実験的アプローチによる平板ダイナミックスピーカの
設計パラメータの最適化日高 倫明^{*1}, 大和 誠^{*2}, 外山 史^{*3}, 長谷川 光司^{*3}

Optimization of the flat plate dynamic speaker of design parameters by experimental approach

Tomoaki HIDAKA^{*1}, Makoto YAMATO^{*2}, Fubito TOYAMA^{*3} and Hiroshi HASEGAWA^{*3}^{*1,*3} Graduate School of Engineering, Utsunomiya University

7-1-2 Yoto, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8585, Japan

^{*2} Right-EAR Limited Liability Company.

2-28-25 Sanarudai, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8021, Japan

Received 31 March 2016

Abstract

This study tried optimization of design parameter of an ultra-thin flat plate dynamic speaker unit as an example of high flexibility of the products design. We derived the regression formula of the sound quality effect of each design parameter by the design of experiments and the multiple linear regression analysis, and the evaluation criteria was decided by the Analytic Hierarchy Process (AHP). The optimal combination was searched using the regression formula and the evaluation criteria from the combination of 4800 kinds of design parameters which can be manufactured. As a result, the combination of these higher ranks satisfied simultaneously some sound quality characteristics required for a speaker. Further, we made the prototype of the same specification as them, and they were compared with the predicted value. They had high accuracy to the predicted value. These results suggests that, though the optimum design is difficult by experience and intuition, it can be performed comparatively easily using the regression formula from the design of experiments and the evaluation criteria by the AHP.

Key words : Design engineering, Optimum design, Design of experiments, Analytic hierarchy process, Sound quality, Speaker

1. 緒 言

あらゆる製品・装置の設計において設計自由度が高いことは、様々なニーズに対応可能となりその機能を向上させる上で多くの利点がある。一方、自由度の高さは性能設計を複雑にするために簡単な計算では手に負えず、その解決策として CAE などのシミュレーションツールを利用して性能を予測する方法が普及してきている。しかしながら、それらは高い専門知識と少なからず労力を要するため、時間制約の厳しい設計者は多くの場面で経験と勘に頼った設計にならざるを得ないのが実状で、設計パラメータを適切に選択できているとはいえない。

本研究では、自由度の高い製品設計の一例として、スピーカユニットの設計パラメータ最適化の方法を試行した。情報伝達手段の一つであるスピーカは、昨今の情報化社会の進展に伴って家電や自動車など様々な製品への搭載が進んでいる重要なアイテムである。その設計要件として、搭載先製品の本来機能やデザイン性を損ねない薄型化と、より情報伝達量が優れる高性能化、および、消費者の様々な嗜好に合わせた特色のある音質へのニーズが高まっている。これらのニーズへの対応策として、本研究では様々なスピーカ方式の中で超薄型平板ダイナミックスピーカユニット(プロトロ, 2001)に着目した。このスピーカユニットは、昨今のニーズに適する薄型で優れた伝達特性を持ち、設計自由度が高く設計者の意思を反映しやすい特徴がある。しかし、現在では設計パラ

No.16-00140 [DOI:10.1299/transjsme.16-00140], J-STAGE Advance Publication date : 7 July, 2016

^{*1} 正員, 宇都宮大学大学院 工学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

^{*2} (合) ライト・イア (〒432-8021 静岡県浜松市中区佐鳴台 2-28-25)

^{*3} 宇都宮大学大学院 工学研究科

E-mail of corresponding author: dt147117@cc.utsunomiya-u.ac.jp

メータを適切に選択できているとはいえず、製品設計者が理解しやすく簡便に行える最適化の方法が望まれる。

これまでのスピーカ設計における最適化の研究では、CAE 解析により性能を予測する事例は近年多く報告されている(岩濱他, 2001)(小椋, 田村, 2002)(西村他, 2001)。しかし、これらの方法は設計者が簡便に行える最適化とは言い難い。また、設計者が理解しやすい最適化として、タグチメソッドや実験計画法などによる実験的なアプローチ(今西他, 2002)は、設計者の経験則を補間する上で有効であるが、設計の意思を反映させるのは難しい。

一方、設計者の意思を製品に反映させる方法としては、階層分析法 (AHP) (Thomas, 1996)の活用が考えられる。AHP は階層型意思決定法の一つで、意思決定の場面で遭遇する様々なトレードオフや意見衝突に対して科学的アプローチをもって解決する手法である(八巻, 高井, 2005)。この手法の製品設計への適用として、顧客価値を基にデザインや音質などの五感に関する直感的判断やフィーリングが主となる意思決定に用いた事例(Lin et al, 2008) (丹羽, 近田, 2003)(豊川他, 1996) , 機能選択の方法に用いた事例(Chen and Chuang, 2008)(Eraslan, 2009) (Han et al, 2001)(山川他, 2003) などが幾つか報告されており、設計者の意思を製品に反映させるための有効な方法と考えられる。しかし、複数の性能に連動する設計パラメータの最適化に関する具体的な事例は見られない。

そこで、本研究では自由度の高いスピーカユニットの複数の性能が連動する設計パラメータの選択において、製品設計者が理解しやすく簡便に意思を反映できる最適化の手法として、実験計画法と重回帰分析、および、AHP の組み合わせによる方法を試行した。

