第１版 2010 年 10 月
第２版 2011 年 ９月

『連載ラウドネス講座』

第５回　トゥルーピークとサンプルピーク（第２版）
＝　ピークレベルのサンプリング誤差を考える　＝

JPPA 理事 オーディオ部会基準小委員会　丸谷　正利
MARUYA, Masatoshi

今回は目（耳）にする機会が多くなった「トゥルーピーク（True peak）」と「サンプルピーク（Sample peak）」ついて考えてみます。トゥルーピークについては本講座の第１回でも触れましたが、ITU-R BS.1770 が広まるにつれて注目されるようになりました。日本のラウドネスに関する規定（ARIB TR-B32 及び民放連技術規準 T032）でもトゥルーピークについて触れています。

尚、本稿では、「サンプル」と「サンプリング」を混在使用していますが、どちらも同じ意味で使用しています。慣例に従った使い方をしているつもりですが、筆者の判断で使用している場合もあることをお断りしておきます。

1. トゥルーピークレベルの定義

トゥルーピークレベルは ITU-R BS.1770 で定義されています。そこでは「連続した時間軸における信号波形の、正あるいは負の最大値」となっており、“連続した時間軸”つまりアナログ信号の正又は負の最大値をトゥルーピークレベルと定義しています（デジタル化した信号波形は「不連続な時間軸」になります）。

ITU-R BS.1770 では、このトゥルーピークレベルを検出するために 192kHz（48kHz の 4 倍）のオーバーサンプリング処理を行うことを推奨しています。したがって、ITU-R BS.1770 に準拠した“トゥルーピークメータ”が表示するピークレベルは、オーバーサンプリングで補間した“サンプルピークデータ”のひとつであり、厳密に言えば、物理的な“トゥルーピークレベル”ではありません。便宜上、トゥルーピークメータの表示値を「トゥルーピーク」あるいは「トゥルーピークレベル」と呼びますが、その意味するところを理解しておく必要があります。

2. サンプルデータとトゥルーピーク

アナログ信号をリニア PCM A/D 変換（以後、単に A/D 変換と呼ぶ）して得られた符号化データを、サンプルデータ（あるいはサンプリングデータ）と呼んでいます。48kHz サンプリングの場合は、アナログ信号を 20.83･･･μs 毎に量子化・符号化しますが、デジタル表示のメータは、この値を基にレベル表示を行うので「サンプルピークメータ」と呼ばれています。

先ほど述べたように、トゥルーピークメータで使用する表示データもサンプルデータのひとつですが、実際に入力信号をサンプリングしたものではなく、A/D 変換で得られたサンプルデータを補間して作られた疑似データを含んでいます（8 項参照）。

図 2－1 及び図 2－2 にアナログ信号とサンプルデータ、オーバーサンプルデータ（トゥルーピークメータ）の関係を示します。

図 2－1 の「True-peak」はアナログ信号のピークレベル、「48kHz Sample」はサンプルデータのレベル、「x4 Over Sample」は 4 倍オーバーサンプルデータのレベル（トゥルーピークメー

タのレベル）になります。トゥルーピークメータを使用することで表示誤差が小さくなることが分かります。

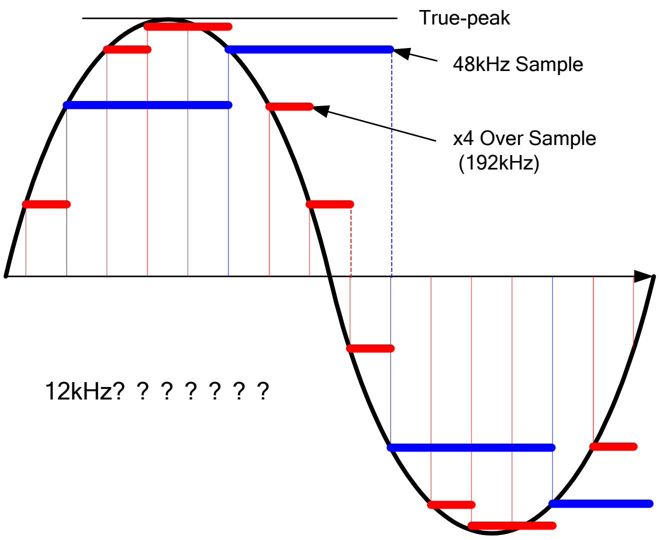

図 2－1　サンプリングタイミングとピークレベルの関係

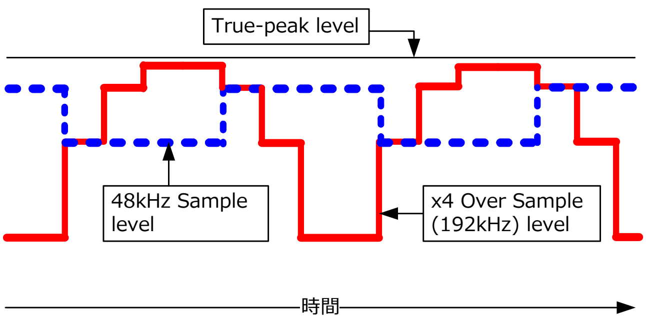

図 2－2　48kHz と 4 倍オーバーサンプリングのレベルメータ動作例

3. サンプルピークレベルの誤差

アナログ信号をデジタル信号に変換すると、原理的にはどのような周波数のトゥルーピークレベルでもサンプリング誤差を生じる可能性があります。しかし、実用的（ここでは 1dB 以下の誤差とします）には、ほとんどの周波数でサンプリング誤差が問題になることはありません。

