

スペクトル楽派の作曲家を対象とした 音響加工過程に関する視覚分析手法の提案

高倉 優理子^{1,a)} 中山 雅紀¹ 小島 有利子² 藤代 一成¹

概要: 20世紀以降音響技術の発展に伴い、電子音響が広く音楽作品に採り入れられるようになった。現代音楽を代表する潮流の一つに、1970年代以降フランス発展し、音響分析を創作の基盤とするスペクトル楽派がある。この楽派の作曲家は、その創作過程において音響のスペクトル解析を通じて音素材の音響特性を追究するという特徴をもつ。彼らが利用する音響分析/加工/合成システムの一例として、フランスの国立機関 IRCAM が開発した AudioSculpt とよばれるソフトウェアが挙げられる。本研究では、このソフトウェアで音素材をスペクトルに分解した後に、各種のフィルタ効果を重畳して独特の音響を構成する過程を、作品の時間進行と作曲行程の2本の時間軸を用いて表現し、その画素指向空間基盤上の専用対話操作群によって分析する随伴ソフトウェアを開発した。本研究は音楽可視化の分野において初めて創作過程の出自管理を試みたものであるといえる。

Visual Analysis Approach for the Process of Sound Processing by Composers in Spectral School

YURIKO TAKAKURA^{1,a)} MASANORI NAKAYAMA¹ YURIKO KOJIMA² ISSEI FUJISHIRO¹

Abstract: After the 20th century, with the advent of computer technologies, composers initiated the use of electronic sounds in their musical pieces. Spectral school is one of the significant trends in contemporary music since the 1970s. Composers in spectral school use the acoustic properties of sound spectra as their key composition materials. One of the representative software systems they use for spectral analysis, sound processing and synthesis is AudioSculpt. We have developed an accompanying system with AudioSculpt to represent the history of creating sounds with spectral analysis of sound materials and processing of sound spectra using various filters by stacked spectrogram space whose axes represent the elapsed time of the sound and the progress of composition. The present system can be regarded as an initial attempt at managing the provenance of designing sounds in information visualization field.

1. はじめに

20世紀以降音響技術が大きく発達し、現代音楽の分野においても音響技術を用いた多様な音楽表現が試みられるようになった。本稿で主題とするスペクトル楽派は、その主要な潮流の一つとして位置づけられる。同楽派はフランスの国立音響音楽研究所 IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique) で学んだ作曲家を中

心に世界的に広まった。スペクトル楽派の作曲家によって作曲された楽曲はしばしばスペクトル音楽とよばれ、ニューグローヴ世界音楽大辞典のなかでは、“主に1970年代以降のヨーロッパにおいて作曲された、音（ないしは音のスペクトル）自体の音響特性を楽曲における音素材の基盤として使用する音楽のことである”と説明されている [1]。

スペクトル楽派の作曲プロセスは作曲家によって異なるため、そのプロセスを類型化するのは困難であるが、概ね次のような作曲プロセスをとっている。まず作曲家はコンピュータを用いて音響素材のスペクトル分析をおこなう。この場合の音響素材には、楽器音や鐘の音、人声など様々

¹ 慶應義塾大学

Keio University

² 尚美学園大学

Shobi University

^{a)} yuriko.takakura@fj.ics.keio.ac.jp

なものが使用されている。Fineberg はスペクトル楽派によって使用される音響素材を、抽象的な倍音列 (abstract harmonic series), 自然音 (natural sounds), および音素材の数学モデル (mathematical models of sound materials) の3点に分類している [2]。スペクトル楽派の作曲家は、音響素材の音響分析を通じてその特性を解析および把握した後、その解析結果をもとに楽器の書法の音響特性や新しい和声を追及し、曲を構成する。このプロセスのうちいずれの段階までコンピュータを用いて創作をおこなうかということは作曲家ないしはそれぞれの曲によって異なっているが、スペクトル楽派の作曲家に共通しているのはコンピュータを用いて音響分析をおこなっていることである。すなわち、コンピュータを用いて音をスペクトル分解し、その音響的特性を追及することは、スペクトル楽派の創作を特徴づける主要なプロセスであるといえる。

