

車載用タイムドメインシステムの開発

Development of Time Domain System for In-Vehicle Use

本島	顯	Akira Motojima
西川	彰	Akira Nishikawa
安東	正美	Masami Andou
津森	克彦	Katsuhiko Tsumori
加藤	茂樹	Shigeki Kato



要 旨

「タイムドメイン理論」に基づき、車室内で演奏者が目の前に現れたような定位感、臨場感のあるリアルな音が再生できるまったく新しい車載用スピーカシステムを開発した。本システムは、昨年発売したホーム用タイムドメインシステムを発展させたものであり、車載に適合させるため、機能、取り付けに工夫をこらすとともに、DSP補正を行い、トータルシステムとして最良の効果が得られるようにしている。

本稿では、車載用システムの考え方、各スピーカ構造、取り付け構造について説明を行う。そして、本開発内容に基づいて、本年11月に製品化したスピーカシステムの概要について紹介する。

Abstract

We have developed a completely new in-vehicle speaker system based on "time domain theory" that can play sound giving localization and "being there" sensations so realistic it's as if the performer is before one's eyes inside the car. This system is a further development of the home time domain system launched last year; to make it conform to in-vehicle requirements we made innovations in the functions and installation techniques and additionally implemented DSP correction, making it a total system providing the very best effects.

In this paper we first describe the concepts for the in-vehicle system, the structures of its speakers, and their installation structures. Then we present an overview of the speaker system brought on the market in November of this year, which is based on the content of the present development.

1

はじめに

当社は昨年4月に、オーディオ技術力のアピールとブランドイメージの強化を目的として、ホーム用タイムドメインシステムを発売した。車載用においてもこのタイムドメインシステムの考え方をを用いることにより、従来オーディオの音質からのブレイクスルーがはかれると考え、技術開発を行ってきた。

このタイムドメインシステムとは、奈良のベンチャー企業である株式会社タイムドメイン由井啓之社長の提唱する「タイムドメイン理論」に基づいた商品である。タイムドメイン理論とは、従来のオーディオシステムの多くが、周波数特性を重視し、低い音から高い音までをできるだけ平坦に再生すること、また歪みを低減することなどに注力して商品開発を行っているのに対し、時間軸特性を重視しているのが特徴である。これは、音の入力波形をできる限り忠実に再生することであり、これにより、あたかも目の前で演奏者が演奏しているかのような実像感の再現と、音の繊細な表情までをも再生することが可能である。

本稿では、上記理論に基づいた車載用タイムドメインシステムの開発について、車載適用のための課題解決を中心に紹介する。

2 従来カースピーカシステムの問題点と改善の考え方

まず、従来カースピーカシステムでの車室内音場の問題点を明確にし、その問題点に対するタイムドメインシステムでの改善の考え方について説明を行う。

2.1 従来カースピーカシステムの問題点

従来のカースピーカシステム（フロントドア2SP+リアトレイ2SPシステム）の問題点としては、大きく下記の4点が考えられる。

- ・音像がぼける（定位が不明瞭）
- ・中音域が濁っている
- ・耳にまとわりつくような音がある
- ・音像が低い

まず、「音像がぼける」ということに対する原因としては、聴取位置に対するスピーカからの距離がばらばらであり、音の到達時間がずれてしまうということが考えられる。

次に、「中音域が不明瞭」ということに対する原因としては主に、ドアスピーカが音を鳴らす際に発生させる振動がドアに伝わり、ドア自身及びガラスが振動し不要な音を発生させ、音を濁していると考えられる。この不要音の発

生は、上記の「音像がぼける」ことに対しても悪影響を及ぼしていると考えられる。

そして、「耳にまとわりつくような音」ということに対する原因としては、ガラスの反射などの影響（反射音による悪影響）で周波数特性、位相特性に乱れを生じさせていると考えられる。

最後に、「音像が低い」ということに対する原因としては、聴取位置に対して、スピーカがかなり下方に配置されていることが考えられる。

2.2 問題点に対する改善の考え方

前項で述べたそれぞれの問題点に対するタイムドメインシステムでの改善の考え方は、大きく2項目にわけられ、それぞれに対して、具体的改善方策がある。まずこの2項目を下記する。

- ・ガラスの反射や不要振動の影響を減少させるスピーカの最適配置や取り付け及びシステムでの改善
- ・スピーカからの不要振動発生を防ぐための改善

次に、この2項目それぞれに対する具体的な改善方策を下記する。

【スピーカ配置、取り付け、システム】

配置：聴取者前方にスピーカを配置し、その配置位置は、出来る限り反射音の影響が少ない位置を選定する。

取り付け：スピーカから発生した振動をできる限り車両へ伝達しない方法をとる。

システム：各スピーカ間の時間差を遅延処理により補正する。

【スピーカ】

- ・スピーカユニットが発生する振動をスピーカボックスに伝えない構造をとる。

3

車載用システム

2章の改善の考え方に基づいた、車載用システムについて下記する。ただし、今回のシステムは前席を中心として述べる。

小型高性能（ワイドレンジ・ハイパワー）スピーカを開発し、音像定位に大きな影響を与える帯域（音声帯域以上）を再生するスピーカを聴取者前方にメインスピーカとして設置する。その際のスピーカは、振動対策を織り込んだボックススピーカとする。

