

# マイクロダイナミクス評価のための次世代オーディオ指標に関する包括的評価と実装戦略報告書

## 1. 序論: 定常状態指標の限界と「音楽性」の定量化への挑戦

現代のオーディオ工学において、SINAD (Signal-to-Noise and Distortion Ratio) や THD+N (Total Harmonic Distortion + Noise) といった定常状態の測定指標は、機器の基本的な線形性と静的なノイズフロアを評価する上で不可欠な基準として確立されています<sup>1</sup>。Audio Precision APx555などの最新のアナライザを用いれば、トップクラスのDACやアンプは人間の聴覚限界を遥かに超える120dB以上のSINADを容易に達成します<sup>2</sup>。しかしながら、エンジニアや熟練したリスナーの間では、これらの数値が極めて優秀であっても、機器間で「音楽性」や「マイクロダイナミクス」——微細な過渡応答、空間情報の再現性、音色のテクスチャー——に有意な聴感上の差異が存在するという認識が共有されています。

今回提示された社内レビューにおける仮説は、この乖離を説明するために非常に示唆に富むものです。すなわち、「強力な負帰還 (NFB) 技術が、定常的な歪みを低減させる一方で、過渡的な微細構造 (トランジェント) を平滑化し、結果としてスペクトルの微細な凹凸 (ノッチやピーク) が情報欠損を起こしているのではないか」という指摘です。これは、1970年代にMatti Ojalaらが提唱した過渡相互変調歪 (TIM) の議論を現代的な視点で再解釈したものと言えます<sup>4</sup>。

本報告書では、この仮説を検証し、社内で提案された評価指標群 (ノッチ保存度、 $\Delta$ SE、MPS、TFS相関) の妥当性を厳密に評価します。さらに、単なる概念実証にとどまらず、実際のR&Dや生産ラインで運用可能なレベルまで落とし込んだ、具体的かつ堅牢な「実装指示書 (Instruction Manual)」を提示することを目的とします。特に、レビュー内でも懸念されていたTFS (時間微細構造) の測定におけるクロックドリフト問題や、聴覚モデルに基づくフィルタバンクの選定について、最新の研究成果に基づいた解決策を提供します。

---

## 2. 理論的枠組み: 負帰還と過渡応答のジレンマ

### 2.1 定常性能と過渡性能のトレードオフ

負帰還 (NFB) は、出力信号の一部を入力に戻して誤差を補正する技術であり、現代のアンプ設計の根幹をなしています。NFBは定常的な正弦波に対しては劇的な歪み低減効果を発揮しますが、それはシステムが「準静的」であるという前提に基づいています。しかし、音楽信号は本質的に非定常であり、急峻な立ち上がりを持つトランジェントを含みます。

Ojalaらの研究によれば、高い開ループ利得と強力なNFBを持つアンプにおいて、入力信号の立ち上がりがアンプ内部の伝搬遅延よりも速い場合、フィードバック信号が戻ってくる前に入力段が飽和

(スルーレート制限)する現象が発生します<sup>5</sup>。この瞬間、アンプは一時的に「開ループ」状態となり、制御不能な歪み(TIM)が発生させます。現代のアンプはスルーレートが改善されていますが、この現象の微細な形態——「ソフトTIM」や動的な帯域制限——が、マイクロダイナミクスの喪失、すなわちレビューで指摘された「平滑化(Smoothing)」の原因である可能性は高いと考えられます<sup>4</sup>。

## 2.2 スペクトル平滑化とエントロピー増大

レビューで提案された「スペクトルの凹凸の情報欠損＝平滑化」という概念は、情報理論の観点から非常に合理的です。

- ノッチの埋没: 理想的な線形システムであれば、入力信号に存在する深いスペクトルの谷(ノッチ)は、出力でもそのまま維持されるはずですが、アンプが動的な相互変調歪(IMD)を発生させると、エネルギーの高い帯域から低い帯域(ノッチ)へエネルギーが漏れ出し、ノッチの底が「埋まる」現象が起きます<sup>7</sup>。これはS/N比の悪化とは異なり、信号依存的なノイズフロアの上昇(Noise Modulation)を意味します。
- エントロピーの増大: 秩序ある信号(明確なピークやノッチを持つ信号)は低いスペクトルエントロピーを持ちます。一方、信号が平滑化されたり、ランダムなノイズが混入したりすると、スペクトル分布は平坦化し、エントロピーは増大します<sup>8</sup>。したがって、入出力間のエントロピー差分( $\Delta SE$ )を測定することは、アンプが信号にどれだけの「無秩序(Disorder)」を加えたかを定量化する強力な手段となります<sup>9</sup>。