音響信号は複雑な正弦波の組み合わせから成り立っています。一般的には正弦波を A/D 変換すると、1 サイクルにおけるサンプリング位置が時間経過とともに変わります。つまり、サンプルデータは常に変化するので、あるサイクルで最大誤差を生じても、次のサイクルでは微小誤差になるという状態を繰り返し、常に最大誤差を生じるタイミングにはなりません。

しかし、ある特定の周波数ではサンプリング位置が固定される（誤差の値が変わらない）ので、これが問題となります。ある特定の周波数とは「サンプリング周波数÷入力周波数＝整数倍」という条件が成立した周波数になります。

整数倍の周波数では、1 サイクルに対するサンプル位置が固定されるため、その誤差（サンプルデータ）も一定となります。これを「整数倍関係の周波数」と呼ぶことにします。

一方、1 サイクル毎にサンプルポイントが移動する周波数は「非整数倍関係の周波数」と呼びます。

ITU-R BS.1770 には最大誤差を求める計算式が示されていますが、この式は半サイクルの最大誤差を求めているので、先に述べた「非整数倍関係」及び後ほど述べる「奇数倍関係」の周波数では正しい最大誤差を求めることができません。

例えば、この式を使って周波数 20kHz に対する最大誤差を計算すると 11.74dBFS という大きな値になりますが、実際のサンプルピークメータでは 0.3dBFS 程度の表示になります。

20kHz とサンプリング周波数 48kHz の関係は 2.4 倍（非整数倍）なので、1 サイクル以上の波形では、ある瞬間は 11.74dBFS の誤差が発生しても、時間経過と共にその誤差は小さくなり、サンプルピークメータのような表示になります（詳細は５項参照）。

4.　非整数倍関係と整数倍関係の周波数

サンプリング周波数と入力周波数の関係は「非整数倍」と「整数倍」に分けることができます。それでは、どのような周波数が非整数倍、あるいは整数倍になるのでしょうか。

簡単に言うと「サンプリング周波数を整数（2,3,4,…、1 はサンプリングの定理より使用しません）で割った周波数が「整数倍」の周波数で、それ以外の周波数は「非整数倍」の周波数になります。

サンプリング周波数 48kHz の場合を例に取ると「48000÷整数」で得られる周波数（24k/16k/12k/9.6k/8k/…など）が整数倍周波数になります。周波数が低くなるほど整数倍関係に該当する周波数が多くなりますが、低域周波数では 1 サイクルのサンプリング回数が多いので、大きな誤差は生じません。最大誤差 1dBFS 以下と言う条件で考えると、6kHz（0.688dBFS の誤差）以下の周波数は、サンプリング誤差を気にする必要はないでしょう。

5.　非整数倍の周波数（非同期サンプリング）

すでに述べたように、サンプリング周波数と非整数倍の関係にある周波数では、サンプルポイントが固定されない（非同期サンプリング：実際にはあるサンプリング回数ごとに同じタイミングが繰り返される）ので、ある瞬間は大きな誤差を生じても、時間経過と共にその誤差は小さくなります。つまり、ある瞬間最大誤差を生じても、時間経過とともにその誤差は小さくなり、ある時点でトゥルーピークレベルに対し誤差の少ないサンプリングが可能となります。

図 5－1 を見てください。図は非整数倍周波数 15kHz（3.2 倍の関係）を 48kHz でサンプリングした例です。番号はサンプリングの順番です。1 から 7 の後は折り返して 8 から 13 までのタイミングとなります。

図を見て分かるように、スタート時点の 1、2 番サンプリングはトゥルーピークがその中間にあり、最大誤差 5.1dBFS を生じています。（これは ITU-R BS.1770 の計算式で求めた最大誤差と同じです）。しかし、次のサンプルポイント 3 番ではトゥルーピーク付近をサンプリングしています。

また、次のサイクル（4、5、6、7 番）ではサンプルポイントが移動し、5 番ではトゥルーピーク付近のサンプリングが行われています。3 サイクル目、4 サイクル目でも同様です。ある半サイクルで最大誤差が発生（サンプルポイント 1、2）しても、次の半サイクルではトゥルーピークレベル付近を捉えていることが分かります。

15kHz の場合、4 サイクルの区間でかなり誤差の小さいサンプルピークデータ（0.2dBFS 前後）を得ることができます。

このように非整数倍関係周波数の場合は、数サイクル程度の継続時間があればトゥルーピークもしくはそれに近いサンプルデータを得ることができます。したがって、通常のピークメータでも誤差の小さい表示を得ることが可能になります。

図 5－2～図 5－5 に非整数倍関係周波数である 15kHz と 20kHz のサンプリング波形（サンプル値を接続した波形）を示します。図の位相差とは、

非測定周波数とサンプリング周波数のスタート時点の位相差です。

波形からわかるように、誤差が発生しない場合も、最大誤差が発生する場合も、サンプリングが進むにつれて値が変化し、結果としてサンプルピークメータの誤差は 0.2～0.3dBFS 程度です。

