

はじめての音響信号処理

－ 音響信号処理を行う上での基本的注意点
音の入口と出口に関連した部分を中心に －

1. 録音・再生における一般的注意

(1) 注意点

a) 過大入力

- ・ デジタル最大値以下でクリッピングされる場合もある

b) 雑音

- ・ 聞こえない雑音に注意
電氣的雑音、超低周波、固体伝播音、非正常音

c) 再生系の歪

- ・ スピーカの歪は、意外と小さいレベルから発生

(2) 対策

- ・ 録音波形を表示して確認
- ・ スペクトログラムやスペクトルで確認
- ・ 耳で確認

※ 雑音の記録

2. 補間の必要性

標本化定理を満たしていれば十分か？

(1) デジタルデータを視覚化(表示)する場合

人間が見て、誤解のないプロット(表示)をするために

(2) デジタルデータの最大値を求める場合

補間しないと2倍以上の誤差が出る場合もある

(3) DA変換をするデジタルデータの正規化を行う場合

デジタル最大振幅で出力すると波形が歪む場合がある

3. オーディオインタフェースのフィルタ

(1) LPF (Low Pass Filter): 折り返し防止

・ 2つの設計指針

① 折り返しを防止する

② 多少の折り返しは発生しても、 $f_s/2$ までの特性を平坦化する

f_s : 標本化周波数

・ ②が多数派

・ どちらの場合も、上限10%は使わない方が良い

・ DAも同様な折り返しが発生

(2) HPF (High Pass Filter): 直流成分の除去

・ 時間波形の立ち上がりに影響

※1: マイクロホン記号

※2: 補間を行う時の注意事項

※3: AD入力時だけではなく、デジタル処理でも折り返し歪が発生する

はじめての音響信号処理

ー デジタル録音と折り返し歪と補間の話 ー

東京電機大学
金田 豊

kaneda@c.dendai.ac.jp

http://www.asp.c.dendai.ac.jp/

本日の内容

音響信号処理を行う上での
いろいろな基本的注意点の紹介

1. 録音・再生における一般的注意
2. 補間の必要性
3. オーディオインタフェースのフィルタ

はじめに

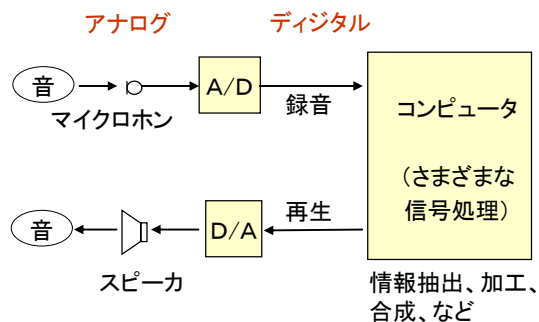
音響信号処理

音源分離
雑音抑圧
残響抑圧
携帯電話
通信会議システム

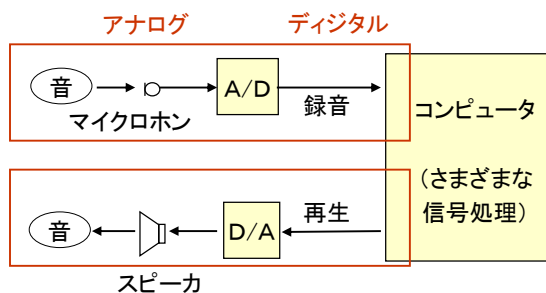
指向性制御
音響エコーキャンセラ
オーディオシステム

音響計測
音源定位
音場制御
能動騒音制御
ロボット聴覚
音声認識装置

音響信号処理の流れ



本日の話題



音の入口と出口に関連する注意点

録音・再生における一般的注意

- (1) 過大入力
- (2) 雑音
- (3) 再生系の非線形歪

