

## 品質工学を用いた振動板形状の最適化

The optimization of the diaphragm shape based on the quality engineering

今西 快友, 馬場 輝夫, 長谷川 知己, 小谷野 進司

Yoshitomo Imanishi, Teruo Baba, Tomomi Hasegawa, Shinji Koyano

**要 旨** 薄型かつ異形で有りながら広帯域再生可能なスピーカ振動板を実現する手法について検討した。構造解析を用いた異形振動板の開発では形状パラメータの増加により、従来の経験的手法では最適形状を効率よく得ることが困難である。そのため、品質工学を適用し、形状パラメータの最適化を試みた。パラメータは形状要因から8種類を選定し、L18の直交表に割り付け周波数を誤差因子として実験を行った。その結果、平坦で広帯域な音圧特性が得られる振動板形状を効率よく決定することを可能とした。

**Summary** The authors have investigated the method to design the diaphragm which has wide range frequency response even though it is thin and unique shape. In respect to developing the unique shape diaphragm using structure analysis, increasing the parameters made it difficult to realize a suitable shape. So the authors have tried to optimize the shape using the Quality engineering. Eight parameters are selected from all variables of the shape. They are allocated to an Orthogonal Array 'L18' with noise variables for frequency. The result revealed that it is possible to design the diaphragm with a flat and wide range frequency response efficiently.

**キーワード** : 品質工学, タグチメソッド, パラメータ設計, SN比, 直交表, 薄型スピーカ, 振動板, シミュレーション

### 1. まえがき

AVやカー用途のスピーカにおいてデザインや実装上の要求からさまざまな形状が求められている。特に薄型のスピーカでは振動板形状が浅くなるため、分割振動による特性の乱れや、高域特性が十分延びないなどの問題がある。これらの問題に関して、これまでも解析ツールを駆使し、さまざまな形状が検討されてきた。しかし、形状が複雑になるほどパラメータ数が増大するため最適な形状を得ることを困難にしている。

今回、振動板形状を決定するために、パラメータ設計に有効な手法とされている品質工学を用いた評価手法の適用を試みたので報告する。

### 2. 振動板のモデル化

解析の対象とした振動板の基本形状を図1に示す。スピーカとしての厚みを出来るだけ小さくするためコーン中央部に折り返し部を設け、また、コーンを補強する目的で凸形状のリブを形成した。この振動板についてパラメトリック

に解析できるよう各部分について数式化し、効率よく実験を行えるようにした。

解析には有限要素法を用い、振動系部分のみをモデリングし、荷重条件としてボイスコイル下端部へ垂直に1[N]の駆動力を加え、振動板中心軸上1mでの出力音圧レベルを算出した。

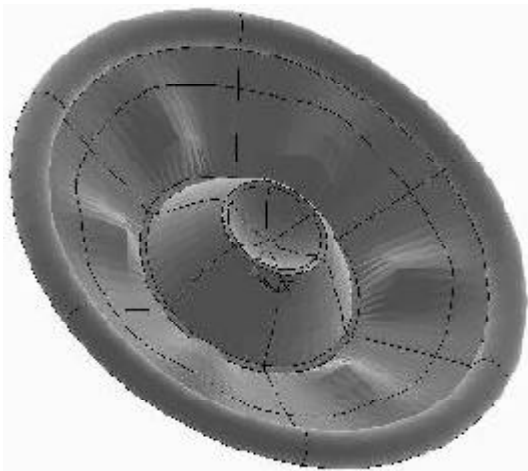


図1 解析対象となる振動板の基本形状

### 3. 基本機能の考え方

品質工学ではシステムの基本機能を明確にしこれを改善することでロバストな系を実現することを目的としている。スピーカの基本機能は「入力信号に対し、忠実な振動を再現し、空気に伝える事」と言える。すなわち、入力周波数に関わらず、一定の音圧を出力できることが理想である。エネルギー変換率をとすれば、スピーカの理想機能は、式(1)のように表せる。

$$y = (f)M \dots\dots\dots (1)$$

y: 出力音圧 M: 入力信号  
: 変換率 f: 周波数

今回の適用においては周波数を誤差因子として、信号因子である入力信号を変化させたときの出力変化を評価する動特性を利用すれば最適なパラメータを求めることが可能であると考えた。実際にはシミュレーションによる実験を行うため、入出力関係は線形になり、誤差による変動を評価する望目特性と同等になる。

