メディアテクノロジーシリーズ　10

音楽制作

― プログラミング・数理・アート ―

松村誠一郎
【編著】

今井慎太郎・森本洋太・田所　淳
田中　翼・後藤　英
【共著】

コロナ社

メディアテクノロジーシリーズ 編集委員会

編集委員長 近藤　邦雄（元東京工科大学，工学博士）

編 集 幹 事 伊藤　貴之（お茶の水女子大学，博士（工学））

編 集 委 員（五十音順）
五十嵐悠紀（お茶の水女子大学，博士（工学））
稲見　昌彦（東京大学，博士（工学））
牛尼　剛聡（九州大学，博士（工学））
大淵　康成（東京工科大学，博士（情報理工学））
竹島由里子（東京工科大学，博士（理学））
鳴海　拓志（東京大学，博士（工学））
馬場　哲晃（東京都立大学，博士（芸術工学））
日浦　慎作（兵庫県立大学，博士（工学））
松村誠一郎（東京工科大学，博士（学際情報学））
三谷　　純（筑波大学，博士（工学））
三宅陽一郎（株式会社スクウェア・エニックス，博士（工学））
宮下　芳明（明治大学，博士（知識科学））

（2023 年 5 月現在）

編者・執筆者一覧

編　著　者 松村誠一郎（1 章）

執　筆　者（執筆順）
今井慎太郎（2 章）　森本　洋太（3 章）
田所　　淳（4 章）　田中　　翼（5 章）
後藤　　英（6 章）

刊行のことば

“Media Technology as an Extension of the Human Body and the Intelligence”

「メディアはメッセージである（The medium is the message)」というマクルーハン（Marshall McLuhan）の言葉は，多くの人々によって引用される大変有名な言葉である。情報科学や情報工学が発展し，メディア学が提唱されたことでメディアの重要性が認識されてきた。このような中で，マクルーハンのこの言葉は，つねに議論され，メディア学のあるべき姿を求めてきたといえる。

人間の知的コミュニケーションを助けることができるメディアは生きていくうえで欠かせない。このようなメディアは人と人との関係をより良くし，視野を広げ，新しい考え方に目を向けるきっかけを与えてくれる。

また，マクルーハンは「メディアはマッサージである（The medium is the massage)」ともいっている。マッサージは疲れた体をもみほぐし，心もリラックスさせるが，メディアは凝り固まった頭にさまざまな情報を与え，考え方を広げる可能性があるため，マッサージという言葉はメディアの特徴を表しているともいえるだろう。

さらにマクルーハンは “人間の身体を拡張するテクノロジー” としてメディアをとらえ，人間の感覚や身体的な能力を変化させ，社会との関わりについて述べている。現在，メディアは社会，生活のあらゆる場面に存在し，五感を通してさまざまな刺激を与え，多くの技術が社会生活を豊かにしている。つまり，この身体拡張に加え，人工知能技術の発展によって “知能拡張” がメディアテクノロジーの重要な役割を持つと考えられる。このために物理的な身体と情報や知識を扱う知能を融合した “人間の身体と知能を拡張するメディアテクノロジー” を提案・開発し，これらの技術を活用して社会の構造や仕組みを変革し，

どのような人にとっても住みやすく，生活しやすい社会を目指すことが望まれている。

一方，大学におけるメディア学の教育は，東京工科大学が 1999 年にメディア学部を設置して以来，全国の大学でメディア関連の学部や学科が設置され文理芸分野を融合した多様な教育内容が提供されている。その体系化が期待されメディア学に関する教科書としてコロナ社から「メディア学大系」が発刊された。この第一巻の『改訂メディア学入門』には，メディアの基本モデルの構成として「情報の送り手，伝達対象となる情報の内容（コンテンツ），伝達媒体となる情報の形式（コンテナ），伝達形式としての情報の提示手段（コンベア），情報の受け手」と書かれている。これからわかるようにメディアの基本モデルには文理芸に関連する多様な内容が含まれている。

メディア教育が本格的に開始され 20 年を過ぎるいま，多くの分野でメディア学のより高度で急速な展開が見られる。文理芸の融合による総合知によって人間生活や社会を理解し，より良い社会を築くことが必要である。

そこで，このメディア分野の研究に関わる大学生，大学院生，さらには社会人の学修のため「メディアテクノロジーシリーズ」を計画した。本シリーズは“人間の身体と知能を拡張するメディアテクノロジー”を基礎として，コンテンツ，コンテナ，コンベアに関する技術を扱う。そして各分野における基本的なメディア技術，最近の研究内容の位置づけや今後の展開，この分野の研究をするために必要な手法や技術を概観できるようにまとめた。本シリーズがメディア学で扱う対象や領域を発展させ，将来の社会や生活において必要なメディアテクノロジーの活用方法を見出す手助けとなることを期待する。

本シリーズの多様で広範囲なメディア学分野をカバーするために，電子情報通信学会，情報処理学会，人工知能学会，日本ソフトウェア科学会，日本バーチャルリアリティ学会，ヒューマンインタフェース学会，日本データベース学会，映像情報メディア学会，可視化情報学会，画像電子学会，日本音響学会，芸術科学会，日本図学会，日本デジタルゲーム学会，ADADA Japan などにおいて第一線で活躍している研究者の方々に編集委員をお願いし，各巻の執筆者選

定，目次構成，執筆内容など検討を重ねてきた。

本シリーズの読者が，新たなメディア分野を開拓する技術者，クリエイター，研究者となり，新たなメディア社会の構築のために活躍されることを期待するとともにメディアテクノロジーの発展によって世界の人達との交流が進み相互理解が促進され，平和な世界へ貢献できることを願っている。