具体的な作品を例に挙げると、スペクトル楽派の創始者の一人であるトリスタン・ミュライユ (Tristan Murail, 1947-) の代表作《ゴンドワナ》(1980) では、鐘の音をスペクトル分析し、その結果をもとにオーケストレーションがおこなわれた。また、もう一人の創始者として位置づけられるジェラルド・グリゼー (Gérard Grisey, 1946–1998) は、自身の代表作である《音響空間》(1974–1985) のなかでトロンボーンのE音を音響分析した結果を用いてオーケストレーションをしている。このように、スペクトル楽派の作曲家は非音楽や音楽を問わず様々な音素材を用いて創作をおこなっている。

このような音楽を対象とした研究をおこなう際には、楽譜を用いて楽曲を分析するだけでなく、各楽曲の音響特性も含めて研究を進める必要がある。しかし従来の音楽学研究では、資料調査や文献調査が主な研究手法であり、独自の音響を数理的な解析手法を用いて分析することは困難であった [3]。また、スペクトル楽派のようにコンピュータを用いて創作した楽曲の創作過程を研究する際には、紙媒体で残された資料の調査や文献のみでは創作過程の全貌を明らかにするには不十分であり、ソフトウェア上に残された作曲の履歴を分析することが不可欠である。

スペクトル楽派の主要な創作プロセスである音響分析および合成を支援するソフトウェアとして、IRCAM が開発し 1992 年に販売された AudioSculpt(図 1) が先行研究でもしばしば採り上げられている [4]。このソフトウェアは、音素材をスペクトル分析した結果をスペクトログラムとして提示し、そのスペクトログラムをフィルタや他の処理を用いて編集することによって音響処理をおこなうことができるものである。本研究では、この AudioSculpt というシステムによる音響分析と音処理の過程を視覚解析するシステムを開発している。本稿では、現行システムの仕様を示したうえで [5]、創作過程のより詳細な視覚解析に必要な拡張機能について考察する。

2. 関連研究

音響分析をおこない、その結果に処理をかけるという操作は音響処理の分野では一般的であるため、これらを目的としたソフトウェアは AudioSculpt の他にも多数存在する [6][7][8]。音響分析や加工をおこなうソフトウェアの一例としては、AudioSculpt のほかに Adobe Audition CC が挙げられる。同ソフトウェアには延べ7種類のフィルタや、エフェクト、変調の機能が搭載されているが、AudioSculpt には音を移高する Transposition、音を引き延ばす Time stretch、フォルマントの音量を変化させる Formant フィルタ、音を一時的に停止させる Freeze など 10 種類以上のフィルタが搭載されている。このことから、AudioSculpt は他のソフトウェアと比較しても音響スペクトルの加工によって新しい音響効果を生み出すことに重点がおかれたシステムであるといえる。

音楽可視化の分野では、従来、楽曲構造を可視化および分析する研究や、楽曲間の類似度を明らかにする研究がなされてきた。楽曲構造を対象にした研究の一つとしては Wittenberg が提案した Arc Diagrams というシステムが挙げられる [9]。このシステムは、楽曲の繰り返しパターンを可視化するものである。また、Chan らの研究では、Wittenberg の研究をもとにして、オーケストラ楽曲における楽器の役割を可視化するシステムが提唱された [10]。このシステムでは、楽曲における楽器の用法を一瞥することが可能となっている。

音楽可視化と並ぶ重要な側面として、本研究は、作曲における出自管理の概念を提唱するという観点から、データの編集履歴(出自)を明らかにする出自管理研究の一つとしても位置づけられる。

従来提案されている包括的な出自管理可視化システムの例としては VisTrails [11] や VIDELICET [12] がある。これらは可視化デザインの出目を管理し、データの適切な可視化を支援するシステムである。このように出自を可視化することによってデザインを支援する研究は近年でも広くおこなわれており、たとえば Kurlander らの提案するシステム [13] ではグラフィックデザインプロセスを可視化することによってデザインの作成を支援している。また、Doboř [14] のシステムではタイムラインを用いて 3D モデルの制作を支援している。

これらの研究をふまえ本研究では、音の処理過程を可視化するシステムを提案する。本システムは、従来の音楽可視化研究が対象としていた完成作品の構造ではなく、音処理過程に注目した作曲過程を対象としている点が特徴的である。また、可視化手法の面においても従来の可視化方法では見られない、音の時間進行と作曲行程の時間進行という、2本の時間軸をもった可視化をおこなっている。



