

帯域雑音エッジ聴音程の非線形なふるまいについて

陳 施佳 李 珍咏 伊東 乾

On Non-Linear Behaviors of Band Noise Edge Listening Pitches

Shijia CHEN, Jinyoung LEE and Ken ITO

梗概

バンドパス・フィルタを通過した帯域雑音を聴取すると、ヒト聴覚はバンド端付近の周波数の正弦波と同様の音程を知覚する。1962 年、フォン・ベケシーによる発見以来「エッジ聴」として知られるこの現象は、従来ローパスあるいはハイパスフィルタで研究されてきた。私達はデジタル・ベースの狭域バンドノイズを系統的に用い、聴取される等価周波数（Fermi frequency）を定義、その測定法を確立するとともに、同じ境界周波数であってもエッジ聴のフェルミ周波数がバンド幅の関数として変化する事を確認した。

Abstract

Listening to band noises, human auditory system recognizes pitches near upper/lower boundary of the bandpass filter; equivalent pitches to the sine waves of frequencies at those boundaries. This phenomenon, known as 'edge listening' was discovered by Georg von Békésy on 1962. Since then, this phenomenon has been studied only with low-pass filters or high-pass filters. In this study we use various digital bandpass filter and produce band noise systematically, and define the recognized equivalent frequency as “Fermi frequency” and establish method of the measurement. Under the same filter boundary condition, different “Fermi frequencies” are observed according to the band width.

Key words: Band noise, edge listening, band width, pitch listening, Fermi frequency

=====

*) 東京大学大学院情報学環 作曲＝指揮・AI 生命倫理／情報動力学研究室

Division of Composition/Conducting, Information Statistic Dynamics and AI Life ethics,
Interfaculty Initiative in Informatics, The University of Tokyo

7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, 113-0032 Tokyo JAPAN

1. はじめに

「エッジ聴」は帯域雑音の聴取で端（エッジ）付近の音高のみが認識されるという特異的な非線形認知現象である。1963 年、蝸牛の微細構造と機能を解明してノーベル賞を受賞したハンガリーの聴覚生理学者 G. von Békésy はヒト聴覚のエッジ聴現象を初めて報告した。

現実には人間が耳にする音はすべて複数の周波数成分を有する帯域雑音である。オシレーターで人工的に生成した、自然界には存在しない正弦波の純音信号であっても、実在するスピーカーから音波が放射される段階で、不可避免的に一定の線幅が付随してしまう。

Fig.1 に示すように、人間が帯域雑音を聴取するとき、蝸牛など聴覚末梢系では帯域雑音に含まれるすべての周波数成分に反応するが、中枢神経系、即ち脳や私たちの主観的な意識は帯域雑音の上下両端付近の「エッジ音高」しか認識しない。

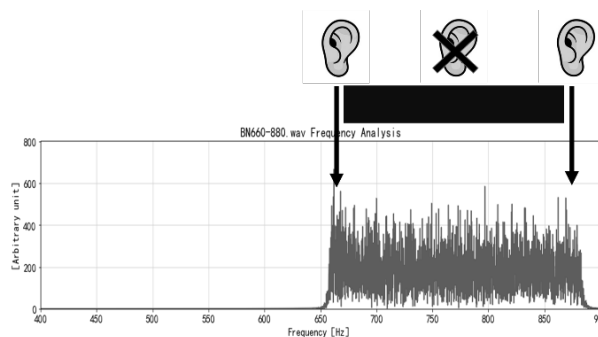


Fig. 1 帯域雑音のエッジ聴

エッジ聴聴取の実験に用いられる帯域雑音サンプルは従来、von Békésy 以来の慣習で **Fig.2-a** のような $(0, f_{edge}]$ あるいは $[f_{edge}, \infty)$ の开区間のエッジサンプルが使用されていた。我々はこれを改めデジタル・ベースの高いQ値を持つバンドパス・フィルタにより、**Fig.2-b** のような両端の周波数が制約された閉区間の帯域雑音サンプル $[f_{edge1}, f_{edge2}]$ を初めて用いた。[1]

