Cognitive Studies, **22**(2), 282-296. (June 2015)

●展望論文●

協和感研究の動向と課題
－聴覚的協和感を中心として－

山本 由紀子・仁科 エミ・大西 仁

In musicology consonance is defined as the state where two or more tones simultaneously presented sound pleasantly. Sensory consonance, which is perceived from tones isolated from a musical context, is largely independent of listener's cultural background and musical experience. Several studies revealed that infants prefer consonant tones to dissonant tones and that nonhuman animals discriminate between consonant and dissonant tones. Since Helmholtz introduced the concept of sensory consonance in the 19th century, sensory consonance has been studied actively. In the 1960s models became able to estimate the perceived consonance of complex tones from the physical properties of the tones. However, sensory consonance still contains a number of problems to be solved and has been studied by multiple approaches. This paper reviews the advances and issues in studies on consonance, especially sensory consonance.

Keywords: consonance（協和）, dissonance（不協和）, sensory consonance, psychoacoustic consonance（聴覚的協和感）, musical consonance（音楽的協和感）, musical tone（楽音）, auditory mechanism（聴覚機構）

1. はじめに

我々の周囲には，自然環境音，人工音，音声，楽音といった多くの種類の音が存在する．これらの音はそれぞれ特徴的な音色を持ち，私たちが音の発生源を認識する重要な手がかりとなっている．音色は，音の大きさ，音の高さと並んで，音の聴覚的属性の三要素とされている．音の大きさは大小，音の高さ (pitch) は高低というように一次元的に表現することが可能であり，物理量との関係も比較的単純である (岩宮・小坂・小澤・　田・藤沢・山内, 2010)．それに対して，音色は「聴覚に関する音の属性の一つで，物理的に異なる二つの音が，たとえ同じ大きさと高さであっても異なった感じに聞こえる時，その相違に対応する属性」と JIS の規格で定義されている (JIS, 2000)．つまり，音の大きさと高さ以外の性質のすべてが音色とされるので，音色は一次元的に表現されるものではない．本論文が対象とする協和は，この音色の一側面と位置付けられる．

協和とは，音楽学的には「同時に鳴った二つ以上の音が快く調和して響く状態」(新音楽辞典　楽語, 1977) と定義される．複数の周波数成分からなる複合音に対しては協和性ないしは不協和性の印象 (協和感，不協和感) が生じる状態を指す．この時，二つの音の高さの隔たりを音程と呼び，音程は二つの音の周波数の比に基づき分類される．周波数比の組み合わせは無限に存在するが，それぞれの音楽文化において使用される音程は限られている．表 1 に西洋音楽文化における音程の名称と周波数比を，一般的に受けいれられている協和性の高い順に示す．表 1 に示しているのは純正律の場合の周波数比である．純正律とは，協和音程の周波数比が単純な整数の比になるように構成された音律で，音律とは，

A Research Review on Perception of Consonance and Dissonance —As a Focus on Sensory Consonance—, by Yukiko Yamamoto (SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)), Emi Nishina (The Open University of Japan / SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)), and Hitoshi Ohnishi (The Open University of Japan / SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)).

表 1　音程の名称と周波数比
（協和性の高い順）

音程の名前	周波数比率
完全 1 度 (ユニゾン)	1 : 1
完全 8 度 (オクターブ)	2 : 1
完全 5 度	3 : 2
完全 4 度	4 : 3
長 6 度	5 : 3
長 3 度	5 : 4
短 3 度	6 : 5
短 6 度	8 : 5
長 2 度	9 : 8
長 7 度	15 : 8
短 7 度	16 : 9
短 2 度	16 : 15
増 4 度 (三全音)	45 : 32

音階を構成する各音高間の周波数比を規定する方法である．

音楽において協和性が聴き手の印象に影響を与えるのは，その定義から現象としては当然である．しかしそれにとどまらず，協和性は学習，記憶，感情を伴う発話音声とも関わりがあることを示唆する知見が得られている．例えば，協和音程を含まない音階は協和音程を含む音階より学習が難しい (松永・阿部, 2009)，音程を刺激とする再認課題において，45 秒程度の保持間隔では不協和音程のほうが協和音程より再認成績が良い (Rogers & Levitin, 2007)，ネガティブな感情を伴う発話音声は相対的に不協和な音高構造をしている (Cook, Fujisawa & Takami, 2006) といった報告があり，協和性は単なる音楽の決まり事ではなく，知覚・認知のメカニズムとも密接に関わっているようである．

音程に対して生じる協和感の大きさ（協和度）と音の物理的属性との関係に関する研究は，古代ギリシアの Pythagoras らの研究に端を発する．1960〜1970 年代には，単純な構造の複合音の協和度に関しては音の物理的属性から高い精度で推定できるモデルが提案された．これらのモデルは実験データによく当てはまり，音楽心理学や聴覚の入門書，ハンドブック，一般書に引用されるほど知れ渡っている (岩宮・小坂・小澤・　田・藤沢・山内, 2010; 小方, 2007; 大山・今井・和気・菊池, 1994; 福島・斎藤・大串, 2001; 谷口, 2000).

しかし，協和感研究は 1970 年代に完成したわけではなく，多くの問題が指摘され，現在に至るまで様々なアプローチによる研究が行われている．本論文では，協和感のうちで特に研究の進んでいる聴覚的協和感に関する研究動向とその課題について述べる．

2.　聴覚的協和感

協和感には音楽的協和感 (musical consonance) と聴覚的協和感 (sensory consonance, psychoacoustic consonance) の二種類がある (Terhardt, 1984)．音楽的協和感は，聴覚的協和感を包含しており，聴覚的協和感とハーモニーによって成り立っている．音楽的協和感におけるハーモニーとは，メロディのまとまりや自然さを指す．ハーモニーは個人の音楽経験，文化的背景によって異なる特性であるため，音楽的協和感は音楽経験，文化的背景に影響を受ける．一方，聴覚的協和感は音楽の文脈から切り離された音そのものに対する協和感を言い，音楽経験や文化的背景の影響をあまり受けないとされる．音楽的協和感は音楽を聴取した時に生じる印象に深く関連するが，音の物理特性やヒトの生理特性以外の要因が多く関与しており，音楽的協和感の研究はあまり進んでいない．一方，聴覚的協和感に関する研究は，様々な聴覚現象の発見と関連して古くからなされてきた．

2.1　音楽的協和感

音楽的協和感とは，例えば音楽の文脈（音楽の進行）中における音程や和音に対して感じる協和感のことである．同じ音程や和音であっても，それが異なる調に挿入されると協和感は異なる．例えば，不協和音が多く使われているジャズに慣れていない人は，ジャズ音楽そのものに不協和を感じることがある．

同じ西洋音楽でも，10 世紀頃の教会音楽は完全 8 度 (2 : 1)，完全 5 度 (3 : 2)，完全 4 度 (4 : 3) の協和音程を中心として構成されており，三全音と呼ばれる音は「悪魔の響き」「音楽の悪魔」と呼ばれ忌避されていた．三全音とはいわゆる増 4 度 (45 : 32) のことで，例えばドとファのシャープの音程である．しかし 18 世紀にもなればこの増 4 度は属 7 の和音と呼ばれる基本的な和音の中にも存在する音であり，忌避されることはなくなった．また長 3 度 (5 : 4) も，11 世紀までは避けられており，11 世紀になっ

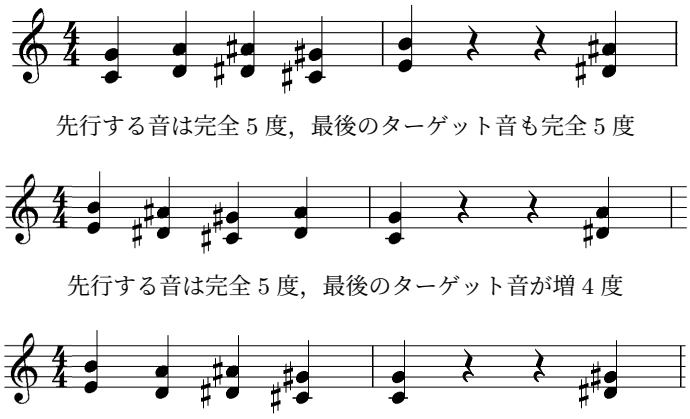


図 1 Schellenberg & Trainor (1996) の実験刺激例.

