

# 粒子群社会モデルで創発する複雑系ダイナミクスの 可聴化による臨場的経験

高野 佑紀奈<sup>1,a)</sup> 鈴木 麗瑩<sup>1</sup> 有田 隆也<sup>1</sup>

**概要:** 近年、複雑で巨大なデータに取り組む研究者が増えてきた。我々は可聴化によって実現する臨場的経験が人工的あるいは現実の世界の複雑系で起こるダイナミクスの理解を促進しようと考えている。本稿では、人々の心理の変化を表現した粒子群社会モデルで創発する複雑なダイナミクスに焦点を合わせる。具体的には、長調や短調の和音、協和音と不協和音、そして音の高さを利用して社会的関係の心理的な意味合いを表現した立体音響手法によって、そのダイナミクスの臨場的経験を実現した。評価実験により、協力と搾取、あるいはクラスターの形成と崩壊の繰り返しなどの社会的関係とそのダイナミクスを音の相互作用によって生成された雰囲気を通じて理解できることが示された。

## 1. はじめに

可聴化とは、コミュニケーションや解釈を容易にするために、データにおける関係性を、音響信号で知覚される関係性に変換することである [1]。可聴化の技術は、データの信号を直接音に変換する Audification、日常の音生成イベントと同様にコンピュータでの出来事に音をマッピングする Auditory Icons、コンピュータの操作、インタラクションなどを伝えるために、ユーザとコンピュータインタフェースで使われる非言語の音のメッセージの Earcons、データを提示する目的で情報と音のパラメータとの間に関連を持たせる Parameter Mapping Sonification、ユーザーの行動に応じて音が鳴る Model-Based Sonification の 5 種類に分類される [2]。

近年、自然にあるいは人工的に作成された、抽象的、複雑で大規模なデータセットを扱う研究者が増えてきた。我々は可聴化が、そのようなデータを生み出す複雑系のダイナミクスの解釈、理解、説明に貢献する可能性が大いにあると考える。研究のこの方向は、人工社会や自然のシステムを対象にすでに開始されている。例えば、Cadiz らは、被食者と捕食者の個体数ダイナミクスが、モデル上で存在する種の量に応じて変化する音を聴くことで理解できるシステムを提示した [3]。Vickers らは、正常および異常なネットワークトラフィックと動作の両方をネットワーク管理者に警告するために、リアルタイムで情報インフラの自己組

織化臨界を可聴化するシステムを提案した [4]。

我々は、可聴化により複雑系の現象を理解することを目指している。本稿では、人々の心理に密接に関係する粒子群社会モデルで創発する複雑なダイナミクス [5], [6] に焦点を合わせる。この目的のために、我々は協力や搾取などのエージェント間の社会的関係の感情的な意味を表すために、長調/短調の和音、協和音/不協和音、音の高低、立体音響を利用し複雑なダイナミクスの創発の臨場的な経験を実現する。可聴化は、創発する社会ダイナミクスの聴覚的な経験と理解のために、聴覚的に複雑なダイナミクスを理解するための科学的な方法として仮想的な環境を作る我々のアプローチに必須の手段である。

先述の分類によれば、我々のアプローチにおける可聴化技術は、エージェントの状態と分布に依存して音を割り当てるという側面からは、Parameter Mapping Sonification に分類されると考えられる。同時に、仮想的な環境においてユーザーの位置に依存して、モデルにおける音が生み出されるという側面からは、Model-Based Sonification にも分類されると考えられる。

西洋音楽の作曲家は一般的には、正と負の感情を表すために、長調と短調の和音をそれぞれ使用する [7]。最近の脳電位研究では、長三和音と短三和音は、それぞれ、正の感情的な意味合いと負の感情的な意味合いを持っていることが明らかにされた [8]。協和音、不協和音および音の高さに関して、協和音と高い音は正の感情表現 (例えば、嬉しい、陽気な) があり、不協和音と低い音は負の感情表現 (例えば、不吉な、暗い) があることが指摘されている [9]。最近では、堀口らが不協和音の組み合わせの 2 音は、協和音

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻  
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan

<sup>a)</sup> takano\_y@alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp

の組み合わせの2音よりも、その付加的な合成から各音の強度を認識することが容易であることを示した [10]。人間とインタラクションするロボットシステムにおいて、センサーで得られたデータの精度の低さを不協和音で伝えるという応用例もある [11]。

## 2. Social Particle Swarm (SPS) モデル [5], [6]

SPS モデルは、社会ダイナミクスを分析するために考案された、ゲーム理論に基づいて動く自己駆動粒子系のモデルである (図 1)。

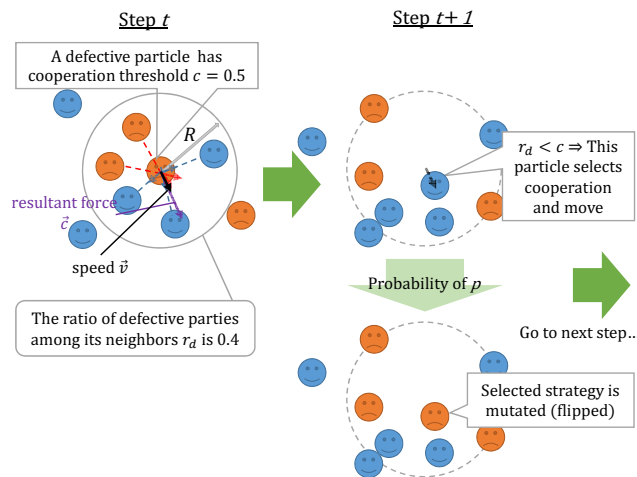


図 1: SPS モデルの概要 (青: 協力粒子, 赤: 裏切り粒子)

各粒子は2次元トーラス平面に配置され、粒子間の距離は社会的 (心理的) な関係の近さを表している。各粒子は囚人のジレンマゲームの戦略を持ち、ゲーム利得により生み出された力に基づいて移動する。これは社会的関係の変化を表している。各粒子の毎ステップにおける行動は、以下の戦略決定フェーズと移動フェーズの2つのフェーズからなる。

### 2.1 戦略決定フェーズ

全ての粒子は同時に、現ステップにおいて協力が裏切りのどちらを選択するかを、近隣粒子の戦略に基づいて決定する。各粒子は、不変の属性値として他の粒子に対する協力しやすさを表す協力度  $c$  ( $\in [0, 1)$ ) を持つ。各粒子は自らを中心とした相互作用半径  $R$  の円内にいる粒子を近隣粒子として認識する。前ステップにおいて近隣粒子集団の中で裏切りを選んだ粒子の割合  $r_d$  が  $r_d < c$  を満たす場合、粒子は現ステップでの戦略として協力を選択し、条件を満たさない場合は裏切りを選択する。さらに、各粒子はこの選択した戦略を確率  $p$  で反転させる (突然変異)。

### 2.2 移動フェーズ

各粒子は表 1 で定義される囚人のジレンマゲームの利得

に基づいた相互作用の結果により、近づくあるいは遠ざかる力を持つ。

表 1: 粒子  $i$  と近隣粒子  $j$  の相互作用を規定する利得行列

|            |           | player $j$ |            |
|------------|-----------|------------|------------|
|            |           | Cooperate  | Defect     |
| player $i$ | Cooperate | $R (= 1)$  | $S$        |
|            | Defect    | $T$        | $P (= -1)$ |

もし粒子  $i$  が粒子  $j$  とのゲームから得る利得  $P(s_i, s_j)$  ( $s_i, s_j$  はそれぞれ  $i$  と  $j$  の戦略を表す) が正の値 (あるいは負の値) であれば、 $i$  は  $j$  に向かう方向 (あるいは  $i$  は  $j$  から遠ざかる方向) の力を持つ。それぞれの力の大きさは式 1 で定義される。 $\vec{d}_{i,j}$  は粒子  $i$  から粒子  $j$  へのベクトルを表す。

$$p_{i,j} = \frac{P(s_i, s_j)}{|\vec{d}_{i,j}|} \quad (1)$$

この式で、粒子間の距離に反比例するのは、距離が小さくなるほど2者間の関係がより強まり、相互作用の結果により大きな影響を与えることを表現している。

式 2 と 3 は、粒子  $i$  における、近隣粒子からの合力  $\vec{c}_i$  を一定値  $v$  に正規化した速度ベクトル ( $\vec{v}_i$ ) を示している。

