

報告 (Note)

低周波音による圧迫感・振動感に関する主観評価実験

横島 潤紀, 森長 誠*, 牧野 康一**, 土肥 哲也**, 横山 栄**, 小林 知尋**, 山崎 徹*
(環境情報部, *神奈川大学, **小林理学研究所)

A subjective evaluation experiment of oppressive or vibratory feeling induced by low-frequency sound

Shigenori YOKOSHIMA, Makoto MORINAGA*, Koichi MAKINO**, Tetsuya DOI**,

Sakae YOKOYAMA**, Tomohiro KOBAYASHI**, and Toru YAMAZAKI*

(Environmental Information Division, *Kanagawa University, **Kobayasi Institute of Physical Research)

キーワード： 低周波音, 圧迫感, 振動感, 主観評価実験, 知覚

1 はじめに

低周波音に関する苦情は以前から一定数申し立てられており、特に近年では、周辺が静かな地域においても、低レベルの低周波音に関する苦情が寄せられている。その結果として、現状では、多くの地方公共団体がその対応に苦慮している。令和2年度公害苦情調査結果報告書¹⁾によると、2020年度に新規に受け付けた公害苦情の件数については、低周波音に係るものは313件で、コロナ禍により人々の在宅時間が増えたことも関係して、前年度比25%の増加となっている。

環境省は、低周波音に係る苦情に的確に対応することを目的とし、2004年に「低周波音問題対応の手引書」²⁾を公表した。この中で、低周波音問題対応のための評価指針として参照値が示されている。この参照値が公表された後も、消費者安全調査委員会が、2014年に家庭用ヒートポンプ給湯機から生じる運転音・振動等と不眠等の症状との関連³⁾について、否定できないことを報告している。さらに、2017年には家庭用コージェネレーションシステムから生じる運転音・振動等と不眠等の症状との関連⁴⁾についても同様の報告を行っている。このように、低周波音による住民への影響は一過性の問題ではなく、良好な住環境を希求する人々が増える現状を踏まえると、今後も生活環境を阻害する課題として残り続けると考える。

低周波音が人体に及ぼす影響及びそのメカニズムには不明な点も多く、更なる研究が不可欠である。この低周波を特徴づける感覚として、中村ら⁵⁾は、圧迫感・振動感の存在を報告している。

圧迫感・振動感とは、低周波音域の音により身体の一部が圧迫される、もしくは振動する感覚のことである。この先行研究において、うるささ等の他の印象と比べて圧迫感・振動感を優先して感じる領域が、周波数と音圧レベルの二次元グラフで示されている。Morinaga et al.⁶⁾は、圧迫感・振動感を優先的に感じるレベルの更新を目的として、中村らの研究と同様の手法で心理実験を行った。この中で、実験前の教示において、圧迫感・振動感に関する具体的な説明の有無により、圧迫感・振動感を優先的に感じるレベルに差が生じることを報告している。すなわち、圧迫感・振動感を評価するためには、その正確な意味を教示する必要性が示された。

しかし、これらの先行研究でも、人体のいずれの部位で圧迫感・振動感を知覚しているのか、という根本的な問いは十分に議論されていない。低周波音による振動感を知覚する人体の部位に関しては、Takahashi⁷⁾が精力的に取り組んでいる。しかし、圧迫感も含めた研究は未だ実施されていない。そして、圧迫感と振動感の両者を対象に、知覚する人体の部位を明らかにすることは、圧迫感・振動感のみならず、低周波音による人への影響の定量的評価に向けての第一歩になることが期待される。

筆者らは、2019年度に1/3オクターブバンドノイズを刺激音源として、圧迫感・振動感に関する主観評価実験(既往実験)を実施した⁸⁾。この既往実験と実験の枠組み自体はほぼ同じではあるが、純音を刺激音源として、2021年度に実施した圧迫感・振動感に関する主観評価実験(本実験)

の結果について本稿で報告する。

2 実験

実験は、神奈川大学倫理審査委員会の承認を経て、2021年10月から12月の期間に、図1に示す小林理学研究所内の低周波音実験室(以下、「実験室」と記す。)で実施した。



図1 実験室の状況

2.1 実験室

実験室の天井には、低周波音を発生させるために、直径38cmのスピーカー16個が取り付けられている。実験室のサイズは、2.8m(L)×2.1m(W)×2.2m(H)である。

