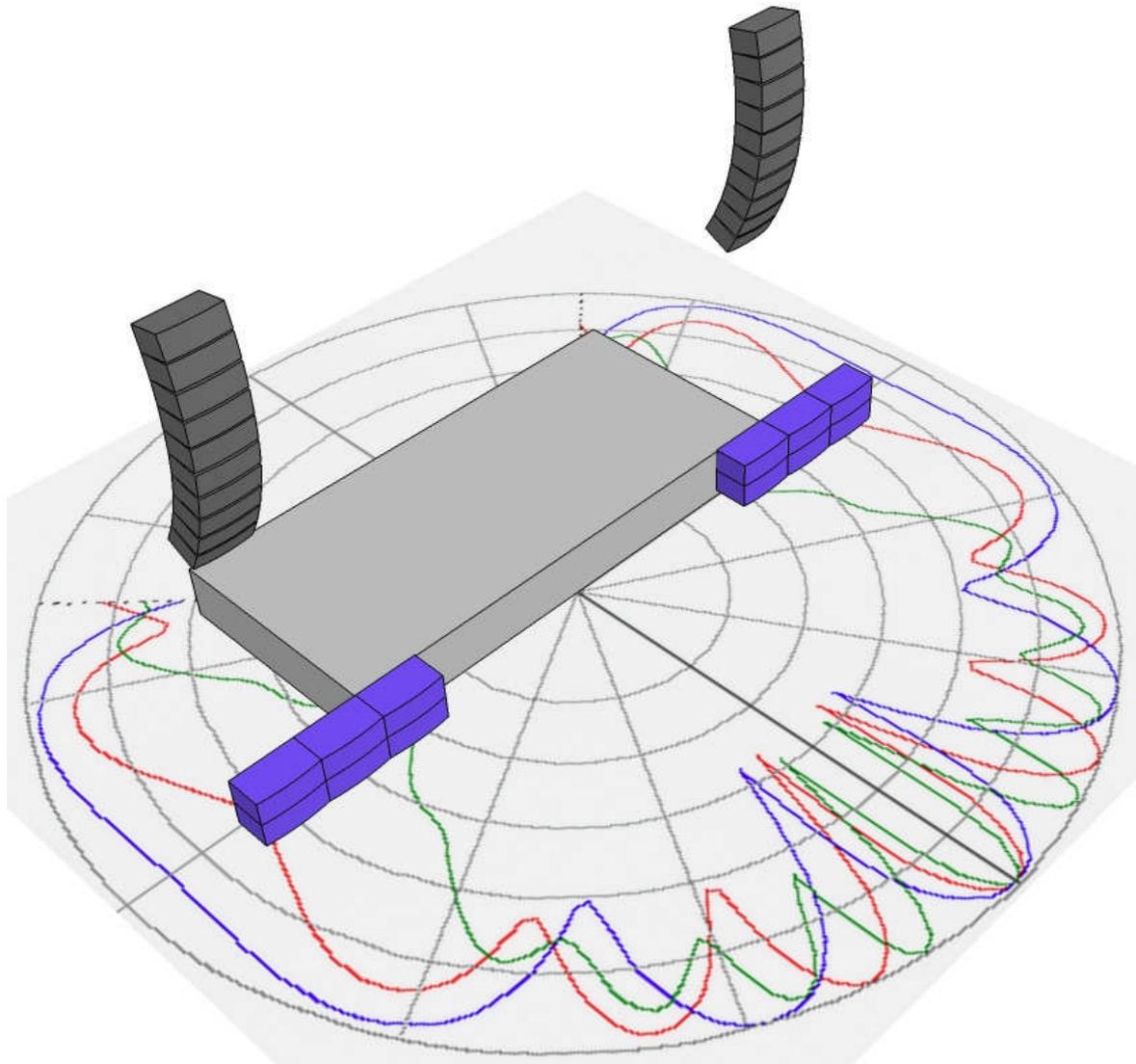




# サブウーファー・アレイ

## 実用ガイド



**Electro-Voice, Burnsville, Minnesota, USA**

© Boshe Security Systems Inc.

---

# サブウーファー・アレイ

## 実用ガイド



### 目次

1. はじめに .....	1
2. 音響概念 .....	2
2.1. 波長 .....	2
2.2. 指向性の基本原則 .....	2
2.3. 水平 - 垂直の独立性 .....	3
2.4. 複数の音源とロビング .....	3
2.5. ビームフォーミング .....	5
3. ゲイン・シェーディング .....	6
4. グラフとアレイ設計ツール .....	6
5. ウーファー・アレイのタイプ .....	7
5.1. ブロードサイド・アレイ .....	7
6. グラウンドスタック・アレイ .....	10
7. フライニング・アレイ .....	13
8. 傾斜アレイ .....	17
8.1. 例 .....	17
8.2. 傾斜アレイの特性 .....	18
8.3. 高度な傾斜駆動 .....	20
8.4. 傾斜ラインアレイ .....	21
8.5. 傾斜アレイ・アプリケーション .....	23
8.6. エンドファイヤ・アレイ .....	25
付録 A: サブウーファーのクロスオーバーのセットアップ .....	27
付録 B: 超低域のイコライゼーション .....	30
付録 C: ディストーション・ビーミング .....	32

## 1. はじめに

もしサウンド・システムのスピーカが、スポットライトのように音を鳴らしたとすると、それは大変なことです。適切な指向特性をもつスピーカー・ボックスを選び、サウンドを届けたいところにボックスを向けて終わりにするとします。当然ながら、これでは特に低域がよく聴こえません。

普通の低域用スピーカはその動作周波数レンジでほぼ無指向性ですが、数台積み上げると指向性が増し、複雑になります。明かりがそのように機能すると想像してみてください。1つの裸電球は部屋全体を照らしますが、4つ並べると室内の数か所を明るくするだけです。

さらに悪いことに、複数のウーファー・スタックを使用した場合、例えばステージの左と右に配置すると、波動干渉（「コム・フィルタリング」とも呼ばれるもの）が起こり、会場内の場所によって周波数のピークとゼロ点が変わります。明かりが同じように作用した場合、少し間隔をあげた2つの白色光で部屋を照らすと、その部屋は虹のようなさまざまな色で照らされます。

その上にスピーカの場合には残響の問題もあり、時間領域のなかで独特なあいまいさと音色上の色づけが加わります。しかし照明には同様の効果はありません。

このような現象をすべて考慮し、オーディオのプロは、必要なカバレッジと音を忠実に再生するサブウーファー・アレイと駆動方式をどのように設計するのでしょうか。

### 適切に設計した場合

- 低域がクリアで、聴取範囲全体で音のバランスにむらがない。
- 低域のサウンド・レベルが聴取範囲全体で、ミッドレンジ、高い周波数と正しいバランスになる。
- 残響や反響のマイナス効果がわずかである。
- 機器の効率（ユニット1台のコスト当たりのサウンド出力）が最大である。

本ガイドでは、クリアでバランスのよい低域を作りだすためのコンセプトとテクニックを解説します。本文中の低域とは、約20 Hzから150 Hzまでの周波数レンジです。

## 2. 音響概念

### 2.1. 波長

スピーカアレイの音響特性の調整に必要なことは、その大半が波長に関することです。ボックスやアレイは、その寸法または寸法の一部が波長の約1.5倍以上あれば「大型」であり、波長の約1/3未満であれば、「小型」とみなされます。

以下は代表的な波長です。

周波数	波長 (フィート)	波長 (メートル)
20 Hz	55.8	17
50 Hz	22.3	6.8
80 Hz	13.9	4.3
120 Hz	9.3	2.8
200 Hz	5.6	1.7
1000 Hz	1.1	0.34
20000 Hz	0.0558 (= 0.67 インチ)	0.017

通常の気温、気圧、湿度では、波長は次の計算式から求められます。

$$\text{波長} = \frac{1116}{\text{周波数}} (\text{フィート}) = \frac{340}{\text{周波数}} (\text{メートル})$$

### 2.2. 指向性の基本原則

普通の音源では、指向性は寸法に反比例します。つまり、音源が物理的に小さければその指向性は広く、大きければ指向性は狭くなります (図 1を参照)。

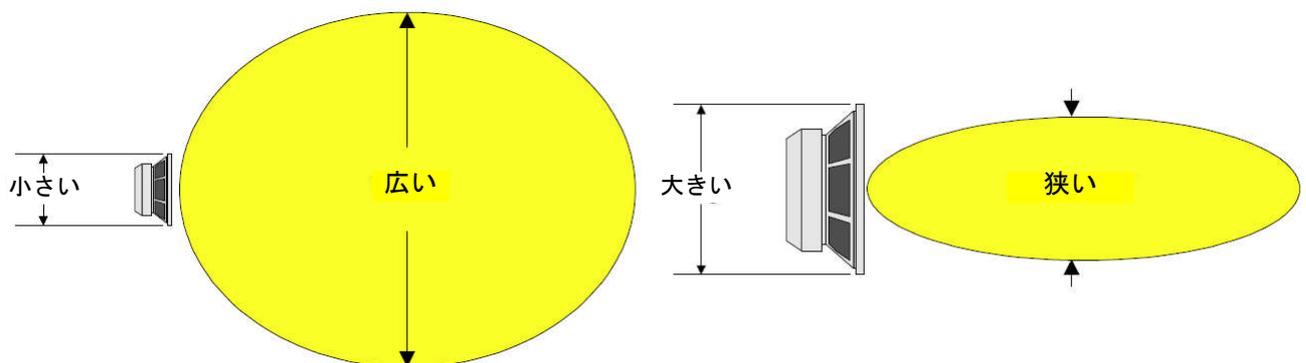


図 1. 寸法と指向性の逆相関関係

ここで注意すべきことは、「小さい」、「大きい」は波長で測定されたものであり、フィート (メートル) ではありません。

### 2.3. 水平 - 垂直の独立性

指向性の基本ルールは水平面と垂直面で別々に適用されます。例えば、サブウーファーの水平ラインは水平方向で大きく、垂直方向では小さくなります。従って、その指向性は水平方向では狭く、垂直方向では広くなります (図2を参照)。

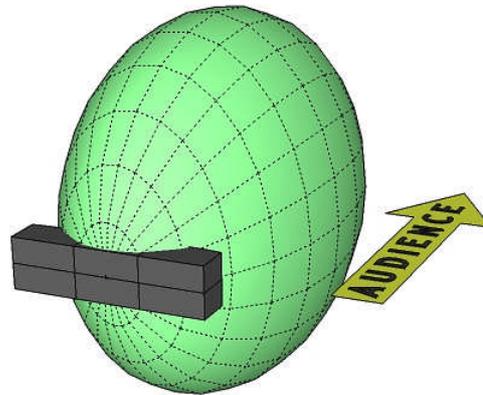


図 2. 非対称パターン

### 2.4. 複数の音源とロビング

大部分ではないとしても多くのサブウーファー設備は、ステージの両脇に2つのアレイを配置します。これらのアレイはフロアにスタックするかフライングします。どちらの方法でも、複数の音源から、物理学者が「波動干渉」と呼ぶ現象と、音響関係者が「コムフィルタリング」または「ロビング」と呼ぶ現象が発生します。

図 3は1台のXsubウーファーの50 Hzの指向性を示しています。この例のステージの大きさは40 × 20フィートです。赤い線はポーラ (極) パターンで、円の間隔は6dBです。Xsubは基本的に全指向性 (無指向性) です。

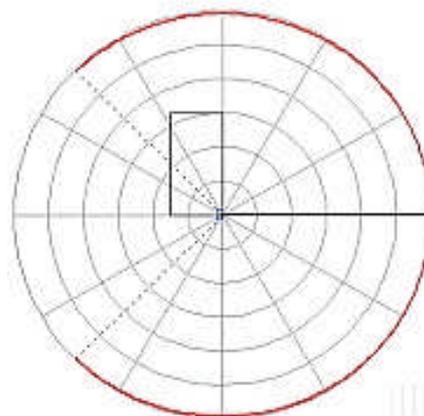


図 3. 1台のXsub (6dB / 区分)

次ページの図 4は、ステージの反対側にもう1台Xsubを設置したときの指向性を示しています。結果は全く異なり、良くなっていません。

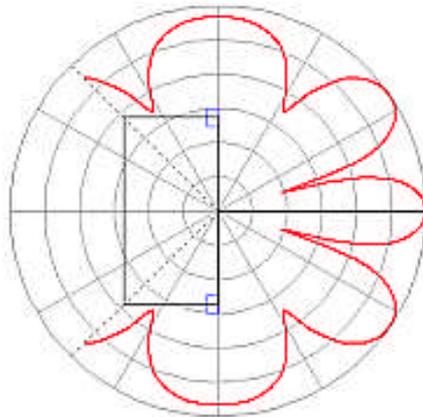


図 4. Xsubを左右に配置した場合 (6dB /区分、50Hz)

ウーファーは無指向性なので、その空間にいる人全員に両方のウーファーからの音が聴こえます。ところが、ウーファーから観客までの距離は、中央部を除きそれぞれ違います。距離の差が半波長の奇数倍に等しいところでは、2台のウーファーからのサウンドは抑制され、少なくとも観客には低域は、ウーファーから直接聴こえません。

これらのロブから、会場内の低域のバランスとレベルが均一でなくなります。屋内会場では、音のアンバランスは残響によって少し目立たなくなりますが、明瞭度はやはりありません。野外では残響がないので、この問題は非常に顕著です。

