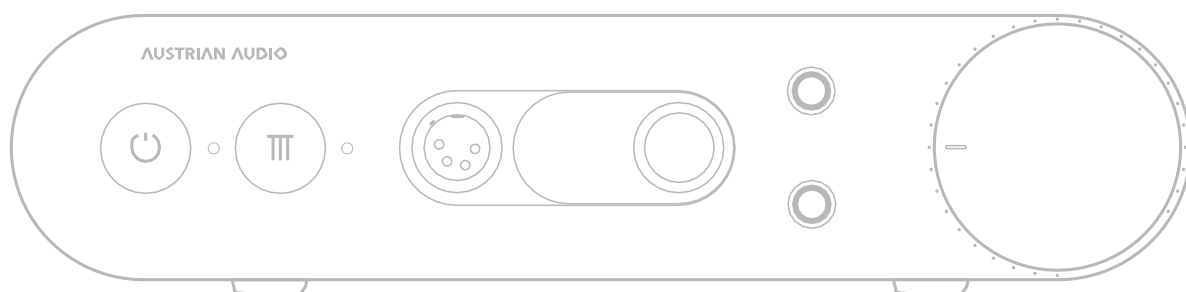


Austrian Audio | Paul Weinreich

Behind the *Full Score one*

テクニカルレポート



目次

1	はじめに	4
1.1	測定基準と聴力の限界	4
1.2	時間領域の測定パラメーター	5
1.3	時間領域に関するリスニング・テスト	6
2	設計目標	7
2.1	全高調波歪みの目標値	7
2.2	ノイズ・ターゲットおよびゲイン	7
2.3	周波数応答の目標値	7
2.4	チャンネル・セパレーションの目標値	8
2.5	立ち上がり時間の目標値	8
2.6	位相マージンの目標値	8
2.7	DCバランスの目標値	8
2.8	入力インピーダンスの目標値	8
2.9	出力電力の目標値	8
2.10	出力電圧の目標値	9
2.11	出力インピーダンスの目標値	9
2.12	電源設計の目標値	9
2.13	まとめ	9
3	回路概要	11
3.1	ブロック図	11
3.2	電源アダプター	13
3.3	プリアンプおよびTTT機能	13

3.4	メイン・アンプ	16
3.4.1	入力ステージ	17
3.4.2	ゲイン・ステージ	17
3.4.3	B級出力ステージおよびバイアス	19
3.4.4	DCサーボ・ループ	19
3.4.5	保護	19
4	測定	21
4.1	測定のセットアップ	21
4.2	測定結果	21
4.2.1	ダッシュボード	21
4.2.2	THD vs 周波数	23
4.2.3	周波数レスポンスの目標値	23
5	技術データ	25
6	詳細情報	25

1 はじめに

本書では、Austrian Audio *Full Score one*の開発背景について紹介し、*Full Score one*で採用された回路技術、それらの設計思想に加え、測定結果などを詳しく解説します。

ヘッドホン・アンプやオーディオ・アンプの技術に関しては既に議論し尽くされたと思っている方も多いでしょう。また現在市場には膨大な数のヘッドホン・アンプが存在し、それぞれ全く異なる特徴やセールス・ポイントを持っています。たとえば、*THX AAA*¹回路を採用し全高調波歪み（THD）が極めて低いものから、真空管を使用したハイインピーダンスで比較的THDが高い製品までさまざまです。また、トランジスター・アンプの違いを聴き分けられないと感じている人や、アンプの音は程度の差こそあれ、どれも似たようなものだと断言する人も多く存在します。

本書ではそれら理由を説明すると共に、今日オーディオ・アンプに採用されている多くの設計が、真に透明な信号再生を目指す上での障壁となっている可能性があることを明らかにします。*Full Score one*が何を目標に設計されたかを理解するには、まず基本的な事柄を定義し、「真に透明な」という言葉が何を意味するのかを理解する必要があります。すべては、客観的に測定可能なパラメーターが、どのように認知可能な違いとして変換されるのか、という問題に帰結します。まずは簡単なパラメーターから見てみましょう。

1.1 測定基準と聴力の限界

- 人間の聴覚が音声信号の振幅変化を認識できる最小単位は、ピュア・トーンの場合約0.3 dB、より複雑な信号の場合0.5～1.0 dBです。
- また音程の変化を認識できる最小単位は、最も聴覚が敏感な500 Hz～2 kHzの範囲で0.2%となります。
- 低次のTHDは1%以上、5次以上の高次THDは、0.3%で確実に知覚されます。0.001%と0.005%の違いがどのような影響を与えるのか、またトランスペアレントなシステムに0.00001%のTHDが必要なのか、を示す明確な証拠はありません。

上記の3つの要件は、多くのアンプ設計で容易に達成できます。また音の時間的な変化が、実際に聴いたときに異なる印象を与える要因になる場合もあります。これは、オーディオ・アンプの特性評価における「盲点」とも呼ばれています。電気回路信号に与える可能性のある時間領域の複雑な非線形性は、一般的なオーディオ測定では考慮されておらず、さらにこれらは主観的に知覚される音の違いに明確に関連付けられていないからです。今のところ、リスナーへの影響は除外しておきます。時間領域における最も重要な測定値とは何でしょうか？

¹ THX AAA回路ウェブサイト：<https://www.thx.com/aaa/>、2024年3月12日時点

1.2 時間領域の測定パラメーター

- スルー・レート：スルー・レートの値はV/ μ s単位で測定され、アンプの最大出力変動率を表します。たとえばスルー・レート1 V/ μ sのアンプは、1 μ sの間に1 Vの電圧を変動できます。アンプのスルー・レートは信号の特性によって異なる場合があります、その変化は非線形的です。より小さな信号でスルー・レートが高くなるシステムや、出力範囲の中間付近で最もスルー・レートが高くなるシステムも存在します。また多くのアンプ、特にオーディオICは、ユニティ・ゲインの帯域幅（通常は非常に広い）に見合ったスルー・レート（通常はユニティ・ゲインの高い周波数との組み合わせでは不十分）が得られないことがあります。
- 立ち上がり時間：アンプの立ち上がり時間 (μ s) は、スルー・レートと帯域幅に必ずしも依存しません。アンプは立ち上がり時間が一定となるように設計でき、これにより入力信号に応じてスルー・レートが変化します。立ち上がり時間は通常、ピーク信号レベルの10%~90%の間で測定されます。ここでは正確な測定を省略し、簡単なデモンストレーションを行います。アンプの立ち上がり時間が1 μ sのとき、これはアンプが1 Vピークを出力するときのスルー・レートが1 V/ μ sであり、5 Vピークを出力するときのスルー・レートが5 V/ μ sであることを意味します。一定の立ち上がり時間は、殆どの用途、特にオーディオ分野では好まれています。アンプの立ち上がり時間が一定だと、すべての出力信号を同様に扱うことができるからです。つまり立ち上がり時間が一定のアンプの場合、レベルの大小を問わず、帯域幅が同じになります。時間領域におけるクリーンな挙動が設計上保証されることとなります。
- ユニティ・ゲインの帯域幅周波数：アンプが増幅可能な周波数を差し、ほとんどのシステムにおいて位相マージンが最も少ない周波数を示します。ユニティ・ゲインの帯域幅周波数の値は、ネガティブ・フィードバックを使用する回路の安定性の評価に役立ちます。
- 位相マージン：エラー補正のためにグローバルなネガティブ・フィードバック・ループ機構を備えるアンプの場合、位相マージンは、アンプが正常に動作するために許容できる位相シフトの量を示します。ほとんどの設計では、負荷に対する低抵抗の経路が存在するため、位相マージンが特に重要です。これは、アンプの伝達関数が負荷の影響を受けやすいため、結果として全体の位相マージンにも影響を与えるからです。パッシブ・スピーカーを駆動するパワー・アンプは、複雑なパッシブ・クロスオーバーが周波数によって様々な位相シフトを引き起こすため、十分な位相マージンを持つ必要があります。ヘッドフォン・アンプでも、位相マージンに注意を払うことが重要となります。インピーダンスの非常に高いヘッドフォンや、大きな静電容量を持つ一部の高級ケーブルまで、接続されるヘッドフォンやケーブルの特性が様々だからです。帯域幅が信号レベルに影響を受けるアンプの場合、レベル変化に伴って位相マージンも変動することがあります。

