

ヤマハパワーアンプ ホワイトペーパー

2009年5月

目次

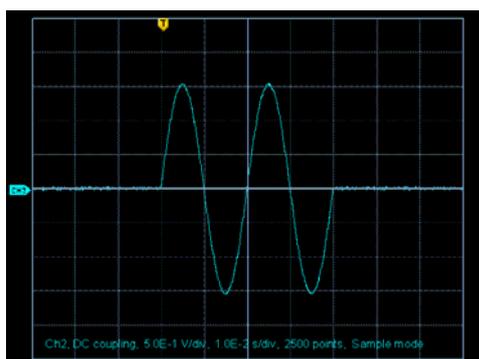
1. EEngine について	2
1.1. はじめに	2
1.2. 各種パワーアンプ駆動方式について	2
2. ヤマハパワーアンプの技術	5
2.1. デュアル・モノラルアンプ構造	5
2.2. 振動抑制	5
2.3. フル共振型電源	5
3. 低インピーダンス負荷の駆動について	6
3.1. 安定した低インピーダンス駆動の重要性	6
3.2. 信号波形を用いた比較実験	7
3.3. 音楽ソースを用いた比較実験	8
3.4. 最後に	9

1. EEEngine について

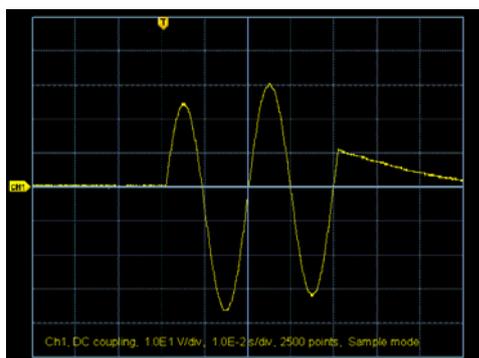
1.1. はじめに

ヤマハパワーアンプの基本理念

ヤマハパワーアンプの設計理念は至ってシンプルで、入力信号の自然で忠実な増幅を基本としています。音響システムにおいて、ミキサーからの微小な電気信号(数 mW)を空気振動の音に変換して多くの聴衆に届けるためには、パワーアンプでスピーカーを駆動するのに十分なレベル(数十～数千 W)まで増幅する必要があります。システムの最終的な出力信号を制御するパワーアンプが果たすべき役割は、どのような増幅レベルでも、またどのようなスピーカーに対してでも入力された信号をいかに忠実に出力できるか、という点です。

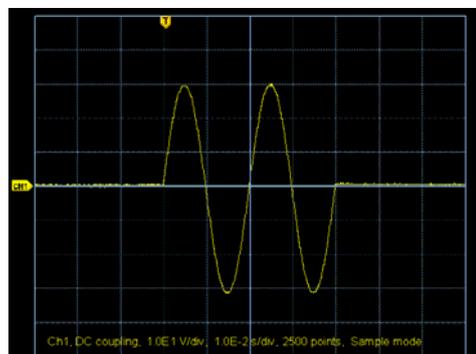


[図1] 入力信号：70Hzの正弦波バースト。



[図2] 競合A社の出力波形

出力波形がオーバーシュート・アンダーシュートしている。信号の経路に何らかのフィルター特性があると思われる。



[図3]ヤマハ T5n の出力波形。
自然で入力信号に忠実な波形を確保している。

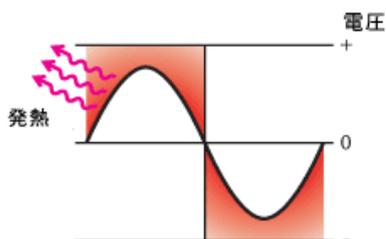
1.2. 各種パワーアンプ駆動方式について

パワーアンプの駆動方式にはいくつかの手法（クラス）があり、現在業務用パワーアンプの大多数はクラス AB、クラス H、もしくはクラス D といった駆動方式を基本に設計されています。ヤマハでは EEEngine という、クラス AB とクラス D を融合した画期的な駆動方式を多くのアンプに採用しています（特許取得済）。下記に各駆動方式の特徴を記します。

