

## 側方スピーカを付加したステレオ音場の解析

Analysis of Stereophonic Sound Field  
with a Side Loudspeaker藤田 尚<sup>(1)</sup>      若松 和夫<sup>(2)</sup>      加藤 茂樹<sup>(3)</sup>  
Takashi Fujita      Kazuo Wakamatsu      Shigeki Kato本島 顕<sup>(4)</sup>      長野 武<sup>(5)</sup>  
Akira Motojima      Takeshi Chono

## 要 旨

2チャンネルステレオ再生において、聴取条件によって、最良のステレオ効果が得られない場合がある。このようなステレオ効果の減少を補償する目的で、ステレオ音場に付加した側方スピーカの影響について検討した。

左右スピーカと側方スピーカのレベル差と音像の定位方向について、各スピーカからの音波の合成波面により理論値を求め、聴感試験により確認した。さらに、 $\Delta P$ - $\Delta\phi$ 法により、音像の質についても考察を加え、音場の補償に有効なレベル差の範囲を明らかにしている。

It is impossible to get the best stereophonic sound except standard listening position in 2-channel stereophonic reproduction. In order to compensate the reduction of stereophonic effect, we researched the effect of a side loudspeaker added in stereophonic sound field.

We calculated the relation between the direction of sound image and the level difference of each loudspeaker using mixed wave surfaces from three loudspeakers, and confirmed it through aural experiment.

This report describes the quality of sound image by  $\Delta P$ - $\Delta\phi$  method.

The result makes effective range of level difference for compensation of sound field clear.

(1) 上野学園大学

(2)~(5) 富士通テン株式会社第二技術部

## 1. ま え が き

一般の2チャンネルステレオ信号は、適当な音響条件を備えた室（いわゆるリスニングルーム）の標準的な聴取位置<sup>脚注 1)</sup>で受聴する場合、最良のステレオ効果<sup>脚注 2)</sup>が得られるよう作られている。したがって、所定の条件を満たさない場合、音像がそれぞれ決められた方向に定位しなかったり、音場の広がり感<sup>脚注 3)</sup>が得られず、ステレオ効果が損なわれる。特に車室内におけるステレオ再生では、聴取位置が上記の場合と大きく異なり、これらに起因するステレオ音場の歪、および音質の欠陥が生じている。

このようなステレオ効果の減少を補償するには、一般に左右2個のスピーカに加え、側方に補助スピーカを付加することが行われている。側方スピーカを使用して、ステレオ音場を補償する効果を与えるには、もとの音場に対する側方スピーカの影響を定量的に知る必要がある。しかし、これまで、音場の補償を目的として、2チャンネルステレオ音場に付加した側方スピーカの影響を調査した例は、ほとんどなかった。

本稿では、左右2個のスピーカに加え、側方に1個のスピーカを加えた場合のステレオ音場につ

いての実験的、理論的検討結果を報告する。

## 2. 実験条件の検討

この実験では、車載用スピーカシステムへの応用を考慮し、実験スタジオ内で聴感テストを行うことにしたが、その妥当性を確認するため、3個のスピーカによる検討に先立って、従来から行われている水面内における2個のスピーカによる方向定位について再検討を行った。

### 2.1 水平面内における2個のスピーカによる方向定位

水平面内における2個のスピーカによる方向定位については、過去に多くの研究報告がある。例えば牧田<sup>1)</sup>は、両スピーカから放射される音波によって形成される合成波面の法線方向を、自由音場について計算すれば、音像の定位方向を与えるという仮説をたて、実験的に検証している。

これによれば、通常標準聴取条件に用いられている、左右スピーカが聴取者の正面方向より $\pm 30^\circ$ の方向で等距離( $R_1 = R_2$ )の場合は、等位相面の法線方向は、正面方向より右回りに測った角度 $\theta$ として次式で表される。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1-\gamma}{3(1+\gamma)} \quad (1)$$

$\gamma$  : 右スピーカを基準とした左スピーカの信号の大きさ

また、音像定位の方向と質についての解析は、 $\Delta P - \Delta \phi$ 理論がある。これは、聴取者の左右の外耳道入口における信号の音圧レベル差( $\Delta P$ )および位相差( $\Delta \phi$ )の相互関係によって、音像の定位方向と質を、自然な音場における実音源の方向と質と比較し、自然度をパラメータとして解析するものである。

この方法は、スピーカの数に関係なく聴取者の両耳の音圧レベル差と位相差のみによって解析できるという利点があり、後述の3個のスピーカに

脚注 1) 標準的な聴取位置

左右2個のスピーカ間の距離を底辺とする正三角形の頂点、あるいはそのやや後方。

脚注 2) ステレオ効果

主に音像の方向定位とひろがり感で構成される。

脚注 3) 音像

立場の中に知覚される見かけ上の音源。

脚注 4) 方向定位

音源がどの方向に知覚されるかをいう。

脚注 5) ひろがり感

聴取者が広い空間にいるように知覚する感覚をいう。

より方向定位と質の解析に用いることにした。

ここでは、まず、(1)式で示される2個のスピーカによるレベル差と方向定位について、実験スタジオの機能の検証もかね、実験的な再検討を行った結果について述べる。

## 2.2 実験条件および実験方法<sup>2)</sup>

図-1に示すように、実験スタジオ内に2個のスピーカを被験者の正面から $\pm 30^\circ$ の方向で、それぞれ1.5mの等距離に配置する。スピーカは16cmフルレンジユニットを使用しており、実験用として十分な左右バランスその他の性能を有する。

