

車室内音響特性とイコライジング

Acoustic Characteristic in a Car and Equalizing

加藤 茂樹⁽¹⁾ 澤井 利仁⁽²⁾
Shigeki Kato Toshihito Sawai

西野 雄治⁽³⁾ 天谷 祐治⁽⁴⁾
Yuji Nishino Yuji Amaya

要 旨

カーオーディオにおいて、音質向上を図るにはオーディオ機器だけでなく、車室内音響特性も含めた改善が必要である。その中から、車室内伝送周波数特性の問題を取上げ、これを補正するイコライジングの方法を検討した。

本稿では、聴取する領域を考慮した伝送周波数特性の測定、一点の伝送周波数特性をフラットにするイコライジング方法の問題点、聴感上の効果を考慮したイコライジングの方法およびイコライジング効果の聴感評価実験について述べる。

In order to improve sound in a car audio system, not only improvement of car audio equipments themselves but also improvement including acoustic characteristic in a car are necessary.

Among items to be considered, we focused on frequency transfer response in a car cabin and method of compensation.

This report explains measurement results of frequency transfer response considering listening area, an issue for equalizing to obtain flat frequency transfer response at a certain point, an equalizing method considered effects on actual listening and aural experiment of equalizing effect.

(1), (3), (4) 開発技術部

(2) 第二技術部

1. ま え が き

昨今のカーオーディオブームとともに、「車の中でも良い音を聴きたい」というユーザーの声はますます高まってきている。しかし、ホームオーディオの感覚で車室に移って音楽を楽しもうとした時、我々はその音質の違いに驚かされることが多い。これは、オーディオ機器の音質差ばかりでなく、音響的に見た場合、車室内という狭い空間が、一般のリスニングルームと数多くの相違点をもっているためである。

こうした中で、カーオーディオの音質に影響を及ぼしている、基本的かつ大きな要因の一つとして、車室内伝送周波数特性の問題がある。一般に車室内はリスニングルームと比較して、伝送周波数特性のピークやディップが大きい。そこで、カーオーディオシステムでは、この伝送周波数特性を補正する目的で、再生アンプ側の周波数特性を調整するイコライザがしばしば用いられている。従来、イコライジングの方法として、聴取位置の近傍へ測定用マイクロフォンを置き、スピーカより測定用信号（ピンクノイズなど）を再生して、伝送周波数特性がフラットになるよう調整する方法がとられてきた。しかし、この方法では聴感上の周波数特性がフラットな感じを受けないことが多い。これは、車室内における伝送周波数特性のピーク・ディップの発生状態が複雑であることに起因すると考えられるが、これまで車室内で聴感上の周波数特性をフラットにする最適イコライジングの検討を行った例は、あまりなかった。

脚注1) 聴感上の周波数特性をフラットにする

以下、聴感上、周波数特性がフラットに感じるようにすることをこのように言う。

脚注2) 調整法による聴感評価実験

被験者に、音を自由に变化させることができるようにしてこの音を聴かせ、目標とする音になるよう調整させる方法。

本稿では、まず車室内伝送周波数特性を、聴取位置近傍の複点数で測定し、その特徴を知るとともに、調整法による聴感評価実験によりイコライジング特性を求め、聴感上の効果を考慮したイコライジングの方法をまとめた。さらに、これに基づいたイコライザの効果について、シェッフェの一対比較法により聴感評価実験を行った結果を報告する。

2. 車室内伝送周波数特性

2.1 車室内伝送周波数特性の特徴

車室内における音の伝わり方は複雑であり、ウィンドガラスによる反射、内装材による吸収など種々の現象を生じる。また、車室内におけるステレオ再生では、一般に、聴取位置に対して左右2個のスピーカが非対称である。さらに、取り付け条件によって、スピーカユニット本来の性能が発揮されていない場合もある。これらに起因する伝送周波数特性の特徴として主に次の点が上げられる。

