

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K00389

研究課題名(和文)和音の新しいマッピングとその音響心理学的・生理学的基盤の研究

研究課題名(英文) Novel mapping method of musical chords and investigation of its psychoacoustic and neurophysiological basis.

研究代表者

根本 幾 (Nemoto, Iku)

東京電機大学・システムデザイン工学部・研究員

研究者番号：40105672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：特に西洋音楽において和声は重要な役割を担っていて、現在でもその協和・不協和の生理心理学的根拠は議論の対象である。我々は各和音について、周波数比の単純度 $S_f$ と周期比の単純度 $S_p$ を定義して、それらを2次元平面の2軸として和音をプロットすることを提案した。この平面内において長三和音と短三和音は対角線 $S_f=S_p$ を対称軸として対称の位置にある。同じ関係にある他の和音の対は、長短七和音(属七)と半減七和音の対であった。他の和音は異なる和音と同種の対を作らなかった。少なくとも三和音に関しては、 $S_p+S_f$ は主観的な協和度の尺度と対応し、 $S_p-S_f$ はメランコリー・悲しみの尺度に対応した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

西洋音楽において重要な役割を担う和音については、その協和度などの主観的な尺度が、和音の物理的などの特性に対応するのか、過去から議論があり、極端な論争においては、その物理的性質を無視し文化的背景のみを論じている。また物理的特性としては周波数比のみが論じられる。しかし、ピッチ(主観的音高)は楽音の基本周波数成分のみでなく、波形の周期が重要であることは特に前世紀から盛んに論じられている。そこで和音についても周期比にも注目することによって、新たな知見が得られた。これは和音に対する認識に新たな方法論を加えたものと考えている。

研究成果の概要(英文)：Musical chords play an essential role, especially in Western music, and the corresponding consonance-dissonance contrasts and emotional continua are still the targets of investigation in psychoacoustics and neurophysiology. We define the simplicity of frequency ratios  $S_f$  and simplicity of period ratios  $S_p$  for the constituents of a chord and propose that those measures should be used as the two coordinate axes in the plane for plotting chords. In this plane, the major and minor chords are reflections of each other with respect to the diagonal  $S_f = S_p$ . The other chord pair in the same relationship is the major-minor seventh (dominant seventh) and the half-diminished seventh chords. It was also found that at least for triads, the sum  $S_p + S_f$  and the difference  $S_p - S_f$  correspond to subjective consonance and the melancholic/sad emotional ratings, respectively. The proposed simple presentation may help interpret and model psychoacoustic and neurophysiological results on musical chords.

研究分野：医用生体工学

キーワード：和音 周波数比 周期比 協和度

1. 研究開始当初の背景

和音の認知はピッチ(主観的な音高)認識と密接な関連があるが、後者には周波数認識とともに周期の認識が関連していることはよく知られている。しかし和音を周波数比で語られることはあっても、周期比で語られることはなかった。2音の音程では周波数比は周期比と同じであるが、たとえば長三和音の周波数比は4:5:6で、周期比は $1/4:1/5:1/6=15:12:10$ である。したがってこれらの比の単純度を議論するときには、周波数か周期を用いるかで異なってくる。そこで周波数比だけでなく周期比も、協和度その他の和音の主観的な属性に関わるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

(1)上述の通り、和音の記述法として周波数比だけでなく周期比を用いることには意味があると考えた。そこで両者を考慮した記述法を考案して、それによって最もよく使われる三和音(triads)と七の和音(7<sup>th</sup> chords)を表現して、それらの性質と表現との間の関連を調べる。和音の主観的属性としては、協和度の他に悲喜の感情が典型的なものである。その他にも多くの言葉が用いられているが、それらに関しては定量的な研究に耐えるだけのデータは少ない。また本研究では、物理的属性として周波数比と周期比の2つを用いるので、対する主観的属性の数を多くすることには意味がない。

(2)楽曲における和声進行は、楽曲の気分などを支配する重要な要素である。和声進行を調べる方法として、本研究の方法も一つの有効な手段となると思われるので検討する。

(3)調律法として現在では平均律が一般的であるが、平均律では音程間の整数比は得られないので、本研究では周波数比を元にした音階、周期比を元にした音階、純正調などを用いて、それらから生成される和音を比較する。

3. 研究の方法

以下では通常の音程や和音の記述法を用いる。つまり音程にはたとえばM2(長2度), m3(短3度), P4(完全4度), A4(増4度), d5(減5度)など、三和音にはmaj(長三), min(短三), dim(減三), aug(増三), sus4, 七の和音にはMm7(属七), m7(min 7<sup>th</sup>), M7(major 7<sup>th</sup>), ø7(half diminished 7<sup>th</sup>), ø7(減七)などである。

