

報告 (Note)

低周波数成分を含む自動車騒音に対する心理的評価の因果構造

横島 潤紀, 篠内 和真*, 森長 誠**, 牧野 康一***,
土肥 哲也***, 横山 栄***, 小林 知尋***, 山崎 徹****

(調査研究部, *神奈川大学大学院, **大同大学, ***小林理学研究所, ****神奈川大学)

Causal structure of psychological evaluation due to road traffic noise including low-frequency components

Shigenori YOKOSHIMA, Kazuma YABUCHI*, Makoto MORINAGA **, Koichi MAKINO***,
Tetsuya DOI***, Sakae YOKOYAMA***, Tomohiro KOBAYASHI***, and Toru YAMAZAKI****

(Research Division, *Kanagawa University, Graduate School of Engineering, **Daido University,
Kobayashi Institute of Physical Research, *Kanagawa University)

キーワード： 低周波音, 圧迫感, 振動感, 主観評価実験, 構造方程式モデリング

1 はじめに

近年, 低周波音に係る苦情件数は増加傾向にある¹⁾。低周波音に係る苦情は, 知覚したときに生じる心理的影響が問題となることが多い。特徴的な心理的な感覚として, 圧迫感・振動感の存在が報告されている。そして, この感覚に関しては, 40Hz ~50Hz の低周波数領域において, 他の感覚よりも優先的に生じることが報告されている²⁾。

環境省は, 低周波音に係る苦情に適切に対応することを目的に, 「低周波音問題対応の手引書」³⁾を公表している。この中で, 空調室外機, 送風機など固定発生源による低周波音に係る苦情の申し立てに際し, 当該苦情が低周波音によるものか否かを判断するための目安となる参照値が示されている。しかし, この参照値は, 走行する自動車やヘリコプタなど交通機関の移動により生じる低周波音には適用できない。

交通機関の移動に伴い発生する音の周波数特性に関しては, 人の耳の感度が比較的良好とされる 1,000 Hz 前後だけではなく, 100 Hz 以下の低周波数成分が同時に卓越する場合がある。そのため, 前述のとおり, 40 Hz から 50 Hz の低周波数成分が卓越している場合には, ラウドネスだけではなく圧迫感・振動感も考慮して, 対象となる音を評価する必要があると思われる。

以上の課題を踏まえ, 著者らは, 低周波数成分の有無を基本パラメータとして, 複数の自動車騒音を組み合わせた自動車交通騒音を対象とした主観評価実験(以下, 単に「実験」と記す。)を行

った。騒音に含まれる低周波数成分の有無が主観評価に及ぼす影響を検討した結果, 自動車交通騒音の等価騒音レベルが同程度の場合, 低周波数成分を含む場合の圧迫感・振動感や不快感は, 低周波数成分を含まない騒音に比べて強い傾向にあることを示した⁴⁻⁶⁾。さらに, 構造方程式モデリング (Structural Equation Modeling : SEM) の適用により, 騒音に含まれる低周波数成分の存在が, 圧迫感・振動感を経由して, 間接的に不快感を強めることを明らかにした。

しかし, 上述の知見は低周波数成分の有無に着目したものであり, 低周波数成分の大きさと主観評価との定量的関係は十分に検討されていない。低周波数成分を十分に含む騒音が人に及ぼす影響を適切に評価するためには, 低周波数成分と可聴周波数成分それぞれからの寄与を定量的に把握することが必要である。このことに加え, 一台の自動車走行から発生する単体騒音(自動車単体騒音)と自動車交通騒音の両者について, 低周波数成分の寄与により, 騒音に対する主観評価への影響が異なるのか否かを確認することも, 重要な知見の蓄積につながると考えている。

筆者らは, 2024 年度に, 低周波数成分が十分に含まれる自動車単体騒音及び自動車交通騒音を用いた 2 種類の実験を実施した。既往実験⁴⁻⁶⁾では, 低周波数成分において, 1/3 オクターブバンド中心周波数で 50 Hz の帯域が卓越する刺激を用いたが, 新たに 40 Hz の帯域が卓越する刺激を加えた。本研究では, 卓越周波数となる 40 Hz または 50 Hz