- 1) 低次の固有振動周波数の粗密部が数100 Hzまで分布し、伝送周波数特性を乱す。

これは、車室内が一般のリスニングルームと比較して狭いことに起因するものである。ここで、

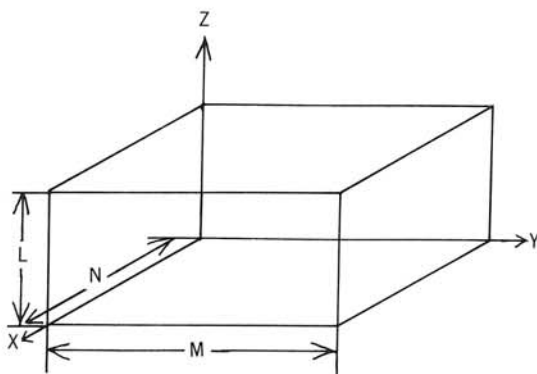


図-1 音の反射面で囲まれた直方体

Fig. 1 Rectangular parallelepiped enclosed acoustic reflectors.

図-1に示すような6面の壁で囲まれた直方体の部屋を仮定すると、この内部に発生する固有振動周波数 f は、次式で与えられる。¹⁾

$$f = \frac{C}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 + \left(\frac{m}{M}\right)^2 + \left(\frac{n}{N}\right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

C : 音速 [m/sec]

L, M, N : 部屋の高さ、幅、奥行 [m]

l, m, n : モードを求める0および正の数

(1)式を使って、広いリスニングルームと、車室内に近い寸法の部屋で生じる固有振動周波数の分布をシミュレーションした結果を図-2(a)および、図-2(b)に示す。広い部屋では、固有振動周波数の粗密部は、100 Hz以下に分布し、実用上、音質に対しての影響は少ないと思われる。しかし、車室内程度の寸法の狭い部屋では、これが音質への影響が大きい数100 Hzにまで分布して伝送周波数特性のピークディップを生じさせ、聴感上の「こもり感」などにつながる原因になっている。²⁾³⁾

2) 非対称ステレオ聴取位置では、音波の波長 λ と左右のスピーカから聴取位置までの行路差 d

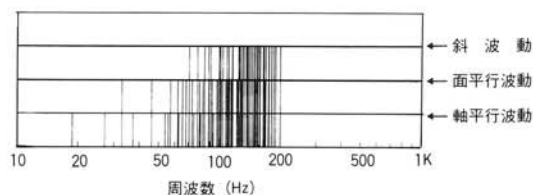


図-2 (a) 試聴室内固有振動周波数分布

Fig. 2 (a) Distribution of natural vibration frequency in listening room.

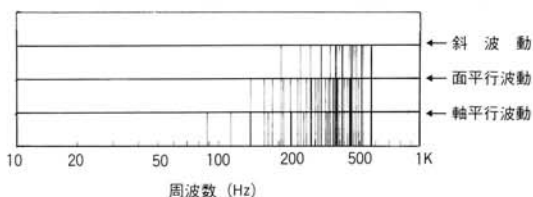


図-2 (b) 車室内固有振動周波数分布

(b) Distribution of natural vibration frequency in a car.

が、 $d = \lambda/2$ となる周波数で音波の打ち消し合いを生じる。

車のインストルメンタルパネルの両側へ取り付けした2個のスピーカを運転席で聴取する場合、左右のスピーカから聴取位置までの行路差は、一般に40cm程度であり、両スピーカより同一信号を再生するとこれが半波長($\lambda/2$)になる400 Hz付近に大きなディップを生じる。

3) 車両へのスピーカユニットの取付け条件により低音域の音圧不足や、1~2 kHz付近のピークを生じる。

直接放射型スピーカでは、背面の逆相成分の音が空間に放射されないように、バッフル板を必要とする。しかし、車両へ直接マウントするグリルタイプのスピーカでは、取付けが不完全でバッフル効果が不足し、低音域が十分に再生されないものが多い。また、取付構造上、スピーカ前面でのキャビティ効果の影響により、中音域にピークを生じる場合などもある。

