

ヘッドライナースピーカ開発

～リア席での拡がり感ある音響効果の実現～

Development of "Headliner Speaker System" -Realization of a New Sound Effect with Spacial Impression in Rear Seats-

外	山	耕	一	Kohichi Toyama
中	島	裕	一	Yuichi Nakajima
西	川	彰		Akira Nishikawa
大	谷	清	司	Kiyoshi Ohtani



要 旨

車載用（1 Box Car）オーディオシステムにおいて、リア席（2列目および3列目）での音響効果（音の拡がり感）が要求されている。この一解決策として、天井から音を再生する「ヘッドライナースピーカ」を開発した。

本スピーカは、車の内装材である天井にエキサイタ（振動子）を取付け駆動することにより、天井材を振動板としてDistributed Mode（振動モード分布）を形成し、直接音を放射するものである。

本スピーカを、すき間の小さい天井裏への取付け、振動、熱といった車載条件に適合させるため、板バネと放熱に工夫を加えた新構造の薄型エキサイタ、及びブラケットを用いたその固定方法を開発した。また、車室内で最大限の音響効果を得るための搭載要件（天井への取付位置）も明確にした。

以上により、実際の車載用オーディオシステムに搭載して聴感評価を行った結果、音の拡がり感と音像の上昇等の音響効果を得られることが確認できた。

Abstract

The recent in-car audio systems for station wagons are expected to have sound effect (spacial impression), especially, in vehicle's rear seat (second and third row). In order to improve our in-car audio systems in this respect, we have developed a "headliner speaker", which reproduces sounds from the direction of vehicle's headliners.

"The headliner speakers" radiate sounds by using headliner material as vibration board, and forming a "Distributed Mode", as a consequence that an exciter is fitted into the headliners of vehicles.

In order to adapt the speakers to the condition of vehicle interiors, such as narrowness, vibration and heat in the backside of vehicle headliners, we have also developed the following: 1) a thin exciter with new structure in terms of blade spring sound radiation, and 2) a method of fixation of the new exciters using brackets. In addition to these, this paper reports the requirements on our headliner speakers' mounting positions in a car that realizes a maximum sound effect.

All these developments as well as the listening evaluation with actual in-car audio system contributed to our achievement in creating spacial impression and sound image enhancement as sound effect.

1

はじめに

従来、車室内という限られた空間の中で1 Box Carのリア席（2列目および3列目）での音響効果（音の拡がり感）を得ようとする場合、DSPによる信号処理技術を用いる方が一般的であった。

しかし、信号処理技術だけでは限界があり、また車室内とリスニングルームの空間情報、特に上方からの空間情報に差があるため、天井等の車室内上方に広指向性スピーカを配置し、空間情報を再生することが望まれていた。ところが、従来方式のスピーカでは寸法的に天井付近に配置することは困難である。また音の拡がり感が出にくい等の問題から、これらを解決できる新しいスピーカの開発が必要となっていた。

そこで、省スペースでその拡がり感と音像の高さを得るための新技术スピーカとして、ヘッドライナースピーカ（内装直接駆動型スピーカ）をトヨタ紡織殿と協業し、開発してきた。このスピーカは従来のコンタイプとは異なり、エキサイタ（振動子）を天井材に取付け振動させることにより天井材自身を振動板として駆動し、Distributed Mode（振動モード分布）を形成するものである。このモードにより天井材自身に多数の音源が分布する面音源を実現でき、特に大型車両のリア席（2列目および3列目）の、音響効果（拡がり感と音像の上昇）を得ることが可能となると共にエキサイタの小型軽量化に取組む事で省スペース化を図った。

本項では、「ヘッドライナースピーカ」の開発に至る背景と本製品を実現する為の要点 代表的な薄型スピーカ方式の指向性、重量および厚み比較 駆動理論と従来スピーカと本開発品の構造比較 駆動源になるエキサイタと天井構造及び効果を出すための搭載要件を明らかにする。

2

従来車載用オーディオシステムの問題点と改善の考え方

まず、市場で要求されている車室内の音響効果を明確にしながら、従来スピーカの問題点と改善の考え方について説明を行う。

2.1 市場で要求されている車室内音響効果

20代～40代の男女約100名を対象に、現行カーオーディオシステムにおけるリア席での音質不満点についてアンケートを実施した。

【全体】

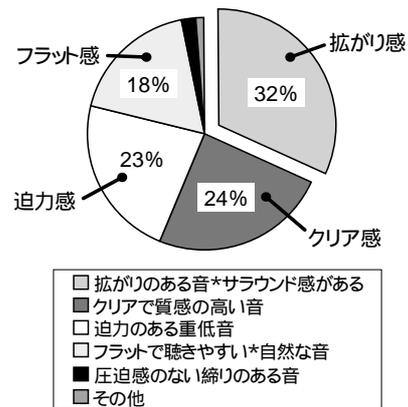


図-1 アンケート結果（全体）
Fig.1 Questionnaire results (total)

【年齢別】

N=104(男性61 / 女性43)

