

創作ノート

蝸牛による Auditory Distortion Products 合成と モジュラーシンセサイザによる階層的空間表現の試み Efforts Toward Hierarchical Spatial Representation Using Synthesis with Cochlea-Based Auditory Distortion Products and a Modular Synthesizer

岩堀 風太

Futa IWAHORI

東京工科大学

Tokyo Univ. of Tech

伊藤 彰教

Akinori ITO

東京工科大学

Tokyo Univ. of Tech

概要

本稿は、聴覚系内部で生成される主観的な音響現象「Auditory Distortion Products (ADP)」の活用と、West Coast Synthesis の系譜を汲む音響合成手法によってデザインされたモジュラーシンセサイザの音色を統合した立体音響サウンドアート《Myodesopsia Interstice》についての創作ノートである。モジュラーシンセサイザの物理的な合成音に対し、リスナーの耳内で生成される ADP の粒子は聴取者の頭部内で生成されるため、外部音源とは異なるヘッドフォン再生に似た定位特性を持つ。7.1.4ch マルチスピーカー環境において両者はレイヤーとして重なり響きの迷宮を構築し、スピーカーと聴取者の間で混ざり合う様は実体なき知覚の拡張を提示する。本稿では、本作のコンセプトと ADP の合成手法、モジュラーシンセサイザのサウンドデザインについて述べる。

This paper is an artist statement on the spatial sound art piece titled *Myodesopsia Interstice*. This musical piece integrates the use of Auditory Distortion Products (abbr. ADP): a subjective acoustic phenomenon generated within the auditory system, with the timbre of a modular synthesizer designed using sound synthesis techniques rooted in West Coast Synthesis. In contrast to the physically synthesized sounds of the modular synthesizer, the ADP generated within the listener's ears originate inside the listener's head. This results in localization characteristics distinct from external sound sources, resembling headphone playback. Within a 7.1.4ch multi-speaker environment, these elements overlap as layers, constructing a labyrinth of reverberation. The way they blend into the interstices between the speakers and the listener extends intangible perception. This paper discusses the concept

of this work, the ADP synthesis method, and the sound design of the modular synthesizer.

1. はじめに

近年の VR や没入型メディアの発展に伴い、立体音響技術の応用が注目を集めている。しかし、従来の立体音響研究の多くは、現実の音場を精密に再現する写実的なアプローチに主眼が置かれてきた。聴覚器官の生理現象である Auditory Distortion Products(以下 ADP)を活用することで、現実にはあり得ないような超現実的な聴覚体験を創出する可能性があると考えた。ADP は、聴覚器官の非線形特性によって蝸牛内で生成される音響現象である。複数の純音が同時に耳に入力されると、それらの周波数の和や差に対応する新たな音が聴覚系内部で生成される。この現象は 1754 年に Giuseppe Tartini によって「第三の音」として報告されて以来、音響学や聴覚生理学の研究対象となってきた (Tartini 1754)。ADP の音楽的応用事例としてサラウンド環境下での現代音楽である Maryanne Amacher『*Sound Characters*』と Christopher Haworth『*Correlation Number One*』があげられる (Cimini 2022)(Haworth 2011)。ADP の音楽的応用事例はこの二人の作品以外殆ど無く、ハイトスピーカーを使用した立体音響作品における活用例は稀である。一方、1960 年代に Don Buchla によって提唱された West Coast Synthesis は、減算合成を基本とする East Coast Synthesis とは対照的に、波形の折り畳み (Wave Folding) や非線形変調を用いた音色生成を特徴とする (Holmes 2015)。Buchla は San Francisco Tape Music Center からの要請から生まれたシステムであるため、設計段階からサラウンド環境化での電子音楽の演奏を想定していた点である。空間表現を音色と空間を不可分なものとして扱い、電圧制御による動的な空間表現を可能にした。本作品《*Myodesopsia Interstice*》は、ADP と West

Coast Synthesis という一見異なるがサラウンド環境下での現代音楽での文脈で共通する二つの概念を統合することで、知覚の境界に揺らぎを与える立体音響表現の可能性を探るものである。スピーカーから再生される音(客観的な音)と、聴取者の耳内部で生成される音(主観的な音)を組み合わせることで、音源定位の曖昧さと空間的深度の多層性を追求した。