### 4. 各因子の設定

前述の考え方を検証するために予備実験としてリブ形状を中心とした4つのパラメータを設定し、L9の直交表を適用して評価した。その結果、概ね良好な傾向を得た。しかし、パラメータの設定で交互作用が生じ、個々のパラメータの効果が十分に評価されていないことが明らかになった。

予備実験の結果を基に、この理想機能に準じて信号因子、出力、誤差因子を表1のように設定した。通常、誤差因子は正側最悪要因と負側最悪要因に分かれるように調合することが推奨される。しかしここでは、周波数と出力特性との間に傾向的な相関がないと考えられるので、あえて調合は行わず、慣性制御領域でかつ解析上信頼できる範囲の周波数200～2000Hzのうち44ポイントを抽出し、全て計算した。

表1 入出力因子の割り付け

因子名	スピーカへの適用
信号因子M	ボイスコイルへの荷重(1[N])
出力y	軸上1mでの出力音圧([dB])
誤差因子N	周波数(200～2kHz 44ポイント)

次に制御因子を設定する。本来制御因子は、考え得る全てのパラメータを抽出すべきであるが、振動板形状を規定するパラメータは無数に考えられるため、ある程度の限定が必要である。予備実験の結果からL18直交表を適用することとし、モデル化された基本形状を基に分割振動に影響するパラメータとしてリブ形状を中心に8種類の因子を抽出した。抽出した因子は表2および図2の通りである。これらの因子に対し表3のように各々の2～3水準を与えている。

以上のように設定した制御因子とその水準をL18の直交表に割り付けた(表4参照)。さらに、その外側には誤差因子44ポイントを割り付けて、これら全てに対してデータを収集した。

前述の通り,実際の実験はシミュレーションにて行っており,直交表に従った18通りのモデルごとに軸上1mにおける出力特性を算出し,この結果より周波数(誤差因子)ごとのデータを抽出している。なお,出力データは基準音圧  $2 \times 10^{-5}$  [N/m<sup>2</sup>] で換算した SPL を用いた。

### 5. データの評価法

データの評価に当たっては品質工学でいわれる2段階設計の考え方をを用いた。すなわち,最初にSN比のみを評価してロバストな組み合わせを求め,その後,SN比を維持しながら感度を調整して目標値へ合わせ込む。

表3 制御因子と水準(L18直交表用)

	制御因子	第1水準	第2水準	第3水準
A	ネック位置	14	1E	---
B	面積比	11	12	14
C	内側リブ数	0	3	5
D	外側リブ数	0	3	5
E	厚さ	s	l	h
F	エッジ内径	E4	E7	S0
G	貼り合せ量	5	7	3
H	キャップR	1	3	5

表2 制御因子の概要

制御因子	変数	補足説明
ネック位置	tachiy	voとの接合部のy座標
面積比	midx	折り返し位置のx座標とこれに伴う内外振動板カーブ
内側リブ数	---	内側振動板へ付与するリブの数(形状は一定)
外側リブ数	---	外側振動板へ付与するリブの数(形状は一定)
厚さ		振動板厚さ(物性値を含む) s:無発泡 l:低発泡 h:高発泡
エッジ内径	edgex	エッジ内側(振動板外周)のx座標
貼り合せ量	wx_hari	エッジと振動板の貼り合せ幅
キャップR	V_HCAP	センターキャップの曲率