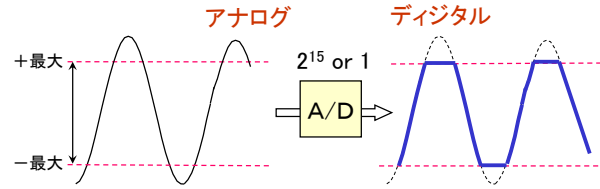
・ 知ってはいるけど
おこなってしまう失敗

録音・再生における一般的注意

- (1) 過大入力
 - (2) 雑音
 - (3) 再生系の非線形歪
- ・ 知っているけど
おこなってしまう失敗

過大入力

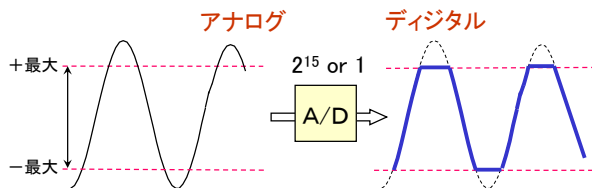
デジタル信号は、ある値以上は表現できない
→ 波形はクリッピング



- 原因:
- ・ SN比を稼ぐために大きくしたい
→ レベル調整の失敗
 - ・ 予想しなかった信号の過大振幅

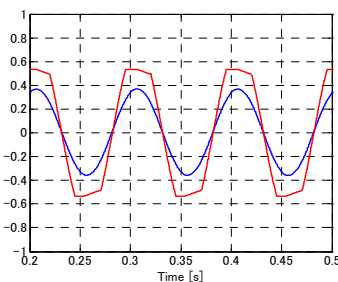
過大入力

デジタル信号は、ある値以上は表現できない
→ 波形はクリッピング

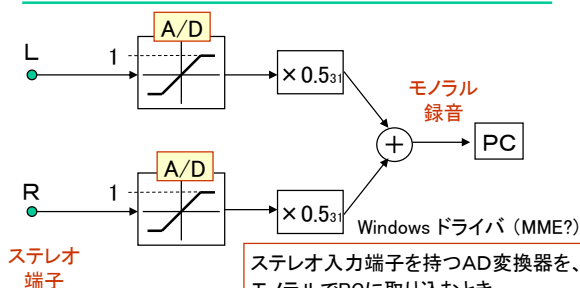


- 録音した信号の最大値でチェックできるか?
- デジタル最大値より小さな値でクリップが
起きている場合がある!

最大値より小さな値でクリップされる例



デジタル最大値より小さな値でクリッピングされる原因例

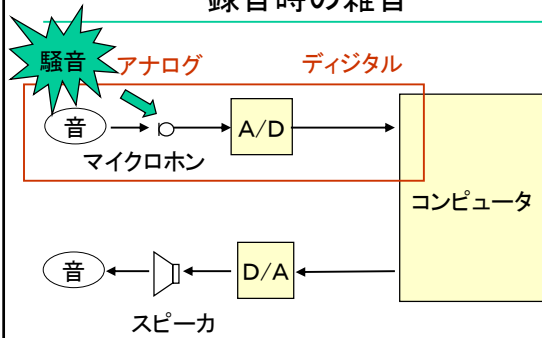


ステレオ入力端子を持つAD変換器を、
モノラルでPCに取り込むとき、
LとRは0.5倍後に加算されるので、
Rが無入力の場合は、クリップレベル
が0.5に見える

録音・再生における一般的注意

- (1) 過大入力
 - (2) 雑音
 - (3) 再生系の非線形歪
- ・ 知っているけど
おこなってしまう失敗

録音時の雑音



気をつけたほうがよい雑音

- ◇ 聞こえない雑音
 - ・ 電氣的雑音 (ハムなど)
 - ・ 超低周波音
 - ・ 固体伝播音 (機材の振動など)
 - ・ 非定常音 (瞬間的な音、ガタツ、カチツ)

録音・再生における一般的注意

- (1) 過大入力
 - (2) 雑音
 - (3) 再生系の非線形歪
- ・ 知っているけどおこなってしまう失敗

再生系の非線形歪

線形性: 入力が A 倍 → 出力が A 倍

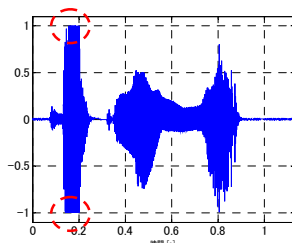
- ◇ スピーカは過大入力に対しては非線形性



スピーカにもよるが、
意外と低いレベルで非線形が発生

対策

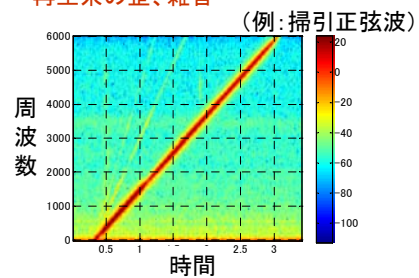
- 1) 録音波形を表示して、異常無しを確認
→ クリッピング、雑音



特徴的波形

対処方法

- 2) スペクトログラムやスペクトルを表示して、異常無しを確認 (気にしすぎない)
→ 再生系の歪、雑音



対処方法

3) 耳で音を聞いて確認

※) 雑音を録音しておくとい
(周波数分析に必要な長さ)