試験信号として、425 Hz、1200 Hz、3400 Hz

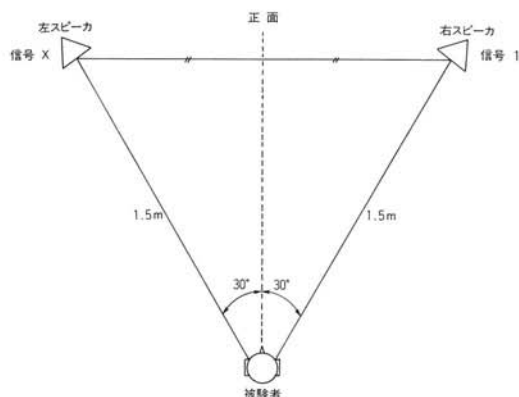


図-1 スピーカの配置  
Fig. 1 Loudspeakers arrangement.

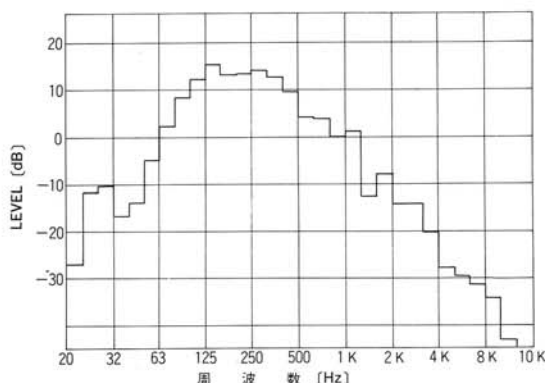


図-2 使用プログラム(男声アナウンス)のスペクトル  
Fig. 2 Spectrum of the program (male voice).

を中心周波数とするバンドノイズ、および音声(男声アナウンス)を用い、聴取音圧レベルは約70<sup>脚注6)</sup> dBとした。このうち、バンドノイズは、ホワイトノイズを $-75$  dB/octの遮断特性を有するバンドパスフィルタで帯域制限したものである。また、男声アナウンスは、FM放送より収録した定時ニュースで、声量、声質共に安定しており、試験用として適している。図-2にその周波数スペクトルを示す。

実験は、各試験信号および各被験者毎に、音像が左右スピーカの中央に定位することを確認してから始める。まず、右スピーカのレベルを基準として、左スピーカのレベルを調整し、音像を左右スピーカの中央に定位させる。次に、左右スピーカの音圧レベル差をランダムに変化させて提示し、被験者はこれを聴き、常に音像の方向を直視して指示棒により音の到来方向を指示する。なお、被験者は正常な聴覚を有する20才代の男子4名である。

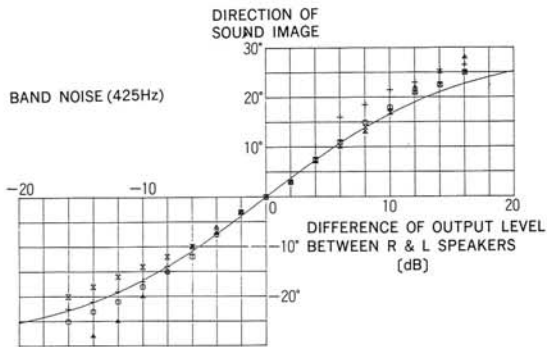
## 2.3 実験結果

試験信号として、バンドノイズを使用した場合、および男声アナウンスを使用した場合の実験結果を図-3に示す。グラフ上の実線は(1)式を用いて計算した理論値である。横軸は左右スピーカ間のレベル差、縦軸は合成波面の進行方向を示す。

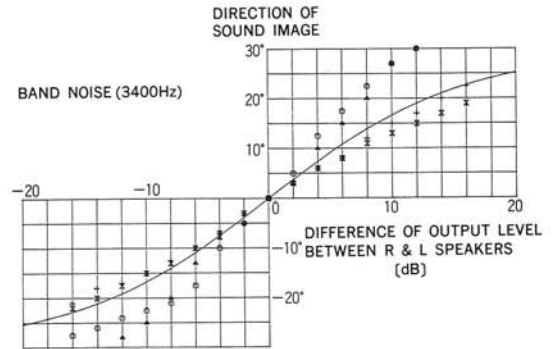
この結果を見ると、バンドノイズを試験信号として用いた場合、多少のバラツキはあるが、理論値によく合っていることがわかる。同様に男声アナウンスの場合も理論値とよく合うことがわかった。

