

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：20103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12029

研究課題名（和文）可聴限を超える空気振動が音の質感及び人の生体活動に及ぼす影響の研究

研究課題名（英文）The influence of inaudible high frequency waves on sound quality and vital activities

研究代表者

伊藤 精英 (ITO, Kiyohide)

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授

研究者番号：90325895

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）：本研究は可聴限を超える空気振動が音の質感認知と生体に及ぼす効果の解明を目指した。自然音に超音波を付加した空気振動に曝露されると、耳朶周辺の血流量の増加、心拍LF/HF値のばらつき減少、鼻頂の皮膚表面温度の上昇が見られ、交感神経の活性度が低下傾向になった。自然音に超音波及び低周波（非可聴音）付加の有無で比較すると、非可聴音を付加した方がストレス課題後に指尖部の皮膚表面温度が上昇し、日本語版PRSの得点が高かったことから、非可聴音を付加した空気振動はストレス回復効果が高いことがわかった。音の構造を見ると、可聴音に周期的な超音波スパイク列を重畳させると可聴音そのものにも周期的なスパイクが出現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では非可聴音を付加した音に曝露された際の生体反応指標として、従来の脳活動ではなく、末梢皮膚温度・末梢血流量を用いて解析し、これらが指標として有効であることが明らかになった。非可聴音付加により交感神経の活性度が低下傾向になるという本研究の知見をもとに、これらの新たな指標を用いることにより、非可聴音を利用した新たな健康維持法や治療法の可能性が見出され、ストレス関連疾患の予防や管理に役立つツール等の開発が期待される。さらに、非可聴音を付加した音はストレス回復に効果的であることが明らかになったことから、リラクゼーション効果を高めるための新たな手法や製品の開発、空間音響分野での導入が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to elucidate the effects of air vibrations beyond the audible range on the perception of sound quality and biological responses. Exposure to air vibrations with added ultrasound to natural sounds resulted in increased blood flow around the earlobe, decreased variability in the heart rate LF/HF ratio, and an increase in the skin surface temperature of the nose, indicating a trend toward reduced sympathetic nervous system activity. When comparing the presence and absence of added ultrasound and infrasound (inaudible sounds) to natural sounds, it was found that air vibrations with added inaudible sounds resulted in increased skin surface temperature at the fingertips after stress tasks and higher scores on the Japanese version of the PRS, indicating a higher stress recovery effect. Analyzing the sound structure revealed that when periodic ultrasonic spike trains were superimposed on audible sounds, periodic spikes also appeared in the audible sounds themselves.

研究分野：感性認知科学

キーワード：生体反応 超音波 自然音 末梢皮膚温度 末梢血流量 感性評価 自律神経活動

### 1. 研究開始当初の背景

自然界に存在する空気振動や倍音を豊かに含む楽器音には可聴限を超える超音波を強いレベルで含んでいることが知られている。超音波を含む自然音や楽音が呈示されると、人の脳内深部の血流量が増加すること、脳波α波が相対的に増加することをもとに、超音波を含む空気振動が中枢神経系を活性化する効果はハイパーソニックエフェクト (HSE) として報告され (Oohashi, et al., 2000), 中枢神経系の活性のみならず、音の質感 (聴覚印象) を肯定的に変容させる効果があるとされている。HSE 発現に關与する感覚系について大橋 (2017) は、可聴音は鼓膜から、超音波は体表面皮膚から感受するとしているが、仮説の域を出ていない。超音波を含む音の質感について大橋らは聴覚印象評価で肯定的であるとしているが、超音波を含む可聴音そのもののスペクトル構造を明らかにした知見はない。研究代表者らは超音波を付加した音を聞くと耳介周辺の毛細血管の血流量が増大する示唆を得た (Ito & Sawada, 2019)。これは、超音波を含む空気振動が中枢神経系のみならず末梢系の生体活動にも影響することを意味する。そこで、超音波を付加した可聴音がどのようなスペクトル構造をなすのかを解明し、聴覚印象をどう変容させるのか、人の生体活動にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする必要があると考えた。