2.2 刺激

本実験の刺激条件を表1に示す。刺激に用いた純音の周波数(FRQ)の範囲は10~160Hzと既往実験⁸⁾と同じであるが、音圧レベル(SPL)の範囲は、40dBの刺激4種類(40~80Hz)を加えた40~100dBとした。その結果、刺激条件を40種類として実験を行った。なお、63Hz・100dBの刺激条件に関しては、実験室の固有振動数が60Hz付近にあるために、既往実験と同様に100dBの音が実験環境に顕著な影響を及ぼすことが危惧されたことから、本実験の刺激条件には含まなかった。また、刺激の継続時間は、2019年度と同じく20秒とした。

2.3 実験参加者

実験参加者は、当センターの職員を含む20代~50代の成人30名であり、音響に関する特別な知識は有していない。実験参加者の性別及び年齢分布は表2に示すとおりで、性別及び年齢の偏りは見られない。実験開始前には聴力検査を実施し、いずれの実験参加者も正常な聴力を有することを確認した。また、実験終了後には、WNS-6B質問紙⁹⁾を用い、実験参加者の騒音感受性を評価した。この騒音感受性に関しては、その得点が5点以上を高感受性群、4点以下を低感受性群と判断して、それぞれ11名、19名となった。

2.4 実験手順

実験は1名単位で実施した。実験参加者は実験室内の椅子に座り、実験室のモニターに再生された動画により実験の教示や流れを確認した。その後、ランダムに割り当てた40種類の刺激を順番に聴取した。それぞれの刺激を聴取した後に、実

表1 刺激条件(周波数及び音圧レベルの範囲)

SPL (dB) \ FRQ (Hz)	40	50	60	70	80	90	100
10	—	—	—	—	○	○	○
20	—	—	—	○	○	○	○
40	○	○	○	○	○	○	○
50	○	○	○	○	○	○	○
63	○	○	○	○	○	○	—
80	○	○	○	○	○	○	○
160	—	○	○	○	○	○	○

表2 実験参加者の性別及び年齢分布

年齢	20 歳代	30 歳代	40 歳代	50 歳代	合計
女性	4 名	3 名	4 名	4 名	15 名
男性	3 名	4 名	3 名	5 名	15 名

験室内に設置したモニターに表示された質問(図2)に対して、マウスやキーボードを用いて回答を入力した。なお、すべての実験参加者で耳の位置が同じになるように、床面から 115cm の高さになるように椅子の高さを調整した。

本実験で用いた質問について概説する。Q1 から Q3 の質問では、圧迫感と振動感を区別せずに、両者を統合した評価を得る質問とした。Q1 で圧迫感・振動感を「感じた」と回答した場合に、Q2 ではそれを知覚した人体のすべての部位を、Q3 ではその強さの評価を質問とした。Q4 及び Q5 は低周波音に関する質問であり、Q4 で音を「聞こえた、または耳元で何かを感じた」と回答した場合に、Q5 ではその不快感の評価を質問した。

3 分析

本稿では、以後の分析においては、Q1 から Q3 で得られた結果を報告する。

3. 1 刺激の音源種別による圧迫感・振動感の知

覚割合の差

本実験では刺激音源として純音を用いたが、既往実験⁸⁾では刺激音源として 1/3 オクターブバンドノイズを用いた。そこで、両者の実験結果から、刺激の音源種別(純音と 1/3 オクターブバンドノイズ)により、人体の各部位における圧迫感・振動感の知覚に差が生じるのかを検証した。具体的には、刺激条件ごとに、Q2 に示す人体の各部位において、圧迫感・振動感を知覚する人の割合(知覚割合)を 2 つの実験で比較した。ここで、既往実験、本実験いずれもサンプル数が 30 であったこと、刺激条件によっては知覚割合が低かった(分割表の期待度数が小さい)ことを考慮し、カイ 2 乗検定ではなく、Fisher の正確確率検定により有意差を検討した。

表 3 には、刺激条件ごとに、刺激の音源種別により知覚割合に 5%水準で有意な差が生じた人体の部位(a: 耳の周り, b: 耳の奥, c: 頭部, d: 胸部, e: 腹部)を示している。なお、前述の通り、既往実験では音圧レベル 40 dB の刺激を用い

The image shows a screenshot of a questionnaire interface with five questions (Q1-Q5) and their response options. Each question is displayed in a separate box with a title and a scale of response options.