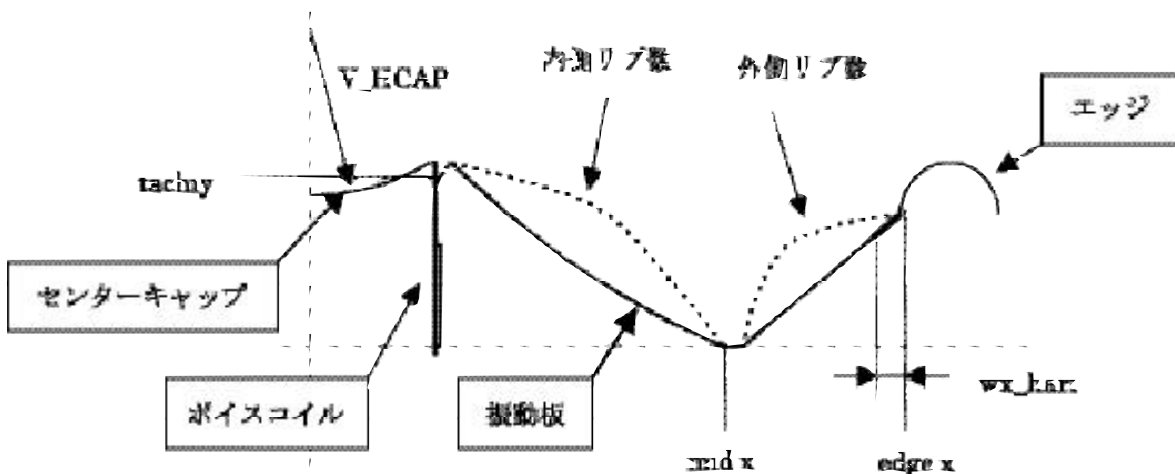


図2 モデル断面図による制御因子の説明

具体的な手順としては実験モデルごとのSN比を算出し、制御因子に対する分散分析を行い、これにより得られた要因効果図からロバストな組み合わせを抽出する。その後、感度についても同様に要因効果図を求め、SN比に対し影響の少ない制御因子で目的の感度へ調節する。今回は、スピーカの理想機能として効率が良い方が良くとみなし、より感度をあげるようにチューニングした。

望み特性を用いた場合のSN比および感度は式(2)により求められる。

$$\left. \begin{aligned}
 [\text{SN比}] &= 10 \log \left( \frac{S_m - V_e}{n V_e} \right) \\
 [\text{感度}] S &= 10 \log \left( \frac{S_m - V_e}{n} \right) \\
 S_m &= \frac{(y_1 + y_2 + \dots + y_n)^2}{n} \\
 V_e &= \frac{(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2 - S_m)}{n-1}
 \end{aligned} \right\} (2)$$

y: 出力      S<sub>m</sub>: 一般平均  
n: データ数    V<sub>e</sub>: 誤差分散

## 6. 最適組み合わせの抽出

算出された各実験モデルのSN比および感度を表5に、また、これらのデータから算出される分散分析表、工程平均、および要因効果図をそれぞれ、表6、7および図3、4に示す。

以上の結果は制御因子が直交しているとの仮定で成り立っているため、各制御因子をSN比がもっとも大きい水準で組み合わせれば、もっともロバストな組み合わせになると考えられる。よって、図3のSN比の要因効果図より、SN比最適組み合わせは表8のようになる。

2段階設計にのっとり、次にSN比を下げずに感度を上げられる制御因子を抽出してチューニングを行うことになる。しかし、今回は以下の理由により、あえてチューニングを行わずこのSN比最適組み合わせで抽出されたモデルを最適な組み合わせと判断した。

- ・図4より感度の効果が高い面積比のパラメータを変更しても、その効果はわずかに0.2dB程度しかないことが判る。
- ・また予備実験より、ここで扱っている感度は全体のレベルをあげるよりも特性の暴れを助長する傾向がみられ、SN比への影響の方が大きいと考えられる。

表4 直交表L18への割りつけ

実験No.	モデル名	制御因子								誤差因子 NI~N44
		A	B	C	D	E	F	G	H	
No.1	11111111	1	1	1	1	1	1	1	1	-----
No.2	11222222	1	1	2	2	2	2	2	2	-----
No.3	11333333	1	1	3	3	3	3	3	3	-----
No.4	12112233	1	2	1	1	2	2	3	3	-----
No.5	12223311	1	2	2	2	3	3	1	1	-----
No.6	12331122	1	2	3	3	1	1	2	2	-----
No.7	13121323	1	3	1	2	1	3	2	3	-----
No.8	13232131	1	3	2	3	2	1	3	1	-----
No.9	13313212	1	3	3	1	3	2	1	2	-----
No.10	21133221	2	1	1	3	3	2	2	1	-----
No.11	21211332	2	1	2	1	1	3	3	2	-----
No.12	21322113	2	1	3	2	2	1	1	3	-----
No.13	22123132	2	2	1	2	3	1	3	2	-----
No.14	22231213	2	2	2	3	1	2	1	3	-----
No.15	22312321	2	2	3	1	2	3	2	1	-----
No.16	23132312	2	3	1	3	2	3	1	2	-----
No.17	23213123	2	3	2	1	3	1	2	3	-----
No.18	23321231	2	3	3	2	1	2	3	1	-----

