

生理反応に基づく音環境の快適性評価に関する研究

阿部 将幸 中島 美百合
原澤 悠 江川 隼太

概 要

ウェアラブルセンサや生体計測技術の進展により、近年では生理的な反応をリアルタイムかつ非侵襲的に計測することが可能となってきた。これに伴い、音環境の評価においても、主観評価に加えて、心拍変動や脳波といった生理指標を取り入れる研究が進められている。従来の主観評価法は簡便である一方で、評価者の感受性や心理的バイアスの影響を受けやすいとされている。これに対し、生理指標を用いることで、より客観的かつ定量的な評価が可能になることが期待されている。

本研究では、音刺激が人間の心理・生理反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、ストレス音源および非ストレス音源提示時における主観評価と心拍変動の対応を検討した。その結果、不快度とHR（平均心拍数）、HRの変動量、およびCVRR（心拍のばらつきを示す指標）との間に比較的高い相関が確認された。不快な音刺激に対しては心拍数が低下する傾向が見られ、一般に報告されているストレス時の心拍数の上昇とは異なる結果となった。一方、CVRRに関しては、ベースライン条件の違いにより不快度との相関の正負が逆転することを確認した。

A study on the evaluation of acoustic comfort based on physiological responses

Abstract

Recent advancements in wearable sensors and biometric measurement technologies have made real-time, non-invasive monitoring of physiological responses possible. As a result, studies evaluating acoustic environments have increasingly incorporated physiological indicators such as heart rate variability (HRV) and brain activity, in addition to conventional subjective assessments. While subjective evaluations are convenient, they are susceptible to influences from individual sensitivity and psychological bias. In contrast, physiological indices are expected to provide more objective and quantitative evaluation methods.

This study aimed to clarify the effects of auditory stimuli on human psychological and physiological responses through examining the relationship between subjective evaluations and HRV during exposure to both stress-inducing and non-stressful sounds. As a result, relatively high correlations were found between unpleasantness ratings and HR (mean heart rate), HR variation, and CVRR (a measure of heart rate variability). It was observed that heart rate tended to decrease in response to unpleasant auditory stimuli, which contrasts with the commonly reported increase in heart rate under stress. In addition, the correlation between CVRR and unpleasantness was found to reverse depending on the baseline condition, suggesting that the experimental baseline setting may significantly influence physiological responses.

キーワード：音環境、生理反応、心拍変動、快適性

§1. はじめに

ウェアラブルセンサや生体計測技術の進展により、近年では生理的な反応をリアルタイムかつ非侵襲的に計測することが可能となってきた。これに伴い、音環境の評価においても、主観評価に加えて、心拍変動や脳波といった生理指標を取り入れる研究が進められている^{1,2)}。

従来の主観評価法は簡便である一方で、評価者の感受性や心理的バイアスの影響を受けやすいとされている。これに対し、生理指標を用いることで、より客観的かつ定量的な評価が可能になることが期待されている。

本報では、音刺激が人間の心理・生理反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、ストレス音源および非ストレス音源提示時における主観評価と心拍変動の対応を検討した。

§2. 実験概要

2.1 被験者

被験者は、20～60代の計15名（男性9名、女性6名、平均年齢34.9歳±11.7歳）を対象とした。いずれも聴力に異常がないと自己申告があり、実験に先立ち実験の趣旨と目的、実験方法について説明を行い、書面による同意を得た。実験は芝パレスクリニック倫理審査委員会の承認（承認番号：155085_rn-37385）を得て実施した。

2.2 刺激音

刺激音はストレス音源として、工事騒音（解体作業音、重機のエンジン騒音を含む）、低周波音（63 Hz純音）、高周波音（4k Hz純音）の3種、非ストレス音源として自然音（川のせせらぎや鳥の鳴き声を含む）、クラシック音楽（ノクターン 第2番 変ホ長調³⁾）の2種を使用した。

刺激音はPCよりオーディオインターフェース（Roland Rubix44）、アンプ（YAMAHA A-S801）を通して、スピーカー（YAMAHA NS-B330）より提示した。提示音量は被験者頭部位置で60 dB（ $L_{Aeq,2min}$ ）となるよう調整した。