本日の内容

音響信号処理を行う上での
いろいろな基本的注意点の紹介

1. 録音・再生における一般的注意
2. 補間の必要性
3. オーディオインタフェースのフィルタ

標本化定理 (サンプリング定理)

アナログ信号を標本化してデジタル化するとき、
信号の帯域幅 (0 ~ f_{max})
標本化周波数 f_s

$$2 \cdot f_{max} < f_s$$

この条件を満たせば、原信号を再現できる。

標本化定理を満たしていれば十分か？

標本化定理

- ・「AD → DA の復元」を保証
- ・必ずしも十分ではない場合もある
 - ① デジタル信号の視覚化
 - ② 波形の最大値を求める場合
 - ③ DA信号の最大値を決める場合

デジタル信号と視覚化

デジタル信号は数列

例えば、

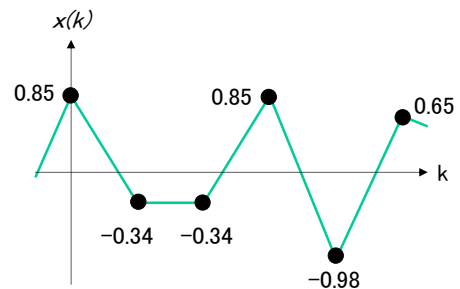
{0.85, -0.34, -0.34, 0.85, -0.98, 0.65,}

である。

しかし、これでは、直観的にわかりにくいので、
グラフとしてプロット (視覚化) することが多い。

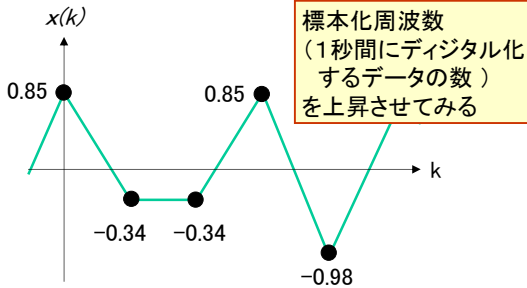
元のアナログ信号はどんな信号？

通常のPC上の描画プロットは、デジタル信号 (数列) を直線で結ぶ

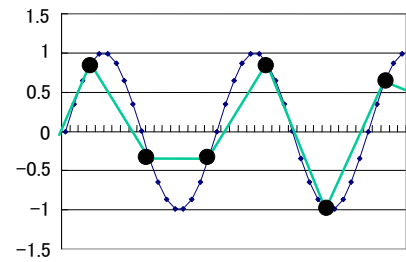


元のアナログ信号はどんな信号？

通常のPC上の描画プロットは、デジタル信号(数列)を直線で結ぶ



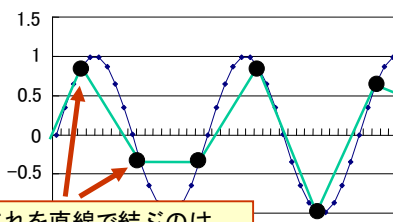
元のアナログ信号は正弦波



● 1周期に2.6回の標本化 (>2回)

◆ 1周期に18回の標本化

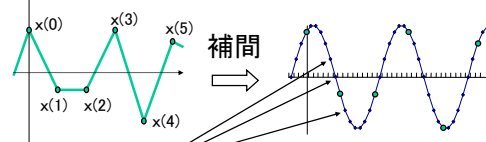
元のアナログ信号は正弦波



これを直線で結ぶのは
誤った情報を与える恐れ有り

だから、標準化周波数を上げる必要
→ ただし、実際に上げるのではなく、計算で

補間



・ 離散時間間の値を計算により求め、
標準化周波数を上げて、アナログ信号に近づく

・ 「内挿」「Interpolation」「オーバーサンプリング」
「リサンプル」とも言う

→ sinc 関数のたたみ込み (関数も用意されている)

