

6.5 周期ベース (Period Based) の時間スケールでのバースト減衰 (Burst Decay)

6.5.1 従来のサインバーストテスト

サインバースト減衰応答の観測は、共振システムの過渡動作を分析するためのよく知られた手法です[46]。

N サイクルの成形正弦波バースト (図 6.24) を使用して、一定の相対帯域幅 $\Delta f / f_{0i}$ でさまざまな周波数 f_{0i} で DUT を励起します。システム応答のエンベロープが観測され、バースト減衰パターンへの洞察が得られます。

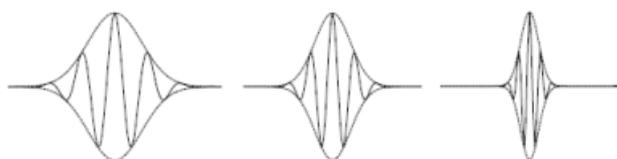


図 6.24 ガウスウィンドウで成形された正弦バースト (エンベロープとして表示)。すべての周波数で一定のサイクル数により、一定の相対帯域幅が保証されます。

図 6.25 は、小型スピーカークの形状正弦波バースト減衰応答のエンベロープを示しています。ウォーターフォールグラフは、バースト正弦周期 (t/T) で表される周波数と時間の関数としてバースト応答エンベロープのレベルを示します。

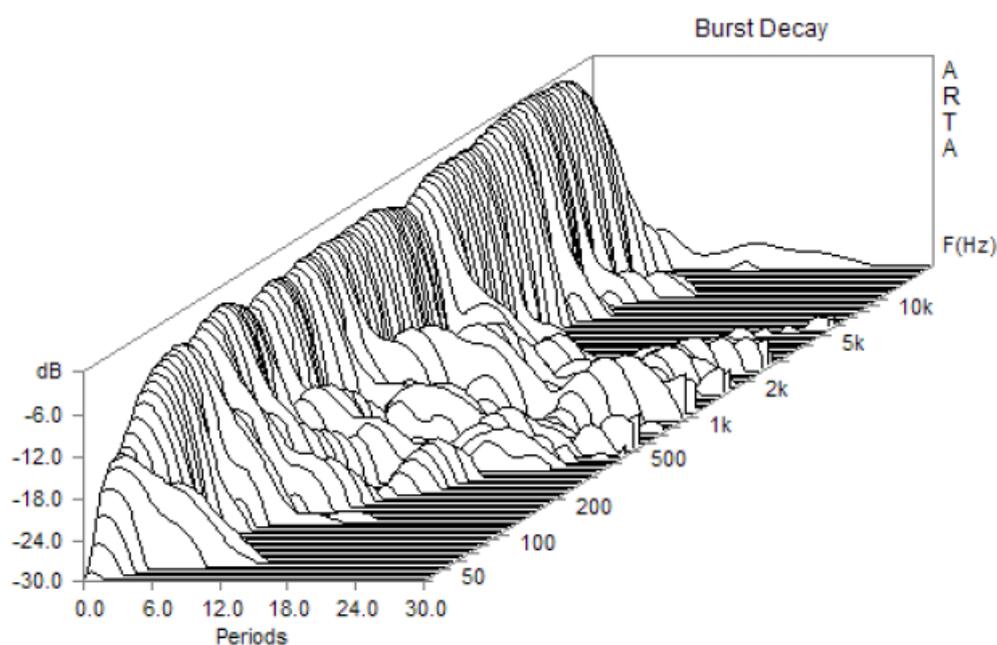


図 6.25 小型スピーカークの成形正弦波バースト応答減衰のエンベロープ

6.5.2 周期ベースの時間スケールの重要性

周期ベースの時間スケールでバースト応答エンベロープを観察することの重要性は、次の理由で示されます。

すべての自然のシステムには、ある種の共鳴があります。

たとえば、2次ローパスフィルタには次の伝達関数があります

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{1}{1 + sT/Q + s^2T^2}$$

ここで、 ω_n は自然なシステム共振周波数 ($T = 1/\omega_n$)、 ζ は減衰係数、 $Q = 1/(2\zeta)$ は Q 値です。フィルタのインパルス応答は、次の減衰正弦関数の形をとります。

$$h(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n t \sqrt{1-\zeta^2}), \quad t > 0$$

実際のエネルギー減衰は周波数 ω_0 に現れます。 $\omega_0 = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$.