クラス AB

クラス AB は長年プロオーディオ業界で標準的な駆動方式であったため、現在でも多くの現場でクラス AB を採用したアンプが見られます。シンプルな回路構成と優れた音質を特徴とし、ヤマハでは P2200(1976 年発売)、PC2002M (1982 年発売)などのモデルに採用されていました。しかしクラス AB は、入力信号の大小に関わらず、最大出力を引き出すのに必要な電圧を常にパワートランジスタへ供給する必要があります。そのため大量に電力を消費し、発熱（図 4 の赤い部分）が非常に大きい、という問題があります。効率が低いため、クラス AB のパワーアンプは出力が小さく出力のわりに筐体が大きく重いものが一般的です。トランスによる電源効率の低さもあり、クラス AB アンプの効率*は音楽ソースの再生時（定格出力の 1/8、ロック音楽などで時折クリップする程度）で 20%程度です。つまり、アンプに供給された電力の 80%が熱として失われているのです。この効率の問題を解決するべく、その後の駆動方式が開発されてきました。

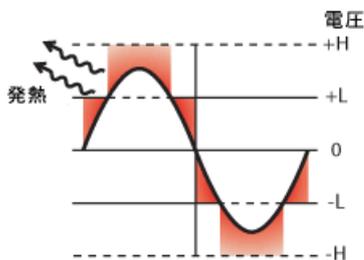
* 本書でのアンプの効率(%)は、アンプ部だけでなく主電源を含んだ製品全体としての効率です。出力定格1/8(ロックなどの音楽再生レベル)での駆動を想定しています。



[図4] クラス AB 動作波形
音質に優れるが、発熱(赤い部分)が非常に多く効率は低い。

クラス H

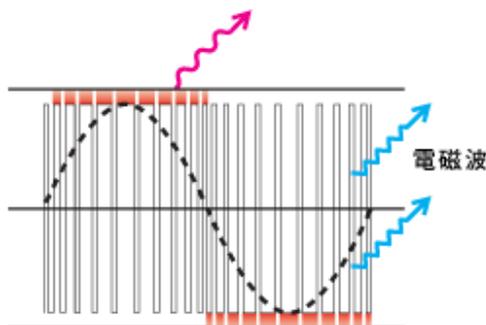
クラス H は入力信号に応じてパワートランジスタに供給する電圧レベルを段階的に切り替える方式です。図 5 を例にとると、入力レベルが小さいときは供給電圧が最大値の半分で済むため発熱が抑えられ効率が改善されます。しかし、入力が切り替わりのレベル (+L のレベル) より少しでも大きい場合や、ダイナミックレンジが大きいソースの場合は、最大限の電圧を供給する必要があるため効率は悪化します。電圧レベルの切り替え段数を増やすことが出来れば効率の向上が期待できますが、実際には段数が増えるごとにスイッチ・ロスが生じ、回路も複雑になるため、2~3 段階に留まるのが一般的です。こうしたことからクラス H アンプの効率は一般的に 30% 程度となります。また音質面では電圧切り替わり時のノイズの克服が課題となります。ヤマハでは PC5002 (1982 年発売) にクラス H 方式が採用されていました。当時としては大出力の 500w(8Ω) x2 チャンネルを実現していましたが、重量は 60Kg もあり、軽量化の課題もありました。



[図5] クラス H 動作波形
電圧を切り替えられるためクラス AB よりは発熱が少ないが、実装上の限界がある。

クラス D

クラス D は、スイッチングを用いた増幅方式です。(誤解されることが多いのですが「D」は Digital に由来しているわけではありません。) Pulse Width Modulation (PWM) 方式により、入力ソースの波形から各時点の信号レベルに応じたパルス幅の信号 (PWM 信号) を生成します。PWM 信号は必要な分だけパワートランジスタをスイッチング駆動するため効率の高い増幅が可能となり、クラス D アンプでは一般的に 60% 程度の効率が実現できます。しかし、矩形波である PWM で増幅された信号をアナログに復調するには高周波を除去するローパスフィルターが必須となり、周波数レスポンス、位相特性、ダンピングファクターに影響を及ぼすことがあります。また、高出力の PWM 信号は電磁波ノイズを発生するため様々な対策が必要となるなど、クラス D で大出力アンプを実現するにはまだ多くの課題が残っています。ヤマハでは、小型軽量・高効率が要求される一部のパワードスピーカーやテレビ/カーオーディオ用の回路にクラス D 方式を採用しています。

