

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：24301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24243070

研究課題名(和文) 加齢に伴う絶対音感シフトに関する心理物理学の実験検討と計算モデルの構築

研究課題名(英文) Effects of aging on absolute pitch perception: Psychophysical experiments and computational models

研究代表者

津崎 実 (Tsuzaki, Minoru)

京都市立芸術大学・音楽学部・教授

研究者番号：60155356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は加齢による「聴力」の変化について知覚・生理現象観察と計算モデルを構築を目的とした。従来ほとんど関心を集めていなかった加齢性ピッチ・シフト現象について、十分な数の幅広い年齢層の聴取者を用いて、その現象が確実に生じることを突きとめ、さらに同じ聴取者に対する聴力検査、耳音響放射検査、脳波の周波数追従反応との相関分析を実施した。並行実施した非線形圧縮特性、聴神経の位相固定性などへの加齢による変容の基礎検討を通して、ピッチ・シフトはこれらの要因の変容によっては説明困難であること示し、新規の聴覚モデルの提案に至った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the current study was phenomenal, psychophysical and physiological observations for effects of aging on hearing. The focus of the research was the age-induced pitch shift, which had not been investigated systematically. Experimental data have been collected sufficiently large number of listeners whose age ranged from 20s to 50s. The correlation analyses between the pitch shifts, the hearing level, the level of otoacoustic emissions, and the frequency following responses of EEGs were performed. With several basic experiments on the reduction of the compressive characteristics of the peripheral auditory mechanism, and on the deterioration of the phase locking of the neural activities, it was concluded that the pitch shift was difficult to be explained by these well-known factors, and a new computational model for pitch coding was proposed.

研究分野：知覚心理学

キーワード：聴覚 ピッチ 聴覚計算モデル 加齢 絶対音感 時間微細構造情報 トノトピー 非線形応答

1. 研究開始当初の背景

音のピッチに関する研究は聴覚モデルの中でも中核をなす課題であった。それはピッチが音の特徴の中でも重要なものの代表であり、またピッチの違いに対する知覚的感度が非常に高いからでもある。実際にピッチという心理量に対応した音響信号の物理量は周期（または基本周波数）である。人間が音楽的ピッチを感じる範囲の周期は約0.25msから35msと非常に短い時間間隔のものとなる。これをいかに聴覚系が符号化するかについては現在のところ2つの方法があり得ると考えられている。ひとつは聴覚末梢系の基底膜の共振特性の違いによる場所的（トノトピー的）な符号化であり、もうひとつは基底膜の振動を神経発火に変換する際に、発火がその振動の特定位相で生じることによる神経発火間隔の時間的な符号化である。

特に音楽的なピッチに関しては、後者の時間間隔符号化に基づくものであるというモデルが主流である。時間間隔としてある段階で表現されていることまでは分かっているものの、その先に特定の時間間隔が特定のピッチへマッピングされる機構については未解明のままである。

音楽的ピッチについては絶対音感保有者の存在が古くから知られている。彼等はひとつの音を聞いただけで、それが鍵盤上のどの鍵によるものかを正確に言い当てることができる。この能力は西洋では非常に稀な能力と言われている一方で、日本ではそれほど稀ではなく、また現在では幅広い年齢層に存在している。年齢を増すことによって絶対音感判断に狂いが生じ、若い頃に比べて高い音に聞こえる傾向が増すことを示す研究が数例存在していたが、絶対音感保有自体を特別視する傾向も相まって研究者の関心をあまり引いておらず、その現象の発生機序について探究するために十分な実験データも揃っていなかった。この現象について精緻な精神物理学の実験を通してアプローチすることを通して、これまで深く踏み込んでいなかった位相固定した神経発火間隔という物理的次元からピッチという知覚次元に変換する機構について洞察を深めるための基礎データの収集が可能となる。