$\zeta < 1$ ($Q > 0.5$) の場合、システムに共鳴があることがわかります。このとき、応答は周期的に減衰する関数です (ω_0 は実数)。

より高い減衰の場合、 $\zeta \geq 1$ ($Q \leq 0.5$) の応答は周期的ではありません (ω_0 は虚数)。

スピーカーのような複雑なシステムを分析すると、ハイパス、ローパス、およびオールパスフィルタ、これらすべての共鳴が、インパルス応答のエンベロープ (減衰曲線) で表される、同じ減衰パターンを持っていることを示すことができます。

$envelope(h(t)) = e^{-\zeta\omega_n t}$, or in the logarithmic form:

$$\ln[envelope(h(t))] = -2\pi\zeta f_n t = -\pi f_n t / Q$$

最後の式は、周期 ($t/T_n = t/f_n$) を横軸としたグラフにおいて、単一の共鳴バーストエンベロープの対数が周期の数に比例し、比例係数が共鳴減衰に等しいことを示しています。

周期ベースの時間スケールのこの特性は、フライヤー氏とトール氏の心理音響研究の結果と一致しています[41]。

つまり、彼らは、人間の知覚システムがすべての周波数で同じ Q ファクターを持つ共鳴に同様の重みを与えることを示しました。

(訳者注：周波数が高くなると、同じ周期での減衰時間（例えば減衰するのに必要な 5 波長分の時間）は短くなります。しかし、聴感において重要なのは減衰にかかる時間ではなく、減衰の度合いを示す Q 値であることが、フライヤー氏・トール氏の研究で明らかになっています。そのため、様々な周波数における共振の大きさを比較する際は、横軸を周期 (period) とするバースト減衰 (Burst Decay) グラフで見ると解釈しやすくなります。)

注：整形された正弦バーストに対するシステムの応答には、立ち上がり時間と減衰時間の 2 つの特徴的な時間領域があります。もう少し分析すると、減衰エンベロープの対数が上昇エンベロープの対数よりもはるかに長く続くことが示されます。これが、バースト減衰エンベロープの観察のみに関心がある理由です。

6.5.3 バースト減衰 (Burst Decay) エンベロープの高速推定のためのウェーブレット解析

バースト減衰パターンの直接測定には多くの時間が必要です。すべての周波数について、正弦バースト応答を個別に生成して測定する必要があるためです。

さまざまな周波数でバースト減衰エンベロープを取得するためのより高速な方法は、測定されたインパルス応答を使用し、それを整形された正弦バースト信号で畳み込むことです。これによりバースト応答が得られます。バースト減衰エンベロープを取得するには、ヒルベルト変換を使用できます[47]。

ARTA はより効率的な推定方法を使用しています。複雑なモーレットウェーブレット解析信号は、システムのインパルス応答との畳み込みで使用されます。ウェーブレットスカログラムとしても知られるその応答の大きさは、成形されたバースト応答の減衰形状を表します。

複雑なモーレットウェーブレット解析信号は、次のように定義されます。

$$w(t) = e^{-t^2/\tau^2} e^{j\omega_0 t} = e^{-t^2/\tau^2} (\cos(\omega_0 t) + j \sin(\omega_0 t))$$

これは、ガウスウィンドウで変調された単なる余弦 (+正弦) 関数です。

モーレットウェーブレットのフーリエ変換は次のようになります。

$$W(\omega) = e^{-(\omega-\omega_0)^2 \tau^2/4} = e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2 \tau^2}{4}}$$

それはまた、ガウスウィンドウの形をしています。

$W(f)$ の相対 (-3dB) 帯域幅は次のようになります。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{2.3548}{\omega_0 \tau}$$

