

音楽曝露によるラット聴覚野の情報処理容量の変化

石田 直輝, 高橋宏知

キーワード Music, Auditory cortex, Information processing capacity, Physical reservoir computing, Rat

1. 背景

音楽は、古くから、人間の生活に寄り添い、共に発展してきた。音楽が我々の知覚や認知機能に影響をもたらすという報告により、今や音楽は、娯楽としてだけでなく、学習や医療といった分野での応用も期待されている。こうした音楽の可能性を追求するうえで、音楽に対する我々の脳の情報処理の解明が必要である。

音楽が脳に及ぼす影響として、学習の促進がよく知られている。特に、Mozart のピアノソナタ (K. 448) は、聴取後に、人間のみならず動物でも、複数の行動タスクの成績が上昇することが報告されている [1]。こうした音楽による学習促進の神経メカニズムを明らかにできれば、音楽の社会的応用に大きく資すると考えた。

脳は、外界から感覚刺激を受け取り、そこから取り出した情報をもとに、学習や意思決定を行うシステムであると、広く考えられている。この考えに従えば、感覚入力に対する情報処理能力は、大脳皮質の聴覚野で主に定量化できる。このことから、長期間の音楽曝露による、聴覚野の情報処理の変化が特徴づけられれば、音楽が脳の情報処理に及ぼす影響の一端が解明できると考えた。

音楽を含む音系列に対する、聴覚野の情報処理の一つの側面として、本研究は、音刺激系列の時間変化が、聴覚野でどのような時空間パターンに埋め込まれているかに着目した。すなわち、聴覚野が、音系列をどのような形で、どの程度の情報量を保持できるか、という側面を定量的に調べることを考えた。しかし、従来のベンチマークタスクでは、限定された刺激パターンでしか、神経系における入力情報の保持を調べることはできなかった [2]。

聴覚野における音情報の保持を、網羅的に定量化する手法として、本研究はリザーバー計算に着目した。リザーバー計算は、近年、時間変化する系列に対する脳の情報処理を説明する枠組みとして注目を集めている。リザーバー計算では、力学系の内部状態に貯蔵された入力記憶を、情報処理容量 (Information Processing Capacity; IPC) という指標で、系列パターンに依存せず、網羅的に定量化できる [4]。したがって、聴覚野の神経活動から IPC を計測できれば、音楽による聴覚野の情報処理の変化も、タスク非依存的に特徴づけられる。

本研究の目的は、音楽曝露が、聴覚野の情報処理にもたらす影響を調べることである。そのためにまず、聴覚野の神経活動から IPC を計測する実験系を確立する。その後、4 週間の音楽曝露による、聴覚野の IPC の変化を調べる。

2. 手法

2.1 ラット聴覚野における IPC 計測系の確立

Wister 種ラット (n=15) の聴覚野第 4 層に、微小電

極アレイを刺入した。IPC を計算するための音刺激として、各ステップにおいて 50% の確率でクリック音が提示される系列 ($u_n = 1$ (click) or -1 (silent)) を提示し、神経活動 (Multi-unit activity; MUA) を得た。ステップ間隔 (ISI; 10, 18, 32, 56, 178, 316 ms) をパラメータとした。時刻ステップ n , 計測点 i における、単位時間当たりの MUA 数を状態量 $x_{n,i}$ として求め、状態量行列 $X = (x_{n,i}) \in R_{N \times L}$ を得た。式 (1) を用いて、1 次から 6 次までの IPC を計算し、すべての次数に対する IPC の総和値を、ISI 間で比較した。

$$IPC(X, \mathbf{z}) = \mathbf{z}^T X X^+ \mathbf{z} / \mathbf{z}^T \mathbf{z} \quad (1)$$

$$z_{s_d, n} = \prod_{s \in S_d} u_{n-s} \text{ for } s_d \in S_d \quad (2)$$

ここで、 d は多項式の次数を表し、 s は入力の遅延ステップ数、 S_d は次数 d に対する s の組み合わせ全体の集合を表す。目標出力 $\mathbf{z} = (z_{s_d, n})$ は、時刻ステップ n における、過去の入力の直交多項式基底である。