の帯域に着目し、当該帯域の音圧レベルを低周波数成分の大きさ（曝露量）とする。2種類の実験のうち、自動車単体騒音を用いた実験については、*籐内ら*⁷⁾が報告していることから、本稿では自動車交通騒音を用いた実験を報告する。特に、低周波数成分の曝露による圧迫感や振動感、妨害感、そして不快感への影響について、構築した階層的評価構造モデルにSEMを適用し検証する。

2 実験

実験は、神奈川大学倫理審査委員会の承認（No. 2024-32）を経て、2024年11月から2025年1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。）において、1名単位で実施した。



図1 低周波音実験室

2. 1 概要

被験者は実験室内の椅子に着席し、実験室天井部に設置されているスピーカから再生される28種類の刺激（各1分間）を、ランダムな順序で聴取した。この際には、実験室内の高さ位置による音圧分布の影響を考慮し、被験者の耳の高さは実験室床面から115cmの高さに統一した。なお、日常生活の行動場面を模擬するため、刺激の聴取中は、被験者には本や雑誌を読んでもらった。

被験者は、自動車単体騒音を用いた実験（実験1）及び自動車交通騒音を用いた実験（実験2）の両方に参加した。実験のスケジュールは、最初に実験2（40分程度）、休憩（10分程度）を挟んで実験1（20分程度）とした。

2. 2 刺激

本実験では、家屋内部における自動車交通騒音の聴取を模擬するため、片側一車線道路沿道にて録音した大型車（Heavy vehicle: HV）及び小型車

（Light vehicle: LV）の通過騒音に、家屋の遮音特性を模擬したフィルタ⁸⁾を適用した。さらに、空調音のスペクトルを模擬した等価騒音レベル35dBのノイズを重畠したものを刺激として用いた。

本実験の基本パラメータとして、低周波数成分の卓越周波数（Dominant Frequency: DF）及びその時間平均音圧レベル $L_{\text{peq,DF}}$ （1分間）を設定した。その他には、大型車及び小型車の単発騒音曝露レベル (L_{EA}) の組合せとともに、大型車の通過騒音の発生頻度（Frequency: FRQ）を設定した。これらの発生頻度の設定により、1分間の刺激の等価騒音レベル (L_{Aeq}) が従属的に変化することになる。以上を組み合わせ、全28種類の刺激(ST1～ST28)を作成した。各刺激の提示条件の詳細を表1に示す。なお、本実験において、低周波音成分が小さい小型車の通過騒音を、日常的な交通環境を模擬するための背景騒音として位置付け、全ての刺激において発生頻度を6回とした。

刺激ST1からST4の周波数特性として、1/3オクターブバンド中心周波数ごとの時間平均音圧レベル $(L_{\text{peq,1/3oct}})$ を図2に示す。また、刺激ST1とST14について、1分間におけるA特性音圧レベル $(L_{pA,F})$ の時間変動特性を図3に示す。

2. 3 手順

実験室内のモニターに表示された主観評価の項目に対して、各刺激の聴取直後に、被験者は、マウスやキーボードを用いて回答を入力した。主観評価では、最初に、刺激全体に対する不快感の評価を11段階尺度（0.全く不快でない～10.常に不快）で得た。続いて、妨害感、圧迫感及び振動感に対する評価を5段階尺度（1.全く感じない～5.非常に感じる）で得た。以後の分析では、各評価値を間隔尺度として扱う。また、実験終了後、内観調査を実施するとともに、騒音感受性の尺度としてWNS-6B⁹⁾の評価得点を得た。

2. 4 被験者

被験者は、音響に関する特別な知識を有していない20代から60代の30名とした。性別・年齢別の度数分布を表2に、WNS-6Bの評価得点の度数分布を表3に示す。ここで、WNS-6Bの評価得点が6点満点中、4点以上の被験者を高感受性群、4点未満を低感受性群に分類した。なお、実験前には、被験者全員に対し聴力検査を実施し、いずれも正常な聴力を有することを確認した。

表1 実験に用いた刺激の概要

ST	DF (Hz)	L_{Aeq} (dB)	L_{peq_DF} (dB)	L_{EA} (dB)		FRQ	ST	DF (Hz)	L_{Aeq} (dB)	L_{peq_PF} (dB)	L_{EA} (dB)		FRQ		
				HV	LV						HV	LV			
1	40	61	70	70	65	5	15	40	58	66	70	65	2		
2			60				16			57					
3			51				17			48					
4			45				18			44					
5		46	56	55	50		19	44		52	55	50			
6			47				20			45					
7			44				21			43					
8		61	67	70	65	5	22	58		63	70	65			
9			57				23			53					
10			48				24			45					
11			42				25			42					
12		46	52	55	50	5	26	44		49	55	50			
13			45				27			43					
14			42				28			41					