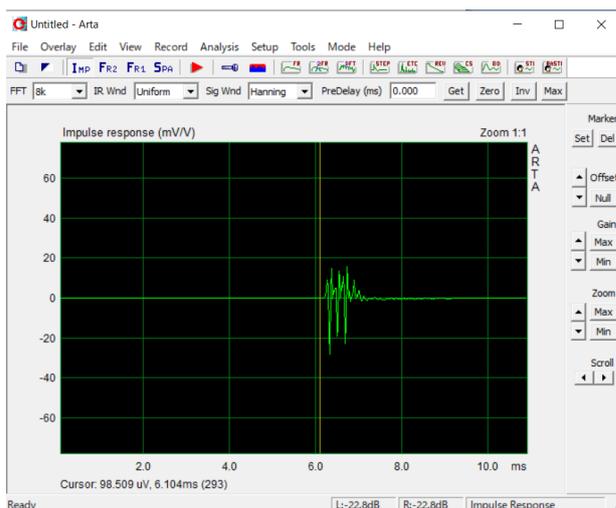
ARTA では、ユーザーは 1/3 および 1/6 オクターブの相対帯域幅を選択できます。

6.5.4 バースト減衰 (Burst Decay) グラフを取得するための手順

ARTA には、次の 3 種類のバースト減衰グラフを表示できます。

- Waterfall_F は、CSD グラフに似ていますが、周期ベースのバースト減衰スペクトル 3D グラフです。
- Waterfall_P は、図 6.25 に示すバースト減衰エンベロープグラフです。
- Sonogra は、色付きの 2D バースト減衰グラフです。

これらのグラフを取得するには、ユーザーは最初に PIR ウィンドウでインパルス応答のピークを見つける必要があります。その前にカーソルを置きます (ピークの位置の前の 250 サンプル未満のあるポイント)。



応答が始まる少し前の場所を左クリック

次に、メニューコマンド「分析->バースト減衰 (Analysis->Burst Decay)」を選択、またはツールバーアイコン  をクリックすると、図 6.26 に示す「Burst Decay Setup」ダイアログボックスが開きます。

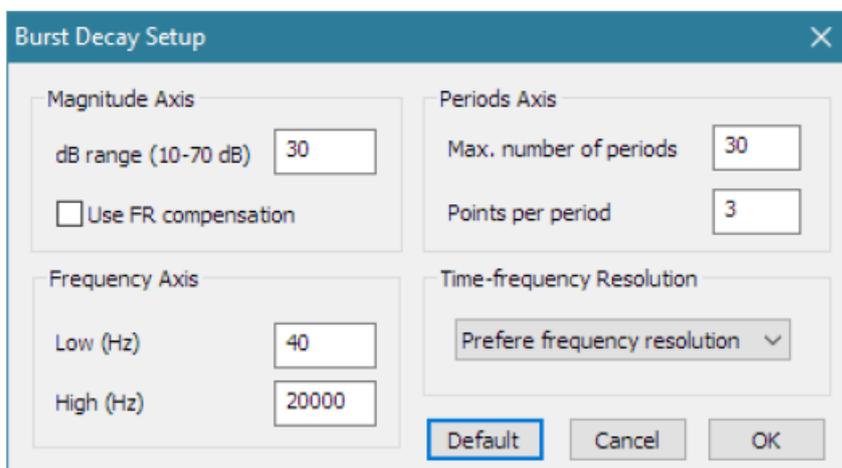


図 6.26 ダイアログボックス ‘Burst Decay Setup’

このダイアログボックスには、以下の設定ができます。

Magnitude Axis セクション :

dB 範囲 (10~70 dB) : 振幅範囲 (−0dB までの減衰を見るか) を入力します。

※訳者注 : 通常、20~40dB が推奨。

FR 補正を使用 : -FR 補正を使用するかどうかを選択します。

Periods Axis セクション :

Low (Hz) : -最低バースト周波数を入力します。(40 Hz 未満の値は、はるかに長い計算時間になります) ※訳者注 : 20Hz で通常問題ありません。

High (Hz) : -最高のバースト周波数を入力します。(最大周波数は $f_s / 2$ より少なくとも 1/3 オクターブ下) ※訳者注 : 20,000Hz で通常問題ありません。

Periods Axis セクション :

Max. number periods : 減衰周期の最大数 (20~60) を入力します。

Points per period : -周期あたりの減衰ポイントの数を入力します (1~10)。

Time-frequency resolution セクション :

プルダウンで優先する解像度を選択します。

Prefer time resolution (時間軸 解像度優先)

-バースト帯域幅が 1/3 オクターブに近い分析を設定します。

Prefer frequency resolution (周波数軸 解像度優先)

