

**A White Paper  
Of  
The Installation Series Loudspeakers**

**YAMAHA CORPORATION  
PA · DMI Division,  
Advanced System Development Center**

## 1. 序論

サウンドコントラクターやサウンドエンジニアにとってスピーカシステムは、スピーカ自体の音質が良いこと以外に、施設の音響条件に合わせた調整が容易にできるものでなければならない。

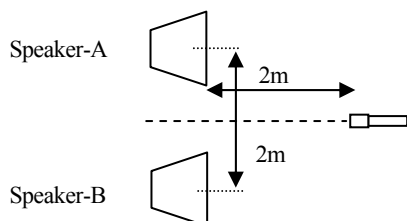
絵画に例えるなら、赤の絵の具はキャンバス上でも元の色を変えることなく赤でなければならない。そのために、キャンバスは発色の良い「ホワイトキャンバス」が必要となる。

スピーカシステムにおける「ホワイトキャンバス」とは、振幅特性がフラットであることはもちろん、イコライザーがリニアに反応してくれることである。複数のスピーカでアレイを構成したときに、振幅特性が大きく変化したりイコライザーがリニアに反応してくれないという経験はないだろうか。

こうした状況を引き起こす大きな要因としては、設置・建築条件に起因するコムフィルタの発生と、スピーカ自体が持つ位相特性の不整合が考えられる。前者の問題に関してはスピーカの角度を調整する等のデザイン面から検討する必要がある。

一方の位相特性に起因する問題について、ヤマハはスピーカシステムを「ホワイトキャンバス」にするために取り組むべき課題と位置づけた。

<図1：スピーカ測定条件>



2台の2ウェイスピーカを使って位相特性に関する簡単な実験を行なった。セッティングを図1に示す。スピーカAは60度×40度（水平×垂直）、スピーカBは90度×50度の高域指向性を持つ。振幅特性はほぼ同じである。

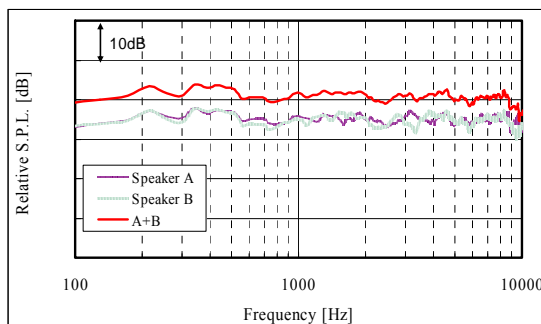
2台のスピーカの位相特性を揃えて同時に鳴らした場合、図2に示すように全帯域において振幅特性上に加算が見られた。

次にスピーカBの位相特性を変えて測定した。結果を図3に示す。

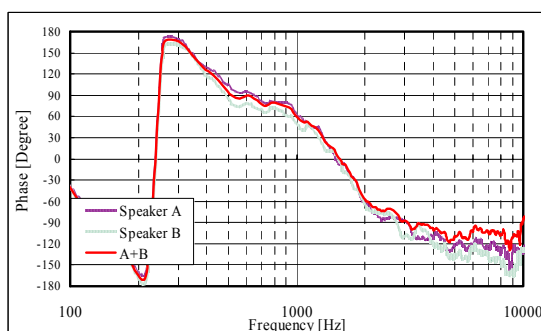
位相差が120°以上の周波数において、振幅特性上に大きなキャンセレーションが生じている（位相差がおおよそ120度～240度において振幅特性上のキャンセレーションが発生する）。キャンセレーションが起きた周波数ではイコライザーがリニアに反応せず、イコライザーを使って周波数特性を改善させることは困難である。

<図2：位相が同じスピーカを同時駆動>

振幅特性

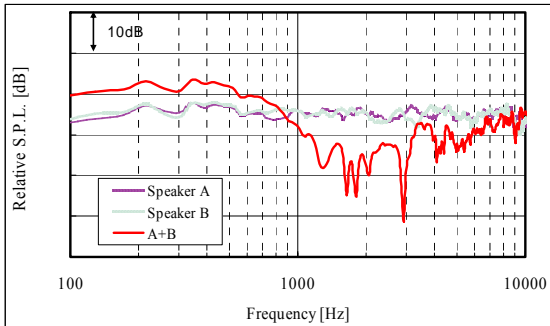


位相特性

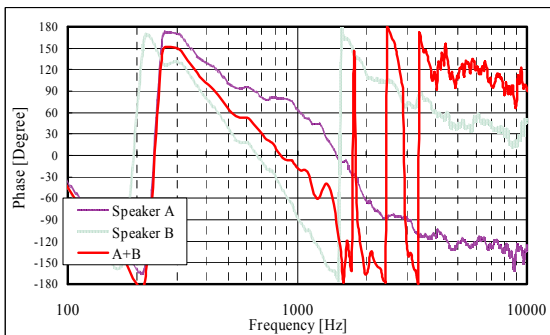


## &lt; 図3：位相が異なるスピーカーを同時駆動 &gt;

## 振幅特性



## 位相特性



この位相の問題は同種のスピーカ内だけではなく、異なる機種間でも考慮する必要がある。

例えば、ライブコンサートでは、基本的に複数台の同一スピーカを組み合わせさせてアレイが構成されるのに対し、設備においては様々な形態でスピーカが組み合わせられて使用される。