以上より、この実験スタジオ内での諸実験については十分一般性があると考え、また試験信号としても、一般プログラムのモデルとして、男声ア

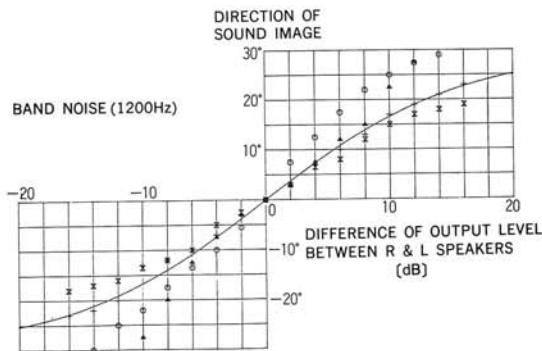
脚注6) 0 dB:  $2 \times 10^{-4}$   $\mu$ bar



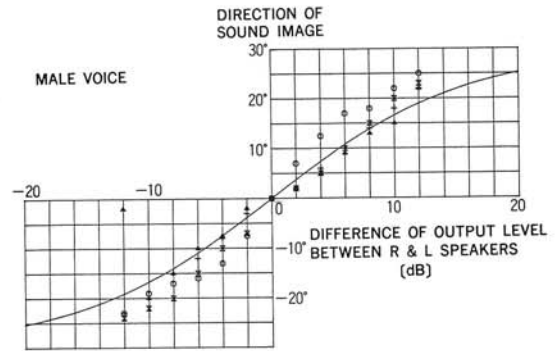
(a) BAND NOISE (425 Hz) を使用した場合



(c) BAND NOISE (3400 Hz) を使用した場合



(b) BAND NOISE (1200 Hz) を使用した場合



(d) 男声アナウンスを使用した場合

図-3 左右スピーカ間のレベル差と音像方向との関係

Fig. 3 Relation between difference of output level and direction of sound image.

ナウンスを使用し、以後の実験を進めることにした。

### 3. 水平面内における3個のスピーカによる方向定位

2チャンネルステレオ音場へ側方スピーカを付加することによって、次のような効果が期待される。

- 1) 非対称ステレオ聴取における、音場のバランスを補正する。
- 2) 聴感上の周波数特性のバランスを整える。
- 3) ステレオ効果の「広がり感」の拡大を図る。

従来より、このようなステレオ効果の改善を目的として側方スピーカを用いた例は多数見かけ

る。しかし、それらの設定条件は、直観的、経験的なものが多く、必ずしも目的とする効果を得ている例ばかりではない。したがって、ステレオ音場を効果的に補償する目的として、側方スピーカを付加するには、側方スピーカのステレオ音場に対する影響を定量的に知る必要がある。

側方スピーカの影響を調べるためのパラメータは、左右スピーカと側方スピーカ間のレベル差と位相差がある。これらは、音像の方向定位に複雑に影響をおよぼすが、実際の使用条件を考えると側方スピーカと聴取者との距離は、左右の近い方のスピーカのそれとほぼ同様であり、特定の処理を除くと、レベル差による影響が主であるといえる。以上より、ここではレベル差による方向定位

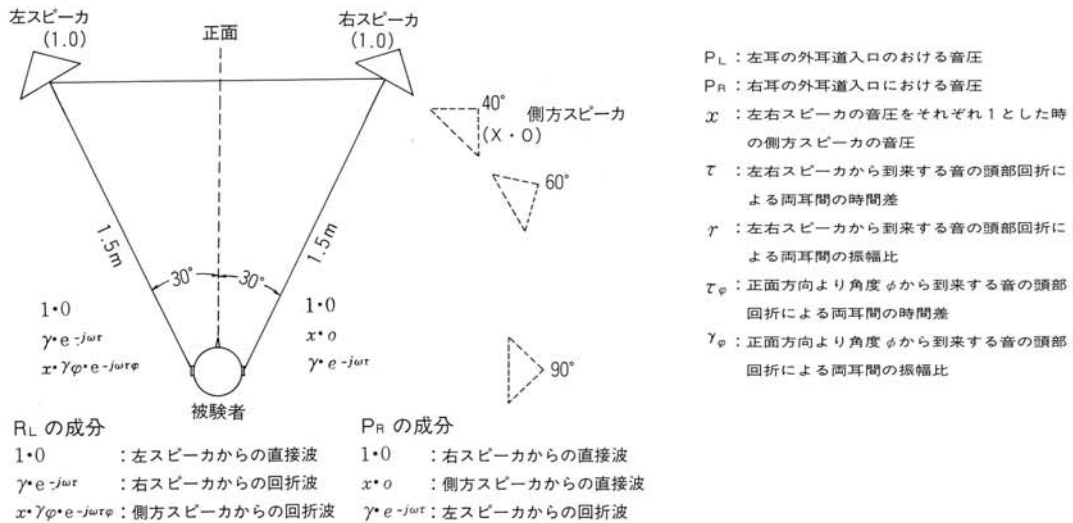


図-4 スピーカ配置および各パラメータ

Fig. 4 Loudspeakers arrangement and parameters.

