

シンクロの可聴化

岡崎 詩歌 (指導教員：郡宏)

1 はじめに

人間が直接見ることができない事物や現象を、グラフや映像などにして「見る」ことができるようにすることを、可視化という。では、音を利用して「聴く」ことができるようにする、すなわち可聴化を行うと、どのような情報が得られるのだろうか？

本研究では振動子集団のシンクロ現象の分析に、従来から行われている可視化に加え、本研究の提案手法である可聴化を用い、両者の比較を通して可聴化の有効性について検討する。

2 使用する2つのモデル

本研究では、振動子集団を記述する数理モデルとして、以下の2つを使用する。蔵本モデルは

$$\dot{\phi}_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^{N-1} \sin(\phi_j - \phi_i), \quad (1)$$

FitzHugh-南雲 (FHN) モデルは

$$\frac{du_i}{dt} = h_i(u_i(a - u_i)(u_i - 1) - v_i) + K \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i - u_i \right), \quad (2)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = h_i(\epsilon(\beta u_i - \gamma v_i)), \quad (3)$$

で与えられる [1]。各モデルの K は各振動子間の結合強度、 N は振動子数を表すパラメータである。蔵本モデルは位相振動子のモデルであり、 $\phi_i (i = 1, \dots, N)$ と $\omega_i (i = 1, \dots, N)$ は振動子の位相と固有振動数をそれぞれ表している。FHN モデルは、神経細胞の電気的活動を簡潔に記述したモデルであり、FHN モデルの $u_i (i = 1, \dots, N)$ は神経細胞の電位、 h_i は固有振動数を調節するパラメータを表す。残りの変数やパラメータは本研究で重要でないので説明を省略する。

3 各モデルのシミュレーション結果

蔵本モデルにおいては、10個の振動子において、固有振動数を $[0:1]$ の一様分布からランダムに選択してシミュレーションを行った。FHN モデルにおいては、神経細胞が自発的に興奮を繰り返すパラメータ ($a = -0.1$, $\beta = 1$, $\epsilon = 0.01$, $\gamma = 0.5$) を選んだ。

まず、結合強度 K を変化させた時の各振動子の平均振動数 Ω_i を調べた結果を図1に示す [2]。図1より、どちらのモデルも結合強度を増加させると振動子集団の振動数が徐々に一致していくことがわかる。

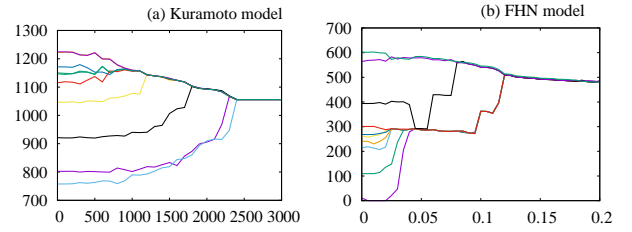


図1: 各振動子の平均振動数 Ω_i (縦軸) の結合強度 K (横軸) 依存性。(a) 蔵本モデル, (b) FHN モデル。

次に蔵本モデルにおいて、時系列の可視化と可聴化を行った。各振動子からの出力が $\sin \phi_i$ であるとしたときの平均出力 $S_1(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin \phi_i(t)$ の時系列を図2に示した。 $K = 0$, $K = 1000$ の時系列の波形からは周期性が読み取れないが、 $K = 2000$, $K = 3000$ では明らかに周期性があることがわかる。

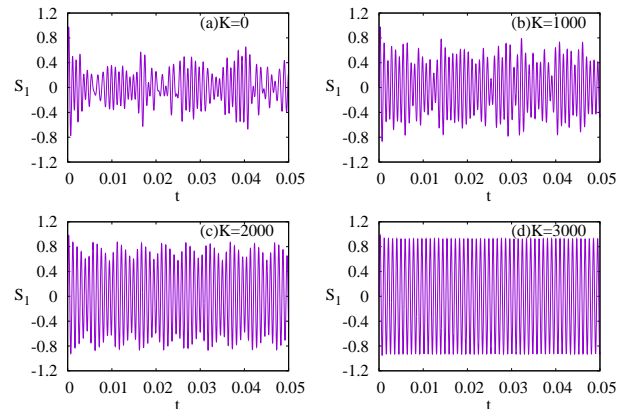


図2: 蔵本モデルの時系列。縦軸は S_1 、横軸は時間

この $S_1(t)$ を音圧として音声を作成することにより可聴化を行った [3]。 $K = 0$, $K = 1000$, $K = 2000$ のとき、複数の音が混合した音 (以後、複音と表す) が聞き取れる。 $K = 0$ のとき、混合しているそれぞれの音の大きさに大差はない。 $K = 1000$ のときはある周波数の音が極めて大きく聞こえ、振動子集団の振動数同期が起こり始めていると考えられる。 $K = 2000$ のときは前者2つの場合に比べ、混合している音の数が少ない。 $K = 3000$ のときは単音が聞き取れる。

FHN モデルでは10個の振動子の電位の平均 $S_2(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(t)$ の時系列に対して可視化と可聴化を行った。図3より、 $K = 0$, $K = 0.025$ の時系列の波形からは周期性が読み取れないが、 $K = 0.1$, $K = 0.2$ では明らかに周期性があることがわかる。また、蔵本モデルにおける $K = 3000$ のときの時系列 (図2) と FHN