「様々な組み合わせが行なわれた場合にもホワイトキャンバスを提供したい」との考えから、ヤマハは特に位相特性に着目し、シリーズ全体での位相特性の統一（In Phase Concept）を目指した。

また音質に関しては、シリーズ全体での音色の統一（Family Sound Concept）をコンセプトに据えながら、明瞭なスピーチ拡声（PA）と高音質な歌・楽器の拡声（SR）の両立を目指した。また、拡声音における自然な音像の大きさの実現にもこだわった。

この位相・音色に関するコンセプトの両立が、“Installation”シリーズのデザインコンセプトである。

以下にその詳細と、それを実現した手法に関して述べる。

## 2. スピーカの位相特性に関する考察

## 1) ドライバー間の位相特性に関して

複数のドライバーを持つ単体のスピーカにおいても、例えば2ウェイスピーカにおいて高域ドライバーと低域ドライバーの間でも、位相不整合の問題は発生する。

図4は2ウェイスピーカの特徴を示している。HPF(18dB/oct, BW)、LPF(18dB/oct, BW)共にカットオフ周波数は1.5kHzである。

ここで、1.5kHzに着目して検討していく。

まず、振幅特性のグラフから、1.5kHzの周波数は高域ドライバーと低域ドライバーの両方から再生されていることがわかる。また、位相特性のグラフからは、高域と低域の位相差は180度となっていることがわかる。2つの信号レベルは同等であるため、互いに打ち消しあって振幅特性上にディップを生じさせている。

また、位相の総合特性において1k~2kHzの間で急激に位相が変化しており、クロスオーバー帯域において位相のつながりが悪いスピーカシステムとなっている。

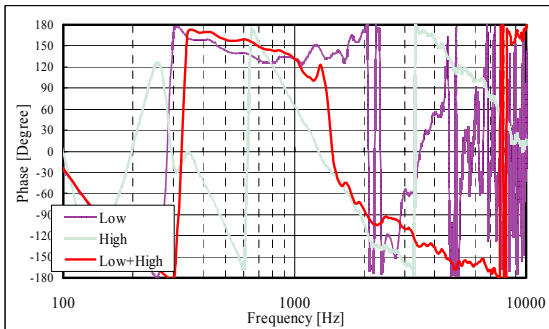
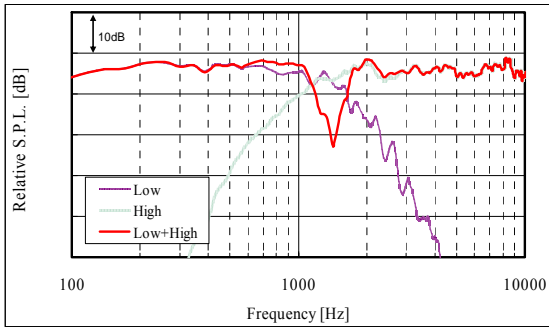
図5は、図4と同じスピーカを使い、特にディップの大きい1k~2kHzにおける位相差を90度以内に抑えることを目標に調整したものである。全帯域において位相特性の傾きは一定であり、クロスオーバー帯域での位相差による振幅特性への影響も最小に留めスムーズなものになっている。

“ Installation ” シリーズは、このような全体域において傾斜が一定でスムーズな位相特性を持っている。

2) 複数スピーカを組み合わせた場合の位相特性に関する検討

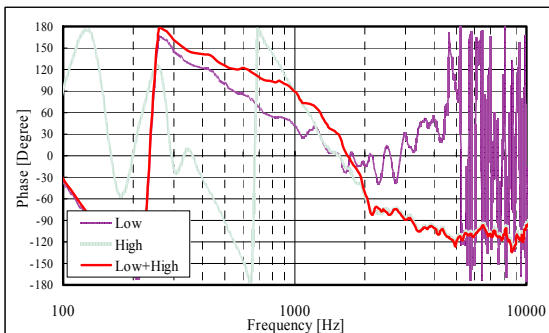
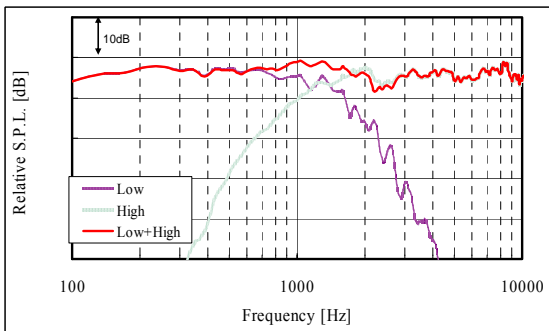
ホールや劇場、教会などの施設においては、複数のスピーカをアレイ形状に組み合わせたりスタックして使用される。

< 図 4 : 位相差による振幅特性への影響 >



この時、複数のスピーカのカバーエリアが重なるオーバーラップ部分に関して、2-1) で述べたドライバー間と同様に、音源 - 受音点間の距離差から生じる位相差により周波数軸上でのディップが生じる。そのためシステム設計にあたってはこのオーバーラップ部分を可能な限り狭める事が重要となるが、実際の設計条件では完全に取り除く事は困難である。