上記スピーカで不足する帯域（中低音域）をミッドロー

スピーカとウーファスピーカで再生する。これらも、振動対策を織り込んだスピーカである。

この3way構成の各スピーカ間の時間差をデジタル信号処理を用いて、どのスピーカからの音も同時に聴取者の耳に到達するように補正する（タイムアライメント）。

以上の考え方を盛り込んだ具体的なシステムブロック図が図1であり、実車搭載時の概略図が図2である。

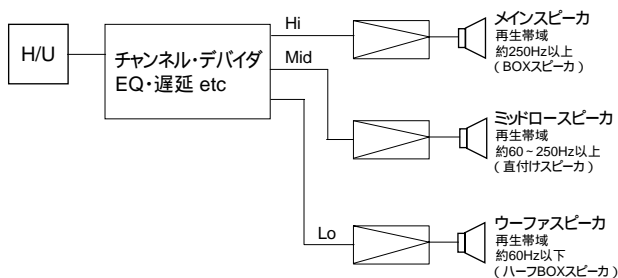


図-1 システムブロック
Fig.1 Block diagram of system

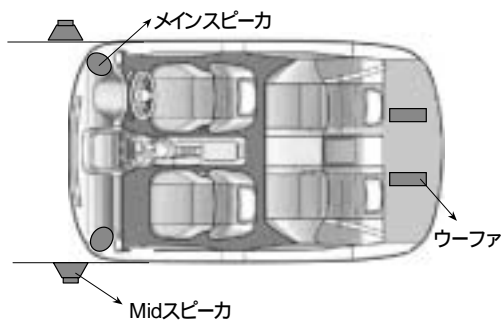


図-2 実車搭載概略
Fig.2 Schematic of system installed in vehicle

4 各コンポーネントの特徴

この章では、3章で述べた車載用システムに対する各スピーカの具体的な構造や、車室内での時間補正などについて、車載適用の課題解決を含めて説明を行う。

4.1 メインボックススピーカ

3ウェイ構成のスピーカシステムの中で、音像定位方向を決定する周波数全帯域を含むなど、音質に最も影響度が高いスピーカである。

4.1.1 構造検討

ホーム用タイムドメインスピーカEclipse TD512の内部構造を図3に示す。

基本的な考え方は、スピーカボックスにスピーカユニットが直接触れないように浮かせて取り付けであり、スピーカユニットはディフュージョンステー（注1）を介して地

面にグラウンドを落とす構造になっている。

車載用のメインボックススピーカを開発するに当たり、ホーム用と同様、車体をグラウンドとして取り付ける事が可能かどうか、検討を行った。検討用に試作したスピーカボックスを図4に示す。基本構造はEclipse TD512と同じ考え方で、グラウンドアンカー（注2）から伸びたステーを車体に取り付けて検討を行った。

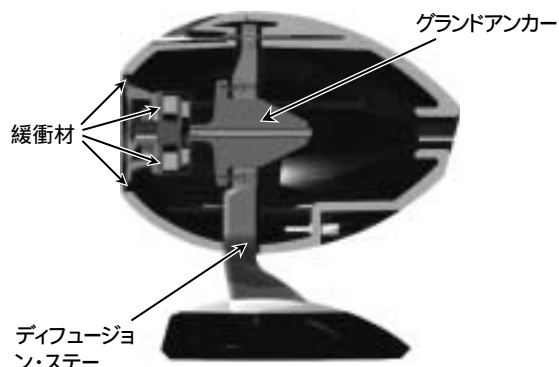


図-3 Eclipse TD512の内部構造
Fig.3 Internal structure of Eclipse TD512

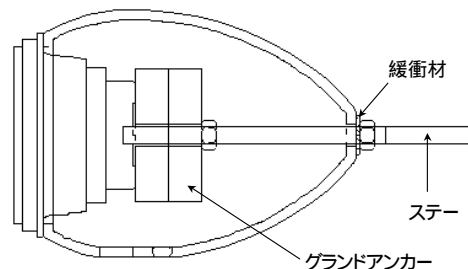


図-4 検討用試作ボックス構造
Fig.4 Structure of prototype box used for deliberations

車載用の場合、グラウンドとして考えられる固い部分は、車体のフレーム部分になるので、インパネ周りを代表してAピラーの金属部に取り付けて検討を行った。

試聴結果では車の様々な部分から音が鳴っている感じで、音像の定位もぼけた感じとなってしまった。原因は、スピーカユニットの振動が金属フレームに伝わり、その金属部分は、車体全体に繋がっているため、様々な場所で二次放射されることにある。ドアミラーベースの金属部に取り付けた場合も、ドアガラスからの二次放射と同様の結果となった。そこで、金属部に取り付けずに樹脂部であるインパネ上に取り付けて試聴した結果、余分な音が消えすっきりした音色となった。樹脂部に取り付けたことにより、