2.3 実験の流れ

実験は、図1に示す居室内（暗騒音レベル：25 dB以下）で実施した。実験中、被験者は室中央に配置した椅子に着席し、音提示中は目を閉じて音に集中するよう指示した。

図2に実験の流れを示す。各試行は、2分間のベー

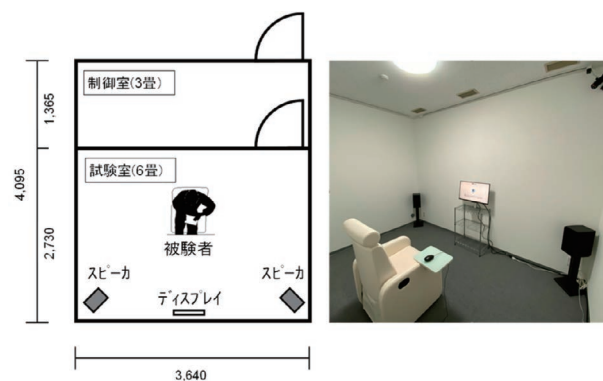


図1 実験室のレイアウトと写真

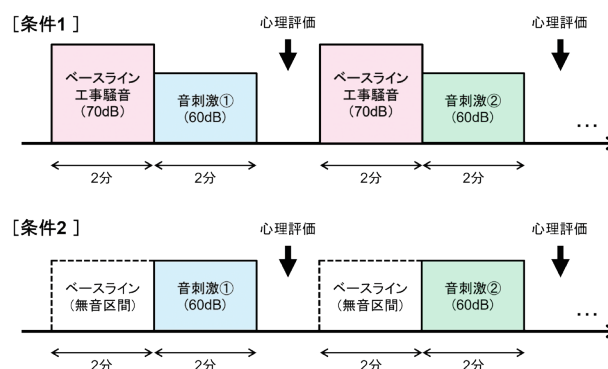


図2 実験の流れ

スラインを設けた後、音刺激を2分間提示し、心理評価アンケートを実施した。この一連の流れを合計5回実施し、音源再生および評価は、被験者の前方ディスプレイを通じて、被験者自身によるマウス操作で行った。

ベースライン条件として、(1) 工事騒音を70 dBで提示し被験者をストレス状態とする〔条件1〕、(2) 無音とする〔条件2〕の2条件を設定した。ベースラインの条件、および音の提示順は被験者ごとにランダム化し、条件1および条件2は別日に実施した。

実験中はウェアラブル心拍センサ（WHS-1）をベルト電極（UER-MB）により前胸部に装着し、RR間隔データを連続測定した。

2.4 心理指標

音刺激に対する心理反応は、感情の二次元モデル⁴⁾に基づき、音提示後に「不快に感じる（感情価）」、「落ち着く（覚醒度）」の2項目について、7段階のリッカート尺度（1：全く当てはまらない～7：完全に当てはまる）で回答を求めた。

2.5 生理指標

測定したRR間隔データから、心拍変動によるストレス評価手法として代表的な以下の指標を算出した^{1,5)}。各指標について①ベースラインの平均値、②刺激音提示中の平均値、およびその変動量（②-①）を評価値とし、心理指標との相関を求めた。

- ・HR (bpm)：平均心拍数。一般にはストレス時に上昇し、リラックス時に低下する。
- ・LF/HF：低周波成分 (LF：0.05～0.15 Hz) と高周波成分 (HF：0.15～0.40 Hz) の比率。一般にはストレス時に上昇し、リラックス時に低下する。
- ・CVRR (%)：RR間隔の標準偏差を平均で除したもの。一般にはストレス時に低下し、リラックス時に上昇する。
- ・RMSSD (ms)：隣接するRR間隔の差の2乗平均の平方根。一般にはストレス時に低下し、リラックス時に上昇する。
- ・pNN50 (%)：RR間隔の差分信号時系列のうち50 msを超えるものの割合。一般にはストレス時に低下し、リラックス時に上昇する。

2.6 騒音感受性評価

心理・生理反応に対する騒音感受性の影響を検討するため、すべての実験終了後に騒音感受性評価アンケートを実施した。

質問項目は、「テレビやオーディオをたまに大音量で鳴らしている人がいてもあまり気にしない」、「物音がすぐに目が覚める」、「近所の人々がさわがしいと気になる」などの10項目で構成されており、それぞれ6段階のリッカート尺度（1：全く当てはまらない～6：非常によく当てはまる）で回答を求め、合計得点により被験者の騒音感受性を定量化した^{6,7)}。

