

Application Note

TAS5825M 向けスマートアンプ アプリケーションガイド



Paul Li, Jesse Ji

Consumer Audio Amplifiers and Haptics

概要

スマートアンプ テクノロジーは、インテリジェントな予測アルゴリズムを通じて音質の大幅な向上、ピーク電力出力の最大化、システムの信頼性向上に貢献します。このペーパーは、ノート PC、スマートスピーカ、TV など、TAS5825M を使用したスマートアンプ アプリケーションの簡潔な概要と詳細な実装ガイドラインを紹介します。

最初に、代表的なスピーカの基本原理とモデル化を含めたスマートアンプの基礎と、スマートアンプ アルゴリズムについて説明します。最後に、スピーカ特性評価とスマートアンプのチューニングと検証の両方について詳細なガイドラインを示し、TAS5825M を使用したスマートアンプの迅速な実装を容易にしました。

目次

1はじめに.....	2
2スマートアンプの基礎.....	3
2.1スピーカーの基礎とモデル.....	3
2.2スマートアンプ アルゴリズム.....	6
3準備作業.....	8
3.1ハードウェアの準備.....	8
3.2ソフトウェアの準備.....	8
3.3スピーカー情報.....	8
4スピーカの特性評価.....	9
4.1特性評価セットアップ.....	9
4.2特性評価プロセス.....	9
4.3スピーカー特性ガイド.....	9
5スマートアンプのチューニングと検証.....	15
5.1スマートアンプ チューニング ガイド.....	15
5.2スマートアンプの検証.....	24
6まとめ.....	27
7参考資料.....	28

商標

PurePath™ is a trademark of Texas Instruments.

MATLAB® is a registered trademark of The MathWorks, Inc.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

スピーカの特性と動作について深く理解した結果、TI のスマートアンプは、高度でインテリジェントかつ構成可能な処理フローを実現し、過熱や過度の変位によってスピーカの損傷を招くことなく、従来型システムより強力で豊かなサウンドを出力します。TI のスマートアンプを使用して音響効果と信頼性の高いスピーカ保護機能を実現するには、オーディオスピーカの基礎に関する理解を深め、スピーカの特性評価と性能チューニングを適切に実装する必要があります。

したがって、このホワイトペーパーは、TI のスマートアンプ テクノロジーの包括的な紹介と、TAS5825M を使用してスマートアンプを迅速に実装できるように、使いやすい指針を提示することを意図しています。

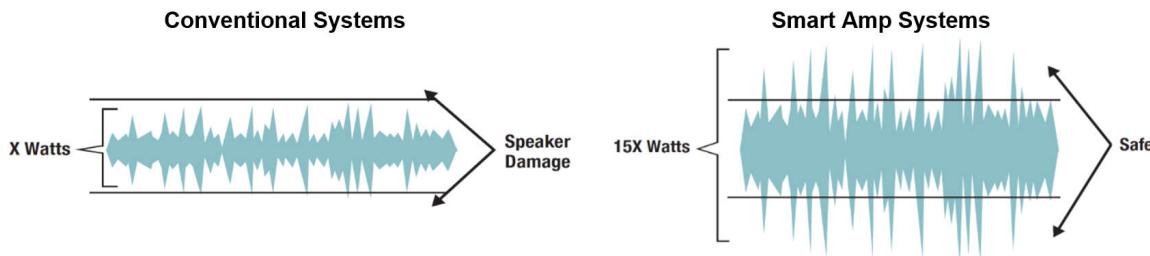


図 1-1. 通常のアンプシステムとスマートアンプシステムの比較

図 1-1 に示すように従来型のオーディオシステムでは、オーディオ再生時にスピーカが損傷しないように、通常、コンプレッサとハイパスフィルタによって、アンプの出力がスピーカの定格内に制限されます。しかし、従来のシステムのチューニング結果は保守的すぎる傾向があり、結果としてダイナミックレンジと低音のパフォーマンスが低下します。

それに対して、スピーカの機械的、電気的、熱的特性の高精度モデル化に基づき、TI のスマートアンプは、スピーカの変位と熱挙動を動的に監視し、潜在的な損傷状況を予測して、適切な時間枠で、スピーカが常に安全動作領域 (SOA) 内にあることを確認できます。したがって、スピーカとアンプの両方の潜在能力を最大限に活用し、スピーカを損傷させずに非常に優れた音質を実現できます。一方、オーディオ信号の過渡ピークに厳密な制限や圧縮が不要になり、音楽のダイナミックレンジが拡張され、深みと深みがありながら低音パフォーマンスが向上します。

TI のスマートアンプの代表的な実装は、スピーカの特性評価とスマートアンプのチューニングという 2 つの部分に分割できます。さらに、図 1-2 は、TAS5825M を使用するスマートアンプアプリケーションの一般的な手順を示します。

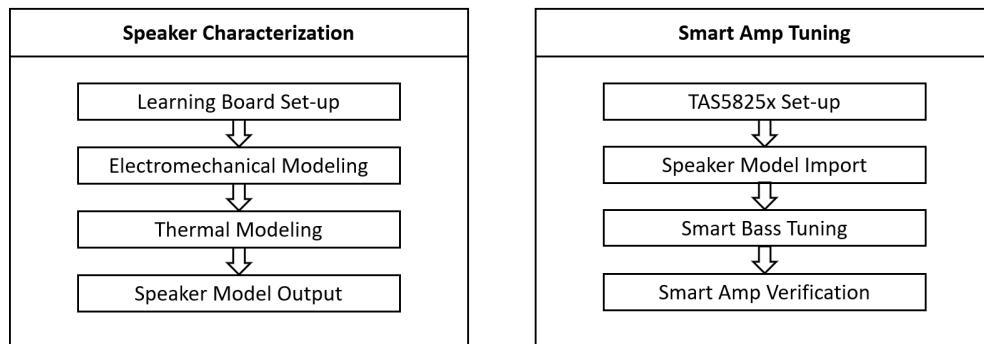


図 1-2. TAS5825M によるスマートアンプの応用手順

上の図に示すように、スピーカ特性評価は、主に、スピーカ学習ボードと PurePath™ Console 3 (PPC3) ソフトウェアを使用した設定、スピーカの電気機械モデルと熱モデルの特性評価、スピーカモデルの出力で構成されます。スマートチューニングプロセスには、TAS5825M と PPC3 ソフトウェアの設定、スピーカモデルのインポート、スマートバスチューニング、スマートアンプの検証が含まれます。

2 スマートアンプの基礎

2.1 スピーカーの基礎とモデル

スピーカーの代表的な構造を [図 2-1](#) に示します。ボイスコイルに一定の周波数の交流電流を印加すると、磁石とボイスコイルの間に磁力が発生し、取り付けられているコーン膜（コーン、ダストキャップ、サラウンドなどを含むすべての可動部品）を駆動して同じ周波数で前後に移動し、音が発生します。

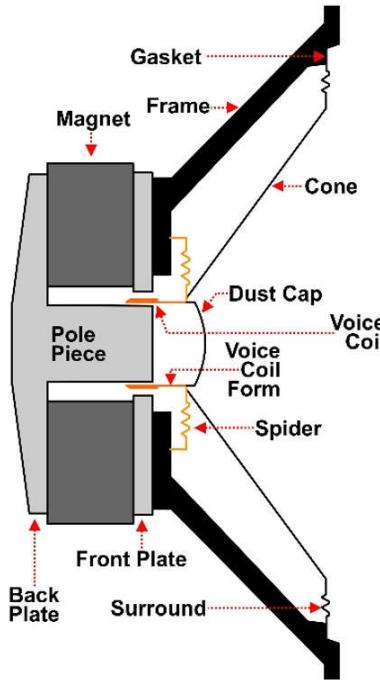


図 2-1. 代表的なスピーカー構造

スピーカーの原理と動作をよりよく理解し分析するために、スピーカーの電気機械的および熱的モデルを含む数学モデルが開発されました。[図 2-2](#) に、代表的なスピーカーの線形化電気機械モデルを示し、主なパラメータの説明を [表 2-1](#) に示します。

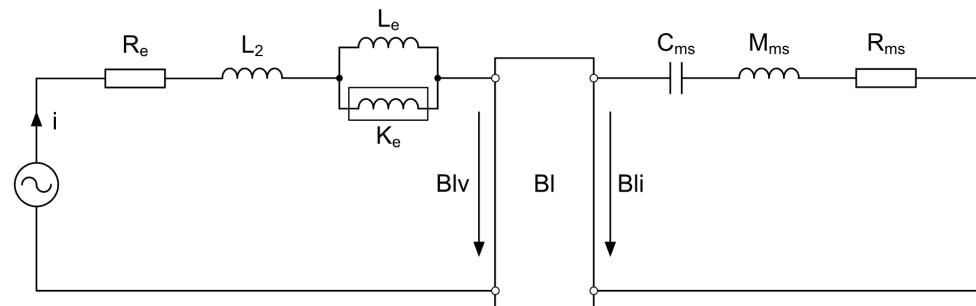


図 2-2. スピーカーの代表的な電気機械的モデル

表 2-1. 電気機械モデルのパラメータ

パラメータ	単位	説明
R_e	Ω	ボイスコイルの DC 抵抗
S_d	cm^2	ダイアフラムの面積
Bl	$\text{T}\cdot\text{m}$	力率
R_{ms}	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	機械的減衰係数
M_{ms}	g	機械質量
C_{ms}	m/N	機械的コンプライアンス
L_e	mH	ボイスコイルのリーケージインダクタンス
L_2	mH	ボイスコイルのインダクタンス
K_e	sH	ボイスコイルの半インダクタンス
u	V	入力電圧
i	A	入力電流
v	m/s	膜の速度
X	m	メンブレン エクスカーション

上記の電気機械モデルに基づいて、代表的なスピーカーの伝達関数を導き出すことができます。単純化のため、 L_e 、 L_2 、および K_e などの小さい値の寄生パラメータは、さらに解析する際に省略することができる。したがって、スピーカーの入力電気的インピーダンスは次のように推定できます。

$$Z_{in}(s) = \frac{u(s)}{i(s)} = R_e + \frac{(Bl)^2}{sM_{ms} + R_{ms} + 1/sC_{ms}} \quad (1)$$

また、入力電圧からエクスカーションへの伝達関数は次のように導くことができます。

$$H_{exc}(s) = \frac{X(s)}{u(s)} = \frac{Bl}{sR_e} \cdot \frac{1}{sM_{ms} + (R_{ms} + (Bl)^2/R_e) + 1/sC_{ms}} \quad (2)$$

さらに、表 2-2 に示すように、一般的なスピーカーの電気機械モデルの等価ティレスモール (T/S) パラメータを導出することができます。

表 2-2. 電気機械モデルの T/S パラメータ

パラメータ	単位	説明
F_s	Hz	スピーカーの共振周波数
Q_{es}	-	FS での電気的品質係数
Q_{ts}	-	FS での機械的品質係数
Q_{ms}	-	FS での総品質係数
V_{as}	リットル	同等のコンプライアンス ボリューム

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ms}C_{ms}}} = \frac{\omega_s}{2\pi} \quad (3)$$

$$Q_{es} = \frac{R_e}{(Bl)^2} \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \quad (4)$$

$$Q_{ms} = \frac{1}{R_{ms}} \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \quad (5)$$

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es}Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}} \quad (6)$$

$$V_{as} = 1000 \cdot \rho c^2 S_d^2 C_{ms} \quad (7)$$

表では、 ρ は空気密度 (25°C で 1.184kg/m³)、 c は音速 (25°C で 346.1m/s) である。この場合、電気機械モデルの伝達関数は次の式に変換できます。

入力電気的インピーダンス:

$$Z_{in}(s) = R_e + \frac{(Bl)^2}{M_{ms}} \times \frac{s}{s^2 + s\omega_s/Q_{ms} + \omega_s^2} \quad (8)$$

変位伝達関数:

$$H_{exc}(s) = \frac{Bl}{M_{ms}R_e} \times \frac{1}{s^2 + s\omega_s/Q_{ts} + \omega_s^2} \quad (9)$$

同様に、スピーカの熱挙動は、図 2-3 に示すように、線形化数学モデル、すなわち熱モデルでも記述できます。表 2-3 に、代表的なスピーカの熱モデルに対応するパラメータを示します。

