

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17265

研究課題名（和文）蝸牛・前庭器官・半規管および体性感覚の寄与を区別した低周波音の受容特性の解明

研究課題名（英文）Receptive properties of low-frequency sound with differentiated contributions from the cochlea, vestibular organs, semicircular canal, and somatosensory

研究代表者

田鎖 順太（Tagusari, Junta）

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：40791497

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、低周波音の受容特性を解明することを目的とし、低周波音による特異的な影響としてめまいが報告されていることを鑑み、「振動感」に注目してその評価を試みた。多くの被験者で、振動感の強さに関する等感覚曲線は、40Hz付近で極小値を持つV字型となっており、等振動感曲線はV字型の曲線となると示唆される。しかし、実験条件によって得られる結果は異なり、音響心理学的手法に基づく「振動感」の評価に関する課題が浮き彫りとなった。今後、生理学的・客観的手法の利用が望ましく、感受性が高い方法の探索が求められる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低周波成分が顕著に含まれる騒音によって、睡眠障害・頭痛・めまい・吐き気等の健康影響が生じることが報告されているが、そのメカニズムに関して明らかにはなっていない。本研究では、低周波音を曝露した際の「振動感」に注目し、そのメカニズムへの示唆を得ることを目的とした実験を行った。「振動感」は約40Hzにおいて最も高い反応性を示したものの、実験条件によって異なる結果が得られることがあり、その信頼性には課題があることもまた示された。低い曝露レベルでも評価可能な生理学的手法の探索が求められ、また、低周波音の受容メカニズムの解明に向けてはさらなる研究が求められる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to elucidate the receptive characteristics of infrasound. In light of the fact that dizziness has been reported as a specific effect of infrasound, we focused on the "vibration sensation" and attempted to evaluate it. In many subjects, the isosensory curve for the intensity of the vibration sensation was V-shaped with a minimum around 40 Hz, suggesting that the isovibration sensation curve would be V-shaped. However, the results obtained differed depending on the experimental conditions, highlighting issues related to the evaluation of "vibration sensation" based on psychoacoustic methods. In the future, the use of physiological and objective methods is desirable, and a search for more sensitive methods is required.

研究分野：騒音

キーワード：低周波音 騒音 振動感 音響心理実験 調整法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

発電用風車の周辺において、睡眠障害・頭痛・めまい・吐き気等の健康影響を伴う症例が数多く報告されている。これらの症例は、複数の異なる地域で同様の内容であったこと、転居による劇的な症状改善がみられたこと、等から、風車との因果関係が強く示唆され、「風車病」と呼ばれる。さらに、「風車病」と類似の症例が、高架道路・ガスヒートポンプ式給湯器等を音源とした騒音曝露でも報告されており、これらの音源の間には、「低周波成分が顕著に含まれる」という共通点があるため、低周波音が原因であると推察されている。

低周波音は、単に物理的特性に基づく呼称であり、周波数の低い騒音(100Hz以下程度)を指すが、通常の騒音とは異なる心理反応を示すことが従来より指摘されている。通常の騒音ではヒトの「音の大きさ」の知覚感度に基づく周波数重み付け(A特性音圧レベル)が広く用いられているが、世界保健機関は、実験的研究等の成果に基づき、「低周波音は小さな音でも煩わしく感じて睡眠を妨害する」とし、「A特性音圧レベルの利用は適切ではない」と結論づけている。現在では、低周波音を評価するために各国が独自のガイドラインを設けており、我が国においても、「入眠時に気になる」という心理反応に関する実験結果に基づき、低周波音による苦情を判断するための参照音圧レベル(A特性音圧レベルではない)を環境省が示している。

低周波音による心理的反応に関する実験・考察は、反応の特異性を浮かび上がらせた点において価値があった。しかし、低周波音に関するこれまでの実験結果は音刺激以外の心理的な要因に大きく左右されることも知られており、生理学的な経路が不明である点が重大な課題として残っている。つまり、「風車病」等の症例にみられる症状は他の騒音(たとえば交通騒音)によって生じる健康影響(睡眠障害・心臓血管系疾患等)とは大きく異なるが、その発生経路は未解明である。