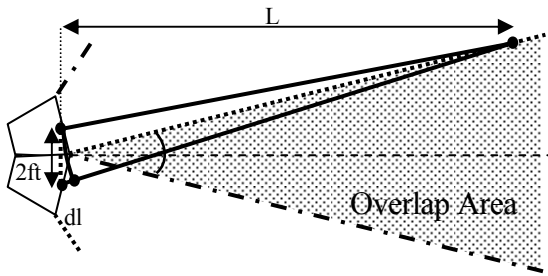
< 図 5 : 位相整合が取れたスピーカーの特性 >



ここで図 6 に示すように 2 台のスピーカを組み合わせた条件において、スピーカ - 受音点間の距離差及び距離差から生じる位相差が 90 度となる周波数を、中心軸に対しての角度  $\theta$  をパラメータに表 1 に示す。

表 1 よりオーバーラップ範囲を 10 度以内とした時に、音源からの距離によらずオーバーラップ内での距離差から生じる位相差は 1 kHz 以下の周波数において 90 度以内になり、またオーバーラップ範囲が 20 度以内の時には同じく 1 kHz において 120 度以内になる。この位相差では干渉の影響がほぼ無いと考えられることより、この条件においては、ディップの無い特性を得る為には上記のドライバー間の特性と同様に 2 つのスピーカの位相特性を合わせる事が重要となる。(但し実際には周波数によりスピーカの指向特性が変わる為、周波数と指向特性、及び受音点距離から検討が必要である。)

<図6：オーバーラップエリアの特性に関する検討>



<表1：オーバーラップエリアの位相特性>

	L=6 m	L=12 m	L=24 m
5	0,174 / 3 3252 Hz	0,174 / 3.249 Hz	0,174 / 3.248 Hz
10	0,347 / 1.627 Hz	0,347 / 1.626 Hz	0,347 / 1.626 Hz
15	0,517 / 1.087 Hz	0,517 / 1.086 Hz	0,518 / 1.085 Hz
20	0,683 / 817 Hz	0,684 / 816 Hz	0,684 / 816 Hz

位相差 = 90度

	L=6 m	L=12 m	L=24 m
5	0,087 / 4.336 Hz	0,087 / 4.332 Hz	0,087 / 4.331 Hz
10	0,174 / 2.170 Hz	0,174 / 2.168 Hz	0,174 / 2.167 Hz
15	0,261 / 1.449 Hz	0,261 / 1.448 Hz	0,261 / 1.447 Hz
20	0,347 / 1.089 Hz	0,347 / 1.088 Hz	0,347 / 1.088 Hz

位相差 = 120度

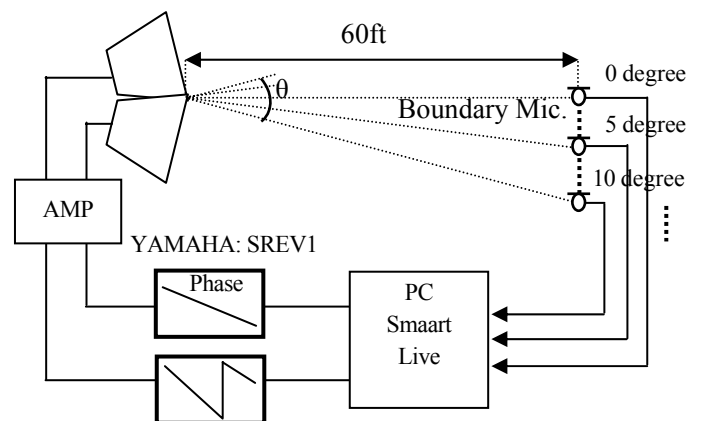
ここで上記の考察の妥当性を確認する為、リアルタイム畳み込み器 (Yamaha SREV1) を用いて位相差 (周波数領域での傾きが異なるインパルス応答をシ

ミュレートして使用：2kHz で 90 度、120 度、150 度の位相差) を与え、異なる位相をもつスピーカを組み合わせた際の受音点における周波数特性を比較した。

図7に実験条件を、また図8に結果を示す。なお、受音点は壁からは十分に離し、またマイクにはバウンダリーマイクを用いることで、側壁、床からの反射音の影響を取り除いている。また結果は全て  $\theta = 0$ 、位相差無しの結果で基準化している。

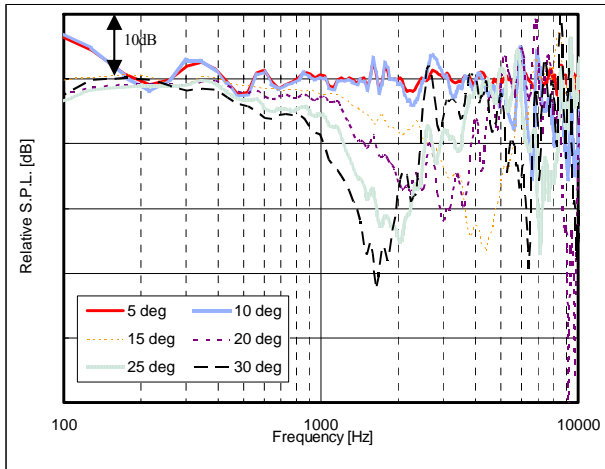
まず位相差が無い場合には、 $\theta = 15^\circ$  以内で 2kHz 以下の周波数でレベル差が 3dB 以内に収まっており、また  $\theta = 25^\circ$  以内で 1kHz 以下の周波数で同じくレベル差が 3dB 以内に収まっている。これに対し位相差を与えていくと、干渉によるディップの影響範囲が広がり、また周波数が低くなっていくことが分る。位相差が 90 度では  $\theta = 15^\circ$  以内で 1kHz 以下の周波数でレベル差が 3dB 以内に収まっているが、位相差が 150 度では  $\theta = 0^\circ$  でも 1kHz で 6dB 以上の差が生じてしまっている。これらの結果は、スピーカを組み合わせた際には、場内で均一な応答を得る為には使用するスピーカの位相特性を合わせ込むことが重要である事を示唆している。