### 2. 研究の目的

超音波及び低周波 (非可聴音) を含む音が人の質感認知と生体信号に及ぼす影響を解明する。具体的には、①可聴音の質感認知 (印象評価) に及ぼす超音波の影響の解明、②非可聴音が含まれる空気振動の曝露による血流、心拍、皮膚表面温度など生体活動への影響の解明を実施し、なぜ音の質感認知と生体活動に変容があらわれるのか、周期的な超音波を付加した際の可聴音のスペクトル構造を解析することにより、これらの変容と音との関係性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験 1: 超音波付加による耳朶血流量の変化の解析

超音波の有無による毛細血管血流量の変化を測定した。実験参加者は3名であった。呈示する空気振動刺激として、可聴音は自然環境音、超音波はコウモリの鳴音から超音波を取り出して使用し、可聴音のみを呈示した後、超音波を付加した音刺激を呈示し、耳朶部にレーザードップラー血流計を取り付けて、超音波の有無による毛細血管血流量への影響を解析した。

#### (2) 実験 2: 超音波付加による心拍及び鼻頂皮膚温度の変化の解析、及び聴覚印象変化の評価

実験参加者は実験1と同じであった。呈示する空気振動刺激として可聴音はグラスハープ音、超音波は30kHz~90kHz帯域のピンクノイズから生成した断続的なクリックス列を用いた。可聴音のみを呈示する条件をA、可聴音に超音波を付加した条件をBとし、3名ともにA→B、B→Aの2試行を別の日に実施し、交感神経を優位にするため各条件間に立位を挿入した。自律神経系の優位性を推定するため前額部及び鼻頂部の皮膚温度を測定してその差を求め、心電位を記録して心拍変動解析を行った。

#### (3) 実験 3: 可聴音に低周波及び超音波を付加した際の聴覚印象の変化と皮膚温度の変化を解析

自然環境空気振動が人の心身に及ぼす効果を明らかにするため、末梢皮膚温度を測定し、聴覚印象は音から受ける回復環境の印象を評価した。呈示する空気振動刺激として75Hz~20kHzに編集した自然環境音を可聴音条件とした。60Hz以下の低周波及び20~90kHzの超音波を可聴音に付加して非可聴音付加条件とした。生理指標として、ストレス負荷及びそこから回復の程度の指標となる手指末端部と、恒常的な身体温度を反映する前額部の2箇所の皮膚温度を測定し、その差を求めた。心理指標として芝田ら (2008) により作成された日本語版 PRS (Perceived Restorativeness Scale) を参考に、本実験に適する19項目 (表1) を抜粋し、刺激条件から受ける空間の印象を5件法で回答を求めた。実験参加者8名は5分間のストレス負荷後、15分間の刺激を呈示され、PRSに回答した。可聴音条件と非可聴音付加条件は時間帯を揃え日を変えて実施した。

表1 本実験に使用した日本語版 PRS の質問項目 (芝田ら, 2008 より抜粋)

下位尺度	質問項目
逃避 (Being Away)	1. 余計な邪魔の入らない場所 2. ぼーっとできる空間 3. 日常から解放されたように感じる 4. 色々と面倒なことから逃れられる 5. やらなくてはならないことを考えずに済む
魅了 (Fascination)	6. 魅力的な空間であると感じる 7. 好奇心を掻き立てられる 8. いろいろな発見がありそうだ
まとまり (Coherence)	9. 全ての物事が互いに違和感なく馴染んでいる 10. 全てのものに決まった場所があるようだ
視野 (Scope)	11. 広くて見通しの多い場所のように感じる 12. どこまでも広がっているようだ 13. ここだけで1つの世界が出来上がっているようだ 14. とても広々とした感じがする
適合 (Compatibility)	15. ここでは気の向かないことをやらなくても良い 16. 自分の性に合った場所 17. やりたいことがすぐできる
好み (Preference)	18. 好きな場所である
熟知度 (Familiarity)	19. よく知っている感じがする