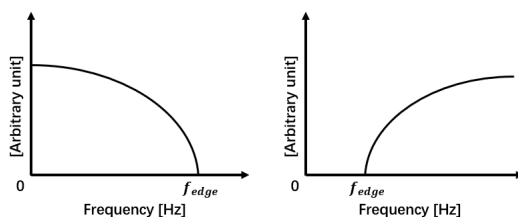


Fig. 2-a 开区間エッジサンプル

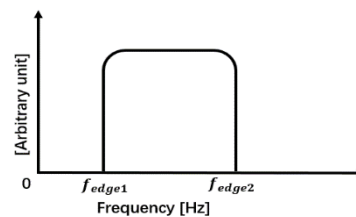


Fig. 2-b 閉区間エッジサンプル

我々はバンド幅を引数として聴き取られる周波数、即ち、聴覚的な等価正弦波周波数を、「フェルミ周波数」と名付けた。これは量子統計力学のフェルミ分布関数からのアナロジーによるもので、有限温度で熱励起された電子はなだらかなシグモイド関数状のスロープを描くことから、聴覚が実効的に認識する音程を統計的に扱うに当たって命名したものである。

Fig.3 に示すように、物理的には 440 Hz から 880 Hz までの間の周波数の響きがぎっしりつまった帯域雑音のフィルタバウンダリの下端は 440Hz 付近、上端は 880Hz 付近である。しかし、実際に聴き取られる音程つまり上フェルミ周波数、ならびに下フェルミ周波数は、バンドパス・フィルタ上下の端より、少しバンドの内側にずれている。

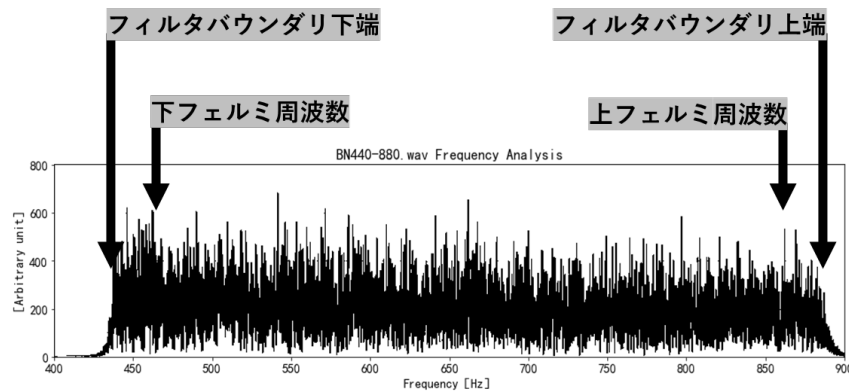


Fig. 3 フィルタバウンダリとフェルミ周波数

帯域雑音を聴取する際、人間が実際に聞き取るフェルミ周波数の分布する区間と、聴覚的に抑制されてしまう「禁止区間」の評価は、従来注目されてこなかった。

フェルミ周波数など聴取現象に対する人間の認知メカニズムを解明するため、本研究では「ソルフェージュ・サイコフィジックス」の測定方法確立を目指した。フェルミ周波数は帯域雑音のバンド幅により変化し、単純な「側抑制モデル」では説明不可能であることを以下で初めて観測した。

2. 実験

Fig.4 に示すようにヘッドホンを改造し、左右のチャンネルにエッジサンプルとファンクションジェネレータからの正弦波を提示する事で、音程を「聴音（ソルフェージュ）」している状態のサイコフィジックス測定が可能になる。

被験者は左右のチャンネルから提示された音高が等しくなるよう、ファンクション・ジェネレータを操作して正弦波の周波数を変化させる。音高が同一と認識される正弦波の周波数として知覚的な統計量としてのフェルミ周波数を決定した。