<図7：実験条件>

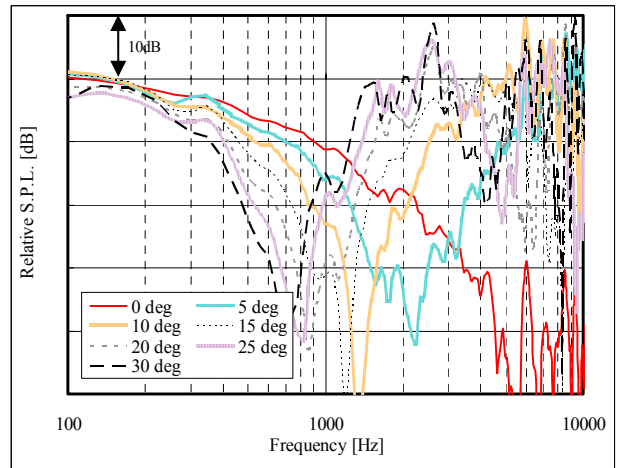


< 図 8 : オーバーラップエリアの位相特性 >

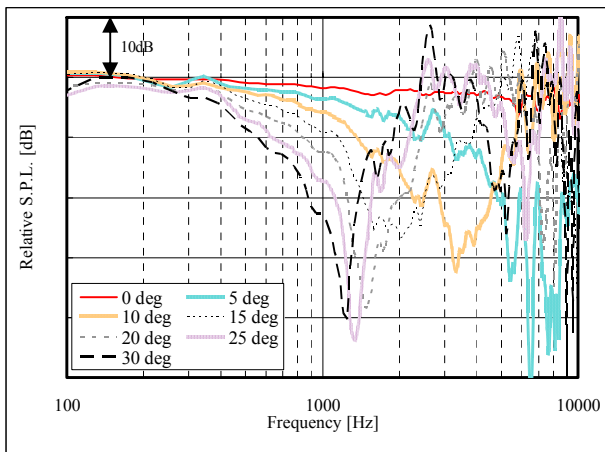
位相差 0 度



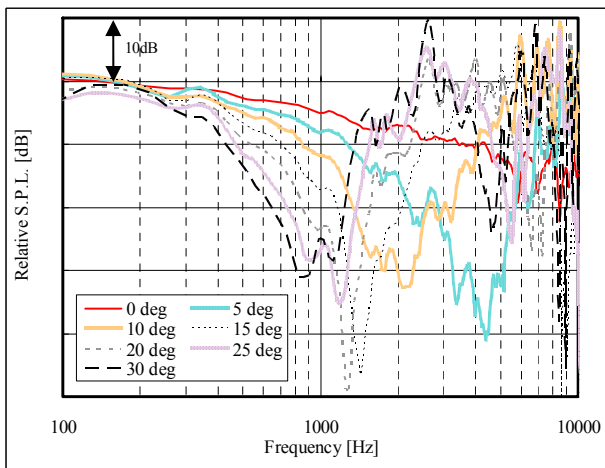
位相差 150 度



位相差 90 度



位相差 120 度



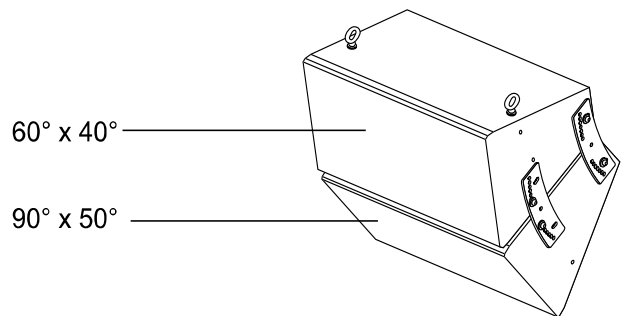
劇場等実際にインストールする際には、必要カバーエリアに応じて指向性の異なるスピーカを組み合わせられて構成されることが多い。

また、パワー配分の違いによっても様々な組み合わせが考えられる (図 9)。

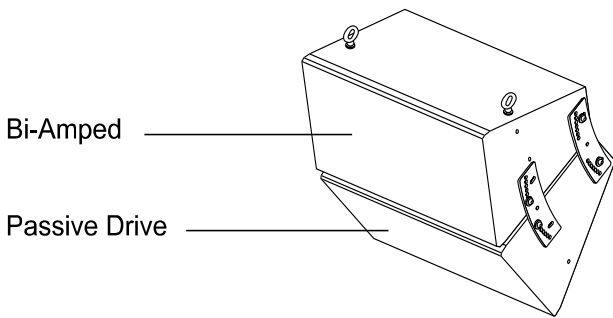
ヤマハは設備用スピーカ "Installation" シリーズの設計にあたってこの点に着目し、同種のスピーカ内での特性はもちろんのこと、異なる機種間においても位相特性を合わせる必要があると考えた。

