

# クロスシンセシスに関する一考察 FFTの用法

加藤充美  
くらしき作陽大音楽学部

コンピュータが進歩し、比較的容易にMAX/MSPなどを使って様々な自然楽器の音をリアルタイムで加工した音楽作品が制作されるようになった。FFTなども容易に用いられているが、信号処理の理論からみると問題のありそうな応用もみられる。この報告では、クロスシンセシスのなかで特にFFTの使い方が歪みなどにどの程度影響しているか考察する。

A Consideration on cross synthesis  
Usage of FFT

Mitsumi Kato  
The faculty of music, Kurasiki Sakuyo University

As computer progressing, it becomes easier that music works are created with natural musical instruments and computers, in which sounds are produced on real time using MAX/MSP. FFT is used easily too. But some applications have several problems in view of the theory of signal processing. In this report, I consider how to use FFT in crossing synthesis and filtering.

## 1. はじめに

いままでにコンピュータなどによって音を合成する方法は様々な提案され、電子音楽作品が作られてきた<sup>1)</sup>。近年ではコンピュータが進歩し、従来では大規模な設備などが必要であったこれらの作品制作も、軽量のコンピュータとMAX/MSP<sup>2)3)</sup>などを使って自然楽器の音をリアルタイムに加工して演奏することもできるようになった<sup>4)</sup>。そのなかで極めて工学的な道具であったFFTも盛んに用いられている。たとえばフィルタリングや、2つの音のスペクトルを合成して新たな音を創造するクロスシンセシスなどである。これらが容易に実現できるようになった反面、FFTがブラックボックス化して分からないままに結果がよければ使うこともあるように思われる。また当初はコンピュータの処理能力の問題などで仕方なく簡便な方法で用いられていた手法が、コンピュータの処理能力が上がった現在でもそのまま用いられていたりして問題がないわけではない。この報告の目的は、クロスシンセシスの手法を信号処理理論の観点から見直すことである。特にFFTを用いた信号処理における巡回畳み込みの影響がどの程度か検証する。もちろん計測にFFTを用いているのではないので正確な演算が必要条件ではないが、どのような歪が生じるかを把握しておくことは必要であると思われる。

## 2. クロスシンセシスにおけるFFT

ここでクロスシンセシスの考え方を整理してみる。これはA音の要素とB音の要素を組み合わせることによって新たな音を作り出そうとする考え方である。この要素の選び方によって様々なクロスシンセシスが考えられる。簡単に述べれば音を合成するモデルの数だけクロスシンセシスの方法が考えられることになる。即ち2つの音の合成パラメータを組み合わせればよいわけであるから、たとえば加算合成では倍音のピッチ変化や音量変化の組み合わせを色々変化させたり、物理モデル合成においては発音源に相当する部分と共鳴器や音の放射部分の組み合わせなどを変えることによってさまざま

まな音が創造されることが期待される<sup>5)</sup>。ただし創られた音の利用価値があるかは制作者の判断にゆだねられることはゆうまでもない。

FFTをクロスシンセシスに利用するのは、スペクトルレベルでのクロスシンセシスといえる。スペクトルレベルのクロスシンセシスは音声合成モデルとも密接に関係していて、声帯振動などの振動源に起因するスペクトルの微細な構造と声道のフィルタリング特性に起因するスペクトル包絡の組み合わせを変えて新しい音を創造することになる。したがってLPCなど音声における様々な手法がスペクトルレベルでのクロスシンセシスに適應できる。AとBの2つの音のクロスシンセシス音を得る方法の理想的な手順は次のようになるであろう。

- 1) A音のスペクトル平坦化
- 2) B音のスペクトル包絡の検出
- 3) 1)に2)のフィルタを掛ける

LPCを用いると、A音の残差信号にB音のフィルタ係数を用いてほぼ理想的なクロスシンセシスができると思われる。また2)にはケプストラムの手法も有効と考えられる。ここでは、FFTを使った場合について検討する。

