



複素1次系を用いた短時間スペクトル分析法による打楽器の分析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-10 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 梅本, 敏孝, 薄木, 壮士, 里見, 隆司 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007743

複素1次系を用いた短時間スペクトル分析法 による打楽器の分析

梅本 敏孝*・薄木 壮士**・里見 隆司***

Analysis of Percussion Instruments with Short Time Spectrum Analysis using
Complex First Order System

Toshitaka UMEMOTO*・Soushi USUKI**・Takashi SATOMI***

ABSTRACT:In the spectral analysis of temporally varying signals such as sound from musical instruments, the short time spectral analysis is known to be effective because with that method one can change the frame length depending on the frequency involved and choose arbitrarily the analysis interval in the frequency domain. Among the methods, the analysis with the complex first order system by Aoshima are well-known and currently being used. In order to optimize and develop further the methods, it is necessary to investigate their stability because of its recursive nature.

In this paper we first discuss the stability of the Aoshima's method and by extending the discussion, next propose a new method of IIR short time spectral analysis which utilizes data window in order to analyze even lower level spectral components of signals. Furthermore, the effectiveness of the proposed method for feature extracting the tone in the process of transcription of music is experimentally demonstrated.

Key Word: FFT, spectrum, complex, transcription, stability

1. はじめに

打楽器には木琴・鉄琴などに代表される固定ピッチ打楽器（音階を有する楽器）とシンバル・ドラムなどに代表される不定ピッチ打楽器（音階を有さない）がある。これらの楽器は歴史が古く、今日でも一般的な楽器であるにも関わらず、その音に関する研究があまりなされていない。たとえば、シンバルについては、牧田の著書¹⁾の中でシンバル音のサウンドスペクトログラムが示されたものや60個程度のモードが存在するとの安藤らの研究報告²⁾だけであり、音の減衰についての研究報告はほとんどない。このことは、木琴などの固定ピッチの楽器についても同じである。

楽器が奏でる音の減衰特性を調べるのには、短時間スペクトル分析を用いるのが有利である。通常は有限のフレーム長をもつ窓関数で指定した時間範囲の信号を切り出し、FFT法によってこのようなスペ

クトル分析を行っている。しかしながら、打楽器のように減衰の激しい音の減衰特性を観測する場合、FFT法ではフレームの重複区間が長くなり演算効率も悪化する。また、フレーム長が分析周波数に関係なく一定となり、中高域の周波数領域では分析周波数に対して相対的にフレーム長が長くなり特徴が平均化されてしまう。さらに、固定ピッチの楽器の分析は音階に沿った周波数成分だけを分析すればよく、FFT法では得られるスペクトルの分析間隔は一定となり、不必要な周波数成分まで分析しなくてはならず演算効率が良くない。このようなことから、フレーム長を周波数に依存して変えられ、周波数軸上の分析間隔も自由に選択できる短時間スペクトル分析が要求される。

このようなスペクトル分析法の1つとして青島が提案した複素1次系の概念から導びかれた再帰型の短時間離散フーリエ変換法^{3)~10)}があり、これらの応用も多く報告されている。しかし、システムとしての安定性や短時間離散フーリエ変換の式との関係を記述した報告はない。そこで、本論文では、短時間離散フーリエ変換の式との関係、システムの安定性についての報告を行うとともに、卒研で行ったシンバ

1997年4月9日受理

* システム工学科(Department of Systems and
Control Engineering)

** Mシステム技研(M.S.K)

*** 総合警備保障(S.O.K)

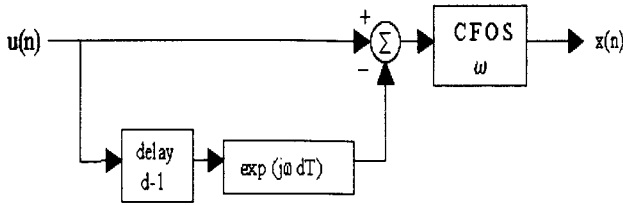


Fig.1 IIR short time spectrum analyzing system

ルと木琴の打楽器の分析を示す。

2. 複素1次系による再帰型短時間スペクトル分析法

楽器などの機械系は、近似的に1次もしくは2次の減衰振動系の和で表わすことができるといわれている。青島はそのような系の同定法として通常の1次系のパラメータを複素数に拡張した複素1次系とい

