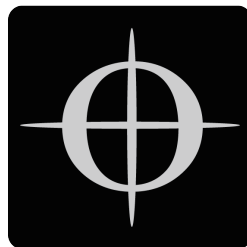




Cardioid Deployments

– v2 –



■目次

1. なぜカーディオイドなのか？	3
2. サブウーファー	3
2.1. サブウーファーの種類	3
2.2. なぜ CODA Audio はカーディオイド専用のサブウーファーを作らないのか？	3
2.3. カーディオイド専用サブウーファーの主な制限は？	3
2.4. オムニ型やカーディオイド型のサブウーファーを壁際に設置するとどうなる？	4
2.5. なぜこのようなことが起こるのでしょうか？	5
2.6. 軽減策 1 - サブウーファーを壁に近づける	6
2.7. 軽減策 2 - 壁に向けて設置	7
2.8. 軽減策 3 - コーナーに設置	7
2.9. Adaptable/Versatile(多用途型) サブウーファーでカーディオイド構成を実現するには？	9
2.10. カーディオイド構成 1 - 標準カーディオイド・アレイ	10
2.11. カーディオイド構成 2 - 拡張カーディオイド・アレイ	14
2.12. カーディオイド構成 3 - 物理的なエンドファイア・アレイ	19
2.13. カーディオイドモードの評価	24
3. その他の情報および考慮事項	24
4. ラインアレイ	26
4.1. ラインアレイはカーディオイドにできる？	26
4.3. なぜ CODA Audio はカーディオイド専用のラインアレイを製造しないか？	28
4.4. ラインアレイでカーディオイドパターンを実現するには？	28
4.5. 拡張カーディオイド配置はどのように機能しますか？	32
4.6. カーディオイド構成で、他に考慮すべき点は？	32
4.7. Low extension (低域拡張) は、他にどのような配置が可能ですか？	32
5. まとめ	34

1. なぜカーディオイドなのか？

カーディオイド（単一指向性）のシステム構成は、以下の点で非常に有効です。

- 拡散して失うエネルギーを低減し、リスニング環境に対してよりダイレクトで正確な信号再生を行うことができます。
- 放射パターンを誘導することで、隣接するシステムエレメントの相互間の損失を低減します。
- 騒音ノイズに敏感なエリアのエネルギーを排除すると同時に、他のエリアの音圧を高く保つ。

このような理由から、カーディオイド・サブウーファーやラインアレイの構成が急速に普及しています。CODA Audio では、サブウーファーのカーディオイド設定をいくつか紹介するとともに、ラインアレイのカーディオイドパターンを実現するために試行錯誤された施策を紹介します。

2. サブウーファー

2.1. サブウーファーの種類

分散に関しては、一般的にサブウーファーには2つのタイプがあります。

- Adaptable/Versatile（多用途型）サブウーファー。
 - 一般的には、フロントロード型のサブウーファーです。
 - ユーザーは、用途に応じて、同じサブウーファーを無指向性、カーディオイド、エンドファイヤーなどのセットアップで使用できます。
 - 「カーディオイド専用」のサブウーファーよりも柔軟性が高い。
- カーディオイド専用のサブウーファー。
 - 一般的には、2つ以上のドライバーを同じエンクロージャーのフロントとリアに配置した、フロント&リアロード型のサブウーファーです。
 - 多くの場合、これらのドライバーを独立して駆動するために、2つ以上のチャンネルのアンプが必要となります。
 - これらのサブウーファーは、常にカーディオイドパターンで放射され、無指向性パターンは通常不可能である。

2.2. なぜ CODA Audio はカーディオイド専用のサブウーファーを作らないのか？

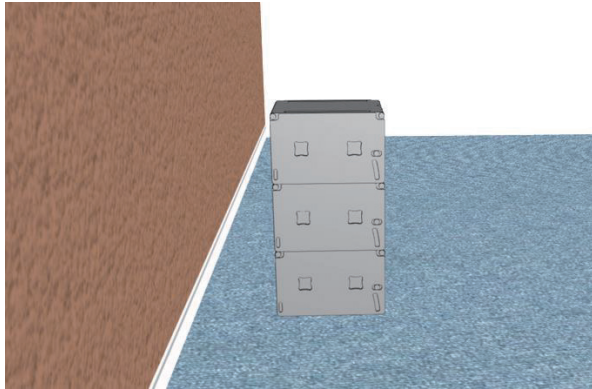
簡単に言うと、カーディオイドでサブウーファーを使用できない状況が多すぎるからです。

2.3. カーディオイド専用サブウーファーの主な制限は？

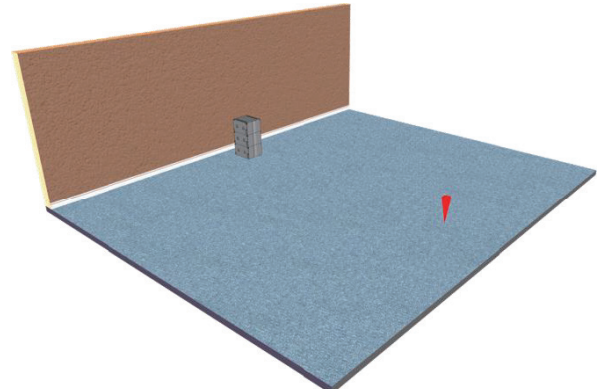
カーディオイド専用サブウーファーは一般的にリアロード型のドライバーを搭載しているため、ほとんどのメーカーは、壁やその他の境界線（特に強固な壁）の近くに設置する場合、適切な動作を可能にするためにエンクロージャーの後ろに空間を設ける設置指示をします【図 1】。しかし、残念ながら多くの会場では、この隙間を確保することは現実的ではなく、サブウーファーを壁際に設置することになり、能率が大幅に損なわれてしまいます。

2.4. オムニ型やカーディオイド型のサブウーファーを壁際に設置するとどうなる？

サブウーファーの後ろに隙間があると、以下に示すように、コム（櫛型）フィルターによる周波数特性の大幅な劣化が生じます。この効果は、若干ではありますが、無指向性とカーディオイド専用のサブウーファーの両方で観察できます。

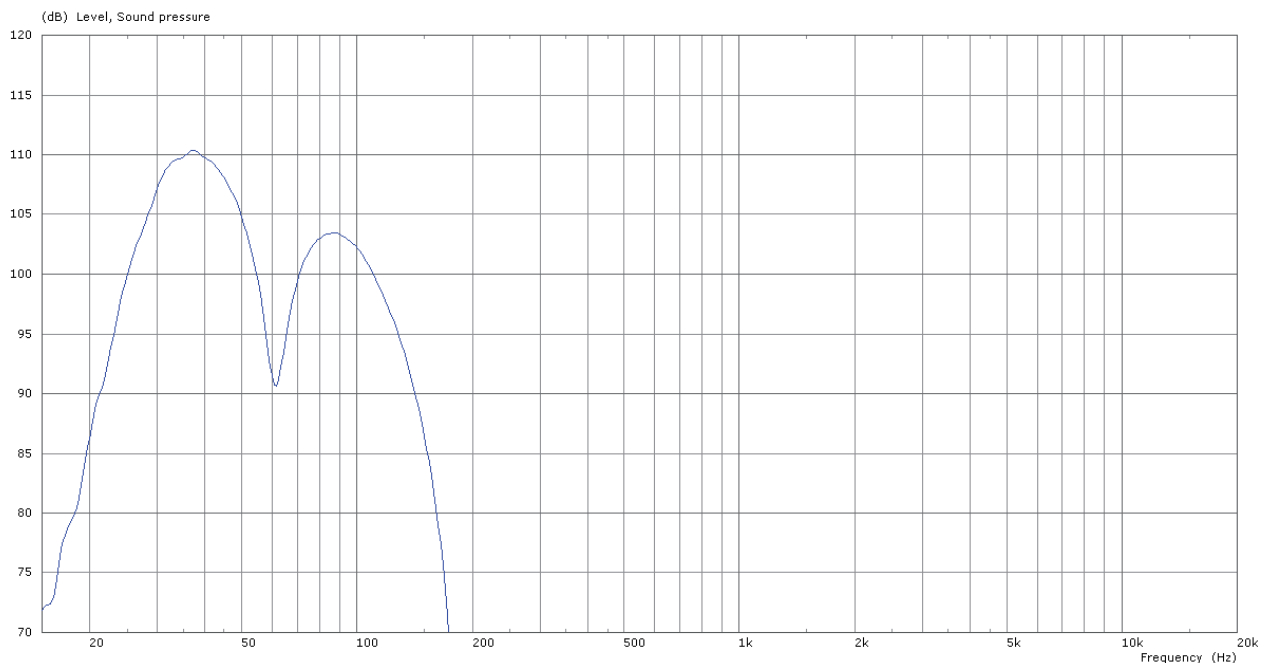


【図 1】 - 後方に 0.6m の隙間を設けたサブウーファーの配置。



【図 2】 - 【図 3】 に示す周波数特性の測定位置。

このコム（櫛型）フィルターは、サブウーファーから後方に放射されたエネルギーが壁で反射してリスナーに向かう際に生じる破壊的な干渉の結果です。このエネルギーは、サブウーファーから前方に放射されるエネルギーと加算され、以下の【図 3】のような周波数特性を引き起こします。

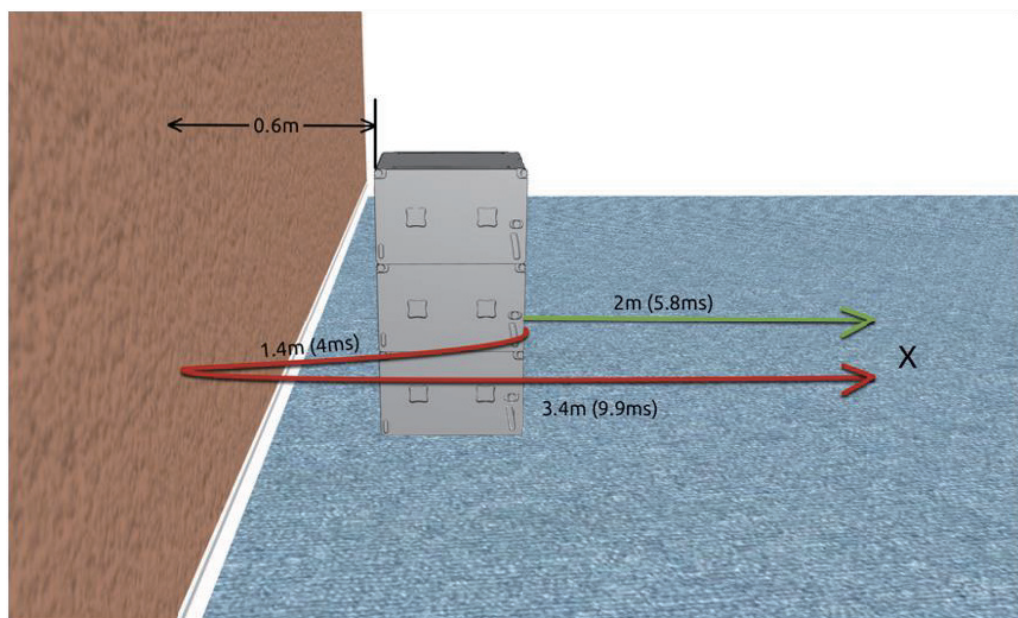


【図 3】 - 【図 1】 の周波数特性を【図 2】 のように測定した場合。

この最初のキャンセルの周波数（ここでは 62Hz）は、主にサブウーファーの物理的な大きさと、壁との間に残されたギャップの組み合わせの結果です。

2.5. なぜこのようなことが起こるのでしょうか？

下の【図 4】は単純化した例です。点「X」に到達するエネルギーは、緑で示された直接エネルギーと赤で示された反射エネルギーの複合的な合計であることがわかります。サブウーファースタックの背後に 0.6m の隙間を設けて配置した場合、直接エネルギーと反射エネルギーの間には経路長の差があり、これは 62Hz で 180° のキャンセルに相当します。



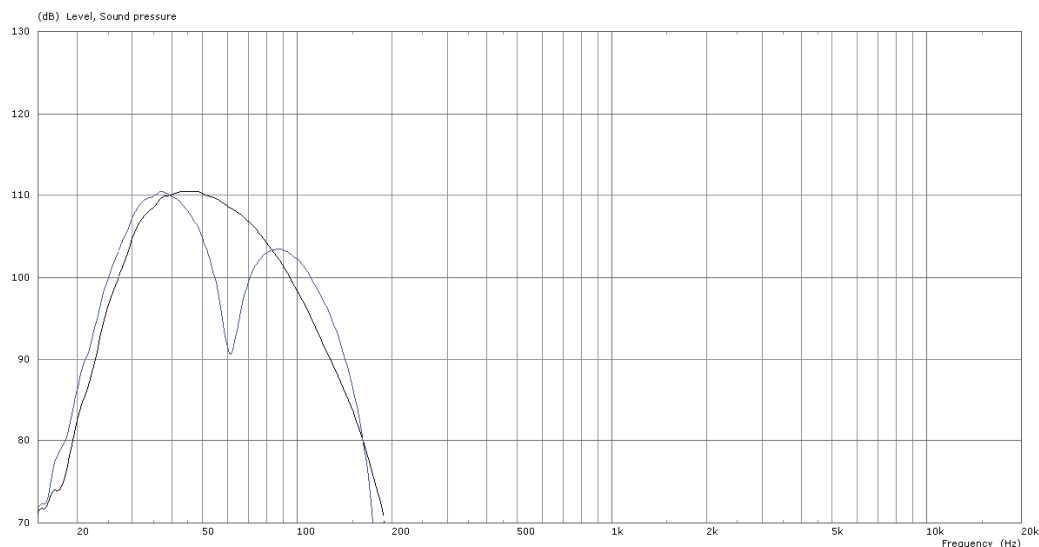
【図 4】 - 経路長の違いの例。

【図 4】に示した経路長を【表 5】にまとめました。直接エネルギーと反射エネルギーの到着には、8.16ms の差があることがわかります。

これは 122Hz の 1 サイクルに相当し、正の和が発生します（【図 6】で確認できます）。したがって、8.16ms が波長の 180° に相当する周波数、すなわち 61.25Hz で破壊的なコーミングが発生します。