@1V _{rms} 、10k Ω 負荷	TL072	NE5532	NJM4580	LME49720	AD797	OPA1612
[THD] = %	0.003	0.002	0.0005	0.00003	0.000001	0.000015
電圧利得	125 dB	100 dB	110 dB	140 dB	120 dB	130 dB
UGBW	5.25 MHz	10 MHz	12 MHz	55 MHz	110 MHz	40 MHz
必要なスルー・レート	47 V/ μ s	88 V/ μ s	107 V/ μ s	489 V/ μ s	977 V/ μ s	355 V/ μ s
実際の最大スルー・レート	20 V/ μ s	9 V/ μ s	5 V/ μ s	20 V/ μ s	20 V/ μ s	27 V/ μ s
最小位相マージン	56°	50°	58°	55°	65°	67°

表1：いくつかの人気のオーディオICの比較

必要なスルー・レートは、1 Vrmsの定格ユニティ・ゲイン帯域幅周波数における正弦波の最も急な勾配を用いて計算されています。多くのオーディオICでは、中程度の出力信号レベルでさえ、実際のスルー・レートが必要なスルー・レートの値と一致しないことが確認できます。これらのすべてのICは、出力範囲にわたって立ち上がり時間とスルー・レートが非線形的に変化し、さらにすべての回路が独自の高調波および非高調波歪みを生じます。さらに、1 Vrmsというレベルを基準にしていた点についても、これはあくまで恣意的であり、その他のレベル時における影響も考慮されていません。また、すべてのアンプは、それぞれ独自の高調波および非高調波歪み（クロスオーバー・アーティファクトなど）を持ち、これらがフィードバックされると、純粋な正弦波よりも急峻な波形になることがあります。

1.3 時間領域に関するリスニング・テスト

これらのパラメーターは、アンプのサウンドにどのような影響を与えるのでしょうか？ Full Score oneのプロダクト・マネージャーは、最初のプロトタイプが完成すると、そのディテール豊かなサウンドに満足したと同時に、システムがあまりに正確過ぎて音源によっては欠点が目立ち始めてしまう事に驚かされました。そこで、トグル・スイッチを用いて2つの異なるモードを切り替えるアイデアが生まれました。1つ目のモードではアンプの速度が少し抑えられ、もう1つのモードでは立ち上がり時間が非常に短くなります。これらのパラメーターをどこまで調整すべきかという質問に答えるには、オーディオ・アンプにおける知覚できないほど最小の立ち上がり時間について考える必要があります。Austrian Audioは、以下の3つの二重ブラインド・テストを実施しました。最初の2回のテストは同じ40人の参加者を対象に行われ、3回目は（Covidの制限により）22人の参加者のみで行われました。テストでは、パラメーターが綿密に調整されたテスト用プリアンプが用意され、DACとメイン・アンプの間に接続されたセットアップが用いられました。メイン・アンプは常に同じものが使用され、最終的なFull Score oneのメイン・アンプ回路と類似したものが使用されました。

1. 最初のテストでは、被験者が二重ブラインド・テストに臨み、シグナル・チェーンにあるプリアンプ回路の存在を知覚できるかどうかを試されました。このテストの目的は、プリアンプを知覚できる限界の立ち上がり時間を決定することです。そこで、テスト・アンプの立ち上がり時間を250 nsから1 μ sまで、200 nsステップで変化させながらテストが行われました。結果は、65%のリスナーが立ち上がり時間650ナノ秒以上のプリアンプの音を聞き取ることができました。テスト中は、立ち上がり時間を除くすべてのプリアンプの電気的特性が一定に保たれています。
2. 次のテストでは、スルー・レートが一定の回路と、立ち上がり時間が一定のアンプのどちらが好まれるかが試されました。最大ピーク信号レベルで同じスルー・レートに調整された立ち上がり時間固定の回路との比較が行われ、被験者の80%がスルー・レート100 V/ μ s以下の固定スルー・レート回路を識別することができました。
3. 3つ目のテストは、コロナ禍の期間中に別の小規模なグループを対象に実施されました。被験者は3種類の異なるプリアンプの音を聴き、最も気に入ったプリアンプを選択することを求められました。TTT 機能を無効にした場合、シグナル・チェーン全体の速度が低下します。最も選ばれたプリアンプが明確に特定できず、結論は出ませんでした。

これらすべてのテスト結果は、慎重に評価すべきです。主観的な（リスニング）テストは、それがたとえ二重のブラインド・テストであっても、多くの（外的）要因に影響されやすくなります。セットアップのわずかな差異が結論を混乱させる可能性があります。また最初の被験者集団が一見重要な結果をもたらしたかのように見えるものの、2つの被験者集団はいずれもあまりに小規模であったことも否めません。とはいえ、いくつかの結果をガイドラインとして使用しながら、これまで蓄積してきた経験値に基づいて設計目標を策定しました。

これらのテスト結果が反映された本製品に対する市場の反応に耳を傾けるのが楽しみでもあります。そしてFull Score one のサウンドがTTT機能のオン/オフでどのように感じられるかについて、より多くの意見を聞きたいと考えています。

2 設計目標

2.1 全高調波歪みの目標値

冒頭で述べたように、Full Score one の設計では、全高調波歪みの目標値よりも時間領域での良好な動作が重要視されています。THD値は、どんなヘッドフォンを使用しても感知されることが無いほど十分に低い値でなければなりません。余分な高次歪みのアーティファクトが存在しない限り、0.01%以下の値が要求されます。

2.2 ノイズ・ターゲットおよびゲイン

今日のヘッドフォン市場には、様々な感度の製品が存在します。ヘッドフォン・アンプが適切に動作するための出力電圧範囲は、ヘッドフォンの感度に応じて決定されます。感度の低いヘッドフォンを十分に駆動するには、より多くの電圧が必要となります。つまりその場合ヘッドフォン・アンプは、より多くの電圧ゲインを供給しなければなりません。感度の高いヘッドフォンは、最大SPLレベルに達するために必要な電圧が少なく、ヘッドフォン・アンプの電圧ヘッドルームの一部が未使用のまま確保されます。この場合、ノイズ電圧が可聴域になると、アンプのノイズ・フロアが問題になることがあります。多くの機器では、ノイズ問題を解決するためにゲイン調整機能を備えます。なぜなら入力ノイズは設計固有のものであるため、適切なゲイン設定はノイズの影響を最適化するのに役立つからです。一方、Full Score oneではユーザーの利便性を考慮し、ゲイン・スイッチを実装しないことにしました。従って、メイン・アンプの電圧ノイズは極めて低く抑えられている必要がありますが、同時に最も低感度のヘッドフォンに対して十分な電圧ゲインを供給する必要があります。

メイン・アンプはわずか0.9 nV/Hzという低い値で、室温における電圧ノイズの物理的限界にほぼ達しています。最も低感度のヘッドフォンを駆動できるようにするため、Full Score oneでは10 dBの電圧ゲインを採用しました。これによりメイン・アンプの入力ノイズも10 dB増幅されますが、高感度のヘッドホンを使った場合でも、聴感上ノイズが知覚されることはありません。Austrian AudioのヘッドフォンThe Composerは、かなり高感度だと言えるでしょう。この例では、ノイズは9 dB SPL(A)以下にとどまり、環境ノイズによってほとんどのノイズはマスキングされます。一方、ゲイン・スイッチを実装しないという決定には、別の理由も存在します。高感度のヘッドフォンで低域のボリューム・コントロールを正確に行うため、特注のポテンシオメーターALPS RK271シリーズが採用されました。とても緩やかな傾きから始まり、最終的に非常に急勾配のテーパ・カーブを実現しています。

2.3 周波数応答の目標値

ドライバーのインターモジュレーションを引き起こす超低域周波数を取り除くには、5 Hz以下のロールオフを実装するのが有効です。また適切な高音域ロールオフは、回路の安定性に繋がります。多くのオーディオICと同様、アンプのスルー・レートと立ち上がり時間が異なる場合、(帯域幅が適切に制限されていない場合は常に) 高音域の干渉やその他の不自然な挙動が生じる恐れがあります。その点Austrian Audio Full Score oneでは、利用可能な帯域幅に必要な値をはるかに上回るスルー・レートを実現しています。そのため、高域のロールオフは可聴帯域より遥かに高いメイン・アンプのエッジ周波数付近となります。