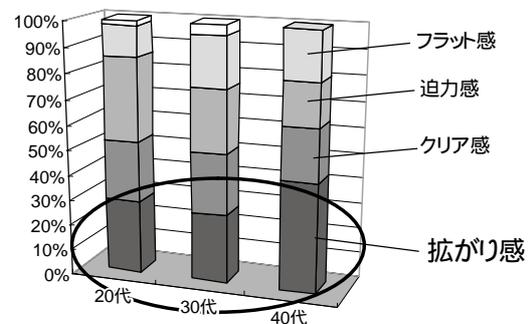


図-2 アンケート結果（年齢別）
Fig.2 Questionnaire results (by age)

この結果より、ユーザーは「拡がり感」、「音のクリアさ」、「迫力感」を求めており、全世代にわたり「拡がり感」に対する要望が強い事が分かった。

2.2 当社が目指す音のイメージ

市場のアンケートを参考に、当社が目指す音のイメージを現状のリア席での音響効果（拡がり感）と比較して説明する。

【現状のリア席での音響効果（拡がり感）】

- 「拡がり感が感じられない」
- = 「リア席近傍のスピーカ配置：ドア（足元）部であるため」
- = 「拡がり感の出る位置にスピーカを配置できない」
- = 「スピーカレイアウトの自由度が少ない」



図-3 現状の音響効果（拡がり感）
Fig.3 Current sound effect (spacial impression)

【目指すリア席での音響効果（拡がり感）のイメージ】

スピーカレイアウトに依存しない、拡がり感のある音響空間を再現したい。



図-4 目指す音響効果（拡がり感）イメージ

Fig.4 Sound effect (spacial impression) we are aiming at

2.3 従来車載用オーディオシステムでの問題点

従来の車載用オーディオシステムで、リア席での拡がり感のある音響空間を作り出せない原因は、図5のリスニングルームと車室内の空間情報に差があるためである。1要因としては、内装材「天井/カーペット/シート」が吸音材として働いていることが考えられる。さらに車室内のスピーカレイアウトより、上方からの空間情報に差があると推測できる。

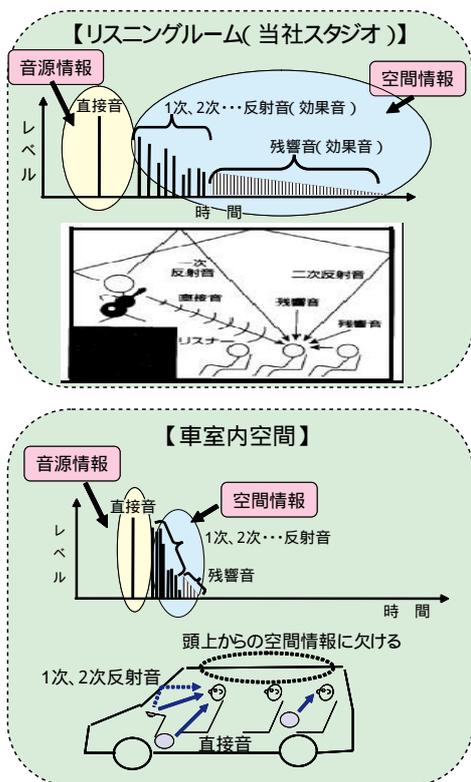


図-5 リスニングルームと車室内との比較

Fig.5 Comparison between listening room and vehicle interior

2.4 改善の考え方

前項で述べた原因に対する改善方策を下記する。

課題である「上方からの空間情報の差」を埋めるために、スピーカとリア席聴取者間に障害物がなく搭乗者全員に対

し均等に空間情報を提供できる位置すなわち天井に広指向性スピーカを配置すると共にリスニングルーム（20畳レベル）に相当する反射音および残響音等の効果音（～30msec相当）を再生させる。具体的搭載位置としては、前席後方天井が最適であると考えられるが、天井裏へスピーカを配置するためには、スペース制約から薄型スピーカである必要がある。

次項では、薄型スピーカの調査を行い、最適な薄型スピーカ方式を決定する。

3 各種薄型スピーカ方式の比較

現在、従来のコーン型スピーカ（以下、従来型スピーカとする）方式と比較し飛躍的な薄型化が可能な薄型平板スピーカには、大きく NXT方式 FPS方式 プロトロ方式の3つがある。

それぞれの方式の特徴を下記に述べる。

【NXT方式】

方式：従来型スピーカのピストン振動モード（図6）とは異なり、平面パネルの曲げ振動の共振を応用した方式であり、パネルに最適なDistributed Mode（振動モード分布）を形成する（図7）。概略構造を図8に示す。

特徴：このモードによりパネル上に多数の音源が分布する面音源を実現できるため指向性が広く、内装材等のパネルを直接駆動することができるために薄型化が図れる。

従来スピーカ
(ピストン振動モード)

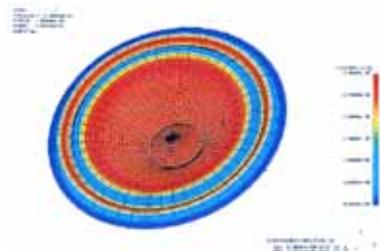


図-6 ピストン振動モード（従来型スピーカ）
Fig.6 Piston vibration mode (conventional speakers)