10代から20代の被験者5名に対して、高いQ値をもつデジタルフィルタを用いてホワイトノイズを

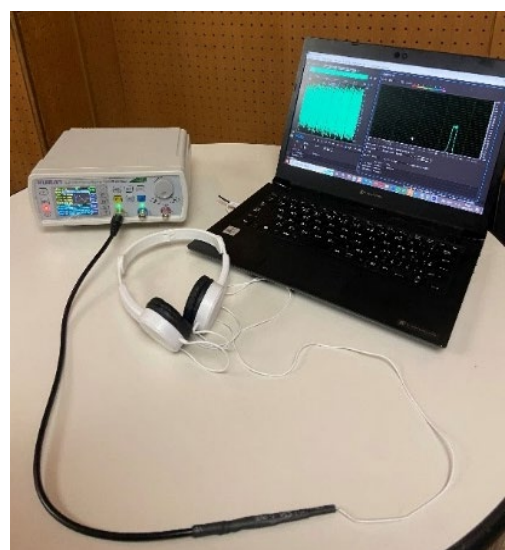


Fig. 4 ソルフェージュ・サイコフィジックス測定装置

フィルタリングして作成された、バンド幅が短 2 度の超狭域帯域雑音 (2500~2656Hz)、並びに 2656~2822Hz のフェルミ周波数を測定した。

超狭域帯域雑音は半音以下程度の狭いバンド幅の雑音を指す。人はこのような帯域雑音を聴取すると、上フェルミ周波数と下フェルミ周波数を別の音程として聞き分けることができない。このため一つの音程が認識される。

Fig.5-a と **Fig.5-b** に超狭域帯域雑音 2500~2656Hz と超狭域帯域雑音 2656~2822Hz によるフェルミ周波数聴取実験の測定結果を示す。表中の異なる色の点は、異なる被験者のフェルミ周波数を示す。両表の同じ色の点は、同じ被験者が異なる帯域雑音を聴取するときに見えるフェルミ周波数の違いを示す。

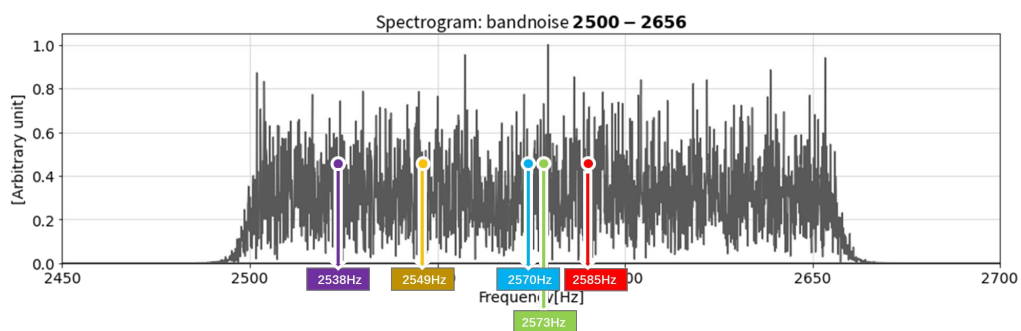


Fig. 5-a 超狭域帯域雑音 2500~2656Hz によるフェルミ周波数聴取実験の測定結果

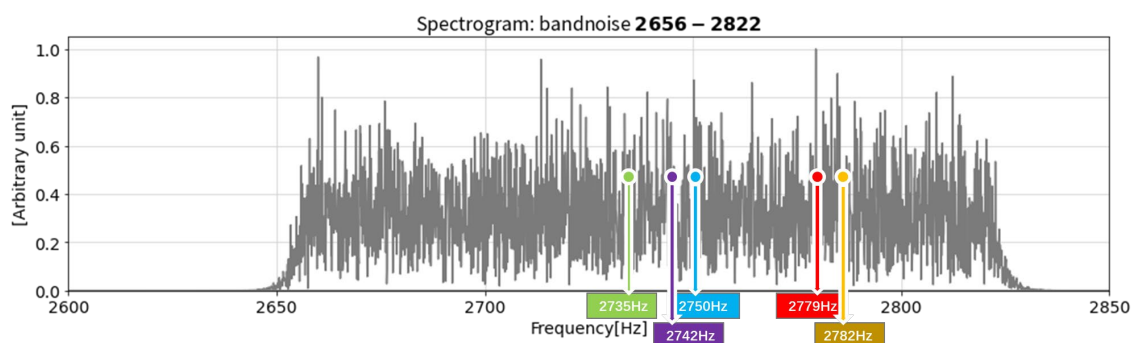


Fig. 5-b 超狭域帯域雑音 2656~2822Hz によるフェルミ周波数聴取実験の測定結果

Fig.5-a と **Fig.5-b** に示すように、すべての被験者のフェルミ周波数は境界周波数からずれている。これについては被験者数を増やし、統計的な傾向を見る後続実験を計画している。