2. 立体音響作品《MYODESOPSIA INTERSTICE》 概要

2.1. 作品コンセプト

《Myodesopsia Interstice》というタイトルは、飛蚊症(Myodesopsia)と間隙(Interstice)という二つの語を組み合わせたものである。飛蚊症は視覚における生理現象であり、眼球内部の浮遊物が網膜に影を落とすことで、実在しない浮遊物が知覚される。ADPは聴覚における生理現象であり、外部から入力された音が蝸牛内で変調されることで、実在しない音が知覚される。この作品では、ADPによって生成される「実在しない音」と、スピーカーから再生される「実在する音」の間隙において、知覚の境界を揺さぶる聴覚体験を創出することを目指した。

2.2. 階層的空間表現の試み

従来のマルチスピーカー音響では、スピーカーの物理的配置に基づく音源定位が主要な表現手段であった。ADPは聴取者の頭部内で生成されるため、外部音源とは異なる定位特性を持つ。両耳強度差(ILD)や両耳時間差(ITD)といった通常の定位手がかりが適用されにくく、頭内定位として知覚される傾向がある(Kendall et al. 2014)。本作品では、この特性を積極的に活用することで、以下の三層からなる階層的空間表現を試みた

1. 外部音響層 7.1.4ch マルチスピーカーシステムによる物理的な空間配置
2. 内部音響層 ADPによって聴取者の蝸牛内で生成される頭内定位音
3. 境界層 外部音と内部音が干渉し、定位が曖昧化する中間領域

これらの層を動的に変化させることで、聴取者の知覚において空間の階層構造そのものが浮遊し、自らの境界を失った知覚は身体の深層へと響鳴を拡張させていく体験を創出した。

2.3. 音楽的動機

Maryanne Amacherは、ADPを活用した作品『Sound Characters』において、「耳音」(ear tones)という概念を提唱し、聴覚器官そのものを楽器として扱う可能性を示した(Cimini 2022)。彼女は、部屋の音響(Room)、蝸牛の非線形特性(EAR)、そして神経系の処理(NEURAL)という三層のフィルタリングを通じて、聴取者の知覚に直接働きかける音楽表現を追求した。本作品は、Amacherの思想を継承しつつ、West Coast Synthesisによる動的な音色変化と空間制御を統合することで、より複雑な階層構造を持つ立体音響作品の実現を目指した。

3. AUDITORY DISTORTION PRODUCTS

3.1. ADPの生成メカニズム

Auditory Distortion Products(ADP)は、聴覚器官の非線形特性によって蝸牛内で生成される音響現象である。二つ以上の純音が同時に耳に入力されると、それらの周波数の組み合わせに対応する新たな音が生成される。主要なADPとして、二次差音(Quadratic Difference Tone, QDT)と三次差音(Cubic Difference Tone, CDT)が知られている(Goldstein 1967)。QDTは、二つの周波数 f_1 と $f_2(f_2 > f_1)$ が入力された際に、その差 $f_2 - f_1$ の周波数で生成される。CDTは $2f_1 - f_2$ の周波数で生成され、QDTよりも低い周波数となる。CDTは、周波数比が1.1から1.8の範囲で最も強く知覚され、約10dBの音圧レベルで検出可能である(Campbell and Greated 1994)。ADPの生成メカニズムは、蝸牛の能動増幅機構(cochlear amplifier)に起因する。外有毛細胞の電気機械変換特性が非線形性を持つため、入力信号の相互変調が生じ、ADPが生成される(Kemp 1978)。ADPは単なる物理的な音響現象ではなく、聴覚生理に深く関わる現象である。

3.2. ラウドスピーカー再生におけるADPの定位特性

ラウドスピーカーから再生された音によってADPが生成される場合、その定位特性は通常の音源定位とは異なる挙動を示す。ADPは聴取者の蝸牛内で生成されるため、両耳強度差(ILD)や両耳時間差(ITD)といった通常の定位手がかりが適用されにくい。二つのスピーカーからそれぞれ異なる周波数の純音を再生した場合、ADPは両スピーカーの間ではなく、聴取者の頭部内に定位する傾向がある。この現象はADPが外部音源ではなく、聴覚器官内部で生成される音であるためである(Kendall et al. 2014)。ADPの定位は入力音の音圧レベルや周波数比によって変化する。この不確定な定位特性は、音楽表現において独特の効果をもたらす。本作品では、この特性を積極的に活用するこ