< 図 9 : スピーカーの組合せ形態 >

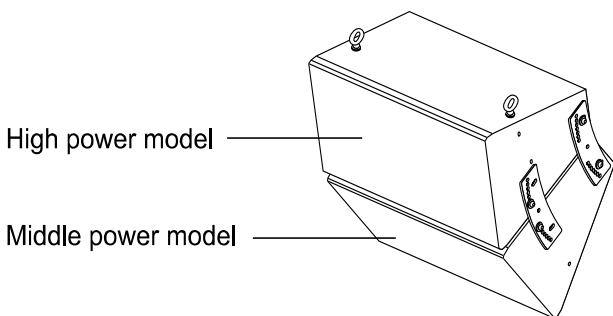
同一ボックス・異なる指向性



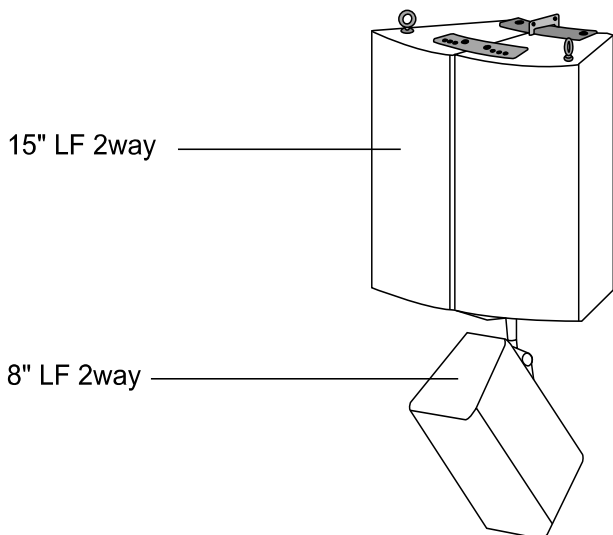
同一ボックス・異なるドライブモード



同一ボックス・異なるパワーモデル



異なる大きさのボックスの組合せ



### 3. デザインコンセプトに関して

#### 1) 位相制御

上記の考察を基に、位相特性に関しては以下のようなコンセプトをもって設計にあたった。

#### In Phase concept

上述の検討結果から、シリーズ全てのスピーカの位相特性を統一することとした。

- 同種エンクロージャーにおける指向性違いモデル間の位相特性の統一
- 同種モデルのパッシブとバイアンプモード間の位相特性の統一
- 同種エンクロージャーを使ったハイパワーモデルとミドルパワーモデル（2005年秋に発売予定）間の位相特性の統一
- 異なるエンクロージャーを持つモデル間の位相特性の統一
- 各スピーカの位相差を2kHzで90度以内とする

#### 位相変化最小型の採用

マルチウェイ方式スピーカの位相制御の手法には以下の2つがある。

#### A. 位相変化最小型

20Hz～20kHzの帯域で位相変化を最小に抑えることを目的としたもので1ラップ（180度～-180度）の間で滑らかに変化する位相特性を実現するもの。

低域と高域ドライバーのクロスオーバーする帯域において、2つのユニットの位相差に起因する振幅特性の減算が問題となりやすい。

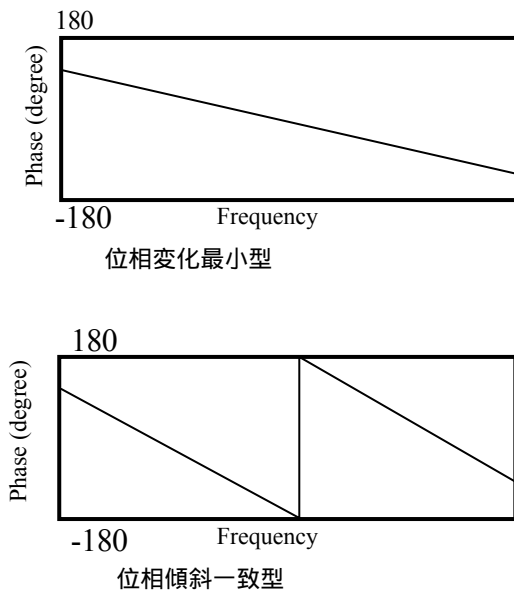
B. 位相傾斜一致型

位相変化を最小にすることにはこだわらずに全体の位相変化のつながり方を重視したものである。

低域ドライバーにディレイをかけることで位相の傾きを高域ドライバーの傾斜に合わせて、2つのドライバーの位相特性をスムーズにつなげていく。

この方法では、2つのドライバーの位相特性がつながる部分では360度の位相差となるが、エネルギー加算の点からは同相とみなすことができるためクロスオーバー帯域でのレベル減算を抑えることができる。位相変化最小型より容易な制御方法であるが、全体の位相は大きく変化することになる。