## 2.3 社内レビューの妥当性評価

レビューアの指摘する「単一スコアではなく、原因切り分け可能な指標群(ベクトル)として設計する」という方針は、極めて適切です。SINADのような単一数値への集約は、多次元的な音質劣化の要因(周波数特性、位相特性、時間応答、非線形性)を隠蔽してしまいます。

提案された4つの指標は、それぞれ以下の物理現象を捉えるベクトルとして機能します。

1. ノッチ保存度: 動的な相互変調によるスペクトル汚染(Spectral Bleed)。
2.  $\Delta SE$ : 信号構造の平坦化と過渡的な情報の喪失。
3. MPS: 時間的・周波数的な変調情報の伝達能力(テクスチャの保存)。
4. TFS関連: 高周波帯域における位相コヒーレンス(タイミングの精度)。

ただし、レビューアも懸念している通り、これらの指標、特にTFSの実装には、ADC/DAC間のクロック非同期問題など、高度な信号処理上の課題が存在します。次章より、各指標の詳細な批判的検討と、それを克服するための実装戦略を解説します。

---

## 3. 提案指標の批判的検討と精緻化

### 3.1 指標A: ノッチ保存度(Notch Preservation Score: NPS)

【現状の提案】

中心周波数8kHz、Q=8.6のノッチドノイズを用い、出力のノッチ深度(dB)を測定する。FFTではなくガマートンフィルタバンクの使用を推奨。

### 【批判的検討】

FFTを用いたノッチ深度の測定は、窓関数によるサイドローブ漏れ(Spectral Leakage)の影響を受けやすく、実際の聴感上の「ノッチの埋まり」と相関しない可能性があります。また、単なるdB値の比較では、アンプの残留ノイズフロアによる底上げなのか、動的な歪みによる埋没なのかの区別がつきにくいという課題があります。

### 【精緻化された実装: Gammatone Noise Power Ratio (GNPR)】

人間の聴覚フィルタ特性を模倣したGammatoneフィルタバンクを使用することは、聴感上の劣化を評価する上で必須です<sup>11</sup>。

- フィルタ設計: 4次のGammatoneフィルタを使用します<sup>13</sup>。これは、聴覚末梢のインパルス応答を近似する標準的なモデルです。
- 帯域幅の定義: ノッチ幅はQ値ではなく、\*\*ERB(Equivalent Rectangular Bandwidth: 等価矩形帯域幅)\*\*で定義すべきです。聴覚マスキングの観点からは、1 ERB幅のノッチが重要です<sup>7</sup>。8kHzにおける1 ERBは約890Hzとなります。
- 測定アルゴリズム:
  1. 入力信号として、8kHzを中心に1 ERB幅で完全にカット(デジタルゼロ)したホワイトノイズを生成します。
  2. 出力信号をGammatoneフィルタバンクに通し、8kHz中心のフィルタ出力のパワー(RMS)を計算します。
  3. このパワーを、無信号時の同帯域のノイズフロアと比較します。無信号時よりも有意にパワーが増加していれば、それは他の帯域からの「スペクトル漏れ(Spectral Bleed)」、すなわち動的歪みが発生している証拠となります。

## 3.2 指標B: 差分スペクトル・エントロピー ( $\Delta SE$ )

### 【現状の提案】

「平滑化＝分布の平坦化＝エントロピー増大」とし、入出力の差分 $\Delta SE$ を情報損失量とする。

### 【批判的検討】

スペクトルエントロピー(SE)は、信号の帯域幅やFFTのビン数、そしてノイズフロアの絶対レベルに強く依存します<sup>14</sup>。例えば、高域がロールオフしているアンプは、高域成分(ビン)がゼロに近づくため、見かけ上のエントロピーが変化してしまいます。また、単にS/Nが悪いだけのアンプも、ノイズによってスペクトルが平坦化されるため、エントロピーが増大します。これでは「信号の平滑化」と「単なるノイズ」の区別が付きません。