§3. 実験結果

3.1 心理評価結果と考察

刺激音に対する不快感と落ち着き度の評価結果を表1、図3、図4に示す。不快感と落ち着き度の相関係数は条件1で-0.99、条件2で-1.00であり、いずれも強い負の相関を示した。工事騒音に対する評価では、条件2と比較して条件1で不快感が1.27点低下し、落ち着き度が0.93点上昇した。これは、ベースラインで工事騒音を繰り返し提示したことにより、被験者に慣れが生じたことが条件1の評価に反映されたと考えられる。

また、刺激音条件、ベースライン条件、個人差を要因とした三元配置分散分析（有意水準5%、個人差の交互作用は除く）を行い、両評価項目で刺激音条件の

表1 刺激音に対する不快感・落ち着き度の評価結果（平均±SD、両者の相関係数）

	条件1				条件2			
	不快感		落ち着き度		不快感		落ち着き度	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
工事騒音	4.33	1.23	2.73	1.03	5.60	0.99	1.80	0.94
低周波音 (63Hz)	5.27	0.83	2.27	0.80	4.73	1.58	2.67	1.50
高周波音 (4kHz)	5.53	1.41	1.93	1.10	5.87	1.19	1.67	1.18
自然音	1.47	0.74	5.67	1.11	1.93	1.03	5.40	1.18
クラシック音楽	1.53	0.83	6.07	0.80	1.73	0.96	5.73	1.33
不快感・落ち着き度の相関係数	-0.99				-1.00			

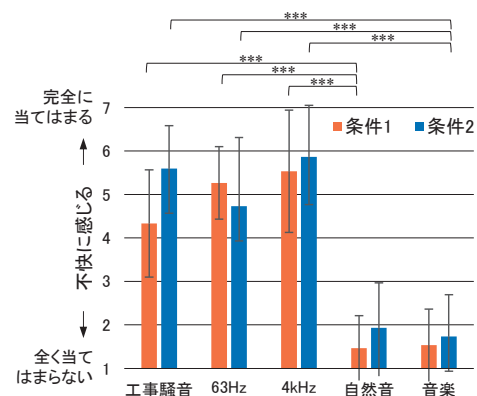


図3 刺激音に対する不快感の評価結果 (***) : $p < 0.001$)

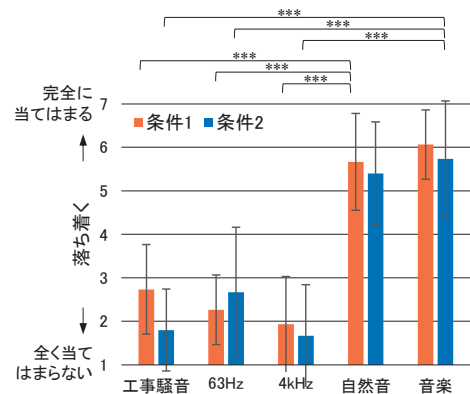


図4 刺激音に対する落ち着き度の評価結果 (***) : $p < 0.001$)

主効果が0.1%水準で有意となり、不快感評価では交互作用が5%水準の有意傾向となった。さらにTukeyのHSD検定による多重比較を行った結果、ストレス音源と非ストレス音源の間には0.1%水準で有意差が認められたが、ストレス音源同士、非ストレス音源同士では有意差は確認されなかった。

3.2 騒音の感受性評価と考察

被験者の騒音感受性評価点は平均39.7点±5.1点であった。評価点とストレス音源（3種）、非ストレス

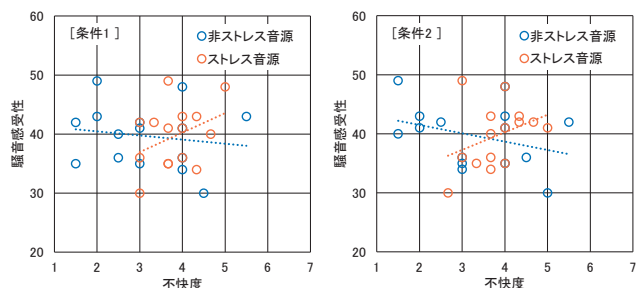


図5 騒音感受性と不快度の相関

表2 騒音感受性と不快度・落着き度の相関

	条件1		条件2	
	不快度	落着き度	不快度	落着き度
ストレス音源(3種)	0.38	-0.20	0.36	-0.12
非ストレス音源(2種)	-0.15	0.32	-0.34	0.50