について検討する。

### 3.1 実験条件および、実験方法

図-4に示すように、実験スタジオ内に2個のスピーカを被験者の正面から±30°の方向に配置し、さらに右スピーカの右側に1個のスピーカを配置する。この側方スピーカの設置角度は、被験者の正面より右へ45°、60°、および90°の3点とした。また、被験者と各スピーカ間の距離は、それぞれ1.5mの等距離である。試験用信号は、前述の男声アナウンスである。

実験は、2個のスピーカによる実験と同様に、まず、各被験者毎に音像が左右スピーカの中央へ定位するように、左右スピーカの音圧レベルを調整する。次に、右スピーカのレベルを基準として、側方スピーカのレベルをランダムに変化させて提示する。音像の指示方法、および被験者は、前述と同様である。

### 3.2 実験結果

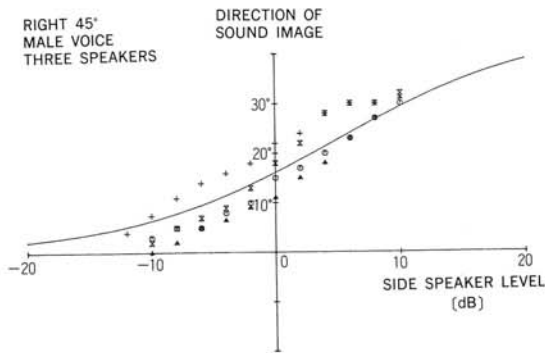
設置角度45°、60°、90°の3つの場合の結果を、図-5に示す。実線は、(1)式と同様に波面の式より計算した理論値である。

この結果から、側方スピーカが正面定位に与える影響を知ることができる。これらの図から、側方スピーカレベルと方向定位には、相関関係が認められ理論値にも良くあっている。正面定位に影響を与え出す側方スピーカレベルは、表-1に示すとおりである。

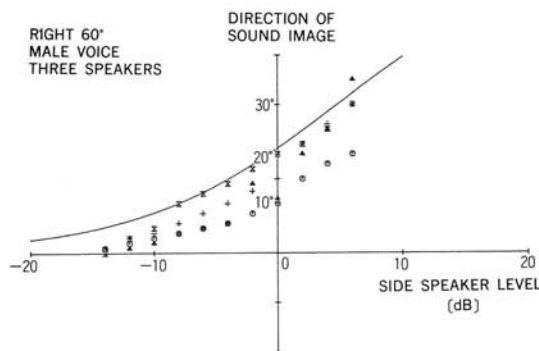
### 3.3 音像の質

次に、前述の $\Delta P$ - $\Delta\phi$ 理論を用いて、側方スピーカを付加した場合の音像の質について解析する。いま、聴取者に対して、ある方向に音源があるとき、両耳の外耳道入口では音圧のレベル差 $\Delta P$ と位相差 $\Delta\phi$ を生じるが、 $\Delta P$ 、 $\Delta\phi$ を直交座標で表した平面を考えると、音源の方向が聴取者の右から左へ動くに従って $\Delta P$ 、 $\Delta\phi$ は原点を通る逆S字を描く(図-6)。この軌跡は、500Hzの場合であるが、図-7に示すメルテンスのグラフを用いると、他の周波数における軌跡も描くことができる。一方、ステレオ再生音を受聴する場合は、必ずしもこの軌跡上にのるとは限らない。この $\Delta P$ - $\Delta\phi$ と音像の質の関係についての研究が中林ら<sup>4)</sup>によって報告されている。(図-8)

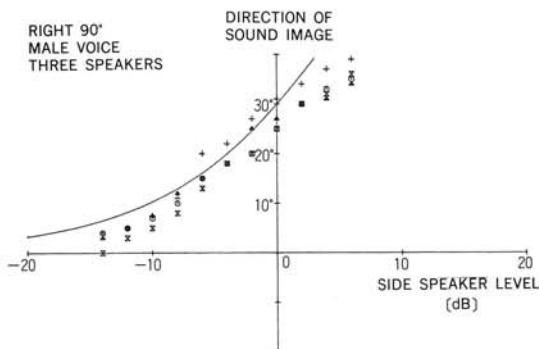
筆者らは、左右2個のスピーカに側方スピーカを付加した場合の $\Delta P$ 、 $\Delta\phi$ を実際に計算し、上記の音質評価曲線上に写像することによって、3個



(a) 右45°の位置に側方スピーカを付加した場合



(b) 右60°の位置に側方スピーカを付加した場合



(c) 右90°の位置に側方スピーカを付加した場合

図-5 側方スピーカレベルと音像方向の関係

Fig. 5 Relation between side loudspeaker level and direction of sound image.

のスピーカによる音像の質を考察した。以下にその計算方法を示す。

被験者と、3個のスピーカが図-4のように配置された場合、信号として左右スピーカにそれぞれ1.0、側方スピーカにX.0が供給されたとする。Xは、左右スピーカ各々に対する、側方スピーカの信号の振幅比、0は信号間に位相差がないことを表す。

さて、被験者の正面方向より角度 $\varphi$ の音源から到来する音波の頭部回折による減衰係数を $\gamma_\varphi$ 、両耳間の到達時間差を $\tau_\varphi$ とすると、3個のスピーカによる左右の外耳道入口における音圧、 $P_L$ 、 $P_R$ は次式で得られる。

