

薄型・軽量・広指向性スピーカ

Thin, Lightweight and Broad Directivity Loudspeaker

佐藤 正宏 Masahiro Sato
蔭山 雅義 Masayoshi Kageyama
加藤 茂樹 Shigeki Kato



要 旨

車載用スピーカは、ホームオーディオ用と異なり、仕様に対して種々の制約を受ける。奥行き寸法等に代表される制約条件を満たすことは、スピーカ本来の音響性能を劣化させる。そこで、車両に起因する制約条件を満足しながらスピーカの性能を確保する技術が必要となる。

今回、我々は、上で述べた車両とのマッチングを画期的に向上させる技術の開発として薄型化・軽量化・広指向性という課題に取り組み、新形状の振動板を考案することにより、奥行き寸法 31 mm、指向性による（車両取付け時の受聴点方向での）高域音圧劣化を従来比 2.5 dB改善、また、40 %の軽量化という成果を得た。

本稿では、開発の過程で生じた、新型振動板による音圧周波数特性の劣化や振動板のローリング現象と、それらの改良対策内容を交えながら、スピーカの仕様・性能について紹介する。

Abstract

Specification of the loudspeaker for car audio system is different from it used at home. Because car audio loudspeaker's specification is limited when it is designed, in order to keep the performance of the car itself. If we design the loudspeaker for car audio system according to this limitation (for example, the thickness dimension smaller), it's acoustic performance becomes poor. Therefore, we need the technique which make the loudspeaker matched well with the car maintaining it's acoustic performance.

Now, we tried study of the technique above, thinking much of thin shape, lightweight and broad directivity. And we developed the original loudspeaker for car audio system which is 31mm depth dimension, 2.5dB recovering from sound pressure level decrease by directivity, and 40% lightweight, compared with the current products. This epoch-making success was achieved through our original idea about the shape of diaphragm.

We introduce the specification and acoustic performance of the newly developed thin-lightweight-broad-directivity-loudspeaker on this report, including that the explanation of countermeasure against the lowering of sound pressure frequency response and the diaphragm rolling which occurred in the process of development.

1. まえがき

最近の車載用スピーカ開発の流れとして、ドアへの取り付けを前提とした進め方が主流である。ドア内部をスピーカボックスとして活用しながら低音が確保でき、また、聴く人の前方に音場を形成することが容易である。さらに、以前のようなインストルメントパネルの左右端に取り付ける方法では、聴く人に近い方のスピーカの音ばかりが目立つが、ドアスピーカの場合、左右音場バランスをとることが、インパネの場合よりも容易である。

しかし、一方で車としての要求性能を満たすためには、ドアへのスピーカ取り付けスペースや取り付け角度が制約を受け、軽量化も要求される。また、ドアへの水の侵入に対する配慮も必要となる。

このような制約条件に対して、単純にスピーカの小型化、軽量化等を図ろうとすると、スピーカの音響性能が著しく低下する。従って、スピーカとしての性能を維持しながら、いかにして車両側の要求から来る制約条件を満足させるかが重要な技術的課題となる。

今回、上記のような課題に取り組み、1つの成果が得られたので、その内容を以下に紹介する。

2. 車載用スピーカに要求される性能

2. 1. スピーカ開発の経緯

自動車の製造ラインで取り付けられるスピーカを、自動車メーカーと共同で開発する場合の過去の経緯について簡単に述べる。

1990年頃までは、オーディオに対しては音質最重視と言っても良く、音を良くするためにはコストをかけ、スピーカも大型化する傾向があり、車両側のスピーカ取り付け部位周辺の設計やデザインは、スピーカに合わせてスペースを確保しながら行われた。

しかしその後、燃費向上の強い要求から、それまで音質優先のため大型化してきていたマグネットを中心として、スピーカの性能を維持しながら小型軽量化する技術が求められ、さらに、バブル崩壊後の景気低迷の時期を迎えてからは、コスト低減が主体となり、良い音を作っていく上では非常に制約が厳しくなって来た。

しかし、その間も良い音に対する要求レベルは依然として高く、音質の追求は進められて来た。

今後は、以前のように音のみを重視して車の設計を配慮するとか、逆にコスト優先で音質を落とすとか言ったような片寄った考えではなく、車の機能・性能を生かしながら、オーディオの音質も成立させることができるよ

うな、バランスのとれた車両とのマッチング技術をスピーカ開発の中で見いだして行かなければならない。

2. 2. 開発のねらい

良い音を提供することが、スピーカの働きであることは言うまでもない。従って、構成部品の材料やスピーカ構造の改良による音質向上への取り組みが数多く行われており、高能率化、低歪み化、広帯域化、f特性の平坦化、高リニアリティー化等が、スピーカ単体としての開発テーマとなっている。