経路	長	時間
直接（緑）	2m	5.83ms
反射（赤）	1.4m + 3.4m = 4.8m	13.99ms
	差（デルタ）：	8.16ms

【表 5】 - 直接対反射のエネルギー到達時間。

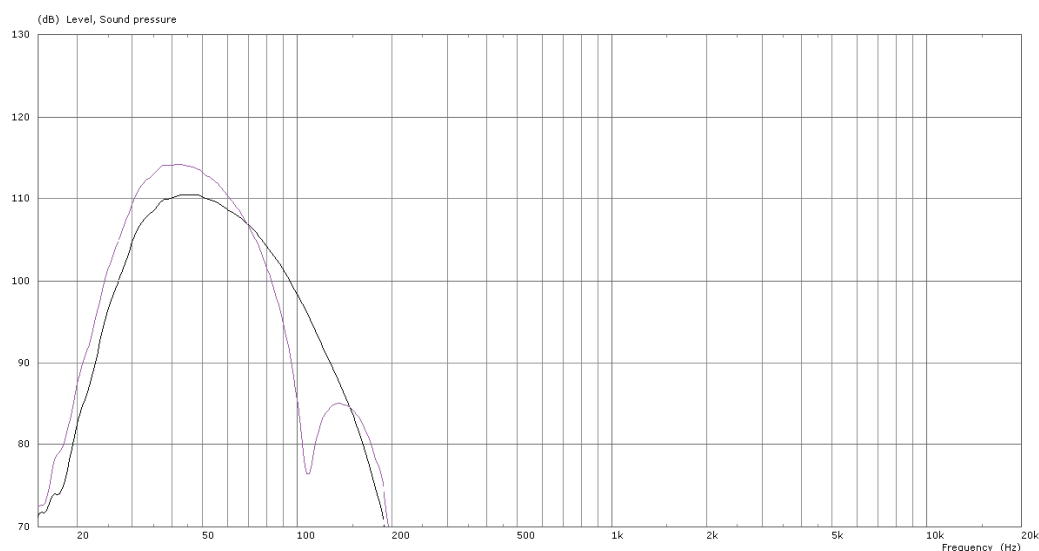


【図 6】 - ハーフスペースに置かれたサブウーファー（黒）と【図 3】（青）の比較

重要なことは、この周波数特性の劣化は、無指向性とカーディオイド専用の両方のタイプのサブウーファーに存在することを理解することです。しかし、無指向性のサブウーファーでは、ユーザーがこの問題を軽減するためのオプションがあります。

2.6. 軽減策 1 - サブウーファーを壁に近づける

最初のケースは、サブウーファーを壁に密着させて設置することです（コネクタの保護を考慮して、可能な限り近づけます）。これにより、直接エネルギーと反射エネルギーの間の経路長の差が最小になり、コムフィルターの周波数が高くなる効果があります。コムフィルターは、帯域外に押し出したり、問題にならない程度に高くすることもできます。この周波数以下では、壁との効率的なカップリングにより、エネルギーの増加が見られます。【図 7】は、3 台の無指向性 SCP-F サブウーファーをスタックした結果を示しています。サブウーファーは、1/4 スペース（紫）、1/2 のスペース（黒）のどちらの場合にも壁に密着して設置されています。

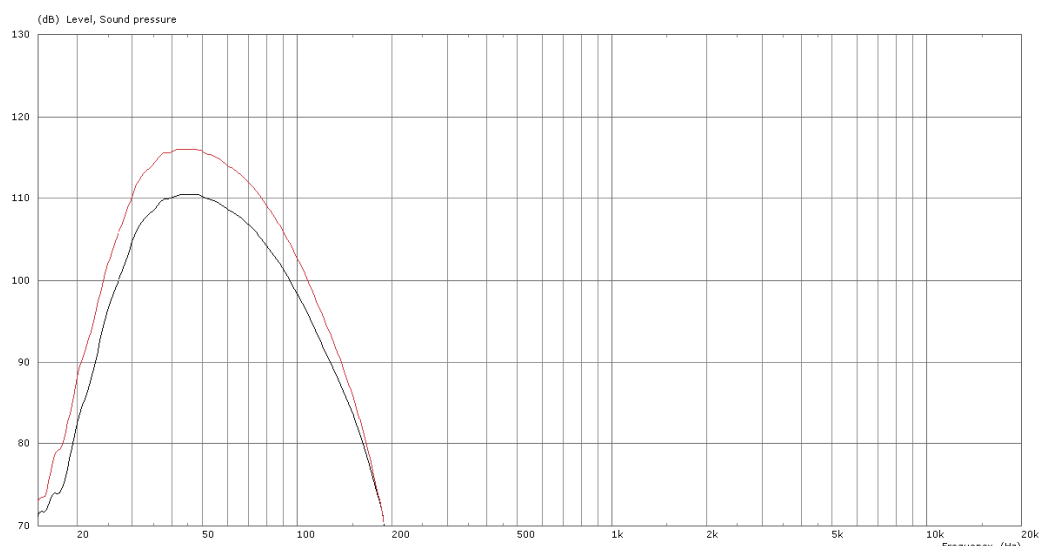


【図 7】 - 「軽減策 1」のサブウーファー

2.7. 軽減策 2 - 壁に向けて設置

この2つ目のケースでは、相互作用をさらに制限して、エネルギーをさらに増加させることができます。これを実現するには、サブウーファーのスタックを180°回転させて、壁に向けます。サブウーファーの面と壁の間には、約0.3mから0.5mの隙間を空けます。この場合、後方に反射したエネルギーによるキャンセルがなく、すべてのエネルギーが同位相になります。また、前方に放射されるエネルギーは、ハーフスペースでの測定と比較して約6dB増加します。

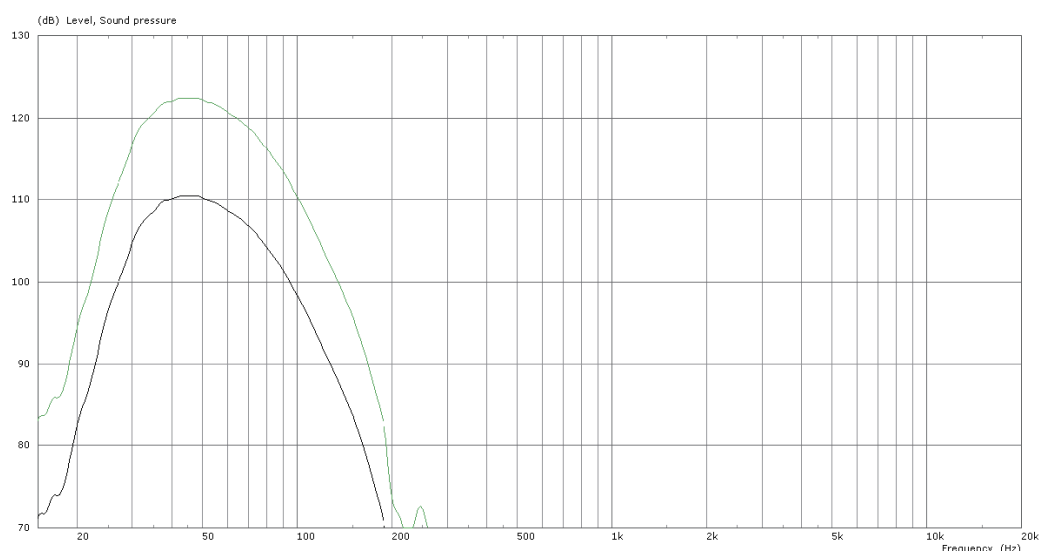
【図8】は、3台のSCP-Fサブウーファーのスタックを壁に向けて配置し、サブウーファーの面と固い壁の間に0.3mの隙間を設けた場合の結果を示しています。サブウーファーは無指向性の構成になっています。黒はハーフスペースでの周波数特性、赤は1/4スペースの周波数特性を示しています。



【図8】 - 「軽減策2」のサブウーファー

2.8. 軽減策 3 - コーナーに設置

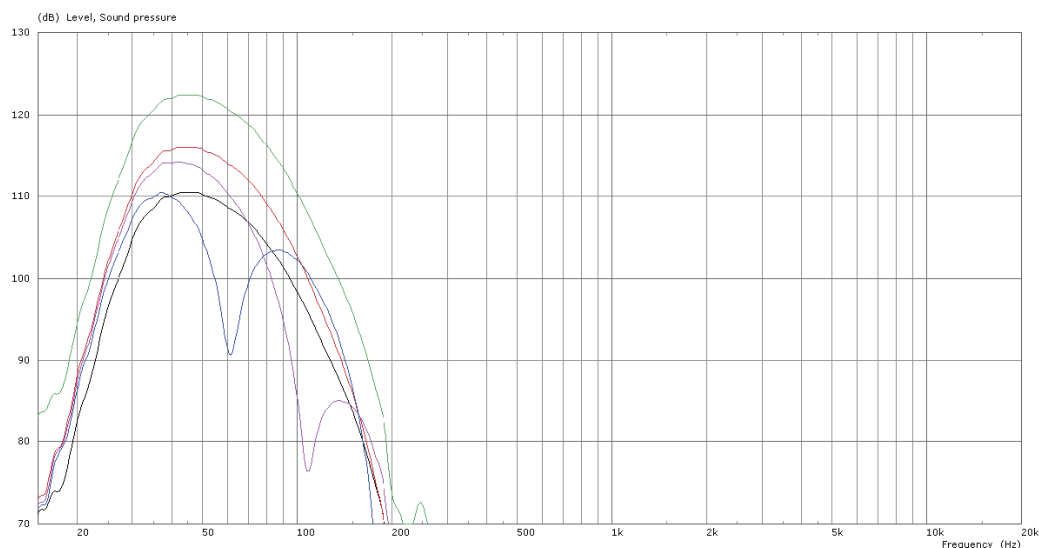
コーナーに強固な壁がある場合、サブウーファーをコーナーに回すことも考えられます。この場合、コーナー自体が大きなホーンとなり、前面に放射されるエネルギーが劇的に増大します。このコーナー配置は、部屋そのものを活用し、ホットスポットのない均一な分散を提供するという、さらなる利点があります。このコーナー配置は、より少ないサブウーファーで一定のSPLを達成できます。この効率の向上により、はるかに少ない増幅電力で済みます。【図9】の緑は、3台のSCP-Fサブウーファーのスタックを部屋のコーナーに配置した結果を示しており、黒はハーフスペースに配置した結果を示しています。かなりのゲインが得られていることがわかります。



【図9】 - 「軽減策3」のサブウーファー

3つの軽減策の比較を【図 10】に示します。いずれも3台の SCP-F で構成されています。

- 黒：基準となるハーフスペースの測定結果です。
- 青：サブウーファーを壁の後ろに隙間を空けて配置。
- 紫 - 軽減策 1：サブウーファーを壁に密着させて設置。
- 赤 - 軽減策 2：サブウーファーを壁に向けて設置。
- 緑 - 軽減策 3：サブウーファーを部屋のコーナーに移動。



【図 10】 - これまでに説明したすべてのサブウーファーの位置の比較。

注意：これら3つの壁に対する軽減策は、いずれも壁が強固でかなりの「質量」を持っていることを前提としています。

これらの軽減策をカーディオイド専用のサブウーファーで同じ効果を得ることは不可能であり、Adaptable/Versatile（多用途型）サブウーファーでなければこれらの構成をうまく展開することはできないことに注意してください。

2.9. Adaptable/Versatile(多用途型) サブウーファーでカーディオイド構成を実現するには？

カーディオイドのサブウーファーを構築するために認知された 3 つの方法を紹介します。それぞれの方法には様々な特徴があり、中には他の方法よりも優れたものもあります。システム設計者は、これらの構成を評価し、妥協点のバランスを取りながら、正しい配置を選択することになります。

提示する提案は以下の通りです。

1. Standard cardioid array. (標準カーディオイド・アレイ)
2. Extended cardioid array. (拡張カーディオイド・アレイ)
3. Physical end-fire array. (エンドファイア)

それぞれの案では、同じサブウーファーを使った標準的な無指向性の配置と比較しています。これらの配置の性能を判断するために使用できる基準がいくつかあります。

1. 必要な物理的スペース。
 - a. アレイの「配置面積」。
2. フロント / フォワード SPL。
 - a. 観客に向かって前方に放射されるエネルギー。
 - b. 無指向性のサブウーファー構成と比較した場合、周波数特性がどの程度変化するかを伝える基準となる。
 - c. マグニチュード領域において、アレイの前方への信号再生の正確さ / 真実さを示す定性的な尺度である。
3. リアの SPL。
 - a. 観客から離れた後方に放射されるエネルギー。
4. 時間領域 (タイムドメイン) の整合性
 - a. 過渡期の信号における信号再生の正確さ / 真実さを示す定性的な尺度。
5. 指向性。
 - a. 構成の放射パターンの質的な尺度。

注意：フロントの SPL とリアの SPL の比は、" 除去率 (rejection ratio) " と考えることができる。

注意：以下のすべての説明では、簡単にするためにサブウーファーのスタックを説明していますが、これは SCP-F / SCV-F のようなフライングの場合にも同様に関連します。

2.10. カーディオイド構成 1 - 標準カーディオイド・アレイ

2.10.1. 概要

標準的なカーディオイド・アレイは、最も簡単に設置・構成することができ、優れたオールラウンダーであると考えられます。この配置は、従来の無指向性サブウーファーのアレイよりもはるかに少ない床面積で済みます。

2.10.2. 物理的構成

【図 11】に示すように、サブウーファーのアレイ内の 1 つは、観客から 180°回転しています。この 180°回転させたサブウーファーを「リア」サブウーファーと呼ぶことにします。推奨される比率は、2 台または 3 台のフロントサブウーファーに対して、1 台のリアサブウーファーです。

注意：フロントサブウーファー 7 台に対して、リアサブウーファー 1 台を使用することは可能ですが、アレイの前方に向かって達成可能な最大 SPL が減少します。

アレイの後ろと上には、少なくとも 60cm の空間を確保してください。アレイの両側には、少なくとも 60cm のフリースペースが必要ですが、この構成で複数のスタックを使用する場合は、約 30cm の空間があれば十分です。限られた環境で自由空間と同じような結果を得るためには、アレイの後ろ、上、横に 2m の間隔を空ける必要があります。

このため、ステージの下や壁の中などにサブウーファーをカーディオイドで設置することはできません。
この記事をご参考になさってください。

<http://adamjhill.com/2018/04/25/cardioid-subwoofers-are-claustrophobic/>



【図 11】 - 標準的なカーディオイド・アレイ

2.10.3. エレクトロニック・コンフィギュレーション（電氣的構成）

CODA アンプのカーディオイド・プリセットは、スピーカーリストの中の「Cardioid」というタイトルの下に、LPF 周波数と、「Front」または「Rear」という用途で示されています。フロントサブウーファーは「Front」プリセットでドライブし、リアサブウーファーは「Rear」プリセットでドライブすることが重要です。