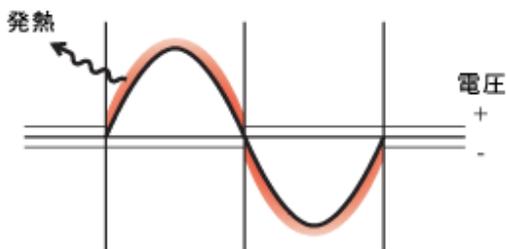


[図6] クラス D 動作波形
発熱は少ないが、ノイズ抑制など音質面での課題がある。

EEEngine

業務用の高出力パワーアンプの研究開発は、高音質、高効率、軽量化の両立を探る歴史でした。ヤマハ独自の EEEngine (Energy Efficient Engine) は、従来の駆動方式の問題を克服し、クラス AB の音質を保ちながら、クラス D の高効率を高次元に両立させる画期的な技術です。元来はヤマハの Hi-Fi オーディオ設計のために生まれたアイデアですが、長年の研究開発の結果、大出力のプロオーディオ用としての製品化に成功しました。EEEngine はフラッグシップの TXn、Tn シリーズをはじめ多くのヤマハアンプ、および NEXO の NXAMP シリーズに採用されています。

EEEngine は入力された信号のレベルを動的に判別しています。パワートランジスタへの電力供給ステージではクラス D の考え方を利用して、入力信号を追従した必要最小限の電力を供給するため発熱量が少なく、効率を飛躍的に向上させています。一方、音声信号の経路は入力から出力まですべて純粋なアナログ信号であり、出力ステージはクラス AB 回路を採用しているため、優れた周波数レスポンスを保ち、電磁波やダンピングファクターなどに影響を及ぼしません。EEEngine 搭載アンプはクラス AB 級の音質を保ちながら、50%以上の高効率を実現しています。発熱が少ないことは、パーツの長寿命化や冷却ファンノイズの低減にも寄与します。TXn、Tn、NXAMP では、 2Ω という過酷な負荷状況においても安定動作できるように新開発のパワートランジスタや低損失のトランスを採用したさらに進化した EEEngine を搭載しています。



[図7] EEEngine 動作波形
出力段はクラス AB 回路を持ち、音質に優れ、発熱も少ない。

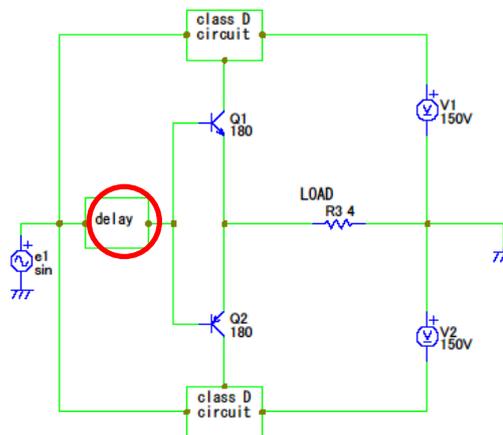
EEEngine と他社技術の違い

近年力を伸ばしているヤマハ以外のあるパワーアンプメーカーでも、EEEngine と非常に似た駆動方式が採用されています。この駆動技術は EEEngine 同様に入力信号を動的に判別して電力を供給しますが、その判別手法が異なります。