また両測定とも各被験者のフェルミ周波数値にランダムな変化が観察された。一例を挙げれば超狭域帯域雑音 2500~2656Hz の測定で、被験者 1 のフェルミ周波数は 2538hz で、5 人の被験者の中で最も下端境界周波数に近く、フェルミ周波数の値も最も低かった。だが超狭域帯域雑音 2656~2822Hz の測定では、被験者 1 のフェルミ周波数は 2742hz で帯域幅の中心であった。各被験者のフェルミ周波数は、帯域雑音のバンド幅に応じ変化する、極めて非線形な振る舞いを見せた。

3. バンドパスノイズの両端部の振る舞い・・・シグモイド・フィッティング

帯域雑音の作成には高い Q 値のデジタルフィルターを使用した。だが現実には周波数の立ち上がりに有限な幅が伴うため Fig.5-a と Fig.5-b に示すように帯域雑音の初期と終期に励起と減衰の過程が避けられない。スペクトル解析を高い周波数分解能で行えば Fig.6-a、Fig.6-b に示すように、ピークの立ち上がり幅を確認する事が出来る。

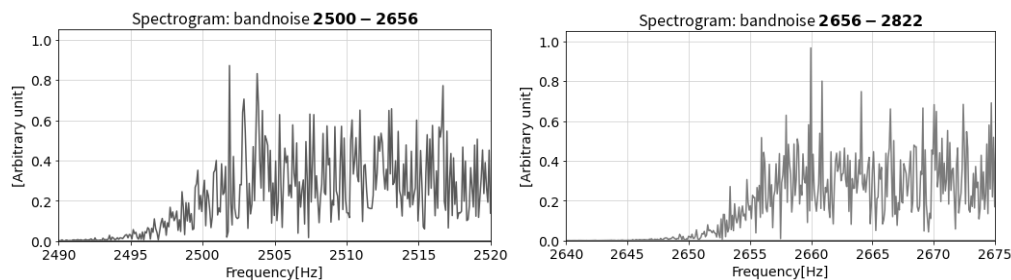


Fig. 6-a 超狭域帯域雑音 2656～2822Hz の立ち上がり部分 Fig. 6-b 超狭域帯域雑音 2656～2822 の立ち上がり部分

今回の測定では、聴き手が認識する音高であるフェルミ周波数はフィルタバウンダリの上昇、下降の区間には確認されなかった。短二度幅の帯域雑音半音階刺激源は乱数で周波数と振幅をランダムに振り分けられた音から構成されており、言わば全幅に渡って聴取可能な周波数の「ゆらぎ」成分だけで出来ている（超狭域雑音）[1]。認知的に抑制される「禁止帯域」が存在しないため、フェルミ周波数は全バンド幅に分布しうるが、上昇と下降の区間ではフェルミ周波数は確認されなかった。帯域雑音のバンド幅を短二度、すなわち半音幅程度より狭くすると、聞き手は一つの音程（ピッチ）が揺らいでいるように聞く割合が増える。音程の幅を半音より拡大するとバンド幅の上下端に異なる二つのピッチを持つフェルミ周波数が観測されるようになる（分離 segregate）。同時に、バンド中心部には音程が知覚されない「禁止帯域」が発生する知覚的な相転移（cognitive phase transitions）が起こる [Fig.7]。短二度（半音）より広いバンド幅を持つ帯域雑音を聴くと、バンド幅両端で異なるフェルミ周波数で特徴づけられるピッチが聴こえるエッジ聴現象が再び発生する。