NXTスピーカ
(振動モード分布(Distributed Mode))

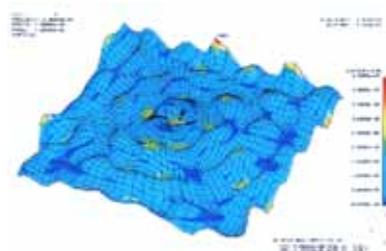


図-7 振動モード分布
Fig.7 Distributed mode

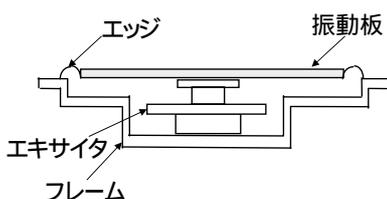


図-8 NXT (方式) の構造概略図
Fig.8 Rough schematic of NXT system

【FPS方式】

方式：平面振動板を多点駆動させ、ピストン運動させる方式。概略構造を図9に示す。

特徴：超薄型スピーカの製作が可能であり、多点駆動で振動板全体をピストン運動させることが可能であるために過渡特性もよい。

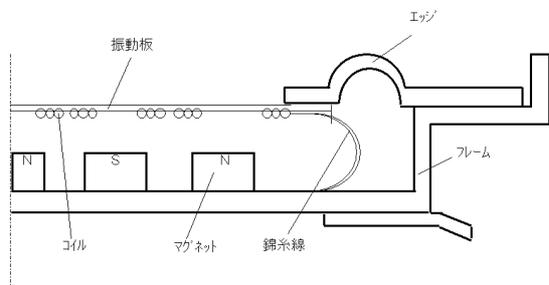


図-9 FPS方式の構造概略図
Fig.9 Rough schematic of FPS system

【プロトロ方式】

方式：2枚の異方性プラスチック磁石に特殊多極着磁を行い、その2枚の磁石板の間に、薄膜を配置して、ピストン運動をさせる方式。概略構造を図10に示す。

特徴：超薄型スピーカの製作が可能。ただし、マグネットの開口率、厚みに音質が依存するという、背反特性を持っており、高音質化は困難。また、指向性も狭い。

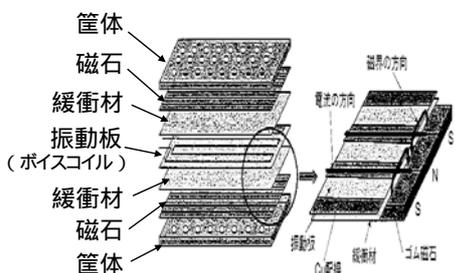


図-10 プロトロ方式の構造概略図
Fig.10 Rough schematic of Protro system

これら3つのスピーカ方式の特徴を表1に示し比較する。

表-1 各種スピーカ方式の比較

Table 1 Comparison between the three speaker systems

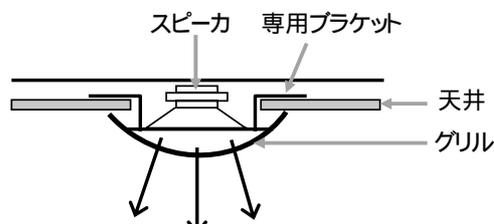
	目標値	NXT方式	FPS方式	プロトロ方式	
質量	100g以下	100 (エキサイタ単品)	50 (50mm×88mm)	2000 (298mm×210mm) ×	
厚み	20mm以下	100 (エキサイタ単品)	50	40	
音響性能	音圧再生帯域	75dB/w.m以上 400~10kHz	100 130~20kHz	100 150~55kHz	90 25~6kHz
	指向性	従来スピーカ以上	広い	従来スピーカと同程度であるがコントロール可能	狭い ×

上記比較結果より、今回のスピーカ方式としては、広がり感の向上が目的であるため、指向特性の広いNXT方式が最適であると考える。

次項以降に、ヘッドライナースピーカ（NXT方式）の構造と車両搭載要件の検討結果を述べる。

4 ヘッドライナースピーカの構造

今回開発したヘッドライナースピーカは、図7の Distributed Mode（振動モード分布）を天井材自身に発生させるために、構造としては振動を発生するエキサイタ（振動子）と振動板となる天井材の2つに大きく分けることができる。このエキサイタを天井裏とボディ間の隙間へ搭載するため、薄型で軽量のエキサイタが必要となる。下記に、従来型スピーカを天井に搭載した場合のイメージ図11とヘッドライナースピーカのイメージ構造 図12を示す。



（狭い指向性、厚みが増す = スピーカが天井からせり出す）

図-11 従来型スピーカを天井に搭載した場合
Fig.11 The diagram of a conventional speaker installed in the ceiling