てからも不協和音程の扱いであったが，13 世紀以降は協和音程の扱いとなった (Tenney, 1988).

また，時代が同じでも，文化が異なると協和音に対する感じ方は大きく異なる．安土桃山時代に来日したポルトガルの宣教師 Luis Frois は，その著書『ヨーロッパ文化と日本文化』(1585) において,『われわれはオルガンに合わせて歌う時の協和音と調和を重んずる．日本人はそれを姦し (caxi maxi) と考え，一向に楽しまない.』と述べている (ルイス・フロイス, 1991).

これらの例は，音楽的協和感は文化的背景や個人の音楽経験などの要因に影響を受けることを示している.

2.2 聴覚的協和感

聴覚的協和感は，音楽の文脈からは切り離された音に対する協和感であり，文化的背景や個人の音楽経験の影響をあまり受けないとされている．実際, Butler & Daston (1968) は音楽経験のないアメリカ人の学生と日本人の学生とに協和性を判断させ，その判断の間に違いが見られなかったと報告している.

Schellenberg & Trainor (1996) は，5 年以上の音楽経験を持つ成人とそうでない成人とに，音程の弁別を課した．実験の刺激は，完全 5 度 (3 : 2) 音程を継時提示して，最後に不協和音程である増 4 度 (45 : 32) 音程，あるいは協和音程である完全 4 度 (4 : 3) 音程か完全 5 度音程を提示した．課題は，最後に提示した音程が先行する音と同じ音程の種類であるか異なる音程の種類であるかどうかを判断させたものであった（図 1）．その結果，最後に不協和音程を提示した場合の方が，協和音程を提示した場合より異同弁別判断の成績が良かった．また，参加者の音楽経験は弁別成績には影響しなかったことから，成人は音楽経験によらない協和性の概念を持っていることが示唆される.

Schellenberg & Trainor (1996) は，先に述べた弁別課題を，オペラント条件づけを用いて 7 か月児に課したところ，弁別成績は成人と同パターンであった．Zentner & Kagan (1998) は，4 か月児に，協和音程からなる旋律と不協和音程からなる旋律とを聴かせて，注視時間と手足の動きを観察した．その結果，協和音からなる旋律提示時には音源方向への注視時間が長く，手足の動きが少なかった．同様の実験により 2 か月児でも，協和音程からなる旋律を好むことが示されている (Trainor, Tsang & Cheung, 2002)．さらに，Masataka (2006) は，聴覚障害者の両親を持つ生後 2 日の乳児と，健聴者の両親を持つ生後 2 日の乳児に，オリジナルの Mozart のメヌエットとそれを多くの不協和音を含むように改変した曲を提示し，注視時間を比較した．その結果，どちらの乳児もオリジナルのメヌエットを好み，選好の程度に両親の聴覚障害の影響はなかった．生後 2 日の乳児は極めて聴覚経験が少なく，特に両親が聴覚障害者の場合は，胎児期の聴覚経験も少ない．この結果は，そのような乳児でも協

和音程を好むということを示している．これらの研究は純粋な聴覚的協和感を扱ったものではないが，協和感が音楽経験によらない生得的な側面を持つことを示唆している．

ヒト以外の動物における協和感も研究されている．Izumi (2000) は，ニホンザル (Macaca fuscata) には協和音と不協和音との弁別学習が可能であり，学習に用いた音程とは異なる音程に関しても弁別が可能であることを示した．Watanabe, Uozumi, & Tanaka (2005) は，ブンチョウ (Padda oryzivora) に音高の異なる同種の協和音と不協和音（3 和音）を用いて弁別学習をさせた．その結果，ブンチョウは協和音と不協和音との弁別学習が可能であり，さらに学習に用いた刺激と音高が異なる協和音と不協和音との弁別もできることを示した．

Fannnin & Braud (1971) は，ラット (Rattus norvegicus) に不協和音程である短 2 度 (16 : 15) と協和音程である完全 4 度 (4 : 3) を提示して，音提示と対応するレバーを押す頻度を比較した．その結果，協和音程である完全 4 度に対応するレバーをより多く押したことから，ラットも協和音を選好しているとした．Sugimoto, Kobayashi, Nobuyoshi, Kiriyama, Takeshita, Nakamura, & Hashiya (2010) は，人間に育てられた生後 5 か月のチンパンジー (Pan troglodytes) の乳児に，オリジナルの協和音楽とその曲の一部を不協和音に変えた不協和音楽とを聴取させた． 手首に装着した紐を引くことにより再生する曲を切り替えるようにして，曲の再生時間を比較したところ，協和音楽をより長時間再生させた．この結果から，音楽の経験をほとんど持たないチンパンジーの乳児が協和音楽を好むことが明らかになった[1)]．

このように聴覚的協和感は文化や音楽経験にあまり依存せず，乳児やヒト以外の動物の一部にも共通した傾向がみられ，生得的な聴覚現象であることが示唆される．

2.3　聴覚的協和感の理論（加法的モデルまで）

先に述べたように聴覚的協和感の理論的研究は，古くは古代ギリシアの Pythagoras によって，完全 8 度，完全 5 度，完全 4 度などの完全協和音程の周波数比が簡単な整数比であることが発見されたことに端を発する．完全 8 度の周波数比は 2 : 1，完全 5 度の周波数比率は 3 : 2，完全 4 度の周波数比率は 4 : 3 である．これらの音程は快く響き協和していると感じられるのに対し，不協和音程と呼ばれる音程の周波数比率は複雑であることが述べられている．具体的に短 2 度音程の周波数比は 16 : 15，長 7 度音程の周波数比は 15 : 8 である．

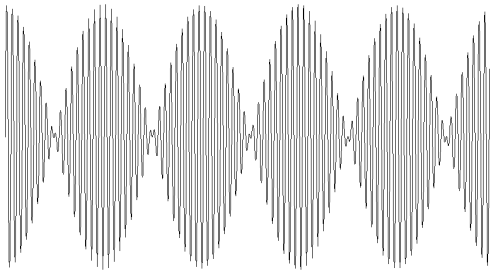


図 2　二つの純音の複合音の波形.

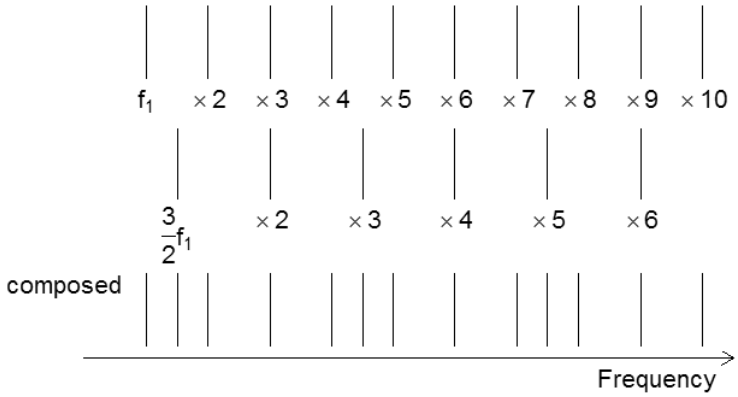
Helmholtz (1877) は, 不協和感はおもにうなり (beat) とざらつき感 (roughness) より生じ，協和感は不協和感がないことであるとした．うなりとは，二つの近接した周波数の音が同時に鳴ると，一つの音の強弱が変化しているように聞こえる現象である．近接する周波数 f_1, f_2 (Hz) の二つの純音 $A\sin(2\pi f_1 t)$, $A\sin(2\pi f_2 t)$ からなる複合音は,

$$A\sin(2\pi f_1 t) + A\sin(2\pi f_2 t) = 2A\cos\left(2\pi\frac{f_1 - f_2}{2}t\right)\cdot\sin\left(2\pi\frac{f_1 + f_2}{2}t\right)$$