以上のような多数の要因が複合して生じた伝送周波数特性のピーク・ディップを補正する目的で、従来より再生アンプ側の周波数特性を調整するイコライジングが行われている。

2. 2 従来のイコライジング方法と問題点

従来、一般に行われているイコライジングは、次のような方法である。まず、聴取位置の近傍へ測定用マイクロフォンを置き、スピーカよりピンクノイズを再生する。そして、マイクロフォンより得られた信号を $1/3$ オクターブのバンドパスフィルタで周波数分析し、伝送周波数特性がフラットとなるように、再生側の周波数特性を調整するものである。伝送周波数特性の測定には、この他、ワープルトーンをスイープする方法もよく行われる。

図-3に実験車(2800cc 4ドアセダン)のインストルメンタルパネルの両側へ取付けた、10cm ス

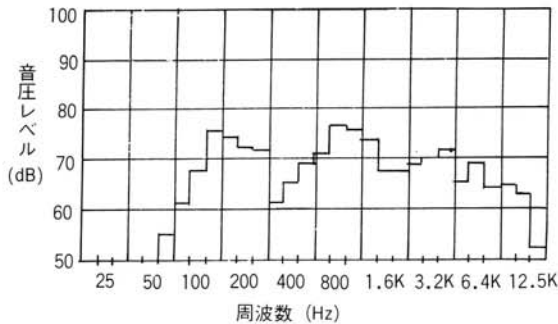


図-3 フロントスピーカによる車室内伝送周波数特性

Fig. 3 Frequency transfer response in a car from front loudspeaker.

ピーカによる伝送周波数特性を示す。測定位置は、運転席の中央で耳の高さである。図-4に、従来の手法でイコライジングを行った後の伝送周波数特性を示す。図-4の状態を音を聴くと、イコライザがない場合と比較して、聴感上フラットな感じはなく、むしろ補正した周波数にピークを持った感じに聴こえる。

ここで、イコライザを入れたまま、測定位置を車室内の横方向へ8 cm ほど移動させると 図-5のような伝送周波数特性になる。前述の聴感上のイメージは、むしろこの図-5とよく合っている。車室内のように、伝送周波数特性のピーク・ディップの発生原因が複雑な場合、一点の伝送周波数特性をフラットにただけでは、このような現象が

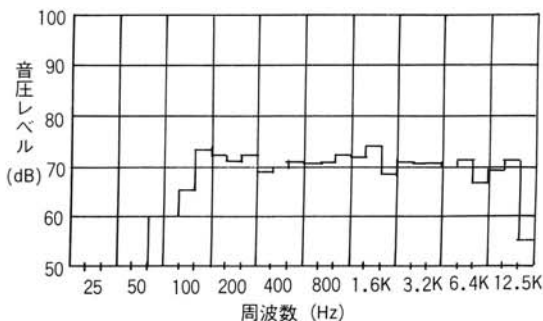


図-4 従来手法でイコライジングされた車室内伝送周波数特性 (フロントスピーカ使用)

Fig. 4 Frequency transfer response in a car with current type equalizing.

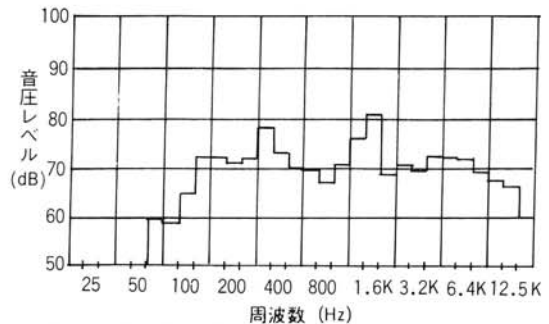


図-5 測定位置を移動させた車室内伝送周波数特性 (フロントスピーカ使用)

Fig. 5 Frequency transfer response in a car each measuring points.