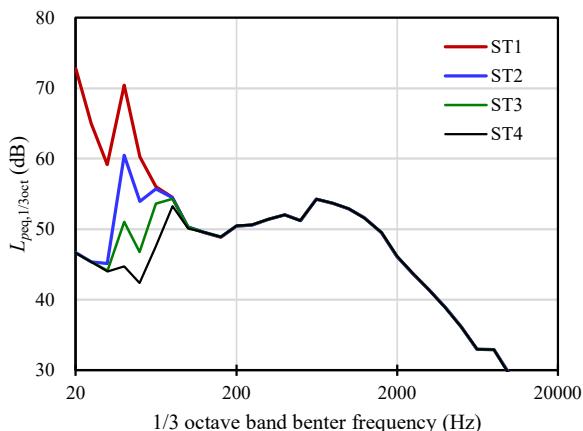


図2 1/3オクターブバンド中心周波数ごとの時間平均音圧レベル（刺激 ST1～ST4）

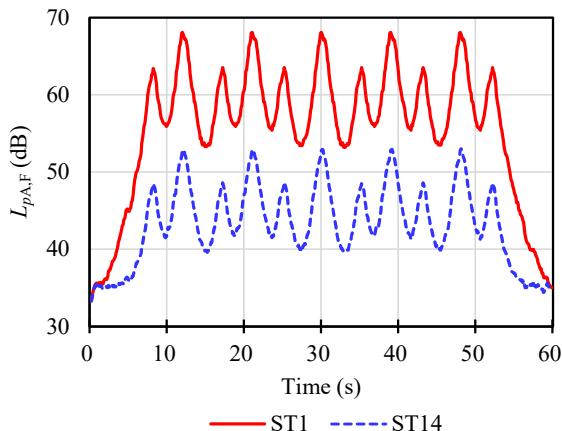


図3 A特性音圧レベルの時間変動特性（刺激 ST1 及び ST14）

表2 実験参加者の性別及び年齢分布

Gender	20 yrs	30 yrs	40 yrs	50 yrs	60yrs
Male	3	3	4	3	2
Female	3	3	2	5	2

表3 実験参加者のWNS-6B評価得点の度数分布

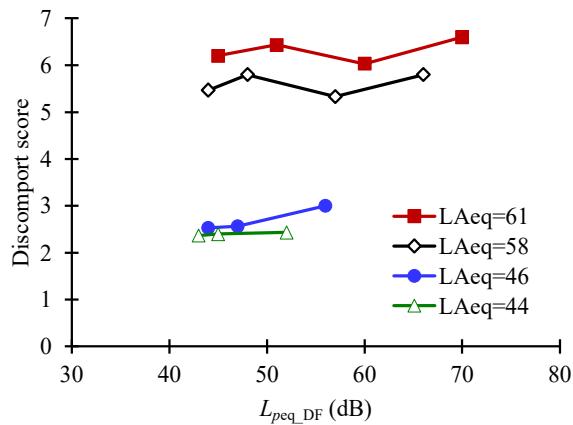
Score	0	1	2	3	4	5	6
Frequency	2	5	3	2	3	8	7

3 分析

本稿では、以後の分析においては、不快感、妨害感、圧迫感及び振動感に対する評価を中心に報告する。

3. 1 低周波数成分の大きさと評価値との関係

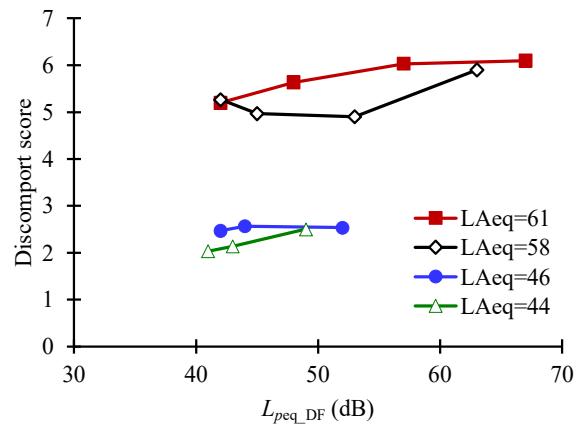
最初に、低周波数成分の大きさと不快感の評価との関係を検証する。図4に、 L_{Aeq} に応じて分類した4グループそれぞれについて、(a) 卓越周波数(DF)が40Hzの場合、(b) 卓越周波数が50Hz