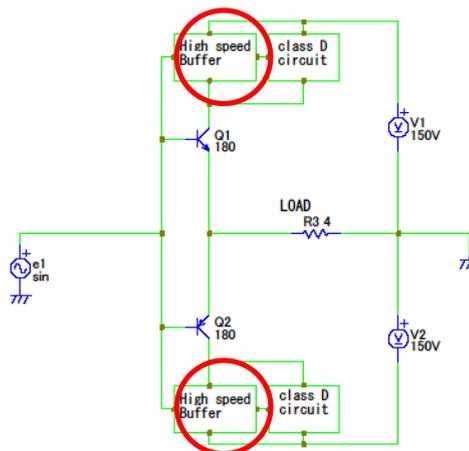
高い周波数（短い波長）の信号を忠実に増幅するためには、パワーアンプは出力を早く立ち上げる必要があります。高いスルーレート（最大応答速度）が要求されます。入力信号に常に追従している EEEngine と他社技術ですが、そのままでは急激な入力波形の変化へは対応できず、電源供給が追いつかなくなります。

他社の駆動方式ではこの問題を対処するために入力信号にディレイを設けることで、電源供給に時間の余裕を持たせています。

ヤマハでは、出力信号に影響を及ぼすような回路を追加することは出来るだけ避けるべきだと考えており、音質に影響を与えないシンプルな回路を目指するという思想に基づいて設計しています。EEEngine は立ち上がり時間の速い入力波形への電源供給を行うために、補助電源供給ラインを設けています。速い応答速度が必要と感知された時のみ、「高速電圧バッファ」が動作し、主電源供給を補助します。この補助電源を搭載することにより、EEEngine はオーディオ信号になんら影響を与えることなく高スルーレートを達成し、入力信号に忠実な出力と高効率を両立させています。



[図8] 他社のアンプ回路図。急な入力信号に対応するために、入力信号はディレイを通過する。



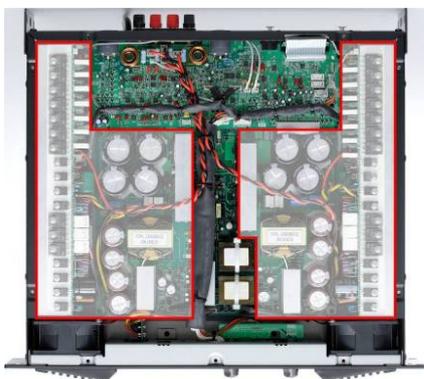
[図9] EEEngine では、急な入力信号の変化に主電源供給ラインだけでは追いつかない場合に高速電圧バッファが補助的に動作する。オーディオ信号は付加的な回路を通らないため音質への影響を受けない。

2. ヤマハパワーアンプの技術

2.1. デュアル・モノラルアンプ構造

ヤマハパワーアンプのハードウェア設計

TXn, Tn シリーズ、PC9501N パワーアンプはデュアル・モノラルアンプ構造となっており、シャーシ内部に全く同じ二つのモノラルアンプユニットと電源部を左右に配置することで一つのステレオアンプとして駆動しています。この構造によりチャンネル間のセパレーションが向上します。さらに両チャンネルへ独立して電源が供給されることにより、片チャンネルに重い負荷がかかっても別のチャンネルの電源には全く影響が及びません。これは片チャンネルに大電力を要するサブウーファァーが接続されている場合などでの安定動作に大きく貢献します。プロオーディオの市場では上級機種でもこのようなデュアル・モノラル構造を持つパワーアンプは希少です。また、独立した2つの電源は逆位相で作動することで、お互いが電源電圧のノイズをキャンセルし、電波の干渉を防ぐだけでなく音質の向上にも寄与しています。



[図10] デュアル・モノラルアンプ構造。
両チャンネルが独立した電源供給を持つ

2.2. 振動抑制

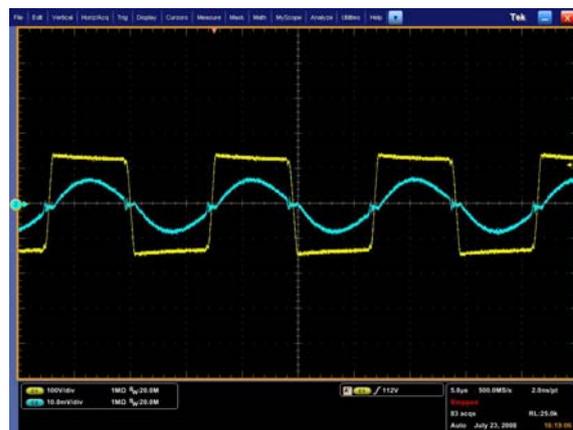
アンプ自身の振動は音質にも影響を及ぼすため、様々な方法で内部部品や筐体の振動を抑制しています。例えばパワートランジスタは大電力を出力する時にそれ自体が振動を起しますが、これを抑制するためヒートシンクとの結合部には薄膜を挟んで共振を抑え、ヒートシンクも肉厚としシャーシに頑丈に固定されています。これら多くの工夫が音質の向上に貢献しています。