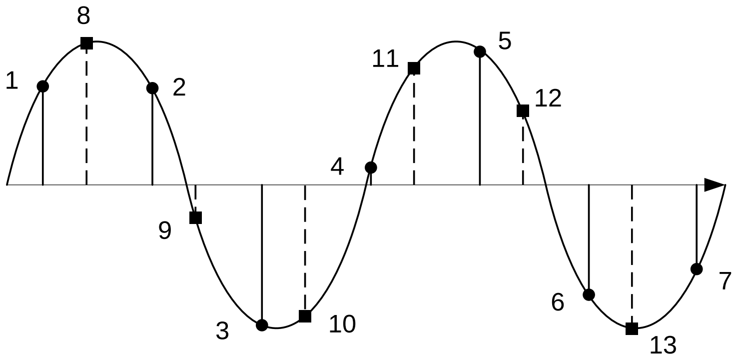

図５－１　非整数倍周波数（15kHz）のサンプリングタイミング
（この場合は４サイクルで 13 回のサンプリング）

【図５－１の説明】

サンプリング周波数が 48kHz の場合、15kHz 正弦波では１サイクルのサンプリング回数は固定値とならず、３回の場合と４回の場合がある。図から分かるように１サイクル内のサンプルポイントは少しずつ移動する（非同期状態）ので、ある時点では最大誤差を発生しても時間経過と共にその誤差は小さくなる。15kHz ではサンプリング開始のタイミング（位相差 0゜）によってはトゥルーピークを捕らえることができる。このように、サンプリング周波数と同期しない非整数倍周波数では、1dBFS の最大誤差マージンを見ればほとんど問題にならない。

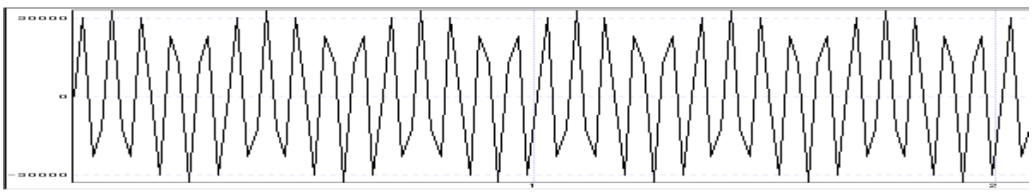

図５－２　15kHz／0dBFS／位相差 0°（サンプルメータ表示=0.0dBFS）

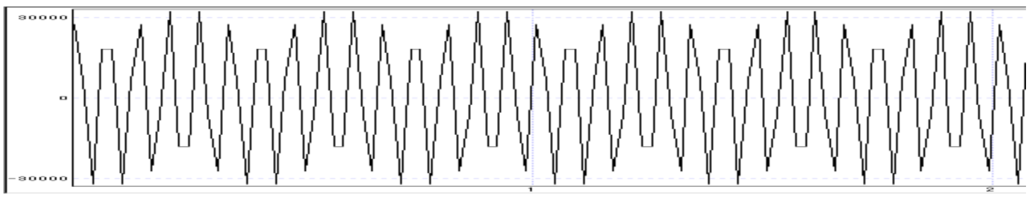

図５－３　15kHz／0dBFS／位相差 33.75°（サンプルメータ表示=－0.2dBFS）

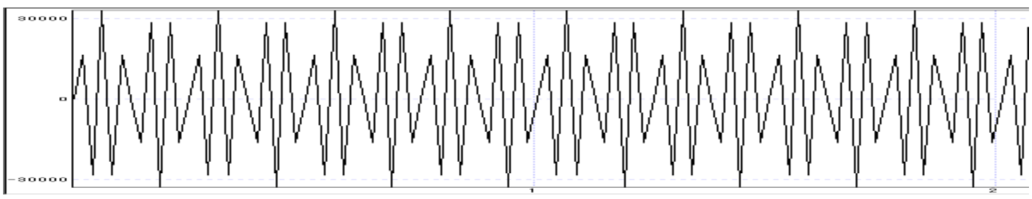

図５－４　20kHz／0dBFS／位相差 0°（サンプルメータ表示=0.0dBFS）

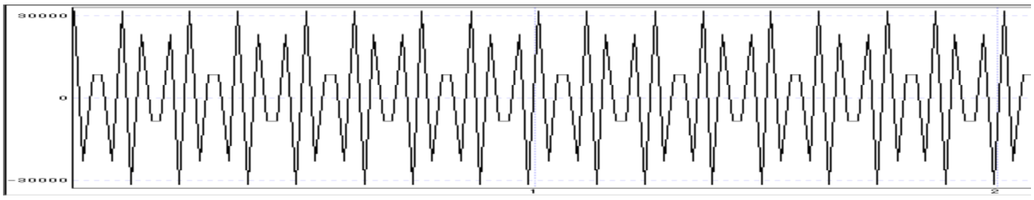

図５－５　20kHz／0dBFS／位相差 15°（サンプルメータ表示=－0.3dBFS）

6. 整数倍の周波数（同期サンプリング）

サンプリング周波数と整数倍関係になる入力周波数は、1 サイクルの間に行われるサンプリングが、常に同じ回数（例えば 12kHz では 4 回）なので、サンプルポイントも固定されることになります。つまり、一度サンプルポイントが決まると常に同じ位置がサンプリングされます（サンプルデータが同じ値になる）。これをサンプリング周波数と入力周波数が同期した状態と呼ぶことにします。