2023 年 5 月

編集委員長　近藤邦雄

編集幹事　伊藤貴之

表紙・カバーデザインについて

私たちは五感というメディアを介して世界を知覚し，自己の存在を認知することができます。メディア技術の進歩によって五感が拡張され続ける中，「人」はなにをもって「人」と呼べるのか，そんな根源的な問いに対する議論が絶えません。

本書の表紙・カバーデザインでは，二値化された五感が新しい機能や価値を再構築する様子をシンプルなストライプ柄によって表現しました。それぞれのストライプは 5 本のゆらぎを持った線によって描かれており，手描きのような印象を残しました。

しかし，この細かなゆらぎもプログラム制御によって生成されており，十分に細かく量子化された表現によって「ディジタル」と「アナログ」それぞれの存在がゆらぐ様子を表しています。乱雑に描かれたストライプをよく観察してみてください。本書を手に取った皆さんであれば，きっともう一つ面白いことに気づくでしょう。

デザインを検討するにあたって，同じコンセプトに基づき，いくつかのグラフィックパターンを生成可能なウェブアプリケーションを準備しました。下記 URL にて公開していますので，あなただけのカバーを作ってみてください。読者の数だけカバーデザインが存在するのです。世界はあなたの五感を通じて存在しているのですから。

馬場哲晃

〈**Cover Generator**〉　ぜひお試しください
https://tetsuakibaba.github.io/mtcg/
（2023 年 5 月現在）

ま　え　が　き

「テクノロジーとともに音楽はこれからどのように形作られていくのか」

「今後，音楽で表現することの価値はどうなっていくのか」

本書『音楽制作—プログラミング・数理・アート—』は，上記の問いに対しての回答を模索したものと考えています。

最初にコンピュータを用いて音楽が作られて以降，これまで数十年かけて音楽制作に関連するテクノロジーの進化が続いてきました。そして現在はある一定の成熟の域に達しており，音楽制作にも変化がもたらされています。

例えば，以前は作曲家の手掛けた楽譜を演奏者が専用のレコーディングスタジオで演奏し，録音機材をスタジオエンジニアが操作して録音/ミックスするのが主流でした。しかし，テクノロジーが進化した現在はそうした方法に加えて，個人のコンピュータ上で DAW やエフェクタプラグイン（1 章にて解説），マイクなどを駆使して自宅で楽曲録音・ミキシングまで行う「宅録（自宅録音）」という方法が定着しています。かつてはスタジオでしか使えなかった高価な音楽用のハードウェアの機材と同等の品質のものが，ミュージシャン自身が手に届く価格帯のハードウェアやソフトウェアとなったためです。安価になっただけではなく，音楽制作に関連するテクノロジーの用途も発達してきています。例えば，特定の楽器音の抽出，ボーカルのピッチ補正，サンプル音の伸縮といった，以前は研究所でしか扱えなかった技術が個人でも利用できるようになりました。

このあたりまでは音楽を作る主体が人間であり，その創作過程で主たる判断をするのが人間であることが前提となっているものです。しかし，ここ数年で生成系 AI（以下，AI）を用いた音響処理や音楽創作支援，はたまた自律的な音楽生成といった話題を耳にする機会が多くなり，音楽制作の風景そのものに少

し変化がもたらされています。例えば

- ミキシングやマスタリングの音響面の処理について AI が代替して処理を自動化するサービス。
- AI による音楽生成を可能とするシステムとサービス。

といったものが実現して普及が始まっています。2025 年 2 月現在は AI に「命令（プロンプト）」や「歌詞」を与えれば，それに応じた旋律や和音，リズム，歌声で構成された「音楽の音響」が短時間で複数個，出力されるようになっています[†]。例えば CM 広告映像のための「…風の音楽」を得るのに，ミュージシャンや作曲家に依頼して音楽を制作してもらうプロセスが必要なくなるかもしれない，という未来予想は技術面ではかなり現実的になってきています。先走った思考として，人間の「作曲家」や「音楽アーティスト」は職業として存在し得るのだろうか，という懸念も耳にします。進化しきったミュージックテクノロジーの存在意義はもはや「人間が音楽を作るため」ではなくなるかもしれないというわけです。

これまでも歴史的に音楽とテクノロジーは密接な関係を保ってきました。しかし，音楽を生み出す主体がなにかさえもが揺らぎ始めている現在ほど，パラダイムシフトのエッジに私たちが身を置いている感覚を味わう機会はなかったのではないでしょうか。

音楽を商業的に「利用する」か，リスナーとして「聴く」か，ミュージシャンとして「創る」かなど，おのおのの立場の違いによって，音楽の捉え方は驚くほど違うことに気づかされます。それは音楽になにを求めて期待しているか，なにを拠り所としているかが非常に多様であるためでしょう。

音楽は「音に基づく，人間の積極的な表現および知覚活動のすべて」と定義される文化的産物である一方で，AI が台頭してきている現状では，一種の中庸かつ混沌とした状態になっているのではないでしょうか。ゆえに冒頭の問いは避けられないものとなるでしょう。

---

† suno, https://suno.com/home

そんな中で，本書では少し立ち止まるような形で AI の登場以前から用いられてきた音楽制作のテクノロジーや手法，プログラミングで音楽や音響を作り出す手法，作曲や音列の生成を数理の面から捉える分野，音を軸としたメディアアートなど，多岐に渡る分野についてそれぞれの章の担当著者の視点と世界観に基づいて解説されています。