図 5は実際の2つのケース、「グラウンドスタック・タイプのサブウーファー」と「フライング・タイプのサブウーファーラインアレイ」のパフォーマンスを示しています。

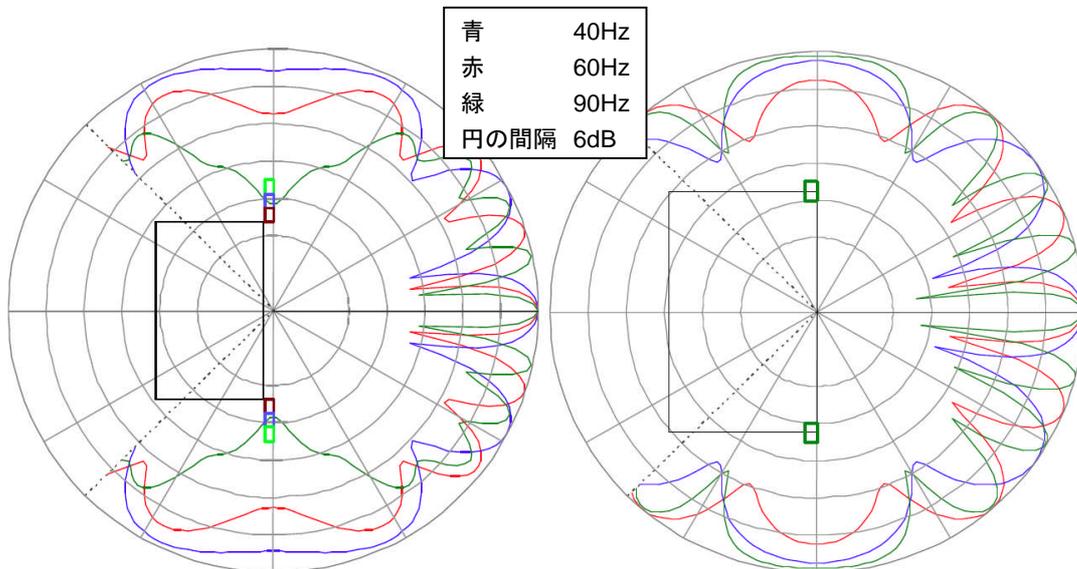


図 5. 左右にスタックしたサブウーファーとフライング・サブウーファーの水平パターン  
 左: 水平アレイ、左右に3台のXsub      右: 垂直(ライン)アレイ、左右にフライング

すべての周波数でロブのない部分は、ステージ中央正面だけです。このラインに沿って低域は、

力強くクリアです。これがよく知られている「パワー・アレイ」効果で、低域サウンドはミックス位置では非常に良いバランスですが、他の観客にどのように聴こえているかミキシング・エンジニアには分かりません。

ロビングの最適な解決方法は、左右に積み上げるのではなく、中央にまとめて配置するセッティングです。このセッティングは水平アレイと垂直アレイの両方に有効ですが、演出やりギング金具から現実的な解決策ではないケースがよくあります。

左右に積み上げる場合には、スタッキング、ビームフォーミング、傾斜ウーファーを利用してロビング問題を軽減することができます。どの場合でも、その考え方は2つのスタックのカバレッジ・エリア同士の干渉を最小にすることです。

## 2.5. ビームフォーミング

ビームフォーミングとは、大きいアレイにより放出される音波の到達方向を定め、シェーピングするテクニックです。ビームフォーミング・アレイでは、スピーカは別々に（または小さいグループごとに）駆動され、駆動信号に固有のディレイとレベルを設定します。

図 6と図 7は、 代表的な中規模サブウーファー・アレイでのビームフォーミングの典型的な効果を示しています。図中のアレイは4台のXsubサブウーファーです。図 6 はビームフォーミングなしのアレイを示しています。図 7では、低域の放射がステージ裏に向けられるようにディレイ値が選択されています。これはサイド・カバレッジを増やすための代表的なテクニックです。

ビームフォーミングは、大きいアレイ（定義は2.1項を参照）でのみ効果を発揮します。小さいアレイの指向性の調整には傾斜テクニックが必要です（8項を参照）。

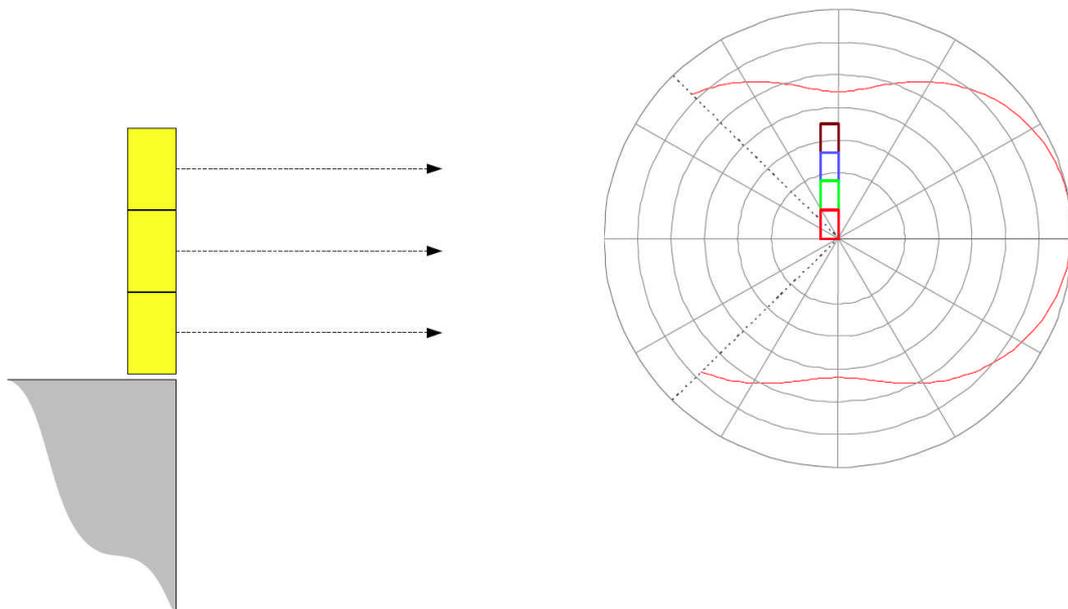


図 6. 単純なラインの4台のXsubウーファー  
ステージの1つのコーナーの平面図。60Hz。右側が観客席

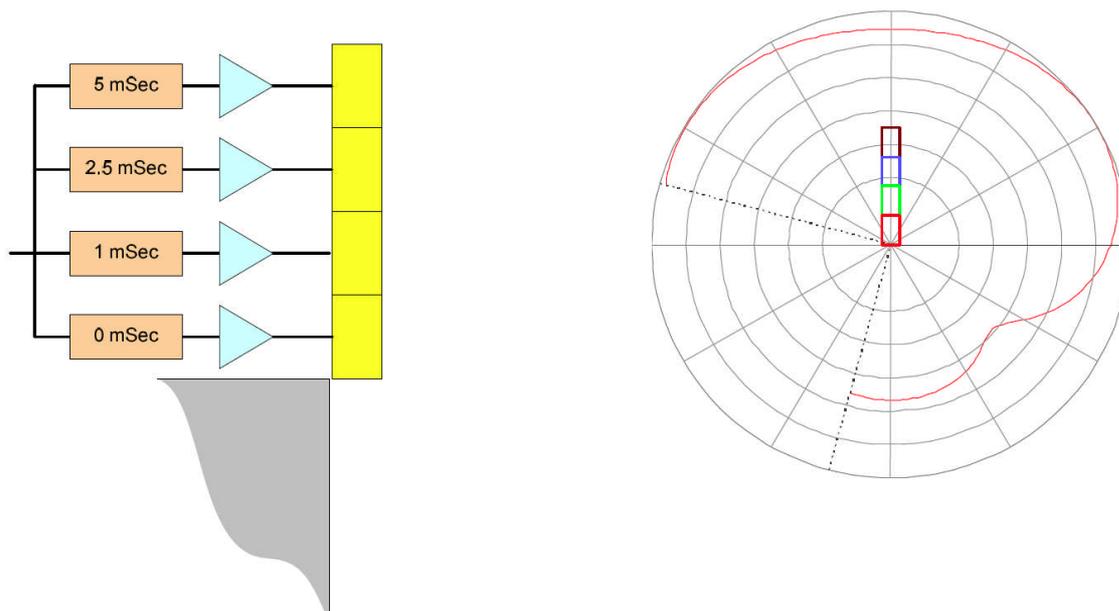


図 7. ビームフォーミング・アレイの4台のXsubウーファー  
 デレイ値 (ステージからステージ外側へ): 0.0、1.0、2.5、5.0 mSec.  
 ステージの1つのコーナーの平面図。60Hz。右側が観客席

### 3. ゲイン・シェーディング

「シェーディング」とは、アレイの両端またはその近くにあるエレメントのアレイ駆動パラメータを修正することです。これに対して「ゲイン・シェーディング」は、駆動ゲインを調整する、具体的にはアレイのどちらかの端の1つまたは複数のエレメントの駆動ゲインを減らすことです。

長いアレイでシェーディングを行うと、各端の最後の2つまたは3つのエレメントで、ゲインが0 dBから約-6 dBに徐々に弱くなっていきます。シェーディング効果は、カバレッジ・パターンをより均一にし、周波数によるむらを少なくします。この効果の例は、図21を参照してください。

### 4. グラフとアレイ設計ツール

本書の図に示したポラー・パターンはすべて、Electro-Voice社独自のプログラムLAPS 2.2Aで作成されています。このLAPSはElectro-Voiceのラインアレイ設計プログラムです。2.2Aが初回リリースで、サブウーファー・モデリング・ページが含まれています。

LAPSにはEVADA (Expandable Vertical Array Design Assistant: 拡張可能な垂直アレイ設計支援プログラム) という姉妹プログラムがあります。これは、Electro-Voice EVAスピーカのアレイ設計用の簡易LAPSです。EVADAにもLAPSと同じ超低域モデリング・ページがあります。LAPSとEVADAはMicrosoft Excelアプリケーションで、イーブイオーディオジャパンのホームページ ([www.eviaudio.co.jp](http://www.eviaudio.co.jp)) から無料でダウンロードできます。このアプリケーションの動作にはIBM PC (またはPCエミュレータ環境)、Microsoft Excel 2000以降、Windows 2000以降が必要です。

## 5. ウーファー・アレイのタイプ

プロ用オーディオには、次の3種類のウーファー・アレイがあります。

1. **ブロードサイド・アレイ** - 多数のウーファーを横1列に並べます。一次放射ラインは列に直角です。これは大部分のアプリケーションで見られる代表的なサブウーファー配置で、スタック型またはフライング型のどちらかです。現在は、ブロードサイド・アレイが圧倒的に多いセッティングです。
2. **傾斜アレイ** - ウーファーは、マイクロホンのような指向性パターン（通常はカーディオイドまたはハイパーカーディオイド）を示す方法で配置、駆動します。このアレイでは、望ましいパターンを作るため、ディレイ、フィルタ、および/または極性反転を設定できる複数の駆動チャンネルをもつウーファーが必要です。傾斜アレイは1つの筐体で購入できますが、いくつかのウーファー・ボックスで構成することもできます。
3. **エンドファイヤ・アレイ** - 多数のウーファー・キャビネットを希望の放射方向に向けて間隔をあけて横1列に並べ、少しずつ遅らせて非常に狭いパターンを作るように駆動します。エンドファイヤ・アレイはショットガン・マイクのスピーカと同等のものです。エンドファイヤ・アレイはまれなケースで、ロングスロー・アプリケーション、野外または巨大会場でのみ有効です。

### 5.1. ブロードサイド・アレイ

ブロードサイド・アレイは、ウーファー・ボックスを横1列に並べたもので（またはボックスを積み上げたもの）、音波放射は列に対しておおよそ直角です。列はまっすぐ、カーブ状または階段状に配列できます。

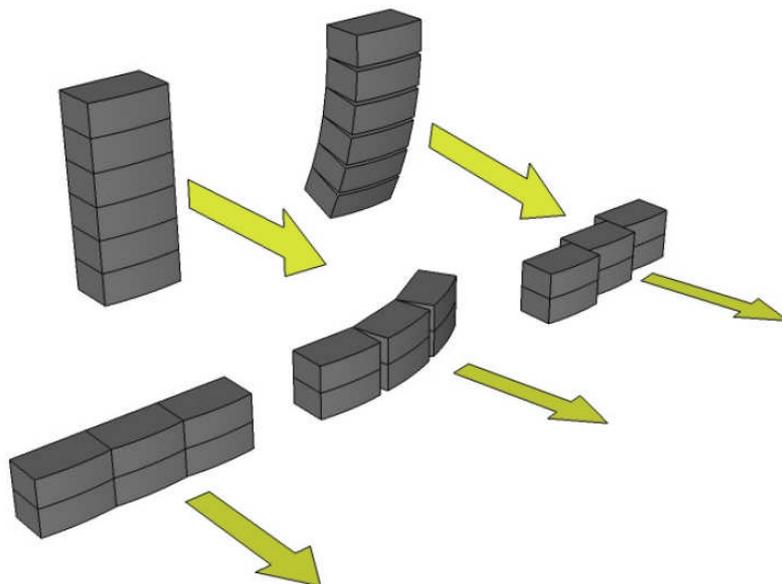


図 8. ブロードサイド・アレイ

ブロードサイド・アレイは設計とセットアップが簡単であるため、最も一般的なウーファー構成です。ところが、広範囲に低域を響かすには、基本セッティングにいくつか追加する必要があります。図 9から図 12は基本原理を示しています。