5 項で述べたように、非整数倍関係周波数の場合は、時間経過とともにサンプルポイントが移動するので、トゥルーピークレベル付近をサンプリングすることが可能でした。しかし、整数倍関係周波数では、時間が経過してもサンプルポイントが移動しないので、トゥルーピークに対し常に同じ誤差を生じることになります。これが、整数倍周波数と非整数倍周波数の違いです。

偶数倍と奇数倍について

一般的に整数倍関係では、周波数が高くなるほどサンプルピーク誤差も大きくなりますが、周波数が高くなっても、それより低い周波数より最大誤差の値が小さくなる場合があります。その違いは、入力周波数とサンプリング周波数の倍数関係が偶数なのか奇数なのかによって生じます。

音響信号では偶数倍よりも奇数倍の方が、最大誤差が小さくなります。例えば、16kHz（奇数倍）と 12kHz（偶数倍）を比較すると、通常 16kHz の方が最大誤差は大きくなるはずですが、1 サイクル以上の信号では 16kHz の方が誤差は小さくなります。これは、入力信号の正側と負側でサンプルリング回数が異なるために生じます。（詳細は図６－１及び図６－４の説明を参照）

図 6－1 は 48kHz のサンプリング周波数と整数倍の関係にある 12kHz 正弦波（4 倍の関係）の最大誤差と最少誤差のサンプリングタイミングを示したものです。

また、整数倍関係周波数の最大誤差を求める場合は、倍数の値が“奇数”なのか“偶数”なのかによって、計算式が異なります（詳細は「解説 1」を参照）。

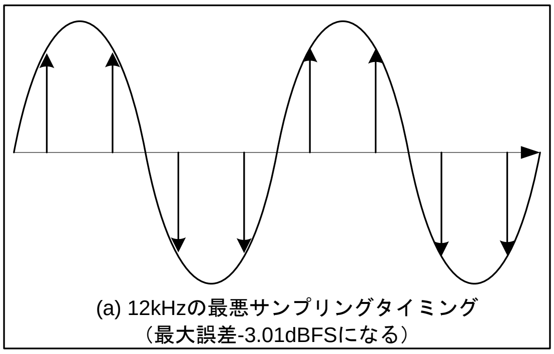

図 6－1(a)　最大誤差タイミング（θ=45°）

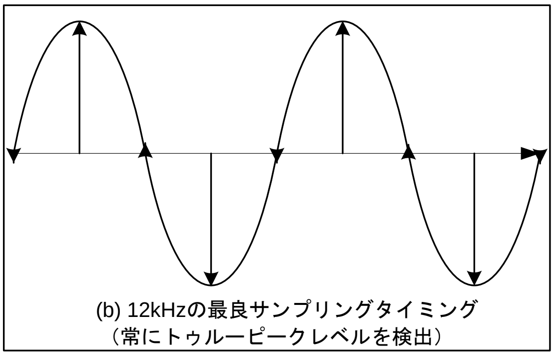

図 6－1(b)　最少誤差タイミング（θ=0°）

図 6－1　偶数倍関係周波数（12kHz）の最大誤差、最少誤差タイミング

【図 6－1 の説明】（図は 12kHz 正弦波（4 倍の関係）であるが、6 倍、8 倍なども同じ。）

偶数倍関係では 0～180°と 180～360°のサンプリング回数が同じになる。サンプリング周波数が 48kHz の場合、12kHz 正弦波では 1 サイクルのサンプリング回数が 4 回となり、毎サイクル同じ場所がサンプリングされる。したがって、その周波数が続く限り誤差の値は変わらない。

図 6－1(a)はトゥルーピークがサンプルポイントの中間に位置した例（位相差 45°）で、このとき最大誤差が発生する。

図 6－1(b)はトゥルーピークとサンプルポイントが一致した例（位相差 0°）で、この場合、誤差は生じない。サンプルピークの最大誤差とは(a)の場合を言う。

図 6－2～図 6－3 に偶数倍関係周波数 12kHz のサンプリング波形を示します。図 6－2 は最大誤差が発生する位相差 45°の波形で、図 6－3 は誤差 0dB の位相差 0°の波形です。どちらの波形もサンプルポイントが固定（同期）するため、1 サイクルの波形が同じになっています。

