

# 音環境および風環境による機能性を有する生活空間の構築 Creation of Functional Life Space by Sound and Wind Environments

精密工学専攻 22 号 竹本 星羅  
Seira Takemoto

## 1. はじめに

音には心理および生理作用があり<sup>(1)</sup>、聴覚のみならず他刺激による影響を受ける。近年、機能性を有する音環境が着目され、複合刺激の環境下での活動支援が研究されている。

機能性を有する生活空間には、生活シーンに応じて適切な環境を提案する必要がある。生活シーンとして、リラックスしているくつろぎ時や、眠りにつく仮眠時などが挙げられる。近年では、健康増進と生活の夜型化に伴い、日中の仮眠による休息も着目されている。

そこで本研究は、空調機器の音環境および風環境による複合刺激に着目し、機能性を有する生活空間の構築を目的とする。設問調査に基づく主観評価と、生体情報に基づく客観評価により、心理作用および生理作用を調査する。くつろぎ時の音環境および風環境の印象を評価し、快適性および自然性を高めるための条件を明らかにする。また、機能性を有する空調環境の適用として、仮眠時を考える。脳機能計測による客観評価を用いて音環境の誘眠作用を把握する。なお、被験者には十分なインフォームドコンセントを実施している。

## 2. 送風音および送風の印象変化

空調機器送風音のゆらぎ特性による印象変化と、送風が当たる身体部位による印象変化について、評価実験を行う<sup>(2)</sup>。

### 2.1 送風音のゆらぎ特性による印象変化

#### 2.1.1 評価送風音の作成

ゆらぎ風送風音の印象変化を把握する。本研究のゆらぎ風は、一定風のファン回転数を基準に変動させて駆動した規則性のないゆらぎ特性を有する。

防音室内で空調機器の送風口から 0.15 m の位置のマイクロホンで測定した送風音を加工する。加工方法は、まず、ゆらぎ周期が 5 s, 10 s, 20 s, 30 s の送風音を作成し、次に、ゆらぎ振幅(音圧レベルの最大と最小の差)を 5 dB, 10 dB, 15 dB とした。さらに、ゆらぎ周期およびゆらぎ振幅を組み合わせたゆらぎ特性により 12 種の評価音を作成した。このとき、評価音の騒音レベルは 42.5~53.5 dB である。

#### 2.1.2 送風音のゆらぎ特性の評価条件

作成した評価音をヘッドホンで 30 s 再生し、Table 1 に示す形容詞対を用いて SD 法で 7 段階の絶対評価を行う。被験者は 20 代 12 名である。ただし、評価に用いる形容詞対は予備実験の結果から、因子の寄与率が 15% 以上および累積寄与率が 60% 以上となるように選定している。以後の検討においても同様に、評価送風音は被験者によって提示順をランダムに変えて提示した。

#### 2.1.3 送風音のゆらぎ特性による心理作用

Table 1 にバリマックス回転を用いた因子分析による因子負荷量を示し、それぞれ静穏因子、快適因子、および自然因子と名付ける。Fig. 1 に快適因子と静穏因子の因子得点を示す。静穏因子は、ゆらぎ振幅が小さいほど高く、快適因子得点と静穏因子得点には、矢印で示す正の相関が見られた。また、ゆらぎ周期が短い 5 s のとき快適性が低い一方で、ゆらぎ周期が長いほど快適性が高いとは限らず、高い快適性を得るためには適切な条件があると推測される。

Table 1 Result of factor analysis

(+) Variable name (-)	Factor name		
	Calm	Comfort	Natural
Violent - Mild	-0.78	-0.44	-0.01
Strong - Weak	-0.83	-0.24	0.10
Relaxed - Aggressive	0.66	0.57	0.11
Comfortable - Uncomfortable	0.56	0.65	0.18
Pleasant - Unpleasant	0.43	0.70	0.36
Cozy - Uncomfortable	0.43	0.75	0.33
Natural - Artificial	0.05	0.16	0.90
Mountain・Plateau - Indoor	0.06	0.20	0.91
Contribution ratio	30.2 %	26.6 %	24.2 %
Cumulative cont. ratio	30.2 %	56.8 %	81.0 %