② 図に表さない場合も注意

例えば、

1) ADしたデジタルデータ(数値)から
最大値を求める

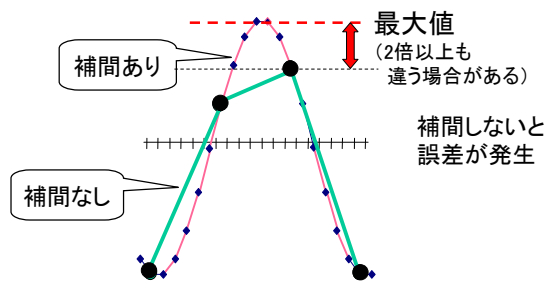
↓
標本値の最大値であるが、
アナログデータとしての最大値ではない

2) 相関関数を計算して、その最大値を得る

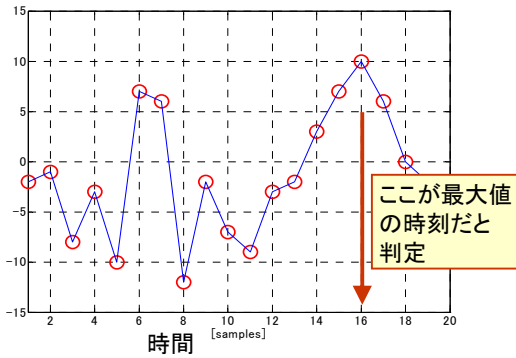
↓
補間なしでは、精度が悪い場合もある

正確な最大値を求めるには

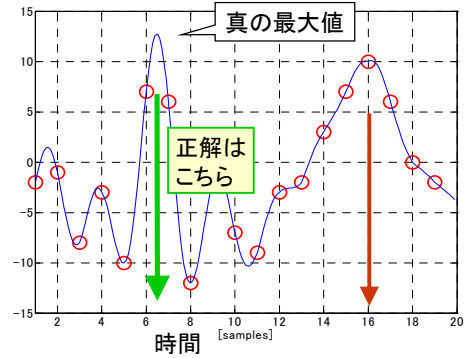
補間が必須



補間が必要な例：最大値の時刻の検出



波形の高さを比較する場合には補間をする



③ DA出力のための信号正規化

処理・合成した信号 $s'(k)$

なるべく大きな振幅 = 量子化誤差の影響小
 $\Rightarrow s'(k)$ の最大値を、デジタル最大値 (± 1 or $\pm 2^{15}$)
 (DAできる最大値)に正規化

$$s(k) = \frac{s'(k)}{(|s'(k)| \text{の最大値})} \times \text{デジタル最大値} \quad (1 \text{ or } 2^{15})$$

よくある正規化
 DA出力

③ DA出力のための信号正規化

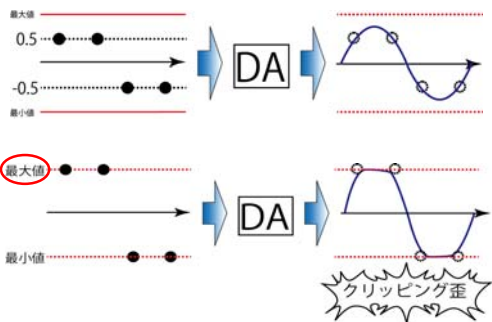
処理・合成した信号 $s'(k)$

なるべく大きな振幅 = 量子化誤差の影響小
 $\Rightarrow s'(k)$ の最大値を、デジタル最大値 (± 1 or $\pm 2^{15}$)
 (DAできる最大値)に正規化

$$s(k) = \frac{s'(k)}{(|s'(k)| \text{の最大値})} \times \text{デジタル最大値} \quad (1 \text{ or } 2^{15})$$