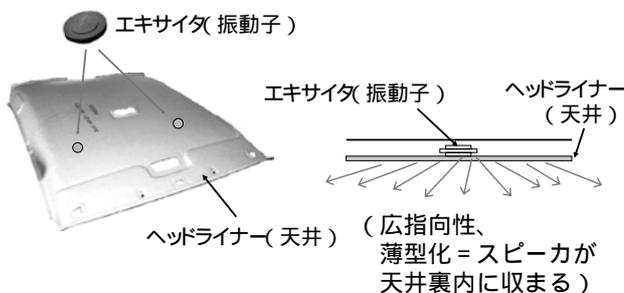


図-12 ヘッドライナースピーカ構造
Fig.12 Structure of a headliner speaker

従来型スピーカとヘッドライナースピーカの違いを表2にまとめる。

表-2 各種スピーカ方式の比較

Table 2 Comparison between the three speaker systems

	項目	従来型スピーカ	ヘッドライナースピーカ
性能	全高	34mm	14mm
	重量	180g	100g
	指向性	×	
構造	天井からの出っ張り	有り	無し
	部品点数	3点	2点

5 ヘッドライナースピーカの搭載要件

従来型スピーカと異なり、天井材自身を振動板として使用している事から車両搭載による音質への影響がより大きいと予測される。従って、特に注意した搭載関連（下記6項）について以下に説明する。

- ・エキサイタとブラケットの固定構造検討
- ・天井背面温度に耐えるエキサイタ構造検討
- ・振動板としての天井材の必要面積の検討
- ・エキサイタ最適搭載位置検討（車両前後方向）
- ・エキサイタ最適搭載位置検討（車両左右方向）
- ・天井材曲げR寸法検討

5.1 エキサイタとブラケットの固定構造検討

エキサイタとブラケットの固定構造を検討する前提条件として、下記 ~ の要件を満足する必要がある。

- 締結部、内装材の経年劣化後の締結力の確保
 - サービス性の確保（エキサイタ脱着可）
 - 車両振動に耐え得る締結力及びエキサイターダンパ強度の確保
 - 締結部を含めたエキサイタ全高の確保（薄型化）
- この中より、 ~ について述べる。