表-1 定位に影響を与え始める側方スピーカの音圧

| 側方スピーカ設置角度<br>〔度〕 | 45 | 60  | 90  |
|-------------------|----|-----|-----|
| 側方スピーカレベル<br>〔dB〕 | -8 | -10 | -12 |

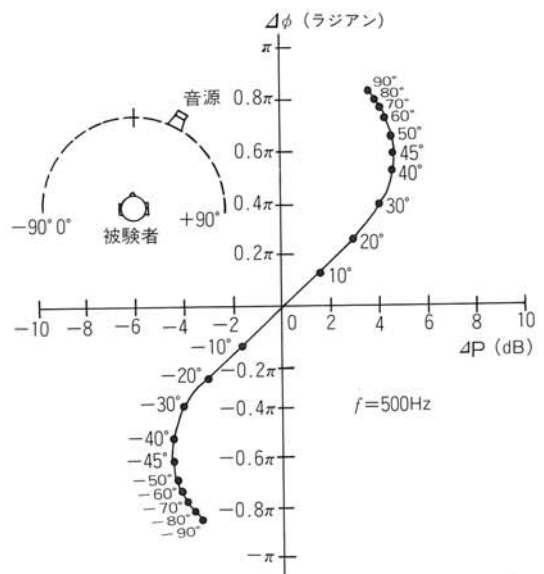
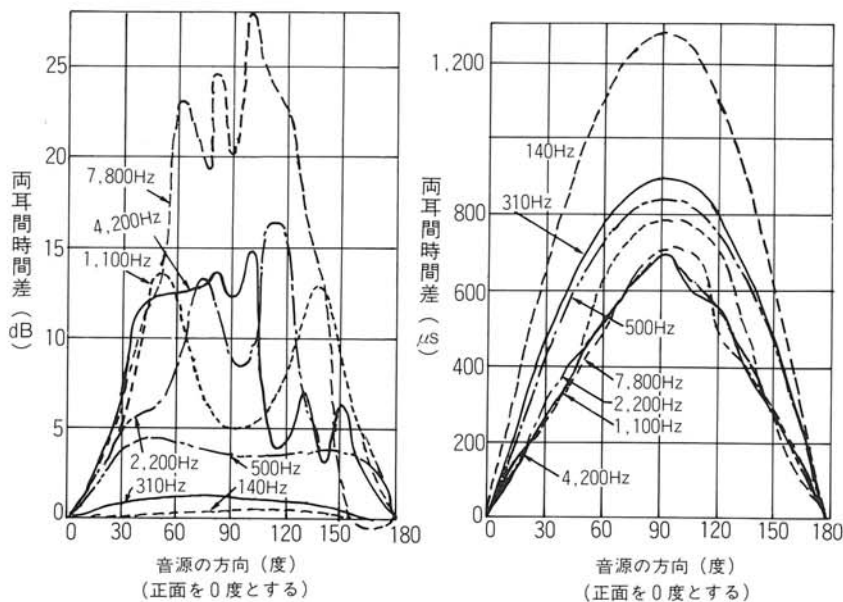


図-6 実音源による $\Delta P$ - $\Delta\phi$

Fig. 6 The locus of the point  $(\Delta P, \Delta\phi)$  made by a real sound source.

図-7 周波数による  $\Delta P - \Delta \phi$ Fig. 7 The locus of the point  $(\Delta P, \Delta \phi)$  made by frequency response.

$$P_L = (1 + \gamma e^{-j\omega\tau} + x\gamma_\phi e^{-j\omega\tau\phi}) P_0 \quad (2)$$

$$P_R = (1 + x + \gamma e^{-j\omega\tau}) P_0 \quad (3)$$

$P_0$  : 基準音圧

よって  $\Delta P$ 、 $\Delta \phi$  は次のような形になる。

$$\begin{aligned} \Delta P &= 20 \log |P_L / P_R| \\ &= 10 \log \frac{1 + \gamma^2 + x^2 \gamma_\phi^2 + 2[\gamma \cos \omega\tau + x\gamma_\phi \cdot \cos \omega\tau_\phi + x\gamma\gamma_\phi \sin \omega(\tau - \tau_\phi)]}{1 + x^2 + \gamma^2 + 2(x + \gamma \cos \omega\tau + x\gamma\gamma_\phi \cos \omega(\tau - \tau_\phi))} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\Delta \phi = \text{Arg}(R_L) - \text{Arg}(P_R)$$

$$\begin{aligned} &= \tan^{-1} \frac{x\gamma \sin \omega\tau + x\gamma_\phi (1+x) \sin \omega\tau_\phi}{1 + x + \gamma^2 + \gamma(2+x) \cos \omega\tau + x\gamma_\phi \cdot \cos \omega\tau_\phi} \\ &\quad \frac{\sin \omega\tau_\phi + x\gamma\gamma_\phi \sin \omega(\tau - \tau_\phi)}{(1+x) \cos \omega\tau_\phi + x\gamma\gamma_\phi \cos(\omega\tau - \omega\tau_\phi)} \quad (5) \end{aligned}$$

$\phi = 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  の場合を (4) 式、(5) 式を用いて、音質評価曲線にコンピュータシミュレーションした結果が図-9である。