音源（2種）に対する不快度および落着き度との相関を表2、図5、図6に示す。ストレス音源に対しては不快度と正の相関、落着き度に負の相関が確認され、非ストレス音源に対しては逆の傾向が示された。すなわち、騒音感受性が高い被験者ほどストレス音源に対する不快感が強く、落着きが低下する一方、非ストレス音源に対しては不快感が低下し、落着きが増す傾向が見られた。ただし、相関の強さとしてはいずれも弱から中程度であった。

3.3 生理評価結果と考察

測定したRR間隔データから解析した生理指標の平均値と標準偏差、および不快度との相関係数を表3～表5に示す。音の不快度との間に比較的高い相関が認められた生理指標は、刺激音提示中の平均心拍数HR、HRの変動量、およびCVRRであった。

刺激音提示中の平均心拍数HR、HRの変動量、およびCVRRに対し、3.1節記載の条件下で三元配置分散分析および多重比較を実施したところ、HR変動量についてベースライン条件の主効果が0.1%水準で有意となった。また、同項目においては刺激音条件の主効果も5%水準で有意となったものの、条件間の有意差は確認されなかった。

音の不快度と平均心拍数HRの相関を図7に示す。相関係数は条件1で-0.78、条件2で-0.61であり、不快な音を聴くほど心拍数が低下する傾向が見られた。これは、一般に報告されているストレス時の心拍数の上昇とは異なる結果であった。

音の不快度とHRの変動量との相関を図8に示す。相関係数は条件1で-0.94、条件2で-0.86であり、いずれも強い負の相関を示した。HRの変動量は条件1で-1.4～-3.5 bpm、条件2では-0.1～-1.0 bpm

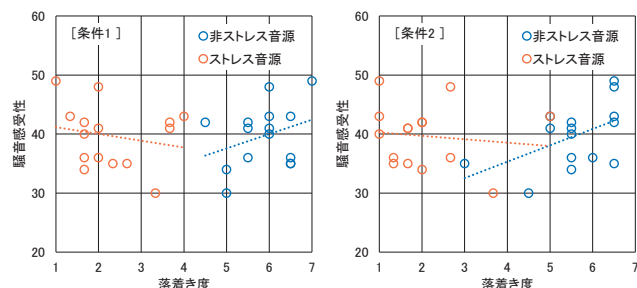


図6 騒音感受性と落着き度の相関

表3 生理評価結果：①ベースライン

条件1	HR (bpm)		LF/HF		CVRR (%)		RMSSD (ms)		pNN50 (%)	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
工事騒音	74.4	15.5	3.2	2.2	4.5	1.3	33.5	17.3	13.4	13.3
低周波音 (63Hz)	74.9	15.2	3.2	2.0	4.6	1.8	33.2	20.5	15.3	17.6
高周波音 (4kHz)	74.4	15.4	3.3	2.5	4.5	1.4	34.2	18.9	16.4	16.0
自然音	75.3	16.4	2.7	2.4	4.1	1.3	30.7	18.6	13.8	15.9
クラシック音楽	73.4	15.5	3.9	3.1	4.6	1.6	33.4	18.0	13.8	13.3
平均値	74.5	15.2	3.3	2.4	4.5	1.5	33.0	18.2	14.5	14.9

条件2	HR (bpm)		LF/HF		CVRR (%)		RMSSD (ms)		pNN50 (%)	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
工事騒音	72.6	8.9	4.2	3.7	4.3	1.2	30.0	15.3	12.2	13.3
低周波音 (63Hz)	71.4	9.0	3.5	3.9	4.3	1.6	30.6	16.5	12.0	16.0
高周波音 (4kHz)	72.1	9.1	5.7	8.5	4.7	1.5	31.4	15.4	12.8	15.2
自然音	72.4	9.4	4.2	2.8	4.8	1.5	31.1	15.1	11.5	12.4
クラシック音楽	72.3	9.4	4.4	2.6	4.4	1.5	29.9	15.9	11.6	15.3
平均値	72.2	8.9	4.4	4.7	4.5	1.4	30.6	15.2	12.0	14.1