2. 研究の目的

研究は大別して3つの柱から構成された。

(1)加齢による絶対音感シフトの現象観察。(2)加齢による聴覚の基礎的な能力の変化の精神物理学測定と生理学的測定。(3)ピッチ抽出を実現する聴覚計算モデルの構築。(1)では、代表的な楽器であるピアノ音による観察に加えて実験室的合成音を用いて、加齢によるシフトが確実に生じること確かめつつ、その手掛かりを絞り込むことを目的とした。(2)では、気導聴力検査、耳音響反射、聴覚フィルター幅、脳波の周波数追従反応、模擬難聴条件下での音

声聴取閾などをヒトを被験者とする実験で測定する。これらと加齢によるピッチシフトの程度との間の相関分析を通して、その背景となる加齢性の聴覚変容の追究を行う。さらに、動物を被験体とした電気生理実験を通して加齢の効果が聴神経の位相固定発火にどのような影響を与えるのかの基礎的なデータの取得を行う。(3)では、これらの実験結果を考慮して、計算機上で稼働するピッチ抽出モデルの実装を行い、実験結果を予測可能なモデルの提案につなげる。

3. 研究の方法

【(1)絶対音感シフトの現象観察】

20代から50代の範囲で絶対音感保有者を集め、絶対音感課題を実施する。各年代については少なくとも15名の実験参加者を集めることで実証研究としての統計的な信頼性を確保する。絶対音感課題では、現在の標準的なピアノ音の調律に従った音階上の音を各試行単独で提示し、その音名を答えることを要求した。88鍵のピアノで言えば、鍵盤上中央に位置する白鍵の音名はC4であり、その標準的な周波数は262 Hzとなる。これはA4を440 Hzとし、12音平均律に従ったとした場合の計算値であり、実際のピアノの調律では完全にそれに従っているわけではないが、今回の実験手法上その微妙な逸脱は誤差範囲であり、また実験参加者からもその点に対する違和感の訴えはなかった。音階上ではオクターブ関係（周波数比が1:2となる）にある2音については同じクロマを有する。音名のうちの前半のアルファベット（先の例で言えばA）はそのクロマ名に相当し、後の数値は属するレジスタを表す。つまりC5はC4の1オクターブ上であることになる。実験課題では後半のレジスタ番号を答えることは要求しなかった。絶対音感保有者もこのオクターブ間の混乱を起こすことが知られており、また音楽に日常的に接する場面でレジスタを判断することはそれほど重要視されないためである。

最初の実験では実存するピアノ音（88音）からデジタル・サンプリングされた音響信号をヘッドフォンを介して実験参加者に提示した。これは厳密な意味で言うと実験参加者が日常的に耳にしていたはずの実際のピアノ音とは室内残響の影響などの点で異なったものであるが、そのような音響的変化がピッチ判断の基本となる音響信号の周期性を変えることにはならない。絶対音感判断であるためには、直前に提示された音との相対関係を用いた判断とならないように留意する必要がある。よって、音の提示順は実験参加者毎にランダムとなるようにした。

実際のピアノ音に追加して、同一の実験参加者群に対して実験室的な試験信号を用いた絶対音判断課題を課した。この場合の信号の種類は、(a)純音、(b)基本周波数欠

落音, (c)非調波振幅変調音, (d)反復リプル雑音とした。日常的な観察として, ピッチは音の基本周波数で決定される。ピッチを明確に持つ楽器音の特徴は周期性をもつことであるが, この周期性を持つ音をフーリエ分析すると振幅スペクトルは離散的なものとなる。つまり, 基本周波数成分とその自然数倍の周波数の成分だけから構成される。このことを調波構造を持つと言う。この一つ一つの周波数成分に対応した複数のピッチを同時に聴くことは滅多になく, 基本周波数に対応したひとつのピッチ(即ちひとつの音)を通常我々は聞く。ここからの単純な推定として基本周波数成分のところにある音響的なパワーがピッチ知覚の源となるという仮説を立てることができる。基本周波数欠落音はこの仮説に挑むための試験刺激であり, 基本周波数成分のパワーが実質的に存在しない信号を指す。先行研究によれば, この場合に聞こえるピッチは欠落しているはずの基本周波数に対応する。但し, 絶対音感保有者という特殊な集団においてもそうであるかどうかについては, 実際に検証された例がなく, 今回の実験条件に追加した。

