

二音和音の協和性と三音和音の調性を表現する聴皮質の神経活動

白松（磯口）知世^{†1} 野田貴大^{†1} 神崎亮平^{†1} 高橋宏知^{†1,2}

二音和音の多くは協和音、不協和音といった質感をもち、三音和音の一部は長調、短調といった調性をもつ。本研究では、聴皮質の定常的な神経活動が、二音和音の協和度や三音和音の調性を表現しているかを調べた。ラット聴皮質の4層から、二音和音、三音和音、それらの構成音に対する定常的な局所電場電位 (LFP) を、微小電極アレイで計測した。計測した LFP から5つの帯域における位相同期度を求め、比較した。その結果、3つの帯域 (β , 14–30 Hz; low- γ , 30–40 Hz; high- γ , 60–80 Hz) において、協和音は不協和音よりも位相同期が強化された。同様に、3つの帯域 (α , 8–14 Hz; low- γ , high- γ) において、長調和音は短調和音よりも位相同期が強かった。これらの結果は、聴皮質内の位相同期が、和音の質感を表現していることを示唆する。

Neural Representation for chord texture in rat auditory cortex

TOMOYO SHIRAMATSU (ISOGUCHI)^{†1} TAKAHIRO NODA^{†1}
RYOHEI KANZAKI^{†1} HIROKAZU TAKAHASHI^{†1,2}

Two-tone chords can be divided into consonance and dissonance, and some three-tone chords have tonality such as major or minor key. In this study, we targeted phase locking value (PLV) of local field potential (LFP) in rat auditory cortex and investigated whether PLV represents consonance of the chord consisting of two pure tones, and tonality of the chord consisting of three pure tones. A microelectrode array recorded LFPs from the fourth layer of the auditory cortex of anesthetized rats, while we presented two-tone chords, three-tone chords, or their constitutive pure tones. From the recorded LFPs, we calculated PLVs in 5 bands (theta, 4–8 Hz; alpha, 8–14 Hz; beta, 14–30 Hz; low gamma, 30–40 Hz; high gamma, 60–80 Hz) and compared them. As results, in beta, low gamma and high gamma band, PLV was more strengthened by the consonant chords than the dissonant chords. In addition, in alpha, low gamma and high gamma band, PLV was larger in the major chords than the minor chords. These results suggest that the phase synchrony within the auditory cortex represents the consonance or the tonality of the chord.

1. はじめに

音には、様々な質感、つまり音の周波数構造のカテゴリが存在する。例えば、2つの周波数の音で構成される二音和音は、協和音と不協和音に分けることができる。また、3つの周波数の音で構成される三音和音の一部は、長調、短調といった調性と関わる。一般に、協和音は心地よさを、不協和音は不快感を誘発すると言われている。実際に、被験者が感じる心地よさや選好性は、協和音と不協和音で異なることが、心理物理実験で調べられている [1]。また、長調の楽曲が幸福感を、短調の楽曲が悲哀を誘発することも、心理物理実験により調べられている [2]。

ある和音が協和音、不協和音であるか、または長調、短調の調性をもつかは、和音を構成する音の周波数比によって決まる。例えば楽典では、周波数比が 2:3 の二音和音は協和音に、8:9 の二音和音は不協和音に分類される。また、周波数比が 4:5:6 の三音和音は長調に、10:12:15 の三音和音は短調に分類される。こうしたことから、和音の質感を、構成音の周波数から求まる物理的な指標で表す事が試みられてきた。例えば、二音和音の構成音から生じるうなりの

パワーから、二音和音の不協和度が定義される [3]。さらに、構成音の周波数だけでなく、それらの倍音を考慮すると、不協和度や、三音和音のモダリティといった物理的な指標は、協和音と不協和音、長調と短調を、楽典と同様に分類できる事が示されている [3]。

和音の質感に対する脳の情報処理機構を調べるために、機能的核磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging; fMRI) を用いて、和音の協和度や調性に関わる情報を処理する脳の領野が調べられてきた。例えば、協和音は下前頭回、下頭頂小葉を活性化させる [4]。また、長調の音楽は、線条体、前帯状皮質、海馬傍回を、短調の音楽は、扁桃核、前頭前皮質、海馬傍回などの、辺縁系の領野や、高次聴皮質を活性化させる [5, 6]。