しかし、車載用オーディオシステムにおけるスピーカの性能は、メインユニットと異なり、車両そのものの要求性能から来る車両構造の影響を大きく受ける。このような見方で車両側の要求性能とスピーカ開発アイテムとの関係の一例を、図-1に示す。

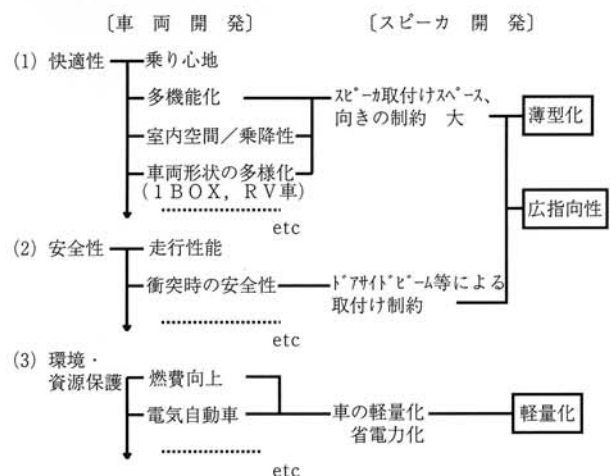
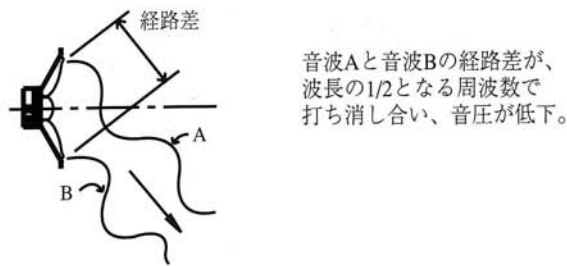


図-1 スピーカ開発アイテム
Fig.1 Items of speaker development

車室内空間の拡大や、衝突時の安全対策としてのドアサイドビームの設置により、ドアスピーカの取り付けスペースが制約を受け、さらに、乗降性やデザインの良さを確保する必要から、スピーカ取り付け角度も制約を受ける。また、燃費向上をねらいとした車両の軽量化に対しては、スピーカの軽量化が要求される。また、軽量化により、バッテリーの省エネにつながり、将来の電気自動車にも対応が可能となる。

これらの条件を検討し、今回、薄型化・軽量化・広指向性を開発のねらいとした。薄型化により、スペース的な制約に対応出来る。また、取り付け角度の制約により、聴取者（乗員）はスピーカ中心軸から外れた方向で音を

(a) 指向性による音圧低下



(b) ドアスピーカの受聴方向

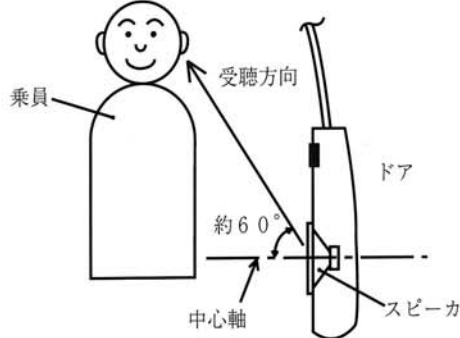
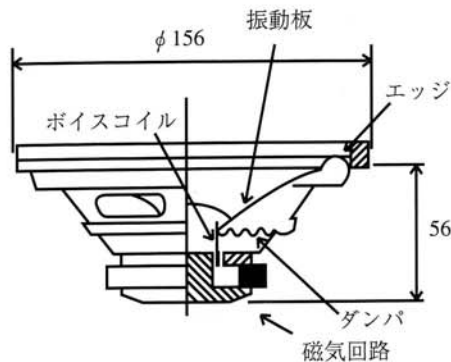


図-2 ドアスピーカと指向性の関係
Fig.2 Relation between speaker location and directivity

聴くことになり、高域の音圧が低下するという問題が生じるが(図-2)、広指向性とするにより、解決出来る。特に薄型、軽量化というアイテムについては、従来から重要視され、種々の試みが報告されているが、画期的な薄型化や軽量化が実現出来ても、音響性能と両立させることが困難なため、極端な音圧不足や、再生帯域が狭くなる等の問題が生じ、スピーカ本来の性能が満足できない場合が多い。

我々のねらいは、音響性能を確保しながら、車両との
〔現行品〕



マッチングを得る技術を開発することである。

3. 開発の目標と課題

開発の目標と課題を、表-1に示す。

表-1 開発目標

ねらい	現状値	目標値	開発課題	実現方策
薄型化	奥行き寸法 56mm	40mm以下	振動板の薄型化	新型逆コーン振動板
軽量化	重量 510g	255g (-50%)	磁気回路の小型化	ネオジウムマグネットの採用
広指向性	軸上より60°方向の音圧低下 -7dB	-4dB (現状+3dB)	振動板の形状検討	新型逆コーン振動板