#### (4) 実験 4: 可聴音に超音波を付加した際の聴覚印象の変化と皮膚温度の変化を解析

実験参加者は実験3と同じであった。可聴音条件は実験3と同じ自然環境音を用い、超音波付加条件では実験3と同じ超音波を付加した。実験3と同じ手法を用い、手指末端部と前額部の皮膚温度の差を求め、口頭で聴覚印象を回答してもらった。

#### (5) 実験 5: 周期的な超音波スパイク列を重畳した際の可聴帯域音波の変化を解析

カットオフ周波数250Hzのローパスフィルターを通過させた低域ホワイトノイズに、実験4で使用した超音波を付加して出力し、聴取者の位置で外耳道模型に小型マイクを挿入して20kHzまでの可聴音を録音した。超音波付加の有無による違いを調べるため自己相関分析を行った。分析

にあたっては、複雑な音構造の分析、聴覚情景分析及び音源分離の手法として Tolonen & Karjalainen (2000) により提案された拡張自己相関関数(enhanced autocorrelation function: EACF)を用いた。解析には音声編集ソフトウェア (Audacity version 3.2.2) を使用した。

#### 4. 研究の成果

##### (1) 実験 1

可聴音条件に比して超音波付加条件の方が耳朶血流量が増加した。血流量とその変化量の時間波形において血流量が一拍ごとに極小値に至る波形に着目すると、超音波付加条件の方が振幅が大きかった。血流量の単位時間あたりの変化量(すなわち血流速度)の時系列データを求め、その周波数解析 (FFT) を行った (図 1)。3 名とも可聴音条件に比較して超音波付加条件の方が血流変化量のパワーが小さくなった。これは、血液の粘性にもかかわらず滞りなく、かつ安定した速度で流れた、つまり、血管の拡張により血液がスムーズに流れたためと考えられる。

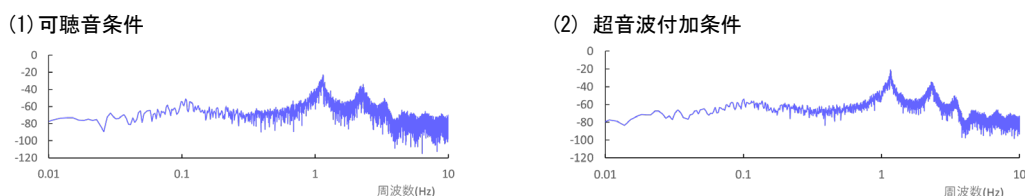


図 1 耳朶血流量の FFT の例

##### (2) 実験 2

[聴覚印象] 実験参加者に呈示音の印象を質問した。3 名とも可聴音条件に比べて超音波条件の方が①音楽全体に左右の広がりが出た、②可聴音のみでは不快な擦音が気になったが超音波が付加されると不快さが解消された、③細かい音の変化が聞き取れるようになった、などを挙げた。

[心拍変動] RRI を元に、LF と HF の比 (LF/HF) を交感神経亢進の程度の指標とした。各条件で 30 秒ごとに算出した LF/HF 値の推移を図 2 に示す。全体的な推移を見ると超音波付加条件の方がばらつきが少なく狭い範囲でまとまる傾向にあった。LF/HF の最低値を見ると、可聴音条件では両試行ともばらつきが大きかったが、超音波付加条件では AB 試行では 540 秒前後、BA 試行では 180~300 秒あたりが最低値を示し、その後はやや上昇傾向を伴った上下動を繰り返すいわば「揺らぎモード」のように見えた。音呈示開始後 60 秒及び 360 秒までの LF/HF の値の推移から、超音波を付加すると交感神経の活性度が低下すること、楽曲聴取による交感神経系の活性化の個人差も少なくなることが示唆された。