(a) 卓越周波数が 40 Hz の場合

図4 低周波数成分の大きさと不快感の評価との関係

の場合、それにおける L_{peq_DF} と不快感評価の平均値との関係を示す。同図より、卓越周波数に関わらず、 L_{Aeq} が同程度の場合には、低周波数成分の大きさが増加するに伴い、単調に増加しているとは限らないが、不快感の評価が高くなる傾向が認められる。一方、 L_{Aeq} の大小により不快感の評価が顕著に異なることから、 L_{Aeq} による不快感への影響が強いことも読み取れる。また、圧迫感及び振動感に関する限りでも、同様の傾向が認められた。



(b) 卓越周波数が 50 Hz の場合

3. 2 自動車交通騒音に対する不快感の評価構造モデル

低周波数成分を含む自動車交通騒音の評価構造モデルを構築し、SEMを適用することで各影響要因からの寄与を明らかにした。ここで、SEMは、モデル内に観測変数に加えて、実測されない構成概念を潜在変数として導入し、階層構造を想定した変数間の因果分析を可能とする手法である。

本稿では、既報⁴⁻⁷⁾の知見等に基づき、図5に示すとおり、不快感 Discomfort を目的変数とした評価構造モデル（初期版）を作成した。図中の矢印に関しては、单方向の矢印（→）は因果関係を、双方向の矢印（↔）は相関関係を示している。評価構造モデルの外生変数には、等価騒音レベル L_{Aeq} 、低周波数成分の卓越周波数 DF、低周波数成分の大きさ L_{peq_DF} 、年齢 Age、性別 Gender、騒音感受性 Sensitivity を設定した。さらに、説明変数と目的変数の中間変数に、圧迫感・振動感 Oppressive and Vibratory senses 及び妨害感 Disturbance を設定した。ここで、圧迫感・振動感は、圧迫感 Oppressive sense、振動感 Vibratory sense それぞれの5段階評

価から形成される潜在変数とした。以上のことから、外生変数が、中間変数を介して間接的に、目的変数に影響を及ぼすとともに、中間変数を介さずに直接的に、目的変数に影響を及ぼす階層型の評価構造モデルとなっている。

さらに、他の変数から影響を受ける内生変数に対して誤差変数（e1～e5）を設定するとともに、等価騒音レベルと低周波数成分の大きさ、年齢と騒音感受性、性別と騒音感受性、それぞれの変数間に共分散を設定した。

分析に用いた変数の尺度構成を説明する。性別については、男性を1、女性を0のダミー変数とした。年齢については、20代から60代までの5段階の順序尺度を、便宜的に、20歳から60歳までの10歳間隔の間隔尺度とした。騒音感受性については、高感受性群を1、低感受性群を0のダミー変数とした。等価騒音レベル、卓越周波数及び低周波数成分の大きさについては、数値をそのまま用いた。最後に、主観評価（圧迫感、振動感、妨害感及び不快感）については、実験により得られた評価値をそのまま用いた。

3. 3 構造方程式モデリングの適用

分析の手順としては、最初に、初期の評価構造モデルに SEM を適用した。変数間の関係性の強さを示すパス係数のうち、有意確率が最も高いパスを削除したモデルに対して再び SEM を適用す

る行程を、すべてのパス係数の有意確率が 5%以下となるまで繰り返した。図 6 には、評価構造モデル（最終版）を示す。図中の数値は、パス係数（標準偏回帰係数）を示す。なお、本分析では SPSS Amos 29 を用いた。