さらに、状態量行列 X を前後に二分して、二つの記憶ベンチマークタスク (シフトレジスタタスク、論理計算タスク) を行い、それぞれの成績を、IPC で回帰分析した。

2.2 音楽曝露下での育成と IPC 計測

20 匹のラットを防音室にて飼育し、毎日 6 時間ずつ 4 週間、音楽に曝露した。ラットは 3 群に分け、Mozart K. 448 の原曲 (Original; OR, n=9), K. 448 の音程をランダムに並べ替えたもの (Pitch Shuffled; PS, n=6), 音間隔をランダムにしたもの (Rhythm Shuffled; RS, n=5) をそれぞれ曝露した。音楽に曝露しなかった 16 匹のラットを加えて、2.1 と同様の手法で、聴覚野の神経活動を計測し、6 種類の ISI に対する、1 次から 6 次の IPC を得た。

3. 結果・考察

3.1 ラット聴覚野の IPC

図 1(a), (b) に、各 ISI に対する、1 次から 6 次の IPC の総和値を積み上げ棒グラフと箱ひげ図で示す。IPC の総和値は、ISI に対して、有意な差異を示し (Kruskal-Wallis test; $p=0.014$), ISI が 10 および 18 ms において、IPC のピークを認めた。この結果は、聴覚野における発火率符号化 (Rate-coding) のタイムスケールと合致しており [5], 本手法で得られる IPC が、聴覚野の情報処理の特徴と矛盾しないことを示す。

表 1 に、各ベンチマークタスクの成績を IPC によって回帰した結果を示す。いずれのベンチマークタスクにおいても、1 次または 2 次の IPC が、高い決定係数を示した ($R^2 = 0.788-0.930$)。この結果は、IPC が、

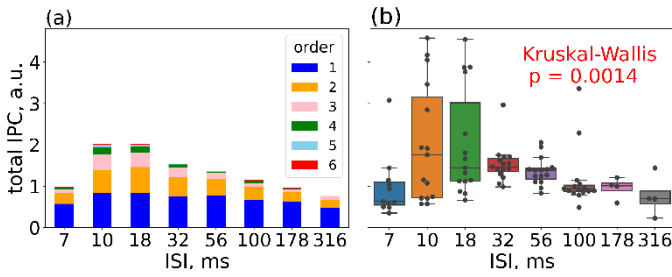


Figure 1: Sum of 1st to 6th order of IPC for each ISI. (a) Degree wise sum of IPC for each ISI. The average values were shown. (b) Total IPC for each ISI. Gray scatters show individual IPC. In each box, median value was shown as a horizontal line.

既存のベンチマークタスクと矛盾しないことを示す。

3.2 長期音楽曝露による IPC 変化

図 2 (a) に、ISI ごとに、各群の 1 次から 6 次までの IPC の総和値を示す。ISI および、曝露音楽の二つの要因に対して二元配置分散分析 (2-way ANOVA) を行ったところ、共に有意な効果が見られた ($p < 0.001$)。また、ISI が 300 ms のとき、3 つの音楽曝露群の IPC は、非曝露群よりも有意に高かった (Mann-Whitney U の片側検定とボンフェローニの補正, $p = 0.016$)。本研究で用いた曝露音楽はいずれも、音の平均間隔が 287.7 ms だった。このことから、曝露音系列の平均音間隔に近い ISI においてのみ、情報処理容量が増大した可能性がある。一方で、曝露群間での違いは認められなかったことから、音楽様の音系列刺激への長期曝露は、ピッチやリズムといった、音楽構造に依存せずに、聴覚野の情報処理を変化させることを示唆する。今後、倍速やスロー再生といった、音の平均間隔が異なる楽曲が IPC に齎す影響を調べるのが有用であると考え。

図 2(b) に、ISI 300 ms における各次数の IPC が全体に占める割合を、ラットの群ごとに示す。3 つの音楽曝露群では、2 次以上、すなわち非線形の IPC が全体に占める割合が、非曝露群と比較して約 10% 高かった。音楽のリズムは、時間方向に相関を持つことから、こうした音系列への長期曝露によって、聴覚野における非線形な情報処理が強化されたことを示唆する。

Table 1: Regression analysis of each benchmark tasks by IPC. In p-val column, *** means $p < 0.001$.