（注1） 台座と直結して外側にのびる支柱で、スピーカユニットを支える独自の支柱構造

（注2） 振動板の反作用を質量でしっかりと受け止め、理想的なピストン運動が得られる構造

音の二次放射が少なくなり、すっきりした音になったと思われる。図5に右Aピラー金属部に取り付けた場合と、インパネ右端樹脂部に取り付けた場合の、インパルス応答（運転席で測定）の例を示す。

そして図6にそれぞれの立下り累積スペクトラム（注3）を示す。インパルス応答からは、Aピラー金属部の方が初期部に大きなエネルギーがあることが観測でき、立下り累積スペクトラムでもAピラー金属部の方が、尾を引く周波数のはるかに多く、不要振動が続いていることが判る。これらの結果から車載用システムでは、スピーカのグラウンドを車体に落とす方式は問題があると判明した。そこで、スピーカボックス内で、完全にスピーカユニットがフローティングしている構造を採用することにした。図7に内部構造を示す。フロントケースとリアケースでスピーカユニットとグラウンドアンカーを挟み込んだ構造となっている。なお、メインスピーカとして考えている本ボックススピーカの必要再生帯域は、約250Hz以上であり、耐入力も考慮して、スピーカユニットの口径は5cmとした。

スピーカユニットをボックス内で完全にフローティングさせることで、スピーカユニットの振動を外部に伝え難くしているため、通常のブラケットで車室内に固定しても、車への振動伝達は少なくなっている。

図8は、さらに制振効果を高めるための取り付け方法として、スピーカボックスを緩衝材で挟み込んで車に取り付ける構造を考えた。これにより車からの不要な二次放射が大きく低減される。

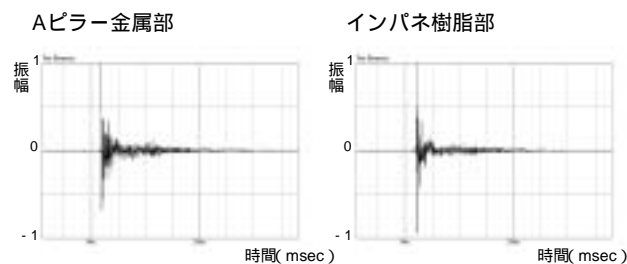


図-5 Aピラー金属部とインパネ樹脂部とのインパルス応答比較
Fig.5 Comparison of impulse responses of A pillar metal portion and instrument panel resin portion

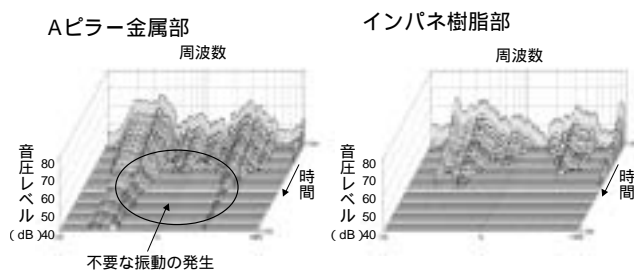


図-6 立下り累積スペクトラム比較
Fig.6 Comparison of cumulative spectra

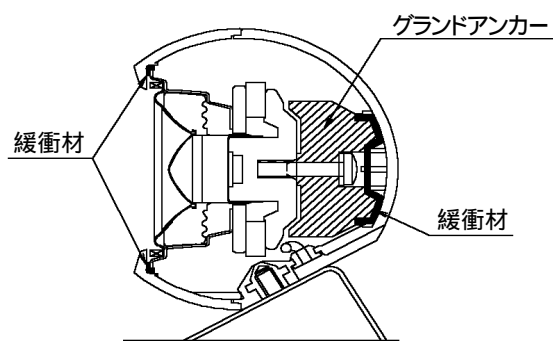


図-7 メインボックススピーカ内部構造
Fig.7 Internal structure of main box speaker

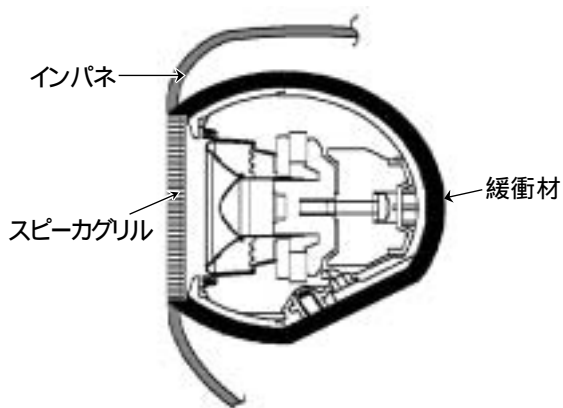


図-8 メインボックススピーカ車両取り付け構造
Fig.8 Structure of installation of main box speaker to vehicle

4.1.2 取り付け位置の検討

メインスピーカの取り付け位置としては、インパネ上部両サイド付近を考えているが、最適位置を調べるために、試作したスピーカを取り付け可能と思われるいくつかの位置に取り付けて検討を行った。