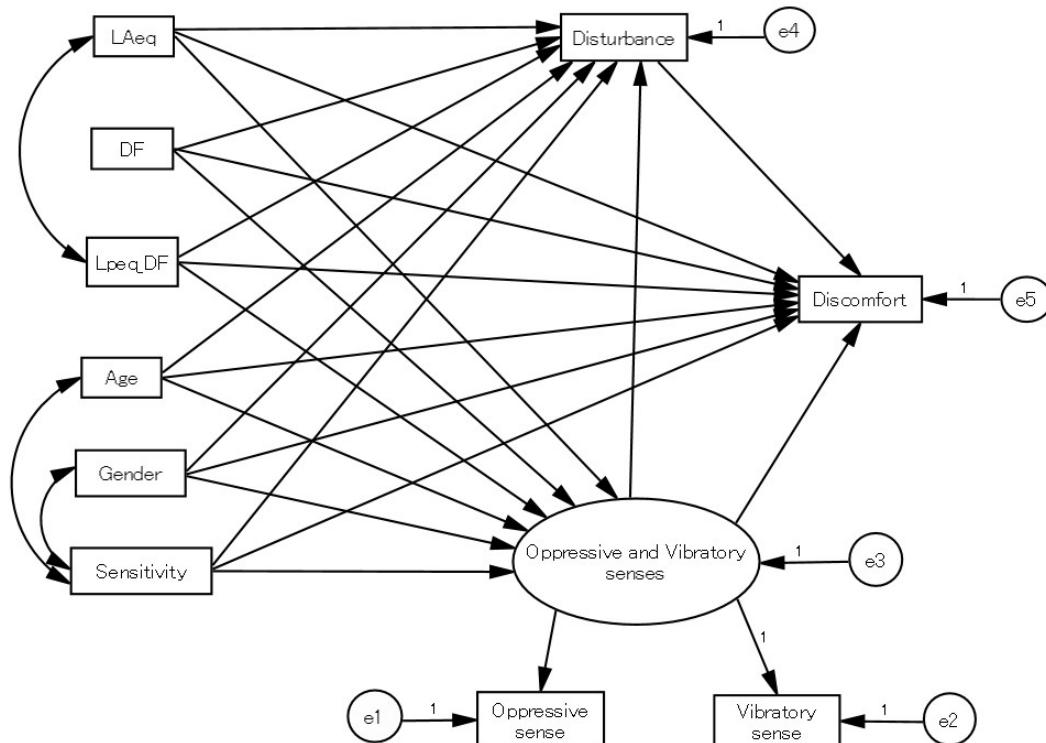


図 5 評価構造モデル（初期版）

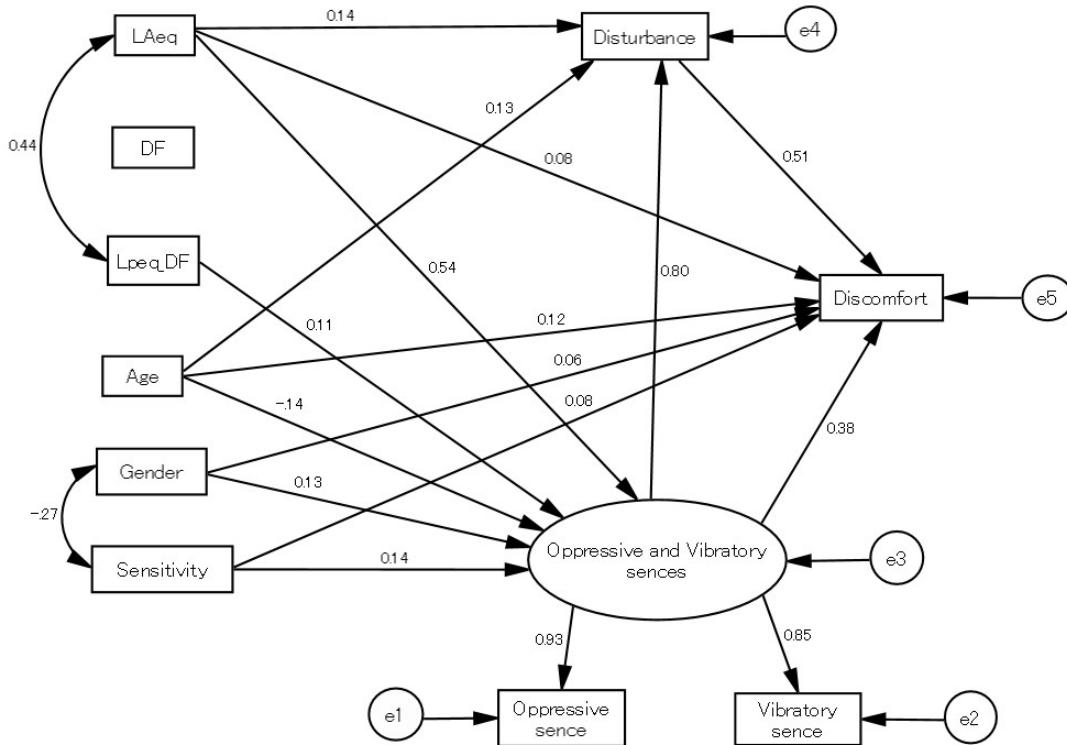


図 6 評価構造モデル（最終版）

既往文献を参考に、モデルの適合度指標として、AGFI (Adjusted Goodness of Fit Index) 及び RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation) を採用した。AGFIは、モデルが観測データとの当てはまりの良さを示すもので、自由度で補正された決定係数に相当する。1に近いほど当てはまりが良いとされ、0.95以上が良好な適合の目安とされる。RMSEAは、モデルの予測値と実際のデータとの乖離度を、1自由度あたりの大きさで表したものである。値が0に近いほど適合度が高いとされ、一般的に0.05以下なら良好、0.1以上なら不良と判断される。本モデルにおいては、AGFIは0.957、RMSEAは0.054であり、実験結果に対して妥当な適合を示していると判断した。

図6より、低周波数成分に関するパラメータであるDFからのパス係数は、すべて有意ではなかった。同様なパラメータである $L_{\text{peq_DF}}$ からのパス係数は、圧迫感・振動感 Oppressive and Vibratory senses に対してのみ有意であり、その大きさは0.11であった。一方、等価騒音レベル L_{Aeq} からのパス係数は、圧迫感・振動感、妨害感 Disturbance 及び不快感 Discomfort いずれに対しても有意かつ正の値を示していた。このうち、圧迫感・振動感へのパス係数が0.54で最も大きかった。

次に、年齢Ageからのパス係数はすべて有意で、圧迫感・振動感に対しては負の値、妨害感及び不快感に対しては正の値を示した。性別 Gender からのパス係数は、圧迫感・振動感及び不快感に対して有意かつ正の数値を示した。騒音感受性からのパス係数は、圧迫感・振動感、妨害感及び不快感に対しては有意かつ正の数値を示した。