とで、音源の位置が曖昧化し、聴取者の知覚において空間が揺らぐような体験を創出した。

3.3. 現代音楽における ADP の応用

ADP の音楽的応用は、Giuseppe Tartini の時代から試みられてきたが、現代音楽における本格的な活用は限定的である。先駆的な例として、Maryanne Amacher の『Sound Characters』が挙げられる。Amacher は、ADP を「耳音」(ear tones) と呼び、聴覚器官そのものを楽器として扱う音楽表現を追求した (Cimini 2022)。Christopher Haworth は、マルチスピーカー環境における ADP の生成を探求した作品『Correlation Number One』を発表している (Haworth 2011)。Haworth は、8 チャンネルのスピーカーシステムを用いて ADP を生成し、空間的な音色変化と定位の不確定性を音楽的に活用した。これらの先行作品は、ADP が単なる聴覚の副産物ではなく、積極的な音楽表現の手段となり得ることを示している。本作品は、これらの知見を継承しつつ、West Coast Synthesis の動的な音色変化と組み合わせることで、より複雑な空間表現を実現することを目指した。

4. WEST COAST SYNTHESIS

4.1. West Coast Synthesis とは

West Coast Synthesis は、1960 年代に Don Buchla によって提唱された電子音楽合成の設計思想である。同時期に Robert Moog が開発した East Coast Synthesis が減算合成 (subtractive synthesis) を基本とするのに対し、West Coast Synthesis は波形の折り畳み (Wave Folding) や非線形変調を用いた加算的なアプローチを特徴とする (Holmes 2015)。East Coast Synthesis では、倍音豊かな波形をフィルタで削ることで音色を形成する。West Coast Synthesis は、正弦波などの単純な波形から出発し、非線形処理によって倍音を付加していく。この違いは単なる技術的な相違ではなく、音楽に対する根本的な哲学の違いを反映している。

4.2. San Francisco Tape Music Center とサラウンド環境での空間制御

West Coast Synthesis の発展において、San Francisco Tape Music Center (SFTMC) の役割は極めて重要である。SFTMC は 1962 年に Ramon Sender と Morton Subotnick らによって設立された、現代音楽とパフォーマンスアートの実験的な拠点である。 (Holmes 2015)。1963 年、Subotnick と Sender は Buchla に対し、「現代音楽作曲用の電子楽器システム」の開発を依頼した。この依頼の重要な要件の一つが、サラウンド環境での電子

音楽の演奏に伴うリアルタイムの空間制御であった。当時、テープ音楽においては多チャンネル再生による空間表現が試みられていたが、ライブパフォーマンスにおいて空間を動的に制御する手段は限られていた。Buchla は、この要求に応えるため、音色パラメータと同様に空間パラメータを電圧制御できるシステムを開発した。これにより、音色の変化と空間移動を有機的に連動させることが可能となった。Buchla 200 シリーズに搭載された Quadraphonic パンナーは、4 チャンネルのスピーカーシステムにおいて、音源の位置を電圧によって制御することを可能にした (Manning 1994)。この「音色と空間の不可分性」という思想は、West Coast Synthesis において重要な特徴の一つである。従来のシンセサイザでは、音色生成と空間配置は独立した処理として扱われることが多かった。Buchla のシステムでは、CV 制御によって音色パラメータと空間パラメータを同時に制御することで、音色の変化と空間移動が一体となった表現を実現した。本作品では、この Buchla の思想を継承し、DAW 環境においてカスタムプラグインを開発することで、音色と空間の動的な連動を追求した。

4.3. Low Pass Gate による空間的深度の表現

Low Pass Gate (LPG) は、West Coast Synthesis において特に重要な役割を果たすモジュールである。LPG は、ローパスフィルタと電圧制御アンプ (VCA) の機能を統合したものであり、音色の明るさと音量を同時に制御することができる。Don Buchla は、LPG に光依存抵抗器 (LDR) を用いた Vactrol という素子を採用し、自然楽器のような「音色の変化と音量の変化の相関性」を電子的に再現することを目指した (Parker and D'Angelo 2013)。LPG の特徴は、音の立ち上がりりと減衰において、音色と音量が有機的に連動する点にある。打楽器や撥弦楽器では、音の立ち上がりにおいて高次倍音が豊富に含まれ、時間とともに減衰していく。LPG は、この自然な音色変化を電圧制御によって実現し、音に空間的な奥行きを与える。本作品では、LPG を用いることで、音色の変化と空間的深度の变化を連動させた。音が明るくなるにつれて前景化し、暗くなるにつれて後退するような空間的な動きを創出することで、聴取者の知覚において音源の距離感が流動的に変化する体験を実現した。