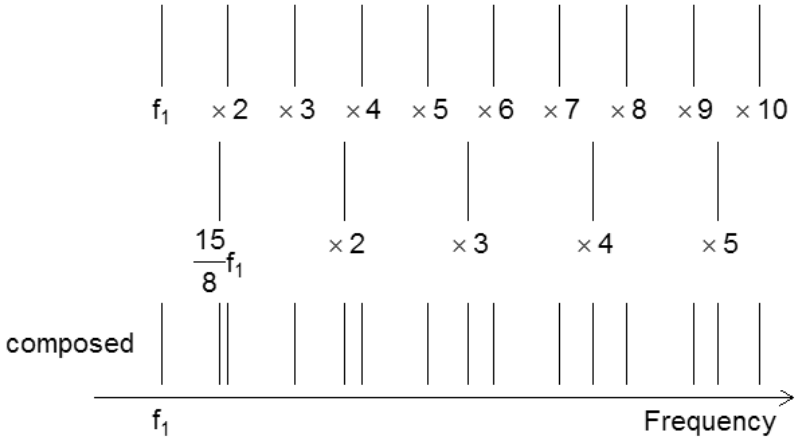
となる．この複合音のスペクトルを見ても周波数成分が二つ確認できるだけだが，波形を見てみると図 2 のような振幅変動（波形の包絡線）を確認できる．図の横軸は時間，縦軸は音圧である．振幅は $|f_1 - f_2|$ (Hz) で変動する．つまり，うなりは振幅変動の知覚により生じている．

周波数差が小さいとうなりが遅く，あまり不協和感を与えないが，周波数差が大きくなるとざらつき感が生じ，大きな不協和感を与える．さらに周波数差が十分大きくなると，2 音がきれいに分離して聞こえるようになり，ざらつき感も消えて不協和感を与えなくなる．このうなりやざらつき感が不協和感の原因で，周波数差が 30〜40 Hz の時にざらつき

1) ただし，McDermott & Hauser (2004) はサル目のワタボウシタマリン (Saguinus oedipus) が協和音への選好を示さなかったと報告しており，哺乳動物であれば協和音に選好を示すという訳ではない．



完全 5 度 (3 : 2)



長 7 度 (15 : 8)

図 3 周波数比と倍音構造.

感は最大になるとした.

二つの純音の複合音では，二つの音の周波数が離れているほど不協和度（不協和感の大きさ）は小さくなるが，各音が倍音を持つ場合，周波数比が簡単な整数の比であれば，周波数が一致する共通倍音が多くなる．周波数が一致するとうなりやざらつき感が生じないことから，共通倍音を多く持つ複合音の不協和度は小さくなる．倍音とは，周期的複合音の成分中の基音以外の周波数成分のことである．我々の周囲にある音は基本的に，一つの音に聞こえても多くの成分を含んでいる．時に基音よりも低い周波数の倍音が現れることもあるが，基音は大概の場合最も低い周波数であると考えてよい．楽音などの複合音に含まれている成分の中には基音の整数倍にならない成分が多いのに対し，特に楽音の場合は整数倍の倍音が強く発生し，その整数倍音が各楽音の音色を決定する．基音を含む整数倍音の列のことを，倍音列と呼ぶ．図 3 に周波数比が簡単な整数の比になる例として協和音程である完全 5 度 (3 : 2) と，複雑な整数の比になる例として不協和音程である長 7 度 (15 : 8) との倍音構造を示す．横軸は周波数を表し，縦線は周波数に対応する音が含まれることを示す．完全 5 度の f_1 は音程のうち低い方の音（根音）の基音，$3/2f_1$ は根音の完全 5 度上の基音である．その 2 音が同時に鳴った時の倍音構造が composed である．下の図の長 7 度も同様に，f_1 は根音の基音，$15/8f_1$ は根音の長 7 度上の基音である．周波数差は長 7 度音程の方が大きいが，共通倍音が少な

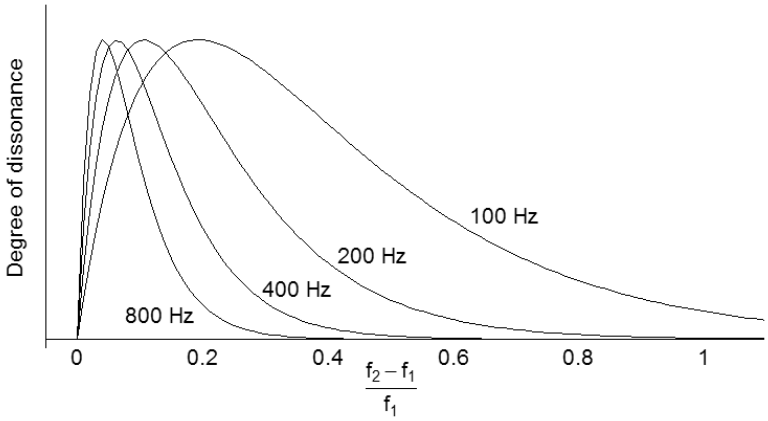


図 4 周波数 $f_1, f_2 (f_1 \leq f_2)$ の二つの純音からなる複合音の不協和度．図中の周波数は f_2 を示す．Sethares (2005) のモデルにより計算．

く，うなりやざらつき感が大きくなるため，不協和度は大きくなる．

これに対して，Stumpf (1897) は，音の融合感 (tonal fusion) が協和感の本質であるという観点を提案した．融合感とは二つの音が溶け合って一つに聴こえる感覚のことである．Stumpf が提案した融合の法則とは，(1) 音程の融合の程度（融合度）は，二つの音が簡単な整数比であるほど高い，(2) 融合度は音圧の影響を受けない，(3) ある融合度を持つ二つの音の組み合わせに倍音を加えると，融合度の高い音の融合度はさらに高く，融合度の低い音の融合度はさらに低くなる，(4) ある融合度を持つ二つの音の組み合わせに第 3，第 4 の音を加えても，元の 2 音に注意を向けていると融合度は変わらない等の 8 条からなる．(1)〜(3) は音の物理特性で決まるが，(4) には心理的な要因が加わっている (伊福部, 2008)．融合度と協和度の評定は一致せず，融合感の生理学的な説明もなかったので，うなりやざらつきが不協和感の原因であるという説が，長らく最も説得的な説として受け入れられてきた．本節で紹介するモデルもその説に基づいている．

Plomp & Levelt (1965) は，不協和度は 2 音の周波数差のみにより決まるものではなく，臨界帯域幅 (critical bandwidth) を考慮する必要があるとした（図 4）．臨界帯域幅とは 2 音がざらつきなくきれいに分離するようになる最小の周波数差のことで，2 成分の中心周波数が 500 Hz 以下の場合は 100 Hz 程度，それ以上の場合は中心周波数の 1/5 程度である (Zwiker, Fiottorp & Stevens, 1957)[2]．聴取実験の結果に基づき，二つの純音からなる複合音 (dyad) の不協和度は，周波数差を臨界帯域幅で除した値の関数で，3 音以上の複合音の不協和度は各 dyad の不協和度の和であるとした（図 5）．本論文では，複合音の不協和度は複合音を構成する dyad の不協和度の和であるとするモデルを，加法的モデルと呼ぶことにする．

Plomp & Levelt による加法的モデル（P-L モデル）の提案以降，複数の研究者によって，数式化された加法的モデルが提案された (Kameoka & Kuriyagawa, 1969a, 1969b; Hutchinson & Knopoff, 1978, 1979; Sethares, 1993, 2005)．