### 3. FFTによるフィルタリング

FFTを利用したクロスシンセシスを理解するうえで、FFTを使ったフィルタリングを理解する必要がある<sup>6)</sup>。コンピュータが発達したおかげでデジタル信号処理が簡単に実現できるようになり、FFTも簡単に使えるようになった。そのためFFTを用いたフィルタリングも盛んに用いられている。これはFFTを用いてかなり自由な特性を持つFIRフィルタが実現できるからである。これは周波数領域での演算であるが、時間領域ではフィルタリングされる信号とインパルス応答波形との畳み込み演算と等価になる。そしてこのインパルス応答の長さがフィルタの特性の急峻さをきめることになる。

ここで注意しなければならないの

はFFTの巡回的な性質である。FFTはデジタル信号処理のアルゴリズムであるため周波数領域と時間領域のどちらも離散的な信号を扱う。そのため周波数領域と時間領域のどちらも周期的な信号であることに注意する必要がある。これらの関係を図1で示す。a)は元の波形である。実際のスペクトルの計算を行うためには分析区間が有限でなければならない。FFT分析区間幅で波形を切り出し計算したスペクトルがc)である。このスペクトルは実はb)で示されるように分析区間で切り出された波形が周期的に繰り返された波形のスペクトルに当たる。即ちFFTは切り出した波形を一周期とする波形のフーリエ級数といえることができる。この周期的な性質がFFTによるフィルタリングの際の制限となる。即ち本来関係のない波形部分が畳み込み計算に使われるので、その影響を取り除く方策を採らない限りきちんとしたフィルタリングができないことになる。

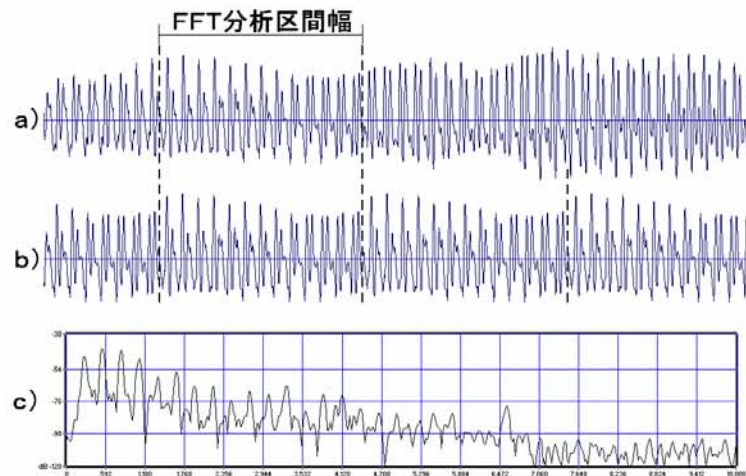


図1. FFTにおける波形の繰り返し

- a) 元の波形
- b) FFTのサイズで切り出した波形
- c) そのスペクトル

### 3 - 1 . 巡回畳み込み

巡回畳み込みについて、図2で説明する。a) はもと元の波形ある。分かりやすくするためにここでは一定間隔のパルス列とした。この波形にb) で示すインパルス応答波形を持つフィルタをかけると出力はc) で示すように一定間隔のパルスの位置毎にインパルス応答があらわれる波形となる。しかしながらFFTを利用してフィルタリングを行おうとすると、d) で表されるようなFFTサイズで切り出した波形が繰り返される波形とb) で示すインパルス応答が畳み込まれることになる。したがって結果はe) に示す波形となる。実際に観測される波形のデータはFFTサイズしかないために、図中の で囲われた波形となる。b) とe) とを比較すると、繰り返すことによって現れるパルスの影響によ