2. 超薄型平板ダイナミックスピーカユニット

本研究で取り上げる 超薄型平板ダイナミックスピーカユニット の原理と構造を図 1 に示す。フレキシブルプリント回路 (電気回路がプリントされたフィルム) が形成された振動板と、それを両側から磁石で挟む単純構造で厚さ 1 cm 程度の薄型化が可能である。この回路に電流を流すと、フレミングの左手の法則に従って生まれる力により振動板が運動して、周囲の空気を震わせて音が発生するダイナミック式のフルレンジスピーカである。このスピーカユニットの特徴は、振動板が全面駆動にすることで特定の分割振動がなく中高域周波数帯域での再生能力が優れており、ダンパーやエッジがないことから f_0 (最低共振周波数) が存在しないために広い周波数帯域にわたってインピーダンス特性がフラットで歪みが少なく、高忠実度再生が可能である(プロトロ, 2001)。

この設計において図 1 に示す通り、磁石については、厚さ (Magnet thickness), 間隔 (Magnet gap), 着磁ピッチ (Magnetized pitch), および、穴径の寸法 (Hole diameter) が自由に選択可能で、また、振動板については、厚さ (Substrate thickness), 回路パターンに伴う導体間隔 (Center - to - center spacing of conductor), 導体幅 (Conductor width), 導体厚さ (Conductor thickness), および、導体種類 (Conductor material) の選択自由度を持っており、これら複数の設計パラメータの様々な組み合わせにより、スピーカユニットとしての音質特性が大きく変化する。

Fig. 1 Ultra-thin flat plate dynamic speaker unit

3. 実験による設計パラメータ感度の解析

本研究では、各設計パラメータに対して実験計画法にもとづく直交配列実験(荒木, 2010)(菅, 2012)を行い、これらの結果を用いて重回帰分析によりスピーカユニットの音質に関する特性値(周波数応答特性, 全音圧レベル, 低音域限界入力値)への影響を明らかにした。

3・1 実験計画法による割り付け

前項の超薄型平板ダイナミックスピーカユニットにおいて、現在の製品製造設備の制約と実験規模が大きくなり過ぎないように配慮して、表1に示す9種類のパラメータを実験因子として取り上げた。また、それらについて現状の設計範囲の上・下限値を抽出し、それを2水準として直交表 $L_{16}(2^{15})$ に割り付けた。なお、これまでの設計経験から各因子間の互いの影響が十分考えられるため、出来る限り交互作用が観測できるように配慮した。割り付けした結果を表2に示す。この割り付けにもとづいて、16通りの仕様のスピーカユニットサンプルを準備した。なお、実験に用いた試作スピーカの外形サイズは図2に示す通りとした。

Table 1 Design parameter of speaker

Design parameter	Unit	Lower limit	Upper limit
A : Magnet thickness	mm	1.0	3.0
B : Magnetized pitch	mm	3.0	6.0
C : Magnet gap	mm	1.0	3.0
D : Substrate thickness	μm	25	50
E : Conductor occupancy ratio	%	40	80
F : Hole diameter	mm	1.5	6.0
G : Aperture ratio	%	10	40
H : Conductor material	-	Al	Cu
I : Conductor thickness	μm	12	15

Fig. 2 Flat plate dynamic speaker

Table 2 Allocation result of design parameters in orthogonal table $L_{16}(2^{15})$

	A	C		B			D	F			I		G	H	E
	a	b	ab	c	a c	bc	abc	d	a d	e	ab d	cd	a cd	bcd	abcd
Sample No.	Magnet thickness	Magnet gap	A×C	Magnetized pitch	A×B	B×C	Substrate thickness	Hole diameter	A×F	e	Conductor thickness	B×F	Aperture ratio	Conductor material	Conductor occupancy ratio
	mm	mm		mm			μm	mm			μm		%	-	%
1	1.0	1.0	Interaction	3.0	Interaction	Interaction	25	1.5	Interaction	error	12	Interaction	10	Al	40
2	1.0	1.0		3.0			25	6.0			15		40	Cu	80
3	1.0	1.0		6.0			50	1.5			12		40	Cu	80
4	1.0	1.0		6.0			50	6.0			15		10	Al	40
5	1.0	3.0		3.0			50	1.5			15		10	Cu	80
6	1.0	3.0		3.0			50	6.0			12		40	Al	40
7	1.0	3.0		6.0			25	1.5			15		40	Al	40
8	1.0	3.0		6.0			25	6.0			12		10	Cu	80
9	3.0	1.0		3.0			50	1.5			15		40	Al	80
10	3.0	1.0		3.0			50	6.0			12		10	Cu	40
11	3.0	1.0		6.0			25	1.5			15		10	Cu	40
12	3.0	1.0		6.0			25	6.0			12		40	Al	80
13	3.0	3.0		3.0			25	1.5			12		40	Cu	40
14	3.0	3.0		3.0			25	6.0			15		10	Al	80
15	3.0	3.0		6.0			50	1.5			12		10	Al	80
16	3.0	3.0		6.0			50	6.0			15		40	Cu	40