DA出力
 は、歪が発生する可能性あり

DA で発生するクリッピング歪

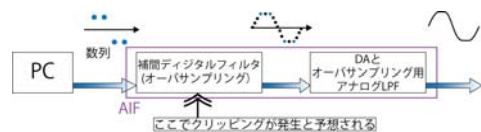


クリッピング歪の原因

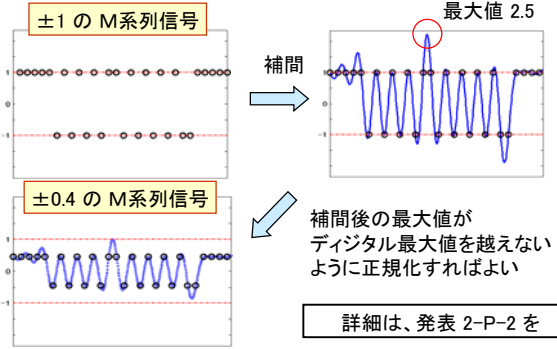
旧来型のDA



最近のオーバーサンプリング型のDA



防止方法

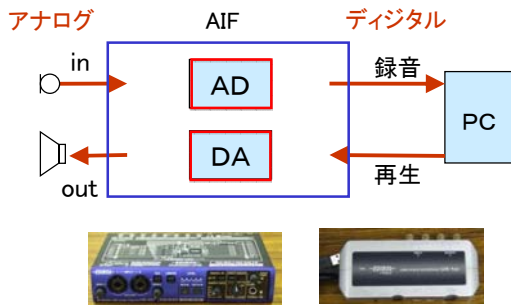


本日の内容

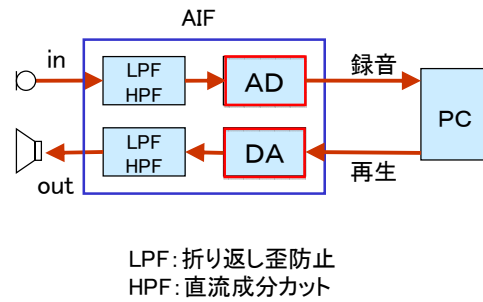
音響信号処理を行う上での
いろいろな基本的注意点の紹介

1. 録音・再生における一般的注意
2. 補間の必要性
3. オーディオインタフェースのフィルタ

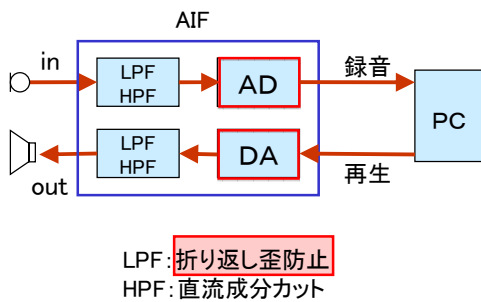
オーディオインタフェース (AIF)



オーディオインタフェース



オーディオインタフェース



標本化定理 (サンプリング定理)

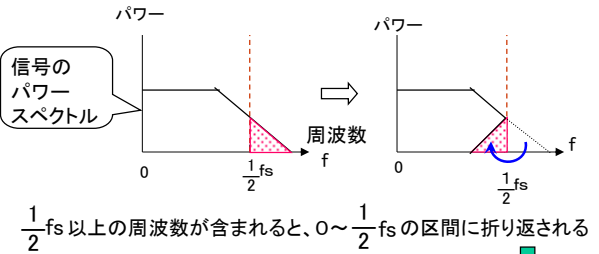
アナログ信号を標本化してデジタル化するとき、
信号の帯域幅 (0 ~ f_{max})
標本化周波数 f_s

$$f_{max} < f_s/2$$

この条件を満たせば、原信号を再現できる。

標本化定理が満たされないと

⇒ 折り返し歪み(エリアシング)が発生

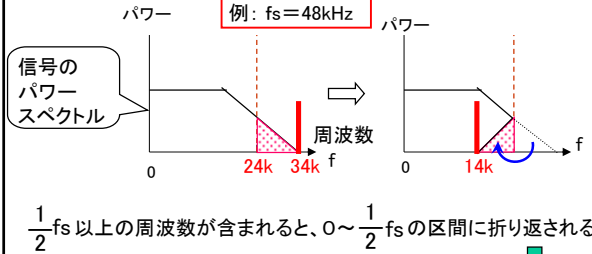


$\frac{1}{2}f_s$ 以上の周波数が含まれると、 $0 \sim \frac{1}{2}f_s$ の区間に折り返される

↓
不自然な雑音になる

標本化定理が満たされないと

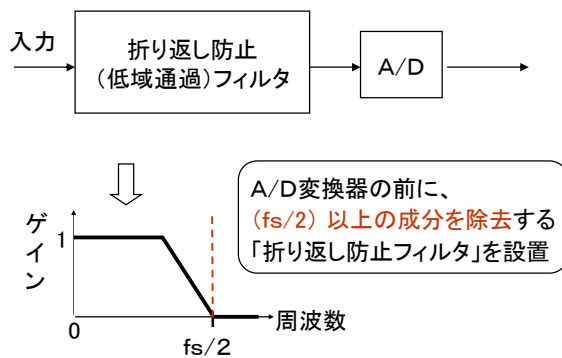
⇒ 折り返し歪み(エリアシング)が発生



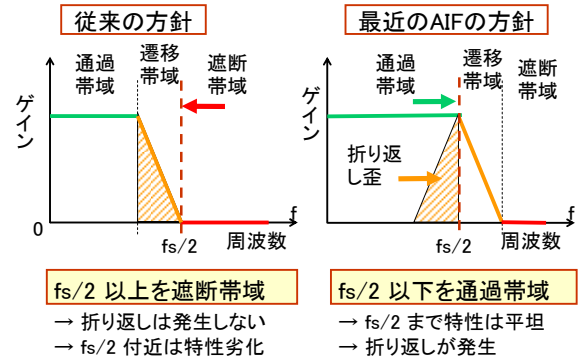
$\frac{1}{2}f_s$ 以上の周波数が含まれると、 $0 \sim \frac{1}{2}f_s$ の区間に折り返される