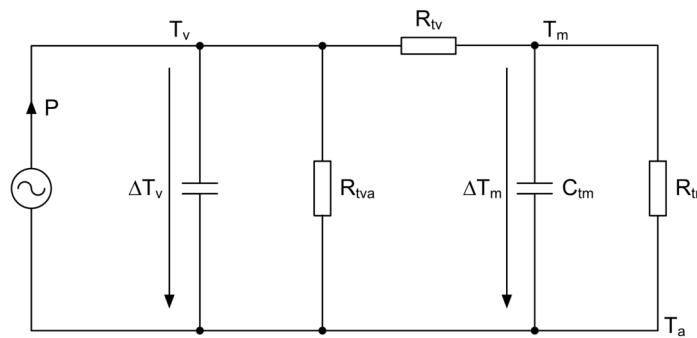


図 2-3. スピーカの代表的な熱モデル

表 2-3. 热モデルのパラメータ

パラメータ	単位	説明
R_{tv}	K/W	ボイスコイルから磁石への熱抵抗
C_{tv}	J/K	ボイスコイルの熱容量
R_{tm}	K/W	磁石と周囲の空気間の熱抵抗
C_{tm}	J/K	磁石の放熱容量
R_{tva}	K/W	ボイスコイルとエアギャップの間の熱抵抗
P	W	ボイスコイルの消費電力を熱として測定
T_v	K	ボイスコイルの温度
T_m	K	磁気素子の温度
T_a	K	周囲温度
ΔT_v	K	ボイスコイルと周囲の温度差
ΔT_m	K	磁石と周囲の温度差

熱モデルの消費電力と温度差の関係は電気回路の電流と電圧の関係と似ています。したがって、熱抵抗は次のようにになります。

$$\Delta T(s) = R_{thermal} \times P_{dissipated}(s) \quad (10)$$

および放熱容量の場合は次のようにになります。

$$\Delta T(s) = \frac{1}{sC_{thermal}} \times P_{dissipated}(s) \quad (11)$$

したがって、消費電力からボイスコイル温度への伝達関数は次の式で表される必要があります。

$$H_{coil}(s) = \frac{\Delta T_v(s)}{P(s)} = \left(R_{tv} + \frac{1}{sC_{tm}} \parallel R_{tm} \right) \parallel \left(\frac{1}{sC_{tv}} \right) \parallel R_{tva} \quad (12)$$

同様に、消費電力から磁石温度への伝達関数は次のようにになります。

$$H_{mag}(s) = \frac{\Delta T_m(s)}{P(s)} = H_{coil}(s) \times \left(\frac{1}{sC_{tm}} \parallel R_{tm} \right) \times \left(R_{tv} + \left(\frac{1}{sC_{tm}} \right) \parallel R_{tm} \right)^{-1} \quad (13)$$

2.2 スマートアンプアルゴリズム

TAS5825M にはフィードフォワードスマートアンプ保護アルゴリズムが内蔵されており、ターゲットスピーカの変位と熱保護の両方の目的でこのアルゴリズムを [図 2-4](#) に示します。

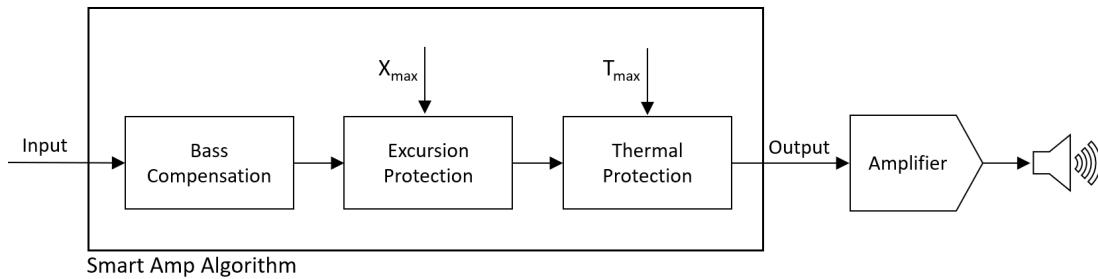


図 2-4. スマートアンプアルゴリズム

変位保護の場合、ルックアヘッド構造を適用して、信号がアルゴリズム出力に供給される前に変位の推定と信号制限が完了したことを確認できます。[図 2-5](#) に、逸脱保護アルゴリズムのブロック図を示します。

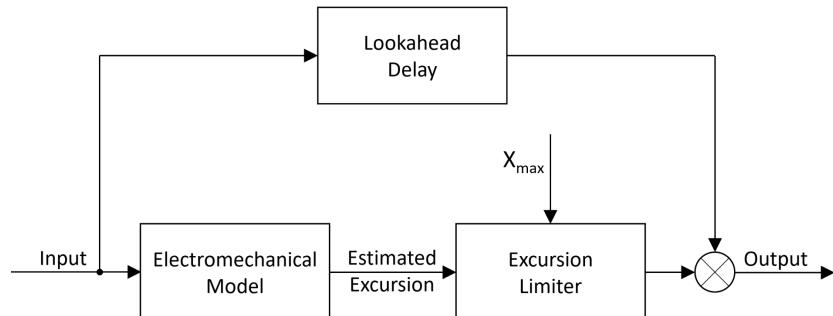


図 2-5. スマートアンプ変位保護アルゴリズム

[図 2-5](#) に示すように、スピーカーのメンブレンの変位は、まずオーディオ信号と導出された変位伝達関数との間の畳み込み動作によって推定されます。

$$X(t) = u(t) \times \mathcal{L}^{-1}[H_{exc}(s)] \quad (14)$$

次に、保護が開始されるかどうかを決定する前に、エクスカーションは最大エクスカーション制限と比較されます。推定変位が制限値 X_{max} を超えると、入力信号が減衰されてスピーカ保護を実現します。そうしないと、入力信号は変化しません。

スマートアンプの熱保護アルゴリズムのブロック図を、[図 2-6](#) に示します。ここでは、熱系の応答特性が遅いことを考慮して、リアルタイム処理構造を採用した。

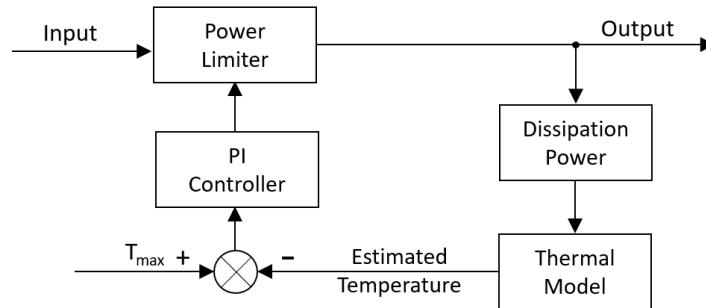


図 2-6. スマートアンプの熱保護アルゴリズム

まず、ボイスコイルの温度は、消費電力とスピーカの熱モデルから推定します。このモデルは次の式で求められます。

$$T_v(t) = T_a(t) + P(t) \times \mathcal{L}^{-1}[H_{coil}(s)] \quad (15)$$

次に、推定温度をボイスコイルの温度制限と比較して、PI 温度コントローラへの基準信号を生成します。その後、サーマルコントローラの出力を電力制限モジュールに送信してオーディオ信号を減衰させ、必要に応じてボイスコイルの温度を熱制限内に維持します。

3 準備作業

スマートアンプ デバイスを使用してスピーカの特性評価とチューニングを正しく実装するには、以下の詳細について必要な準備を行います。

3.1 ハードウェアの準備

スピーカの特性評価に必要なハードウェアには、次のものがあります。

- スマートアンプ学習ボード (PP-SALB-EVM-XMOS)
- スピーカー ボックス付きターゲットスピーカー
- DC 電源 (24V/3A の出力をサポート)
- USB ケーブル (micro-USB から type-A)
- マルチメータ
- マイク
- 接着パテ
- 重量計
- 配線を接続します

スマートアンプのチューニングと検証に必要なハードウェア：

- 開発ボード、TAS5825M 使用
- スピーカー ボックス付きターゲットスピーカー
- DC 電源 (24V/3A の出力をサポート)
- USB ケーブル (micro-USB から type-A)
- マルチメータ
- レーザー機器
- オーディオ精度の装置

3.2 ソフトウェアの準備

TAS5825M を使用してスマートアンプを実行するには、以下のソフトウェアが必要です。

- PurePath™ Console 3:
 - PP-SALB-EVM-XMOS 向け評価ボード モジュール
 - TAS5825M モジュール
- MATLAB® コンパイラランタイム:
 - PurePath™ Console 3 とともにインストールされます

3.3 スピーカー情報

スマートアンプを使用してオーディオを設計する際に、スピーカのパラメータを把握し、その精度を確実に確保することが重要です。推奨するのは、スピーカのベンダにデータシートに、以下の詳細情報を請求することです。

- ダイアフラム領域:
 - スピーカー ダイアフラムの面積または直径
- 変位制限:
 - X_{max} :スピーカー ダイアフラム/コイルの最大リニアエクスカーション
- 熱制限:
 - T_{max} :スピーカ コイルの最大温度
 - P_{max} :スピーカの最大ピーク電力
- Thiele/Small (T/S) パラメータ:
 - ターゲットスピーカーの T/S パラメーターを検証することをお勧めします。

4 スピーカーの特性評価

4.1 特性評価セットアップ

学習ボード (PP-SALB-EVM-XMOS) を使用したスピーカー特性評価用のハードウェア設定は、図 4-1 に示すように説明できます。

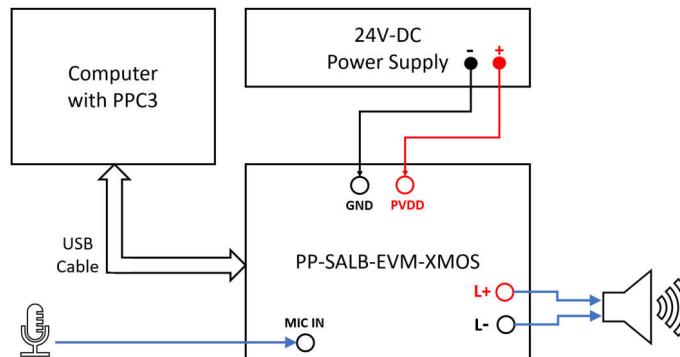


図 4-1. スマート アンプ ラーニング ボード向けのハードウェア設定

4.2 特性評価プロセス

図 4-2 に、学習ボードを使用したスピーカーの特性評価プロセスを示します。

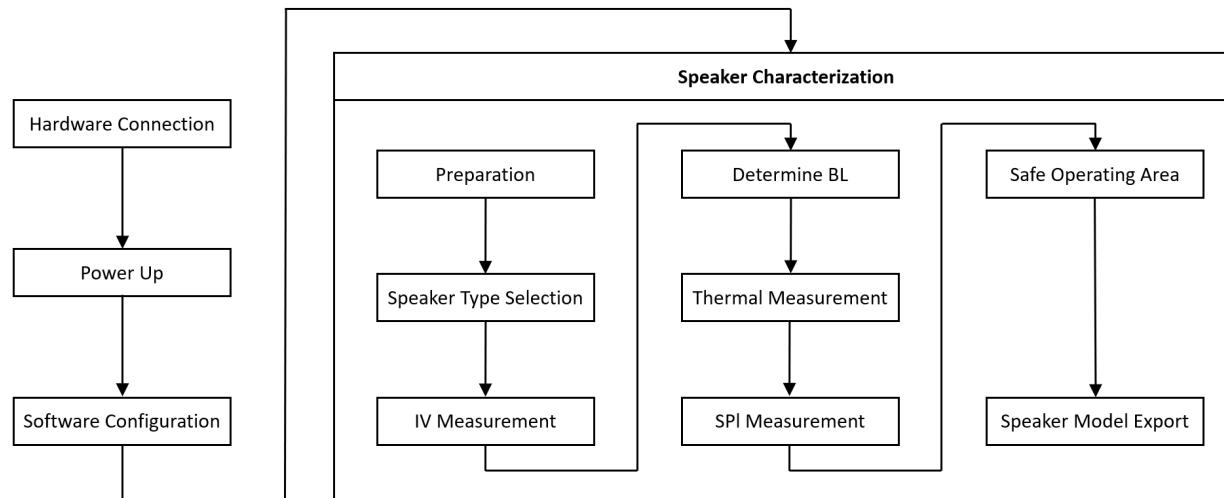


図 4-2. スピーカー キャラクタライゼーション プロセス

4.3 スピーカー特性ガイド

4.3.1 ハードウェア接続

DC 電源をオフにし、図 4-1 に示すハードウェア設定に従って、学習ボード、コンピュータ、DC 電源の間に適切なハードウェア接続を行います。この手順では、スピーカーを取り外したままにしておくことができます。

4.3.2 パワーアップ

DC 電源の出力電圧を 24V/3A に設定し、電源をオンにします。

4.3.3 ソフトウェアの設定

- Windows のサウンド設定を開き、サウンド設定で正しい出力デバイスと入力デバイスを選択してください。
 - 出力:スピーカー (2 TI USB オーディオ UAC2.0)
 - 入力:ライン (2-TI USB オーディオ UAC2.0)