3・2 測定方法

スピーカユニットサンプルの測定は、反射の影響が十分に少ない無響室で行なった。実験の状況を図3に示す。各仕様の効率を比較するために、事前に 1 kHz の正弦波において 0.25 W となるように入力パワーを調整した。その後、製品の想定している使用方法に合わせてスピーカユニット中心の表面から 10 cm の距離にマイクロホン置き、周波数範囲：10 Hz ～ 40 kHz のスイープ音を印加して、その時の周波数応答特性と全音圧レベル（オーバーオール値：OA）を騒音計により記録した。また、低音域での再生能力を観測するために、80 Hz、および、100 Hz の正弦波を印加しながら昇圧させて、全高調波歪み（THD）が 10% を超えた時点での音圧レベルを低音域限界入力値として記録した。なお、製作過程での要因を取り除くため、測定順序はランダムに行った。

Fig. 3 Measurement condition in an anechoic chamber

3・3 測定結果の解析

直交配列実験により得られた周波数応答特性 (f)、全音圧レベル (OA)、低音域限界入力値 (LD_{80} , LD_{100}) の測定結果に対して、それぞれを目的変数、各設計パラメータ（因子）を説明変数として重回帰分析により各々の関係式（回帰式）を求め、因子の主効果と交互作用を算出した。ここで、連続値である周波数応答に対する因子効果の算出は、測定時の周波数分解能（測定器に依存：10 Hz ～ 40 kHz 範囲で 577 点）ごとに重回帰分析により回帰式を求め、これらを周波数順に繋いで応答特性とする方法とした。以上の結果より得られた交互作用を含んだ回帰式を、式 (1) ～ (4) に示す（周波数応答特性の回帰式は、1 kHz の式を代表として示す）。

$$f_{(1\text{ kHz})} = 74.3 + 1.31x_A + 1.57x_B - 2.35x_C - 0.06x_D + 0.03x_E - 0.40x_F - 1.57x_H + 0.67x_I + (1.42x_Ax_B - 0.26x_Ax_C + 0.26x_Ax_F - 0.77x_Bx_C) \quad (1)$$

$$OA = 76.6 + 1.39x_A + 1.78x_B - 2.43x_C - 0.07x_D - 0.01x_E - 0.16x_F - 0.03x_G - 2.35x_H + 0.71x_I + (1.03x_Ax_B - 0.21x_Ax_C + 0.44x_Ax_F - 0.80x_Bx_F) \quad (2)$$

$$LD_{80} = 34.4 + 1.38x_A - 0.58x_B + 6.75x_C + 0.18x_D - 0.13x_E - 0.33x_F - 0.05x_G + 1.75x_H + 2.42x_I + (1.75x_Ax_B + 0.50x_Ax_C - 0.78x_Ax_F + 1.67x_Bx_C - 0.37x_Bx_F) \quad (3)$$

$$LD_{100} = 43.4 + 2.60x_A + 6.06x_C - 0.08x_E + 0.58x_F - 3.13x_H + 1.96x_I + (2.21x_Ax_B - 1.81x_Ax_C - 0.47x_Ax_F + 1.96x_Bx_C) \quad (4)$$

ただし、

x_A , x_B , x_C , x_D , x_E , x_F , x_G , x_H , x_I : 磁石厚さ (Magnet thickness), 着路ピッチ (Magnetized pitch), 磁石隙間 (Magnet gap), 基材厚さ (Substrate thickness), 導体占有率 (Conductor occupancy ratio), 穴径 (Hole diameter), 開口率 (Aperture ratio), 導体種類 (Conductor material), 導体厚さ (Conductor thickness), とする。

なお、重回帰分析において注意すべき点である回帰式の検定において、これらの回帰式（周波数応答 577 式, 全音圧レベル 1 式, 低音域限界入力値 2 式）の決定係数は平均 0.883 と十分な精度であったことを確認した。また、各式の回帰係数（説明変数）において、有意でない（各特性値と各設計パラメータの相関関係が低い）係数は効果がほとんどないと考え、回帰式から取り除いた。

これらの回帰式に基づいて算出した各設計パラメータの特性感度を図4～図6に示す。これらの図中において、各主効果図は水準を上げた場合（水準1 → 水準2）の音圧増減量を表す。また、各交互作用図に示す値は、

互いの因子が同じ水準の場合（例えば、磁石厚さ：水準1 …1.0 mm × 磁石隙間：水準1 …1.0 mm）では“+”（プラス）、互いの因子が異なる水準の場合（例えば、磁石厚さ：水準1 …1.0 mm × 磁石隙間：水準2 …3.0 mm）では“-”（マイナス）に作用する音圧の増減量を表す。なお、図中で負の値の場合はその逆を表す。

Fig. 4 Frequency response characteristics on each design parameter. The sound level increased as the values of Magnet thickness, Magnetized pitch, and Conductor thickness became large at the low frequency range from 20 Hz to 6 kHz. The sound level increased as the values of Aperture ratio and Conductor occupancy ratio became large at around 50 Hz and at above 10 kHz. The overall sound level decreased when the values of Magnet gap, Substrate thickness, and Hole diameter increased. The sound level was reduced by changing Conductor material from Al to Cu at high frequency range above 7 kHz. The interaction showed complex characteristics.

