

車載用ケルトン型ウーファ

Keltone Type Woofer for Automobile

本 島 顕⁽¹⁾ 伊 藤 辰 男⁽²⁾
Akira Motojima Tatuo Ito

要 旨

車載用スピーカシステムでは、一般に、100 Hz以下の低音域を再生するスピーカは、主にリアパッケージトレイ上に取付けている。これは、比較的口径の大きなスピーカが取付けられることや、トランクルームをバックキャビティに使用できるからである。ところがハッチバック車等トランクルームの無い車は、その構造上バッフル効果を十分取れないために、低音再生が非常にむずかしくなる。そこで、このハッチバック車等の荷物室内に簡単に設置できて、豊かな低音を再生するスピーカとして、車載用ケルトン型ウーファを開発した。本機は、ヘルムホルツ共振を利用することにより、小型、高能率で低歪率な車載用スーパーウーファを実現した。

A large loudspeaker is generally installed on the rear package tray in the vehicle for reproducing bass sound. But it is difficult in hatch back type car which has no trunkroom, to reproduce bass sound, because of its poor baffle effect.

To solve this problem we developed the Keltone type woofer designed to be easily installed in the rear space of the hatch back type car.

By using Helmholtz resonator, this unit realized compact size, high level of sound pressure and low distorted sound.

(1), (2) 第一開発部

1. はじめに

近年、コンパクトディスクプレーヤ等の車載用オーディオ機器の高音質化に伴い、スピーカシステムの広帯域、高忠実再生が望まれている。これに対し、車室内では、スピーカの設置上の制約から、低音域が十分に再生できないことが多い。この大きな原因として次の2点がある。

1) 大口径のスピーカを取付けられない。

一般に、速度 (V) で振動している振動板から放射される音響パワー (W_a) は、低音域で次式となる。

$$W_a \approx S \rho_0 C \frac{(ka)^2}{2} V^2 \quad [\text{W}] \quad (1)$$

$\rho_0 C$: 固有音響インピーダンス

S : 振動板面積

a : 振動板半径

$$k = \frac{\omega}{c}$$

c : 音速

すなわち、音響パワーは、振動板面積に比例する。また、スピーカの最低共振周波数は、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{M}} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

で示されるので、スピーカの口径が大きくなり等価質量 (M) が増せば、 f_0 が下がり、低音再生能力も向上する。

以上のように、音圧レベル、低音再生能力は、スピーカの口径が大きくなる程有利である。しかし、車室内のスペース等を考慮すると、口径20cmのスピーカが、取付けられる最大である。しかも取付けられる車は、限定される。

2) パッフル効果が不十分

車の構造及び、取付け方法の問題で、スピーカ口径に見あったパッフル効果が得難い。

これらに対し、トランクルームを有する車は、口径16cm~20cmのスピーカを、リアパッケージ

トレイに直接固定すれば、低音域も十分再生可能である。当社は既に、エアートランス方式を採用したスーパーウーファ (SB-6001) を開発し、好評を得ている。しかし、ハッチバック車等トランクルームの無い車は、トレイボードの強度不足や、密閉度が低いこと等から、低音再生には不利である。そこで、このハッチバック車等に、簡単に設置でき、豊かな低音を再生するスピーカシステムとして、車載用のケルトン型ウーファを開発した。本稿では、本機の基本設計、特徴および車室内特性について述べる。

2. 基本設計

2.1 原理

本機は基本的に、ヘルムホルツ共振器を利用したものである。ここで、ヘルムホルツ共振器のモデルとして、図-1のような、太さの異なる2つの短い管の結合を考えてみる。ただし、細い“1”の管のA端は開放、太い“2”の管のB端は閉じているものとする。いま、考える音の波長が、この管の寸法に較べて大である場合、“2”の部分の管内音圧は、次式となる。

$$P_2(t, x) = 2P_2 i \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

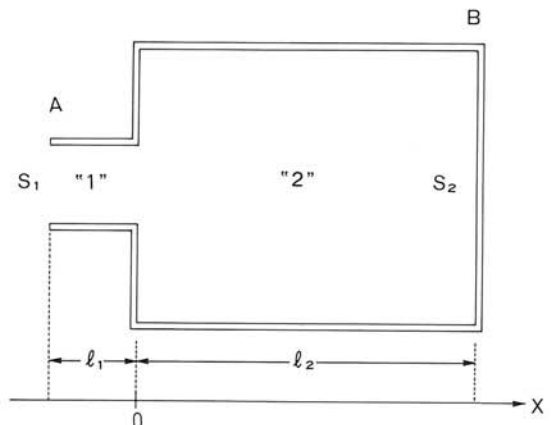


図-1 ヘルムホルツ共振器のモデル

Fig. 1 Model of Helmholtz resonator.