$$\vec{c}_i = \sum_{j \in \text{neighbors}_i} p_{i,j} \frac{\vec{d}_{i,j}}{|\vec{d}_{i,j}|} \quad (2)$$

$$\vec{v}_i = \frac{v}{|\vec{c}_i|} \vec{c}_i \quad (3)$$

全ての粒子は、算出された速度ベクトルに基づき同時に移動する。近隣粒子を持たない粒子は、ランダムな方向に動く。

### 2.3 ダイナミクスの創発

西本らはこの集団のふるまいが、全体の半数以上が裏切りを選択し、個体が反発し合っているクラス 1、ほぼ全員が協力を選択し、互いに引き合いクラスタを作って固まっているクラス 2、協力クラスタを形成→裏切り粒子の侵入と増加→協力クラスタの崩壊と粒子の拡散のように、協力クラスタの形成と崩壊のサイクルが繰り返されるクラス 3 (図 2) の3つのクラスに分類されることを明らかにした。クラス 3 で観察されたような社会的ふるまいのダイナミクスは、いくつかの適応ネットワークの研究 [12], [13], [14] において報告された現象と類似しており、注目に値する。

## 3. 可聴化

### 3.1 概要

我々は、SPS モデルで創発するダイナミクス、すなわち協力や裏切りの状態の分布や、クラス 3 で繰り返し起こる

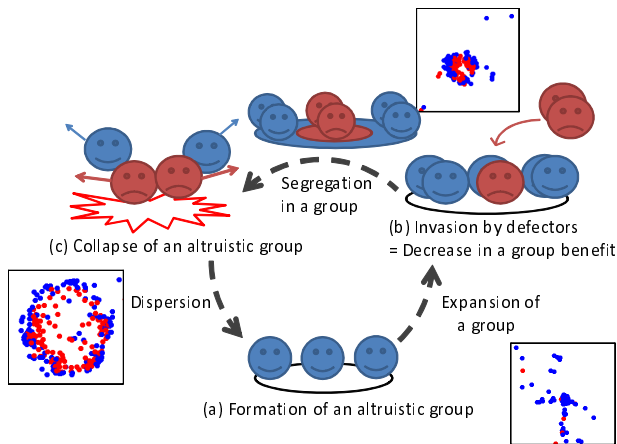


図 2: クラス 3: クラスタの形成と崩壊のサイクル (青: 協力粒子, 赤: 裏切り粒子)

クラスタの形成と崩壊に焦点を合わせ、聴くことでそれらを知覚することを目的としモデルを可聴化する。複雑系のダイナミクスを理解するためには、集団だけでなく粒子の微視的な動きも重要である。そのため我々は、各ステップにおいて平面内の粒子の方向から来る、各粒子が発する心理的に基づいた音を聴けるように、立体音響を使用する。

可聴化の基本方針は以下の通りである。

- (1) 各粒子は1ステップにつき1つの音を鳴らす。協力戦略の粒子は群れとして長三和音を、裏切り戦略の粒子は群れとして短三和音を形成する。長三和音と短三和音はそれぞれ明るい、暗い感情の意味を含んでいる [8] ので、この設定により、両者の戦略が心理的に表現される。
- (2) 協力粒子と裏切り粒子が混在していると不協和音を形成するように、長三和音と短三和音を選択する。これにより搾取の心理を表現する。
- (3) 近隣粒子の密度は音の高さと関係する。これによりクラスタの形成と崩壊のダイナミクスを知覚可能にする。

音の高さの表記法として、国際式 (真ん中のドは C4, その1オクターブ上のドは C5 と表す) がしばしば使われる。これに基づき、我々は和音の名前と位置の両方を表すために、和音の表現にもオクターブ表記を使用することにする。例えば、F4, A4, C5 から構成される長三和音は長三和音 F4 というように表現する。