\*モデル名は制御因子の組み合わせを表している。

表 5 各モデルのSN比・感

実験No.	モデル名	SN比[dB]	感度[dB]
No_1	11111111	26.8876	38.5845
No_2	11222222	40.5712	38.7681
No_3	11333333	23.8437	38.5043
No_4	12112233	26.0349	38.8514
No_5	12223311	30.1503	38.7438
No_6	12331122	27.2077	38.8742
No_7	13121323	27.8195	38.6755
No_8	13232131	28.2241	38.8731
No_9	13313212	29.1264	38.9038
No_10	21133221	24.1533	38.5777
No_11	21211332	27.5341	38.8760
No_12	21322113	29.7603	38.8094
No_13	22123132	29.9729	38.8336
No_14	22231213	25.4568	38.8339
No_15	22312321	28.0986	38.9406
No_16	23132312	26.4972	38.8667
No_17	23213123	26.4795	38.9057
No_18	23321231	25.9526	38.9810

表 6 分散分析表

Source	f	S	V	F0	S'	p (%)
ネック位置	1	14.1511	14.1511	4.33	10.8823	4.85
面積比	2	6.4876	3.2438	-	-	-
内側リップ数	2	28.0972	14.0486	4.3	21.5595	9.61
外側リップ数	2	72.8703	36.4351	11.15	66.3326	29.58
厚さ	2	32.3971	16.1985	4.96	25.8594	11.53
エッジ内径	2	4.5968	2.2984	-	-	-
貼り合せ量	2	13.5843	6.7922	2.08	7.0466	3.14
キャップR	2	43.5406	21.7703	6.66	37.0029	16.6
e	2	8.5288	4.2644	-	55.5706	24.78
T	17	224.2538			224.2538	100

\* 面積比、エッジ内径はプーリングされている。

表 7 工程平均

因子名	水準 1	水準 2	水準 3	総平均
ネック位置	28.8739	27.1006	—	27.9873
面積比	28.7917	27.8202	27.3499	
内側リップ数	26.8942	29.736	27.3316	
外側リップ数	27.3602	30.7045	25.8971	
厚さ	26.8097	29.8844	27.2877	
エッジ内径	28.0887	28.5492	27.3239	
貼り合せ量	27.9798	29.055	26.9271	
キャップR	27.2444	30.1516	26.5658	

### 7. 再現性の確認

以上の結果はあくまで SN 比からの推定である。推定した最適条件で期待通りの出力特性になっているか検証するために、再度、確認実験を行なった。このとき品質工学では「利得の再現性」を評価する手法を用いる。SN 比そのものは、再実験においてその都度誤差を含んでしまうため、再現するとは限らない。そこで、比較対象を設定し、これらの SN 比の差を利得として評価する。この利得が再現しなければ、品質工

学の適用の仕方に問題があったと考えられる。

表7に示す工程平均より最適組み合わせモデルの SN 比を推定し、比較対象との利得を算出した。その上でこれらのモデルの解析を行ない、改めてその利得を評価した。なお、比較対象としては、予備実験で抽出されたモデルを適用した。これらの形状を図5,6に示す。また、結果を表9に示す。