2.3. フル共振型電源

電源部のノイズの抑制もパワーアンプの音質に貢献します。TXn, Tn, PC1N シリーズに採用されているフル共振型電源は、電圧共振と電流共振を併用したスイッチング電源で、ナチュラルな電圧と電流の波形を生成します。一般的なスイッチング電源で行われる「ハードスイッチング」は矩形波に近い直流を出力してしまうため、フィルターを必要とします。それに対して、フル共振型電源の「ソフトスイッチング」の波形は高周波ノイズを劇的に軽減できるため、オーディオ再生に最適な電源なのです。



[図11] 他社アンプ電源部の電流と電圧波形。
多くのノイズが見られる。(赤丸) 黄色が電圧、青が電流。



[図12] ヤマハフル共振型電源。波形はスムーズで、スイッチングノイズは非常に少ない。黄色が電圧、青が電流。

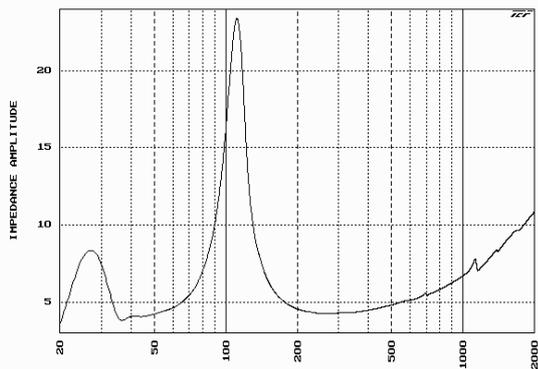
3. 低インピーダンス負荷の駆動について

3.1. 安定した低インピーダンス駆動の重要性

パワーアンプにとって低インピーダンス負荷の駆動は大電力を供給する必要があるため大変過酷な状況ですが、業務用の音響機器として厳しい環境でも安定した動作を保証することは重要な条件の一つです。

一般的にスピーカーをパラレル接続すると、ダンピングファクターの低下や万一の場合に被害を受けるスピーカー数の増加などの影響があるため、本書でも多数のスピーカーのパラレル接続を推奨するものではありません。しかし高出力パワーアンプが使われる現場では、実際に低インピーダンス駆動となる場面が少なくないため、そのような状況下でも安定して忠実な増幅を得られることは重要な性能だと考えています。

例えば、ラインアレイでは一般的に複数のスピーカーがパラレル接続され、インピーダンスが低くなるとともに大電力の供給が必要とされます。また、デュアルウーファースのサブウーファーでは、負荷は定格でも 3Ω もしくは 4Ω となります。さらに、図 13 に見られるようにスピーカーのインピーダンス特性は周波数によって大きく変動するため、アンプにかかっている実際の負荷インピーダンスは定格インピーダンスから計算されるよりも低くなる場合があります。



[図 13] 典型的なバスレフウーファースのインピーダンス特性。定格 4Ω のスピーカーであるが、周波数によっては 4Ω よりも低くなる。

このような低インピーダンスの駆動時にはパワーアンプはクリップを起こしやすくなります。パワーアンプがクリップすると出力波形が歪み、波形の頭がつぶれた信号（矩形波）を出力します。矩形波には高周波ノイズが含まれ、このような信号がスピーカーに入力されるとボイスコイルが発熱して破損する原因となります。そのため、スピーカーシステムを保護しヘッドマージンのある音響システムを構築するためにも、低インピーダンス負荷の環境下での安定した動作を確保することは重要といえます。

ヤマハ TXn および Tn シリーズは、安定した 2Ω 駆動をコンセプトの一つとして開発されており、 2Ω 駆動の条件で UL*および SEMKO*といったグローバルな安全規格を取得している、業界でも希少なパワーアンプです。