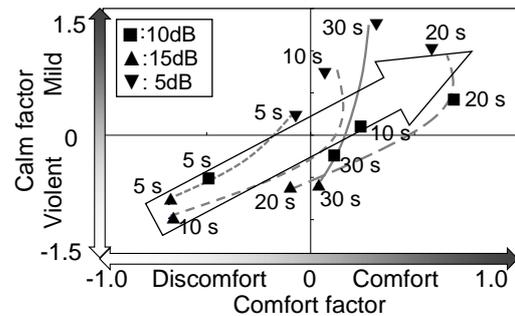


Fig. 1 Evaluation result of Comfort & Calm factor by SD method

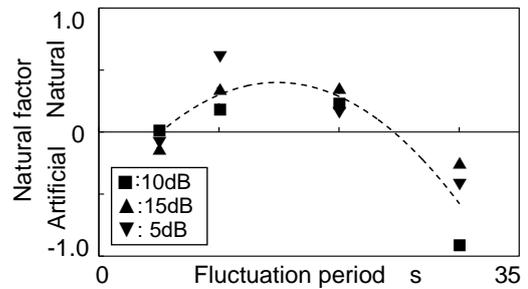


Fig. 2 Prediction of the natural factor

Fig. 2 に自然因子得点とゆらぎ周期との関係を示す。自然因子得点にはゆらぎ周期の変化に対して、音圧レベルの変化の影響が低いことが確認できる。また、Fig. 2 より 10 s から 20 s の間のゆらぎ周期の時に音圧レベルに係わらず自然性が高くなる傾向が見られた。

本評価より、送風音のゆらぎ特性には、快適性および自然性向上に適切な条件が存在すると言える。

## 2.2 送風の印象変化

### 2.2.1 風当て部位ごとの風環境の評価条件

風当て部位による快適性および自然性の影響を評価するため、風当て部位を、部分刺激としての顔ならびに胴、および全体刺激としての全身の三種類を定義する。適切な風当て部位を評価するために、ゆらぎの影響を排除した一定風を用いて評価を実施する。

実験には送風口に合計四つの可動ルーバのある空調機器を用い、ルーバの角度を上下に設定して風当て部位を変更する。全体刺激の場合は、それぞれのルーバを顔と足元に同時に向けることで全身に風を当てる。

空調機器のファン回転数は900 rpmで統一する。被験者位置における風速は、部分刺激として顔位置で平均1.5 m/s、胴位置で平均1.6 m/s、全体刺激として顔位置で平均1.1 m/s、胴位置で平均0.6 m/s、足位置で平均0.5 m/sである。

室内環境は、夏場の空調機器の利用を想定し、室温を27~28℃、湿度は常時45~50%に保つ。被験者は20代12名である。着衣条件は半袖半ズボンの0.3 clo(着衣量の単位)に統一し、遮音用イヤーマフを装着して送風音を遮断する。高さ1.5 mに設置した空調機器の前方1.8 mに被験者を着座させ、3分後と15分後に、2.1節の評価条件と同様に風環境を評価する。

また、心電計測による心電波形より、交感神経の活性度の指標であるLF/HFを用い、ストレス負荷量を評価する。

### 2.2.2 風当て部位ごとの風環境の心理および生理作用

主観評価結果について、バリマックス回転を用いた因子分析を行い、抽出された因子をそれぞれ快適因子および自然因子と名付けた。

Fig. 3に快適因子自然因子の因子得点を示す。時間経過により快適性および自然性は変化し、これらの印象は風当て部位によって異なる。全体刺激である全身は快適性および自然性が最も高い。また、顔や胴と比較して時間経過で自然性は増加し、快適性の低下率は小さい。全体刺激は送風が全身に分散することで自然性が高くなり、各部位における風速が相対的に低くなるため快適性の低下率が小さいと考えられる。

さらに、時間経過によるLF/HFと主観による快適感をFig. 4に示す。LF/HFは安静30秒間の値を基準とし、相対値で示している。棒グラフで示すLF/HFより、全体刺激である全身は最もストレス負荷が低い。また、部分刺激は、線グラフで示す主観評価による快適性の印象と異なり、顔刺激よりも胴刺激でストレス負荷が高い。これより、送風が肌に直接当たる面積が大きいほどストレス負荷が低いと推定できる。