スピーカの特性評価

- 出力と入力の音量レベルが 100% に設定されていることを確認します。
- 出力デバイスと入力デバイスの両方の追加デバイスプロパティを開き、「Advanced」(詳細) 項目でデバイスのサンプリングレートを確認します。図 4-3 に示すように、正しい構成を行う必要があります。
- PPC3 ソフトウェアを開き、「Learning Board」(学習ボード) モジュールに入ります。
- 「New」(新規作成) をクリックして新しいファイルを作成し、左下の「Connect」(接続) ボタンをクリックして、図 4-4 に示すように、PPC3 を学習ボードに接続します。

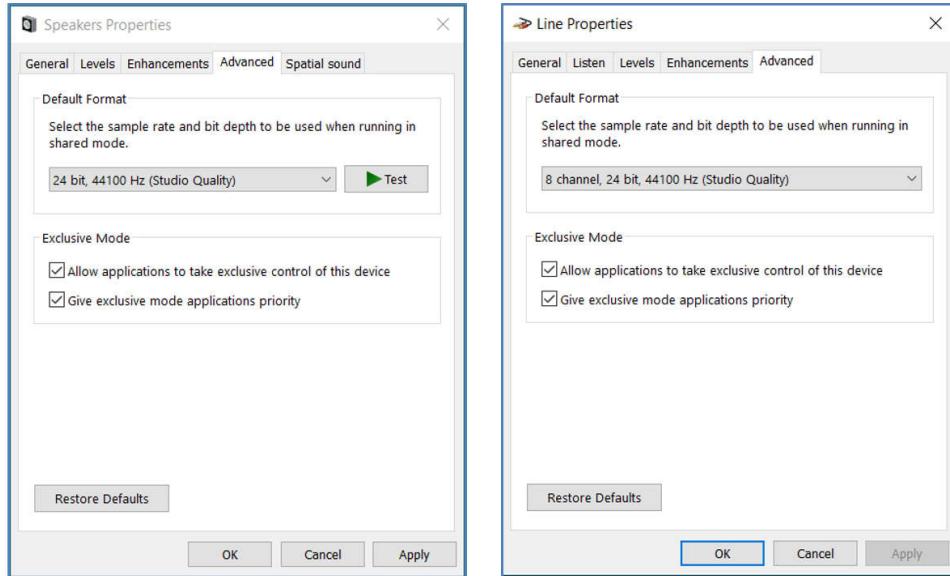


図 4-3. 学習ボードのサウンド設定



図 4-4. PPC3 接続ボタン

4.3.4 スピーカの特性評価

PPC3 ページで「Characterization」(特性) モジュールをクリックします (図 4-5 を参照)。



図 4-5. PPC3 の特性モジュール

4.3.4.1 準備

DC 電源が正常であることを再確認し、「Hardware Setup」(ハードウェア設定) ページの「Supply is Connected」(電源が接続されています) ボタンをクリックします。次に、「Start Checks」(チェックの開始) ボタンをクリックして、ハードウェアチェックを開始します。ハードウェア チェックを正しく完了したら、PPC3 に図 4-6 のようにチェック結果を表示する必要があります。

次に、「System Gain Calibration」(システム ゲイン キャリブレーション) ページで、「Start Gain Calibration」(ゲイン キャリブレーションを開始) ボタンをクリックして、システム ゲイン較正プロセスを開始します。マルチメータの DC モードを使用して PVDD と GND の上の電源 DC 電圧を測定し、マルチメータの AC モードを使用して、評価ボードの L+ ピンと L- ピンの間で出力 AC 電圧 (RMS) を測定します。

「System Gain Calibration」(システム ゲイン キャリブレーション) ページの対応するボックスに測定結果を入力し、「Next」(次へ) ボタンをクリックして次の手順に進みます。

Run Hardware Checks

- Download successful 
- Audio sound card detected and unambiguous 
- Audio sound card sampling frequency is good 
- Power supply is connected and in range 
- Audio record is successful 
- Audio playback is successful 

図 4-6. ハードウェア チェックの結果

4.3.4.2 スピーカー タイプの選択

「Choose your Speaker Type」(スピーカー タイプの選択) ページで、対象のスピーカーのプロパティに応じて適切な種類を選択します。スピーカーには、クローズド ボックス、ポート ボックス、パッシブ ラジエーターの 3 種類があります。たとえば、ポート ボックス付きの単一スピーカーの場合は、図 4-7 に示すように、「Single Driver Ported Box」(シングル ドライバ ポート ボックス) を選択できます。パッシブ ラジエーター スピーカーを正常にモデル化できない場合があることに注意しました。この状況では、パッシブ ラジエーター スピーカー モデルを置き換えるためにポート ボックスを選択する必要があります。

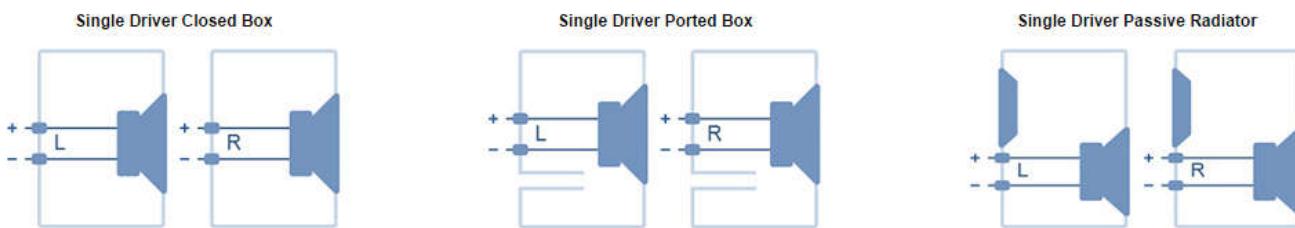


図 4-7. スピーカー タイプの選択

4.3.4.3 IV の測定

ターゲットスピーカーを学習ボードの L+ ピンと L- ピンに接続し、スピーカーが安定していることを確認します (粘着パテがある場合もあります)。次に、「Start IV Measurement」(IV 測定を開始) ボタンをクリックして、IV 測定プロセスを開始します。測定中に一定レベルのノイズが聞こえることに注意してください。

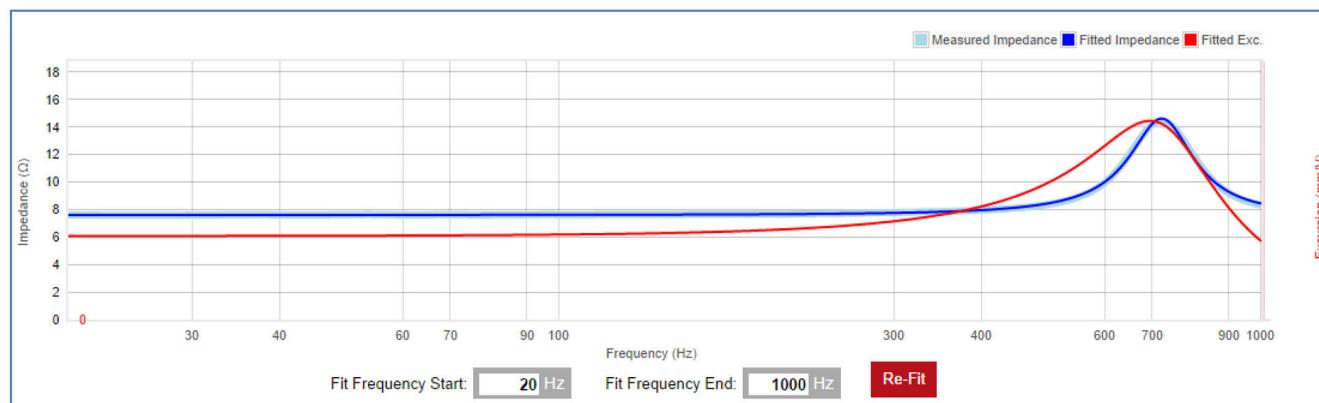


図 4-8. モデル継ぎ手結果の例

「Model Fit」(モデルフィット) プロセスが完了するまで待ち、「Review Speaker Model」(レビュー スピーカー モデル) ページでフィッティング結果を確認します。図 4-8 に示すように、水色の曲線(測定インピーダンス)が濃い青の曲線(適合インピーダンス)とよく揃う必要があります。その場合は、「Accept」(確定) ボタンをクリックして次の手順に進むことができます。そうでない場合は、ハードウェアとソフトウェアの構成を確認し、「Re-run IV Measurement」(IV 測定を再実行) ボタンをクリックして、IV 測定プロセスを再実行する必要があります。

4.3.4.4 BL の決定

「Speaker Details」(スピーカーの詳細) ページで、セクション 2 の説明に従ってスピーカーのダイアフラムの面積または直径を入力し、「Next」(次へ) ボタンをクリックします。

「Force Factor」(力係数) (BL) ページでは、BL パラメータを取得するために、「Enter BL Method」(BL 入力方法) ではなく、「Added Mass Method」(質量方法を追加) を使用することをお勧めします。「Added Mass Method」(質量方法を追加) ボタンをクリックして、特性評価を続行します。

「Added Mass Specification」(質量仕様を追加) ページの指示に従って、接着パテを「mass」(質量) として取得し、重量計を使用して質量の正確な重量を取得し、測定値を入力します。提案は、質量をスピーカーの移動質量の約 20% にすることです。移動質量が指定されていない場合は、スピーカーの直径のおよそ 1/5 のパテボールを使用してください。

図 4-9 に示すように、「Added Mass Specification」(質量仕様を追加) ページで説明されているように、スピーカーのターゲットダイアフラムに質量を追加し、「Mass Added」(質量を追加) ボタンをクリックして BL 測定プロセスを開始します。



図 4-9. 質量方法を追加する例

「Added Mass IV Measurement」(質量 IV 測定を追加) と「Find BL by Added Mass」(質量を追加することによる BL の検索) ステップが完了するまで待ってから、質量を除去し、「Remove Added Mass」(追加された質量の除去) ページで「Next」(次へ) ボタンをクリックします。

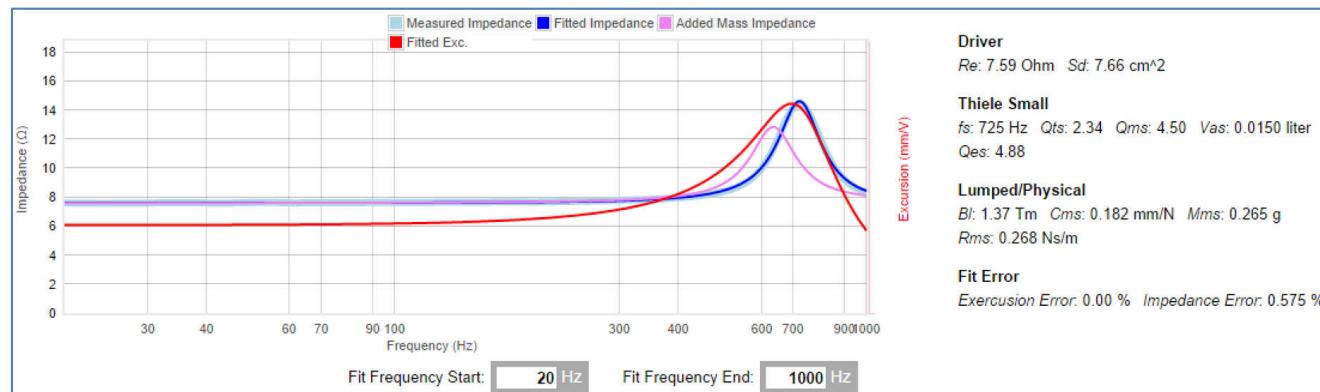


図 4-10. 電気機械モデルの継ぎ手の結果

「Run Model Fit」(ラン モデル フィット) が完了するまで待ちます。図 4-10 に示すように、「Review Speaker Model」(レビュー スピーカー モデル) ページで適合モデルを確認してください。

まず、水色の曲線(測定されたインピーダンス)が濃い青の曲線(適合したインピーダンス)とよく一致していることを確認します。

次に、モデリング結果の *Re* と *fs* の値を、スピーカーの Thiele/Small パラメータと比較します。モデル値と定格値の間に大きなギャップは存在しない。

最後に、「*Impedance Error in Fit Error*」(フィット誤差におけるインピーダンス誤差) パーツをチェックします。推奨するのは、インピーダンス誤差を 1% 未満に維持することです。モデルが適切に適合している場合は、「*Accept*」(確定) ボタンをクリックして次のステップに進みます。そうでない場合は、ハードウェアとソフトウェアの構成を確認し、追加された質量と関連データを確認してから、ボタンをクリックして BL 測定をやり直すことをお勧めします。

4.3.4.5 热測定

「*Thermal Parameters*」(熱パラメータ) ページ、テキスト全体を読み、「*Thermal Characterization*」(熱特性) ボタンをクリックして次のページに進みます。