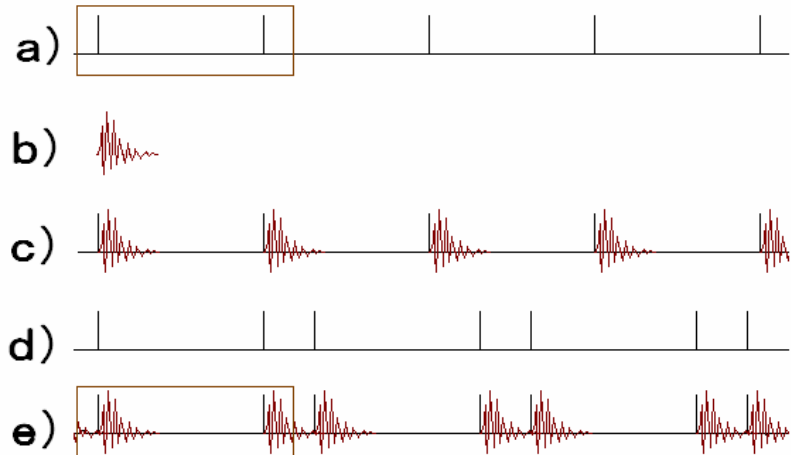


図2 . FFTを使ったフィルタリングにおける巡回性の影響

- a) フィルタリングされる波形
- b) フィルタのインパルス応答
- c) 正しくフィルタリングした結果
- d) FFT区間幅で繰り返されるパルス列
- e) d)をフィルタリングした結果

って結果が異なっていることが分かる。計測などの信号処理においてはこの影響を取り除くために、インパルス応答の長さ計算された波形を捨ててこの影響のない部分だけを取り出してつなぎ合わせて結果を得ている。こうすることによってb) とまったく同じ出力波形が得られる。

注意しなければならないのはインパルス応答波形の長さである。この長さがFFT分析区間幅より短くないと巡回性の影響のない部分が存在しないことになる。したがって正確なフィルタリングは実現できないことになる。このためインパルス応答に時間窓をかけて所望の長さ以下に抑えることが行われている。当然インパルス応答の長さが長ければ急峻で自由な周波数特性を実現できる。また使用する時間窓によっても特性が左右される。一般的にはhanning窓の使用が無難である。

### 3 - 2 . 時間窓の使い方

FFTした結果をiFFTするとまったく元の波形に戻り、途中でスペクトル変化させるとフィルタリングが実現できる。このときフィルタリングされる波形に時間窓を掛けてFFTすると、時間窓を掛けた波形をフィルタリングすることになる。入力が一定の振幅でも時間変動のある波形として処理されてしまう。したがってフィルタリングされる波形には時間窓を掛けないのが一般的である。区間をずらしながら計算し区間の間をクロスフェードする場合は、出力の波形に時間窓を掛けるとよい。フィルタの位相特性が直線位相の場合は含まれる成分の位相はそろっているはずなので、2つの波形に掛ける時間窓のそれぞれの時刻の値が合計で1になるようにするとうねりのないクロスフェードが行われる。たとえば三角窓などが有効である。

### 3 - 3 . 巡回畳み込みの影響

FFTを用いたフィルタリングにおいて簡便なクロスフェードを行った場合の巡回畳み込みの影響を検討した結果を次に示す。パルス列をフィルタリングした結果と比較してみる。フィルタリングされる信号は周期が500サンプル(サンプリング周波数を44100Hzにしたので周波数は88.2Hzになる)のパルス列を用い、フィルタのもとになる信号は周期が510サンプル(86.47

0.59 Hz)の正弦波である。ともにFFTの区間幅と若干ずれているので時間とともに分析区間と信号の位相がずれてくることになる。正確なフィルタリングができればこの位相のずれの影響はない。その結果の波形を図3・5、スペクトルを図4・6に示す。図3・4ではフィルタするデータが各区間で同じものとした結果で、時不変のフィルタリングを行ったことになる。一方図5・6ではフィルタリング側の波形も区間をずらしながら計算していて、クロスシンセシスを行ったことになる。ただしそれぞれの波形は一定なので、出力も一定になるはずである。

図3のa)は元のパルス列波形、b)はFFTクロスフェードで得られた結果である。このようにややうねりが見られる。スペクトルでも図4のb)のように、このうねりに対応する側波が各倍音の周りに現れている。また倍音の間にも成分があり非調和による歪があることを示している。これらは音の濁りの原因になる。

一方、図3・4のc)はFFTの巡回畳み込みを考慮した方法で、このように、倍音の間には余分な成分がなく、振幅も一定で歪もなくフィルタリングが実現できていることが分かる。

図5・6は、フィルタになる波形も区間をずらしながら計算した結果である。図5・6と同様にクロスフェードで行った方法では波形のうねりや歪が見られ、巡回畳み込みを考慮した方法ではきれいなフィルタリングができていることがわかる。