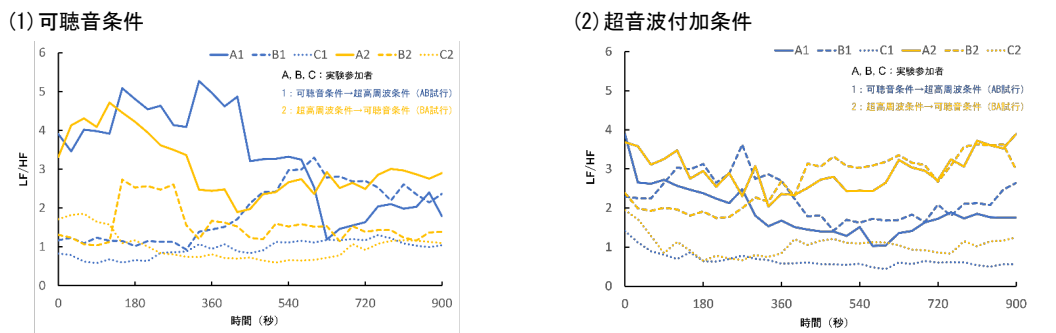


図 2 各音呈示条件ごとの LF/HF 値の推移

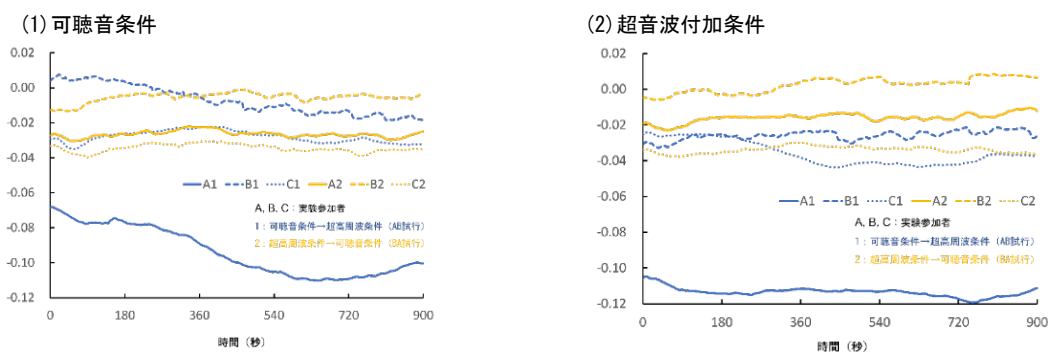


図 3 各音呈示条件ごとの皮膚温度比の推移

[皮膚温度] 前額部の体表面温度は比較的恒常的であるのに対して、鼻部は自律神経系の影響を受けやすいとされている (矢田, 2021) ことから、皮膚温度の指標を式(1)のように求めた。

可聴音及び超音波付加の各条件ごとの皮膚温度比の推移を図3に示す。超音波付加条件では刺激呈示直後から約60秒まではすべての試行で低下し、60秒を過ぎるとC1をのぞき上下動を伴った上昇傾向に転じた。音刺激条件が開始されると聴覚的注意・興奮作用が反映され、60秒までは鼻頂部の皮膚温度が低下したと考えられるが、それ以後の鼻頂皮膚温度の推移から、可聴音条件では音刺激により交感神経の活性化が維持され、超音波付加条件では副交感神経が活性化したことが推察され、皮膚表面温度比が上昇したと考えられる。

$$[\text{皮膚温度比}] = \frac{[\text{鼻頂の皮膚温度}] - [\text{額の皮膚温度}]}{[\text{額の皮膚温度}]} \quad (1)$$

### (3) 実験3

〔聴覚印象〕 実験参加者8名個々の19項目の得点の平均値を求め、参加者のPRS得点とした。8名のPRS得点の平均値を見てみると、非可聴音付加条件は3.48、可聴音条件は3.18であり、非可聴音を付加した方がPRS得点が高かった。これは、非可聴音を付加すると自然環境が有する回復効果が高いことを示唆する。図4に7下位尺度ごとに非可聴音付加、可聴音の両条件におけるPRS下位尺度得点の平均値を示す。全ての尺度において非可聴音付加条件の方が高い得点となった。「熟知度」で刺激条件間に有意差が見られた( $t(7) = 2.64, p < 0.05$ )。「逃避」「まとまり」「視野」「適合」では刺激条件間に有意傾向が見られなかったが、「魅了」「好み」では有意差が見られ、非可聴音を付加した方が回復環境としてより好ましいと知覚されていたことが示唆された。