さらに, 同じ基本周波数欠落音であってもそれを構成する成分の高調波の次数によって聴覚的な処理のされ方が異なる可能性があることも分かっている。これは聴覚末梢系である蝸牛基底膜の周波数分解特性に端を発する違いである。基底膜はその物理的な特性が場所によって異なり, 外部から到来した音響的振動に対して各場所はバンドパスフィルターとして機能する。その場合のバンド幅はその中心周波数にほぼ比例的な関係となることが分かっている。つまり, 周波数の絶対値で表すと, 中心周波数が上昇するほどバンド幅は広がる。これに対して, 調波構造を持つ音響信号の成分は周波数軸上等間隔に並び, よって低次の成分間は基底膜上分離され, 高次成分は分離されにくい。このことを踏まえて, 基本周波数欠落音は, 5次から8次に成分をもつものと, 15次から18次に成分を持つものの2種類を用意した。

蝸牛での周波数分解のことを一旦考慮から外すと, 基本周波数欠落音の各成分は大気という単独の媒体に振動を起し, それぞれの成分の加算和となった瞬時圧力の変化パターンを示す。その時間波形には基本周期に一致した振幅変調が観察される。これはそれぞれの成分間の周波数の差の逆数に一致するという法則性がここに存在する。ピッチ研究のごく初期の段階から, この振幅変調の周期がピッチ知覚の手掛かりとなっている可能性について研究がされてきた。もしもこの仮説が正しいならば, 調波関係を持たずに等価な振幅変調周期を持つ音響信号は基本周波数欠落音と等価なピッチをもたらすはずである。先行研究はそうなら

ないことを示してきたが, 一方でこのような調波関係から逸脱した刺激に対しても明瞭度は低下するもののピッチ知覚が成立することも示してきており, さらに中心周波数の変化によって知覚されたピッチも系統的に変化することも示してきている。よって, このような音響刺激についてもテスト刺激に加えることとした。

【(2)加齢による聴覚の基礎的な能力の変化の精神物理学的測定と生理学的測定】

この中には2つの異なる手法がある。

《A. ヒトを用いた非侵襲的測定》

ヒトの知覚内容をできる限り客観的に捉えようとする手法のひとつである精神物理学測定による閾値推定と, 脳波に代表されるヒト自身から由来する信号を観測し, その入力刺激に対して反応を見る手法を用いる。どちらの手法とも, ヒトという情報処理装置をブラックボックスとして位置づけ, 入出力の関係を見ることで内部処理過程に対する情報を得ようとするものである。

今回は(1)に参加したすべての実験参加者に対して, 気導聴力検査(絶対閾の推定), 耳音響放射, 脳波の周波数追従反応を実施した。また, 一部の参加者に対してはノッチノイズ・マスキング法による聴覚フィルターのバンド幅推定も実施した。加齢による難聴はまず聴力検査による聴力損失レベルによって直裁に観察できる。正常聴力を持つものは, 基底膜にある外有毛細胞が入力された音に対応して適切に変形することで実効的に増幅をするに等しい効果が機能している。この増幅効果は入力レベルの上昇に伴い減少していくので結果的に入出力関係には非線形圧縮型となり, 広いダイナミックレンジでの応答を可能としている。加齢による影響の特徴的なタイプはこの外有毛細胞の能動性の低下であり, 結果的に低レベルの入力への応答ができなくなりダイナミックレンジが狭まる。それは基底膜の特性が非線形から線形へ転じることにつながる。非線形応答をする場合, 基底膜は入力した信号に比例しない応答を出し, これは聴覚系の伝播経路を逆流するかたちで外耳道内に音響信号を出力する。これが耳音響反射と呼ばれる成分で, 外耳道内に挿入したマイクロフォンで他覚的に計測可能である。この成分のレベルを観測することで聴覚末梢系の正常さが推定可能である。