### 3.2 和音の選定

上記の方針 1 と 2 を達成するため、次のように協力粒子と裏切り粒子それぞれに用いる和音を選定した。各ステップにおいて、各協力粒子はある長三和音の構成音からランダムに1つの音を選び、各裏切り粒子はある短三和音の構成音からランダムに1つの音を選ぶ。これにより、協力あ

るいは裏切り粒子がそれぞれ、群れとして長三和音、短三和音を形成する。

我々はまず、和音の色々な組み合わせにおいて、協力粒子と裏切り粒子から作られる音がどのように聴こえるのかを推測した。具体的には、協力粒子が対象とする長三和音を F4 で固定し、裏切り粒子が対象とする短三和音を Am3, Bm3, Cm4, Dm4, Em4, Fm4, Gm4 と変化させる。これら長三和音と短三和音の構成音で、可能な全ての音程について、それぞれ完全協和音程、不完全協和音程、不協和音程のどれに分類されるのかを調べた。例えば、長三和音 F4 (構成音は F4, A4, C5) と短三和音 Bm3 (構成音は B3, D4, F#4) の場合、両者から一音ずつ選んだ組み合わせは完全協和音程が1つ (A4 と D4), 不完全協和音程が2つ (F4 と D4, A4 と F#4), 不協和音程が6つ (F4 と B3, F4 と F#4, A4 と B3, C5 と B3, C5 と D4, C5 と F#4) となる。音程の分類は、最も基本的な分類 [15], [16] に十二平均律を適用した表 2 の分類、すなわち増4度以外の増音程、減音程を異名同音的に読み替えた分類に基づいて行った。十二平均律は1オクターブを12個に分割していることを意味するので、それぞれの音程は半音の数から考えることが可能である。

表 2: 協和音程と不協和音程の分類

| 分類   | 協和音程    |        |        |        |                |
|------|---------|--------|--------|--------|----------------|
|      | 完全協和音程  |        |        |        |                |
| 音程   | 完全 1 度  | 完全 8 度 | 完全 5 度 | 完全 4 度 |                |
| 半音の数 | 0       | 12     | 7      | 5      |                |
| 分類   | 協和音程    |        |        |        |                |
|      | 不完全協和音程 |        |        |        |                |
| 音程   | 長 6 度   | 長 3 度  | 短 3 度  | 短 6 度  |                |
| 半音の数 | 9       | 4      | 3      | 8      |                |
| 分類   | 不協和音程   |        |        |        |                |
|      | 音程      | 長 2 度  | 長 7 度  | 短 7 度  | 短 2 度    増 4 度 |
| 半音の数 | 2       | 11     | 10     | 1      | 6              |

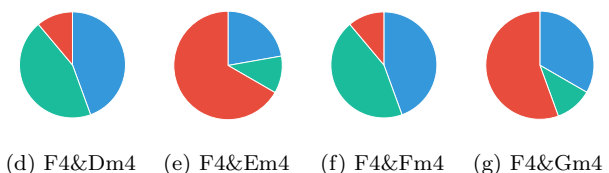
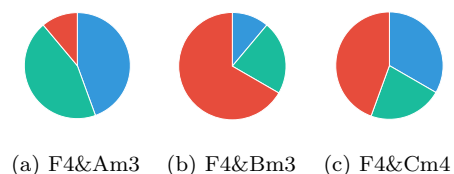


図 3: 協和音程と不協和音程の割合 (青: 完全協和音程, 緑: 不完全協和音程, 赤: 不協和音程)

図3は、先述の長三和音と短三和音全ての組み合わせに対し、3つの音程の割合を示している。この図から、和音の組み合わせによって不協和音程の割合が大きく異なっていることがわかる。これらを踏まえ形成された音を実際に聴いたところ、F4とBm3のように不協和音程となる音の組み合わせが多いほど、多い方の戦略の雰囲気の中に小さな不協和音が形成されることで、もう一方の戦略の存在を確認しやすい傾向があった。また、協力粒子と裏切り粒子が混在している際には、不協和音を聴くことにより不安定な雰囲気を感じ取ることができた。さらに、F4とAm3のように2つの和音の高さがより離れていると、群れとしてそれぞれの和音が形成されやすく、明るいあるいは暗い雰囲気をより知覚しやすい傾向があった。