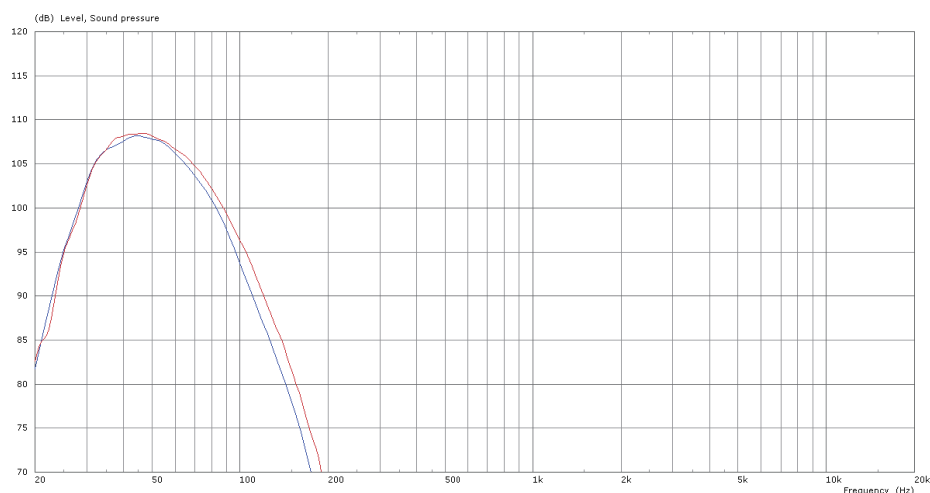
注意：異なる LPF 周波数をアレイ内で混在させてはいけません。

2.10.4. アコースティック・パフォーマンス（音響性能）

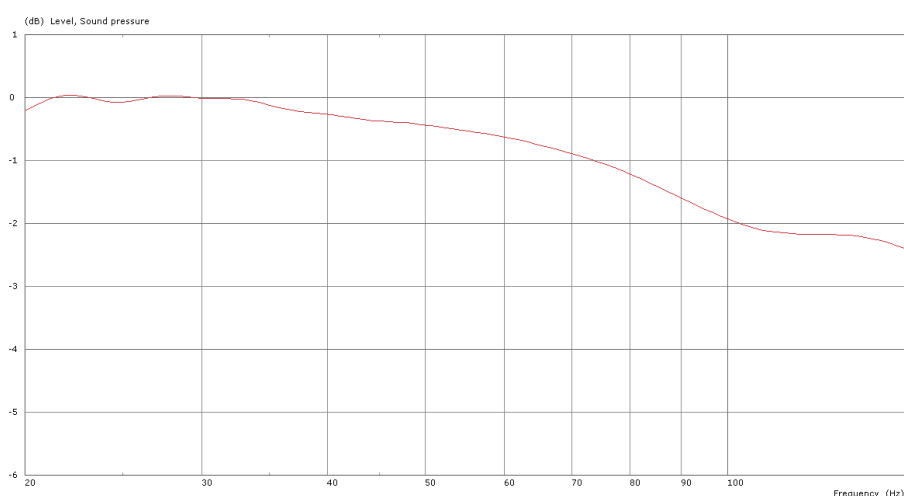
2.10.4.1. フロント SPL

リスナーに向かって前方に放射されるエネルギーは、基準となる無指向性構成のものと非常によく似ています。【図 12】では、サブ領域のプレッシャーレベルがわずかに減少していることがわかります。

赤は、基準となる無指向性構成で 3 台の SCP-F をスタックした測定値です。青は、標準的なカーディオイド構成で 3 台の SCP-F をスタックした測定値です。これらの測定値の差分（デルタ）を【図 13】に示します。



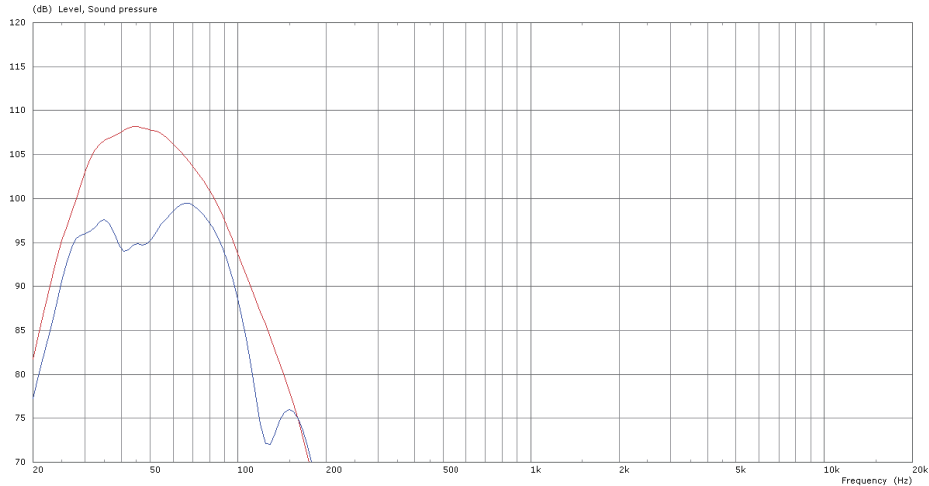
【図 12】 - 基準となる無指向性アレイと標準カーディオイド・アレイのフロント SPL の比較。



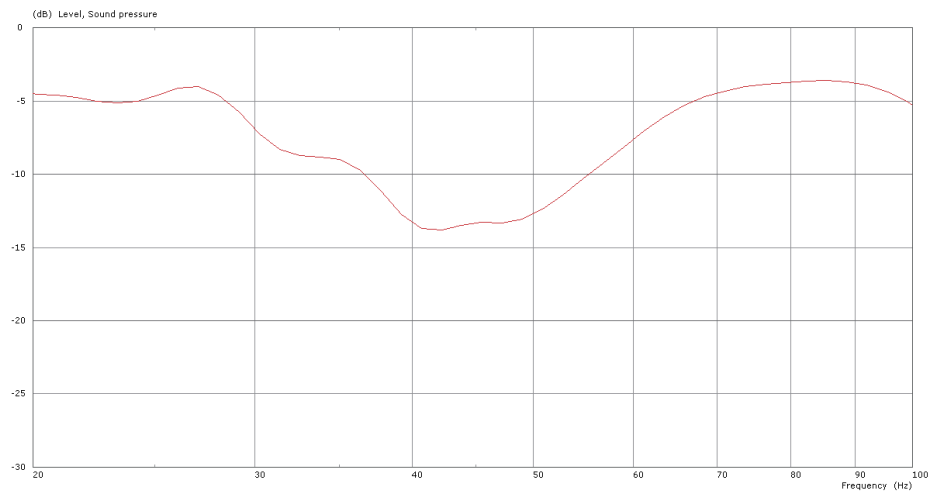
【図 13】 - 図 12 のデルタ値
高域に向かって SPL が減少していることに注意してください。

2.10.4.2. リア SPL

後方に放射されるエネルギーは、44Hz を中心に顕著なキャンセルを示しています。この周波数より上と下では、それほど深くないにもかかわらず、まだ減少が見られます。【図 14】は、3 台の SCP-F を「標準カーディオイド」アレイとして配置したもので、赤はアレイの前方での測定、青は後方での測定を示しています。これらの測定値の差分（デルタ）を【図 15】に示します。



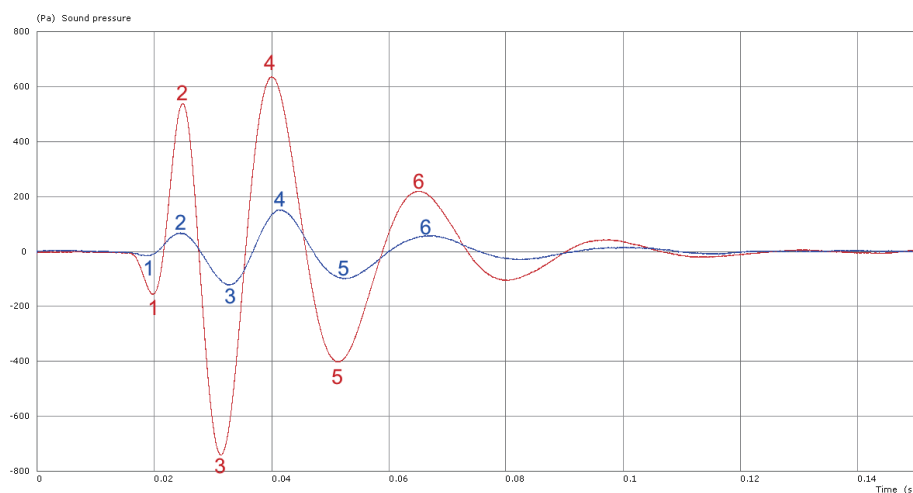
【図 14】 - 標準カーディオイド・アレイ - 前方と後方の測定値



【図 15】 - 図 14 のデルタ値

2.10.4.3. タイムドメイン（時間領域）の整合性

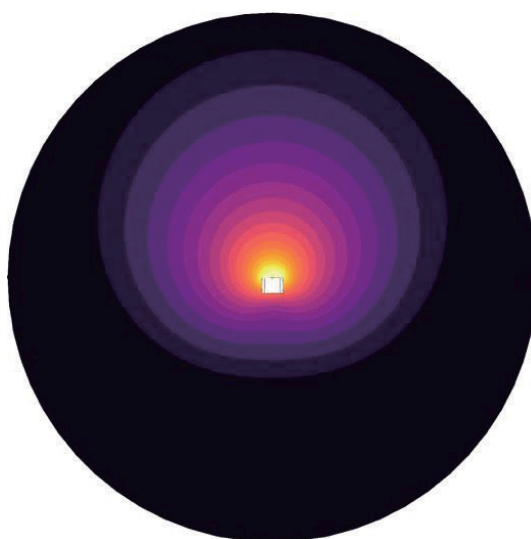
【図 16】は、標準的なカーディオイド構成でスタックされた 3 台の SCP-F のインパルスレスポンスを示しており、アレイの前面 8m の位置で測定されています。赤はフロントドライバーだけのインパルスを示し、青はリアドライバーだけのインパルスを示しています。この位置で測定すると、前方と後方の両方のドライバーのインパルスの「ピーク」が互いに時間的に一致しており、主観的には「Hi-Fi でパンチの効いた」サウンドを生み出していることが確認できます。



【図 16】 標準カーディオイド・アレイのタイムドメインレスポンス

2.10.4.4. ダイレクティビティ（指向性）

標準的なカーディオイドアレイから実現される放射パターンを【図 17】に示します。



【図 17】 - 標準カーディオイド・アレイの放射パターン -50Hz 1oct- シミュレーション

2.10.5. 分析

標準カーディオイド・アレイを規定通りに配置すると、基準となる無指向性の構成と比較して、ステップレスポンスの整合性にわずかな妥協をするだけで、大きなキャンセル効果が得られます。さらに、サブウーファースタックからの高いスペクトル出力がわずかに減少するだけで、低域周波数の出力は、事実上変化がありません。無指向性スタックと比較して、より大きな設置面積は必要ありませんが、カーディオイド専用サブウーファースタックのように壁の近くに設置する場合は注意が必要です。全体的に、これは後方への適切なリジェクション（除去）を示す堅実なオールラウンダーです。

2.11. カーディオイド構成 2 - 拡張カーディオイド・アレイ

2.11.1. 概要

拡張カーディオイド・アレイは、物理的には標準カーディオイド・アレイと同じ外観で、設置も簡単です。しかし、電氣的な構成は全く異なり、リスナーに向けた音質が損なわれることを承知の上で、アレイ後方への最大のリジェクション（除去）を達成したいという最優先の願望がある場合にのみ検討すべきです。

アレイの前面で達成される SPL は、基準となる無指向性構成とリスナーに向けた音質の両方と比較して減少します。基準となる無指向性の構成と標準的なカーディオイド・アレイの両方と比較すると、アレイの前面に到達する SPL は減少します。また、超低周波の再生とともに、時間領域の整合性も損なわれます。

このような妥協は、唯一の利点である大きな除去率 (rejection ratio) と比較した場合、重要なファクターではないと見なされる可能性があります。

2.11.2. 物理的構成

標準的なカーディオイド・アレイと同様に、【図 11】に示すように、サブウーファーのアレイ内の 1 つは、観客から 180° 回転させています。この 180° 回転させたサブウーファーを「リア」サブウーファーと呼ぶことにします。推奨される比率は、2 台または 3 台のフロントサブウーファーに対して、1 台のリアサブウーファーです。

注意：フロントサブウーファー 7 台に対して、リアサブウーファー 1 台を使用することは可能ですが、アレイの前方に向かって達成可能な最大 SPL が減少してしまいます。

アレイの後ろと上に少なくとも 60cm の空間を確保する必要があります。アレイの両側には、少なくとも 60cm の空間を確保してください。ただし、この構成で複数のスタックを使用する場合は、約 30cm の隙間があれば十分です。

2.11.3. エレクトロニック・コンフィギュレーション（電氣的構成）

この構成では、アレイ内のすべてのサブウーファーに「Extended Cardioid」プリセットを使用し、70Hz、100Hz（またはその他）の LPF を使用します。前方のサブウーファーは「Front」プリセットでドライブし、後方のサブウーファーは「Rear」プリセットでドライブすることが重要です。