次に、「*Thermal Characterization*」(熱特性) に関する提案に従って励起周波数を入力します。「*Caution*」(注意) ページ。たとえば、図 4-11 に示すように、励起周波数として **995Hz** を入力します。

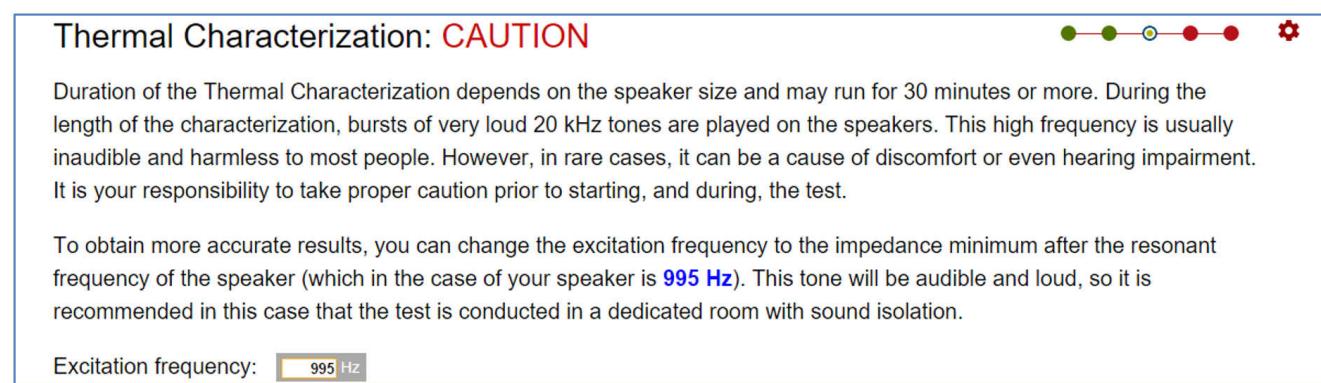


図 4-11. 励起周波数を入力します

次に、「*Next*」(次へ) ボタンをクリックして、熱測定プロセスを開始します。全体のプロセスは約 10 ~ 20 分かかります。

温度測定プロセスが完了したら、「*Review Temperature Model*」(温度モデルのレビュー) ページでターゲットスピーカーの熱モデルを確認します。

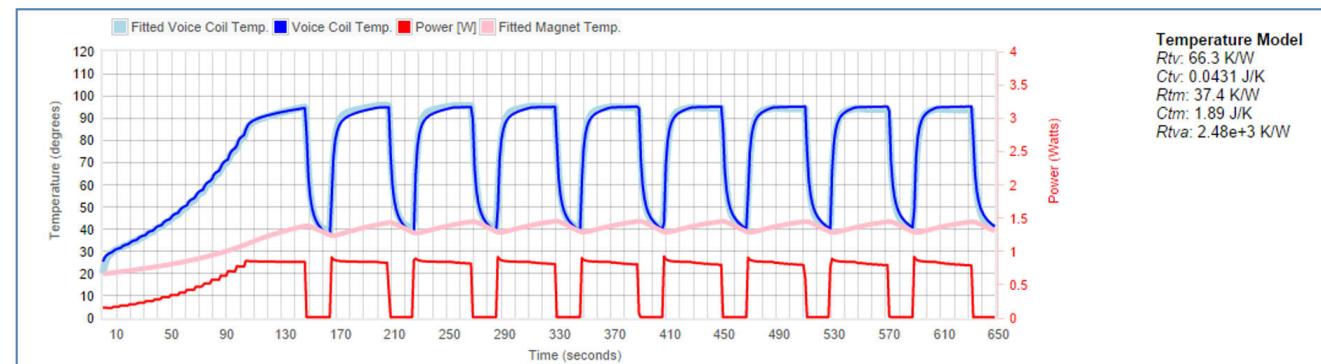


図 4-12. スピーカの熱モデリングの結果

図 4-12 に示すように、水色の曲線(ボイスコイルの温度)は、濃い青の曲線(適合するボイスコイルの温度)とよく揃う必要があります。「*Accept*」(確定) ボタンをクリックすると、ターゲットスピーカーの熱モデリングが完了します。

そうしないと、コイル温度の 2 つの曲線がうまく一致しない場合、または温度測定プロセスで PPC3 ソフトウェアで障害が報告された場合は、ハードウェアとソフトウェアの設定を確認して、スピーカーのボイスコイルが冷えるまで(約 20 分間)待

つことをお勧めします。次に、「Run Temperature Characterization」(温度特性評価を実行) ボタンをクリックして、温度特性評価を再度実行してください。

4.3.4.6 SPL の測定

スピーカーの SPL 特性を測定するには、「Speaker Acoustic Response」(スピーカーの音響応答) ページの指示に従って、マイクを学習ボードに接続し、SPL 測定を行います。

図 4-13 に、「Review SPL Model」(SPL モデルのレビュー) ページでの SPL 特性評価の一般的な結果を示します。対象スピーカーのデータシートに記載されている情報を使用して SPL の結果を確認し、「Accept」(確定) ボタンをクリックして特性評価を続行します。

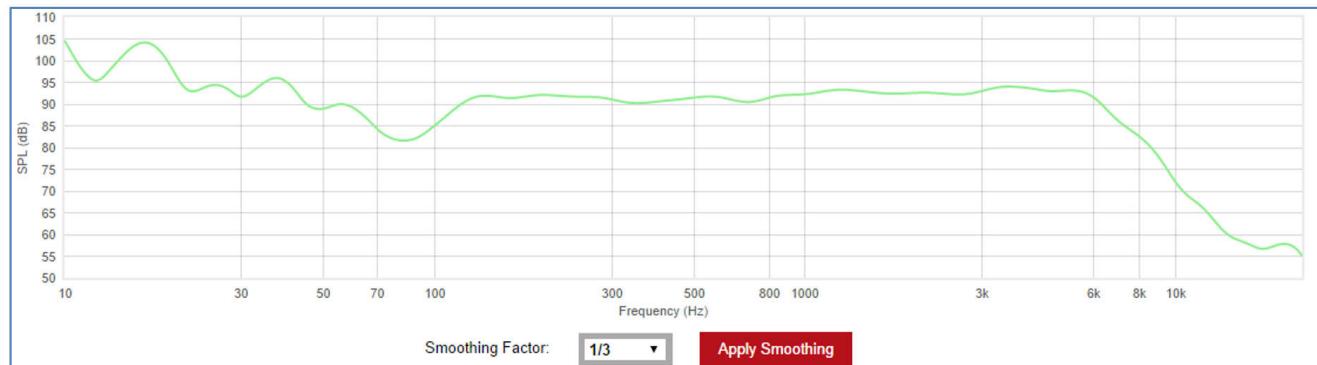


図 4-13. 代表的な SPL モデル化の結果

4.3.4.7 安全動作領域

「Safe Operating Area」(安全動作領域) ページでは、図 4-14 に示すように、前のセクションで説明したデータに応じて、ピーク変位制限、熱制限または電力制限を入力します。温度データの熱的制限は、 $T_{max} - T_{ambient}$ に設定されます。

Safe Operating Area

Before you can begin using the Smart Bass algorithm, you need to specify the safe operating area (SOA) of the speaker for both excursion and thermal limits.

Peak Excursion Limit:

Thermal Limit:

Power limit:

CAUTION: It is extremely critical that System Gain, Excursion Limit and Thermal Limit are set correctly and according to the system specifications. With improper settings Smart Bass can potentially overload the system causing permanent failure.

図 4-14. 安全動作領域ページ

4.3.4.8 スピーカー モデルのエクスポート

「Safe Operating Area」(安全動作領域) ページで「Accept」(確定) ボタンをクリックすると、スピーカーの特性評価は完了しました。

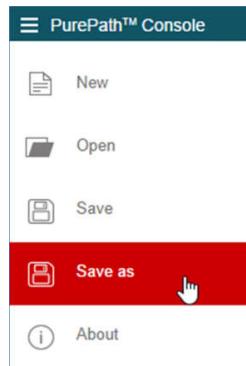


図 4-15. PPC3 を使用してスピーカー モデルをエクスポートします

スピーカー モデルをエクスポートするには、図 4-15 に示すように、PPC3 の左上隅にあるボタンをクリックし、「Save As」(名前を付けて保存) をクリックして ppc3 ファイルをエクスポートします。また、スピーカー モデルを使用する場合は、保存した ppc3 ファイルを使用して特性データをインポートすると便利です。

5 スマートアンプのチューニングと検証

5.1 スマートアンプ チューニング ガイド

TAS5825M には、強力な DSP オーディオ処理コアが搭載されており、いくつかの異なるオーディオ処理フローをサポートします。内蔵のスマートアンプ処理フローは、従来のアンプに比べて、ピーク電力出力、ラウドネス、および音質を大幅に向上させることができます。PPC3 ソフトウェア GUI を使用すると、開発者はシステム内でスピーカーがどのように実行されるのかを理解し、オーディオ性能を向上させるために調整を加えることができます。アルゴリズム、特性評価、チューニングツールを使用して、開発者はさまざまなオーディオの課題を克服できます。スマートアンプのチューニング プロセスを以下に示します。

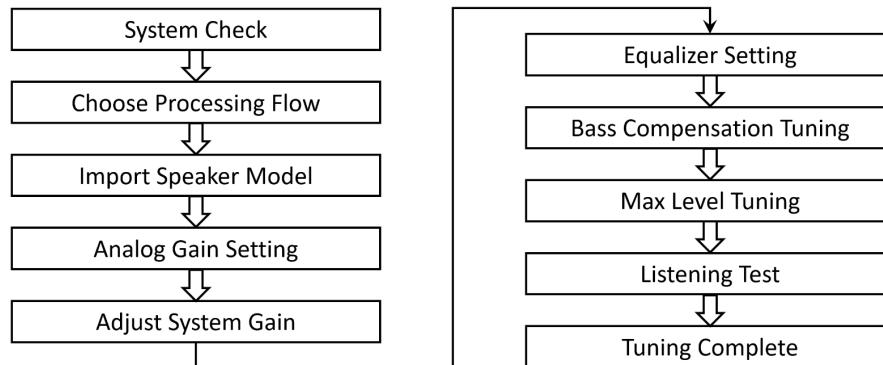


図 5-1. TAS5825M スマートアンプのチューニング プロセス

5.1.1 システム チェック

調整する前に、「System Check」(システム チェック) をクリックしてシステム全体が正常に動作できるかどうかを検出し、図 5-2 に示すようにシステム ゲインをキャリブレーションします。これはスマートアンプ アルゴリズムの精度に影響を及ぼす可能性があります。

System Gain Calibration

Enter your power supply voltage : V



Enter the observed voltage: V

System Gain: 28.3 V/F.S

図 5-2. システム チェック

5.1.2 [処理フロー]を選択します

TAS5825M には多くの種類の DSP 処理フローがあり、図 5-3 に示すように、スマートアンプ アプリケーションでスマートアンプアヘッド処理フローを使用することを推奨します。このアルゴリズムはルックアヘッド構造を使用して 128 サンプルを遅延させ、アルゴリズムに計算に十分な時間を与えます。2 つのスマートアンプの処理フローの間で最も大きな違いは、内部 DSP サンプル レートです。たとえば、48K のスマートアンプのルックアヘッド処理フローの場合、ルックアヘッド遅延時間は次のようにになります。

$$LookAhead_time = 128 \times \frac{1}{48k} \approx 2.67ms \quad (16)$$

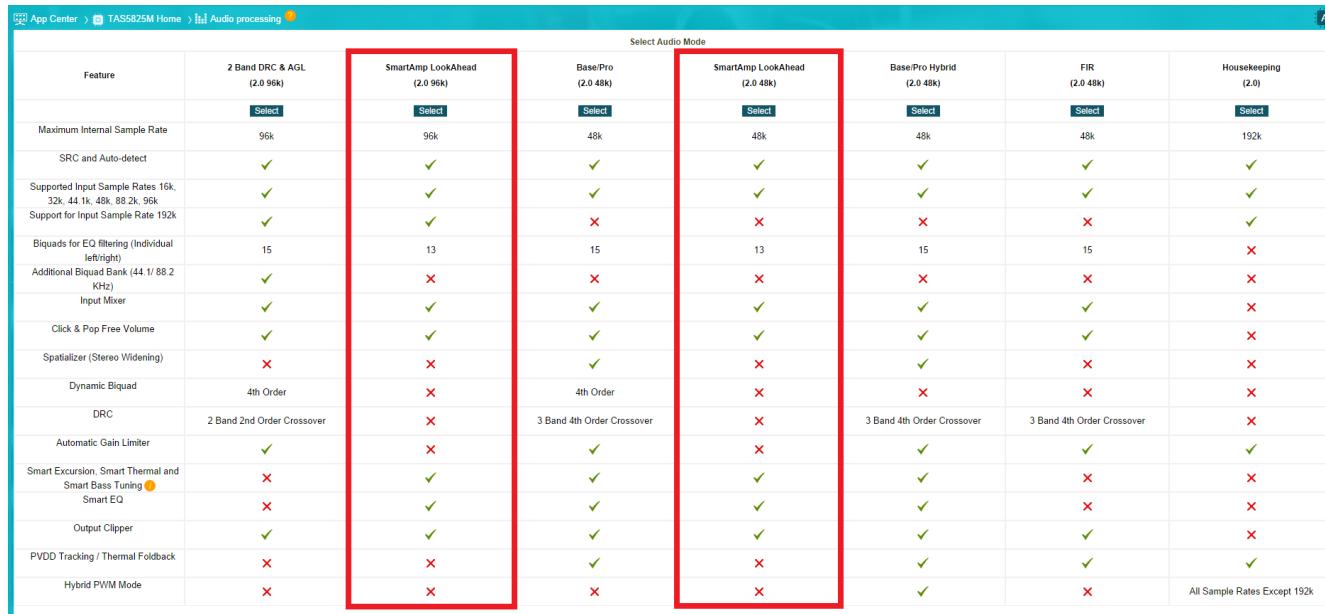


図 5-3. TAS5825M のプロセス フロー

また、96K のスマートアンプの先読み処理フローでは、信号遅延は 1.33ms であり、48K の処理フローに比べて遅延が短くなります。顧客は、システムのオーディオ信号のサンプル レートに基づいて正しい処理フローを選択する必要があります。