今回抽出された最適組み合わせモデルは、前回抽出モデルに比べ SN 比が 10dB 以上改善して

表 8 SN 比最適組み合わせ

モデル名	ネック位置	面積比	内側リブ数	外側リブ数	厚さ	エッジ内径	張り合せ量	キャップR
11225222	1E	11	5	3	1	57	7	5

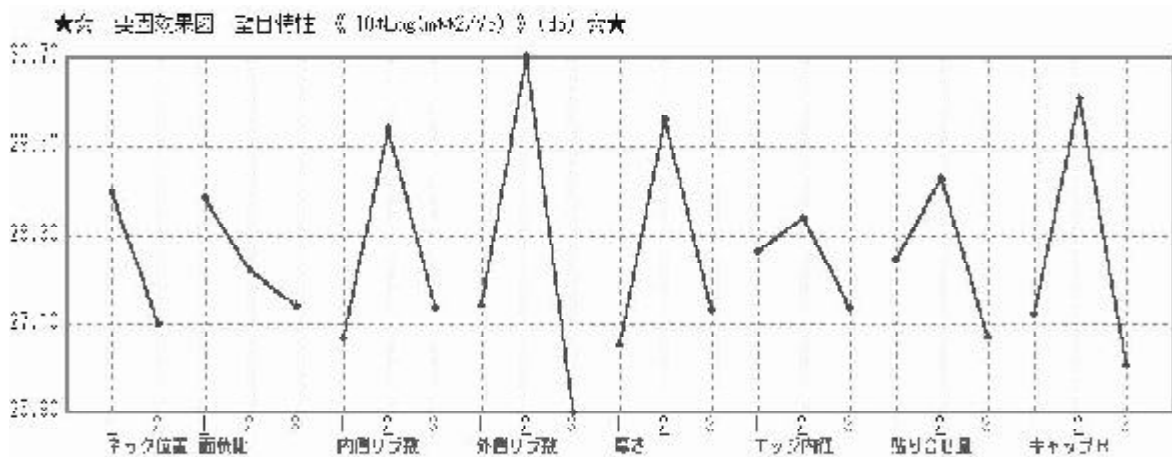


図 3 SN 比の要因効果図

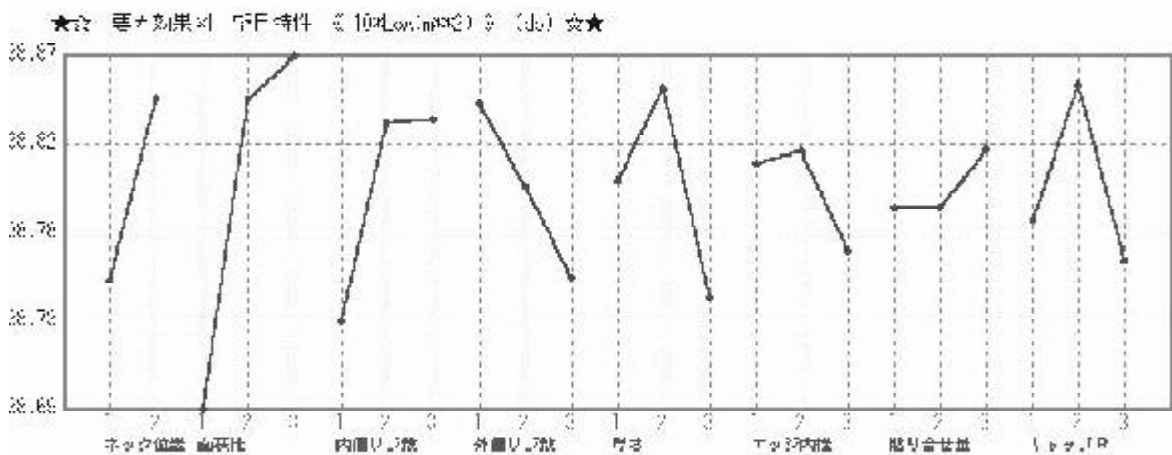


図 4 感度の要因効果図

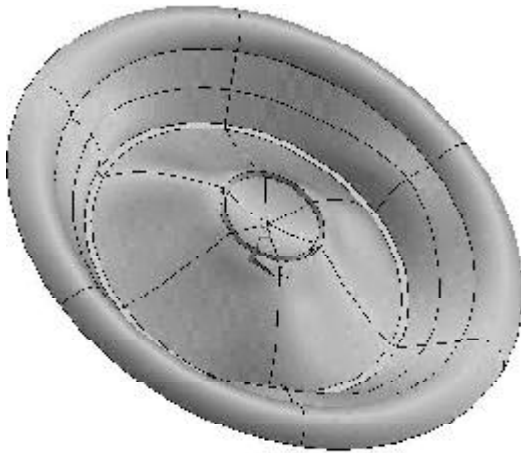


図5 SN比最適組み合わせモデル  
(No.11222222)