Fig. 5 Overall sound level on each design parameter. The overall sound level increased as the each value of Magnet thickness, Magnetized pitch, or Conductor thickness became large. The overall sound level, however, decreased by the interaction when the parameters increased at the same time.

Fig. 6 Maximum input level at 80 Hz and 100 Hz. Increasing Magnet gaps was the most effective way to increase the maximum input level at the low frequency range. The maximum input level largely decreased by the interaction when the values of Magnet thickness and Magnetized pitch or the values of Magnetized pitch and Magnet gap increased at the same time.

図4～図6より各設計パラメータの効果を見ると、周波数応答特性においては図4(a)～(c)に示す通り、“磁石厚さ”、“着磁ピッチ”、“導体厚さ”が増すと、低音域(20 Hz付近)～高音域(6 kHz付近)の音圧が一定に上昇する効果がある一方、“磁石隙間”、“基材厚さ”、“穴径”が増すと音圧が低下する傾向を示した。また、“開口率”、“導体占有率”を上げると50 Hz付近を中心とした低中音域(1 kHz付近まで)と高音域(10 kHz以上)の音圧が上昇し、“導体種類”を銅(Cu)にすると、周波数が高くなるほど音圧を減少させる結果となった。なお、交互作用として図4(d),(e)に示す通り、“磁石厚さ”と“着磁ピッチ”、“磁石隙間”と“着磁ピッチ”、“磁石厚さ”と“穴径”を各々同時に増やした場合は、主効果の上昇分を帳消しにする音圧の減少が見られ、“着磁ピッチ”と“穴径”を同時に増やす場合には、高音域(10 kHz以上)で大きく変動する複雑な特性が見られた。

全音圧レベルについては、図5に示す通り“磁石厚さ”、“着磁ピッチ”、“導体厚さ”の各設計パラメータは、値を増やすと音圧が増加するが、これらも各々を同時に増やすと音圧が減少する交互作用があった。

低音域限界入力値では、図6(a)に示す通り、80 Hzと100 Hzで多少の相違はあるが、“磁石隙間”を増やすことが限界入力値の増加に最も効果的で、次いで“導体厚さ”、“磁石厚さ”の順となった。但し、図6(b)に示す通り、“磁石厚さ”と“着磁ピッチ”、“着磁ピッチ”と“磁石隙間”をそれぞれ同時に増加させると、限界入力値が大きく減少する交互作用があった。以上の通り、本研究で扱うスピーカユニットは、各設計パラメータの選択に対して非常に複雑な特性を示すことがわかった。

また、これらの関係式より算出した各サンプルの予測値と測定値の平均誤差を確認したところ、周波数応答特性: ± 0.7 dB (相対誤差率 1.0%)、全音圧レベル: ± 0.4 dB (相対誤差率 0.5%)、低音域限界入力値(80 Hz): ± 0.4 dB (相対誤差率 0.5%)、低音域限界入力値(100 Hz): ± 2.0 dB (相対誤差率 2.5%)の精度であった。

4. 設計パラメータの最適化

昨今のスピーカユニット製品に求められている高性能化には、幾つかの条件が考えられる。これらの条件の中で本研究では、“入出力効率が優れていること”、“周波数応答特性が平坦であること”、“歪が小さいこと”、および、“再生周波数帯域が広いこと”について、高い次元で同時に満たすことを目標とした。これを多目的最適設計問題と捉え、設計パラメータの組み合わせにより変動する各特性値を、直交配列実験の結果を用いて重回帰分析により得られた前述の回帰式から算出し、これら複数の特性値に対してAHPにより重み付けした評価関数を用いて適切な設計パラメータを探索した。

4・1 スピーカユニット特性の評価基準

スピーカユニットの高性能化の条件(佐伯, 1999)において, どれをどの程度満足させるかはスピーカの方式や商品の目的によって異なり(松田, 1989), また, その評価方法はメーカーごとに様々である(岩濱他, 2001)(西村他, 2001). 一方, 高忠実度再生のスピーカ特性の一般化された評価方法として感性評価による方法も提案されている(三井他, 2010)が, いずれも明確な判断項目と評価基準は見られない. そこで, 設計パラメータの適切な選択にあたり, 本研究で扱うスピーカユニットの性質を考慮して, スピーカユニットの音質特性の適切さを表す基本的な条件として, “入出力効率が優れていること (能率が良いこと)”, “周波数応答特性が平坦であること”, “歪が少ないこと”, および, “再生周波数帯域が広いこと” を取り上げ, それぞれに対して評価項目を設定してこれを評価基準とした. これらの評価項目を図 7, および, 表 3 に示す.