$$P_{2i} = \left| \frac{P_0}{2 \left(\cos kl_1 - \frac{S_2 kl_2}{S_1} \sin kl_1 \right)} \right| \quad (4)$$

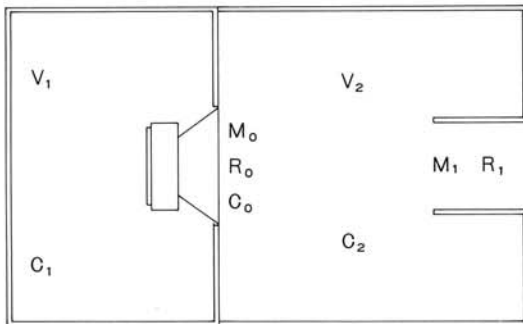
P_0 : 励起音圧

“2”の管内の音圧は、(4)式の分母が0になる周波数で、最大となる。これを、ヘルムホルツの共振といい、このような装置を、ヘルムホルツ共振器という。 l_1 も、十分短いと、 $\sin kl_1 = kl_1$ 、 $\cos kl_1 = 1$ とできるので、その共振周波数 f_0 は、(5)式となる。

$$f_0 \doteq \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S_1}{l_1 l_2 S_2}} = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S_1}{l_1 V_2}} \quad (5)$$

($V_2 = l_2 S_2$: 2の管の容積)

“1”の管は、開管であるので、 l_1 は実際の管長ではなくて、開口端の補正をした長さをとる必要がある。よって、実際には“1”の管がなくて、 S_1 の孔を開けた形でも共振を起こす。“2”の管は、その体積のみが関係するので、管状である必



- V_1 バックキャビティ
- V_2 フロントキャビティ
- C_1 バックキャビティコンプライアンス
- C_2 スピーカユニットコンプライアンス
- M_0 スピーカユニット等価質量
- R_0 スピーカユニット等価抵抗
- M_1 イナータンス
- R_1 放射抵抗

図-2(a) ケルトン型ウーファの概念図

Fig. 2(a) General idea of Kelton type woofer.

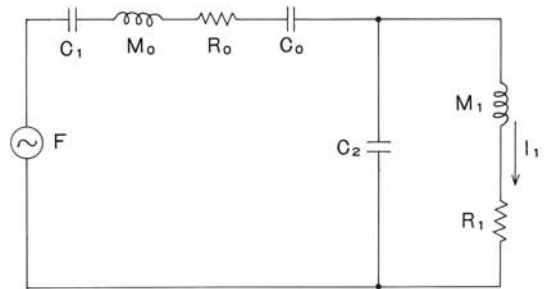


図-2(b) ケルトン型ウーファの等価回路

Fig. 2(b) Equivalent circuit of Kelton type woofer.

要はない。

2.2 シミュレーション

ケルトン型ウーファの設計にあたり、各パラメータの定数を決めるために、コンピュータシミュレーションを実施した。ケルトン型ウーファの概念図を図-2(a)に、等価回路を図-2(b)に示す。図-2(b)の R_1 を流れる電流 I_1 を求めれば、相対的な応答が得られる。個々のパラメータに関しては、次の条件のもとで求めた。

- 1) 全内容積は、車室内に設置する事を考慮し約10ℓとする。
- 2) ドライブスピーカは、口径12cmとする。
(内容積及び、断面積を考慮)

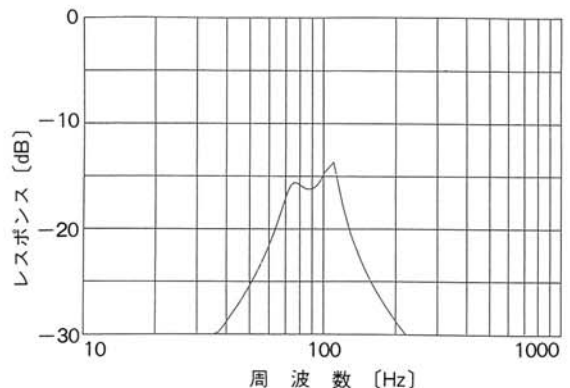


図-3 ケルトン型ウーファのシミュレーション結果

Fig. 3 Result of the simulation for Kelton type woofer.