さらに、主観評価間の影響に関しては、圧迫感・振動感から妨害感及び不快感へのパス係数、妨害感から不快感へのパス係数はいずれも有意であった。ここで、圧迫感・振動感から不快感への直接効果はパス係数そのもので、妨害感を経由した間接効果はパス係数の積で算出できる。すなわち、直接効果は0.38であるのに対し、間接効果は $0.80 \times 0.51 = 0.41$ となり、若干高いことが分かる。

最後に、低周波数成分と可聴周波数成分それぞれの曝露による不快感への影響を定量的に比較する。 $L_{\text{peq_PF}}$ から不快感への総合効果が0.0867となつたことから、不快感を標準偏差で1単位変化させるためには、 $L_{\text{peq_PF}}$ を標準偏差で $11.5 (= 1/0.0867)$ 単位を変化させることが必要である。 $L_{\text{peq_PF}}$ の標準偏差が8.32 dBであるため、 11.5×8.32

= 95.7 dB の変化は、不快感の1標準偏差分の変化と等価になる。同様に、 L_{Aeq} から不快感への総合効果は、 $0.08 + 0.14 \times 0.51 + 0.54 \times (0.80 \times 0.51 + 0.38) = 0.577$ となることから、不快感を標準偏差で1単位変化させるためには、 L_{Aeq} を標準偏差で $1.73 (= 1/0.577)$ 単位を変化させることが必要である。 L_{Aeq} の標準偏差が7.28 dBであるため、 $1.73 \times 7.28 = 12.6$ dBの変化は、不快感の1標準偏差分の変化と等価になる。このことから、 $L_{\text{peq_PF}}$ の95.7 dBの変化は、 L_{Aeq} の12.6 dBの変化と等価である。単純な数値で表すと、 $L_{\text{peq_PF}}$ の15 dBの変化は、 L_{Aeq} の2 dBの変化とほぼ等しいことになる。

4 考察

本実験の結果から、低周波数成分の大きさは、圧迫感・振動感を介して間接的に不快感の評価を強める傾向が示唆された。この傾向は、著者らの既往研究^{4,6)}においても一貫して確認されており、低周波数成分が不快感に及ぼす心理的影響のメカニズムを適切に把握したものと考えられる。また、卓越周波数の差違が確認されなかつたが、40 Hz及び50 Hzのいずれも、圧迫感・振動感を優先的に感じやすい領域であることとも一因であろう。