これによると、側方スピーカのレベルが低い傾

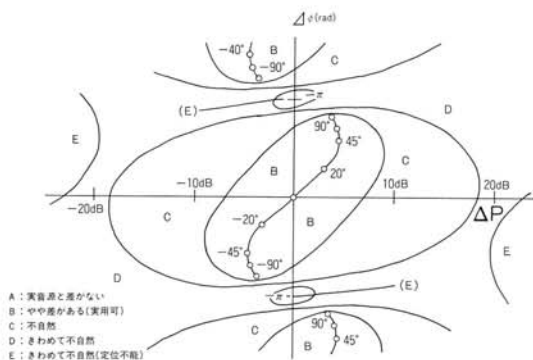
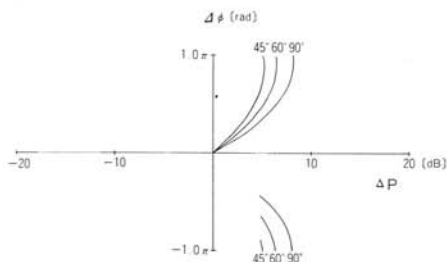


図-8 音質評価曲線

Fig. 8 The result of the subjective evaluation of a sound image represented on the  $\Delta P - \Delta \phi$  plane.図-9 側方スピーカを付加した場合のステレオ音像による  $\Delta P - \Delta \phi$ Fig. 9 The locus of the point  $(\Delta P, \Delta \phi)$  made by three loudspeakers.

域では、評価 B であり、音像は「やや差がある（実用可）」と言う評価を得るが、 $45^\circ$  設置の場合側方スピーカのレベルを、13 dB 以上にしたとき評価 C、D、つまり「不自然」、「きわめて不自然」という評価を得る。 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  の場合は、それぞれ表-2 のようになる。以上の結果をまとめると、表-2 で示すレベル以下では、側方にスピーカ付加した場合でも、自然な音像が得られることが期待できる。

#### 4. 水平面内でない 3 個のスピーカによる方向定位

前節では、側方スピーカを左右スピーカと同一平面上に設置した場合の方向定位について述べた。しかし、ふつう車室内において側方スピーカを設置する場合、このような配置をとることは、実用上、困難なことが多い。したがって、側方スピーカが、左右スピーカと同一平面上にない場合の方向定位についても検討しておく必要がある。

はじめに、側方スピーカの位置を、被験者の正面より上方、および下方に設置する場合について概略の検討を行い、次に、もっとも一般的な場合

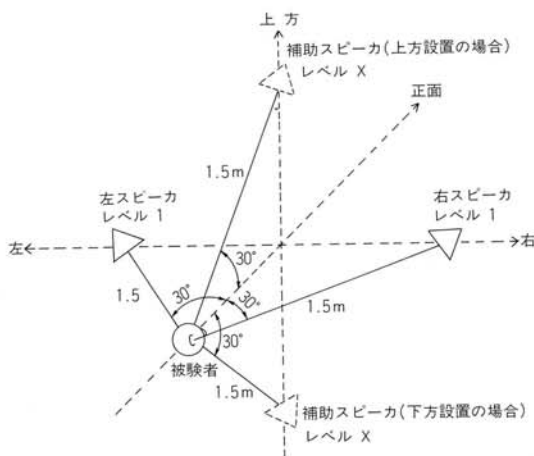


図-10 上または下方に補助スピーカを付加した場合のスピーカ配置

Fig. 10 Loudspeakers arrangement.

を考慮し、被験者の右側方で水平面より下方に設置した場合について、実験を行った。

#### 4.1 実験条件および実験方法

##### 4.1.1 側方スピーカを上方または下方に設置する場合

図-10に示すように、上方設置では、被験者の正面より上方 $30^\circ$ に、下方設置では、下方 $30^\circ$ に側方スピーカを設置した。その他の実験条件および実験方法は、水平面内における方向定位実験と同様である。

##### 4.1.2 側方スピーカを右側方で水平面より下方に設置する場合

図-11に示すように、被験者の正面より右へ $45^\circ$  水平面より下方 $30^\circ$ に側方スピーカを設置した。ここでは、音の到来方向を、被験者の正面より水平方向の角度と垂直方向の角度について、それぞれ指示する方法をとった。その他の実験条件および実験方法は、水平面内における方向定位実験と同様である。