図 9は、長いアレイはパターンが狭く、短いアレイはパターンが広いことを示しています。

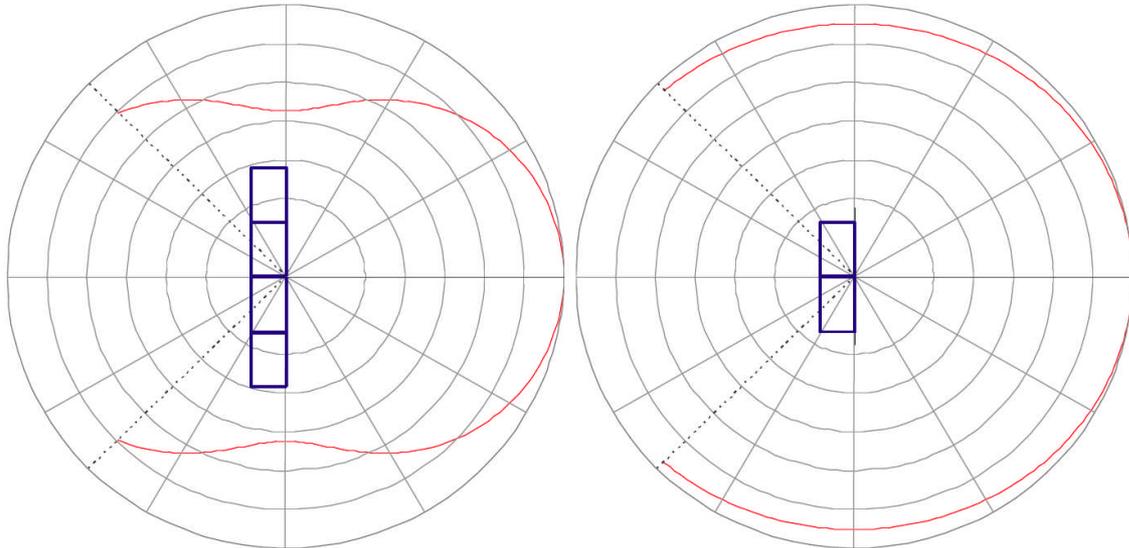


図 9. 長いアレイと短いアレイ - 2台と4台のXsubウーファー  
60Hz。平面図。右側が観客席

図 10は、直線アレイは周波数が高くなるほどパターンが狭く、ロブが多くなっています。カーブ状アレイは、十分な長さがあればより一定した指向性を示しています。

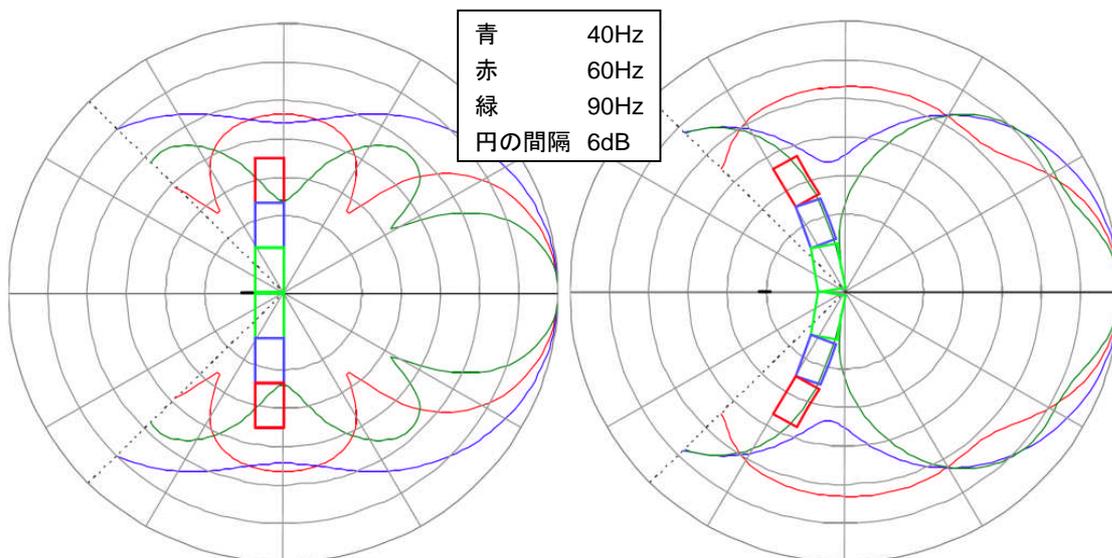


図 10. 直線アレイとカーブ状アレイ - 6台のXsubウーファー。右側が観客席

図 11は、階段状が基本的に傾斜と同じであることを示しています。階段状は、演出や見た目などの制約から傾斜アレイを使用できないときに便利です。

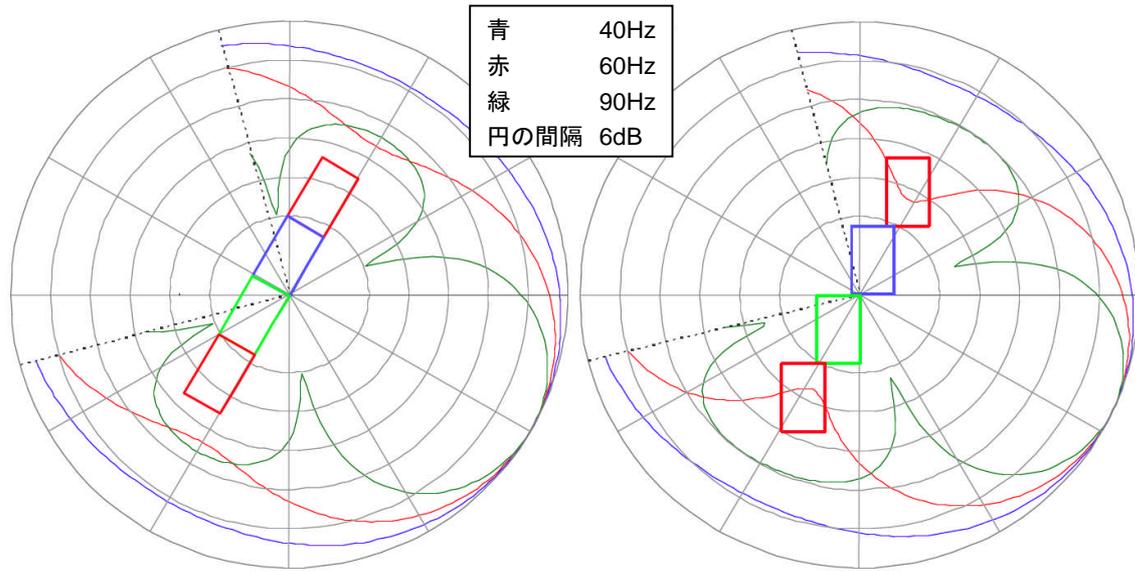


図 11. 傾斜アレイと階段状アレイ - 4台のXsubウーファー  
右側が観客席

図 12は、パターンを広げるには、カーブ状ではなく階段状を利用できることを示しています。この場合、階段状アレイのほうがよい結果が得られます。

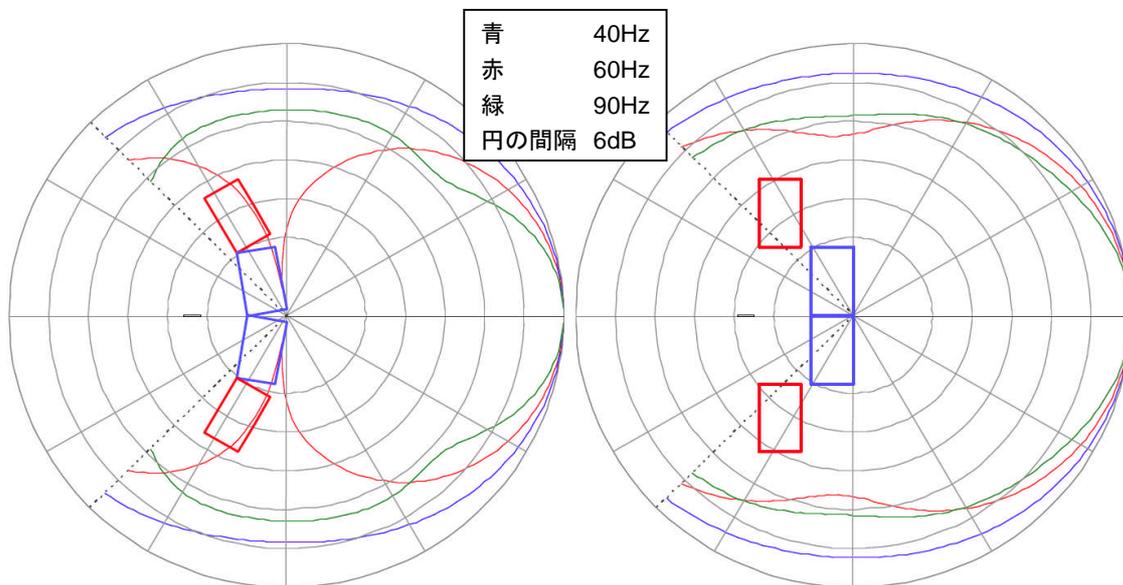


図 12. カーブ・アレイと階段カーブ・アレイ - 4台のXsubウーファー  
右側が観客席

## 6. グラウンドスタック・アレイ

**パターン幅** - グラウンドスタック水平アレイでは、カバレッジの幅がよく問題になります。約10フィート (3m) より広い超低域の直線アレイは、大半の会場では指向性が強すぎます。例えば、図 9のグラフを見ると、4台のXsubウーファー (幅は約12 フィートまたは3.7 m) のカバレッジ・パターンは60 Hzで90度しかありません。それより高い周波数では、さらに狭くなります。

さらに顕著な例は、図10の左側の図、Xsubウーファーを6台配置したときのパターンです。アレイの物理的な幅は約24フィート (7.3m) です。この例では、パターンは60 Hzで60度しかなく、周波数依存性が高いことを示しています。

パターンは、アレイをカーブ状または階段状にしたり (図 12を参照) ビームフォーミングを利用して、広げたりスムーズにすることができます。

**左右配置アレイのシステム** - 左右配置アレイのシステムでは、左右それぞれのアレイのパターンを理解するとうまくいきますが、最適な設計には両方のアレイを同時に考慮する必要があります。

指向性を完璧に調整したとすると、左アレイは左側の観客のみをカバーし、右アレイは右側の観客のみをカバーすることになります。これは不可能なことなので、パターンは重なり、ロビングが発生します。システム設計の目標は、観客全体をカバーしながら、同時にロビングを最小限に抑えることです。

アレイが約10フィート (3m) より広い場合は、狭いパターンを利用してロビングを減らすことができます。左と右のビームをステージ後方に向けると、中央のパターンの重なりが減り、同時に全体的なカバレッジを広げることができます。図 13はこれを示しています。右側の図では、ウーファー・アレイは30度ステージ後方に向けられました。右側の図では、90 Hzのゼロ点がより浅くなり、カバレッジが改善されています。

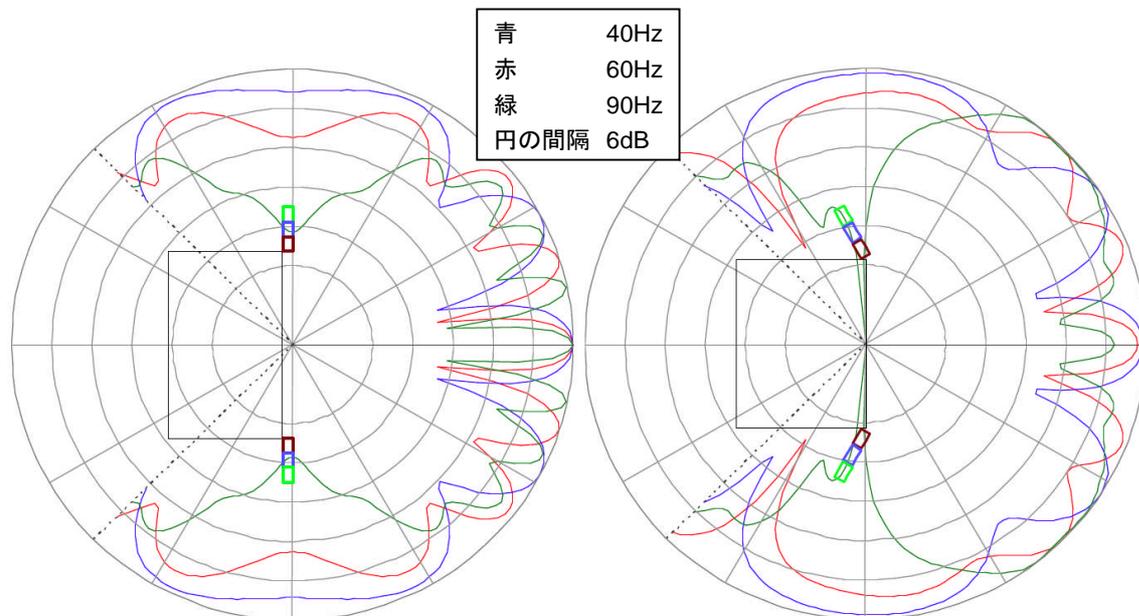


図 13. ステージ後方に向けたグラウンドスタック・ウーファー  
片側に3台のXsub。ステージの横幅は50フィート (15m)。平面図。右側が観客席

ビームフォーミングは、ウーファーをステージ後方に向けたときとほぼ同じ効果があります。図 14 は図 13 のアレイにビームフォーミング・ディレイを適用したときの効果を示しています。かなりすばらしい結果です。