図 1 AudioSculpt のインタフェース

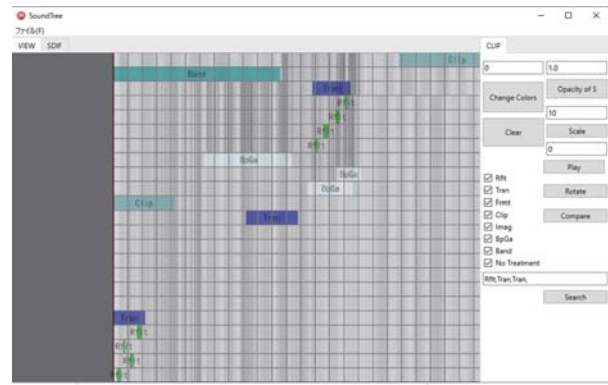


図 2 提案システムのインタフェース

3. 提案システム

本稿では、前述の時間軸をもった画素指向可視化システムを提案する。本システムは Shneiderman の提唱した可視化の要件である TTT [15] に対応して設計されている。

入力データは、AudioSculpt の中間ファイルとして抽出された SDIF (Sound Description Interchange Format) とよばれるデータフォーマットに保存されている音響処理データを用いる [16]。このデータフォーマットは、IRCAM とカリフォルニア大学バークレー校が共同開発したものであり、一つの音響処理をおこなうたびにそのデータが一つのフレームとして保存され、そのフレームが音の時間進行順に並べられているものである。本システムでは、この SDIF に保存されたデータから、音の処理順序や処理の種類、処理がかかっている時間に関するデータを使用する。

図 2 は本システムのインタフェースを示しており、縦軸は音処理の進行を、横軸は音の時間進行をそれぞれ表している。また作曲家が用いたフィルタは四角いブロックとして表示している。本稿ではこれらのブロックを「処理ブロック」とよぶ。処理ブロックの色は処理の種類に対応している。提案システムでは、処理ブロックを画面の下から上に描画することによって音処理の過程を表示している。各処理ブロックの左端はサウンドファイルに対する処理の開始時間を、処理ブロックの横幅は処理の継続時間をそれぞれ表している。

可視化研究においては時間軸を横軸にとることが一般的であり、従来の音楽可視化や出自管理システムの多くが横軸を時間軸に設定している。しかし、本システムでは縦軸も横軸も時間進行を表しているため、音の時間進行と処理過程の時間進行のいずれに注目するかということにたがって、ユーザは横軸と縦軸を入れ替えることができる。また、どのような長さの音素材にも対応できるよう、時間軸の目盛りの間隔は、音素材の長さによって適宜変更可能である。

本システムの目的は、創作過程の視覚解析をおこなうこ

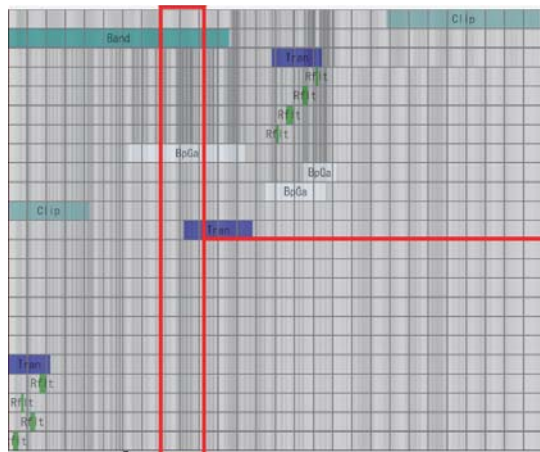
とである。創作過程を分析する目的としては次の 2 点が考えられる。1 点目は、創作過程自体を詳細に明らかにすることであり、2 点目は作曲家の創作技法や意図を明らかにすることである。これらの目的を満たすため、本研究では、提案システムに 3 点の要件を定義している。1 点目は、処理をかけた順序が正確に把握できること、2 点目は音響の変化が大きい処理ブロックを把握すること、3 点目は作曲家の独自の創作手法が分析可能であることである。