#### 4.2 実験結果

##### 4.2.1

図-10に示す位置に補助スピーカを付加した場合の実験結果を図-12に示す。実線は波面の式より算出した理論値である。

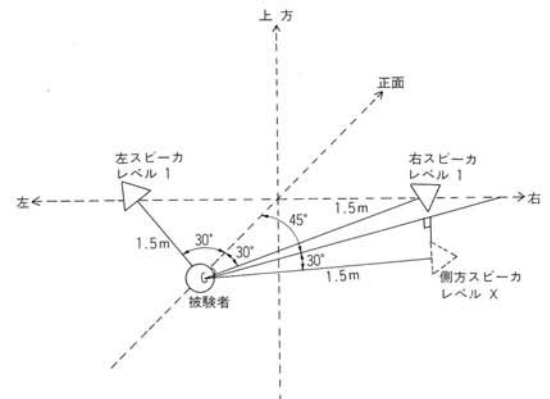
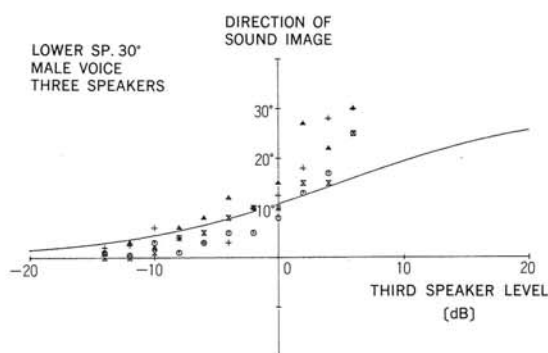
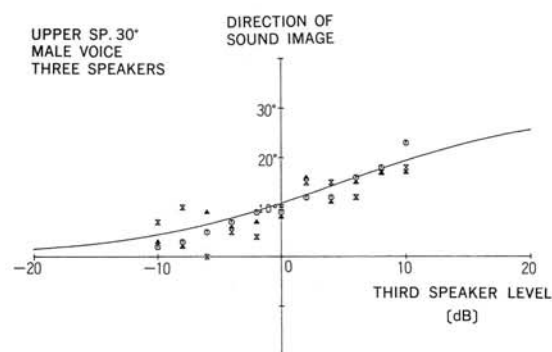


図-11 右 $45^\circ$ 、下 $30^\circ$ の位置に側方スピーカを付加した場合のスピーカ配置

Fig. 11 Loudspeakers arrangement.



(a) 下方向30°の位置に補助スピーカを付加した場合



(b) 上方向30°の位置に補助スピーカを付加した場合

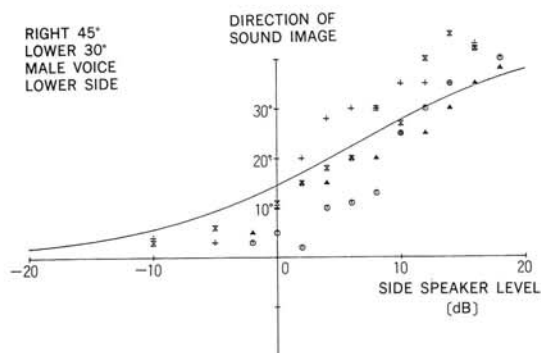
図-12 補助スピーカレベルと音像の方向の関係

Fig. 12 Relation between third loudspeaker level and direction of sound image.

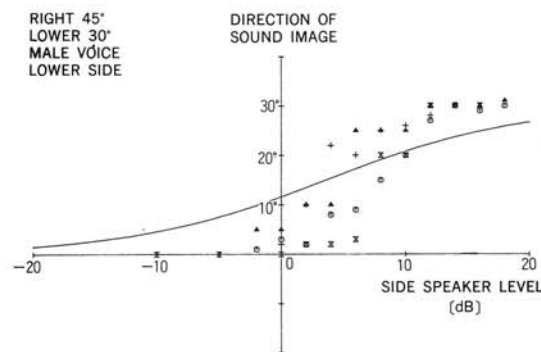
上方向設置の場合、方向感是不明瞭で、音像は広がって感じられた。しかも影響を与え始める補助スピーカのレベルは、右スピーカを基準とすると-10 dBで、比較的低いレベルにおいて、音像定位を不明確にしている。下方向設置では、音像定位はやや乱れるが、音像のボケは上方向設置の場合より少なく方向感もそれほど不明瞭ではない。定位に影響を与え始めるのは、-10 dB位からである。

#### 4. 2. 2

図-11に示す位置に側方スピーカを付加した場合の実験結果を図-13に示す。図-13(a)はレベル差に対する側方向の定位角度、図-13(b)は、レベル



(a) 側方向定位角度



(b) 下方向定位角度

図-13 側方スピーカ(右45°、下方30°)レベルと音像の方向の関係

Fig. 13 Relation between side loudspeaker (right 45°, lower 30°) level and direction of sound image.

差に対する下方向定位角度である。実線は理論値である。図-13によれば、同じレベル差を与えても、被験者によって側方向最大20°、下方向では最大22°の判定のバラツキが見られる。このバラツキが顕著になるのは、側方で2~12 dB、下方で2~10 dBである。この間は、音像の幅が広がり、方向感がうすれたため、判定にバラツキが出たものと思われる。

次にレベル差をパラメータとした側方対下方の定位角度のグラフを図-14に示す。このグラフによると、斜め下に補助スピーカを設置した場合には、比較的早く音像のボケを生ずるが、ステレオ

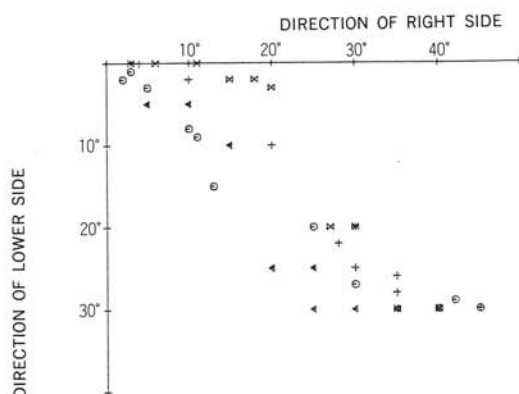


図-14 レベル差による側方対下方の定位方向

Fig. 14 Direction of sound image by level difference (right v. s. lower).