検討を行った代表的な取り付け位置は以下の通り。なお、中央定位を明確にするため、スピーカの向きは全て前席中央部に向けて取り付けた。

- インパネ奥両サイド（フロントガラス側）
- インパネ前両サイド（車室内側）
- フロントドア上部前方

図9～図11に、各取り付け位置での反射音の状態が観測できるエネルギーレスポンス（注4）の測定結果を示す。マイクロホン位置は運転席。また、各図上部に示した数値は、0msec～20msecまでの総エネルギーを加算し、ピーク

（注3）各インパルス応答から求めた周波数成分の時間変化を、3次元表示させたグラフ

（注4）インパルス応答をエネルギー表示させたグラフエネルギー成分の時間変化が観測出来る。

値で正規化したものである。この数値が小さいほど反射音が少ないことになる。この結果より、インパネ奥が最も反射音が多いことが分かる。これはフロントガラスの影響が大きく、聴感上でも中央定位の明瞭度が低下し、音色が変化する。

この車室内の反射音は、スピーカ近傍のガラス等による直接音に近接した反射音であり、音色・音像定位を阻害してしまう。よってメインボックススピーカは、できる限り反射音の少ない位置への取り付けが理想と考える。

一方インパネ前部、ドア上部はエネルギーレスポンスの数値的にも大差なく、インパネ奥に比べて反射音が少なく、聴感でもすっきりした音になっている。

～ 以外にも、インパネ周辺の取り付け位置に関して同様の検討を行ったが、ドアミラーベースを中心にしたインパネ両サイドの前部付近が最も反射音が少なく、タイムドメインシステムの取り付け位置として、適切と考えられる。

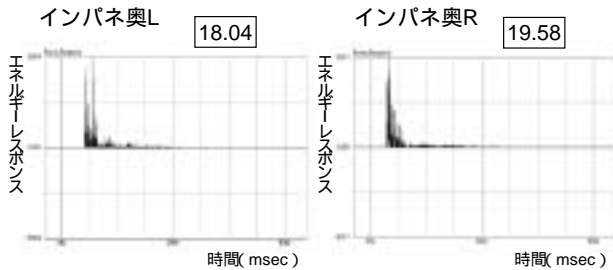


図-9 インパネ両サイド奥のエネルギーレスポンス
Fig.9 Energy response at the far end of instrument panel sides

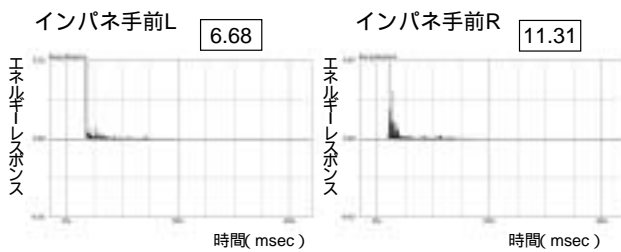


図-10 インパネ両サイド前のエネルギーレスポンス
Fig.10 Energy response at the forward end of instrument panel sides

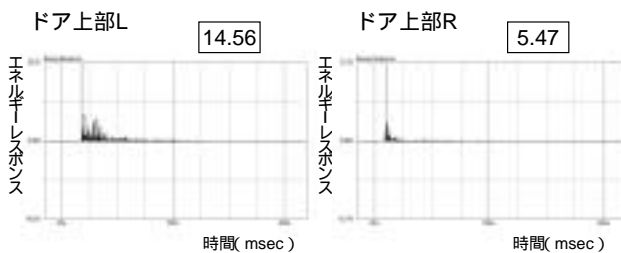


図-11 フロントドア上部前方のエネルギーレスポンス
Fig.11 Energy response of upper forward portion of front door

4.2 ミッドロースピーカ

メインボックススピーカで不足する低音域を再生するスピーカであり、再生帯域として約250Hz以下を受け持つが、メインボックススピーカとのクロスオーバー周波数が音声帯域の下部にかかるので、安定した音像定位感を得るため、乗員前方に取り付けるのが望ましい。前席乗員前方での取り付け可能場所としては、フロントドア下部、またはカウルサイドが考えられる。(図12)



図-12 ミッドロースピーカ取り付け位置
Fig.12 Installation position of mid-low speaker

ミッドロースピーカの、不要振動を伝えない理想的な形は、密閉ボックス構造を採用することであるが、低音域を再生するためには、ボックスサイズが大きくなる。そこで、グリルタイプのスピーカで検討を行った。

4.2.1 取り付け構造検討 (グラウンドアンカー)

過渡特性向上のために、グラウンドアンカーの有効性をグリルタイプのスピーカで検討した。

ドアに取り付けた13cmスピーカのマグネット後部に、500gの錘を取り付けた場合と無い場合のインパルス応答の比較を図13に、立下り累積スペクトラムの比較を図14に示す。

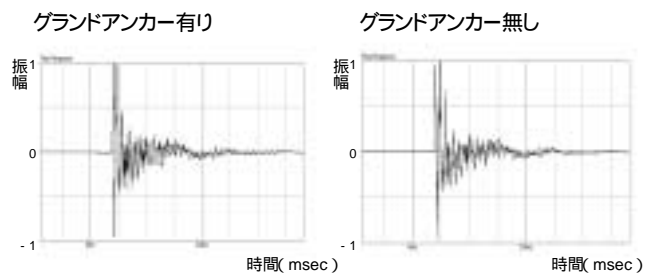


図-13 グラウンドアンカー有無のインパルス応答比較
Fig.13 Comparison of impulse responses with and without anchor