4.4. Model 227e System Interface による動的空間制御

Buchla Model 227e System Interface は、4 チャンネルのクアドラフォニック環境におけるイコライジング、空間定位、ミキシング、ルーティングを統括する。このモジュールは、Suzanne Ciani をはじめとした立体音響

作品の実現において重要な役割を果たした。227eの各チャンネルには「Swirl」モードが搭載されている。このモードを選択すると、内部の Quadrature LFO (90度の位相差を持つ4系統のLFO) が作動し、音源を円環状に巡回させる。Swirlモードには巡回速度とその方向を制御するRateおよびDirection、音源が中心(聴取者)からどの程度離れた軌道を通るかを決定するAmplitudeおよびRadiusコントロールがある。Swirlモードオフの状態(XYモード)ではデカルト座標系に基づき左右・前後の位置をノブで直接的に決定する。これらのパラメータはすべて独立した電圧入力として設計されており、エンベロープやLFOによる時間的変調が可能である。音色と空間位置の変化を同期させることが可能である。これにより、音が明るくなるにつれて遠ざかり、暗くなるにつれて近づくような、通常の空間認識とは異なる知覚体験を創出できる。Suzanne Cianiは、Buchla 200シリーズを用いた即興演奏『Improvisation On Four Sequences』において、音色と空間位置の変化を同一のCVで同期させた。音が明るくなるにつれて近づき、暗くなるにつれて遠くなるような、ダイナミクスに富んだ知覚体験を創出した。本作品はこの手法をDAW環境において再現することを試みた。

5. JSFX プラグインの実装

5.1. MIDI CC 制御 LFO モジュレーター「InterFLO」

227eの「Swirl」モードにおける動的な空間制御を実現するため、REAPER用のJSFXプラグイン「InterFLO」を開発した。JSFXプラグインとはREAPERに統合されたリアルタイム音声処理用のスクリプト言語環境である。コードを修正して保存した瞬間にREAPER上で処理が更新されるため、立体音響の定位感や音色の微細な調整を、出力を聴きながらリアルタイムで行い既存の商用プラグインでは不可能な作品特化型の実装が可能である。「InterFLO」は共通のグローバル周波数を持つ異なる振幅や位相を持つ4つのLFOを生成し、MIDI CCメッセージとして出力する。Fluctuationパラメータは各LFOの周波数に微細な揺らぎを追加することでより複雑で自由度の高い空間制御を可能にした。Drift LFOはグローバル周波数そのものを変調させる専用のLFOである。この機能は同一モジュール内のCV INPUTとCV OUTでCV変調させるモジュラーシンセサイザの「Self-Modulation」というテクニックを模した機能であり、この機能を適用することでBuchlaシステムにおける「うねり」(drift)を再現し、長時間にわたって空間位置が緩やかに変化する効果を生み出す。これらのパラメータにより、モジュラーシンセサイザの電圧制御と同様の、有機的で予測不可能な空間移動を実現した。InterFLOが出力するMIDI CCは、REAPERの標準空間制御プラグイン「ReaSurroundPan」のX、Y、

Z軸のパラメータに割り当てられ、3つの独立したLFOによって音源が複雑な軌道を描くように制御される。図1はInterFLOでReaSurroundPanを制御した空間移動のイメージである。X、Y、Z軸全てが同時に変化する空間移動はDAWのオートメーションによる制御よりも遥かに容易になった。FluctuationとDrift LFO機能を加えたことにより開発時点では予想できなかった複雑な移動パターンの設定が可能となった。

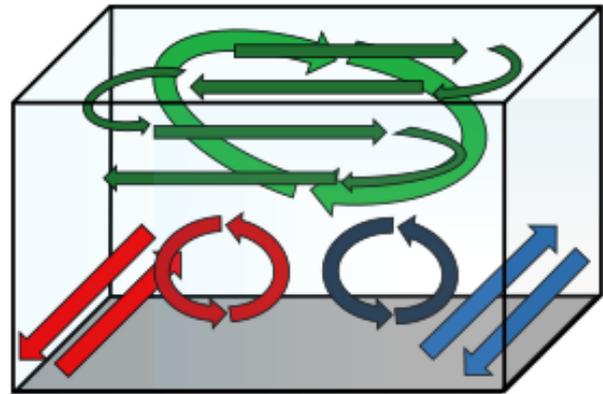


図1: 「InterFLO」による動的な空間移動イメージ (各色はそれぞれのトラックを表す)