の締結力に対しては、 のサービス性と強く関連し、 を満足しかつ締結力を確保する必要があり、最終的に図13のようなネジ構造での実現を図った。

また、 のエキサイタ - ダンパ強度に対しては、車両振動により折れが発生したため、図14のようにシミュレ

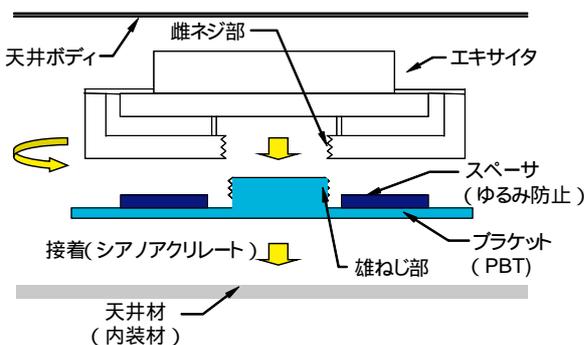


図-13 エキサイタおよびブラケット構造
Fig.13 Structure of exciter and bracket

シジョンによる応力分散に着目する事で車両振動に耐えるダンパ形状を実現できた。

の薄型化に対しては、度重なる設計見直しおよび試作による特性確認を実施する事により実現を図った。

要件 ~ を満足した開発品の外観図を図15に示す。

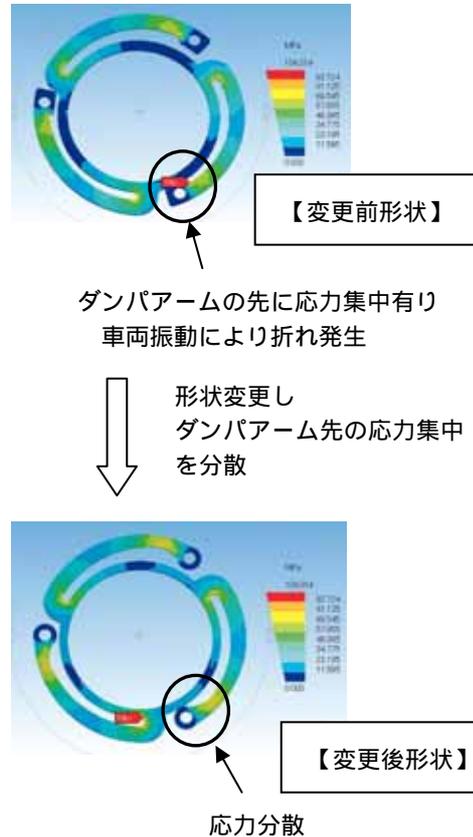


図-14 ダンパ形状およびシミュレーション結果
Fig.14 Form of the damper and its simulation results

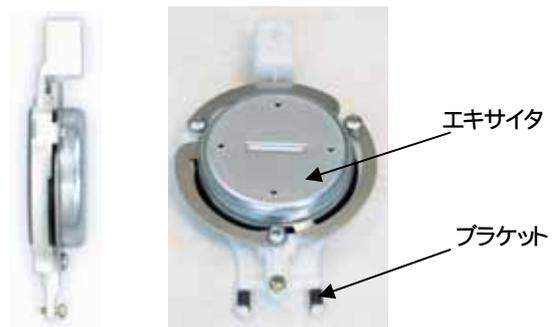


図-15 開発品
Fig.15 The newly-developed product

5.2 天井背面温度に耐えるエキサイタ構造検討

天井背面の温度は環境により大きく上昇する。この温度に耐えうるエキサイタの構造を明確化した。

図16のようにヨークに小さな放熱穴を設けることにより振幅による空気の流れを早くすることで、放熱性を向上させた。図17に放熱穴の効果を示す。

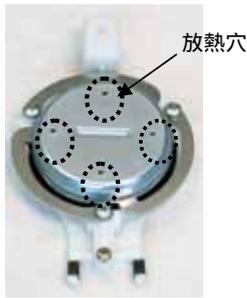


図-16 放熱穴の適用

Fig.16 Application of heat dissipation holes

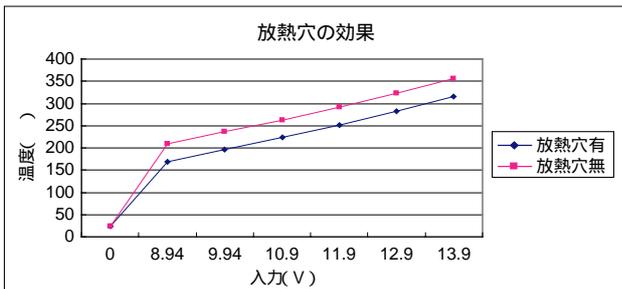


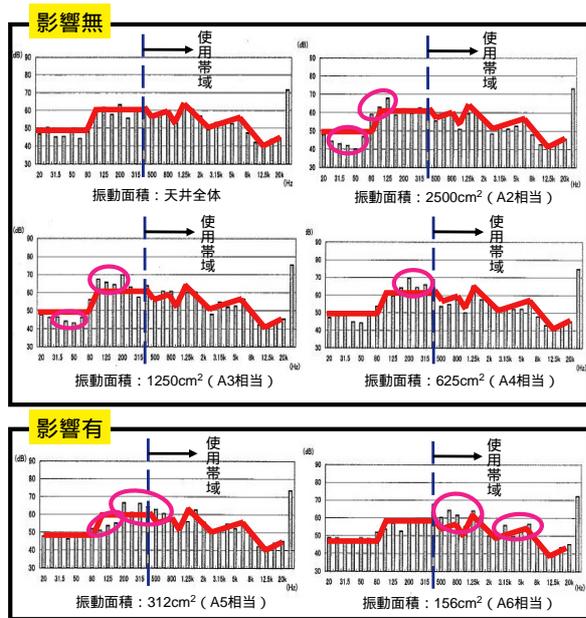
図-17 放熱穴の効果 (ボイスコイル温度比較)

Fig.17 Effect of heat dissipation holes (Comparison of the temperature of the voice coil)

5.3 振動板としての天井材の必要面積の検討

ヘッドライナースピーカでの使用帯域 (400Hz以上) において、なるべく高く平坦な音圧周波数特性をえるために必要な天井材振動面積を明確化する。

天井材の振動範囲を限定させた場合の各面積での音響性能を図18に示す。



— : 天井全体での周波数特性概略カーブ (基準カーブ)
 ○ : 基準カーブから変化する周波数

図-18 各面積での1/3oct音圧レベル

Fig.18 1/3oct sound pressure level in each dimension

このデータより、振動面積が625cm²以上の場合、基準カーブからの音圧が変化するのは、使用帯域以下であるが、312cm²以下では、使用帯域内での音圧変化が見られる。

本結果より、天井材の振動面積は、使用帯域内で音圧変化のない625cm²以上を確保することが必要である。

5.4 エキサイタ最適搭載位置検討 (車両前後方向)

車両前後方向でのエキサイタ搭載最適位置について説明する。

本ヘッドライナースピーカでは、搭乗者全員、特にリア席の搭乗者に対し空間情報を提供できる位置、つまり天井からの空間情報 (反射音および残響音等) を提供することにより、フロント/リア席両席で同様な音響効果 (拡がり感) を実現させる必要がある。このことより、フロント席、リア席でのオーバーオール音圧のレベル差が小さい位置を最適とする。

