

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 18 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330316

研究課題名(和文) MEGの定常応答を用いた和声や多声部音楽の知覚の神経生理学的基盤の研究

研究課題名(英文) Investigations of neurophysiological correlates of the perception of harmony and polyphonic melodies using ASSRs in MEG.

研究代表者

根本 幾 (Nemoto, Iku)

東京電機大学・情報環境学部・教授

研究者番号：40105672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では音楽知覚研究としては新しい手法である脳磁図のASSRを用いた。これにより同時に提示される異なる音に対する反応を分離して取り出すことができる。和声については、長・短三和音、減三和音、増三和音の順にASSRが有意に増大するという結果を得た。これは不協和度と対応していた。また和音構成各音に対する反応を調べ、それが和音の種類によりどのように変化するか調べた。これは和音認識に対する知見を得るのに将来役立つ方法である。多声部音楽として、3声部からなる多義的な旋律を提案し、同じ音構成でも旋律の認識の仕方によりASSRが変化することを見出した。これにより多声部旋律研究の一つの方法が提案できる。

研究成果の概要(英文)：ASSRs in MEG were used to investigate the neurophysiological correlates of harmony recognition and melody recognition especially in polyphonic music. Different tones can be modulated by different frequencies and thus the responses to tones presented simultaneously can be separately measured, which makes ASSR a suitable technique for harmony and polyphonic music recognition. The degree of dissonance of chords was found to be reflected by ASSR amplitudes which also depended on the constituent tones of each type of chords. This result may be further extended to formulate some sort of correlation diagram of chords in terms of neural responses. As regards polyphonic music recognition, we devised ambiguous music consisting of three voices. We found different ASSRs to the same ambiguous music depending on the interpretation of the music by the listener. This result suggested a neurophysiological method of melody recognition using ASSRs.

研究分野：音楽脳機能工学

キーワード：脳磁図 聴性定常応答 和声 多声部音楽 多義的旋律

### 1 研究開始当初の背景

(1) ASSR(聴性定常応答)については過去 20 年くらい研究が進められており、異なる周波数の純音を異なる変調周波数で変調するなどの技術もよく知られたものとなっていた。しかしそれを音楽認知の研究に利用することは行われていなかった。

(2) 旋律認識の神経生理学的過程の研究はほとんどされていない。調性や和声進行に結びつけられた旋律認識の研究は多いが、旋律そのものというより、より上位構造の文脈に対する認識の研究であることが多い。より基礎的な旋律認識の研究が望まれた。

(3) 和声の認識の神経生理学的研究でも、進行と結びつけられた文脈的、音楽理論的なものが多い。ただし協和不協和に関する研究は多い。しかしそれが生理学的にどう反映されるのかは確定していなかった。

### 2. 研究の目的

上の(2)(3)で述べた背景に対して、(1)で述べた方法を適用し、それらの神経生理学的な基礎について知見を得るのが目的である。具体的に以下に述べる。

(1) 旋律はピッチと継続時間の異なる音の系列を聴いて、人間が音楽認識過程において組み立て直してできるものであり、物理的な刺激そのものではない。複数の音が順次提示されたことを認識した後、それらが1つのまとまりを構成することを認識して初めて旋律を認識したことになる。この後者の過程の神経生理学的反映を観測することにより、この過程に対する知見を得るのが目的である。さらに多声音楽における複数の旋律の認識過程の研究方法の開発も目的とする。

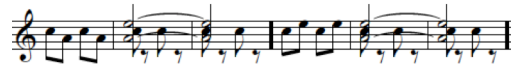
(2) 和声については、4 種類の三和音つまり長・短三和音、減三和音、増三和音について、脳磁図に異なる反応を得ることがまず一つの目標である。さらにそれがそれらに関係する情動とどう結びつか明らかなにしたい。