(スピーカ仕様)
口径：φ16cm 出力音圧レベル：88dB/Wm インピーダンス：4Ω
定格入力：15W

薄型化に対しては、ドア内部の機器やガラスとの位置関係による取り付け時の干渉を考慮して、40mm以下を目標値とし、スピーカ奥行き寸法の約65%を占める振動板の高さを、いかにして低減するかということを課題としてとらえ、振動板の形状を工夫することで実現することとした。

広指向性に対しては、従来からの車室内音響特性の検討結果から、60°方向での高域音圧低下に対して従来比3dB改善することを目標値とした。実現方策としては、薄型化と同様に、最も影響の大きい振動板に着目し、当社オリジナルの考えを織り込みながら、振動板の新形状を開発した。

軽量化は、ネオジウムマグネットによる内磁型磁気回路を用いた。

〔開発品〕

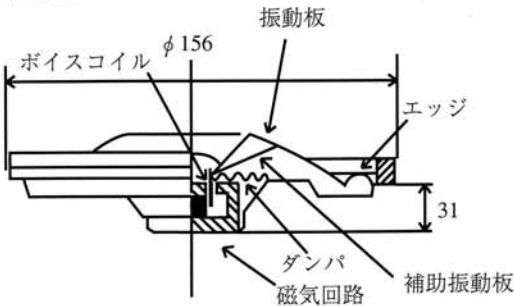


図-3 スピーカの構造
Fig.3 Structure of speaker

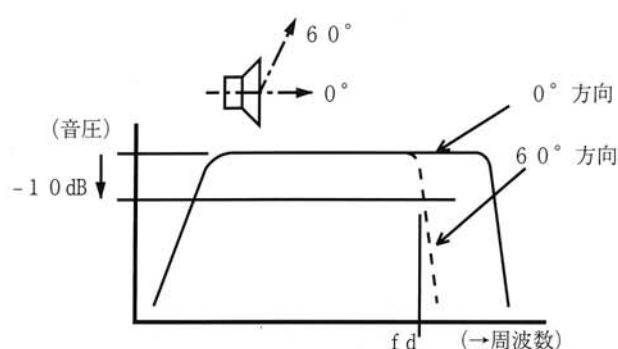


図-4 指向特性
Fig.4 Charact-directivity

4. スピーカの概要

4. 1. 構造

スピーカの構造を、従来のコーン型スピーカと対比しながら、図-3に示す。

4. 2. 振動板形状について

スピーカの指向特性において、図-4に示すように、スピーカ中心軸から 60° の方向（車両取り付け状態で受聴者が実際にスピーカの音を聴く方向）で高域音圧が10 dB低下する周波数 $f d$ は、振動板の振動半径を a (cm) とすると、理論上(1)式で表される。

$$f d = 17000 / a \quad (1)$$

(1)式より、振動板の口径が小さくなるほど $f d$ が高くなり、高域音圧が低下し始める周波数が高い方へ移動す

るため音圧の低下が少なくなる。言い換えると、スピーカ中心軸から外れた方向でも音圧が維持されていることになり、指向性が广くなる。

従って、ねらいとする広指向性を得るためには、振動板を小口径化すれば良いことになるが、一方で、低域の再生音圧を確保するためには、振動板の面積を広く取る必要がある。フルレンジスピーカとして、目標とする低域音圧を得るためには $\phi 16$ cm相当の振動板外径寸法が必要となる。

そこで、図-5に示すような新型逆コーン振動板を設計した。この振動板形状によると、主として高域周波数の音を再生する振動板中央部の開口を小口径化することができると同時に、低域周波数の音は $\phi 16$ cm相当の振動板全体で再生するため、現状のコーン型振動板と比べて、広指向性のフルレンジスピーカを得ることができる。