これらのモデルは数式の形は異なるが，(1) P-L モデルでは，不協和度は周波数の差を臨界帯域幅で除した値のみの関数としたが，その後のモデルによるは不協和度の計算に音圧も取り入れている，(2) P-L モデルでは隣接する周波数成分の対のみが不協和度の計算に用いられるが，その後のモデルではすべての周波数成分の対が不協和度の計算に用いられる点で共通している[3]．これらのモデル，特に Kameoka & Kuriyagawa (1969a, 1969b) のモデルは聴取実験による不協和度の測定値によく当てはまった．また，これらの理論を基に，音楽における音高の構成法が提案されている (小畑, 2001)．

2) 後に臨界帯域幅はより優れた方法で測定され，特に低周波数領域ではここで挙げた値より小さい値が採用されている (Moore & Glasberg, 1983)．

3) ただし，Kameoka & Kuriyagawa (1969b) のモデルは，不協和度自体には加法性が成り立たず，物理量と心理量の間にべき法則 (Stevens, 1957) を仮定し，不協和度に対応する不協和強度に加法性が成り立つとした．

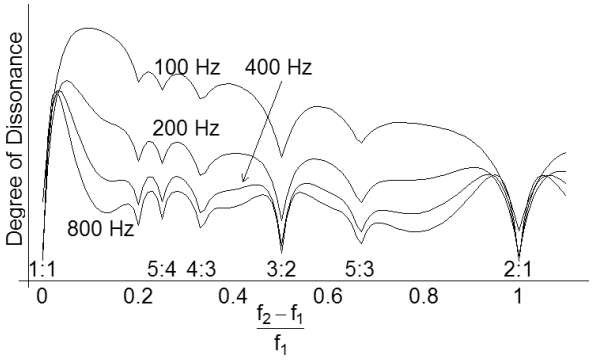


図 5 f_1, f_2 の第 6 倍音までからなる複合音の不協和度．図中の周波数は最も低い周波数を示す．Sethares (2005) のモデルにより計算．

3. 協和感研究の発展と課題

3.1 加法的モデルの問題と拡張

加法的モデルの研究において実験の対象とした音は，高々十数成分で構成され振幅が変動しない単純な複合音であった．しかし，我々が日常生活で耳にする音は，実験で対象とした音よりもはるかに複雑である．例えば，楽音は振幅の変動が大きく，基本周波数とその倍音（調和成分）以外の非調和成分も多数存在する音である．実際，2.3 で述べた加法的モデルによって楽音の不協和度が推定できたというような報告はない．Kameoka & Kuriyagawa (1969b) 自身が述べているように，先に挙げた加法的モデルは，不協和度を周波数と音圧の関数としており，時間や位相を取り入れていないので，振幅の変動や位相の効果については対応できない．この問題については 3.2 で述べる．

加法的モデルの研究において実験の対象とした音は，図 2 に示したような離散的で疎な音であった．一つの周波数成分と大きく干渉するのは高々隣接する 1 成分で，他の成分は周波数が十分離れている．そのため，3 成分以上の間で複雑な相互作用が生じず，dyad の不協和度の和として複合音の不協和度を推定できた可能性がある．山本・仁科・大西 (2013) は，臨界帯域内および臨界帯域周辺に 3 成分存在する複合音や楽音を用いた聴取実験で不協和度を測定し，加法的モデルの予測が当てはまらないことを示した．

3 成分以上の音が狭い周波数帯域に同時に存在する場合，複雑な相互作用が生じ，不協和度は各 dyad の不協和度の単純な和にならないことから，山本他 (2013) は Sethares (2005) のモデルを拡張し，相互作用の影響を扱えるようにした．楽音のように多数の成分からなる音の 3 項以上の関係をすべて考慮するのは計算量が大きく困難であるため，不協和度がピークになる dyad が他の dyad の不協和度に影響を与え，影響の程度は dyad の中心周波数間の距離の関数となると仮定し，重み関数を用いたモデルを構成した．このモデルをピアノ音色，オルガン音色の複合音に適用し，不協和度の推定精度が大幅に向上することを示した．

三つ以上の音が同時に鳴る複合音を和音 (chord) と呼ぶ．異なる和音は異なる協和感を与える．和音のうち，最も低い音（根音）と，根音の 3 度上の音（第 3 音）と，根音の 5 度上の音（第 5 音）の三つの音から成る和音を 3 和音 (triad) と呼ぶ．3 和音において，根音と第 3 音の音程が長 3 度 (5 : 4) で根音と第 5 音の音程が完全 5 度 (3 : 2) の音程を長 3 和音 (major)，根音と第 3 音の音程が短 3 度 (6 : 5) で根音と第 5 音の音程が完全 5 度 (3 : 2) の音程を短 3 和音 (minor)，根音と第 3 音の音程が短 3 度 (6 : 5) で根音と第 5 音の音程が減 5 度 (45 : 32) の音程を減 3 和音 (diminished)，根音と第 3 音の音程が長 3 度 (5 : 4) で根音と第 5 音の音程が増 5 度 (8 : 5) の音程を増 3 和音 (augmented) と呼ぶ．一般的な傾向として，最も協和性が高いのが長 3 和音で，以下短 3 和音, 減 3 和音, 増 3 和音の順となることが知られている．また，3 和音だけでなく 3 和音に根音から 7 度上の音を加えた 4 和音を用いた聴取実験においても，この傾向が成り立つことが示

されている (Roberts, 1986).

加法的モデルが扱ってきた離散的で疎な音であれば，和音の不協和度を加法的モデルで予測できそうなものであるが，Cook & Fujisawa (2006), Cook (2009) は加法的モデルでは 3 和音の不協和度を正しく予測できないことを示した．Cook らは，周波数 f_1, f_2, f_3 ($f_1 < f_2 < f_3$) の 3 音間に音程の等しさに基づく緊張性 (tension) という概念を導入した．f_1, f_2 からなる音程と f_2, f_3 からなる音程が等しいとき，緊張性は最大になり，二つの音程の差が大きくなるにつれて緊張性は小さくなる．倍音成分も含めて 4 音以上からなる複合音の緊張性は，すべての三つ組みの緊張性の和とした．この緊張性と Sethares (1993) の不協和度の重み付き和を和音の不安定性（不協和度）として，長 3 和音 短 3 和音, 減 3 和音, 増 3 和音の不協和度の順序を正しく予測できることを示した．

3.2 位相と時間領域モデル

加法的モデルは，不協和度を周波数と音圧の関数としており，時間や位相を取り入れていないので，振幅の変動や位相の効果については対応できない．位相とは周期中の位置を示す．例えば，正弦波 $A\sin(2\pi f_t + \phi)$ の位相は $2\pi f_t + \phi$ である．複合音における位相の効果とは，例えば周波数 f_1 および f_2 の正弦波からなる複合音，

$$A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi)$$

の不協和感に ϕ の値が与える影響のことである．Helmholtz (1877) は，基本周波数や位相の異なる複合音を用いた実験を行ったが，位相が音色を顕著に変化させる効果を見出すことはできなかった．それに対して，Plomp & Steeneken (1969) は，音の大きさと音高を一定にして，位相を変化させた複合音を用いて，参加者に音色の最も類似したペアと最も異なるペアを選択させた．その結果，すべての成分の位相が揃っている複合音と位相が 90 °ずれている複合音とのペアが最も音色が異なると判断され，位相の効果は周波数が低いほうが大きいことを見出した．また，Andersen & Jensen (2004) は，楽音の位相を操作することにより音質が大きく変化することを示した．

Pressnitzer & McAdams (1999) は位相が不協和感 (ざらつき感) に与える影響を検討した．実験 1 では，次式で表される 3 成分複合音を刺激に用いた．

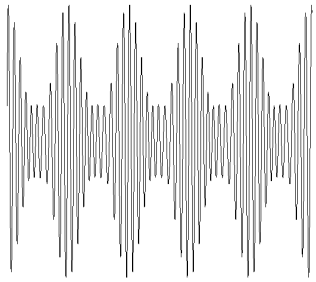


図 6 谷の浅い振幅変動.