多く発生する。すなわち、車室内の特定の点において左右スピーカからの直接音どうしが干渉したり、固有振動周波数による定在波の谷が原因で発生している伝送周波数特性のディップを、その点だけでフラットとなるように補正した場合と考えられる。

3. イコライジングの具体的方法

3.1 聴取する領域を考慮した車室内伝送周波数特性

聴感上の周波数特性をフラットにする最適なイコライジングの特性を得るには、車室内の音響特性の様子を、もう少し詳しく調べる必要がある。測定位置による車室内音圧周波数特性の変化を見るため、この測定を一点だけでなく聴取位置近傍の複数点で行うと、その特徴を知ることができる。

図-6は、図-3と同じ実験車のインストルメンタルパネルの両側へ取付けた10cm スピーカを使用し、測定用マイクロフォンの位置をパラメータにして伝送周波数特性を測定し、3次元表示したものである。測定用マイクロフォンは、耳の高さで運転席の中央より16cm 右側から、車両の横方向に中央付近まで4 cm ずつ移動している。

この図において、運転席の中央部で発生している320 Hz付近の特徴的なディップに注目すると、

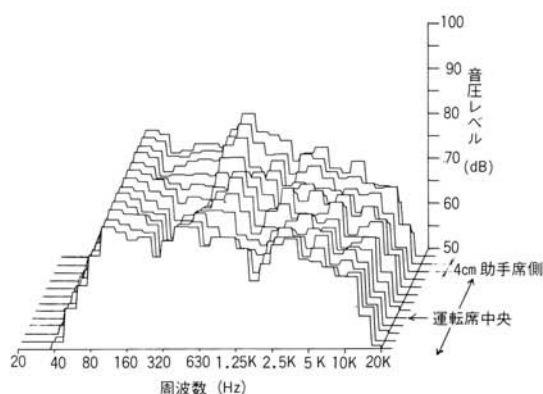


図-6 測定位置を考慮した車室内伝送周波数特性
(フロントスピーカ使用)

Fig. 6 Frequency transfer response in a car
consider measuring point.

測定位置を車両の中央へ移動させた時は、これがなくなっている。両耳の位置を考慮して、運転席の中央部より8cm右側のデータを見ると、運転席中央部であった320 Hzのディップは、約8 dB減少している。(図-7)

図-8は、前述と同一の実験車を使用し、車両後方のリアパッケージトレイの両側へ13cm 2ウェイのボックス型スピーカを置いて、図-6と同じ測定を行ったものである。

この図で特徴的なのは、250 Hz付近にあるピークである。しかし、図-6で見られた320 Hzのディップとは違い、測定位置を移動した場合、多少の

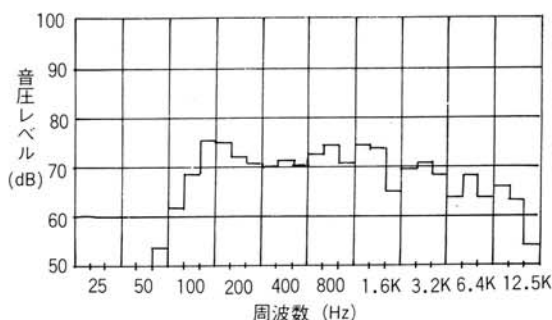


図-7 両耳位置を考慮した車室内伝送周波数特性
(フロントスピーカ使用)

Fig. 7 Frequency transfer response in a car
consider ear point.

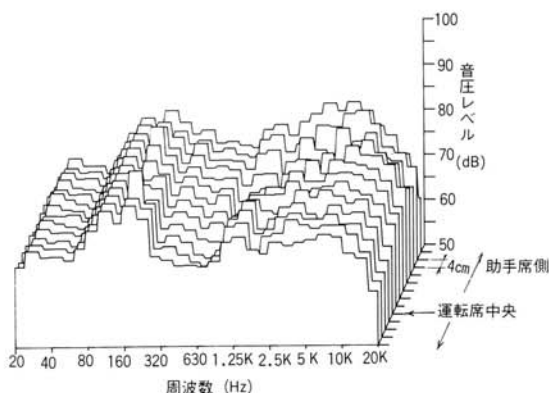


図-8 測定位置を考慮した車室内伝送周波数特性
(リアスピーカ使用)

Fig. 8 Frequency transfer response in a car
consider measuring point.