2.4 チャンネル・セパレーションの目標値

チャンネル・セパレーションの業界標準値は少なくとも60 dBとされており、目標値を決める際の出発点としては良い値と言えます。

一般的に6.35 mmジャックは、低インピーダンス・ヘッドフォン（32Ω未満）を使用した場合この値を実現できず、40 dBを下回る場合もあります。これは、ジャック内部で左右チャンネルのグラウンド接続が共有されていることが原因です。ヘッドフォン・インピーダンスが32 Ω未満の場合は、代わりに4極XLRジャックを使用することをお勧めします。4極XLRには90 dB以上のチャンネル・セパレーションを実現する独立したグランド・リターンがあるからです。

2.5 立ち上がり時間の目標値

立ち上がり時間の目標値は、リスニング・テストの結果に基づいて定義されました。Full Score oneの立ち上がり時間は、TTT機能有効時650 ns以下である必要があります。前回のリスニング・テストで人為的に結論が得られなかったため、Austrian Audioは好みのプリアンプを選択し、TTT機能オフ時に立ち上がり時間を6 μsに設定することにしました。

2.6 位相マージンの目標値

ヘッドフォン・アンプの位相マージンは十分に高くなければなりません。どんなに悪い条件でも少なくとも90°を維持する必要があります。90°以上の位相マージンがあれば、1次側の誘導性負荷や容量性負荷によってネガティブ・フィードバック・ループが不安定になることはありません。

2.7 DCバランスの目標値

ヘッドフォン・アンプのDCバランスは、ヘッドフォンのグラウンドを基準として、出力部で測定されます。Full Score oneはDCサーボ回路を備え、メイン・アンプのDCオフセットを常時監視し、補正します。オフセット値は、ドライバーが機械的な中心位置から常にずれてしまうのを防ぐため、1 mV未満に保つ必要があります。インイヤー・ヘッドフォンは、DCオフセット電圧に特に敏感です。Full Score oneでは、オフセット補正にのみICが使用されています。ディスクリット回路によるアンプでは、レーザー・トリミングで製造されているIC回路と同等のDCバランスを実現することは容易ではないからです。また、DCサーボのエッジ周波数より高い周波数のオーディオ信号は、ICによって影響を受けることはありません。

2.8 入力インピーダンスの目標値

Full Score oneの入力インピーダンスは、十分に高い値である必要があります。インピーダンスの高いトランスレス真空管アンプでもFull Score oneを簡単に駆動する必要があるからです。実際には100 kΩの値を採用しました。入力インピーダンスがやや高いため、入力端子に未接続のままボリュームを上げるとノイズが聞こえますが、これは想定内の動作です。入力が信号ソースで適切に終端されている場合、Full Score Oneは最小限の低ノイズで動作します。

2.9 出力電力の目標値

近年、ヘッドフォン駆動に必要な平均電力は増加傾向にあります。20 Ω以下のインピーダンスで94 dB以上のSPLを得るために1 Vrms以上の電力を必要とするヘッドフォンさえ存在します。大型のデスクトップ型ヘッドフォン・アンプAustrian Audio Full Score oneは、その広い冷却面積を生かし、1チャンネルあたり1 W以上の定格電力の供給も可能です。

2.10 出力電圧の目標値

ヘッドフォンの電力要件と電圧要件は、混同されがちです。実際に問題となるのは効率であり、ヘッドフォンのインピーダンスは効率と直接関係があるわけではありません。ハイインピーダンスで非常に効率的なヘッドフォンも存在します。それらはヘッドフォン・アンプから高い電圧出力を必要としますが、電力はそれほど必要ありません。また、効率性が非常に低いヘッドフォンも存在し、ローインピーダンスにもかかわらず、より高い駆動電圧を必要とします。Full Score oneは10 dBのゲイン（一般的なヘッドフォン・アンプのハイ・ゲイン設定と同等）を備え、入力電圧0 dBV (1 Vrms) では3.16 Vrmsの出力となります。より大きな出力電圧が必要な場合は、1 Vrms以上の信号ソースでFull Score oneを「オーバードライブ」させることができます。フル・ボリューム時の最大非クリップ出力電圧は約9 Vrmsです。この値は、メイン・アンプの比較的高い供給電圧に合わせて決定されました。プリアンプは通常の使用でクリップが生じることはほとんどありません。ボリューム・アッテネーターの前段で0 dBバッファとしてのみ機能し、最大15 Vrmsまでの高い入力電圧を処理できます。

2.11 出力インピーダンスの目標値

理論的には、ヘッドフォン・アンプの出力インピーダンスは可能な限り低くすべきです。これは接続されたヘッドフォンの周波数応答の偏差をできるだけ小さく維持したいからです。また、低い出力インピーダンスは、ヘッドホンの共振を抑えるのにも役立ちます。実際にはヘッドフォン・ケーブルのインピーダンスの方が遙かに高いため、アンプの出力インピーダンスの要件はそれほど厳しくありません。潜在的な問題を未然に防ぐため、Full Score oneの出力インピーダンスの目標値は、パワー・アンプと同様の基準に設定されています。出力インピーダンスが0.1 Ω 以下に設定されていることで、たとえヘッドフォンのインピーダンスが大きく変動しても、動作に影響はありません。Full Score oneの出力端子で直接測定した出力インピーダンスは、0.02 Ω 未満の値を実現しています。

2.12 電源設計の目標値

Full Score one は、伝統的でシンプルなりニア電源を採用しています。電源回路へのノイズ干渉が少ないため、多くのユーザーはスイッチング電源よりもリニア電源を好みます。さらにリニア電源は耐久性が非常に優れていることも利点です。Full Score Oneの電源は、2つの異なる電圧範囲（100～120 Vおよび220～240 V）を自動的に選択する機能を備える必要があります。これにより、ユーザーの誤操作による事故を防ぐことができます。民生機器や家庭用電子機器のスタンバイ・モードに関する規制では、最大使用電力が0.3 W未満であることが求められています。この要件を満たすため、Austrian Audioは電源オフ時にのみ使用される小型のスイッチング電源を実装する必要がありました。このスイッチング電源は、Full Score oneの電源が投入されると自動的に切断されます。

2.13 まとめ

以上をまとめると、アンプ回路に求められる要件は、一般的なアンプICを用いた既製のソリューションでは完全に満たすことはできません。適切な位相マージンと速度を同時に実現するには、電気的パラメーターを細かく調整する必要があります。また、電気的なノイズや干渉に対する高い耐性を持つことも重要です。そのため、リード/ラグ補償によって慎重に調整された、ディスクリートな広帯域アンプ回路を採用しました。最終的な設計目標は以下の通りとなります。

	設計目標	実際の設計
[k] = %	< 0.01、20 Hz - 20 kHz	< 0.002、20 Hz-20 kHz、< 0.0004 @ 1kHz
ノイズ	音響ノイズより低い	0.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、1.5 μVrms (A)、10 dBゲイン時
ゲイン	通常のハイ・ゲイン設定	10 dB
チャンネル セパレーション	> 60 dB	90 dB @ 1 kHz
立ち上がり時間	< 650 ns	200 ns、TTT 機能オン
位相マージン	> 90°	97°
DCバランス	< ± 1 mV	< ± 0.6 mV
入力インピーダンス	> 47 k Ω	100 k Ω
入力電力	> 0.6 W @ 10 Ω	1 W @ 10 Ω 、1 Vrms入力
出力電圧	> 1Vrms	3.16 Vrms、1 Vrms入力
出力インピーダンス	< 0.1 Ω	< 0.02 Ω