低周波音の生理学的受容には、複数の器官が寄与すると考えられる。まずは、通常の音刺激と同様、蝸牛で受容されることに多くの知見がある。次に、前庭器官・半規管における受容が寄与している可能性が指摘されている。このことは、動物実験や前庭の数値流体シミュレーション等で示唆されている他、「風車病」の特異的な症状が平衡機能障害に類似していることから、症例研究からも推察されている。さらに、低周波音によって振動感が生じることを考慮すると、体性感覚が寄与している可能性も排除できない。体の様々な部位が共振周波数を持ち、大きな音刺激で振動が生じることは過去の文献で示されている。これまでに、それぞれの器官の外部刺激に対する反応性に関する研究は数多いが、低周波音曝露による健康影響に注目し、各器官における受容の寄与や相互の関係性について考察した研究は見受けられない。

したがって、本研究で根幹をなす問いは、低周波音がどのような生理学的メカニズムで受容されるのかという点にある。このことは、低周波音による健康リスクを評価し、住民の健康を保護する上での基本的知見としてきわめて重要であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、低周波音の受容特性を解明することを目的とし、ヒトを対象とした実験室実験を行う。これによって、低周波音を評価するための適切な手法の提案が可能と考えられる。ヒトの低周波音への反応性を評価する上では、低周波音による特異的な影響としてめまいが報告されていることを鑑み、「振動感」に注目し、その評価を試みた。

### 3. 研究の方法

振動感の知覚に関する音響心理実験の被験者は、19~26歳の男女21名(男性16名、女性5名)であった。被験者はいずれも聴力正常であり、めまいの既往歴はなかった。実験は、北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟701号室内に設置した防音室(ヤマハ,Dr-35,0.8畳)内で行った。

実験に用いた試験音はPC(DELL, Precision 3440)およびPython(バージョン3.8.8, pyaudioパッケージを使用)を用いて作成した純音であった。PCより出力されたデジタル信号は、DAC(TEAC, UD-503)を用いてアナログ信号へ変換し、ヘッドホン(SONY, MDR-MA900)から出力した。また、試験音の音圧レベルや周波数を調整するために、コントローラーを自作し、ADQ(LabJack, T7)を介してPCと接続した。

ヘッドホンに入力される電圧レベルと曝露音圧レベルの関係については、ヘッドトルソシミュレータを使った実験結果より導き、ヘッドホンによる鼓膜前音圧レベルがスピーカーから2m離れて正対した位置で被験者が曝露された条件と同じになるよう補正した。

実験では、被験者に「基準音」と「調整音」の2つの音を曝露し、適当な指示のもとで被験者の操作によって「調整音」の音圧レベルや周波数を調整させる方法「被験者調整法」を用いた。調整条件として、ラウドネス(音の大きさ)を一定として周波数を被験者に調整させる方法および周波数を一定として音圧レベルを被験者に調整させる方法を用いた。前者に関しては、調整音の「大きさ」が調整時間を通してほぼ一定となるため、被験者が振動感の判断が行いやすいと考えた。後者に関しては、任意の周波数における実験を実施できるため、周波数特性の計測に向い

ていると考えた。

試験音の調整可能範囲は物理的制約を受けた。周波数については、25 Hz を下回る周波数ではスピーカーから異音の発生が認められたためこの周波数を下限とし、低周波音を対象とする実験であることから 200Hz を上限とした。音圧レベルについては、40 dB を下限とし、上記の周波数範囲で正常な音を発生させられる 100 dB を上限とした。

実験の手順は次の通りである。

まず、被験者を防音室内の椅子に座らせ、ヘッドホンを装着させた。その後、25 Hz、40 Hz、80 Hz の純音をランダムな順番で、それぞれの聴覚閾値より 20 dB 高い音圧レベルで音を曝露し、それらの音が知覚できることを確認した。

次に、被験者に対して、「音には周波数や大きさによって、聞こえやすさや振動感、圧迫感などの複数の感覚がある」とこと、振動感を「耳の奥や頭の中で振動を感じる感覚」であることを教示し、振動感とその他の知覚とをできる限り意識して区別するように伝えた。