5.2. マルチチャンネルリバーブ「Innerverb」

ADPの制御と連動した非現実的な響きを付与するため、7.1.4ch専用のマルチチャンネルリバーブ「Innerverb」を開発した。このプラグインは、Feedback Delay Network(FDN)アルゴリズムを採用し、16本のディレイラインを16×16のHadamard変換によって相互接続することで、密度の高い残響を生成する。Innerverbのアルゴリズムの全容は図2の通りである。

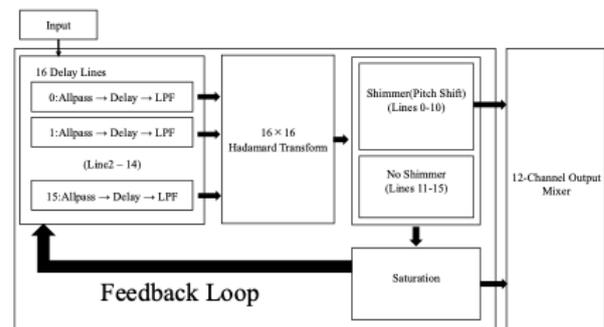


図2: 「Innerverb」アルゴリズム

11チャンネル(LFEを除く)に対して、それぞれ独立したピッチシフトを設定可能である。チャンネル別にウェットレベルを設定することが可能であり各出力チャ

ンネルのリバース量を個別に調整できる。Innerverb は、Make Noise Erbe-Verb の設計思想を参考に、オールパスフィルタとFDNを組み合わせることで、高密度かつ透明感のある残響を実現している (Erbe 2015)。オールパスフィルタは各ディレイラインに拡散を加え、音のディレイ感を無くし自然な残響特性を実現した。個別チャンネルシマー機能により、階層的空間表現の外骨格となる ADP の周波数構造と連動した非現実的な響きを創出することが可能となった。

6. 制作システム

本作品の制作は、Dolby Atmos の公式フォーマットに準拠した 7.1.4ch マルチスピーカー環境と REAPER ver.7.58 を使用して行われた。7.1.4ch はフロント層 (L, R, C, LFE)、サラウンド層 (SL, SR, SRL, SRR)、ハイト層 (HL, HR, HRL, HRR) の 12 チャンネルから構成される。REAPER は、柔軟なルーティングとカスタムプラグインの統合が可能な DAW であり、立体音響作品の制作に適している。JSFX によるカスタムプラグイン開発により、West Coast Synthesis 的なアプローチを実現することができた。音素材の制作には、Eurorack モジュラーシンセサイザとプログラミング言語 Csound を使用した。Eurorack システムは、Wave Folder や Low Pass Gate などのモジュールを組み合わせることで、West Coast Synthesis 的な音色生成を実現した。Csound は ADP 生成を考慮した正弦波の精密な生成に使用された。Csound は全て 800Hz 以上の正弦波であるが、モジュラーシンセサイザの音は 30Hz 付近の重低音も一部使用することで客観的な実在する音と主観的な音である ADP の違いを明確にした。

7. AUDITORY DISTORTION PRODUCTS 生成を考慮した音素材の制作

本作品における ADP 生成は、Csound を用いた正弦波の合成によって実現された。今回 ADP として取り扱ったのは QDT (f_2-f_1) である。QDT は生成される音の周波数が刺激周波数よりもはるかに低い領域に位置するため、より容易に認識することが可能である。音楽家の Giuseppe Tartini は QDT を認識したことでこの現象を発見し、Maryanne Amacher の作品と Christopher Haworth 両者の作品でも QDT を ADP として取り扱っていることから、音楽的側面では $ADP = QDT$ として取り扱っていると判断した。中程度の音量でも ADP を生成するため直接加算合成法を使用した (Pressnitzer and Patterson 2001)。隣接する正弦波ペアが同一周波数の ADP を生成することで、ADP のレベルを増加させ中程度の音量でも ADP を聴き取りやすくすることを可能にする。この手法は Christopher Haworth 「Correlation