また、時間経過で被験者のストレス負荷を高める可能性があるため、今後の検討における送風の実験時間は10分未満とする。

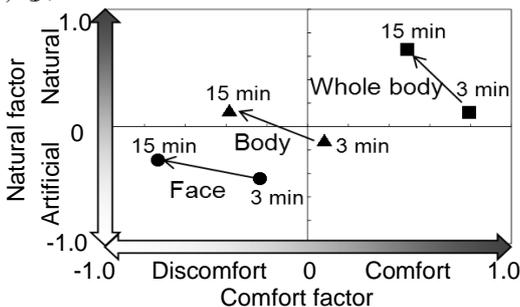


Fig. 3 Evaluation result of Natural & Comfort factor by SD method



Fig. 4 Evaluation result of LF/HF

## 3. 複合刺激の印象変化

### 3.1 評価に用いる音環境および風環境

評価に用いる風環境をTable 2に示す。扇風機の風(以後、扇風機)、空調機器の一定風、空調機器のゆらぎ風の3種を検討する。風当て部位は、扇風機および一定風は部分刺激である胴、ゆらぎ風は全体刺激である全身とする。

被験者位置におけるそれぞれの部位の風速は、扇風機では平均1.5 m/s、一定風では平均1.6 m/s、ゆらぎ風では顔位置で0.5~1.5 m/s、胴位置で0.4~1.0 m/s、足位置で0.3~0.7 m/sである。

Fig. 5およびFig. 6は、送風口から0.15 mの位置で測定した送風音および風速計で測定した風速を示す。扇風機の送風音は音圧レベルの変動があり、ゆらぎ振幅が10 dB程度、小刻みに揺らいでいる。また、ゆらぎ風の風速は、扇風機や一定風よりも大きく揺らぐ。

### 3.2 音環境および風環境の評価条件

実験条件、および評価条件は2章と同様である。本評価は風環境と音環境の作用を考慮するため、遮音用イヤーマフは装着しない。風当てから3分後と9分後に、2.1節と同様に風環境を評価する。Table 3に示す2章と共通する8対の形容詞を用いてSD法で7段階の絶対評価を行う。被験者は2章と同じ20代12名である。

### 3.3 風の種類による音環境および風環境の心理作用

Table 3にバリマックス回転を用いた因子分析による因子負荷量を示す。Fig. 7に自然因子と静穏因子の因子得点を示す。自然因子得点は、ゆらぎ風、一定風、扇風機の順に高く、ゆらぎ風は自然性向上のための適切なゆらぎ特性を含むことが示された。また、ゆらぎ風は、時間経過後も自然性が最も高い。一方、静穏因子得点は、ゆらぎ風、および一定風、扇風機の順に高い。扇風機の風速は一定風と同程度であるが、送風音のゆらぎ振幅が10 dB程度で、ゆらぎ周期が短いため、静穏性が低いと考えられる。

2章より送風音の快適因子が高いと静穏因子も高いことが示されたため、静穏因子の高いゆらぎ風の送風音は快適性が高いと言える。

以上より、自然の中で収集した風環境を空調機器で再現し、10 sから20 s間のゆらぎ周期および静穏性が高いゆらぎ特性を有する送風音、およびゆらぎを有する送風を全身に当てる全体刺激により、快適性かつ自然性の高い音環境および風環境が構築できた。

Table 2 Wind environment for evaluation

No.	Equipment	Wind	Body parts
1	Electric fan	Steady wind	Body
2	Air conditioner	Steady wind	Body
3		Fluctuating wind	Whole body

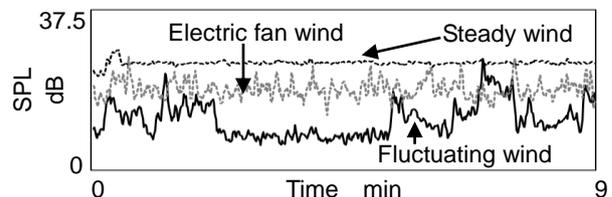


Fig. 5 Ventilation sound

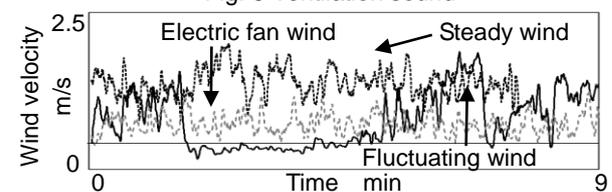


Fig. 6 Wind velocity

Table 3 Result of factor analysis about wind environment

(+) Variable name (-)	Factor name		
	Comfort	Natural	Calm
Pleasant – Unpleasant	0.85	0.14	-0.06
Comfort – Discomfort	0.68	0.21	-0.24
Cozy – Uncomfortable	0.64	0.45	-0.30
Relaxed – Aggressive	0.55	0.35	-0.31
Mountain · Plateau – Indoor	0.22	0.84	-0.09
Natural – Artificial	0.25	0.83	-0.28
Strong – Weak	-0.08	-0.23	0.76
Violent – Mild	-0.43	-0.08	0.69
Contribution ratio	27.6%	23.1%	17.4%
Cumulative cont. ratio	27.6%	50.7%	68.1%