検討を実施したエキサイタ搭載評価位置を図19に、フロント席、リア席でのオーバーオール音圧のレベル差を表3に示す。

- 評価条件 : ・エキサイタ取付け位置 ~
 ・ピンクノイズ0.5W入力
 ・Lch、Rch同時再生

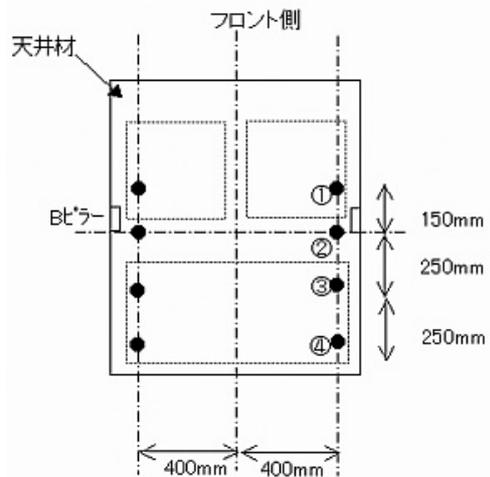


図-19 エキサイタ搭載評価位置

Fig.19 Various mounting positions of the exciter evaluated

表-3 搭載位置毎のオーバーオール音圧レベル差

Table 3 Overall sound pressure level difference by mounting positions

取付位置	FR席	RR席	レベル差
	86dB	81dB	5dB
	84dB	82dB	2dB
	84dB	84dB	0dB
	80dB	83dB	3dB

本データ差だけから見ると、フロント席、リア席でのレベル差が小さいのは、 の位置もしくは の位置が良いと考えられる。ただし、同時に実施した聴感評価結果より、

位置では音像定位(1)が高すぎるという問題があったため、最適位置は、の位置となった。

本結果より、車両前後方向でのエキサイタ最適搭載位置は、のBピラー後端部付近に決定した。

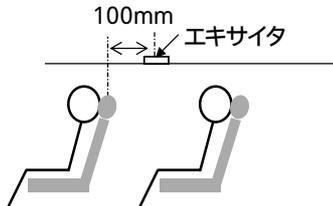


図-20 エキサイタ最適搭載位置(車両前後方向)
Fig.20 Most appropriate mounting position of the exciter (anteroposterior direction in a vehicle)

5.5 エキサイタ最適搭載位置検討(車両左右方向)

車両左右方向でのエキサイタ最適搭載位置について説明する。

エキサイタ搭載位置を左右方向に振った場合の聴感評価結果を表4に、またその場合の周波数特性の変化を表5に示す。本結果より、車両左右方向でのエキサイタ最適搭載位置は、700mm以上で極力離すことが必要である。ただし、背反事項として天井左右端のR部にかかるると音質が劣化するため、天井平坦部で取付ける必要がある。

表-4 聴感評価結果

Table 4 Listening evaluation results

No.	エキサイター間距離	音質(音色)	拡がりステレオ感
1	700mm (天井平坦部)		
2	900mm (天井平坦部)		
3	980mm (天井周囲R上)	×	

表-5 周波数特性比較

Table 5 Comparison of frequency characteristics

No.	エキサイター間距離	Hi-Mid Lch	Hi-Mid Rch	Hi-Mid Lch+Rch	判定
1	700mm (天井平坦部)	-14.3dB	-13.0dB	-13.0dB	
2	900mm (天井平坦部)	-15.2dB	-10.4dB	-12.5dB	
3	980mm (天井周囲R上)	-17.1dB	-21.9dB	-18.9dB	×

エキサイタ設置範囲



図-21 エキサイタ搭載範囲位置(車両左右方向)
Fig.21 Mounting position range of the exciter (horizontal direction in a vehicle)

5.6 天井材曲げR寸法検討

天井の曲げRに対する音響特性を表6および図22に示す。

表-6 天井曲げR違いでの音響特性比較

Table 6 Comparison of acoustic characteristics by different bending radius of the ceiling

曲げ寸法	出力音圧レベル (300,400,500,600Hz 平均)	周波数帯域 (出力音圧レベルより 10dB落ち)
R = 5.0×10 ³ mm 以上(平板相当)	75.95dB/W・m	75Hz ~ 20KHz 2
R = 1.0×10 ³ mm	75.26dB/W・m	80Hz ~ 20KHz 2
R = 700mm	76.06dB/W・m	85Hz ~ 20KHz 2
R = 500mm	77.07dB/W・m	95Hz ~ 20KHz 2
R = 300mm	76.60dB/W・m	100Hz ~ 20KHz 2

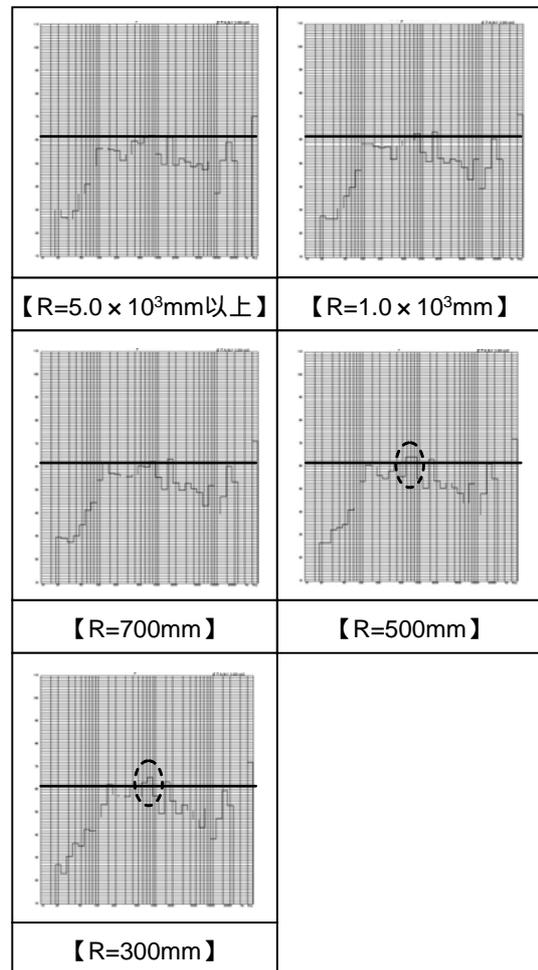


図-22 天井材各曲げRでの1/3oct音圧レベル
Fig.22 1/3oct sound pressure level by the ceiling materials with different bending radius