### 3. 研究の方法

(1) 旋律に関する研究には我々の提案した多義的旋律を用いる。これは図 1 のような錯聴を利用したものである。実際に提示する音は(a)であるが、多くの場合(b)のように連続したフレーズとして錯聴する。つまり旋律を聴者自身が構築するのである。この錯聴現象を利用し、図(2)のような多義的旋律を構成した。多義性は A4 と E5 の持続音を提示することにより、C5-A4 の繰り返しまたは C5-E5 の繰り返しとして聴く 2 つの可能性から生じる。また物理的な音そのもの、すなわち C5 の断続音として聴く可能性もある。先行刺激は一時的にその多義性を除去し、先行刺激と同じフレーズを聴くよう誘導するためのものである。行動学的実験と MEG の ASSR 実験



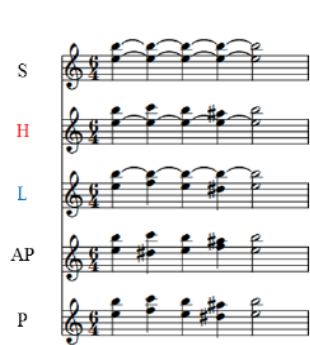
(a) (b)  
図 1. (a)の錯聴によるメロディ形成(b)



(a) (b)  
図 2. 多義的旋律に先行刺激を組み合わせたもの。



図 3. 記憶したメロディ(上段)を想起する形で錯聴 0 をおこさせるような多義的旋律(下段)。



を  
図 4. 多声部認識研究用刺激。高声部を 40 Hz, 低声部を 38 Hz で振幅変調した。

を行った。図 3 は最近用いた始めた旋律である。これは先行刺激として、誘導されるフレーズを直接用いるのではなく、あらかじめ上段のようなメロディを記憶したうえで、下段のテスト刺激を聴くものである。

行動学的実験 I では、被験者に、先行刺激の次に多義的旋律を提示し、聴いている音が先行刺激と異なって聞こえたときにボタン押しをするものである。これにより遷移時間の分布を計測する。ボタンが押された時点で 1 回の計測は終了し、これを 100 回程度繰り返す。

行動学的実験 II もほぼ同様であるが、多義的部分を 1 分間続けて提示し、その間に聴かれる旋律が変化するたびに、所定のボタンを押すものである。これを 50 回繰り返す。

これらの実験結果を定性的に説明できるようなモデルを構築する。

MEG の ASSR 測定方法は以下の通りである。ASSR は、刺激音を一定の低周波数(たとえば  $f_m = 40$  Hz)の正弦波で変調して、MEG の誘発反応中の  $f_m$  [Hz]成分を抽出するものである。これを利用すると、複数の音を異なる変調周波数で変調することにより、個々の音に対する反応を分離して測定できる。ここでは、多

義的旋律を構成する持続音 A4 を 37.5 Hz, E5 音を 42.5 Hz で振幅変調した. 先行刺激によって誘導された旋律によって, これらの持続音に対する反応が変化するのはないかと予想した. 長らく使用した本学の MEG 装置が研究の途中で故障する事態に見舞われ, 頓挫しかかったが, 岡崎の生理学研究所の柿木研究室の装置を使用させていただき, どうか研究を続けることができた.

生データは実験項目別に加算平均された. その結果を FFT 処理して ASSR 成分を抽出したり, あるいはピークフィルタ処理して Hilbert 変換して, ASSR 成分の振幅の包絡線を求めたりその平均値を求めた.

図 4 の刺激を用いた多声部旋律知覚に関する実験方法も同様である. 4 種類の刺激はランダムな順に提示した.

(2) 調べた和音を図 5 に示す, 長三和音, 短三和音, 減三和音, 増三和音の 4 種類の三和音である. 構成各音に対する反応を調べるには各音を最下音から, 18, 20, 22 Hz で振幅変調した. MEG 測定法は前項とほぼ同様である. 根音は C4 から B4 まで変えた 12 種類を用意し, すべてをランダムな順で提示した.