音場固有の性質である音像が上方に移動する現象は全くなく、水平面内に音像を保つ機能を持つことがわかる。

## 5. 考察

2チャンネルステレオ音場に付加した側方スピーカの影響について大別すると、

- 1) もとのステレオ音場の音像定位に、ほとんど影響を与えない場合。
- 2) もとのステレオ音場の音像を、その質を保ちながら制御できる場合。
- 3) もとのステレオ音場の音像定位が、不明確となる場合。

ここでは、以上の実験結果を上記の3項目についてまとめてみることにした。

### 5.1 もとの音像定位にほとんど影響を与えないレベル。

音像定位の変移が、5°以内である各々の位置における側方スピーカのレベルをまとめたものを表-1に示す。この領域は、ステレオ放送伝送受信基準の左右レベル差2.5 dBに相当する<sup>5)</sup>。したがって側方スピーカがもとの音像定位にほとんど影響を与えない場合の、左右スピーカレベルと側方ス

表-2 自然な音像を得るための側方スピーカの限界レベルと定位方向

| 側方スピーカ設置角度<br>〔度〕 | 45 | 60 | 90 |
|-------------------|----|----|----|
| 側方スピーカレベル<br>〔dB〕 | 13 | 8  | 2  |
| 音像定位方向<br>〔度〕     | 32 | 33 | 34 |

ピーカレベルの関係を示していると言える。

この点から考えると、側方スピーカを使用して、もとの音場バランスを保ちながら、聴感上の周波数特性のバランスを整えるなどの効果を与える手法として、ここで得られたレベル関係を取り上げておく必要がある。

### 5.2 もとの音像を、その質を保ちながら制御できるレベル

ステレオ音の効果として、音像方向定位はもっとも重要な性質であるが、その音像の自然性についても同様、最終の音質を支配する要因である。そこで、 $\Delta P - \Delta \phi$ 理論を用い、ステレオ音場評価の一つの大きな要因である音像の質が、側方スピーカ付加時にどのような特性を持つかについて検討した。図-9のシミュレーション結果より評価Bから、評価Cへの移行時の側方スピーカレベルを求め、その時の定位方向を計算によって求めたものをまとめたのが、表-2である。これを見ると自然な音像を得るための限界レベルにおける定位方向は、側方スピーカ設置角度によらず、30°付近となっている。このことより、以下の事が考えられる。左右スピーカの作る音像に側方スピーカを付加したとき、自然な音像が得られるのは、左右スピーカの開き角を $\theta$ とすると、定位角度 $\varphi$ が、 $-\frac{\theta}{2} \leq \varphi \leq \frac{\theta}{2}$ の範囲である。この解析結果を基礎にすると、さらに新しい、効果的な側方スピーカによるステレオ音場の補正が可能と思

われる。

### 5. 3 側方スピーカのレベルによって音像定位が、不明確となる場合。

理論値に対して、聴感試験結果のバラツキが大きいのは、側方スピーカの位置が被験者の正面より右へ $45^\circ$ 、水平面より下方へ $30^\circ$ のときである。図13(a)において側方スピーカのレベルが6 dBのとき、被験者による音像方向の指示値の差は $22^\circ$ におよんでいる。また図14では、音像方向が被験者の正面と側方スピーカに近い位置に集中し、レベルによって連続的に移動しない傾向を示している。

これは上記の側方スピーカの位置では、あるレベルで音像が不明確となり、定位が定まらない様子を示している。したがって、このような条件を利用すれば、ステレオ感の一つである「広がり感」を増強する効果が得られることが期待される。

## 6. む す び

以上、音場の補償を目的として、2チャンネルステレオ音場の側方に付加した補助スピーカが、もとの音場に与える影響について検討した。その結果、側方スピーカを左右スピーカと水平面内、あるいは水平面外の各位置に設置したとき、レベル差と音像定位方向について理論的、実験的にその

特徴を明らかにし、さらに音像の質についても考察した。

なお、本稿では、ステレオ番組の制作の中心的手法であるレベル差定位を主として取り上げてきたが、これに位相差が加わった場合は、より複雑な問題が生じることが十分推測される。この点については、今後さらに検討を進めて行きたい。

また、本検討の結果を応用した、新しい車載用スピーカシステムの開発も進めて行く計画である。

## 参 考 文 献

- 1) 高橋 良ほか：放送音響技術、日本放送出版協会(1982)。
- 2) 境 久雄ほか：聴覚と音響心理、日本音響学会編(1979)。
- 3) 二階堂誠也：『両耳聴研究のステレオ音響技術への応用』、日本音響学会誌、第37巻第4号(1981)。
- 4) 中林克己：『ステレオ音場の解析法とその応用』、日本音響学会誌、第33巻第3号、P116-127(1977)。
- 5) 藤田 尚ほか：FMステレオ放送技術、日本放送出版協会(1965)。