上記測定結果より、次のことが分かった。
曲げ寸法が小さくなる(曲げがきつくなる)につれて、
低域の再生限界周波数が上昇する。

- 1 「音像定位とは」
音を聞いた時の方向や距離などの空間的な情報
- 2 一部のディップは除く

曲げ寸法がR = 500mm以下になると700, 800Hz付近のピークが大きくなる。(中域のピークが大きくなる)
 本結果より、天井の曲げRは、700mm以上が望ましい。

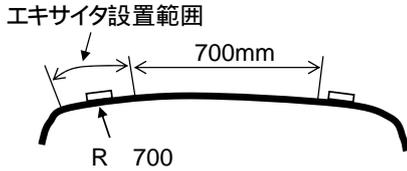


図-23 エキサイタ搭載範囲位置
 Fig.23 Mounting position range of the exciter

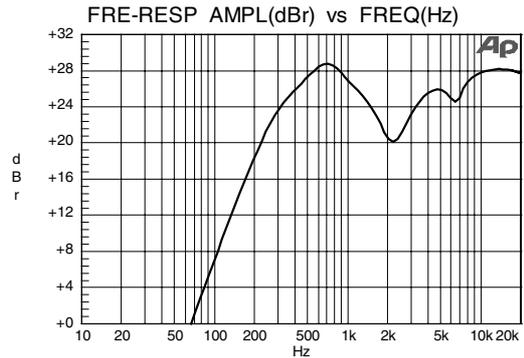


図-26 アンプの周波数特性 (5cmスクーカ)
 Fig.26 Frequency characteristics of the amplifier (5cm squawker)

6

まとめ

今回開発したヘッドライナースピーカの車両搭載要件を満たした1BOXカー用のオーディオシステムを仕立て、効果の確認を行なった。従来の車載用オーディオシステムにはない、リア席での拡がり感を得ることができる。

6.1 成果

本検討結果を織り込んだスピーカレイアウトを図24に、アンプのシステムブロックを図25に、各スピーカにおけるアンプの周波数特性を図26~図30に、ヘッドライナースピーカ有無での測定データ(1/3oct音圧)を図31に、また聴感評価結果を表7に示す。

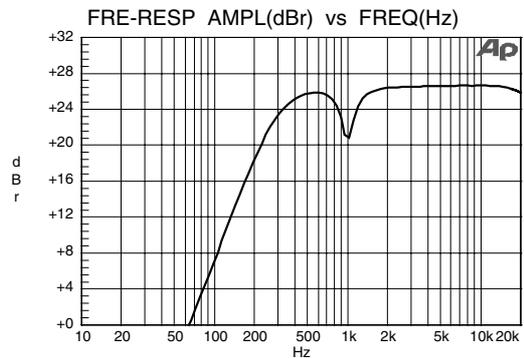


図-27 アンプの周波数特性 (5cmセンター)
 Fig.27 Frequency characteristics of the amplifier (5cm center speaker)

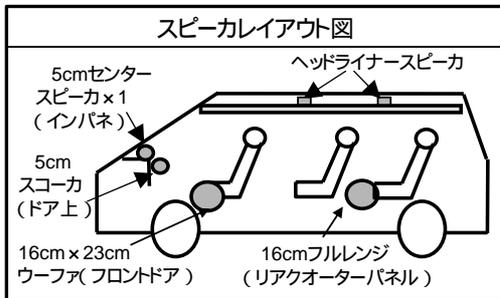


図-24 スピーカレイアウト図
 Fig.24 Diagram of the speaker layout

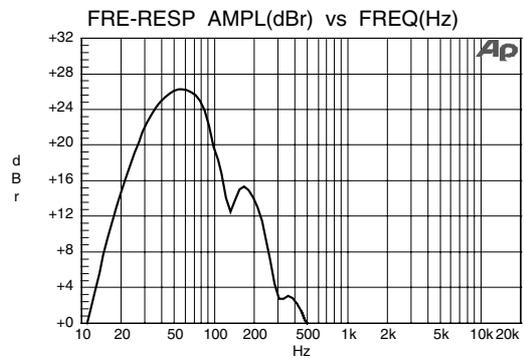


図-28 アンプの周波数特性 (ウーファ)
 Fig.28 Frequency characteristics of the amplifier (woofer)

