

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03125

研究課題名（和文）ピッチ不安定性強調現象を用いたピッチ知覚メカニズムの解明

研究課題名（英文）Investigation of pitch perception mechanism using pitch instability enhancement phenomenon

研究代表者

饗庭 絵里子 (Aiba, Eriko)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：40569761

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）：人間のピッチ知覚には、聴覚末梢系で抽出された音の周期情報を手掛かりとするだけでは説明できない様々な現象がある。本研究においては、申請者が発見したピッチ不安定性強調現象を足掛かりとして、人間が音程レベルの予測を活用して不安定な周期情報を補償し、ピッチを知覚している可能性を明らかにすることを目的として、聴取実験およびFFR（Frequency Following Response）計測実験の2つを実施した。その結果、聴取実験においても、FFR計測実験においても、本現象が聴覚末梢系ではなく、より高次の処理において生じる現象であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の聴覚系にとって、高次の認知的処理は欠かせない存在である。しかしながら、人間のピッチ知覚メカニズムの解明を目指す研究は、聴覚末梢系で抽出された周期情報をもとにほとんどを説明しようとしており、より高次の情報処理過程については考慮していないことが多い。既存の聴覚モデルでは考慮されていなかった高次レベルでの処理を反映したピッチ知覚モデルの構築が可能となり、末梢レベルから知覚に至るまでの人間のピッチ知覚メカニズム解明に新展開をもたらすことができる。これによって聴覚末梢系において抽出された周期情報だけでは説明できなかった様々な知覚現象を新たに検証できるようになる可能性も広がる。

研究成果の概要（英文）：Various phenomena in human pitch perception cannot be explained only using the periodic information of sounds extracted by the auditory peripheral system. In this research, we use the pitch instability enhancement phenomenon as a clue to clarify the possibility that humans utilize an interval unit prediction to compensate for unstable periodic information and perceive pitch. Listening experiments and FFR (Frequency Following Response) measurement experiments were performed. As a result, both experiments suggested that this phenomenon occurs not in the peripheral auditory system but in the higher-order level of auditory processing.

研究分野：聴覚心理学

キーワード：ピッチ知覚 ピッチ不安定性強調現象 絶対音感 相対音感 音程

1. 研究開始当初の背景

人間の聴覚系は、カクテルパーティ効果のように多くの音が重なっている中から必要な音を再構築したり、連続聴効果のように音声がつづつと途切れていたとしても、途切れている区間にノイズが挿入されれば、連続的に聞こえるように補償したりすることができる。つまり、人間の聴覚系にとって、高次の認知的処理は欠かせない存在である。しかしながら、人間のピッチ知覚メカニズムの解明を目指す研究は、聴覚末梢系で抽出された周期情報をもとにほとんどを説明しようとしており、より高次の情報処理過程については考慮していないことが多い。一方、申請者が新たに発見した知覚現象であるピッチ不安定性強調現象は、高次の情報処理過程による影響を考慮せずに説明することが不可能である。

従って、ピッチ不安定性強調現象が生じるメカニズムを明らかにすることは、末梢系だけではなく、より高次においてどのような情報処理が行われているかを明らかにすることができるようになると考えられる。これにより、既存の聴覚モデルでは考慮されていなかった高次レベルでの処理を反映したピッチ知覚モデルの構築が可能となり、末梢レベルから知覚に至るまでの人間のピッチ知覚メカニズム解明に新展開をもたらすことができる可能性がある。また、聴覚末梢系において抽出された周期情報だけでは説明できなかった様々な知覚現象を新たに検証できるようになる可能性も広がる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者が新たに発見した知覚現象であるピッチ不安定性強調現象を足掛かりとして、人間が音程レベルの予測を活用して不安定な周期情報をもつ音のピッチを知覚している可能性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

ピッチ不安定性強調現象においては、定常的なピッチ感をもつ刺激音を複数回聴取した後、西洋音階より若干狭い周波数差を持つ音程 (図1左側、非西洋音階的音程) だけ離れた音に移行した際に、刺激音の開始部分でピッチが揺らいで不安定になるような知覚を得る[1]。これを複数回聴取するうちに不安定感はなくなる。先行研究においては、組み合わせる音は対数軸上で半音程を3分の1した音程であると最も不安定に知覚された。また、本知覚現象は純音や調波複合音よりも、開始部分で打弦、撥弦、擦弦によるノイズが生じる楽器音など、周期情報が不安定な部分をもつ音で生じやすいことから、予測が関係している可能性が高いと言える。