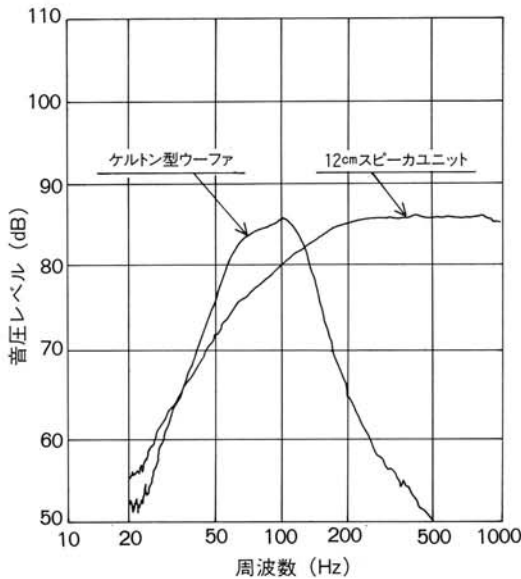


図-4 試作機と使用スピーカユニットの音圧周波数特性

Fig. 4 Frequency response of the trial model and the loud speaker.

3) 再生帯域（車室内における）は、40 Hz～100 Hzで、平坦な特性が得られるようにする。上記の条件を考慮したシミュレーションの結果の例を図-3に示す。

条件(3)については、後述の実車特性の章で説明するが、車室内は、放射空間が小さいために、低域の放射効率が高くなるので、図-3の特性でも条件を十分満たす。

このシミュレーションをもとに、実際に試作したモデルの無響室における音圧一周波数特性を、図-4に示す。これによると、シミュレーションと大きく異なる点は、ピーク点の応答の違いである。これは、シミュレーションでは、ダクト等の材質による摩擦抵抗を考慮していないためである。そこで、図-2(b)の放射抵抗 (R_1) に直列に摩擦抵抗を追加し再度シミュレーションした結果、図-4の特性に近づいた。

3. ケルトン型ウーファの特徴

3.1 高 能 率

前章で、ケルトン型ウーファの原理について説明したが、ケルトン型ウーファは、ヘルムホルツ共振を利用しているために、ある帯域で音圧レベルが高くなる。図-4に、実際の例として、使用したスピーカユニットと、試作したケルトン型ウーファの無響室特性を示す。これによれば、最大9 dB 近く能率が向上している。これはスピーカユニット単体（600 l 相当の密閉箱使用）で使用すれば、8 Wの入力を必要とするのに対して、本ウーファを使用すれば1 Wの入力で十分という高能率を実現できる。

3.2 フィルタ効果（低歪率）

3.2.1 原 理

ヘルムホルツ共振の原理でも説明したが、図-5に示すような管を音波が通過する場合、管の太さが異なるので、 ρC （固有音響インピーダンス）は変わらないが、一方から他に流れこむ流体の量が連続で、粒子速度は不連続になる。従って、AとBに挟まれた部分は、 ρC が異なる媒質のように働く。これは管の横断面積が、ちょうど ρC の逆数に相当するような関係が成り立ち、A-Bの部分の透過率が、周波数によって変化する。波長に比べA-Bの間隔が短かいような周波数の低い音は、当然この影響を受けないので、低域通過形のフィ

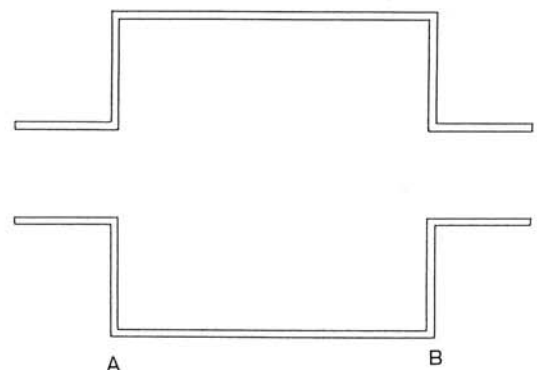


図-5 低域通過フィルタ

Fig. 5 Low pass filter.