また、高さ寸法も小さくすることができ、ねらいの薄型化も可能となる。

振動板の材質は、防水性を考慮し、樹脂（ポリプロピレン）とした。

また、振動板本体の裏側に取り付けられた補助振動板については次項で述べる。

5. スピーカの性能と振動板の改良

5. 1. 新型振動板の問題点

オリジナル振動板形状の構想に基づき、スピーカの試作、評価を行った。当初の試作においては、図-3に示す

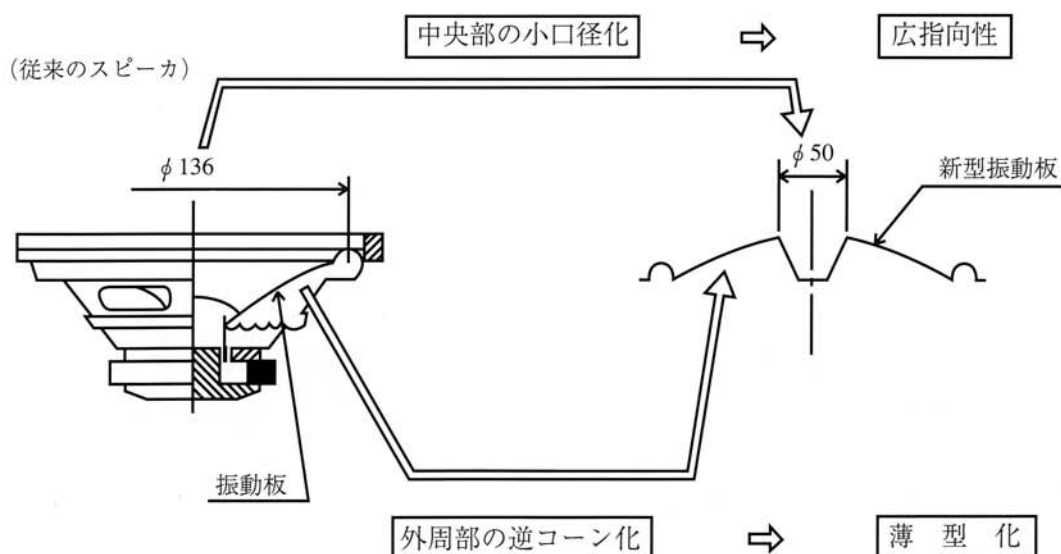
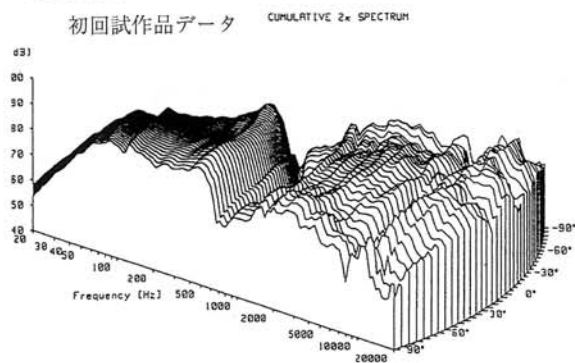


図-5 振動板形状
Fig.5 Shape of diaphragm

〔開発品〕



〔現行品〕

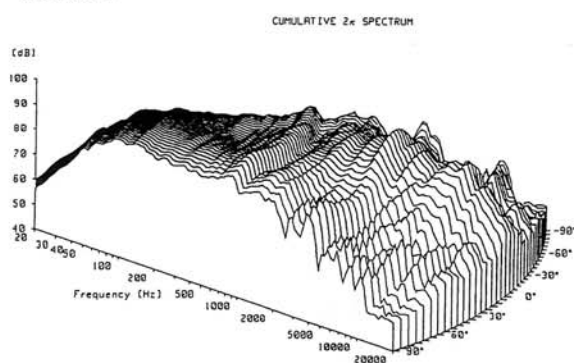


図-6 小累積 2 π 周波数特性
Fig.6 Charact-cumulative 2 π spectrum

ような補助振動板は設けていない。

評価結果である、累積 2 π 音圧周波数特性を、図-6に示す。

図-6は、スピーカ中心軸の方向を 0° として、90° 方向までの間の 5° ごとの各音圧周波数特性を、まとめて表している。このデータからわかるように、開発品の方は、中心軸から外れるに従って生じる高域の音圧低下が少なく、広指向性となっており、振動板を新形状としたことによる効果が現れている。

しかし、中域の 1 k Hz 付近に、平均音圧から約 15 dB もの音圧の低下が見られ、スピーカの性能として、実用不可能なレベルになっている。

5. 2. 振動板の改良(1)

振動板を新形状とすることで、ねらいの薄型化・広指向性の効果が得られたものの、中域の音圧低下を改善しないと、スピーカとして成立しない。

原因として考えられることは、振動板の不要共振現象である。振動板を薄型としたために、従来のコーン型振動板と比べて、高さ方向の剛性が低下しており、駆動部をボイスコイルにより加振したとき、全面が同一形状を保ったままピストン振動出来ないことによると考えられる。(図-7)