さらにこの非線形応答は基底膜の各箇所での周波数応答特性を先鋭化させるという効果をもたらす。聴覚フィルターのバンド幅の推定は, この尖鋭度を推定する目的で計画された。

この非線形性の消失の効果については, その状態を模擬したフィルターを実装した模擬難聴シミュレーターを構成し, それを介して正常聴力を有する聴取者(但し, 絶対音感保有者とは限らない)に日本語音節連鎖の語音聴取閾値を測定する実験も実施

した。

以上の基底膜応答に対する加齢の効果に加えて、脳波の周波数追従反応 (Frequency Following Response; FFR) の計測もすべての絶対音感保有者に対して実施した。この計測の目的は周期信号に対する時間的符号化の要因について調べることが目的とする。時間的な符号化は特に音楽のピッチについては重要性が高いという考え方が近年は優勢であり、非侵襲的測定で時間的な符号化について調べられる方法のひとつがFFRの測定である。また、加齢効果の一因として考えられる、音響信号の暴露の一時的な影響についても、1時間のバイオリン演奏の前後での変化を観察することを実施した。

《B. 動物を使った電気生理実験》

いくつかの先行研究は加齢によって聴神経の位相固定発火が劣化する可能性を指摘しているものの、それを直接観察した例は少なく、確証が得られるには至っていなかった。そこで、モルモットとラットを用いた電気生理学的な実験により、麻酔下の動物に聴覚的な音響入力を与え、聴神経の発火の様相を微小電極法によって観察した。被験体動物としては、ヒトとほぼ同じ可聴周波数範囲を持ち、寿命も比較的長い研究期間中には十分に老化が進むと想定されるモルモットと、ヒトに比べて可聴周波数範囲は高い方にずれてしまうが、比較的短期間に老化が進むラットを使うこととした。モルモットに対しては125 Hzから4 kHzまでの正弦波刺激を用いた。ラットの場合は感度の良い周波数帯域が18–25 kHzで位相固定が生じるには高過ぎるため、搬送周波数2 kHzから19.8 kHzを変調周波数125 Hzから4 kHzの振幅変調刺激を用いることとした。それぞれのテスト群の齢は、結果的にモルモットは7–10週、1年、4年、ラットは7週、1–2.4年、3年であった。(これらの記録は開始すると施術から最低8時間を要し、施術による失血などの要因で個体から記録が取れない場合もあるため、ある程度のばらつきが生じている。)

【(3) ピッチ抽出を実現する聴覚計算モデルの構築】

計算モデルの構築には2つの方向性をとることとした。ひとつは蝸牛フィルターバンクに対する加齢効果の現実的な機能モデルの実装であり、もうひとつはピッチにマッピングを可能とする計算論的なモジュールの提案である。

前者については、蝸牛基底膜の非線形応答と、フィルターの非対称性を組み込んだ動的圧縮型ガンマ・チャープ・フィルター・バンク (dcGCF bank) の実装と、それを実際の聴力レベルにフィッティングをできる限り少ないパラメータで達成できるアルゴリズムの開発を目指した。

後者については、蝸牛フィルターのそれ

ぞれのユニットからの神経活動を模擬した出力と自律的な発振回路との共起検出を仮定することの妥当性についての検討を進めた。

4. 研究成果

【(1) 絶対音感シフトの現象観察】

ピアノ音を使った絶対音感判断課題の結果は図1に示すように年代が進むにつれて正答の割合が減少し、実際よりも半音か全音高いという判断の割合が上昇する傾向があることが明瞭に確認された。年代により絶対音感を身につけたときのピアノの調律が異なるという可能性が疑われるが半音ものズレがあるとは考えにくく、ここで見られる年代群間の差は加齢の効果と考えてい

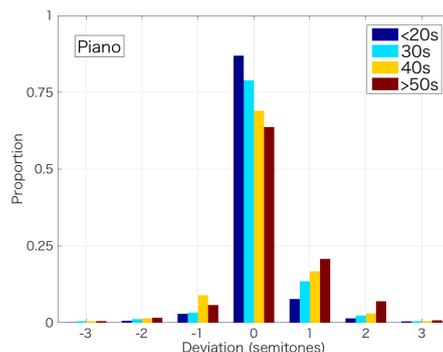


図1 ピアノ音を用いた絶対音感判断の結果。各バーは聴取者の年齢群を示す。

実験室的な刺激を用いた場合でも、成分の次数が低い箇所が存在する場合は基本的にピアノ音で得られた結果と同様の傾向が示された。対して次数が高い成分だけにある場合はピッチ判断が全体的に曖昧となり若年層であっても正確な判断ができないことが分かった。

【(2) 加齢による聴覚の基礎的な能力の変化の精神物理学的測定と生理学的測定】

《A. ヒトを用いた非侵襲的測定》

この絶対音判断の加齢によるシフトが加齢による一般的な聴力低下と関係するかを

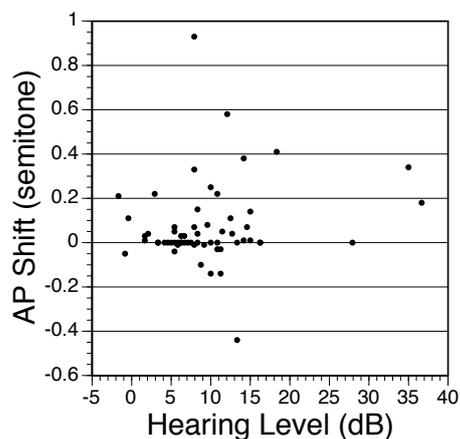


図2 聴力レベルとピアノ音を用いた絶対音感シフトの程度の散布図。

調べるために実施した聴力検査との相関関係が図2に示す散布図となる。図が示すように明確な相関関係を見出すことはできなかった。

この他、耳音響反射、基底膜フィルターのバンド幅など、これまで知られてきた加齢による基底膜物理特性の変化との相関関係も観察されなかった。

ついで考えられるのは時間的符号化の劣化であるが、その側面を反映すると考えられるFFRとの関係を示したのが図3である。この指標との明確な相関関係も見いだせなかった。

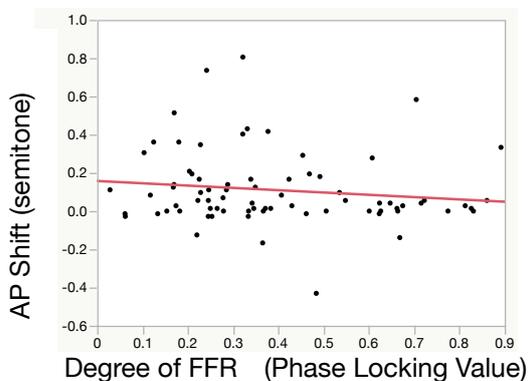


図3 FFRとピアノ音を用いた絶対音感シフトの程度の散布図。

FFRは従来型の聴力検査では捉えきれない「隠れた聴力障害」を捉える可能性のある指標として近年注目されてきており、実際に1時間程度のヴァイオリンの自主的な練習の後に一時的な劣化が生じることを別途20代のヴァイオリン演奏者群を用いて観察している。しかし、図3に示す結果は加齢によるピッチ・シフトはそれとはまた別の機序に基づくものであることを示す。

絶対音感保有者ではない聴取者に対して、80歳相当の聴力レベルを聴覚フィルターの圧縮がある条件とない条件を模擬難聴シミュレーターを用いて実施した結果では、圧縮特性を消した条件では大きな音の間に存在する小さな音の語音聴取閾はさらに上昇することを示し、加齢による聴力の劣化は単に全体的な音圧レベルの増幅では克服困難であるということを実際に近い刺激状況で再確認できたわけであるが、加齢による聴覚への効果にはそれとは独立した機序に基づくものがあることを上記の結果は示している。

《B. 動物を使った電気生理実験》

モルモットは可聴範囲がヒトに近く、純音刺激を用いた聴神経の位相固定発火の程度を測定可能という点で望ましいものであったが、微小電極を聴神経に挿入するために必要な手術に対する耐性が予想以上に弱かったため計測個体数を伸ばすことが困難であった。より手術に対する耐性の高いラットを用いて信号音の振幅変調波形に対する位相固定性を計測することに切り替えた結果、

加齢によって位相固定が劣化することが確認できた。

【(3) ピッチ抽出を実現する聴覚計算モデルの構築】

《A. 蝸牛フィルターバンクに対する加齢効果の現実的な機能モデル》 加齢による聴覚処理の変容は今回の実験結果が示すように、さらには先行研究のそれらからも、関わる要因が多く複雑な様相を呈しているが、外有毛細胞の能動性の低下に起因する非線形特性の減衰について、少数のパラメータで適切な精度を持つシミュレーション・モデルの実装に至った。難聴者の聞こえを完全には再現できているわけではないが、少なくともオージオグラムでその特性を持つ難聴者のbest performance (上限)を再現できていると考える。

《B. ピッチ・マッピングを可能とする計算論的モジュール》

上記のモデルの後段に従来型の時間微細構造処理モジュールを想定し、さらに時間構造抽出の精度を単純に劣化するだけでは、加齢によるピッチ・シフトを予測することは困難であるという結論に至った。従来型のモデルは、神経発火という物理的時間次元で観察される現象の物理的な時間間隔をいかに抽出するかという段階で停まっていた。ほとんどのピッチ現象は物理的な時間間隔、あるいはそれを神経活動という生理現象上の物理的時間間隔を捉えることで説明ができたからである。しかし加齢によりピッチが上昇すると言うことは物理次元で観察される時間間隔のレベルでは絶対に説明できず、現在まで知られている非線形性の低下、位相固定発火の劣化を加味したシミュレーションでも予測することは困難であった。そこでは、物理的な入力される時間間隔に対応して興奮のレベルを変える、時間間隔符号化ニューロンを想定する必要がある。このニューロンは自律発振する回路(ニューロン群によるループ回路で実現可能)と入力される神経発火間隔との共起検出を組み合わせることで実装可能であった。加齢するとニューロンのシナプス結合を支配する膜電位などのパラメータが変容する可能性は十分考えられ、それによって発振回路の周期が若い頃より長くなるという仮定をすれば、物理的には同じ周期を持つにもかかわらず、若いときに比べてピッチが上昇して感じられるという現象が定性的にも予測可能である。実際には計算機上に実装した計算モデルの結果により、この予測は確認された。

今回の研究成果は絶対音感保有者という特別な能力を持つ限られた対象からの現象観察である。報告者は、この加齢によるピッチ・シフトは絶対音感保有者しか今のところ気づけていないものの、その背後にあるピッチ抽出機構の加齢による変容は、ヒト全般に生じているものと考えられる。この

現象とさらにこれに基づいて提案した計算モデルはこれまで注目されていなかった加齢による聴覚処理の変容の一側面に光を当てて潜在力を持っていると自負している。

この加齢効果が何らかの意味での障害をもたらしているかどうかは、今後さらに検討を重ねていく必要がある。提案したモデルでは当面ピッチ抽出モジュールとしての神経回路モデルの構築を目指したが、これは物理世界に存在する周期性の検出機構にはかならない。近年注目されている聴覚情報処理モデルの多くでは変調フィルターバンクが活用されている。これは基底膜の各場所から到来する神経活動の時間変動の周期性に対してバンドパスフィルター群を準備するものである。基底膜フィルターの場合は膜という物理構造体がバンドパス・フィルターを構成するという実体が伴っているが、変調フィルターバンクの場合の実体についてはまだ確認されていない。今回提案した、周期性の符号化モジュールはこの変調フィルターバンクの候補としても考えられ、今後の聴覚研究の進展にとってもひとつの重要な足がかりとなるであろう。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計12件)