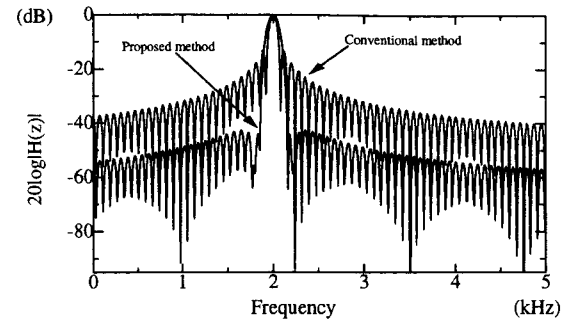
うものを提案した。青島によって提案された複素1次系の式は、入力を $u(n)$ 、出力を $y(n)$ とおけば、つぎのように表わすことができる。

$$y(n+1) = e^{(-\sigma + j\omega)T} y(n) + \frac{C_R + jC_I}{-\sigma + j\omega} u(n) e^{(-\sigma + j\omega)T} \quad (1)$$

このシステムの特長は $C_R = 1$, $C_I = 0$, $\sigma = 0$ そして、初期値 $y(-0) = 0$ としたときの、インパルス応答の実部が \cos 波形に虚部が \sin 波形になることである。青島は $C_R = 1$, $C_I = 0$, $\sigma = 0$ の条件下で、初期値 $y(n-N) = 0$ という条件下で入力 $u(n-N) = 1$ なるインパルスをも(1)式に代入し、時刻 n での応答 $y(n) = e^{j\omega n T} u(n-N)$ を相殺するような入力 $u(n)$ を(1)式に代入すれば、 $y(k)$ は $k = n$ で0となり、それ以降の入力がなければ、恒頭的に0となることを利用して、Fig.1なるシステムによってスペクトル分析を行うことを考えた。つまり、このシステムのインパルス応答は、 N 点の正弦波信号列となるので、このシステムにインパルスでない一般の波形を入力すると、ある瞬間の出力はその時刻の直前の長さ N の波形に正弦波を乗算し、積分したものになりフーリエ係数を計算したものと等しくなることを用いた方法であり、つぎのような式で計算することができる。

$$x(n+1) = e^{j\omega T} x(n) + e^{j\omega T} \{u(n) - e^{j\omega n T} u(n-N)\} \quad (2)$$

3. 短時間離散フーリエ変換法との関係

Fig.2 Characteristic frequency of CFOS method for the case of $\sigma=0$ and $\sigma=0.0025$

前章で述べたように複素1次系による短時間スペクトル分析法は離散フーリエ変換の再帰式であることは明らかであるにもかかわらず、今までの報告では離散フーリエ変換の式との関係を厳密に求めたものはない。そこで、この章では(2)式を離散フーリエ変

換の式から導出する。始めに時刻 n における N 個の信号列 $u(n+(k-N))$ ($k=0,1,\dots,N-1$)に対する離散フーリエ変換の式を考えると、つぎのように定義することができる。

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} u(n+(k-N)) e^{-j\omega(k-N)T} \quad (3)$$

どのように時刻 $n+1$ における離散フーリエ変換の式を考えれば、つぎのようになる。

$$x(n+1) = \sum_{k=0}^{N-1} u(n+1+(k-N)) e^{-j\omega(k-N)T} \quad (4)$$

(4)式から(2)式を $e^{-j\omega T}$ 倍したものを引くとつぎのようになる。

$$x(n+1) - e^{-j\omega T} x(n) = e^{-j\omega T} \{u(n) - e^{-j\omega n T} u(n-N)\} \quad (5)$$

ここで、 $e^{-j\omega T} x(n)$ を右辺に移項すれば、(1)式になる。つまり、遅延時間 NT の複素1次系を用いた短時間スペクトル分析法は、 N 点の離散フーリエ変換法の逐次計算法であることが示された。

4. 再帰型短時間離散フーリエ変換法の安定化

今までの報告では、提案されたこのシステムが再帰型のシステムであるにもかかわらず、安定性の議論がなされていなかった。そこで、このシステムの安定性の議論を行うことにする。システムが安定であるための必要十分条件はすべての極が複素平面の単位円内にあることである¹⁾。このシステムの伝達関数は(2)式からつぎのようなる。

$$H_{\omega}(z) = \frac{X_{\omega}(z)}{U(z)} = \frac{e^{j\omega T} z^{-1} - e^{j\omega(N+1)T} z^{-(N+1)}}{1 - e^{j\omega T} z^{-1}} \quad (6)$$