対策として、振動板への補強リブの追加等、種々の方法を検討した結果、図-3に示した補助振動板により中域の音圧低下をリカバーすることが出来た。これは、振動

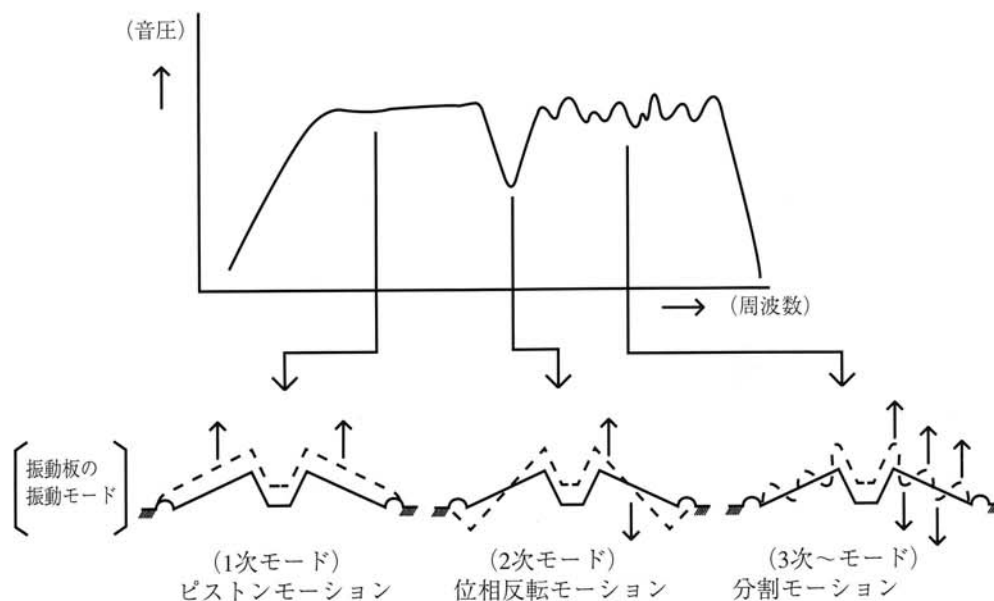


図-7 振動モード
Fig.7 Mode of vibration

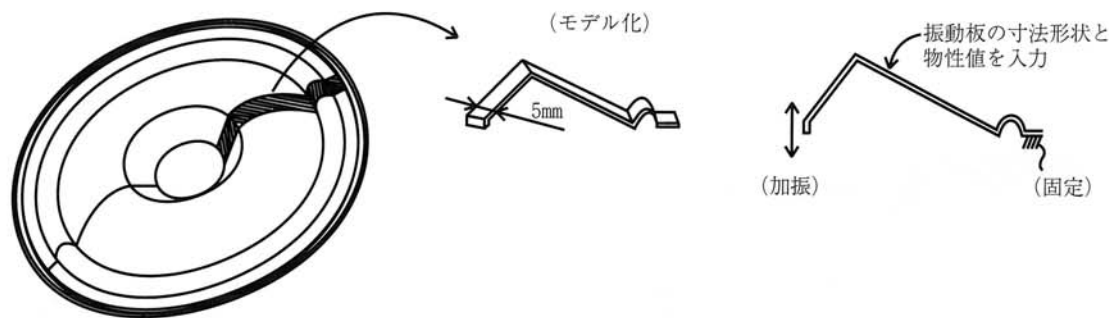


図-8 シミュレーションモデル
Fig.8 Diaphragm model for simulation

板の外側部分の、逆振動を生じようとする部位に、ボイスコイルの駆動力を直接伝達することで、逆方向の振動を阻止し、振動板全体の振動方向をボイスコイルの動きと同方向に保つ方策である。

5. 3. シミュレーションによる形状検討

5. 3. 1. 設計シミュレーションについて

スピーカ単体の開発・設計にかかわるCAEシミュレーションの手法として、磁気回路（磁束密度）・振動モード・共振点・機械的強度・音場のそれぞれに対するシミュレーションがある。この中で、共振点解析を応用して振動板の形状検討を実施したので、以下に説明する。