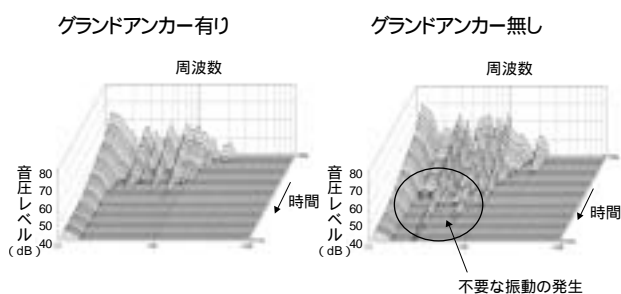


図-14 グラウンドアンカー有無の立下り累積スペクトラム比較
Fig.14 Comparison of cumulative spectra with and without anchor

インパルス応答の比較でも、錘を取り付けた方が若干後部振動が少なくなっているのが判るが、立下り累積スペクトラムでは、不要振動が少なくなっているのが、さらにはっきり判る。聴感でも低音のしまりが良くなるのが判る。グラウンドアンカーの重さに関しては、データ上でも重量を増やせば増やすほど効果ははっきり現れており、出来る限りの重量を取り付けることが望ましい。

4.2.2. 取り付け構造検討 (フローティング)

グリルタイプの取り付けでも、スピーカ振動を極力ボディ側に伝えないようにするために、図15に示すように緩衝材を挟んで取り付ける方法を採用した。取り付けるネジ穴にも緩衝材を巻き、スピーカユニットの金属部が車の金属部に接触しないようにしている。図16に緩衝材を挟んだ場合と無い場合の立下り累積スペクトラムの比較を示す。緩衝材で挟み込んだ方が、不要振動が少なくなっているのが判る。なお、緩衝材はさまざまな材質を検討した結果、制振効果が高かったフェルトを使用した。

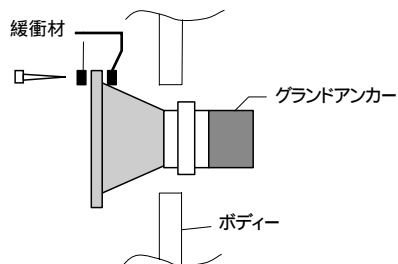


図-15 ミッドロースピーカ取り付け構造
Fig.15 Structure of installation of mid-low speaker

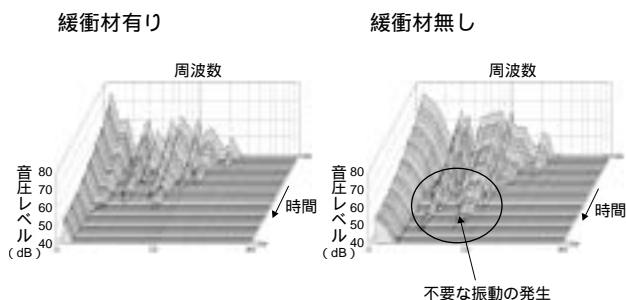


図-16 緩衝材有無での立下り累積スペクトラム比較
Fig.16 Comparison of cumulative spectra with and without shock absorbent material

4.2.3 取り付け位置の検討

13cm口径のスピーカをフロントドア下部とカウルサイドに取り付けて比較を行った。図17に両取り付け位置での立下り累積スペクトラムの比較を示す。フロントドア下部の方が、明らかに不要振動が多いことが判る。これは、フロントドアは強度が低く、振動がドアガラスへも伝播するが、カウルサイドは平面が少ないので強度が高いことによる。取り付け位置としては、カウルサイドを推奨するが、ヒューズボックスがあったり、タイヤハウス近接しており、取り付け困難な場合もあるので、今後はドアでの取り付けに関しても、改善検討を進めていく。

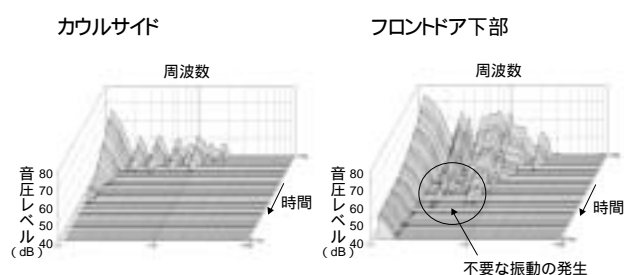


図-17 カウルサイドとドアとの立下り累積スペクトラム比較
Fig.17 Comparison of cumulative spectra of cowl side and door

4.3 ウーファスピーカ

ミッドロースピーカの取り付けでグラウンドアンカーについて検討を行ったが、低音域でグラウンドアンカーの効果を出すためには、かなりの重量のグラウンドアンカーが必要になる。そこで、別のアイデアを抽出し過渡特性に優れた新しい小型ウーファを開発した。図18に開発したウーファの構造を示す。