5.1.3 スピーカー モデルをインポートします

システム チェックとフロー選択の処理が完了したら、「*Tuning and Audio Processing*」(チューニングとオーディオ処理) ビューに入ります。

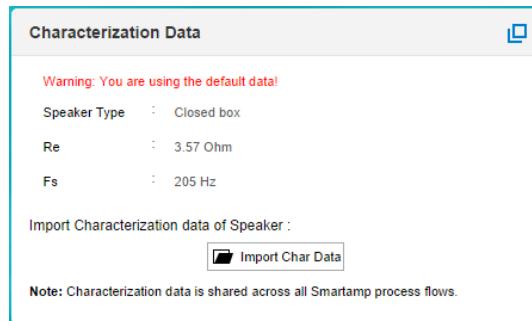


図 5-4. キャラクタライゼーション データ ブロック

図 5-4 に示すように、「Characterization Data」(特性データ) ブロックでは、学習ボードによってモデル化された「Import Char Data」(文字データをインポート) するか、右上のボタンをクリックしてスピーカーのキー パラメータを手動で入力できます。TI のラーニング ボードでキャプチャしたスピーカー モデルをインポートすることをお勧めします。

5.1.4 アナログ ゲイン設定

TAS5825M のアナログ ゲインは、実際の PVDD 電源電圧に応じて改訂する必要があり、これによりアナログ PVDD クリッピングを防止できます。詳細については、アプリケーション ノート [『TAS58xx ファミリーの一般的なチューニング ガイド』](#) を参照してください。アナログ ゲイン用の設計値を計算するには、以下の式を使用してください。

$$\text{Analog_gain} \approx 20 \times \log_{10} \left(\frac{V_{\text{speaker_max}}}{29.5V} \right) \text{dB} \quad (17)$$

$$V_{\text{speaker_max}} \approx PVDD \times \frac{R_{\text{speaker}}}{R_{\text{speaker}} + 2 \times (R_{\text{ds_on}} + Z_{\text{DC}})} \quad (18)$$

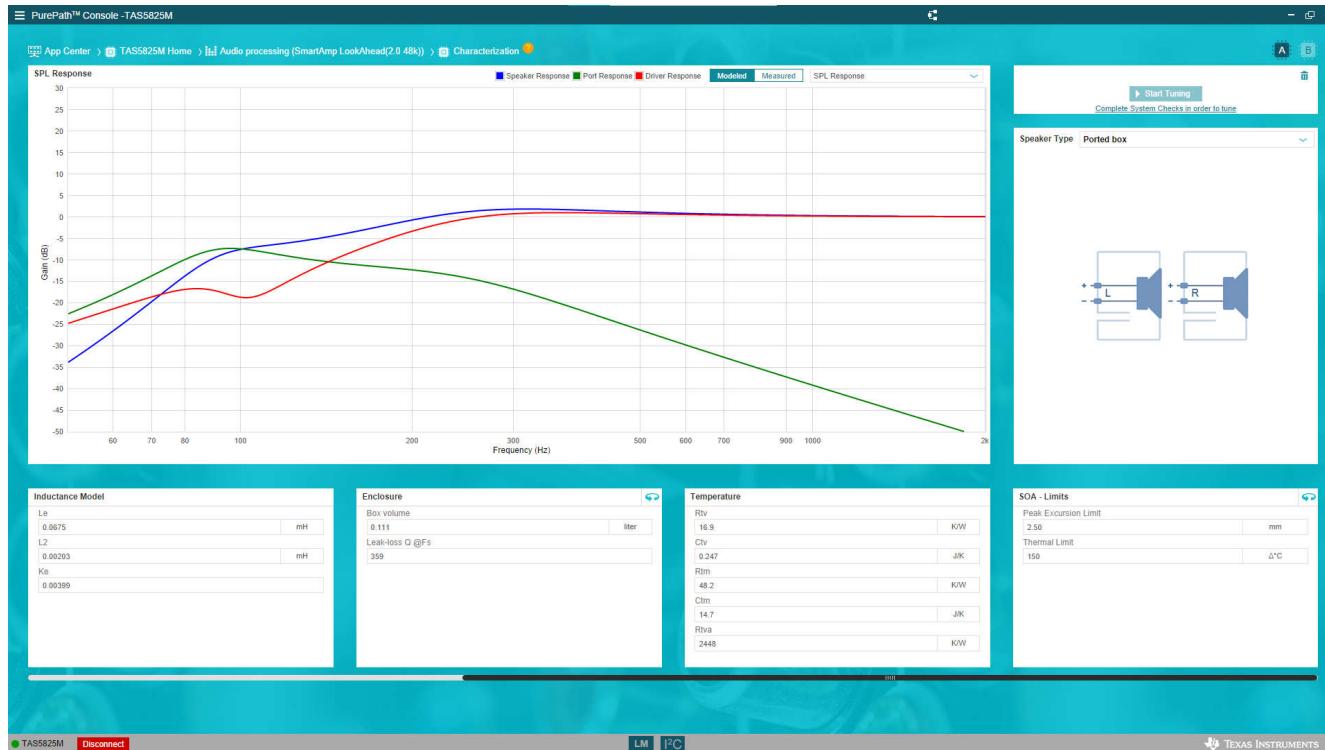


図 5-5. キャラクタライゼーション ビュー

たとえば、TAS5825M の電源として 12V PVDD を使用する場合、次のようになります。

$$V_{speaker_max} \approx 12V \times \frac{4}{4 + 2 \times (0.18 + 0.023)} = 10.89V \quad (19)$$

$$Analog_gain \approx 20 \times \log_{10}\left(\frac{10.89V}{29.5V}\right)dB \approx -8.7dB \quad (20)$$

TAS5825M の場合、アナログ ゲインステップは 0.5dB です。したがって、この例では、PVDD クリッピングを避けるため、アナログ ゲインを -9dB に設定する必要があります (図 5-6 を参照)。

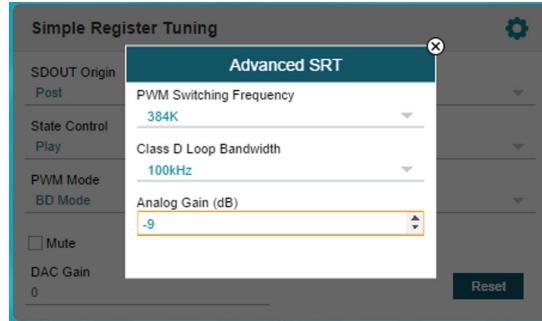


図 5-6. アナログ ゲイン設定

5.1.5 システム ゲインの調整

アナログ ゲインを設定した後、「Characterization」(特性評価) ビューに戻り、それに応じてシステム ゲインと電源電圧を調整してください。図 5-7 に示すように、最初に電源電圧を設定し、システム ゲインは実際のアナログ ゲインと「System Check」(システム チェック) ステップで測定された元のシステム ゲインに応じて設定する必要があります。

$$System_gain = Original_system_gain \times 10^{\frac{Analog_gain}{20}} \quad (21)$$

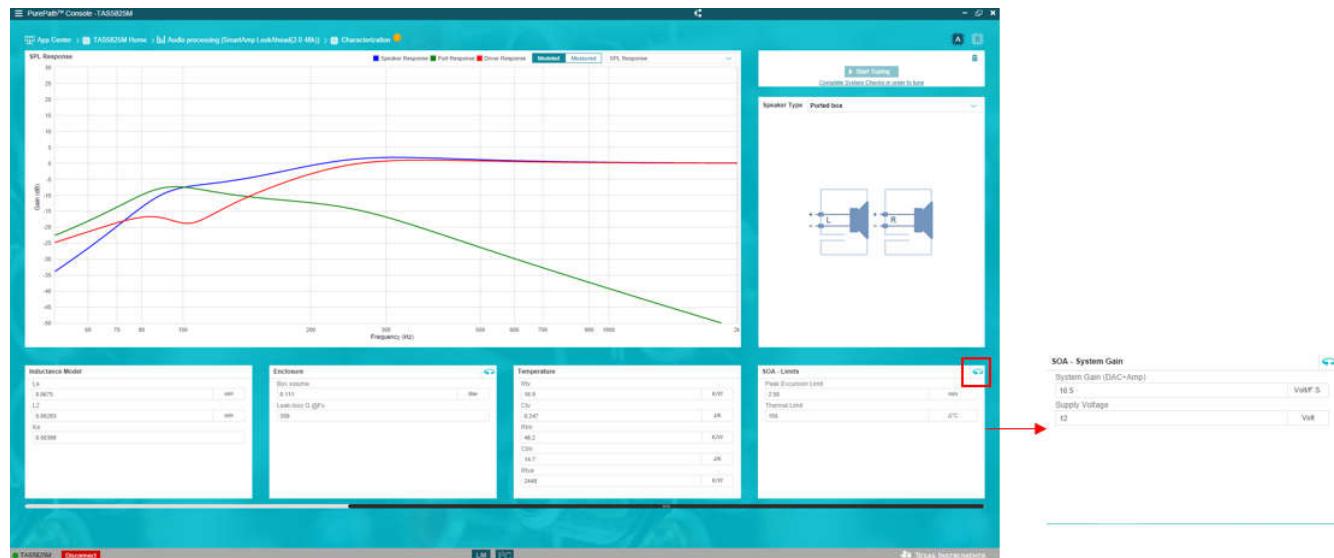


図 5-7. キャラクタライゼーションビューの SOA 設定

たとえば、「System Check」(システム チェック) ステップで構成した元のシステム ゲインが 19.5V/FS の場合、アナログ ゲインを -9dB に設定したとき、システム ゲインを次のように調整する必要があります。