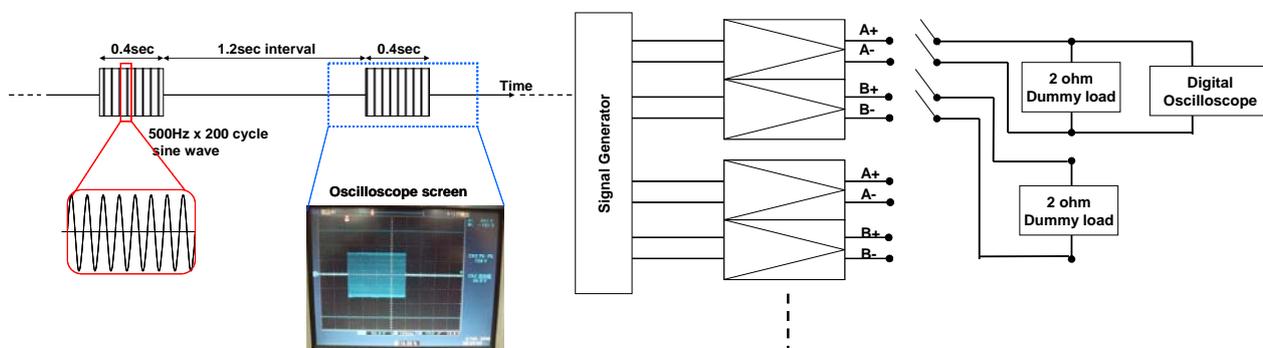
次項からは、意図的にパワーアンプに重い負荷をかけた環境での他社との比較実験を記します。これと類似の試験は、パワーアンプの研究開発における検証試験としてだけでなく、スピーカーメーカーである NEXO 社においてもパワーアンプの性能限界を評価する手段として実際に行われています。

* UL は米国に拠点を置く製品安全規格の認証機関、SEMKO はヨーロッパで広く用いられている認定試験機関です。特に UL では部品や機構のチェック、正常試験、異常試験（内部部品のショート、オープン試験、負荷ショート、 1Ω 駆動）等の厳しい審査が行なわれました。本認証は、 2Ω 駆動条件においても信頼性と安全性を証明するものといえます。

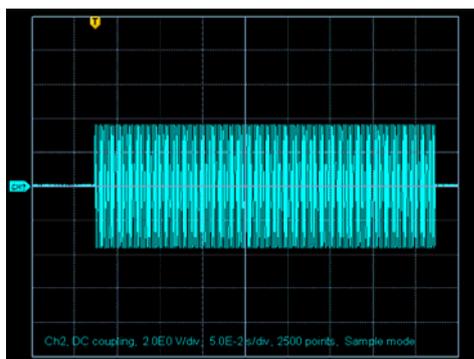
3.2. 信号波形を用いた比較実験

本項および次項で紹介している比較実験では、2Ω負荷時の出力がヤマハ T5n と同等かそれ以上 (2500W から 3300W) で、今日の SR 現場でよく使用されているモデルを対象としました。公平な比較を行うべく、各パワーアンプのゲイン、パワーアンプへの入力レベルは測定器を用いて厳密に合わせてあります。

本項では、各社パワーアンプの挙動を比較するためにオシロスコープを用いて出力波形を測定した結果を記します。入力信号は 500Hz の正弦波 (200 サイクル=0.4sec) と 1.2sec のインターバル (信号なし) を繰り返したものです。実際の SR の現場では正弦波が連続出力されるようなことは稀なため、典型的な音楽ソースにも含まれる 500Hz の合間にインターバルを設けました。両チャンネルへ負荷として 2Ω のダミーロードが接続されている状態での比較です。