本研究においては、この現象を活用し、聴取実験①純音を用いた聴取実験、②ランダム・メロディ音列を用いた聴取実験、③音程予測に着目した聴取実験、および Frequency Following Response 計測実験を行った。

<聴取実験①純音を用いた聴取実験>

実験刺激は図2のとおりである。計3音高×7音程の21種類の音刺激を実験参加者ごとに5回ずつランダムに呈示した。実験参加者はクラウドソーシングサービスで募集した成人健聴者50人(平均年齢41.5±9.2歳)であった。実験はWeb上で実施し、イヤホンあるいはヘッドフォンを装着して聴取を行うよう指示した。実験参加者は、呈示刺激の4番目の音の高さに対し、「全く不安定でない」から「非常に不安定である」までの6段階で評価を行った。

実験結果を先行音から音が高くなる上行条件と音が低くなる下行条件に分け、それぞれに Kruskal-Wallis 検定を実施した結果、推移音程の主効果が有意であった(下行条件: $\chi^2(2)=11.5$, $pp=.0032$, 上行条件: $\chi^2(2)=9.63$, $pp=.0081$)。また、西洋音階的音程との差異を明らかにするために、+100 Cent および -100 Cent を対照群として、Steel 検定を行ったところ、+33 Cent は+100 Cent

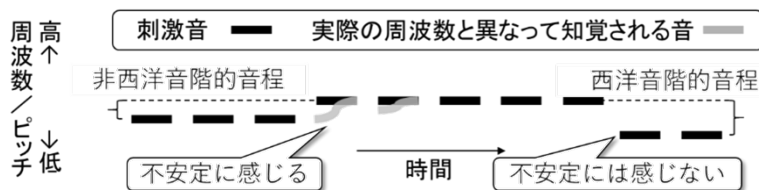


図1 ピッチ不安定性強調現象

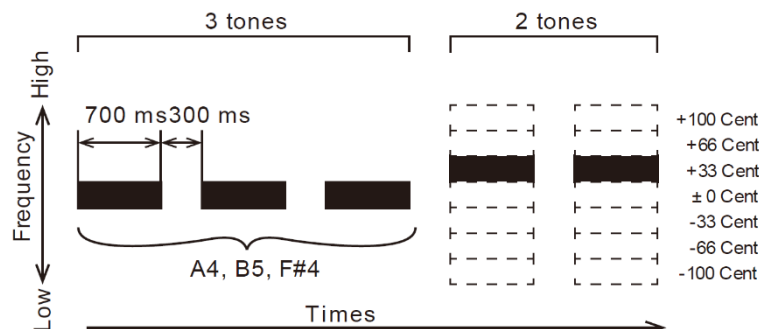


図2 実験刺激

に対して評点が有意に高かった。従って、実際に非西洋音階的音程の推移で PIEI が生じていることが明らかになった。

<聴取実験②ランダム・メロディ音列を用いた聴取実験>

より直接的に PIEI に対する予測や順応といった高次の聴覚情報処理過程の寄与を明らかとするため、ランダムに上下する音列と既知のメロディ（チューリップ）の一部を改変した音列を用いることとした。前者は音列に対する強い予測を聴取者が持つことが期待され、後者は普段慣れ親しんでいる西洋 12 音系列を逸脱している点で PIEI が生じる可能性が高い。

実験参加者は、直前にヘッドフォンスクリーニングを行い、通過した成人健康者 50 名（40.4±10.1 歳）であった。

結果について、実験参加者ごとの回答から割合を求め、音高とともに色分けして表 1 に示した。赤いほど不安定であると回答された割合が高い音となる。ランダム音列では先行音との音高差が 100 Cent 未満の音で不安定に感じられる傾向が見られた。一方、メロディ音列では本来の旋律を逸脱した音では先行音と半音の整数倍差であっても不安定と回答されている割合が高い。

Tulip1 と Tulip2 の 3 音目を不安定と回答したのはそれぞれ 47.8%と 78.2%であり、100 Cent 差である Tulip2 のほうが高い。このことから強い予測が存在する場合にはピッチ不安定性強調現象が生じている可能性と、ピッチ不安定性強調現象ではなく単純に大きな逸脱に対し、そのような回答を行った可能性がある。

<聴取実験③音程予測に着目した聴取実験>

聴取実験①および②から、西洋音階的音程ではない推移において、ピッチ不安定性強調現象が生じることが示唆された。従って、西洋音階的音程に対する暗黙的知識に基づく予測が存在し、それに対する逸脱がピッチ不安定性強調現象を生じさせている可能性があることが予想される。音程予測からの逸脱によってピッチ不安定性強調現象が生じているのであれば、半音だけでなく、全音の推移においても、ピッチ不安定性強調現象が生じにくく、その近傍の推移音程ではピッチ不安定性強調現象が生じるはずである。このことを検証するため、100 Cent をこえる推移音程も条件に含んだ聴取実験を行うこととした。