Fig. 7 Evaluation criteria in frequency domain

Table 3 Evaluation items and evaluation criteria of sound quality for the speaker

Evaluation item	Evaluation characteristics		Frequency range [Hz]	Optimization
Speaker efficiency	① OA	Overall Level	by Sound level meter	Maximize
	② OA_{lim}	Average of each frequency sound level	1.6k - 16k	Maximize
Variability, frequency characteristic	③ SD	Standard Deviation of each frequency sound level	80 - 16k	Minimize
	④ SD_{lim}	Standard Deviation between approximation curve of sound level	1.6k - 16k	Minimize
	⑤ D_{max}	Max difference between approximate curve of Sound level	1.6k - 16k	Minimize
Capability, low range	⑥ LS	Difference between 1.6k Hz to 80 Hz sound level	80 - 1.6k	Minimize
	⑦ LD_{80}	Sound level of THD 10% at 80 Hz	80	Maximize
	⑧ LD_{100}	Sound level of THD 10% at 100 Hz	100	Maximize
Capability, high range	⑨ HS	Slope of 1.6k Hz on the approximate curve of sound level	16k	Minimize

次に、これら 9 種類の評価項目に対して、設計者の意思を反映できるように AHP を用いて重要度を定めた。本研究では、図 7、および、表 3 に示す評価項目について、① OA と② OA_{lim} を“出力音圧”，③ SD と④ SD_{lim} と⑤ D_{max} を“周波数の暴れ”，⑥ LS と⑦ LD_{80} と⑧ LD_{100} を“低音域再生能力”，および、⑨ HS を“高音域の伸び”として、スピーカ設計者が製品設計時に意識する性能に再整理し、2 階の階層構造とした。そして、AHP の手法に基づいて、これらの“出力音圧”，“周波数の暴れ”，“低音域再生能力”，および，“高音域の伸び”の 4 つの性能に対して各々対比較で重要性を 5 段階で評価し、これらの幾何平均から 1 次階層の重要度を求めた。さらに、①～⑨の項目についても 4 つの性能ごとに分けて同様に評価し、2 次階層の重要度を算出した。その後、各階層の重要度を掛け合わせて総合重要度を算出した。これより得られた階層構造と重要度を図 8 に示す。図中において、それぞれの項目枠内に各重要度を、最終行に総合重要度を表す。なお、AHP における各評価項目の一对比較は、スピーカ設計に関する知識と経験が十分に深い技術者 1 名と研究者 1 名で協議しながら実施した。また、AHP 手法において、整合度指数 (C.I.) が 0.1 以下であれば問題ないと言われている(八巻, 高井, 2005)が、今回の結果は 0.095 と良好な値であった。

Fig. 8 Weighting of evaluation characteristics value by the Analytic Hierarchy Process

4・2 設計パラメータの組合せによる特性値予測と最適化

スピーカユニットの特性値を予測するのにあたり、各設計パラメータは現状の設備・工具・材料から判断して表 4 に示す値に限定した。これらの値を使って、直交配列実験の解析により得られた式 (1) ～ (4) (周波数応答 577 式, 全音圧レベル 1 式, 低音域限界入力値 2 式) を用いて、 $5^2 \times 2^6 \times 3 = 4800$ 通りの全組合せによる各特性値の予測計算を行った。予測計算結果による特性値の変動範囲を表 5 に示す。

Table 4 Level values of design parameter for the prediction

Design parameter		Level value				
		1	2	3	4	5
A : Magnet thickness	mm	1.0	1.2	2.0	2.4	3.0
B : Magnetized pitch	mm	3.0	6.0	-	-	-
C : Magnet gap	mm	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
D : Substrate thickness	μm	25	50	-	-	-
E : Conductor occupancy ratio	%	40	80	-	-	-
F : Hole diameter	mm	1.5	6.0	-	-	-
G : Aperture ratio	%	10	20	40	-	-
H : Conductor material	-	0 (Al)	1 (Cu)	-	-	-
I : Conductor thickness	μm	12	15	-	-	-

Table 5 Range of prediction results

Evaluation item	Predicted value [dB]					
	Minimum	Maximum	Average	Median	Standard deviation	Range
① OA	75.5	97.9	86.5	86.6	4.1	22.4
② OA_{lim}	79.3	100.1	89.4	89.4	3.9	20.7
③ SD	4.66	10.3	7.29	7.34	1.03	5.60
④ SD_{lim}	0.49	4.54	1.77	1.68	0.73	4.05
⑤ D_{max}	2.08	30.5	9.08	7.91	4.53	28.4
⑥ LS	11.7	25.6	18.9	19.3	2.95	14.0
⑦ LD_{80}	53.9	104.6	77.8	78.0	7.85	50.8
⑧ LD_{100}	58.1	102.8	83.1	83.4	7.13	44.8
⑨ HS	0.04	26.7	10.5	10.4	5.14	26.6

次に、表4の各設計パラメータの適切な組合せの選択を多目的最適設計問題として、これを重み付けによる単一目的最適設計問題へ変換して探索した(日本機械学会, 2007). 各項の重み付けは4・1項のAHPから得られた総合重要度を活用し、式(5)に示す線形和を評価式として、全組合せの総合評価値を算出して順位付けを行った. なお、各特性値の単位の影響を取り除くために、最大化したい評価値(OA , OA_{lim} , LD_{80} , LD_{100})は最小値が0で最大値が1に、最小化したい評価値(SD , SD_{lim} , D_{max} , LS , HS)は最大値が0で最小値が1になるように、評価値ごとに正規化した値を用いた. この方法による最適化結果の上位5仕様を表6に示す.

$$C.E. = 0.017 OA + 0.084 OA_{lim} + 0.018 SD + 0.058 SD_{lim} + 0.189 D_{max} + 0.030 LS + 0.115 LD_{80} + 0.268 LD_{100} + 0.222 HS \quad (5)$$