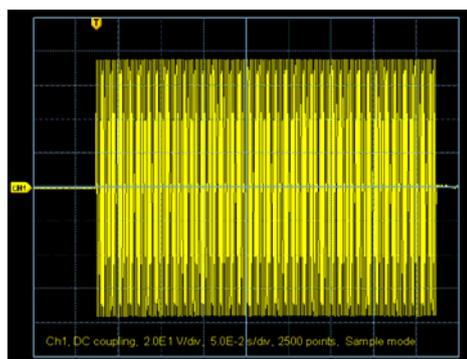


[図 14] 比較実験ブロック図

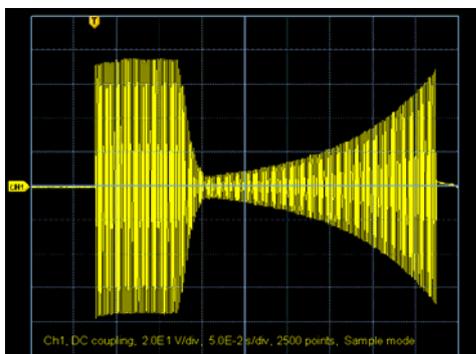


[図 15] 入力信号の波形。

パワーアンプからの出力波形は、入力信号と同じ形状で増幅されたものとなるのが理想的。

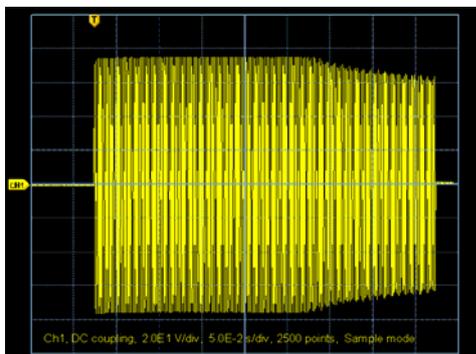


[図 16] ヤマハ T5n(スペック 2500W @ 2Ω)の出力波形
入力信号を忠実に増幅した波形が出力されている。



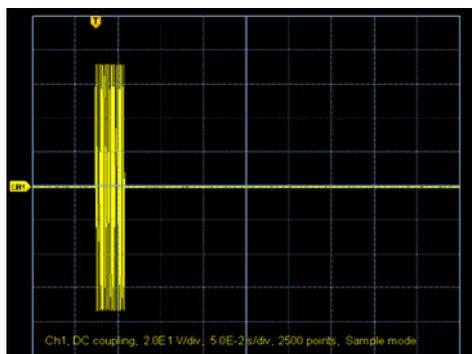
[図 17] A 社(スペック 2500W @ 2Ω)の出力波形。
波形途中で強い圧縮が起こっている。

図 17 の A 社パワーアンプの出力は波形の途中で強い圧縮がかかっており、入力信号とは大きく異なったものとなっています。負荷が片方のチャンネルのみにかかっている状況ではこのような挙動を示しませんでしたが、両チャンネルに負荷がかかると同時に出力が崩れました。このアンプの電両方のチャンネルで一つの電源を共有しており、片チャンネルへの供給には十分でも両チャンネルへの供給には耐え切れなくなっているものと推測されます。



[図 18] B 社(スペック 2900W @ 2Ω)の出力波形。
途中から出力電圧が落ちてきている。

図 18 はスペック 2900W (2Ω) の B 社パワーアンプの出力波形です。出力の初めのほうは良好な増幅を見せますが、徐々に出力電圧が落ちてきています。このモデルでも両チャンネルに負荷がかかると、この現象が見られるようになりました。



[図 19] C 社(スペック 3300W @ 2Ω)の出力波形
本比較で最大出力を誇るが、瞬時に過度なプロテクション動作とも出力がなくなった。

図 19 はスペック 3300W (2Ω) の C 社パワーアンプの出力波形です。このモデルは比較モデルのなかでカタログスペックは最大の出力パワーを持ちますが、信号が入力されると即座に強いプロテクション動作が起こり、出力はミュートされました。図 19 はミュートがかかった瞬間の単発の出力波形ですが、実際には無音状態がしばらく続き、ミュートが解除されると再び即座にミュートがかかり、この動作を繰り返しました。

これらの比較のように、低インピーダンス駆動において各社パワーアンプは様々な挙動を見せました。これはカタログスペックから期待される動作と実際の動作が必ずしも一致しないことを示しています。その要因としてパワーアンプの測定条件に統一された標準規格がないことが挙げられます。