### 【精緻化された実装: 正規化・帯域制限エントロピー】

指標としての堅牢性を確保するために、以下の処理を追加します。

- 正規化: エントロピー値をFFTビン数 $N$ の対数( $\log_2 N$ )で除算し、0～1の範囲に正規化します(Normalized Spectral Entropy)<sup>8</sup>。

$$H_n = \frac{-\sum p_i \log_2 p_i}{\log_2 N}$$

ここで、 $p_i$ はパワースペクトル密度(PSD)を確率質量関数として正規化したものです( $\sum p_i = 1$ )。

- マスキング: ノイズフロア以下のビンは計算から除外するか、あるいは「有効帯域(例: 20Hz-20kHz)」のみに限定して計算を行うことで、測定帯域外のノイズの影響を排除します<sup>9</sup>。

- テスト信号: エントロピー測定には、ホワイトノイズよりも\*\*マルチトーン信号 (Multitone)\*\*が適しています<sup>15</sup>。マルチトーンは周波数軸上で離散的なピークを持つ「楕形」のスペクトルを持ち、理論的に低いエントロピーを持ちます。アンプがIMDを起こしてトーン間の谷を埋めると、エントロピーは敏感に上昇します。

### 3.3 指標C: 変調伝達 (Modulation Power Spectrum: MPS)

#### 【現状の提案】

スペクトログラムに2D-FFTを適用し、高いスペクトル変調や時間変調の減衰を測定する。

#### 【批判的検討】

MPSは、音声認識や生物音響学で用いられる強力なツールですが、オーディオ機器評価への応用例はまだ限定的です<sup>17</sup>。通常MPS解析では、音声信号の特性に合わせて低周波の変調(4Hz程度)に注目しますが、オーディオの「マイクロダイナミクス」や「テクスチャ」を評価するには、より高速な時間変調成分を見る必要があります<sup>18</sup>。

#### 【精緻化された実装: テクスチャMPS (Texture MPS)】

- 信号源: 音声ではなく、高密度のオーケストラ音源や、特定の変調特性を持たせた**AM変調ノイズ**(例: ピンクノイズをチャープ信号で振幅変調したもの)を使用します<sup>19</sup>。これにより、MPS平面全体を励起することができます。
- 注目領域: アンプの過渡応答性能(スルーレートや電源の追従性)は、MPS平面上の\*\*高時間変調周波数(>50Hz)かつ高スペクトル変調周波数(>2 cycles/kHz)\*\*の領域に現れます<sup>17</sup>。この領域のエネルギーが入出力でどう変化したか(Modulation Transfer Function比)を計算します。比率が1.0を下回る場合、トランジェントの「鈍り」が発生していると判断できます。

### 3.4 指標D: TFS相関 (Temporal Fine Structure Correlation)

#### 【現状の提案】

高域ガマトーン出力波形の入出力相関をとる。

#### 【批判的検討】

これは最も実装難易度が高い指標です。レビューアも指摘している通り、DACから出力された信号をADCで取り込む「ループバック測定」において、DACとADCが同一のマスタークロックで同期していない限り、\*\*クロックドリフト(サンプリングレートの微小な偏差)\*\*が避けられません<sup>21</sup>。

例えば、48kHzのサンプリングレートで10ppmの偏差がある場合、1秒間で約0.5サンプルのズレが生じます。10kHzの信号において0.5サンプルのズレは大きな位相回転を意味し、数秒後には波形が完全に逆位相になる可能性すらあります。この状態で相関係数を計算すると、波形が完璧であってもスコアは著しく低下します<sup>23</sup>。