$$\frac{1}{2}\cos[2\pi(f_c - f_m)t] + \cos(2\pi f_c t + \phi) + \frac{1}{2}\cos[2\pi(f_c + f_m)t]$$

この複合音は，ϕ の値に関わらず同一の振幅スペクトルを持つ．$\phi = 0$ では，図 2 のように波形の包絡が正弦曲線となるが，$\phi \neq 0$ では振幅は 0 にならず，図 6 に示すような谷の浅い変動となる．ϕ の正負が逆の複合音は，振幅スペクトルと波形の包絡は同一で，波形の微細構造が異なる．このような刺激を用いて参加者にざらつき感を評価させた結果，$|\phi|$ が増加するとざらつき感が減少し，ϕ の正負が逆になるとざらつき感が変化するという非対称性が示された．

実験 2 では，振幅がゆっくり増加して急激に減衰する鋸歯状の波形を持つ音とそれを逆転再生させた音を刺激として，波形の包絡がざらつき感に与える影響を検討した結果，振幅スペクトルと波形の包絡の深さが一定でも逆転再生によりざらつき感が減少することが示された．

これらの結果は，不協和度を音圧と周波数のみの関数とする加法的モデルでは説明できない．そこで，位相の効果を部分的に説明できる時間領域モデルも提案されている．Fastl & Zwicker (2006) は波形の包絡の深さ（ただし，物理量ではなく聴覚系における興奮レベル）と振幅変動の変調周波数の積に基づくざらつき感のモデルを提案した．Pressnitzer & McAdams (1999) は Giguere & Woodland (1994) の聴覚末梢系のモデルを用いたシミュレーションにより実験結果の再現を試みている．また，Tind &

Jensen (2004) は Leman (2000) が開発したざらつき感の計算モデルを用いてシミュレーションを行い，位相によるざらつき感の複雑な変化を示している．さらに位相を操作することにより合成音の不協和感を制御する方法を提案している．不協和度を制御することにより，効果音等に応用される合成音に，これまでは避けられてきた音の組み合わせを利用できる可能性を示唆している．ただし，いずれのシミュレーションにおいてもここで述べた実験結果を完全に再現できた訳ではない．

3.3 協和感・不協和感発生のメカニズム

3.3.1 協和感・不協和感の処理部位

Blood, Zatorre, Bermudez, & Evans (1999) は，同一メロディに協和音および不協和音の伴奏をつけた刺激を聴取させた時の脳血流の変化を PET を用いて観察した．その結果，傍辺縁系の海馬傍回，右楔前部の脳血流量は不協和度の増加と正に相関し，両側眼窩前頭皮質，梁下前帯状皮質，前頭極皮質の脳血流量は不協和度と負に相関することが明らかになった．さらに，刺激に対する快さに関する評定値は内側梁下前帯状皮質，右眼窩前頭皮質の脳血流量と正に相関し，左後帯状皮質，右海馬傍回の脳血流量と負に相関した．また，協和音および不協和音の刺激聴取時における両側上側回の脳血流量は，雑音聴取時におけるそれより大きかった．これらのことから，両側上側回は感情的解釈に先立ち音楽の聴覚的分析を行っていると解釈した．

Peretz, Blood, Penhune, & Zatorre (2001) は，両側の聴覚皮質の損傷により音楽の知覚と記憶に障害を持つ患者を用いて実験を行った．刺激はクラシック音楽の抜粋とそのオリジナルを不協和音が多く含まれるように改変したもので，各刺激の印象を評定させ，健常者による評定と比較した．その結果，患者のオリジナルの音楽と不協和に改変した音楽に対する快・不快の評定には差がなく，健常者の評定とは大きく異なった．しかし，嬉しい・悲しい，の評定は健常者との間に差がなかったことから，この患者は音楽に関するすべての感情を喪失しているわけではないことがわかる．さらに，この患者の CT スキャンの画像と，前述の Blood et al. (1999) による健常者が不協和度の異なる和音を聴いた時の PET のデータを比較したところ，脳血流量が不協和度と相関した傍辺縁系は損傷しておらず，音楽の聴覚的分析を司る上側頭回が損傷していた．これらの結果から，不協和感は感情的な解釈に先立って上側頭回において処理されるとした．

Ayotte, Peretz, & Hyde (2002) は，複数の先天性失音楽 (congenital amusia)[4] の患者を用いて，先天性失音楽の性質を調べた．この研究においても Peretz et al. (2001) と同様に，先天性失音楽の人々は音楽の嬉しい・悲しい，の判断は健常者と変わらないにもかかわらず，協和性・不協和性に対して極めて鈍感な反応を示した．

Passynkova, Neubauer, & Scheich (2007) は，協和音および不協和音聴取時の脳波コヒーレンスを用いて，協和感・不協和感の処理における左右半球間および半球内間の関連性を解析した．コヒーレンスとは 2 組の時系列データの関連性の強さを周波数ごとに表したものである．その結果，θ 波帯域において，前頭部の半球間のコヒーレンス値は協和音聴取時に大きくなり，後頭部の半球間のコヒーレンス値は不協和音聴取時に大きくなった．また，θ 波帯域において，右半球内のコヒーレンス値は協和音聴取時により大きくなり，快さの評定と対応した．一方，$\theta 2$ 波帯域において，左半球内のコヒーレンス値は協和音および不協和音聴取時に統制条件より小さくなったことから，感情的な解釈なしに協和感・不協和感の処理を行っているとした．さらに，$\alpha 1$ 波帯域において，左半球前部と右半球後部の半球間のコヒーレンス値は親近性の評定と負に相関したことから，新奇な音楽の処理に関連しているとした．

3.3.2 協和感・不協和感の神経基盤

正弦波刺激（純音）聴取時，聴神経の細胞は刺激の特定の位相に同期して発火する．この現象を位相固定と呼ぶ (内川, 2008)．うなりは振幅変動の知覚により生じていると 2.3 で述べた． Fishman, Reser, Arezzo, & Steinschneider (2000) は，サルに振幅変調音を聴取させ一次聴覚野の神経細胞の活動を計測した．その結果，波形の包絡線，すなわち振幅変動の特定の位相に同期して神経細胞が発火する位相固定が観察された．また，Fishman, Volkov, Noh, Garell, Bakken, Arezzo, Howard, & Stein-

4) 失音楽は元々は後天的な（脳の損傷による）音楽機能の障害を指す用語として用いられてきたが，近年になって先天性の音楽機能の障害，明らかな脳の損傷を認めないような音楽機能の障害も含めて失音楽という用語が使われている (緑川, 2013).

schneider (2001) は，ヒトとマカクに不協和度の異なる複合音を聴取させ，一次聴覚野の神経活動を調べた．その結果，位相固定の度合いは音程の不協和度と正に相関することを示した．これらの結果から，一次聴覚野における神経細胞活動の位相固定は不協和感を表現しているとした．

Fishman らの研究結果は，うなりやざらつき感が不協和感の原因であるという Helmholtz の説を神経生理学的に裏付けたことになる．しかし，これで聴覚的協和感について完全に解明できた訳ではない．DeWitt & Crowder (1987) は，単一音と種類の異なるいくつかの音程とを提示し，それが単一の音か音程（二つの音）なのかを判断させた．音程を単一の音と誤判断した確率と反応時間を比較した結果，完全 8 度 (2 : 1) と完全 5 度 (3 : 2) が他の音程より誤判断率が高く，反応時間も長かった．この結果は Stumpf の融合説を裏付けるものと考えることもできる．

Bidelman & Krishnan (2009) は，音程を構成する二つの音を左右別々に提示する両耳分離聴パラダイムを用いて，音程の不協和度を測定した．うなりを生じる dyad を両耳分離聴すると，うなりはほとんど感じられないことが知られている．不協和感がうなりやざらつき感により生じているのであれば，不協和音程を両耳分離聴すると不協和感は生じないはずである．ところが，音程の協和度を評定させると，両耳分離聴の場合でも協和音程を高く評定した．