いずれの章にも共通する要素は，特定の「表現」のための「音楽制作」について着目していること，テクノロジーと人間の一定のバランス感覚を持って共存して「音楽」「音響」を生み出すシステムに基づく「音楽制作」を論じていることです。いわば現在ホットな現象となっている AI，その AI と音楽の関係から一歩引いて俯瞰している感覚と言い換えることができるかもしれません。

本書で扱うトピックは，AI を含めたテクノロジーの「技術面の最先端」とは定義できないかもしれませんが，人間が手の届く範囲での機械やテクノロジーとの調和の末の「表現の最先端」を模索していると言えるでしょう。その中身は思考と論理が渦巻いていますが，ブラックボックスではありません。

かつて，14〜16 世紀のヨーロッパ（おもにイタリア）において古代ギリシャ・ローマの文化を再評価し，個人の能力や知識を重視して「文芸復興」「文化再生」を掲げた「ルネッサンス」から芸術面で新たな波が起こりました。同様にバランスの取れた音楽とテクノロジーの関係に眼差しを向けることは，音楽表現の未来につながっていくものと信じています。

本書は以下のように構成されています。

1 章「電子音楽の制作ツール」では，電子音楽の制作における基本概念とそれを実現するシステムの原理について解説します。前半は市販の電子楽器やツールを例に挙げながら，音源部（シンセサイザなど）と制御部（シーケンサ）の歴史と技術面について解説します。後半では対照的にアンダーグラウンドなシーンで発展を遂げてきたツール「ミュージックトラッカー」がもたらしたもの，「楽譜を時系列で再生する」概念から離れた音楽制作を可能にするプログラミング環境 Pure Data について，著者の作品事例を示しながら述べます。

2 章「ライブコンピュータ・エレクトロニクス」では，コンピュータを用い

たライブ演奏であるライブコンピュータ・エレクトロニクスの概念と定義について述べることを出発点としています。作曲家ピエール・ブーレーズの作品例を通してリアルタイム・デジタル信号処理の技術面の解説，その後に登場したプログラミング環境 Max とそれを用いたコート・リッピの作品例について紹介していきます。最後に著者によるアンドロイド（ロボティクス）を用いた作品をはじめ，現在の主要技術と実践について論じます。

3 章「音響コンポジション」では，おもにプログラミング環境 SuperCollider を用いた，プログラミングコードによって直接的に音響を形作る作曲方法を「音響コンポジション」と定義し，実際のプログラミングコードを挙げながらその世界の概念について解説しています。後半は著者による音響コンポジションに基づいた数多くの作品，携わった事例について紹介します。音響コンポジションの中で実現したいアイデアを，実際にコードの中でどのように記述するかの実践的ヒントが多数述べられています。

4 章「ライブコーディング」では，コンピュータでリアルタイムにコーディングをしながら音楽を作り上げていく音楽制作スタイル「ライブコーディング」について，その定義，成立の歴史と発展，コミュニティやオンラインのリソースなどの文化的醸成について紹介します。ライブコーディングの具体的なプログラミング言語やツール群について紹介したあと，代表的なライブコーディング環境である Tidal Cycles について，サンプルコードを用いて実践的に解説していきます。

5 章「作曲技法と数理」では，コンピュータの登場によりさまざまなアルゴリズムや数理的手法が音楽の作曲に応用された際に，用いられた概念と論理について歴史をたどり実例を挙げながら解説します。調性音楽から無調音楽への移行，その後の 12 音技法とその延長としてのセリー主義音楽の数学的な思考へと至る歴史を概観し，ピッチクラス集合論を軸としたさまざまな数理の解説とポスト調性音楽の作曲の適用について，数式と証明を用いながら説明します。作曲家ピエール・ブーレーズの作品群の根底を支えるブロックソノールといった数理を対象として，それを Python のコードで表した事例も交えて数学的音

楽理論の世界に案内していきます。

6 章「メディアアートとミュージックテクノロジー」では，音楽とテクノロジー，センサとロボット，メディアアートと作曲といったキーワードについて，著者による多く作品事例を参照しながら，メディアアートとミュージックテクノロジーの世界を概観します。これらの作品群は「仮説」とそれに対する「解」という形で展開されてきたものと言えます。本章では，実際に作品に実装された技術やシステム，それに至るまでの試行錯誤の過程をつぶさに解説することにより，「デジタルアートへの音楽的アプローチ」という命題に対峙する様子が示されています。

本書は順番に章を読み進めても構いませんし，気になった章から読んでいくのでも構いません。

テクノロジーと結びついた音楽制作という人間の文化的な営みが今後も継続することを願いながら，その価値を見直す契機に本書がなれば幸いです。

2025 年 2 月

編著者　松村誠一郎

---

1) 本書の書籍詳細ページ（https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339013801/）にカラー図面などの補足情報があります。