レベル変化は認められるものの、共通してピーク特性を示している。

この二つの例に見られるように、聴取する領域を考慮すると、一点における伝送周波数特性をイコライジングによってフラットにしても、周波数によっては両耳の間隔ほどのわずかな位置の違いだけで、他点では、フラットにならない場合が発生することは明らかである。車室内におけるイコライジングでは、この点を十分考慮する必要がある。

3. 2 聴感上の効果を考慮したイコライジングの方法

我々の考えるイコライジングは、聴感上の周波数特性をフラットにすることである。これは、一般の適当な音響条件を備えた部屋（いわゆるリスニングルーム）に設置したオーディオシステムにより、あるプログラムで得られている印象と、車室内のオーディオシステムで得られる印象とを一致させることである。

ここで、車室内において、フロントスピーカとリアスピーカのイコライジングを調整法による聴感評価実験で決定した例を図-9(a)および、図-9(b)に示す。被験者は技術担当者4名、評価用ソース

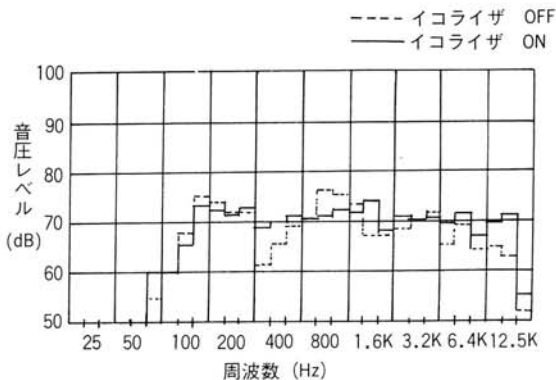


図-9 (a) 調整法イコライジングの車室内伝送周波数特性（フロントスピーカ使用）

Fig. 9 (a) Frequency transfer response in a car with improved equalizer (Front loud speaker).

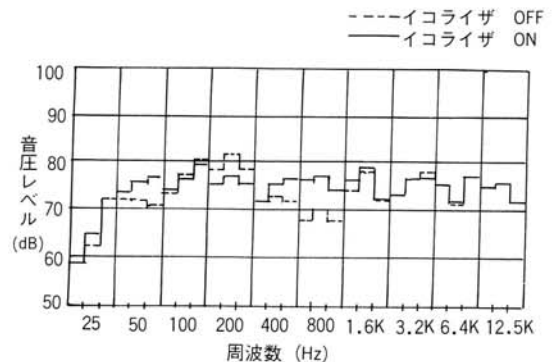


図-9 (b) 調整法イコライジングの車室内伝送周波数特性（リアスピーカ使用）

(b) Frequency transfer response in a car with improved equalizer (Rear loud speaker).

は、女性ボーカル、男声アナウンス、ピアノ、オーケストラを含む6種類を使用し、聴取位置は運転席とした。聴取レベルは平均 80 dB SPL である。

イコライザ特性の調整方法は、音楽ソースの再生側に周波数特性を中心周波数、レベル、Qについて最大5ポイントまである範囲内で自由に可変できる装置を入れておき、被験者が車室内で音を聴きながらこれを操作して、目標とする音に近づけるようにした。

この聴感評価時の印象と、同時に実施した伝送周波数特性の測定結果を比較すると、次のようになる。まず、平均的な音圧レベルより高い音圧レベルが生じている周波数帯域（いわゆるピーク点）では、この部分の伝送周波数特性をフラットにすることで聴感ともほぼ一致することが分かった。次に、平均的な音圧レベルより音圧レベルの低い（いわゆるディップ点）では、伝送周波数特性のフラット化と聴感上の印象は、ほとんどの場合一致しない。すなわち、イコライザによって補正を行った周波数帯域について、逆にピークを生じたように聴こえる事が多い。また、このような伝送特性上のディップは、測定位置によって、その周