#### 【精緻化された実装: ドリフト補正付きエンベロープ相関】

この問題を解決するには、以下の2つのアプローチのいずれか(あるいは両方)が必要です。

1. ハードウェア同期: APx555などのハイエンドアナライザを使用し、DUT (Device Under Test) とアナライザのクロックを同期させる<sup>3</sup>。
  2. ソフトウェア・ドリフト補正: 非同期系で測定する場合、信号の最初と最後に「パイロットトーン(同期用チャープ信号)」を埋め込み、その間隔の変化からドリフト率(リサンプリング係数)を正確に推定し、録音データを線形リサンプリングして補正します<sup>21</sup>。
- さらに、ファインストラクチャ(搬送波)そのものの相関をとるよりも、ヒルベルト変換を用いたエン

ベロープ(包絡線)の相関をとる方が、位相の微小なズレに対して頑健であり、かつ「音の立ち上がり」のタイミング精度を評価する目的に合致します<sup>25</sup>。

---

## 4. 負帰還起因のアーティファクトを示唆する「ストレス・テスト」

レビューアは「負帰還そのものを直接測ることはできないが、TIM的な挙動を示す測定は組める」と述べています。これは非常に重要です。マイクロダイナミクスの喪失がNFBに起因することを示唆するためには、NFBループが不安定になりやすい条件、すなわち「高速過渡」と「容量性負荷」を与えた状態での測定が不可欠です。

### 4.1 DIM/TIM測定(IEC 60268-3準拠)

過渡歪みを評価する国際標準として、**DIM (Dynamic Intermodulation Distortion)**、特にDIM30やDIM100があります<sup>27</sup>。

- テスト信号: 3.15kHzの矩形波(帯域制限あり)と15kHzの正弦波を合成した信号です。矩形波の急峻な立ち上がりがアンプの入力段に強いスルーレート要求を課します。
- メカニズム: NFBが追従しきれない場合、15kHzの正弦波が矩形波の遷移部分で変調を受け、相互変調歪(サイドバンド)が発生します<sup>4</sup>。
- 重要性: この測定で高い歪率を示すアンプは、高速な音楽トランジェントにおいて「微細構造の平滑化」を起こしている可能性が極めて高いと言えます。

### 4.2 容量性負荷による安定性試験(Power Cube)

現代のアンプは、スピーカーケーブルやクロスオーバーネットワークといった複雑なリアクタンス負荷を駆動する必要があります。NFBを多用したアンプは、容量性負荷(Capacitive Load)に対して位相余裕が減少し、リングングや発振を起こしやすくなります<sup>29</sup>。

- 実装: 全ての指標(A~D)を、純抵抗( $8\Omega$ )だけでなく、\*\*擬似容量性負荷(例:  $8\Omega // 2\mu F$ )\*\*を接続した状態で測定します<sup>30</sup>。
- 判定: 抵抗負荷時と比べて、容量負荷時にMPSやノッチ保存度が著しく悪化する場合、そのアンプは「負荷変動に弱いNFB設計」であると判断できます。

---

## 5. 実装指示書: 真の指標セット「Micro-Dynamics Vector」

以上の検討に基づき、R&Dチームが実装すべき具体的な測定プロトコルを以下に定めます。これは、従来のSINAD偏重から脱却し、聴感上の音楽性を科学的に担保するための「Instruction Manual」です。

### 5.1 測定システム構成

ハードウェア要件:



- アナライザ: Audio Precision APx555 (DIM生成機能と広帯域解析能力を持つため推奨)<sup>3</sup>。または、高性能ADC/DACインターフェース (RME ADI-2 Pro等) とPython解析環境。
- 負荷装置: Active Loadbox (AudioGraph等) または、切り替え可能なダミーロード ( $4\Omega, 8\Omega, 8\Omega+2\mu F$ )<sup>30</sup>。

ソフトウェア要件:

- 言語: Python (NumPy, SciPy, Librosa) または MATLAB (Audio Toolbox)。
- 必須ライブラリ: scipy.signal (フィルタリング), gammatone (聴覚フィルタ), librosa (STFT/スペクトログラム)。

## 5.2 指標A: Gammatone Notch Preservation Ratio (GNPR)

目的: 動的IMDによるスペクトル情報の「埋没」を定量化する。

テスト信号:

- ベース: 白色ガウスノイズ (10秒間)。
- ノッチ: 中心周波数  $f_c = 8 \text{ kHz}$ 。帯域幅 1.0 ERB (約890Hz)。深さはデジタル無音 (-140dB以下)。
- 同期: 信号の開始前と終了後に、同期用の1kHzパイロットトーンを付加。

解析アルゴリズム:

1. 録音: DUT (被測定デバイス) からの出力を録音。
2. 同期: パイロットトーンを用いて、入力信号配列と録音信号配列の時間軸を完全に整列させる。
3. フィルタリング: 録音信号を **Gammatone** フィルタバンク (64ch, 100Hz-20kHz) に通す<sup>11</sup>。
4. パワー測定: ノッチ中心 (8kHz) に対応するフィルタの出力パワー (RMS) を計算する。

$$P_{\text{notch}} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \int |y_{8k}(t)|^2 dt \right)$$

5. スコア算出:

$$GNPR = P_{\text{notch}}(DUT) - P_{\text{noise\_floor}}(DUT)$$

ここで、 $P_{\text{noise\_floor}}$  は無信号時の同帯域ノイズレベル。

- 判定基準: GNPRが3dB以上であれば、スペクトル漏れが発生しているとみなす。

## 5.3 指標B: Delta Normalized Spectral Entropy ( $\Delta NSE$ )

目的: 信号の「秩序」の喪失 (ホワイトニング効果) を定量化する。

テスト信号:

- **APx 32-tone Multitone:** 対数等間隔に配置された32本の正弦波<sup>15</sup>。クレストファクタを最小化するように位相最適化されたものを使用。

解析アルゴリズム:

1. **PSD計算:** Hanning窓を使用し、Welch法にてパワースペクトル密度  $S(f)$  を計算。
2. **PMF変換:** 有効帯域 (20Hz-20kHz) 内のスペクトルを確率質量関数に正規化。

$$p_i = \frac{S(f_i)}{\sum_{k \in \text{Band}} S(f_k)}$$

3. **正規化エントロピー:**

$$H_n = -\sum p_i \log_2 p_i / \log_2 (\text{有効ビン数})$$

4. **差分計算:**

$$\Delta NSE = H_n(\text{Output}) - H_n(\text{Input})$$

- 判定基準: 入力信号(マルチトーン)は極めて低いエントロピーを持つ。 $\Delta NSE$  が正の大きな値を示す場合、トーン間にIMDノイズが充填され、信号構造が崩れていることを意味する。

## 5.4 指標C: Texture Modulation Power Spectrum (TMPS)

目的: 複雑なテクスチャ信号における時間分解能の喪失を可視化する。

テスト信号:

- 変調ノイズ: ピンクノイズをキャリアとし、1Hz~100Hzのログスweep正弦波で振幅変調(深さ50%)した信号。あるいは、標準的なオーケストラ音源(Tutti)。

解析アルゴリズム:

1. **スペクトログラム:** ガウス窓を用いたSTFTを計算(時間分解能を重視し、フレーム長は短めに設定)<sup>17</sup>。
2. **2D-FFT:** スペクトログラムの対数振幅に対して2次元FFTを適用し、MPSを得る。
  - X軸: 時間変調周波数 ( $\omega_t$ )
  - Y軸: スペクトル変調周波数 ( $\omega_f$ )
3. **MTF比:** 特定の「マイクロダイナミクス領域」におけるエネルギー比を計算。
  - 領域定義:  $\omega_t > 20 \text{ Hz}$  かつ  $\omega_f > 2 \text{ cycles/kHz}$ 。
  - $$\text{Score} = \frac{\sum_{\text{Region}} |\text{MPS}_{\text{out}}|}{\sum_{\text{Region}} |\text{MPS}_{\text{in}}|}$$
  - 判定基準: スコアが1.0を割り込む(例: 0.9以下)場合、速い時間変動成分が平滑化されている。

## 5.5 指標D: Drift-Corrected TFS Correlation

目的: 高域成分の位相・タイミング精度の絶対評価。

テスト信号:

- 帯域制限された高周波ノイズ(例: 10kHz-14kHz)。前後に同期用チャープ信号(Sync Chirp)を

付加<sup>21</sup>。

解析アルゴリズム(ドリフト補正必須):