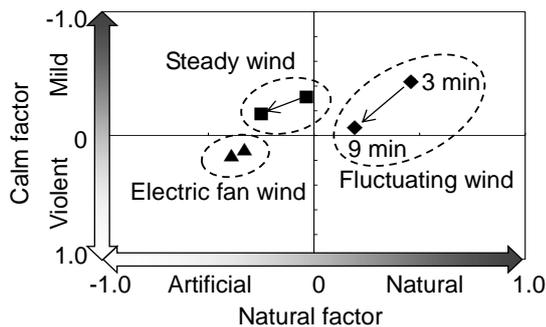


Fig. 7 Evaluation result by SD method

#### 4. 脳機能計測による仮眠評価

仮眠時に適した音環境を構築するために、主観評価および客観評価を用いて音環境の誘眠作用を把握する。

##### 4.1 光トポグラフィ (NIRS) について

光トポグラフィ (NIRS: Near Infrared Spectroscopy) は、酸化ヘモグロビンの濃度変化を計測する近赤外分光法を利用した脳機能計測手法のひとつである。脳機能が活性化している時は、脳血流内における酸化ヘモグロビンの濃度変化が活発となることがわかっており、その変化から脳機能の活性量が調査可能となる。本章では、仮眠時の客観評価として光トポグラフィによる前頭前野部の脳機能計測を実施する。

##### 4.2 脳機能計測による仮眠評価指標の提案

本節では、仮眠を主観的および客観的に評価するための仮眠評価指標を提案する<sup>(3)</sup>。

20代6名(非喫煙者)を対象に脳機能計測を用いた仮眠実験を行う。JIS照度基準で寝室に適した明るさ(照度7.1lx)の防音室内に被験者を着座させ5分間安静する。安静後に誘眠度を主観評価し、消灯(0.5lx)し就床させて20分間の仮眠時間を設ける。実験後に仮眠状態を主観評価する。

防音室内は室温25~26℃、湿度45~50%に保つ。暗騒音は24dBAである。被験者には規則的な睡眠習慣を守るよう教示した上で、予備実験を行い、定期的な日中の仮眠を習慣付けている。実験前日の飲酒、当日のカフェインや薬剤の摂取は禁止する。

就床前の誘眠度は、Table 4に示すように、身体的誘眠度ESと精神的誘眠度TSの尺度で主観評価する<sup>(4)</sup>。各4項目の形容詞対について-3~+3点の得点をつけ、合計点を評価得点とする。実験後の仮眠状態は、“A:よく眠れた、B:うとうとしていた、C:覚醒していた”の3段階で主観評価する。仮眠状態Aを回答した場合には、主観的な入眠潜時をVAS(Visual analog scale)に記入する。

Fig. 8に、仮眠状態Aと回答した被験者1の計測結果を示

Table 4 Index of sleepiness score

	-3	+3	
ES	Blight	-	Passive
	Industrious	-	Idle
	Attentive	-	Dull
	Lucid	-	Sleepy
TS	Tense	-	Restful
	Nervous	-	Placid
	Jittery	-	Calm
	Anxious	-	Composed

