

# 初等セル・オートマトンを用いたサウンド生成とその音色属性

馬場涼音 (指導教員: オベル加藤ナタナエル)

## 1 はじめに

コンピュータが登場して以来, 多くの研究者や音楽家が様々な数学的モデルを使って音楽を生み出そうと試みてきた. その1つがセル・オートマトンである. セル・オートマトン (CA) とはセルの列からなる力学系であり, 各セルは局所的な時間発展パターン (ルール) にしたがって状態を変化させていく. これらのルール自体は単純であるにもかかわらず CA は多様で複雑な挙動を示す. 本研究では理論物理学者である Stephen Wolfram が分類した4つのクラス [1] からそれぞれ2つずつ代表的なルールを選択し [2], 合計8種類の初等セルオートマトンを利用して生成されるサウンドの音色属性の分析を行うことで, CA のクラスと生成されるサウンドの音色にどのような関係があるかを調べた. 音色属性の分析にはサリー大学の Audio Commons というプロジェクトで実装された "Timbral models" を利用した. [3][4][5]

### 1.1 初等セル・オートマトン

初等セル・オートマトン (Elementary Cellular Automaton: ECA) とは2状態3近傍のセル・オートマトンであり, 最も単純な各セルの状態は数値 (0/1), 色 (白/黒), 生死 (死んでいる細胞/生きている細胞) などと表現される. ここでいう近傍とは, あるセル自身とその両隣を指す. 各セルは2種類の記号で表現できるため ECA は合計で  $2^8 = 256$  個存在し, それらは Rule0~Rule255 という名で区別される.

### 1.2 セル・オートマトンの分類

Wolfram による CA の分類と今回サウンドの生成に用いたルールを括弧内に示す.

**Class 1:** 時間と共にパターンが消えたり, 固定化したりするパターンを作る. (ルール 40, ルール 232)

**Class 2:** 周期的な構造を作るようになり無限にそのパターンを繰り返す. (ルール 94, ルール 108)

**Class 3:** 非線形でランダムなパターン "カオス" を作る. (ルール 30, ルール 54)

**Class 4:** 空間的, 時間的に局在する構造を持つ複雑なパターンを作る. (ルール 110, ルール 121)

## 2 サウンド生成と音色分析

### 2.1 サウンド生成環境

ジェネラティブアート等の作成に使われるプログラミング言語 Processing で以下のように実装した.

セルの数: 100 個 / 行

初期状態: 中央に生きているセルが1つ存在

フレームレート (1秒間に更新される画面の数): 5

各音の長さ: 1秒

利用したライブラリ: Minim

使用した音の数: Cメジャーペンタトニックスケール (5音), Cメジャースケール (7音), 12音階 (12音)

### 2.2 サウンド生成方法

CA の世代が増えるごとにその時点で生きているセルの数を合計し, その剰余と音を対応させて出力する. (図1)

図1: 生きているセル (■) の合計の剰余と音の対応

<Cメジャーペンタトニックスケール>	<Cメジャースケール>	<12音階>
■(0) → C(ド)	■(0) → C(ド)	■(0) → C(ド)
■(1) → D(レ)	■(1) → D(レ)	■(1) → C#(ド#)
■(2) → E(ミ)	■(2) → E(ミ)	■(2) → D(レ)
■(3) → F(ファ)	■(3) → F(ファ)	■(3) → D#(レ#)
■(4) → G(ソ)	■(4) → G(ソ)	■(4) → E(ミ)
■(5) → A(ラ)	■(5) → A(ラ)	■(5) → F(ファ)
■(6) → B(シ)	■(6) → B(シ)	■(6) → F#(ファ#)
		■(7) → G(ソ)
		■(8) → G#(ソ#)
		■(9) → A(ラ)
		■(10) → A#(ラ#)
		■(11) → B(シ)