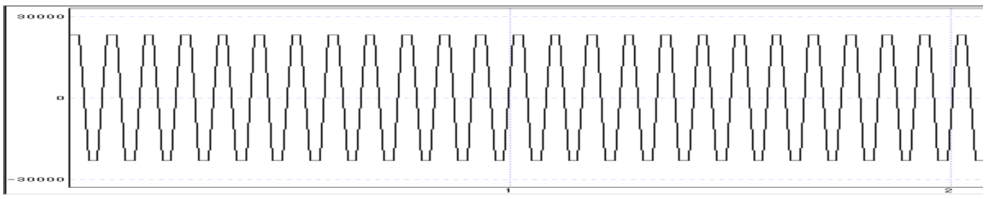

図 6－2　12kHz／位相差 45°のサンプリング波形（正負ともに－3.0103dBFS）

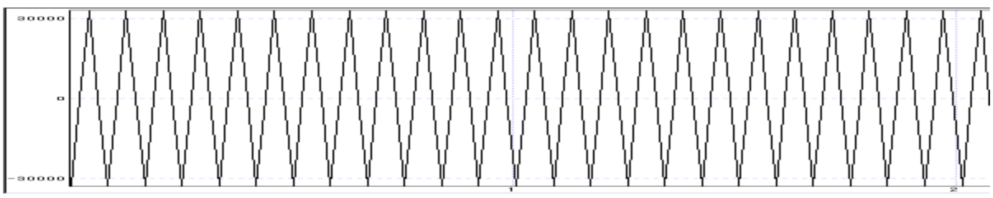

図 6－3　12kHz／位相差 0°のサンプリング波形（正負ともに 0.0dBFS）

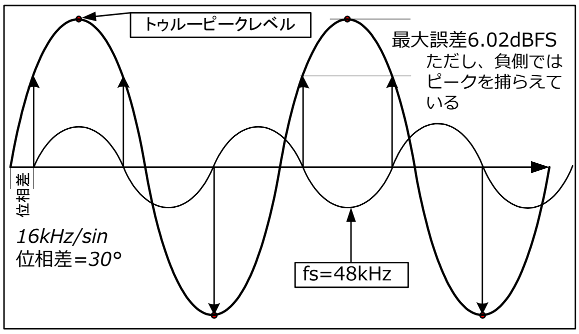

図 6－4(a)　半サイクルの最大誤差（θ=30°）

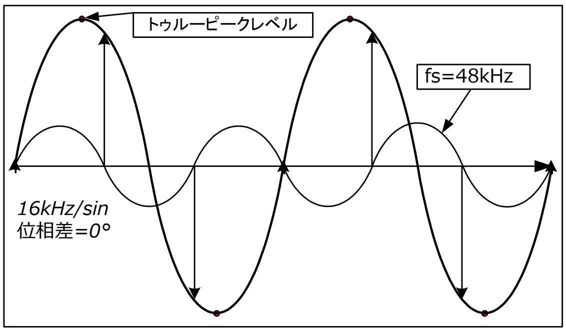

図 6－4(b)　１サイクルの最大誤差（θ=0°）

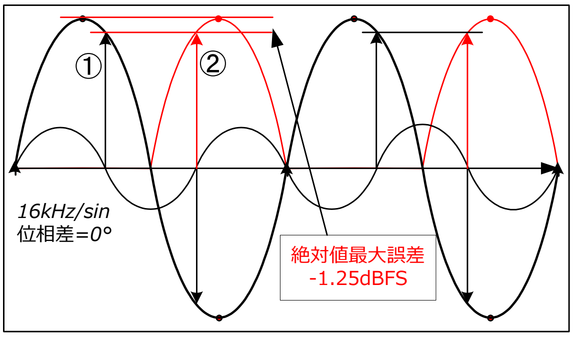

図 6－4(c)　絶対値誤差

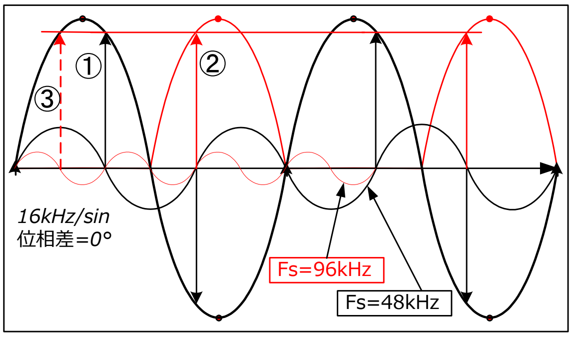

図 6－4(d)　２倍 Fs との関係

図 6－4　奇数倍関係周波数（16kHz）の最大誤差、最少誤差タイミング

【図 6－4 の説明】（図は 16kHz 正弦波（3 倍の関係）であるが、5 倍、7 倍なども同じ。）

奇数倍関係の場合、0～180°と 180～360°ではサンプリング回数が異なる。

図 6－4(a)は半サイクルの最大誤差発生時のサンプリングタイミングを示している。16kHz とサンプリング周波数 48kHz の関係は「cos(π/3)」なので、トゥルーピークを中心に±60°の位置がサンプリングされている。16kHz では、サンプリング周波数 48kHz との位相差が 30°になると、正側はトゥルーピークを中心に同じ値となり、これが半サイクルの最大誤差値（－6.0206dBFS）になる。しかし、負側はトゥルーピークをサンプリングしているので 1 サイクルで考えると測定誤差を生じない。

図 6－4(b)は 1 サイクルの区間で最大誤差が発生するサンプリングタイミングである。入力周波数 16kHz とサンプリング周波数 48kHz の位相差が 0°の時、180°を中心に正負のサンプリング値（絶対値）が等しくなり、1 サイクルの最大誤差として－1.2494dBFS を生じる。