-バースト帯域幅が 1/6 オクターブに近い分析を設定します。

Default ボタン : -デフォルト値を設定します。

OK ボタン : バーストディケイウィンドウを開きます。

[OK]ボタンを押すと、ウェーブレット変換の計算が開始されます。これは 1 から数回続く場合があります。

コンピュータの計算速度と選択した最低バースト周波数に応じて、秒数程度の計算が行われます。その後、次のようなバーストディケイウィンドウが表示されます(図 6.27 を参照)。

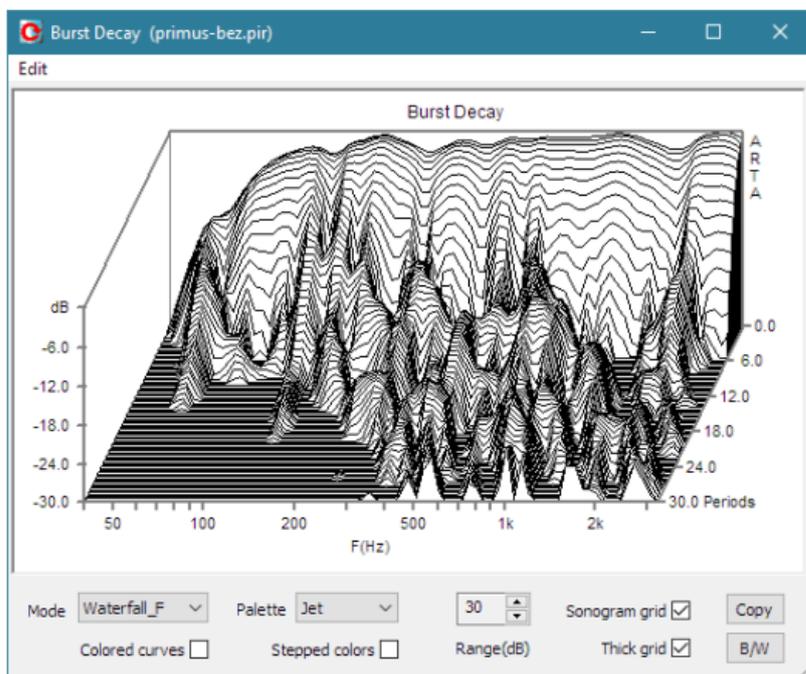


図 6.27 Burst Decay ウィンドウ。グラフは、小型モニタースピーカーのバースト減衰を示しています。バースト周波数分解能は 1/6 オクターブです。

Burst Decay ウィンドウには、グラフ操作に次のコントロールがあります。

Mode : -Waterfall_F、Waterfall_P、または Sonogram の グラフ種類を選択します。

Palette : いくつかのカラーパレット (ジェット、グレー、銅、およびクール) から選択します。

Colored curves : -色付き (または単色) のウォーターフォールグラフを選択するためのチェックボックス。

Grid : - Sonogram グラフ表示において、軸をグラフ中に表示することができるチェックボックス。

Stepped colors : -チェックボックスをオンにすると、ステップ (または段階的な) カラー表示になります (図 6.22 および 6.23 を参照)。

Range (dB) : 表示グラフの縦軸を 5~70dB 幅で変更できます。

※訳者注 : 通常は 20~40dB 程度で使います。70dB 程度の広い範囲表示は、下記の注意点があります。

Copy ボタン : -現在のグラフをクリップボードにコピーします。

B/W ボタン : -黒または白のグラフの背景色を設定します。

「Range (dB)」設定に関する注意 :

ARTA は 70 dB の減衰範囲を示すことができますが、いくつかの予防措置が必要です。

・ナイキスト周波数ではガウスウィンドウが消えないため、エイリアシング効果はナイキスト周波数 $f_s / 2$ より 1 オクターブ低いバースト周波数で発生する可能性があります。