IPC	Coef	p-val	R_{adj}^2	Task
IPC(s)	0.944	***	0.890	SR
IPC(s1)	0.517	***	0.847	AND
IPC(s2)	0.390	***		
IPC(s1s2)	0.201	***		
IPC(s1)	0.269	***	0.788	OR
IPC(s2)	0.338	***		
IPC(s1s2)	0.435	***		
IPC(s1)	-0.0192		0.930	XOR
IPC(s2)	-0.0026			
IPC(s1s2)	0.974	***		

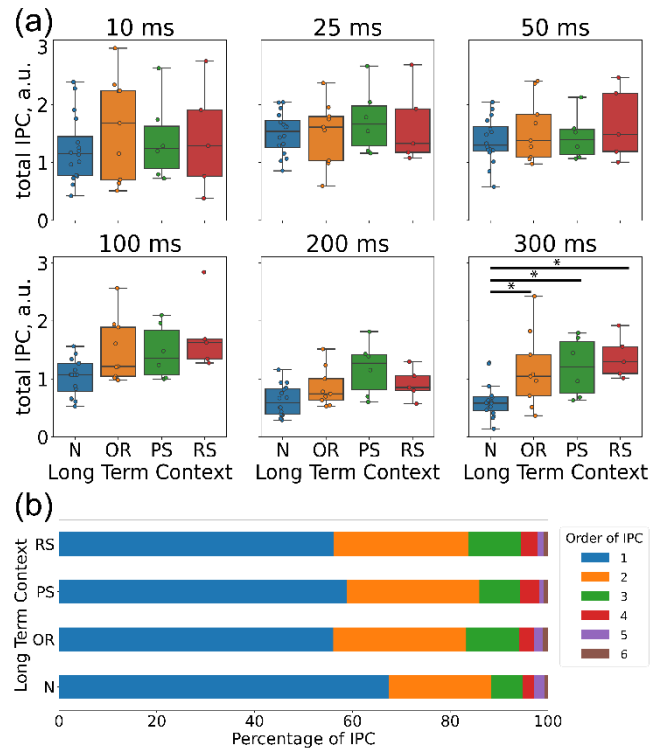


Figure 2: (a) Sum of 1st to 6th order IPC for each music exposure condition. (b) Percentage of each degree IPC over total IPC in ISI 300 ms.

4. 結論

本研究は、音楽曝露が、聴覚野の情報処理にもたらす影響を調べることを目的とした。そのためにまず、ラット聴覚野における情報処理を IPC によって特徴づける手法を確立したのち、音楽曝露群と非曝露群の IPC を比較した。その結果、長期的な曝露によって、ISI が 300 ms のときの IPC が、3 つの音楽曝露群全てにおいて、非曝露群よりも有意に高かった。また、これらの音楽曝露群では、1 次から 6 次までの IPC の総和値に占める、2 次以上の IPC の割合が、非曝露群よりも約 10% 高かった。これらの結果は、音楽への長期曝露が、聴覚野の非線形な情報処理を向上させることを示唆する。

参考文献

- [1] Xing, Y. *et al.*, “Mozart Rhythm and Retrograde Mozart effects: Evidences from Behaviours and Neurobiology Bases”, *Sci Rep*, **6**, 18744 (2016).
- [2] Alain, C., Woods, D.L., & Knight, R.T., “A distributed network for auditory sensory memory in humans”, *Brain res*, **812**, pp.23-27 (1998).
- [3] Dambre, J., Verstraeten, D., Schrauwen, B., *et al.* “Information Processing Capacity of Dynamical Systems”, *Sci Rep*, **2**, p.514 (2012).
- [4] Lu, T. & Wang, X. “Temporal and rate representation of time-varying signals in the auditory cortex of awake primates”, *Nat. Neurosci*, **4**, 1131-1138 (2001).