これらの結果を踏まえ我々は、不協和音程の組み合わせが多く、さらに2つの和音の高さがより離れていることから、FとBmをそれぞれ可聴化に用いる長三和音、短三和音として使用することにした。この組み合わせにより、我々は協力粒子や裏切り粒子、さらにはそれらの混在した雰囲気を音によって感じ聴きわけることが可能になるはずである。

### 3.3 可聴化手法

各ステップで個々の粒子が鳴らす音は、協力あるいは裏切りの戦略と、近隣粒子の個数の2つの情報を基に次のように決定される。各協力粒子は長三和音Fの3つの構成音(F, A, C)から1つをランダムに選択し、各裏切り粒子は短三和音Bmの3つの構成音(B, D, F#)から1つをランダムに選択する。これは協力粒子が多いと全体で明るい雰囲気を感じ、逆に裏切り粒子が多いと全体で暗い雰囲気を感じ、さらに両者が混在している場合は不安定な雰囲気を感じられることを意図している。さらにFおよびBmの高さは、近隣粒子の個数に応じて決定される。我々は、協力クラスターの形成および崩壊が発生した際、近隣粒子の個数の平均が増加し、その後急速に減少するというSPSモデルのクラス3の特徴[5]に基づき、この設定を採用した。表3は、近隣粒子の個数と音の高さとの関係を示しており、同表右欄に、粒子が選ぶ3つの音の対象とする和音のコードと高さを示す。例えば、自分が協力粒子のときに前ステップで近隣粒子の個数が10個である場合、和音F1(F1, A1, C2)の3つの音から1つを選択する。

本臨場的経験システムは、立体音響に基づく可聴化した音を聴く方法として、オブザーバーモードとエージェントモードの2つのモードを持つ。オブザーバーモードでは、位置および聴者の方向は、それぞれ二次元トラス平面上の特定の位置に、かつ一定方向に固定される。エージェントモードでは、ある一つの粒子になりきって空間中を移動する。粒子の位置は粒子間の心理的な関係を表現しているが、粒子の方向の変化はこのモデルでは意味をもたないの

表 3: 近隣粒子の個数による音の条件設定

| 前ステップでの<br>近隣粒子の個数 $n$ | 現ステップで選択する対象と<br>する和音 (協力/裏切り) |
|------------------------|--------------------------------|
| $n < 20$               | F1 / Bm0                       |
| $20 \leq n < 50$       | F2 / Bm1                       |
| $50 \leq n < 80$       | F3 / Bm2                       |
| $80 \leq n < 110$      | F4 / Bm3                       |
| $110 \leq n < 140$     | F5 / Bm4                       |
| $140 \leq n < 170$     | F6 / Bm5                       |
| $170 < n$              | F7 / Bm6                       |

で、ディスプレイ上では両方のモードにおいて、聴者の位置が中央に固定されており、その方向は両モードにおいて上向き方向に固定されている。オブザーバーモードは聴者に全体の群れの巨視的なダイナミクスの理解を、エージェントモードは微視的なダイナミクスの理解を与える傾向があることを期待する。粒子が二次元トラス平面上で再生する場合の問題として、特定の方向から聞こえる音が、反対方向からも聞こえることがある。したがって、我々は聴者の周りに円形の可聴範囲を設定し、図4に示すように、範囲内にある粒子からの音を聴くことができるようにした。この図では、中央の緑色の円は聴者を表し、黒い円は半径が150となっている聴者の可聴範囲を表している。

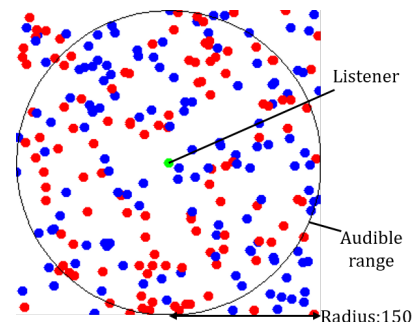


図 4: 聴者と可聴範囲

図5はオブザーバーモードとエージェントモードでの様子の例を示している。オブザーバーモードでは聴者が緑色の円として表され、エージェントモードでは対象とする粒子が協力である場合は水色の円、裏切りである場合はピンク色の円で表される。