図 6－4(c)は図 6－4(b)の負の半サイクルを正側に折り返したものである。①と②のサンプルポイントは 180°±60°（①は 120°、②は 240°）となり、図 6－4(a)の正側波形と同様の関係になっている。したがって、正側波形のサンプルポイントと負側波形のサンプルポイントの絶対値が同じになることが分かる。この状態からサンプルポイントが少しでも移動すると、①＞②あるいは①＜②の関係になり、誤差は減少する。

奇数倍関係では 180°を中心に正側と負側で θ/2（θ は入力周波数に対するサンプルポイントの移動角度）の位相差が発生する。これは、偶数倍関係の周波数で半サイクルの最大誤差を求める場合と同じ関係である。5 倍、7 倍でも同様で、奇数倍関係の周波数では位相差 0°で最大誤差を生じることになる。

図 6－4(d)に奇数倍関係の最大誤差と 2 倍オーバーサンプリングの関係を示した。図から分かるように、奇数倍関係の最大誤差は、その周波数を 2 倍オーバーサンプリングした時の最大誤差と同じになる。絶対値処理をしているピークメータの場合、12kHz 正弦波で最大誤差が発生し、その値は－3.0103dBFS になる。したがって、－3dBFS のマージンを取ればピークオーバーを防ぐことができる。

図 6－5～図 6－6 に奇数倍関係周波数 16kHz のサンプリング波形を示します。図 6－5 は最大誤差が発生する位相差 30° の波形で、図 6－6 は最少誤差（誤差 0dB、ただし正側半サイクルでは－6.0206dB の誤差が発生）の位相差 0° の波形です。どちらの波形もサンプルポイントが固定（同期）しているので 1 サイクルの波形が同じになっています。

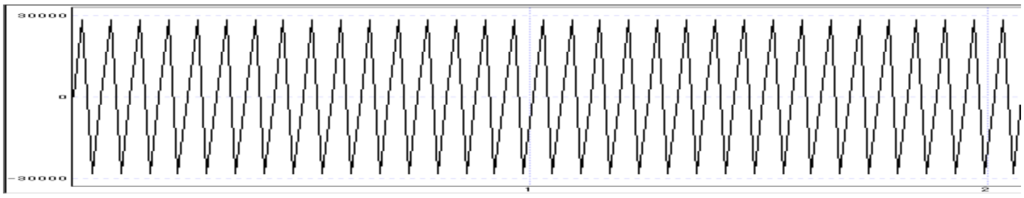

図 6－5　16kHz／位相差 30°のサンプリング波形（正負ともに－1.2494dBFS）

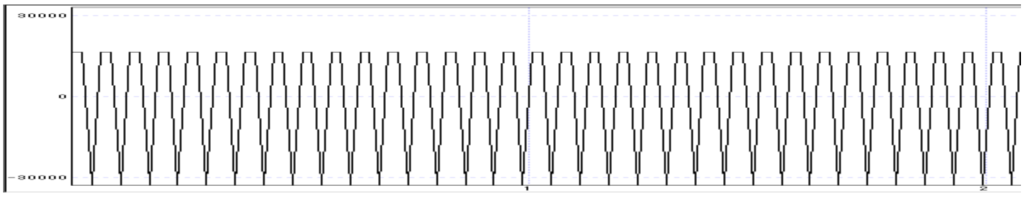

図 6－6　16kHz／位相差 0°のサンプリング波形（正側は－6.0206dBFS、負側は 0dBFS）

7. 整数倍関係周波数の最大誤差

入力周波数とサンプリング周波数の関係から導かれる最大誤差は、巻末の「解説 1」に述べる式で求めることができます。一般的には「解説 1」の偶数倍関係式を用いて最大誤差を求めることが多いのですが、この式は入力周波数の半サイクルについて計算しています。1 サイクルのサンプリング回数が奇数の場合は正しい値を導くことができません。

表 7－1 にサンプリング周波数 48kHz と整数倍関係にある周波数の、「半サイクル」と「1 サイクル」のサンプルピークとトゥルーピークの最大誤差を示します。10 倍以上の関係にある周波数は、その誤差が 0.5dBFS 以下となるので代表例を記載しています。

この表の「True-peak との最大誤差」（ITU-R BS.1770 の maximum under-read）の項は、トゥルーピークに対してサンプルピーク値がどれだけ小さな値になるかを示しています。例えば、サンプルピークメータで 0dBFS を示している 12kHz 正弦波の場合、本当のピークレベルは「+3.0103dBFS」かもしれない（最悪値）ということです。表から分かるように周波数が低くなるにしたがって、トゥルーピークとサンプルピークの誤差は小さくなります。

周波数	48kHz との倍数	半サイクル区間の True-Peak との最大誤差	1 サイクル区間の True-Peak との最大誤差
24kHz	2	-∞(96dB/16bit)	同左
16kHZ	3	-6.0206dBFS	-1.2494dBFS
12kHz	4	-3.0103dBFS	同左
9.6kHz	5	-1.8408dBFS	-0.4359dBFS
8kHz	6	-1.2494dBFS	同左
6.857...kHz	7	-0.9058dBFS	-0.2205dBFS
6kHz	8	-0.6877dBFS	同左
5.333...kHz	9	-0.5403dBFS	-0.1330dBFS
4.8kHz	10	-0.4359dBFS	同左
4kHz	12	-0.3011dBFS	同左
2kHz	24	-0.0746dBFS	同左
1kHz	48	-0.0186dBFS	同左