- Q1 (音による)圧迫感または振動感を体のどこかで感じましたか。**
Options: 1. 感じなかった, 2. 感じた
- Q2 (Q1 で「2. 感じた」と回答した場合)圧迫感または振動感を体のどこで感じましたか。(複数回答可)**
Options: 1. 耳の周り, 2. 耳の奥, 3. 頭部, 4. 胸部, 5. 腹部, 6. その他
- Q3 (Q1 で「2. 感じた」と回答した場合)圧迫感または振動感は何の程度でしたか。**
Options: 非常に弱い, 非常に強い
- Q4 提示された音は聞こえた、または耳元で何かを感じたでしょうか。**
Options: 1. 聞こえなかった、または耳元で何も感じなかった, 2. 聞こた、または耳元で何かを感じた
- Q5 (Q4 で「2. 聞こえたまたは耳元で感じた」と回答した場合)提示された音は不快でしたか。**
Options: 全く不快でない, 非常に不快

An "OK" button is located at the bottom center of the interface.

図2 刺激提示後の質問及び回答項目

表3 刺激の音源種別により知覚割合の差が有意な人体の部位

SPL (dB) \ FRQ (Hz)	50	60	70	80	90	100
10	—	—	—			
20	—	—				d
40						
50						
63						—
80						
160		a				

なかったことから、表3には音圧レベル50 dBから100 dBまでの結果を示す。有意な差が生じた刺激は、160 Hz・60 dBでの「耳の周り」、20 Hz・100 dBでの「胸部」の2条件のみであった。このことから、純音と1/3オクターブバンドノイズとの違いにより、知覚割合に差は生じないと判断して、以後は、本実験により得られた結果のみを用いて分析を行った。

3.2 圧迫感・振動感を知覚する人体の部位

Q2の回答から、圧迫感・振動感を知覚した人体の部位の回答数について、組み合わせも含めて上位10番目までを整理した結果を表4に示す。なお、有効データ数1200のうち、圧迫感・振動感を知覚したデータ数は830であった。

回答数が最も多い人体の部位は、「耳の奥」単独で172と最も多く、「耳の奥」・「頭部」の両者

で104、「頭部」単独で98、「耳の周り」単独で67、「耳の周り」・「耳の奥」・「頭部」の組み合わせで58となった。なお、上位10番目までの回答に、「腹部」は含まれていなかった。

3.3 音圧レベルと人体の各部位での圧迫感・振動感の知覚割合との関係

続いて、Q2に示す人体の各部位を対象に、音圧レベルと圧迫感・振動感の知覚割合との関係を、周波数別に整理したものを図3から図7に示す。人体のいずれの部位でも、音圧レベルの増加とともに、知覚割合が高くなっている。人体の部位別に比較すると、「耳の奥」の知覚割合が最も高く、「頭部」が続き、「腹部」が最も低い傾向にある。ここで、「耳の奥」の知覚割合を周波数で比較すると、40 Hz及び50 Hzの知覚割合が高い傾向に

表4 圧迫感・振動感を知覚した人体の部位の回答数

順位	耳の周り	耳の奥	頭部	胸部	腹部	部位数	回答数
1		○				1	172
2		○	○			2	104
3			○			1	98
4	○					1	67
5	○	○	○			3	58
6	○	○				2	54
7	○	○	○	○		4	25
8				○		1	24
8		○	○	○		3	24
10	○		○			2	22