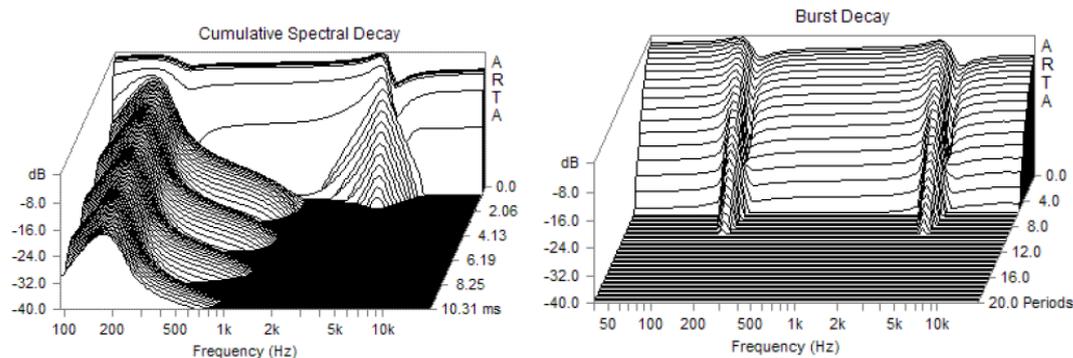
・低い周波数マージンが 50Hz 未満で、記録されたシーケンスが 64k より短い場合、インパルス応答の切り捨てにより、50 dB 未満のレベルで 20~50Hz の範囲でアーティファクトが発生する可能性があります。20 Hz でフルダイナミックレンジを取得するには、シーケンス長 128k 以上のインパルス応答を記録することをお勧めします。

6.5.4 バースト減衰 (Burst Decay) グラフと CSD グラフの比較

スピーカーの設計者は、主に「CSD」と「バースト減衰」グラフを使用して共振を分析または検出します。これらの2つのグラフは、異なる時間スケールと異なる周波数分解能で共振パターンを示しているため、直接比較することはお勧めできません。すべてのグラフは、独自のメリットによって分析する必要があります。

ここでは、①異なる共振パターン ②反射波を含むパターン の2つの例を用いて、「CSD」と「バースト減衰」を比較します。

最初の例では、CSD とバーストディケイのウォーターフォールグラフ (図 6.28 と 6.29) は、200Hz と 5kHz に2つの共振があり、両方とも $Q = 4$ の共振系です。



(左) 図 6.28 CST(Cumulative Spectral Decay)

(右) 図 6.29 Burst Decay

Burst Decay は両方の共振に等しい形状を与えます。両方の共振の Q 値が同じであるため、(聴感では2つの共振は同じ強度として感じられます。そのため、これらを等しく描画できる) Burst Decay は共振の音響評価に非常に役立つ手法だと言えるでしょう。

測定されるシステム応答に「反射音」が含まれていると、共振の検出が難しくなります。その場合、Burst Decay のような周期ベース (period-based) のグラフは図 6.30 に示されるようないくつかの「不自然な」パターンを示しています。

図 6.30 では、単一反射を含む理想的なインパルス応答のバースト減衰グラフを示しています。反射音の遅延時間は $t_d = 20\text{ms}$ で、反射音の振幅は理想的な応答のレベルより -10dB 低くなっています。