モデルにおける $K = 0.2$ のときの時系列 (図 3) を比較すると、波形が異なるのが読み取れる。

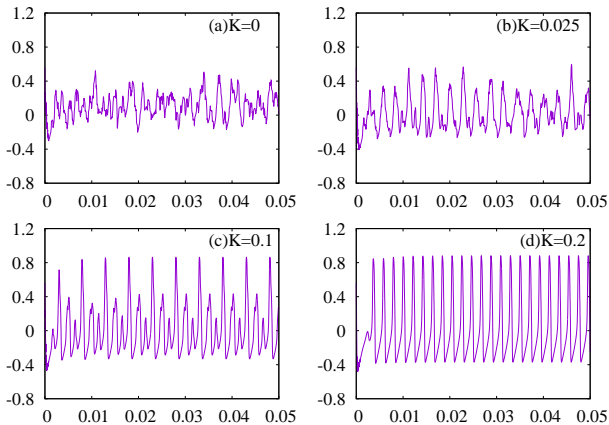


図 3: FHN モデルの時系列. 縦軸は S_2 , 横軸は時間 t .

次に可聴化を行った。 $K = 0$ のとき、複音が聞き取れる。 $K = 0.025$ のとき、分岐図からは複音が聞き取れると予想したが、実際はノイズが非常に目立ち、 $K = 0$ の時とは大きく異なる音であった。 $K = 0.1$ のとき、分岐図からは 2 つの音が混合していると予想したが、単音に聞こえた。 $K = 0.2$ では単音が聞き取れた。また、蔵本モデルとの波形の違いから予想できる通り、蔵本モデルとは異なる音色の音が聞き取れた。

4 FHN モデルの特徴的な振動数同期

FHN モデルの可聴化において、 $K = 0.025$ と $K = 0.1$ のとき、分岐図や時系列から予想される音と実際の音が大きく異なって聞こえた。そこでパワースペクトルを分析し、音の周波数成分 f と、それぞれの成分が持つパワーを調べた。

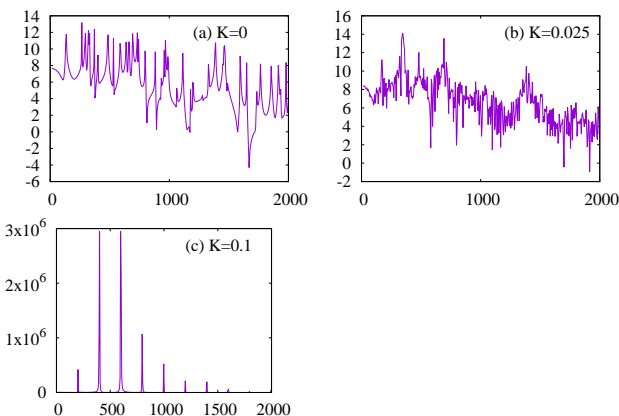


図 4: FHN モデルのパワースペクトル. 縦軸はパワー, 横軸は周波数 f . (a) と (b) の縦軸はパワーの自然対数.

図 4 より、対数パワースペクトルは $K = 0$ ではなめらかで、 $K = 0.025$ では乱雑であった。

$K = 0.1$ のとき、主要な音が 2 つ混合していて、この 2 音の振動数の比はほぼ 2:3 である。このように振動数の比が整数比となる音を同時に鳴らすと、単純で心地のいい感触として聞くことができる。このことが、単音のように聞き取れる理由であると予測できる。

5 可視化と可聴化を融合した解析

可視化と可聴化を同時に利用し、結合強度 K の値が増加するにつれて振動数が同期していく様子を観察した。 K の変化に伴い、その K に対応する時系列を可聴化して得られた音がリアルタイムに出力される音声付き動画を作成した。

蔵本モデルは、 K の値に関係なく動画から予想される音と実際に聞き取れる音がほぼ対応していた。

FHN モデルは、 $K = 0$ から $K = 0.05$ に変化する間に、複音がノイズに変化し、それ以降は振動数同期が複数に分散しているにもかかわらず、単音のように聞こえるようになる。このような場面では、同期が分散している振動数の比が整数比となっていると予測できる。さらに、 $K = 0.05$ から $K = 0.1$ に変化する間に、分岐図からは予想できない劇的な音の変化が一瞬起きることが聞き取れた。このように、FHN モデルでは、分岐図から予想される音と実際に聞き取れる音が異なる場面が複数存在した。

6 まとめと今後の課題

可聴化は、あるモデルの時系列の波形や同期の仕方の規則性の有無など、パワースペクトルや時系列から得られる情報を知る手がかりとなることがわかった。また、複数の情報を調べる場合、情報源として画像だけでなく音を併用の方が効率的であると感じた。よって今後は別のモデルのデータを集めて可聴化の優れている点についての知見を深め、可聴化の有用性を生かした新しい解析方法の考案を目指したい。

参考文献

- [1] 郡宏, 森田喜久. 生物リズムと力学系. 共立出版, 2011.
- [2] 加藤由里子. 周期が大きく異なるリズム集団のシンクロ, 2017. 修士論文.
- [3] 鳥山早紀. モード間相互作用の音色に対する効果, 2018. 修士論文.