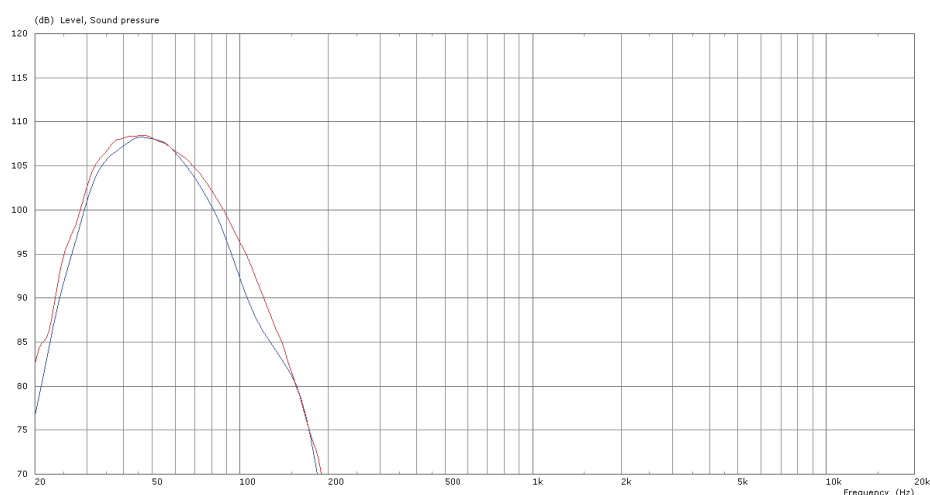
注意：異なる LPF の周波数をアレイ内で混在させてはいけません。

2.11.4. アコースティック・パフォーマンス（音響性能）

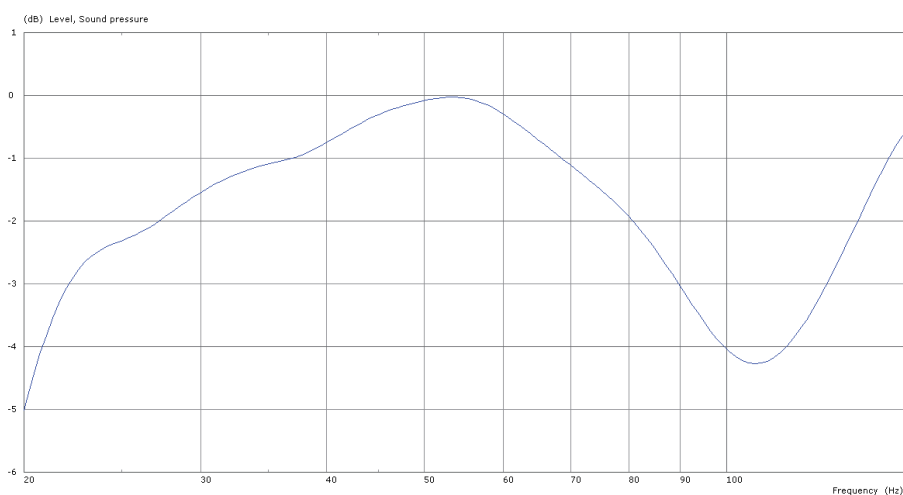
2.11.4.1. フロント SPL

リスナーに向かって放射されるエネルギーは、基準となる無指向性と多少似ていますが、重要なのは 50Hz 以下のエネルギーが減少していることで、これは達成可能な最大 SPL と、この SPL を達成するために必要なパワーにかなりの影響を与えます。

【図 18】の赤は、基準となる無指向性で 3 台の SCP-F をスタックした場合の測定結果、青は、拡張カーディオイド構成で 3 台の SCP-F をスタックした場合の測定結果です。これらの測定値の差分（デルタ）を【図 19】に示します。



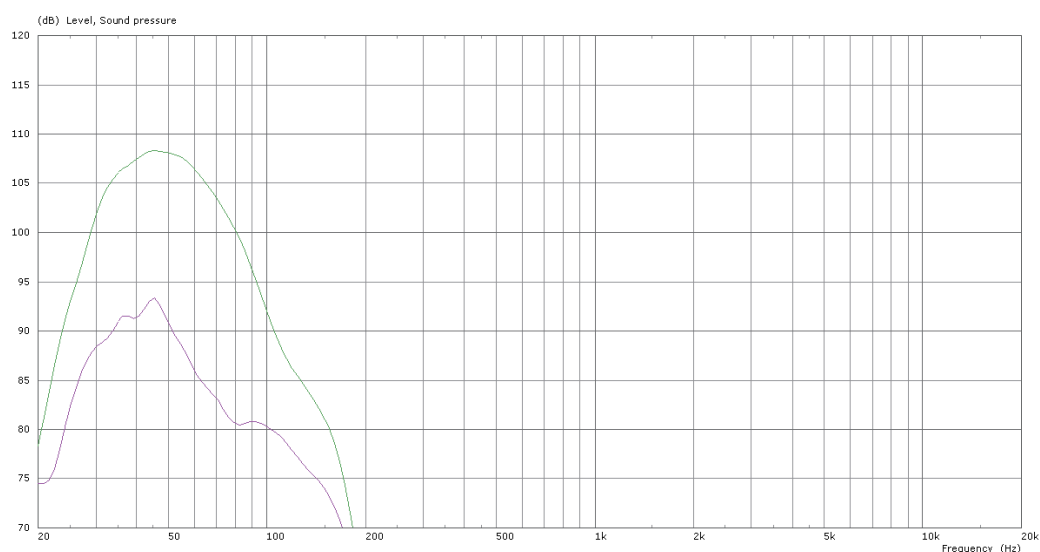
【図 18】 - 基準となる無指向性アレイと拡張カーディオイド・アレイのフロント SPL の比較



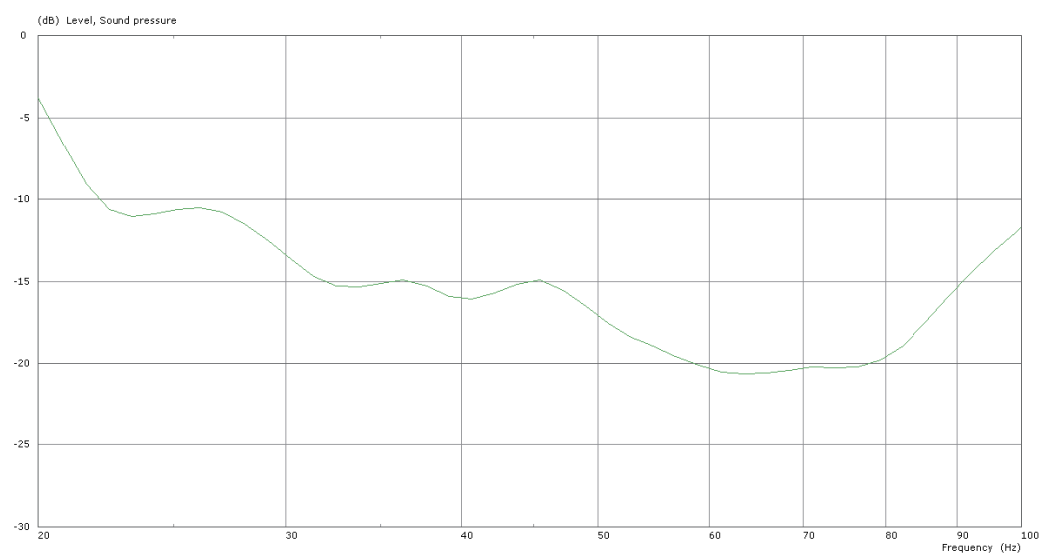
【図 19】 - 図 18 のデルタ値

2.11.4.2. リア SPL

後方に放射されるエネルギーは、前方に比べて著しく、かつ広帯域に減少しています。【図 20】は、拡張カーディオイド・アレイに設定された 3 台の SCP-F を示しています。緑はアレイ前方での測定を示し、紫は後方への測定を示しています。【図 21】は、この 2 つの測定値の差分（デルタ）を示しています。



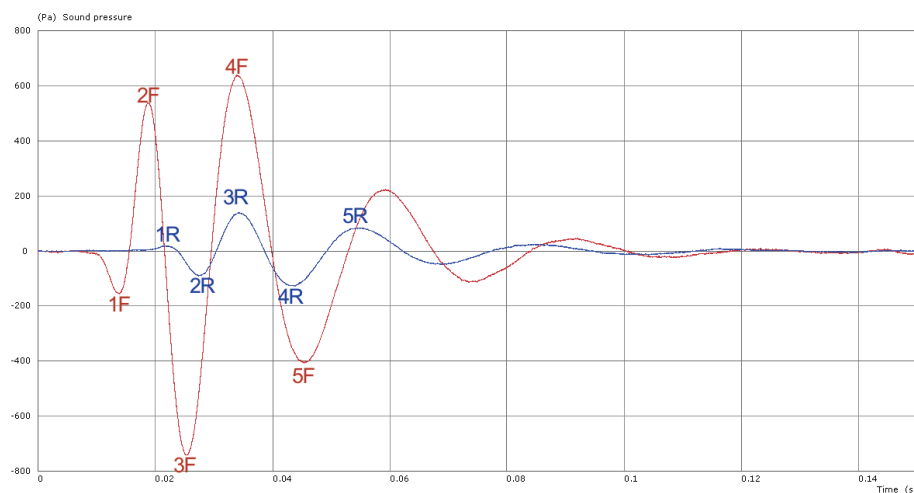
【図 20】 - 拡張カーディオイド・アレイ - 前方と後方の測定値。



【図 21】 - 図 20 のデルタ値

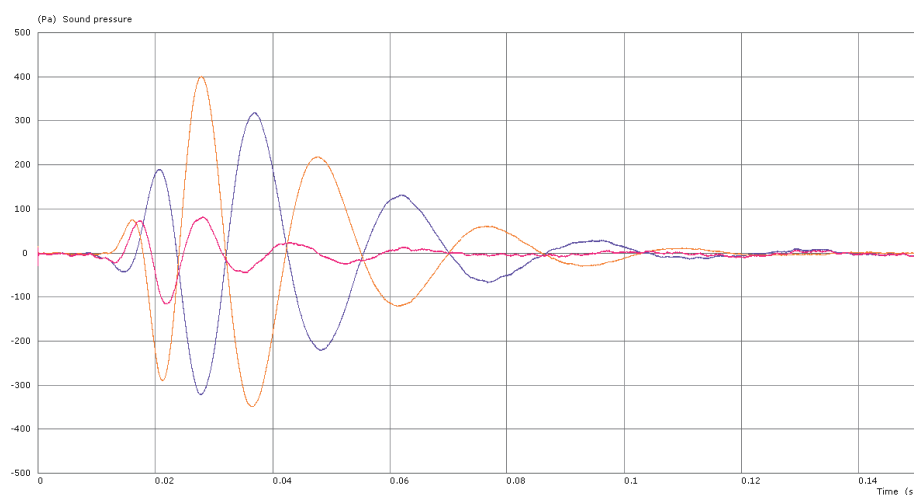
2.11.4.3. タイムドメイン（時間領域）の整合性

【図 22】は、拡張カーディオイド構成でスタックされた 3 台の SCP-F のインパルスレスポンスを、アレイの正面から 8m の位置で測定したものです。赤はフロントドライバーだけのインパルスを示し、青はリアドライバーだけのインパルスを示しています。フロントドライバーとリアドライバーのインパルスの「ピーク」は、リスニングエリアで互いに極性がずれていることがわかり、リアドライバーの正方向の圧力勾配が、フロントドライバーの正方向の圧力勾配に合わせて位相が回転するように遅延しています。



【図 22】 - 拡張カーディオイド・アレイのタイムドメインレスポンス - 前方に向かって測定。

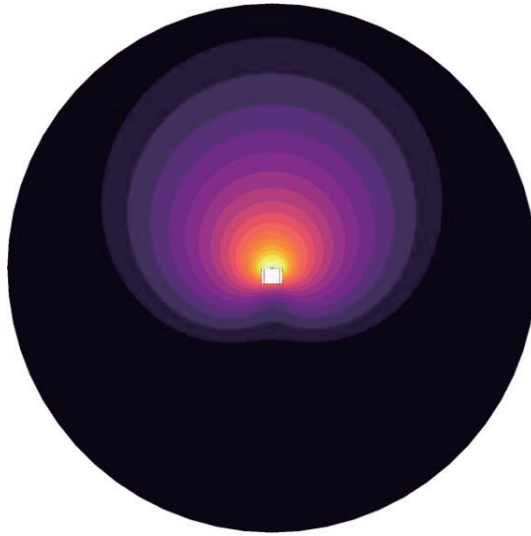
【図 23】は、【図 22】と同じサブウーファースタックを示していますが、これらの測定はすべてスタックの後方で行われています。オレンジは後ろに向いたドライバーからのエネルギーを示し、紫は前に向いたドライバーからのエネルギーを示しています。ピンクは、フロントとリアのドライバーからのエネルギーを合計したものです。フロントとリアのドライバーがお互いによく作用して、アレイ後方の圧力を大幅に低減していることがわかります。



【図 23】 - 拡張カーディオイド・アレイのタイムドメインレスポンス - 後方に向けて測定。

2.11.4.4. ダイレクティビティ（指向性）

拡張カーディオイド・アレイから実現される放射パターンを【図 24】に示します。



【図 24】 - 拡張カーディオイド・アレイの放射パターン -50Hz 1oct- シミュレーション。

2.11.5. 分析

規定通りに拡張カーディオイド・アレイを配置すると、【図 21】に示すように、優れた除去率が得られます。除去率の観点から見ると、帯域幅が広く大きいということです。しかし、標準的なカーディオイド・アレイや基準となる無指向性の構成と比較すると、ステップレスポンスの整合性と低域周波数の再生には妥協があります。

無指向性スタックと比較して大きな設置面積は必要ありませんが、カーディオイド専用サブウーファーのように壁の近くに設置する場合は注意が必要です。

全体的には、リアの大きなキャンセルが可能な構成ですが、欠点を十分に考慮せずに無闇に使用するべきではありません。

2.12. カーディオイド構成 3 - 物理的なエンドファイア・アレイ

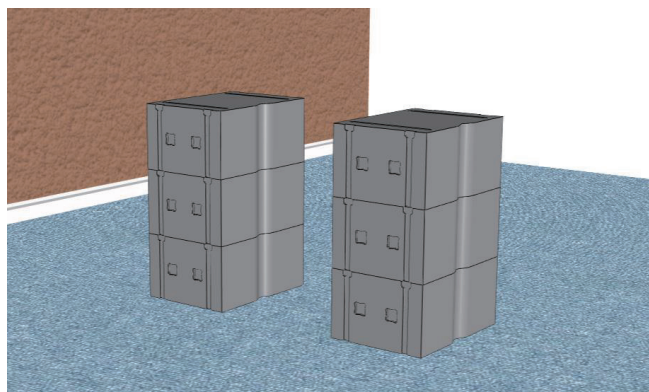
2.12.1. 概要

物理的なエンドファイア・アレイは、先に述べたカーディオイド・セットアップのいずれよりも大きな設置面積を必要とします。しかし、スペースに問題がなく、高い除去率と前方への高い SPL、基準となる無指向性構成と変わらないステップレスポンス & 周波数特性の整合性の両方を達成したいという強い要望がある場合は、検討すべきです。