2) 本書で使用している会社名，製品名は一般に各社の登録商標です。本書では ® や TM は省略しています。

3) 本書で紹介している URL で参照日のないものは 2025 年 1 月現在のものです。

目　　次

第 1 章
電子音楽の制作ツール

1.1　電子楽器の登場 *1*

1.1.1　民生機のアナログシンセサイザ　*3*

1.1.2　民生機のデジタルシンセサイザ　*4*

1.2　シンセサイザの原理 *4*

1.3　DSP による電子楽器 *8*

1.3.1　初期の DSP 開発　*8*

1.3.2　ウェーブテーブルから PCM へ　*9*

1.3.3　デジタルシンセサイザの音源方式　*10*

1.3.4　ソフトウェアシンセサイザ　*10*

1.4　シ ー ケ ン サ *11*

1.4.1　シーケンサの芽生え　*11*

1.4.2　アナログシーケンサ（CV/GATE）　*12*

1.4.3　CV/GATE のデジタルシーケンサ　*13*

1.4.4　MIDI シーケンサの特徴　*14*

1.4.5　ハードウェアシーケンサ　*16*

1.4.6　ソフトウェアシーケンサ　*17*

1.4.7　リアルタイムレコーディングとステップレコーディング　*18*

1.4.8　MIDI イベントと分解能　*19*

1.4.9　MIDI トラックとオーディオトラック　*19*

1.4.10　プラグイン（インストルメント，エフェクト）　*21*

1.5 ミュージックトラッカー *22*

1.5.1 トラッカーとは *25*

1.5.2 サンプラーとシーケンサの組合せ *25*

1.5.3 初期のトラッカー *28*

1.5.4 現在のトラッカー *28*

1.5.5 音楽教育ツールとしてのトラッカー *30*

1.6 サウンドプログラミング *31*

1.6.1 Pure Data *32*

1.6.2 Pure Data のプログラミング方法 *33*

1.6.3 MIDI の制御と DSP の制御 *34*

1.6.4 メッセージデータと DSP データの境界 *35*

1.6.5 インタフェースの変化と固定化 *36*

1.6.6 BSD ライセンスと Pure Data コミュニティ *36*

1.6.7 Pure Data のパッケージ *37*

1.6.8 Deken によるライブラリ追加 *38*

1.6.9 シーケンサの時間軸とインタラクションの時間軸 *40*

1.6.10 Pure Data の作品事例 *42*

1.7 ま と め *43*

第 2 章
ライブコンピュータ・エレクトロニクス

2.1 ライブコンピュータ・エレクトロニクスとはなにか *44*

2.2 ライブコンピュータ・エレクトロニクスの誕生 *45*

2.2.1 ピエール・ブーレーズ *46*

2.2.2 ブーレーズと電子音楽 *46*

2.2.3 IRCAM の設立と 4X の開発 *47*

2.2.4 『レポン』：ライブコンピュータ・エレクトロニクスの原点 48
2.2.5 デジタル信号処理による音の変形 50
2.2.6 楽器と電子音響の演繹的拡張と統一 52
2.2.7 『レポン』の空間性 52
2.2.8 託された課題 53
2.3 プログラミング環境 Max 54
2.3.1 Maxとはなにか 54
2.3.2 Max開発の背景 55
2.3.3 Max の登場 56
2.3.4 Max の実用化 58
2.3.5 Max の展開 60
2.3.6 Max の特徴 61
2.4 ライブコンピュータ・エレクトロニクスの実践 64
2.4.1 新しいミュジシャンコンプレ 64
2.4.2 ピアノとコンピュータのための音楽 65
2.4.3 上演プロセス：準備 67
2.4.4 上演プロセス：演奏 71
2.5 ライブコンピュータ・エレクトロニクスの現在 73
2.5.1 オペラの舞台に立つアンドロイド 73
2.5.2 歌唱システム 74
2.5.3 動きのシステム 76
2.6 まとめ 79
2.6.1 インタラクションとはなにか 79
2.6.2 ライブコンピュータ・エレクトロニクスの課題 80
2.6.3 ライブコンピュータ・エレクトロニクスの持続可能性 81

第 3 章
音響コンポジション

3.1 音 と 作 曲 *84*
3.1.1 音「の」作曲 *86*
3.1.2 音のプログラミング *87*
3.1.3 音 と 響 き *88*
3.1.4 音の存在論と作曲 *89*
3.2 SuperCollider の特徴 *91*
3.2.1 構 成 *91*
3.2.2 実 践 *92*
3.3 関連作品やプロジェクト *97*
3.3.1 WFS *98*
3.3.2 BEAST *99*
3.3.3 『AudioScape』 *100*
3.3.4 norns *101*
3.3.5 『breathing space』 *102*
3.3.6 空港のための音楽 *103*
3.3.7 AI × Beethoven *104*
3.3.8 可 聴 化 研 究 *105*
3.3.9 『snr』 *106*
3.3.10 『spray』 *108*
3.3.11 『matrix』 *108*
3.3.12 『x/y』 *109*
3.3.13 『textures ±』 *110*
3.4 ま と め *111*

第 4 章
ライブコーディング

4.1　ライブコーディングとは *113*
4.1.1　ライブコーディングの定義　*113*
4.1.2　プログラミング言語のライブ性　*114*
4.1.3　コンパイラとインタープリタ　*115*
4.1.4　プログラミング言語におけるライブコーディングの歴史　*115*
4.1.5　ライブパフォーマンスとしてのライブコーディング　*118*
4.1.6　ライブコーディングの世界への広がりとコミュニティ　*119*
4.1.7　Show us your screen（スクリーンを見せろ）　*121*
4.2　ライブコーディングのための主要なプログラミング言語 *122*
4.2.1　Max　*123*
4.2.2　Pure Data　*124*
4.2.3　SuperCollider　*125*
4.2.4　ChucK　*126*
4.2.5　OverTone　*128*
4.2.6　TidalCycles　*129*
4.2.7　Extempore　*130*
4.2.8　Gibber　*132*
4.2.9　Sonic Pi　*133*
4.2.10　FoxDot　*134*
4.2.11　Orca　*135*
4.2.12　Strudel　*136*
4.2.13　その他の環境　*137*
4.2.14　ライブコーディングによるパフォーマンス事例　*138*
4.3　TidalCycles によるライブコーディング実践 *139*

4.3.1 TidalCycles を構成するプログラミング言語，ライブラリ，アプリケーション 139
4.3.2 Windows，macOS への手動インストール手順 140
4.3.3 TidalCycles の起動と終了 144
4.3.4 TidalCycles によるパターンの生成の基本 146
4.3.5 パターンを変化させる 154
4.3.6 シンセサイザを使う 159
4.3.7 ライブコーディングパフォーマンス実践 160
4.4 ま と め 164