図1(a)は純正調の八長調の各音のトニック音Cに対する周波数比を示す。図1(b)(c)はそれぞれ高調波系列, 下調波系列による12音の, 最初のCに対する周波数比を示す。周期比はもちろんその逆数となる。 $f_1 < f_2 < \dots < f_n$ が互いに素な自然数で周波数比を表すとき, 周波数比の単純度を $S_f = 1/f_n$ と定義する。同様に $p_1 > \dots > p_n$ が互いに素な自然数で周期比を表すとき, 周期比の単純度は $S_p = 1/p_1$ で定義する。たとえば純正調でのmajでは周波数比は4:5:6で周期比は15:12:10だから,  $S_f = 1/6, S_p = 1/15$ となる。本研究で用いられるすべての和音は平均律から離脱しているので, その離脱の大きさを $\delta = \max\{|R_i - r_i|, i = 1, \dots, n-1\}$ で定義する。ここで $R_i$ は最下音に対する*i*番目の音の周波数比で $r_i$ は平均律において対応する値である。半音は約0.06であるから $\delta > 0.03$ の場合, その和音は受け入れられない目安とした。

(1)三和音

以下では和音名の次の-H, -SH, -Jはそれぞれ, 高調波, 下調波, 純正調の系列を表す。三和音には基本形, 第一, 第二転回があるので, それぞれについて周波数比, 周期比を求め, それらの単純度を求める。たとえば基本形の周波数比が4:5:6ならば, 第一, 第二転回のそれは, 5:6:8および3:4:5となり,  $S_f$ は基本形から順に1/6, 1/8, 1/5となる。図2はこのようにして $S_p - S_f$ プロットを求めたものである。対角線は直線 $S_f = S_p$ である。領域 $S_f > S_p$ を高調波領域, 他を低

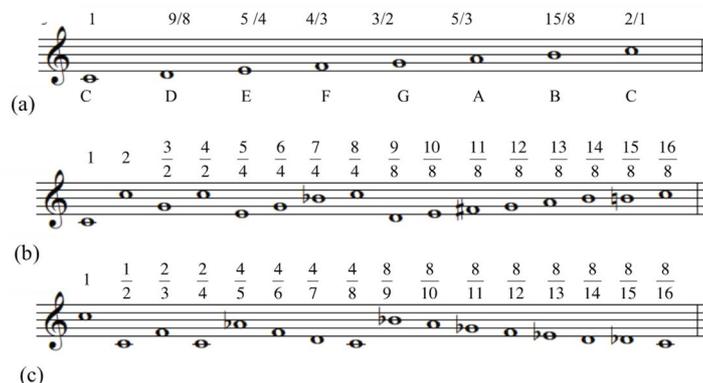


図1. 本研究で用いた3種類の音系列。(a)純正調音階。(b)高調波系列。(c)低調波系列。各音につけた数は、基準音に対する周波数比。

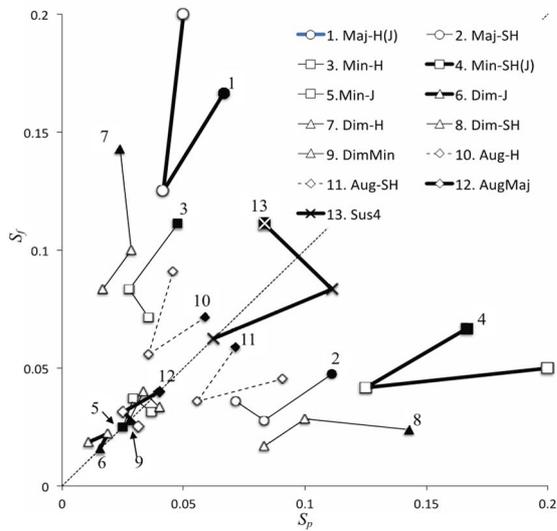


図 2. 三和音のプロット .

調波領域と呼ぶことにする . 各和音の 3 つの形は , 線分でつながれた 3 点で表す . 塗り潰された点は基本形を表し , 第一 , 第二転回は高調波領域ではこの順に , 低調波領域では逆順に示される .