本システムのユーザとしては、スペクトル楽派の作曲家と研究者を想定している。しかし、両者が本システムを使用する際の目的は異なっており、作曲家は音響分析をおこなって独自の音響を創出することを目的とし、研究者は作曲家が音響を創出する過程を分析することを目的としている。このことから、本システムの各機能の使用目的も両者間で一部異なるが、その詳細については各機能の説明に併せて述べることにする。以下 Shneiderman の分類に従って本システムの機能について述べる。

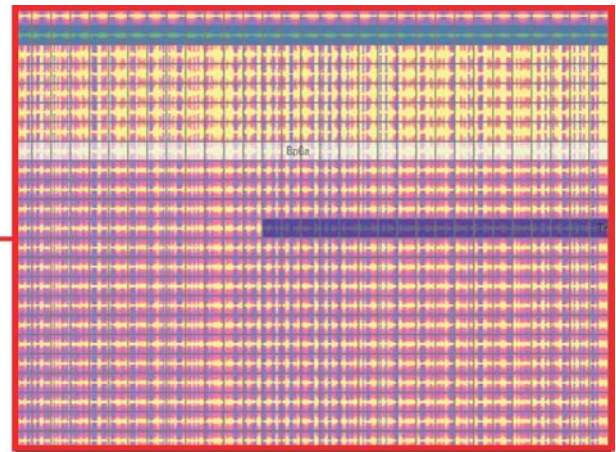
(1) Overview: この表示方法では、処理過程全体を一覧表示することができる。この状態では横軸に音の進行方向を、縦軸に時間の進行方向をとってフィルタをかけた順番や音響変化を示しており、作曲家および研究者は処理の過程及び全体像を把握することが可能となる。

(2) Zoom: スペクトログラムの横幅の数値を大きくすると、スペクトログラムが横に長く伸ばして表示される。その際、スペクトログラムはカラーで詳細に描画される。黄色で描画された箇所は音量の大きい箇所を示しており、赤や青の箇所は相対的に音量が小さくなっていることを示している。また、ステレオ音源に対応するため、各処理ステップのスペクトログラム画像の上半分と下半分で左右のスピーカから録音された音源のスペクトログラムが分かれて描画されている。本機能によってユーザは、作曲の進行に伴う音の変化を詳細に把握することができる。

(3) Filter: 特定の処理のみを色を変えて表示する機能である。本機能では、処理の種類が 4 文字で表記されたボタンを押すことによって、選択した処理のみ色が変わって提



(a) Overview の結果画像



(b) (a) の四角で囲んだ箇所の横幅を 10 倍にした結果画像

図 3 Overview 機能と Zoom 機能を用いた際の結果画像

示される。本機能により、処理手順の特徴を把握することが可能となり、作曲家は自らが従来おこなってきた音処理の手順を鑑みたくえで大局的な処理の方向性を考えることができる。また、研究者はその作曲家の処理手順を明らかにできるとともに、他の作曲家の処理手順と比較することによって相対的にその作曲家の音響創作手順を理解することが可能となる。

(4) Extract: 作曲家が頻繁に使用する処理パターンを色を変化させて抽出する。このことによって研究者および作曲家は処理手順の特徴が処理パターンとして把握できる。また、他の作曲家のデータを入手した場合他の作曲家との処理手順の比較が可能となる。

(5)View Relations: 本システムでは MFCC (Mel-Frequency Cepstrum Coefficients) とよばれる音響特徴量を計算し、その結果をグラフとして提示することによって、処理の各ステップ間における音響変化を観察することができる機能を提供している。このグラフは本システムにおいてセカンドウィンドウとして表示される。グラフの横軸は処理ステップ、縦軸はある処理ステップを基準とした際の各処理ステップの音響上の差分を表している。基準となる処理ステップはグラフの横に付されたボックスに処理ステップの番号を入力することによって選択できる。例えばボックスに入力する処理ステップの番号を 0 とした場合、処理前の音源と各ステップ間の MFCC の差分がグラフとなって表示される。このグラフでは、傾きが大きくなるほど音響変化が大きいことを示している。

(6)Details On Demand: 処理後の音変化スペクトログラムの変化を提示することができ、それぞれの処理がどのような音響上の効果をもつかということについてスペクトログラム上で表示したうえで、実際に音を聴いて確認することができる。このことにより、各処理が音響上に及ぼす影響を視覚的に解析することが可能である。