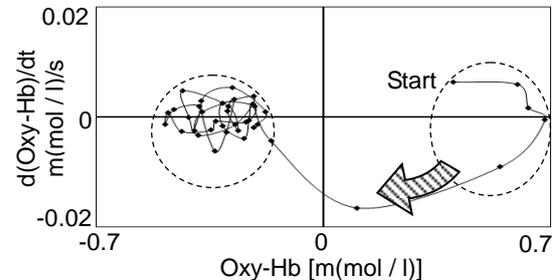


Fig. 8 Trajectory of Oxy-Hb and d(Oxy-Hb)/dt

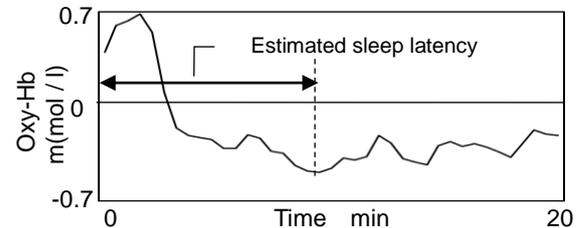


Fig. 9 Oxy-Hb and time

す。横軸を脳血流量、縦軸を脳血流量の変化率とした特徴平面<sup>(5)</sup>で示している。このとき、脳血流量は安静時間終了1分間を基準とした相対値で表している。仮眠状態Aの場合、脳血流量は就床時から時計回りに減少し、就床開始時に対して横軸負方向の位置にクラスタが形成されている。仮眠状態B、Cと回答した被験者には、脳血流量の特徴平面で有意なクラスタは見られず、仮眠状態Cの場合には脳血流量が基準値より高い傾向がある。

Fig. 9に、被験者1の脳血流量の時間変化を示す。安静時の基準値を0とする。就床から数分後、脳血流量は減少し、最小となった後に、基準値以下の範囲で変動が確認できる。脳血流量が最小となるまでの時間は、主観的な入眠潜時と5分以内の範囲で一致する。よって、脳血流量の時間変化から客観的に入眠潜時を推定できると考えられる。

脳機能計測に基づく客観評価から、仮眠状態と入眠潜時を推定するための仮眠評価指標を提案する。客観評価によって推定される仮眠状態は主観評価と対応して小文字の“a, b, c”で表記する。

安静時間終了1分間を基準として算出した脳血流量の特徴平面から、仮眠状態を推定する。就床開始時に対して、横軸負方向に離れた位置にクラスタが形成される場合に、仮眠状態aと推定する。このとき、脳血流量が最小となるまでの時間を推定入眠潜時とする。また、脳血流量の特徴平面で有意なクラスタが形成されず、脳血流量が基準値以下を含む場合を仮眠状態b、常に基準値以上である場合を仮眠状態cと推定する。

##### 4.3 音環境における仮眠評価

空調機器送風音の音響特性を変更し、音環境が仮眠時に与える影響を把握する<sup>(6)</sup>。

### 4.3.1 評価音の作成と評価条件

3章で測定した一定風送風音とゆらぎ風送風音を加工し、評価音を作成する。Table 5に示すように、ローパスフィルタ( $f_c=500$  Hz)をかけた評価音(以下、LPF)と、ハイパスフィルタ( $f_c=300$  Hz)をかけた評価音(以下、HPF)を作成し、加工前の音(以下、Default)を含む6種類の評価音を仮眠時の音環境として用いる。

実験条件、被験者の条件は4.2節と同様に、6種類の音環境で仮眠実験を行う。枕位置より頭上方向0.9 mに設置したスピーカで、実験開始から終了まで評価音を再生する。枕位置での騒音レベルは37.5~38.0 dBAである。

### 4.3.2 送風音による音環境の誘眠作用

誘眠度の主観評価結果について、身体的誘眠度ESでは条件ごとの有意な差が得られなかった。ES得点は疲労感などの体調に依存するために音環境の影響を受けにくいと考えられる。Fig. 10に精神的誘眠度TSの平均値を示す。送風音を

Table 5 Specification of processing method of evaluation sound

Sound		Processing method
Steady wind	Default	No filter
	LPF	Low pass filter ( $f_c=500$ Hz)
	HPF	High pass filter ( $f_c=300$ Hz)
Fluctuating wind	Default	No filter
	LPF	Low pass filter ( $f_c=500$ Hz)
	HPF	High pass filter ( $f_c=300$ Hz)

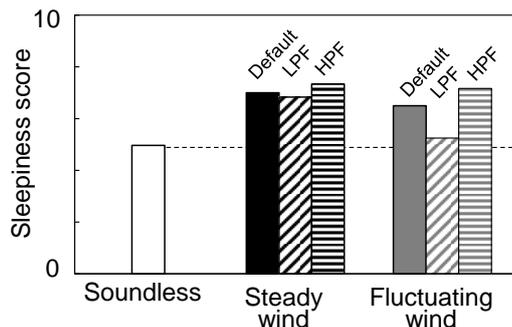


Fig. 10 Subjective sleepiness score : TS

Table 6 Result of sleep evaluation

		Steady wind						Fluctuating wind					
		Default		LPF		HPF		Default		LPF		HPF	
		S	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S	O
Subject	1	A	a	A	a	A	a	A	a	B	a	A	a
	2	A	a	A	a	B	b	A	a	A	a	A	a
	3	A	a	A	a	A	a	A	b	B	b	A	a
	4	A	a	B	c	B	b	B	c	B	b	B	c
	5	B	b	B	c	B	b	A	a	B	b	A	b
	6	B	b	C	c	C	c	C	b	C	b	A	a