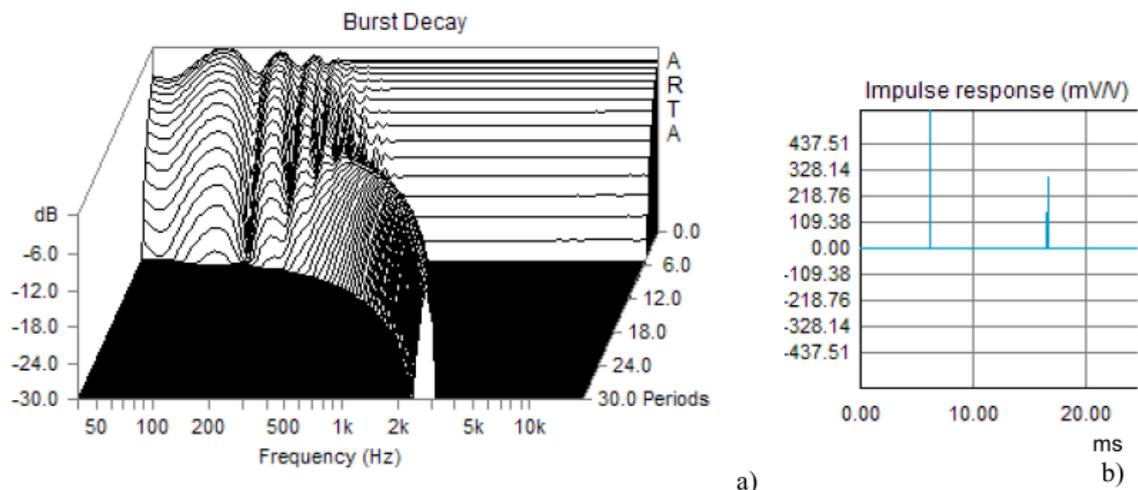


図 6.30 (a) バースト減衰および (b) 単一反射による広帯域インパルス応答

図 6.30 の減衰パターンは、より高い周波数で右にシフトしています。低周波数では、減衰パターンは低 Q 共振の減衰パターンに似ています。この説明は簡単です。

すべての反射は、次の式で示すように、反射遅延とバースト周波数の積に等しいいくつかの周期 (n_p) で示されます。

$$n_p = f t_d$$

低い周波数では、(f が小さいため n_p は小さく、) 減衰パターンは遅延のない応答の応答で不鮮明になります。より高い周波数では、反射は周波数 f に比例するいくつかの周期 (n_p) で局所化されます。これにより、減衰パターンが右にシフトします。

この **Burst Decay** 機能には良い点と悪い点があります。 **Burst Decay** は、低周波数での低 Q 共振検出を覆い隠すので、それは悪いことです。反射の減衰パターン (右にシフト) を共振の減衰パターン (海峡の周波数線に続く) から分離するため、より高い周波数領域の解析に適しています。

反射により、CSD ウォーターフォールグラフも不明瞭になります。図 6.31 は、先に示した単一反射を使用した理想的な応答の CSD グラフを示しています。

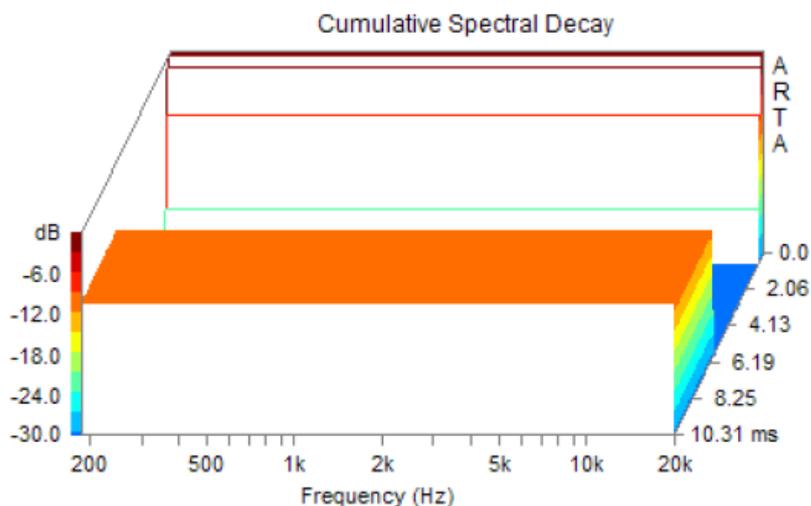


図 6.31 単一反射による理想的なインパルス応答の CSD ウォーターフォールグラフ

見てわかるように、(反射波の描画で、反射波の到達以降のグラフ下部が隠れてしまうため) 反射波は CSD ダイナミックレンジを反射波のレベルまで低下してしまいます。

この反射を除去する唯一の方法は、(疑似無響室測定と同様の手法で) 反射を含むインパルス応答の一部をゲートアウトすることです。実際には、反射をゲートアウトすることは、CSD グラフを作成するための通常の最初のステップです。

バースト減衰 (Burst Decay) グラフにおいても、グラフを作成する前に、(反射波を計算範囲から取り除く) ゲーティングをインパルス応答に適用することもできます。その場合、ゲーティングにより、低周波数での有効なバースト減衰周期の数が減少します。一般に、バースト減衰ではゲーティングの使用は推奨されません。