第 5 章
作曲技法と数理

5.1 音楽と数学の歴史 165
5.2 ピッチクラス集合論 168
5.2.1 音高の同値類とその集合 168
5.2.2 教会旋法とダイアトニック集合 170
5.2.3 集合，部分集合，補集合 171
5.2.4 集合間の写像 173
5.2.5 共通音定理 174
5.3 ブーレーズのブロックソノール技法の数理 180
5.3.1 ブロックソノール 181
5.3.2 ブロックソノールの積の演算 186
5.3.3 ブロックソノールの代数学 190
5.3.4 ブロックソノールの組合せ論 197
5.4 作曲上の意思決定の数理 199
5.4.1 制約充足問題と制約最適化問題 200
5.4.2 ブロックソノールを用いた作曲への制約プログラミングの応用 204

5.4.3　ハーモニックドメインの割り当てによる大域構造の決定　207
5.4.4　ハーモニックドメイン内のブロックソノールの経路の決定　208
5.5　ま　と　め ……215

第 6 章
メディアアートと ミュージックテクノロジー

6.1　メディアアートとミュージックテクノロジーの関係 ……217
6.2　バーチャルミュージカルインストルメントとロボット工学の芸術的アプローチ ……220
6.2.1　ロボットのインテリジェンス　220
6.2.2　バーチャルミュージカルインストルメントと『RoboticMusic』の開発　222
6.2.3　作品への応用と新たなメディアアート技術の適用　226
6.2.4　ロボティクスの展望　230
6.3　バーチャルミュージカルインストルメントの技術的側面と実装 ……231
6.3.1　ジェスチャーと音楽　234
6.3.2　マッピングインタフェース，アルゴリズム，サウンドシンセシス，映像　236
6.3.3　サウンドシンセシス, サウンドとジェスチャーによる音楽制作　238
6.3.4　音楽のコンテクストとインタラクションの課題　242
6.3.5　パフォーマンスの問題点：人間の知覚とコンピュータの限界　242
6.4　バーチャルミュージカルインストルメントを用いた作品例（初期の作品） ……244
6.4.1　『L'homme transcendé』　245
6.4.2　『netBody』　246

6.5 バーチャルミュージカルインストルメントを用いた作品例（メディアアートとの関連作品） *250*

6.5.1 『Cymatics』 *251*

6.5.2 『Hypnoïde』 *253*

6.5.3 『Body in Zero G』 *254*

6.5.4 『gravityZero』 *256*

6.6 ま と め *257*

引用・参考文献 *259*

索 引 *266*

第 1 章

電子音楽の制作ツール

本章では，電子音楽制作を行うユーザーの使用環境やツールの変遷について，音源面（アナログシンセサイザとデジタルシンセサイザ/サンプラー）と制御面（シーケンサ）の二つの側面から紹介を始める。そして，市販の電子楽器，シーケンサと異なる進化を遂げて現在まで続いてきているミュージックトラッカー，サウンドプログラミング環境について解説する。

1.1 電子楽器の登場

世界最初の電子楽器は，真空三極管の発明者であるアメリカのリー・ド・フォレスト（Lee de Forest）が 1915 年に出願した特許と言われており，のちにオーディオンピアノ（Audion Piano）という電子楽器を生み出した[1),2),†]。ここで用いられた二つの高周波を組み合わせて音を合成するヘテロダイン干渉の技術は，1920 年にロシアのレオン・テルミン（Léon Theremin）が開発し発表した**テルミン**（theremin）や後述の**オンドマルトノ**（ondes martenot）にも使われている。

テルミンはアンテナに手をかざして出力音の音量と音高（以下，ピッチ）をコントロールする，非接触型の電子楽器である。アンテナと演奏者の手の間に発生する静電容量の変化によって，二つの高周波発振器の周波数のズレを発生させ，アンプで増大させて発音するという原理である。サイン波に似た単音を発音する機構，演奏者の姿勢や奏法など制限もあるが，微妙な手の動きで発音の

† 肩付き数字は，巻末の引用・参考文献を示す。

表現ができる演奏方法の独自性ゆえに現在も演奏が継承されている[3]（**図 1.1**）。

その後 1928 年にフランスのモーリス・マルトノ（Maurice Martenot）が開発したオンドマルトノが登場する。こちらも基本的には単音のみでの演奏となる。初期のオンドマルトノはテルミンの発音機構を模したものであったが，その後改良が重ねられて鍵盤とリボンによる連続的なピッチ変更や，音量をコントロールする特殊なスイッチ，外部のスピーカーや共鳴板による音色変化が可能となった[1]（**図 1.2**）。オンドマルトノも演奏者が奏法を受け継ぎながら現在に至っている。

図 1.1　テルミン[†1]

図 1.2　オンドマルトノ[†2]

なお，従来の楽器と同様の機構で発生させた物理的な振動を電気的に処理する楽器，例えば，弦の振動をアナログの電気信号に変換するピックアップなどで検知してからアンプリファイア（アンプ：amplifire）で増幅するエレキギターや電気オルガンは**電気楽器**と呼ばれ，電子回路で発振器（オシレータ：oscillator）を制御してピッチ，音量，音色をコントロールして音を出力する機構の**電子楽器**とは区別されている。

電子楽器の代表格であるシンセサイザ（synthesizer）はその言葉の通り「音響

†1　https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leon_Theremin.jpg
†2　https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ondes_martenot.jpg