1. ラグ推定: 入力信号と録音信号の双方で、開始チャープと終了チャープのピーク位置を検出。
2. ドリフト率算出:

$$R = \frac{T_{\text{end\_rec}} - T_{\text{start\_rec}}}{T_{\text{end\_in}} - T_{\text{start\_in}}}$$

もし  $R \neq 1$  なら、サンプリングレートに偏差がある。

3. リサンプリング: 録音信号を  $1/R$  の比率で高品質リサンプリング(Sinc補間)し、時間軸を完全に一致させる<sup>24</sup>。
4. エンベロープ抽出: Gammatoneフィルタで該当帯域を抽出し、ヒルベルト変換して包絡線(Envelope)を得る。
5. 相関計算: 入力と出力のエンベロープ間のピアソン相関係数  $r$  を計算する。
  - 判定基準: ドリフト補正後で  $r > 0.98$  を目標とする。

---

## 6. 実装ロードマップと結論

### フェーズ1: 電氣的ストレス耐性の確認(即時実施)

複雑なDSP解析を行う前に、アンプの基礎的な「足腰」を確認します。

- **DIM100 + 容量負荷:** Audio PrecisionにてDIM100信号を出力し、 $8\Omega // 2\mu F$ の負荷を接続した状態で測定を行う。この段階で高い歪みが出るモデルは、マイクロダイナミクス以前の問題としてNFB設計が不安定であるため、設計見直しとする。

### フェーズ2: 自動解析ツールの開発(1-2ヶ月)

Pythonベースの自動解析スクリプトを作成し、上記A~Dの指標をWAVファイルから自動算出する環境を整備します。

- ダッシュボードには、4つの指標をレーダーチャートとして表示し、SINAD(定常性能)とは別軸の「動的性能ベクトル」として管理する。

## 結論

レビューアの直感は正しく、従来のSINAD測定では捉えきれない動的な信号劣化が存在します。それは「平滑化(Smoothing)」や「ノッチの埋没」として現れます。本報告書で提示した**Gammatone**フィルタによる聴覚的評価、正規化エントロピーによる構造評価、そしてドリフト補正を施した**TFS**解析を導入することで、社内における「音楽性」の評価は、主観的な言語から客観的なエンジニアリングパラメータへと昇華されます。

この実装指示書に従い、まずはDIM100と容量負荷試験によるスクリーニングから開始し、順次DSP



ベースの指標を導入することを強く推奨します。

---

参考文献(本文中に統合済み)

4 他多数。

## 引用文献

1. What are the most common measurements for amplifier testing? - Audio Precision, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.ap.com/applications/amplifier-testing/what-are-the-most-common-measurements-for-amplifier-testing>
2. Amplifier Testing & Measurement | Audio Precision | The Global Leader, 1月 1, 2026にアクセス、<https://www.ap.com/applications/amplifier-testing>
3. APx555B Audio Analyzer: High Performance Meets Versatility, 1月 1, 2026にアクセス、<https://www.ap.com/analyzers-accessories/apx555>
4. 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://keith-snook.info/wireless-world-articles/Wireless-World-1981/Measuring%20transient%20intermodulation%20in%20audio%20amplifiers.pdf>
5. Possible methods for the measurement of transient intermodulation distortion - Linear Audio, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://linearaudio.net/sites/linearaudio.net/files/espoo%201976.pdf>
6. Transient Intermodulation Distortion - Phoenix Audio Community Forums, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://forums.phxaudiotape.com/threads/transient-intermodulation-distortion.8673/>
7. Gammatone filter bank - Simulink - MathWorks, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.mathworks.com/help/audio/ref/gammatonefilterbank.html>
8. MoNA uses spectral and normalized entropy to measure the quality and complexity of spectra in the database, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://mona.fiehnlab.ucdavis.edu/documentation/entropy>
9. Robust Entropy-based Endpoint Detection for Speech Recognition in Noisy Environments, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.ee.columbia.edu/~dpwe/papers/ShenHL98-endpoint.pdf>
10. Spectral entropy - OpenAE, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://openae.io/standards/features/latest/spectral-entropy/>
11. Decompose Signal Using Gammatone Filter Bank Block - MATLAB & Simulink - MathWorks, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.mathworks.com/help/audio/ug/decompose-signal-using-gammatone-filter-bank-block.html>
12. gammatoneFilterBank - Gammatone filter bank - MATLAB - MathWorks, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.mathworks.com/help/audio/ref/gammatonefilterbank-system-object.html>
13. Gammatone filterbank - File Exchange - MATLAB Central - MathWorks, 1月 1,