実験刺激の先行音は -50 Cent から 50 Cent の範囲で 25 Cent 刻みで 5 水準、条件を設定した。先行音を 2 音呈示した後に、先行音から -200 Cent から 200 Cent の範囲で 25 Cent 刻みで差作成した 17 水準で音程推移する。5 × 17 = 85 通りを 1 セッションとし、1 人あたり 4 セッション実施した。

実験結果について、先行音に対して後続音が高くなる上行条件および先行音に対して後続音が低くなる下行条件、それぞれ 8 つの推移音程で評点の平均値に差があるかどうか Kruskal-Wallis 検定を行った（図 4）。上行条件において、音高変化を感じられたかどうかの評点に対する推移音程の主効果は有意であった（ $\chi^2(7)=31.0$, $pp=.0001$ ）。特に西洋音階的音程との差異を明らかにするために、+100 Cent および+200 Cent を対照群として、Steel 検定を行った。その結果、上行条件において+75 Cent のスコアは+100 Cent に対して有意に高いことが示された（ $pp=.0038$, $rr=.008$ ）。一方、+200 Cent にはどの水準とも有意差が見られなかった。これらの結果はこれまでのピッチ不安定性強調現象に関する実験の結果に反しないものの、+200 Cent においてピッチ不安定性強調現象が生じにくくなるという予想に反するものであった。同様に下行条件においても、音高変化を感じられたかどうかの評点に対する推移音程の主効果が有意

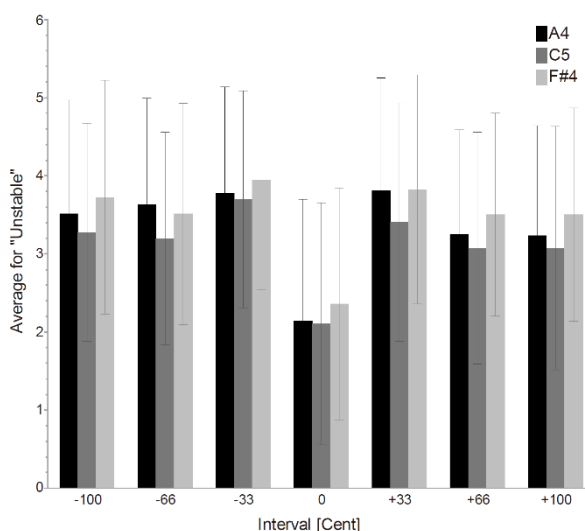


図 3 音の高さの不安定さの評点

表 1 各音を不安定であると回答した割合

	Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Note 5	Note 6	Note 7	Note 8	Note 9	Note 10
Random1	0 (0.02)	166 (0.17)	200 (0.35)	100 (0.37)	200 (0.15)	33 (0.35)	233 (0.26)	166 (0.35)	200 (0.20)	33 (0.28)
Random2	133 (0.07)	100 (0.24)	0 (0.28)	233 (0.20)	266 (0.37)	66 (0.24)	233 (0.11)	266 (0.30)	33 (0.24)	200 (0.22)
Random3	166 (0.11)	300 (0.46)	133 (0.28)	66 (0.28)	266 (0.33)	266 (0.24)	0 (0.26)	200 (0.15)	100 (0.22)	233 (0.39)
Random4	100 (0.11)	200 (0.26)	0 (0.30)	33 (0.41)	233 (0.24)	266 (0.35)	300 (0.33)	200 (0.20)	100 (0.33)	200 (0.17)

	Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Note 5	Note 6	Note 7	Note 8	Note 9	Note 10
Tulip1	0 (0.00)	200 (0.11)	433 (0.48)	0 (0.07)	200 (0.04)	400 (0.26)	700 (0.57)	400 (0.13)	200 (0.11)	-33 (0.30)
Tulip2	0 (0.02)	200 (0.09)	500 (0.78)	0 (0.04)	200 (0.02)	400 (0.20)	700 (0.52)	400 (0.04)	200 (0.07)	-33 (0.28)
Tulip3	0 (0.07)	200 (0.11)	400 (0.35)	66 (0.48)	266 (0.22)	466 (0.41)	766 (0.59)	466 (0.11)	233 (0.22)	100 (0.43)
Tulip4	0 (0.00)	200 (0.09)	400 (0.33)	0 (0.07)	200 (0.02)	400 (0.24)	600 (0.70)	400 (0.17)	200 (0.11)	133 (0.52)
Tulip5	0 (0.02)	200 (0.13)	333 (0.50)	-66 (0.46)	134 (0.09)	334 (0.20)	634 (0.59)	334 (0.09)	134 (0.11)	0 (0.33)
Tulip6	0 (0.00)	200 (0.09)	400 (0.35)	0 (0.07)	200 (0.04)	400 (0.26)	700 (0.63)	400 (0.07)	200 (0.09)	0 (0.11)