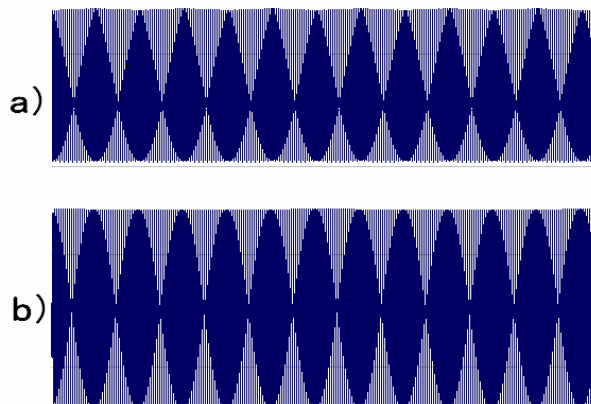


図5．クロスシンセシスの波形（時変）  
 a) FFTクロスフェードで計算した波形  
 b) 巡回畳み込みを考慮して計算した波形

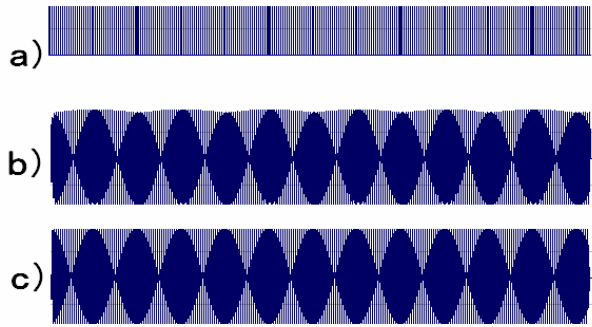


図3．クロスシンセシスの波形（時不変）  
 a) 元の波形  
 b) FFTクロスフェードで計算した波形  
 c) 巡回畳み込みを考慮して計算した波形

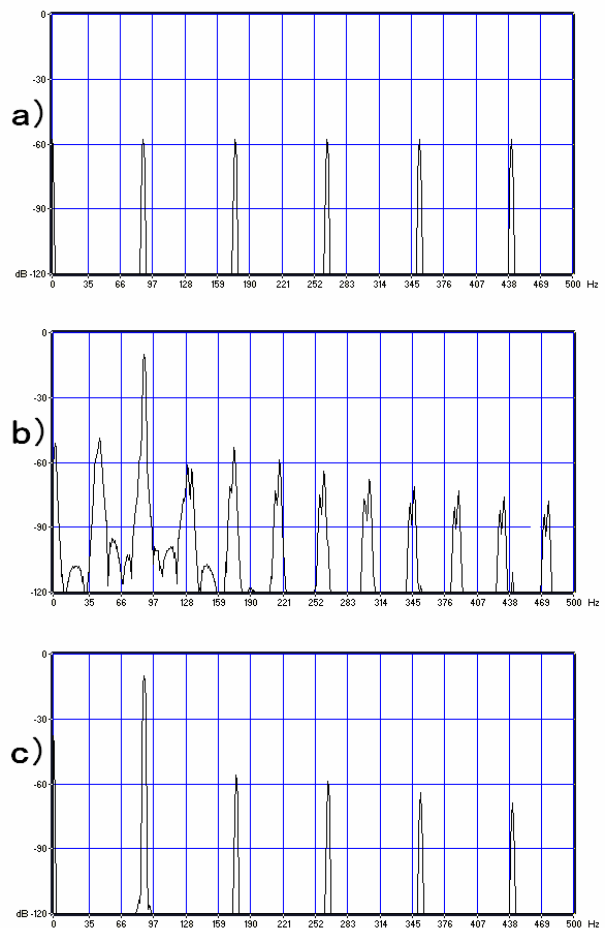


図4．クロスシンセシスのスペクトル（時不変）

a) 元の波形のスペクトル  
 b) FFTクロスフェードで計算  
 c) 巡回畳み込みを考慮して計算

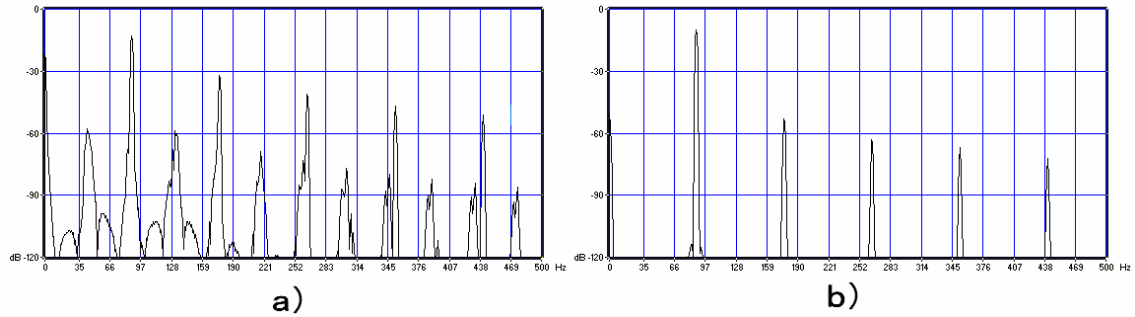


図6．クロスシンセシスのスペクトル

- a) F F Tクロスフェードで計算した波形のスペクトル
- b) 巡回畳み込みを考慮して計算した波形のスペクトル

いずれの場合も巡回畳み込みを考慮した方法ではインパルス応答の長さがF F Tクロスフェードの方法に比べて半分になるので、その分周波数特性が緩やかになる傾向がある。