↓
不自然な雑音になる

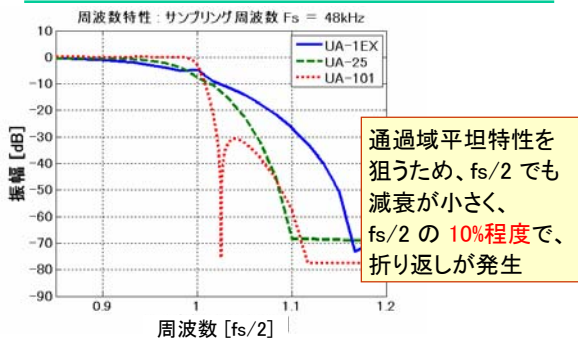
折り返し防止フィルタ



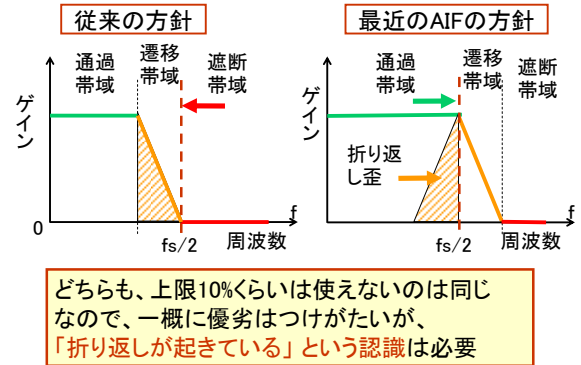
折り返し歪防止用 LPF の設計方針



オーディオインタフェースのAD付属の折り返し防止フィルタ特性の測定例



折り返し歪防止用 LPF の設計方針



「ない」と「汚れた」、 $f_s=48\text{kHz}$ なら問題ない?

オーディオインターフェースのDA付属のローパスフィルタ特性の測定例

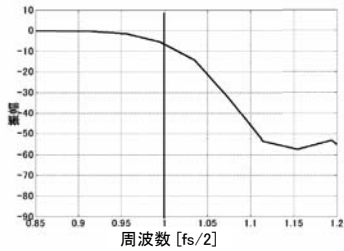


図 11 UA-1EX の DA 系 LPF の振幅特性

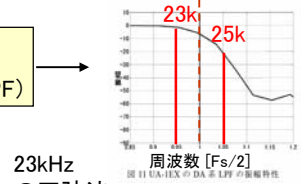
ADのフィルタと同様に、通過域平坦特性を狙うため、 $f_s/2$ でも減衰が小さく、 $f_s/2$ の10%程度で、折り返し($F_s/2$ 以上の成分)が発生

DA の逆折り返し

例) $f_s = 48\text{kHz} \rightarrow f_s/2 = 24\text{kHz}$

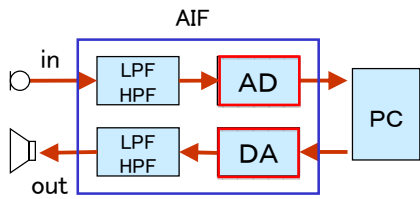
デジタル正弦波
23kHzの正弦波を入力

AIF (DA+LPF)