Number One」で使用された手法と同様のものである (Haworth 2011)。個々の正弦波には ADP の非相関化を生成し ADP が空間内で聴取者の動きに呼応して拡散する複雑でインタラクティブな音響空間を構築するため周波数ジッターを適用した。この周波数ジッターは、8Hz で変動する $\pm 1.5\text{Hz}$ のランダムな周波数変化であり、聴取者の頭部の動きによる ADP の定位変化を意図的に強調する (Kendall et al. 2014)。 $A_4=440\text{Hz}$ を基準として、A1 から E3 までの音程に対応する ADP を生成するよう、正弦波の周波数を計算した。正弦波の数を削減し編集を容易にするために 800Hz, 1500Hz, 2000Hz の正弦波は複数の ADP 生成の作成で使用した。表 1 は生成した正弦波の周波数である。

表 1: Csound で生成した正弦波周波数 ($A_4 = 440\text{Hz}$)

ADPターゲット周波数 (F)	サイン波 1 (f1)	サイン波 2 (f1+F)	サイン波 3 (f1+2F)	サイン波 4 (f1+3F)
55.0 Hz (A1)	800.0 Hz	855.0 Hz	910.0 Hz	965.0 Hz
61.7 Hz (B1)	800.0 Hz	861.7 Hz	923.4 Hz	985.1 Hz
65.4 Hz (C2)	800.0 Hz	865.4 Hz	930.8 Hz	996.2 Hz
73.4 Hz (D2)	800.0 Hz	873.4 Hz	946.8 Hz	1020.2 Hz
82.4 Hz (E2)	800.0 Hz	882.4 Hz	964.8 Hz	1047.2 Hz
110.0 Hz (A2)	800.0 Hz	910.0 Hz	1020.0 Hz	1130.0 Hz
123.5 Hz (B2)	800.0 Hz	923.5 Hz	1047.0 Hz	1170.5 Hz
130.8 Hz (C3)	800.0 Hz	930.8 Hz	1061.6 Hz	1192.4 Hz
146.8 Hz (D3)	800.0 Hz	946.8 Hz	1093.6 Hz	1240.4 Hz
164.8 Hz (E3)	800.0 Hz	964.8 Hz	1129.6 Hz	1294.4 Hz
55.0 Hz (A1)	1500.0 Hz	1555.0 Hz	1610.0 Hz	1665.0 Hz
61.7 Hz (B1)	1500.0 Hz	1561.7 Hz	1623.4 Hz	1685.1 Hz
65.4 Hz (C2)	1500.0 Hz	1565.4 Hz	1630.8 Hz	1696.2 Hz
73.4 Hz (D2)	1500.0 Hz	1573.4 Hz	1646.8 Hz	1720.2 Hz
82.4 Hz (E2)	1500.0 Hz	1582.4 Hz	1664.8 Hz	1747.2 Hz
110.0 Hz (A2)	2000.0 Hz	2110.0 Hz	2220.0 Hz	2330.0 Hz
123.5 Hz (B2)	2000.0 Hz	2123.5 Hz	2247.0 Hz	2370.5 Hz
130.8 Hz (C3)	2000.0 Hz	2130.8 Hz	2261.6 Hz	2392.4 Hz
146.8 Hz (D3)	2000.0 Hz	2146.8 Hz	2293.6 Hz	2440.4 Hz
164.8 Hz (E3)	2000.0 Hz	2164.8 Hz	2329.6 Hz	2494.4 Hz

Csound による正弦波生成の後、REAPER に WAV ファイルをインポートし、Envelope 制御によって時間的な変化を加えた。これにより、ADP の生成が時間とともに変化し、音楽的な流れを持つ素材となった。

8. モジュラーシンセサイザを使用した WEST COAST SYNTHESIS 的アプローチ

8.1. 使用機材

本作品のサウンドデザインには、Doepfer A-100 BS-2 を基に Wave Folder、Low Pass Gate 等の West Coast Synthesis 的アプローチを実現するために以下の Eurorack モジュラーシンセサイザを追加で使用した。

- **Wave Folder** After Later Audio Valley
- **Low Pass Gate** shkrjn Dual Low Pass Gate
- **VCA/ Ring Modulator** Doepfer A-133-2 Dual VC Polarizer
- **Clock/ Sequencer** ALM Busy Pamela's Pro Workout

これらのモジュールを組み合わせることで、Buchla システムに類似した West Coast Synthesis 的な音色生成を実現した。図3のような形でレコーディングを行った。