2026にアクセス、

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32212-gammatone-filterbank>

14. spectralEntropy - Spectral entropy for signals and spectrograms - MATLAB - MathWorks, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/spectralentropy.html>
15. Multitone Analysis with APx500 | Audio Precision | The Global Leader, 1月 1, 2026にアクセス、<https://www.ap.com/news/multitone-analysis-with-apx500>
16. Using Multitones in Audio Test | Audio Precision | The Global Leader, 1月 1, 2026にアクセス、<https://www.ap.com/news/using-multitones-in-audio-test>
17. Modulation statistics of natural soundscapes | bioRxiv, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2025.03.04.638661.full>
18. Modulation Representations for Speech and Music - Johns Hopkins Whiting School of Engineering, 1月 1, 2026にアクセス、  
[https://engineering.jhu.edu/lcap/data/uploads/pdfs/springer2019\\_elhilali.pdf](https://engineering.jhu.edu/lcap/data/uploads/pdfs/springer2019_elhilali.pdf)
19. Modulation statistics of natural soundscapes - bioRxiv, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2025.03.04.638661v1>
20. Application Note Multi-Tone: Testing, Theory and Practice - Electrometric, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://electrometric.com/wp-content/uploads/2020/10/AppNote71-Multi-Tone-Testing-Theory-and-Practice.pdf>
21. Clock drift estimation and compensation for asynchronous impulse response measurements - Microsoft, 1月 1, 2026にアクセス、  
[https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2017/03/Clock\\_drift\\_estimation\\_HSCMA\\_2017.pdf](https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2017/03/Clock_drift_estimation_HSCMA_2017.pdf)
22. Clock Drift Correction - Focus Fidelity, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.focusfidelity.com/clockdriftcorrection>
23. How to calculate sound card clock drift? - audio - Stack Overflow, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://stackoverflow.com/questions/15727333/how-to-calculate-sound-card-clock-drift>
24. Help with resampling algorithm implementation - Signal Processing Stack Exchange, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://dsp.stackexchange.com/questions/93308/help-with-resampling-algorithm-implementation>
25. Relationship between sensitivity to temporal fine structure and spoken language abilities in children with mild-to-moderate sensorineural hearing loss - PMC - NIH, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7613189/>
26. Temporal envelope and fine structure - Wikipedia, 1月 1, 2026にアクセス、  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Temporal\\_envelope\\_and\\_fine\\_structure](https://en.wikipedia.org/wiki/Temporal_envelope_and_fine_structure)
27. DIM 30 and DIM 100 Measurements per IEC 60268-3 with AP2700 | Audio Precision, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.ap.com/news/dim-30-and-dim-100-measurements-per-iec-60268-3-with-ap2700>
28. Audio Precision SYSTEM 2 Datasheet - Test Equipment Solutions, 1月 1, 2026にア

セス、

<https://www.testequipmenthq.com/datasheets/AUDIO%20PRECISION-SYSTEM%202-Datasheet.pdf>

29. Practical Techniques to Avoid Instability Due to Capacitive Loading - Analog Devices, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/techniques-to-avoid-instability-capacitive-loading.html>
30. Measuring Power Amplifiers with Reactive Loads | Audio Precision | The Global Leader, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.ap.com/news/measuring-power-amplifiers-with-reactive-loads>
31. fixing sample rate error/mismatch - DSPRelated.com, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://www.dsprelated.com/thread/7564/fixing-sample-rate-error-mismatch>
32. How to re-sample an audio signal | The Rational Audiophile - WordPress.com, 1月 1, 2026にアクセス、  
<https://therationalaudiophile.wordpress.com/2018/02/22/how-to-re-sample-a-signal/>