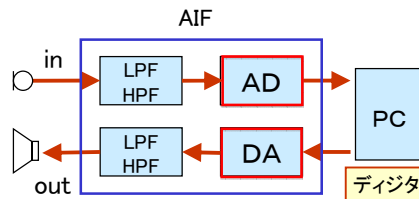
23kHzの正弦波 + 25kHzの正弦波

オーディオインターフェース



LPF: 折り返し歪防止
HPF: 直流成分カット

オーディオインターフェース

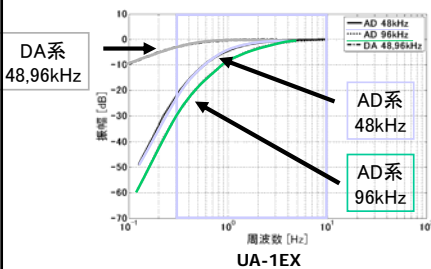


LPF: 折り返し歪防止
HPF: 直流成分カット

デジタル信号処理は信号の平均値がゼロ(直流成分なし)が暗黙の前提

オーディオインターフェース付属の直流カットHPF特性の測定例

AD、DA系ともに 0.3~10Hz 程度の遮断振幅特性



DA系 48.96kHz

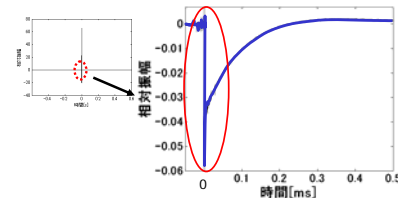
AD系 48kHz

AD系 96kHz

UA-1EX

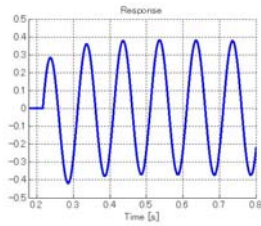
HPF 時間応答特性

原点付近の不連続性、および長時間継続する応答

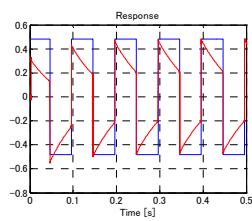


時間波形の立ち上がり部分の変動
周期信号の先頭と最後の値の不一致などが発生

時間波形の立ち上がり等に影響



立ち上がりの
レベルが変動

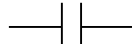


方形波が変形

豆知識: マイクロホン記号



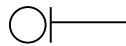
スピーカ



コンデンサ



マイクロホン



古典的なマイク形状に由来



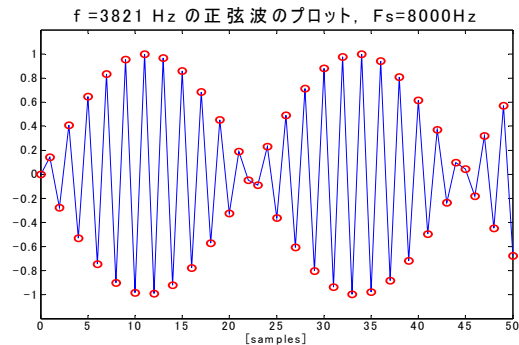
標本化定理 再考(その2)