波数やレベルが鋭敏に変化する傾向があった。したがって、ここでの補償レベルは、伝送周波数特性をフラットにするレベルではなく、各被験者の選んだ補正レベルの平均的な値とすると自然な聴感特性が得られることが分かった。さらに、 $1/3$ オクターブ以下の狭い帯域の単一ディップについては、ほとんどの場合、実用上、特に補正を必要としないように感じた。

以上、調整法による聴感評価実験の結果と、聴取する領域を考慮した車室内伝送特性の測定結果を総合すると、イコライジングの方法として次のように考えるのが妥当と思われる。

- 1) 測定位置の移動により、伝送周波数特性上のピークやディップを生じる周波数に変化の少ないところでは、特性上フラットになるまで補正する。
- 2) 測定位置の移動により、伝送周波数特性上のピークやディップを生じる周波数に変化が大きい場合は、聴取位置の近傍で変化している周波数範囲で、そのスペクトルエンベロープに比例した補正レベルの平均的な値となるレベルで補正する。

3) 伝送周波数特性上にディップを生じている場合でも、その周波数帯域が $\frac{1}{3}$ オクターブの範囲以下であれば、特に補正する必要はない。

このような条件による予備的実験で求めたイコライジングの効果を確認するため、実験車の車室内伝送周波数特性を補正する従来の方法と今回の方法による2種類のイコライジング、およびイコライジングをしない場合について聴感評価実験を実施した。図-10に、この時の車室内伝送周波数特性を示す。なお、スピーカシステムは、前述のフロント10cmスピーカを使用した。

4. 聴感評価実験

4.1 実験方法

聴感評価実験は、表-1に示す6種類のソースを使用し、7段階の評定尺度で、シェッフェの対比較法により行った。⁴⁾⁵⁾ 聴取聴取位置は、実験車の前席（運転席または助手席）とし、聴取レベルは平均80 dB SPLとした。被験者は、社内の聴感評価メンバー6名であり、対を構成する二つの再生音を聴いて、どちらが「特定の帯域の音が強調された感じがなく、自然な印象である」かを判断する。

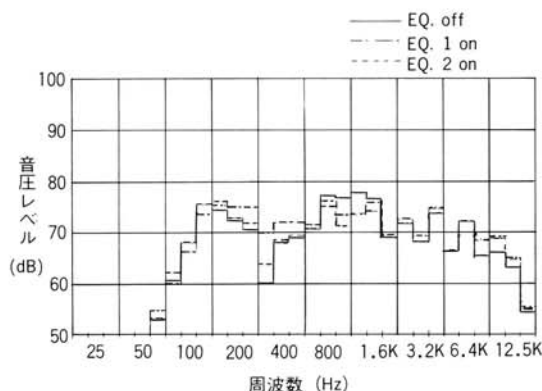


図-10 改善前（従来）および改善後のイコライザによる車室内伝送周波数特性

Fig. 10 Frequency transfer response in a car with equalizer.

表-1 聴感評価実験使用ソース一覧表

着 目 点		評 価 用 ソ ー ス
①	女 性 ボ ー カ ル	*真夜中のラヴソング* 五輪真弓
②	ギ タ ー	*シェラザード*(ギター編曲) リムスキー・コルサコフ
③	オーケストラ	*惑星より木星* ホルスト
④	トランペット	*トランペット協奏曲* M・ハイドン
⑤	ピ ア ノ	*ノクターン第二番* ショパン
⑥	男声アナウンス	*ニュース*

この聴感評価実験に使用した機器のシステムブロック図を、図-11に示す。

4.2 実験結果

評価結果を図-12に示す。図中の各軸は6種類のソースに対応しており、各軸上に尺度値をプロットしている。各軸と平行に二重線で示されているのはヤードスティックの大きさであり、このステックの長さより差が大きければ有意水準1%で有意差があることを示すもので判定結果について“>”で示した。また、EQ. offは補正なし、EQ. 1は従来の方法による補正、EQ. 2は今回の方法による補正を表す。結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 今回の方法による補正は、すべてのソースにおいて、補正なしの場合よりよくなっている。
- 2) 今回の方法による補正は、「ギター」のソースを除き、従来の方法による補正よりよくなっ