を合成する」機械である。1950 年代から本格的に開発が進み，その時代ごとの適用可能な先端技術が用いられてきた。電圧の制御によって音響を生成するオシレータが発音をする機構の**アナログシンセサイザ**から，計算機＝コンピュータの中でのデジタル演算によって波形を生成，デジタル/アナログ（D/A）変換器を通して発音する**デジタルシンセサイザ**へと進化を遂げてきた。しかし，シンセサイザの基本構造と概念はアナログシンセサイザの段階でほぼ確立したため，デジタルシンセサイザであってもオシレータ，フィルタ，エンベロープジェネレータといった同様の構造をコンピュータ内に仮想的に再現している（詳細は 1.2，1.3 節を参照）。大きく違う部分は，発音源であるオシレータに，デジタルシンセサイザでは**デジタル信号処理**（digital signal processing，**DSP**）による多様な音源方式が適用されている点である。

1.1.1　民生機のアナログシンセサイザ

アナログシンセサイザの民生機として最初に発表されたのは，1964 年にアメリカのロバート・モーグ（Robert Moog）とハーブ・ドイチ（Herbert Arnold “Herb” Deutsch）が開発した Moog First Synthesizer と言われている。言われているというのは，ほぼ同時期の 1964〜65 年に同じくアメリカのドン・ブックラ（Don Buchla）が Buchla 100 Music Box モジュールシンセサイザを San Francisco Tape Center の支援で開発して発表をしているためである。両者は発表時期がほぼ重なっているため，どちらが「最初の」シンセサイザの民生機かというのはいまだに議論が分かれるところである[4)]。

民生機として販売を開始した両者だが，インタフェースは少し異なる。Moog は音楽用のピアノ鍵盤状のコントローラがあり，一方，Buchla 100 のほうにはピアノ鍵盤の代わりに電極を用いた接触子が並んでいる。双方ともモジュールという単位で機能が分かれたブロック間をケーブルで接続（パッチング）して信号を受け渡していく**モジュラーシンセサイザ**であり，各ブロックのパラメータを調整するためのノブやスライダー，スイッチを備えている。

その後，Moog が音楽を演奏するキーボードプレイヤー，ミュージシャンの

ためのシンセサイザという演奏者マーケットに狙いを定めて，パッチングの要素を省いた鍵盤型シンセサイザのリリースを進めたのに対して，Buchla はモジュール同士の柔軟な接続による**音響合成**（**シンセサイズ**）方式を継続するという対照的な路線を進んでいく。

1980〜90 年代は Moog のスタイルの鍵盤型シンセサイザ製品が主流であったが，2010 年代以降現在に至るまで音響合成方法の柔軟性が再評価されて Buchla のスタイルを継承したモジュラーシンセサイザがブームとなっている。それを受けて 2016 年には Moog からも Mother32，DFAM，Subharmonicon といったセミモジュラーシンセサイザがリリースされるようになった。

1.1.2　民生機のデジタルシンセサイザ

デジタル演算によって音の波形の生成や制御を行う DSP を用いた最初のデジタルシンセサイザの民生機は，1983 年に発表された FM（frequency modulation，周波数変調）音源のヤマハ社 DX7 であった[5)]。この FM 音源のシンセサイザはその音源部分，フィルタ，エンベロープジェネレータも含めてデジタルで演算を行うものである。FM 音源はヤマハ社独自のデジタル音源方式だったが，その他のデジタル音源のオシレータの方式には，短いデジタル波形のループ再生を行うウェーブテーブル音源，録音した音のデジタルデータを再生する PCM（pulse code modulation）音源などが登場して，国内メーカーから発表される民生機として普及していった。KORG 社 Wavestation の Advanced Vector Synthesis 音源，KAWAI 社 K5 の Additive Realtime Synthesis 音源など，その機種独自の音源方式が使われた。それらの音源を十分に使いこなすためにはその原理や設定するパラメータについての理解する必要があった[5)]。DSP の歴史と主要な音源方式については後述する。

1.2　シンセサイザの原理

アナログシンセサイザの主要な音響合成方式は，音源部で生成された音をその

後のブロックで「削って」加工をしていく「減算方式」である。おもに電圧の変化によって基本波形の信号を発生させるオシレータ（voltage controlled oscillator, VCO），どの周波数成分を通過させるかを制御するフィルタ（voltage controlled filter, VCF），出力音量を調整するアンプ（voltage controlled amplifier, VCA），出力する前にオーディオに効果を掛けるエフェクト（effect）のブロックを順に音響の電気信号が通過していって最終的に音として出力される。主要なブロックは電圧の変化によって制御されるため，“voltage controlled” が頭についている。これらのブロックに電気的に働きかける別のブロックとして LFO（low frequency oscillator）と EG（envelope generator）がある（**図 1.3**）。

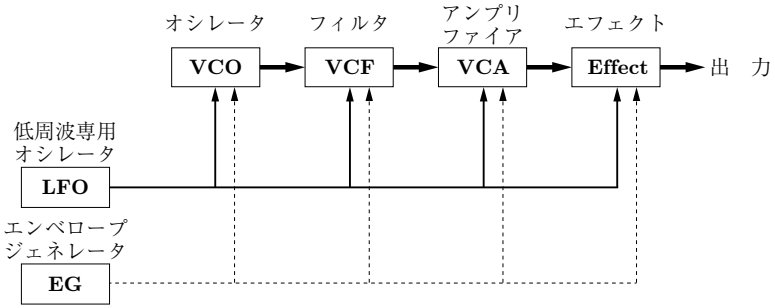

図 1.3　シンセサイザーの基本的な構造図

電圧で制御せずに CPU のデジタル演算で制御しているデジタルシンセサイザであっても，オシレータ，フィルタ，アンプリファイアといった各ブロックの呼び名はアナログシンセサイザに準拠して，VCO，VCF，VCA となっているケースが多い。つまり，このシンセサイザの基本構造を理解すれば，アナログシンセサイザと同様にほとんどのデジタルシンセサイザの構造を理解して操作することができると言えよう[6)]。