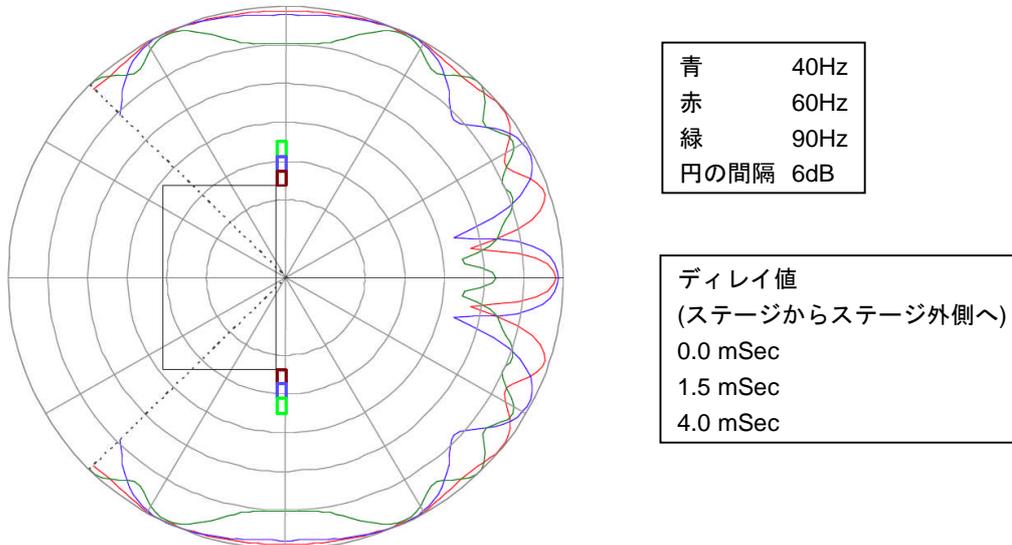


図 14. ビームフォーミングでステージ後方へ放射  
各サイドに3台のXsub。ステージの横幅は50フィート (15m)。平面図。右側が観客席

大きい中央スタック - 大型会場や野外ステージでは、サブウーファーをステージ前面に1列に並べると便利がよくあります。そのような1つにまとめたセッティングでビームフォーミング・ディレイを使うと、すばらしい結果が得られます。図 15 は 12 台の Xsub ウーファーを1列に並べ、ディレイを最適な値に設定したときの指向性を示しています。

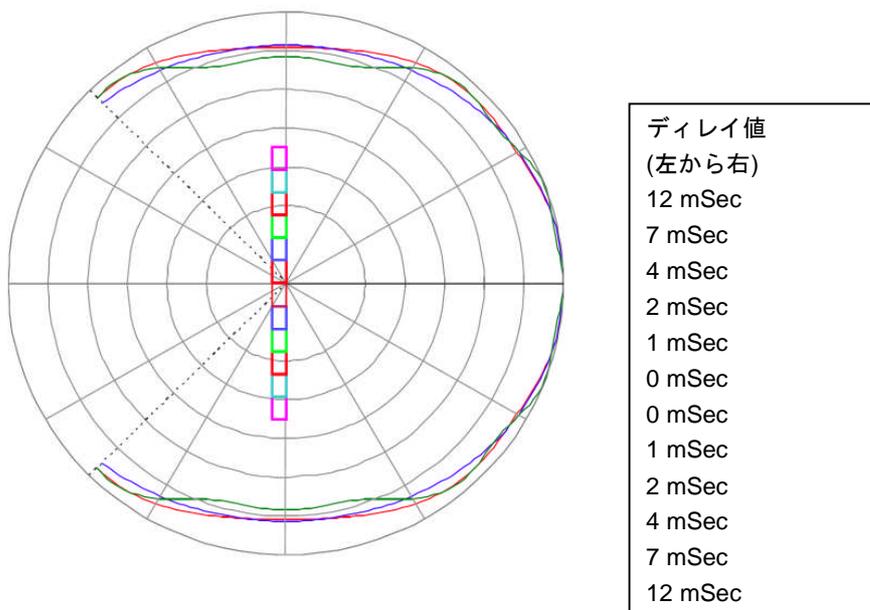


図 15. 12台のXsubウーファーを中央に並べ、ビームフォーミングを利用  
平面図。右側が観客席

図 15は微妙なビームフォーミングを詳しく図示したもので、注意が必要です。ディレイ値の表を見ると、値は均等に増減していません。増加の幅はアレイの両端に向かうにつれだんだん大きくなっています。これが普通です。実際にビームフォーミングを設計してみれば (LAPSその他のモデリング・ツールを使用)、アレイの両端でディレイを増やす量を大きくしたほうが、放射の方向とビーム拡大の両方でよい結果が得られることが分かるはずです。

図 16は図15と同じアレイのパターンですが、ビームフォーミングを適用していません。カバー角度は狭く、周波数依存性がより強くなっています。そのようなアレイは細長い会場 (パレードの行進順路など) のカバーには有効ですが、普通のコンサート会場では、図15に示したビームフォーミングを利用したセッティングのほうが適しています。

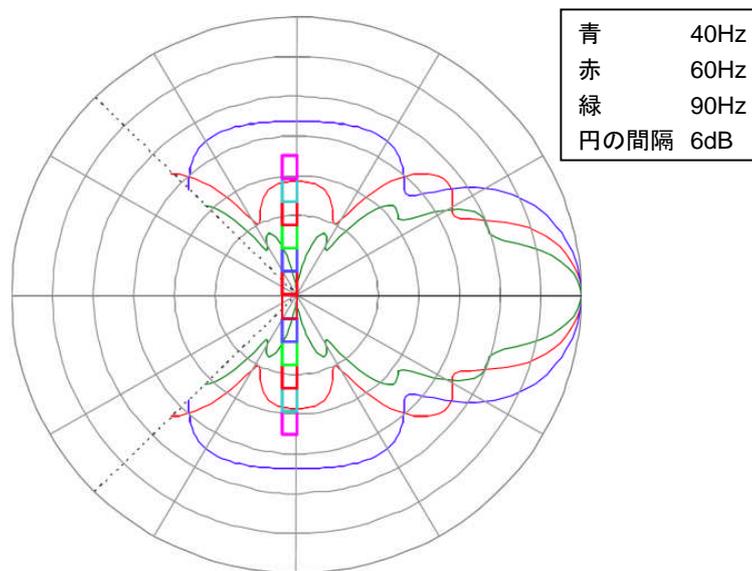


図 16. 12台のXsubウーファーを中央に並べ、ビームフォーミングは利用しない平面図。右側が観客席

## 7. フライング・アレイ

フライング・サブウーファー・アレイは普通、1つのボックス、または多くとも2つのボックスの幅があり、非常に広い水平カバレッジを持っています。その反面、このアレイは通常は長く、そのために垂直カバレッジが狭くなりすぎるのがよくあります。特に、前の数列の座席で超低域が聴こえないことがあります。

### セッティング方法

1. 図 10 と図 12 に示した水平面と同様、アレイを垂直面でカーブ状に並べます。カーブ状のスタックは見た目がよいことが多く、最近では、ウーファー・スタックの前面を高中音スピーカー・スタックの前面と合わせて配置する傾向があります。ただしこのセッティングは、スピーカを高く積み重ねる場合のみに効果があります。
2. 中央ステージに数台のグラウンドスタック・ウーファーを追加します。このウーファーは、影響を受けるエリアをカバーできる音量にします。ディレイとレベルは、前の10列から20列までを均等にカバーするように調整します。これはよくある手法ですが、均等にカバーするように調整することは複雑で難しい設定です。
3. ビームフォーミングを使用します。これは通常、フライング・アレイでは最も効果的なテクニックです。

図 17から図 19はLAPSラインアレイ・モデラーの結果です。代表的な2つのバルコニーをもつ劇場で、フライング・バスラインアレイ(8台のXLC-215ウーファー) のセッティングを変えたときのパフォーマンスの違いを示しています。グラフは1つのスタックのみの垂直カバレッジ・パターンを示しているため、存在する水平ロビング効果は含まれていませんが、垂直パターンの調整についてヒントが得られます。

図 17はカーブ、傾斜、ビームフォーミングなしのシンプルなフライング・アレイを示しています。前列で明らかに低域の問題があります。

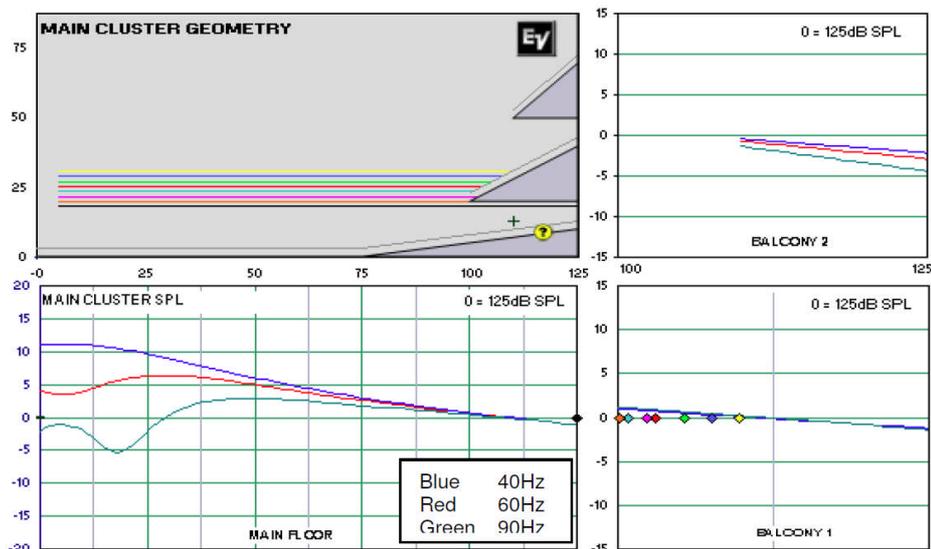


図 17. 傾斜なし、ビームフォーミングなし

図 18は図 17と同じアレイですが、2台のXLC-215ウーファーを追加してステージまたはステージ前面に積み上げています。フロントフィル用ウーファーは2.0ミリ秒遅らせます。カーブの形状はディレイ値にかなり敏感です。パフォーマンスは向上しますが、まだ改善の余地があります。

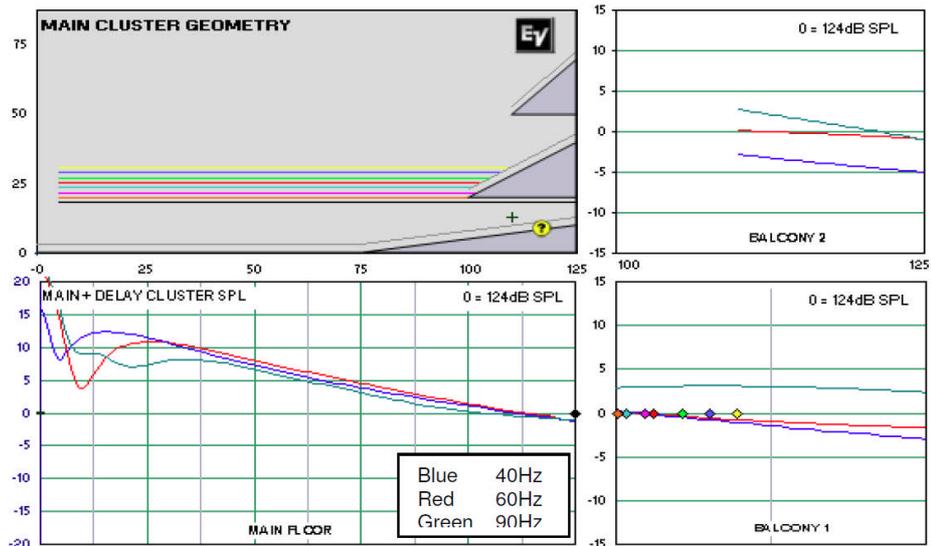


図 18. 傾斜なし、ビームフォーミングなし

2台のXLC-215ウーファーをフロントフィル用にグラウンドスタック

図 19は、シンプルなビームフォーミングを少し加えるだけで効果が現れることを示しています。スタック下段の2つのボックスは4 ミリ秒遅らせます。他のプロセッシングは適用していません。

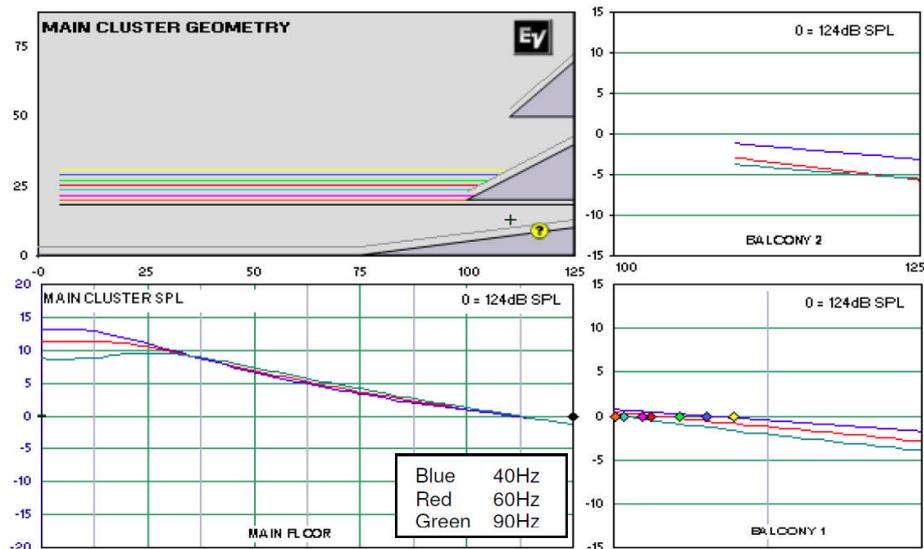


図 19. ビームフォーミングを適用: 下段の2つのボックスは4.0 ミリ秒遅延

これらのすべてのセッティング例では、全体として前から後に12から14 dBの低域レベルの差があります。これは大半のアプリケーションで満足できるものではありません。この問題を解決する完璧なセッティングは難しいです。