$$System_gain = 19.5 \times 10^{\frac{-9}{20}}V/FS \approx 6.92V/FS \quad (22)$$

5.1.6 イコライザ設定

TAS5825M では、スマートアンプ処理フローによって両方の L/R チャネルに 10 の BQ が供給され、調整用に手動で構成できます。

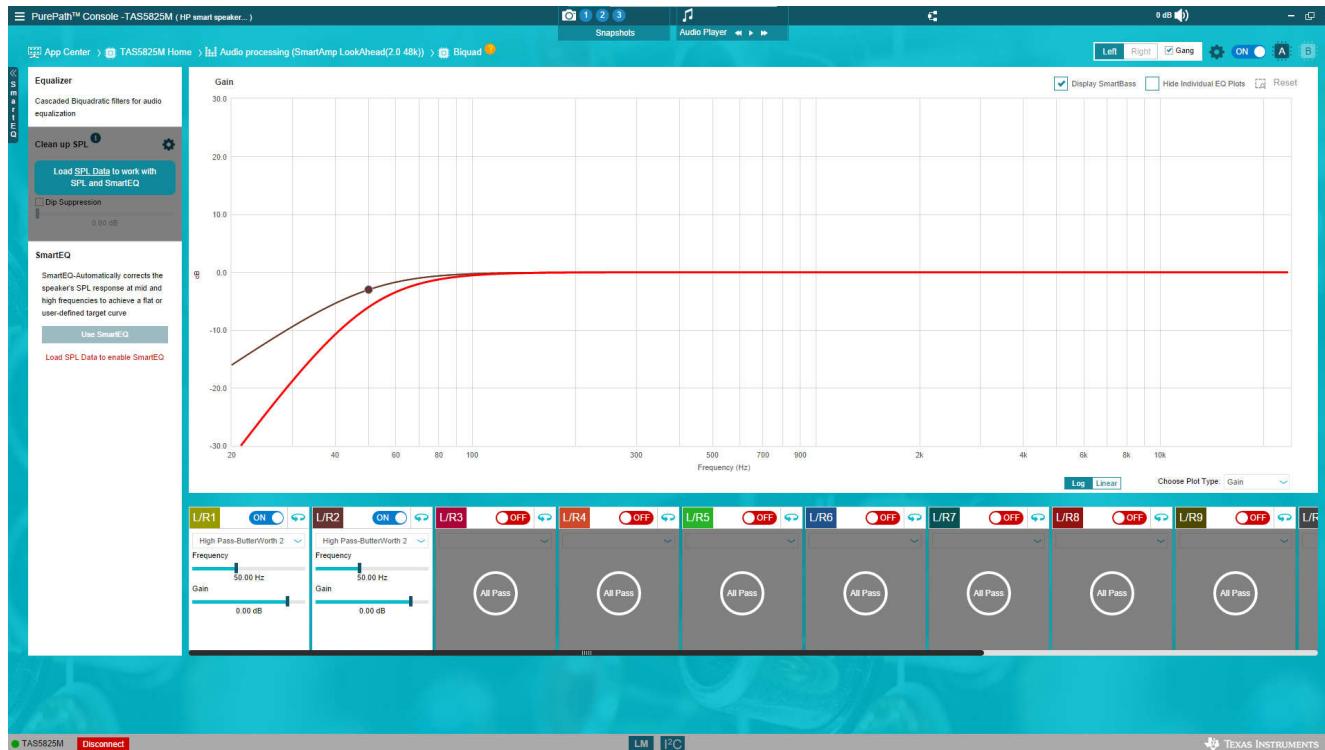


図 5-8. イコライザ設定

一般に、超低周波信号をバイパスするように、最初は 2 つのハイパスフィルタを設定することをお勧めします。これは、非常に低い周波数範囲では、スピーカーの消費電力が大きすぎる可能性がありますが、大きなオーディオ出力を生成できなかったため、システムの効率が低下する可能性があるためです。通常、このハイパスフィルタのカットオフ周波数としては 50Hz ~ 100Hz の周波数を使用できます。

また、スマート EQ 機能もサポートしています。スマート EQ 機能を使用すると、PPC3 ソフトウェアは、スピーカーの SPL データに応じて EQ パラメータを自動的に設定し、フラットな応答を実現したり、ターゲット曲線に合わせたりすることができます。このスマート EQ 機能を使用するには、スピーカーの SPL データを最初にインポートする必要があります。

5.1.7 スマートバス チューニング

スマートバスは、スマートアンプアルゴリズムを構成するための主要な保護ブロックであり、低音補償、エクスカーション保護、熱保護、クリッパー防止の 4 つの主要な機能ブロックが含まれています。目的のオーディオ効果を満たすために、実際の要件に基づいて各ファンクションブロックをオンまたはオフにすることができます。

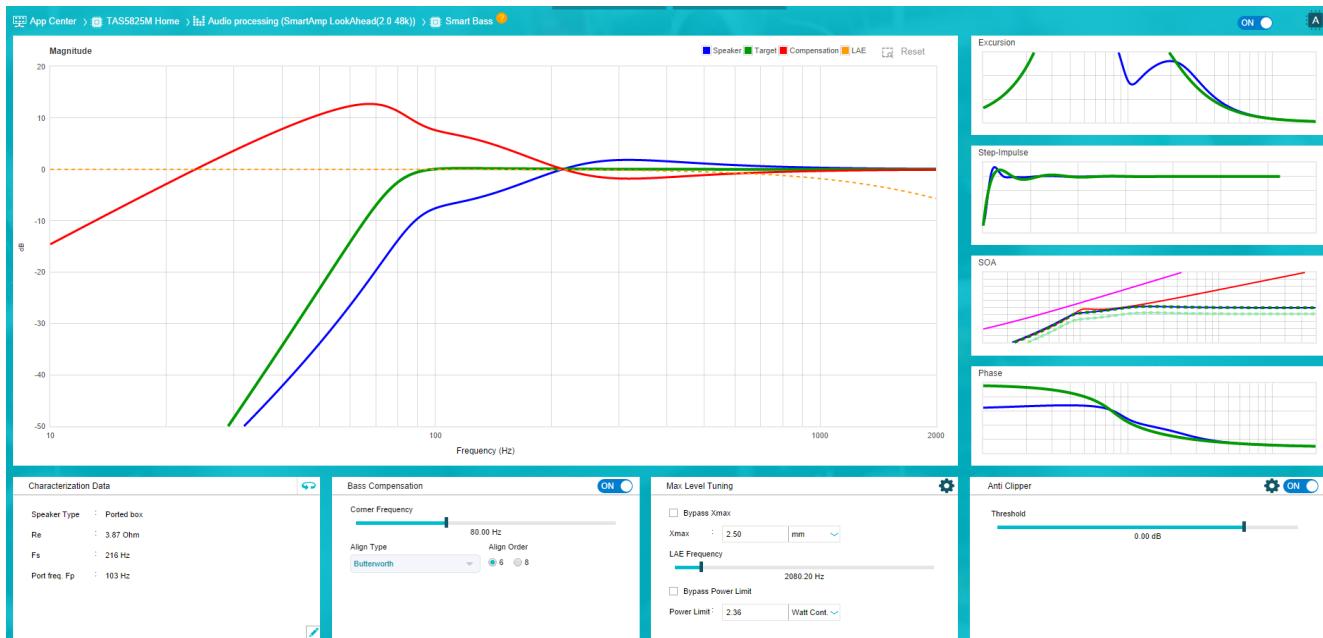


図 5-9. スマート低音の構成

5.1.8 低音補正

低音補正機能を使用すると、アルゴリズムは自動的にオーディオ応答をモーフィングしてベース性能を向上させることができます。

5.1.8.1 コーナー周波数

コーナー周波数は、目標の大きさの応答を -3dB ポイントで示します (図 5-9 の緑の曲線で示されます)。システム全体的な性能にとって、適切なコーナー周波数を選択することが重要です。この周波数が高すぎると、スピーカーの低音の応答が制限される場合があります。周波数が低すぎると、スピーカーが適切に応答できない低周波数を駆動するために、電力が浪費される可能性があります。また、変位保護も過度に敏感になります。

5.1.8.2 位置合わせの順序とタイプ

順序とタイプの設定により、ターゲット振幅応答の低音信号の減衰速度が決定されます。これは、コーナー周波数未満の信号のオーディオ応答に大きな影響を与える可能性があります。この設定は、ほとんどのアプリケーションでデフォルト値に維持できます。スピーカーが非常に敏感で、大きな遠足に耐えられない場合は、より高い順序を選択することをお勧めします。また、低次の設定を選択して、より低い周波数の信号を維持し、オーディオ低音のパフォーマンスを向上させることができます。

これらの設定を調整する場合は、一連のリスニングテストを実行する必要があります。以下に、実用的な推奨事項を示します。

1. 応答プロットウィンドウで補償曲線 (赤い曲線) を観察しながら *「Corner Frequency」* (コーナー周波数) を調整します。
2. 一般的に、 $10\text{dB} \sim 20\text{dB}$ の補償 (赤の曲線) により、良好な性能を達成できます。
3. 20dB の行を超えないようにしてください (少なくともチューニングの開始時)。

低音補償ありなしでのスピーカの振幅応答曲線は、図 5-10 および 図 5-11 に示されています。

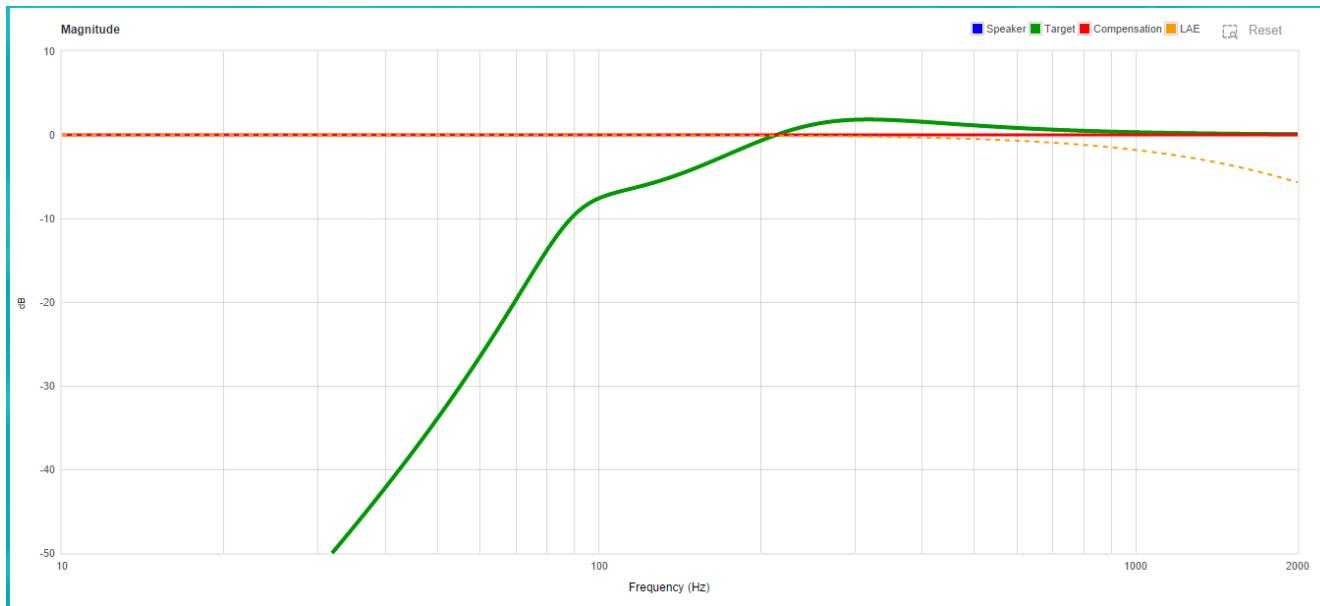


図 5-10. 低音補償が無効な場合のスピーカ応答

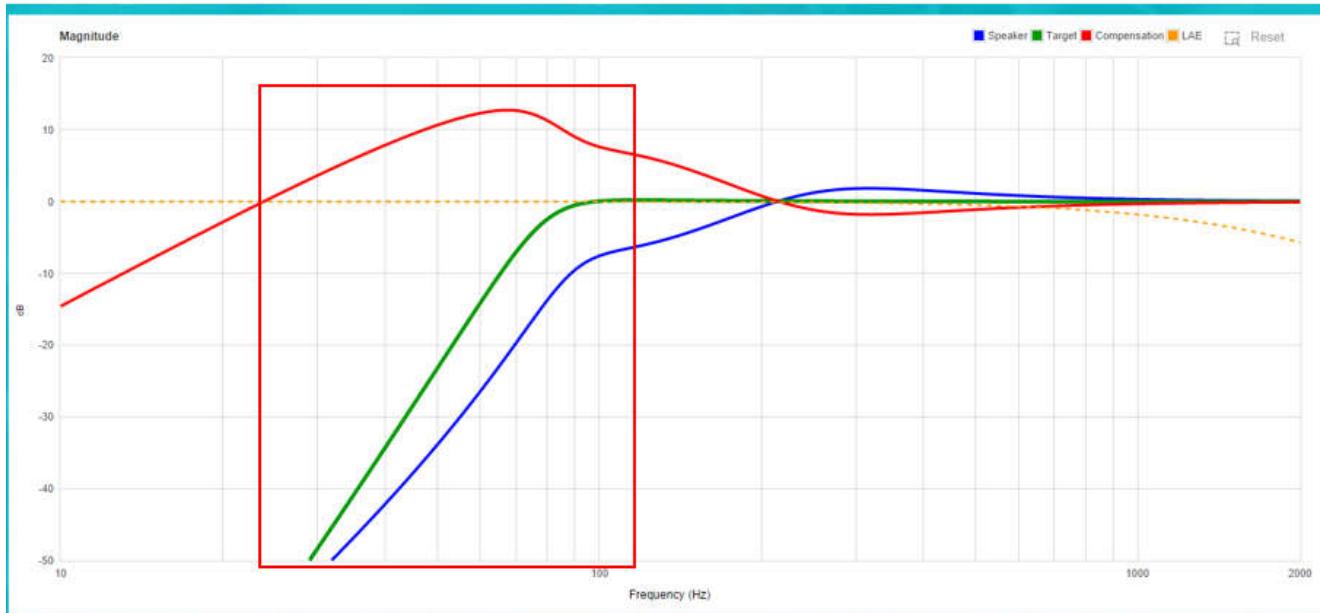


図 5-11. 低音補償が有効なスピーカ応答

5.1.9 最大レベル チューニング

最大レベル チューニングには、スピーカ変位保護 (X_{max}) とスピーカ過熱保護 (電力制限) が含まれ、スピーカが SOA 内で確実に動作できるようになります。これにより、バイパス ボタンをクリックすることで、これら 2 つの保護を個別に有効または無効にすることが簡単にできます。保護アルゴリズムやスピーカ モデルには潜在的なエラーが発生するため、実際のリスニング テストとアルゴリズム保護状況に応じて設定を注意深く調整する必要があります。