< 図 10 : 位相変化最小型と位相傾斜一致型 >



“ Installation ” シリーズの設計に先立ち、位相変化最小型と位相傾斜一致型を試作して比較試聴を行なった。

DSPを用いたバイアンプスピーカでは、クロスオーバー帯域においてニュアンスの違いは感じられるものの総合的には優劣つけ難いものであった。

一方、パッシブスピーカでは、シンプルなネットワーク回路となった位相変化最小型が優れているように感じられた。

また、シリーズ全てのスピーカを位相傾斜一致型で調整した場合、モデルごとに低域ドライバーの遅延時間が異なることが懸念された。単体使用では問題ないが、組み合わせて使用された場合に問題となる。

上記の理由から、位相変化最小型を採用することとした。

2) 音質制御

一方、スピーカの音質に関しては以下の様なコンセプトで設計を行い、上記の「 In Phase Concept 」との両立を図った。

目標とする音質

Installation ” シリーズの主要顧客としては、ホール、劇場、教会を想定した。

このような施設では、講演会や集会、演劇、音楽コンサートなどが様々な演目が行なわれる。音響設備には、明瞭さと良好な音質、均一で十分な音量を基本条件とし、さらに歌や楽器の拡声、音楽や効果音の再生などの機能を満足させることが求められる。

そこで、 “ Installation ” シリーズの音質に関しては、フラットな振幅特性を得ること以外に以下の項目を掲げた。

- スピーチ拡声での優れた音声明瞭度
- 音楽拡声・再生でのバランスと分離の良い良好な音質
- 音圧の大小に関わらず一定の音質
- 指向範囲内での均一な音質
- 適切な音像サイズ



### Family Sound Concept

ホールや劇場、教会などの施設においては、客席向けスピーカとしてメインスピーカの他にアンダーバルコニースピーカ、フロントフィルスピーカなどの補助スピーカが使用される。

これらの複数のスピーカから発せられた音は空間でミックスされるが、同じメーカーのスピーカであってもシリーズや大きさが異なると音質も異なり、会場全体で均一な音色を得ることは容易ではなかった。

そこでヤマハは「Family Sound Concept」として、シリーズを通して音色を統一することとした。

- 同種エンクロージャーにおける指向性違いモデル間の音色統一
- 同種モデルのパッシブとバイアンプモード間の音色統一
- 同種エンクロージャーを使ったハイパワーモデルとミドルパワーモデル間の音色統一
- 異なるエンクロージャーを持つモデル間の音色統一

### 電氣的補正の最小化

イコライジングは振幅特性を補正する一方で、位相特性を悪化させる原因にもなる。イコライジングによる振幅変化が急なほど、位相変化も急なものとなるため、スピーカの設計にあたってイコライザーによる電氣的補正を最小化することを目指した。

特にクロスオーバー帯域では、イコライザーを使わないことを目標として掲げた。

### 外部のスピーカデザイナーとの協業

実際のスピーカデザインは、ヤマハの開発チームと外部のデザイナーが協業で行うこととした。

ヤマハのスピーカ開発チームのリーダーは「仲村昭」が担当した。仲村は、ロングセラーとなったHi-

fiスピーカ「NS1000M」、スタジオでデファクトスタンダードとなった「NS10M」「NS10M STUDIO」、パワードモニタースピーカ「MSPシリーズ」の開発者である。

外部のスピーカデザイナーとしては、米国のスピーカデザイン専門会社「Audio Composite Engineering」のチーフデザイナーである「Michael Adams」氏を登用した。「Michael Adams」氏はSRエンジニアとしても長年の経験を持つベテランのスピーカデザイナーである。ヤマハが掲げた難題とも言えるコンセプトを理解し実現してくれる「SRエンジニアの耳」を持った希少なスピーカデザイナーである。

## 4．設計・開発手法に関して

設計と試作品の開発は、3つのステージに分けて行なった。

第1ステージでは初回の音質評価用となるプロト1の開発、第2ステージではプロト1の評価結果に基づいて改良を加えたプロト2の開発を行なった。基本的なエンクロージャーとホーン的设计、ドライバーの選定は「Audio Composite Engineering」社が担当した。

ヤマハでは、無響室だけでなく実使用に近い環境での詳細なデータ測定と試聴テストを実施し、解析結果と問題点の改善策を「Audio Composite Engineering」社にフィードバックするやり方で協業による開発が進められた。

第3ステージでは、プロト2をベースに実際に製品を生産する工場に材料・部品等を調達して試作が行なわれた。増産品である製品の品質を確認するための試作ステージである。

材料や塗装の異なる数種類のエンクロージャーと様々なコンポーネントが組み合わせ変えて試作された。

各コンポーネントの開発状況を以下に記す。

➤ ホーン

位相特性・振幅特性などのデータ測定による評価とともに、データには現われない「音抜け」「解像度」「音像の大きさの適切さ」などを重点に試聴による評価を実施した。

15インチと12インチモデル用の1.4インチスロットを持つホーンは、音の遠達性、解像度の向上を図りエンクロージャー内に納まる最大の大きさとしている。その材質は、グラスファイバーで補強したFRP製で、制振材を加えてデッドニングしている。

全てのホーンは90度の回転が可能なローテータブルとしている。

➤ 高域用コンプレッションドライバー

ファミリーサウンドを追及し試聴を繰り返した結果、すべてのモデルに使われているドライバーは同一メーカーのものとなっている。

15インチと12インチモデルのドライバーには3インチのボイスコイルを採用し、ダイアフラムはチタン製とした。エッジとダイアフラムを一体化し、そのエッジにはタンジェンシャルエッジを使用して耐久性の向上と音質の改善を図っている。