その後、「振動感」の体感および「調整法」の練習を行った。まず、ラウドネス一定条件で純音を曝露し、被験者がコントローラーを操作することによって周波数を 200 Hz から 25 Hz まで下げさせることによって、各被験者に体感させた。さらに、被験者に基準音 (40 Hz、80 dB) を 5 秒曝露した後に調整音 (40 ~ 60 phon、ラウドネス一定条件で周波数調整可能) をランダムな順序で呈示し、「振動感」の強さが一致するように被験者に調整をさせた。調整を繰り返し、その結果の差が小さくなった段階で練習を終了した。

以上の練習を終えた後、調整法に基づく実験を行った。この実験では、基準音 (40 Hz、80 dB (35.7 phon)) を 5 秒間曝露し、0.5 秒のインターバルの後、ラウドネス一定条件で周波数を操作可能な調整音を曝露し、基準音と調整音との振動感の強さが等しくなるよう被験者に調整させた。調整音の曝露時間は無制限で、手元のコントローラーにより被験者は任意で基準音を再度聴くことができるようにした。ラウドネスは 25、30、40、45、50、55、60、65、70 phon の 9 つの条件とし、ランダムな順序で 3 回ずつ呈示した。

最後に、周波数一定条件で音圧レベルを調整する実験を行った。この実験では、2 つの基準音 (40 Hz、70 dB/80 dB) を 5 秒間曝露し、0.5 秒のインターバルの後、周波数一定条件で音圧レベルを操作可能な調整音を曝露し、基準音と調整音との振動感の強さが等しくなるよう被験者に調整させた。調整音の曝露時間は無制限で、手元のコントローラーにより被験者は任意で基準音を再度聴くことができるようにした。周波数は 25、31.5、35.5、45、50、63、80 Hz の 7 つの条件とし、ランダムな順番で 3 回ずつ呈示した。

#### 4. 研究成果

本研究では、条件の異なる 2 つの調整法によって「振動感」の評価を試みた。被験者に対して振動感が同じ強さとなる周波数・音圧レベルの条件を尋ねており、周波数-音圧レベル平面上に実験結果を表せば等振動感曲線が得られることとなる。

図 1 に、2 つの調整条件に基づく等振動感曲線について、各被験者の結果を表す。

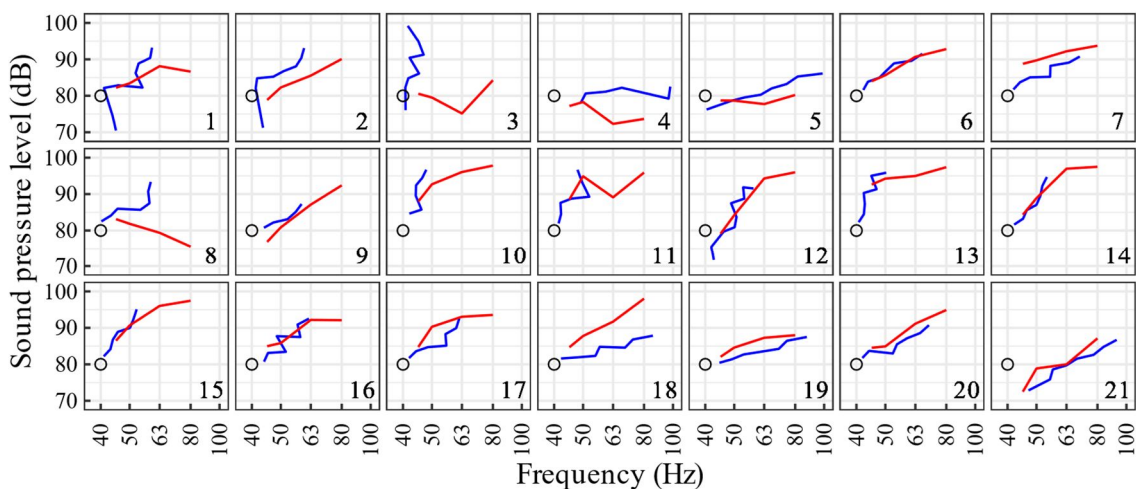


図 1 2 つの調整法の計測結果 (黒丸は基準音、青線はラウドネス一定での周波数調整結果、赤線は周波数一定での音圧レベル調整結果、右下の数字は被験者番号を示す)

多くの被験者において調整条件によらず同様の等振動感曲線が得られている一方、1/3 程度の被験者ではその結果は調整条件によって大きく異なった。この結果は、上記の実験によって得られた値が、被験者に振動感の強さを尋ねているにも関わらず、振動感のみに基づいていないことを示唆している。音響心理実験では、音の感じ方の最終判断を被験者に委ねているが、このような心理学的方法によって振動感を評価することは困難であることが示された。