〔皮膚温度〕 参加者ごとに安静セッションの皮膚温度と、それに続く4セッションの皮膚温度との相対的な変化を比較した。すなわち、個人ごとの安静時の指尖部皮膚温度と前額部皮膚温度を基準とした、実験操作時の指尖部の皮膚温度(これを $\Delta F$ と示す)を、矢田(2021)を参考に式(2)により求めた。

$$\Delta F = (F2i - \bar{F1}) - (H2i - \bar{H1}) \quad (2)$$

$\Delta F$ は安静時の指尖部皮膚温度及び前額部皮膚温度を基準とした1秒ごとの指尖部皮膚温度(相対的指尖部皮膚温度)、 $\bar{F1}$ は安静セッション後半5分間の指尖部皮膚温度の平均値、 $\bar{H1}$ は安静セッション後半5分間の前額部皮膚温度の平均値、 $F2i$ 及び $H2i$ は、ストレス負荷、刺激呈示前半・中間・後半の各セッションにおけるデータサンプル*i*番目の指尖部と前額部の皮膚温度値であった。図5に8名の $\Delta F$ の推移を加算平均値で示す。値が0とは $\Delta F$ が安静時と等しいことを意味する。2刺激条件(可聴音 vs. 非可聴音付加)×4セッション(ストレス負荷、刺激前半、刺激中間、刺激後半)の2要因分散分析を実施した。その結果、刺激条件の主効果は認められなかった。一方、セッションの主効果は1%水準で有意であった( $f(1, 3) = 7.34, p < 0.01$ )。刺激条件とセッションの交互作用も1%水準で有意であった( $f(1, 3) = 5.24, p < 0.01$ )。LSD法により多重比較を行った結果、非可聴音付加条件ではストレス負荷セッションに比べて刺激呈示セッション前半の皮膚温度が有意に高くなっていった。それに対し、可聴音条件ではそれらの間に有意な差は見られなかった。つまり、非可聴音付加条件ではストレス負荷セッションに比べて刺激呈示セッション前半の方が有意に相対的指尖部皮膚温度の上昇が見られ、一方、可聴音条件ではストレス負荷セッションに比べて刺激呈示セッション中間以降で有意に相対的指尖部皮膚温度の上昇が見られ、非可聴音付加条件の方がストレス負荷により、低下した皮膚温度が急速に回復した。

### (4) 実験4

〔聴覚印象〕 可聴音条件では、「リラックスして眠くなる」「水(川)の音が心地よい・涼しげ」などが挙げられた。一方、超音波付加条件では、「リラックスした感覚ではないがぼーっとして寝そう」「退屈・飽きる」「水の音がとても聞こえる／うるさい」であった。可聴音刺激の場合は聴覚印象が類似していたが、超音波付加刺激に曝露されると聴覚印象に個人差が現れた。これは、超音波を付加した可聴音に曝露されると、刺激を受けた際の個々人の自律神経系の状況を反映した応答が現れることが考えられ、HSEなどの先行研究とは合致しない。HSE研究の多くが脳波測定など中枢神経系の生理反応を測定しているのに対し、本研究では末梢部位の生体反応を計測しており、計測指標の差異に依存する可能性も考えられる。HSE研究とは異なる方向性の結果となったが、少なくとも可聴音のみの呈示刺激と、超音波を付加した可聴音の呈示刺激とを実験参加者すべてが識別していることは確かめられた。