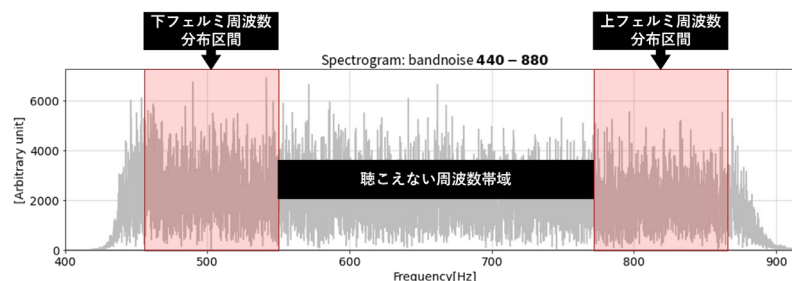


Fig. 7 帯域雑音の上下フェルミ周波数と聴こえない部分

そこで各被験者のバンド幅におけるフェルミ周波数の分布、また人間に聴こえない周波帯域を確認、評価するため、シグモイド関数を用いて帯域雑音の立ち上がり部分と減衰部分のフィッティングを行った。シグモイド関数は以下のように定義される。

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Fig.8 に帯域雑音 440～880Hz の立ち上がり部分に対するシグモイド関数によるフィッティングを示した。シグモイドの中心周波数を f_s とする。帯域雑音の形式的なフィルタバウンダリは 440Hz であるが、実際に提示される音の立ち上がりピークは 453.7Hz 付近にあり、中心周波数からピークに達するまでの周波数幅は約 13.7Hz、立ち上がり幅 Δf はその 2 倍で 27.4Hz 程度である。この Δf の範囲でフェルミ周波数聴取が発生可能性が考えられる。

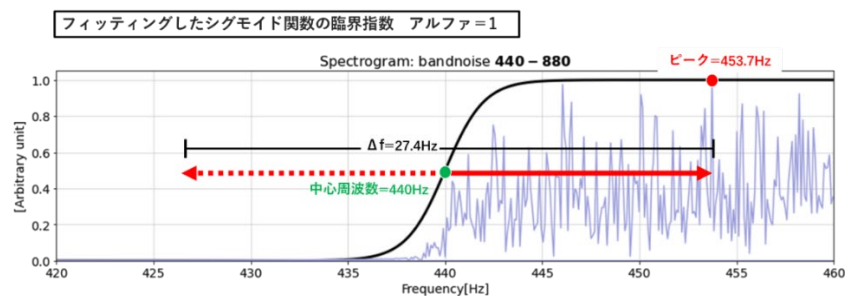


Fig. 8 帯域雑音 440～880Hz の立ち上がり部分のシグモイドフィッティング

この仮説を検証するために後続実験を準備中である。今後より多くの被験者で、さまざまな帯域幅の雑音による認知データを測定し、エッジ聴認知の実態を明らかにする予定である。

上では帯域雑音の立ち上がり部分のみをシグモイドでフィットしたが、今後帯域雑音の立ち上がり部分と減衰部分の双方をダブルシグモイドフィッティングし、帯域雑音の両端でのエッジ聴の範囲と、人間が聴き取れない禁止帯域のバンド幅割合などを評価したい。

4. まとめと展望

超狭域帯域雑音サンプルを用いフェルミ周波数を定義して、その測定を初めて行った。個人が主観的に聴取する音程を示すフェルミ周波数は、被験者によってさまざまに異なり、またバンド幅の変化に依存して分布が移動する非線形性が確認された。

参考文献

- [1] 陳 施佳、李 珍咏、伊東 乾、帯域雑音エッジ聴音程の非線形特性, J JASTICE: Vol.8, (2), 170-175, 2022
- [2] 伊東 乾、輝線から領域へ・・・声の周縁と非線形ポリフォニー, 「スペクトラル・コンダクティング」, 東京大学出版会, 2022 (in printing)
- [3] Hartmann, W. et al., Noise edge pitch and models of pitch perception, J. Acoust. Soc. Am. 145(4), 1993-2008, 2019

本研究は科学研究費「挑戦的研究(開拓)」20K20500「機械学習を用いた東アジア数理調和思想の実証的研究と共生倫理の検討(研究代表者;筆者)」

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-20K20500/> の助成を受けて行ったものです。関係ご各位に深く感謝します。