であった
 ($\chi^2(7)=43.7$, $pp=.0001$). 推移音程 - 200 Cent のスコアが最も高く、これも全音に対する予測が存在するという予想に反する結果となった。また、下行条件のほうがピッチ不安定性強調現象は生じにくいことも明らかになった。

加えて、ピアノ経験の有無によって結果が大きく異なることも示唆された(図5, 6)。ピアノ経験ありの法では西洋音階的音程に対してのスコアが低くなっている。これは、日頃から離散的な音高に触れていることから、音程予測がより強いためであると考えられる結果となった。

<FFR 計測実験>
 FFR (Frequency Following Response) は周期性のある刺激音によって引き起こされる聴性脳幹反応の一種であり、聴覚抹消系の神経活動を反映した反応を取得することができる。その反応には聴取音の周期性が反映される。ピッチ不安定性強調現象が生じる音刺激とそうでない音刺激での FFR を比較することでピッチ不安定強調現象が聴覚末梢系で生じているものかどうか確認を行った。

実験刺激の基準音高は A4、変化音程は +33,+100 Cent の 2 種類を用いた。音列刺激の前者ではピッチ不安定強調現象が生じ、後者では生じにくい。加えて比較のために後続 2 音の単音および実験環境を評価するために A4 から 33 Cent 周波数上昇するチャープ信号の FFR を計測した。2 種類の音列刺激はランダム、単音刺激はそれぞれ連続して、1000 回呈示した。

実験参加者は成人健聴者 5 名(平均年齢 22.2 ± 0.84 歳)であった。事前と事後の聴取実験でピッチ不安定強調現象が生じることを確認した。

音列刺激と単音刺激によって得られた FFR の 33 Cent 条件およびスイープ音刺激を FFT (Fast Fourier Transformation) した結果を図 7 に示す。図中の実線が FFR のスペクルで、網掛け部分はその 95%信頼区間である。音列刺激と単音刺激の 33 Cent 条件における各周波数ビンのパワーに有意差はなかった。本実験により、ピッチ不安定強調現象が聴覚抹消系の処理過程においては生じているわけではないことが示された。

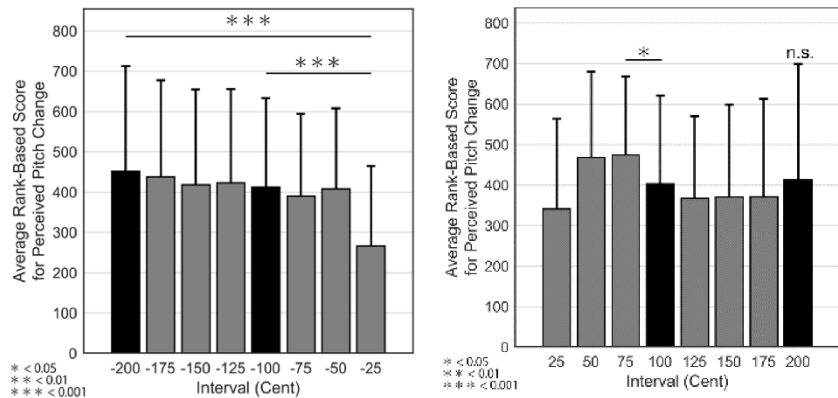


図 4 音高変化に対する評点の順位和の平均

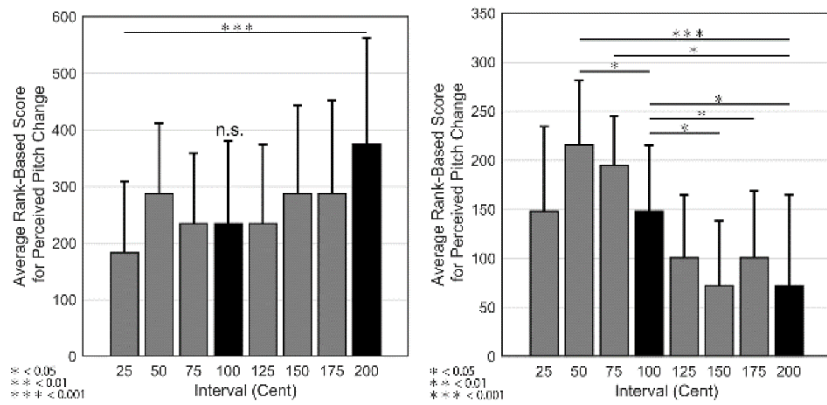


図 5 音高変化に対する評点の順位和の平均 (上行条件)