McDermott, Lehr, & Oxenham (2010) は，250 人以上の参加者を集めて複数の聴取実験を行った．一つの実験では，基本周波数が 250 Hz で第 10 倍音までの倍音成分からなる複合音から一部の成分を除いた調和的な複合音と，その複合音の各成分の周波数を僅かに変えた非調和的な複合音，成分間の周波数比を 2.0 より僅かに大きくした非調和的な複合音の，調和度と協和度（快さ）を評定させた．いずれの複合音においてもすべての音程はうなりやざらつき感が生じないほど離れていたが，調和的な複合音のほうが調和度，協和度が高く評定された．調和的な複合音を好む傾向は楽器演奏経験の年数と正に相関した．また，dyad を両耳分離聴および両耳聴で聴いた場合，うなりが生じる両耳聴の場合に，より不快であると評定された．調和性を操作した複合音における協和度と調和度の評定値には正の相関があったが，調和性を操作した複合音における協和度とうなりの大きさの評定値との間には相関がなかった．

Cousineaua, McDermott, & Peretz (2012) は，先天性失音楽の患者の，うなりの有無の判断やうなりのない音の選好，感情のこもった発話音声の感情の判断は，健常者と同様であるが，複合音が調和的であるか否かの判断は健常者とは異なり，調和的複合音や協和音も選好しないことを示した．

これらの結果から，McDermott et al. (2010) は協和性の基盤は調和性にあるとした．調和性は複合音が一つの音のように聴こえることである．これは Stumpf の融合に近い概念であるので，以降この考え方も併せて融合説と呼ぶことにする．周波数比が簡単な整数の比となる音程，例えば完全 5 度音程 (3 : 2) で，低い方の音の基本周波数を 200 Hz とすると，200, 300, 400, 600, 800, 900,... (Hz) という倍音成分を持つが，この音は基本周波数が 100 Hz の完全 1 度音程 (1 : 1)，すなわち単一音のサブセットとなるので，一つの音のように聴こえる．一方，周波数比が複雑な整数の比となる音程では，対応する完全 1 度音程の基本周波数が非常に低くなる．30 Hz より低い音は和音を構成する音とは認識されないので (Pressnitzer, Patterson, & Krumbholtz, 2001)，対応する完全 1 度音程の基本周波数が 30 Hz より低くなる複合音は一つの音のようには聴こえないという考え方である．

Tramo, Cariani, Delgutte, & Braida (2001) は，協和音程（完全 5 度 (3 : 2)，完全 4 度 (4 : 3)）および不協和音程（短 2 度 (16 : 15)，増 4 度 (45 : 32)）聴取時のネコの聴神経繊維の神経細胞の発火間隔 (interspike interval; ISI) を測定し，ISI の分布を解析した．神経細胞の発火は位相固定するので，発火間隔は刺激音の周期を反映する．そのため，ISI の分布は自己相関関数に相当し，音高をコードしている (Cariani & Delgutte, 1996)．解析の結果，協和音程聴取時の ISI のピークは音程を構成する二つの音の音高，missing fundamental[5]等のハーモニーに関連する音高を反映していた．一方，不協和音程聴取時の ISI の分布は不規則で，音程を構成する二つの音の音高やハーモニーに関連する音高を表現していなかった．これらの結果は，調和性を感

5) ある音の基本周波数やその周辺周波数が存在しなくても，その整数倍音が存在していた場合，存在していない基音が聞こえる現象．脳が音高を基本周波数だけではなく，倍音も知覚しているために起こる．

じるための神経生理学的基盤の存在を裏付けるものと考えることもできる．このようなメカニズムにより協和度を計算する数理モデルも提案されている (Ebeling, 2008).

Bidelman & Krishnan (2009) は，ヒトが不協和度の異なる音程を聴取した時の脳幹の周波数対応反応 (FFR) を解析した．FFR は音により誘発される頭頂部反応で脳幹に由来する反応である．FFR の波形は刺激音の波形と類似している．FFR 波形の自己相関関数のうち，根音の基本周波数とその倍音成分に相当する部分の割合である（脳幹内の神経活動として表現された）音高の明確さ (neural pitch salience) が算出された．音高の明確さはその定義から単一音らしさ，すなわち融合度の指標と解釈することができる．音高の明確さと協和度の評定値との間には大きな正の相関があった．また，3 和音に関しても音高の明確さと協和度の評定値との間には大きな正の相関があった (Bidelman & Krishinan, 2011)．これらの結果は融合説を裏付けるものである．

しかしこのことは，うなりやざらつき感が不協和性の知覚においてほとんどあるいはまったく役割を果たしていないことを示している訳ではない．Johnson-Laird, Kang, & Leong (2012) は不協和性の知覚において，調和性が不協和性の大まかな傾向を，うなりやざらつき感が不協和性の微小な差異を決める，という理論を提案している．うなりやざらつき感は感覚的な過程により生じ，調和性は調性に関する暗黙的知識に基づく高次認知過程により決まるということで，彼らはこの理論のことを二重過程理論と呼んでいる．調和性が高次認知過程に基づくということは，調和性の選好が楽器演奏の経験と相関するという McDermott et al. (2010) の結果とも整合的である．

Minati, Rosazza, D'Incerti, Pietrocini, Valentini, Scaioli, Loveday, & Bruzzone (2009) は，音楽家および非音楽家に協和音や不協和音を聴取させ，fMRI による撮像および事象関連電位 (ERP) の測定を行った．その結果，協和音聴取時に主に前頭部の血流量が増加し，非音楽家においては右半球に側性化したが，音楽家においては左右の非対称性は小さかった．さらに，協和度に応じて両群とも ERP の P1 成分の振幅が変化したが，非音楽家においてのみ協和度に応じて N2 成分の振幅が変化した．Minati et al. (2009) は，音楽家は感情的処理に加え分析的処理も行っていると推測した．これらの結果は，二重過程理論を神経生理学的に裏付けていると考えることもできる．

3.4 聴覚的協和感研究の課題

ここまで概観したように，加法的モデルの発表以降現在に至るまで，聴覚的協和感に関する研究は着実な進展を遂げている．特に近年には，聴覚的協和感の神経生理学的裏付けも行われるようになり，聴覚メカニズムを反映したモデルも構築されている．聴覚的協和感が乳児やヒト以外の動物の一部にも共通することを考慮すると，一般的な聴覚メカニズムに基づいた協和感の説明はより説得的であると考えられる．聴覚メカニズムのモデルは加法的モデルと比較するとはるかに複雑であるが，プログラムが公開されている場合が多いので，モデルの評価や変更も比較的容易に行うことができる．こういったことから，聴覚的協和感に関する理解を深めるための下地は整ってきたと思われる．ここでは，本来なら研究されて然るべき課題を幾つか挙げる．

まず挙げられるのが，計算機の能力が飛躍的に向上し，複雑な音声刺激を作成することも容易になった現在においても，ほとんどの研究で少数成分からなる単純な複合音のみを用いていることである．音声や楽音をはじめとして我々が日常耳にする音の多くは，成分数が多く振幅が変動する複雑な音である．また，紹介した聴覚的協和感のモデルの中には振幅変動や位相を扱えるものもあり，音声や楽音のような複合音を研究対象にしない理由は見当たらない．

次に挙げられるのが，音楽的協和感への展開である．音楽の文脈中にある音の協和感である音楽的協和感は，文化的背景，個人の音楽経験といった音の物理特性やヒトの生理特性以外の影響が大きいことから，聴覚的協和感に比べて扱いにくく，研究はあまり進んでいない．和音の系列の物理特性および音楽経験，文化的背景と聴覚的協和感，ハーモニー，音楽的協和感の関係を明らかにしようという研究は見当たらない．聴覚的協和感とハーモニーに関する研究では，和音の系列を操作して参加者の期待（予想）を調べるというアプローチをとるものがある．Regnault, Bigand, & Besson (2001) は，和音の系列における最後の和音（ターゲット）を感覚レベル（聴覚的協和感）と認知レベル（ハーモニーの構造）