5. 3. 2. 形状検討

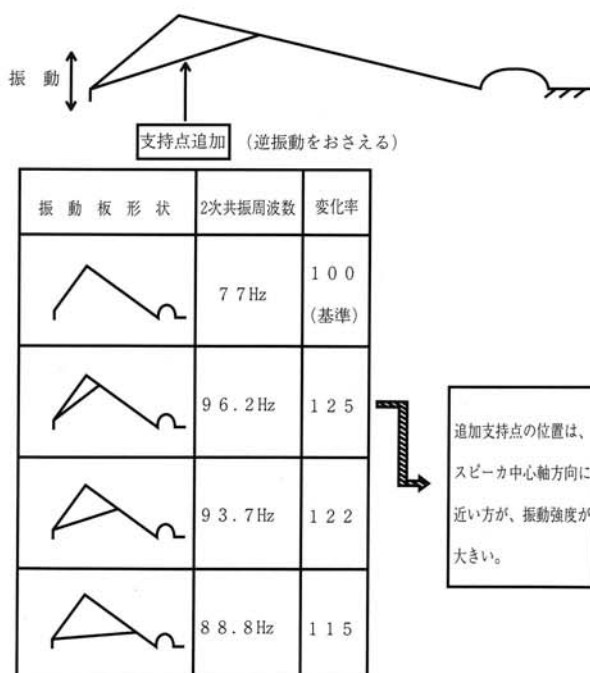


図-9 補助振動板のシミュレーション検討
Fig.9 Simulation of support diaphragm

補助振動板の形状を含め、振動板の剛性を高めるための最適形状を見いだすため、CAEシミュレーションにより形状検討を行った。図-8に示すように、振動板を一定の幅で切り取った形状でモデル化し、振動板の形状を種々変化させた場合の、各々の共振周波数を求め、比較し、共振点が高い形状が振動に対して剛性が高いと考え、最適形状を求めた。結果を図-9に示す。

5. 4. 振動板の改良(2)

補助振動板を設定し、シミュレーションによる検討結果を反映させながら、振動板を再度設計し、試作したスピーカの音圧周波数特性を、図-10に示す。

中域の音圧低下は補助振動板の効果により改善されているが、900 Hz 付近に約10 dBのピークが発生していることがわかる。

そこで、振動モードを観察しながら再検討した結果、振動板の外周のエッジとの接合部付近で生じている共振が、悪影響を及ぼしていることがわかり、その部分に補強リブを設けた。このことにより、振動板の外周付近での共振が押さえられ、図-11に示すような音圧周波数特性が改善効果として得られた。

また、音圧周波数特性の改善のため、下記のような種々の方策について実験検討を行った。各々についての

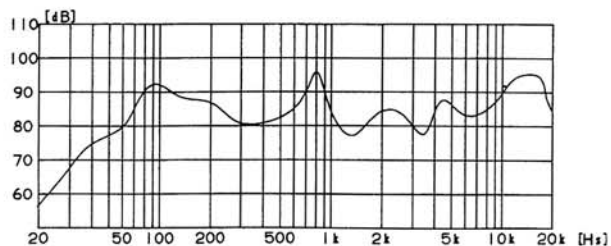


図-10 改良特性(1)
Fig.10 Improved characteristic(1)

説明は、本稿では省略する。

- ・補助振動板の軽量化穴の寸法形状
- ・エッジ、センタキャップの材質

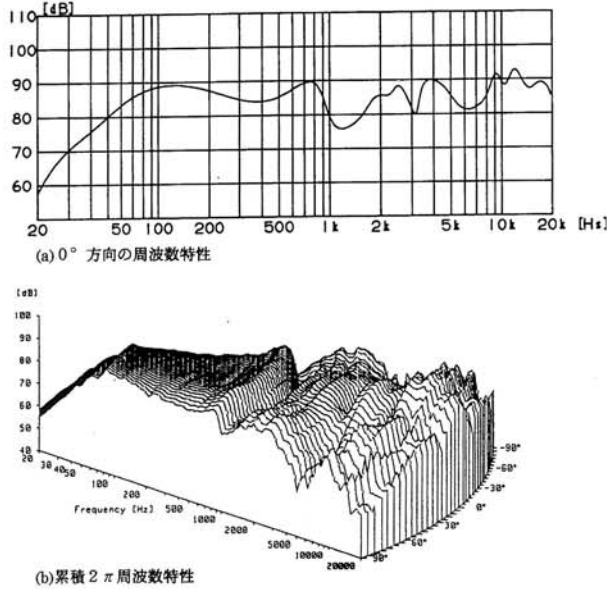


図-11 改良特性 (2)
Fig.11 Improved characteristic(2)