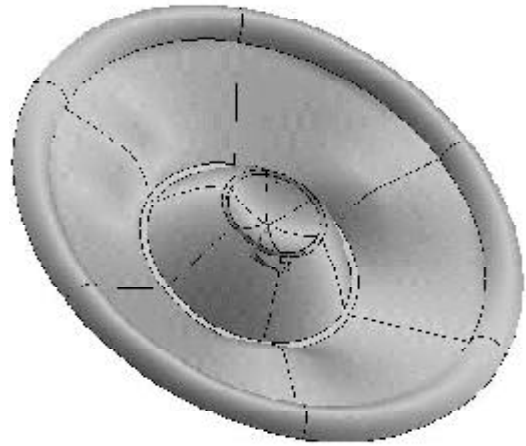
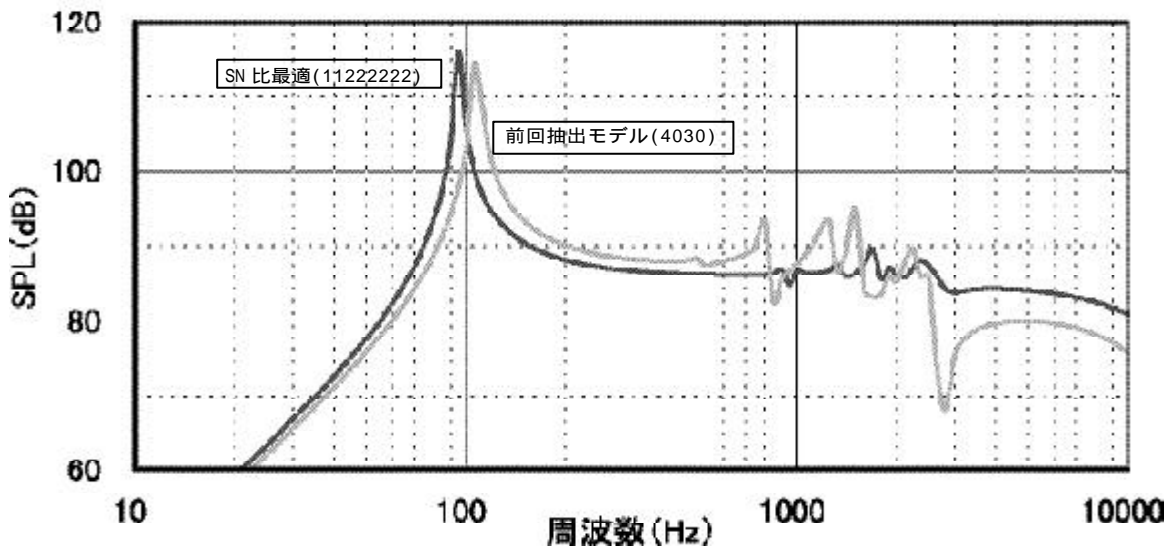


図6 前回抽出モデル  
(No.4030)

表9 検証結果

	工程平均の推定		検証結果		利得差	
	SN比	感度	SN比	感度	SN比	感度
SN比最適:11222222	39.8154	38.7889	40.5712	38.7681	——	——
前回(4030):23122313	27.8721	38.8205	30.9987	38.9167	——	——
利得	11.9433	-0.0316	9.5725	-0.1486	2.3708	0.1170



周波数応答(軸上1m出力音圧:SPL)

図7 SN比最適組み合わせと前回抽出モデルの出力音圧特性比較

おり,その利得差も2dB程度と小さい。よって,今回抽出された最適組み合わせの方が良好な特性であり,その再現性も十分であると考えられる。解析によって得られた出力特性を図7に示す。このように前回抽出モデルより平坦で広帯域な特性が抽出されていることが判る。

## 8. まとめ

薄型でかつ異形な振動板形状を開発するために,品質工学を用いて形状の最適化を検討した。その結果,8種類のパラメータおよびL18直交表を適用することで効率よく実験でき,暴れの少ない特性を示す形状を抽出することが出来た。品質工学の適用においては,設計の対象とするシステムのパラメータをどれだけ熟慮できるかが成功の鍵といえる。ポイントとしては,交互作用に注意し,より多くのパラメータを抽出することが重要であることが判った。

また,評価データとして単純にシミュレーションによる軸上1mでの出力音圧特性を用いて,暴れを望目的に評価して品質工学を適用することで十分に評価できることが判った。今後,上記ポイントを考慮し,さらに適用事例を増やして行きたいと考えている。

## 9. 謝辞

品質工学に関わる数々の助言をいただいた所沢工場 品質技術部の関係各位,並びに振動板試作に協力をいただいた東北パイオニア(株)スピーカー事業部 開発技術部の関係各位に感謝します。

## 参考文献

- (1) 田口玄一:“開発・設計段階の品質工学”,日本規格協会
- (2) “通信教育による品質工学コースト,テキスト”,日本規格協会
- (3) 矢野宏 “品質工学計算法入門”,日本規格協会

## 著者

今西 快友 (いまにし よしとも)

- a. 研究開発本部・総合研究所・モバイルシステム開発部
- b. 1991年4月
- c. 入社以降スピーカの設計,開発業務に従事。現在は音場解析に関する研究に従事。

馬場 輝夫 (ばば てるお)

- a. 研究開発本部・総合研究所・モバイルシステム開発部
- b. 1991年4月
- c. 現在は音場制御に関する研究に従事。

長谷川 知己 (はせがわ ともみ)

- a. 研究開発本部・総合研究所・モバイルシステム開発部
- b. 1994年4月
- c. 現在は音場解析に関する研究に従事。

小谷野 進司 (こやの しんじ)

- a. 研究開発本部・総合研究所・モバイルシステム開発部
- b. 1975年
- c. 入社以降スピーカの設計,開発業務に従事。現在,音場制御,音響変換器に関する研究に従事。