ここからはシンセサイザの基本機能を備えているアナログシンセサイザ KORG 社 MS-20mini を参照しながら，各ブロックについて解説していく。MS-20mini は 1978 年に発売された同社の MS-20 を 2013 年に現代の技術を用いた復刻版として発売された。1978 年当時より個々の電子部品が小型化したため，MS-20mini

索　　引

【あ】

アタック 6
アテマティズム 185
アナログシーケンサ 12
アナログシンセサイザ 3

【い】

イコライザ 7
遺伝的アルゴリズム 204
インストルメント 25
インタープリタ方式 115

【う，え】

ウェーブテーブル
　シンセシス 9
打込み 18
エディタ 26

【お】

応　唱 49
オーケストレーション 84
オシレータ 7
オブジェクト 32, 33
音楽実践 45
音楽用 MIDI 13
音響合成 4
音程内容 175
オンドマルトノ 1

【か】

掛け算 186
カットオフ周波数 6
環 191

【き】

機械語 109, 115
基　数 172
記譜法 150
逆　元 191
教会旋法 166, 170
共通音定理 170, 176
近親調 175

【く】

空間化 51
組合せ論 168
グラニュラーシンセシス 42, 241
グラフィカルプログラミング環境 32
グラフィカルユーザインタフェース 17
群 166

【け，こ】

結合音 88
コムフィルタ 50
コーラス 8
根　音 166
コンパイル方式 115
コンプレッサ 8

【さ】

サイクル 147
サイン波生成 51
サウンドシンセシス 232
差集合 172
サステイン 6
作　曲 89
作曲実践 46
サンプルベースシンセシス 9

【し】

シェア 23
ジェスチャーインタフェース 234
時系列的時間 47
シーケンサ 11
シーケンス 11
市場の専有率 23
実行可能解 202
写　像 173
集合分割問題 203
十二音技法 46
周波数シフト 50
周波数と持続のセリー構造 46
準同型写像 192
準同型定理 192
商　環 193
商集合 194
商モノイド 193
シンセサイズ 4
心理的時間 47

【す】
数字付き低音 169
ステップレコーディング 18
【せ】
制御される偶然性 46
整数計画法 203
制約充足問題 200
制約付き最適化問題 202
制約プログラミング 168, 201
積集合 171
セミドメイン 205
セリー 87
セリー主義音楽 181
全音階 167, 170
全解列挙 202
宣言的プログラミング 201
【そ】
総音程音列 201
総音列主義 46, 181
素ブロック 189
ソルバー 201
【た】
ダイアトニックスケール 167, 169, 170
第一級オブジェクト 93
代数学 168
多重度 175
多チャンネル拡張 94
タートルグラフィック 116
ダンステクノロジー 227
【ち】
置換群 167
中心周波数 6
【て】
ディケイ 6
定常波 91
ディストーション 7
ディレイ 8, 50
デジタル信号処理 3
デジタルシンセサイザ 3
手続き型プログラミング 201
テープ再生 51
デ　モ 25
デモシーン 23, 25
デュレーション 12
テルミン 1
転　回 173
転回形 166
電気楽器 2
電子楽器 2
【と】
同値関係 194
同値類 166
トランスポジション 173
トリガー 12
トレモロ 8
【に】
ニューメディアアート 229
ニューラルネットワーク 168
【ね】
音色旋律 84
ネオ・リーマン理論 167
【の】
ノードベースのプログラミング環境 32
【は】
破壊編集方式 20
パターン 148
発振器 6
パッチ 33, 54
パッチウィンドウ 33
パッチコード 32, 33
パッチャ 54
ハードウェアシーケンサ 13
ハーモニックドメイン 204
半　環 192
半　群 191
半順序 171
【ひ】
ピッチ 12
ピッチクラス 167
ピッチクラス集合 169
ピッチクラス集合論 167, 169
ピッチシフト 8
非破壊編集方式 20
ビブラート 8
ヒューリスティクス 204
【ふ】
部分集合 171
普遍集合 171
フランジャー 8
ブレークビーツ 23
プロジェクトファイル 20
ブロックソノール 168, 181
　——の同値類 199
【へ】
冪集合 171
ヘクサコード 178
ベクターシンセシス 9
変　調 7
【ほ】
ホケット 84
補集合 171
ポリメータ 152
【ま】
マッピングインタフェース 232
マルチウェーブテーブルシンセシス 9
【み】
ミュージックシアター 228
ミュージックトラッカー 23

【む】
無主題法 185
無名関数 93
【め】
メタメディア 45
メッセージデータ 34
【も】
モジュラーシンセサイザ 3
モジュール 23, 27
モジュレーション
ジェネレータ 7
モノイド 191
問題の定義 201
【ゆ】
ユークリッドシーケンス 153
ユークリッドの互除法 153
ユーザー間の共有 23
【ら】
ライブエレクトロニクス 44, 118
ライブコーディング 113
ライブコンピュータ・
エレクトロニクス 44
ライン 32
ラップトップミュージック 118
ラップトロニカ 118
【り】
リアルタイムレコーディング 18
リージョン 20
リバーブ 8, 51
リリース 6
リング変調 50
【る〜ろ】
ルックアップテーブル 9
レゾナンス 6
レゾネータバンク 88
ロ ー 27
【わ】
ワ ウ 8
和集合 172