#### 4. 研究成果

##### (1) 旋律に関する研究

図 6 は一人の被験者の図 2 の音形(持続音は変調)に対する誘発応答に 37.5 Hz(青)と 42.5 Hz(赤)のピークフィルタをかけたものである. 右半球上の 62 個のコイルの応答を示す. 反応の大きいチャネルは, 右聴覚野付近にある. 重ね書きのため 37.5 Hz 成分(E5 に対する反応)はよく見えないが, 全体的に 42.5 Hz 成分(A4 に対する反応)が優勢であることがわかる. これは 2 音を 40 Hz 付近の周波数で変調して提示すると, 高い音に対する ASSR が低い音に対するそれを抑制する, という従来の報告と一致する. しかし, 個人差もかなりあることがわかった. 図 7 はパワスペクトルの 62 チャネルにわたる平均を 14 人の被験者に渡って平均したものである. 42.5 Hz に対する応答が 37.5 Hz に対する応答より大きい, その比は Up(約 1.12)よりも Down(約 1.31)の先行刺激に対して大きい. これは次のように解釈できる. この比が大きいほど高い持続音低い持続音に対する応答を抑制していると考えられる. Down に対しては, C5-A4 の繰り返しを聞く傾向にあるから, 持続音のうち A4 が旋律構成に使われる. このとき A4 は変調されているにもかかわらず, 旋律の一部としてはなめらかに聞こえる. そのため, 変調に対する応答がより抑制されたと考える. 同様に Up のときは逆の傾向にあると考えられる. ただし今のところ「傾向」であり, 統計的有意性は得られていない.

図 8 は SPM12(Welcome Trust Centre for Neuroimaging) による信号源推定の 1 結果を

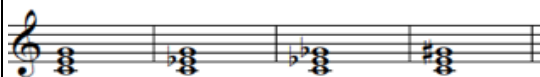


図 5. 三和音. 左から長三和音, 短三和音, 減三和音, 増三和音でこの図ではすべて根音を C4 とするものである. 実験では根音を C4 から B4 まで変えたそれぞれ 12 個の和音を用いた.

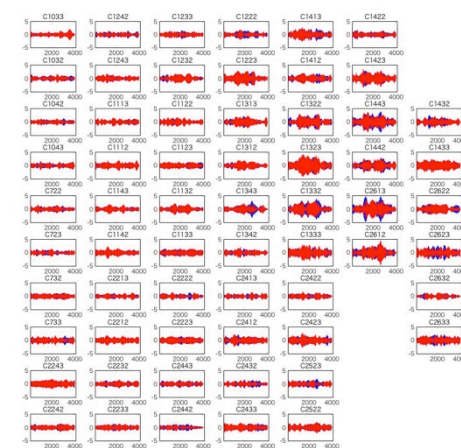


図 6. 図 2(a)の音形に対する誘発反応の 37.1 Hz(青)と 42.5 Hz(赤)成分. 右半球上のセンサの応答.

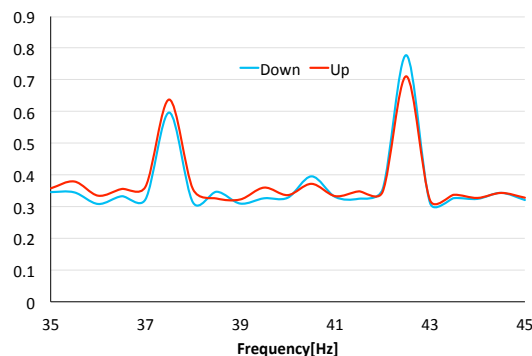


図 7. 図 2 の音形(a が down, b が up)に対する誘発反応のパワスペクトル. 11 人の右半球の平均.

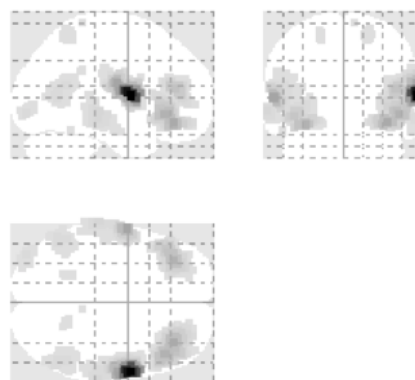


図 8. 多義的部分聴取時の ASSR の 42.5 Hz 成分の信号源推定. 皮質全体に対してベイズ推定による逆投射を行ったもの(SPM12 による).