表2：全負荷時の設計目標と実際の設計の比較

3 回路概要

3.1 ブロック図

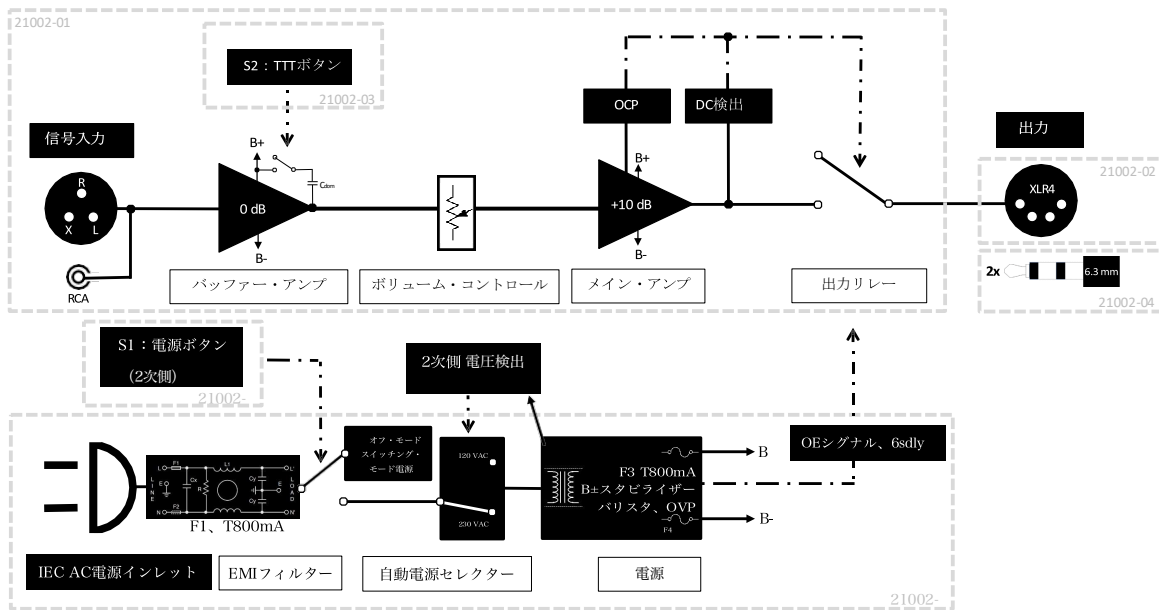


写真1 : Austrian Audio Full Score oneブロック図

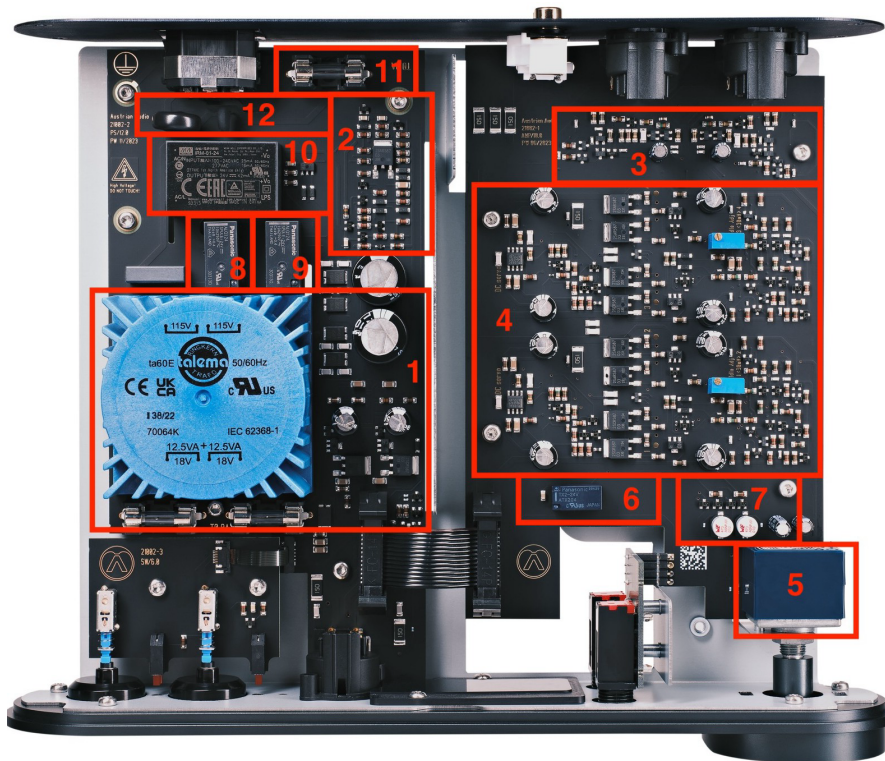


図2：Austrian Audio Full Score one内部の様子

1. 電源、リニア電源
2. 電源電圧自動選択回路
3. プリアンプ、LRチャンネル
4. メイン（パワー）アンプ、LRチャンネル
5. ボリューム・アッテネーター
6. 出力オン／オフ・リレー
7. DCオフセット保護回路の一部
8. 電源投入リレー
9. 電源電圧選択リレー
10. スタンバイ・モード・スイッチング電源
11. 一次ヒューズ
12. 電源過電圧プロテクター（左）、突入電流リミッター（右）

Austrian Audio Full Score oneは、電源電圧自動選択機能 (2)を備えたりニア電源 (1)、プリアンプ (3)およびメイン・パワー・アンプ (4)、そしてボリューム・アッテネーター (5)の3つの主要パーツで構成されています。プリアンプは増幅率0 dBに設定され、トゥルー・トランジエント・テクノロジー・スイッチを実装しています。メイン・アンプは10 dBのゲインが行えます。2つの6.35 mmジャックと4極XLRの3つの出力端子のすべては、メイン・パワー・アンプに並列接続されています。

3.2 リニア電源

Full Score oneの電源は、非常にシンプルです。プリアンプおよびメイン・アンプは、いずれも自己バランスの動作電流と電圧基準を備えた回路が採用されているため、厳密に規制された電源電圧は不要です。プリアンプの電源除去比は約70 dBであり、一般的な電流帰還型アンプと類似しています。一方、メイン・アンプの電源除去比は、オーディオ周波数帯域で100 dBを実現します。Full Score oneでシンプルなパス・トランジスターと容量マルチプライヤによる回路が採用されているのはこれが理由であり、これにより電源からの微細なノイズを平滑化することができます。この構成により、電源からのリップルを100 Hz以上の周波数で90 dB追加で除去でき、結果としてプリアンプ出力で170 dB、メイン・アンプで190 dBのリップル除去を実現しています。この回路は、目標値が定められた電圧レギュレーターではなく、単なるトランスの平均整流された二次電圧を追跡する平滑化回路です。これにより常にリップルが除去され、電圧が極端に低い、または一時的なドロップアウトがあった場合でもシステムの安定性が保たれます。

3.3 プリアンプおよびTTT機能

プリアンプには、非常にシンプルで高速な2段電流帰還アンプが採用されています。最初のステージはカスコード接続されたJFETを用いた入力ステージで、2番目のステージは出力ステージとゲイン・ステージの両方を兼ね備えています。JFETを使うことで、入力インピーダンスを高く、安定かつ低容量に保つことが可能になります。このアンプは、負荷として10 k Ω のボリューム・アッテネーターのみが使用されているため、専用の出力ステージは必要ありません。入力トランジスターとゲイン・ステージ・トランジスターの間はプッシュプルの関係にあり、これは速く、対称的で一定の立ち上がり時間と、高いスルー・レートを実現するために必要となります。電流帰還型アンプは、時間領域では優れたパフォーマンスが得られることが知られていますが、THDの数値は平均的です。Austrian Audioのトゥルー・トランジエント・テクノロジーはプリアンプ・ステージで実装されており、その効果はボリュームのアッテネート、つまりユーザーのリズニング・レベルや使用するヘッドフォンのモデルに影響されません。TTT機能を無効にするとコンデンサーが回路に接続され、プリアンプの立ち上がり時間を制限します。その結果、より低速のヘッドフォン・アンプの一部の効果を再現できます。この場合も回路は一定の立ち上がり時間を維持しており、スルー・レートは一定でも非線形でもありません。THDは特に1 kHz以上の周波数帯域で高くなるがありますが、人間が聞き分けられる周波数範囲ではなく、音質への影響はありません。また、2次の影響（例えばDACの帯域外ノイズの復調や自己発生の帯域外歪み成分によるインターモジュレーション）も「再現」から除外されています。このような方法により、他の多くのオーディオ・アンプ回路と比較して、時間領域での特性は十分な性能を維持します。プリアンプの技術データは以下の通りです。