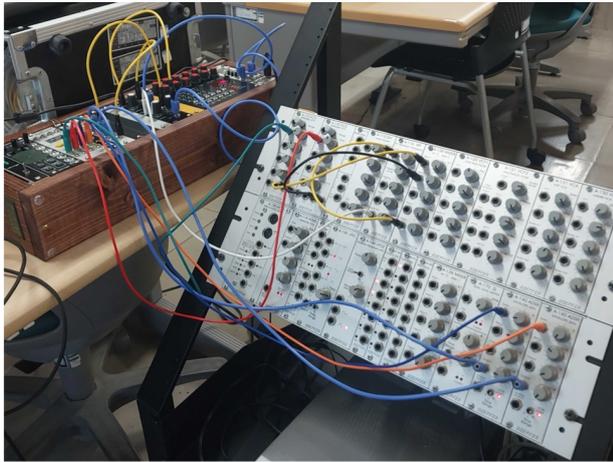


図 3: Eurorack モジュラーシンセサイザを使用したレコーディング

8.2. Wave Folder による連続的な倍音変化

Wave Folder は、入力信号の振幅が一定の閾値を超えると、波形を折り畳むことで高次倍音を生成する非線形プロセッサである。本作品では、After Later Audio Valley を使用し、Symmetry パラメータと Order パラメータを電圧制御することで、倍音構造を動的に変化させた。After Later Audio Valley は Wave Folder と Cross Fader が一体となったモジュールであるが、図4、図5のバッティング図では、他のモジュールでもこれらのパッチを再現可能とするために「CROSS FADER」と「WAVE FOLDER」と分割して表現している。

8.3. Low Pass Gate による空間表現

Low Pass Gate は、Vactrol を用いた電圧制御によって、音色の明るさと音量を同時に制御する。本作品では、shkrjn Dual Low Pass Gate を使用し、Envelope の Attack と Release を調整することで、音の立ち上がりと減衰における有機的な音色変化を実現した。図4は Wave Folder と Low Pass Gate 利用した West Coast Synthesis の代表的なパーカッションサウンドの Patch である。本作品でも中盤以降に使用した。LPG の応答特性により高域スペクトルが削れるとともにアタックが少し歪み、これが膜鳴楽器のような質感を生み出した。

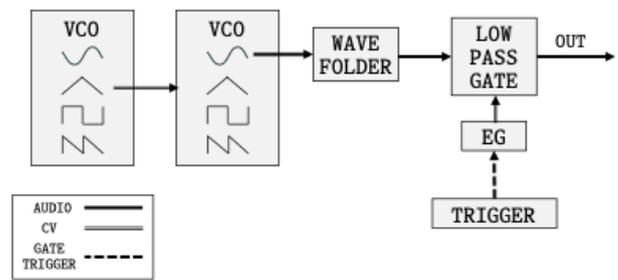


図 4: ローパスゲートを活用したパーカッションサウンド

8.4. Audio Rate Modulation による持続音

モジュラーシンセサイザの特徴的な手法として、Audio Rate Modulation がある。これは、可聴域の周波数で VCO を FM 変調または AM 変調することで、複雑な倍音構造を持つ持続音を生成する手法である。本作品では、図5のように二つの VCO を用いて、一方の VCO の出力を他方の VCO の FM 入力に接続することで、複雑な倍音構造を持つ持続音を生成した。この音は、Csound による ADP 生成用の正弦波とは対照的に、有機的で予測不可能な音色変化を持つ。LPG の応答特性が、空間的な距離感の変化と連動しているように聞こえるように Mix を行なった。音が明るくなるにつれて前景化し、暗くなるにつれて後退するような空間移動を創出することで、聴取者の知覚において音源の位置が流動的に変化する体験を実現した。この有機的な音色変化と空間移動を伴う持続音は音を個別に認識することを困難にさせることで迷宮のような空間を創出し階層的空間表現における外殻を形成した。