示す．一人の被験者の多義的部分聴取時の ASSR の 42.5 Hz 成分の信号源推定で，Bayesian 推定により皮質全体に対して逆投射したものである．広い範囲の賦活を示すが，聴覚野付近に特に強い応答が見られる．この操作を 11 人の被験者の結果に対して行い，最大の活動を示した点の活動を，実験条件について比較したのが図 9 である．強度比は  $Dn42.5/Dn37.5 \sim 1.24$ ， $Up42.5/Up37.5 \sim 1.06$  であった．傾向としては図 7 と同様，錯聴に参与した持続音に対する応答が抑制されている．

図 10 は図 3 の刺激に対する一人の反応である．2 箇所が多義的部分聴取時の EEG の誘発反応における ASSR の信号の振幅比である．やはり図 7, 9 と類似の傾向を示した．

図 11 は 10 人の行動学的実験 I の結果の平均であり，最初の遷移が起こるまでの時間のヒストグラムである．横軸は先行刺激終了後の時間である．この実験結果のみ，断続音は C#5 である．この結果からは，先行刺激が Down のときには状態遷移，特に up への遷移が起こりやすいこと，先行刺激が up のときには Neutral すなわち断続音が断続音としてのみ聞こえる状態に遷移しやすいことがわかる．図 12 は行動学的実験 II の結果で，断続音は C5 である．1 ランの刺激持続時間は 60 s で，その間に状態が遷移したときボタン押しをする実験の結果である．被験者 11 名の 50 ランの全平均で，横軸は各ランの開始時から時間であり，縦軸はその時刻での各状態の割合を示す．左が先行刺激が up，右が down の場合である．この図から up から down へ変わりやすいことがわかる．これは断続音が C# のとき(図 11)と逆の傾向で，音程関係に依存することがわかる．しかし最終的な(60 s)状態分布は先行刺激に依存しない．つまり先行刺激は 60 s で忘れることを意味する．

次にこの行動学的結果をモデル化した．Up, Down に対応する内部状態をそれぞれ  $x_u, x_d$  としそれぞれに対する入力を  $I_u, I_d$ ，独立な雑音を  $n_1, n_2$  とする．モデルは

$$\begin{aligned} x_u(t+1) &= c_u x_u(t) + I_u(t+1) - \alpha_d x_d(t) + n_u(t+1) \\ x_d(t+1) &= c_d x_d(t) + I_d(t+1) - \alpha_u x_u(t) + n_d(t+1) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで  $t$  は離散化した時刻で  $c_d, c_u, \alpha_d, \alpha_u$  は非負の定数である．内部状態から実際の聴取状態への変換は

$$y(t+1) = \begin{cases} -1, & x_u(t+1) - x_d(t+1) < -\lambda^{t+1} w_l \\ 1, & x_u(t+1) - x_d(t+1) > \lambda^{t+q} w_h \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

で表される．ここで  $\lambda, w_l, w_h$  は非負の定数である． $y(t) = 1$  は up 聴取状態， $y(t) = -1$  は down 状態，0 は neutral 状態を表す．図 13 は計算結果の 1 例である．パラメータ値は

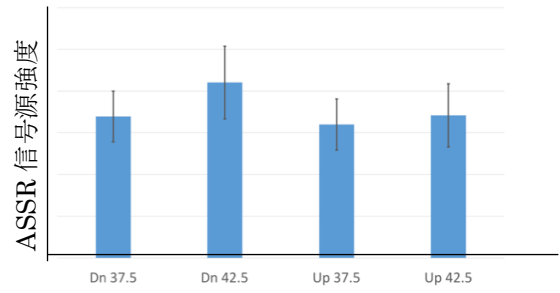


図 9. 多義的部分聴取時の ASSR の信号源強度．強度比は  $Dn42.5/Dn37.5 \sim 1.24$ ， $Up42.5/Up37.5 \sim 1.06$  であった．