2.12.2. 物理的構成

物理的なエンドファイア・アレイは、2 つかそれ以上のサブウーファーのスタックで構成されており、片方はもう片方の前に配置されています。ディレイはそれぞれのスタックに段階的に適用され、アレイの前では同位相の加算が、アレイの後ろでは逆位相のキャンセルが行われます。

注意：技術的には、エンドファイア・アレイの各スタックに異なる数のサブウーファーを使用し、ゲインを使用して互いの出力を一致させることは可能ですが、推奨できません。スタックは高い音圧レベルでドライブされると異なるレベルで制限されます。これは、カーディオイドパターンがより高い音圧レベルで崩壊することにつながり、一般的にリアの減衰が最も重要な時です。



【図 25】 - 物理的なエンドファイア・アレイ

【図 25】 に、3 台ずつのスタック 2 つの物理的なエンドファイア・アレイの簡単な例を示します。スタックの間隔を決めるために、次の式を用います。結果は、グリル間のスタックの距離となります。

$$\text{間隔} = \text{音速 (m/s)} \div \text{キャンセル周波数 (Hz)} \div 4(1/4 \lambda)$$

キャンセル周波数が 50Hz の場合、その間隔は 1.72m となります。【表 26】 に一般的なキャンセル周波数とそれぞれの間隔の参考値を示します。

周波数 (Hz)	間隔 (m)
40	2.14
45	1.91
50	1.72
55	1.56
60	1.43
65	1.32
70	1.23
75	1.14
80	1.07

【表 26】 - 共通のキャンセル周波数とそれぞれの間隔

2.12.3. エレクトロニック・コンフィギュレーション（電氣的構成）

この構成では、アレイ内のすべてのサブウーファーに標準的な無指向性プリセットを使用し、70Hz、100Hz（またはその他）のLPFを使用するものとします。アレイ内で異なるLPF周波数を混在させてはいけません。

- Upstage（舞台奥側）のサブウーファーは、すべてゼロタイムとする。
- Downstage（舞台前側）のサブウーファーにはディレイをかけ、その量は次の式で決定する。

その量は、以下の式で決定される。

$$\text{ディレイ (ms)} = (1 \div \text{キャンセル周波数 (Hz)} \div 4) \times 1000$$

キャンセル周波数が50Hzの場合、必要なディレイは5.0msとなります。

一般的なキャンセル周波数とそのディレイの参考例を【表 27】に示します。

周波数 (Hz)	ディレイ (ms)
40	6.3
45	5.6
50	5.0
55	4.5
60	4.2
65	3.8
70	3.6
75	3.3
80	3.1

【表 27】 - 一般的なキャンセル周波数とそれぞれのディレイ

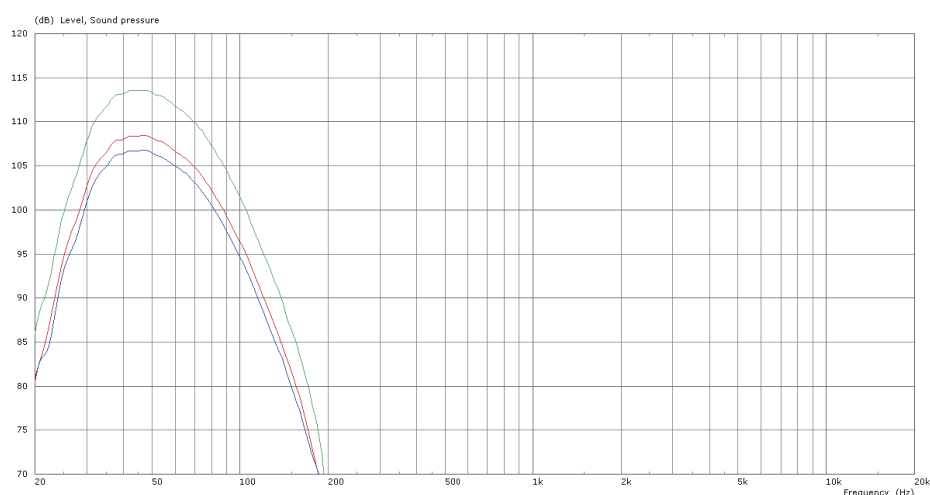
2.12.4. アコースティック・パフォーマンス（音響性能）

2.12.4.1. フロント SPL

【図 28】は、50Hz にチューニングされた 2 スタックの物理的エンドファイア・アレイで構成された 6x SCP-F の周波数特性を 8m で測定したものです。赤は舞台奥側の SCP-F スタックを単独で使用した周波数レスポンスを示しており、青は舞台上側の SCP-F スタック単独で使用した周波数レスポンスを示しています。

舞台上側スタックには、舞台奥側のスタックに「プッシュする」ためのディレイが 5ms かけられています。

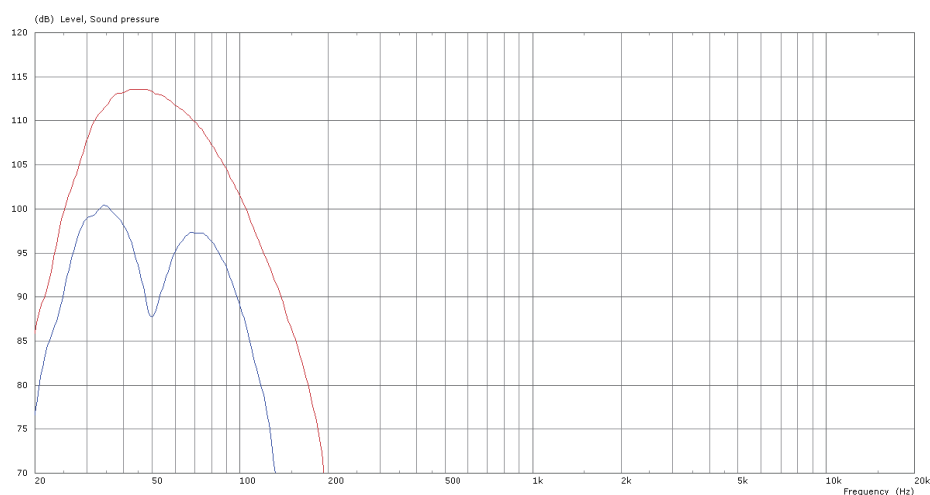
これらの 2 つの結果としての合計が、緑に示されています。このアレイの周波数特性は、基準になっている無指向性の構成と比べて実質的に変化していないことがわかります。



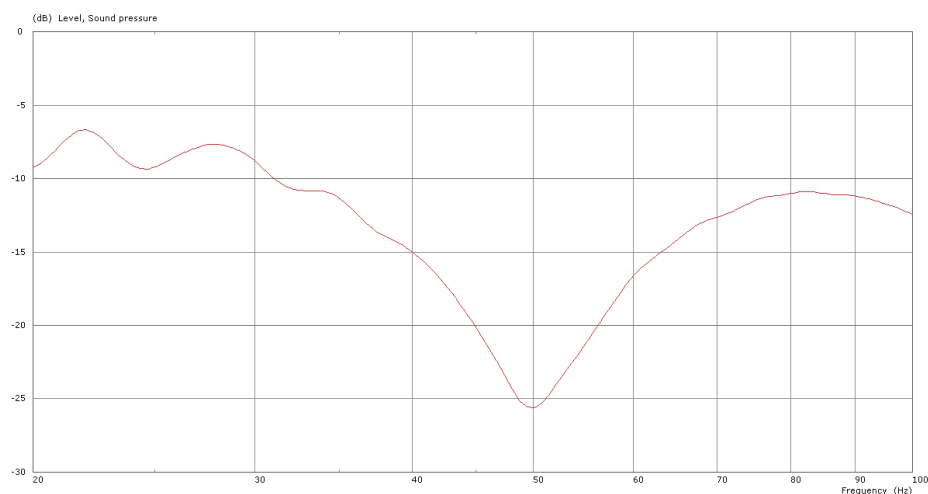
【図 28】 - エンドファイア・アレイ - フロント SPL

2.12.4.2. リア SPL

【図 29】の青は、後方に放射されるエネルギーを示しており、赤はアレイの前方に向かって放射されるエネルギーを示しています。50Hz に大きな空白が見られ、その両側には広い範囲のキャンセルが見られます。この 2 つの測定値の差分を【図 30】に示します。



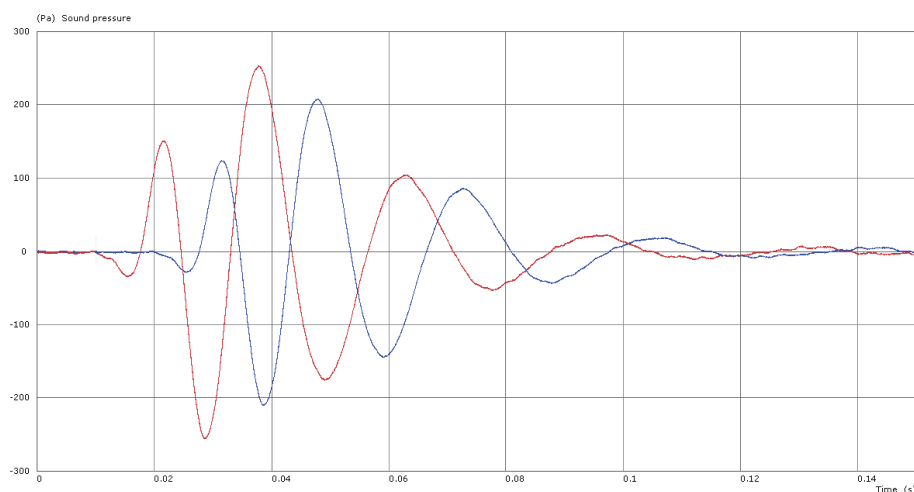
【図 29】 - エンドファイア・アレイ - フロントとリアの SPL



【図 30】 - 図 29 のデルタ値

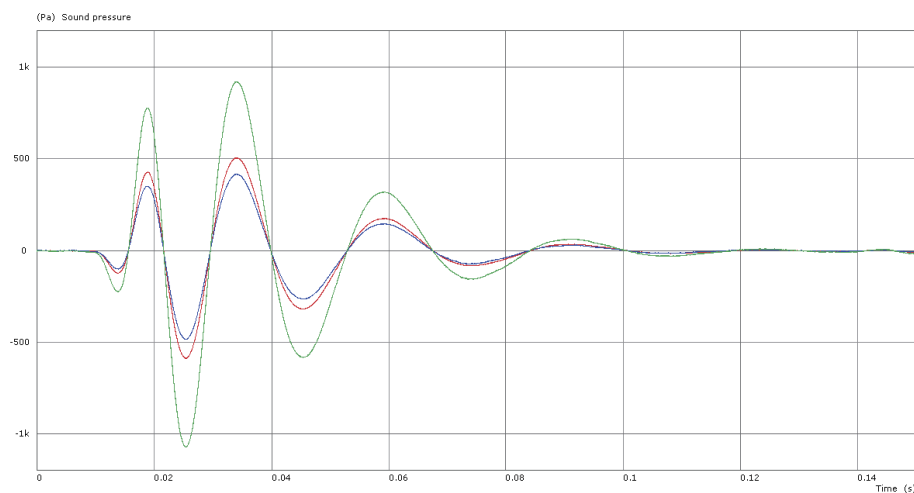
2.12.4.3. タイムドメイン（時間領域）の整合性

【図 31】は、舞台前側と舞台奥側のそれぞれのインパルスレスポンスを後ろから測定したものです。アレイ内の個々のスタックの物理的な変位により、時間とレベルの両方の差があることがわかります。その結果、後方への強いキャンセルが発生しています。



【図 31】 - エンドファイア・アレイのタイムドメインレスポンス、アレイの後方。

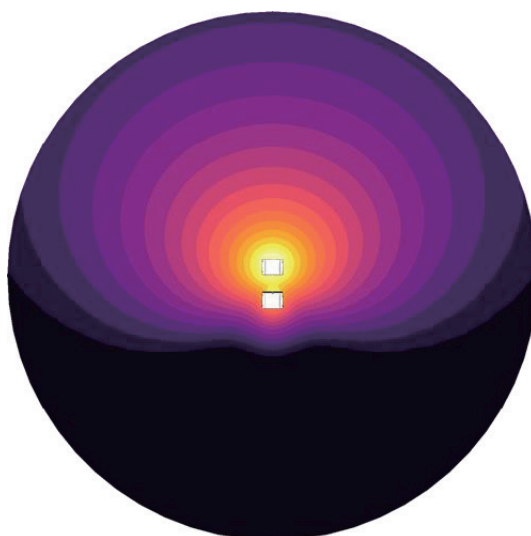
前方、つまり観客の方向に向かって、【図 32】に示すように、舞台前側のスタック（赤）は舞台奥側のスタック（青）に合わせてタイムアライメントをしているので、完璧なサミングが見られます（緑）。



【図 32】 - エンドファイア・アレイのタイムドメインレスポンス、アレイの前方。

2.12.4.4. ダイレクティビティ（指向性）

2 スタックのエンドファイア・アレイ例の放射パターンを【図 33】に示します。

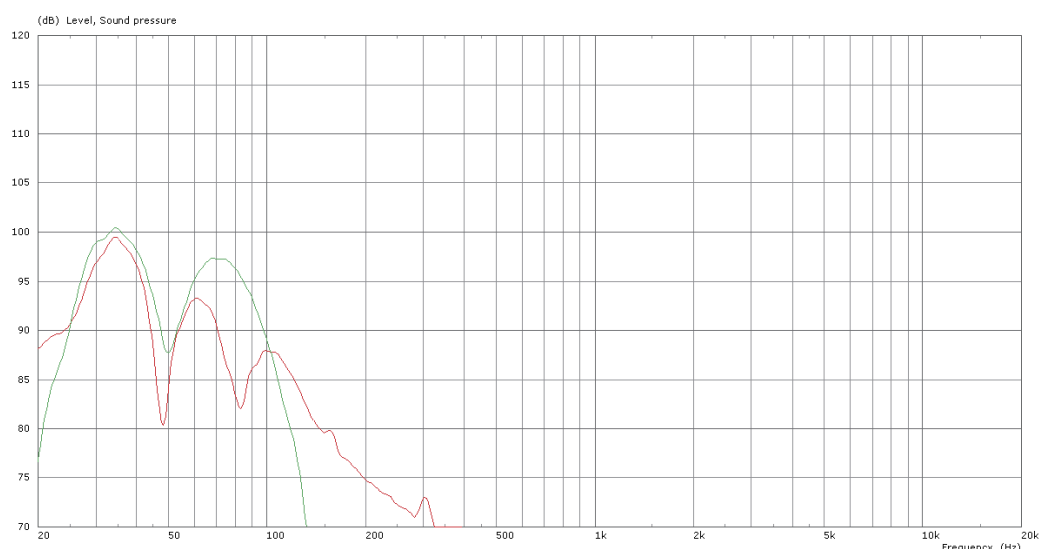


【図 33】 - 2 スタックのエンドファイア・カーディオイド・アレイの放射パターン
50Hz/1oct シミュレーション

2.12.5. 分析

規定通りに配置にすると、エンドファイア・アレイは帯域幅が広く、優れた除去率をもたらしますが、ある特定の周波数に「調整」していることは確かです。ステップレスポンスの整合性や効率性には一切の妥協がなく、アレイ前面の周波数特性はほとんど変化しません。物理的な設置面積が大きくなるという明らかなデメリットがありますが、状況によっては、舞台奥 / 舞台前方には十分なスペースがあるけれど、舞台袖にはほとんどスペースがないという場合には、有効であることがわかります。