4. 実験と評価

開発環境として PC(OS:Windows 10, プロセッサ: Intel Core i7 2.40GHz, 実装メモリ: 8GB, GPU: Intel HD Graphics 5500), プログラミング言語は Delphi を用いた。

図 3 (a) は 2.788 秒の録音された梵鐘音に 23 個のフィルタを使用した際の例を示している。6 から 11 ステップ目の間にみられるブロックがないステップは、作曲家が一旦処理をかけた後、その処理を作曲家が削除したことが示されている。また、処理の後半部分ではスペクトログラムの色が濃く表示されていることから、この音処理過程では後半に音響が大きく変化する処理がかけられたことがわかる。

図 3 (b) は図 3 (a) に赤で示された箇所を 10 倍に拡大して描画したものである。ユーザは処理の効果を反映してスペクトログラムがどのように変化しているかということについて詳細に見てとることができる。この画像では、Bandpass フィルタによって高音域の倍音が大幅に削除されていることがわかる。

図 4 は、Filter 機能を用いて Gain フィルタを抽出した例である。この機能を用いると、Gain フィルタが音源の中間に固まって用いられていることがわかる。Gain フィルタは音を強くする効果をもつフィルタであるから、作曲家は音源の中間部を強調するという意図もっていたことを読みとることができる。

図 5 は、Extract 機能を用いて Rectangular Surface フィルタと Transposition フィルタが連続するパターンを抽出した結果である。この結果画像からは、Rectangular Surface フィルタと Transposition フィルタが連続するパターンがサウンドファイルの前半と中盤に 2 回繰り返されて使用されていることが読みとれる。

図 6 からは、音響処理によってどのように音響が変化していったのかということ把握することができる。グラフから、5 番目の処理と 12 から 14 番目の処理、さらに 21 番

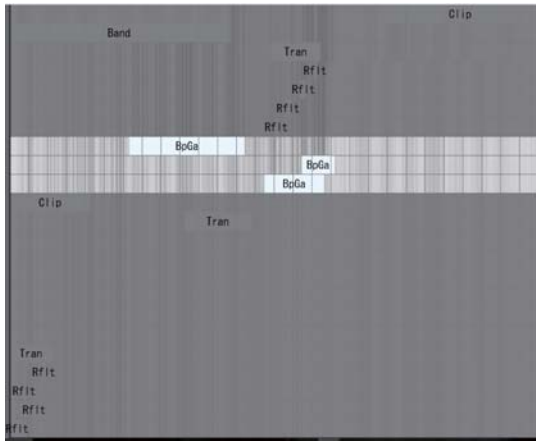


図 4 Gain フィルタの抽出結果

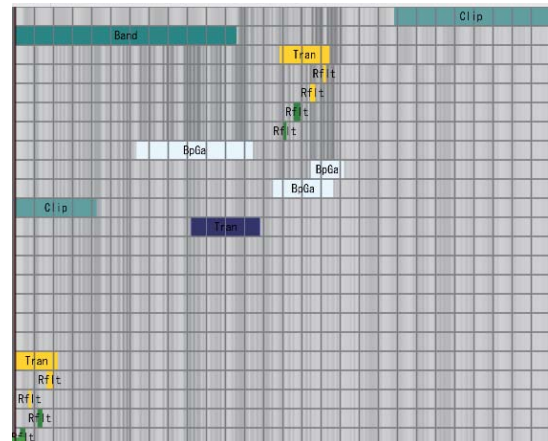


図 5 Rectangular Surface フィルタと Transposition が連続するパターンの抽出結果

目の処理の際にグラフの傾きが大きくなっている。5, 12~14, 21 番目の処理をみると、それぞれ Transposition, Gain フィルタ, Bandpass フィルタとなっている。このことから、本処理過程においてはこれらの処理によって音響的に大きな変化がもたらされていることがわかる。また、これらの処理のうち特に音響変化が大きいのが 22 番目にかけられた Bandpass フィルタである。このことから Bandpass フィルタが音響的にもっとも大きな効果をもたらしているといえる。

本研究を評価するにあたり、共著者の小島およびその学生 2 名にインタビューを実施し、作曲家の創作過程を視覚解析することが効果的であるという評価を得た。しかし、本システムによって大局的な処理過程の可視化は実現できたものの、各フィルタをどのような意図で作曲家が使用したのかということについて詳細な分析は困難であった。また、データから読みとることができるのは、単純な処理の種類やタイミングであるが、個々の処理をどのような意図で使用したかという詳細な分析に関してはインタビューをおこなわなければ不可能であった。このことを解決するためには、インタビュー等を通じて詳細な意図を確認しながら、知見を収集し可視化結果に反映するという作業を繰り返す必要があると考えられる。