この式からこのシステムの極は $z = e^{j\omega T}$ であり、 $|z|=1$ となり、安定条件を満たさない。これは、システムのインパルス応答によって N 点の正弦波信号列をつくり、その信号列と観測信号列との畳み込み積分によってフーリエ係数を計算するという考え方に基づいて $\sigma = 0$ としたためである。しかし、スペクトル分析の考え方にはバンドパスフィルタに観測信号列を通すことによって行うという考え方もある。そこで、減衰項 $\sigma = 0$ とはせずに Fig.1 に示されたシステムの周波数特性があまり変わらない程度の値を(2)式に用いることを考える。つまり、(2)式の $j\omega$ を $-\sigma + j\omega$ に変えればよく、(2)式はつぎのようになる。

$$x(n+1) = e^{(-\sigma + j\omega)T} x(n) + e^{(-\sigma + j\omega)T} \{u(n) - e^{(-\sigma + j\omega)NT} u(n-N)\} \quad (7)$$

この場合の伝達関数はつぎのようになる。

$$H_{\omega}(z) = \frac{e^{(-\sigma + j\omega)T} z^{-1} - e^{(-\sigma + j\omega)(N+1)T} z^{-(N+1)}}{1 - e^{(-\sigma + j\omega)T} z^{-1}} \quad (8)$$

この式の極は $z = e^{(-\sigma + j\omega)T}$ であり、 $|z| = e^{-\sigma T}$ となり、 $\sigma > 0$ とすれば安定条件を満たす。(6)式と(8)式において $\sigma T = 0.0025$ とした場合の周波数特性を Fig.2 に示す。この図から解るようにこのスペクトル分析システムでは $\sigma T \ll 1$ とすれば、周波数特性上では離散フーリエ変換とほとんど特性が変わらない安定な再帰型のフィルタを構成することができる。

5. 打楽器の分析

この章では平成7年度と平成8年度に行った打楽器の分析結果について示す。打楽器には木琴・鉄琴などに代表される固定ピッチ打楽器(音階のある楽器)とシンバル・ドラムなどに代表される不定ピッチ打楽器(音階のない楽器)がある。そのため、分析周波数成分もその特徴に合わせて変えて行かなくてはならない。

5.1 木琴の分析結果

木琴の F5 (基本周波数: 622.25kHz) を打撃したときに奏でる音をサンプリング周波数 10kHz で AD 変換し、第2オクターブから第6オクターブまでの音階成分を複素1次系の ω とし、 $\sigma = 0.001$ とした場合の減衰曲線を Fig.3 に示す。この図から解るよう

に木琴の F5 の音は 622.25Hz, 1244.50Hz, 1864.64Hz および 2489.00Hz の4つの周波数成分から構成されることがわかる。また、音の減衰性を詳しく調べるためにこれらのうちパワーの強かった基本周波数成分(622.25Hz)から3倍音成分(1864.64Hz)までの3つの成分を抽出した結果を Fig.4 に示す。この図から解るように木琴の音は3段減衰を起こすことが考えられる。これは、木琴の構造がバーとパイプ共振器から構成されているため

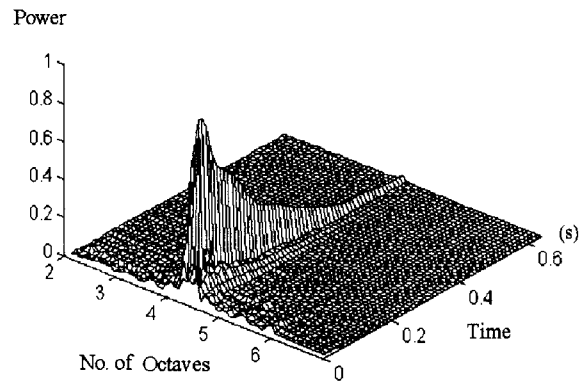


Fig.4 Decay curves of Xylophone tone

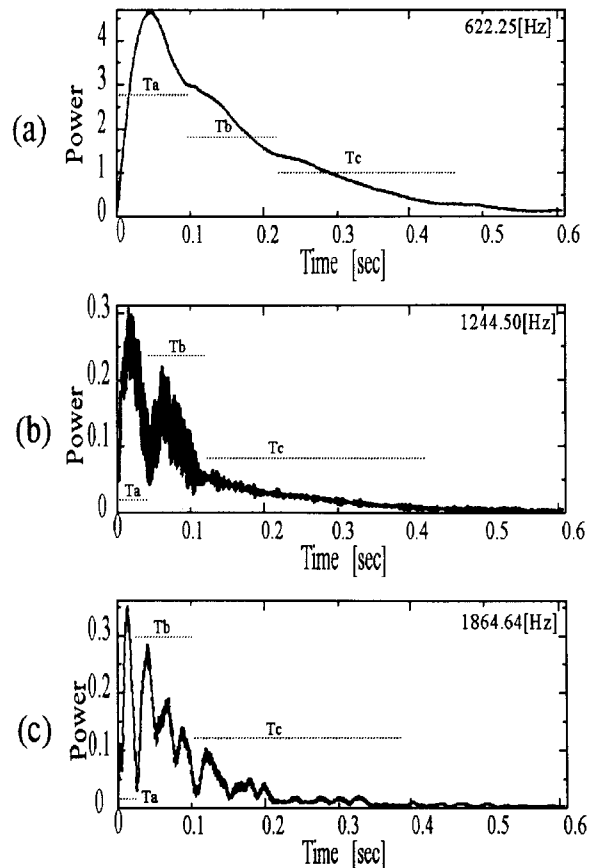


Fig.5 Decay curves of Xylophone tone

に打撃による初期減衰, パーによる2次減衰とパイプ共振器による3次減衰が生じると考えられる.