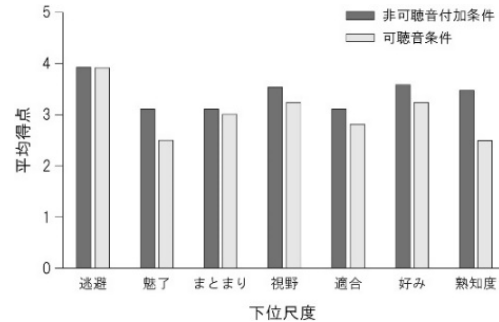


図4 PRSの下位尺度得点の平均値

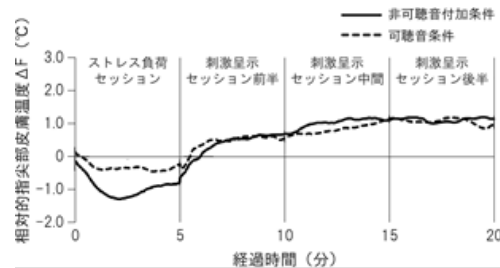


図5 実験3における $\Delta F$ の加算平均値の推移

[皮膚温度] 図6に、安静時の指尖部皮膚温度及び前額部皮膚温度を基準とした、実験操作時の相対的指尖部皮膚温度の加算平均値の推移を示した。ストレス負荷セッションで皮膚温度が低下した後、刺激呈示前半で皮膚温度が上昇しており、特に、超音波付加条件の方が急激に上昇し、相対的指尖部皮膚温度が可聴音条件よりも高く維持されたまま推移した。このように、可聴自然音に超音波ピンクノイズを付加して聴取者に呈示すると、可聴音のみに比べて相対的指尖部皮膚温度が高くなる傾向を維持した。

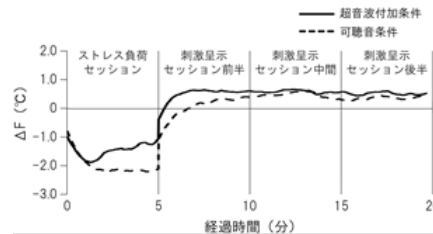


図6 実験4における $\Delta T$ の加算平均値の推移

#### (5)実験5

図7に示した超音波スパイク列の拡張自己相関関数を見ると、第1ピークがtime lagにして約83.333ミリ秒に見られた。この周波数は12Hzであり、超音波スパイク列のスパイク周期に等しい。第2ピークがtime lagにして約0.625ミリ秒、周波数1.6kHzに認められた。ピンクノイズスパイク列から構成される超音波の周期的な構造がこれらに現れているといえる。次に、低域ホワイトノイズ及び超音波を付加した低域ホワイトノイズの拡張自己相関関数を図8に示す。(b)を見ると、ホワイトノイズのみにはないピークが複数散見される。time lagを見ると、それらのピークはおよそ0.625ミリ秒ごとに現れているように見える。可聴帯域、しかもホワイトノイズには見られない周期的なピークが現れたということは、可聴音に超音波を付加すると可聴音帯域の音波それ自体の構造が変化したことを示し、可聴帯域ホワイトノイズが秩序づけられて構造化されたことを示唆する。この示唆の一般化は時期尚早であり、注意すべき点が2点ある。第1に、今回の分析では可聴帯域ノイズに付加した超音波はピンクノイズから生成したスパイク列であったため、図8のような可聴音の構造が超音波の音響特性に依存するの否かを今後検討する必要がある。第2に、今回の予備的解析に用いた音材料は、外耳道模型の外耳道入り口からほぼ1cmの位置に設置したマイクロフォンからの収録で、マイクロフォン単体によるものではなかった。自己相関関数に見られた構造化が可聴音波と超音波の相互干渉のみによるものなのか、それとも、耳介に媒介された結果なのかについては今後検討が必要である。いずれにしても、超音波空気振動は可聴音空気振動を変化させる可能性があり、そこに聴取者の身体が媒介しうることも示唆された。