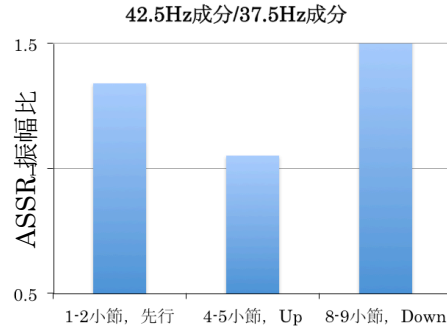


図 10. 多義的旋律に対し記憶から錯聴を起こす場合(図 3)の 2 箇所が多義的部分聴取時の EEG の誘発反応における ASSR の振幅比．1 人の被験者のデータ．図 6, 8 の傾向と同じ傾向を示した．

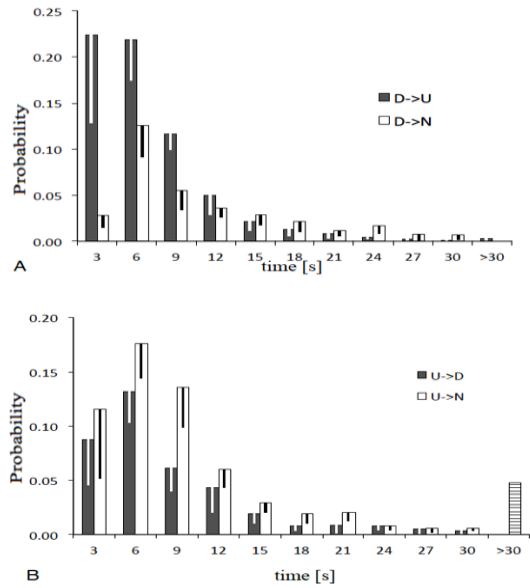


図 11. 行動学的実験の結果．10 人の平均．横軸は時間[s]で先行刺激の後，多義的部分を聴き始めてから，最初に状態が繊維するまでの時間のヒストグラム．上は先行刺激が Down，下が Up, N は断続音そのまま聞こえる状態．断続音はこの例のみ C#5．

$$c_u = c_d = 0.4, \alpha_d = 0.4, \alpha_u = 0.41, \lambda = 0.07, w_l = w_h = 0.25$$

である．図 12 に定性的に類似している．

図 14 は図 4 の 2 声部刺激による ASSR で低声部に対するものである(変調周波数は 38



Hz). AP(逆平行的進行)の場合に ASSR は一番抑制されることがわかった(S 以外すべての刺激に対して抑制は有意であったが). 高声部に対する旋律の影響はなかった. この応答に対するモデル化検討も行った.

[旋律認識研究のまとめ]

1. 錯聴を利用した多義的旋律の構成法を提案した.
2. 先行刺激による多義性の除去および聴取状態の遷移を行動学的実験で観測した. そのモデル検討を行った.
3. MEG の ASSR を利用して多義的旋律聴取時の反応を計測し, ASSR が聴取状態を反映する(傾向にある)ことを見出した.
4. 多声部音楽に対して ASSR を応用することにより, 各声部に対する反応を調べることができた. メロディの動きに対して ASSR が抑制されたが, その方法には規則性があり, そのモデル検討も行った.

(2)和声に対する応用.

三和音に対する ASSR の測定結果を図 15 に示す. ASSR 振幅は和音の不協和度とともに増大した. この理由は現在不明であるが, 情動と関連するか, 単に物理的なものなのか検討しなければならない.

(3) 和音の 2 次元表現法.

和声に対する MEG 計測は, MEG 装置の故障もあってこれ以上進められなかったが, 和音の表現法について新しい知見を得た. 一般に和音は構成音の周波数比によって特徴付けられる. たとえば純正調において長三和音は 4:5:6 である. ここで周期比も考えることにする. 長三和音の周期比は  $1/6:1/5:1/4=10:12:15$  である. とところで短三和音周期比は  $6:5:4$  であるので, その周波数比は  $10:12:15$  となる. この対称性は昔から知られているが, 周期比はあまり重要視されていなかったもので, 和音間の対称性の関係は特に調べられていなかったようである.