【A】
ADSR 6
all-partition array 203
Attack 6
AU 21
【B】
BEAST 99
bloc premier 189
bpm 146
BSD ライセンス 37
【C】
COP 202
CP 168
cps 147
CSP 200
【D】
DAW 18, 19
Decay 6
DSP 3, 118
DSP データ 34
【F】
FM 音源 10
【G】
GA 204
GMIT 167
GUI 17
【H】
hexachordal
combinatoriality 179
【I】
IP 203
IRCAM 167
【R】
Release 6
【S】
Sustain 6
【U】
UGen 94
【V】
VST 11, 21
VST インストルメント 11
VST エフェクタ 11
【W】
Wave Field Synthesis 98
【Z】
Z 関係の対 179
【数字】
12 音技法 167

—— 編著者・著者略歴 ——

松村　誠一郎（まつむら　せいいちろう）
株式会社セガ・エンタープライゼス（現 セガ）AM ソフトウェア研究開発本部，東京藝術大学助教，東京工科大学准教授を経て，2010 年より東京工科大学教授，博士（学際情報学）。専門はサウンドを用いたデジタルアート作品制作，プログラミングによるライブパフォーマンスとサウンドデザイン。作品は Sound and Music Computing（SMC），International Computer Music Conference（ICMC），Pd-con などの国際学会，WRO Media Art Biennale，Audio Art などの国際的なフェスティバルで上演，展示されている。

今井　慎太郎（いまい　しんたろう）
文化庁派遣芸術家在外研修員（ZKM），DAAD ベルリン客員芸術家（ベルリン工科大学），国立音楽大学専任講師を経て，2014 年より国立音楽大学准教授，修士（音楽デザイン）。専門はコンピュータ音楽。ブールジュ国際電子音楽コンクールにてレジデンス賞，ムジカ・ノヴァ国際電子音楽コンクール第 1 位，ZKM 国際電子音楽コンクール第 1 位などを受賞。2008 年よりバウハウス・デッサウ財団にてバウハウス舞台の音楽監督をたびたび務める。2015 年に作品集『動きの形象』を発表。近年はアンドロイドによる音楽実践について，研究開発と運用に携わっている。

森本　洋太（もりもと　ようた）
作曲家。2024 年よりハーグ王立音楽院ソノロジー研究所客員教授，早稲田大学准教授，博士（作曲）。専門は作曲，サウンドアート，可聴化など聴覚ディスプレイ。シンガポール空港や国際花博 Floriade2022 の音楽を作曲。ハーグ市立美術館，Transmediale（ベルリン）などでサウンド・インスタレーションを発表するほか，資生堂，トヨタ自動車，NTT コミュニケーション科学基礎研究所， 産業技術総合研究所などに楽曲や音響生成システムを提供。

田所　　淳（たどころ　あつし）
多摩美術大学，東京藝術大学，慶應義塾大学，明治大学非常勤講師などを経て，2019 年より前橋工科大学准教授，修士（政策・メディア）。クリエイティブコーディングやライブコーディングを用いたオーディオビジュアル作品のライブパフォーマンスや，音響と映像の関係を探求したインスタレーション作品の制作を行っている。作品は，Ars Electronica，International Computer Music Conference（ICMC），International Conference on New Interfaces for Musical（NIME），International Conference for Live Coding（ICLC）など，国内外のフェスティバルや展覧会で発表されている。

田中　　翼（たなか　つばさ）
京都大学理学部で数学を，東京大学情報理工学系研究科で情報学を学び，東京藝術大学美術研究科先端芸術表現領域にて音楽生成の研究で博士号を取得。その後渡仏し，フランス国立音響音楽研究所（IRCAM）などパリの音楽研究所や数学研究所で博士研究員として研究を行う傍ら音楽院で作曲を学ぶ。2021 年より東京藝術大学音楽環境創造科非常勤講師として芸術のための AI 開発について教えている。AI 技芸研究会代表。博士（美術）。専門は数理的手法による楽曲分析や音楽生成。作品は International Computer Music Conference（ICMC）や Sound and Music Computing Conference（SMC）などで発表されている。

後藤　　英（ごとう　すぐる）
作曲家，ニューメディア・アーティスト。国際的に評価されており世界活地で活躍。刺激的な作品で新たなテクノロジーと関連させて発表している。フランス，パリにあるポンピドゥー・センターの IRCAM の招待作曲家，研究員，ボルドー芸術大学の准教授を経て，現在は東京芸術大学教授，Ph.D.。オーストリアのアルスエレクトニカにてデジタル・ミュージック&サウンド・アートの栄誉賞を受賞などが挙げられる。作品は世界各国の音楽祭，レゾナンス/IRCAM，タングルウッド音楽祭，ICC，SONAR，Haus der Kultures der Welt，ISEA，NIME，ヴェネツィアビエンナーレなどにて演奏されている。

音楽制作 ープログラミング・数理・アートー
Music Creation —Programming, Mathematics and Art—
© Matsumura, Imai, Morimoto, Tadokoro, Tanaka, Goto 2025

2025 年 4 月 25 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

編著者	松村　誠一郎
著　者	今井　慎太郎
	森本　洋太
	田所　淳
	田中　翼
	後藤　英
発行者	株式会社　コロナ社
	代表者　牛来真也
印刷所	三美印刷株式会社
製本所	株式会社　グリーン

112–0011　東京都文京区千石 4–46–10
発行所　株式会社　**コロナ社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140–8–14844・電話(03)3941–3131(代)
ホームページ　https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978–4–339–01380–1　C3355　Printed in Japan　（松岡）

JCOPY　<出版者著作権管理機構 委託出版物>
本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088，FAX 03-5244-5089，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製･転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。