Table 6 Top five of comprehensive evaluation

Ranking		1	2	3	4	5	Average (all types)
Prototype No.		1377	670	217	862	29	
A : Magnet thickness	mm	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	—
B : Magnetized pitch	mm	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	—
C : Magnet gap	mm	2.0	2.5	1.5	3.0	1.0	—
D : Substrate thickness	μm	25	50	25	50	25	—
E : Conductor occupancy ratio	%	40	80	40	80	40	—
F : Hole diameter	mm	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	—
G : Aperture ratio	%	40	40	10	40	20	—
H : Conductor material	-	Al	Al	Al	Al	Al	—
I : Conductor thickness	μm	12	15	12	15	12	—
Speaker efficiency	OA	dB	83.5	81.7	86	80	86.5
	OA_{lim}	dB	87.6	85.4	88.9	83.8	89.4
Variability, frequency characteristics	SD	dB	6.4	5.1	8.0	5.1	7.29
	SD_{lim}	dB	0.6	0.6	0.6	0.6	1.77
	D_{max}	dB	3.1	2.9	3.7	2.9	9.08
Capability, low range	LS	dB	17.3	15.1	24.1	14.5	18.9
	LD_{80}	dB	76.8	85.8	77	87.6	77.8
	LD_{100}	dB	86.2	91.7	84	94.2	83.1
Capability, high range	HS	dB	0.2	4.7	4.5	6.2	10.5

これら上位 5 仕様の各設計パラメータを確認すると、“磁石厚さ”は 1.0 mm (上位 1 位を除く)，“着磁ピッチ”は 3.0 mm，“穴径”は 6.0 mm，および，“導体種類”は アルミ (Al) に集約される結果となった。

4・3 最適化結果の検証

前述の評価式より求めた総合評価値の上位 5 仕様の各特性値を確認すると， SD_{lim} ， D_{max} ，および， HS は平均値より良好な値（この場合はより低い値の方が望ましい）となり，また， LD_{100} も上位 4 種類までは平均値よりも良好な値（この場合はより大きい値の方が望ましい）となった。一方で，その他の特性値は平均値よりも良好な値とはなっていない。そこでこの結果を判断するために，これら上位 5 仕様のスピーカを試作して設計者が試聴したところほぼ意図した性能が得られており，特に 4 番目 (No.862) がフィーリングにおいて最も適切であることを確認した。これらより，スピーカ音質特性の適切さを表す“入出力効率が優れていること（能率が良いこと）”，“周波数応答特性が平坦であること”，“歪が少ないこと”，および，“再生周波数帯域が広いこと”を同時に満足する結果が得られた。

周波数応答特性について詳細にみると，1 kHz 以下のレベルは低いが 20 kHz までは平坦でそれ以上では急激に落ち込むタイプ (図 9 (a)，(c)) と，1 kHz 以下のレベルは高いが 10 kHz 以上では徐々に下がって行くタイプ (図 9 (b)，(d)，(e)) に分かれる傾向であった。

また，これらの予測値と測定結果の平均誤差を確認したところ，周波数応答特性： ± 2.1 dB (相対誤差率 2.9%)，全音圧レベル： ± 3.3 dB (相対誤差率 4.1%)，低音域限界入力値 (80 Hz)： ± 2.7 dB (相対誤差率 3.6%)，低音域限界入力値 (100 Hz)： ± 5.5 dB (相対誤差率 7.1%) と良好な精度が得られた。ただし，図 9 (c) ～ (d) に示す仕様において，予測値にはない 14 ～ 16 kHz 付近の周波数ピークが見られた。これはスピーカの組み立て誤差が影響している可能性があるため，組み立て方法と寸法精度の見直しを検討する必要があると考えている。

Fig. 9 Comparison of the frequency response characteristics (Prediction calculation vs. Measurement result). The results were classified into two groups as follows; the sound level was low at below 1 kHz and decreased sharply at over 20 kHz, and the sound level was high at below 1 kHz and decreased gradually at over 10 kHz. The peaks appeared at around 14 to 16 kHz that were not seen in the prediction characteristics in (c) to (e).

5. 実験結果と最適化結果の考察

直交配列実験により得られた各設計パラメータの効果を観察すると、“磁石厚さ”、“着磁ピッチ”、“導体厚さ”、“導体占有率”が増加すると音圧が上昇し、“磁石隙間”、“穴径”が増加すると音圧が低下する傾向は、磁力の強さに音圧が影響していると考えられる。また、“基材厚さ”の増加、もしくは、“導体種類”を銅 (Cu) にすると音圧が低下することは、振動板の重さが音圧に影響を及ぼしていると考えられる。さらに、“開口率”、“導体種類”を変えることで周波数特性が部分的に変化する傾向は、形状特性や材料特性が音質に影響を与えていると考えられる。これらの結果は、これまでに得ている設計者の経験（磁力が高ければ音量が大きくなる。磁石から距離がある場合、および、振動板が重くなれば音量が出ない。銅の導体は高音域の音質に悪影響がある）に従っていると言える。一方で、今回の実験で明らかになった複雑な交互作用の存在は、経験と勘に頼るだけでは複数の性能が連動する設計パラメータの適切な選択は難しいことを示している。