5. 考察

本研究では、スペクトル楽派の作曲家の創作過程を視覚解析する手法に関し、画素指向空間基盤上で創作過程とそれに伴う音響変化を可視化する初期的システムを提案した。以下では創作過程のより詳細な分析に必要な拡張機能について考察する。

5.1 スペクトログラムの差分表示

創作の進行による音響変化を詳細に把握するために、スペクトログラムのどの箇所がどのように変化したかという

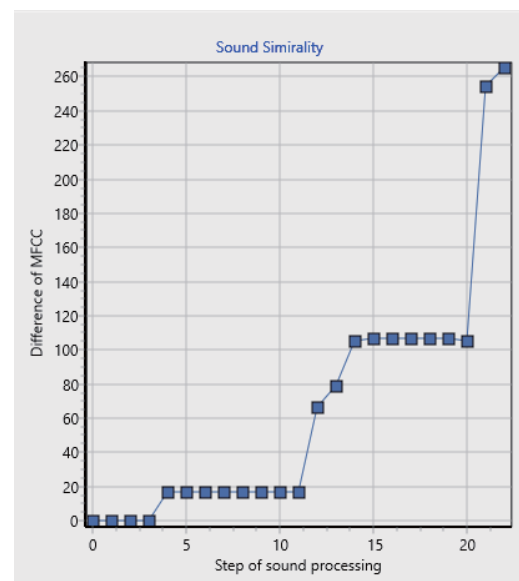


図 6 MFCC を用いて計算した処理の進行に伴う音響変化

ことをより詳細に提示する必要がある。その提示方法として、フィルタをかける前後のスペクトログラムの差分をとることが考えられる。

5.2 創作の進行に伴う音響変化の提示

本稿では MFCC を用いて作曲の進行に伴う音響変化をグラフを用いて表示した。しかし、この手法では、音処理の各段階のサウンドファイル全体を比較しているのみであり、音処理による音響変化を詳細に分析するためには、より精緻な手法で音響変化を定義する必要がある。

音響加工過程を追跡する際の指標として、次の 4 点が考えられる。1 点目は、フィルタがかけられた箇所、2 点目はフィルタの種類、3 点目はそのフィルタによって得られた音響変化、4 点目は作曲家がその処理をいつつけたか、また処理全体に対する所要時間などといった作曲時間に関する指標である。現時点のシステムではスペクトログラムとフィルタを表すブロックを重ねて表示することによって大

局的な音響変化を示しているが、サウンドファイルのなかでどの場所にフィルタがかけられ、音響がどのくらい変化しているかという厳密な特定は難しい。今後これらの指標を組み合わせ、可視化として反映させることが課題である。

5.3 他のシステムへの適用

スペクトル楽派が使用するシステムは AudioSculpt ばかりではない。そのため、より包括的な作曲過程の分析には AudioSculpt 以外のシステムへの適用が必要とされる。なかでもスペクトル楽派において使用している作曲家の多い OpenMusic [17] への適用は重要な課題である。

OpenMusic は、作曲用ビジュアルプログラミング言語を扱うソフトウェアであり、プログラムの変更履歴を可視化することで処理の流れを概観することは可能であると考えられる。しかし OpenMusic は曲の構成を支援するソフトウェアであることから、作曲の進行に伴う音響変化を可視化することは難しいことが想定される。OpenMusic では、コマンドによって AudioSculpt で作成した SDIF ファイルを組み込んで作曲を行うことができるため、AudioSculpt による作曲過程の可視化と OpenMusic による可視化を合わせた分析システムを設計することができると考えられる。

また、共著者の小島は、電子音楽作曲の際にも紙へメモをとるという行為は重要な役割を果たしていることを指摘している。そのため、本システムを作曲家が実際に使用するためにはタッチペンや指で直感的な書き込みが可能なタッチパネル式のデバイスやソフトウェアとの連携が求められると考えられる。