5.1.9.1 X_{max}

X_{max} は、スピーカーエクスカーションの制限を意味し、スピーカー ベンダーが提供する仕様に応じて設定できます。

5.1.9.2 LAE 周波数

LAE 周波数は先読み変位周波数を指し、これはエクスカーション保護アルゴリズムの有効範囲です。図 5-13 に示すように、通常、スピーカの変位のピークは低周波域で発生するのに対し、高周波域ではスピーカ変位は非常に小さくなっています。したがって、スピーカの変位による損傷は大振幅の低周波信号ではほとんど発生します。そのため、変位保護アルゴリズムは高周波信号を考慮に入れることはできません。

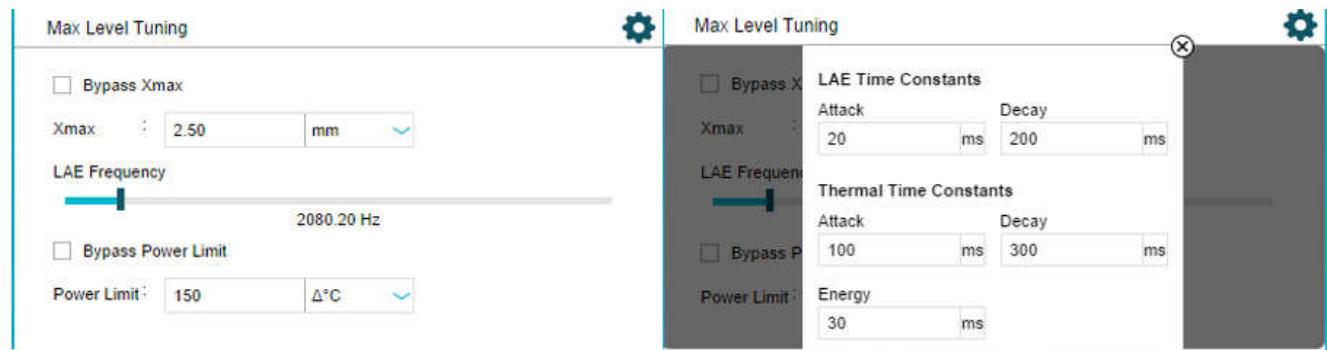


図 5-12. 最大レベル チューニング設定

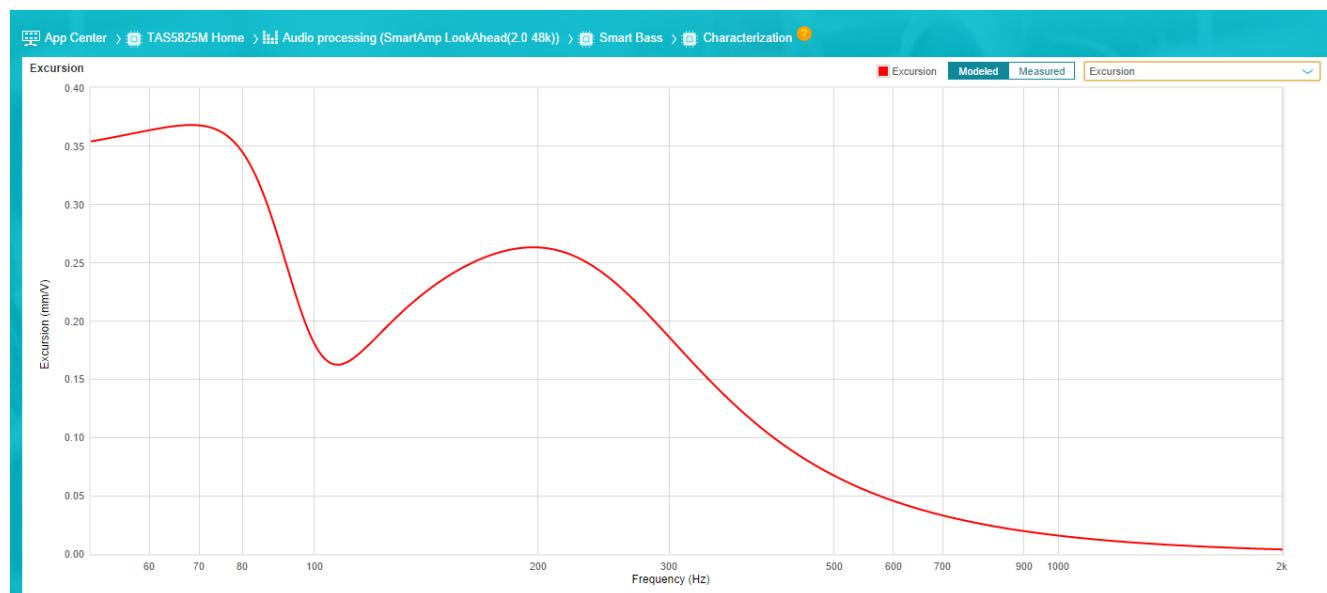


図 5-13. スピーカ変位と周波数プロットの関係

図 5-14 のオレンジ色のダッシュ線で示されているように、LAE 周波数は高周波信号を低減するために適用されるローパス フィルタのカットオフ周波数であり、その信号はエクスカーション保護アルゴリズムに送られ、計算と保護が行われます。

LAE 周波数の値が高すぎると、アルゴリズムのアクティブ範囲に高周波信号が多すぎる可能性があり、保護動作が過度にアクティブになる可能性があります。反対に、LAE 周波数の値が低すぎると、保護アルゴリズムが低周波信号を見逃し、スピーカ エクスカーションが制限を超える可能性があります。通常、この値をスピーカーのモデル フィッティング周波数範囲の 1 ~ 3 倍に調整することをお勧めします (たとえば、図 5-14 では、モデル フィッティング範囲と同様に、LAE 周波数を約 2000Hz に設定します)。

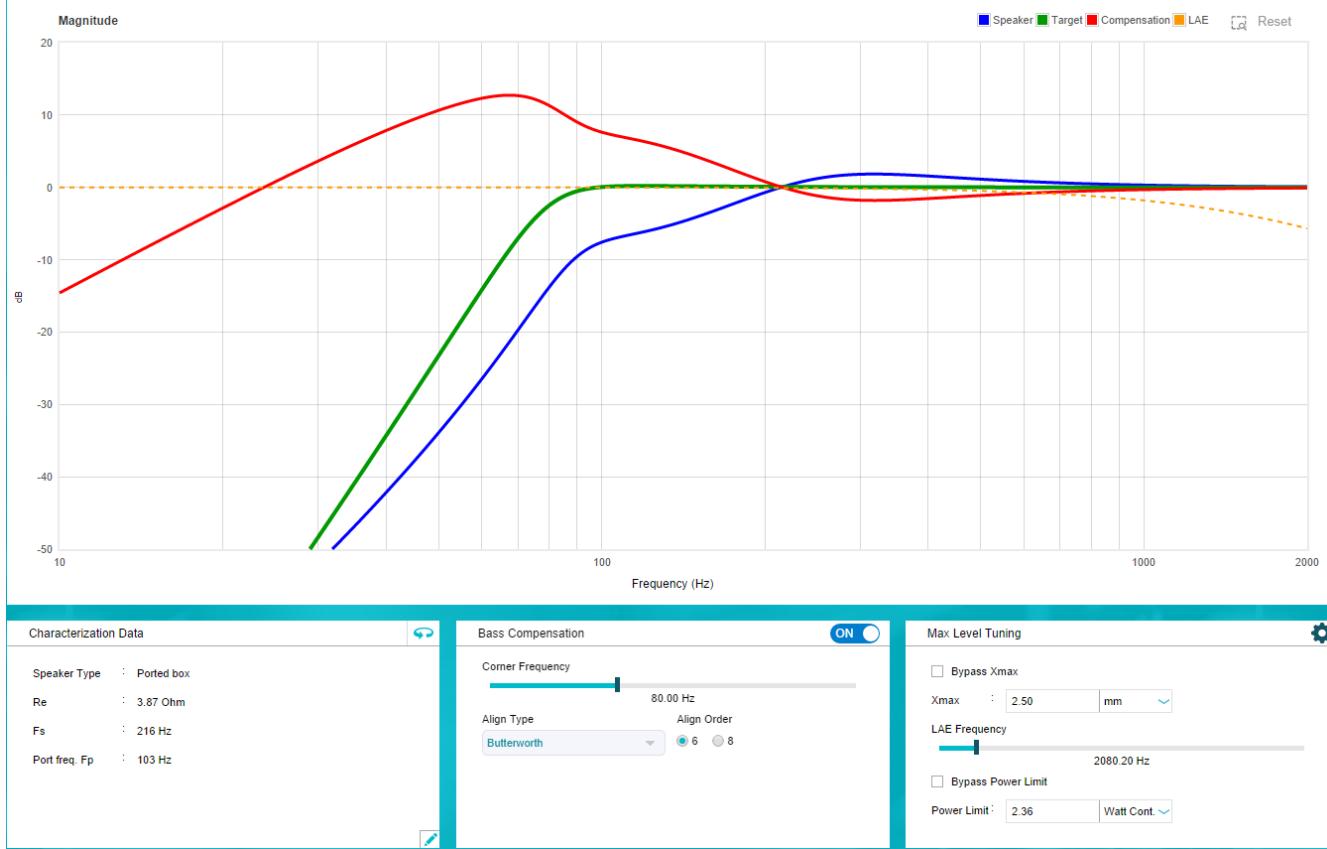


図 5-14. LAE 周波数設定

5.1.9.3 電力制限

電力制限は、スピーカ過熱保護をトリガするアルゴリズムのスレッショルドです。これは、スピーカー モデルに基づいて互いに等価である、さまざまな方法、つまり電力スレッショルドまたは温度スレッショルドに入力できます。

5.1.9.4 アタック、ディケイ、エネルギー

TAS5825M の代表的な処理フローの DRC ブロックと同じ (アプリケーション ノート [TAS58xx ファミリ用汎用チューニングガイド](#) を参照)、アタックおよび減衰時間は、保護アルゴリズムが有効になってリリースするまでの時間を指します。エネルギー時間は、アルゴリズムが入力信号のエネルギーを検出する時間です。

通常、アタック時間とエネルギー時間をアルゴリズムの先読み時間の近くに設定することをお勧めします (たとえば、48K 処理フローの場合、先読み時間は約 2.67ms)。また、減衰時間をアタック時間よりもわずかに長く設定することもできます。アタック時間が短いと、アルゴリズムがオーディオ信号に迅速に応答することができます。また、大きなダイナミクスを持つ音楽を再生すると、ラウドネスが低下する可能性もあります。エネルギー時間が非常に短い場合、アルゴリズムはより敏感になり、より多くの圧縮を引き起こす可能性があり、それは音楽のラウドネスにも影響を与える可能性があります。

次のグラフは、同じスイープ正弦波信号を使用して、異なるアタック時間とエネルギー時間設定を持つスピーカー エクスカーション (レーザー装置で測定) の例を示しています。これらの設定を調整するときは、一連のリスニング テストを実行することをお勧めします。リスニング テストと保護テストに最適な設定を行うには、複数のスピーカーを選択することもお勧めします。