会場の規模から可能ならば、前から後の低域SPLを均一にするための1つの最も効果的なテクニックは、トリムを高く設定することです。上記の図のセッティングでは、スタック最上段までのトリム高さは32フィート (~10m) でした。図 20は図19と同じビームフォーミング・アレイの結果ですが、スタック最上段までのトリム高さは65フィート (~20m) です。前から後へのレベルの変化はかなり少なくなっています。

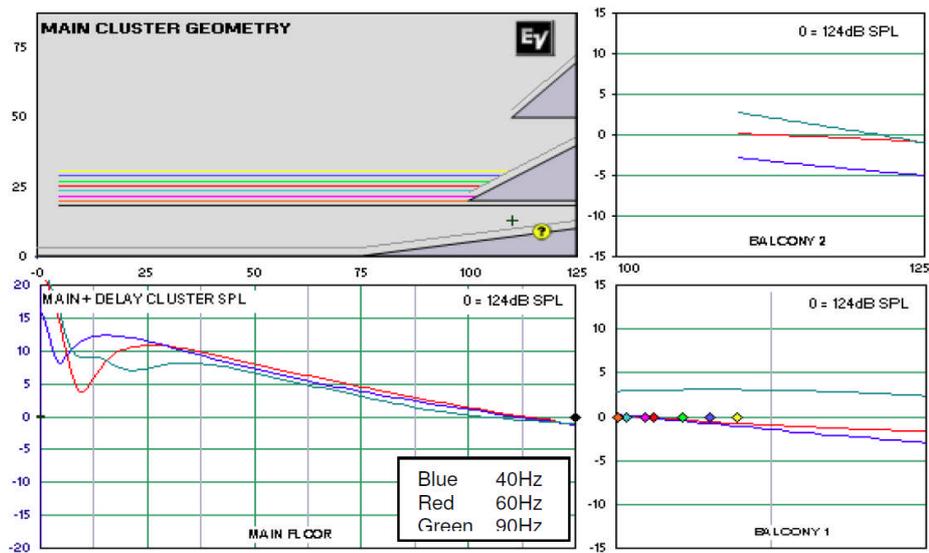


図 20. ビームフォーミングを適用; トリム高さ65ft (~20m)

フライング型中央超低域ラインアレイ - 演出や舞台装具から可能であれば、中央のサブウーファー・フライング・スタックは素晴らしい結果が得られます。ロビングは全くなく、水平カバレッジは基本的に360度で、垂直カバレッジはビームフォーミングで適切に調整できます。

図 21はアリーナ会場の中央に12台のXsubウーファーをまとめて吊り下げたときのカバレッジを示しています。ウーファーはまっすぐに吊り下げられ、最適に設定されたビームフォーミング・ディレイが適用されています。さらに、レベル・シェーディングが適用されました。その結果、超低域のカバレッジ・パターンは、聴取エリア全体で音のバランスが一定に保たれています。

この例では、ディレイは2つ一組で適用されました。つまり、隣接した1組のウーファーが駆動チャンネルを共有します。これは各ウーファーに駆動部とアンプ・チャンネルを装備させるよりも経済的です。その反面、各ウーファーで駆動チャンネルを利用できるほうが良いカバレッジが可能です。

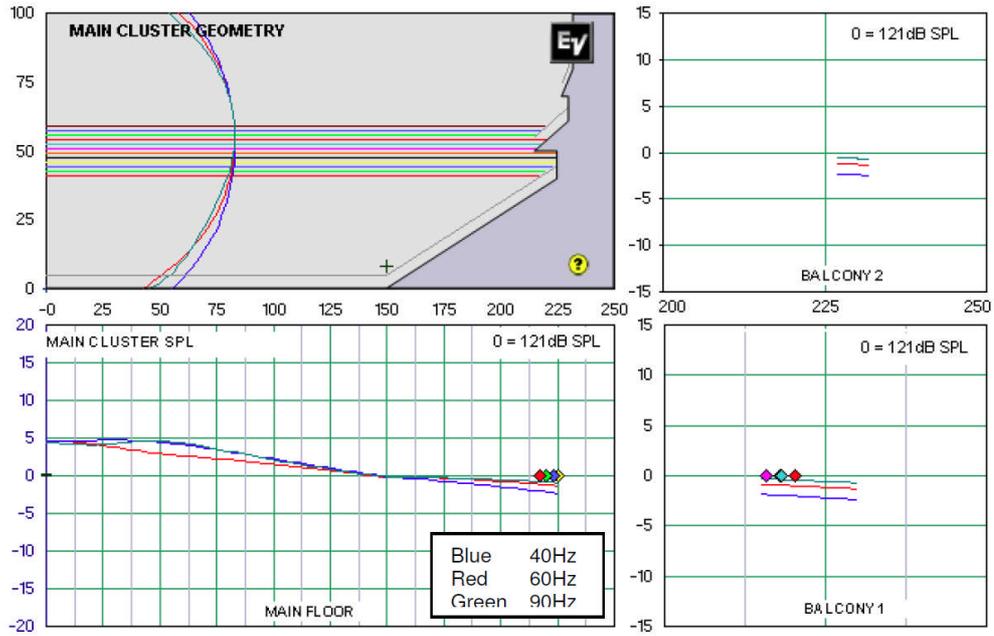


図 21. アリーナ会場の中央にフライングした12台のXsub

ディレイとゲイン  
(上段から下段)

5 mSec	-3 dB
5 mSec	3 dB
2 mSec	0 dB
2 mSec	0 dB
1 mSec	0 dB
1 mSec	0 dB
0 mSec	0 dB
0 mSec	0 dB
1 mSec	0 dB
1 mSec	0 dB
1 mSec	-3 dB

## 8. 傾斜アレイ

傾斜アレイとは、不要な方向での音の放射を抑制させる方法で、異なる振幅と位相で駆動させたスピーカを配置したものです。

傾斜アレイは 寸法が波長に対して小さい場合にのみ有効です。このアレイは、大きくなれば有効でないビームフォーミング・アレイとエンドファイヤ・アレイの正反対のものです。その理由は、傾斜させたスピーカは音波のさまざまな部分の圧力差を調整することで機能するからで、「音波」内で機能できる小さいものでなければいけません。

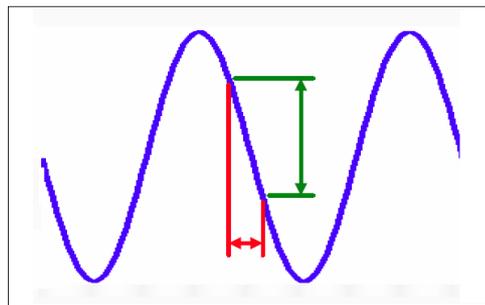


図 22. 傾斜

傾斜スピーカは、普通の指向性マイクロホンとよく似た性質をもつスピーカで、音波のさまざまな部分の音圧差を制御して動作します。

傾斜テクニックは、小さいアレイで超低域パターンを調整する唯一の実用的な方法です。入念に正しくセットアップすれば、傾斜アレイは一連の実用的なパターンを提供でき、同程度のサイズのシンプルなアレイよりもかなり良い低域カバレッジが得られます。

### 8.1. 例

図 23は標準傾斜構成の1組のXsubサブウーファーを示しています。スピーカー・ボックスはそれぞれ駆動部を備えています。ボックスは4インチ (10cm) 離して配置されています。後のボックスは逆極性で駆動され、4.65ミリ秒遅れます。その結果、このアレイはハート型 (カーディオイド) 指向性パターンを示します。

この例のスピーカは背中合わせでマウントされていますが、常にそうする必要はありません。フロントキャビネットとリアキャビネットの間にリアスピーカの音が出る十分なスペースがあれば、リアキャビネットは前方または後方に向けてマウントできます。すきまは最低18インチ (50cm) 必要です。いずれにしても、スピーカ・コーンの間隔に合わせてディレイ値を調整する必要があります。

図 23に示したXsubそれぞれが1台のXsubではなく、複数のXsubを積み上げた場合は、傾斜ラインアレイになります。傾斜ラインアレイには便利な特性があります。この特性については後で詳しく説明します。

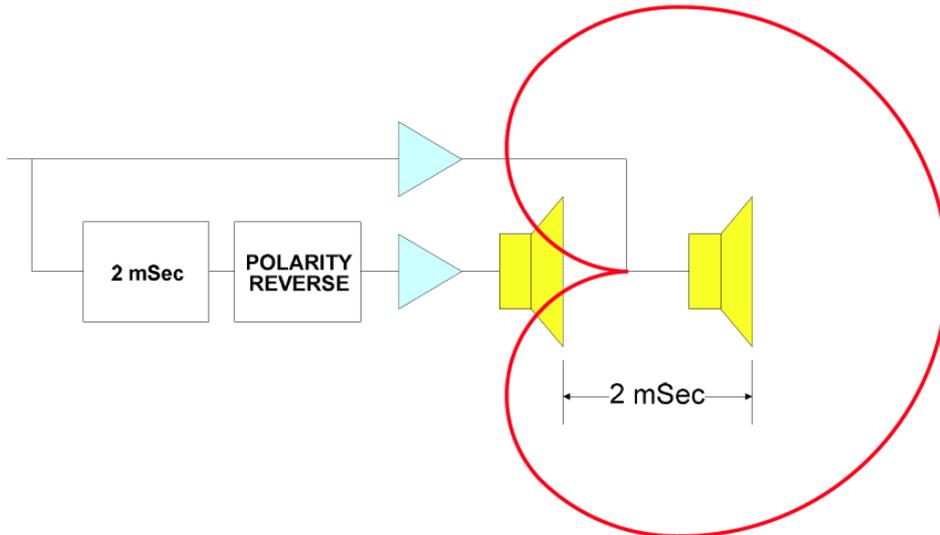


図 23. ハート型 (カーディオイド) 指向性のXsubペア

## 8.2. 傾斜アレイの特性

パターン・オプション - 傾斜ペアでは、リア・エレメントのディレイを変えるとパターンは変わります。利用できるパターンはマイクロホンのパターンと似ていて、カーディオイド、ハイパーカーディオイド(さまざまなタイプ)、8の字です。

図 24と図 25は、上記の例の背中合わせのXsubペアの4つのパターン・オプションを示しています。

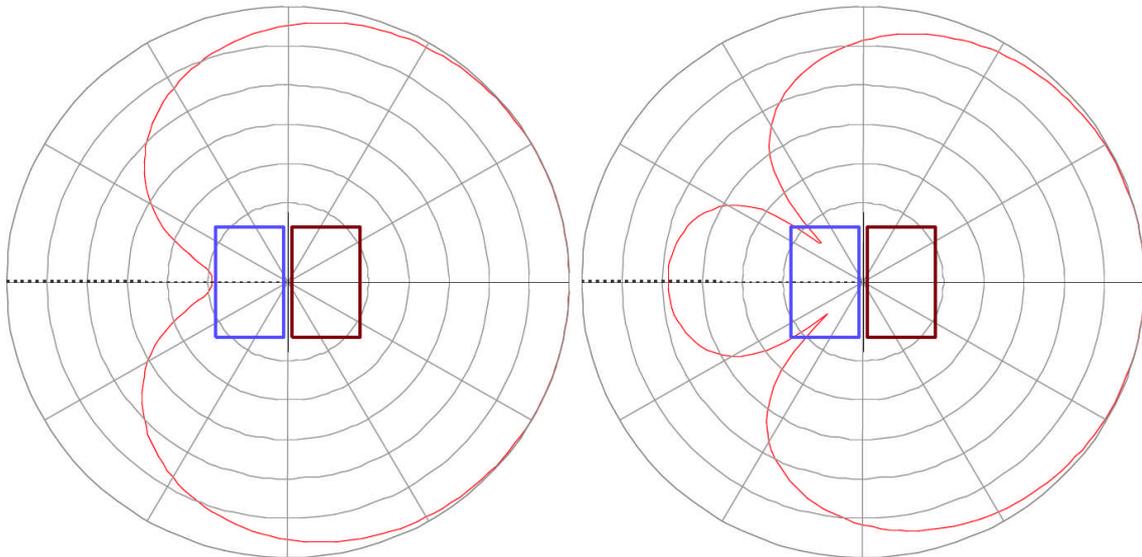


図 24. 左:カーディオイド、ディレイ = 4.65 mSec  
 右: ハイパーカーディオイド、 $\pm 135$ 度ゼロ点、ディレイ = 3.4 mSec  
 60Hz。右側が観客席

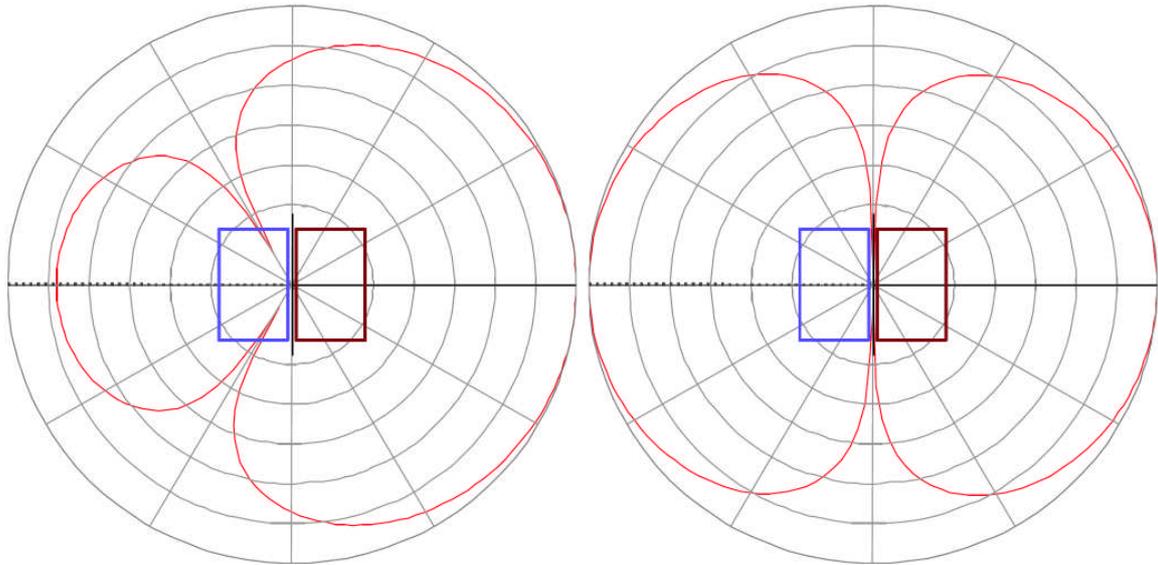


図 25. 左: ハイパーカーディオイド、 $\pm 120$ 度ゼロ点、ディレイ = 2.3 mSec  
 右: 8の字。ディレイ = 0.0 mSec  
 60 Hz。右側が観客席

エレメントの間隔、出力、帯域幅 - 傾斜ペアを構成する場合は、エレメントの間隔の役割を理解する必要があります。「エレメントの間隔」とは、フロントスピーカー・コーンとリアスピーカー・コーンの距離を指します。エレメントの間隔が大きいほど超低域の出力は増しますが、最大動作周波数は下がります。またエレメントの間隔が小さいほど出力は減りますが、最大動作周波数は上がります。

例に示したエレメントの間隔は62インチ (157 cm) で、最大動作周波数は約90 Hzです。パターンは図26に示したように、高周波数限度を越えると急に悪化します。

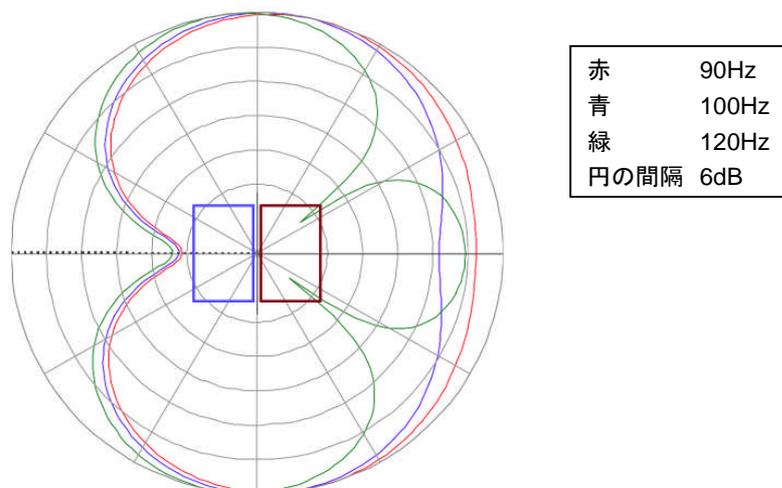


図 26. 背中合わせのXsubの90Hz、100Hz、120Hzでの指向性  
 右側が観客席

**隣接面の影響** - 傾斜ペアは、壁や他の反射面の前に置いたときは正しく機能しません。図 27は、壁から2フィート (60cm) 離して置いたXsubペアの指向性を示しています。グラフ中央の縦線で示したものが壁です。左の2台のウーファー・ボックスは仮想ボックスで、壁の反射音によって作られる音響イメージです。右の2つのボックスは実際のウーファーです。

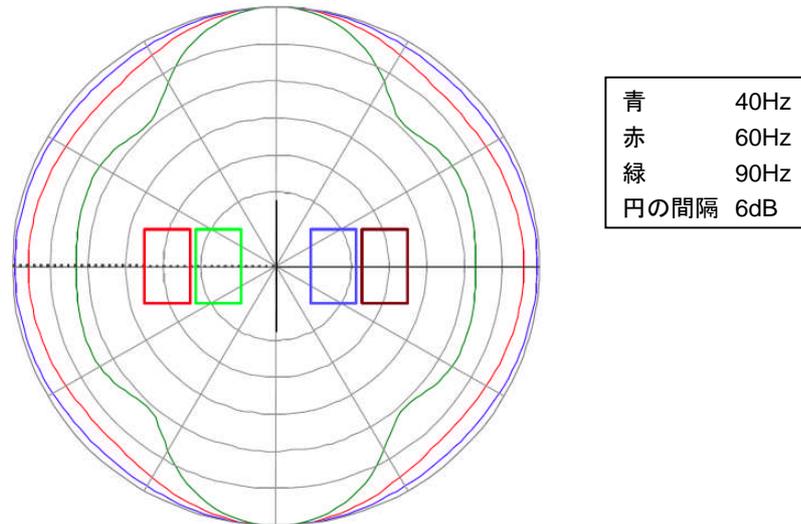


図 27. 壁から2フィート離れたカーディオイド・ペア。  
左のボックスは実際のアレイの音響イメージ、右は実際のアレイ  
右側が観客席

**残響場の音バランス** - たいていのサブウーファー・アレイは低い周波数で指向性が弱くなります。従って、周波数が下がるにつれ、アレイは比例してより多い出力を会場の残響場に送ります。このため、残響場の超低域が過剰になります (「バス・ブルーム」とも呼ばれます)。

他のほとんどすべてのタイプのスピーカとは違い、傾斜スピーカは一番低い周波数までそのパターン制御を維持します。従って、残響場の低周波エネルギーが多すぎないアプリケーションで便利です。

**エレメント駆動レベルとウーファー・カウント** - 実際の傾斜アレイでは、リア・エレメント (「ステアリング・エレメント」と呼ばれることが多い) がフロント・エレメントの出力より約6 dB 小さいとき、リアの放射が最小になることが分かりました。この結果は、キャビネットの形状効果によるものです。実際面では、リア・ウーファーの数はフロント・ウーファーの数の半分でよいということです。

### 8.3. 高度な傾斜駆動

ディレイを利用して指向性パターンを作る手法は低周波数では効果的なテクニックですが、スピーカ・キャビネットの形状が音波に与える影響を考慮していません。このため、アレイの周波数レンジの上限で放射パターンが予想した形状からずれることがあります。

Electro-VoiceのXCS-312カーディオイド・サブウーファーのように、フロントスピーカとリアスピーカが1つのキャビネットに一体化されている場合には、これらの影響を補正する高度の駆動プロセッシング方式を開発でき、スピーカは周波数レンジ全体でその定められた指向性を維持します。この駆動システムは「オールパス・フィルタ」を使い、キャビネット周辺の音波伝搬の影響を補正します。

#### 8.4. 傾斜ラインアレイ

傾斜ペアを並べてラインアレイで配置すると、その指向性は傾斜特性とブロードサイド特性の両方を示します。

図 28は、2台のボックスを積み重ねた傾斜ラインの放射パターンですが、2台だけではブロードサイド・アレイの性質を示すには短すぎます。パターンはシンプルなカーディオイド形回転です。

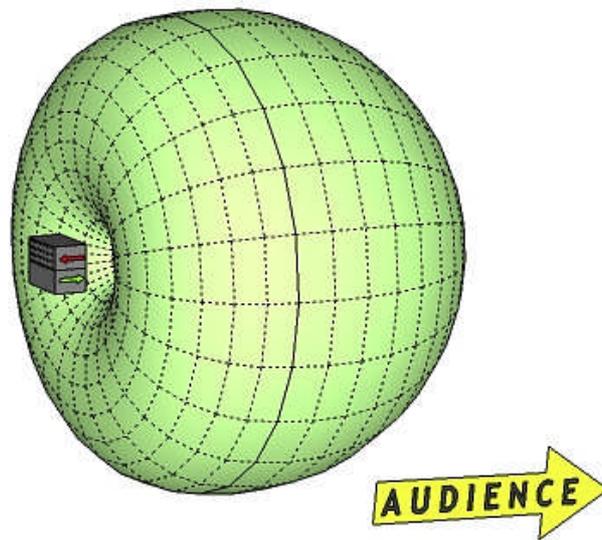


図 28. 非常に短い傾斜ラインアレイ

図 29は、ブロードサイドの性質を示す長さを持つ傾斜ラインアレイのパターンを示しています。パターンは平たくのびたカーディオイド形回転です。

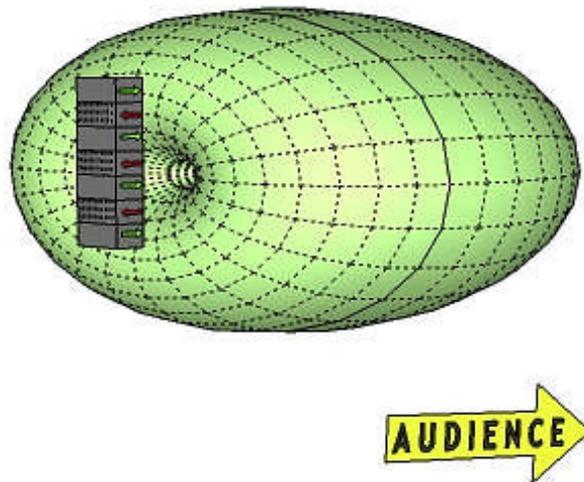


図 29. 長い傾斜ラインアレイ

実際、傾斜ラインアレイは、XCS-312サブウーファーなどの専用傾斜スピーカや、従来のスピーカを前後に縦2列で積み上げまたはフライングして構成できます。

ビームフォーミングを適用した傾斜ラインアレイ - ビームフォーミング・ディレイを傾斜ラインアレイに適用し、パターンを傾斜させることができます。この場合、ビームフォーミング・ディレイは、アレイの傾斜ペアのフロント・エレメントとリア・エレメントに均等に適用する必要があります。

図 30は、ビームフォーミング・ディレイを追加して下向き傾斜を作りだした傾斜ラインアレイのパターンを示しています。このパターンは平たくのぼし、傾斜させたカーディオイド形回転といえます。高度なディレイ・プロファイルを利用すれば、より複雑な垂直パターンの形状を実現できます。

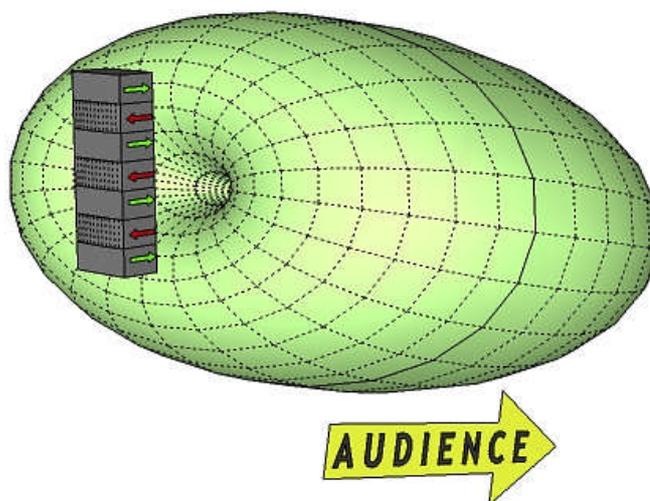


図 30. ビームフォーミングを適用した傾斜ラインアレイ

## 8.5. 傾斜アレイ・アプリケーション

前に説明したように、傾斜アレイは、垂直寸法は大きくとも水平寸法は小さい小規模なサブウーファー・アレイとラインアレイに有効です。

小規模なアレイの問題は次の2つに分けられます。

1. 左スタックと右スタックとの重なりによるロビング
2. 過度に広いカバレッジ

また、傾斜アレイは後方向の低域放射が問題の場合にも便利です。よくある問題は次のとおりです。

- a) ステージ上で低域が強すぎる。
- b) デイレイ・クラスタからの望ましくない低域後方放射

**左右アレイ** - スタック型またはフライング型の左右サブウーファー・システムでは、放射アレイをステージ外側に向けると、ロビングを減らすことができます。図 31はステージの両脇に配置した1台の幅のXsubのカバレッジと、同じサイズで傾斜構成のカバレッジとの比較です。