ただし、2 つの調整条件において一致した結果を示す被験者もあり、心理実験を通じて振動感

の周波数特性に関する一定の示唆は与えられると考えられる。図2は、周波数一定の調整条件によって得られた等振動感曲線である。ただし、2つの基準音についてそれぞれ実験を行った結果であることに注意されたい。

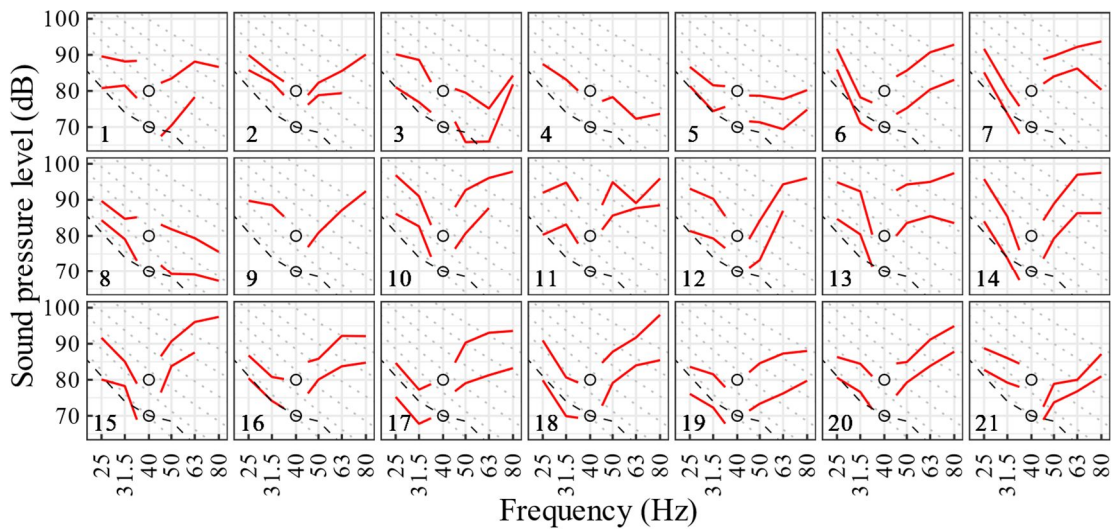


図2 2つの基準音に対する調整結果(黒丸は基準音,赤線は周波数一定での音圧レベル調整結果,薄い点線は等ラウドネス曲線,破線は既報の振動感閾値<sup>4)</sup>を示す)

多くの被験者で、2種類の等感覚曲線は、いずれも40 Hz付近で極小値を持つV字型となっている。したがって、振動感の等感覚曲線について、心理学的方法よりも信頼性の高い手法で評価・計測が可能だとすると、同様にV字型の曲線となる可能性が高いと推測される。また、70 dBの基準音は既報の振動感閾値に相当するが、本研究で測定された等感覚曲線がV字型になっているのに対して、既報の振動感閾値は一様に右下がりの傾向となっている。これは、振動感の閾値を各被験者が判断する際に音の大きさの知覚が強く影響したことが示唆される。

以上より、本研究を通じて、低周波音による「振動感」の知覚が40Hz付近の特定の周波数において高い反応性をもつ可能性が示され、また心理学的方法による「振動感」の評価に関して信頼性の課題があることが示された。

低周波音の評価において、生理学的・客観的方法の利用が望ましい。しかしながら、低周波音に対する反応を評価するための有効な方法は現時点では見受けられない。環境において曝露の可能性のある低周波音は長時間で比較的低レベルであるが、前庭器官の反応性を評価するための試験(誘発筋電位試験や眼球運動観察)はいずれも高レベルの短音を対象としており、本研究においても予備的な検討を行ったものの、その適用を実現する方法を見出すことはできなかった。今後、感受性が高い生理学的評価方法の探索が求められる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 酒井秀, 田鎖順太, 松井利仁
2. 発表標題 低周波音による振動感を最も強く知覚する周波数に関する検討
3. 学会等名 音響学会騒音振動研究会
4. 発表年 2021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
---------	---------