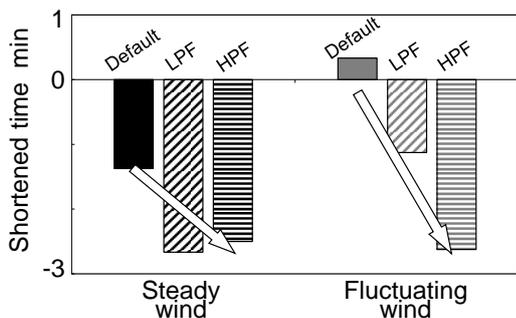


Fig. 11 Shortened time of estimated sleep latency

再生しない無音条件(Soundless)と比較して、音環境を与えた条件の方がTS得点は高い。よって、本評価に用いた送風音には誘眠作用があり、仮眠時の音環境に適すと言える。

Table 6に、仮眠状態の主観評価(S)と客観評価(O)結果を被験者ごとに示す。主観評価の仮眠状態Aと客観評価の仮眠状態aは9割一致した。また、主観評価の入眠潜時と客観評価の推定入眠潜時は7.5割が5分以内で一致した。以上より、4.2節で提案した仮眠評価指標の有用性が確認できた。

仮眠状態の評価結果を被験者ごとに見ると、被験者1~3はどの条件でも良い評価を得ているが、被験者4~6は音環境によって仮眠状態の評価結果が異なる。仮眠時の音環境による影響は個人差があると推測できる。被験者1~3は影響を受けにくく、被験者4~6は影響を受けやすいと分類できる。被験者4~6に着目すると、ゆらぎ風送風音の音環境では主観評価で4割、客観評価で3割が仮眠状態Aまたはaであり、一定風送風音よりも良い評価を得ている。このことから、ゆらぎを有する音環境はより誘眠に適すと考えられる。

また、音環境の音響特性によっても誘眠作用は異なることがわかる。ゆらぎ風送風音では、特にHPFの音環境で良い評価が得られ、高周波数帯域を含む音環境は仮眠に適すと推測できる。

Fig. 11に、基準入眠潜時に対する推定入眠潜時の短縮時間を、被験者1~6の平均で示す。基準入眠潜時は、複数回行った予備実験で得られた入眠潜時の平均値とし、被験者ごとに算出している。推定入眠潜時は、仮眠状態aの場合のみ推定できる。音響特性を変更した音環境によって、入眠潜時は短縮された。特にゆらぎ風送風音のHPFの音環境では、入眠潜時が平均2.6分短縮された。

以上より、空調機器送風音による音環境の誘眠作用を把握し、仮眠時に適した音環境が構築できた。

## 5. 研究成果

- 音質評価により、送風音のゆらぎ特性には、快適因子と静穏因子には正の相関があり、快適性および自然性向上のための適切な条件が存在することがわかった。
- 送風による風環境は、時間経過で印象は変化し、それらの印象は風当て部位によって異なることがわかった。
- 送風音による音環境および送風による風環境の複合刺激について、心理作用を把握した。
- 光トポグラフィ(NIRS)による脳機能計測を用いて、音環境が仮眠時に与える影響を把握し、誘眠作用を有する音環境が構築できた。

### 参考文献

- 岡崎 他, 付加音を利用した空調機器の快適性および冷感制御, 日本音響学会講演論文集(春), pp. 1559-1560, 2013.
- 竹本 他, 音環境および風環境による空調機器の快適性制御, 日本音響学会講演論文集(春), pp. 1511-1512, 2014.
- 小池 他, 脳血流計測を用いた入眠評価指標の提案, 日本音響学会講演論文集(秋), pp. 1519-1520, 2014.
- 松本 他, 日本語版 UWIST 気分チェックリスト (JUMACL) の緊張覚醒, エネルギー覚醒に及ぼすスポーツの効果, 九州大学心理学研究, 第9巻, pp. 1-7, 2008.
- 柳澤 他, NIRSを用いたニューロフィードバックトレーニングにおける訓練効果の評価方法の提案, 日本大学工学部第46回学術講演会講演概要, pp. 172-176, 2013.
- 竹本 他, 音環境および風環境による快適な生活空間の構築, 日本音響学会講演論文集(春), 2-6-7, 2015.