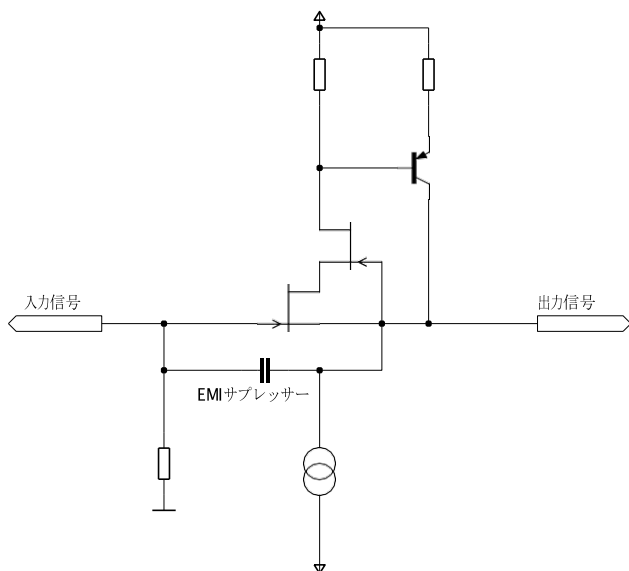


図1：Austrian Audio Full Score oneのプリアンプ：簡易的な回路図

@1Vrms、10kΩ負荷	TTT = ON	TTT = OFF
[THD]=% @ 1 KHz	0.0004	0.003
OLG	134 V/mA	134 V/mA
UGBW	0.3 MHz	0.02 MHz
帯域幅 (-3 dB)	3.3 MHz	0.075 MHz
最大スルー・レート	2000 V/μs	5 V/μs
立ち上がり/立ち下がり時間	20 ns	6 μs
位相マージン	175 °	120 °
ノイズ密度	3.5 nV/√Hz	3.5 nV/√Hz

表3：Full Score oneプリアンプの技術データ

プリアンプにはリード/ラグ補償が施されており、速度、位相マージン、歪みのバランスを最適に保ちながら、3.3 MHzでの適切なロールオフを実現しています。

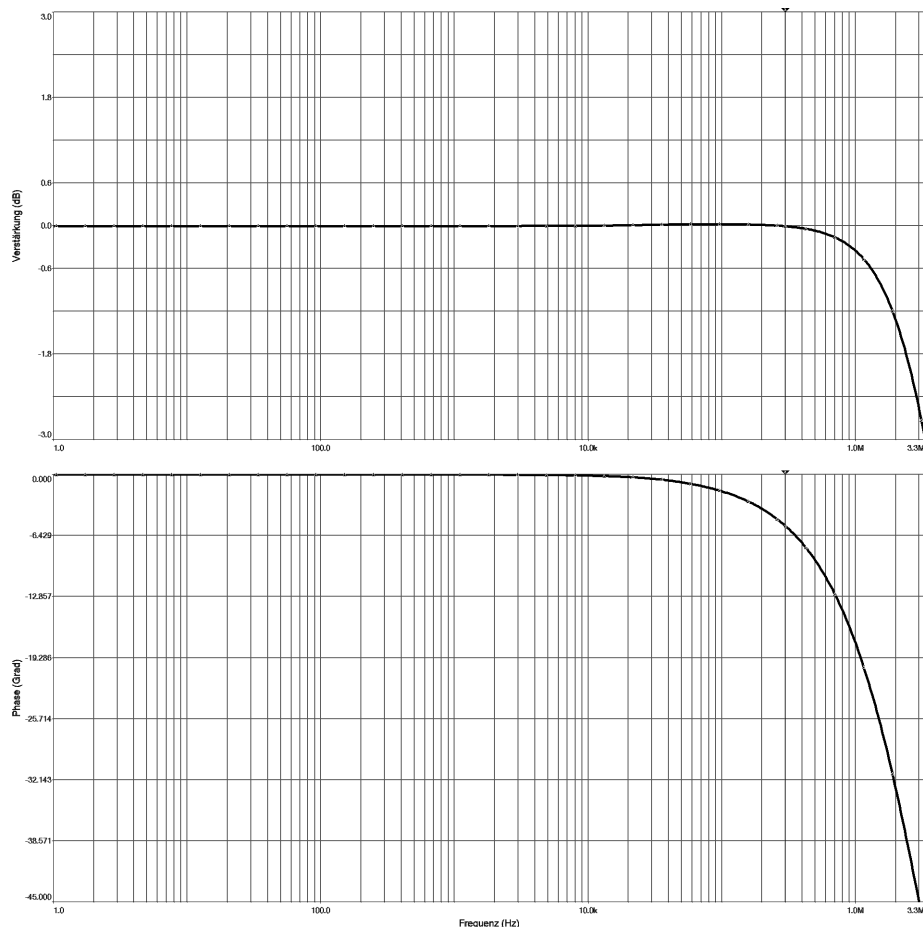


図2 : Austrian Audio Full Score one : プリアンプ・ゲイン vs 位相シフト、3 dB@3.3 MHz

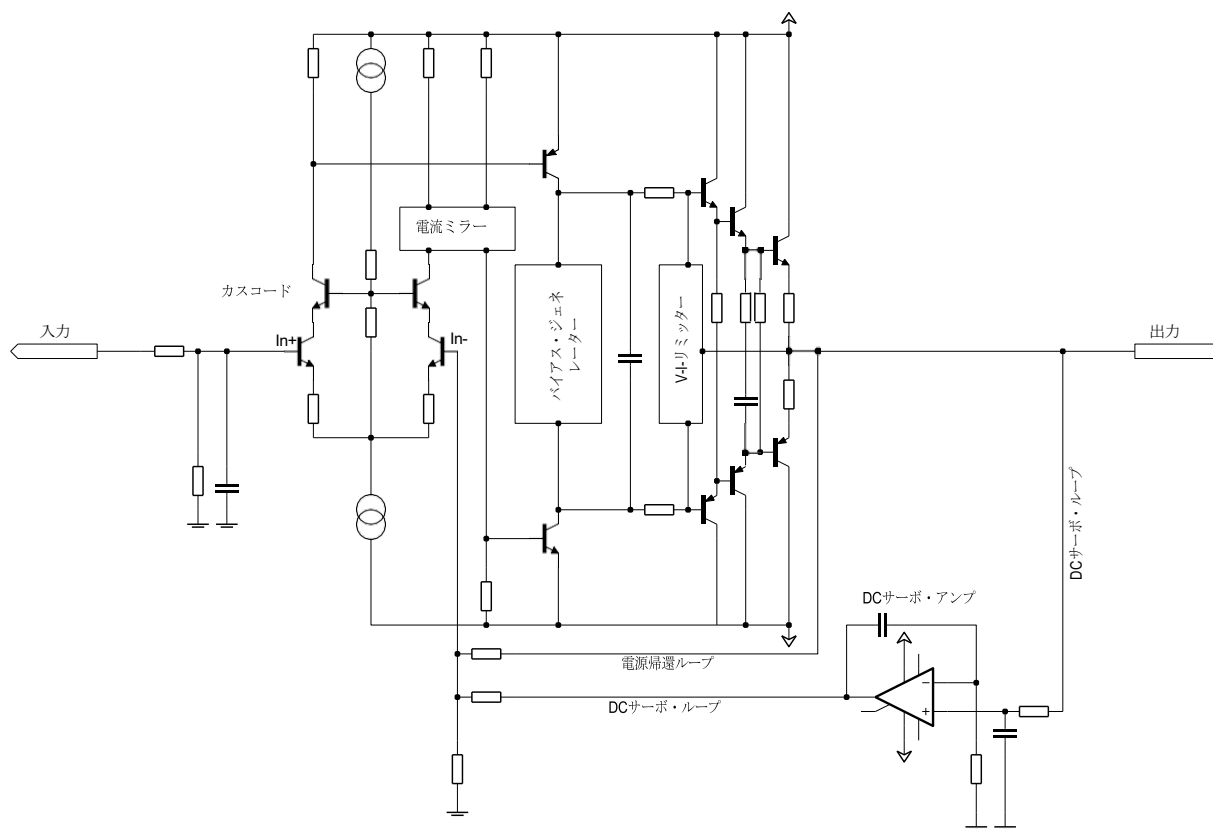


図3：Austrian Audio Full Score oneメイン・アンプ：簡易的な回路図

3.4 メイン・アンプ

Austrian Audio Full Score oneのメイン・アンプは、広帯域電圧帰還型アンプです。一般的なあらゆるダイナミック・ヘッドフォンに対応できるように、小型のパワー・アンプと同様の構成で作られています。たとえば、300 Ωを超える高インピーダンス・ヘッドフォン（より多くの電圧が必要）から32 Ω以下の低インピーダンス／高感度のヘッドフォン（インイヤー・タイプなど）、さらには低感度／低インピーダンスの平面磁気ドライバーまで、様々なヘッドフォンに対応します。