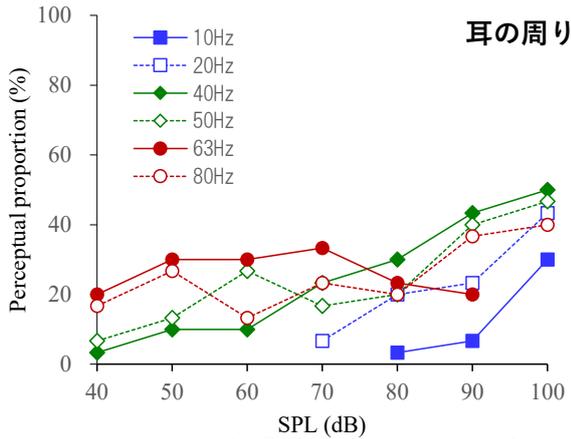


図3 音圧レベルと「耳の周り」での圧迫感・振動感の知覚割合との関係

ある。一方、10 Hz の知覚割合が最も低く、20 Hz 及び 80 Hz の知覚割合も低い傾向にある。

「頭部」では、「耳の奥」と同様に 10 Hz 及び 20 Hz での知覚割合が低く、40 Hz 及び 50 Hz で

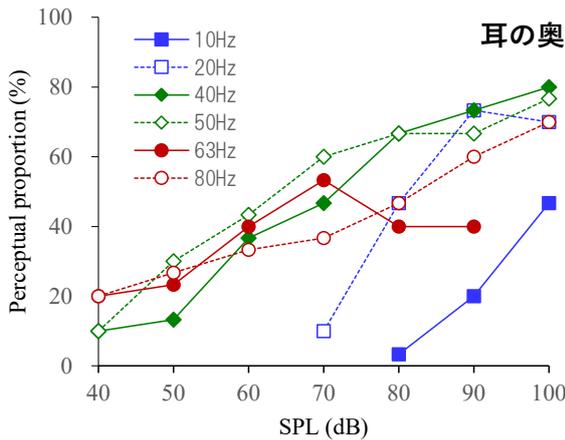


図4 音圧レベルと「耳の奥」での圧迫感・振動感の知覚割合との関係

の知覚割合が高い傾向にある。ここで、80 Hz と 40 Hz または 50 Hz との差に着目すると、「頭部」は「耳の奥」に比べて小さい傾向を示している。

「胸部」では、63 Hz の知覚割合が、90 dB で急激に高くなるのがわかる。この 63 Hz では、「耳の周り」や「耳の奥」は 70 dB、「頭部」は 80 dB で、それぞれ頭打ちの傾向を示している。

3. 4 音圧レベルと圧迫感・振動感の近く割合との関係

前節の結果を踏まえ、圧迫感・振動感を知覚する人体の部位が複数あることや刺激条件により変化することを考慮し、各刺激条件における知覚割合を以下のように整理した。各刺激条件での知覚割合を人体の部位で比較し、その中の最高値