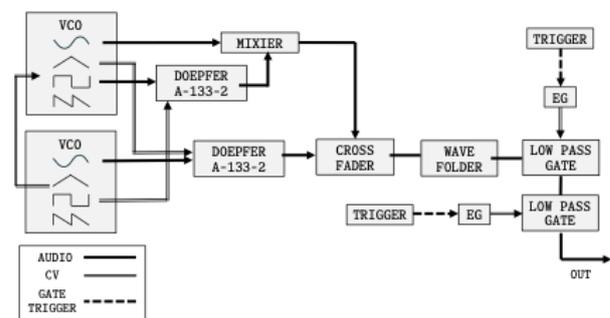


図 5: VCO を2つ使用した FM 変調と AM 変調による複雑な持続音

9. まとめ

本稿では、立体音響サウンドアート作品《Myodesopsia Interstice》の制作を通じて、Auditory Distortion Products(ADP)と West Coast Synthesis 的アプローチによる階層的空間表現の可能性を探った。スピーカーから再生される外部音と聴取者の耳内部で生成される内部音を組み合わせることで、知覚の境界を揺さぶる独特な聴覚体験を創出した。今後の展望として、以下の点が考えられる。ADP の制御精度を向上させるため、周波数と音圧レベルの最適化をさらに進める必要がある。本作品では、Csound による正弦波生成を用いたが、リアルタイムでの ADP 制御には課題が残る。DAW 環境における West Coast Synthesis 的アプローチの実現についても、さらなる研究が必要である。REAPER の ReaSurroundPan と JSFX プラグインを用いた空間制御は、Buchla Model 227e System Interface の極座標制御を部分的に再現できたが、より直感的な制御インターフェイスの開発が求められる。本作品が示した階層的空間表現のアプローチは、立体音響作品における新たな表現可能性を開くものである。ADP によって生成される主観的な内部音響と、モジュラーシンセサイザによる客観的な外部音響を統合することで、聴取者の知覚において空間が多層的に揺らぐような体験を創出できることが明らかとなった。

10. 参考文献

- Campbell, Murray, and Clive Greated. 1994. *The Musician's Guide to Acoustics*. Oxford University Press.
- Cimini, Amy. 2022. *Wild Sound: Maryanne Amacher and the Tenses of Audible Life*. Oxford University Press.
- Erbe, Tom. 2015. "Building the Erbe-Verb: Extending the feedback delay network reverb for modular synthesizer use." In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, 262–265.
- Goldstein, Julius L. 1967. "Auditory Nonlinearity." *Journal of the Acoustical Society of America* 41(3), 676–699.
- Haworth, Christopher. 2011. "Composing with absent sound." In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, 342–345.
- Holmes, Thom. 2015. *Electronic and Experimental Music: Technology, Music, and Culture* (5th ed.). Routledge.
- Kemp, David T. 1978. "Stimulated Acoustic Emissions from within the Human Auditory System."

Journal of the Acoustical Society of America 64(5), 1386–1391.

- Kendall, Gary S., Christopher Haworth, and Rodrigo F. Cádiz. 2014. "Sound synthesis with auditory distortion products." *Computer Music Journal* 38(4), 5–23.
- Manning, Peter. 1994. *Electronic and Computer Music*. Oxford University Press.
- Parker, Julian, and Stefano D'Angelo. 2013. "A Digital Model of the Buchla Lowpass-Gate." *Proceedings of the 16th International Conference on Digital Audio Effects*, 1–8.
- Pressnitzer, Daniel, and Roy D. Patterson. 2001. "Distortion products and the perceived pitch of harmonic complex tones." In D. J. Breebaart et al. (Eds.), *Physiological and Psychophysical Bases of Auditory Function*, 97–104. Shaker.
- Tartini, Giuseppe. 1754. *Trattato di musica secondo la vera scienza dell'armonia*. Stamperia del Seminario, appresso Giovanni Manfrè.

11. 著者プロフィール

岩堀 風太 (Futa IWAHORI)

2003年茨城県生まれ。東京工科大学メディア学部メディア学科所属。中学時にシンセサイザに触れ、以降電子楽器やエレキベースでの楽器演奏を始める。Csound を使用したサウンドプログラミング、C++を使用したVST プラグイン開発、モジュラーシンセサイザの演奏を行う。

伊藤 彰教 (Akinori ITO)

慶應義塾大学環境情報学部卒。東京藝術大学音楽研究科後期博士課程修了。博士(学術)。東京工科大学メディア学部助手などを経て、東京工科大学メディア学部特任講師。コンピュータ音楽、サウンドデザイン、シネマ&ゲームオーディオ制作技術などの研究に従事。AES 正会員。芸術科学会、日本デジタルゲーム学会理事を歴任。



この作品は、クリエイティブ・コモンズの表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際 ライセンスで提供されています。ライセンスの写しをご覧になるには、<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> をご覧頂るか、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。