で操作した刺激を呈示し，事象関連電位 (ERP) の測定を行った．その結果，認知レベルの操作の影響はターゲットのオンセット 300 ms 後に陽性方向のピークとして表れ，感覚レベルの操作の影響は認知レベルの影響より遅れて，ターゲットのオンセット 300〜800 ms 後に陽性方向のピークとして表れた．また，これらの影響は独立であったことから，音楽を聴取している時の期待には独立した二つのメカニズムが寄与しているとした．この研究は，音楽的協和感の構成要素である聴覚的協和感とハーモニーを同時に扱っている点で重要である．期待はメロディのまとまりや自然さを反映しているので，ERP を指標としたり，プライミングを用いて期待を評価したりする方法 (Tillmann, Bigand, Escoffier, & Lalitte, 2006) は注目に値する．

最後に挙げておきたいのは，音楽以外の認知活動と聴覚的協和感の関係，より広くは起源と機能の解明である．聴覚的協和感は音楽に特化したものではなく，一般的な聴覚現象である (Hauser & McDermott, 2003; Terhardt, 1984)．1 において，聴覚的協和感と学習，記憶，感情を伴う発話音声の関係に関する研究があることを述べたが，音楽以外の認知活動における聴覚的協和感に関する研究はほとんどない．協和音を快，不協和音を不快と感じるのは，そう感じることが生物の生存上有利に働くかもしれない．例えば，不協和音が何らかの認知活動を阻害しているため不快に感じる可能性がある．うなりやざらつきは，2 音の周波数の差が聴覚フィルタの分解能より小さい時に干渉が生じることにより発生するとされている．仮に聴覚的不協和感の原因がうなりやざらつきであるなら，不協和な音高構造を持つ発話音声は聞き取りや話の内容の再生が阻害されるような可能性が考えられる．

協和感の研究は日本ではあまり盛んではなく，日本語で読める協和感に関する文献の大部分は 1960〜1970 年代までの記述にとどまっている．しかし世界では，協和感，特に聴覚的協和感の研究は，教科書の書き換えを迫るほど進展しており，解明すべき問題も多方面にわたり多数存在している．日本の認知科学コミュニティが協和感に関する諸問題の解明に貢献することを期待したい．

文 献

Andersen, H. T., & Jensen, K. (2004). Importance and Representation of Phase in the Sinusoidal Model. *Journal of the Audio Engineering Society*, **52** (11), 1157–1169.

Ayotte, J., Peretz, I., & Hyde, K. (2002). Congenital amusia: A group study of adults afflicted with a music-specific disorder. *Brain*, **125** (2), 238–251.

Bidelman, M. G., & Krishnan, A. (2009). Neural correlates of consonance, dissonance, and the hierarchy of musical pitch in the human brainstem. *Journal of Neuroscience*, **29** (42), 13165–13171.

Bidelman, M. G., & Krishnan, A. (2011). Brainstem correlates of behavioral and compositional preferences of musical harmony. *NeuroReport*, **22**, 212–216.

Blood, J. A., Zatorre, J. R., Bermudez, P., & Evans, C. A. (1999). Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. *Nature Neuroscience*, **2** (4), 382–387.

Butler, W. J., & Daston, G. P. (1968). Musical consonance as musical preference; A closs-cultural study. *Journal of general psychology*, **79** (1), 129–142.

Cariani, A.P., & Delgutte, B. (1996). Neural correlates of the pitch of complex tones. I. Pitch and pitch salience. *Journal of Neurophysiology*, **76** (3), 1698–1716.

Cook, D. N. (2009). Harmony perception: Harmoniousness is more than the sum of interval consonance. *Music Percpetion*, **27** (1), 25–42.

Cook, D. N., & Fujisawa, X. T. (2006). The psychophysics of harmony perception: Harmony is a three-tone phenomenon. *Empirical Musicology Review*, **1** (2), 106–126.

Cook, D. N., Fujisawa, X. T., & Takami, K. (2006). Evaluation of the affective valence of normal speech using pitch substracture. *IEEE Trunsactions on Audio, Speech, and Language Prosessing*, **14** (1), 142–151.

Cousineaua, M., McDermott, H. J., & Peretza, I. (2012). The basis of musical consonance as revealed by congenital amusia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109** (48), 19858–19863.

DeWitt, A. L., & Crowder, G. R. (1987). Tonal fusion of consonant musical intervals:

The oomph in Stumpf. *Perception and Psychophysics*, **41** (1), 73–84.

Ebeling, M. (2008). Neuronal periodicity detection as a basis for the perception of consonance: A mathematical model of tonal fusion. *Journal of the Acoustical Society of America*, **124** (4), 2320–2329.

Fannin, A.H., & Braud, G.W. (1971). Preference for consonant over dissonant tones in the albino rat. *Perceptual and Motor Skills*, **32** (1), 191–193.

Fastl, H., & Zwicker, E. (2006). *Psychoacoustics: Facts and Models*. Third-edition, Berlin: Springer.

Fishman, I. Y., Reser, H. D., Arezzo, C. J., & Steinschneider, M. (2000). Complex tone processing in primary auditory cortex of the awake monkey. I. Neural ensemble correlates of roughness. *Journal of the Acoustical Society of America*, **108** (1), 235–246.

Fishman, I. Y., Volkov, O. I., Noh, D. M., Garell, C. P., Bakken, H., Arezzo, C. J., & Stein-Schneider, M. (2001). Consonance and Dissonance of Musical Chords: Neural Correlates in Auditory Cortex of Monkeys and Humans. *Journal of Neurophysiology*, **86**, 2761–2788.

福島 邦彦・斎藤 秀昭・大串 健吾 (2001). 『視聴覚情報処理』. 森北出版.

Giguere, C., & Woodland, C. P. (1994). A computational model of the auditory periphery for speech and hearing research. I. Ascending path. *Journal of the Acoustical Society of America*, **95** (1), 331–342.

Hauser, D. M., & McDermott, J. (2003). The evolution of the music faculty: A comparative perspective. *Nature Neuroscience*, **6** (7), 663–338.

Helmholtz, H. L. F. (1877). *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage fur die Theorie der Musik*. Fourth eddition, (Ellis, J. Alexander, 訳) Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn.

堀内 久美雄 (編) (1977). 『新音楽辞典　楽語』. 音楽之友社.

Hutchinson, W., & Knopoff, L. (1978). The acoustic component of Western consonance. *Interface*, **7** (1), 1–29.

Hutchinson, W., & Knopoff, L. (1979). The significance of the acoustic component of consonance in Western triads. *Journal of Musicological Research*, **3**, 5–22.

伊福部 昭 (2008). 『完本　管弦楽法』. 東京版, 音楽之友社.

岩宮 眞一郎・小坂 直敏・小澤 賢司・　田 正幸・藤沢 望・山内 勝也 (2010). 『音色の感性学: 音色・音質の評価と創造 (第 1 巻)』. 音響サイエンスシリーズ/日本音響学会 (編). コロナ社.

Izumi, A. (2000). Japanese monkeys perceive sensory consonance of chords. *Journal of the Acoustical Society of America*, **108** (6), 3073–3078.

JIS (2000). JIS Z 8106:2000 音響用語.

Johnson-Laird, N.P., Kang, E.O., & Leong, C.Y. (2012). On musical dissonance. *Music Perception*, **30** (1), 19–35.

Kameoka, A., & Kuriyagawa, M. (1969a). Consonance theory, part I: Consonance of dyads. *Journal of the Acoustical Society of America*, **45** (6), 1451–1459.

Kameoka, A., & Kuriyagawa, M. (1969b). Consonance theory, part II: Consonance of complex tones and its computation method. *Journal of the Acoustical Society of America*, **45** (6), 1460–1469.