対称性を簡単に表現するため, 比を一つの数で表すこととする. 周波数比が簡単なほど協和度が高いということはよく知られているので, 比の単純度を既約の比を構成する整数のうちの最大値の逆数と定義する. たとえば長三和音の場合  $1/6$  となる. これによりすべての三和音のすべての転回形に対して周波数比の単純度  $S_f$  と周期比の単純度  $S_p$  が与えられる. さらに, 和音の構成音は, 図 16 に示す倍音系列(Harmonic), 分数倍音(Sub-Harmonic)系列から選ぶが必要に応じて純正調(Just intonation)からも選ぶ. 図 17 はこのようにして各和音とその転回形を  $S_p$ - $S_f$  平面内にプロットしたものである. 最も特徴的なのは異なる 2 和音で対称の位置にあるのは長短三和音の組み合わせのみであること

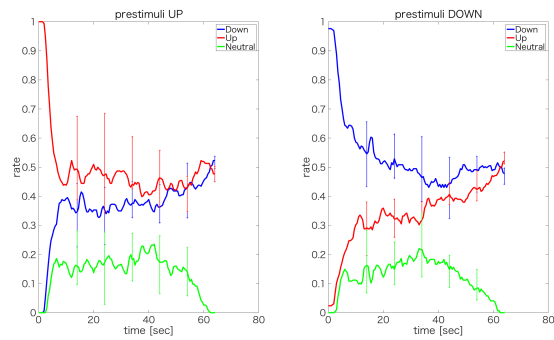


図 12. 多義的旋律に対する行動学的実験結果. 60 s の刺激に対して各時点での聴取状態の分布を示す. 11 人の被験者各人につき 50 ランの平均.

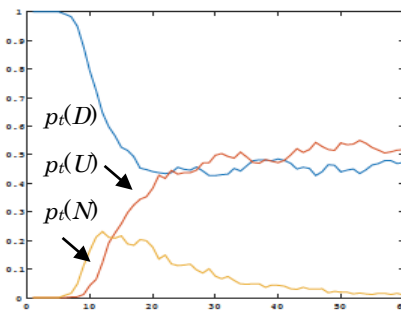


図 13. 行動学的実験結果のモデル化(式(2)).  $p_t(U)$ :  $t$  秒における up 旋律聴取の割合.  $D, N$  はそれぞれ down 旋律, neutral 旋律.

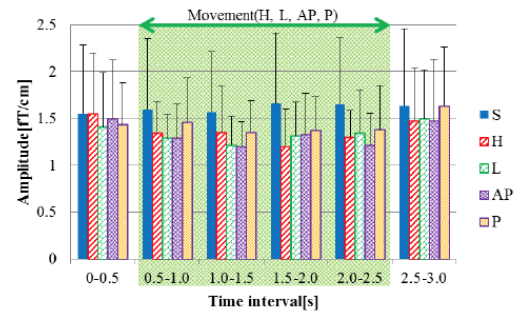


図 14. 図 4 の刺激の低声部に対する ASSR の変化. 横軸が時間で図 4 の 1 小節が 0.5 s である. AP(逆平行)の動きに対して一番強く抑制を受けるのがわかる.

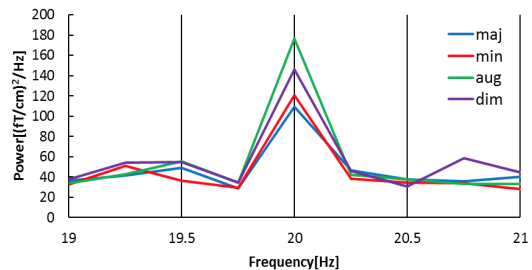


図 15. 長三和音(maj), 短三和音(min), 減三和音(dim), 増三和音(aug)に対する ASSR のパワースペクトル. 13 人の被験者の平均. 不協和度の順にパワーも増大している.