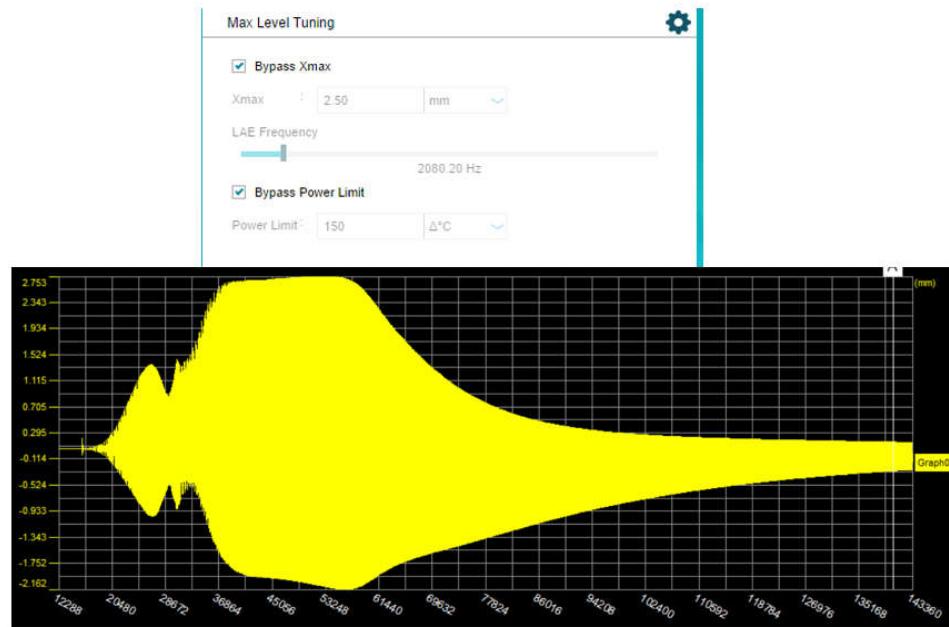


図 5-15. スピーカ エクスカーション、保護なし ($X_{max} = 2.75\text{mm}$)

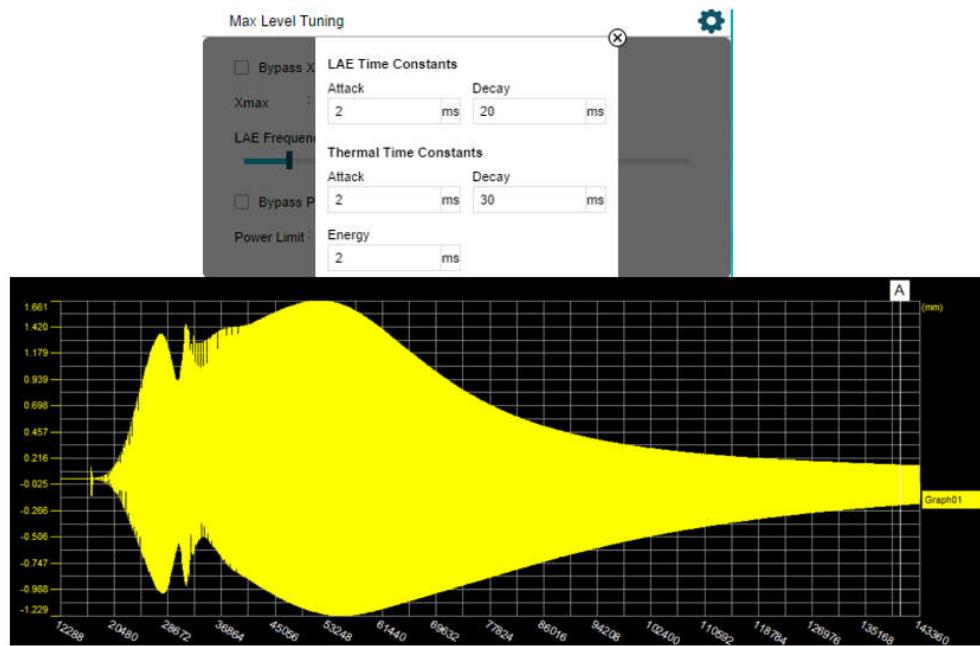


図 5-16. スピーカ エクスカーション、保護付き ($X_{max} = 1.66\text{mm}$)

5.1.10 反クリッパー

アンチ クリッパーはフル バンド AGL ブロックであり、これは調整と保護のためのより柔軟性を提供するために、処理フロー全体の最終的な信号制限ブロックです。

5.2 スマート アンプの検証

5.2.1 SPL 応答検証

このセクションでは、ピンク ノイズの SPL 応答を測定し、スマート アンプ アルゴリズムを適用するときの性能向上を示します。図 5-17 に示すように、TAS5825M は、スマート アンプ アルゴリズムをオンにしたときに、より多くの低音域、より大音

量の中周波数、高周波という効果を実現できます。変位と熱保護機能により、スピーカの損傷の懸念なしに印象的なオーディオ改善を進めることができます。

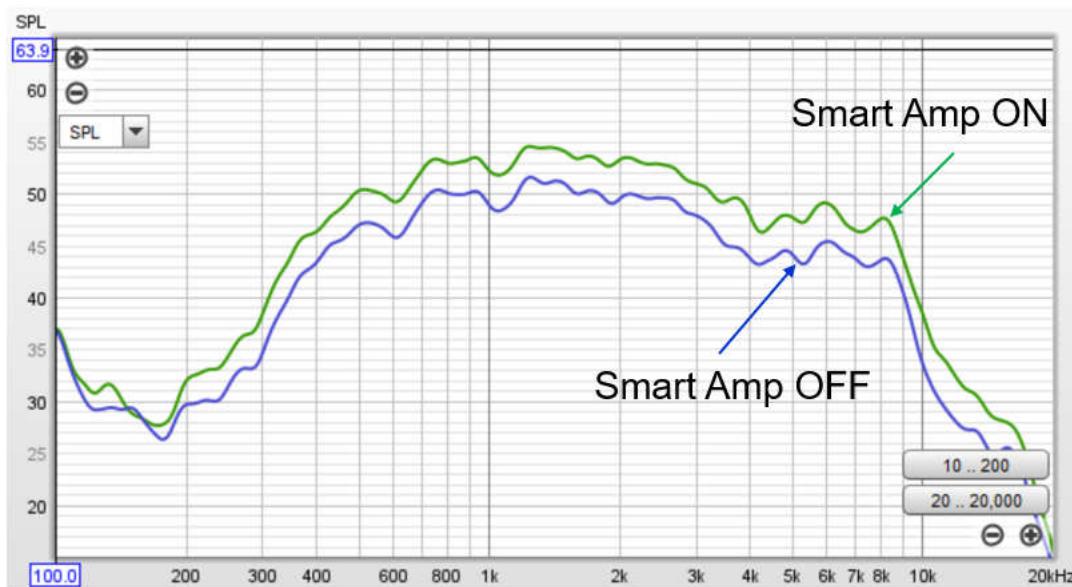


図 5-17. SPL 応答の比較 (テキサス インスツルメンツのスマート アンプのチューニングと通常の調整との比較)

5.2.2 過熱保護の検証

スピーカの I/V センス機能を搭載したオーディオシステムでは、スピーカの抵抗 Re をリアルタイムで測定することができ、同時に周囲温度も計算できます。TAS5825M は I/V センス機能をサポートしていないため、スピーカの Re はリアルタイム I/V データを使用して自動的にキャプチャすることはできません。ただし、TAS5825M スマートアンプ アルゴリズムはオーディオデータとスピーカ モデルを使用してスピーカのボイスコイルの温度を予測し、過熱保護を実現するためにある程度のマージンを確保することができます。

表 5-1 および 図 5-18 に、單一周波数オーディオ信号による TAS5825M の過熱保護機能の保護検証を示します。電力制限設定が異なる (温度上昇マージン) 場合、このアルゴリズムは TAS5825M の出力電力を自動的に制限し、スピーカの音声コイルの熱的損傷を防止することができます。実際には、TAS5825M は 25°C のスピーカ Re を使用してスピーカの音声コイルへの出力の有効電力を計算しますが、音声コイルの温度上昇に伴う Re の増加は考慮しないため、実際の出力電力が保護アルゴリズムの期待値よりも低くなる可能性があり、温度が上昇すると保護動作がより積極的になります。その結果、表 5-1 に示すように、ボイスコイルの実際の温度上昇は温度制限設定よりも小さくなり、温度が上がるほどギャップが大きくなり、保護メカニズムが保守的になります。

表 5-1. 過熱保護検証結果

電力制限 (W)	熱制限 (K)	出力 RMS (V)	Re (Ω)	温度変化測定結果 (K)	エラー (K)
3	122.96	4.608	7.64	113.91	-9.05
2	81.97	3.767	7.12	81.66	-0.31
1	40.99	2.66	6.73	43.09	2.1

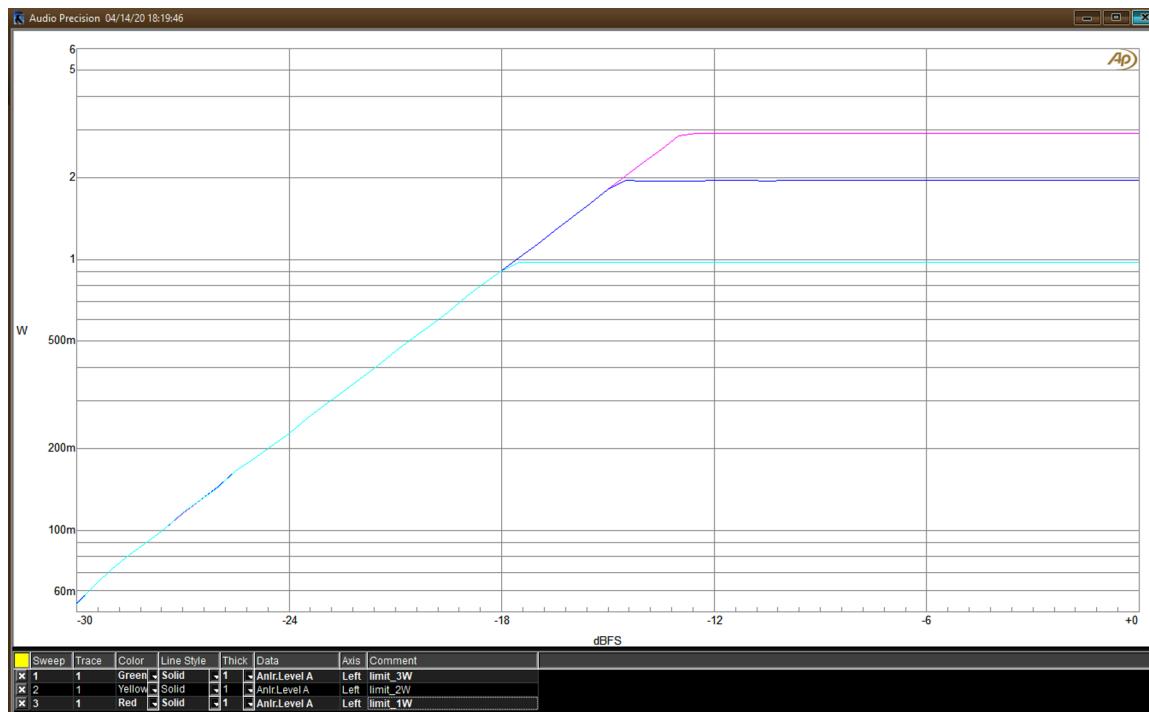


図 5-18. 過熱保護検証結果

6 まとめ

このペーパーでは、TAS5825M オーディオ アンプを使用したスマート アンプ テクノロジーの実装方法の包括的な概要を説明します。スマート アンプ テクノロジーは、音質の向上、オーディオ出力の最大化、予測アルゴリズムを使用してスピーカの動作を監視と制御し、スピーカを保護します。

最初に、スピーカのモデル化の基礎と、スマート アンプ アルゴリズムの基本原理を説明します。このホワイトペーパーは、TI のスマート アンプが、スピーカの変位と温度に基づいてオーディオ出力を動的に調整し、損傷を防止すると同時に、従来型システムよりも優れた低音とダイナミックレンジを実現する方法の概要を説明します。次に、このホワイトペーパーでは、スマート アンプを TAS5825M に適用するためのハードウェアとソフトウェアの準備に関する詳細なガイダンスを提供します。このホワイトペーパーでは、スピーカの特性評価とスマート アンプのチューニングと検証の両方について詳細なガイドラインを提示しており、TAS5825M を使用したスマート アンプの迅速な実装を容易にします。また、スマート アンプ技術による利点とオーディオ性能の向上を検証するための検証実験も実施されています。

7 参考資料

- ・テキサス インスツルメンツ、『[TAS58xx ファミリの一般的なチューニング ガイド](#)』、アプリケーション ノート。
- ・テキサス インスツルメンツ、『[スマートアンプのチューニング ガイド](#)』、アプリケーション ノート
- ・テキサス インスツルメンツ、『[スマートアンプクイック ガイド](#)』、アプリケーション ノート
- ・テキサス インスツルメンツ、『[スマートアンプ開発の開始](#)』、アプリケーション ノート
- ・テキサス インスツルメンツ、『[SmartPA S スピーカー保護アルゴリズム](#)』、アプリケーション ノート

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の默示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または默示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適したテキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されているテキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ（データシートを含みます）、設計リソース（リファレンス デザインを含みます）、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の默示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または默示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適したテキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されているテキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または ti.com やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated