

# 呼吸音の同調による覚醒を考慮した 在宅医療機器の快音設計

## Comfortable Sound Design for Home Medical Equipment in Consideration of Arousal Due to Synchronization of Respiratory Sound

精密工学専攻 13号 大林 葵  
Aoi Obayashi

### 1. はじめに

近年、睡眠時無呼吸症候群の患者数は500万人といわれ、持続陽圧呼吸療法（CPAP）の使用者数が増加している。しかし、医療機器の動作音に対しては低騒音化が取り組まれる中、マスクから発生する呼吸に伴い変動する気流音（以下、呼吸音）が相対的に目立つ<sup>(1)</sup>。また、先行研究では呼吸音が非使用者の覚醒度上昇に影響を及ぼすことがわかっている<sup>(2)</sup>。

そこで本研究では、呼吸音における時間的変化、および周波数帯域の変化に着目し、それらが非使用者の覚醒に及ぼす影響を把握する。まず、CPAP呼吸音の特徴を把握するためCPAP着用時、および未着用時の周波数特性を比較する。そして、時間的な変化として呼吸数を変化させた場合において呼吸同調が発生するのか、また、覚醒度に影響するののかについて把握する。最後に周波数特性上、眠りやすい音質に寄与する周波数帯域を抽出し、在宅医療機器の音に対する不快感軽減を目指し快音設計を提案する<sup>(3)</sup>。

なお、本研究のすべての評価実験は、被験者に対し十分なインフォームド・コンセントを行った上で実施している。

### 2. CPAP呼吸音の特徴把握

CPAPの機器本体およびマスクから発生する音をそれぞれ測定し、各周波数帯の各部品音圧寄与について把握する。また、CPAP着用時の呼吸音の特徴を把握する。

#### 2.1 CPAP各部品における周波数帯ごとの音圧寄与

##### 2.1.1 測定条件

CPAP機器本体から発生する音（以下、機械音成分）、およびCPAPマスクリークポートより発生する音（以下、気流音成分）を、マイクロホンを用いてそれぞれ測定する。

本測定では、A特性音圧レベルの周波数重みづけがされた指標を用いる。これは、人間の聴覚の特性として、同じ音圧であっても周波数の違いにより実際に耳で感じる音の大きさは異なる特性を考慮した指標である。また、測定環境は、外部の音を遮音し、内部の音を反射しない無響室とする。そして、機器本体の測定時はマスクを無響室外に、マスクの測定時は機器本体を無響室外に設置し、測定点は各部品から10.0 cm地点とする。また、測定周波数帯域を100~800 Hz、1000~2000 Hz、2000~4000 Hz、4000~10000 Hzの4帯域に区分し、それぞれをB1、B2、B3、B4とする。

##### 2.1.2 測定結果および考察

Fig. 1に示す機器本体、およびマスクにおける各帯域のA特性音圧レベルより、B1からB4にかけて機械音成分が低下するのに対し、気流音成分が上昇することがわかる。

したがって、B1、B2の低周波数域では機械音成分が、B3、B4の高周波数域では気流音成分が多く含まれることがわかる。また、設定圧の上昇に伴い、B4の高周波数域音に占めるマスクの割合が増加し、気流音成分が目立つ。

#### 2.2 CPAP着用の有無における呼吸音の周波数特性比較

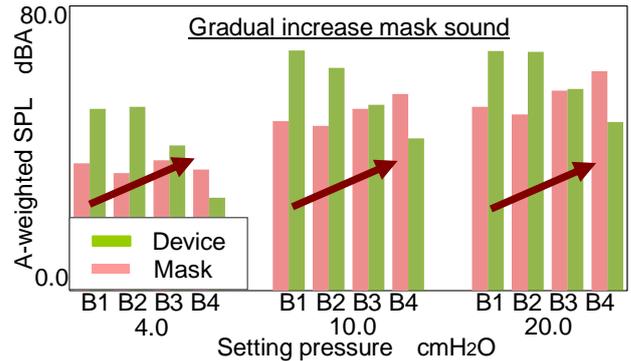


Fig. 1 A-weighted SPL of CPAP device and mask

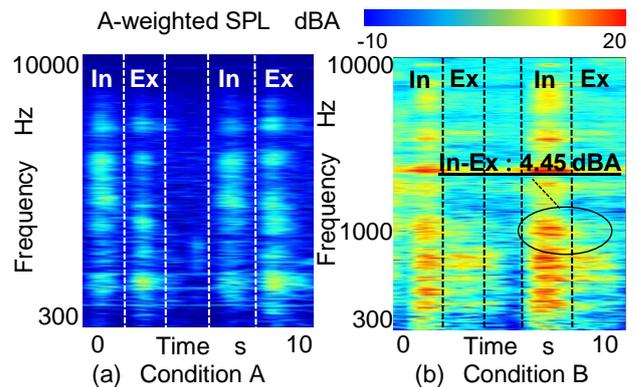


Fig. 2 Spectrogram of respiratory sound

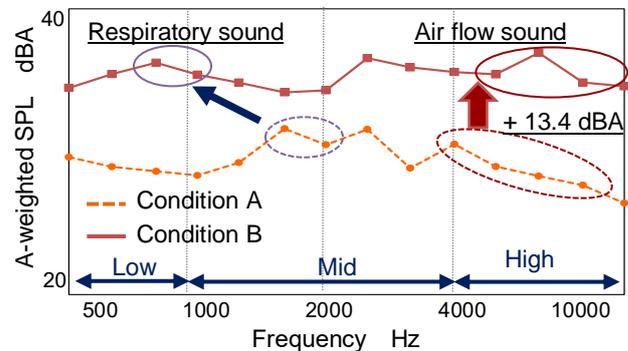


Fig. 3 1/3 octave band level of inhalation

本測定ではCPAP未着用時（条件A）およびCPAP着用時（条件B）の呼吸音を測定し、周波数特性の変化を把握する。

#### 2.2.1 測定条件

本測定では、条件Aにて鼻呼吸音を、条件BにてCPAPマ

スクリークポートより発生する呼吸音を無響室で測定する。また、両条件ともに同一被験者とし、着座状態にて測定する。そして、測定点を被験者の鼻先から 20 cm 地点とする。

### 2.2.2 実験結果および考察

まず、各周波数帯の音圧レベルの総和をとった合成レベルを表す OA 値について各条件下で比較する。条件 B の吸気音は条件 A と比較して約 9.1 dBA 高い。これは、条件 B では呼吸に合わせて多くの空気が気道に送り込まれ、マスクリークポートより流体内が広い周波数帯域にわたって発生する（以下、広帯域音）ためと考えられる。

次に、Fig. 2 (a), (b) に示す各条件下の時間-周波数特性より、各条件下の呼気音 (Ex) および吸気音 (In) の A 特性音圧レベル差に着目する。条件 A : 0.24 dBA, 条件 B : 4.45 dBA であり、条件 B にて大きな差が生じる。これは、CPAP から常に息を吸う方向に空気が流れ込み、呼気時よりも流速が速くなるのが起因していると考えられる。

ここで、Fig. 3 に示す条件 A, 条件 B の吸気音におけるある周波数を中心として上限と下限の周波数比がオクターブとなる帯域を 1/3 に分割した帯域ごとの音圧レベルを示す 1/3 オクターブバンドレベルに着目する。呼吸音は、広帯域に分布しているため帯域を中心周波数 (以下、 $F_m$ )  $F_m$  500 Hz-1000 Hz の低周波数域、 $F_m$  1000 Hz-4000 Hz の中周波数域、 $F_m$  4000 Hz-10000 Hz の高周波数域の 3 帯域に区分する。条件 A の吸気音は主に中周波数域内の 1500-2000 Hz を含み、条件 B では低周波数域内の 800 Hz-1000 Hz を含む。したがって、吸気音の周波数主成分が条件 A から条件 B にかけて低周波数域に推移していることがわかる。これは、条件 B ではマスクで鼻が覆われた状態となるため中周波数域の音が伝播しにくいことが起因していると推察される。また、条件 B では気流音成分が多いことより呼気音、吸気音ともに高周波数域を多く含む。

以上より、CPAP 着用時の呼吸音の特徴を踏まえ、ある周波数範囲内の全域における音の強さを一定としたホワイトノイズに対し、呼気音と吸気音の周波数特性をフィルタリングした 2 音源を組み合わせる呼気音を作成し、第 3 章以降の実験に用いる。

## 3. 呼吸数変化音源提示時の覚醒度変化および呼吸数変化把握

CPAP 使用時、使用者の呼吸音は、機器を介して音圧が増幅した状態で非使用者に聞こえる状態となる。したがって、使用者の平常時の呼吸数が非使用者よりも多い場合、または少ない場合に非使用者の呼吸リズムが使用者に同調する現象（以下、呼吸同調）が生じることが想定される。

また、使用者および非使用者の呼吸数大小関係が使用者 < 非使用者の場合は、呼吸同調による非使用者の呼吸数の減少に伴い、リラックス状態となり、覚醒度が低下することが想定される。一方、使用者 > 非使用者の場合は、非使用者の呼吸数の増加に伴い、緊張状態となり、覚醒度が上昇することが想定される。ここで、本実験では提示する呼吸音を使用者の呼吸音と仮定し、被験者を非使用者と仮定し、音源提示時の覚醒度変化、および呼吸数変化を把握する。

### 3.1 実験条件

評価方法は主観評価、および脳波と呼吸測定による客観評価を行う。リラックス度の把握は、疲労・覚醒主観評価指標 RAS を用いる。RAS は「眠気」「リラックス」「全般的活性」「緊張」の感情尺度からなる。また、覚醒度把握は、式 (1) より算出される AAC ( $\alpha$  波減衰係数) を用いる。ただし、式 (1) にて用いる値は閉眼と開眼を交換反復する AAT 動作時の  $\alpha$  波の値とする。また、AAC は睡眠、覚醒などの条件によ

Table 1 Evaluation sounds (Respiratory rate change)

Sound	RR-	RR	RR+
RR	Normal -30%	Normal	Normal +30%
Image			

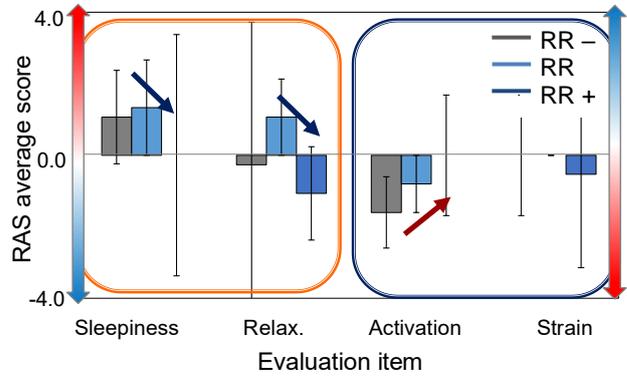


Fig. 4 Results of RAS

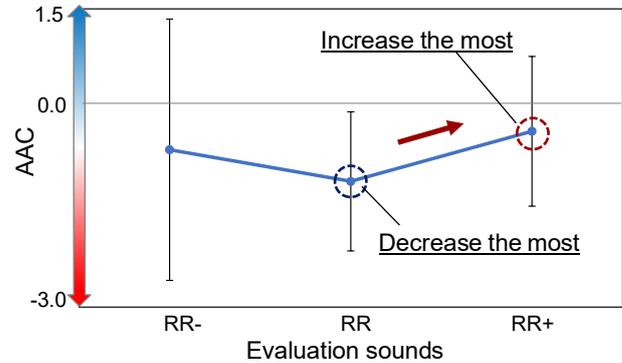


Fig. 5 Results of AAC

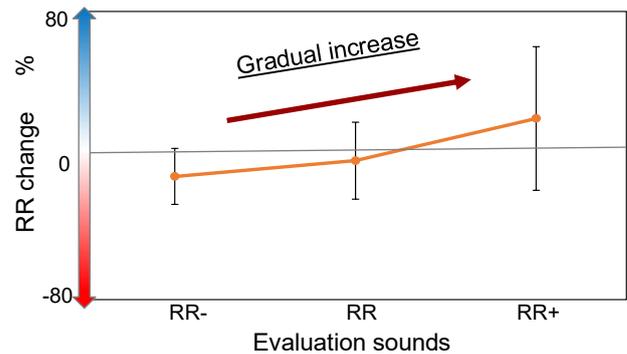


Fig. 6 Results of respiratory rate of change

り  $\alpha$  波の出現量が異なる特徴から算出され、AAC の値が大きいほど覚醒度が高いことを意味する。

$$AAC = \frac{P_c}{P_o} \quad \dots (1)$$

$P_c$  : Alpha wave power with eye closure  
 $P_o$  : Alpha wave power with eye opening

一方、被験者の呼吸数把握は呼吸ベルトを用いて測定する。

Table 1 に示す呼吸音は、各被験者の平常時の呼吸数より-30%とした音源 RR-, 同数の音源とした音源 RR, +30%とした音源 RR+の3音源とする。実験手順は音刺激のない状態を2分間測定後、閉眼と開眼を交換反復するAAT動作を3分間行った後、主観評価を行う。これを音源提示時も同様の流れを繰り返す。また、被験者は20代5名である。

### 3.2 実験結果および考察

Fig. 4にRAS (主観評価) の評価平均得点, Fig. 5にAAC (客観評価) の平均変化量, Fig. 6に呼吸数の平均変化率を示す。各評価結果はすべて音刺激なし (以下, 平常時) を基準値とした変化量でありエラーバーは標準偏差を示す。また, AACは個人ごとの変動を考慮し, 標準化を行った上で評価する。式(2)に示す各条件下で得られたAAC測定値と複数回測定した平常時の平均値の差を, 標準偏差で除した値を標準化したAAC値とする。

$$Z_{AAC} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad \dots (2)$$

$Z_{AAC}$  : Standardized AAC value     $X$  : Measured AAC value  
 $\mu$  : Averaged AAC value         $\sigma$  : Standard deviation

まず, RAS (主観評価) のリラックス感については, RR-およびRR+では減少がみられ, RRでは増加がみられる。次にAACの平均変化量については, RR+, RR-, RRの順に高い傾向がみられる。そして, 呼吸数の平均変化率については, RRでは変化がみられず, RR-では減少, RR+では増加がみられる。

以上の結果よりRRは, 提示音と被験者の呼吸数間にほとんどずれがないため, 条件間で最もリラックス状態にあり覚醒度が低下すると推察される。一方, RR+では呼吸同調による呼吸数の増加に伴い主観的なリラックス感が低下し, 覚醒度が上昇すると推察される。また, RR-は呼吸同調による呼吸数の低下によりリラックス感の上昇するが, 呼吸数のずれに違和感を持ち, 覚醒度がやや上昇すると考えられる。

したがって, 使用者の平常時の呼吸数が非使用者よりも多い場合, 呼吸同調による呼吸数の増加に伴い主観的なリラックス感が低下し, 覚醒度が上昇することが示唆される。しかし, CPAP使用者の呼吸数を制御することはできないため, 次章では呼吸音の音質に着目する。

## 4. 呼吸音における睡眠に影響する周波数帯の抽出

広帯域音である呼吸音をFm 1000 Hz-8000 Hzの4帯域に区分し, 眠りやすい音質に寄与する周波数帯を抽出する。

### 4.1 実験条件

評価方法は7段階の評定尺度法を用いて相対評価で行う。評価項目は眠りやすさとし, 評価音源は呼気音のみ, または吸気音のみの定常的な気流音, および呼吸音の3種とする。また, Table 2に示す, 低周波数域Fm 1000 Hzまたは2000 Hz, および高周波数域Fm 4000 Hzまたは8000 Hzの2つの帯域を組み合わせ, -10 dB音圧低下させた12音源とする。

また, 本実験ではラウドネス値という人の聴覚にあった音のレベルを示す指標を用いる。呼気音のラウドネス値を3.0 sone, 吸気音を4.0 soneに統一している。被験者は20代8名である。

### 4.2 実験結果および考察

Fig. 7に定常的な気流音の呼気音(SE)のみ, 吸気音(SI)のみ, および呼吸音(F)に関する音質変更に対する評価平均得点を示す。SEの場合SE1, SE2間およびSE3, SE4間において有意水準5%の有意差が確認できる。また, SIの場合も有意差はみられないが音源SI2, SI4の得点が高い傾向がみ

Table 2 Evaluation sounds

Sound symbol	Sound state	Low frequency Hz	High frequency Hz
SE1	Steady (Ex)	1000	4000
SE2	Steady (Ex)	1000	8000
SE3	Steady (Ex)	2000	4000
SE4	Steady (Ex)	2000	8000
SI1	Steady (In)	1000	4000
SI2	Steady (In)	1000	8000
SI3	Steady (In)	2000	4000
SI4	Steady (In)	2000	8000
F1	Fluctuation	1000	4000
F2	Fluctuation	1000	8000
F3	Fluctuation	2000	4000
F4	Fluctuation	2000	8000

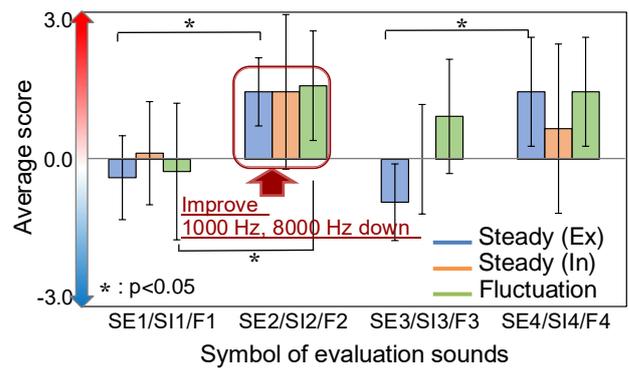


Fig. 7 Results of subjective evaluation

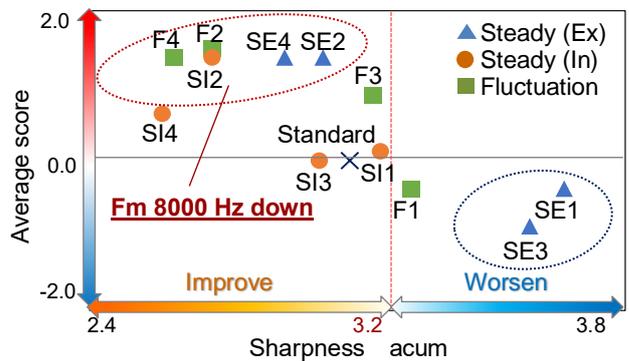


Fig. 8 Relationship between sharpness and subjective evaluation

られる。したがって, SE, SIの両条件でFm 8000 Hzを含む高周波数域の音圧低下が眠りやすい音質に寄与していることが推察される。また, 音源F1, F2間において有意水準5%の有意差が確認できる。SE, SIの評価結果と同様, Fm 8000 Hzを含む高周波数域の音圧低下が眠りやすい音質に寄与すると推察される。

次に, Fig. 8に音の甲高さを示す心理指標であるシャープネス値とRASの評価平均得点の関係を示す。シャープネス値約3.2 acumを境にRASの評価傾向が異なることがわかる。また, 先行研究においても3 acum以上で覚醒効果があることが明らかとされ<sup>(4)</sup>, 3.2 acum以下の音源は眠気をもたらしやすいことがいえる。そして, 評価得点の高い音源は, Fm 8000 Hzを音圧低下した音源であることがわかる。しかし, Fm 8000 Hzを含む郡内でSI4のみ得点が高い傾向がみ

呼気音と吸気音の音圧差が顕著にみられる。

したがって、覚醒に影響する Fm 8000 Hz の高周波数域および呼吸変動による音圧差が大きい Fm 1000 Hz の低周波数域を組み合わせると音圧低下することにより、音質改善につながると推察される。

## 5. 快音設計要件の検討

第4章を踏まえ、CPAP マスクリークポートに着目した快音設計について検討する。

### 5.1 実験条件

穴径、および穴数を変更したリークポートを Table 3 に示す。No. 1 を基準とし、3D プリンターにて作成した No. 2-No. 4 のうち No. 4 に不織布またはフェルトを用い、リークポートに付加した No. 5, 6 の計6種を設置時の気流音を測定する。測定点は、リークポートから 10 cm 地点とする。

### 5.2 実験結果および考察

まず、Fig. 9 に示す No. 1, No. 5, No. 6 の周波数特性より、No. 6 にて 4000 Hz 以上の高周波数域の音圧が、基準となる No. 1 と比較して約 2.7 dBA 低下する。

さらに、Fig. 10 に各リークポートの開口率とシャープネス値の関係を示す。開口率  $A$  は、リークポート全体の楕円面積を  $s$ 、穴の面積を  $h$ 、穴の数を  $n$  とすると、式 (3) より算出される。

$$A[\%] = \frac{h}{s} \times n \times 100 \quad \dots(3)$$

$A$  : Aperture ratio    $h$  : Area of hole  
 $s$  : Area of ellipse    $n$  : Number of holes

先行研究より、穴径が 3 mm 以上の場合、リーク量が多く、陽圧を維持することができない<sup>(5)</sup>。ここで、Fig. 8 の No. 2, No. 3 より、穴径を 0.5 倍にすると、開口率が約 0.25 倍、シャープネス値が 0.8 倍に低下する。しかし、開口率が 5.5 % を下回るとリーク量が基準値を満たさない。また、No. 1 にフィルタを付加した場合もリーク量が大きく減少する。一方、No. 3 のような穴径の拡大によりリーク量、圧は基準値を満たすが、シャープネス値が 3.2 acum を超え、音質的に睡眠を妨げることが考えられる。ここで、リーク量、圧ともに基準値を満たす No. 4 のような対角線上の穴径の拡大、フィルタの吸音効果によりシャープネス値が 0.4 acum 低下する。

したがって、対角線上の穴径の拡大により乱流の発生を抑制し、また、リーク量増加による音圧上昇を防ぐため不織布素材のフィルタの設置により、開口率を約 5.5 %、シャープネス値を 3.2 acum 以下に抑えることで快音化の可能性が示唆される。

## 6. 研究成果

- (1) 機器を介して音圧が増幅された使用者の呼吸音により、非使用者に対して呼吸同調が生じ、非使用者の呼吸数の増加に伴い、主観的なリラックス度が低下することで、覚醒度が上昇する傾向を確認した。
- (2) 呼吸音の音質評価にてシャープネス値が約 3.2 acum を境に評価傾向が異なることより、主に眠りやすい音質に寄与する周波数帯は Fm 8000 Hz の高周波数域であることを示した。
- (3) 眠りやすい音質に寄与する Fm 8000 Hz、および呼気音と吸気音の周波数変動が大きい Fm 1000 Hz の音圧低下が音質改善に寄与し、効果的であることを示した。
- (4) リークポートの開口率とシャープネス値の関係に着目し、CPAP の性能維持可能な快音化への各指標を示した。

Table 3 About CPAP leak ports

No.	Standard	Specification change				
	1	2	3	4	5	6
Hole diameter mm	0.8	1	2	1-2 corner		
Number of holes	22	8				
Image						
Aperture ratio %	5.5	3.1	12.5	7.8		
Sharpness acum	3.0	2.6	3.3	3.2	2.8	2.8
Filter	No			4+Non woven	4+Felt	

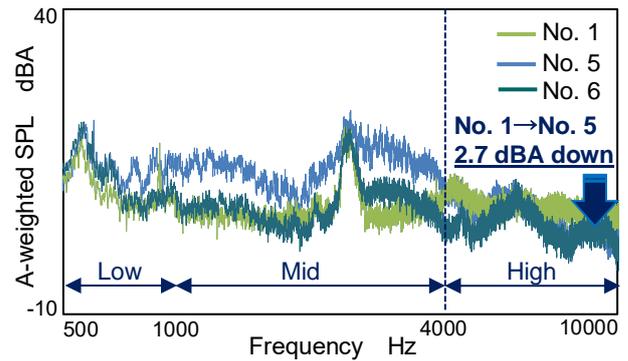


Fig. 9 Frequency spectrum of each leak port

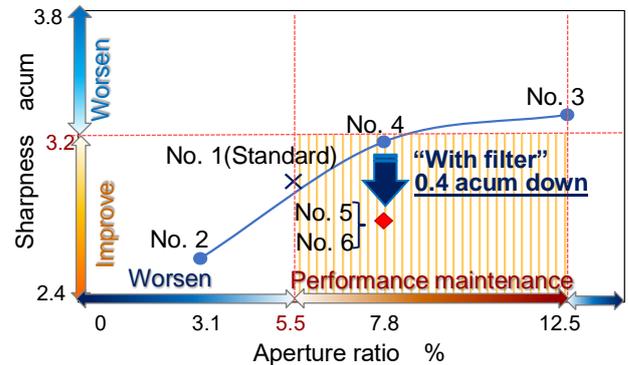


Fig. 10 Relationship between sharpness and aperture ratio

### 参考文献

- (1) 大林葵, 島峰徹也, 金澤立哉, 戸井武司, 高流量経鼻酸素療法による動作音の使用者および非使用者の快音化, 第32回日本臨床工学技士会誌, (2022) p. 151.
- (2) 大林葵, 島峰徹也, 戸井武司, 医療機器の呼吸変動音が覚醒に及ぼす影響把握, 日本音響学会講演論文集(春) (2023) pp. 1005-1006.
- (3) 大林葵, 島峰徹也, 戸井武司, 呼吸変動音の同調による覚醒を考慮した在宅医療機器の快音化, 日本音響学会講演論文集(春) 1-9-16 (2024).
- (4) 星野博之, 戸井武司, 音源のシャープネス値と感情極性値に基づく快適覚醒音刺激に関する考察, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 19-3 (2017) pp. 231-242.
- (5) 関口純也, 島峰徹也, 安部花純, 大林葵, 戸井武司, 持続陽圧呼吸療法マスクの呼気ポートにおける気流音特性分析と快音化にむけての取り組み, 第6回神奈川県臨床工学学会抄録集 (2023) p. 40.