次に、本研究で得られた評価式による最適化結果を観察すると、各特性値において SD_{lim} , D_{max} , HS , および, LD_{100} 以外は平均値よりも良好な値とはならなかった。これは、AHP で得られた重要度 (図 8 参照) において, D_{max} , HS , および, LD_{100} の重み付けが大きく優先される傾向のため、他の特性は良好な値を同時に満たすことができないことを示している。このことから、それぞれの特性値の間にはトレードオフの関係があると推測される。さらに、周波数応答特性の傾向において 2 つのタイプ (1 kHz 以下のレベルは低い 20 kHz までは平坦でそれ以上では急激に落ち込むタイプ, 1 kHz 以下のレベルは高い 10 kHz 以上では徐々に下がって行くタイプ) に分かれる傾向であったことは、低音域と高音域の特性も同様にトレードオフの関係が推測される。以上ことから、これらにはパレート解と言われる複数の目的を同時に満たすことが不可能な実行可能解 (日本機械学会, 2007) の存在が考えられる。しかし、全ての特性が平均値を上まわることを最適化に期待する設計者にとって、このパレート解の存在は容易には理解し難く、実際の設計において多目的最適設計問題を単一目的最適設計問題へ変換することの難しさを表していると言える。これを簡便に解決するための方法として、本研究で実施した総合評価の上位数種類の試作による最終確認は、有効な手段の一つと考える。ただし、今回の最終確認はフィーリング判断のみであったため、判断結果の定量化を実施して判定基準を評価式にフィードバックすると共に、更に分かり易いパレート解の対応策を探索することが今後の課題である。

6. 結 言

本研究は自由度の高い製品設計の一例として、超薄型平板ダイナミックスピーカユニットの 9 種類の設計パラメータの最適化を試行した。まず始めに、実験計画法に基づく直交配列実験を行い、重回帰分析により関係式を導出して各設計パラメータの主効果と交互作用効果を明らかにした。その後、階層分析法 (AHP) を用いてスピーカ音質特性値の重要度を求め、それらを重み係数として総合評価値を算出する評価関数を設定した。これらの関係式と評価関数を用いて、現実的に製作可能な 4800 通りの設計パラメータの組合せの中から総合評価値の上位 5 仕様を抽出し、これに従う仕様の試作品を製作して設計者の試聴による最終確認にて最適な仕様を選出した。これにより、スピーカ音質特性の適切さを表す“入出力効率が優れていること (能率が良いこと)”, “周波数応答特性が平坦であること”, “歪が少ないこと”, および, “再生周波数帯域が広いこと”を同時に満足する結果が得られた。なお、これらの試作品の音質測定を行なって予測値と精度を比較した結果、全般的に良好な精度であったことを確認した。

以上より、本研究で実施した実験計画法と重回帰分析、および、AHP の組み合わせによる複数の性能が連動する設計パラメータの選択方法は、経験と勘だけでは難しい最適化設計が比較的容易にできると共に、設計者の意思を反映できる最適化の手法として有効なことが確認できた。

文 献

- 荒木孝治, R と R コマンドではじめる実験計画法 (2010), pp.105-138.
 Chen, C. and Chuang, M., Integrating the Kano model into a robust design approach to enhance customer satisfaction with product design, International Journal of Production Economics, Vol.114 (2008), pp.667-681.

- Eraslan, E., Usability evaluation of Mp3/CD players : A multi-Criteria decision making approach, Human Centered Design, Vol.5619 (2009), pp.55-64.
- Han, H., Yun, M., Kwahk, J. and Hong, S., Usability of consumer electronic products, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol.28 (2001), pp.143-151.
- 今西快友, 馬場輝夫, 長谷川 知己, 小谷野進司, 品質工学を用いた振動板形状の最適化, PIONEER R&D, Vol.12, No.3 (2002), pp.39-46.
- 岩濱正男, 菅信敬嗣, 飯泉高正, 牧野薫, 平板スピーカの振動音響設計法開発, 日本機械学会, [No.01-15] Dynamics and Design Conference 2001 CD-ROM 論文集 (2001).
- 特許庁, 平成 18 年度 特許出願技術動向調査報告書 最新スピーカ技術 ―小型スピーカを中心に― (要約版) (2007).
- 菅民郎, Excel で学ぶ実験計画法 ―シックスシグマと重回帰分析― 第 2 版, オーム社 (2012), pp.94-220.
- Lin, M., Wang, C., Chen, M. and Chang, C.A., Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process, Computers in Industry, Vol.59, No.1 (2008), pp.17-31.
- 松田醇, 平面スピーカ, テレビジョン学会誌, Vol. 43, No.7 (1989), pp.676-683.
- 三井実, 石川智治, 宮原誠, 高忠実音再生に必要なスピーカ特性の検討, ものづくり大学紀要, No.1 (2010), pp.14-21.
- 西村健, 飯塚健児, 米原秀春, 境克敏, 山根基宏, 平面スピーカ振動膜の開発, 古河電工時報, No.108 (2001), pp.1-6.
- 丹羽信弘, 近田康夫, AHP を援用した高架橋の橋脚形状選定, 土木学会, 第 8 回設計工学に関するシンポジウム 講演論文集 (2003), pp.119-122.
- 小椋高志, 村田耕作, セラミック圧電材料による小型平面スピーカの実用化, 電学誌, Vol.122, No.12 (2002), pp.832-834.
- 株式会社プロトロ, 薄型平板スピーカー, 特許第 3192372 号 (2001).
- 佐伯多門, 新版スピーカー&エンクロージャー百科, 誠分堂新光社 (1999), p.25.
- 日本機械学会編, 機械工学便覧 デザイン編 β 1 設計工学, 丸善 (2007), pp.101-117.
- 豊川勝生, 市原恒一, 澤口勇雄, ファジィ AHP 法による残響特性の快適感の評価, 日本造園学会, 平成 8 年度 研究発表論文集 (1996), pp.193-196.
- Thomas L.Saaty, The analytic network process, RWS Publishing Pittsburgh (1996), pp. 24-25.
- 山川宏, 荒川雅生, 畔上秀幸, 尾田十八, 杉本博之, 鈴木真二, 長松昭男, 中山弘隆, 萩原一郎, 三木光範, 吉村允孝, 最適設計ハンドブッカー基礎・戦略・応用, 朝倉書房 (2003), pp.392-398.
- 八巻直一, 高井英造, 問題解決のための AHP 入門―Excel の活用と実務的例題, 日本評論社 (2005), pp.1-39.