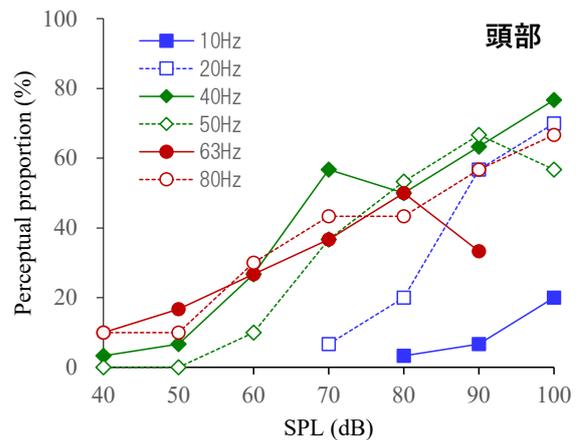


図5 音圧レベルと「頭部」での圧迫感・振動感の知覚割合との関係

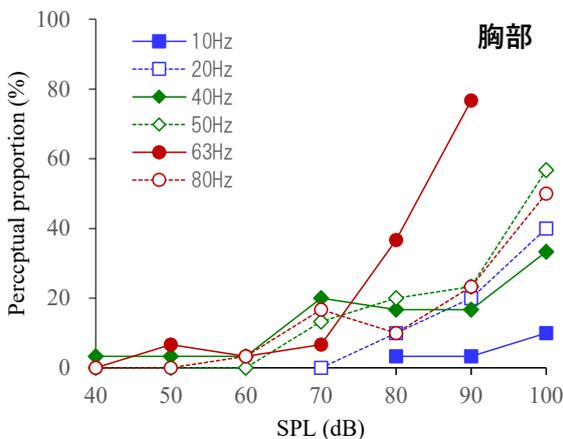


図6 音圧レベルと「胸部」での圧迫感・振動感の知覚割合との関係

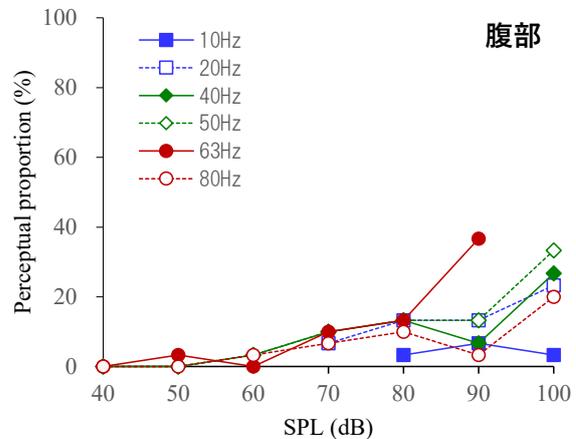


図7 音圧レベルと「腹部」での圧迫感・振動感の知覚割合との関係

表5 音圧レベルと圧迫感・振動感の知覚割合（最高値）との関係

SPL (dB) \ FRQ (Hz)	40	50	60	70	80	90	100
10	—	—	—	—	3.3% [abcde]	20.0% [b]	46.7% [b]
20	—	—	—	10.0% [b]	46.7% [b]	73.3% [b]	70.0% [bc]
40	10.0% [b]	13.3% [b]	36.7% [b]	56.7% [c]	66.7% [b]	73.3% [b]	80.0% [b]
50	10.0% [b]	30.0% [b]	43.3% [b]	60.0% [b]	66.7% [b]	66.7% [bc]	76.7% [b]
63	20.0% [ab]	30.0% [a]	40.0% [b]	53.3% [b]	50.0% [c]	76.7% [d]	—
80	20.0% [b]	26.7% [ab]	33.3% [b]	43.3% [c]	46.7% [b]	60.0% [b]	70.0% [b]
160	—	33.3% [b]	20.0% [b]	43.3% [c]	53.3% [c]	56.7% [bc]	73.3% [b]

を当該条件での知覚割合とした。表5には、この手順により得られた知覚割合（最高値）とその人体の部位を示す。表中の記号は表3と同じで、知覚割合が同じ場合にはすべての部位を記載した。

さらに、表5に示す音圧レベルと知覚割合との関係について、10 Hz から 80 Hz のデータを対象に、ロジスティック回帰モデルを当てはめて得た回帰式を図8に示す。

表5において、知覚割合が30%以上を示す人体の部位（表中では太字で示す）に着目すると、「耳の奥」が最も多く、「頭部」が続く。また、「胸部」は、63 Hz・90 dB の刺激条件で知覚割合が最も高い。以上の結果を踏まえると、圧迫感・振動感は、「耳の奥」と「頭部」に加えて、限定的ではあるが「胸部」も含めて知覚されると考える。

続いて、図8から音圧レベルが50~90 dB の範囲における知覚割合を周波数で比較すると、音圧レベルにより異なるが、40 Hz から 63 Hz の知覚割合が高い傾向にある。その反面、10 Hz 及び 20 Hz の知覚割合は低い。また、80 Hz に関しては、音圧レベルの増加に伴う知覚割合の増加割合が、他の周波数よりも小さいことがわかる。

3.5 音圧レベルと高度の圧迫感・振動感強度の反応割合との関係

Q3 の回答から、圧迫感・振動感の強さに関する基礎的な検討を行う。本稿では、圧迫感・振動感の強さを評価する指標として、5段階評価のうち上位2段階の回答割合（%highly oppressed or

vibrated, 以後「%HOV」と記す。）を、高度の圧迫感・振動感強度の反応割合として用いた。最初に、前節の結果を踏まえて「耳の奥」、「頭部」及び「胸部」の3か所それぞれについて、各刺激条件で圧迫感・振動感を知覚した場合の%HOV を整理した。なお、前述の各部位を知覚した回答数が10以下の場合には、当該条件での%HOV を算出しなかった。続いて、当該条件における%HOV を3か所の部位で比較し、その中の最高値を高度の圧迫感・振動感強度の反応割合（最高値）とした。図9には、周波数別（40~80 Hz）に音圧レベルとの関係を整理したものを示す。