さらに、和音の質感を表現する神経活動の特徴量が、ヒトや、動物モデルを用いて調べられてきた。例えば、音提示後数百 ms で生じる聴性誘発電位 (auditory evoked potential; AEP) や活動電位は、協和音と不協和音 [7]、長調と短調 [8] で異なる。しかし、AEP や活動電位といった神経活動は、数秒あるいは数十秒持続する音に対して順応してしまう。一方で、心理物理実験や fMRI 計測で用いる和音刺激や音楽の持続時間は、数秒あるいは数十秒と、比較的長い。こうしたことから、AEP や活動電位が順応した後の、定常的な神経活動も、和音の質感を表現していると考えられる。しかしながら、和音の協和度や調性を表現す

^{†1} 東京大学先端科学技術研究センター
Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo
^{†2} JST さきがけ
Precursory Research for Embryonic Science and Technology, Japan Science and Technology Agency

る、定常的な神経活動の特徴量は、十分に解明されていない。

著者らはこれまでに、音に対する定常的な神経活動が、音の周波数情報や、音と連合した情動の情報を表現していることを、機械学習によって示した [9]。特に、聴皮質の局所電場電位 (local field potential; LFP) における位相同期度 (phase locking value; PLV [10]) が、音の情動情報をよく表現していたことから、音の質感に関する情報も、PLV に表現されている可能性が高いと考えた。

本研究の目的は、聴皮質の定常的な神経活動の位相同期度が、二音和音の協和性や三音和音の調性を表現しているかどうかを調べることである。具体的には、ラット聴皮質を対象とし、二音和音と三音和音、それらの構成音に対する定常的な LFP を、聴皮質の第 4 層に刺入した微小電極アレイで計測する。計測した LFP から PLV を求めて、協和音と不協和音、長調と短調で PLV を比較する。

2. 方法

2.1 音刺激の作製

先行研究 [3] を参考に、7 つの二音和音 (4 つの協和音と 3 つの不協和音) と、7 つの三音和音 (2 つの長三和音、短三和音と、3 つの無調性和音) を作製した (表 1, 表 2)。

2.2 神経活動の多点同時計測

本実験はすべて「東京大学動物実験マニュアル」に即して行った。17 匹のウィスター系ラット (8-11 週齢, 240-310 g) を用いて、聴皮質の第 4 層から、純音と和音に対する定常的な LFP を多点同時計測した。ラットをイソフルレンで吸入麻酔 (3% で導入, 1% で維持) し、頭部固定装置に固定した。直径 0.5 mm の汎用 IC ソケットを、頭頂部の硬膜に接するように接着剤で固定して、基準電極とした。また、注射針を右腋皮膚に刺入してアース電極とした。右側肋骨と硬膜の一部を除去して聴皮質を露出した後、剣山型の微

小電極アレイ (Blackrock Microsystems, ICS-96) を、聴皮質に 600 μm 程度の深さで刺入した。同アレイは、400 μm 間隔で 96 点の計測点を持つ。ラットの右耳の鼓膜を破ることで、音入力を左耳のみに限定し、ラットの左耳から 10 cm 離れたスピーカより音刺激を提示した。

10 匹のラットには、表 1 に示した 7 つの二音和音と、それぞれの和音の構成音を、60 dB SPL で 30 秒間ずつ提示した。それぞれの純音または和音の前には、音を提示していない時間 (silence) を 30 秒設け、それぞれの音を、7 回ずつラットに提示して LFP を計測した。残り 7 匹のラットには、表 2 に示した 7 つの三音和音と、それぞれの和音の構成音を、同様に提示して LFP を計測した。