➤ 低域用ウーハ

ハイパワー再生での音像崩れを防ぐため、15インチと12インチモデルのウーハは4インチのボイスコイルを使用することとした。

ダンピングと低音の伸びの両立、エンクロージャーとの音質的なマッチングと高域とのつながりを考慮して選定した。

磁気回路には、大型のフェライトマグネットを使用して磁束密度を高め、音抜けの良さとスピード感溢れる音質としている。

➤ エンクロージャー

試聴の結果、11プライのフィンランドパーティを採用した。

チューニング周波数の設定は、ポートからの音圧が低域周波数特性に最も有効に働くポイントとしている。コンピュータシミュレーションを元に算出し、次に試作品を用いて低域ドライバーとのマッチングを確認しながら試聴と変更を繰り返して設定を行なった。

エンクロージャーの形状は、側面とバッフル面の高さを合わせ、ユニットから出た音が側面で反射して不明瞭な音質となるのを防ぎ、明瞭な音質を確保している。

内部には強度と共振を考慮した十分な補強を行ない、箱鳴きのない明瞭な音質にしている。

内部吸音材は、低音の伸びと締りのバランスのとれた音質となるよう25mm厚のグラスウールを使用している。

また、メタルグリルは、音の透過性を考慮して開口率63%としている。

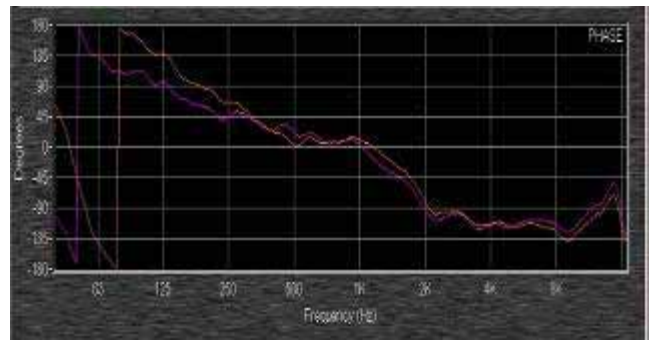
➤ ネットワーク

挿入による音質劣化を抑制するためシンプルな構成とした。

15インチと12インチモデルの低域には、大型ケイ素鋼板芯へ15ゲージの銅線を巻いたコイルとTan の小さな大型フィルムコンデンサーを使用して、ハイパワー再生時でも解像度の高い音質を確保している。

バイアンプ時と同じ位相特性、振幅特性を持たせるために、コンピュータシミュレーションと実測を繰り返して完成させた。

全体的な結果としては、「In Phase Concept」と「Family Sound Concept」が両立でき、全体の位相変化を最小にとどめ、急激な位相変化のない緩やかな右肩下がり位の位相特性とスムーズな振幅特性を得ることができた。



Orange: IF2115/64/bi-amp

Purple: IF2115/64/passive

## 5. "Installation" シリーズの位相特性

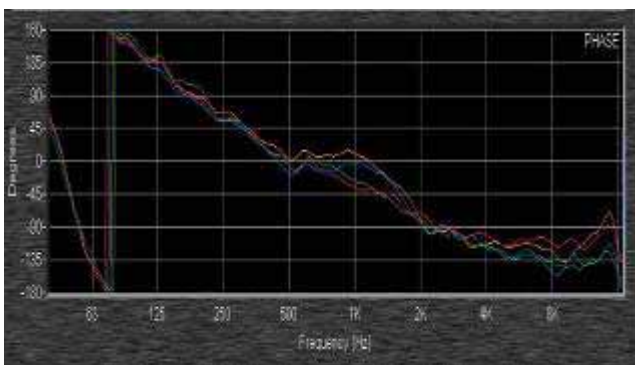
"Installation" シリーズの位相特性とコンペティターの位相特性を以下に示す。