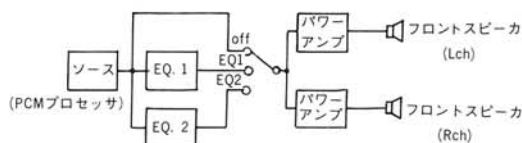


図-11 聴感評価実験システムブロック図

Fig. 11 Block diagram of aural experiment system.

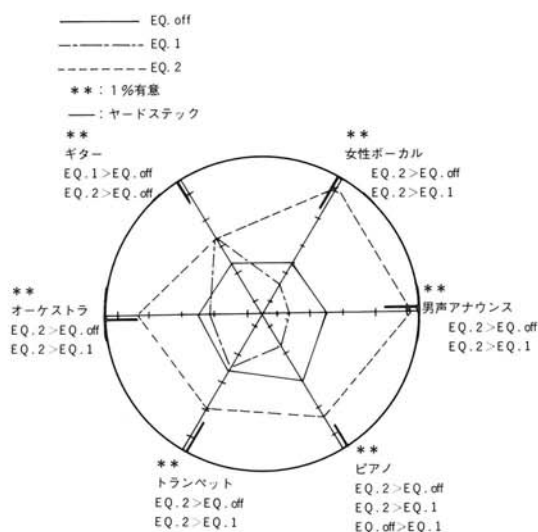


図-12 聴感評価実験結果

Fig. 12 Result of aural experiment.

ている。

- 3) 従来の方法による補正は、「女声ボーカル」「男声アナウンス」「ピアノ」のソースでは、補正なしの場合より悪くなっている。

この結果、一点の伝送周波数特性を平坦にする補正より、今回の方法による補正の方が、良い評価を得ることが確認出来た。一点の伝送周波数特性を平坦にする補正では前述のように、聴感上、特定の周波数帯域が強調されたため、ソースによっては悪い評価になったと思われる。

5. イコライザ回路自動設計システム

車室内伝送周波数特性を補正するイコライザの特性は、一般に複雑なカーブになる場合が多いが、実際の回路設計にはスピード化、正確化を図るため、自動設計システムを使用している。以下、その概要を説明する。

図-13にこのシステムの概要ブロック図を示す。車室内における伝送周波数特性の評価と試聴によって決定したイコライジングの特性を、まずFFTアナライザにより短時間で測定する。次に、こ

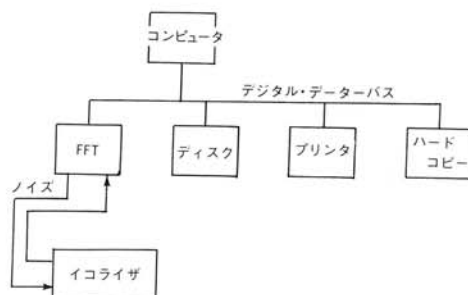


図-13 自動設計システムブロック図

Fig. 13 Block diagram of automatic design system.

のデータをパーソナルコンピュータに送りCRTディスプレイ上へ表示する。表示内容から特性の基本パターン、条件等をキーボードより入力すると、許容誤差の範囲内でプログラム中のデータから回路定数を選び出し出力するとともに、その回路定数によるイコライジングの特性も表示する。さらに、測定した特性との誤差の確認も可能にしている。また、これらのデータはフロッピーディスク内へ格納していつでも取り出せるようにしている。

図-14、表-2、および図-15にこのシステムによる実際の回路設計例とその回路図を示す。

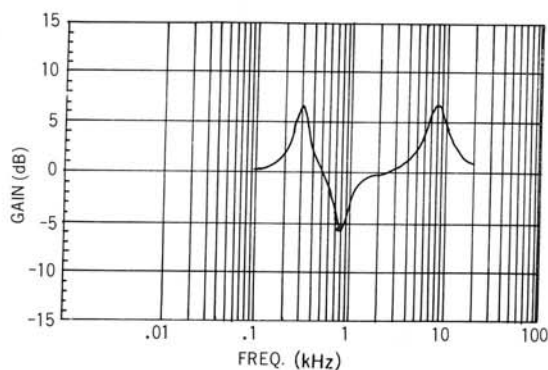


図-14 シミュレーションしたイコライザの周波数特性

Fig. 14 Simulated frequency response of equalizer.