2.3 位相同期度の算出

計測された LFP から、5 つの周波数帯域における位相同期度 (PLV [10]) を算出した。なお、音刺激開始後 600 ms までの LFP と、紡錘波 (spindle) を含む LFP は、以後の解析から除外した。まず、LFP に各周波数帯域のバンドパスフィルタをかけて、5 つの帯域に分離した (θ , 4-8 Hz; α , 8-14 Hz; β , 14-30 Hz; low- γ , 30-40 Hz; high- γ , 60-80 Hz)。次に、フィルタ後の LFP にヒルベルト変換をかけ、各時刻における瞬時位相を求めてから PLV を算出した。2 計測点 j, k 間の PLV は、下記の式 (1) で求めた。

$$P L_{(j,k)} = \frac{1}{T} \times \left| \sum_{t=T} e^{i(\theta_j(t) - \theta_k(t))} \right| \dots (1)$$

ここで、 j, k は電極番号、 $\theta_j(t)$ は電極 j の時刻 t における瞬時位相、 T は解析対象の時間帯、 i は虚数単位を示す。全ての音刺激提示中と、無音状態での PLV を算出したのち、音刺激提示中の PLV から、直前の無音状態の PLV を引いた値を ΔPLV とした。また、音刺激提示中の、聴皮質内の PLV の中央値から、直前の無音状態での PLV の中央値を引いた値を、 $d\text{PLV}$ とした。

表 1 実験で用いた二音和音

Table 1 Two-tone chord stimuli.

Frequency of the higher tone, kHz	13.5	14.4	15	16	18	19.2	20
Frequency ratio with the lower tone (12 kHz)	8:9	5:6	4:5	3:4	2:3	5:8	3:5
Interval name	Major 2 nd	Minor 3 rd	Major 3 rd	Perfect 4 th	Perfect 5 th	Minor 6 th	Major 6 th
Consonant category	Dissonance	Dissonance	Consonance	Consonance	Consonance	Dissonance	Consonance

Four consonant chords and three dissonant chords were used in the experiment. The lower tone frequency was 12 kHz, and the higher tone frequency of each was indicated in the first line of this table.

表 2 実験で用いた三音和音

Table 2 Three-tone chord stimuli.

Frequency of the highest tone, kHz	9	9	9	9	10	10	10
Frequency of the middle tone, kHz	6.75	7.2	7.5	8	7.2	7.5	8
Tonal category	No tonality	Minor	Major	No tonality	No tonality	Minor	Major

Two major chords, two minor chords and three chords which don't have clear tonality were used in the experiment. The lower tone frequency was 6 kHz, and the higher and the middle tone frequency of each was indicated in the first line of this table.

