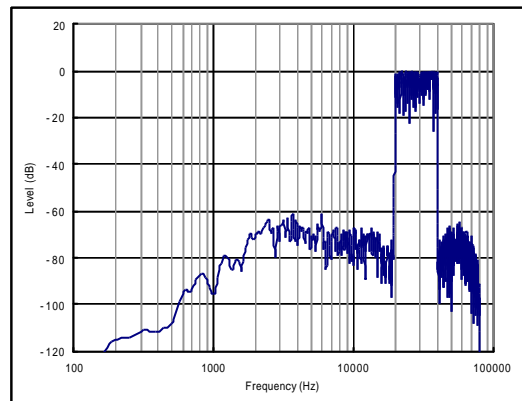
(a) 力係数非線形(小)



(a) 非線形性(小)



(b) 力係数非線形(大)

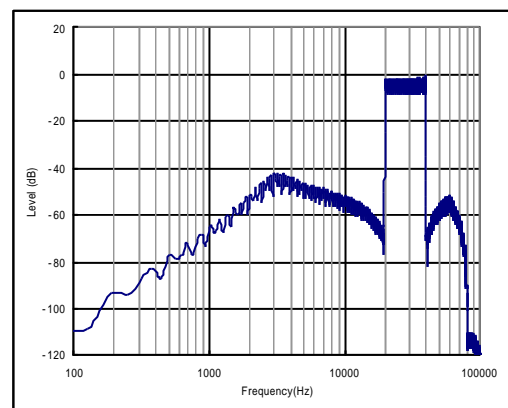


(b) 非線形性(大)

図10 力係数非線形

4.3 狭帯域信号による歪み

帯域20～30kHz, 20～40kHzの2種類の狭帯域信号を入力したときスペクトルについて解析した。本稿では20kHzから40kHzの狭帯域信号を入力した場合について図11に示す。入力信号は周波数間隔100Hz, 200本のスペクトルを持つ。これにおいて信号の性質を2種類仮定した。一つは、全ての入力スペクトルが同相である信号、他は、位相がランダムである信号とした。これは、



(c) 同相信号印加

図11 狭帯域信号入力時のスペクトル解析

トイターに 1/3oct バンド幅を持つパルスを印加したときの応答特性を FFT したものである。入力レベルについては校正を行っていないため歪みレベルの絶対値は比較できないが、シミュレーションと同様に低域側への影響が現れていることが解る。

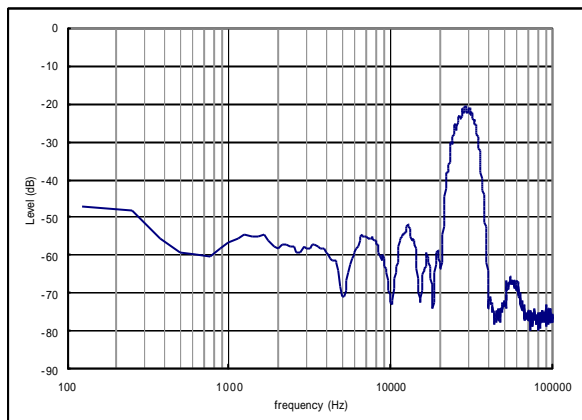


図 12 実測特性

4.4 入力に対する依存性の評価

今回の解析では高域に入力したときの歪み発生について検討したため、振幅が小さい帯域での解析となっている。非線形性は入力に依存するため数種類の入力パワーにおける歪みについて検討を行った。

図 13 の結果は入力値で正規化してある。入力の依存性はあまり見られないが、入力スペクトル近傍の特性の変化が見られる。

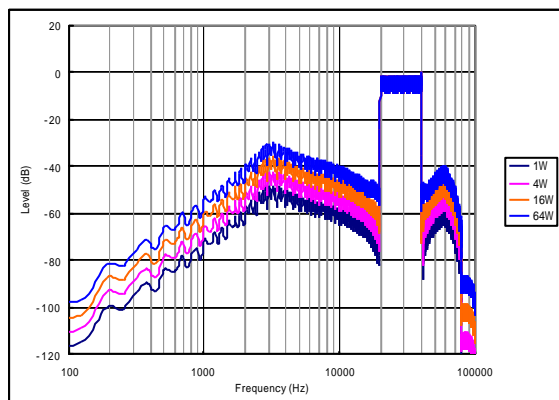


図 13 歪み入力依存性

6. まとめ

高音用スピーカにおいて指摘されている混変調歪みの発生要因について非線形モデルにより

検討を行った。その結果

- 1) 機械系の非線形性において力係数の非線形性の影響が最も大きく、特に非対称性がある場合はその影響が顕著に現れる。
- 2) 狭帯域信号が入力された場合スピーカの低域特性に依存した歪みが発生する。歪みのレベルは入力信号のスペクトル間の位相に依存する。
- 3) 広帯域スピーカの場合可聴帯域外の信号により可聴帯域側に混変調歪みが高いレベルで発生する。

ことが明らかになった。

今後はこの結果を基に具体的な構造提案に繋がりたい。

参考文献

- (1) 蘆原 郁：「ハイサンプリングのメリットとデメリット」信学技報第2種研究会資料 HDA99 - 4(1999)
- (2) 蘆原 郁, 桐生昭吾：「超音波試聴実験におけるスピーカ非線形ひずみの影響」AES 東京コンベンション '99 予稿集 ,(1999)
- (3) S. Yoshikawa, S. Noge, M. Ohsu, S. Toyama, H. Yanagawa, and T. Yamamoto: " Sound-Quality Evaluation of 96-kHz Sampling Digital Audio ", AES 99th Convention preprint #4112, (1995).
- (4) W. Klippel: " Dynamic Measurement and Interpretation of the Nonlinear parameters of Electrodynamic Loudspeakers ", JAES vol.38 No12(1990)
- (5) 小谷野進司：「高音用スピーカの歪み発生要因の検討」信学技報第2種研究会資料 HDA02 - 2(2002-04)

筆者

小谷野 進司(こやの しんじ)

- a. 研究開発本部総合研究所モバイルシステム研究部
- b. 1975年4月
- c. 入社以降スピーカユニット、システムの設計、開発に従事。現在、音場制御、デジタル信号処理、変換器の研究に従事