6. おわりに

本研究は、スペクトル楽派の音響分析と加工の過程に焦点をあてて、作曲過程を視覚分析する新たな情報可視化手法の提案した。この研究を通じ、AudioSculpt 上で音素材をスペクトルに分解した後に、各種のフィルタ効果を重畳して独特の音響を構成する過程を、作品の時間進行と作曲行程の2本の時間軸を用いて表現し、その画素指向空間基盤上の専用対話操作群によって分析可能にする初期的システムを開発した。従来の音楽可視化研究においては完成した作品を対象としたものにとどまっていたが、本研究ではその創作過程を対象としている。このことは、作曲過程の定量化により、作曲作法を他者と効果的に共有・発展させることを可能にすると考えられる。また、可視化方法に関しても、可視化出自管理のなかでも殆ど類を見ない時系列イベントを対象とした点が特徴的である。

今後は、作曲過程による音響変化を詳細に分析し、可視化結果として反映することが課題である。そのためには、スペクトログラムにおいて音響変化の差分を明示するとともに、サウンドファイルにおけるフィルタの位置やフィルタの種類、処理がかけられた時間のデータを加味して音響

変化を評価する必要があると考えられる。また、実際に作曲家が使用しているソフトウェアは AudioSculpt 以外にも多く存在するため、これらへの適用も重要な課題である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科研費新学術領域計画研究 25120014 の支援により実施された。また、本研究発表は一部、文部科学省博士課程教育リーディングプログラム(オールラウンド型)「超成熟社会発展のサイエンス」の RA 支援によって行われたことを記す。

参考文献

- [1] J. Anderson: "Spectral Music," Grove Music Online, Oxford Music Online, <http://www.oxfordmusiconline.com/subscriber/article/grove/music/50982>, 2016.
- [2] J. Fineberg: "Guide to the Basic Concepts and Techniques of Spectral Music," Contemporary Music Review, Vol. 19, No. 2, pp. 81–113, 2000.
- [3] 高倉 優理子:「黛敏郎《涅槃交響曲》(1958年)の「カンパノロジー・エフェクト」に関する一考察——日本近代音楽館蔵「Campanology 資料」の検討を中心に」, 第66回美学会全国大会若手研究者フォーラム発表報告集, pp. 63-72, 2016.
- [4] AudioSculpt Ircam Anasynth, <http://anasynth.ircam.fr/home/english/software/audiosculpt>, 2016.
- [5] Y. Takakura, M. Nakayama, and I. Fujishiro: "A Visual Analysis System for Compositional Processes of Composers in Spectral School," in the Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Image Electronics and Visual Computing, pp. 5B-2-1-5B-2-6, 2017.
- [6] Audacity, <http://www.audacityteam.org/>, 2017.
- [7] Adobe Audition CC, <http://www.adobe.com/jp/products/audition.html>, 2017.
- [8] Pro Tools, <https://www.avid.com/ja/pro-tools>, 2017.
- [9] M. Wittenberg: "Arc Diagrams: Visualizing Structure in Strings," in Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization, pp. 110–116, 2002.
- [10] W. Y. Chan, H. Qu and W. H. Mak: "Visualizing The Semantic Structure in Classical Music Works," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 16, No. 1, pp. 161–173, 2010.
- [11] C. T. Silva, J. Freire and S. P. Callahan: "Provenance for Visualizations: Reproducibility and Beyond," IEEE Computing in Science Engineering, Vol. 9, No. 5, pp. 82–89, 2007.
- [12] I. Fujishiro: "Visualization Design and Lifecycle Management," Dagstuhl Seminar on Scientific Visualization, 2007.
- [13] D. Kurlander and S. Feiner: "Editable Graphical Histories," in Proceedings of the IEEE Workshop on Visual Languages, pp. 127–134, 1988.
- [14] J. Doboš, N. J. Mitra and A. Steed: "3D Timeline: Reverse Engineering of A Part-based Provenance from Consecutive 3D Models," Computer Graphics Forum, Vol. 33, No. 2, pp.133–144, 2014.
- [15] B. Shneiderman: "The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations," in Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Languages, pp. 336–343, 1996.
- [16] SDIF Sound Description Interchange Format, <http://sdif.sourceforge.net/>, 2017.
- [17] IRCAM Forumnet OpenMusic, <http://forumnet.ircam.fr/product/openmusic-en/>, 2017.