	1	100.0Hz	6.323V	%
	2	200.0	.116	1.833
	3	300.0	.600	9.482
	4	400.0	.022	.355
	5	500.0	.182	2.881
	6	600.0	.021	.340
	7	700.0	.033	.529
	8	800.0	.019	.294
	9	900.0	.048	.757
	10	1000.0	.007	.104
	TOTAL HARMONIC			.641 10.144

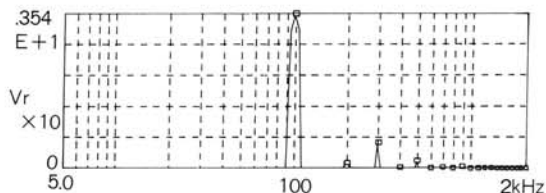


図-6(a) パワーアンプ出力の高調波歪

Fig. 6(a) Total harmonic distortion of the amplifier.

	1	100.0Hz	95.28dB SPL	%
	2	200.0	55.69	1.049
	3	300.0	66.02	3.445
	4	400.0	41.92	.215
	5	500.0	65.51	3.249
	6	600.0	42.00	.217
	7	700.0	51.35	.636
	8	800.0	47.37	.402
	9	900.0	45.31	.317
	10	1000.0	48.84	.476
	TOTAL HARMONIC			69.20 4.967

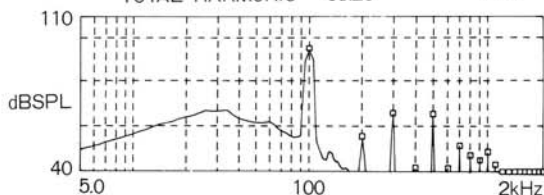


図-6(b) ケルトン型ウーファ出力の高調波歪

Fig. 6(b) Total harmonic distortion of Kelton type woofer.

ルタとなる。

3. 2. 2 フィルタ効果の利点

フィルタ効果の利点は、主にパワーアンプの高調波歪を通しにくいことである。実際の例として

車載用 パワーアンプを用い、100 Hz の正弦波を 10W 相当出力した時のアンプ出力、およびウーファ出力の全高調波歪率を図-6(a), (b) に示す。なお、これは極端な例として、パワーアンプの電源電圧を下げて、全高調波歪率を 10% として設定したも

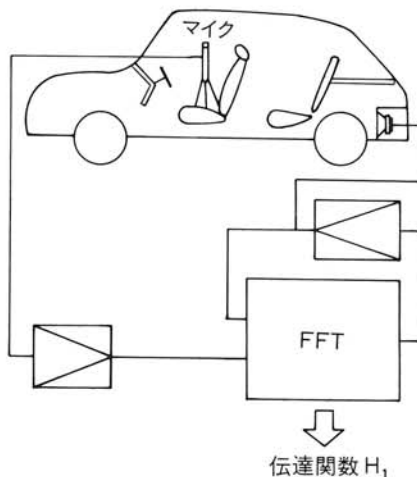
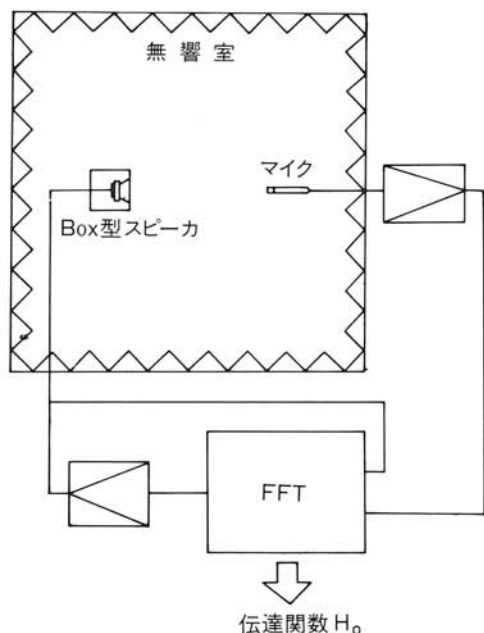
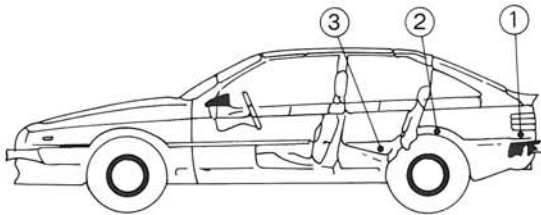


図-7 伝達関数の測定ブロック図

Fig. 7 Block diagram of measuring transfer function.