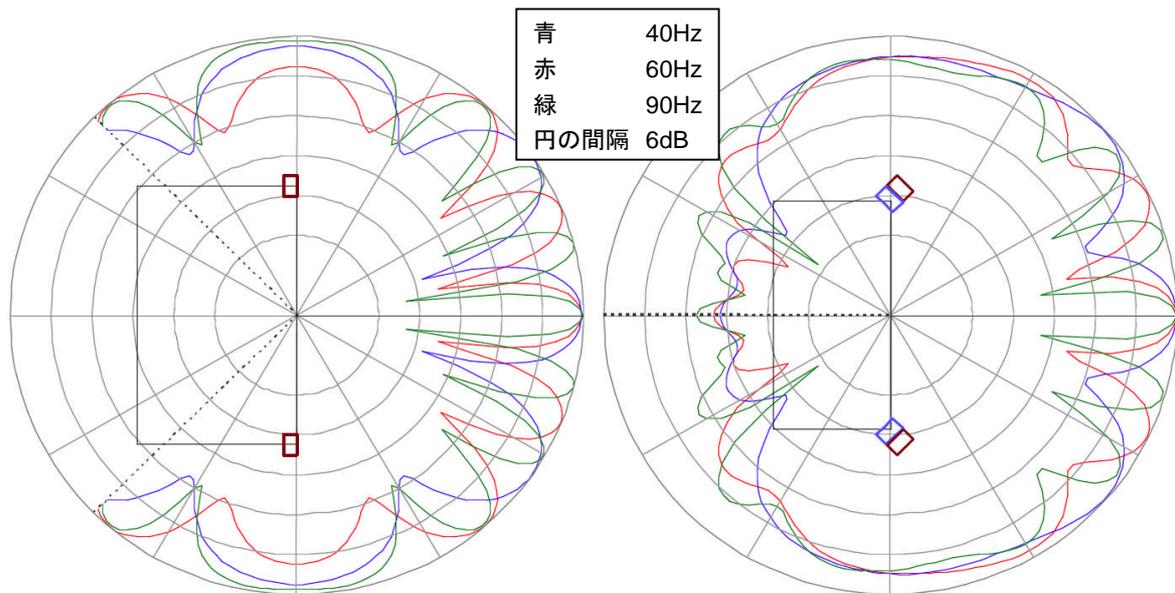


図 31. シンプルな左右アレイと傾斜左右アレイの比較。ステージの横幅=50' (15m)

左: 2台のXsubを左右に配置、シンプルな駆動

右: 45度ステージ外側に向けた2台の135度ハイパーカーディオイド傾斜ウーファ

ー

平面図

**ステージ上の低域**- 図 31からは分かりませんが、角度をつけたハイパーカーディオイド構成では、シンプルな構成よりもステージ上の低域がかなり弱くなります。

左のシンプルな構成では、ステージ中央の出演者には比較的短い距離から両方の超低域スタック

の合計された出力が聴こえます。会場内で超低域がこれより大きいところはどこにもありません。これに対し右の構成では、傾斜ウーファースのハイパーカーディオイドのゼロ点がステージ正面に直接、向いています。代表的な構成では、ステージ手前の中央で超低域レベルが15 dB以上下がります。

**より小規模なアレイのカバレッジ調整** - フラットフロアの小さい会場では、サブウーファーを並べると、普通、ステージ近くの観客エリアの低域レベルが強くなりすぎます。ダンスクラブであればこれで十分ですが、企業のAVプレゼンテーションでは好ましくありません。その場合には、中央に小型サブウーファーを吊り下げると、どこも低域レベルが強すぎず、優れたカバレッジを実現できます。ところが、従来のウーファーを使用すると、基本的に無指向性となり、(a) 大量の低域エネルギーが残響場に放出されて、濁りのあるサウンドを生み出し、(b) ステージ上の低域が非常に大きくなります。

これに対し、カーディオイドまたはハイパーカーディオイド・ウーファーをステージの上に吊ると、低域エネルギーは必要な場所、すなわち観客席に入れられ、残響場に入らずステージからも遠ざけられます。

図 32は、120°度ハイパーカーディオイド・ウーファースのパターンです。図を水平ポーラー・プロットと考えると、低域エネルギーの大半は前方に放出され、無用な方向には入っていません。図を垂直プロットと考えると、ハイパーカーディオイドのゼロ点はステージを指しています。

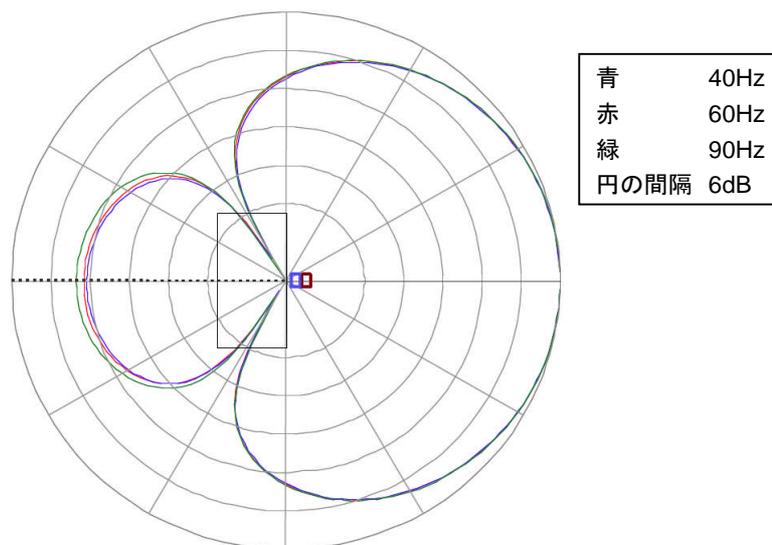


図 32. ステージ中央上に設置した小型の120度ハイパーカーディオイド・ウーファース平面図と側面図

**大規模な中央クラスタ** - 大規模な中央ウーファース・ラインアレイは、それだけで素晴らしいサウンドを再生できますが、360度の超低域カバレッジが必要でないショーでは傾斜テクニックを利用するとさらにより結果が得られます。そのようなショーでウーファース・クラスタを傾斜ラインアレイとしてセッティングすると、残響場に放射される低域エネルギーが少なくなります。その結果、超低域はよりクリアで、音の粒立ちがよく、インパクトと低域感も強くなります。

音響理論上、傾斜ウーファースを使用すると、無指向性ウーファースと比べて残響場の超低域エネルギーが4 dBから6 dB 減ります。

**ディレイ・クラスタ** - 大規模な会場、特に野外スタジアムや野外会場では、ディレイ・クラスタを使用して、ステージから遠く離れた聴取位置でのサウンドのレベルと音質を補強させるセッティングが一般的です。このクラスタの主要な目的は、高周波レベルをブーストして、空気に吸収される比較的高い高周波エネルギーを補正することです。また一方で、ディレイ・クラスタで低周波エネルギーを追加したほうがよい場合もあります。この場合には、従来のスピーカでは問題が起こります。低い周波数では、一般的なディレイ・クラスタは基本的に無指向性です。従って、かなりの量のサウンドがステージの方へ戻されます。この後方放射はメイン・スピーカ・システムからの直接のサウンドと時間がずれ、好ましくない干渉を引き起こします。

この問題を解決するには、低周波のディレイに傾斜スピーカを使用します。この場合に選択するパターンは、後方放射レベルが最も低いカーディオイドです。

## 8.6. エンドファイヤ・アレイ

エンドファイヤ・アレイはボックスを1本の共通軸に並べたセッティングで、サウンドの一次放射が軸方向になるように駆動されます。

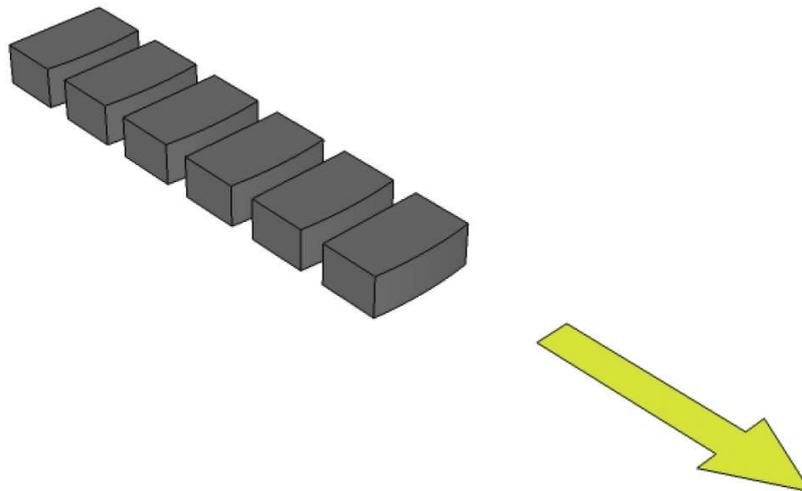


図33. エンドファイヤ・アレイ

各ボックスは別個のディレイから駆動されます。すべてのボックスは同じ極性です。一番単純なセッティングでは、ボックスを等間隔に配置し、ボックス間のディレイ時間は、音波が1つのボックスから次のボックスに届くまでの所要時間に等しい値に設定します。図 34はある例のパフォーマンスを示しています。

ここで使用したグラフでは、最大出力は任意に0 dBと示してあります。実際には、長いエンドファイヤ・アレイであれば、パワフルで指向性のある低域を遠くまで響かせることができます。

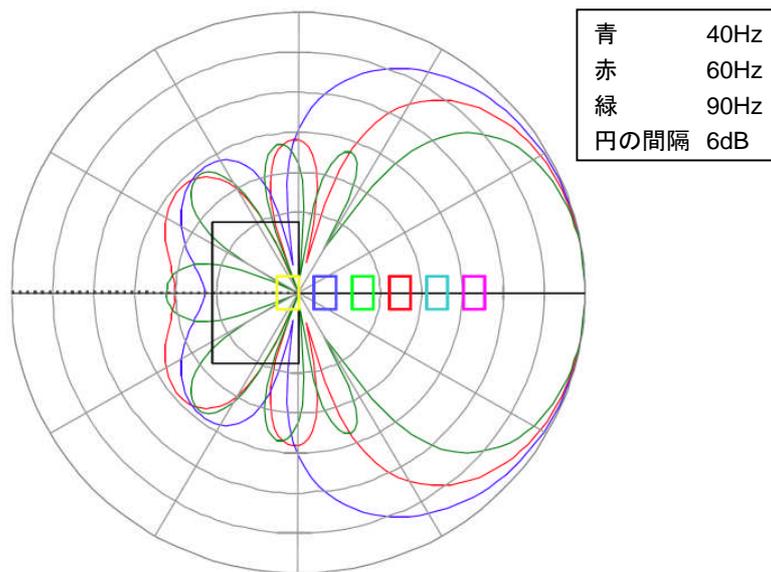


図 34. エンドファイヤ・アレイ (6台のXsub)  
ボックスの間隔は2フィート (60cm)、ボックス間のディレイは4 mSec

## 付録 A: サブウーファーのクロスオーバーのセットアップ

サブウーファーのクロスオーバーのセットアップは、サブウーファーの配置問題とは関係ありませんが、クロスオーバーの調整は超低域サウンドの重要な要素です。次の手順は、N8000 Matrix Processor用FIRドライブ・クロスオーバー・ソフトウェア、Electro-VoiceのFIR.1に付属する取扱説明書『FIR.1: ご使用前に』を編集したものです。

必要な作業は、メイン (高中域) クラスタとサブウーファーの周波数、タイプ、ディレイ、極性、ゲイン・パラメータの設定です。この設定は難解で面倒と思われかもしれませんが、決められた手順を行えば、実際はそれほどむずかしくありません。サブウーファーのクロスオーバー調整手順は数多くあります。ここで説明する手順はたいいていの屋内、野外会場でよい結果が得られます。

次の手順は、多くの場所で満足のいく結果が得られる基本手順です。

1. 音響信号ジェネレータ、または超低域クロスオーバー周波数を中心にした周波数レンジで正弦波音を生成できるテスト用CDを設置します。音がメイン・システム、サブウーファーまたはその両方から出るようにシステムを構成します。
2. 標準の左右システムの場合には、システムの片側だけがアクティブになるように信号パスをセットアップします。単一の中央サブウーファー・クラスタ (フライングまたはスタック・セッティング) を使用する場合は、左右両方のメイン・クラスタを使用するように信号パスを設定します。
3. 初期クロスオーバー・パラメータを次のように設定します。

	メイン・アレイ	サブウーファー
周波数	X-Line: 80 Hz XLC DVX 80 Hz その他のXLC 90 Hz XLD 100 Hz XLE 100 Hz	メインと同じ
タイプ	下記を参照	18 dB/oct バターワースまたは 24 dB/oct リンクウィッツ/ライリー - 下記を参照
ディレイ	0.0 mS	0.0 mS
極性	標準	8 dB/oct バターワース: 反転 24 dB/oct リンクウィッツ/ライリー: 標準
ゲイン	0.0 dB	0.0 dB

クロスオーバーのタイプは、次の2つから選択できます。

- **18 dB/oct バターワース** - このタイプはサブウーファーがメイン・スタックから比較的離れている構成 (メインはフライング/サブウーファーはスタック・セッティング) に適し、残響が多い環境にも適しています。位置のずれも比較的許容されます。

- **24 dB/oct リンクウィッツ/ライリー** – このタイプは、ウーファーがメイン・スタックの近くにあり (例えば、メインはフライング/サブウーファーも左右にフライング・セッティング)、残響の少ない環境で良い結果が得られます。また、メイン・スタックが中低域を効かせる状況でも優れています。クリアで、低域を強調しすぎないサウンドを作るには入念な位置の調整が必要です。

どちらのタイプを選んだ場合でも、メインとサブウーファーに同じタイプを使用します。

4. ジェネレータの周波数を上記で入力したクロスオーバー周波数に設定します。レベルは低い値 (-30以下) に設定し、システムのミュートを選択的に解除します。音のレベルは会場の残留ノイズより高くなるように調整します。
5. サブウーファーをミュートし、ジェネレータの周波数をクロスオーバー周波数の約2倍の値に設定します。SPL測定計または SysTune<sup>®</sup> などのPC測定システムを使い、レベルを測定します。

測定計がない場合は、低域応答が優れたマイクロホンとミキソング・コンソールのレベルメーター、もしそれも無理ならば耳を利用できます。このステップでボーカル用ハンドマイクは使用しないでください。このマイクでは低域応答が十分平らになりません。