これは対称性を見やすくするためである . 対角線を介して鏡像図形になっている和音ペアを反射組と呼ぶことにする . 4 個の反射組がある . 2 組の長短三和音組と 1 組の減三 , 1 組の増三である . 周波数比が  $f_1 : f_2 : f_3$  の和音の逆転の周波数比は  $1/f_1 : 1/f_2 : 1/f_3$  となり , もともとの和音の周期比と等しくなる . したがって和音の逆転はその周波数比と周期比を交換したものである . すると図 2 がほぼ対称である理由が了解される . 次に図 2 を単純化して 1 種類の和音について 1 つの表現しか持たないようにして , 協和との関連について調べてみる .

まず和音の 3 つの転回形の 値のうちどれか一つでも 0.02 を超えるものがある表現は除去する . これによっても Dim-J , Dim-H , Dim-SH , DimMin は残ることがわかる . これらの座標値は各転回について平均をとることによって , Dim について一つの表現にまとめる . 短三和音のまとめ方は少し複雑である . Min-SH と Min-J は同じ重み 0.5 が与えられる . Min-SH の基本形は  $(S_f, S_p)$  として  $(1/15, 1/6)$  を持ち , Min-J の 2 個の和音 (E-G-B と A-C-E) も  $(1/15, 1/6)$  を持ち , もう一つの D-F-A は  $(1/40, 1/160)$  を持つ . 純正調 (-J) の 3 個の和音には同じ重み  $1/3$  を与える . それにより , 平均基本形の位置は

$$(S_f, S_p) = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{2}{3}\right) \times \left(\frac{1}{15}, \frac{1}{6}\right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right) \times \left(\frac{1}{40}, \frac{1}{160}\right) \cong (0.06, 0.14)$$

となる . 転回形についても同様に計算できる . 結果が図 3(a) である . 次に  $S_d = (S_f + S_p) / \sqrt{2}$  とする .

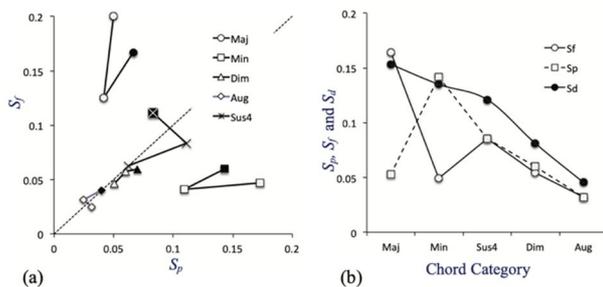


図 3. (a) は図 2 の簡略化 . (b) 各和音の  $S_f, S_p, S_d$  値 .

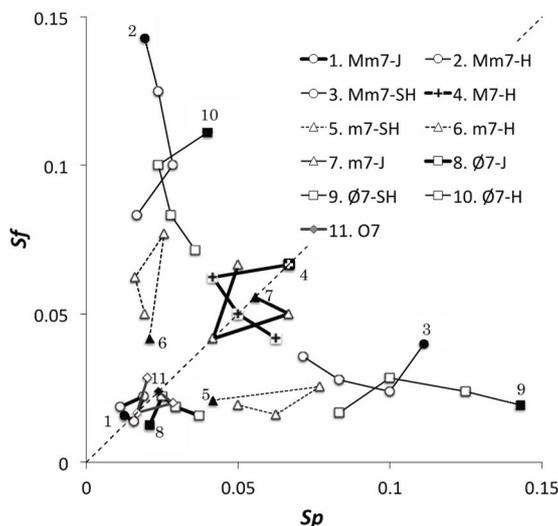


図 4. 七の和音の 2 次元プロット .

## (2) 七の和音

図 4 は七の和音の表示である . 三和音の場合と同様 , 純正調の長音階を含むもの以外は平面全体の表示が対称的である . たとえば Min-J と Dim-J の組みである . m7-H と m7-SH の組はそれらの 値が 0.3 を超え , 実際に調子外れに聞こえるので , 排除されるべきものである . 七の和音においては , Mm7-H と ø7-HS のみが , 異種和音間で反射組を作る . M7 , m7-J と ø7 は対角線に関して対称な図形となる . ø7 和音は開位置 (たとえば B-D-F-A を B-F-A-D に広げて) で発音されるとき , いわゆる「トリスタン和音」となる .