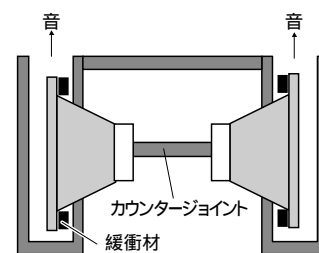


図-18 ウーファスピーカ構造
Fig.18 Structure of woofer speaker

2個のスピーカユニットのヨーク部分をカウンタージョイント(非磁性体金属連結棒)で結合し、スピーカユニットの振動を相殺する背面結合構造で、仮想的に無限大グラウンドアンカーを取り付けたのと同様な効果を狙っている。またスピーカユニットには前面負荷(注5)を設け、スリットを通して車室内に音が放射される構造にして低音域の特性改善を図っている。スピーカユニットのバックキャビ(注5)スピーカ振動板の直前に設置して、音の放射効率を上げる効果を果たす。

ティにはトランクルームを使用する。

4.3.1 背面結合の効果

図19に背面結合の有無による音圧周波数特性の違いを示す。背面結合することで、スピーカのQ0が低下(0.6 0.45)しており、磁力が向上した場合と同じ効果が得られている。また、図20に背面結合の有無による立ち下がり累積スペクトラムの違いを示す。背面結合することで、250Hz付近の不要振動が減少していることが判る。

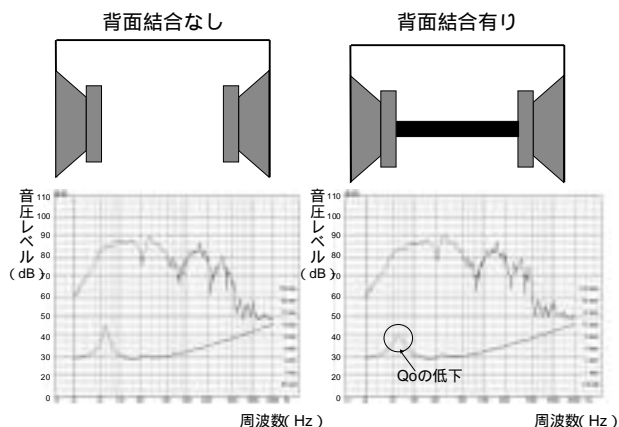


図-19 背面結合有無での音圧周波数特性比較

Fig.19 Comparison of sound pressure / frequency characteristics with and without rear surface join

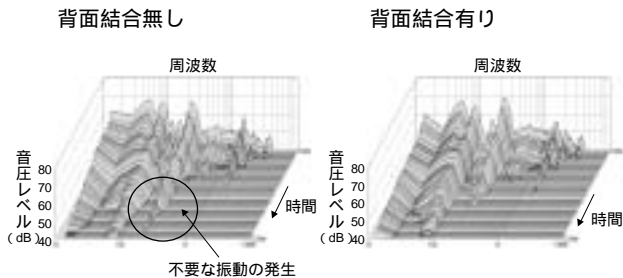


図-20 背面結合有無での立ち下がり累積スペクトラム比較

Fig.20 Comparison of cumulative spectra with and without rear surface join

4.3.2 前面負荷の効果

図21に前面負荷の有無による音圧周波数特性の違いを示す。

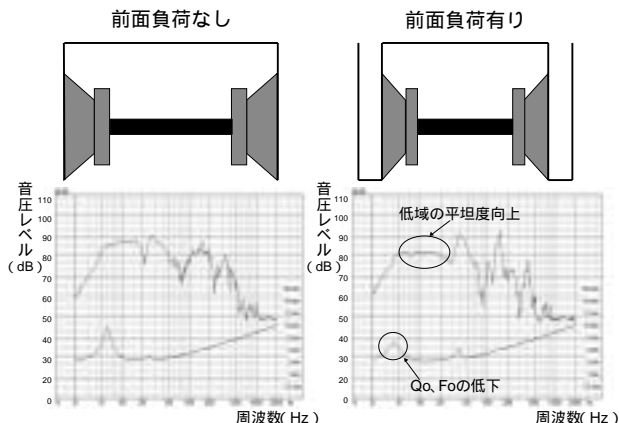


図-21 前面負荷有無での音圧周波数特性比較

Fig.21 Comparison of sound pressure / frequency characteristics with and without front surface load

前面負荷を設けることで、さらにQ0が低下(0.45 0.41)し、F0も低下(60Hz 40Hz)している。その結果、低音域の平坦部分が拡大していることが判る。つまり前面負荷を設けることで、平坦帯域を80Hz以上から40Hz以上に拡大することが出来た。

4.4 タイムアライメント

制振構造のスピーカボックスや取り付け構造を採用しても、乗員位置から各スピーカまでの距離が異なるために、各スピーカからの到達音は時間的にバラバラになってしまう。図22にフロントLchのスピーカとリアトレイ上のウーファを鳴らした時の例を示すが、運転席に近いLchスピーカの音が先に到来し、ウーファの音が遅れて到来する。各スピーカの時間領域応答を良くしても、各スピーカからバラバラに音が到達してはスピーカの良さが出ないため、この距離を補正する必要がある。そこで、デジタル処理を用い、この遅れ時間T1分だけフロントLchスピーカの音を遅延させれば、2つのスピーカからの到達時間は同じになる。このように、全てのスピーカに関して、聴取位置から一番遠いスピーカの到達時間を基準にして、近いスピーカの音を順に遅延処理(タイムアライメント処理)をして、聴取位置での各スピーカからの音の到達時間を揃えた。