### 2.3 音色分析

音色の決定に関係するとされる音響特徴は複数存在するが, 音の固さや深さといった質感を物理量である音響特徴から算出するための指標も発見されている. 今回使用した Timbral models では音色の特徴を形容詞などで表現した音色属性 (Timbral attributes: TA) のうち 'hardness', 'depth', 'brightness', 'roughness', 'warmth', 'sharpness', 'boominess', 'reverb' の8つを評価するための指標が Python で実装されている. 各評価は0から100までの値を取り, 数値が高いほどその音色属性を持っていることになる. 以下にそれぞれの音色についての説明を示す. [6]

**Hardness:** 音の硬さを表す指標であり, スペクトル傾斜やスペクトル重心などのスペクトルに関する情報やアタックタイムなどから算出される.

**Depth:** 音の奥行き感を表す指標であり, 20から500Hzの周波数成分が多く含まれる. 基本周波数が低く, 音の立ち上がり後にエネルギーの最大となる地点が早いほど奥行きを感じる.

**Brightness:** 音の明るさを示す指標であり, 3,000Hz以上の周波数成分が多く含まれる音ほど明るさを感じる.

**Roughness:** 音の粗さを表す指標であり, 変調周波数が70Hzに近い音ほど粗さを感じる.

**Warmth:** 音のあたたかさを表す指標であり, 80の刺激に対するあたたかさの主観的評価に基づいて実装された. 20Hzから40Hzの周波数成分が多く含まれる音ほどあたたかさを感じる.

**Sharpness:** 音の甲高さを表す指標であり, 正弦波信号の場合周波数が高いほどシャープネスを高く感じる.

**Boominess:** 音のブーミング感を表す指標であり, 重み付けされた1/3オクターブバンドのパワーの合計を用いて算出される. シャープネスとは反対に低い周波数ほどブーミング感を感じる.

本研究では音の生成を20秒で終了するようにプログラム上で設定しているため, 残響である 'reverb' を除いた7つの音色属性について合計24つのwavファイルを分析した.

## 3 結果

各ファイルの分析結果は図3のようになった. それぞれの音色の相関関係を示したのが図2である. また, クラス間で統計的な差があるか調べるため, 有意水準を0.05, 帰無仮説を「2群間の代表値に差がないこと」と設定し, それぞれの音色についてP値を求めた. 結果は図4に示すとおりである.

## 4 考察

全ての音色についてP値>0.05となり, 帰無仮説は棄却されないため, 今回の実験で生成されたサウンドの音色は元となったCAのクラスによる統計的な差はないと言える.

また各音色の相関関係からは roughness ほどの音色に対しても相関関係が弱いことがわかる。つまり roughness は他の音色に依らないため、多様なサウンドを生成する上で重要であると考えられる。

## 5 まとめと課題

CA のクラスとそれらを元に生成されたサウンドの音色に関係性があることを期待していたが、そのような結果は得られなかった。今回は CA の中でも最も単純な ECA を使用し、かつ簡単のために生きているセル (黒いセル) の合計値に基づき Proessing のデフォルトのライブラリを利用して音を生成した。そのため、今回の音の分析結果は必ずしもあるルールから生成されるサウンドの音色属性を示すわけではない。また、今回の結果から一般的な商業音楽のようなメロディを生成するためにはより複雑なルールを適応する必要があると考えられる。今後は問題の最適解ではなく高品質で多様な解の集合を見つけようとする進化アルゴリズム、Quality-Diversity optimization algorithms(QD)[7] を用いたサウンドの最適化に取り組みたい。