## 4. 評価実験

### 4.1 実験設定

Java 言語と JOAL<sup>\*1</sup>を用いて立体音響を実現することにより、本システムを実装した。そのため、聴者とある粒子の距離が離れているほど、より小さな音が聴こえる。また、聴者と粒子群の距離が離れていたとしても、集まっている

<sup>\*1</sup> Java bindings for the OpenAL API. クロスプラットフォームの3D オーディオ API である OpenAL の Java バインディング。(<https://jogamp.org/joal/www/>)



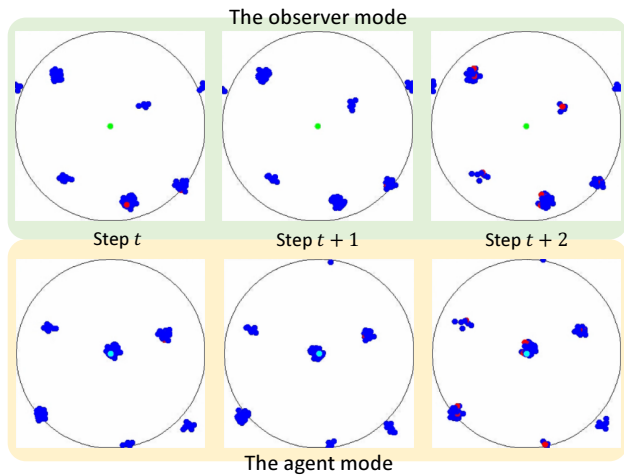


図 5: オブザーバーモード (上図) とエージェントモード (下図) における動きの例

とその方向から大きな音が聴こえる。SPS モデルの平面  $300 \times 300$  に対し、JOAL 上の平面は  $30 \times 30$  に対応するように設定した。実装したプログラムは OpenAL 対応のマルチチャンネル出力が可能なサウンドデバイスを用いて再生した。聴者は、5.1 ch のリアルサラウンドヘッドホンあるいは 5.1 ch のマルチスピーカーを使って音を聴く。粒子から鳴らす音は、あらかじめ用意したピアノの WAVE 形式のファイルを使用した。

SPS モデルの設定は、平面 (二次元トラス) を  $300 \times 300$ ,  $N = 250$ ,  $R = 60$ ,  $v = 10$ ,  $S = -1.4$ ,  $T = 1.4$ ,  $p = 0.03$  とした。各粒子の初期位置・開始時の戦略、協力度はランダムに決定した。可聴化した音を聴くためのステップ間隔を 0.5 秒に設定した。

## 4.2 結果

まずオブザーバーモードを評価した。立体音響により、粒子がどの付近に集まったり散らばったりしているかを認識できた。そして、協力粒子が多いと明るい和音を、裏切り粒子が多いと暗い和音を、さらに両者が混在している場合には不協和音を聴き分けることができた。不協和音は、F と F#等により形成されていると考えられる。

さらに音の高低の変化により、協力クラスタの形成と崩壊の現象も知覚することが可能になった。具体的には、2.3 で述べた 3 つのクラスは以下の通りである。クラス 1 (図 6a) では、多くの粒子が裏切りであり、さらに個体が反発し合うことで広がり各粒子における近隣粒子の個数が少なくなっている。そのため、低い短三和音が平面全体で形成され、暗い雰囲気全体から聴き感じ取れた。クラス 2 (図 6b) では、多くの粒子が協力であり、さらにクラスタを作って固まっている。そのため、高い長三和音がクラスタで形成され、明るい雰囲気をクラスタのある方向から聴き感じ取れた。クラス 3 (図 6c) では、(a) 協力クラスタを

形成、(b) 裏切り粒子の侵入と増加、(c) 協力クラスタの崩壊と粒子の拡散が繰り返される。そのため、(a) だんだん音が高くなりながら明るい雰囲気の和音がクラスタのある方向から聴こえる、(b) 不協和音が少し聴こえるようになる、(c) だんだん音が低くなりながら音の聴こえる範囲が広がっていく、という音の変化を聴きとることができ、どの付近やタイミングでサイクルが起こっているのかを音で知覚することが可能となった。