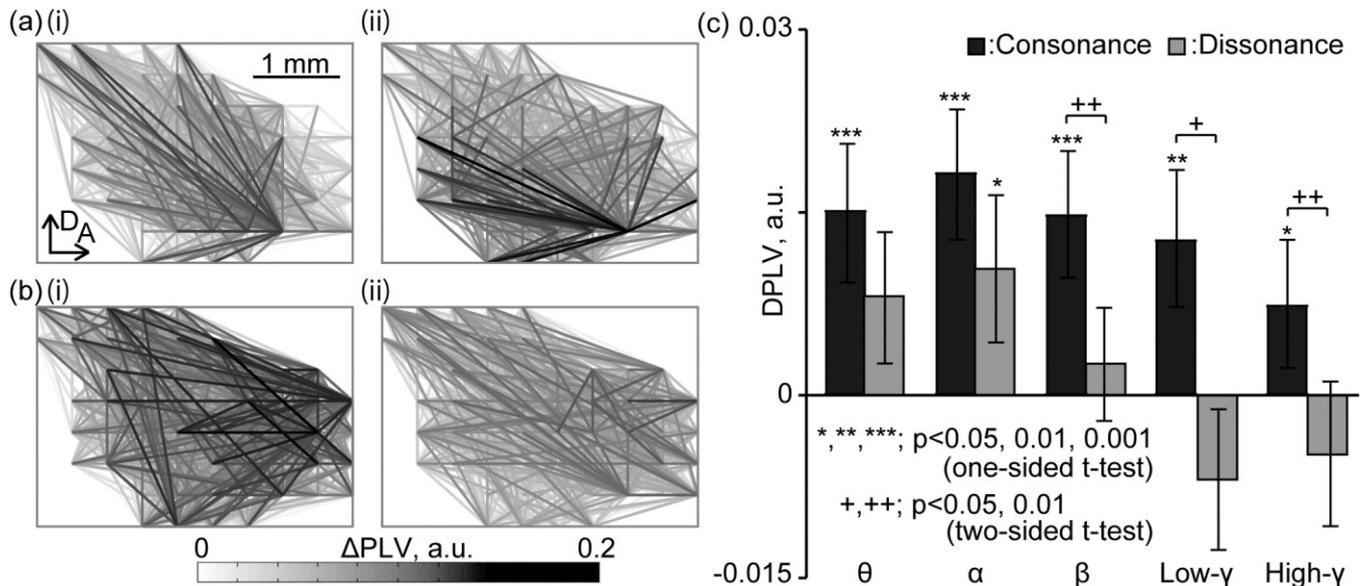


図 1 二音和音の位相同期度

(a) 和音の構成音に対する Δ PLV の空間的な分布の例。刺激音はそれぞれ、(i) 13.5 kHz と(ii) 15 kHz である。(b) 二音和音に対する Δ PLV の空間的な分布の例。刺激音はそれぞれ、(i) 12 kHz と 15 kHz (完全 5 度)、(ii) 12 kHz と 13.5 kHz (短 2 度) である。(c) 協和音と不協和音の平均 DPLV。エラーバーは標準誤差を示す。

Figure 1 Phase locking value for the two-tone chords.

(a) Representative spatial distributions of Δ PLV responding to the one pure tone. Tone frequency was (i) 13.5 kHz and (ii) 15 kHz. Abbreviations: A, anterior; D, dorsal. (b) Representative spatial distributions of Δ PLV responding to two-tone chords. Tone frequencies were (i) 12 kHz and 15 kHz (perfect 5th), and (ii) 12 kHz and 13.5 kHz (minor 2nd). (c) Mean DPLV of the consonant and dissonant chords. Error bars indicate standard errors of each condition.

3. 結果と考察

3.1 協和音、不協和音の PLV

図 1 (a), (b) に、純音と二音和音に対する Δ PLV の、聴皮質内の空間分布を示す。純音に対する Δ PLV は、純音の高さに応じて、異なる空間分布を示している (図 1 (a))。また、協和音の Δ PLV (図 1 (b)(i)) は、不協和音の Δ PLV (図 1 (b)(ii)) に比べて大きい。このことを詳しく調べるため、二音和音に対する dPLV から、和音の高構成音に対する dPLV を引いた値 (DPLV) を、協和音と不協和音でそれぞれ平均した。その結果、協和音の DPLV は、全ての帯域で、ゼロよりも有意に大きかった (図 1 (c)、片側 1 群 t 検定、 $p < 0.05$)。一方で、不協和音では、 α 帯域でのみ、DPLV がゼロよりも有意に大きかった。さらに、 β , low- γ , high- γ 帯域では、協和音の DPLV が、不協和音よりも有意に大きかった (図 1 (c)、両側 2 群 t 検定、 $p < 0.05$)。

蝸牛神経の活動電位の発火周期は、音刺激の周波数と一致することが知られている [11]。聴皮質の 4 層で計測される LFP は、蝸牛神経から下丘、視床を経て入力される興奮性、抑制性シナプス電位を反映している。こうしたことから、聴皮質の LFP の各周波数成分も、音の周波数に同期している可能性がある。また、聴皮質は、特定の神経細胞が特定の周波数の音情報を処理する周波数局在構造を持つ

[12]。そのため、和音提示中に、それぞれの構成音を処理する神経細胞が、構成音に同期して活動しているとすれば、協和音提示中には、それぞれの構成音の情報を処理する神経細胞の LFP が、不協和音に比べて同期しやすくなる。こうしたことから、協和音の DPLV は、不協和音よりも大きかったと考えられる。

3.2 長三和音、短三和音の PLV

図 2 (a) に、三音和音に対する Δ PLV の、聴皮質内の空間分布を示す。長三和音の Δ PLV (図 2 (a)(i), (ii)) は、短三和音 (図 2 (a)(iii))、無調性和音 (図 2 (a)(iv)) の Δ PLV に比べて大きい。このことを詳しく調べるため、三音和音に対する dPLV から、和音の中構成音に対する dPLV の平均値を引いた値 (DPLV) を、長三和音、無調性和音、短三和音でそれぞれ平均した。その結果、 α , low- γ , high- γ 帯域で、長三和音の DPLV が短三和音よりも有意に大きかった (図 2 (b)、片側 2 群 t 検定、 $p < 0.05$)。