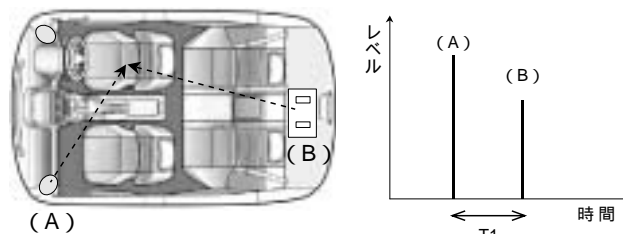


図-22 タイムアライメント・イメージ図

Fig.22 Conceptual diagram of time alignment

5

市販製品の概要

この章では、今回のシステムを市販で商品化するためのポイントと、各製品(5cmボックススピーカ, 12cmスピーカ)の仕様を下記する。

5.1 市販商品化のポイント

今回は、スピーカの取り付け方法を含めて、トータルシステムとして最高の音を出すために、当社の最高級ブランドであるイクリプスサウンドモニターで商品化を行うことにした。また、専門店での取り付けに関しても最良の音が出せるように、取り付けノウハウの展開を行っている。ただし、ウーファスピーカについては、今後さらに検討を進

め、商品性の向上を図ってから商品化する予定である。

商品化開発にあたり、代表的な専門店に対する聞き取り調査及びセダン、SUVなど各車型の実車取り付け調査を実施し、メインとなる5cmボックススピーカについては、埋め込み取り付けとインパネなどへの直置き取り付けの両方が成立するような意匠を採用した。

5.2 メインボックススピーカ

本スピーカの周波数特性を図23に、インパルス応答を図24に、マルチインパルス応答を図25に示す。また、構造については、前項の図7に示している。

次に、本スピーカの仕様を下記する。

- ・口径：5 cm
- ・インピーダンス：6
- ・許容入力：定格20W，瞬間最大80W
- ・音圧レベル：83dB/W・m
- ・再生周波数帯域：200Hz～30kHz
- ・推奨クロスオーバー：250Hz
- ・外形寸法：W74×H90×D71 mm
- ・質量：約500g

最後に本スピーカに採用した技術アイテムを下記する。

- ・フローティング構造ボックス
前項参照
- ・グラウンドアンカー
前項参照
- ・複合型スピーカユニット（図26）
小口径での広帯域化達成
- ・PEN(Polyethylene Naphthalate)基材織布マイクロファイバーコーン紙（図27）
内部損失を確保しながらの高剛性化達成
- ・エッジワイズボイスコイル
磁気エネルギーの有効活用が可能
- ・外磁型ネオジウムマグネット
強力な磁気エネルギーの確保が可能
- ・砲弾形状センターキャップ（図28）
高域での不要振動の低減を達成。