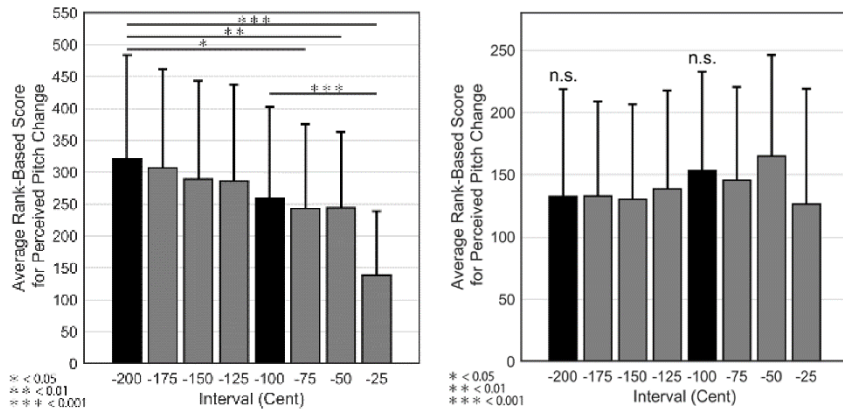


図 6 音高変化に対する評点の順位和の平均 (下行条件)

4. 研究成果

FFR 計測実験において、PIEI が聴覚抹消系で観測できなかったことからピッチ知覚への高次の聴覚情報処理の影響がある可能性が示唆された。

聴取実験では、直接的にピッチ知覚への予測などの高次の聴覚情報処理の影響を受けていることを明らかにすることはできなかったが、音楽経験の差という後天的な要因によるピッチ知覚の差異があることから高次の聴覚情報処理の影響が存在することが示唆された。

参考文献

[1] 川井大輔 and 饗庭絵里子, “ピッチ不安定性強調現象が音知覚に与える影響,” 学士, 電気通信大学, 2021.

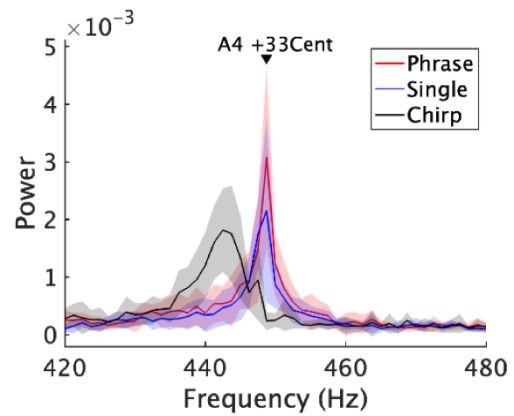


図7 FFR のスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 近森 正二郎, 響庭 絵里子
2. 発表標題 ピッチ不安定性強調現象におけるピッチ知覚メカニズム - 心理評価実験による検討
3. 学会等名 日本音響学会第149回(2023年春季)研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masajiro Chikamori, Eriko Aiba
2. 発表標題 Pitch Instability Enhancement Illusion and its Relation to the Pitch Perception Mechanism
3. 学会等名 The Association for Research in Otolaryngology 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近森 正二郎, 響庭 絵里子
2. 発表標題 ピッチ不安定性強調現象におけるピッチ知覚メカニズム - 純音刺激による検討 -
3. 学会等名 日本音響学会第148回(2022年秋季)研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近森正二郎, 響庭絵里子
2. 発表標題 ピッチ不安定性強調現象を用いたピッチ知覚メカニズム解明 - Frequency Following Responseによる検討 -
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田照久, 饗庭絵里子
2. 発表標題 ピッチ不安定性強調現象に係わる錯聴作品の制作
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田照久, 饗庭絵里子
2. 発表標題 音律の固執 よろめくピアノ
3. 学会等名 日本基礎心理学会 第13回 錯視・錯聴コンテスト 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masajiro Chikamori, Eriko Aiba
2. 発表標題 Pitch Instability Enhancement Illusion : representation in auditory peripheral system
3. 学会等名 The 27th SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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
---------	---------