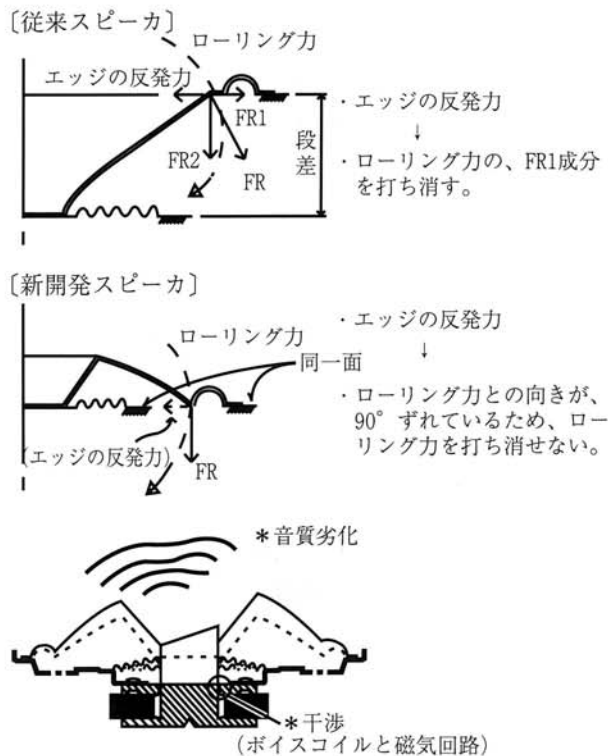


図-12 振動板のローリング
Fig.12 Rolling of diaphragm

- ・振動板の重量バランス
- ・振動板中央部開口径の最適値
- ・補強リブの形状と位置
- ・振動板屈曲部の剛性変化
- ・サブコーンの追加

5. 5. ローリングについて

薄型振動板の、もう1つの問題点として、ローリング現象がある。振動板がローリングを起こすと、音質に悪

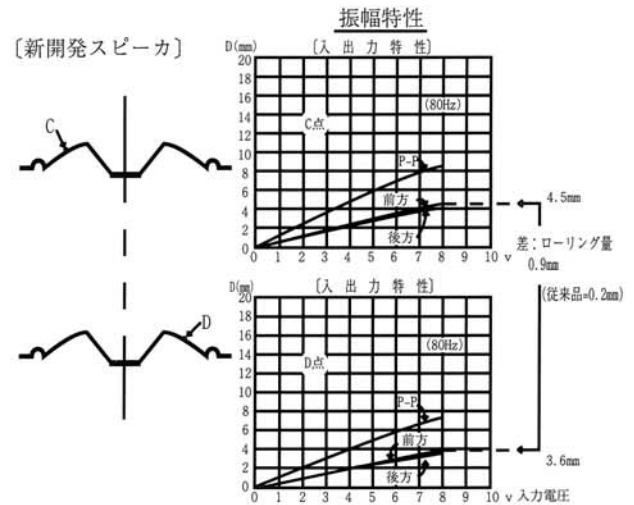


図-13 ローリングの測定
Fig.13 Measurement of rolling

影響を及ぼすばかりでなく、ボイスコイルが磁気回路部品に当たって擦れ、コイルが断線しスピーカが鳴らなくなる恐れがある。

ローリングの原因は、図-12に示すようにエッジおよびダンパの2つの支持点が近づくために、ローリングを阻止する力が減少することによって起こると考えられる。

ストロボ観察により実際の振動状態を見ても、ローリングが認められた。

ローリング量を定量的に表すことは難しいが1つの試みとして、レーザを用いた振幅測定器を応用して、振動板表面上で、中心軸を介して対称な2点の各々の振幅量を比較し、その差をローリング量と考え、従来のスピーカと比較した。結果を図-13に示す。

データ上、従来のコーン型振動板ではローリング量が0.2mmであるのに対し、新形状の薄型振動板では0.9mmとなっており、従来品と比べて5倍近い大きさのローリングを起こしている。

改良策として、前述の2つの支持点の間に段差を設け

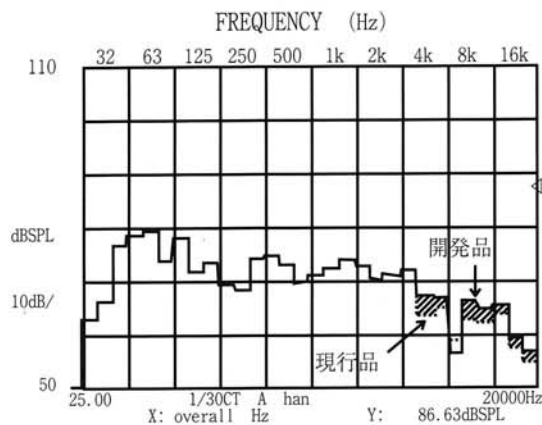


図-14 車室内特性
Fig.14 Characteristic in the car

るようにした。このことにより、従来のスピーカ並の0.2mmまで、ローリングを抑制することが出来た。

5. 6. 実車評価

車（セダン型）の左右フロントドアにスピーカを取り付けた時の、運転席での音圧周波数特性を図-14に示す。

従来のスピーカと比べて、指向性による受聴点での高域音圧の低下が少なく、新型振動板形状の効果が表れている。

聴感上は、ハイエンドの音が良く鳴っており、低音感も良好で、素直な音色である。

従来のコーン型振動板では、スピーカを車に取り付けた時、どうしても受聴点方向で高域の音圧低下が大きいため、あらかじめスピーカ中心軸方向の高域音圧を極端に持ち上げた特性を作っておくという手法をとることが