表-2 自動設計によるイコライザ定数一覧表

UP_1 PARAMETER	
R1(KILO OHMS)=	1
R2(KILO OHMS)=	100
C1(μ F)=	.18
C2(μ F)=	.015
Fo(Hz)=	306.29383079
Q=	2.88675134595
UP_2 PARAMETER	
R1(KILO OHMS)=	1
R2(KILO OHMS)=	100
C1(μ F)=	.01
C2(μ F)=	.00039
Fo(Hz)=	8059.12381676
Q=	1.97484176581
DOWN_1 PARAMETER	
R1(KILO OHMS)=	1.2
R2(KILO OHMS)=	100
C1(μ F)=	.056
C2(μ F)=	.0056
Fo(Hz)=	820.429903901
Q=	2.88675134595
RF(KILO OHMS)=	1.2
RD(KILO OHMS)=	1.2

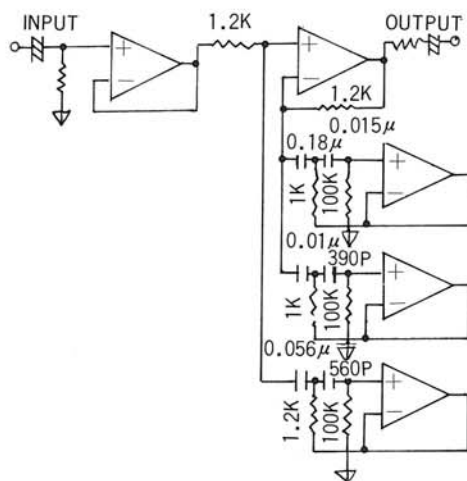


図-15 イコライザ回路

Fig. 15 Equalizeing circuit.

6. む す び

以上、車室内伝送周波数特性の特徴とこれを補正するイコライジングの方法について検討した結果を述べた。今回は、実験車として4ドアセダンを使用し、現在標準的な取付け位置になっている

フロントのインストルメンタルパネル両側の2個のスピーカと、リアパッケージトレイ両側の2個のスピーカについて検討したが、車室内の前席に注目した場合、これを4スピーカにした場合や、他の車形でも、ほぼ同等の考え方が適用できると考えられる。当社では、ここで報告した方法によるイコライザを搭載した、新しい車載用オーディオシステムを製品化し、好評を得ている。

なお、最適なイコライジングの決定には、まだ人間の聴感にたよるところが大きいと、聴感上の印象と相関の大きい物理量を求めることがこれからの課題である。また、本稿では、車室内音響特性の持つ問題点の中から、基本的かつ重要と思われる伝送周波数特性の問題を取上げたが、さらに高音質を求めるには、まだ多くの課題を残していることは明らかである。今後、車室内が良い音で、音楽の楽しめるリスニングルームになるよう、さらに努力を続けて行きたいと思う。

参 考 文 献

- 1) 伊藤 毅：音響工学、電気書院、pp. 119-21 (1977)
- 2) 加銅鉄平ほか：現代オーディオ技術 —基礎からリスニングルームまで—、オーム社、pp. 259-57 (1976)
- 3) 厨川 守：オーディオと音楽のための音質のすべて、誠文堂新光社、pp. 114-24 (1981)
- 4) 境 久雄：聴覚と音響心理、コロナ社、pp. 265-85 (1978)
- 5) 日科技連官能検査委員会：官能検査ハンドブック、日科技連、pp. 349-93 (1973)