低周波数成分と可聴周波数成分それぞれの大きさによる不快感の評価への影響について、自動車単体騒音の実験結果を対象とした既報⁷⁾と同様に、可聴周波数成分の影響が強かった。しかし、既報では、低周波数成分の音圧レベル15 dB程度の変化が、A特性音圧レベル1 dB程度の変化と等価であったことから、自動車交通騒音では、低周波数成分の影響が強いことになる。この要因として、自動車交通騒音が間欠的に発生しているために、含まれる低周波数成分の時間変動特性が激しいことに着目する。Moorhouse et al.¹⁰⁾は、実験室実験の結果から、変動の激しい低周波音に対する許容閾値は、安定した低周波音に比べて平均で5 dB低いことを報告しており、本研究の一連の結果とも一致している。

個人属性、すなわち、年齢、性別及び騒音感受性のいずれも、不快感への総合効果は正の数値を示している。それぞれの変数の尺度構成を踏まえると、女性に比べて男性が、低年層よりも高年層が、そして低感受性群よりも高感受性群が、不快感を強く評価している。年齢に関しては、圧迫感・振動感へのパス係数が負になっており、既報での結果^{4,6)}とは異なっており、更なるデータの蓄積が

必要である。性別に関しては、日本国内における社会調査の結果を取りまとめた Yokoshima et al.¹¹⁾も、交通騒音に対する高度のアノイアンスの反応割合が、女性よりも男性の方で高いことを報告している。今後の研究でも同様の結果が得られるのか注視していきたい。また、騒音感受性は、低周波音ではなく、あくまでも騒音に対する感受性であり、この指標が低周波音に対する感度に本当に影響を及ぼすものなのか、今後も検討を続けたい。

5 おわりに

本報告では、自動車交通騒音に含まれる低周波数成分の音圧レベルをパラメータとした主観評価実験を実施した。低周波数成分及び可聴周波数成分それぞれの曝露による圧迫感や振動感、妨害感、そして不快感への影響について、構築した階層的評価構造モデルに構造方程式モデリングを適用して検証を行った。分析の結果、低周波数成分の曝露は、圧迫感・振動感を介して不快感に間接的な影響を及ぼすことが示された。さらに、低周波数成分と可聴周波数成分それぞれの曝露による不快感への影響を定量的に比較したところ、40 Hz または 50 Hz の時間平均音圧レベル 15 dB の変化は、等価騒音レベル 2 dB の変化とほぼ等しい結果が得られた。

謝辞

本実験の実施にあたり、ご協力いただいた被験者各位、2024 年度神奈川大学工学部卒業生の溝口駿輔氏に深甚なる謝意を表す。本研究は、科研費 JP22K04437 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 公害等調整委員会事務局、令和 5 年度苦情調査結果報告書 (2025).
- 2) 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).
- 3) 環境省大気生活環境室：低周波音問題対応の手引書 (2005).
- 4) 篠内 和真、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：自動車交通騒音に対する主観評価における低周波数成分の影響、日本音響学会秋季研究発表会講演論文集、497–500 (2024).
- 5) 篠内 和真、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：低周波数成分を含む騒音に対する不快感の因果分析、日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集、249–250 (2024).
- 6) 篠内 和真、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：低周波数成分を含む自動車交通騒音に対する不快感の因果分析、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-2024-52 (2024).
- 7) 篠内 和真、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：低周波数成分を含む自動車単体騒音に対する主観評価、自動車技術会論文集、56(5), 940–946 (2025).
- 8) H. Tachibana, A. Fukushima and H. Ochiai: Modelling of house filter for wind turbine noise, Proc. Wind Turbine Noise 2015 (2015).
- 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).
- 10) A. T. Moorhouse, D. C. Waddington, M. D. Adams: The effect of fluctuations on the perception of low frequency sound, J. Low. Freq. Noise., Vib. & Act. Cont., 26(2), 81–89 (2007).
- 11) S. Yokoshima, M. Morinaga, S. Tsujimura, K. Shimoyama, T. Morihara: Representative exposure–annoyance relationships due to transportation noises in Japan, Int. J. Environ. Res. Public Health, 18(20), 10935 (2021).