多い。車両取り付け時、指向性により受聴点方向で高域音圧の低下が起きても、比較的平坦な特性に近づくというねらいである。

しかし、このような方法では、高域音圧を上げるために、振動板材料の剛性を極端に高めることになり、それに伴って内部損失が下がり、不要共振が減衰しにくくなるため、聴感上、音がきつく、やかましい傾向となる。これに対して、今回の開発品は上記のような手法を用いていないため、振動板の剛性と損失係数のバランスが保たれ、素直な音色が得られていると考えられる。

また、車室内音圧周波数特性データからもわかるように、中域の特性が非常にフラットであることが特徴的である。

通常のスピーカの場合、車室内特性上、中域においてピーク（特定の周波数での音圧上昇）が見られる場合が多く、音質に悪影響があり、アンプ側の電気回路による補正を行う等、フラットな特性を得るために苦勞することが多い。

しかし、今回の開発品の場合、このような中域特性の不具合が生じにくいため、車室内の音づくりに適していると言える。

特性がフラットになる原因としては、スピーカ単体の音圧周波数特性上で、中域に音圧低下の傾向がやや残っているため、車室内の影響によって生じようとするピークをうち消すためであると考えられ、結果としてフラットな車室内特性が得られる。

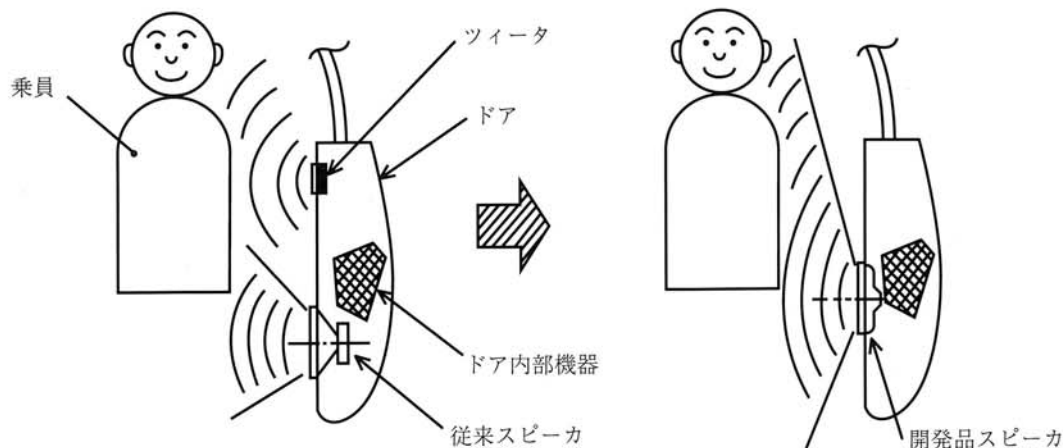


図-15 開発品の効果
Fig.15 Effect of developed speaker

6. 予想効果

以上に述べてきた検討結果として、当初のねらいである薄型・軽量・広指向性の目標値をほぼ達成することが出来た。

このスピーカを用いることにより、次のような効果が期待できる。

(1) 今までドアスピーカは、スペースが比較的空いているドア下方に取り付けることが多かったが、薄型化することにより、スペースが小さいドア上方へも取り付けが可能となり、音場の高さを高くすることが出来る。

同時に、高域の音圧が十分確保されるため、補助ツイーターの設置が要らなくなり、システムとしてのコストメリットが期待できる。

(2) 軽量化により燃費向上や電気自動車における省エネ効果が期待できる。

(3) 形状的な面白さで、商品としての新規性がアピールできる。

7. あとがき

音圧周波数特性の平坦化や歪みの低減等、スピーカ単体での性能向上をねらいとした開発は、非常に重要な意味を持つが、車載用スピーカである以上、車両とのマッチング（車両取り付け時の性能および取り付け性）を無視することはできない。

今後、本開発品をもとに製品化設計を進めると共に、今回得られた経験やノウハウを生かしながら、車としての基本的な商品性を確保しつつ、良い音を提供するための、車載用スピーカとしての技術を追求して行きたい。

参考文献

山本武夫：“スピーカ・システム（上）”，ラジオ技術社，1977

筆者紹介

佐藤 正宏（サウ マヒロ）



1979年入社。以来車載用音響システムの開発に従事。現在AVC本部要素技術開発部音響開発課在籍。

蔭山 雅義（カゲヤマ マサヨシ）



1986年入社。以来車載用音響システムの開発に従事。現在AVC本部要素技術開発部第三開発課在籍。

加藤 茂樹（カウ シゲキ）



1979年入社。以来車載用音響システムの開発に従事。現在AVC本部要素技術開発部音響開発課長。