音圧レベル 60 dB 及び 70 dB では、%HOV に顕著な差は生じていないが、音圧レベルの増加とと

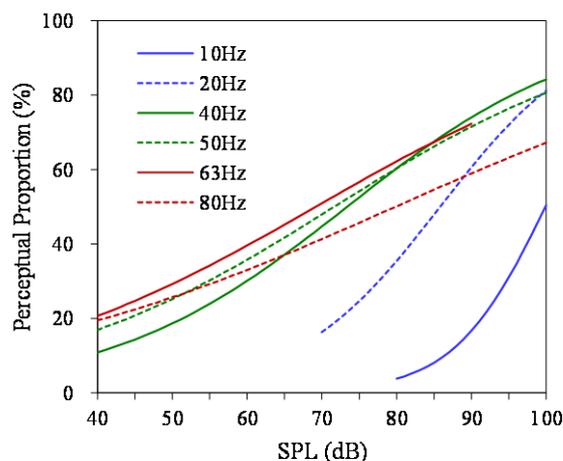


図8 ロジスティック回帰モデルによる音圧レベルと圧迫感・振動感の知覚割合（最高値）との関係

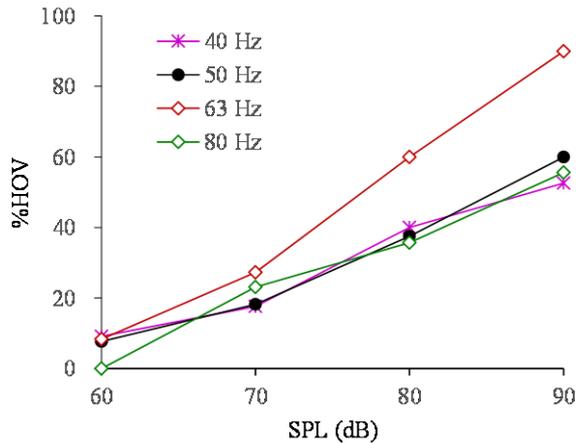


図9 音圧レベルと高度の圧迫感・振動感強度の反応割合（最高値）との関係

もに 63 Hz で急激に増加している。人体の部位で比較すると、「耳の奥」より「頭部」や「胸部」で %HOV が高い傾向を示していた。このように、63 Hz の音により生じる圧迫感・振動感を、頭部に加えて、特に胸部で知覚することにより、他の周波数に比べて強く感じていることが示唆される。しかしながら、前述のとおり実験室の固有振動数が 60 Hz 付近にあることから、63 Hz の音を刺激とした場合の実験結果に関しては、3.3 節や 3.4 節において検討した音圧レベルと知覚割合との関係も含めて、更なる検討が必要である。

4 おわりに

低周波音により生じる圧迫感・振動感について、この感覚が生じる人体の部位に着目し、主に純音を刺激に用いた主観評価実験の結果を報告した。本稿で得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 刺激種別 (1/3 オクターブバンドノイズと純音) による知覚割合の差は小さい。
- 2) 圧迫感・振動感は、主に「耳の奥」と「頭部」で知覚されているが、限定的に「胸部」でも知覚される。
- 3) 圧迫感・振動感の知覚割合は、音圧レベルにより異なるが、40 Hz、50 Hz 及び 63 Hz の周波数帯では高い傾向にあるが、10 Hz、20 Hz 及び 80 Hz の周波数帯では小さい。
- 4) 63 Hz の音により生じる圧迫感・振動感は、頭部に加えて胸部で知覚されることにより、他の周波数に比べて強く感じる人の割合が増える。

謝辞

実験の実施にあたり、2021 年度神奈川大学工学部卒業生の 大八木天斗氏、木菱智哉氏、桑原優氏の協力を得た。ここに深甚なる謝意を記す。

参考文献

- 1) 公害等調整委員会事務局:令和 2 年度公害苦情調査結果報告書(2021)
- 2) 環境省大気生活環境室:低周波音問題対応の手引書(2005)
- 3) 消費者安全調査委員会:消費者安全法第 23 条第 1 項に基づく事故等原因調査報告書 家庭用ヒートポンプ給湯機から生じる運転音・振動により不眠等の健康症状が発生したとの申出事案(2014)
- 4) 消費者安全調査委員会:消費者安全法第 23 条第 1 項の規定に基づく事故等原因調査報告書 家庭用コージェネレーションシステムから生じる運転音により不眠等の症状が発生したとされる事案(2017)
- 5) 中村俊一,時田保夫,織田厚:超低周波音の生理・心理的影響と評価に関する研究班報告書,昭和 55 年度文部省科学研究費「環境科学」特別研究(1979).
- 6) Morinaga, M., Yamamoto, I., Kobayashi, T., Makino, K., Ochiai, H., Tachibana, H.: Frequency characteristics of oppressive and vibratory feeling to low-frequency sound, Proc of International Congress of Acoustics 2019, Germany (2019)
- 7) Takahashi, Y.: Vibratory Sensation Induced by Low-Frequency Noise: A Pilot Study on the Threshold Level, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 28, 4, 245–253(2009)
- 8) 横島潤紀, 森長誠, 牧野康一, 横山栄, 小林知尋, 土肥哲也:低周波音による圧迫感・振動感の知覚に関する主観評価実験,日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2020-38(2020)
- 9) 岸川洋紀:感受性を考慮した騒音影響の評価方法に関する研究,京都大学博士論文(2007)