図 2: 各音色の相関関係

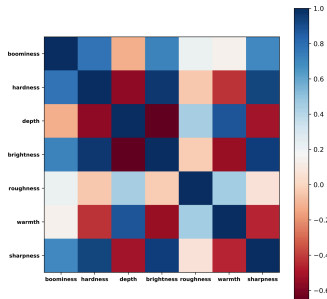


図 3: 各音色についての分析結果

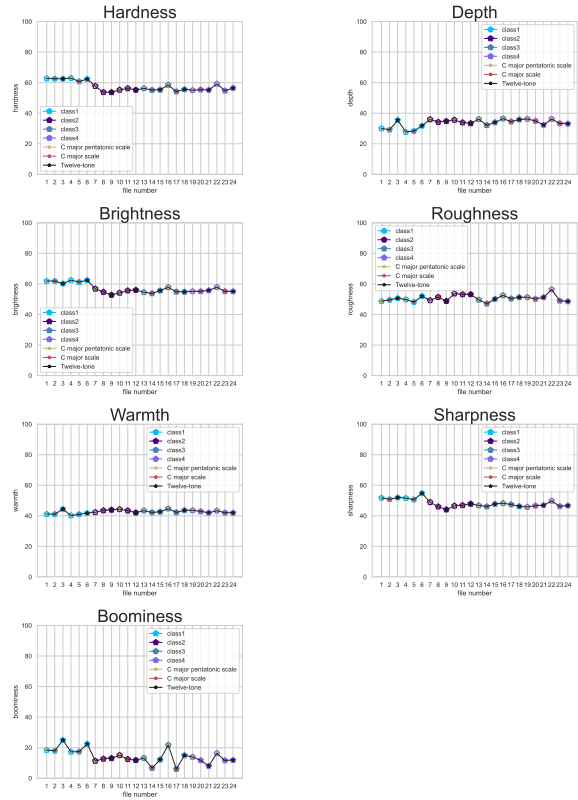


図 4: 各音色とクラスの関係 (P 値)

## 参考文献

- [1] Stephen Wolfram. *Cellular automata and complexity: collected papers*. crc Press, 2018.
- [2] 岡端起, 池上高志, ドミニク・チェン, 青木竜太, 丸山典宏. 作って動かす Alife. オライリー・ジャパン, 2018.
- [3] Peeters et al. The timbre toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 130, No. 5, pp. 2902–2916, 2011.
- [4] Pearce et al. Timbral attributes for sound effect library searching. In *Audio Engineering Society Conference: 2017 AES International Conference on Semantic Audio*. Audio Engineering Society, 2017.
- [5] Font et al. Audio commons: Bringing creative commons audio content to the creative industries. In *Audio engineering society conference: 61st international conference: Audio for games*. Audio Engineering Society, 2016.
- [6] 倉誠吾. 音色属性に係る評価指標を用いた異常音検知の研究. JAIST Repository, 2021.
- [7] Pugh et al. Quality diversity: A new frontier for evolutionary computation. *Frontiers in Robotics and AI*, p. 40, 2016.

表 1: Hardness

Compared Classes	P-value
Class1-Class2	0.55657
Class1-Class3	0.30649
Class1-Class4	0.24538
Class2-Class3	0.76878
Class2-Class4	0.46512
Class3-Class4	0.55657

表 2: Depth

Compared Classes	P-value
Class1-Class2	0.76878
Class1-Class3	1.0
Class1-Class4	1.0
Class2-Class3	1.0
Class2-Class4	0.88385
Class3-Class4	1.0

表 3: Brightness

Compared Classes	P-value
Class1-Class2	1.0
Class1-Class3	1.0
Class1-Class4	1.0
Class2-Class3	1.0
Class2-Class4	1.0
Class3-Class4	0.88571

表 4: Roughness

Compared Classes	P-value
Class1-Class2	1.0
Class1-Class3	0.6612
Class1-Class4	1.0
Class2-Class3	0.55657
Class2-Class4	1.0
Class3-Class4	0.76878

表 5: Warmth

Compared Classes	P-value
Class1-Class2	0.76878
Class1-Class3	1.0
Class1-Class4	1.0
Class2-Class3	1.0
Class2-Class4	1.0
Class3-Class4	1.0

表 6: Sharpness

Compared Classes	P-value
Class1-Class2	0.55657
Class1-Class3	0.88385
Class1-Class4	0.56136
Class2-Class3	0.55657
Class2-Class4	0.88385
Class3-Class4	0.55657

表 7: Boominess

Compared Classes	P-value
Class1-Class2	0.76878
Class1-Class3	1.0
Class1-Class4	0.38363
Class2-Class3	1.0
Class2-Class4	0.46512
Class3-Class4	0.37782