また、物理的なエンドファイア構成では、後方に向かってかなりのキャンセルが発生しますが、キャンセルされた帯域幅は非常に狭くなる可能性があります。配置にスタックを追加すると、前方のビーム幅が狭くなり、後方への時間差が十分にあるため、除去率をさらに高めることができます。しかし、これには問題がないわけではありません。確かにキャンセルはより広帯域になりますが、スタック後方のレスポンスのリップル【図 34】は、拡声に頼っている一部のミュージシャンにとっては厄介なものになるかもしれません。ある音階は強調され、ある音階は全く感じられないということになるからです。



【図 34】 - 2 スタック（緑）と 3 スタック（赤）のエンドファイア・アレイの後方に向かってキャンセルが発生
周波数特性のリップルに注目。

しかし、エンドファイア構成では、前方へのステップレスポンスの整合性と周波数特性の整合性は無指向性サブウーファーと同等であり、同じ数量のサブウーファーを使用した無指向性構成と比較して SPL の損失がほとんどないという事実と相まって、これを否定することはできません。後方への周波数特性のリップルを考慮しても、先に述べた 2 つのアレイと比較して、SPL が大きく減少していることがわかります。

2.13. カーディオイドモードの評価

汎用性の高いサブウーファーを使ってカーディオイドに調整して設置するにはいくつかの方法があり、それぞれに利点と欠点があることがわかります。これらは、【表 35】に擬似的な「評価」とともにまとめられています。どのようなシナリオでも、どのように進めるかを決めるのは、システム設計者の義務です。カーディオイドを選択した最大の動機があるのですから、選択された構成の欠点とのバランスをとってください。

構成	指向性	SPL		整合性		壁と近い？
		フロント	リアのキャンセル	周波数特性	ステップレスポンス	
無指向性	★	★★★★	★	★★★★	★★★★	★★★★
標準カーディオイド	★★	★★	★★	★★	★★	★
拡張カーディオイド	★★★★	★	★★★★	★	★	★
エンドファイア	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★

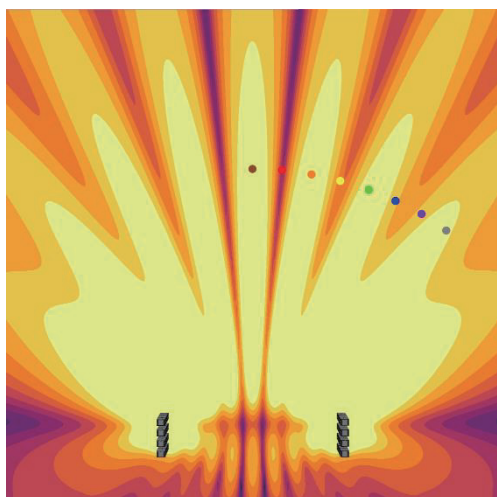
【表 35】 - 利点と欠点のまとめ

3. その他の情報および考慮事項

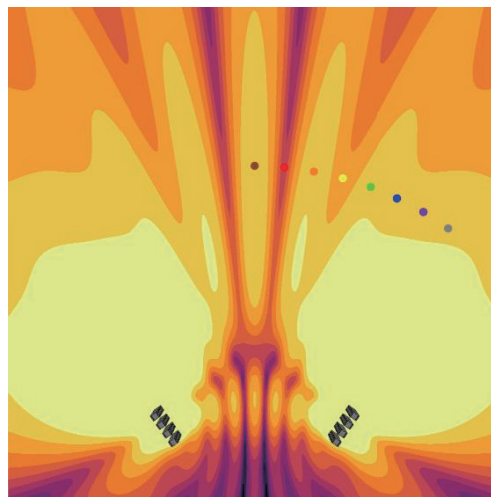
3.1.1. Interference pattern (干渉パターン) の低減

一般的な左右のサブウーファーのコンフィギュレーションでは、カバレッジに顕著な干渉パターンがあることはよく知られており、私たちは皆パワーアレイに精通しています。

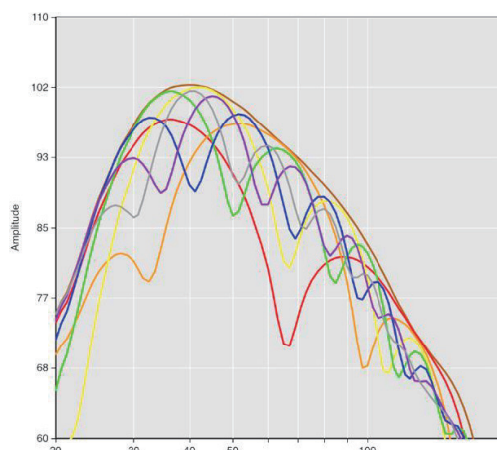
他のサブウーファーの配置を議論することなく、純粋にカーディオイドサブウーファーの構成だけでこの左右の構成を拡張し、カバレッジを改善するためのシンプルで効果的な戦術は、カーディオイドパターンを有利に利用して、サブウーファーのスタックを外側に回転させることです。【図 36】から【図 39】は、実際にエンドファイアで展開し、30m 地点で測定したものです。水平角度の 50 分解能を持ち、[63Hz/1 oct] を示しています。干渉パターンが著しく減少していることが容易に確認できます。



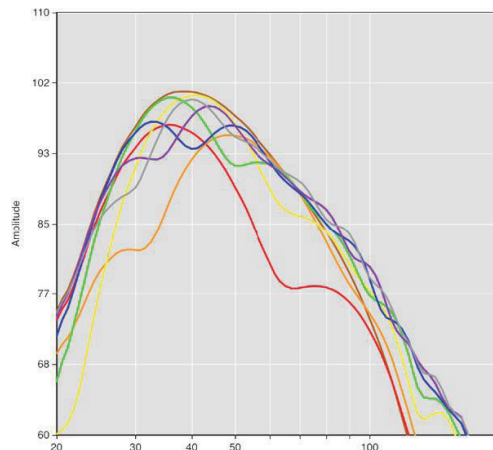
【図 36】 - 舞台奥から前方までまっすぐに配置



【図 37】 - 外側に 35° 回転した状態



【図 38】 - 直線 - 5° の分解能



【図 39】 - 回転した状態 - 5° の分解能

3.1.2. リミット付近のノンリニア

サブウーファースのカーディオイド配置がノンリニアになる瞬間は、カーディオイドパターンが崩壊し、予測不可能な世界に突入する瞬間でもあります。「カーディオイド専用」のサブウーファースがノンリニアになる典型的な例は、寸法、数量、能力の異なるフロントとリアのドライバーで構成されている場合です。限界に近い状態で強く押し込まれると、前方と後方のドライバーの動作の違いにより、カーディオイドパターンが変化します。前方のドライバーは、小型の後方ドライバーの限界特性に合わせて、早期に限界に達するようにすれば、そうならないかもしれませんが、これは理想的とは言えません。同じサブウーファースを使ってカーディオイドアレイの前方と後方の要素を作ると、この問題が解消され、どのような状況でもカーディオイドパターンが維持されます。

3.1.3. エンドファイア構成におけるカーディオイド専用または傾斜型サブウーファースの使用

エンドファイア・アレイを構成するために、カーディオイド専用のサブウーファースに多目的サブウーファースのアレイを使用することは理想的ではありません。編成の中で後ろ向きのドライバーは、後ろのアレイの前向き要素に逆行する働きが見られます。この相互作用は複雑ですが、最終的にはアレイの効率が全体的に低下してしまいます。

3.1.4. 正しいプリセットの呼び出しとケーブル配線の重要性

これは特に言及する必要はないかもしれませんが、念のため述べておきます。コンフィギュレーションを選択するときは、正確な設定を確実にするために、徹底的かつ系統だったプロセスに従うことが重要です。アンプのプリセットの選択やパッチの間違いまたは電氣的セッティングのミス、間違ったスピーカーの識別などは、最適な結果からはほど遠いものになります。大規模なサブウーファースのアレイでは、アレイ内の2つの要素を誤って認識してしまうと、完全に台無しになってしまう場合もあります。デュアルチャンネル測定のソフトウェアを使用して、配置の正確さを確認する必要があります。ツアーリングでは、単純ミスを防ぐために、すべてのパネルワークとケーブルにラベルを付けることが強く推奨され、一般的となっています。これらの理由は、大規模なアレンジメントで組み立てられた後では、発見するのが難しくなるかもしれないからです。

4. ラインアレイ

4.1. ラインアレイはカーディオイドにできる？

一言で言えば、できます。サブウーファーが本質的にカーディオイド専用であったり、多用途型であったりするのと同様に、ラインアレイも同様なことができます。

ラインアレイエレメントの放射パターンは、エンクロージャーの素材、ドライバーの構成、ウェーブガイドの設計、適用される電氣的な処理など、多くの要素の結果です。これらの要素は互いに独立したものではなく、他の要素に影響を与えることなくある要素を変更することはほとんど不可能で、性能は疑いなくすべての構成要素の総和です。

注意：カーディオイド放射パターンとは、最終的な結果を意味します。これは、測定できる後方への放射エネルギーが前方に比べて少ない状態を表しているだけです。ここでは、ラインアレイにアクティブに駆動される背面または横向きのトランスデューサが組み込まれているかどうかは関係ありません。このカーディオイド放射パターンを結果的に実現するには、いくつかの方法があります。

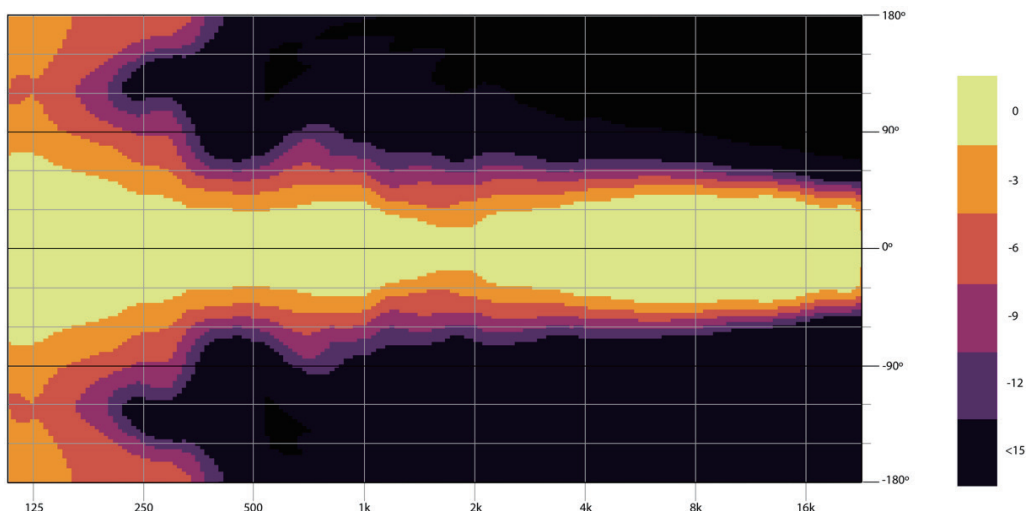
4.2. CODA のラインアレイはカーディオイド？

はい、ですが、いいえ、でもあります。私たちのラインアレイは、後方へのキャンセルを唯一の目的としたアクティブ駆動のトランスデューサーを内蔵していませんが、多くの研究開発の成果、CODA の最新のラインアレイは 200Hz 付近より上の周波数で本来のカーディオイドパターンを生み出しています。

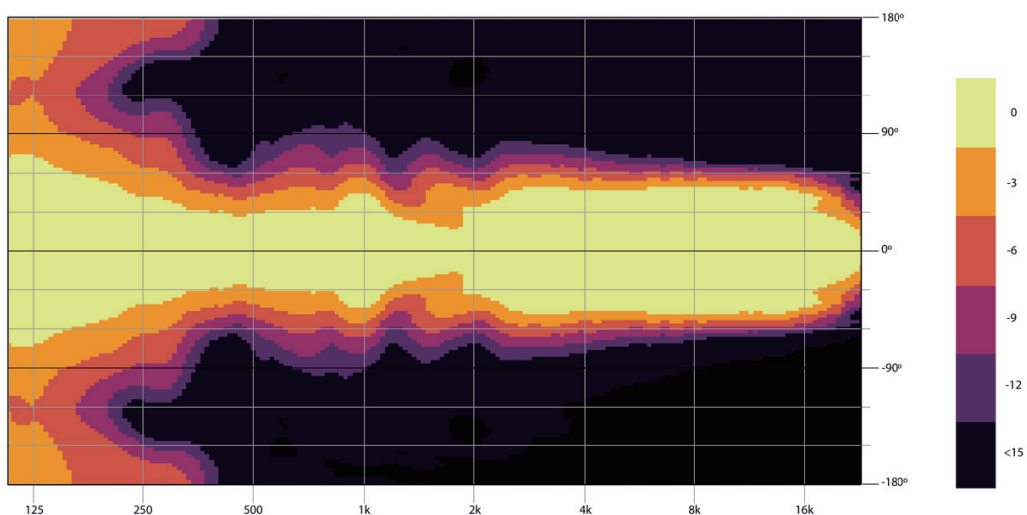
このカーディオイドパターンは、当社のカプラー技術によって部分的に実現されており、いくつかの点で大きく貢献しています。カプラーは、中高域を水平方向に制御するだけでなく、重要なことに、低域ドライバーの水平方向の音響中心を水平方向にバラバラにします。事実上、これは音響的な意味でスピーカーを人為的に水平方向に大きくするもので、物理的な大きさで可能とされる周波数よりはるかに低い周波数まで正確な指向性を維持することができます。