(4)考察

最近の研究[1]において、相対的周期性  $h$  が、和音自体の周期の、和音の最低構成音の周期に対する比として定義されている。そして和音の不協和度が、 $h$ とともに増加するとしている。ところで、周波数比が  $f_1 < f_2 < f_3$  である和音では、計算により  $h = f_1$  であることがわかる。図2のデータ(13×3点)中の  $1/h$  と  $(S_f, S_p)$  の関係を見るため回帰直線

$$1/h = 1.561 \times S_f - 0.0179 \times S_p + 0.00214$$

を求めた。有意性を示す  $p$ -値は  $S_f, S_p$  について、それぞれ  $< 2 \times 10^{-16}$  と  $0.479$  であった。したがって  $1/h$  は  $S_f$  のみによって決定されると考えてよい。図7の散布図もそれを示している。

比の単純度が近いということは、比そのものが近いことを必ずしも意味しない。たとえば5:8と7:8はどちらも単純度は1/8である。同様に  $(S_f, S_p)$  平面中の点間の距離は比自体の近さを表さない。したがってプロット中ではMin-HがMin-SH(J)よりMaj-Hに近いことは不思議ではない。

図3に示すように、ベクトル  $(S_f, S_p)$  の対角線 ( $S_f = S_p$ ) 方向成分が、三和音の主観的協和度を予測できる。七の和音に関しては、主観的な協和度の統計的に使えるようなデータがない。それは七の和音に対する主観的反応は、それらの使われ方や聴者の個人差に依存する部分が大いからと思われる。最近、14個の和音について、情動を表す9項目に対し269名の被験者が評点を与えた実験がある[2]。図8中、黒丸はそのうちの「メランコリー/悲哀」に対する評点を表す。白丸は  $S_a$  の線形変換  $S_a' = \alpha S_a + \beta$  を表す。ここで、 $\alpha, \beta$  は白丸で表される値との2乗誤差を最小にするように求めた。結果から、この修正  $S_a$  値が、「メランコリー/悲哀」の評点をよく予測することがわかる。

最後に、脳における和音認識と理解に関して仮説を述べる。もし脳内の周期性検出ネットワーク中のニューロンが、[3][4]で示唆されているように、ある周波数の低調波や高調波に刺激されたり促通されたりするならば、そのネットワークはその周波数の有理数倍の周波数に対して反応する可能性がある。したがってそのネットワークは、より簡単な周波数比や周期比をもつ和音に強く反応するだろう。人は長・短三和音には明確な反応をするが、短三和音と同じく「幸福感」を与えない増・減三和音が、短三和音のように「メランコリー/悲哀」感のような明確な情動を持たないのは、それが原因かも知れない。なぜならば、長・短三和音は簡単な周波数比・周期比を持つが、増・減三和音はそうでないからである。このような仮説を進めると、Maj-HやMm7-Hのような高調波領域 ( $S_f > S_p$ ) 内の和音は(仮説上の)周波数処理機構で認識され、Min-SHや $\emptyset$ 7-SHなど低調波領域内の和音は周期性処理機構で、対角線 ( $S_f = S_p$ ) 付近の和音は両方あるいはどちらか一方の機構で認識されるのかも知れない。

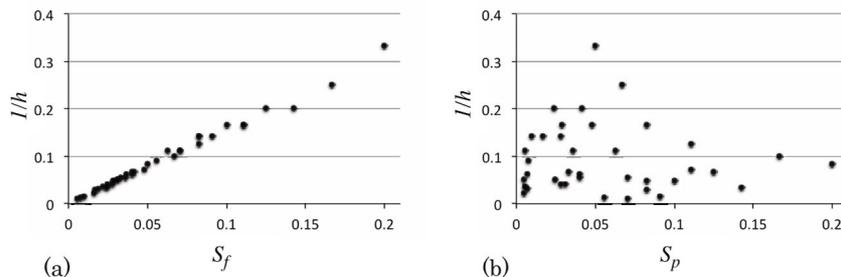


図7.  $1/h$  と  $S_f, S_p$  の散布図

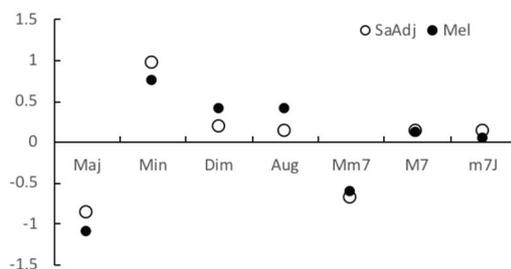


図8. 修正  $S_a$  値と「メランコリー/悲哀」評点の対応。

<引用文献>

- [1] Stolzenburg, F. 2015. "Harmony Perception by Periodicity Detection." *Journal of Mathematics and Music* 9, 215–238.
- [2] Lahdelma, I., and T. Eerola. 2016. "Single Chords Convey Distinct Emotional Qualities to Both Naïve and Expert Listeners." *Psychology of Music* 44, 37–54.
- [3] Langner, G.. 2015. *The Neural Code of Pitch and Harmony*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [4] Kadia, S. C., and X.Wang. 2003. "Spectral Integration in A1 of Awake Primates: Neurons with Single- and Multi-peaked Tuning Characteristics." *Journal of Neurophysiology* 89, 1603–1622.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>Iku Nemoto, Masaki Kawakatsu   | 4. 巻<br>-          |
| 2. 論文標題<br>A two-dimensional representation of musical chords using the simplicity of frequency and period ratios as coordinates | 5. 発行年<br>2021年    |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Mathematics and Music   | 6. 最初と最後の頁<br>1-13 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1080/17459737.2021.1924304   | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>-          |