である。他は、同じ和音の異なる系列(H と SH)によるものである。さらに、縦軸、横軸は周波数比、周期比の単純度だから、長短三和音はどちらかの単純度が大きく、しかも互いに離れた位置にある。これは長短三和音がどちらも協和度が高く感じられること、それにもかかわらず明暗のコントラストの強い2和音であることと関係があるのではないかと考えている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- 1) Kuriki, S., Numao, R., Nemoto, I. Neural correlates of auditory scale illusion, *Hearing Research*, 査読有, 339, 23-31, 2016.
- 2) Yang, Z., Nemoto, I., et al. (8名中7番目) Perceptual temporal asymmetry associated with distinct ON and OFF response to time-varying sounds with rising versus falling intensity: a magnetoencephalography study, *MDPI*, 査読有, 6, 12-25, 2016.
- 3) Nemoto, I., Kawakatsu, M., Detection of a mismatch field in evoked magnetoencephalographic responses of individual subjects by multivariate analysis, *Advanced Biomedical Engineering*, 査読有, 4, 126-134, 2015.

[学会発表] (計27件)

- 1) 吉野雄介, 草野睦月, 油原亮介, 根本幾, 川勝真喜 「多義的旋律に対するMEGを用いた聴覚定常応答-続報」, 日本生体磁気学会大会, 2017年5月25日, 国際センター(宮城県, 仙台市)
- 2) 草野睦月, 根本幾, 多義的旋律に対する反応の研究, 日本生体医工学会大会, 2017年5月4日, 東北大学(宮城県, 仙台市)
- 3) Yuhara, R., Nemoto, I., Investigation of the processing of ambiguous melodies in the brain by behavioral and neurophysiological experiments, 5th Joint Meeting of Acoust. Soc. Am. and Acoust. Soc. Jap., Nov 30, 2016, Honolulu (USA).
- 4) Yuhara, R., Nemoto, I., Investigation of perception of ambiguous melodies using ASSR's in MEG, 20th Intern. Conf. Biomag, Oct. 3, 2016, Seoul (South Korea).
- 5) Yuhara, R., Nemoto, I., Ambiguity involving two illusory melodies induced by a simple configuration of tones, 37th Ann. Intern. Conf. IEEE

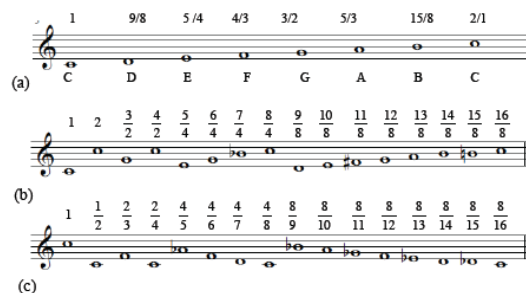


図 16. (a) 純正調長音階. (b)倍音(harmonic)系列. (c)分数倍音(sub-harmonic)系列.

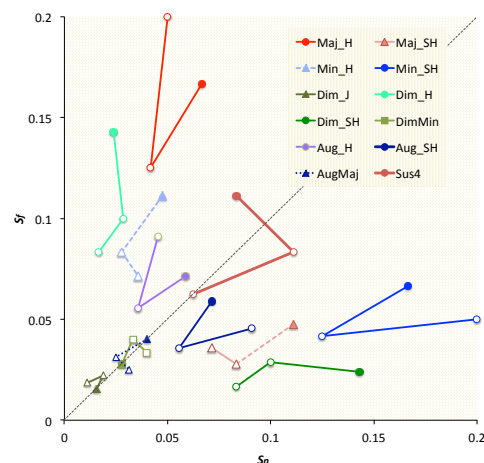


図 17. 三和音の  $S_p$ - $S_f$  平面内のプロット。1種類の和音は直線で結んだものであり、塗りつぶした点はその基本形、他の2点が転回形。H: harmonic, SH: sub-harmonic, J:純正調。本文参照。

EMBS, 2015, Milan (Italy).

- 6) Yuhara, R., Nemoto, I., ASSRs in MEG to two-voice musical fragments, *Biomag2014*, Aug 25, 2014, Halifax (Canada).
- 7) Seki, S., Nemoto, I., ASSRs in MEG to musical chords modulated in amplitude, *Biomag2014*, Aug 25, 2014, Halifax (Canada).

[図書] (計1件),

- 1) 根本幾 (訳) 「ピッチと和声の神経コード」 東京電機大学出版局, 2017, 270頁.

[産業財産権]

出願取得状況とも0件

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者 根本幾 (Iku Nemoto)  
東京電機大学・情報環境学部・教授  
研究者番号 40105672