長三和音、短三和音はそれぞれ、長調、短調といった調性と深く関わる和音であり、これらの調性は、特定の情動を誘発する。先行研究において、神経活動の θ , α , high- γ 帯域における同期が、情動を表現している可能性が示唆されている [9,13]。こうしたことから、本研究においても、長三和音と短三和音が誘発する情動の違いが、 Δ PLV や DPLV の違いに現れた可能性がある。

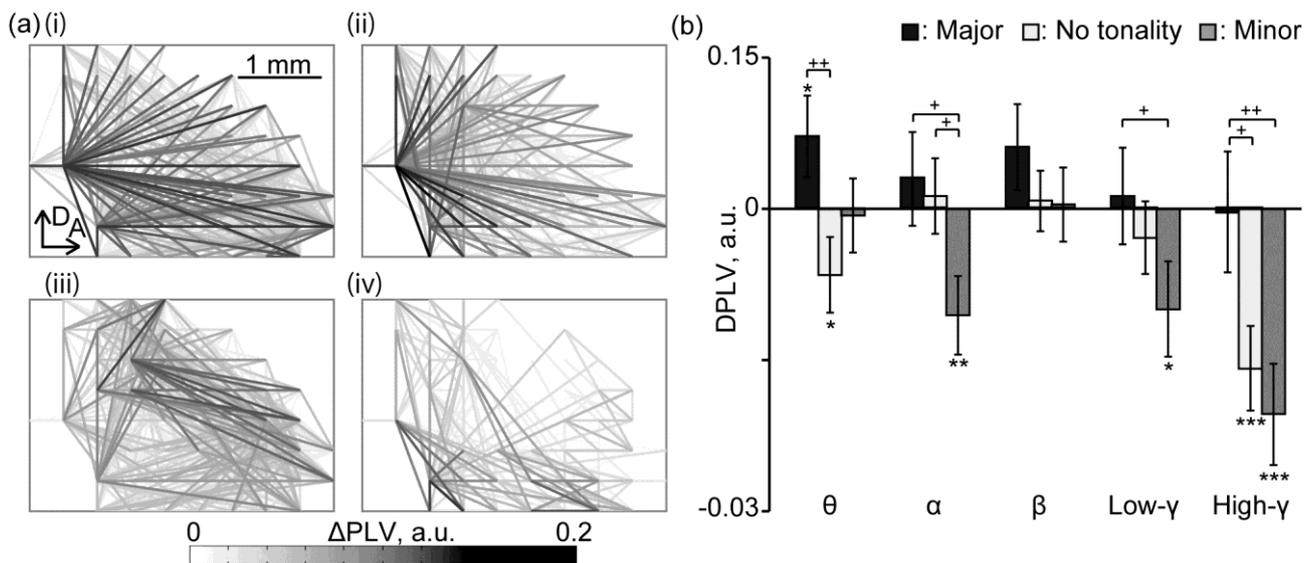


図 2 三音和音の位相同期度

(a) 三音和音に対する ΔPLV の空間的な分布の例。刺激音はそれぞれ、(i) 6 kHz と 7.5 kHz と 9 kHz (長三和音)、(ii) 6 kHz と 8 kHz と 10 kHz (長三和音)、(iii) 6 kHz と 7.2 kHz と 9 kHz (短三和音)、(iv) 6 kHz と 6.75 kHz と 9 kHz (無調性和音) である。(b) 長三和音、短三和音と無調性和音の平均 DPLV。エラーバーは標準誤差を示す。

Figure 2 Phase locking value for the three-tone chords.

(a) Representative spatial distributions of ΔPLV responding to three-tone chords. Tone frequencies and the tonality category were (i) 6 kHz + 7.5 kHz + 9 kHz, major chord, (ii) 6 kHz + 8 kHz + 10 kHz, major chord, (iii) 6 kHz + 7.2 kHz + 9 kHz, minor chord, and (iv) 6 kHz + 6.75 kHz + 9 kHz, no-tonality chord. Abbreviations: A, anterior; D, dorsal. (b) Mean DPLV of the major, no-tonality and minor chords. Error bars indicate standard errors of each condition.