@3 Vrms、10Ω負荷時	
[THD]=% @ 1 KHz	0.00017
OLG	65 dB
UGBW	8 MHz
帯域幅 (-3 dB)	2 MHz
最大スルー・レート	300 V/μs
立ち上がり/ 立ち下がり時間	200 ns
位相マージン	97°
ノイズ密度	0.9 nV/√Hz

表4：Full Score oneメイン・アンプの技術データ

3.4.1 入力ステージ

入力ステージは並列差動アンプで構成されます。このアンプの利点は以下の通りです。

- 非常に優れた線形性
- 非常に優れたDCバランス

並列差動アンプでは、（直列差動アンプとは対称的に）2つの「アーム」が同じ極性のコンポーネントを使用するため、すべての半導体を容易にマッチングできます。

- 低ノイズ

パワフルな負荷ネットワークを実装することで、フィードバック・ループの位相マージンを簡単に増やすことができます。

このアンプには、一つだけ大きな欠点があります。

共通エミッタ回路の固定電流源は、差動アンプの各テールを流れる最大電流を制限します。その結果、アンプの立ち上がり時間が一定ではなく、スルー・レートが制限されます。メイン・アンプ全体の立ち上がり時間を一定に保つため、入力ステージの定常電流を最大化し、局所フィードバックを用いてゲインを抑える必要がありました。差動入力アンプのゲインとコモン・モード電圧がゲイン・ステージに比べて十分に低い場合、主にゲイン・ステージの特性が立ち上がり時間に影響を与える要因となります。このようなアプローチにより、並列差動アンプの立ち上がり時間を一定に保つ設計が可能になります。

3.4.2 ゲイン・ステージ

ゲイン・ステージには、完全な補完型プッシュプル回路を実装しました。並列差動入力ステージの電流はミラーリングされ、ゲイン・ステージの負側（またはプル側）にレベル・シフトされた補完信号が生成されます。プッシュプル・ゲイン・ステージは、利用できる電流が信号レベルに比例するため、一定の立ち上がり時間を維持できるという利点があります（電圧変動が大きいほど電流は大きくなります）。しかし、プッシュプル・ゲイン・ステージを設計する際は、注意が必要です。プッシュプル・ゲイン・ステージの増幅率は、電流の変動に影響を受けます。特に大きな信号に対し顕著で、フィードバック・ループが安定せず、アンプ全体の動作に影響を与える可能性があります。さらに、プッシュプル・ゲイン・ステージは、出力ステージによる負荷が非線形である場合、動作に影響を受けやすい特徴を持ちます。幸い、上記の課題はすべて解決可能です。いくつかの工夫により電圧ゲインをコントロールし、出力ステージに流れる電流を低く抑えることで、プッシュプル・ゲイン・ステージを安定させ、歪みを最小限に抑えることができます。

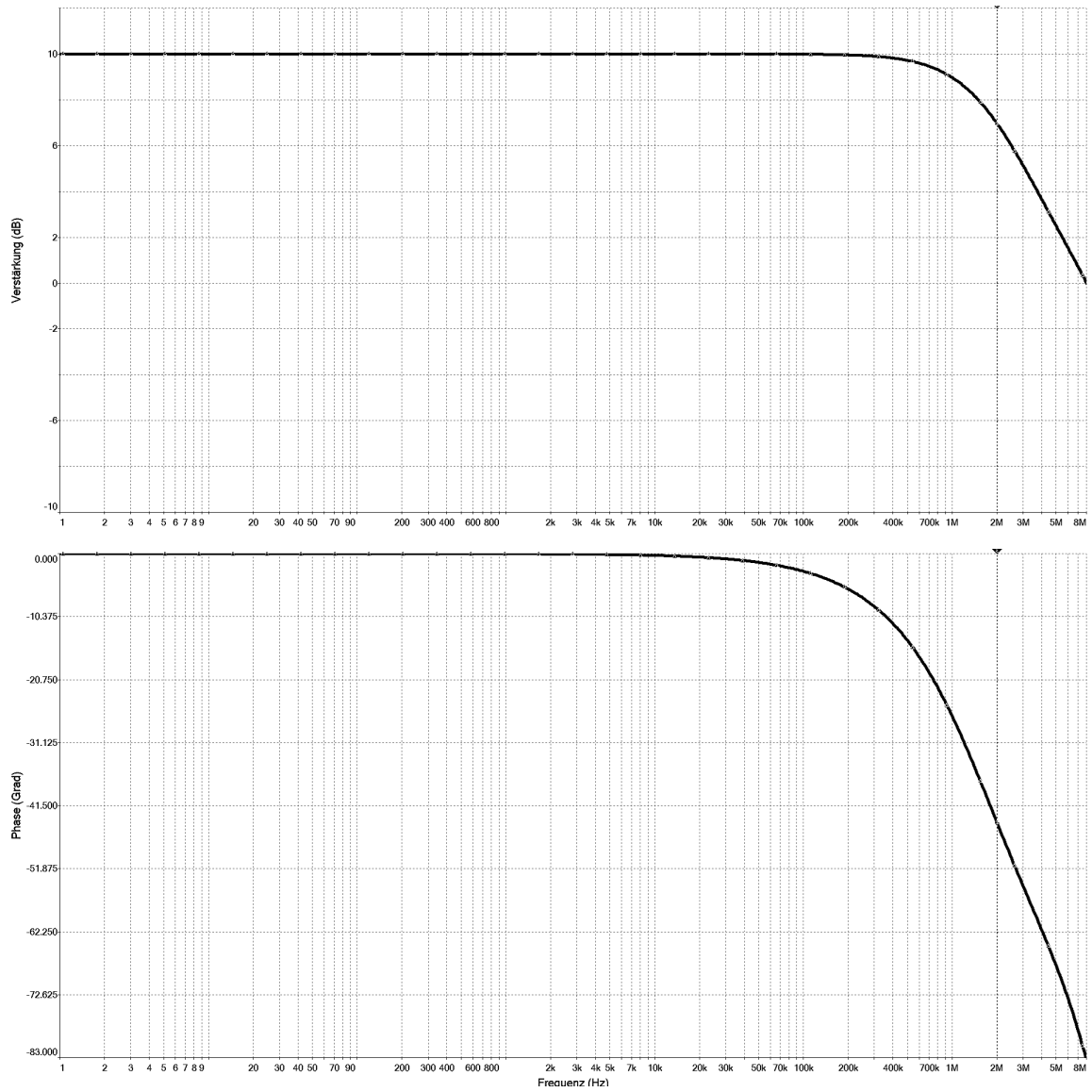


図4 : Austrian Audio Full Score one : メイン・アンプ・ゲイン vs 位相シフト、 3dB @ 2 MHz

3.4.3 B級出力ステージおよびバイアス

Austrian Audio Full Score oneの出力ステージは、バイポーラ・トランジスターで構成された補完的なトリプル・エミッタ・フォロワーB級出力ステージを採用しています。ダーリントン・ペアではなくトリプル構成を採用したことで、遙かに高い電流ゲインが得られるのが利点です。これは、出力ステージの負荷により流れる電流の影響を抑える必要のあるプッシュプル・ゲイン・ステージと組み合わせる場合に重要となります。出力ステージのバイアスについては、B級とAB級の定義に関して（文献でさえ）適切に理解されていない場合があります。大まかに言うとAB級は、小さな信号に対してはA級にバイアスされ、A級のアイドル電流を超えるとB級にドリフトする出力ステージのことを指します。純粋なB級は、出力ステージにアイドル電流が全く流れないという定義もありますが、これは破滅的なクロスオーバー歪みを引き起こします。（Austrian Audioの見解では）アイドル電流を欠いた出力ステージは、どの級にも分類されるべきではありません。真のB級出力ステージは、AB級の電流に触れることなく、クロスオーバー領域で歪みが最小限になるようにバイアスが調整されています。これは「最適にバイアスされた」と表現することもできます。より詳細な情報は、Bernard Oliver博士の論文「Distortion in Complementary-Pair Class-B Amplifiers」またはDouglas Self著「Power Amplifier Design」17章446ページをご参照ください。アンプ設計者の間では、アイドル時の消費電力が大きくなるのが欠点の完全なA級にするか、アイドル時の合理的な消費電力と多少の歪みを伴う最適なB級バイアスのどちらを選択することが一般的な合意となっています。AB級バイアスでは通常、B級よりも歪みが大きくなる傾向にあります。これは、A級の電流を超えるとA級からB級への2つのクロスオーバー領域が出力信号に加わることが原因です。これが、Austrian Audio Full Score oneがB級出力ステージを採用した理由です。