表 7－1　fs=48kHz 時の最大誤差

サンプリング周波数との関係が奇数倍になる周波数では、半サイクルと 1 サイクル（以上）の測定で、最大誤差が異なることに注意。1 サイクル以上の波形では 12kHz の－3.01dBFS が理論上の最大誤差となる。半サイクルデータのみを使用してレベル表示を行う簡易形式のサンプルピークメータではレベル管理に注意する必要がある。

8. トゥルーピークメータ

これまでの説明で、サンプリング周波数と入力周波数の関係が整数倍になると最大誤差を生じる場合がある、ということが理解できたと思います。サンプルピークメータでフルスケール表示になったとき、実際の入力信号はそれよりも何 dBFS か大きい場合があるのです。

この表示誤差を小さくするにために考えられたのが、ITU-R BS.1770 に記述されている、オーバーサンプリング手法による“擬似的”なトゥルーピークレベル表示を行う「トゥルーピークメータ」です。

ITU-R BS.1770 では 4 倍オーバーサンプリングによるトゥルーピークレベル表示を推奨しています。表示レベルの単位には「dBTP」を用いることになっており、1dBTP は 1dBFS と等しい値になります。

このトゥルーピークメータは、A/D 変換時のサンプリングで捕らえきれなかった、サンプルポイントとサンプルポイントの間のレベルを、オーバーサンプリング処理により補間して、入力信号のピークレベルに近い値を表示できるようにしたものです（図 8－1）。

4 倍オーバーサンプリングを行ったときの最大誤差は 24kHz 正弦波で発生し、その値は 0.6877dB となります。したがって、4 倍オーバーサンプリングを用いたトゥルーピークメータでは「－1dBTP」を最大許容ピークレベルとして運用すれば、オーバーロードの危険を避けることができます。

オーバーサンプリングはサンプリング周波数に対する倍数が大きいほど誤差が小さくなります。D/A 変換の専用 LSI では 64 倍などが使用されていますが、汎用 CPU で処理する場合は、倍数が大きくなると負荷も重くなり処理時間が長くなるなどの問題も発生します。オーバーサンプリングについては解説 2 を参照願います。

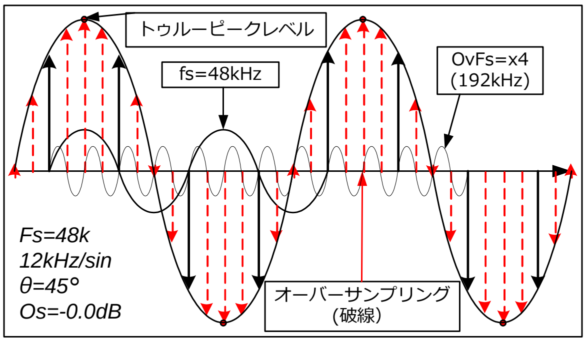

図８−1(a)

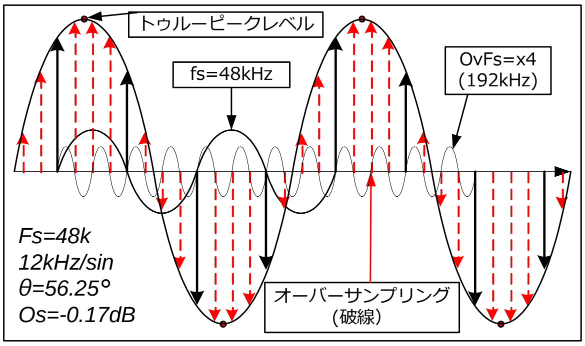

図８−1(b)

図８−１　４倍オーバーサンプリングによるサンプリングデータ補間例

【図８−１の説明】

図 8−1(a)はサンプリング周波数 48kHz 時の、12kHz 正弦波の最大誤差サンプリングタイミング（実線矢印、位相差 45°）と４倍オーバーサンプリング（破線矢印）による補間例である。この例ではオーバーサンプリングによりトゥルーピークを捉えることができているので誤差は発生しない。

一方、図 8−1(b)は位相差が 56.25°になった場合である。このサンプリングタイミングではトゥルーピークが４倍オーバーサンプリングの中央となり、誤差が最大（−0.1685dBFS）となる。

9. サンプルピークメータのマージン

日本でもラウドネスレベルに関する規定が制定されました。2011 年 4 月に ARIB から TR-B32「デジタルテレビ放送番組におけるラウドネス運用規定」が発行され、日本民間放送連盟も T032-2011「テレビ放送における音声レベル運用規準」を制定しています。これらの規定にはトゥルーピークレベルについても記述されており、共に−1dBTP あるいは−3dBFS を運用上の最大ピークレベルとしています。

筆者もこの講座の第 1 回で、サンプルピークメータを用いたレベル管理のマージンは「安全を見て−3dBFS もあれば十分かもしれません」と述べました。この値は理論的には問題のない数値と言えますが、運用上注意すべき点があります。それは、−3dBFS でピークレベル管理を行った場合、トゥルーピークメータによるレベル管理では−1dBTP をオーバーする可能性があることです。