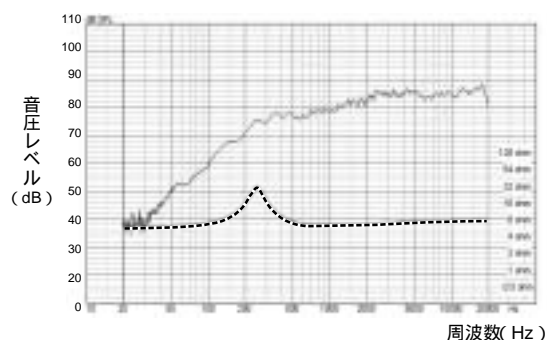


図-23 メインボックススピーカの音圧周波数特性

Fig.23 Sound pressure / frequency characteristic of main box speaker

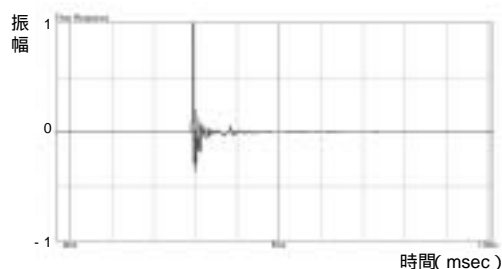


図-24 メインボックススピーカのインパルス応答

Fig.24 Impulse response of main box speaker

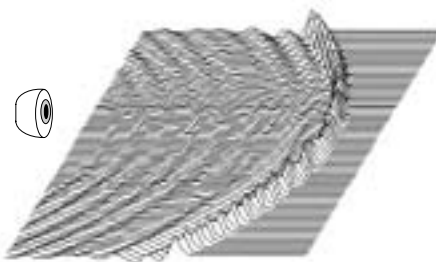


図-25 メインボックススピーカのマルチインパルス応答

Fig.25 Multi impulse response of main box speaker

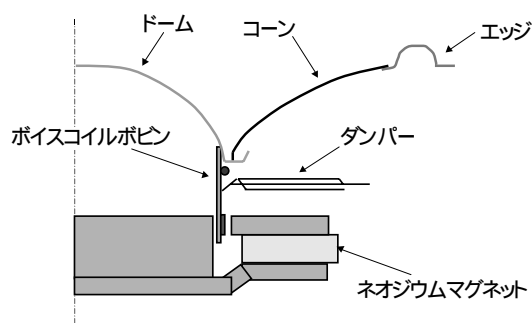


図-26 複合型スピーカユニット

Fig.26 Composite speaker unit

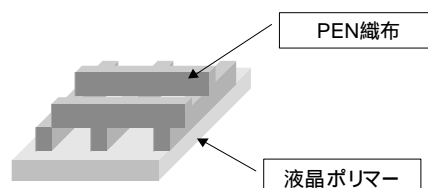


図-27 PEN基材織布マイクロファイバーコーン紙

Fig.27 PEN base-material woven fabric microfiber cone paper

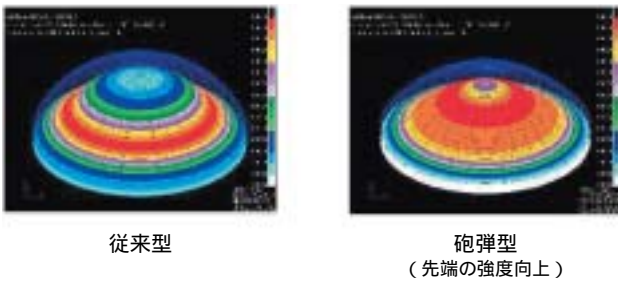


図-28 シミュレーションによる分割振動解析
Fig.28 Break up mode analysis using simulation

5.3 ミッドロースピーカ

本スピーカの周波数特性を図29に、インパルス応答を図30に示す。また、取り付け構造については、前項の図15に示している。

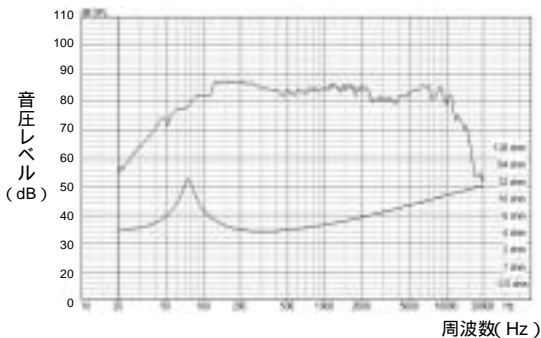


図-29 ミッドロースピーカの音圧周波数特性
Fig.29 Sound pressure / frequency characteristic of mid-low speaker

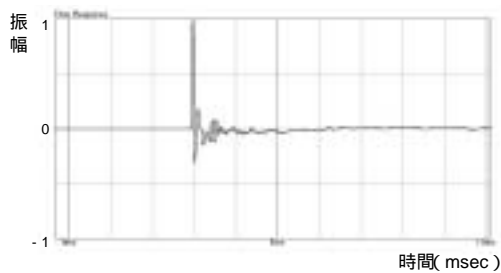


図-30 ミッドロースピーカのインパルス応答
Fig.30 Impulse response of mid-low speaker

次に、本スピーカの仕様を下記する。

- ・口径：12 cm
- ・インピーダンス：4
- ・許容入力：定格40W，瞬間最大160W
- ・音圧レベル：86dB/W・m
- ・再生周波数帯域：50Hz～13kHz
- ・推奨クロスオーバー：250Hz
- ・外形寸法：W144×D66mm
- ・質量：約900g

最後に本スピーカに採用した技術アイテムを下記する。

- ・緩衝材を使用したフローティング取り付け
前項参照
- ・グラウンドアンカー
前項参照
- ・不織布マイクロファイバークーン紙
内部損失を確保しながらの高剛性化達成

6

おわりに

以上、今回開発した車載用タイムドメインシステムの特徴と発売される市販製品の概要について述べた。

今回発売する市販製品の音は、あたかも目の前で演奏者が演奏しているかのような実像感の再現と、音の繊細な表情までの再生を達成できたと考えている。この音質が市場で多くのユーザーに感動を与え、まったく新しい車の音の世界を築いて行く事を確信している。

今後は、さらなる音質向上を目指して、個々のスピーカの改善、取り付け方法の改善を行っていく。また、小型、軽量化を含めた純正システムとしての成立性の検討も進めたい。

最後に本システム開発にご協力いただいた社内外的関係者に厚く感謝の意を表します。

筆者紹介



本島 顕
(もとしま あきら)
1983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、AVC本部音響事業部音響技術部に在籍。



安東 正美
(あんどう まさみ)
1999年入社。以来、車載用音響システムの開発に従事。現在、AVC本部音響事業部音響技術部に在籍。



津森 克彦
(つもり かつひこ)
1986年入社。以来、車載用音響システムの開発に従事。現在、AVC本部音響事業部音響技術部に在籍。



加藤 茂樹
(かとう しげき)
1979年入社。以来車載用音響システムの開発に従事。現在、AVC本部音響事業部音響技術部担当部長。