4. 結論

本研究では、ラット聴皮質を対象にして、純音と和音に対する局所電場電位 (local field potential; LFP) を多点同時計測した。計測した LFP から、5つの帯域 (θ , 4–8 Hz; α , 8–14 Hz; β , 14–30 Hz; low- γ , 30–40 Hz; high- γ , 60–80 Hz) における位相同期度 (phase locking value; PLV) を算出し、PLV が、二音和音の協和性、または三音和音の調性を表現しているかを調べた。その結果、

- ・協和音は、全ての帯域で、DPLV がゼロよりも大きかったが、不協和音では、 α 帯域でのみ、DPLV がゼロよりも大きかった。さらに、 β , low- γ , high- γ 帯域では、協和音の DPLV が、不協和音よりも大きかった。

- ・長三和音の DPLV は、 α , low- γ , high- γ 帯域で短三和音よりも大きかった。

以上の結果より、聴皮質の定常的な神経活動の位相同期には、協和性や調性といった、和音の質感が表現されている可能性があると考えられる。

本研究は、総務省 SCOPE (121803022) と科研費 (25135710) の助成を受けた。

参考文献

- 1) Guthrie, E.R. and Morrill, H.: The Fusion of Non-Musical Intervals, *Am. J. Psychol.*, Vol.40, No.4, pp.624-625 (1928).
- 2) Hunter, P.G. et al.: Feelings and Perceptions of Happiness and Sadness Induced by Music: Similarities, Differences, and Mixed Emotions, *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, Vol. 4, No.1, pp.47-56 (2010).

- 3) Cook, N.D. and Fujisawa, T.X.: The Psychophysics of Harmony Perception: Harmony is a Three-Tone Phenomenon, *Empirical Musicology Review*, Vol.1, No.2, pp.106-126 (2006).
- 4) Minati L., et al.: Functional MRI/Event-related potential study of sensory consonance and dissonance in musicians and nonmusicians, *NeuroReport*, Vol. 20, No.1, pp.87-92 (2009).
- 5) Green, A.C. et al.: Music in minor activates limbic structures: a relationship with dissonance?, *NeuroReport*, Vol. 19, No.7, pp.711-715 (2008).
- 6) Mitterschiffthaler, M.T. et al.: A functional MRI study of happy and sad affective states induced by classical music, *Human Brain Mapping*, Vol.28, No.11, pp.1150-1162 (2007).
- 7) Itou, K. et al.: Central auditory processing of noncontextual consonance in music: An evoked potential study, *J Acoust soc Am*, Vol.128, No.6, pp. 3781-3787 (2010).
- 8) Virtala, P. et al.: The preattentive processing of major vs. minor chords in the human brain: An event-related potential study, *Neuroscience Letters*, Vol. 483, No.3, pp.406-410 (2011).
- 9) Shiramatsu, T.I. et al.: Decoding of Auditory Information from Steady-state Neural Activity in rat Auditory Cortex, *Electronics and Communications in Japan*, Vol.97, No.2, pp.17-27, (2014).
- 10) Doesburg, S.M. et al.: Asynchrony from synchrony: long-range gamma-band neural synchrony accompanies perception of audiovisual speech asynchrony, *Exp Brain Res*, Vol. 185, No.1, pp. 11-20 (2008).
- 11) Rose, J.E. et al.: Phase-locked response to low-frequency tones in single auditory nerve fibers of the squirrel monkey, *J Neurophysiol*, Vol.30, No.4, pp.769-793 (1967).
- 12) Lee, C.C. et al.: Tonotopic and heterotopic projection systems in physiologically defined auditory cortex, *Neuroscience*, Vol. 128, No.4, pp.871-887 (2004).
- 13) 磯口知世, 野田貴大, 神崎亮平, 高橋宏知: 音の情動価がラット聴皮質の位相同期に与える影響, *日本音響学会聴覚研資料*, Vol.40, No. 9, pp.735-739 (2011).]