表4 生理評価結果：②刺激音提示中

条件1	HR (bpm)		LF/HF		CVRR (%)		RMSSD (ms)		pNN50 (%)	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
工事騒音	72.2	15.9	3.6	3.7	3.9	1.2	32.9	18.9	14.0	16.9
低周波音 (63Hz)	71.6	15.1	2.4	1.9	4.3	1.6	36.6	21.0	19.5	19.7
高周波音 (4kHz)	70.8	15.0	2.1	2.1	4.2	1.4	38.2	18.7	22.2	18.5
自然音	73.6	16.5	2.3	1.7	3.9	1.3	33.6	21.5	16.0	19.1
クラシック音楽	72.0	15.0	2.7	2.8	4.0	1.1	35.8	21.3	17.7	17.0
不快度との相関係数	-0.78		-0.03		0.72		0.49		0.50	

条件2	HR (bpm)		LF/HF		CVRR (%)		RMSSD (ms)		pNN50 (%)	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
工事騒音	71.7	9.3	3.9	4.0	4.1	1.2	31.7	17.5	14.3	16.2
低周波音 (63Hz)	70.4	9.3	3.4	2.6	4.2	1.3	32.4	18.2	13.8	17.1
高周波音 (4kHz)	71.2	9.5	4.2	3.1	4.2	1.5	30.7	16.5	13.0	16.8
自然音	71.8	9.9	3.6	2.9	4.6	1.5	33.4	19.6	15.5	18.3
クラシック音楽	72.2	9.6	4.6	4.6	4.3	1.3	30.5	17.9	12.6	16.5
不快度との相関係数	-0.61		-0.20		-0.79		-0.21		-0.15	

表5 生理評価結果：③変動量（②-①）

条件1	HR (bpm)		LF/HF		CVRR (%)		RMSSD (ms)		pNN50 (%)	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
工事騒音	-2.2	2.2	0.4	2.6	-0.6	1.2	-0.6	7.0	0.7	7.7
低周波音 (63Hz)	-3.3	1.7	-0.8	2.3	-0.3	1.1	3.5	3.8	4.2	6.9
高周波音 (4kHz)	-3.5	2.2	-1.1	3.4	-0.3	1.2	4.0	5.1	5.8	7.0
自然音	-1.7	2.8	-0.4	1.4	-0.2	0.6	2.9	5.8	2.2	6.8
クラシック音楽	-1.4	2.5	-1.2	3.9	-0.6	1.0	2.4	6.2	3.9	6.4
不快度との相関係数	-0.94		0.03		0.15		0.11		0.34	

条件2	HR (bpm)		LF/HF		CVRR (%)		RMSSD (ms)		pNN50 (%)	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
工事騒音	-0.9	1.7	-0.3	2.2	-0.2	0.7	1.7	3.9	2.1	5.4
低周波音 (63Hz)	-1.0	2.7	-0.1	3.6	-0.1	0.8	1.8	4.6	1.8	4.7
高周波音 (4kHz)	-0.9	2.4	-1.6	9.5	-0.6	1.4	-0.7	5.7	0.3	5.6
自然音	-0.6	1.9	-0.6	1.7	-0.2	0.9	2.3	6.4	4.0	7.1
クラシック音楽	-0.1	1.7	0.2	3.4	-0.1	1.0	0.5	6.2	1.0	5.7
不快度との相関係数	-0.86		-0.50		-0.51		-0.32		-0.45	

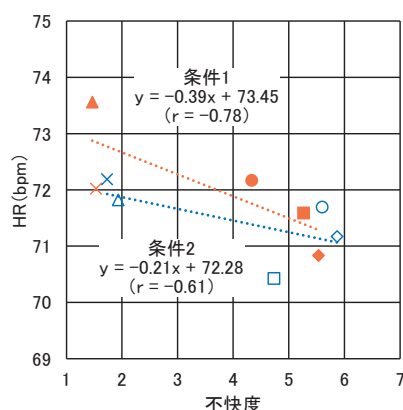


図7 不快度との相関
(平均心拍数 HR)

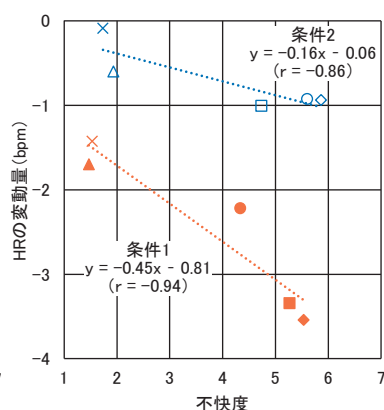


図8 不快度との相関
(HRの変動量)