3.3. 音楽ソースを用いた比較実験

次に、より現実の動作環境に近い比較とするため、音楽信号とスピーカーを使った実験を行いました。パワーアンプの片方のチャンネルには定格 8Ω のフルレンジスピーカーを 4 本パラレル接続しました。複数のスピーカー間の干渉を避けるため、また耳への負担を軽減するために 4 本中 1 本だけをレファレンスとし、残りの 3 本は倉庫に隔離しました。パワーアンプのもう片方のチャンネルには 2Ω のダミーロードの負荷がかかっています。この実験方法により耳とスピーカーに負担をかけずにパワーアンプの性能限界付近の音質を比較することが可能になります。

実験の結果、前項でのオシロスコープの出力で確認したのと同じような現象が、音楽ソースを使った比較でも音として確認されました。

A 社パワーアンプでは、バスドラムの音が激しく歪み、耳障りかつスピーカーにとっても危険と思われるノイズが確認されました。また、オシロスコープでの観察と同様、バスドラムの直後は音量が下がり、全体的に音量レベルは安定しませんでした。

B 社パワーアンプは、入力のはじめのほうは問題なかったものの、徐々に歪みが増し、大きな音が連続する部分では明らかな歪みを発生しました。

C 社パワーアンプでは、バスドラムの直後に強いプロテクションが動作し、その後数秒間音がミュートされました。数秒後に音は復帰しましたが、その後バスドラムの音のたびにミュートを繰り返しました。パワーアンプが自身を保護するためにプロテクションは重要な役割を持ちますが、本番の演奏中に音が完全に遮断されてしまうような事

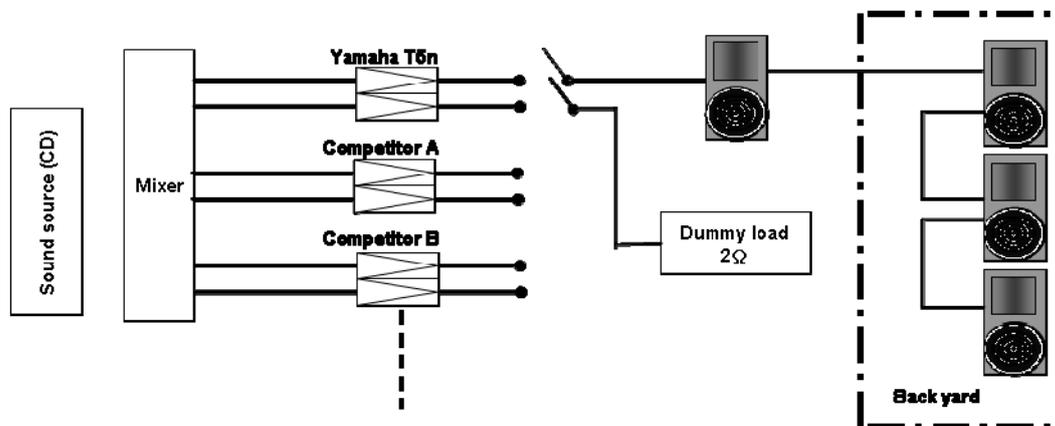
態が望ましくないことは明らかです。

この実験を通して、ヤマハ T5n は過度な圧縮がかかることも、電源が持ちこたえられなくなることも無く、出力される音は稀に歪むことがあっても音楽として破綻することはありませんでした。

これらの実験からパワーアンプの性能はカタログスペックだけでは単純に比較が出来ないことがわかります。アンプの限界付近の挙動を確かめるためには実際に試験する必要があるといえます。

3.4. 最後に

ヤマハパワーアンプの設計では、信頼性にも最大の注意が払われています。設計段階から厳しい耐久試験で検証されており、工場では徹底的な品質管理のもと手作業で組み立てられています。本書でご紹介したような取り組みから、ヤマハパワーアンプは、あらゆるアプリケーションで最大限のパフォーマンスを発揮します。



[図 20] 比較試聴回路図

ヤマハ株式会社

静岡県浜松市中区中沢町 10-1

<http://proaudio.yamaha.co.jp>