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 2件/うち国際学会 6件）

|                               |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名<br>根本 幾               |
| 2. 発表標題<br>和声の表現法と神経コードに関する話題 |
| 3. 学会等名<br>日本生体磁気学会大会（招待講演）   |
| 4. 発表年<br>2019年               |

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>吉野雄介, 古川優香, 根本幾, 川勝真喜 |
| 2. 発表標題<br>多義的旋律の聴取における状態遷移確率の計測 |
| 3. 学会等名<br>日本生体医工学会大会            |
| 4. 発表年<br>2018年                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kusano, M., Kawakatsu, M., Nemoto, I., Rikigun, O.                        |
| 2. 発表標題<br>Brain activities during listening to ambiguous melodies revealed in fMRI. |
| 3. 学会等名<br>日本生体医工学会大会  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Nemoto, I., Yoshino, Y., Kawakatsu, M.  |
| 2. 発表標題<br>MEG ASSR's to AM-modulated ambiguous musical segment reflecting the listener's induced state of illusory hearing. |
| 3. 学会等名<br>World Congress on Medical Physics & Biomedical Engineering (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yoshino, Y., Nemoto, I.  |
| 2. 発表標題<br>Auditory steady-state responses in MEG to ambiguous melodies depending on induced implicit melodies. |
| 3. 学会等名<br>Biomag 2018 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>吉野雄介, 根本幾, 川勝真喜                  |
| 2. 発表標題<br>画像により錯聴を誘導したときの多義的旋律に対するMEGのASSR |
| 3. 学会等名<br>日本生体磁気学会大会                       |
| 4. 発表年<br>2018年                             |

|                               |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名<br>根本 幾               |
| 2. 発表標題<br>和声の表現法と神経コードに関する話題 |
| 3. 学会等名<br>日本生体磁気学会大会 (招待講演)  |
| 4. 発表年<br>2019年               |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>草野睦月, 川勝真喜, 根本幾, 王力群   |
| 2. 発表標題<br>多義的旋律に対する脳活動のfMRIによる研究 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会MBE研究会         |
| 4. 発表年<br>2019年                   |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>吉野雄介, 根本幾, 川勝真喜           |
| 2. 発表標題<br>MEGを用いた多義的旋律に対する聴性定常応答の研究 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会MBE研究会            |
| 4. 発表年<br>2019年                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yoshino, Y. and Nemoto, I.  |
| 2. 発表標題<br>Measurement of behavioral state transition between ambiguous melodies and its model |
| 3. 学会等名<br>33rd Ann Mt. Intern. Soc. Psychophys (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kusano, M, Nemoto, I., Kawakatsu, M.,                                    |
| 2. 発表標題<br>Brain activities during listening to ambiguous melodies revealed in fMRI |
| 3. 学会等名<br>5th Intern Conf. Music Emotion, (国際学会)                                   |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yoshino, Y., Nemoto, I. and Kawakatsu, M.   |
| 2. 発表標題<br>Auditory Steady-State Responses to Ambiguous Melodies by Visual Stimulus with MEG |
| 3. 学会等名<br>Biomag 2018 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|                           |
|---------------------------|
| 1. 発表者名<br>草野睦月, 根本 幾     |
| 2. 発表標題<br>多義的旋律に対する反応の研究 |
| 3. 学会等名<br>日本生体医工学会大会     |
| 4. 発表年<br>2017年           |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>吉野雄介, 根本 幾                |
| 2. 発表標題<br>多義的旋律の聴取における状態遷移の時間的变化の計測 |
| 3. 学会等名<br>日本生体医工学会大会                |
| 4. 発表年<br>2017年                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yoshino, Y., Kusano, M., Yuhara, R., Nemoto, I., Kawakatsu, M. |
| 2. 発表標題<br>Auditory steady state responses to ambiguous melodies with MEG |
| 3. 学会等名<br>日本生体磁気学会大会(他2学会と共済の国際学会) (国際学会)                                |
| 4. 発表年<br>2017年   |

〔図書〕 計1件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|