NO. ①：リアゲート内最後部
NO. ②：リアゲート内最前部
NO. ③：リアシート上
車種：ピアッツァ・ネロ XS 61年式

図-8 伝達関数測定スピーカ設置場所

Fig. 8 Location of the loud speaker for measuring transfer function.

ので、ウーファ出力の全高調波歪率を測定すると、5%となり、フィルタ効果（歪の改善）を確認した。

一般的な車載用の小型スーパーウーファは、小口径のため能率が低い。このため歪の少ない豊かな低音を得るためには、大出力の専用アンプを必要とする。本機であれば、能率が高いことと、フィルタ効果があるために、比較的出力の小さなアンプでも、歪の少ない低音を得ることができる。

4. 実車特性

4.1 伝達関数の測定

本機は、ハッチバック車等に、簡単に設置でき

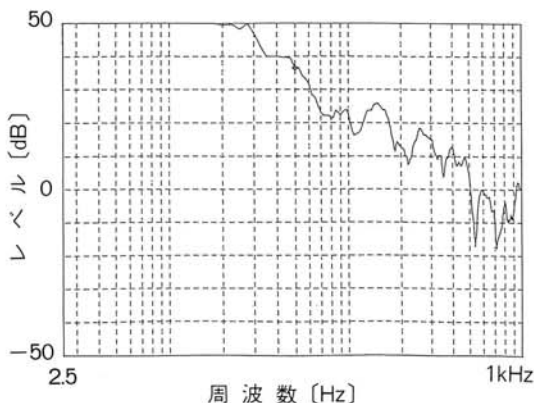


図-9 設置No.①の伝達関数（振幅特性）

Fig. 9 Transfer function No. ①

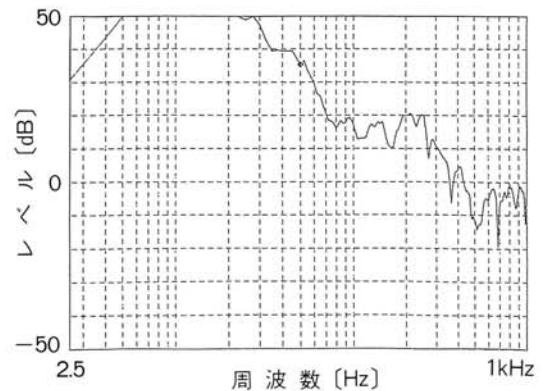


図-10 設置No.②の伝達関数（振幅特性）

Fig. 10 Transfer function No. ②

て、低音再生ができることを開発目的にしている。実車のどの場所に設置すれば最良の特性が得られるかを、実車で伝達関数を測定することで検討した。図-7に伝達関数の測定ブロックを示す。

方法は、次の通りである。

- 1) ある小型のボックス型スピーカを用い、無響室での伝達関数 (H_0) を測定する。
- 2) 同一スピーカを実車に設置し、マイクまでの伝達関数 (H_1) を測定する。
- 3) H_1 を H_0 でイコライズすることで、スピーカの特性を除去し、実車の設置場所からマイクまでの伝達関数を得る。

図-9～図-11に伝達関数の測定例を示す。スピーカの設置場所は図-8の通り。これは、本機の設

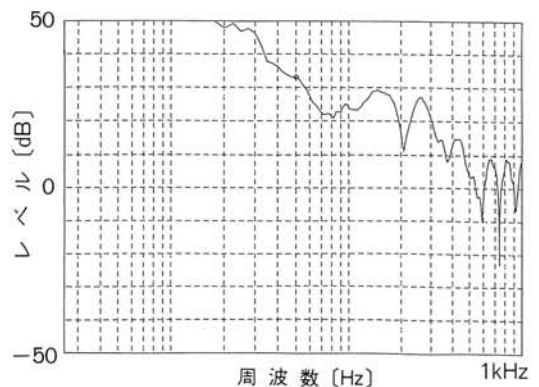


図-11 設置No.③の伝達関数（振幅特性）

Fig. 11 Transfer function No. ③

表-1 伝達関数比較値

(No. 1を0 dBとした場合)

(単位: dB)