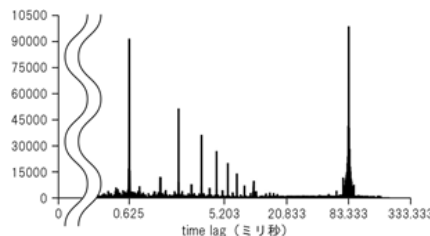


図7 ピンクノイズスパイク列の拡張自己相関関数

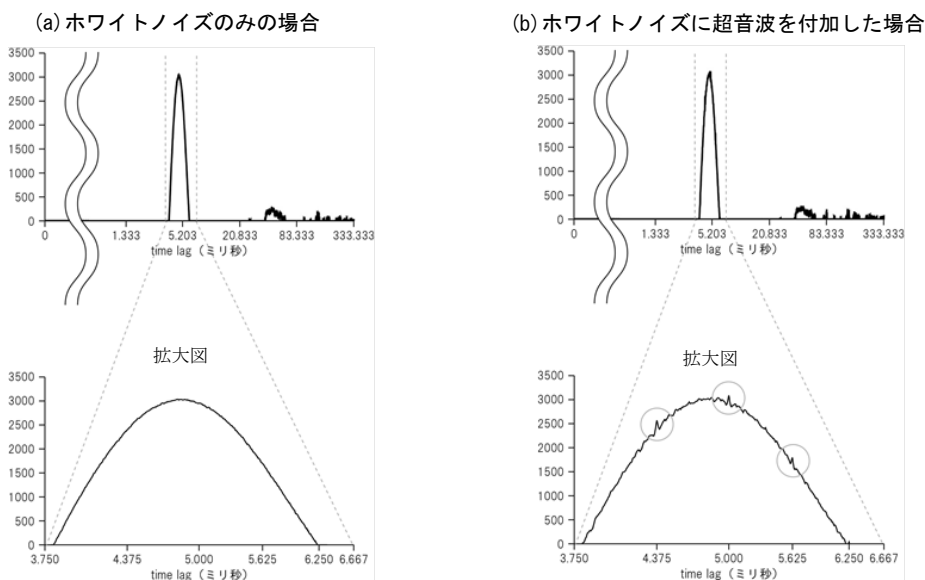


図8 超音波の有無による自己相関関数の比較

#### 〈引用文献〉

- ① Oohashi, T. et al. Inaudible High-Frequency Sounds Affect Brain Activity: Hypersonic Effect. *Journal of Neurophysiology*, 83(6), 3548-3558, 2000.
- ② 大橋 力. ハイパーソニック・エフェクト. 岩波書店, 2017.
- ③ Ito, K., & Sawada, M. Inaudible high-frequency waves facilitates active perception-action cycle. 20th International Conference on Perception and Action (ICPA2019), 2019.
- ④ 芝田 征司, 畑 倫子, 三輪 佳子. 日本語版 Perceived Restorativeness Scale (PRS) の作成とその妥当性の検討. *人間・環境学会誌*, 11, 1-10, 2008.
- ⑤ Tolonen, T., & Karjalainen, M. A computationally efficient multipitch analysis model, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 8(6), 708-716, 2000.
- ⑥ 矢田 幸博. 不定愁訴の統合生理学と商品開発 —美・健康・老化予防と有効性評価試験—. *エヌ・ティー・エス*, p. 96, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Seki Yoshikazu, Ito Kiyohide	4. 巻 2022
2. 論文標題 Objective Evaluation of Obstacle Perception Using Spontaneous Body Movements of Blind People Evoked by Movements of Acoustic Virtual Wall	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Human Behavior and Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2022/9475983	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Nonaka Tetsushi, Ito Kiyohide, Stoffregen Thomas A.	4. 巻 11
2. 論文標題 Structure of variability in scanning movement predicts braille reading performance in children	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-86674-5	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤精英, 辻美祝, 丹野夏海
2. 発表標題 自然音聴取における低周波及び超高周波空気振動の付加が人の心身に及ぼす効果
3. 学会等名 第25回日本感性工学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤精英, 丸尾海月, 沢田護
2. 発表標題 超高周波空気振動に含まれる知覚情報が知覚 行為循環にもたらす影響
3. 学会等名 日本生態心理学会第9回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤精英, 丸尾海月, 沢田護
2. 発表標題 超高周波を含む空気振動の曝露に対する身体応答: 知覚 - 行為循環の観点から
3. 学会等名 日本感性工学会 生命ソフトウェア・感性工房・而立の会 合同シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 伊藤精英	4. 発行年 2021年
2. 出版社 金子書房	5. 総ページ数 196
3. 書名 音が描く日常風景 - 振動知覚的自己がもたらすもの	

〔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
研究 分 担 者	佐藤 直行  (SATO Naoyuki)  (70312668)	公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授   (20103)	

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
---------	---------