- ◇ 補間によって
全ての離散信号は元のアナログ信号に
正確に戻るのか？

→ 補間を行うための注意事項

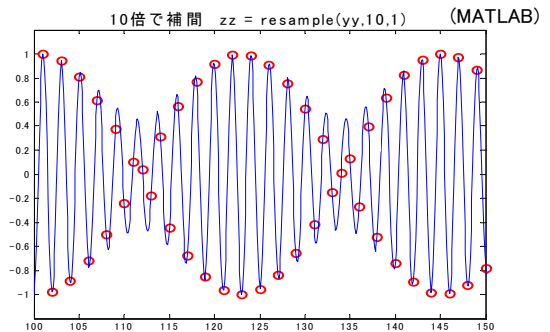
fs/2 近くの正弦波のプロット

サンプル値(○)を結ぶと、「うなり」のように見える。



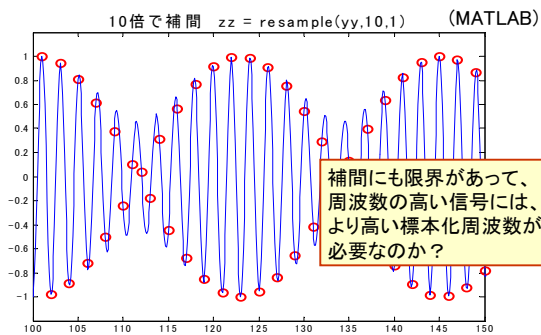
補間(10倍)をしてみた

若干の補間効果はあるが、「うなり波」のまま



補間(10倍)をしてみた

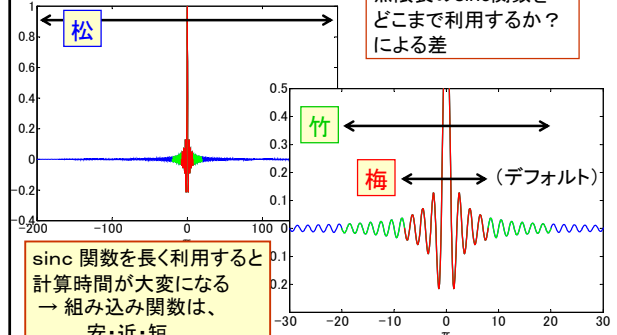
若干の補間効果はあるが、「うなり波」のまま



問題は補間の品質

補間には品質があるので注意

無限長のsinc関数をどこまで利用するか？による差



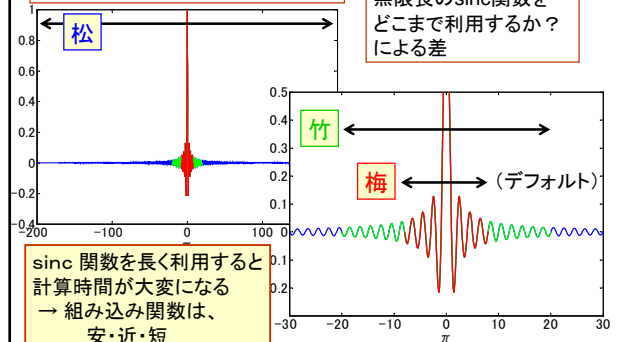
組み込み関数の利用に当たって

- ◇ 安易に組み込み関数を利用して良しとしない
- ◇ 理想的には、内容を理解して使う
- ◇ 最低限、ヘルプを見て、パラメータを確認しておくことが望ましい。(私の反省です)
- ◇ 組み込み関数よりは自作のほうが安心な場合もある (⇔ 欠点は速度)
- ※ sinc 関数に窓 (Hanning など) をかけてから補間するのも有効

問題は補間の品質

補間には品質があるので注意

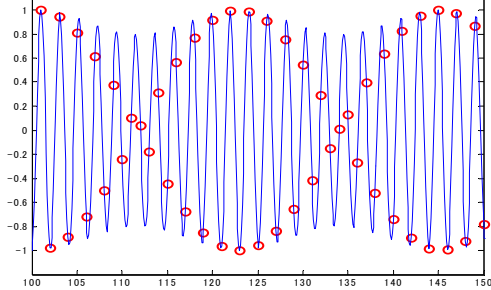
無限長のsinc関数をどこまで利用するか？による差



少し品質の高い補間を試してみた (竹)

まだ「うなり波」のように見える

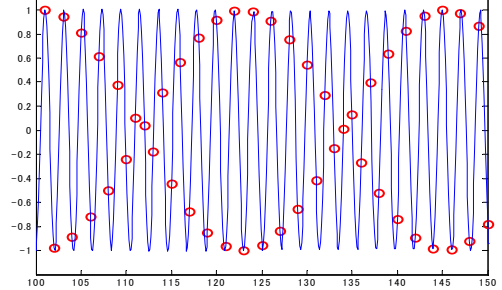
sinc 関数を片側 10 周期に。10倍で補間 `zz = resample(yy,10,1,20)`



念入りな補間 (松)

ほぼ一定振幅の正弦波に「見える」ようになった。

sinc 関数を片側 100 周期に。10倍で補間 `zz = resample(yy,10,1,200)`



折り返し歪発生原因

◇ 入力

AD時の帯域オーバー

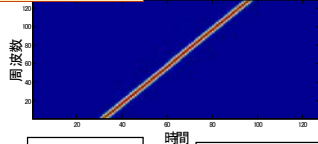
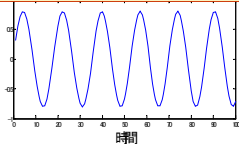
- 最近では、AD変換器に一体化されている場合が多いので、考えなくて良い (というより、選択の余地なし)
- 特性の良いものを選ぶ必要)

◇ 内部処理 !

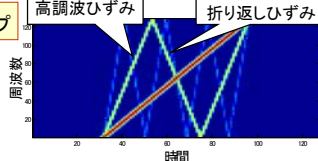
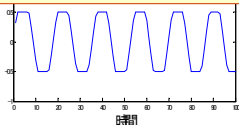
非線形処理による高調波成分の発生 → 後述 (デジタル信号の掛け算、波形の非線形加工、ほか)

内部処理による折り返し歪 発生 の例

スイープ正弦波 (デジタル信号: 一部を拡大)

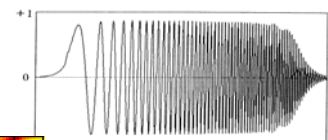


波頭をデジタル処理でクリップ

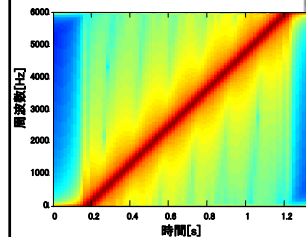


TSP信号

◇ $S(p)$ を逆DFTした信号 $s(k)$ がTSP信号

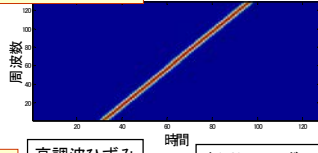
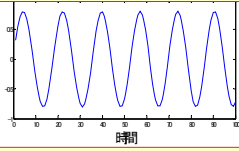


(TSP-up)



内部処理による折り返し歪 発生 の例

スweep正弦波(デジタル信号:一部を拡大)



波頭をデジタル処理でクリップ