図 40 ~ 43 は、90° と 120° のカプラーを装着した AiRAY と、80° と 120° のカプラーを装着した ViRAY の 2 つのラインアレイの水平方向の指向性を示したものです。これらはスピーカーが本来持ち合わせている優れた水平方向のコントロールを示しており、カーディオイドドライバーを使用しなくても、200Hz より上が本質的なカーディオイドであるとみなすことができます。

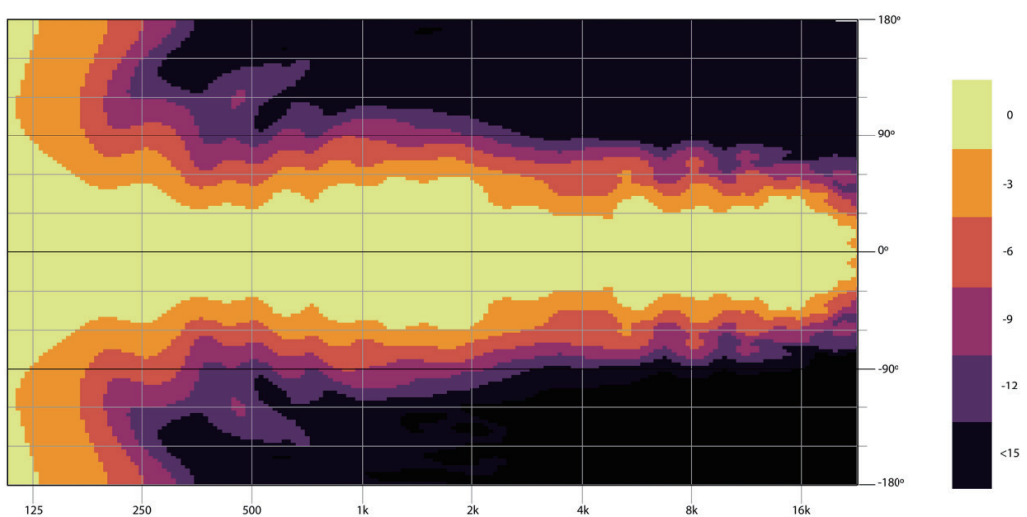
注意：私たちの言葉をただそのまま信じるのではなく、楽しみながら、自分自身でこのパラメータと他のすべてのパラメータを測定してください。様々なメーカーのエンクロージャーを、カーディオイドかどうかに関わらず比較してみてください。可能であれば、実際のスピーカーを使用し、各社独自の予測ソフトウェアだけに頼らず、スムージングとスケーリングに細心の注意を払うようにしてください。



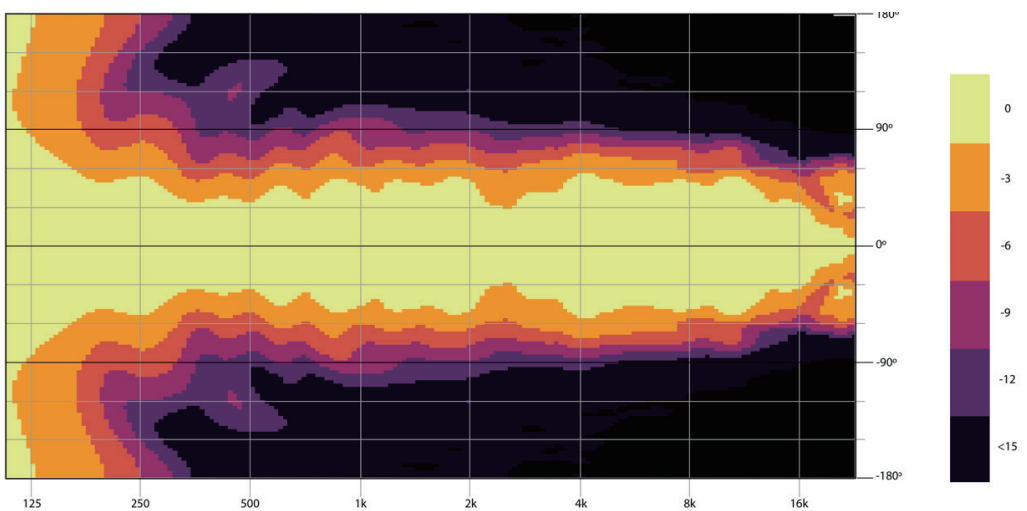
【図 40】 - AiRAY 90° 水平方向の指向性



【図 41】 - AiRAY 120° 水平方向の指向性



【図 42】 - ViRAY 80° 水平方向の指向性



【図 43】 - ViRAY 120° 水平方向の指向性

しかし、150Hz 以下の低い周波数帯域では、ラインアレイは真のカーディオイド専用システムのような「カーディオイド」ではないことがわかります。しかし、当社のサブウーファーが様々な配置展開の可能性を持っているのと同じように、ラインアレイも設計の初期段階でこの点を考慮しています。

CODA Audio では、ラインアレイだけでなく、Low extension（低域拡張）モデルも製造しているので、非常に適応性の高いシステムになっています。Low extension モデルは、あとから思い付きの付け足しではなく、十分に満足する CODA Audio のラインアレイの「スタンドアロン」動作に必要でもありません。Low extension モデルは、システムの汎用性を劇的に向上させ、互換性の観点を持ちながら音響的にも機械的にも設計されたオプションです。

これらの低い周波数帯域に対応するモデルは様々な方法で配置することができ、そのうちのいくつかは低周波数におけるカーディオイドパターンを実現します。

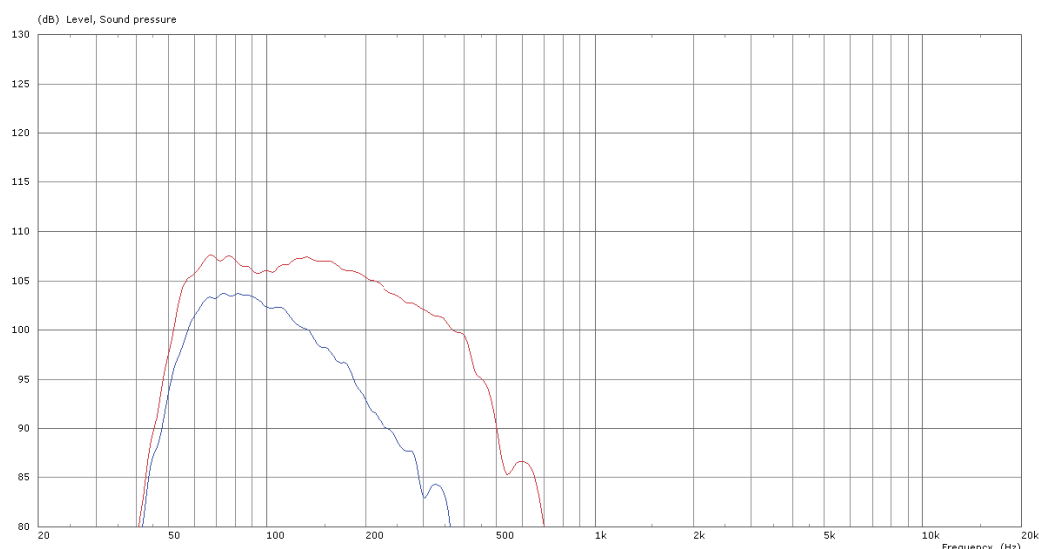
4.3. なぜ CODA Audio はカーディオイド専用のラインアレイを製造しないか？

CODA Audio の設計哲学において、音質は最優先事項の一つです。簡単に言えば、スピーカーの設計に関しては「TANSTAAFL（何もせずに何かを得られることはない）」ということであり、多くの場合、妥協のバランスがあります。これを正当化するすべての理由を完全に説明することは、このドキュメントの範囲外ですが、要するに、本質的にカーディオイドであるラインアレイを設計するには、（少なくとも）エレメント前面の中低域の時間的応答が犠牲になります。これは妥協としては大きすぎると考えています。私たちは、システムの本質である、直線に限りなく近いニア・リニアフェイズに誇りを持っており、本質的なカーディオイド動作を実現するためにラインアレイの位相とステップレスポンスに関して妥協をしたくないのです。以下に説明するカーディオイド戦略は、システムのニア・リニアフェイズと言っても良い性質を維持し、その他の CODA Audio 製品との相互運用性を維持するだけでなく、著しく優れたサウンドを実現します。

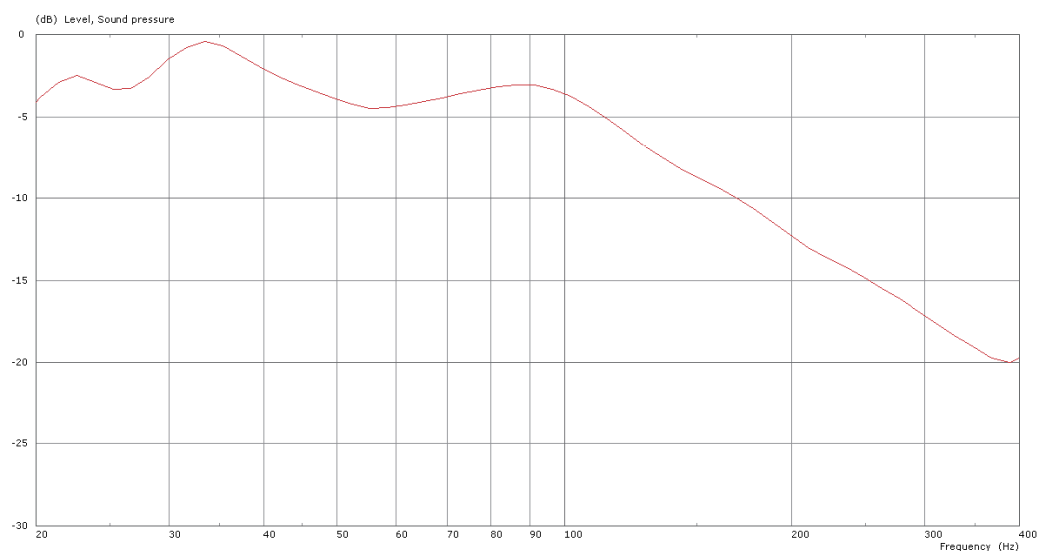
4.4. ラインアレイでカーディオイドパターンを実現するには？

以下に示すように、弊社の Low extension（低域拡張）モデルを効果的に使用することで、システムの低域のインパクトとヘッドルームを大幅に向上させることができるだけでなく、システムの優れたニア・リニア・フェーズの性質を維持したカーディオイド・パターンを実現することができます。

【図 44】は、AiRAY ラインアレイスピーカーの前後 8m で測定された SPL を示しています - 赤はフロント SPL、青はリア SPL を示しています。この 2 つの測定値の差分を【図 45】に示します。



【図 44】 -AiRAY LF の 8m フロントとリアでの測定結果

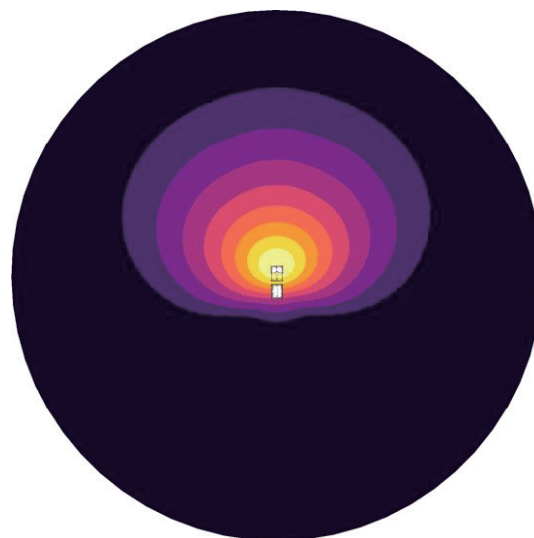


【図 45】 - 【図 44】 のデルタ値

ラインアレイの後ろに Low extension (低域拡張) モデルのアレイをフライングさせると、標準的なカーディオイドパターン、または除去率を高めたカーディオイドパターンを作り出すことができます。【図 47】は、低域拡張モデルのアレイをラインアレイの後ろにフライングしたときに得られるカーディオイドパターンを示しています (63Hz@1oct がマッピングされています)。