5. 3 ドラム・シンバルの分析結果

ドラムセットに含まれるスネアドラムとクラッシュシンバルを叩いたときに奏でる音をサンプリング周波数 10kHz で AD 変換し, ドラムやシンバルは音階がないので, 50Hz から 50Hz 間隔で 4kHz まで分析を周波数成分を複素1次系の ω とし, $\sigma = 0.001$ とした場合の減衰曲線を Fig. 5, Fig. 6 に示す. スネアドラム音は 200Hz から 500Hz までの帯域雑音的な音であり, 200Hz と 450Hz が支配的であり2段減衰することが解る. また, クラッシュシンバル音は 600Hz 付近と 3kHz 付近に強い成分を持つ白色に近い広帯域な雑音的な音であり, 一度減衰した音が再度他のモードからエネルギーを受け, 振動し直すことが解る.

6. 結論

本研究では青島によって提案された複素1次系の考えを用いた短時間スペクトル分析法と離散フーリエ変換法の関係を導くとともに, 再帰型のアルゴリズムにとって重要な安定化を行い, 打楽器の分析に応用した. その結果, 木琴の音は楽器の構造のため, 3段減衰を行うこと, ドラムやシンバルは帯域雑音的な音を発すること, 余韻はいくつかの振動モードが優勢になり, 2段減衰をすることなどが解った.

参考文献

- 1) 牧田康雄: 現代音響学, 192/121, オーム社(1971)
- 2) 安藤, 山口: 打楽器の研究について, 日本音響学会誌, 44-12, 972/978(1988)
- 3) N.Aoshima: Short Time Spectrum Analysis by Complex First Order System, Proc. of the 31st SICE Annual Conference, 1156/1160(1992)
- 4) N.Aoshima: Short Time Spectrum Analysis by Complex First Order System, Trans. of SICE, 29-6, 617/622(1992)
- 5) H.Tinone and N.Aoshima: Frequency Domain System Identification with CFOS, Proc. of the 32nd SICE Annual Conference, 817/818(1993)

6) 鎌田, 青島: 複素1次系を用いた定Qフィルタバンク, 第34回 SICE 学術講演会予稿集, 961/962(1995)

7) 青島伸治: 複素1次系とその応用, 計測自動制御学会論文集, 26-7, 811/817(1990)

8) 青島伸治: 複素1次系による減衰振動系パラメータと入力波形の同時推定, 計測自動制御学会論文集, 27-7, 1138/1143(1991)

9) 梅本, 藤沢, 葭谷: 複素1次系をもとにした再帰型短時間スペクトル分析法とその応用, 計測自動制御学会論文集, 32-9, 1329/1334(1996)

10) 梅本, 藤沢, 葭谷: ウェーブレット変換の高速計算法とその応用, 電子情報通信学会論文集 A, J79A-12, 2063/2066(1996)

11) 森下, 小畑: 信号処理, 計測自動制御学会(1982)

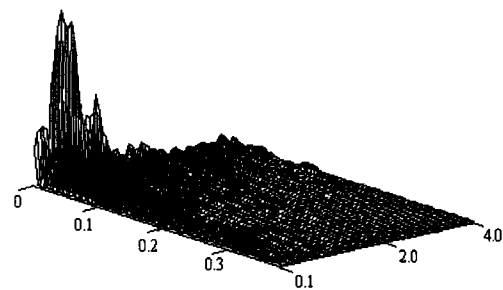


Fig.5 Decay curves of Drume tone

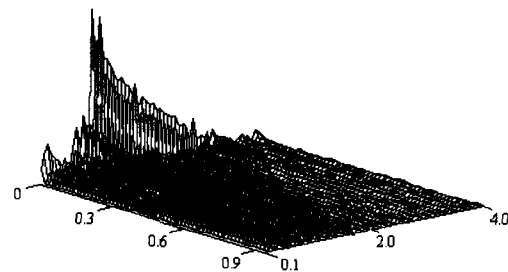


Fig.6 Decay curves of Cymbal tone