#### 4．実際の処理アルゴリズム

実際に巡回畳み込みの影響を考慮した処理の手順を図7に示す。ここでは時間領域で説明する。

フィルタリングされる波形は、F F Tサイズの1 / 4ずつずらしながら切り出して計算する。その様子をa)に示す。各々が分析区間を現している。おのおの区間をF F Tしてスペクトルを得、それに別の音から得たフィルタの特性を掛けて逆F F Tをすることによってフィルタリングされた時間波形が得られる。先に述べたように、フィルタのインパルス応答に0の区間が必要で、b)に示すように中心の1 / 4 ~ 3 / 4の部分が必要になるようにする。この方法は図8で説明する。最終的に使う波形はc)で示される各区間の波形の1 / 4 ~ 3 / 4の部分である。

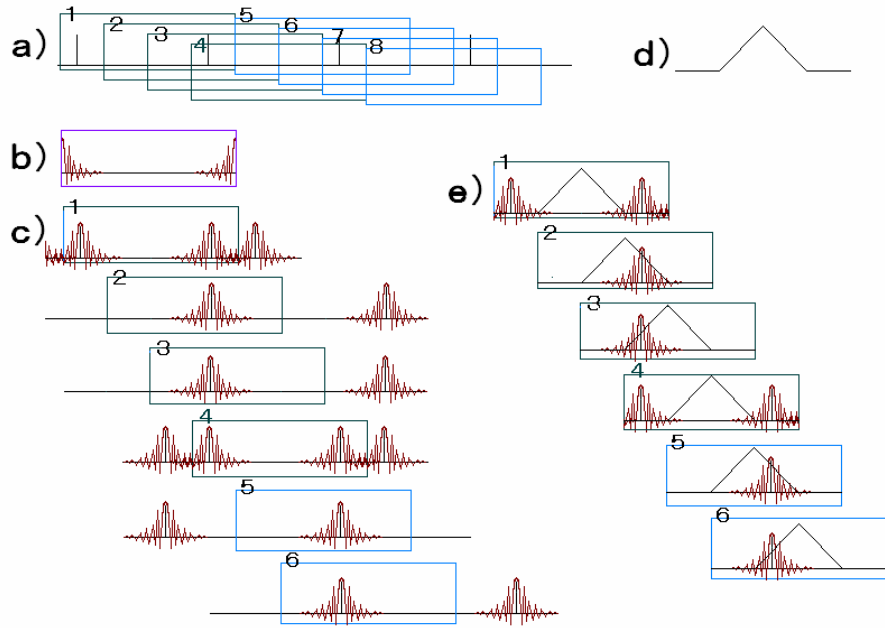


図7．MAX / MSP用のクロスシンセシスのアルゴリズム

- a) 元の波形の切り出し方。区間を で示す
- b) 畳み込みをするインパルス応答。位相が 0 に揃えられている
- c) 各区間の巡回畳み込みの様子
- d) 使用する時間窓
- e) 各区間の波形