サンプルピークメータで−3dBFS のレベルは、20kHz までの音響信号を考えると、トゥルーピークに対して「0.0103dBFS」のマージンを持つことになります。

一方、トゥルーピークメータの−1dBTP レベルは、トゥルーピークに対して「0.3123dBTP」のマージンです。つまり、−3dBFS のレベルは−1dBTP のレベルより 0.3dB 大きな値となる場合があります。

このため、サンプルピークメータを使用してレベル管理（−3dBFS）を行った番組を、トゥルーピークメータで測定すると−1dBTP を超える場合が考えられます。

どの方式もオーバーロードにはならないので問題はありませんが、気になる場合は、サンプルピークメータでは−4dBFS を最大ピークレベルとして管理すれば、トゥルーピークメータで測定しても−1dBTP を超えることはありません。

【解説 1】整数倍関係周波数の最大誤差を求める式

サンプリング周波数と整数倍関係にある周波数の最大誤差を求める式について説明します。本文の 6 項で述べたように、偶数倍と奇数倍では計算に使用する式が異なります。

最大誤差を求めるには、1 サイクル（360°＝2π）をサンプリング回数（fs/fn）で割って位相角を求めます。求めた位相角の中間にトゥルーピークがあると最大誤差を発生するので、位相角を 1/2 にして最大誤差を求めています。

1. 偶数倍関係の場合（2,4,6,…倍）

偶数倍関係では 0～180°と 180～360°のサンプリング回数が同じになります。したがって、半サイクルの最大誤差は【式 1】で求めることができます。

偶数倍関係最大誤差[dB] = 20log {cos [(2π) / (fs/fn)] / 2) }

（数式を整理すると）　= 20log {cos [π / (fs/fn)] }　……………………【式 1】

: fs/fn = 1 サイクルのサンプリング回数

: fs = サンプリング周波数

: fn = 入力周波数

【計算例】

サンプリング周波数 48kHz に対して入力周波数 12kHz（偶数倍関係）の場合を計算すると、以下のようになります。

最大誤差[dB] = 20log {cos [π / (48/12)] }
= 20log {cos [π/4] }
= 20log {cos 45}
= 20log {0.707106781}
= 20(-0.15051499)
= -3.010299 [dB]

2. 奇数倍関係の場合（3,5,7,…倍）

奇数倍関係では、0～180°と 180～360°の区間のサンプリング回数が異なるので、偶数倍関係の式では正しい最大誤差を求めることができません。したがって【式 2】を使って求めます。この式は 2 倍オーバーサンプリングの最大誤差を求めるのと同じことになります（図 6－2 の説明を参照）。

奇数倍最大誤差[dB] = 20log {cos [π / [2(fs/fn)]] }　……………………【式 2】

【計算例】

入力周波数 16kHz（奇数倍）、サンプリング周波数 48kHz の場合を計算すると以下のようになります。

最大誤差[dB] = 20log {cos [π / [2 (48/16)]] }
= 20log {cos [π/6] }
= 20log {cos 30 }
= 20log {0.8660254}
= 20(-0.06246937)
= -1.249387 [dB]　（偶数倍の式 1 を使って求めると 6.02dB になります）

【解説 2】オーバーサンプリングとは

オーバーサンプリングは⊿Σ 型（Σ⊿型とも呼ばれる）A/D、D/A コンバータで使われている技術です。一般的には A/D、D/A 変換時にローパスフィルタを簡略化できるので、LSI 化に適しており古くから実用化されています。

すでに符号化されたデジタルオーディオデータに対しオーバーサンプリングを行う場合は、“ゼロ挿入”を行った後、デジタルフィルタ（ローパス）により補間データを生成するのが一般的な手法です。4 倍オーバーサンプリングでは元のデータとデータの間に 3 個の“ゼロデータ”を挿入し、ローパスフィルタ処理で補間することになります。したがって、すでに符号化されているデータに対して、オーバーサンプリングを行い得られたデータは近似値であり、アナログ信号を、例えば 192kHz でサンプリングして得たデータと同じではありません。

D/A コンバータの場合は、オーバーサンプリングで得られた X 倍のデジタルデータをノイズシェービングで数ビットまで落とし、最終的には 1 ビットデータ（PWM）として出力します。この出力を簡単なローパスフィルタを通すことでアナログ信号に変換しています。

民生機器の D/A コンバータでは古くから 64 倍オーバーサンプリング技術が実用化され使われています。48kHz × 64 倍オーバーサンプリング時の最大誤差は、24kHz 正弦波で－0.002616dB になります。ちなみに 64 倍は CD と SACD のサンプリング周波数の関係と同じです。

筆者紹介

(社)日本ポストプロダクション協会理事。技術委員会オーディオ部会委員。基準小委員会に所属、BWF-J WG 議長。

現在、一般社団法人電波産業会(ARIB) にて、スタジオ設備開発部会及びスタジオ音声作業班の客員委員並びに音響システム検討作業班のオブザーバとして、また、一般社団法人電子情報技術産業協会(JEITA) では、プロ対応デジタルオーディオ標準化グループ及び IEC/TC100/TA11 対応グループの客員委員として、主に音声関係の標準化作業に従事している。