3.4.4 DCサーボ・ループ

Full Score oneでは、メイン・アンプのDCオフセットを常に補正するDCサーボ回路が実装されています。この回路は、グローバルなネガティブ・フィードバック・ループの周りに第2の制御ループを形成します。メイン・アンプの4 Hzのローパス・フィルター処理された信号のみが、超低オフセットのアンプICによって処理されます。このICは入力オートゲインのシグナル・グラウンドを比較することで、低域のローフオフを設定します。

3.4.5 保護

殆どのヘッドフォン・アンプは、再生中にヘッドフォンを抜き差しすることで、出力部のショートが日常的に発生します。その理由は、左右の出力チャンネルを接続する6.35 mmジャックにあります。かつては、出力保護のために電源抵抗を直列に使用しただけのヘッドフォン・アンプが多く存在しました。その代わりに本機では、多くの現代的な設計と同様に、出力インピーダンスをできるだけ低く保つことを試みていますが、これによりアンプの保護がより難しくなります。高速で低インピーダンスのアンプには、高速の保護機能も必要になります。そこでAustrian Audio Full Score oneでは、2段階のアプローチを採用しました。1つ目は、メイン・アンプの制御よりもさらに高速なV-Iリミッターです。出力トランジスターが安全な動作領域に保つため、メイン・アンプよりもさらに高速である必要があります。次は、出力トランジスターの平均電力損失を監視する回路です。過負荷状態が続く場合は最終的に出力リレーを完全に遮断します。Full Score oneのヘッドフォン・アンプは、過熱保護と過電圧保護機能も備えます。

そして最後に、DCフォルト保護機能も備え、メイン・アンプの出力にDC電圧が検出されると、出力リレーを無効にしてヘッドフォンを保護します。

4 測定

4.1 測定のセットアップ

以下の測定は、Audio Precision APx525測定システムで測定されました。シグナル・ジェネレーターの非対称BNC出力とアナライザーの対称入力を用いて、グラウンド・ループを回避しています。Px525および555システムに精通しているのであれば、テスト対象機器がトロイダル・トランスによって電源が供給されている場合、APxアナライザーへの電源リークによるハム・ノイズが避けられないことはご存じでしょう。Austrian Audio Full Score oneのアース設計は、ヘッドフォンの様なフローティングした負荷に最適化されており、これにより入力側で発生するグラウンド・ループに対する影響を最小限に抑えることができます。APxのシャーシ・グラウンド・ジャックをFull Score oneのRCA入力端子のグラウンドに直接接続することで、電源からの漏電の影響を若干低減することができます。実際にヘッドフォンを使用する状況では、測定されたハム・ノイズは存在しません。

4.2 測定結果

4.2.1 ダッシュボード

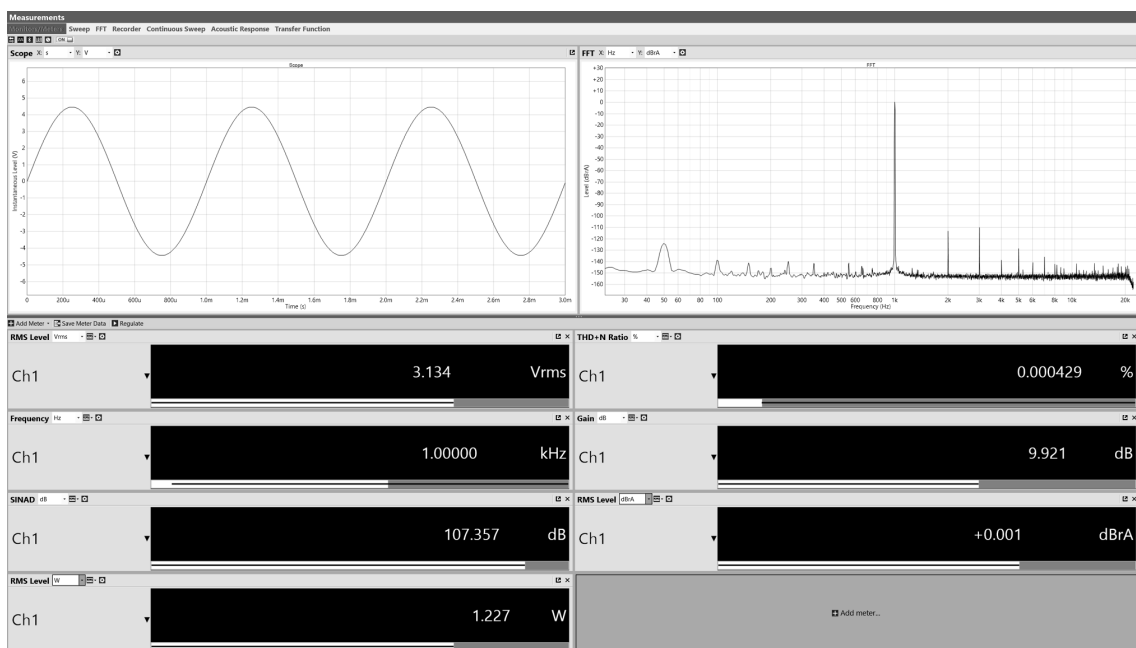


図5：Audio Science Reviewフォーラムからヒントを得て作成されたダッシュボード
20 kHz帯域幅 | 1 Vrms入力 | 両チャンネル負荷10 Ω | 指定された電力

通常の電源周波数50 Hzで最大のピークとなり倍音が続く漏電のスパイクを観測できます。Full Score oneでは、この最大負荷時でも2次および3次の歪みが現れますが、これらは可聴周波数を遙かに下回るため、通常の使用中は殆ど気づかれないレベルです。

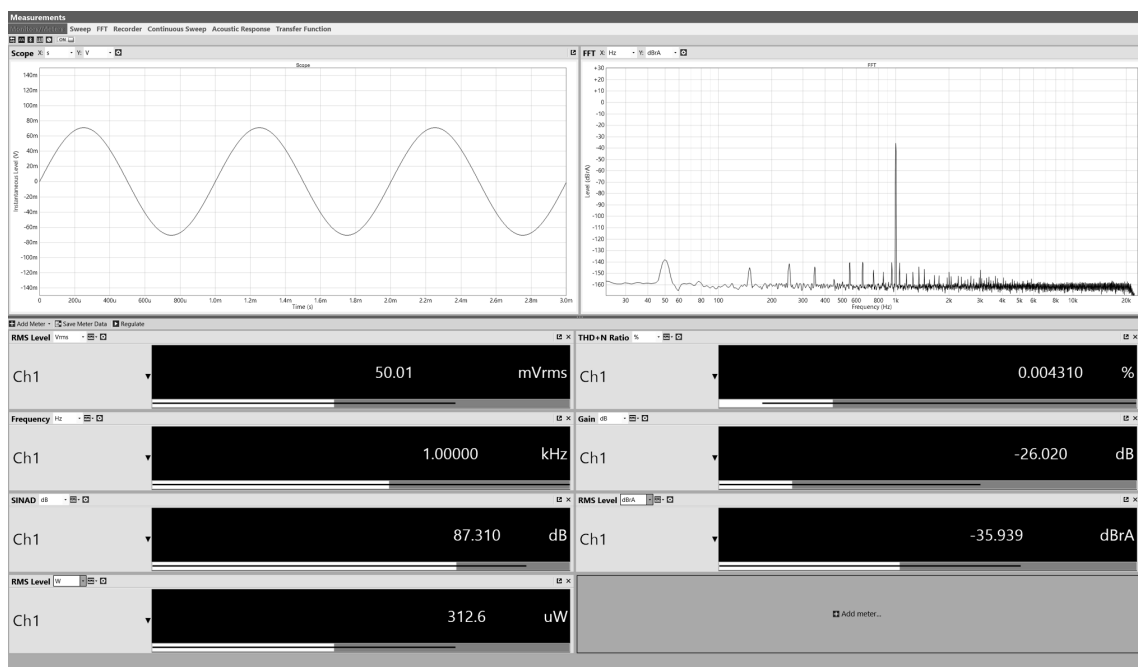


図6：Audio Science Reviewフォーラムからヒントを得て作成されたダッシュボード
20 kHz帯域幅 | 1 Vrms入力 | 両チャンネル負荷10 Ω | | 50 mVrms出力