また、区間ごとにフィルタの特性が異なりクロスフェードする必要があるのでd)のような時間窓を掛けて足し合わせていく。この時間窓は前後の1 / 4は0になっていて、巡回畳み込みによる影響を除くようになっている。中心は1 / 4ずつの三角波形になってクロスフェードを行う。このようにすると、b)のインパルス応答を畳み込みで計算したものと等価になる。



図7のb)のインパルス応答を得るためには図8の手順で計算する。

- a) フィルタとして使う区間を切り出す
  - b) これをFFTしスペクトルの絶対値を計算する
  - c) b)を逆FFTし、適当な時間窓を掛けて中心の1/4～3/4を0にする。
  - d) これをFFTする。
- d)で得られた結果を図7のb)として用いるとよい。

#### 5. まとめ

MAX/MSPのFFTを使って音を加工する際に用いられているクロスフェードによるフィルタリングの特性を検討した。計測などの分野では数値的に問題のない手法が用いられているが、音楽の応用では必ずしもその必要はない。しかしFFTの性質もきちんと把握しておかなければ、何か問題が起こった場合や新たなパッチを組むことも困難であると思われる。原理的にFFTをクロスフェードして用いてフィルタリングすれば歪が生じる。この歪は実際にクロスシンセシスした音の濁りや不自然さの原因のひとつと考えられる。原理的に問題のない方法は今までの方法に比べて2倍のコンピュータの処理が必要であるが、コンピュータの処理能力が上がってきているのでさほど問題にならないのではないかと思われる。

音声の領域のLPCの手法やケプストラムなどの手法は電子音楽の制作にも有効な手法であると思われる。コンピュータの処理能力が上がってきているので、これらの手法も取り入れられるようになっていくであろう。

#### 6. 参考文献

- 1) C. Roads 著, 青柳他訳 「コンピュータ音楽」 東京電機大学出版会
- 2) 赤松、左近田著 「トランスMaxエクスプレス」 RittorMusic
- 3) Max/MSP 付属マニュアル
- 4) 菜孝之 「作品創作からポストプロダクションへ」  
情報処理学会研究報告 2002-MUS-48, p7-13
- 5) 引地孝文、小坂直敏、板倉文忠、「笙の物理モデリング」  
電子情報通信学会技術報告 SP2000-135, p35-42
- 6) A.V. Oppenheim 「Digital Signal Processing」  
Prentice Hall

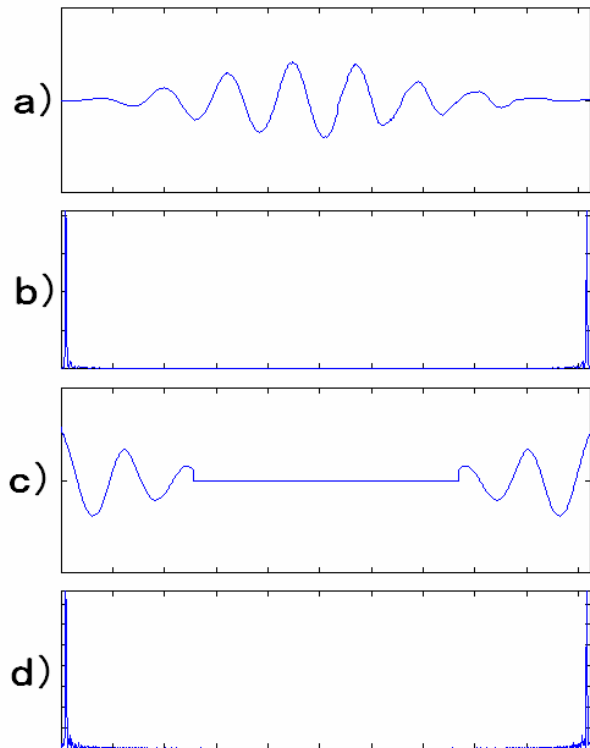


図8. フィルタ波形を得る手順

- a) FFT区間幅で切り出した波形
- b) a)のスペクトルの絶対値
- c) b)の逆FFT波形に時間窓をかけ、中央の部分を0にしたもの
- d) c)のスペクトル