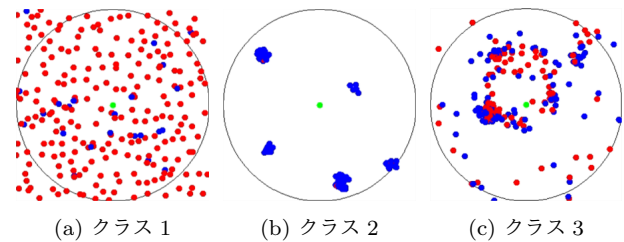


図 6: 3 つのクラスの様子 (青: 協力粒子, 赤: 裏切り粒子, 緑: 聴者)

次に、エージェントモードを評価した。エージェントモードでは、なりきっている粒子がクラスタ外にあるのかクラスタ内にあるのかで聴こえ方が異なった。前者の場合は、粒子の挙動の知覚はオブザーバーモードで聴いたときとほぼ変わらなかった。後者の場合は次のように、オブザーバーモードで聴いたときよりも、明るい、暗い、不安定な雰囲気やその変化を明確に感じ取ることができた。

なりきっている粒子がクラスタ内にいる際、大きな音の方向が常に変わっていること、すなわちクラスタ内での位置が常に変わることがわかった。エージェントモードにおいて、ある粒子と一緒に動いて音を聴くことはその近辺の音を聴くことと同等である。このことは聴者が対象とした粒子になりきり、よりリアルな経験をもたらすことで、粒子が常に動いているという、クラスタにおける粒子間の微視的な関係性の理解を可能にした (図 5 の下部)。

クラス 3 では、なりきっている粒子がクラスタ内にある際、不協和音の程度がだんだん強くなっていった。クラスタは不協和音の程度が強くなると崩壊する傾向があった。このことは、クラスタ内で可聴化した音の現在の状態を聴くことにより、クラスタの今後のふるまいを予想しうることを示している。

クラス 2 では、協力粒子が集団を支配しているため、基本的に明るい和音を聴くことができた。しかしながら、多かれ少なかれ、同時に不協和音が聴こえるので、裏切り粒子が消滅することはないことがわかる。より明確に不協和音が聴こえるクラスタは、もし突然変異などで裏切り粒子が増え、より不協和音が強くなると、崩壊する可能性がある。

## 5. 博覧会での展示

2016年12月3日(土)と4日(日)に、愛知県名古屋市中でデジタルコンテンツ博覧会 NAGOYA<sup>\*2</sup>が開催された。我々は本博覧会の企業・団体展示会に出展し、ブース内で本システムの実演を行った。

我々はまず SPS モデルを、人々の心理的な関係の動きをシミュレートしたものとして簡単に紹介した。モデルについて理解しやすくするために、協力粒子を良い人、裏切り粒子を悪い人として説明した。可聴化手法に関することを含む他の特性についても、なるべく簡単な言葉を用いて説明した。その後、クラス3の動きを可聴化した音を、オブザーバーモードで5.1ch サラウンドヘッドフォンを使用し聴いてもらった。可聴化に用いる音源はピアノを使用した。

鑑賞者による主な評価は以下であった。(1) 立体音響によって、粒子の定位を知覚できた。(2) 協力粒子と裏切り粒子により、それぞれ明るい、または暗い雰囲気を感じられた。(3) クラスタの崩壊が起こった際に、残念な雰囲気を感じ取れた。(4) 可聴化し生成された音は現代音楽のように感じた。これらのことから、可聴化の基本的な有効性を確認できた。

## 6. おわりに

我々は、人々の心理に密接に関係する粒子群社会モデルで創発するダイナミクスを題材として、その臨場的な経験を実現する可聴化手法を提案した。具体的には、エージェント間の社会的関係性の感情的な意味を表現するために、長調/短調の和音、協和音/不協和音、音の高低を利用した立体音響により実現した。さらに本システムは、立体音響に基づいて可聴化した音を経験する方法として2つのモードを持っていた。各粒子がそれぞれの位置において音を鳴らしていると仮定し、粒子の集散的なダイナミクスを表現した。評価実験により、経験する人が音の相互作用により形成された明るい、暗い、あるいは不安定な雰囲気を感じ取ることで、協力と搾取、クラスタの形成と崩壊の繰り返しを含む社会的な関係性とそのダイナミクスを把握できることを示した。また、設定した2つのモードによって、群れの巨視的ダイナミクスと微視的なダイナミクスのそれぞれに焦点を合わせることができるとも示された。