Leman, M. (2000). Visualization and calculation of the roughness of acoustical musical signals using the synchronization index model (SIM). *Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-00)*.

ルイス・フロイス (1991). 『ヨーロッパ文化と日本文化』. 岡田 章雄 (訳). 東京: 岩波書店.

Masataka, N. (2006). Preference for consonance over dissonance by hearing newborns of deaf parents and of hearing parents. *Developmental Science*, **9** (1), 46–50.

松永 理恵・阿部 純一 (2009). 習得しやすい音階, 習得しにくい音階：音階スキーマの普遍的特性. 『電気通信情報通信学会技術報告』, **109** (345), 35–40.

McDermott, H. J., Lehr, J. A., & Oxenham, J. A. (2010). Individual differences reveal the basis of consonance. *Current Biology*, **20**, 1035–1041.

McDermott, J., & Hauser, M. (2004). Are consonant intervals music to their ears?: Spontaneous acoustic preferences in a nonhuman primate. *Cognition*, **94**, B11–B21.

緑川 晶 (2013). 『音楽の神経心理学』. 東京: 医学書院.

Minati, L., Rosazza, C., D'Incerti, L., Pietrocini,

E., Valentini, L., Scaioli, V., & Bruzzone, G. M. (2009). Functional MRI/Event-related potential study of sensory consonance and dissonance in musicians and nonmusicians. *NeuroReport*, **20** (1), 87–92.

Moore, B. C. J., & Glasberg, R. B. (1983). Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns. *Journal of the Acoustical Society of America*, **74** (3), 750–753.

小畑 郁男 (2001).「楽器の音色を視野に入れた音高構成理論の研究: 感覚的協和理論の音楽への応用」, 九州芸術工科大学博士論文.

小方 厚 (2007).『音律と音階の科学: ドレミ…はどのようにして生まれたか』. 講談社.

大山 正・今井 省吾・和気 典二・菊地 正 (1994).『新編感覚・知覚心理学ハンドブック』. 誠信書房.

Passynkova, N., Neubauer, H., & Scheich, H. (2007). Spatial organization of EEG coherence during listening to consonant and dissonant chords. *Neuroscience Letters*, **412**, 6–11.

Peretz, I., Blood, J. A., Penhune, V., & Zatorre, R. (2001). Cortical deafness to dissonance. *Brain*, **124**, 928–940.

Plomp, R., & Levelt, J. M. W. (1965). Tonal consonance and critical bandwidth. *Journal of the Acoustical Society of America*, **38**, 548–560.

Plomp, R., & Steeneken, H. J. M. (1969). Effect of phase on the timbre of complex tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, **46** (2B), 409–421.

Pressnitzer, D., & McAdams, S. (1999). Two phase effects in roughness perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, **105** (5), 2773–2782.

Pressnitzer, D., Patterson, D. R., & Krumbholz, K. (2001). The lower limit of melodic pitch. *Journal of the Acoustical Society of America*, **109** (5), 2074–2084.

Regnault, P., Bigand, E., & Besson, M. (2001). Different brain mechanisms mediate sensitivity to sensory consonance and harmonic context: Evidence from auditory event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **13** (2), 241–255.

Roberts, A. L. (1986). Consonance judgements of musical chords by musicians and untrained listeners. *Acoustica*, **62**, 163–181.

Rogers, E.S., & Levitin, J.D. (2007). Memory for musical intervals: Cognitive differences for consonance and dissonance. *Canadian Acoustics*, **35** (3), 56–57.

Schellenberg, G. E., & Trainor, J. L. (1996). Sensory consonance and the perceptual similarity of complex-tone harmonic intervals: Tests of adult and infant listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, **100** (5), 3321–3328.

Sethares, A. W. (1993). Local consonance and the relationship between timbre and scale. *Journal of the Acoustical Society of America*, **94** (3), 1218–1228.

Sethares, A. W. (2005). *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*. Second eddition, London: Springer-Verlag.

Stevens, S. S. (1957). On the psychological law. *Psychological Review*, **64**, 153–181.

Stumpf, C. (1897). Neueres über Tonverschmelzung. *Zeitschrift für Psychologie*, **15**, 280–354.

Sugimoto, T., Kobayashi, H., Nobuyoshi, N., Kiriyama, Y., Takeshita, H., Nakamura, T., & Hashiya, K. (2010). Preference for consonant music over dissonant music by an infant chimpanzee. *Primates*, **51**, 7–12.

谷口 高士 (2000).『音は心の中で音楽になる: 音楽心理学への招待』. 京都: 北大路書房.

Tenney, J. (1988). *A History of 'Consonance' and 'Dissonance'*. N.Y.: Excelsior Music Publishing.

Terhardt, E. (1984). The consept of musical consonance: A link between music and psychoacoustics. *Music perception*, **1** (3), 276–295.

Tillmann, B., Bigand, E., Escoffier, N., & Lalitte, P. (2006). The influence of musical relatedness on timbre discrimination. *European Journal of Cognitive Psychology*, **18** (3), 343–358.

Tind, E., & Jensen, K. (2004). Phase models to control roughness in additive synthesis. *International Computer Music Conference Proceedings*.

Trainor, J. L., Tsang, D. C., & Cheung, W. V. (2002). Preference for sensory consonance in 2-and 4-month-old infants. *Music Perception*, **20** (2), 187–194.

Tramo, M. J. P., Cariani, A., Delgutte, B., & Braida, D. L. (2001). Neurobiological foun-

dations for the theory of harmony in Western tonal music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **930**, 92–116.

内川 惠二 (編) (2008). 『聴覚・触覚・前庭感覚』. 朝倉書店.

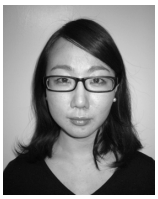
Watanabe, S., Uozumi, M., & Tanaka, N. (2005). Discrimination of consonance and dissonance in Java sparrows. *Behavioural Processes*, **70**, 203–208.

山本 由紀子・仁科 エミ・大西 仁 (2013). 楽音を含む協和感と不協和感について. 『電子情報通信学会技術研究報告』, **113** (299), 7–12.

Zentner, M. R., & Kagan, J. (1998). Infants' perception of consonance and dissonance in music. *Infant Behavior & Development*, **21** (3), 483–492.

Zwiker, E., Flottorp, G., & Stevens, S. S. (1957). Critical bandwidth in loudness summation. *Journal of the Acoustical Society of America*, **29**, 548–557.

(Received 20 Aug. 2014)
(Accepted 5 Feb. 2015)



山本　由紀子

2007 年信州大学大学院教育学研究科修了（教育学）. 現在，総合研究大学院大学文化科在学中．人間の聴覚的協和感の研究に従事．音楽における協和感や，音色の効果，ハーモニーなどが人間の心理に及ぼす影響についても興味を持つ．また，教育における音楽科の存在価値についても模索している．音楽知覚認知学会，日本音楽教育学会，日本音楽表現学会会員.

仁科　エミ

1991 年東京大学工学系大学院都市工学専攻博士課程修了，工学博士．日本学術振興会特別研究員，東京大学助手，放送教育開発センター助教授等を経て，現在，放送大学教養学部教授，総合研究大学院大学文化科学研究科教授．可聴域上限をこえる高周波の生理的・心理的・行動的効果（ハイパーソニック・エフェクト）や，高精細映像などメディア情報環境と人間の脳との適合性に関する研究に従事．電子情報通信学会，バーチャルリアリティ学会，音響学会会員.

大西　仁 (正会員)

1995 年東京工業大学総合理工学研究科博士課程修了．博士（学術）. 放送教育開発センター助手，メディア教育開発センター助教授等を経て，現在，放送大学教養学部准教授，総合研究大学院大学文化科学研究科准教授．最近の主な関心は，力触覚，感覚間相互作用およびそれらの情報通信工学への応用．電子情報通信学会，バーチャルリアリティ学会，The Cognitive Science Society 会員.