※訳者注：反射波を極力避けられるよう、特に低音域の測定では、マイクをスピーカユニット近傍 (1cm~20cm 程度) にセットして測定すると良いでしょう。

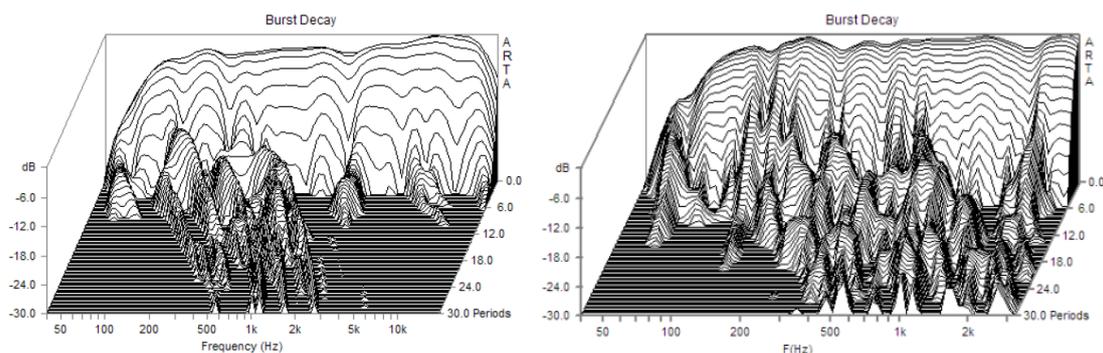
6.5.5 時間-周波数分解能

時間-周波数分解能の設定は、バースト減衰グラフの作成と分析において重要です。

ARTA は、音響基準によって決定される 2 つの解像度を提供します。1/3 オクターブの周波数分解能は、1/6 オクターブ分解能の他の選択肢より優れた時間分解能を提供します。時間分解能の違いにより、通常、減衰パターンが異なります。

図 6.32 は、1/3 オクターブの周波数分解能を持つ小型モニタースピーカーのバースト減衰を示しています。

一方で、図 6.27 は同じスピーカーの応答を示していますが、1/6 オクターブの解像度です。この場合、遅延の減衰パターンと共振の減衰パターンを区別するのに役立つはるかに優れた時間分解能があることが明らかになります。



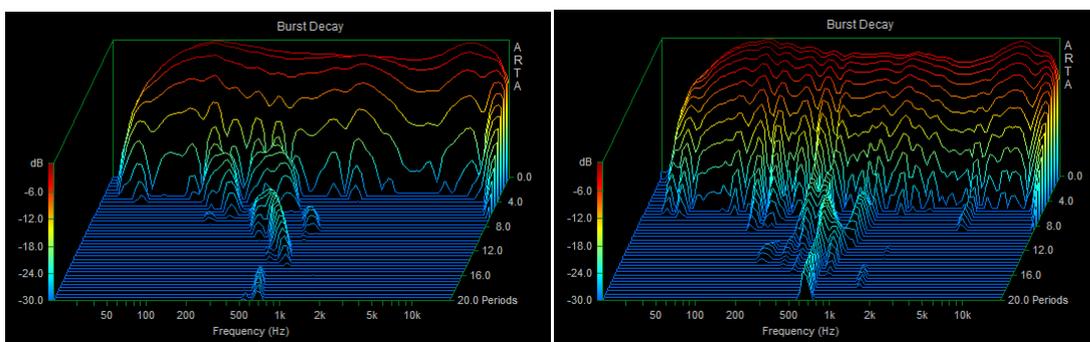
(左) 図 6.32 1/3 オクターブ測定 (時間軸 解像度優先)

(右) 図 6.27 1/6 オクターブ測定 (周波数軸優先)

※訳者注：上記の比較は、0 周期（発音直後）の周波数特性も異なっており、同じスピーカーを異なる環境で測定したものと思われます。

以下に示すグラフは、訳者が小型 2way スピーカー「SOLAMk2」をバッフルから 20cm の距離で測定した同一波形データを用いて、時間優先 or 周波数優先でそれぞれ Burst Decay グラフにしたものです。

トール氏の著書「Sound reproduction」にあるように、通常の周波数特性のピークディップは、共鳴によるものと解釈できます。1/6 オクターブ測定では、0.0 Periods の周波数特性の凹凸から伸びる峰のようなピーク（=共振）がより見やすいと思います。



- (左) 1/3 オクターブ測定 (時間軸 解像度優先)
- (右) 1/6 オクターブ測定 (周波数軸 解像度優先)