## 参考文献

- [1] Kramer, G., Walker, B., Bonebright, T., Cook, P. and Flowers, J. H.: The Sonification Report: Status of the Field and Research Agenda, *Faculty Publications, Department of Psychology, Paper 444* (2010).
- [2] Hermann, T., Hunt, A. and Neuhoﬀ, J. G.: *The Sonification Handbook*, Logos Verlag Berlin (2011).
- [3] Cadiz, R. F. and Colasso, M.: OSC-NETLOGO: A Tool for Exploring the Sonification of Complex Systems Using NETLOGO, *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, pp. 379–382 (2012).
- [4] Vickers, P., Laing, C. and Fairfax, T.: Sonification of a Network’s Self-organized Criticality for Real-time Situational Awareness, *Displays*, Vol. 47, pp. 12–24 (2017).
- [5] Nishimoto, K., Suzuki, R. and Arita, T.: Social Particle Swarm: Explosive Particle Dynamics on Cooperative/Defective Forces, *Proceedings of IEEE ALIFE 2013 (IEEE SSCI 2013)*, pp. 134–139 (2013).
- [6] Nishimoto, K., Suzuki, R. and Arita, T.: Where Do the Dynamics of Social Relationship Come from?—An Analysis Based on Social Particle Swarm, *Proceedings of 19th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2014)*, pp. 86–91 (2014).
- [7] Gagnon, L. and Peretz, I.: Mode and tempo relative contributions to “happy-sad” judgements in equitone melodies, *Cognition and emotion*, Vol. 17, No. 1, pp. 25–40 (2003).
- [8] Bakker, D. R. and Martin, F. H.: Musical Chords and Emotion: Major and Minor Triads are Processed for Emotion, *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, Vol. 15, No. 1, pp. 15–31 (2015).
- [9] Wedin, L.: A Multidimensional Study of Perceptual-emotional Qualities in Music, *Scandinavian Journal of Psychology*, Vol. 13, No. 1, pp. 241–257 (1972).
- [10] Horiguchi, Y., Nakashima, M., Nakanishi, H. and Sawaragi, T.: Effectiveness of Choosing Dissonant Combination of Tones for Multivariate Data Sonification, *Proceedings of the 16th International Conference on Human-Computer Interaction, Human Interface and the Management of Information: Information, Design and Interaction, LNCS*, Vol. 9734, pp. 25–33 (2016).
- [11] Hermann, T., Niehus, C. and Ritter, H.: Interactive Visualization and Sonification for Monitoring Complex Processes, *Proceedings of the 2003 International Conference on Auditory Display*, pp. 247–250 (2003).
- [12] Suzuki, R., Kato, M. and Arita, T.: Cyclic coevolution of cooperative behaviors and network structures, *Phys. Rev. E*, Vol. 77, p. 021911 (7 pages) (2008).
- [13] Chen, Z., Gao, J., Cai, Y. and Xu, X.: Evolutionary prisoner’s dilemma game in flocks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 390, No. 1, pp. 50–56 (2011).
- [14] Cavaliere, M., Sedwards, S., Tarnita, C., Nowak, M. and Csikász-Nagy, A.: Prosperity is associated with instability in dynamical networks, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 299, pp. 126–138 (2012).
- [15] Müller, M.: *Fundamentals of Music Processing*, Springer International Publishing (2015).
- [16] Cambouropoulos, E., Kaliakatsos-Papakostas, M. and Tsougras, C.: An Idiom-independent Representation of Chords for Computational Music Analysis and Generation, *Proceeding of the joint 11th Sound and Music Computing Conference (SMC) and 40th International Computer Music Conference (ICMC)* (2014).

<sup>\*2</sup> <https://www.digihakunagoya.com/>