References

- Araki, T., R to R commander de hajimeru jikkenkeikakuhou (2010), pp.105-138 (in Japanese).
- Chen, C. and Chuang, M., Integrating the Kano model into a robust design approach to enhance customer satisfaction with product design, International Journal of Production Economics, Vol.114 (2008), pp.667-681.
- Eraslan, E., Usability evaluation of Mp3/CD players : A multi-Criteria decision making approach, Human Centered Design, Vol.5619 (2009), pp.55-64.
- Han, H., Yun, M., Kwahk, J. and Hong, S., Usability of consumer electronic products, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol.28 (2001), pp.143-151.
- Imanishi, Y., Baba, T., Hasegawa, T. and Koyano, S., The optimization of the diaphragm shape based on the quality engineering, PIONEER R&D, Vol.12, No.3 (2002), pp.39-46 (in Japanese).
- Iwahama, M., Sukanobu, T., Iizumi, T. and Makino, K., Development of vibro-Acoustic design method of flat panel Speakers, [No.01-15] Dynamics and Design Conference 2001 CD-ROM, (2001) (in Japanese).
- Japan Patent Office, 2006 patent application technology trend survey report, The latest speaker technology (Abridged edition) (2007) (in Japanese).
- Kan, T., Excel de manabu jikkenkeikakuhou - Six Sigma to juukaikibunseki - 2nd edition, Ohmsha (2012), pp.94-220 (in Japanese).
- Lin, M., Wang, C., Chen, M. and Chang, C.A., Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process, Computers in Industry, Vol.59, No.1 (2008), pp.17-31.
- Matsuda, A., Heimen speaker, ITEJ technical report, Vol.43, No.7 (1989), pp.676-683 (in Japanese).

- Mitsui, M., Ishikawa, T. and Miyahara, M., Discussion of speaker characteristics for high fidelity reproduction, The Bulletin of Institute of Technologists, No. 1 (2010), pp.14-21 (in Japanese).
- Nishimura, T., Iizuka, K., Yonehara, H., Sakai, K. and Yamane, M., Development of a diaphragm for planar acoustic converting apparatus, Furukawa Electric Review, No.108 (2001), pp.1-6 (in Japanese).
- Niwa, N. and Cikata, Y., Bridge pier from selection of an elevated bridge for which AHP was used, Japan Society of Civil Engineers, The 8th design engineering Symposium (2003), pp.119-122 (in Japanese).
- Ogra, T. and Murata, K., Ceramic atsuden zairyou niyoru kogata heimen speaker no jitsuyouka, J.IEE Japan, Vol.122, No.12 (2002), pp.832-834 (in Japanese).
- Protro Co., Ltd., Thin profile electromagnetic transducer, Japanese patent 3192372 (2001).
- Saeki, T., Sinban Speaker and enclosure hyakka 2nd edition, Seibundo-shinkosha (1999), p.25 (in Japanese).
- Toyokawa, K., Ichihara, K. and Sawaguchi, I., A Study for the evaluation of sound with different reverberating time by fuzzy analytic hierarchy process method, Papers of the 14th scientific research meeting (1996), pp.193-196 (in Japanese).
- The Japan Society of Mechanical Engineers ed., JSME Mechanical Engineers' Handbook, Design Engineering, Maruzen (2007), pp.101-117 (in Japanese).
- Thomas L.Saaty, The analytic network process, RWS Publishing Pittsburgh (1996), pp.1-25.
- Yamakawa, H., Arakawa, M., Azekami, H., Oda, J., Sugimoto, H., Suzuki, S., Nagamatsu, A., Yamanaka, H., Hagiwara, I., Miki, M. and Yoshimura, M., Saitekisekkei Handbook kiso/senryaku/ouyou, Asakura Shobo (2003) , pp.392-398 (in Japanese).
- Yamaki, N. and Takai, E., Mondai kaiketsu no tame no AHP nyuumon –Excel no katsuyou to jitsumuteki reidai (2005), pp.1-39 (in Japanese).