"Installation" シリーズでは、指向性が異なるスピーカ間、異なるドライブモード間、さらに異なる機種間でもシリーズを通して位相特性を統一している。

< 図 1 1 : 位相特性の比較 >

- YAMAHA INSTALLATION SERIES -

指向性違いのモデルの比較

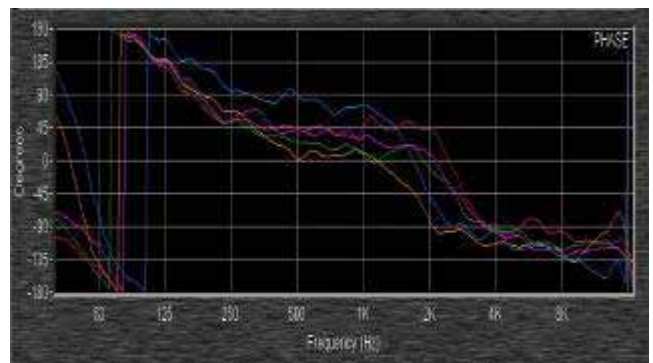


Orange: IF2115/64/bi-amp Blue: IF2115/95/bi-amp

Red: IF2115/99/bi-amp Green: IF2115/AS/bi-amp

駆動モード違いの比較

エンクロージャーサイズが違うモデルの比較



Orange: IF2115/95 bi-amp Blue: IF2112/95 bi-amp

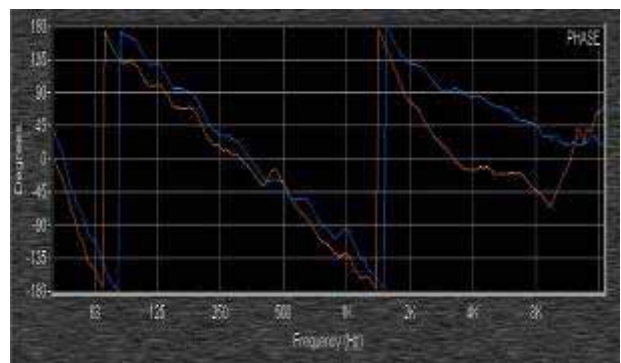
Green: IF2208

Purple: IF2108

Red: IF2205

- 他社モデル -

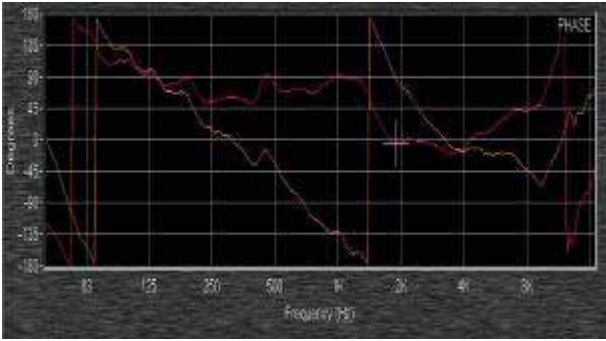
指向性違いのモデルの比較



Orange: Competitor's 15" LF 2way 60x40 bi-amp

Blue: Competitor's 15" LF 2way 90x50 bi-amp

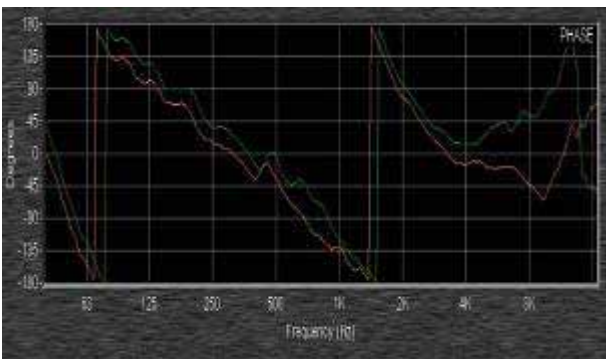
### 駆動モード違いの比較



Orange: Competitor s 15" LF 2way 60x40 bi-amp

Red: Competitor s 15" LF 2way 60x40 passive

### エンクロージャーサイズが違うモデルの比較



Orange: Competitor s 15" LF 2way 60x40 bi-amp

Green: Competitor s 12" LF 2way 60x40 bi-amp

## 6. まとめ

2004年秋、サンディエゴの「Audio Composite Engineering」社で、最終試作品の音質評価会を開催した。

各自が持ち込んだCDソースとマイクロホンを使った入念なチェックが行なわれた結果、評価者からの拍手をもって試聴会を終えることとなった。

日本においても同様の音質評価会を開催し、両試聴会ともに優れた音質と設計コンセプトが実現できていることが確認でき、特にファミリーサウンドの実現について好評価を得ることができた。英語と日本語を使ったマイクロホンによるテストでは、とも

に優れたスピーチ拡声の能力を持っていることが確認できた。

ヤマハ設備用スピーカ「Installation」シリーズは、設備の現場で様々なスピーカを組み合わせることによって起きていた問題を解決するものである。是非、その音質と組み合わせて使用したときのスピーカ同士の音色のマッチング、イコライザーのリニアな反応を確かめて頂きたい。

DSPセッティングとしては、クロスオーバーフィルタ、イコライザーともに特殊なものは使用していないため汎用のスピーカプロセッサでのドライブも可能であるが、スピーカの音作りの過程で使用したヤマハ「DME24N・64N」が現時点では音質的には最適な組み合わせであろう。DSPセッティングデータ及びEASEデータは、ヤマハのWEBサイトに掲載されている。尚、音作りの最終過程で使用したパワーアンプは、ヤマハの「PC-01N」シリーズである。

現在、これらのハードウェア開発と平行して、サウンドシステムの設計段階で簡易な操作で使用できるシミュレーションソフト「Yamaha Sound System Simulator (YS3)」の開発を進めている。

これは、施設の形状・サイズ・受音点での音圧を簡易に入力するだけで最適なアレイ構成を導き出してくれるもので、アレイの特性補正のためのイコライジングもシミュレーションすることができる。イコライジングのシミュレーション結果は、ヤマハの「DME24N・64N」のライブラリーファイルとして保存することができる。

スピーカの「ホワイトキャンバス」化を実現したヤマハ「Installation」シリーズと、このシミュレーションソフトを併用することで、現場での調整時間を大幅に削減することができるであろう。

最後に、「Audio Composite Engineering」と「Michael Adams」氏の多大な尽力に感謝を申し上げます。

参考文献:

- 1] G. Davis and R. Jones, "Sound Reinforcement Handbook, Second Edition," Yamaha, 1989
- [2] D. Davis and C. Davis, "Sound System Engineering, Second Edition," Focal Press, 1997