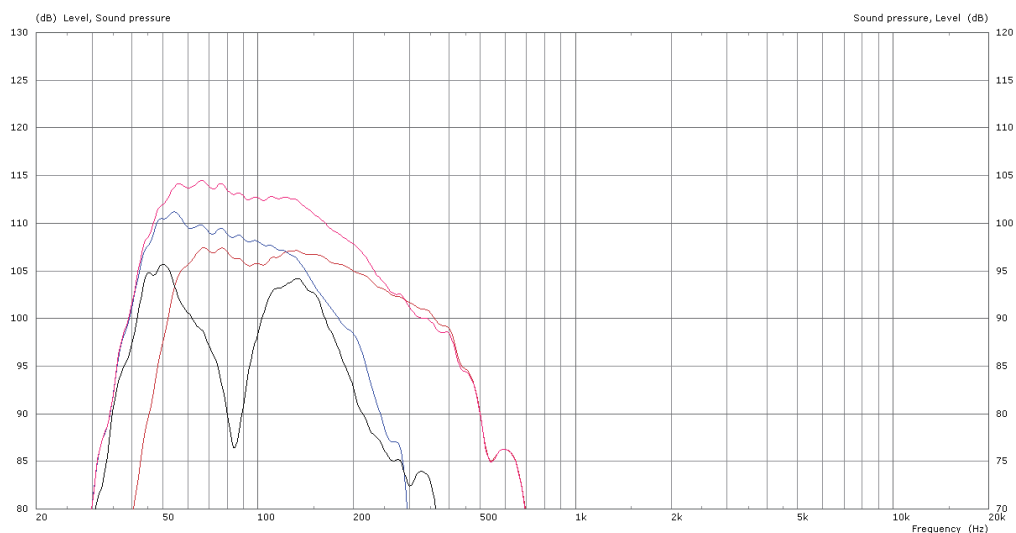


【図 46】 - フライングによるカーディオイド配置

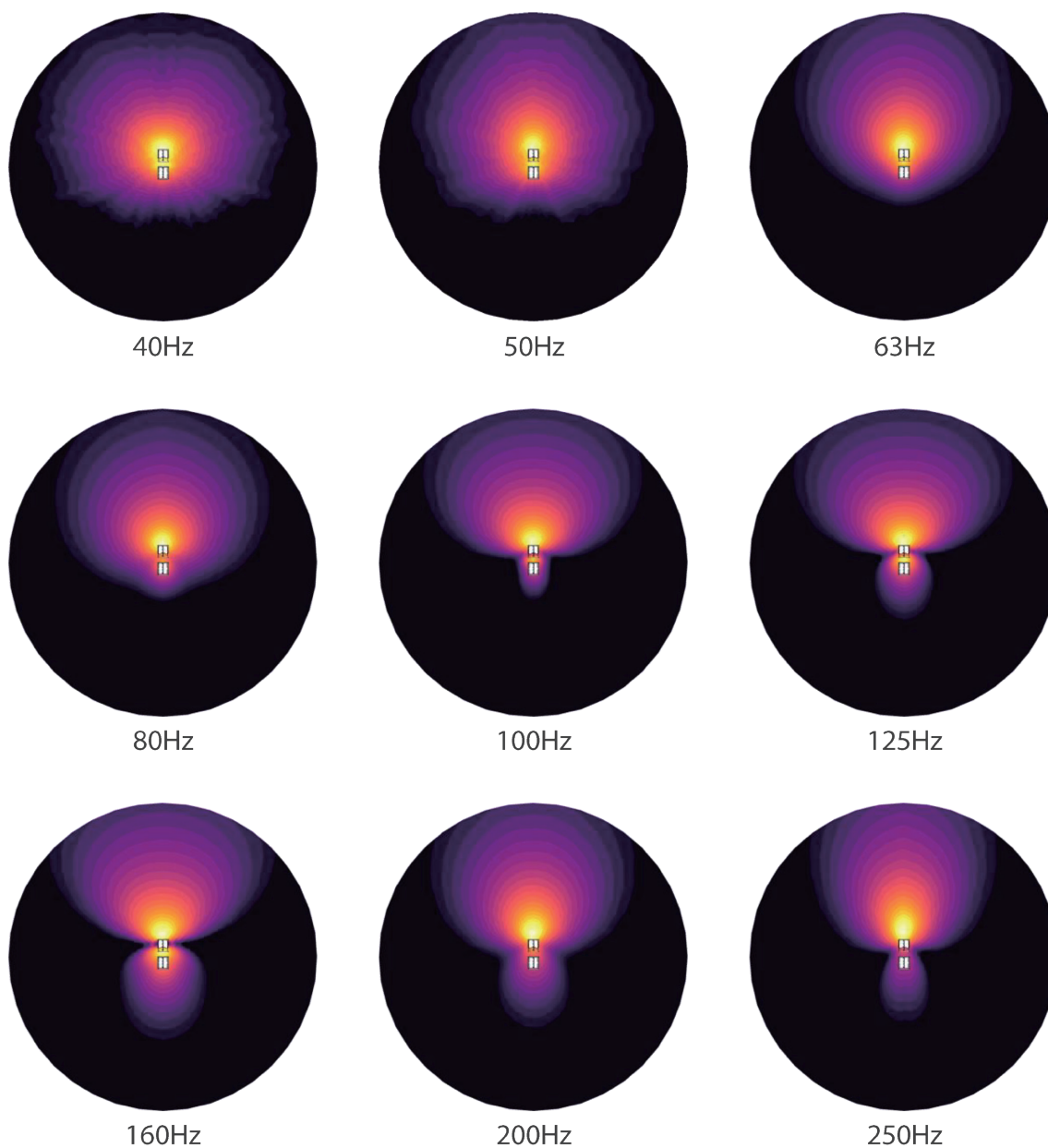


【図 47】 - フライングによるカーディオイド配置

次ページの【図 48】は、これらのアレイの前後の周波数特性を示しています (AiRAY MF/HF はミュートされています)。ピンクは AiRAY LF と SC2 の合計で、青は SC2 のソロ、赤は AiRAY LF のソロを表しています。黒はアレイ後方 8m の除去率を示しています。



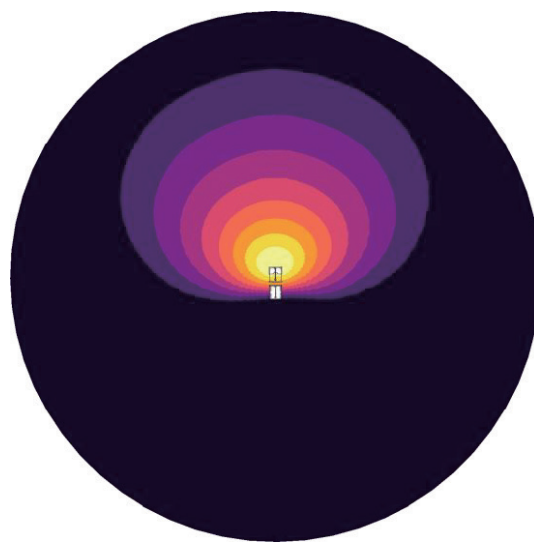
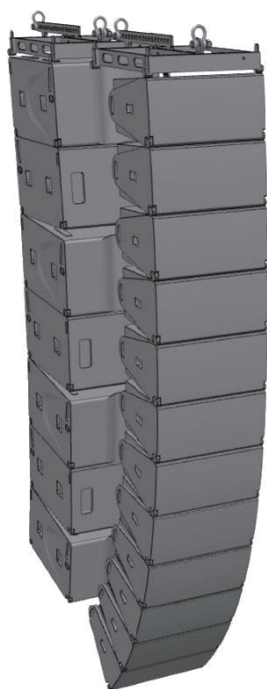
【図 48】 - フライングによるカーディオイド配置：前面と背面での音圧マッピング



【図 49】 - ラインアレイと低域拡張の水平指向

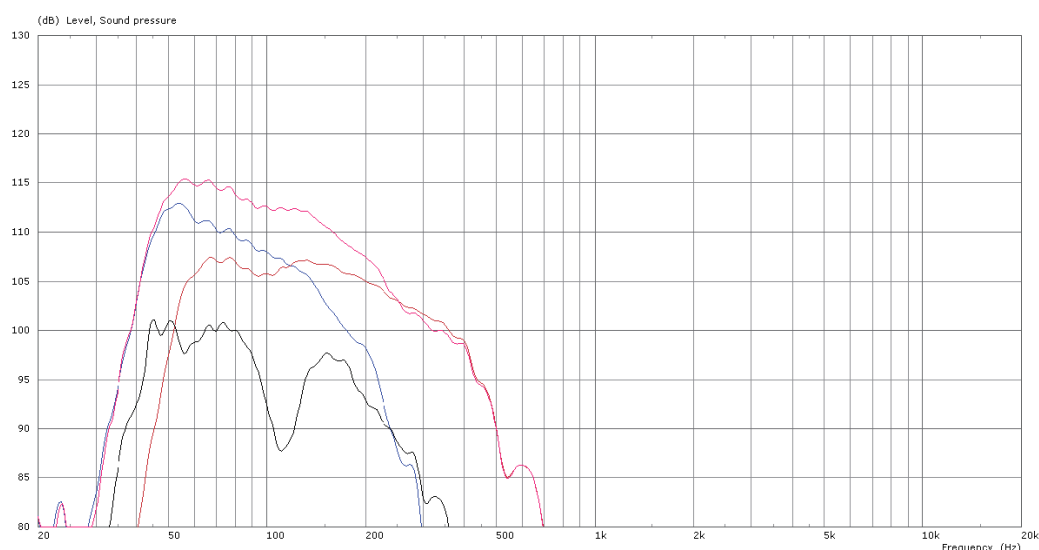
【図 49】は、SC2-F を後方にフライングした AiRAY システムの水平指向性を示しています。指向性のグラフは 1/3 オクターブを示しています。この放射パターンは、2 つのシステムの周波数帯域をオーバーラップさせることで実現されていますが、これは先に紹介した物理的なエンドファイア・サブウーファーアレイと全く同じ動作原理です。

このカーディオイド配置は、SC2-F エンクロージャーを 1 つおきに回転させ、SC2-F 自体に拡張カーディオイドプリセットを使用することで、リアリジェクション（後方除去率）に向けてさらに調整できます。【図 51】は、低域拡張モデルをラインアレイの後ろにフライングし、低域拡張モデル自体は拡張カーディオイド配置にした場合に得られる放射パターンの向上を示しています（63Hz@1oct がマッピングされています）。【図 52】では、【図 48】と比較して、除去率の向上が確認できます。ここでは、これらのアレイの前後の周波数特性を示しています（AiRAY MF/HF はミュートされています）。ピンクは AiRAY LF と SC2 の 8m 前方の合計で、青は SC2-F のソロ、赤は AiRAY LF のソロとなっています。黒はアレイ後方 8m の除去率を示しています。



【図 50】 - フライングによる拡張カーディオイド配置

【図 51】 - フライングによる拡張カーディオイド配置



【図 52】 - フライングによる拡張カーディオイド配置：前面と背面の音圧マッピング

4.5. 拡張カーディオイド配置はどのように機能しますか？

Low extension（低域拡張）を標準的なカーディオイドアレイ（つまり、1つのアレイ内に前方と後方を向いたハンギングが混在している）で構成し、ラインアレイの後ろにフライングすると（前述の【図 50】のように）、事実上、システム全体が連携してエネルギーを前方に放射し、後方に向けてかなり広帯域のキャンセレーションとなります。この構成は、3つのソース（ラインアレイ / 低域拡張のフロント / 低域拡張のリア）が後ろに配置されているのと同じです。システム全体の水平方向の指向性は、非常に広い周波数範囲で一貫しています。

4.6. カーディオイド構成で、他に考慮すべき点は？

特に垂直方向です。ラインアレイの後ろにある低域周波数のアレイの高さ調整を変更するだけで、システムの垂直方向の放射パターンを変えることができます。これは非常に複雑な性質を持っていますが、オフラインで広範なモデル化が可能です。この高さを調整するだけで、前方に放射されるエネルギーの焦点と、後方のキャンセルの焦点を調整することができます。

低域エレメントの開き角度の制御については、機械的な角度と、個々のエレメントに適用される微増な電氣的ディレイの両方の観点から、さらなる可能性を見出せます。ここでの議論は本稿では割愛しますが、システム設計者の頭の中には種が植えられているはずです。

これらすべての可能性は非常に柔軟性があり、非常に精密なカバレッジを実現できます。

4.7. Low extension（低域拡張）は、他にどのような配置が可能ですか？

カーディオイドパターンは、いくつかの状況で非常に有益であることがわかっています。

- 残響のある空間で、後方に放射されるエネルギーの拡散を抑えることで、リスナーに向かってよりクリーンなミックスを提供することができる。
- システム全体の指向性を高める事で、野外フェスティバルの隣接するステージ間のこぼれ音の減少。
- 大規模な野外フェスティバルで、指向性を狭くしてメインとサイドのフライングしたスピーカー間のエリアオーバーラップを軽減したいという強い要望がある場合。

この他にも、2つの注目すべき構成があり、それぞれ異なる結果が得られます。

1. ロングスロー
2. ビームスプリット

4.7.1. Low extension (低域拡張) - ロングスロー構成



アレイが長くなると、垂直方向の指向性が狭くなります。低域拡張モデルを他のラインアレイの上に配置した場合、通常、60-200Hz の周波数範囲でオーバーラップします（モデルによって若干の違いがあります）。このようにアレイが物理的に長くなることで、低域周波数でのシステムのロングスロー特性が強化され、遠方での低域周波数のエネルギーが全体的に増加します。

ロングスロー構成の主な利点は、広いリスニングエリアの前方から後方への音色的変化が小さくなることです。

【図 53】 - ロングスロー構成

4.7.2. Low extension (低域拡張) - ビームスプリット構成



Low extension (低域拡張) のエレメントをラインアレイの間に配置すると、システムの垂直方向への放射が 2 つのビームに分割されます。これにより、例えば反射を引き起こす劇場のバルコニーの硬いエッジを回避しながらエネルギーを望ましいゾーンに集中させる効果があります。

線状の低域カップリングは適切に維持されますが、この構成を実行する前に、シミュレーション・ソフトウェアで注意深くモデリングを行い、中低域や中域に望ましくない副作用がないことを確認する必要があります。

注意：すべてのコンフィグレーションと同様に、ここでは妥協の明確なバランスがあり、オプションを検討するのはシステムデザイナーの責任です。

【図 54】 - ビームスプリット構成

5. まとめ

本書は、すべてを網羅したマニュアルではありませんし、正式なトレーニングの代わりになるものでもありません。本書は、情報に基づいた上で意思決定を行うための情報を提供するものであり、特定の構成の利点と欠点の両方を示すことを目的としています。多くの場合、ある配置の利点が欠点を上回ることがあります。しかし、実際にはそうでない場合もあります。スピーカーシステムの設計は、常に妥協のバランスを必要としますが、カーディオイドシステムの実際の配置については、確かにこれが真実です。

「カーディオイド専用」のサブウーファーは、音響性能に限界があるだけでなく、効果的に使用できるアプリケーションにも限界があります。また、状況によっては使用することが不可能に近いことが示されています。しかし、汎用性の高い多用途型サブウーファーは、無指向性、標準カーディオイド、拡張カーディオイド、エンドファイア・カーディオイド、およびそれらの多くの組み合わせでアレイ化することができ、はるかに柔軟性が高く、ほぼすべての状況に対応することができます。

CODA Audio では、可能な限り多くの製品が相互に互換性を持つように配慮しています。これは偶然ではなく、設計段階での徹底した計画があってこそ実現できるものです。本稿で私たちのシステムの多様性を示すことができているのであれば幸いです。



MEMO

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

CODA

C O D A A U D I O



202108

●商品写真やイラストは、実際の商品と一部異なる場合があります。●掲載内容は発行時のもので、予告なく変更されることがあります。変更により発生したいかなる損害に対しても、弊社は責任を負いかねます。●記載されている商品名、会社名等は各社の登録商標、または商標です。



ヒビノインターサウンド株式会社

〒105-0022 東京都港区海岸2-7-70 TEL: 03-5419-1560 FAX: 03-5419-1563

E-mail: info@hibino-intersound.co.jp <https://www.hibino-intersound.co.jp/>