1. Otsuka, S., Tsuzaki, M., Sonoda, J., Tanaka, S., & Furukawa, S. (2016). A Role of Medial Olivocochlear Reflex as a Protection Mechanism from Noise-Induced Hearing Loss Revealed in Short-Practicing Violinists. *PLoS ONE*, 11(1), e0146751. doi:10.1371/journal.pone.0146751
2. Matsui, T., Irino, T., Nagae, M., Kawahara, H., & Patterson, R. D. (2016). The effect of peripheral compression on syllable perception measured with a hearing impairment simulator. *Physiology, Psychoacoustics and Cognition in Normal and Impaired Hearing, Advances in Experimental Medicine and Biology*, 894, 307-314. doi:10.1007/978-3-319-25474-6_32
3. Tsuzaki, M., Takeshima, C., & Matsui, T. (2013). Pitch Perception for Sequences of Impulse Responses Whose Scaling Alternates at Every Cycle. *Basic Aspects of Hearing: Physiology and Perception*, 147-156. doi:10.1007/978-1-4614-1590-9_17
4. Irino, T., Fukawatase, T., Sakaguchi, Nishimura, R., Kawahara, H., & Patterson, R. D. (2013). Accurate Estimation of Compression in Simultaneous Masking Enables the Simulation of Hearing Impairment for Normal-Hearing Listeners. *Basic Aspects of Hearing: Physiology and Perception*, 73-80. doi:10.1007/978-1-4614-1590-9_9

[学会発表] (計70件)

1. Tsuzaki, M., & Maki, K. (2016). A new pitch extraction model: Coincidence detectors with an array of self-oscillatory units. Paper presented at the The 3rd Annual Meeting of the Society for Bioacoustics, Irako, Japan.

[図書] (計3件)

1. 大串健吾. (2016). 206頁 音のピッチ知覚. 東京, Japan: コロナ社.
2. 宮崎謙一. (2014). 246頁 絶対音感神話: 科学で解き明かすほんとうの姿. 京都, Japan: 化学同人.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津崎 実 (TSUZAKI, Minoru)
京都市立芸術大学・音楽学部・教授
研究者番号: 60155356

(2) 研究分担者

入野 俊夫 (IRINO, Toshio)
和歌山大学・システム工学部・教授
研究者番号: 20346331

(3) 研究分担者

堀川 順生 (HORIKAWA, Junsei)
豊橋技術科学大学・工学研究科・教授
研究者番号: 50114781

(4) 研究分担者

宮崎 謙一 (MIYAZAKI, Ken'ichi)
新潟大学・人文社会・教育科学系・フェロー
研究者番号: 90133579

(5) 研究分担者

牧 勝弘 (MAKI, Katuhiro)
愛知淑徳大学・人間情報学部・准教授
研究者番号: 50447033

(6) 研究分担者

竹島 千尋 (TAKESHIMA, Chihiro)
桜美林大学・総合文化学群・助手
研究者番号: 80583450

(7) 連携研究者

大串 健吾 (OHGUSHI, Kengo)
京都市立芸術大学・音楽学部・名誉教授
研究者番号: 00203745

(8) 連携研究者

加藤 宏明 (KATO, Hiroaki)
独立行政法人情報通信研究機構・研究員
研究者番号: 20374093

(9) 連携研究者

倉片 憲治 (KENJI, Kurakata)
早稲田大学・人間科学学術院・教授
研究者番号: 90356931

(10) 連携研究者

松井 淑恵 (MATSUI, Toshie)
和歌山大学・システム工学部・助教
研究者番号: 10510034