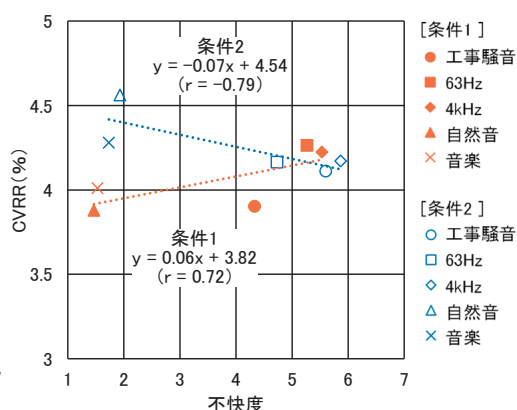


図9 不快度との相関
(CVRR)

であり、変動幅は条件1の方が大きい。これは、ベースライン時の平均心拍数HRが条件1で74.5 bpm、条件2で72.2 bpmであったことが影響していると考えられる。不快度と心拍数との関係からも、ベースラインに工事騒音を提示した条件1よりも、無音環境とした条件2の方が、被験者にとってよりストレスと感じた可能性が考えられる。

音の不快度とCVRRの相関を図9に示す。相関係数は条件1で0.72、条件2で-0.79であり、いずれも強い相関を示したが、相関の正負が条件間で逆転している。ストレス音源提示中のCVRRは両条件でほぼ同程度である一方、非ストレス音源提示中には条件1で低く、条件2で高くなる傾向が見られた。一般にCVRRはストレス時に低下するとされるが、条件1では逆の傾向が示されており、ベースライン条件の違いがその後の反応にも影響を及ぼした可能性が考えられる。

§4. まとめ

本研究では、ストレス音源および非ストレス音源に対する心理・生理反応を測定し、主観評価と心拍変動の対応を検討した。結果を以下に示す。

- ・心理指標である不快度と落ち着き度の間には強い負の相関が認められ、被験者の騒音感受性の高低がこれらの項目の評価傾向に若干の影響を与える可能性がある。
- ・生理指標と心理指標の関係において、不快度と平均心拍数HR、HRの変動量、およびCVRRとの間に比較的高い相関が確認された。不快な音刺激に対しては心拍数が低下し、一般的な傾向とは異なる結果となった。CVRRに関しては、ベースライン条件の違いにより不快度との相関の正負が逆転した。
- ・生理指標による定量的評価を行うためには、ベース

ライン条件の統一や、その妥当性に関する検討が今後の課題である。

謝辞

本研究にあたり、ご指導を賜りました立命館大学の西浦敬信教授、産業技術総合研究所の添田喜治先生に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 岩永誠、森数馬、音楽と自律神経系活動の関係:音楽への反応と心臓血管系反応の測定法、音楽知覚認知研究 Vol.23 (1)、57-68、2017.
- 2) 田原靖彦、山本和恵、快・不快音環境が脳波特性に及ぼす影響、騒音制御 Vol.37 (2) 117-123、2013.
- 3) 後藤真孝、橋口博樹、西村拓一、岡隆一、RWC研究用音楽データベース:クラシック音楽データベースとジャズ音楽データベース、情処音楽情報科学研報、Vol.2002 (14)、25-32、2002.
- 4) J. A. Russell, A circumplex model of affect, J. Pers. Soc. Psychol., 39 (6), 1161-1178, 1980.
- 5) F. Shaffer, J. P. Ginsberg, An overview of heart rate variability metrics and norms, Frontiers Public Health, 5, 258, 2017.
- 6) 添田喜治、伊藤納菜、実験参加者のスクリーニング、音響学会誌 Vol.76 (10)、578-583、2020.
- 7) H. Kishikawa, T. Matsui, I. Uchiyama, M. Miyakawa, K. Hiramatsu and S. A. Stansfeld, The development of Weinstein's noise sensitivity scale, Noise Health, 8, 54-60, 2006.

ひとこと

快適性の定量評価手法の構築
に向けて、今後は音以外の環境
要因も含めた検討を進めていき
ます。



阿部 将幸