周波数[Hz] 設置場所	40	50	60	70	80	90	100
No. 1	0	0	0	0	0	0	0
No. 2	-0.7	-1.2	-1.9	-2.9	-5.3	-4.4	-5.6
No. 3	-3.8	-3.4	-4.0	-0.8	0	0	+1.4

置可能な場所が、荷物室内、リアシート上に限られるために、この3カ所を選んだ。

表-1に、設置場所①の伝達関数の40 Hz～100 Hzの各ポイントを0 dBとした場合の各設置場所②、③の伝達関数の値を示す。これにより、最後部に設置した①の場合が、最も放射効率が高いことがわかる。これは、最後部に設置した場合、放射部分が壁に囲まれ、低域の放射インピーダンスが高くなることに起因する。また、この伝達関数の逆特性のウーファを使用すれば、マイク位置で平坦な特性を得ることが予測される。

4.2 位相干渉

本機は、基本的に3Dウーファとして使用する。3Dウーファを既設スピーカシステムに接続する

場合、位相干渉が問題になる。そこで、実際の例として、ハッチバック車の、リアパッケージトレイ上のボックス型スピーカ(Z-301)と、荷物室内に設置した本機との位相干渉を調べた。図-12に、運転席における、Z-301に対する本機の相対位相特性を示す。これによれば、本機がZ-301に比較して、100 Hzで175度遅れている。すなわち、同相で鳴らした場合、運転席で低音が打ち消されることになり、本機の位相を反転させた方が音のつながりが良くなる。図-13に、Z-301と本機の位相を反転させて、接続した場合の車室内音圧周波数特性を示す。このように、3Dウーファを既設スピーカシステムに接続する場合は、位相合わせが、重要である。従って、専用アンプで駆動する場合は、位相切替スイッチ、ネットワークで接

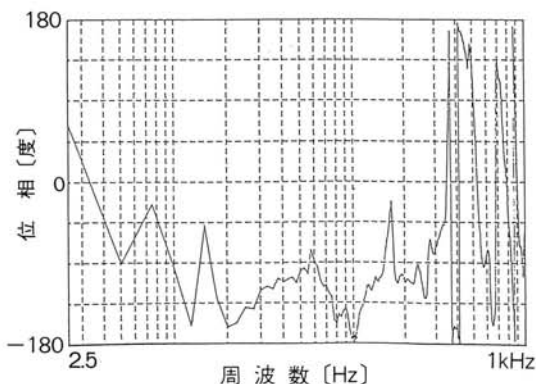


図-12 リアパッケージトレイ上のZ-301に対する本機の相対位相特性

Fig. 12 Relative phase characteristics of Z-301 and Kelton type woofer.

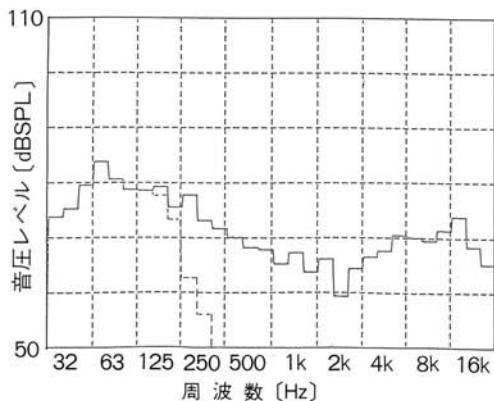


図-13 ケルトン型ウーファとZ-301の車室内音圧周波数特性

Fig. 13 Frequency response in a vehicle of Z-301 and Kelton type woofer.

続する場合は、既設スピーカシステムの低域をカットし、ウーファとの位相干渉を防ぐ等の工夫をしている。なお、本機の写真を89頁に示す。

5. む す び

以上、車載用ケルトン型ウーファについて説明した。本機により、今まで低音再生が困難であったハッチバック車等でも、豊かな低音再生が可能となった。また、その取付性の良さは、従来の車載用スーパーウーファには無かったもので、設置場所も、荷物室内としているため、狭い車室内を

有効に活用できる。なお今回はハッチバック車等トランクルームの無い車を対象に開発したが本機はその構造上、ダクトの開口部を車室内に設けるだけで良いので、トランクルームを有する車にも展開したい。

参 考 文 献

- 1) 小橋 豊：音と音波、裳華房（1979）
- 2) 伊藤 毅：音響工学、電気書院（1977）
- 3) H. F. Olson 著、平岡正徳訳：音楽工学、誠文堂新光社（1969）