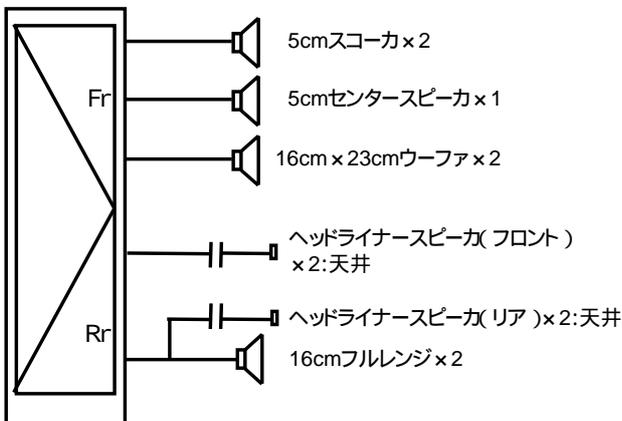


図-25 アンプのシステムブロック図
 Fig.25 System block diagram of the amplifier

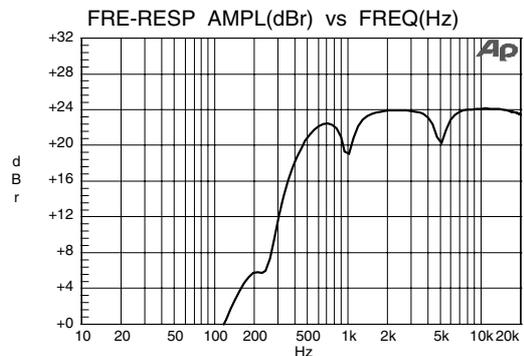


図-29 アンプの周波数特性 (天井スピーカ)
 Fig.29 Frequency characteristics of the amplifier (headliner speaker)

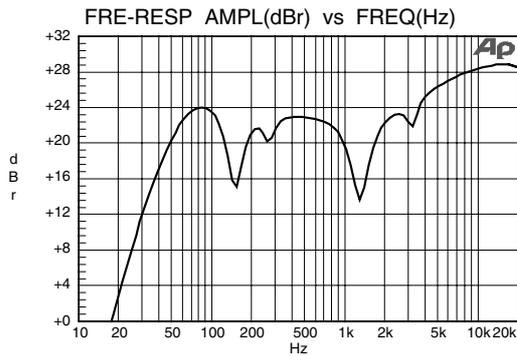


図-30 アンプの周波数特性 (リアスピーカ)

Fig.30 Frequency characteristics of the amplifier (rear speaker)

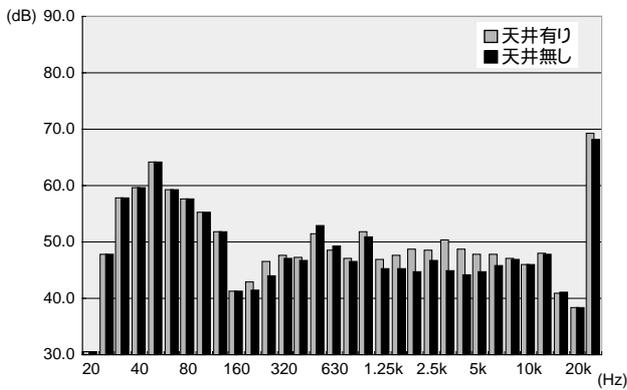
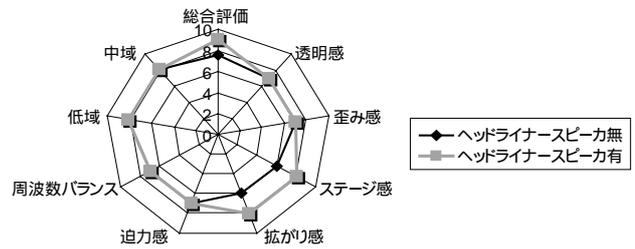


図-31 ヘッドライナースピーカ有無での1/3oct音圧レベル

Fig.31 1/3oct sound pressure level with/without headliner speaker

表-7 聴感評価結果

Table 7 Listening evaluation results



ヘッドライナースピーカを搭載することにより、特性上では1.25k~7.5kHzで2~5dBの音圧レベルの改善があり、中~高域の音圧周波数特性が平坦化している。実車における聴感評価においても、リア席での「拡がり感」を確認できた。

特許14件(99項)申請中(トヨタ紡織殿との共願を含む)

6.2 今後の展望

本開発技術を応用したアプリケーション開発を推進し、従来の概念にとらわれない音響空間向上に努める。

最後に、本開発を実施するうえでの、トヨタ自動車株式会社殿、トヨタ紡織株式会社殿の多大なご協力に感謝致します。

本スピーカは英国New Transducers Limited社のNXT®フラットパネルスピーカ技術を使用しています。NXT®はNew Transducers Limited社の登録商標です。

社外執筆者紹介



外山 耕一
(とやま こういち)

2001年トヨタ紡織(当時は豊田紡織)へ入社。以来、内装トリム分野の先行開発に従事。現在、開発部内装トリムグループ主査。

筆者紹介



中島 裕一
(なかじま ゆういち)

1998年入社。以来、生産技術開発を経て、スピーカ開発に従事。現在、CI本部音響事業部音響技術部に在籍。



西川 彰
(にしかわ あきら)

1990年入社。以来、車載用音響システムの開発に従事。現在、CI本部音響事業部音響技術部に在籍。



大谷 清司
(おおたに きよし)

1990年入社。以来、車載用音響システムの開発に従事。現在、CI本部音響事業部音響技術部開発チームリーダー。