6. メイン・アレイをミュートし、ジェネレータ周波数をクロスオーバー周波数の約2/3の値に設定します。サブウーファーのミュートを解除し、サブウーファーのレベルをステップ3で測定したメイン・レベルと同じ値に調整します。上記ステップの後、メイン・チャンネルとサブウーファー・チャンネルは、全体的な音響ゲインがほぼ等しくなっているはずですが。この設定が最もスムーズなクロスオーバーを提供します。

演奏曲目で超低域のブーストまたはカットが必要な場合は、サブウーファーのゲインを調整しないでください。音質補正イコライゼーションを使用してください。サブウーファーの音質補正イコライゼーションについては付録Bで説明します。

7. 聴取ポイントからメイン・アレイとサブウーファー・アレイまでの距離の差を概算します。図 12のD(LF) - D(SB) の値がこれに相当します。

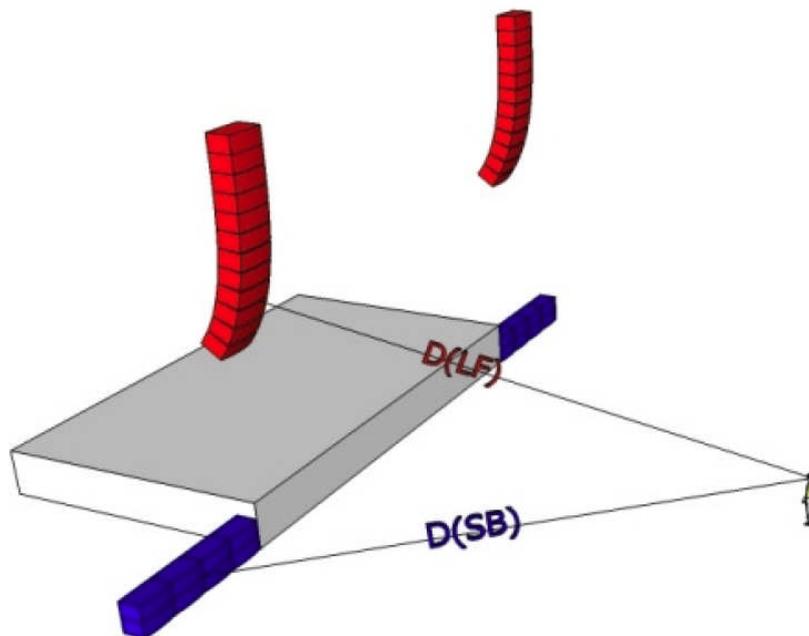


図 12. メインとサブウーファーまでの距離

音速は約0.9 mSec/フィート (または3 mSec/メートル) であることを考え、このサウンドをディレイ時間に変換します。この数字が必要なディレイ時間の推定値です。

セットアップ時間が限られている場合には、クロスオーバーにディレイ推定値を入力するだけで、他の調整プロセスは省略できます。ディレイは、聴取ポイントに近いほうのクラスタ(メインまたはサブウーファー)に適用します。より正確に調整したい場合には、次のステップを行ってください。

8. ジェネレータ周波数をクロスオーバー周波数と等しい値に設定します。メイン・クラスタとサブウーファー・クラスタのミュートを解除します。左右システムを調整する場合は、調整する方だけミュートを解除します。
9. ディレイをステップ7で説明した推定値に設定します。
10. ディレイを増減して、聴取ポイントで最大音量になるように調整します。このステップでは、耳やSPL計測計、または測定システムやマイクロホンとVU測定計を利用できます。
  - 最終的にディレイ値と推定値に10-15 mSec以上の差があった場合は、推定が間違っているか、または会場に問題があります。この場合は推定値を利用し、その後のステップは省略してください。
  - ステップ3でクロスオーバー・タイプにリンクウィッツライリーを選択した場合は、これで設定は終了です。
  - ステップ3でクロスオーバー・タイプにバターワースを選択した場合は、ステップ11に進んでください。
11. (バターワース・クロスオーバーを選択した場合のみ) Butterworth Tweakを適用します。次の分量だけディレイを増減させます。

クロスオーバー周波数	Tweak (mSec)
70	3.57
80	3.13
90	2.78
100	2.50

ディレイを増やすか減らすかの判断基準は少し複雑です。最適な手順は、両方を試し、カバレッジが優れているほうを選択することです。

## 付録 B: 超低域のイコライゼーション

ミックス・エンジニアの中には、バス・ブースト機能を搭載したシステムの使用を好む人たちがいます。例えば、次の図は、著者がよく知っている有名な男性ボーカリストがスタジアムやアリーナで使用するバス・ブーストのカーブです。

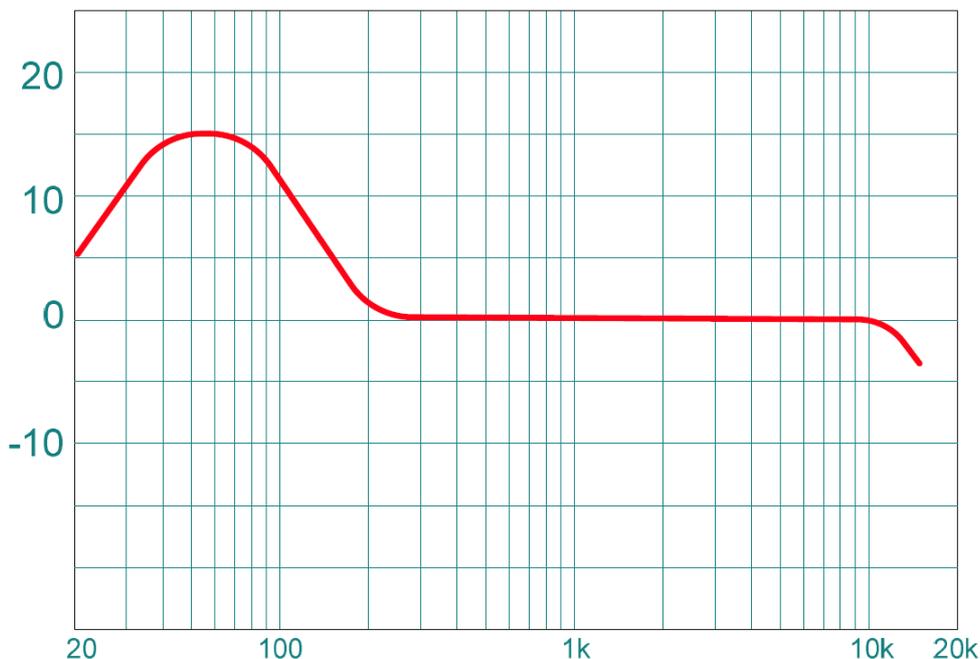


図 35. システムによるバス・ブースト

このような周波数特性カーブを描くように調整するとき、従来は、サブウーファー・チャンネルのゲインを上げていました。この方法の問題は、サブウーファーだけのゲインを変えると、サブウーファーのクロスオーバーの振る舞いが予期せぬ方法で影響を受けることです。

良い方法は、フラットな特性を示すようにサブウーファーのクロスオーバーを調整し (付録Bの初めで説明)、次にイコライゼーション (「超低域Contour EQ」と呼ばれるもの) を使いカーブ全体を希望通りの形にすることです。このイコライゼーションは、サブウーファーとメイン・アレイの両方に等しく適用すれば、サブウーファーのクロスオーバーに干渉しません。

この原理から、サブウーファーがメイン・ミックスの一部として駆動される、または自身のミックスから駆動されるかどうかに応じて、結果は次の2つの信号パス図のどちらかになります。

図 36は、サブウーファーがメイン・ミックスから駆動されるケースです。超低域Contour EQは標準のプレクロスオーバー・イコライザとして構成されています。

図 37は、サブウーファーが別のミックスから駆動されているケースを示しています。この場合には、超低域Contour EQは1組のイコライザ、すなわち1つのミックスに1台のイコライザで実行されます。両方のイコライザは常に同じ設定でなければいけません。設定は手作業またはマルチチャンネル・イコライザを使って行いますが、ソフトウェア制御のイコライザの場合はソフトウェアでチャンネルをリンクして行います。

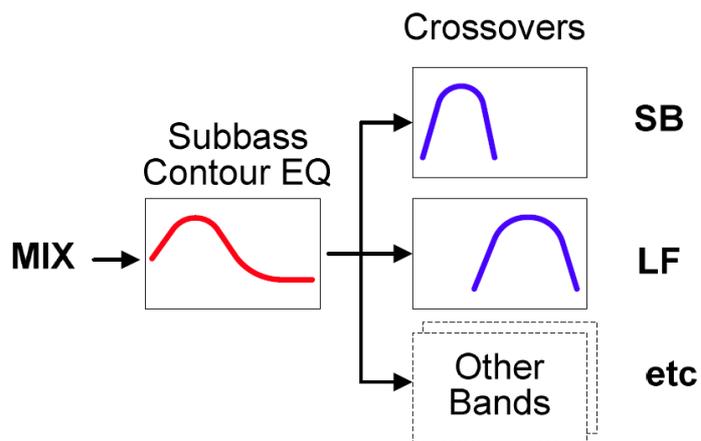


図 36. 超低域Contour EQ - サブウーファーはメイン・ミックスから駆動

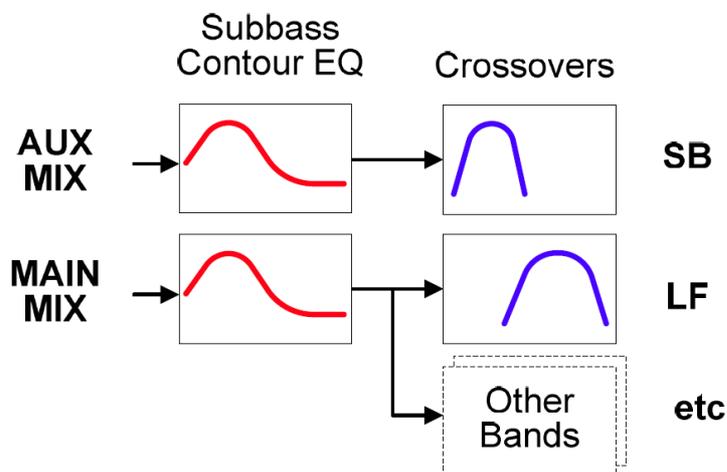


図 37. 超低域Contour EQ - サブウーファーは補助ミックスから駆動

## 付録 C: ディストーション・ビーミング

計算すると (またはモデリング・プログラムを使って計算すると)、1台のサブウーファー・ボックスは基本的に動作周波数レンジで無指向性です。つまり、ボックスのあらゆる面から同じサウンドが聴こえるはずですが。

ところが、多くの音響スペシャリストはこの事実を信じがたいと感じています。その理由は、実際は耳にそう聴こえていないからです。どういことでしょうか。

すべてのスピーカにはいくらか歪みがあるため、この食い違いが起こります。スピーカはより高周波の高調波を生成します。ボックスは基本周波数では無指向性ですが、高調波では指向性があります。

図 38は、1台のXsub (または同サイズのボックス) の90Hz、180Hz (90 Hzの第2高調波)、270 Hz (90 Hz の第3高調波) の指向性を示しています。影響は明らかです。基本周波数はすべての方向に放射されますが、歪みが正面ビームとして現れています。

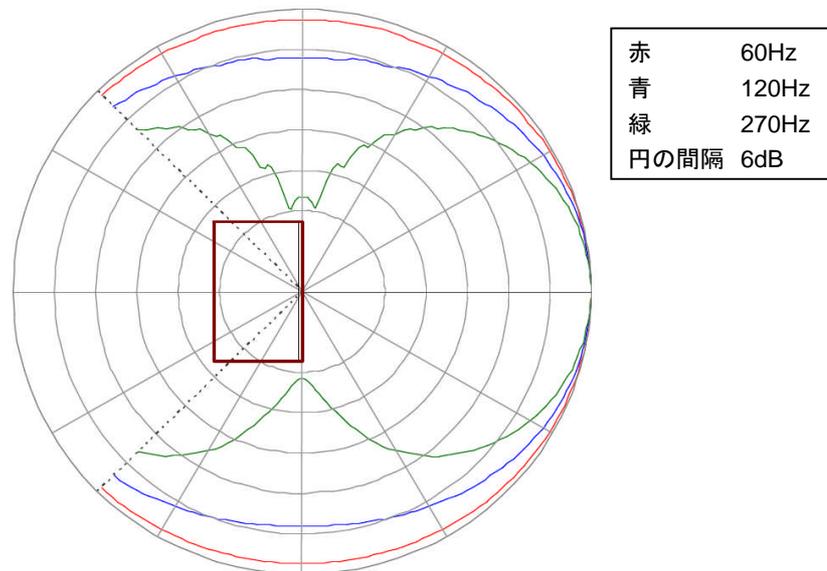


図 38. 1台のウーファーの90、180、270 Hzでの指向性

通常の聴取レベルでは、人の聴覚は基本波より高調波でかなり敏感です。このため、歪みの少ないウーファーで歪み高調波のレベルが小さくとも、耳で増幅されます。耳は高調波の音を敏感に聞き分けます。従って、耳にはボックスの正面から発する高調波が聴こえ、基本周波数もビームであると知覚します。

歪みの多いウーファーの場合、ディストーション・ビーミングは非常に不快なものです。著者が知っている1つのケースに、サブウーファー・スタック (EVスピーカではありません) を再構成して、限られた観客席部分に激しい歪みによる高調波が聴こえないようにしたコンサート・ツアーがありました。