50 mVrmsで測定された2つ目のダッシュボードは、同じく漏電によるノイズを示しています。これは、APxシグナル・ジェネレーターのノイズ・フロアとFull Score oneのプリアンプ・ノイズがボリューム・ポテンシオメーターによって減衰されるため、より詳細に表示されるためです。いずれのダッシュボードでも、出力ステージのクロスオーバーのアーティファクトが無いことが確認できます。

4.2.2 THD vs 周波数

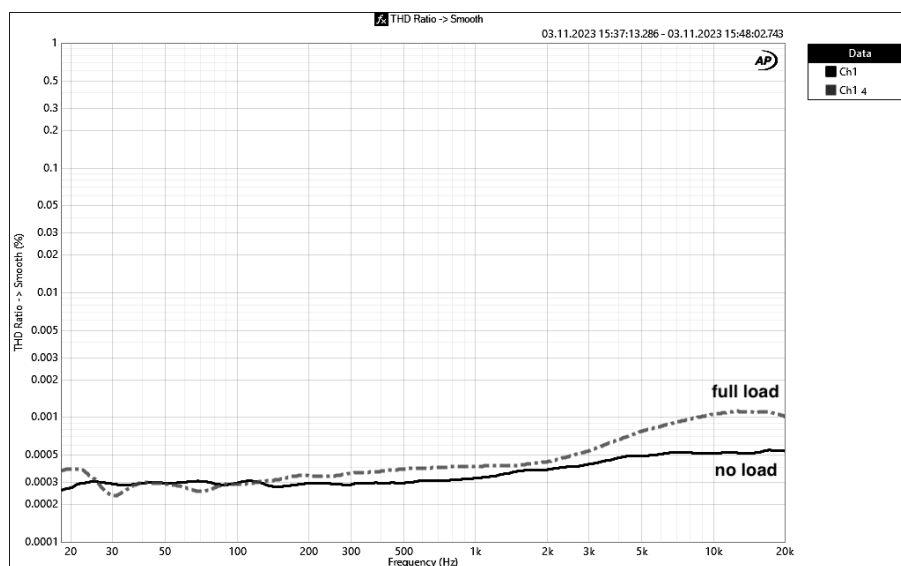


図7：Austrian Audio Full Score one | THD vs 周波数| 周波数90 kHz
| 実線：負荷なし | 点線：全負荷 (10 Ω、1.2 W)

Full Score oneの負荷依存性を示すため、負荷スペクトラムの両端でTHDが測定されました。負荷インピーダンスが上昇、もしくは出力電圧が低下したことで電力出力が減少した場合の中間グラフは、ご想像にお任せします。

4.2.3 周波数レスポンスの目標値

以下の周波数レスポンス測定は、オシロスコープのステップ・スイープ機能を使用していることにご注意ください。位相値には、プリアンプおよびメイン・アンプ両方の影響だけでなく、信号経路にあるEMIフィルター回路による位相値も含まれており、図4および図2と比較して追加の位相遅延をもたらします。



図8 : Austrian Audio Full Score one | 周波数レスポンス | TTT 機能オン

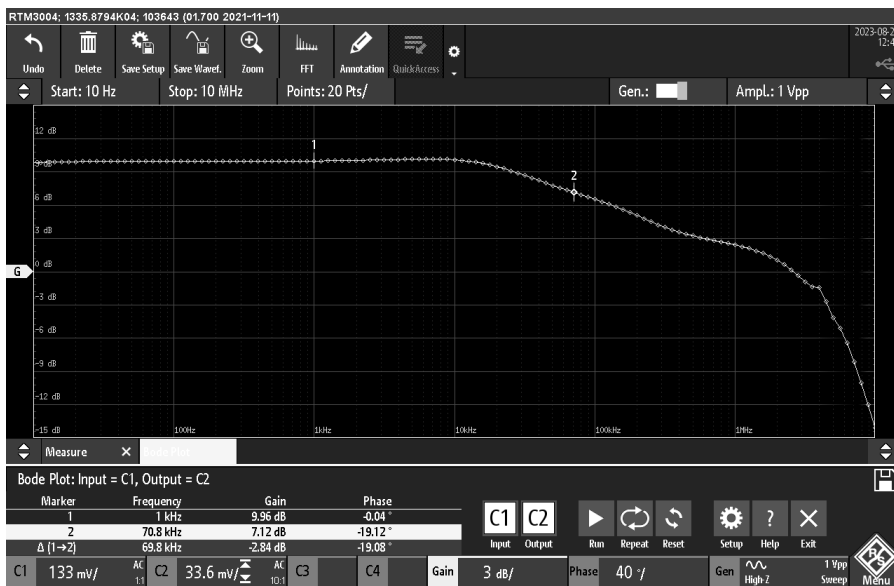


図9 : Austrian Audio Full Score one | 周波数レスポンス | TTT 機能オフ

5 技術データ

以下のデータ・シートは、電源電圧230 V/50 Hz、室温25°Cでのものです。

パラメーター	値
最小入力インピーダンス、4 Hz~20 kHz	100 k Ω 、実効値9 pF
最大出力電圧、4 Hz~20 kHz	19 dBV、9 Vrms、< 0.1 % THD
推奨最大負荷、4 Hz~20 kHz	10 Ω ~600 Ω
THD + N、4 Hz~20 kHz	< 0.001 % @ 10 Ω 、測定帯域幅 90 kHz
THD + N、1 kHz	< 0.0004 % @ 10 Ω 、1.0 W、測定帯域幅22 kHz***
SINAD、帯域幅22 kHz	87 dB @ 50 mVrms /107 dB @ 3.12 Vrms ***
ゲイン、無負荷	9.96 dB
ボリューム・アッテネート	-100 dB***
電力帯域幅	5 Hz~2 MHz, TTT 機能オン
最大スルー・レート	300 V/ μ s***
立ち上がり時間	0.2 μ s***
減衰係数、4 Hz-20 kHz、XLR 4	200 @ 8 Ω
自己ノイズ、入力なし、音量最小	EIN = 136 dB(A) / 1.5 μ Vrms (A)

表5：Full Score oneの技術データ

***平均値。Austrian Audioのその他の公表物では、プロダクションによる値のばらつき補正のため、数値が異なる場合があります。

6 詳細情報

- Harris, J D. : 「Loudness discrimination」 J. Speech Hear, Dis.Monogr.Suppl.11, pp. 1-63 Moore, B C J.: 「Relation between the critical bandwidth and the frequency-difference limen」 J.Acoust.Soc.Am., 55, 1974, p. 359.
- Moir, J. : 「Just detectable distortion levels」 Wireless World, 02/1981, pp. 32-34.
de Santis, E and Henin, S. : 「Perception and Thresholds of Nonlinear Distortion using Complex Signals, thesis」 Institute of Electronic Systems, Aalborg University, Denmark, 2007
- Oliver, B M. : 「Distortion in Complementary-Pair Class-B Amplifiers」 Hewlett-Packard Jour- nal, 02/1971, pp. 11-16
- Self, D. : 「Audio Power Amplifier Design (Sixth Edition)」 Focal Press, 2013

2024年4月15日制作

© 2024 AUSTRIAN AUDIO GmbH 無断複写・転載を禁じます。